

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科
佳作

051904

微粒瀰漫，誰「霾」弄潮州？—高屏地區 PM2.5
時空變遷與擴散機制探討

學校名稱： 國立屏東女子高級中學

作者： 高二 吳沛寰	指導老師： 李旺霖
---------------	--------------

關鍵詞： PM2.5、空氣汙染、民生公共物聯網

摘要

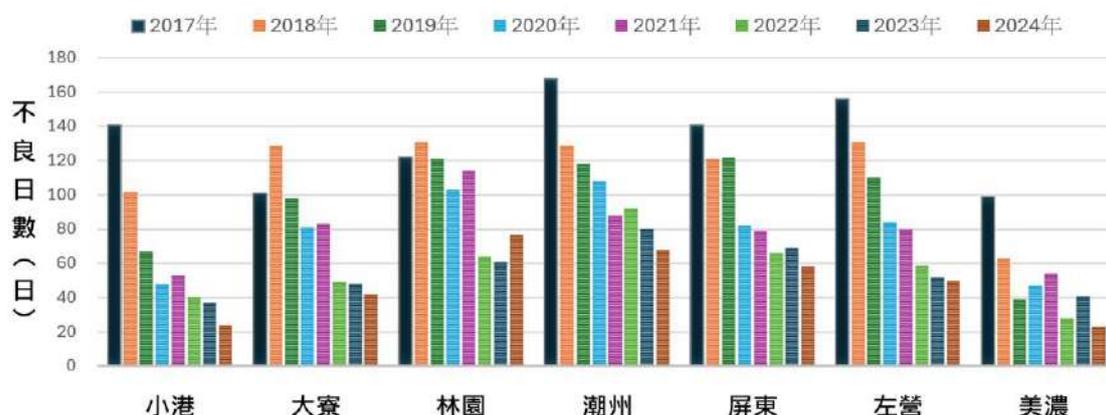
本研究透過整合環境部空品測站與智慧城鄉微型感測器的資料，輔以 Python 及 R 語言進行大數據整理與統計分析，並搭配 QGIS 空間分析工具，深入研究高屏地區冬季空氣品質惡劣的原因，並剖析 2025 年三場空汙事件的時空變化與擴散機制。結果顯示，高屏地區近年整體汙染雖有改善，但仍存在著區域差異與季節差異。冬季時，受東北季風與地形影響水平擴散不佳，再加上低混合層與逆溫現象導致垂直對流缺乏，汙染物容易滯留。分析發現，高屏地區測站的溫度、降雨日數與 PM_{2.5} 有著高度負相關。本文透過感測器資料的逐時空間分布圖，搭配風向與地形影響，說明汙染物如何透過環境風場與海陸風的傳輸機制累積於高屏地區下風處且難以擴散，導致「潮州延遲」效應的發生。

壹、前言

冬季的屏東，時常被灰霧壟罩著，入夜後經常瀰漫著一種污濁且難以言喻的臭味，甚至在清晨偶爾會被令人窒息的空氣嗆醒。這對於每天晚上有慢跑習慣的作者來說甚是困擾，冬季要隨時留意空品監測網的 AQI 資訊，以免自己的肺淪為「人體空氣清淨機」。我很好奇，為何在南臺灣高屏空品區的冬季，空氣汙染這麼嚴重？

一、研究動機

為了瞭解高屏地區的空氣品質有多糟，我們查詢環境部的 AQI 不良日數統計資料，經過整理計算後繪製成柱狀圖。發現除了大寮與林園測站以外，高屏地區大部分測站近年來不良日數都有明顯的降幅，表示高屏地區整體空氣品質是有改善的。各測站中最引起我們注意的是潮州，2017 年潮州的空氣品質不良日數為高屏地區最多，一個沒有大型工業區，人口僅有五萬多的中小型鄉鎮，其不良日數竟然遠高於石化重工業聚集地的小港、林園與大寮？



圖（一）高屏地區七個測站 2017-2024 年不良日數 (AQI>100) 比較

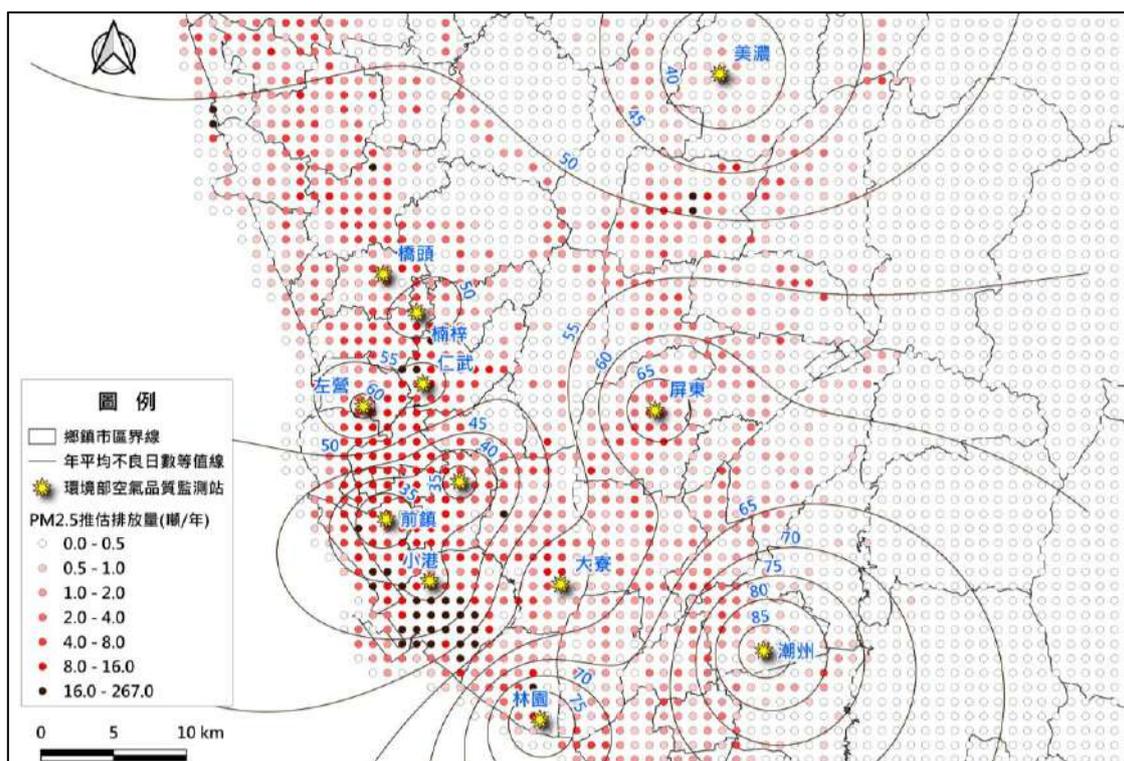
資料來源：環境部環境資料開放平台-不良日數月報表，空氣品質年報，本研究計算整理後繪製。

¹ 環境部定義不良日數指的是 AQI 指數大於 100，AQI>100 對敏感族群不健康，AQI>150 即對所有族群不健康。

若排除各測站 2017-2019 年過高的極端值，僅聚焦於 2020~2024 年近五年的不良日數，潮州 AQI>100 的總日數依舊最多，達到 435 天，平均每年不良日數達 87 天，其次是林園測站 79 天/年，再次是屏東測站 67 天/年。我們以 QGIS 將各測站近五年平均不良日數繪製成等值線圖，更能清楚看出空間分布的差異（圖二）。

此外，由於 AQI 超標最主要原因是細懸浮微粒，我們想了解高屏地區究竟哪裡是 PM_{2.5} 最大的排放源。根據環境部空氣汙染物排放清冊統計²，南部 PM_{2.5} 最大排放地是在高雄市的小港區（黑色圓點），該地的臨海工業區有近五百家工廠，包括中鋼、中油、台船、台電火力發電廠等排放大戶，鄰近的林園與大寮區也不遑多讓，擁有中油林園廠、台塑林園廠、臺灣氯乙烯等大型石化公司，該三區的空品從 1980 年代起就一直為高雄市民所詬病。

我們將上述兩資料在 QGIS 中進行疊圖分析（圖二），有趣的問題於焉誕生：為什麼 PM_{2.5} 排放量最多在小港區，而不良日數最多卻在潮州鎮？這中間存在著什麼樣的傳輸機制？這激起了我們想要一探究竟的好奇心。



圖（二）高屏地區 PM_{2.5} 年推估排放量²與 AQI 年平均不良日數等值線圖

資料來源：環境部（2023）空氣汙染物排放量清冊、環境部（2025）環境資料開放平台。AQI 不良日數統計時間為 2020 年 1 月~2024 年 12 月，累計五年來總不良日數，再計算出各站年平均不良日數，最後以內差法取出等值線圖。本研究以 QGIS 3.34 繪製。

² 我國最新版空氣汙染物排放量清冊（Taiwan Emission Data System, TEDS）是民國 112 年 9 月公布 12.0 版，是以 110 年為基準的汙染物調查統計結果。當中包括全台近 16000 間的工廠的申報資料，再進行排放量推估（點源）；車輛監理所登錄之 26 類營業或自用車輛，並區分行駛道路別的模式推估資料（線源）；另外還有高達 120 項不同來源種類的小型汙染源，排放量總數據超過 430 萬筆，以區域總面積累積推算（面源）。換言之，圖（二）為兼具點、線、面源的 PM_{2.5} 的綜合統計推估結果。

二、空氣污染物的指標

空氣污染物包含氣狀與粒狀污染物。氣狀污染物是以氣體形態存在於大氣中的污染物，包含硫氧化物（SO_x）、氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）等；粒狀污染物則是指以微粒型態存在大氣中的污染物，如懸浮微粒（PM₁₀）、細懸浮微粒（PM_{2.5}）、落塵等。

將空氣的污染程度量化的指數，則稱為空氣品質指標（AQI）。將不同濃度的污染物濃度換算為副指標值，再以當日各副指標之最大值為當日該測站的空氣品質指標值（AQI）。採計污染物包括細懸浮微粒（PM_{2.5}）、懸浮微粒（PM₁₀）、臭氧（O₃）、一氧化碳（CO）、二氧化硫（SO₂）及二氧化氮（NO₂）³（表一）。

表（一）空氣品質指標 AQI 分級

AQI 指標	PM _{2.5} (µg/m ³) 24 小時平均值	PM ₁₀ (µg/m ³) 24 小時平均值	O ₃ (ppm) 8 小時 平均值	O ₃ (ppm) 小時 平均值*	CO (ppm) 8 小時 平均值	SO ₂ (ppb) 小時 平均值	NO ₂ (ppb) 小時 平均值
良好 0~50	0.0-12.4	0-30	0.000-0.054	-	0-4.4	0-8	0-21
普通 51~100	12.5-30.4	31-75	0.055-0.070	-	4.5-9.4	9-65	22-100
對敏感族群 不健康 101~150	30.5-50.4	76-190	0.071-0.085	0.101-0.134	9.5-12.4	66-160	101-360
對所有族群 不健康 151~200	50.5-125.4	191-354	0.086-0.105	0.135-0.204	12.5-15.4	161-304	361-649
非常不健康 201~300	125.5-225.4	355-424	0.106-0.200	0.205-0.404	15.5-30.4	305-604	650-1249
危害 301~400	225.5-325.4	425-504	*	0.405-0.504	30.5-40.4	605-804	1250-1649
危害 401~500	325.5-500.4	505-604	*	0.505-0.604	40.5-50.4	805-1004	1650-2049

資料來源：本研究整理自環境部空氣品質監測網，2025。

備註*：一般以臭氧（O₃）8小時值計算各地區之空氣品質指標（AQI）。但部分地區以臭氧（O₃）小時值計算空氣品質指標（AQI）更具預警性，因此臭氧（O₃）8小時與1小時之平均值皆計算，取兩者之最大值作為空氣品質指標（AQI）。而空氣品質指標（AQI）301以上之指標值，僅以臭氧（O₃）小時值計算之。

³ 本文主要探討對象為 PM_{2.5}，其餘的空氣污染物來源與影響如下：（環境部，2023）

- (1) 懸浮微粒（PM₁₀）：係指粒徑在10微米以下之粒子，來源包括道路揚塵、露天燃燒、營建施工及農地耕作等，部分PM₁₀粒子可透過鼻腔內絨毛阻擋或痰液排出，對人體健康危害相對較PM_{2.5}來得小。
- (2) 二氧化硫（SO₂）：自然界產生如火山爆發、森林火災，人為產生則多由石化燃料中硫的燃燒氧化而成，具刺激性臭味，溶於水成為亞硫酸，為酸雨的主要物質。國內SO₂排放以火力發電廠貢獻度40.4%為大宗。
- (3) 臭氧（O₃）：工廠、汽機車等所排放的廢氣之中含有具揮發性的有機物（VOCs）、氮氧化物（NO_x）等前驅物，在太陽光的持續照射下產生變化，就會生成高濃度的臭氧。
- (4) 氮氧化物（NO_x）：發電廠及汽車引擎在高溫燃燒運作時，空氣中氮或燃料中氮化物氧化而成，其排放95%是NO，化學性質穩定，不易溶於水；經光化反應後可形成NO₂，具刺激味的褐色氣體，易溶於水成為亞硝酸及硝酸，亦是酸雨的來源之一。國內NO_x以移動污染源中的大貨車貢獻度24%為最高。
- (5) 一氧化碳（CO）：CO是含碳物質不完全燃燒的產物，主要來燃燒石化燃料的車輛引擎，無色無味，比空氣輕，由於一氧化碳對血紅素的親和力比氧氣大得多，可能造成血氧過低產生中毒現象。

而本文研究的目標「細懸浮微粒 (PM_{2.5})」，則是指顆粒直徑在 2.5 微米 (μm) 以下的粒狀物⁴。由於 PM_{2.5} 無法被呼吸道中的纖毛與黏液過濾，並可攜帶各種化學物質、重金屬、細菌與病毒，一但吸入便會穿透肺部氣泡，進入血管隨著血液循環全身。長期暴露在高濃度的 PM_{2.5} 下可能會引起過敏氣喘、心血管疾病並提高死亡風險，對過敏族群的影響更為顯著。

PM_{2.5} 依照來源地可以分為境外傳遞與境內污染，依據環保署的擴散模擬，冬季境外來源佔比可高達 42%，夏季則降至 10% 左右，全年境外與境內平均濃度影響比約為 35%：65% (環保署，2020)。境內污染包括工廠排放、水泥產業、火力發電廠等固定污染源，卡車、貨車、汽機車等移動污染源，與建築施工、揚塵等逸散污染源等，根據環境部空氣污染物排放清冊資料顯示，所有 PM_{2.5} 貢獻當中，以車輛行駛造成的鋪面揚塵佔比最高，約占總量的 1/5。(環境部，2023)

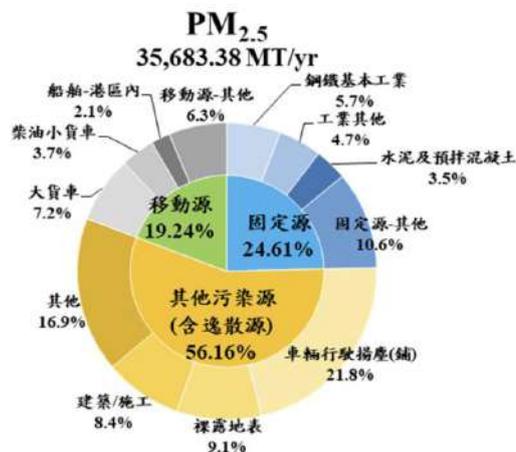


圖 (三) 全臺 PM_{2.5} 行業別排放量佔比
資料來源：環境部 (2023) 空氣污染物排放清冊 12.0 版

三、文獻回顧

我們透過國家圖書館博碩士論文網查詢到許多空氣污染相關的研究，分類說明如下：

(一) 污染物與氣象、環境因子的相關性研究

陳柔安 (2018) 採用臺灣中部以北 18 個國家空品測站 2 年的研究數據進行 TSAPSS 分析，並透過結果中的每組數據、最早發生的地點、濃度高值及濃度變化進行統計，並將受到 PM_{2.5} 污染的類型分成十二種。林佳瑩 (2017) 以國家測站 PM_{2.5} 的數據與 WRF 模型分析的大氣資料對埔里盆地進行研究，發現西部沿海污染物透過海風進入盆地區，而山區日夜的山谷風、上下坡風與邊界層的發展，對於污染物的累積與擴散影響甚大。另外，葉庭宏 (2021) 也利用中部地區國家測站的 PM_{2.5} 數值，以多層次分析模型檢視大範圍外部因素 (季節、地形等) 對地區性污染因素 (離尖峰時段、汽機車密度等) 的交互影響。

(二) 關於污染物的時間差異性研究

潘慧芳 (2004) 發現假日缺少上下班車流，當前趨物 NO_x 減少時，O₃ 濃度反而上升。孫蓁儀 (2009) 進一步分析了各項污染物之「假期效應」，並探討臺灣各地假期以及非假

⁴ PM_{2.5} 依產生過程可分為原生性及衍伸性 PM_{2.5}，兩者皆有可能為自然界或人為活動所排放。原生性是指被排放到大氣後即成為 PM_{2.5} 的粒狀物，例如工廠排放、運輸廢氣、野火燃燒等；衍生性是指污染物以揮發性有機物 (VOCs)、硫氧化物 (SO_x) 等前驅物的形式，被釋放大氣中，再經光化反應形成 PM_{2.5} 微粒。因此在非污染事件狀況下，PM_{2.5} 一日中的濃度，從上班尖峰時段開始明顯上升，此後因前驅物光化反應產生的衍伸性 PM_{2.5} 增加，濃度仍會持續升高，到接近中午時最高；中午過後濃度略為下降，直到下班尖峰又略微小升。若觀測日為晴天，太陽的強輻射可能導致光化作用更強，使 PM_{2.5} 的高濃度情況持續存在 (環境部，2025)。

期時各項污染物的濃度差異。范和聰（2019）研究全臺 $PM_{2.5}$ 具顯著季節差異，11 月到次年 4 月濃度較高，山區與西部沿海差異不大，城市測站 $PM_{2.5}$ 平均濃度約為鄉村測站的 1.7 倍，證實境內污染源影響較大。另外，賴政維（2023）對南科的污染物做了長期趨勢的濃度分析，將測站缺漏的數值做線性填補，再以迴歸方程式獲得長期趨勢並加以分析。

（三）關於 $PM_{2.5}$ 的內部成分研究

林雅鈴（2018）利用移動式空氣品質監測車，監測臺中市北屯區 $PM_{2.5}$ 與其他常見污染物之間的關係，發現停路邊的監測車測得污染物數據較一般測站高，推測是離地面近，揚塵大且受重金屬沉降影響所致，民俗節慶及上下班尖峰也會使監測車污染物濃度升高。張基正（2019）針對臺中市三個測站的 2018 年 3~11 月間的採樣，分析事件日 $PM_{2.5}$ 內的硝酸鹽與銨鹽質量濃度最高增加到 19.5 倍與 6.1 倍，推測是因風速低，擴散條件不良所導致。

（四）加入空氣盒子與微型感測器的研究

2010 年代後隨著物聯網與雲端運算的崛起，民眾也可架設簡易空品感測器（俗稱空氣盒子）並將即時數據上傳。陳嘉惠（2018）對臺北市空氣盒子的監測數據做樣條插值函數，並透過地理加權迴歸建立空間模型，校正空氣盒子的數據，呈現研究區 $PM_{2.5}$ 的污染分布。

2017 年起環境部於全臺佈建空間解析度更密集，時間解析度更細膩的城鄉微型感測器。邱亦穎（2024）利用嘉義市 250 台微型感測器一整年的 $PM_{2.5}$ 數據，計算標準化 Z 值 >2 的感測器作為熱區分析目標，進行逐時逐日分析並配合現勘，推論污染源。林祐如（2024）使用中研院的 AS-LUNG 感測器資料，對微型感測器的 $PM_{2.5}$ 數值進行校正，再與溫濕度、風速風向、污染源等資料建立空汙預測模型，進而做出臺中市 24 小時 $PM_{2.5}$ 時空變異推估圖。

由上述論文可知，過去國內空氣品質與污染的研究，多使用環境部空品測站的監測數據，方法上多採統計分析，探討單一或數個測站污染物的長期趨勢、污染物內容、污染濃度與環境因子的關聯性。本文發現，過去關於空品研究以臺中地區最多，高屏地區空汙濃度相關論文較少。其次，上述論文多直接以數據做相關性分析，缺少將污染物繪製成空間分布地圖；再次，前輩研究的時間尺度多為逐年、分季或逐月，較缺乏事件日細膩的逐時研究；最後，即使全臺微型感測器在 2020 年布建完成，但使用微型感測器資料的論文仍屈指可數。

四、研究目的

基於前輩們的研究基礎上，我們希望能做出更細緻地高屏地區空品分析，故本研究同時採用國家空品測站與城鄉微型感測器的資料，對高屏地區的 $PM_{2.5}$ 濃度進行時間變遷與空間分布研究。本文以各式統計圖說明高屏地區空品不佳的事實，並分析近幾年空品的變化與季節差異。再來，探究影響高屏地區空氣品質大尺度的天氣系統如何影響空品，再對各測站的氣

溫、降雨、風速風向與PM_{2.5}之間進行相關性分析，企圖找到小尺度氣象因素與污染濃度、污染分布之間的關聯性；最後以 2025 年初三場污染事件為例，繪製高屏空品區 PM_{2.5} 污染濃度逐時分布圖，探討高屏空品區 PM_{2.5}的傳輸機制。本文具體的研究目的如下：

- (一) 研究高屏地區近年來空氣品質的變化與季節差異
- (二) 探討影響高屏地區空氣品質的水平與垂直天氣系統
- (三) 檢視高屏地區氣象因素與 PM_{2.5} 濃度之間的關聯性
- (四) 剖析 2025 年高屏地區三場空汙事件日 PM_{2.5} 逐時的空間分布變化，並探討原因

貳、研究設備與器材

為了達成以上研究目的，本研究使用以下設備蒐集到的資料，與研究使用設備如下：

一、環境部國家標準空品測站 PM_{2.5}「手動監測」、「自動監測」與智慧城鄉微型感測器

本研究使用環境部國家監測站的 AQI 與 PM_{2.5} 資料，和智慧城鄉感測器的 PM_{2.5} 資料（下頁表二）。兩種系統監測內容與數據應用不盡相同（表二），測量機制也迥然有異。

國家空品測站之 PM_{2.5} 之自動監測，是將空氣泵引至採樣口，再通過區分粒徑大小的篩分器（區分 PM₁₀ 與 PM_{2.5}），裡面還有加熱裝置以避免水分的干擾，再來透過 β 射線穿透顆粒物的衰減量，計算顆粒物的質量；「手動監測」儀則利用特殊材質的濾紙收集空氣中的細懸浮微粒，再用慣性質量法微量天平去量測濾紙重量⁵。（照片一）

城鄉微型感測器則是藉由物理光散射原理，用雷射光束照射空氣中的顆粒物，在未經篩選的方式下，根據光散射的程度量測不同粒徑微粒數量，再經轉換得出 PM_{2.5} 質量濃度。由於國家測站準確度較高，故當相鄰測站與感測器數據差異太大時，判定為感測器故障。



照片（一）國家標準測站與智慧城鄉微型感測器

(甲)環境部屏東測站（位於屏東市中正國小 4 樓）；(乙)工程人員正在替換 PM_{2.5} 手動監測試紙；(丙)作者家中附近的智慧城鄉微型感測器。照片來源：本研究實地拍攝。

⁵ 全國設有 31 站手動監測，因需人工放樣、取樣，每 3 天才能採樣一次，樣本需經調理、量測及品管等程序，約 20 天才能完成。本研究區的屏東、美濃、前金三個站設有手動監測站。自動監測與手動監測數據會有系統性的誤差，2014~2019 年舊儀器必須計算兩種監測資料的線性迴歸公式，用以校正自動監測數據。2019 年 9 月底開始，新儀器通過測試，則不須迴歸式校正，可即時公布提供預警（環境部，2025）。本研究採取 2020 年之後新儀器的 PM_{2.5} 濃度小時值，故下載後可直接繪圖或計算。

表（二）國家與城鄉空品測站兩種不同監測儀器之比較

項目	國家測站細懸浮微粒監測儀	智慧城鄉空品微型感測器
監測內容	PM ₁₀ 、PM _{2.5} 、O ₃ 、SO ₂ 以及 NO _x 等各種污染監測儀，以及基本氣象量測	僅有溫度、相對濕度及 PM _{2.5} 濃度
數據應用	監控大範圍空氣品質是否符合標準與長期趨勢，作為政策訂定依據	小區域空氣污染熱區鑑定，污染排放追蹤以供執法應用
空間解析度	約 10 至 25 公里	工業區內 100~300 公尺，其餘點位考慮通電、通訊、通風及安全位置設立
時間解析度	1 小時	1 分鐘
設置高度	10 公尺	3 公尺
測站數量 *	79 個	10999 個
使用限制	1. 分布密度低，較難追蹤空汙來源 2. 操作須經專業訓練。 3. 設置地點與民眾居住區位置差異大，具有高度及遮蔽物限制。	1. 長時間使用後，光源因灰塵覆蓋而導致數據精準度下降。 2. 不同年分和計畫的感測器品質不一 3. 測值易受干擾因素（如濕度）影響
維護頻率	週、雙週、月及季維護	每季巡檢一次

資料來源：本研究整理自環境部空氣品質監測網，2025。

備註*：測站數量結算至 2025 年 3 月 2 日。

二、微脈衝雷射雷達（LIDAR）與光達回波圖（LDAR）

微脈衝雷射雷達（LiDAR，又稱光學雷達，簡稱光達）是現今被廣泛運用於氣膠光學遙測的技術之一，其儀器利用發射器發射固定波長且單一頻率的光，待大氣反射後，經由接收器內的望遠鏡接收散射光，再以光子計數器計算反射光子的多寡，稱為光達回波（NRB, Normalized Relative Backscatter）。

環境部在 2005 年引進第一套微脈衝雷射雷達系統，在全國設有四個測站—桃園（中央大學）、臺中（西屯）、雲林（斗六）和高雄（左營）。四測站均使用波長為 527 奈米綠光雷射，具有低能量、操作安全等特性。我們可以從空氣品質監測平台上下載每天逐時的雷達回波圖，透過 NRB 圖來研究空汙事件時的大氣垂直結構變化。



照片（二）微脈衝雷射雷達左營站

資料來源：空氣品質監測網-任務監測

三、研究使用設備

- （一）筆記型電腦：作者使用的筆電為 Acer Swift3 品牌。
- （二）QGIS 3.34.14 版本：本文的 PM_{2.5} 等值線圖及各種統計地圖與分布圖均使用免費的 QGIS 軟體與外掛程式繪製。
- （三）Microsoft 365 的 Excel、Word：本文的統計圖與文書處理均使用付費的 Microsoft 365 個人版的 Excel 與 Word 軟體製作。

參、研究過程或方法

一、蒐集政府開放數據資料

本研究中的環境部國家測站 AQI 指數、PM_{2.5} 濃度與風速、風向，下載自環境部環境資料開放平台，該網站有各測站污染物的即時與歷史數據資料，資料建構完整，可設定條件查詢下載，非常方便。但其資料建構時間自 2016 年 11 月起，正好是環保署將空氣污染指標 (PSI) 改成空氣品質指標 (AQI) 的同時，故更早之前的 PSI 是逐年查詢自空氣品質年報 (1995 年起)。此外，智慧空品微型感測器則是取自民生公共物聯網，該網站的資料集完整收錄 2017 年之後微型感測器每一天每一分鐘的資料。另外，我們也搭配中央氣象署的資料開放平台蒐集分析所需的氣溫及降雨資料，與 PM_{2.5} 濃度進行相關性分析。

二、利用 R 語言和 Python 程式整理資料

目前全臺有超過一萬個城鄉微型感測器測站，而每個測站的資料更新頻率為 1 分鐘 1 筆，一整天全臺資料量超過一千萬筆，全被匯入同一個 CSV 檔內。由於資料量過於龐大，無法以 Excel 檔直接開啟或以 CSV 格式匯入。在嘗試以 Python 介接感測器歷史資料 API 時，遇到無法克服的系統問題，我們轉而摸索其他程式語言。

我們最後用 R 語言讀取微型感測器的 deviceID，指定研究時間，將有問題的 PM_{2.5} 資料過濾，並刪除 IQR (第 3 四分位數減第 1 四分位數) 1.5 倍以外的極端值，程式計算得到 PM_{2.5} 的小時平均值 (圖四)，如此便能與國家測站一小時一筆的數據做比較。

```
## 未來委-片感測器
library(dplyr)
library(lubridate)
library(readr)

# 設定工作目錄
setwd("D:/課外活動/地理小論文/資料/2025.1月/2025.1.1/環境部微型空氣感測器")

# 讀取測站資料
pangtung <- read_csv("MOENV_ict_station-高屏地區(潮洲板).csv")

# 讀取 PM2.5 原始資料
moenviot_pm25_20250101 <- read_csv("moenv_micro_pm25_20250101.csv")

# 確認 deviceId 欄位存在
if (!"deviceId" %in% colnames(pangtung)) {
  stop("匯集 MOENV_ict_station-高屏地區(潮洲板).csv 中找不到 deviceId 欄位")
}

# 選擇 PM2.5 欄位
moenviot_pm25_20250101$PM2.5 <- gsub("[^0-9.]", "", moenviot_pm25_20250101$PM2.5)
moenviot_pm25_20250101$PM2.5 <- as.numeric(moenviot_pm25_20250101$PM2.5)

# 時間處理
moenviot_pm25_20250101$time <- sub("\\.\\d+", "", moenviot_pm25_20250101$time)
moenviot_pm25_20250101$time <- ymd_hms(moenviot_pm25_20250101$time)

...中間省略

# 計算 PM2.5 IQR 並過濾異常值
Q1 <- quantile(filtered_data$PM2.5, 0.25, na.rm = TRUE)
Q3 <- quantile(filtered_data$PM2.5, 0.75, na.rm = TRUE)
IQR_value <- Q3 - Q1
lower_bound <- Q1 - 1.5 * IQR_value
upper_bound <- Q3 + 1.5 * IQR_value

# 過濾極端值
cleaned_data <- filtered_data %>%
  filter(PM2.5 >= lower_bound & PM2.5 <= upper_bound)

# 計算每小時的 PM2.5 資料筆數
hourly_count <- cleaned_data %>%
  group_by(deviceId, year, month, day, hour) %>%
  summarise(count = n(), .groups = "drop")

# 計算每小時 PM2.5 平均值
micro_pm25_20250101 <- cleaned_data_with_count %>%
  group_by(deviceId, year, month, day, hour) %>%
  summarise(PM25_hr = mean(PM2.5, na.rm = TRUE), .groups = "drop")
```

圖 (四) 以 R 語言整理 PM_{2.5} 濃度資料
資料來源：本研究實際操作截圖

表 (三) 資料異常格式

標記	含義
NULL	資料庫沒有存入該數據(完全缺失)
空白	可能暫時缺少數據，但欄位仍存在
×(打叉)	系統判定數據異常或錯誤
NaN	數據計算錯誤、超出範圍、格式錯誤，或系統標記為無效

資料來源：本研究實作整理

在處理資料的過程中，可能出現如表 (三) 中的幾種異常標示，由於微型感測器沒有系統校正或程式檢核的過程，因此經常遇到欄位「NULL」與「空白」的狀況。為求研究的嚴謹，我們不採用內插值推估填補資料短缺的欄位，直接捨棄該分鐘的 PM_{2.5} 濃度資料。此外

，當該小時內的有效資料不到 10 筆時（正常是 60 筆），其計算出來的平均值難以做為該測站該小時的平均濃度，故我們也捨棄不用。透過這個方式我們在繪圖時就可以挑出 PM_{2.5} 超過一定濃度時就會當機的感測器。另外，在抓取環境部空品資料並計算歷年 PM_{2.5} 濃度之月平均值時，也使用 Python 語言協助計算（圖五），以節省時間。

```

1 import pandas as pd
2 from google.colab import files
3 import io
4
5 def calculate_monthly_avg():
6     # 請使用著上傳檔案
7     uploaded = files.upload()
8     input_file = list(uploaded.keys())[0] # 獲取上傳的檔案名稱
9
10    # 讀取 CSV 檔案
11    df = pd.read_csv(io.BytesIO(uploaded[input_file]))
12
13    # 確保日期欄位為 datetime 格式
14    df['monitordate'] = pd.to_datetime(df['monitordate'], format='%Y/%m/%d')
15
16    # 先將 concentration 欄位中無法轉換為數字的值變為 NaN，然後刪除
17    df['concentration'] = pd.to_numeric(df['concentration'], errors='coerce')
18    df.dropna(subset=['concentration'], inplace=True)
19
20    # 提取年與月份作為分組依據
21    df['年月'] = df['monitordate'].dt.to_period('M')
22
23    # 先按照測站名稱排序
24    df.sort_values(by=['sitename', 'monitordate'], inplace=True)
25
26    # 計算每個測站每月的 PM2.5 平均值
27    monthly_avg = df.groupby(['sitename', '年月'])['concentration'].mean().round(1).reset_index()

```

...以下省略

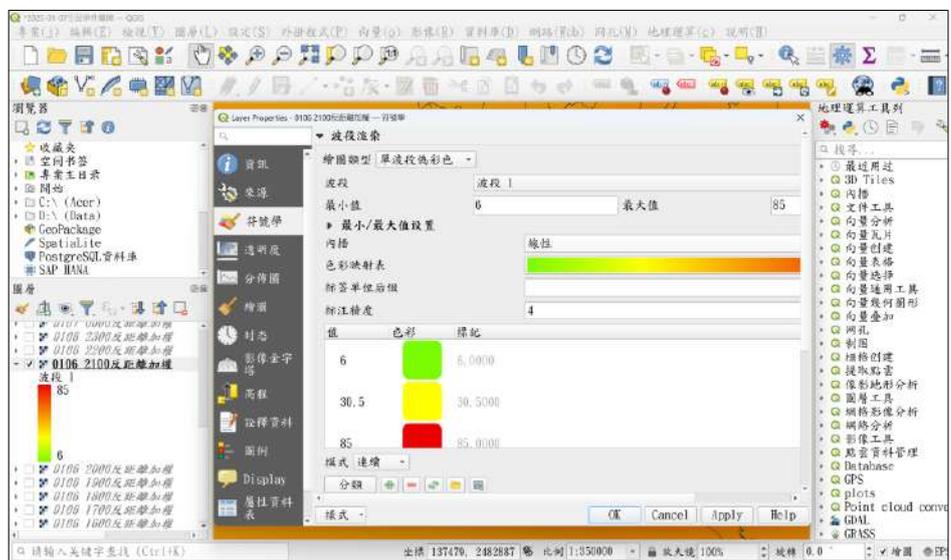
圖（五）用 Python 計算 PM_{2.5} 濃度月平均值

資料來源：本研究實際操作截圖

操作愈熟悉後，我們也不斷優化過程，同時搭配 R 與 Python，最後已經可以在短短幾分鐘內從上千萬筆感測器資料中，挑出研究測站特定時間區段的 PM_{2.5} 濃度並且計算完畢⁶。

三、QGIS 地理資訊系統繪圖

我們將程式計算後的感測器逐時資料存成 CSV 檔，再匯入 QGIS（Quantum 地理資訊系統）中，利用反距離加權法差值計算各感測器點位間的濃度變化，並以單波段偽彩色重新配色，調色基準則是參照環境部空氣品質指標 PM_{2.5} 標準的顏色，再取內差值繪製（圖六）。最後套疊上鄉鎮市區行政界線與名稱，部分地圖還有取出等值線圖，即可看出 PM_{2.5} 濃度空間分布上的差異。



圖（六）QGIS 汙染濃度配色與實際繪圖畫面

資料來源：本研究實際操作截圖

⁶ 研究小插曲：2 月 26~28 日空汙事件發生後，民生公共物聯網的微型感測器資料突然中斷上傳，連同 2 月的歷史資料全部消失。我們寫信給民生公共物聯網官網，很快得到回覆，負責人員轉寄國網中心處理，三天後資料就恢復上傳。在此一併感謝民生公共物聯網與國網中心團隊。

肆、研究結果

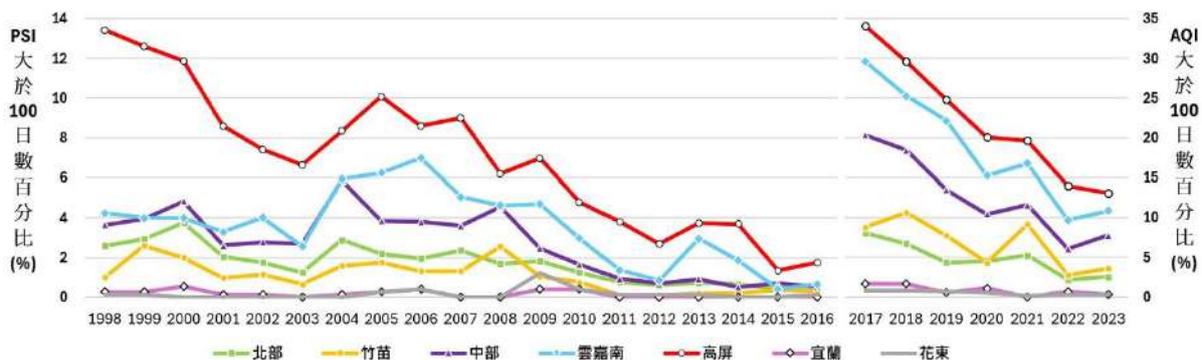
由於空氣汙染會跨越縣市界線，環境部以行政區劃分為底，再參照地形、氣候、風向及擴散情形，將臺灣劃分為北部、竹苗、中部、雲嘉南、高屏、宜蘭、花東等七大空氣品質區，以下簡稱空品區。本文的研究範圍聚焦在高屏空品區的高雄平原與屏東平原（圖七）。

一、高屏地區近年來空氣品質變化與季節差異

圖（八）為臺灣各地區在 1998~2023 年間，一年中日平均 PSI 及 AQI 數值大於 100 之日數比例，即不良日數占全年觀測日數百分比折線圖，相當於 AQI 達到對敏感族群不健康以上的等級。由圖可知，花東及宜蘭地區的空品狀況最佳，北部與竹苗地區次之，中部與雲嘉南地區再次之。雖然中部、雲嘉南與高屏空品區這二十多年來不良日數百分比有明顯下降的趨勢，但高屏自 1998 年開始不良日數比例一直都是最高，2023 年仍達 13%，相當於一年中有 48 天對敏感族群不健康。全臺空品最差的地方就在高屏空品區，這是無庸置疑的。



圖（七）七大空品區與國家測站位置圖
資料來源：環境部環境資料開放平台-空氣品質區範圍圖、空氣品質監測站基本資料，本研究以 QGIS 3.34 繪製。



圖（八）臺灣七大空品區測站歷年不良日數百分比（1998 年~2023 年）

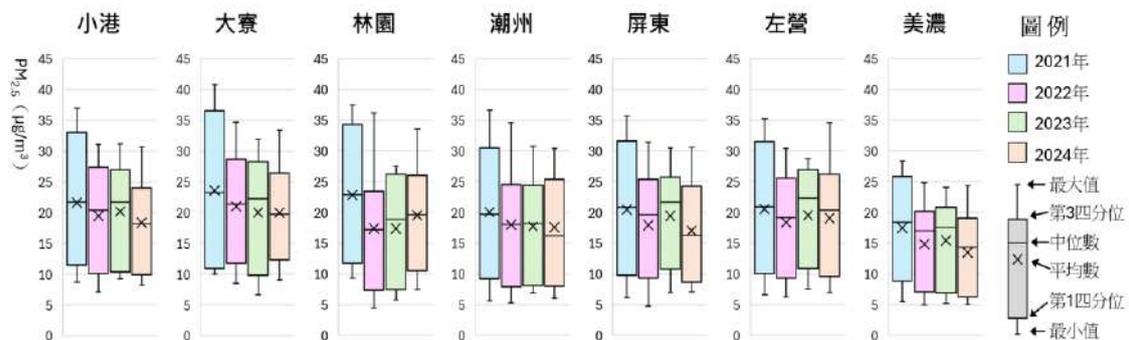
資料來源：環境部環境資料開放平台-不良日數月報表，空氣品質年報（逐年），本研究計算整理後以 Excel 繪製（註 1、註 2）⁷。

⁷ 註 1：環保署在 2016 年 12 月將過去獨立的空氣污染指標（PSI）與細懸浮微粒（PM_{2.5}）整合，並新增臭氧 8 小時與 1 小時兩個項目，以空氣品質指標（AQI）取代空氣汙染指標（PSI），能更精準判斷大氣中的汙染物與空氣品質。上圖以左右雙座標呈現兩種不同指數。

註 2：由於早期空品儀器常有故障或短暫失靈狀況，造成各測站全年觀測日數的不一致，故以單一空品區整體測站之觀測總日數為分母，日平均 PSI 或 AQI 數值>100 的總日數為分子，計算其不良日數百分比。

(一) 高屏空品區近年來 PM_{2.5} 的變化

我們將高屏空品區七個測站歷年來的 PM_{2.5} 濃度變化畫成盒鬚圖（圖九），可以發現 2021 年的盒子（淺藍色）在多數測站中平均數均較高，顯示當年 PM_{2.5} 濃度整體平均較高。而在 2022 到 2024 年間，盒子的平均數和中位數整體呈現下降的趨勢，顯示 PM_{2.5} 濃度在近年來有改善情形，與圖（八）不良日數的變化一致。值得我們注意的還有以下兩個現象：其一，大多數測站與年份的中位數略大於平均數，顯示出 PM_{2.5} 高於平均值的事件次數比起低於平均值的事件次數還要多。其二，在多數情況下，最大值與第 3 四分位之間的距離大於最小值與第 1 四分位之間的距離，表示 PM_{2.5} 極端高值較極端低值更顯著。這些高於平均值的事件與極端高值就是值得我們深入探究之處。



圖（九）高屏地區七測站在 2021~2024 年 PM_{2.5} 濃度之盒鬚圖

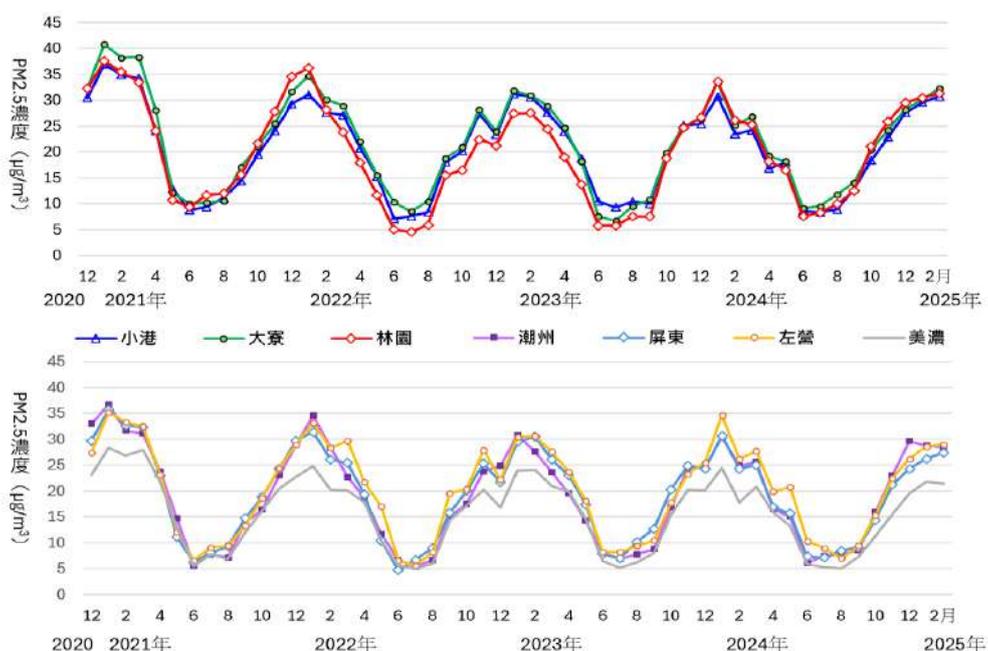
資料來源：環境部環境資料開放平台-PM_{2.5} 日均值，以 python 計算出各站的月均值，再以 Excel 繪製。

接著比較圖（九）各測站歷年來的變化。在研究區範圍內，鄉村的美濃測站的盒子較靠近圖下方，整體 PM_{2.5} 濃度明顯較低；而其餘測站雖然盒子位置普遍較高，但仍能看出區域性的差異，例如 2021 年的盒子在小港、大寮與林園等石化與重工業密集區，明顯較潮州、屏東、左營等都市型測站為高，但隨著高雄市政府加大對石化產業與發電廠的汙染排放管制，2022~2024 年已與其他都市測站沒有明顯差異。

(二) 高屏空品區 PM_{2.5} 的季節性差異

下頁圖（十）為高屏地區七個測站在 2020 年 12 月至 2025 年 2 月的 PM_{2.5} 月平均濃度變化情形。七個測站在逐月變化上有著相同的趨勢，以每年的冬季（12 月到 2 月）PM_{2.5} 濃度最高，各站通常以 1 月達到濃度的最高峰，除了美濃外，其餘六站 1 月均在 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，其中以大寮在 2021 年 1 月的平均濃度最高，達 40.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相當於每日平均空氣品質均對敏感族群不健康。濃度的最低點則是在每年的夏季（6 月到 8 月），除了 2021 年夏季外，夏季 PM_{2.5} 月平均濃度多在 5-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，是一年當中空氣最乾淨的時期。

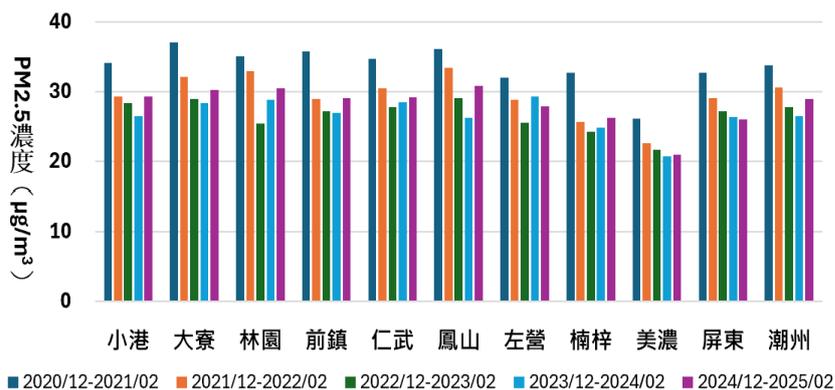
若比較逐年的變化趨勢，可以發現近五年各測站的月平均值在冬季多有下降的情形，而夏季僅有 2021 到 2022 年有明顯的降低。各測站中，以林園測站的下降幅度最為顯著，其在 2021 年冬季時為七個測站中最高，到了 2022 年夏季，濃度卻低於大多數測站。



圖(十) 2020年12月~2025年2月PM_{2.5}月平均濃度變化情形⁸

資料來源：環境部環境資料開放平台-PM_{2.5}日均值，以 python 計算出各站的月均值，再以 Excel 繪製。

由於高屏地區空品冬夏差異甚大，本文以下均聚焦在高屏地區冬季的空品來討論。我們繪製 2020 年到今年的冬季（12~2 月）的 PM_{2.5} 柱狀圖比較（圖十一）。2021/12-2022/02 冬季各測站空品明顯改善許多（橘柱子），我們深入探究後發現兩個原因：



圖(十一) 2020~2025 年冬季平均 PM_{2.5} 濃度變化

資料來源：環境部環境資料開放平台-PM_{2.5}日均值，以 python 計算出各站的月均值，再以 Excel 繪製

1. 大陸地區因疫情限制當地的產業生產與民生活動，減少了污染物傳輸到臺灣，北部富貴角測站的 PM_{2.5} 較前一期減少 27%，境外污染物明顯減少⁹。國內雖然也受疫情調控的影響，車流減少，但產業經濟活動並無縮減，境內污染僅有略減（環境部，2023）。
2. 跟降雨有關。2021 年上半年臺灣西部發生 50 多年來最嚴重的春旱，而 2022 年 1-3 月南部地區雨量卻異常的多，高污染型天氣日數因而較前一年冬季驟減，少了 PM_{2.5} 高的極端值，使得該 2021/12~2022/02（橘柱子）PM_{2.5} 濃度明顯較前一年下降許多。

⁸ 我們將小港、大寮、林園（重工業區測站），與潮州、屏東、左營（一般都市測站）分成兩圖，避免過於擁擠。美濃測站屬於鄉村測站，無論冬夏數值均低於高屏空品區其他各測站，故可視為背景測站，故並列比較。

⁹ 由於臺灣整體冬季多數吹北風~東風，因此臺灣北部富貴角測站上風處已無臺灣陸地，排除了境內污染的可能。因此富貴角測站 PM_{2.5} 濃度可作為境外污染物傳輸的一個重要指標。

二、影響高屏地區空氣品質的水平與垂直天氣系統

空氣中的污染物伴隨著風移動，風速愈大愈能帶走污染物，風速愈小或靜風狀態，污染物愈容易滯留在原地。臺灣不同季節吹著風向相異的盛行風，複雜的地形產生迎背風等不同效應，加上日夜循環的海陸風，連帶影響臺灣各地的空氣品質。

(一) 影響高屏地區空品的水平天氣系統

臺灣冬半年東北季風盛行或大陸冷高壓南下時，臺灣附近的風場多為北風至東北風。若風向為東北風，則西部強風區域會擴及至雲林，則中部以北空品較好，雲嘉南與高屏空品較差；若風向為北風或北北東風，西部的強風區會擴及至臺南，雲嘉南以北擴散條件佳，僅剩高屏位於尾流弱風處，容易累積污染物（圖十二-甲）。但若偏北風向伴隨著境外污染物移入，臺灣西部原本空氣良好的地區也可能發生高濃度空汙的現象（圖十二-乙）。



(甲)高壓南下，北~東北風 (乙)境外汙染移入



(丙)高壓東移，吹東風 (丁)高壓迴流，轉東南風
圖（十二）冬季天氣系統對西部空品的影響

資料來源：環境部空氣品質監測網，空品科普

冬季當大陸冷高壓出海並持續東移時，臺灣附近環流會由東北風轉為偏東風。東風在中央山脈阻隔下，臺灣西部背風側天氣較為穩定，風速弱使得污染物不易擴散（圖十二-丙）。若冷高壓繼續減弱東移，風場可能持續偏東風或轉變成東南風，在中央山脈的背風側可能形成背風渦旋（圖十二-丁），污染物常隨著渦旋從臺灣海峽再回流臺灣西部。此外，因地形效應的影響，偏東風會順著臺灣東南部山脈與海岸轉為偏東北東風，繞過臺灣南端再進入臺灣海峽，此一地形繞流更加強了臺灣海峽背風渦旋的影響。



(甲)迎風與背風空品差異 (乙)上風與下風空品差異



(丙)白天（海風）與夜間（陸風）形成的空品差異

圖（十三）各種地方風系對空氣品質的影響

資料來源：環境部空氣品質監測網，空品科普

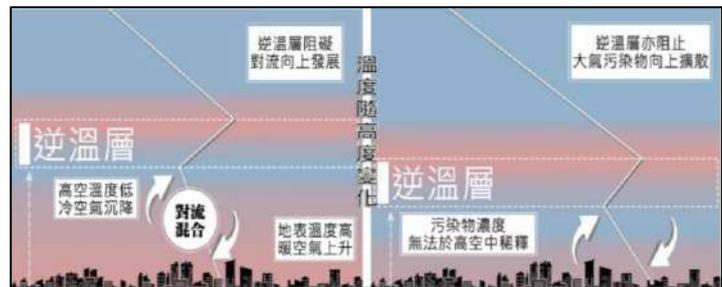
當風遇到地形阻礙時，迎風面空氣流動佳，相對有較好的空品。背風側因氣流沉降，弱風導致大氣擴散條件不佳，空品較差（圖十三-甲）。上風區若有污染物排放，會被吹往下風處，若下風處位於內陸或近山地區，污染物容易累積，空品相對較差（圖十三-乙）。若在海陸風環流主導的狀況下，則白天盛行海風會將污染物往內陸傳輸，而夜間陸風再次將內陸污染物往沿海推送（圖十三-丙）。

(二) 影響高屏地區空品的垂直天氣系統

除了冬季水平尺度的天氣系統對高屏地區的空氣品質產生不利的影響外，冬季混合層與逆溫層的高度，對高屏地區污染物的擴散且產生很大的限制。

「混合層」(Mixing Layer)指的是大氣中近地面到一定高度內，受對流影響、氣體混合均勻的區域(圖十四)。在這一層內空氣中的水氣、溫度、氣溶膠等特性較為均勻，並且受地表加熱與風力的影響，不斷發生上下攪動與混合的狀態。夏季白天地表受太陽輻射增溫，垂直對流較旺盛，因此空氣污染物容易被稀釋，空品較佳。冬季的日照時間較短，太陽高度角低，使得大氣的混合層高度較夏季低，壓縮了污染物能夠垂直擴散的範圍，此為冬季 PM_{2.5} 濃度較夏季為高的原因之一。

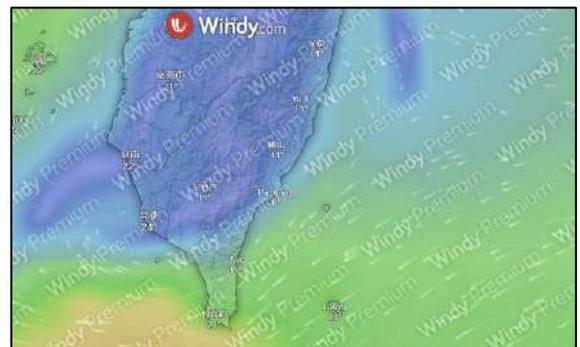
冬季夜晚時，由於輻射冷卻與冷平流的形成，近地面空氣溫度快速冷卻，導致較高處的氣溫高於近地面氣溫，與正常的大氣對流層-溫度隨著高度遞減的狀況相反，形成「逆溫層」(Inversion Layer)。當逆溫層產生時，空氣垂直對流差，



圖(十四) 混合層、逆溫層與污染物的關聯示意圖
資料來源：環保署監資處

污染物更容易被鎖在近地面，使得 PM_{2.5} 濃度升高。盛冬時輻射冷卻效應更強烈，使得逆溫層甚至可能從地表開始形成，這是導致冬季的 PM_{2.5} 濃度比夏季高出許多的原因之二。

綜上所述，綜觀高屏地區冬季空氣品質普遍惡劣原因，應同時涵蓋水平與垂直尺度的天氣系統來說明。當東北季風或東風盛行時，高屏位於背風側的沉降弱風區；當北風與北北東風吹拂時，高屏除了位在尾流弱風區，又位在整個西部平原區的下風處，集污染物之大成，加上地形繞流與背風渦流可能將污染物再從海上捲回來(圖十五)。若此時高屏平原帶冬季夜間輻射冷卻效應明顯，溫度下降，混合層被壓縮，垂直擴散條件已差，若再加上發生逆溫現象，則猶如鍋蓋倒扣，所有污染物被困在近地處。難怪高屏空品區常年位居臺灣七大空品區中空氣品質最差之列，成為空污治理的重點區域。



圖(十五) 偏東風的地形繞流與背風渦流
資料來源：2025-03-01 <http://www.windy.com> 截圖

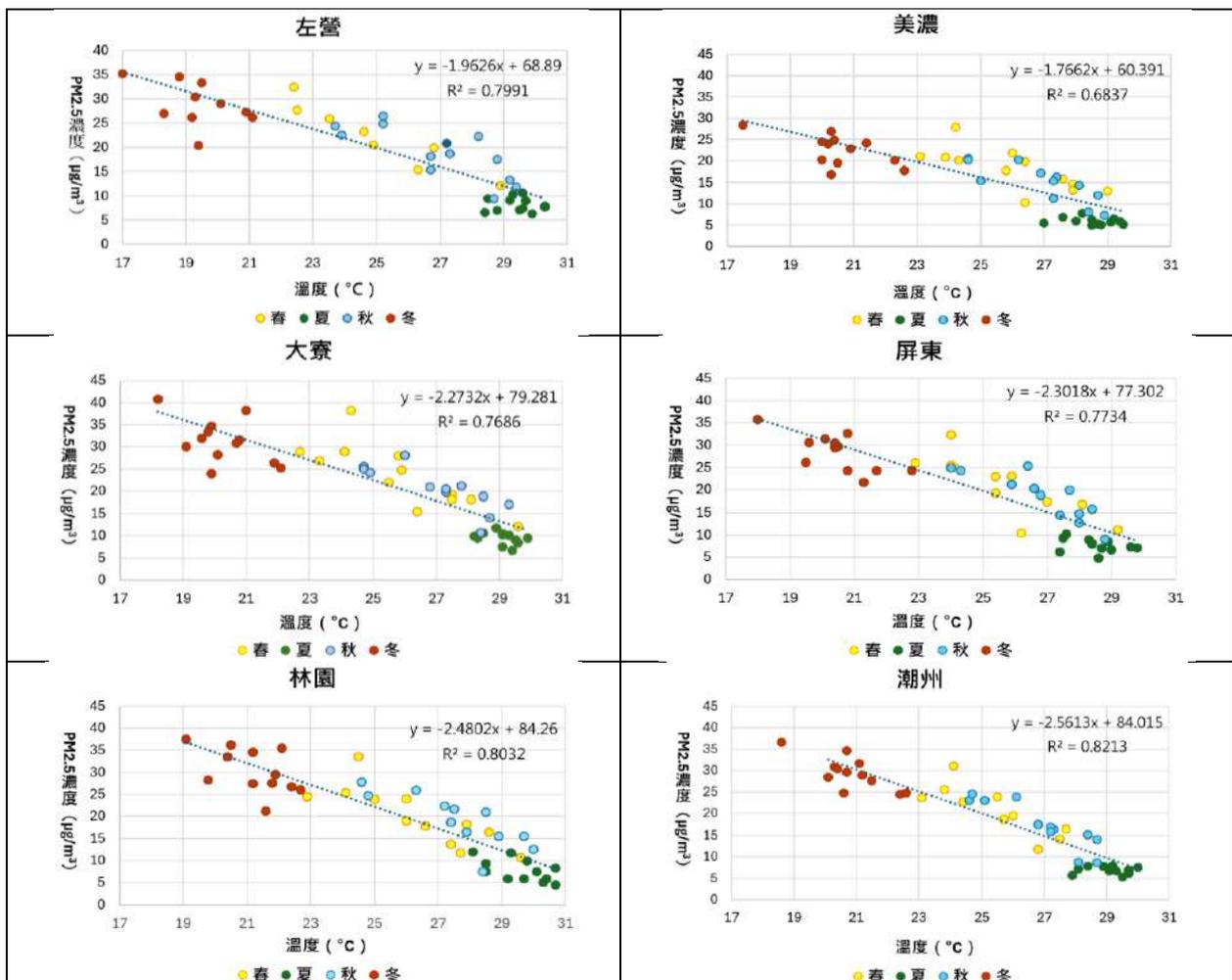
三、高屏地區 PM_{2.5} 濃度與氣象因子之相關性探討

除了上述大尺度的天氣系統外，我們也好奇，高屏地區 PM_{2.5} 的濃度與各測站小尺度的氣象因子，如溫度、降水、風速風向之間是否有明顯的相關性。

(一) 溫度與 PM_{2.5} 的相關性探討

我們將左營、林園、大寮、屏東、潮州、美濃等測站 2021-2024 年的月均溫對 PM_{2.5} 月平均濃度繪製成散佈圖，並以不同顏色標出春（3-5 月，黃）、夏（6-8 月，綠）、秋（9-11 月，藍）、冬（12-2 月，紅）四季（圖十六）。由圖可看出，高屏平原冬季 PM_{2.5} 濃度皆為四季中最高，除美濃外均在 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。春季和秋季的差異比較不顯著，但整體而言春季氣溫較秋季稍低一些。夏季各地溫度均高且分布較集中，均在 29 $^{\circ}\text{C}$ 左右，PM_{2.5} 月平均濃度則分布在 5~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，少數案例甚至低於 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，為南部地區全年空氣品質最佳的時期。

由圖可知，各測站的月均溫和 PM_{2.5} 月平均濃度之判定係數 R^2 皆達 0.68 以上，顯示兩者間有相當大的關聯性。在各站中以潮州判定係數為最高， $R^2=0.821$ ，若換算成相關係數 R 則高達 -0.906；判定係數最低則是美濃， $R^2=0.684$ 。對照圖（二）AQI 不良日數等值線圖，我們發現一個有趣的現象，不良日數最多的潮州與林園站，其 PM_{2.5} 濃度與溫度的相關性最高，而空氣品質相對最佳的美濃，其相關性為最低，值得進一步探討。綜上所述，南部地區測站大致上月均溫愈高，則 PM_{2.5} 月平均濃度呈現愈低，兩者呈現高度負相關的趨勢。



圖（十六）高屏地區六個測站 2021-2024 年月均溫與 PM_{2.5} 濃度關係圖

資料來源：中央氣象署氣候觀測資料查詢服務，擷取離空品測站最接近的中央氣象署屬有人站或自動氣象站的歷史氣溫資料。本研究計算整理後以 Excel 繪製。

(二) 降雨量、雨日與 PM_{2.5} 的相關性探討

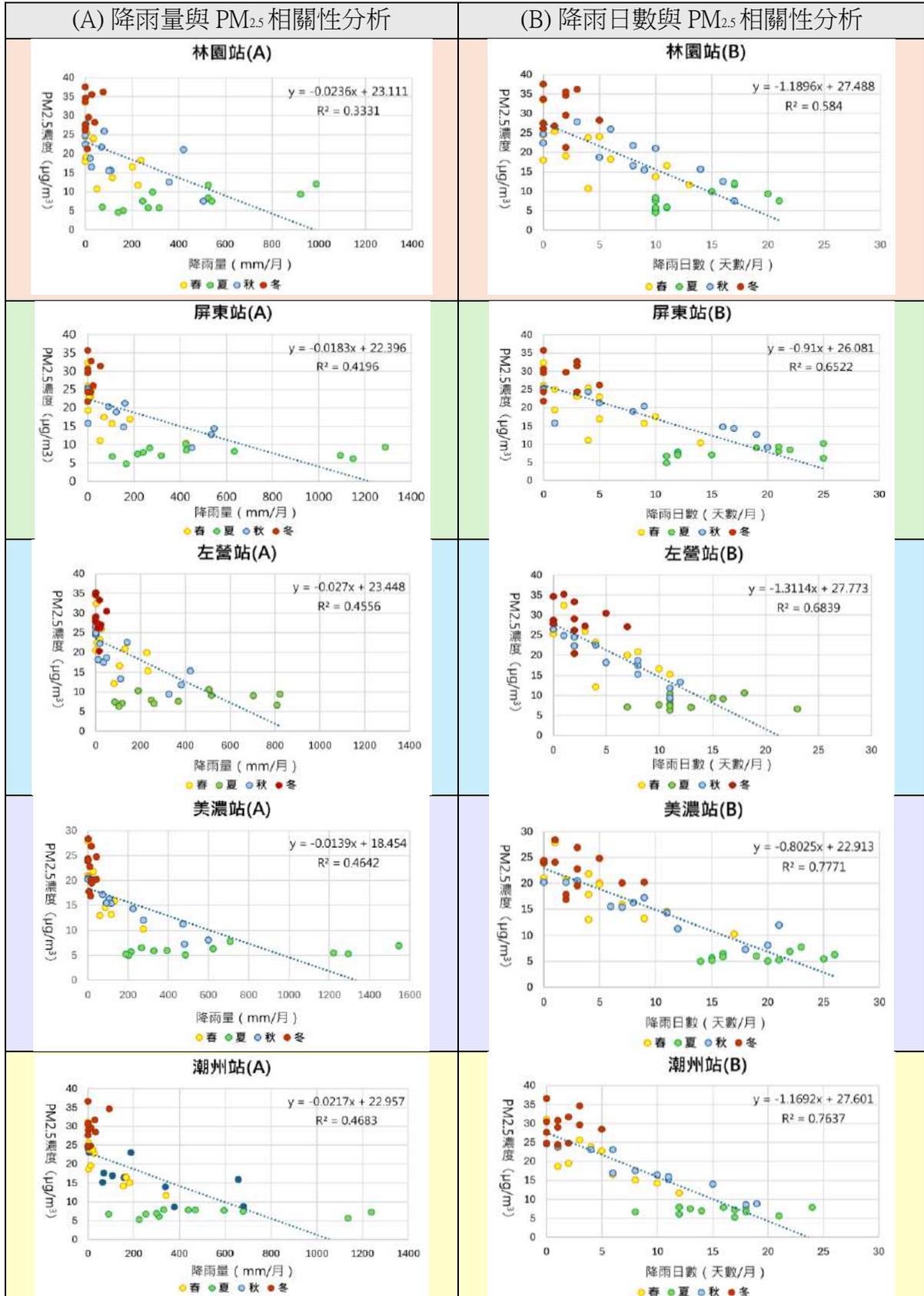


圖 (十七) 高屏地區五個測站 2021-2024 年降雨量及降雨日數與 PM_{2.5} 濃度關係圖
 註：屏東站 2022 年 10 月、左營站 2022 年 1~5 月因儀器故障，故無雨量及與雨日資料。
 資料來源：中央氣象署氣候觀測資料查詢服務，擷取離空品測站最接近的中央氣象署屬有人站或自動氣象站的歷史氣溫資料。本研究計算整理後以 Excel 繪製。

我們將高屏地區各測站的月降雨量與 PM_{2.5} 月平均濃度作成散佈圖（圖十七-A 欄）。研究發現，冬季降雨量最少，對應的 PM_{2.5} 濃度最高；春、秋季次之；而夏季降雨量最多，屏東與潮州站甚至出現單月降雨超過 1200mm 的狀況，PM_{2.5} 濃度較低。以整體四季來看，降雨量愈多，PM_{2.5} 月平均濃度大致呈現下降的趨勢，這與一般的理解相同，降雨在大氣中具有「清洗作用」，因雨滴會捕捉大氣中的細懸浮微粒再沉降到地面，有效減少空氣中的 PM_{2.5} 濃度。空氣中的濕氣也可促進污染顆粒的凝結，若產生濕沉降，則可進一步降低它們的懸浮程度。

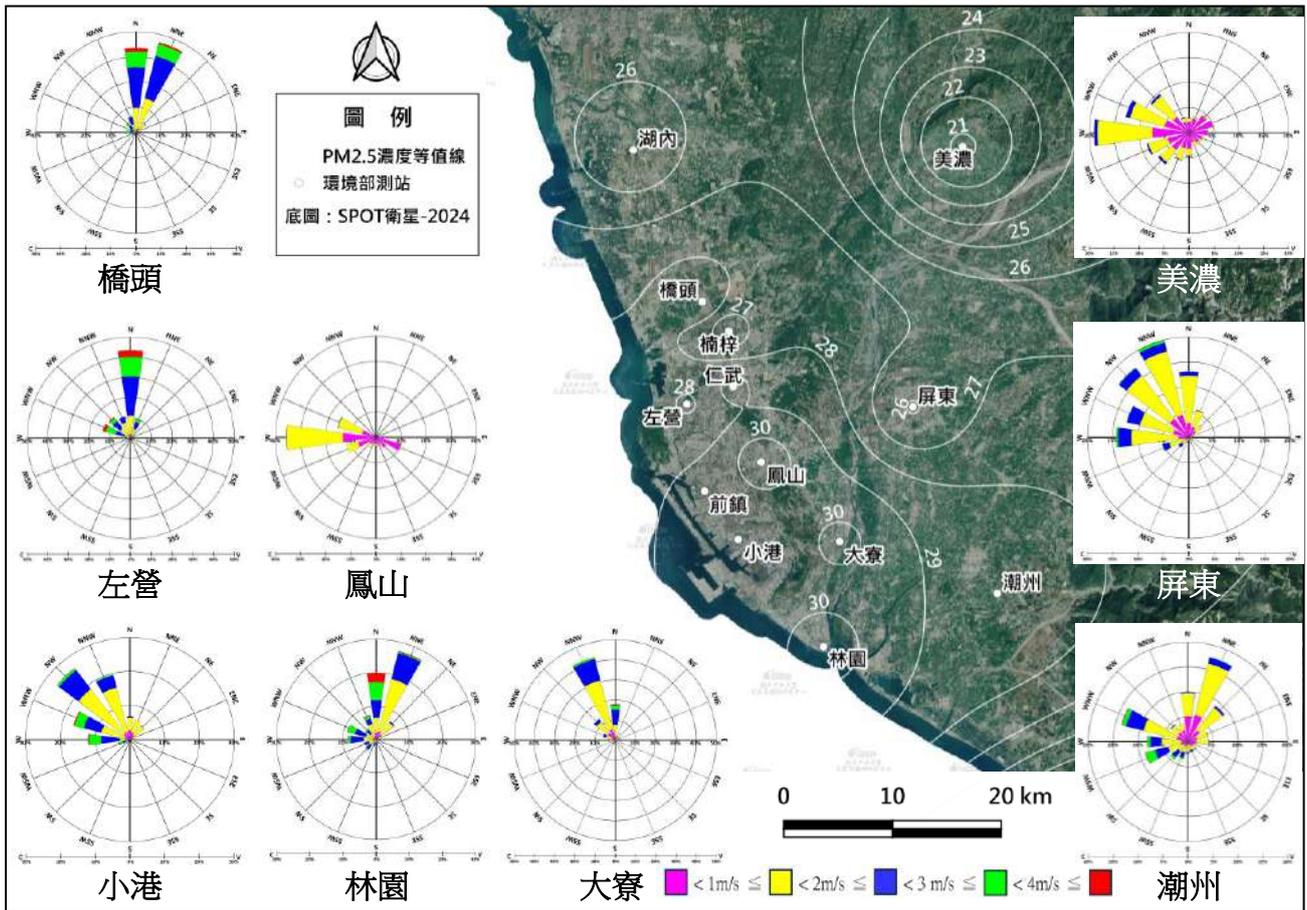
然而，當我們進行降雨量和 PM_{2.5} 的相關性分析時（圖十七-A 欄），發現各站的判定係數均不高，落在 0.33~0.46 之間，最低為林園站， $R^2=0.3331$ ，意即相關係數僅有-0.577，屬於中度負相關。然而，若改以降雨日數對 PM_{2.5} 濃度作圖（圖十七-B 欄），則兩者之間的判定係數明顯較降雨量為大。在各測站中以美濃站為最高， R^2 達 0.7771；最低者為林園站 R^2 為 0.584，換算成相關係數為-0.764，亦達到高度負相關。

比較同一測站之降雨量與降雨日數，可發現每個測站的降雨日數和 PM_{2.5} 濃度相關性都比降雨量來得較大。降雨日數對 PM_{2.5} 濃度的判定係數皆在 0.58 以上，但降雨量對 PM_{2.5} 濃度之判定係數卻都低於 0.5，顯示降雨日數對於 PM_{2.5} 濃度的影響較單月降雨量大。換言之，觀察降雨對 PM_{2.5} 的影響，重點在有沒有降雨，而不是降雨量有多少。

（三）冬季風向、風速與 PM_{2.5} 的關係

接著我們繪製了高屏地區 2024 年 12 月~2025 年 2 月（冬季）的 PM_{2.5} 平均濃度等值線圖，並搭配九個測站的風花圖（風玫瑰圖，Wind Rose Plot）來顯示不同風向發生頻率，以及每個風向內不同的風速區間。本年度冬季空氣品質以美濃 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 最佳，鳳山、大寮、林園三地超過 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 為最差。我們將測站依風向與風速特性分為以下四類：

1. **橋頭、左營、林園**：橋頭與左營的北方空曠，故冬季北風（N）與北北東風（NNE）長驅直入且風速稍強（風速高於 3m/s，綠與紅色）；林園則是因位於高屏溪出海口，冬季北風順著高屏溪河谷南下，風速亦有累加增強的效果。
2. **小港、大寮、屏東**：大寮與屏東位處較內陸，大寮冬季以北北西風（NNW）為主，屏東則北風（N）~西風（W）均有，兩地風速稍低（1~3m/s，黃與藍色），冬季水平擴散條件不佳。小港以西北風（NW）為最多，但西風與西北西風佔了近 30%，且風速稍強（3~4m/s，綠色），顯示海風對小港測站具有一定的影響力。
3. **鳳山、美濃**：兩地多吹偏西風，且風速極低（小於 2m/s，粉紅與黃），不利於污染物擴散，但兩者命運大不相同。美濃遠離都市化地區，東、北、西三面山脈環繞，盆地內部為沖積平原，地形開口朝南，故冬季污染物不易進入，本年度冬季 PM_{2.5} 濃度還不到 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成為高屏地區空品最好的環境部測站。鳳山屬於平原地形，其本身與周圍均為都市化區域，由於都市熱島效應與高樓阻隔，鳳山風速較弱，污染物容易累積。



圖（十八）高屏地區測站 2024/12~2025/02 風花圖與 PM_{2.5} 平均濃度等值線圖

資料來源：環境部環境資料開放平台-AQI(歷史資料)、PM_{2.5} 日均值，本研究計算整理後以 Excel 繪製

4. **潮州：**高屏地區九測站中，冬季風向最複雜的就屬潮州。潮州冬季整體風速不強，容易造成嚴重的污染滯留。潮州冬季風向有兩個明顯的系統，北、北北東與東風共約佔 36.4%，且風速較微弱（低於 2m/s，粉紅與黃）；另一系統是西北西、西與南南西風，共約佔 30.8%，且風速稍強（2~4m/s）。換言之，在偏北的冬季環境風場之下，潮州距海雖然不是很近，但仍有相當高比例的時間是受到來自偏西的海風所影響。

從風花圖中可以看出，高屏地區整體而言是以西北風~東北風為主，橋頭、左營風向顯示，境外污染或中北部地區的污染物會順著偏北風快速南下，高屏空品區正好成為下風處，累積迅速再加上風速過低，污染物不易擴散。其次，小港、林園、潮州的風向又顯示，偏西風再將這些累積的污染物，連同重工業與石化業的境內污染物，再往潮州地區輸送。根據屏東縣政府環保局空汙防制科的統計，屏東縣 PM_{2.5} 年均濃度有 9.2% 是受到高雄市影響，相反的，高雄市 PM_{2.5} 年均濃度僅 3.8% 是受到屏東縣所影響（屏縣府環保局，2024）。以下我們將以 2025 年年初的三場空汙事件為例，詳細說明高屏地區污染的擴散，如何受到風向與風速的影響。

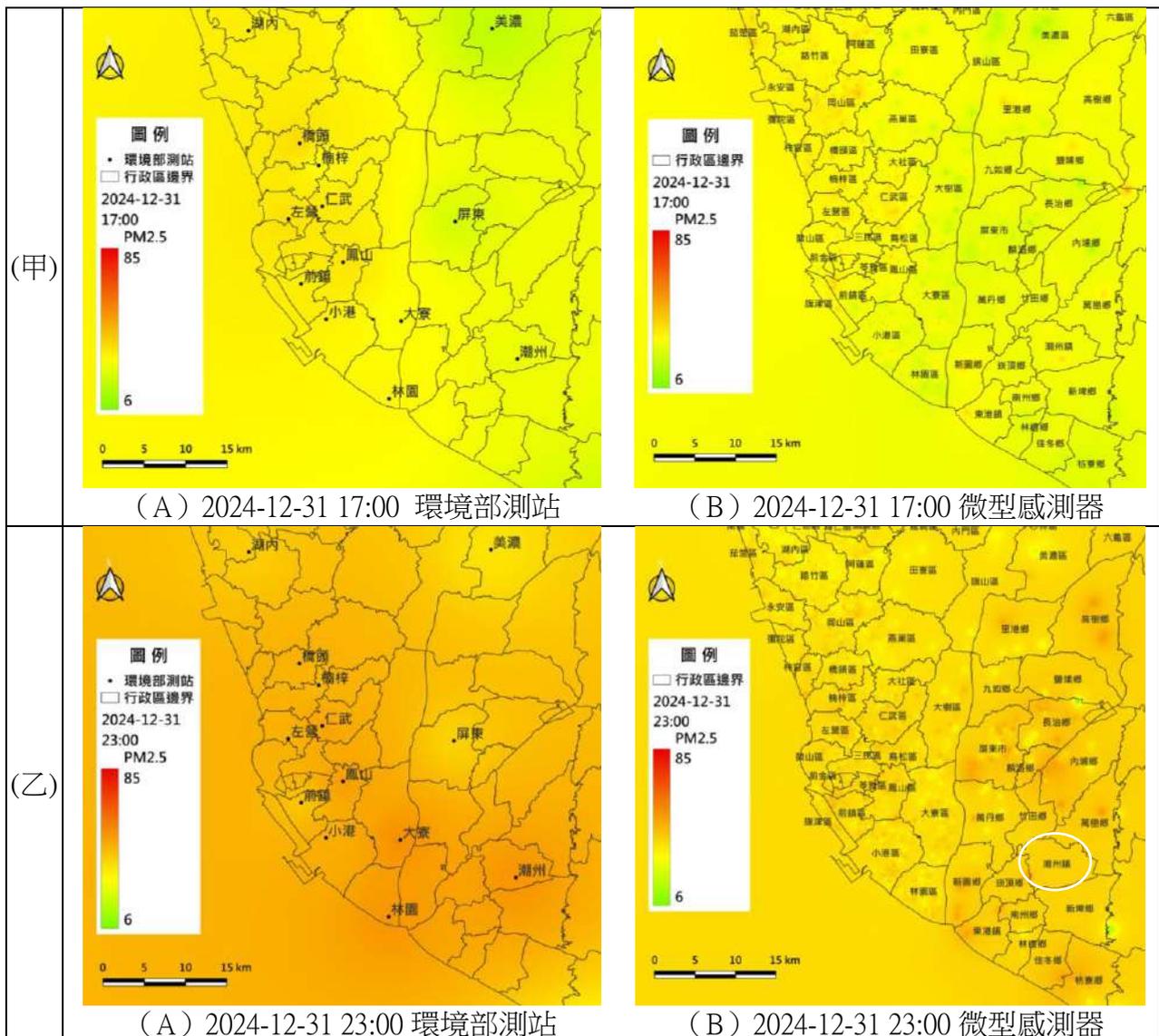
四、從三場空汙事件剖析高屏地區的空汙歷程

為了要深入了解空汙來襲時高屏地區各測站污染物的擴散情形與濃度變化，我們將環境部測站及微型感測器的資料繪製成 PM_{2.5} 濃度逐時分布圖，分析 2025 年三場空汙事件的始末。

(一) 第一場空汙事件：2024 年 12 月 31 日 - 2025 年 1 月 1 日

這是今年的第一場空汙事件，12 月 31 日受到東北季風增強的影響，挾帶來自中國山東及上海地區之細懸浮微粒來襲，西半部的空氣品質亮起了橘燈。

1. 12 月 31 日 傍晚~午夜：這場空汙事件始於 12 月 31 日 17 時，高屏地區多數測站的 PM_{2.5} 介在 30~40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，而美濃站則僅有 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （圖十九-甲）。在接下來的兩個小時內，高雄市區各測站 PM_{2.5} 濃度迅速增加，接著才輪到屏東、潮州上升。潮州 6 顆微型感測器在 19 時 PM_{2.5} 上升至 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右即全面當機，至(乙)圖-(B)23 時仍未恢復。
2. 12 月 31 日午夜~1 月 1 日清晨：在 23 時過後，環境部潮州及大寮測站的濃度分別上升至 62 和 69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，顯示可能有增強的西北風將汙染物往南帶。大部分測站濃度均有上升，汙染程度最低的美濃也達到 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （圖十九-丙）。



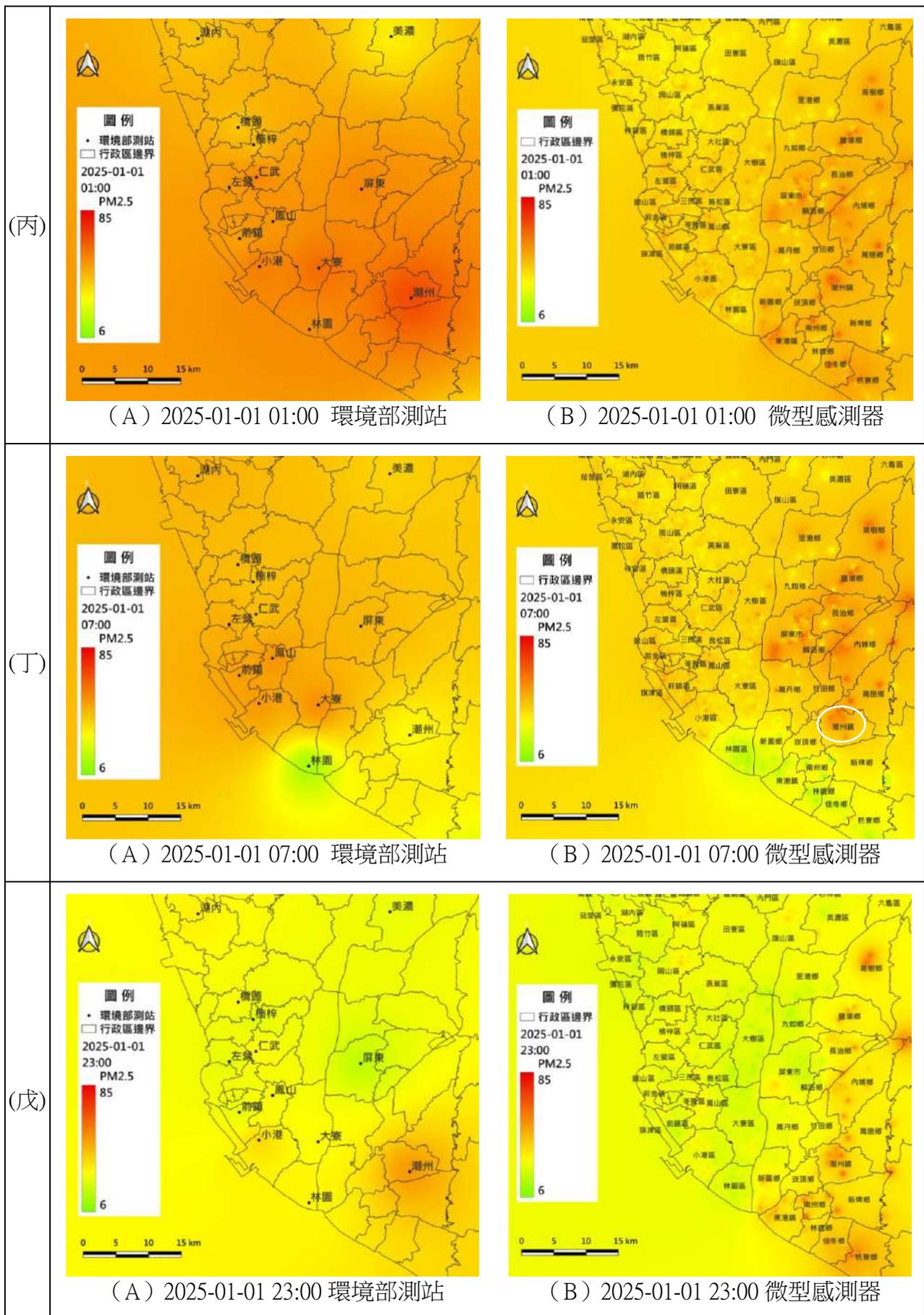


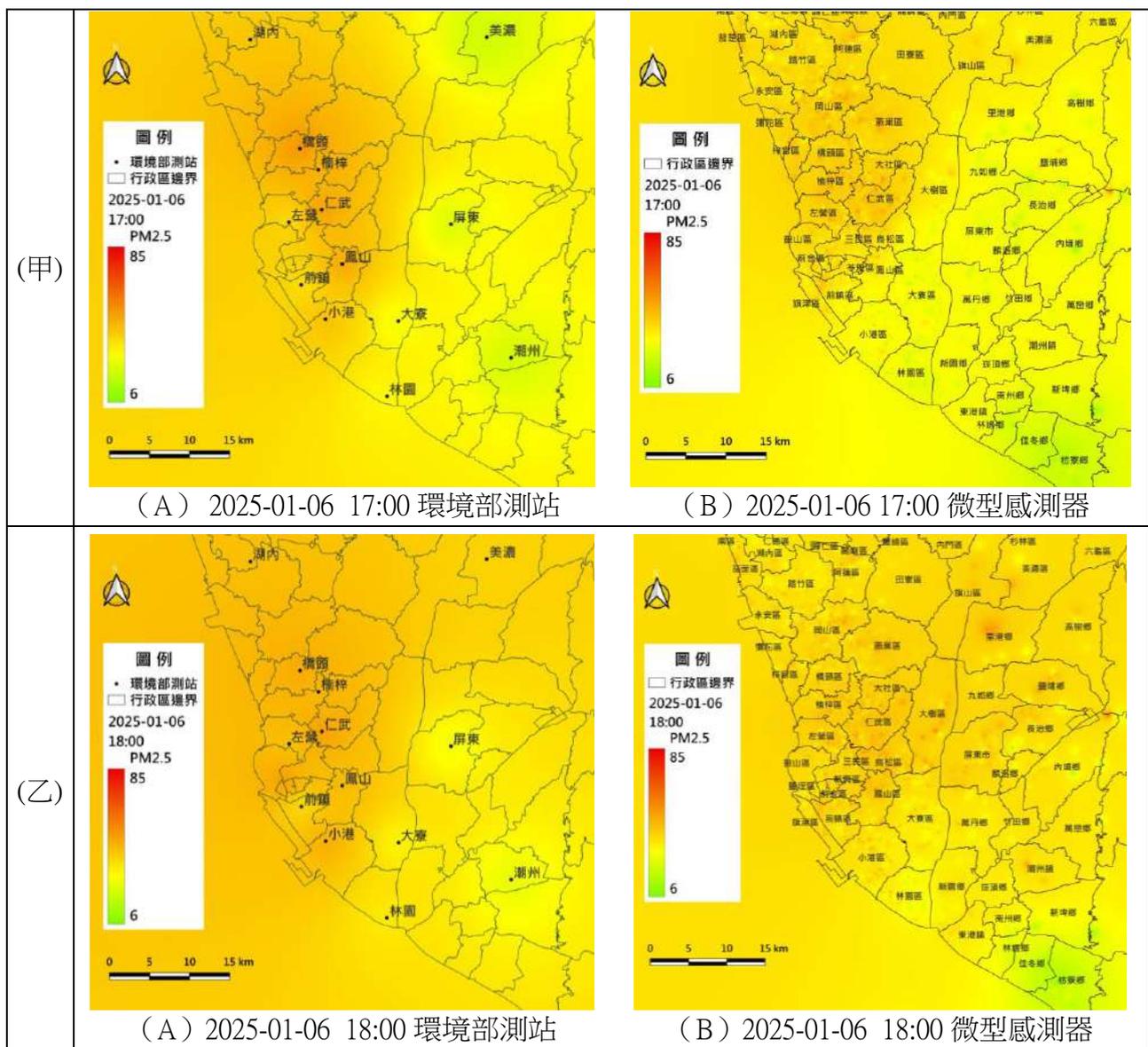
圖 (十九) 第一場空汙事件 PM2.5 濃度分布圖 (2024/12/31~2025/01/01)

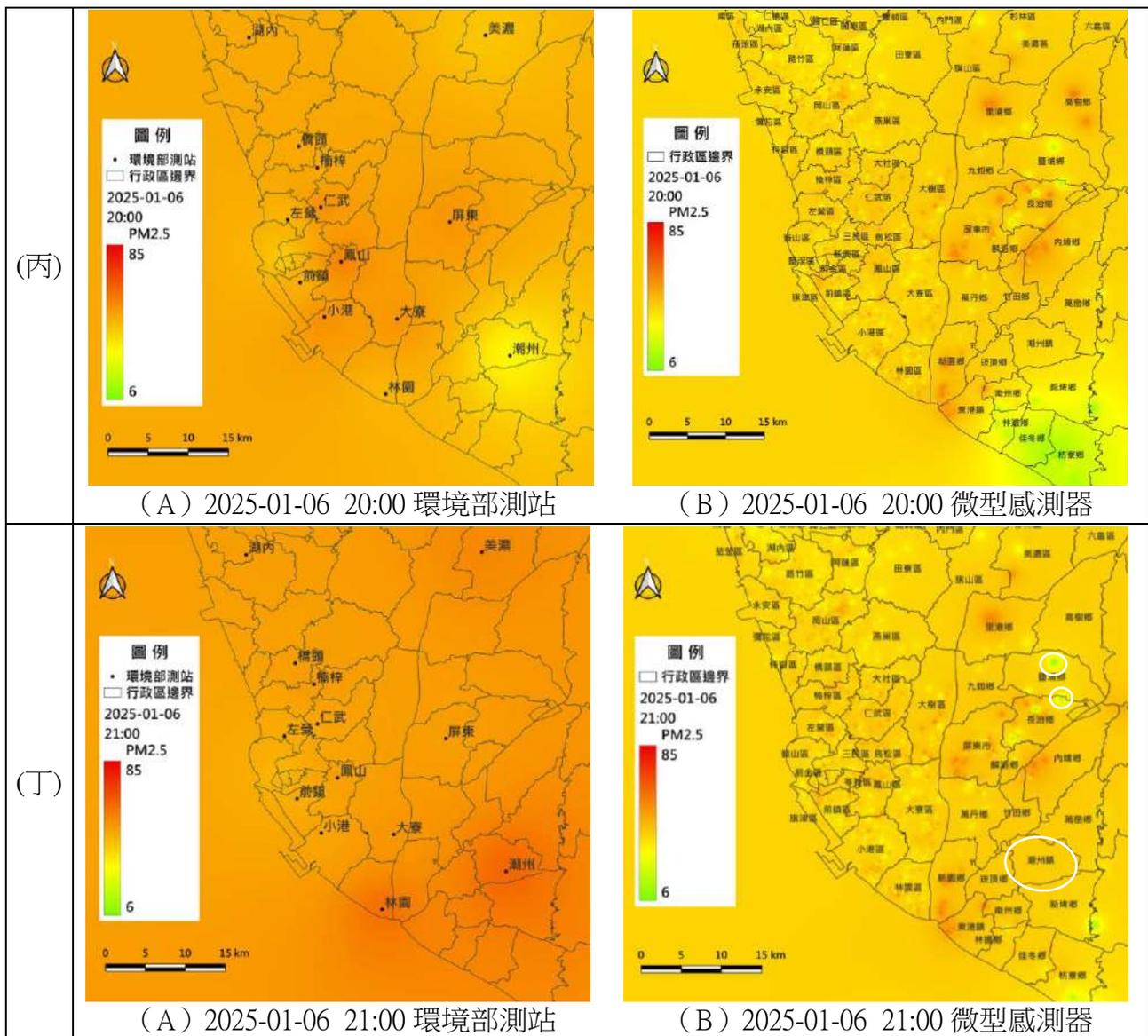
資料來源：環境部環境資料開放平台，民生公共物聯網資料服務平台，本研究以 QGIS 3.34 版繪製。

3. 1月1日清晨~日出過後：污染情況有所緩減，以環境部林園測站下降最顯著，PM_{2.5}濃度下降到 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （圖十九-丁），印證了日出之後大氣逆溫層高度增加，區域風場也開始轉吹海風，地面污染物開始擴散。在此同時，潮州測站的濃度也降至 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，然而此時潮州鎮 6 顆微型感測器的感測資料卻還停留在 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，相當奇怪。
4. 1月1日早晨~午後：午後新的一波污染物被帶至高屏地區。北高雄地區環境部測站的 PM_{2.5}濃度均增加至 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，但大寮、屏東和美濃的濃度反而呈現下降的趨勢。
5. 1月1日午後~午夜：在接下來的半天內，環境部各測站的 PM_{2.5}均逐漸下降，唯有潮州在入夜之後仍節節高升，在 20 時達到 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成為入夜後唯一亮紅燈的地區（圖十九-戊）。但對照微型感測器資料，發現屏東沿山鄉鎮仍有諸多紅點，污染物仍無法擴散，此例更凸顯以微型感測器填補環境部國家測站不夠密集的重要性。

(二) 第二場空汙事件：2025 年 1 月 6 日 - 2025 年 1 月 7 日

由於 1 月 5 日上海至山東一帶 PM_{2.5}濃度約 100~180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，加上 1 月 6 日有大陸冷氣團南下，故環境部於前一日即預告次日下午臺灣西部空氣品質明顯變差（環境部監資司，2025）。





圖(二十) 第二場空汙事件 PM_{2.5} 濃度分布圖

資料來源：環境部環境資料開放平台，民生公共物聯網資料服務平台，本研究以 QGIS 3.34 版繪製。

- 1月6日下午~入夜：本場空汙事件也是伴隨著境外汙染而來，圖(二十)的(甲)~(丁)完整呈現空汙來襲時的逐時變化。污染物從 16 時開始南下掃過高屏地區。值得注意的是，汙染物並非均勻地由北往南擴散，我們從圖二十-(甲)-(B)的微型感測器 PM_{2.5} 濃度分布圖，可以看出汙染物在大樹、鳥松與鳳山之間有一條明顯界線，這是受到大樹丘陵地形的阻擋，汙染物在丘陵西北側上風處累積，直到 18 時才明顯突破進入屏東平原。18 時起屏東平原的各微型感測器開始飆升，環境部潮州測站從 19 時 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 暴增到 21 時 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在此同時，潮州鎮的 6 個微型感測器再次全面停擺(圖二十-丁)。
- 1月7日凌晨~午後：接近凌晨又再有一波空汙南下，從 0 時環境部橋頭測站達 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1 時鳳山、仁武測站達 67、69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，3 時潮州測站達 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此波空汙來得快也去得快，潮州測站從 6 時 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，一小時後 7 時立刻降到 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，再次應證日出後近地溫度上升，逆溫破壞，風場改變，汙染物才有辦法很快退散。

(三) 第三場空汙事件：2025 年 2 月 26 日 - 2025 年 2 月 28 日

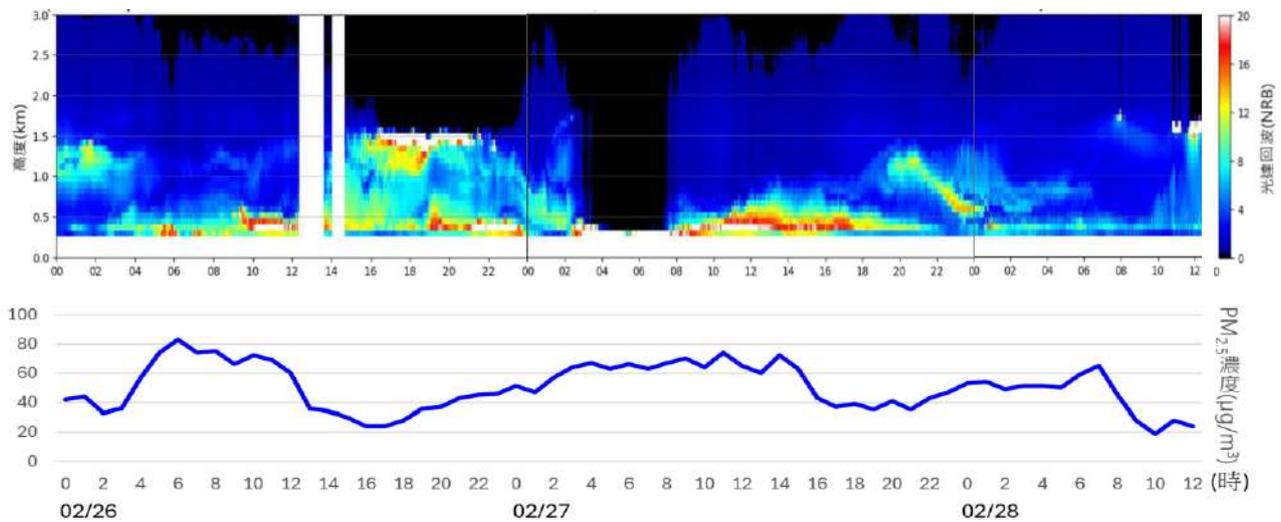
二月底南部地區發生今年以來最嚴重的空汙，正逢二二八連假。2 月 26 日因高壓出海，臺灣大環境偏東風，風速偏弱導致水平擴散條件不佳；再加上華南雲雨帶通過，導致濕度上升，PM_{2.5} 粒子因吸濕而使得濃度提升（環境部大氣環境司，2025）。我們從學校高樓往遠處看，市區也一片灰濛（照片三）。



照片（三）空汙影響整個城市
資料來源：校園拍攝 20250226

1. 事件日的垂直大氣結構變化

臺灣南部僅有左營設有微脈衝雷射雷達測站，故我們對照環境部左營測站的 PM_{2.5} 濃度，說明光達回波顯示的大氣結構與氣膠濃度、PM_{2.5} 濃度數值的關聯性¹⁰（圖二十一）。



圖（二十一）微脈衝雷射雷達左營站光達回波圖與環境部左營空品測站 PM_{2.5} 濃度比較圖
資料來源：環境部空氣品質監測網-任務監測-大氣遙測、環境資料開放平台-AQI(歷史資料)

在 2 月 26 日的雷達回波圖中，可以發現在 0-3 時空品尚未惡化前，混合層頂大約距地 1.5km 處，4 時後 PM_{2.5} 開始飆升，混合層頂降至距地 0.5km 處，氣膠濃度上升至 16NRB 以上（紅色）。過午 13-14 時部分時段，可能是儀器問題或受到遮蔽，故缺乏資料。14-17 時接近傍晚時，強回波的氣膠垂直向上擴散，PM_{2.5} 明顯下降，但幾小時後，近地面的氣膠濃度隨著入夜而再次上升，空氣垂直結構發生變化，混合層頂快速下降。

2 月 27 日凌晨開始 PM_{2.5} 濃度居高不下，2 時起空氣垂直結構疑似發生強烈下沉逆溫，高空氣膠濃度極低，光達在近地面 0.3km 處出現極強的回波（白色），表示有低層雲系覆蓋在左營上空，此時也對應到左營空品測站 PM_{2.5} 濃度超過 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。傍晚過後，左營附近地面風場改變，污染物逐漸擴散，PM_{2.5} 濃度降至 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，光達回波也顯示混合層頂逐漸回到距地 1.5km 左右，混合層內的氣膠濃度也明顯下降。

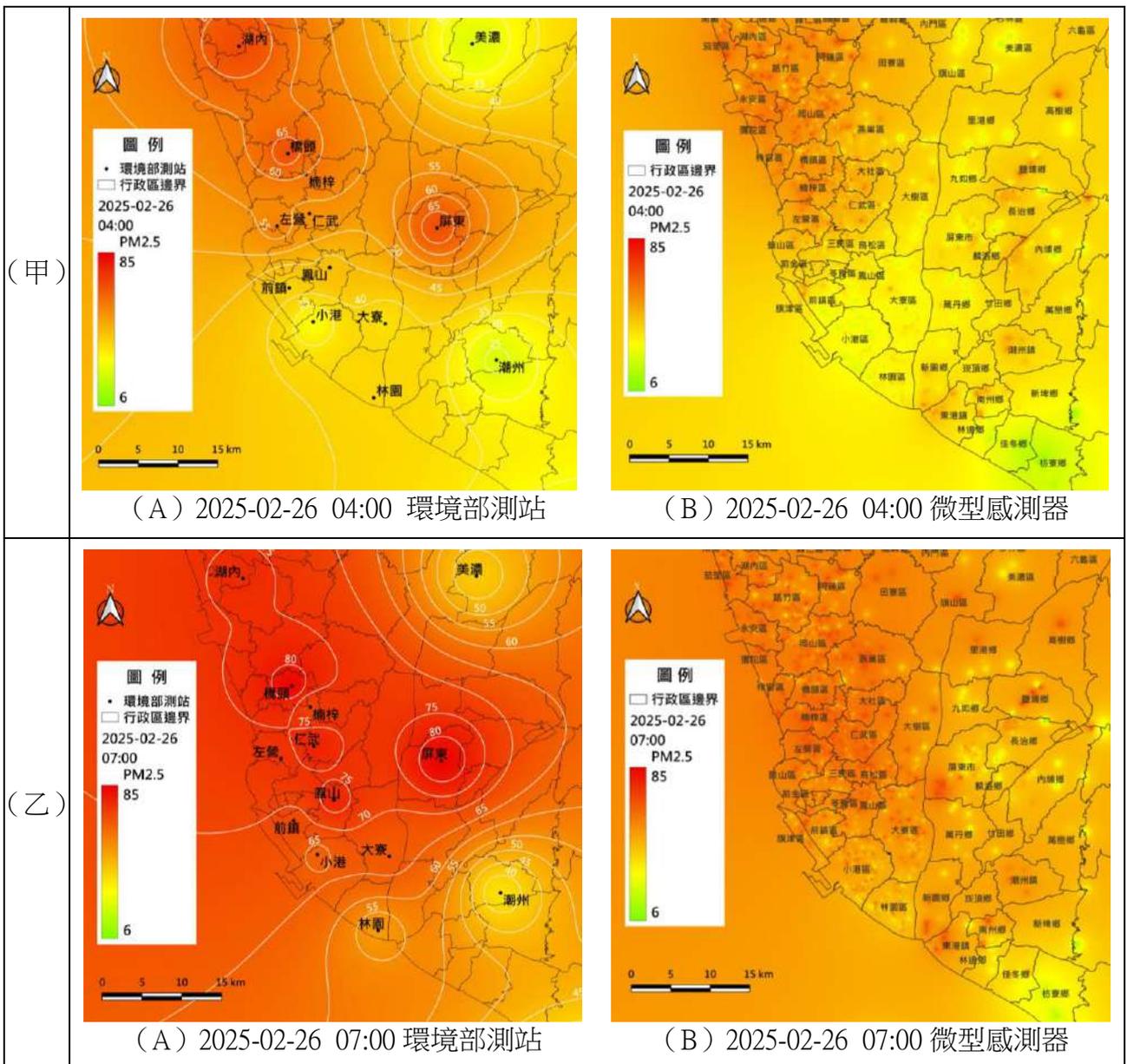
¹⁰ 光達回波圖的橫軸為時間，左縱軸為距地高度（km），右縱軸的數值代表大氣散射回儀器的光子數量。NRB 數值越高代表氣膠濃度越高，在圖中越接近紅色。圖中白色區域，則是因為雷射光遇到雲，導致反射訊號強。NRB 圖中亮色與暗色交界處，極為混合層層頂。

2月28日凌晨PM_{2.5}再次上升到50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，但此時無論是地面或高空，氣膠濃度明顯降低許多（淺藍~深藍），早上9時過後隨著日照漸增，地面溫度上升，左營整PM_{2.5}降到30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，整場空汙結束，混合層頂也逐步上升，11時回到距地1.7km的高度。

有了光達回波圖這項研究空品的利器，我們卻沒辦法直接拿左營的光達回波圖來解釋屏東或潮州地區的大氣垂直結構，原因是當汙染物南下時，屏東平原的PM_{2.5}濃度上升時間會稍晚於高雄地區的測站，特別是潮州測站，有著很明顯的延遲時間（圖二十二），我們將它命名為「潮州延遲」效應。以下擷取幾個重要時段，將環境部測站與微型感測器並列比較。（圖二十三）



圖（二十二）環境部左營站與潮州測站PM_{2.5}濃度逐時比較
資料來源：環境部（2025）環境資料開放平台-AQI（歷史資料）



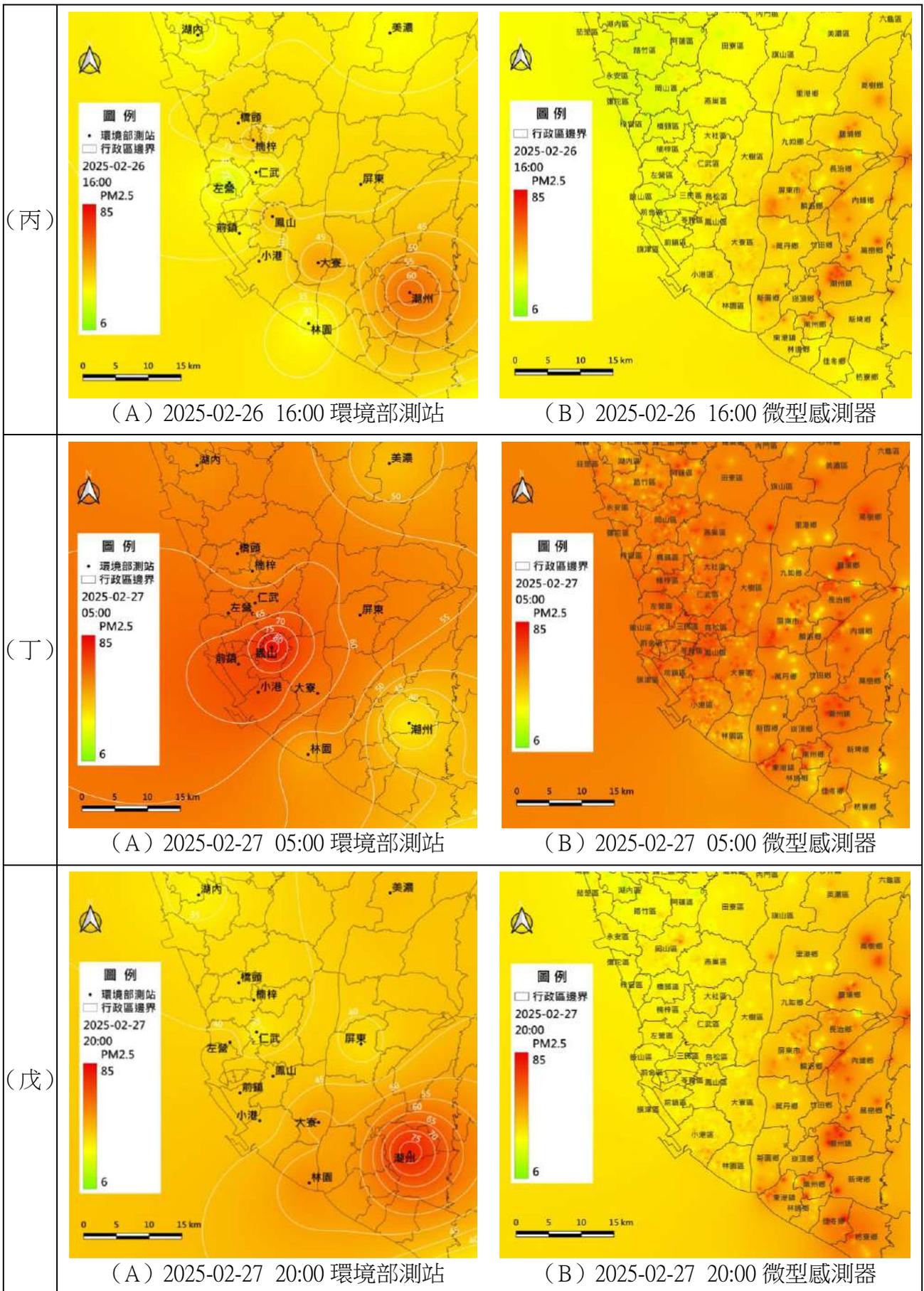


圖 (二十三) 第三場空汙事件 PM_{2.5} 濃度分布圖

資料來源：環境部環境資料開放平台，民生公共物聯網資料服務平台，本研究以 QGIS 3.34 版繪製。

2. 事件日的污染濃度水平變化

- (1) **2月26日凌晨～早上**：該場空汙事件自26日0時開始，高屏多數測站PM_{2.5}都在20-45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，僅湖內達55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，接著各測站在清晨由北往南依次升高，顯示污染物快速南下的過程（圖二十三-甲）。污染物接著跨過高屏溪來到屏東平原，使屏東測站在7時PM_{2.5}濃度高達84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （乙圖），相當驚人。這段時間內，污染核心從零星分佈轉變為更大範圍的高濃度區，顯示大氣條件不利於擴散且可能有污染源增加。
- (2) **2月26日午後～入夜**：26日12時空品突然大幅改善，各測站PM_{2.5}濃度在1小時內迅速降到50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，顯示風場或大氣擴散變好，僅有左營、屏東等地降速較慢，其餘測站整體午後均在30-45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間。直到16時污染再次惡化，尤其是潮州與大寮地區（圖二十三-丙）。入夜後潮州污染有改善，但高雄平原的多數測站卻逐漸嚴重。
- (3) **2月27日凌晨～中午**：污染繼續惡化，尤其是鳳山、左營、小港、一帶，PM_{2.5}飆升至75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，屬重度污染，鳳山在2月27日凌晨5時甚至達到82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成為污染最嚴重之區（圖二十三-丁）。相較之下，潮州猶如蓋上保護罩，他人皆濁我獨清。此時潮州測站的微型感測器疑似故障，仍停留在前幾個小時的高濃度數值。
- (4) **2月27日午後～入夜**：傍晚17時起大氣條件有明顯變化，高雄平原的測站PM_{2.5}的濃度迅速下降，特別是離海較近的左營、前鎮、小港降至50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，此時潮州PM_{2.5}濃度卻開始明顯增加，20時高達77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （圖二十三-戊）。
- (5) **2月28日凌晨～早上**：進入空汙事件的最後一天，凌晨時鳳山、前鎮、小港一帶空汙日益嚴重，相反的潮州地區空品卻逐漸好轉，早晨7時降至40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。9時過後高屏地區除了林園測站以外，其餘均降至40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。本次空汙事件到此結束。

我們將兩天半的整場空汙事件，詳細繪製出每小時的環境部空品測站與微型感測器的分布圖相互比對，並且剪輯成逐時連續影片¹¹。從動態的影片中，更能清楚看出污染物的擴散方向與水平變化。然而，從環境部測站的逐時分布圖中，我們發現兩個有趣的地方：

1. 當高雄平原一片紅，甚至連屏東測站也淪陷的時候，潮州一片清朗；但當高雄平原污染物退去，潮州卻快速惡化？我們我們很好奇，為何潮州在整個高屏空品區的變化，相較於高雄市其他測站，有著明顯的「延遲效應」（圖二十二）？
2. 在同一個時間環境部測站與微型感測器的比較上，第一場空汙事件的(乙)、(丁)圖、第二場的(丙)圖與第三場的(甲)、(乙)、(丁)圖，很明顯兩者有不太一致的狀況。這又是因為甚麼原因？此議題我們將在下面「伍、討論」部分進行分析。

¹¹ 由於作品說明書內文不可呈現作品研究資料之連結網址，故第三場空汙事件之逐時PM_{2.5}分布圖影片將於競賽時於展板前呈現。

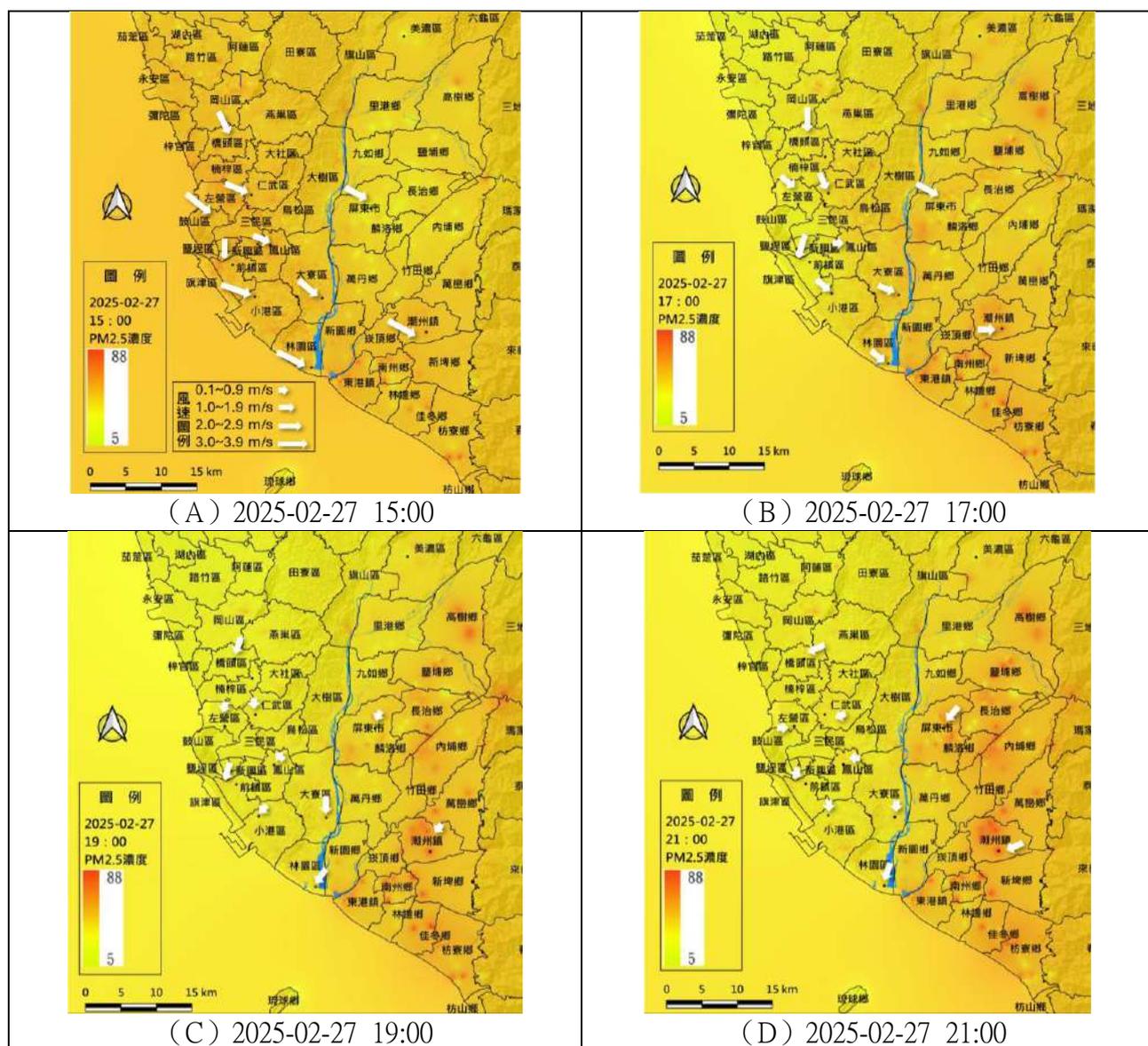
伍、討論

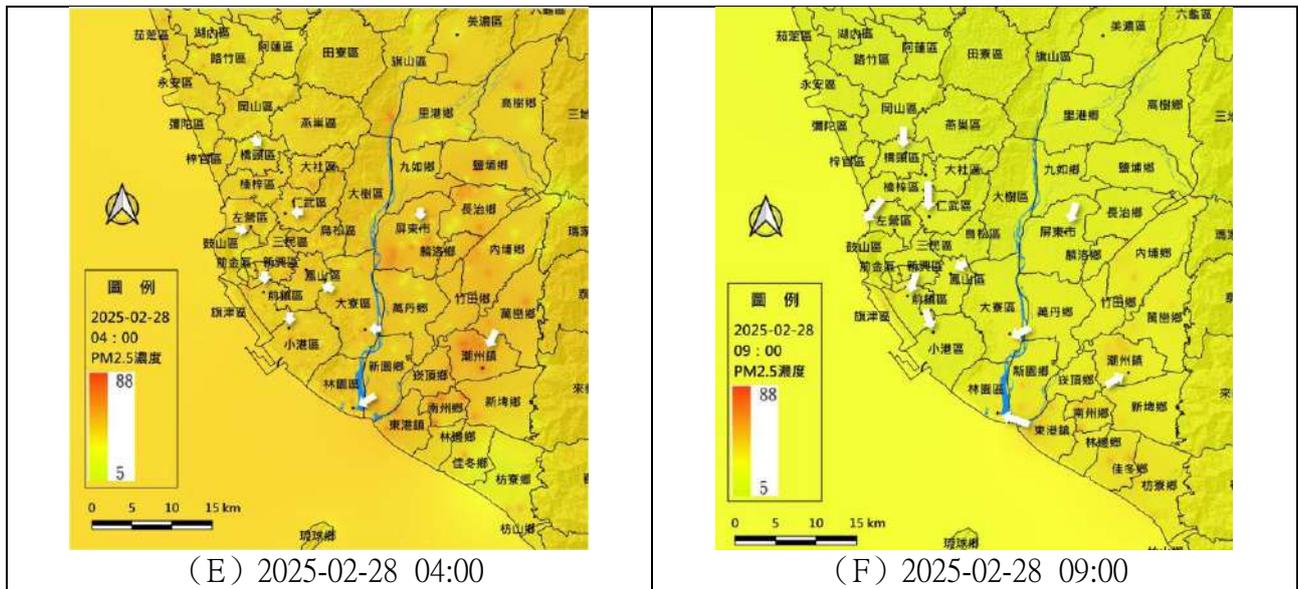
我們將第三場空汙的微型感測器 PM_{2.5} 分布圖，加上 100 公尺 DTM 數值地形模型與風速、風向，說明為何潮州地區污染物的累積與退散常晚於高雄平原，而出現「潮州延遲」效應？

一、「潮州延遲」效應的原因：

2 月 27 日 15 時污染一開始以高雄平原較為嚴重，此時受海風影響產生偏西北的風場，各地風速多在 2.0m/s 以上。雖不算強風，但足以將污染物跨過高屏溪往東輸送（圖二十四-A）。境外污染與中北部的污染物累積在下風處，外加小港、大寮、林園石化重工業園區的新鮮排放一起向東傳輸，並持續在中央山脈的山腳累積，潮州正好集污染物之大成，因此潮州 PM_{2.5} 的高峰期較高雄市的測站來得晚。17 時，高雄沿海測站 PM_{2.5} 濃度明顯降低，而屏東平原的 PM_{2.5} 濃度升高，部分地區如高樹、鹽埔、潮州等地才出現污染熱點（圖二十四-B）。

到了 19 時，高雄平原空品逐漸清朗，此時雖然以轉換成北風為主的風場，但風速明顯減弱，屏東平原污染熱點濃度更高（圖 C）。21 時屏東平原已轉為陸風為主的東北風場，屏東、潮州風速雖然略較 19 時微增，但低風速仍不足以帶走污染物（圖 D）。





圖(二十四) 高屏空品區 2025 年 2 月 27~28 日風速、風向與 PM_{2.5} 污染物擴散圖

資料來源：民生公共物聯網資料服務平台，內政部 100 公尺數值地形模型。本文以 QGIS 3.34 版繪製。

4 時過後，污染熱點的 PM_{2.5} 濃度才開始慢慢均勻化。9 時過後高屏整體空品明顯好轉，但偏北風將屏東平原北部的汙染物往南輸送，而潮州改吹西南風，殘餘的汙染物再次被往山腳下推送，導致整個屏東平原南部的汙染物濃度依舊高於高屏其他地區多個小時才慢慢下降。總言之，汙染事件發生時，區域風場的海陸風將汙染物在潮州地區反覆推送累積，難以退散。

二、「潮州延遲」效應的錯覺

整體而言，我們在研究成果中觀察到環境部測站顯示的「潮州延遲」效應，若繪製微型感測器的 PM_{2.5} 分布圖，可以看出整個沿山地區的鄉鎮如高樹、鹽埔、長治、內埔、萬巒、等地 PM_{2.5} 濃度也都很高。換言之，過去屏東平原只有環境部屏東測站與潮州測站，因此單看環境部空氣品質監測網或下載環境部測站資料繪製地圖，常常出現潮州附近一片紅（p25 圖二十三-丙(A)、戊(A)），會讓潮州人覺得只有潮州空品很差。有了微型感測器繪製的分布圖後，本文提醒屏東縣沿山鄉鎮的人都要謹慎以對。也強烈建議潮州居民在空汙事件發生時，不要在傍晚～夜間於戶外進行劇烈運動，此時通常都是潮州空品最差的時候。

三、研究限制

- (一) 關於 QGIS 繪製地圖的限制：由於環境部測站的密度不夠高，使用反距離加權法插值（內插法）計算出來的成果，會受限於實際測站點位分布的差異，在測站較稀疏的地方可能存在誤差，無法代表實際 PM_{2.5} 濃度分布。
- (二) 關於微型感測器的資料處理：由於微型感測器一季才巡檢一次，精確度不如環境部國家測站，因此我們假設環境部國家測站的數值是絕對精準數值，對比之下，我們將 R 語言計算後的微型感測器數據匯入 QGIS 地圖時，發現以下 3 個問題：
 1. 某些感測器在 PM_{2.5} 濃度超過 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 時，儀器可能發生暫時性故障，例如 p22 圖二十(丁)(B)潮州鎮的 6 顆微型感測器停擺，該鎮完全沒有數值，直到 3、4 個小時後才恢復。

2. 程式判斷感測器數值沒有問題，也算出小時平均值，但畫出圖後卻與鄰近測站的 PM_{2.5} 數值差異太大，如圖二十-(丁)鹽埔鄉的微型感測器，成為紅燈區中亮綠燈的異常狀況。
3. 當污染物退去，周圍環境部測站與其他微型感測器的 PM_{2.5} 數值均明顯下降，但有部分感測器仍持續火紅 2~3 小時，表示機器已經當機（p20 圖十九-(丁)）。

當我們以 deviceID 追尋，發現這些異常的感測器多是 SAQ-200 型號，是屏東縣 2018 年最早一批裝設的感測器，隔年 SAQ-210 較少出現異常，在此提出供屏東縣環保局做為參考。

(三) 關於 PM_{2.5} 的傳輸速率：本文曾企圖計算 PM_{2.5} 傳輸速度以印證潮州延遲時間，但因各站距離不一且風速差異大，無法採均質化計算，有待後人以污染物傳輸模型加以驗證。

陸、結論

本研究針對高屏地區近年空氣品質的變化進行深入探討，發現雖然整體 PM_{2.5} 濃度與 AQI 不良日數多年來逐漸下降，但部分區域如潮州、林園與屏東仍為高污染熱點，尤以潮州最為顯著，顯示空污並未均質改善，仍存在區域性差異與極端污染事件。

經由分析高屏地區的天氣系統，我們歸納出影響冬季空氣品質的關鍵因素：在水平尺度上，當東北季風或東風盛行時，高屏位於背風側的沉降弱風區；當北北東風或北風吹拂時，高屏地區位於尾流弱風區與下風處，污染物會由中北部甚至境外輸送至此堆積；地形繞流與背風渦旋更可能將已離開的污染物再度回捲。此外，冬季垂直尺度的低混合層高度加上逆溫現象，進一步壓縮污染物的垂直擴散空間，使污染物易在近地面累積。

藉由氣象因子與 PM_{2.5} 濃度的相關性分析，本研究發現高屏地區氣溫與 PM_{2.5} 呈現高度負相關，溫度愈低，污染愈易發生；降雨對 PM_{2.5} 的清除作用亦被證實，但「頻率」（降雨日數）比起「總量」（降雨量）更具影響力。此外，風速與風向在污染物的擴散與堆積上扮演關鍵角色，風速偏弱或風向轉變時常造成局部污染事件。

最後，本研究以 2025 年初的三場空污事件為案例，繪製污染濃度逐時空間分布圖，結合雷達回波圖、環境部國家測站與微型感測器資料，清楚還原污染的生成、累積與消散過程。我們的研究顯示，污染物從境外或中北部向南輸送至高雄平原，午後偏西的海風再將境外加小港林園的工業污染物搬運至屏東平原南部，累積在中央山脈山腳，因此潮州 PM_{2.5} 高峰較高雄測站來得晚；而夜間高雄沿海地區污染漸散，但潮州地區微弱的陸風加上地形效應，又不足以吹散污染物，讓潮州 PM_{2.5} 濃度較高雄地區晚退散，不但形成「微粒瀰漫、霾鎖潮州」的現象，污染的動態時間也形成「潮州延遲」的現象。

本研究結合氣象資料、多源感測數據與地理資訊系統繪圖，企圖建構出一套針對區域性空氣污染熱區的識別方式與分析架構，提出污染物的傳輸機制，確切指出民生公共物聯網資料於空品研究上的應用潛力，也期望本研究能為南部空污治理與健康風險評估提供參考依據。

柒、參考文獻資料

【學位論文】

1. 潘慧芳（2004）。中部空氣品質區空氣品質之時空分佈特性分析〔未出版之碩士論文〕。國立中興大學環境工程研究所。
2. 孫綦儀（2009）。台灣空氣汙染之假期效應〔未出版之碩士論文〕。嘉義大學史地學系。
3. 林佳瑩（2017）。臺灣中部山區局部環流結構特性與其對空氣汙染物傳送過程的影響〔未出版之碩士論文〕。國立中央大學大氣科學學系。
4. 林雅鈴（2018）。臺中市北屯區細懸浮微粒 PM2.5 數據分析〔未出版之碩士論文〕。國立中興大學環境工程研究所。
5. 陳柔安（2018）。PM2.5 細懸浮微粒之時間序列巨量數據分析應用於污染趨勢與源解析〔未出版之碩士論文〕。國立交通大學環境工程研究所。
6. 陳嘉惠（2018）。細懸浮微粒資料精確度校正探討—以臺北地區空氣盒子為例〔未出版之碩士論文〕。國立臺灣師範大學地理學系。
7. 張基正（2019）。細懸浮微粒組成之季節性變化以及事件日成分組成探討—以 2018 台中市為例〔未出版之碩士論文〕。國立中興大學環境工程學系。
8. 范和聰（2019）。臺灣地區細懸浮微粒 PM2.5 分布特性之研究〔未出版之碩士論文〕。國立臺北科技大學環境工程與管理研究所。
9. 葉庭宏（2021）。臺灣中部地區細懸浮微粒空氣汙染影響因素之層級研究〔未出版之碩士論文〕。國立暨南國際大學資訊管理學系。
10. 賴政維（2023）。台南科學園區之空氣品質監測站空氣品質長期變化趨勢探討〔未出版之碩士論文〕。崑山科技大學環境工程系。
11. 邱亦穎（2024）。感測器物聯網污染熱區分析及應用方法探討（以嘉義市之細懸浮微粒為例）〔未出版之碩士論文〕。國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系。
12. 林祐如（2024）。基於地理人工智慧方法與微型感測器數據進行 PM2.5 濃度未來數小時時空預測〔未出版之碩士論文〕。國立成功大學測量及空間資訊學系。

【政府出版品】

1. 屏東縣政府環保局（2024）。屏東縣空氣汙染防制計畫 113-116 年核定版，取自 <https://pse.is/7bwcm>。
2. 環保署（2020）。空氣汙染防制方案（109 年至 112 年）核定版。取自 <https://pse.is/7bwc5n>。
3. 環境部（2023）。空氣汙染防制方案（113 年至 116 年）核定版。取自 <https://pse.is/7bweas>。
4. 環境部（2023）。空氣汙染物排放量清冊-12.0 版。取自 <https://pse.is/7bx3wr>。
5. 環境部（2025）。1995-2023 年空氣品質（監測）年報。取自 <https://pse.is/7bwzck>。

【網站資料】

1. 環境部環境資料開放平臺（2025）。取自 <https://data.moenv.gov.tw/>。
2. 民生公共物聯網資料服務平台（2025）。空氣品質相關資料集。取自 <https://pse.is/7n4q98>。
3. 交通部中央氣象署（2025）。氣候觀測資料查詢服務。取自 <https://codis.cwa.gov.tw/>。
4. 環境部（2025）。環境部空氣品質監測網。取自 <https://pse.is/785ggz>。
5. 內政部（2025）。100 公尺網格數值地形模型資料-DEM。取自 <https://pse.is/7nlmv3>。
6. 環境部監測資訊司（2025 年 1 月 5 日）。1 月 6 日至 9 日兩波境外汙染物移入 留意空氣品質變化。環境部新聞專區。<https://pse.is/7bxqkh>。
7. 環境部大氣環境司（2025 年 02 月 26 日）。【空品你好!】 - 全臺空品播報。空氣汙染防制頻道。<https://www.youtube.com/watch?v=Xy1VUub6ZX8c>。

【評語】 051904

作者透過整合環境部空品測站與智慧城鄉微型感測器的資料，輔以 Python 及 R 語言進行大數據整理與統計分析，並搭配 QGIS 空間分析工具，深入研究高屏地區冬季空氣品質惡劣的原因，並剖析 2025 年三場空汙事件的時空變化與擴散機制。結果顯示，高屏地區近年整體汙染雖有改善，但仍存在著區域差異與季節差異。冬季時，受東北季風與地形影響水平擴散不佳，再加上低混合層與逆溫現象導致垂直對流缺乏，汙染物容易滯留。分析發現，高屏地區測站的溫度、降雨日數與 PM2.5 有著高度負相關。本文透過感測器資料的逐時空間分布圖，搭配風向與地形影響，說明汙染物如何透過環境風場與海陸風的傳輸機制累積於高屏地區下風處且難以擴散，導致「潮州延遲」效應的發生。

環境部空品測站與智慧城鄉微型感測器的資料差異甚大，導致兩種空間分佈非常不同。建議作者先將智慧城鄉微型感測器設置於環境部空品測站附近，進行儀器校準或比對，再進行實驗。由於智慧城鄉微型感測器可大量佈建，預期可獲得詳細的逐時空間分布圖。本研究雖有呈現風場與汙染熱點分布，但對汙染濃度變化的成因(如逆溫、邊界層穩定度、長程傳輸)，建議引入更多

文獻佐證或基礎物理概念來強化機制推論。若能進一步對照幾起具代表性的高濃度事件(例如冬季某次污染事件),進行軌跡回推與氣象條件交叉分析,並探討未來如何應用於地方預警機制,將更具應用價值。

作品海報



微粒瀰漫，誰「霾」弄潮州？

高屏地區 PM_{2.5} 時空變遷與擴散機制探討

一、研究動機

壹、前言

眾所皆知高屏地區冬季的空氣品質全台最差。從圖 1 可看出 2017 年高屏不良日數最多在潮州，一個沒有大型工業區，人口僅五萬的鄉鎮，其不良日數竟然高於石化業密集的小港、林園與大寮地區？若聚焦在 2020 年以後，潮州 AQI>100 的年平均日數依舊拔得頭籌。為何 PM_{2.5} 推估排放量最高在小港，但平均不良日數最多卻在潮州（圖 2）？這中間存在什麼樣的傳輸機制？

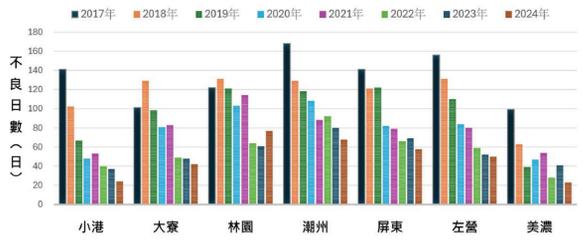


圖 1 高屏地區七個測站 2017-2024 年不良日數比較

二、文獻回顧

國內過去關於 PM_{2.5} 的研究，多使用環境部測站的數據，方法上多採統計分析，探討單一或數個測站污染物的內容、長期趨勢、污染濃度與環境因子的關聯性。前輩們的論文：

1. 多以數據做相關性分析，鮮少繪製出污染物的空間分布圖或擴散圖。
2. 時間尺度多逐年、分季或逐月，缺乏細膩的事件日逐時研究。
3. 全臺微型感測器 2020 年佈建完成，但使用該數據的研究甚少。

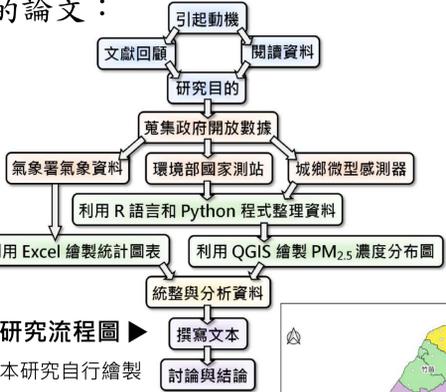


圖 3 研究流程圖

圖 3、圖 4 來源：本研究自行繪製



圖 4 七大空品區與國家測站位置圖

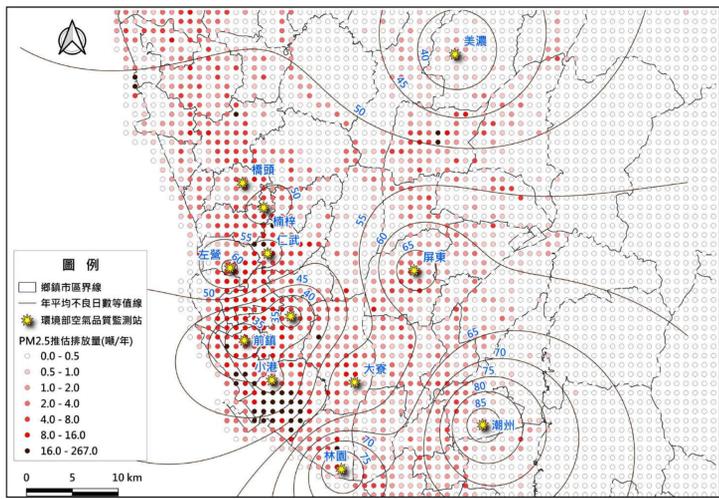


圖 2 高屏地區 PM_{2.5} 推估年排放量與 AQI 年平均不良日數等值線圖
資料來源：推估排放量取自環境部空氣汙染物排放量清冊(2023)。AQI 統計取自環境部環境資料開放平台，時間 2020 年 1 月~ 2024 年 12 月。作者以 QGIS 3.34 繪製。

貳、研究設備與器材

Acer Swift 筆電、QGIS 3.34 版本、Microsoft 365

參、研究過程與方法

(一) 蒐集政府開放數據資料：

1. 國家測站監測數據：環境部環境資料開放平台
2. 智慧空品微型感測器資料：民生公共物聯網
3. 氣象資料：中央氣象署的資料開放平台

(二) 利用 R 語言和 Python 程式整理大數據：

1. 以 R 語言從全臺每日一千多萬筆感測器數據中抓取 deviceID 與時間，過濾有問題的資料，刪除 IQR 之 1.5 倍以外的極端值，計算 PM_{2.5} 小時平均值。
2. 以 Python 計算環境部測站歷年 PM_{2.5} 月平均值。

(三) 使用 QGIS 地理資訊系統繪圖：

將程式計算後的感測器逐時資料存成 csv 檔，匯入 QGIS 中，利用反距離加權法差值繪製濃度分布圖

三、研究目的

- (一) 研究高屏地區近年來空氣品質的變化與季節差異
- (二) 探討影響高屏地區空氣品質的水平與垂直天氣系統
- (三) 檢視高屏地區氣象因素與 PM_{2.5} 濃度之間的關聯性
- (四) 剖析 2025 年高屏地區三場空汙事件日 PM_{2.5} 逐時空間分布變化，並探討原因

肆、研究結果

一、高屏地區近年來空氣品質變化與季節差異

從圖 5 各空品區 PSI 及 AQI>100 之「不良日數比例」可知：

1. 不良日數百分比有明顯下降趨勢→二十多年來空品有改善
2. 高屏空品區不良日數比例一直是最高，2023 年仍達 13%

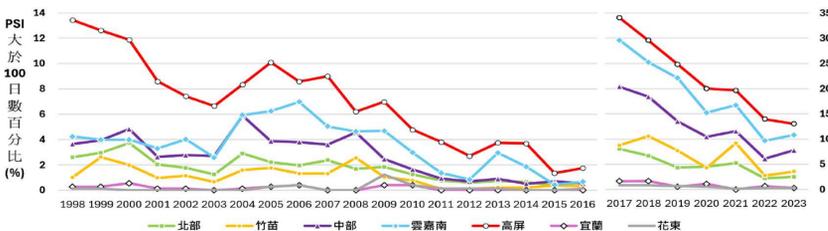


圖 5 臺灣七大空品區測站 1998~2023 年不良日數百分比

資料來源：同圖 1。備註：環保署於 2016 年 12 月將 PSI 改為 AQI 指標，故以左右雙座標呈現。

(一) 高屏空品區近年來 PM_{2.5} 的變化

1. 平均數和中位數整體呈現下降趨勢→PM_{2.5} 近年有改善。
2. 多數年份測站的中位數略大於平均數→PM_{2.5} 高於平均值的事件次數比起低於平均值的事件次數還要多。
3. 多數最大值與第 3 四分位之間距離大於最小值與第 1 四分位之間距離→PM_{2.5} 極端高值較極端低值更顯著。
4. 鄉村型美濃測站整體盒子最低→PM_{2.5} 濃度最低，空品佳。
5. 小港、大寮與林園等石化工業密集區，2021 年明顯較潮州、屏東、左營等都市型測站為高，但此後沒有明顯差異。

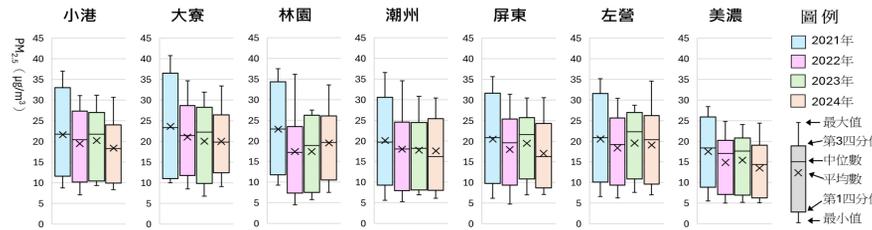


圖 6 高屏地區七測站在 2021~2024 年 PM_{2.5} 濃度之盒鬚圖

圖 6、7、8 來源：環境部環境資料開放平台-PM_{2.5} 日均值，以 python 計算出各站的月均值，再以 Excel 繪製。

(二) 高屏空品區 PM_{2.5} 的季節性差異

圖 7 顯示高屏七測站 PM_{2.5} 濃度最高均在冬季(12~2 月)，通常以 1 月達最高峰，約 30~40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。最低點均在夏季(6~8 月)，約 5~10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。圖 8 橋柱(2021/12-2022/2)空品明顯較前一年冬季(綠柱)改善之因：

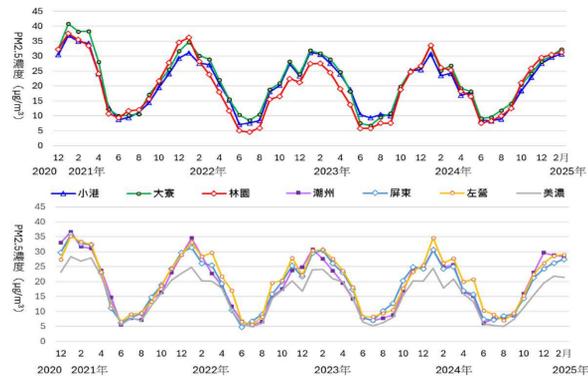


圖 7 2020/12~2025/02 PM_{2.5} 月平均濃度變化情形

圖 7、圖 8 資料來源：同上圖 6

1. 大陸因疫情限制產業生產，境外污染物明顯減少。
2. 對比 2021 年臺灣發生嚴重旱災，2022 年 1-3 月南部雨量異常多，高污染極端值驟減。

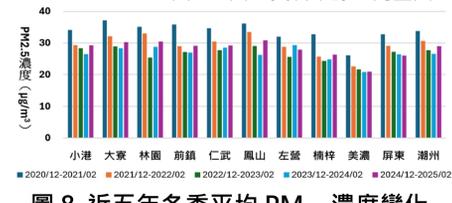


圖 8 近五年冬季平均 PM_{2.5} 濃度變化

二、影響高屏空氣品質的水平與垂直天氣系統

(一) 影響高屏地區空品的水平天氣系統

冬季冷高壓南下或東北季風盛行時，中部以北吹強風，空品較好，雲嘉南與高屏較差；若風向轉為北風或北北東風，臺南以北擴散條件佳，僅剩高屏位於尾流弱風處，易累積污染物(圖 9 甲)。但若北風伴隨境外污染物移入，則整個西部均有高濃度污染現象(圖 9 乙)。

當冷高壓東移，環境轉為偏東風(圖 9 丙)。受山脈阻隔，西部位於沉降弱風區，污染不易擴散，甚至形成背風渦旋。東風順著臺灣東南海岸，繞過恆春半島再進入臺灣海峽(圖 10)，地形繞流更加強背風渦旋的影響。



圖 10 地形繞流與背風渦旋
資料來源：2025-03-01 Windy 官網截圖，環境風場偏東風。

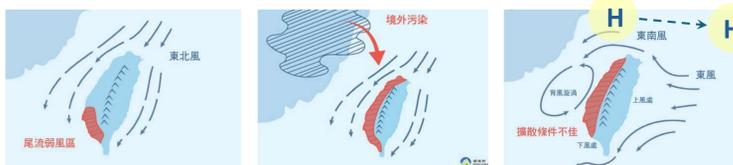


圖 9 冬季天氣系統對西部空品的影響

資料來源：圖片取自環境部空氣品質監測網-空品科普。

迎風面空氣流動較背風側佳(圖 11 甲)，上風區排放的污染物則易累積於下風處(圖 11 乙)。白天盛行海風會將污染物往內陸傳輸，而夜間陸風再次將內陸污染物往沿海推送(圖 11 丙)。

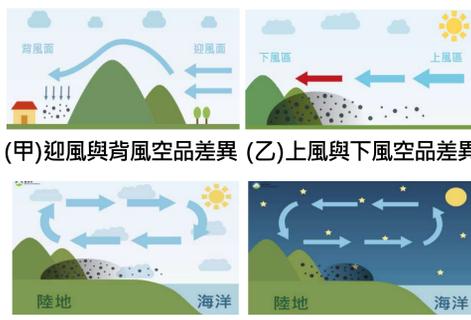


圖 11 各種地方風系對空氣品質的影響

資料來源：圖片取自環境部空氣品質監測網-空品科普

(二) 影響高屏地區空品的垂直天氣系統

- ❖「混合層」(Mixing Layer)：指的是近地面到一定高度內，氣溶膠混合較為均勻的區域，且受地表加熱與風力的影響，不斷發生上下攪動混合的狀態。
- ❖「逆溫層」(Inversion Layer)：冬季夜晚由於近地面溫度快速冷卻，導致較高處的氣溫高於近地面氣溫，與正常的大氣對流層相反的狀況。

高屏夜間輻射冷卻導致溫度下降，混合層被壓縮，垂直擴散差，若再發生逆溫現象，污染物會被困在近地處。



圖 12 混合層、逆溫層與污染物的關聯示意圖

資料來源：圖片取自環保署監資處。

三、高屏地區 PM_{2.5} 濃度與氣象因子之相關性探討

(一) 溫度與 PM_{2.5} 的相關性探討

從圖 13 月均溫與 PM_{2.5} 月平均濃度散佈圖可看出，冬季 PM_{2.5} 濃度普遍較高，多數測站超過 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；夏季溫度高且集中，PM_{2.5} 則落在 5 至 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間。春秋差異不大。

各測站的月均溫與 PM_{2.5} 濃度的判定係數 R² 皆大於 0.68，可知兩者呈現高度負相關。不良日數最多的潮州，其判定係數也最高 (R²=0.82)；空氣最佳的美濃，其判定係數為最低 (R²=0.68)。

(二) 降雨量、雨日與 PM_{2.5} 的相關性探討

圖 14(A) 顯示冬季降雨量最少，PM_{2.5} 濃度較高；夏季降雨量最多，PM_{2.5} 濃度較低。然而，降雨量和 PM_{2.5} 濃度的判定係數卻不高 (0.33<R²<0.47)，若改以圖 14(B) 降雨日數來分析，相關性明顯提高 (R²>0.58)，顯示月降雨日數比月降雨量對 PM_{2.5} 影響更顯著。

(三) 冬季風向、風速與 PM_{2.5} 的相關性探討

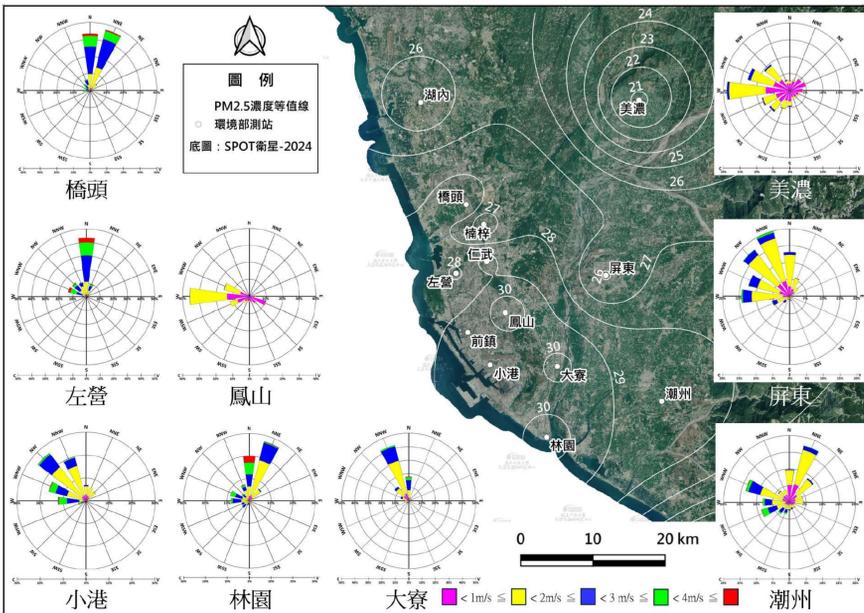


圖 13 高屏地區測站 2021-2024 年月均溫與 PM_{2.5} 濃度關係圖

圖 13、14 資料來源：中央氣象署氣候觀測資料查詢服務，擷取離空品測站最近的中央氣象署氣象站的歷史氣溫資料。本研究整理後以 Excel 繪製。

AQI 指標	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24 小時平均值
良好 0 ~ 50	0.0 - 12.4
普通 51 ~ 100	12.5 - 30.4
對敏感族群不健康 101 ~ 150	30.5 - 50.4
對所有族群不健康 151 ~ 200	50.5 - 125.4
非常不健康 201 ~ 300	125.5 - 225.4
危害 301 ~ 400	225.5 - 325.4
危害 401 ~ 500	325.5 - 500.4

表 1 空氣品質指標 AQI 與細懸浮微粒 PM_{2.5} 分級

表 1 資料來源：本研究整理自環境部空氣品質監測網。

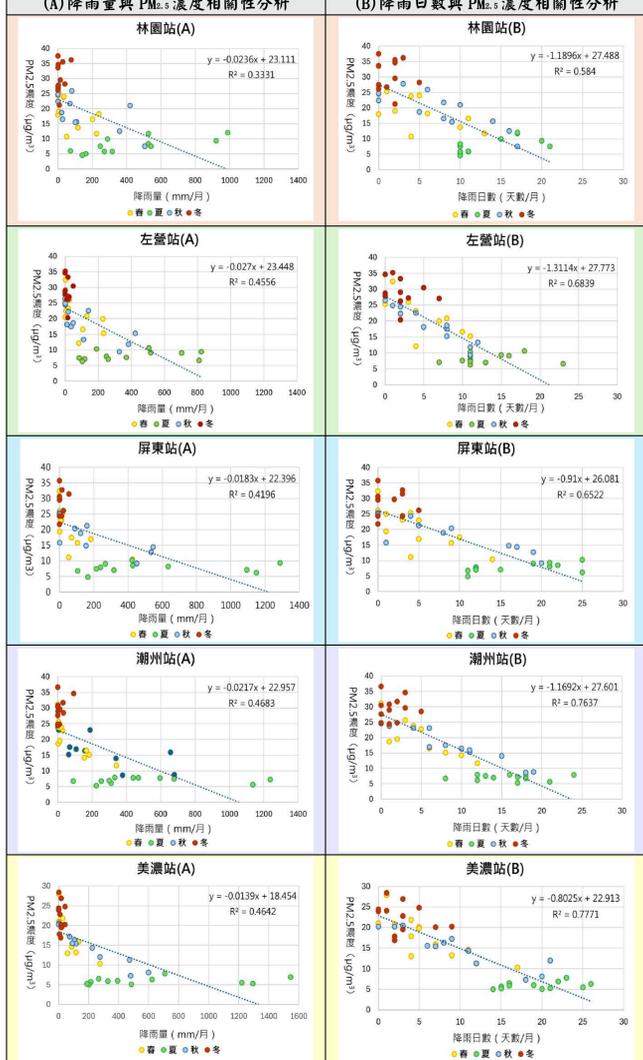


圖 14 高屏五個測站 2021-2024 年降雨與 PM_{2.5} 濃度關係圖

註：屏東站 2022 年 10 月、左營站 2022 年 1-5 月儀器故障，無雨量及雨日資料
資料來源：同圖 13。

圖 15 高屏測站 2024 年 12 月~2025 年 2 月風花圖與 PM_{2.5} 平均濃度等值線圖

資料來源：SPOT 衛星影像，環境部環境資料開放平台-AQI 歷史資料、PM_{2.5} 日均值，本研究計算整理後以 Excel 繪製。

圖 15 呈現 2024 年 12 月至 2025 年 2 月高屏 PM_{2.5} 平均濃度等值線圖，依照九個測站的風向和風速分成以下四類：

1. 橋頭、左營、林園：橋頭與左營北側地勢開闊，冬季偏北風南下，風速偏強 (>3 m/s，綠、紅色)。林園位於高屏溪出海口，北風沿河谷南下風速更增強。
2. 小港、大寮、屏東：大寮以北北西風為主，屏東北風~西風皆有，兩測站位於內陸，冬季風速較弱 (1~3 m/s，黃、藍色)，水平擴散不佳。小港雖以西北風為主，但西風與西北西風風速較強，顯示海風有明顯影響。
3. 鳳山、美濃：皆偏西風為主且風速極低 (<2 m/s，黃、粉紅)，但兩者情況截然不同。鳳山受都市化與熱島效應影響，污染物易累積；而美濃三面環山、地形開口朝南，遠離市區，外來污染不易進入，因此空氣品質較佳。
4. 潮州：風場最為複雜，北、北北東與東風約佔 36.4%，風速微弱 (<2m/s，黃、粉紅)；另有西北西、西與南南西風約佔 30.8%，風速稍強 (2~4 m/s)。潮州雖不靠海，卻明顯受偏西海風的影響，位於下風處，加上東有中央山脈阻擋，污染物易滯留。

四、從三場空汙事件剖析高屏地區的空汙歷程

(一) 第一場空汙事件 2024 年 12 月 31 日 -2025 年 01 月 01 日

12 月 31 日東北季風挾帶境外汙染物南下。

❖ 31 日傍晚~夜間(圖 16 甲)：當日 17 時起，高雄市多數測站 PM_{2.5} 濃度從 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 迅速升高，兩小時後屏東與潮州才逐漸上升。

❖ 1 日凌晨(圖 16 乙)：大寮與潮州站分別升至 62 與 69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，顯示當時西北風將汙染物往高屏南部與內陸輸送。

❖ 1 日清晨(圖 16 丙)：日出後的逆溫層抬升並轉吹海風，汙染物擴散，汙染趨緩。但部分微型感測器故障停滯。

❖ 1 日早上~午後：新的汙染物被帶至高屏地區，北高雄多個測站的 PM_{2.5} 濃度增至 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，但大寮、屏東和美濃濃度下降。

❖ 1 日午後~午夜(圖 16 丁)：多數環境部測站數值下降，僅潮州持續上升，20 時高達 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，過午夜才緩降。

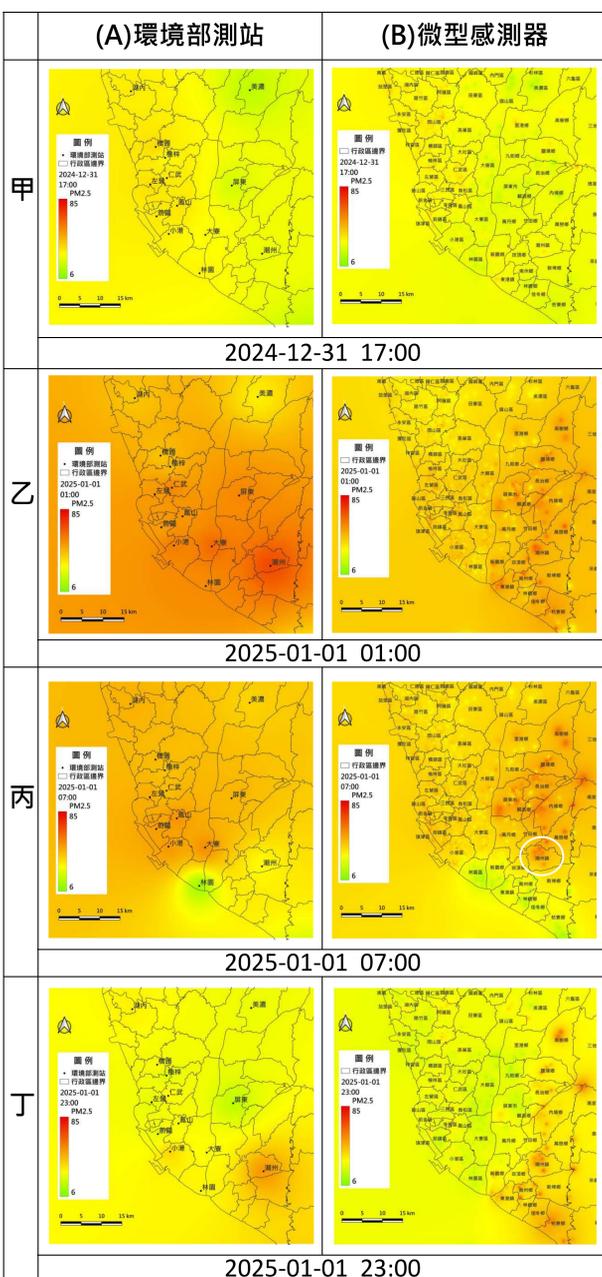


圖 16 第一場空汙事件 PM_{2.5} 濃度分布圖

(二) 第二場空汙事件 2025 年 01 月 06 日 -2025 年 01 月 07 日

本場空汙事件也是伴隨著境外汙染而來。

❖ 6 日下午~入夜：由 17-甲(B) 的圖可看出汙染物受到大樹、鳥松與鳳山之間的丘陵阻擋。18 時屏東平原的各微型感測器數值開始飆升(圖 17-乙~丁)，環境部潮州站從 19 時 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 暴增到 21 時 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，造成潮州鎮 6 個微型感測器全面停擺(圖 17-丁-B)。

❖ 1 月 7 日凌晨~午後：凌晨又一波空汙南下，0 時起橋頭、鳳山、大寮測站每隔一小時依序站上 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，3 時潮州達 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。但 6 時濃度又快速降至 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，7 時降到 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，應證日出後近地溫度上升及風場改變，汙染快速退散。(備註：1/7 受限於海報版面，無法搭配附圖呈現，故以文字詳細說明)

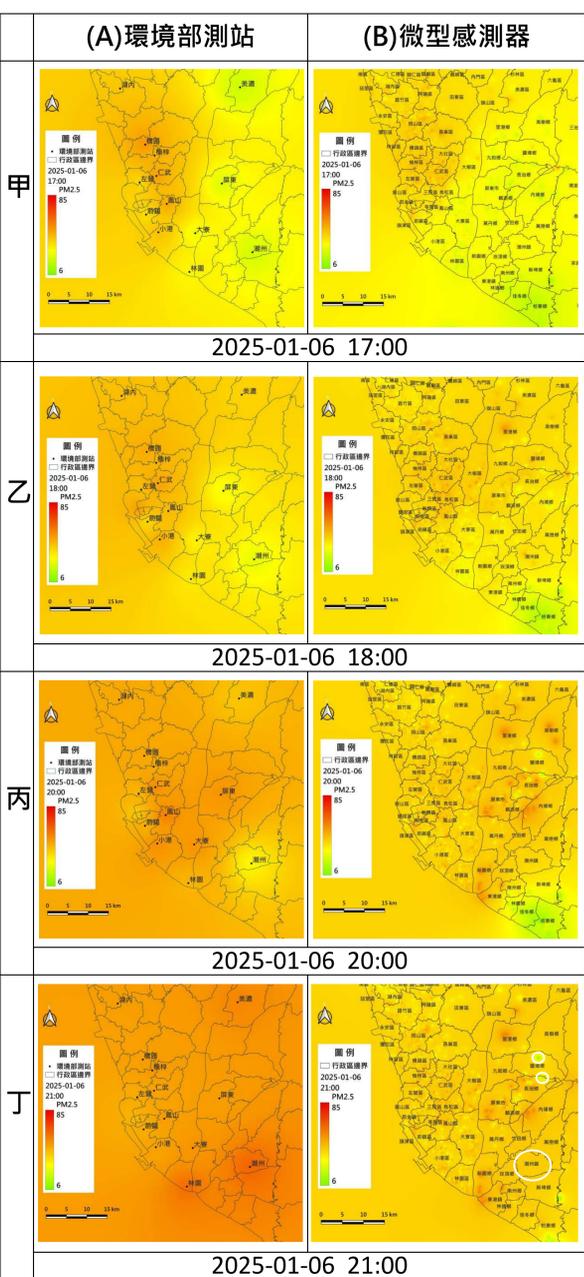


圖 16、17、20 資料來源：環境部環境資料開放平台，民生公共物聯網資料服務平台、作者以 QGIS3.34 版繪製

圖 17 第二場空汙事件 PM_{2.5} 濃度分布圖

(三) 第三場空汙事件 2025年02月26日 - 2025年02月28日

1. 事件日的垂直大氣結構

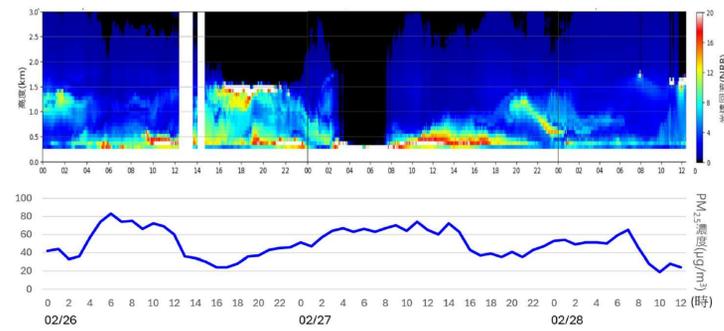


圖 18 微脈衝雷射雷達回波圖與 PM_{2.5} 濃度比較圖(左營站)

資料來源：環境部空氣品質監測網-任務監測-大氣遙測、環境資料開放平台-AQI 歷史資料、本研究以 Excel 繪製。(備註：光達回波圖的橫軸為時間，左縱軸為距地高度 (km)，右縱軸代表大氣散射強度的相對值。NRB 數值越高代表氣膠濃度越高，圖中越接近紅色。白色是因為雷射光遇到雲，導致反射訊號強。NRB 圖中亮色與暗色交界處，即為混合層頂。)

26 日凌晨的空品尚未惡化，混合層頂約在 1.5 公里高處。自 4 時起 PM_{2.5} 開始飆升，氣膠濃度升高至 16NRB 以上 (紅色)。午後 14 至 17 時，氣膠垂直擴散，PM_{2.5} 濃度下降。

27 日凌晨 2 時疑似發生強烈下沉逆溫，距地面 0.3 公里出現強回波，PM_{2.5} 亦高。傍晚後風場轉變，混合層頂回升至 1.5 公里，PM_{2.5} 濃度隨之下降。

28 日凌晨 PM_{2.5} 再度升至約 50µg/m³，但氣膠濃度明顯減弱。早上 9 時後 PM_{2.5} 降至 30µg/m³ 以下，混合層頂逐步升高，11 時回到約 1.7 公里高度。



圖 19 環境部左營與潮州測站 PM_{2.5} 濃度逐時比較

資料來源：環境資料開放平台-AQI 歷史資料、本研究以 Excel 繪製。

我們無法直接拿左營的光達回波圖來解釋潮州的大氣結構，因為當污染物南下，潮州有很明顯的延遲時間(圖 19)，我們稱為「潮州延遲」效應。

2. 事件日的水平汙染擴散

❖ 26 日凌晨~早上：
(圖 20 甲、乙)高屏測站 PM_{2.5} 濃度清晨時由北往南快速升高，形成高濃度核心，屏東測站 7 時達 84µg/m³。

❖ 26 日午後~入夜：
中午過後各測站 PM_{2.5} 迅速降至 50 µg/m³ 以下，直到 16 時後潮州、大寮汙染再次惡化。(圖 20 丙)

❖ 27 日凌晨~中午：
鳳山一帶汙染惡化，PM_{2.5} 飆升至 80µg/m³ 以上。(圖 20 丁)

❖ 27 日午後~入夜：
高雄平原測站 PM_{2.5} 濃度迅速下降。離海近的測站降至 50µg/m³ 以下，但潮州卻反而上升，20 時達 77µg/m³

❖ 28 日凌晨~早上：
凌晨時高雄地區空汙較嚴重，潮州站在 7 時降至 40µg/m³ 以下。9 時過後高屏整體才降至 40µg/m³ 以下。

2/27 午後~2/28 早上：圖 20 篇幅有限，詳細逐時分布圖請見圖 21。

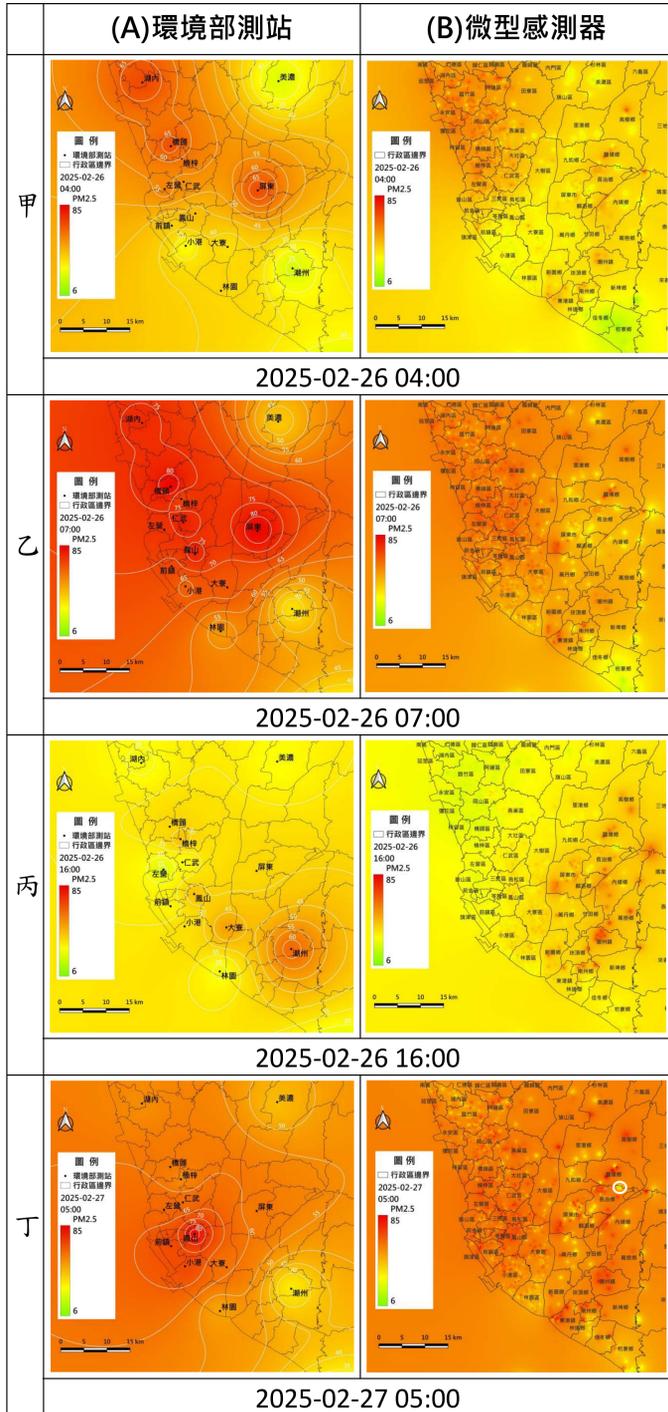


圖 20 第三場空汙事件 PM_{2.5} 濃度分布圖 資料來源：環境部環境資料開放平台、民生公共物聯網資料服務平台、作者以 QGIS 3.34 繪製

伍、討論

一、「潮州延遲」效應的原因

以第三場事件為例，海上吹來的西北風(風速>2 m/s)將境外污染物與小港林園石化區的排放往東輸送，累積在中央山脈山腳下(圖 21-A)，使潮州 PM_{2.5} 高峰時間較高雄區來得晚，退散也晚。17 時起高雄平原空品逐漸好轉(圖 21-B)，風向轉為偏北風但風速減弱，屏東平原汙染熱點增加且濃度升高(圖 21-C)。21 時轉偏東北的陸風，但風力微弱不足以驅散污染物(圖 21-D、E)。28 日清晨 6 時汙染開始均勻化(圖 21-F)。9 時後空品改善，但北風將汙染往南帶，加上潮州轉吹西南風，使少量汙染物再次累積於山腳。海陸風反覆推送導致汙染物滯留潮州，延遲退散。

二、「潮州延遲」效應的錯覺

過去屏東平原只有環境部屏東與潮州測站，以環境部測站資料繪製地圖常出現潮州附近一片紅(圖 16-丁-A、圖 20-丙-A)，產生只有潮州空氣差的錯覺，我們加入微型感測器資料後，驚覺整個屏東沿山鄉鎮 PM_{2.5} 濃度也都很高。本文提醒潮州與沿山鄉鎮居民，在空汙事件發生時避免在傍晚~夜間進行戶外運動。

三、研究限制

1. 環境部測站密度低，GIS 內插繪圖恐無法代表實際 PM_{2.5} 濃度。
2. 微型感測器巡檢頻率低，在 PM_{2.5} 高汙染時可能當機，汙染結束後依然呈現高數值(圖 16-丙-B)，該小時無數據(圖 17-丁-B)，或有數據但明顯異常(圖 20-丁-B)，異常型號多為 SAQ-200。
3. 因各測站距離不一且風速差異大，尚無法計算 PM_{2.5} 傳輸速率。

陸、結論

高屏地區近年空汙雖有改善，但仍存在著區域與季節差異。冬季時，受東北季風與地形影響，高屏位於尾流弱風或背風下沉區，水平擴散不佳；再加上夜間混合層低與逆溫導致垂直對流缺乏，汙染物更易滯留。分析發現，高屏測站的溫度、雨日與 PM_{2.5} 有著高度負相關。最後，我們分析今年的三場空汙事件，透過感測器及雷達回波資料，還原空汙從發生到消散的過程，並發現偏西的海風、地形效應共同導致「潮州延遲」現象的產生。本研究結合氣象署、環境部與微型感測器資料並以 GIS 繪圖，透過空汙熱區的辨識提出汙染物的傳輸機制，期望能提供未來空汙治理參考。

柒、參考文獻

【學位論文】(以下僅列出部分重要參考論文為代表)

1. 潘慧芳(2004)。中部空氣品質區空氣品質之時空分佈特性分析。國立中興大學環境工程研究所碩論。
2. 林佳瑩(2017)。臺灣中部山區局部環流結構特性與其對空氣汙染物傳送過程的影響。國立中央大學大氣科學系碩論。
3. 林雅鈴(2018)。臺中市北屯區細懸浮微粒 PM_{2.5} 數據分析。國立中興大學環境工程研究所碩論。
4. 陳秉安(2018)。PM_{2.5} 細懸浮微粒之時間序列巨量數據分析應用於汙染趨勢與源解析。國立交通大學環工所碩論。

【網站資料】(僅列出重要數據來源網站為代表)

1. 環境部環境資料開放平台(2025)。取自 <https://data.moenv.gov.tw/>。
2. 民生公共物聯網資料服務平台(2025)。空氣品質相關資料集。
3. 交通部中央氣象署(2025)。氣候觀測資料查詢服務。取自 <https://codis.cwa.gov.tw/>。
4. 環境部(2025)。環境部空氣品質監測網，取自 <https://pse.is/785ggz>。

【政府出版品】(以下僅列出較多的政府出版品為代表)

1. 環境部(2023)。空氣汙染防治法(113 年至 116 年)核定版。取自 <https://pse.is/7bweas>。
2. 環境部(2023)。空氣汙染物排放量清冊-12.0 版。取自 <https://pse.is/7bx3wr>。
3. 環境部(2025)。1995-2023 年空氣品質(監測)年報。取自 <https://pse.is/7bwzck>。
4. 屏東縣政府環保局(2024)。屏東縣空氣汙染防治計畫(113-116 年)核定版，取自 <https://pse.is/7bwcrn>。

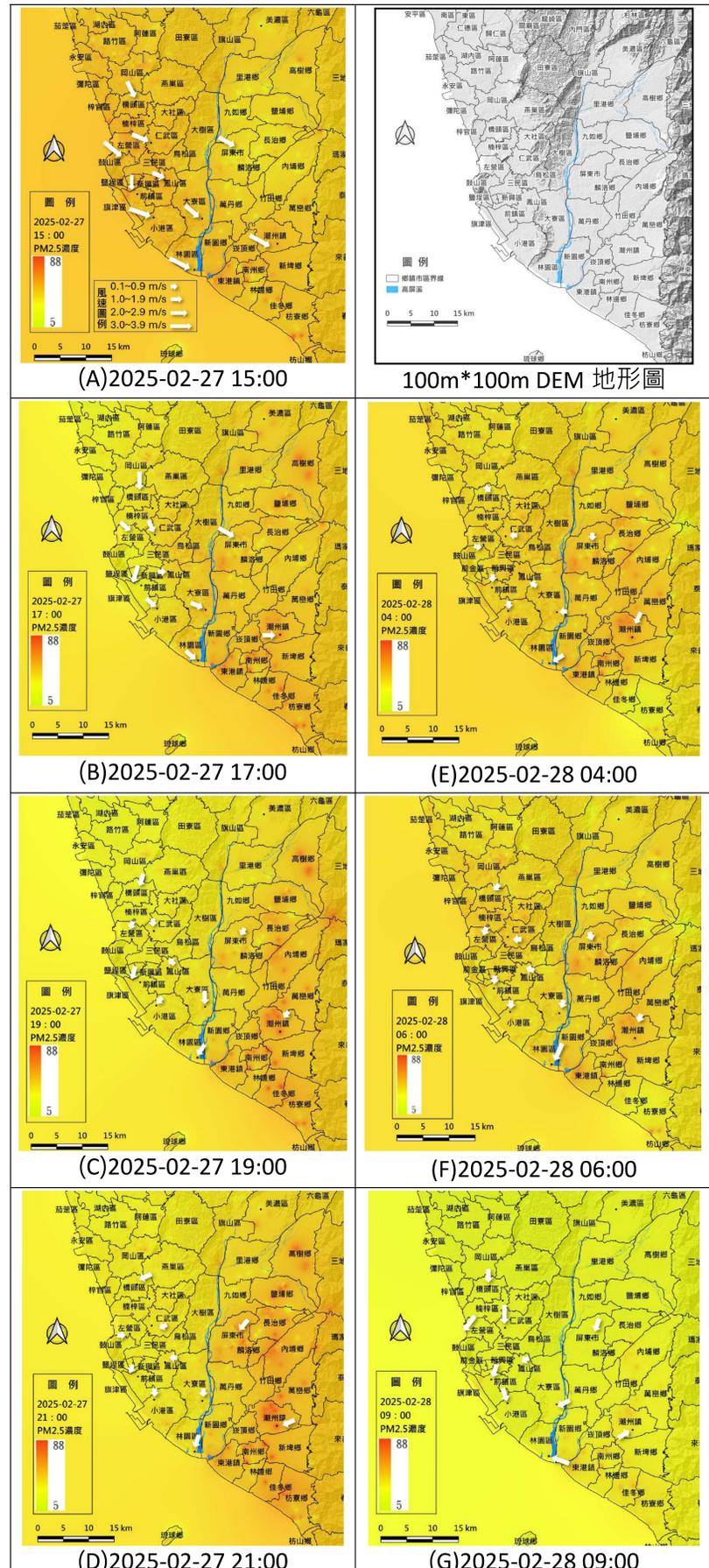


圖 21 第三場空汙事件風速、風向、PM_{2.5} 與數值地形分布圖

資料來源：內政部 100m 數值地形模型、環境部環境資料開放平台、民生公共物聯網資料服務平台。本研究以 QGIS 3.34 繪製。