

東海大學環境科學與工程學系碩士班

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Science and Engineering

TungHai University

Master Thesis

工業密集區大氣懸浮微粒特性分析

Characteristic of Atmospheric Particulate Matters in an
Industry Intensive Region

研究生：陳亭妤

Author: Ting-Yu Chen

指導教授：彭彥彬 博士

Advisor: Dr. Yen-Ping Peng

中華民國一〇七年六月

June, 2018

東海大學環境科學系碩士班

論文口試委員審定書

環境科學與工程學系碩士班陳亭妤君所提之論文

題目：工業密集區大氣懸浮微粒特性分析

Characteristic of Atmospheric Particulate Matters in an Industry Intensive Region

經本委員會審議，認為符合碩士資格標準。

論文口試委員召集人 江鴻勳 (簽章)

委員 張嘉祥
林富麟
彭嘉彬

中華民國 107 年 6 月 20 日

中文摘要

為瞭解工業密集區大氣懸浮微粒特性及其潛在來源，本研究於2016年12月至2018年2月間於工業密集區，同時以十階及三階微孔均勻沉積衝擊器 (Micro Orifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI) 進行四季之大氣懸浮微粒採樣，並將採集之微粒樣本進行質量濃度量測與水溶性離子、金屬及戴奧辛組成分析，以探討工業密集區大氣微粒之濃度變化、化學組成特性及粒徑分布，最後再利用主成分分析解析大氣懸浮微粒之潛在來源。研究結果顯示：採樣期間大氣懸浮微粒於粗微粒 ($>1.8 \mu\text{m}$)、細微粒 ($0.1-1.8 \mu\text{m}$)及超細微粒 ($<0.1 \mu\text{m}$)質量濃度分別介於 $3.70\sim 20.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5.09\sim 28.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 $1.16\sim 11.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 間，其平均濃度分別為 $13.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $14.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 $3.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。大氣微粒之粒徑分布大多呈雙峰及三峰分布，於秋、冬兩季主峰主要位於細微粒上，於春季及夏季主峰則主要位於粗微粒上。大氣懸浮微粒化學組成方面，微粒中之水溶性離子以 NO_3^- 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 為優勢物種。微粒上 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 均呈單峰分布， K^+ 及 NO_3^- 則呈現雙峰分布。於粗微粒及細微粒上主要金屬元素分別依序為 $\text{Fe} > \text{Al} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na}$ 及 $\text{Al} > \text{K} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg}$ 。採樣期間大氣微粒之戴奧辛濃度介於 $0.0006\sim 0.0017 \text{ pg I-TEQ}/\text{Nm}^3$ ，濃度平均值為 $0.001 \text{ pg I-TEQ}/\text{Nm}^3$ 。此外，由主成分分析結果顯示大氣懸浮微粒主

要由海鹽飛沫、衍生性污染物、交通排放、工業製程、生質燃燒、土壤及地表揚塵所貢獻。

關鍵字：懸浮微粒、粒徑分布、化學組成、主成分分析



Abstract

Atmospheric particulate matters (PMs) were collected in an industry intensive region in central Taiwan in order to investigate the characteristics and possible sources of PMs. The samplings were simultaneously conducted by using 10 and 3 stage Micro Orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI) in four seasons from December 2016 to February 2018. In this study, characteristics of PMs in this region were evaluated by measuring the mass concentration of PMs and analyzing the water-soluble ions, metal elements and dioxins. Additionally, principal component analysis (PCA) was used to identify the potential sources of PMs. The results showed that the concentration of coarse ($>1.8 \mu\text{m}$), fine ($0.1\text{-}1.8 \mu\text{m}$) and ultrafine ($<0.1 \mu\text{m}$) particles ranged from $3.70\text{-}20.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.09\text{-}28.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $1.16\text{-}11.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Mean concentration of PMs were 13.60 , 14.38 , $3.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for coarse, fine and ultrafine particles during sampling periods. In the industry intensive region, the size distribution of ambient particles showed bi-modal and tri-modal distribution. The size distribution of PMs were mainly contributed by coarse particles in spring and summer, while fine particles were dominant species in autumn and winter. The dominant water-soluble ions of PMs were NO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-} . The size distributions of Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} exhibited unimodal distribution, while only K^+ and NO_3^- displayed bimodal distributions. The order of major metal elements of coarse and fine particles was $\text{Fe} > \text{Al} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na}$ and $\text{Al} > \text{K} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg}$, respectively. The concentration of dioxins in the atmosphere ranged from $0.0006\text{-}0.0017 \text{ pg I-TEQ}/\text{Nm}^3$,

and mean concentration of dioxins was 0.001 pg I-TEQ/Nm³. The results of Principal Component Analysis (PCA) revealed that the contribution to PMs were associated with sea salt, secondary pollutants, traffic emissions, biomass burning, industrial process and road dust.

Keywords: PMs; Size distribution; Chemical composition; PCA



誌謝

承蒙恩師 彭彥彬副教授之悉心指導及諄諄教誨，學生於碩士班修業期間，專業領域知識及待人處事態度皆受益良多，亦使得論文得以順利完成，學生在此致上最誠摯之謝意。論文口試期間，承蒙中國醫藥大學 江鴻龍博士、中臺科技大學 賴嘉祥博士及虎尾科技大學 林家驊 博士之不吝指正及寶貴建議，使論文得以更加充實及完備，特此致上最誠摯之謝意。

求學期間，感謝綠色技術與大氣實驗室夥伴揚能學長、易靜學姊、智禎學姊、瑋晨學長、琬淳、若蓁及羚榛於研究過程中各方面之協助及鼓勵，並帶給實驗室許多歡樂，亦感謝土壤實驗室智翔學長、淑慧及蕙如、界分實驗室怡妙、環管實驗室硯勛學長及水質實驗室好甄學姊於實驗過程中提供各方面之協助，使我得以順利完成論文。謝謝大家讓我在研究生活中增添不少色彩，我將永銘記於心。

最後感謝我的家人，給予我無怨無悔之付出、鼓勵及支持，讓我能專心於學業，順利取得碩士學位。謹以此致上最深的謝忱，感謝所有親朋好友及父母，祝福各位在未來旅途上一切平安、健康、順利。

陳亭妤 謹誌於 中華民國 107 年 6 月

目錄

| | |
|------------------------------|-----|
| 中文摘要..... | I |
| Abstract..... | III |
| 誌謝..... | V |
| 目錄..... | VI |
| 表目錄..... | X |
| 圖目錄..... | XI |
| 第一章 前言..... | 1 |
| 1.1 研究緣起..... | 1 |
| 1.2 研究目的..... | 2 |
| 第二章 文獻回顧..... | 3 |
| 2.1 大氣懸浮微粒..... | 3 |
| 2.1.1 大氣懸浮微粒形成機制及來源..... | 3 |
| 2.1.2 大氣懸浮微粒粒徑分布..... | 6 |
| 2.1.3 各國懸浮微粒濃度標準..... | 7 |
| 2.1.4 大氣懸浮微粒對人體之影響..... | 10 |
| 2.2 台灣地區大氣懸浮微粒濃度變化..... | 12 |
| 2.3 大氣懸浮微粒之化學組成特性..... | 15 |
| 2.3.1 水溶性離子組成特性、來源及粒徑分布..... | 15 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.3.2 | 金屬元素組成特性及來源 | 20 |
| 2.3.3 | 戴奧辛組成特性及來源 | 23 |
| 2.3.4 | 工業區及科學園區大氣懸浮微粒特性之相關研究 | 28 |
| 2.4 | 大氣懸浮微粒及氣象因子相關性研究..... | 31 |
| 2.4.1 | 天氣型態..... | 31 |
| 2.4.2 | 氣象因子..... | 34 |
| 2.5 | 大氣懸浮微粒潛在污染來源解析..... | 38 |
| 2.5.1 | 主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA)..... | 38 |
| 第三章 | 實驗設備及方法 | 41 |
| 3.1 | 研究架構..... | 41 |
| 3.2 | 採樣規劃..... | 43 |
| 3.2.1 | 採樣區域背景..... | 43 |
| 3.2.2 | 採樣時間與頻率..... | 44 |
| 3.2.3 | 採樣濾紙前處理..... | 44 |
| 3.3 | 採樣設備..... | 45 |
| 3.3.1 | 微孔均勻沉積衝擊器 (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactors, MOUDI)..... | 45 |
| 3.3.2 | DAVIS 6152C 有線綜合氣象站 | 49 |
| 3.4 | 微粒組成分析..... | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.1 質量濃度分析..... | 50 |
| 3.4.2 水溶性離子成分分析 | 51 |
| 3.4.3 金屬元素成分分析..... | 55 |
| 3.4.4 戴奧辛/呔喃分析 | 58 |
| 3.5 大氣懸浮微粒潛在污染來源解析..... | 60 |
| 3.5.1 主成分分析..... | 60 |
| 3.6 品質保證與品質控制..... | 61 |
| 3.6.1 採樣方法之品保與品管 | 61 |
| 3.6.2 分析方法之品保與品管 | 63 |
| 第四章 結果與討論 | 66 |
| 4.1 氣象條件分析..... | 66 |
| 4.1.1 2011-2017 年間細懸浮微粒事件日天氣型態概況分析 | 66 |
| 4.1.2 採樣期間氣象條件分析 | 72 |
| 4.2 大氣懸浮微粒質量濃度..... | 74 |
| 4.2.1 採樣期間微粒質量濃度變化 | 74 |
| 4.2.2 PM ₁₀ 採樣結果與鄰近環保署空品測站監測值比較 | 78 |
| 4.2.3 微粒之粒徑分布特性 | 80 |
| 4.3 大氣懸浮微粒之水溶性離子成分..... | 83 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 4.3.1 水溶性離子濃度變化 | 83 |
| 4.3.2 水溶性離子濃度之粒徑分布 | 89 |
| 4.3.3 水溶性離子組成比例 | 91 |
| 4.3.4 微粒酸鹼性探討..... | 93 |
| 4.3.5 硫氧化比值及氮氧化比值 | 95 |
| 4.4 大氣懸浮微粒之金屬元素組成..... | 98 |
| 4.4.1 金屬元素濃度變化..... | 98 |
| 4.4.2 金屬元素組成比例..... | 105 |
| 4.5 大氣懸浮微粒潛在來源解析..... | 108 |
| 4.5.1 主成分分析..... | 108 |
| 4.6 大氣懸浮微粒之戴奧辛組成..... | 111 |
| 4.6.1 採樣期間氣象條件..... | 111 |
| 4.6.2 大氣微粒之戴奧辛濃度 | 112 |
| 4.6.3 與國內外相關研究結果之比較 | 115 |
| 第五章 結論與建議 | 117 |
| 5.1 結論 | 117 |
| 5.2 建議..... | 120 |
| 參考文獻..... | 121 |

表目錄

| | |
|---|-----|
| 表 2.1.1 各項空氣污染物之空氣品質標準規定 | 9 |
| 表 2.1.2 各國懸浮微粒標準值 | 10 |
| 表 2.3.1 PCDD/Fs 毒性當量因子 | 26 |
| 表 3.3.1 MOUDI 各階層之截取粒徑範圍-十階 | 48 |
| 表 3.3.2 MOUDI 各階層之截取粒徑範圍-三階 | 48 |
| 表 3.4.1 離子層析儀基本資訊 | 54 |
| 表 4.1.1 2011 年至 2017 年間四季細懸浮微粒事件日出現日數 | 68 |
| 表 4.1.2 14 種天氣類型及其特性描述 | 69 |
| 表 4.1.3 2011 年至 2017 年間四季天氣類型出現日數及機率 | 71 |
| 表 4.1.4 採樣期間氣象條件 | 73 |
| 表 4.2.1 各粒徑範圍懸浮微粒質量濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)及 $\text{PM}_{1.8}/\text{PM}_{10}$ 比值 | 76 |
| 表 4.2.2 國內外 PM_{10} 濃度量測結果比較 | 77 |
| 表 4.2.3 本研究 PM_{10} 測值與鄰近環保署空品測站監測值比較 | 79 |
| 表 4.3.1 採樣期間粗微粒上水溶性離子濃度 | 85 |
| 表 4.3.2 採樣期間細微粒上水溶性離子濃度 | 86 |
| 表 4.3.3 採樣期間超細微粒上水溶性離子濃度 | 87 |
| 表 4.3.4 微粒中和比 (NR)比較表 | 95 |
| 表 4.4.1 大氣粗微粒中金屬元素濃度 | 100 |
| 表 4.4.2 大氣細微粒中金屬元素濃度 | 102 |
| 表 4.4.3 大氣超細微粒中金屬元素濃度 | 103 |
| 表 4.5.1 大氣懸浮微粒離子成分主成分分析結果 | 109 |
| 表 4.5.2 大氣懸浮微粒金屬元素主成分分析結果 | 110 |
| 表 4.6.1 採樣期間之氣象條件 | 111 |
| 表 4.6.2 採樣期間大氣 PCDD/PCDFs 之濃度 | 114 |
| 表 4.6.3 本研究與國內外不同地區大氣中 PCDD/Fs 濃度比較表 | 116 |

圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 2.1.1 大氣懸浮微粒形成機制及來源 | 5 |
| 圖 2.1.2 大氣懸浮微粒粒徑分布圖 | 7 |
| 圖 2.1.3 各粒徑範圍之微粒於人體各部位之沉積百分比 | 12 |
| 圖 2.3.1 PCDD/Fs 之化學結構 | 28 |
| 圖 3.1.1 研究架構圖 | 42 |
| 圖 3.2.1 相對地理位置圖 | 43 |
| 圖 3.2.2 鐵氟龍濾紙 | 45 |
| 圖 3.3.3 採樣現場示意圖 | 47 |
| 圖 3.3.4 微孔均勻沉積衝擊器-十階 | 47 |
| 圖 3.3.5 微孔均勻沉積衝擊器-三階 | 47 |
| 圖 3.3.6 綜合氣象站 | 49 |
| 圖 3.4.1 微量天平 | 51 |
| 圖 3.4.2 水溶性離子分析程序 | 53 |
| 圖 3.4.3 離子層析儀 | 54 |
| 圖 3.4.4 金屬元素分析流程 | 56 |
| 圖 3.4.5 微波加速反應系統 | 57 |
| 圖 3.4.6 大氣微粒中戴奧辛/呔喃分析流程 | 59 |
| 圖 4.1.1 2011 年至 2017 年間四季天氣類型出現日數 | 68 |
| 圖 4.1.2 採樣期間風花圖 | 74 |
| 圖 4.2.1 粗微粒、細微粒、超細微粒濃度及 $PM_{1.8}/PM_{10}$ 比值圖 | 77 |
| 圖 4.2.2 本研究 PM_{10} 測值與鄰近環保署空品測站監測值比較 | 80 |
| 圖 4.2.3 大氣懸浮微粒粒徑分布圖 | 81 |
| 圖 4.2.4 各季節大氣懸浮微粒濃度之累積百分率圖 | 82 |
| 圖 4.3.1 採樣期間粗微粒水溶性離子成分濃度圖 | 88 |
| 圖 4.3.2 採樣期間細微粒水溶性離子成分濃度圖 | 88 |
| 圖 4.3.3 採樣期間超細微粒水溶性離子成分濃度圖 | 88 |
| 圖 4.3.4 大氣微粒各水溶性離子粒徑分布 | 91 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 圖 4.3.5 採樣期間各粒徑範圍水溶性離子組成百分比 | 93 |
| 圖 4.4.1 採樣期間大氣粗微粒中金屬元素濃度圖 | 104 |
| 圖 4.4.2 採樣期間大氣細微粒中金屬元素濃度圖 | 104 |
| 圖 4.4.3 採樣期間大氣超細微粒中金屬元素濃度圖 | 104 |
| 圖 4.4.4 採樣期間各粒徑範圍金屬元素組成百分比 | 105 |
| 圖 4.6.1 採樣期間風花圖 | 112 |
| 圖 4.6.2 採樣期間大氣微粒之 PCDD/Fs 之組成百分比..... | 115 |



第一章 前言

1.1 研究緣起

台中市為台灣中部之大型都市，總面積約 2215 平方公里，人口數約 279 餘萬人，人口密度約 1260 人/平方公里，為中部地區之重要發展核心。轄區內擁有台中工業區、關連工業區、中部科學園區及清泉崗機場等，為工業及交通樞紐。近年來，隨著經濟、工業及高科技產業快速發展，人口密度及交通工具數量皆大幅增長，且工、商業活動頻繁，致使石化燃料燃燒及工業區排放等人為活動產生之污染大幅提升，造成空氣品質惡化現象發生，進而對人體健康及環境產生直接或間接危害。此外，除人為產生之污染外，空氣品質亦受氣象條件(如：風速、風向及降雨等氣象因子)影響。於特定天氣型態下，大氣條件將影響污染物之擴散及傳輸，對空氣品質產生影響。然而工業化及都市化發展衍生之空氣污染問題日益增加，且民眾對於環境品質要求逐漸提升，因此，空氣品質方面之議題持續受到大眾關注。

由於大氣懸浮微粒之組成及粒徑分布受區域排放特性、地理位置及氣候條件影響，各地區之微粒特性有所差異。東海大學位於台中市西屯區，因鄰近台中科學園區、台中工業區、台中火力發電廠及國道一號和國道三號，空氣品質易受鄰近污染源影響。因此，本研究乃針對工業密集區進行大氣懸浮微粒採樣，並分析其物化組成特性，最後

利用主成分分析探討潛在污染來源。

1.2 研究目的

本研究之主要目的為調查工業密集區大氣懸浮微粒濃度、粒徑分布及化學組成特性，並探討大氣懸浮微粒之潛在污染來源，以了解此區域之大氣懸浮微粒特性，作為未來減量及有效管制之參考及依據。

首先蒐集並彙整大氣懸浮微粒相關文獻及西屯空品測站歷年懸浮微粒監測數據及氣象資料，藉以瞭解大氣懸浮微粒之空氣品質及氣象背景特性，探討易發生懸浮微粒事件日之氣象特徵。並於工業密集區進行大氣懸浮微粒之四季採樣及物化特性分析，藉以探討工業密集區大氣微粒濃度、季節變化趨勢、粒徑分布及化學組成特性，最後再利用主成分分析探討其潛在污染來源。

本研究預期達成目標如下：

1. 蒐集並彙整西屯區空品測站歷年懸浮微粒監測數據及氣象資料，探討易發生懸浮微粒事件日之氣象特徵。
2. 執行工業密集區之大氣懸浮微粒採樣，以瞭解工業密集區大氣懸浮微粒濃度及季節變化趨勢。
3. 分析工業密集區大氣懸浮微粒之物理化學特性。
4. 利用主成分分析解析工業密集區之懸浮微粒潛在污染來源。

第二章 文獻回顧

2.1 大氣懸浮微粒

2.1.1 大氣懸浮微粒形成機制及來源

懸浮微粒 (Particulate Matter) 係指懸浮於空氣中固態或液態之微細顆粒，包括氣膠 (Aerosol)、灰塵 (Dust)、霧 (Fog)、煙霧 (Smog)、靄 (Haze) 及燻煙 (Fume) 等 (Hinds et al., 1999)。一般依微粒粒徑之大小，將粒徑介於 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 之微粒稱為粗懸浮微粒 (Coarse Particles； $\text{PM}_{2.5-10}$)，粒徑小於等於 $2.5\ \mu\text{m}$ 之微粒稱為細懸浮微粒 (Fine Particles； $\text{PM}_{2.5}$)。

Whitby et al. (1976) 依大氣懸浮微粒之粒徑不同，將微粒之形成、粒徑分布、來源及去除機制區分為三類，其中第一類微粒主要分布於粗粒徑範圍，第二類及第三類則分布於細粒徑範圍，如圖 2.1.1 所示：第一類微粒之粒徑大部分大於 $2.0\ \mu\text{m}$ ，主要藉機械力 (Mechanical Force) 產生，包括人為製造及自然產生，像是火山爆發、海鹽飛沫及地表揚塵，或是經工業製程排放所產生之微粒，大多屬於原生性氣膠 (Primary Aerosols)，此類微粒之沉降速度較快，在大氣中去除機制以重力沉降為主；第二類微粒之粒徑大多分布於 $0.08\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 間，形成機制為大氣中氣體經化學反應轉化形成低揮發性蒸氣後，直接形成液滴，或是藉同相成核作用 (Homogeneous Nucleation) 及核凝結生長作用

(Condensation Growth of Nucleus)間接形成液滴或是固體微粒，最後再經由凝聚作用產生微粒。此類微粒因其沉降速度較慢，在大氣中去除方式以濕沉降為主，多屬於衍生性氣膠 (Secondary Aerosols)；第三類微粒之粒徑大部分小於 $0.08 \mu\text{m}$ ，形成機制為高溫蒸氣經冷凝作用產生原生性微粒，再經凝聚及鍵結聚合作用形成微粒，稱為艾特坎核子 (Aitken Nuclei)，因此類微粒較不穩定，短時間內易與其他微粒相互凝聚形成較大微粒，大多屬衍生性微粒。

大氣懸浮微粒依其生成來源可分為自然產生及人為排放，自然產生如沙塵暴、火山爆發及海鹽飛沫等，通常濃度會隨季節變化及區域特性不同而改變；而人為排放可依污染源之排放特性分成固定性污染源 (Stationary Source)及移動性污染源 (Mobile Source)，固定性污染源像是工廠製程排放及燃料燃燒等，移動性污染源則主要來自交通工具排放。

大氣懸浮微粒依其產生機制不同，可分為原生性 (Primary)及衍生性 (Secondary)微粒。原生性微粒係指污染物由污染源直接排放至大氣中，包括自然產生及人為排放兩類，像是：海鹽飛沫、地表揚塵及火山噴發等屬於自然產生，而汽、機車排放尾氣、農業廢棄物燃燒及工業製程活動等則屬於人為產生；衍生性微粒係指排放至大氣中之原生性污染物經複雜之物理及化學反應 (如：光化學反應、勻相反應、

氣固相反應等)所衍生之二次污染物，像是硫氧化物 (SO_x)及氮氧化物 (NO_x)經化學反應形成硫酸鹽及硝酸鹽等微粒，其中硫氧化物及氮氧化物即稱為二次污染物之「前驅物」。通常海鹽飛沫及道路揚塵等原生性微粒屬於粒徑大於 2.5 μm 之粗微粒；而二次污染物則大多屬於粒徑小於 2.5 μm 之細微粒 (Mangelson., 1997)。

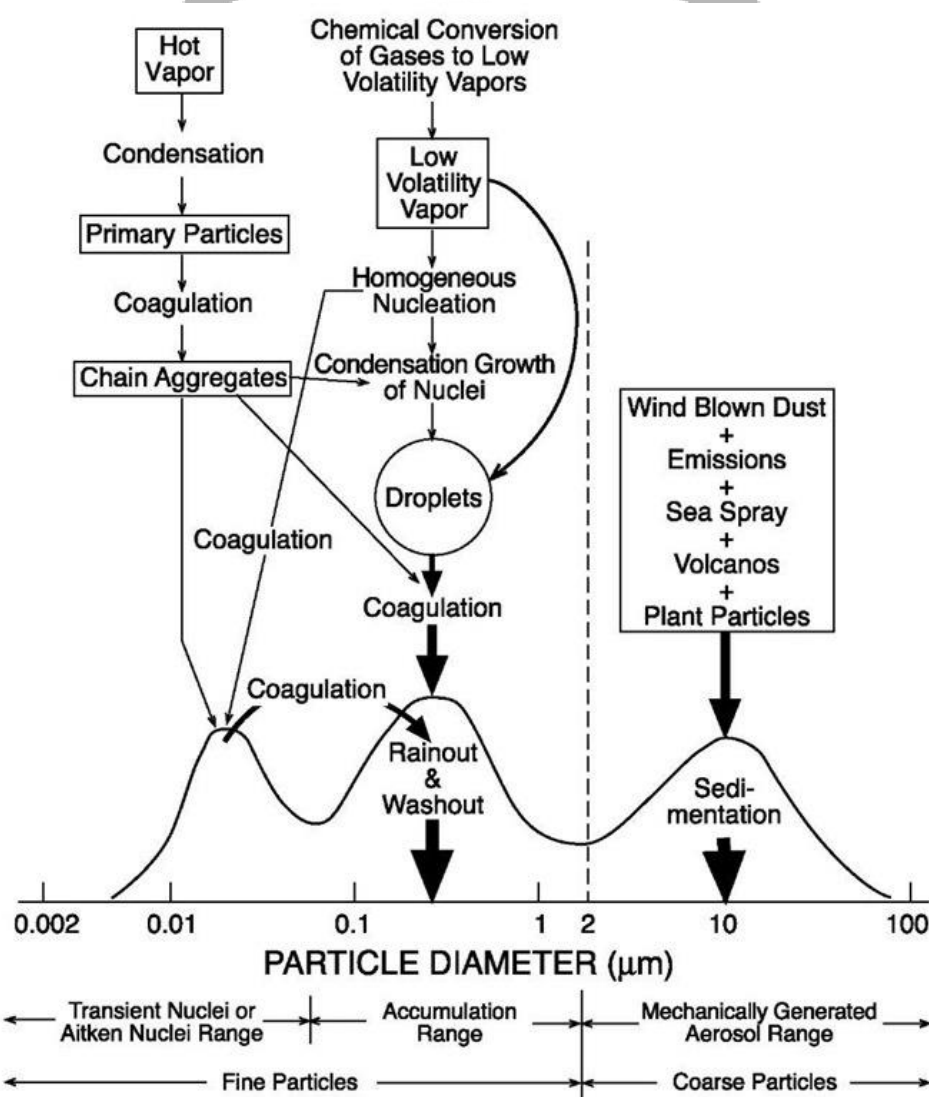


圖 2.1.1 大氣懸浮微粒形成機制及來源 (Whitby et al., 1976)

2.1.2 大氣懸浮微粒粒徑分布

大氣懸浮微粒依其來源及生成機制不同，粒徑分布特性亦不相同，一般微粒粒徑分布介於 0.002~100 μm 間。大氣懸浮微粒粒徑分布如圖 2.1.2 所示，Watson (1998)研究指出：大氣懸浮微粒一般呈典型之三峰分布 (Trimodal Distribution)，依粒徑範圍由大至小依序為粗粒峰 (Coarse Mode)、累積峰 (Accumulation Mode)及凝核峰 (Nucleation Mode)，其中粗粒峰分布於粗粒徑範圍，累積峰及凝核峰則分布於細粒徑範圍。粗粒峰主要經磨碎及撞擊等作用形成，主要成分為地殼物質，粒徑大多大於 2 μm ；累積峰主要由燃燒排放之微粒經凝聚及氣固轉化作用所形成，粒徑範圍介於 0.08~2 μm 間；凝核峰主要經由燃燒過程直接排放或是排放後經低溫冷卻凝結產生，於短時間內可與其他微粒相互凝聚形成較大微粒，粒徑大多小於 0.08 μm 。

大氣微粒之粒徑分布除上述典型之三峰分布，亦有不同之區分方式。John et al. (1990)將微粒粒徑分布分成一個粗粒峰及兩個次微米波峰 (Submicron Mode)，其中次微米波峰可再分成液滴峰 (Droplet Mode，波峰位於 $0.7\pm 0.2 \mu\text{m}$)及凝結峰 (Condensation Mode，波峰位於 $0.2\pm 0.1 \mu\text{m}$)。Kulmala et al. (2004)研究結果指出可將大氣微粒分為四個波峰，依粒徑範圍由大至小依序為：粗粒峰 (粒徑大於 1 μm)、累積峰 (粒徑介於 0.09~1 μm)、艾特坎核峰 (Atiken Nuclei Mode，粒

徑介於 0.02~0.09 μm)及凝核峰 (粒徑介於 0.003~0.02 μm 間)。

由於各區域之地理特性、排放特徵及氣象條件有所差異，因此不同區域大氣懸浮微粒之形成機制、化學組成及粒徑分布亦不相同。通常原生性污染物主要分布於粗粒徑範圍，衍生性污染物則主要分布於細粒徑範圍。此外，依地區及氣候差異，微粒之粒徑分布於沿海地區之微粒大多呈單峰分布型態 (Unimodal Distribution)，大陸地區則呈雙峰分布型態 (Bimodal Distribution)。

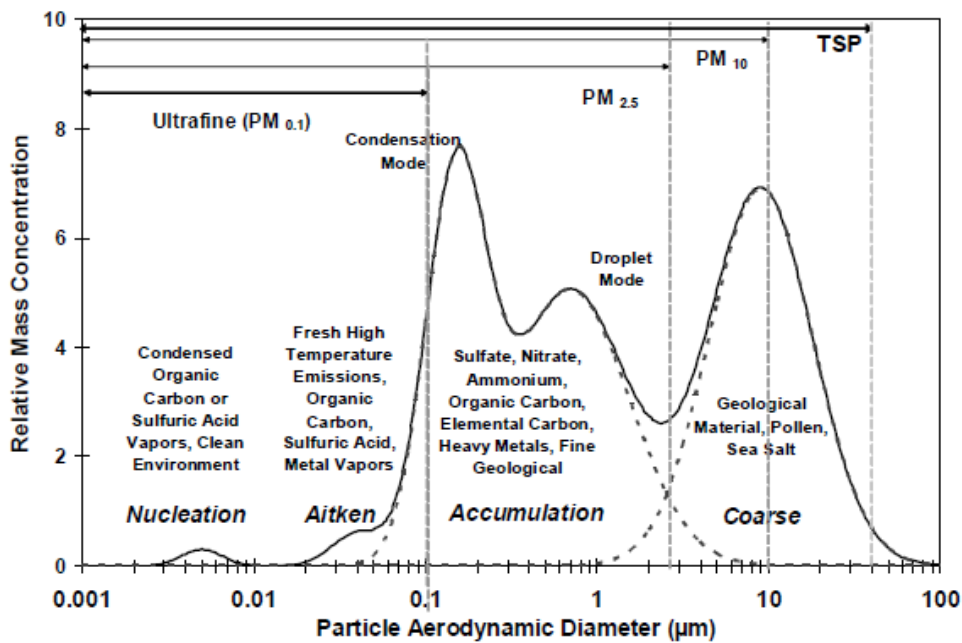


圖 2.1.2 大氣懸浮微粒粒徑分布圖 (Wilson et al., 2002)

2.1.3 各國懸浮微粒濃度標準

台灣於 1992 年制定並發布「空氣品質標準」，期間共進行三次修訂，現行法規為 2012 年修訂之空氣品質標準。目前訂定空氣品質標準之污染物包括：總懸浮微粒 (TSP)、懸浮微粒 (PM_{10})、細懸浮微粒

(PM_{2.5})、二氧化硫 (SO₂)、二氧化氮 (NO₂)、一氧化碳 (CO)、臭氧 (O₃) 及鉛 (Pb)，各項污染物之空氣品質標準值如表 2.1.1 所示。

由於大氣懸浮微粒不僅會造成空氣品質惡化、能見度降低，甚至對人體健康、動植物生長及環境皆會造成影響，因此各國將懸浮微粒視為重要規範項目。表 2.1.2 為各國懸浮微粒濃度標準，由表中得知：國內目前實行之 PM₁₀ 濃度標準值，年平均濃度限值為 65 µg/m³，24 小時限值為 125 µg/m³，相較於其他國家法規標準較為寬鬆。此外，由於近年來對於細懸浮微粒(PM_{2.5})之關注日漸提升，因此各國均將細懸微粒濃度(PM_{2.5})納入空氣品質標準中。美國為第一個將 PM_{2.5} 納入空氣品質標準的國家，於 2006 年修正並訂定 PM_{2.5} 之年平均限值為 15 µg/m³，24 小時平均值為 35 µg/m³，並於 2012 年 12 月將 PM_{2.5} 年平均標準值修訂為 12 µg/m³。而台灣於 2012 年 5 月亦修正空氣品質標準，並將 PM_{2.5} 濃度納入空氣品質標準中，年平均限值為 15 µg/m³，24 小時平均限值為 35 µg/m³。

表 2.1.1 各項空氣污染物之空氣品質標準規定 (資料來源：環保署)

| 項目 | 標準值 | 單位 |
|--|-------------|------|
| 總懸浮微粒 (TSP) | 二十四小時值 | 250 |
| | 年幾何平均值 | 130 |
| 粒徑小於等於 10 微米 (μm)之懸浮微粒 (PM_{10}) | 日平均值或二十四小時值 | 125 |
| | 年平均值 | 65 |
| 粒徑小於等於 2.5 微米 (μm)之懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) | 二十四小時值 | 35 |
| | 年平均值 | 15 |
| 二氧化硫 (SO_2) | 小時平均值 | 0.25 |
| | 日平均值 | 0.1 |
| | 年平均值 | 0.03 |
| 二氧化氮 (NO_2) | 小時平均值 | 0.25 |
| | 年平均值 | 0.05 |
| 一氧化碳 (CO) | 小時平均值 | 35 |
| | 八小時平均值 | 9 |
| 臭氧 (O_3) | 小時平均值 | 0.12 |
| | 八小時平均值 | 0.06 |
| 鉛 (Pb) | 月平均值 | 1.0 |

表 2.1.2 各國懸浮微粒標準值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (資料來源：各國環保署網站)

| 地區 | TSP | | PM ₁₀ | | PM _{2.5} | |
|-----------------|---------|--------|------------------|-------|-------------------|-------|
| | 24 小時 | 年平均 | 24 小時 | 年平均 | 24 小時 | 年平均 |
| | 平均值 | 值 | 平均值 | 值 | 平均值 | 值 |
| 台灣 | 250 | 130 | 125 | 65 | 35 | 15 |
| 香港 | - | - | 100 | 50 | 75 | 35 |
| 中國大陸 (一級/二級) | 120/300 | 80/200 | 50/150 | 40/70 | 35/75 | 15/35 |
| 日本 | - | - | 100 | - | 35 | 15 |
| 韓國 | - | - | 100 | 50 | 50 | 25 |
| 澳洲 | - | - | 50 | - | 25 | 8 |
| 歐盟 | - | - | 50 | 40 | - | 25 |
| 美國 | 260 | 75 | 150 | - | 35 | 12 |

2.1.4 大氣懸浮微粒對人體之影響

近年來國內外已有許多相關研究發現大氣懸浮微粒會對人體健康造成影響，包括：過敏、呼吸系統疾病、肺功能下降、心血管疾病、肺癌及早逝等，而微粒之濃度、化學組成及粒徑大小等，對人體健康之危害均具關聯性。人體對於懸浮微粒之暴露程度除受當地條件影響，如：氣候條件、地形及污染排放來源等，亦與人體生理特徵相關，像是：呼吸方式、頻率及呼吸量等，其中造成人體健康危害之主要因素為微粒粒徑大小 (Casati et al., 2007; Brown et al., 2013)。

大氣中微粒主要藉由人體呼吸作用進入人體內部，依微粒粒徑之大小而沉積於不同器官內，對人體健康產生不同危害。通常粒徑大於 $10\ \mu\text{m}$ 以上之微粒大部份可經由鼻腔去除，或是沉積於鼻咽處，只有少部分微粒能進入人體呼吸道，易產生過敏、氣喘等症狀；粒徑介於 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 之微粒會被鼻腔內纖毛截留，或是經由人體呼吸道進入而沉積於上下呼吸道；粒徑小於 $2.5\ \mu\text{m}$ 之微粒，由於其粒徑較小，因此容易深入至支氣管、肺泡及肺泡組織中，易造成支氣管炎、支氣管纖維化及肺水腫等症狀 (Londahl et al., 2006)。圖 2.1.3 顯示不同粒徑範圍之微粒於人體各部位之沉積率。

過去研究發現當大氣懸浮微粒濃度增加時，易導致氣喘、心血管疾病及支氣管發炎等症狀發生，Samet et al. (2000)研究結果指出當 PM_{10} 濃度提高 $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 時，死亡率增加約 1%；Pope et al. (2002)研究顯示每當大氣中 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度增加 $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 時，人體對於全因死亡、心肺疾病及肺癌之死亡率風險會分別提高 4%、6%及 8%；Tecer et al. (2008)研究發現 $\text{PM}_{2.5-10}$ 濃度上升 $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 時，當天氣喘患者人數約增加 18%。而 Brook et al. (2010)研究結果則顯示：暴露於 $\text{PM}_{2.5}$ 環境中數小時至數天會引發心血管疾病，當濃度提高 $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 時，心血管死亡率增加 0.4%~1.0%。

此外，Brauer et al. (2012)研究顯示幼童及老年人或是罹患心肺疾

病者，因懸浮微粒導致疾病問題之風險較一般人高，結果指出兒童暴露於懸浮微粒環境中，其肺部發育會受到影響，導致肺功能缺陷及肺生長速率降低等；而美國國家流行病學研究發現在調整肥胖及種族條件等風險因子後，成人糖尿病與懸浮微粒仍具高度相關性存在 (Pearson, 2010)。

綜上所述，目前已有許多研究結果證實懸浮微粒對於人體之呼吸系統和心肺疾病等健康問題會造成危害，因此有效規範及管理空氣品質相當重要，以維持良好空氣品質並降低人體健康危害之風險。

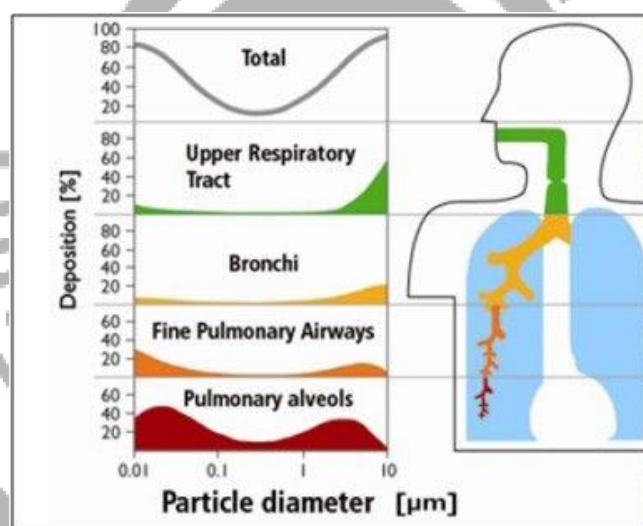


圖 2.1.3 各粒徑範圍之微粒於人體各部位之沉積百分比

(來源：ICAO Information Paper CAEP-SG/ 20082-IP/05)

2.2 台灣地區大氣懸浮微粒濃度變化

謝岳書 (2013)於 2011 年至 2012 年間於北部地區四縣市同步進行大氣懸浮微粒採樣，研究結果顯示夏季期間 (7 月至 9 月)PM_{2.5} 濃度介於 17.6~45.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 間；秋季期間 (10 月至 12 月) PM_{2.5} 濃度介於

13.1~23.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 間；冬季期間 (1 月至 3 月) $\text{PM}_{2.5}$ 濃度介於 37.1~51.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 間；春季期間 (4 月至 6 月) $\text{PM}_{2.5}$ 濃度介於 15.4~52.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 間，結果顯示冬季及春季期間測得之 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度高於夏季及秋季期間。

Lin et al. (2015)於 2011 年 5 月至 2013 年 10 月間於台北市、新北市及新竹縣進行 $\text{PM}_{2.5}$ 及超細微粒 ($\text{PM}_{0.1}$)採樣，研究結果指出三測站於春季 (3 月至 5 月)及夏季 (6 月至 8 月)期間， $\text{PM}_{0.1}$ 濃度高於秋季 (9 月至 11 月)及冬季 (12 月至 2 月)，推測可能因夏季氣候較溫暖，益發生光化學反應形成微粒，導致超細微粒濃度較其他季節高。此外，採樣期間於新竹縣竹東測站所量測 $\text{PM}_{0.1}$ 濃度較其餘測站低，推估因新竹測站地形環山，且人為活動及交通排放較少，導致該地區超細微粒濃度較低。而 $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度於三測站皆以夏季最低，推測為氣候條件所影響。

李崑璋 (2014)於 2009 年於台中都會區進行懸浮微粒採樣，結果顯示 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度介於 4.3~69.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 間，平均濃度為 $32.6 \pm 14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，為法規標準限值 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)2.2 倍，各採樣日 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度高於法規標準值佔全部樣本共 43%。

鄭至庭 (2015)於 2015 年於南投縣埔里地區以高量採樣器進行日/夜間 $\text{PM}_{2.5}$ 及 $\text{PM}_{2.5-10}$ 採樣，研究結果指出 $\text{PM}_{2.5}$ 日間及夜間平均濃度分別為 52.9 及 54.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； $\text{PM}_{2.5-10}$ 日間及夜間平均濃度分別為 15.1

及 $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。PM_{2.5}/PM₁₀ 日間及夜間平均比值皆為 0.8。

Tseng et al. (2016)於 2014 年至 2015 年間於嘉義地區進行大氣懸浮微粒採樣，研究結果顯示 PM_{2.5} 濃度於冬季最高 ($50.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，其次依序為春季 ($45.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、秋季 ($44.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，夏季濃度最低 ($12.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。此外，PM_{2.5}/PM₁₀ 比值於夏季期間較低，推測可能因夏季降雨頻繁，大氣中原生性細微粒及衍生性前驅物可被移除。

蔡仁雄 (2006)於 2005 年至 2006 年間於潮州地區進行大氣懸浮微粒採樣，結果指出 PM_{2.5} 平均濃度於四季分別為 51.3、34.5、56.9 及 $86.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，冬季濃度最高，夏季最低，推測可能因冬季常有農業廢棄物之燃燒，導致懸浮微粒濃度提升。

Yang et al. (2017)於 2014 年 12 月至 2015 年 5 月間於高雄前金區、小港區及屏東車城鄉進行 PM_{2.5} 採樣，分別做為郊區、都市及背景測站，研究結果指出 PM_{2.5} 濃度於前金及小港地區均高於車城地區。此外，前金及小港地區於 2014 年 12 月至 2015 年 3 月間所量測之 PM_{2.5} 濃度高於 2015 年 4 月至 5 月之 PM_{2.5} 濃度，而車城地區於採樣期間 PM_{2.5} 濃度並無明顯變化。PM_{2.5}/PM₁₀ 比值除 2015 年 5 月之外，皆高於 0.5，顯示台灣南部地區微粒組成以細微粒為主。

黃元勳 (2006)於 2004 年至 2005 年間於屏東地區以 MOUDI 進行懸浮微粒採樣，結果顯示 PM_{2.5-10}、PM_{2.5}、PM₁ 及 PM_{0.1} 平均濃度依

序為 18.1、56.0、40.0 及 3.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此外，採樣結果指出 $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度於四季分別為 48.6、37.2、61.7 及 64.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中冬季濃度最高，夏季濃度最低。而 $\text{PM}_{0.1}/\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 及 $\text{PM}_{2.5-10}/\text{PM}_{10}$ 比值分別為 0.05、0.55、0.75 及 0.25，其研究結果顯示屏東郊區微粒以細微粒為主。

綜上所述得知各區域由於地理特性、排放特徵及氣象條件有所差異，因此不同區域之大氣懸浮微粒濃度亦不相同。

2.3 大氣懸浮微粒之化學組成特性

大氣懸浮微粒之化學組成主要由水溶性陰陽離子、金屬元素及碳成分（包含元素碳及有機碳）所組成，各地區因地理環境、氣候條件及排放源不同，微粒之組成亦有所差異。

2.3.1 水溶性離子組成特性、來源及粒徑分布

大氣懸浮微粒之組成中水溶性離子約佔 20~60%，主要成分包括： F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 等，其來源包括自然產生及人為排放，像是道路揚塵、海水飛沫及工業排放等，大部分以化合物之型態存在於大氣中。上述離子中， Na^+ 及 Cl^- 主要源自於海水飛沫，其中部分 Cl^- 源自於氯化氫與鹼性氣體生成之衍生性微粒； Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 K^+ 大多來自土壤灰塵及道路揚塵等，少部份源自於海水飛沫； NH_4^+ 之前驅物為 NH_3 ，主要由農業及畜牧業活動之有機物

質腐化所生成或是 NH_4 之逸散； F^- 可能來自高溫金屬冶煉工業所產生之氟化物； NO_3^- 可能經由交通源排放之尾氣或是固定源排放之 NO_x 經化學反應所生成； SO_4^{2-} 則可能來自工業製程排放、石化燃料之燃燒或是交通源等人為排放 (Lin, 2002; Chang et al., 2006)。

一般可將大氣微粒中水溶性離子大致分成海水飛沫及人為排放兩類，海水飛沫離子包括 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Cl^- 等，可能形成 NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 、 Na_2SO_4 、 MgCl_2 及 CaCl_2 等物種，而沿海地區之微粒組成通常海水飛沫貢獻量較其他地區大，常以 Na^+/Cl^- 比值衡量大氣微粒受海鹽飛沫之影響程度；人為排放離子主要為 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 等，主要由人為活動產生之 NO_x 及 SO_x 經大氣化學反應，可能形成 NH_4NO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4HSO_4 及 $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$ 等物種。其中，經二次光化學反應所形成之硫酸鹽、硝酸鹽及銨鹽，為大氣微粒中水溶性離子主要貢獻源，約佔微粒濃度之 10~40% (Tsai and Chen, 2006; Moreno et al., 2003)。

張凱倫 (2004) 於高雄市潮州及大寮地區採集之微粒化學組成分析結果顯示，無機鹽類組成中，以 SO_4^{2-} 所佔比例最高(8.0%)，其次依序為 NH_4^+ (5.4%) 及 NO_3^- (3.9%)，其餘 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Cl^- 等離子共佔約 4.6%，未分析之組成則佔 78.1%。而 SOR/NOR 比值則顯示硫酸鹽及硝酸鹽之轉化作用主要發生於細微粒間 (0.18~1.8 μm)。

廖建欽 (2013)於 2012 年 7 月至 2013 年 5 月間於馬祖閩江口海域及大陸福州地區進行懸浮微粒採樣及化學組成分析，結果顯示各季節之水溶性離子皆以衍生性氣膠為主，佔水溶性離子組成約 70%，其中又以 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 為主。而微粒中和比 (NR) 均小於 1，指出該區域受境外傳輸影響，將上風處之酸性污染物帶至閩江口，導致微粒偏酸性。

劉育甫 (2009)於琉球嶼進行大氣懸浮微粒之物化特性分析，結果顯示水溶性離子組成包括 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 等二次衍生性氣膠及 Na^+ 、 Cl^- 等海鹽飛沫，其中 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 約佔總濃度 40%，顯示該區域之微粒組成以人為污染產生之二次污染物為主。

Stone et al. (2011)於南韓分別進行沙塵事件日、微粒事件日及一般日之微粒採樣分析，結果顯示沙塵事件日期間 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 NH_4^+ 之濃度於沙塵事件日中依序為 22.9、1.78 及 6.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；於微粒事件日中依序為 55.1、8.41 及 18.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；於一般日中依序為 9.57、1.22 及 3.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中沙塵事件日期間微粒之 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 NH_4^+ 濃度較一般日分別高 1.5、2.4 及 1.9 倍。

Deshmukh (2011)於 2009 年 7 月至 2010 年 6 月間於印度進行大氣懸浮微粒採樣及水溶性離子組成分析，研究結果顯示 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 年平均濃度分別為 135.0 及 64.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。水溶性離子於 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 上

分別佔 11.57 及 16.98%，而 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 為主要貢獻物種。冬季期間因燃燒活動及工業排放之增加，導致該地區之 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 K^+ 及 NH_4^+ 濃度提升；而春季及夏季期間因氣候較乾燥，土壤揚塵易再懸浮，導致 Na^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 濃度之增加。

Dongarra et al. (2010) 於義大利進行 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 採樣及分析，結果顯示水溶性離子成分約佔 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度之 31~47%，其中地殼元素及海鹽飛沫分別約佔 49% 及 41%，而 NH_4^+ 及 NO_3^- 則約佔 14~29%。

此外，大氣懸浮微粒之粒徑分布主要與其來源及形成機制相關，彙整國內外對於懸浮微粒中水溶性離子之粒徑分布之文獻，結果顯示 NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 等二次氣膠主要分布於細微粒； Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 及 Ca^{2+} 等海鹽飛沫及地殼元素則主要分布於粗微粒中。

陳佩娟 (2013) 於 2000 年至 2002 年間於高美濕地 (海岸區) 及台中霧峰 (內陸區) 進行採樣，結果顯示 Mg^{2+} 及 Ca^{2+} 主要分布於粗微粒， SO_4^{2-} 主要分布於細微粒，而 NO_3^- 則依地區不同，粒徑分布亦有所差異，若採樣地點位於海岸區， NO_3^- 於夏、秋季主要分布於粗粒徑範圍，春、冬季主要分布於細粒徑範圍；若地點移至內陸區則 NO_3^- 粒徑分布以細粒徑為主。

蘇怡如 (2006) 於 2005 年進行農業廢棄物燃燒、沙塵暴期間及一

般日之微粒特性探討，結果顯示農廢燃燒事件日期間，微粒中 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 及 NH_4^+ 較一般日分別增加 4.3、3.2、2.3、4.0 及 2.7 倍，而 Cl^- 及 K^+ 主要波峰位於 1.0~1.8 μm 處，與一般日波峰分布於 3.2~5.6 μm 不同，推測可能為稻草燃燒產生 Cl^- 及 K^+ ，形成氯化鉀微粒；沙塵暴期間 $\text{PM}_{2.5-10}$ 中 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 及 NH_4^+ 濃度皆較一般日高，增加約 1.7~3.8 倍，其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 及 NO_3^- 呈單峰分布，波峰位於 3.2~5.6 μm 處，推測為大陸沙塵暴經長程傳輸帶來之海鹽飛沫及塵土微粒，而 SO_4^{2-} 則呈現雙峰分布，分別位於 0.56~1.0 μm 及 3.2~5.6 μm 處，推測粗微粒部分為細微粒硫酸鹽與塵土反應形成粗粒徑硫酸鹽微粒。

Yin (2014) 於 2010 年至 2011 年間於大陸沿海地區進行 $\text{PM}_{2.5}$ 及 $\text{PM}_{2.5-10}$ 採樣，研究結果顯示微粒上水溶性無機離子佔 $\text{PM}_{2.5}$ 約 42.2~50.1%，以 SO_4^{2-} 及 NH_4^+ 為優勢物種。其中 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 及 Ca^{2+} 主要分布於粗微粒； K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 主要分布於細微粒中；而 NO_3^- 於夏季期間主要分布於粗微粒，冬季期間則主要分布於細微粒，推測可能因溫度對於不同粒徑之 NO_3^- 形成造成影響。

Chen et al. (2015) 於大陸南京地區進行大氣採樣，其研究結果顯示 Ca^{2+} 濃度會隨粒徑大小縮減而降低，其餘 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 等離子其濃度則隨粒徑縮小而增加。 Na^+ 及 Mg^{2+} 主要貢

獻來源為海鹽飛沫，主要分布於粗微粒中； NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 NH_4^+ 之 $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{10}$ 比例分別為 70、70 及 95%，結果指出衍生性氣膠主要分布於細微粒中。

Zhao and Gao (2008)於美國東海岸進行微粒之物化特性研究，結果顯示 SO_4^{2-} 為細微粒之優勢物種，佔 $\text{PM}_{0.1}$ 約 31%，其最大波峰位於 $0.032\sim 0.56\ \mu\text{m}$ 間； NO_3^- 則呈現雙峰分布，波峰分別位於 $0.32\sim 0.56\ \mu\text{m}$ 及 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 間。

2.3.2 金屬元素組成特性及來源

大氣懸浮微粒中金屬元素組成根據來源不同，組成特性亦有所差異，依來源主要可分成自然產生及人為排放兩類，大多皆以粒狀物形態經氣流傳送或重力沉降作用存在於大氣中。自然產生包括海鹽飛沫、火山噴發及地表揚塵等，金屬元素以 Na、Al、Ca、Fe、Mg 及 Si 等為主；人為污染源排放之金屬元素主要為工業製程、交通排放及廢棄物焚化等產生，一般可將人為排放源分為固定污染源、移動污染源及逸散性污染源三類，其涵蓋物種較廣，組成較複雜，主要金屬元素包括：Cd、Cr、Zn、Mn、Ni、Co、Cu、Pb、As 及 V 等，而大部分金屬元素皆以人為排放為主。

近年來已有許多研究探討大氣微粒中金屬成分可能來源，Al、Fe、Na、Mg、K 及 Ca 主要來自道路揚塵及海鹽飛沫；V 及 Ni 主要與燃

料油之燃燒相關；K 主要源自生質燃燒；Zn、Pb、Sb 及 Cu 主要來自車輛輪胎及煞車磨損；Mn、Fe、Al、V 及 Cr 與金屬冶煉相關 (Lough et al., 2005; Smichowski et al., 2008; Hsu et al., 2004; Viana et al., 2008; Pachon et al., 2013; Yu et al., 2013; 李崑瑋, 2014)。

廖嘉政 (2012)於 2011 年至 2012 年間於高雄小港區某鋼鐵廠進行周界及周邊地區敏感點進行懸浮微粒採樣，其金屬元素組成分析結果顯示，廠區周界及周邊敏感地區皆以 Al、Fe、Ca 及 K 為主，廠區周界污染來源主要為製程逸散、燃燒排放及道路揚塵等，而周邊敏感地區則受盛行風向影響，金屬元素濃度於 PM₁₀ 中較高，其來源以工業排放、交通源污染及道路揚塵為主。

謝岳書 (2013)於北部進行特定區域之微粒物化特性分析，研究結果顯示大氣微粒中金屬成分以 Al、Ca、Fe、K、Mg 及 Na 為主要金屬元素；工業區以 Cu、Mn、Pb 及 Zn 濃度較高；柴油車密集區以 Al、Ca、Cr、Cu、Fe 及 Ni 濃度較高；隧道、地下道及地下停車場中以 Cr、Cu、Fe、Mn 及 Zn 含量較高。

魏宇鴻 (2014)於屏東地區進行大氣細懸浮微粒濃度及組成特性研究，結果顯示大氣 PM_{2.5} 上金屬成分以 Mg、Al、Ca 及 Fe 等地殼元素為主，佔總金屬濃度比例約 85.0%，其餘由人為活動排放產生之金屬元素則以 Zn、Ni 及 Pb 為主要物種。

Chen et al. (2015)於雲林地區進行事件日及非事件日之微粒物化

特性分析，結果顯示事件日及非事件日期間，Al、Ca 及 Fe 於 PM_{2.5} 及 PM_{2.5-10} 上皆為優勢物種，約佔 75~85%。其中在微粒事件日發生期間，Pb 及 As 於細微粒中濃度分別提升 132% 及 116%，而 Fe、Al、Mn、Ti 及 Co 於粗微粒中濃度則分別增加 223%、220%、214%、210% 及 115%。

丁振洲 (2015) 於楠梓加工出口區進行懸浮微粒採樣及分析，結果發現 PM_{2.5} 之金屬組成於各季節皆以地殼元素為主，包括：Al、Fe、Ca、Mg、K 及 Na，主要源自於環境中土壤灰塵及地表揚塵等，佔總濃度約 45%。此外，非金屬元素 S 及 B 所佔比例分別為 41 及 15%，研判為交通工具排放及煉油廠製程所貢獻。

Li et al. (2013) 於 2009 年至 2010 年間於廈門灣進行大氣微粒之微粒濃度及化學特性分析，研究結果顯示微粒金屬組成中地殼元素 (包括：Ca、Mg、Fe 及 Al) 之濃度高於人為排放產生之金屬元素 (包含：Zn 及 Pb)。於春季及夏季期間，Pb、Cu、Zn 及 As 夜間濃度高於白天濃度；而秋季及冬季期間，白天濃度則是高於夜間濃度。

Hueglin et al. (2005) 於瑞士地區進行懸浮微粒之物化特性分析，結果顯示地殼元素主要分布於粗微粒中，微量元素主要分布於細微粒中。其中，Ba、Ca、Cu、Fe、Mo、Mn、Pb、Sb、Rh、La 及 Ce 之濃度隨道路距離遞增而降低。而 Al、As、Cd、K 及 V 濃度變化小，顯示

此地區主要受長程傳輸所影響。

Sun et al. (2006)於北京地區進行大氣微粒上金屬元素組成分析，結果顯示於高污染事件日期間，微粒中經人為排放產生之金屬元素(包含：Zn、Pb、Cu 及 As)濃度顯著增加，推測為當地燃煤等污染源排放所累積或是由都會區輸送污染物至當地相關。

Wahlin et al. (2006)於丹麥進行交通源微粒上金屬元素來源之探討，其研究結果指出，PM_{2.5} 及 PM_{2.5-10} 微粒上 Fe、Cu 及 Zn 主要來自交通工具之煞車系統或輪胎摩擦所導致，而 Ca、Al、Fe 及 K 則源自於道路揚塵所貢獻。

Ntziachristos et al. (2007)於美國南加州高速公路旁進行大氣懸浮微粒之採樣，結果顯示 PM_{1.8} 微粒中之金屬元素主要為 Fe、Sb、Cu、Mo、Ca、Ba 及 P，而 PM_{0.18-2.5} 微粒中則以 Cu、Sb、Ba 及 Fe 為主，推測為汽、機車排放所導致。

Oliveria et al. (2010)於葡萄牙進行道路交通對於懸浮微粒影響之探討，結果顯示日夜間道路旁大氣微粒中金屬組成以 Fe、S、Si、K、Zn、Ca 及 Al 為主，其中微粒上 Al 及 Si 研判約 30~50%源自於道路揚塵所貢獻。

2.3.3 戴奧辛組成特性及來源

戴奧辛 / 呔喃 為 多 氯 二 聯 苯 戴 奧 辛 (PolyChloriated

Dibenzo-p-Dioxins，簡稱 PCDDs)及多氯二聯苯呋喃 (PolyChlorinated DibenzoFurans，簡稱 PCDFs)之總稱，由一個或兩個氧原子聯結一對苯環類化合物組成，苯環上之氯原子數目可為 1 至 8 個，因氯原子數目及鍵結位置不同，為 210 種化合物之總稱，其中包括 75 種多氯二聯苯戴奧辛及 135 種多氯二聯苯呋喃，其化學結構如圖 2.3.1 所示。

PCDD/Fs 依來源可分為自然及人為產生，自然生成之 PCDD/Fs 像是燃燒天然木材及森林火災，人為產生包括廢棄物焚化、含氯塑膠物之燃燒、工業原料製程之副產物、金屬冶煉及含氯化合物之製造(如：殺蟲劑及木材防腐劑)等。而大氣中 PCDD/Fs 主要來源係由人為活動所產生，其中又以燃燒程序為戴奧辛主要生成來源。

Chen et al. (2004)研究指出台灣以二次銅煉廠為主要 PCDD/Fs 之排放貢獻來源，約佔 39%，大型都市垃圾焚化廠次之，約 23.7%，其餘重要排放源包括：煉焦爐、電弧爐、二次鋁精煉廠、工業用油燃燒及電廠，皆大於 5%。研究指出義大利北部主要之 PCDD/Fs 排放源為都市垃圾焚化爐，約佔總排放量 32%，電弧爐次之，約 26%，再次之依序為柴油車 (10%)、住宅木材燃燒 (7%)、二次鋁精煉廠 (9%) 及水泥製造 (5%) (Caserini and Monguzzi, 2002)。

PCDD/Fs 依氯原子數目不同，具不同之毒性強度，而 210 種戴奧辛異構物中，僅 17 種 PCDD/Fs 具毒性，其餘毒性極低，甚至不具毒

性。為計算戴奧辛毒性，國際針對 PCDD/Fs 採用不同之毒性當量因子 (Toxic Equivalent Factor, 簡稱 TEF) 對其毒性進行量化。其中將毒性最強之 2,3,7,8-TCDD 之 TEF 值訂為 1.0，其餘同源物之毒性則與 2,3,7,8-TCDD 相比，訂為 0 至 0.5 不等。測定個別之 PCDD/Fs 濃度後，再與 TEF 值相乘，得出之值即為毒性當量 (Toxicity Equivalency Quantity, 簡稱 TEQ)，而樣品之毒性大小即為所有 TEQ 值總和。此外，國際衛生組織將 TEF 值進行修正，訂定不同之毒性當量係數。常採用之 TEF 值如表 2.3.1 所示。目前我國對於 PCDD/Fs 之管制以 I-TEF 為換算基準，世界各國目前亦多採用 I-TEF 為管制基準。

大氣擴散及沉降將影響空氣中污染物與地面、水體及植物等所承受之污染量，影響大氣中 PCDD/Fs 濃度之因子包括：光解及 OH 自由基轉化效應、風速及風向、溫度、雨量、大氣邊界層溫度及季節性污染源 (像是冬季木材燃燒、稻作收割期等) 等 (Green et al., 1996; Lorber et al., 1998)。而大氣中 PCDD/Fs 之濃度主要受各區域之人為活動影響，表 2.3.2 為歸納國內外對於大氣 PCDD/Fs 濃度之研究，結果顯示各國及各區域之戴奧辛濃度分布有所差異。

表 2.3.1 PCDD/Fs 毒性當量因子

| PCDD/Fs | FQO ¹ | Nordie ² | I-TEF ³ | WHO ⁴ |
|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 2,3,7,8-TeCDD | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 1,2,3,7,8-PeCDD | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 1.0 |
| 1,2,3,4,7,8-HxCDD | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,6,7,8-HxCDD | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,7,8,9-HxCDD | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| OCDD | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.0001 |
| 2,3,7,8-TeCDF | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,7,8-PeCDF | 0.1 | 0.01 | 0.05 | 0.05 |
| 2,3,4,7,8-PeCDF | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 1,2,3,4,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,7,8,9-HxCDF | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 2,3,4,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| OCDF | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.0001 |

註：¹德國衛生部；²北歐；³國際；⁴世界衛生組織

表 2.3.2 各國大氣 PCDD/Fs 之濃度

| 城市 (國家) | pg I-TEQ/Nm ³ | 文獻來源 |
|---------|--------------------------|---------------------|
| | 3 月：0.010-0.129 | |
| | 5 月：0.007-0.079 | |
| 台灣空品測站 | 8 月：0.009-0.031 | 環保署 (2017) |
| | 10 月：0.005-0.031 | |
| 台灣 | 0.058~0.260 | 陳俊吉 (2005) |
| 台中 | 0.012~0.225 | 山口俊政 (2015) |
| 高雄 | 0.05 | Wang et al., 2002 |
| | 夏季：0.03-0.43 | |
| 香港 | 冬季：0.018-0.025 | Sin et al., 2002 |
| 韓國 | 0.057 | Rahman et al., 2014 |
| 東京 | 0.45 | Ogura et al., 2002 |
| 橫濱 | 0.54 | Ogura et al., 2002 |
| 上海 | 0.268 | Li et al., 2008 |
| | 夏季：0.069 | |
| 天津 | 冬季：0.509 | Ding et al., 2012 |
| 西班牙 | 0.017~0.140 | Abad et al., 2007 |

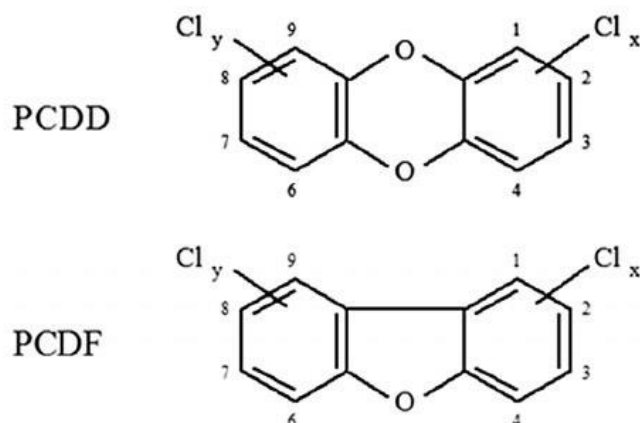


圖 2.3.1 PCDD/Fs 之化學結構

2.3.4 工業區及科學園區大氣懸浮微粒特性之相關研究

蘇建中 (2000)於新竹科學園區進行懸浮微粒採樣及物化特性分析，結果顯示水溶性離子組成以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 及 NH_4^+ 為主，金屬元素組成以 Al、Fe 及 Ca 等地殼元素為主。此外，園區內之微粒中 As 及 Se 等元素濃度較高，推測可能為科學園區內之半導體製程所貢獻。

陳勁宇 (2011)於南部科學園區以微孔均勻沉積衝擊器及分道採樣器採集大氣懸浮微粒，並進行微粒之化學組成分析。研究結果顯示園區之微粒皆呈雙峰分布，主峰位於粗粒徑範圍 (3.2~5.6 μm)，次峰則位於細粒徑範圍 (1.0~1.8 μm)。園區大氣 $\text{PM}_{2.5}$ 上水溶性離子、碳成分及金屬元素所佔比例依序為 50、34 及 9%； $\text{PM}_{2.5-10}$ 上所佔比例則依序分別為 26、33 及 12%。而微粒上水溶性離子以 NH_4^+ 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 等二次氣膠為主，其於 $\text{PM}_{2.5}$ 上所佔比例達 85%；於 $\text{PM}_{2.5-10}$

上所佔比例約 60%。

張弘澤 (2012)於楠梓加工區進行大氣微粒特性分析，結果顯示採樣期間微粒濃度介於 $54.7\sim 203\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 間，且於秋 (9 至 11 月)、冬 (12 至 2 月)兩季之微粒濃度大於春季 (3 至 4 月)及夏季 (5 月至 8 月)期間之微粒濃度，其中細微粒佔總濃度約 50%。而微粒之金屬組成以 Al、Fe、Ca、Mg、K 及 Na 等地殼元素為主。

吳慈敏 (2012)於南部科學園區進行大氣總懸浮微粒、粗微粒及細微粒採樣，研究結果顯示大氣微粒皆呈雙峰分布，主峰及次峰分別位於細微粒 ($0.32\sim 1\ \mu\text{m}$)及粗微粒 ($2.5\sim 5.6\ \mu\text{m}$)上。大氣 $\text{PM}_{2.5}$ 及 $\text{PM}_{2.5-10}$ 之水溶性離子分別約佔微粒濃度 30~50%及 31~43%，其中皆以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 等衍生性氣膠為主，約佔 80%以上。各粒徑範圍之微粒金屬總濃度約 97%由 Na、Mg、Al、K、Ca、Fe、Ni 及 Zn 所貢獻。

林人杰 (2013)於中科后里園區進行大氣懸浮微粒採樣，研究結果顯示園區周界大氣懸浮微粒約 50~60%由細微粒所貢獻。微粒上水溶性離子以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 等衍生性氣膠為主，其中細微粒以 SO_4^{2-} 含量最多，粗微粒則以 NO_3^- 含量最多。而園區大氣微粒上海鹽 (Na^+ 及 Cl^-)及地殼元素 (K^+ 、 Mg^{2+} 及 Ca^{2+})組成之含量較沿海地區低。

丁振洲 (2015)於楠梓加工出口區進行微粒採樣及物化特性分析，結果顯示採樣期間細懸浮微粒平均質量濃度為 $25.3\sim 44.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，微粒

濃度於秋、冬兩季明顯高於春、夏兩季。而 $PM_{2.5}$ 中金屬組成以 Al、Fe、Ca、Mg、K 及 Na 等地殼元素為主，佔總濃度約 45 %，主要來自土壤再懸浮及環境中粉塵。此外，非金屬元素 S 及 B 分別佔約 41% 及 15%，推測與車輛排放及加工區鄰近煉油廠之高能燃料製程相關。

Chen et al. (2016)於台中科學園區進行懸浮微粒之採樣及分析，研究結果顯示園區中超細微粒之金屬組成以 V、As、In、Cu、Ga 及 Cd 為主。於粒徑 $0.32 \mu m$ 之微粒，其金屬成分 Ga 推測可能來自光電導體產業所貢獻。此外，研究亦發現超細微粒上 Ga 及 As 對於科學園區周遭居民具潛在健康風險。

林彥儒 (2017)於南部半導體工業區進行 $PM_{2.5}$ 事件日及一般日大氣 $PM_{2.5}$ 採樣及金屬組成特性分析，研究結果顯示事件日期間微粒濃度均較非事件日期間增加，且 $PM_{2.5}$ 濃度於事件日及非事件日期間，夜間濃度皆較日間濃度高，分別增加 2.4% 及 23%。而微粒上金屬組成以 Na、K、Ca、Al、Fe、Mg 及 Zn 為主，佔總金屬組成達 97 %。

Ragosta et al. (2008)於義大利工業區進行懸浮微粒特性分析，研究結果顯示採樣期間 $PM_{2.5}$ 濃度介於 $0.04 \sim 117 \mu g/m^3$ 間，平均濃度為 $13 \mu g/m^3$ 。由加強因子分析結果顯示 Cd、Zn、Pb、Cr、Ni 及 Cu 之 EF (Enrichment Factor) 值遠高於 10，指出上述金屬元素由人為污染所產生，Ni、Cr 及 Cu 推測來自工業製程，而 Pb、Zn 及 Cd 則與交通車

輛排放廢氣相關。

Lim et al. (2010)於韓國工業區進行微粒採樣及金屬組成分析，結果顯示金屬元素組成濃度佔 PM₁₀ 質量濃度約 6%，其中以 Al、Fe 及 K 等地殼元素濃度較高。此外，研究結果亦指出可將 As、Cd、Cr、Mn、Ni、Pb 及 Zn 視為區別工業區及住宅區之指標元素。

2.4 大氣懸浮微粒及氣象因子相關性研究

空氣品質除受當地污染源排放影響之外，亦可能因地理特性或是季節變化而受當時之天氣型態影響，導致擴散不良之情況發生，且許多大氣條件會使大氣中污染物濃度提升，像是沉澱、輻射及大氣穩定度等。若污染源排放變化不大時，則區域性空氣品質主要受當地氣象條件（如：逆溫層高低、混合層高度、水平及垂直風速大小及降雨等）所控制，對大氣中污染物之傳輸及擴散能力造成影響。

2.4.1 天氣型態

局部地區空氣品質條件受氣象因子變化及天氣型態影響，國內外已有許多學者對於空氣污染及天氣型態間關聯性進行相關之研究。

楊宏宇 (1992)將台灣天氣型態分成 25 種，研究結果指出台灣各地區 PM₁₀ 污染較嚴重之天氣型態如下，北部地區為 A3 (鋒面滯留型)、A9 (高壓出海型 II)、A11 (高壓迴流型)、A12 (太平洋高壓西伸型)、

A15 (西南氣流型)；中部地區為 A1 (鋒面過境型)、A3 (鋒面滯留型)、A4 (熱帶低壓系統外圍環流型)、A7 (微弱東北季風型)、A8 (高壓出海型 I)、A9 (高壓出海型 II)、A10 (高壓出海型 III)、A11 (高壓迴流型)、A14 (熱帶性低氣壓型)、A19 (台灣近海鋒面型)、A20 (太平洋高壓型)、A24 (東北季風及颱風外圍環流型)；南部地區為 A1 (鋒面過境型)、A7 (微弱東北季風型)、A8 (高壓出海型 I)、A9 (高壓出海型 II)、A10 (高壓出海型 III)、A11 (高壓迴流型)、A19 (台灣近海鋒面型)、A20 (太平洋高壓型)、A21 (偏南氣流型)。

白珏玲 (1998) 將台灣天氣型態分為 14 種類型，並將天氣類型與高臭氧日 ($O_3 \geq 80$ ppb) 之日數進行相關統計，結果顯示以熱帶低壓系統型發生高臭氧日之頻率最高，南投測站發生率高達 95%，忠明及大里測站則為 70%。

林能暉 (2000) 將台灣地區之天氣型態分為 15 類，研究結果顯示最常發生高污染之天氣類型為高壓迴流型、鋒前暖區型、鋒面滯留型或過境台灣型等天氣型態。

Chuang et al. (2008) 於 2002 年至 2005 年間分析臺北地區 $PM_{2.5}$ 濃度及天氣類型之關係，並將天氣型態分為 7 種類型，結果顯示 $PM_{2.5}$ 事件日發生之天氣型態以 HPPC、WAF 及 HPP 此三種天氣型態為主，共佔約 77%。

洪崇軒 (2002)進行高雄地區懸浮微粒事件日解析，結果顯示懸浮微粒事件日約佔總日數 16%，事件日發生頻率最高之氣象型態為高壓迴流型、高壓出海型及東北季風型，分別約佔 30.5%、21.8%及 19.7%。

許家彰 (2002)於埔里地區進行懸浮微粒高污染事件日與氣象因子之相關性探討，結果顯示於 2001 年間埔里地區懸浮微粒事件日約 49 天，其中事件日發生之天氣型態以東北季風型為主，共佔 24 天，佔總事件日約 50%，其次則為高壓迴流天氣型。

邱宏城 (2009)於 2007 年至 2008 年間進行大氣能見度及天氣型態分析，研究結果指出平均能見度最低之天氣型態依序為華南兩區東移型、偏南氣流型、強烈東北季風型、高壓迴流型及微弱東北季風型。其中高壓迴流型及微弱東北季風型之天氣型態因風速較低及高壓等特性，導致大氣中懸浮微粒不易擴散，使得能見度降低；而華南兩區東移型、偏南氣流型及強烈東北季風型之天氣型態因降雨使大氣中水氣增加，導致能見度降低。

曾韋勳 (2012)進行高屏地區懸浮微粒及氣象條件之探討，結果顯示高屏地區易發生事件日之天氣型態為東北季風型及高壓迴流型。由微粒數據分析結果顯示，於此兩種天氣型態，事件日及非事件日微粒濃度主要差異為累積型粒徑 (0.1-2.5 μm)。

曾章瑋 (2013)於 2012 年進行細懸浮微粒採樣及天氣型態分析，

研究指出 3 月採樣期間，天氣型態屬於高壓迴流型。由探空氣象結果顯示逆溫層離地面高度低，有利於污染物之累積，導致 PM_{2.5} 濃度較高，其濃度分布由沿海向山區遞增；於 8 月份採樣期間，受熱帶低壓外圍環流天氣型態影響，天氣狀況不穩，風速較高，不利於污染物之累積，故 PM_{2.5} 濃度較低。

林能暉 (2017)將台灣天氣類型以夏半季 (5 月至 9 月)及冬半季 (11 月至 3 月)進行區分，將夏半季分成 6 種天氣類型，冬半季分成 7 種天氣類型，分析易發生 PM_{2.5} 高污染事件日之天氣類型。研究結果顯示 2006 年至 2015 年間，高 PM_{2.5} 事件日發生之天氣型態以 PW1 及 PW2 最多，分別佔約 45%及 20%，其次為 PW3 及 PW4 型，結果指出 PM_{2.5} 污染類型主要發生於冬半季。

Gomiscek et al. (2004)於奧地利進行微粒及氣象條件之分析，結果顯示高濃度微粒污染主要發生於冬季天氣型態，當微粒濃度低於 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，天氣類型主要為低壓系統，且帶有潮濕之西南氣流。

2.4.2 氣象因子

氣象因子(如：風速、風向、溫度、相對濕度、太陽輻射及降雨等)對於大氣懸浮微粒之形成、化學組成、濃度變化及空間分布等具密切相關性，而不同季節、地區之氣象因子亦有所不同。

風速及風向之交互作用主要對於大氣中污染物傳輸及稀釋作用

產生影響，經由風向及風速大小改變污染物之傳輸方向及於大氣中之稀釋程度。溫度並非直接影響大氣懸浮微粒濃度之因素，因區域性大氣層或海陸溫度之差異，導致熱對流作用產生，進而影響大氣擴散之難易程度。當大氣發生逆溫現象 (Temperature Inversion)，易使大氣較為穩定，不利於污染物之擴散。一般而言，當大氣環境條件為低風速、高日照且相對濕度低時，大氣污染物不易擴散，易發生光化學反應並累積於大氣中。

林建宏 (2008)探討高雄大寮地區大氣懸浮微粒濃度變化與氣象因子之關聯性，研究結果顯示事件日 $PM_{0.1-1.8}$ 微粒濃度隨大氣相對濕度增加而提高 ($r=0.68$)，非事件日 $PM_{0.1-1.8}$ 微粒濃度則隨溫度增加而漸少 ($r=0.70$)。由多因子變異數分析結果顯示， $PM_{0.1-1.8}$ 微粒濃度受大氣溫度及相對濕度影響較明顯。此外，由風向分布結果顯示微粒事件日期間，盛行風向為西南風，與季節性盛行風向 (西北風)不同，大寮測站於事件日期間因風向改變，致使上風處排放源傳輸影響顯著。

莊鳳宸 (2008)研究結果顯示於六輕工業區各測站受工業製程影響，下風之台西及麥寮地區金屬濃度較高，其亦可能來自重工業；而位於濁水溪上風處之大城測站受西南氣流影響，濁水溪揚塵顯著。此外，由氣象資料及受體模式分析得知，當風向為東北風時，台西測站

位於下風處，使得工業製程之貢獻比例達 58%，麥寮測站達 40%；濁水溪之貢獻比例則以下風處之崙背測站最高，大城測站最低。研究結果指出當平均風向轉變時，濃度則呈相反現象，顯示鄰近地區受六輕工業區及濁水溪揚塵影響大。

于培倫 (2010)探討 2006 年至 2007 年間中部空品區 $PM_{2.5}$ 與天氣型態之相互影響及污染成因分析，結果發現當風速愈小時，微粒愈易累積；當風速愈大， $PM_{2.5}$ 濃度愈低，但愈往內陸地區此趨勢漸減，研判因內陸地區建築物過於密集、地形較複雜及當地排放所致。

曾韋勳 (2012)探討高屏地區懸浮微粒特性於不同天氣型態與氣象因子之關聯性，結果指出高屏地區於非事件期間風速較事件日高約 0.2~0.8 m/s，濕度於事件日期間高於非事件日期間 5~18%。風向分析結果顯示北高屏區域於事件日及非事件日，風場主要受綜觀天氣型態影響，皆為東北向，但愈往南，風向則受地形影響，使風場出現變化。由微粒與氣象因子相關性分析結果顯示，於東北季風型態事件日，北高屏及中高屏地區 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 濃度與風速及相對濕度皆具較好之相關性；於高壓迴流事件日，北高屏 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 濃度與風速及相對濕度皆具較好之相關性；中高屏及南高屏 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 濃度與相對濕度則具較好之相關性。

廖嘉政 (2012)於鋼鐵廠廠區及周邊地區進行懸浮微粒研究，結果

顯示廠區及周邊地區皆呈現夏季微粒濃度較低之趨勢，主要因夏季混合層較高且風速快，使得污染物垂直擴散及稀釋範圍較大，導致夏季懸浮微粒濃度低於其他季節。

陳柏霖 (2017)分析雲林斗六、台西及崙背地區於 2005 年至 2015 年間 PM_{2.5} 濃度時空分布特性及氣象因子相關性。結果顯示斗六地區 PM_{2.5} 濃度於日間上升夜間下降，台西地區於夜間上升日間下降，推測與海陸風環流日間將沿海污染物送至斗六地區，夜間將內陸污染物送至台西地區相關。此外，斗六於 2005 年至 2015 年間秋季 PM_{2.5} 濃度日平均與相對濕度、風速、溫度及垂直大氣穩定度之 r 值分別為 -0.30、-0.29、-0.18 及 0.19，代表濕度大、風速高，有利於污染物之清除；當 PM_{2.5} 濃度高時，到達地表之太陽輻射減少，導致溫度下降，垂直大氣穩定度提升，不利於污染物之垂直擴散，使 PM_{2.5} 濃度提升。

Lee et al. (2013)探討香港地區於 1996 年至 2002 年間微粒與氣象因子之相關性，結果顯示冬季及春季期間共發生 7 次 PM₁₀ 事件日，事件日期間風速低於 4.5 m/s，溫度介於 20.1~30.8 °C 間。結果指出當風速及溫度較低時，污染物不易擴散，使濃度易產生累積。

吳仲翼 (2011)於廈門灣研究結果發現於例行性採樣期間，秋、冬兩季 PM₁₀ 平均濃度高於春、夏兩季，推測廈門灣地區因高污染工業眾多，且秋、冬季之混合層高度較低，不利於污染物之擴散，另亦受

大陸冷高壓南下將北方污染物吹送至廈門灣所影響。

2.5 大氣懸浮微粒潛在污染來源解析

2.5.1 主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA)

主成分分析法為多變量統計分析方法之一，將原先數目眾多之變數經由維度縮減 (Dimension Reduction)，簡化為數目較少之新變數，並保留其間之變異性，常應用於大氣污染物主要貢獻源之分析。首先，將所有參數標準化後，再進行因子分析，選取特徵值大於 1.0 之因子作為主成分，並計算出各主成分中個別參數之因子負荷。一般採用因子負荷大於 0.7 者做為追蹤因子，視為鑑別潛在污染物之依據。

廖嘉政 (2012) 以主成分分析鑑別高雄小港地區鋼鐵廠及周邊敏感區域大氣懸浮微粒之潛在污染源，結果顯示廠區周界及周邊地區於不同季節之污染來源皆以工業排放污染 (包括煉油廠、火力發電廠、焚化爐、一貫作業煉鋼廠及電弧爐煉鋼廠等) 為主，其次為交通污染源及衍生性污染物；而周邊敏感區域則因部分測站鄰近海域，海水飛沫亦為主要污染源之一。

謝岳書 (2013) 利用主成分分析法對於台灣北部地區 $PM_{2.5}$ 之來源進行分析，結果顯示有 4 個因子其特徵值大於 1，其中因子 1 之金屬包括：Pb、Mn、K、Zn 及 Cd，因子 1 之來源定義為混合污染源之人為排放；因子 2 中包含 Na 及 Mg，推論因子 2 之主要來源為地殼組

成及海水飛沫等自然因子；因子 3 中金屬元素包括 Cu 及 Ni，定義為重油燃燒貢獻；因子 4 中金屬元素包含 Al 及 Fe，由地殼土壤所貢獻。

Chen et al. (2015)於雲林地區進行事件日及非事件日期間懸浮微粒特性分析，並利用主成分分析法對於微粒之潛在來源進行解析，結果顯示於事件日期間粗微粒及細微粒之主成分皆為四個，分別可解釋約 97.9%及 96.5%之總變異量，粗微粒主要由地殼組成 (61.6%)、地表揚塵 (19.4%)、工業製程及燃煤 (10.6%)所貢獻；細微粒主要來源為燃煤 (36.5%)、鋼鐵工業 (30.5%)、車輛及工業油燃燒 (16.3%)及非鐵金屬冶煉 (13.1%)所貢獻。於非事件日期間粗微粒及細微粒之主成分皆為四個，分別可解釋約 88.5%及 89.4%之總變異量，粗微粒與車輛排放 (53.6%)、土壤灰塵 (21%)、鋼鐵工業 (8.4%)及鋁之冶煉 (6.1%)相關；細微粒為道路揚塵 (38.2%)、土壤 (20.2%)、海鹽飛沫 (18.6%)及玻璃製造 (11.5%)所貢獻。

Kothai et al. (2011) 於印度進行大氣中微粒之化學組成及潛在來源分析，研究結果顯示粗微粒及細微粒之主成分因子分別為四個及五個，可解釋分別約 82.81%及 84.03%之總變異量。於粗微粒之分析結果顯示，因子 1 為土壤揚塵所貢獻，包括：Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、Cr、Mn、Fe、Cu 及 Zn，約可解釋 52.53%之變異量；因子 2 源自於海鹽飛沫，包括：Na、Cl 及 K，約可解釋 17.43%之變異量，因

子 3 包含 S、V、Zn、As 及 Pb，約可解釋 6.95% 之變異量，與燃燒相關；因子 4 包含 Br，約可解釋 5.9% 之變異量，來自鄰近地區液態溴及溴化鈉之生產。於細微粒之分析結果顯示因子 1 為地殼土壤所貢獻，包括：Mg、Al、Si、K、Ca、Ti 及 Fe，約可解釋 45.9% 之變異量；因子 2 源自海鹽飛沫，包括：Na、Cl 及 K，約可解釋 22.5% 之變異量；因子 3 包含 S、Ti、Mn、Ni、Zn、As 及 Pb，約可解釋 7.46% 之變異量，與燃燒相關；因子 4 包含 Cr 及 Cu，約可解釋 3.53% 之變異量，與工業製程相關；因子 5 包含 Se，為特定工業製程所貢獻。

吳仲翼 (2011) 以主成分分析法鑑別廈門灣之潛在污染源，結果顯示廈門灣於不同季節日間及夜間污染來源主要以衍生性污染物為主，人為燃燒（包括：鍋爐燃燒、生質燃燒及工業燃燒等）、海水飛沫、交通污染及土壤揚塵於四個季節中皆為穩定污染來源。

廖建欽 (2013) 利用主成分分析法對於閩江口海域（馬祖）及陸域（福州）之懸浮微粒進行潛在來源解析，研究結果顯示閩江口海陸域於不同季節及密集採樣期間污染來源皆以衍生性氣膠、交通污染源及土壤揚塵等混合因子為主，海鹽飛沫亦為穩定污染來源。除夏季之外，燃煤鍋爐、燃油電廠、煉鋼高爐或金屬冶煉等工業性污染排放所佔變異量呈逐漸增加趨勢。

第三章 實驗設備及方法

3.1 研究架構

東海大學因鄰近台中科學園區、台中工業區、台中火力發電廠及國道一號和國道三號，空氣品質易受鄰近污染源影響。為探討此區域之大氣懸浮微粒特性及其潛在污染來源，因此本研究於 2016 年 12 月至 2018 年 2 月間，於東海大學附屬實驗高級中學小學部頂樓，以微孔均勻沉積衝擊器 (MOUDI)，進行大氣懸浮微粒採樣，再將所採集之微粒樣本進行質量濃度、粒徑分布及化學組成分析 (包括：水溶性離子成分、金屬成分及戴奧辛分析)，並針對天氣型態及氣象因子 (風速、風向) 與懸浮微粒間之關聯性進行探討，最後利用主成分分析 (PCA) 探討潛在污染來源。本研究之流程架構如圖 3.1.1。

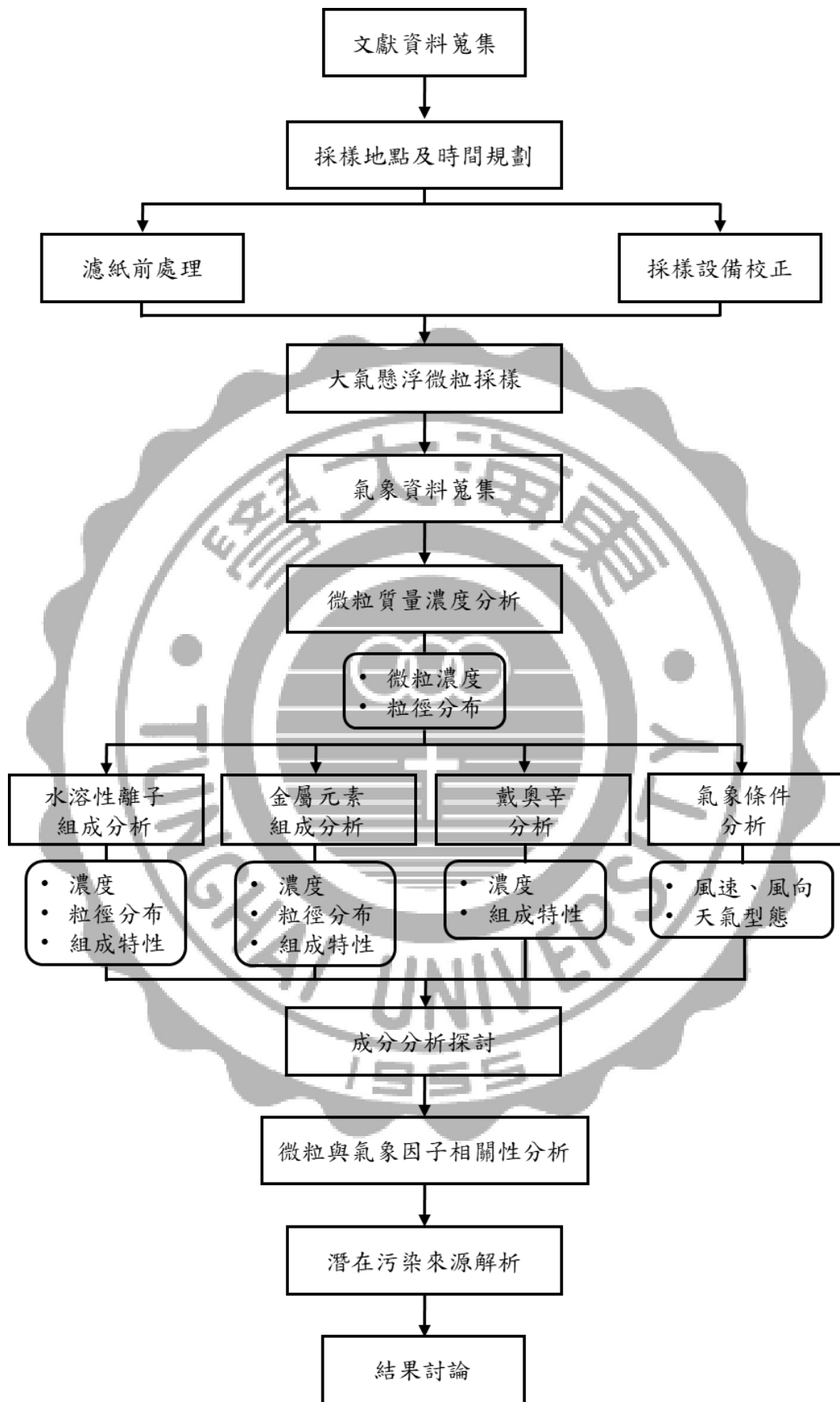


圖 3.1.1 研究架構圖

3.2 採樣規劃

3.2.1 採樣區域背景

本研究之採樣地點位於東海大學附屬實驗高級中學小學部二樓頂，測站高度離地面約 9 公尺。採樣點座標為北緯 24.183 度，東經 120.608 度。東海大學位於台中市西屯區，周遭重要固定污染源包括：台中科學園區（位於東北方約 3.4 公里處）、台中工業區（位於南方約 1.4 公里處）及台中火力發電廠（位於西方約 12.7 公里處）。此外，採樣點因鄰近台灣大道（位於北方約 180 公尺處）及國道一號（位於東方約 2.4 公里處）和國道三號（位於西方約 3.6 公里處），於尖峰時刻交通流量大，因此採樣點周界空氣亦受移動源之影響。其相對地理位置如圖 3.2.1 所示。



圖 3.2.1 相對地理位置圖

3.2.2 採樣時間與頻率

本研究於 2016 年 12 月至 2018 年 2 月間，於東海大學附屬實驗高級中學小學部頂樓進行大氣懸浮微粒採樣，採樣期間共進行四次連續採樣，每次採樣四天，每天採樣時間持續 24 小時。採樣過程中，若遇降雨、斷電等因素導致採樣不完全之情形發生，則停止採樣，擇期另行補採。

3.2.3 採樣濾紙前處理

本研究所採用之濾紙為鐵氟龍 (Teflon) 濾紙，如圖 3.2.2，為 Cobetter 公司出產，直徑 47 mm，孔徑 1 μm 。採樣前濾紙先置於恆溫及恆濕之乾燥箱內，溫度控制於 25 ± 3 $^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度控制於 $45\pm 5\%$ ，平衡至少 24 小時以上。於採樣前取出，以微量天平進行稱重，並記錄稱重結果，再將濾紙放置於乾淨之小型塑膠培養皿中，放入乾燥箱中備存等待採樣。採樣時，將濾紙連同塑膠培養皿帶至採樣現場，待採樣設備架設完成後，再將濾紙置於各階層之衝擊板上，調整採樣設備流量後，即可開始進行採樣。待採樣完成後，再將濾紙放置於與採樣前相同之溫、濕度環境條件中，平衡 24 小時後，再次以微量天平進行稱重，以求得所採集之懸浮微粒重量。



圖 3.2.2 鐵氟龍濾紙

3.3 採樣設備

3.3.1 微孔均勻沉積衝擊器 (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactors, MOUDI)

本研究同時採用兩台美國 MSP 公司生產之微孔均勻沉積衝擊器 (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactors, 簡稱 MOUDI), 型號分別為 Model 110-R 及 Model 100S4, 同步進行大氣懸浮微粒採樣 (如圖 3.3.3)。

MOUDI 為一多階層連續式衝擊器 (Cascade Impactor), 如圖 3.3.4 及圖 3.3.5 所示, 主要由階段式衝擊器及旋轉器構成, 階段式衝擊器外圍具有齒輪, 用以連接旋轉器。階段式衝擊器分為十階 (Model 110-R) 及三階 (Model 100S4), 截取粒徑範圍分別介於 $0.056\text{-}18\ \mu\text{m}$ 及 $1.0\text{-}18\ \mu\text{m}$ 間, 各階層之截取粒徑 (Cutsizes) 則如表 3.3.1 及表 3.3.2 所示。採樣時, 各階層衝擊板上均會放置 $47\ \text{mm}$ 之鐵氟龍濾紙, 用以收集不同粒徑範圍之微粒。為監控 MOUDI 之壓力變化, 衝擊器設有兩個壓

差錶，且下方具流量控制閥，藉以隨時觀察壓力數值變化，進行抽氣流量之調整。若採樣期間壓力值出現明顯誤差變化，則需確認各階層之衝擊板是否未妥善安裝，以致於漏氣情況發生，或是衝擊板是否有阻塞之情形，並定期將採樣設備進行流量校正。

MOUDI 乃藉由慣性衝擊之原理，以 30 L/min 之定流量抽引空氣進入採樣器中，使氣流挾帶大氣懸浮微粒通過採樣器，由於衝擊器各階層所截取之粒徑不同，若氣流中微粒粒徑大於該階層之截取粒徑，則微粒會經由慣性作用撞擊至衝擊板，進而被截留於濾紙上；若粒徑小於該階層截取粒徑之微粒，則會隨氣流被帶至下一階層。藉此由上往下依序縮小截取粒徑，利用慣性差異分離不同粒徑之微粒，藉以將不同粒徑範圍之微粒分類收集於濾紙上。

此外，於每次採樣前後均須將每一階層之衝擊板先以中性洗劑浸泡，再用清水清洗，以將阻塞於孔隙中之雜質沖洗而出，避免因採樣設備阻塞，導致設備之抽氣流量改變，影響採樣結果。而濾紙於置換過程中，需注意各階層衝擊板之排列順序，應按階層依序排列組裝，以免造成採樣結果錯誤。

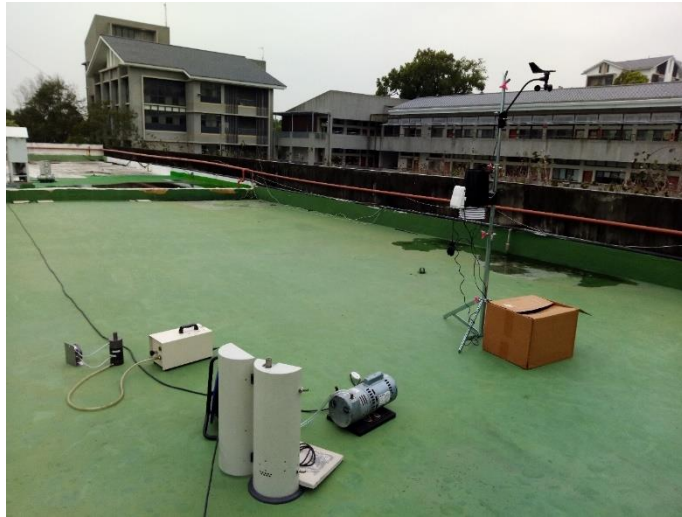


圖 3.3.3 採樣現場示意圖

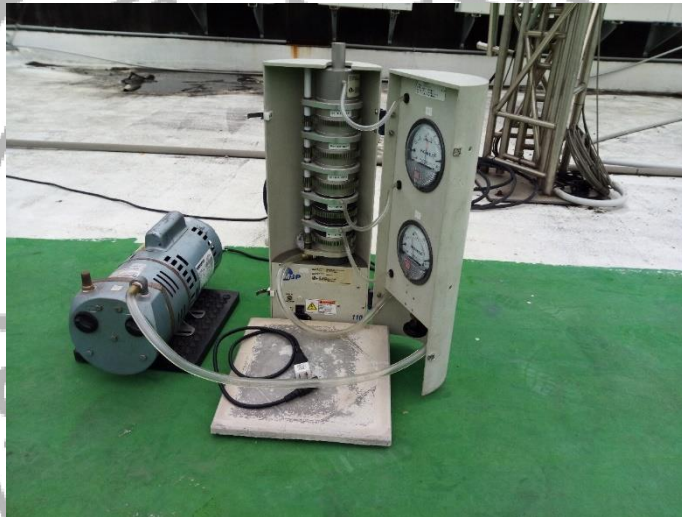


圖 3.3.4 微孔均勻沉積衝擊器-十階 (MOUDI Model 110-R)



圖 3.3.5 微孔均勻沉積衝擊器-三階 (MOUDI Model 100S4)

表 3.3.1 MOUDI 各階層之截取粒徑範圍-十階

| 階層 | 截取粒徑範圍 (μm) |
|-------------|-------------|
| Inlet | >18 |
| 1 | 10-18 |
| 2 | 5.6-10 |
| 3 | 3.2-5.6 |
| 4 | 1.8-3.2 |
| 5 | 1.0-1.8 |
| 6 | 0.56-1.0 |
| 7 | 0.32-0.56 |
| 8 | 0.18-0.32 |
| 9 | 0.1-0.18 |
| 10 | 0.056-0.1 |
| Back Filter | <0.056 |

表 3.3.2 MOUDI 各階層之截取粒徑範圍-三階

| 階層 | 截取粒徑範圍 (μm) |
|--------|-------------|
| Inlet | >18 |
| 1 | 10-18 |
| 2 | 2.5-10 |
| 3 | 1.0-2.5 |
| Outlet | <1.0 |

3.3.2 DAVIS 6152C 有線綜合氣象站

本研究以 Davis Vantage Pro2 Weather Stations Model 6152C 有線綜合氣象站 (如圖 3.3.6)，進行採樣期間氣象因子之連續監測，以收集採樣期間之氣象資料。此氣象站係以一整合式氣象感測器組成，可即時監測並完整記錄採樣當時之氣象條件，包括風向、風速、溫度、相對濕度、大氣壓力及雨量等項目。



圖 3.3.6 綜合氣象站

3.4 微粒組成分析

為探討微粒之物理化學組成特性，採樣完之濾紙需先經不同粒徑範圍之懸浮微粒質量濃度分析，待質量濃度分析完畢，再進行懸浮微粒之化學組成分析，其中包括：水溶性離子、金屬及戴奧辛組成分析，以下各節將針對各物理化學特性分析進行介紹。

3.4.1 質量濃度分析

本研究採用 Denver 公司生產之五位數微量天平進行濾紙稱重，型號為 TB-215D，靈敏度 0.01 mg，秤盤尺寸 80 mm (如圖 3.4.1)。每張濾紙於採樣前後均須經溫、濕度平衡 24 小時以上，再以微量天平進行稱重，以決定各階層所採集之懸浮微粒重量。稱重時，須將濾紙於乾燥箱中取出，並以鑷子夾取濾紙放至秤盤中心。為達量測之精確性，每張濾紙稱重時，須待天平數值穩定後，才可記錄濾紙重量，當濾紙取出後，待天平讀值歸零才可再次進行稱重。

採樣後所秤得之濾紙重扣除採樣前之濾紙重，再除上採樣空氣總體積，即可求得大氣懸浮微粒之質量濃度。而採樣空氣總體積則依採樣器之抽氣流量及採樣時間決定。

大氣懸浮微粒質量濃度 C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 計算式如下：

$$C = W \times 1000 / (Q \times t)$$

上式中：

W：採樣前後濾紙之重量差 (μg)

Q：採樣流量 (L/min)

T：採樣時間 (min)

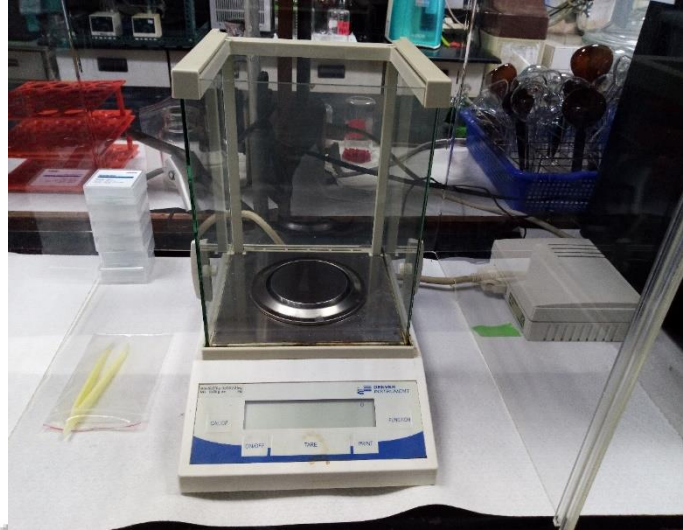


圖 3.4.1 微量天平

3.4.2 水溶性離子成分分析

進行微粒之水溶性離子成分分析前，採樣完之濾紙須先進行前處理步驟，才可進行離子成分分析。本研究採用超音波震盪萃取法，將微粒中可溶於水之離子物種萃取而出。其分析程序如圖 3.4.2 所示：首先，取出經採樣並稱重完畢之 47 mm 鐵氟龍濾紙放入 50 mL 之聚乙烯瓶中，加入 10 mL 之去離子水 (D.I. water)，並使濾紙浸泡於去離子水中，再放入超音波震盪機，震盪萃取 60 分鐘。待震盪完畢後，將萃取液以 0.22 μm 醋酸纖維濾紙加以過濾，再將濾液注入離子層析儀中進行水溶性陰陽離子成分分析。空白試驗係採用空白濾紙進行分析，處理步驟與上述樣品處理程序相同。

本研究採用恆茂公司 (Metrohm) 生產之離子層析儀 (Ion Chromatography；簡稱 IC)，型號為 883 Basic IC plus (如圖 3.4.3)，進

行大氣懸浮微粒上之水溶性離子成分分析，分析物種包括：五種陰離子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-})及五種陽離子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})。於陰離子成分分析中，本研究採用 Metrosep A Supp 5-150/4.0 型管柱，總長度 150 mm，內徑 4 mm，流洗液為 1 mM $NaHCO_3$ /3.2 mM $NaCO_3$ ，流洗液流速為 0.7 mL/min；於陽離子成分分析中，則採用 Metrosep C 4-150/4.0 型管柱，總長度 150 mm，內徑 4 mm，流洗液為 1.7 mM HNO_3 /0.7 mM $C_7H_5NO_4$ ，流洗液流速為 0.9 mL/min。離子層析儀基本資訊如表 3.4.1 所示。

離子層析儀之操作原理係以離子交換樹脂管柱為固定相 (Stationary Phase)，流洗液為移動相 (Mobile Phase)，藉由離子與固定相上帶相反電荷官能基間之庫倫作用力結合，再利用移動相使離子被沖提而出。因各離子對於移動相之親和力不同，其親和力大小主要受離子半徑及離子電荷價數大小等因素影響，導致不同離子於管柱中之滯留時間不同，而達分離之目的。當離子從管柱流洗出來，分離出之離子會經由導電度 (Conductivity)偵測器之測定進行分析，再依其滯留時間判定離子物種。層析圖譜顯示於螢幕，可依其滯留時間、波峰面積、高度或感應強度加以定性及定量，而樣品濃度帶入檢量線經換算後即可求得樣品中水溶性陰陽離子之濃度。

本研究陰、陽離子檢量線皆採用 Merck 公司出品之標準液，濃度

均為 1000 ppm，分析樣品前須先以標準溶液進行檢量線配製，選擇適合樣品分析之範圍，配製至少五個不同濃度之標準溶液以製備檢量線，其相關係數 (R^2) 大於 0.995 者才使用。檢量線範圍需涵蓋樣品濃度分析範圍，若樣品濃度超出所配製之檢量線範圍，則需將樣品進行稀釋，再重新進行分析。

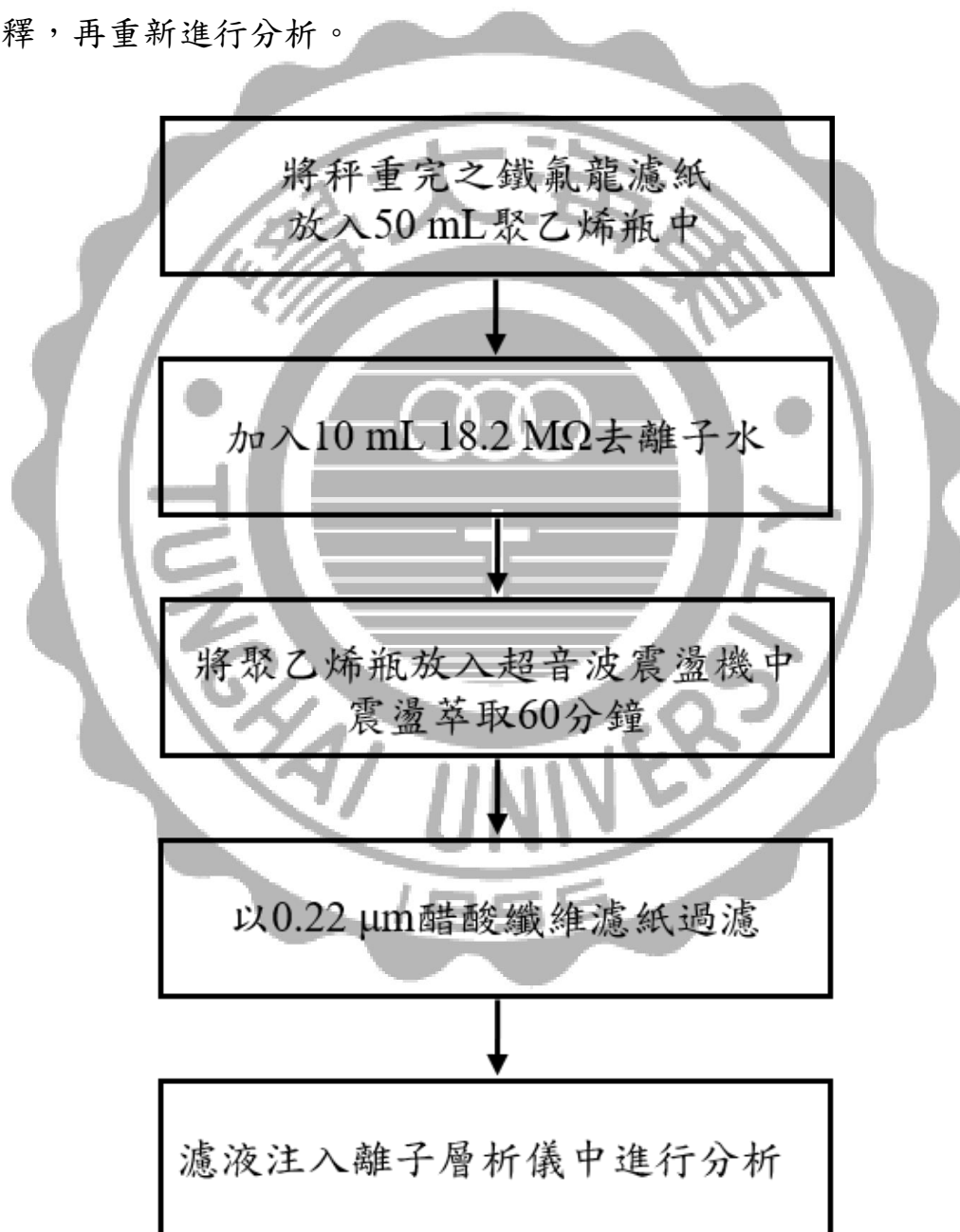


圖 3.4.2 水溶性離子分析程序

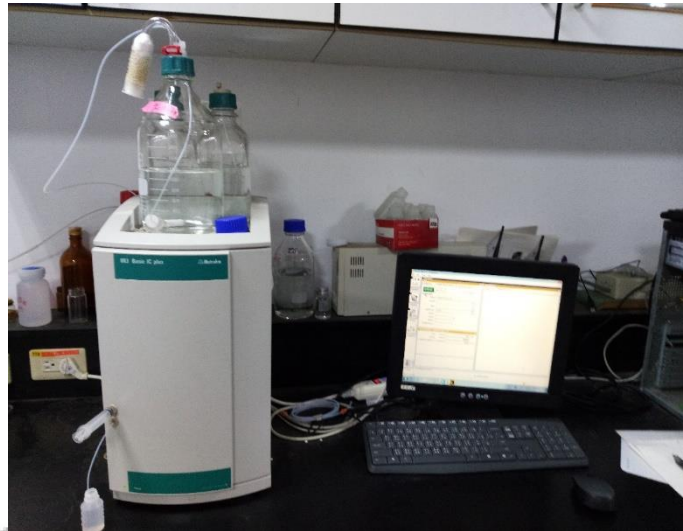


圖 3.4.3 離子層析儀 (IC)

表 3.4.1 離子層析儀基本資訊

| 離子層析儀 | 陰離子 | 陽離子 |
|-------|--|---|
| 分析物種 | F ⁻ 、Cl ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、 NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ | Na ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、K ⁺ 、 Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ |
| 管柱 | Metrosep A Supp 5-150/4.0 | Metrosep C 4-150/4.0 |
| 流速 | 0.7 mL/min | 0.9 mL/min |
| 樣品注入量 | 20 μL | 20 μL |
| 流洗液 | 1 mM NaHCO ₃ / 3.2 mM NaCO ₃ | 1.7 mM HNO ₃ / 0.7 mM C ₇ H ₅ NO ₄ |
| 分析時間 | 17 mins | 15 mins |

3.4.3 金屬元素成分分析

本研究將鐵氟龍濾紙採集之懸浮微粒樣本利用感應耦合電漿質譜儀 (Inductivity Coupled Plasma-Mass Spectrometry；簡稱 ICP-MS) 進行微粒中金屬元素成分分析，採用之感應耦合電漿質譜儀為 Thermo Scientific 公司生產，型號為 iCAP RQ。金屬元素分析物種包括：鋅 (Zn)、鎘 (Cd)、鈷 (Co)、鉻 (Cr)、銅 (Cu)、鐵 (Fe)、鎵 (Ga)、銦 (In)、錳 (Mn)、鎳 (Ni)、鉛 (Pb)、銦 (Sr)、銀 (Ag)、硼 (B)、鋇 (Ba)、鉍 (Bi)、鈣 (Ca)、鉀 (K)、鋰 (Li)、鎂 (Mg)、鈉 (Na)、銻 (Tl)、砷 (As) 及鋁 (Al) 共 24 種金屬元素。檢量線以金屬元素之標準溶液配製成不同濃度之標準液，再由低濃度至高濃度依序注入 ICP-MS，進行檢量線製備，其相關係數 (R^2) 大於 0.995 者才可使用。

ICP-MS 原理係將待測樣品溶液先以霧化器 (Nebulizer) 經霧化處理後，再藉由載流氣體輸送，將含待分析元素之氣膠傳送至電漿 (Plasma) 中，於高溫電漿環境下經由去溶劑、分解、原子化等反應，將電漿中待分析元素形成離子，再導入真空系統進入質譜儀，經由質量分析器 (Mass-Analyzer) 選擇特定質荷比 (Mass-to-charge Ratios) 之離子，以電子倍增器加以檢測，進行各元素之定性及定量工作。

進行 ICP-MS 金屬元素成分分析前，經稱重完之濾紙須先經微波消化萃取步驟，以萃取微粒上之金屬元素成分，再以 ICP-MS 進行微

粒之金屬元素成分分析，其分析步驟如圖 3.4.4 所示。

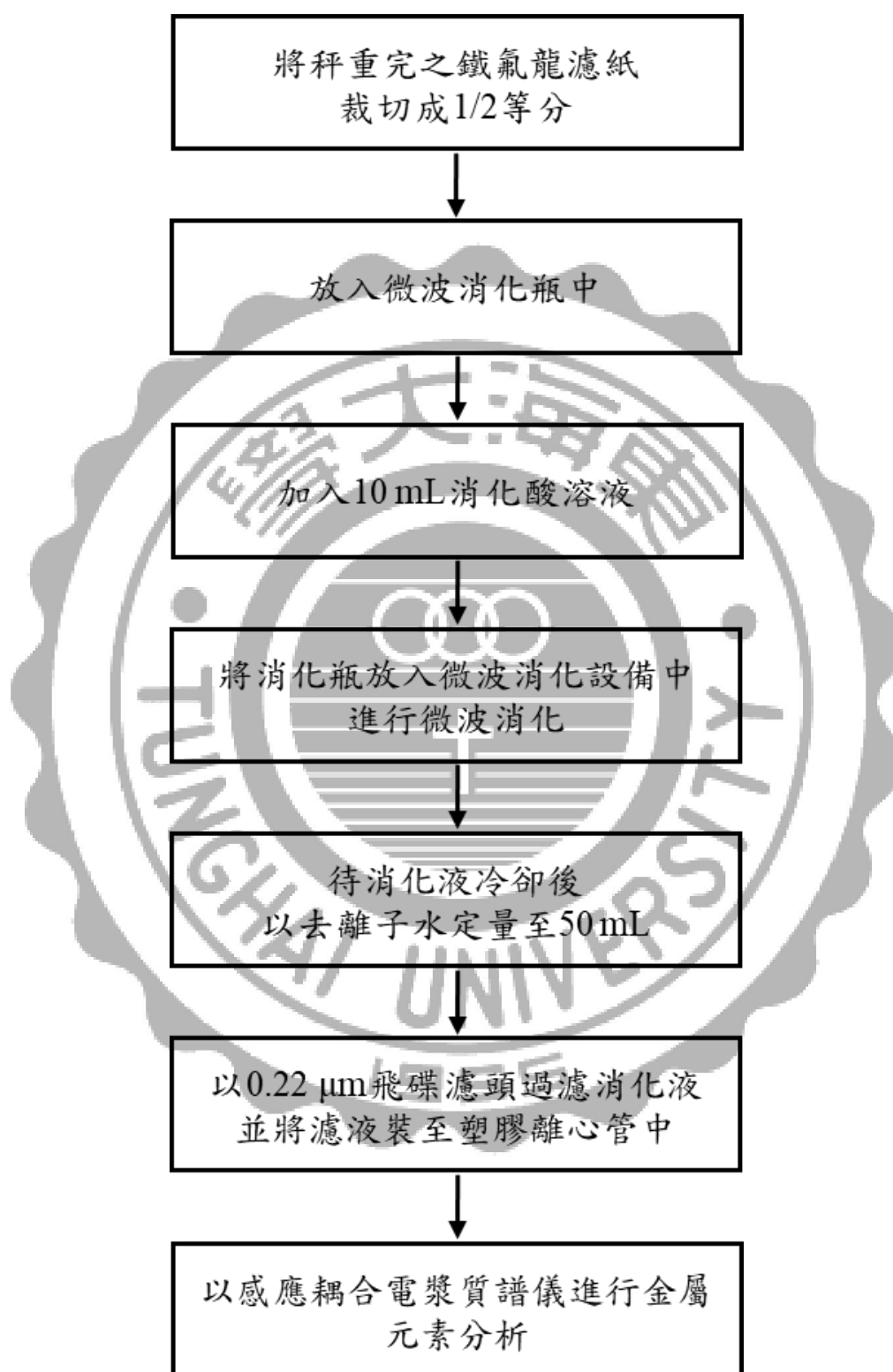


圖 3.4.4 金屬元素分析流程

本研究採用之微波消化設備為 CEM 公司生產之微波加速反應系統 (Microwave Accelerated Reaction System)，型號為 MARS 5 (如圖 3.4.5)，屬於密閉式微波消化系統，附有溫度控制感應器 (Sensor)，可依所設定之升溫 (Ramping time)及持溫 (Holding Time)時間進行不同階段之加溫程序。微波消化瓶採用 HP-500 型，材質為 Teflon-PFA。

微波消化萃取流程如下：先將稱重完之鐵氟龍濾紙裁切成二分之一，取其中二分之一等分，以塑膠鑷子置入微波消化瓶中，並將瓶身進行編號。接著加入 10 mL 消化酸溶液於置有濾紙之微波消化瓶內，再以扭力扳手鎖緊瓶蓋，並將消化瓶置入微波消化器中進行微波消化。微波消化設定功率為 600 W，升溫時間 20 分鐘，溫度設定 175°C，並持溫 10 分鐘。消化完畢待消化液冷卻後，以去離子水定量至 50 mL，再以聚偏氟乙烯 (PVDF) 濾膜加以過濾於塑膠離心管中，最後以 ICP-MS 進行 24 種金屬元素分析。



圖 3.4.5 微波加速反應系統

3.4.4 戴奧辛/呔喃分析

大氣懸浮微粒之 PCDD/PCDFs 樣品，先經前處理分析程序（包括：萃取、濃縮、酸洗及淨化等步驟），以去除干擾物質並濃縮樣品濃度，使其達儀器可偵測範圍，再利用 ^{13}C -同位素標幟稀釋法 (Isotope Dilution Method)，經高解析氣相層析儀 / 高解析質譜儀 (High-Resolution Gas Chromatography/ High-Resolution Mass Spectrometry，簡稱 HRGC/HRMS) 進行大氣微粒之戴奧辛分析，測定 17 種 PCDD/PCDFs 之濃度，並計算其總毒性當量濃度。分析流程如圖 3.4.6 所示，本研究戴奧辛分析部分，委託取得環保署 PCDD/PCDFs 分析認證之台灣檢驗科技股份有限公司進行檢測，皆符合行政院環境保護署公告之「空氣中戴奧辛及呔喃檢測方法 (NIEA A810.13B)」規範。

PCDD/PCDFs 樣品之 HRGC 及 HRMS 分析，採用 J&W Scientific 公司之管柱，型號為 DB-5MS，管長 60 m，內徑 0.25 mm，管壁厚度 0.25 μm 。管柱溫度於 150°C 停留 3 分，接著以 30°C/min 升溫至 210°C，持溫 15 分，再以 1.5 °C/min 升溫至 230°C，持溫 5 分，再以 15 °C/min 升溫至 310 °C，持溫 12 分。載流氣體為氦氣，監測模式為選擇性離子監測 (Selected Ion Monitoring，簡稱 SIM)，解析度大於 10,000，離子源溫度為 250 °C。

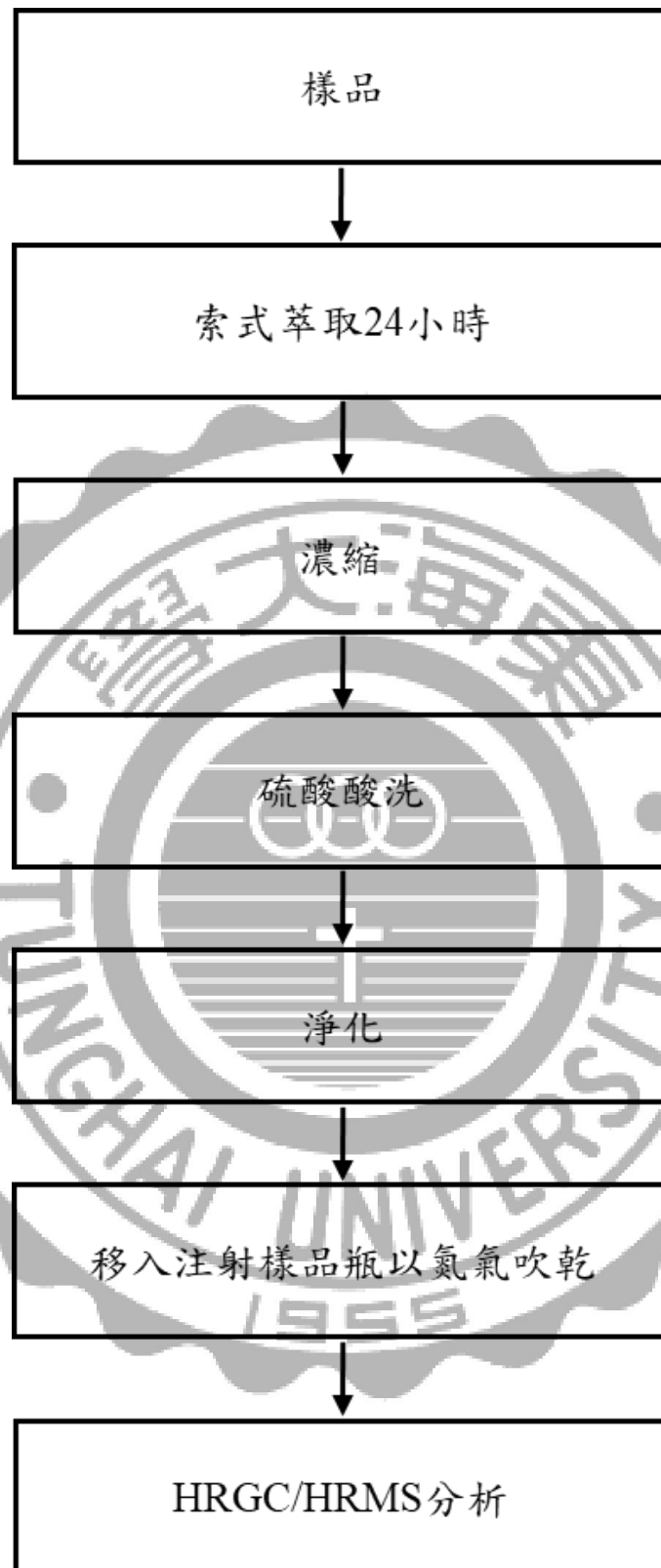


圖 3.4.6 大氣微粒中戴奧辛/呔喃分析流程

3.5 大氣懸浮微粒潛在污染來源解析

3.5.1 主成分分析

主成分分析為一種多變量統計分析方法，其藉維度縮簡方法，將原先數目眾多之變數以線性組合方式，縮減為數目較少且相互獨立之新變數，以取代原先變數，降低數據維度並達到保留原始資料所提供大部分資訊之目的。進行主成分分析前，因常使用不同來源或不同型態之資料進行分析，為避免量測單位差異影響數據分析，須先將原始資料之變數標準化 (Standardization)，再利用共變異矩陣 (Covariance Matrix) 或相關係數矩陣 (Correlation Matrix) 進行特徵分析，求得特徵值 (Eigen Value) 及特徵向量 (Eigen Vector)，再選取特徵值大於 1 之因子做為主成分 (Principal Component)，並計算出各主成分中個別參數之因子負荷 (Factor Loading)。因子負荷顯示各物種與各主成分之相關性，一般採用因子負荷值大於 0.7 者做為判定潛在污染源之參考。最後選定主成分個數，並進行各主成分之結果闡釋。而主成分個數主要取決於變異量，一般以可解釋 70% 以上變異量決定主成分數目。

本研究為解析工業密集區大氣懸浮微粒中金屬元素成分之潛在污染來源，採用軟體 PASW Statistics v18 進行主成分分析，並選取因子負荷量大於 0.7 者進行可能污染來源之推估，最後再藉由文獻資料之蒐集，判別可能影響周界大氣之各項潛在來源。

3.6 品質保證與品質控制

3.6.1 採樣方法之品保與品管

(1) 濾紙選擇及調理

由於濾紙種類不同，其組成特性亦不相同，因此濾紙選擇需考量其背景成分及適合分析之項目。本研究除進行微粒之質量濃度量測外，尚需進行微粒上水溶性離子、金屬元素及戴奧辛成分分析。因此，本研究選用鐵氟龍濾紙做為採集大氣懸浮微粒之介質，其干擾度較低，適於進行成分分析。而濾紙於使用前應先確認是否有損毀或皺褶等情形，若有上述之情形，則該濾紙捨棄不用。

此外，因溫度及濕度等環境條件均會影響濾紙量測之準確性，濾紙於採樣前後均須保存於恆溫、恆濕之乾燥箱內，並控制溫度於 25 ± 3 °C、相對濕度 $45\pm 5\%$ 之環境條件，平衡至少 24 小時以上，才可進行濾紙稱重，使濾紙於稱重前後之調理條件一致，以免產生稱重誤差。

(2) 微量天平校正

由於採樣前後之濾紙重量差異幅度小，因此天平需具備一定標準之靈敏度及準確度。本研究採用 Denver 公司生產，型號為 TB-215D 之五位數微量天平，靈敏度為 0.01 mg，可精確稱得大氣微粒之重量變化。

天平於每次使用前，需預先暖機至少 30 分鐘，以免影響天平之

穩定性，造成量測誤差。天平開啟後，需先檢查水平並進行天平內部校正，確認是否符合標準，若無法達標準，則可能是因為環境之溫、濕度變化或是天平本身所導致，需將天平重新進行校正，直到符合標準才可進行量測。此外，天平需定期實施內部及外部校正，以確保天平量測之精密性及準確性。

(3) MOUDI 流量校正及清洗

MOUDI 需定期進行流量校正，以確保抽氣流量之精確性。採樣流量不僅會影響抽氣體積，對於各階層微粒之截取也會造成影響，因此，每次採樣前皆需進行採樣設備之流量校正，以確保採樣流量之正確性。本研究以乾式流量校正器進行流量之校正，校正步驟如下：將流量計與 MOUDI 進氣口連接，並開啟抽氣馬達，使校正後之流量達 30 L/min。

此外，於採樣前後均需將每一階層之衝擊板，先以中性洗劑浸泡，再以清水沖洗，將阻塞於孔隙中之雜質沖出，以免因堵塞造成採樣流量之改變，影響採樣結果。

(4) 採樣程序

本研究於採樣過程中皆以塑膠鑷子夾取濾紙，且採樣人員均戴橡膠手套，避免濾紙或實驗器材於採樣過程中受污染。並於採樣當天確實記錄每天之採樣條件及採樣設備壓力變化等項目，以利於日後能確

實掌握採樣當時之條件。此外，採樣人員應熟悉採樣設備之架設、濾紙更換及各項採樣工作之細節，以確保採樣之準確性。

(5) 樣本之攜帶及保存

濾紙於採樣前後均置於乾淨之小型塑膠培養皿中保存，避免於採樣過程中受環境或人為污染。由於溫度及濕度等環境條件變化可能影響濾紙及懸浮微粒之重量，導致量測誤差產生。因此，於採樣完畢後，應儘速將濾紙帶回實驗室，放入與採樣前相同環境條件之乾燥箱中保存，減少因溫度及溼度等環境條件變化而造成之誤差。

3.6.2 分析方法之品保與品管

為了降低分析過程中可能產生之誤差，確保分析數據之精確性及合理性，因此需進行各項品保及品管程序，並藉由提升分析人員對分析操作程序之熟悉度，及遵照各項品保及品管之規範要求，以降低分析誤差。本研究中各項品保及品管程序如下：

(1) 空白分析 (Blank)

於採樣過程中，均會放置未使用過之空白濾紙於採樣地點，該空白濾紙須使用與採樣相同之濾紙，並於採樣結束時與樣品一同帶回實驗室。於分析過程中，則以空白濾紙進行與樣品相同條件之前處理步驟及分析程序。

(2) 檢量線 (Calibration Curve)之製備

進行各項成分分析前，須先以標準品配製不同濃度之標準溶液，進行檢量線製備，再由積分面積換算求得樣品濃度，做為該批次樣本之定量依據。檢量線之配製，應選擇適合樣品濃度之分析範圍，至少需包含五個不同濃度之標準溶液，樣品濃度應介於檢量線最低及最高濃度範圍內，其相關係數 (R^2) 應大於 0.995 以上，該檢量線方可使用。當樣本實際濃度大於檢量線最高濃度時，則須將樣品進行適當倍數之稀釋，再次進行分析，使樣品濃度測值落於檢量線範圍內。

(3) 重複分析 (Duplicate Analysis)

進行樣品分析時，需隨機抽取樣品進行重複分析，以確認量測結果之精密度 (Precision)，確保分析品質。重複分析係將一樣品取二等份，依相同之前處理步驟及分析程序進行量測。此兩組數據之差異須在可接受範圍內，才可繼續進行分析，否則須立即停止分析並釐清原因，同時應捨棄該樣品數據，待檢查完畢後，重新再次進行測定。

(4) 偵測極限 (Detection Limit)

偵測極限一般可依樣品分析程序及儀器操作狀態分為儀器偵測極限 (Instrument Detection Limit; 簡稱 IDL) 及方法偵測極限 (Method Detection Limit; 簡稱 MDL)。IDL 代表儀器本身對待測物所能偵測之最低極限，若待測物濃度低於儀器偵測極限，表示儀器無法偵測到該待測物濃度，則以未檢出 (not detected; 簡稱 N.D.) 表示。MDL 則為

一包含待測物樣品之基質中，於 99 %信賴極限 (Confidence Limit)，可偵測到待測物之最低且大於零之濃度。

(5) 查核分析

查核分析係將與樣品類似基質中添加適當濃度之標準品，並進行與樣品相同之前處理步驟及分析程序進行檢測，藉此確認分析結果之準確性。

(6) 添加樣品分析

添加樣品分析係將一樣品取二等分，一部分依樣品前處理步驟及分析程序進行檢測，另一部分則添加適當濃度之標準品於樣品中後再進行檢測，藉此確認樣品中是否有基質干擾。

第四章 結果與討論

4.1 氣象條件分析

4.1.1 2011-2017 年間細懸浮微粒事件日天氣型態概況分析

為了解天氣型態及空氣品質間之相關性，本研究整理環保署台中西屯測站於 2011 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日間之 PM_{2.5} 監測資料，以日均值為單位，篩選出細懸浮微粒事件日 (PM_{2.5} 濃度大於 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，並利用地面天氣圖進行天氣型態分類，以解析台中市西屯地區細懸浮微粒事件日發生頻率較高之天氣型態。

環保署台中西屯測站於 2011 年至 2017 年間發生細懸浮微粒事件日日數統計如表 4.1.1，本研究以四季進行分類統計：分別為春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月) 及冬季 (12~2 月)，由表中得知西屯測站於 2011 年至 2017 年間發生細懸浮微粒事件日日數共 698 日，且各年皆以春季、秋季及冬季發生事件日頻率較高，夏季發生事件日頻率最低。

本研究根據白珏玲 (1998) 歸納之 14 種天氣類型，將篩選出細懸浮微粒事件日，利用中央氣象局地面天氣圖進行天氣型態分析，14 種天氣類型特性如表 4.1.2 所述。表 4.1.3 及圖 4.1.1 彙整出 2011 年至 2017 年間於四季發生細懸浮微粒事件日之天氣類型出現日數及機率 (機率 (%) = 該天氣類型 / 細懸浮微粒事件日總日數 $\times 100\%$)，顯示春季

發生細懸浮微粒事件日頻率較高之天氣型態以鋒面前緣型最多 (B6)，其次為高壓迴流型 (B3)、華南雨區東移型 (B11)及高壓出海型 (B2)；夏季依序以颱風型 (B8)、熱帶低壓型 (B7)及偏南氣流型 (B9)為主；秋季依序以東北季風型 (B1)、高壓出海型 (B2)及華南雨區東移型 (B11)為主；冬季則以高壓出海型 (B2)、東北季風型 (B1)及高壓迴流型 (B3)為主要天氣型態。

綜上所述，由各季天氣型態分類統計結果顯示：秋、冬兩季發生細懸浮微粒事件日之主要天氣型態為東北季風型(B1)及高壓出海型 (B2)，由於台中市西屯地區位於台灣西側，冬季盛行東北季風，當盛行風越過中央山脈於西側形成下沉氣流，加上海陸風之影響，不利於污染物之擴散，導致污染物濃度提升，易發生懸浮微粒事件日；春季則以鋒面前緣型(B6)及高壓迴流型(B3)之天氣型態發生細懸浮微粒事件日頻率較高，因該天氣型態具風速較低及高壓等特性，導致大氣擴散及傳輸條件不佳，使污染物易產生累積；夏季由於細懸浮微粒事件日發生日數較少，因此各類型之天氣型態日數差異不大。

表 4.1.1 2011 年至 2017 年間四季細懸浮微粒事件日出現日數

| 季節\年份 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 春季 | 57 | 40 | 43 | 29 | 18 | 30 | 21 |
| 夏季 | 12 | 10 | 7 | 0 | 5 | 3 | 0 |
| 秋季 | 45 | 54 | 33 | 22 | 30 | 21 | 9 |
| 冬季 | 32 | 24 | 45 | 34 | 36 | 21 | 17 |
| 合計 | 146 | 128 | 128 | 85 | 89 | 75 | 47 |

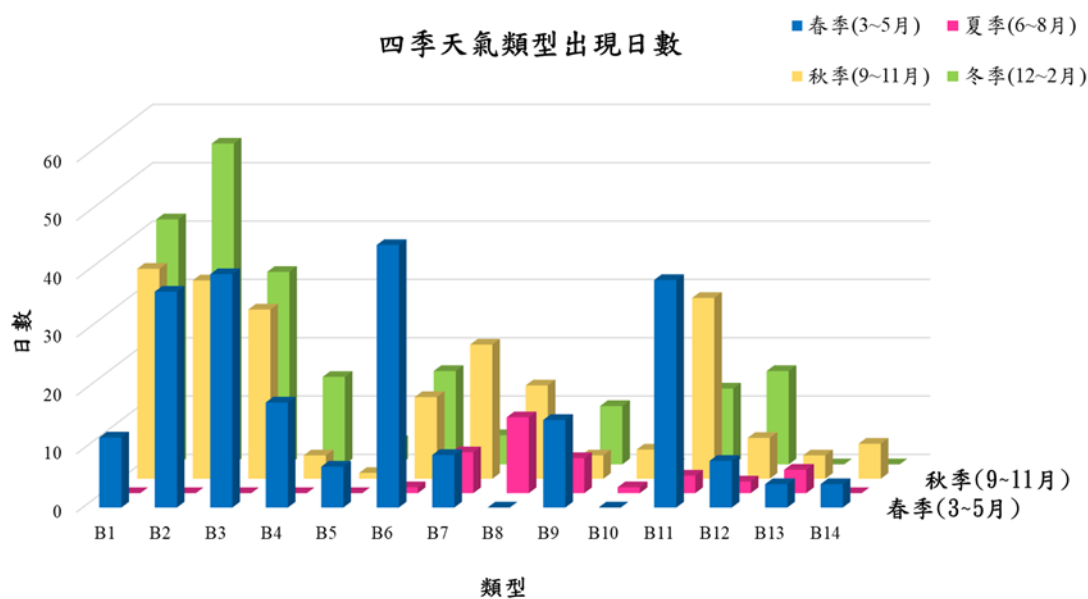


圖 4.1.1 2011 年至 2017 年間四季天氣類型出現日數

表 4.1.2 14 種天氣類型及其特性描述

| 天氣類型 | 特徵簡述 |
|---------------|--|
| 東北季風型 (B1) | 大陸冷高壓未出海，台灣受其影響溫度低，風力則決定於氣壓梯度大小，盛行北風或東北風，多發生於秋末、冬季及春初。 |
| 高壓出海型 (B2) | 當大陸冷高壓於 30 °N 處或附近出海，但中心未達 125 °E。台灣盛行北風或東北風，多發生於秋末、冬季及春初。 |
| 高壓迴流型 (B3) | 大陸高壓東移通過 125 °E，高壓中心處於台灣東北方，有偏南風或東南風出現，北部多雲有雨，南部晴到多雲。一般全年均有出現機會，惟秋末至梅雨期間較多。 |
| 鋒面過境型 (B4) | 指鋒面在 24 小時內離開台灣，台灣地區受鋒面影響天氣相當不穩定，陰天或有雨。 |
| 鋒面滯留型 (B5) | 鋒面位於台灣境內且停留時間在 24 小時以上，如滯留鋒或囚錮鋒。冷暖氣團勢力相當，鋒面無法快速移動，徘徊、停留於原地，造成雲雨天氣。 |
| 鋒面前緣型 (B6) | 鋒面在華南一帶 (27-30 °N)，鋒面雲系尚未籠罩台灣本島，台灣位於鋒前暖區，天氣相對穩定但有時北部雲量偏多，偶有陣雨。多出現在梅雨期及秋、冬季，夏季甚少。 |
| 熱帶低壓型 (B7) | 台灣附近無鋒面，太平洋高壓中心偏東微弱，台灣東南面有熱帶低壓(或颱風)，受外圍環流影響，雲多或雨，偏東或東南風。多發生在夏季，偶於梅雨期。 |

| | |
|----------------------------------|--|
| <p>颱風型 (B8)</p> | <p>台灣在颱風或或熱帶性低氣壓 (T.D.)侵襲中或在 在其外圍環流內，多發生在夏季至秋初。</p> |
| <p>偏南氣流型 (B9)</p> | <p>一般華中有熱低壓，而太平洋高壓中心在日本以 東之海面，並未抵達台灣附近，台灣南面有熱帶 低壓系統，吹偏南風，一般天氣炎熱，然午後雲 量增多，與西南氣流型 (A15)不同處乃是降雨並 不明顯，且為不連續性降雨。</p> |
| <p>西南氣流型 (B10)</p> | <p>當颱風北上至東海、韓國或日本九州島以西時， 將引西南氣流入台灣。西南氣流受地形影響，台 灣西部有明顯降雨，多發生於夏至秋末。</p> |
| <p>華南雨區東移型 (B11)</p> | <p>鋒面在華北、華中一帶向東南移動，華南沿海常 有另一並不明顯的鋒面出現，不至直接東移經過 台灣，但伴隨之雨區卻隨氣流影響天氣。</p> |
| <p>東海低壓/台灣低 壓型 (B12)</p> | <p>東海低壓指 27 °N 以北之東海所生成之低氣 壓，對大陸天氣之影響小，而台灣處其南面，受 其影響大，天氣不穩定。 台灣低壓指 20-27 °N 和 117-128 °E 海域形成之 低氣壓，台灣終日陰雨，發生在冬至春初。</p> |
| <p>太平洋高壓西伸 型 (B13)</p> | <p>台灣地區及周圍海域由西伸太平洋高壓所控 制，其高壓中心多在 20-24 °N 及 125-135 °E 範 圍內，壓力梯度微弱、風速緩、偏南風、悶熱， 有時午後有雷陣雨，為典型的夏季氣候。</p> |
| <p>太平洋高壓型 (B14)</p> | <p>當太平洋高壓斷裂為多中心型時，台灣在南海高 壓影響下，風力小，一般為晴朗炎熱。在盛夏至 秋初出現。</p> |

(資料來源：白珏玲, 1998)

表 4.1.3 2011 年至 2017 年間四季天氣類型出現日數及機率

| 天氣類型\季節 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 總日數 |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|
| B1 | 12 (1.72%) | 0 (0.00%) | 36 (5.16%) | 42 (6.02%) | 90 |
| B2 | 37 (5.30%) | 0 (0.00%) | 34 (4.87%) | 55 (7.88%) | 126 |
| B3 | 40 (5.73%) | 0 (0.00%) | 29 (4.15%) | 33 (4.73%) | 102 |
| B4 | 18 (2.58%) | 0 (0.00%) | 4 (0.57%) | 15 (2.15%) | 37 |
| B5 | 7 (1.00%) | 0 (0.00%) | 1 (0.14%) | 4 (0.57%) | 12 |
| B6 | 45 (6.45%) | 1 (0.14%) | 14 (2.01%) | 16 (2.29%) | 76 |
| B7 | 9 (1.29%) | 7 (1.00%) | 23 (3.30%) | 5 (0.72%) | 44 |
| B8 | 0 (0.00%) | 13 (1.86%) | 16 (2.29%) | 0 (0.00%) | 29 |
| B9 | 15 (2.15%) | 6 (0.86%) | 4 (0.57%) | 10 (1.43%) | 35 |
| B10 | 0 (0.00%) | 1 (0.14%) | 5 (0.72%) | 0 (0.00%) | 6 |
| B11 | 39 (5.59%) | 3 (0.43%) | 31 (4.44%) | 13 (1.86%) | 86 |
| B12 | 8 (1.15%) | 2 (0.29%) | 7 (1.00%) | 16 (2.29%) | 33 |
| B13 | 4 (0.57%) | 4 (0.57%) | 4 (0.57%) | 0 (0.00%) | 12 |
| B14 | 4 (0.57%) | 0 (0.00%) | 6 (0.86%) | 0 (0.00%) | 10 |

4.1.2 採樣期間氣象條件分析

由於採樣期間之氣象條件會對污染物之傳輸與分布造成影響，各地區又因地形及地理位置差異，使得不同區域之氣象條件有所差異。其中，風速決定大氣中污染物之擴散程度，風向則影響污染物之傳遞方向，藉由大氣氣流之流動，將污染物從污染源傳送至下風處，因此風速及風向與大氣污染物之傳輸具密切關聯性。本研究將採樣期間區分為春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月) 四季，並利用採樣期間蒐集之風速、風向資料繪製風花圖，以分析各季節之氣象條件。

採樣期間之氣象監測資料如表 4.1.4 所示，表中顯示各氣象參數之平均值及其範圍，包括：溫度、相對濕度、大氣壓力、風速及風向。由於春季之氣象監測數據有誤，因此本研究春季之風速及風向資料採用台電東大測站之監測數據。採樣期間冬季溫度因受強烈大陸冷氣團影響，平均溫度約 10.1 °C，採樣期間最高溫則發生在夏季，平均溫度為 30.0 °C。平均相對溼度於冬季及夏季期間較高，分別為 80.9% 及 75%；秋季之平均相對濕度則較低。

採樣期間風花圖如圖 4.1.2 所示，由春季之風花圖顯示，因春季屬於季節交替之際，風向與其他季節相比較不穩定，風向變化大。春季採樣期間盛行風向以西北風及北風為主，平均風速低於 1 m/s。由

夏季之風花圖顯示，夏季期間主要受季風影響，盛行風向主要以南風為主，平均風速小於 1 m/s。由秋季之風花圖顯示，秋季風向開始轉變，風速亦增強，以東北東風向為主，平均風速為 1.5 m/s。由冬季之風花圖顯示，由於冬季受大陸高壓冷氣團影響，盛行風向以東北東及東風為主，平均風速為 1.3 m/s。整體而言，平均風速以秋季為四季中最高者，而春季最低。

表 4.1.4 採樣期間氣象條件

| 季節\氣象因子 | 溫度 (°C) | 相對溼度 (%) | 大氣壓力 (hPa) | 風速 (m/s) | 盛行風向 |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------------|------------------|------------|
| 春季 | -- | -- | -- | 0.8* (0-2.6) | NW*, N* |
| 夏季 | 30.0 (25.9-35.6) | 75.0 (54.0-90.0) | 1010.7 (1008.3-1013.2) | 0.9 (0-4.0) | S |
| 秋季 | 22.7 (19.9-29.8) | 68.9 (46.0-84.0) | 1015.9 (1010.9-1022.8) | 1.5 (0.4-4.0) | ENE |
| 冬季 | 10.1 (7.0-17.2) | 80.9 (63.0-91.0) | 1025.5 (1022.4-1028.7) | 1.3 (0-2.7) | ENE, E |

註：標記星號 (*)之數據源自於台電東大測站測值

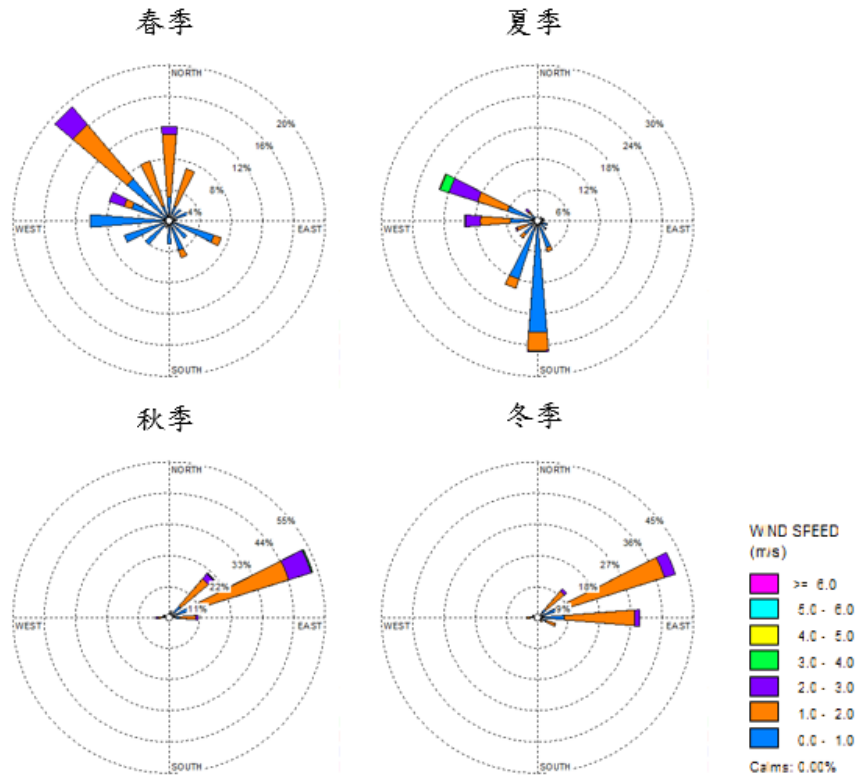


圖 4.1.2 採樣期間風花圖

4.2 大氣懸浮微粒質量濃度

4.2.1 採樣期間微粒質量濃度變化

本研究將大氣懸浮微粒區分為三個粒徑範圍：粗微粒 ($>1.8 \mu\text{m}$)、細微粒 ($0.1-1.8 \mu\text{m}$)及超細微粒 ($<0.1 \mu\text{m}$)，各粒徑範圍微粒質量濃度及 $\text{PM}_{1.8}/\text{PM}_{10}$ 比值如表 4.2.1 及圖 4.2.1 所示。由表 4.2.1 及圖 4.2.1 得知：採樣期間粗微粒質量濃度介於 $3.70\sim 20.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，粗微粒平均濃度以春季最高 ($16.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，冬季最低 ($9.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$)；細微粒質量濃度介於 $5.09\sim 28.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，細微粒平均濃度以冬季最高 ($18.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，夏季最低 ($9.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$)；超細微粒質量濃度介於 $1.16\sim 11.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超細微粒平均濃度以夏季最高 ($5.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，冬季最低 (1.27

$\mu\text{g}/\text{m}^3$)。採樣期間於粗微粒、細微粒及超細微粒之平均濃度分別為 $13.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $14.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 $3.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。PM₁₀ 濃度介於 9.26~42.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均濃度為 $28.96 \pm 3.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。採樣期間各季節平均 PM₁₀ 濃度春季 ($31.94 \pm 7.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 秋季 ($31.02 \pm 4.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 冬季 ($27.37 \pm 13.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 夏季 ($25.52 \pm 5.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。由於夏季混合層高度較高、降雨頻繁，大氣對流條件佳，利於懸浮微粒之擴散；而冬季時因混合層高度較低、降雨量少，污染物不易擴散，且冬季盛行東北季風，空氣品質易受長程傳輸影響，因此導致夏季懸浮微粒濃度較低，冬濃度較高 (Ho et al., 2006; Hao et al., 2007)。目前環保署訂定 PM₁₀ 之 24 小時平均標準值為 $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，本研究於採樣期間量測之 PM₁₀ 濃度均低於法規標準值。比較國內外研究結果如表 4.2.2，由表中顯示：本研究量測之 PM₁₀ 濃度較其他研究低，而台灣地區量測到之 PM₁₀ 濃度與韓國地區相近，大陸地區之 PM₁₀ 濃度測值則略高。PM_{1.8}/PM₁₀ 比值範圍介於 0.47~0.84 間，平均值為 0.61 ± 0.09 ，由 PM_{1.8}/PM₁₀ 比值顯示此區域之大氣懸浮微粒主要以細微粒為主。

表 4.2.1 各粒徑範圍懸浮微粒質量濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)及 $\text{PM}_{1.8}/\text{PM}_{10}$ 比值

| 採樣時間\ 粒徑範圍 | 粗微粒 | 細微粒 | 超細微粒 | PM_{10} | $\frac{\text{PM}_{1.8}}{\text{PM}_{10}}$ |
|---------------|-------|-------|-------|------------------|--|
| 2017.04.28 | 20.83 | 13.43 | 4.86 | 35.42 | 0.52 |
| 2017.04.29 | 13.19 | 7.64 | 2.78 | 21.53 | 0.48 |
| 2017.04.30 | 14.12 | 17.36 | 3.94 | 33.10 | 0.64 |
| 2017.05.01 | 19.68 | 20.83 | 4.17 | 37.73 | 0.66 |
| 平均濃度 | 16.96 | 14.82 | 3.94 | 31.94 | 0.59 |
| 2017.08.14 | 12.04 | 8.80 | 11.34 | 30.79 | 0.65 |
| 2017.08.15 | 8.33 | 6.94 | 4.63 | 18.75 | 0.62 |
| 2017.08.16 | 15.97 | 9.72 | 3.01 | 26.85 | 0.47 |
| 2017.08.17 | 14.35 | 11.11 | 4.86 | 25.69 | 0.62 |
| 平均濃度 | 12.67 | 9.14 | 5.96 | 25.52 | 0.59 |
| 2017.10.26 | 14.58 | 14.12 | 2.55 | 28.94 | 0.58 |
| 2017.10.27 | 15.51 | 15.74 | 2.55 | 32.87 | 0.56 |
| 2017.10.28 | 12.73 | 12.27 | 3.24 | 26.39 | 0.59 |
| 2017.10.29 | 17.13 | 19.44 | 2.08 | 35.88 | 0.60 |
| 平均濃度 | 14.99 | 15.39 | 2.60 | 31.02 | 0.58 |
| 2018.02.01 | 6.02 | 22.45 | 1.39 | 28.24 | 0.84 |
| 2018.02.02 | 14.82 | 28.47 | 1.39 | 42.59 | 0.70 |
| 2018.02.04 | 3.70 | 5.09 | 1.16 | 9.26 | 0.68 |
| 2018.02.05 | 14.58 | 16.67 | 1.16 | 29.40 | 0.61 |
| 平均濃度 | 9.78 | 18.17 | 1.27 | 27.37 | 0.71 |

表 4.2.2 國內外 PM₁₀ 濃度量測結果比較

| 採樣地點 | 採樣時間 | PM ₁₀ 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 參考文獻 |
|--------|-----------|---|--------------------------|
| 台中(台灣) | 2017-2018 | 28.96 | 本研究 |
| 台中(台灣) | 2000-2008 | 56.22 | Fang et al. (2010) |
| 新北(台灣) | 2011 | 39.45 | Gugamsetty et al. (2012) |
| 高雄(台灣) | 2009-2010 | 55.8 | Yeh et al. (2016) |
| 彰化(台灣) | 2013-2014 | 52.4 | Hsu et al. (2016) |
| 蔚山(韓國) | 2008-2009 | 60.05 | Ny et al. (2011) |
| 上海(大陸) | 2009-2010 | 149.22 | Wang et al. (2013) |
| 南京(大陸) | 2010-2011 | 鼓樓：135.8 浦口：132.2 | Chen et al. (2015) |

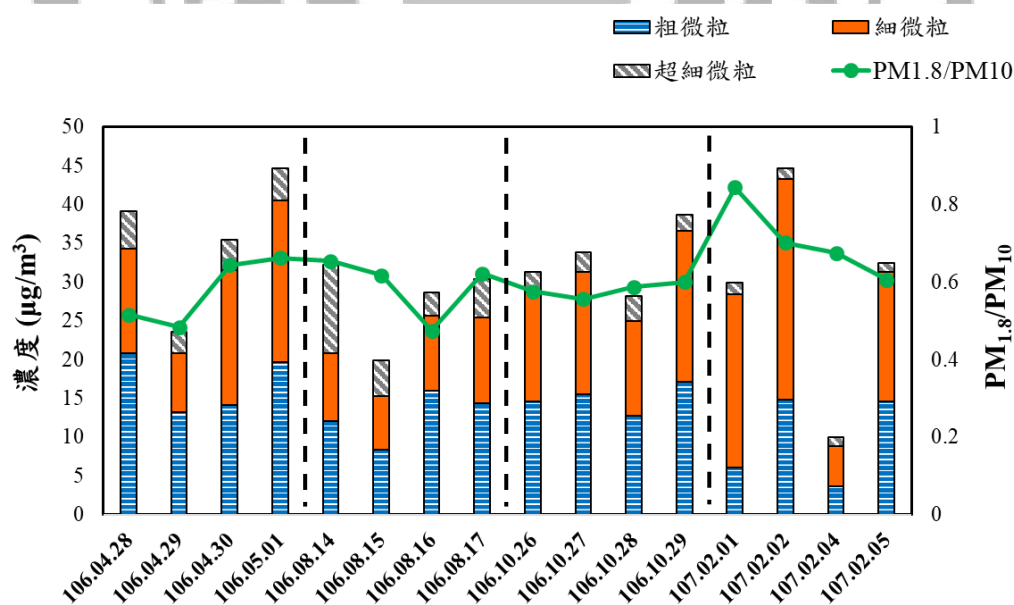


圖 4.2.1 粗微粒、細微粒、超細微粒濃度及 $\text{PM}_{1.8}/\text{PM}_{10}$ 比值圖

4.2.2 PM₁₀採樣結果與鄰近環保署空品測站監測值比較

採樣期間本研究 PM₁₀ 測值與環保署西屯及忠明測站之監測值比較結果如表 4.2.3 及圖 4.2.2 顯示：西屯測站之 PM₁₀ 監測值除冬季 (27.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)與本研究所量測之平均濃度 (27.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)相似之外，其餘三季之平均 PM₁₀ 濃度 (依序分別為：46.16、28.06 及 47.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)均較本研究高 (依序分別為：31.94、25.52 及 31.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)；忠明測站春季 (40.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)及秋季 (36.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)之平均 PM₁₀ 濃度較本研究高，夏季 (19.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)及冬季 (20.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)則略低於本研究之測值。採樣期間 PM₁₀ 濃度季節變化趨勢於東大附小及環保署忠明測站均以春季濃度最高，夏季濃度最低；而環保署西屯測站則以秋季濃度最高，冬季濃度最低。推測造成本研究及環保署空品測站之 PM₁₀ 濃度差異可能因素為：自動監測儀器及手動採樣之檢測原理、採樣濾紙及環境條件不同，導致量測數據之差異。

表 4.2.3 本研究 PM₁₀ 測值與鄰近環保署空品測站監測值比較 (µg/m³)

| 採樣時間\測站 | 本研究 | 西屯測站 | 忠明測站 |
|------------|-------|-------|-------|
| 2017.04.28 | 35.42 | 39.67 | 30.17 |
| 2017.04.29 | 21.53 | 44.67 | 43.88 |
| 2017.04.30 | 33.10 | 52.38 | 45.54 |
| 2017.05.01 | 37.73 | 47.92 | 42.04 |
| 平均濃度 | 31.94 | 46.16 | 40.41 |
| 2017.08.14 | 30.79 | 25.96 | 14.58 |
| 2017.08.15 | 18.75 | 25.17 | 17.52 |
| 2017.08.16 | 26.85 | 26.21 | 19.46 |
| 2017.08.17 | 25.69 | 34.88 | 26.39 |
| 平均濃度 | 25.52 | 28.06 | 19.49 |
| 2017.10.26 | 28.94 | 38.21 | 29.54 |
| 2017.10.27 | 32.87 | 47.46 | 37.41 |
| 2017.10.28 | 26.39 | 53.67 | 38.88 |
| 2017.10.29 | 35.88 | 50.83 | 41.79 |
| 平均濃度 | 31.02 | 47.54 | 36.91 |
| 2018.02.01 | 28.24 | 40.42 | 28.29 |
| 2018.02.02 | 42.59 | 30.08 | 22.83 |
| 2018.02.04 | 9.26 | 13.83 | 11.58 |
| 2018.02.05 | 29.40 | 25.04 | 19.33 |
| 平均濃度 | 27.37 | 27.34 | 20.51 |

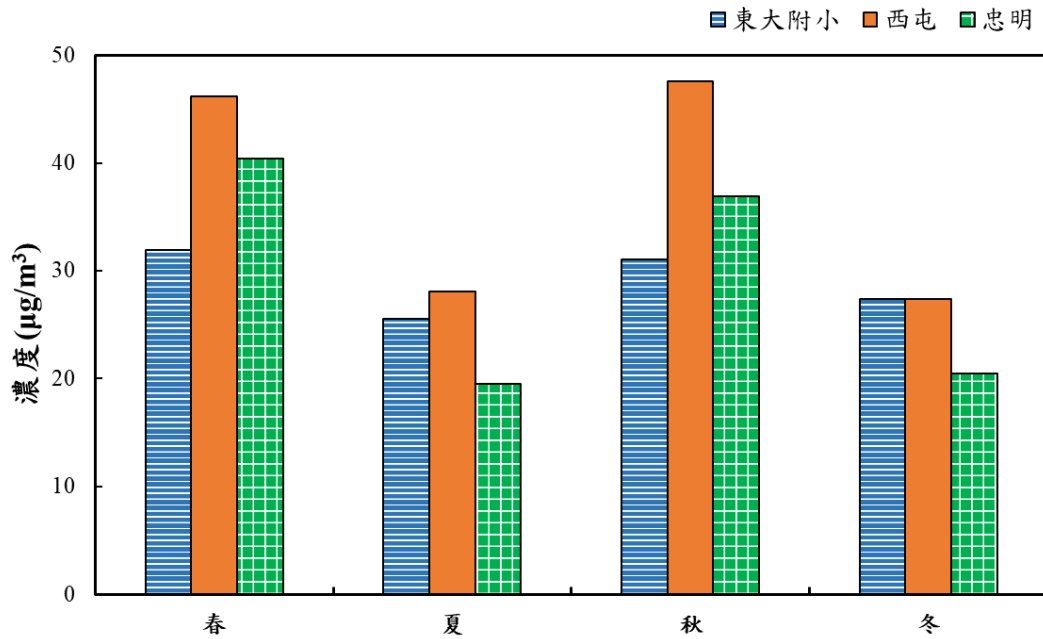


圖 4.2.2 本研究 PM₁₀ 測值與鄰近環保署空品測站監測值比較

4.2.3 微粒之粒徑分布特性

圖 4.2.3 為各季節大氣懸浮微粒各粒徑之分布圖，由圖 4.2.3 可知，四季之大氣懸浮微粒大多呈雙峰及三峰分布。春季及夏季呈雙峰分布時，主要於 0.18~0.32 µm 及 3.2~5.6 µm 處各有波峰出現，若呈現三峰分布時，則於 0.18~0.32 µm、3.2~5.6 µm 及 10~18 µm 處各有波峰出現；秋季及冬季呈雙峰分布時，主要於 0.32~0.56 µm 或 0.56~1 µm 及 3.2~5.6 µm 處各有波峰出現，若呈現三峰分布時，則於 0.32~0.56 µm 或 0.56~1 µm、3.2~5.6 µm 及 1.8~3.2 µm 或 10~18 µm 處各有波峰出現。

本研究以粒徑 1.8 µm 區分粗微粒 (Coarse particles) 及細微粒 (Fine particles)，由圖 4.2.3 顯示：春、夏兩季之最大波峰主要出現於

粗粒徑範圍，次峰出現於細粒徑範圍；秋、冬兩季之最大波峰則出現於細粒徑範圍，次峰出現於粗粒徑範圍。陳勁宇 (2010)於南部科學園區進行大氣微粒採樣，採樣結果顯示該區域微粒粒徑呈雙峰分布，主峰位於粗微粒 (3.2~5.6 μm)，次峰則分布於細微粒 (1.0~1.8 μm 及 0.56~1 μm)。張凱倫 (2004)於潮州地區進行懸浮微粒粒徑分布研究，結果亦呈現雙峰 (位於 0.56~1 μm 及 3.2~5.6 μm)及三峰分布 (位於 0.32~0.56 μm 、1~1.8 μm 及 3.2~5.6 μm)，與本研究結果相似。

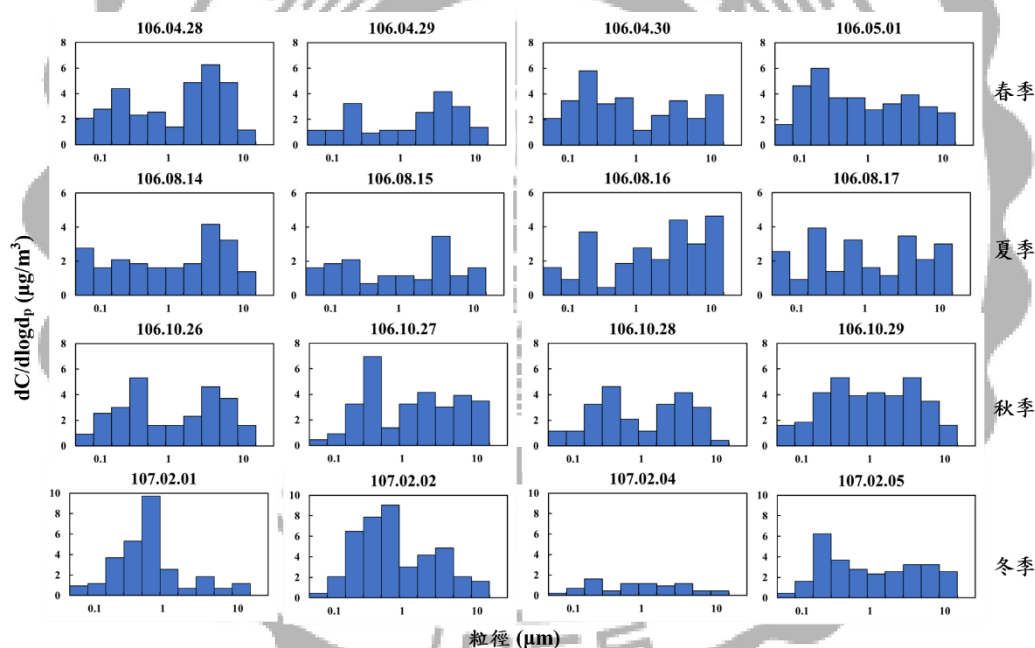


圖 4.2.3 大氣懸浮微粒粒徑分布圖

懸浮微粒依其來源不同，其粒徑分布特性亦有差異，像是海鹽飛沫及道路揚塵等原生性微粒，其粒徑主要分布於粗微粒範圍；交通及工業源排放產生之衍生性污染物則主要分布於細粒徑範圍 (Teinil et al., 2003)。圖 4.2.4 為各季節之大氣懸浮微粒於不同粒徑範圍之累積

百分率圖，圖中顯示春季細微粒累積百分率介於 38.24%~45.75%間，平均為 41.79%；夏季細微粒累積百分率介於 28.06%~37.90%間，平均為 33.40%；秋季細微粒累積百分率介於 44.44%~56.16%間，平均為 51.78%；冬季細微粒累積百分率介於 53.49%~73.64%間，平均為 62.45%。由結果得知秋季及冬季懸浮微粒於細粒徑所佔比例較粗粒徑大。推測可能因採樣點鄰近交通源、工業區及科學園區，大氣懸浮微粒多以交通源及工業源排放產生之二次污染物為主，導致較多細懸浮微粒產生。Tsai et al. (2010)研究結果顯示於台灣南部地區秋、冬兩季微粒粒徑分布以細微粒為主，春季及夏季以粗微粒為主，本研究量測結果與其相似。Gupta et al. (2006)研究結果亦顯示相似之粒徑分布，其研究結果指出粗微粒及細微粒之粒徑分布均與當地交通相關。

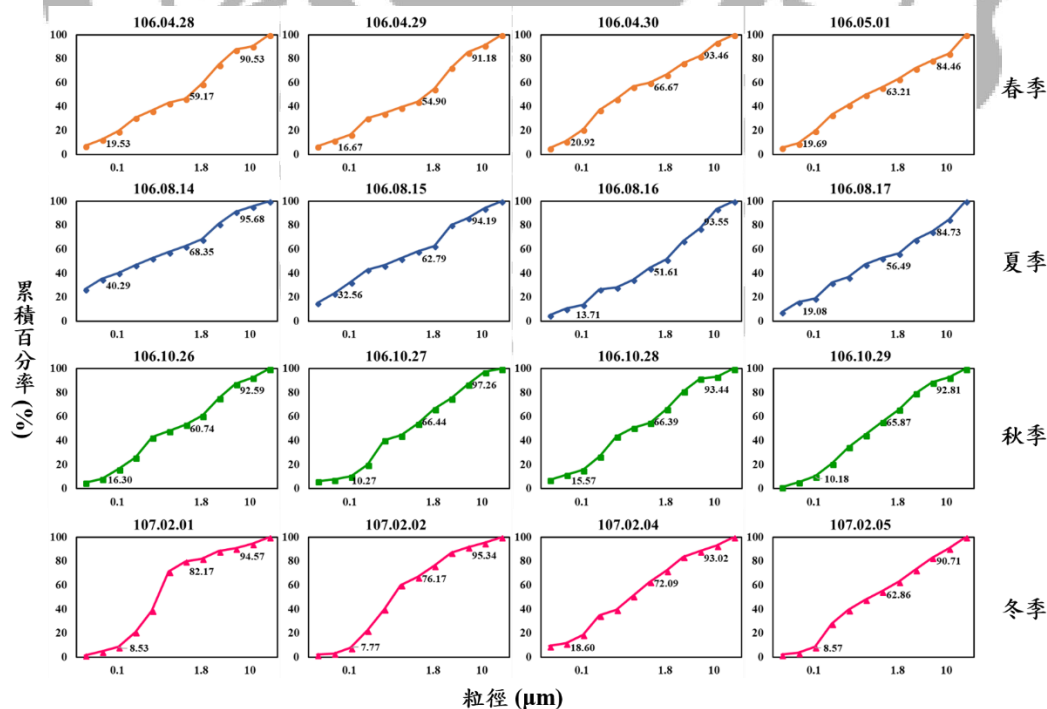


圖 4.2.4 各季節大氣懸浮微粒濃度之累積百分率圖

4.3 大氣懸浮微粒之水溶性離子成分

4.3.1 水溶性離子濃度變化

本研究歷次採樣各粒徑範圍微粒上之水溶性離子濃度如表 4.3.1~表 4.3.3 所示。由表 4.3.1~表 4.3.3 可知：採樣期間粗微粒上 Na^+ 濃度介於 $0.29\sim 2.04\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NH_4^+ 濃度介於 $0.17\sim 0.46\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 K^+ 濃度介於 $0.09\sim 0.73\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Ca^{2+} 濃度介於 $0.15\sim 0.89\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Mg^{2+} 濃度介於 $0.05\sim 0.48\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 F^- 濃度介於 $0.02\sim 0.94\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Cl^- 濃度介於 $0.91\sim 2.66\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NO_3^- 濃度介於 $0.85\sim 3.43\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 SO_4^{2-} 濃度介於 $0.74\sim 1.91\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。平均濃度以 Cl^- ($1.63\pm 0.41\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 及 NO_3^- ($1.62\pm 0.61\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 較高， SO_4^{2-} ($1.18\pm 0.29\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 及 Na^+ ($0.90\pm 0.52\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 次之，共佔粗微粒濃度比例約 53.48%。

採樣期間細微粒上 Na^+ 濃度介於 $0.11\sim 1.76\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NH_4^+ 濃度介於 $0.37\sim 3.50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 K^+ 濃度介於 $0.13\sim 0.45\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Ca^{2+} 濃度介於 $0.09\sim 0.57\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Mg^{2+} 濃度介於 $0.03\sim 0.33\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 F^- 濃度介於 $0.02\sim 0.75\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Cl^- 濃度介於 $0.61\sim 1.66\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NO_3^- 濃度介於 $0.29\sim 3.93\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 SO_4^{2-} 濃度介於 $0.81\sim 4.22\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。平均濃度依序以 SO_4^{2-} ($2.32\pm 1.03\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 及 Cl^- ($1.37\pm 0.29\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 較高， NO_3^- ($1.30\pm 1.02\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 及 NH_4^+ ($1.24\pm 1.01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) 次之，共佔細微粒濃度比例約 54.97%。

採樣期間超細微粒上 Na^+ 濃度介於 $0.04\sim 1.08\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NH_4^+ 濃度介

於 $0.10\sim 0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 K^+ 濃度介於 $0.03\sim 0.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Ca^{2+} 濃度介於 $0.01\sim 0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Mg^{2+} 濃度介於 $0.01\sim 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 F^- 濃度介於 $0.01\sim 0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 Cl^- 濃度介於 $0.14\sim 1.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NO_3^- 濃度介於 $0.13\sim 0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 SO_4^{2-} 濃度介於 $0.18\sim 0.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。平均濃度依序以 SO_4^{2-} ($0.44\pm 0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 及 Cl^- ($0.41\pm 0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$)較高， NO_3^- ($0.26\pm 0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$)及 Na^+ ($0.23\pm 0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$)次之，共佔超細微粒濃度比例約 62.05%。

圖 4.3.1~圖 4.3.3 為粗微粒、細微粒及超細微粒上水溶性離子濃度圖，比較各粒徑範圍微粒之水溶性離子濃度，結果顯示採樣期間於不同季節中各粒徑範圍之主要水溶性離子均以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 為主，此三種離子佔所有離子總濃度約 50.23%~70.90%。其中，粗微粒及超細微粒均以 Cl^- 濃度最高，其次依序為 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 Na^+ 。粗微粒之 Na^+ 及 Cl^- 推測採樣點因鄰近沿海地區，受海風影響，微粒中之 Na^+ 及 Cl^- 主要由海水飛沫貢獻。細微粒則以 SO_4^{2-} 濃度最高， Cl^- 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 次之，其中細微粒以二次無機性氣膠 (Secondary Inorganic Aerosols，簡稱 SIA； $\text{SIA}=\text{SO}_4^{2-}+\text{NO}_3^-+\text{NH}_4^+$)為主要物種，其佔總水溶性離子比例約 63%，佔細微粒質量濃度約 33.47%，主要經大氣光化學反應形成二次衍生性污染物 (Lonati et al., 2008)。

表 4.3.1 採樣期間粗微粒上水溶性離子濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | Na^+ | NH_4^+ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | F^- | Cl^- | NO_3^- | SO_4^{2-} |
|-----|---------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 春-1 | 2.04 | 0.33 | 0.34 | 0.56 | 0.17 | 0.15 | 1.64 | 3.43 | 1.38 |
| 春-2 | 0.59 | 0.23 | 0.26 | 0.43 | 0.13 | 0.06 | 1.16 | 1.41 | 0.96 |
| 春-3 | 0.29 | 0.17 | 0.09 | 0.40 | 0.10 | 0.02 | 0.91 | 0.94 | 0.74 |
| 春-4 | 0.64 | 0.19 | 0.40 | 0.48 | 0.09 | 0.18 | 1.28 | 1.11 | 0.95 |
| 夏-1 | 0.76 | 0.20 | 0.29 | 0.66 | 0.07 | 0.70 | 1.75 | 1.89 | 1.36 |
| 夏-2 | 0.71 | 0.23 | 0.27 | 0.68 | 0.08 | 0.58 | 1.69 | 1.72 | 1.29 |
| 夏-3 | 0.29 | 0.18 | 0.21 | 0.52 | 0.05 | 0.27 | 1.56 | 1.44 | 1.23 |
| 夏-4 | 0.58 | 0.21 | 0.40 | 0.56 | 0.07 | 0.55 | 1.65 | 1.49 | 1.04 |
| 秋-1 | 1.61 | 0.42 | N.D. | 0.32 | 0.44 | 0.18 | 1.95 | 1.83 | 1.24 |
| 秋-2 | 0.56 | 0.40 | N.D. | 0.15 | 0.31 | 0.37 | 1.61 | 1.42 | 1.01 |
| 秋-3 | 1.27 | 0.39 | N.D. | 0.38 | 0.44 | 0.76 | 2.09 | 2.03 | 1.32 |
| 秋-4 | 1.60 | 0.40 | N.D. | 0.53 | 0.48 | 0.94 | 2.66 | 2.15 | 1.54 |
| 冬-1 | 0.41 | 0.30 | 0.31 | 0.46 | N.D. | 0.17 | 1.27 | 1.19 | 1.08 |
| 冬-2 | 0.86 | 0.37 | 0.73 | 0.20 | N.D. | 0.06 | 1.50 | 1.41 | 0.90 |
| 冬-3 | 0.95 | 0.32 | 0.47 | 0.89 | N.D. | 0.34 | 1.50 | 0.85 | 1.91 |
| 冬-4 | 1.25 | 0.46 | 0.43 | 0.39 | N.D. | 0.22 | 1.88 | 1.57 | 0.95 |

註： NO_2^- 測值皆為 N.D.

表 4.3.2 採樣期間細微粒上水溶性離子濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | Na^+ | NH_4^+ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | F^- | Cl^- | NO_3^- | SO_4^{2-} |
|-----|---------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 春-1 | 0.61 | 0.79 | 0.41 | 0.31 | 0.07 | 0.47 | 1.46 | 0.93 | 2.07 |
| 春-2 | 0.17 | 1.40 | 0.16 | 0.17 | 0.04 | 0.02 | 0.61 | 0.96 | 2.10 |
| 春-3 | 0.26 | 2.06 | 0.30 | 0.18 | 0.05 | 0.08 | 1.06 | 1.03 | 2.62 |
| 春-4 | 0.31 | 1.51 | 0.30 | 0.18 | 0.04 | 0.13 | 0.94 | 0.77 | 2.52 |
| 夏-1 | 0.12 | 0.62 | 0.13 | 0.44 | 0.03 | 0.55 | 1.55 | 0.29 | 1.76 |
| 夏-2 | 0.44 | 0.83 | 0.40 | 0.53 | 0.05 | 0.59 | 1.64 | 0.83 | 1.81 |
| 夏-3 | 0.21 | 0.69 | 0.22 | 0.57 | 0.06 | 0.29 | 1.27 | 0.56 | 1.65 |
| 夏-4 | 0.11 | 1.13 | 0.24 | 0.54 | 0.06 | 0.41 | 1.55 | 0.30 | 1.91 |
| 秋-1 | 0.62 | 0.39 | N.D. | 0.14 | 0.25 | N.D. | 1.61 | 1.48 | 1.58 |
| 秋-2 | 0.44 | 0.37 | N.D. | 0.09 | 0.12 | 0.74 | 1.50 | 0.40 | 1.05 |
| 秋-3 | 0.63 | 0.40 | N.D. | 0.22 | 0.25 | 0.75 | 1.58 | 1.58 | 4.06 |
| 秋-4 | 1.76 | 0.42 | N.D. | 0.15 | 0.33 | 0.56 | 1.66 | 1.69 | 4.22 |
| 冬-1 | 0.33 | 3.50 | 0.45 | 0.30 | N.D. | 0.12 | 1.39 | 3.33 | 3.24 |
| 冬-2 | 0.29 | 3.21 | 0.44 | 0.04 | N.D. | 0.18 | 1.60 | 3.93 | 3.82 |
| 冬-3 | 0.20 | 0.38 | 0.30 | 0.11 | N.D. | 0.17 | 1.18 | 0.86 | 0.81 |
| 冬-4 | 0.34 | 2.13 | 0.44 | 0.10 | N.D. | 0.17 | 1.35 | 1.76 | 1.88 |

註： NO_2^- 測值皆為 N.D.

表 4.3.3 採樣期間超細微粒上水溶性離子濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | Na^+ | NH_4^+ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | F^- | Cl^- | NO_3^- | SO_4^{2-} |
|-----|---------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 春-1 | 0.06 | 0.18 | 0.03 | 0.07 | 0.02 | 0.40 | 0.40 | 0.25 | 0.41 |
| 春-2 | 0.04 | 0.19 | 0.03 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.21 | 0.13 | 0.51 |
| 春-3 | 0.05 | 0.22 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.21 | N.D. | 0.18 |
| 春-4 | 0.07 | 0.16 | 0.04 | 0.08 | 0.02 | 0.03 | 0.42 | N.D. | 0.35 |
| 夏-1 | 0.14 | 0.20 | 0.06 | 0.14 | 0.00 | 0.14 | 0.66 | 0.29 | 0.58 |
| 夏-2 | 1.08 | 0.28 | 0.69 | 0.29 | 0.02 | 0.40 | 1.03 | 0.32 | 0.59 |
| 夏-3 | 0.38 | 0.13 | 0.21 | 0.18 | 0.01 | 0.29 | 0.73 | 0.29 | 0.50 |
| 夏-4 | 0.69 | 0.15 | 0.48 | 0.18 | 0.01 | 0.00 | 0.64 | 0.28 | 0.29 |
| 秋-1 | 0.19 | 0.16 | N.D. | 0.03 | 0.06 | 0.14 | 0.43 | 0.40 | 0.87 |
| 秋-2 | 0.17 | 0.15 | N.D. | 0.02 | 0.15 | 0.18 | 0.43 | N.D. | 0.48 |
| 秋-3 | 0.20 | 0.16 | N.D. | 0.03 | 0.06 | 0.19 | 0.43 | 0.39 | 0.79 |
| 秋-4 | 0.13 | 0.15 | N.D. | 0.06 | 0.12 | 0.01 | 0.44 | 0.27 | 0.48 |
| 冬-1 | 0.05 | 0.10 | 0.07 | 0.11 | N.D. | 0.06 | 0.15 | 0.14 | 0.25 |
| 冬-2 | 0.18 | 0.11 | 0.08 | 0.01 | N.D. | 0.07 | 0.15 | 0.19 | 0.24 |
| 冬-3 | 0.07 | 0.12 | 0.09 | 0.03 | N.D. | 0.07 | 0.14 | 0.19 | 0.28 |
| 冬-4 | 0.12 | 0.12 | 0.09 | 0.04 | N.D. | 0.06 | 0.14 | 0.20 | 0.27 |

註： NO_2^- 測值皆為 N.D.

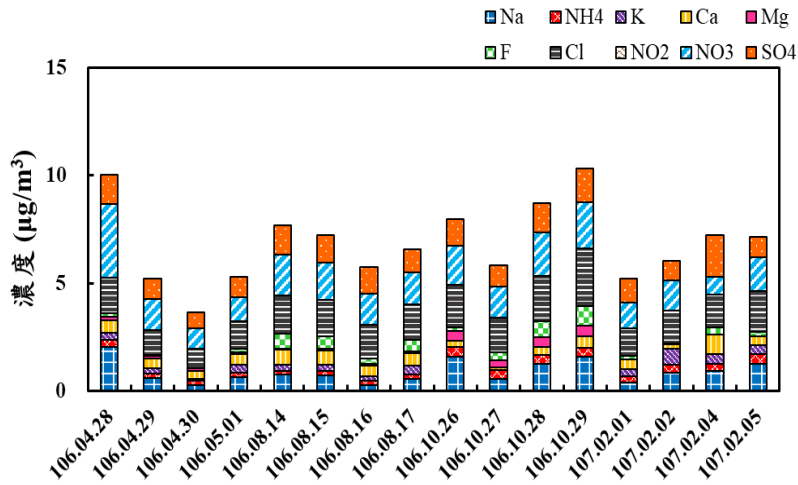


圖 4.3.1 採樣期間粗微粒水溶性離子成分濃度圖

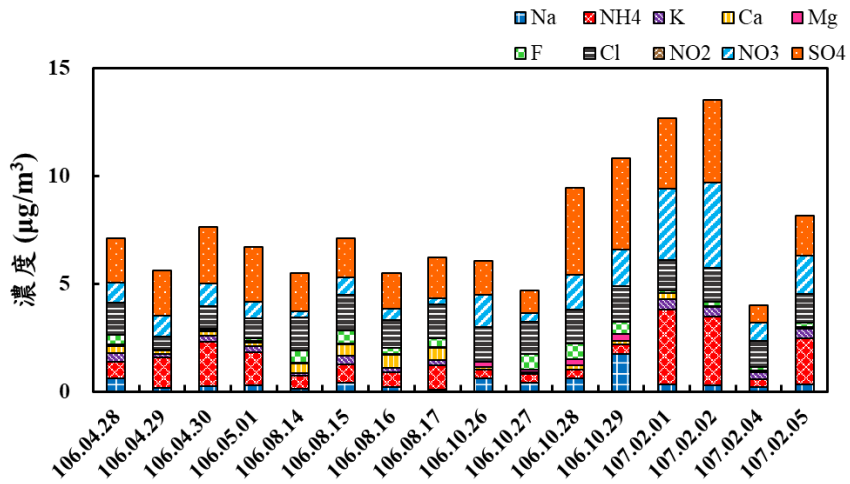


圖 4.3.2 採樣期間細微粒水溶性離子成分濃度圖

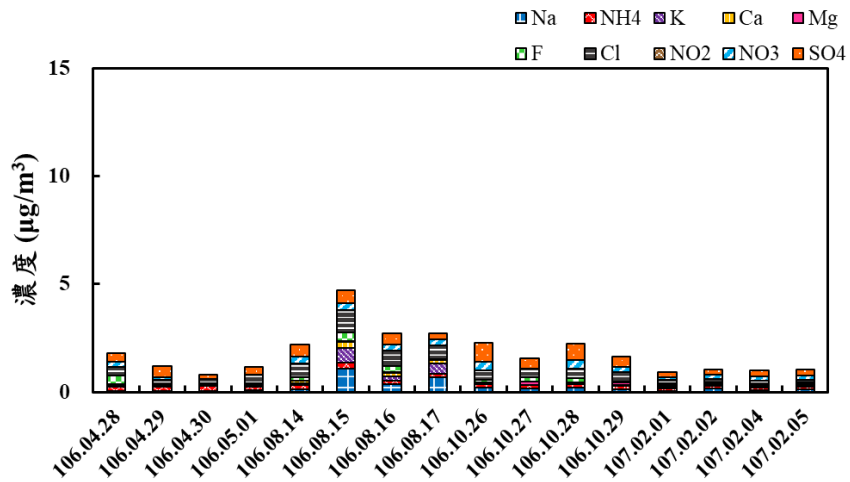


圖 4.3.3 採樣期間超細微粒水溶性離子成分濃度圖

4.3.2 水溶性離子濃度之粒徑分布

各離子之粒徑分布圖如圖 4.3.4 所示，結果顯示：本研究中 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 呈單峰分布， Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 及 Cl^- 之主峰位於粗粒徑範圍，除 Ca^{2+} 外皆位於 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 處，而 Ca^{2+} 則位於 $1.8\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 處；而 NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 之主峰分布於細粒徑範圍，分別位於 $0.18\sim 0.32\ \mu\text{m}$ 及 $0.18\sim 0.32\ \mu\text{m}$ 處。 K^+ 及 NO_3^- 則呈現雙峰分布，其主峰均位於粗粒徑範圍，位於 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 處，次峰則分別位於細粒徑範圍 $0.18\sim 0.32\ \mu\text{m}$ 及 $0.56\sim 1\ \mu\text{m}$ 處。而 F^- 之粒徑分布於本研究中則未觀察到明顯之波峰出現。陳勁宇 (2011) 指出半導體廠周界大氣之水溶性離子分布，於一般晴天、空品不良日及雨後晴天微粒上 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 SO_4^{2-} 均呈單峰分布， NO_3^- 及 Cl^- 於空品不良日及一般晴天則呈現雙峰分布。Fang et al. (2002) 研究結果顯示： Mg^{2+} 及 Cl^- 主要分布於粗微粒； NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 則分布於細微粒，與本研究量測結果相似。

各離子粒徑分布特性如下所述： Na^+ 及 Cl^- 皆呈單峰分布，波峰均位於粗粒徑範圍 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 處，粗粒徑之 Na^+ 及 Cl^- 主要來自海鹽飛沫所貢獻 (Liu et al., 2008)。 NH_4^+ 呈現單峰分布，主要分布於細粒徑範圍 $0.18\sim 0.32\ \mu\text{m}$ 處，其前驅物質為 NH_3 ，會與氣相或微粒相中之酸性物質產生中和反應，因此工廠排放之酸鹼廢氣 (如： HNO_3 及 H_2SO_4)

可能導致微粒上 NH_4^+ 濃度之增加或是由農業活動所產生。 K^+ 大致呈雙峰分布，波峰位於 $0.18\sim 0.32\ \mu\text{m}$ 及 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 處，研究指出若 K^+ 主要分布於粗微粒可能源自於海水飛沫產生；而農業廢棄物燃燒產生之 K^+ 則主要分布於細微粒 (Wu and Chen, 2008 ; Hu et al., 2002)。 Mg^{2+} 呈現單峰分布，其波峰位於 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 處，許多文獻指出粗微粒之 Mg^{2+} 可能由地殼元素或是海水飛沫所貢獻 (Parmar et al., 2001; Duvall et al., 2008)。 Ca^{2+} 大致呈單峰分布，波峰出現於 $1.8\sim 3.2\ \mu\text{m}$ ，研究指出粗微粒之 Ca^{2+} 主要來自於地殼元素 (Parmar et al., 2001; Duvall et al., 2008)。 F 於本研究中並未觀察到明顯之波峰出現，文獻指出其可能由土壤礦石及工廠排放所貢獻。 NO_3^- 則大致呈現雙峰分布，波峰位於 $0.56\sim 1\ \mu\text{m}$ 及 $3.2\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 處。Chang et al. (2008) 於大寮研究結果顯示： NO_3^- 呈雙峰分布，波峰位於 $0.56\sim 1\ \mu\text{m}$ 及 $3.2\sim 18\ \mu\text{m}$ 處，本研究波峰分布與其相似。文獻指出細微粒之 NO_3^- 主要由 HNO_3 及 NH_3 反應生成 NH_4NO_3 ， NH_4NO_3 微粒會構成細粒徑波峰，而粗微粒之 NO_3^- 則由 HNO_3 與海鹽微粒或地殼元素反應所形成 (Chang et al., 2008)。 SO_4^{2-} 大致呈現單峰分布，波峰出現於 $0.18\sim 0.32\ \mu\text{m}$ 處，文獻指出 SO_4^{2-} 之來源主要可分為原生性及衍生性，而衍生性 SO_4^{2-} 主要分布於細粒徑範圍 (Zhao and Gao, 2008)。

綜上所述，研究結果顯示微粒上 NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 粒徑分布之波峰以

細粒徑最為明顯，且均呈現單峰分布，而出現於粗粒徑波峰之離子 (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 及 NO_3^-)，其來源大部分與海鹽飛沫及地殼元素相關，其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Cl^- 主要呈現單峰分布， K^+ 及 NO_3^- 則呈雙峰分布型態。

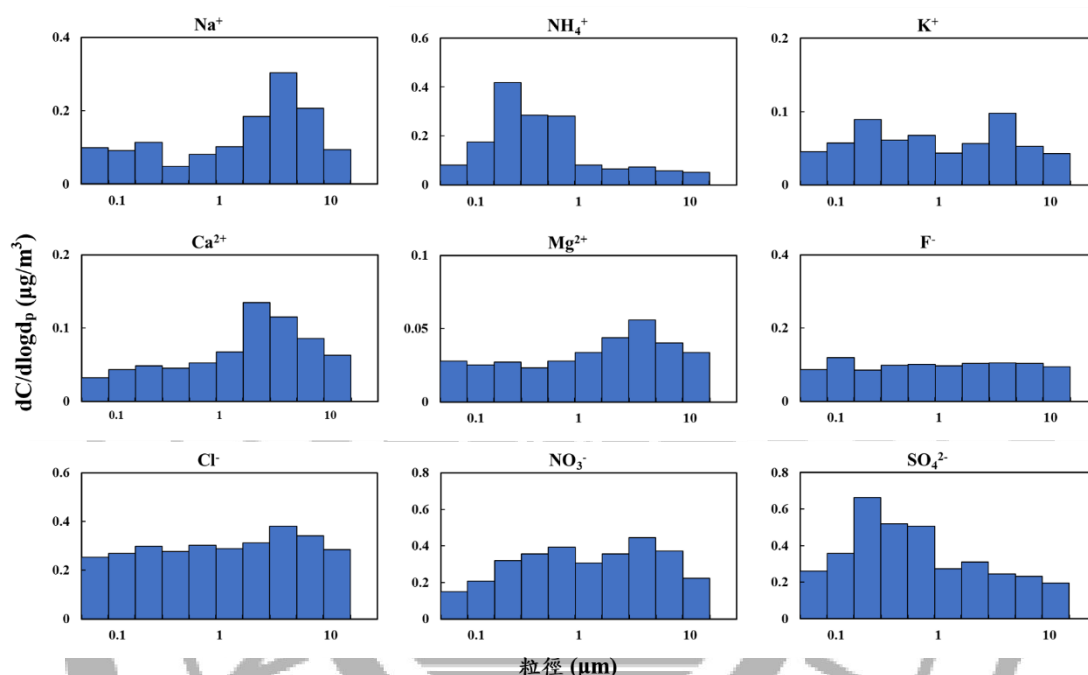


圖 4.3.4 大氣微粒各水溶性離子粒徑分布

4.3.3 水溶性離子組成比例

採樣期間各離子物種於粗微粒、細微粒及超細微粒上所佔百分比如圖 4.3.5。由圖 4.3.5 得知各季節之水溶性離子組成比例相似，於粗微粒皆以 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 為主要離子物種，其所佔比例分別為 8.60~14.71%、20.58~25.33%、19.61~28.41%及 15.55~18.94%；細微粒以 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 為主要離子物種，其所佔比例分別為 5.00~24.04%、14.37~24.66%、8.12~25.77%及 25.41~34.40%；超細微

粒則與粗微粒組成相似，亦以 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 為主要離子物種，其所佔比例分別為 4.05~18.55%、14.52~24.72%、9.59~17.8% 及 15.92~32.28%。

結果顯示粗微粒中由海鹽飛沫貢獻之 Na^+ 及 Cl^- 各佔約 13.06% 及 23.59%，而與地殼組成相關之 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} ，則分別佔約 7.09% 及 2.71%，由此可知海鹽飛沫及街道揚塵等原生性污染物均主要分布於粗粒徑範圍。細微粒則主要以二次氣膠為主，其中 SO_4^{2-} 及 NH_4^+ 於細微粒中明顯佔較高比例，分別佔約 30.85% 及 15.92%，而 NO_3^- 則是於粗微粒所佔比例略高，約為 23.66%。由於採樣點位於人口密度較高之區域，且鄰近台中工業區、中部科學園區及台中火力發電廠，空氣品質易受鄰近污染源影響，而工廠及交通工具使用之燃料均含有硫，推測可能為導致此地區水溶性離子成分中 SO_4^{2-} 佔較高之比例。此外，工廠及移動源之燃料燃燒均會排放 NO 及 NO_2 ，大量的 NO 及 NO_2 易導致大氣微粒中 NO_3^- 比例增加，因此 NO_3^- 於此區域之水溶性離子組成分布亦佔較高比例。Tsai et al. (2004); Eom et al. (2006) 研究指出：高科技產業排放微粒上之離子主要以 NH_4^+ 、 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 為主。

此外，由圖 4.3.5 得知：採樣期間於冬季時，微粒上之 NH_4^+ 、 K^+ 及 NO_3^- 之含量較其他季節高，推測可能為該季節農業活動較多，農業廢棄物之燃燒次數增加，導致該季節之 NH_4^+ 及 K^+ 濃度明顯較其他

季節高。Kang et al. (2004)研究指出：在大陸及韓國地區因秋季及冬季間常有農業廢棄物之燃燒，燃燒過程中會伴隨大量 K^+ 產生。

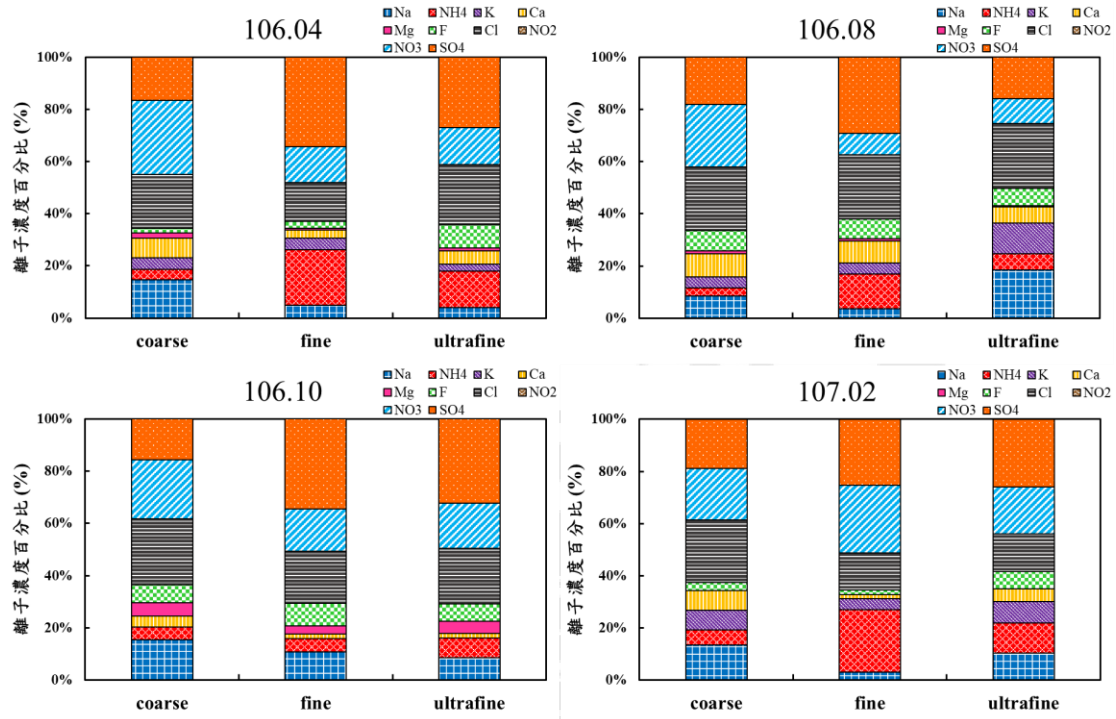


圖 4.3.5 採樣期間各粒徑範圍水溶性離子組成百分比

4.3.4 微粒酸鹼性探討

大氣微粒之酸鹼性評估利用微粒中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 之當量濃度，進行微粒之中和比 (Neutralization Ratio, 簡稱 NR) 估算，以探討微粒之酸鹼性。Colbeck and Harrison (1984) 定義如下：

$$NR = \frac{[NH_4^+]}{[NO_3^-] + [nss \cdot SO_4^{2-}]}$$

其中， $[NH_4^+]$ 為微粒中銨鹽當量濃度； $[NO_3^-]$ 為微粒中硝酸鹽當量濃度； $[nss \cdot SO_4^{2-}]$ 為微粒中非海鹽硫酸鹽 (Non-sea-salt Sulfate) 當量濃

度。當量濃度單位均為 eq/m^3 。

根據 Ohta and Okita (1990) 研究指出：微粒上之 Na^+ 僅源自於海鹽，Parmar et al. (2001) 依此假設由量測所得之 SO_4^{2-} 濃度扣除海鹽貢獻求得非海鹽硫酸鹽濃度，如下式：

$$[\text{nss} \cdot \text{SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.251 \times [\text{Na}^+]$$

由微粒中和比得知：若 $\text{NR} > 1$ ，代表銨鹽過剩，微粒呈偏鹼性；若 $\text{NR} = 1$ ，代表三種離子完全反應，微粒呈中性；若 $\text{NR} < 1$ 則代表 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 過剩，銨鹽不足，微粒呈偏酸性。

表 4.3.4 為本研究與其他研究之微粒中和比比較表，本研究 PM_{10} 、 PM_1 及 $\text{PM}_{0.1}$ 之 NR 值如表所示依序分別為 0.82、1.11 及 1.03，粒徑較大之微粒偏酸性，粒徑愈小則微粒呈中性或偏鹼性。比較各研究之 NR 值，由表中可得知除大寮地區量測 $\text{PM}_{0.1}$ 之 NR 值偏高以外，大部分城市及本研究量測之微粒中和比均接近於 1。此外，由表中可觀察到 NR 值與粒徑之關係，結果顯示當微粒粒徑小於 $1 \mu\text{m}$ ，微粒呈偏鹼性；當微粒粒徑大於 $2.5 \mu\text{m}$ ，微粒主要呈偏酸性或中性，本研究量測結果於其他研究相似。

表 4.3.4 微粒中和比 (NR)比較表

| 微粒大小 | 加泰隆尼亞, 西班牙 ¹ | 青島, 大陸 ² | 大寮, 台灣 ³ | 台西, 台灣 ⁴ | 本研究 |
|-------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------|
| PM ₁₀ | 0.67 | - | 1.00 | - | 0.82 |
| PM _{2.5} | 0.99 | 0.66~1.18 | 1.11 | 0.94 | - |
| PM ₁ | - | - | 1.11 | - | 1.11 |
| PM _{0.1} | - | - | 1.6 | - | 1.03 |

註：¹Querol et al. (2001); ²Hu et al. (2002); ³張立鵬 (2009); ⁴林聖達 (2011)

4.3.5 硫氧化比值及氮氧化比值

本研究利用硫氧化比值 (Sulphur Oxidation Ratio, SOR)及氮氧化比值 (Nitrogen Oxidation Ratio, NOR)，探討大氣中 SO₂ 及 NO₂ 轉化成硫酸鹽及硝酸鹽之程度及污染傳輸情形，藉以推估為當地之污染源或是經其他污染傳輸過程所產生之二次污染物。

Colbeck and Harrison (1984)以 SOR 及 NOR 指標量化硫及氮的轉化，定義如下：

$$\text{SOR} = \frac{\text{nss} \cdot \text{SO}_4^{2-}}{\text{nss} \cdot \text{SO}_4^{2-} + \text{SO}_2}$$

$$\text{nss} \cdot \text{SO}_4^{2-} = \text{SO}_4^{2-} - 0.251 \times \text{Na}^+$$

$$\text{NOR} = \frac{\text{NO}_3^-}{\text{NO}_3^- + \text{NO}_2}$$

其中， $\text{nss}\cdot\text{SO}_4^{2-}$ 為非海水飛沫硫酸鹽濃度； SO_2 為大氣中 SO_2 濃度； NO_3^- 為大氣中硝酸鹽濃度； NO_2 為大氣中 NO_2 濃度，單位皆為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。當 SOR 值大於 0.25 及 NOR 值大於 0.1 時，代表當地所產生之污染物轉化潛勢高，或是可能來自遠距離物種轉化及傳輸，大氣中存在較多二次無機性氣膠。

本研究 SOR 及 NOR 計算採用環保署西屯測站量測之 SO_2 及 NO_2 數據進行計算，各粒徑微粒於各季節之 SOR 及 NOR 值整理如表 4.3.5 所示。Colbeck and Harrison (1984)指出 NOR 值會低於 SOR，由表 4.3.5 結果顯示本研究於各粒徑範圍下皆符合此現象。由表中得知：採樣期間大氣中 $\text{PM}_{0.1}$ 、 PM_1 及 PM_{10} 微粒於四季之 SOR 值分別介於 0.240~0.510、0.629~0.834 及 0.731~0.881 間，平均值依序為 0.330、0.752 及 0.814；NOR 值則分別介於 0.049~0.161、0.199~0.537 及 0.421~0.658 間，平均值依序為 0.090、0.356 及 0.562。採樣期間 SOR 值除 $\text{PM}_{0.1}$ 於夏季為 0.24 外，其餘 SOR 值皆大於 0.25，顯示此區域大氣中有較多 SO_2 轉化形成二次硫酸鹽，或其他地區之衍生性氣膠經由長程傳輸所造成。NOR 值除 $\text{PM}_{0.1}$ 於春季、夏季及冬季外，皆大於 0.1，顯示此地區大氣中有較多 NO_2 轉化成二次硝酸鹽，亦可能為其他地區之衍生性氣膠經由外界長程傳輸所造成。

由各季節之 SOR 及 NOR 值結果顯示，秋季及冬季之轉化程度較

春季及夏季略高，因採樣期間秋、冬兩季盛行風向以東北東風為主，經光化學反應導致 SO_2 及 NO_2 轉化形成 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 之程度顯著，亦可能將都會區之污染物傳輸至採樣點，經長程傳輸具充足時間將 SO_2 及 NO_2 轉化成二次硫酸鹽及二次硝酸鹽，造成 SOR 及 NOR 值偏高，因此推測此區域除當地排放外，亦可能為自其他地區傳輸之衍生性氣膠。而春季及夏季之 SOR 及 NOR 值較低，推測因夏季盛行西南季風，風速較弱，且氣團來自於海洋，污染濃度較低，西南季風將氣團由海洋傳入至採樣點，由於傳輸距離較短，污染物反應時間較短，且夏季大氣對流旺盛，污染物較易擴散，導致夏季之 SOR 及 NOR 值較低。

表 4.3.5 採樣期間大氣於各季節不同粒徑微粒之 SOR 及 NOR 值

| | 季節 | $\text{PM}_{0.1}$ | PM_1 | PM_{10} |
|-----|----|-------------------|---------------|------------------|
| SOR | 春 | 0.273 | 0.727 | 0.785 |
| | 夏 | 0.240 | 0.629 | 0.731 |
| | 秋 | 0.510 | 0.818 | 0.859 |
| | 冬 | 0.298 | 0.834 | 0.881 |
| | 平均 | 0.330 | 0.752 | 0.814 |
| NOR | 春 | 0.049 | 0.199 | 0.421 |
| | 夏 | 0.064 | 0.241 | 0.520 |
| | 秋 | 0.161 | 0.448 | 0.658 |
| | 冬 | 0.088 | 0.537 | 0.648 |
| | 平均 | 0.09 | 0.356 | 0.562 |

4.4 大氣懸浮微粒之金屬元素組成

4.4.1 金屬元素濃度變化

本研究分析各季節粗微粒、細微粒及超細微粒中 24 種金屬元素，由於冬季微粒之金屬組成採樣分析結果有瑕疵，故於本研究中不列入討論。各季節於各粒徑範圍微粒之金屬組成分析結果如表 4.4.1~表 4.4.3 及圖 4.4.1~圖 4.4.3 所示，結果顯示粗微粒中平均濃度較高為 Fe 及 Al，分別為 484.35 ng/m^3 及 366.20 ng/m^3 ，次之為 K 及 Mg，平均濃度分別為 352.91 ng/m^3 及 320.75 ng/m^3 ；再次之為 Ca 及 Na，平均濃度分別為 316.86 ng/m^3 及 272.61 ng/m^3 ，粗微粒中金屬元素平均濃度根據濃度高低依序排列為：Fe > Al > K > Mg > Ca > Na > Ag > As > Zn > Ba > Bi > Cu > B > Cr > Tl > Ni > Sr > Mn > Pb > Li > Co > In > Cd > Ga；細微粒中平均濃度較高為 Al 及 K，分別為 375.27 ng/m^3 及 284.53 ng/m^3 ，次之為 Na 及 Ca，平均濃度分別為 276.35 ng/m^3 及 243.59 ng/m^3 ；再次之為 Fe 及 Mg，平均濃度各為 237.98 ng/m^3 及 212.36 ng/m^3 ，細微粒中金屬元素平均濃度高低依序排列為：Al > K > Na > Ca > Fe > Mg > Ag > Bi > Zn > B > Ba > As > Cu > Tl > Ni > Sr > Cr > Pb > Mn > Li > Ga > Co > In > Cd；超細微粒中平均濃度較高者為 K 及 Ca，分別為 169.96 ng/m^3 及 157.62 ng/m^3 ，次之為 Fe 及 Al，平均濃度分別為 150.87 ng/m^3 及 150.83 ng/m^3 ，再次之則為 Na 及 Mg，平均濃度分別為 128.81 ng/m^3 及 80.91 ng/m^3 ，超細微粒中金屬元素平均濃度高低

依序排列為：K > Ca > Fe > Al > Na > Mg > B > As > Zn > Bi > Ba > Tl > Cu > Ni > Pb > Cr > Sr > Ag > Mn > In > Ga > Li > Co > Cd。郭瓊文 (2005)之研究指出：彭佳嶼海域微粒上各金屬元素濃度依其濃度高低順序排列為：Na > Mg > K > Ca > Al > Fe > Zn > Pb > Ti > Mn > Ni > Cu > Sr > Ba > Cr > Cd，其中 Na、Mg、K、Ca、Al 及 Fe 其平均濃度均大於 300 ng/m³，本研究微粒之金屬組成結果與其相似，以地殼元素及海水飛沫為主，為自然界存在之大量元素，因此微粒中具高濃度為可預期結果。

綜上所述，採樣期間各粒徑範圍之微粒中主要金屬元素為 Al、K、Ca、Fe、Na 及 Mg，佔總金屬元素比例約 82.94%，主要為地殼元素及海水飛沫所貢獻，此六種主要金屬元素濃度遠高於其他金屬元素濃度。謝岳書 (2013);薛智遠 (2011)於台灣北部地區量測大氣微粒中金屬元素，其結果均顯示以 Al、Ca、Fe、K、Mg 及 Na 為主要金屬元素，本研究量測結果與其相同。此外，微粒上金屬元素於不同季節之分布變化由圖 4.4.1~圖 4.4.3 可知：各季節之金屬濃度以春季及秋季最高，夏季最低，推測可能因春季及秋季較不利於污染物擴散，導致污染物易累積於大氣中；而夏季期間因混合層高度較高，降雨較頻繁，擴散條件較佳，因此污染物不易累積 (Yang, 2002)。此趨勢與國內台中都會區 (李崑璋, 2014)及台北都會區 (Hsu et al., 2008)之研究結果

一致，均以夏季濃度最低，春季或冬季最高之趨勢。

另外，As、Cd 及 Ni 因確定對人體為致癌物質，若人體長期暴露於富含毒性元素微粒之大氣環境中，對人體健康造成之危害甚大，因此歐盟對此三種金屬元素濃度訂定標準限值，分別為 6.0、5.0 及 20.0 ng/m³ (European Community, 2007)。本研究總懸浮微粒之 As、Cd 及 Ni 平均濃度於春季分別為 371.299、2.344 及 42.263 ng/m³；於夏季平均濃度為 0.671、0.016 及 1.436 ng/m³；於秋季平均濃度為 2.302、0.44 及 48.516 ng/m³。結果顯示：除 Cd 各季節之濃度皆低於歐盟之規範值外，As 於春季及 Ni 於春季及秋季皆高於歐盟之標準限值。推測可能因春季及秋季大氣擴散條件較差，因污染物不易擴散致累積現象產生，導致春季及秋季之微粒金屬濃度明顯增加。Suzuki et al. (2007) 研究指出：台灣半導體業為主之地區，可作為生物指標之松鼠，其體內 Ga、As、In 及 Tl 等金屬濃度較日本高，推測可能與其長時間暴露於含砷化鎵之環境相關。Chen et al. (2016) 研究結果指出中部科學園區內之超細微粒(粒徑<1 μm)中含有金屬元素 V、As、In、Ga、Cd 及 Cu 等，其中粒徑為 0.32 μm 微粒中 Ga 推測可能來自科學園區內光電業及半導體產業所貢獻。此外，由 As/Ga 濃度比例顯示：超細微粒上 Ga 及 As 等金屬對科學園區周遭之居民具潛在之健康危害。

表 4.4.1 大氣粗微粒中金屬元素濃度 (ng/m³)

| 金屬元素 | 春季 | 夏季 | 秋季 |
|------|---------|--------|---------|
| Zn | 111.482 | 2.605 | 67.914 |
| Cd | 2.062 | 0.008 | 0.166 |
| Co | 3.509 | 0.012 | 0.416 |
| Cr | 21.590 | 0.585 | 16.560 |
| Cu | 28.917 | 1.889 | 53.077 |
| Fe | 727.660 | 14.414 | 710.964 |
| Ga | 1.195 | 0.027 | 0.078 |
| In | 1.978 | 0.131 | 0.532 |
| Mn | 6.404 | 0.327 | 10.689 |
| Ni | 14.895 | 0.536 | 18.295 |
| Pb | 5.540 | 0.199 | 7.950 |
| Sr | 6.819 | 2.937 | 20.107 |
| Ag | 212.128 | 25.453 | 1.111 |
| B | 0.489 | 8.372 | 71.336 |
| Ba | 18.186 | 13.758 | 85.650 |
| Bi | 101.291 | 0.050 | 0.591 |
| Ca | 482.673 | 64.726 | 403.185 |
| K | 710.069 | 36.559 | 312.115 |
| Li | 6.125 | 0.238 | 0.746 |
| Mg | 284.262 | 15.283 | 662.716 |
| Na | 734.403 | 77.472 | 5.955 |
| Tl | 33.839 | 0.015 | 0.338 |
| As | 196.368 | 0.302 | 0.708 |
| Al | 356.863 | 43.168 | 698.555 |

表 4.4.2 大氣細微粒中金屬元素濃度 (ng/m³)

| 金屬元素 | 春季 | 夏季 | 秋季 |
|------|---------|--------|---------|
| Zn | 107.046 | 2.020 | 83.543 |
| Cd | 0.272 | 0.006 | 0.217 |
| Co | 0.752 | 0.009 | 0.502 |
| Cr | 1.955 | 0.902 | 19.353 |
| Cu | 17.666 | 1.205 | 47.027 |
| Fe | 259.881 | 12.925 | 441.125 |
| Ga | 1.117 | 0.020 | 0.153 |
| In | 0.666 | 0.074 | N.D. |
| Mn | 2.409 | 0.302 | 9.845 |
| Ni | 13.899 | 0.675 | 21.265 |
| Pb | N.D. | 0.197 | 11.112 |
| Sr | 2.861 | 2.815 | 29.170 |
| Ag | 285.660 | 14.274 | 1.056 |
| B | 0.125 | 6.603 | 148.065 |
| Ba | 15.731 | 11.657 | 89.762 |
| Bi | 132.627 | 0.013 | N.D. |
| Ca | 201.048 | 66.697 | 463.028 |
| K | 238.637 | 35.849 | 579.108 |
| Li | 5.644 | 0.238 | 1.085 |
| Mg | 84.481 | 16.780 | 535.822 |
| Na | 734.191 | 86.270 | 8.580 |
| Tl | 46.832 | 0.006 | 0.365 |
| As | 64.587 | 0.268 | 1.240 |
| Al | 105.979 | 36.629 | 983.198 |

表 4.4.3 大氣超細微粒中金屬元素濃度 (ng/m³)

| 金屬元素 | 春季 | 夏季 | 秋季 |
|------|---------|--------|---------|
| Zn | 60.924 | 0.644 | 24.756 |
| Cd | N.D. | 0.002 | 0.057 |
| Co | 0.474 | 0.003 | 0.195 |
| Cr | N.D. | 0.257 | 8.425 |
| Cu | 9.617 | 0.393 | 22.185 |
| Fe | 159.874 | 3.913 | 288.835 |
| Ga | 4.200 | 0.007 | 0.070 |
| In | 4.716 | 0.031 | N.D. |
| Mn | 1.439 | 0.078 | 5.719 |
| Ni | 13.469 | 0.225 | 8.956 |
| Pb | 11.510 | 0.066 | 3.320 |
| Sr | 0.002 | 1.233 | 11.210 |
| Ag | 4.447 | 2.941 | 0.466 |
| B | N.D. | 2.825 | 80.772 |
| Ba | 7.242 | 5.643 | 37.461 |
| Bi | 46.581 | 0.004 | N.D. |
| Ca | 267.969 | 26.462 | 178.431 |
| K | 277.942 | 13.137 | 218.790 |
| Li | 2.338 | 0.082 | 0.450 |
| Mg | 26.414 | 6.918 | 209.403 |
| Na | 345.448 | 34.893 | 6.088 |
| Tl | 43.187 | 0.002 | 0.093 |
| As | 110.374 | 0.101 | 0.354 |
| Al | 80.644 | 13.372 | 358.481 |

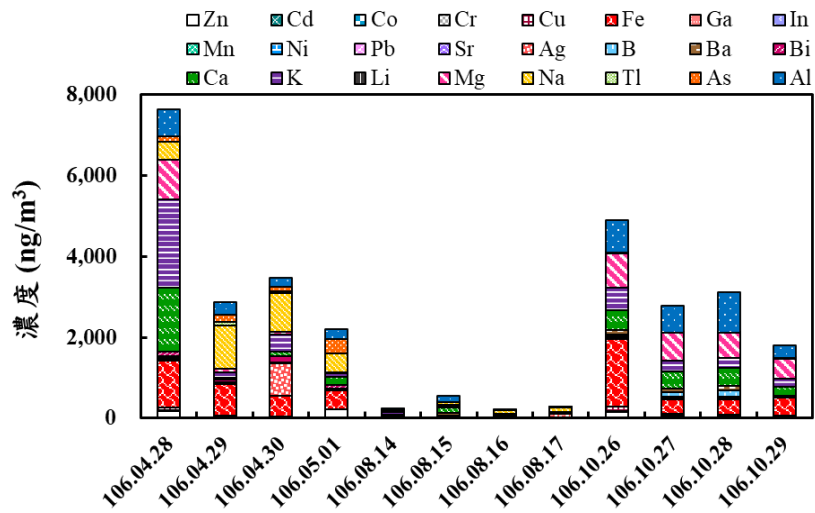


圖 4.4.1 採樣期間大氣粗微粒中金屬元素濃度圖

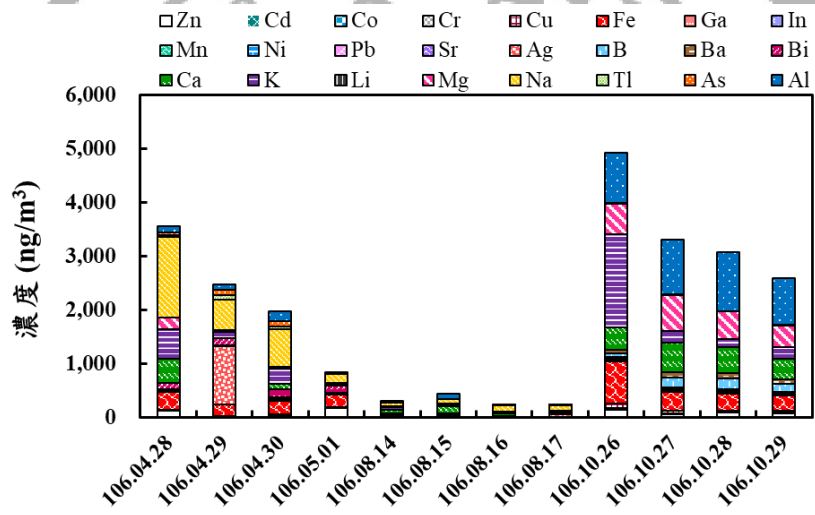


圖 4.4.2 採樣期間大氣細微粒中金屬元素濃度圖

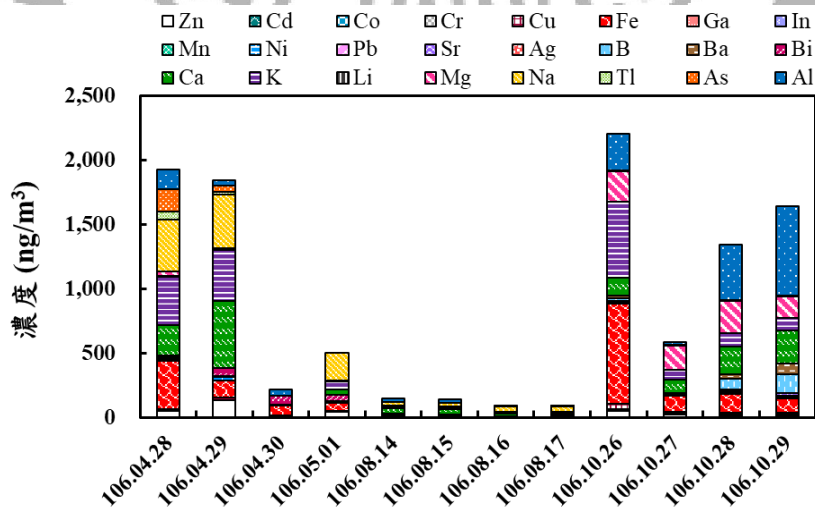


圖 4.4.3 採樣期間大氣超細微粒中金屬元素濃度圖

4.4.2 金屬元素組成比例

採樣期間各金屬元素於粗微粒、細微粒及超細微粒上所佔百分比如圖 4.4.4 所示。由圖 4.4.4 得知，採樣期間各季節於各粒徑範圍之微粒均以 Al、K、Ca、Fe、Na 及 Mg 為主，占總金屬元素百分率分別介於 4.56~30.95%、4.30~18.80%、8.65~36.91%、3.46~22.57%、1.76~31.59% 及 1.79~21.04% 間，此六種金屬元素共佔總金屬元素組成約 82.94%。吳慈敏 (2012) 於南部科學園區進行各粒徑微粒中金屬元素組成分析，結果顯示各粒徑微粒上所測得金屬總濃度有 97% 以上由 Na、Mg、Al、K、Ca、Fe、Ni 及 Zn 所貢獻。Wahlin et al. (2006) 研究顯示丹麥地區微粒上 Ca、Al、Fe 及 K 等主要為道路揚塵所貢獻，而 Fe、Cu 及 Zn 主要來自車輛煞車系統及輪胎摩擦所排放。

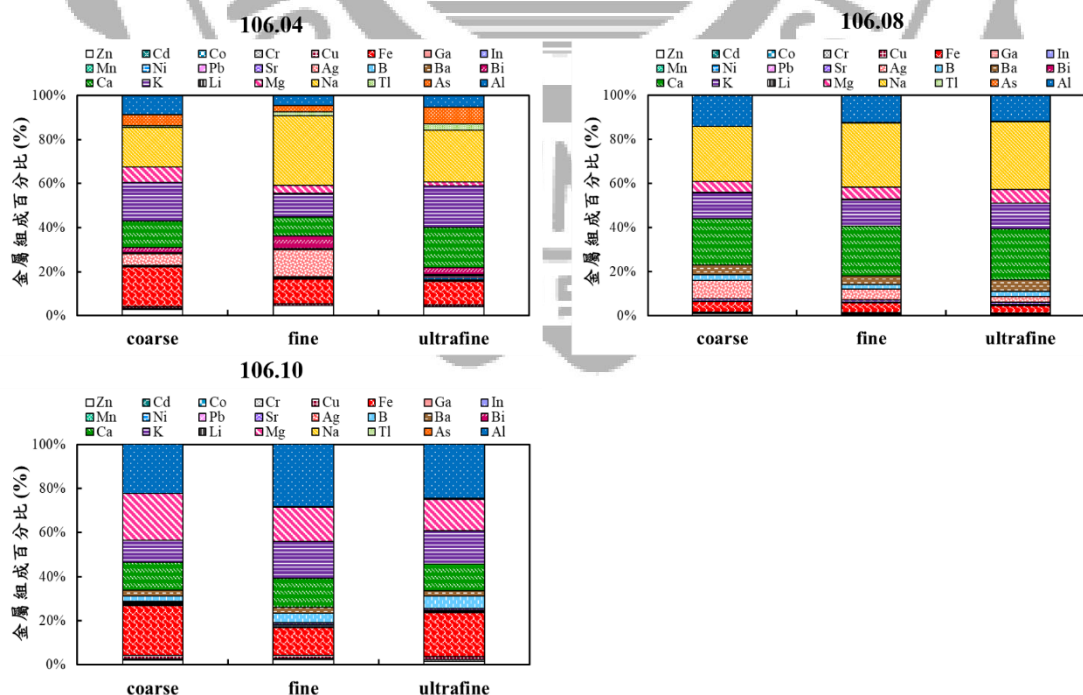


圖 4.4.4 採樣期間各粒徑範圍金屬元素組成百分比

此外，由圖 4.4.4 得知：於第一季採樣期間，As、Tl、Bi、Ag 及 Zn 佔總金屬成分比率較其他季節高，分別為 2.78~7.46%、0.83~2.92%、2.49~5.71%、0.30~12.29% 及 2.74~4.61%，其中 Tl、Bi、Ag 及 Zn 主要分布於細微粒中，As 則以超細微粒所佔比率較大。Tl、Bi、Ag 及 As 主要由工業污染源排放所貢獻，而 Zn 則與交通工具排放相關。As 大多來自燃煤發電廠及焚化爐等，此外，Tanaka et al. (2004) 研究指出：砷化鎵 (GaAs)、砷化銦 (InAs) 及砷化鋁 (AlGaAs) 為半導體及光電子產業常使用之主要原料之一。Querol et al. (2007) 研究指出 As 及 Bi 常用於銅金屬冶煉製程，易造成逸散性揚塵。因此推測上述金屬元素可能為鄰近之科學園區及工業區之半導體及工業製程排放所貢獻，導致微粒之金屬濃度提升。Furusjo et al. (2007) 研究指出 Zn 主要為車輛輪胎之磨損所造成，而本研究採樣點因鄰近交通源，車流量大易導致 Zn 濃度較高。Yatin et al. (2000) 於土耳其研究發現，Zn 及 Pb 主要分布於細微粒上 ($<2.5 \mu\text{m}$)，與本研究量測結果相似。於第二季採樣期間，Ba 及 Ag 於微粒中佔總金屬成分比率較其他季節高，分別為 3.93~4.98 % 及 2.60~8.24 %。Ba 主要由塵土及道路揚塵所貢獻，亦與交通工具之煞車墊片及輪胎磨損相關 (Lough et al., 2005)。於第三季採樣期間，B 及 Cu 佔總金屬成分比率較其他季節高，分別為 2.27~5.52 % 及 1.35~1.69 %，其中 B 主要分布於超細微粒中，而 Cu

於各粒徑範圍中則無明顯變化。Furusjo et al. (2007)研究指出 Cu 及 Sb 與交通車輛排放相關，因車輛之煞車磨損會增加 Cu 及 Sb 濃度。此外，Cu 濃度較高亦可能與金屬冶煉工業相關，推測可能為鄰近之冶金工廠所排放產生之污染，導致 Cu 濃度提升 (Lough et al., 2005)。過去許多研究指出，大氣微粒上 Al、K、Ca、Fe、Na 及 Mg 主要為地殼元素及海鹽飛沫所貢獻，Cr、Cu、Mn、Pb 及 Zn 則主要來自交通及工業活動，而 Ti、Cr、Ni、Sr、Cd、Ag 及 As 則主要由人為活動產生 (Lopez et al., 2005; Rahn, 1999; 吳仲翼, 2011)。



4.5 大氣懸浮微粒潛在來源解析

4.5.1 主成分分析

本研究為了解大氣懸浮微粒中離子及金屬元素組成之潛在污染來源，利用主成分分析法解析微粒中 9 種離子及 24 種金屬元素之污染貢獻因子，並將因子負荷量大於 0.7 者視為高度相關因子，作為鑑定可能污染來源之依據。

微粒離子成分之主成分分析結果如表 4.5.1 所示，結果顯示主成分因子共兩個，總解釋變異量為 79.864%。第一個主成分因子解析量為 46.942%，因子 1 具高度相關之離子成分包括： Na^+ 、 Mg^{2+} 、 F^- 及 Cl^- 。 Na^+ 、 Mg^{2+} 及 Cl^- 主要來自海鹽飛沫 (Quinn et al., 2004)， F^- 可能由工業製程所產生。此因子推測可能為海鹽飛沫及工業製程所貢獻。第二個主成分因子解析量為 32.921%，因子 2 具高度相關之離子成分為 NO_3^- 及 SO_4^{2-} ，屬於經光化學反應產生之衍生性污染物 (Kleeman et al., 2001; Watson et al., 1994; Steinfeld and Pandis., 1998)，此因子可視為衍生性污染物。

微粒金屬成分之主成分分析結果如表 4.5.2 所示，結果顯示主成分因子共三個，總解釋變異量百分比達 99.356%。第一個主成分因子解析量達 94.378%，因子 1 具高度相關之元素包括： Zn 、 Co 、 Cr 、 Fe 、 K 及 Mg 。 Cr 及 Co 大多來自煤炭燃燒或金屬冶煉製程等工業排

放來源，Zn 主要可視為柴油車等交通源所貢獻，K 可能來自道路揚塵及生質燃燒，Fe 及 Mg 可能由塵土所貢獻，此因子屬混合污染源，推測可能為交通排放、工業製程、塵土及生質燃燒為貢獻來源；第二個主成分因子解析量為 3.911%，因子 2 具高度相關之元素包括：Sr、B、Ba 及 Al，推估以燃煤及工業製程、交通排放及地表揚塵為貢獻來源；第三個主成分因子解析量為 1.067%，因子負荷量大於 0.7 之元素為 Na，推測來自海鹽飛沫 (Anderson et al.,1996; Hsu et al., 2004; Querol et al., 2007; Viana et al., 2008; Mooibroek et al.)。

表 4.5.1 大氣懸浮微粒離子成分主成分分析結果

| 離子成分 | 因子 1 | 因子 2 |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| Na ⁺ | 0.831 | 0.324 |
| NH ₄ ⁺ | -0.711 | 0.657 |
| K ⁺ | -0.449 | 0.138 |
| Ca ²⁺ | 0.184 | -0.365 |
| Mg ²⁺ | 0.781 | 0.064 |
| F ⁻ | 0.821 | -0.110 |
| Cl ⁻ | 0.870 | 0.109 |
| NO ₃ ⁻ | 0.163 | 0.950 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.487 | 0.719 |
| 解釋變異量 (%) | 46.942 | 32.921 |
| 累積解釋變異量 (%) | 46.942 | 79.864 |
| 可能污染來源 | 海鹽飛沫 工業製程 | 衍生性污染物 |

表 4.5.2 大氣懸浮微粒金屬元素主成分分析結果

| 金屬元素 | 因子 1 | 因子 2 | 因子 3 |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|--------------|
| Zn | 0.809 | 0.270 | 0.050 |
| Cd | 0.572 | 0.517 | 0.142 |
| Co | 0.715 | 0.318 | 0.027 |
| Cr | 0.750 | 0.476 | -0.189 |
| Cu | 0.613 | 0.292 | -0.147 |
| Fe | 0.700 | 0.533 | 0.226 |
| Ga | 0.521 | 0.622 | 0.171 |
| In | 0.071 | -0.079 | 0.609 |
| Mn | 0.663 | 0.487 | -0.062 |
| Ni | 0.587 | 0.428 | -0.054 |
| Pb | 0.661 | 0.408 | -0.052 |
| Sr | 0.479 | 0.808 | -0.336 |
| Ag | -0.200 | -0.033 | 0.175 |
| B | 0.456 | 0.818 | -0.346 |
| Ba | 0.493 | 0.806 | -0.320 |
| Bi | -0.118 | -0.080 | 0.416 |
| Ca | 0.633 | 0.691 | -0.349 |
| K | 0.848 | 0.443 | 0.248 |
| Li | 0.317 | 0.683 | 0.107 |
| Mg | 0.705 | 0.608 | -0.223 |
| Na | 0.337 | 0.118 | 0.927 |
| Tl | -0.028 | -0.045 | 0.447 |
| As | -0.037 | -0.053 | 0.461 |
| Al | 0.484 | 0.819 | -0.308 |
| 解釋變異量 (%) | 94.378 | 3.911 | 1.067 |
| 累積解釋變異量 (%) | 94.378 | 98.289 | 99.356 |
| 可能污染來源 | 交通排放 塵土 生質燃燒 工業製程 | 燃煤及工業 製程 交通排放 地表揚塵 | 海鹽飛沫 |

4.6 大氣懸浮微粒之戴奧辛組成

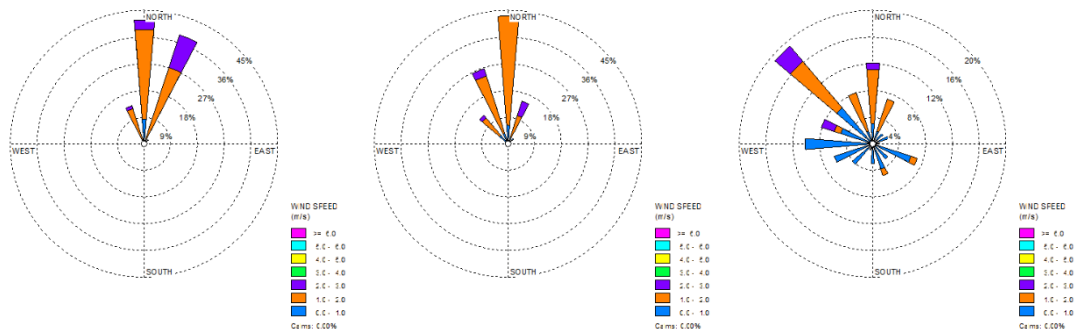
4.6.1 採樣期間氣象條件

本研究分別於 2016 年 12 月 6 日至 9 日、2017 年 1 月 16 日至 19 日及 2017 年 4 月 28 日至 5 月 1 日進行採樣，採樣期間大氣懸浮微粒之戴奧辛濃度受風速、風向及大氣穩定度等當地氣象條件影響，其中又以風速及風向影響較大，表 4.6.1 為採樣期間氣象條件觀測結果。

由表 4.6.1 得知，三次採樣期間盛行風向分別以北風、北風及西北風為主，平均風速分別介於 1.2~2.1 m/s、1.1~1.6 m/s 及 0.7~1.1 m/s 間，其中以第一次採樣期間之風速較大。採樣期間風花圖如圖 4.6.1 所示。綜觀採樣期間之風速風向結果顯示，平均風速大致均低於 1.5 m/s，因此於該期間大氣污染物不易擴散，易發生污染物累積之情形。

表 4.6.1 採樣期間之氣象條件

| 採樣日期 | 風速 | | | 盛行風向 |
|------------|-----|-----|---------|------|
| | Max | Min | Average | |
| 2016.12.06 | 2.7 | 1.2 | 2.1 | NNE |
| 2016.12.07 | 1.9 | 0.7 | 1.2 | N |
| 2016.12.08 | 1.9 | 0.7 | 1.4 | N |
| 2016.12.09 | 2.1 | 0.1 | 1.2 | N |
| 2017.01.16 | 2.7 | 0.7 | 1.5 | N |
| 2017.01.17 | 2.0 | 0.4 | 1.3 | NNW |
| 2017.01.18 | 1.8 | 0.4 | 1.1 | N |
| 2017.01.19 | 2.4 | 0.8 | 1.6 | N |
| 2017.04.28 | 2.0 | 0.1 | 1.1 | N |
| 2017.04.29 | 2.4 | 0 | 0.8 | NNW |
| 2017.04.30 | 2.6 | 0 | 0.8 | NW |
| 2017.05.01 | 2.3 | 0.1 | 0.7 | NW |



(a) 2016 年 12 月

(b) 2017 年 1 月

(c) 2017 年 4 月

圖 4.6.1 採樣期間風花圖

4.6.2 大氣微粒之戴奧辛濃度

本研究於 2016 年至 2017 年間進行大氣微粒之戴奧辛採樣及分析，分析結果如表 4.6.2 所示，由表中得知採樣期間大氣微粒之總 PCDD/Fs 濃度介於 0.191~0.254 pg/Nm³ 間，平均濃度為 0.195 pg/Nm³，其中以 2017 年 1 月量測之濃度最高，2017 年 4 月之濃度最低。採樣期間總 PCDDs 濃度介於 0.0722~0.1122 pg/Nm³ 間，總 PCDFs 濃度介於 0.0665~0.1418 pg/Nm³，其 PCDDs/PCDFs 總濃度比值分別為 1.44、1.26 及 0.92，結果顯示除 2017 年 1 月外，採樣期間大氣微粒之 PCDD/Fs 以 PCDDs 為主要濃度貢獻來源。

若以毒性觀點 (總 I-TEQ) 論之，採樣期間大氣微粒之總 I-TEQ 濃度介於 0.0006~0.0017 pg I-TEQ/Nm³，總 I-TEQ 濃度平均值為 0.001 pg I-TEQ/Nm³，其中以 2017 年 1 月量測之濃度最高 (0.0017 pg I-TEQ/Nm³)，2017 年 4 月之濃度最低 (0.0006 pg I-TEQ/Nm³)。採樣

期間總 PCDDs 之 I-TEQ 濃度範圍為 0.0002~0.0005 pg I-TEQ/Nm³，總 PCDFs 之 I-TEQ 濃度範圍為 0.0003~0.0012 pg I-TEQ/Nm³，其 PCDDs/PCDFs TEQ 之比值分別為 1.00、0.39 及 0.68，顯示大氣微粒中 PCDD/Fs 於 2017 年 1 月及 4 月之主要毒性來源為 PCDFs。採樣期間大氣微粒之 PCDD/Fs 組成百分比如圖 4.6.2 所示，由圖 4.6.2 可知，採樣期間皆以 OCDD 所占比例最高，其次依序為 OCDF、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 及 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD，採樣期間之主要特徵污染物所佔比例相似。



表 4.6.2 採樣期間大氣 PCDD/PCDFs 之濃度

| PCDD/PCDFs (pg/Nm ³) | 2016 年 12 月 | 2017 年 1 月 | 2017 年 4 月 |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|
| 2,3,7,8-TeCDD | ND | ND | ND |
| 1,2,3,7,8-PeCDD | ND | ND | ND |
| 1,2,3,4,7,8-HxCDD | ND | ND | ND |
| 1,2,3,6,7,8-HxCDD | ND | ND | ND |
| 1,2,3,7,8,9-HxCDD | ND | ND | ND |
| 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.0316 | 0.0377 | 0.0177 |
| OCDD | 0.0811 | 0.1042 | 0.0488 |
| 2,3,7,8-TeCDF | ND | ND | ND |
| 1,2,3,7,8-PeCDF | ND | ND | ND |
| 2,3,4,7,8-PeCDF | ND | ND | ND |
| 1,2,3,4,7,8-HxCDF | ND | ND | ND |
| 1,2,3,6,7,8-HxCDF | ND | ND | ND |
| 2,3,4,6,7,8-HxCDF | ND | 0.0068 | ND |
| 1,2,3,7,8,9-HxCDF | ND | 0.0013 | ND |
| 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.0352 | 0.0341 | 0.0288 |
| 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | ND | ND | ND |
| OCDF | 0.0430 | 0.0699 | 0.0434 |
| PCDDs | 0.0782 | 0.1122 | 0.0722 |
| PCDFs | 0.1127 | 0.1418 | 0.0665 |
| PCDDs/PCDFs 比 | 1.44 | 1.26 | 0.92 |
| 總 PCDD/Fs (pg/Nm ³) | 0.1909 | 0.2541 | 0.1387 |
| PCDDs (pg I-TEQ/Nm ³) | 0.0004 | 0.0005 | 0.0002 |
| PCDFs (pg I-TEQ/Nm ³) | 0.0004 | 0.0012 | 0.0003 |
| PCDDs/PCDFs (TEQ) 比 | 1.00 | 0.39 | 0.68 |
| 總 pg I-TEQ/Nm ³ | 0.0008 | 0.0017 | 0.0006 |

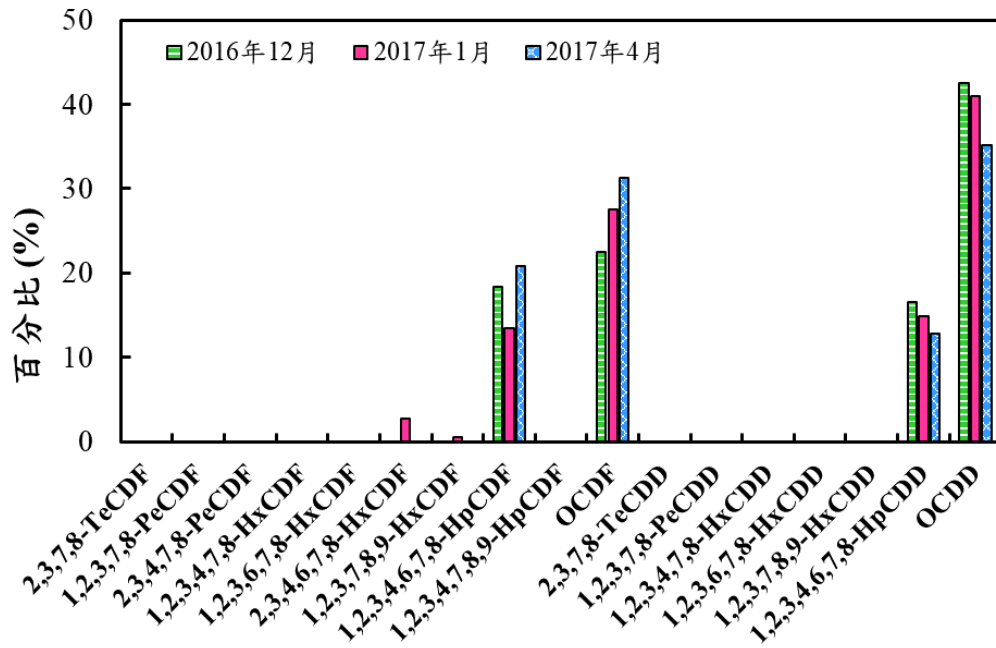


圖 4.6.2 採樣期間大氣微粒之 PCDD/Fs 之組成百分比

4.6.3 與國內外相關研究結果之比較

表 4.6.3 為本研究與國內外不同地區大氣中之 PCDD/Fs 濃度比較表，由表可知，本研究三次周界大氣採樣分析總 PCDD/Fs 之 TEQ 濃度與國內其他地區相比 PCDD/Fs 濃度偏低。由於台灣行政院環保署現行之空氣品質標準對於大氣戴奧辛濃度並無管制規範，若將國內周界大氣之 PCDD/Fs 濃度與日本法規規範值 (0.6 pg TEQ/Nm^3) 相比，國內周界大氣之 PCDD/Fs 濃度皆低於其法規規範值。若與國外文獻比較，本研究所得大氣微粒之 PCDD/Fs 濃度亦屬偏低。

表 4.6.3 本研究與國內外不同地區大氣中 PCDD/Fs 濃度比較表

| 採樣地點 | | 採樣時間 | 總 pg I-TEQ/Nm ³ | 文獻 |
|------------|----------|-------------|-------------------------------|--------------------------|
| 台灣 (台中) | 都市 | 2016-2017 年 | 0.001 | 本研究 |
| 台灣 (台中) | 都市 | 2009-2014 年 | 0.012~0.225 | 山口俊政 (2015) |
| 台灣 | 工業區 | 2004 年 | 0.058~0.260 | 陳俊吉 (2005) |
| 台灣 (中部) | 焚化爐周界大氣 | 2008-2009 年 | 0.029~0.111 | 吳慶堂 (2010) |
| 台灣 (南部) | 背景測站 | 2001 年 | 0.006 | 王琳麒 (2003) |
| | 焚化廠周界大氣 | | 0.079~0.200 | |
| | 火葬場周界大氣 | | 0.368~0.673 | |
| 台灣 (高雄) | 住宅區 | 2001 年 | 0.05 | Wang et al. (2002) |
| 香港 | 都會區 (夏季) | 2000 年 | 0.018~0.025 | Sin et al. (2002) |
| | 都會區 (冬季) | | 0.03~0.43 | |
| 南韓 | 大型都市 | 2000-2001 年 | 0.654 | Park et al. (2002) |
| | 中型都市 | | 0.272 | |
| | 小型都市 | | 0.102 | |
| 西班牙 | 工業區 | 1994-2000 年 | 0.018~0.954 | Abad et al. (2002) |
| | 都市 | | 0.013~0.357 | |
| | 郊區 | | 0.005~0.125 | |
| 土耳其 | 工業區 | 2002 年 | 0.023~0.563 | Bakoglu et al. (2005) |

第五章 結論與建議

5.1 結論

為了解工業密集區大氣懸浮微粒特性，本研究於 2016 年 12 月至 2018 年 2 月間，於台中市東海大學附屬實驗高級中學小學部頂樓，以微孔均勻沉積衝擊器 (MOUDI)，進行大氣懸浮微粒採樣，再將所採集之微粒樣本進行質量濃度、粒徑分布及化學組成分析 (包括：水溶性離子、金屬及戴奧辛成分分析)，並利用主成分分析 (PCA) 探討大氣懸浮微粒之潛在來源。本研究所得之結論彙整分述如下：

- (1) 台中市西屯地區秋、冬兩季較易發生細懸浮微粒事件日之主要天氣型態為東北季風型及高壓出海型；春季則以鋒面前緣型及鋒面迴流型之天氣型態發生細懸浮微粒事件日頻率較高。
- (2) 採樣期間大氣懸浮微粒於粗微粒質量濃度介於 $3.70\sim 20.83\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，細微粒質量濃度介於 $5.09\sim 28.47\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超細微粒質量濃度介於 $1.16\sim 11.34\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其平均濃度分別為 $13.60\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $14.38\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 $3.44\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。平均 PM_{10} 濃度以春季最高 ($31.94\pm 7.20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)，夏季最低 ($25.52\pm 5.01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)；各採樣日之 PM_{10} 濃度均低於法規標準值 ($125\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)。
- (3) 大氣懸浮微粒之粒徑分布大多呈雙峰及三峰分布。春、夏兩季之最大波峰主要出現於粗粒徑範圍，次峰出現於細粒徑範圍；秋、

冬兩季之最大波峰則出現於細粒徑範圍，次峰出現於粗粒徑範圍。

(4) 採樣期間大氣懸浮微粒於細微粒之質量濃度累積百分率介於28.06~73.64%間，春季、夏季、秋季及冬季之細微粒累積百分率平均分別為41.79%、33.40%、51.78%及62.45%，結果顯示秋季及冬季懸浮微粒於細粒徑所佔比例較粗粒徑大，春季及夏季之微粒主要以細微粒為主。

(5) 水溶性離子分析結果顯示，此區域各粒徑範圍之水溶性離子皆主要以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 為主，其佔所有離子總濃度約50.23~70.90%。大氣懸浮微粒於各粒徑範圍組成中水溶性離子所佔比例約53.48~62.05%，而以超細微粒所佔之比例最高(62.05%)。

(6) 大氣微粒中 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 之粒徑分布均呈單峰分布， Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 及 Cl^- 之主峰位於粗粒徑範圍， NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 之主峰分布於細粒徑範圍； K^+ 及 NO_3^- 呈現雙峰分布，其主峰均位於粗粒徑範圍； F^- 之粒徑分布於本研究中則未觀察到明顯之波峰出現。

(7) 本研究 PM_{10} 、 PM_1 及 $\text{PM}_{0.1}$ 之NR值依序分別為0.82、1.11及1.03，由NR值及粒徑關係結果顯示，粒徑較大之微粒偏酸性，粒徑愈小則微粒呈中性或偏鹼性。

- (8) 採樣期間 PM_{10} 、 PM_1 及 $PM_{0.1}$ 之 SOR 值均大於 0.25，且 NOR 值除 $PM_{0.1}$ 外皆大於 0.1，顯示此地區大氣中有較多 SO_2 及 NO_2 轉化成二次硫酸鹽及硝酸鹽，亦可能為其他地區之衍生性氣膠經由長程傳輸所造成。
- (9) 金屬元素分析結果顯示，此區域採樣期間各粒徑範圍之微粒中主要金屬元素為 Ca、Al、Fe、Mg、K 及 Na，佔總金屬元素比例約 82.94%，顯示此地區微粒之金屬元素組成主要為地殼元素及海水飛沫所貢獻。
- (10) 以主成分分析解析大氣懸浮微粒中離子及金屬組成之潛在污染來源，大氣微粒中水溶性離子組成之主成分分析結果顯示為海鹽飛沫、工業製程及衍生性污染物所貢獻；大氣微粒中金屬元素組成之主成分分析結果顯示可能為交通排放、工業製程、生質燃燒、地表揚塵及海鹽飛沫所貢獻。
- (11) 採樣期間大氣微粒之總 PCDD/Fs 濃度介於 $0.191\sim 0.254\text{ pg/Nm}^3$ 間，平均濃度為 0.195 pg/Nm^3 。若以毒性觀點論之，採樣期間大氣微粒之總 I-TEQ 濃度介於 $0.0006\sim 0.0017\text{ pg I-TEQ/Nm}^3$ ，總 I-TEQ 濃度平均值為 $0.001\text{ pg I-TEQ/Nm}^3$ 。

5.2 建議

- (1) 大氣懸浮微粒化學組成分析建議增加碳成分分析（元素碳及有機碳），以更加了解微粒組成特性。此外，戴奧辛採樣於本研究中未能涵蓋四季，建議可進行四季採樣及各粒徑範圍分析，以探討其濃度變化趨勢及粒徑分布。
- (2) 本研究分別於四季中各選四天進行連續採樣，季節代表性相對較為不足，建議可增加各季節之採樣天數，以觀察懸浮微粒季節變化情形，並於高污染季節增加採樣次數，以取得事件日樣品；此外亦可進行日間及夜間採樣，以探討懸浮微粒之日夜變化情形。
- (3) 本研究因人力及經濟成本考量，僅於東海大學進行單一地點之採樣，建議未來可進行多點同步採樣，將可更深入探討此區域懸浮微粒之時空變化並考量上下風區域間之污染傳輸情形。
- (4) 本研究藉主成分分析得知此區域懸浮微粒之潛在污染來源，建議可再利用化學質量平衡受體模式，並搭配模式模擬風場流動情形及污染物之擴散，進一步解析污染物之來源及傳輸。未來若能建立此地區之污染源指紋資料庫將能更瞭解此區域之污染貢獻。
- (5) 各區域之大氣懸浮微粒組成及特性隨環境條件及排放特性不同而有所差異，若能進行健康風險評估，可減少對人體健康之危害及降低對環境之影響。

參考文獻

- Anderson, J.R., Buseck, P.R. and Patterson, T.L. (1996) "Characterization of the Bermuda tropospheric aerosol by combined individual-particle and bulk-aerosol analysis." *Atmospheric Environment*, 30:319-338.
- Brauer, M., Amann, M., Burnett, R.T., Cohen, A., Dentener, F., Ezzati, M., Henderson, S.B., Kryzanowski, M., Martin, R.V., Van Dingenen, R., Van Donkelaar, A. and Thurston, G.D. (2012) "Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution." *Environmental Science and Technology*, 46:652–660.
- Brook, R.D., Rajagopalan, S., Pope, III C.A., Brook, J.R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A.V., Holguin, F., Holguin, F., Hong, Y.L., Luepker, R.V., Mittleman, J.D. (2010) "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American heart association." *Circulation*, 121:2331-2378.
- Brown, J.S., Gordon, T., Price, O., Asgharian, B. (2013) "Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment." *Particle and Fibre Toxicology*, 10:12.
- Caserini, S., Monguzzi, A.M. (2002) "PCDD/Fs Emissions Inventory in the Lombardy Region: Results and Uncertainties." *Chemosphere*, 48:779-786.
- Casati, R., Scheer, V., Vogt, R., Benter, T. (2007) "Measurement of nucleation and soot mode particle emission from a diesel passenger car in real world and laboratory in situ dilution." *Atmospheric Environment*, 41:2125–35.
- Chang, S.Y., Fang, G.C., Chou, C.K., Chen, W.N. (2006) "Source identification of PM₁₀ aerosols depending on hourly measurements of soluble components characterization among different events in Taipei Basin during spring season of 2004." *Chemosphere*, 65:792-801.
- Chang, L.P., Tsai, J.H., Chang, K.L., Lin, J.J. (2008) "Water-soluble inorganic ions in airborne particulates from the nano to coarse mode: a case study of aerosol episodes in southern region of Taiwan." *Environmental Geochemistry and Health*, 30:291-303.
- Chen, C.C. (2004) "The Emission Inventory of PCDD/PCDF in Taiwan." *Chemosphere*, 54:1413-1420.
- Chen, Y.C., Hsu, C.Y., Lin, S.L., Chang-Chien, G.P., Chen, M.J., Fang, G.C., Chiang, H.C. (2015) "Characteristic of Concentrations and Metal Compositions for PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in Yunlin County, Taiwan

- during Air Quality Deterioration.” *Aerosol Air Quality Research*, 15:2571-2583.
- Chen, P., Wang, T., Hu, X., Xie, M. (2015) “Chemical Mass Balance Source Apportionment of Size-Fractionated Particulate Matter in Nanjing, China.” *Aerosol Air Quality Research*, 15:1855-1867.
- Chen, H.W., Chen, W.Y., Chang, C.N., Chuang, Y.H., and Lin, Y.H. (2016) “Identifying Airborne Metal Particles Sources near an Optoelectronic and Semiconductor Industrial Park.” *Atmospheric Research*, 174-175:97-105.
- Chuang, M.T., Chiang, P.C., Chan, C.C., Wang, C.F., Chang, E.E., Lee, C.T. (2008) “The effects of synoptical weather pattern and complex terrain on the formation of aerosol events in the Greater Taipei area.” *Science of the Total Environment*, 399:128-146.
- Colbeck, I. and Harrison, R.M. (1984) “Ozone-secondary-visibility relationship in north-west England.” *Science of the Total Environment*, 34:87-100.
- Deshmukh, D.K., Deb, M.K., Tsai, Y.I., Mkoma, S.L. (2011) “Water Soluble Ions in PM_{2.5} and PM_{0.1} Aerosols in Durg City, Chhattisgarh, India.” *Aerosol Air Quality Research*, 11:696-708.
- Dongarrà, G., Manno, E., Varrica, D., Lombardo, M., and Vultaggio, M. (2010) “Study on ambient concentrations of PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5} and gaseous pollutants. Trace elements and chemical speciation of atmospheric particulates.” *Atmospheric Environment*, 44:5244-5257.
- Duvall, R.M., Majestic, B.J., Shafer, M.M., Chuang, P.Y., Simoneit, B.R. T., Schauer, J.J. (2008) “The water-soluble fraction of carbon, sulfur, and crustal elements in Asian aerosols and Asian soils.” *Atmospheric Environment*, 42:5872-5884.
- Eom, Y.S., Hong, J.H., Lee, S.J., Lee, E.J., Cha, J.S., and Lee, D.G. (2006) “Emission Factors of Air and Waste Management Association, 56(11):1518-1524.
- Fang, G.C., Chang, C.N., Wu, Y.S., Fu, P.C., Yang, C.J., Chen, D.C., and Chang, S.C. (2002) “Ambient Suspended Particulate Matters and Related Chemical Species Study in Central Taiwan, Taichung during 1998-2001.” *Atmospheric Environment*, 36(12):1921-1928.
- Furusjö, E., Sternbeck, J., and Cousins, A.P. (2007) “PM₁₀ source characterization at urban and highway roadside locations.” *Science of the total environment*, 387(1):206-219.
- Gomiscek, B., Frank, A., Puxbaum, H., Stopper, S., Preining, O., Hauck,

- H. (2004) "Case study analysis of PM burden at an urban and a rural site during the AUPHEP project." *Atmospheric Environment* 38:3935-3948.
- Green, N.J. L., Lohmann, R. Jones, K.C. (1996) "Seasonal, Anthropogenic, Air Mass, and Meteorological Influences on the Atmospheric Concentrations of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans (PCDD/Fs): Evidence for the Importance of Diffuse Combustion Sources." *Environmental Science and Technology*, 33:2864-2871.
- Gupta, A.K., Nag, S. and Mukhopadhyay, U.K. (2006). "Characterisation of PM₁₀, PM_{2.5} and Benzene Soluble Organic Fraction of Particulate Matter in an Urban Area of Kolkata, India." *Environmental Monitoring and Assessment*, 115:205-222.
- Hao, Y., Guo, Z., Yang, Z., Fang, M. and Feng, J. (2007). "Seasonal variations and sources of various elements in the atmospheric aerosols in Qingdao, China." *Atmospheric Research*, 85:27-37.
- Hinds, W.C. (1999) "Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles." New York: John Wiley and Sons.
- Hsu, S.C., Liu, S.C., Lin, C.Y., Hsu, R.T., Huang, Y.T., and Chen, Y.W. (2004) "Mental compositions of PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols in Taipei during spring, 2002." *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 15(5):925-948.
- Hsu, S.C., Liu, S.C., Huang, Y.T., Lung, S.C. C., Tsai, F., Tu, J.Y., and 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, D18306, doi:10.1029/2007JD009574.
- Ho, K.F., Lee, S.C., Cao, J.J., Chow, J.C., Watson, J.G. and Chan, C.K. (2006). "Seasonal variations and mass closure analysis of particulate matter in Hnog Kong." *Science of the Total Environment*, 355:276-287.
- Hu, M., He, L.Y., Zhang, Y.H., Wang, M., Kim, Y.P., Moon, K.C. (2002) "Seasnoal variation of ionic species in fine particles at Qingdao, China." *Atmospheric Environment*, 36:5853-5859.
- Hueglin, C., Gehrig, R., Baltensperger, U., Gysel M., Monn, C., and Vonmont, H. (2005) "Chemical characterization of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland."

- Atmospheric Environment, 39:637-651.
- John, W.F., Hoppel, W.A., Frick, G.M., and Larson, R.E. (1990) "Aerosol size distributions and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean." *Journal of Geophysical Research*, 95:3659-3664.
- Kang, C.M., Lee, H.S., Kang, B.W., Lee, S.K., Sunwoo, Y. (2004) "Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea." *Atmospheric Environment*, 38:4749-4760.
- Kleeman, M.J., Schauer, J.J., Cass, G.R., (2001) "Size and composition distribution of fine particulate matter emitted from motor vehicles." *Environmental and Science Technology*, 34:1132-1142.
- Kothai, P., Saradhi, I.V., Pandit, G.G., Markwitz, A., Puranik, V.D. (2011) "Chemical Characterization and Source Identification of Particulate Matter at an Urban Site of Navi Mumbai, India." *Aerosol Air Quality Research*, 11:560-569.
- Kulmala M., Vehkamäki, H., Petaja, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V.M., Birmili, W., McMurry, P.H. (2004) "Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: A review of observations." *Aerosol Science*, 35:143-176.
- Lee, Y.C., Hills, P.R. (2003) "Cool season pollution episodes in Hong Kong, 1996-2002." *Atmospheric Environment*, 37:2927-2939.
- Li, T.C., Wu, C.Y., Chen, W.H., Yuan, C.S., Wu, S.P., Wang, X.H., Du, K. (2013) "Diurnal Variation and Chemical Characteristics of Atmospheric Aerosol Particles and Their Source Fingerprints at Xiamen Bay." *Aerosol Air Quality Research*, 13:596-607.
- Lim, J.M., Lee, J.H., Moon, J.H., Chung, Y.S., and Kim, K.H. (2010) "Airborne PM₁₀ and metals from multifarious sources in an industrial complex area." *Atmospheric Research*, 96:53-64.
- Lin, G.Y., Lee, G.R., Lin, S.F., Hung, Y.H., Li, S.W., Wu, G.J., Ye, H., Huang, W., Tsai, C.J. (2015) "Ultrafine Particles and PM_{2.5} at Three Urban Air Monitoring Stations in Northern Taiwan from 2011 to 2013." *Aerosol Air Quality Research*, 15:2305-2319.
- Lin, J.J. (2002) "Characterization of water-soluble ion species in urban particles." *Environment International*, 28:55-61.
- Liu, S., Hu, M., Slanina, S., He, L.Y., Niu, Y.W., Brüegemann, E., Gnauk, T., Herrmann, H. (2008) "Size distribution and source analysis of ionic compositions of aerosols in polluted periods at Xinken in Pearl

- River Delta (PRD) of China.” *Atmospheric Environment*, 42:6284-6295.
- Lonati, G., Giugliano, M., and Ozgen, S. (2008) “Primary and secondary components of PM_{2.5} in Milan (Italy).” *Environmental International*, 34:665-670.
- Londahl, J., Pagels, J., Swietlicki, E., Zhou, J.C., Ketznel, M., Massling, A., and Bohgard, M. (2006) “A set-up for field studies of respiratory tract deposition of fine and ultrafine particles in humans.” *Aerosol Science*, 37:1152–63.
- López, J.M., Callén, M.S., Murillo, R., Garcia, T., Navarro, M.V., De la Cruz, M.T., and Mastral, A.M. (2005) “Levels of selected metals in ambient air PM₁₀ in an urban site of Zaragoza (Spain).” *Environmental Research*, 99(1):58-67.
- Lorber, M., Pinsky, P., Gehring, C. and Sovocool, W. (1998) “Relationships between Dioxins in Soil, Air, Ash and Emissions from a Municipal Solid Waste Incinerator Emitting Large Amounts of Dioxin.” *Chemosphere*, 37:2173-2197.
- Lough, G.C., Schauer, J.J., Park, J.S., Shafer, M.M., Deminter, J.T., Weinstein, J.P. (2005) “Emissions of metals associated with motor vehicle roadways.” *Environmental Science and Technology*, 39:826-836.
- Mangelson, N.F., Lewis, L., Joseph, J.M., Cui, W., Machir, J., Williams, N.W., Eatough, D.J., Rees, L.B., Wilkerson, T., Jensen, D.T. (1997) “The contribution of sulfate and nitrate to atmospheric fine particles during winter inversion fogs in Cache Valley, Utah.” *Air and Waste Management Association*, 47:167-175.
- Mooibroek, D., Schaap, M., Weijers, E. P., and Hooger brugge, R. (2011) “Source apportionment and spatial variability of PM_{2.5} using measurements at five sites in the Netherlands.” *Atmospheric Environment*, 45(25):4180-4191.
- Moreno, T., Gibbons, W., Jones, T., Richards, R. (2003) “The geology of ambient aerosols: characterizing urban and rural/coastal silicate PM_{10-2.5} and PM_{2.5} using high-volume cascade collection and scanning electron microscopy.” *Atmospheric Environment*, 37:4265-4276.
- Ntziachristos, L., Ning, Z., Geller, M.D., Sheesley, R.J., Schauer, J.J. and Sioutas, C. (2007) “Fine, ultrafine and nanoparticle trace element compositions near a major freeway with a high heavy-duty diesel fraction.” *Atmospheric Environment*, 41(27):5684-5696.

- Ohta, S. and Okita, T. (1990) "A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo." *Atmospheric Environment*, 24:815-822.
- Oliveira, C., Pio, C., Caseiro, A., Santos, P., Nunes, T., Mao, H., Luahana, L., Sokhi, R. (2010) "Road Traffic Impact on Urban Atmospheric Aerosol Loading at Oporto, Portugal." *Atmospheric Environment*, 44:3147-3158.
- Parmar, R.S., Satsangi, G.S., Kumari, M., Lakhani, A., Srivastava, S.S., Prakash, S. (2001) "Study of size distribution of atmospheric aerosol at Agra." *Atmospheric Environment*, 35:693-702.
- Pearson, J.F., Bachireddy, C., Shyamprasad, S., Goldfine, A.B., Brownstein, J.S. (2010) "Association between fine particulate matter and diabetes prevalence in the U.S." *Diabetes Care*, 33(10):2196.
- Pope, III C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., and Thurston, G.D. (2002) "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution." *Journal of American Medical Association*, 287:1132–1141.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodeiguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massague, G., Puig, O. (2001) PM₁₀ and PM_{2.5} 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., Rosa, J. de la, Campa, A., Sánchez de la, Artñano, B., Salvador, P., Santos, S., García, Dos., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M.C., Monfort, E., Gil, J.I., Inza, A. Ortega, L.A., Santamaría, J.M. and Zabalza, J. (2007) "Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain." *Atmospheric Environment*, 41(34):7219-7231.
- Ragosta, M., Caggiano, R., Macchiato, M., Sabia, S., Trippetta, S. (2008) "Trace elements in daily collected aerosol: Level characterization and source identification in a four-year study." *Atmospheric Research*, 89:206-217.
- Rahn, K.A. (1999) A graphical technique for determining major components in a mixed aerosol. I. Descriptive Aspect." *Atmospheric Environment*, 33:1441-1455.
- Samet, J.M., Dominici, F., Curriero, F.C., Coursac, I., and Zeger, S.L. (2000) "Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 U.S. Cities,

- 1987-1997.” *Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, 34:1742-1749.
- Steinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (1998). “Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.” Wiley, New York.
- Stone, E.A., Yoon, S.C., Schauer, J.J. (2011) “Chemical Characterization of Fine and Coarse Particles in Gosan, Korea During Springtime Dust Events.” *Taiwan Association for Aerosol Research*, 11:31-43.
- Sun, Y., Zhuang, G., Tang, A., Wang, Y., and An, Z. (2006) “Chemical Characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Haze-fog Episodes in Beijing.” *Environmental Science and Technology*, 40:3148-3155.
- Tecer, L.H., Alagha, O., Karaca, F., Tuncel, G., Eldes, N. (2008) “Particulate matter (PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, and PM₁₀) and children's hospital admissions for asthma and respiratory diseases: A bidirectional case-crossover study.” *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part A-Current Issues*, 71(8):512–520.
- Tsai, C.J., Chang, C.T., Liu, T.W., Huang, C.C., Chien, C.L., and Chien, H.M. (2004) “Emission Characteristics and Control Efficiency of Acidic and Basic Gases and Aerosols from Packed Towers.” *Atmospheric Environment*, 38(4):643-646.
- Tsai, Y.I., Chen, C.L. (2006) “Atmospheric aerosol composition and source apportionments to aerosol in southern Taiwan.” *Atmospheric Environment*, 40:4751-4763.
- Tsai, H.H., Yuan, C.S., Hung, C.H. and Lin Y.C. (2010). “Comparing Physicochemical Properties of Ambient Particulate Matter of Hot Spots in a Highly Polluted Air Quality Zone.” *Aerosol and Air Quality Research*, 10:331-334.
- Tseng, C.Y., Lin, S.L., Mwangi, J.K., Yuan, C.S., Wu, Y.L. (2016) “Characteristics of Atmospheric PM_{2.5} in a Densely Populated City with Multi-emission Sources.” *Aerosol Air Quality Research*, 16:2145-2158.
- Viana, M., Pandolfi, M., Minguillón, M.C., Querol, X., Alastury, A., Monfort, E., and Celades, I. (2008) “Inter-comparison of receptor models for PM source apportionment: case study in an industrial area.” *Atmospheric Environment*, 42(16):3820-3832.
- Wahlin, P., Berkowicz, R., Palmgren, F. (2006) “Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen.” *Atmospheric Environment*, 40:2151-2159.
- Watson, J.G., Chow, J.C., Lurmann, F.W., Musarra, S.P. (1994)

- “Ammonium nitrate, nitric acid and ammonia equilibrium in wintertime phoenix Arizona.” *Journal of the Air and Waste Management Association*, 44:405–412.
- Watson, J.G. (1998) “The Science of Fine Particulate Matter, Workshop on Sampling, Regulation, and Light Scattering Effects of PM_{2.5}.” 1-14.
- Whitby, K.T., Kittelson, D.B., Cantrell, B.K., Barsic, N.J., Dolan, D.F., Tarvestad, L.D., Nieken, D.J., Wolf, J.L. and Wood, J.R. (1976) “Aerosol size distributions and concentrations measured during gm proving ground sulfate study.” *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 172 (SEP3): 32-32.
- Wilson, W.E., Chow, J.C., Claiborn, C., Fusheng, W., Engelbrecht, J., and Watson, J.G. (2002) “Monitoring of particulate matter outdoors.” *Chemosphere*, 49(9):1009-1043.
- Wu, H.B. and Chan, C.K. (2008) “Effects of Potassium Nitrate on the Solid Phase Transitions of Ammonium Nitrate Particles.” *Atmospheric Environment*, 42(2):313-322.
- Yang, K.L. (2002) “Spatial and seasonal variation of PM₁₀ mass concentrations in Taiwan.” *Atmospheric Environment*, 36:3403-3411.
- Yang, H.Y., Tseng, Y.L., Chuang, H.L., Li, T.C., Yuan, C.S., Lee, J.J. (2017) “Chemical Fingerprint and Source Identification of Atmospheric Fine Particles Sampled at Three Environments at the Tip of Southern Taiwan.” *Aerosol Air Quality Research*, 17:529-542.
- Yatin, M., Tuncel, S., Aras, N.K., Olmez, I., Aygun, S., Tuncel, G. (2000) “Atmospheric trace elements in Ankara, Turkey: Factors affecting chemical composition of fine particles.” *Atmospheric Environment*, 34:1305-1318.
- Yin, L., Niu, Z., Chen, X., Chen, J., Zhang, F., Xu, L. (2014) “Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in the coastal urban agglomeration along the Western Taiwan Strait Region, China.” *Aerosol Air Quality Research*, 21:5141-5156.
- Zhao, P., Feng, Y., Zhu, T., and Wu, J. (2006) “Characterizations of Resuspended Dust in Six Cities of North China.” *Atmospheric Environment*, 40(30):5807-5814.
- Zhao, Y., Gao, Y. (2008) “Mass size distributions of water-soluble inorganic and organic ions in size-segregated aerosols over metropolitan Newark in the US east coast.” *Atmospheric Environment*, 42:4063-4078.

丁振洲，「楠梓加工出口區空氣中細懸浮微粒(PM_{2.5})之季節性變化及

重金屬特性分析」，碩士論文，國立中山大學，高雄 (2015)。

于培倫，「中部空品區天氣型態與二次氣膠之探討分析」，碩士論文，

私立東海大學，台中 (2010)。

白珏玲，「中部地區臭氧濃度特徵與天氣型態相關探討」，碩士論文，

私立東海大學，台中 (1998)。

吳仲翼，「廈門灣大氣懸浮微粒濃度日夜變化趨勢分析及污染源指紋

特徵探討」，碩士論文，高雄 (2011)。

吳慈敏，「半導體廠大氣氣膠粒徑分佈及細胞毒性」，碩士論文，國立

屏東科技大學，屏東 (2012)。

李崑璋，「台中都會區金屬元素特性及應用正矩陣因子法解析大氣細

懸浮微粒之污染來源及其貢獻量」，碩士論文，國立中興大學，

台中 (2014)。

林人杰，「科學園區半導體廠周界及沿海大氣氣膠特性研究」，碩士論

文，國立屏東科技大學，屏東 (2013)。

林建宏，「大氣懸浮微粒濃度及化學組成與氣象因子變異關聯性研究」，

碩士論文，國立成功大學，台南 (2008)。

林彥儒，「南臺灣半導體廠園區大氣細懸浮微粒金屬特性」，碩士論文，

國立屏東科技大學，屏東 (2017)。

林能暉，「東亞地區空氣污染跨國長程傳輸對台灣地區之影響」，行政院環境保護署研究報告 (2000)。

林能暉、嚴明鈺、Joshua Fu、莊銘棟、王聖翔、林傳堯、鄭芳怡，「區域大氣氣候與空氣品質分析模擬」，行政院環境保護署專案工作計畫 (2017)。

林聖達，「台西地區大氣懸浮微粒化學組成分析及特性之研究」，碩士論文，私立環球科技大學，雲林 (2011)。

洪崇軒、楊宏宇、林沛練、宋偉國、林銳敏、張凱鈞，「氣象條件對高雄地區空氣品質之預測及分析計畫」，高雄市環保局 (2002)。

張弘澤，「楠梓加工出口區大氣懸浮微粒之季節性變化及重金屬特性分析」，碩士論文，國立中山大學，高雄 (2012)。

張立鵬，「大氣超細微粒物化特性與環境因子關聯性研究」，博士論文，國立成功大學，台南 (2009)。

張凱倫，「大氣奈米微粒無機鹽類組成特性研究」，碩士論文，國立成功大學，台南 (2004)。

莊鳳宸，「六輕離島工業區附近地區懸浮微粒來源之受體模式分析」，碩士論文，國立雲林科技大學，雲林 (2008)。

許家彰，「埔里地區氣象因子對於懸浮微粒濃度之探討」，碩士論文，國立中興大學，台中 (2002)。

郭瓊文，「彭佳嶼海域大氣懸浮微粒中金屬元素之組成及來源探討」，

碩士論文，國立台灣大學，台北 (2005)。

陳佩娟，「沿海地區大氣中懸浮微粒化學特性分析研究」，碩士論文，

私立朝陽科技大學，台中 (2003)。

陳勁宇，「半導體廠園區大氣氣膠粒徑分佈特性之研究」，碩士論文，

國立屏東科技大學，屏東 (2011)。

陳柏霖，「雲林斗六 PM_{2.5} 濃度變化與氣膠光學特性及氣象條件之關聯

性研究」，碩士論文，國立中央大學，桃園 (2017)。

曾韋勳，「高屏大氣懸浮微粒於不同天氣型態之特徵與氣象因子關聯

性研究」，碩士論文，國立成功大學，台南 (2012)。

曾章瑋，「台中市 PM_{2.5} 空間濃度及成份分布調查」，碩士論文，私立

東海大學，台中 (2013)。

黃元勳，「屏東郊區大氣微粒化學組成特性探討」，碩士論文，國立屏

東科技大學，屏東 (2006)。

楊宏宇、梁文傑，「台灣地區空氣品質與天氣類型分類相關性分析」，

第九屆空氣污染控制技術研討會論文專輯 (1992)。

廖建欽，「閩江口海島及陸域大氣懸浮微粒濃度季節變化趨勢分析及

污染源貢獻量探討」，碩士論文，國立中山大學，高雄 (2013)。

廖嘉政，「鋼鐵工廠周界及鄰近敏感點之懸浮微粒物化特性分析及污

染源解析」，碩士論文，國立中山大學，高雄 (2012)。

劉育甫、蔡協宏、袁中新、洪崇軒、林啟燦、錢立行，「海島地區懸浮微粒物化特性分析-以琉球嶼為例」，第六屆海峽兩岸氣膠技術研討會論文，(2009)。

蔡仁雄，「屏東郊區懸浮微粒特性之研究」，碩士論文，國立屏東科技大學，屏東 (2006)。

鄭至庭，「南投縣埔里地區大氣懸浮微粒的化學組成及其污染源貢獻量解析」，碩士論文，國立中興大學，台中 (2015)。

薛智遠，「北部地區細懸浮微粒化學成份及來源貢獻暨民眾細懸浮微粒暴露之研究」，碩士論文，私立朝陽科技大學，台中 (2011)。

謝岳書，「大氣細懸浮微粒金屬成份特徵及來源貢獻分析研究」，碩士論文，私立朝陽科技大學，台中 (2006)。

魏宇鴻，「屏東地區大氣細懸浮微粒特性」，碩士論文，國立屏東科技大學，屏東 (2014)。

蘇怡如，「台中都會區大氣懸浮微粒特性及農廢燃燒與沙塵暴的案例分析」，碩士論文，國立中興大學，台中 (2006)。

蘇建中，「半導體工業區空氣污染物之懸浮微粒的調查分析」，碩士論文，國立清華大學，新竹 (2000)。