

台灣大氣中 PM_{2.5} 污染濃度和汙染源的時空分布

謝瑞豪¹ 李睿桓¹ 詹長權²

摘要：臺灣細懸浮微粒的汙染狀況可透過分析臺灣空氣品質監測站的汙染與氣象資料、臺灣環保署的排放資料以及美國國家海洋暨大氣總署的多層氣流軌跡模式來進行評估。就臺灣而言，臺灣細懸浮微粒的汙染狀況在秋、冬與春季較夏季來的嚴重，而以台灣本島區分則是西部與中南部之汙染狀況較東部與北部來的嚴重。近年來，臺灣接近大陸之外島的細懸浮微粒狀況亦日趨惡化。從臺灣環保署 76 個監測站的資料可發現，細懸浮微粒的年平均濃度從 2005 年的 35.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 2014 年的 24.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以及 2015 年的 21.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而 2013 年至 2015 年間之降幅更明顯達到 28.41 %。加嚴的車輛排放標準是臺灣細懸浮微粒汙染下降的一大主因尤其在都市更為明顯，以台北的萬華測站為例，細懸浮微粒濃度中位數在 2006 年至 2015 年間就下降到 19.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。然而臺灣的中南部因為工廠與發電廠的排放使得其細懸浮微粒的汙染程度依舊偏高，以雲林縣的臺西站為例，細懸浮微粒濃度中位數在 2006 年至 2015 年間只下降到 26.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。另外在 2012 年 9 月高雄大林發電廠將兩座燃煤火力發電廠除役後發現，高雄市的林園測站之細懸浮微粒濃度從 2012 年的 39.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 2015 年的 27.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降幅達 30.3 %。從多層氣流軌跡模式可知，臺西站的細懸浮微粒汙染主要是來自於台灣本土的工業源，而在秋、冬兩季時才會受到大陸長程傳輸的些微影響。本研究表示臺灣整體除中部地區尤其是雲林之外的細懸浮微粒濃度皆持續下降中，而臺灣中南部的細懸浮微粒主要是受到本土汙染源的影響以及些許的長程傳輸影響。

關鍵詞：細懸浮微粒，石化工業，燃煤電廠

(台灣醫學 Formosan J Med 2016;20:367-76) DOI:10.6320/FJM.2016.20(4).4

臺灣細懸浮微粒空氣品質監測站

臺灣 2005 年起於 76 個測站全面監測空氣中細懸浮微粒，包括氣象資料中的風速與風向，各年的歷史資料細懸浮微粒的趨勢變化[1]。76 個測站中有 60 個為一般測站，5 個為工業測站，由北到南依序為頭份、線西、臺西、麥寮與前鎮，其他包括 6 個交通測站、2 個國家公園站與 2 個其他測站[2]。測站空間分布上，臺灣本島有 73 個監測站，地理分佈主要集中於人口數較多的五都，西部各縣市至少有三個監測站，西部的宜蘭與臺東各有兩個站，花蓮縣僅有 1 個監測站，外島則有馬公、金門與馬祖等三個測站，2015 年 1 月環保署也於馬祖東引鄉設置了第 77 個監測站作為早期預警之監測

站，這 77 個監測如圖一所示。

本土汙染源排放資料

本土汙染來源貢獻可依據 2015 年 6 月 12 日最新更新固定汙染源排放清冊 8.1 版的資料[3]，整理其中原生性的細懸浮微粒排放量與衍生性的二氧化硫與氮氧化物，使用微軟的 POWER MAP 建立固定汙染源排放空間分佈圖。

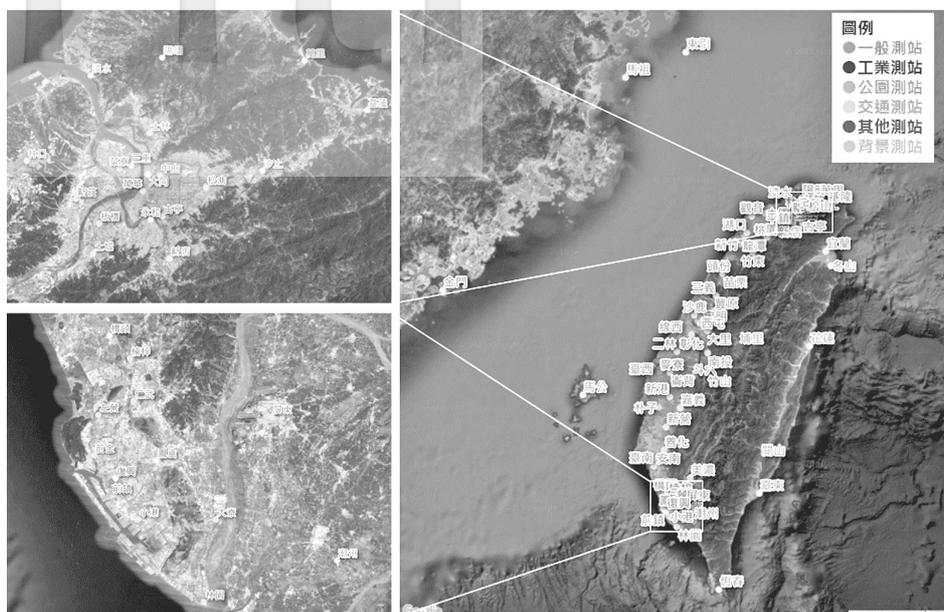
資料統計分析

使用 R version 3.2.3 與 Openair 套件[4-5]，進行全臺灣空氣品質監測站之細懸浮微粒與氣象監測資料統計與分析。由於細懸浮微粒長期濃度變化

¹工業技術研究院綠能與環境研究所，²臺灣大學公共衛生學院職業醫學與公共衛生研究所

通訊作者連絡處：謝瑞豪，工業技術研究院綠能與環境研究所，新竹市光復路二段 321 號 6 館 216 室。

E-mail: rueihaoshie@itri.org.tw



圖一：全臺空氣品質監測站分佈圖

受到氣象、時間與不同排放源的影響，通常不是呈現常態分佈(normal distribution)，無法以典型的簡單線性回歸(simple linear regression)進行統計分析，處理這些環境資料的離群值(outlier)，需要避開傳統參數(traditional parametric)與無參數(non-parametric)統計法來進行分析，以泰爾-森斜率估計與檢定(Theil-Sen slope estimate and tests)[6]，分析細懸浮微粒長時間濃度變化趨勢。

細懸浮微粒的來源分析方法於本土小尺度的細懸浮微粒污染源追溯，使用風速風向濃度極座標圖(polorplot)函式用於雙變異極座標濃度圖(bivariate plar plot)[7]，有別於百分位玫瑰污染圖用風向單一變數對於濃度分布影響，可同時風速與風向兩種變數一起對於濃度的影響作圖來得到污染的來源方向與最大濃度之風速。境外大尺度傳輸分析則使用美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的多層氣流軌跡模式(Hybrid Single-Practice Lagrangian Integrated Trajectory model, HYSPILT Model)4.0 進行氣流來源軌跡分析[8-9]，以臺西(lat = 23.72, lon = 120.28)為受體位置，每三小時為時

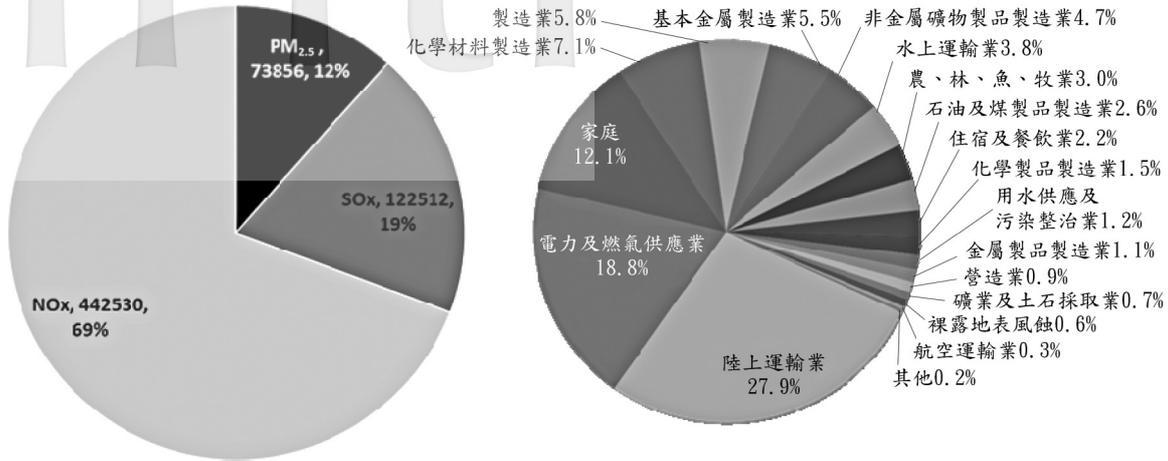
間區隔，進行 72 小時的反軌跡分析，2015 年整年的軌跡資料合併後，進行 2015 年臺西測站四季 PM_{2.5} 軌跡來源分析。

結果

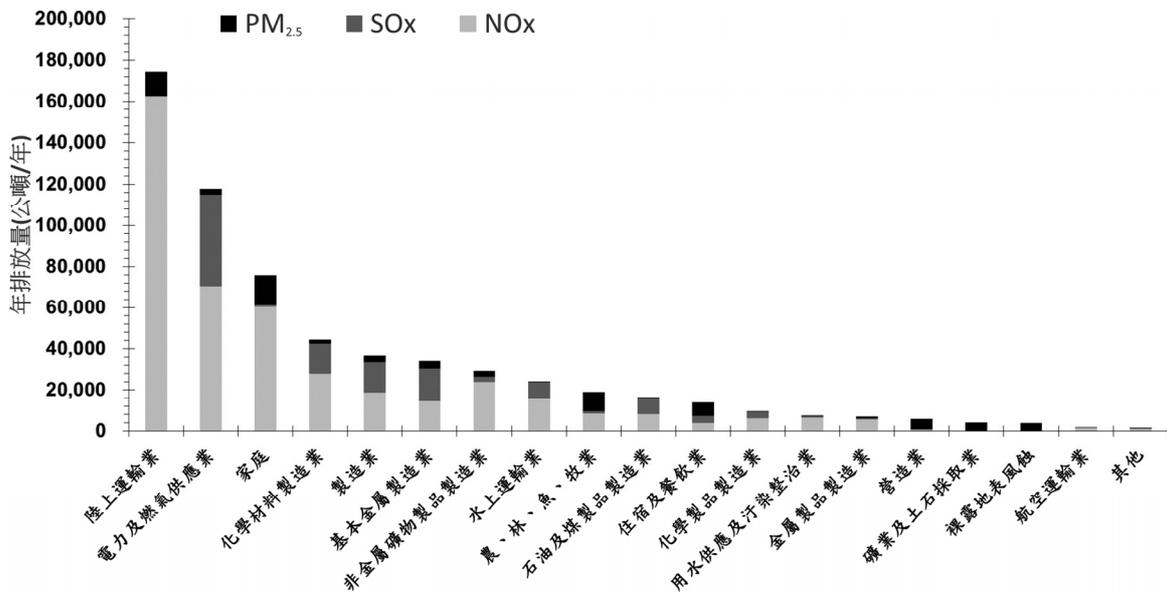
一. 臺灣細懸浮微粒空氣品質空間時間分佈

依據 2015 年 6 月 12 日最新更新固定污染源排放清冊 8.1 版的資料，汙染來源貢獻如圖二，臺灣地區原生性的 PM_{2.5} 的汙染別排放量百分比(左)僅佔 12%，主要的成分為衍生性的氮氧化物佔 69%與硫氧化物佔 19%，由行業別排放總量百分比(右)發現主要的汙染源為陸上運輸業，其次為電力業(27.9%)、燃氣供應業(18.8%)與家庭(12.1%)，化學材料製造業與製造業各佔 7.1%與 5.8%，這些業別為臺灣地區的主要固定汙染源貢獻來源。

臺灣地區各行業別細懸浮微粒、硫氧化物與氮氧化物排放量如圖三，由圖中明顯發現在氮氧化物(NO_x)的主要排放源為陸上運輸業，但是各行業別皆有不同程度的貢獻；但是在硫氧化物(SO_x)則是燃氣供應業化學材料製造業、製造業與基本金屬



圖二：2010年臺灣地區排放成分排放量百分比(左)與行業別排放總量百分比(右)



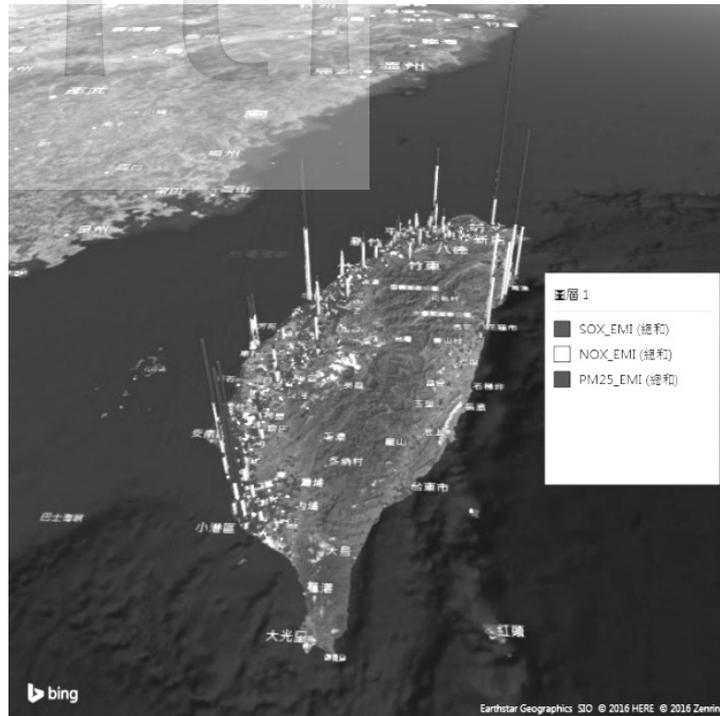
圖三：臺灣地區 2010 年各行業別細懸浮微粒、硫氧化物與氮氧化物排放量

製造業為主，因此臺灣硫氧化物(SOx)是可以做為工業源與交通源區分的重要指標汙染物，一但有工業源的汙染時，工業區的特定位置就是汙染源，不像交通源的氮氧化物會集中於交通繁忙的區域，同時汙染的發生會於一日中的交通流量有關。

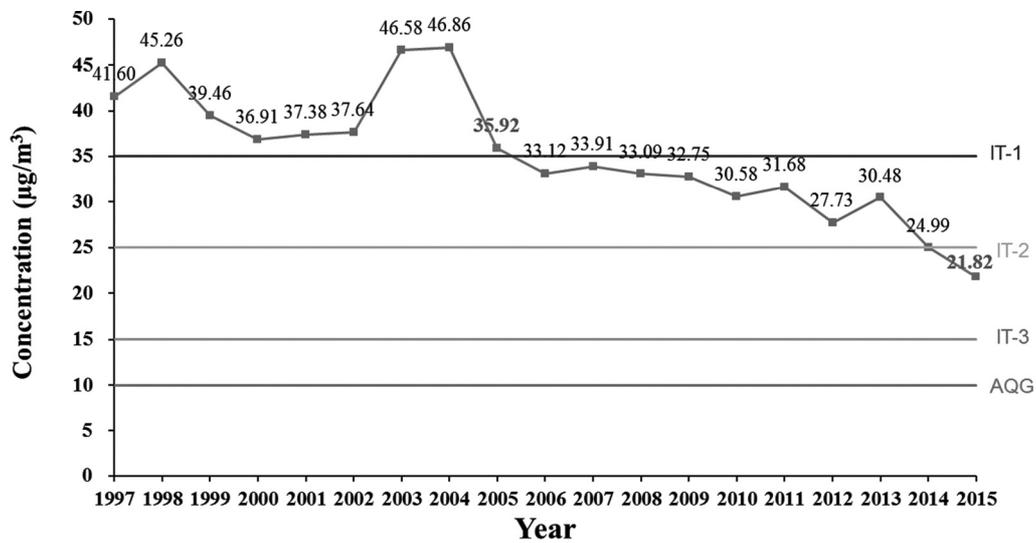
原生性細懸浮微粒中 PM_{2.5} 與衍生性 NO_x 與 SO_x 合併排放量空間分佈如圖四，在南部的高雄市呈現汙染源密度高且排放量又大現象，向北依序則

是雲林麥寮鄉六輕工業區的燃煤燃油電廠與煉油廠、臺中的龍井鄉的臺中火力發電廠，北部的林口火力發電廠與基隆協合電廠，花蓮北方的和平電廠與水泥廠。

環保署依據聯合國 2005 年所公布空氣品質指引，將臺灣細懸浮微粒年平均濃度於 2020 年的控制目標，訂為過渡時期目標-3(Interim target-3, IT-3)建議標準 15 μg/m³，可用來比較臺灣的空氣品質狀



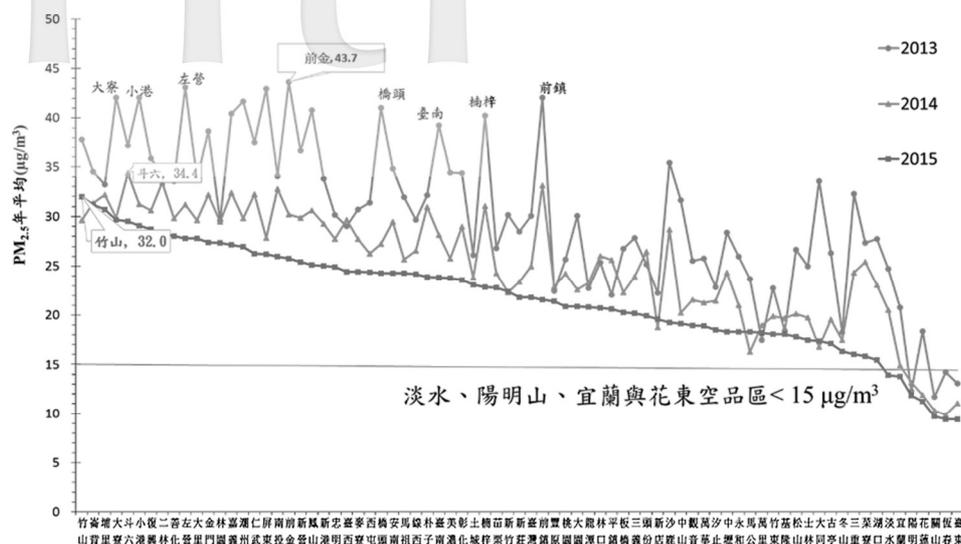
圖四：原生性與衍生性細懸浮微粒排放源分佈圖



圖五：1997 年至 2015 年臺灣含離島 PM_{2.5} 年平均趨勢圖

況。每個環保署空氣品質測站一年產生 8760 筆資料，每年全臺灣 76 個監測站可產生 665760 筆細懸浮微粒，1997 年至 2015 年期間，細懸浮微粒一共

累積 726 萬筆資料，每年監測資料濃度平均值繪製趨勢圖如圖五。由分析趨勢圖顯示，在 2005 年 76 個監測站開始全面監測後，2005 年濃度為 35.92



圖六：全臺 2013 年至 2015 年 76 個監測站 PM_{2.5} 年平均變化趨勢

µg/m³，高於 IT-1 建議標準(35 µg/m³)，在 2014 年為 24.99 µg/m³已低於 IT-2 建議標準(35 µg/m³)，2015 年已下降至 21.82 µg/m³，與 2005 年比較下降 14.1 µg/m³，其中以 2013 年至 2015 年降幅最為明顯，由 2013 年 30.48 µg/m³，2015 年下降至 21.82 µg/m³，下降幅度高達 28.41 %。

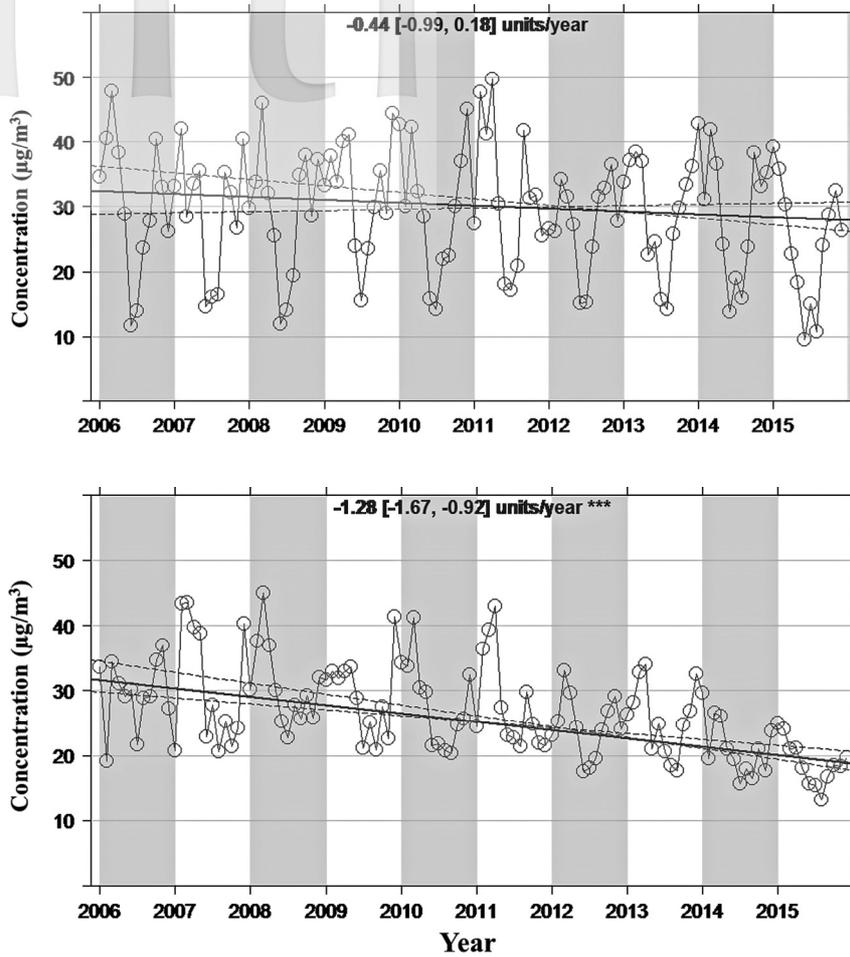
臺灣 2013 年至 2015 年的年平均濃度依 2015 為基準排序由高至低排序如圖六，由圖中發現在 2013 年之年平均濃度較高的測站主要都在高雄市，前金站是 2013 年全臺年平均濃度最高的測站，平均濃度高達 43.7 µg/m³，前金站在 2015 年的細懸浮微粒的年平均濃度已降至 25.8 µg/m³，年平均濃度下降 17.9 µg/m³ 降幅高達 41.0%，在 2014 年與 2015 年間，高雄市的監測站也都出現大幅的濃度下降，顯示空氣品質中的細懸浮微粒大幅改善。反之，位於中部空品區的竹山站細懸浮微粒年平均濃度不降反升，由 2014 年 29.6 µg/m³ 上升至 2015 年 32.0 µg/m³，成為全臺 2015 年細懸浮微粒年平均濃度最高的測站，顯示空氣品質的細懸浮微粒沒有明顯的改善。近三年臺灣細懸浮微粒的年平均濃度的排名變化趨勢，已由高屏空品區移至雲嘉南與中部空品區，2015 年包括臺東、恆春、關山、宜蘭、花蓮、陽明與淡水等 7 個站，已低於 15 µg/m³

年平均目標，東部宜蘭東山站尚未達聯合國 IT-3 的 15 µg/m³ 年平均目標。

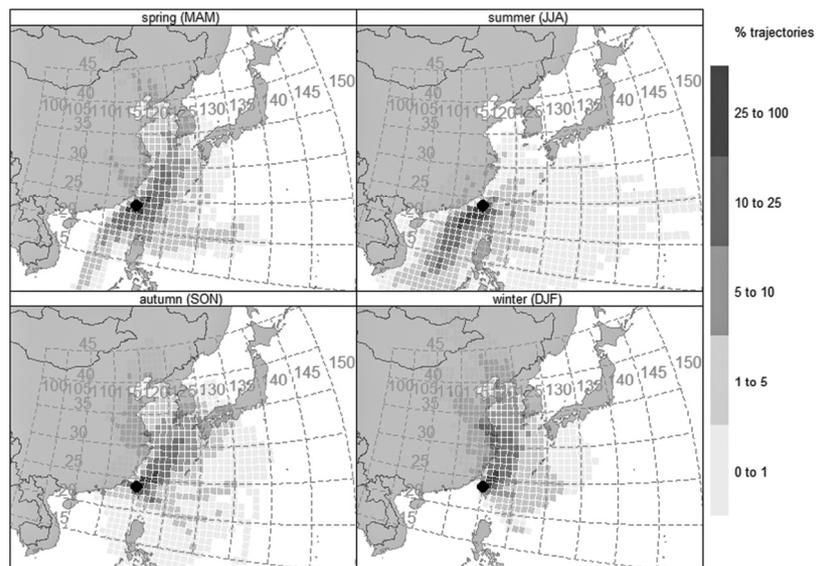
二. 汙染源對細懸浮微粒空氣品質的影響

鄰近石化工業區與燃煤電廠的雲林臺西工業站與臺北市交通繁忙的萬華站比較，如圖七季節的變化上，兩測站每年冬季(12 月、1 月與 2 月)濃度相對較高。臺西近 10 年的濃度變化是以 -0.44 µg/m³ (95% CI, -0.99~0.18) 下降，但未達統計上的顯著意義(p>0.1)；萬華近 10 年濃度則以每年 -1.28 µg/m³ (95% CI, -1.67~-0.92) 的速度下降，達統計上的顯著意義(p<0.001)，2006 年 1 月臺西與萬華站中位數濃度分別為 34.59 µg/m³ 與 33.61 µg/m³，兩測站濃度相近，2015 年萬華明顯低於臺西，2015 年 12 月臺西與萬華中位數濃度分別 26.38 µg/m³ 與 19.75 µg/m³，兩測站濃度已出現明顯之差異。

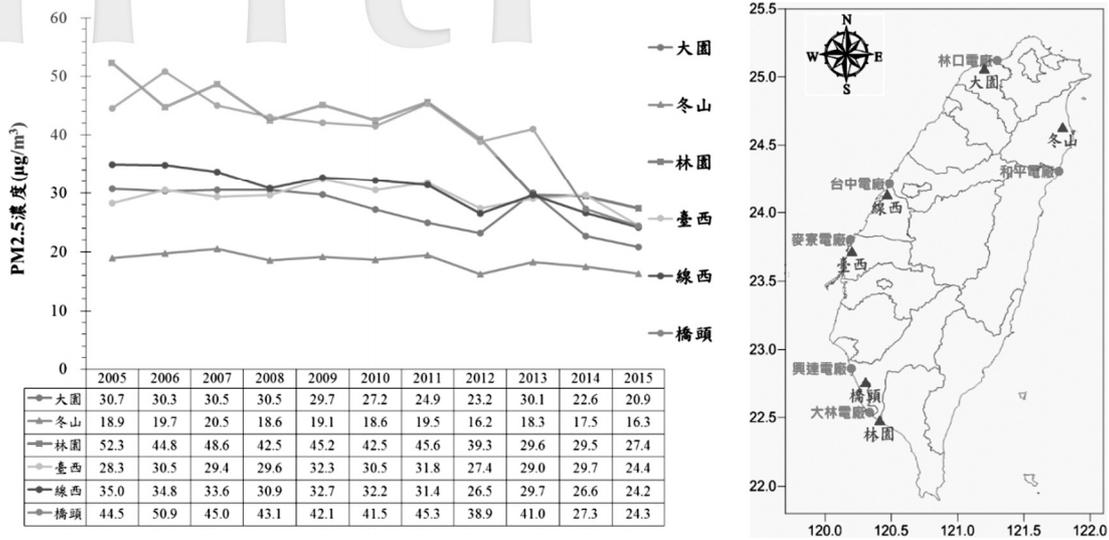
探討汙染來源的軌跡分佈，以臺西為受體位置，使用 NOAA 的 HYSPLIT Model，每三小時為時間區隔，進行 72 小時的反軌跡分析，所得到的 210943 筆軌跡資料合併後，進行 2015 年四季 PM_{2.5} 軌跡來源分析如圖八，由模式分析結果發現在冬季(12 月、1 月與 2 月)為氣流軌跡會經過中國大陸細懸浮微粒重汙染區域，在春季(3-5 月)的氣流軌跡來源會移出至東海，因此中國細懸浮粒傳送軌跡對



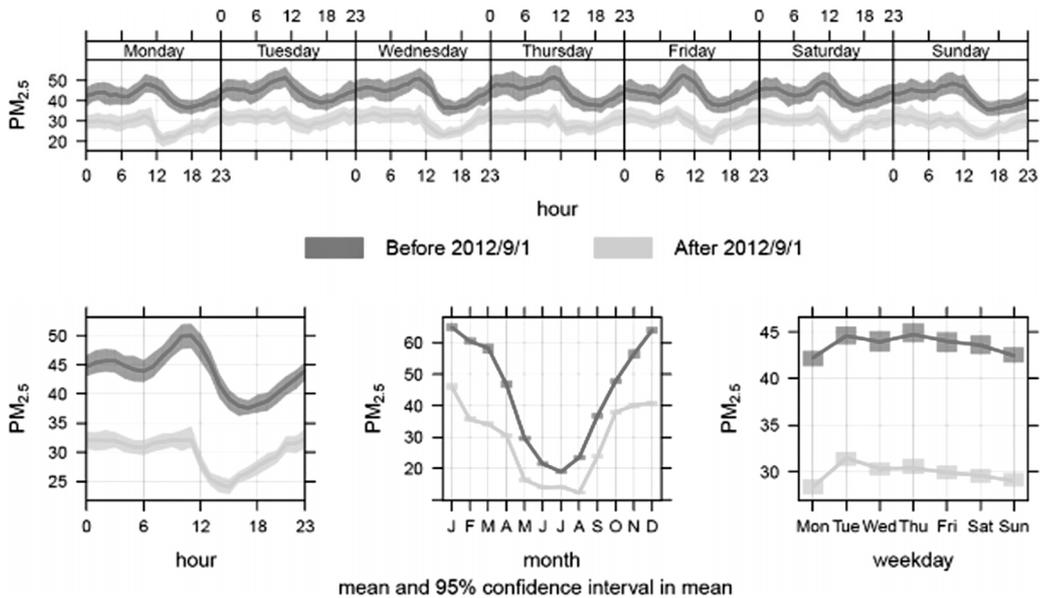
圖七：臺西測站(上)與萬華測站(下)月平均濃度中位數回歸分析



圖八：臺西監測站 2015 年 PM_{2.5} 軌跡來源四季空間分析



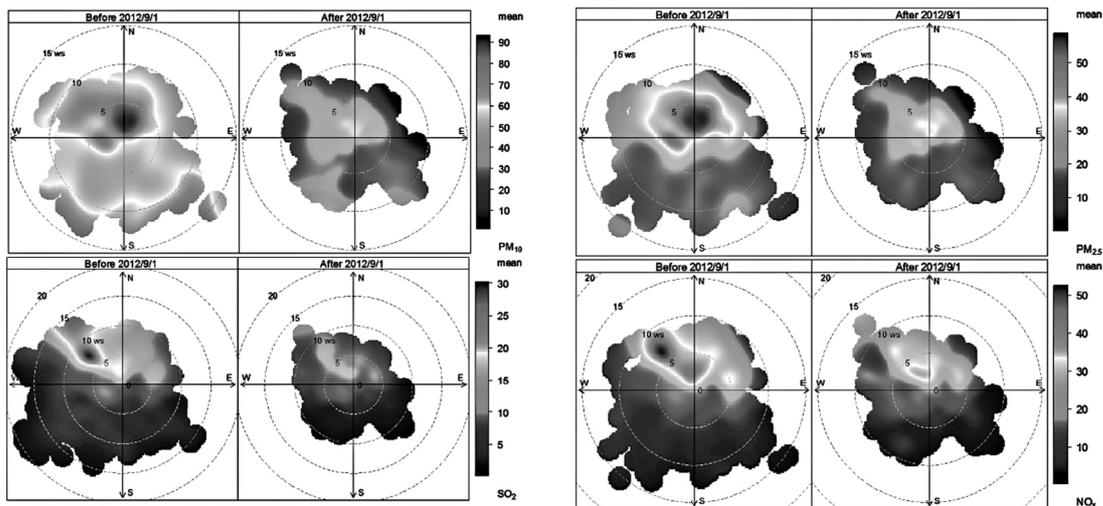
圖九：臺灣地區鄰近燃煤電廠監測站 PM_{2.5} 年平均值變化趨勢



圖十：大林電廠 1,2 機除役前後林園站 PM_{2.5} 濃度時序變化

臺灣的影響開始減少，到了夏季(6-8 月)氣流軌跡對於臺灣的影響主要是東南亞，夏季中國氣流軌跡對於臺灣的影響最小，秋天(9-11 月)氣流傳送軌跡又開始接進中國的細懸浮粒汙染區，然而四季的軌跡的比例是於臺灣本島附近的比例相對較高。

燃煤電廠所排放的汙染物包括原生性的細懸浮微粒，也會排放衍生性的二氧化硫與氮氧化物，以鄰近燃煤電廠監測站 PM_{2.5} 年平均值變化趨勢如圖九，由圖中可以發現林園與橋頭站的濃度於 2012 年至 2015 年出現大幅下降，由 2012 年的 39.3



圖十一：大林電廠 1,2 機除役前後污染雷達圖

µg/m³ 降至 2015 年 27.4 µg/m³ 降幅達 30.3%，橋頭站則是於 2013 年至 2014 年出現大幅下降。這段期間內主要的排放變化主要是大林電廠的大一與大二機為舊燃煤的機組，於 101 年 9 月除役。

大林廠除役前後兩年的監測站數據進行比對如圖十，分析結果顯示臺電大林廠 1,2 機除役後，環保署林園站細懸浮微粒濃度約下降 15 µg/m³，而且是無論是日、週與月的趨勢都是一樣大幅下降。

進一步分析除役前兩年與後兩年的環保署林

園站空氣中的 PM_{2.5}、PM₁₀、SO_x 與 NO_x 的濃度各風向風速來源變化如圖十一，由分析結果顯示在大林電廠的大一與大二機除役前空氣中的 SO_x 與 NO_x 的高濃度來源方向皆為西北方，除役後這兩種污染物的濃度來自於西北方的濃度皆明顯的降低；PM_{2.5} 與 PM₁₀ 主要來源為北方，但是次要的來源為西北方，除役後發現於西北方需要風速 5 m/s-10 m/s 傳遞而來的污染源明顯的下降，來自北方風速 0.5 m/s-5 m/s 的污染濃度也跟著下降。

討論

臺灣長期細懸浮微粒空氣品質資料分析結果顯示，臺灣整體的細懸浮的濃度持續的下降之中，空氣品質日漸改善中，但是在雲林地區鄰近工業區與下風處濃度在近十年內沒有顯著的改善。時序變化上，Lin 等人由長期衛星光化學厚度資料分析顯示[10]，2009 年後中國珠江三角洲的濃度開始出現下降的趨勢，由大陸重污染移入的影響也會減少，推估北臺灣的萬華所受影響也會出現下降，但是主要是受本土污染為主的臺西站，受境外細懸浮微粒移入的減少的效應並不顯著。空間變化上，Zhang 等人分析 2004-2015 中國 190 個城市[11]，城市之空間分布依序為黃河流域 > 長江流域 > 珠江三角洲，近年的受大陸境外移入的嚴重區域已經範圍減少，會發生高污染傳入主要來自於北京、天津與河北等高污染區域，透過整年的氣流軌跡分析，臺灣受到大陸重污染區影響的時間主要是在冬季，然而主要的軌跡還是在臺灣附近。南部區域高雄由於大林電廠的舊機組改建前後，近年來位於下風處的林園站在原生性與衍生性的細懸浮微粒的濃度都出現改善，顯示老舊之燃煤發電廠有明顯污染。因此，臺灣北部地區受到的境外影響高於中南部，有賴於大陸地區持續改善；中南部發生空氣品質不良的主因還是本土的污染再加上境外的雙重影響，對於要改善中南部的細懸浮微粒空氣品質不良，需要管制高排放的工業大戶，減少原生性與衍生性的細懸浮微粒排放，才是根本之道。

聲明

本研究之利益衝突：無。知情同意：無。受試者權益：無人體或動物實驗。

參考文獻

1. 行政院環保署：空氣品質監測網，資料查詢與服務，空氣品質監測，歷史資料下載。
<http://taqm.epa.gov.tw/taqm/tw/YearlyDataDownload.aspx/> Accessed May 8, 2016.
2. 行政院環保署：空氣品質監測網，空氣品質監測，背景說明。<http://taqm.epa.gov.tw/taqm/tw/b0101.aspx/> Accessed May 8, 2016.
3. 行政院環保署：空氣污染排放量查詢系統。http://teds.epa.gov.tw/new_main2-0-1.htm/ Accessed May 8, 2016.
4. R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/2016>.
5. Carslaw DC, Ropkins K: openair - An R package for air quality data analysis. *Environ Model Softw* 2012;27-28:52-61.
6. Munir S, Habeebullah TM, Seroji AR, et al: Quantifying temporal trends of atmospheric pollutants in Makkah (1997-2012). *Atmos Environ* 2013;77:647-55.
7. Uria-Tellaetxe I, Carslaw DC: Conditional bivariate probability function for source identification. *Environ Model Softw* 2014; 59:1-9.
8. Draxler RR, Hess GD: An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Aust Meteorol Mag* 1998;47:295-308.
9. Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, et al: NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull Am Meteorol Soc* 2015;96:2059-77.
10. Lin C, Li Y, Lau AKH, et al: Estimation of long-term population exposure to PM_{2.5} for dense urban areas using 1-km MODIS data. *Remote Sens Environ* 2016;179:13-22.
11. Zhang YL, Cao F: Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level. *Sci Rep* 2015;5:14884.

Temporal-Spatial Distribution of PM_{2.5} Concentration and the Contribution of Sources in Taiwan

Ruei-Hao Shie¹, Jui-Huan Lee¹, Chang-Chuan Chan²

Abstract: PM_{2.5} pollution in Taiwan can be evaluated by analyzing pollution and weather data from air quality monitoring stations and emission data from Taiwan EPA, and air mass tracking models of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) HYSPLIT Model from the USA. PM_{2.5} pollution in Taiwan was high in fall, winter, and spring seasons and low in summer season. Island wide, PM_{2.5} pollution in Taiwan was high in west part and central and southern parts of Taiwan and relatively low in eastern and norther parts of Taiwan. PM_{2.5} pollution at offshore islands near China has deteriorated in recent years. Annual average of PM_{2.5} concentration at all 76 Taiwan-EPA monitoring stations was 35.92 µg/m³ in 2005 and declined to 24.99 µg/m³ in 2014, and 21.82 µg/m³ in 2015, with a sharp decrease of 28.41 % between 2013 and 2015. Increasing strict vehicular emission standards is the main reason of driving down the PM_{2.5} pollution in Taiwan, especially in cities, as exemplified by the median PM_{2.5} concentration at Wanhua station in Taipei being decreased to 19.75 µg/m³ from 2006 to 2015. But emissions from industries and power plants still keep relatively high PM_{2.5} pollution in central and southern Taiwan as exemplified by the median PM_{2.5} concentration at Taixi station in Yunlin County being decreased to 26.38 µg/m³ only from 2006 to 2015. Another example was the decrease of PM_{2.5} concentration at Linyuan station in Kaoshung City from 39.3 µg/m³ in 2012 to 27.4 µg/m³ in 2015 (30.3% decrease) since a nearby power plant (Dalin) retired two old coal-fired power plants in September 2012. The HYSPLIT model showed the majority of PM_{2.5} pollution in Taixi coming from domestic sources of nearby industrial complex and minor influenced by long-range transported pollution outside Taiwan in fall and winter seasons. It is concluded that overall PM_{2.5} concentration was decreasing except central Taiwan (Yunlin). Local sources contribute to most of the PM_{2.5} pollution in central and south Taiwan with additional contribution by long-range transport of pollution.

Key Words: PM_{2.5}, petrochemical plant, coal power plant

(Full text in Chinese: Formosan J Med 2016;20:367-76) DOI:10.6320/FJM.2016.20(4).4

¹Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute; ²Institute of Occupational Medicine and Industrial Hygiene, College of Public Health, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

Address correspondence to: Ruei-Hao Shie, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Room 216, Bldg.6, 321 Sec. 2, Kuang-Fu Rd., Hsinchu, Taiwan. E-mail: rueihaoshie@itri.org.tw