

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180007

參展科別 地球與環境科學

作品名稱 臺灣北端 PM 2.5 來源分析與季節比對

得獎獎項

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 何東垣、林郁梅

作者姓名 邱子耘

關鍵詞 PM 2.5、東北季風、境外汙染

作者簡介



我是邱子耘，目前就讀臺北市立第一女子高級中學三年級。生活中充滿各種現象值得我們探索，因此在高中我利用專題課程尋找有興趣的主題開啟了我的研究。在過程中學習到了不僅僅是研究的內容，更有許多的人生道理，感謝一路上遇到的貴人相助，也期盼在未來也能秉持著這樣的態度與精神探索其他議題。

摘要

本研究以具空間梯度的臺灣周邊離島測站實測數據及衛星氣膠光學深度時空變化及相關性推斷東亞境外氣膠對臺灣北端 PM 2.5 濃度的影響。我們選取鄰近中國的金門與馬祖、中等距離的馬公及臺灣北部(富貴角、基隆)、遠離大陸的日本離島(石垣、那霸)共七站，分析 2015-2021 年東北季風盛行冬春季與西南季風盛行夏季的資料。結果顯示各測站冬春季 PM 2.5 濃度均較夏季高 2-3 倍並由西向東下降，冬春季相關性均較夏季高；針對高濃度事件，氣膠光學深度顯現冬春季高 PM 2.5 傳輸和各站測值在時空上緊密連結，由西向東下降；冬春季當地污染極低的馬公平均濃度與臺灣北端兩站數值一致但夏季顯著較低，顯示季節性境外污染對馬公和富貴角、基隆影響程度的一致及重要性。以上結果均支持東亞境外氣膠傳輸為臺灣北端冬春季 PM 2.5 主要來源。

Abstract

Using the spatial and temporal variations and correlations of PM 2.5 concentrations and aerosol optical depth (AOD) data from satellite measured at 7 islets around Taiwan, we investigated whether East Asian foreign PM 2.5 is the major PM 2.5 source of the northern end of Taiwan. The chosen seven stations exhibiting spatial gradient from mainland China are Kinmen and Matsu (near mainland China), Cape Fugui, Keelung, and Penghu (middle distance), and Ishigaki and Naha (relatively long distance) to analyze the variations and correlations during high aerosol deposition seasons (winter and spring) and low aerosol deposition seasons from 2015 to 2021. The results show that the averaged PM 2.5 concentrations at all stations in winter and spring were 2-3 folds of the value observed in summer and decreased from the western to the eastern stations. The correlations of PM 2.5 concentrations among stations are higher in winter and spring than summer. Comparing the spatial and temporal variations of extremely high PM 2.5 deposition events, we found that the value of AOD and the transport of PM 2.5 also exhibited close connection spatially and temporally among the stations and also show declining trend from the western to the eastern stations. More importantly, the averaged PM 2.5 concentrations observed at Magong during winter and spring seasons were statistically the same as the value observed at Cape Fugui and Keelung but the value at Magong were significantly lower than the two end stations in summer. As Magong station is located in Penghu where local PM_{2.5} input is extremely low, the consistent value indicates that the foreign input is the major source of PM_{2.5} at the two northern end stations during high PM_{2.5} seasons. All of these results support the argument that the transport of foreign aerosols from mainland China is the main PM 2.5 source in the northern end of Taiwan during winter and spring seasons.

壹、研究動機

在臺灣空氣品質主要受 PM 2.5 及臭氧影響，且會隨周遭大氣條件而有所改變，以西北太平洋高壓強度與位置影響最大，因此臺灣的空氣品質有季節性差異。Wu 等人 (2019) 研究表示，從秋末到梅雨季來臨前，臺灣北部及南部受空氣污染的頻率較夏季高，臺灣西半部的污染物濃度也比東半部高。在一年當中北部地區的季節性差異不具對稱性，南部地區則具有對稱性。

日常生活中，在冬春季的台北也能感受到明顯較差的空氣品質，沒幾天汽車上就覆蓋著一層落塵，這情況是擁有約 900 萬人口的臺北生活圈內活動所造成？或者主要是境外來源所導致？其占比影響有多少？因此讓我想探討，臺灣北部冬春季 PM 2.5 是否主要源自境外。本研究嘗試選取臺灣北端及週邊的離島測站，藉由其距離中國遠近、以及人口與主要產業活動差異，來比較不同季節各地的 PM 2.5 濃度相關性，再佐以衛星遙測影像、大氣運動模擬與嘗試進行元素分析，來評估境外來源的支持證據與影響程度。

貳、研究目的與研究問題

- 一、瞭解各測站在東北季風與西南季風盛行月份的 PM 2.5 濃度
- 二、分析各測站 PM 2.5 濃度的相關程度
- 三、瞭解降雨對 PM2.5 濃度的影響
- 四、分析馬祖不同大小氣膠顆粒的元素特徵
- 五、探討臺灣北部與鄰近地區的 PM 2.5 來源

參、研究設備及器材

一、 軟體

- (一) Excel
- (二) SigmaPlot
- (三) Sublime Text

二、 程式語言

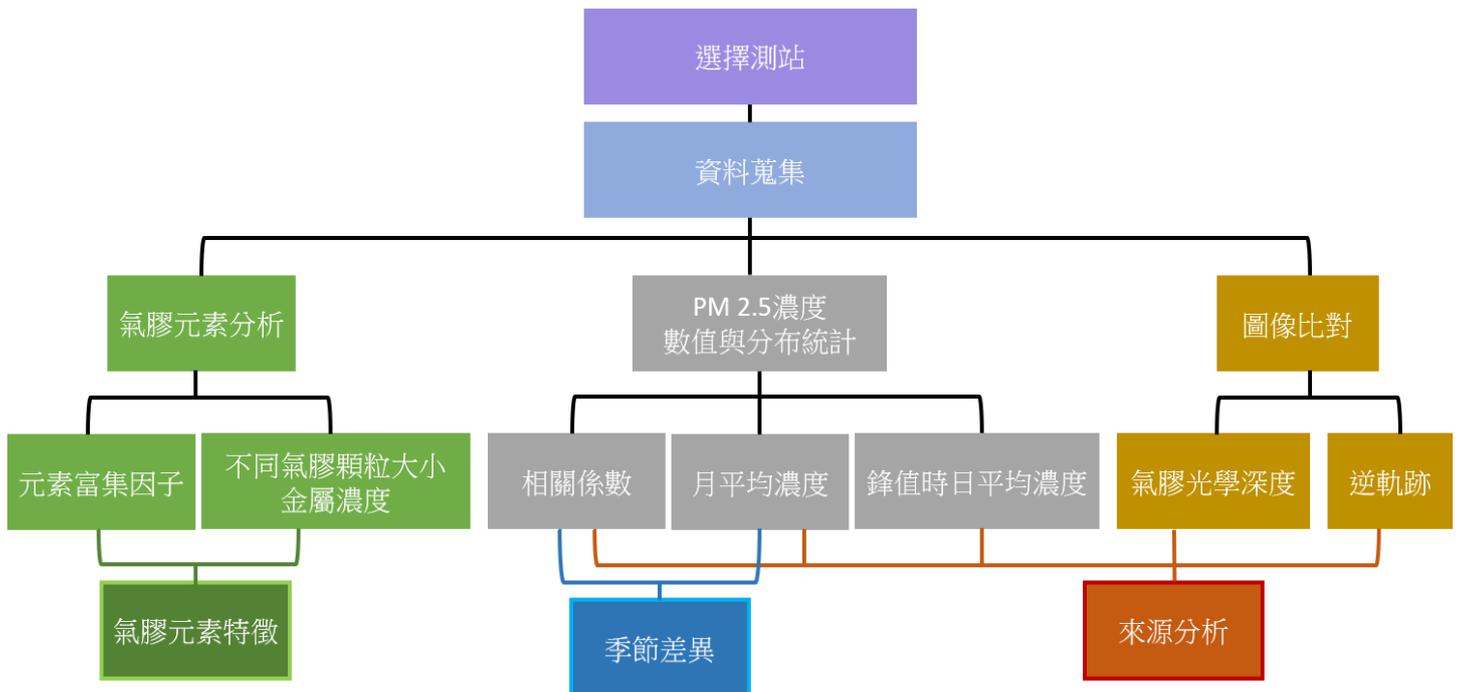
- (一) Python

三、 數據

- (一) 行政院環境保護署空氣品質監測小時值資料(一般污染物,每日更新)
- (二) 日本國立環境研究所環境數值數據庫每月數據
- (三) 日本環境省大氣汙染物質廣域監測系統最近一年間數據
- (四) NASA Goddard Trajectory Analyses of AERONET sites Homepage
- (五) NASA GIOVANNI

肆、研究過程或方法及進行步驟

一、 研究過程



(一) 選擇分析測站

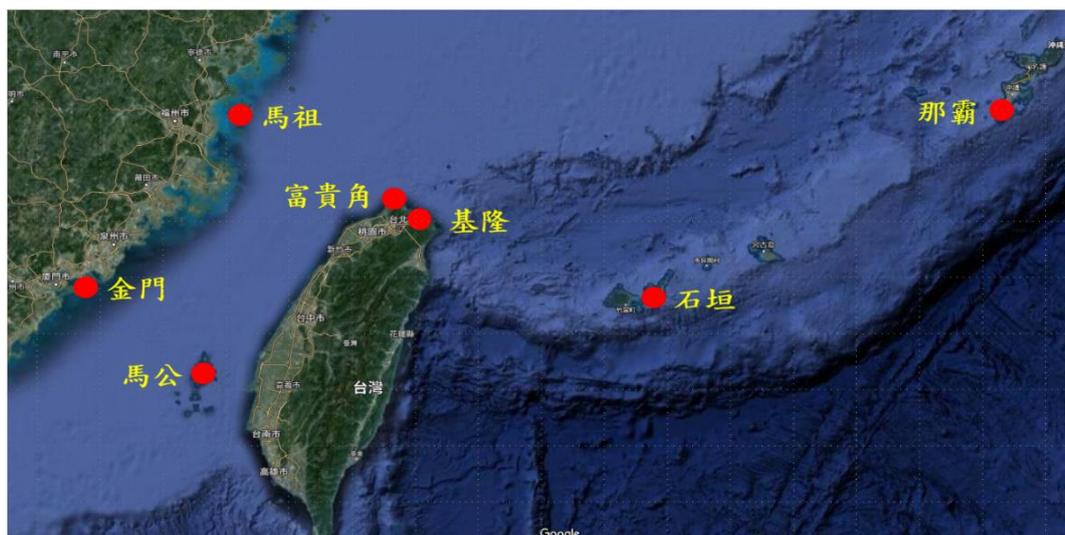


圖 1 分析測站位置圖

本研究所選用的測站如圖 1 所示，臺灣北海岸屬於東北季風迎風面，故本研究選擇基隆和富貴角作為代表；金門與馬祖則距離中國非常近，推測受到東北季風帶來的污染物會較多；澎湖馬公位於臺灣海峽中央，因為地理位置，受到東北季風影響時風速很強，可能會使 PM 2.5 濃度降低；日本沖繩縣同樣受到東北季風影響，且以觀光業為主，沒有過多的工業活動，其中石垣島為距離臺灣較近的沖繩縣測站，因此選擇作為分析比較的位置，而那霸測站則是因為與琉球群島中最大的沖繩島上各測站 PM 2.5 濃度之相關程度較高，且距離臺灣較近，因此做為代表測站。

(二) 蒐集數據

為了與東北季風影響之一到四月做比較，本研究選擇主要受西南季風影響之六到八月做對照，因此僅擷取 2015 年~2021 年一到四月及六到八月之資料。

測站	有資料之日期
基隆	2015 年 01 月~2021 年 08 月
富貴角	2018 年 01 月~2021 年 08 月
馬公	2015 年 01 月~2021 年 08 月
金門	2015 年 01 月~2021 年 08 月
馬祖	2015 年 01 月~2021 年 08 月
石垣	2015 年 01 月~2018 年 08 月、2019 年 06 月~2020 年 03 月、2020 年 7 月~2021 年 08 月
那霸	2015 年 01 月~2020 年 3 月、2020 年 7 月~2021 年 08 月

表 1 各測站 PM 2.5 濃度數據所包含的時間

(三) 氣膠元素分析

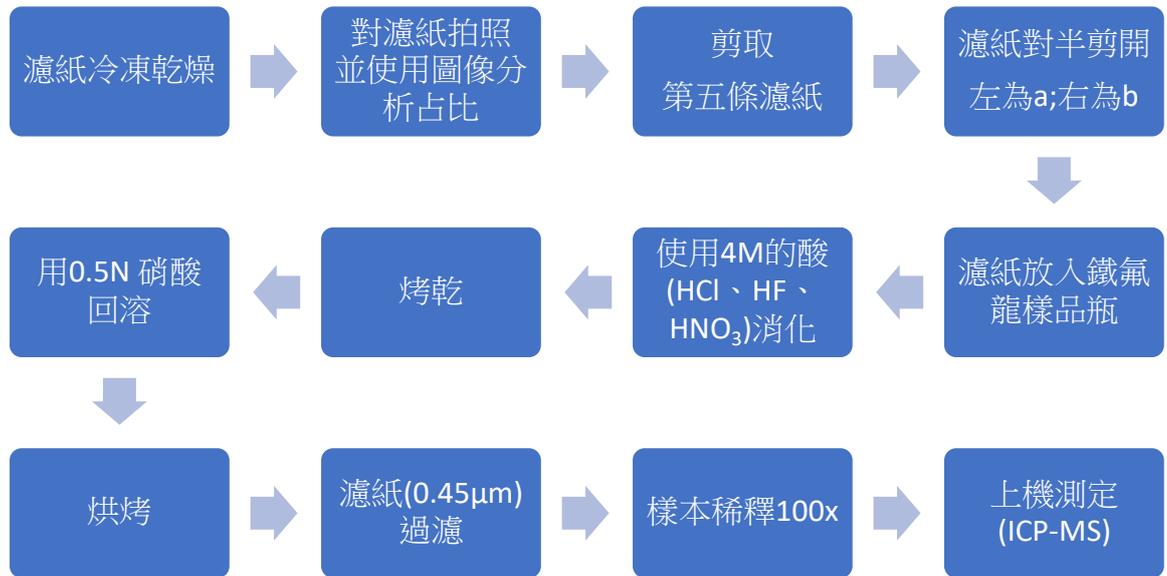


圖 2 氣膠元素分析流程圖

(四) 資料處理

數值資料是使用 Excel 將 PM_{2.5} 濃度之數據依照每個小時整理，計算每日平均及每月平均，並計算相關係數。氣膠元素分析則是運用已知濃度的標準品製作檢量線，計算各元素單位體積的濃度。利用 $EF_x = \frac{(C_x/C_{Ti})_{aerosol}}{(C_x/C_{Ti})_{crust}}$ (Gordon et al., 1974) 計算元素富集因子，並選用鈦做為參考元素，分母之地殼中的元素濃度含量參照 S.R.Taylor(1995)的數據。利用數據處理的資料，將數據以 SigmaPlot 進行繪圖，並整合圖表，最後將數據結合繪製出的圖表進行分析及討論。

伍、研究成果

一、地面 PM 2.5 濃度數值分析

本研究首先欲探討東北季風與 PM 2.5 濃度的關連性，因此選擇 2015 年~2021 年東北季風盛行的一到四月與西南季風盛行的六到八月進行比較。以下將先對季風盛行月份的平均 PM 2.5 濃度進行比較，然後分析兩季風盛行月份中各測站間 PM 2.5 濃度相關係數，並且將上述數據中 2016 年~2021 年馬祖、金門、馬公、富貴角與基隆測站當日有降雨的 PM 2.5 日平均值刪除進行分析，比較降雨對 PM 2.5 濃度的影響，而 2015 年以及石垣與那霸測站皆因無降雨數據，因此不列入討論範圍。以下以「全時」表示該時期所有資料的結果，「無降雨時」表示刪減降雨數據後的結果；以「冬春季」表示冬季季風盛行的一到四月，以「夏季」表示夏季季風盛行的六到八月。

(一)冬春季與夏季平均 PM 2.5 濃度

1.各測站的 PM 2.5 濃度平均值與標準差

(1)全時數據

	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆	石垣	那霸
冬春季	26.2±3.2	31.8±4.5	18.9±2.4	17.9±2.7	18±3.2	10.4±2.2	10.5±1.7
夏季	12.4±2.1	12.2±2.4	7.6±2.4	8.7±1.2	11.2±1.9	7.3±1	6.9±0.9

表 2 全時數據 PM 2.5 濃度平均值與標準差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

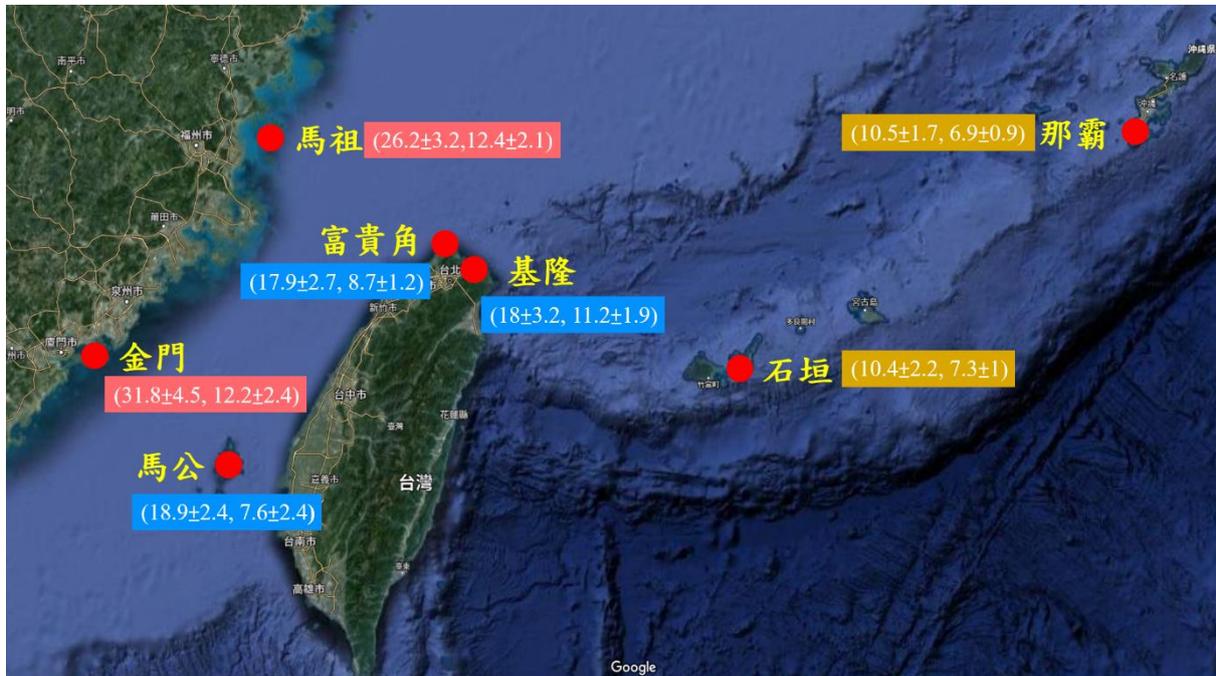


圖 3 各測站冬春季與夏季全時 PM 2.5 濃度平均值與標準差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

由表 2 可以發現除了馬公測站在冬春季及夏季的 PM 2.5 濃度標準差相同外，各測站 PM 2.5 濃度平均值、標準差及各測站間 PM 2.5 濃度差異在冬春季都較夏季大。

冬春季各測站 PM 2.5 平均值都在 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，其中金門平均濃度約 $32\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，是所有測站中最高的。夏季的平均 PM 2.5 濃度則是在 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，那霸及石垣是全部測站中平均 PM 2.5 濃度最低的，約為 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。從圖 3 可以看到各測站不論冬春季或夏季平均 PM 2.5 濃度都以馬祖、金門最高，其次是馬公、富貴角、基隆，而石垣、那霸則最低，有由西向東遞減的趨勢。

(2)無降雨時之數據

	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆
冬春季	28.1±4	32±5.1	19.4±2.9	19.5±2.7	19.1±2.6
夏季	12.8±2.1	12.4±2.8	7.4±2.5	8.9±1.4	11.6±2.2

表 3 無降雨時之數據平均 PM 2.5 濃度與標準差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

由表 3 可以發現無降雨時馬公測站在冬春季及夏季的 PM 2.5 濃度標準差相同外，在冬春季各測站的 PM 2.5 濃度平均值、標準差以及各測站間 PM 2.5 濃度差異都比夏季大。

冬春季無降雨時五個測站的平均 PM2.5 濃度都在 $19\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，其中金門的平均 PM2.5 濃度最高，為 $32\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在夏季的平均 PM 2.5 濃度約為 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，馬公的 PM 2.5 濃度則是五個測站中最底的，約為 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

相較於全時數據，除了夏季馬公測站以外，各測站無降雨時的 PM 2.5 濃度數值都略微提高，且在冬春季提升較夏季明顯。

(3)比較全時與無降雨時之數據

冬春季	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆
全時數據	26.2±3.2	31.8±4.5	18.9±2.4	17.9±2.7	18±3.2
無降雨時	28.1±4	32±5.1	19.4±2.9	19.5±2.7	19.1±2.6

表 4 冬春季全時與無降雨時之數據平均 PM 2.5 濃度與標準差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

夏季	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆
全時數據	12.4±2.1	12.2±2.4	7.6±2.4	8.7±1.2	11.2±1.9
無降雨時	12.8±2.1	12.4±2.8	7.4±2.5	8.9±1.4	11.6±2.2

表 5 夏季全時與無降雨時之數據平均 PM 2.5 濃度與標準差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

從表 4 與表 5 中可以發現無降雨時各測站的 PM2.5 濃度在冬春季及夏季平均值大多上升，多數測站的標準差也提高，且冬春季較夏季顯著。其中，馬祖與富貴角提升最多，分別約提升 1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以及 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(二)各測站間的 PM2.5 濃度之相關係數

藉由分析各測站間的 PM 2.5 濃度相關係數，找出各測站間的相關性。在本研究中將相關係數四捨五入取至小數點後兩位，其絕對值等於 1.00 稱為完全相關，以黃底表示；0.70 以上稱為高度相關，當大於等於 0.90 時，字體顏色為紅色、0.80 為橘色、0.70 為黃色；介於 0.30(含)~0.70 之間稱為中度相關；介於 0.00~0.30 之間稱為低度相關，大於等於 0.20 為淺藍色、0.10 為青綠色，大於 0.00 為墨綠色；等於 0.0 稱為零相關，字體顏色為墨綠色，以綠底表示。相關係數大於 0.0 稱為正相關，小於 0.0 則稱為負相關。



圖 4 相關係數對應之字體顏色

1. 2015 年~2021 年全時數據

2015~2021															
Jan-Apr	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆	石垣	那霸	Jun-Aug	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆	石垣	那霸
馬祖	1.00							馬祖	1.00						
金門	0.69	1.00						金門	0.59	1.00					
馬公	0.70	0.62	1.00					馬公	0.38	0.58	1.00				
富貴角	0.54	0.48	0.63	1.00				富貴角	0.55	0.46	0.34	1.00			
基隆	0.60	0.52	0.63	0.91	1.00			基隆	0.49	0.32	0.33	0.81	1.00		
石垣	0.50	0.40	0.58	0.41	0.54	1.00		石垣	0.12	0.18	0.18	0.22	0.03	1.00	
那霸	0.47	0.37	0.54	0.39	0.52	0.74	1.00	那霸	0.28	0.35	0.26	0.22	0.22	0.44	1.00

表 6 2015 年~2021 年冬春季(Jan.-Apr.)及夏季(Jun.-Aug.)各測站間全時數據 PM 2.5 濃度相關係數

由表 6 可以看到在 2015~2021 年冬春季各測站間 PM 2.5 濃度的相關係數絕對值普遍大於夏季，且富貴角-基隆在冬春季及夏季的相關程度皆為高度正相關。

在冬春季所有測站間相關程度皆為中度正相關至高度正相關，其中富貴角-基隆之相關程度最高，相關係數為 0.91。

在夏季除了富貴角-基隆之 PM2.5 濃度相關程度為高度正相關外，其餘測站間皆為低度正相關至中度正相關，其中基隆-石垣的相關程度最低，相關係數為 0.03。

2. 2016 年~2021 年無降雨時之數據

2016~2021											
Jan-Apr	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆	Jun-Aug	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆
馬祖	1.00					馬祖	1.00				
金門	0.64	1.00				金門	0.67	1.00			
馬公	0.70	0.57	1.00			馬公	0.44	0.64	1.00		
富貴角	0.50	0.55	0.59	1.00		富貴角	0.63	0.48	0.29	1.00	
基隆	0.61	0.47	0.46	0.81	1.00	基隆	0.49	0.36	0.30	0.81	1.00

表 7 2016 年~2021 年冬春季(Jan.-Apr.)及夏季(Jun.-Aug.)各測站間無降雨時 PM 2.5 濃度相關係數

由表 7 可以看到在 2016 年~2021 年無降雨時多數測站 PM 2.5 濃度相關係數絕對值在冬春季大於夏季。

冬春季無降雨時，馬祖-馬公及富貴角-基隆的 PM 2.5 濃度相關程度為高度正相關，而相關程度最低的為馬公-基隆，相關係數為 0.46，屬於中度正相關。

在夏季無降雨時僅富貴角-基隆的 PM 2.5 濃度相關程度為高度正相關，而馬公-富貴角的相關程度最低，相關係數為 0.29。

3. 2016 年~2021 年比較全時與無降雨時之數據

2016~2021 Jan-Apr											
All	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆	No Rain	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆
馬祖	1.00					馬祖	1.00				
金門	0.69	1.00				金門	0.64	1.00			
馬公	0.70	0.62	1.00			馬公	0.70	0.57	1.00		
富貴角	0.54	0.48	0.63	1.00		富貴角	0.50	0.55	0.59	1.00	
基隆	0.60	0.52	0.63	0.91	1.00	基隆	0.61	0.47	0.46	0.81	1.00

表 8 2016 年~2021 年冬春季全時(All)數據與無降雨時(No Rain)各測站間 PM 2.5 濃度相關係數

比較冬春季全時與無降雨時的 PM 2.5 濃度相關係數，由表 8 可以發現 2016 年~2021 年冬春季馬祖-基隆以及金門-富貴角的 PM 2.5 濃度相關係數絕對值在無降雨時皆大於全時，前者 PM 2.5 濃度相關係數由 0.60 變為 0.61，後者則由 0.48 增為 0.55，馬祖-馬公相關係數絕對值則皆持平，而其餘測站間相關係數絕對值降低。

2016~2021_Jun-Aug											
All	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆	No Rain	馬祖	金門	馬公	富貴角	基隆
馬祖	1.00					馬祖	1.00				
金門	0.59	1.00				金門	0.67	1.00			
馬公	0.38	0.58	1.00			馬公	0.44	0.64	1.00		
富貴角	0.55	0.46	0.34	1.00		富貴角	0.63	0.48	0.29	1.00	
基隆	0.49	0.32	0.33	0.81	1.00	基隆	0.49	0.36	0.30	0.81	1.00

表 9 2016 年~2021 年夏季全時(All)數據與無降雨時(No Rain)各測站間的 PM 2.5 濃度相關係數

分析夏季全時以及無降雨時 PM 2.5 濃度相關係數，由表 9 可以看到在 2016 年~2021 年夏季無降雨時只有馬公-富貴角的相關係數絕對值相對全時變小，相關係數由 0.34 降為 0.29，而馬祖-基隆及富貴角-基隆的相關係數絕對值皆不變，相關係數前者皆為 0.49，後者則皆為 0.81，其餘測站間的相關係數絕對值則都增加。

比較表 8 與表 9 可以發現馬祖-馬公在冬春季與夏季的 PM 2.5 濃度相關程度有較大差異，在冬春季是高度正相關，而夏季則是中度正相關；富貴角-基隆則是在冬春季與夏季的 PM 2.5 濃度相關程度都是高度正相關。

(三)各測站逐年的 PM 2.5 濃度平均值

1.全時數據

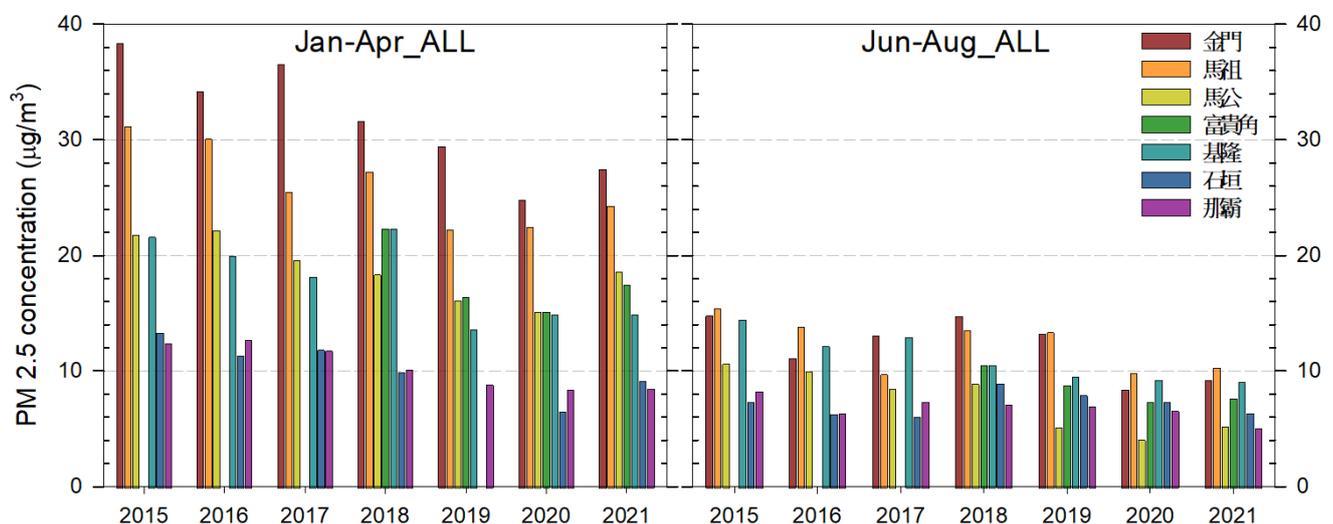


圖 5 2015 年~2021 年冬春季(Jan-Apr_ALL)及夏季(Jun-Aug_ALL)全時數據各年 PM 2.5 濃度平均值

完全無 PM 2.5 濃度觀測資料之站點與時間							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
冬春季	富貴角	富貴角	富貴角		石垣		
夏季	富貴角	富貴角	富貴角				

表 10 2015 年~2021 年冬春季及夏季全時數據中無 PM 2.5 濃度資料之測站

表 10 顯示在 2015 年~2021 年冬春季及夏季全時數據中無 PM 2.5 濃度資料的測站，因此在圖 5 中沒有顯示任何濃度。由圖 5 可以看到在 2015 至 2021 年各年的冬春季平均 PM2.5 濃度普遍都高於夏季。

在 2015 年~2021 年冬春季金門、馬祖測站的平均 PM 2.5 濃度都高於 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，且金門的平均濃度都高於馬祖，金門在 2015 年有最高的平均值約 $38\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而石垣、那霸的平均濃度則最低，約 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，與平均濃度最高的金門可以相差超過兩倍。冬春季各年的平均 PM 2.5 濃度有下降的趨勢，其中在 2020 年最低，除了馬祖及基隆以外其餘測站的 PM 2.5 濃度平均值皆為 2015 年至 2021 年各年冬春季平均值中最低者，而馬祖及基隆測站的最低 PM 2.5 平均值則出現在 2019 年。

夏季各測站各年的平均 PM 2.5 濃度約在 $5\sim 15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 間，其中 2020 年全部測站 PM 2.5 平均值皆低於 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，石垣、那霸則在 2015 年~2021 年各年的平均 PM 2.5 濃度都低於 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2. 無降雨時之數據

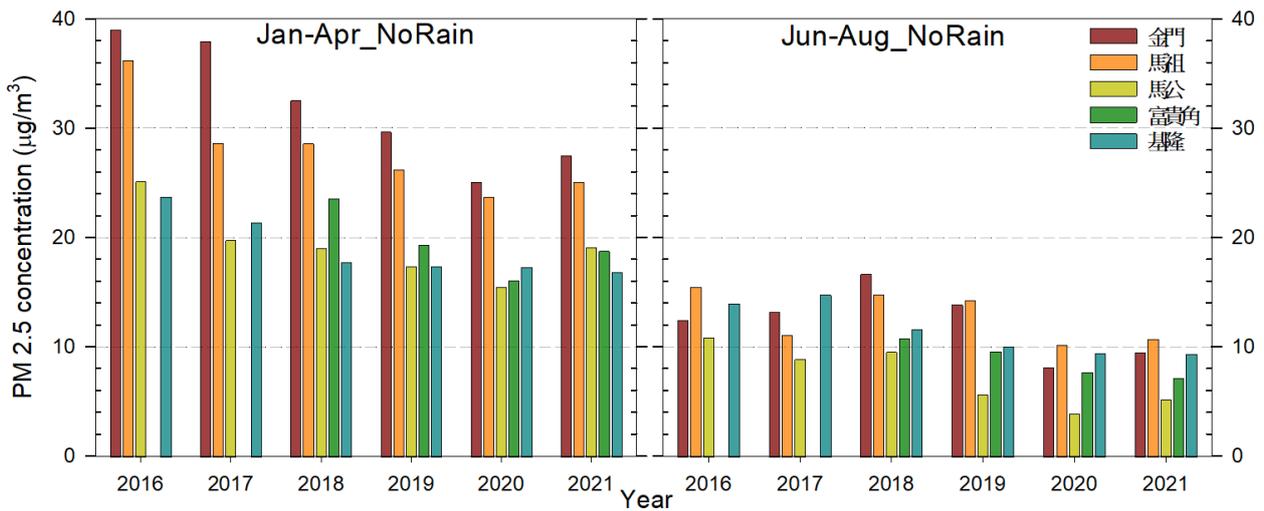


圖 6 2016 年~2021 年冬春季(Jan-Apr_NoRain)及夏季(Jun-Aug_NoRain)無降雨時各年 PM 2.5 濃度平均值

完全無 PM 2.5 濃度觀測資料之站點與時間						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
冬春季	富貴角	富貴角				
夏季	富貴角	富貴角				

表 11 2016 年~2021 年冬春季及夏季無降雨時無 PM 2.5 濃度資料之測站

表 11 顯示在 2016 年~2021 年冬春季及夏季無降雨時的數據中無 PM 2.5 濃度資料的測站，因此在圖 6 中沒有顯示其資料。由圖 6 可以發現在 2016 年~2021 年各年度冬春季無降雨時的平均 PM 2.5 濃度普遍都大於夏季。

各年度冬春季的平均 PM 2.5 濃度皆大於 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。金門在 2016 年~2021 年皆為當年度冬春季平均 PM 2.5 濃度中最高的，其中以 2016 年最高，約為 $39\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

在夏季各測站的平均 PM 2.5 濃度大多在 $5\sim 15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，馬祖、金門以及馬公在 2020 年有最小的平均值，其中馬公平均 PM 2.5 濃度亦為 2016 年~2021 年夏季各測站中最小的，約 $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而富貴角與基隆則是在 2021 年有最小的平均值。

3. 比較全部與無降雨時之數據

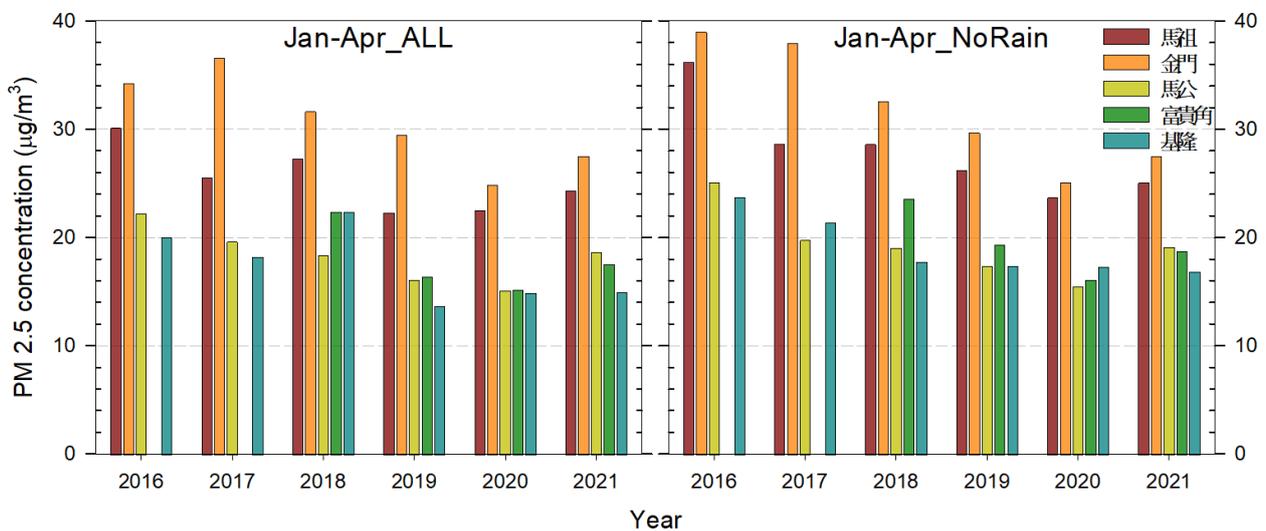


圖 7 2016 年~2021 年冬春季全時數據與(Jan-Apr_ALL)無降雨時之數據(Jan-Apr_NoRain)各年 PM 2.5 濃度平均值

由圖 7 可以發現在 2016 年~2021 年無降雨時各測站各年度冬春季之平均 PM 2.5 濃度幾乎較全時上升。馬祖與馬公測站 2016 年~2021 年冬春季無降雨時各年度間平均值趨勢皆與全時相同。金門測站冬春季全時平均 PM 2.5 濃度最大值出現在 2017 年，濃度約 $37\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而無降雨時最大值則出現

在 2016 年，其值約為 $39\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而 2017 年~2021 年變化趨勢在全時與無降雨時都大致相同。基隆測站 2016~2021 年冬春季全時平均 PM 2.5 濃度的變化無明顯趨勢，而無降雨時的平均 PM 2.5 濃度則由高而低逐漸趨於平緩，在 2018~2021 年皆介於 $16\sim 18\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

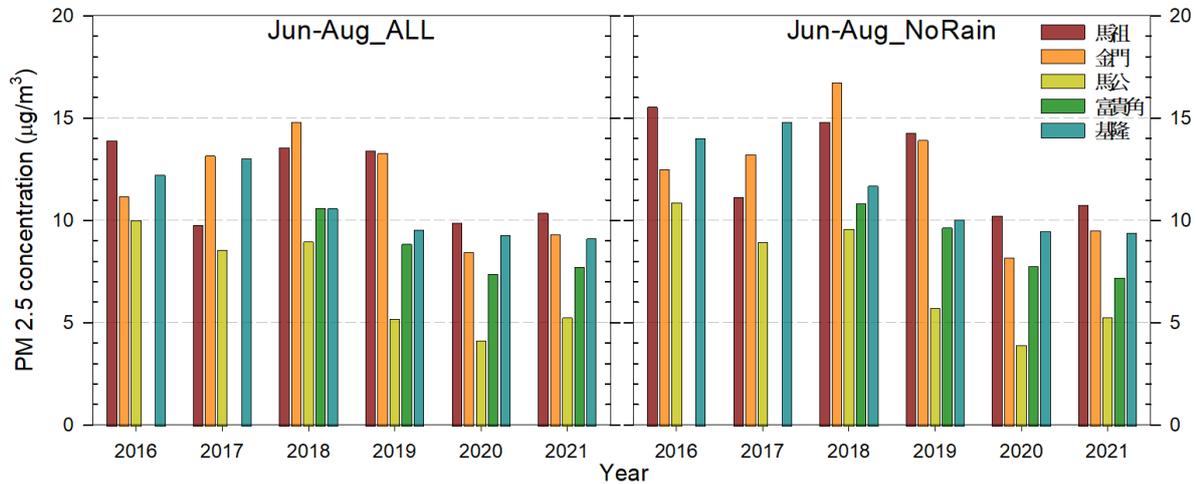


圖 8 2016 年~2021 年夏季全時數據(Jun-Aug_ALL)與無降雨時之數據(Jun-Aug_NoRain) 各年 PM 2.5 濃度平均值

由圖 8 可以看到在 2016 年~2021 年無降雨時各測站夏季平均 PM 2.5 濃度大多較全時增加，且馬祖、金門、馬公及基隆測站分別在各年的變化趨勢大致相同。

富貴角測站在 2020 年是夏季全時平均 PM 2.5 濃度中最低的，而在無降雨時 2020 年夏季的平均 PM 2.5 濃度超過 2021 年，使富貴角測站在無降雨時夏季的平均 PM 2.5 濃度最低的年度為 2021 年。

二、馬祖氣膠元素分析

本研究使用馬祖 2021 年 3 月下半月的濾紙進行氣膠元素分析。濾紙總共區分出五種不同大小的氣膠顆粒，分別為 0.57~1.0 μm 、1.0~1.6 μm 、1.6~3.1 μm 、3.1~7.3 μm 以及大於 7.3 μm ，並且將 0.57~3.1 μm 歸類為細顆粒，大於 3.1 μm 歸類為粗顆粒。本研究中共選擇九種金屬進行分析，包含：鋁、鈦、鉻、錳、鐵、鈷、鋅、鎳、鉛。

(一)元素濃度

1.不同顆粒大小中各元素的濃度

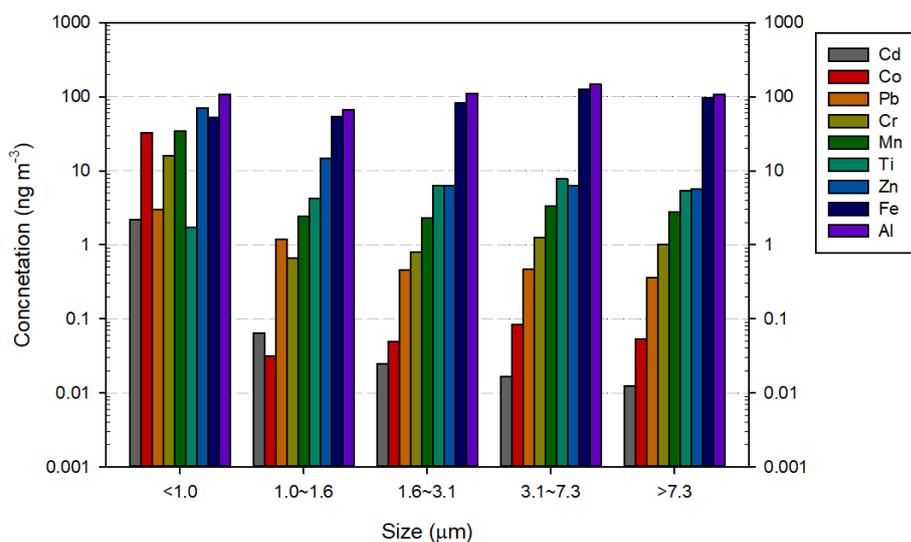


圖 9 不同顆粒大小中各元素的濃度

由圖 9 可以看到氣膠顆粒大小在 1.0 μm 以上，此九種元素的濃度大小具有一致性，濃度由小到大多為鎳、鈷、鉛、鉻、錳、鈦、鋅、鐵、鋁。鎳、鈷、鉛、鉻、錳、鋅等元素的氣膠顆粒大小在小於 1.0 μm 以下的各個元素濃度大多都比其他顆粒大小時大，鉛、鉻、錳、鋅在不同顆粒大小可差幾十倍，鎳則可以相差幾百倍，鈷甚至差到幾千倍，而鐵、鋁、鈦的差異較其他元素小。

2. 粗細顆粒中各元素的濃度

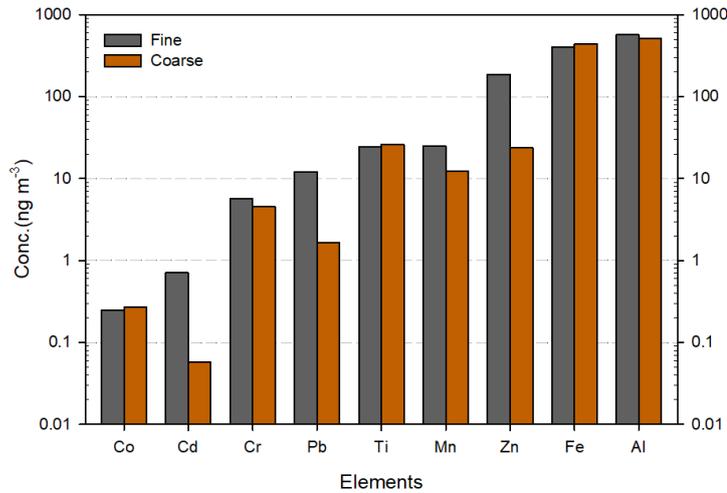


圖 10 粗細顆粒中各元素的濃度

從圖 10 中可以發現各元素的濃度在粗細顆粒中的濃度大多相近，落在相同的數量級，僅鎳、鉛、鋅濃度差異較大，差距達到幾十倍。各元素粗細顆粒濃度大小排序不盡相同，在細顆粒中濃度由小到大分別是：鈷、鎳、鉻、鉛、鈦、錳、鋅、鐵、鋁；在粗顆粒中的濃度有小到大則是：鎳、鈷、鉛、鉻、錳、鋅、鈦、鐵、鋁。

(二) 元素富集因子

1. 粗細顆粒中各元素的元素富集因子

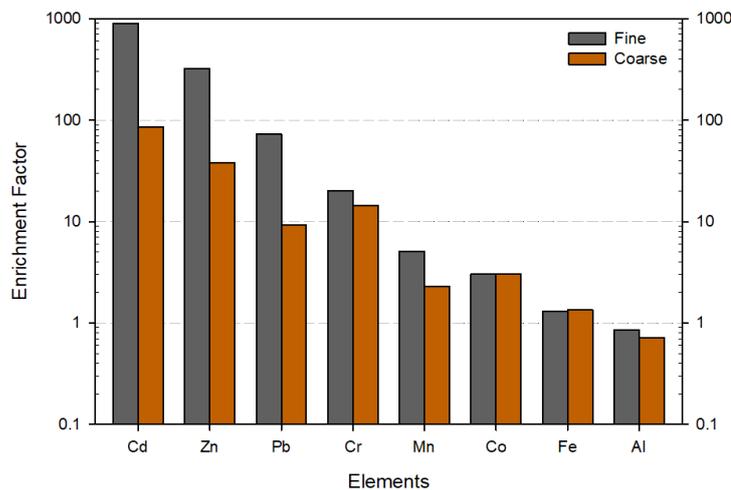


圖 11 以鈦為參考元素時不同顆粒大小中各元素的濃度

在圖 11 中可以發現以鈦為參考元素時，EF 值大於 10 的有：細顆粒中的鎳、鋅、鉛、鉻以及粗顆粒中的鎳、鋅、鉻，這些氣膠顆粒來源可能多為人為產生；EF 值介於 1~10 之間的有：細顆粒的鉛、錳、鈷和粗顆粒的鉛、錳、鈷；EF 值約等於 1 的則有：細顆粒和粗顆粒的鐵、鋁，其氣膠來源可

能多來自自然中的岩石性氣膠。鎘、鋅、鉛的 EF 值在細顆粒氣膠中可以是粗顆粒氣膠的約 10 倍；錳、鉻、鋁的差異則約為 1~2 倍；鐵、鈷在粗細顆粒氣膠中的 EF 值則是無明顯差異。

三、NASA 逆軌跡模式圖分析

由於可選擇的資料與時間限制，本研究利用 NASA Goddard Trajectory Analyses of AERONET sites Homepage 網站中提供之 2017 年~2021 年富貴角測站冬春季及夏季各月份之 1 號、11 號及 21 號的逆軌跡模式分析圖進行分析。若當日無分析圖，則選擇前或後一天的分析圖進行分析，而前後一天亦皆無分析圖時則跳過當日。其餘測站則皆無逆軌跡模式圖，故僅使用富貴角逆軌跡模式圖。本研究共使用 79 張富貴角逆軌跡模式圖，冬春季 44 張，夏季 35 張。

年份	無分析圖之日期 (MMDD)	使用前後一天分析圖之日期 (MMDD)
2017	-	-
2018	-	-
2019	0101、0111、0121、0201、0211、0221、0301、0311、0321、0401、0411、0421、0601、0611、0621、0701、0711、0721、0801、0811、0821	-
2020	0101、0111	0621→0622
2021	0101、0421、0601	0811→0812

表 12 無富貴角逆軌跡圖像與使用前後一天逆軌跡圖像之年份與日期

(一)逆軌跡模式圖路徑歸類方法

依據富貴角逆軌跡模式圖，選擇 950.0 hPa 線段經過之地區分類。

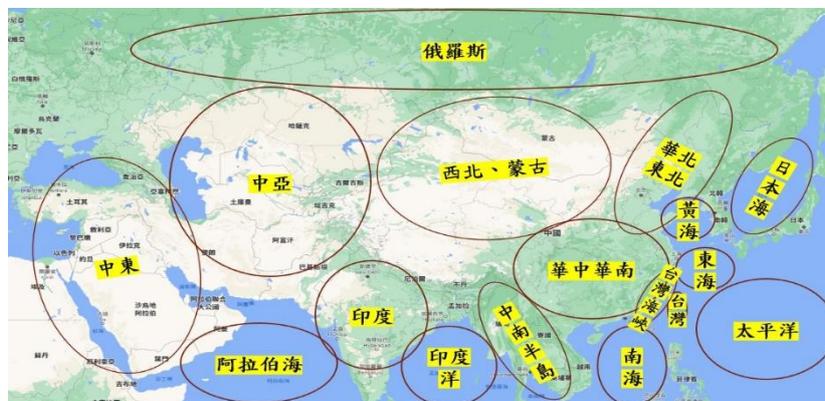


圖 12 逆軌跡路徑地區分類地圖

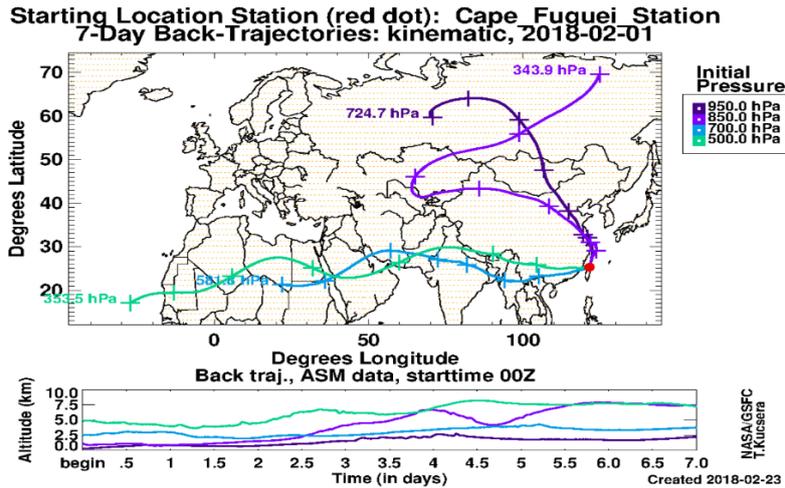


圖 13 2018 年 2 月 1 日富貴角逆軌跡圖像

本研究將逆軌跡分析圖 950.0 hPa 的深紫色線段經過路徑記錄，每一張圖不限制記錄之地區數目。以圖 13 為例 950.0 hPa 線段經圖 13 中的俄羅斯、西北與蒙古、華北、華中、東海。

(二)2017 年~2021 年富貴角逆軌跡模式圖 950.0 hPa 線段經過地區

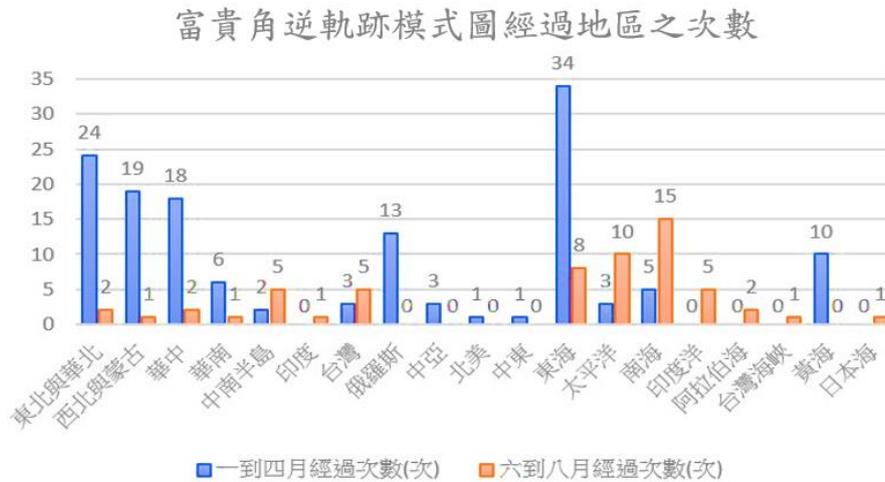


圖 14 2017 年~2021 年冬春季(一到四月)及夏季(六到八月)富貴角逆軌跡模式圖 950.0 hPa 線段經過地區之次數

由圖 14 可得知富貴角逆軌跡模式圖中近地表氣團行進軌跡經過次數較多的區域在冬春季是東海、東北與華北、西北與蒙古、華中，以東亞的中國為主，且多經過陸地，夏季的路徑則大多經過南海、太平洋、東海，以海洋為主。

四、衛星遙測影像與地面實測結果比對

衛星遙測可提供在時空上大範圍的分析影像，本研究使用 NASA DOVANNI 網站提供的 MODIS-Terra 衛星的氣膠光學深度(AOD)圖片與地面實際觀測的 PM 2.5 濃度進行比對。AOD 是大氣中氣膠含量的半定量指標。時間區段選用測站出現 PM 2.5 濃度高峰的前後約 2 至 3 天。而 AOD 會受到雲層影響而沒有辦法呈現，因此會出現空缺區域。PM 2.5 濃度在這五個臺灣的測站：金門、馬祖、馬公、富貴角、基隆刪去了一日累積降雨超過 1mm 的 PM 2.5 濃度日平均值，石垣、那霸則因為沒有取得雨量資料，因此無刪去任何 PM 2.5 濃度。

(一)2016 年 1 月 16 至 2016 年 1 月 20 日

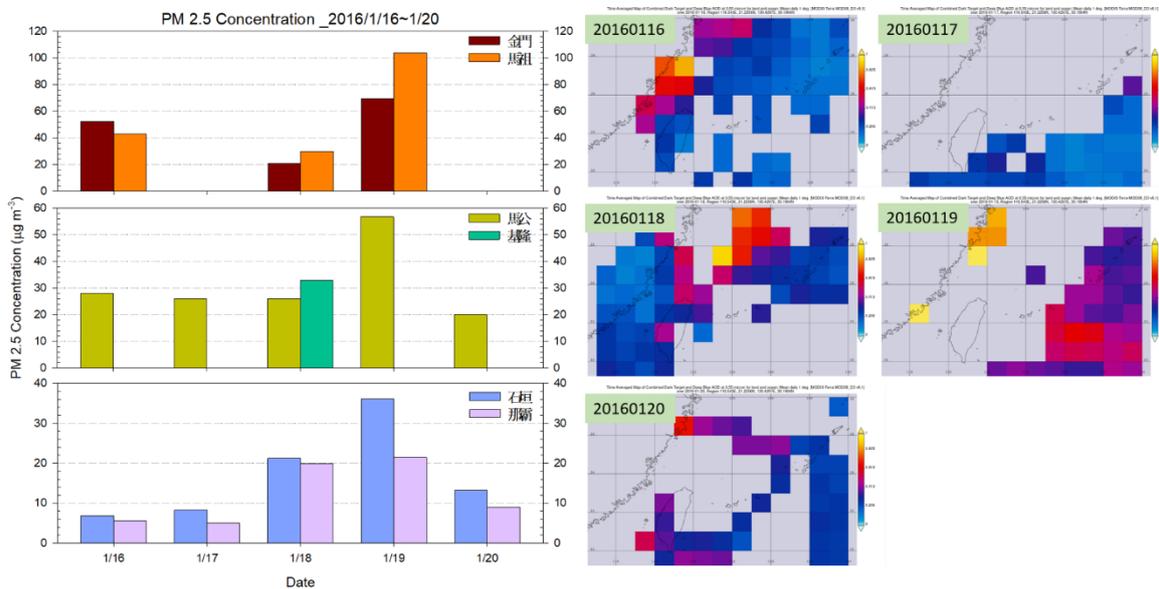


圖 15 2016 年 1 月 16-2016 年 1 月 20 日 PM 2.5 濃度與衛星遙測 AOD 分析圖

由圖 15 左側可以看到在金門、馬祖、馬公、石垣、那霸於 2016 年 1 月 19 日的日平均 PM 2.5 濃度都高於其它天，而從圖 15 右側由衛星遙測得到的 AOD 圖片可以發現在 19 日於中國東南沿海出現 AOD 數值較高的情況，而從 16 日至 19 日可以發現偏橘紅色的區塊範圍有逐漸從西北往東南移的趨勢。

(二)2016年2月5日至2016年2月11日

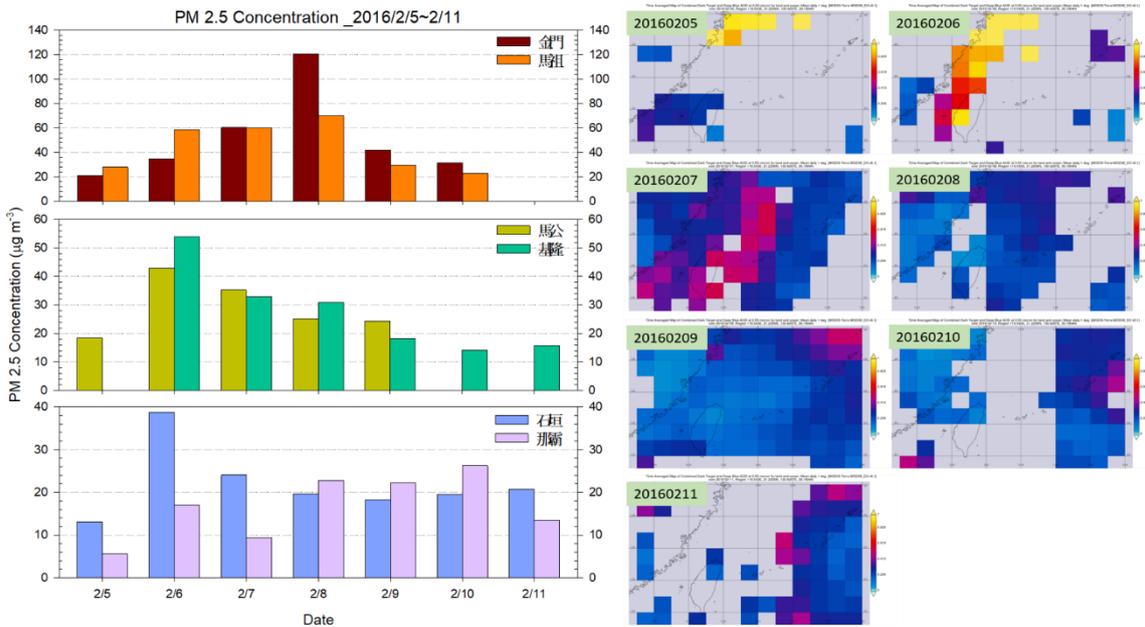


圖 16 2016 年 2 月 5 日-2016 年 2 月 11 日 PM 2.5 濃度與衛星遙測 AOD 分析圖

從圖 16 左側可以看到基隆、馬公、石垣在 2016 年 2 月 6 日出現日平均的 PM 2.5 濃度峰值，而金門的峰值則是出現在 8 日。由圖 14 右側衛星遙測得到的 AOD 數值分析圖可以發現在 2 月 5 日時臺灣北方出現了黃色的色塊，表示大氣混濁度高，而到了 6 日橘黃色區塊往南邊擴散，到了 7 日，AOD 數值降低，但臺灣一帶仍以紫紅色色塊為主，到 9 日才變成藍色色塊，即較低的 AOD 數值，有較不混濁的大氣。

(三)2017年2月26日至2017年3月7日

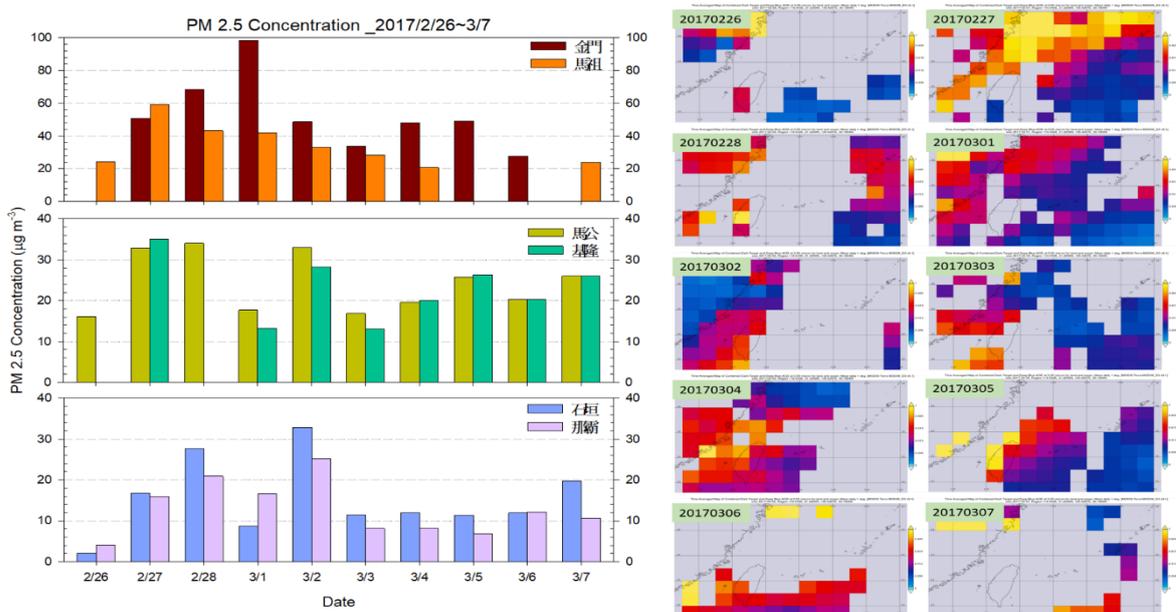


圖 17 2017 年 2 月 26 日-2017 年 3 月 7 日 PM 2.5 濃度與衛星遙測 AOD 分析圖

由圖 17 可以發現在 2017 年 3 月 1 日在金門出現日平均 PM 2.5 濃度的峰值後，在 3 月 2 日基隆、馬公、石垣、那霸也都出現了 2017 年 2 月 26 日至 2017 年 3 月 7 日間相對較高的日平均 PM2.5 濃度。從 AOD 圖像可以看到 2017 年 2 月 27 日在臺灣北方的區域皆為黃色色塊，表示其 AOD 數值高，而從 3 月 1 日的圖片可以發現 AOD 數值呈現由西向東降低的趨勢，而 2 日則是西向東增加，但是到了 3 日之後又變成由西向東降低的趨勢，且 5 日時臺灣西岸大多屬於最高值的黃色色塊。

(四)2019 年 3 月 11 日至 2019 年 3 月 17 日

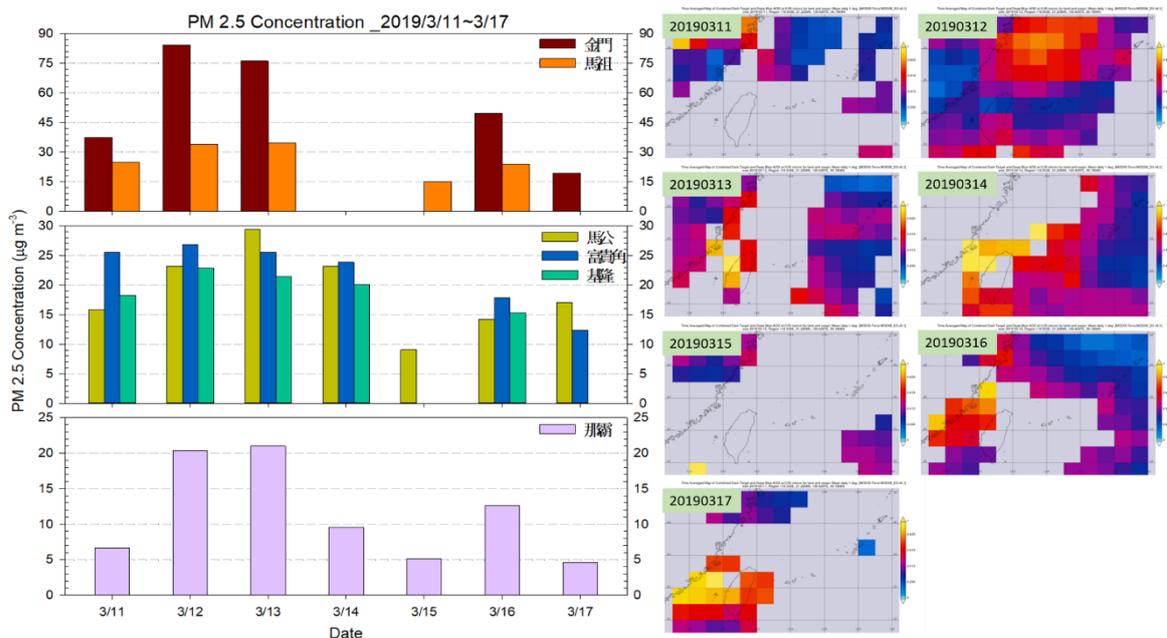


圖 18 2019 年 3 月 11 日-2019 年 3 月 17 日 PM 2.5 濃度與衛星遙測 AOD 分析圖

由圖 18 可以發現在 2019 年 3 月 12 日在金門、馬祖、富貴角和基隆出現日平均 PM2.5 濃度的峰值後，3 月 13 日馬公、那霸也都出現日平均 PM2.5 濃度的高峰。從 AOD 圖像可以看到 2019 年 3 月 12 日在臺灣北方的區域皆為紅橘色色塊，表示其 AOD 數值高，而從 3 月 13 日以及 3 月 14 日的圖片可以發現所有測站所在位置的 AOD 數值幾乎都上升，16 日與 17 日台灣北部的富貴角、基隆以及台灣海峽上的金門、馬祖、馬公所在的區域的 AOD 數值仍較其他測站所在位置高。

(五)2020年3月16日至2020年3月22日

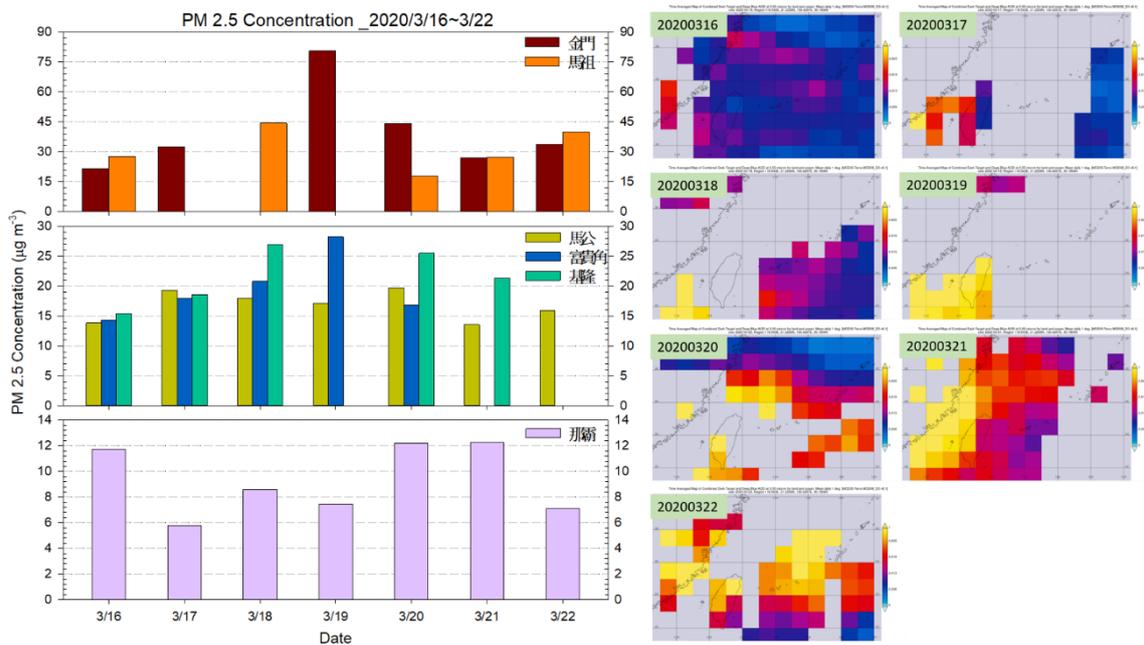


圖 19 2020 年 3 月 16 日-2020 年 3 月 22 日 PM 2.5 濃度與衛星遙測 AOD 分析圖

由圖 19 可以發現在 2020 年 3 月 19 日在金門、富貴角出現日平均 PM 2.5 濃度的峰值後，3 月 20 日馬公、基隆、那霸也都出現日平均 PM 2.5 濃度的峰值。從 AOD 圖像可以看到 2020 年 3 月 16 日在各測站附近的 AOD 數值多落在藍色到紫紅色之間，而從 3 月 17 日到 3 月 21 日的圖片可以發現所有測站所在位置的 AOD 數值幾乎都在上升，特別是在台灣西部與台灣海峽一帶多日的日平均 AOD 數值達到黃色，石垣、那霸的 AOD 數值也有紫紅色到桃紅色。

陸、 討論

一、PM_{2.5} 濃度的時空分布特徵

從 PM_{2.5} 濃度的季節性變化及空間分布的分析中可以發現，距離中國較近的金門與馬祖的濃度於冬春季時特別高，距離較遠、且產業活動以觀光為主的石垣以及那霸的濃度則最低。在冬春季時，PM_{2.5} 濃度地理位置分布上呈現由西向東遞減的趨勢，此一分布特徵較夏季顯著，濃度差異可達三倍之多。並且，各測站的濃度在冬春季的平均值都大於夏季時期，且冬春季與夏季的濃度差異比值從較西邊的 2 倍以上(馬祖、金門、馬公、富貴角)到東邊測站(基隆、石垣、那霸)的約 1.5 倍。顯示可能於冬春季有一 PM_{2.5} 擴散源頭來自於西邊。另外，還可注意到，以觀光產業活動為主、且坐落在台灣海峽中的馬公(18.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，在冬春季的平均濃度較富貴角(17.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、基隆(18.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)略高，但差異不大；而在夏季時段，馬公(7.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的平均濃度卻明顯較富貴角(8.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、基隆(11.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)低，基隆於夏季的平均 PM_{2.5} 濃度幾乎是馬公的 1.5 倍。基隆是以工商業開始發展的港口都市且在 1990 年代以後轉型為臺北都會區的重要衛星都市，相較於馬公可以有更多的當地的 PM_{2.5} 產生源(工廠、海陸運交通等)。此等產業活動差異，可在夏季的 PM_{2.5} 濃度差異上獲得佐證，但在冬春季卻呈現出較一致的濃度分布，顯見對馬公而言，於冬春季有顯著的境外因素影響其空氣品質，致使馬公於冬春季時期的平均空氣品質狀況與富貴角、基隆相似。在資料中也可觀察到，夏季各測站的平均 PM_{2.5} 濃度差異較冬春季小；而在去除降雨時的比較中，在冬春季的馬祖、金門、馬公測站的 PM_{2.5} 平均濃度數值、標準差皆有所提升，顯示冬春季時的每日濃度變化可能較夏季時顯著。

分析各測站間的 PM_{2.5} 濃度之相關係數，可以發現不論是全時或者無降雨時各測站間的 PM_{2.5} 濃度相關係數在冬春季普遍大於夏季，且冬春季各測站間的 PM_{2.5} 濃度相關程度多為中度正相關至高度正相關，而夏季的相關程度則多為低度正相關至中度正相關，如馬祖-馬公在冬春季為高度正相關(0.70)，夏季則降為中度正相關(0.38)；石垣、那霸與台灣各選擇測站的相關性，也從冬春季的中度正相關降低至夏季的低度正相關，且石垣-那霸兩測站間的相關性在冬春季也較高(高度正相關，0.74)；富貴角-基隆則不論在冬春季或夏季，兩測站間皆為高度正相關(0.81~0.91)，而在 PM_{2.5} 的數值上，富貴角與基隆在冬春季有相近的濃度，夏季則是基隆的濃度較高於富貴角。相關係數的分析結果也可支持相較於夏季時，在各測站的冬春季有明顯的共同 PM_{2.5} 影響來源，影響著冬春季時期從金門、馬祖到石垣、那霸的空氣品質。反之，夏季時期的 PM_{2.5} 濃度則可能主要受各地境內人為活動所主導。

進一步比較全時數據及無降雨數據，各測站間的 PM_{2.5} 濃度相關係數絕對值在冬春季全時幾乎都大於無降雨時，而在夏季則是無降雨時大多大於全時。在無降雨時各測站 2015 年~2021 年冬春季及夏季的 PM_{2.5} 濃度平均值幾乎都較全時大，此可能是因為降雨使空氣中的懸浮粒子隨著雨水到達地面，導致觀測到的 PM_{2.5} 濃度降低，因此無降雨時平均 PM_{2.5} 濃度上升。

二、衛星氣膠光學深度影像分析

由於單點測站資料僅能勉強呈現與推測大範圍的分布變化趨勢，故本研究嘗試取用衛星氣膠光學深度(AOD)影像進行分析，比較各測站 PM_{2.5} 濃度峰值時，與衛星遙測於此時間段前後得到的 AOD 影像分布圖做對照關係。雖然 AOD 資料會受雲層影響而缺失，且台灣冬春季的東北季風常伴隨鋒面的雲雨系統，但在去除無資料與降雨的數據後，仍從資料中可發現各測站的 PM_{2.5} 濃度峰值發生時段具有時間差，並且 AOD 數值在空間與時間上的分布變化也與各測站所得的 PM_{2.5} 濃度變化相近，並呈現具有由西向東的擴散趨勢，即呈現出氣膠傳送距離差異所導致的變化。

三、逆軌跡大氣模擬分析

透過逆軌跡圖像分析可以發現，在冬春季的軌跡大多經過東亞，其中以中國及黃海頻率最高，與東北季風路徑相符，因此能解釋 PM_{2.5} 冬春季平均濃度之區域分布以靠近中國之測站濃度較高之原因，所以 PM_{2.5} 濃度可能受到較多人為活動產生的影響；而在夏季的軌跡多經過海洋，PM_{2.5} 濃度受到人為活動的影響可能較小，也與各測站的夏季 PM_{2.5} 平均濃度較冬春季低的統計結果相符。綜上所分析，可推斷在冬春季台灣北部及周遭地區 PM_{2.5} 濃度較高，主要是受到境外污染所導致。

四、馬祖氣膠元素分析

進一步從馬祖的氣膠元素分析中獲得，不論在粗細顆粒中，元素皆以鋁、鐵、鋅的濃度最高。其中，鋁、鐵其元素富集因子(EF)約為 1，代表主要為自然環境的岩石來源；而鎘、鋅、鉛在細顆粒中的元素濃度明顯較粗顆粒高，由其元素富集因子(EF)皆大於 10 可知其氣膠來源多為人為。人為氣膠顆粒大小通常較岩石性氣膠小，故導致此三種元素在細顆粒的氣膠中濃度較高。林秀娟(2015)於 2013 年全年的彭佳嶼、基隆市大氣氣膠重金屬分析中發現，基隆市大氣懸浮微粒中元素的富集因子分析結果呈現「Al、Fe、K、Ca 和 Mg 等元素主要為地殼源；Cr、Pb 和 K 等元素主要為污染源」；而在彭佳嶼的分析中觀察到「細顆粒標本各元素在冬季時濃度顯著增加」，並且「Al、Fe 和 Cr 等元素則在十二月份濃度為最高」，與本研究針對馬祖的氣膠元素分析結果(鋁、鐵)相似。但這些氣膠的化學組成可能受到不同污染排放源的影響，周崇光(2020)等人的研究中即提及「火力電廠排放的 PM_{2.5} 有較高的金屬元素與硫酸鹽，而金屬元素以 Na(和該電廠採用海水脫硫有關)、Mg、K、Ni、Zn、Mo、Cr 和 Se 等為主；煉油廠排放的 PM_{2.5} 特徵元素包括 Fe、Mn、Ni、Zn、Mo、Pb 和 Cr 等；鋼鐵廠排放的 PM_{2.5} 有較高的硫酸鹽和鉀等金屬元素，其特徵元素包括 Fe、Mg、K、Ca、Mn、Zn、Mo、Cd、Tl、Pb、Cr、Se、Rb 和 Cs 等」。不過本研究僅分析一個時期的樣本，對其來源解讀可待更多其他時段樣本的進一步分析。

柒、 結論

- 一、各測站之 PM 2.5 濃度有著季節上的變化以及空間上的關係，在冬春季的平均 PM 2.5 濃度較夏季高 2-3 倍，且濃度由西向東的測站降低，其中馬公在冬春季與臺灣北端的富貴角與基隆的 PM 2.5 濃度相近，但馬公在夏季的 PM 2.5 濃度卻較富貴角及基隆低。且各測站 PM 2.5 濃度的相關程度在冬春季均較夏季高。
- 二、在高 PM2.5 濃度事件發生時，由衛星遙測得到的氣膠光學深度圖顯示冬春季 PM 2.5 的高濃度傳輸和各測站量測到的 PM 2.5 濃度在時空上具有緊密的關聯，且衛星也顯示各測站的 PM 2.5 濃度由西向東降低。
- 三、由本研究的觀察結果顯示東亞境外氣膠傳輸為臺灣北端冬春季 PM 2.5 主要來源。

捌、參考資料

- 一、中華民國行政院環境保護署空氣品質監測小時值資料(一般污染物,每日更新)。取自 https://data.epa.gov.tw/dataset/detail/AQX_P_15
- 二、日本國立環境研究所環境數值數據庫每月數據(~2020 年 3 月)。取自 <http://www.nies.go.jp/igreen/>
- 三、日本環境省大氣汙染物質廣域監測系統最近一年間數據。取自 <https://soramame.env.go.jp/download>
- 四、NASA Goddard Trajectory Analyses of AERONET sites Homepage。取自 <https://tropo.gsfc.nasa.gov/aeronet/>
- 五、NASA GIOVANNI。取自 <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- 六、NOAA ESRL Global Monitoring Laboratory。取自 <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>
- 七、Wu, C.-H., Tsai, I.-C., Tsai, P.-C., Tung, Y.-S., 2019. Large-scale seasonal control of air quality in Taiwan. Atmospheric Environment 214, 116868.
- 八、Taylor, S.R., and S.M., McLennan, 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Review of Geophysics, Vol.33, Issue 2, 241-265.
- 九、E. S. GLADNEY, W. H. ZOLLER, A. G. JONES, G. E. GORDON,1974. Composition and size distributions of atmospheric particulate matter in Boston area. Environmental Science & Technology, 8, 6, 551-557.
- 十、周崇光(2020)。108 年度細懸浮微粒碳與鉛同位素分析技術之發展與應用研究計畫。取自 <https://www.epa.gov.tw/DisplayFile.aspx?FileID=B2D8A4098EBA42C6>
- 十一、林秀娟，2015，彭佳嶼與基隆市大氣氣膠中重金屬分布之研究。國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系碩士學位論文。

【評語】 180007

本研究選取台灣北端及週邊離島測站，比較不同季節 PM2.5 濃度之差異與降雨之影響。並分析近六年來的年際變化與不同測站量測結果之差異與相關性。量測分析很完整但較欠缺變化原因之分析與討論。逆軌跡分析若能搭配污染源與風的平流傳送會更完整，測站間量測結果之相關性分析，若能考慮時間延遲效應，結果可能會更容易解釋。