

108年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析 技術之發展與應用研究計畫

執行單位：中央研究院環境變遷研究中心

執行期間：108年1月1日至108年12月31日

計畫主持人：周崇光

協同主持人：李崇德、李家偉、榮建誠

行政院環境保護署 編印

中華民國 109 年 1 月

108年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析 技術之發展與應用研究計畫

委託單位： 行政院環境保護署

執行單位： 中央研究院環境變遷研究中心

執行期間： 108年1月至108年12月

計畫經費： **NT\$3,230,000**

計畫執行人員： 周崇光、李崇德、李家偉、榮建誠、黃譯檣、張雋緯、陳美君

中華民國 109 年 1 月

「108年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用研究計畫」

計畫期末報告基本資料表

委辦單位	行政院環境保護署		
執行單位	中央研究院環境變遷研究中心		
參與計畫人員姓名	周崇光、李崇德、李家偉、蔡建誠、黃譯檣		
年 度	108	計畫編號	
研究性質	<input type="checkbox"/> 基礎研究 <input checked="" type="checkbox"/> 應用研究 <input type="checkbox"/> 技術發展		
研究領域	環境科學		
計畫屬性	<input checked="" type="checkbox"/> 科技類 <input type="checkbox"/> 非科技類		
全程期間	108年1月~108年12月		
本期期間	108年1月~108年12月		
本期經費	_____億 <u>3230</u> 千元		
	資本支出		經常支出
	土地建築_____千元	人事費 <u>1123</u> 千元	
	儀器設備_____千元	業務費 <u>1348.7</u> 元	
	其 他_____千元	材料費_____千元	
		其 他 <u>758.3</u> 千元	
摘要關鍵詞（中英文各三則）			
同位素 (Isotope)			
細懸浮微粒 (PM _{2.5})			
空氣污染辨識 (Air Pollution Forensics)			

行政院環境保護署專案工作計畫成果報告摘要 (簡要版)

一、中文計畫名稱：

108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用研究計畫

二、英文計畫名稱：

Development and application of carbon and Pb isotopes analysis technology in fine particles.

三、計畫編號：

四、執行單位：

中央研究院環境變遷研究中心

五、計畫主持人：

周崇光、李崇德、李家偉、榮建誠

六、執行開始時間：

108/1/1

七、執行結束時間：

108/12/31

八、報告完成日期：

109/1/6

九、報告總頁數：

312 頁

十、使用語文：

中文、英文

十一、報告電子檔名稱：

108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用研究計畫.doc

十二、報告電子檔格式：

WORD 2013

十三、中文摘要關鍵詞：

同位素，細懸浮微粒，空氣污染辨識

十四、英文摘要關鍵詞：

Isotope, PM_{2.5}, Air Pollution Forensics

十五、中文摘要

本計畫目的為透過建立高屏地區大氣和主要污染源排放之 PM_{2.5} 的碳與鉛同位素特徵，探討高屏地區的大氣 PM_{2.5} 污染來源。本計畫分別於 2019 年春季 (3 月) 和夏季 (7 月) 期間，採集位於高屏地區的橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站等 8 站的大氣 PM_{2.5} 樣本；此外，2019 年春季 (4 月) 和夏季 (8 月) 期間，也陸續採集高雄地區的燃煤火力發電廠、煉油廠、鋼鐵廠燒結爐煙道和高雄港內外作業區排放之 PM_{2.5} 樣本，並完成水溶性陰陽離子、有機碳、元素碳、地殼元素、重金屬和碳 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C) 與鉛同位素 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb) 的分析。

三種固定污染源排放的 PM_{2.5} 都以可凝結性微粒 (Condensable particulate matter, CPM) 為主，而除了煉油廠排放的 CPM 以有機組成為主外，其他 2 種固定污染源煙道排放的 CPM 都以無機成分為主。在化學組成部分，可發現 1.) 火力電廠排放的 PM_{2.5} 有較高的金屬元素與硫酸鹽，而金屬元素以 Na (和該電廠採用海水脫硫有關)、Mg、K、Ni、Zn、Mo、Cr 和 Se 等為主，平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值為 1.1959 (1.1781~1.2115)，平均 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值為 2.4305 (2.4108~2.4403)；2.) 煉油廠排放的 PM_{2.5} 有較高的硫酸鹽比例 (54%)，特徵元素包括 Fe、Mn、Ni、Zn、Mo、

Pb 和 Cr 等，平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值為 1.1930 (1.1758~1.2106)，平均 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值為 2.4318 (2.4171~2.4437)；3.) 鋼鐵廠排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 有較高的硫酸鹽和鉀等金屬元素，其中硫酸鹽占了 35%，特徵元素包括 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Zn、Mo、Cd、Tl、Pb、Cr、Se、Rb 和 Cs 等；平均現代碳比例為 18% (14~22%)，平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值為 1.1908 (1.1664~1.2143)，平均 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值為 2.4010 (2.3774~2.4229)；4.) 港口作業區 (第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和貨櫃區) 的主要化學組成為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、有機碳和元素碳；各作業區主要的金屬元素為 Na、Zn 和 V； $\delta^{13}\text{C}$ 範圍在-31.3‰至-22.5‰之間，平均現代碳比例為 34% (12~68%)，平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 分別為 1.1561 (1.1406~1.1884) 和 2.4295 (2.4013~2.4546)。

8 個測站的日平均 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度為 $19.9 \pm 10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其值低於國家日平均標準 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。在傳統化學組成部分，8 個測站 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要化學組成均為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和有機碳，其濃度各占 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度的 21%、20%、13% 和 24%；此外，高雄的現代碳與化石碳濃度占 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度的比例相當 (化石碳：15%；現代碳：14%)，但位於屏東的 2 個測站則以現代碳占優勢 (化石碳：12%；現代碳：18%)，反映高雄和屏東的主要碳污染源不同。當以 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度標準值將樣本劃分為 $\text{PM}_{2.5}$ 事件日和非事件日時，可發現相較於非事件日，事件日期間的硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽濃度加總對 $\text{PM}_{2.5}$ 總濃度的增量貢獻比例最大，顯示光化學反應前驅物的管制應有助於降低高屏地區的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度，化石碳對 $\text{PM}_{2.5}$ 總濃度的增量貢獻比例明顯，說明管制化石燃料的燃燒有助於降低高屏地區的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度。

春季和夏季的大氣平均 $\delta^{13}\text{C}$ 分別為-25.7‰ (-28.2 至-23.6‰) 和

-25.1‰ (-28.7 至 -20.7‰)，分析結果顯示各測站 $\delta^{13}\text{C}$ 數值有顯著差異，說明高屏地區不同測站的碳污染源有區域上的變異。在鉛同位素比值部分，春季和夏季的平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 分別為 1.1554 (1.1298~1.1712) 和 1.1572 (1.0974~1.1966)，春季和夏季的平均 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 分別為 2.4263 (2.3985~2.4519) 和 2.4295 (2.3714~2.4572)，多數測站的鉛同位素比值變異較大，顯示就單一測站而言，不同採樣日的鉛污染源可能不同。無論 $\delta^{13}\text{C}$ 或鉛同位素比值，其量測值多和過去在中南部 (台中-彰化-南投-雲林-嘉義) 的量測結果相近，但多低於北部的量測結果，反映碳與鉛污染源有區域上的差異。

本計畫綜合傳統化學組成和同位素量測結果發現，工業污染源和燃料油的燃燒是高屏地區 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要碳污染源，但鉛污染源的掌握種類仍有限，有待未來調查更多位於高雄污染源排放之 $\text{PM}_{2.5}$ 同位素特徵，提高鉛污染源的鑑識能力；此外，屏東站與潮州站的現代碳比例明顯偏高，因此調查及管制屏東與潮州當地的現代碳貢獻源，相信有助於改善當地的空氣品質。

十六、英文摘要

The objective of this study is to investigate the compositions of carbon and lead isotopes in fine particulate matters ($\text{PM}_{2.5}$) and, accordingly, to attribute potential sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Kaohsiung and Pingtung with the isotopic fingerprints. During the period from the spring (March) of 2019 to the summer (July) of 2019, ambient $\text{PM}_{2.5}$ samples were collected from 8 sampling stations (Ciaotou, Zuoying, Fengshan, Siaogang, Daliao, Linyuan, Pingtung, and Chaozhou), respectively. In addition, this study also collected $\text{PM}_{2.5}$ samples from 4 specific sources: a coal-fired power plant, an oil refinery plant, a steel plant, and Kaohsiung port in April and August, respectively. All the $\text{PM}_{2.5}$ samples were characterized with the

measurements of water-soluble ions, organic carbon, elemental carbon, crustal elements, heavy metals, and isotopic compositions of carbon ($\delta^{13}\text{C}$ and ^{14}C) and lead (^{206}Pb , ^{207}Pb , and ^{208}Pb).

The results revealed that condensable particulate matter (CPM) was predominant in the $\text{PM}_{2.5}$ emitted from three stationary pollution sources. Moreover, the level of organic CPM was higher than inorganic CPM in oil-refinery plant, whereas the levels of inorganic CPM were higher in both coal-fired power plant and steel plant. The chemical compositions from four pollution sources were: (1) coal-fired power plant: sulfate was important species (10%), predominant elementals included Na (due to the flue gas desulfurization with seawater), Mg, K, Ni, Zn, Mo, Cr, and Se, average $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ were 1.1959 (1.1781~1.2115) and 2.4305 (2.4108~2.4403); (2) oil-refinery plant: sulfate was important species (54%), predominant elementals included Fe, Mn, Ni, Zn, Mo, Pb, and Cr, average $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ were 1.1930 (1.1759~1.2106) and 2.4318 (2.4171~2.4437); (3) steel plant: sulfate was important species (35%), predominant elementals included Fe, Mg, K, Ca, Mn, Zn, Mo, Cd, Tl, Pb, Cr, Se, Rb, and Cs, average $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ were 1.1908 (1.1664~1.2143) and 2.4010 (2.3774~2.4229), the percentage of modern carbon was 18% (14~22%); (4) Kaohsiung port: the major compositions included sulfate, nitrate, ammonium, organic carbon, and elemental carbon, predominant elementals included Na, Zn, and V, $\delta^{13}\text{C}$ ranged from -31.3 to -22.5‰, average $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ were 1.1561 (1.1406~1.1884) and 2.4295 (2.4013~2.4546), the average percentage of modern carbon was 34% (12~68%).

The average level of ambient $\text{PM}_{2.5}$ from all sampling sites was $19.9 \pm 10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which was lower than national air quality standard ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$). The major constituents of the ambient $\text{PM}_{2.5}$ in the study area included

nitrate, sulfate, ammonium and total carbon, which accounted for 21%, 20%, 13%, and 24% of the PM_{2.5} mass, respectively. The contributions of fossil (15%) and modern (14%) carbon were similar in the six sampling sites in Kaohsiung. However, modern carbon was predominant in Pingtung and Chaozhou, which means that investigating and controlling the sources of modern carbonaceous aerosols is helpful to improvement of air quality in that area. It was found from the chemical analysis that the concentrations of inorganic secondary aerosols (sulfate, nitrate, and ammonium) and fossil carbonaceous aerosols were elevated during high PM_{2.5} episodes. These results implied that photochemical reactions and fossil combustion were important factors influencing the PM_{2.5} in the study areas.

The averages of $\delta^{13}\text{C}$ for ambient PM_{2.5} were -25.7‰ (-28.2 to -23.6‰) and -25.1‰ (-28.7 to -20.7‰) in the spring and summer, respectively. The average $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ratios were 1.1554 (1.1298~1.1712) and 1.1572 (1.0974~1.1966) in the spring and summer, respectively, and $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ratios were 2.4263 (2.3985~2.4519) and 2.4295 (2.3741~2.4572), respectively. The variations of $\delta^{13}\text{C}$ and Pb isotopic compositions were larger, which means the pollution sources were unstable in Kaohsiung and Pingtung for carbon and Pb. In comparison, the values of isotopic compositions were similar to the data in central Taiwan, but, the values were different from that in northern Taiwan, which reflects that there was spatial variation of carbon and Pb pollution sources in Taiwan.

In this study, we combined the traditional chemical and isotopic compositions to investigate the air pollution sources for Kaohsiung and Pingtung. Our results indicated that industrial emission and oil-combustion were important pollution sources. However, it's necessary to collect more isotopic fingerprints from various pollution sources of PM_{2.5} for pollution

source forensics in the near future, particularly in Pb; moreover, modern carbon was a major component in Pingtung, it's necessary to deeply investigate the carbon pollution source.

目錄

目錄	I
圖目錄	V
表目錄	IX
第一章 研究背景	1
1.1 研究源起	1
1.2 細懸浮微粒特性	5
1.3 污染源排放微粒特徵	9
1.4 污染源鑑定技術	14
1.5 污染源排放微粒同位素特徵	15
1.6 同位素在環境污染源鑑識之應用	21
1.6.1 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素應用	22
1.6.2 碳 14 同位素應用	26
1.6.3 鉛同位素比值應用	30
第二章 前言	39
2.1 計畫目標	39
2.2 計畫之工作內容	39
2.3 其它應配合事項	40
第三章 研究方法	41
3.1 大氣細懸浮微粒密集觀測	42
3.2 污染源排放微粒採樣	46
3.3 微粒樣本化學分析方法	49
3.3.1 水溶性陰陽離子	49
3.3.2 碳微粒之分析	50
3.3.3 金屬元素分析	51
3.4 同位素化學分析方法	55
3.4.1 碳同位素分析方法	55
3.4.2 鉛同位素分析方法	59

3.4.3 樣本中化學成分分析之品保與品管	61
3.5 細懸浮微粒污染源鑑識方法	64
第四章 結果與討論	67
4.1 大氣細懸浮微粒採樣	67
4.1.1 密集觀測期間之氣象資料	67
4.1.2 大氣細懸浮微粒濃度分布	88
4.1.3 細懸浮微粒化學組成特性	91
4.1.4 以高低 PM _{2.5} 事件日探討微粒潛在污染成因	96
4.2 大氣細懸浮微粒碳及鉛同位素特性	99
4.2.1 碳同位素	99
4.2.2 鉛同位素	105
4.3 污染源排放之 PM _{2.5} 化學組成	109
4.3.1 火力發電廠	109
4.3.2 煉油廠	121
4.3.3 鋼鐵廠燒結爐	122
4.3.4 高雄港作業區排放之污染源特徵	125
4.4 污染源分析	137
4.4.1 碳與鉛同位素	137
4.4.2 PMF 受體模式	143
4.4.3 同位素與受體模式之污染源分析結果比較	144
4.5 高屏地區 PM _{2.5} 污染改善方針建議	150
第五章 結論與建議	151
5.1 執行進度	151
5.2 結論	152
5.3 建議	153
參考文獻	155
附錄	171
附錄一 評選會議記錄	171
附錄二 第一次工作報告會議紀錄	177

附錄三 期中報告審查會議紀錄及意見回覆	181
附錄四、期末報告審查會議紀錄	193
附錄五 排放管道採樣資料	209

圖目錄

圖 1.1.1 2016 年至 2018 年各縣市 PM _{2.5} 年平均濃度	2
圖 1.1.2 嘉義縣市、台南市、高雄市和屏東縣 PM _{2.5} 各類污染源排放量比例	3
圖 1.5.1 國內外各污染源排放微粒與氣體污染物 $\delta^{13}\text{C}$ 值	16
圖 1.5.2 國內外各污染源排放微粒鉛同位素特徵分佈	17
圖 1.5.3 前期計畫和其他研究量測之污染源排放微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值的比較	19
圖 1.5.4 前期計畫和其他研究量測之污染源排放微粒之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值的比較	20
圖 1.5.5 前期計畫和其他研究量測之污染源排放微粒之 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值的比較	21
圖 1.6.1 墨西哥市空氣及各污染源排放碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 值分佈	23
圖 1.6.2 中國大陸各城市空氣中碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 值	24
圖 1.6.3 立陶宛 Vilnius 不同粒徑懸浮微粒之 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 值與其污染來源相對貢獻量	24
圖 1.6.4 2016~2018 年計畫調查的周界和重要污染源分佈圖	26
圖 1.6.5 TC/PM _{2.5} 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 關係圖	27
圖 1.6.6 日本 Toyko 地區不同粒徑之微粒中現代碳含量	29
圖 1.6.7 英國 Birmingham 地區 PM _{2.5} 之 OC 與 EC 濃度及其污染源相對貢獻量	29
圖 1.6.8 2016~2018 年調查之生質燃燒指標和現代碳濃度關係圖	30
圖 1.6.9 中國大陸上海地區大氣 PM ₁₀ 及污染源排放微粒鉛同位素特徵	32
圖 1.6.10 中國大陸上海地區大氣 TSP 及污染源排放微粒鉛同位素特徵	32
圖 1.6.11 全球大氣微粒鉛同位素比值分佈	33
圖 1.6.12 2016~2018 年計畫之 PMF 與鉛同位素比值分析結果	35
圖 1.6.13 2016~2018 年計畫採樣期間之逆軌跡分析圖	36
圖 1.6.14 法國及英國地區空氣微粒之鉛同位素比值變化	37
圖 3.1.1 本計畫流程圖	41
圖 3.1.2 本計畫大氣細懸浮微粒採樣測站和污染源相對位置圖	43

圖 3.1.3 Super SASS 採樣器構造圖	44
圖 3.1.4 BGI PQ200 氣膠採樣器	44
圖 3.1.5 PM _{2.5} 高量採樣器	45
圖 3.2.1 固定源煙道排放 FPM 採樣器示意圖	47
圖 3.2.2 固定源煙道排放 CPM 採樣器示意圖	47
圖 3.2.3 高雄港務局規劃之港區空氣品質監測站位置圖	48
圖 3.2.4 高雄港海域船舶動態資料 (不同顏色代表不同類型的船隻).....	48
圖 3.3.1 氣膠樣品有機碳及元素碳分析方法及結果圖譜說明。	51
圖 3.3.2 本計畫使用的 ICP-MS	53
圖 3.4.1 CRDS 腔體內部示意圖	56
圖 3.4.2 ¹³ CO ₂ 以及 ¹² CO ₂ 吸收波長示意圖	57
圖 3.4.3 AMS 示意圖	58
圖 3.4.4 微粒中鉛同位素純化流程示意圖	60
圖 3.4.5 無塵箱內微粒樣品溶液加熱蒸乾	60
圖 3.4.6 無塵箱內微粒樣品溶液進行鉛純化	61
圖 4.1.1 本計畫大氣 PM _{2.5} 採樣測站照片	68
圖 4.1.2 橋頭站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	70
圖 4.1.3 左營站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	71
圖 4.1.4 鳳山站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	72
圖 4.1.5 小港站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	73
圖 4.1.6 大寮站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	74
圖 4.1.7 林園站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	75
圖 4.1.8 屏東站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	76
圖 4.1.9 潮州站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	77
圖 4.1.10 橋頭站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	79
圖 4.1.11 左營站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	80
圖 4.1.12 鳳山站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	81
圖 4.1.13 小港站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	82
圖 4.1.14 大寮站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	83

圖 4.1.15 林園站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	84
圖 4.1.16 屏東站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	85
圖 4.1.17 潮州站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖	86
圖 4.1.18 本計畫和環保署監測站同步採集之春季 PM _{2.5} 濃度分布圖	88
圖 4.1.19 本計畫和環保署監測站同步採集之夏季 PM _{2.5} 濃度分布圖	90
圖 4.1.20 春季密集採樣期間之 PM _{2.5} 化學組成比例	92
圖 4.1.21 夏季密集採樣期間之 PM _{2.5} 化學組成比例	95
圖 4.1.22 春季密集採樣期間 PM _{2.5} 事件日和非事件日之各化學組成濃度分佈 和各化學物種增量比例	97
圖 4.1.23 夏季密集採樣期間 PM _{2.5} 事件日和非事件日之各化學組成濃度分佈 和各化學物種增量比例	98
圖 4.2.1 春季密集採樣期間各測站 PM _{2.5} 中的總碳和碳同位素時間關係圖	102
圖 4.2.2 夏季密集採樣期間各測站 PM _{2.5} 中的總碳和碳同位素時間關係圖	104
圖 4.2.3 春季密集採樣期間各測站 Pb 濃度和鉛同位素比值時間關係圖	107
圖 4.2.4 夏季密集採樣期間各測站 Pb 濃度和鉛同位素比值時間關係圖	108
圖 4.2.5 本期計畫和前期計畫之鉛同位素比值分佈圖	109
圖 4.3.1 污染源煙道排放之 PM _{2.5} 採樣實況	111
圖 4.3.2 高雄港作業區之採樣位置圖	112
圖 4.3.3 各污染源排放之 PM _{2.5} 的 CPM 和 FPM 比例	116
圖 4.3.4 各污染源排放之有機與無機 CPM 比例	116
圖 4.3.5 不同污染源之 ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb 比值分布圖	118
圖 4.3.6 不同污染源之 ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb 比值分布圖	119
圖 4.3.7 火力發電廠煙道排放之 PM _{2.5} 中各元素濃度分佈	120
圖 4.3.8 火力發電廠煙道排放之 PM _{2.5} 含有元素的富集因子特性	120
圖 4.3.9 煉油廠煙道排放之 PM _{2.5} 中各元素濃度分佈	124
圖 4.3.10 煉油廠廠煙道排放之 PM _{2.5} 含有元素的富集因子特性	124
圖 4.3.11 鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 PM _{2.5} 中各元素濃度分佈	126
圖 4.3.12 鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 PM _{2.5} 含有元素的富集因子特性	126
圖 4.3.13 第一港口船舶進出航道之金屬元素濃度分布圖	130

圖 4.3.14 第二港口船舶進出航道之金屬元素濃度分布圖	131
圖 4.3.15 前鎮漁港之金屬元素濃度分布圖	131
圖 4.3.16 旗津漁港之金屬元素濃度分布圖	132
圖 4.3.17 第五貨櫃區之金屬元素濃度分布圖	132
圖 4.3.18 第一港口船舶進出航道之 EF 分布圖	133
圖 4.3.19 第二港口船舶進出航道之 EF 分布圖	133
圖 4.3.20 前鎮漁港之 EF 分布圖	134
圖 4.3.21 旗津漁港之 EF 分布圖	134
圖 4.3.22 第五貨櫃區之 EF 分布圖	135
圖 4.4.1 密集採樣期間之 PM _{2.5} 濃度、總碳濃度和 δ ¹³ C 之關係圖	138
圖 4.4.2 大氣和污染源排放之 PM _{2.5} 中的 δ ¹³ C 比較圖	139
圖 4.4.3 大氣和港口作業區排放之 PM _{2.5} 中的 δ ¹³ C 比較圖	141
圖 4.4.4 各測站大氣 PM _{2.5} 之鉛污染源分析結果	142
圖 4.4.5 PMF 解析因子數和臨界參數比值 (Q _{true} /Q _{exp}) 關係圖	143
圖 4.4.6 PMF 污染源推估因子剖面圖	145
圖 4.4.7 PMF 推估之不同污染源對不同測站的相對貢獻量	147
圖 4.4.8 PMF 和 pMC 推估之各污染源對現代碳與化石碳的貢獻比例比較圖	148
圖 4.4.9 PMF 推估之各污染源對鉛的貢獻比例比較圖	149

表目錄

表 1.2.1 典型大氣氣膠的三尖峰粒徑分佈	6
表 1.3.1 懸浮微粒各污染排放源之指標元素	11
表 1.3.2 國內外交通污染源 PM _{2.5} 之 OC、EC 之含量與 OC/EC 之比值	12
表 3.3.1 濾紙樣本微波消化升溫設定條件	52
表 3.3.2 濾紙樣本第二階段微波消化升溫設定條件	52
表 3.3.3 感應耦合電漿質譜儀分析設定參數	54
表 3.3.4 本計畫建立之 ICP-MS 針對 34 種元素的方法偵測極限 (ng/m ³)	55
表 4.1.1 大氣及污染源 PM _{2.5} 採樣之樣本數統計表	69
表 4.1.2 春季密集採樣期間之各測站大氣 PM _{2.5} 及化學組成濃度統計表	89
表 4.1.3 夏季密集採樣期間之各測站大氣 PM _{2.5} 及化學組成濃度統計表	90
表 4.2.1 密集採樣期間之大氣 PM _{2.5} 中的總碳與總鉛濃度及其同位素數值統計表	101
表 4.3.1 污染源排放 FPM 和 CPM 濃度 (mean ± SD) 統計表	113
表 4.3.2 污染源排放之 PM _{2.5} 化學組成濃度 (mean ± SD) 統計表	114
表 4.3.3 高雄港作業區排放之 PM _{2.5} 化學組成濃度 (mean ± SD) 統計表	127
表 4.3.4 港口作業區之 PM _{2.5} 化學組成因子分析結果	136
表 5.1 預定與實際進度表	151

行政院環境保護署專案工作計畫成果報告摘要 (詳細版)

計畫名稱：108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用研究計畫

計畫編號：

計畫執行單位：中央研究院環境變遷研究中心

計畫主持人：周崇光、李崇德、李家偉、榮建誠

計畫期程：108 年 1 月 1 日起至 108 年 12 月 31 日止

計畫經費：3,230 千元

摘要

本計畫目的為透過建立高屏地區大氣和主要污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的碳與鉛同位素特徵，探討高屏地區的大氣 $PM_{2.5}$ 污染來源。本計畫分別於 2019 年春季和夏季期間，採集位於高屏地區的橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站等 8 站的大氣 $PM_{2.5}$ 樣本，也陸續採集高雄地區的燃煤火力發電廠、煉油廠、鋼鐵廠燒結爐煙道和高雄港內外作業區排放之 $PM_{2.5}$ 樣本。

三種固定污染源排放的 $PM_{2.5}$ 都以可凝結性微粒 (Condensable particulate matter, CPM) 為主。在化學組成部分，可發現 1.) 火力電廠排放的 $PM_{2.5}$ 有較高的鈉等金屬元素與硫酸鹽；2.) 煉油廠排放的 $PM_{2.5}$ 有較高的硫酸鹽比例；3.) 鋼鐵廠排放的 $PM_{2.5}$ 有較高的硫酸鹽和鉀等金屬元素；4.) 港口作業區的主要化學組成為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、有機碳和元素碳，各作業區主要的金屬元素為 Na、Zn 和 V。8 個測站 $PM_{2.5}$ 中的主要化學組成均為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和有機碳；此外，高雄的現代碳與化石碳濃度占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的比例相當，但位於屏東的 2 個測站則以現代碳占優勢。以 $PM_{2.5}$ 濃度標準值將樣本劃分為 $PM_{2.5}$

事件日和非事件日時，發現光化學反應前驅物和化石碳排放的管制有助於降低高屏的 $PM_{2.5}$ 濃度。春季和夏季的大氣平均 $\delta^{13}C$ 分別為 -25.7% 和 -25.1% (大氣樣本)，在鉛同位素比值部分，春季和夏季的平均 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 分別為 1.1554 和 1.1572 (大氣樣本)，春季和夏季的平均 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 分別為 2.4263 和 2.4295 (大氣樣本)。本計畫綜合傳統化學組成和同位素量測結果發現，工業污染源和燃料油的燃燒是高屏地區 $PM_{2.5}$ 的重要碳污染源，但鉛污染源的掌握種類仍有限，有待未來調查更多位於高雄污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的傳統化學組成與同位素特徵，提高鉛污染源的鑑識能力。

十六、英文摘要

The objective of this study is to investigate the compositions of carbon and lead isotopes in fine particulate matters ($PM_{2.5}$) and, accordingly, to attribute potential sources of $PM_{2.5}$ in Kaohsiung and Pingtung with the isotopic fingerprints. During the period from the spring of 2019 to the summer of 2019, ambient (Ciaotou, Zuoying, Fengshan, Siaogang, Daliao, Linyuan, Pingtung, and Chaozhou) and pollution sources (a coal-fired power plant, an oil refinery plant, a steel plant, and Kaohsiung port) $PM_{2.5}$ samples were collected.

The results revealed that condensable particulate matter (CPM) was predominant particles in the $PM_{2.5}$ emitted from three stationary pollution sources. The chemical compositions from four pollution sources were: (1) coal-fired power plant: sulfate and Na were important species; (2) oil-refinery plant: sulfate was important species; (3) steel plant: sulfate and K were important species; (4) Kaohsiung port: the major compositions included sulfate, nitrate, ammonium, organic carbon, and elemental carbon, predominant elementals included Na, Zn, and V. The major constituents of

the ambient $PM_{2.5}$ in the study area included nitrate, sulfate, ammonium and total carbon. The contributions of fossil (15%) and modern (14%) carbon were similar in the six sampling sites in Kaohsiung. However, modern carbon was a predominant carbonaceous aerosols in Pingtung and Chaozhou. It was found from the chemical analysis that the concentrations of inorganic secondary aerosols (sulfate, nitrate, and ammonium) and fossil carbonaceous aerosols were elevated during high $PM_{2.5}$ episodes. These results implied that photochemical reactions and fossil carbon were important factors influencing the $PM_{2.5}$ in the study areas. The average $\delta^{13}C$ for ambient $PM_{2.5}$ are -25.7‰ and -25.1‰ in the spring and summer, respectively. The average $^{206}Pb/^{207}Pb$ ratios were 1.1554 and 1.1572 in the spring and summer, respectively, and $^{208}Pb/^{207}Pb$ ratios were 2.4263 and 2.4295, respectively. Our results indicated that industrial emission and oil-combustion were important pollution sources. However, it's necessary to collect more isotopic fingerprints from various pollution sources of $PM_{2.5}$ for pollution source forensics in the near future, especially in Pb.

前言

細懸浮微粒為粒徑小於 $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$) 且懸浮在空氣中的固態或液態污染物，過去許多流行病學研究均已證實，心血管疾病與呼吸道疾病的就診率或死亡率和 $PM_{2.5}$ 的暴露有密切關係 (Pope III et al., 2002; Wilson et al., 2005)。此外，根據世界衛生組織的統計 (World Health Organization, 2016)，全球有 92% 的地區之 $PM_{2.5}$ 濃度超過世界衛生組織的建議值；在台灣，根據環保署近 3 年 (2016~2018) 的統計資料可知，除了花東和宜蘭的 $PM_{2.5}$ 濃度低於年平均標準值外，其他縣市，如台中、雲林、嘉義、台南和高雄等縣市的年平均 $PM_{2.5}$ 濃度均居高不下，儘管年平均濃度都呈逐年下降的趨勢，但仍超過年平均標準值；因此，找

出 $PM_{2.5}$ 污染源也成為降低我國大氣 $PM_{2.5}$ 濃度和國人暴露 $PM_{2.5}$ 引發的健康危害風險的重要手段。

目前，較為廣泛的 $PM_{2.5}$ 污染源鑑定技術為受體模式，如 Positive Matrix Factorization (PMF)，但該方法在污染源的鑑定上有較高的不確定性 (Salcedo et al., 2016)；同位素具有穩定性，且不同污染源排放之微粒的同位素特徵具有較高的專一性，因此，近年歐美國家也紛紛應用該技術在 $PM_{2.5}$ 污染來源的鑑識 (Gioia et al., 2017; Widory et al., 2010; Zong et al., 2016)。本研究團隊於前期計畫執行期間 (周崇光, 2016, 2017, 2018)，已陸續針對台中、彰化、雲林、南投和嘉義等 $PM_{2.5}$ 污染較為嚴重的地區，進行污染源與當地大氣 $PM_{2.5}$ 的採集和傳統化學組成與同位素的分析，並探討其污染來源；今年度計畫，則著重在 $PM_{2.5}$ 污染情形同樣嚴重的高雄與屏東地區。由於高雄具有全國最大的港口，港區內也有重大污染源，如火力發電廠、鋼鐵廠和煉油廠，過去的分析報告也指出高雄地區的污染源也可能是影響屏東縣空氣品質的主要因素之一 (屏東縣政府, 2017)；因此，本年度計畫調查高雄境內重要污染源與港口作業區排放之微粒之同位素特徵，並架設大氣 $PM_{2.5}$ 採樣站於高雄市與屏東縣境內，藉此探討高雄境內污染源排放之微粒對高雄市與屏東縣的影響。

研究方法

大氣 $PM_{2.5}$ 的採樣分別在 2019 年 3 月~4 月和 2019 年 8 月完成，架設的採樣點包含位於高雄市境內的橋頭、左營、大寮、林園、鳳山與小港和屏東縣境內的屏東與潮州，架設位置均在環保署所屬的空氣品質監測站上，所有測站的採樣作業均同步進行，每一個測站在每一個季節的採樣天數最少 7 天，每個樣本均採集 22 小時。本計畫採用的採樣器包

含採用鐵氟龍濾紙的 PQ-200 採樣器、採用石英濾紙的 Super-SASS 採樣器和採用石英濾紙的高量採樣器。PQ-200 採集下來的樣本是用於分析 $PM_{2.5}$ 中的金屬元素和鉛同位素，Super-SASS 採集的樣品用於分析 $PM_{2.5}$ 中的碳成分和水溶性陰陽離子，高量採樣器採集的樣品用於分析 $PM_{2.5}$ 中的 Levoglucosan 和碳同位素， $PM_{2.5}$ 質量濃度以 PQ-200 採集的樣品進行分析。

特定污染源的採樣對象包含火力發電廠、鋼鐵廠燒結爐和煉油廠，並均以 NIEA A212.10B 和 NIEA A214.70C 串聯之採樣方法，採集可過濾式微粒 (filterable particulate matter, FPM) 和可凝結性微粒 (condensable particulate matter, CPM)。每種污染源煙囪排放之 $PM_{2.5}$ 的採樣次數各為 2 次 (春季與夏季)，每次 3 重複，採樣時間分別為 2019 年的 4 月~5 月和 8 月，所分析之特定污染源的化學組成和大氣 $PM_{2.5}$ 的分析指標相同 (分析的樣本來自 FPM)。2019 年 4 月和 8 月分別完成高雄港區內的第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區的 $PM_{2.5}$ 採樣與分析。

水溶性陰陽離子以離子層析儀進行分析，有機碳和元素碳則利用 IMPROVE-A Protocol 以 Thermo-Optical Reflection (TOR) 分析技術進行分析，金屬成分以 Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) 分析經微波消化後的溶液。同位素部分， $\delta^{13}C$ 以光腔衰盪光譜儀 (Cavity Ringdown Spectroscopy, CRDS) 分析， ^{14}C 以加速質譜儀 (accelerator mass spectrometer, AMS) 分析，鉛同位素 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb) 則以 Sr-Spec 樹脂純化微波消化後的溶液 (取得鉛同位素)，再以 ICP-MS 進行分析和計算鉛同位素比值。

結果

三種固定污染源排放的 $PM_{2.5}$ 都以可凝結性微粒 (Condensable particulate matter, CPM) 為主，而除了煉油廠排放的 CPM 以有機組成為主外，其他 2 種固定污染源煙道排放的 CPM 都以無機成分為主。在化學組成部分，可發現 1.) 火力電廠排放的 $PM_{2.5}$ 有較高的金屬元素與硫酸鹽，而金屬元素以 Na (和該電廠採用海水脫硫有關)、Mg、K、Ni、Zn、Mo、Cr 和 Se 等為主，平均 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 比值為 1.1959 (1.1781~1.2115)，平均 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 比值為 2.4305 (2.4108~2.4403)；2.) 煉油廠排放的 $PM_{2.5}$ 有較高的硫酸鹽比例 (54%)，特徵元素包括 Fe、Mn、Ni、Zn、Mo、Pb 和 Cr 等，平均 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 比值為 1.1930 (1.1758~1.2106)，平均 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 比值為 2.4318 (2.4171~2.4437)；3.) 鋼鐵廠排放的 $PM_{2.5}$ 有較高的硫酸鹽和鉀等金屬元素，其中硫酸鹽占了 35%，特徵元素包括 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Zn、Mo、Cd、Tl、Pb、Cr、Se、Rb 和 Cs 等；平均現代碳比例為 18% (14~22%)，平均 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 比值為 1.1908 (1.1664~1.2143)，平均 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 比值為 2.4010 (2.3774~2.4229)；4.) 港口作業區 (第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和貨櫃區) 的主要化學組成為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、有機碳和元素碳；各作業區主要的金屬元素為 Na、Zn 和 V； $\delta^{13}C$ 範圍在 -31.3‰ 至 -22.5‰ 之間，化石碳為優勢碳成分 (34%，12~68%)，平均 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 分別為 1.1561 (1.1406~1.1884) 和 2.4295 (2.4013~2.4546)。

8 個測站的日平均 $PM_{2.5}$ 濃度為 $19.9 \pm 10.2 \mu g/m^3$ ，其值低於國家日平均標準 ($35 \mu g/m^3$)。在傳統化學組成部分，8 個測站 $PM_{2.5}$ 中的主要化學組成均為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和有機碳，其濃度各占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 21%、20%、13% 和 24%；此外，高雄的現代碳與化石碳濃度占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的比例相當 (化石碳：15%；現代碳：14%)，但位於屏

東的 2 個測站則以現代碳占優勢（化石碳：12%；現代碳：18%），反映高雄和屏東的主要碳污染源不同。當以 $PM_{2.5}$ 濃度標準值將樣本劃分為 $PM_{2.5}$ 事件日和非事件日時，可發現相較於非事件日，事件日期間的硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽濃度加總對 $PM_{2.5}$ 總濃度的增量貢獻比例最大，顯示光化學反應前驅物的管制應有助於降低高屏地區的 $PM_{2.5}$ 濃度，化石碳對 $PM_{2.5}$ 總濃度的增量貢獻比例最為明顯，說明管制化石燃料的燃燒有助於降低高屏地區的 $PM_{2.5}$ 濃度。

春季和夏季的大氣平均 $\delta^{13}C$ 分別為 -25.7‰ (-28.2 至 -23.6‰) 和 -25.1‰ (-28.7 至 -20.7‰)，分析結果顯示各測站 $\delta^{13}C$ 數值有顯著差異，說明高屏地區不同測站的碳污染源有區域上的變異。在鉛同位素比值部分，春季和夏季的平均 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 分別為 1.1554 (1.1298~1.1712) 和 1.1572 (1.0974~1.1966)，春季和夏季的平均 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 分別為 2.4263 (2.3985~2.4519) 和 2.4295 (2.3714~2.4572)，多數測站的鉛同位素比值變異較大，顯示就單一測站而言，不同採樣日的鉛污染源可能不同。無論 $\delta^{13}C$ 或鉛同位素比值，其量測值多和過去在中南部（台中-彰化-南投-雲林-嘉義）的量測結果相近，但多低於北部的量測結果，反映碳與鉛污染源有區域上的差異。

本計畫分析的大氣（8 個測站）及污染源（4 種污染源）排放微粒的傳統化學組成與同位素結果顯示：工業污染源和燃料油的燃燒是高屏地區 $PM_{2.5}$ 的重要污染源，但鉛污染源的掌握數量仍有限，有待未來更多位於高雄污染源的調查，以提高鉛污染源的鑑識能力；此外，屏東站與潮州站的現代碳比例明顯偏高，因此調查屏東與潮州當地的現代碳貢獻源，相信有助於降低當地的 $PM_{2.5}$ 濃度。比較同位素與 PMF 之污染源推估結果可發現，碳同位素和 PMF 的結合，可增加碳污染源的

鑑識能力，然而，研究蒐集到的污染源排放之鉛同位素比值之區別性不佳，較難提供完整的污染源鑑識結果，因此有待未來增加位於高雄的鉛污染源的採樣與分析，以提高鉛污染源的鑑定能力。

結論

1. 無論春季或夏季，大氣測站的優勢傳統化學組成均為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和有機碳；以現代碳比例換算的現代碳和化石碳濃度則顯示高雄的 6 個測站之化石碳與現代碳相當，但屏東 2 個測站以現代碳占優勢。
2. 以 $PM_{2.5}$ 濃度標準值將樣本劃分為 $PM_{2.5}$ 事件日和非事件日，分析發現管制光化反應前驅物及化石碳貢獻源（如煉油廠或交通源）應有助於降低當地的 $PM_{2.5}$ 濃度。
3. 大氣 $PM_{2.5}$ 中的 $\delta^{13}C$ 鉛同位素分析結果顯示夏季的量測值較春季低。然而，無論夏季或春季，其量測結果都和台灣北部的量測結果有差異，但和過去在中南部地區（台中-彰化-雲林-南投-嘉義）的量測結果相近，顯示本土的碳與鉛污染源可能存在著空間上的差異。
4. 火力電廠排放的 $PM_{2.5}$ 主要集中在無機 CPM，FPM 中的重要成分為金屬元素與硫酸鹽，金屬元素之重要元素包括 Na、Mg、K、Ni、Zn、Mo、Cr 和 Se 等， $^{206}Pb/^{207}Pb$ 平均比值為 1.1959 (1.1781~1.2115)， $^{208}Pb/^{207}Pb$ 平均比值為 2.4305 (2.4108~2.4403)。
5. 煉油廠排放的 $PM_{2.5}$ 以有機 CPM 為主，FPM 中的主要成分為硫酸鹽和鉀等金屬元素，其中硫酸鹽占了 54%，特徵元素包括 Fe、Mn、Ni、Zn、Mo、Pb 和 Cr 等， $^{206}Pb/^{207}Pb$ 平均比值為 1.1930 (1.1758~1.2106)， $^{208}Pb/^{207}Pb$ 平均比值為 2.4318 (2.4171~2.4437)。
6. 鋼鐵廠排放的 $PM_{2.5}$ 以無機 CPM 為主，FPM 中的主要成分為硫酸

鹽和鉀等金屬元素，其中硫酸鹽占了 35%，特徵元素包括 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Zn、Mo、Cd、Tl、Pb、Cr、Se、Rb 和 Cs 等， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 1.1908 (1.1664~1.2143)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 2.4010 (2.3774~2.4229)。

7. 港口作業區 (第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區) 的主要化學組成為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、有機碳和元素碳；主要的金屬元素除了 Na、V 和 Zn； $\delta^{13}\text{C}$ 範圍在-31.3‰至-22.5‰之間，化石碳為優勢的碳成分，平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 分別為 1.1561 (1.1406~1.1884) 和 2.4295 (2.4013~2.4546)。
8. PMF 分析結果顯示 6 個污染源對橋頭站與左營站的貢獻相當；鳳山站以工業排放 (煉油廠) 和燃料油燃燒為主；小港站則有較多的工業排放 (重油燃燒) 和揚塵 (含水泥灰) 和工業排放 (混合源) 貢獻；大寮站以海鹽飛沫占優勢；林園站則有海鹽飛沫和工業排放 (重油燃燒)；屏東站和潮州站則以工業排放 (煉油廠) 和燃料油燃燒占優勢。
9. 比較同位素與 PMF 之污染源推估結果，可發現碳同位素和 PMF 的結合，可增加碳污染源的鑑識能力；然而，研究蒐集到的污染源排放之鉛同位素比值相似性高，因此較難提供完整的污染源鑑識結果，且因本研究掌握的高雄地區之鉛污染源種類有限，因此有待未來增加位於高雄的鉛污染源的採樣與分析，以提高鉛污染源的鑑定能力。

建議

1. 光化反應和燃燒源(包括化石和生質燃料)是造成高屏地區高 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度的重要成因，因此管制光化反應前驅物的排放及燃燒源是重要

的管理方向。

2. 比較台灣北部、中部和南部的碳或鉛同位素資料，可發現南部和中部的特徵相近，但都和北部有明顯不同，隱含的污染過程需要進一步追蹤。
3. 本計畫發現煙道採樣所獲得的 $PM_{2.5}$ 樣本，其含有的碳成分均無法提供足量的碳供作碳同位素的分析。因此，建議未來若要調查煙道排放之微粒的碳同位素特性，且仍採用 NIEA 之公告採樣方法，除了延長採樣時間外，增加樣本數是重要的採樣與分析策略。
4. 本計畫已獲得部份位於高雄地區的污染源之碳、鉛同位素指紋資料，後續研究仍需增加高雄地區之污染源的採樣與分析，以提高微粒污染源的鑑識能力。
5. 根據本研究的量測結果，我們發現 5 個港口作業區的 $PM_{2.5}$ 污染源特性和周界相近，而在港區內，除來自船舶的排放外，也包含貨運車輛，但船舶或貨運車輛排放之微粒的採集較為困難，且不同規模的船舶或貨運車輛排放的微粒特性也有差異；然而，透過量測資料仍可發現部分組成和周界有明顯差異，如化石碳的比例明顯較周界高。因此，本研究團隊建議未來若要探討港區對周界 $PM_{2.5}$ 的影響，可將其視為”面污染源”來評估。

第一章 研究背景

1.1 研究源起

細懸浮微粒係指粒徑小於 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) 且懸浮在空氣中的固態或液態污染物，其粒徑愈小的微粒，越容易透過呼吸吸入沉降在肺泡區甚至進入血液循環系統，進而影響民眾的健康，如心血管疾病或呼吸道疾病等。流行病學研究證實，心血管疾病與呼吸道疾病的就診率和 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露有密切關係 (Wilson et al., 2005)，Pope III 在美國執行的研究發現 (Pope III et al., 2002)，空氣中的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度每增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，民眾的死亡率會增加 4%。在臺灣，Pan 的研究發現 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露會增加肝癌的發生風險 (Pan et al., 2016)，Hung 的研究指出 $\text{PM}_{2.5}$ 和卵巢癌的發生有關 (Hung et al., 2012)。有鑑於此，世界衛生組織針對 $\text{PM}_{2.5}$ 制定建議濃度，希望藉此降低民眾的暴露進而減低健康危害風險，歐美等先進國家亦參考其濃度規範，制定國家級的 $\text{PM}_{2.5}$ 法規標準，我國也於 2012 年 5 月 14 日立法完成大氣的 $\text{PM}_{2.5}$ 法規標準，其 24 小時平均標準值為 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均標準值為 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

我國自 2012 年開始立法管制 $\text{PM}_{2.5}$ 後，在各級環保機關的努力下，各縣市 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度逐年減低，顯示各級政府在 $\text{PM}_{2.5}$ 排放減量的控制政策已見成效。然而，由圖 1.1.1 所呈現的近 3 年 (2016 年至 2018 年) 各縣市 $\text{PM}_{2.5}$ 之年平均濃度變化可發現，除了台東縣、花蓮縣和宜蘭縣外，其餘各縣市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均濃度距離環保署規畫 2020 年的法規標準 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 尚有努力空間，故管制 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放仍是未來環保機關須持續努力的課題，其中污染來源的鑑定在 $\text{PM}_{2.5}$ 的管制為重要的手段。

過去研究多利用統計模型或受體模式來分析污染來源，然而，這些方法對污染源的定義有較高的不確定 (Samek et al., 2016)，且不同污染源可能排放同樣的化學組成，並增加污染源的鑑定難度。因此，近年有研究開始利用具有穩定性和污染源專一性的同位素來探討各地區的微粒污染源 (Gioia et al., 2017; Sen et al., 2016; Widory et al., 2010; Zong et al., 2016)。本研究團隊在 2015 年~2017 年的計畫中，即建立 $\text{PM}_{2.5}$ 之碳、鉛與鋇同位素的分析方法，並得到 $\delta^{13}\text{C}$ 和鉛同位素比值 ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 與 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) 適合應用在鑑識本土 $\text{PM}_{2.5}$ 污染來源的結論 (Jung et al., 2019; 周崇光, 2016, 2017)；2016~2018 年期間更進一步建立 $\text{PM}_{2.5}$ 污染較為嚴重的

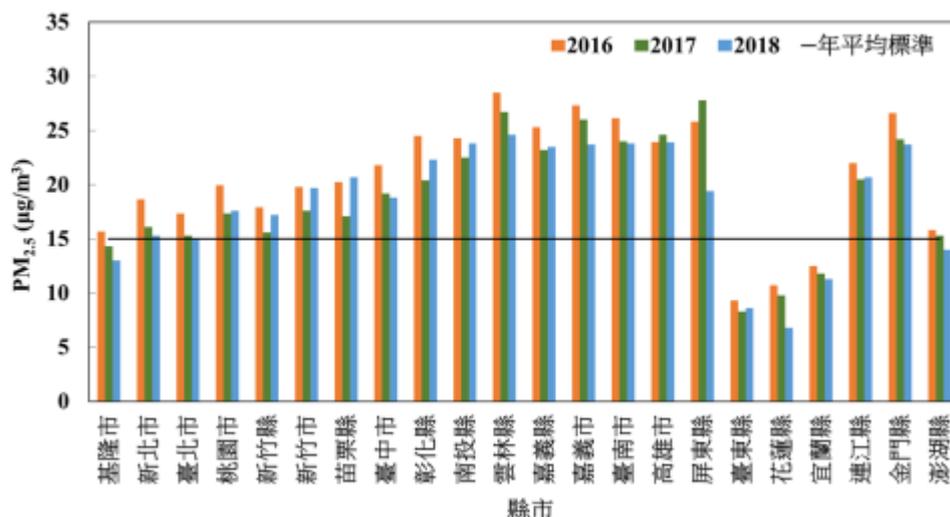


圖 1.1.1 2016 年至 2018 年各縣市 PM_{2.5} 年平均濃度

雲林縣和鄰近縣市（包含台中市、彰化縣和南投縣）之污染源的同位素特徵（交通源、生質燃燒、燃煤電廠、煉油廠、焚化爐和鋼鐵廠），並透過大氣 PM_{2.5} 的採集和同位素特徵的分析，了解台中市、雲林縣和南投縣主要污染源排放之 PM_{2.5} 對當地大氣的影響和貢獻。根據前期計畫的污染源鑑定結果發現，北台灣地區在春季期間的碳與鉛明顯受來自中國境外傳輸的影響，夏季以當地污染源為主，推測以交通源為主要的貢獻源；台中和雲林等地區的碳濃度除了和二次氣膠的生成有關外，木材燃燒也是貢獻源之一，而鉛則是受交通排放與工業源的影響（包含燃煤電廠）（前期計畫之詳細應用成果，請見第 1.6.1~1.6.3 節）。然而，不同地區的污染源種類及其運作模式均不同，相對的，排放之微粒的同位素特徵亦可能有差異。是故，建立 PM_{2.5} 污染情形同樣嚴重的嘉義、台南、高雄和屏東之重要污染源排放的同位素特徵，並應用在評估重要污染源排放之 PM_{2.5} 對嘉義、台南、高雄和屏東空氣品質的影響，相信有助於降低高雄等地區的 PM_{2.5} 濃度。

根據 Taiwan Emission Data System 10.0 (TEDS 10.0) 排放量資料庫顯示 (圖 1.1.2)，在嘉義縣市、台南市、高雄市和屏東縣等 5 個縣市中，污染源都以點污染源為主，如工業排放和商業活動（餐廳油煙）等，平均約為 60%，面源和線源的平均排放量分別為 10% 和 30%，其中高雄市的 PM_{2.5} 排放量為全國最高，每年約有 9,351 噸，遠高於第二高的台中市 (7,714 噸/年)，主要是因高雄市有較多的工業區，如臨海工業區、林園工業區、大發工業區和仁武工業區等，其工業區內又擁有石

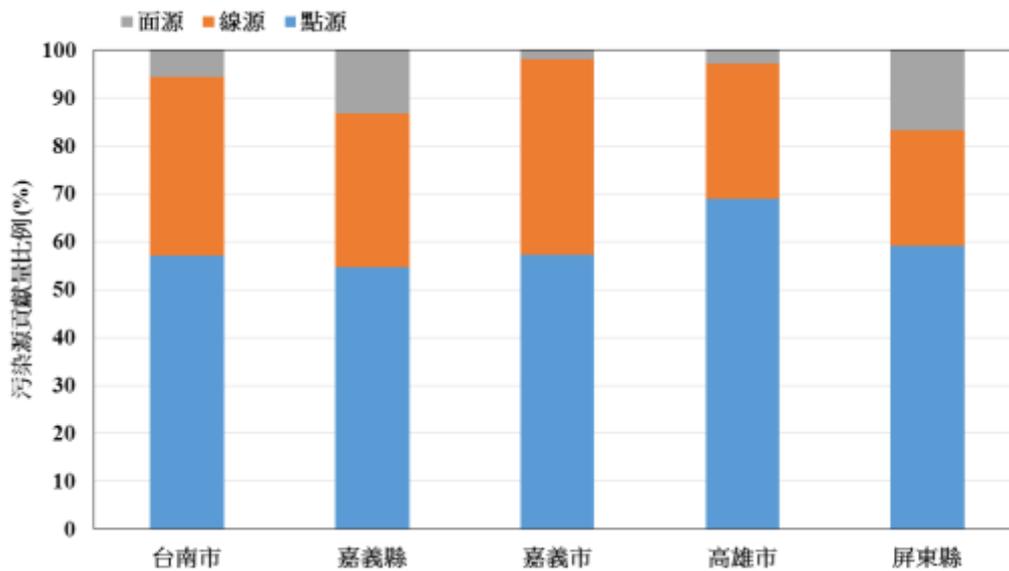


圖 1.1.2 嘉義縣市、台南市、高雄市和屏東縣 PM_{2.5} 各類污染源排放量比例

化業、鋼鐵業和煉油業等重工業。此外，高雄市的港口也是全國第一大港，根據台灣港務股份有限公司的統計，高雄港在 2017 年的港口貨物吞吐量為 111,070,972 噸，其貨物吞吐量不僅遠高於第二名的台中港 (75,348,241 噸)，也是唯一排名在全球前 50 名的國內港口；在 2017 年，進出高雄港的船艘數為 37,546 艘次，同樣高於第二名的台中港 (15,797 艘次)，其中有較高污染排放量的遠洋船，其進出高雄港的艘次也遠較其他國內港口高。由上述可知，高雄市 PM_{2.5} 的污染源眾多且排放量高，具有優先建立其污染源的 isotopic 特徵和評估其對周邊區域空氣品質影響的急迫性。然而，要建立高雄市重要污染源之 isotopic 排放特徵，並探討其對周界空氣品質的影響，所需時間和成本相當可觀；是故，本團隊規劃最少以 2 年的時間探討高雄地區重要污染源排放之微粒的 isotopic 特徵，並評估其對周邊空氣品質的影響，其中第一年以探討高雄港區內的污染源排放之微粒的 isotopic 特徵及其對周界空氣品質的影響為主。

過去研究指出，貨櫃集中區和船舶進出港口所排放的廢氣是港口的主要污染源，因貨櫃集中區會有較多的貨運卡車通行，且在貨物搬運過程中也會產生較高的微粒，如在 Donateo 的研究中 (Donateo et al., 2014)，他們發現當貨物在搬運過程中，PM_{2.5} 的濃度會較無搬運貨物時高 1.5 倍，同一研究也發現當船舶進港或出港時，PM_{2.5} 的質量濃度和顆粒濃度均會顯著上升，並為無船舶進出港口時的 3 倍。

Zhao 的研究也發現 (Zhao et al., 2013a)，無論國際商船或當地的船舶，在港口所量測到的大氣金屬 V 濃度 (船舶燃油後排放之重要元素) 均和進港的船舶數量呈顯著正相關。此外，港口區內的污染源除了會影響港口區內的空氣品質，也會影響周邊區域的空氣品質，如 Yau 採集香港 Kwai Chung 和 Tsing Yi 貨運碼頭的 PM_{2.5}，並分析其化學組成 (Yau et al., 2013) 和以 positive matrix factorization 進行分析，分析後發現二次硫酸鹽、柴油燃燒和燃煤等是當地的重要污染源，且和鄰近碼頭地區的 PM_{2.5} 之化學組成量測結果相近。de Foy 結合 Weather Research and Forecasting model (WRF) Comprehensive Air-quality Model with eXtensions (CAMx) 模式模擬發現，美國 Milwaukee 大氣中的 Ni、V 和黑碳會受鄰近的港口排放之污染物影響，其中 Ni 和 V 約有 5% 由鄰近港口的船舶所貢獻，黑碳約有 10% 來自鄰近港口的船舶所貢獻 (de Foy et al., 2012)。此外，Saraga 和 Xu 以 PMF 分別分析希臘 Thessaloniki 島和中國廈門港口產生的污染物種類，並探討其和鄰近市區空氣品質的關係 (Saraga et al., 2019; Xu et al., 2018)；兩個研究都發現港口的污染源，特別是船舶運輸是影響鄰近市區空氣品質的重要因子之一，該類研究也證實港口的作業活動確實會影響鄰近地區的空氣品質。

在台灣，有關港口污染源及其對周界空氣品質影響之研究較少，都以排放清單的建立和污染減量為主要的研究議題。如環保署在 2015 年~2016 年間，委託國內顧問公司建立國內 5 大商業港區的污染源排放清單和減量策略 (蔡志賢, 2017)；根據統計，高雄港和基隆港每年的 PM_{2.5} 排放量相近 (最高的兩個港口)，但基隆港的海巡船貢獻將近 80%，在高雄港，不同類型的船隻和作業區所貢獻的 PM_{2.5} 較為平均，表示高雄港的 PM_{2.5} 貢獻源較為複雜。成功大學吳義林教授受交通部運輸研究所委託 (吳義林, 2017)，結合交通部氣象局之氣象觀測資料與交通部運輸研究所的 Automatic Identification System (AIS) 即時船隻等相關資料，建置高雄港區之即時空氣品質推估系統。另有研究在高雄港區架設探空氣球 (蔡文正, 2016)，並分析不同氣流傳輸軌跡對高雄港周邊區域空氣品質的影響 (以環保署的復興、前鎮、小港和前金站為受體點)，探討的污染物包含氮氧化物、硫氧化物和 PM₁₀ 等；然而，該研究並無深入討論高雄港區排放之空氣污染對周界空氣品質的影響，僅討論同一時間量測到的高雄港區和高雄港周邊 4 個測站的空氣污染物濃度差異。

透過前述資料可知，港口是重要 PM_{2.5} 污染源之一，但國內較少有研究深入探

討港口污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的特徵及其對周邊空氣品質的影響。本期計畫著重在高雄港區的污染源調查，並評估其對周邊空氣品質的影響；在污染源的選取上，由於過去研究指出船舶進港區和貨物集中區是重要的 $PM_{2.5}$ 污染源，且高雄港位於臨海工業區內，工業區內又有中油的火力發電廠和煉油廠，因此，調查的污染源以高雄港區內的火力發電廠、煉油廠、貨物集中區和船舶進港區排放的 $PM_{2.5}$ 為調查對象；另外，因貨物的運載都以貨運卡車為主，是故，本研究團隊也會調查高雄港的貨運卡車聚集區的 $PM_{2.5}$ 污染源特徵，以充分了解整個高雄港區的 $PM_{2.5}$ 污染源特性及其對周界空氣品質的影響。

在大氣空氣品質的採樣部分，除了被設於高雄市境內的採樣點，以調查高雄港排放之 $PM_{2.5}$ 對高雄市空氣品質的影響外，也架設採樣點於屏東縣，主要是因屏東縣政府在 2017 年發布的屏東縣空氣污染防制計畫-2017 年修訂版 (屏東縣政府, 2017) 指出，屏東境內並無重大工業區，且工業登記數僅為高雄市的 15%，但近年的 $PM_{2.5}$ 濃度卻和雲林縣不相上下 (圖 1.1.1)，其中高雄境內重大工業污染源排放後，其隨著氣流南下進入屏東縣，被認為是影響屏東縣空氣品質的重要污染途徑之一。因此，即便高雄港位於高雄市西側，並緊鄰旗津、前鎮、小港和林園等高雄市行政區，但仍不可忽略高雄港排放之污染物對屏東縣空氣品質的衝擊。

1.2 細懸浮微粒特性

大氣懸浮微粒典型的粒徑分佈有三個尖峰粒徑，包括粗微粒、核凝型 (Nucleation mode) 及累積型 (Accumulation mode) 尖峰粒徑，各粒徑之粒徑範圍、來源及主要成分如表 1.2.1 所示 (Chow, 1995; John et al., 1990)。核凝型微粒粒徑一般小於 $0.08 \mu\text{m}$ (或 $0.1 \mu\text{m}$)，主要為燃燒程序之排放或排放後急速冷卻氣體之凝結，此範圍之微粒會快速的與較大微粒產生膠凝或成為雲、霧滴的凝結核，生命週期通常小於一小時。累積型微粒主要為粒徑介於 $0.08 \sim 2 \mu\text{m}$ 之微粒，來自於核凝型微粒之相互膠凝、揮發性物種的凝結、氣固相間之轉換作用或細微的地表塵土，硫酸、硫酸氫銨、硫酸銨、有機碳及元素碳多分佈在此粒徑範圍，一般而言，核凝型與累積型的微粒通稱為細微粒。相反地，粗微粒所指的是懸浮微粒粒徑大於 2 或 $3 \mu\text{m}$ 以上的顆粒，其來源多來自磨碎行為之產物，以地殼物質為主，另外花粉、樹葉及輪胎碎片亦在此範圍內，由於細微粒粒徑較小，除了影響人體健康外，其

對大氣雲、霧之形成扮演著重要的角色，影響局部及區域性之天氣系統，故近年來大氣細懸浮微粒除了受到流行病學及公衛領域研究人員的關注之外，大氣科學家對於細懸浮微粒在雲、霧事件中所扮演之角色與關聯性的科研熱忱亦不在話下。

表 1.2.1 典型大氣氣膠的三尖峰粒徑分佈

	核凝區	累積區 Condensation Droplet	粗粒區
粒徑(dp)	< 0.08 μm	0.08 ~ 2 μm	> 2 or 3 μm
		0.2 μm ~ 0.7 μm	
主要來源	燃燒程序直接排放 冷卻氣體之凝結	會揮發性物種之凝結 氣固相間之轉化 細微之地表塵土	磨碎之行為
主要成分	H ₂ SO ₄ 、硫酸(氫)銨、有機碳、元素碳		地殼物質
分類	Fine Particles		Coarse Particles

大氣細懸浮微粒的主要成分可被概分為水溶性離子、含碳成分及金屬元素，其中水溶性離子中的硫酸離子 (SO₄²⁻)、硝酸離子 (NO₃⁻) 及銨離子 (NH₄⁺) 為二次無機氣膠 (secondary inorganic aerosol, SIA) 的主要成分，其含量約占 PM_{2.5} 質量濃度的 20-40%，為 PM_{2.5} 的主要成分 (Chow et al., 2002; He et al., 2001; Ho et al., 2003; Putaud et al., 2010; Zhang et al., 2013)。PM_{2.5} 之 SO₄²⁻ 的形成分成異相反應 (heterogeneous reaction) 及同相反應 (homogeneous reaction)，異相反應主要發生在高相對濕度的環境上，SO₂ 溶解至雲霧裡，與液滴中的 H₂O₂ 及 O₃ 進行反應，此類機制所產生的硫酸鹽粒徑較大，中位粒徑 (mass median diameter) 約 0.7 ± 0.2 μm (John et al., 1990)。NO₃⁻ 微粒之形成則為固定或移動污染源排放的 NO_x 經由氣相 (NO₂+OH) 或液相反應 (N₂O₅ 之水解反應) 在大氣中轉化成 HNO₃ 後再與 NH₃ 形成 NH₄NO₃ 微粒，在都會區 NH₄NO₃ 微粒之生成速率約為 1-4%/h (Lin and Cheng, 2007)，且相對濕度為控制 NH₄NO₃ 微粒生成之主要因子，然而在高溫度下，NH₄NO₃

微粒則會藉由熱解形成 HNO_3 及 NH_3 。

大氣懸浮微粒含碳成份 (Carbonaceous Fraction) 一般可區分成無機碳 (Inorganic Carbon, IC, 如 CaCO_3)、元素碳 (Elemental Carbon, EC) 及有機碳 (Organic Carbon, OC), 其中EC及OC為微粒中主要的成分, 其含量占 $\text{PM}_{2.5}$ 的質量濃度約20-40% (Bae et al., 2006; Chou et al., 2010; Lin et al., 2009; Zhao et al., 2013b)。元素碳又稱為黑碳 (black carbon) 或石墨碳 (graphitic carbon), 為一惰性物質, 在科學上元素碳對於局部環境產生強烈的暖化作用已被證實 (Jacobson, 2001), 由於EC不易參與大氣的光化反應而使得其含量增加或減少, 故在大氣化學上常被當作參考元素 (reference element) (Kuo et al., 2013; Lin et al., 2012)。元素碳的污染來源主要係由燃燒程序所產生, 包括使用汽柴油車排氣、化石工業排放、農廢燃燒、木材燃燒及烹飪等 (Birch and Cary, 1996; Hu et al., 2003; Lowenthal et al., 1994)。有機碳泛指各種氣膠態有機物質的總合, 相對於元素碳, 有機碳的來源就相對的複雜許多, 除了污染源直接排放所生成的原生性有機碳 (primary organic carbon, POC) 外, 尚包括氣態污染物轉化而成的二次有機氣碳 (secondary organic carbon, SOC)。在大氣環境中, POC的來源主要來自燃燒程序包括交通工具排放、燃料燃燒、肉類烹調過程、舖柏油道路過程等均為釋放POC至環境中。而SOC的形成機制是非常複雜的, 一般而言, 大氣中有揮發性的有機氣體與氣膠之間的氣-固相傳輸所形成 (Seinfeld and Pandis, 1998)。過去的研究中顯示, 環境中的氣象因子會影響SOC的生成, 如Strader指出晴朗的天氣配合低風速及低混和層高度有利於二次有機碳微粒的生成 (Strader et al., 1999), 而Duan的研究結果顯示高相對濕度及低風速的環境有利於SOC微粒的形成 (Duan et al., 2005)。然而在對大氣環境的影響上, 有機碳則在雲霧凝結核 (cloud condensation nuclei, CCN) 的形成程序上扮演重要的角色 (Novakov and Penner, 1993)。相同地, 由Cruz and Pandis的研究顯示, 部分的有機氣膠具有吸濕特性, 可作為雲霧的凝結核 (Cruz and Pandis, 1997)。

細懸浮微粒中含有一些金屬元素, 其在 $\text{PM}_{2.5}$ 之含量約5%~10% (Hsu et al., 2016; López et al., 2011; Pakkanen et al., 2001; Qin et al., 2006; Querol et al., 2001), 並以Si、Al、Fe、Mg及Ca等地殼元素為主要元素, 人為排放元素如Co、Ni、Cu、Zn、Pb、As、Se等元素濃度較低。然而, 大氣微粒中金屬元素的濃度會因不同地區的產業型態、季節、周邊區域的活動或氣象而有所變化。在北京的霾害事件期間, $\text{PM}_{2.5}$

平均濃度高達 $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Lin et al., 2016)，其中As、Ni、Cd和Co等人為污染為主要的金屬元素，平均濃度分別為 $8.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $19.1 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $2.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $0.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ ，Pb可高達 $202 \text{ ng}/\text{m}^3$ 。在上海，PM_{2.5}中優勢的金屬元素為Al、Ca、K、Mg、Na和Fe (Wang et al., 2013)，在工業區的Baoshan之平均濃度分別為 $2.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $3.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $7.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $2.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但屬於郊區的Putuo，Al、Ca、K、Mg、Na和Fe之平均濃度明顯較Baoshan低，分別為 $1.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $3.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $6.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二個地區之每一個元素在不同季節的濃度高低分布均不同。屬於鄉村型態的日本秋田縣，地殼元素的Al、Fe和Si為優勢元素 (Kikuchi et al., 2010)，平均濃度分別為 $17.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $26 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $87.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ ，而以海港和重工業為主的日本橫濱，Al、Mg和Ca濃度 (PM₁₀) 分別為 $0.14\sim 0.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.21\sim 0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.16\sim 0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，Mn、Cu和Pb分別為 $16.5\sim 32.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $12.9\sim 47.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $21.3\sim 27.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ 。以工業為主要產業的南韓蔚山，Cd、Ni、Mn和Pb (PM_{3.3}) 之平均濃度為 $131.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $140.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $304.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $131.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ (Ny and Lee, 2011)。南韓的水原市以都會和旅遊的區域型態為主，Fe、Al和Si等地殼元素為主要的組成 (Oh et al., 2011)，平均濃度分別為 $318.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $204.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $139.3 \text{ ng}/\text{m}^3$ (PM_{3.3})，主要來自交通排放的Pb、Cu和Zn的平均濃度分別為 $71.8 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $40.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $59.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ ，工業排放的Mn、Cd和V都在 $30 \text{ ng}/\text{m}^3$ 以下。

在臺灣，不同區域的活動型態也影響著大氣金屬元素的濃度分布，例如中臺灣西岸PM_{2.5}的各季節平均Cu濃度在 $1\sim 15 \text{ ng}/\text{m}^3$ 左右 (Hsu et al., 2016)，Mn則在 $2\sim 20 \text{ ng}/\text{m}^3$ 的範圍，Ni的濃度在 $7 \text{ ng}/\text{m}^3$ 左右，Pb在 $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ 左右，經受體模式分析後發現燃煤廠、燃油廠、金屬工業和和交通排放為主要的污染源。較靠臺灣內陸的某科學園區PM_{2.5}中的Cu、Mn、Ni和Pb平均濃度分別為 $50.3 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $13.1 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $11.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ 和 $33.6 \text{ ng}/\text{m}^3$ (Chen et al., 2013)。此外，金門本身無大型工業，但冬季期間受到中國工業活動的影響，PM₁₀中的Sb、Cd、Sn、Zn、Pb、Cu、Se及As最高濃度可達 $3350 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $3066 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $1276 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $753 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $1599 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $133 \text{ ng}/\text{m}^3$ 、 $28303 \text{ ng}/\text{m}^3$ 及 $677 \text{ ng}/\text{m}^3$ (Hsu et al., 2010)，反映周邊區域的排放源及氣象條件的改變，也會影響微粒中金屬元素濃度的分布。

1.3 污染源排放微粒特徵

各種自然或人為空氣污染源會因所使用的原物料組成、添加物質及工業製造程序的不同，使其排放到大氣的微粒化學組成存在差異性，各種污染源之微粒特徵化學組成如表 1.3.1 所示。如 Chow 所建立的資料庫顯示 (Chow et al., 2004)，煉油廠所排放之 PM_{2.5} 微粒組成以硫酸鹽的組成最高，可占 59%，稀土元素 La 的含量顯著高於背景，可當作化石業的排放指紋指標元素 (Kulkarni et al., 2007)。

在燃煤電廠方面，煙道排放的 PM_{2.5} 中之化學組成以硫酸鹽及碳為主，兩者在 PM_{2.5} 的含量共高達 56%，其次為 Ca (17%)、Si (11%)、S (8%)、Al (5%) 及 Fe (4%)，Se 的含量約 0.6%，較其他行業別高數十倍，可作為燃煤電廠主要的排放指標 (Okuda et al., 2008; Xie et al., 2006)。在國內，前期計畫 (105 年度) 也量測燃煤電廠煙道排放之微粒的化學組成 (周崇光, 2017)，發現硫酸鹽是主要的成分，其濃度占 PM_{2.5} 質量濃度的 30~40%，Zn、Zr 和 Se 等元素含量也都在 0.05% 以上，且富集因子特性 (Enrichment Factor, EF) 都在 10 以上；煉油廠煙道排放之微粒的化學組成也以硫酸鹽為主，Na 離子和 Ammonium 的濃度也都占 5% 以上，Na、Ni、Zn 和 La 的含量也都在 0.05% 以上，EF 也都超過 10。

鋼鐵廠也是重要的工業污染源之一，其中 Fe、Zn、Pb、Mn、Ni 和 Cr 等元素為重要的元素 (Tsai et al., 2007)，國內曾有研究結合鋼鐵廠周界 PM_{2.5} 的採集和 CMB 模式 (姚辰和, 2015)，分析並發現鋼鐵廠貢獻的微粒對周界 PM_{2.5} 的影響不同，其中鋼鐵廠在秋季、冬季和春季對周界 PM_{2.5} 的貢獻均在 35% 以上，擴散不良期間的貢獻可達 40% 以上，顯示鋼鐵廠也是國內周界 PM_{2.5} 的重要污染源之一。

在臺灣，幾乎每個縣市都設有焚化爐，使得焚化爐排放之微粒對周界空氣品質的影響備受關注。過去有研究調查不同污源排放的重金屬，發現焚化爐是國內第三大鉛貢獻源，其排放量僅次於燃煤電廠和鋼鐵廠 (陳怡伶, 2013)；此外，也有研究量測焚化爐煙道和周界的 PM_{2.5}，並發現焚化爐煙道的 Mg、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、As、Pb 和 Hg 等金屬元素的排放量高，且和周界 PM_{2.5} 之金屬元素的輪廓相似，說明焚化爐也可能是鄰近地區重要的 PM_{2.5} 貢獻源之一 (Hu et al., 2003)。

在交通源方面，Watson 的研究結果指出 (Watson et al., 2001)，交通排放之 PM_{2.5} 中的碳含量高達 90% 以上，然而與其它重要碳微粒排放源不同的是 OC/EC 比值多

介於 1 至 2 之間，較面源的街塵及生質燃燒所排放微粒之 OC/EC 比值小，不同來源的 OC/EC 比值如表 1.3.2 所示，其中前期計畫量測的八卦山和國姓 1 號隧道之 PM_{2.5} 中的碳也都占 15% 以上，OC/EC 比值也介於 1~2。此外，Sb、Cu、Zn、Pb、Cr、Mo 及 Ba 等微量金屬可當作交通排放之微粒的追蹤元素，面源部份則以街塵及農廢燃燒所排放的微粒為主，街塵主要是由自然的塵土礦物及交通排放微粒混合而成，故 Si 為街塵中主要的組成，約占 18% (Watson et al., 2001)，其次為 OC(6.5%)、Fe(5.4%)、Al(4.5%)、Ca(3.3%) 及 K(2.1%)，而街塵排放微粒之 OC/EC 比值則明顯高於交通源。

生質燃燒長久以來疑似為造成臺灣中南部秋、冬高懸浮微粒濃度的主因之一，由 Chow 的研究結果顯示 (Chow et al., 2004)，生質燃燒生成的 PM_{2.5} 中，以 OC 約 64% 最多，EC 含量為 16% 次之，其他主要物種包含 Cl⁻ (8%)、K⁺ (5%)、NH₄⁺ (1.7%) 及 SO₄²⁻ (1.4%)，生質燃燒所排放之微粒有 80% 以上為碳微粒，但 OC/EC 的比值會因燃燒物質的不同而有所差異，約介於 3 至 15 之間 (Chow et al., 2004; 周崇光, 2016)。前期計畫 (105 年度) 模擬稻草在農田燃燒的情境，並採集燃燒生成的微粒，發現產生的微粒化學組成以碳為主，其中又以 OC 占有的質量濃度比例最高，約占總碳的 95%，而 Na、K 和 Ca 等元素的含量也都有 0.1% 以上，enrichment factor (EF) 也都超過 10。此外，臺灣四面環海，海洋氣膠為沿岸地區大氣懸浮微粒主要的貢獻源之一，而海鹽所排放微粒以較粗的顆粒為主，其成分以 Cl⁻ (41%) 及 Na⁺ (40%) 為主要組成，SO₄²⁻ 含量則占 9%，由於海鹽氣膠含大量的 Cl⁻ 及 Na⁺，故此兩物種可視為海鹽飛沫的指標物種 (Hsu et al., 2004)。

港口也是重要的微粒污染源之一，其中又以貨櫃集中區和船舶進出港口所排放的廢氣是港口的污染源。Donateo 調查義大利 Mediterranean Sea 港口的微粒特徵 (Donateo et al., 2014)，他們的研究發現當貨物在搬運過程中，PM_{2.5} 的濃度會較無搬運貨物時高 1.5 倍，當船舶進港或出港時，PM_{2.5} 的質量濃度和顆粒濃度均會顯著上升，並為無船舶進出港時的 3 倍，且港口內的船舶和作業區約貢獻 56% 的 polycyclic aromatic hydrocarbon。此外，Zhao 的研究也發現 (Zhao et al., 2013a)，無論國際商船或當地的船舶，在港口所量測到的大氣金屬 V 濃度 (船舶燃油後排放之重要元素) 均和進港的船舶數量呈顯著正相關，並認為 V 是港口區的重要金屬元素指標。Tolis 採集希臘 Thessaloniki 港口周邊的 PM_{2.5} 並分析其化學組成 (Tolis

et al., 2015)，分析發現當 V/Cu 和 V/Ni 的比值分別大於 1.0 和 3.5 時，表示空氣品質明顯受船舶排放之微粒的影響，反之，貢獻較不顯著。de Foy 結合 Weather Research and Forecasting model (WRF) Comprehensive Air-quality Model with eXtensions (CAMx) 模式模擬發現，美國 Milwaukee 大氣中的 Ni、V 和黑碳會受鄰近的港口排放之污染物影響，其中 Ni 和 V 約有 5% 由鄰近港口的船舶所貢獻，黑碳約有 10% 來自鄰近港口的船舶所貢獻 (de Foy et al., 2012)。

表 1.3.1 懸浮微粒各污染排放源之指標元素

污染源	集中的粒徑	指標元素	文獻
地殼及揚塵	PM _{2.5-10}	Si、Al、Fe、Ca、Mg、 Ti、Sr、Ba、K、Mn、Co	Rahn (1999); Hsu et al. (2004); Wang et al. (2005)
海鹽飛沫	PM _{2.5-10}	Na、Mg	Rahn (1999); Hsu et al. (2004)
交通排放	PM ₁ PM _{2.5-10}	Sb、Cu、Zn、Pb、Cr、 Co、Mn、Ba、Mo、Fe、Ce	Thorpe and Harrison (2008); Iijima et al. (2008); Lin et al. (2015)
水泥工業	PM ₁₀	Ca、K、Mg、P、 Ti、Tl、Sr、Rb	Santacatalina et al. (2010); Escudero et al. (2012)
非鐵金屬 冶煉	PM ₁ PM _{2.5}	Cr、Cd、Cu、As、 Pb、Se、Zn	Kuo et al. (2007); Querol et al. (2007)
燃煤電廠	PM ₁	As、Se、Cr、 Cd、Pb、Sb	Xie et al. (2006); Okuda et al. (2008)
重油燃燒	PM ₁ PM _{2.5}	Ni、V	Querol et al. (2007); Cheng et al. (2008)
鋼鐵廠	PM ₁ PM _{2.5}	Fe、Zn、Pb、 Mn、Ni、Cr	Tsai et al. (2007)
垃圾焚化	PM _{2.5}	Cd、Pb、Zn、 As、Sb	Hu et al. (2003); Christian et al. (2010)
生質燃燒	PM ₁	K、Rb	Querol et al. (2007); Hsu et al. (2009)
化石業	PM _{2.5}	La、Ce	Kulkarni et al. (2007); Moreno et al. (2008)
港口 (包含 船舶)	PM _{2.5}	V、Ni、Cu	de Foy et al. (2012); Tolis et al. (2015); Zhao et al. (2013a)

表 1.3.2 國內外交通污染源 PM_{2.5} 之 OC、EC 之含量與 OC/EC 之比值

污染源	OC (%)	EC(%)	OC/EC
交通污染源			
柴油車，AZ，美國	40.1	32.9	1.2
汽油車，AZ，美國	30.1	13.5	2.2
地區道路旁交通污染源，Phoenix，AZ，美國	39.0	36.5	1.0
地區道路旁交通污染源，Craig，CO，美國	62.0	35.3	1.8
地區道路旁交通污染源，San Antonio，TX，美國	58.1	37.1	1.6
高速公路交通污染源，Steamboat Springs Colorado，美國	38.8	58.5	0.7
州際公路隧道交通污染源，Milwaukee，WI，美國	32.8	27.4	1.1
地區道路隧道交通污染源，Milwaukee，WI，美國	8.1	3.6	2.3
八卦山隧道，彰化，臺灣	20.5	79.5	0.6
雪山隧道(北上)，宜蘭，臺灣	22.1	67.4	0.3
雪山隧道(南下)，宜蘭，臺灣	50.0	45.6	1.1
八卦山隧道 (東向)，彰化，臺灣	20.8	26.3	0.9
國姓 1 號隧道 (東向)，南投，臺灣	16.6	19.5	0.9
逸散源			
街塵，Craig，CO，美國	7.7	1.1	7.0
街塵，Steamboat Springs，美國	7.1	0.4	17.8
燃燒源			
火力發電廠，Craig，CO，美國	2.2	1.2	1.8
火力發電廠，TX，美國	27.2	1.4	19.4
化石廠，TX，美國	0.5	0.1	5.0
水泥廠(燒窯)，TX，美國	12.8	3.0	4.3
木材燃燒，Graig，CO，美國	51.4	12.4	4.2
森林燃燒，Dinosaur，CO，美國	46.9	3.2	14.7
生質燃燒，TX，美國	64.4	15.8	4.1
生質燃燒 (野外稻草燃燒)，臺灣	36.3	1.9	20.3

資料來源：周崇光 (2016)；周崇光 (2017)

就固定污染源而言，前述研究透過分析固定污染源煙道排放之 $PM_{2.5}$ 的化學組成來探討其對周界空氣品質的影響，然而，由於煙道會因高溫或其燃燒材料的不同，使排放之微粒以固態、氣態或液態的形態存在，因此煙道排放之微粒又可被分為以濾紙捕集的可過濾性微粒 (Filterable particulate matter, FPM) 和因高溫而使微粒以氣相形態存在，遇低溫後凝結的可凝結性微粒 (Condensable particulate matter, CPM)。過去，研究透過 FPM 與 CPM 的採樣與分析，評估其對周界空氣品質的影響。

Yang 等人採集燃煤火力發電廠、燃煤鍋爐燃燒、紅磚製造業、焚化爐和電弧爐業煙道排放之 $PM_{2.5}$ (Yang et al., 2014)，分析發現除了紅磚製造業排放的 $PM_{2.5}$ 以 FPM 為主外，其他四個污染源都以 CPM 占優勢。Yang 在 2015 年採集煉鋼廠不同製程排放之 $PM_{2.5}$ (sintering、coke making、blast furnace、basic oxygen furnace 和 electric arc furnace) (Yang et al., 2015)，並發現每一個製程排放的微粒都以 CPM 占優勢，但不同金屬元素或陰陽離子在 CPM 或 FPM 的濃度高低分布不一致，例如，sintering 製程排放的 FPM 有較高的 K、Fe、Pb 和 Zn 濃度，Pb、Zn 和 Sn 最高濃度出現在 electric arc furnace 製程，而無論哪一個製程，鈉離子和氯離子最高值則出現在 CPM，除了 sintering 外，其他四個製程中的 CPM 都有較高的鉀離子。Yang 進一步分析燃煤與燃油鍋爐排放的 $PM_{2.5}$ 特性 (Yang et al., 2018)，發現 CPM 濃度較 FPM 高，也發現硫酸鹽是 FPM 的重要組成，而硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽則是 CPM 的重要組成；在碳成分部分，燃煤鍋爐排放的碳以 OC 為主，燃油鍋爐則以 EC 占優勢。

Li 採集中國燃煤火力發電廠排放之微粒特性 (Li et al., 2017)，採集的位置包含選擇性觸媒還原設備後端、靜電集塵器後端、濕式脫硫設備後端和煙道，分析發現除了選擇性觸媒還原設備後端的 $PM_{2.5}$ 以 FPM 占優勢外，另外三個採樣位置都以 CPM 的濃度較高，但無論 FPM 或 CPM，靜電集塵器後端採集的濃度明顯較選擇性觸媒還原設備後端採集的濃度低，說明靜電集塵器具有良好的微粒移除效果；此外，該研究也發現選擇性觸媒還原設備後端和靜電集塵器後端的 CPM 以無機組成為主，濕式脫硫後端和煙道的 CPM 以有機組成為主，在所分析的無機離子與金屬元素部分，則以硫酸鹽、Na 和 Ca 為主，並可能是影響周界空氣品質的重要組成。透過固定污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的採樣與分析，可發現微粒可被分為 FPM 及 CPM，

儘管不同製程排放的 FPM 和 CPM 比例不同，但多以 CPM 占優勢，因此分析 CPM 濃度及其組成，對於探討固定污染源排放之微粒對空氣品質的影響有其重要性。

1.4 污染源鑑定技術

有關 PM_{2.5} 污染源鑑定部分，除了可利用前節的污染源和大氣微粒之金屬元素特徵的比對來探討微粒污染來源外，也有研究透過氣象特性或統計方法來探討各區域的 PM_{2.5} 污染來源。鄭等人在執行中部總量管制計畫時 (鄭曼婷, 2000)，於中部沿海、都會及內陸地區進行大規模懸浮微粒之密集觀測，並調查造成該地區懸浮微粒高污染之成因，結果發現中部地區懸浮微粒主要以二次無機氣膠及有機碳為主要的物種，其含量可占 PM_{2.5} 質量濃度 40-65%，在秋、冬季節，當出現高壓迴流或高壓出海天氣型態時，擴散條件差，容易出現懸浮微粒高污染事件日，且以內陸地區之竹山及沿海二林測站的微粒污染情形最為嚴重。進一步利用軌跡模式探討竹山地區微粒之來源後，發現除了當地的交通源貢獻外，沿海地區之臺中電廠或臺中都會區所排放之氣體如 SO₂ 與 NO_x 易經由傳輸至內陸地區並形成微粒及累積在該地區造成 PM 高污染事件日。此外，中部地區當高微粒污染事件日發生時，細懸浮微粒之硝酸鹽為主要的貢獻者 (Kuo et al., 2013; Lin et al., 2010)，因硝酸鹽濃度會受到大氣氣象條件的影響，當高污染事件日下，大氣相對溼度增高與溫度降低有利於硝酸銨微粒的生成，此外，在風速微弱之下，氣團停留於中部都會區時間較久，吸納較多的 NO_x 且在傳輸至內陸所經過的時間較長，利於較多的 NO_x 轉換成硝酸銨微粒而累積在內陸地區 (Lin et al., 2010)。

Hsu 於彰化縣境內的大成、芳苑及二林地區進行大氣 PM_{2.5} 之整年採樣並分析其元素組成 (Hsu et al., 2016)，同時結合 Positive Matrix Factorization (PMF) 解析其可能污染來源，結果顯示彰化地區 PM_{2.5} 之有毒金屬 As 及 Cr(IV) 濃度人體可接受的致癌風險 (As: 7.6×10^{-6} ; Cr (IV): 15.3×10^{-6})，而燃煤電廠 (35%)、交通排放 (24%)、鉛煉製業 (22%) 及燃油業 (19%) 為其主要的貢獻源。Chen 在雲林麥寮及崙背地區量測 PM_{2.5} 及 PM_{2.5-10} 微粒並分析其元素組成 (Chen et al., 2015)，結果發現當 PM 高污染事件發生時，PM_{2.5} 中有毒金屬 Pb 與 As 的濃度為非污染事件日時的 2.3 及 1.9 倍，尤其 As 之濃度已超過 WHO 所建議之標準值 6 ng/m³，利用因子分析法推估 PM_{2.5} 之污染來源，結果顯示 PM 高污染期間，燃煤電廠係該地區 PM_{2.5} 最大的

污染來源，其貢獻量約為 36.5%，其次依序為鋼鐵業 (31%)、交通與燃油業 (16%) 及銅煉製業 (13%)。在嘉義地區的研究方面，張簡等人的研究顯示 (張簡國平, 2014)，嘉義市 PM_{2.5} 之化學組成隨著不同的季節有些差異，SIA 為 PM_{2.5} 最主要之組成，約占 PM_{2.5} 質量的 37%至 53%之間，其次則為有機碳 (6-10%)、金屬元素 (5-13%)及元素碳 (4-7%)，利用受體模式之化學質量平衡法 (Chemical Mass Balance, CMB) 推估該地區 PM_{2.5} 之污染來源，結果發現二次硫酸鹽及硝酸鹽氣膠、土壤揚塵及交通排放為其主要的貢獻源外，固定源中的化石業、鋼鐵業及水泥業的排放對本地區 PM_{2.5} 有明顯的貢獻，三個行業別對嘉義市區 PM_{2.5} 的貢獻量平均分別約為 10%、5%及 4%，顯示固定源排放對本地區空氣品質的影響嚴重。

透過上述文獻可知，氣象特性和統計模式為目前多數研究用來評估 PM_{2.5} 污染源的方法，然而，上述方法仍存在許多限制。例如，PMF 僅能提供“相對定量”的結果，針對貢獻量大但時間變異性小的污染源而言，分析結果會顯示其貢獻量不如貢獻量小但時間變異性高的污染源，進而忽略掉重要污染源的貢獻，且 PMF 所分析出的污染源因子之不確定性較高 (Kim et al., 2005)。CMB 雖然可提供可信度較高的污染源分析結果，但需事先掌握主要污染源的化學組成資料，且因不同污染源排放之微粒的化學組成會有重覆的現象，因此需分析較多的化學組成，以找出不同污染源的組成特徵，相對的，其成本也較高 (Samek et al., 2016)。應用 PM_{2.5} 中化學組成或氣象條件之方法，其在污染源鑑定上僅能初步判斷微粒主要受那些因素或污染源的影響，無法提供污染源的定量資料。

1.5 污染源排放微粒同位素特徵

近年來同位素成為環境科學鑑識上非常重要的工具，碳與鉛同位素特徵更常應用在懸浮微粒污染來源的鑑識上，雖然物質具有相同的化學組成，但如果來源不同或經不同的物理/化學作用過程所產生，其同位素特徵會因同位素的分化作用 (isotope fractionation) 而有差異，而此不同的特徵則可幫助我們解釋懸浮微粒的污染來源。然欲利用同位素界定空氣懸浮微粒之污染來源，必先須瞭解各污染源排放微粒同位素之特徵。

碳穩定同位素應用在空氣懸浮微粒污染源的鑑識上常利用 ¹³C 的相對豐度 ($\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{sample}})/({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$) 進行污染源判別。圖 1.5.1 為各污染

來源排放的碳微粒及二次有機氣膠主要的前趨物二甲苯、甲苯與異戊二烯的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (Cerri et al., 1985; Das et al., 2010; Giebel et al., 2010; Irei et al., 2006; Rudolph et al., 2002; Widory et al., 2004; 周崇光, 2016), 結果顯示各種不同污染源所排放之碳微粒與其前趨物氣體的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差異非常大。在微粒部分, 柴油車排放微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 最輕, 其值介於-27.3 至-26.0‰之間, 燃油鍋爐排放微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 約介於-26.8 至-25.5‰之間, 天然氣、燃煤及汽油引擎排放的微粒, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值分佈於-25.8 至-22.5‰之間。生質燃燒也是碳微粒的貢獻源之一, 一般可被分為 C3 和 C4 植物, 最大差異在於行光合作用的途徑不同。C3 植物 (CO_2 固定後形成的最初穩定產物是具三個碳原子的化合物 (3-PGA)) 生質燃燒所排放微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 則介於-26.2 至-24.5‰之間, C4 植物 (C4 植物為葉肉細胞吸收之 CO_2 先固定為四個碳原子, 再轉化成蘋果酸 (malic acid) 或天門冬胺酸 (aspartic acid), 四碳分子化合物轉送到束鞘細胞後 (bundle sheath cell), 再行 C3 途徑合成醣類) 之組織, 經燃燒後排放的碳微粒最重, 約介於-13.5 至-12.5‰之間, 產生的 $\delta^{13}\text{C}$ 較 C3 植物輕。

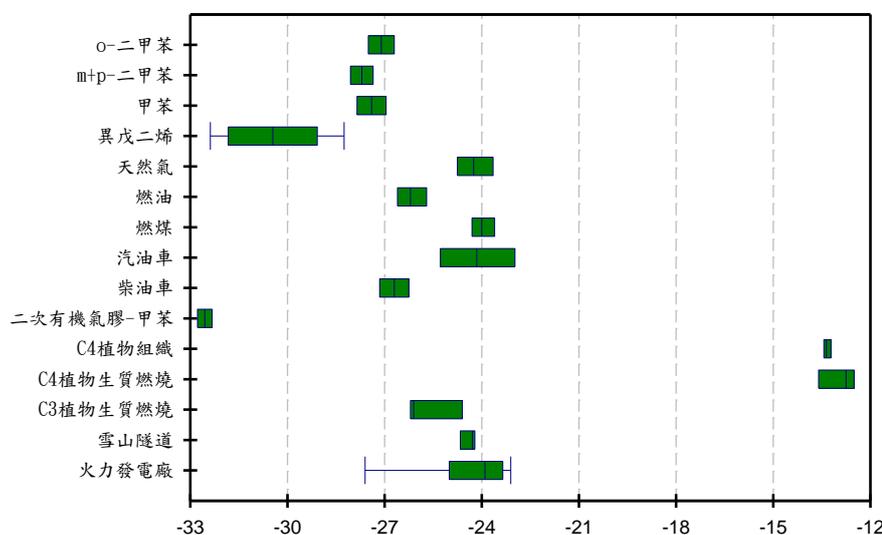


圖 1.5.1 國內外各污染源排放微粒與氣體污染物 $\delta^{13}\text{C}$ 值

資料來源: 1. o-二甲苯 (Rudolph et al., 2002); 2. m+p-二甲苯 (Rudolph et al., 2002); 3. 甲苯 (Rudolph et al., 2002); 4. 異戊二烯 (Giebel et al., 2010); 5. 天然氣 (Widory et al., 2004); 6. 柴油 (Widory et al., 2004); 7. 燃油 (Widory et al., 2004); 8. 燃煤 (Widory et al., 2004); 9. 汽油 (Widory et al., 2004); 10. 二次有機氣膠-甲苯 (Irei et al., 2006); 11. C4植物組織 (Cerri et al. 1985); 12. C4植物生質燃燒 (Das et al., 2010); 13. C3植物生質燃燒 (Das et al., 2010); 14. 雪山隧道 (周崇光, 2016); 15. 火力發電廠 (Kumar et al., 2016)。

此外，本計畫在前期調查發現：雪山隧道內PM_{2.5}總碳之 $\delta^{13}\text{C}$ 介於-24.7至-24.2‰之間，燃煤火力電廠的煤料、飛灰及底灰則介於-25.1‰至-23.1‰之間。在二次有機氣膠前趨物 $\delta^{13}\text{C}$ 的分佈上，生物源二次有機氣膠之氣體前趨物異戊二烯之 $\delta^{13}\text{C}$ 分佈較廣，約介於-28.1至-32.4‰之間，較都會區交通源所排放二次有機氣膠之前趨物苯及二甲苯的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-26.5至-28.2‰之間) 來得輕。

在鉛同位素方面，大氣中的鉛主要來源包括汽機車內燃機所使用的鉛（即四乙基鉛），金屬冶煉工廠精煉過程、煤及石油等化石燃料燃燒、廢棄物焚化爐和其他工業排放。鉛在自然界有四個穩定同位素包括 ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 及 ^{208}Pb ，其中後三者分別是由 ^{238}U 、 ^{235}U 及 ^{232}Th 衰變而來。由於各來源岩石中鈾及釷成分及比例不同，因此各地鉛礦有其獨特的鉛同位素比值，當鉛礦及其礦物之在其生成後Pb同位素比值近乎固定，故可利用其比值加以判定Pb的來源 (Balcaen et al., 2010; Ettler et al., 2004; Ewing et al., 2010; Hsu et al., 2006; Monna et al., 1997)。然而，Pb同位素

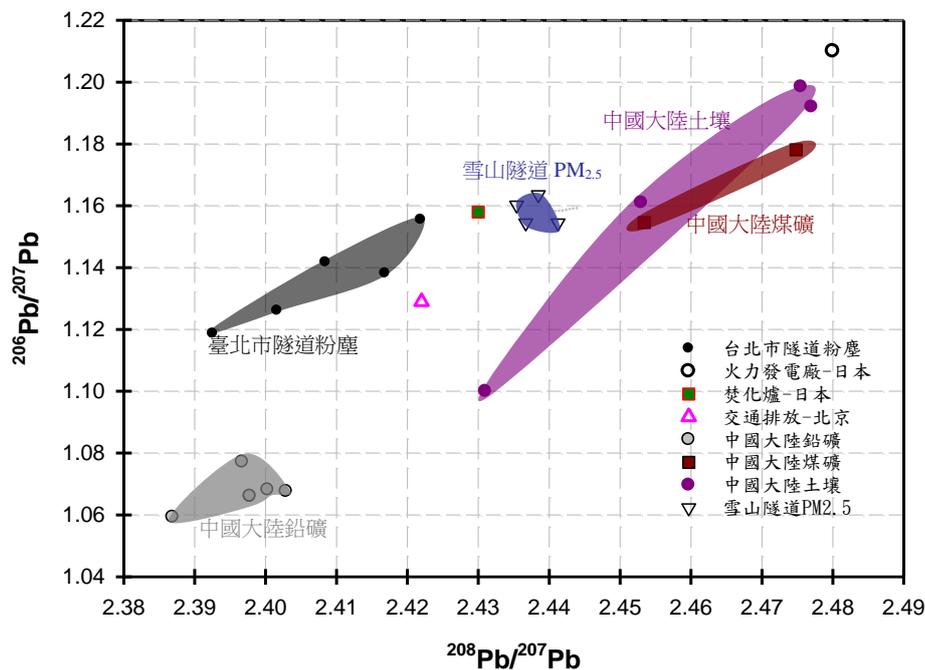


圖 1.5.2 國內外各污染源排放微粒鉛同位素特徵分佈

資料來源：1. 燃煤電廠 (Gallon et al., 2011)；2. 焚化爐 (Gallon et al., 2011)；3. 交通排放 (Zheng et al., 2004)；4. 中國大陸鉛礦 (Sangster et al., 2000)；5. 中國大陸土壤 (Cheng and Hu, 2010)；6. 臺北市隧道粉塵 (Hsu et al., 2006)。

比值可以有多種不同表達方式，如 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ，但在環境污染來源鑑識上常利用後四者，藉此用以辨別大氣微粒中Pb的各種來源，並進而瞭解污染物傳輸路徑。

圖1.5.2為各污染源排放微粒之鉛同位素比值 (Cheng and Hu, 2010; Gallon et al., 2011; Hsu et al., 2006; Sangster et al., 2000; Zheng et al., 2004; 周崇光, 2016)。在本土污染源方面，周等人採集代表交通源的雪山隧道PM_{2.5}，並分析其鉛同位素比值，結果發現 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ($^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) 的比值介於1.1544至1.1636 (2.4354至2.4412)之間，較Hsu於北部地區道路隧道內粉塵樣品的分析結果高($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 與 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 的比值分別介於1.118至1.156 及2.393至2.422)，此兩個本土污染源排放微粒之鉛同位素的分佈與中國大陸各污染源及日本燃煤電廠的鉛同位素比值分佈有明顯差異，中國大陸鉛礦場 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ($^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) 的比值介於1.059至1.077 (2.387至2.397)，無論是 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 或是 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 都較中國大陸的交通污染源、土壤及燃煤排放的同位素比值低，而中國大陸的土壤鉛同位素分佈較廣， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 介於1.164至1.199，而 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 介於2.437及2.476，中國的煤礦同位素 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ($^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) 的比值介於1.155至1.178 (2.453至2.475)，與土壤的同位素比值的分佈部分重疊，日本地區的焚化廠及燃煤電廠的鉛同位素 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ($^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) 比值分別為1.158 (2.430) 及1.210 (2.480)，其中燃煤電廠之同位素比值遠高於其他污染源。鋼鐵廠和焚化爐也是重要的大氣微粒貢獻源，過去研究指出鋼鐵廠排放之微粒 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值在1.151~1.152之間 (Lahd Geagea et al., 2008)，法國和日本量測到的焚化爐之平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值分別為1.152和1.158 (Gallon et al., 2011; Lahd Geagea et al., 2008)，兩種污染源的量測結果相近，但相較於燃煤、燃油或交通排放等污染源的鉛同位素資料，焚化爐和鋼鐵廠的鉛同位素資料則較少。

綜合過去的研究可知，不同研究針對同一污染源所量測之同位素特徵均不同，主要是因其原料和製成的不同所致，且透過圖1.5.3~圖1.5.5顯示近年本研究團隊和其他研究針對同一污染源所分析的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 同位素資料分布，可發現本土污染源排放之微粒的同位素特徵和其他研究的量測結果有明顯差異，反映建立本土污染源之同位素資料，對於鑑定本土微粒污染源有其必要性。

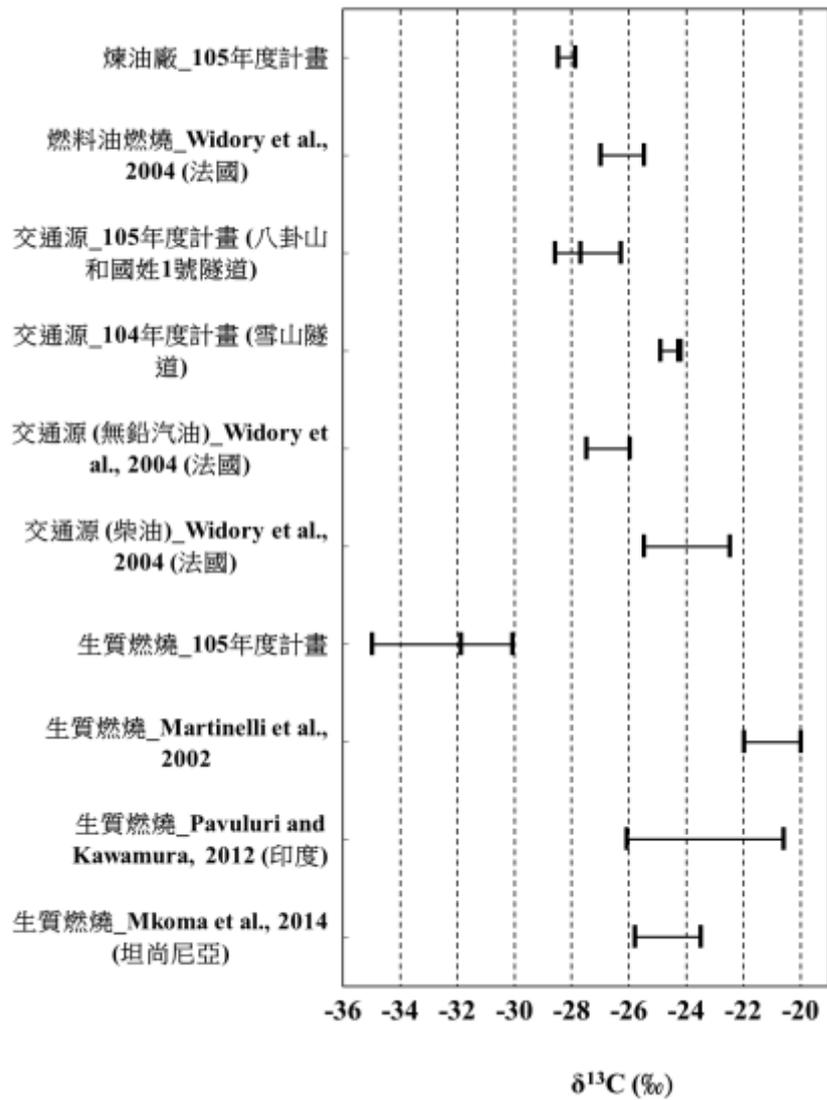


圖 1.5.3 前期計畫和其他研究量測之污染源排放微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值的比較 (數值分別為最小值、中位數和最大值，部分研究僅有最小值與最大值) [(Martinelli et al., 2002; Mkoma et al., 2014; Pavuluri and Kawamura, 2012; Widory et al., 2004; 周崇光, 2017)]

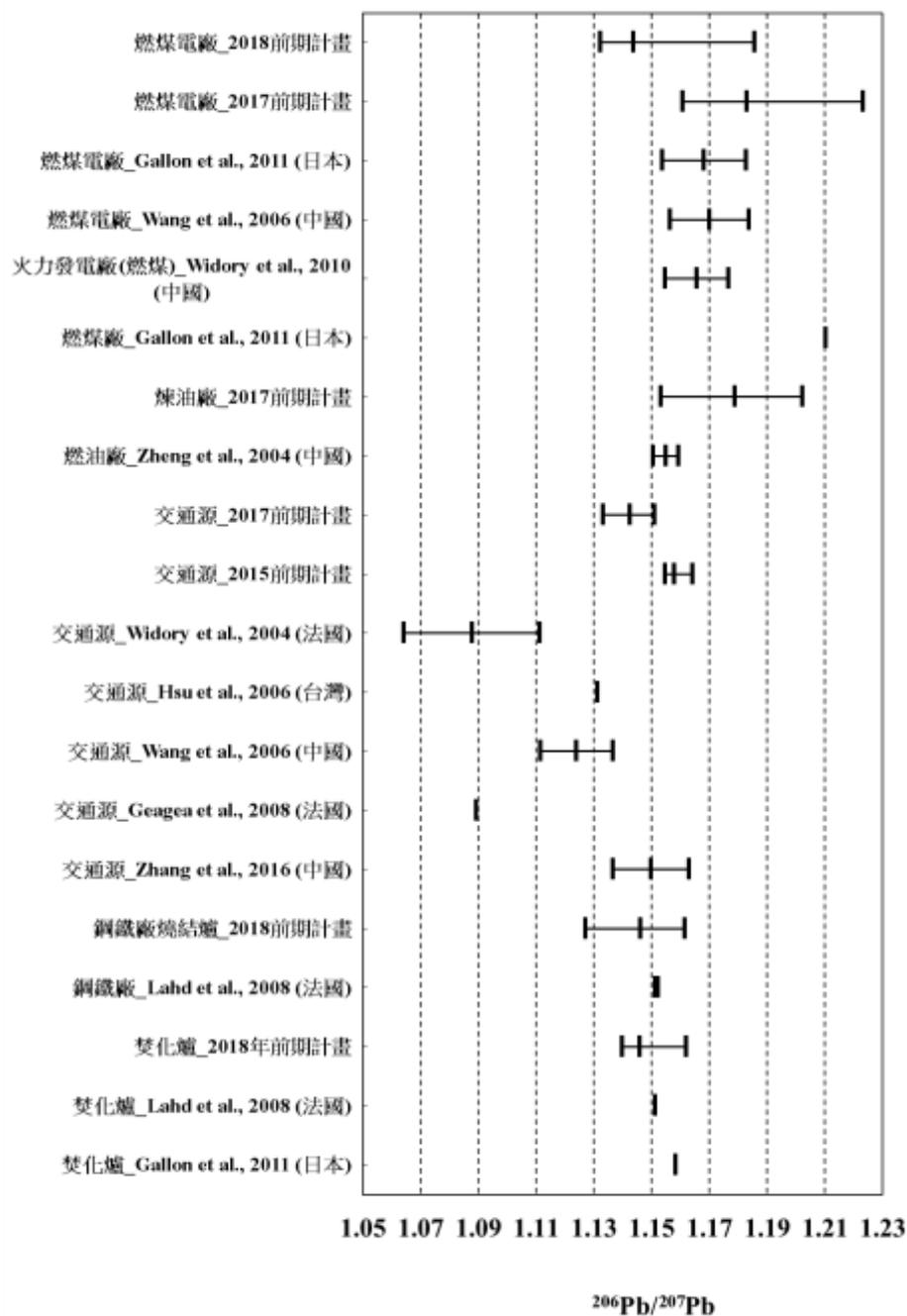


圖 1.5.4 前期計畫和其他研究量測之污染源排放微粒之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值的比較

(數值分別為最小值、中位數和最大值，部分研究僅有最小值與最大值或平均值) [(Gallon et al., 2011; Hsu et al., 2006; Lahd Geagea et al., 2008; Wang et al., 2006; Widory et al., 2010; Widory et al., 2004; Zhang et al., 2016a; Zheng et al., 2004; 周崇光, 2016, 2017, 2018)]

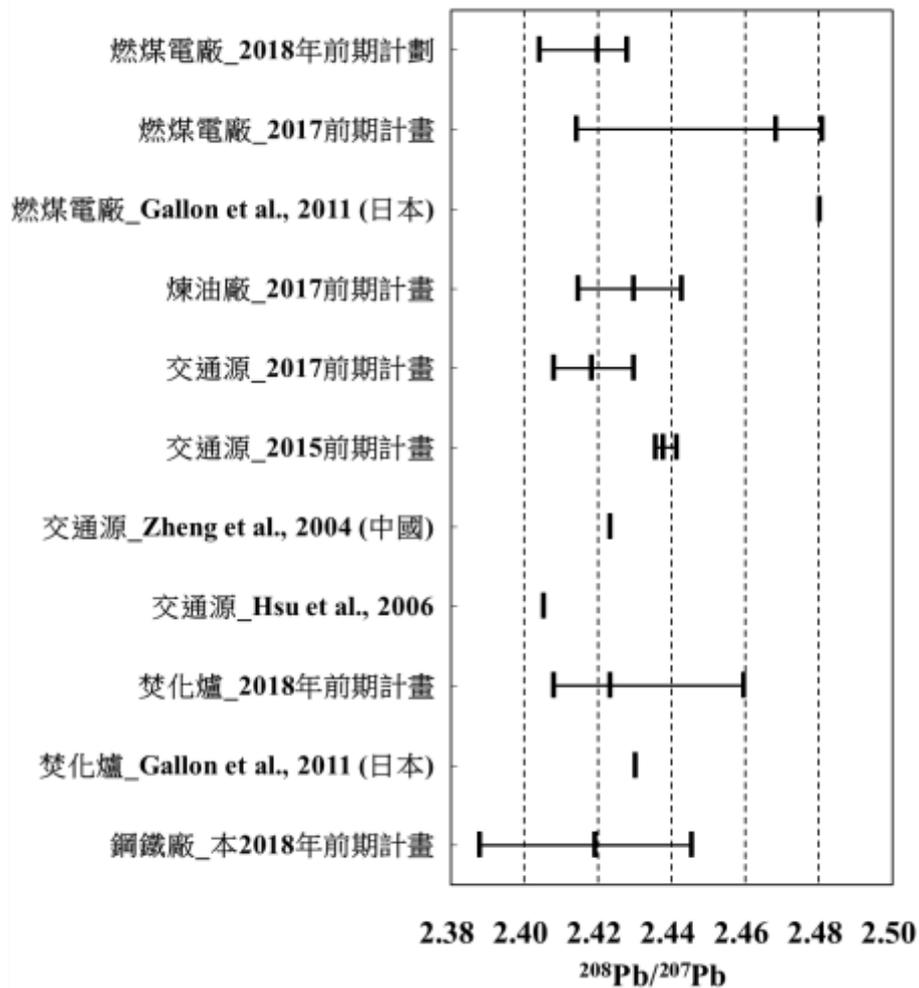


圖 1.5.5 前期計畫和其他研究量測之污染源排放微粒之 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值的比較

(數值分別為最小值、中位數和最大值，部分研究僅有最小值與最大值或平均值) [(Gallon et al., 2011; Hsu et al., 2006; Zheng et al., 2004; 周崇光, 2016, 2017, 2018)]

1.6 同位素在環境污染源鑑識之應用

隨著環境分析技術的發展，微粒含有的同位素檢測技術已越趨成熟，許多研究也利用此一技術在微粒污染源的追蹤，或搭配二端源混合模式 (two end member mixing model) 定量不同污染源對微粒的貢獻。本研究團隊在計畫執行期間，持續更新同位素在空氣污染源的鑑定資料，以期能掌握最新的同位素於空氣污染來源鑑定之應用的研究現況。在期中報告繳交前 (2019年6月22日)，本研究團隊以 isotope、carbon 和 particulate matter 等關鍵字檢索 web of science 等電子期刊資料庫，設定年份為 2019 年，共檢索到 21 篇文章，其中有 4 篇討論碳或鉛等金屬同位素在空氣污染來源的追蹤之應用與成果；期末報告繳交前 (2019年11月30日)，本研究團

隊以相同的資料庫和關鍵字，檢索應用同位素在大氣微粒污染源的鑑定文章，共計檢索到8篇文章，其中有1篇符合需求。以下整合過去和本期計畫新增的文獻，並各別描述碳及鉛同位素在空氣污染來源鑑定之應用現況。

1.6.1 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素應用

懸浮微粒中 $\delta^{13}\text{C}$ 值常應用在污染來源鑑識之用 (Cao et al., 2011; Kundu and Kawamura, 2014; López-Veneroni, 2009; Martinelli et al., 2002; Mkoma et al., 2014)，此同位素特徵有助於區隔不同物理或化學過程所產生的微粒。1980年代末，Cachier的研究結果顯示 (Cachier et al., 1989)，利用懸浮微粒EC/TC的比值及其 $\delta^{13}\text{C}$ ，可提供充分的證據來鑑識象牙海岸Lamto地區碳微粒係來自於草原或森林大火的影响。Kundu and Kawamura利用氣膠中之碳同位素及其他化學組成的分析結果探討韓國Jeju Island氣膠可能的污染來源 (Kundu and Kawamura, 2014)，結果顯示氣膠TC中之 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明顯的季節性分佈，春季期間碳微粒較輕 ($\delta^{13}\text{C}$ 值介於-24.4至-24.2‰)，且伴隨著較高濃度的草酸 (oxalic acid)，顯示此期間空氣微粒之TC主要來自於二次氣膠的形成；相對於春季，夏季或冬季 Jeju Island碳微粒的 $\delta^{13}\text{C}$ 較高 (-23.1至-22.5‰)，在夏季期間，氣流軌跡主要來自於海洋且伴隨著微粒中有較高的甲磺酸鹽/TC比值 (methanesulfonate/TC)，顯示海洋有機物為空氣中碳微粒的主要來源，相反地，在冬季採樣期間，較重的碳微粒伴隨著較高的鄰苯二甲酸/TC (phthalic acid/TC) 與 K^+ /TC值，顯示此期間碳微粒主要來自於化石燃料及生質燃燒的貢獻。López-Veneroni針對墨西哥市空氣及污染源排放微粒之碳同位素進行分析 (López-Veneroni, 2009)，在污染源排放微粒方面，其結果顯示由交通工具尾氣排放直接收集的黑碳微粒與氣體污染物包括n-butane、isobutane及propane的，其 $\delta^{13}\text{C}$ 較輕，約介於-29.0至-27.5‰ (圖1.6.1)，而交通道路旁所採集之空氣微粒其 $\delta^{13}\text{C}$ 則介於-25.2至-23.9‰之間，逸散性粉塵則有較重的碳微粒，其中以街塵的 $\delta^{13}\text{C}$ 最重，約為-17‰，然而在空氣微粒方面，墨西哥市空氣碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 值約介於-27至-24‰之間，經與污染源微粒碳同位素特徵比對後顯示本地區空氣中碳微粒的來源以交通污染源排放及農業耕作之土壤為主要貢獻源。

Cao量測中國14個城市夏季及冬季空氣中EC及OC (Cao et al., 2011)，並同時分析 $\delta^{13}\text{C}$ 的數值。結果顯示中國華北地區及華南地區城市空氣中碳微粒的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量在

夏季及冬季期間有明顯的地域性差異，在冬季期間，華北地區由於天氣寒冷，居民燃燒大量的煤炭，故華北各城市空氣中碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ (-25至-22.5‰，如圖1.6.2所示) 明顯高於華南各主要城市 (-24.5至-26.5 ‰)，相反地，夏季各城市碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 值並無明顯的地域性差異，其值介於-27至-25 ‰，並顯示交通排放可能是主要的污染源。生質燃燒也是微粒中碳的重要來源，在中國，Cao等人量測生質燃燒和非生質燃燒期間的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度及其化學組成與 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (Cao et al., 2016)，發現生質燃燒期間的 $\text{PM}_{2.5}$ 、有機碳、元素碳和非海鹽的鉀離子濃度明顯較非生質燃燒期間高， $\delta^{13}\text{C}$ 數值則偏低 (-26.2‰)，並趨近 C_3 植物。在生質燃燒盛行的印尼，有研究發現生質燃燒期間的 $\text{PM}_{2.5}$ 、有機碳、元素碳和醣類濃度明顯較非生質燃燒期間高 (Nguyen et al., 2016)， $\delta^{13}\text{C}$ 數值亦偏低 (約-26‰)， C_3 植物是主要的燃燒物種。結果顯示生質燃燒

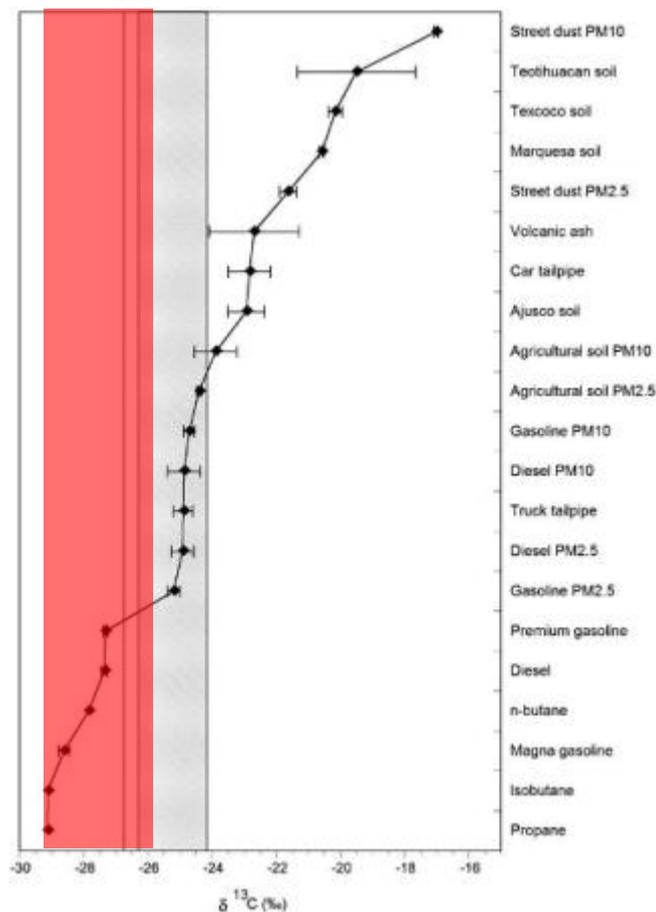


圖 1.6.1 墨西哥市空氣及各污染源排放碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 值分佈 (紅色陰影部份為墨西哥市 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 之碳微粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值。López-Veneroni, 2009)

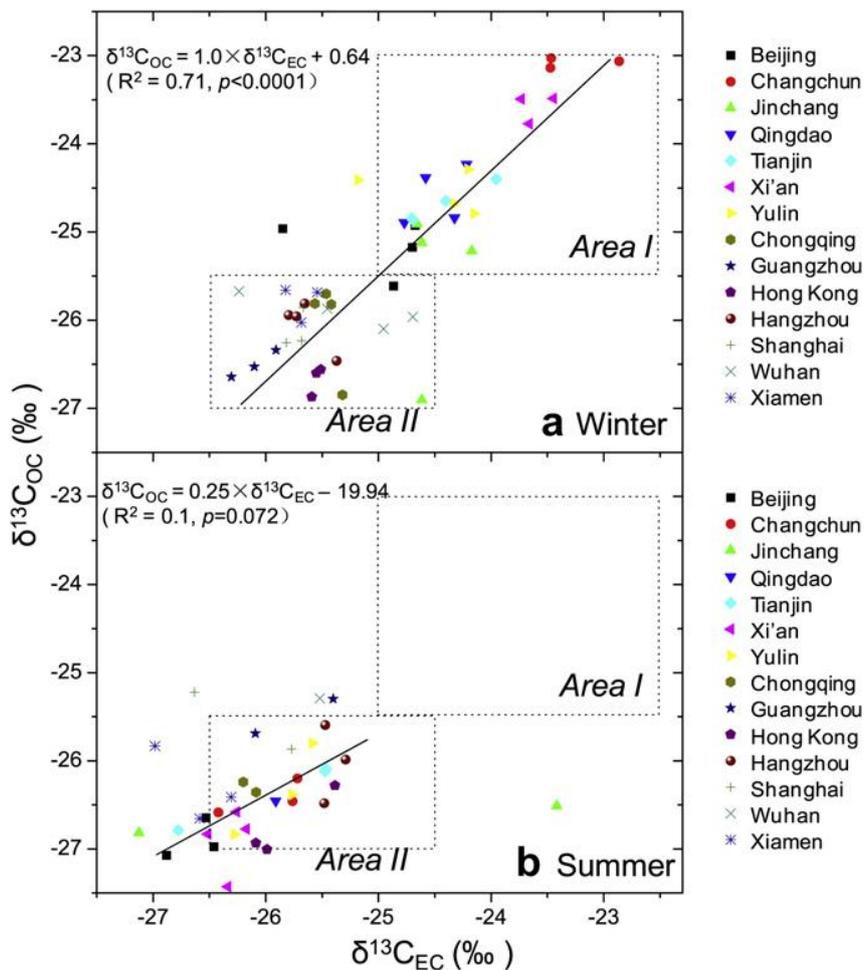


圖 1.6.2 中國大陸各城市空氣中碳微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 值
(資料來源：Cao et al., 2011)

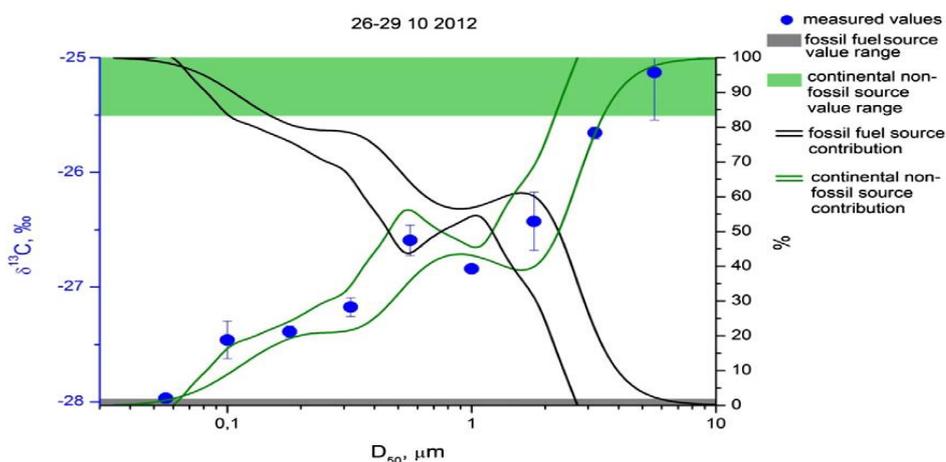


圖 1.6.3 立陶宛 Vilnius 不同粒徑懸浮微粒之 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 值與其污染來源相對貢獻量
(資料來源：Masalaite et al., 2015)

有較高的碳濃度，但透過 $\delta^{13}\text{C}$ 數值的量測，可初步判定所燃燒的植物種類。

Masalaite以同位素比值質譜儀分析立陶宛Vilnius市區不同粒徑懸浮微粒總碳之 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (Masalaite et al., 2015)，圖1.6.3為各不同粒徑微粒TC中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。結果顯示不同粒徑之TC，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值差異非常大，在細微粒方面 ($D_p < 1 \mu\text{m}$)，平均的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 值介於-28.0至-26.5‰，而粒徑大於 $2 \mu\text{m}$ 的粗微粒， $\delta^{13}\text{C}$ 值較重，約介於-26.3至-25.0‰，不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值反應不同粒徑碳微粒來源之差異。研究再結合各污染源排放微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 特徵及利用二端混和源 (two mixing end-member) 推估模式量化推估各粒徑微粒中總碳的污染來源，在細微粒的部份，化石燃料排放微為TC的主要污染來源，其相對貢獻量占60%至100%，且隨著粒徑愈小，化石燃料燃燒排放的相對貢獻量逐漸增加；在粗微粒的部分，微粒中的TC則主要來自於非化石燃料的排放源。同一作者在2018年發表的文章指出 (Masalaite et al., 2018)，在較小粒徑的範圍中 ($< 0.18 \mu\text{m}$)， $\delta^{13}\text{C}$ 數值和化石燃料經燃燒後的數值重疊，較大粒徑 ($0.32 \sim 1 \mu\text{m}$) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值和生質燃燒產生的數值重疊。該研究結果反映，無論化石燃料或非化石燃料的燃燒，都會貢獻 $\text{PM}_{2.5}$ ，但貢獻的粒徑範圍不同；因此，若能進一步量測 $\text{PM}_{2.5}$ 以下之不同粒徑範圍的碳同位素特徵，將有助於釐清 $2.5 \mu\text{m}$ 以下之微粒的碳污染源。除了不同粒徑範圍碳同位素的分析與應用外，也有研究透過不同碳成分的碳同位素資料來剖析碳污染源。Zhao利用質量平衡模式計算有機碳與元素碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 及懸浮微粒中的levoglucosan (Zhao et al., 2018)，評估中國西北城市的元素碳污染源；分析結果顯示煤礦燃燒與交通排放是主要的元素碳污染源，其中冬天的煤礦燃燒源貢獻量最大 (約63%)，此外，該研究也指出生質燃燒約貢獻當地冬天大氣中的元素碳約15%，遠高於夏天的2%，反映此地區在冬天受生質燃燒行為的影響比夏天嚴重。Zhang量測水溶性有機碳 (Water-soluble organic carbon, WSOC) 中的 $\delta^{13}\text{C}$ (Zhang et al., 2019)，並探討中國南京在高 $\text{PM}_{2.5}$ 事件日期間的污染源種類；分析發現在2015年1月期間，中國南京共有3個高 $\text{PM}_{2.5}$ 事件日，其中長程傳輸貢獻的老化氣膠和生質燃燒是主要的碳貢獻源，但另一個事件日的 $\delta^{13}\text{C}$ 較重，尚無法釐清可能的污染源。該研究則是少數透過量測WSOC中的 $\delta^{13}\text{C}$ 來探討大氣的碳污染源種類。

在國內的研究方面，本計畫團隊在2015~2016年的研究發現 (Jung et al., 2019; 周崇光, 2016)，夏季、冬季及春季觀測期間北部地區富貴角測站 $\text{PM}_{2.5}$ 之 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分別為-26.6‰、-26.2‰及-24.5‰，臺大測站夏、冬及春季大氣細懸浮微粒之 $\delta^{13}\text{C}$

平均值則約為-27‰、-25‰及-25.5‰，相對於夏季的結果，春季較高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值與中國大陸北京、天津及上海之文獻值相似，夏季以當地的交通等污染源為主要貢獻源。2016~2018年的研究整合7種污染源的探同位素資料，探討台中-彰化-南投-雲林-嘉義的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源 (周崇光, 2017, 2018) (2016~2018年調查的周界和重要污染源之分佈如圖1.6.4；除了圖上的5種固定源外，另有交通排放和稻梗燃燒，因此2種污染源非固定源，故無標註於圖中)，分析發現春季期間主要受煉油廠與交通源排放的影響，夏季則以煉油廠、交通排放和二次氣膠為主。另外，本研究團隊透過不同 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度和 $\delta^{13}\text{C}$ 關係的分析 (圖1.6.5)，發現當總碳佔 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度越高時，測得的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重，而過去研究指出氧化反應生成的二次氣膠之 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重 (Zhang et al., 2016)；當總碳濃度佔 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度越低時，測得的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏輕，過去研究則指出透過光化反應生成的二次氣膠之 $\delta^{13}\text{C}$ 偏輕 (Irei et al., 2006)。因此，當 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情形越嚴重，氧化反應是 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳的主要影響因子，反之為光化反應。

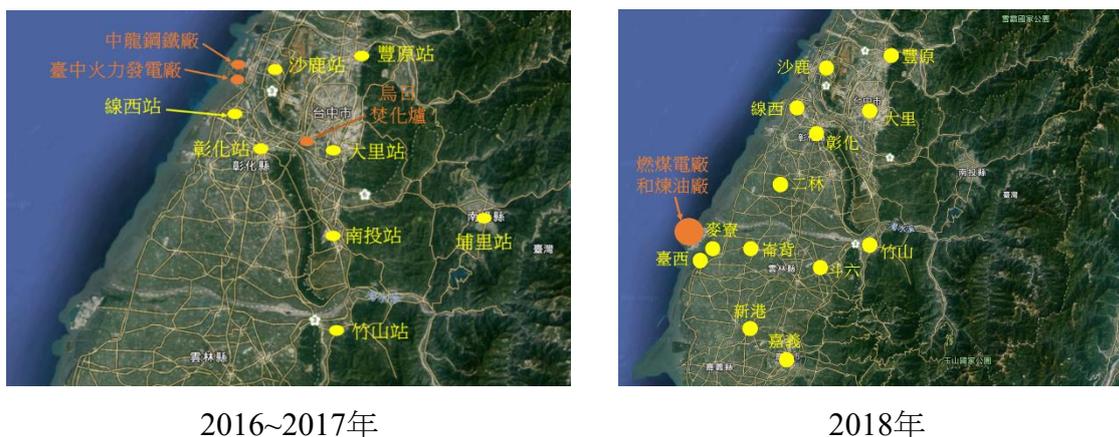


圖 1.6.4 2016~2018 年計畫調查的周界和重要污染源分佈圖

1.6.2 碳 14 同位素應用

碳 (^{14}C) 為一放射性物質，其半衰期約5730年，過去常應用考古學中生物死亡年代之測定，即所謂的放射性定年，然近年來愈來愈多的科學家將其應用在空氣懸浮微粒碳污染源的鑑識 (Chen et al., 2015; Currie et al., 1998; Endo et al., 2004; Heal et al., 2011; Klinedinst and Currie, 1999; Sun et al., 2012; Zhang et al., 2015)，尤其有助於分析化石燃料對空氣懸浮微粒之貢獻度。

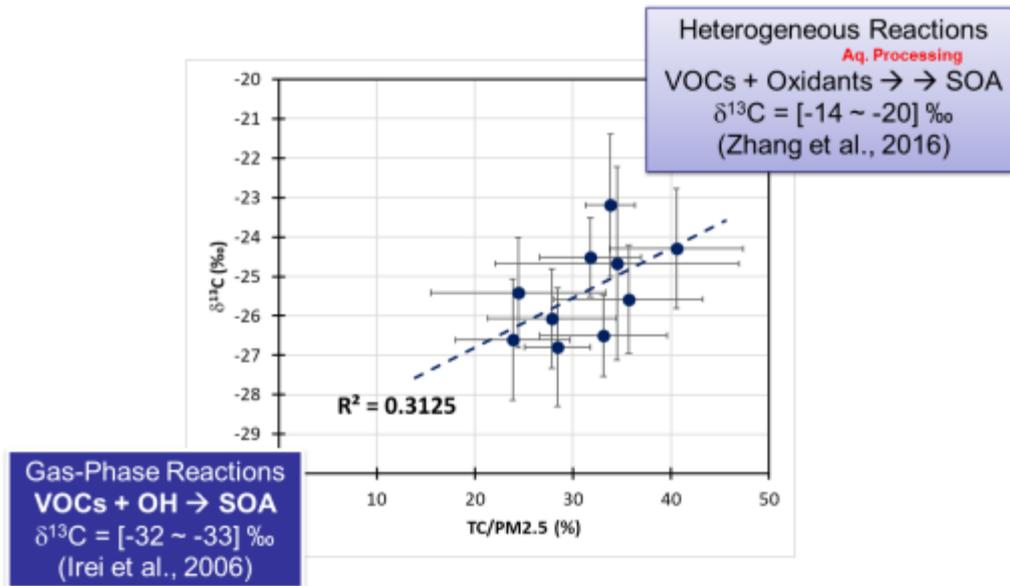


圖 1.6.5 TC/PM_{2.5} 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 關係圖

在 ^{14}C 數據的分析上，可利用樣品與標準品中 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值計算空氣碳微粒中現代碳 (percent modern carbon, pMC) 的含量，此pMC意謂著非化石燃料燃燒所貢獻的碳含量，而相對於現代碳，來自化石燃料燃燒的貢獻則可利用 $1-\text{pMC}$ 示之。一般來說，可以pMC比例是否有超過或低於50%，來反映是現代碳還是化石碳的貢獻較占優勢，因此，過去研究採集到的pMC比例若超過50%，可說明某污染源排放的碳偏向現代碳，或某地區的碳污染源以現代碳的貢獻較占優勢，反之，則以化石碳較占優勢。

在交通及農廢燃燒排放嚴重的美國Denver地區，有研究分析PM_{2.5}碳微粒之 ^{14}C (Klinedinst and Currie, 1999)，結果顯示pMC有明顯的季節性變化，在冬季期間，pMC平均約為23%，夏季則提高至47%，此結果顯示Denver地區冬季期間PM_{2.5}的碳微粒主要來自於化石燃料的排放，而夏季期間，碳微粒的來源則包含化石燃料及生質燃燒的貢獻。Endo分析日本Toyko地區不同粒徑微粒之pMC含量 (Endo et al., 2004)，結果顯示pMC含量隨著粒徑越小呈現遞減的現象 (圖1.6.8)，當微粒粒徑大於3.3 μm 時，其pMC含量可高達60%以上，然而當粒徑小於1.1 μm 時，其pMC含量僅剩38%，此結果說明化石燃料燃燒排放如汽、柴油車排放或工業排放為細微粒中碳的主要污染來源。Sun分析北京地區PM_{2.5}中TC與EC之pMC含量 (Sun et al., 2012)，

採樣期間TC微粒中pMC含量平均約為37%，而EC微粒中pMC含量則約為17%，此結果顯示相對於TC，EC受到化石燃料燃燒排放的貢獻程度更為明顯。Heal採集英國 Birmingham地區之空氣PM_{2.5} (Heal et al., 2011)，除了分析微粒中的OC及EC濃度外，並配合pMC的量測，推估化石燃料燃燒及非化石燃料（主要為生質燃燒及生物源排放）對OC及EC的貢獻量，結果顯示在2008年1月31日的冬季案例中（圖 1.6.7），PM_{2.5}之EC濃度為0.75 μg/m³，其中91%的EC主要來自於化石燃料燃燒之貢獻，而剩餘的9%則主要來自於生質燃燒的影響。在OC方面，最主要的污染源為生質燃燒，對OC的貢獻量約51%，其次為化石燃料，貢獻量約32%，而生物源對於本地區OC微粒之貢獻量則為17%。在中國，Yu量測黑碳 (Black carbon, BC) 中的現代碳比例 (Yu et al., 2016)，並推算不同區域在不同季節的碳污染源；分析發現，無論是Beijing-Tianjin-Hebei (BTH, part of Northern China plain) 或Pearl River Delta (PRD) 區域，不同季節的碳污染源明顯不同，其中位於高緯度的BTH區域，春、夏、秋和冬天的BC污染源分別為燃煤、液態燃料的燃燒、燃煤和液態燃料的燃燒，但在低緯度的PRD地區，四個季節的主要BC來源分別為燃煤、燃煤、液態燃料的燃燒和液態燃料的燃燒，研究結果反應氣候帶的不同，民眾使用的燃料種類也不同，進而影響大氣BC的貢獻源。

近年來，有研究利用微粒中¹⁴C和Isoprene與a-pinene等二次有機碳成分的量測 (Sheesley et al., 2017)，來計算化石碳和非化石碳對微粒中碳的貢獻，及一次和二次有機碳的來源及其貢獻。分析發現化石碳和非化石碳對碳的貢獻各半，而一次有機碳中約有9.8%、2.3%、< 1.0%和30%來自植物脆片、柴油車、汽油車和交通工具潤滑油的貢獻，isoprene、a-pinene、toluene和naphthalene等二次有機碳各貢獻1%左右。雖然僅能解釋有機碳中75%的化石碳和20%的非化石碳來源，但利用有機氣體和¹⁴C的量測也使得有機碳的來源與貢獻的推估更往前一步。

在臺灣，本團隊於前期計畫 (107年度) 執行期間，整合2016~2018年採集與分析生質燃燒、交通排放、燃煤電廠、煉油廠、鋼鐵廠和焚化爐等污染源的pMC比例(周崇光, 2017, 2018) 分析發現生質燃燒產生的碳以現代碳為主，測得之pMC均在90%以上，其他污染源的量測結果顯示生成的碳以化石碳為主，其pMC比例均在50%以下。同時，前期計畫也發現位於臺灣中南部的斗六和竹山等行政區的生質燃燒指標OC與Levoglucosan濃度明顯偏高，PMF受體模式推估結果顯示此兩區域的

優勢污染源為生質燃燒，而密集觀測期間所測得之pMC比例高於50%的樣本數超過50%；反觀，PMF推估果顯示以交通排放和工業排放為主的彰化站和臺西站與麥寮站，多數樣本之pMC比例低於50%，研究結果顯示pMC在評估大氣中的碳以化石碳或現代碳的貢獻有相當之助益。儘管2016~2018年的研究結果均顯示化石碳和現代碳在總碳中的比例相當，但就現代碳而言，前期計畫發現，代表生質燃燒指標的Levoglucosan濃度和現代碳濃度呈顯著正相關 (圖1.6.8)，說明生質燃燒是主要的現代碳貢獻源，而Levoglucosan和Mannosan的比值在10左右，和木材燃燒之Levoglucosan和Mannosan比值相近 (Engling et al., 2009)，低於2017年調查的台灣稻梗燃燒之Levoglucosan和Mannosan比值 (周崇光，2017)，說明中南部地區的木材燃燒可能是現代碳的重要貢獻源。

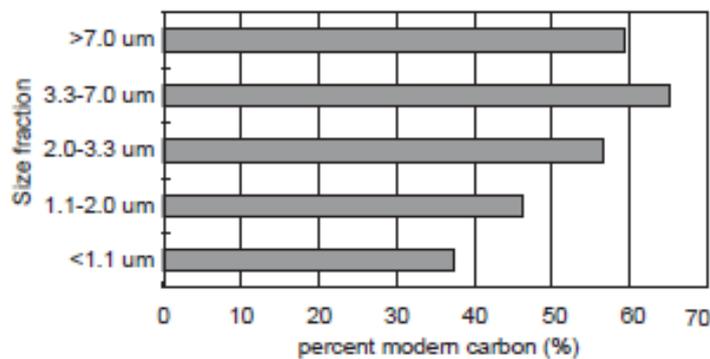


圖 1.6.6 日本 Toyko 地區不同粒徑之微粒中現代碳含量
(資料來源：Endo et al., 2004)

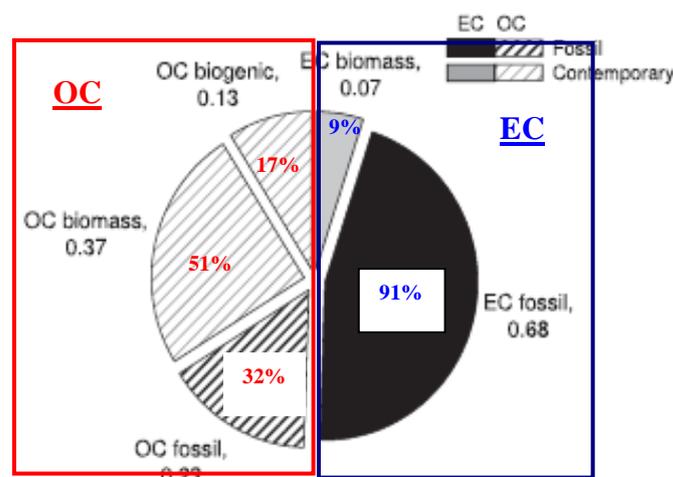


圖 1.6.7 英國 Birmingham 地區 PM_{2.5} 之 OC 與 EC 濃度及其污染源相對貢獻量
(資料來源：Heal et al., 2011)

對有較多工業污染排放源貢獻。Zheng在中國大陸上海地區的研究結果顯示 (Zheng et al., 2004)，在有鉛汽油禁止使用後，上海地區PM₁₀中鉛同位素特徵 ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 與交通污染源排放之鉛同位素特徵明顯不同，如圖1.6.9所示，顯示交通污染源並非上海地區鉛微粒之主要污染源，利用二端源模式粗估在禁用有鉛汽油後，交通排放對上海地區鉛微粒之貢獻僅為20%。

Wang利用鉛同位素特徵調查中國大陸華北天津地區鉛微粒的污染來源 (Wang et al., 2006)，結果顯示此地區TSP中 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的比值介於2.08至2.17之間， $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 介於0.855至0.882之間，此鉛同位素特徵分佈與燃煤排放微粒之鉛同位素特徵相似，顯示燃煤為天津地區鉛微粒之主要來源 (如圖1.6.10所示)。Sen利用鉛同位素比值來探討印度工業城市Kanpur之氣膠來源 (Sen et al., 2016)，該研究發現自2000年禁用含鉛汽油後，大氣的鉛濃度明顯下降，但鉛同位素比值仍和含鉛汽油的比值相近，顯示Kanpur在含鉛汽油的限用下，大氣中的鉛仍受早期含鉛汽油的影響。Gioia量測巴西聖保羅鄰近三個地區的工業和交通工具排放源之微粒中的鉛同位素比值 (Gioia et al., 2017)，並結合因子分析 (金屬元素) 來探討聖保羅鄰近地區的污染源。結果發現聖保羅大學採樣站主要受交通排放的影響，Cubatão以工業排放為主要污染源，土壤是偏遠地區Juquitiba之氣膠的主要來源，而該地區的鉛同位素比值偏低，並可視為背景值。

此外，由於世界各國所使用的含鉛物質的來源及產地的差異，故其反映在大氣鉛同位素的比值亦有明顯的不同，圖1.6.11為Bollhöfer and Rosman分析採自全球微粒樣本Pb的同位素比值 (Bollhöfer and Rosman, 2000, 2001)，並彙整已發表的數據，進而建立全球大氣懸浮微粒鉛同位素特徵之分佈圖。利用此圖可說明利用鉛同位素二維圖形可區分不同國家鉛微粒之特徵，故鉛同位素比值除可推估當地鉛微粒污染來源外，亦可應用在遠程傳輸貢獻量的推估上。

Erel分析以色列耶路撒冷的懸浮微粒重金屬及鉛同位素成分 (Erel et al., 2006)，搭配富集因子之分析結果，發現無沙塵期間，鉛同位素比值主要反應當地污染源，但在沙塵暴期間反應境外污染源訊號，這些沙塵主要來自北非及阿拉伯與敘利亞沙漠，因此認為沙塵事件期間，境外污染除了帶來沙塵顆粒外，亦帶來了其他的微粒物種。Kumar也量測印度德里在受中東地區沙塵暴影響下的微粒組成特性 (Kumar et al., 2016)，結果發現沙塵暴期間的 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值均較沙塵暴

後和非沙塵暴期間的冬季樣本高，Ni和V的濃度也明顯上升。研究認為鉛同位素、Ni和V可被用來反映中東地區的沙塵暴氣膠特性。

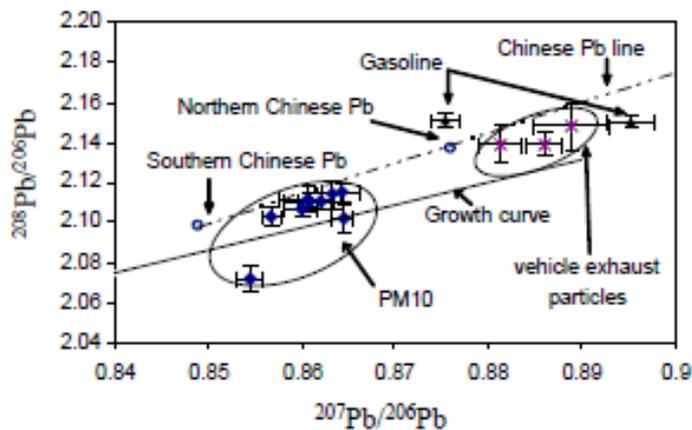


圖 1.6.9 中國大陸上海地區大氣 PM₁₀ 及污染源排放微粒鉛同位素特徵
(資料來源: Zheng et al., 2004)

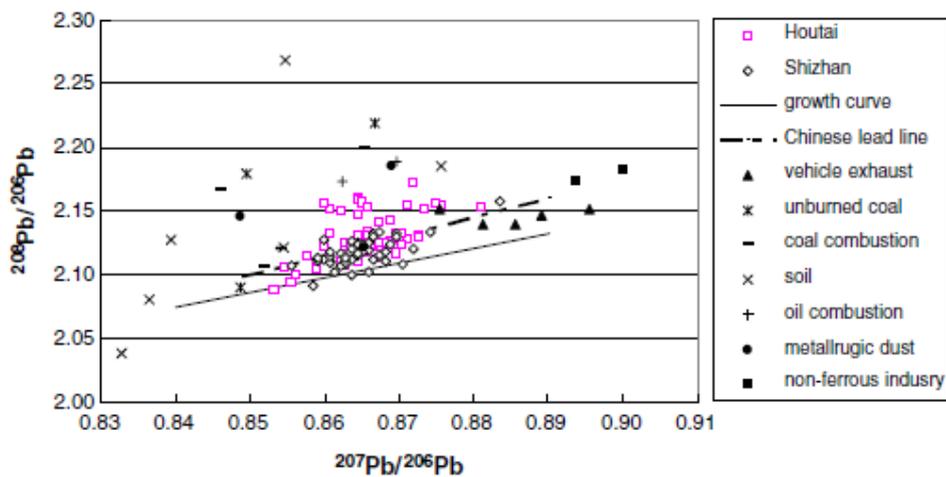


圖 1.6.10 中國大陸上海地區大氣 TSP 及污染源排放微粒鉛同位素特徵
(資料來源: Wang et al., 2006)

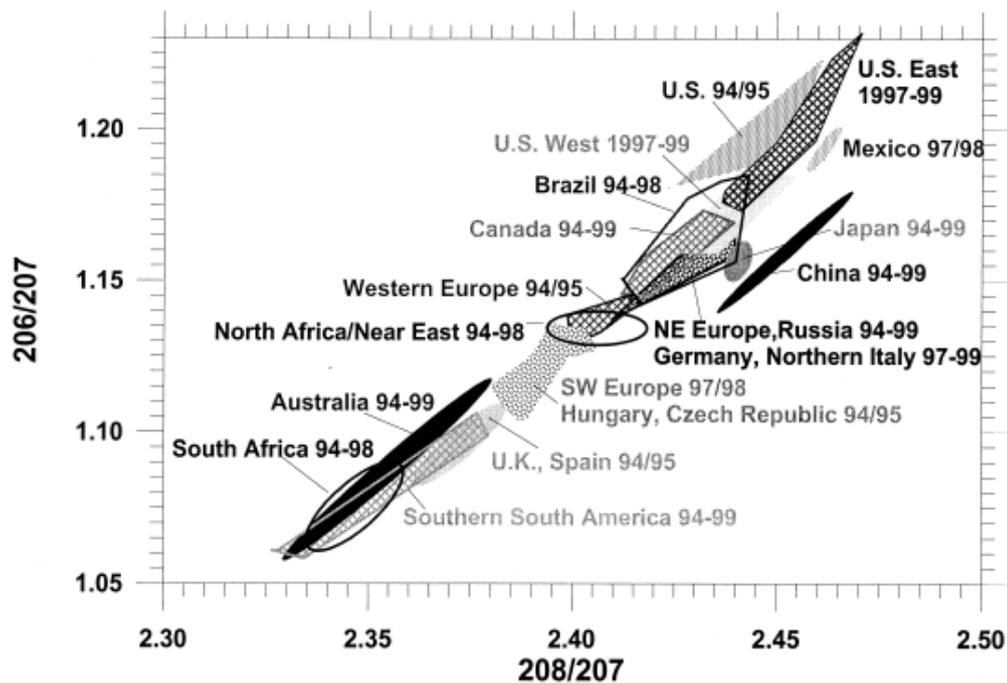


圖 1.6.11 全球大氣微粒鉛同位素比值分佈
(資料來源：Bollhöfer and Rosman, 2010；2001)

Gallon 採集北太平洋的大氣微粒及海水樣本 (Gallon et al., 2011)，並分析其鉛同位素比值，發現亞洲大陸的工業排放是主要的污染源。Ewing 亦利用微粒之鉛同位素比值進行美國加州地區遠程傳輸及本土污染源之鑑識 (Ewing et al., 2010)，結果發現 $PM_{2.5}$ 之鉛微粒來自於亞洲大陸的貢獻約 30%。在墨西哥，Salcedo 也利用鉛同位素比值的量測來探討長距離污染的影響 (Salcedo et al., 2016)，分析發現 Tijuana 地區的 CECyTE 採樣點的鉛同位素比值和美國聖地牙哥礦坑和墨西哥 Sierras 的床岩相近，並推測 CECyTE 大氣的鉛應是受長距離工業污染的影響。Graney 利用懸浮微粒和當地植被表面 (代表長期存在當地的環境介質) 之鉛與鉛同位素的採樣與分析 (Graney et al., 2019)，鑑定當地、區域和長程污染源對加拿大 Albert 空氣品質的影響，結果發現來自東亞地區傳輸的污染物約貢獻 34%，Albert 和加拿大境內的污染源各貢獻 20%和 19%，該研究也指出植被表面上的同位素資料可視為被用於長期污染來源鑑定之重要環境介質。Wang 應用 Pb-Sr-Nd 同位素與受體模式的分析結果，解析中國廈門的金屬元素污染源 (Wang et al., 2019)；分析結果顯示金屬工廠和煤礦燃燒是重要的金屬污染來源，揚塵、建築工地和交通排

放則為次要污染源。此研究雖然應用金屬同位素與受體模式的分析結果，討論廈門當地的金屬污染源，但 Pb-Sr-Nd 同位素僅被用於討論此 3 種金屬元素的污染源，同位素則被用來評估 Pb-Sr-Nd 以外之金屬元素的污染源，是故，在污染源鑑定技術的應用上，仍單獨採用。

在國內，Hsu 為較早利用鉛同位素鑑定微粒污染源的學者，他們分析臺北四季的大氣微粒鉛同位素特徵 (Hsu et al., 2006)，發現無論 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 的鉛同位素比值均有明顯的季節性變化，以 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 的比值來看，夏季期間比值較其他季節輕，且平均值接近本土隧道塵土樣品的結果，顯示本土排放為鉛微粒之主要污染來源，而其他季節臺北地區微粒鉛同位素比值介於大陸及臺灣當地污染源之間，顯示境外傳輸與本土污染源共同的影響。此外，Hsu 也估算臺北地區東北季風盛行季節 (冬及春季)，發現大氣中鉛微粒源自境外傳輸之貢獻量約介於 50%與 85%。周和 Jung 等人也利用鉛同位素比值的分析結果探討不同季節的微粒污染來源 (Jung et al., 2019; 周崇光, 2016)，分析結果指出北台灣在春季期間的鉛同位素比值和過去在中國調查的鉛同位素比值接近 (特別是燃煤電廠)，顯示春季確實受到長程傳輸污染物的影響，夏季則轉以交通排放等當地污染源為主。此外，周等人在 2016~2018 年期間 (周崇光, 2017, 2018)，完成台中-彰化-南投-雲林-嘉義等 13 個測站的大氣 PM_{2.5} 的鉛同位素採樣與分析 (²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb)，也完成 7 種污染源排放之 PM_{2.5} 的鉛同位素採樣與分析 (²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb)，分析結果發現中南部地區的鉛污染源可被劃分為”鋼鐵廠+交通排放+火力發電廠+焚化爐”、”燃煤電廠+煉油廠”和”燃煤電廠”三大類，但無法進一步區分不同污染源的鉛同位素比值特徵。

為了進一步區別不同污染源對台中-彰化-南投-雲林-嘉義地區鉛的貢獻，我們將 ²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb 和 ²⁰⁸Pb 三種同位素匯入 PMF 受體模式中，並解析不同污染源因子對當地的鉛貢獻，分析結果如圖 1.6.12 所示。該圖顯示共有 8 個污染源因子被解析出 (因子 1 為交通排放；因子 2 為硫酸鹽和工業混和源；因子 3 為生質燃燒；因子 4 為二次氣膠；因子 5 為道路粉塵和工業排放 (煉油廠)；因子 6 為工業排放 (水泥灰和燃煤電廠)；因子 7 為海鹽飛沫；因子 8 為工業排放 (燃油鍋爐))，並以因子 1 和 6 的貢獻量最大，分別佔 12%和 53%，其中因子 1 解析出的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 與 ²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb 比值和過去台灣油品的鉛同位素比值的量測結果相近 (Yao et al., 2015)，說明交通排放應是當地的貢獻源之一；然而，在因子 6 部分，圖 1.6.12 顯示該因

子的鉛同位素比值和其他污染源有差距，也大於中南部大氣 PM_{2.5} 的鉛同位素比值，但該比值卻和本研究團隊於北台灣量測到受中國長程傳輸影響期間的鉛同位素比值接近，特別是 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb (Jung et al., 2019)，且逆軌跡也指出高 PM_{2.5} 濃度的季節 (圖 1.6.13，部分案例)，中南部地區的氣流確實來自中國，暗示來自中國的長程傳輸可能也是影響因子之一。

除了上述的應用外，長期或不同時期所觀測到的鉛微粒及其同位素差異亦可反應大氣鉛微粒特徵及其來源的變化紀錄。Monna 的分析結果顯示 (Monna et al., 1997)，法國與英國境內微粒之鉛同位素比值有明顯的時間變化趨勢，如圖 1.6.14 所示，兩地區 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 的變化趨勢相似，從 1965 年至 1985 年同位素比值下降與兩地區澳洲進口油品的用量增加有關，而自 1985 年後同位素比值上升則反應了汽機車排放對空氣中鉛微粒的貢獻減少而工業排放污染增加。相同地，Komárek 的研究提及自無鉛汽油使用後 (Komárek et al., 2008)，工業污染排放對空氣中 Pb 之貢獻度逐漸提升，故鉛同位素比值 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 從 1985 年代的 1.13 上升至 2005 年後的 1.16，紀錄了不同污染源對鉛同位素比值的影響。

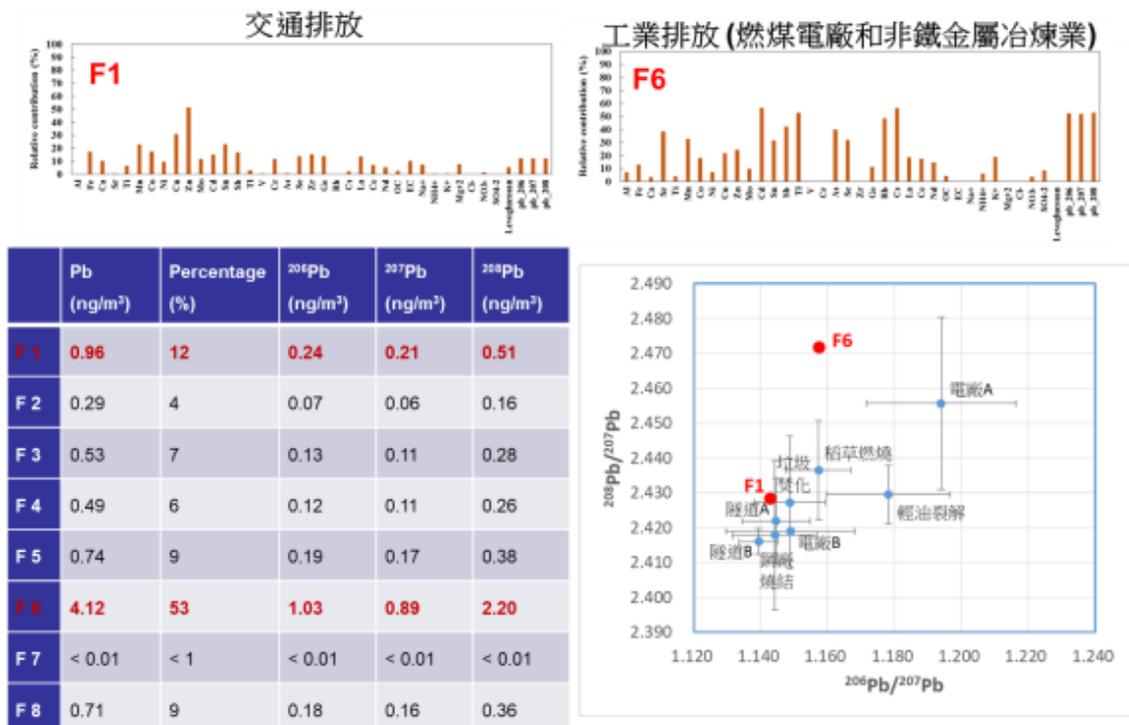
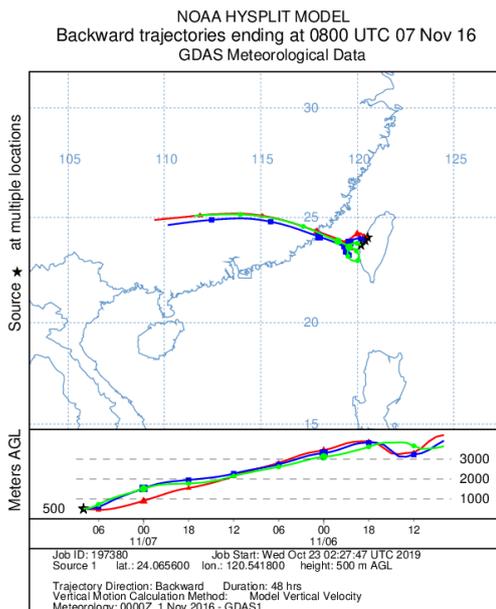
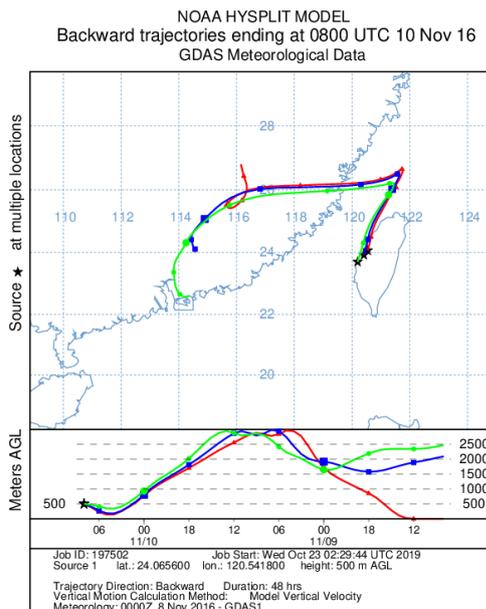


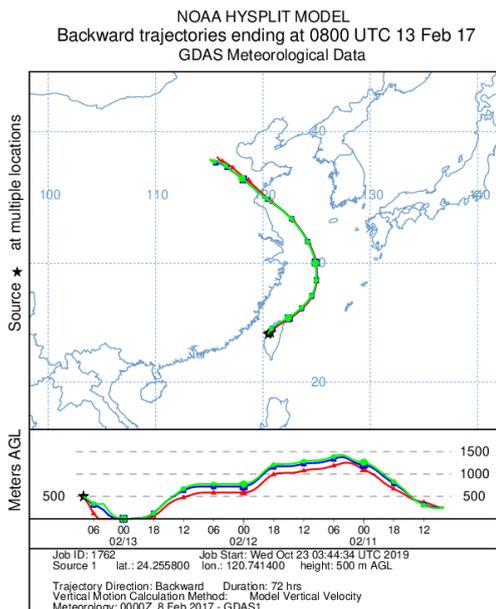
圖 1.6.12 2016~2018 年計畫之 PMF 與鉛同位素比值分析結果



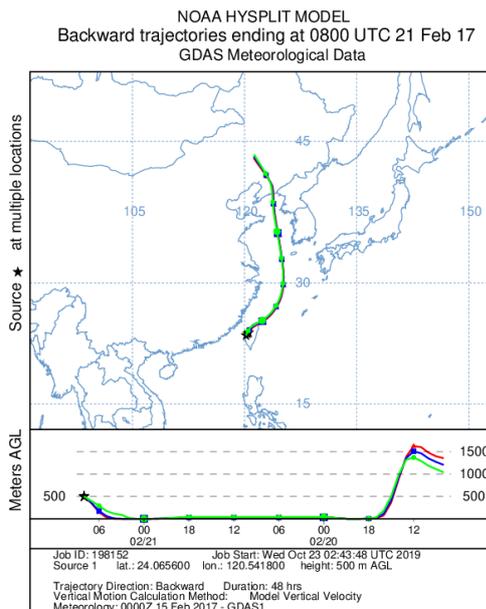
(a) 2016 年 11 月 7 日



(b) 2016 年 11 月 10 日



(c) 2017 年 2 月 13 日



(b) 2017 年 2 月 21 日

圖 1.6.13 2016~2018 年計畫採樣期間之逆軌跡分析圖

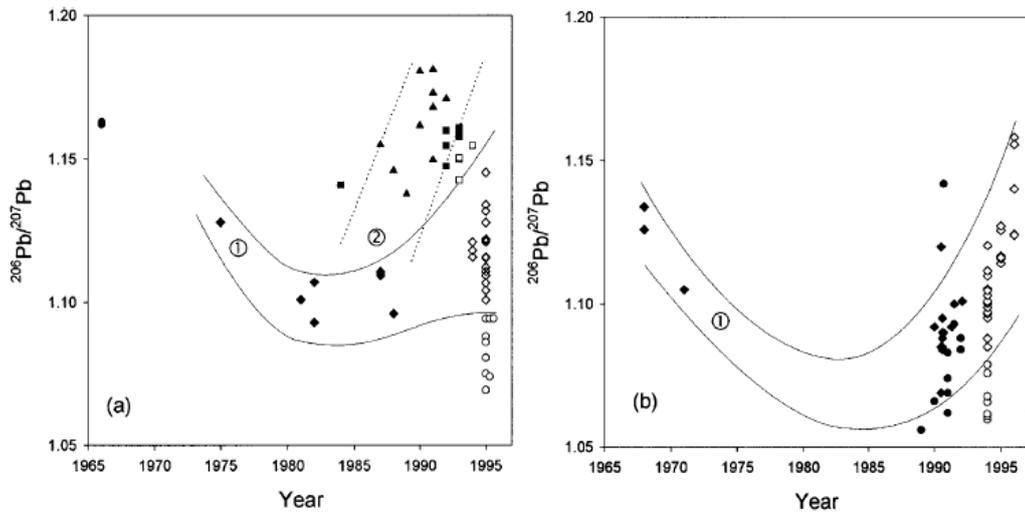


圖 1.6.14 法國及英國地區空氣微粒之鉛同位素比值變化
(資料來源：Monna et al., 1997)

第二章 前言

2.1 計畫目標

根據環境保護署 108 年度「細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用研究計畫」委辦案評選須知，本計畫主要目標為(一)建立高雄和屏東地區大氣細懸浮微粒化學組成及碳與鉛同位素特徵；(二)建立高雄港區內及其周遭排放之細懸浮微粒化學組成及同位素特徵；(三)利用同位素分析技術評估高雄港區排放之細懸浮微粒對高雄和屏東地區大氣細懸浮微粒的影響。

2.2 計畫之工作內容

本計畫主要透過大氣細懸浮微粒採樣與分析的結果，建立高雄和屏東地區大氣細微粒之化學成分和碳與鉛同位素特徵。此外，利用特定污染源排放細懸浮微粒之化學成分和碳與鉛同位素特徵，進行空氣細懸浮微粒之污染來源鑑識，以下列出本年度詳細的工作內容：

- 一、建立高雄和屏東地區大氣細懸浮微粒化學組成及碳與鉛同位素特徵，其工作內容如下：
 - I. 於本署高雄及屏東地區之空氣品質監測站，擇定 8 站執行空氣中細懸浮微粒採樣，至少應完成 2 季採樣，每季最少 7 天，本署得視需求調整時間及地點。
 - II. 分析高雄及屏東地區大氣中細懸浮微粒樣本的碳 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C) 與鉛 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb) 同位素，並建立高雄及屏東大氣中細懸浮微粒的同位素特徵資料庫。
 - III. 分析高雄及屏東地區大氣細懸浮微粒樣本的化學組成特徵(碳成分、離子和金屬元素)，並應用受體模式進行細懸浮微粒污染源的推估。
- 二、建立高雄港區內及其周遭排放之細懸浮微粒化學組成及同位素特徵，其工作內容如下：
 - I. 採集高雄港區內及其周遭 5 種污染源，包含港口作業區(貨櫃集中區、船舶進港區)、火力發電廠、石化業及主要交通道路等樣本，每種污染源採集 2 次，每次 3 重複。

- II. 將所採集之樣本進行碳 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C) 與鉛 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb) 同位素和化學組成 (碳成分、離子和金屬元素) 分析，並建立本土污染源排放之細懸浮微粒同位素和化學組成特徵資料庫。
- III. 蒐集國內外港口、港區交通、火力發電廠和石化業排放之細懸浮微粒的化學組成和同位素特徵差異，並比較其差異。
- IV. 針對本署近年所蒐集之污染源同位素資料，進行同位素分析技術在主要污染源的分析能力評估。

三、利用同位素分析技術評估高雄港區排放之細懸浮微粒對高雄和屏東地區大氣細懸浮微粒的影響，其工作內容如下：

- I. 以大氣及污染源排放之細懸浮微粒中的碳 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C) 與鉛 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb) 同位素特徵為基礎，利用多端源統計模式量化各污染源對大氣細懸浮微粒的貢獻。
- II. 將細懸浮微粒之碳 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C) 與鉛 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb) 同位素分析結果加入受體模式中，並評估此受體模式在細懸浮微粒污染來源鑑識之適用性。
- III. 整合高雄及屏東地區污染源和周界細懸浮微粒的同位素與化學組成特徵資料，並評估高雄港區排放對高雄及屏東地區大氣細懸浮微粒的影響。
- IV. 依細懸浮微粒來源評估結果，提出細懸浮微粒管制方向建議。

2.3 其它應配合事項

- 一、本計畫明訂每月執行進度、預期成效及查核點，但仍會配合 貴署因業務需求而作調整。
- 二、進行期中與期末報告撰寫與審查。
- 三、配合 貴署業務需求，提供必要之專業技術服務。

第三章 研究方法

本計畫應用 105 年度『細懸浮微粒碳及鉛同位素分析技術發展與應用計畫』開發之碳與鉛同位素分析技術，採集及分析高雄和屏東地區大氣和高雄港區重要微粒污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的碳與鉛同位素特徵，並應用受體模式和同位素特徵資料鑑定 $PM_{2.5}$ 污染源。本計畫主要工作內容包括：(1) 建立港口作業區(貨櫃集中區、船舶進港區)、火力發電廠、石化業及主要交通道路排放之 $PM_{2.5}$ 的化學組成及同位素特徵，並探討碳與鉛同位素分析技術在不同污染源的 분석限制，(2) 建立高雄和屏東地區之大氣 $PM_{2.5}$ 的同位素特徵，(3) 應用與比較同位素及受體模式在 $PM_{2.5}$ 之污染來源的診斷，並提出 $PM_{2.5}$ 管制方針建議。本計畫之執行流程如圖 3.1.1 所示。

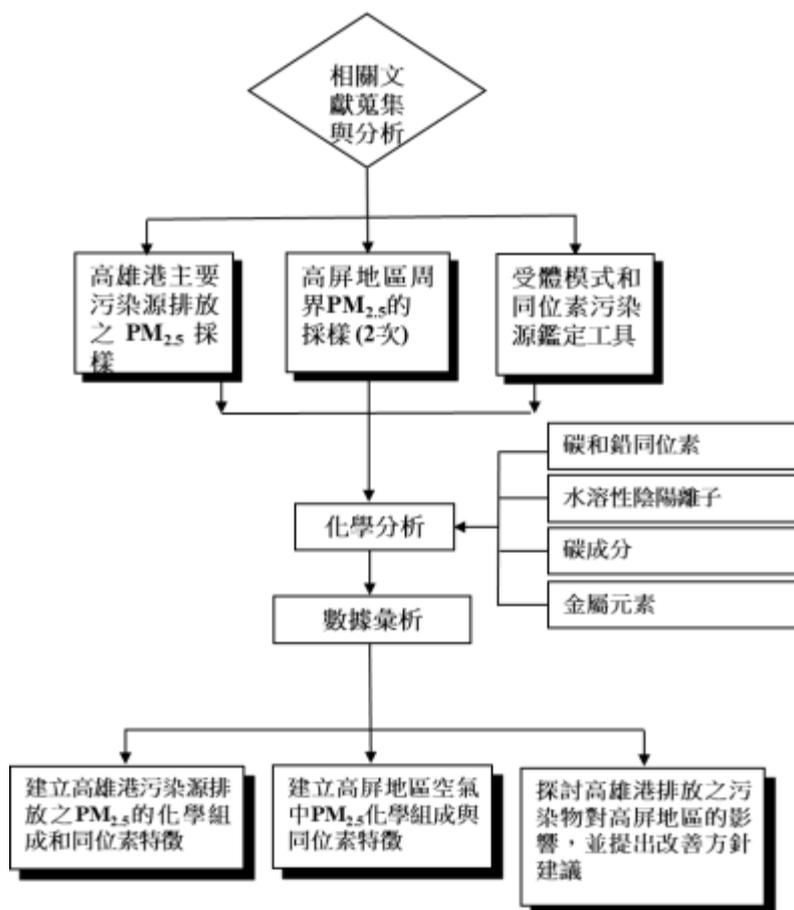


圖 3.1.1 本計畫流程圖

3.1 大氣細懸浮微粒密集觀測

臺灣中南部一直是高 $PM_{2.5}$ 的污染地區，前期計畫 (105 年度細懸浮微粒碳及鉛同位素分析技術發展與應用計畫和 107 年度細懸浮微粒碳同位素分析技術之發展與應用研究計畫) 已分別在台中、彰化、南投和雲林設置 $PM_{2.5}$ 採樣站，同時透過當地主要污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的採集和碳與鉛同位素特徵的分析，鑑定台中、彰化、南投和雲林等地區的微粒污染源。本期計畫以同樣為高 $PM_{2.5}$ 污染地區的高雄和屏東地區為主，並依委辦案評選須知規定，架設 $PM_{2.5}$ 採樣器於高雄和屏東地區。

在採樣點的選擇上，本計畫架設的採樣點位於高雄市的橋頭區、左營區、鳳山區、小港區、大寮區與林園區和屏東縣的屏東市與潮州鎮等 8 個行政區，此 8 個行政區均有環保署空氣品質監測站，這些測站以高雄港區為中心向外擴散，小港與林園測站為最內圈，左營、鳳山與大寮測站居次，橋頭、屏東與潮州測站為最外圈，此 8 個測站相關地理位置如圖 3.1.2 所示。為利於污染源的鑑定與比較，本計畫分別於高 $PM_{2.5}$ 濃度和低 $PM_{2.5}$ 濃度的季節進行採樣。根據屏東縣空氣污染防治計畫-2017 年修正版和高雄市細懸浮微粒空氣品質監測分析報告 (屏東縣政府, 2017; 高雄市政府環境保護局, 2017)，每年的夏季為高雄市和屏東縣 $PM_{2.5}$ 濃度最低的季節，最高的季節則發生在冬季和春季，但根據評選須知，計畫的執行期限到 2019 年 12 月 31 日，若採樣季節包含冬季，將會沒有充分的時間進行樣本的分析與討論，故本研究團隊分別於 2019 年的春季和夏季進行大氣 $PM_{2.5}$ 的採樣與多數指標的分析。

每個測站於每個季節之採樣天數最少 7 天，每個樣本的採樣時間為 22 小時。採樣期間所收集之 $PM_{2.5}$ 樣本，均有進行水溶性陰陽離子、含碳成分、金屬元素和碳與鉛同位素的分析。在採用的採樣器部分，各測站均包含一台 Super SASS (Met One Instruments, OR, USA)、PQ200 採樣器 (BGI Incorporated, MA, USA) 和加裝 $PM_{2.5}$ 衝擊板的 Tisch High-Vol (Tisch Environmental, OH, USA) 高量採樣器進行大氣 $PM_{2.5}$ 的採集。Super SASS 屬於半自動連續採樣器 (圖 3.1.3)，採樣器共有 4 個採樣通道，每個通道之採樣流量為 6.7 LPM，每個通道的流量由 4 個獨立的流量控制器控制，氣流經由 sharp cut cyclone 後，其濾紙上收集的粒徑即為 $2.5 \mu m$ 以下的

微粒。本計畫在第一個通道配置 47 mm 的 Teflon 濾紙，採樣後的濾紙經調理及秤重後，被用於分析 $PM_{2.5}$ 所含之水溶性陰陽離子，第二個通道將配置經過 900 °C 烘烤淨化的 47 mm 石英濾紙，採樣後的濾紙經調理及秤重後，所得樣品被用於分析 $PM_{2.5}$ 所含之有機碳及元素碳。PQ200 採樣器係通過美國環保署 Federal Reference Method 認證的大氣氣膠採樣器 (圖 3.1.4)，其採樣流量為 16.7 LPM，該儀器採用的濾紙為 47 mm 的 PTEF 濾紙，採完樣的濾紙在調理後會秤重，秤重後的濾紙再進行微波消化以利後續金屬元素及鉛同位素的分析。為獲得足夠的微粒樣品以供 $\delta^{13}C$ 和 ^{14}C 的分析，在密集觀測期間，各測站都放置一台 $PM_{2.5}$ 高量採樣器 (圖 3.1.5)，該採樣器係由空氣吸引部、濾紙固定器、流量測定部及保護器所組成，採氣流量可達 $1.13 \text{ m}^3/\text{min}$ 。當馬達開起後，氣流會流經特殊設計之採樣頭，並去除粒徑大於 $10 \mu\text{m}$ 的微粒，爾後含有 $10 \mu\text{m}$ 以下之微粒再流經內部加裝的衝擊板，並透過慣性撞擊原理使 $2.5\text{-}10 \mu\text{m}$ 的微粒被捕集到經 900°C 高溫烘烤淨化的柵狀石英濾紙上，小於 $2.5 \mu\text{m}$ 之微粒再隨氣流被經 900°C 高溫烘烤淨化的 $8''\times 10''$ 石英濾紙捕集。

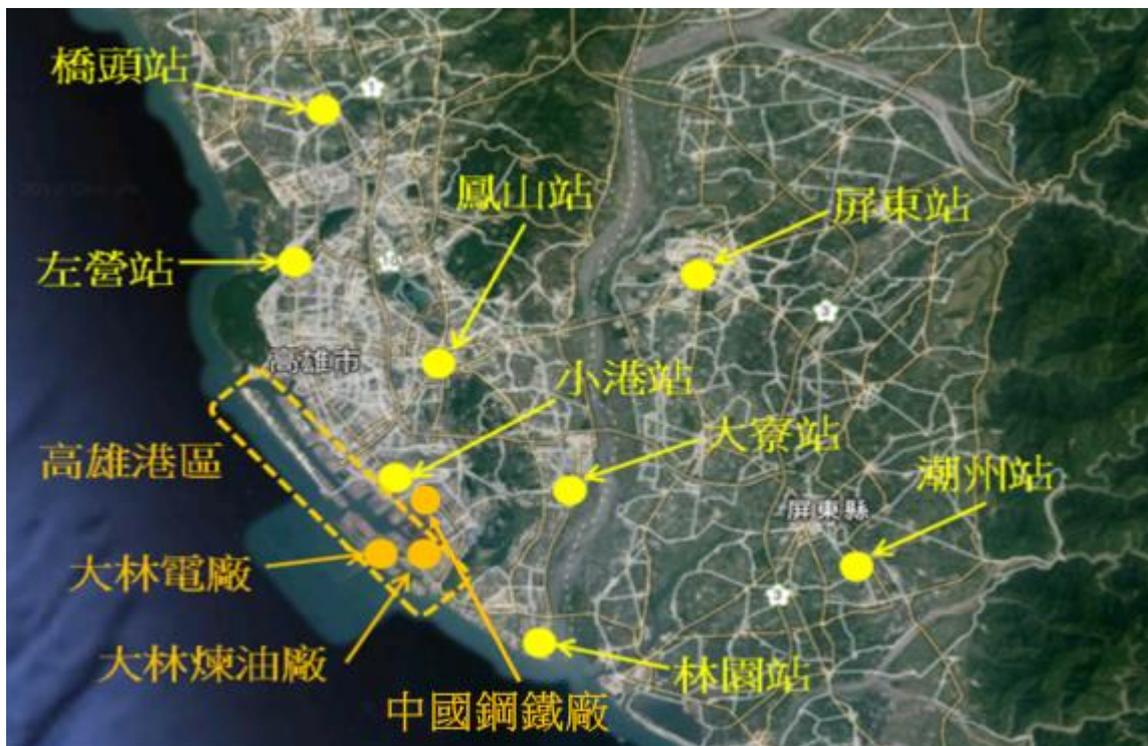


圖 3.1.2 本計畫大氣細懸浮微粒採樣測站和污染源相對位置圖

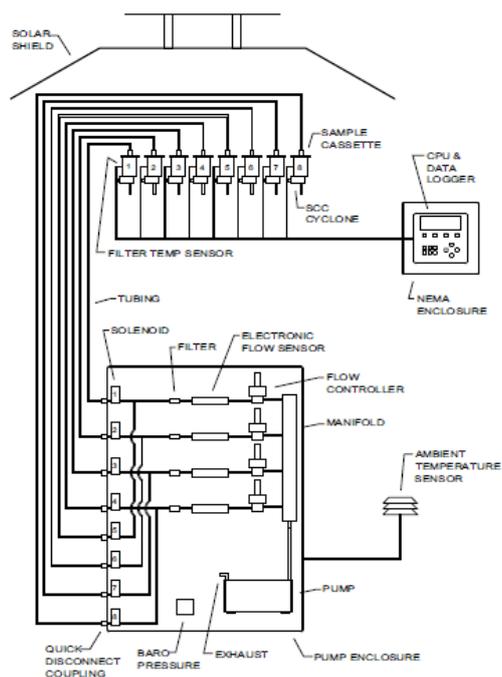


圖 3.1.3 Super SASS 採樣器構造圖



圖 3.1.4 BGI PQ200 氣膠採樣器



圖 3.1.5 PM_{2.5} 高量採樣器

3.2 污染源排放微粒採樣

在污染源排放微粒的採樣上，依委辦案評選須知規範，本計畫採集的污染源類別包括港口作業區（貨櫃集中區、船舶進港區等）、火力發電廠和煉油廠（另外增加鋼鐵廠燒結爐），採集的 $PM_{2.5}$ 樣本也會進行水溶性陰陽離子、含碳成分、金屬元素和碳與鉛同位素的分析，藉此建立高雄港主要污染源排放之 $PM_{2.5}$ 的指紋資料庫及同位素特徵，以利後續應用於大氣 $PM_{2.5}$ 污染來源的鑑識。

在火力發電廠和煉油廠的採樣對象部分，本團隊挑選位於高雄港的大林電廠和大林煉油廠，另增加中鋼燒結爐煙道排放之 $PM_{2.5}$ 的採樣，3 種污染源的位置圖如圖 3.1.2 所示。無論哪一種污染源，均會在最大排放管道進行 $PM_{2.5}$ 採樣，每根排放管道不定期進行二次採樣，每次採樣均為三重複。排放管道之採樣作業採用環保署檢測所公告的 NIEA A212.10B 和 NIEA A214.70C 串聯之採樣方法，以採集可過濾式微粒 (filterable particulate matter, FPM) 和可凝結性微粒 (condensable particulate matter, CPM)。圖 3.2.1 為 NIEA A212.10B 採樣器的示意圖，此採樣器設有旋風分離裝置，以截取粒徑小於 $2.5 \mu m$ 的微粒，當利用等速抽引設備進行微粒採集時，富含微粒之空氣進入煙道採樣裝置，再由旋風分離器去除大於 $2.5 \mu m$ 之微粒，而小於 $2.5 \mu m$ 的微粒則由後端之石英濾紙捕集，採樣後的濾紙經過調理與秤重後，所得質量濃度即為濾紙上的 FPM，以丙酮沖洗旋風集塵器管壁上的 $PM_{2.5}$ 為旋風集塵器上的 FPM。圖 3.2.2 為 NIEA A214.70C 的採樣器示意圖，該採樣器前端為 A212.10B 採樣裝置，並聯接後端用於捕集 CPM 的採樣裝置，CPM 採樣裝置有乾式衝擊瓶與石英濾紙，經乾式衝擊瓶與石英濾紙捕集之微粒的加總即為 CPM。進行排放管道的採樣前，均會測定煙道內的排氣組成、排氣溫度、水分含量、內動靜壓力等參數，然後計算在此條件下使用之適合的吸引嘴尺寸及採樣流率，以達到欲收集微粒之粒徑範圍。

在高雄港污染源的採樣部分，根據本計劃團隊在 2019 年 2 月前往高雄港勘查的結果，共選定 5 個採樣點，以作為高雄港作業區排放之 $PM_{2.5}$ 組成特性的調查用。本計劃團隊選擇的 5 個採樣點之分佈如圖 3.2.3 所示，包含用於監測第一港口與第二港口船隻進出的第一信號台（採樣器設於第一信號台樓頂）和高字塔（採樣器設於紅毛文化園區內），圖 3.2.4 為高雄港海域船舶動態資料，該圖顯示第一港口與

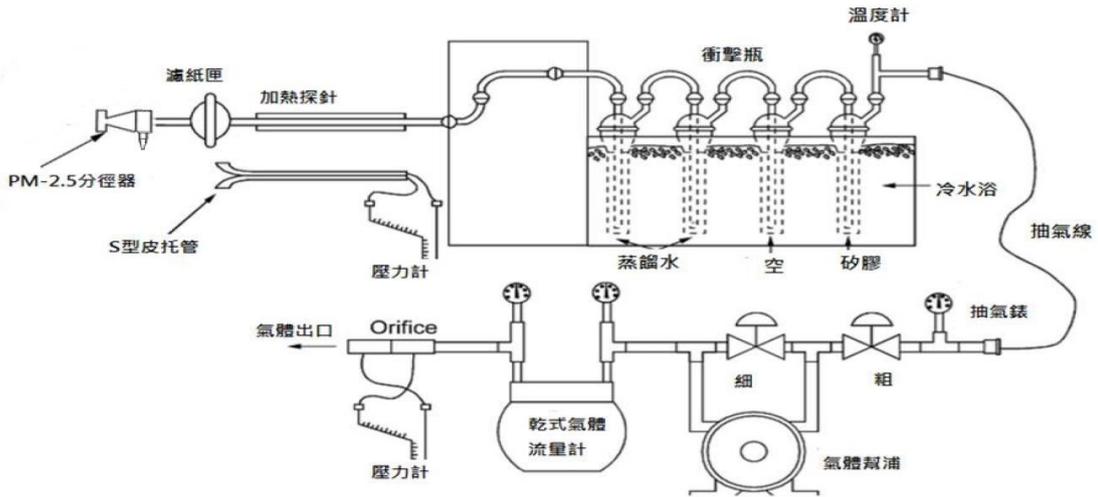


圖 3.2.1 固定源煙道排放 FPM 採樣器示意圖

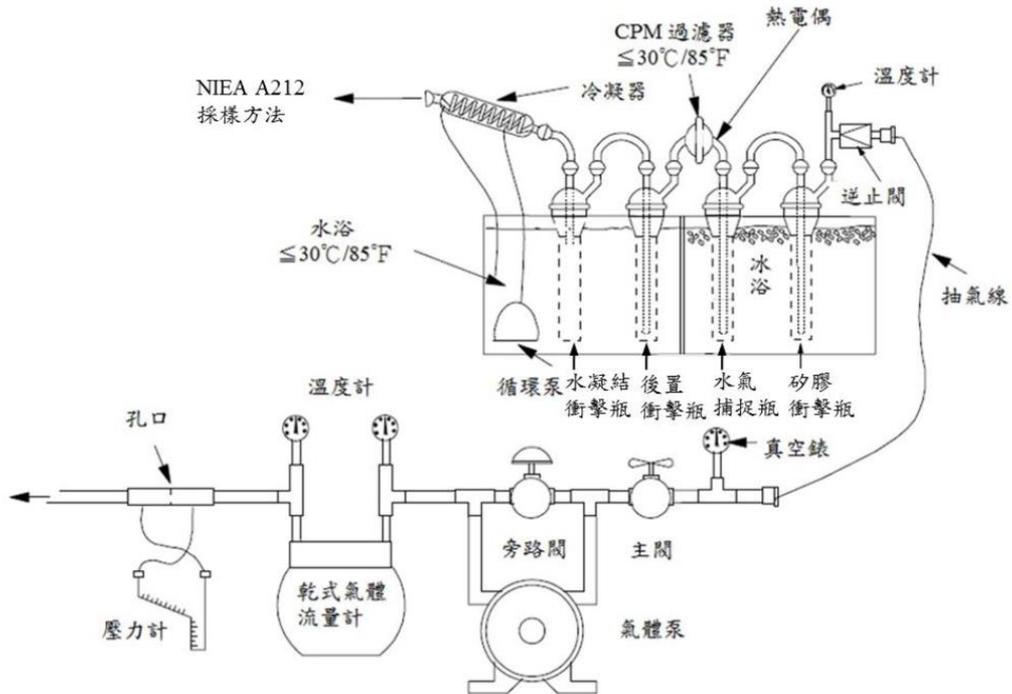


圖 3.2.2 固定源煙道排放 CPM 採樣器示意圖

第二港口都有船隻的進出；用於監測遠洋漁船排放之 $PM_{2.5}$ 的前鎮漁港（採樣器設於前鎮漁港旁的中央氣象局高雄氣象站）和旗津漁港（採樣器設於旗津漁港旁的海洋探索館露天平台）；監測進出港口之貨櫃車排放的 $PM_{2.5}$ （採樣器設於第五貨櫃區的長榮貨櫃公司頂樓）。

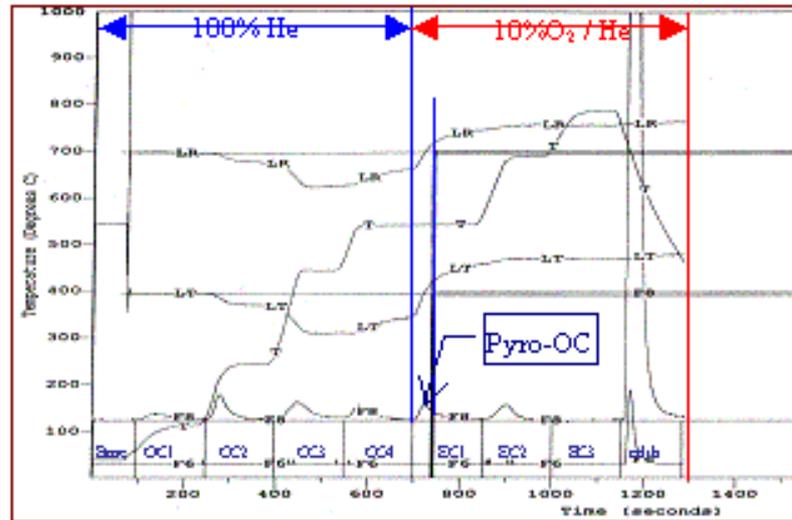
3.3 微粒樣本化學分析方法

3.3.1 水溶性陰陽離子

本計畫針對大氣和污染源的懸浮微粒之水溶性之陰、陽離子成分係以離子層析儀 (Ion Chromatograph, IC) 進行分析，分析之水溶性陰、陽離子包括 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 。陰、陽離子之檢量線乃以水溶性陰、陽離子標準溶液依濃度由低至高之次序注射 5 個不同濃度，所得之波峰積分面積，再利用直線最小平方法求得直線之迴歸檢量線，其線性相關係數 R^2 大於 0.995 始才用之。一般而言，進行陰離子分析之樣品分析值多半在 0.25~30 ppm，陽離子分析值則多半在 0.5~20 ppm 範圍內，若分析之某物種的濃度超出檢量線之內插範圍，不以外插求值，而以稀釋後再行注射分析。而欲分析之樣品萃取，取適量 $PM_{2.5}$ 高量採樣器所採集完之石英濾紙置入塑膠瓶中，加入 10 ml 的去離子水（阻抗值 $> 18.0 M\Omega/cm$ ），封緊瓶口，置入超音波震盪器內震盪 60 分鐘後冰存在冰箱，隔日再倒前一日震盪的溶液於 10 ml 的注射針筒加以過濾，注射筒前端加裝孔隙 $0.45 \mu m$ 、直徑 25 mm 薄膜濾紙的針筒過濾器，過濾後之萃取液置入有蓋的試管，將試管緊密後，放入冰箱內存放，以避免水溶性離子揮發損失。此方法經添加標準品回收率試驗 (spike) 證實，各離子回收率均在 88% 至 104% 之間，顯示此自行發展的方法少有基質干擾且具有良好之回收率。本計畫採用的離子層析儀分析方法在 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的方法偵測極限分別為 $0.007 \mu g/m^3$ 、 $0.017 \mu g/m^3$ 、 $0.035 \mu g/m^3$ 、 $0.007 \mu g/m^3$ 、 $0.017 \mu g/m^3$ 、 $0.007 \mu g/m^3$ 、 $0.007 \mu g/m^3$ 和 $0.007 \mu g/m^3$ 。

3.3.2 碳微粒之分析

在碳微粒分析上，本計畫採用 IMPROVE-A Protocol，以 Thermo-Optical Reflection (TOR) 分析技術進行氣膠有機碳與元素碳濃度之分析。採集於石英濾紙上的樣品置於充滿氮氣的反應腔中，腔內溫度依實驗需求分段升溫至 580°C，樣品中的有機成份因其蒸汽壓的差異而在不同的溫度揮發出來，並隨攜帶氣流 (He) 導入還原管中轉化為 CH₄，後方串連之 Flame Ionization Detector (FID) 將連續檢測氣流中 CH₄ 的濃度，此濃度可直接換算成各溫度條件下揮發出的“有機碳”質量。在樣品的加熱期間，一組 632.8nm 之雷射光源及偵測儀將用於連續監測樣品表面對該雷射光束之反射量。依據 Chow 的研究結果 (Chow et al., 1993)，在 200°C 以上時，該反射強度就會開始逐漸降低，顯示樣品中的“元素碳”有增加的現象，此一增加量即為有機成份“碳化”所致。在 400~550°C 間，雷射光反射量將急遽降低而後達到穩定，顯示樣品中的有機成份已經完全揮發或碳化。在有機成份已經完全揮發或碳化後，導入 10% 的氧氣，樣品中的“元素碳”將被氧化而自濾紙上揮發，揮發出的 CO₂ 經還原成 CH₄ 之後將由 FID 偵測其濃度。此氧化過程將使雷射光反射量急遽增加，當雷射光反射量回復至原始樣本的程度時，代表因碳化而增加的“元素碳”已被去除，此過程中 FID 測得之 CH₄ 濃度可作為有機碳化反應的修正值。雷射光反射量回復至原始樣本的程度後，反應腔內的溫度將逐步分段增加至 840°C，樣品中的“元素碳”將持續被氧化而自濾紙樣本中去除，雷射光反射量亦將持續增加直到回復至空白濾紙的程度。此一過程中 FID 測得之 CH₄ 濃度可直接換算成各溫度條件下揮發出的“元素碳”質量，圖 3.3.1 為一典型樣品之分析圖譜。本計畫採用的碳成分分析方法在 OC 和 EC 的方法偵測極限分別為 0.27 μg/m³ 和 0.06 μg/m³。



(LR: Laser Reflectance, LT: Laser Transmission, T: Temperature, F8: High sensitivity FID signal, F6: Low sensitivity FID signal)。

圖 3.3.1 氣膠樣品有機碳及元素碳分析方法及結果圖譜說明。

3.3.3 金屬元素分析

在金屬元素分析上，在完成濾紙調理和秤重後，濾紙會被放置於消化瓶進行消化，在進行消化程序前，為確保消化瓶不受污染，會進行酸洗步驟。酸洗方法為於消化瓶內（容量為 55 mL）依序添加 5 mL 的硝酸 (Merck, 65 % GR for Analysis) 及 4 mL 的去離子水（阻抗值 > 18.0 MΩ/cm），微波功率設定在 1440 W 下，進行 20 分鐘的微波加熱，隨後以去離子水淋洗 2 次並晾乾，始可進行實際微粒樣本的消化。將濾紙樣本置入鐵氟龍消化瓶中，加入 4 mL 的硝酸 (Merck, 60 % Ultrapure) 與 2 mL 的氫氟酸 (Merck, 48 % Ultrapure)，添加完畢後再以鎖瓶機 (CEM, MARS Xpress) 將消化瓶旋緊至可承受之壓抗，以避免各消化瓶因人為鎖瓶施力不同而使控制條件互異。隨後，以高輸出微波消化系統 (CEM, MARS Xpress) 進行消化，微波消化設定之功率與升溫條件，如表 3.3.1 所示，共分兩階段之加熱程序，第一階段之功率設定在 1440 W，以 8 分鐘之時間升溫 (Ramp) 至 170 °C，並以此功率維持 (Hold on) 7 分鐘後，接續進行第二階段之升溫，其功率調升至 1600 W，並以 7 分鐘之時間升溫至 200 °C 後，維持 15 分鐘，待兩階段之加熱完畢後，進行 60 分鐘的降溫 (Cool down)，使其溫度降至 40°C。第一次消化冷卻完畢後，將消化瓶依序裝入濃縮裝置之附屬套件 (CEM, XpressVap™)，並置入一支備有溫

感光纖 (CEM, No. 431-6494) 之監測瓶進行趕酸。趕酸是以馬達抽取微波消化系統內之消化瓶的酸氣，並使其隨微波消化系統上方的管線被抽到化學操作櫃內的酸鹼中和瓶中，再依序經過裝有硼酸 (Merck, GR for Analysis)、氫氧化鈉 (Merck, GR for Analysis) 和超純水的酸鹼中和瓶進行曝氣，待消化液濃縮趨近至蒸乾，即完成趕酸，此程序之微波消化系統設定的功率與溫度分別為 800 W 和 80 °C。完成趕酸後，依序添加 2.0 mL 的硝酸 (Merck, 60 % Ultrapur) 至樣本中進行第二階段消化，消化之功率與升溫條件如表 3.3.2。待消化程序均完成後，進行定量步驟。

表 3.3.1 濾紙樣本微波消化升溫設定條件

	Max. power (W)	Power (%)	Ramp (min)	°C	Hold (min)	Cool down (min)
Stage 1	1600	90	8:00	170	7:00	---
Stage 2	1600	100	7:00	200	15:00	60:00

表 3.3.2 濾紙樣本第二階段微波消化升溫設定條件

	Max. power (W)	Power (%)	Ramp (min)	°C	Hold (min)	Cool down (min)
Stage 1	1600	100	15:00	200	10:00	60:00

本計畫將消化液移入材質為聚丙烯的離心管中，同時添加 15 ppb (配製濃度為 5 ppm，加入 150 µL) 之銦 (In) 於離心管中作為內標準品，最後再以去離子水稀釋定量至 50 mL，並冷藏於 4 °C 直至上機分析。另於每一消化批次中亦以相同之消化程序，分析至少 2 個空白濾紙樣本及 1 個酸試劑空白樣本，並將實際微粒樣品濃度扣除空白濾紙濃度即為樣品真實的濃度，以避免採樣介質與化學試劑之干擾。而為確保離心管不受污染，使用前需浸泡在濃度為 5 % 的硝酸 (Merck, 65 % GR for Analysis) 並浸泡 16 小時，再以去離子水淋洗且晾乾後方可使用，另避免不同離心管的容量互異，於定量前及定量後均需秤重，以取得確切的定量體積。



圖 3.3.2 本計畫使用的 ICP-MS

本計畫懸浮微粒中元素之定量分析，係利用 Perkin-Elmer 公司出產型號為 NexION 300X 之感應耦合電漿質譜儀 (Inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS) 進行分析，如圖 3.3.2，其具有可同時分析多元素濃度及靈敏度高之優點，而 NexION 300X 具有動力反應腔，利用甲烷氣解氫氣干擾，可將元素濃度解析度推至 ppt 等級。ICP-MS 分析流程係先以霧化器將待測消化液經霧化處理，再以載送氣體輸送 (將形成含待分析元素之氣膠輸送至電漿中)，樣品經受熱後，由一系列去溶劑、分解、原子化/離子化等反應，將電漿中待分析元素形成單價正離子，再透過真空界面傳輸至質譜儀，配合質量分析器將各特定質荷比之離子予以解析，再以電子倍增器檢測，並進行多元素定性及定量。本計畫分析之元素包含鋁(Al)、鐵(Fe)、鈉(Na)、鎂(Mg)、鉀(K)、鈣(Ca)、銣(Sr)、鋇(Ba)、鈦(Ti)、錳(Mn)、鈷(Co)、鎳(Ni)、銅(Cu)、鋅(Zn)、鉬(Mo)、鎘(Cd)、錫(Sn)、銻(Sb)、鉍(Tl)、鉛(Pb)、釩(V)、鉻(Cr)、砷(As)、硒(Se)、鉕(Y)、鋯(Zr)、銣(Rb)、鎳(Ga)、鍮(Ge)、銫(Cs)、鐳(La)、鈾(Ce)、釷(Nd)及磷(P)等 34 種。

此外，上機分析檢量線標準液之配製，係將Merck公司出產各元素之原始標準液濃度 (1000 ppm) 混合，再依懸浮微粒中各元素的豐富度，區分主量元素、次量元素、微量元素及稀土元素，以1 %的硝酸 (Merck, 60 % Ultrapur) 稀釋配製成7種系列濃度，主量元素 (Al、Fe、Na、Mg、K、Ca與P) 的稀釋系列分別為0.1、1、10、100、200、500及1000 ppb，而次量元素及微量元素 (Sr、Ba、Ti、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb、V、Cr、As、Se、Y、Zr、Rb、Ga、Ge與Cs) 的稀釋系列則分別為0.01、0.1、1、10、20、50及100 ppb，另稀土元素 (La、

Ce及Nd) 的稀釋系列則分別為0.01、0.1及1 ppb。此外，於每一分析批次中 (約20個樣本) 亦會安插一個查核標準品 (NIST SRM 1648a之消化液)，以確保分析數據之品質。另為掌握分析儀器之性能，每日亦以10 ug/L之校正液 (含鈹(Be)、鎂(Mg)、銦(In)、鈰(Ce)、與鈾(U))，藉以校正儀器訊號強度，使用ICP-MS分析之設定條件如表3.3.3所示。上述方法與流程由Hsu等人所建立 (Hsu et al., 2009; Hsu et al., 2008)，過去的分析利用NIST的標準品查核其分析方法之回收率，各元素之回收率絕大部分在100±10%，且精密度落在5%以內。本計畫採用的ICP-MS在不同元素的偵測極限如表3.3.4。

表 3.3.3 感應耦合電漿質譜儀分析設定參數

設定參數	設定數值
無線電功率 (W)	1500
電漿氣流-氬氣氣體流速 (L/min)	15
載送氣流-氬氣氣體流速 (L/min)	0.9-1.1
輔助氣流-氬氣氣體流速 (L/min)	1.3
離子進樣深度	調至最強偵測訊號
離子束	調至最強偵測訊號且雜訊比最小
遲滯時間 (ms)	100
解析度 (amu)	0.7±0.1
掃描模式	多元素短暫快速掃描
樣品取樣速率 (L/min)	1.2
操作壓力 (torr)	1.5×10^{-6} - 2.5×10^{-6}
重複次數	3
掃描/讀值	6
取樣器	鉑錐 (1.1 mm)
削減器	鉑錐 (1.1 mm)

表 3.3.4 本計畫建立之 ICP-MS 針對 34 種元素的方法偵測極限 (ng/m³)

元素	方法偵測極限	元素	方法偵測極限
Al	0.9	Sb	0.02
Fe	1.4	Tl	0.002
Na	10.5	Pb	0.08
Mg	2.2	V	0.02
K	4.2	Cr	0.4
Ca	7.5	As	0.04
Sr	0.02	Y	0.008
Ba	0.04	Se	0.07
Ti	0.8	Zr	0.17
Mn	0.10	Ge	0.002
Co	0.007	Rb	0.003
Ni	0.2	Cs	0.001
Cu	0.5	Ga	0.009
Zn	0.10	La	0.001
Mo	0.05	Ce	0.002
Cd	0.004	Nd	0.002
Sn	0.04	P	0.4

3.4 同位素化學分析方法

3.4.1 碳同位素分析方法

在過去的文獻中，針對懸浮微粒中碳同位素的分析係先將欲分析的碳微粒在高溫下使其氧化成CO₂，而後再將CO₂導入至同位素比值質譜儀(isotope ratio mass spectrometry)進行分析，藉以得到待測微粒中碳成分之¹²C與¹³C，以獲得δ¹³C的資

訊 (Cao et al., 2011; Jung et al., 2019; Kundu and Kawamura, 2014; López-Veneroni, 2009)。本計畫在 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析方法上係利用光腔衰盪光譜儀 (Cavity Ringdown Spectroscopy, CRDS)，該方法是先將碳微粒燃燒成 CO_2 並導入CRDS內部腔體內，開啟雷射光源產生一特定強度的雷射光後關掉雷射光源，讓特定強度的雷射光經過三組反射鏡面以光速循環運動 (總有效光徑可以達到20 km) 並同時監測光強度 (如圖3.4.1)，雷射光會在這個循環運動中不斷的衰減 (一部分被腔體內空氣所吸收 (Beer-Lambert law)，一部分是通過反射鏡反射的損失) 直到完全衰減，而感應器則會測量光強度完全衰減所需時間，並計算 ^{13}C 同位素和二氧化碳的測值。

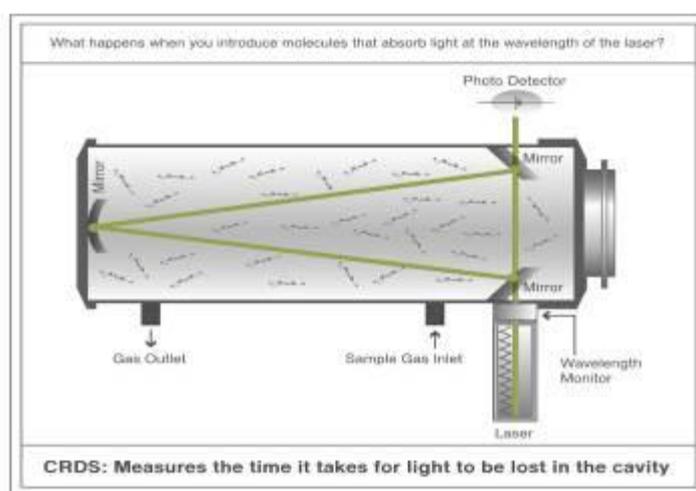


圖 3.4.1 CRDS 腔體內部示意圖

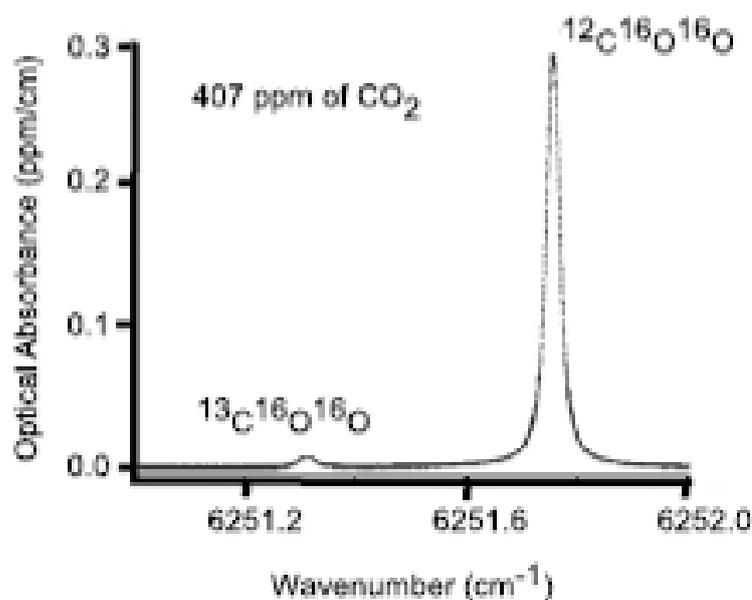


圖 3.4.2 $^{13}\text{CO}_2$ 以及 $^{12}\text{CO}_2$ 吸收波長示意圖
(資料來源：Zare et al., 2009)

本方法用來量測 ^{13}C 同位素的雷射波長為近紅外線 (波數近 6251cm^{-1})，實際用來做計算的是 $^{13}\text{CO}_2$ 以及 $^{12}\text{CO}_2$ 這兩個物種在波數靠近 6251cm^{-1} 的光強度完全衰減時間如附圖 3.4.2，藉此方法所得即是碳微粒之 ^{12}C 與 ^{13}C 值，並利用方程式 3.1 計算 $\delta^{13}\text{C}$ (以國際標準品 IAEA-CO-8 & 8543 NBS 18 校正)：

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (3.1)$$

在空氣懸浮微粒 ^{14}C 分析方面，本計畫委託美國 BETA 實驗室利用加速質譜儀 (accelerator mass spectrometer, AMS) 進行分析 (如圖 3.4.3)，此儀器的特點為具有高效率與高靈敏度，且樣品量僅需含 0.5 mg 的碳即可分析。在總碳中的 ^{14}C 分析上，取適量含有總碳微粒之濾紙樣品至含有 CuO 的石英管內，此石英管乃置於低溫 (-80°C) 及真空的系統中以避免半揮發性有機碳的揮發，爾後將此氣膠樣品在 850°C 的溫度下加熱 4 小時，所產生之 CO_2 經低溫純化及石墨化後，分析其 ^{12}C 及 ^{14}C 值，則總碳微粒中“現代碳”的含量 (pMC) 可利用微粒樣品與標準品間的 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值進行計算，其公式如下：

$$pMC = \frac{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{0.749 \times (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{OX II}}} \times 100 \quad (3.2)$$

上式中 $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}$ 及 $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{OX II}}$ 分別為空氣樣品及標準品 (NIST SRM 4990C OX II) 中 ^{14}C 與 ^{12}C 的比值。



圖 3.4.3 AMS 示意圖

3.4.2 鉛同位素分析方法

在鉛同位素的分析上，須先以微波消化完的細微粒樣品溶液進行鉛純化的步驟。首先，取適當的樣品消化液（此溶液約包含 2-10 ng 鉛）放入鐵氟龍燒杯中，以 180°C 加熱蒸乾後，再加入 1 mL 的 2N HCl，藉以進行微粒樣品之鉛純化。在鉛純化步驟上，如圖 3.4.4 所示，先將約 0.5 mL 的 Sr-Spec 樹脂填入管柱內，並分別以 3 mL 的 6N HCl 及 3 mL 純水重複清洗樹脂二次後，再加入 3 mL 之 2 N HCl 至管柱中以維持樹脂之工作環境。將微粒溶液樣品倒入管柱中，並加入 3 mL 之 2 N HCl 至管柱裡沖提其他元素後，再加入 6 mL 的 6 N HCl 至管柱中以沖提出鉛元素，沖提後的樣本於 190°C 的溫度下蒸乾，並加入 1 mL 的濃 HNO₃，再利用 Milli-Q 水定量至 10 mL 後，以 ICP-MS 進行鉛同位素的分析。上述所有之鉛純化步驟均在無塵箱內進行（如圖 3.4.5 及圖 3.4.6 所示）。鉛同位素比值分析結果將和標準品 NIST SRM 981 進行比對，以確保鉛同位素分析結果的精確度和準確度。

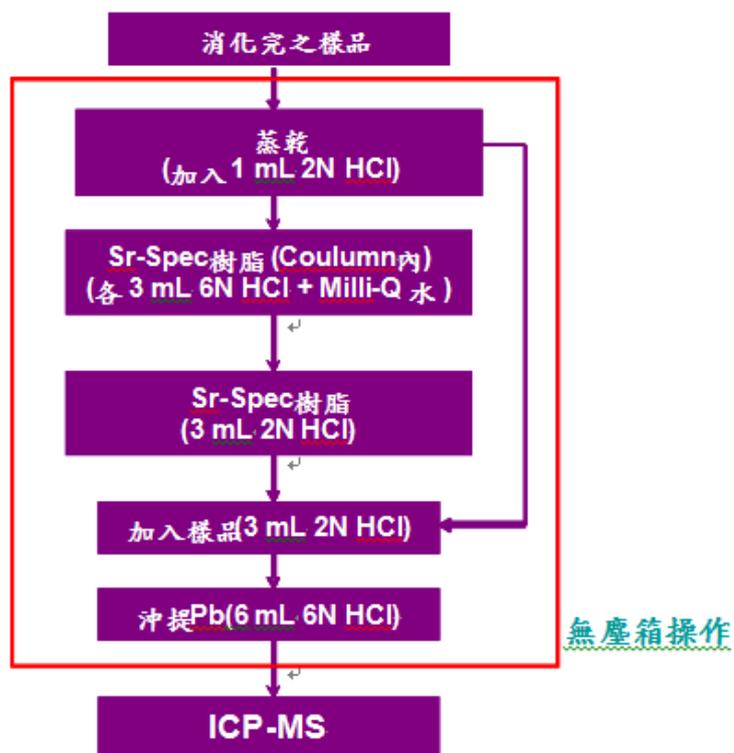


圖 3.4.4 微粒中鉛同位素純化流程示意圖



圖 3.4.5 無塵箱內微粒樣品溶液加熱蒸乾



圖 3.4.6 無塵箱內微粒樣品溶液進行鉛純化

根據 NIST SRM 981 標準品提供的鉛同位素含量， ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 的含量分別為 1.43%、24.14%、22.08% 和 52.35%，其中，用於本研究分析鉛污染源之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值分別為 1.0933 和 2.3704，經 ICP-MS 分析標準品所得到的回收率分別為 100.3% (99.8~101.2%) 和 100.2% (99.6~100.7%)。

3.4.3 樣本中化學成分分析之品保與品管

本研究化學成分分析的數據品質將透過品保與品管之相關措施，以提高分析數據之信賴度與可靠度，本研究藉由標準參考品分析、重複樣品分析、查核樣品分析與濾紙空白值分析進行分析流程之查核。其中，金屬元素將分析標準參考品以驗證消化程序之效果。重複樣品分析主要確認分析儀器的精密度(Precision)，本研究每分析10個樣品後，將進行標準參考品重複分析的查核工作，以確保分析的品質，此兩組數據之差異百分比需小於20%才可被接受，重複樣品分析測定相對差異百分比(Relative Percent Difference, RPD)之計算公式如式(3.3)。

$$\text{RPD} (\%) = \frac{|x_1 - x_2|}{\frac{1}{2}|x_1 + x_2|} \quad (3.3)$$

其中 RPD (%) 為相對差異百分比， x_1 與 x_2 為同一樣品重覆分析兩次時，所得之測定值。

查核樣品分析是用來測定分析儀器之準確度(Accuracy)，用以測定已知濃度

標準樣品的變化，本研究每分析10個樣品後，將進行標準參考品重複分析的查核工作以確保分析的品質，此兩組數據之差異百分比需小於20 %才可被接受，查核樣品分析之回收率(Recovery, R)計算公式如式(3.4)。

$$R (\%) = \frac{X}{S} \times 100\% \quad (3.4)$$

其中 R (%)為查核樣本回收率，X 為測定值，S 為標準樣品的濃度值。

本計畫之品保及品管將按照下列程序執行:

1. 所有品管數據應加以保存以利日後參考或查閱。
2. 儀器偵測極限(IDL)以 $\mu\text{g/L}$ 為單位，至少每 3 個月重新製作 IDL 一次並保存紀錄。IDL 係連續分析 7 次試劑空白溶液，以其 3 倍之標準偏差值表示。
3. 分析過程中須監測內標準品信號強度之變化情形，當樣品中任何內標準元素之信號強度衰減至最初檢量線中內標準品信號強 30%以下時，則可能發生基質效應，儀器之偵測極限會因基質干擾效應之發生而改變。當發生上述情形時，可依下列程序檢查導致內標準品信號衰減之原因：首先可利用分析檢量線空白溶液中之內標準信號，確認儀器之檢測效能(Analytical performance) 是否有明顯地漂移現象，若檢量線空白溶液中之內標準信號強度亦出現明顯衰減現象，則需終止所有分析工作，待查明原因，並解決導致儀器分析效能改變因素後，始得重新建立檢量線，並分析導致基質效應之樣品；如導致內標準品信號衰減原因不是源自儀器效能之飄移時，則可利用稀釋方式，降低樣品中基質濃度，以達到移除基質干擾之目的。此時，可根據內標準品信號衰減之嚴重程度選擇適當之稀釋倍數進行樣品稀釋，並重新添加適量內標準品進行分析，如果第一次稀釋無法消除基質干擾問題，即必須重複上述稀釋程序直到內標準品信號強度提升至檢量線標準溶液中內標準品信號強度 30 %以上。
4. 每 12 小時或於開始分析樣品前，需以干擾查驗液進行分子離子干擾之查核工作。由於干擾查驗液中部分元素有可能會發生沉澱問題，故在檢測過程中

應注意是否有類似問題發生。

5. 為得到高品質分析數據，藉由同時測量分析物以外之干擾離子，作為決定是否須使用校正方程式之依據。當儀器分析過程若有質譜性干擾，於分析結果中必須針對被干擾之元素，並註明被校正之干擾信號占所有分析信號之百分比及校正方程式中未置入校正之干擾物種。
6. 儀器檢量線查核
 - A. 以檢量線空白溶液和檢量線確認溶液進行檢量線查核。
 - B. 每分析 10 個樣品，須以檢量線確認溶液和檢量線空白溶液進行檢量線查核。另外，在分析樣品前後，也必須以上述查核溶液進行檢量線查核。
 - C. 檢量線確認溶液之分析結果均必須小於配製值之 10 %，否則必須停止分析，待問題修正後，再重新利用檢量線確認溶液進行儀器之校正查核。另外，當發現檢量線查核結果不符時，受影響之樣品應利用重新製作之檢量線再次進行分析。
 - D. 每個元素之檢量線空白值必須小於 2 倍 MDL 值。若發現檢量線空白值大於 2 倍 MDL 值時，必須檢查誤差原因並改善後，受影響之樣品亦必須重新分析。
7. 配製空白分析主要為確認待測樣品是否於樣品分析過程中遭受污染。對於每一批次樣品之分析測定，至少需包括一個以上之方法空白樣品，且該樣品必須依循完整之樣品製備程序處理。方法空白樣品之製備為與樣品採樣相同過程進行空白採樣，並與萃取樣品微粒上金屬成分相同步驟進行萃取，再以完整分析程序進行分析。分析步驟包括前處理、消化處理、樣品稀釋、過濾處理和分析測定等。
8. 實驗室品管樣品應以與待測樣品相同之前處理方法、測定及品質管制程序進行分析，每批樣品或至少每 10 個樣品應進行一個實驗室品管樣品分析。
9. 同一批次或 10 個樣品做一次重複分析，若同時有不同基質之樣品時，每種

基質之樣品均需進行重覆分析。對於分析物濃度大於儀器偵測極限值 100 倍之樣品而言，其重覆分析之相對百分偏差值範圍必須在 $\pm 20\%$ 以內。

10. 於消化後之樣品或經稀釋樣品中添加適量之標準品，其回收率應在 75~125% 之間或是在實驗室自訂之管制標準內。如果添加標準品之回收率不在管制範圍內，樣品必須加以稀釋並重新分析，以確認是否已有效抑低基質效應。亦可直接利用標準添加法進行定量的工作。
11. 序列稀釋：如果樣品中分析物之濃度落在儀器線性範圍內，即可利用稀釋法來確認是否有非質譜性之干擾存在。一般而言，若稀釋 5 倍之分析值與未稀釋樣品分析值間之差異超過 10% 以上時，則可能發生非質譜性干擾效應。同一基質之批次樣品中，至少每 10 個樣品必須做一個稀釋測試，以確認是否有非質譜性干擾。

3.5 細懸浮微粒污染源鑑識方法

在污染源鑑識方法上，本計畫結合大氣和各微粒污染源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 之碳 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 pMC) 和鉛同位素 ($^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 與 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) 特徵資料，定性周界 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染來源，其中 pMC 進一步被應用在區分化石燃料或非化石燃料對 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳微粒的影響。在污染源貢獻的定量推估上，本計畫假設量測到的大氣微粒中的碳或鉛同位素數值由 i 個污染源所貢獻，並利用簡單的線性迴歸模式進行各污染源對大氣微粒貢獻比例的推估 (Flament et al., 2002; Hsu et al., 2006; Monna et al., 1997; Nakano and Tanaka, 1997)：

$$R_{\text{atm}} = \sum_{i=1}^k f_i R_i \quad (3.5)$$

其中 R_{atm} 與 R_i 分別為大氣與污染源微粒之同位素數值 (如 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$)，而 f_i 即為污染源 i 所貢獻之比例。在過去的研究中，Monna 等人以 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值配合

此模式定量推估汽機車、工業排放與土壤對法國及英國南方城鎮大氣鉛微粒的貢獻量 (Monna et al., 1997)，而 Hsu 以 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 搭配此模式解析台北地區大氣鉛微粒在不同季節受本土或長程傳輸的貢獻比例 (Hsu et al., 2006)。

此外，本計畫利用大氣微粒的化學組成，配合美國環保署開發的正矩陣因子法 5.0 (Positive Matrix Factorization, PMF) 推估各測站的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源及其貢獻量。PMF 最早由 Paatero 和 Tapper 以主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 為基礎發展而來的污染源推估模式 (Paatero and Tapper, 1994)，該模式於 2003 年被美國環保署納為推估污染源的應用工具，並於 2005 年發布 PMF 1.0，2014 年發布 PMF 5.0，該模式適用於有大氣微粒濃度及化學組成資料但缺乏完整污染源排放之微粒特徵資料的推估，PMF 的推估原理可以下式表示 (U.S.EPA., 2014)：

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (3.6)$$

式中的 X_{ij} 為第 i 個樣本中第 j 個化學物種的量測濃度， p 為污染源因子數目， g_{ik} 為第 k 個污染源對第 i 個樣本的貢獻， f_{kj} 為第 k 個污染源中第 j 個化學物種濃度， e_{ij} 為殘差。

由於 PMF 內的函數均非負值，最後會以最小化 Q 值為導向：

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (3.7)$$

式中的 n 和 m 分別為樣本數和污染源因子數目， u_{ij} 為第 i 個樣本中 j 化學物種的估計值，其餘參數如方程式 3.6 所述。

受體模式解析的結果和同位素的定性結果進行比較，也利用方程式 3.8 估算

在 PMF 的推估結果中 (Wang et al., 2017)，某特定樣本中某化學物種在某污染源因子中的貢獻比例，並和同位素的量化結果進行比較，藉由交叉比對驗證 PM_{2.5} 污染來源，以提高污染源的解析能力，和提供環保機關制定減量措施或管制方針參考，並達到改善空氣品質之目的。

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ik} f_{kj} / X_{ij} \quad (3.8)$$

式中的 R_{ij} 為某樣本 (如冬季樣本) 中某化學物種 (如鉛) 在某污染源因子 (如交通排放) 中的貢獻比例，其餘參數如方程式 3.6 和 3.7 所述。例如，Wang 等人將 PMF 推估出的污染源分為化石碳 (如交通排放或工業排放) 和非化石碳 (如生質燃燒) 兩類 (Wang et al., 2017)，並以方程式 3.8 估算 PMF 的推估結果中，OC 在化石碳或非化石碳污染源因子中的貢獻比例，並和實際上量測到的 OC 中的化石碳和非化石碳比例 (以 pMC 進行量測和估算) 進行比較，以透過兩種方法所獲得之 OC 在化石碳和非化石碳污染源的貢獻比例，評估兩方法在污染源鑑定的差異性。

第四章 結果與討論

4.1 大氣細懸浮微粒採樣

本計畫分別於 2019 年 3 月和 8 月完成春季和夏季大氣細懸浮微粒 ($PM_{2.5}$) 的採樣作業，採樣點包含橋頭、左營、鳳山、小港、林園、大寮、屏東和潮州等 8 站，每站均採集 8 天，各測站採樣現況如圖 4.1.1 所示，每個測站的儀器擺放距離均在 2 m 以上，避免儀器間的干擾。此外，本計畫也已完成 2 次燃煤火力發電廠、煉油廠和鋼鐵廠燒結爐煙道和高雄港內外作業區排放之 $PM_{2.5}$ 的採樣作業。已完成採樣作業的樣本數統計表如表 4.1.1 所示。4.1 節和 4.2 節分別討論春季與夏季的大氣 $PM_{2.5}$ 傳統化學組成和碳同位素特性，4.3 節討論各污染源的化學組成特徵，4.4 節討論高屏地區的 $PM_{2.5}$ 污染源。

4.1.1 密集觀測期間之氣象資料

圖 4.1.2~圖 4.1.9 為 8 個測站在春季密集採樣期間之溫度、相對濕度、風速和風向資料。所有測站的平均溫度為 $23.0^{\circ}C$ ，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站等 8 站分別為 $21.9^{\circ}C$ ($16.9\sim 24.1^{\circ}C$)、 $22.6^{\circ}C$ ($18.2\sim 25.2^{\circ}C$)、 $23.0^{\circ}C$ ($18.9\sim 25.5^{\circ}C$)、 $23.3^{\circ}C$ ($19.6\sim 26.0^{\circ}C$)、 $23.1^{\circ}C$ ($20.7\sim 26.6^{\circ}C$)、 $22.6^{\circ}C$ ($18.7\sim 25.4^{\circ}C$)、 $23.5^{\circ}C$ ($19.7\sim 26.2^{\circ}C$) 和 $23.1^{\circ}C$ ($19.9\sim 26.9^{\circ}C$)，除了橋頭站、左營站和大寮站的平均溫度低於 $23^{\circ}C$ 外，其他測站的平均溫度都高於 $23^{\circ}C$ 。在相對濕度部分，所有測站的平均相對濕度為 75%，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 77% ($68\sim 88\%$)、79% ($69\sim 88\%$)、73% ($63\sim 84\%$)、75% ($64\sim 89\%$)、73% ($67\sim 80\%$)、81% ($72\sim 90\%$)、75% ($65\sim 86\%$) 和 68% ($52\sim 78\%$)，每個測站的相對濕度均呈現日低夜高的分佈趨勢，而潮州站為唯一平均相對濕度低於 70% 的測站。

在風速和風向部分，所有測站的平均風速為 2.1 m/s，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 2.5 m/s ($1.8\sim 3.1$ m/s)、2.4 m/s ($1.7\sim 2.8$ m/s)、1.7 ($1.3\sim 2.1$ m/s)、2.0 ($1.6\sim 2.6$ m/s)、2.6 ($2.1\sim 3.2$ m/s)、2.1 ($1.6\sim 2.8$ m/s)、1.7 ($1.2\sim 2.0$ m/s) 和 1.9 ($1.3\sim 2.5$ m/s)，各測站的風速差異不大，約在 2 m/s 左右，且每日的平均風速變異性小，反映密集採樣期間，各測站之風速穩定。



(a) 橋頭站



(b) 左營站



(c) 鳳山站



(d) 小港站



(e) 林園站



(f) 大寮站



(g) 屏東站



(h) 潮州站

圖 4.1.1 本計畫大氣 PM_{2.5} 採樣測站照片

表 4.1.1 大氣及污染源 PM_{2.5} 採樣之樣本數統計表

採樣項目	採樣日期	樣本數	說明
大氣 PM_{2.5}			
春季	2019 年 3 月 01 日~08 日	63*	
夏季	2019 年 8 月 05 日~09 日、 12 日和 14~15 日	64	8 月 10~11 日和 13 日因 豪雨取消採樣。
污染源 PM_{2.5}			
春季			
中鋼鋼鐵廠	2019 年 4 月 22 日~24 日	3	
大林煉油廠	2019 年 4 月 1 日~3 日	3	
大林電廠	2019 年 4 月 16 日~18 日	3	
高雄港	2019 年 3 月 24 日~31 日	60**	共有 8 個測站，其中 7 個位於高雄港區內外的 作業區，另 1 個為環保 署小港測站。
夏季			
中鋼鋼鐵廠	2019 年 9 月 16 日~18 日	3	
大林煉油廠	2019 年 9 月 23 日~25 日	3	
大林電廠	2019 年 9 月 9 日~11 日	3	
高雄港	2019 年 8 月 28 日~ 9 月 1 日	45***	共有 8 個測站，其中 7 個位於高雄港區內外的 作業區，另 1 個為環保 署小港測站。
共 計		250	

*測站共有 8 站，每站採樣天數為 8 天，其中鳳山站損失 1 個樣本，共計 63 個樣本。

**高雄港區（含同步採樣的環保署小港測站）共有 8 站，每站採樣天數為 8 天，其中 10 號碼頭只能在港務局上班時間採樣，共缺少 3 個樣本，高雄氣象站損失 1 個樣本，共計 60 個樣本。

***高雄港區（含同步採樣的環保署小港測站）共有 8 站，每站採樣天數為 6 天，其中 10 號碼頭和小港站受限場所規定，只能在上班時間採樣，分別缺少 2 個和 1 個樣本，共計 45 個樣本。

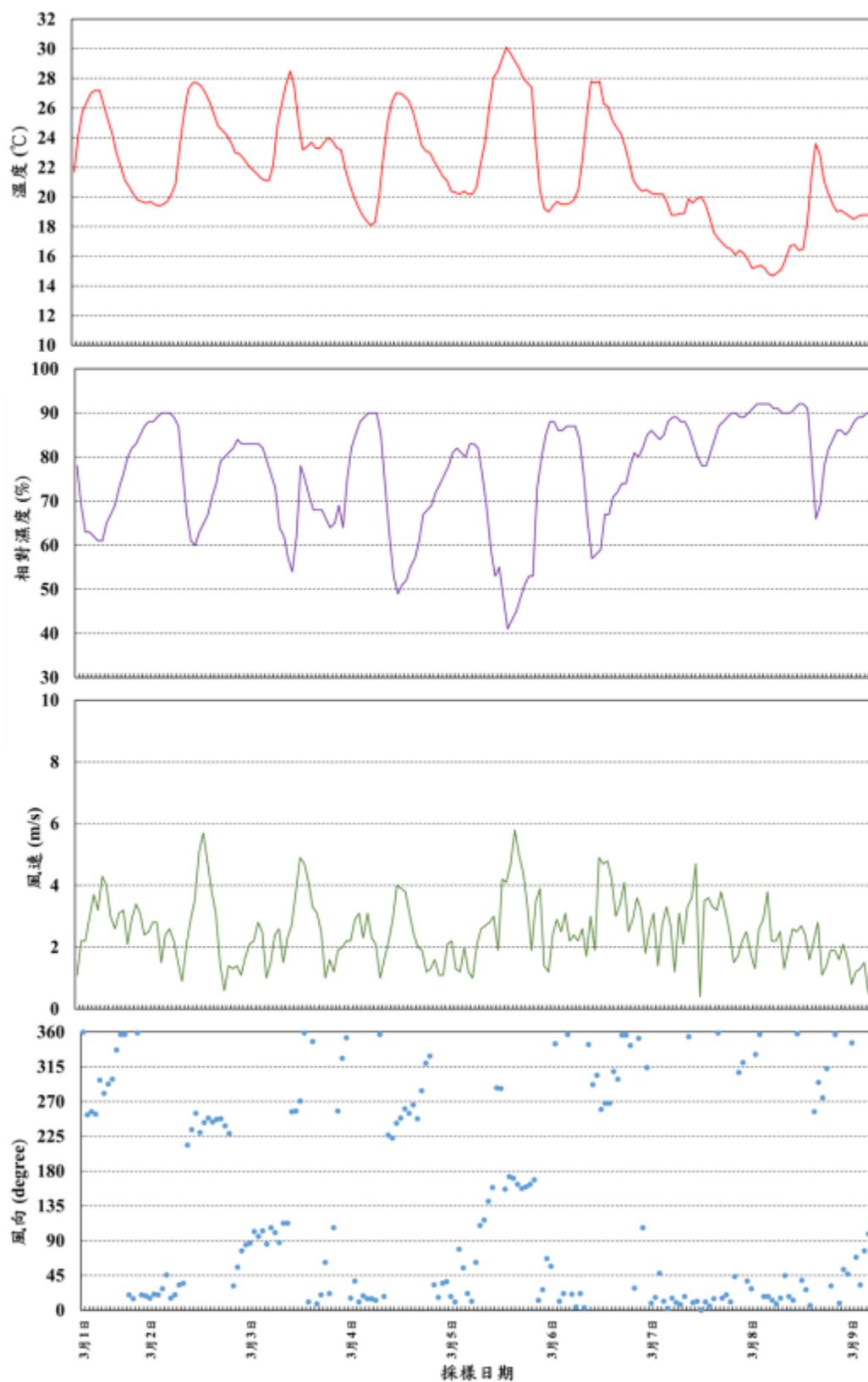


圖 4.1.2 橋頭站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

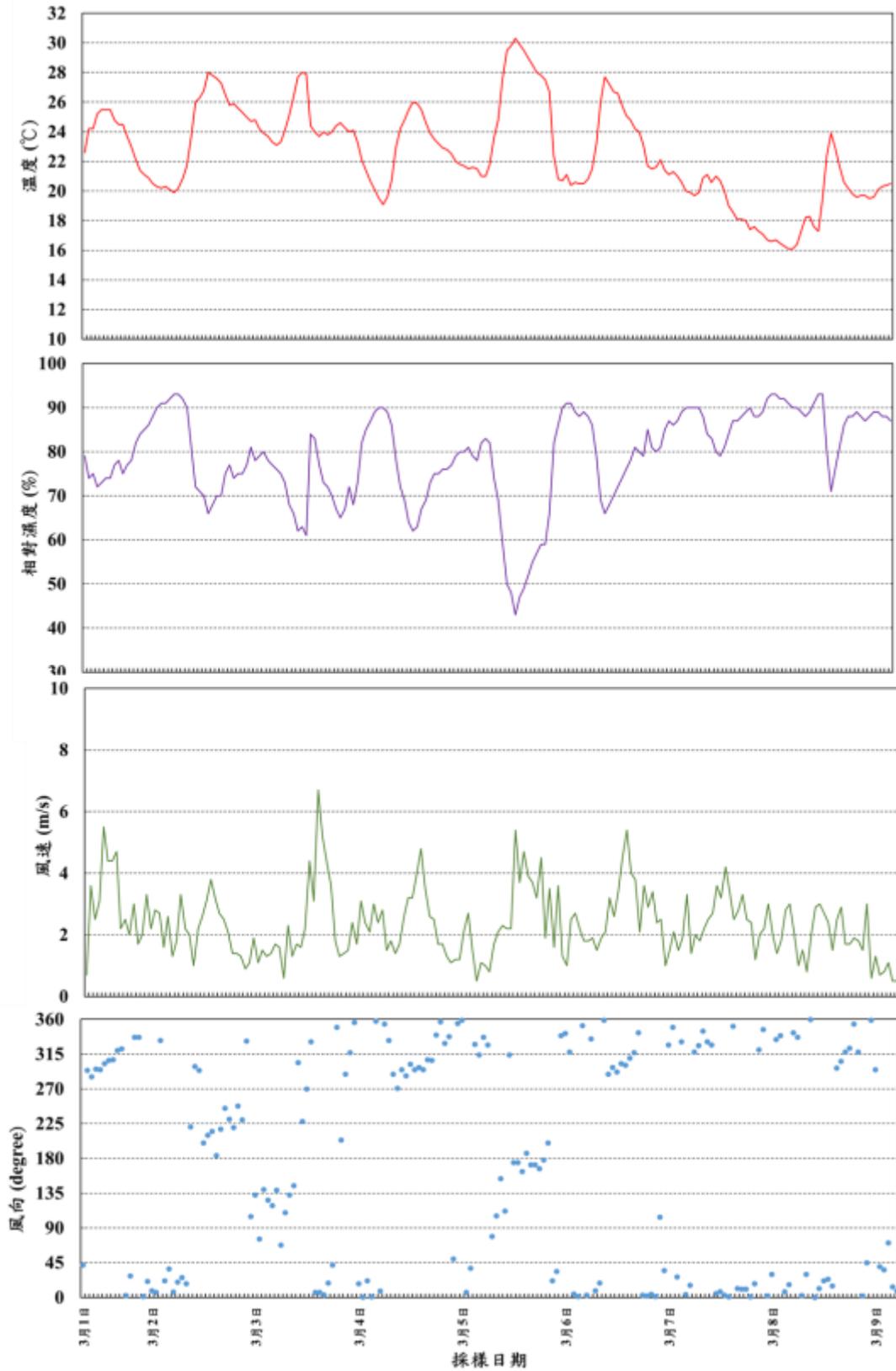


圖 4.1.3 左營站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

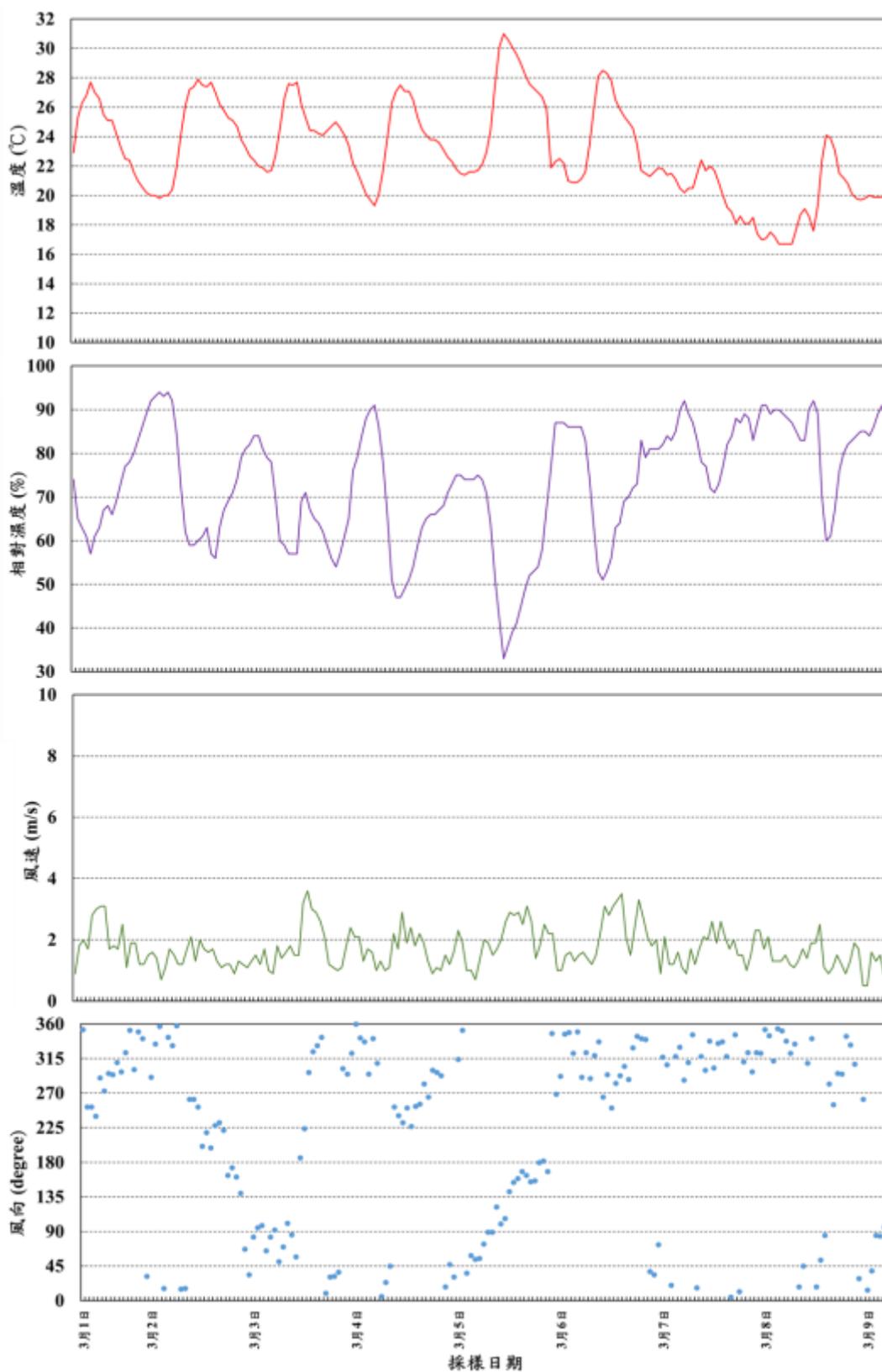


圖 4.1.4 鳳山站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

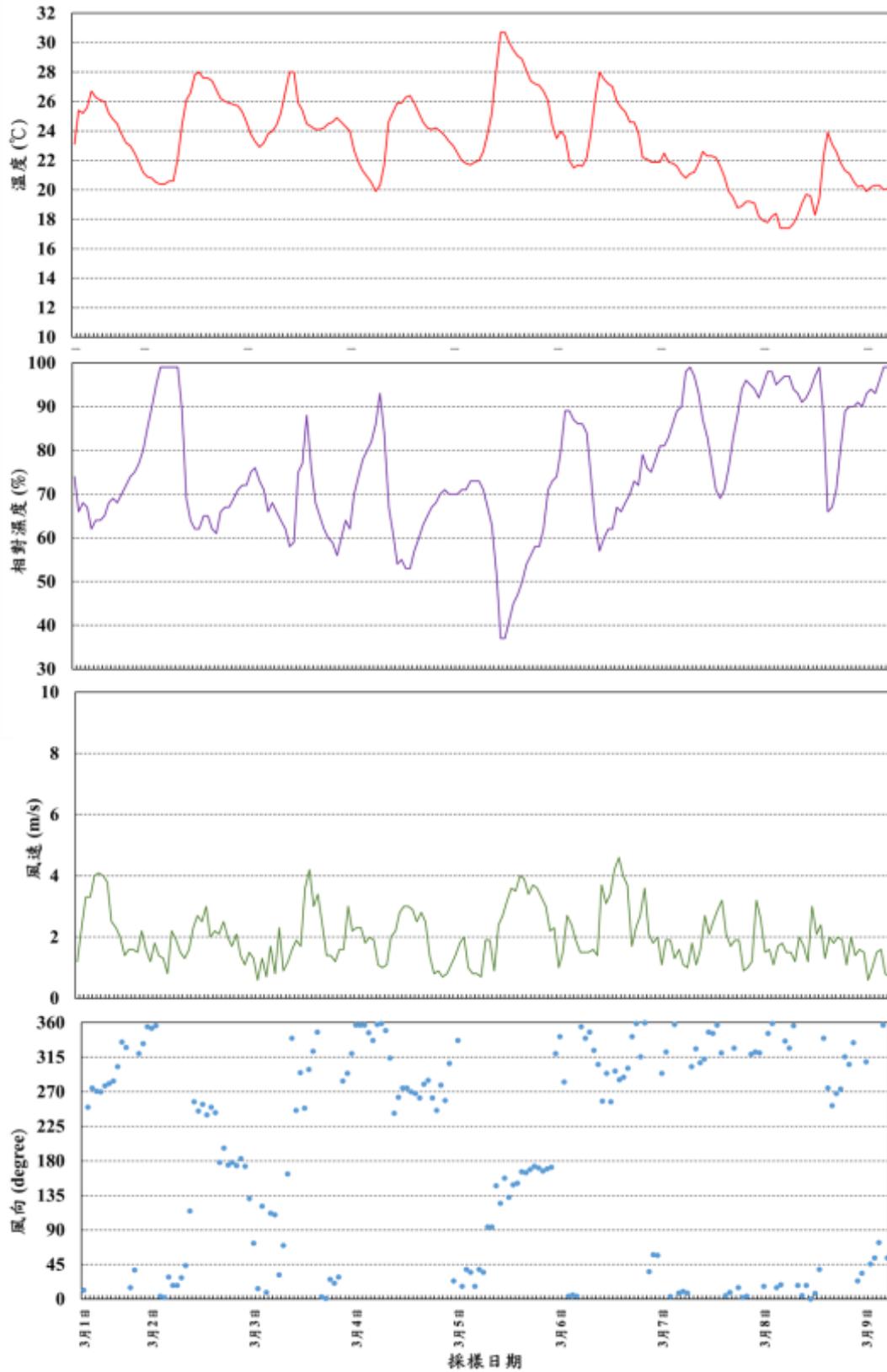


圖 4.1.5 小港站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

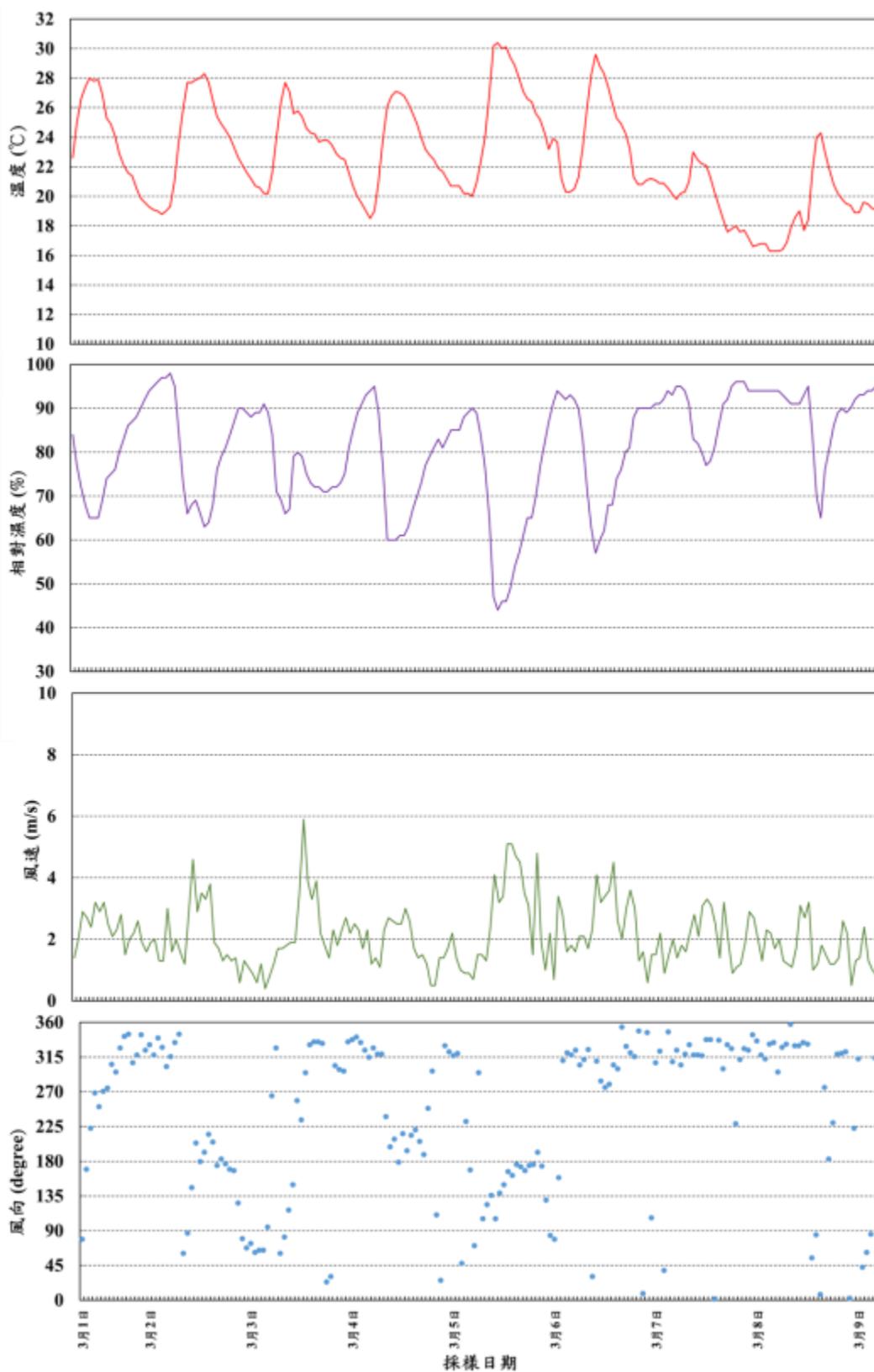


圖 4.1.6 大寮站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

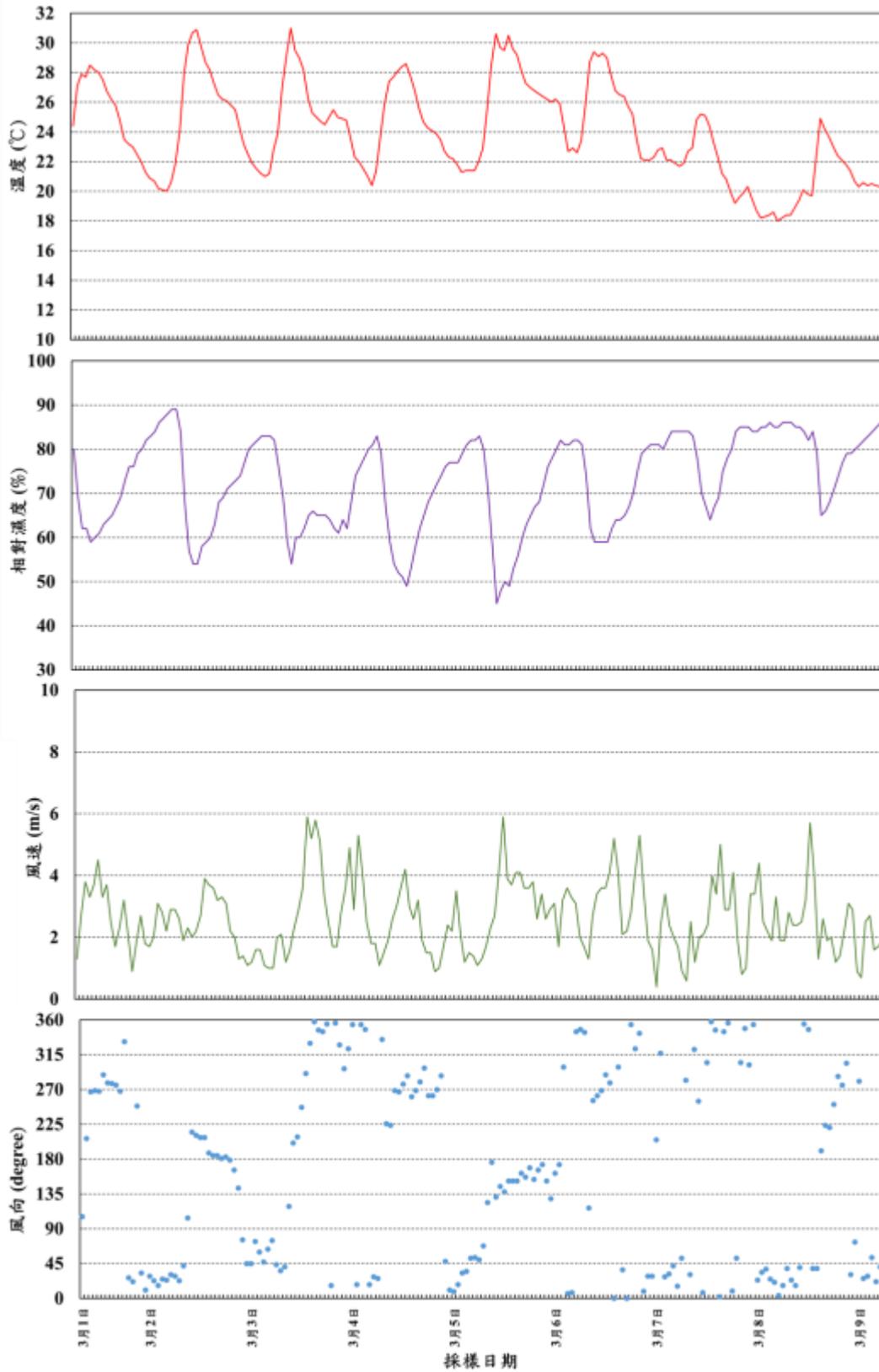


圖 4.1.7 林園站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

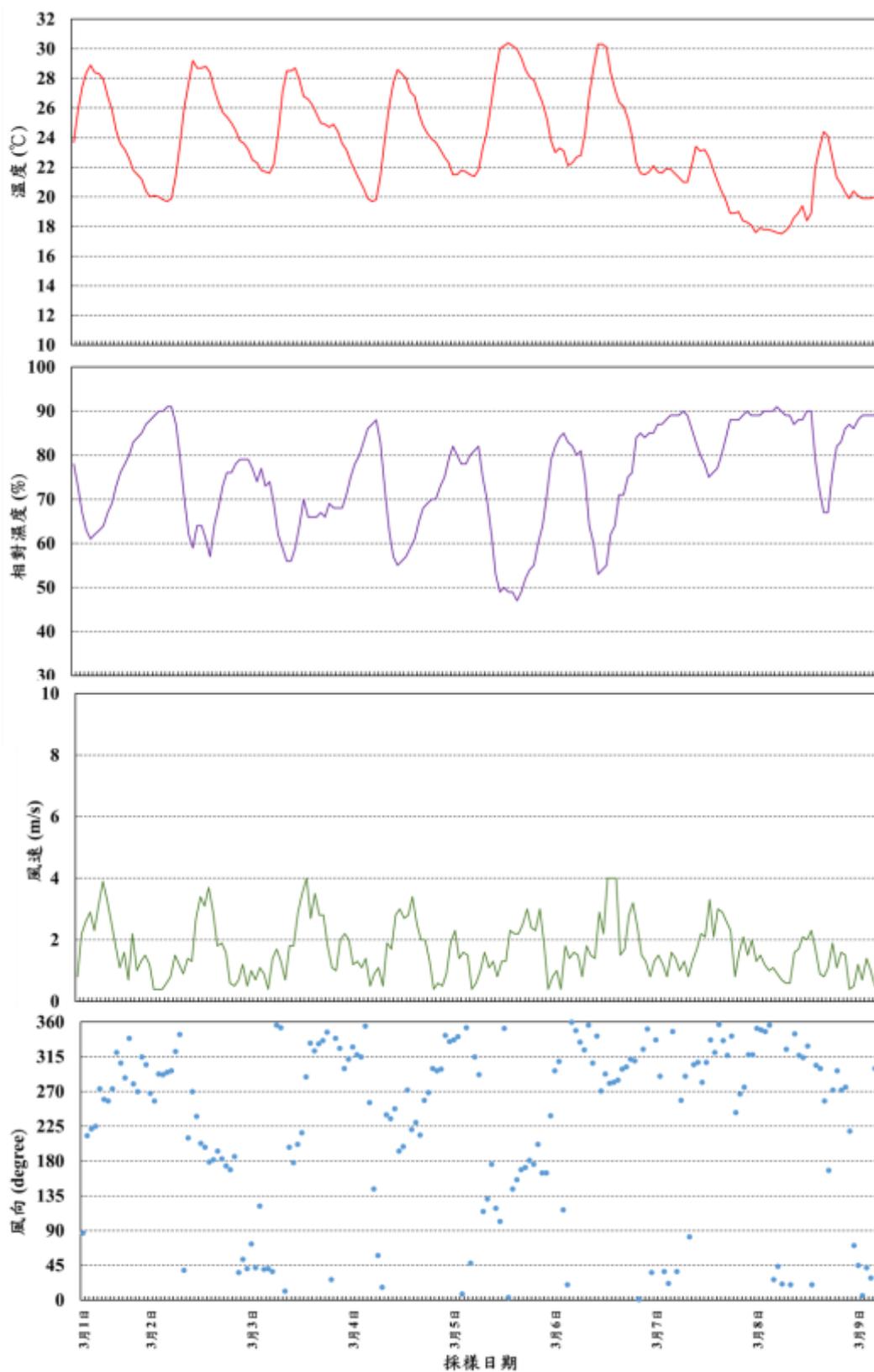


圖 4.1.8 屏東站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

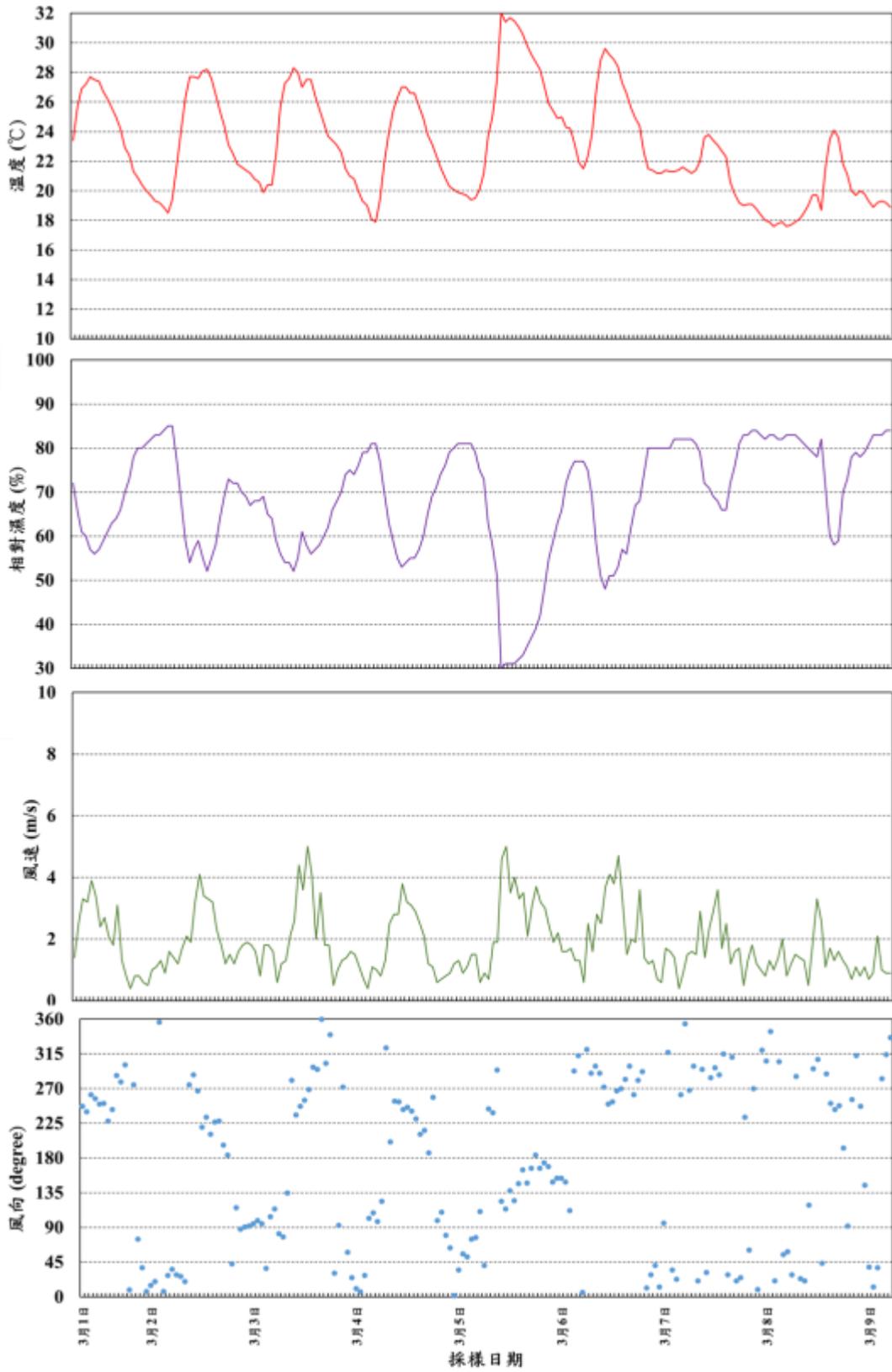


圖 4.1.9 潮州站春季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

在各測站的風向部分，每個測站的優勢風向均不同，橋頭站約有 49% 的風向偏向東北風，另有 23% 偏向西北風；左營站分別有 37% 和 44% 的東北風和西北風；鳳山站則有 49% 的風向以西北風為主，也有 25% 的氣流自東北方；小港站分別有 30% 和 43% 來自東北風向和西北風向；大寮站則以西北風為主 (54%)，東北風、東南風和西南風向各占 1/4 左右；林園站以東北 (40%) 和西北 (27%) 風向為主；屏東站則有 51% 的風向為西北風；潮州站較無明顯的優勢風向，東北、東南、西北和西南風向各貢獻約 25% 左右。總結 8 個測站的風向資料，可發現除了潮州站無優勢風向外，其他 7 個測站的風向都以東北或西北風向為主，約各占 31% 和 40%。在春季密集採樣期間，各測站在 3 月 3 日和 5~8 日陸續有降雨的情形發生，其中橋頭、左營、小港和林園站各有 1 半以上的採樣日有發生降雨，然而密集採樣期間，最大日累計降雨量為 2.0 mm (3 月 7 日的大寮站)，且所有測站的平均日累計降雨量低於 1 mm，顯示降雨的影響有限。總結各測站的氣象資料，可知各測站之溫度、相對濕度和風速變異小，降雨情形較明顯的發生日為 3 月 6 日，而平均日累計降雨量為 0.87 mm。

圖 4.1.10~圖 4.1.17 為 8 個測站在夏季密集採樣期間之溫度、相對濕度、風速和風向資料。所有測站的平均溫度為 29.5°C，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站等 8 站分別為 30.4°C (29.5~31.5°C)、29.8°C (29.1~30.5°C)、29.7°C (28.6~30.6°C)、29.7°C (28.8~30.6°C)、29.6°C (28.5~30.9°C)、28.8°C (28.0~30.0°C)、29.2°C (28.2~30.5°C) 和 29.1°C (27.8~31.7°C)，多數測站的平均溫度都在 29°C 左右。在相對濕度部分，所有測站的平均相對濕度為 81%，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 80% (74~85%)、85% (80~87%)、80% (74~85%)、75% (69~79%)、83% (77~86%)、83% (77~86%)、85% (79~88%) 和 76% (64~80%)，每個測站的相對濕度均呈現日低夜高的分佈趨勢。由於夏季採樣期間受降雨影響，使得相對濕度明顯較春季高 ($p < 0.05$)，而林園站和潮州站為唯二平均相對濕度低於 80% 的測站。

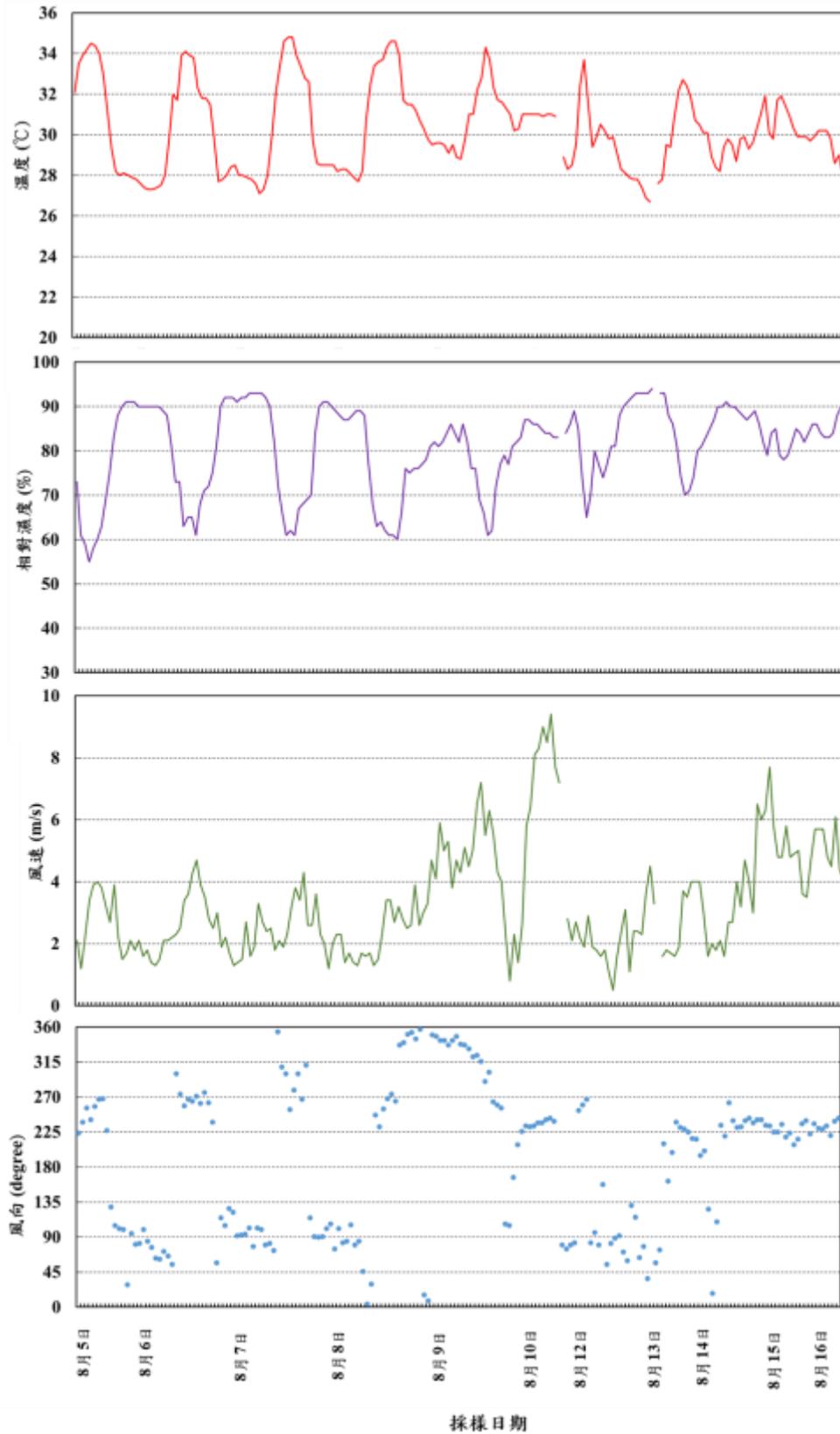


圖 4.1.10 橋頭站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

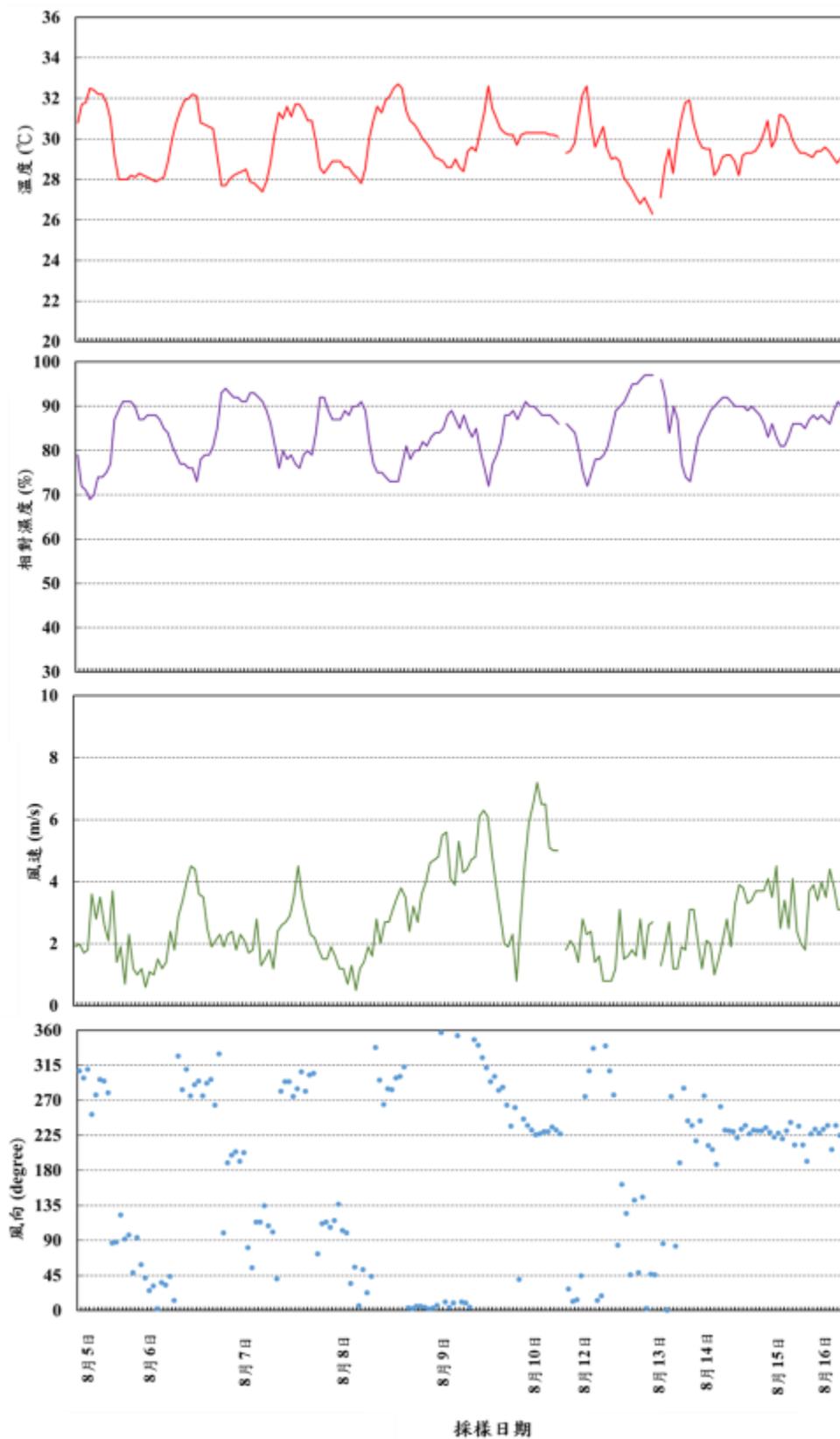


圖 4.1.11 左營站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

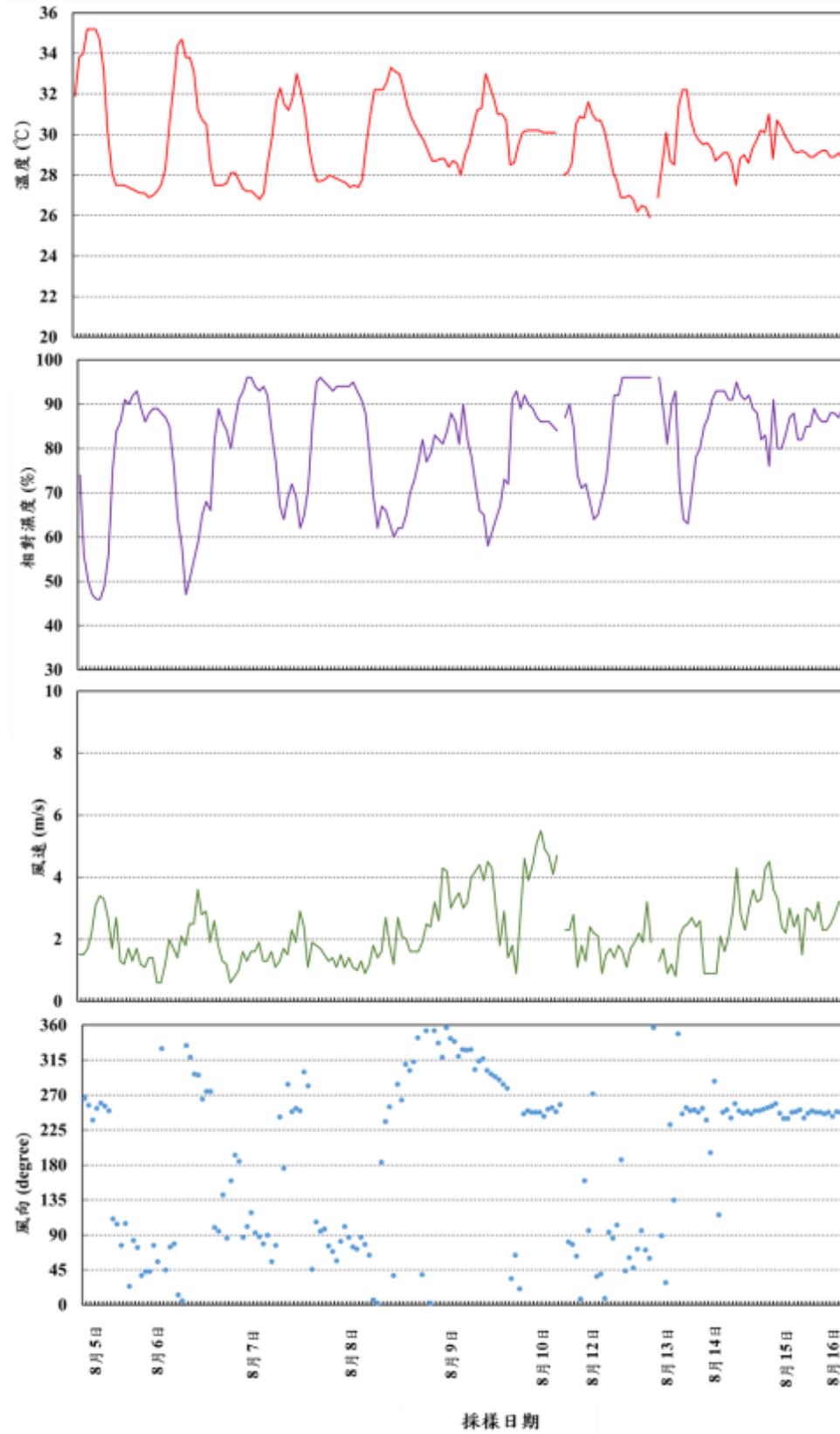


圖 4.1.12 鳳山站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

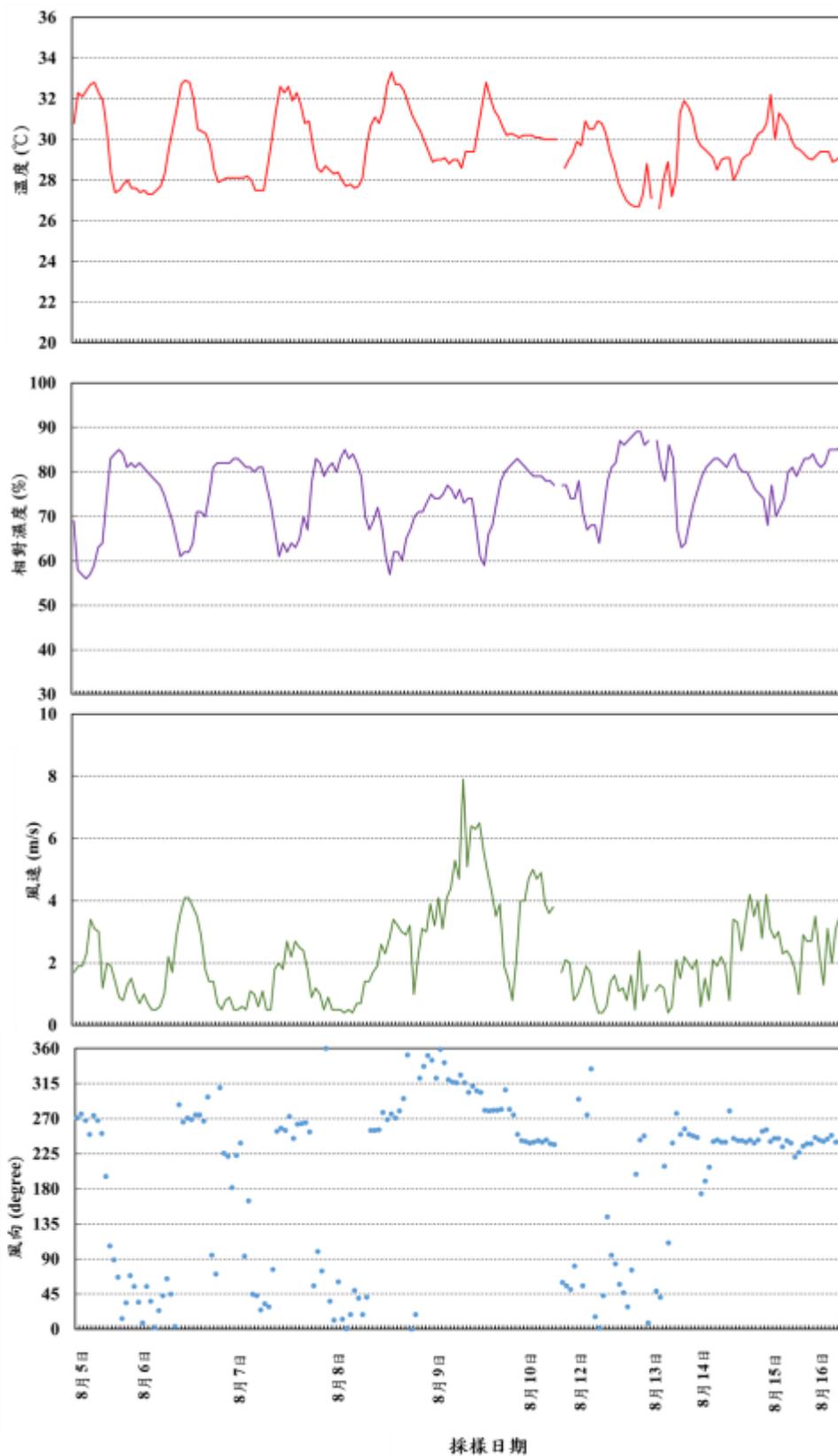


圖 4.1.13 小港站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

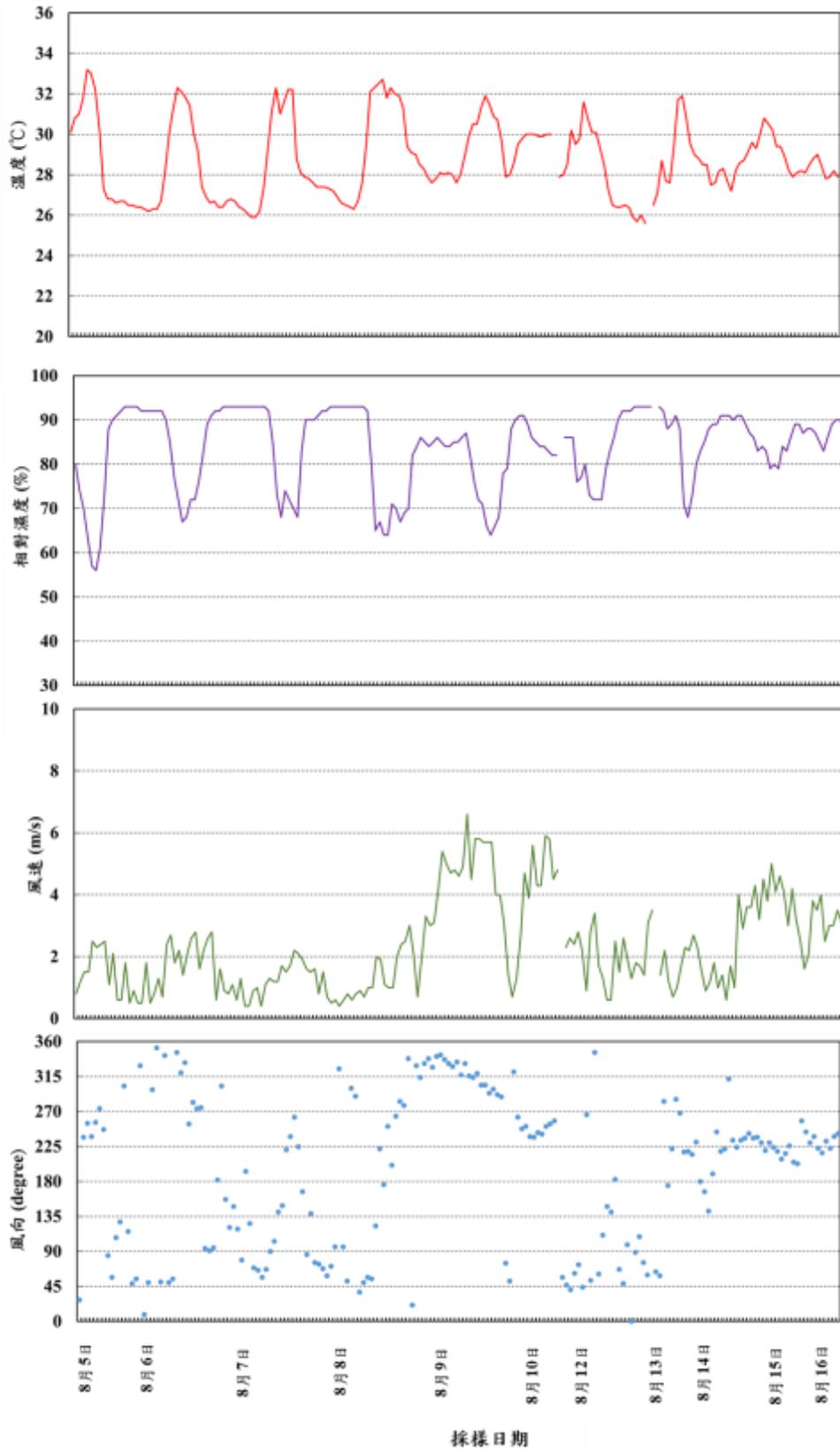


圖 4.1.14 大寮站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

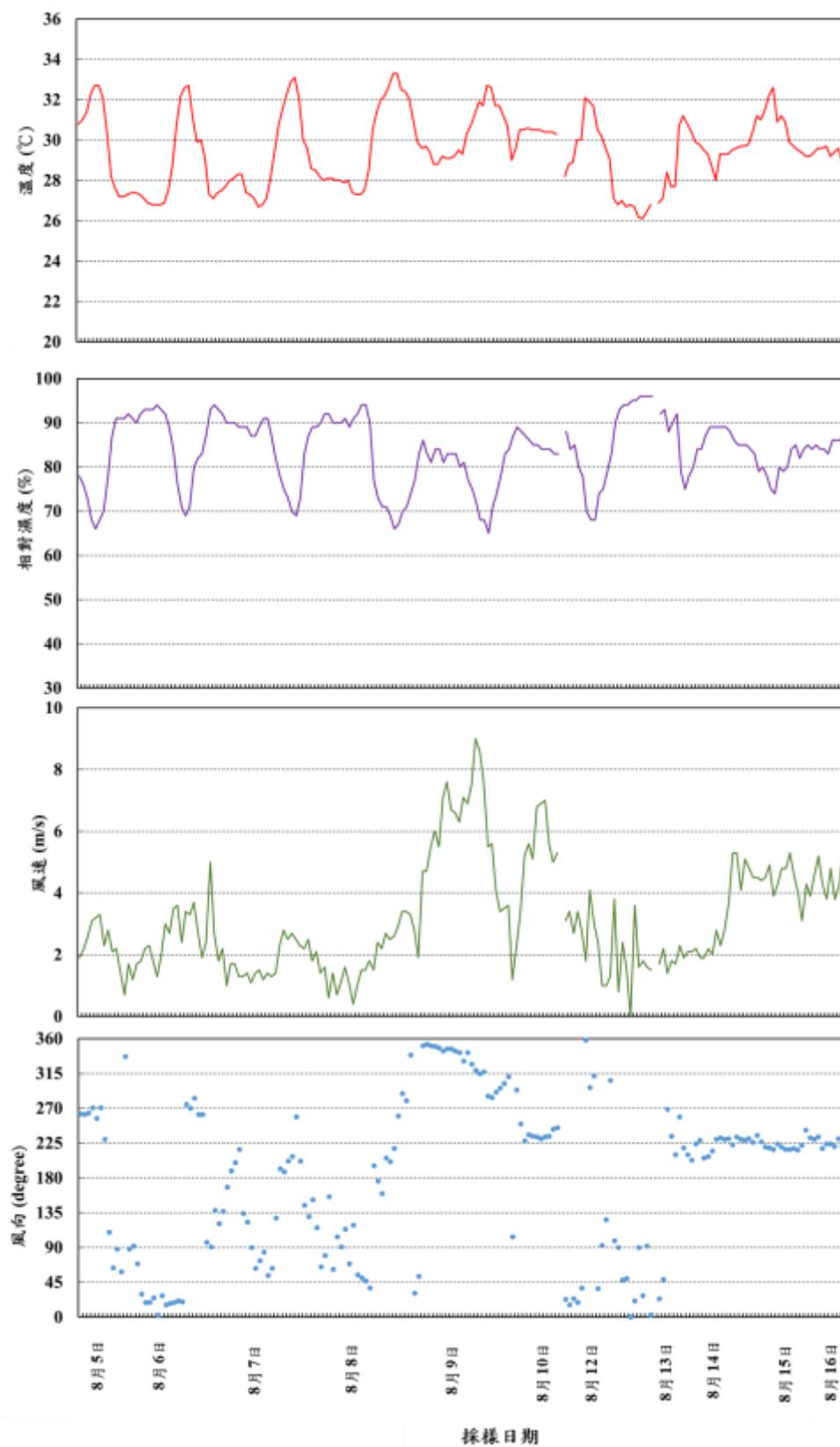


圖 4.1.15 林園站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

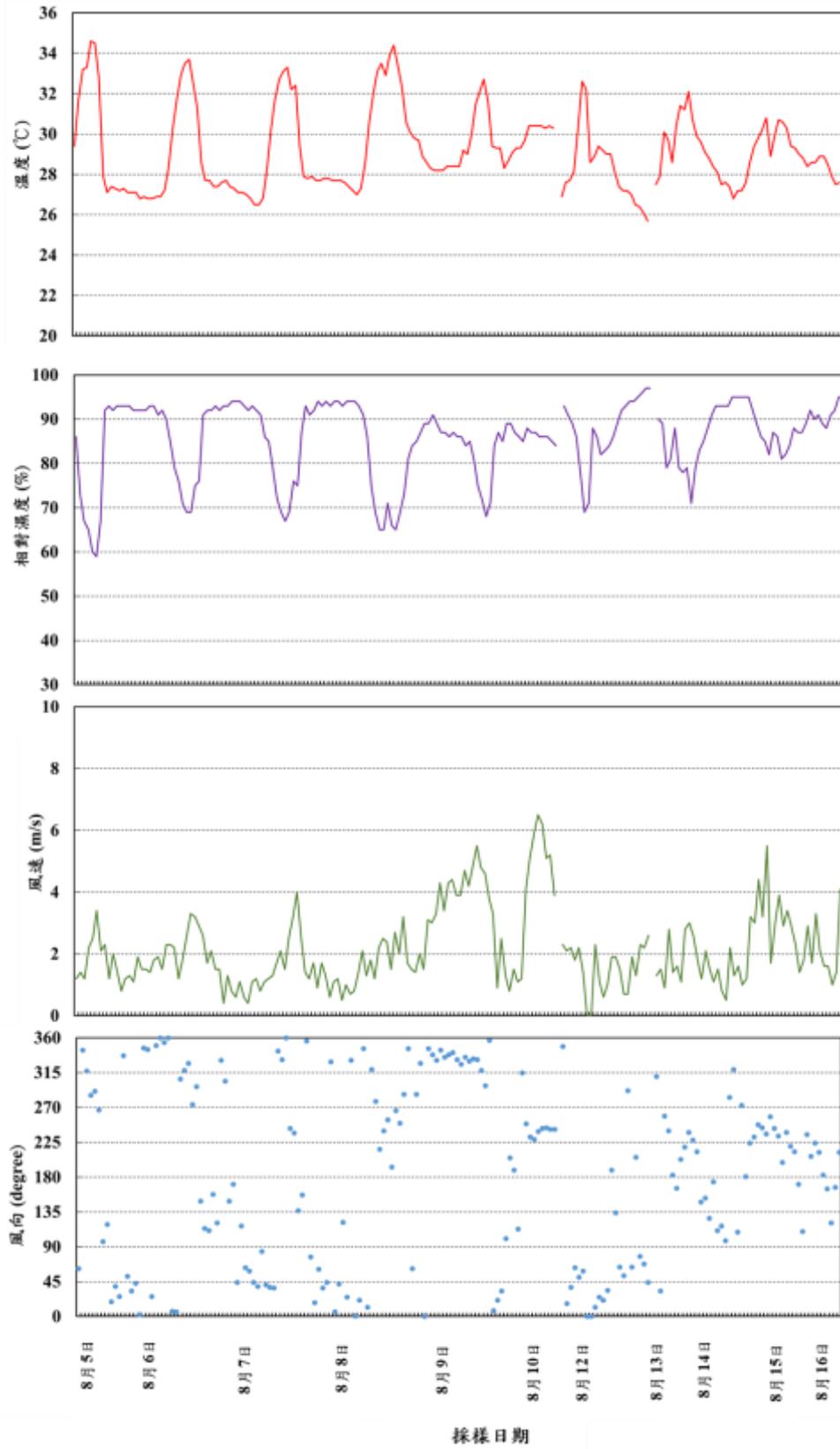


圖 4.1.16 屏東站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

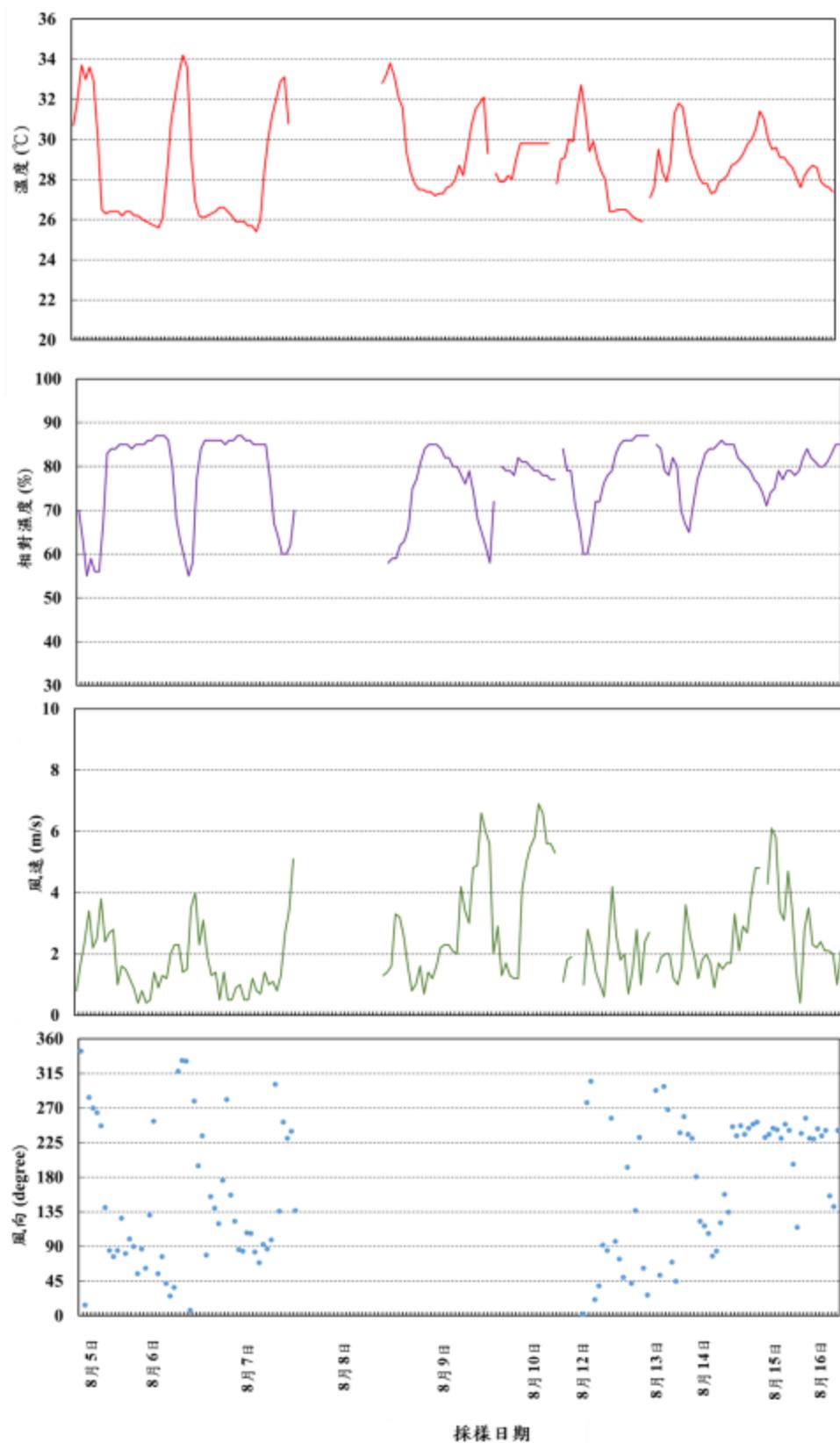


圖 4.1.17 潮州站夏季密集採樣期間之氣象觀測資料時間序列圖

在風速和風向部分，所有測站的平均風速為 2.5 m/s，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 3.3 m/s (2.3~5.6 m/s)、2.8 m/s (1.8~4.6 m/s)、2.2 (1.6~3.7 m/s)、2.2 (1.3~4.2 m/s)、3.1 (1.7~5.4 m/s)、2.3 (1.2~4.3 m/s)、2.1 (1.6~3.7 m/s) 和 2.3 (1.5~4.2 m/s)；除了橋頭站和林園站的平均風速高於 3 m/s 外，其他測站的平均風速都低於 3 m/s，且其他測站的平均風速差異不大，但整體夏季的風速顯著高於春季 ($p < 0.05$)。在各測站的風向部分，每個測站的優勢風向均不同，橋頭站約有 43% 的風向偏向西南風，另有 23% 偏東北風，東南風和西北風約各占 18% 和 17%；左營站的優勢風向分別有東北風、西南風和西北風，各占 28%、33% 和 28%；鳳山站以東北風和西南風為主，分別占了 30% 和 37%；小港站以西南風為優勢風向，該風向占了所有風向的 42%，另有東北風和西北風的 28% 和 25%；大寮站的優勢風向為西南風 (35%)，另外有 24% 的東北風和 25% 的西北風；林園站以西南風為主要風向 (41%)，東北風則占了 25%，東南風和西北風分別占了 15% 和 19%；屏東站有 16% 的東南風，其他以東北風、西南風和西北風為主，分別占了 28%、20% 和 29%，相較於屏東站在春季密集採樣期間，以 51% 的西北風為優勢風向，兩個季節的優勢風向明顯不同；在潮州站部分，由於密集採樣期間，環保署潮州站的風向儀異常，導致 8 月 7~10 日的數值無法使用 (約占 37%)，因此本研究團隊僅分析密集採樣期間，風向儀正常的風向資料。在有完整風向紀錄的資料中 (116 筆)，東北風和西南風分別占了 30% 和 35%，另外有 24% 和 10% 的東南風和西北風。整體而言，夏季和春季密集採樣期間的優勢風向不同，夏季以西南風為主 (36%)，春季則以西北風 (40%) 和東北風為主 (31%)。

在夏季密集採樣期間之降雨部分，夏季有較高的降雨量，平均的日累計降雨量為 20.0 mm，並集中在 8 月 6、12、14 和 15 日，此期間的平均日累計降雨量為 35.2 mm。在各測站部分，每個測站的平均日累計降雨量都在 13 mm 以上，其中又以屏東站和潮州站的平均日累計降雨量較高，分別為 32.5 mm 和 27.2 mm，最大的日累計降雨量發生在 8 月 12 日的屏東站、左營站和 8 月 6 日的林園站，其日累計降雨量都在 100 mm 以上。整體而言，夏季密集採樣期間採集的樣本可能有受降雨影響。

4.1.2 大氣細懸浮微粒濃度分布

本計畫於 2019 年春季密集採樣期間採集的平均 $PM_{2.5}$ 濃度為 $27.6 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 站平均)，環保署測站同時間採集到的平均 $PM_{2.5}$ 濃度為 $29.2 \pm 10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，兩者差異約 $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此外，圖 4.1.18 顯示本計畫和環保署測站分析到的 $PM_{2.5}$ 濃度趨勢相近，其相關性 (r) 為 0.85，並具顯著相關性 ($p < 0.05$)，反映本計畫採集到的 $PM_{2.5}$ 樣本具有代表性。

表 4.1.2 為 2019 年春季 8 個測站之 $PM_{2.5}$ 及其化學組成濃度資料。該表顯示各測站之日平均 $PM_{2.5}$ 濃度均低於環保署日平均標準值 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，而除了大寮站在 3 月 1 日和 3 月 8 日的採樣結果超過日平均標準值外，其他測站的日平均濃度超過 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的樣本都僅發生在 3 月 1 日，顯示本次春季密集採樣期間測得的 $PM_{2.5}$ 濃度多低於標準值。過去 2 年，在高雄進行的大氣 $PM_{2.5}$ 量測結果也顯示 (李崇德, 2017, 2018)，春季的 $PM_{2.5}$ 濃度在 $24\sim 31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的範圍 (以小港站為例)，其量測結果和本研究相近。

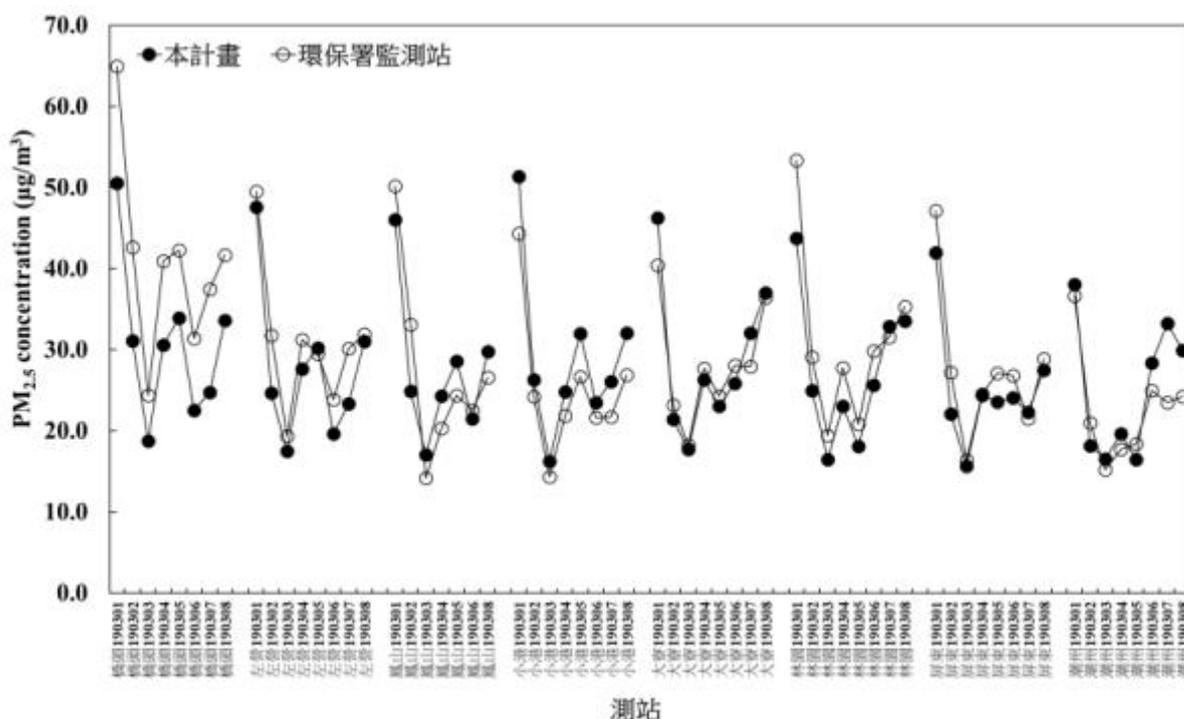


圖 4.1.18 本計畫和環保署監測站同步採集之春季 $PM_{2.5}$ 濃度分布圖
($r = 0.87, p\text{-value} < 0.05$)

本計畫於 2019 年夏季密集採樣期間，採集到的平均 PM_{2.5} 濃度為 12.4 ± 3.8 μg/m³ (8 站平均)，環保署測站同時間採集到的平均 PM_{2.5} 濃度為 11.8 ± 3.8 μg/m³，兩者差異約 0.6 μg/m³。此外，圖 4.1.19 顯示本計畫和環保署測站分析到的 PM_{2.5} 濃度趨勢相近，其相關性 (r) 為 0.82，並具顯著相關性 ($p < 0.05$)，反映本計畫採集到的 PM_{2.5} 樣本具有代表性。表 4.1.3 為 2019 年夏季 8 個測站之 PM_{2.5} 及其化學組成濃度資料。該表顯示各測站之日平均 PM_{2.5} 濃度均低於環保署日平均標準值 (35 μg/m³)，顯示本次夏季密集採樣期間測得的 PM_{2.5} 濃度均低於國家標準值。

表 4.1.2 春季密集採樣期間之各測站大氣 PM_{2.5} 及化學組成濃度統計表
(mean ± SD, μg/m³，每個測站樣本數為 8，鳳山站為 7)

	所有測站	橋頭	左營	鳳山	小港	林園	大寮	屏東	潮州
PM _{2.5}	27.6 ± 8.8	30.7 ± 9.7	27.7 ± 9.3	27.4 ± 9.3	29.0 ± 10.3	27.3 ± 9.0	28.7 ± 9.3	25.2 ± 7.5	25.1 ± 8.4
硫酸鹽	5.2 ± 2.8	5.7 ± 3.2	5.4 ± 3.0	5.9 ± 3.7	5.0 ± 3.4	5.1 ± 2.3	5.1 ± 2.8	4.8 ± 3.0	4.4 ± 1.9
硝酸鹽	7.1 ± 3.8	8.2 ± 3.6	7.8 ± 3.8	7.3 ± 4.2	5.7 ± 3.3	7.0 ± 4.1	7.6 ± 4.5	6.1 ± 3.5	6.9 ± 4.4
銨鹽	7.1 ± 3.9	4.6 ± 1.9	4.4 ± 1.9	4.2 ± 2.3	3.2 ± 2.2	3.9 ± 1.7	4.2 ± 2.1	3.5 ± 1.8	3.5 ± 1.6
氯鹽	0.6 ± 0.5	0.7 ± 0.4	0.6 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.7 ± 0.4	1.1 ± 0.7	0.3 ± 0.3	0.4 ± 0.3
有機碳	6.7 ± 1.7	6.8 ± 1.8	5.5 ± 1.1	8.6 ± 2.6	7.6 ± 1.3	6.2 ± 1.3	6.5 ± 1.4	6.1 ± 1.1	6.4 ± 1.7
元素碳	1.6 ± 0.6	1.7 ± 0.4	1.0 ± 0.8	1.2 ± 0.6	1.7 ± 0.5	1.8 ± 0.7	1.9 ± 0.7	1.7 ± 0.2	1.7 ± 0.7
現代碳 ^{&}	4.1 ± 1.3	4.1 ± 1.5	3.3 ± 0.8	4.0 ± 2.1	3.4 ± 1.8	4.2 ± 0.8	4.3 ± 0.7	4.8 ± 0.8	4.4 ± 0.9
化石碳 [#]	3.7 ± 1.6	4.3 ± 1.2	3.2 ± 0.9	4.3 ± 2.9	4.8 ± 1.7	3.7 ± 1.5	3.7 ± 1.5	3.1 ± 0.9	2.7 ± 1.2
其他組成 [^]	0.6 ± 0.8	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.3	0.8 ± 0.3	1.1 ± 2.3	0.4 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.1

[&]總碳濃度乘上現代碳比例 (%)

[#]總碳濃度乘上(100-現代碳比例 (%))

[^]其他組成為地殼元素和其他元素之濃度總和

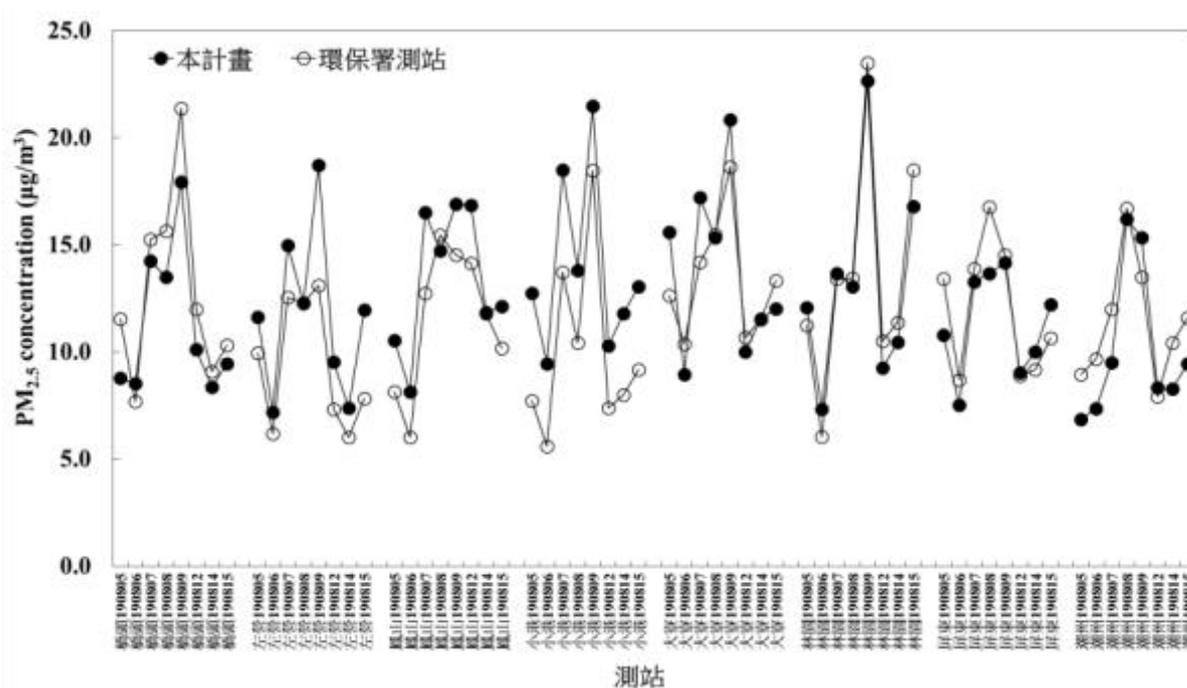


圖 4.1.19 本計畫和環保署監測站同步採集之夏季 PM_{2.5} 濃度分布圖
($r = 0.82, p\text{-value} < 0.05$)

表 4.1.3 夏季密集採樣期間之各測站大氣 PM_{2.5} 及化學組成濃度統計表
(mean ± SD, µg/m³，每個測站樣本數為 8)

	所有測站	橋頭	左營	鳳山	小港	林園	大寮	屏東	潮州
PM _{2.5}	12.4 ± 3.8	11.4 ± 3.5	11.7 ± 3.9	13.5 ± 3.3	13.9 ± 4.1	13.2 ± 4.8	13.9 ± 4.0	11.3 ± 2.4	10.2 ± 3.6
硫酸鹽	3.2 ± 1.3	3.2 ± 1.3	3.5 ± 1.7	3.3 ± 1.2	3.6 ± 1.8	3.1 ± 1.5	3.5 ± 1.3	2.9 ± 1.0	2.8 ± 1.0
硝酸鹽	1.1 ± 0.6	1.0 ± 0.6	1.4 ± 0.6	1.6 ± 0.7	1.0 ± 0.6	1.1 ± 0.6	1.2 ± 0.8	1.1 ± 0.5	0.9 ± 0.5
銨鹽	1.2 ± 0.6	1.2 ± 0.5	1.2 ± 0.7	1.1 ± 0.6	1.2 ± 0.8	1.1 ± 0.6	1.5 ± 0.7	1.1 ± 0.5	1.0 ± 0.4
氯鹽	0.6 ± 0.6	0.5 ± 0.4	0.8 ± 0.8	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.3	0.9 ± 0.9	0.9 ± 0.5	0.3 ± 0.4	0.3 ± 0.4
有機碳	3.0 ± 1.7	2.4 ± 0.7	2.6 ± 1.0	4.3 ± 1.6	3.0 ± 1.4	2.1 ± 0.5	2.5 ± 0.7	3.1 ± 0.4	4.1 ± 4.0
元素碳	0.5 ± 0.9	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.3	1.4 ± 2.1	0.9 ± 0.6	0.2 ± 0.2	0.5 ± 0.3	0.4 ± 0.3	0.1 ± 0.1
現代碳 ^{&}	1.6 ± 0.6	1.4 ± 0.3	1.5 ± 0.3	2.1 ± 0.5	1.7 ± 10.7	1.2 ± 0.5	1.3 ± 1.3	1.9 ± 0.3	1.8 ± 1.1
化石碳 [#]	1.9 ± 1.5	1.8 ± 0.5	2.0 ± 0.7	3.6 ± 3.2	2.3 ± 1.2	1.1 ± 0.5	1.6 ± 0.6	1.6 ± 0.4	1.2 ± 0.7
其他組成 [^]	0.8 ± 0.6	0.8 ± 0.5	0.8 ± 0.4	0.7 ± 0.4	0.9 ± 0.3	1.2 ± 1.0	1.0 ± 0.6	0.5 ± 0.3	0.4 ± 0.3

[&]總碳濃度乘上現代碳比例 (%)

[#]總碳濃度乘上(100-現代碳比例 (%))

[^]其他組成為地殼元素和其他元素之濃度總和

4.1.3 細懸浮微粒化學組成特性

表 4.1.2 為 PM_{2.5} 中的主要化學組成統計表，圖 4.1.20 呈現各測站 PM_{2.5} 中不同化學組成占有的比例，其中除了表 4.1.2 呈現有機碳和元素碳的濃度外，本研究也用現代碳比例乘上總碳濃度來計算現代碳和化石碳濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，並討論大氣 PM_{2.5} 中的化石燃料和非石化燃料的燃燒對 PM_{2.5} 中碳的貢獻。

表 4.1.2 顯示春季密集採樣期間，所有測站的平均 PM_{2.5} 質量濃度為 $27.6 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中硝酸鹽與銨鹽為主要的化學組成，其平均濃度分別為 $7.1 \pm 3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $7.1 \pm 3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其次為有機碳和硫酸鹽的 $6.7 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $5.2 \pm 2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而現代碳與化石碳濃度則分別為 $4.1 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $3.7 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在各測站之 PM_{2.5} 化學組成分佈部分，橋頭站、左營站、林園站、大寮站和潮州站的主要化學組成均為硝酸鹽，其中最高值發生在橋頭站 ($8.2 \pm 3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)；鳳山站與小港站兩站之化學組成都以有機碳的濃度最高；屏東站最高的化學組成濃度則為硝酸鹽 ($6.1 \pm 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和有機碳 ($6.1 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。在金屬元素與地殼元素部分 (其他組成)，除了林園站的濃度為 $1.1 \pm 2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其他測站的濃度都小於 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最低值出現在屏東站 ($0.3 \pm 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

在各化學組成占 PM_{2.5} 質量濃度比例部分，春季 8 站的平均硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、氯鹽、現代碳和化石碳分別占 PM_{2.5} 質量濃度的 19%、26%、14%、2%、15% 和 13%，金屬元素與地殼元素則占 2%，有 9% 的組成無法被分析出，分析結果顯示硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和碳仍是重要的組成，而化石碳與現代碳對此 8 站的貢獻相當。圖 4.1.20 進一步呈現各測站之各化學組成占 PM_{2.5} 質量濃度的比例，該圖顯示硝酸鹽最高比例發生在左營站和潮州站的 28%，最低則為小港站的 20%；硫酸鹽比例則以小港站與潮州站的 17% 最低，鳳山站的 21% 最高；銨鹽比例則以小港站的 11% 最低，最高為左營站的 16%；化石碳濃度比例最高出現在鳳山站 (18%)，最低為潮州站與左營站 (11%)；現代碳濃度比例最高與最低分別出現在屏東站 (19%) 和左營站 (12%)。

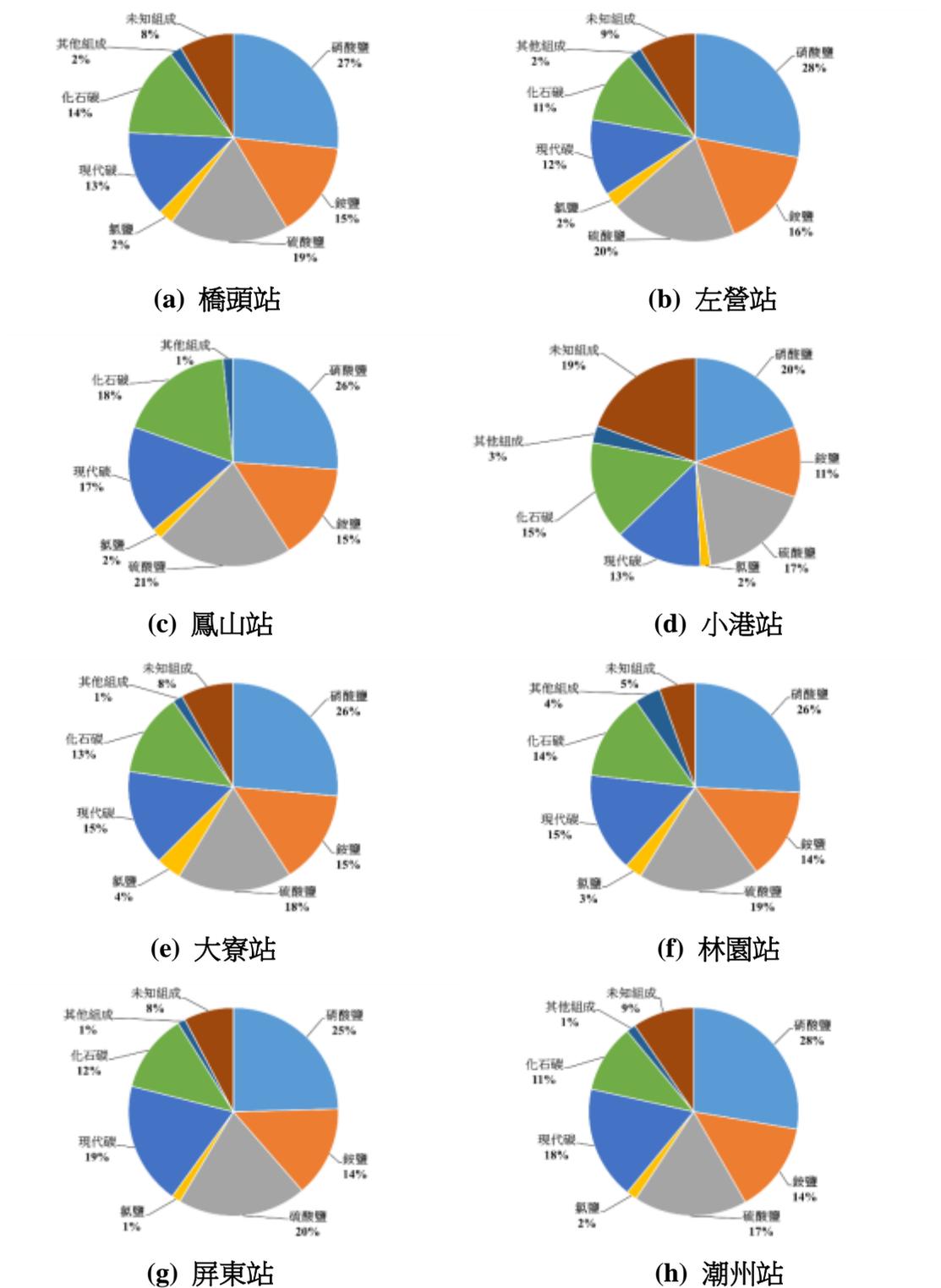


圖 4.1.20 春季密集採樣期間之 PM_{2.5} 化學組成比例
 (a) 橋頭站、(b) 左營站、(c) 鳳山站、(d) 小港站、(e) 大寮站、(f) 林園站、(g) 屏東站和 (h) 潮州站

在金屬元素與地殼元素部分（其他組成），林園站的金屬元素與地殼元素佔 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 4%，其他測站在 1%~3% 不等，反映相較於其他測站，金屬元素和地殼元素為林園站的重要組成之一。在地殼元素與金屬元素的濃度分佈部分，所有測站都以地殼元素的 Ca、Na 和 Fe 占優勢，分別占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.5%、0.4% 和 0.3%，微量元素則為 Zn 和 Cr，分別占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.09% 和 0.04%。另外，在金屬元素占有比例較高的林園站，Fe、Na、K 和 Ca 是主要的組成，加總約占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 2.9%，微量元素則為 Zn 和 Cr，加總約占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.3%。在未知組成部分，除了小港站的未知組成達 19% 外，其他測站都在 5~10% 左右（鳳山站幾乎可被測出化學組成），顯示仍需要透過較精密的儀器來進行化學組成分析，以提供較完整的大氣 $PM_{2.5}$ 化學特性，並用於污染源鑑定或健康危害的探討。

表 4.1.3 顯示夏季密集採樣期間，所有測站的平均 $PM_{2.5}$ 質量濃度為 $12.4 \pm 3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中硫酸鹽、有機碳、銨鹽和硝酸鹽為主要的化學組成，其平均濃度分別為 $3.2 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $3.0 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.2 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.1 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而現代碳與化石碳濃度則分別為 $1.6 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.9 \pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在各測站之 $PM_{2.5}$ 化學組成分佈部分，橋頭站、左營站、小港站、林園站和大寮站的主要化學組成均為硫酸鹽，其中最高值發生在小港站 ($3.6 \pm 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)；鳳山站、屏東站和潮州站則以有機碳的濃度最高。在金屬元素與地殼元素部分（其他組成），較高的兩個測站分別為林園站和大寮站，濃度分別為 $1.2 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.0 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最低值出現在潮州站 ($0.4 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

在夏季各化學組成占 $PM_{2.5}$ 質量濃度比例部分，8 站的平均硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、氯鹽、現代碳和化石碳分別占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 26%、9%、10%、5%、13% 和 16%，金屬元素與地殼元素則占 6%，有 15% 的組成無法被分析出，分析結果顯示硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和碳仍是重要的組成，而化石碳與現代碳對此 8 站的貢獻相近。**圖 4.1.21** 進一步呈現各測站之各化學組成占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的比例，該圖顯示硫酸鹽最高比例發生在左營站的 30%，最低則為林園站和鳳山站的 24%；硝酸鹽比例則以小港站的 7% 最低，左營站的 12% 最高；銨鹽比例則以橋頭站和大寮站的 11% 最高，最低為鳳山站和林園站的 8%；化石碳濃度比例最高與最低分別出現在鳳山站 (30%) 和林園站 (9%)；現代碳濃度比例最高與最低分別出現在潮州

站 (19%) 和林園站與大寮站 (9%)。在金屬元素與地殼元素部分 (其他組成)，各測站的金屬元素與地殼元素之質量濃度占 $PM_{2.5}$ 質量濃度 5%~9% 不等。在地殼元素與金屬元素的濃度分佈部分，所有測站都以地殼元素的 Na、Ca、Fe 和 K 占優勢，分別占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 3.6%、0.6%、0.6% 和 0.6%，微量元素則為 Zn、V、Pb 和 Cr 較占優勢，分別占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.13%、0.04%、0.03% 和 0.03%。另外，在金屬元素占有比例較高的林園站，Fe、Na、K 和 Ca 是主要的組成，加總約占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 6.0%，微量元素則為 Zn、V、Pb 和 Cr，加總約占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.8%。在未知組成部分，最高為林園站的 26%，最低則為鳳山占的 4%，其他測站在 10% 左右，顯示仍需要透過較精密的儀器來進行化學組成分析，以提供較完整的大氣 $PM_{2.5}$ 化學特性，並用於污染源鑑定或健康危害的探討。

綜合春季和夏季密集採樣期間之 $PM_{2.5}$ 化學組成資料可知，春季的 $PM_{2.5}$ 污染問題仍較夏季嚴重，而硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽成分是主要的組成，其中春季的硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽三種鹽類濃度之加總約占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 59%，夏季占了 45%。總碳也是 $PM_{2.5}$ 中的主要化學組成，春季密集採樣期間，總碳約占 $PM_{2.5}$ 的 28%，夏季則占了 29%，其結果也和過去在中南部 (台中-彰化-南投-雲林-嘉義) 的研究成果一致 (周崇光, 2017, 2018) (2017 年計畫：硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和總碳分別佔 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 17%、15%、10% 和 20%；2018 年計畫：硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和總碳分別佔 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 30%、11%、12% 和 31%)。

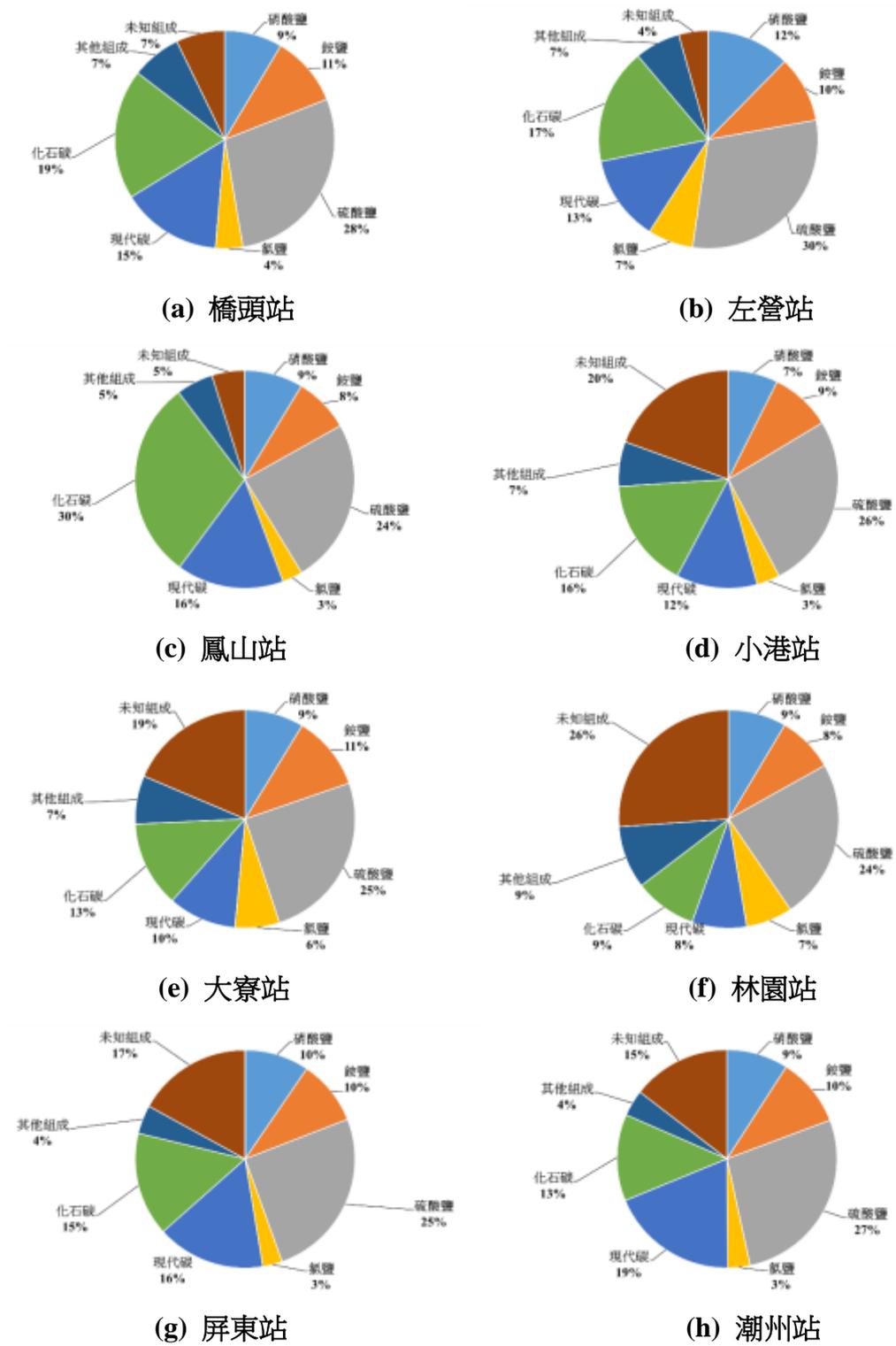


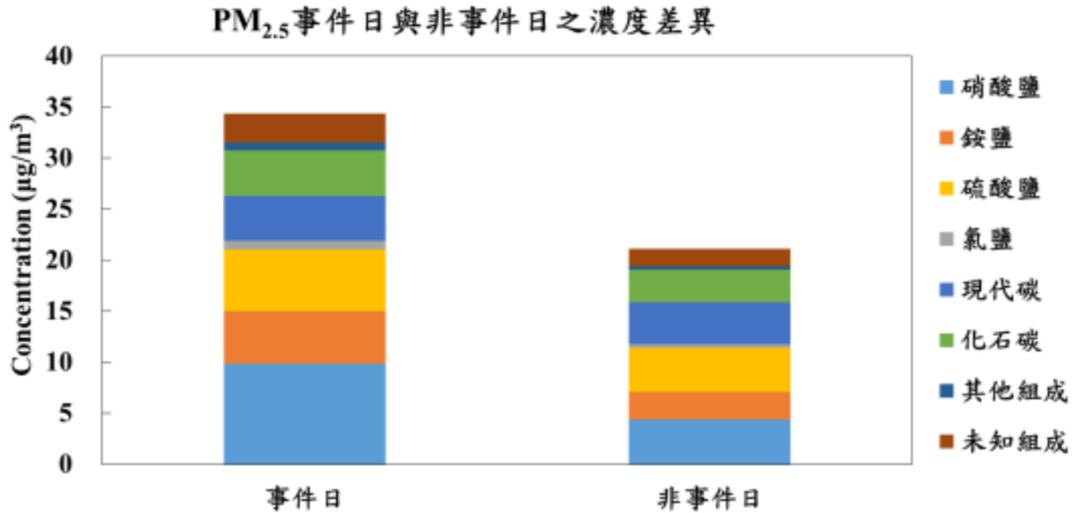
圖 4.1.21 夏季密集採樣期間之 PM_{2.5} 化學組成比例
 (a) 橋頭站、(b) 左營站、(c) 鳳山站、(d) 小港站、(e) 大寮站、(f) 林園站、(g) 屏東站和 (h) 潮州站

4.1.4 以高低 PM_{2.5} 事件日探討微粒潛在污染成因

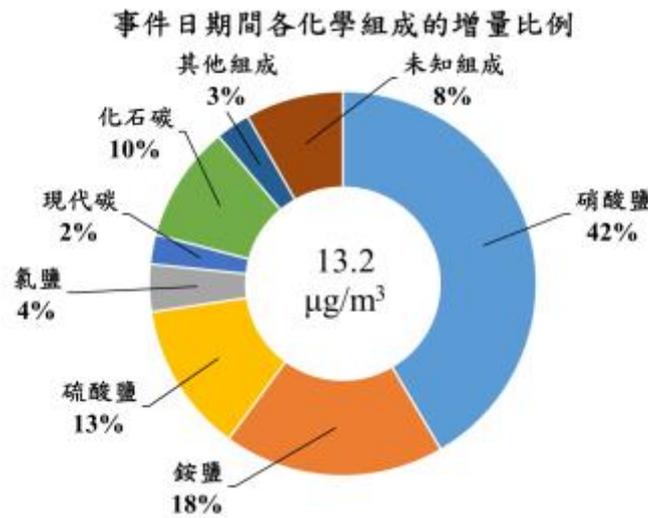
本章節將各測站的 PM_{2.5} 濃度以 35 µg/m³ 進行劃分，並比較非 PM_{2.5} 事件日和 PM_{2.5} 事件日之化學組成，以了解造成高屏地區春季高 PM_{2.5} 事件的潛在因素。然而，在春季與夏季密集的採樣期間，僅有春季的 9 個樣本之 PM_{2.5} 濃度超過 35 µg/m³，夏季均無 PM_{2.5} 樣本的日平均濃度超過 35 µg/m³，因此，本計畫分別以春季和夏季的日平均 PM_{2.5} 濃度之中位數劃分為高 PM_{2.5} 與低 PM_{2.5} 事件日。

圖 4.1.22 為春季密集採樣期間（高 PM_{2.5} 事件日之平均濃度： 34.4 ± 7.6 µg/m³；低 PM_{2.5} 事件日之平均濃度 21.2 ± 3.3 µg/m³），PM_{2.5} 事件日和非事件日之 PM_{2.5} 濃度差異和相較於非 PM_{2.5} 事件日，事件日期間所增加的每一個化學組成濃度占 PM_{2.5} 增加之質量濃度的比例（環圈圖）。該圖顯示事件日與非事件日濃度差值為 13.2 µg/m³，在化學組成部分，硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽為事件日期間增加幅度最為明顯的化學組成，相加硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽上增的比例後可達 74%，其中又以硝酸鹽占有的 42% 最高，且事件日期間的硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽之濃度加總和 PM_{2.5} 質量濃度相關性為 0.93 (r) ($p < 0.05$)，反映 PM_{2.5} 事件期間，光化反應生成的二次氣膠是影響 PM_{2.5} 濃度的重要因素。此外，PM_{2.5} 事件日期間的化石碳與氯鹽濃度都較非事件日期間高 10% 和 4%，說明化石燃料源和海鹽的貢獻可能也為增加高屏地區 PM_{2.5} 濃度的重要因素之一。

圖 4.1.23 為夏季密集採樣期間（高 PM_{2.5} 事件日之平均濃度： 15.4 ± 2.8 µg/m³；低 PM_{2.5} 事件日之平均濃度 9.4 ± 1.5 µg/m³），PM_{2.5} 事件日和非事件日之 PM_{2.5} 濃度差異和相較於非 PM_{2.5} 事件日，事件日期間所增加的每一個化學組成濃度占 PM_{2.5} 增加之質量濃度的比例（環圈圖）。該圖顯示事件日與非事件日濃度差值為 6.0 µg/m³，在化學組成部分，硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽為 PM_{2.5} 事件日期間增加幅度最為明顯的化學組成，相加硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽上增的比例後為 49%，其中硫酸鹽占有的 29% 最高，但事件日期間的硫酸鹽、硝酸鹽和銨鹽之濃度加總和 PM_{2.5} 質量濃度相關性為 0.24 (r) ($p=0.20$)，分析結果和本研究團隊於中部地區分析的夏季高污染事件日之鹽類濃度和 PM_{2.5} 濃度的低相關性一致 (周崇光, 2017, 2018)，反映光化反應生成的二次氣膠或許是影響高屏地區夏季 PM_{2.5} 濃度的重要因素，但可能有其他污染源貢獻著當地的 PM_{2.5}，特別是高 PM_{2.5} 事件日的未知組成達 32%。



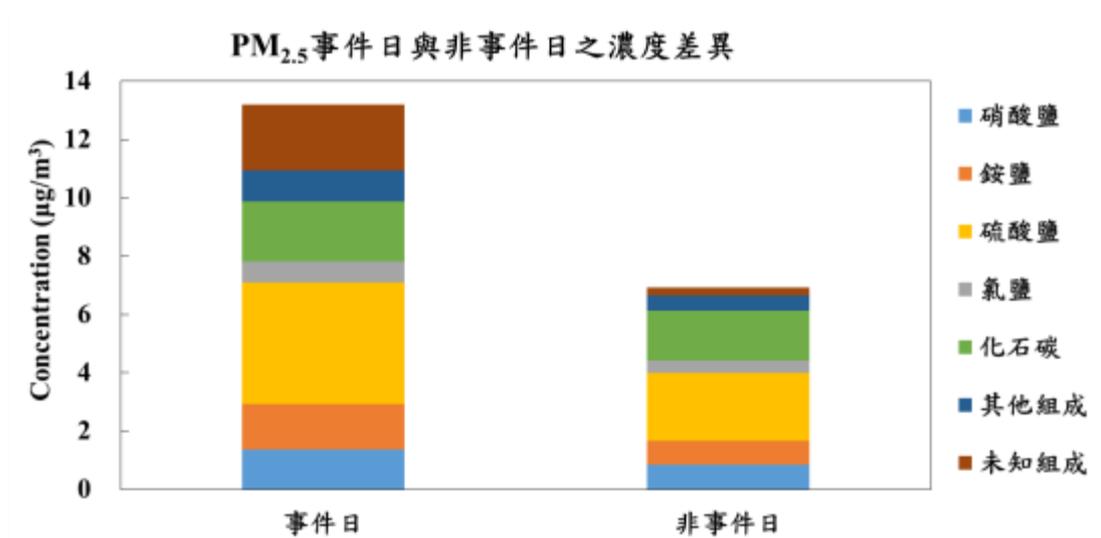
(a) 事件日與非事件日之各化學組成分佈



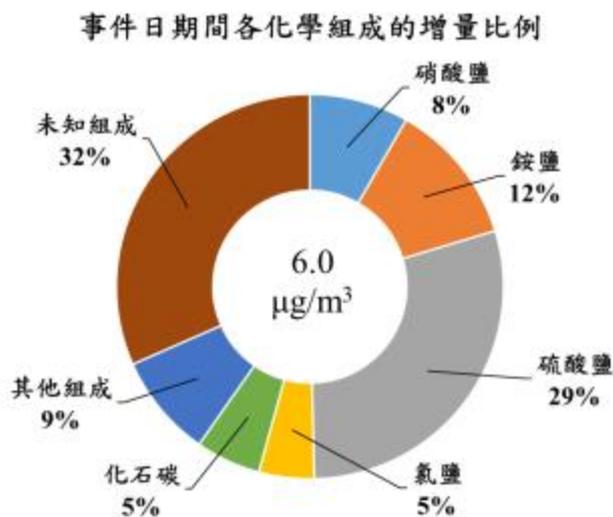
(b) 事件日期間各化學物種之增量比例

圖 4.1.22 春季密集採樣期間 PM_{2.5} 事件日和非事件日之各化學組成濃度分佈和各化學物種增量比例

(a) 各化學組成分佈，(b) 各化學組成增量比例 (右側環圈圖中心的數值為事件日與非事件日之 PM_{2.5} 濃度差異)



(a) 事件日與非事件日之各化學組成分佈



(b) 事件日期間各化學物種之增量比例

圖 4.1.23 夏季密集採樣期間 PM_{2.5} 事件日和非事件日之各化學組成濃度分佈和各化學物種增量比例

(a) 各化學組成分佈，(b) 各化學組成增量比例 (右側環圈圖中心的數值為事件日與非事件日之 PM_{2.5} 濃度差異)

4.2 大氣細懸浮微粒碳及鉛同位素特性

本節呈現春季與夏季密集採樣期間之大氣 PM_{2.5} 的碳與鉛同位素特性。

4.2.1 碳同位素

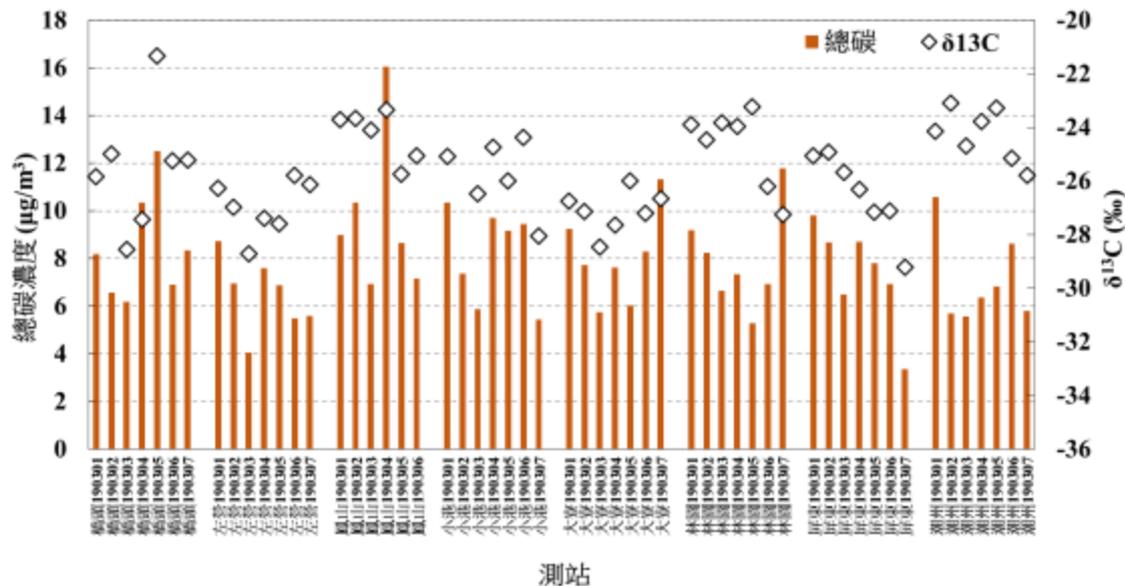
表 4.2.1 顯示春季密集採樣期間所有測站的平均總碳濃度為 $8.1 \pm 2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高值出現在鳳山站 ($9.8 \pm 3.1 \text{ ng}/\text{m}^3$)，最低值出現在左營站 ($6.5 \pm 1.5 \text{ ng}/\text{m}^3$)，各測站的總碳濃度無顯著差異 ($p = 0.12$)，說明高屏地區的碳污染程度相似。所有測站在春季的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值及其範圍為 -25.7‰ (-29.2 至 -21.3 ‰)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 -25.5‰ (-28.6 至 -21.3‰)、-27.0‰ (-28.7 至 -25.8‰)、-24.5‰ (-26.0 至 -23.3‰)、-25.8‰ (-28.0 至 -24.4‰)、-24.7‰ (-27.2 至 -23.2‰)、-27.1‰ (-28.5 至 -26.0‰)、-26.5‰ (-29.2 至 -24.9‰) 和 -24.3‰ (-25.8 至 -23.1‰)，各測站的 $\delta^{13}\text{C}$ 有顯著差異 ($p < 0.05$)，說明不同測站的碳污染源不同。在現代碳比例部分，所有測站的平均現代碳比例及其範圍為 54% (38-74%)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 49% (38~60%)、51% (43~60%)、50% (40~57%)、48% (39~56%)、54% (46~65%)、55% (44~68%)、61% (53~73%) 和 63% (55~74%)，而各測站的現代碳比例有顯著差異 ($p < 0.05$)，其中又以屏東站和潮州站的現代碳比例最高，最高可達 74%。

圖 4.2.1 為 8 個測站的總碳濃度、 $\delta^{13}\text{C}$ 和現代碳比例之時間關係圖，該圖顯示除了鳳山站、林園站和潮州站的 $\delta^{13}\text{C}$ 變異小於 3‰ 外，其他 5 個測站的 $\delta^{13}\text{C}$ 變異均大於 3‰，反映就單一測站而言，不同採樣天數的碳污染源不同，此現象應和鳳山站、林園站和潮州站的風速較穩定有關。在現代碳比例部分，圖 4.2.1 顯示各測站的現代碳比例變異大，其中大寮站的最大現代碳與最小現代碳比例差值達 24%，最小的左營站、鳳山站和小港站也可達 17%，其變異遠較本研究團隊過去在台中-彰化-南投-雲林-嘉義的採樣結果大 (周崇光, 2017, 2018)；此外，由圖 4.2.1 也可發現，屏東站與潮州站所有樣本的現代碳比例都在 50% 以上，在其他測站部分，約有 56% 的樣本之現代碳比例低於 50%，說明相較於高雄地區，屏東地區的現代碳貢獻源較占優勢。

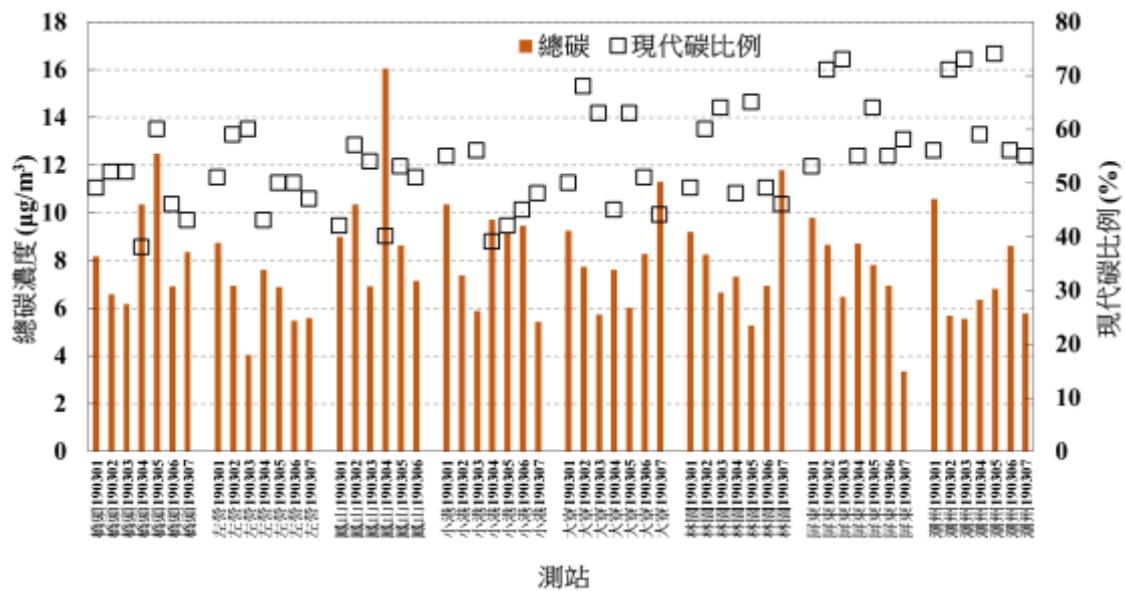
夏季密集採樣期間，所有測站的平均總碳濃度為 $3.5 \pm 2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (表 4.2.1)，最高值出現在鳳山站 ($5.7 \pm 3.4 \text{ ng}/\text{m}^3$)，最低值出現在林園站 ($2.3 \pm 0.6 \text{ ng}/\text{m}^3$)，各測站的總碳濃度有顯著差異 ($p < 0.05$)，顯示高屏地區在夏季的碳污染程度會因測站的不同而有所差異。在 $\delta^{13}\text{C}$ 部分，平均值及其範圍為 -28.1‰ (-37.8 至 -24.1‰)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 -28.5‰ (-37.8 至 -26.3‰)、 -26.6‰ (-28.5 至 -24.8‰)、 -27.7‰ (-29.0 至 -26.2‰)、 -26.8‰ (-29.6 至 -24.7‰)、 -28.8‰ (-34.6 至 -25.2‰)、 -27.6‰ (-30.1 至 -24.1‰)、 -30.9‰ (-33.7 至 -28.1‰) 和 -27.8‰ (-30.9 至 -26.3‰)，各測站的 $\delta^{13}\text{C}$ 有顯著差異 ($p < 0.05$)，說明夏季期間之不同測站的碳污染源不同。在現代碳比例部分，所有測站的平均現代碳比例及其範圍為 49% (16-80%)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站分別為 44% (32~62%)、43% (37~52%)、44% (16~69%)、43% (34~50%)、52% (40~80%)、47% (37~62%)、54% (42~74%) 和 60% (50~73%)，而各測站的現代碳比例有顯著差異 ($p < 0.05$)，反映夏季各測站的現代碳貢獻有差異，但夏季的屏東站和潮州站之現代碳比例仍偏高，暗示屏東和潮州有明顯的現代碳貢獻源。

表 4.2.1 密集採樣期間之大氣 PM_{2.5} 中的總碳與總鉛濃度及其同位素數值統計表(mean ± SD, µg/m³, 春季期間的每個測站樣本數為 8, 鳳山站為 7 個, 夏季每個測站均為 8 個)

	所有測站	橋頭	左營	鳳山	小港
春季					
總碳 (µg/m ³)	8.1 ± 2.1	8.5 ± 2.1	6.5 ± 1.5	9.8 ± 3.1	8.6 ± 2.1
δ ¹³ C (‰)	-25.7 ± 1.7	-25.5 ± 2.3	-27.0 ± 1.0	-24.5 ± 1.1	-25.8 ± 1.3
現代碳 (%)	54 ± 9	49 ± 7	51 ± 6.1	50 ± 7	48 ± 7
總鉛 (ng/m ³)	4.2 ± 8.1	4.8 ± 2.7	3.0 ± 1.0	2.5 ± 2.1	5.3 ± 3.3
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	1.1554 ± 0.0081	1.1494 ± 0.0134	1.1577 ± 0.0036	1.1656 ± 0.0039	1.1527 ± 0.0041
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb	2.4263 ± 0.0103	2.4175 ± 0.0125	2.4362 ± 0.0058	2.4307 ± 0.0118	2.4201 ± 0.0048
夏季					
總碳 (µg/m ³)	3.5 ± 2.1	2.7 ± 0.9	2.9 ± 1.1	5.7 ± 3.4	3.9 ± 1.6
δ ¹³ C (‰)	-28.1 ± 2.6	-28.5 ± 3.9	-26.6 ± 1.2	-27.7 ± 1.0	-26.8 ± 1.8
現代碳 (%)	49 ± 12	44 ± 11.1	43 ± 6	44 ± 15	43 ± 8
總鉛 (ng/m ³)	3.7 ± 3.8	2.6 ± 2.4	2.2 ± 1.7	4.5 ± 1.1	5.3 ± 4.4
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	1.1519 ± 0.0200	1.1643 ± 0.0076	1.1531 ± 0.0064	1.1145 ± 0.0065	1.1556 ± 0.0068
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb	2.4234 ± 0.0183	2.4377 ± 0.0106	2.4378 ± 0.0093	2.3903 ± 0.0080	2.4332 ± 0.0107
	所有測站	林園	大寮	屏東	潮州
春季					
總碳 (µg/m ³)	8.1 ± 2.1	8.0 ± 2.0	8.4 ± 2.1	7.8 ± 1.2	7.3 ± 1.9
δ ¹³ C (‰)	-25.7 ± 1.7	-24.7 ± 1.5	-27.1 ± 0.8	-26.5 ± 1.5	-24.3 ± 1.0
現代碳 (%)	54 ± 9	54 ± 8	55 ± 10	61 ± 8	63 ± 9
總鉛 (ng/m ³)	4.2 ± 8.1	10.0 ± 22.2	3.6 ± 2.6	2.3 ± 1.9	2.1 ± 0.9
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	1.1554 ± 0.0081	1.1545 ± 0.0073	1.1570 ± 0.0066	1.1573 ± 0.0050	1.1489 ± 0.0040
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb	2.4263 ± 0.0103	2.4306 ± 0.0106	2.4252 ± 0.0096	2.4299 ± 0.0044	2.4206 ± 0.0064
夏季					
總碳 (µg/m ³)	3.5 ± 2.1	2.3 ± 0.6	3.0 ± 0.8	3.5 ± 0.3	4.2 ± 3.9
δ ¹³ C (‰)	-28.1 ± 2.6	-28.8 ± 3.6	-27.6 ± 2.1	-30.9 ± 2.3	-27.8 ± 1.4
現代碳 (%)	49 ± 12	52 ± 14	47 ± 7	54 ± 10	60 ± 8.4
總鉛 (ng/m ³)	3.7 ± 3.8	3.6 ± 3.9	7.7 ± 6.9	1.7 ± 0.6	1.5 ± 1.3
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	1.1519 ± 0.0200	1.1468 ± 0.0212	1.1549 ± 0.0092	1.1551 ± 0.0113	1.1823 ± 0.0098
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb	2.4234 ± 0.0183	2.4137 ± 0.0191	2.4357 ± 0.0099	2.4222 ± 0.0074	2.4284 ± 0.0055



(a) 總碳和 $\delta^{13}\text{C}$

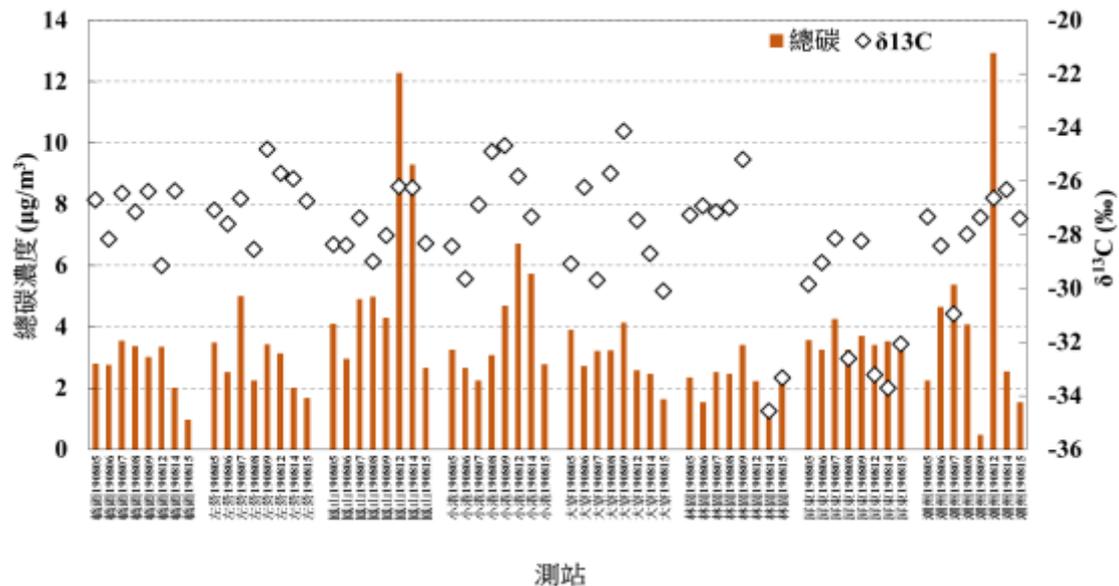


(b) 總碳和現代碳比例

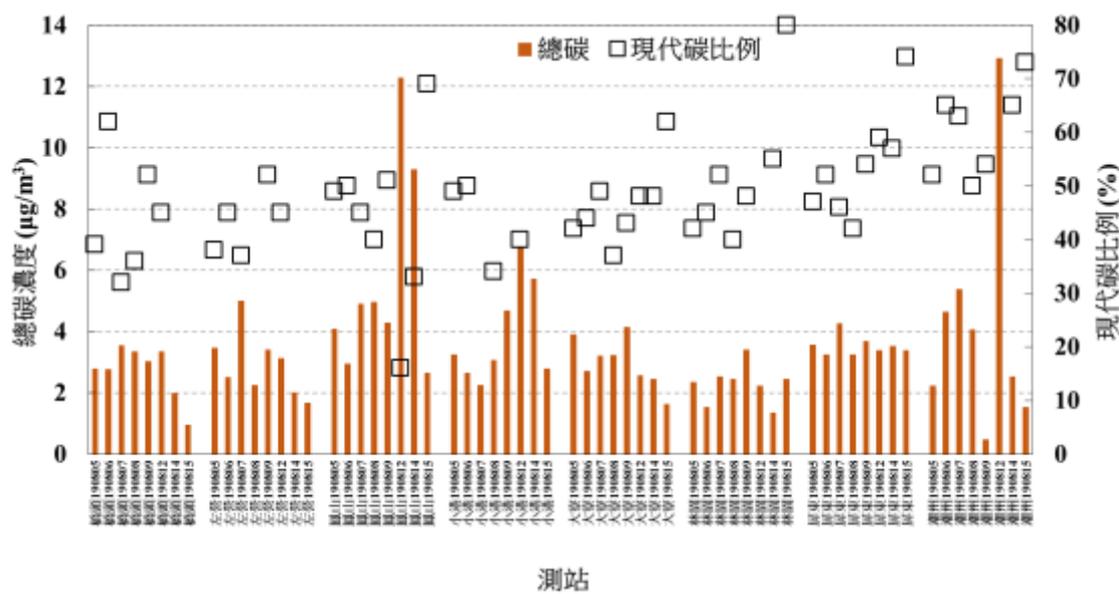
圖 4.2.1 春季密集採樣期間各測站 PM_{2.5} 中的總碳和碳同位素時間關係圖
(a) 總碳濃度和 $\delta^{13}\text{C}$ 和(b) 總碳濃度和現代碳比例

圖 4.2.2 呈現夏季 8 個測站的總碳濃度、 $\delta^{13}\text{C}$ 和現代碳比例之時間關係圖，該圖顯示各測站的 $\delta^{13}\text{C}$ 變異大，顯示就同一測站而言，不同採樣日的碳污染源可能不一樣。在現代碳比例部分，圖 4.2.2 顯示各測站的現代碳比例變異大，其中林園站的最大現代碳與最小現代碳比例差值可達 53%，最小的小港站也可達 16%，其變異遠較本研究團隊過去在台中-彰化-南投-雲林-嘉義的採樣結果大 (周崇光, 2017, 2018)，推測和夏季密集採樣期間受降雨影響有關，但詳細原因仍須進一步探討。此外，由圖 4.2.2 也可發現，就屏東站和潮州站而言，除了屏東站在 8 月 5~8 日的現代碳比例低於 50%，其他樣本的現代碳比例都超過 50%，最高可達 74%，採樣期間的屏東站與潮州站所有樣本的現代碳比例都在 50% 以上，高雄的 6 個測站僅有 29% 樣本之現代碳比例高於 50%，說明相較於高雄地區，屏東地區的現代碳貢獻源較占優勢。

總結春季與夏季的碳同位素，可發現夏季 $\delta^{13}\text{C}$ 數值明顯較春季低，反映兩季節的碳污染源不同。在現代碳部分，春季測得的現代碳比例都較夏季高，說明春季的現代碳貢獻量較夏季高，但屏東站和潮州站的現代碳比例都遠較其他測站高，說明找出屏東與潮州的現代碳貢獻源應有助於改善當地碳污染問題。此外，我們也發現台中-彰化-南投-雲林-嘉義和高屏地區的現代碳比例變動有明顯差異，台中-彰化-南投-雲林-嘉義的變動明顯較高屏地區小 (2017 年計畫： $50 \pm 6\%$ ；2018 年計畫： $47 \pm 5\%$ ；2019 年計畫： $52 \pm 11\%$)，詳細原因仍有待確認。



(a) 總碳和 $\delta^{13}\text{C}$



(b) 總碳和現代碳比例

圖 4.2.2 夏季密集採樣期間各測站 $\text{PM}_{2.5}$ 中的總碳和碳同位素時間關係圖
(a) 總碳濃度和 $\delta^{13}\text{C}$ 和(b) 總碳濃度和現代碳比例

4.2.2 鉛同位素

春季密集採樣期間的大氣鉛濃度和鉛同位素比值如表 4.2.1 所示 (夏季林園站、大寮站和屏東站的鉛同位素正分析中)。表 4.2.1 顯示大氣 PM_{2.5} 中的平均鉛濃度為 $4.2 \pm 8.1 \text{ ng/m}^3$ ，最高值出現在林園站 ($10.0 \pm 22.2 \text{ ng/m}^3$) (林園站的 3 月 7 日之總鉛濃度為 64.9 ng/m^3 ，造成標準偏差較大)，最低為潮州站 ($2.1 \pm 0.9 \text{ ng/m}^3$)，但不同測站的鉛濃度不具顯著差異 ($p=0.55$)，顯示不同區域的鉛污染程度相近。在 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值部分，所有測站的平均比值及其範圍為 1.1554 (1.1298~1.1712)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站的平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值及其範圍分別為 1.1494 (1.1298~1.1648)、1.1577 (1.1512~1.1621)、1.1656 (1.1590~1.1712)、1.1527 (1.1468~1.1594)、1.1545 (1.1430~1.1647)、1.1570 (1.1473~1.1643)、1.1573 (1.1500~1.1627) 和 1.1489 (1.1428~1.1538)。在 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值部分，所有測站的平均比值及其範圍為 2.4263 (2.3985~2.4519)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、林園站、大寮站、屏東站和潮州站的平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值及其範圍分別為 2.4175 (2.3985~2.4519)、2.4362 (2.4289~2.4478)、2.4307 (2.4090~2.4519)、2.4201 (2.4116~2.4265)、2.4306 (2.4080~2.4412)、2.4252 (2.4109~2.4373)、2.4299 (2.4260~2.4394) 和 2.4206 (2.4137~2.4287)，不同測站的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 或 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值具有顯著差異 ($p < 0.05$)，說明不同測站的鉛污染來源可能不同。

圖 4.2.3 為 8 個測站在春季的鉛濃度及鉛同位素比值之時間關係圖，該圖顯示除了鳳山站外，另外 7 站在不同採樣日的鉛同位素比值變異較大，多數測站在不同時間點的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 污染源可能不同。在 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值部分，除了屏東站和潮州站外，另外 6 站在不同採樣日的鉛同位素比值變異較大，顯示多數測站在不同時間點的 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 污染源可能不同。相較於本研究團隊過去在台灣北部 (台北) 和中南部 (台中-彰化-南投-雲林-嘉義) 地區的高 PM_{2.5} 污染季節的鉛同位素比值量測資料，可發現中南部和高雄與屏東的鉛同位素比值較為相近，但都低於北部地區的量測結果 (Jung et al., 2019; 周崇光, 2016, 2017, 2018)，特別是 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值，反映台灣北部和中南部在高 PM_{2.5} 污染季節的鉛污染源種類可能不同。

夏季密集採樣期間的大氣鉛濃度和鉛同位素比值如表 4.2.1 所示。表 4.2.1 顯

示大氣 PM_{2.5} 中的平均鉛濃度為 $3.7 \pm 3.8 \text{ ng/m}^3$ ，最高值出現在大寮站 ($7.7 \pm 6.9 \text{ ng/m}^3$)，最低為潮州站 ($1.5 \pm 1.3 \text{ ng/m}^3$)，但不同測站的鉛濃度具顯著差異 ($p < 0.05$)，顯示不同區域在夏季的鉛污染程度有差異。

在 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值部分，所有測站的平均比值及其範圍為 1.1572 (1.0974~1.1966)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站、大寮站、林園站、屏東站和潮州站的平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值及其範圍分別為 1.1643 (1.1531~1.1787)、1.1531 (1.1393~1.1614)、1.1569 (1.1515~1.1619)、1.1556 (1.1460~1.1664)、1.1468 (1.0974~1.1670)、1.1549 (1.14436~1.1723)、1.1551 (1.1435~1.1722) 和 1.1823 (1.1743~1.1966)。在 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值部分，所有測站的平均比值及其範圍為 2.4295 (2.3714~2.4572)，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站和潮州站的平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值及其範圍分別為 2.4377 (2.4181~2.4528)、2.4378 (2.4284~2.4572)、2.4340 (2.4241~2.4451)、2.4332 (2.4238~2.4563)、2.4137 (2.3714~2.4316)、2.4357 (2.4100~2.4409)、2.4222 (2.4134~2.4360) 和 2.4284 (2.4216~2.4359)，不同測站的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 或 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值具顯著差異 ($p < 0.05$)，說明不同測站的鉛污染來源可能不同。

圖 4.2.4 為 8 個測站在夏季的鉛濃度及鉛同位素比值之時間關係圖，該圖顯示相較於春季，就單一測站而言， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值變異較小，但不同測站的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值有顯著差異，顯示不同測站的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 污染源可能不同。此外，因夏季密集採樣期間有受降雨影響，風速變異也大，因此氣象條件可能也影響了鉛同位素比值。在 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值部分，5 個測站的 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值變異較大，且不同測站的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值有顯著差異，顯示不同測站的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 污染源可能不同。相較於本研究團隊過去在台灣北部 (台北) 和中南部 (台中-彰化-南投-雲林-嘉義) 地區的夏季量測結果，中南部和高雄與屏東的鉛同位素比值較為相近，但略低於北部地區的量測結果 (Jung et al., 2019; 周崇光, 2016, 2017, 2018)，反映台灣北部和中南部的夏季鉛污染源種類可能不同。

總結春季與夏季密集採樣期間測得的鉛同位素比值，可發現無論 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 或 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ，春季和夏季的鉛同位素比值均無顯著差異，反映兩季節的鉛污染源可能相近。在和前期計畫的比較部分 (周崇光, 2015; 周崇光, 2017; 周崇光, 2018)，圖 4.2.5 顯示多數 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 落在 1.14~1.16 之間 (佔了 69%)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 多落在

2.41~2.44 之間 (佔了 77%)，而就同一季節而言，高屏地區測得的鉛同位素比值之差異較過去本研究團隊在中南部 (台中-彰化-南投-雲林-嘉義) 或北部的量測結果大，但目前僅有 1 年的鉛同位素比值監測資料，需要透過更多樣本的採集，以供評估造成高屏地區鉛同位素差異大的原因。

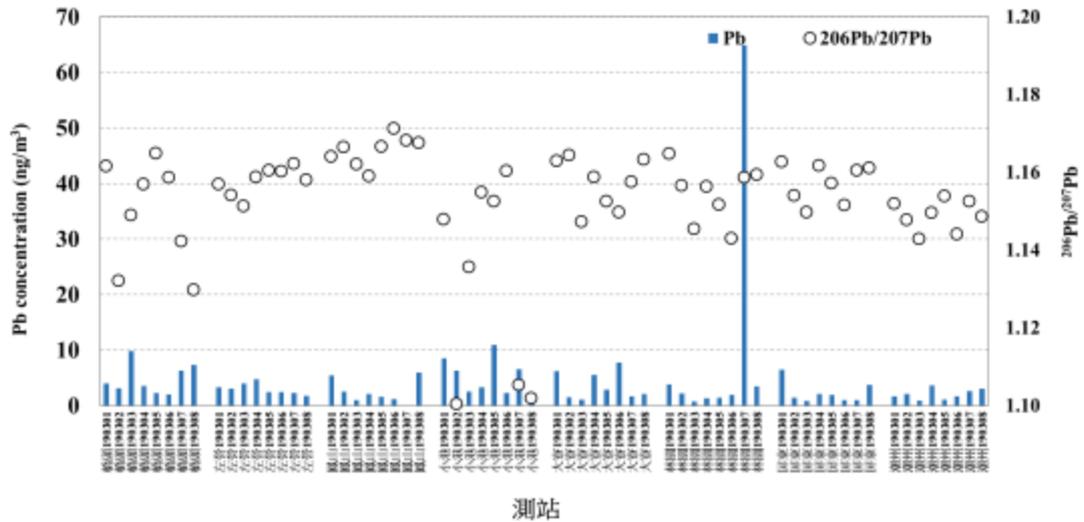
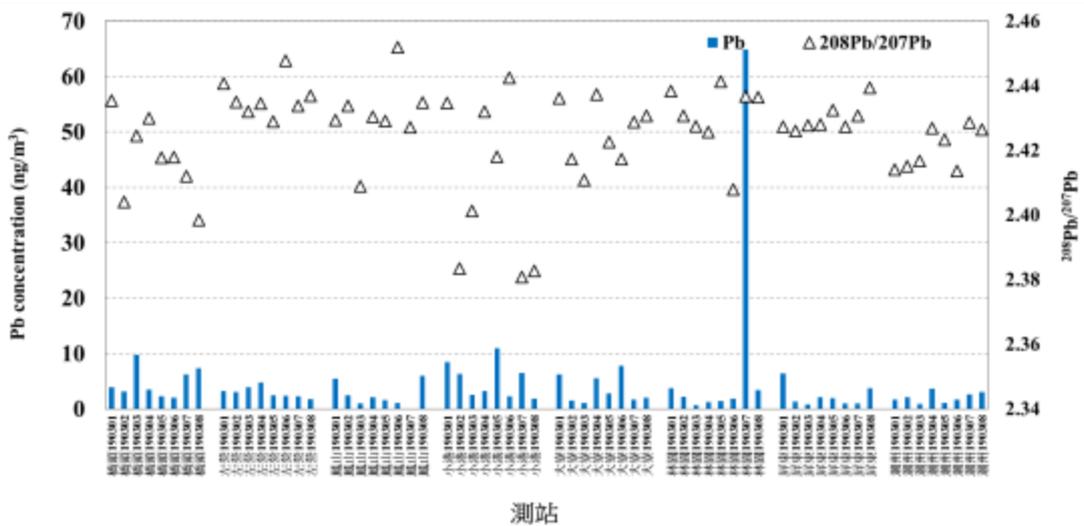
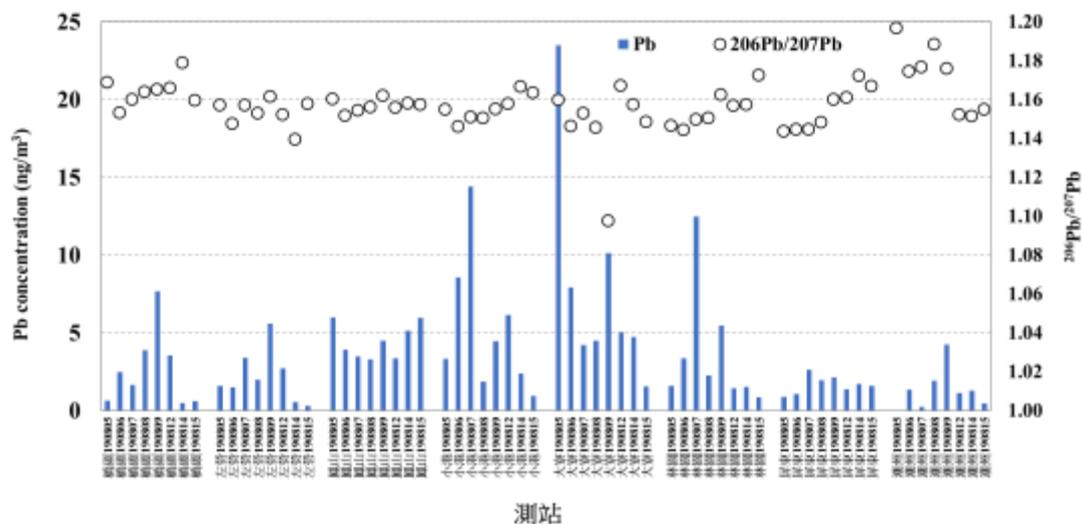
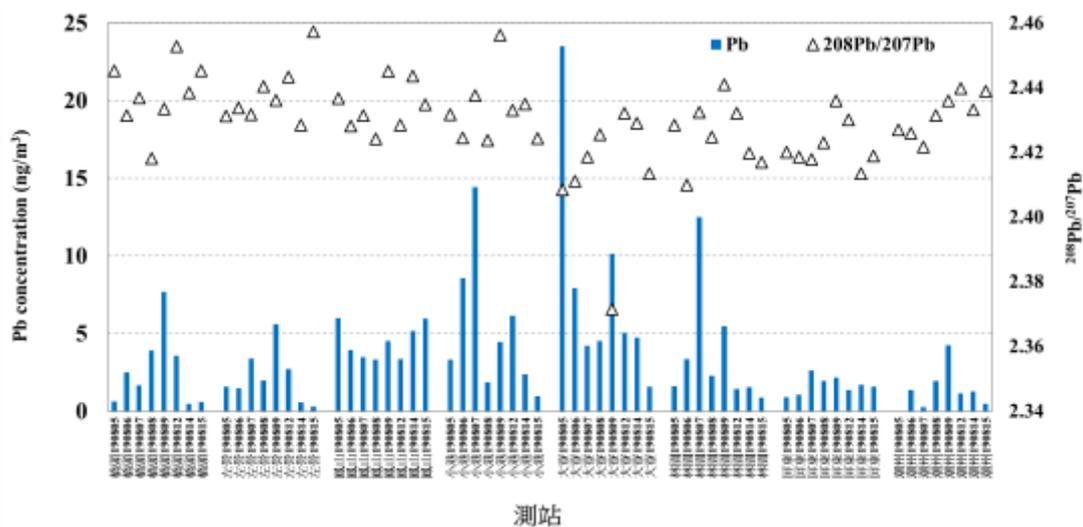
(a) Pb 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ (b) Pb 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$

圖 4.2.3 春季密集採樣期間各測站 Pb 濃度和鉛同位素比值時間關係圖
(a) Pb 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 (b) Pb 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$



(a) Pb 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$



(b) Pb 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$

圖 4.2.4 夏季密集採樣期間各測站 Pb 濃度和鉛同位素比值時間關係圖
(a) Pb 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 (b) Pb 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$

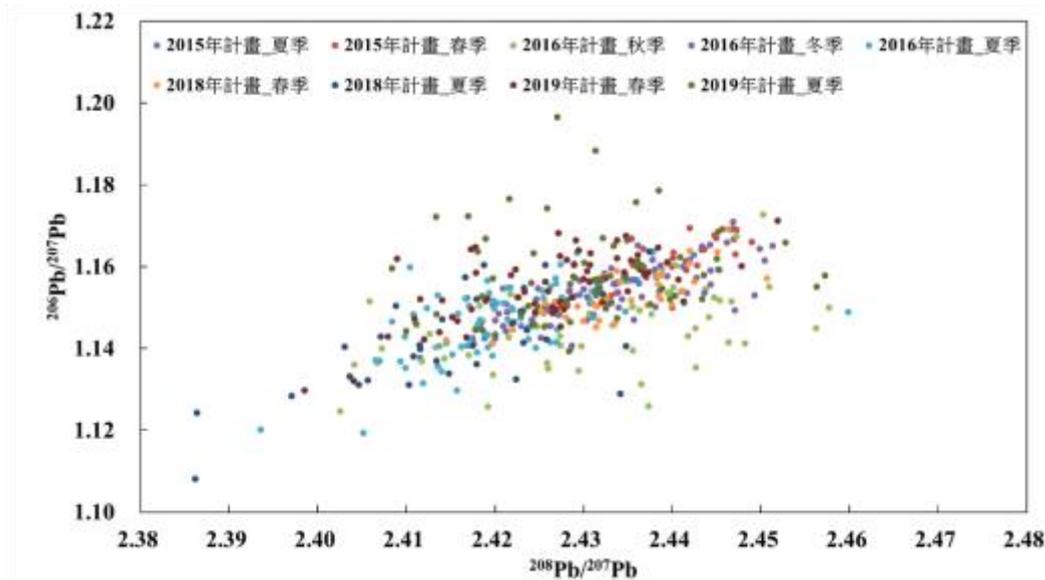


圖 4.2.5 本期計畫和前期計畫之鉛同位素比值分佈圖

4.3 污染源排放之 PM_{2.5} 化學組成

為建立本土主要微粒污染源之化學組成和同位素特徵資料，以供微粒污染源之鑑定，今年度計畫執行期間，分別針對高雄的火力發電廠、煉油廠、鋼鐵廠燒結爐煙道和高雄港作業區排放之 PM_{2.5} 進行採集和化學組成與同位素的分析，其中三種污染源之煙道採樣實況如圖 4.3.1 所示，高雄港作業區之採樣位置如圖 4.3.2 所示。

4.3.1 火力發電廠

本計畫分別於 2019 年 4 月 16~18 日和 9 月 9 日~11 日完成 2 次火力發電廠 (燃煤) 煙道排放之 PM_{2.5} 的採樣，並分析其化學組成。其中，因過去研究指出，燃煤火力電廠等固定污染源排放的微粒會因燃燒的成分種類差異，使得微粒可以固態或液態的型態存在，該類微粒可透過濾紙來捕集，並稱可過濾性微粒 (Filterable particulate matter, FPM)，然而，因煙道的排氣溫度較高，可能使微粒以氣相的型態存在，當排放到大氣時，因低溫使氣態的微粒凝結，此微粒為可凝結性微粒 (Condensable particulate matter, CPM) (Cano et al., 2017; Li et al., 2017; Yang et al., 2018; Yang et al., 2015; Yang et al., 2014)。因此，若能掌握污染源排放之 FPM 與 CPM，對於污染源排放之微粒對周界空氣品質的影響有其重要性，是故，本計畫也針對

煙道排放之 PM_{2.5} 中的 CPM 和 FPM 進行採集。

表 4.3.1 為發電廠煙道排放之總 PM_{2.5}、CPM 和 FPM 質量濃度，該表顯示火力發電廠排放的總 PM_{2.5} 質量濃度為 $2621.1 \pm 1708.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，CPM 和 FPM 分別為 $2136.0 \pm 1755.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $485.1 \pm 212.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中濾紙上的 FPM 約占總 PMF 的 1/3。此外，圖 4.3.3 呈現火力發電廠煙道排放之 CPM 和 FPM 比例，該圖顯示火力發電廠排放的 PM_{2.5} 以 CPM 占優勢 (81%)，其中圖 4.3.4 進一步顯示 CPM 以無機成分為主 (72%)，說明火力發電廠排放的 PM_{2.5} 多為氣態的無機成分，該結果和過去在台灣採集的燃煤鍋爐排放的 PM_{2.5} 特性相似 (Yang et al., 2018)。過去研究曾指出，由於鍋爐燃燒過程使用的含硫燃料最後會以 SO₂ 型態存在，當 SO₂ 被排放到煙道並被 CPM 採樣器中的衝擊瓶捕集後，會在衝擊瓶內因氧化而以硫化物的型態存在，並增加 CPM 的含量 (Corio and Sherwell, 2000)。此外，表 4.3.1 也呈現以濾紙捕集到的 FPM 之離子與碳成分，該表顯示火力發電廠排放的離子以氯離子和鈉離子的濃度較高 (氯離子和鈉離子分別占 FPM 的 42% 和 28%)，主要和該電廠採用海水脫硫去除硫成分有關，此結果也和本研究團隊在 2017 年調查同樣採用海水脫硫設備的燃煤電廠之 FPM 中的濾紙化學組成分析結果之趨勢一致 (周崇光, 2017)。此外，硫酸鹽 (占 FPM 的 10%) 為僅次於氯離子及鈉離子的化學組成，由於該發電廠的主要燃料來源為煤礦，因此硫酸鹽也成為重要的化學組成之一。



(a) 火力發電廠



(b) 煉油廠



(c) 鋼鐵廠燒結爐

圖 4.3.1 污染源煙道排放之 $PM_{2.5}$ 採樣實況
(a) 火力發電廠，(b) 煉油廠，和 (c) 鋼鐵廠



第一訊號台



10 號碼頭



第五貨櫃區



陽明海洋探索館



旗津國中



紅毛港文化園區 (高字塔)



氣象局高雄測站

圖 4.3.2 高雄港作業區之採樣位置圖

表 4.3.1 污染源排放 FPM 和 CPM 濃度 (mean \pm SD) 統計表

	火力發電廠 (n = 6)	煉油廠 (n = 3*)	鋼鐵廠燒結爐 (n = 6)
Total PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2621.1 \pm 1708.4	9405.9 \pm 6727.6	16497.3 \pm 7963.7
CPM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2136.0 \pm 1755.6	9101.7 \pm 6704.2	11764.4 \pm 7139.7
CPM_無機 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1536.6 \pm 1524.6	1588.9 \pm 548.0	7192.0 \pm 1389.1
CPM_有機 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	593.9 \pm 298.5	7510.4 \pm 6988.8	4570.3 \pm 7203.5
FPM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	485.1 \pm 212.8	304.0 \pm 499.6	4732.9 \pm 2257.1
FPM_濾紙 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	179.2 \pm 43.4	26.0 \pm 24.3	4115.2 \pm 1864.5
FPM_旋風集塵	305.8 \pm 224.9	291.0 \pm 482.3	617.7 \pm 464.0

*有三個樣本的 FPM 濃度低於偵測極限，故被排除在分析範圍內。

表 4.3.2 污染源排放之 PM_{2.5} 化學組成濃度 (mean ± SD) 統計表

	火力發電廠 (n = 6)	煉油廠 (n = 3 [#])	鋼鐵廠燒結爐 (n = 6)
Al (µg/m ³)	1.4 ± 0.9	0.6 ± 2.9	33.4 ± 26.4
Fe (µg/m ³)	2.8 ± 1.8	2.9 ± 1.8	586.9 ± 413.7
Na (µg/m ³)	46.9 ± 7.0	0.6 ± 0.4	36.8 ± 12.8
Mg (µg/m ³)	5.4 ± 0.9	0.1 ± 0.1	32.7 ± 13.1
K (µg/m ³)	2.8 ± 1.8	0.8 ± 0.6	267.7 ± 100.5
Ca (µg/m ³)	2.3 ± 1.5	1.4 ± 1.7	235.5 ± 175.3
Sr (µg/m ³)	0.05 ± 0.01	0.003 ± 0.002	0.4 ± 0.3
Ba (µg/m ³)	0.02 ± 0.02	0.01 ± 0.02	0.2 ± 0.1
Ti (µg/m ³)	0.11 ± 0.05	0.09 ± 0.13	3.6 ± 2.3
Mn (µg/m ³)	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.04	2.8 ± 0.9
Co (ng/m ³)	18.3 ± 7.1	4.2 ± 1.6	32.7 ± 19.5
Ni (ng/m ³)	338.0 ± 267.2	197.0 ± 1122.6	682.0 ± 374.2
Cu (ng/m ³)	52.7 ± 24.7	22.8 ± 12.6	1305.1 ± 298.7
Zn (ng/m ³)	188.5 ± 199.1	129.0 ± 97.0	4507.3 ± 1641.8
Mo (ng/m ³)	102.0 ± 83.7	57.8 ± 58.0	3692.7 ± 445.3
Cd (ng/m ³)	0.4 ± 0.3	0.7 ± 1.0	2684.4 ± 2281.0
Sn (ng/m ³)	7.6 ± 7.8	3.6 ± 2.6	14.8 ± 9.8
Sb (ng/m ³)	5.6 ± 6.1	8.9 ± 9.2	16.6 ± 11.2
Tl (ng/m ³)	23.1 ± 2.7	2.0 ± 1.5	3541.8 ± 1500.3
Pb (ng/m ³)	31.3 ± 21.3	49.0 ± 31.3	88481.7 ± 46123.4
V (ng/m ³)	8.9 ± 5.0	5.0 ± 3.1	841.8 ± 386.1
Cr (ng/m ³)	541.1 ± 441.6	344.7 ± 146.9	1308.8 ± 576.5
As (ng/m ³)	3.0 ± 1.5	1.3 ± 1.2	102.2 ± 65.1
Y (ng/m ³)	3.3 ± 3.1	1.9 ± 2.4	21.2 ± 15.5
Se (ng/m ³)	132.2 ± 23.4	65.5 ± 130.7	5871.1 ± 1512.4
Zr (ng/m ³)	23.0 ± 18.9	11.8 ± 16.0	168.7 ± 134.2
Ge (ng/m ³)	2.8 ± 1.7	0.6	32.9 ± 11.6
Rb (ng/m ³)	7.9 ± 7.1	2.2 ± 2.3	5722.9 ± 2080.7
Cs (ng/m ³)	0.7 ± 0.6	0.5 ± 0.4	2841.6 ± 822.5
Ga (ng/m ³)	3.5 ± 2.4	1.1 ± 0.7	20.0 ± 13.8
La (ng/m ³)	1.7 ± 1.0	0.8 ± 1.0	28.1 ± 19.7

化學組成資料均來自 FPM 中濾紙的分析結果。#有三個樣本的 FPM 濃度低於偵測極限，故被排除在分析範圍內。^僅有三個樣本被測出現代碳比例。NA: Not available.

表 4.3.2 污染源排放之 PM_{2.5} 化學組成濃度 (mean ± SD) 統計表 (續)

	火力發電廠 (n = 6)	煉油廠 (n = 3 [#])	鋼鐵廠燒結爐 (n = 6)
Ce (ng/m ³)	2.2 ± 1.0	0.7 ± 0.5	59.5 ± 44.2
Pr (ng/m ³)	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	4.5 ± 3.2
Nd (ng/m ³)	0.9 ± 0.5	NA*	26.1 ± 18.4
Sm (ng/m ³)	0.2 ± 0.2	0.21 ± 0.04	3.5 ± 2.4
Eu (ng/m ³)	0.13 ± 0.07	0.11 ± 0.06	1.0 ± 0.6
Gd (ng/m ³)	0.5 ± 0.2	NA*	4.5 ± 2.9
Tb (ng/m ³)	0.10 ± 0.06	NA*	0.6 ± 0.4
Dy (ng/m ³)	0.13 ± 0.18	0.08	3.2 ± 2.4
Ho (ng/m ³)	0.09 ± 0.07	NA*	0.7 ± 0.5
Er (ng/m ³)	0.3 ± 0.3	NA*	2.8 ± 1.9
Tm (ng/m ³)	0.02 ± 0.01	0.06	0.34 ± 0.29
Yb (ng/m ³)	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.06	2.6 ± 1.9
Lu (ng/m ³)	0.03 ± 0.03	0.07	0.4 ± 0.2
Hf (ng/m ³)	0.960 ± 0.005	0.7 ± 0.1	2.8 ± 2.4
U (ng/m ³)	0.8 ± 0.7	1.0	4.4 ± 3.0
OC (µg/m ³)	7.0 ± 4.3	4.7 ± 1.6	216.8 ± 154.9
EC (µg/m ³)	0.03 ± 0.06	0.8 ± 1.0	3.4 ± 4.5
Na ⁺ (µg/m ³)	50.6 ± 8.2	0.5 ± 0.4	44.6 ± 10.8
NH ₄ ⁺ (µg/m ³)	1.3 ± 0.8	3.8 ± 7.9	131.2 ± 16.5
K ⁺ (µg/m ³)	1.1 ± 0.5	0.3 ± 0.2	294.8 ± 103.5
Mg ⁺² (µg/m ³)	5.2 ± 1.1	0.4 ± 0.3	28.3 ± 5.7
Ca ⁺² (µg/m ³)	2.4 ± 0.3	1.4 ± 1.6	209.6 ± 153.3
Cl ⁻ (µg/m ³)	75.9 ± 13.2	0.8 ± 0.8	17.8 ± 9.6
NO ₃ ⁻ (µg/m ³)	1.7 ± 1.8	1.2 ± 1.2	0.34 ± 0.38
SO ₄ ⁻² (µg/m ³)	18.1 ± 7.0	14.1 ± 26.7	1460.4 431.1
Modern carbon (µg/m ³)	NA	NA	65.1 ± 27.5 [^]
Fossil carbon (µg/m ³)	NA	NA	285.2 ± 47.9 [^]
δ ¹³ C (‰)	NA	NA	NA
pMC (%)	NA	NA	18 ± 4 [^]
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	1.1959 ± 0.0079	1.1930 ± 0.0135	1.1908 ± 0.0213
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb	2.4305 ± 0.0109	2.4318 ± 0.0108	2.4010 ± 0.0194

化學組成資料均來自 FPM 中濾紙的分析結果。#有三個樣本的 FPM 濃度低於偵測極限，故被排除在分析範圍內。^僅有三個樣本被測出現代碳比例。NA: Not available.

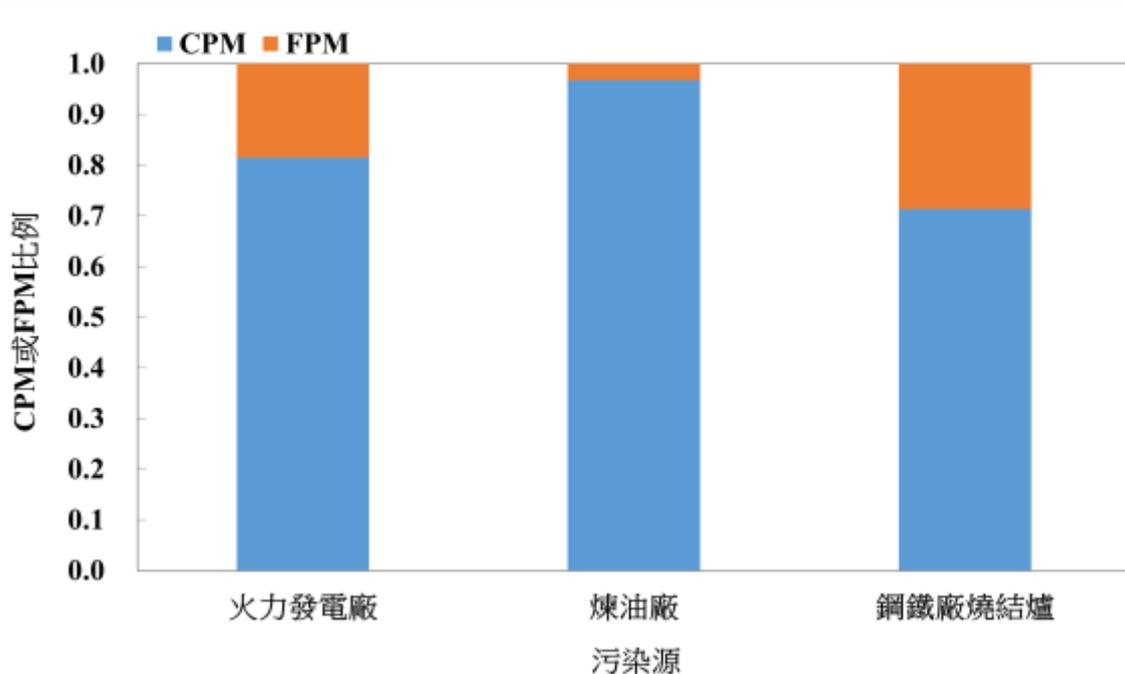


圖 4.3.3 各污染源排放之 PM_{2.5} 的 CPM 和 FPM 比例

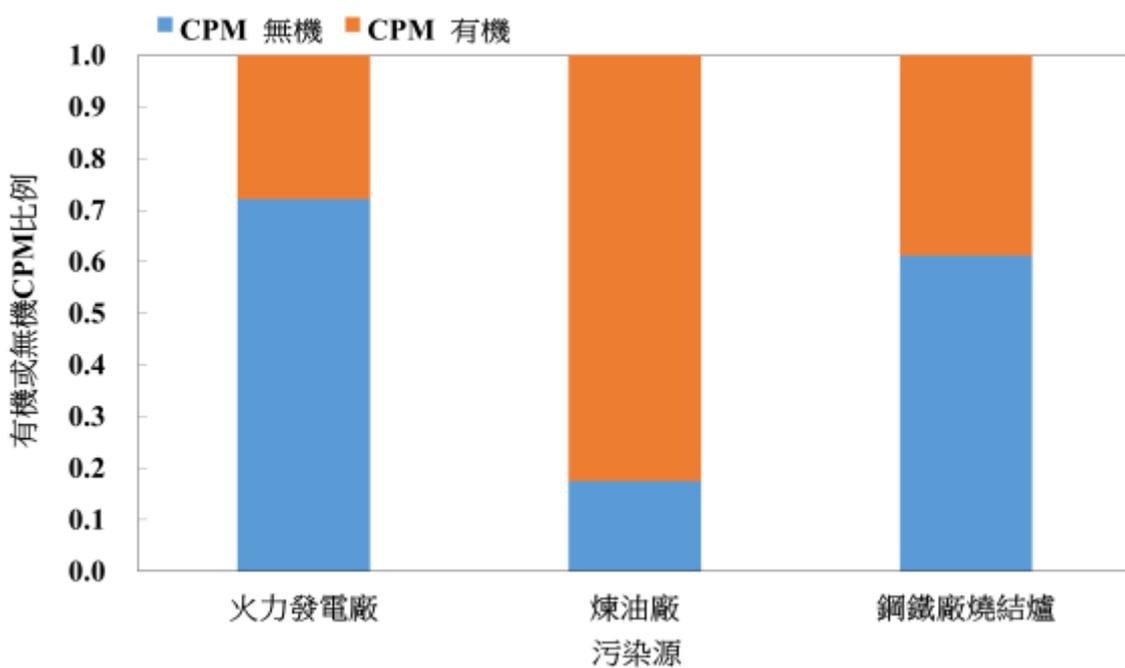


圖 4.3.4 各污染源排放之有機與無機 CPM 比例

圖 4.3.7 為火力發電廠煙道排放 $PM_{2.5}$ 的金屬元素濃度資料，所有金屬元素濃度的加總約占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 35%，其中 Al、Fe、Na、Mg、K、Ca、Ni、Zn 和 Cr 都占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.1% 以上，Tl、Mo 和 Se 則占 0.05~0.1%。此外，圖 4.3.8 顯示火力發電廠煙道排放的 Na、Mg、K、Sr、Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd、Sn、Sb、Pb、Cr、As、Se、Ge、Cs、Ga、Ce、Nd、Hf 和 U 的 EF 均在 10 以上，其中占質量濃度 0.05% 且 EF 超過 10 的元素包含 Na (採用海水脫硫所致)、Mg、K、Ni、Zn、Mo、Cr、Se，過去研究也指出 Zn、Se 和 Cr 等為燃煤電廠排放之重要元素 (Okuda et al., 2008; Park et al., 2001)，因此 Zn、Se 和 Cr 等金屬元素為火力發電廠的重要特徵元素。

在同位素部分， $^{206}Pb/^{207}Pb$ 平均比值為 1.1959 (1.1781~1.2115)， $^{208}Pb/^{207}Pb$ 平均比值為 2.4305 (2.4108~2.4403)，圖 4.3.5 和圖 4.3.6 分別顯示不同污染源之 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 之分布。從圖 4.3.5 可發現本計畫採集的燃煤電廠煙道排放之 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 比值和國內外研究測得的結果相近 (2017 年計畫 1.1940 (1.1604~1.2229)；2018 年計畫：1.1489 (1.1320~1.1854))，圖 4.3.6 顯示本研究量測到的 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 比值和本研究團隊在 2017 和 2018 年於其他地區調查的燃煤電廠之 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 比值重疊 (周崇光, 2017, 2018) (2017 年計畫 2.4557 (2.4414~2.4806)；2018 年計畫 2.4190 (2.4039~2.4277))，但都小於 Gallon 於日本量測到的燃煤電廠排放之 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 比值 (Gallon et al., 2011)，推測和不同國家的煤礦來源不同有關 (Komárek et al., 2008)。然而，無論 $\delta^{13}C$ 或現代碳比例，本研究收集的火力發電廠煙道排放的樣本均無法測出 $\delta^{13}C$ 或現代碳比例，主要是因其所排放 $PM_{2.5}$ 濃度偏低，因此增加採集的樣本數並合併分析可能是主要的解決方法。

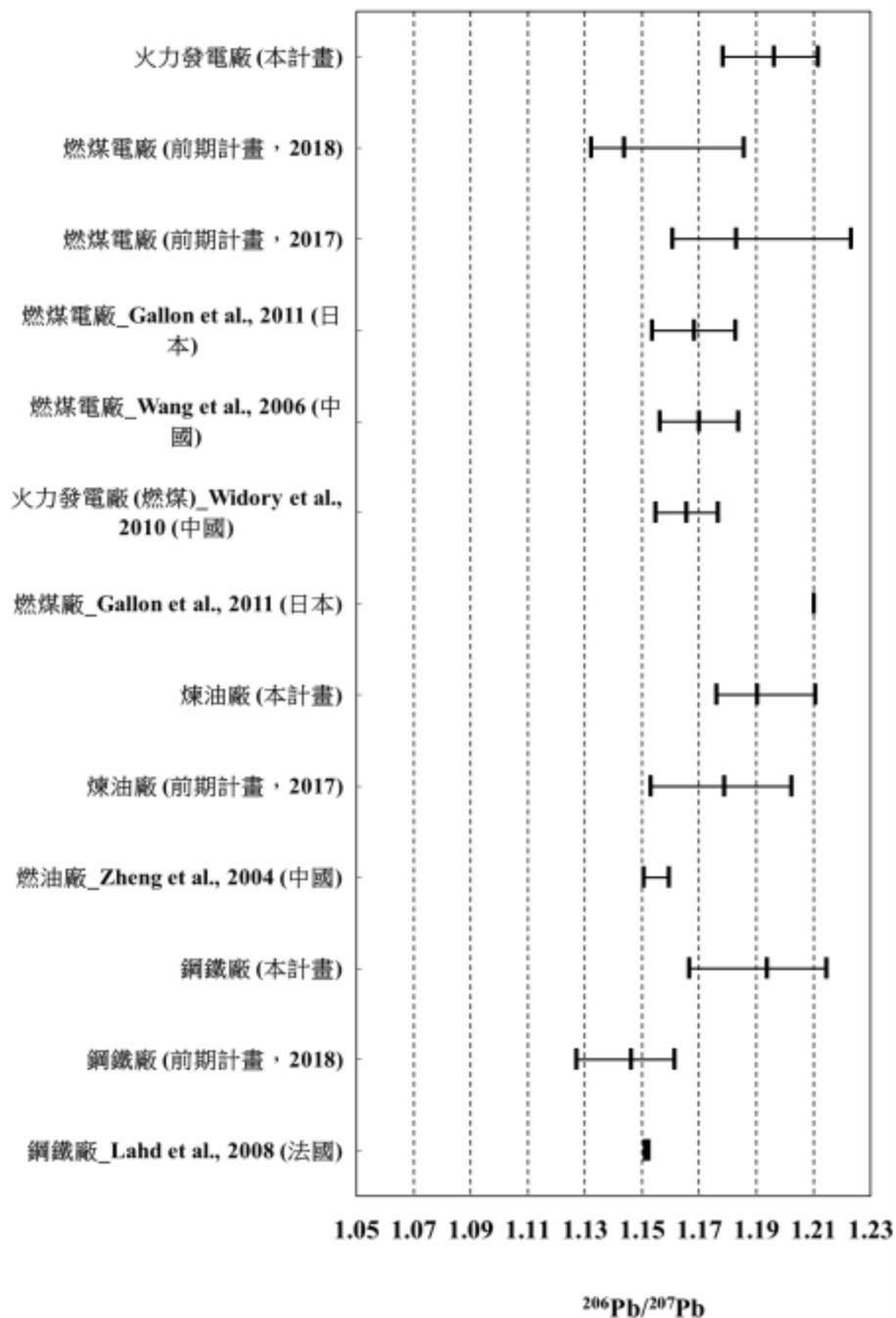


圖 4.3.5 不同污染源之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值分布圖

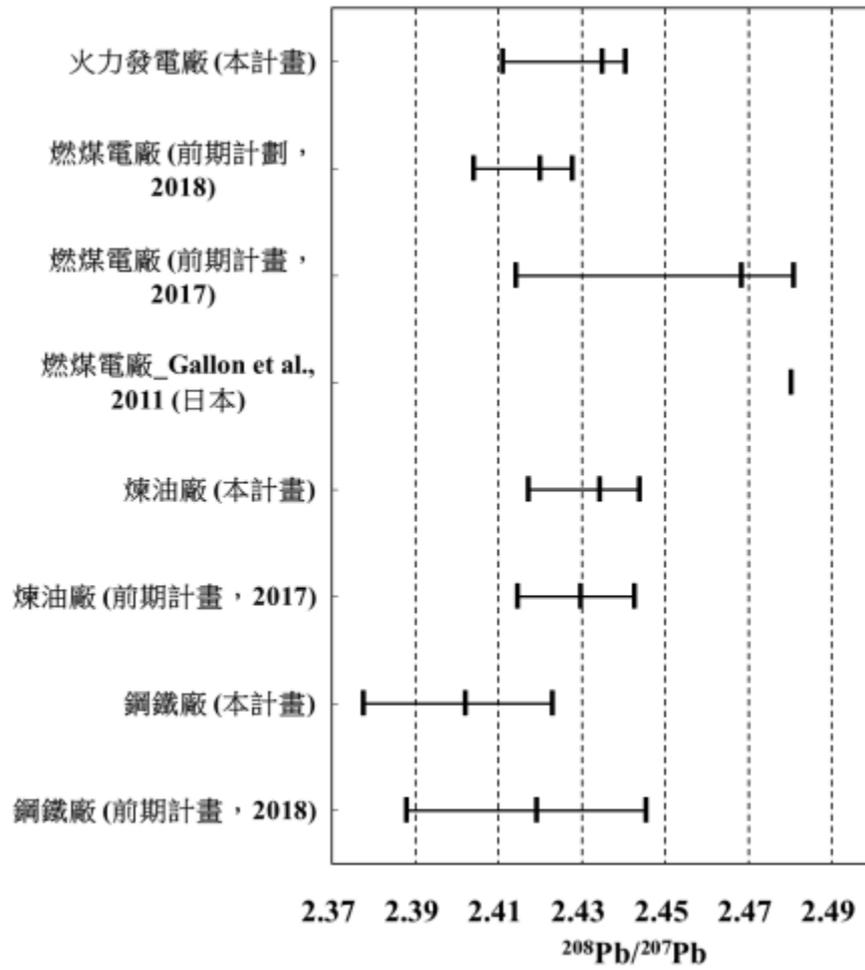


圖 4.3.6 不同污染源之 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值分布圖

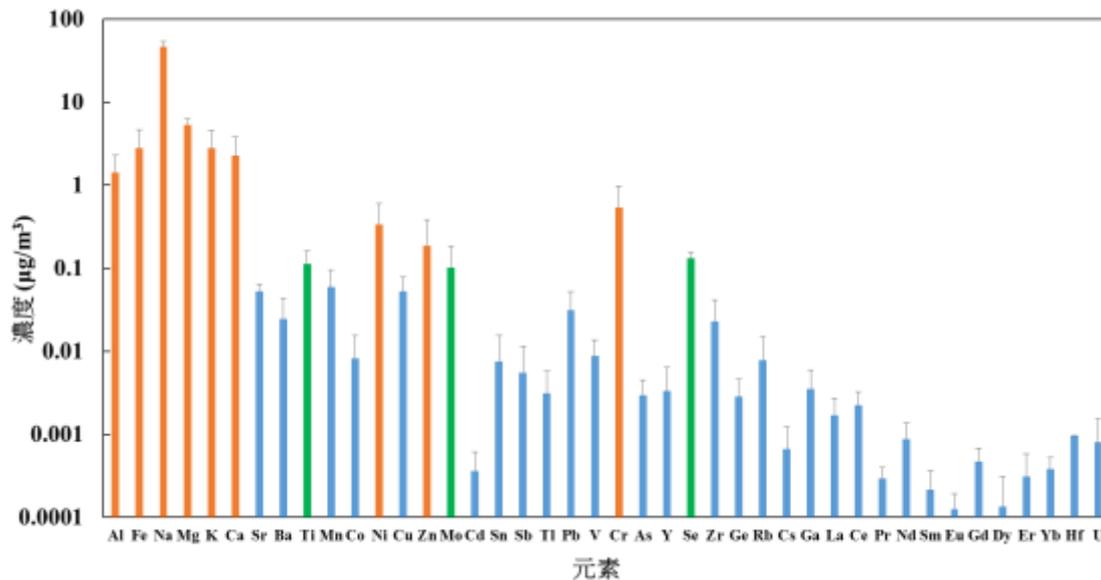


圖 4.3.7 火力發電廠煙道排放之 PM_{2.5} 中各元素濃度分佈 (橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 PM_{2.5} 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

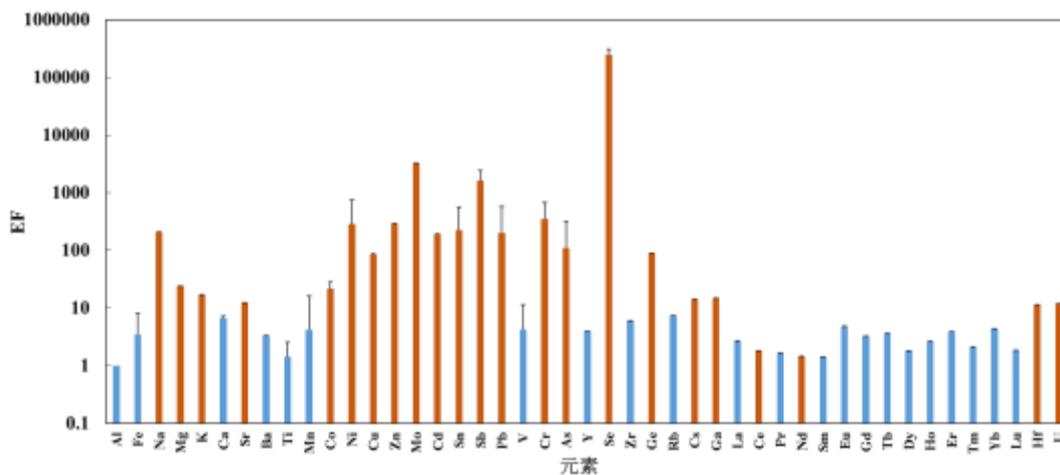


圖 4.3.8 火力發電廠煙道排放之 PM_{2.5} 含有元素的富集因子特性 (Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

4.3.2 煉油廠

本計畫分別於 2019 年 4 月 1~3 日和 9 月 23~25 日，完成煉油廠煙道排放之 PM_{2.5} 的採集，並分析其化學組成。表 4.3.1 為煉油廠煙道排放之總 PM_{2.5}、CPM 和 FPM 質量濃度，該表顯示煉油廠排放的總 PM_{2.5} 質量濃度為 $9405.9 \pm 6727.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而 CPM 和 FPM 濃度有明顯差異，CPM 質量濃度為 $9101.7 \pm 6704.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，FPM 則為 $304.0 \pm 499.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中濾紙捕集到的 FPM 僅占總 FPM 的 9%。圖 4.3.3 呈現煉油廠煙道排放之 CPM 和 FPM 比例，該圖顯示煉油廠排放的 PM_{2.5} 明顯以 CPM 占優勢 (97%)，圖 4.3.4 顯示 CPM 以有機成分為主 (83%)，反映煉油廠排放的 PM_{2.5} 多為氣態的有機成分，該結果和過去在台灣採集的燃油鍋爐煙道排放的 PM_{2.5} 特性相似 (Yang et al., 2018)。過去研究曾指出，燃煤鍋爐燃燒過程若使用含硫燃料，且煉製油品的硫成分又較高，會造成燃燒後容易產生 SO₂，當被 CPM 採樣器中的衝擊屏捕集後，會在衝擊瓶內因氧化而以硫化物的型態存在，並增加 CPM 的含量 (Corio and Sherwell, 2000)。表 4.3.1 呈現以濾紙捕集的 FPM 之離子與碳成分，該表顯示煉油廠排放的微粒以硫酸鹽 (占 54%) 為主，此結果和煉製油品含有較高的硫成分有關。然而，因煉油廠的微粒以 CPM 為主，反映煉油廠排放之 FPM 的 PM_{2.5} 對周界空氣品質的影響不如 CPM 大。

另外，煉油廠煙道排放之 PM_{2.5} 中，元素約占 PM_{2.5} 質量濃度的 17%，圖 4.3.9 進一步呈現不同元素的濃度分布，結果顯示 Al、Fe、Na、Mg、K、Ca、Ti、Mn、Ni、Zn、Pb 和 Cr 等元素的質量濃度均占 PM_{2.5} 質量濃度的 0.1% 以上，Mo 則占了 0.05%~0.1%，而圖 4.3.10 則顯示 Fe、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb、Cr、As、Y、Se、Zr、Rb、Cs、Ga、La、Eu、Tm、Hf 和 U 的 EF 都超過 10；占質量濃度 0.05% 且 EF 到於 10 的元素有 Fe、Mn、Ni、Zn、Mo、Pb、Cr，顯示此類元素為煉油廠排放之微粒的重要判別依據。然而，過去研究指出煉油廠排放之微粒的主要判別指標包含 Ni 和 V (Cheng et al., 2009; Kulkarni et al., 2007; Moreno et al., 2008; Querol et al., 2007)，過去在台灣其他煉油廠煙道採集到的樣本也顯示 Ni 和 V 均為主要的元素組成 (周崇光, 2017)，但本次研究卻發現 V 的濃度偏低且其 EF 無超過 10，推測可能是因此次採集的煉油廠排放的微粒濃度偏低，造成分析結果和過去其他研究有差異。

在同位素部分， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 1.1930 (1.1758~1.2106)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 2.4318 (2.4171~2.4437)。圖 4.3.5 和圖 4.3.6 分別顯示不同污染源之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 之分布，該結果顯示本計畫採集的煉油廠煙道排放之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值和前期計畫於台灣其他地區測得的結果相近 (周崇光, 2017) ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 為 1.1782 (1.1528~1.2021)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 為 2.4296 (2.4145~2.4425))，但 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值高於 Zheng 在中國量測的結果 (Zheng et al., 2004)，推測和不同國家的煉油廠操作條件與原油來源不同有關。無論 $\delta^{13}\text{C}$ 或現代碳比例，本研究收集的煉油廠煙道排放的樣本均無法測出 $\delta^{13}\text{C}$ 或現代碳比例，主要是因其所排放 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度偏低，因此增加採集的樣本數並合併分析可能是主要的解決方法。

4.3.3 鋼鐵廠燒結爐

本計畫分別於 2019 年 4 月 22~24 日和 9 月 16~18 日，完成採集鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 $\text{PM}_{2.5}$ 的採集，並分析其化學組成。表 4.3.1 為鋼鐵廠燒結爐煙道排放之總 $\text{PM}_{2.5}$ 、CPM 和 FPM 之質量濃度，該表顯示鋼鐵廠燒結爐排放的總 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度為 $16497.3 \pm 7963.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而 CPM 和 FPM 濃度有明顯差異，CPM 質量濃度為 $11764.4 \pm 7139.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，FPM 則為 $4732.9 \pm 2257.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中濾紙捕集到的 FPM 占總 FPM 的 87% 左右。圖 4.3.3 呈現三次鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 CPM 和 FPM 比例，該圖顯示鋼鐵廠燒結爐排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 以 CPM 占優勢 (71%)，CPM 以無機成分為主 (61%)，反映鋼鐵廠燒結爐排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 多為氣態的無機成分，該結果和過去在台灣採集的鋼鐵廠燒結爐煙道排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 特性相似 (Yang et al., 2015)，主要是因鋼鐵廠使用的原料含有鉀等成分，該類成分經燃燒後會以離子的型態存在於 CPM 中，因此造成 CPM 的比例較 FPM 比例高，且多為無機組成；此外，表 4.3.2 顯示除了硫酸鹽外 (約 42%)，鉀離子為重要的組成之一 (約 7%)，前期計畫於中部地區調查的結果也呈現類似的結果 (周崇光, 2018)，反映鋼鐵廠燒結爐燃燒的燃料或材料可能以離子的型態存在於 CPM，進而造成 CPM 的比例較 FPM 高。表 4.3.2 也顯示硫酸鹽為濾紙 FPM 之主要成分，此現象和鋼鐵廠燒結爐燃燒的燃料含有硫成分有關。

金屬元素濃度的加總約占鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度的 35%，前期計畫於中部地區調查的結果也顯示鋼鐵廠燒結爐煙道排放金屬元素約占 $\text{PM}_{2.5}$

質量濃度的 41% (周崇光, 2018), 而圖 4.3.11 顯示 Al、Fe、Na、Mg、K、Ca、Zn、Pb、Se 和 Rb 都占 PM_{2.5} 質量濃度 0.1% 以上, Ti、Mn、Mo、Cd、Tl 和 Cs 則占 0.05~0.1%, 圖 4.3.12 則顯示 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb、V、Cr、As、Se、Ge、Rb 和 Cs 的 EF 均在 10 以上; 占質量濃度 0.05% 且 EF 到於 10 的元素有 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Zn、Mo、Cd、Tl、Pb、Cr、Se、Rb、Cs, 過去研究也指出 Fe、K、Ca、Zn、Pb、Mn 和 Cr 等元素為鋼鐵廠排放之重要元素 (Tsai et al., 2007; 周崇光, 2018)。

在同位素部分, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 1.1908 (1.1664~1.2143), $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 2.4010 (2.3774~2.4229)。圖 4.3.4 顯示不同污染源之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ (目前國際上無研究量測鋼鐵廠的 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值) 比值分布, 從圖可發現本研究採集到的鋼鐵廠燒結爐煙道排放的 PM_{2.5} 之 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值高於本研究團隊過去於台灣中部地區 (1.1443, 1.1268~1.1613) 和法國的量測結果 (周崇光, 2018; Ladh et al., 2008), 但本研究採集到的鋼鐵廠燒結爐煙道排放的 PM_{2.5} 之 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值和過去於台灣中部地區 (2.4179, 2.3877~2.4453) 有重疊的現象, 顯示在可掌握的鋼鐵廠燒結爐之鉛同位素比值部分, 原料的不同可能會導致採集到的鉛同位素比值分佈不一樣。然而, 進一步比較鋼鐵廠燒結爐於春季和夏季的鉛同位素比值, 可發現夏季 ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$: 1.1664~1.1817; $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$: 2.4119~2.4229) 分析出的鉛同位素比值明顯高於春季 ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$: 1.2055~1.2143; $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$: 2.3774~2.3920), 此外, 夏季採集到的 PM_{2.5}、鉛和鉀等代表性金屬元素濃度也遠高於春季, 推測和操作條件與原料的不同有關, 如兩個季節的採樣期間使用的焦炭和無煙煤之燃料量不同, 且燃料來源也可能不同, 但仍需進一步確認才能釐清造成 2 個季節測出的鉛同位素比值有明顯差異的原因。

綜合三個固定污染源煙道排放出的 FPM 與 CPM 比例, 和 CPM 中的有機與無機組成, 可發現三種污染源都以 CPM 為主, 其中煉油廠排放的 CPM 以有機組成為優勢, 另 2 種污染源則以無機組成為主, 說明 CPM 對周界空氣品質的影響不容被忽視。在化學組成部分, 除了煉油廠排放的金屬元素占以濾紙捕集到的 FPM 質量濃度的 17% 外, 另外 2 個污染源則都在 30% 以上, 顯示火力發電廠和鋼鐵廠燒結爐煙道排放的成分有較高的金屬元素; 此外, 由於本研究採集的火力發電廠是以海水脫硫方式去除 SO₂, 進而造成鈉離子和氯離子濃度較其他 2 個污染源高, 且

因鋼鐵廠燒結爐燃燒的成分含有硫與鉀，造成鋼鐵廠燒結爐煙道排放的化學組成有較高的硫酸鹽與鉀離子，這些結果反映鈉或氯離子不盡然是由海鹽所貢獻，且硫酸鹽不完全是透過光化反應生成且鉀離子也可能非僅由生質燃燒所貢獻。此結果可為未來進一步評估固定污染源排放的離子成分對周界空氣品質的影響之依據，也可增加其他元素之同位素的量測，作為 $PM_{2.5}$ 中的鹽類來源之鑑定。

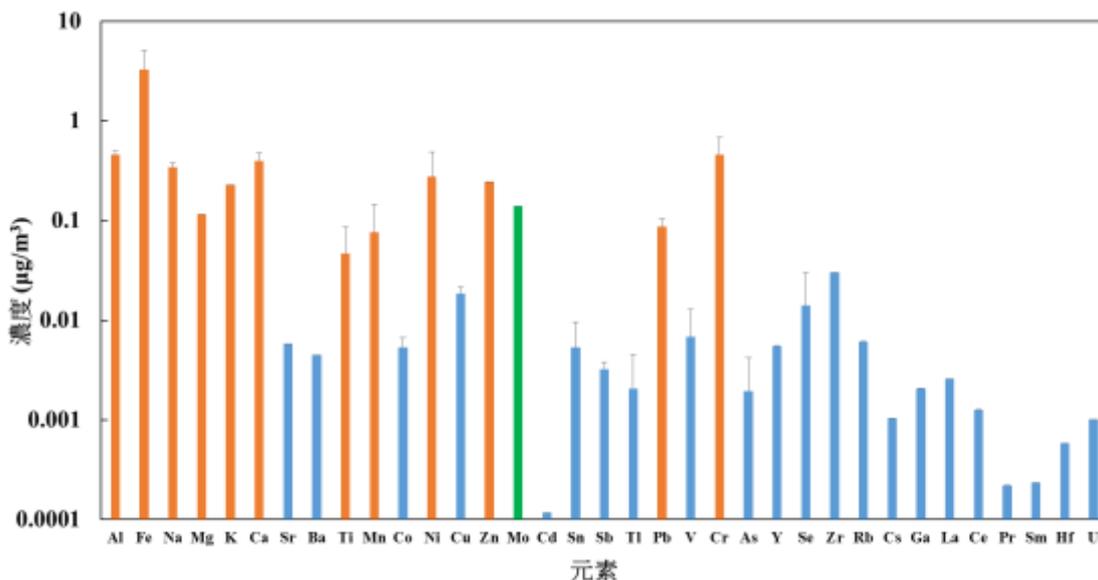


圖 4.3.9 煉油廠煙道排放之 $PM_{2.5}$ 中各元素濃度分佈 (橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 $PM_{2.5}$ 的 $>0.1\%$ 、 $0.05\sim 0.1\%$ 和 $<0.05\%$)

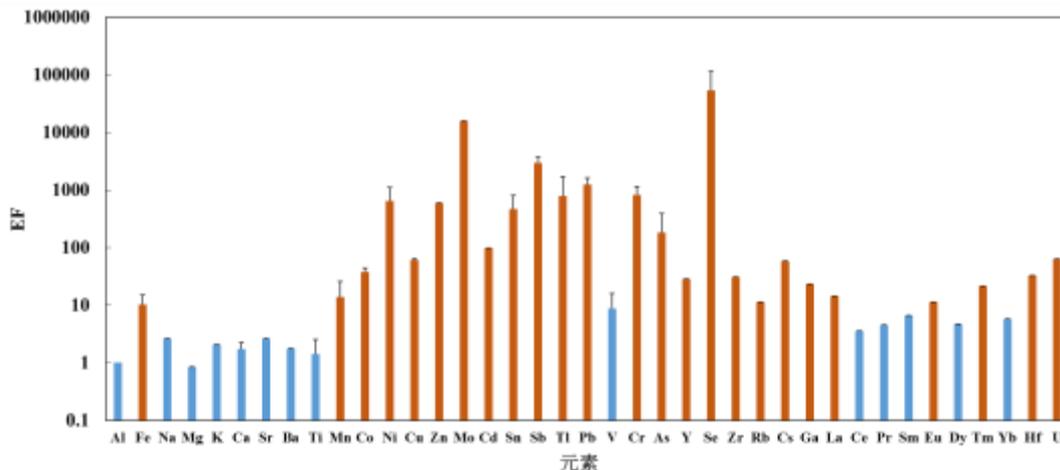


圖 4.3.10 煉油廠煙道排放之 $PM_{2.5}$ 含有元素的富集因子特性 (Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

4.3.4 高雄港作業區排放之污染源特徵

本研究團隊分別於 2019 年 3 月 24 日~31 日和 8 月 28 日~9 月 1 日完成高雄港區內 5 個作業區（第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區）的 $PM_{2.5}$ 採樣與化學組成的分析。5 個作業區的 $PM_{2.5}$ 濃度、傳統化學組成濃度和同位素資料如表 4.3.3 所示。表 4.3.3 顯示 5 個作業區的 $PM_{2.5}$ 濃度在 16.8~21.5 $\mu g/m^3$ 之間，硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、有機碳和元素碳則為主要的組成，其中第一港口船舶進出、第二港口船舶進出、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區的硫酸鹽分別站 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 26%、24%、23%、23% 和 22%，硝酸鹽為 14%、15%、15%、17% 和 15%，銨鹽為 12%、13%、12%、13% 和 12%，有機碳為 18%、24%、31%、28% 和 27%，元素碳為 4%、7%、9%、6% 和 16%。儘管本研究調查的 5 個港口作業區的主要化學組成濃度分布和一般周界的採樣結果相近，但在本研究調查的 5 個作業區中，可發現硫酸鹽和有機碳是 5 個港口作業區的主要組成，元素碳則為僅次於硫酸鹽和有機碳的主要化學組成，有別於一般周界採集到的優勢化學組成分布特性。過去於港口進行 $PM_{2.5}$ 的採樣與化學組成分析的研究也發現 (Tolis et al., 2015; Yau et al., 2013)，硫酸鹽、有機碳和元素碳是重要的化學組成，因船舶在航運過程中所燃燒的油品會排放大量的硫酸鹽和元素碳，有機碳也和油品的燃燒有關。此外，Zhao 和 Xu 的研究也指出 (Xu et al., 2018; Zhao et al., 2013a)，船舶或貨運車在運行過程中會因燃燒油品導致有較高的硫氧化物被排放，相對的，也增加港口作業區的硫酸鹽濃度。在第五貨櫃區部分，本研究發現第五貨櫃區量測到的元素碳比例偏高，推測和大量貨運車輛進出與停靠有關，因過去研究指出港口的船舶或貨運車排放的碳微粒有較高的元素碳比例 (Tolis et al., 2015)。

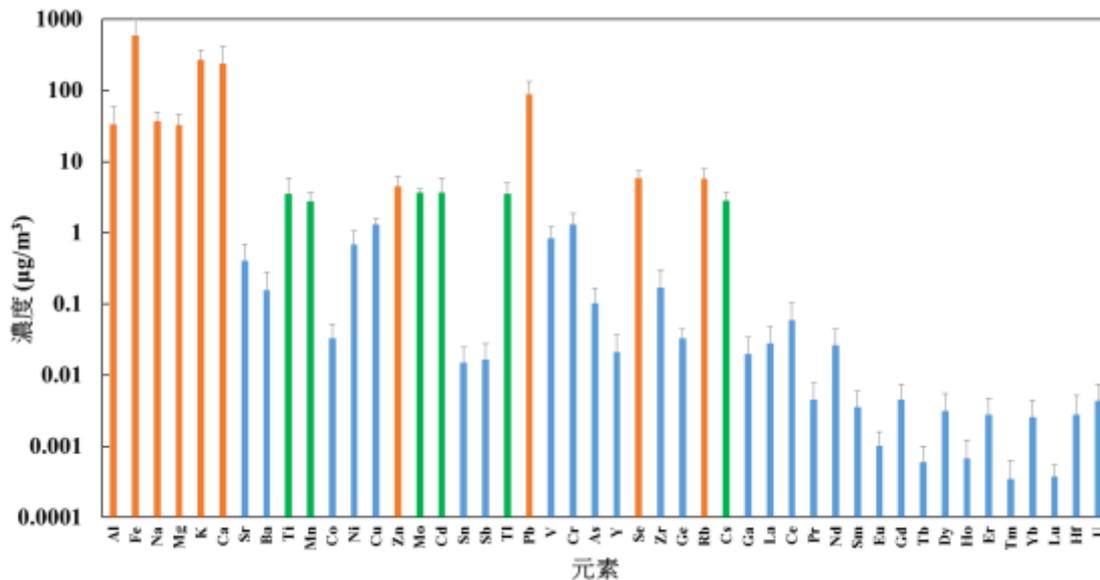


圖 4.3.11 鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 PM_{2.5} 中各元素濃度分佈 (橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 PM_{2.5} 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

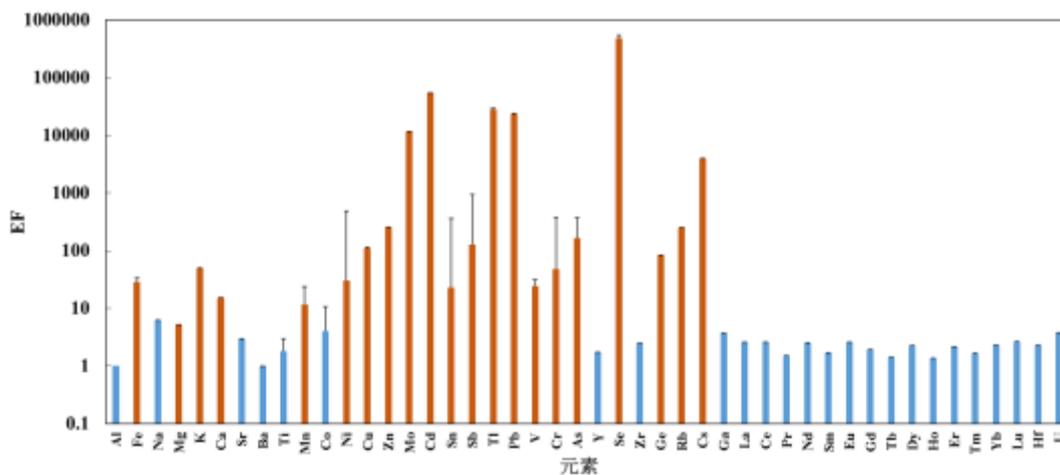


圖 4.3.12 鋼鐵廠燒結爐煙道排放之 PM_{2.5} 含有元素的富集因子特性 (Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

表 4.3.3 高雄港作業區排放之 PM_{2.5} 化學組成濃度 (mean ± SD) 統計表

	第一港口 (n = 14)	第二港口 (n = 14)	前鎮漁港 (n = 14)	旗津漁港 (n = 14)	第五貨櫃區 (n = 14)
PM _{2.5} (µg/m ³)	16.8 ± 7.2	18.5 ± 7.8	20.8 ± 8.2	19.3 ± 8.7	21.5 ± 7.4
Al (ng/m ³)	17.4 ± 16.0	21.4 ± 17.4	31.7 ± 26.9	21.6 ± 17.6	43.6 ± 28.2
Fe (ng/m ³)	31.2 ± 18.6	37.4 ± 30.8	53.3 ± 42.5	38.2 ± 38.7	72.4 ± 46.3
Na (ng/m ³)	179.6 ± 152.1	172.5 ± 150.9	213.9 ± 178.3	229.8 ± 232.4	257.9 ± 170.9
Mg (ng/m ³)	20.7 ± 17.9	167.6 ± 303.6	26.7 ± 23.1	31.6 ± 32.2	33.2 ± 23.2
K (ng/m ³)	38.8 ± 22.7	39.7 ± 30.8	64.6 ± 52.9	44.1 ± 41.8	80.2 ± 49.1
Ca (ng/m ³)	48.9 ± 11.1	67.7 ± 33.0	64.6 ± 11.2	65.1 ± 18.3	73.8 ± 19.6
Sr (ng/m ³)	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.3
Ba (ng/m ³)	0.5 ± 0.3	0.7 ± 0.5	1.1 ± 0.9	0.6 ± 0.7	1.2 ± 0.7
Ti (ng/m ³)	2.0 ± 1.1	10.6 ± 17.8	2.8 ± 1.6	2.4 ± 1.9	4.1 ± 2.4
Mn (ng/m ³)	2.1 ± 1.2	2.5 ± 2.5	6.7 ± 6.7	3.8 ± 5.3	5.9 ± 5.0
Co (ng/m ³)	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1
Ni (ng/m ³)	2.3 ± 1.3	2.5 ± 2.0	3.0 ± 2.6	2.4 ± 1.8	3.8 ± 2.7
Cu (ng/m ³)	1.8 ± 1.0	1.5 ± 1.0	2.4 ± 1.4	1.7 ± 1.0	2.8 ± 1.3
Zn (ng/m ³)	9.0 ± 5.2	10.1 ± 8.8	22.0 ± 23.3	12.0 ± 10.2	29.7 ± 31.3
Mo (ng/m ³)	0.9 ± 0.9	0.7 ± 0.5	0.8 ± 0.6	1.2 ± 1.6	1.0 ± 0.6
Cd (ng/m ³)	0.05 ± 0.03	0.06 ± 0.05	0.09 ± 0.06	0.06 ± 0.04	0.15 ± 0.13
Sn (ng/m ³)	0.6 ± 0.5	0.9 ± 0.8	1.6 ± 1.2	0.9 ± 0.6	1.9 ± 1.8
Sb (ng/m ³)	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.2
Tl (ng/m ³)	0.006 ± 0.004	0.008 ± 0.007	0.01 ± 0.009	0.007 ± 0.007	0.02 ± 0.04
Pb (ng/m ³)	1.5 ± 0.6	1.7 ± 1.4	5.3 ± 5.9	2.1 ± 1.8	3.8 ± 2.3
V (ng/m ³)	9.6 ± 6.5	16.2 ± 11.9	10.5 ± 5.3	10.2 ± 6.2	16.0 ± 12.1
Cr (ng/m ³)	5.9 ± 4.1	6.3 ± 3.7	5.9 ± 3.9	7.4 ± 6.3	5.2 ± 2.8
As (ng/m ³)	0.22 ± 0.09	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1
Y (ng/m ³)	0.006 ± 0.004	0.008 ± 0.006	0.008 ± 0.006	0.007 ± 0.007	0.02 ± 0.01
Se (ng/m ³)	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.2
Zr (ng/m ³)	0.1 ± 0.1	0.7 ± 1.0	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.2	0.3 ± 0.2
Ge (ng/m ³)	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.08 ± 0.06	0.07 ± 0.03
Rb (ng/m ³)	0.11 ± 0.07	0.11 ± 0.07	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1
Cs (ng/m ³)	0.005 ± 0.003	0.005 ± 0.003	0.007 ± 0.004	0.005 ± 0.004	0.012 ± 0.006
Ga (ng/m ³)	0.04 ± 0.02	0.05 ± 0.03	0.08 ± 0.05	0.05 ± 0.04	0.09 ± 0.05
La (ng/m ³)	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.03	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.05	0.04 ± 0.04

表 4.3.3 高雄港作業區排放之 PM_{2.5} 化學組成濃度 (mean ± SD) 統計表 (續)

	第一港口 (n = 14)	第二港口 (n = 14)	前鎮漁港 (n = 14)	旗津漁港 (n = 14)	第五貨櫃區 (n = 14)
Ce (ng/m ³)	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.04	0.03 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.04 ± 0.03
Pr (ng/m ³)	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.003 ± 0.002
Nd (ng/m ³)	0.008 ± 0.006	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.007	0.009 ± 0.009	0.02 ± 0.01
Sm (ng/m ³)	0.001 ± 0.0008	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.003 ± 0.002
Eu (ng/m ³)	0.0003 ± 0.0002	0.0004 ± 0.0003	0.0004 ± 0.0003	0.0003 ± 0.0003	0.0008 ± 0.0005
Gd (ng/m ³)	0.001 ± 0.0009	0.002 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.003 ± 0.002
Tb (ng/m ³)	0.0002 ± 0.0001	0.0003 ± 0.0002	0.0002 ± 0.0001	0.0002 ± 0.0002	0.0005 ± 0.0004
Dy (ng/m ³)	0.0008 ± 0.0006	0.001 ± 0.0009	0.001 ± 0.0008	0.001 ± 0.0009	0.002 ± 0.002
Ho (ng/m ³)	0.0002 ± 0.0001	0.0003 ± 0.0002	0.0003 ± 0.0002	0.0003 ± 0.0002	0.0006 ± 0.0004
Er (ng/m ³)	0.0006 ± 0.0004	0.0007 ± 0.0005	0.0007 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0006	0.001 ± 0.0009
Tm (ng/m ³)	5.1E-5 ± 5.2E-5	6.9E-5 ± 7.5E-5	6.9E-5 ± 7.2E-5	6.7E-5 ± 8.7E-5	0.0001 ± 0.0001
Yb (ng/m ³)	0.0005 ± 0.0004	0.0007 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0004	0.0006 ± 0.0005	0.001 ± 0.0007
Lu (ng/m ³)	6.0E-5 ± 4.0E-5	7.2E-5 ± 5.4E-5	7.0E-5 ± 4.8E-5	7E-5 ± 6.4E-5	0.0001 ± 8.7E-5
Hf (ng/m ³)	0.01 ± 0.008	0.02 ± 0.03	0.01 ± 0.007	0.01 ± 0.006	0.01 ± 0.009
U (ng/m ³)	0.001 ± 0.0007	0.002 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.003 ± 0.002
OC (µg/m ³)	3.1 ± 1.4	4.5 ± 1.9	6.5 ± 2.5	5.4 ± 2.0	5.8 ± 1.9
EC (µg/m ³)	0.6 ± 0.3	1.3 ± 0.7	1.8 ± 0.6	1.1 ± 0.4	3.4 ± 1.0
Na ⁺ (ng/m ³)	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.09	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.2
NH ₄ ⁺ (µg/m ³)	2.0 ± 1.1	2.4 ± 1.3	2.5 ± 1.4	2.5 ± 1.4	2.5 ± 1.3
NO ₃ ⁻ (µg/m ³)	2.3 ± 2.2	2.7 ± 2.4	3.2 ± 2.6	3.3 ± 2.9	3.2 ± 2.6
SO ₄ ⁻² (µg/m ³)	4.4 ± 1.9	4.5 ± 1.8	4.8 ± 2.0	4.5 ± 2.0	4.8 ± 2.1
K ⁺ (ng/m ³)	0.11 ± 0.08	0.1 ± 0.07	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.09	0.1 ± 0.1
Mg ⁺² (ng/m ³)	0.05 ± 0.05	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.07	0.1 ± 0.1	0.06 ± 0.03
Ca ⁺² (ng/m ³)	0.07 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.1 ± 0.06
Cl ⁻ (ng/m ³)	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.2
Modern carbon (µg/m ³)	1.7 ± 1.0	2.0 ± 0.9	2.5 ± 1.1	2.5 ± 1.1	2.2 ± 1.0
Fossil carbon (µg/m ³)	2.0 ± 0.7	3.7 ± 1.7	5.8 ± 1.9	4.0 ± 1.4	7.0 ± 2.1
δ ¹³ C (‰)	-30.4 ± 5.3	-25.0 ± 1.3	-27.0 ± 1.4	-27.7 ± 1.4	-26.3 ± 0.9
pMC (%)	44 ± 11	36 ± 10	29 ± 8	38 ± 8	24 ± 10
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	1.1555 ± 0.0104	1.1571 ± 0.0093	1.1538 ± 0.0103	1.1527 ± 0.0050	1.1597 ± 0.0094
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁷ Pb	2.4296 ± 0.0099	2.4295 ± 0.0097	2.4272 ± 0.0093	2.4259 ± 0.0100	2.4344 ± 0.0060

在金屬元素 (含地殼元素) 部分, 第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區的金屬元素 (含地殼元素) 分別占了 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 2.2%、3.0%、2.5%、2.3% 和 3.1%。圖 4.3.13~4.3.17 分別呈現第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區的金屬元素濃度分布圖, 除了每一個作業區的 Al、Fe、Na、Mg、K 和 Ca 質量濃度均超過 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.1% 外, 其他作業區也有部分金屬元素占 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 0.05~0.1%, 特別是 Zn 和 V (第一港口船舶進出: Zn 和 V; 第二港口船舶進出: Tl、Zn 和 V; 前鎮漁港: V (Zn 超過 0.1%); 旗津漁港: Zn 和 V; 第五貨櫃區: Zn (V 超過 0.1%))。在 EF 部分, 圖 4.3.18~4.3.22 分別呈現第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區的金屬元素 EF 分布圖, 該圖顯示 Na、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb、V、Cr、As、Se、Ge 和 Hf 的 EF 均超過 10, 第一港口另有 K、Cs、Ga 和 La 的 EF 超過 10, 第二港口則有 Mg 和 Zr。目前的研究則指出, 除了 Na 和海鹽飛沫有關外, Al、Fe、Ca 和 Mg 可能和貨物在裝卸過程中產生的揚塵有關 (Tolis et al., 2015), 而船舶或貨運車燃燒的油品所排放的 V 應是造成 V 濃度與 EF 都偏高的原因 (de Foy et al., 2012; Tolis et al., 2015; Zhao et al., 2013a)。Zn 的存在則與貨運車的排放有關 (Lin et al., 2015; 周崇光, 2017), K 則推測和鄰近的污染源有關, 如鋼鐵廠的排放 (Tsai et al., 2007)。另外, 在環保署 107 年度細懸浮微粒($PM_{2.5}$)化學成分監測及分析計畫中 (李崇德, 2018), 該計畫所調查的全台 6 個測站 (板橋、忠明、斗六、嘉義、小港和花蓮) 在最近一年的調查資料中, 發現地殼元素為主要的物種 (2017 年冬季前 5 個濃度最高的金屬元素分別為鉀、鈉、鐵、鋁和鎂, 濃度依序為 310.3 ng/m^3 、 236.9 ng/m^3 、 160.1 ng/m^3 、 125.2 ng/m^3 和 49.6 ng/m^3 , 其 EF 均低於 10; 2018 年春季則為鈉、鉀、鐵、鋁和鈣, 濃度依序為 291.4 ng/m^3 、 214.5 ng/m^3 、 159.4 ng/m^3 、 150.7 ng/m^3 和 124.6 ng/m^3 , 其 EF 均低於 10; 2018 年夏季則為鈉、鐵、鉀、鈣和鋁, 濃度依序為 221.2 ng/m^3 、 71.8 ng/m^3 、 61.7 ng/m^3 、 59.5 ng/m^3 和 41.3 ng/m^3 , 其 EF 均低於 10; 2018 年秋季則為鈉、鉀、鐵、鋁和鈣, 濃度依序為 255.3 ng/m^3 、 169.9 ng/m^3 、 92.6 ng/m^3 、 49.6 ng/m^3 和 25.4 ng/m^3 , 其 EF 均低於 10。各季節中, 除了鈉約可佔 $PM_{2.5}$ 質量濃度的 10%, 其他元素都佔 5% 左右), 但港口的調查結果除了地殼元素外, 也包含 V 和 Zn 等元素, 因此, 相較之較, 港口排放的原素確實和周界有些微差異。

在同位素數值的分佈部分，表 4.3.3 顯示第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區的平均現代碳比例均低於 45%，且超過 50% 的樣本數不超過 10%，其中前鎮漁港和第五貨櫃區的平均現代碳比例更低於 30%，經換算後的 $PM_{2.5}$ 中的化石碳濃度也明顯高於現代碳濃度，顯示於港口作業區採集到的碳以化石碳為主。在 $\delta^{13}C$ 部分，表 4.3.3 顯示 $\delta^{13}C$ 的數值，除了第一港口外，其他四個港口作業區在 -25‰ 至 -28‰ 之間，其值和 Garbarienė 在立陶宛波羅地海沿岸分析的總碳之 $\delta^{13}C$ 數值相近 (-27.5‰ 至 -26.2‰) (Garbarienė et al., 2019)，該研究也透過氣象資料分析發現，沿海的活動，包含船舶的排放，可能是沿海地區碳的主要貢獻源。本研究於高雄港作業區採集到的總碳，應可用來代表港口作業區排放的碳特徵。在第一港口部分，春季採集到的平均 $\delta^{13}C$ 為 -26.3‰，但夏季為 -35.8‰，夏季遠低於其他 4 個港口作業區的量測結果，此部分仍需確認。鉛同位素比值部分，目前尚無研究量測港口作業區的鉛同位素比值，因此無法和其他研究比較。在 5 個港口作業區的鉛同位素比值部分，平均的 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{207}Pb$ 分別為 1.1561 (1.1406~1.1884) 和 2.4295 (2.4013~2.4546)，不同作業區的鉛同位素比值相近且無顯著差異 ($^{206}Pb/^{207}Pb$ 的 *p-value* 為 0.13； $^{208}Pb/^{207}Pb$ 的 *p-value* 為 0.26)。

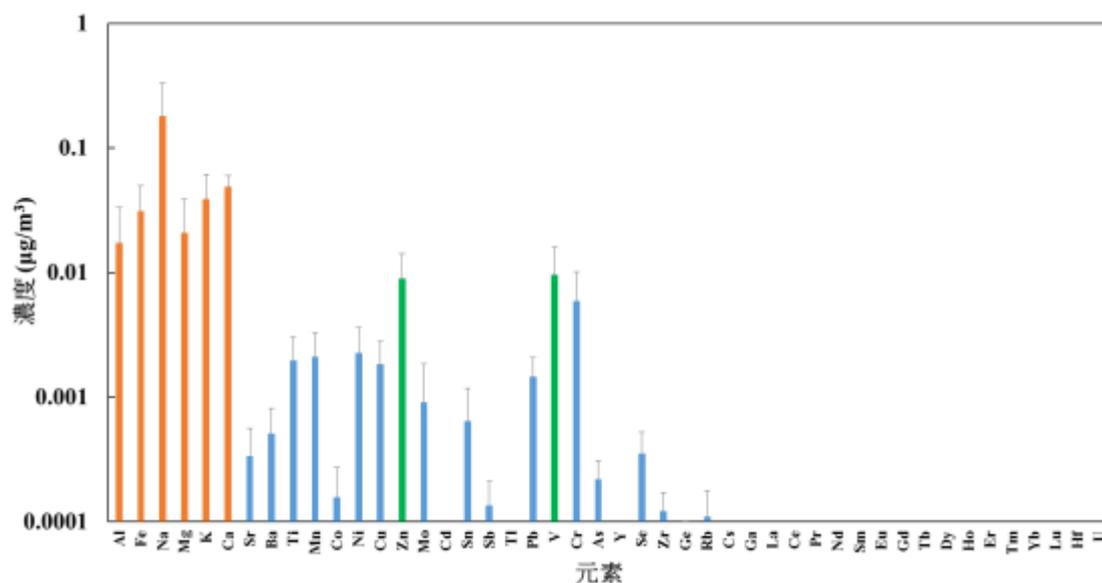


圖 4.3.13 第一港口船舶進出航道之金屬元素濃度分布圖
(橘色、綠色和藍色分別表示該元素的质量濃度占 $PM_{2.5}$ 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

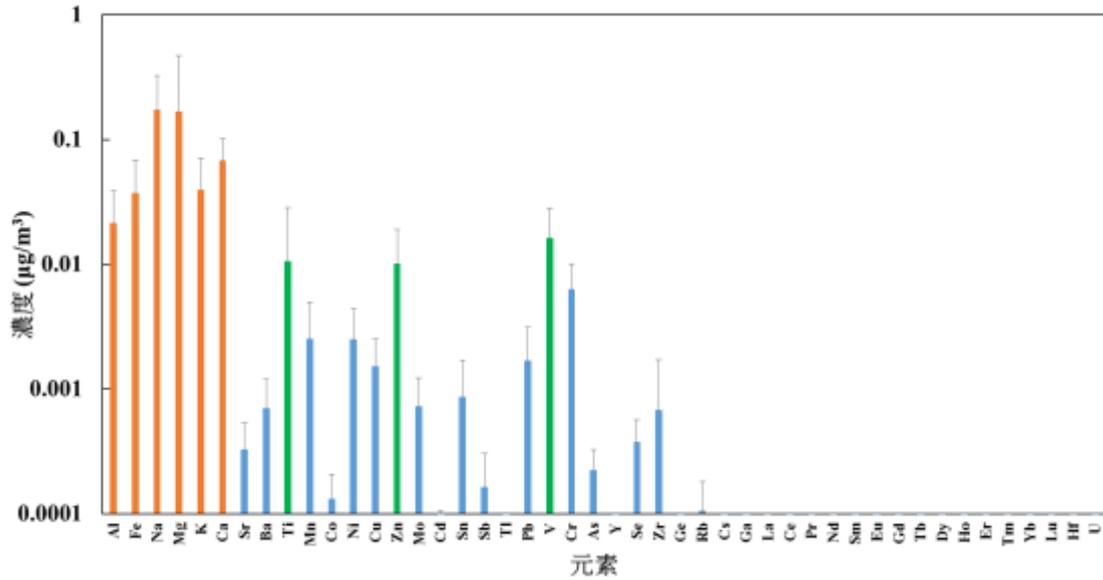


圖 4.3.14 第二港口船舶進出航道之金屬元素濃度分布圖
(橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 PM_{2.5} 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

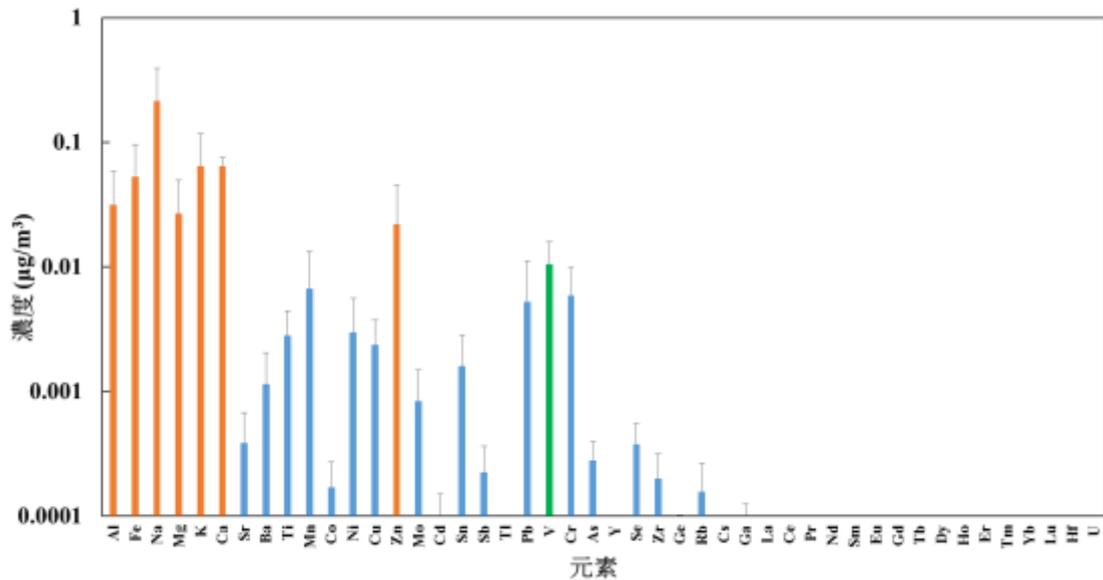


圖 4.3.15 前鎮漁港之金屬元素濃度分布圖
(橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 PM_{2.5} 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

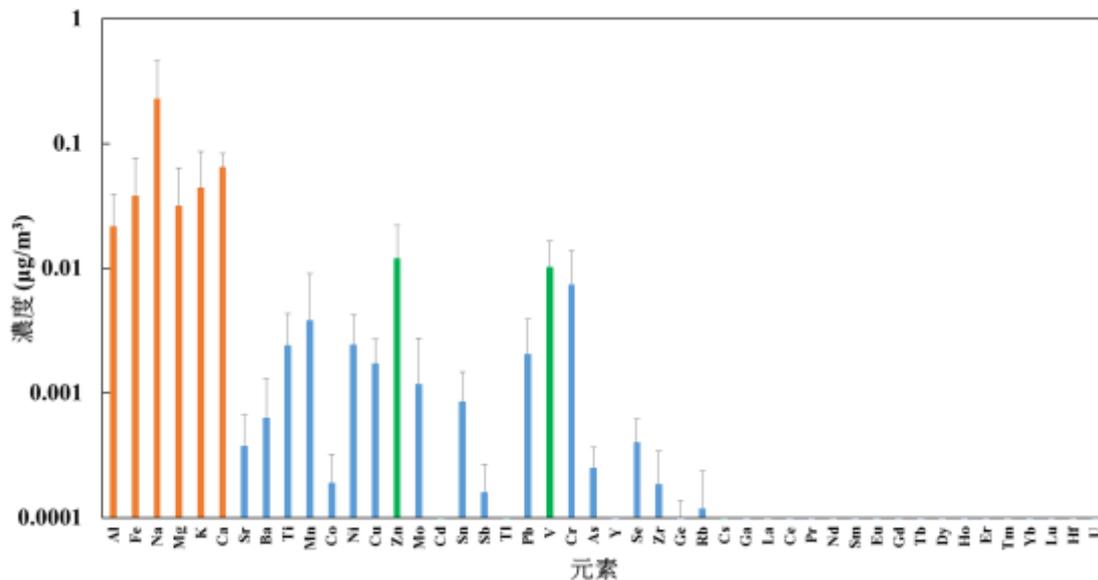


圖 4.3.16 旗津漁港之金屬元素濃度分布圖
(橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 PM_{2.5} 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

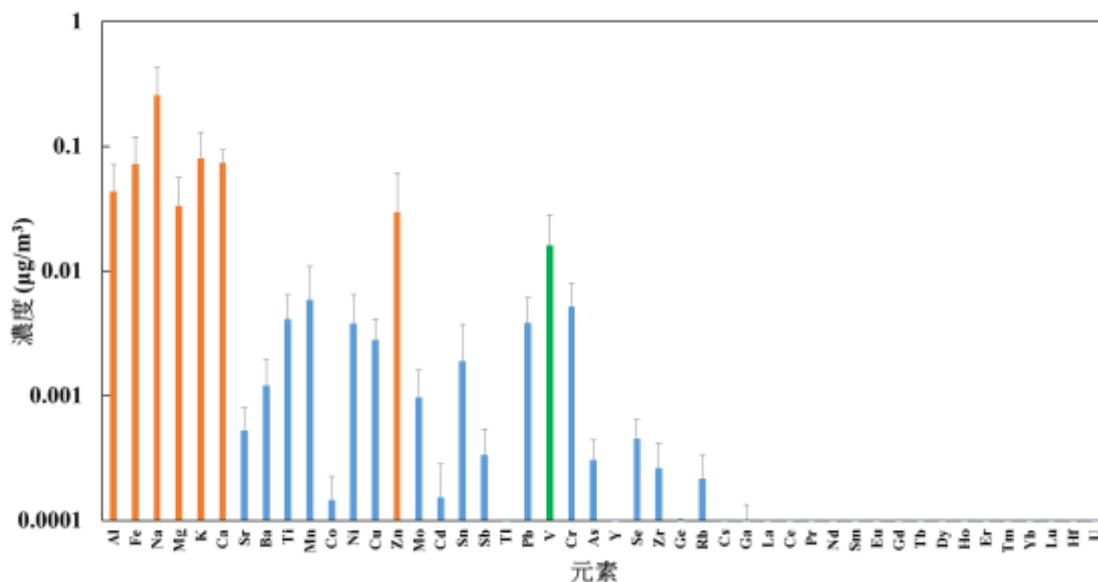


圖 4.3.17 第五貨櫃區之金屬元素濃度分布圖
(橘色、綠色和藍色分別表示該元素的質量濃度占 PM_{2.5} 的 >0.1%、0.05~0.1% 和 <0.05%)

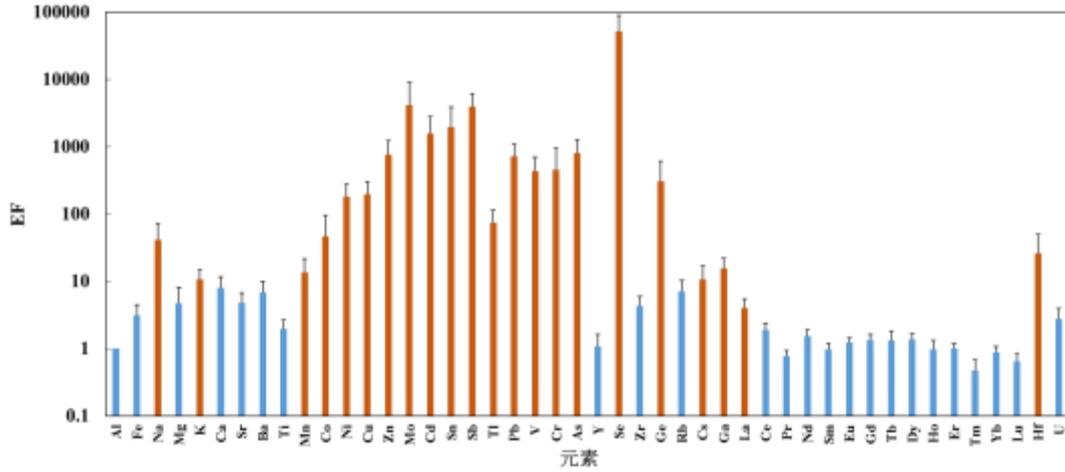


圖 4.3.18 第一港口船舶進出航道之 EF 分布圖
(Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

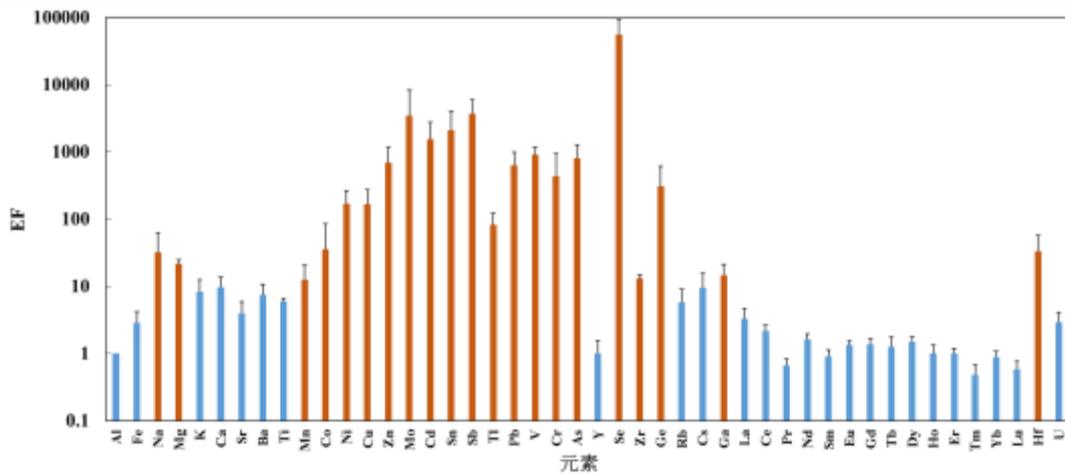


圖 4.3.19 第二港口船舶進出航道之 EF 分布圖
(Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

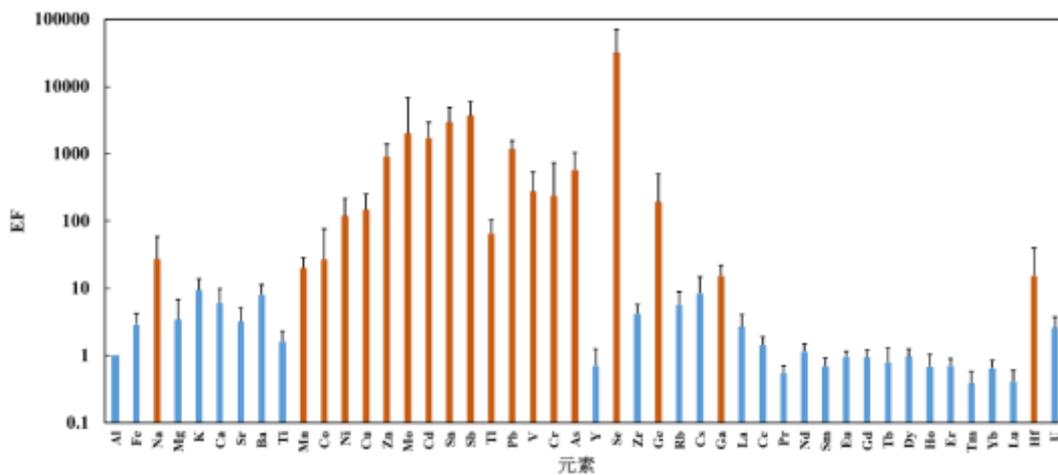


圖 4.3.20 前鎮漁港之 EF 分布圖
(Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

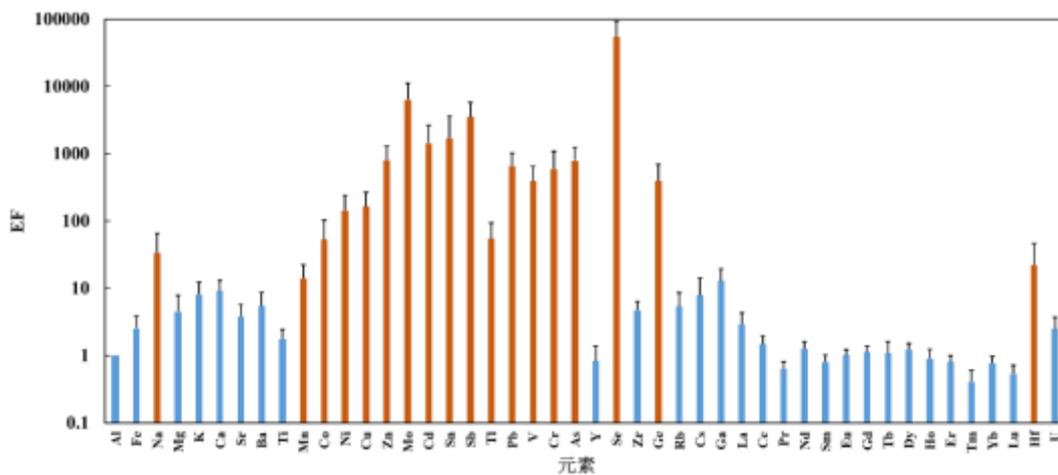


圖 4.3.21 旗津漁港之 EF 分布圖
(Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

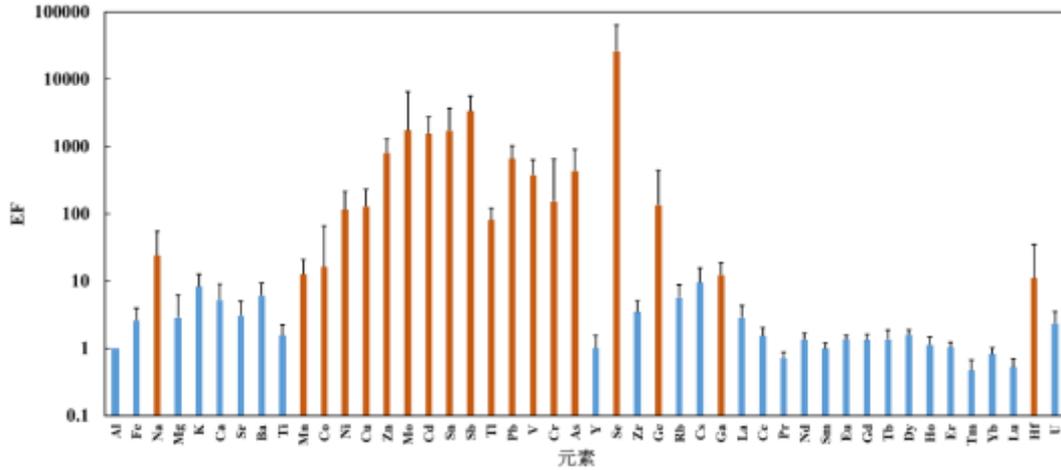


圖 4.3.22 第五貨櫃區之 EF 分布圖
(Enrichment Factor, EF, 橘色代表 EF 大於或等於 10)

由於 5 個港口作業區的 $PM_{2.5}$ 來自大氣採集的樣本，並可能包含非港口作業排放的 $PM_{2.5}$ ，因此本研究團隊進一步以因子分析 (Factor analysis) 探討港口作業區的化學組成特性 (因子分析納入的化學組成以優勢化學組成為主)。因子分析結果如表 4.3.4 所示，該表顯示 4 個因子可解釋 70% 的港口作業區污染源種類，其中第一個因子的變異數超過 10 的組成包含 Cd、Cu、Fe、K、Pb、Sn 和 Zn，此類金屬元素多由交通或工業污染源貢獻 (如鋼鐵廠) (Lin et al., 2015; Tsai et al., 2007)，推測和港口作業區有較多的貨運車輛進出，鄰近也有鋼鐵廠等重工業有關；第二個因子以二次氣膠為主，主要的組成包含有機碳、硝酸鹽、銨鹽和 Se；第三個因子則以 V 和硫酸鹽為主，其中燃料油的燃燒會同時貢獻 V 和硫酸鹽，如船舶 (Yau et al., 2013)；第四個因子則為揚塵 (地殼元素)，因有較高的 Ca 和 Mg 金屬。

總結 5 個港口作業區的 $PM_{2.5}$ 之傳統化學組成和同位素特徵可知，各作業區的主要金屬元素種類差異不大，而硫酸鹽、有機碳和元素碳則為 5 個港口作業區的優勢化學組成，其中貨運車集中區有較高的元素碳比例，並高於其他 4 個港口作業區。在目前已完成分析的現代碳 (均已完成分析)、 $\delta^{13}C$ (尚缺夏季) 和鉛同位素比值 (尚缺夏季) 部分，港口作業區排放的碳以化石碳為主， $\delta^{13}C$ 的變異小且和過去量測沿海有船舶運輸活動的研究之結果相近，5 個港口作業區的鉛同位素比值明顯較周界量測到的結果高，但尚無其他研究可供比較。

表 4.3.4 港口作業區之 PM_{2.5} 化學組成因子分析結果

Composition	Pollution sources			
	工業排放或交通源	二次氣膠	燃料油燃燒	揚塵 (地殼元素)
Al	0.67	-0.08	0.27	0.39
As	0.56	0.59	0.17	-0.03
Ca	0.29	0.10	0.16	0.88
Cd	0.88	0.10	-0.13	-0.07
Cr	0.11	0.68	-0.26	0.26
Cu	0.78	0.20	-0.01	-0.10
Fe	0.92	-0.05	0.14	0.19
K	0.73	0.15	0.25	0.15
Mg	-0.10	-0.05	0.09	0.79
Ni	0.63	-0.09	0.63	0.09
Pb	0.78	0.02	0.18	-0.01
Se	0.15	0.87	0.15	-0.10
Sn	0.72	0.11	-0.21	-0.10
Tl	0.46	-0.07	0.57	-0.07
V	0.09	-0.14	0.74	0.09
Zn	0.85	0.05	0.04	0.02
OC	0.18	0.76	-0.32	0.14
EC	0.52	0.25	-0.06	0.16
SO ₄ ⁻²	-0.04	0.47	0.80	-0.02
NO ₃ ⁻	-0.01	0.94	-0.16	-0.08
NH ₄ ⁺	-0.01	0.91	0.32	-0.09
Na ⁺	-0.11	-0.06	0.57	0.24
Explained variance (%)	33	18	12	7
Cumulative variance (%)	33	51	63	70

*挑選變異係數大於 0.7 的變數。

4.4 污染源分析

本年度計畫分別以同位素和 PMF 分析結果，討論各測站的 PM_{2.5} 污染源。

4.4.1 碳與鉛同位素

(a) 碳同位素

圖 4.4.1 呈現春季與夏季密集採樣期間，大氣 PM_{2.5} 濃度、總碳濃度和 $\delta^{13}\text{C}$ 之關係，該圖顯示在春季密集採樣期間，大氣 PM_{2.5} 濃度、總碳濃度和 $\delta^{13}\text{C}$ 無顯著關係，但當到了夏季，大氣 PM_{2.5} 濃度和 $\delta^{13}\text{C}$ 有略呈正相關，總碳濃度占 PM_{2.5} 質量濃度的比例（倒數）和 $\delta^{13}\text{C}$ 略呈負相關，這現象說明當 PM_{2.5} 濃度與碳含量越高時， $\delta^{13}\text{C}$ 會較重。過去研究指出透過異相反應生成的碳，其 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重（-20 至 -14‰）(Zhang et al., 2016b)，因此推測 PM_{2.5} 濃度較高期間所生成的碳主要是透過異相反映貢獻；反之，當 PM_{2.5} 濃度與碳含量越低時， $\delta^{13}\text{C}$ 會較輕，而過去研究指出透過光化學反應生成的碳，其 $\delta^{13}\text{C}$ 偏輕（-33 至 -32‰）(Irei et al., 2006)，因此光化學反應則可能是造成低 PM_{2.5} 濃度期間的主要碳貢獻因子。

圖 4.4.2 進一步藉由各測站及不同污染源的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值分佈圖，探討春季和夏季密集採樣期間的碳污染源；然而，因本計畫採集的三種污染源之碳含量過低，導致無法提供 $\delta^{13}\text{C}$ 數值進行污染源的分析，因此本節藉由國外其他研究和前期計畫量測的污染源之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值進行碳污染源的分析（前期計畫共採集煉油廠、燃煤電廠、交通排放和稻梗燃燒四種污染源，但僅有煉油廠、交通排放和稻梗燃燒有足夠的碳成分做 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析。煉油廠：-28.5 至 -27.9‰；交通排放：-28.6 至 -26.4‰；稻梗燃燒：-35.0 至 -30.2‰。在現代碳的比例部分，煉油廠：3~24%；燃煤電廠：36~44%；交通排放：7~21%；稻梗燃燒：97~98%。周崇光，2017）。

圖 4.4.2 顯示春季密集觀測期間，鳳山站和潮州站的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值和煉油廠、交通源、生質燃燒和二次氣膠前趨物 (Isoprene) 之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值重疊，其中鳳山站的平均現代碳比例在 50% 以下，反映化石燃料的燃燒是鳳山站的重要碳污染源，但潮州站的平均現代碳比例達 63%，顯然，潮州站可能仍有尚未被掌握的現代碳貢獻源存在。在其他 6 個測站部分， $\delta^{13}\text{C}$ 數值和煉油廠、交通排放、生質燃燒和二次氣膠前驅物重疊，而在每個測站的 7 個採樣日中，橋頭站、小港站和林園站的現代碳比例有超過 4 天小於 50%，因此推測此 3 個測站在春季的碳污染源以化石碳貢

獻源為主，而左營站、大寮站和屏東站則有較多的樣本之現代碳比例高於 50%，推測此三個測站應有尚未被掌握的現代碳污染源。

在夏季部分，圖 4.4.2 顯示夏季密集觀測期間，橋頭站、左營站、鳳山站、小港站和大寮站的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值和煉油廠、交通源、生質燃燒和二次氣膠前趨物 (Isoprene) 之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值重疊，且此 5 個測站的平均現代碳比例都在 50% 以下，反映化石燃料的燃燒是重要的碳污染源。在林園站、屏東站和潮州站部分， $\delta^{13}\text{C}$ 數值和煉油廠、交通排放、生質燃燒和二次氣膠前驅物重疊，但除了林園站的平均現代碳比例小於 50% 外，潮州站和屏東站的平均現代碳比例都在 50% 以上，顯示林園站還是以化石碳的貢獻源為主，潮州站和屏東站則以現代碳為主要貢獻源。

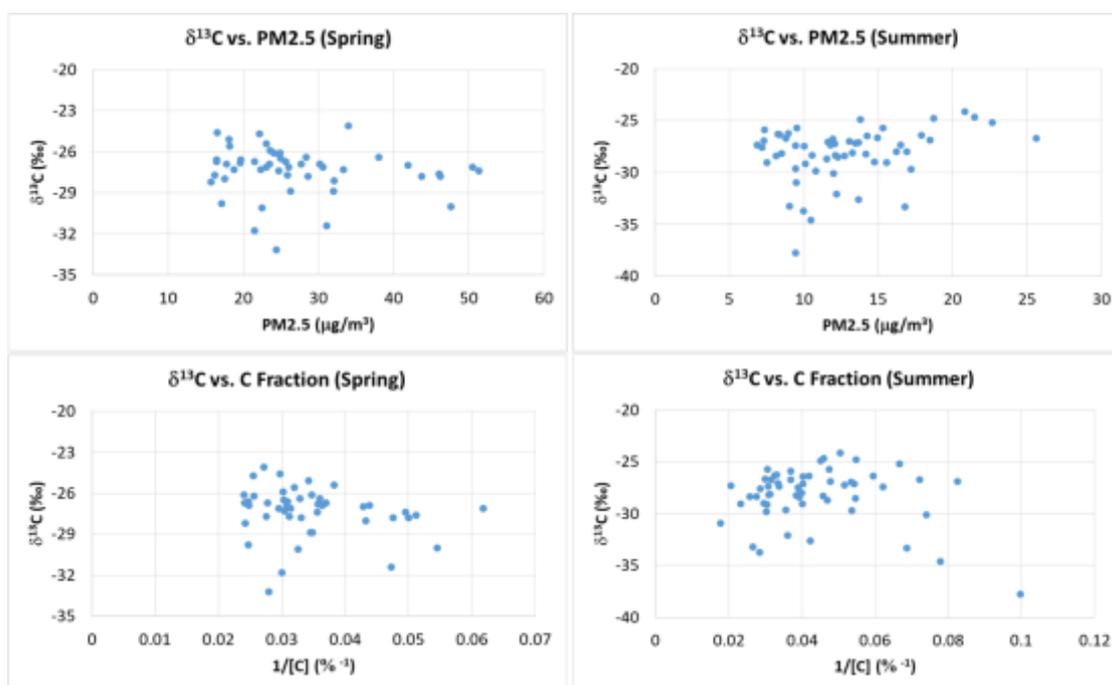


圖 4.4.1 密集採樣期間之 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度、總碳濃度和 $\delta^{13}\text{C}$ 之關係圖

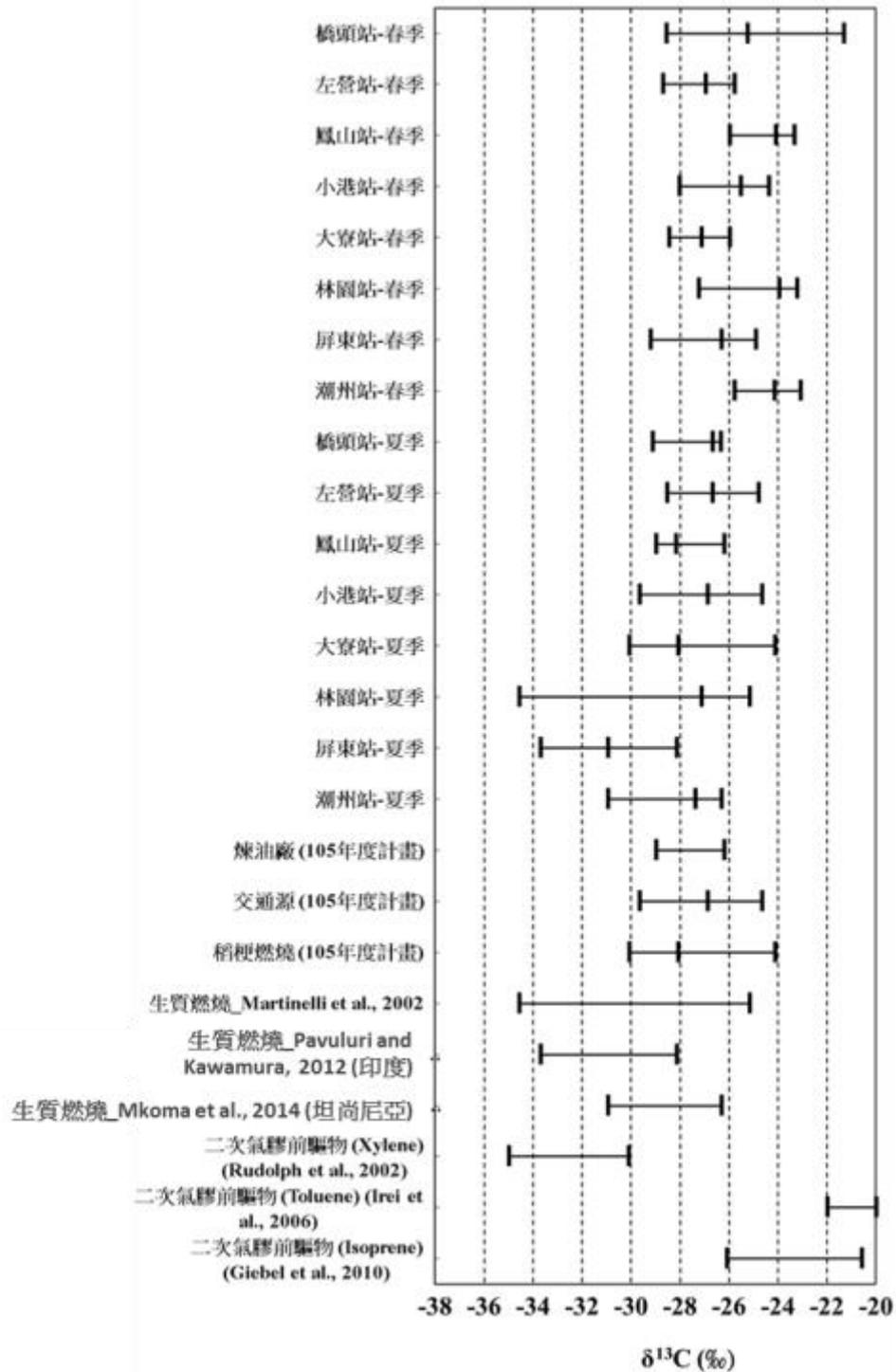


圖 4.4.2 大氣和污染源排放之 $PM_{2.5}$ 中的 $\delta^{13}C$ 比較圖
 (圖中的數值由左至右分別為最小值、中位數和最大值) (Giebel et al., 2010; Irei et al., 2006; Martinelli et al., 2002; Mkoma et al., 2014; Pavuluri and Kawamura, 2012; Rudolph et al., 2002)

圖 4.4.3 顯示加入 5 個港口作業區之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值後的碳污染源鑑定結果。由圖 4.4.3 可發現，除了夏季的屏東站和旗津漁港有重疊外，屏東站和其他港口作業區多無重疊；此外，其他 7 個測站在不同季節和 5 個港口作業區都有重疊，但仍需進一步分析，以瞭解港口作業區對不同測站在不同季節的影響。

儘管本研究團隊已藉由前期計畫調查的煉油廠和燃煤電廠等污染源煙道排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值來分析高屏地區的碳污染源，但前期計畫採集的污染源主要位於台中和雲林地區，且同一污染源但不同廠區的操作條件與燃料來源均不同，因此以前期計畫調查的污染源之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值來討論高屏地區的碳污染源，可能有較大的誤差。然而，藉由 8 個測站的現代碳比例可知，屏東站和潮州站應以現代碳的貢獻源為主，如生質燃燒，而前期計畫調查的污染源排放的碳都以現代碳為主(除了稻梗燃燒外)，因此推測其他 6 個位於高雄地區的測站以化石碳的貢獻源為主，但未來仍進一步收集更多位於高雄地區的污染源之碳同位素特徵，以提高碳污染源的解釋力。

(b) 鉛同位素

圖 4.4.4 為彙整本期計畫調查的 8 個測站、4 種污染源和前期計畫完成的焚化爐、交通排放、煉油廠和燃煤電廠的鉛同位素比值資料，以作為高屏地區鉛污染源的鑑定。圖 4.4.4 顯示 8 個測站的春季鉛同位素比值多落在“交通源+焚化爐+港口作業區”的範圍內，夏季也多落在“交通源+焚化爐+港口作業區”的範圍內，但夏季有部分樣本落在煉油廠的鉛同位素比值範圍內，特別是夏季橋頭站採集的結果 ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 在 1.65 以上)，說明交通源+焚化爐+港口作業區可能是高屏地區的主要鉛貢獻源，但仍有其他污染源存在。然而，因焚化爐為前期計畫於中部地區調查的結果，而不同縣市燃燒的垃圾量與成分可能不同，因此焚化爐是否為高屏地區重要的鉛貢獻源，有待商榷，相對的，未來增加位於高屏地區之焚化爐排放 $\text{PM}_{2.5}$ 的鉛同位素比值的採樣與分析有其必要性。此外，港口作業區的鉛同位素比值雖然和多數測站的鉛同位素比值相近，但因港口被視為面污染源，因此港口作業區是否為高屏地區的主要污染源之一，仍須進一步收集更多位於高雄地區的污染源之鉛同位素比值特徵，以提高鉛污染源的解釋力。

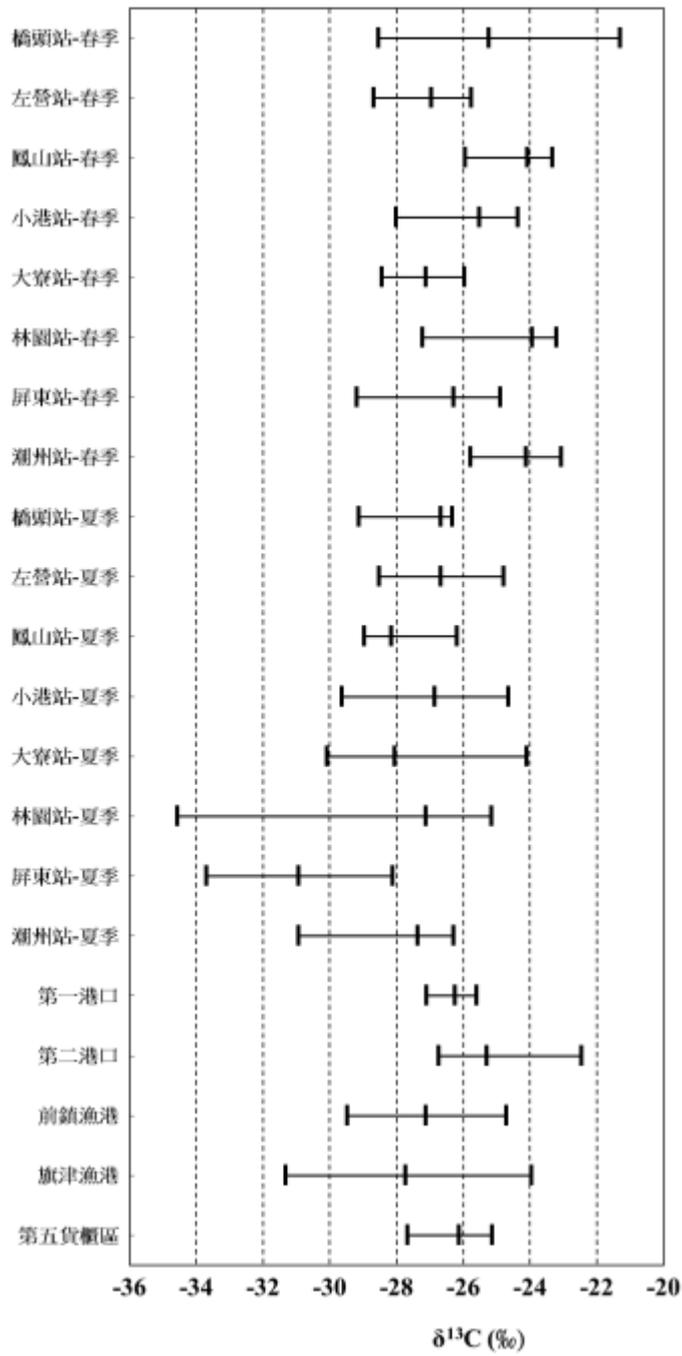
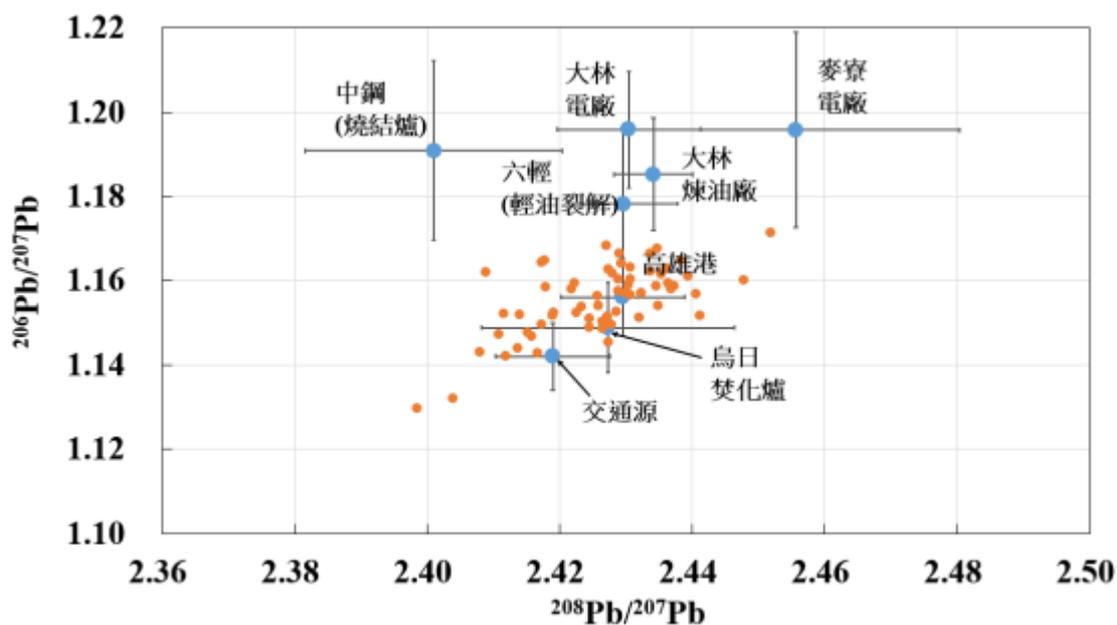
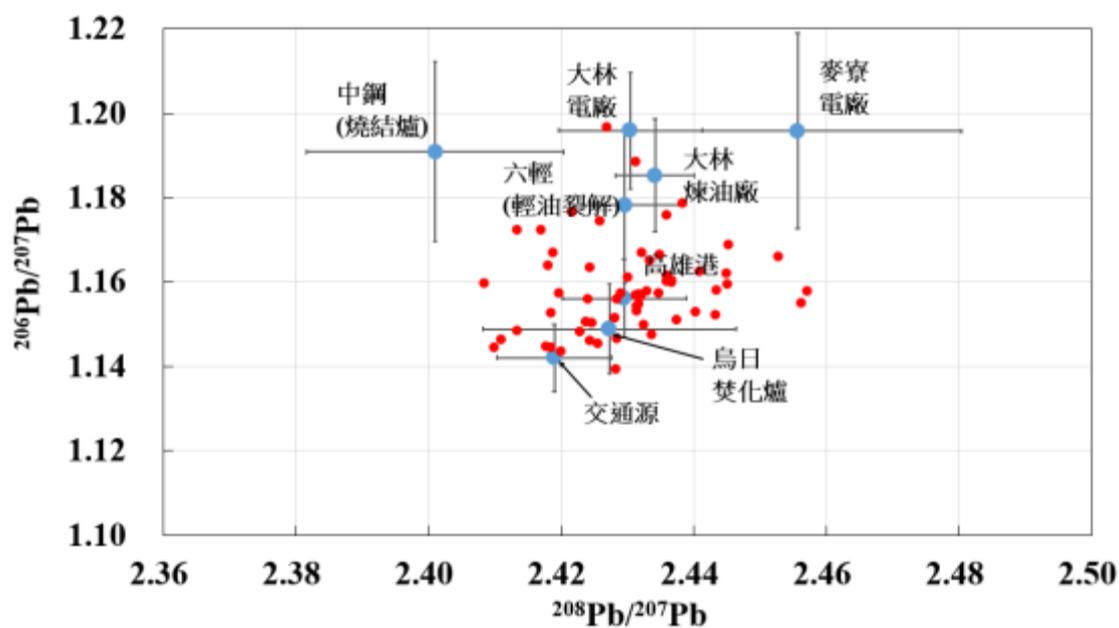


圖 4.4.3 大氣和港口作業區排放之 PM_{2.5} 中的 δ¹³C 比較圖
 (圖中的數值由左至右分別為最小值、中位數和最大值)



(a) 春季



(b) 夏季

圖 4.4.4 各測站大氣 PM_{2.5} 之鉛污染源分析結果

4.4.2 PMF 受體模式

本研究團隊在以 PMF 推估不同測站的污染源種類時，加入的變數除了傳統的化學組成（金屬元素和離子）外，也加入現代碳與化石碳濃度，但因部分測站無碳 14 的分析資料，因此納入 PMF 分析的樣本數為 117 筆。圖 4.4.5 為 PMF 解析因子數和臨界參數比值 ($Q_{\text{true}}/Q_{\text{exp}}$) 關係圖，該圖顯示 PMF 的解析因子數在 6 時，其臨界參數比值呈現較緩和的狀態，因此建議 PMF 推估的污染源因子數為 6。

圖 4.4.6 為以 PMF 推估獲得的 5 個污染源因子的剖面圖。第一個因子含有硝酸鹽和銨鹽之貢獻量較高 (> 55%)，化石碳和現代碳濃度也都高於 40%，因此第一個因子定義為「二次氣膠」，並可能含有老化氣膠。第二個因子為「工業排放（煉油廠）」，因該因子含有的重要指標包含 La、Cs 和 Nd (> 35%) 等石油煉製的指標 (Kulkarni et al., 2007; Moreno et al., 2008; 周崇光, 2014)。第三個因子以 V 和 Cr 等指標的相對貢獻量較高 (> 25%)，其中 V 的相對貢獻量更高達 51%，V 則是重油燃燒的主要化學組成 (Cheng et al., 2008; Querol et al., 2007; 周崇光, 2014, 2017)，因此第三個因子定義為「工業排放（重油燃燒）」。第四個因子的鈉離子、鎂離子和氯離子相對貢獻量都在 30% 以上，此三個離子又是海鹽飛沫的重要組成 (Rahn, 1999)，因此第四個因子定義為「海鹽飛沫」。

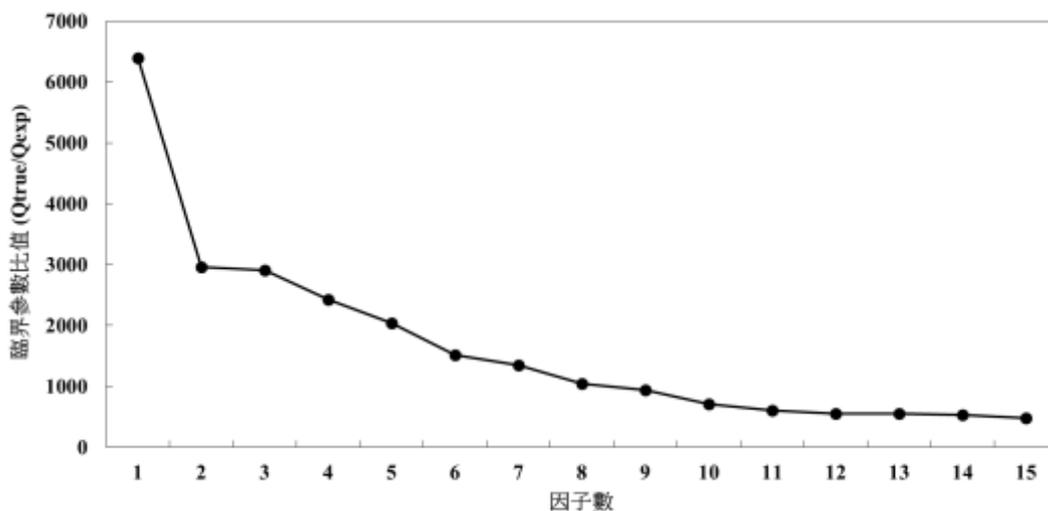


圖 4.4.5 PMF 解析因子數和臨界參數比值 ($Q_{\text{true}}/Q_{\text{exp}}$) 關係圖

第五個因子含有較高的 Fe、Ca、Mn、Mo、Tl、Co、Sb、Cr、Rb 和 Cs 等金屬元素的相對貢獻量，其中 Fe、Ca、Tl 和 Rb 等金屬元素為水泥灰的特徵元素 (Santacatalina et al., 2010; 周崇光, 2014)，Mn、Mo、Co 和 Sb 等金屬元素可能來自燃煤電廠、鋼鐵廠、焚化爐和金屬冶煉業 (Hu et al., 2003; Kuo et al., 2013; Okuda et al., 2008; Querol et al., 2007; Tsai et al., 2007)，因此第五個因子定義為「揚塵 (水泥灰) 和工業排放 (混合源)」。第六個因子的硫酸鹽和 V 有較高的相對貢獻量，在 4.3.4 節中以因子分析探討港口作業區的 PM_{2.5} 化學組成後，發現硫酸鹽和 V 共同存在同一個因子內，且過去研究指出船舶的燃料油經燃燒後貢獻的 PM_{2.5} 含有較高的硫酸鹽和 V (Yau et al., 2013)，Saraga 研究也發現類似的結果 (Saraga et al., 2019)，因此第六個因子定義為「燃料油燃燒 (船舶)」。

圖 4.4.7 為以 PMF 推估出 8 個高屏地區的 PM_{2.5} 濃度變異度的相對貢獻量。本研究發現 6 個污染源對橋頭站與左營站的貢獻相當 (每個污染源約 18%)；鳳山站以工業排放 (煉油廠) 和燃料油燃燒 (船舶) 為主；小港站則有較多的工業排放 (重油燃燒) 和揚塵 (含水泥灰) 和工業排放 (混合源) 貢獻；大寮站以海鹽飛沫占優勢；林園站則有海鹽飛沫和工業排放 (重油燃燒)；屏東站和潮州站則以工業排放 (煉油廠) 和燃料油燃燒 (船舶) 占優勢。總合以 PMF 分析的各測站污染源資料，可發現除了二次氣膠外，其他 5 個污染源分別在不同測站扮演重要的角色，因此工業排放與船舶排放可能是高屏地區的主要人為貢獻源。

4.4.3 同位素與受體模式之污染源分析結果比較

前期計畫於中部地區的研究發現，PMF 和 pMC 的結合可提高碳污染源的解釋力，因此本研究將現代碳與化石碳納入 PMF 進行分析，並和 pMC 的分析結果比較，結果如圖 4.4.8 所示。圖 4.4.8 顯示無論現代碳或化石碳，pMC 與 PMF 分析出的總現代碳和總化石碳結果相近，該圖也指出二次氣膠是主要的碳貢獻源，而燃料油燃燒 (船舶) 則為化石碳的重要污染源之一。然而，根據屏東站和潮州站的 pMC 分析結果，現代碳是主要的碳貢獻源，但 PMF 分析出的現代碳比例卻明顯低於 pMC 的分析結果，特別是兩個方法分析出的潮州站之現代碳比例約差 9%，推測是因尚無法掌握屏東站與潮州站的現代碳污染源種類，且其他 6 個測站的化石碳貢獻較占優勢，使得 PMF 分析結果顯示化石碳的污染源之影響較大。因此，未

來若能找出造成屏東站與潮州站高現代碳比例之原因，並納入關鍵性的指標，也許可修正 PMF 的分析結果。

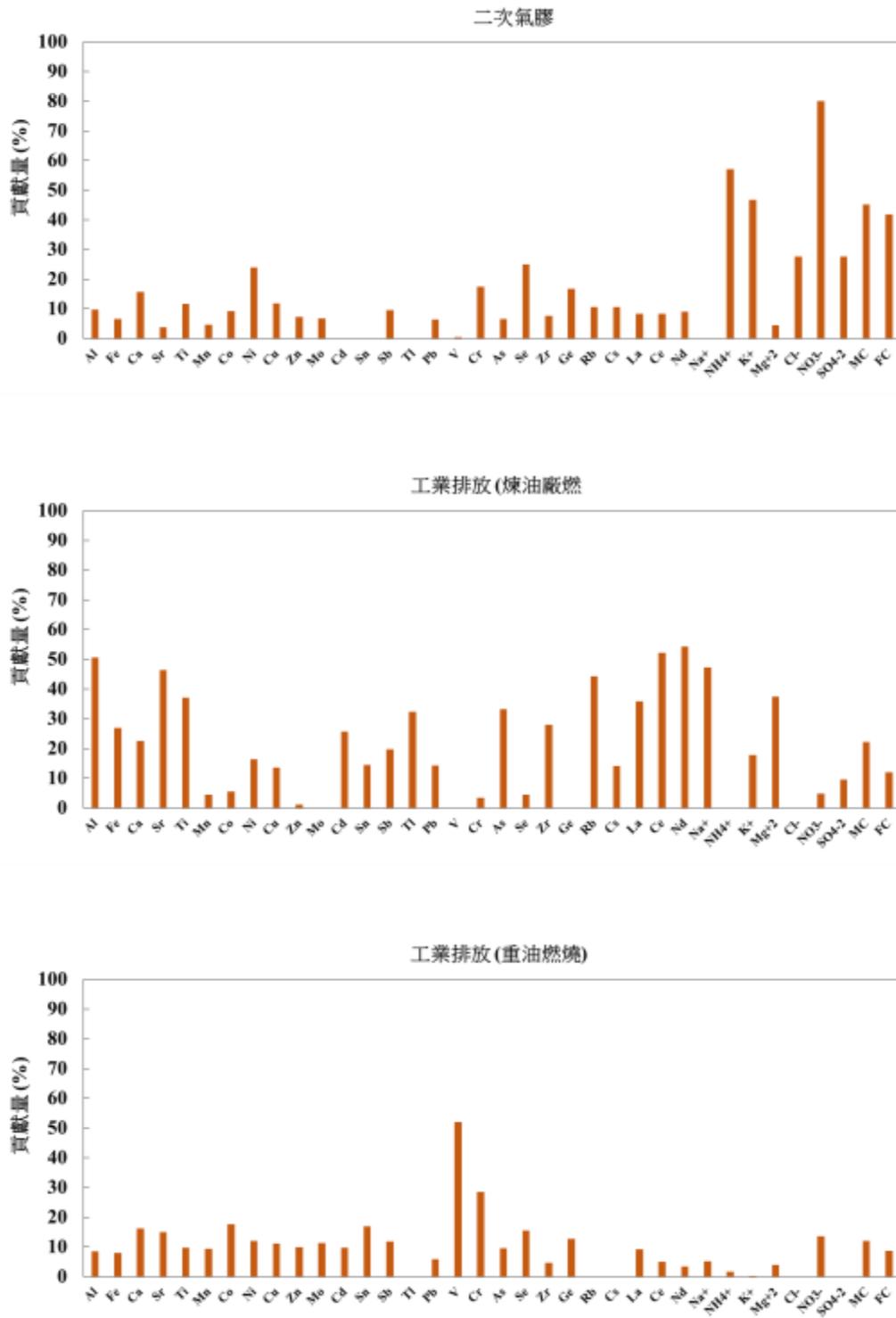


圖 4.4.6 PMF 污染源推估因子剖面圖
(MC: Modern carbon; FC: fossil carbon)

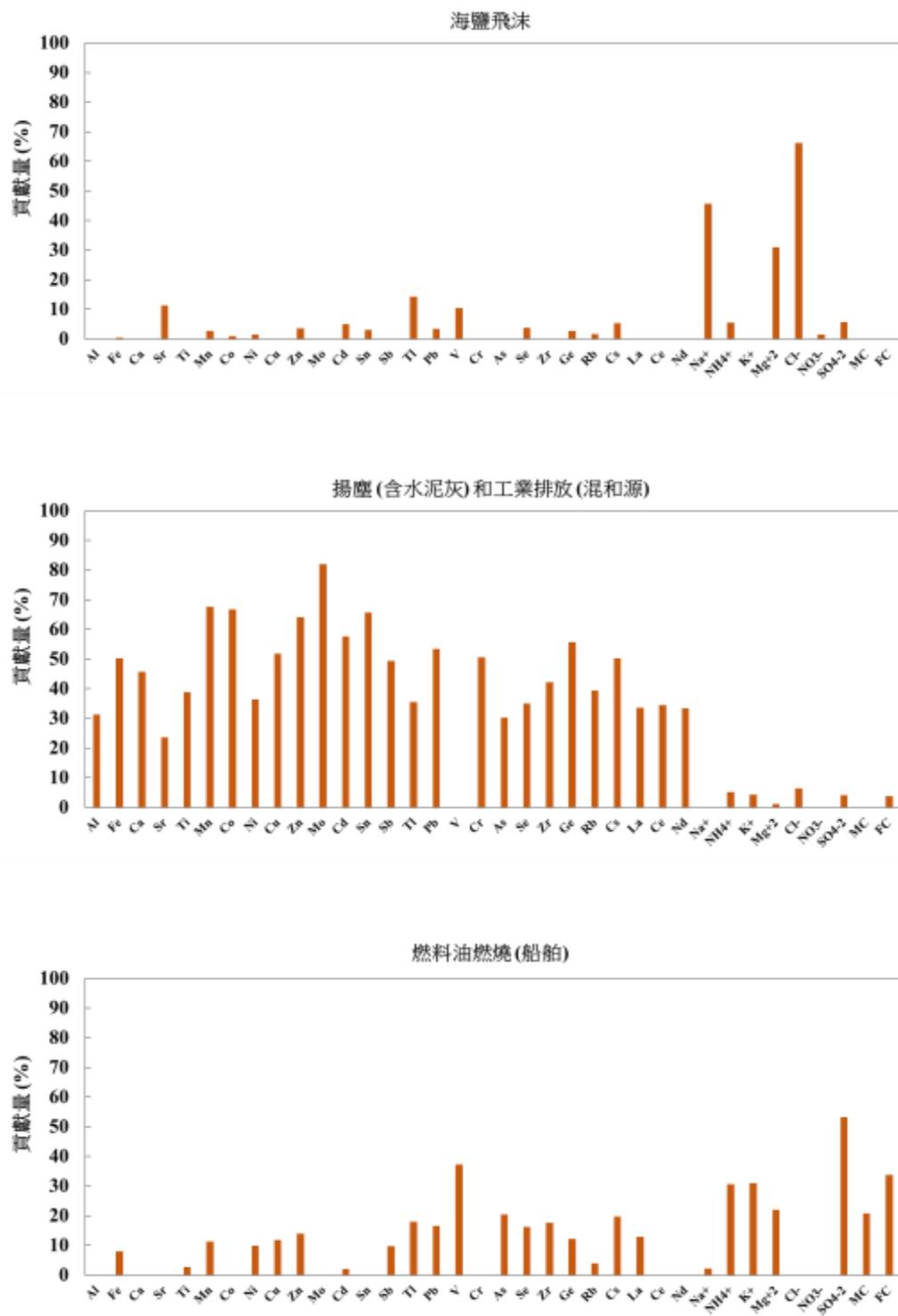


圖 4.4.6 PMF 污染源推估因子剖面圖 (續)
(MC: Modern carbon; FC: fossil carbon)

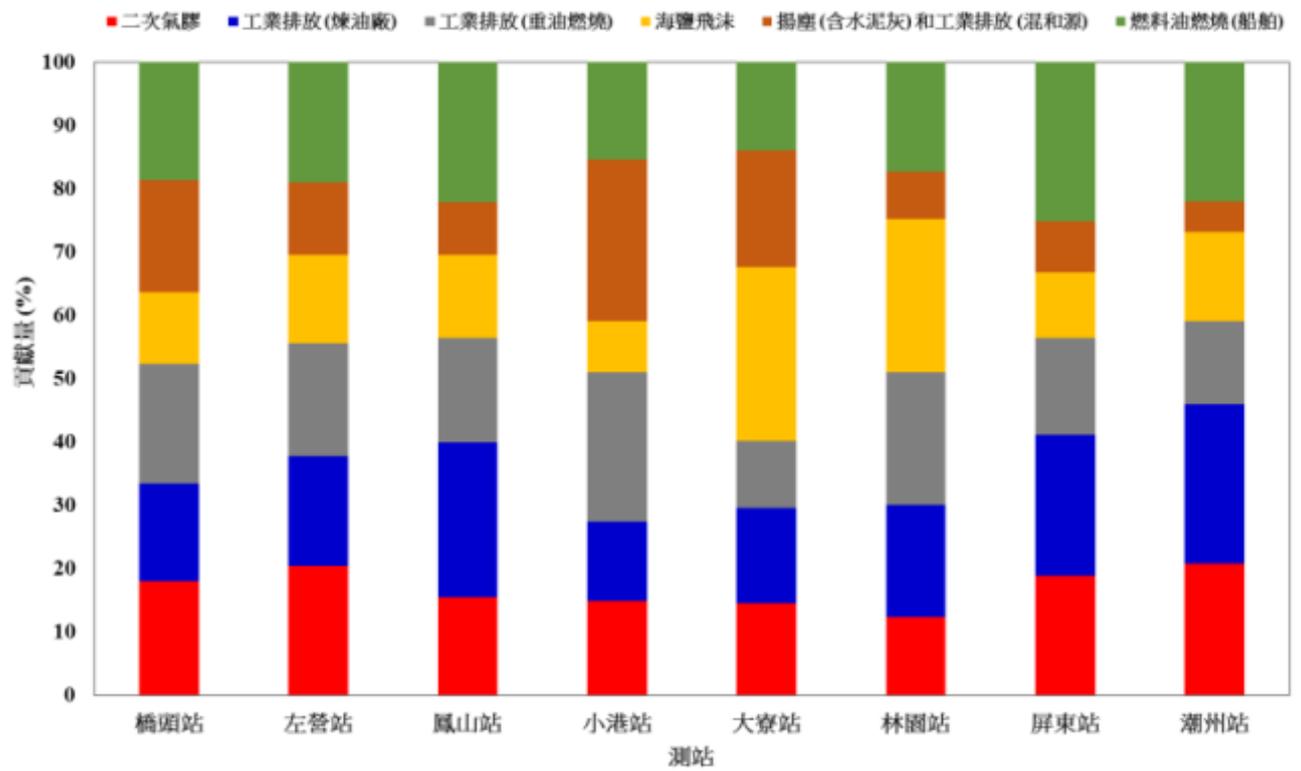
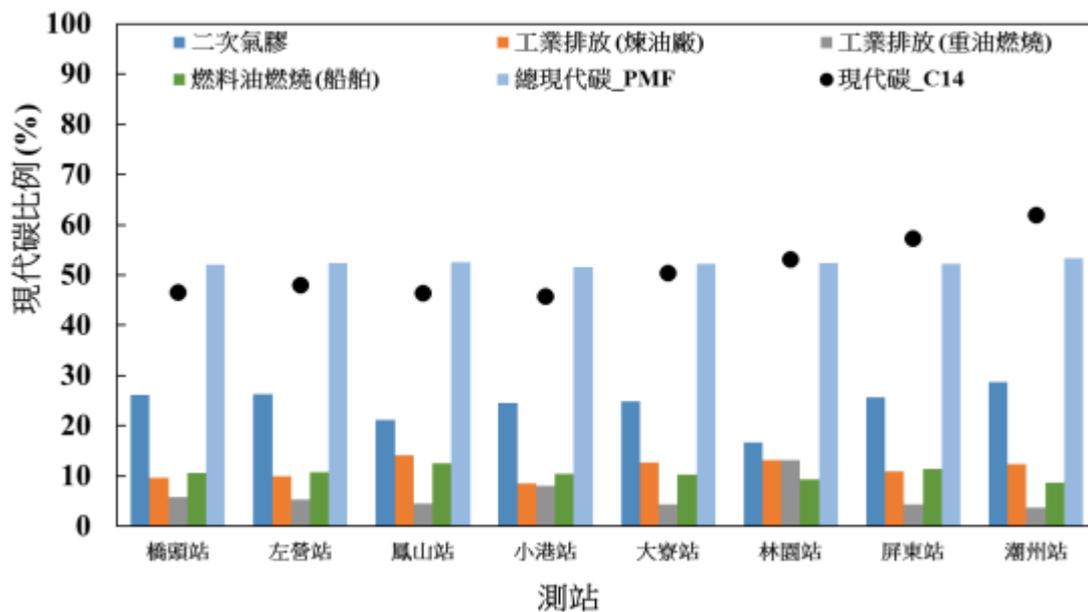
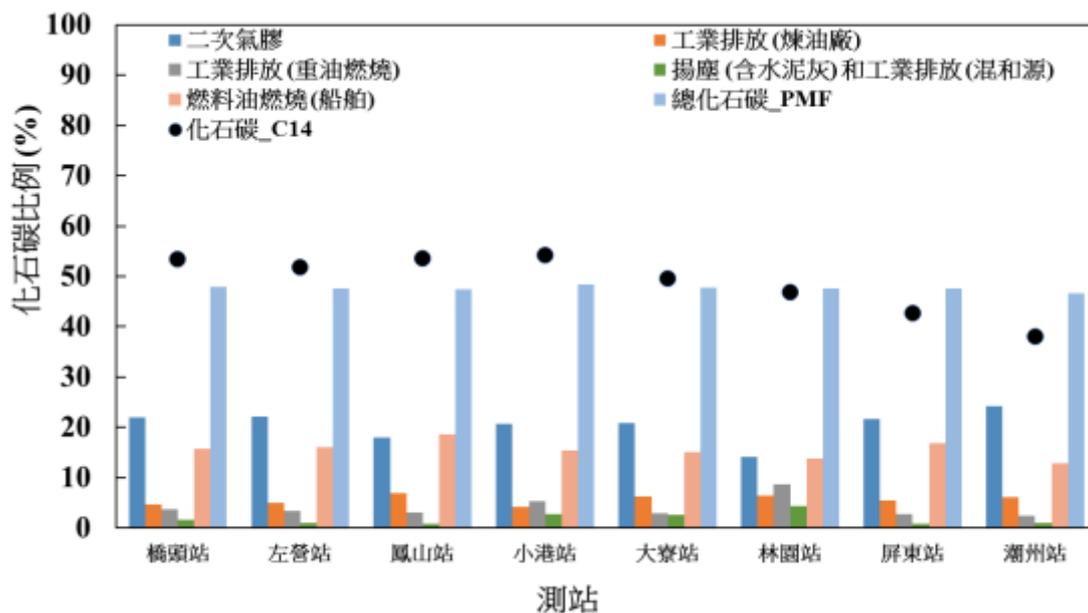


圖 4.4.7 PMF 推估之不同污染源對不同測站的相對貢獻量



(a) 現代碳貢獻



(b) 化石碳貢獻

圖 4.4.8 PMF 和 pMC 推估之各污染源對現代碳與化石碳的貢獻比例比較圖
(a) 現代碳貢獻和 (b) 化石碳貢獻

在 $\delta^{13}\text{C}$ 和 PMF 分析結果的比較部分，圖 4.4.1 和圖 4.4.2 顯示 8 個測站的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值和煉油廠、交通排放、二次氣膠和港口作業區的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值重疊，PMF 也顯示類似的結果，因此兩種方法在碳污染源的鑑定結果相近。然而，在鉛污染源部分，圖 4.4.9 顯示 PMF 推估出的鉛污染源以揚塵（含水泥灰）和工業排放（混和源）為主要鉛貢獻源，但從圖 4.4.3 可發現 8 測站的鉛同位素比值和本研究調查的 3 個固定污染源之鉛同位素比值有明顯差距，且圖 4.4.3 中的焚化爐與交通源排放之鉛同位素來自中部地區的調查結果，其結果和鉛同位素的分析結果不同，因此需要透過更多位於高雄地區污染源的鉛同位素比值的調查，以提高鉛污染源的鑑識能力。

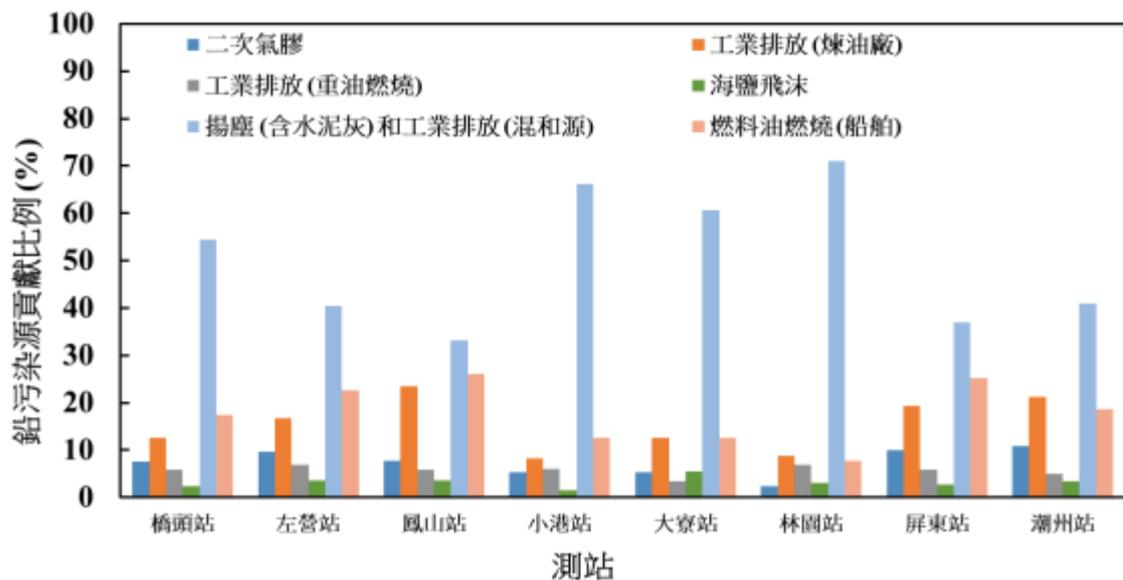


圖 4.4.9 PMF 推估之各污染源對鉛的貢獻比例比較圖

4.5 高屏地區 PM_{2.5} 污染改善方針建議

由於高雄的污染源種類複雜，本研究僅調查 4 個位於高雄的污染源，且鉛同位素與 PMF 針對鉛污染源的分析結果有明顯差異，因此此節僅針對目前的分析結果提出簡易的污染源改善方針。

(1) 屏東站、潮州站和鳳山站

屏東站、潮州站和鳳山站以煉油廠和燃料油燃燒（船舶）為主要貢獻源，因此建議優先管制煉油廠（如提高鍋爐燃燒效率和加強污染控制設備效率等）和港口之船舶的燃料油燃燒效率。此外，潮州站的鉛同位素比值多和交通源重疊，因此交通源的管控也是關鍵措施之一，如持續推動大型柴油車改善或二行程機車改善及淘汰等政策。雖然屏東站和潮州站的碳 14 分析結果顯示現代碳比例占優勢，但目前尚無法找出造成此 2 站高現代碳比例的原因，因此建議仍優先管制煉油廠和港口之船舶的燃料油燃燒效率。

(2) 小港站、大寮站和林園站

此三站以工業污染源為主，包含重油燃燒、揚塵和鋼鐵廠或燃煤廠等工業源的混合，因此加強當地工業區的污染管制，如提高鍋爐燃燒效率，加強污染控制設備等，可能是降低當地 PM_{2.5} 濃度的重要方針之一。

(3) 橋頭站和左營站

此三個站在 PMF 的污染源分析結果無法顯示關鍵性的污染源種類，而碳同位素顯示工業源是主要的影響因子，因此除建議加強工業污染源的排放管制外，仍須透過更多的採樣資料、污染源的監測資料和氣流傳輸等模式的推估，以利探討造成當地高 PM_{2.5} 濃度的主要因素。

第五章 結論與建議

5.1 執行進度

本計畫預定和實際工作進度如表 5.1 所示，均已完成所有的工作目標與內容。

表 5.1 預定與實際進度表

工作項目	108 年												達成率 (%)	
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月		
彙整大氣微粒的同位素特性及應用等相關文獻														100
高雄和屏東地區大氣 PM _{2.5} 之密集採樣														100
固定源排放管道 PM _{2.5} 採樣 - 火力發電廠														100
固定源排放管道 PM _{2.5} 採樣 - 煉油廠														100
固定源排放管道 PM _{2.5} 採樣 - 鋼鐵廠燒結爐														100
港口作業區/主要道路 PM _{2.5} 採樣														100
碳和鉛同位素分析技術在不同污染源的應用限制分析														100
高雄港污染源的排放對高/屏大氣 PM _{2.5} 之影響和貢獻														100
高雄港污染源的排放對高/屏空氣品質之影響的改善方針建議														100
第一次進度報告														100
期中報告														100
期末報告														100
繳交期末報告														
期末審查與結案														
累積進度 (%)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100		

(— 預定進度；— 實際進度)

5.2 結論

1. 無論春季或夏季，大氣測站的優勢傳統化學組成均為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽和有機碳；以現代碳比例換算的現代碳和化石碳濃度則顯示高雄的 6 個測站之化石碳與現代碳相當，但屏東 2 個測站以現代碳占優勢。
2. 以 PM_{2.5} 濃度標準值將樣本劃分為 PM_{2.5} 事件日和非事件日，分析發現管制光化反應前驅物及化石碳貢獻源（如煉油廠或交通源）應有助於降低當地的 PM_{2.5} 濃度。
3. 大氣 PM_{2.5} 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 鉛同位素分析結果顯示夏季的量測值較春季低。然而，無論夏季或春季，其量測結果都和台灣北部的量測結果有差異，但和過去在中南部地區（台中-彰化-雲林-南投-嘉義）的量測結果相近，顯示本土的碳與鉛污染源可能存在著空間上的差異。
4. 火力電廠排放的 PM_{2.5} 主要集中在無機 CPM，FPM 中的重要成分為金屬元素與硫酸鹽，金屬元素之重要元素包括 Na、Mg、K、Ni、Zn、Mo、Cr 和 Se 等， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 1.1959 (1.1781~1.2115)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 2.4305 (2.4108~2.4403)。
5. 煉油廠排放的 PM_{2.5} 以有機 CPM 為主，FPM 中的主要成分為硫酸鹽和鉀等金屬元素，其中硫酸鹽占了 54%，特徵元素包括 Fe、Mn、Ni、Zn、Mo、Pb 和 Cr 等， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 1.1930 (1.1758~1.2106)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 2.4318 (2.4171~2.4437)。
6. 鋼鐵廠排放的 PM_{2.5} 以無機 CPM 為主，FPM 中的主要成分為硫酸鹽和鉀等金屬元素，其中硫酸鹽占了 35%，特徵元素包括 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Zn、Mo、Cd、Tl、Pb、Cr、Se、Rb 和 Cs 等， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 1.1908 (1.1664~1.2143)， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均比值為 2.4010 (2.3774~2.4229)。
7. 港口作業區（第一港口、第二港口、前鎮漁港、旗津漁港和第五貨櫃區）的主要化學組成為硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、有機碳和元素碳；主要的金屬元素除了 Na、V 和 Zn； $\delta^{13}\text{C}$ 範圍在-31.3‰至-22.5‰之間，化石碳為優勢的碳成分，平均 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 分別為 1.1561 (1.1406~1.1884) 和 2.4295 (2.4013~2.4546)。

8. PMF 分析結果顯示 6 個污染源對橋頭站與左營站的貢獻相當；鳳山站以工業排放（煉油廠）和燃料油燃燒為主；小港站則有較多的工業排放（重油燃燒）和揚塵（含水泥灰）和工業排放（混合源）貢獻；大寮站以海鹽飛沫占優勢；林園站則有海鹽飛沫和工業排放（重油燃燒）；屏東站和潮州站則以工業排放（煉油廠）和燃料油燃燒占優勢。
9. 比較同位素與 PMF 之污染源推估結果，可發現碳同位素和 PMF 的結合，可增加碳污染源的鑑識能力；然而，研究蒐集到的污染源排放之鉛同位素比值相似性高，因此較難提供完整的污染源鑑識結果，且因本研究掌握的高雄地區之鉛污染源種類有限，因此有待未來增加位於高雄的鉛污染源的採樣與分析，以提高鉛污染源的鑑定能力。

5.3 建議

1. 光化反應和燃燒源(包括化石和生質燃料)是造成高屏地區高 PM_{2.5} 濃度的重要成因，因此管制光化反應前驅物的排放及燃燒源是重要的管理方向。
2. 比較台灣北部、中部和南部的碳或鉛同位素資料，可發現南部和中部的特徵相近，但都和北部有明顯不同，隱含的污染過程需要進一步追蹤。
3. 本計畫發現煙道採樣所獲得的 PM_{2.5} 樣本，其含有的碳成分均無法提供足量的碳供作碳同位素的分析。因此，建議未來若要調查煙道排放之微粒的碳同位素特性，且仍採用 NIEA 之公告採樣方法，除了延長採樣時間外，增加樣本數是重要的採樣與分析策略。
4. 本計畫已獲得部份位於高雄地區的污染源之碳、鉛同位素指紋資料，後續研究仍需增加高雄地區之污染源的採樣與分析，以提高微粒污染源的鑑識能力。
5. 根據本研究的量測結果，我們發現 5 個港口作業區的 PM_{2.5} 污染源特性和周界相近，而在港區內，除來自船舶的排放外，也包含貨運車輛，但船舶或貨運車輛排放之微粒的採集較為困難，且不同規模的船舶或貨運車輛排放的微粒特性也有差異；然而，透過量測資料仍可發現部分組成和周界有明顯差異，如化石碳的比例明顯較周界高。因此，本研究團隊建議未來若要探討港區對周界 PM_{2.5} 的影響，可將其視為”面污染源”來評估。

參考文獻

- Bae, M.-S., Demerjian, K.L., Schwab, J.J., 2006. Seasonal estimation of organic mass to organic carbon in PM 2.5 at rural and urban locations in New York state. *Atmospheric Environment* 40, 7467-7479.
- Balcaen, L., Moens, L., Vanhaecke, F., 2010. Determination of isotope ratios of metals (and metalloids) by means of inductively coupled plasma-mass spectrometry for provenancing purposes—A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 65, 769-786.
- Birch, M.E., Cary, R.A., 1996. Elemental carbon-based method for occupational monitoring of particulate diesel exhaust: methodology and exposure issues. *Analyst* 121, 1183-1190.
- Bollhöfer, A., Rosman, K., 2000. Isotopic source signatures for atmospheric lead: the Southern Hemisphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 3251-3262.
- Bollhöfer, A., Rosman, K., 2001. Isotopic source signatures for atmospheric lead: the Northern Hemisphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 1727-1740.
- Cachier, H., Brémond, M.-P., Buat-Ménard, P., 1989. Carbonaceous aerosols from different tropical biomass burning sources.
- Cano, M., Vega, F., Navarrete, B., Plumed, A., Camino, J., 2017. Characterization of emissions of condensable particulate matter in clinker kilns using a dilution sampling system. *Energy & Fuels* 31, 7831-7838.
- Cao, F., Zhang, S.-C., Kawamura, K., Zhang, Y.-L., 2016. Inorganic markers, carbonaceous components and stable carbon isotope from biomass burning aerosols in Northeast China. *Science of the Total Environment* 572, 1244-1251.
- Cao, J.-j., Chow, J.C., Tao, J., Lee, S.-c., Watson, J.G., Ho, K.-f., Wang, G.-h., Zhu, C.-s., Han, Y.-m., 2011. Stable carbon isotopes in aerosols from Chinese cities: Influence of fossil fuels. *Atmospheric environment* 45, 1359-1363.
- Cerri, C., Feller, C., Balesdent, J., Victoria, R., Plenecassagne, A., 1985. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C , à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique-physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre* 300, 423-428.
- Chen, B., Jie, D., Shi, M., Gao, P., Shen, Z., Uchida, M., Zhou, L., Liu, K., Hu, K.,

- Kitagawa, H., 2015. Characteristics of ^{14}C and ^{13}C of carbonate aerosols in dust storm events in China. *Atmospheric Research* 164, 297-303.
- Chen, H.-W., Chen, W.-Y., Chang, C.-N., Chuang, Y.H., 2013. Characterization of particles in the ambience of the high-tech industrial park of central Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research* 13, 699-708.
- Cheng, H., Hu, Y., 2010. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review. *Environmental Pollution* 158, 1134-1146.
- Cheng, M.-T., Chio, C.-P., Huang, C.-Y., Chen, J.-M., Wang, C.-F., Kuo, C.-Y., 2008. Chemical compositions of fine particulates emitted from oil-fired boilers. *Journal of Environmental Engineering and Management* 18, 355-362.
- Cheng, M.-T., Horng, C.-L., Su, Y.-R., Lin, L.-K., Lin, Y.-C., Chou, C.C.-K., 2009. Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung City, Taiwan. *Journal of hazardous materials* 165, 187-192.
- Chou, C.-K., Lee, C., Cheng, M., Yuan, C., Chen, S., Wu, Y., Hsu, W., Lung, S., Hsu, S., Lin, C., 2010. Seasonal variation and spatial distribution of carbonaceous aerosols in Taiwan. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 9563-9578.
- Chow, J.C., 1995. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Journal of the Air & Waste Management Association* 45, 320-382.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Edgerton, S.A., Vega, E., 2002. Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997. *Science of the Total Environment* 287, 177-201.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Kuhns, H., Etyemezian, V., Lowenthal, D.H., Crow, D., Kohl, S.D., Engelbrecht, J.P., Green, M.C., 2004. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study. *Chemosphere* 54, 185-208.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Pritchett, L.C., Pierson, W.R., Frazier, C.A., Purcell, R.G., 1993. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in US air quality studies. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* 27, 1185-1201.
- Corio, L.A., Sherwell, J., 2000. In-stack condensable particulate matter measurements and issues. *Journal of the Air & Waste Management Association* 50, 207-218.

- Cruz, C.N., Pandis, S.N., 1997. A study of the ability of pure secondary organic aerosol to act as cloud condensation nuclei. *Atmospheric Environment* 31, 2205-2214.
- Currie, L., Dibb, J.E., Klouda, G., Benner Jr, B., Conny, J., Biegalski, S.R., Klinedinst, D.B., Cahoon, D.R., Hsu, N., 1998. The pursuit of isotopic and molecular fire tracers in the polar atmosphere and cryosphere. *Radiocarbon*.
- Das, O., Wang, Y., Hsieh, Y.-P., 2010. Chemical and carbon isotopic characteristics of ash and smoke derived from burning of C 3 and C 4 grasses. *Organic Geochemistry* 41, 263-269.
- de Foy, B., Smyth, A.M., Thompson, S.L., Gross, D.S., Olson, M.R., Sager, N., Schauer, J.J., 2012. Sources of nickel, vanadium and black carbon in aerosols in Milwaukee. *Atmospheric environment* 59, 294-301.
- Donato, A., Gregoris, E., Gambaro, A., Merico, E., Giua, R., Nocioni, A., Contini, D., 2014. Contribution of harbour activities and ship traffic to PM_{2.5} particle number concentrations and PAHs in a port city of the Mediterranean Sea (Italy). *Environmental Science and Pollution Research* 21, 9415-9429.
- Duan, F., He, K., Ma, Y., Jia, Y., Yang, F., Lei, Y., Tanaka, S., Okuta, T., 2005. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China. *Chemosphere* 60, 355-364.
- Endo, M., Yamamoto, N., Yoshinaga, J., Yanagisawa, Y., Endo, O., Goto, S., Yoneda, M., Shibata, Y., Morita, M., 2004. ¹⁴C measurement for size-fractionated airborne particulate matters. *Atmospheric Environment* 38, 6263-6267.
- Erel, Y., Dayan, U., Rabi, R., Rudich, Y., Stein, M., 2006. Trans boundary transport of pollutants by atmospheric mineral dust. *Environmental science & technology* 40, 2996-3005.
- Ettler, V., Mihaljevič, M., Komárek, M., 2004. ICP-MS measurements of lead isotopic ratios in soils heavily contaminated by lead smelting: tracing the sources of pollution. *Analytical and bioanalytical chemistry* 378, 311-317.
- Ewing, S.A., Christensen, J.N., Brown, S.T., Vancuren, R.A., Cliff, S.S., Depaolo, D.J., 2010. Pb isotopes as an indicator of the Asian contribution to particulate air pollution in urban California. *Environmental science & technology* 44, 8911-8916.
- Flament, P., Bertho, M.-L., Deboudt, K., Véron, A., Puskaric, E., 2002. European isotopic signatures for lead in atmospheric aerosols: a source apportionment based

- upon 206 Pb/207 Pb ratios. *Science of the Total Environment* 296, 35-57.
- Gallon, C., Ranville, M.A., Conaway, C.H., Landing, W.M., Buck, C.S., Morton, P.L., Flegal, A.R., 2011. Asian industrial lead inputs to the North Pacific evidenced by lead concentrations and isotopic compositions in surface waters and aerosols. *Environmental science & technology* 45, 9874-9882.
- Garbarienė, I., Remeikis, V., Mašalaitė, A., Garbaras, A., Petelski, T., Makuch, P., Dusek, U., 2019. Stable carbon and nitrogen isotope ratio in PM1 and size segregated aerosol particles over the Baltic Sea. *Lithuanian Journal of Physics* 59.
- Giebel, B.M., Swart, P.K., Riemer, D.D., 2010. $\delta^{13}\text{C}$ stable isotope analysis of atmospheric oxygenated volatile organic compounds by gas chromatography-isotope ratio mass spectrometry. *Analytical chemistry* 82, 6797-6806.
- Gioia, S., Babinski, M., Weiss, D., Spiro, B., Kerr, A., Veríssimo, T., Ruiz, I., Prates, J., 2017. An isotopic study of atmospheric lead in a megacity after phasing out of leaded gasoline. *Atmospheric Environment* 149, 70-83.
- Graney, J.R., Edgerton, E.S., Landis, M.S., 2019. Using Pb isotope ratios of particulate matter and epiphytic lichens from the Athabasca Oil Sands Region in Alberta, Canada to quantify local, regional, and global Pb source contributions. *Science of the Total Environment* 654, 1293-1304.
- He, K., Yang, F., Ma, Y., Zhang, Q., Yao, X., Chan, C.K., Cadle, S., Chan, T., Mulawa, P., 2001. The characteristics of PM 2.5 in Beijing, China. *Atmospheric Environment* 35, 4959-4970.
- Heal, M.R., Naysmith, P., Cook, G.T., Xu, S., Duran, T.R., Harrison, R.M., 2011. Application of ^{14}C analyses to source apportionment of carbonaceous PM 2.5 in the UK. *Atmospheric Environment* 45, 2341-2348.
- Ho, K., Lee, S., Chan, C.K., Jimmy, C.Y., Chow, J.C., Yao, X., 2003. Characterization of chemical species in PM 2.5 and PM 10 aerosols in Hong Kong. *Atmospheric Environment* 37, 31-39.
- Hsu, C.-Y., Chiang, H.-C., Lin, S.-L., Chen, M.-J., Lin, T.-Y., Chen, Y.-C., 2016. Elemental characterization and source apportionment of PM 10 and PM 2.5 in the western coastal area of central Taiwan. *Science of the Total Environment* 541, 1139-1150.

- Hsu, S.-C., Liu, S.C., Jeng, W.-L., Chou, C.C., Hsu, R.-T., Huang, Y.-T., Chen, Y.-W., 2006. Lead isotope ratios in ambient aerosols from Taipei, Taiwan: Identifying long-range transport of airborne Pb from the Yangtze Delta. *Atmospheric Environment* 40, 5393-5404.
- Hsu, S.-C., Liu, S.C., Lin, C.-Y., Hsu, R.-T., Huang, Y.-T., Chen, Y.-W., 2004. Metal compositions of PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols in Taipei during spring, 2002. *Terr. Atmos. Ocean. Sci* 15, 925-948.
- Hsu, S., Liu, S., Tsai, F., Engling, G., Lin, I., Chou, C., Kao, S., Lung, S., Chan, C., Lin, S., 2010. High wintertime particulate matter pollution over an offshore island (Kinmen) off southeastern China: An overview. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115.
- Hsu, S.C., Liu, S.C., Huang, Y.T., Chou, C.C., Lung, S., Liu, T.H., Tu, J.Y., Tsai, F., 2009. Long-range southeastward transport of Asian biosmoke pollution: Signature detected by aerosol potassium in northern Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114.
- Hsu, S.C., Liu, S.C., Huang, Y.T., Lung, S.C.C., Tsai, F., Tu, J.Y., Kao, S.J., 2008. A criterion for identifying Asian dust events based on Al concentration data collected from northern Taiwan between 2002 and early 2007. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.
- Hu, C.-W., Chao, M.-R., Wu, K.-Y., Chang-Chien, G.-P., Lee, W.-J., Chang, L.W., Lee, W.-S., 2003. Characterization of multiple airborne particulate metals in the surroundings of a municipal waste incinerator in Taiwan. *Atmospheric Environment* 37, 2845-2852.
- Hung, L.-J., Chan, T.-F., Wu, C.-H., Chiu, H.-F., Yang, C.-Y., 2012. Traffic air pollution and risk of death from ovarian cancer in Taiwan: fine particulate matter (PM_{2.5}) as a proxy marker. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 75, 174-182.
- Irei, S., Huang, L., Collin, F., Zhang, W., Hastie, D., Rudolph, J., 2006. Flow reactor studies of the stable carbon isotope composition of secondary particulate organic matter generated by OH-radical-induced reactions of toluene. *Atmospheric Environment* 40, 5858-5867.
- Jacobson, M.Z., 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon

- in atmospheric aerosols. *Nature* 409, 695-697.
- John, W., Wall, S.M., Ondo, J.L., Winklmayr, W., 1990. Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* 24, 2349-2359.
- Jung, C.-C., Chou, C.C.-K., Lin, C.-Y., Shen, C.-C., Lin, Y.-C., Huang, Y.-T., Tsai, C.-y., Yao, P.-H., Huang, C.-R., Huang, W.-R., 2019. C-Sr-Pb isotopic characteristics of PM_{2.5} transported on the East-Asian continental outflows. *Atmospheric Research*.
- Kikuchi, R., Sasaki, Y., Oba, A., Sato, A., Takada, M., Fujiwara, K., Kimoto, T., Ozeki, T., Sera, K., Ogawa, N., 2010. Origin and Transportation Course of Heavy Metal Elements in the Particulate Matter (PM) at the Hachimantai Mountain Range in Northern Japan. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources* 17, 177-181.
- Kim, E., Hopke, P.K., Qin, Y., 2005. Estimation of organic carbon blank values and error structures of the speciation trends network data for source apportionment. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55, 1190-1199.
- Klinedinst, D.B., Currie, L.A., 1999. Direct quantification of PM_{2.5} fossil and biomass carbon within the Northern Front Range Air Quality Study's domain. *Environmental science & technology* 33, 4146-4154.
- Komárek, M., Ettler, V., Chrastný, V., Mihaljevič, M., 2008. Lead isotopes in environmental sciences: a review. *Environment International* 34, 562-577.
- Kulkarni, P., Chellam, S., Fraser, M.P., 2007. Tracking petroleum refinery emission events using lanthanum and lanthanides as elemental markers for PM_{2.5}. *Environmental science & technology* 41, 6748-6754.
- Kumar, S., Aggarwal, S., Malherbe, J., Barre, J., Berail, S., Gupta, P., Donard, O., 2016. Tracing dust transport from Middle-East over Delhi in March 2012 using metal and lead isotope composition. *Atmospheric Environment* 132, 179-187.
- Kundu, S., Kawamura, K., 2014. Seasonal variations of stable carbon isotopic composition of bulk aerosol carbon from Gosan site, Jeju Island in the East China Sea. *Atmospheric Environment* 94, 316-322.
- Kuo, C.-Y., Lin, Y.-R., Chang, S.-Y., Lin, C.-Y., Chou, C.-H., 2013. Aerosol characteristics of different types of episode. *Environmental monitoring and assessment* 185, 9777-9787.

- López-Veneroni, D., 2009. The stable carbon isotope composition of PM 2.5 and PM 10 in Mexico City Metropolitan Area air. *Atmospheric Environment* 43, 4491-4502.
- López, M.L., Ceppi, S., Palancar, G.G., Olcese, L.E., Tirao, G., Toselli, B.M., 2011. Elemental concentration and source identification of PM10 and PM2.5 by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment* 45, 5450-5457.
- Lahd Geagea, M., Stille, P., Gauthier-Lafaye, F., Millet, M., 2008. Tracing of industrial aerosol sources in an urban environment using Pb, Sr, and Nd isotopes. *Environmental science & technology* 42, 692-698.
- Li, J., Qi, Z., Li, M., Wu, D., Zhou, C., Lu, S., Yan, J., Li, X., 2017. Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant. *Energy & Fuels* 31, 1778-1785.
- Lin, Y.-C., Hsu, S.-C., Chou, C.C.-K., Zhang, R., Wu, Y., Kao, S.-J., Luo, L., Huang, C.-H., Lin, S.-H., Huang, Y.-T., 2016. Wintertime haze deterioration in Beijing by industrial pollution deduced from trace metal fingerprints and enhanced health risk by heavy metals. *Environmental Pollution* 208, 284-293.
- Lin, Y.-C., Tsai, C.-J., Wu, Y.-C., Zhang, R., Chi, K.-H., Huang, Y.-T., Lin, S.-H., Hsu, S.-C., 2015. Characteristics of trace metals in traffic-derived particles in Hsuehshan Tunnel, Taiwan: size distribution, potential source, and fingerprinting metal ratio. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 4117-4130.
- Lin, Y., Cheng, M., 2007. Evaluation of formation rates of NO₂ to gaseous and particulate nitrate in the urban atmosphere. *Atmospheric Environment* 41, 1903-1910.
- Lin, Y.C., Cheng, M.T., Chio, C.P., Kuo, C.Y., 2009. Carbonaceous aerosol measurements at coastal, urban, and inland sites in central Taiwan. *Environmental Forensics* 10, 7-17.
- Lin, Y.C., Cheng, M.T., Lin, W.H., Lan, Y.-Y., Tsuang, B.-J., 2010. Causes of the elevated nitrate aerosol levels during episodic days in Taichung urban area, Taiwan. *Atmospheric Environment* 44, 1632-1640.
- Lin, Y.C., Schwab, J.J., Demerjian, K.L., Bae, M.S., Chen, W.N., Sun, Y., Zhang, Q., Hung, H.M., Perry, J., 2012. Summertime formaldehyde observations in New York City: Ambient levels, sources and its contribution to HO_x radicals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117.

- Lowenthal, D.H., Zielinska, B., Chow, J.C., Watson, J.G., Gautam, M., Ferguson, D.H., Neuroth, G.R., Stevens, K.D., 1994. Characterization of heavy-duty diesel vehicle emissions. *Atmospheric Environment* 28, 731-743.
- Martinelli, L., Camargo, P., Lara, L., Victoria, R., Artaxo, P., 2002. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of bulk aerosol particles in a C4 plant landscape of southeast Brazil. *Atmospheric Environment* 36, 2427-2432.
- Masalaite, A., Holzinger, R., Ceburnis, D., Remeikis, V., Ulevičius, V., Röckmann, T., Dusek, U., 2018. Sources and atmospheric processing of size segregated aerosol particles revealed by stable carbon isotope ratios and chemical speciation. *Environmental Pollution* 240, 286-296.
- Masalaite, A., Remeikis, V., Garbaras, A., Dudoitis, V., Ulevičius, V., Ceburnis, D., 2015. Elucidating carbonaceous aerosol sources by the stable carbon $\delta^{13}\text{C}$ TC ratio in size-segregated particles. *Atmospheric Research* 158, 1-12.
- Mkoma, S.L., Kawamura, K., Tachibana, E., Fu, P., 2014. Stable carbon and nitrogen isotopic compositions of tropical atmospheric aerosols: sources and contribution from burning of C3 and C4 plants to organic aerosols. *Tellus B* 66.
- Monna, F., Lancelot, J., Croudace, I.W., Cundy, A.B., Lewis, J.T., 1997. Pb isotopic composition of airborne particulate material from France and the southern United Kingdom: implications for Pb pollution sources in urban areas. *Environmental Science & Technology* 31, 2277-2286.
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Gibbons, W., 2008. Identification of FCC refinery atmospheric pollution events using lanthanoid-and vanadium-bearing aerosols. *Atmospheric Environment* 42, 7851-7861.
- Mukai, H., Tanaka, A., Fujii, T., Zeng, Y., Hong, Y., Tang, J., Guo, S., Xue, H., Sun, Z., Zhou, J., 2001. Regional characteristics of sulfur and lead isotope ratios in the atmosphere at several Chinese urban sites. *Environmental science & technology* 35, 1064-1071.
- Nakano, T., Tanaka, T.-i., 1997. Strontium isotope constraints on the seasonal variation of the provenance of base cations in rain water at Kawakami, central Japan. *Atmospheric Environment* 31, 4237-4245.
- Nguyen, D.L., Kawamura, K., Ono, K., Ram, S.S., Engling, G., Lee, C.-T., Lin, N.-H., Chang, S.-C., Chuang, M.-T., Hsiao, T.-C., 2016. Comprehensive PM 2.5 Organic

- Molecular Composition and Stable Carbon Isotope Ratios at Sonla, Vietnam: Fingerprint of Biomass Burning Components. *Aerosol Air Qual. Res* 16, 2618-2634.
- Novakov, T., Penner, J., 1993. Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei concentrations.
- Ny, M.T., Lee, B.-K., 2011. Size distribution of airborne particulate matter and associated metallic elements in an urban area of an industrial city in Korea. *Aerosol and Air Quality Research* 11, 643-653.
- Oh, M.-S., Lee, T.-J., Kim, D.-S., 2011. Quantitative source apportionment of size-segregated particulate matter at urbanized local site in Korea. *Aerosol and Air Quality Research* 11, 247-264.
- Okuda, T., Katsuno, M., Naoi, D., Nakao, S., Tanaka, S., He, K., Ma, Y., Lei, Y., Jia, Y., 2008. Trends in hazardous trace metal concentrations in aerosols collected in Beijing, China from 2001 to 2006. *Chemosphere* 72, 917-924.
- Paatero, P., Tapper, U., 1994. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics* 5, 111-126.
- Pakkanen, T.A., Loukkola, K., Korhonen, C.H., Aurela, M., Mäkelä, T., Hillamo, R.E., Aarnio, P., Koskentalo, T., Koussa, A., Maenhaut, W., 2001. Sources and chemical composition of atmospheric fine and coarse particles in the Helsinki area. *Atmospheric Environment* 35, 5381-5391.
- Pan, W.-C., Wu, C.-D., Chen, M.-J., Huang, Y.-T., Chen, C.-J., Su, H.-J., Yang, H.-I., 2016. Fine particle pollution, alanine transaminase, and liver cancer: A Taiwanese prospective cohort study (REVEAL-HBV). *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 108.
- Park, J.-S., Schauer, J.J., Shafer, M.M., Chowdhury, Z., Cass, G.R., Wagner, D., Sarofim, A.F., Lighty, J., 2001. Analysis of source apportionment tracers in fine particulate matter emitted from the combustion of coal, *Abstr Papers Am Chem Soc*.
- Pavuluri, C.M., Kawamura, K., 2012. Evidence for ¹³-carbon enrichment in oxalic acid via iron catalyzed photolysis in aqueous phase. *Geophysical Research Letters* 39.
- Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., Thurston,

- G.D., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama* 287, 1132-1141.
- Putaud, J.-P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.-C., 2010. A European aerosol phenomenology-3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environment* 44, 1308-1320.
- Qin, Y., Kim, E., Hopke, P.K., 2006. The concentrations and sources of PM 2.5 in metropolitan New York City. *Atmospheric Environment* 40, 312-332.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massagué, G., Puig, O., 2001. PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment* 35, 6407-6419.
- Querol, X., Viana, M., Alastuey, A., Amato, F., Moreno, T., Castillo, S., Pey, J., De la Rosa, J., De La Campa, A.S., Art ñano, B., 2007. Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain. *Atmospheric Environment* 41, 7219-7231.
- Rahn, K.A., 1999. A graphical technique for determining major components in a mixed aerosol. I. Descriptive aspects. *Atmospheric Environment* 33, 1441-1455.
- Rudolph, J., Czuba, E., Norman, A., Huang, L., Ernst, D., 2002. Stable carbon isotope composition of nonmethane hydrocarbons in emissions from transportation related sources and atmospheric observations in an urban atmosphere. *Atmospheric Environment* 36, 1173-1181.
- Salcedo, D., Castro, T., Bernal, J., Almanza-Veloz, V., Zavala, M., González-Castillo, E., Saavedra, M., Perez-Arv ízu, O., Díaz-Trujillo, G., Molina, L., 2016. Using trace element content and lead isotopic composition to assess sources of PM in Tijuana, Mexico. *Atmospheric Environment* 132, 171-178.
- Samek, L., Stegowski, Z., Furman, L., 2016. Preliminary PM2.5 and PM10 fractions source apportionment complemented by statistical accuracy determination. *Nukleonika* 61, 75--83.
- Sangster, D., Outridge, P., Davis, W., 2000. Stable lead isotope characteristics of lead ore deposits of environmental significance. *Environmental Reviews* 8, 115-147.
- Santacatalina, M., Reche, C., Minguillón, M., Escrig, A., Sanfelix, V., Carratalá, A.,

- Nicolás, J.F., Yubero, E., Crespo, J., Alastuey, A., 2010. Impact of fugitive emissions in ambient PM levels and composition: A case study in Southeast Spain. *Science of the total environment* 408, 4999-5009.
- Saraga, D.E., Tolis, E.I., Maggos, T., Vasilakos, C., Bartzis, J.G., 2019. PM_{2.5} source apportionment for the port city of Thessaloniki, Greece. *Science of The Total Environment* 650, 2337-2354.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1998. From air pollution to climate change. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Sen, I.S., Bizimis, M., Tripathi, S.N., Paul, D., 2016. Lead isotopic fingerprinting of aerosols to characterize the sources of atmospheric lead in an industrial city of India. *Atmospheric Environment* 129, 27-33.
- Sheesley, R.J., Nallathamby, P.D., Surratt, J.D., Lee, A., Lewandowski, M., Offenberg, J.H., Jaoui, M., Kleindienst, T.E., 2017. Constraints on primary and secondary particulate carbon sources using chemical tracer and ¹⁴C methods during CalNex-Bakersfield. *Atmospheric Environment* 166, 204-214.
- Strader, R., Lurmann, F., Pandis, S.N., 1999. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter. *Atmospheric Environment* 33, 4849-4863.
- Sun, X., Hu, M., Guo, S., Liu, K., Zhou, L., 2012. ¹⁴C-Based source assessment of carbonaceous aerosols at a rural site. *Atmospheric Environment* 50, 36-40.
- Tolis, E.I., Saraga, D.E., Filiou, K.F., Tziavos, N.I., Tsiaousis, C.P., Dinas, A., Bartzis, J.G., 2015. One-year intensive characterization on PM_{2.5} nearby port area of Thessaloniki, Greece. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 6812-6826.
- Tsai, J.-H., Lin, K.-H., Chen, C.-Y., Ding, J.-Y., Choa, C.-G., Chiang, H.-L., 2007. Chemical constituents in particulate emissions from an integrated iron and steel facility. *Journal of Hazardous Materials* 147, 111-119.
- U.S.EPA., 2014. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. U.S. Environmental Protection Agency, USA.
- Wang, J., Hu, Z., Chen, Y., Chen, Z., Xu, S., 2013. Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China. *Atmospheric Environment* 68, 221-229.
- Wang, S., Hu, G., Yan, Y., Wang, S., Yu, R., Cui, J., 2019. Source apportionment of

- metal elements in PM_{2.5} in a coastal city in Southeast China: Combined Pb-Sr-Nd isotopes with PMF method. *Atmospheric Environment* 198, 302-312.
- Wang, W., Liu, X., Zhao, L., Guo, D., Tian, X., Adams, F., 2006. Effectiveness of leaded petrol phase-out in Tianjin, China based on the aerosol lead concentration and isotope abundance ratio. *Science of the Total Environment* 364, 175-187.
- Wang, X., Zong, Z., Tian, C., Chen, Y., Luo, C., Li, J., Zhang, G., Luo, Y., 2017. Combining Positive Matrix Factorization and Radiocarbon Measurements for Source Apportionment of PM_{2.5} from a National Background Site in North China. *Scientific Reports* 7, 10648.
- Watson, J.G., Chow, J.C., Houck, J.E., 2001. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995. *Chemosphere* 43, 1141-1151.
- Widory, D., Liu, X., Dong, S., 2010. Isotopes as tracers of sources of lead and strontium in aerosols (TSP & PM_{2.5}) in Beijing. *Atmospheric environment* 44, 3679-3687.
- Widory, D., Roy, S., Le Moullec, Y., Goupil, G., Cocherie, A., Guerrot, C., 2004. The origin of atmospheric particles in Paris: a view through carbon and lead isotopes. *Atmospheric Environment* 38, 953-961.
- Wilson, J.G., Kingham, S., Pearce, J., Sturman, A.P., 2005. A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemiological research. *Atmospheric Environment* 39, 6444-6462.
- World Health Organization, 2016. Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of diseases. World Health Organization, Switzerland.
- Xie, R., Seip, H.M., Wibetoe, G., Nori, S., McLeod, C.W., 2006. Heavy coal combustion as the dominant source of particulate pollution in Taiyuan, China, corroborated by high concentrations of arsenic and selenium in PM₁₀. *Science of the Total Environment* 370, 409-415.
- Xu, L., Jiao, L., Hong, Z., Zhang, Y., Du, W., Wu, X., Chen, Y., Deng, J., Hong, Y., Chen, J., 2018. Source identification of PM_{2.5} at a port and an adjacent urban site in a coastal city of China: Impact of ship emissions and port activities. *Science of The Total Environment* 634, 1205-1213.
- Yang, H.-H., Arafath, S.M., Wang, Y.-F., Wu, J.-Y., Lee, K.-T., Hsieh, Y.-S., 2018. Comparison of Coal-and Oil-Fired Boilers through the Investigation of Filterable

- and Condensable PM_{2.5} Sample Analysis. *Energy & fuels* 32, 2993-3002.
- Yang, H.-H., Lee, K.-T., Hsieh, Y.-S., Luo, S.-W., Huang, R.-J., 2015. Emission characteristics and chemical compositions of both filterable and condensable fine particulate from steel plants. *Aerosol Air Qual. Res* 15, 1672-1680.
- Yang, H.-H., Lee, K.-T., Hsieh, Y.-S., Luo, S.-W., Li, M.-S., 2014. Filterable and condensable fine particulate emissions from stationary sources. *Aerosol Air Qual. Res* 14, 2010-2016.
- Yau, P., Lee, S., Cheng, Y., Huang, Y., Lai, S., Xu, X., 2013. Contribution of ship emissions to the fine particulate in the community near an international port in Hong Kong. *Atmospheric Research* 124, 61-72.
- Yu, Y., Li, Y., Li, B., Shen, Z., Stenstrom, M.K., 2016. Metal enrichment and lead isotope analysis for source apportionment in the urban dust and rural surface soil. *Environmental Pollution* 216, 764-772.
- Zhang, R., Guan, M., Shu, Y., Shen, L., Chen, X., Zhang, F., Li, T., Jiang, T., 2016a. Reconstruction of historical lead contamination and sources in Lake Hailing, Eastern China: a Pb isotope study. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 9183-9191.
- Zhang, R., Jing, J., Tao, J., Hsu, S.-C., Wang, G., Cao, J., Lee, C.S.L., Zhu, L., Chen, Z., Zhao, Y., 2013. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 7053-7074.
- Zhang, W., Zhang, Y.-L., Cao, F., Xiang, Y., Zhang, Y., Bao, M., Liu, X., Lin, Y.-C., 2019. High time-resolved measurement of stable carbon isotope composition in water-soluble organic aerosols: method optimization and a case study during winter haze in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 11071-11087.
- Zhang, Y.-L., Huang, R.-J., El Haddad, I., Ho, K.-F., Cao, J.-J., Han, Y., Zotter, P., Bozzetti, C., Daellenbach, K., Canonaco, F., 2015. Fossil vs. non-fossil sources of fine carbonaceous aerosols in four Chinese cities during the extreme winter haze episode of 2013. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 1299-1312.
- Zhang, Y.L., Kawamura, K., Cao, F., Lee, M., 2016b. Stable carbon isotopic compositions of low-molecular-weight dicarboxylic acids, oxocarboxylic acids, α -dicarbonyls, and fatty acids: Implications for atmospheric processing of organic aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 3707-3717.

- Zhao, M., Zhang, Y., Ma, W., Fu, Q., Yang, X., Li, C., Zhou, B., Yu, Q., Chen, L., 2013a. Characteristics and ship traffic source identification of air pollutants in China's largest port. *Atmospheric environment* 64, 277-286.
- Zhao, P., Dong, F., Yang, Y., He, D., Zhao, X., Zhang, W., Yao, Q., Liu, H., 2013b. Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China. *Atmospheric Environment* 71, 389-398.
- Zhao, Z., Cao, J., Zhang, T., Shen, Z., Ni, H., Tian, J., Wang, Q., Liu, S., Zhou, J., Gu, J., 2018. Stable carbon isotopes and levoglucosan for PM_{2.5} elemental carbon source apportionments in the largest city of Northwest China. *Atmospheric Environment* 185, 253-261.
- Zheng, J., Tan, M., Shibata, Y., Tanaka, A., Li, Y., Zhang, G., Zhang, Y., Shan, Z., 2004. Characteristics of lead isotope ratios and elemental concentrations in PM₁₀ fraction of airborne particulate matter in Shanghai after the phase-out of leaded gasoline. *Atmospheric Environment* 38, 1191-1200.
- Zong, Z., Wang, X., Tian, C., Chen, Y., Qu, L., Ji, L., Zhi, G., Li, J., Zhang, G., 2016. Source apportionment of PM_{2.5} at a regional background site in North China using PMF linked with radiocarbon analysis: insight into the contribution of biomass burning. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, 11249-11265.
- 吳義林, 2017. 建置高雄港區 105 年即時空氣品質推估系統. 交通部運輸研究所, 台北市.
- 李崇德, 2017. 106 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分與分析計畫. 行政院環境保護署, 台北市.
- 李崇德, 2018. 107 年度細懸浮微粒(PM_{2.5})化學成分與分析計畫. 行政院環境保護署, 台北市.
- 周崇光, 2014. 懸浮微粒污染源特徵指標技術之建置與評析. 行政院環境保護署環境檢驗所, 台北市.
- 周崇光, 2016. 以同位素分析鑑別細懸浮微粒(PM_{2.5})污染來源先期計畫. 行政院環境保護署, 台北, 台灣.
- 周崇光, 2017. 細懸浮微粒碳及鉛同位素分析技術發展與應用計畫. 行政院環境保護署, 台北市.
- 周崇光, 2018. 細懸浮微粒碳同位素分析技術之發展與應用研究計畫. 行政院環境

- 保護署, 台北市.
- 姚辰和, 2015. 鋼鐵廠周界及週邊敏感點細懸浮微粒物化特徵分析及污染源貢獻量解析, 環境工程研究所. 國立中山大學, 高雄市.
- 屏東縣政府, 2017. 屏東縣空氣污染防制計畫, 屏東縣.
- 高雄市政府環境保護局, 2017. 高雄市細懸浮微粒 (PM2.5) 空氣品質監測分析報告. 高雄市政府環境保護局, 高雄市.
- 張簡國平, 2014. 103 年度嘉義市大氣中細懸浮微粒濃度特性分析計畫. 嘉義市政府環境保護局, 嘉義市.
- 陳怡伶, 2013. 固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫. 行政院環境保護署, 台北市.
- 蔡文正, 2016. 高雄港區空高雄港區空氣污染氣污染特性之分析, 環境工程與科學系. 輔英科技大學, 高雄市.
- 蔡志賢, 2017. 港區空氣污染物排放清冊建置及減量策略研擬計畫. 行政院環境保護署, 台北市.
- 鄭曼婷, 2000. 中部地區空氣污染總量管制技術資料建立與應用. 行政院環保署, 台北, 台灣.

附錄

附錄一 評選會議記錄

行政院環境保護署

「108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用 研究計畫」採購評選委員會評選會議紀錄

- 壹、會議時間：107 年 11 月 26 日（星期一）下午 2 時
- 貳、會議地點：本署 4 樓第 4 會議室
- 參、主持人：陳國義召集人
記錄：黃健瑋
- 肆、評選委員會組成：外聘委員 4 人、內派委員 1 人，共計 5 人組成。
- 伍、出席委員：陳國義、王嶽斌、張小萍、楊錫賢、劉希平
- 陸、請假委員：無
- 柒、列席人員（工作小組成員）：彭成熹（具有採購人員資格）、游智淵、黃健瑋（協助評選委員會辦理與評選有關之作業）
- 捌、評選方式：採序位法評選優勝廠商。
- 玖、投標廠商家數及名稱：投標廠商 1 家且其資格及評選項目以外資料經審查合格，廠商名稱為中央研究院。
- 拾、評選委員互選召集人，互推過程為出席委員互相推薦，決議由陳國義委員擔任召集人，王嶽斌委員擔任副召集人。
- 拾壹、召集人致詞：(略)
- 拾貳、報告事項：
一、主辦單位就本案需求內容及廠商評選事宜報告（略）。
二、工作小組初審意見報告（略）。
- 拾參、廠商詢答事項：
一、評選委員審查意見：

- (一) 臨海工業區內主要的污染源有大林電廠、中油大林廠外，另有中鋼是否考量。
- (二) 市區的交通道路樣本，如何選擇有代表性的樣本。
- (三) 不同的天氣系統影響空氣品質，如何選擇有代表性的時間來採樣，特別是如何可在事件日採樣，來瞭解空品不佳的污染源同位素特徵。
- (四) 利用成分分析結果進行源解析，再加入同位素的參數後，會使 PMF 分析結果有很大的差異性嗎？
- (五) 船舶污染源採樣工作乃將採樣器設置於碼頭，並採用大氣採樣方法進行採樣，請說明樣品代表性。
- (六) 大林電廠 PM_{2.5} 排放濃度相當低，採樣樣品量是否足夠碳同位素分析？
- (七) P.85 主要研究人力表，在本計畫內擔任之具體工作項目中未提到 PM_{2.5} 化學組成成分分析中的離子分析(IC)及碳成分分析。
- (八) P.63 的預定執行進度表，可否加以量化，依投標須知補充規定採樣數量訂定需有：
 1. 空品 8 站×2 季×7 天=112 件
 2. 港區 5 種污染源×2 次×3 重複=30 件
- (九) 本計畫成果之指紋鑑識資料建立之指紋檔，是否建立在環保署資料庫中。
- (十) 委託採樣是委託哪一家檢測業者？是否將簽署合作同意書？
- (十一) 本案進行臺灣南部高雄、屏東之細懸浮微粒中碳及鉛同位素分析，其中需針對五種污染源進行 2 次採樣、每次 3 重複，請說明採樣方式和如何避免外界污染？尤其高雄港區之排放源。
- (十二) 密集觀測之方式為何？
- (十三) 2 季採樣（春、夏採樣）主要考量因素為何？希望獲致之成果為何？背景樣本如何取得？如何區分其他污染源？

交通、其他工業區？

- (十四) 本計畫在前 2-3 年集中在臺中地區，而本年則南移至高屏，兩者產業型態不同，多了石化及港區。先前在臺中亦有港口，是否曾有研析港口船隻的排放特徵，若套用中部經驗，是否可能有必須修正的項目、方法？還有車輛。
- (十五) 若採船舶，是否區分蒸汽、燃油鍋爐或渦輪引擎的污染源，商船、軍艦也有不同運作方式。
- (十六) 高雄地區的污染源除石化廠、鋼廠、燃煤廠、煉油廠(已關廠)等很複雜，Pb、C 是否已因應？像燃煤的特徵元素是 Se、重油是 V、P(II)的含量特高，Pb、C 還未必很多或易區隔，未來有何檢驗構想？

二、廠商答覆意見：

- (一) 有關臨海工業區的測站選擇，大林油廠還在運作，是前鎮的停掉，所以還是會納入考量。中鋼是有在規劃裡，但因不是在高雄港的範圍，所以是會在下一年的計畫，如認為中鋼影響很大，在執行過程中可以再來討論，目前就先依招標內容。
- (二) 交通源的選擇是貨、卡車進出的位置，也會記錄採樣期間的交通量，而小港站其實就在其外面，就相當於周界的資料可比對，相信兩者資料濃度會有很大的差異。
- (三) 春、夏季的空氣品質代表性，會選擇適當的天氣系統條件，更明確的就是春季選擇東北季風，尤其是背風面擴散條件很差，及夏季選擇典型西南季風來作實驗，來代表空氣品質變化。
- (四) PMF 的源譜在 34 個重金屬進來後，再增加同位素後的分離效果如何，在 PMF 分析就是要解釋這個因子從其源譜上可能跟哪些源比較接近，就會牽涉到有多少源的指紋鑑定，這幾年就是在累積指紋鑑定，有些地方沒有的話就會很難判斷。而計畫本身雖然是碳和鉛的同位素，但其實是

把重金屬、水溶性離子及碳的化學分析都會做。

- (五) 船舶採樣部分，因無法直接採船的煙道，所以是在港口邊，船進出的動線上採樣，可用照相機記錄有多少船的進出，但要注意船舶進出量夠不夠大？受到的影響是否具代表性？如無法明確指向性是船舶污染，備案就會挑風向來採樣，這是可以作得到的，就是在船舶影響時才啟動採樣器。而就過去的觀察，高雄的進出密度是非常高，所以應該可以有一定程度的代表性。
- (六) 大林電廠的排放的確有可能非常低，應該就會不只 3 重複，而要多做幾次才能的樣品才能累積到足夠的質量，為了得到指紋鑑定這部分都會投入下去。
- (七) 離子分析和碳分析都是實驗室一直在做的，研究人力及工作量化後續也都會再補充。化石是指化石的燃料，包含石油、煤，石化是指石油化學，是指產業。
- (八) 關於鉛同位素和碳 13 的生質特徵，目標確實是要蒐集臺灣本土特徵。另被委託採樣廠商的合作協議，會待確定得標後，會和業界有一定名聲的廠商合作。
- (九) 港區取樣的代表性，除了船舶進出外，港口運作還有很多機具使用，而預先了解這些機具會集中在碼頭區，所以會在 69 號碼頭比較開闊的地方作採樣。另還有船舶航道上也會作採樣。
- (十) 7 天採樣的背景條件是因為臺灣很多氣象條件是以 7 天為一個週期，但計畫普遍情況是會不只作 7 天，才能掌握一個事件的前後，才能有背景資料，都可以承諾會做到。
- (十一) 目前主要的重點會是在碳和鉛，因為碳是臺灣 PM_{2.5} 裡面最大一塊，就是有機的氣膠，如果把氧化物算進去，有機物是 PM_{2.5} 最大的的一塊，所以希望是去對碳做分隔。中部地區受生質燃燒的影響非常大，可以看到碳同位素的特質，但預期到高雄受到生質燃燒影響變小、化石燃料的影響變大，也有跟中部對比的目的。

(十二) 鉛的同位素是來自鉛的毒性，而為什麼臺灣還是存在這麼明顯鉛的污染？在北部可以看到中國大陸的污染傳輸，會讓臺北的鉛濃度多一倍上去，故也會想知道中、南部的情況，這都是對公共衛生和民眾健康的期許。所以其他的元素目前可能還沒有在分析能力內，但會對所有的元素做完整分析。

(十三) 計畫的資料都會隨著報告交給署，是否與署的資料庫合併？就交給署來決定。

拾肆、評選結果：

一、經本委員會就各評選項目、受評廠商資料及工作小組初審意見逐項討論後，綜合評選結果詳評選總表（如附件）。

二、經各委員依據本採購案評分表評定參與評選廠商分數（序位），並將各委員評分結果填列於評選總表，中央研究院總評分/平均總評分為 410/82，序位合計值為 5。

三、經召集人詢問各出席委員及列席人員，均認為不同委員之評選結果無明顯差異情形，且評選委員會或個別委員評選結果未與工作小組初審意見有異。

四、決議：

（一）1 家參與評選廠商之平均總評分達 70 分以上，經出席委員過半數決議：序位第一之中央研究院為優勝廠商。

（二）評選結果於簽報機關首長或其授權人員核定後方生效。

拾伍、委員是否有不同意見：無。

拾陸、散會：下午 3 時 5 分。

附錄二 第一次工作報告會議紀錄

「108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用
研究計畫」

第 1 次工作報告會議紀錄

- 一、 時間：中華民國 108 年 3 月 11 日（星期一）下午 3 時 0 分
- 二、 地點：本署 4 樓第 6 會議室
- 三、 主席：張處長順欽
記錄：黃健瑋
- 四、 出（列）席單位及人員：詳附件簽名單
- 五、 主席致詞：（略）
- 六、 計畫執行單位報告：（略）
- 七、 討論內容：
 - （一） 煙道 PM_{2.5} 採樣係以補集足夠量作為採樣時間之估計，建議可蒐集該煙囪過去煙道 PM_{2.5} 或粒狀污染物申報量，作為採樣時間估計。
 - （二） 以 ICP-MS 分析 34 種金屬元素及鉛同位素，須注意可能之干擾（如：Ca 及 P），請於期末報告中說明克服干擾之方式，及以 SRM987 校正鉛同位素比値之結果。
 - （三） 計畫目標第 3 項是要評估高雄港區排放 PM_{2.5} 對高屏地區的影響，但簡報中的目前進度提到，高雄港區採樣作業預計是在 3 月底，似與高屏地區的採樣時程未有重疊，請說明後續如何進行影響評估。
 - （四） 本計畫在小港站有執行採樣作業，因該站目前有許多計畫同時執行，現場儀器較多，請執行單位應妥善擺放設備及線路，以維護測站安全。
 - （五） 本計畫建議與中大李崇德教授的 PM_{2.5} 成分計畫作搭配，以在後續對外成果說明時更增加說服力。
 - （六） 鎳、鈇跟其他元素特徵比較不一樣，建議請再說明。
- 八、 會議結論：
 - （一） 本計畫第 1 次工作報告審查原則通過，相關意見請納入後續各

工作報告、期末報告中回覆。

(二) 請依討論意見及契約規定，辦理後續相關事宜。

九、 散會：下午 3 時 45 分

意見與回覆

審查意見	意見回覆
1. 煙道 PM _{2.5} 採樣係以補集足夠量做為採樣時間之估計，建議可蒐集煙囪過去煙道 PM _{2.5} 或粒狀污染物申報量，做為採樣時間估計。	本研究團隊在前期計畫採樣期間，已發現有部分煙道的 PM _{2.5} 排放量有限，因此也請受委託的業者延長採樣時間；然而，因煙道採樣的事前準備作業時間較長，因此所能延長的採樣時間有限，但為避免採集的 PM _{2.5} 量不足以分析，會以分析合併樣本的替代方案來執行。
2. 以 ICP-MS 分析 34 種金屬元素及鉛同位素，須注意可能之干擾 (如：Ca 及 P)，請於期末報告中說明克服干擾之方式，及以 SRM987 校正鉛同位素比值之結果。	遵照貴處指示辦理。
3. 計畫目標第三項是要評估高雄港區排放 PM _{2.5} 對高屏地區的影響，但簡報中目前的進度提到，高雄港區採樣作業預計是在 3 月底，似與高屏地區的採樣時程未有重疊，請說明後續如何進行影響評估。	由於採樣設備與人力有限，因此無法同步進行高雄港區和周界 PM _{2.5} 的採樣。但因高雄港區的作業種類較不會有時間上的差異，且高雄港區和周界 PM _{2.5} 的採樣作業均在 3 月進行，因此本研究團隊假設高雄港區作業排放的 PM _{2.5} 特性不會有時間上的差異。
4. 本計畫在小港站有執行採樣作業，因該站目前有許多計畫同時執	遵照貴處指示辦理。

<p>行，現場移器較多，請執行單位應妥善擺放設備及線路，以維護測站安全。</p>	
<p>5. 本計畫建議與中大李崇德教授的PM_{2.5}成分計畫做搭配，以在後續對外成果說明時更增加說服力</p>	<p>遵照貴處指示辦理。</p>
<p>6. 鎳、鈳跟其他元素特徵比較不一樣，建議請再說明。</p>	<p>鎳和鈳都是燃油的主要組成，因此常為燃油污染源的重要指標，但因鎳的沸點較鈳低，因此偶而會有鎳損失的情形發生，此為本研究團隊在分析鎳和鈳，並將其應用在污染源的鑑定時，會特別留意的問題。</p>

附錄三 期中報告審查會議紀錄及意見回覆

「108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用

研究計畫」期中報告審查會議紀錄

- 一、 時間：中華民國 108 年 7 月 17 日（星期三）下午 3 時 40 分
- 二、 地點：本署 4 樓第 7 會議室
- 三、 主席：張處長順欽
紀錄：黃健瑋
- 四、 出（列）席單位及人員：詳如附件簽名單
- 五、 主席致詞：（略）
- 六、 計畫執行單位報告：（略）
- 七、 討論內容：

- （一）本次所採集的大林電廠煙氣 PM_{2.5} 樣本與先前在臺中電廠的不同，大林電廠係採海水脫硫(SWFGD)與台中電廠的石灰石膏法不同，受海水影響硫酸鹽及海鹽（氣）成分占比較多，第 96 頁結論 6 以之作為（燃煤）火力發電廠之特性可能會造成誤解，兩種燃煤機組型態應作區隔，且海水脫硫法用於電廠煙氣脫硫之案例並不多，尤應說明以免誤引。
- （二）第 86 頁表 4.3.1 之各數據變化範圍甚大，有何原因？例如火力電廠總 PM_{2.5} 為 1674.4±644.5 g/m³，若僅就同一型式且採用 SWFGD 之發電機組而言，變異程度偏高。
- （三）屏東及潮州空品站的現代碳居多，其所代表之農業區型態，與高雄、臺中等都會區、工業區不同，但現代碳亦須經燃燒生成，採樣期間（季節）當地是否有大規模農業廢棄物燃燒現象？

- (四) 第 67 頁圖 4.1.2 各空品測站之氣象因子變化圖，風向較不適宜以折線圖呈現，其具方向性而非數值大小關係，0 度及 360 度實為同一風向，90/180 度則為反向，一般係以風花圖表現，若能呈現其與排放源關係更具意義。未來環境空氣與排放源樣本可設法規劃在同日採集，若兩者時間一致，後續作比對分析時將可更可能獲得有意義之結果，有助於瞭解判定因果關聯。
- (五) 本計畫檢測空氣中細懸浮微粒之碳和鉛同位素，作為追蹤 PM 成因來源和控制技術，P.15-P.16 說明碳-13 之相對豐度， $\delta^{13}\text{C}$ 和 P.22 的 1.6.1 節 $\delta^{13}\text{C}$ 之應用，請補充 $\delta^{13}\text{C}$ 在現代碳和化石碳之區分方式介紹，並和 P.26 的 1.6.2 節 $\delta^{14}\text{C}$ 定義之區別。
- (六) 碳之同位素分布在排放後，會以 PM 和 CO_2 呈現，在自然植物和水體吸收後，其反應和稀釋/濃縮效應又如何？對於空氣中固/氣之 C 同位素分布又有何種影響？有無可能在環境中產生碳循環？
- (七) 鉛之同位素分布大多認為是不同高階放射性物質衰退、核試爆塵之結果。臺灣在鉛同位素之主要來源為何？第四章結果中，針對鉛同位素之陳述較少，請補充說明。
- (八) 鋼鐵業製程包含高爐、轉爐、煉焦與燒結爐等，選擇燒結爐的原因是什麼？
- (九) 請補充本計畫污染排放源製程資料、空污防制設備及採樣當天操作資訊。
- (十) 污染源排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中 CPM 所含比例高，本計畫是否進行 CPM 之化

學組成分析?CPM 樣品是否進行同位素分析?

- (十一) 本計畫主要是測試 PM_{2.5} 中 C、Pb 同位素含量及其應用在污染源鑑定上。在污染源分析上，受體模式推估 8 個測站 5 個因子的貢獻度，仍僅用於縮小污染源範圍。所以並未探討港區與周邊 4 個測站污染物間關係。
- (十二) P. 60 的 3.6 公式中， X_{lj} 為第 j 個樣本、第 l 個化學物種的量測濃度，是否應修正為第 l 個樣本、第 j 個化學物種的量測濃度。
- (十三) P. 77 的 4.1.3 節中屏東站的 NO₃⁻ 與 OC 皆為最高濃度，但其中 OC 最高是在鳳山的 8.6±2.6 g/m³?
- (十四) P. 96 及其他「楊塵」應修正為「揚塵」。
- (十五) 計畫所使用之兩種標準參考物質，請確認 NIST SRM 1648 是否為 1648a?NIST SRM 987 是否為 981?
- (十六) 本計畫所收集之氣象資料於期中報告中未用於數據解析，請說明未來如何使用。
- (十七) PMF 分析除了把本計畫所採之所有樣品放入分析外，建議亦請考慮季節可能有所不同。
- (十八) 請說明進行排放管道 PM_{2.5} 檢測時之製程操作條件及檢測之代表性。是否符合操作許可證登載之許可最大產量或燃(物)料使用量百分之八十以上?
- (十九) 報告內容應敘明檢測時燃料之含硫量、SO₂、CEMS 值、排氣之含水分、排氣溫度、採樣體積及防制設備種類。
- (二十) 排放管道粒狀物濃度應使用標準狀態(0 °C, 760 mmHg)下 1Nm³

的乾基排氣表示。

- (二十一) 請確認第 84 頁所述內容「FPM 中的濾紙僅捕集到 1/3 的 FPM，反映發電廠排放的微粒不易被濾紙捕集」之正確性。因 FPM 依序經過採樣口、PM_{2.5} 旋風分離器、採樣管、FPM 濾紙，濾紙上僅有 1/3 之原因應為大於 2.5 mm 之 FPM 已被旋風分離器收集，因此後端濾紙量測到較少之微粒質量。另外，NIEA A212.10B 要求濾紙對 0.3 mm 之 DOP 收集效率至少要達到 99.95%，因此應不會有發電廠排放之微粒不易被濾紙捕集之問題。
- (二十二) 第 42 頁第 2 段第 9 行「炫風分離器」應更正為「旋風分離器」。
- (二十三) 量測固定污染源排放管道排放之碳與鉛同位素特性，是否有助於本計畫瞭解大氣細懸浮微粒之特性？又本計畫量測之管道排放 PM_{2.5} 如何與大氣中細懸浮微粒濃度連結？
- (二十四) 請補充其他研究報告針對本研究進行之火力發電廠、煉油廠及鋼鐵廠燒結爐之 PM_{2.5} 相關檢測數據，以利進行平行比對。
- (二十五) 第 88 頁，倒數第 7 行提及 FPM 為 $2,841.9 \pm 191.8 \text{ mg/m}^3$ ，其中濾紙捕集到的 FPM 占總 FPM 的 30% 左右。但在表 4.3.1 中，鋼鐵廠燒結爐中濾紙捕集到的 FPM 質量濃度為 $2,504.5 \pm 173.4 \text{ g/m}^3$ ，與說明不符，是否有誤？請確認。

八、 會議結論：

(一) 本計畫期中報告審查原則通過，相關意見請納入後續期末報告中回覆。

(二) 本署計畫成果皆會公開上網，為避免外界誤用及搶先轉發，請執行單位撰寫結論及建議時應審慎且說明清楚，並能提前收整，以供本署適時的對外發布資訊。

散會：下午 4 時 40 分

期中報告意見與回覆

審查意見	意見回覆
<p>1. 本次所採集的大林電廠煙氣 $PM_{2.5}$ 樣本與先前在臺中電廠的不同，大林電廠係採海水脫硫(SWFGD)與台中電廠的石灰石膏法不同，受海水影響硫酸鹽及海鹽(氯)成分占比較多，第 96 頁結論 6 以之作為(燃煤)火力發電廠之特性可能會造成誤解，兩種燃煤機組型態應作區隔，且海水脫硫法用於電廠煙氣脫硫之案例並不多，尤應說明以免誤引。</p>	<p>由於大林電廠以海水脫硫方式去除燃料中的硫成分，因此會有較高的鈉離子濃度，加上燃煤是產生硫酸鹽的重要來源之一，因此大林電廠的鈉離子與硫酸鹽濃度偏高。期末報告會調整文字的說明，避免出現誤引。</p>
<p>2. 第 86 頁表 4.3.1 之各數據變化範圍甚大，有何原因? 例如火力電廠總 $PM_{2.5}$ 為 $1674.4 \pm 644.5 \text{ g/m}^3$，若僅就同一型式且採用 SWFGD 之發電機組而言，變異程度偏高。</p>	<p>由於本研究團隊委託的採樣業者針對同一污染源的採樣都是三重覆(因每次採樣的時間較長，因此三重覆樣本都在不同天完成)，而每次採樣的污染源運轉狀況又不同，導致三次採樣結果的標準偏差較大。然而，為避免多次的採樣結</p>

	<p>果出現較大的偏差，本研究團隊除了會採集不同季節的煙道樣本外，在彙整不同季節的採樣資料後，也會評估採集之樣本的代表性，以確保分析數據的可信度與穩定性。</p>
<p>3. 屏東及潮州空品站的現代碳居多，其所代表之農業區型態，與高雄、臺中等都會區、工業區不同，但現代碳亦須經燃燒生成，採樣期間（季節）當地是否有大規模農業廢棄物燃燒現象？</p>	<p>本研究團隊於採樣期間並無記錄到明顯的農業廢棄物燃燒現象，因此無法確定屏東站與潮州站的現代碳比例偏高之因素是否和農業廢棄物的燃燒有關。然而，因屏東地區也有部分業者，如養豬戶，以燃燒廢木材做為熱源，且前期計畫的採樣結果也反映木材燃燒可能是中部的生質燃燒源，因此也不排除木材燃燒可能是造成屏東當地有較高現代碳比例的原因。但為了解屏東地區的高現代碳原因，建議未來增加現代碳污染源的調查和分析，以評估造成當地高現代碳的原因。</p>
<p>4. 第 67 頁圖 4.1.2 各空品測站之氣象因子變化圖，風向較不適宜以折線圖呈現，其具方向性而非數值大小關係，0 度及 360 度實為同一風向，90/180 度則為反向，一般係以風花圖表現，若能呈現其與排放源關係更具意義。未來環境空氣與排放源樣本可設法規劃在同日採集，若兩者時間一致，後續作比對分析時將可更可能獲得有意義之結果，有助</p>	<p>期末報告將會加入氣象資料。</p>

於瞭解判定因果關聯。	
<p>5. 本計畫檢測空氣中細懸浮微粒之碳和鉛同位素，作為追蹤 PM 成因來源和控制技術，P.15-P.16 說明碳-13 之相對豐度，$\delta^{13}\text{C}$ 和 P.22 的 1.6.1 節 $\delta^{13}\text{C}$ 之應用，請補充 $\delta^{13}\text{C}$ 在現代碳和化石碳之區分方式介紹，並和 P.26 的 1.6.2 節 $\delta^{14}\text{C}$ 定義之區別。</p>	<p>$\delta^{13}\text{C}$ 是一種穩定同位素，為碳同位素 13 和碳同位素 12 之比值，其數值會因物理或化學作用的不同而改變。碳 14 是放射性同位素，其在碳中的比例會隨年份衰減，因此若由”現代”燃燒行為產生的碳，如農廢燃燒，碳 14 多未衰減，可測得較高比例的碳 14；而化石碳，如石油，因碳 14 多已衰減，因此碳 14 的含量偏低。是故，透過碳 14 比例的量測可知道碳是以現代碳還是化石碳為主。</p>
<p>6. 碳之同位素分布在排放後，會以 PM 和 CO_2 呈現，在自然植物和水體吸收後，其反應和稀釋/濃縮效應又如何?對於空氣中固/氣之 C 同位素分布又有何種影響?有無可能在環境中產生碳循環?</p>	<p>環境中本身存在的二氧化碳確實會影響碳同位素的量測集後續的碳污染源鑑定，因此為提高以碳同位素進行污染源鑑定的效益，本研究團隊除了會採集污染源的其他同位素特徵以供比較外，也會應用其他化學組成，如金屬元素，做為污染源鑑定用。</p>
<p>7. 鉛之同位素分布大多認為是不同高階放射性物質衰退、核試爆塵之結果。臺灣在鉛同位素之主要來源為何?第四章結果中，針對鉛同位素之陳述較少，請補充說明。</p>	<p>過去有關臺灣的鉛同位素研究有限，因此較難說明臺灣的鉛主要來自哪些來源。因此，近幾年，本研究團隊藉由臺灣北、中和南部的大氣與重要污染源排放之鉛及其同位素的分析，釐清臺灣主要的鉛來源。過去幾年在臺灣北部與中部的研究成果均已整理在 1.5 和 1.6.3 節中；待本計畫完成高屏地區大氣與重要</p>

	<p>污染源的鉛同位素分析後，也會討論高屏地區的鉛污染來源，並呈現於期末報告中。</p>
<p>8. 鋼鐵業製程包含高爐、轉爐、煉焦與燒結爐等，選擇燒結爐的原因是什麼?</p>	<p>根據中鋼不同煙道的 $PM_{2.5}$ 排放量清單，燒結爐的 $PM_{2.5}$ 排放量僅排第二，第一為煉焦爐。然而，因煉焦爐的煙囪高度過高，有較高的危險性，受委託的業者無法進行採樣，因此才會改選擇 $PM_{2.5}$ 排放量第二高的燒結爐；此外，由於本研究團隊在前期計畫於中部採集的煉鋼廠，採集的煙道也是燒結爐，因此，本計畫若同樣採集中鋼鋼鐵廠燒結爐排放的 $PM_{2.5}$，可做為不同廠區之燒結爐排放 $PM_{2.5}$ 及其化學組成的比對與討論。</p>
<p>9. 請補充本計畫污染排放源製程資料、空污防制設備及採樣當天操作資訊。</p>	<p>期末報告將會呈現本計畫調查之污染排放源製程資料、空污防制設備及採樣等當天操作資訊。</p>
<p>10. 污染源排放 $PM_{2.5}$ 中 CPM 所含比例高，本計畫是否進行 CPM 之化學組成分析?CPM 樣品是否進行同位素分析?</p>	<p>由於第一次煙道採樣獲得的 CPM 樣本保存不完整，因此無法進行 CPM 中的化學組成分析。但本研究團隊已確定會保留第二次煙道採樣獲得的 CPM 樣本，並分析其化學組成。然而，因 CPM 的保存與分析較為困難，因此，預計所能提供的資料僅能定性無法定量。</p>
<p>11. 本計畫主要是測試 $PM_{2.5}$ 中 C、Pb 同位素含量及其應用在污染源鑑</p>	<p>港區排放的 $PM_{2.5}$ 及其組成仍在分析中，期末報告前將可完成分析，並討論</p>

<p>定上。在污染源分析上，受體模式推估 8 個測站 5 個因子的貢獻度，仍僅用於縮小污染源範圍。所以並未探討港區與周邊 4 個測站污染物間關係。</p>	<p>港區與周界的 $PM_{2.5}$ 關係。</p>
<p>12. P.60 的 3.6 公式中，X_{ij} 為第 j 個樣本、第 i 個化學物種的量測濃度，是否應修正為第 i 個樣本、第 j 個化學物種的量測濃度。</p>	<p>謝謝委員指正。已修正公式 3.6 中參數的定義。</p>
<p>13. P.77 的 4.1.3 節中屏東站的 NO_3^- 與 OC 皆為最高濃度，但其中 OC 最高是在鳳山的 $8.6 \pm 2.6 \text{ g/m}^3$?</p>	<p>已調整文字說明，使內文精準呈現各測站的化學組成特性。</p>
<p>14. P.96 及其他「揚塵」應修正為「揚塵」。</p>	<p>謝謝委員指正。已修正錯誤處。</p>
<p>15. 計畫所使用之兩種標準參考物質，請確認 NIST SRM 1648 是否為 1648a? NIST SRM 987 是否為 981?</p>	<p>謝謝委員指正。本研究團隊採用的標準品確實為 NIST SRM 1648a 和 NIST SRM 981，已修正錯誤處。</p>
<p>16. 本計畫所收集之氣象資料於期中報告中未用於數據解析，請說明未來如何使用。</p>	<p>期末報告將彙整合氣象資料和大氣 $PM_{2.5}$ 化學組成之關係，以瞭解氣象條件對 $PM_{2.5}$ 污染源的影響。</p>
<p>17. PMF 分析除了把本計畫所採之所有樣品放入分析外，建議亦請考慮季節可能有所不同。</p>	<p>本研究團隊會分別以 PMF 模式分析不同季節和整併所有樣本的污染源，以瞭解其差異。</p>
<p>18. 請說明進行排放管道 $PM_{2.5}$ 檢測時之製程操作條件及檢測之代表</p>	<p>本研究團隊委託的採樣業者，均依法規規定執行。</p>

<p>性。是否符合操作許可證登載之許可最大產量或燃（物）料使用量百分之八十以上？</p>	
<p>19. 報告內容應敘明檢測時燃料之含硫量、SO₂、CEMS 值、排氣之含水分、排氣溫度、採樣體積及防制設備種類。</p>	<p>期末報告將會呈現本計畫調查之污染排放源製程資料、空污防制設備及採樣等當天操作資訊。</p>
<p>20. 排放管道粒狀物濃度應使用標準狀態(0 °C, 760 mmHg)下 1Nm³ 的乾基排氣表示。</p>	<p>本研究團隊委託的採樣業者，均依法規規定執行。</p>
<p>21. 請確認第 84 頁所述內容「FPM 中的濾紙僅捕集到 1/3 的 FPM，反映發電廠排放的微粒不易被濾紙捕集」之正確性。因 FPM 依序經過採樣口、PM_{2.5} 旋風分徑器、採樣管、FPM 濾紙，濾紙上僅有 1/3 之原因應為大於 2.5 mm 之 FPM 已被旋風分離器收集，因此後端濾紙量測到較少之微粒質量。另外，NIEA A212.10B 要求濾紙對 0.3 mm 之 DOP 收集效率至少要達到 99.95 %，因此應不會有發電廠排放之微粒不易被濾紙捕集之問題。</p>	<p>謝謝委員指正。已修正文字的敘述。</p>
<p>22. 第 42 頁第 2 段第 9 行「炫風分離器」應更正為「旋風分離器」。</p>	<p>謝謝委員指正。已修正錯誤處。</p>
<p>23. 量測固定污染源排放管道排放之</p>	<p>本研究團隊假設污染源排放的微粒及</p>

<p>碳與鉛同位素特性，是否有助於本計畫瞭解大氣細懸浮微粒之特性？又本計畫量測之管道排放 $PM_{2.5}$ 如何與大氣中細懸浮微粒濃度連結？</p>	<p>其同位素特徵具有穩定性，且大氣與污染源煙道排放的 $PM_{2.5}$ 均在同一季節採樣，可借由兩者同位素資料的比對，並搭配其他化學組成資料，如金屬元素，討論不同區域的 $PM_{2.5}$ 污染源。</p>
<p>24. 請補充其他研究報告針對本研究進行之火力發電廠、煉油廠及鋼鐵廠燒結爐之 $PM_{2.5}$ 相關檢測數據，以利進行平行比對。</p>	<p>由於本計畫的樣本數較多，部份樣本仍在分析中，但期末報告會呈現完整的分析結果，以供比較和污染源的討論。</p>
<p>25. 第 88 頁，倒數第 7 行提及 FPM 為 $2,841.9 \pm 191.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$，其中濾紙捕集到的 FPM 占總 FPM 的 30% 左右。但在表 4.3.1 中，鋼鐵廠燒結爐中濾紙捕集到的 FPM 質量濃度為 $2,504.5 \pm 173.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$，與說明不符，是否有誤？請確認。</p>	<p>期中報告第 88 頁提到的 FPM 濃度 ($2,841.9 \pm 191.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 為濾紙和旋風集塵器採集之 FPM 的加總，其中濾紙補集到的 FPM 即為 $2,504.5 \pm 173.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$。已在表 4.3.1 中註明不同 FPM 的來源，避免誤解。</p>

附錄四、期末報告審查會議紀錄

「108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術

之發展與應用研究計畫」

- 一、會議時間：108 年 12 月 12 日（星期四）上午 9 時 30 分
- 二、會議地點：本署 4 樓第 4 會議室
- 三、主席：張處長順欽 記錄：張志偉
- 四、出（列）席單位及人員：詳如附件簽名單
- 五、主席致詞：（略）
- 六、執行單位報告：（略）
- 七、審查意見：

（一）楊委員錫賢

1. “補”集微粒或“捕”集?請確認。
2. 火力發電廠、燃油廠與燒結爐排放 FPM 中 Cr 濃度都很高，請補充說明。
3. 本計畫建議未來可增加樣本數來克服採集量不足以分析的問題，是合併多樣本作分析嗎?
4. 未來可嘗試進行 CPM 化學成分分析?

（二）劉委員希平

1. 本計畫調查高雄地區主要 PM_{2.5} 來源（高雄港、火力發電廠、鋼鐵廠燒結爐、煉油廠）之碳與鉛同位素，和其分布特徵，以探討高雄境內主要 PM_{2.5} 污染源對高屏空氣污染之影響。 $\delta^{13}\text{C}$ 和鉛同位素比值在鑑定 PM_{2.5} 污染來源是本計畫重點。p.1 提及 2015-17 和 2016-18 年之研究結果，應簡要說明現代碳和化石碳，不同鉛同位素之應用成果。
2. P.26 以 ^{14}C 作現代碳和化石碳之區分，pMC 越高，現代碳貢獻越大，雖以 PM 為主，而 CO₂ 之生成、碳循環義持續穩定進行；天然氣之使用是否均和 pMC 有關?在台灣生質燃燒和天然氣發電下，對於現代碳、化石

碳作為污染源鑑定過程，請說明潛在干擾。

3. 高雄港區內之各項環境採樣，均以大氣環境為主，相較於 p.105 火力電廠煙道採樣，p.116 煉油廠煙道（應註明其製程）和 p.117 鋼鐵廠燒結爐煙道均為直接污染源樣本，港區內空品中 PM 來源和解析宜保守，並在研究過程中，可在結論與建議中提出未來研究方向之建議。

(三) 張委員小萍

1. P.150 煙道採樣 C 成分不夠作 C-isotope 分析，建議除延長採樣時間外，增加樣本數，若為 C 成分濃度不夠，延長採樣時間可能比增加樣品數更為合理可行？
2. P.112~113，表 4.3.3 高雄港排放之 PM_{2.5} 化學組成濃度（mean±SD）統計表，建議加列樣品數 n=?，其他相似表格亦是。另外，Na=179.6±152.1 之 SD 是否過高？
3. P.101“表 4.2.1（p.97）的夏季林園、大寮、屏東站 Pb-isotope 正分析中”，但 p.97 已有數據，應刪去此段文字。
4. P.101 第 3 列，平均 Pb 濃度最高值在春季林園站(10.0±22.2 ng/m³)。
5. P.101 第 4 列...之總 Pb- conc. 維 64.9 ng/m³→為。
6. 鉛同位素比值在本土污染源多有重疊，故應用於指紋鑑定仍有困難，非本土之污染源則可區隔，若能探討原因，是否有助本土污染源之鑑定？

(四) 陳委員國義

1. 摘要的英文內容與中文部分不完全一致，採取的數據也有異，正式報告請調整。
2. 本計畫的各元素成分分析，除 Pb 外另有砷、鋅、硒、鉻等，是否未來可將汞納入？水保處已修法自 109 年起要申報燃煤含汞量，超過一定量就要提改善計畫，甚至作流布分析。
3. 相較於電廠、鋼廠及石化廠的排放源測定，港口作業區的排放源監測並

非從船隻、車輛採集分析，若作受體比較，如何排除其中的背景值(p.42)。

4. P.20、21 的 Pb 同位素比較，其中日本燃煤電廠只有 1 例，作比較略有不足，應蒐集較多案例，本報告後面 (p.113) 內容即有其他日本案例。
5. P.67 各空氣品質站氣象資料，風向較不宜用點狀圖表示，可採取風花圖 (wind rose) 顯示其方向性。
6. P.148 5.2 結論火力電廠的 PM_{2.5} 主要集中在無機 CPM，但本次的大林電廠和 2017 年的麥寮電廠都是海水脫硫，只有 3 座。而另外的燃煤電廠則採石灰石膏法，有很大不同，應作說明。發電廠的燃燒效率很高，C 比例很低 (形成 CO₂)，採樣可能困難，所採到的可能都是灰分中的 C。

(五) 環檢所

1. 圖 4.1.20~圖 4.1.23 建議將同一化學組成之顏色統一，以利判讀。
2. P.89~90 有關夏季各化學組成占 PM_{2.5} 質量濃度比例之敘述，多處之站名、化學組成比例 (%) 與圖 4.1.21 不一致，請再確認並修正。
3. P.99 提及風速變異大 (2-6 m/s) 可能影響 8 個測站在夏季採集到的 $\delta^{13}\text{C}$ 變異，建議可以探討日平均風速或盛行風向每日之 $\delta^{13}\text{C}$ 是否相關。
4. 以 ICP-MS 進行元素分析，所選用之內標準元素的質量數，一般而言可以依分析元素同位素之質量數 ± 50 amu 內可資利用的內標準元素為選擇之依據，本計畫目前僅以銨 (^{115}In) 為內標準品，未來若執行相關分析，建議研究團隊將上述內標準品元素選擇依據納入參考。

(六) 監資處

1. 建議增述移動源之影響。
2. 建請收斂前期及本計畫在北中南之研究結果，如雲嘉地區燒木材會影響臺中地區，俾利解析由南往北之跨縣市傳輸。
3. 請評估受否能藉碳或鉛同位素比值，研判境外傳輸比例。
4. 相關採樣分析工作數量與契約書相符。

5. 工作項目 (2) III, 請補述本計畫及國外之港口及港口交通排放之細懸浮微粒的化學組成和同位素特徵差異。
6. 工作項目 (2) IV, 請於 4.4 節及圖 4.4.1 補述前期計畫 (106 及 107 年) 之同位素成果資料。
7. 本署空氣污染物排放量清冊資訊系統已於 9 月 6 日更新至 10.0 版, 本計畫引述之相關資料請更新。
8. 本報告建議除與 105 年研究報告成果比較外, 建議增加 106 及 107 年報告成果之比較分析。
9. 請補充說明 C3 及 C4 植物分類
10. 本計畫同位素之小數位數請修正一致。
11. P.14 說明鑑定技術背景部分, 係以燃煤電廠對中部地區 PM 高污染事件日影響最大及為主要該區有毒重金屬濃度超出 WHO 建議值污染源做為案例, 因相關資訊未明, 建議改以國外案例闡明。
12. 1.5 節指出前期推論雪山隧道內的 $\delta^{13}\text{C}$ 值因與燃煤相近, 推論係受到燃煤電廠影響, 但圖 1.5.1 及鉛同位素比值圖 1.5.4、圖 1.5.5 亦顯示與燃油相近, 請補充說明。(註:協和電廠為燃油電廠, 和平電廠為燃煤電廠, 深澳電廠的燃煤機組已於 2007 年除役)
13. 我國進口煤碳來源依據經濟部能源局統計資料顯示, 燃煤主要來自澳洲 (48%) 及印尼 (34%), 煉焦煤多來自澳洲 (75%) 及加拿大 (24%), 請補充說明各期計畫我國燃煤電廠及鋼鐵廠的鉛同位素比值之統計差異。
14. 船舶燃油種類繁多 (如 HMO、HFO、MDO、MGO 及分高低硫等), 依據規定船舶需要在 3-4 海浬後才能轉至高硫重油 (HFO), 而 V 及 Ni 等多在 HFO 中驗出, 考量本計畫未直接量測船用燃油, 所以結論是否適宜敘明船舶燃料油為高屏地區 PM_{2.5} 的重要污染源。且鈳除在 HFO 中驗出,

其亦如煉油廠之重要觸媒原料，故是否適用被定義為第 6 個因子，請酌參。

15. 請於第 3 章補充本計畫及前期計畫各採樣點之位置圖。
16. 請於第 4 章補充說明如何結合多種同位素、重金屬成分、或粒子物理特徵（如粒徑）等，協助空污鑑識相關機制或邏輯。
17. 請於 4.3.4 節補充顯示臺灣空氣中各項重金屬之濃度平均值，俾利比較分析。
18. 請於 4.4 節仿圖 1.6.8，補充說明近年計畫臺灣不同地區之大氣微粒鉛同位素比值分布。
19. 表 5.1 預定與實際進度表，請補充修正 12 月之進度。
20. 5.2 節指出 PMF 分析結果顯示 6 個污染源對橋頭站與左營站的貢獻相當，且表 4.1.2 及 4.1.3 顯示兩站的 PM_{2.5} 及化學組成濃度相當，但兩站分為背景測站及一般測站，請協助解析。

八、結論：

- (一) 本計畫期末報告原則通過，請依委員審查意見修正。
- (二) 請執行單位依審查意見修正期末報告、以對照表說明辦理情形，並依契約書補充條款第 4 條第 1 項規定，提交期末報告（修正稿及正式報告）及相關資料，經本署認可後，辦理結案及請款事宜。

九、散會（上午 11 時 30 分）

期末審查意見與回覆

審查意見	意見回覆
1. “補”集微粒或“捕”集?請確認。	已依委員意見修正。
2. 火力發電廠、燃油廠與燒結爐排放 FPM 中 Cr 濃度都很高，請補充說明。	目前國內外研究都指出此 3 種污染源的特徵元素包含 Cr，但其原因為何仍不清楚，可能需待未來更多研究的分析與討論。
3. 本計畫建議未來可增加樣本數來克服採集量不足以分析的問題，是合併多樣本作分析嗎?	本研究團隊根據以往煙道的採樣結果，建議在要取得足量樣本進行同位素組成分析下，會透過增加採集的樣本數並合併多個樣本作分析。
4. 未來可嘗試進行 CPM 化學成分分析?	謝謝委員建議。本研究團隊都有收集 CPM 樣本，未來將嘗試分析 CPM 的化學成分，以供評估是否可增加 PM _{2.5} 污染源鑑定的可信度。
5. 本計畫調查高雄地區主要 PM _{2.5} 來源（高雄港、火力發電廠、鋼鐵廠燒結爐、煉油廠）之碳與鉛同位素，和其分布特徵，以探討高雄境內主要 PM _{2.5} 污染源對高屏空氣污染之影響。 $\delta^{13}\text{C}$ 和鉛同位素比值在鑑定 PM _{2.5} 污染來源是本計畫重點。p.1 提及 2015-17 和 2016-18 年之研究結果，應簡要說明現代碳和化石碳，不同鉛同位素之應用成果。	本研究團隊已補上 2015~2018 年的研究成果於”研究源起”一節中（第 2 頁），詳細內容請見原第 1.6.1~1.6.3 節中關於本土研究成果的描述。

<p>6. P.26 以 ^{14}C 作現代碳和化石碳之區分，pMC 越高，現代碳貢獻越大，雖以 PM 為主，而 CO_2 之生成、碳循環義持續穩定進行；天然氣之使用是否均和 pMC 有關？在台灣生質燃燒和天然氣發電下，對於現代碳、化石碳作為污染源鑑定過程，請說明潛在干擾。</p>	<p>由於 $\text{PM}_{2.5}$ 中的碳佔大氣的 CO_2 濃度有限，因此大氣中的碳循環對現代碳分析結果的影響應可被忽略。關於天然氣或生質燃燒的影響部分，根據 2017 年的研究成果，我們已知道生質燃燒生成的碳以現代碳為主，因此若採集到較高的現代碳比例，推測應和生質燃燒的貢獻有關；天然氣無相關資料，較難推測其排放的碳微粒對化石碳或現代碳的影響，但因天然氣來自長年蘊藏在地球的燃料，推測天然氣的燃燒所貢獻的碳應以化石碳為主。</p>
<p>7. 高雄港區內之各項環境採樣，均以大氣環境為主，相較於 p.105 火力電廠煙道採樣，p.116 煉油廠煙道（應註明其製程）和 p.117 鋼鐵廠燒結爐煙道均為直接污染源樣本，港區內空品中 PM 來源和解析宜保守，並在研究過程中，可在結論與建議中提出未來研究方向之建議。</p>	<p>根據本研究的量測結果，我們發現 5 個港口作業區的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源特性和周界相近，而在港區內，除來自船舶的排放外，也包含貨運車輛，但船舶或貨運車輛排放之微粒的採集較為困難，且不同規模的船舶或貨運車輛排放的微粒特性也有差異；然而，透過量測資料仍可發現部分組成和周界有明顯差異，如化石碳的比例明顯較高。因此，本研究團隊建議未來若要探討港區對周界 $\text{PM}_{2.5}$ 的影響，可將其視為“面污染源”來評估。</p>
<p>8. P.150 煙道採樣 C 成分不夠作 C-isotope 分析，建議除延長採樣時間外，增加樣本數，若為 C 成分濃度不夠，延長採樣時間可能比增加</p>	<p>本研究團隊是委託環保署認可的檢測業者採集煙道排放的 $\text{PM}_{2.5}$，且受限於相關法令的規範（如勞基法），較難要求業者延長採樣時間以補足足夠的碳含</p>

<p>樣品數更為合理可行?</p>	<p>量。因此，建議未來仍以增加樣本數量並合併分析，以期能獲得足夠的碳含量。</p>
<p>9. P.112~113，表 4.3.3 高雄港排放之 PM_{2.5} 化學組成濃度 (mean±SD) 統計表，建議加列樣品數 n=?，其他相似表格亦是。另外，Na=179.6±152.1 之 SD 是否過高?</p>	<p>本研究團隊已加入樣本數於各表格中。另外，報告第 69 頁也有列出各類樣本的採樣期間和數目。關於 Na 的標準偏差過高一事，主要和採集的樣本之 Na 濃度變異較大有關。</p>
<p>10. P.101“表 4.2.1 (p.97) 的夏季林園、大寮、屏東站 Pb-isotope 正分析中”，但 p.97 已有數據，應刪去此段文字。</p>	<p>已刪除該句文字。</p>
<p>11. P.101 第 3 列，平均 Pb 濃度最高值在春季林園站(10.0±22.2 ng/m³)。</p>	<p>由於在春季的密集採樣期間，林園站的最高鉛濃度可達 64.9 ng/m³，因此才會造成該測站的鉛濃度之標準偏差較大。</p>
<p>12. P.101 第 4 列...之總 Pb- conc. 維 64.9 ng/m³→為。</p>	<p>已更正該文字。</p>
<p>13. 鉛同位素比值在本土污染源多有重疊，故應用於指紋鑑定仍有困難，非本土之污染源則可區隔，若能探討原因，是否有助本土污染源之鑑定?</p>	<p>國內外相關研究均有發現不同污染源排放的同位素特徵確實有重疊機會出現，主要是因不同污染源的原料或操作流程可能類似。但為提高同位素在污染源的鑑定效益，除了分析污染源的同位素特徵外，也都會同時分析污染源的傳統化學組成特性，如水溶性陰陽離子、有機碳、元素碳和金屬元素，並合併傳統化學組成的分析結果，提高污染源的</p>

	鑑定效益。
14. 摘要的英文內容與中文部分不完全一致，採取的數據也有異，正式報告請調整。	已修正中英文摘要，並使其內容一致。
15. 本計畫的各元素成分分析，除 Pb 外另有砷、鋅、硒、鉻等，是否未來可將汞納入？水保處已修法自 109 年起要申報燃煤含汞量，超過一定量就要提改善計畫，甚至作流布分析。	因燃煤電廠排放的同位素與金屬元素特徵可作為污染源的鑑定用，且 Hg 的分析較為困難，因此本研究團隊暫時無將 Hg 納入分析對象。
16. 相較於電廠、鋼廠及石化廠的排放源測定，港口作業區的排放源監測並非從船隻、車輛採集分析，若作受體比較，如何排除其中的背景值 (p.42)。	在港區內，PM _{2.5} 除來自船舶的排放外，也包含貨運車輛的排放，但船舶或貨運車輛排放之微粒的採集較為困難，且不同規模的船舶或貨運車輛排放的微粒特性有差異，相對的，代表性可能不足；然而，透過本研究的量測資料仍可發現部分組成和周界有明顯差異，如化石碳的比例明顯較高。因此，本研究團隊建議可將港區視為”面污染源”，以評估港區排放的污染對周界 PM _{2.5} 的影響。
17. P.20、21 的 Pb 同位素比較，其中日本燃煤電廠只有 1 例，作比較略有不足，應蒐集較多案例，本報告後面 (p.113) 內容即有其他日本案例。	本研究團隊已重新檢索近 2 年的文章，並沒有找到日本燃煤電廠排放之鉛同位素資料，但仍會持續進行相關文獻的檢索與更新。

<p>18. P.67 各空氣品質站氣象資料，風向較不宜用點狀圖表示，可採取風花圖（wind rose）顯示其方向性。</p>	<p>本研究團隊的風速與風向表示方式主要是想說明不同採樣日的風速與風向變異，以作為不同採樣日之風速與風向的變異對採樣結果的影響，因此才沒有以風花圖的方式來呈現。</p>
<p>19. P.148 5.2 結論火力電廠的PM_{2.5}主要集中在無機 CPM，但本次的大林電廠和 2017 年的麥寮電廠都是海水脫硫，只有 3 座。而另外的燃煤電廠則採石灰石膏法，有很大不同，應作說明。發電廠的燃燒效率很高，C 比例很低（形成 CO₂），採樣可能困難，所採到的可能都是灰分中的 C。</p>	<p>過去研究發現採用低硫煤礦或以石灰石膏法去除硫成分的燃煤鍋爐（Chow et al., 2004 Chemosphere 185-208），除了硫酸鹽、As、Se 和 Cr 等元素仍是主要的組成外，並沒有發現有較高的鈉含量，而硫酸鹽濃度約為鈉離子的 30 倍，遠高於本研究量測到的 0.36 倍（硫酸鹽/鈉離子）；此外，本研究量測到較高的元素為鈉，過去研究指出採用石灰石膏法除硫的燃煤鍋爐量測到較高的元素為鈣（Chow et al., 2004）。因此，推測採用海水脫硫採集到的 PM_{2.5} 會有較高的鈉，而石灰石膏法除硫的燃煤鍋爐則有較高的鈣。</p>
<p>20. 圖 4.1.20~圖 4.1.23 建議將同一化學組成之顏色統一，以利判讀。</p>	<p>已統一圖 4.1.20~圖 4.1.23 的各化學組成顏色。</p>
<p>21. P.89~90 有關夏季各化學組成占 PM_{2.5} 質量濃度比例之敘述，多處之站名、化學組成比例（%）與圖 4.1.21 不一致，請再確認並修正。</p>	<p>已重新檢視並統一圖表與文字的內容。</p>
<p>22. P.99 提及風速變異大（2-6 m/s）可能影響 8 個測站在夏季採集到的</p>	<p>由於每個測站的每日風速和風向不一致，且每日的碳同位素數值分佈有明顯</p>

<p>$\delta^{13}\text{C}$ 變異，建議可以探討日平均風速或盛行風向每日之 $\delta^{13}\text{C}$ 是否相關。</p>	<p>差異，因此才會推測風速變異大可能是影響碳同位素數值的原因之一。然而，考量到 $\text{PM}_{2.5}$ 樣本的採樣時間為 22 小時，且我們無法掌握不同時間點的風速與風向和污染源間的關係，作為進一步探討風速的變異對碳同位素數值影響用。因此，為避免誤會，我們已移除該段描述。</p>
<p>23. 以 ICP-MS 進行元素分析，所選用之內標準元素的質量數，一般而言可以依分析元素同位素之質量數 ± 50 amu 內可資利用的內標準元素為選擇之依據，本計畫目前僅以銦 (^{115}In) 為內標準品，未來若執行相關分析，建議研究團隊將上述內標準品元素選擇依據納入參考。</p>	<p>謝謝委員的建議。由於加入多個內標準品會增加校正的複雜度，因此暫時仍維持單一內標準品，後續會思考如何在分析過程納入建議。</p>
<p>24. 建議增述移動源之影響。</p>	<p>根據本研究團隊的分析結果，發現潮州站有較多的鉛同位素比值和交通源的鉛同位素比值重疊，因此推測潮州站受交通排放的影響較大，其他測站則以工業源為主。造成此現象可能和工業源是高雄重要排放源有關，因根據 TEDS 10.0 的統計，固定污染源是高雄的重要微粒排放源，約佔了微粒貢獻量的 70%。</p>
<p>25. 建請收斂前期及本計畫在北中南之研究結果，如雲嘉地區燒木材會</p>	<p>由於本計畫僅有風速與風向等氣象資料外，較難評估屬於台灣本島的遠距離</p>

<p>影響臺中地區，俾利解析由南往北之跨縣市傳輸。</p>	<p>的傳輸對各縣市空氣品質的影響，因此可能需待未來結合氣象資料的分析，才能提供較完整的本島跨縣市傳輸的討論與證據。</p>
<p>26. 請評估受否能藉碳或鉛同位素比值，研判境外傳輸比例。</p>	<p>由於高雄境內的污染源複雜，單僅一年的資料較難評估境內與境外對高屏地區空氣品質的影響與貢獻，因此建議待累積較完整的高雄境內污染源資料，以供境外傳輸比例的估算。</p>
<p>27. 相關採樣分析工作數量與契約書相符。</p>	<p>本計畫在污染源與周界 $PM_{2.5}$ 樣本的採集量均符合契約書規範。</p>
<p>28. 工作項目(2) III，請補述本計畫及國外之港口及港口交通排放之細懸浮微粒的化學組成和同位素特徵差異。</p>	<p>本計畫第 125~136 頁彙整本研究團隊量測之高雄港和其他港口的懸浮微粒化學特性和同位素特性。根據本研究的統整發現，各國港口與高雄港排放的微粒仍以 V 和 Zn 等元素為主，主要和船舶的燃燒有關；本研究量測到的 Al、Fe、Ca 和 Mg 元素也偏高，並可能和貨物在裝卸過程中產生的揚塵有關。在同位素部分，目前仍少有研究量測港區的同位素特性，在有限的研究中，我們發現和立陶宛波羅的海的量測到的 $\delta^{13}C$ 和我們的量測結果相近，但仍須更多研究以供比較各國港口排放之微粒的 $\delta^{13}C$ 數值分佈。在本計畫第 136 頁，我們也進一步利用 Factor analysis 分析 5 個港口作業區的化學組成，並發現主要的特性</p>

	仍以燃料油的燃燒為主，此現象也和國外港口量測到的特徵相近。
29. 工作項目(2) IV，請於 4.4 節及圖 4.4.1 補述前期計畫(106 及 107 年) 之同位素成果資料。	在 105 和 107 年度的計畫中(無 106 年度計畫，因 105 年度計畫剛好橫跨 2 個年度)，105 年度採集煉油廠、燃煤電廠、交通排放和稻梗燃燒排放的 $PM_{2.5}$ ，並分析 $\delta^{13}C$ 數值，該年度計畫的量測結果已放入圖 4.4.2 和第 4.4.1 節中；107 年度則採集燃煤電廠、鋼鐵廠和焚化爐排放的 $PM_{2.5}$ ，並分析 $\delta^{13}C$ 數值，但該年度三種污染源的碳含量偏低，造成無足夠的碳進行 $\delta^{13}C$ 的分析，故無法呈現於本計畫，並作為污染源鑑定之用。
30. 本署空氣污染物排放量清冊資訊系統已於 9 月 6 日更新至 10.0 版，本計畫引述之相關資料請更新。	已更新至 10.0 版，敬請參閱第 2 頁。
31. 本報告建議除與 105 年研究報告成果比較外，建議增加 106 及 107 年報告成果之比較分析。	無論周界或污染源的採樣結果，均有補上 105 和 107 年度的量測結果(無 106 年度計畫)，並討論其間的差異與雷同之處。詳細內容請參閱第 94 頁、103~107 頁和 4.3 節之各污染源特性的描述。
32. 請補充說明 C3 及 C4 植物分類。	已補充 C3 和 C4 植物的差異，請見第 16 頁。
33. 本計畫同位素之小數位數請修正一致。	已統一修正 $\delta^{13}C$ 和鉛同位素比值的小數點位數。
34. P.14 說明鑑定技術背景部分，係以	已補充該案例的資料，請見第 14 頁。

<p>燃煤電廠對中部地區 PM 高污染事件日影響最大及為主要該區有毒重金屬濃度超出 WHO 建議值污染源做為案例，因相關資訊未明，建議改以國外案例闡明。</p>	
<p>35. 1.5 節指出前期推論雪山隧道內的 $\delta^{13}\text{C}$ 值因與燃煤相近，推論係受到燃煤電廠影響，但圖 1.5.1 及鉛同位素比值圖 1.5.4、圖 1.5.5 亦顯示與燃油相近，請補充說明。（註：協和電廠為燃油電廠，和平電廠為燃煤電廠，深澳電廠的燃煤機組已於 2007 年除役）。</p>	<p>不同污染源排放的微粒之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值確實會有重疊的現象發生，因此該段內容主要是說明雪山隧道內的 $\delta^{13}\text{C}$ 數值剛好和燃煤電廠的煤料、飛灰和底灰重疊，並非要表達雪山隧道內的碳可能來自燃煤電廠所貢獻。本研究團隊已調整用詞避免誤解。</p>
<p>36. 我國進口煤碳來源依據經濟部能源局統計資料顯示，燃煤主要來自澳洲（48%）及印尼（34%），煉焦煤多來自澳洲（75%）及加拿大（24%），請補充說明各期計畫我國燃煤電廠及鋼鐵廠的鉛同位素比值之統計差異。</p>	<p>已補充 105 和 107 年度計畫採集的燃煤電廠與鋼鐵廠的鉛同位素比值資料於報告中。在統計差異部分，不同鋼鐵廠的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 無顯著差異，$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 有顯著差異（107 和本年度計畫）；在燃煤電廠部分，不同燃煤電廠排放的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 均有顯著差異（105、107 和本年度計畫）。然而，由於樣本數少，且變異大，因此統計其差異的意義不大，故無另外呈現於報告中。</p>
<p>37. 船舶燃油種類繁多（如 HMO、HFO、MDO、MGO 及分高低硫等），依據規定船舶需要在 3-4 海浬後才能轉至高硫重油（HFO），</p>	<p>由於本研究團隊的量測結果和過去的研究均發現船舶燃燒主要的產物為 V，透過因子分析探討港口 5 個作業區的特性，也發現 V 和 Zn 位於同一個因子中，</p>

<p>而 V 及 Ni 等多在 HFO 中驗出，考量本計畫未直接量測船用燃油，所以結論是否適宜敘明船舶燃料油為高屏地區 PM2.5 的重要污染源。且鈇除在 HFO 中驗出，其亦如煉油廠之重要觸媒原料，故是否適用被定義為第 6 個因子，請酌參。</p>	<p>該 2 個元素也是關鍵的燃料油燃燒產物，因此才會於 PMF 中，將第 6 個因子定義為燃料油燃燒 (船舶)，待仍須更多位於高屏地區污染源特徵資料的收集，以提高污染源的解釋力。</p>
<p>38. 請於第 3 章補充本計畫及前期計畫各採樣點之位置圖。</p>	<p>由於前期計畫的應用成果已陳述於 1.6 節中，且為方便說明，因此將前期計畫 (105 和 107 年度) 的周界和固定污染源採樣位置補充於第 1.6 節中，請參閱第 26 頁。</p>
<p>39. 請於第 4 章補充說明如何結合多種同位素、重金屬成分、或粒子物理特徵 (如粒徑) 等，協助空污鑑識相關機制或邏輯。</p>	<p>本研究除了利用比較周界和污染源排放之同位素的特性是否相近 (敬請參閱第 4.4.1 節)，以作為污染源的評估基礎外，也將離子、碳成分、金屬成分和同位素資料匯入受體模式中，藉由同位素與特定污染源的特徵元素之關係，強化污染源的鑑定 (敬請參閱第 4.4.2 節)。然而，因目前掌握的高屏地區之污染源特性資料仍有限，因此仍待未來收集更完整的高屏地區污染源特性資料，以提高污染源的鑑定力。</p>
<p>40. 請於 4.3.4 節補充顯示臺灣空氣中各項重金屬之濃度平均值，俾利比較分析。</p>	<p>由於各研究報告的調查時間與方式不同，且不同年份的污染程度也不同，較難彙整台灣地區的重金屬濃度分佈資料。因此，本研究僅彙整來自環保署的</p>

	委辦計畫「107 年度細懸浮微粒(PM _{2.5})化學成分監測及分析計畫」之採樣資料，以供比較。詳細內容請見第 129 頁。
41. 請於 4.4 節仿圖 1.6.8，補充說明近年計畫臺灣不同地區之大氣微粒鉛同位素比值分布。	已更新於圖 4.2.5 中，敬請參閱第 109 頁 (描述請見 105~106 頁)。
42. 表 5.1 預定與實際進度表，請補充修正 12 月之進度。	已修正。
43. 5.2 節指出 PMF 分析結果顯示 6 個污染源對橋頭站與左營站的貢獻相當，且表 4.1.2 及 4.1.3 顯示兩站的 PM _{2.5} 及化學組成濃度相當，但兩站分為背景測站及一般測站，請協助解析。	由於橋頭站和左營站都位於人口稠密的高雄市內，且鄰近都有污染源，推測和高雄境內的污染源有關，進而造成此 2 站的濃度偏高且相近。然而，因掌握的高屏地區污染源特徵資料有限，因此仍須待較完整的高屏重要污染源特徵資料的收集，以供深入的探討。

附錄五 排放管道採樣資料

發行日期：96.08.01
表格編號：7AS01.0

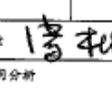
固定污染源空氣污染物排放檢測報告書

管制編號：E5600056 檢測專案編號：ET108NAS0032
公私場所名稱：台灣中油股份有限公司 煉製事業部 大林煉油廠
受測污染源名稱：第一段加氫脫硫加熱爐(P035)
檢測目的：學術研究調查性質之檢測
檢測公司名稱：中環科技事業股份有限公司
採樣日期：108 年 04 月 01-03 日

執行日期: 108.12.3
 表冊編號: 71592.1

二、檢測結果摘要

檢測專案編號: ET108MAS0032

基本資料	1. 受測公私場所名稱: 台灣中油股份有限公司 煉製事業部 大林煉油廠				5. 管制編號: B5800058							
	2. 地址: 高雄市中區臨海一路50號				6. 受測污染源(編號): 第一段加氫脫硫加熱爐(F035)							
	3. 檢測用途: 學術研究調查性質之檢測				7. 採樣日期: 108 年 04 月 01-03 日							
	4. 檢測機構名稱: 中環科技事業股份有限公司				8. 濾紙編號: 21、22、23							
採樣時間	進料量 (註明單位)		產量 (註明單位)			燃料 (註明單位)						
	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量			
	氧氣	4587m ³ /day	187500m ³ /day	低硫汽油	6084KL/day	8784KL/day	*	*	*			
	天然氣	m ³ /day	73.111m ³ /day	*	*	*	*	*	*			
操作狀況	A. 燃料名稱: 主, 含硫量主%; 且, 燃料名稱: 主, 含硫量主%											
	混燒比例A: 主; B: 主。											
採樣時設備操作狀況	空氣污染防治設施名稱			主要操作參數(註明單位)			處理量(註明單位)					
	脫硝系統(A033)			名稱	當日	許可用量	當日	許可用量				
	操作溫度			308°C	200-400°C		330Nm ³ /min		200-400Nm ³ /min			
	製水用量			1.252kg/hr	0.01-3.85kg/hr		*		*			
檢測結果	廢氣性質			排氣平均溫度: 13.38%, 排氣平均溫度126.2°C, 排氣平均流速: 3.82m/s, 濕基排氣量: 410.31Nm ³ /min								
	空氣污染物	排氣組成(k)			FPM(mg/Nm ³)	CFM(mg/Nm ³)	FPM+CFM(mg/Nm ³)	乾基排氣量(Nm ³ /min)	乾基校正排氣量(Nm ³ /min)	空氣污染物排放量(kg/hr)	排放標準	合格
	檢測方法編號	CO ₂	O ₂	CO								
	PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)	6.0	11.8	ND<0.1	ND(0.584)	21.467	22.001	351.16	*	0.484	-	-
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)	6.0	11.4	ND<0.1	ND(0.530)	11.541	12.041	358.98	*	0.257	-	-	
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)	6.1	11.5	ND<0.1	1.299	8.170	9.469	358.60	*	0.204	-	-	
備註	上述資料經本人做最終審查, 確認無誤 實驗室主任簽章 											
	一、本採樣工作係由中環科技事業股份有限公司負責執行, 採完樣後由中環科技事業股份有限公司分析 二、倘檢測機構檢測能力尚未經環保署認可者, 於填報「空氣污染物/檢測方法編號」時, 應以「**」記號註明 三、FPM的偵測極限值為1.35mg 四、CFM之分析結果, 未包含濾紙樣品的分析值 五、本報告登載數值之存盤原則依據環保署環境檢驗所「檢測報告位數表示規定」辦理											

煙道檢測專案編號: E71020990022

中環科技事業股份有限公司
 採樣分析紀錄-現場採樣紀錄與檢驗分析結果之原始資料
 煙道排氣中PM_{2.5}檢測紀錄表(採樣結果)

管制編號: E600086
 採樣日期: 102.9.7

排放管道編號: P025
 記錄人: [簽名]

最終採樣結果						
1、Run Number	1(預採)	2	3	4	5	6
2、樣品(濾紙)編號				NA90022-7		
3、濾紙代碼				27		
4、總採樣時間(min)				715.5		
5、採氣體積Vm(acm)				28254		
6、流量計絕對壓力Pm(inHg)				29.84		
7、標準狀況採氣體積Vms(dscf)				90.785		
8、水氣標準狀況採氣體積Vms(dscf)				73.5114		
9、排氣含水率(Bws)				0.1207		
10、排氣溫度下之飽和蒸汽壓PV				*		
11、理論含水率(Bws)				*		
12、排氣絕對壓力Ps(inHg)				27.60		
13、濕分子量Ms(lb/lb-mole)				27.92		
14、排氣流速Vs(ft/sec)				12.67		
15、罩速吸引百分率(I%)				115.44		
16、乾基排氣流量Qsd(dscm/min)				758.6		
17、濕基排氣流量Qsw(scm/min)				412.52		

皮托管測漏
 採樣前皮托管測漏完成時間: 0919~0921 (施壓至 $\geq 76\text{mmHg}_0$, 維持15秒穩定不變)
 採樣前皮托管測漏完成時間: 1518~1520 (施壓至 $\geq 76\text{mmHg}_0$, 維持15秒穩定不變)

主機測漏
 採樣前測漏
 系統壓力是否加壓至15inHg以上: 是 否
 滲漏率小於 $0.0005\text{m}^3/\text{min}$: 是 否
 測漏是否成功: 是 否--測漏時間: 0915~0917
 採樣後測漏
 系統壓力是否加壓至15inHg以上或大於等於採樣期間的真空壓力值: 是 否
 滲漏率小於 $0.0005\text{m}^3/\text{min}$ 或平均採樣流率的4%(以較小的為準): 是 否
 測漏是否成功: 是 否--測漏時間: 1515~1517

流量計檢查	
設定檢查流量: 0.07 m^3/min	檢查時間: 15 min
溫度: 27.5 $^{\circ}\text{C}$	
參考流量計序號: 014585	PM _{2.5} 主機序號: 0002418
參考流量計起始值(m^3): 650161.4	PM _{2.5} 主機起始值(m^3): 289215.8
參考流量計結束值(m^3): 650467.2	PM _{2.5} 主機結束值(m^3): 289521.2
參考流量計總體積值(m^3): 305.8	PM _{2.5} 主機總體積值(m^3): 305.4
誤差: 1.8 %	

驗算人員: [簽名]

空氣污染物檢驗編號： _____

五、附件一污染源操作紀錄表

管制編號 E 5 6 0 0 0 5 6 排放管道或周界編號 P 0 3 5

茲保證下列所述確為本廠 觸媒裂解程序 設備之實際操作情形：

原料- 名稱	氫氣	用量	45972	單位(立方公尺/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
產品- 名稱	低硫汽油	用量	6109	單位(公乘/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
燃料- 名稱	天然氣	用量	0	單位(仟立方公尺/日)
名稱	燃料氣	用量	22.334	單位(仟立方公尺/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)

操作說明：

A033脫硝設施	廢氣處理量	336 NM ³ /min
	操作溫度	308 ℃
	氣水用量	1.254 kg/hr

公司場所名稱：大林煉油廠煤製處理工場 保證人：李育賢 李育賢 職稱：工場長

中華民國108年4月1日

頁次

空氣污染物檢驗編號： _____

五、附件一污染源操作紀錄表

管制編號 E 5 6 0 0 5 6 排放管道或周界編號 P 0 3 5

茲保證下列所述確為本廠 觸媒裂解程序 設備之實際操作情形：

原料- 名稱	氫氣	用量	47786	單位(立方公尺/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
產品- 名稱	低硫汽油	用量	6098	單位(公乘/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
燃料- 名稱	天然氣	用量	0	單位(仟立方公尺/日)
名稱	燃料氣	用量	22.316	單位(仟立方公尺/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)

操作說明：

A033脫硝設施	廢氣處理量	332 NM ³ /min
	操作溫度	308 °C
	氨水用量	1.271 kg/hr

公司場所名稱：大林煉油廠煤裂處理工場 保證人：李育賢 林五雄
李育賢 職稱：工場長

中華民國108年4月2日

頁次

空氣污染物檢驗編號： _____

五、附件一污染源操作紀錄表

管制編號 E 5 6 0 0 0 5 6 排放管道或周界編號 P 0 3 5

茲保證下列所述確為本廠 觸媒裂解程序 設備之實際操作情形：

原料- 名稱	氫氣	用量	43269	單位(立方公尺/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
產品- 名稱	低硫汽油	用量	6045	單位(公秉/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
名稱		用量		單位(/)
燃料- 名稱	天然氣	用量	0	單位(仟立方公尺/日)
名稱	燃料氣	用量	21.509	單位(仟立方公尺/日)
名稱	以下空白	用量	以下空白	單位(/)

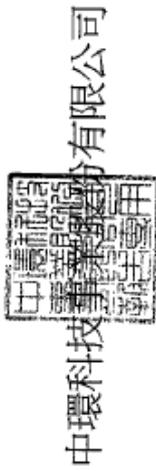
操作說明：

A033脫硝設施	廢氣處理量	321 NM ³ /min
	操作溫度	307 °C
	氨水用量	1.260 kg/hr

公司場所名稱：大林煉油廠觸媒裂解處理工場 保證人：李育賢 林五福
李育賢 職稱：工場長

中華民國108年4月3日

頁次



中環科技股份有限公司

排放管道中可過濾性微粒(FPM)與可凝結性微粒(CPM) 分析報告表

樣品編號：NAS1080032

採樣日期：1080401-03

可過濾性微粒(FPM)			
樣品	補集重量(M ₁ +M ₂)(mg)	採樣體積V _{ms} (DSCF)	濃度(C _{FPM2.5})(gr/Dry Std CF)
樣品一	1.35	89.3281	0.0002
樣品二	1.35	89.8881	0.0002
樣品三	3.34	90.7725	0.0006

備註：樣品一及樣品二之補集重量低於方法要求的偵測極限值，故補集重量以偵測極限值計算

可凝結性微粒(CPM)			
樣品	m _{CPM} (mg)	採樣體積V _{ms(Std)} (DSCF)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	54.3	89.3281	0.6079
樣品二	29.3	89.8881	0.3260
樣品三	21.0	90.7725	0.2313

原生性微粒總量(FPM+CPM)			
樣品	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)	C _{FPM2.5+CPM2.5} (mg/Nm ³)
樣品一	0.534	21.467	22.001
樣品二	0.530	11.511	12.041
樣品三	1.299	8.170	9.469

驗算人員：

中環科技事業股份有限公司
 排放管道中可過濾性【PPM】與可凝結性【CPM】微粒分析報告表
 (己核)
 0000179319
 0000000008
 分析員: [Signature]
 單位主管: [Signature]

方法編號: NIEA A212/214
 丙酮密度 (ρ₂₀) (g/ml): 790
 丙酮空白濃度 (Ca) (μg/ml): 0.00000008
 分析日期: 108.04.24
 0000201238

日期: 107.02.23
 DS-112-008
 樣品編號: 790

樣品編號	樣品名稱	體積 V(mL)	初重(第1次) W ₁ (g)	初重(第2次) W ₂ (g)	恆重差 W ₁ -W ₂	後重(第1次) W ₃ (g)	後重(第2次) W ₄ (g)	恆重差 W ₃ -W ₄	樣品重量 W ₃ -W ₄	微粒重量 (mg)	樣品CPM重量 (mg)
去離子超純水	Blank	150	34.25840	34.25843	0.0000	34.25846	34.25846	0.0000	0.0000	0.00	0.00
丙酮	FB	150	34.19952	34.19955	0.0000	34.19962	34.19962	0.0000	0.0000	0.01	0.01
PPM	A1-1(濾紙)	-	0.12586	0.12583	0.0000	0.12587	0.12587	0.0000	0.0000	0.00	0.00
	A1-2(丙酮)	85	34.39660	34.39664	0.0000	34.39710	34.39711	0.0000	0.0005	0.50	0.45
	A2-1(濾紙)	-	0.12932	0.12930	0.0000	0.12931	0.12931	0.0000	0.0000	0.00	0.00
	A2-2(丙酮)	92	32.10842	32.10840	0.0000	32.10879	32.10875	0.0000	0.0003	0.30	0.24
CPM	A3-1(濾紙)	-	0.13097	0.13100	0.0000	0.13112	0.13111	0.0000	0.0001	0.10	0.10
	A3-2(丙酮)	91	33.17571	33.17573	0.0000	33.17915	33.17903	0.0001	0.0033	3.30	3.34
	Container#1 無機 B1-1	400	33.65475	33.65472	0.0000	33.65763	33.65754	0.0001	0.0028	2.80	#1+#2 54.3
Container#3 (濾紙)	Container#2 有機 B1-2	355	33.23315	33.23315	0.0000	33.28473	33.28465	0.0001	0.0515	51.50	樣品CPM重量 54.3
CPM	Container#1 無機 B2-1	388	33.79099	33.79099	0.0000	33.79445	33.79438	0.0001	0.0034	3.40	#1+#2 29.3
	Container#2 有機 B2-2	350	29.25356	29.25355	0.0000	29.27958	29.27944	0.0001	0.0259	25.90	樣品CPM重量 29.3
CPM	Container#1 無機 B3-1	366	33.03839	33.03839	0.0000	33.04248	33.04240	0.0001	0.0040	4.00	#1+#2 21.0
	Container#2 有機 B3-2	345	33.88317	33.88319	0.0000	33.90021	33.90016	0.0001	0.0170	17.00	樣品CPM重量 21.0
	Container#6 丙酮過濾 試劑空白	190	33.19829	33.19828	0.0000	33.19835	33.19829	0.0001	0.0000	0.00	0.00
CPM	Container#7 去離子超純水 現場試劑空白	200	33.24123	33.24125	0.0000	33.24130	33.24123	0.0001	0.0000	0.00	0.00
	Container#8 己烷現場 試劑空白	184	32.61091	32.61090	0.0000	32.61103	32.61094	0.0001	0.0000	0.00	0.00
CPM	Container#9 現場樣品瓶 無機物空白檢空	200	34.48788	34.48788	0.0000	34.48804	34.48795	0.0001	0.0001	0.10	0.10
	Container#10 現場樣品瓶 有機物空白檢空	374	35.90118	35.90116	0.0000	35.90125	35.90119	0.0001	0.0000	0.00	0.00
CPM	Container#11 現場樣品瓶 回收空白	85	33.30077	33.30078	0.0000	33.30094	33.30085	0.0001	0.0001	0.10	0.10

數據提交日期: 108.05.03
 樣品編號 樣品數量 分析數據
 公式: W₃-W₄ / ρ₂₀
 排放管組-PPM與CPM微粒(M312LA214) 0 4 2 4 (DS)-AMY-JSRU第1頁(共09)張

發行日期：98.08.01
表格編號：7AS16.0

廢氣排氣流速說明

管制編號		E	5	6	0	0	0	5	6	排放管道或周界編號	P	0	3	5
1. 測定管道資料	a. 形狀：	圓形			b. 材質：	鐵材			c. 頂部離地高：	62 m				
	d. 外徑：	*	mm	、長：	*	mm	、寬：	*	mm					
	e. 內徑：	1830	mm	、長：	*	mm	、寬：	*	mm					
2. 測定孔資料	a. 開口內徑：	100mm	b. 凸緣高：	200	mm	c. 數量：	4 個							
	d. 距上一氣體擾流處為	16000 mm，約 8.7 倍於測定孔處測定管道之相當直徑												
	e. 距下一氣體擾流處為	21500 mm，約 12 倍於測定孔處測定管道之相當直徑												
3. 測定點資料	a. 測定點編號	1、4、7、10	2、5、8、11	3、6、9、12	以下空白									
	b. 與測定孔外緣距離(mm)	281	467	742										
	a. 測定點編號													
	b. 與測定孔外緣距離(mm)													
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	排氣量：													
	<p>The diagram illustrates the measurement setup for a circular pipe. The top part shows a circular cross-section with 12 measurement points arranged in a grid. The points are labeled 1-3, 4-6, 7-9, and 10-12. The bottom part shows a side view of the pipe with measurement points 10-12 and 7-9. The distance from the measurement points to the top of the pipe is 21.50m, and the distance from the measurement points to the ground is 16.00m. An arrow indicates the direction of gas flow from right to left.</p>													
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查													
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全													

發行日期：98.08.01
表格編號：7AS16.0

廢氣排氣流速說明

管制編號		E	5	6	0	0	0	5	6	排放管道或周界編號	P	0	3	5			
1. 測定管道資料	a. 形狀：	圓形		b. 材質：				鐵材		c. 頂部離地高：					62	m	
	d. 外徑：	*	mm	長：	*	mm	寬：	*	mm								
	e. 內徑：	1830	mm	長：	*	mm	寬：	*	mm								
2. 測定孔資料	a. 開口內徑：	100	mm	b. 凸緣高：	200	mm	c. 數量：								4	個	
	d. 距上一氣體擾流處為														16000	mm	約 8.7 倍於測定孔處測定管道之相當直徑
	e. 距下一氣體擾流處為														21500	mm	約 12 倍於測定孔處測定管道之相當直徑
3. 測定點資料	a. 測定點編號	1、4、7、10	2、5、8、11	3、6、9、12	以下空白												
	b. 與測定孔外緣距離(mm)	281	467	742													
	a. 測定點編號																
	b. 與測定孔外緣距離(mm)																
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	排氣量：																
	<p>The diagram illustrates the measurement setup for a circular pipe. The left part shows a top-down view of the pipe with 12 measurement points arranged in a circle, labeled 1-3, 4-6, 7-9, and 10-12. The right part shows a side view of the pipe with a measurement point marked with a circled 'X'. Two vertical dimension lines indicate distances: 21.50m from the top of the pipe to the measurement point, and 16.00m from the ground level to the measurement point. An arrow at the bottom indicates the direction of gas flow.</p>																
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查																
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全																

發行日期：96.08.01

表格編號：7AS01.0

固定污染源空氣污染物排放檢測報告書

管制編號：E5600896 檢測專案編號：ET108NAS0036

公私場所名稱：台灣電力股份有限公司大林發電廠

受測污染源名稱：燃煤鍋爐(E801)

檢測目的：學術研究調查性質之檢測

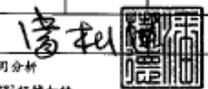
檢測公司名稱：中環科技事業股份有限公司

採樣日期：108 年 04 月 16-18 日

發行日期：88.12.31
表格編號：TNS02.1

二、檢測結果摘要

檢測專案編號：BT108NAS0038

基本資料	1. 受測公私場所名稱：台灣電力股份有限公司大林發電廠				5. 管制編號：E5600886									
	2. 地址：高雄市中區鳳凰里大林路				6. 受測污染源(編號)：燃煤爐(2801)									
	3. 檢測用途：學術研究調查性質之測				7. 採樣日期：108年04月16-18日									
	4. 檢測機構名稱：中環科技事業股份有限公司				8. 濾紙編號：27、28、29									
採樣時源操作狀況	進料量 (註明單位)						燃料 (註明單位)							
	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量					
	純水	2296.23t/hr	2369t/hr	水蒸氣	2300.04t/hr	2369t/hr	燃煤	275.58t/hr	302.28t/hr					
採樣時源操作狀況	A. 燃料名稱：_燃煤_，含硫量 <u>0.6%</u> ，B. 燃料名稱：_主_，含硫量 <u>3.5%</u>				選購比例A：_#_；B：_#_。									
	空氣污染控制設施名稱			主要操作參數(註明單位)			處理量(註明單位)							
防設施操作狀況	名稱		當日	許可用量	當日		許可用量							
	海水脫硫(FGD)設備(A805)		廢氣入口溫度	142.82°C	80-160°C	17629.54Nm ³ /min		8980-21890Nm ³ /min						
	壓降		17.20Pa	10.00-70.00Pa	*		*							
	海水脫硫(FGD)設備(A806)		廢氣入口溫度	142.82°C	80-160°C	17639.54Nm ³ /min		8989-21899Nm ³ /min						
防設施操作狀況	壓降		17.20Pa	10.00-70.00Pa	*		*							
	廢氣性質		排氣平均溫度：5.88N，排氣平均溫度：100.3°C，排氣平均流速：22.40m/s，濕基排氣量：37458.18Nm ³ /min											
測站結果	空氣污染物		排氣組成(%)			PPM(ug/Nm ³)	CPM(ug/Nm ³)	PPM+CPM(ug/Nm ³)	乾基校正排氣量(Nm ³ /min)	乾基校正排氣量(Nm ³ /min)	空氣污染物排放量(kg/hr)	排放標準	合格	
	檢測方法編號		CO ₂	O ₂	CO								是	否
	PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)		14.1	4.4	ND<0.1	0.897	1.471	2.368	35503.55	*	5.044	-	-	-
	PM ₁₀ (**A212.10B)及(**A214.70C)		13.8	5.0	ND<0.1	0.500	1.111	1.611	35549.15	*	3.436	-	-	-
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)		13.9	4.9	ND<0.1	ND(0.507)	0.675	1.182	34938.88	*	2.478	-	-	-	
備註	上述資料經本人駐最終審查，確認無誤													
	實驗室主任簽章 													
一、本採樣工作係由中環科技事業股份有限公司負責執行，採完樣後由中環科技事業股份有限公司分析														
二、倘檢測機構檢測能力尚未經環保署認可者，於填報「空氣污染物/檢測方法編號」時，應以**記號註之														
三、PPM的偵測極限僅為1.35ug														
四、CPM之分析結果，未包含濾紙樣品的分析值														
五、本報告登載數值之修整原則依環保署環境檢驗所「檢測報告位數表示規定」辦理														
選錄單位審核者簽章														

發行日期: 96.08.01
表格編號: 7AS03.0

煙道檢測專案編號: ET108NAS0036

三、採樣分析記錄—採樣當日，受測污染源與防制設備操作記錄表

管制編號		E	5	6	0	0	8	9	6	排放管道或圍界編號	P	8	0	1
I. 製程、污染源或防制設備之資料		2. 類別		3. 操作記錄項目(代碼)		4. 操作數值		5. 計量單位之名稱						
a. 編號	b. 名稱													
E801	燃煤鍋爐 (0099)	1		純水 (360099)	2296.23	t/hr	(M3)							
		1		燃煤 (170299)	275.58	t/hr	(M3)							
		1		柴油 (170006)	0.17	kL/hr	(Q2)							
		2		電力 (350099)	799.88	MWH	(ZZ)							
		2		水蒸氣 (360007)	2300.04	t/hr	(M3)							
A801	選擇觸媒還原(SCR)設備 (200-)	3		操作溫度 (C01---)	383.38	°C	(C1)							
		3		還原劑 NH ₃ (000099)	0.102	t/hr	(M3)							
		3		操作壓力損失 (P99---)	0.503	kPa	(P1)							
A802	選擇觸媒還原(SCR)設備 (200-)	3		操作溫度 (C01---)	383.38	°C	(C1)							
		3		還原劑 NH ₃ (000099)	0.102	t/hr	(M3)							
		3		操作壓力損失 (P99---)	0.503	kPa	(P1)							
A803	脈動式袋式集塵器	3		集塵器壓降 (P14---)	1.61	kPa	(P1)							
		3		廢氣入口溫度 (C02---)	131.42	°C	(C1)							
A804	脈動式袋式集塵器	3		集塵器壓降 (P14---)	1.61	kPa	(P1)							
		3		廢氣入口溫度 (C02---)	131.42	°C	(C1)							
A805	海水脫硫(FGD)設備(210-)	3		pH 值 (L19---)	8.56	-	(--)							
		3		廢氣入口溫度 (C02---)	142.62	°C	(C1)							
		3		吸收劑(海水) (000099)	8154.25	m ³ /hr	(Q4)							
		3		壓降 (P99---)	17.20	Pa	(ZZ)							
		3		廢氣處理量 (Q04---)	17639.54	Nm ³ /min	(Q3)							
A806	海水脫硫(FGD)設備(210-)	3		pH 值 (L19---)	8.56	-	(--)							
		3		廢氣入口溫度 (C02---)	142.62	°C	(C1)							
		3		吸收劑(海水) (000099)	8154.25	m ³ /hr	(Q4)							
		3		壓降 (P99---)	17.20	Pa	(ZZ)							
		3		廢氣處理量 (Q04---)	17639.54	Nm ³ /min	(Q3)							
	以下空白													

煙道檢測專案編號: ET108NA50036

中環科技事業股份有限公司

採樣分析紀錄-現場採樣紀錄與檢驗分析結果之原始資料

煙道排氣中PM_{2.5}檢測紀錄表(採樣結果)

管制編號: E5600896

排放管道編號: P801

採樣日期: 108.4.18

記錄人: 張

最終採樣結果

1、Run Number	1(預採)	2	3	4	5	6
2、樣品(濾紙)編號				NA5108036-3		
3、濾紙代碼				29		
4、總採樣時間(min)				294.6		
5、採氣體積Vm(acm)				2.9458		
6、流量計絕對壓力Pm(inHg)				29.70		
7、標準狀況採氣體積Vms(dscf)				94.137		
8、水氣標準狀況體積Vms(dscf)				5.7478		
9、排氣含水率(Bws)				0.0568		
10、排氣溫度下之飽和蒸汽壓PV				*		
11、理論含水率(Bws)				*		
12、排氣絕對壓力Ps(inHg)				29.70		
13、濕分子量Ms(lb/lb-mole)				29.73		
14、排氣流速Vs(ft/sec)				72.67		
15、等速吸引百分率(I%)				103.67		
16、乾基排氣流量Qsd(dscm/min)				34938.88		
17、濕基排氣流量Qsw(scm/min)				37042.92		

皮托管測漏

採樣前皮托管測漏完成時間: 0908-0910 (施壓至 $\geq 76\text{mmHg}_0$, 維持15秒穩定不變)

採樣前皮托管測漏完成時間: 1445-1447 (施壓至 $\geq 76\text{mmHg}_0$, 維持15秒穩定不變)

主機測漏

採樣前測漏

系統壓力是否加壓至15inHg以上: 是 否

滲漏率小於0.00057m³/min: 是 否

測漏是否成功: 是 否--測漏時間: 0904-0906

採樣後測漏

系統壓力是否加壓至15inHg以上或大於等於採樣期間的真空壓力值: 是 否

滲漏率小於0.00057m³/min或平均採樣流率的4%(以較小的為準): 是 否

測漏是否成功: 是 否--測漏時間: 1441-1443

流量計檢查

設定檢查流量: 0.02 m³/min

檢查時間: 15 min

溫度: 30.3 °C

參考流量計序號: 014585

PM_{2.5}主機序號: 0002418

參考流量計起始值(m³): 654481.4

PM_{2.5}主機起始值(m³): 303802.4

參考流量計結束值(m³): 654782.6

PM_{2.5}主機結束值(m³): 304104.6

參考流量計總體積值(m³): 301.2

PM_{2.5}主機總體積值(m³): 302.2

誤差: 0.33 %

驗算人員: 陸

頁次 | 20

空氣污染物檢驗編號: ET108NAS0036

三、採樣分析記錄—採樣當日、受測污染源與防制設備操作條件登記表

管制編號			E5600896		排放管道或周界編號		P801		
1. 製程、污染源或防制設備之資料			2. 類別	3. 操作記錄項目 (代碼)	4. 操作數值(0416採樣)		5. 計量單位之名稱 (代碼)		
a. 編號	b. 名稱(代碼)	0416採樣			當日				
E801	燃煤鍋爐	0099	1	純水	360099	2369	2306.44	t/hr	M3
			1	燃煤	170299	302.28	282.37	t/hr	M3
			1	柴油	170006	1.75	0	kL/hr	Q2
			2	電力	350099	800	800	MWH	ZZ
			2	水蒸氣	360007	2369	2313.76	t/hr	M3
A801	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	383.36	℃	C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.095	t/hr	M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.51	kPa	P1
A802	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	383.36	℃	C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.095	t/hr	M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.51	kPa	P1
A803	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.6	kPa	P1
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	129.27	℃	C1
A804	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.6	kPa	P1
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	129.27	℃	C1

頁次

空氣污染物檢驗編號: ET108NAS0036

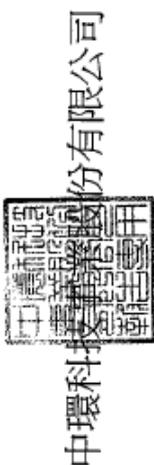
三、採樣分析記錄—採樣當日、受測污染源與防制設備操作條件登記表

管制編號			E5600896		排放管道或周界編號		P801		
1. 製程、污染源或防制設備之資料			2. 類別	3. 操作記錄項目 (代碼)	4. 操作數值(0417採樣)		5. 計量單位之名稱 (代碼)		
a. 編號	b. 名稱(代碼)	平日最大量			當日				
E801	燃煤鍋爐	0099	1	純水	360099	2369	2301.34	t/hr	M3
			1	燃煤	170299	302.28	272.15	t/hr	M3
			1	柴油	170006	1.75	0.52	kL/hr	Q2
			2	電力	350099	800	799.84	MWH	ZZ
			2	水蒸氣	360007	2369	2300.79	t/hr	M3
A801	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	383.64	℃	C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.108	t/hr	M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.507	kPa	P1
A802	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	383.64	℃	C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.108	t/hr	M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.507	kPa	P1
A803	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.64	kPa	P1
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	132.03	℃	C1
A804	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.64	kPa	P1
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	132.03	℃	C1
頁次									

空氣污染物檢驗編號: ET108NAS0036

三、採樣分析記錄—採樣當日、受測污染源與防制設備操作條件登記表

1. 製程、污染源或防制設備之資料			管制編號	E5600896	排放管道或周界編號		P801		
a. 編號	b. 名稱(代碼)	類別	3. 操作記錄項目 (代碼)	4. 操作數值(0418採樣)		5. 計量單位之名稱 (代碼)			
				<input type="checkbox"/> 平日最大量	<input checked="" type="checkbox"/> 許可用量	當日			
E801	燃煤鍋爐	0099	1 純水	360099	2369	2280.9	t/hr	M3	
			1 燃煤	170299	302.28	272.21	t/hr	M3	
			1 柴油	170006	1.75	0	kL/hr	Q2	
			2 電力	350099	800	799.8	MWH	ZZ	
			2 水蒸氣	360007	2369	2285.57	t/hr	M3	
A801	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3 操作溫度	C01	280~390	383.15	°C	C1	
			3 還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.102	t/hr	M3	
			3 操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.493	kPa	P1	
A802	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3 操作溫度	C01	280~390	383.15	°C	C1	
			3 還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.102	t/hr	M3	
			3 操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.493	kPa	P1	
A803	脈動式袋式集塵器	120	3 集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.59	kPa	P1	
			3 廢氣入口溫度	C02	100~160	132.97	°C	C1	
A804	脈動式袋式集塵器	120	3 集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.59	kPa	P1	
			3 廢氣入口溫度	C02	100~160	132.97	°C	C1	
								頁次	



排放管道中可過濾性微粒(FPM)與可凝結性微粒(CPM)分析報告表

採樣日期：1080416~18

樣品編號：NAS10800036

可過濾性微粒(FPM)				
	補集重量(M ₁ +M ₂)(mg)	採樣體積V _{ms} (DSCF)	濃度(C _{FPM2.5})(gr/Dry Std CF)	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	2.44	96.0409	0.0004	0.897
樣品二	1.35	95.3938	0.0002	0.500
樣品三	1.35	94.1137	0.0002	0.507

備註：樣品三之補集重量低於方法要求的偵測極限值，故補集重量以偵測極限值計算

可凝結性微粒(CPM)				
	m _{CPM} (mg)	採樣體積V _{mSTD} (DSCF)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nit ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	4.0	96.0409	0.0416	1.471
樣品二	3.0	95.3938	0.0314	1.111
樣品三	1.8	94.1137	0.0191	0.675

原生性微粒總量(FPM+CPM)				
	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)	C _{FPM2.5} +C _{CPM2.5} (mg/Nm ³)	
樣品一	0.897	1.471	2.368	
樣品二	0.500	1.111	1.611	
樣品三	0.507	0.675	1.182	

驗算人員：

發行日期：86.08.01
表格編號：TAS16.0

廢氣排放管道說明表

管制編號		E	5	6	0	0	8	9	6	排放管道或兩界編號	P	8	0	1
1. 測定管道資料	a. 形狀：	圓形		b. 材質：金屬						c. 頂部離地高：132.3 m				
	d. 外徑：	7016 mm		長 *						寬 * mm				
	e. 內徑：	7000 mm		長 *						寬 * mm				
2. 測定孔資料	a. 開口內徑：	100mm		b. 凸緣高：130 mm						c. 數量：4 個				
	d. 距上一氣體擾流處為 56000 mm，約 8 倍於測定孔處測定管道之相當直徑													
	e. 距下一氣體擾流處為 42550 mm，約 6 倍於測定孔處測定管道之相當直徑													
3. 測定點資料	a. 測定點編號	1、4、7、10			2、5、8、11			3、6、9、12						
	b. 與測定孔外緣距離(mm)	438			1152			2202						
	a. 測定點編號	以下空白												
	b. 與測定孔外緣距離(mm)													
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	排氣量：													
	<p>The diagram illustrates the measurement setup for a circular pipe. The left part shows a top-down view of the pipe with 12 measurement points numbered 1 through 12. Points 1, 2, 3, 6, 9, and 12 are on a vertical line, while points 4, 5, 8, 11, 10, and 7 are on a horizontal line. The right part shows a side view of the pipe with a vertical measurement line. The distance from the measurement points to the next disturbance point above is 42550mm, and the distance to the next disturbance point below is 56000mm. Arrows indicate the direction of gas flow from the right side of the pipe.</p>													
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查													
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全													

發行日期：96.08.01
表格編號：TAS01.0

固定污染源空氣污染物排放檢測報告書

管制編號：E5600841 檢測專案編號：ET108NAS0037
公私場所名稱：中國鋼鐵股份有限公司
受測污染源名稱：#2燒結機(PS38)
檢測目的：學術研究調查性質之檢測
檢測公司名稱：中環科技事業股份有限公司
採樣日期：108 年 04 月 22-24 日

執行日期: 93.12.31
表冊編號: TA932.1

檢測專案編號: ET108BAS0037

二、檢測結果摘要

基本資料	1. 受測公私場所名稱: 中國鋼鐵股份有限公司					5. 管制編號: E5600841				
	2. 地址: 高雄市小港區中鋼路1號					6. 受測污染源(編號): 乾燒結爐(BS01)				
	3. 檢測用途: 學術研究調查性質之檢測					7. 採樣日期: 108 年 04 月 22-24 日				
	4. 檢測機構名稱: 中環科技事業股份有限公司					8. 送紙編號: 33-35-37				

進料量 (註明單位)			產量 (註明單位)			燃料 (註明單位)		
名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量
拌合料	388.07/h	500.07/h	燒結礦	380.97/h	458.31/h	焦炭	10.2/h	30.67/h
場內回收加料	147.77/h	150.07/h	*	*	*	無煙煤	9.27/h	3.47/h
助熔劑	21.07/h	24.07/h	*	*	*	煉焦爐氣	1068.20m³/h	1300m³/h

A. 燃料名稱: 焦炭, 含硫量 0.60%, B. 燃料名稱: 無煙煤, 含硫量 0.52%, C. 燃料名稱: 燒結廢火COG, 含硫量 0.027%
 流燒比例A: 3; B: 3

空氣污染防治設施名稱	主要操作參數(註明單位)			處理量(註明單位)	
	名稱	當日	許可用量	當日	許可用量
靜電集塵器(AS31)	二次放電電極電流	461.1mA	50.0-1400.0mA	*	*
靜電集塵器(AS31)	二次放電電極電壓	44.0KV	10.0-90.0KV	*	*
靜電集塵器(AS31)	廢氣入口溫度	130.1°C	80-200°C	12448.32Nm³/min	11000-17500Nm³/min
脫硫設備(AS38)	操作溫度	56.1°C	10-160°C	*	*
脫硫設備(AS38)	循環液流量	3423.0m³/h	1000-8000m³/h	*	*
脫硫設備(AS38)	pH值	6.0	1-10	*	*
選擇觸媒還原(SCR)設備(AS39)	入口氣體溫度	121.5°C	40-180°C	*	*
選擇觸媒還原(SCR)設備(AS39)	操作溫度	300.6°C	200-350°C	*	*
選擇觸媒還原(SCR)設備(AS39)	噴霧量	55.2m³/h	10-200m³/h	*	*

廢氣性質: 排氣平均濕度: 14.93%, 排氣平均溫度121.5°C, 排氣平均流速: 13.96m/s, 濕基排氣量: 14432.07Nm³/min

空氣污染物	排氣組成(%)			PFM(mg/Nm³)	CFM(mg/Nm³)	PFM+CFM(mg/Nm³)	乾基排氣量(Nm³/min)	乾基校正排氣量(Nm³/min)	空氣污染物排放量(kg/hr)	排放標準	合格	
	CO₂	O₂	CO								是	否
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)	9.0	11.4	ND<0.1	2.840	10.350	13.190	12139.21	*	9.607	-	-	-
PM ₁₀ (**A212.10B)及(**A214.70C)	8.8	11.5	ND<0.1	2.646	6.170	8.816	12598.61	*	6.664	-	-	-
PM ₁₀ (**A212.10B)及(**A214.70C)	8.9	11.4	ND<0.1	3.034	8.338	11.372	12607.13	*	6.602	-	-	-

備註: 上述資料經本人做最終審查, 確認無誤
 實驗室主任簽章:
 一、本採樣工作係由中環科技事業股份有限公司負責執行, 採樣後由中環科技事業股份有限公司分析
 二、備檢測機構檢測能力尚未經環保署認可者, 於填報「空氣污染物/檢測方法編號」時, 應以**記號註
 三、PFM的偵測限僅為1.35mg
 四、CFM之分析結果, 未包含濾紙樣品的分析值
 五、本報告登載數值之修整原則依環保署環境檢驗所「檢測報告位數表示規定」辦理

環保單位簽報者簽章

頁次 2

煙道檢測專案編號: ET108NAS0037

中環科技事業股份有限公司
 採樣分析紀錄-現場採樣紀錄與檢驗分析結果之原始資料
 煙道排氣中PM_{2.5}檢測紀錄表(採樣結果)

管制編號: E5600841

排放管道編號: PS 38

採樣日期: 108.4.24

記錄人: 莫1身 許尚賢

最終採樣結果

1、Run Number	1(預採)	2	3	4	5	6
2、樣品(濾紙)編號	NAS1080037-1	NAS1080037-1	NAS1080037-2	NAS1080037-3		
3、濾紙代碼	*	33	35	37		
4、總採樣時間(min)	48.00	297.33	308.60	300.80		
5、採氣體積Vm(acm)	0.9706	2.4444	2.5372	2.4708		
6、流量計絕對壓力Pm(inHg)	29.76	29.66	29.72	29.72		
7、標準狀況採氣體積Vms(dscf)	30.9357	83.9387	82.5705	85.5583		
8、水氣標準狀況體積Vms(dscf)	5.637	15.1527	15.2551	15.0525		
9、排氣含水率(Bws)	0.1541	0.1529	0.1484	0.1467		
10、排氣溫度下之飽和蒸汽壓PV	*	*	*	*		
11、理論含水率(Bws)	*	*	*	*		
12、排氣絕對壓力Ps(inHg)	29.64	29.60	29.70	29.70		
13、濕分子量Ms(lb/lb-mole)	28.10	28.07	28.11	28.11		
14、排氣流速Vs(ft/sec)	45.34	44.93	46.30	46.16		
15、等速吸引百分率(I%)	*	103.78	101.80	101.31		
16、乾基排氣流量Qsd(dscm/min)	12241.03	12139.21	12598.61	12607.13		
17、濕基排氣流量Qsw(scm/min)	14471.71	14330.32	14794.05	14774.56		

皮托管測漏

採樣前皮托管測漏完成時間: 0916 ~ 0918 (施壓至 $\geq 76\text{mmHg}_0$, 維持15秒穩定不變)
 採樣前皮托管測漏完成時間: 1508 ~ 1509 (施壓至 $\geq 76\text{mmHg}_0$, 維持15秒穩定不變)

主機測漏

採樣前測漏
 系統壓力是否加壓至15inHg以上: 是 否
 滲漏率小於 $0.00057\text{m}^3/\text{min}$: 是 否
 測漏是否成功: 是 否 -- 測漏時間: 0911 ~ 0913
 採樣後測漏
 系統壓力是否加壓至15inHg以上或大於等於採樣期間的真空壓力值: 是 否
 滲漏率小於 $0.00057\text{m}^3/\text{min}$ 或平均採樣流率的4%(以較小的為準): 是 否
 測漏是否成功: 是 否 -- 測漏時間: 1505 ~ 1507

流量計檢查

設定檢查流量: $0.02\text{ m}^3/\text{min}$ 檢查時間: 15 min
 溫度: $30.6\text{ }^\circ\text{C}$
 參考流量計序號: 014585 PM_{2.5}主機序號: 0002418
 參考流量計起始值(m^3): 655846.2 PM_{2.5}主機起始值(m^3): 315223.6
 參考流量計結束值(m^3): 656147.4 PM_{2.5}主機結束值(m^3): 315528.4
 參考流量計總體積值(m^3): 301.2 PM_{2.5}主機總體積值(m^3): 304.8
 誤差: 1.18 %

驗算人員: 

中鋼二號燒結工場 煙囪排放口編號：PS38 PM2.5 每小時操作條件檢測記錄表

檢測日期：108.04.22
管制編號：E5600841

時間	燃料原料 (T/hr)				燃料燃料 (T/hr)		總計	總計COG (Nm ³ /hr)	產品 燒結礦 T/hr	大BP (AS31)		廢氣系統 (AS38)			廢氣系統 (AS39)		
	碎合料	加煤	回收副料	合計	細焦炭	無煙煤				入口溫 度℃	二次電壓 KV	二次電流 mA	操作溫 度℃	卸煤量 立方公尺 /分	PH值	入口溫 度℃	反應溫度 ℃
07:00																	
08:00																	
09:00																	
09:30																	
09:30																	
10:00																	
10:00																	
11:00																	
12:00																	
12:30																	
13:00	384	21	147	552	20	9	29	1047	378	45	455	57	3409	6	123	300	55
13:00	380	19	145	544	20	8	28	1049	385	45	458	57	3408	6	123	301	55
14:00	380	21	146	547	20	9	29	1054	375	44	466	56	3415	6	122	302	55
15:00	394	21	145	560	20	8	28	1050	379	44	467	56	3407	6	122	300	55
16:00	408	19	147	574	20	9	29	1050	389	45	464	56.4	3413	6.3	121	300	55
17:00	403	21	146	570	20	8	28	1065	377	45	465	56.6	3408	6.3	121	300	55
18:00																	
19:00																	
19:00																	
20:00																	
20:00																	
21:00																	

備註：1. 檢測日期：108年4月22日
2. 檢測時間：12:30 ~ 17:50
3. 儀器狀況：正常

現場主管簽名：董華庭

中鋼二號煉結工場 煙囪排放口編號: PS38 PM2.5 每小時操作條件檢測記錄表

檢測日期: 108.04.23
 管制編號: E5600841
 檢測公司: 工研院

時間	煉結原料 (T/hr)			煙結燃料 (T/hr)			產品 燒結礦 T/hr	大EP (ASH) 二次電壓 KV	二次電流 mA	脫硫系統 (ASM)		脫硝系統 (AS39)			
	拌合料	助熔劑	回收燃料 合計	細焦炭	無煙煤	合計				操作溫 度 °C	加壓液流 量 立方公 尺/小時	PH值	入口溫 度 °C	入口溫 度 °C	反應溫度 °C
07:00															
08:30															
09:30															
10:00	387	22	157	18	10	28	373	47	455	56	3421	6	119	301	55
11:00	380	21	153	18	10	28	378	47	459	56	3398	6	120	300	55
11:30	387	21	156	18	11	29	385	46	461	56	3402	6	121	299	55
12:00	387	21	155	18	10	28	372	45	461	56	3418	6	121	301	55
13:00	381	20	153	18	10	28	388	44	463	56	3411	6	122	299	58
14:00	372	22	150	18	11	29	386	44	458	56	3413	6	121	302	55
15:00	372	20	149	18	10	28	375	44	463	56	3410	6	123	302	55
16:00	385	20	149	19	9	28	389	42	460	55.4	3410.6	6.3	124	300	55
17:00															
18:00															
19:00															
20:00															
21:00															
備註	1. 檢測目的: 108年工研院油煙PM2.5 2. 檢測時間: 09:55 ~ 16:11 3. 製程狀況:													現場主管簽名、蓋章處	

中鋼二號燒結工場 煙囪排放口編號: PS38 PM2.5 每小時操作條件檢測記錄表

檢測公司: 工研院
管料編號: E5600841
檢測日期: 103.04.24

時間	燒結原料 (T/hr)			煙結燃料 (T/hr)			煙結COG (Nm3/hr)	產品 燒結礦 (T/hr)	大EP (AS31)			脫硫系統 (AS38)			脫磷系統 (AS39)		
	拌合料	回收細料	合計	細焦炭	無煙煤	合計			入口溫 度 °C	二次電壓 KV	二次電流 mA	操作溫 度 °C	脫硫效率 量立方公尺/小時	入口溫 度 °C	反應溫度 °C	噴風量 Nm3/hr	
07:00																	
08:00																	
09:00																	
09:30																	
10:00	385	21	143	19	9	28	1093	373	127	44	454	56	3427	6	120	298	55
10:30																	
11:00	393	22	143	20	8	28	1071	379	129	43	460	56	3453	6	121	302	55
11:30	399	22	140	21	8	29	1085	382	131	43	463	56	3471	6	122	303	55
12:00																	
12:30	398	22	142	20	9	29	1074	392	128	43	463	56	3485	6	122	300	55
13:00																	
13:30	397	22	140	20	8	28	1081	383	124	43	465	56	3457	6	121	301	55
14:00																	
14:30																	
15:00																	
15:30																	
16:00																	
16:30																	
17:00																	
17:30																	
18:00																	
18:30																	
19:00																	
19:30																	
20:00																	
20:30																	
21:00																	
備註	1. 檢測日期: 103年工研院抽測配. 5. 2. 檢測時間: 09:25 ~ 14:30. 3. 氣候狀況: 正常 現場主管簽名、蓋章處 																



中環科學技術股份有限公司

排放管道中可過濾性微粒(FPM)與可凝結性微粒(CPM) 分析報告表

樣品編號：NASI080037

採樣日期：1080422~24

可過濾性微粒(FPM)				
樣品	補集重量(M ₁ +M ₂)(mg)	採樣體積V _{ms} (DSCF)	濃度(C _{pm2.5})(μg/Dry Std CF)	濃度(C _{pm2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	6.75	83.9387	0.0012	2.840
樣品二	6.56	87.5705	0.0012	2.646
樣品三	7.35	85.5583	0.0013	3.034

可凝結性微粒(CPM)				
樣品	m _{CPM} (mg)	採樣體積V _{ms(DSTP)} (DSCF)	濃度(C _{cpm2.5})(mg/Nft ³)	濃度(C _{cpm2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	24.6	83.9387	0.2931	10.350
樣品二	15.3	87.5705	0.1747	6.170
樣品三	20.2	85.5583	0.2361	8.338

原生性微粒總量(FPM+CPM)				
樣品	濃度(C _{pm2.5})(mg/Nm ³)	濃度(C _{cpm2.5})(mg/Nm ³)	C _{pm2.5} +C _{cpm2.5} (mg/Nm ³)	C _{pm2.5} +C _{cpm2.5} (mg/Nm ³)
樣品一	2.840	10.350	13.190	13.190
樣品二	2.646	6.170	8.816	8.816
樣品三	3.034	8.338	11.372	11.372

驗算人員：

發行日期：96.08.01
表格編號：7AS16.0

廢氣排放管道說明表

管制編號		E	5	6	0	0	8	4	1	排放管道或周界編號			
		P	S	3	8								
1. 測定管道資料	a. 形狀：圓形	b. 材質：鋼		c. 頂部離地高：		73		m					
	d. 外徑： * mm、長 * mm、寬 * mm												
	e. 內徑： 5693 mm、長 * mm、寬 * mm												
2. 測定孔資料	a. 開口內徑： 200mm	b. 凸緣高： 1130 mm		c. 數量：		4		個					
	d. 距上一氣體擾流處為 53100 mm，約 9 倍於測定孔處測定管道之相當直徑												
	e. 距下一氣體擾流處為 11400 mm，約 2 倍於測定孔處測定管道之相當直徑												
3. 測定點資料	a. 測定點編號	1、4、7、10		2、5、8、11		3、6、9、12							
	b. 與測定孔外緣距離(mm)	1380		1961		2815							
3. 測定點資料	a. 測定點編號	以下空白											
	b. 與測定孔外緣距離(mm)												
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	排氣量：												
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查												
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全												

發行日期：96.08.01

表格編號：TAS01.0

固定污染源空氣污染物排放檢測報告書

管制編號：E5600896 檢測專案編號：ET108NAS0065公私場所名稱：台灣電力股份有限公司大林發電廠受測污染源名稱：燃煤鍋爐(E701)檢測目的：學術研究調查性質之檢測檢測公司名稱：中環科技事業股份有限公司採樣日期：108 年 09 月 09~11 日

發行日期：88.12.23
表冊編號：7A902.1

二、檢測結果摘要

檢測專案編號：ET108NAS0085

基 本 資 料	1. 受測公私場所名稱：台灣電力股份有限公司大林發電廠				5. 管制編號：E5600896							
	2. 地址：高雄市小港區鳳凰里大林路3號				6. 受測污染源(編號)：燃煤鍋爐(E701)							
	3. 檢測用途：學術研究調查性質之檢測				7. 採樣日期：108 年 09 月 09-11 日							
	4. 檢測機構名稱：中環科技事業股份有限公司				8. 通風編號：43、45、47							
採 樣 時 間 污 染 係 統	逆料量 (註明單位)		產 量 (註明單位)				燃 料 (註明單位)					
	名 稱	當 日	許可用量	名 稱	當 日	許可用量	名 稱	當 日	許可用量			
	純水	2312t/hr	2309t/hr	水蒸氣	2302.67t/hr	2309t/hr	燃煤	264.57t/hr	302.280t/hr			
採 樣 時 間 防 治 設 施 操 作 狀 況	A. 燃料名稱：燃煤，含硫量 0.6%，B. 燃料名稱：煤，含硫量 3% 混燒比例A：*；B：*。											
	空氣污染防治設施名稱	主要操作參數(註明單位)				處 理 量(註明單位)						
檢 測 結 果	海水平脫硫(FGD)設備(A705)		廢氣入口溫度	86.07℃	80-160℃	18799.4Nm ³ /min	8986-21899Nm ³ /min					
			壓降	24.32Pa	10.00-70.00Pa	*	*					
	海水平脫硫(FGD)設備(A706)		廢氣入口溫度	86.07℃	80-160℃	18799.4Nm ³ /min	8986-21899Nm ³ /min					
			壓降	24.32Pa	10.00-70.00Pa	*	*					
	廢氣性質		排氣平均溫度：5.67%，排氣平均溫度：99.5℃，排氣平均流速：23.70m/s，濕基排氣量：39809.73Nm ³ /min									
	空氣污染物		排氣組成(%)		FPM(mg/Nm ³)	CFM(mg/Nm ³)	FPM+CFM(mg/Nm ³)	乾基排氣量(Nm ³ /min)	乾基校正排氣量(Nm ³ /min)	空氣污染物排放量(kg/hr)	排放標準	合格
檢測方法編號		CO ₂	O ₂	CO						是	否	
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)		18.6	5.3	ND<0.1	ND(0.500)	1.888	2.388	37585.34	*	5.387	-	-
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)		14.1	4.9	ND<0.1	ND(0.504)	5.589	6.084	37547.11	*	13.661	-	-
PM _{2.5} (**A212.10B)及(**A214.70C)		14.0	5.1	ND<0.1	ND(0.500)	2.112	2.612	37522.97	*	5.881	-	-
備 註	上述資料經本人做最終審查，確認無誤 實驗室主任簽章 											
	一、本採樣工作係由中環科技事業股份有限公司負責執行，確定後由中環科技事業股份有限公司分拆 二、倘檢測機構檢測能力尚未經環保署認可者，於填報「空氣污染物/檢測方法編號」時，應以**記號加註 三、FPM之偵測極限僅為1.35ug 四、CFM之分析結果，亦包含濾紙限品的分析值 五、本報告登載數值之修整原則依據環保署環境檢驗所「檢測報告位數表示規定」辦理									環保單位審核簽章		
頁次 2												

發行日期：96.08.01
表格編號：7AS03.0

煙道檢測專案編號：ET108NAS0065

三、採樣分析記錄—採樣當日，受測污染源與防制設備操作記錄表

管制編號		E	5	6	0	0	8	9	6	排放管道或周界編號	P	7	0	1
I. 製程、污染源或防制設備之資料		2. 類別		3. 操作記錄項目(代碼)		4. 操作數值		5. 計量單位之名稱						
a. 編號	b. 名稱													
E701	燃煤鍋爐 (0099)	1	純水 (360099)	2312	t/hr (M3)	1	燃煤 (170299)	264.57	t/hr (M3)	1	柴油 (170006)	0.29	kL/hr (Q2)	
		2	電力 (350099)	799.46	MWH (ZZ)	2	水蒸氣 (360007)	2302.67	t/hr (M3)					
A701	選擇觸媒還原(SCR)設備 (200-)	3	操作溫度 (C01---)	376.23	°C (C1)	3	還原劑NH ₃ (000099)	0.091	t/hr (M3)	3	操作壓力損失 (P99---)	0.497	kPa (P1)	
A702	選擇觸媒還原(SCR)設備 (200-)	3	操作溫度 (C01---)	376.23	°C (C1)	3	還原劑NH ₃ (000099)	0.091	t/hr (M3)	3	操作壓力損失 (P99---)	0.497	kPa (P1)	
A703	脈動式袋式集塵器	3	集塵器壓降 (P14---)	1.67	kPa (P1)	3	廢氣入口溫度 (C02---)	131.96	°C (C1)					
A704	脈動式袋式集塵器	3	集塵器壓降 (P14---)	1.67	kPa (P1)	3	廢氣入口溫度 (C02---)	131.96	°C (C1)					
A705	海水脫硫(FGD)設備(210-)	3	pH值 (L19---)	7.54	-- (--)	3	廢氣入口溫度 (C02---)	86.07	°C (C1)	3	吸收劑(海水) (000099)	8026.13	m ³ /hr (Q4)	
		3	壓降 (P99---)	24.32	Pa (ZZ)	3	廢氣處理量 (Q04---)	18799.4	Nm ³ /min (Q3)					
A706	海水脫硫(FGD)設備(210-)	3	pH值 (L19---)	7.54	-- (--)	3	廢氣入口溫度 (C02---)	86.07	°C (C1)	3	吸收劑(海水) (000099)	8026.13	m ³ /hr (Q4)	
		3	壓降 (P99---)	24.32	Pa (ZZ)	3	廢氣處理量 (Q04---)	18799.4	Nm ³ /min (Q3)					
以下空白														
												頁次	3	

樣本日期: 108.08.28
表格編號: SAS27.0

排放管道檢測專案編號: E11080430065

中環科技事業股份有限公司
採樣分析記錄-排放管道中PM_{2.5}採樣後紀錄表

管制編號: E56000896 排放管道編號: P701 記錄人簽名: [簽名] 採樣日期: 108.9.11

一、採樣後流量檢查資料

既定檢查流量(m ³ /min)	0.0200	檢查時間(min)	15
參考流量計序號	1901432	PM _{2.5} 主機序號	10002810
參考流量計溫度(°C)	27.5	PM _{2.5} 主機溫度(°C)	29.2
參考流量計起始值(m ³)	662.7432	PM _{2.5} 主機起始值(m ³)	289.2214
參考流量計結束值(m ³)	662.0594	PM _{2.5} 主機結束值(m ³)	289.6264
參考流量計總體積值(m ³)	0.3162	PM _{2.5} 主機總體積值(m ³)	0.20500
V _{ref} (參考流量計校正因子)	1.0077	V _{post}	1.0289
差值(%)(<5%)	2.10		

採樣後資料填寫及確認

資料項目	預採	樣品
1. 總採樣時間(min)	*	299.07
2. 乾式氣體流量計採樣體積V _{ACM} (m ³)	*	2.9208
3. 流量計絕對壓力P _a (inHg)	*	29.761
4. 標準狀態下乾式氣體流量計採樣體積V _{std} (DSCF)(Nft ³)(公式28)	*	95.2897
5. 標準狀態下水氣體積V _w (DSCF)(Nft ³)	*	5.8708
6. 排氣溫度下飽和水蒸氣壓P _v (mmHg)	*	796.0
7. 含水率B _w	*	5.86
8. 理論含水率B _{st}	*	105.28
9. 最終判定含水率B _{sp}	<input checked="" type="checkbox"/> 之前報告 <input type="checkbox"/> 預採	5.80
10. 濕基氣體分子重量M _w (lb/lb-mole)	29.77	29.7
11. 絕對排放管道氣體壓力P _g (inHg)	29.650	29.768
12. 排放管道內氣體絕對溫度T _g (°R)	669.7	672.9
13. 排氣流速V _g (ft/sec)	78.05	77.99
14. 標準狀態下排放管道乾排氣流量Q _{std} (DSCMM)(Nm ³ /min)	*	27522.97
15. 標準狀態下排放管道濕排氣流量Q _{std} (DSCMM)(Nm ³ /min)	*	27824.78
16. 等速吸引百分比(%)	*	95.3

三、採樣後數據判斷

1. 標準狀態下採樣速率Q _{std} (DSCFM)(Nft ³ /min)(公式29)	0.2187
2. 採樣速率Q _g (ACFM)(公式32)	0.4667
3. 實際μ(微油)(公式3)	205.1596
4. 實際雷諾數N _{re} (公式10)	2530.3
5. 實際克寧寧校正係數C(公式4)	1.075
6. 實際PM _{2.5} 截取粒徑D ₅₀ (um)(公式33、公式34)	2.5474

四、實際截取粒徑判斷

1. 疊代步驟次數N	1	2	3	4	5
2. 重新建立克寧寧校正係數C _r	1.074				
3. 重新建立D ₅₀₋₁ ; D ₅₀₋₂ (um)(公式35)	2.5476				
4. Z(D ₅₀₋₁ /D ₅₀₋₁ ; D ₅₀₋₁ /D ₅₀₋₂)(公式36、公式37)	1.000				
5-1. 最佳截取粒徑判斷: D ₅₀₋₁ 是否在 0.25-2.75 之間	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			
5-2. 最佳截取粒徑判斷: Z 是否在 0.99-1.01 之間	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			

檢算人員簽章: [簽章] 頁次: 2/

空氣污染物檢驗編號:

三、採樣分析記錄—採樣當日、受測污染源與防制設備操作條件登記表 1080909-1

1. 製程、污染源或防制設備之資料			2.	3.	4. 操作數值		5. 計量單位之名稱 (代碼)	
a. 編號	b. 名稱(代碼)	管制編號	類別	操作記錄項目 (代碼)	<input type="checkbox"/> 平日最大量	<input type="checkbox"/> 許可用量	當日	
E701	燃煤鍋爐	0099	1	純水	360099	2369	2306	t/hr M3
			1	燃煤	170299	302.28	264	t/hr M3
			1	柴油	170006	1.75	0	kL/hr Q2
			2	電力	350099	800	799	MWH ZZ
			2	水蒸氣	360007	2369	2299	t/hr M3
A701	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	374.5	℃ C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.1	t/hr M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.5	kPa ZZ
A702	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	374.5	℃ C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.1	t/hr M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.5	kPa ZZ
A703	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.61	kPa ZZ
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	132.57	℃ C1
A704	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.61	kPa ZZ
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	132.57	℃ C1

頁次

空氣污染物檢驗編號:

三、採樣分析記錄—採樣當日、受測污染源與防制設備操作條件登記表

1080910-1

I. 製程、污染源或防制設備之資料		管制編號	E5600896	排放管道或周界編號			P701	
a. 編號	b. 名稱(代碼)	類別	操作記錄項目 (代碼)	4. 操作數值		5. 計量單位之名稱 (代碼)		
				<input type="checkbox"/> 平日最大量	<input type="checkbox"/> 當日用量			
E701	燃煤鍋爐	0099	1 純水	360099	2369	2309	t/hr	M3
			1 燃煤	170299	302.28	263.6	t/hr	M3
			1 柴油	170006	1.75	0.88	kL/hr	Q2
			2 電力	350099	800	799.65	MWH	ZZ
			2 水蒸氣	360007	2369	2297	t/hr	M3
A701	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3 操作溫度	C01	280~390	378.5	℃	C1
			3 還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.086	t/hr	M3
			3 操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.5	kPa	ZZ
A702	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3 操作溫度	C01	280~390	378.5	℃	C1
			3 還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.086	t/hr	M3
			3 操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.5	kPa	ZZ
A703	脈動式袋式集塵器	120	3 集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.68	kPa	ZZ
			3 廢氣入口溫度	C02	100~160	131.3	℃	C1
A704	脈動式袋式集塵器	120	3 集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.68	kPa	ZZ
			3 廢氣入口溫度	C02	100~160	131.3	℃	C1

頁次

空氣污染物檢驗編號:

三、採樣分析記錄—採樣當日、受測污染源與防制設備操作條件登記表 10809(1-1)

1. 製程、污染源或防制設備之資料		管制編號	E5600896		排放管道或周界編號		P701		
a. 編號	b. 名稱(代碼)	類別	3. 操作記錄項目 (代碼)		4. 操作數值 <input type="checkbox"/> 平日最大量 <input type="checkbox"/> 許可用量		5. 計量單位 之名稱 (代碼)		
					當日				
E701	燃煤鍋爐	0099	1	純水	360099	2369	2322	t/hr	M3
			1	燃煤	170299	302.28	266.1	t/hr	M3
			1	柴油	170006	1.75	0	kL/hr	Q2
			2	電力	350099	800	799.73	MWH	ZZ
			2	水蒸氣	360007	2369	2312	t/hr	M3
A701	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	375.7	℃	C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.086	t/hr	M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.49	kPa	ZZ
A702	選擇觸媒還原(SCR)設備	200	3	操作溫度	C01	280~390	375.7	℃	C1
			3	還原劑NH3	000099	0.086~0.258	0.086	t/hr	M3
			3	操作壓力損失	P99	0.2~1.0	0.49	kPa	ZZ
A703	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.71	kPa	ZZ
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	132	℃	C1
A704	脈動式袋式集塵器	120	3	集塵器壓降	P14	0.10~2.50	1.71	kPa	ZZ
			3	廢氣入口溫度	C02	100~160	132	℃	C1
								頁次	



排放管道中可過濾性微粒(FPM)與可凝結性微粒(CPM)分析報告表

樣品編號：NAS1080065

採樣日期：1080909-11

可過濾性微粒(FPM)				
	補集重量(M ₁ +M ₂)(mg)	採樣體積V _{ms} (DSCF)	濃度(C _{fpm2.5})(gr/Dry Std CF)	濃度(C _{fpm2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	1.35	95.3928	0.0002	0.500
樣品二	1.35	94.6371	0.0002	0.504
樣品三	1.35	95.2897	0.0002	0.500

備註：樣品一~三之補集重量低於方法要求的偵測極限值，故補集重量以偵測極限值計算

可凝結性微粒(CPM)				
	m _{CPM} (mg)	採樣體積V _{msSTD} (DSCF)	濃度(C _{cpm2.5})(mg/Nft ³)	濃度(C _{cpm2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	5.1	95.3928	0.0535	1.888
樣品二	14.9	94.6371	0.1574	5.560
樣品三	5.7	95.2897	0.0598	2.112

原生性微粒總量(FPM+CPM)				
	濃度(C _{fpm2.5})(mg/Nm ³)	濃度(C _{cpm2.5})(mg/Nm ³)	C _{fpm2.5} +C _{cpm2.5} (mg/Nm ³)	
樣品一	0.500	1.888	2.388	
樣品二	0.504	5.560	6.064	
樣品三	0.500	2.112	2.612	

驗算人員：



最新確認日期: 108.08.12
 DS-10-006/9 DS
 分析員: DS
 單位主管: 王日

中環科技事業股份有限公司
 排放管道中可過濾性【FPM】與可凝結性【CPM】微粒分析報告表
 (已核)

分析日期: 108.09.17
 0000210800
 0000196203
 丙酮空白濃度(Ca)(ug/mg): 0.0000001

樣品編號	體積 V(mL)	初重(第1次) W1(g)	初重(第2次) W2(g)	恆重差 W2-W1	恆重差 W2-W1	初重(第1次) W1(g)	初重(第2次) W2(g)	恆重差 W2-W1	恆重差 W2-W1	微粒重量 (mg)	微粒重量 (mg)	樣品CPM重量
去離子超純水	150	33.89376	33.89379	-0.00003	-0.00003	33.89376	33.89382	0.00006	0.00006	0.03	0.01	
丙酮	150	33.00603	33.00606	-0.00003	-0.00003	33.00603	33.00607	0.00004	0.00004	0.01	0.00	
FPM	A1-1(濾紙)	94	32.84224	32.84221	0.00003	32.84224	32.84271	0.00047	0.00047	0.43	0.49	0.92
	A2-1(濾紙)	100	32.62825	32.62827	-0.00002	32.62825	32.62888	0.00063	0.00063	0.41	0.60	1.01
	A3-1(濾紙)	100	33.06660	33.06660	0.00000	33.06660	33.06706	0.00046	0.00046	0.51	0.44	0.95
	A3-2(丙酮)	393	32.09062	32.09066	-0.00004	32.09062	32.09397	0.00335	0.00335	3.32	0.44	5.1
	Container#1 無機	374	31.75818	31.75819	-0.00001	31.75818	31.75992	0.00174	0.00174	1.73	0.44	5.1
CPM Container#3 (濾紙)	Container#1 無機	420	31.92310	31.92308	0.00002	31.92310	31.93515	0.01205	0.01205	12.07	0.44	14.9
	Container#2 有機	382	32.62229	32.62228	0.00001	32.62229	32.62508	0.00279	0.00279	2.80	0.44	14.9
CPM Container#3 (濾紙)	Container#1 無機	420	31.64726	31.64722	0.00004	31.64726	31.65183	0.00457	0.00457	4.61	0.44	5.1
	Container#2 有機	366	32.82730	32.82728	0.00002	32.82730	32.82836	0.00106	0.00106	1.08	0.44	5.1
CPM Container#6	200	32.46956	32.46955	0.00001	32.46956	32.46955	-0.00001	-0.00001	0.00	0.00	0.03	
CPM Container#7	200	32.51402	32.51405	-0.00003	32.51402	32.51406	0.00004	0.00004	0.01	0.01	0.03	
CPM Container#8	195	33.20377	33.20375	0.00002	33.20377	33.20375	-0.00002	-0.00002	0.02	0.02	0.03	
CPM Container#9	200	33.44116	33.44114	0.00002	33.44116	33.44120	0.00004	0.00004	0.03	0.03	0.07	
CPM Container#10	398	33.26696	33.26694	0.00002	33.26696	33.26701	0.00005	0.00005	0.04	0.04	0.07	
CPM Container#11	90	32.30743	32.30740	0.00003	32.30743	32.30740	-0.00003	-0.00003	0.01	0.01	0.01	

數據提交日期: 108.10.08
 樣品編號: 樣品數量: 分析數據
 公式: $W_a - Ca \cdot V_a$
 排放管道-FPM與CPM濃度(A21-A21(4)09)TDS: 樣A21214-FU)第1頁2019/09

發行日期：98.08.01
表格編號：7AS16.0

廢氣排放管道說明表

管制編號		E	5	6	0	0	8	9	6	排放管道或周界編號	P	7	0	1
1. 測定管道資料	a. 形狀：	圓形		b. 材質：	金屬		c. 頂部離地高：		132.3 m					
	d. 外徑：	7016 mm、長 * mm、寬 * mm												
	e. 內徑：	7000 mm、長 * mm、寬 * mm												
2. 測定孔資料	a. 開口內徑：	100mm		b. 凸緣高：	130 mm		c. 數量：		4 個					
	d. 距上一氣體擾流處為	56000 mm，約 8 倍於測定孔處測定管道之相當直徑												
	e. 距下一氣體擾流處為	42550 mm，約 6 倍於測定孔處測定管道之相當直徑												
3. 測定點資料	a. 測定點編號	1、4、7、10		2、5、8、11		3、6、9、12								
	b. 與測定孔外緣距離(mm)	438		1152		2202								
	a. 測定點編號	以下空白												
	b. 與測定孔外緣距離(mm)													
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	排氣量：													
	<p>The diagram illustrates the measurement setup for a circular pipe. The left part shows a top-down view of the pipe with 12 measurement points (1-12) distributed around its circumference. The right part shows a side view of the pipe, indicating its vertical position relative to a ground level. Two vertical dimensions are shown: 42550mm from the top of the pipe to the measurement points, and 56000mm from the ground level to the measurement points. Arrows indicate the direction of gas flow through the pipe.</p>													
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查													
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全													

發行日期：96.08.01

表格編號：7AS01.0

固定污染源空氣污染物排放檢測報告書

管制編號：E5600841 檢測專案編號：ET108NAS0068

公私場所名稱：中國鋼鐵股份有限公司

受測污染源名稱：#2燒結機(PS38)

檢測目的：學術研究調查性質之檢測

檢測公司名稱：中環科技事業股份有限公司

採樣日期：108 年 09 月 16-18 日

檢行日期: 98.12.31
 表格編號: 71692.1

二、檢測結果摘要

檢測專案編號: ET108N4S0068

基 本 資 料	1. 受測公私場所名稱: 中國鋼鐵股份有限公司				5. 管制編號: E5600841									
	2. 地址: 高雄市小港區中鋼路1號				6. 受測污染源(編號): 42塊爐機(E531)									
	3. 檢測用途: 學術研究調查性質之檢測				7. 採樣日期: 108年09月16-18日									
	4. 檢測機構名稱: 中環科技事業股份有限公司				8. 港機編號: 50、52、72									
採 樣 時 間	進料量 (註明單位)		產量 (註明單位)			燃料 (註明單位)								
	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量					
	拌合料	381.4T/h	500.0T/h	燒結礦	381.7T/h	458.3T/h	焦炭	15.0/h	39.6T/h					
	場內回收細料	146.1T/h	150.0T/h	*	*	*	無煙煤	13.9T/h	3.4T/h					
操 作 狀 況	膨脹劑		39.8T/h	24.0T/h	*	*	煉焦爐氣	1067.8Nm ³ /h	1300Nm ³ /h					
	A. 燃料名稱: 焦炭, 含硫量 0.60%, B. 燃料名稱: 無煙煤, 含硫量 0.52%, C. 燃料名稱: 燒結廢火CO ₂ , 含硫量 0.027%													
泥澆比例A: 主; B: 主。														
操 作 狀 況	空氣污染防治設施名稱		主要操作參數(註明單位)			處理量(註明單位)								
			名稱	當日	許可用量	當日		許可用量						
	靜電集塵器(AS31)	二次放電電極電流	396.1mA	50.0-1400.0mA	*	*		*						
		二次放電電極電壓	49.3KV	10.0-90.0KV	*	*		*						
	靜電集塵器(AS31)	廢氣入口溫度	115.6°C	80-200°C	12477.75Nm ³ /min	11000-17500Nm ³ /min								
	脫硫設備(AS38)	操作溫度	57.0°C	10-160°C	*	*		*						
		循環液流量	1806.9m ³ /h	1000-8000m ³ /h	*	*		*						
		pH值	6.0	1-10	*	*		*						
	選擇觸媒還原(SCR)設備(AS39)	入口氣體溫度	128.5°C	40-180°C	*	*		*						
		操作溫度	277.4°C	200-350°C	*	*		*						
噴霧量		31.6m ³ /h	10-200m ³ /h	*	*		*							
廢氣性質		料氣平均溫度: 16.15N, 粗氣平均溫度133.5°C, 料氣平均流速: 14.60m/s, 濕基排氣量: 14880.53Nm ³ /min												
測 驗 結 果	空氣污染物		組成組成(S)			FPN(mg/Nm ³)	CFM(mg/Nm ³)	PPM+CFM(mg/Nm ³)	乾基排氣量(Nm ³ /min)	乾基校正排氣量(Nm ³ /min)	空氣污染物排放量(kg/hr)	排放標準	合格	
	檢測方法編號		CO ₂	O ₂	CO								是	否
	PM ₁₀		8.8	11.7	ND<0.1	6.378	9.543	15.921	12513.56	*	11.954	-	-	-
	PM _{2.5}		9.0	11.4	ND<0.1	8.191	10.217	18.408	12450.01	*	13.751	-	-	-
PM _{2.5}		9.1	11.3	ND<0.1	5.253	25.964	31.217	12469.67	*	29.356	-	-	-	
備 註	上述資料經本人做最終審查, 確認無誤													
	實驗室主任簽章 													
	一、本採樣工作係由中環科技事業股份有限公司負責執行, 採完樣後由中環科技事業股份有限公司分析													
	二、倘檢測機構檢測能力的未經環保署認可者, 於填報「空氣污染物/檢測方法編號」時, 應以「*」記號加註													
	三、PPM的偵測限僅為1.35mg													
四、CFM之分析結果, 未包含濾紙樣品的分析值														
五、本報告空氣數值之修整原則依據環保署環境檢驗所「檢測報告位數表示規定」辦理														
環保單位審核者簽章														
頁次 2														

發行日期: 108.06.28
表格編號: 34527.0

排放管線檢測專案編號: ET108N46068

中環科技專業股份有限公司
採樣分析記錄-排放管中PM_{2.5}採樣後紀錄表

管制編號: ET1080841 排放管線編號: P538 記錄人簽名: 謝谷頌 採樣日期: 108.9.18

一、採樣後流量檢查資料

設定流量(m ³ /min)	0.0200	檢查時間(min)	15
參考流量計序號	1901432	PM _{2.5} 主機序號	0003810
參考流量計溫度(°C)	32.6	PM _{2.5} 主機溫度(°C)	33.7
參考流量計起始值(m ³)	663.7892	PM _{2.5} 主機起始值(m ³)	398.6972
參考流量計結束值(m ³)	664.1062	PM _{2.5} 主機結束值(m ³)	399.0022
參考流量計總體積值(m ³)	0.3170	PM _{2.5} 主機總體積值(m ³)	0.3050
V _{real} (參考流量計校正因子)	1.0077	V _{real}	1.0429
差值(%)(<5%)	3.49		

二、採樣後資料填寫及確認

資料項目	預採	採品
1. 總採樣時間(min)	*	296.07
2. 乾式氣體流量計採樣體積V _s (ACM/m ³)	*	2.5714
3. 流量計絕對壓力P _a (inHg)	*	29.754
4. 標準狀態下乾式氣體流量計採樣體積V _s (DSCF)(Nft ³)(公式28)	*	82.1054
5. 標準狀態下水氣體積V _w (DSCF)(Nft ³)	*	15.9383
6. 排氣溫度下飽和水蒸氣壓P _v (mmHg)	*	*
7. 含水率B _{wp}	*	16.27
8. 理論含水率B _{wt}	*	*
9. 最終判定含水率B _{wp}	<input checked="" type="checkbox"/> 此項報告 <input type="checkbox"/> 預採	16.27
10. 濕基氣體分子量M _w (lb/lb-mole)		27.92
11. 絕對排放管線氣體壓力P _a (inHg)		29.783
12. 排放管線內氣體絕對溫度T _a (°R)		731.3
13. 排氣流速V _s (ft/sec)	*	47.95
14. 標準狀態下排放管線乾排氣流量Q _{sd} (DSCM)(Nm ³ /min)	*	12467.67
15. 標準狀態下排放管線濕排氣流量Q _{sw} (DSCM)(Nm ³ /min)	*	14890.56
16. 穿透吸打百分比(%)	*	88.4

三、採樣後數據判斷

1. 標準狀態下採樣速率Q _{sd} (DSCFM)(Nft ³ /min)(公式29)	0.277
2. 採樣速率Q _s (ACFM)(公式32)	0.4966
3. 實際μ(微油)(公式3)	21.9501
4. 實際富集數N _g (公式10)	2.298.t
5. 實際克寧學校正係數C(公式4)	1.089
6. 實際PM _{2.5} 截粒徑D ₅₀ (um)(公式33、公式34)	2.1976

四、實際截粒徑判斷

1. 疊代步驟次數N	1	2	3	4	5
2. 重新建立克寧學校正係數C _g	1.082				
3. 重新建立D ₃₀₋₁ ; D _{50-H} (um)(公式35)	2.7063				
4. Z(D _{30-1}/D₃₀₋₁; D_{30-1}/D_{50-H})(公式36、公式37)}}	1.003				
5-1. 最佳截粒徑判斷: D _{50-H} 是否在2.25-2.75之間	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			
5-2. 最佳截粒徑判斷: Z是否在0.99-1.01之間	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			

計算人員簽章: 謝谷頌 頁次: 2/

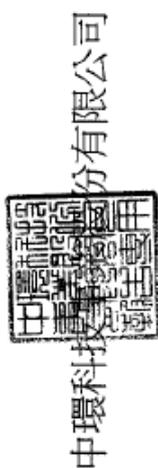
中鋼二號燒結工場 () 廠排放口編號: PS38 PM2.5 每小 () 操作條件檢測記錄表

檢測日期: 108.09.16
 管制編號: E5600841
 檢測公司: 中研院 (中環)

時間	燒結原料 (T/hr)			燒結燃料 (T/hr)			燒結COG (Nm ³ /hr)	產品 燒結率 T/hr	大EP (AS31)		脫硫系統 (AS38)			脫硫系統 (AS39)			
	拌合料	助熔劑	回收燃料	合計	細焦炭	無煙煤			合計	入口溫度 °C	二次電壓 KV	二次電流 mA	操作溫度 °C	箱塵液量 立方公尺/小時	PH值	入口溫度 °C	反應溫度 °C
07:00																	
08:00																	
09:00																	
10:00																	
11:00	376	31	136	543	15	13	28	375	116	48	413	57	1694	6	127	281	30
12:00	386	32	138	556	15	14	29	378	113	47	419	57	2353	6	127	282	30
13:00	389	31	140	560	14	14	28	391	111	49	422	57	2509	6	125	282	30
14:00	389	31	142	562	15	14	29	371	114	49	424	57	2507	6	126	280	30
15:00	391	32	140	563	15	14	29	381	113	49	415	57	2514	6	127	279	30
16:00	377	31	128	536	14	14	28	390	119	49	424	57	2498	6	128	280	30
17:00	397	32	134	563	15	14	29	394	125	48	427	57.2	2498	6	130	280	30
18:00																	
19:00																	
20:00																	
21:00																	
備註	1. 檢測目的: 108年中研院檢測PM2.5 2. 檢測時間: 10:40 ~ 16:25 3. 製程狀況: 正常 現場主管簽名、蓋章處 																

中鋼二號燒結工場 () 函排放口編號: PS38 PM2.5 每小) 操作條件檢測記錄表

時間	燒結原料 (T/hr)				燒結燃料 (T/hr)			總結COG (Nm3/hr)	產品 燒結礦 T/hr	大PP (AS31)			脫硫系統 (AS38)			脫硝系統 (AS39)		
	碎合料	助熔劑	回收細料	合計	細焦炭	無煙煤	合計			入口溫度 度℃	二次電壓 KV	二次電流 mA	操作溫度 度℃	循環液量 立方公尺/小時	PH值	入口溫度 度℃	反應溫度 度℃	噴霧量 Nm3/hr
07:00																		
08:00																		
09:00																		
09:00	370	29	146	545	15	13	28	1063	382	111	51	363	57	1120	6	124	282	30
10:00																		
10:00	384	31	149	564	15	14	29	1052	378	116	50	380	57	1119	6	126	281	30
11:00																		
11:00	387	31	151	569	15	14	29	1043	379	115	49	367	57	1116	6	127	276	30
12:00																		
12:00	395	31	153	579	16	15	31	1057	397	112	50	381	57	1153	6	125	274	30
13:00																		
13:00	386	32	149	567	15	14	29	1065	386	118	50	371	57	1648	6	127	275	30
14:00																		
14:00	381	31	150	562	15	14	29	1049	374	121	49	376	57	1643	6	129	274	30
15:00																		
15:00																		
16:00																		
16:00																		
17:00																		
17:00																		
18:00																		
18:00																		
19:00																		
19:00																		
20:00																		
20:00																		
21:00																		
備註	1. 檢測目的: 108年中研院抽測PM2.5。 2. 檢測時間: 09:20 ~ 15:00。 3. 製鐵狀況: 正常																	
現場主管簽名、蓋章處																		



中環科技股份有限公司

排放管道中可過濾性微粒(FPM)與可凝結性微粒(CPM)分析報告表

樣品編號:NAS1080068

採樣日期:1080916~18

可過濾性微粒(FPM)				
	補集重量(M ₁ +M ₂)(mg)	採樣體積V _{ms} (DSCF)	濃度(C _{FPM2.5})(gr/Dry Std CF)	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	14.77	81.7816	0.0028	6.378
樣品二	19.08	82.2643	0.0036	8.191
樣品三	12.20	82.0154	0.0023	5.253

可凝結性微粒(CPM)				
	m _{CPM} (mg)	採樣體積V _{ms(Dry)} (DSCF)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nft ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	22.1	81.7816	0.2702	9.543
樣品二	23.8	82.2643	0.2893	10.217
樣品三	60.3	82.0154	0.7352	25.964

原生性微粒總量(FPM+CPM)			
	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)	C _{FPM2.5} +C _{CPM2.5} (mg/Nm ³)
樣品一	6.378	9.543	15.921
樣品二	8.191	10.217	18.408
樣品三	5.253	25.964	31.217

驗算人員:



發行日期：96.08.01
表格編號：7AS10.0

廢氣排放管道說明表

管制編號		E	5	6	0	0	8	4	1	排放管道或周界編號			
		P	S	3	8								
1. 測定管道資料	a. 形狀：	圓形		b. 材質：	鋼					c. 頂部離地高：	73 m		
	d. 外徑：	*	mm	、長	*	mm	、寬	*	mm				
	e. 內徑：	5693	mm	、長	*	mm	、寬	*	mm				
2. 測定孔資料	a. 開口內徑：	200mm		b. 凸緣高：	1130 mm			c. 數量：	4 個				
	d. 距上一氣體擾流處為	53100 mm，約 9 倍於測定孔處測定管道之相當直徑											
	e. 距下一氣體擾流處為	11400 mm，約 2 倍於測定孔處測定管道之相當直徑											
3. 測定點資料	a. 測定點編號			1、4、7、10		2、5、8、11		3、6、9、12					
	b. 與測定孔外緣距離(mm)			1380		1961		2815					
	a. 測定點編號	以下空白											
	b. 與測定孔外緣距離(mm)												
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	<p>排氣量：</p>												
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查												
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全												

發行日期：96.08.01

表格編號：7AS01.0

固定污染源空氣污染物排放檢測報告書

管制編號：E5600056 檢測專案編號：ET108NAS0071

公私場所名稱：台灣中油股份有限公司 煉製事業部 大林煉油廠

受測污染源名稱：鍋爐蒸氣產生程序(M05)

檢測目的：學術研究調查性質之檢測

檢測公司名稱：中環科技事業股份有限公司

採樣日期：108 年 09 月 23-25 日

發行日期: 98.12.31
表格編號: 74512.1

二、檢測結果摘要

檢測專案編號: ET108NAS0071

基 本 資 料	1. 受測公私場所名稱: 台灣中油股份有限公司 煉製事業部 大林煉油廠						5. 管制編號: E560056																	
	2. 地址: 高雄市小港區沿海四路5						6. 受測污染源(編號): 鍋爐蒸氣產生程序(M05)																	
	3. 檢測用途: 學術研究調查性質之						7. 採樣日期: 108年09月23-25日																	
	4. 檢測機構名稱: 中環科技事業股份有限公司						8. 濾紙編號: 76、78、79																	
採 樣 時 間	進料量 (註明單位)			產量 (註明單位)			燃料 (註明單位)																	
	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量	名稱	當日	許可用量															
	自來水	1274T/day	2880T/day	水蒸氣	1254T/day	2312.4T/day	燃料氣	98.35m³/day	107.23m³/day															
	*	*	*	*	*	*	液化天然氣	0.95m³/day	117.23m³/day															
污 染 源	*			*			4-B號重油			0KL/day 183.62KL/day														
	A. 燃料名稱: 4-B號重油, 含硫量 0.0%, B. 燃料名稱: 液化天然氣, 含硫量 0.0%, C. 燃料名稱: 燃料氣, 含硫量 0.0% 混燒比例A: * : B: * : C: *																							
操 作 狀 況	空氣污染防治設施名稱											主要操作參數(註明單位)			處理量(註明單位)									
												名稱	當日	許可用量	當日	許可用量								
	選擇觸媒還原(SCR)設備(ADD3)											操作溫度範圍		217.8°C	200-350°C	779.5Nm³/min	500-2016Nm³/min							
												還原劑注入量		1.52kg/hr	0.3-8kg/hr	*	*							
	靜電集塵器(A003)											第一段電壓		131.4V	10-600V	779.5Nm³/min	500-2016Nm³/min							
												第一段電流		17.9A	2-300A	*	*							
第二段電壓												29.5KV	20-200KV	*	*									
第二段電流												46.0mA	10-200mA	*	*									
											入口氣體溫度		145.1°C	20-160°C	*	*								
廢氣性質											排氣平均溫度: 8.60%, 醇氣平均溫度134.2°C, 排氣平均流速: 5.93m/s, 濕基排氣量: 823.48Nm³/min													
檢 測 結 果	空氣污染物											排氣組成(%)		FPM(mg/Nm³)	CPM(mg/Nm³)	FPM+CPM (mg/Nm³)	耗基排放量 (Nm³/min)	耗基校正排放量 (Nm³/min)	空氣污染物的排放量 (kg/hr)	排放標準	合格			
	檢測方法編號											CO₂	O₂									CO		
	PM ₁₀											10.0	5.1	ND<0.1	ND(0.492)	3.538	4.028	757.19	*	0.183	-	-	-	
	PM _{2.5}											9.8	5.3	ND<0.1	ND(0.501)	4.825	5.326	754.98	*	0.241	-	-	-	
PM _{2.5}											10.2	5.1	ND<0.1	ND(0.508)	5.108	5.611	746.24	*	0.251	-	-	-		
備 註	上述資料係本人做最終審查, 確認無誤												實驗室主任簽章											
	一、本採樣工作係由中環科技事業股份有限公司負責執行, 採完樣後由中環科技事業股份有限公司分析												環保單位審核者簽章											
	二、倘檢測機構檢測能力尚未經環保署認可者, 於填報「空氣污染物/檢測方法編號」時, 應以「**」記號註註																							
	三、FPM的偵測極限值為1.35mg																							
	四、CPM之分析結果, 未包含濾紙樣品的分析值																							
五、本報告登載數值之修整原則依環保署環境檢驗所「檢測報告位數表示規定」辦理																								

發行日期: 108.08.28
表格編號: SAG27.0

排放管線檢測專案編號: ET108/A5001

中環科技事業股份有限公司
採樣分析記錄-排放管線中PM_{2.5}採樣後紀錄表

管制編號: E560056 排放管線編號: P007 記錄人簽名: 吳明 採樣日期: 108.9.25

一、採樣後流量檢查資料

設定檢查流量(m ³ /min)	0.0200	檢查時間(min)	15
參考流量計序號	P01432	PM _{2.5} 主機序號	0003810
參考流量計溫度(°C)	30.6	PM _{2.5} 主機溫度(°C)	29.6
參考流量計起始值(m ³)	665.2136	PM _{2.5} 主機起始值(m ³)	410.8532
參考流量計結束值(m ³)	665.5284	PM _{2.5} 主機結束值(m ³)	411.1558
參考流量計總體積值(m ³)	0.3148	PM _{2.5} 主機總體積值(m ³)	0.3026
V _{refl} (參考流量計校正因子)	1.0099	V _{inst}	1.0369
差值(%)(<5%)	2.88		

二、採樣後資料填寫及確認

資料項目	預採	採品
1. 總採樣時間(min)	✗	297.09
2. 乾式氣體流量計採樣體積V _s (ACH/m ³)	✗	2.9016
3. 流量計絕對壓力P _a (inHg)	✗	29.994
4. 標準狀態下乾式氣體流量計採樣體積V _{std} (DSCF)(Nft ³)(公式28)	✗	94.7159
5. 標準狀態下水氣體積V _w (DSCF)(Nft ³)	✗	8.9217
6. 採氣溫度下飽和水蒸氣壓P _w (mmHg)	✗	*
7. 含水率B _{wt}	✗	8.61
8. 理論含水率B _{th}	✗	*
9. 最終判定含水率B _{me}	✗	8.61
10. 酒基氣體分子重量M _g (lb/lb-mole)	28.98	28.81
11. 絕對排放管線或氣體壓力P _a (inHg)	29.76	29.729
12. 排放管線內氣體絕對溫度T _g (°R)	731.9	734.6
13. 排氣流速V _g (ft/sec)	19.35	19.25
14. 標準狀態下排放管線乾排氣流量Q _{std} (DSCMD)(Nm ³ /min)	754.88	746.24
15. 標準狀態下排放管線濕排氣流量Q _{std} (DSCMD)(Nm ³ /min)	824.57	816.53
16. 等速吸引百分比(%)	✗	94.4

三、採樣後數據判斷

1. 標準狀態下採樣流量Q _{std} (DSCFM)(Nft ³ /min)(公式29)	0.3188
2. 採樣速率Q _s (ACFM)(公式32)	0.5217
3. 實際μ(微法)(公式3)	216.5259
4. 實際雷諾數Re(公式10)	2443.5
5. 實際克寧罕校正係數C(公式4)	1.087
6. 實際PM _{2.5} 截取粒徑D ₂₅ (um)(公式33、公式34)	2.5543

四、實際截取粒徑判斷

	1	2	3	4	5
1. 疊代步驟次數					
2. 重新建立克寧罕校正係數C _r	1.085				
3. 重新建立D ₂₅₋₁ ; D _{25-n} (um)(公式35)	2.5566				
4. Z(D ₂₅ /D ₂₅₋₁ ; D _{25-n} /D _{25-(n-1)}) (公式36、公式37)}	1.001				
5-1. 最佳截取粒徑判斷: D _{25-n} 是否在 2.25-2.75 之間	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			
5-2. 最佳截取粒徑判斷: Z 是否在 0.90-1.01 之間	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			

核算人員簽章: 頁次: 25/26

空氣污染物檢驗編號： _____

五、附件一 污染源操作記錄表

管制編號	E	5	6	0	0	0	5	6	排放管道或周界編號	P	0	0	7
------	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---

茲保證下列所述確為本廠第二動力工場B407鍋爐設備之實際操作情形：

原料- 名稱 超純水 用量 1290 單位 (T / D)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)

產品- 名稱 中壓蒸汽 用量 1272 單位 (T / D)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)

燃料- 名稱 燃料油 用量 0 單位 (KL / D)
 名稱 液化天然氣 (NG) 用量 0.0 單位 (Km³ / D)
 名稱 燃料氣 (RG) 用量 94.9 單位 (Km³ / D)

操作說明：

- 1、中壓蒸汽：壓力 20.6 kg/cm² 溫度：315℃
- 2、脫硝設備運轉：操作溫度：272.7 °C 壓力：2.0 kg/cm²
 注入量：1.52 NM³/HR。
- 3、靜電集塵器運轉：一次側 電壓 131.5 電流 17.9
 二次側 電壓 28.9 KV 電流 46.0 mA
 廢氣入口溫度 145.1℃
- 4、廢氣處理量：772.4 Nm³/min

公私場所名稱：大林煉油廠第二動力工場 保證人：陳界祥 公三動力
陳界祥 職稱：工程師

中華民國 108 年 9 月 23 日



頁次	02
----	----

空氣污染物檢驗編號： _____

五、附件一 污染源操作記錄表

管制編號	E	5	6	0	0	0	5	6	排放管道或周界編號	P	0	0	7
------	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---

茲保證下列所述確為本廠第二動力工場B407鍋爐設備之實際操作情形：

原料- 名稱 超純水 用量 1290 單位 (T / D)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)

產品- 名稱 中壓蒸汽 用量 1270 單位 (T / D)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)

燃料- 名稱 燃料油 用量 0 單位 (KL / D)
 名稱 液化天然氣 (NG) 用量 0.0 單位 (Km³ / D)
 名稱 燃料氣 (RG) 用量 100.5 單位 (Km³ / D)

操作說明：

- 1、中壓蒸汽：壓力 20.7 kg/cm² 溫度：314.5℃
- 2、脫硝設備運轉：操作溫度：271.7 °C 壓力：2.0 kg/cm²
 注入量：1.58 NM³/HR。
- 3、靜電集塵器運轉：一次側 電壓 131.2 電流 17.8
 二次側 電壓 29.8 KV 電流 46.0 mA
 廢氣入口溫度 144.9℃
- 4、廢氣處理量：767.2 Nm³/min

公私場所名稱：大林煉油廠第二動力工場 保證人：陳界祥 公三動力
陳界祥 職稱：工程師

中華民國 108 年 9 月 24 日



頁次 02

空氣污染物檢驗編號： _____

五、附件一 污染源操作記錄表

管制編號	E	5	6	0	0	0	5	6	排放管道或周界編號	P	0	0	7
------	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---

茲保證下列所述確為本廠第二動力工場B407鍋爐設備之實際操作情形：

原料- 名稱 超純水 用量 1242 單位 (T / D)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)

產品- 名稱 中壓蒸汽 用量 1220 單位 (T / D)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)
 名稱 _____ 用量 _____ 單位 (/)

燃料- 名稱 燃料油 用量 0 單位 (KL / D)
 名稱 液化天然氣 (NG) 用量 0.0 單位 (Km³ / D)
 名稱 燃料氣 (RG) 用量 99.4 單位 (Km³ / D)

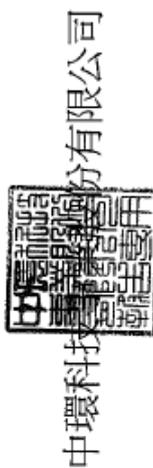
操作說明：

- 1、中壓蒸汽：壓力 20.5 kg/cm² 溫度：315℃
- 2、脫硝設備運轉：操作溫度：271.1 °C 壓力：2.0 kg/cm²
 注入量：1.47 NM³/HR。
- 3、靜電集塵器運轉：一次側 電壓 131.4 電流 18.0
 二次側 電壓 29.7 KV 電流 46.1 mA
 廢氣入口溫度 145.4℃
- 4、廢氣處理量：772.0 Nm³/min

公私場所名稱： 大林煉油廠第二動力工場 保證人： 陳界祥 公二動力 職稱： 工程師

中華民國 108 年 9 月 25 日





排放管道中可過濾性微粒(FPM)與可凝結性微粒(CPM)分析報告表

樣品編號：NAS1080071

採樣日期：1080923~25

可過濾性微粒(FPM)				
樣品	補集重量(M ₁ +M ₂)(mg)	採樣體積V _{ms} (DSCF)	濃度(C _{FPM2.5})(gr/Dry Std CF)	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	1.35	96.8831	0.0002	0.492
樣品二	1.35	95.1488	0.0002	0.501
樣品三	1.35	94.7159	0.0002	0.503

備註：樣品一~三之補集重量低於方法要求的偵測極限值，故補集重量以偵測極限值計算

可凝結性微粒(CPM)				
樣品	m _{CPM} (mg)	採樣體積V _m (STD)(DSCF)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nit ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)
樣品一	9.7	96.8831	0.1001	3.536
樣品二	13.0	95.1488	0.1366	4.825
樣品三	13.7	94.7159	0.1446	5.108

原生性微粒總量(FPM+CPM)				
樣品	濃度(C _{FPM2.5})(mg/Nm ³)	濃度(C _{CPM2.5})(mg/Nm ³)	C _{FPM2.5} +C _{CPM2.5} (mg/Nm ³)	
樣品一	0.492	3.536	4.028	
樣品二	0.501	4.825	5.326	
樣品三	0.503	5.108	5.611	

驗算人員： 

發行日期：96.08.01
表格編號：TAS16.0

廢氣排氣流速說明

		管制編號	E	5	6	0	0	0	5	6	排放管道或周界編號	P	0	0	7
1. 測定管道資料	a. 形狀：	圓形		b. 材質：	鐵材		c. 頂部離地高：	105		m					
	d. 外徑：	*	mm	、長：	*	mm	、寬：	*	mm						
	e. 內徑：	2100	mm	、長：	*	mm	、寬：	*	mm						
2. 測定孔資料	a. 開口內徑：	100mm	b. 凸緣高：	120	mm	c. 數量：	4	個							
	d. 距上一氣體擾流處為	33000 mm		約 16 倍於測定孔處測定管道之相當直徑											
	e. 距下一氣體擾流處為	69000 mm		約 33 倍於測定孔處測定管道之相當直徑											
3. 測定點資料	a. 測定點編號	1、4、7、10	2、5、8、11	3、6、9、12	以下空白										
	b. 與測定孔外緣距離(mm)	212	427	742											
	a. 測定點編號														
	b. 與測定孔外緣距離(mm)														
4. 測定管道、測定孔與測定點位置示意圖	<p>排氣量：</p>														
5. 檢查項目	<input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場電源檢查； <input checked="" type="checkbox"/> 是、 <input type="checkbox"/> 否有做現場水源檢查														
6. 採樣作業安全性評估	<input checked="" type="checkbox"/> 安全、 <input type="checkbox"/> 不安全														

*「本報告係受託單位或計畫主持人個人之意見，僅供本署施政之參考，不代表本署立場」。

*「本報告之著作財產權屬（委辦者）所有，非經（委辦者）同意，任何人均不得重製、仿製或其他之侵害」