

應用收支分析診斷春季高屏地區的 PM_{2.5} 傳輸與排放

林明彥¹ 林亞辰¹ 徐偉庭¹ 吳曜竹² 鄭凌韻¹
高雄市立高雄高級中學¹ 國立臺灣大學大氣科學系²

摘要

本研究的目的是分析高雄春季境外 PM_{2.5} 污染的來源，以及本地 PM_{2.5} 污染物排放的主要區域及類型。透過計算污染物的水平傳輸，探討高雄各邊界污染物移出、移入的時間變化。高雄的污染物傳輸大致上是移入大於移出，污染物受高雄春季之盛行風向影響呈現西進東出。春轉夏之際，受到高壓接近，混和層厚度增加稀釋 PM_{2.5} 的濃度，使得污染物傳輸量下降。利用污染物收支方程估算境內污染物的源匯和。源匯和的日週期變化主要分為單峰型(固定污染源)及雙峰型(移動污染源)，而單位面積的污染源以移動污染源為最大宗。最後綜合春季期間高雄整體的本地污染源排放量是境外污染物傳輸量的 1.1 倍。

關鍵字：PM_{2.5} 收支分析、高雄地區、春季

一、前言

近年來空氣污染議題受到一般大眾重視，媒體常常報導綜觀天氣系統(如：鋒面)影響，導致來自中國的污染物進入臺灣，使得臺灣空氣品質不良，也有媒體表示高雄本地的污染排放才是影響高雄空氣品質的主要原因。

關於污染物傳輸的研究，吳和吳(1998)使用二維高階擴散模式並利用一維邊界層模式提供的日夜大氣邊界層背景場作為邊界條件，模擬污染物日夜擴散變化。夜間靠近污染源處的垂直擴散較小，下風處的垂直擴散距離較大。經過濃度收支分析，下風處的污染物透過垂直擴散項向上下擴展。祁(1993)使用 Sun and Chang (1986)的二維高階擴散模式模擬對流邊界層中之擴散情形，並以普度二維中尺度大氣模式模擬污染物在海風環流下的擴散情形。海風環流雖加強了垂直傳輸，但垂直傳輸對污染物擴散的貢獻仍偏小，主要還是水平傳輸對污染物移動貢獻較大。Miller and Holzworth (1967)在高斯類擴散模式的基礎上推導出都會擴散模型(urban diffusion model)，可以利用觀測到的污染物濃度推算污染源強度。

混合層厚度是污染物擴散和傳輸的重要指標，黃和張(2012)比較 Nozaki 法和 Holzworth 法計算大

氣混合層厚度的準確度，因國內探空測站極少，以 Holzworth 法計算時，常需以鄰近地區的探空資料做為估算混合層高度之依據因此 Nozaki 法較適合臺灣。曾(2005)利用能量守恆及亂流動能方程發展出考量多氣象參數的混合層預測模型。將通風指數與污染物濃度作比對，顯示當高污染事件發生時，通風指數有明顯下降，使得污染物擴散不佳。混合層上方的大氣穩定度對於混合層厚度也有一定程度的影響。

收支分析方法常被用在強降水事件中作為討論豪雨成因的其中一種方法。Braun (2006)利用 MM5 模擬 Bonnie (1998)颱風，透過水收支分析發現颱風眼牆中的凝結大部分發生在對流熱塔中，而眼牆以外的凝結大部分發生在較弱的上升氣流中。Yang et al. (2011) 利用水收支方程，發現臺灣的陡峭地形顯著增強了納莉颱風二次環流，並在低層產生了更強的水平通量輻合。Huang et al. (2014)和 Wu et al. (2020)以準拉格朗日(quasi-Lagrangian)座標的水收支分析方程分別追隨莫拉克(2009)颱風雨帶上的強對流胞和南海上的中尺度對流系統，發現臺灣地形抬升使系統中水氣凝結增加且雨滴蒸發減少。

本研究利用污染物收支平衡的概念，估算各種機制的污染物貢獻量，並嘗試回答下列科學問題：(1) 春季期間境外的 PM_{2.5} 是從哪裡進入高屏地區？量

有多少？(2)春季期間境內排放的 PM_{2.5} 主要在哪些區域？這些區域主要的排放源可能是什麼？(3)春季期間高雄的本地 PM_{2.5} 排放較多還是外部傳入的 PM_{2.5} 較多？

二、研究方法

(一) 觀測網格模型建立與垂直風速估計

本研究使用環保署空氣品質監測網當中 2014-2018 年三月到五月高雄和屏東的 14 個空氣品質測站之 PM_{2.5} 濃度、地面風向、風速。將各個測站標上代號 A-N，表一為測站名稱與代號的對照表。接著我們將各個測站連成 18 個三角形，同時假設(1)污染物、風等變數在高度 100 公尺內和測站所量測的數值變異不大，(2)側邊界和上邊界空氣密度大約一致，(3)下邊界(地面)沒有空氣質量通過，也就是下邊界的垂直風速為零。測站地理位置以及網格如圖一所示。

表一 測站代號對照表。

美濃	橋頭	楠梓	仁武	鳳山	左營	前金	復興	前鎮	小港	大寮	林園	潮州	屏東
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N

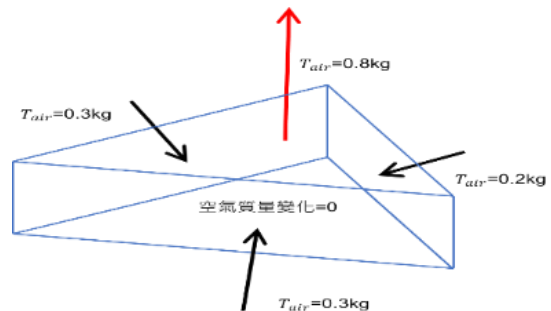


圖一、各測站的地理分佈與測站網格劃分。

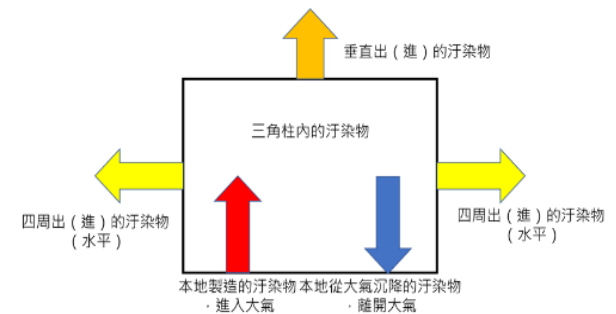
利用空氣質量守恆的概念(如圖二)，以測站互相連接形成的網格，計算從所有邊界流進和流出的空氣質量，在質量保守的假設下，測站網格內的空氣質量要維持一致，使得垂直風速可以寫作式(1)。

$$w = \frac{-1}{A_U} \sum_i A_i V n_i \quad (1)$$

其中， A_i 為側邊界的面積， $V n_i$ 為垂直側邊面積的速度分量，測站網格底面積 A_U ，並定義進入網格為正，出網格的方向為負。



圖二、垂直速度估算示意圖。



圖三、污染物收支示意圖

(二) 污染物收支方程

參考 Braun (2006)、Yang et al. (2011)、Huang et al. (2014) 及 Wu et al. (2020) 中的水收支方程式，簡易的污染物收支方程式如式(2)：

$$\Delta L = -T_h - T_v + S_c - S_k \quad (2)$$

其中， ΔL 表示三角柱內的污染物局地隨時間的質量變化， T_h 為正值表示污染物在單位時間內水平傳出三角柱外的污染質量， T_v 為正值表示污染物在單位時間內垂直傳出三角柱外的污染質量， S_c 表示本地生產或排放出來的污染質量， S_k 表示本地在單位時間內從大氣中所移除的污染質量。水平傳輸以及垂直傳輸前有負號，是由於將朝外的側邊界法向量和朝上的上邊界法向量定為正，而

污染物收支模型的示意圖如圖三所示。

污染物濃度局地時間變化(ΔL)使用中插法計算，使用前後相鄰時間濃度(C)的差值除以前後兩格的間隔時間(2t)，再將濃度變化乘上觀測網格體積換算成質量變化，如式(3)：

$$\Delta L = \frac{C_{t+1} - C_{t-1}}{2t} \times Vol \quad (3)$$

其中，C 為三頂點測站的平均污染物濃度，下標 t 為時間標記，Vol 為三角形測站網格的體積。

污染物水平傳輸和垂直傳輸的計算方法如式(4)和(5)。垂直於側邊界的平均風 V_n 乘上平均的污染物濃度(C)乘上側邊界面積(A)，即可求得單位時間污染物從側邊界進出的污染物水平傳輸質量。將垂直風速(w)乘上三測站平均的污染物濃度(C)乘上上邊界面積(A_U)，即可求得單位時間污染物從上邊界進出的污染物垂直傳輸質量。

$$T_h = V_n C A_i \quad (4)$$

$$T_v = w C A_U \quad (5)$$

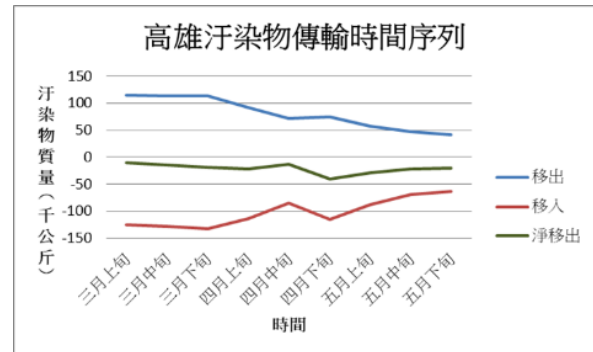
由於缺乏源和匯的直接觀測，所以我們只能利用污染物收支方程式，將水平以及垂直傳輸項移至等號左邊，間接求得源匯和($SS = Sc - Sk$)，正值表示源大於匯，負值表示源小於匯。

三、春季高雄的污染物傳輸

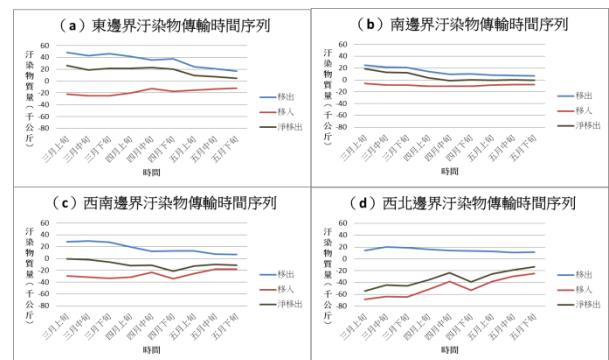
圖四為高雄 $PM_{2.5}$ 傳輸的時間序列，計算通過 AM、ML、GIJL、GFBA 各邊界的 $PM_{2.5}$ 移出量、移入量以及淨移出量，以一句為時間單位。縱軸為十天 $PM_{2.5}$ 傳輸的質量和，橫軸為三月到五月間的時間軸，分成移出(藍線)、移入(紅線)、淨移出(墨綠線)三條。不論是移入或移出，三月到五月的傳輸量都是逐漸減少的，春季的 $PM_{2.5}$ 移入高雄比移出多。

圖五 a-d 分別探討東邊界 AM(圖五 a)、南邊界 ML(圖五 b)、西南邊界 GIJL(圖五 c)、西北邊界 GFBA(圖五 d) $PM_{2.5}$ 水平傳輸的時間變化。四個邊界都發現大部分的移入和移出都是呈現遞減的情形，尤其是東邊界的移出以及西北邊界的移入的傳輸量減少尤為明顯。而移出的最大宗為東邊界，移入的最大宗為西北邊界。從污染物主要移入以及移出的邊

界來看，得出整體 $PM_{2.5}$ 移動的趨勢大致由西向東移動，另外春季位於冬季與夏季的轉換期間，風向也逐漸轉成西南風，也與西南邊界的淨移入量增加的結果是相符的。西北邊界的 $PM_{2.5}$ 來自高雄以北的地區，隨著風向慢慢傳下來，也有可能是來自中國的污染物因綜觀天氣系統影響而傳入。西南邊界的外側為臨海工業區以及高雄港，船舶以及工廠的污染物排放是可能的 $PM_{2.5}$ 來源。



圖四、高雄汙染物移出(藍)、移入(紅)、淨移出(墨綠)的時間序列。

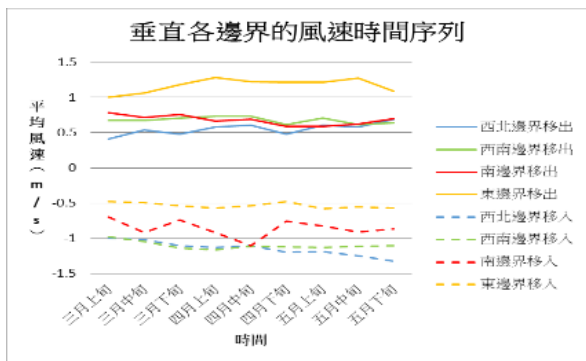


圖五、同圖四，(a)東邊界、(b)南邊界、(c)西南邊界、(d)西北邊界的汙染物傳輸時間變化。

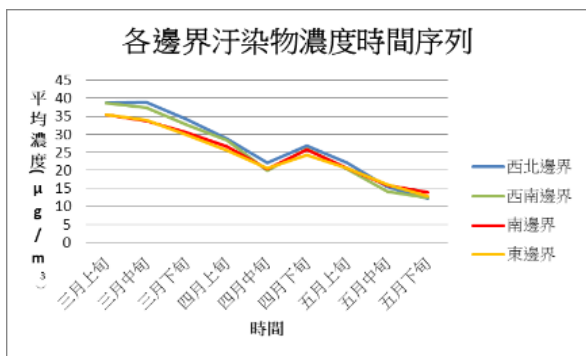
為了釐清汙染物傳輸移入、移出隨時間呈現逐漸下降的原因，由式(4)中可以得知，影響 $PM_{2.5}$ 水平傳輸量可能為(1)垂直於側邊界的風速和(2)側邊界上的平均 $PM_{2.5}$ 濃度兩種因素。

圖六縱軸為垂直於邊界的風速量值(V_n)，橫軸為以一句為單位的時間軸，正值為垂直邊界向外吹的風，負值為垂直邊界向內吹的風。大部分垂直通過邊界的風速並沒有隨時間明顯的變化，值得注意的是東邊界以及西北邊界，東邊界移出的垂直風速為四個最大，而移入的垂直風速為四個最小，意味著東

邊界為四個邊界中汙染物移出量最大宗的原因。西北邊界移出的垂直風速為最小，移入的垂直風速為最大，表示西北邊界為汙染物移入量最大宗。從風向的角度來看，東邊界的移出是強的，而西南邊界與西北邊界的移入也是強，南邊界則大致互相抵銷，說明了春季高雄整體的汙染物傳輸大致是由西往東移動。



圖六、垂直側邊界的風速時間序列。



圖七、側邊界汙染物濃度變化趨勢。

圖七縱軸為平均 $PM_{2.5}$ 濃度，橫軸為以一句為單位的時間軸，所有側邊界的 $PM_{2.5}$ 濃度都是逐漸變小的，從初春至春末 $PM_{2.5}$ 濃度降低約 3 倍，這也就解釋水平傳輸的量隨著時間而逐漸變小的原因。每個側邊界的 $PM_{2.5}$ 濃度都呈現下降的趨勢，可能是因為季節轉換，混合層厚度在夏季較高，冬季較低(江和倪，2007)，使得汙染物在夏季可以垂直混合的空間較大，冬季較小，造成整體汙染物濃度在靠近夏季較小，靠近冬季較大。

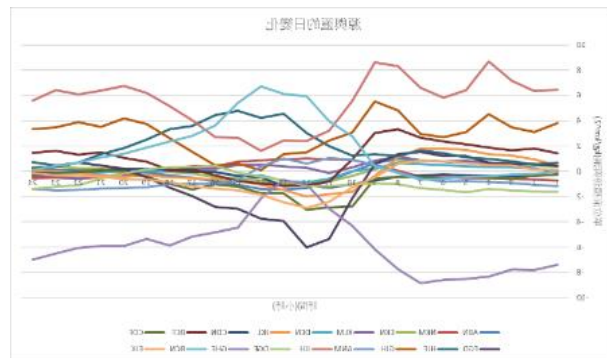
混合層的厚度變化是因為在北太平洋上的副熱帶高壓強度會因為季節而有所不同，夏季的高壓較強，籠罩臺灣，此時中層大氣會伴隨下沉氣流，臺灣多為晴朗炎熱的天氣，且雲量較少，太陽加熱地表，

產生上升氣流和紊流，有助空氣的流動混合，汙染物也就不會只累積在地表附近，所以當混合層厚度增加，汙染物的濃度也就隨之下降。

四、春季高雄境內汙染源

圖八縱軸為單位面積的源匯和(SS)，正值表示整體源大於匯，負值表示整體匯大於源，橫軸為一天當中的 24 個小時(當地標準時)，折線表示各個三角形測站網格 $PM_{2.5}$ 的源匯和日變化。源匯和取中位數，以避免極大或極小的數值影響平均的結果，使得中位數更能代表五年春季的日變化。

圖八中源匯和明顯大於 $+2kg/km^2$ 的網格區域包含 JIH、GIH、BCN、HJE(如圖一)。JIH、GIH 是位於高雄市中心的地區，車流量較其他地區多，而 JIH、GIH 地區則是有密集的工業區和加工出口區。根據環保署資料統計，車輛行進時引起的揚塵廢氣和工廠排放的廢氣為境內 $PM_{2.5}$ 汙染源大宗。依源匯和的日變化趨勢可以分為兩種：一種是早上跟傍晚較高的雙峰型趨勢，有 JIH、GIH；另一種是中午大於其他時間的單峰型趨勢 BCN、HJE。



圖八、源匯和的日變化圖

單峰型(圖八的 BCN 線)網格區域包含工業區，因此 $PM_{2.5}$ 的排放主要由工業區的工廠排放所貢獻， $PM_{2.5}$ 排放在凌晨 1 時到 7 時較低且有緩慢下滑的趨勢，上午 7 時排放量開始急遽上升，於下午 14 時到達最大排放量，14 時之後開始下滑，下滑的趨勢在傍晚 17 時後逐漸減緩。雙峰型(圖八的 GIH 線)網格區域包含市中心的通勤要道，且 $PM_{2.5}$ 的排放高峰又是位於上下班尖峰時段(9 時和 19 時)，因此雙峰

主要是由汽機車排放的廢氣和行進引起的揚塵所導致。

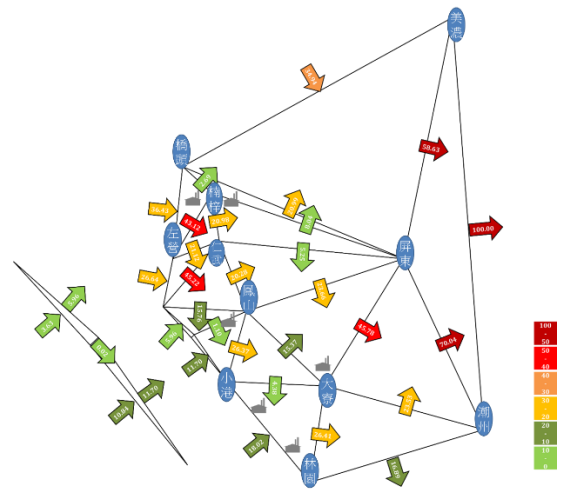
五、春季 PM_{2.5} 的總收支結果

為了解整個春季期間污染物收支方程中各項過程(ΔL 、 T_h 、 T_v 、 SS)在高雄不同地區的分佈和貢獻，並以全高雄內所有收支項最大的數值(通過美濃與潮州邊界的水平傳輸項)令為 100%，其餘依照比例計算出相對的數值，做正規化處理。圖九為春季期間平均的污染物水平傳輸量(T_h)，其中箭頭方向表示污染物通過邊界時的方向，箭頭的顏色表示 PM_{2.5} 的傳輸量大小，黃、紅色表示 PM_{2.5} 傳輸量大，綠色表示 PM_{2.5} 傳輸量較少，呈現高雄春季污染物的水平傳輸。圖十為 ΔL 、 T_v 、 SS 的空間分佈，並將源匯和的大小用顏色來區分，呈現各網格的 PM_{2.5} 排放差異，黃紅色表示 PM_{2.5} 污染源排放較多的區域，綠色則表示 PM_{2.5} 沉降較明顯的區域。圖九和十皆是呈現相對於美濃-潮州測站邊界(AM)污染物水平傳輸量，表示春季整體的結果，因為每個邊長和三角形面積是不一致的，不適合任意拿兩個邊長或面積上的污染物質量直接比較。

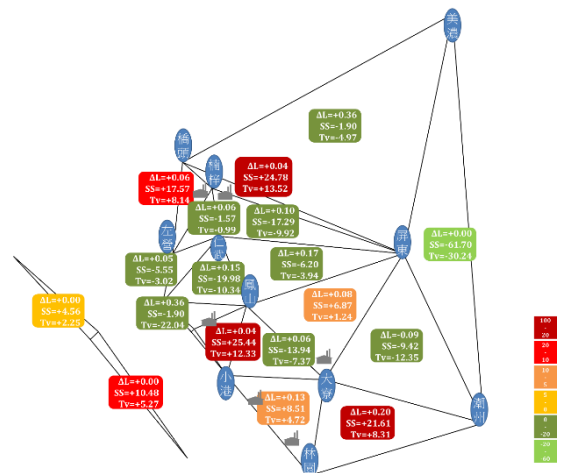
圖九顯示高屏地區的境外污染物傳輸主要是藉由冬季初春盛行的西北風所帶入，因此來源主要為高雄以北或中國的 PM_{2.5}。次要為自西南方移入的 PM_{2.5}，可能是來自於高雄港附近停靠的船隻、臨海工業區所排放，藉由春末夏初西南風或海風帶入。

源匯和跟地區的特性有關，圖十中源匯和大於 10% 的區域(即鮮紅及深紅區塊)其附近的工廠皆屬於重工業，因此有較多的 PM_{2.5} 排放，例如：臨海工業區(包含中國造船廠、中國煉鋼廠、中國煉油廠等)。在這些區塊中源匯和受到當地固定污染源的影響較大，圖十一的高雄工廠密度分佈圖能夠看出工廠(固定污染源)和源匯和在空間上有蠻好的相關性。其中，楠梓、小港、大寮、林園區之工廠密度和源匯和皆大致符合收支分析的結果(圖十)。然而在市中心之工廠密度也不低，但可能因為不同類型的工廠排放的 PM_{2.5} 濃度落差相當大，因此雖然市中心之工廠密度高，但其工廠類型較偏向輕工業，PM_{2.5} 之排放量遠不及重工業。垂直風速和水平風速的比值約為 1/100，

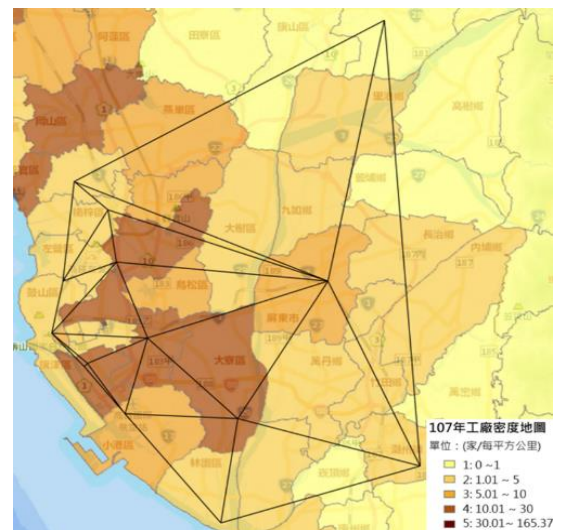
即使底面積比側邊面積大，最後垂直傳輸(T_v)相對水平傳輸(T_h)還要小。



圖九、正規化後春季平均的污染物水平傳輸(T_h)



圖十、正規化後春季平均的局地變化、源匯和、污染物垂直傳輸(正值朝上，負值朝下傳輸)。



圖十一、工廠密度圖，修改自經濟地理資訊系統。

當 PM_{2.5} 隨著風進到高屏境內後，會因為 PM_{2.5} 在本地沉降而減少、也會因為污染源排放而增加。經過正規化後，由圖九可發現，水平傳輸所攜帶的 PM_{2.5} 順著風向往東方移動並逐漸增加(水平傳輸由西向東遞增)，最後由東側邊界移出的 PM_{2.5} 是最大值。

為了找出春季高雄的主要汙染是來自於境外還是境內，我們計算境內產生的汙染物和境外移入的汙染物的比值。將境內源匯和(SS)為正值的區域加總，代表本地產生的 PM_{2.5}；境外傳輸(T_h)的負值加總，代表境外移入的 PM_{2.5}，得到其比值為-1.1，因此說明了高雄境內排放的汙染物「至少」是境外移入的 1.1 倍。

六、結論

透過汙染物收支分析，汙染物大致上是由西向東傳入，對於整個春季而言，高雄整體汙染物傳輸移入大於移出，平均一個春季會淨移入將近 $2 \times 10^5 \text{ kg}$ 的 PM_{2.5}，因此春季是境外汙染物移入的季節。就不同方位的邊界而言，西北邊界的 PM_{2.5} 可能是從台南以北或者甚至是從中國的汙染物隨著風傳入，西南邊界的汙染物可能來自與高雄港的船舶以及臨海工業區的排放有關。隨著時序由冬轉夏，PM_{2.5} 的傳輸量下降是由於混合層厚度增加使得汙染物濃度下降，風速風向的影響較小。

根據源匯和的日變化趨勢，大部分區域的排放特性主要分成由工廠影響的單峰型，和交通運輸所影響的雙峰型。前者主要因為工廠營運高峰期，約下午14時有最高排放量，後者則是於上下班的尖峰期間，因為交通運輸繁忙而有最大的排放量。

整體春季的汙染物順著風向往東方移動並逐漸增加，PM_{2.5} 的源匯和(SS)跟地區的特性有關，鄰近重工業的地區，會有較多的汙染物排放。比對工廠密度和當地的汙染物排放也有蠻高的關聯。以春季的高雄而言，境內排放的汙染源「至少」是境外移入的1.1倍。

七、參考文獻

- 江智偉、倪簡白，2007：光達遙測中壢地區夜間邊界層變化和低層噴流之討論。*大氣科學*，**35** (1)，2-9。
- 吳清吉、吳志宏，1998：大氣邊界層汙染物擴散之日夜變化。*大氣科學*，**26**(2)，181-204。
- 祁立中，1993：海風環流下汙染物之擴散。*國立臺灣大學大氣科學系碩士論文*。72 頁。
- 曾威霖，2005：混合層預測方程式之研究。*國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文*。187 頁。
- 黃隆明、張台聖，2012：混合層高度簡易估算法之探討。*水土保持學報*，**44**(3)，231-250。
- Braun, S. A., 2006: High-resolution simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part II: Water budget. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 43–64.
- Huang, H.-L., M.-J. Yang, and C.-H. Sui, 2014: Water Budget and Precipitation Efficiency of Typhoon Morakot (2009). *J. Atmos. Sci.*, **71**, 112–129.
- Miller, M. E., and G. C. Holzworth, 1967: An Atmospheric Diffusion Model for Metropolitan Areas. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **17**(1), 46-50.
- Sun, W.-Y., and C. Z. Chang, 1986: Diffusion model for a convective layer. *Atmos. Envir.*, **23**, 1205-1217.
- Yang, M.-J., S. A. Braun, and D.-S. Chen, 2011: Water budget of Typhoon Nari (2001). *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3809-3828.
- Wu, Y.-C., Yang, M.-J., and P.-H. Lin, 2020: Evolution of water budget and precipitation efficiency of mesoscale convective systems associated with the southwesterly monsoon flow over the South China Sea. *Terr., Atmos., and Oceanic Sci.*, **31**, 141–158.