船舶航行對沿岸及港域空污預測模式之建立

吳羕林	<b>卧立成功大擘環境工程學系教授</b>
赖信志	長榮大學科技工程與管理學系副教授
幫德明	崑山科技大學資訊傳播系財理教授
張鴻長	<b>卧立成功大劈環境工程劈泵研究助理</b>
楊紫元	<b>卧立成灯大劈環境工程劈泵研究助</b> 理
邱疗芳	立道部運輸研究所港灣技術研究中心主任
蔣敏玲	· 过 部 運 輸 研 乳 所 港 灣 技 術 研 乳 日 心 副 研 乳 晶

近年空污議題受到各界重視,本研究結合船舶自動識別系統(Automatic Identification System, AIS)資料臺灣主要 商港及周遭海域船舶排放量資料,並進 行模擬分析港埠相關活動對於臺灣沿岸 地區與港區附近之空氣品質影響,尤其 是區分一次原生性污染物與二次衍生性 污染物之影響;以 Models-3/CMAQ 模 式模擬分析其對於臺灣地區之空氣品質 影響,以環保署排放清冊(Taiwan Emission Data System, TEDS)建置之臺 灣地區排放量為基礎,再以AIS 搭配勞 氏資料庫建置沿海區域之船舶排放量, 以分析船舶排放空氣污染物對臺灣地區

## 摘要

地區五大港口排放影響,其中污染物種 細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)介於 0.31% ~ 5.88% 之間,最高為小港測站之 5.88%;8 小 時平均臭氧(O<sub>3</sub>)介於 -11.13% ~ 1.45% 之間,最高為仁武測站之 1.45%;硫氧 化物(SO<sub>2</sub>)介於 0.67% ~ 33.5%之間,最 高為前鎮及復興測站之 33.5% ; 氮氧化 物(NOx)介於 0.29% ~ 25.1% 之間,最高 為萬里測站之 25.1%。研究成果可提供 交通部、航港局與港務公司或環境保護 署在研擬港埠及沿岸地區空污對策之參 考,以建立綠色港口,使之符合國際海 事組織(IMO)與歐洲海港組織(ESPO)規 範,提升港口國際競爭力,並確保環境 永續發展。

國內港埠地區空氣污染物排放,長 期以來未被列入環保管制項目重點,但 依據國內外研究顯示,港區空氣污染物 排放量對該區域污染排放總量的佔比頗 高,尤其是硫氧化物(SO<sub>2</sub>)與氮氧化物 (NOx)最為顯著。根據環保署最新之全 國空氣污染物排放清冊顯示港埠相關活 動於 102 年之 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NOx、 NMHC 與 CO 排放量佔全國排放量之比 例分別為 1.54%、2.66%、29.3%、7.91%、 0.26%與 0.56%。

世界各國經濟活動互動頻繁且合作 密切,其遠洋船舶肩負貨運或客運在國 際間交流的重任,但伴隨而來的空氣污 染物排放問題也愈形嚴重,再加上港口 內運輸工具船舶、裝卸設備與重型卡車 等污染排放問題,已不容忽視,應分析 其對臺灣空氣品質之影響,提供交通 部、航港局與港務公司或環境保護署在 研擬港埠及沿岸地區空污對策之參考。

本研究應用環保署之排放清冊 TEDS 的排放量資料與 AIS 推估臺灣海 域之船舶排放量,同時透過氣象局 WRF 模式所提供之氣象風場資料,採 CMAQ 模式用來模擬臺灣海域船舶與基隆港、 臺北港、臺中港、高雄港及花蓮港等主 要港口之原生性與衍生性污染物對於臺 灣本島的貢獻比例。

## 二、研究目的

為提昇環境品質及維護國人健康, 環保署於101年5月14日增訂細懸浮微 粒(PM<sub>2.5</sub>)周界空氣品質標準之24小時 值與年平均值分別為35µg/m<sup>3</sup>與15 µg/m<sup>3</sup>;而為了因應細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>) 之管制,環保署於104年11月17日頒 布「空氣品質嚴重惡化緊急防制辨法」 部分修正。並於105年8月5日公告各 縣市之空氣品質防制區劃分結果,結果 為除了臺東縣以外,其餘所有縣市均為 細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)之三級防制區,亦即 均未達細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)之周界空氣品 質標準,而各項管制措施已於105年8 月5日開始生效;顯然空氣品質惡化已 成為國內目前急待解決之重要課題。

因此,本研究的目的即在建立船舶 航行對沿岸及港域空污預測模式,後續 一步供相關單位擬定防治對策,以提升 國內港口的國際競爭力,並確保環境永 續發展。

# 三、文獻回顧

# 3.1 WRF (Weather Research and Forecast)氣象模式

本研究採用WRF氣象模式來提供 空氣品質模式所需的氣象初始場, WRF 是一套中尺度數值天氣預報系 統,主旨在同時滿足大氣研究和天氣 預報上的需求,它具有兩個動力核 心、數據同化系統和有利於平行運算 與系統可延展性的軟體架構,此模式 提供了廣泛的跨尺度氣象應用,從幾 十公尺到幾千公里。WRF 的開發起始 於 1990 年代後期,主要由美國大氣研 究中心(NCAR)與美國海洋和大氣管理 局(NOAA)之間的合作夥伴關係,美國 氣象環境預報中心(NCEP)和當時預報 系統實驗室(FSL),空軍氣象局 (AFWA),海軍研究實驗室,奧克拉荷 馬大學和美國聯邦航空管理局(FAA) 共同研發。WRF 模式可以根據實際的 數據資料(觀察、分析)或理想化條件來 生成大氣模擬,WRF 模式提供天氣預 報的靈活性與有計算效率的平台。

WRF 的兩個動力核心是依據不同 目的所設計的,分別為 ARW (Advanced Research WRF) 及 NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model)。 雨 者在 WRF 架構上是相同的,但所著重 的地方不同。ARW 是由 NCAR 的 MMM( Mesoscale and Microscale Meteorology Division)所研發,靜力穩 定模式能夠應用於理想個案模擬、參 數化研究、資料同化研究、即時數值 天氣預報與分析、颱風模擬、區域氣 候研究、偶合模式應用及教學等,而 NMM 則由 NCEP 所研發, 著重於非靜 力穩定與即時預報,可應用於即時數 值天氣預報與分析、參數化研究、偶 合模式應用及教學等。相關更詳細之 WRF 模式介紹、動力架構與物理過程 介紹可參考(Skamarock et al., 2008)。

WRF-ARW 主要之物理過程可分 為微物理、積雲參數化、行星邊界層、 地表過程與輻射。而 WRF-ARW 的資 料 處 理 流 程 為 (1)WPS (WRF Preprocessing System)、(2)FDDA(Fourdimensional data assimilation)、(3)PostProcessing & Visualization Tools •

WPS 包含定義模式模擬範圍、網 格層數、網格格點及地形投影法等, 並將模式中各種不同的地理資料內差 至模式網格的 geogrid,由其他區域模 式或全球模式產生的 GRIB 格式氣象 場,萃取出所需的氣象資料,並以較 簡單的格式寫入另一暫存檔的 ungrib,及由 ungrib 所產生的暫存檔 中,將氣象場內差至 geogrib 所定義的 網格點,作為模式的初始場及邊界條 件的 metgrid 。WRF-DA 可將傳統或 非傳統觀測的實際資料,納入 WPS 所 建立的模式初始場,此外也可將實測 資料與 WPS 所建立的初始場進行對 比,建立較為符合實際情形或較佳的 模式初始場,進而增加模式預報的準 確度。ARW Solver 為 ARW 的主程式, 由數個可進行理想個案模擬、真實資 料模擬以及數值積分之程式所組 成,所有的動量、能量之物理或化 學過程運算以及時間、空間積分均 位於此部分。Post-Processing & Visualization Tools 為WRF 輸出資料的 後處理過程,將模式的輸出結果經由 內差後,轉換為可讓不同繪圖軟體所 讀取的格式或利用 MET (Model Evaluation Tools)處理輸出結果,以進 一步來做對比驗證。

四維數據同化(Four-dimensional data assimilation(FDDA)是一種在模擬 分析或觀測分析趨勢加入一個或多個 診斷方程式,主要分為兩種網格納進 法 (Grid nudging) 和 觀 測 納 進 法 (observation nudging),網格納進法利用 全球氣象資料的初始場資料和測邊界 資料的分析場資料進行所有網格調整。觀測納進法主要是利用地面、探空、船舶等觀測資料加入模式初始場進行調整,調整過程將實際觀測的資料和解析度較粗的全球氣象資料進行時空的融合。

對於複雜的中尺度系統而言, WRF 氯象模式的模擬可彌補觀測資料 上時、空解析度的不足,對於區域的 預報有相當好的能力。經過在邊界層 參數化,積雲對流參數化以及四維資 料融入等各方面的改進,目前此模式 已廣泛地被國內外氣象與空氣品質模 式之模擬研究。Li 等人在美國德州的 春季進行 WRF-CMAQ 模式研究垂直 臭氧結構,在WRF模式模擬溫度和風 場結果使用客觀分析(使用方法有相關 係數, IOA, RMSE, 絕對值誤差, 偏 差量),其結果誤差表現良好(Li &Rappengluck, 2014)。其他文獻在東亞 地區使用 WRF-CAM5 進行模擬評估 氯象結果以及 CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, 再對污染 物化學變化影響的溫度、濕度、風場 和降水及雲變量等氣象因子進行解 析,統計與地面測站的觀測值誤差溫 度在偏差量為-1.0℃,水氣為 0.04g/kg, 風速在 0.3m/s, 降水偏差 0.4mm/day(He et al., 2017), Zhao 等人 評估中國地區的 PM2.5 來源,使用了 WRF 及 CMAQ 氣象模式和空氣品質 模式評估,在WRF模式分析了風速、 風向、溫度及濕度,在溫度月平均充 分被 WRF 模式所預測,偏差(Bias)與 絕對值誤差(GE)符合建議的性能規範 (Bias 在≤±0.5, GE 為≤2), 風速部份大 致落在模式性能建議的標準(Bias 在

±0.5m/s 內, RMSE 在 2m/s 內)(Wang et al., 2015), 顯示 WRF 模式可掌握區域 大氣環境。

### 3.2 Models-3/CMAQ 模式

為了同時分析原生性與衍生性空 氣污染物之影響,本研究選用之空氣 品質模式為 Models-3/CMAQ, 此模式 為美國第三代空氣品質模式的簡稱, 並經我國環保署認可。此一模式之最 大特色即在『一個大氣』 (One-Atmosphere)的觀念。傳統的模式 大多僅針對單一物種或單相物種進行 模擬,例如 RADM2 (Regional Acid Deposition Model)主要針對氣態之光 化物種而 RPM (Regional Particulate Model)則主要針對固態污染物進行模 擬。然而實際的大氣中,所有的物種 均具有緊密的相關性,例如與臭氧累 積具有高相關性的 NOx,其最終產物 為HNO3,而HNO3實際上與酸沈降及 懸浮微粒之硝酸鹽(nitrate)成分相關性 甚高;另一個與臭氧累積有關的 VOCs 物種,在光化的過程中,亦會產生有 機碳的固態成分;此外,在氣固相轉 换的過程中,由於形成的粒狀物粒徑 均甚小,亦容易阻礙光線的行進而造 成能見度的問題,凡此均為一個複雜 的大氣所造成。因此,在白天主要由 OH 自由基所引發的光化反應機制 中,不但可造成臭氧問題,亦與懸浮 微粒、酸性沈降、能見度問題具有密 不可分的相關性, Models-3 即是建立 在一個大氣的架構上所開發的模擬工 具,本研究之多污染物成分的綜合分 析將以空氣品質模式 Models-3/ CMAQ 同時模擬分析。

Models-3/CMAQ 為三維的空氣品 質模式,屬於網格模式的一種,此網 格模式的特色為使用多層次網格,模 式中各網格之設定基準如表1,圖1為 本研究之 Models-3/CMAO 模擬分析的 區域,其主要的模擬區域為 D4 區,網 格大小為 3km\*3km, 而 D3 網格則為 9km\*9km,至於 D4 區域的邊界濃度則 以D3 模擬之結果代入,此一網格規劃 即為多層次網格。使用多層次網格具 有相當多的優點,由於主要的模擬區 域為 D4 區,其範圍雖然不大,然而為 求模式結果的準確性,常需要擴大模 擬區間,不過若擴大的模擬區間中, 網格仍以 3km\*3km 大小進行模擬,由 於巨大的網格點將導致電腦計算時間 的倍增,使模擬工作難以快速的完 成,而缺乏模式的時效性。若使用多 層次網格模式,則可將網格點簡化, 且由於離模擬區域較遠的網格對於模 擬區域的影響較小,因而加大網格大 小對於模式的準確度不致造成影響,

故可兼顧模擬時的 CPU 處理器時間及 準確性。此外, Models-3/CMAQ 使用 者介面為傳輸速度較快的 I/O API (Input/Output Application Programming Interface)介面,對於模式所需資料庫的 讀取與儲存均較傳統的三維模式快速。



圖1 Models-3 多層次網格示意圖

		Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
	Vertical Layer	45	45	45	45
大	Grid Size	91 × 91	166 × 169	$223 \times 223$	223 × 223
氣	FDDA	Yes	Yes	Yes	No
<b></b> 存 上	Land use	20	20	20	20
式	PBL	YSU	YSU	YSU	YSU
	Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
空	Vertical Layer	6	15	15	15
品 Ht	Grid Size	70  imes 80	70  imes 80	70  imes 80	90 × 135
<b></b> 々	Aerosol Mod	Aero6	Aero6	Aero6	Aero6
式	Chemical	CB05	CB05	CB05	CB05

表1 本研究模擬模式採用的設定基準

Models-3/CMAQ 之主要運算核心 稱為 Community Multi-Scale Air Quality(CMAQ) modeling system,經由 WRF 取得之氣象資料與 SMOKE 運算 之排放量資料,最後均輸入 CMAQ 中,以進行化學機制之模擬。整個模 擬工作可約略分為三大部分:

1.氣象模組:

CMAO 以廣泛使用的 WRF 模式 作為氣象資料的提供者,詳 3.1 小 節。WRF 除了提供氣象資料外,亦 提供模式所需要的土地利用型態及 巢狀網格資訊。在 I/O API 檔案的轉 換中, CMAQ 以 Meteorological-Chemistry Interface Processor(MCIP) 模組進行 WRF 資料之轉換,在 MCIP 模組中可重新計算混合層高度。以 MCIP 轉換後的氣象資料可提供排放 資料庫處理及最後化學機制模擬時 之用。MCIP 模組為 Models-3 的首要 工作,這是由於經過 MCIP 產生的檔 案為模式所需要氣象資料檔,裡面包 含有雲層厚度資料、風速風向、土地 利用型態、及地形高層資料等等資 訊,這些資訊為後續的排放源處理 (SMOKE)及模式核心模擬(CCTM) 所必須使用的參數。

2.排放量資料庫:

CMAQ 在排放量資料處理中, 允許 Models-3 Emission Processing and Projection System (MEPPS)模組 或 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions System (SMOKE)模組進 行處理。SMOKE 的處理分為四部 分:點源、線源、面源及生物源,點 源部分除了較面源多考慮了氣團的 煙流上升效應外,另外加入氣團對於網格化的影響(Plume in Grid);在移動源(線源)的模擬情況中,SMOKE 可將移動源分兩種輸入模式進行模擬,第一種使用機動車輛行駛里程數 及車輛型態進行模擬(MVK),第二種 則直接以排放量進行模擬。

3.化學傳輸模擬:

CMAQ Chemical-Transport Modeling System(CCTM)模組為整個模式的處 理核心,CCTM 包含擴散、傳輸、化 學反應機制、雲程序及氣膠反應等等 模組。CMAQ 為主要的 Models-3/ CMAQ 核心,其使用介面為 I/O API,具有可額外增加模組的特性, 使模式具有擴增性及未來性。至於 CMAQ 的機制模組則建立於 CCTM (CMAQ Chemical- Transport Modeling System)中,CCTM 具有可增加及調 整不同機制的功能,例如現階段空氣 品質模式主要的模擬機制為CB-05、 CB-IV 及 RADM2,使用 CCTM 即可 隨時轉換成各種機制,而無須改變原 始程式碼。此外,於CCTM 中尚可加 入雲模組、擴散與傳輸模組、氣膠模 組及煙模組式(Plume in Grid)等等,而 這些模組是可以選擇的,亦即模式操 作者可以選擇不同的雲模組或是氣 膠模組來進行模式操作者的模擬工 作,以利於模式在不同區域的模擬。

輸出介面部分:由於 Models-3 的輸出檔亦為 I/O API 介面,因而資 料的使用需要經過轉換,轉換後的資 料可以 SAS 或其他相關的統計軟體 進行分析,或直接以 PAVE 等繪圖軟 體進行資料轉換。

77

本研究使用環保署公布 TEDS 9.0 排放清冊資料,以 Models-3/CMAQ 模 擬分析 2013 年各空品區之點源、線源與 面源的粒狀物 (particle)、硫氧化物 (SO<sub>2</sub>)、氮氧化物(NOx)與非甲烷碳氫化 合物(NMHC)對於細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)及 臭氧(O<sub>3</sub>)濃渡之影響,為確保模擬之準 確性,其結果須符合環保署公告之模式 性能評估規範,以下將說明其規範值及 性能評估結果。

依據環保署 2015 年公告之模式模 擬性能評估規範,於模擬 PM<sub>10</sub> 或 PM<sub>2.5</sub> 時,需同時比較 PM<sub>10</sub> 或 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>及 NO<sub>2</sub> 濃度之模擬結果與觀測值;於模擬 O<sub>3</sub>時,需同時比較 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>及 NMHC 濃度之模擬結果與觀測值。其中懸浮微 粒(PM)之模式模擬性能評估規範如表 2 所示,其細懸浮微粒之配對值分數偏 差(MFB)介於-35% ~ 35%之間,配對值 絕對分數偏差(MFE)則為小於 55%,且 相關係數 R 要大於 0.5;而 SO<sub>2</sub>與 NO<sub>2</sub> 之配對值分數偏差(MFE)則為小於 55% ~ 65%之間,配對值絕對分數偏差(MFE) 則為小於 85%,且相關係數 R 要大於 0.45。

表2 懸浮微粒之模式模擬性能評估規範

	項目	MFB	MFE	R值
懸浮微粒	PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	±35%	<55%	0.50
	$SO_2$ , $NO_2$	±65%	<85%	0.45

臭氧(O<sub>3</sub>)之模式模擬性能評估規範 則如表 3 所示,其臭氧之非配對峰值常 化偏差(MB)介於-10%~10%之間,配對 值常化偏差(MNB)介於-15%~15%, 配 對值絕對常化誤差(MNE)則為小於 35% 且相關係數 R 要大於 0.45; 而 NO<sub>2</sub>與 NMHC 配對值常化偏差(MNB) 介於 -40%~50%, 配對值絕對常化誤差 (MNE)則為小於 80%且相關係數 R 要大 於 0.35。

表3 臭氧之模式模擬性能評估規範值

臭氧	項目	MB	MNB	MNE	R 值
	$O_3$	± 10%	± 15%	35%	0.45
	NO <sub>2</sub> , NMHC	-	-40%~50%	80%	0.35

進行上述定量指標分析時,除模擬 區域範圍內全部測站之平均結果須符合 各定量指標標準值外,各指標於模擬區 域範圍內符合其標準值之測站數須達到 該模擬區域範圍內總測站數之 60%以 上。

本研究模擬期程為基準年 2013 年 之 TEDS 9,故首先說明 2013 年之模式 模擬性能評估結果,並區分成細懸浮微 粒與臭氧 2 個案例分別分析。表 4 為春 秋雨季細懸浮微粒之模式模擬性能評估 結果,其中 PM<sub>2.5</sub> 全臺灣之配對值分數 偏差為 -6.3%,配對值絕對分數偏差為 38.1%,相關係數則為 0.683;且 SO<sub>2</sub> 與 NO<sub>2</sub>之配對值分數偏差、配對值絕對 分數偏差與相關係數依序分別為 -19.8 %、59.5%、0.577 及 -23.9%、43.8%、 0.616。

表5及表6為臭氧之模式模擬性能 評估結果,其中O3全臺灣之配對值分數 偏差為11.0%,配對值絕對分數偏差為 24.3 %,相關係數則為 0.553;且 NO2
與 NMHC 之配對值分數偏差、配對值
絕對分數偏差與相關係數依序分別為

-5.6%、57.8%、0.532及60.5%、89.9%、0.408。非配對峰值常化偏差則為12.5%,相關係數0.646。

表4 細懸浮微粒之模式模擬性能評估結果

	MFB	符合站數比	MFE	符合站數比	R	R 符合比例
PM2.5	-6.3%	84.9%	38.1%	93.2%	0.683	83.6%
SO2	-19.8%	93.2%	59.5%	87.7%	0.577	12.3%
NO2	-23.9%	84.9%	43.8%	94.5%	0.616	71.2%

表5 臭氧之模式模擬性能評估結果(1/2)

	MNB	符合站數比	MNE	符合站數比	R	R 符合比例
O3	11.0%	59.2%	24.3%	95.8%	0.553	90.1%
NO2	-5.6%	76.7%	57.8%	93.2%	0.532	89.0%
NMHC	36.5%	40.5%	69.9%	45.9%	0.408	75.7%

表 6 臭氧之模式模擬性能評估結果(2/2)

	MB 符合站數比		R	R 符合比例
03	8.5%	35.2%	0.646	94.4%

# 五、研究結果

本研究於分析基隆港、臺北港、臺 中港、高雄港及花蓮港等臺灣5大主要 商港與沿海航行船舶排放之空氣污染物 對臺灣地區空氣品質之影響時,係以基 本案例與無排放源案例之差值分析各排 放源之影響,而將探討之成份包括原生 性 SO<sub>2</sub>與 NOx 及衍生性細懸浮微粒與 臭氧等。為配合 TEDS9.0 資料庫之時間 (2013 年),本研究係進行 2013 年 4 月與 10 月之案例分析。

#### 5.1 CMAQ 基準年分析

經 2013 年 4 月及 2013 年 10 月 CMAQ 模擬基本案例結果,分別擷取環 保署測站共 76 站位置,分布如圖中紅色 三角形符號,再依個別測站之位置與污 染物濃度,使用繪圖軟體繪製等濃度 圖,並切除臺灣本島外圍海域地區,即 可得到濃度空間分布圖,如圖 2 至圖 5 分別為 CMAQ 模擬臺灣全區之細懸浮 微粒(PM<sub>2.5</sub>)以及臭氧(O<sub>3</sub>)的基本案例結 果。依序分別說明如下。

## 2013年4月:

PM<sub>2.5</sub> 濃度最高為 46.0 µg/m<sup>3</sup>, 位於 小港測站,其次為仁武站之 35.2 µg/m<sup>3</sup>, 第三高則為前鎮站之 33.8 µg/m<sup>3</sup>,主要分布位於高雄市區沿海一 带;且其中硫酸鹽(SO42-)最高濃度為9.8 µg/m3,位於小港站,硝酸鹽(NO3)最高 濃度為潮州之9.1 µg/m3, 銨鹽(NH4+)最 高濃度則為橋頭站之4.8 µg/m3。小時最 大臭氧濃度最高濃度為 78.4 ppb, 位於 萬里站,其次為陽明站之78.2 ppb,第 三高則為永和站之78.1 ppb,主要分布 位於北部基隆、臺北一帶,亦有部分位 於高屏山區附近;且其中二氧化硫(SO2) 最高濃度為 26.9 ppb, 位於小港站, 二氧 化氮(NO2)最高濃度為小港之 37.8 ppb, 揮發性有機物(VOC)最高濃度則為板橋 站之 588.9 ppb。









## 2013年10月:

PM<sub>2.5</sub>濃度最高為62.6 μg/m<sup>3</sup>, 位於 小港測站,其次為仁武站之47.6 µg/m<sup>3</sup>, 第三高則為前鎮站之45.6 µg/m<sup>3</sup>,主要分 布位於高雄市區沿海一帶;且其中硫酸 鹽(SO4<sup>2-</sup>)最高濃度為12.9 µg/m<sup>3</sup>, 位於小 港站,硝酸鹽(NO3)最高濃度為潮州之 12.0 µg/m<sup>3</sup>, 銨鹽(NH4<sup>+</sup>)最高濃度則為小 港站之6.8 μg/m<sup>3</sup>。小時最大臭氧濃度最 高濃度為107.3 ppb,位於屏東站,其次 為美濃站之103.9 ppb,第三高則為潮州 站之100.4 ppb,主要分布位於高雄及屏 **東山區附近,同時往北延伸至臺中、南** 投部分區域;且其中二氧化硫(SO2)最高 濃度為30.3 ppb,位於小港站,二氧化氮 (NO2)最高濃度為小港之43.3 ppb,揮發 性有機物(VOC)最高濃度則為板橋站之 428.3 ppb •



圖 4 基準年 2013 年 10 月細懸浮微粒模 擬結果



圖 5 基準年 2013 年 10 月臭氧模擬結果

### 5.2 CMAQ 臺灣五大港口影響

使用 CMAQ 三維網格模式分別模 擬 2013 年 4 月及 2013 年 10 月之基隆 港、臺北港、臺中港、高雄港及花蓮港 等臺灣五大港口污染排放影響,再將各 港口之影響加總合計, 擷取環保署測站 共 76 站位置之貢獻比例,分布如圖中紅 色三角形符號,再依個別測站之位置與 貢獻比例,使用繪圖軟體繪製等濃度 圖,並切除臺灣本島外圍海域地區,即 可得到濃度空間分布圖,如圖 6 至圖 8 分別為 CMAQ 模擬 4 月、10 月及兩個 月 平均之細懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>)、 臭氧 (O<sub>3</sub>)、硫氧化物(SO<sub>2</sub>)及氮氧化物(NOx) 之結果。依序說明如下。

## 2013年4月:

4 月之五大港口合計之貢獻比例 中,PM<sub>2.5</sub>介於 0.48% ~ 5.88% 之間,貢 獻比例最高位於小港測站之 5.88%,其 次為林園站之 5.22%, 第三高則為前鎮 站之 4.59%; 8 小時平均 O3 介於-11.13% ~0.39%之間,貢獻比例最高位於橋頭測 站及楠梓測站之 0.39%,其次為仁武站 之 0.32%, 第三高則為阿里山站之 0.25%; SO2介於 0.67%~30.08%之間, 貢獻比例最高位於前鎮及復興測站之 30.08%,其次為小港站之28.77%,第三 高則為林園站之 27.11%; NOx 介於 0.44%~19.44%之間,貢獻比例最高位 於小港測站之19.44%,其次為萬里站之 18.47%, 第三高則為林園站之 15.41%; 而各污染物種之影響範圍則主要位於臺 灣地區西南沿海一帶,部分落在中部沿 海以及基隆市沿海區域,亦有少部分位 於花蓮市區域。其中貢獻比例負值之產

生為臭氧被消耗之結果,即 NO 滴定效 應所引起。



2013年10月:

10 月之五大港口合計之貢獻比例 中,  $PM_{2.5}$  介於  $0.31\% \sim 5.24\%$ 之間,貢 獻比例最高位於前鎮及復興測站之 5.24%,其次為小港站之 5.16%,第三高 則為潮州站之 4.86%; 8 小時平均  $O_3$  介 於- $6.53\% \sim 1.45\%$ 之間,貢獻比例最高 位於仁武測站之 1.45%,其次為左營站 之 1.37%,第三高則為楠梓站之 1.33%;  $SO_2$  介於  $1.79\% \sim 33.51\%$ 之間,貢獻比 例最高位於前鎮及復興測站之 33.51%,其次為小港站之 25.77%,第三 高則為潮州站之 20.70%; NOX 介於  $0.29\% \sim 25.07\%$ 之間,貢獻比例最高位 於萬里測站之 25.07%,其次為小港站之 16.45%,第三高則為基隆站之 10.31%; PM<sub>2.5</sub>及 SO<sub>2</sub> 影響範圍主要位於臺灣地 區西南沿海一帶,而 NOx 影響範圍則靠 近基隆市區一帶。其中貢獻比例負值之 產生為臭氧被消耗之結果,即 NO 滴定 效應所引起。



圖 7 2013 年 10 月五大港口合計影響

#### 2013 年平均:

將4月及10月兩個月平均之五大港 口合計貢獻比例中, $PM_{2.5}$ 介於 0.41% ~ 5.52%之間,貢獻比例最高位於小港測 站之 5.52%,其次為前鎮及復興站之 4.91%,第三高則為林園站之 4.66%;8 小時平均  $O_3$ 介於-8.83% ~ 0.88%之間, 貢獻比例最高位於仁武測站之 0.88%, 其次為楠梓站之 0.86%,第三高則為橋 頭站之 0.79%; $SO_2$ 介於 1.38% ~ 31.79% 之間,貢獻比例最高位於前鎮及復興測 站之31.79%,其次為小港站之27.27%, 第三高則為林園站之23.58%;NOx介 於0.48%~21.77%之間,貢獻比例最高 位於萬里測站之21.77%,其次為小港站 之17.94%,第三高則為林園站之 12.40%;各污染物種之影響範圍主要位 於臺灣地區西南沿海一帶,部分落在中 部沿海、基隆市沿海及東部花蓮沿海區 域。其中貢獻比例負值之產生為臭氧被 消耗之結果,即NO 滴定效應所引起。



圖 8 2013 年平均五大港口合計影響

# 六、沉箱式防波堤維護工法探討

本研究目的在建立船舶航行對沿岸 及港域空污預測模式,以提升國內港口 之國際競爭力,並確保環境永續發展。 本研究結論分別詳述如后:

五大港口排放影響比較,2013年4 月細懸浮微粒影響最高為小港測站之 5.88%,8小時平均臭氧影響最高為橋頭 測站及楠梓測站之 0.39%,硫氧化物影 響最高為前鎮及復興測站之 30.08%,氮 氧化物影響最高則為小港測站之 19.44%。 五大港口排放影響比較,2013年10 月細懸浮微粒影響最高為前鎮及復興測 站之 5.24%,8 小時平均臭氧影響最高 為仁武測站之 1.45%,硫氧化物影響最 高為前鎮及復興測站之 33.51%,氮氧化 物影響最高則為萬里測站之 25.07%。

本研究成果可提供航港局、臺灣港 務公司、縣市政府、環保署等機關參考, 俾利擬定相關防治對策,以改善港域空 氣品質。

- He, J., Zhang, Y., Wang, K., Chen, Y., Leung, L. R., Fan, J., ...He, K. (2017) Multi-year application of WRF-CAM5 over East Asia-Part I: Comprehensive evaluation and formation regimes of O3 and PM2.5. Atmospheric Environment.
- Li, X., and Rappengluck, B. (2014) A WRF-CMAQ study on spring time vertical ozone structure in Southeast Texas. Atmospheric Environment, 97, 363–385.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Powers, J. G. (2008) A

Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Report, (June), 113.

- Wang, L., Wei, Z., Wei, W., Fu, J. S., Meng, C., and Ma, S. (2015) Source apportionment of PM2.5 in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model. Atmospheric Environment, 122, 723–736.
- 5. 吴義林、蔡德明(2001),「The simulation of photochemical reactions in southern Taiwan by Models-3/CMAQ」,高雄市空氣品質模式技術研討會。