

109-006-7B53

MOTC-IOT-108 -H2DB001f

# 建立即時氣象模組及船舶排放之 三維空氣品質模擬系統



交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

109-006-7B53

MOTC-IOT-108 -H2DB001f

# 建立即時氣象模組及船舶排放之 三維空氣品質模擬系統

著者：蔣敏玲、蔡立宏、李俊穎、吳義林、蔡德明、  
賴信志、楊榮元、張鴻良、邱慧真

交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

GPN: 1010900117

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬  
系統 / 蔣敏玲等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部  
運研所, 民 109.02

面；公分

ISBN 978-986-531-081-3(平裝)

1.港埠管理 2.管理資訊系統

557

108023140

建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統

著者：蔣敏玲、蔡立宏、李俊穎、吳義林、蔡德明、賴信志、楊榮元、  
張鴻良、邱慧真

出版機關：交通部運輸研究所

地址：臺北市敦化北路 240 號

網址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版 > 中心出版品)

電話：(04)26587128

出版年月：中華民國 109 年 2 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010900117

ISBN：978-986-531-081-3 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部  
運輸研究所書面授權。

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN 978-986-531-081-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1010900117	運輸研究所出版品編號 109-006-7B53	計畫編號 108-H2DB001f
本所主辦單位：港研中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：李俊穎 研究人員：蔣敏玲 聯絡電話：04-26587128 傳真號碼：04-26564415	合作研究單位：國立成功大學 計畫主持人：吳義林 研究人員：蔡德明、賴信志、楊榮元、張鴻良、邱慧真 地址：台南市大學路1號 聯絡電話：06-2386764	研究期間 自 108 年 2 月 至 108 年 12 月	
關鍵詞：空氣品質、船舶自動辨識系統、美國第三代空氣品質模式(Model-3/CMAQ)			
<p>摘要：</p> <p>本計畫採用本所港研中心介接航港局之船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)資料以推估臺灣周遭海域船舶之排放量，並以 CMAQ 模式(Community Multi-scale Air Quality model)模擬分析其對於臺灣地區之空氣品質影響，俾利相關單位擬定防治對策參考，以改善港域空氣品質。</p> <p>依據 2013 年與 2016 年 AIS 資料顯示，航行於臺灣周遭海域之船舶數約 3000 艘左右，其中以散裝船、貨櫃船與油輪等三種類型為主要船種，總引擎功率則約在 35GW ~ 40 GW。以 AIS 及國內全國性排放清冊(Taiwan Emission Data System, TEDS)來推估港內、外船舶排放量時會有差異，原因主要來自部分船舶會關閉 AIS，導致與港口船舶進出港記錄有所出入，未來可透過進出港記錄修正，以精進排放量之計算。</p> <p>排放量預測係數於特殊節日如春節期間與端午節以及颱風警報發布時啟動修正原本預設之係數，實際推估與預測結果第二天誤差約在 10%內，絕對誤差則在 30%左右；CMAQ 模式預測結果顯示空氣品質 AQI 指標在綠燈狀態時有較好的結果，而在橘燈及紅燈狀態時有高估之情形。</p> <p>本研究成果可提供交通部、航港局、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，使之符合國際海事組織(IMO)與歐洲海港組織(ESPO)規範，提升港口形象，並確保環境永續發展，另研究成果已藉由舉辦 1 次教育訓練進行推廣。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
109 年 2 月	257	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>限閱 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>(解密【限】條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密， <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS**  
**INSTITUTE OF TRANSPORTATION**  
**MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Establishment of Real-Time Three-dimensional Meteorological and Air Quality Forecasting System for Ship Emission			
ISBN(OR ISSN) 978-986-531-081-3(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010900117	IOT SERIAL NUMBER 109-006-7B53	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-108-H2DB001f
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tasi PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chun-Ying Lee PROJECT STAFF: Min-Ling Chiang PHONE: +886-4-26587128 FAX: +886-4-26560661			PROJECT PERIOD  FROM February 2019 TO November 2019
RESEARCH AGENCY: NCKU PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wu, Yee-Lin PROJECT STAFF: Der-Min Tsai, Hsin-Chih Lai, Zhang, Hong-Liang, Yang, Rong-Yuan, Hui-Chen Chiou ADDRESS: No.1, University RD., Tainan City 701, Taiwan, R.O.C. PHONE: 886-6-2386764			
KEY WORDS: Air quality, AIS, WRF, CMAQ			
<p>ABSTRACT:</p> <p>The air pollutants emitted from ships traveling at major harbors and in the ocean around Taiwan have been estimated by using Automatic Identification System (AIS) from MOTC in this study. Their impacts on the ambient air quality in Taiwan, including primary and secondary air pollutants, were evaluated by using three-dimensional grid model Community Multi-scale Air Quality model (CMAQ). The results can be used by various agencies to decide control strategies to improve the ambient air quality in Taiwan.</p> <p>Based on AIS data in 2013 and 2016, there were about 3000 ships travelling around Taiwan every day and the major three type of ships were bulker, container, and tank. The total power of major engine in ships were about 35 GW to 40 GW. There were differences of the emission inventory for ships within and outside of harbors between AIS and Taiwan Emission Data System (TEDS) and part of the differences may be from the turn-off of AIS. Therefore, it is recommended to include the port record with AIS to improve the emission inventory in the future.</p> <p>The ship emission forecasting factors for special events like Chinese new year, typhoon, have to be modified and the errors for the second-day forecast were less than 10% and the absolute errors were less 30%. The air quality index forecasting by CMAQ are better at green range and are overestimated for orange and red ranges.</p> <p>The results of this study can provide a reference to the Ministry of Transportation and Communications, Maritime Port Bureau and Taiwan International Ports Corporation or the Environmental Protection Administration to develop air pollution countermeasures in the port and coastal areas to establish a green port to comply with the norms of the International Maritime Organization (IMO) and the European Sea Ports Organization (ESPO), enhancing the image of the port, as well as ensuring the sustainable development of the environment. Separately, the research results have been promoted by holding one session of education and training.</p>			
DATE OF PUBLICATION February 2020	NUMBER OF PAGES 257	PRICE 200	<p style="text-align: center;">CLASSIFICATION</p> <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統

## 目 錄

中英文摘要.....	I
第一章 前言 .....	1-1
1.1 研究動機 .....	1-1
1.2 研究目的 .....	1-2
1.3 前期研究內容與成果 .....	1-2
1.4 本期研究成果 .....	1-3
第二章 文獻回顧 .....	2-1
2.1 懸浮微粒 .....	2-1
2.2 網格模式 .....	2-4
2.3 WRF 氣象模式 .....	2-4
2.4 Models-3/CMAQ 模式 .....	2-7
第三章 研究方法 .....	3-1
3.1 規劃執行流程 .....	3-1
3.2 Models-3/CMAQ 模式性能評估 .....	3-3
3.3 排放量推估 .....	3-6
3.3.1 AIS 資料庫 .....	3-9
3.3.2 勞氏資料庫 .....	3-10
3.3.3 船舶排放量 .....	3-11

3.4 排放量自動化模組 .....	3-21
3.4.1 排放量計算方式 .....	3-21
3.4.2 自動化模組計算 .....	3-26
3.4.3 排放量預測係數 .....	3-26
3.5 WRF 氣象資料建置 .....	3-29
3.6 CMAQ 模擬建置 .....	3-36
3.6.1 Model-3/CMAQ.....	3-36
3.6.2 TEDS 的點源處理修訂 .....	3-38
3.6.3 中國地區排放量資料庫處理依據 .....	3-39
3.6.4 生物源排放量處理 .....	3-40
3.7 CMAQ 空氣品質預測系統 .....	3-42
第四章 研究結果 .....	4-1
4.1 排放量預測係數 .....	4-1
4.1.1 特殊節日 .....	4-1
4.1.2 颱風影響 .....	4-9
4.2 船舶數統計 .....	4-15
4.2.1 海域船舶種類分布 .....	4-15
4.2.2 勞氏船舶種類分布 .....	4-17
4.2.3 進出港船舶 .....	4-24
4.3 船舶排放量預測結果 .....	4-32
4.4 WRF 性能評估 .....	4-37

4.5 排放量區域分布 .....	4-48
4.6 排放量比較 .....	4-50
4.7 CMAQ 性能評估 .....	4-53
4.8 海域船舶影響 .....	4-55
4.9 港口排放影響 .....	4-63
4.10 空氣品質預測 .....	4-70
第五章 結論與建議 .....	5-1
5.1 結論 .....	5-1
5.2 建議 .....	5-3
5.3 成果效益及應用情形 .....	5-3
參考文獻 .....	參-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表 .....	附 1-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表 .....	附 2-1
附錄三 期末報告簡報資料 .....	附 3-1
附錄四 工作會議記錄 .....	附 4-1
附錄五 教育訓練簡報 .....	附 5-1
附錄六 西北太平洋颱風 .....	附 6-1
附錄七 逐日船舶數與引擎功率 .....	附 7-1



## 圖目錄

圖 2.1	WRF 氣象模式執行流程圖 .....	2-8
圖 2.2	Models-3 多層次網格示意圖 .....	2-10
圖 2.3	Models-3/CMAQ 各模組之相關性 .....	2-12
圖 3.1	計畫目標執行流程圖 .....	3-2
圖 3.2	海上船舶排放量區域分布 .....	3-7
圖 3.3	排放量推估流程圖 .....	3-8
圖 3.4	臺灣周遭海域 .....	3-22
圖 3.5	AIS 船舶軌跡缺值示意圖 .....	3-23
圖 3.6	臺灣周遭海域區間分布圖 .....	3-24
圖 3.7	船舶軌跡與區間分布 .....	3-25
圖 3.8	船舶軌跡推算排放量基準 .....	3-25
圖 3.9	NO <sub>x</sub> 排放量預測係數 .....	3-27
圖 3.10	SO <sub>x</sub> 排放量預測係數 .....	3-28
圖 3.11	PM 排放量預測係數 .....	3-28
圖 3.12	春節期間排放量預測係數 .....	3-29
圖 3.13	WRF 四層網格將影響臺灣天氣的環境條件均包含於模擬範圍 .....	3-30
圖 3.14	TEDS A050+A817 與 WRF 常綠闊葉林空間分佈比較 .....	3-42
圖 3.15	海域船舶排放量預測流程圖 .....	3-43
圖 3.16	CMAQ 空氣品質預測流程示意圖 .....	3-45

圖 4.1	颱風接近臺灣路徑影響 .....	4-10
圖 4.2	颱風近臺影響前後三日 .....	4-14
圖 4.3	颱風近臺影響前後十四日 .....	4-14
圖 4.4	日平均船舶種類分布 .....	4-17
圖 4.5	日平均引擎功率船舶種類分布 .....	4-19
圖 4.6	可用率反推船舶數與引擎功率 .....	4-21
圖 4.7	特殊節日船舶種類分布與引擎功率 .....	4-23
圖 4.8	主要港口船舶進出港統計範圍 .....	4-26
圖 4.9	2013 年主要港口進出港船舶數 .....	4-27
圖 4.10	2016 年主要港口進出港船舶數 .....	4-27
圖 4.11	基隆港與臺中港進出港範圍 .....	4-28
圖 4.12	基隆港 2016 年 AIS 進出港船舶數 .....	4-29
圖 4.13	基隆港 2016 年 AIS 與進出港紀錄船舶數 .....	4-29
圖 4.14	臺中港 2016 年 AIS 進出港船舶數 .....	4-30
圖 4.15	臺中港 2016 年 AIS 與進出港紀錄船舶數 .....	4-31
圖 4.16	臺灣周遭海域船舶排放量推估結果 .....	4-34
圖 4.17	船舶 NO <sub>x</sub> 排放量預測誤差結果 .....	4-35
圖 4.18	船舶 SO <sub>x</sub> 排放量預測誤差結果 .....	4-35
圖 4.19	船舶 PM 排放量預測誤差結果 .....	4-36
圖 4.20	WRF 模式模擬範圍設定圖 .....	4-38
圖 4.21	2016 年臺北站時序比對圖 .....	4-42

圖 4.22	2016 年梧棲站時序比對圖 .....	4-43
圖 4.23	2016 年嘉義站時序比對圖 .....	4-43
圖 4.24	2016 年高雄站時序比對圖 .....	4-44
圖 4.25	2016 年花蓮站時序比對圖 .....	4-45
圖 4.26	2016 年各區溫度性能評估圖 .....	4-46
圖 4.27	2016 年各區風速性能評估圖 .....	4-46
圖 4.28	2016 年各區風向性能評估圖 .....	4-47
圖 4.29	WRF 中尺度氣象模式預報流程 .....	4-48
圖 4.30	臺灣周遭海域排放量區域分布 .....	4-49
圖 4.31	臺灣本島五大港口區域分布 .....	4-50
圖 4.32	海域船舶 2016 年平均增量濃度(一).....	4-59
圖 4.33	海域船舶 2016 年平均增量濃度(二).....	4-60
圖 4.34	海域船舶 2016 年平均貢獻比例(一).....	4-61
圖 4.35	海域船舶 2016 年平均貢獻比例(二).....	4-62
圖 4.36	五大港口 2016 年平均增量濃度(一).....	4-66
圖 4.37	五大港口 2016 年平均增量濃度(二).....	4-67
圖 4.38	五大港口 2016 年平均貢獻比例(一).....	4-68
圖 4.39	五大港口 2016 年平均貢獻比例(二).....	4-69
圖 4.39	CMAQ 模擬空氣品質預測結果 .....	4-71
圖 4.39	空氣品質預測模擬值與觀測值 AQI 散點圖 .....	4-73



## 表目錄

表 2-1	本研究模擬模式採用的設定基準 .....	2-9
表 3-1	工作進度管理 .....	3-3
表 3-2	懸浮微粒之模式模擬性能評估規範 .....	3-6
表 3-3	臭氧之模式模擬性能評估規範值 .....	3-6
表 3-4	AIS 資料欄位 .....	3-9
表 3-5	勞氏資料庫欄位名稱 .....	3-10
表 3-6	船舶缺值預設表 .....	3-12
表 3-7	輔助引擎缺值預設表 .....	3-13
表 3-8	鍋爐缺值預設表 .....	3-14
表 3-9	主引擎排放係數(g/kW·h).....	3-16
表 3-10	輔助引擎排放係數(g/kW·h).....	3-17
表 3-11	鍋爐排放係數(g/kW·h).....	3-17
表 3-12	MDO/MGO 燃油校正係數 .....	3-19
表 3-13	低負載校正係數 .....	3-20
表 3-14	輔助引擎負載預設值 .....	3-21
表 3-15	本研究 WRF 模式模擬採用的設定基準 .....	3-31
表 3-16	本研究模擬 WRF 模式採用的參數設定 .....	3-32
表 3-17	各測站資料表 .....	3-35
表 3-18	CMAQ Aero6 模組所需要的 PM <sub>2.5</sub> 排放成份 .....	3-37
表 3-19	東亞地區各主要國家的經濟成長率 .....	3-39

表 3-20	WRF 土地利用型態與各植被佔土地面積比例 .....	3-41
表 3-21	排放量與預測係數關係表 .....	3-43
表 3-22	海域船舶排放量預測誤差 .....	3-44
表 3-23	海域船舶排放量預測絕對誤差 .....	3-44
表 4-1	春節期間排放量 .....	4-2
表 4-2	春節期間預測係數 .....	4-3
表 4-3	其他節日預測係數 .....	4-4
表 4-4	清明節期間排放量 .....	4-5
表 4-5	清明節期間排放係數 .....	4-5
表 4-6	端午節期間排放量 .....	4-6
表 4-7	端午節期間排放係數 .....	4-7
表 4-8	中秋節期間排放量 .....	4-8
表 4-9	中秋節期間排放係數 .....	4-8
表 4-10	最接近臺灣之颱風 .....	4-10
表 4-11	颱風接近臺灣前後影響 .....	4-12
表 4-12	颱風警報發布預測係數 .....	4-13
表 4-13	2016 年勞氏船種比例 .....	4-15
表 4-14	2016 年 AIS 船種比例 .....	4-16
表 4-15	各船種日平均船舶數 .....	4-18
表 4-16	各船種日平均引擎功率 .....	4-19
表 4-17	可用率反推船舶數與引擎功率 .....	4-21

表 4-18 排放量增加百分比 .....	4-21
表 4-19 主要港口進出港平均船舶數 .....	4-25
表 4-20 基隆港 2016 年 AIS 船舶數與進出港記錄 .....	4-29
表 4-21 臺中港 AIS 船舶數與進出港記錄比較 .....	4-31
表 4-22 AIS 船舶數與進出港記錄比較 .....	4-32
表 4-23 排放量推估期間發布之颱風警報 .....	4-33
表 4-24 排放量預測誤差 .....	4-36
表 4-25 排放量預測絕對誤差 .....	4-37
表 4-26 本研究模擬 WRF 模式所採用的設定基準 .....	4-38
表 4-27 環保署訂定氣象模式模擬結果性能評估規範標準 .....	4-40
表 4-28 2016 年 WRF 氣象模擬定量性能評估 .....	4-41
表 4-29 各地區測站比對模擬結果 .....	4-45
表 4-30 TEDS10 各污染源排放量 .....	4-51
表 4-31 五大港口排放量比較 .....	4-52
表 4-32 排放量差異比較表 .....	4-53
表 4-33 2016 全年 PM <sub>2.5</sub> 性能評估 .....	4-55
表 4-34 空氣品質預測 AQI 指標比較 .....	4-74



# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

世界各國經濟活動互動頻繁且合作密切，船舶肩負貨物在國際間交流的重任，伴隨而來的空氣污染物排放問題也愈形嚴重，再加上港內運輸工具船舶、裝卸設備與重型卡車等污染排放問題，已不容忽視。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 TEDS(Taiwan Emission Data System)、REAS(Regional Emission inventory in ASia)與 HTAP(Hemispheric Transport of Air Pollution)等國內外研究顯示，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(NO<sub>x</sub>)最為顯著。

為提昇環境品質及維護國人健康，環保署於 2012 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 35 µg/m<sup>3</sup>與 15 µg/m<sup>3</sup>；而為了因應細懸浮微粒之管制，環保署於 2015 年 11 月 17 日頒布「空氣品質嚴重惡化緊急防制辦法」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之三級防制區，亦即均未達細懸浮微粒之周界空氣品質標準，顯然空氣品質改善已成為國內目前急待解決之重要課題。

根據環保署最新之全國空氣污染物排放清冊(Taiwan Emission Data System ,TEDS 第 10 版)顯示港埠相關活動於 2016 年之懸浮微粒(PM<sub>10</sub>)、細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)、硫氧化物 (SO<sub>2</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、非甲烷碳氫化合物 (NMHC)與一氧化碳 (CO)排放量佔全國排放量之比例分別為 2.28%、4.26%、26.2%、8.72%、0.21%與 0.51%，所以港埠相關活動排放 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>與 PM<sub>2.5</sub>等污染物之比例已有一定程度之影響，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。

## 1.2 研究目的

近年來隨著工業及經濟快速的發展，經由船舶發展所排放的空氣污染物已受到全球日益關切，本研究目的在確立排放量預測係數會因為特殊節日以及颱風影響的情況下，建立未來排放量推估之預測係數，並以此為基準，預測未來海域船舶污染物之排放，並以三維網格模式 CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model) 搭配氣象模式 WRF(Weather Research and Forecasting Model)分析臺灣周遭海域與主要港口船舶對臺灣地區空氣品質的影響。本研究研究目的說明如下：

1. 以臺灣海域船舶自動辨識系統(AIS)資料推估臺灣周遭海域與主要港口每日之船舶污染物排放量。
2. 以臺灣周遭海域與主要港口之船舶排放量，建置 2016 年港口之船舶排放源資料庫。
3. 以 CMAQ 模式分析 103 年臺灣地區周遭海域與主要港口船舶對臺灣地區空氣品質之全年影響。
4. 建置空氣品質預測系統使用之 WRF 氣象模式與 CMAQ 模擬模式。
5. 建置以 CMAQ 模式搭配船舶未來預測之排放量，預測臺灣本島 48 小時內之空氣品質預測系統。
6. 考量特殊節日及颱風影響等影響因素，精進排放量推估之預測係數，進而提昇預測船舶排放量之準確度。

## 1.3 前期研究內容與成果

本所前期研究計畫已於 106 年完成 CMAQ 空氣品質網格模式之運作架構，並進行案例分析模擬 102 年 4 月及 10 月之臺灣五大商港及周邊海域船舶排放量影響臺灣本島之情形，結果顯示船舶影響並不可等閒忽視之。本所已於 107 年完成即時船舶排放量推算模組，並進而推

估 102 年全年之周域海域船舶的排放量，藉以瞭解船舶排放對臺灣本島的影響。本研究則承續上述前期成果，於 108 年建立即時氣象模組，逐步精進船舶污染物排放對空氣品質影響推估系統，以做為後續進行空氣品質預測作業之基礎。亦即應用 TEDS 排放量資料與 AIS 推估之臺灣海域船舶排放量，透過 WRF 所提供之氣象風場資料，使用 CMAQ 三維網格空氣品質模式模擬臺灣海域與主要港口船舶之原生性與衍生性污染物對於臺灣本島空氣品質的影響。

前期計畫模擬 102 年海域船舶排放影響臺灣本島之情形，其結果顯示船舶影響年平均約 13%，並無法忽略之；因此本年度計畫採用 TEDS10 基準年為 2016 年之海上船舶排放量，藉以瞭解船舶排放對臺灣本島的影響。

## 1.4 本期研究成果

本研究完成以 AIS 資料推估臺灣周遭海域船舶污染物排放量，時間為 107 年 8 月 17 日至 108 年 11 月 25 日，並依據排放量結果搭配排放量預測係數，預測未來兩日之排放量結果，統計其誤差百分比，其中排放量預測係數透過特殊節日與颱風警報發布時啟動修正。同時統計高雄港、臺中港、臺北港、基隆港以及花蓮港等主要港口之船舶數，其船舶型態、引擎功率等參數，提高船舶排放量預測之準確率。

完成建置空氣品質預測系統使用之 WRF 氣象模式與 CMAQ 模擬模式，並依照建置完成之 CMAQ 模式搭配船舶排放量預測系統，以預測未來 48 小時之空氣品質狀況，俾利擬定相關空污防治對策，藉以改善臺灣周遭環境之空氣品質。

本研究完成結果如下：

1. 完成 107 年 8 月 17 日至 108 年 11 月 25 日海域船舶排放量推估及預測結果分析。
2. 完成建置春節期間與端午節及颱風警報發布等影響排放量推估之

預測係數。

3. 完成本研究與環保署 TEDS 10.0 之海域船舶排放量資料比較。
4. 完成 AIS 船舶數資料與港口進出港記錄之分析比較。
5. 完成三維網格 WRF 氣象模式建置與性能評估。
6. 完成三維網格 CMAQ 模擬建置與性能評估。
7. 完成 105 年海域船舶及五大港口污染物排放影響之模擬解析。
8. 完成 108 年 11 月 22 日至 11 月 26 日空氣品質預測系統模擬解析。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 懸浮微粒

依據前期計畫結果，懸浮微粒是指大氣中除了水分子以外之固態或液態微粒，一般係指粒徑介於 0.005 ~ 100  $\mu\text{m}$  之粒狀物，如細懸浮微粒( $\text{PM}_{2.5}$ )即為粒徑小於 2.5 $\mu\text{m}$  以下之粒狀污染物，依污染物產生來源不同又可區分為原生性氣膠(Primary Aerosol)與衍生性氣膠(Secondary Aerosol)兩種。一般而言，原生性氣膠具有較大之顆粒粒徑，而衍生性氣膠因來自於氣固相轉換所生成，所以通常會有較小之顆粒，屬於小粒徑之微粒。分別介紹如下：

#### 1. 原生性氣膠：

原生性氣膠之定義為該成分主要由物理破碎或由污染源直接一次排放所產生之微粒，如海鹽飛沫、地表或河川裸露揚塵、鍋爐及車輛燃燒排放產生等。原生性氣膠主要的化學組成分與來源分別為：

##### (1) 海鹽飛沫

在海面上藉由風力作用所揚起的海水液滴稱為海鹽飛沫。由於海水本身含有氯化鈉與硫酸鹽等物質，其中主要為氯化鈉，因而海鹽微粒將貢獻大量的  $\text{Na}^+$  與  $\text{Cl}^-$ 。此外，由於人為活動中甚少鈉離子的排放，故可假設鈉離子完全來自於海鹽的貢獻，則藉由分析鈉離子將可約略瞭解海鹽的貢獻程度。由於海鹽飛沫來自於海洋，因而靠近海岸線之區域將有較為大量的海鹽貢獻度。

##### (2) 逸散源

裸露地表經由風力或其他機械力作用所揚起的灰塵微粒與車行揚塵等均會揚起沈積於地表的微粒。因此，經由此一作用所揚起的微粒會含有大量的地殼元素，這些地殼元素主要有鈣、鎂、鋁及矽等，其中主要是矽元素占大部分。由於逸散源的粒狀物主要來自於地表，例如街塵、裸露料堆、裸露地表及砂石業等，所以化學成分

組成相似，因此較難釐清逸散源種類之個別來源。

### (3) 營建工程之排放

進行營建工程之土木施工階段也很容易造成逸散，而導致短時間內有大量微粒的排放。

### (4) 鍋爐及機動車輛之燃燒排放

在燃燒的過程當中，由於使用化石燃料以及過程中可能產生的不完全燃燒，因此燃燒過程中會排放出含碳化合物，例如燃燒重油的鍋爐及使用柴油車引擎所造成的煤灰碳粒(soot)。此種由燃燒所產生的含碳化合物可粗分為元素碳成分(EC)及有機碳成分(OC)。除了含碳微粒之外，機動車輛亦可能排放含鉛化合物，而鍋爐亦可能產生硫氧化物與氮氧化物，例如燃煤發電業。

### (5) 其他原生性來源

除了上列幾項排放源之外，其他諸如火山爆發、森林大火與風化微粒等自然界發生源，工廠廠區的排放如建材、木材業等之物理切割過程，皆會產生原生性微粒。

## 2. 衍生性氣膠：

相較於原生性氣膠的直接排放，衍生性氣膠的來源主要為原生性污染物經由大氣化學機制所產生，包含光化學反應、氣相均相反應、異相液相反應以及氣固相反應等複雜的機制。由於此類大氣化學機制涉及原生性污染物的轉化，因此微粒的化學組成與其相關前驅物種均具有相當大的關聯性，例如經由氮氧化物反應生成的硝酸鹽，其濃度則與氮氧化物之濃度具有相當程度的相關性，因此欲瞭解微粒之衍生性氣膠的化學成分來源，則該化學成分之前驅污染物亦需要加以分析。衍生性氣膠主要的化學組成分與來源分別為：

### (1) 硫酸鹽(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)：

硫酸鹽主要為硫氧化物(SO<sub>2</sub>與 SO<sub>3</sub> 合稱為 SO<sub>x</sub>，其主要來源為

化石燃料的燃燒，例如燃煤發電業與燃燒重油的鍋爐等)經由氣相均相或液相異相反應而形成。

(2) 硝酸鹽( $\text{NO}_3^-$ ):

大氣中的硝酸鹽主要來自於氮氧化物( $\text{NO}$  與  $\text{NO}_2$ 合稱為  $\text{NO}_x$ ，其主要來自於燃燒過程 $\text{N}_2$ 與 $\text{O}_2$ 的反應形成 $\text{NO}$ 而排放)氧化所生成，其反應機制亦可分為氣相與液相。硝酸鹽主要來自於硝酸( $\text{HNO}_3$ )與大氣中鹼性物質如 $\text{NH}_3$ 、 $\text{Na}^+$ 及其他地殼元素等的中和作用，而硝酸的來源則主要來自於日間的光化學反應所致( $\text{NO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3$ )。至於夜間亦可能經由液相反應而生成( $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3$ )。硝酸鹽可因其鹼性中和物種的不同而分別存在於不同粒徑的懸浮微粒中，例如細微粒的硝酸鹽主要為 $\text{HNO}_3$ 與 $\text{NH}_3$ 反應所生成之細微粒所致，粗微粒硝酸鹽則可能由於 $\text{HNO}_3$ 與海鹽微粒( $\text{NaCl}$ )或土壤微粒(如 $\text{Ca}^{2+}$ 與 $\text{Mg}^{2+}$ 等)反應，而在粗微粒懸浮微粒表面形成 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 或 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 所致。

(3) 銨鹽( $\text{NH}_4^+$ ):

銨鹽的前驅物為氨氣( $\text{NH}_3$ )，而氨氣的來源主要為動植物殘體或排泄物及其他微生物的活動所產生。氨氣在大氣中的角色甚為重要，其為大氣中酸性物質的主要中和物種，例如硫酸與硝酸均主要與氨氣進行中和反應而形成微粒。由於銨鹽必須要有酸性成分的中和方可形成於微粒中，而大氣中主要的酸性氣膠為硫酸鹽與硝酸鹽，因而銨鹽的濃度除了需要考慮氨氣外，亦會由於酸性氣膠的濃度而改變。當大氣中含有過量的氨氣時，則當發生較強烈的光化學反應時，其產生的酸性氣體將會與氨氣反應形成酸性氣膠與銨鹽，將導致懸浮微粒濃度的增加；然而若大氣中缺乏氨氣與其他鹼性物種，則即使發生較為強烈的衍生性反應而導致大量的酸性氣體發生，由於沒有鹼性物種與之反應，理論上，將可抑制懸浮微粒之生成。

#### (4) 衍生性有機碳成分：

大氣中的揮發性有機物(VOC)主要來自於煉油與石化業的排放、有機溶劑的使用及有機物的逸散等；此外，自然界的植物亦會排放出大量的揮發性有機物成分。大氣中的揮發性有機物為光化學反應的重要參與物種之一，由於揮發性有機物的參與才會導致臭氧濃度的累積。而光化學反應持續進行的結果，將使揮發性有機物進而氧化成為有機酸及其他含碳之最終產物，此一含碳化合物即為衍生性有機碳成分的來源。

## 2.2 網格模式

空氣品質模式模擬在環境空氣品質分析及管理上扮演非常重要的角色。空氣品質模式模擬的主要工作在模擬污染物從排放源排出後，經過大氣的傳輸、擴散、轉化及沈降等過程後，到達周遭生活環境時的濃度。因此，空品模式模擬可用於針對既有環境污染來源的解析及政策管制成果的分析。

依據「空氣品質模式模擬規範」可將空氣品質模式分類為高斯擴散模式、軌跡模式及網格模式三種，其分類的考量依據與排放量的規模有關係，對於中大型規模排放量，其影響範圍及程度均較大，因此必須要考慮遠距傳輸的效應及光化學污染物產出對空氣品質的影響，因此必須使用較為複雜的軌跡模式或網格模式。

其中，網格模式(Models-3/CMAQ)是目前較完整的三維網格空氣品質模式之一，該模式以 One atmosphere 的概念模擬分析各種空氣污染物於大氣中的傳輸、反應與沉降等，所以包含了原生性與衍生性空氣污染物種，同時也包括了氣相、液相與固相的作用程序。

## 2.3 WRF 氣象模式

本研究採用 WRF(Weather Research and Forecasting Model)氣象模式來提供空氣品質模式所需的氣象場，WRF 是一套中尺度數值天氣預

測系統，主旨在同時滿足大氣研究和天氣預測上的需求，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，美國氣象環境預測中心(NCEP)和當時預測系統實驗室(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 模式可以讓研究人員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 模式提供天氣預測的靈活性與有計算效率的一個平台，同時提供研究人員由在廣泛研究中心的開發人員所深入研究的物理、數值方法和數據同化。

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)。兩者在 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、即時數值天氣預測與分析、颱風模擬、區域氣候研究、耦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測，可應用於即時數值天氣預測與分析、參數化研究、耦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 (Four-dimensional data assimilation) (3) Post-Processing & 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插至模式網格的 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，進而增加模式預測的準確度。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。

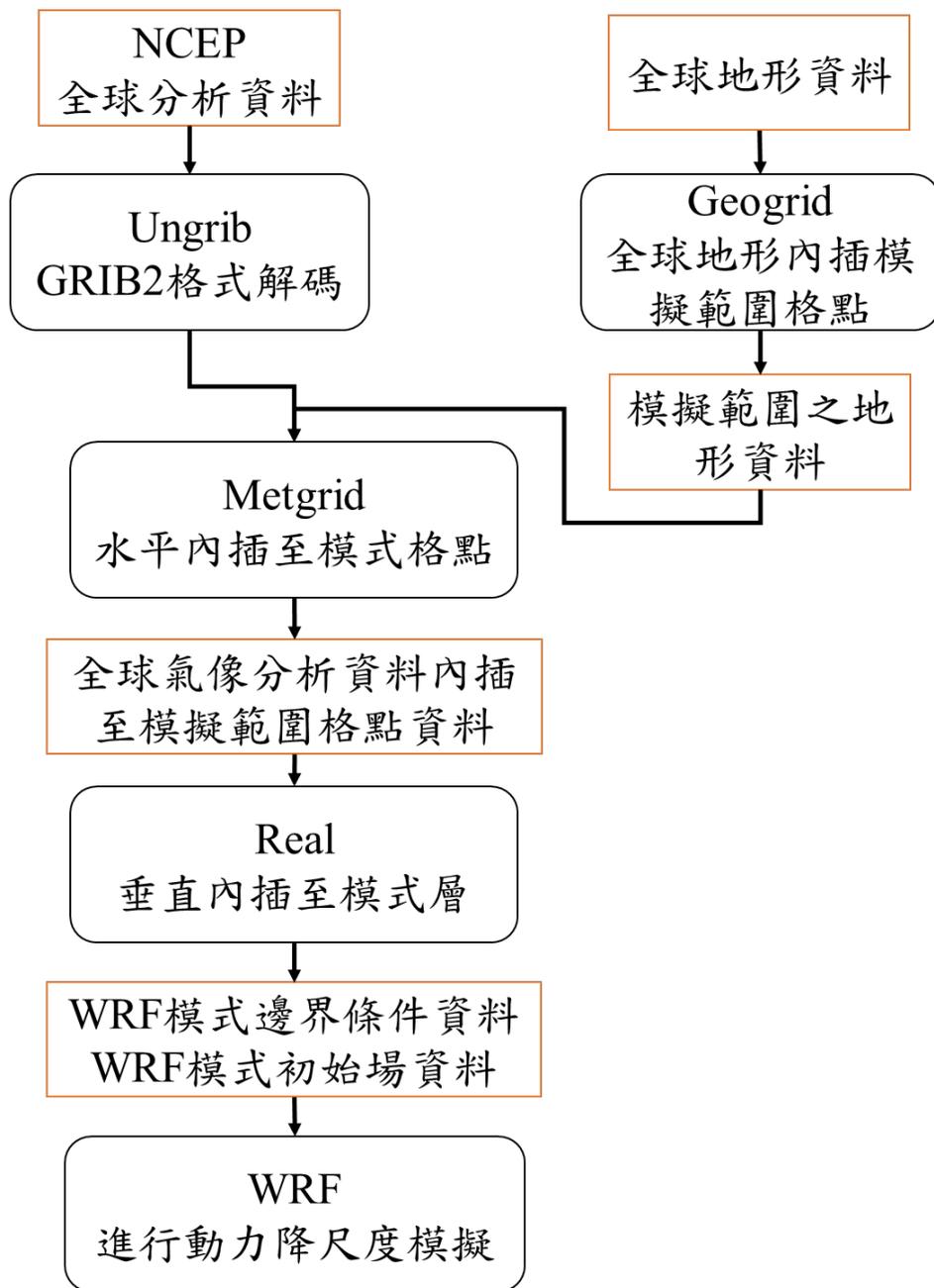
四維數據同化(Four-dimensional data assimilation(FDDA)是一種在模擬分析或觀測分析趨勢加入一個或多個診斷方程式，主要分為兩種網格納進法(Grid nudging)和觀測納進法(observation nudging)，網格納進法利用全球氣象資料的初始場資料和測邊界資料的分析場資料進行所有網格調整。觀測納進法主要是利用地面、探空、船舶等觀測資料加入模式初始場進行調整，調整過程將實際觀測的資料和解析度較粗的全球氣象資料進行時空的融合。

對於複雜的中尺度系統而言，WRF 氣象模式的模擬可彌補觀測資料上時、空解析度的不足，對於區域的預測有相當好的能力。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 進行模擬評估氣象結果以及 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°C，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 PM<sub>2.5</sub> 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  $\leq \pm 0.5$ ，GE 為  $\leq 2$ )，風速部份大致落在模式性能建議的標準(Bias 在  $\pm 0.5$ m/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。WRF 氣象模式執行流程則如圖 2.1 所示。

## 2.4 Models-3/CMAQ 模式

為同時分析原生性與衍生性空氣污染物之影響本研究將選用之空氣品質模式為 Models-3/CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)，此模式為美國第三代空氣品質模式的簡稱。此一模式之最大特色即在『一個大氣』(One-Atmosphere)的觀念。傳統的模式中，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 NO<sub>x</sub>，其最終產物為 HNO<sub>3</sub>，而 HNO<sub>3</sub> 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，在氣固相轉換的過程中，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。



註：橘色為資料說名  
黑色為模式執行過程

資料來源：本研究彙整。

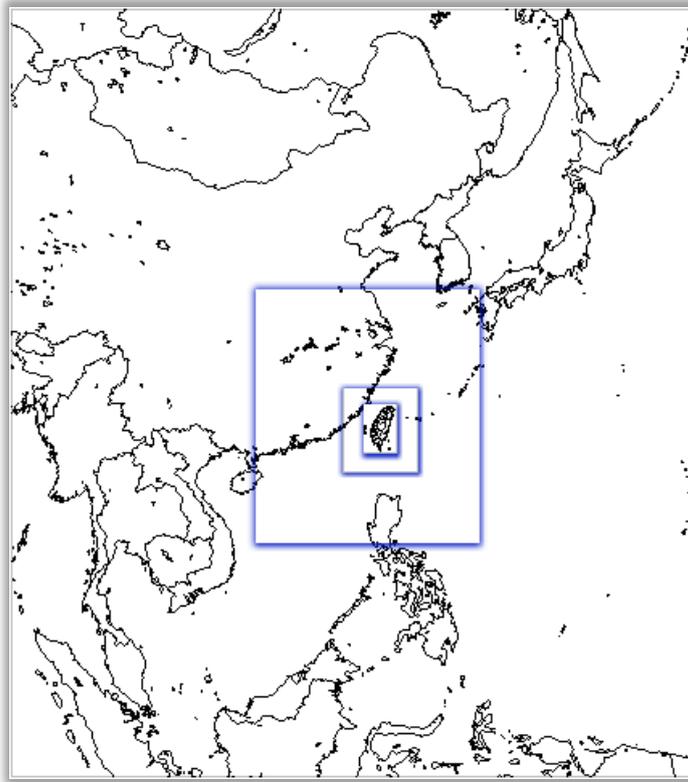
圖 2.1 WRF 氣象模式執行流程圖

Models-3/CMAQ 為一三維的空氣品質模式，屬於網格模式的一種，此網格模式的特色為使用了多層次網格，模式中各網格之設定基準如表 2-1 所示，圖 2.2 為本研究之 Models-3/CMAQ 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。

表 2-1 本研究模擬模式採用的設定基準

		Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
大氣模式	Vertical	45	45	45	45
	Grid Size	91 × 91	166 × 169	223 × 223	223 × 223
	FDDA	Yes	Yes	Yes	No
	Land use	20	20	20	20
	PBL	YSU	YSU	YSU	YSU
空品模式	Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
	Vertical	6	15	15	15
	Grid Size	70 × 80	70 × 80	70 × 80	90 × 135
	Aerosol Mod	Aero6	Aero6	Aero6	Aero6
	Chemical	CB05	CB05	CB05	CB05

資料來源：本研究彙整。



資料來源：本研究彙整。

**圖 2.2 Models-3 多層次網格示意圖**

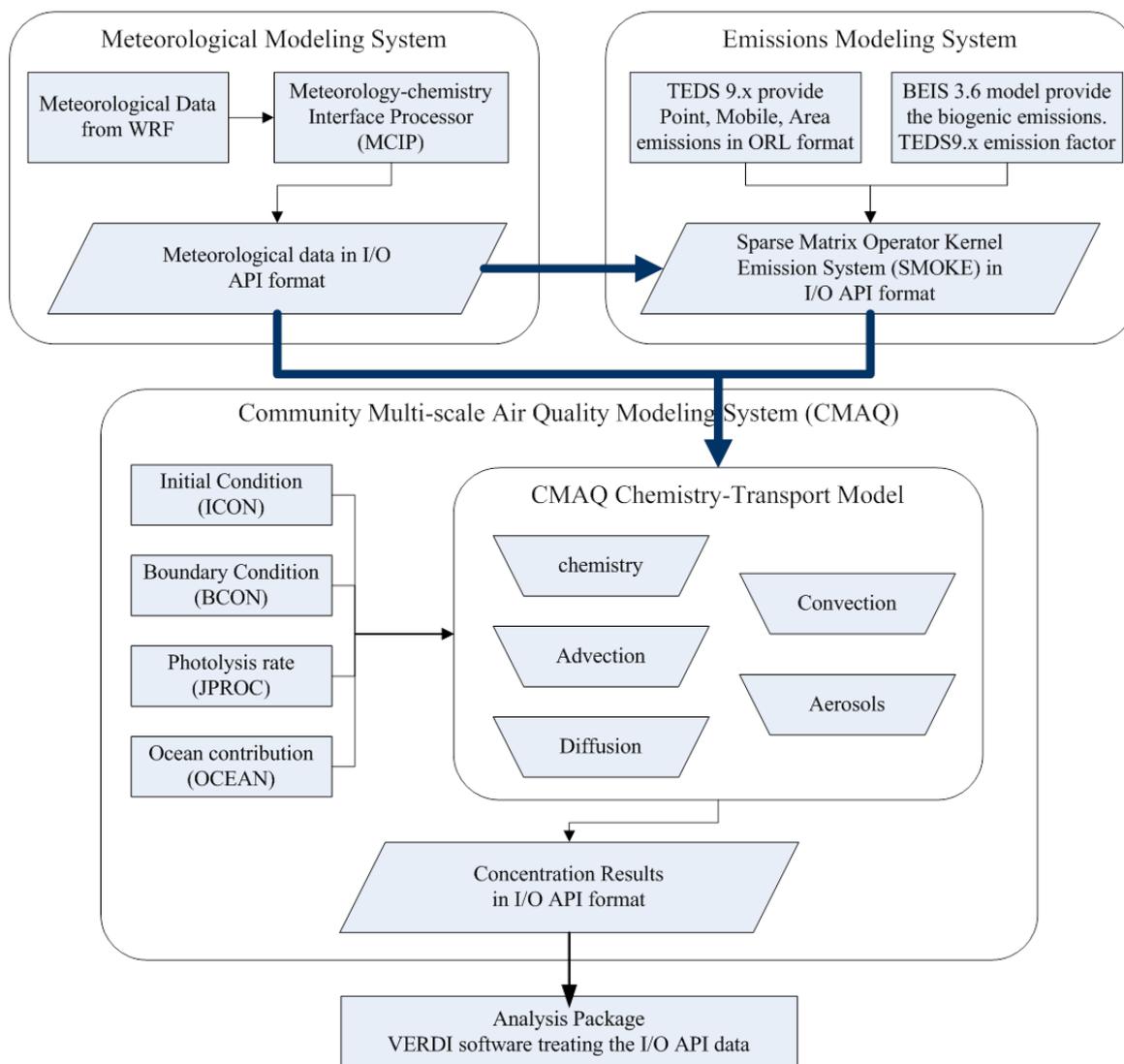
Models-3/CMAQ 之主要運算核心稱為 Community Multi-Scale Air Quality(CMAQ) modeling system，整體 Models-3/CMAQ 之運作如圖 2.3 所示：經由 WRF 取得之氣象資料與 SMOKE 運算之排放量資料，最後均輸入 CMAQ 中，以進行化學機制之模擬。整個模擬工作可約略分為三大部分：

1. 氣象模組：CMAQ 以廣泛使用的 WRF 模式作為氣象資料的提供者。WRF 除提供氣象資料外，亦提供模式中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，同時在 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，係因經過 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 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，另外加入了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 中包含了擴散、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。



資料來源：根據 CMAQ 官網建議之模式處理流程，搭配臺灣 TEDS10 排放量格式資料。

**圖 2.3 Models-3/CMAQ 各模組之相關性**

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。

## 第三章 研究方法

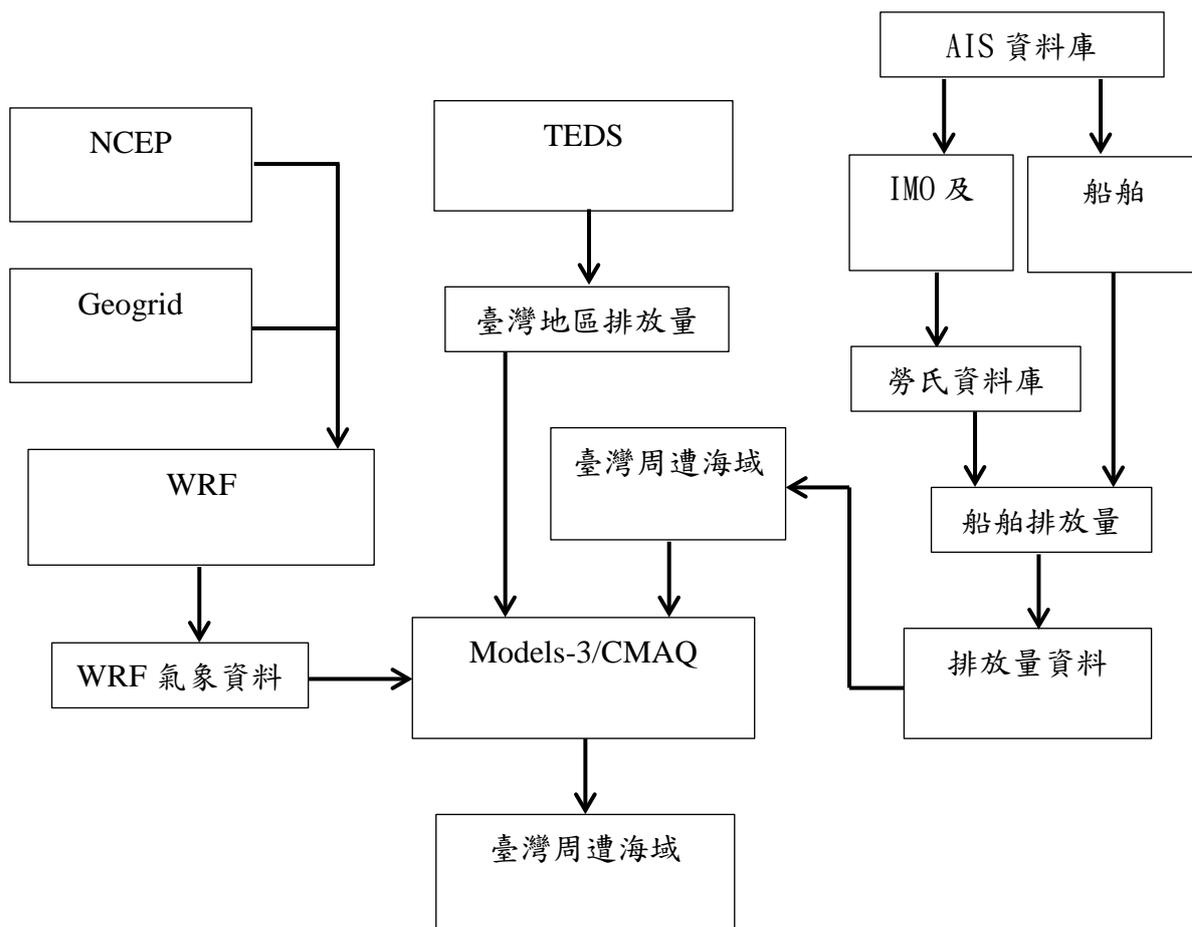
### 3.1 規劃執行流程

為建立臺灣周遭海域船舶航行對本島沿岸及港域空污預測模式，以提升港口國際形象，並確保環境永續發展，本研究採用 CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)三維網格模式模擬原生性與衍生性污染源影響臺灣之案例解析。其中 CMAQ 模擬使用之船舶污染物排放量，透過臺灣海域船舶動態資訊系統(AIS)抓取船舶航行之軌跡訊息，利用 AIS 所提供之船舶即時動態如船速、座標、航行狀態等資訊，搭配勞式資料庫中同一條船之引擎功率及最大船速等參數，最後套用洛杉磯港提供之船舶排放量計算公式，即可建立船舶之排放量資料。

利用前述所計算之船舶排放量資料搭配 TEDS(Taiwan Emission Data System)排放清冊所提供之點源、面源、線源與生物源等本土污染源排放量，以及氣象資料使用 WRF(Weather Research and Forecasting Model)所產生之風場資料，將前述兩者所述之污染物排放量與風場資料，應用 CMAQ 模式解析臺灣的歷史案例，分析其污染源排放對周界大氣之影響，如 2016 年臺灣周遭海域船舶污染物排放影響周界環境之貢獻比例。

本研究於解析臺灣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，將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 NO<sub>x</sub> 及衍生性細懸浮微粒等，本研究將分析 2016 年 1 月至 12 月全年之案例，同時建置三維網格空氣品質預測系統。

本研究執行流程如圖 3.1 所示，執行期間將採用先前建立之自動化排放量計算模組，搭配 CMAQ 三維網格預測模式與 WRF 三維網格氣象預測模式。



資料來源：本研究彙整。

圖 3.1 計畫目標執行流程圖

### 3.2 Models-3/CMAQ 模式性能評估

依據前期計畫結果，排放量基準年為 2013 年之 TEDS 9 所做之模式性能評估，其結果顯示全臺模式性能評估，PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>及 NO<sub>2</sub>皆符合模式規範，其中細懸浮微粒配對值分數偏差(MFB)、配對值絕對分數偏差(MFE)與相關係數(R)平均值分別為-0.2%、41.2%與 0.75，而符合模式性能評估規範之監測站比例分別為 90.4%、94.5%與 100%；同時，臭氧之模式性能評估結果，O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>及 NMHC 亦皆符合模式規範，其中臭氧配對值常化偏差(MNB)、配對值絕對常化誤差(MNE)、相關係數(R)與非配對峰值常化偏差(MB)之全臺平均值分別為 7.6%、26.0%、0.48與 5.3%，符合模式模擬性能評估規範之監測站比例分別為 69.0%、93.0%、76.1%與 77.5%。

本研究採用排放量基準年為 2016 年之 TEDS 10 排放量資料，搭配同為 2016 年之船舶海上排放量資料，以 Models-3/CMAQ 模擬分析 2016 年各空品區之點源、線源與面源的粒狀物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>與 NMHC 對於細懸浮微粒及臭氧濃度之影響，為確保模擬之準確性，亦進行如同前述 2013 年之模式性能評估，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，網格模式模擬結果應進行定性與定量性能評估；模式模擬定性性能評估包括模擬值與監測值之時序變化趨勢圖、散布圖與地面等濃度圖。模式模擬性能定量評估中，包括配對值分數偏差(Mean Fractional Bias, MFB)、絕對值絕對分數偏差(Mean Fractional Error, MFE)、非配對峰值常化偏差(Maximum peak normalized Bias, MB)、配對值常化偏差(Mean Normalized Bias, MNB)、配對值絕對常化誤差(Mean Normalized Error, MNE)及相關係數(Correlation coefficient, R)等統計參數，各參數之定義公式分別如下：

非配對峰值常化偏差(Maximum peak normalized Bias, MB) :

$$MB = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N \left( \frac{Max_{i=1}^{24}(P_{i,j,k}) - Max_{i=1}^{24}(O_{i,j,k})}{Max_{i=1}^{24}(O_{i,j,k})} \right) \dots\dots\dots(3-1)$$

配對值常化偏差(Mean Normalized Bias, MNB) :

$$MNB = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{i,k} - O_{i,k}}{O_{i,k}} \right) \dots\dots\dots(3-2)$$

配對值絕對常化誤差(Mean Normalized Error,MNE) :

$$MNE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{i,k} - O_{i,k}}{O_{i,k}} \right| \dots\dots\dots(3-3)$$

配對值分數偏差(Mean Fractional Bias, MFB) : :

$$MFB = \frac{2}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{i,k} - O_{i,k}}{P_{i,k} + O_{i,k}} \right) \dots\dots\dots(3-4)$$

配對值之絕對分數誤差(Mean Fractional Error, MFE) :

$$MFE = \frac{2}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{i,k} - O_{i,k}}{P_{i,k} + O_{i,k}} \right| \dots\dots\dots(3-5)$$

配對值偏差(Mean Biased Error, MBE) :

$$MBE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k}) \dots\dots\dots(3-6)$$

配對值絕對值偏差(Mean Absolute Gross Error, MAGE) :

$$MAGE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N |P_{i,k} - O_{i,k}| \dots\dots\dots(3-7)$$

相關係數(Correlation coefficient, R) :

$$R = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(P_{i,k} - \bar{P})(O_{i,k} - \bar{O})}{S_p S_o} \right] \dots\dots\dots(3-8)$$

$$\text{而 } \bar{P} = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N P_{i,k} \quad , \quad \bar{O} = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N O_{i,k} \quad , \quad S_p = \left[ \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - \bar{P})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad ,$$

$$S_o = \left[ \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (o_{i,k} - \bar{O})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

其中：

$P_{i,j,k}$  = 第 j 天、第 i 小時、第 k 測站之模擬值

$O_{i,j,k}$  = 第 j 天、第 i 小時、第 k 測站之監測值

$P_{i,k}$  = 第 i 小時(日)第 k 測站之模擬值

$O_{i,k}$  = 第 i 小時(日)第 k 測站之監測值

$N$  = 所有模擬小時(日)數

$M$  = 所有測站數

$\text{Max}$  = 第 j 天、第 k 測站最大小時值

$\bar{P}$  = 模擬區域範圍內所有測站之所有小時平均模擬值

$\bar{O}$  = 模擬區域範圍內所有測站之所有小時平均監測值

$S_p$  = 模擬區域範圍內所有測站之所有小時模擬值之標準偏差

$S_o$  = 模擬區域範圍內所有測站之所有小時監測值之標準偏差

於模擬  $\text{PM}_{10}$  或  $\text{PM}_{2.5}$  時，需同時比較  $\text{PM}_{10}$  或  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_2$  濃度之模擬結果與觀測值；於模擬臭氧時，需同時比較臭氧、 $\text{NO}_2$  及  $\text{NMHC}$  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 3-2 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  $\text{SO}_2$  與  $\text{NO}_2$  之配對值分數偏差(MFB)須介於 -65% ~ 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 3-2 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 <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub>	±65%	<85%	0.45

資料來源：環保署民國 105 公告之模式性能規範恕限值。

臭氧(O<sub>3</sub>)之模式模擬性能評估規範則如表 3-3 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 3-3 臭氧之模式模擬性能評估規範值**

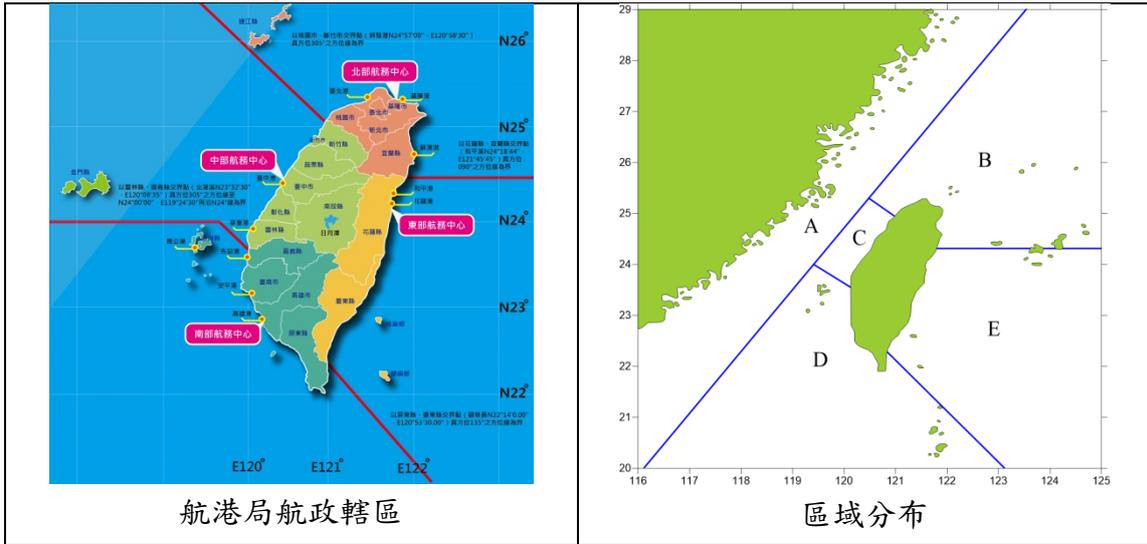
	項目	MB	MNB	MNE	R 值
臭氧	O <sub>3</sub>	± 10%	± 15%	35%	0.45
	NO <sub>2</sub> , NMHC	-	-40%~50%	80%	0.35

資料來源：環保署民國 105 公告之模式性能規範恕限值。

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百分之六十以上。

### 3.3 排放量推估

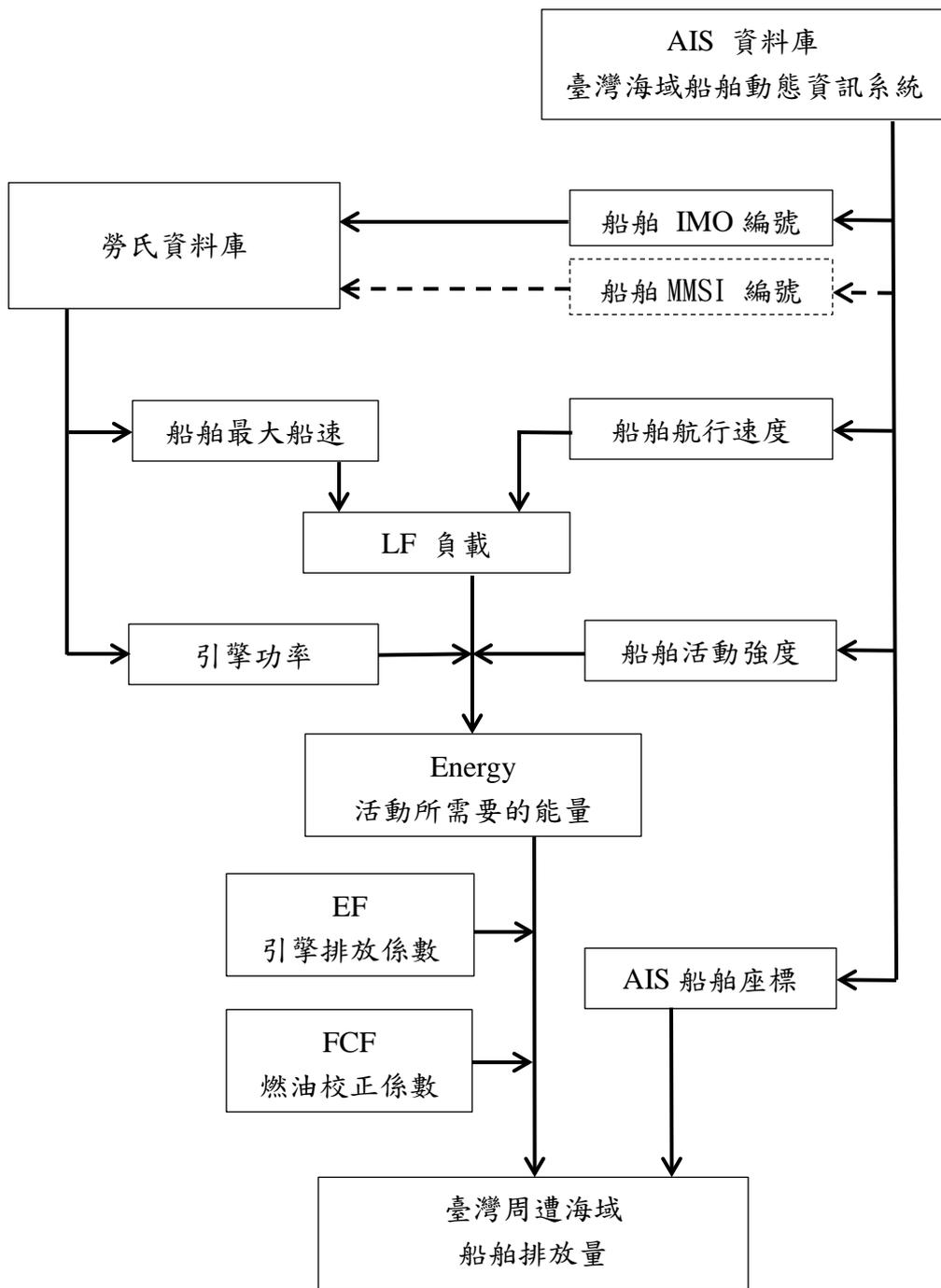
排放量推估主要分為臺灣周遭海域與港口兩個部分，其中海域部分參照航港局航政轄區加上海峽中線，共分為 A、B、C、D 及 E 五個區域，其中海峽中線以西海域為區域 A，原本北部航務中心轄區則為 B 區，中部航務中心轄區為 C 區，南部航務中心轄區為 D 區，東部航務中心轄區則為 E 區，各區域分布範圍如圖 3.2 所示。港口的部分則分為高雄港、臺中港、臺北港、基隆港與花蓮港等主要商港，最後再將港口排放量細分為港內排放與距離港口外 20 海浬內之船舶排放量。



資料來源：本研究彙整。

圖 3.2 海上船舶排放量區域分布

船舶排放推估可透過如圖 3.3 排放量推估流程所示，本研究採用洛杉磯港船舶排放量計算公式，透過 AIS 資料庫抓取船舶 IMO 編號，對應勞氏資料庫中之 IMO 編號，若沒有符合之船隻，則再度抓取 AIS 資料中同一船舶之 MMSI 編號，重新搜尋勞氏資料庫中之 MMSI 編號，最終取得資料庫中此一船舶之最大船速、主引擎功率、輔助引擎功率以及鍋爐功率等參數。其中船舶最大船速搭配 AIS 資料中之船舶航行速度，用以計算船舶之負載(LF)，同時取得引擎功率再加上引擎排放係數(EF)、燃油校正係數(FCF)以及負載情況，即可計算船舶之污染物排放量。



資料來源：本研究彙整。

圖 3.3 排放量推估流程圖

### 3.3.1 AIS 資料庫

本所港研中心之前建之 AIS 系統已於 107 年底移轉給交通部航港局，本研究之 AIS 資料係經由本所介接航港局之資料，其檔案格式為逗號分隔之 csv 檔案，資料共計有 11 個欄位，依序分別為 IMO 編號、船隻呼號、水上行動業務識別碼、航行狀態、航速、經度、緯度、船舶類型、船長 A、船長 B 以及記錄時間，各欄位名稱如表 3-4。本研究使用 AIS 資料中之 IMO 及 MMSI 等欄位找尋勞氏資料庫中該船之引擎功率以及最大船速等參數，以計算該船之污染物排放量。

表 3-4 AIS 資料欄位

Field	Description
IMO_Number	(IMO Number)國際海事組織編號
Call_Sign	(Call Sign)呼號
MMSI	(MMSI, Maritime Mobile Service Identities Code)水上行動業務識別碼
Navigation_Status	(Navigation status)航行狀態
SOG	(Speed Over Ground, SOG)航速
Longitude	經度
Latitude	緯度
Ship_and_Cargo_Type	(Type of ship)船舶類型
Reference_Position_A	A+B = 船長
Reference_Position_B	
Record_Time	此筆紀錄接收時間

資料來源：本研究彙整。

### 3.3.2 勞氏資料庫

本研究使用之勞氏資料庫為根據 2015 年高雄港區空氣污染擴散與監測系統規畫之研究執行單位所提供，資料並已更新到 2017 年 4 月，其格式為 Access 資料庫格式，將該資料轉換為空白間格之文字檔案格式，使用 Fortran 格式為(I9, A15, A9, A7, A7, A6, A10, A12, A6, A7, A8, 2A12, A11, I11)，供 AIS 對照並篩選引擎功率使用，欄位名稱依序為 IMO 編號、呼號、總噸、總長、主船種、引擎數量、轉速、引擎馬力、引擎種類、最大船速、標準貨櫃數、輔助引擎功率、鍋爐功率、引擎判斷 Tier 之時間以及水上行動業務識別碼。各欄位名稱說明如表 3-5。

表 3-5 勞氏資料庫欄位名稱

	欄位名稱	代碼
1	IMO 號	imo_no
2	呼號	call_sign
3	總噸	dwt
4	總長	loa
5	主船種	main_vesse
6	引擎數量	engine_num
7	轉速(rpm)	engine_rpm
8	引擎馬力(kw)	engine_kw_
9	引擎種類(柴油、渦輪、混合等等)	engine_typ
10	最大船速(節)	speed
11	標準貨櫃數	teu
12	輔助引擎功率	AE_ENERGY
13	鍋爐功率	AB_ENERGY
14	Tier 判斷	due_or_del
15	水上行動業務識別碼	MMSI

資料來源：瑩諮科技股份有限公司，2015：本研究彙整。

### 3.3.3 船舶排放量

由於船舶種類眾多，若依據 CARB(California Air Resources Board) 定義，只要符合下列三項其中一項條件，則歸屬於遠洋船舶類型(Ocean Going Vessel, OGV)：

- 1.船舶長度總長(Length Overall, LOA) 400 呎(122 公尺)或以上。
- 2.船舶重量總噸位(Gross Tonnage, GT) 10,000 噸或以上。
- 3.船舶使用柴油引擎，且汽缸排氣量達 30L 或以上。

遠洋船舶排放量推估公式如下：

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF \dots \dots \dots (3-9)$$

其中 E 是引擎的排放量(g)、Energy 是所需要的能量(kW · h)、EF 是排放係數(g/kW · h)與 FCF 是(HFO)燃料校正係數。又排放量推估公式中所需要的能量，可藉由下列公式推估之：

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act} \dots \dots \dots (3-10)$$

其中 MCR 是最大引擎動力(kW)、LF 是負載係數與，Act 則是活動量(hr)。

各排放係數說明如下：

#### 1.缺值預設：

因為在船舶註冊資料中如勞氏資料庫，一般只有少數船舶登記輔助引擎甚至鍋爐的資料，其船舶資料或有缺值的情況產生，因此只能藉由相關研究資料取得各型船隻的船重、最大船速及引擎功率等資料，作為無資料船舶的預設值，因此本研究引用 2011 年至 2013 年洛杉磯港報告中所提出之建議缺值預設，其值則為進出洛杉磯港期間各船種之船舶參數平均值，如表 3-6。輔助引擎及鍋爐在海上、調度、繫泊及錨泊狀態下之預設功率則如表 3-7 及表 3-8 所示。

表 3-6 船舶缺值預設表

船種別	DWT(公噸)	最大船速(節)	主引擎功率(kW)
汽車船(Auto Carrier)	25,048	19.7	12,930
散裝船(Bulk)	50,582	14.3	8,249
貨櫃船(Container-1000)	14,587	20.1	16,727
貨櫃船(Container-2000)	38,640	22.0	22,576
貨櫃船(Container-3000)	45,510	22.5	29,424
貨櫃船(Container-4000)	60,853	24.0	40,479
貨櫃船(Container-5000)	67,460	25.1	52,364
貨櫃船(Container-6000)	79,123	25.1	61,214
貨櫃船(Container-7000)	78,704	25.3	58,355
貨櫃船(Container-8000)	101,000	25.4	67,547
貨櫃船(Container-9000)	102,725	24.9	64,818
貨櫃船(Container-10000)	112,247	24.8	62,684
貨櫃船(Container-11000)	120,805	24.8	68,639
貨櫃船(Container-13000)	142,865	22.9	64,017
客船(Cruise)	6,849	21.6	52,184
一般貨船(General Cargo)	43,747	15.5	9,903
遠洋拖船(ATB/ITB)	798	13.5	7,421
其他(Miscellaneous)	10,987	15.0	13,129
冷藏船(Reefer)	12,499	19.1	9,350
油船(Tanker-Chemical)	26,663	14.8	8,323
油船(Tankers-Handysize)	45,728	14.7	8,696
油船(Tankers-Panamax)	70,610	14.9	11,573
油船(Tankers-Aframax)	105,845	14.9	12,532

資料來源： Aldrete, G. et al.(2011~2013)：本研究彙整。

表 3-7 輔助引擎缺值預設表

船種別	海上(kW)	調度(kW)	繫泊(kW)	錨泊(kW)
汽車船(Auto Carrier)	503	1,508	838	503
散裝船(Bulk)	255	675	150	255
貨櫃船(Container-1000)	545	1,058	429	545
貨櫃船(Container-2000)	981	2,180	1,035	981
貨櫃船(Container-3000)	602	2,063	516	602
貨櫃船(Container-4000)	1,434	2,526	1,161	1,434
貨櫃船(Container-5000)	1,725	3,367	900	1,725
貨櫃船(Container-6000)	1,453	2,197	990	1,453
貨櫃船(Container-7000)	1,444	3,357	1,372	1,444
貨櫃船(Container-8000)	1,494	2,753	902	1,494
貨櫃船(Container-9000)	1,501	2,942	1,037	1,501
貨櫃船(Container-10000)	2,300	2,350	1,450	2,300
貨櫃船(Container-11000)	2,000	4,000	1,500	2,000
貨櫃船(Container-13000)	1,865	3,085	982	1,865
客船(Cruise)	7,058	9,718	5,353	7,058
一般貨船(General Cargo)	516	1,439	722	516
遠洋拖船(ATB/ITB)	79	208	102	79
其他(Miscellaneous)	72	191	42	72
冷藏船(Reefer)	513	1,540	890	513
油船(Tanker-Chemical)	658	890	816	658
油船(Tankers-Handysize)	537	601	820	537
油船(Tankers-Panamax)	561	763	623	561
油船(Tankers-Aframax)	806	1,109	874	806

資料來源：Aldrete, G., et al.(2012~2014)：本研究彙整。

表 3-8 鍋爐缺值預設表

船種別	海上(kW)	調度(kW)	繫泊(kW)	錨泊(kW)
汽車船(Auto Carrier)	253	351	351	351
散裝船(Bulk)	132	132	132	132
貨櫃船(Container-1000)	241	241	241	241
貨櫃船(Container-2000)	325	325	325	325
貨櫃船(Container-3000)	474	474	474	474
貨櫃船(Container-4000)	492	492	492	492
貨櫃船(Container-5000)	545	547	547	547
貨櫃船(Container-6000)	577	573	573	573
貨櫃船(Container-7000)	538	551	551	551
貨櫃船(Container-8000)	650	531	531	531
貨櫃船(Container-9000)	475	475	475	475
貨櫃船(Container-10000)	708	708	708	708
貨櫃船(Container-11000)	600	600	600	600
貨櫃船(Container-13000)	599	599	599	599
客船(Cruise)	1,482	1,482	1,482	1,482
一般貨船(General Cargo)	137	137	137	137
遠洋拖船(ATB/ITB)	-	-	-	-
其他(Miscellaneous)	137	137	137	137
冷藏船(Reefer)	255	255	255	255
油船(Tanker-Chemical)	371	371	821	371
油船(Tankers-Handysize)	371	371	2,586	371
油船(Tankers-Panamax)	371	371	3,293	371
油船(Tankers-Aframax)	371	371	3,000	371

資料來源：Aldrete, G. ,et al.(2012~2014)：本研究彙整。

## 2.排放係數：

主引擎的排放係數與引擎的製造年份、引擎種類以及引擎轉速的快慢有關，如表 3-9，柴油引擎依照引擎的製造年份，2000 年以前由於 IMO 並未規範引擎的環保標準，因此為 0 期引擎(Tier 0)，又 2000 年至 2010 年生產的引擎為 1 期引擎(Tier 1)，而 2011 年至 2015 年生產的引擎則為 2 期引擎(Tier 2)，共區分為 3 個期別。其中引擎的最大轉速又可區分為轉速低於 130 rpm 的慢速引擎(Slow Speed Diesel)以及轉速大於 130 rpm，一般則介於 400 ~ 2000 rpm 之間的中速引擎(Medium Speed Diesel)。另外，亦區分有氣體渦輪機引擎(Gas Turbine)及蒸汽渦輪引擎(Steam Turbine)兩種。一般船舶使用含硫量 2.7% 之重油(HFO)的排放係數，若船舶進港之前即將重油切換為柴油，則需使用柴油之係數，另外再根據硫含量以不同的油料校正係數校正之。輔助引擎及鍋爐之排放係數如表 3-10 及表 3-11 所示。其中排放係數單位為 g/kW·h。

表 3-9 主引擎排放係數(g/kW·h)

引擎種類	IMO 期別	出廠年份	NOx	SOx	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
含硫量 2.7% (HFO) 重油						
慢速引擎	Tier 0	≤ 1999	18.1	10.5	1.50	1.2
中速引擎	Tier 0	≤ 1999	14.0	11.5	1.50	1.2
慢速引擎	Tier 1	2000 ~ 2010	17.0	10.5	1.50	1.2
中速引擎	Tier 1	2000 ~ 2010	13.0	11.5	1.50	1.2
慢速引擎	Tier 2	2011 ~ 2015	15.3	10.5	1.50	1.2
中速引擎	Tier 2	2011 ~ 2015	11.2	11.5	1.50	1.2
氣體渦輪引擎	na	all	6.1	16.5	0.05	0.04
蒸氣渦輪引擎	na	all	2.1	16.5	0.80	0.64
含硫量 0.5% (MDO) 重油						
慢速引擎	Tier 0	≤ 1999	17.0	1.9	0.38	0.35
中速引擎	Tier 0	≤ 1999	13.2	2.1	0.38	0.35
慢速引擎	Tier 1	2000 ~ 2010	16.0	1.9	0.38	0.35
中速引擎	Tier 1	2000 ~ 2010	12.2	2.1	0.38	0.35
慢速引擎	Tier 2	2011 ~ 2015	14.4	1.9	0.38	0.35
中速引擎	Tier 2	2011 ~ 2015	10.5	2.1	0.38	0.35
氣體渦輪引擎	na	all	5.7	3.1	0.01	0.01
蒸氣渦輪引擎	na	all	2.0	3.1	0.20	0.18

資料來源：Aldrete, G. ,et al. (2013)：本研究彙整。

表 3-10 輔助引擎排放係數(g/kW·h)

IMO 期別	出廠年份	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
含硫量 2.7% (HFO) 重油					
Tier 0	≤ 1999	14.7	12.3	1.50	1.2
Tier 1	2000 ~ 2010	13.0	12.3	1.50	1.2
Tier 2	2011 ~ 2015	11.2	12.3	1.50	1.2
含硫量 0.5% (MDO) 重油					
Tier 0	≤ 1999	13.8	2.3	0.38	0.35
Tier 1	2000 ~ 2010	12.2	2.3	0.38	0.35
Tier 2	2011 ~ 2015	10.5	2.3	0.38	0.35

資料來源：Aldrete, G. ,et al. (2013)：本研究彙整。

表 3-11 鍋爐排放係數(g/kW·h)

Fuel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
HFO 2.7% Sulfur	2.1	16.5	0.8	0.64
MDO 0.5% Sulfur	2.0	3.1	0.2	0.18

資料來源：Aldrete, G. ,et al. (2013)：本研究彙整。

### 3. 燃油校正係數：

船舶引擎使用不同的燃油，其污染排放量會隨之變化，主要為油中含硫量的差異，會造成 SO<sub>2</sub> 的排放量不同；前面所述之主引擎、輔助引擎及鍋爐的排放係數，均是以含硫量 2.7% 的重油或 0.5% 的柴油為基準，故使用低硫燃油時，需加乘燃油校正係數，如表 3-12 是以 2.7% 的重油(HFO)為基礎的校正係數，亦即含硫量 2.7% 重油之 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 及 PM 等污染物種，其燃油校正係數均為 1.0。

若計算時採用排放係數表中重油(HFO)的係數，則切換為柴油時，直接乘上校正係數表中相對應的燃油校正係數即可；又若計算時採用排放係數表中柴油(MDO)的係數，則進行硫含量校正時，須先轉換為該油料含硫量的排放係數，再乘以該含硫量之校正係數；以含硫量 1.0% 之計算方式為例，如 NO<sub>x</sub> 輔助引擎 2.7%時為 14.7，0.5%時為 13.8，則換算 1.0%時即為 14.4；SO<sub>x</sub> 輔助引擎 2.7%時為 12.3，0.5%時為 2.3，則換算 1.0%時即為 4.6，此時再乘上燃油校正係數(FCF)之 NO<sub>x</sub> 為 1.0，SO<sub>x</sub> 則為 0.370，即為該船舶使用 1.0%含硫量之排放量。

#### 4. 低負載：

船舶負載資料與船舶行進速度有密切關聯性，一般在 20% ~ 80% 的負載時，可估計為實際船速與最大船速比值的 3 次方值(Propeller Law)，公式如下所示：

$$LF = (AS / MS)^3 \dots\dots\dots(3-11)$$

其中，AS 為船舶實際船速，而 MS 則為最大船速，其單位均為節。如此便可由船速估計主引擎負載，進而進行排放量估算。

當負載小於 20%時，上述方程式會有少許誤差，故需另以低負載調整因子加以修正。一般來說，柴油引擎在低負載或非常高的負載時，其引擎效率並不好，EEIA(Energy and Environmental Analysis, Inc.)在其研究報告中建置一個計算柴油引擎在低負載運轉時，例如在港區內的移動及調度時引擎的排放係數校正公式。由於柴油引擎在低負載時比較沒有效率，故雖然引擎廢氣單位時間的總排放量在低負載時較低，然而排放係數實際上卻是增加的。

為方便推估時使用，故將此公式推估出 1% ~ 20% 的值，再除以 20% 時的值，以作為低負載時的校正係數(LLA, Low-Load Adjustment foactor)，實際計算時，只要將結果再乘以校正係數即可得到正確的推估值。低負載校正係數如表 3-13 所示，但因為主引擎的負載下限訂為 2%，因此表中僅列出 2% ~ 20% 之係數。

表 3-12 MDO/MGO 燃油校正係數

硫含量(%)	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	硫含量(%)	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
1.00	1.00	0.370	0.73	0.27	0.94	0.100	0.20
0.90	0.94	0.333	0.34	0.26	0.94	0.096	0.20
0.82	0.94	0.304	0.32	0.25	0.94	0.093	0.20
0.75	0.94	0.278	0.31	0.23	0.94	0.085	0.20
0.67	0.94	0.248	0.29	0.21	0.94	0.078	0.19
0.63	0.94	0.233	0.28	0.20	0.94	0.074	0.19
0.60	0.94	0.222	0.27	0.19	0.94	0.070	0.19
0.58	0.94	0.215	0.27	0.17	0.94	0.063	0.18
0.54	0.94	0.200	0.26	0.16	0.94	0.059	0.18
0.53	0.94	0.196	0.26	0.15	0.94	0.056	0.18
0.51	0.94	0.189	0.25	0.14	0.94	0.052	0.18
0.50	0.94	0.185	0.25	0.13	0.94	0.048	0.18
0.46	0.94	0.170	0.24	0.12	0.94	0.044	0.17
0.45	0.94	0.167	0.24	0.11	0.94	0.041	0.17
0.43	0.94	0.159	0.24	0.10	0.94	0.037	0.17
0.42	0.94	0.156	0.23	0.09	0.94	0.033	0.17
0.41	0.94	0.152	0.23	0.08	0.94	0.030	0.17
0.40	0.94	0.148	0.23	0.07	0.94	0.026	0.16
0.39	0.94	0.146	0.23	0.06	0.94	0.022	0.16
0.38	0.94	0.141	0.23	0.05	0.94	0.019	0.16
0.36	0.94	0.133	0.22	0.04	0.94	0.015	0.16
0.35	0.94	0.130	0.22	0.03	0.94	0.011	0.16
0.34	0.94	0.126	0.22	0.02	0.94	0.007	0.15
0.30	0.94	0.111	0.21	0.01	0.94	0.004	0.15

資料來源：Aldrete, G. ,et al. (2012、2013)：本研究彙整。

表 3-13 低負載校正係數

Load	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	Load	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
20%	1.00	1.00	1.00	10%	1.22	1.00	1.38
19%	1.01	1.00	1.02	9%	1.27	1.00	1.48
18%	1.02	1.00	1.04	8%	1.35	1.00	1.61
17%	1.03	1.00	1.06	7%	1.45	1.00	1.79
16%	1.05	1.00	1.08	6%	1.60	1.00	2.04
15%	1.06	1.00	1.11	5%	1.83	1.00	2.44
14%	1.08	1.00	1.15	4%	2.21	1.00	3.09
13%	1.11	1.00	1.19	3%	2.92	1.00	4.33
12%	1.14	1.00	1.24	2%	4.63	1.00	7.29
11%	1.17	1.00	1.30				

資料來源：Aldrete, G. ,et al. (2013)：本研究彙整。

#### 5. 輔助引擎負載：

船舶之輔助引擎主要用於停泊時的燈光、空調及通訊等船上電力的供應，在航道或開放水域上因為可由主引擎提供上述之電力來源，因此輔助引擎此時的負載最低。當船舶處於調度移動狀態時，因需要提供船首推進器隨時在備用狀態，輔助引擎此時的負載可能最高。因此輔助引擎的活動量是以船舶的調度時間加上停泊的時間作為其活動量係數，負載因子則可由 Aldrete 等人於 2007 年在 Puget Sound maritime air emission inventory 發表的文獻中查得一般船舶柴油引擎的操作負荷表，而負載資料亦僅就船舶在各個型態的時間來估計其負載的變化情形。輔助引擎負載如表 3-14 所示。

表 3-14 輔助引擎負載預設值

船種別	港外	港內	停泊
汽車船(Auto Carrier)	0.15	0.45	0.26
散裝船(Bulk)	0.17	0.45	0.1
貨櫃船(Container)	0.13	0.5	0.18
客船(Cruise)	0.15	0.45	0.32
一般貨船(General Cargo)	0.17	0.45	0.22
遠洋拖船(ATB/ITB)	0.17	0.45	0.22
其他(Miscellaneous)	0.17	0.45	0.22
冷藏船(Reefer)	0.15	0.45	0.32
駛上駛下船(RoRo)	0.15	0.45	0.26
油船(Tanker)	0.24	0.33	0.26

資料來源：Aldrete, A., et al. (2007)：本研究彙整。

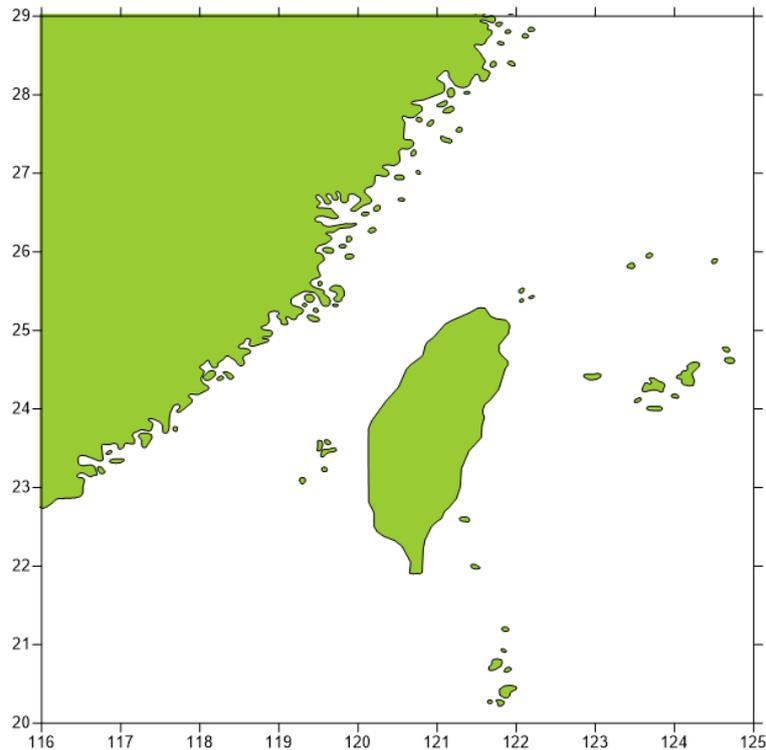
### 3.4 排放量自動化模組

#### 3.4.1 排放量計算方式

依據前期計畫結果，臺灣海域船舶排放量推估透過前述 3.2 小節所述之排放量推估方式，採用洛杉磯港船舶排放量計算公式，透過 AIS 資料庫抓取船舶 IMO 及 MMSI 編號，搭配勞氏資料庫中同一編號之船舶種類，以取得船舶最大船速、主引擎功率、輔助引擎功率以及鍋爐功率等參數。其中最大船速搭配 AIS 資料中當時船舶航行之船速、航行狀態，即可計算該船舶當時之負載(LF)，同時抓取之引擎功率再利用引擎排放係數(EF)、燃油校正係數(FCF)以及負載情況，利用洛杉磯港船舶排放量計算公式計算船舶排放量。

船舶航行速度之單位為節(Knot)，其單位符號為 kn 或 kt，是專門用於計算航海速率的單位，而海浬為海上的長度單位，即船舶每小時航行 1 海浬的速度叫做 1 節，原本指的是地球子午線上緯度 1 分的長度，但因地球自轉的關係，略為呈現橢球體形狀，因此在不同緯度的 1

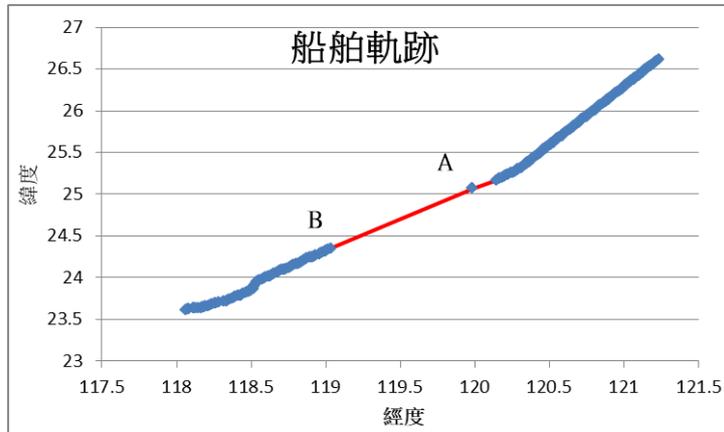
分其弧度略有差異。1929 年國際水文地理學會議，通過以 1 分的平均長度 1,852 公尺(或 6,076.115 英尺)作為 1 標準海哩長度，目前已為國際上所採用。若約略以臺灣為中心，分別在東經 116~125 度之間，北緯 20~29 之間，各以 0.01 度(1,111.2m，換算距離約為 1km)為一網格間距，則可得到網格點  $901 * 901 = 811,801$  個網格點，同時每個網格點的座標以該網格之西南角為座標點位置，網格分布範圍則如圖 3.4。



資料來源：本研究彙整。

**圖 3.4 臺灣周遭海域**

經由取得 AIS 資料中之各個欄位資料，可以得到該筆船舶的經緯度座標位置以及船舶當時的航行速度(SOG)，若同時取得船舶該筆資料的記錄時間，再利用前述網格點建置方法，即可建立該網格點的船舶軌跡資料；由於船舶軌跡記錄中間有可能因為訊號不佳或其他因素，可能造成缺值、軌跡中斷的情形產生，如圖 3.5；假使圖中 A 點為第一筆資料，B 點為第二筆資料，則假設 B 點之活動時間為(B - A)，亦即中斷之軌跡線總排放量會累積計算至 B 點，以減低中斷之軌跡線排放影響。



資料來源：本研究彙整。

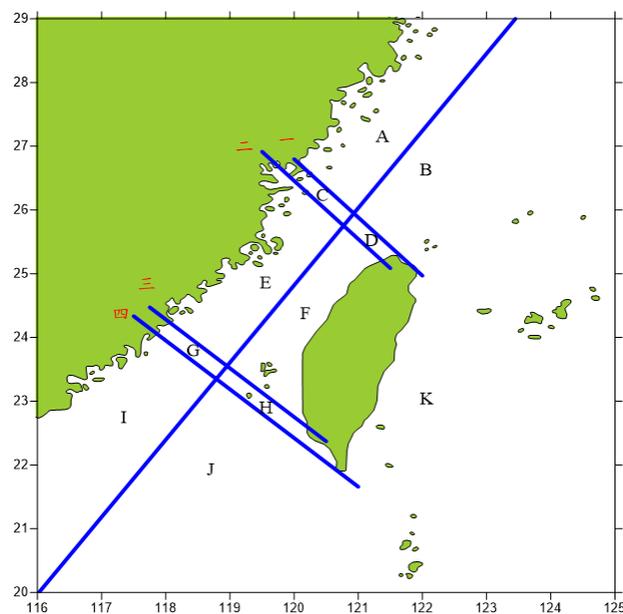
**圖 3.5 AIS 船舶軌跡缺值示意圖**

本研究利用船舶軌跡計算網格排放量，首先必須先要將 AIS 各筆資料之記錄時間排序，之後於排序過之 AIS 資料中，找出計算期間內共有多少艘船舶經過，亦即相同的船舶 IMO 編號筆數，同時剔除數據資料中 IMO 編號異常(依據勞氏資料庫中 IMO 編號介於 100 萬至 1,000 萬之間)，通常為亂碼、0、-1 或是編號超出 1,000 萬、小於 100 萬的數據，也就是在勞氏資料庫中找無此筆數據；由於此類數據無法得知船舶之引擎功率、最大船速等資訊，故無法計算船舶之排放量，必須事先移除之。

之後便可依照船舶各別之 IMO 編號，依序篩選同一條船的記錄時間，按照前後兩筆資料之時間差，換算為該筆資料之活動強度，如為第一筆則時間假定為當時段與 0 分之差值為其活動強度。例如有第一筆資料時間為 0 時 20 分，則其活動強度為  $(20 - 0)/60 = 0.333$ ；第二筆資料時間為 0 時 26 分，其活動強度則為  $(26 - 20)/60 = 0.1$ 。假若期間有缺值產生，如第三筆資料時間為 2 時 32 分，該筆資料活動強度變為  $(212 - 26)/60 = 3.1$ 。而當船舶前後記錄時間超過 3 小時以上，則視為下一段軌跡線的開始。

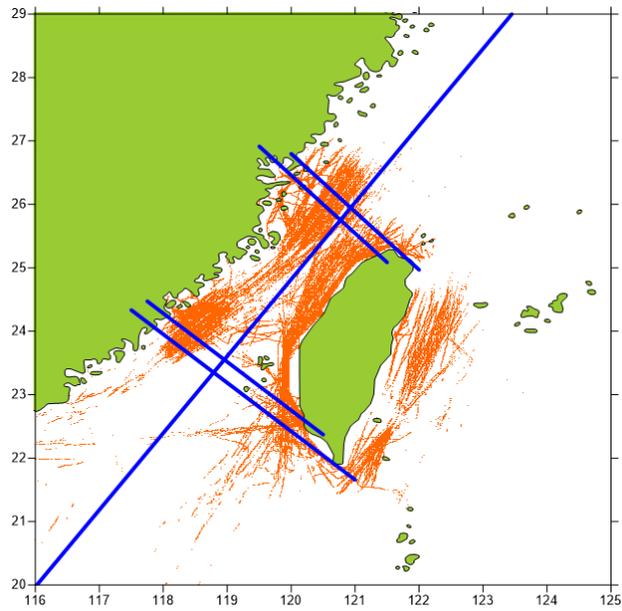
應用前述計算之活動強度，搭配勞氏資料庫篩選 IMO 船舶之引擎功率、最大船速等，以及其排放係數等資訊，即可計算該筆資料所代表之排放量。再利用該筆資料所在之座標，使各筆資料隸屬於該所屬網格點，最後即可將相同網格之排放量加總，得出單位網格點之排放量結果。由於亦可藉由水上行動業務識別碼，即 MMSI(Maritime Mobile Service Identities Code)抓取特定之船舶軌跡，故依據前述船舶軌跡篩選方式，本研究將透過利用 IMO 再加上 MMSI 兩種篩選方式，計算 2013 年 AIS 臺灣周遭海域之船舶排放量。

透過 IMO 加上 MMSI 所篩選出來之船舶軌跡，由於資料可用率稍低且篩選出之軌跡常有突然中斷、缺值的情形，所以將範圍內之區域區隔為 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K 等 11 個區域，分別如圖 3.6 及圖 3.7 所示。由於船舶航行為一持續軌跡線，而東北區域(區域 A、B)及西南區域(區域 I、J)之軌跡線經常為缺值的狀態，所以東北區域採用 2017/7/20 及 2017/7/25 兩天之軌跡排放量平均，而西南區域則採用 2016/10/27 及 2016/10/28 兩天之軌跡平均，以補足船舶軌跡空白的情形發生，並當作軌跡推算排放量之基準使用，分布情形則如圖 3.8。



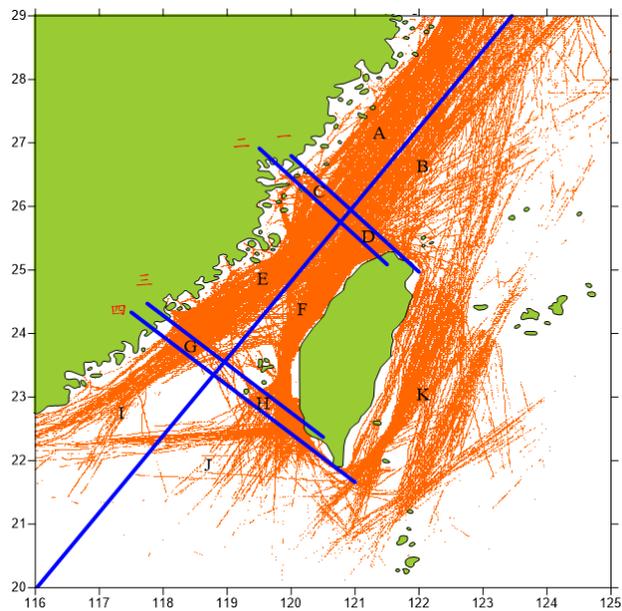
資料來源：本研究彙整。

圖 3.6 臺灣周遭海域區間分布圖



資料來源：本研究彙整。

**圖 3.7 船舶軌跡與區間分布**



資料來源：本研究彙整。

**圖 3.8 船舶軌跡推算排放量基準**

依據符合篩選之船舶軌跡推算出來之原始排放量，與相同區域之基準排放量之比例，則可依照對應的區域排放量比例來推算船舶軌跡空白的區域排放量，如可用其中的區域 C 推算區域 A、區域 D 推算區域 B、區域 G 推算區域 I 及 區域 H 推算區域 J，中間的區域 E 則由區域 C、G 兩區域推算，而區域 C、D、F、G、H、K 則沿用原始推算之排放量。

### 3.4.2 自動化模組計算

依據前期計畫結果，由於 AIS 數據量龐大，動輒數萬甚至百萬筆數據，若使用前述 3.3.1 小節手動計算排放量方式，其計算過程繁複且較花費時間，同時容易產生人為錯誤；故本研究將排放量計算過程批量化執行，利用批次檔執行數個步驟等計算方式，將其轉換為可自動電腦執行，以利後續 CMAQ 模擬推估時應用。各步驟說明如下：

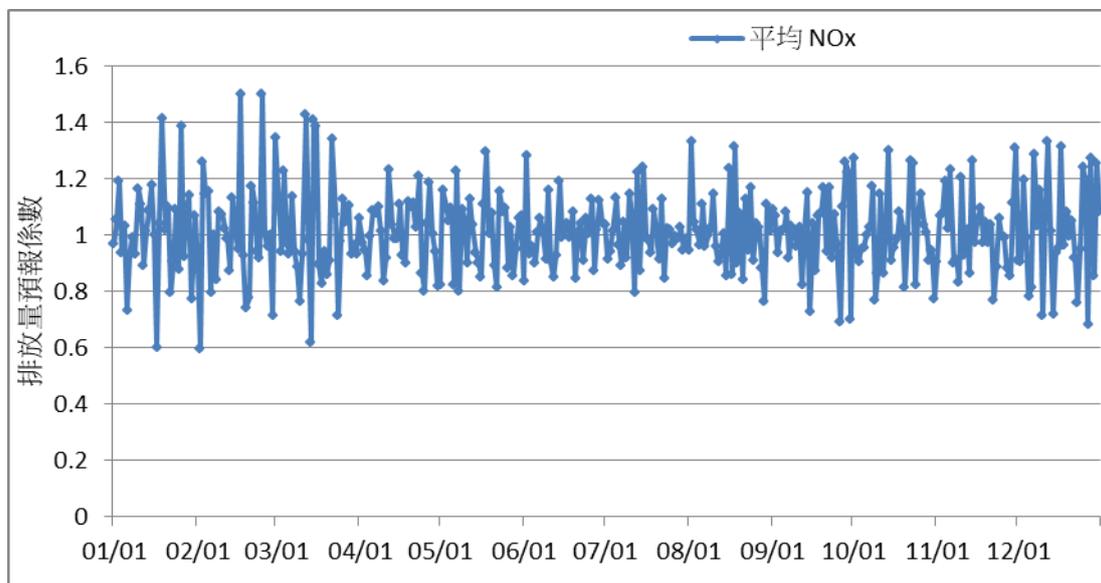
1. 船舶資訊：抓取每一條船之軌跡，並對照勞氏資料庫輸出船舶之引擎功率、船速等參數。
2. 計算排放量：依據洛杉磯港提供之排放量計算公式，計算由步驟 1 抓取之船舶排放量。
3. 區域比例推算：依照預先設定之基準區域排放量，回推各區域之船舶排放量。
4. 預測係數：當日排放量乘上預測係數即可得到隔日之預測排放量。

### 3.4.3 排放量預測係數

依據前期計畫結果，排放係數為排放量預測係數，係採用 2013 年及 2016 年計算之區域百分比反推之船舶排放量為基礎，將隔天之排放量除以今日之排放量，以計算次日排放量為今日排放量的比值；亦即假若以今日之排放量為  $E_0$ ，隔天之排放量為  $E_1$ ，則排放量預測係數  $a_1$  就等於  $E_1/E_0$ ，藉此預測未來之排放量。

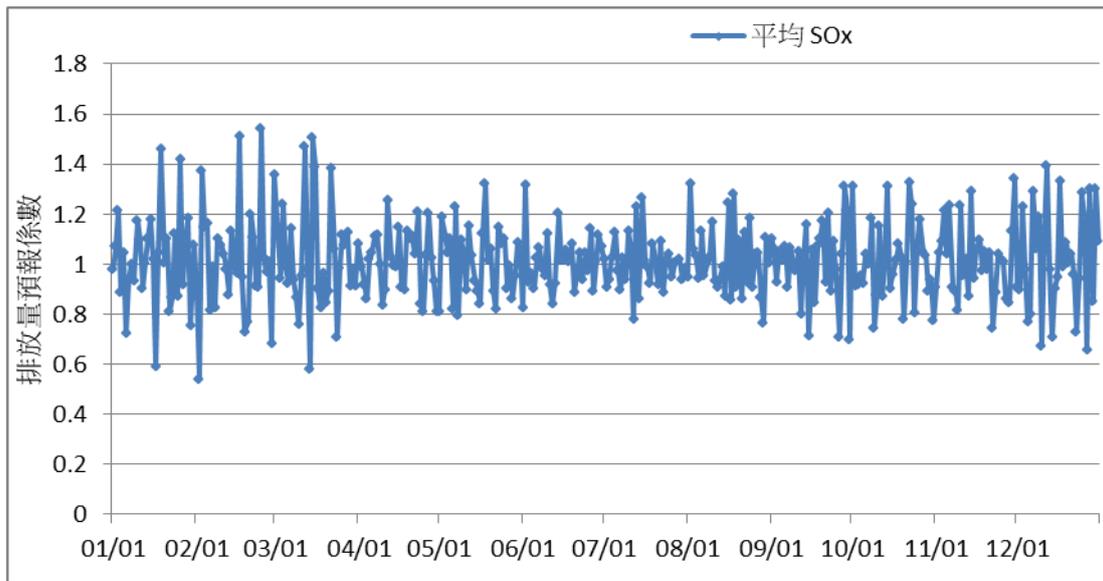
之後剔除 2013 年及 2016 年各別明顯之異常高值以及  $\text{NO}_x$  預測係數  $< 0.6$  之數值，並將 2013 年每一天搭配 2016 年全年相同日期之預測係數平均，即可得到全年每一天之排放量預測係數。 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 PM 其結果分別如圖 3.9 至圖 3.11。

由於春節屬於東亞及東南亞重大節日之一，且每年之春節期間日期不盡相同，故特將 2013 年及 2016 年春節期間之排放量挑選出來，計算其排放量預測係數並將兩年之係數平均，其結果如圖 3.12 所示。圖中顯示春節初一至初五期間之船舶排放量變化並不大。



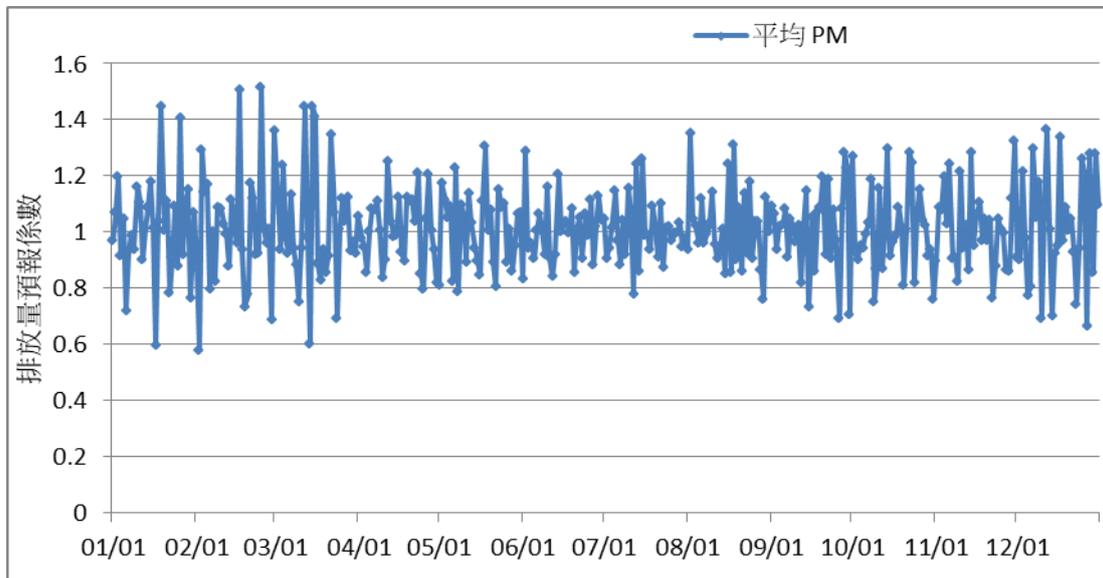
資料來源：本研究彙整。

圖 3.9  $\text{NO}_x$  排放量預測係數



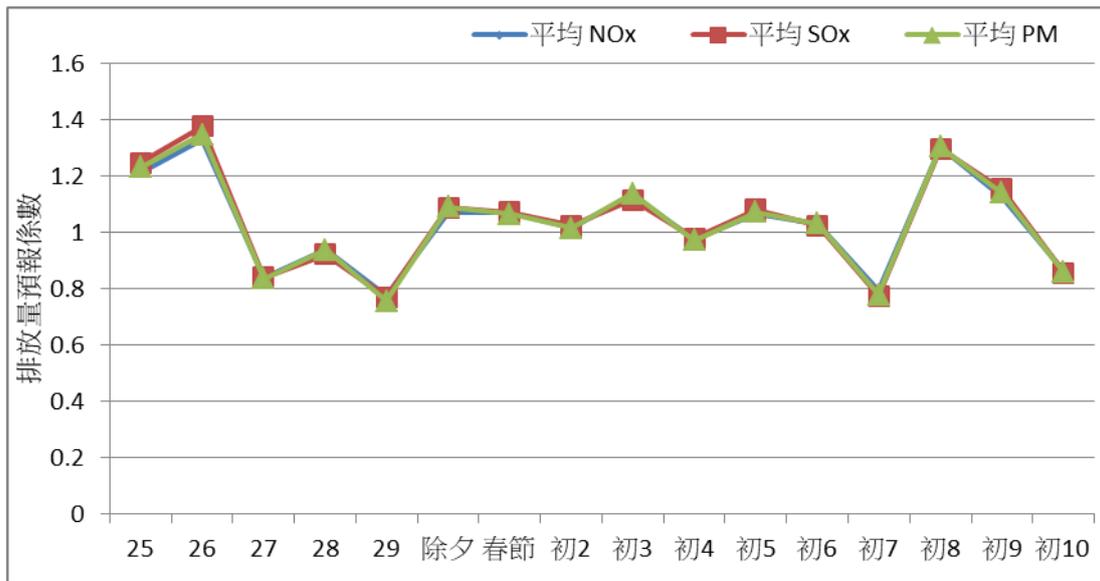
資料來源：本研究彙整。

圖 3.10 SOx 排放量預測係數



資料來源：本研究彙整。

圖 3.11 PM 排放量預測係數



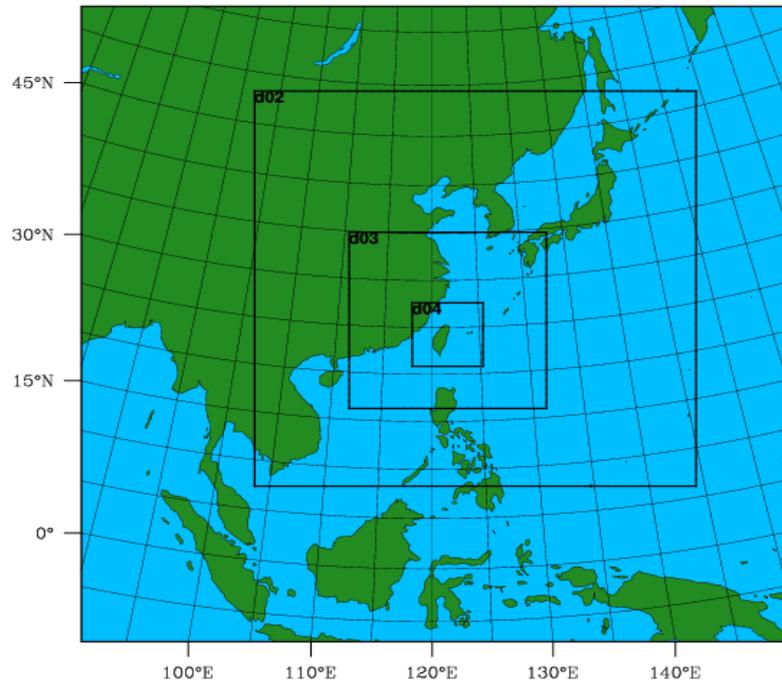
資料來源：本研究彙整。

圖 3.12 春節期間排放量預測係數

### 3.5 WRF 氣象資料建置

本研究 WRF 模式模擬利用四層網格將影響臺灣天氣的環境條件包含於模擬範圍中，如圖 3.13，採用設定以及設定基準為表 3-15，主要設計範圍是採用環保署空氣品質模式模擬規範規定需要包含臺灣粗網格 9km 解析度和臺灣北部地區、中部地區、雲嘉地區、南部地區及東部地區細網格 3km 解析度的巢狀網格。運用經過美國 NCEP 的初始場建立時，也使用資料四維同化的技術，以期能在更長時間的模擬過程中精確的掌握模擬結果，評估方法模擬結果使用中央氣象局局屬測站觀測值進行評估，完成 2016 年氣象模式模擬與驗證評估模式性能。

## WPS Domain Configuration



資料來源：本研究彙整。

**圖 3.13** WRF 四層網格將影響臺灣天氣的環境條件均包含於模擬範圍

表 3-15 本研究 WRF 模式模擬採用的設定基準

	Domain 1	Domain 2	Domain3	Domain 4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Grid Size	91 X 91	169 X 166	223 X 223	223 X 223
FDDA	Yes	Yes	Yes	No

資料來源：本研究彙整。

本研究所使用的 NCEP 資料為 Global Forecast System(GFS)的 ANL 來作為氣象初始場，GFS 資料是美國 NCEP 生產的全球數值天氣預測計算模式，GFS-ANL 由大氣模式、海洋模式、土地/土壤模式、海冰模式組成，這四個模式共同運作提供天氣變化的精確畫面，亦包含颱風模擬路徑，而 GFS-ANL 其資料等壓面上水平解析度為  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ；使用 6 小時資料，資料涵蓋時間自 2007 年 1 月 1 日迄今，共 9 年。四維資料同化技術(FDDA)主要使用網格納進法，在模擬流程部分，以模擬 1 月 3 日為例，會往前多模擬 12 小時，也就是由 1 月 2 日 12 時開始模擬到 1 月 4 日 0 時，而 FDDA 在模擬 6 小時時加入，使用網格納進法，因此分析場與 FDDA 皆使用 GFS-ANL 分析資料。

有關納進法(Nudging)的部分，主要是透過觀測資料來修正模式模擬的結果，將觀測資料與模式模擬的差值乘上權重係數，納進法可分為二種，一種是網格納進法(Gridded Nudging)，使用的資料即為 GCMs 的資料，另一種是觀測納進法(Observation Nudging)，需要額外提供觀測資料。在納進法中會針對每個積分時間皆會進行納進，可依照資料來源選擇不同的納進內插間隔，網格納進法皆用 GCMs 資料，因此資料多為每六個小時一筆，因此運算時會將六小時一筆的 GCMs 資料內插到每一個 Time step 上提供納進。

在 WRF 模式範圍設定部分，總共分為四層網格，解析度分別為 81 公里、27 公里、9 公里及 3 公里，而網格大小依序為 91x91、166x166、223x223、223x223，WRF 參數設定部分則是經過許多的測試與調整，最後決定物理參數設定如表 3-16 所示，在微物理參數(Microphysics)部

分為 WSM 5-class scheme，積雲參數化(Cumulus Parameterization)使用 Kain-Fritsch 的設定，行星邊界層(Planetary Boundary Layer)使用 YSU scheme 的設定，地表過程部分則分為三個部分，第一部分的地面層(Surface Layer)使用 MM5 Monin-Obukhov scheme 的設定，第二部分的地面層(Land Surface)使用 Unified Noah land-surface model，第三部分為都市表面(Urban Surface)則沒有使用，長波輻射(Longwave Radiation)與短波輻射(Shortwave Radiation)從設定為 cam scheme，SST 更新部分(SST\_update)則為啟動，在不同解析尺度上，除了積雲參數部分只開啟前兩層設定外，其餘參數四層皆啟用並使用相同設定，此外地形資料方面，利用 Modis 衛星資料來進行內插，四層網格皆使用相同資料。

**表 3-16 本研究模擬 WRF 模式採用的參數設定**

參數	設定
Microphysics	WSM 5-class scheme
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch
Planetary Boundary Layer	YSU scheme
Surface Layer	MM5 Monin-Obukhov scheme
Land Surface	Unified Noah land-surface model
Urban Surface	no
Longwave Radiation	cam scheme
Shortwave Radiation	cam scheme
SST_update	Yes

資料來源：WRF 大氣模式預設建議之模式參數設定。

經由上述模擬範圍訂定、物理參數選擇以及提供全球氣象初始場資料進行模式模擬後，產出空氣品質模式模擬所需之大氣變數，如風速、風向、溫度、濕度、氣壓等 154 個大氣變數，為了檢核模式模擬之準確性，本研究運用中央氣象局局屬地面測站每日所提供的地面溫度以及 10 公尺高度的風速風向等變數值來驗證涵括全臺之模擬結果(解析度 3 公里)，參考環保署空氣品質模式模擬規範之氣象評估方法與標準進行分析，扣除高山及離、外島等模式解析度驗證會有較大誤差的測站後，共計 24 個測站進行校驗如表 3-17 所示。驗證之變數以跟空

氣污染傳輸有較大關聯的地面氣溫及 10 公尺高度之風向與風速為主，結果將以時間序列分析使用觀測值與模擬值比對圖來表示。另外在統計結果方面，將各模擬結果與觀測值進行比對，計算偏差量進行討論，運用公式如下：

(1) 配對值偏差(MBE)：

$$MBE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k}) \dots\dots\dots(3-12)$$

(2) 絕對值偏差(MAGE)：

$$MAGE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N |P_{i,k} - O_{i,k}| \dots\dots\dots(3-13)$$

(3) 均方根誤差(RMSE)：

$$RMSE = \left[ \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3-14)$$

(4) 風向標準化偏差(WNMB)

$$WNMB = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k})}{M \times N \times 360^\circ} \times 100\% \dots\dots\dots(3-15)$$

(5) 風向標準化絕對值誤差(WNME)

$$WNME = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N |P_{i,k} - O_{i,k}|}{M \times N \times 360^\circ} \times 100\% \dots\dots\dots(3-16)$$

- $P_{i,k}$  = 第 i 小時(日)第 k 測站之模擬值
- $O_{i,k}$  = 第 i 小時(日)第 k 測站之監測值
- $N$  = 所有模擬小時(日)數
- $M$  = 所有測站數

依據空氣品質模式模擬規範之氣象場性能評估規範針對溫度、風速和風向設定標準，溫度評估統計方法為配對值偏差(Mean Biased Error, MBE)及配對值絕對值偏差(Mean Absolute Gross Error, MAGE)，標準為配對值偏差(MBE)為 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以內，配對值絕對值偏差為 $3^{\circ}\text{C}$ 以內；風速評估統計方法為配對值偏差(Mean Biased Error, MBE)及配對值均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)，標準分別為 $\pm 1.5\text{ m/s}$ 以內及 $3\text{ m/s}$ 以內；風向評估統計方法為風向配對值標準化偏差(Wind Normalized Mean Bias, WNMB)標準為 $\pm 10\%$ 以內及配對值標準化絕對值偏差(Wind Normalized Mean Error, WNME)標準為 $30\%$ 以內，最後進行上述定量指標分析時，除模擬區域範圍內全部測站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百分之六十以上。

表 3-17 各測站資料表

代碼	站名	經度	緯度
466880	板橋	121.4338	24.9993
466900	淡水	121.4400	25.1656
466910	鞍部	121.5203	25.1864
466920	臺北	121.5067	25.0396
466930	竹子湖	121.5363	25.1650
466940	基隆	121.7321	25.1348
466990	花蓮	121.6050	23.9770
467080	宜蘭	121.7479	24.7656
467410	臺南	120.1970	22.9952
467420	永康	120.2286	23.0349
467440	高雄	120.3080	22.5679
467480	嘉義	120.4245	23.4977
467490	臺中	120.6759	24.1475
467530	阿里山	120.8051	23.5104
467540	大武	120.8957	22.3576
467550	玉山	120.9517	23.4893
467571	新竹	121.0061	24.8300
467590	恆春	120.7381	22.0054
467610	成功	121.3654	23.0992
467620	蘭嶼	121.5506	22.0387
467650	日月潭	120.8999	23.8830
467660	臺東	121.1465	22.7540
467770	梧棲	120.5151	24.2587
467780	七股	120.1051	23.1524

資料來源：中央氣象局氣象站資料。

## 3.6 CMAQ 模擬建置

### 3.6.1 Model-3/CMAQ

本研究使用之模式版本為美國環保署之空氣品質模式支援中心在 2015 釋出最新版 CMAQ v5.1，此版本主要的特色包括底下幾點：

1. 在光化學反應機制方面 (Photochemistry)，將均相與異相 (homogeneous/heterogeneous) 的反應機制整合在同一張反應機制的表格內，將以前分開計算的反應機制整合在一起運算處理，包括整合了原生性排放有機粒狀物(POA)的老化效應(aging)、由  $\text{NO}_2$  光化反應產生的 HONO、與異相  $\text{N}_2\text{O}_5$  反應生成的  $\text{HNO}_3$  等現象。由於臺灣地區相對濕度較高於大陸型氣候的國家，因此  $\text{N}_2\text{O}_5$  的反應與異相液相將可能影響相當程度的光化反應模擬準確度。
2. 將原先的 aerosol module 5 取代為 aerosol module 6，且 aero5 將不再被支援。
3. 在垂直分層的傳輸上，增加重力效應的影響，讓 Accumulation mode 與 coarse mode 的懸浮微粒更容易傳輸到下層網格上。
4. 過去的模擬中，Na/Cl 等物種均假設由海鹽所排放，這兩種元素在氣膠化學中，可能佔有很重要的反應，例如硝酸鹽就很容易在海鹽微粒上附著。不過近來的研究發現，其實人為排放亦可能排放出 Na/Cl/ $\text{NH}_4$  等離子元素，因此 aero6 模組中，將過去不分類的物種依據 SCC 以及 SPECIATE 的資料庫，再細分為多種成份。主要新增的成份如下表 3-18 所示。
  - a. 與原本暨有的成份相同者有： $\text{PSO}_4$ ,  $\text{PNO}_3$ , PEC, POC。
  - b. 將原本的不可分類物種(PMFINE)再細分為：PH<sub>2</sub>O, PCL, PNCOM, PCA, PSI, PMG, PMN, PNA, PNH<sub>4</sub>, PAL, PFE, PTI, PK, PMOTHR，其中 PNCOM 為非碳有機元素，排放源中因為碳的遺失，剩下的氧、氫、氮等元素的總量，模式運作過程所需。

c. 上述物種除 H<sub>2</sub>O/CL/NA/NH<sub>4</sub> 等元素會繼續加入其他反應機制中，其他成份元素大多作為特殊 tracer 之用。

表 3-18 CMAQ Aero6 模組所需要的 PM<sub>2.5</sub> 排放成份

Emitted species name	Corresponding CMAQ species	Species description	Species status
PSO4	ASO4J	Fine mode sulfate	Existing CMAQ species
PNO3	ANO3J	Fine mode nitrate	Existing CMAQ species
PCL	ACLJ	Fine mode particulate chloride	Newly-emitted existing CMAQ species
PNH4	ANH4J	Fine particulate ammonium	Newly-emitted existing CMAQ species
PNA	ANAJ	Fine mode sodium	Newly-emitted existing CMAQ species
PCA	ACAJ	Fine mode calcium	New CMAQ species
PMG	AMGJ	Fine mode magnesium	New CMAQ species
PK	AKJ	Fine mode potassium	New CMAQ species
POC	APOCI and APOCJ	Fine mode primary organic carbon	Existing CMAQ species - new name
PNCOM	APNCOMI and APNCOMJ	Fine mode primary non-carbon organic matter	New CMAQ species
PEC	AECI and AECJ	Fine mode elemental carbon	Existing CMAQ species
PFE	AFEJ	Fine mode iron	New CMAQ species
PAL	AALJ	Fine mode aluminum	New CMAQ species
PSI	ASIJ	Fine mode silicon	New CMAQ species
PTI	ATIJ	Fine mode titanium	New CMAQ species
PMN	AMNJ	Fine mode manganese	New CMAQ species
PH2O	AH2OJ	Fine mode particulate water	Newly-emitted existing CMAQ species
PMOTHR	AOTHRJ	Remaining unspiciated fine mode primary PM	Existing CMAQ species - new name
PMC	ACORS	Coarse mode primary PM	Existing CMAQ species

資料來源：本研究彙整。

由於 v5.1 新增了許多的異相液相反應機制，對於相對濕度偏高的臺灣地區來說，應該會產生比較好的模擬結果。而且為了與國際間的研究接軌，因此本研究變更 v4.7.1 的版本到最新的 v5.1 版本。不過由於新的 v5.1 版本若要順利操作，在大氣模式方面需要加入比較多的控制參數，包括增加土地利用型態等。因此本研究亦使用新的 WRF v3.7 版取代 MM5，以利新版 CMAQ 模式的運作。WRF 使用了 2013 年的衛星遙測地理植被狀況，因此對於生物源的準確性會更好。因此最終本研究所使用的大氣模式為 WRF v3.7，排放量處理模式為 SMOKE v3.7，而空氣品質模式版本則為 CMAQ v5.1。

### 3.6.2 TEDS 的點源處理修訂

TEDS 在點源的處理上，除了實際煙囪的排放之外，尚有廠房逸散源的資料，以及料堆等排放資料彙整其中，此部份並無煙囪與管道資料，僅有污染物排放量的資料。經查 SMOKE 的實際作業，發現到當 SMOKE 處理點源的煙流上升高度後，即使因為出口風速與周界溫度無法讓氣團上升到第二層，但仍有 2/3 的排放量會帶入到第二層，亦即第一層地表層最多僅有 1/3 的排放量。由於一般逸散大多發生於第一層網格內，因此有必要將逸散源與實際管道排放分開處理。

本研究在 TEDS 的點源處理上，重新使用新的機制來處理。首先就 TEDS 提供的排放源的類別進行分類，如果排放源為逸散，則帶入到面源處理。而如果是煙道排放，則事先使用 Briggs(1971)提供的煙流上升高度公式來處理，主要公式如下所示。經過煙流上升高度的計算後，如果其氣團的高度不到第一層網格的 3/4 高度，亦即 30 公尺的高度時，則該排放源亦當作逸散源來處理，帶入到面源的處理模式中。

$$F = 0.25 \times G \times V_s \times D_s^2 \times (T_s - T)/T_s \dots\dots\dots(3-17)$$

$$\text{Plume rise} = H_s + 21.31 \times F^{0.75}/U \dots\dots\dots(3-18)$$

其中：

F = Bouyancy flux (m<sup>4</sup>/s<sup>3</sup>)

G = Mean gravitational acceleration (9.80665 m/s<sup>2</sup>)

V<sub>s</sub> = Stack gas exit velocity (m/s)

D<sub>s</sub> = Inside stack diameter (m)

T<sub>s</sub> = Stack gas temperature (K)

T = Default ambient air temperature (293 K)

U = Default wind speed (2 m/s)

$H_s = \text{Physical stack height (m)}$

### 3.6.3 中國地區排放量資料庫處理依據

在 2015 年環保署公告的模式性能評估標準中，須考量原生性  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$  的氣態空氣污染物之性能評估。若在不修改中國地區排放量的情況下，模擬所得的結果中，臺灣的  $\text{SO}_2$  濃度均明顯偏低，且無法符合模式性能規定。由於 TEDS 10 為目前相對正確的排放量，因此本計畫考慮修改中國地區的排放量，以符合模式性能評估的要求。

目前國際間處理排放量的方法，大多使用未來年的經濟成長率加以推估，亦即假設經濟成長率是建構於相對應的電廠與工廠製造排放上。本計畫考慮亞洲地區從 2006 年以來的經濟成長率，如表 3-19 所示。由於本計畫所模擬的區域中，非臺灣地區的排放量，主要來自於中國地區的貢獻。因此參考中國地區的經濟成長率後，其累積之經濟成長率達到 68.1%。

表 3-19 東亞地區各主要國家的經濟成長率

年份\國家	臺灣	中國	日本	韓國	越南	菲律賓
2007	5.98	14.20	2.20	5.10	8.50	6.60
2008	0.73	9.60	-1.00	2.80	5.70	4.20
2009	-1.81	9.20	-5.50	0.70	5.40	1.10
2010	10.76	10.40	4.70	6.50	6.40	7.60
2011	4.20	9.30	-0.50	3.70	6.20	3.60
2012	1.50	7.70	1.40	2.30	5.20	6.80
2013	2.23	7.70	1.60	2.90	5.40	7.20
累計成長	23.59	68.10	2.90	24.00	42.80	37.10

資料來源：IMF International Financial Statistics(IFS)，行政院『中華民國所得』；中華人民共和國國家統計局相關資料(更新日期為 2015/12)

根據前述說明，故本研究針對中國地區的排放量處理方式如下：

- a. 原本排放量中針對懸浮微粒主要的物種分類有： $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , BC, OC 而已，並沒有其他的成份。由於中國地區並沒有針對不同的排放源提供 SCC 代碼，因此本研究在模擬中國地區的排放量

時，並沒有針對 aero6 所需要的成份進一步分析，僅提供 EC(BC), OC, PMC(PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>), PMO<sub>THR</sub>(PM<sub>2.5</sub>-BC-OC)等成份別。

- b. 由於 Zhang 所提供的資料主要分為四種基本的分類，包括電力、工廠、人為一般與交通源，因為電力業與工廠主要由煙囪排放，且主要物種為 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>，因此這兩種排放源的 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 放入點源的 3D 排放中。電力業煙囪高度假設為 250m，而工廠的煙囪高度假設為 60m。
- c. 由於中國地區 2006 年到 2013 年的累加經濟成長率高達 60% 以上(如表 4-6)，為考量人為排放量的成長，因此在與能源相關性較高的 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 這兩種污染物各乘上 1.6 的校正因子，其他污染物則保持原有排放量。
- d. 其他的排放源則保留原有的設定，亦即使用面源方式處理。

#### 3.6.4 生物源排放量處理

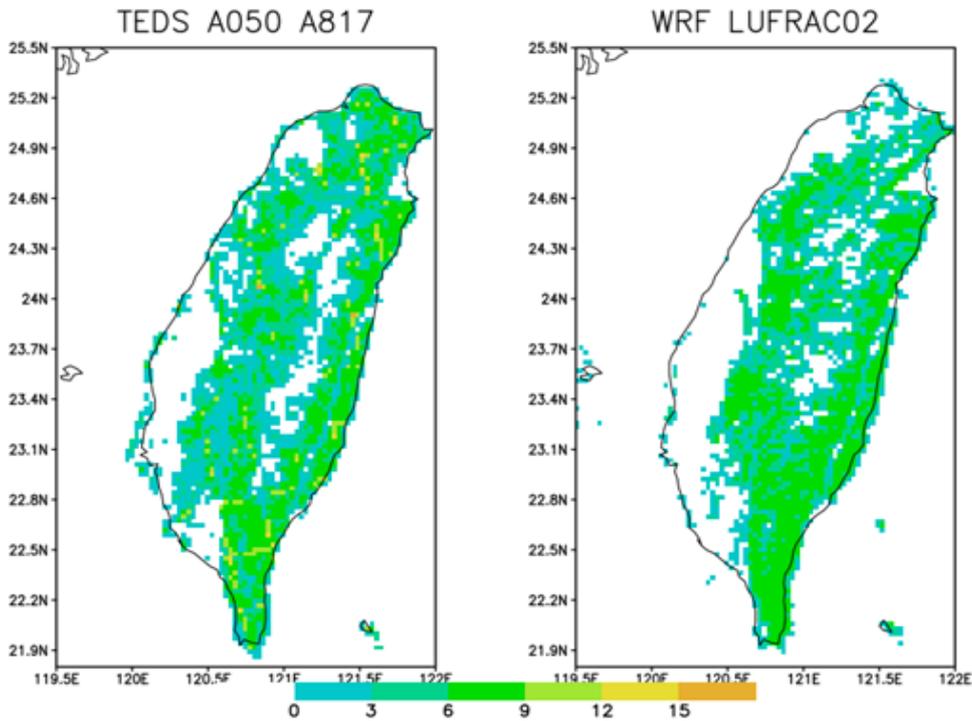
臺灣地區處理生物源時，主要均以林務局於 1995 年所進行的林相資料普查為依據，TEDS8.1 在處理林務局的資料時，再以中央大學於 2005~2006 年的衛星遙測進行校正。由 TEDS 8.1 的官方文件中提及該生物源的林相資料中，闊葉林佔約 43% 的土地利用型態，其中以天然闊葉混合林(20%)及闊葉林(14%)佔最大宗。

由於 WRF 大氣模式中已包含衛星遙測的土地利用型態資料，且該衛星遙測資料為 2013 年基準，因此本研究將直接使用 WRF 的土地利用型態來進行生物源的排放模擬。為使 WRF 的衛星遙測數據具有可靠性，本研究將 WRF 的土地利用型態取出進行分析，各土地利用型態所佔臺灣地區的面積比例與說明如表 3-20 所示。表中可發現常綠闊葉林佔約 36.6% 的比例，該比例與 TEDS 8.1 的天然闊葉混合林+闊葉林(34%)相當，若分析其空間分佈，如圖 3.14 所示，可發現其空間分佈有些許誤差，不過仍具有一定程度的可信度。因此，本研究將直接以 WRF 的土地利用型態來作為生物源排放計算的依據。

表 3-20 WRF 土地利用型態與各植被佔土地面積比例

土地型態	土地面積 (Km <sup>2</sup> )	百分比	WRF 說明	中文說明
LAND17	74,867		Water	
LAND02	12,622	36.6%	Evergreen Broadleaf Forest	常綠闊葉林
LAND05	6,833	19.8%	Mixed Forests	混和林
LAND13	5,283	15.3%	Urban and Built-Up	城市區域
LAND12	4,042	11.7%	Croplands	農田
LAND01	2,299	6.7%	Evergreen Needleleaf Forest	常綠針葉林
LAND14	1,293	3.7%	Cropland-Natural Vegetation Mosaic	農田、自然植被
LAND10	782	2.3%	Grasslands	一般草原
LAND04	269	0.8%	Deciduous Broadleaf Forest	落葉闊葉林
LAND07	255	0.7%	Open Shrublands	開放灌木叢
LAND16	224	0.6%	Barren or Sparsely Vegetated	植被少的區域
LAND06	197	0.6%	Closed Shrublands	封閉灌木叢
LAND08	173	0.5%	Woody Savannas	伍迪大草原
LAND11	120	0.3%	Permanent Wetlands	永久溼地
LAND09	90	0.3%	Savannas	稀樹大草原
LAND03	0		Deciduous Needleleaf Forest	落葉針葉林
LAND15	0		Snow and Ice	雪地
LAND18	0		Wooded Tundra	
LAND19	0		Mixed Tundra	
LAND20	0		Barren Tundra	
總計	109,350			
臺灣地區	34,484			

資料來源：本研究彙整。



資料來源：本研究彙整。

**圖 3.14 TEDS A050+A817 與 WRF 常綠闊葉林空間分佈比較**

至於在生物源排放因子方面，由於臺灣地區的排放因子經過張(2005)的校正，其排放因子較大陸型國家的排放要高出許多。為使模式取得較為可信的結果，因此本研究修改 SMOKE 預設的 WRF 土地利用型態排放因子，改以 TEDS 提供的資料取代。

由於 WRF 的土地利用型態在四層網格當中均存在，因此生物源的部份，在臺灣與非臺灣地區，均以 WRF 的土地利用型態搭配 TEDS 的生物源排放因子進行計算。

### 3.7 CMAQ 空氣品質預測系統

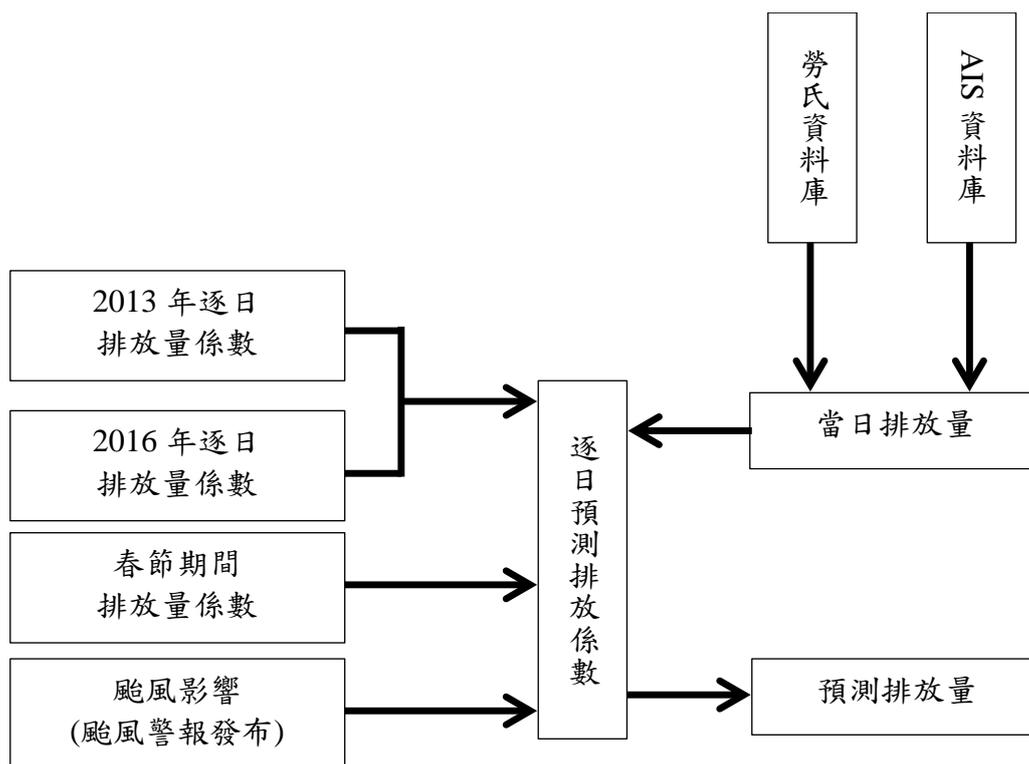
排放量預測流程如圖 3.15 所示，為避免網路及電腦延時，設定每天 00:10 下載前一天 00:00 至 23:59，為期一天共 24 小時之 AIS 資料，並抓取 AIS 資料中船舶之 IMO 編號以及當時的船舶航速 SOG，搜尋勞

氏資料庫中對應之船舶參數如引擎功率、最大船速等，以計算當日之船舶排放量，並以當日之排放量再乘上隔天之排放量預測係數，即可得到隔天之預測排放量，以此類推至第二天、第三天與第四天，如表 3-21 所示，其中  $E1=E0*a1$ 、 $E2=E1*a2$ 、 $E3=E2*a3$ 、 $E4=E3*a4$ ，預測係數則為 2013 年與 2016 年之逐日排放量依照對應日期逐日平均，若以  $n$  代表第  $n$  日之排放量，則  $n+1$  日之排放係數即為  $(n+1)/n$ 。

表 3-21 排放量與預測係數關係表

	當日實際	預測			
		第一天	第二天	第三天	第四天
排放量	E0	E1	E2	E3	E4
預測係數		a1	a2	a3	a4

資料來源：本研究彙整。



資料來源：本研究彙整。

圖 3.15 海域船舶排放量預測流程圖

將預測結果與實際日期推估之排放量進行比較，統計測試期間之誤差百分比如表 3-22，絕對誤差百分比如表 3-23。預測時間愈長則誤差愈大，故本研究採用預測天數最長為期二日，即 48 小時之預測結果。

**表 3-22 海域船舶排放量預測誤差**

預測誤差 (%)		第一天	第二天	第三天	第四天
NO <sub>x</sub>	最大值	59.4%	68.0%	72.9%	68.3%
	平均	-3.5%	-5.1%	-7.1%	-7.8%
	最小值	-137.1%	-170.6%	-133.9%	-146.8%
	標準偏差	26.7%	35.4%	38.5%	39.2%
SO <sub>x</sub>	最大值	65.5%	71.5%	75.8%	73.2%
	平均	-4.0%	-6.1%	-8.3%	-9.1%
	最小值	-153.0%	-191.1%	-164.2%	-167.4%
	標準偏差	29.1%	39.2%	42.4%	42.9%
PM	最大值	61.3%	69.3%	73.0%	70.4%
	平均	-3.8%	-5.6%	-7.8%	-8.5%
	最小值	-147.2%	-179.7%	-147.7%	-160.0%
	標準偏差	28.2%	37.5%	40.7%	41.3%

資料來源：本研究彙整。

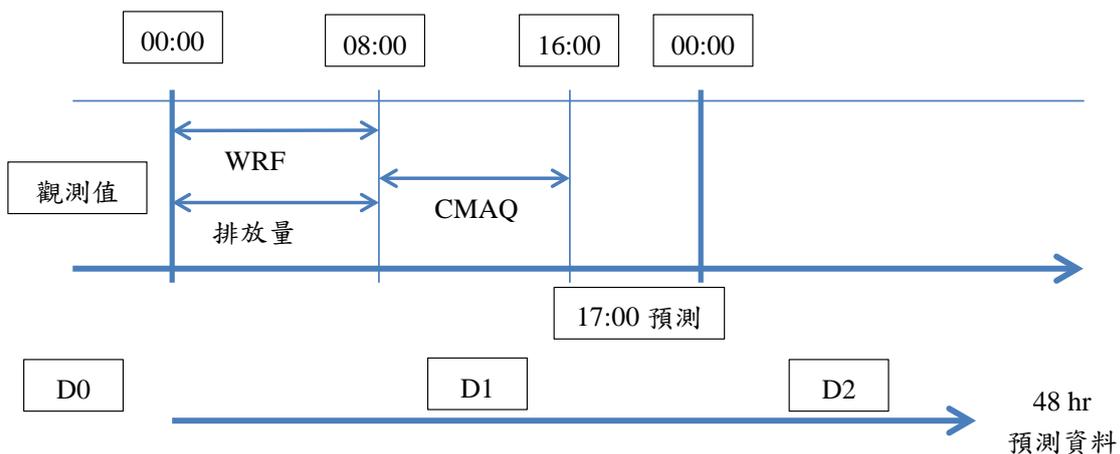
**表 3-23 海域船舶排放量預測絕對誤差**

絕對誤差 (%)		第一天	第二天	第三天	第四天
NO <sub>x</sub>	最大值	137.1%	170.6%	133.9%	146.8%
	平均	19.2%	25.9%	29.9%	30.7%
	最小值	0.1%	0.4%	0.2%	0.3%
	標準偏差	18.9%	24.7%	25.3%	25.6%
SO <sub>x</sub>	最大值	153.0%	191.1%	164.2%	167.4%
	平均	20.7%	28.4%	32.6%	33.6%
	最小值	0.2%	0.0%	0.0%	0.4%
	標準偏差	20.8%	27.8%	28.4%	28.2%
PM	最大值	147.2%	179.7%	147.7%	160.0%
	平均	20.2%	27.3%	31.3%	32.2%
	最小值	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%
	標準偏差	20.0%	26.4%	27.1%	27.2%

資料來源：本研究彙整。

CMAQ 空氣品質預測流程如圖 3.16 所示，系統於午夜 12 時下載氣象觀測值，同時啟動 WRF 氣象模式進行氣象場的預測，氣象預測執行時間估計花費 8 小時；同時計算 AIS 資料提供之船舶污染物排放量，供後續 CMAQ 預測污染物影響使用；全部執行時間將於 16 時完成，並於 17 時發布預測結果，亦即以 D0 之排放量透過預測係數預測 D2 之排放量結果。

本研究之預測模式為三維網格模式 CMAQ，具有非類神經網路的特性，使用各污染物種的物理及化學特性所產生的各種反應、變化，以模擬各污染物種的影響情形。若將預測模擬結果累積一段時間後，可同時取得實際的觀測值，進行兩者間的比較分析，亦即進行預測模擬數值與實際觀測值之比較。如解析預測之排放量與當日實際之排放量結果，亦可篩選環保署監測站等受體點之預測模擬濃度或氣象風場條件，將預測數值與環保署測站的實際觀測值做比較。即環保署測站觀測值為所有污染源的排放影響總和，若透過模式模擬將船舶排放與其他污染源之影響為 A，其他污染源影響則為 B，則  $A-B=C$  即為船舶排放之影響，而 C 值將小於觀測值，即可透過 C 值解析船舶的影響。



資料來源：本研究彙整。

圖 3.16 CMAQ 空氣品質預測流程示意圖



## 第四章 研究結果

### 4.1 排放量預測係數

船舶排放量除了當日實際計算排放量之外，如前述 3.4.3 節與 3.7 節所述，預測係數為影響排放量預測高低的主要因素之一，而當日船舶排放量則與當日之船舶活動量高低有關，其中船舶海上活動量又受特殊節日以及颱風影響關係密切。由於排放量預測係數採西曆日期計算，而特殊節日採用農曆日，其每年發生的日期不盡相同，故另外挑出討論；而聖誕節至新年期間，因每年均發生在西曆相同日期區間，即每年之 12 月 25 日至 12 月 31 日，故其變化趨勢應與每日排放量變化趨勢相同。以下就特殊節日與颱風兩大影響因素說明之。

#### 4.1.1 特殊節日

排放量預測係數一年當中，依據節日的重要性往往會影響船舶的活動量多寡，傳統特殊節日當中又以影響華人地區較大之四大節日如春節、清明節、端午節及中秋節等，依序說明如下：

春節：

依據 2013 年及 2016 年排放量  $\text{NO}_x$  日平均約為 3000 噸左右，與春節期間排放量約 2000 多噸，有明顯之落差，又臺灣位於東南亞華人居多的區域，且春節為華人地區重大節日之一，故將其挑出特別討論之。由於春節屬於華人地區連續假日較長之節日，每年之春節期間日期不盡相同，若將 2013 年及 2016 年春節期間船舶推算排放量整理如表 4-1，同時將兩年農曆相同日期之排放量平均，再以”初五”除以”初四”、”初四”除以”初三”等方式，以此類推取得春節期間各日的預測係數，結果如表二所示，表中可得知除夕到初五期間，除了初三預測係數為 1.1 左右，其餘天數之預測係數均在  $1.0 \pm 0.1$  之間，顯示春節期間船舶排放量變化並不大。

表 4-1 春節期間排放量

		區域推算排放量(噸)				區域推算排放量(噸)		
		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
廿四	2013/02/03	-	-	-	2016/02/01	1,843.6	1,116.2	164.1
廿五	2013/02/04	2,741.1	1,768.5	250.7	2016/02/02	1,730.8	1,017.2	153.8
廿六	2013/02/05	3,770.2	2,444.5	346.3	2016/02/03	2,185.0	1,396.2	199.0
廿七	2013/02/06	2,712.8	1,790.4	251.8	2016/02/04	2,277.6	1,441.9	204.9
廿八	2013/02/07	2,647.2	1,700.8	242.6	2016/02/05	2,034.0	1,284.5	186.0
廿九	2013/02/08	1,714.3	1,056.6	151.5	2016/02/06	1,917.0	1,242.5	172.8
除夕	2013/02/09	1,896.6	1,207.2	171.3	2016/02/07	1,995.7	1,298.0	182.8
春節	2013/02/10	1,975.5	1,276.8	178.7	2016/02/08	2,196.8	1,414.3	199.3
初二	2013/02/11	1,901.4	1,243.8	174.2	2016/02/09	2,340.2	1,517.0	210.4
初三	2013/02/12	2,224.3	1,428.6	203.6	2016/02/10	2,584.9	1,655.4	234.5
初四	2013/02/13	1,910.8	1,223.2	175.0	2016/02/11	2,780.5	1,798.7	251.8
初五	2013/02/14	2,602.7	1,718.6	238.5	2016/02/12	2,403.1	1,549.9	219.7
初六	2013/02/15	3,016.7	1,959.1	275.9	2016/02/13	2,137.5	1,393.5	197.0
初七	2013/02/16	2,109.8	1,350.1	192.1	2016/02/14	1,981.7	1,248.2	176.4
初八	2013/02/17	3,703.1	2,396.1	338.6	2016/02/15	1,634.8	976.0	142.5
初九	2013/02/18	3,690.5	2,415.3	338.5	2016/02/16	2,318.9	1,479.4	210.4
初十	2013/02/19	2,246.3	1,458.5	203.6	2016/02/17	2,946.5	1,881.6	268.0

資料來源：本研究彙整。

表 4-2 春節期間預測係數

	區域推算排放量(噸)			預測係數		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
廿四	1,843.6	1,116.2	164.1	-	-	-
廿五	2,235.9	1,392.9	202.2	1.213	1.248	1.232
廿六	2,977.6	1,920.3	272.7	1.332	1.379	1.348
廿七	2,495.2	1,616.1	228.4	0.838	0.842	0.838
廿八	2,340.6	1,492.6	214.3	0.938	0.924	0.938
廿九	1,815.6	1,149.5	162.2	0.776	0.770	0.757
除夕	1,946.2	1,252.6	177.0	1.072	1.090	1.092
春節	2,086.2	1,345.6	189.0	1.072	1.074	1.068
初二	2,120.8	1,380.4	192.3	1.017	1.026	1.017
初三	2,404.6	1,542.0	219.1	1.134	1.117	1.139
初四	2,345.7	1,510.9	213.4	0.975	0.980	0.974
初五	2,502.9	1,634.3	229.1	1.067	1.082	1.073
初六	2,577.1	1,676.3	236.4	1.030	1.026	1.032
初七	2,045.7	1,299.2	184.2	0.794	0.775	0.779
初八	2,669.0	1,686.1	240.6	1.305	1.298	1.306
初九	3,004.7	1,947.4	274.4	1.126	1.155	1.141
初十	2,596.4	1,670.0	235.8	0.864	0.858	0.859

資料來源：本研究彙整。

由於清明節、端午節及中秋節等特殊節日只有一日，故擷取各節日當月所有日期之排放量與排放係數，並統計其標準偏差，整理如表 4-3，若該節日排放係數低於 1±標準偏差，則不另外計入預測係數，若該節日排放係數高於 1±標準偏差，則須另外計入預測係數機制中，其中端午節預測係數 0.846，低於標準偏差，顯示端午節需要額外加入預測係數機制中，以替換對應日期之預測係數，而清明節與中秋節之預測係數未低於標準偏差，故不須列入預測係數機制中。

特殊節日預測係數是否納入預測機制中，主要取決於該係數與正常值(1.0)的差值，若差值高過與標準偏差的數值，則設定該節日需要額外納入預測機制中。

其他節日預測係數說明如下：

**表 4-3 其他節日預測係數**

	區域推算排放量(噸)			預測係數		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
清明節	1,949.4	1,255.1	177.1	0.858	0.858	0.858
當月平均	2,623.5	1,703.5	239.2	1.015	1.016	1.016
標準偏差	518.6	344.9	48.7	0.173	0.183	0.178
端午節	2,506.8	1,652.2	227.6	0.846	0.859	0.844
當月平均	2,618.0	1,709.8	238.6	1.017	1.019	1.017
標準偏差	316.6	205.3	28.6	0.151	0.152	0.153
中秋節	2,328.9	1,500.5	212.4	0.878	0.881	0.889
當月平均	3,295.3	2,133.8	301.3	1.013	1.016	1.015
標準偏差	665.9	451.7	61.5	0.212	0.230	0.220

資料來源：本研究彙整。

清明節：

清明節(民族掃墓節)的日期是依據”清明”這個節氣所在的日期來訂定，故有可能每年出現的日期不會一致，其中 2013 年及 2016 年的清明節則均落在 4 月 4 日這一天，若將 2013 年及 2016 年清明節前後期間船舶的推算排放量整理如表 4-4，再將兩年相同日期之排放量平均，以”4 日”除以”3 日”、”3 日”除以”2 日”等方式，以此類推取得清明節前後期間各日的排放係數，結果如表 4-5 所示。表中可得知清明節排放係數約為 0.86，前後震盪幅度則約在 1.0±0.1 之間，且清明節之預測係數與正常值(1.0)之差值 0.142，低於標準偏差 0.173，故清明節不須列入預測係數機制中。

表 4-4 清明節期間排放量

		區域推算排放量(噸)				區域推算排放量(噸)		
		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
03/29	2013/03/29	2,186.4	1,402.2	198.6	2016/03/29	2,963.4	1,923.5	271.3
03/30	2013/03/30	1,889.4	1,253.3	172.3	2016/03/30	3,078.4	2,006.6	282.1
03/31	2013/03/31	2,006.0	1,261.5	178.8	2016/03/31	2,638.5	1,714.0	241.7
04/01	2013/04/01	2,427.5	1,554.4	216.5	2016/04/01	2,490.2	1,655.3	228.1
04/02	2013/04/02	2,398.7	1,548.2	215.6	2016/04/02	2,399.3	1,632.4	220.4
04/03	2013/04/03	2,074.4	1,304.0	184.4	2016/04/03	2,468.0	1,619.9	228.4
清明節	2013/04/04	2,102.6	1,333.9	189.2	2016/04/04	1,796.3	1,176.2	165.0
04/05	2013/04/05	2,175.0	1,421.3	197.0	2016/04/05	1,714.9	1,131.9	157.4
04/06	2013/04/06	1,726.1	1,062.7	152.1	2016/04/06	2,511.4	1,610.5	231.5
04/07	2013/04/07	1,722.9	1,083.9	149.9	2016/04/07	2,845.6	1,887.3	264.7
04/08	2013/04/08	2,740.9	1,795.5	248.5	2016/04/08	2,291.5	1,528.6	212.1
04/09	2013/04/09	2,550.4	1,658.8	231.7	2016/04/09	-	-	-

資料來源：本研究彙整。

表 4-5 清明節期間排放係數

	區域推算排放量(噸)			排放係數		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
03/29	2,574.9	1,662.8	235.0	-	-	-
03/30	2,483.9	1,630.0	227.2	0.965	0.980	0.967
03/31	2,322.2	1,487.7	210.3	0.935	0.913	0.925
04/01	2,458.9	1,604.8	222.3	1.059	1.079	1.057
04/02	2,399.0	1,590.3	218.0	0.976	0.991	0.981
04/03	2,271.2	1,461.9	206.4	0.947	0.919	0.947
清明節	1,949.4	1,255.1	177.1	0.858	0.858	0.858
04/05	1,944.9	1,276.6	177.2	0.998	1.017	1.000
04/06	2,118.7	1,336.6	191.8	1.089	1.047	1.083
04/07	2,284.3	1,485.6	207.3	1.078	1.111	1.081
04/08	2,516.2	1,662.0	230.3	1.102	1.119	1.111
04/09	2,550.4	1,658.8	231.7	1.014	0.998	1.006

資料來源：本研究彙整。

端午節：

端午節的日期定在每年農曆的五月五日，若將 2013 年及 2016 年端午節前後期間船舶的推算排放量整理如表 4-6，再將兩年相同日期之排放量平均，以”初五”除以”初四”、”初四”除以”初三”等方式，以此類推取得端午節前後期間各日的排放係數，結果如表 4-7 所示。表中可得知除端午節當日之排放係數約為 0.85，前後期間排放係數則約在 1.0±0.1 之間，且端午節之預測係數與正常值(1.0)之差值 0.154，超過標準偏差 0.152，故端午節須列入預測係數機制中。

表 4-6 端午節期間排放量

		區域推算排放量(噸)				區域推算排放量(噸)		
		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
廿九	2013/06/06	2,274.5	1,448.9	205.4	2016/06/03	3,206.4	2,072.8	295.4
三十	2013/06/07	2,432.3	1,561.7	219.4	2016/06/04	2,984.1	1,959.5	275.3
初一	2013/06/08	2,342.9	1,476.5	210.1	2016/06/05	2,805.2	1,835.2	258.3
初二	2013/06/09	2,227.7	1,447.2	200.5	2016/06/06	2,983.1	1,997.9	271.2
初三	2013/06/10	2,582.1	1,659.7	234.4	2016/06/07	3,143.5	2,103.2	288.2
初四	2013/06/11	2,634.7	1,718.5	238.2	2016/06/08	3,294.4	2,128.2	301.5
端午節	2013/06/12	2,073.9	1,316.0	184.3	2016/06/09	2,939.7	1,988.4	270.9
初六	2013/06/13	1,825.8	1,166.2	163.1	2016/06/10	3,410.0	2,195.8	312.2
初七	2013/06/14	2,026.1	1,313.1	182.8	2016/06/11	2,785.5	1,808.5	256.1
初八	2013/06/15	2,404.2	1,570.7	219.9	2016/06/12	2,541.3	1,641.3	231.5
初九	2013/06/16	2,359.9	1,535.8	215.7	2016/06/13	2,453.8	1,566.6	220.2
初十	2013/06/17	2,504.3	1,606.0	228.5	2016/06/14	3,080.4	1,976.2	279.6

資料來源：本研究彙整。

表 4-7 端午節期間排放係數

	區域推算排放量(噸)			排放係數		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
廿九	2,740.5	1,760.8	250.4	-	-	-
三十	2,708.2	1,760.6	247.4	0.988	1.000	0.988
初一	2,574.1	1,655.9	234.2	0.950	0.941	0.947
初二	2,605.4	1,722.6	235.9	1.012	1.040	1.007
初三	2,862.8	1,881.5	261.3	1.099	1.092	1.108
初四	2,964.6	1,923.4	269.9	1.036	1.022	1.033
端午節	2,506.8	1,652.2	227.6	0.846	0.859	0.844
初六	2,617.9	1,681.0	237.7	1.044	1.017	1.044
初七	2,405.8	1,560.8	219.4	0.919	0.929	0.923
初八	2,472.7	1,606.0	225.7	1.028	1.029	1.029
初九	2,406.8	1,551.2	217.9	0.973	0.966	0.966
初十	2,792.3	1,791.1	254.1	1.160	1.155	1.166

資料來源：本研究彙整。

#### 中秋節：

中秋節的日期定在每年農曆的八月十五日，若將 2013 年及 2016 年中秋節前後期間船舶的推算排放量整理如表六，再將兩年相同日期之排放量平均，以”十五日”除以”十四日”、”十四日”除以”十三日”等方式，以此類推取得中秋節前後期間各日的排放係數，結果如表 4-8 所示。由於船舶排放量在 2013 年中秋節後有 3 天之缺值，而 2016 年中秋節前亦有 1 天缺值，藉此計算之排放係數落差較大，造成中秋節期間排放係數落差高達±0.4 之間。中秋節當日之排放係數約為 0.88，且中秋節之預測係數與正常值(1.0)之差值 0.122，低於標準偏差 0.212，故中秋節不須列入預測係數機制中。

表 4-8 中秋節期間排放量

		區域推算排放量(噸)				區域推算排放量(噸)		
		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
初九	2013/09/13	3,976.3	2,562.5	362.6	2016/09/09	4,024.3	2,648.0	374.6
初十	2013/09/14	3,861.3	2,541.3	353.1	2016/09/10	3,773.3	2,497.7	354.8
十一	2013/09/15	3,338.8	2,175.7	307.1	2016/09/11	3,888.5	2,731.5	366.1
十二	2013/09/16	2,835.5	1,822.8	256.9	2016/09/12	3,119.2	2,065.4	291.0
十三	2013/09/17	3,076.3	1,966.4	278.4	2016/09/13	2,736.2	1,826.6	253.5
十四	2013/09/18	2,653.4	1,702.9	238.9	2016/09/14	-	-	-
中秋節	2013/09/19	2,375.5	1,544.2	215.5	2016/09/15	2,282.4	1,456.8	209.3
十六	2013/09/20	-	-	-	2016/09/16	3,022.8	2,011.2	285.6
十七	2013/09/21	-	-	-	2016/09/17	2,047.6	1,282.3	187.5
十八	2013/09/22	-	-	-	2016/09/18	2,825.5	1,771.5	258.8
十九	2013/09/23	3,130.4	1,950.0	281.0	2016/09/19	3,524.5	2,288.2	325.9
二十	2013/09/24	3,688.4	2,379.3	335.9	2016/09/20	3,455.0	2,252.0	323.8

資料來源：本研究彙整。

表 4-9 中秋節期間排放係數

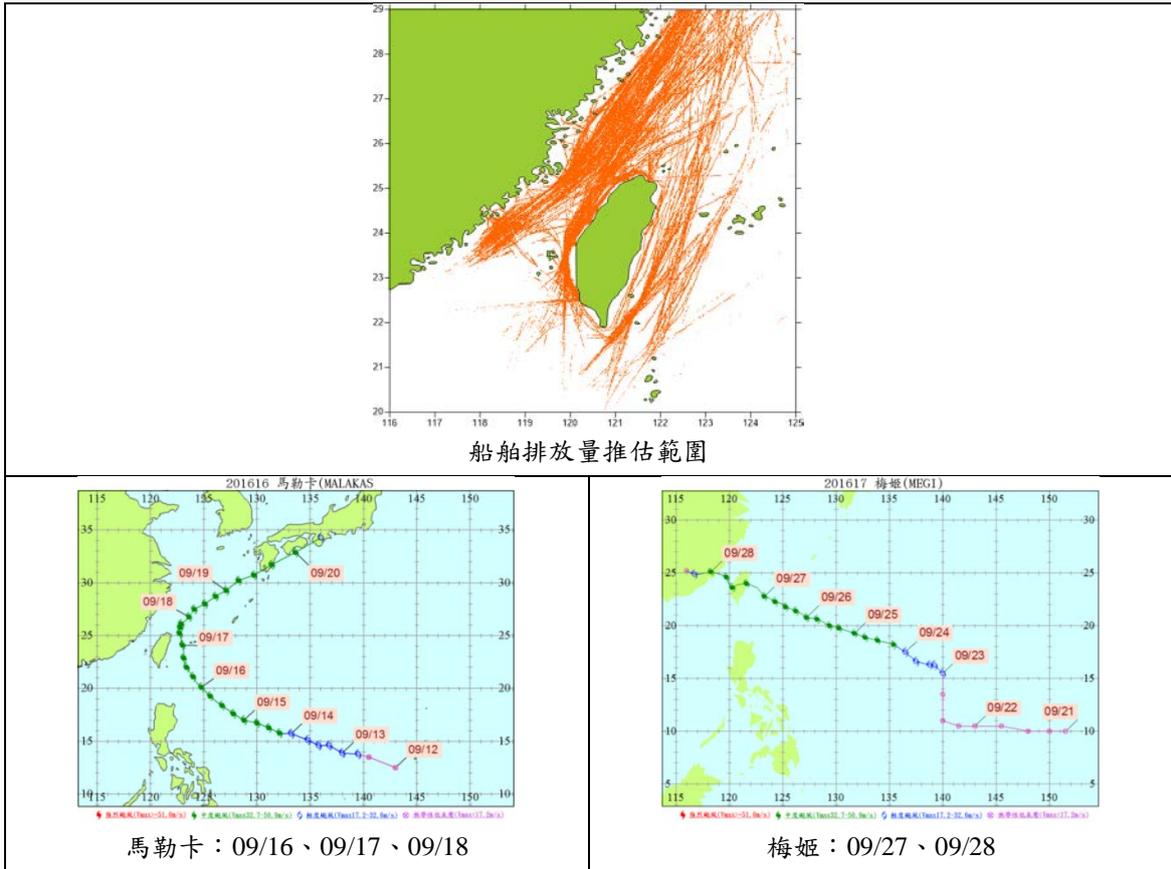
	區域推算排放量(噸)			排放係數		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
初九	4,000.3	2,605.3	368.6	-	-	-
初十	3,817.3	2,519.5	353.9	0.954	0.967	0.960
十一	3,613.6	2,453.6	336.6	0.947	0.974	0.951
十二	2,977.4	1,944.1	273.9	0.824	0.792	0.814
十三	2,906.2	1,896.5	266.0	0.976	0.976	0.971
十四	2,653.4	1,702.9	238.9	0.913	0.898	0.898
中秋節	2,328.9	1,500.5	212.4	0.878	0.881	0.889
十六	3,022.8	2,011.2	285.6	1.298	1.340	1.345
十七	2,047.6	1,282.3	187.5	0.677	0.638	0.657
十八	2,825.5	1,771.5	258.8	1.380	1.382	1.380
十九	3,327.5	2,119.1	303.4	1.178	1.196	1.172
二十	3,571.7	2,315.6	329.8	1.073	1.093	1.087

資料來源：本研究彙整。

#### 4.1.2 颱風影響

太平洋海面每年因潮濕豐沛的水分蒸發，發展了無數次的颱風，這些颱風每每影響著地球圈生態的發展；以人類在海上的影響即是船舶航運的活動量多寡，其活動量高則污染物排放量相對就提高。依據中央氣象局颱風資料庫(<https://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/>)統計，2013 年及 2016 年西北太平洋颱風發生的次數依序為 31 個及 26 個，颱風資訊及行經路徑如附錄六。

由於海上船舶排放量推估範圍位於東經 116 ~ 125 度、北緯 20 ~ 29 度之間，而 2013 年及 2016 年西北太平洋颱風當中，依照颱風行進路線，可為經過臺灣周遭海域或是穿越臺灣本島等路徑，如圖 4.1 所示，透過與排放量推估範圍交叉比對下，如馬勒卡颱風最接近臺灣的日期為 9 月 17 日，如梅姬颱風最接近臺灣日期為 9 月 27 日。如表 4-10，為統計這兩年中颱風行進路線最接近臺灣的日期，其中 2013 年颱風接近臺灣次數共有 8 次，颱風名稱依序為麗琵、蘇力、西馬隆、潭美、康芮、天兔、菲特及柯羅莎；而 2016 年颱風接近臺灣共有 10 次，颱風名稱依序為尼伯特、尼妲、電母、南修、莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬、艾利、海馬等，其中艾利颱風因為路徑折返的關係，所以接近臺灣的次數有兩次。



資料來源：中央氣象局 及 本研究彙整。

**圖 4.1 颱風接近臺灣路徑影響**

**表 4-10 最接近臺灣之颱風**

最接近日期	颱風名稱	最接近日期	颱風名稱
2013/06/20	麗琵	2016/07/08	尼伯特
2013/07/13	蘇力	2016/08/01	妮妲
2013/07/18	西馬隆	2016/08/16	電母
2013/08/21	潭美	2016/08/31	南修
2013/08/29	康芮	2016/09/14	莫蘭蒂
2013/09/21	天兔	2016/09/17	馬勒卡
2013/10/06	菲特	2016/09/27	梅姬
2013/11/01	科羅莎	2016/10/06	艾利
		2016/10/10	艾利
		2016/10/20	海馬

資料來源：中央氣象局。本研究彙整。

統計2013年與2016年颱風期間以颱風最接近臺灣的日期為中心，往前及往後十四日之排放量，將前後時間對應之排放量平均，得知颱風最接近臺灣時，其NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>及PM排放量依序為2,071.5噸、1,295.4噸及185.1噸，且接近臺灣前七日及後八日有最高值，依序分別為3,455.2噸、2,238.3噸及316.8噸與3,510.2噸、2,289.5噸及321.6噸。

同時挑選2013年當月無颱風所有天數之排放量並平均之，獲得2013年無颱風之海上船舶排放NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>及PM平均依序為2,721.3噸、1,744.0噸及245.4噸；同樣挑選2016年當月無颱風所有天數之排放量並平均之，其海上船舶排放NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>及PM平均則依序為2,749.0噸、1,774.8噸及250.9噸，結果如表4-11所示。

由於當前颱風路徑之預測範圍落差尚且過大，而表4-11為歷史颱風之解析，目前排放量尚無法為未來颱風影響預作推估，故僅以颱風警報發布時當作颱風預測係數啟動之依據。

表 4-11 颱風接近臺灣前後影響

	區域推算百分比反推(噸)			標準偏差		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
前十四	2,960.3	1,921.3	270.4	630.8	432.3	60.2
前十三	2,993.1	1,938.5	273.5	1,047.5	713.3	97.4
前十二	3,234.9	2,108.4	296.4	729.8	501.6	68.7
前十一	3,357.7	2,189.7	308.0	901.7	596.6	85.2
前十日	3,205.3	2,087.2	293.2	997.5	659.4	92.1
前九日	3,254.4	2,117.9	298.2	1,003.9	682.2	93.9
前八日	3,213.6	2,083.8	294.1	724.7	495.1	69.6
前七日	3,455.2	2,238.3	316.8	891.4	609.2	86.4
前六日	3,299.7	2,156.4	302.4	768.3	558.6	74.7
前五日	3,325.4	2,170.0	304.9	892.2	607.8	83.8
前四日	3,377.3	2,224.0	310.8	617.0	421.1	58.6
前三日	3,295.8	2,154.1	302.7	793.1	552.1	74.0
前二日	3,323.1	2,181.5	305.6	759.8	504.4	70.3
前一日	3,030.9	1,985.6	276.7	840.6	562.1	77.8
近台日	2,071.5	1,295.4	185.1	1,017.2	690.2	94.6
後一日	2,622.7	1,661.7	237.7	698.2	475.1	65.3
後二日	3,397.6	2,197.0	311.3	819.8	538.8	76.4
後三日	3,424.9	2,215.0	313.2	815.6	563.3	76.2
後四日	3,299.6	2,135.6	300.2	799.3	558.5	75.3
後五日	3,456.2	2,240.7	316.0	710.1	491.7	67.6
後六日	3,428.3	2,226.7	313.9	762.0	523.6	72.8
後七日	3,476.4	2,259.4	317.7	738.9	492.6	68.3
後八日	3,510.2	2,289.5	321.6	633.1	435.5	62.1
後九日	3,231.0	2,107.1	295.4	683.7	483.6	66.4
後十日	2,952.4	1,906.4	269.4	913.1	625.1	86.5
後十一	3,138.1	2,040.2	287.5	713.7	502.8	68.2
後十二	3,061.0	1,988.9	279.9	880.9	588.7	82.7
後十三	2,891.5	1,877.2	263.5	940.2	628.8	87.5
後十四	2,880.8	1,853.1	261.4	804.5	562.6	75.0
2013 無颱風	2,721.3	1,744.0	245.4	578.7	387.8	54.2
2016 無颱風	2,749.0	1,774.8	250.9	567.0	384.0	53.2

資料來源：本研究彙整。

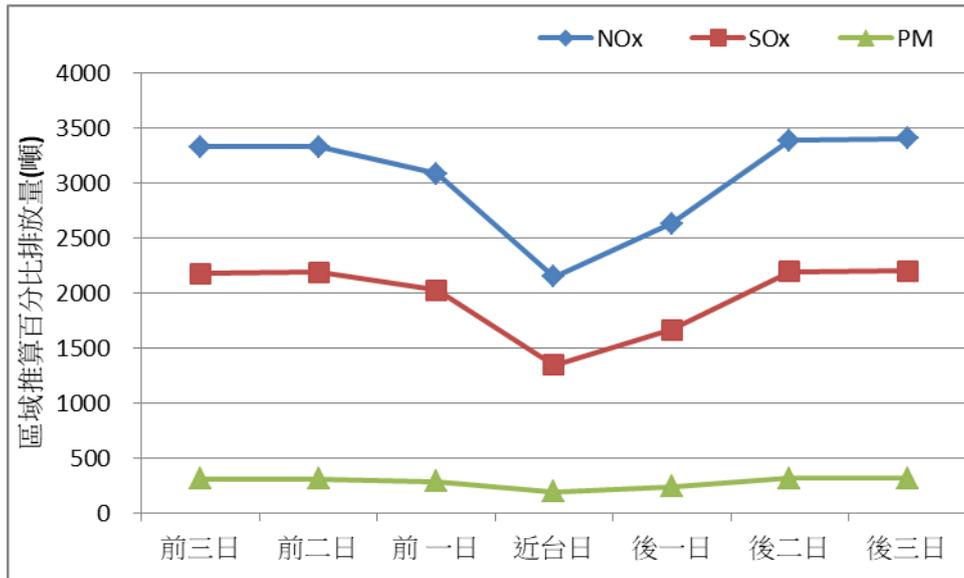
結果顯示颱風接近臺灣時有最低的活動量，而颱風前後期間，船舶活動量則有被擠壓的情形，研判船舶希望趕在颱風進來前出船，待颱風離開後馬上密集出船，之後再慢慢回復到無颱風時的活動量，即颱風接近前活動量增加，颱風離開後短時間內活動量亦有增加，如圖 4.2 及圖 4.3。

由於颱風行進路線千變萬化，當大氣條件有些微的變動，便有可能大幅度的改變颱風侵臺路徑，故為了簡化颱風影響排放量推估的諸多不確定性，所以將排放量預測係數定於颱風警報發布時，便同時啟動颱風影響的預測機制。以 2013 年及 2016 年無颱風時之排放量為基準，將兩年之排放量平均，得到 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>及 PM 無颱風時之排放量依序為 2,735 噸、1,759.4 噸及 248.2 噸，再挑選表 4-11 中所列近台日與前、後各一日之排放量當作颱風影響期間前後之排放量變化，將相同成分的兩個排放量相除，即可得到颱風警報發布時之船舶排放量預測係數，其結果如表 4-12 所示，由表中係數可看出颱風警報發布時，有最高的排放量預測係數，介於 1.11 ~ 1.13 之間。

**表 4-12 颱風警報發布預測係數**

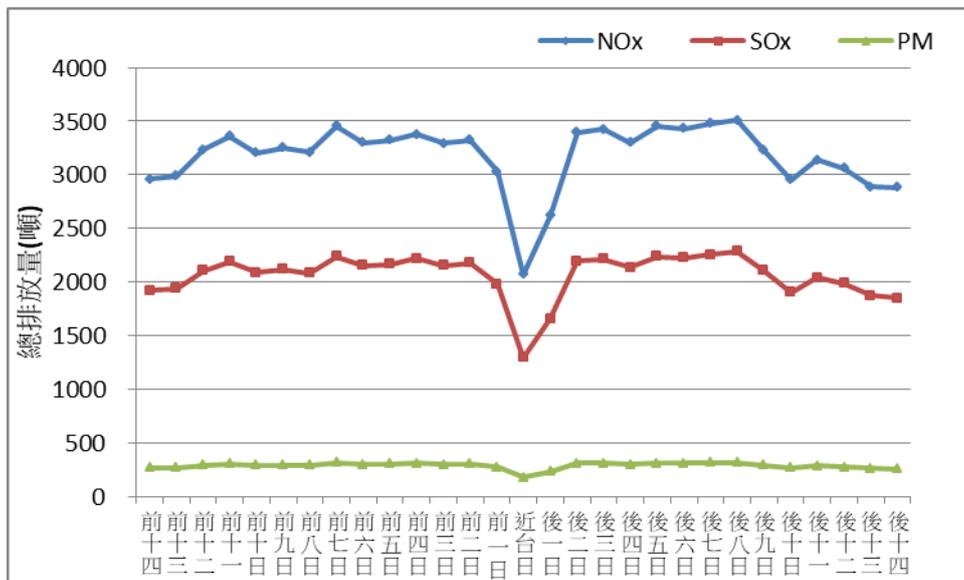
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
警報發布	1.11	1.13	1.12
近台日	0.76	0.74	0.75
後一日	0.96	0.94	0.96

資料來源：本研究彙整。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.2 颱風近臺影響前後三日



資料來源：本研究彙整。

圖 4.3 颱風近臺影響前後十四日

## 4.2 船舶數統計

### 4.2.1 海域船舶種類分布

依據 2016 年航行於海上之船舶 AIS 資料，統計符合 IMO 編號的船舶數，資料中包含了大小不同、種類亦不同的各類型船舶，其逐日最大值為 11,759 艘，最小值為 976 艘，日平均則為 5,373.7 艘；其中勞氏資料庫中有資料之船舶數，逐日最大值為 1,305 艘，最小值為 232 艘，日平均則為 945.4 艘；而無勞氏資料庫資料之船舶數，其逐日最大值為 10,683 艘，最小值為 786 艘，日平均則為 4,428.3 艘。

以勞氏船舶種類代碼 1 ~ 13 中，其船種名稱依序為汽車運輸船、散裝船、貨櫃船、客船、一般貨輪、拖船、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等，若將逐日有勞氏資料之船舶除以逐日總船數，並統計勞氏船舶種類之佔總船數之比例如表 4-13 所示，則勞氏船舶種類比例介於 0.0% ~ 5.2% 之間，其中比例最高為散裝船之 5.2%，次之為貨櫃船之 4.8%，第三高則為油輪 4.7%。

表 4-13 2016 年勞氏船種比例

船種代碼	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
船舶種類	汽車運輸船	散裝船	貨櫃船	客船(郵輪)	一般貨輪	拖船	其他	冷藏船	滾裝滾卸船	油輪	近海船	渡輪	混合船
平均	0.0%	5.2%	4.8%	0.0%	2.4%	0.0%	1.2%	0.2%	0.4%	4.7%	0.1%	0.3%	0.0%
最大值	0.0%	11.7%	9.6%	0.0%	5.3%	0.0%	3.6%	0.5%	0.9%	10.3%	1.3%	0.7%	0.1%
最小值	0.0%	2.6%	2.1%	0.0%	1.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.1%	2.4%	0.0%	0.1%	0.0%
標準偏差	0.0%	1.4%	1.4%	0.0%	0.8%	0.0%	0.4%	0.1%	0.1%	1.4%	0.1%	0.1%	0.0%

資料來源：本研究彙整。

AIS 船種代碼 0 ~ 19 為保留至未來使用，20 ~ 29 為飛翼船，30 為漁船，31 及 32 為拖船與拖曳長度超過 200 公尺或寬超過 25 公尺之拖船，33 為從事疏浚或水下作業之船舶，34 為從事潛水作業之船舶，35 為從事軍事作業之船舶，36 為帆船，37 為遊艇或娛樂船舶，38 ~ 39 為特殊船種保留，40 ~ 49 為高速船，50 ~ 59 為港勤船，60 ~ 69 為客船，70 ~ 79 為貨船，80 ~ 89 為油輪，90 ~ 99 則為其他船種，其中船種代碼-1 為無法辨別之未知船種。

將逐日 AIS 抓取的船舶資料中，無勞氏資料之船舶除以當日之總船舶數，統計其船舶種類佔總船數之比例如表 4-14 所示，則無勞氏船舶種類比例介於 0.2% ~ 32.7% 之間，若不計未知船種 17.9% 及保留船種之 6.1%，則其中比例最高船種為漁船之 32.7%，次之為貨船之 14.5%，第三高則為油輪 2.3%。

表 4-14 2016 年 AIS 船種比例

AIS 船種代碼	-1	0 - 19	20 - 29	30	31,32	33 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 79	80 - 89	90 - 99
船舶種類	未知	保留	飛翼船	漁船	拖船	特殊船種	高速船	港勤船	客船	貨船	油輪	其他
平均	17.9%	6.1%	0.7%	32.7%	0.4%	1.9%	0.2%	2.1%	1.3%	14.5%	2.3%	0.8%
最大值	52.3%	12.5%	1.2%	52.4%	0.9%	4.7%	1.7%	4.7%	2.4%	24.4%	4.9%	1.8%
最小值	7.7%	3.1%	0.2%	12.2%	0.2%	0.7%	0.1%	0.6%	0.2%	3.3%	0.5%	0.2%
標準偏差	7.1%	1.8%	0.2%	7.7%	0.1%	0.7%	0.1%	0.6%	0.4%	3.8%	0.7%	0.2%

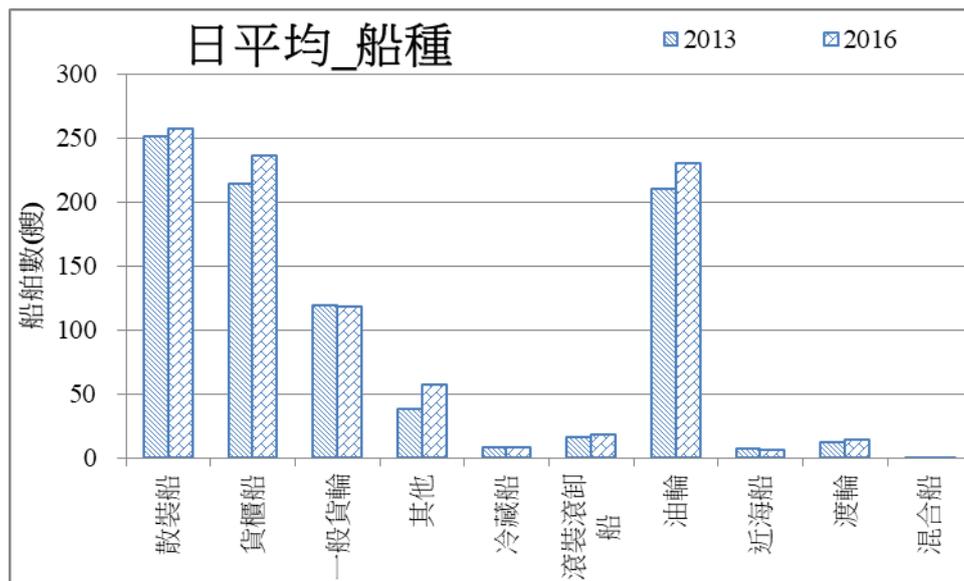
資料來源：本研究彙整。

#### 4.2.2 勞氏船舶種類分布

若將船舶種類分成散裝船、貨櫃船、一班貨輪、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等十種，統計 2013 年與 2016 年 AIS 每日船舶的船種分布狀態，其結果如圖 4.4。

其中 2013 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船之 250.9 艘，其次為貨櫃船之 214.0 艘，第三高則為油輪之 210.1 艘，各船種日平均船舶數總和則為 876.1 艘；2016 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船之 256.8 艘，其次為貨櫃船之 236.3 艘，第三高則為油輪之 230.4 艘，各船種日平均船舶數總和則為 945.4 艘。

各船種日平均船舶數統計結果如表 4-15。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.4 日平均船舶種類分布

表 4-15 各船種日平均船舶數

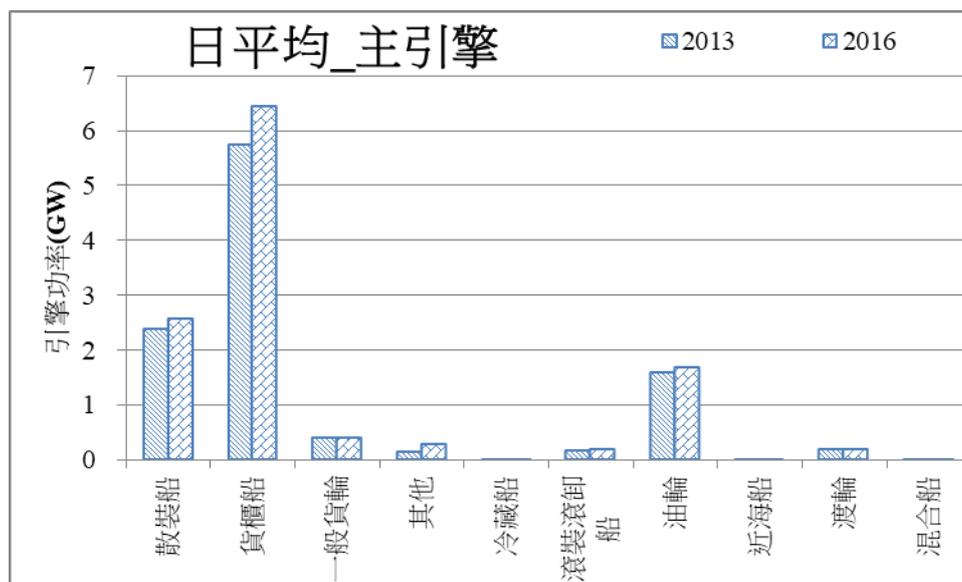
日平均船舶數 (艘)		散裝 船	貨櫃 船	一般 貨輪	其他	冷藏 船	滾裝 滾卸 船	油輪	近海 船	渡輪	混合 船	總和	可用 率
2013 年	平均	250.9	214.0	118.7	38.3	7.6	16.6	210.1	6.8	12.6	0.5	876.1	30.3%
	最大值	340.0	274.0	183.0	57.0	15.0	28.0	276.0	18.0	18.0	3.0	1,151.0	44.8%
	最小值	152.0	138.0	70.0	18.0	0.0	3.0	138.0	0.0	3.0	0.0	574.0	18.4%
	標準偏差	29.5	21.6	15.5	5.8	2.8	3.9	20.5	3.2	2.1	0.6	83.1	5.5%
2016 年	平均	256.8	236.3	117.9	56.9	7.7	18.4	230.4	6.4	14.0	0.6	945.4	30.9%
	最大值	395.0	343.0	162.0	79.0	16.0	33.0	343.0	21.0	20.0	2.0	1,305.0	46.2%
	最小值	66.0	61.0	26.0	10.0	1.0	1.0	36.0	1.0	3.0	0.0	232.0	19.7%
	標準偏差	40.4	31.6	17.3	8.9	3.0	5.4	31.8	3.3	2.7	0.5	115.6	5.9%

資料來源：本研究彙整。

依據洛杉磯港船舶排放量公式，船舶引擎功率為排放量計算之主要不變之參數；而船速影響負載，航行距離則影響活動強度，皆於排放量計算式中表現其影響高低。若同前述船種分布，將船舶種類分成散裝船、貨櫃船、一班貨輪、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等十種，統計 2013 年與 2016 年 AIS 每日船舶的引擎功率分布狀態，其結果如圖 4.5。

其中 2013 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船之 5.75GW，其次為散裝船之 2.38GW，第三高則為油輪之 1.60GW，各船種日平均引擎功率總和則為 10.71GW；2016 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船之 6.44GW，其次為散裝船之 2.57GW，第三高則為油輪之 1.68GW，各船種日平均引擎功率總和則為 11.83GW。

各船種日平均引擎功率統計結果如表 4-16。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.5 日平均引擎功率船舶種類分布

表 4-16 各船種日平均引擎功率

日平均引擎功率(GW)		散裝船	貨櫃船	一般貨輪	其他	冷藏船	滾裝滾卸船	油輪	近海船	渡輪	混合船	總和	可用率
2013年	平均	2.38	5.75	0.41	0.15	0.03	0.17	1.60	0.03	0.19	0.00	10.71	30.3%
	最大值	3.36	7.78	0.65	0.24	0.06	0.31	2.13	0.14	0.40	0.02	13.98	44.8%
	最小值	1.34	3.12	0.24	0.05	0.00	0.03	0.81	0.00	0.05	0.00	6.51	18.4%
	標準偏差	0.30	0.70	0.06	0.03	0.01	0.04	0.20	0.02	0.06	0.00	1.10	5.5%
2016年	平均	2.57	6.44	0.41	0.29	0.03	0.18	1.68	0.03	0.20	0.00	11.83	30.9%
	最大值	4.32	9.74	0.61	0.41	0.06	0.34	3.13	0.13	0.41	0.03	18.06	46.2%
	最小值	0.59	1.28	0.10	0.06	0.00	0.00	0.29	0.00	0.05	0.00	3.20	19.7%
	標準偏差	0.44	1.01	0.07	0.05	0.01	0.06	0.30	0.02	0.07	0.00	1.62	5.9%

資料來源：本研究彙整。

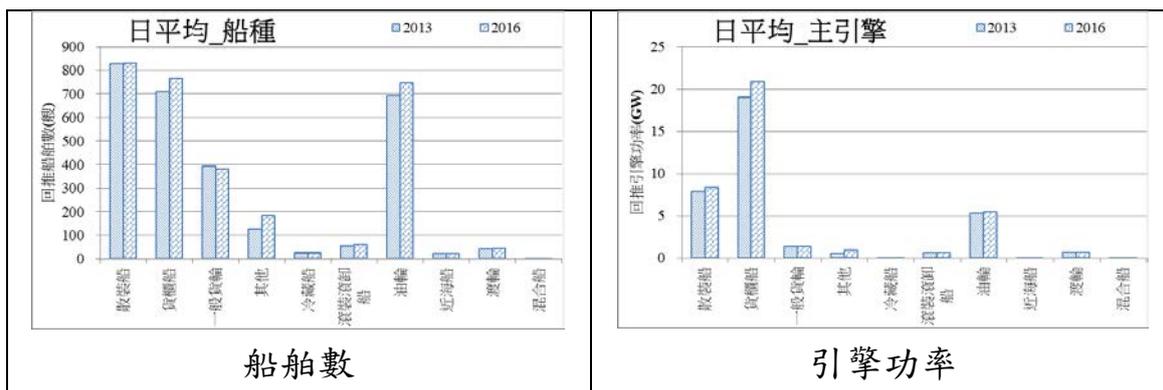
使用 2013 年與 2016 年 AIS 資料之可用率，將各船種之船舶數與引擎功率依照資料可用率之百分比，按照船舶種類等比例放大回推，得到如圖 4.6 及表 4-17 的結果。

其中船舶種類中，2013 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船之 828.6 艘，其次為貨櫃船之 706.9 艘，第三高則為油輪之 693.8 艘，各船種日平均船舶數總和則為 2,893.4 艘；2016 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船之 831.9 艘，與 2013 年相比船舶數百分比增加為 100.4%，其次為貨櫃船之 765.7 艘，船舶數百分比增加為 108.3%，第三高則為油輪之 746.4 艘，船舶數百分比增加為 107.6%，各船種日平均船舶數總和則為 3062.8 艘，船舶數百分比增加為 105.9%。

引擎功率百分比回推結果中，2013 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船之 19.01GW，其次為散裝船之 7.88GW，第三高則為油輪之 5.28GW，各船種日平均引擎功率總和則為 35.4GW；2016 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船之 20.83GW，與 2013 年相比引擎功率百分比增加為 109.6%，其次為散裝船之 8.30GW，船舶數百分比增加為 105.3%，第三高則為油輪之 5.44GW，船舶數百分比增加為 103.0%，各船種日平均引擎功率總和則為 38.2GW，引擎功率百分比增加為 108.0%。

依照 2013 年與 2016 年排放量推估結果顯示，2016 年 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 及 PM 排放量依序增加為 102.5%、103.6% 及 104.0%，如表 4-18，各污染物種增加之比例均未超過 5%，經統計此兩年份之船舶數與引擎功率其增加之比例總合介於 5% ~ 10% 之間。顯示由於經濟發展因素，航行於海上之船舶數增加了，而且由於船舶的噸位相對先前的船隻有越來越大的趨勢，航行所需的引擎功率相對也增加了。由於新船引擎的燃燒效率更好，故近年來船舶數雖然增加了，但船舶污染物排放量並未隨著船舶數等比例增加。

各船種逐日船舶數以及引擎功率結果如附錄七。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.6 可用率反推船舶數與引擎功率

表 4-17 可用率反推船舶數與引擎功率

日平均 (符合篩選)		散裝 船	貨櫃 船	一般 貨輪	其他	冷藏 船	滾裝 滾卸 船	油輪	近海 船	渡輪	混合 船	總和
船舶數 (艘)	2013 年	828.6	706.9	392.0	126.6	25.2	54.7	693.8	22.4	41.5	1.6	2,893.4
	2016 年	831.9	765.7	382.0	184.3	25.0	59.7	746.4	20.8	45.3	1.8	3,062.8
引擎功 率(GW)	2013 年	7.88	19.01	1.35	0.49	0.08	0.55	5.28	0.11	0.64	0.01	35.4
	2016 年	8.30	20.83	1.32	0.93	0.08	0.58	5.44	0.10	0.64	0.01	38.2
船舶數 百分比(%)		100.4 %	108.3 %	97.4%	145.6 %	99.1%	109.1 %	107.6 %	92.6%	109.2 %	113.8 %	105.9 %
引擎功率 百分比(%)		105.3 %	109.6 %	98.1%	189.7 %	98.6%	104.5 %	103.0 %	91.2%	100.4 %	109.2 %	108.0 %

資料來源：本研究彙整。

表 4-18 排放量增加百分比

	總排放量(噸)			區域百分比反推(噸)		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
2013 年	501	318	44	2923	1875	264
2016 年	559	359	50	2997	1943	275
百分比(%)	111.6%	112.9%	113.4%	102.5%	103.6%	104.0%

資料來源：本研究彙整。

特殊節日船種分布：

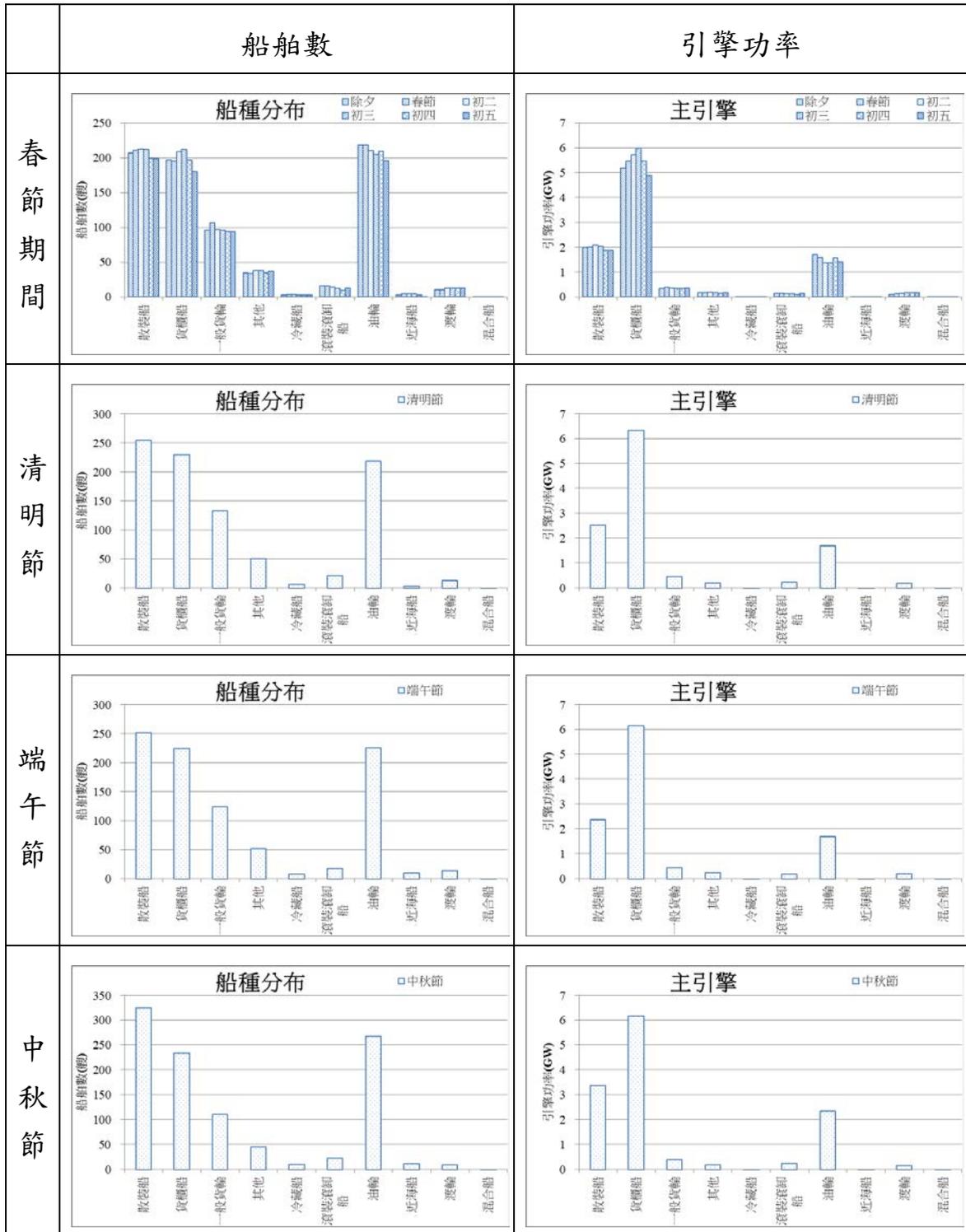
將 2013 年與 2016 年特殊節日逐日船舶數與船種、引擎功率等繪製如圖 4.7 所示。

春節期間船舶數及引擎功率最高的船種均為散裝船、貨櫃船及油輪，其中散裝船之船舶數介於 198.0 艘 ~ 212.5 艘之間，船舶數最高為初二之 212.5 艘，最低則為初五之 198.0 艘，而引擎功率介於 1.86GW ~ 2.09GW 之間，最高為初二之 2.09GW，最低則為初五之 1.86GW；貨櫃船之船舶數介於 180.0 艘 ~ 211.5 艘之間，最高為初三之 211.5 艘，最低則為初五之 180.0 艘，引擎功率介於 4.88GW ~ 5.97GW 之間，最高為初三之 5.97GW，最低則為初五之 4.88GW；油輪之船舶數介於 196.0 艘 ~ 218.5 艘之間，最高為春節之 218.5 艘，最低則為初五之 196.0 艘，引擎功率介於 1.37GW ~ 1.70GW 之間，最高為除夕之 1.70GW，最低則為初二與初三之 1.37GW。

清明節船舶種類船數介於 0.5 艘 ~ 255.5 艘之間，最高為散裝船 255.5 艘，次之則為貨櫃船之 230.5 艘；引擎功率則介於 0.00GW ~ 6.34GW 之間，最高為貨櫃船之 6.34GW，次之則為散裝船之 2.55GW。

端午節船舶種類船數介於 1.0 艘 ~ 252.5 艘之間，最高為散裝船 252.5 艘，次之則為貨櫃船之 225.5 艘；引擎功率則介於 0.00GW ~ 6.16GW 之間，最高為貨櫃船之 6.16GW，次之則為散裝船之 2.38GW。

中秋節船舶種類船數介於 0.5 艘 ~ 326.0 艘之間，最高為散裝船 326.0 艘，次之則為油輪之 268.5 艘。引擎功率則介於 0.00GW ~ 6.18GW 之間，最高為貨櫃船之 6.18GW，次之則為散裝船之 3.39GW。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.7 特殊節日船舶種類分布與引擎功率

### 4.2.3 進出港船舶

船舶於進港後有可能關閉 AIS 系統，以至於無 AIS 資料可供計算排放量，此時可透過船舶進出港記錄，比對 AIS 與各港進出港的船舶資料，依據船舶進出港資料來修正勞氏資料中各船舶之 IMO 等參數，確認 AIS 資料之準確性，以及可能短缺之船舶數，希望藉此修正船舶排放量的誤差，以精進船舶排放量之計算，修正無資料之船舶排放量。

因此，將臺灣主要商港如高雄港、臺中港、臺北港及基隆港等港口之出海口設定一範圍，並統計經過此範圍之 AIS 船舶數，且當日不計經過次數，只要有經過一次即列入當日船舶數統計。

其中基隆港口設定範圍為經度 121.751 度 ~ 121.757 度之間，緯度則為 25.158 度 ~ 25.163 度之間，臺北港範圍為經度 121.353 度 ~ 121.363 度之間，緯度 25.148 度 ~ 25.158 度之間，臺中港範圍為經度 120.490 度 ~ 120.510 度之間，緯度 24.280 度 ~ 24.295 度之間，高雄二港口範圍為經度 120.280 度 ~ 120.305 度之間，緯度 22.540 度 ~ 22.555 度之間，高雄一港口範圍為經度 120.250 度 ~ 120.270 度之間，緯度 22.610 度 ~ 22.625 度之間，各範圍如圖 4.8 中顯示之紅色框框。

如上所述之設定範圍內，統計 2013 年與 2016 年間，AIS 資料中有經過各港口出入口(紅框處)之船舶數，逐日結果如圖 4.9 及圖 4.10。

2013 年統計結果，高雄一港口通過船舶數介於 1 艘 ~ 77 艘之間，船舶數最高為 11 月 21 日之 77 艘，其次為 7 月 4 日之 75 艘，全年日平均 48.9 艘；高雄二港口通過船舶數介於 2 艘 ~ 79 艘之間，船舶數最高為 9 月 24 日及 12 月 10 日之 79 艘，其次為 9 月 25 日之 78 艘，全年日平均 52.8 艘；臺中港通過船舶數介於 3 艘 ~ 115 艘之間，船舶數最高為 11 月 8 日之 115 艘，其次為 11 月 6 日及 10 月 14 日之 112 艘，全年日平均 56.4 艘；臺北港通過船舶數介於 1 艘 ~ 33 艘之間，船舶數最高為 8 月 9 日之 33 艘，其次為 3 月 8 日之 32 艘，全年日平均 18.6 艘；基隆港通過船舶數介於 0 艘 ~ 79 艘之間，船舶數最高為 7 月 11 日之 79 艘，其次為 7 月 15 日之 43 艘，全年日平均 23.8 艘。

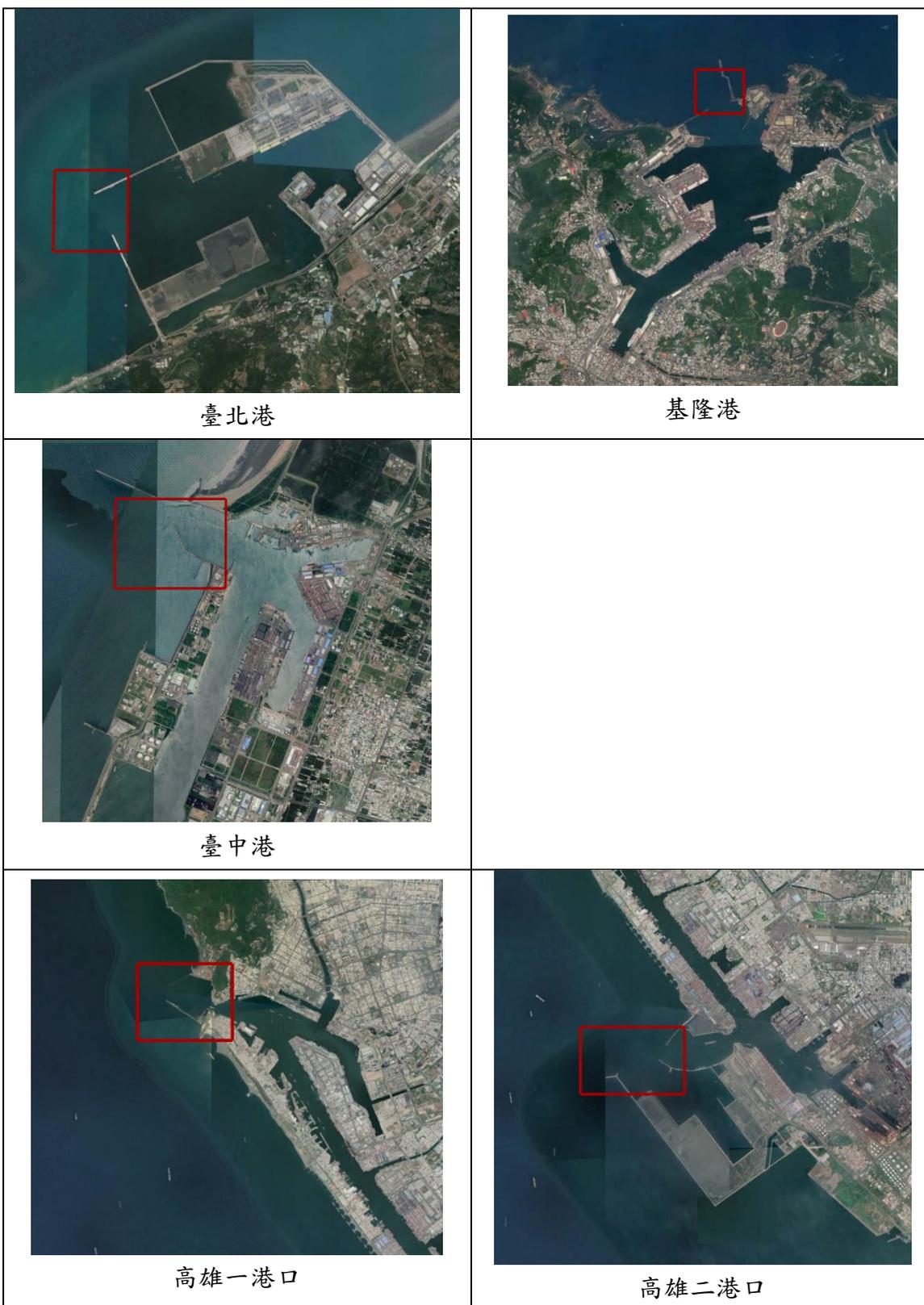
2016年統計結果，高雄一港口通過船舶數介於0艘～102艘之間，船舶數最高為4月27日之102艘，其次為4月26日之92艘，全年日平均55.0艘；高雄二港口通過船舶數介於0艘～142艘之間，船舶數最高為4月26日之142艘，其次為4月25日之132艘，全年日平均71.3艘；臺中港通過船舶數介於0艘～206艘之間，船舶數最高為11月14日之206艘，其次為11月5日及11月19日之199艘，全年日平均81.5艘；臺北港通過船舶數介於0艘～52艘之間，船舶數最高為5月14日、1月2日、12月9日及5月18日之52艘，其次為7月29日之50艘，全年日平均29.5艘；基隆港通過船舶數介於0艘～97艘之間，船舶數最高為7月6日之97艘，其次為11月29日之82艘，全年日平均23.0艘。

統計結果如表4-19所示。

**表 4-19 主要港口進出港平均船舶數**

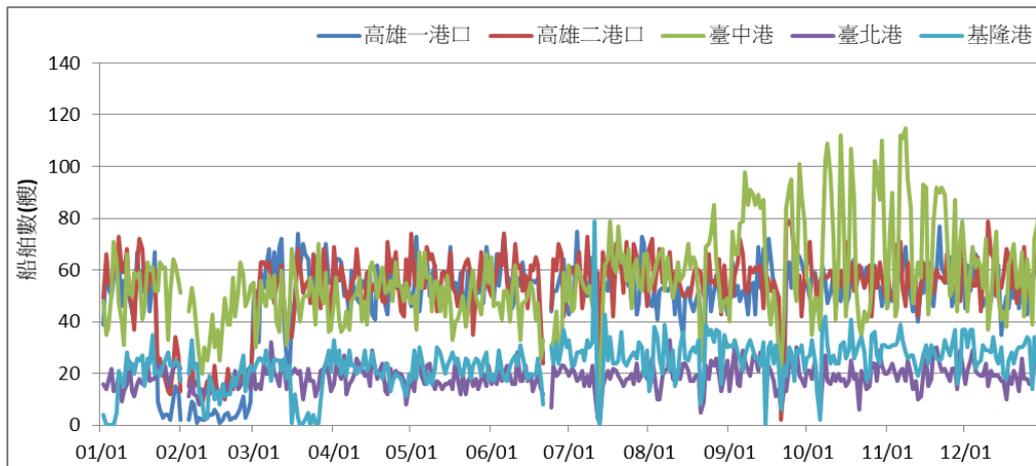
		高一港口	高二港口	臺中港	臺北港	基隆港	總和
2013年	總和	17598	19004	20291	6700	8570	72163
	平均	48.9	52.8	56.4	18.6	23.8	200.5
	最大值	77	79	115	33	79	299
	最小值	1	2	3	1	0	18
2016年	總和	19973	25878	29595	10698	8353	94497
	平均	55.0	71.3	81.5	29.5	23.0	260.3
	最大值	102	142	206	52	97	431
	最小值	0	0	0	0	0	8

資料來源：本研究彙整。



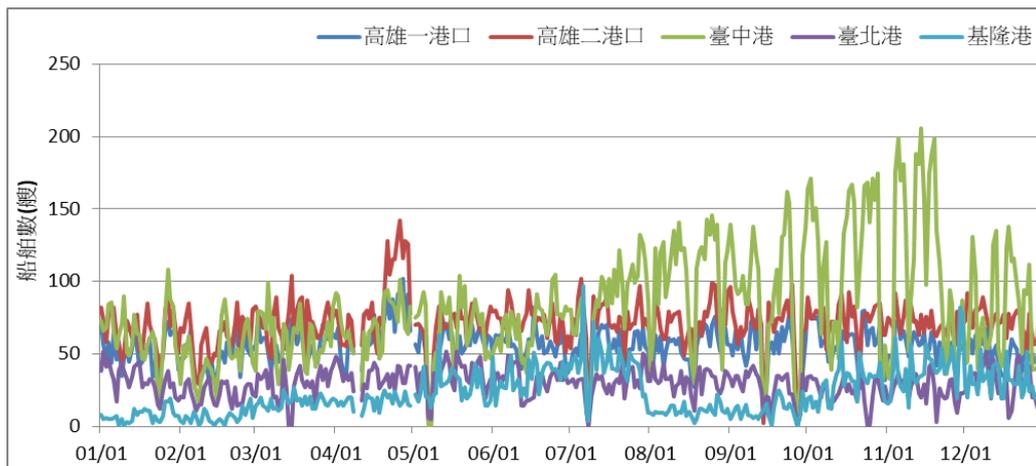
資料來源：本研究彙整。

圖 4.8 主要港口船舶進出港統計範圍



資料來源：本研究彙整。

圖 4.9 2013 年主要港口進出港船舶數

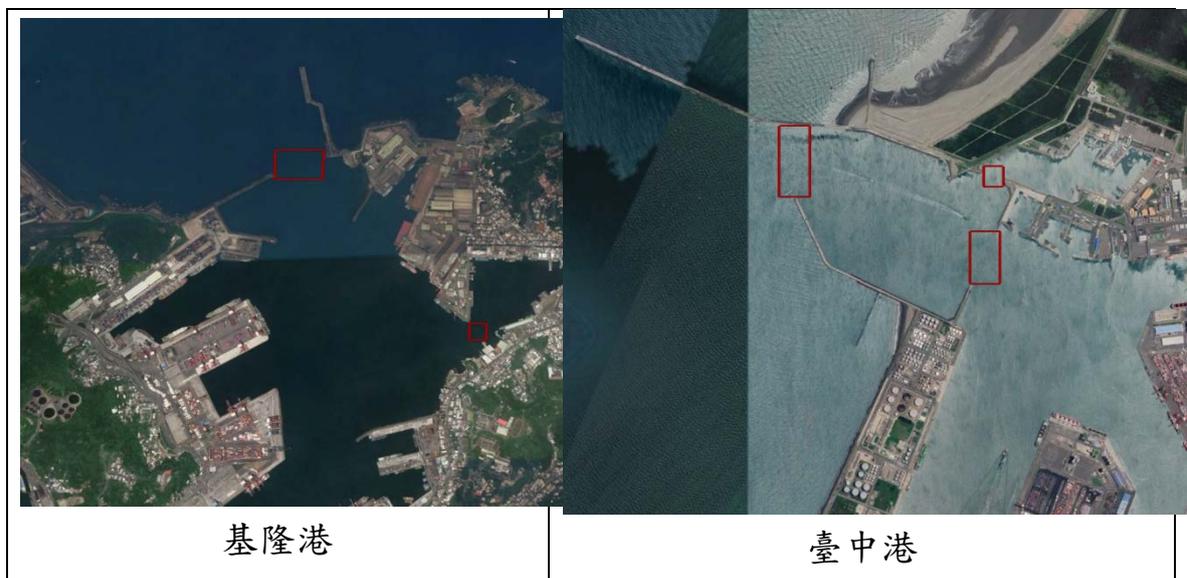


資料來源：本研究彙整。

圖 4.10 2016 年主要港口進出港船舶數

為判別 AIS 船舶資料與港務公司提供之船舶進出港記錄之異同，故將前述統計所列之範圍縮小至港口大小，並增加港內漁港口區域，同時採用述所列之船舶數統計方式，統計經過此範圍之 AIS 船舶數，即當日不計經過次數，只要有經過一次便列入當日船舶數統計，統計 2016 年經過臺中港與基隆(紅框處)之船舶數。

其中基隆港內之正濱漁港口設定範圍為經度 121.762820 度 ~ 121.763680 度，緯度 25.150470 度 ~ 25.151260 度之間；基隆港外堤防口範圍為經度 121.752700 度 ~ 121.755250 度，緯度 25.158280 度 ~ 25.159750 度之間；臺中港內之梧棲漁港口範圍為經度 120.513940 度 ~ 120.512650 度，緯度 24.290950 度 ~ 24.292150 度之間；臺中港內堤防範圍為經度 120.511800 度 ~ 120.513750 度，緯度 24.285200 度 ~ 24.288300 度之間；臺中港外堤防範圍為經度 120.499500 度 ~ 120.501450 度，緯度 24.290350 度 ~ 24.294550 度之間，各範圍則如圖 4.11 中顯示之紅色框框。

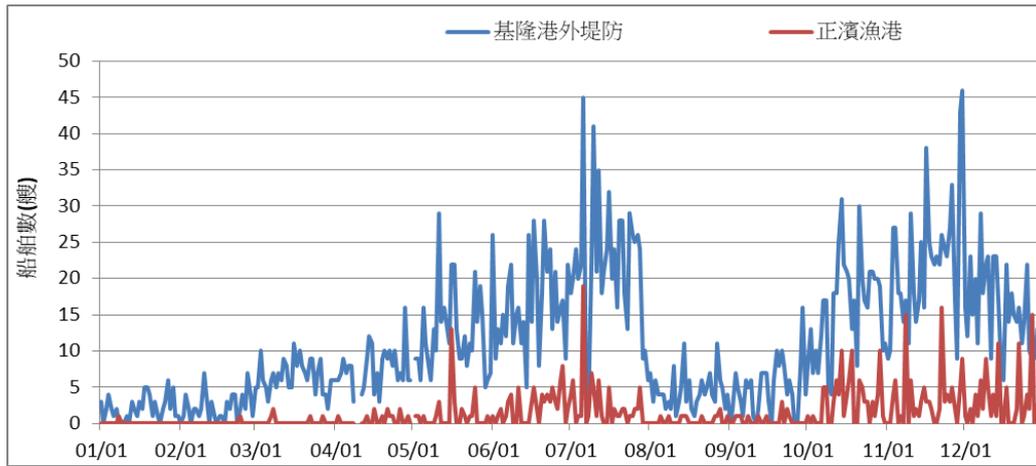


資料來源：本研究彙整。

**圖 4.11 基隆港與臺中港進出港範圍**

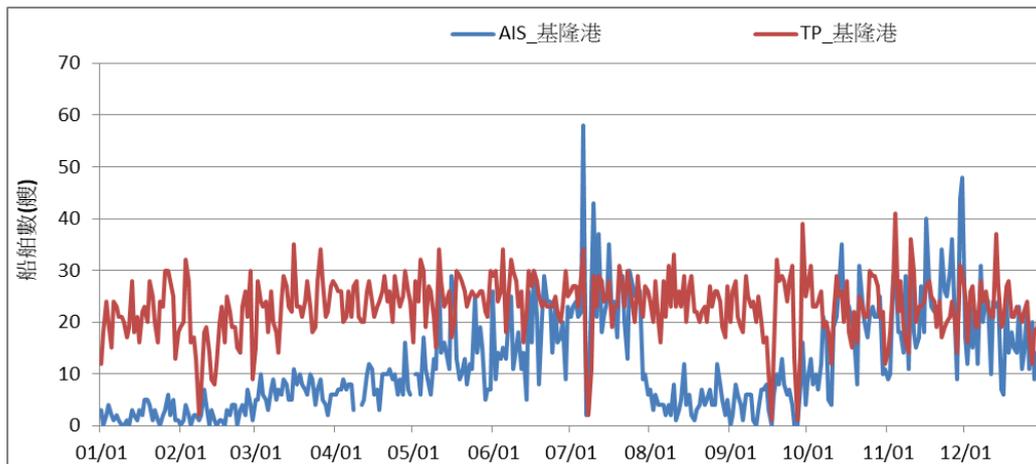
如圖 4.12，基隆港外堤防船舶數介於 0 艘 ~ 46 艘之間，平均 11.1 艘，正濱漁港船舶數介於 0 艘 ~ 19 艘之間，平均 1.4 艘，圖中顯示有兩個明顯之峰值，研判可能與遠洋作業漁船的作業週期有關。

由於正濱漁港的船會通過基隆港外堤防進入漁港內，故將通過基隆港外堤防的船舶數加上正濱漁港的船舶數，並移除重複船隻，當成基隆港的船數，同時與港務公司提供之船舶進出港記錄繪製成圖 4.13，其中基隆港船舶數介於 0 艘 ~ 58 艘之間，平均 11.9 艘，進出港記錄船舶數介於 1 艘 ~ 41 艘之間，平均 23.0 艘。各區域統計結果如表 4-20。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.12 基隆港 2016 年 AIS 進出港船舶數



資料來源：本研究彙整。

圖 4.13 基隆港 2016 年 AIS 與進出港紀錄船舶數

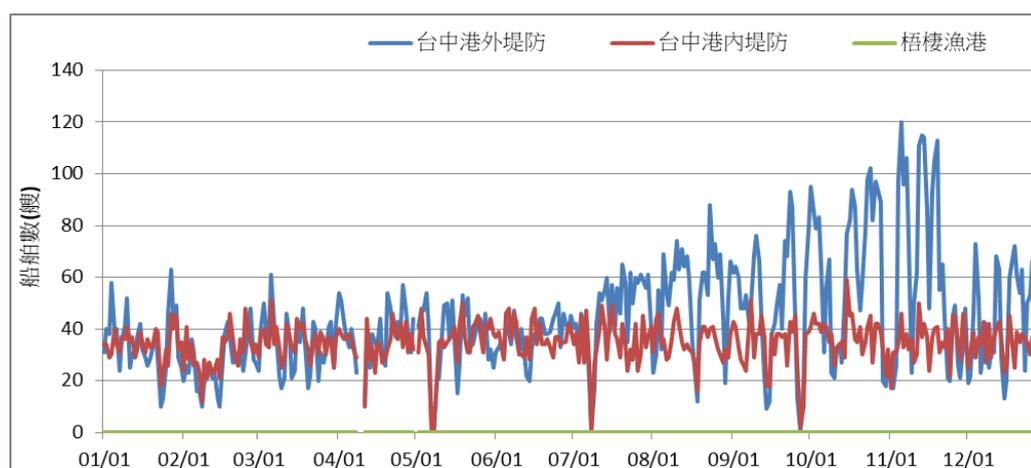
表 4-20 基隆港 2016 年 AIS 船舶數與進出港記錄

	港外堤防	正濱漁港	基隆港_AIS	基隆港_TP
總和	4044	508	4329	8428
平均	11.1	1.4	11.9	23.0
最大值	46	19	58	41
最小值	0	0	0	1

資料來源：本研究彙整。

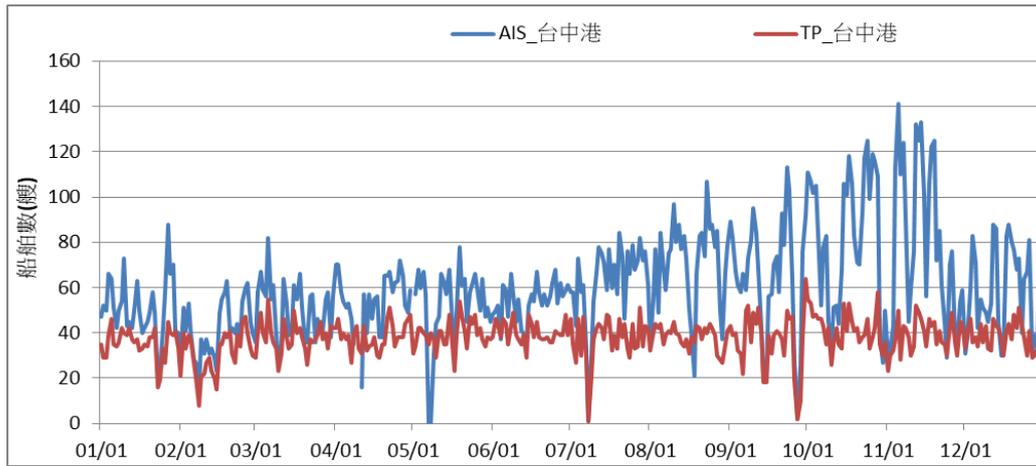
如圖 4.14，臺中港外堤防船舶數介於 0 艘 ~ 120 艘之間，平均 44.1 艘，臺中港內堤防船舶數介於 0 艘 ~ 59 艘之間，平均 34.6 艘，梧棲漁港船舶數則均為 0 艘。

由於進出臺中港在通過港內堤防的船必定會通過港外堤防，同理梧棲漁港也是，故將通過港外堤防的船舶數加上港內堤防與梧棲漁港的船舶數，同時移除重複的船隻，當作臺中港的船舶數同時與港務公司提供之臺中港船舶進出港記錄繪製成圖，如圖 4.15，其中臺中港船舶數介於 0 艘 ~ 141 艘之間，平均 60.2 艘，進出港記錄船舶數介於 1 艘 ~ 64 艘之間，平均 37.4 艘。各區域統計結果如表 4-21 所示。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.14 臺中港 2016 年 AIS 進出港船舶數



資料來源：本研究彙整。

圖 4.15 臺中港 2016 年 AIS 與進出港紀錄船舶數

表 4-21 臺中港 AIS 船舶數與進出港記錄比較

	港外堤防	港內堤防	梧棲漁港	AIS	TP
總和	16009	12564	0	21866	13837
平均	44.1	34.6	0.0	60.2	37.8
最大值	120	59	0	141	64
最小值	0	0	0	0	1

資料來源：本研究彙整。

將前述臺中港與基隆港抓取到之船舶，挑選 2016 年 12 月 25 日至 2016 年 12 月 31 日，交互比對 AIS 有抓到的船，與進出港記錄(TP)的船隻是否有重複，即(AIS+TP)的船舶包含 AIS 的船與 TP 的船，但不重複出現，並且以勞氏資料庫篩選是否有該船隻資料，同時統計其可篩選到之百分比，結果如表 4-22。

其中基隆港 AIS 船隻可在勞氏資料庫中抓取到的百分比介於 30.0% ~ 92.9%之間，TP 船隻百分比則介於 76.5% ~ 100%之間，而 (AIS+TP)船隻可抓到百分比為 48.1% ~ 95.2%之間；臺中港 AIS 船隻可在勞氏資料庫中抓取到的百分比介於 32.8% ~ 69.7%之間，TP 船隻百分比則介於 80.0% ~ 93.8%之間，而(AIS+TP)船隻可抓到百分比為 34.2% ~ 74.4%之間。

表 4-22 AIS 船舶數與進出港記錄比較

		基隆港			臺中港		
		AIS_data	TP_data	AIS+TP	AIS_data	TP_data	AIS+TP
船舶數 (艘)	2016/12/25	23	24	35	67	30	73
	2016/12/26	11	17	22	81	41	87
	2016/12/27	20	12	27	31	27	37
	2016/12/28	9	18	19	39	30	44
	2016/12/29	14	19	21	33	33	43
	2016/12/30	15	23	30	71	41	78
	2016/12/31	32	30	44	66	32	71
勞氏有抓到 (艘)	2016/12/25	12	24	24	22	24	25
	2016/12/26	6	13	13	32	34	35
	2016/12/27	6	12	13	20	24	24
	2016/12/28	8	17	17	23	26	27
	2016/12/29	13	19	20	23	31	32
	2016/12/30	8	19	19	34	38	40
	2016/12/31	16	27	27	28	30	32
百分比 (%)	2016/12/25	52.2%	100.0%	68.6%	32.8%	80.0%	34.2%
	2016/12/26	54.5%	76.5%	59.1%	39.5%	82.9%	40.2%
	2016/12/27	30.0%	100.0%	48.1%	64.5%	88.9%	64.9%
	2016/12/28	88.9%	94.4%	89.5%	59.0%	86.7%	61.4%
	2016/12/29	92.9%	100.0%	95.2%	69.7%	93.9%	74.4%
	2016/12/30	53.3%	82.6%	63.3%	47.9%	92.7%	51.3%
	2016/12/31	50.0%	90.0%	61.4%	42.4%	93.8%	45.1%

資料來源：本研究彙整。

### 4.3 船舶排放量預測結果

由於本所 AIS 系統已於 107 年底移轉交通部航港局，本研究使用之 AIS 資料均為本所介接航港局之資料，因介接設定問題導致部份資料異常，故 108 年 5 月 31 日至 7 月 9 日期間之排放量不計入本研究分析。

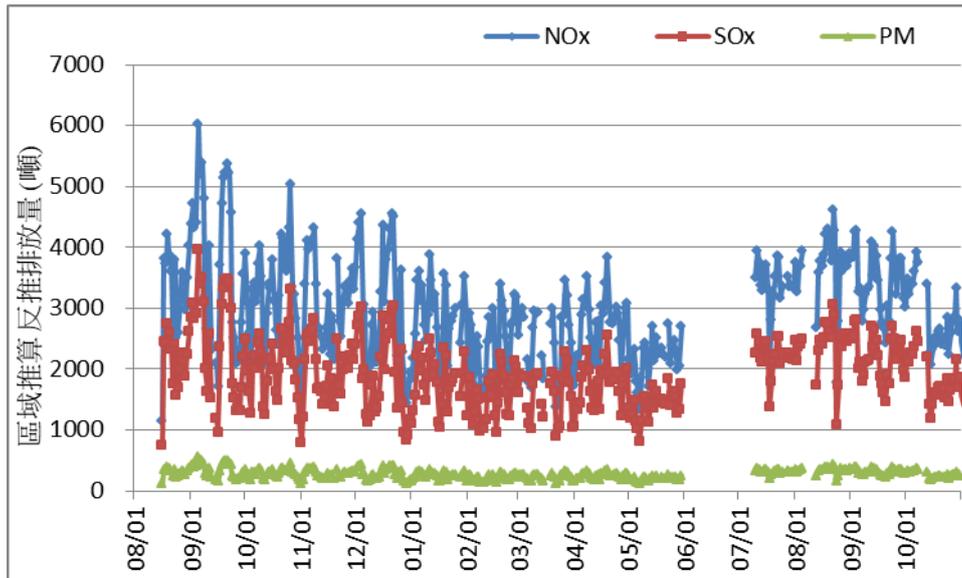
依照前述 3.3 節及 3.4 節所述排放量推估方式，統計 107 年 8 月 16 日至 108 年 11 月 25 日臺灣周遭海域船舶排放量推估結果，如圖 4.16。其中 107 年 9 月 5 日有最高值，NO<sub>x</sub>推估量 6,021.2 噸、SO<sub>x</sub>推估量 3,968.4 噸及 PM 推估量 563.4 噸，AIS 資料筆數 1,777,798 筆；次之為 107 年 9 月 20 日，其 NO<sub>x</sub>推估量為 5,220.7 噸、SO<sub>x</sub>推估量 3,460.8 噸及 PM 推估量 485.0 噸，AIS 資料筆數則為 967,196 筆；第三高則為 107 年 10 月 26 日，其 NO<sub>x</sub>推估量為 5,035.7 噸、SO<sub>x</sub>推估量 3,307.0 噸及 PM 推估量 456.3 噸，AIS 資料筆數則為 883,582 筆。

船舶於海上航行時，由於目前尚無法確切得知船舶是否有切換低硫油，當後續使用低硫油政策，排放量預測可採用含硫率 0.5% 之燃油排放係數。排放量推估期間移除資料未滿 1 日之排放量，並套用特殊節日與颱風影響之排放量預測係數，其中接近臺灣且發布颱風警報者有瑪莉亞、山竹、丹娜絲、利奇馬、白鹿及米塔等颱風詳細如表 4-23。

**表 4-23 排放量推估期間發布之颱風警報**

年份	颱風編號	颱風名稱	警報期間	近臺強度	近臺最低氣壓 (hPa)	近臺最大風速 (m/s)	近臺 7 級風暴風半徑 (km)	近臺 10 級風暴風半徑 (km)	警報發布報數
2019	201918	米塔	2019/9/29 08:30	中度	960	38	180	60	18
		(MITAG)	2019/10/1 11:30						
2019	201911	白鹿	2019/8/23 05:30	輕度	975	30	150	50	19
		(BAILU)	2019/8/25 11:30						
2019	201909	利奇馬	2019/8/7 17:30	強烈	915	53	280	100	22
		(LEKIMA)	2019/8/10 08:30						
2019	201905	丹娜絲	2019/7/16 23:30	輕度	988	23	150	---	15
		(DANAS)	2019/7/18 17:30						
2018	201822	山竹	2018/9/14 11:30	強烈	895	60	320	120	12
		(MANGKHUT)	2018/9/15 20:30						
2018	201808	瑪莉亞	2018/7/9 14:30	強烈	915	55	280	100	17
		(MARIA)	2018/7/11 14:30						

資料來源：中央氣象局。本研究彙整。

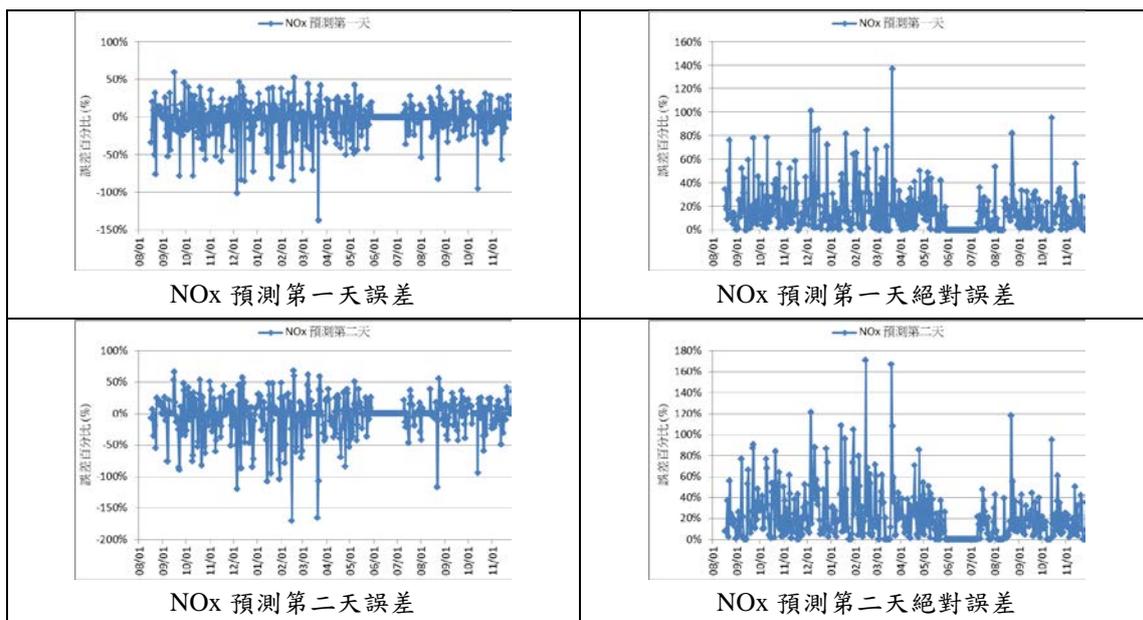


資料來源：本研究彙整。

圖 4.16 臺灣周遭海域船舶排放量推估結果

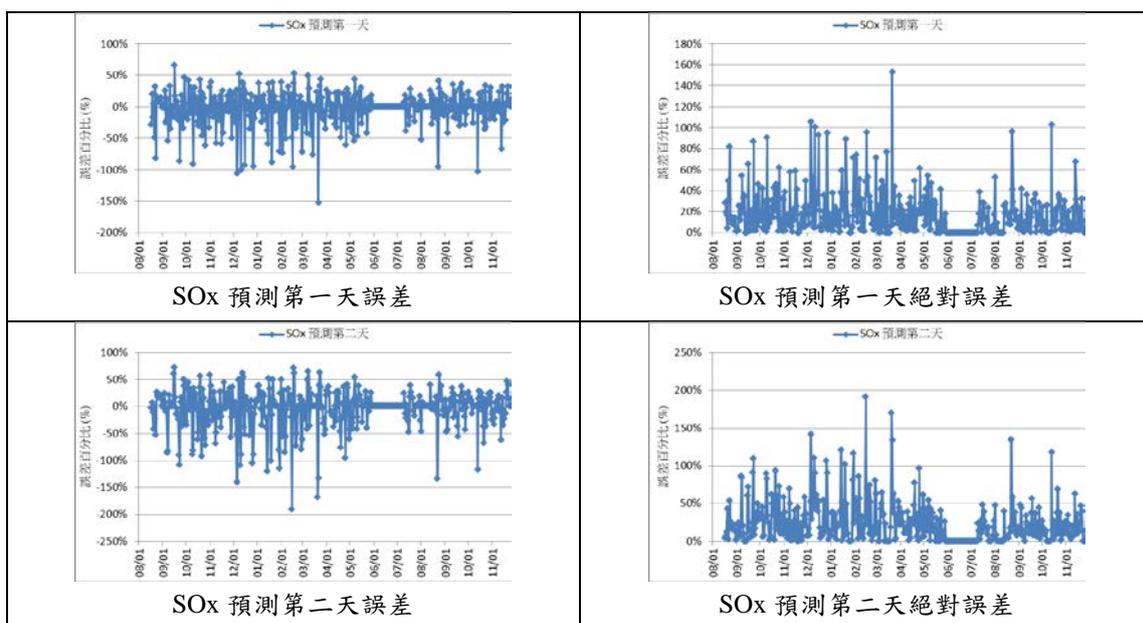
將排放量推估結果依照 3.7 節所述，計算排放量實際推估結果與預測結果之誤差百分比以及絕對誤差百分比，繪製如圖 4.17 ~ 圖 4.19，其中  $\text{NO}_x$  預測第一天誤差百分比介於 -137.1% ~ 59.4% 之間，平均 -3.5%，第二天誤差介於 -170.6% ~ 68.0% 之間，平均 -5.1%； $\text{SO}_x$  預測第一天誤差百分比介於 -153.0% ~ 65.5% 之間，平均 -4.0%，第二天誤差介於 -191.1% ~ 71.5% 之間，平均 -6.1%；PM 預測第一天誤差百分比介於 -147.2% ~ 61.3% 之間，平均 -3.8%，第二天誤差介於 -179.7% ~ 69.3% 之間，平均 -5.6%；推估期間逐日結果如表 4-24。

絕對誤差百分比  $\text{NO}_x$  預測第一天介於 0.1% ~ 137.1% 之間，平均 19.2%，第二天誤差介於 0.4% ~ 170.6% 之間，平均 25.9%；絕對誤差百分比  $\text{SO}_x$  預測第一天介於 0.2% ~ 153.0% 之間，平均 20.7%，第二天誤差介於 0.0% ~ 191.1% 之間，平均 28.4%；絕對誤差百分比 PM 預測第一天介於 0.0% ~ 147.2% 之間，平均 20.2%，第二天誤差介於 0.0% ~ 179.7% 之間，平均 27.3%；逐日結果如表 4-25。



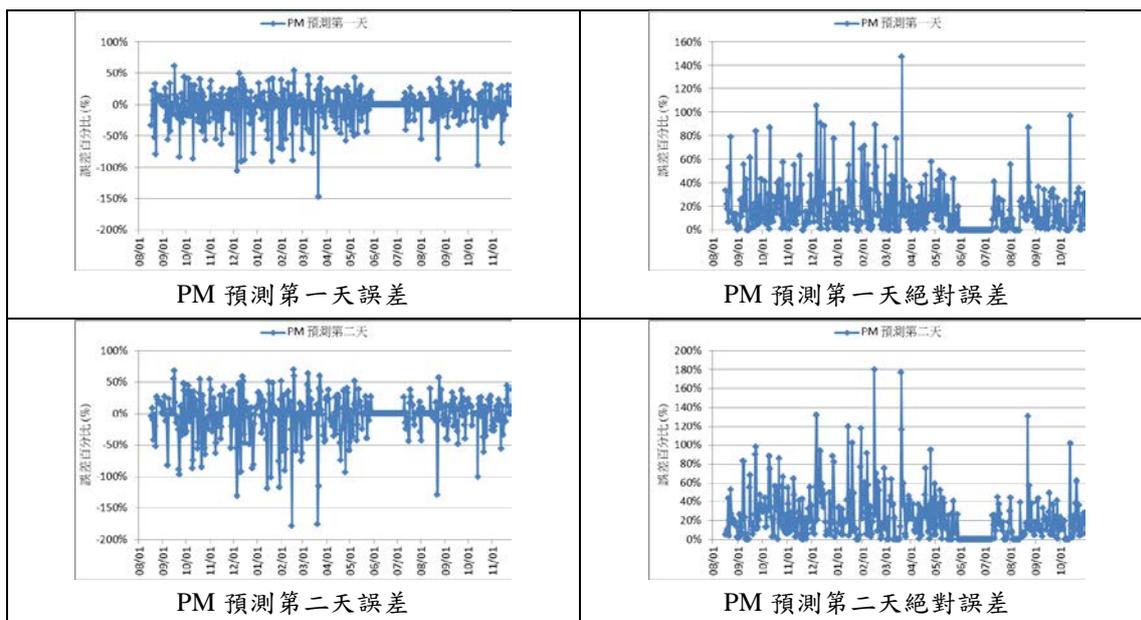
資料來源：本研究彙整。

圖 4.17 船舶 NO<sub>x</sub>排放量預測誤差結果



資料來源：本研究彙整。

圖 4.18 船舶 SO<sub>x</sub>排放量預測誤差結果



資料來源：本研究彙整。

圖 4.19 船舶 PM 排放量預測誤差結果

表 4-24 排放量預測誤差

預測誤差 (%)		第一天	第二天	第三天	第四天
NO <sub>x</sub>	最大值	59.4%	68.0%	72.9%	68.3%
	平均	-3.5%	-5.1%	-7.1%	-7.8%
	最小值	-137.1%	-170.6%	-133.9%	-146.8%
	標準偏差	26.7%	35.4%	38.5%	39.2%
SO <sub>x</sub>	最大值	65.5%	71.5%	75.8%	73.2%
	平均	-4.0%	-6.1%	-8.3%	-9.1%
	最小值	-153.0%	-191.1%	-164.2%	-167.4%
	標準偏差	29.1%	39.2%	42.4%	42.9%
PM	最大值	61.3%	69.3%	73.0%	70.4%
	平均	-3.8%	-5.6%	-7.8%	-8.5%
	最小值	-147.2%	-179.7%	-147.7%	-160.0%
	標準偏差	28.2%	37.5%	40.7%	41.3%

資料來源：本研究彙整。

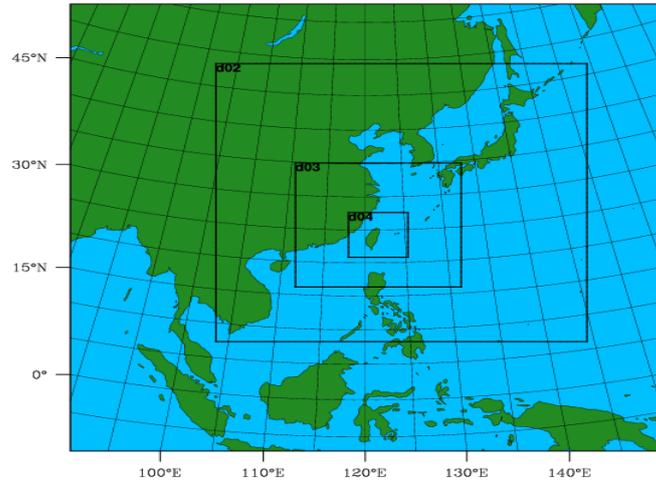
表 4-25 排放量預測絕對誤差

絕對誤差 (%)		第一天	第二天	第三天	第四天
NO <sub>x</sub>	最大值	137.1%	170.6%	133.9%	146.8%
	平均	19.2%	25.9%	29.9%	30.7%
	最小值	0.1%	0.4%	0.2%	0.3%
	標準偏差	18.9%	24.7%	25.3%	25.6%
SO <sub>x</sub>	最大值	153.0%	191.1%	164.2%	167.4%
	平均	20.7%	28.4%	32.6%	33.6%
	最小值	0.2%	0.0%	0.0%	0.4%
	標準偏差	20.8%	27.8%	28.4%	28.2%
PM	最大值	147.2%	179.7%	147.7%	160.0%
	平均	20.2%	27.3%	31.3%	32.2%
	最小值	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%
	標準偏差	20.0%	26.4%	27.1%	27.2%

資料來源：本研究彙整。

#### 4.4 WRF 性能評估

本研究建置即時三維網格 WRF 氣象模式，依據環保署 TEDS10 基準年進行 2016 年模擬建置，在 WRF 模式模擬範圍設定部分，如圖 4.20、表 4-26 所示，共分為四層網格，解析度依次為 81 公里、27 公里、9 公里以及 3 公里，而各層網格大小分別是 91x91、169x166、223x223、223x223。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.20 WRF 模式模擬範圍設定圖

表 4-26 本研究模擬 WRF 模式所採用的設定基準

	Domain 1	Domain 2	Domain3	Domain 4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Grid Size	91 X 91	169 X 166	223 X 223	223 X 223
FDDA	Yes	Yes	Yes	No

資料來源：本研究彙整。

為了確保 WRF 模式模擬的氣象場具有合理性，本研究將 2016 年 WRF 模式模擬的結果，與中央氣象局的地面測站觀測資料，依照行政院環保署在 2015 年公告的空氣品質模式模擬規範進行驗證分析，所運用到的統計方法與評估規範分述如下：

1. 配對值偏差(Mean Biased Error, MBE)：

$$MBE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k})$$

2. 配對值絕對值偏差(Mean Absolute Gross Error, MAGE)：

$$MAGE = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N |P_{i,k} - O_{i,k}|$$

3. 配對值均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE) :

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

4. 風向配對值標準化偏差(Wind Normalized Mean Bias, WNMB)

$$\text{WNMB} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{i,k} - O_{i,k})}{M \times N \times 360^\circ} \times 100\%$$

5. 風向配對值標準化絕對值偏差(Wind Normalized Mean Error, WNME)

$$\text{WNME} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N |P_{i,k} - O_{i,k}|}{M \times N \times 360^\circ} \times 100\%$$

● 變數說明：

$P_{i,k}$  代表第 i 小時(日)第 k 測站的模擬值

$O_{i,k}$  代表第 i 小時(日)第 k 測站的監測值

M 代表所有的測站數

N 代表所有模擬的小時(日)數

$\bar{P}$  代表模擬區域範圍內所有測站每小時平均模擬值

$\bar{O}$  代表模擬區域範圍內所有測站每小時平均監測值

$S_P$  代表模擬區域範圍內所有測站每小時模擬值之標準偏差

$S_O$  代表模擬區域範圍內所有測站每小時監測值之標準偏差

環保署所訂定的氣象模式模擬結果性能評估規範，針對溫度、風速與風向訂定標準，如表 4-27 所示，溫度部分配對值偏差(MBE)為 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以內，配對值絕對值偏差(MAGE)為 $3^\circ\text{C}$ 以內；風速部分配對值偏差

(MBE)在±1.5m/s 以內，配對值均方根誤差(RMSE)在 3m/s 以內；風向部分風向配對值標準化偏差(WNMB)在±10%以內，而風向配對值標準化絕對值偏差(WNME)在 30%以內。

**表 4-27 環保署訂定氣象模式模擬結果性能評估規範標準**

氣象變數	規範代稱	Benchmark
溫度	MBE MAGE	$\leq \pm 1.5^{\circ} \text{C}$ $\leq 3^{\circ} \text{C}$
風速	MBE RMSE	$\leq \pm 1.5 \text{ m/s}$ $\leq 3 \text{ m/s}$
風向	WNMB WNME	$\leq \pm 10 \%$ $\leq 30 \%$

資料來源：環保署。本研究彙整。

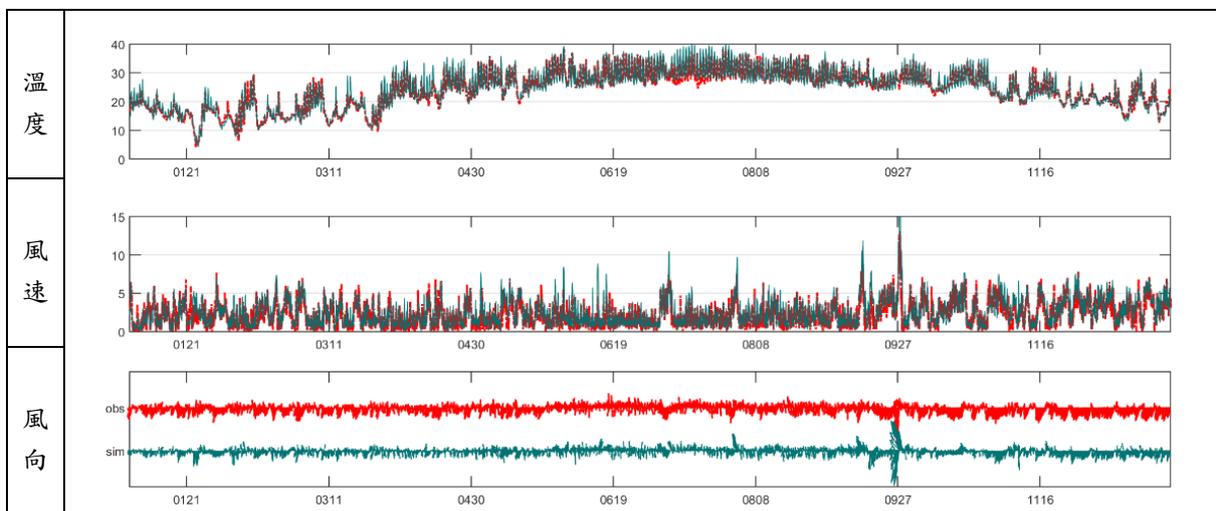
2016 年 WRF 模式模擬性能結果如表 4-28 所示。其中溫度性能指標 MBE 介於-0.7 ~ 2.5 之間，平均 0.2，MAGE 介於 0.4 ~ 2.5 之間，平均 0.9；風速性能指標 MBE 介於-0.4 ~ 1.9 之間，平均 0.5，RMSE 介於 0.8 ~ 2.6 之間，平均 1.4；風向性能指標 WNMB 介於-11.0% ~ 4.0% 之間，平均-0.8%，WNME 介於 8% ~ 27% 之間，平均 14%。所有測站在性能指標合格率均在 90% 以上。

表 4-28 2016 年 WRF 氣象模擬定量性能評估

測站	溫度性能指標		風速性能指標		風向性能指標	
	MBE	MAGE	MBE	RMSE	WNMB	WNME
板橋	0.01	0.7	0.7	1.3	-2.00%	14%
淡水	-0.1	0.4	1	1.7	-0.30%	14%
鞍部	1.2	1.2	0.8	1.6	-11.00%	25%
臺北	0.3	1.1	0.3	1.1	0.70%	15%
竹子湖	0.4	0.6	1.2	2	1.90%	21%
基隆	-0.4	0.7	0.3	1.1	1.00%	13%
花蓮	0.01	0.4	-0.03	1	2.60%	14%
蘇澳	-0.7	0.8	0.5	1.2	2.20%	18%
宜蘭	-0.03	0.6	0.1	0.9	1.40%	18%
臺南	0.1	1.1	0.002	0.9	-6.50%	12%
永康	0.2	1.2	0.1	0.9	-1.60%	9%
高雄	-0.1	0.6	0.7	1.2	-1.00%	11%
嘉義	-0.1	1.1	0.5	1.2	-1.30%	12%
臺中	0.7	1.1	0.7	1.1	1.50%	14%
阿里山	1	1.3	0.6	1.1	-10.20%	27%
大武	-0.3	0.7	0.7	1.3	1.30%	13%
玉山	2.5	2.5	-0.4	1.7	-3.10%	13%
新竹	-0.02	0.8	1.9	2.6	-0.30%	13%
恆春	-0.7	0.8	1.2	2	-2.10%	10%
成功	-0.1	0.4	0.7	1.3	2.70%	11%
蘭嶼	1	1.1	-0.4	2	0.90%	10%
日月潭	0.3	1.1	0.2	0.8	-3.90%	22%
臺東	0.1	0.5	1.3	1.9	2.90%	12%
梧棲	-0.1	0.7	0.4	1.2	4.00%	10%
新屋	-0.2	0.5	0.6	1.4	0.10%	8%
Overall	0.2	0.9	0.5	1.4	-0.80%	14%
Criteria	1.5/-1.5	3	1.5/-1.5	3	10.0%/-10.0%	30%
合格率	96%	100%	96%	100%	92%	100%

資料來源：長榮大學。本研究彙整。

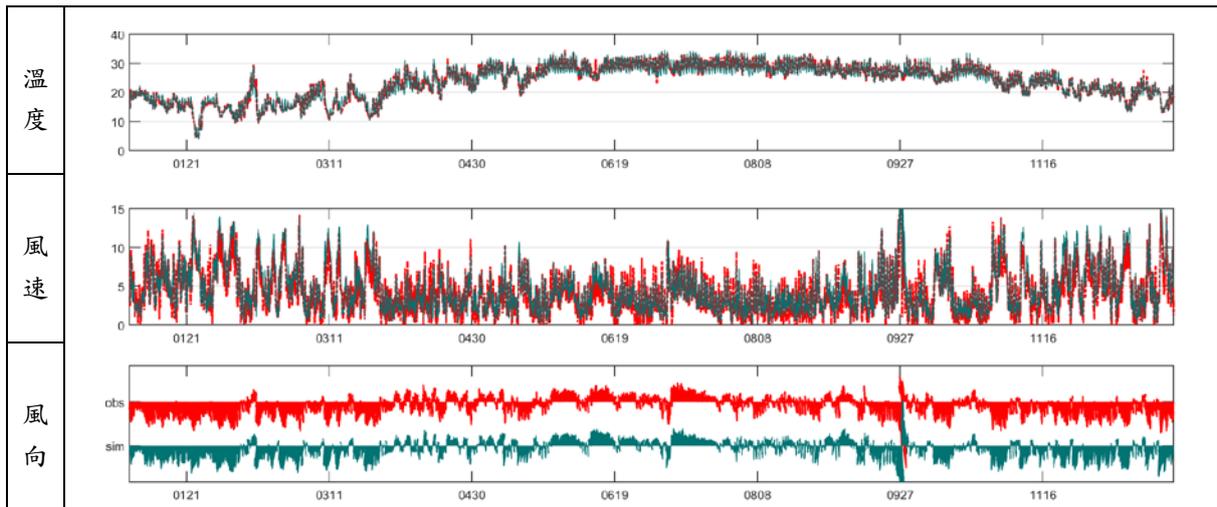
模式定性評估方面，在各地區分別挑選一個測站作為代表進行說明，圖 4.9 為 2016 年北部地區臺北站的時序比對圖，紅色代表觀測結果，而綠色為 WRF 模式模擬結果，由時序結果來看，整體模擬趨勢與觀測相當接近，溫度方面除了 3 月、5 月、7 月與 9 月為高估外，其餘月份皆有低估的情況，風速部分則是所有月份皆為高估；定量評估部分由表 4-16 可發現全年溫度模擬略為高估，MBE 為 0.3，MAGE 為 1.1，風速方面模擬略為高估，MBE 為 0.3，RMSE 為 1.1，風向上 WNMB 為 0.7%，WNME 為 11%，整體來看所有性能指標皆符合模擬模擬規範標準。



資料來源：長榮大學。本研究彙整。

圖 4.21 2016 年臺北站時序比對圖

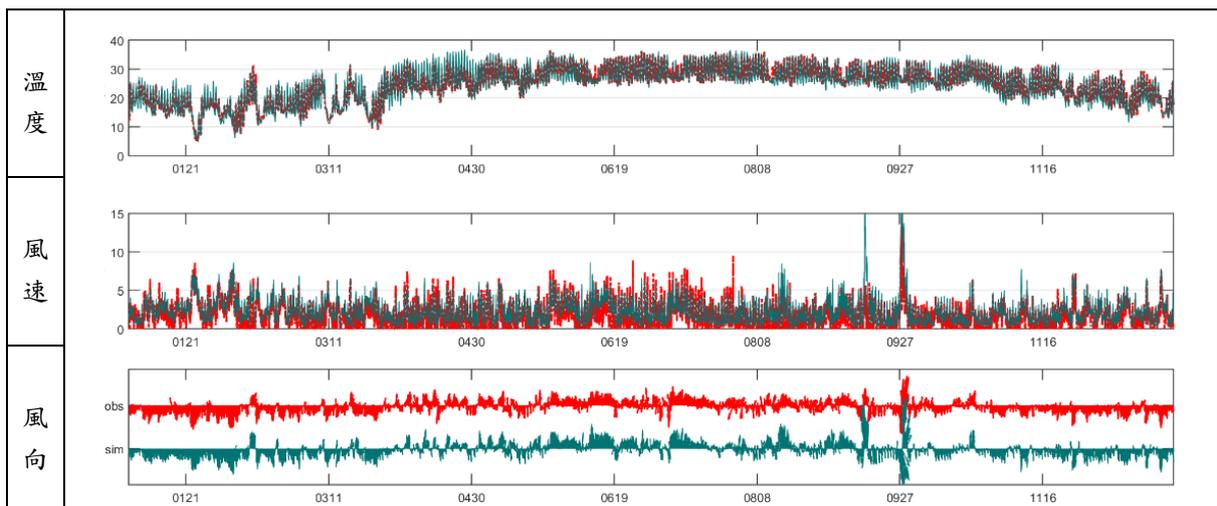
圖 4.10 為 2016 年中部地區梧棲站的時序比對圖，由時序結果來看，整體模擬趨勢與觀測相當接近，溫度方面 1 月、2 月、3 月與 11 月為高估，其餘月份皆有低估的情況，風速部分則是所有月份皆為高估；定量評估部分由表 4-16 可發現全年溫度模擬略為低估，MBE 為 -0.1，MAGE 為 0.7，風速方面模擬略為高估，MBE 為 0.4，RMSE 為 1.2，風向上 WNMB 為 4%，WNME 為 10%，總體來看所有性能指標皆符合模擬模擬規範標準。



資料來源：長榮大學。本研究彙整。

**圖 4.22 2016 年梧棲站時序比對圖**

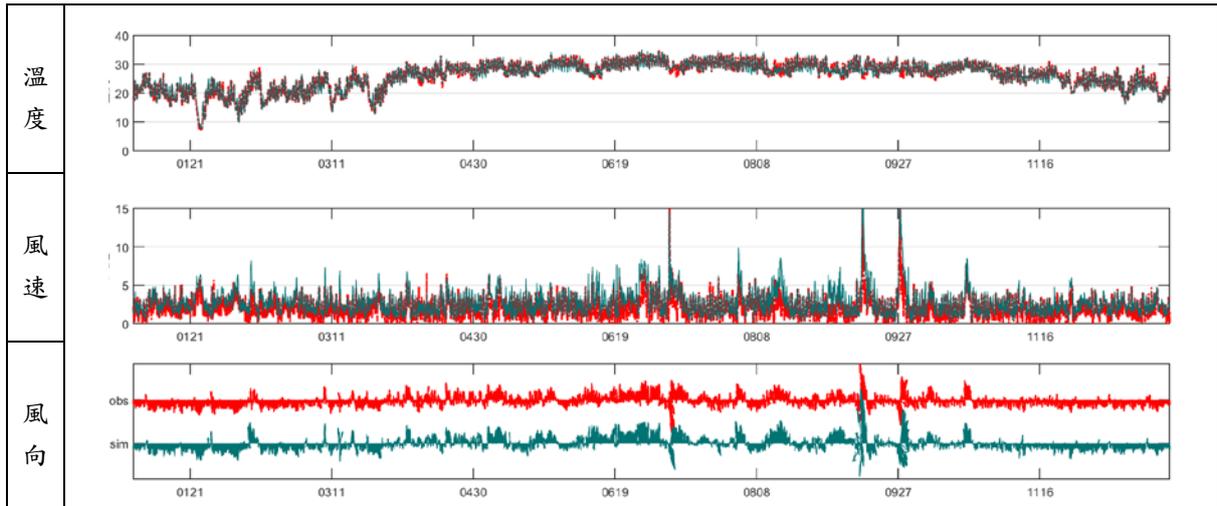
圖 4.11 為 2016 年雲嘉地區嘉義站的時序比對圖，由時序結果來看，整體模擬趨勢與觀測相當接近，溫度方面 3 月、4 月為高估，其餘月份皆有低估的情況，風速部分則是所有月份皆為高估；定量評估部分由表 4-16 可發現全年溫度模擬略為低估，MBE 為 -0.1，MAGE 為 1.1，風速方面模擬略為高估，MBE 為 0.5，RMSE 為 1.2，風向上 WNMB 為 -1.3%，WNME 為 12%，整體來看所有性能指標皆符合模擬模擬規範標準。



資料來源：長榮大學。本研究彙整。

**圖 4.23 2016 年嘉義站時序比對圖**

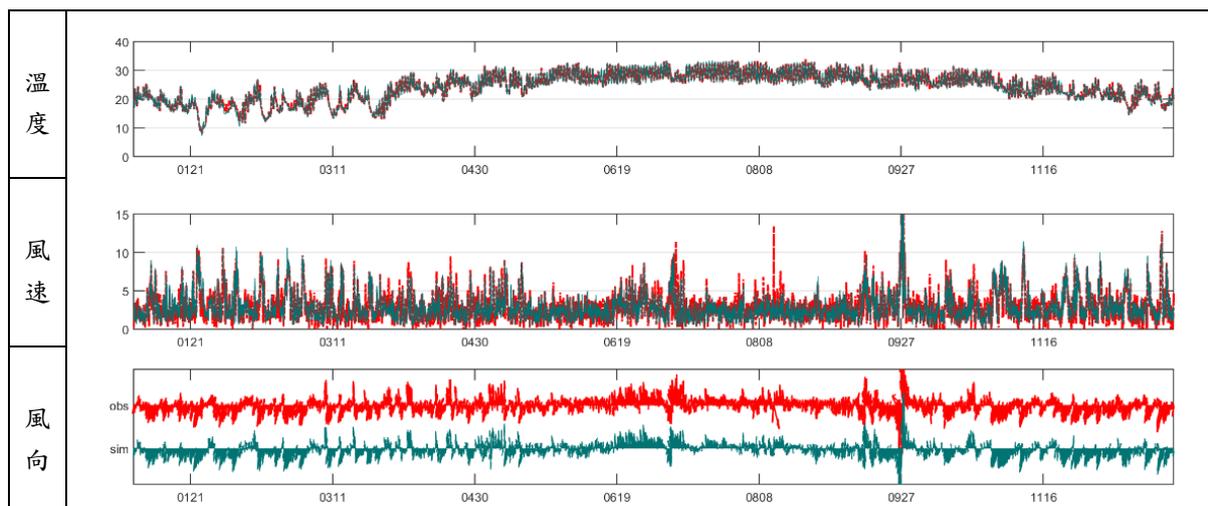
圖 4.12 為 2016 年南部地區高雄站的時序比對圖，由時序結果來看，整體模擬趨勢與觀測相當接近，溫度方面所有月份皆有低估的情況，風速部分則是所有月份皆為高估；定量評估部分由表 4-16 可發現全年溫度模擬略為低估，MBE 為 -0.1，MAGE 為 0.6，風速方面模擬略為高估，MBE 為 0.7，RMSE 為 1.2，風向上 WNMB 為 -1%，WNME 為 11%，整體來看所有性能指標皆符合模擬模擬規範標準。



資料來源：長榮大學。本研究彙整。

**圖 4.24 2016 年高雄站時序比對圖**

圖 4.13 為 2016 年東部地區花蓮站的時序比對圖，由時序結果來看，整體模擬趨勢與觀測相當接近，溫度方面 2 月、9 月、10-12 月有低估的情況，其餘月份則是高估，風速部分在 6-10 月份為低估，其餘月份皆為高估；定量評估部分由表 4-16 可發現全年溫度模擬略為高估，MBE 為 0.01，MAGE 為 0.4，風速方面模擬略為低估，MBE 為 -0.03，RMSE 為 1，風向上 WNMB 為 2.6%，WNME 為 14%，總體來看所有性能指標皆符合模擬模擬規範標準。



資料來源：長榮大學。本研究彙整。

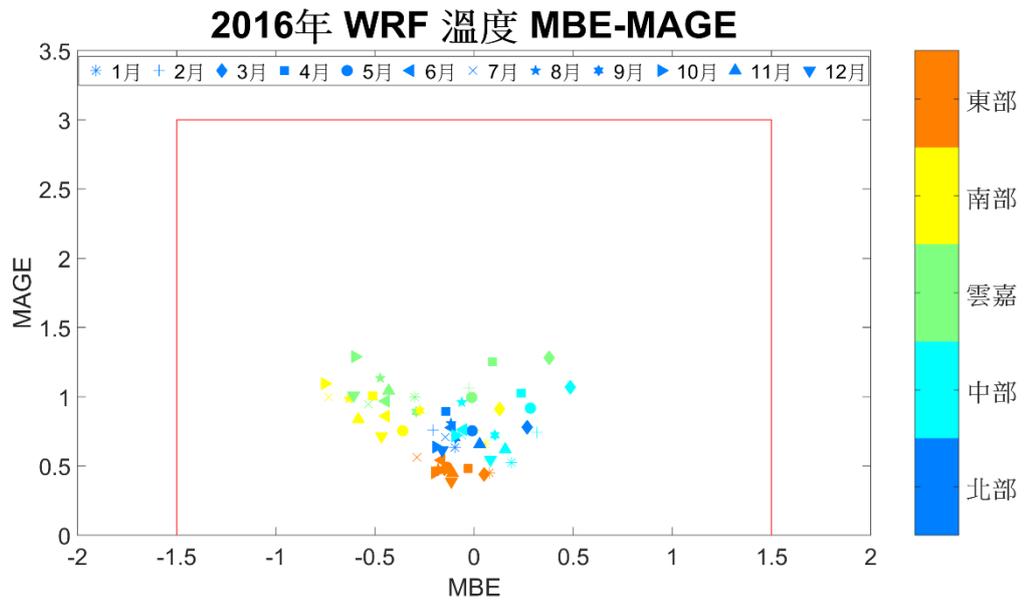
**圖 4.25 2016 年花蓮站時序比對圖**

利用中尺度氣象模式模擬臺灣地區，2016 年各地區平均溫度與風場與各地區測站比對模擬結果，皆符合模擬規範標準誤差值，如表 4-29 以及圖 4.14-4.16 所示。其中溫度 MBE 介於 -0.38 ~ 0.13，MAGE 介於 0.47 ~ 1.07；風速 MBE 介於 0.64 ~ 0.86，RMSE 介於 1.26 ~ 1.58；風向 WNMB 介於 -3% ~ 3%，WNME 介於 11% ~ 16% 之間。由各地區模擬結果可發現，除了中部地區溫度略微高估外，其餘地區整體來看多數月份皆有低估的情況，風速上則是所有地區皆有風速模擬值高估的現象，風向在各地區的評估結果，中部與東部模擬上略高於觀測值，北部、雲嘉與南部則是較易出現模擬低估的情況。

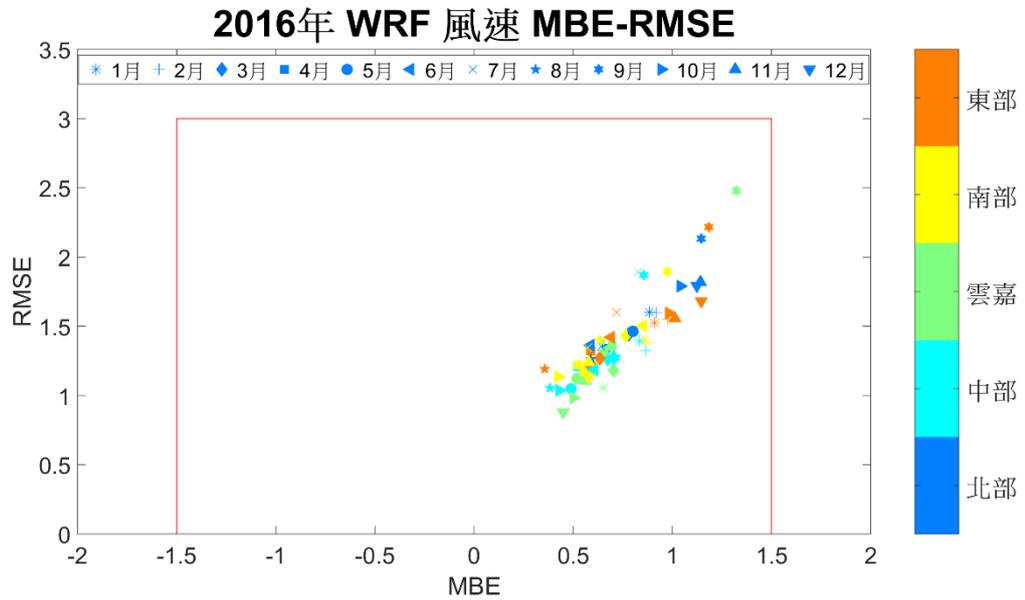
**表 4-29 各地區測站比對模擬結果**

2016 年	溫度 MBE	溫度 MAGE	風速 MBE	風速 RMSE	風向 WNMB	風向 WNME
北部地區	-0.08	0.73	0.86	1.58	-1%	16%
中部地區	0.13	0.78	0.64	1.26	3%	12%
雲嘉地區	-0.27	1.07	0.69	1.33	-2%	12%
南部地區	-0.38	0.87	0.68	1.36	-3%	11%
東部地區	-0.12	0.47	0.82	1.51	2%	12%
全臺	-0.14	0.78	0.74	1.41	-0.20%	13%
模式模擬規範	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\leq 3.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5\text{m/s}$	$\leq 3.0\text{ m/s}$	$\pm 10\%$	$\leq 30\%$

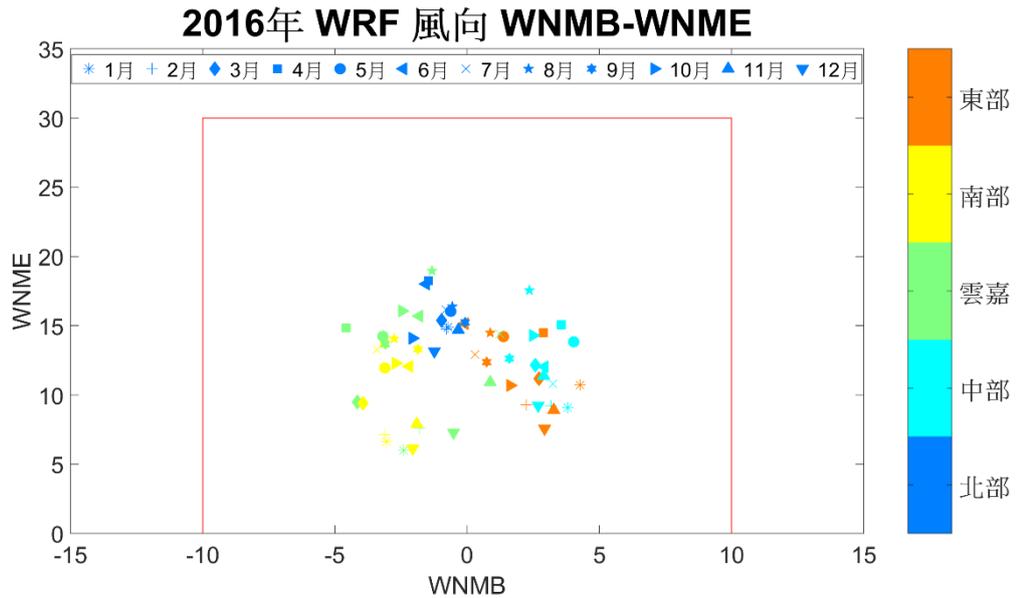
資料來源：長榮大學。本研究彙整。



**圖 4.26 2016 年各區溫度性能評估圖**



**圖 4.27 2016 年各區風速性能評估圖**



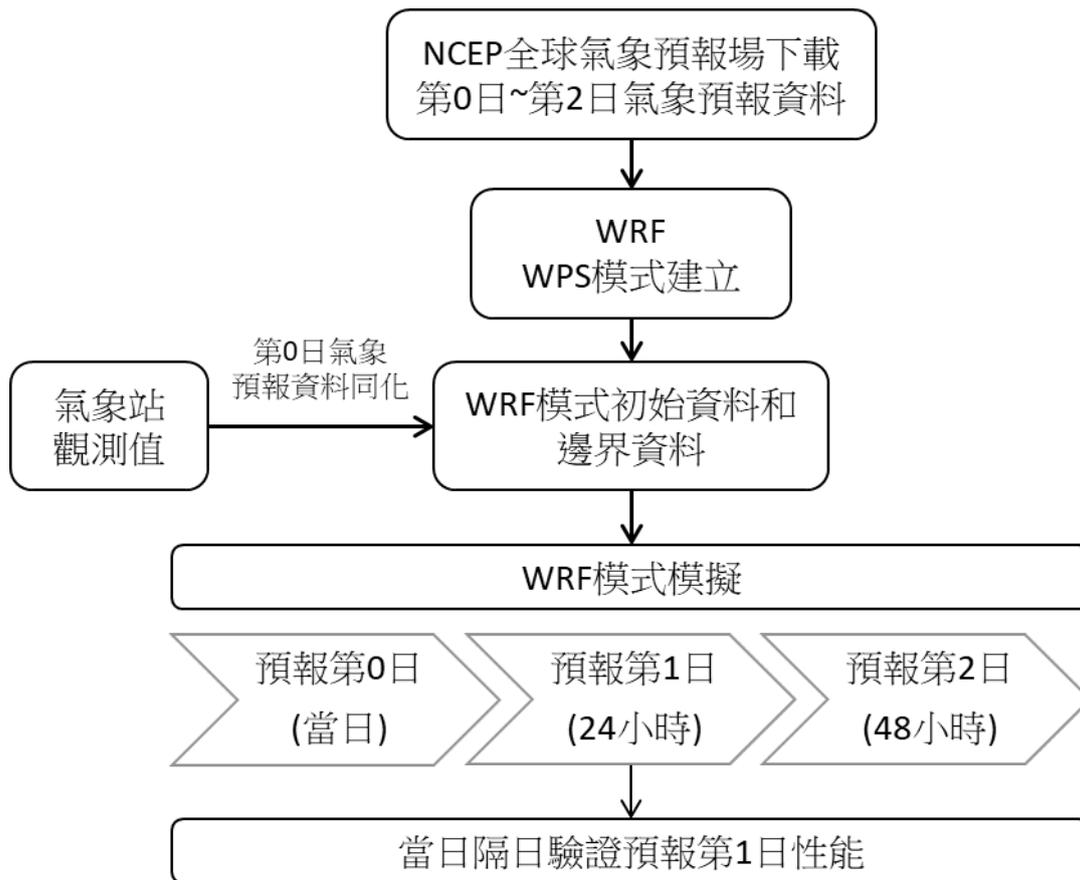
資料來源：長榮大學。本研究彙整。

圖 4.28 2016 年各區風向性能評估圖

### 氣象模式預報建立說明

WRF 中尺度氣象模式主要有兩個動力核心，其一為 ARW(Advanced Research WRF)核心，主要注重再研究，可以調為靜力穩定模式，能用應用參數畫研究、資料同化研究、颱風模擬及耦合模式應用等；其二為 NMM(Non-hydrostatic Mesoscale Model)核心，由 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)的 NCEP 所研發，主要功能為非靜力穩定與即時預報，可應用於中尺度數值天氣預報與分析。本研究將利用 WRF 中尺度氣象模式進行預報模擬作為空氣品質模式預報之氣象場使用。

中尺度氣象預報模擬流程如圖 4.17，NCEP 全球氣象預報場為每 6 小時一個預報，分別為 00 時(UTC)、06 時(UTC)、12 時(UTC)、18 時(UTC)。當日凌晨 0 點下載 12 時(UTC)之 NCEP 全球氣象預報場，下載至預報 72 小時，開始建立 WRF 模式初始條件與邊界條件氣象資料，當日利用溫度、風速、風向觀測值進行 12 時(UTC)資料同化，並於凌晨 1 時開始 WRF 模擬 72 小時。並於下一預報時間進行前一日之氣象模擬性能評估，評估項目為溫度、風速、風向以了解預報模擬準確度。

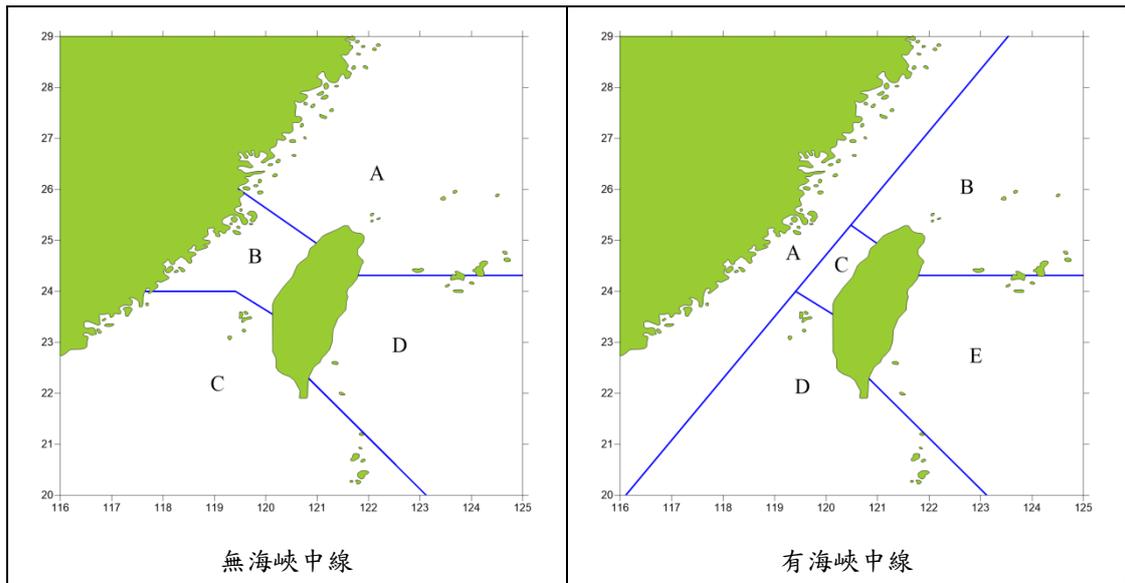


資料來源：長榮大學。本研究彙整。

圖 4.29 WRF 中尺度氣象模式預報流程

## 4.5 排放量區域分布

如 3.3 節所述，排放量區域分布主要以航港局航政轄區為主，共分為北部航務中心轄區、中部航務中心轄區、南部航務中心轄區以及東部航務中心轄區等 4 個區域，若再於臺灣海峽中間加上一條線，將海峽畫分為東西兩側，結果如圖 4.30，則中線以西為 A 區，中線以東且為原北部航務中心轄區為 B 區，中線以東且為原中部航務中心轄區為 C 區，中線以東且為原南部航務中心轄區為 D 區，東部航務中心轄區則變為 E 區。



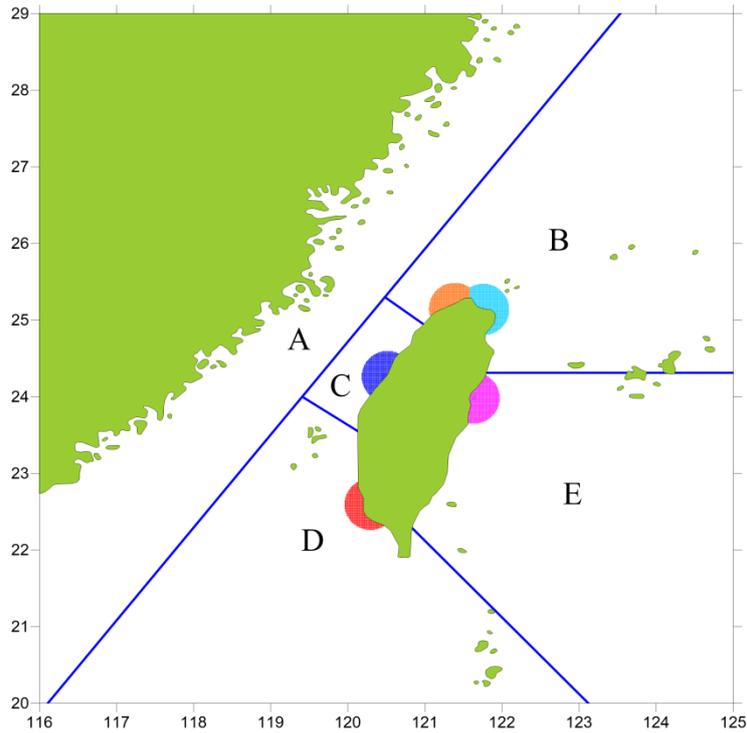
資料來源：本研究彙整。

**圖 4.30 臺灣周遭海域排放量區域分布**

港口的部分則分為高雄港、臺中港、臺北港、基隆港與花蓮港等 5 個主要商港，又將各港口排放量細分為港內排放與距離港口外 20 海浬內之船舶排放量。各港口所在區域位置中，高雄港位於區域 D，臺中港位於區域 C，臺北港與基隆港同屬於區域 B，而花蓮港則位於區域 E 中，各港口相對位置如圖 4.31。

其中基隆港與臺北港 20 海浬海域重疊部分，分別將兩港口 20 海浬同心圓交會之兩點連成一直線，即重疊的區域平均分配給兩個港口。

劃分的區域，依據前期計畫結果顯示，船舶離臺灣越遠則影響越低，依照所劃分的區域排放影響，與距離臺灣本島之遠近，以及季節風向的改變有很大的關係，其中以臺灣北海岸以北之區域 B 及臺灣西海岸近岸之區域 C 影響較大，而區域 A 之排放量雖然比較多，但因距離臺灣本島相對亦較遠，故其排放量影響臺灣便會有限。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.31 臺灣本島五大港口區域分布

## 4.6 排放量比較

海域船舶排放量推估範圍為東經 116 度至 125 度之間，北緯 20 度至 29 度之間海域，範圍海域面積約 74 萬平方公里，面積約為臺灣本島之 20 倍左右。依照前述排放量推估結果，2016 年海域船舶排放量推估  $\text{NO}_x$  為 108,8681 噸、 $\text{SO}_x$  為 705,843 噸以及 PM 為 99,756 噸。

如表 4-30 所示，統計排放量基準年同為 2016 年之 TEDS 10，依照污染源種類加總，全國  $\text{NO}_x$  總排放量為 389,920 噸， $\text{SO}_x$  總排放量為 120,694 噸，TSP 總排放量則為 363,545 噸；其中  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 TSP 於本島排放中，各污染物種最高值依序為車輛排放之 184,275 噸、工業之 82,807 噸、營建/道路揚塵之 285,667 噸，而港區內排放則依序為 21,938 噸、23,073 噸以及 2,103 噸，離岸排放則依序為 12,076 噸、9,085 噸、1,277 噸。

表 4-30 TEDS10 各污染源排放量

	NO <sub>x</sub> (噸)	SO <sub>x</sub> (噸)	TSP(噸)
工業	150,157	82,807	34,928
車輛	184,275	141	30,257
非公路運輸	4,335	363	117
商業	3,577	2,598	3,439
營建/道路揚塵	0	0	285,667
露天燃燒	3,668	1,497	4,618
其他	9,894	1,131	1,139
船舶-港區內	21,938	23,073	2,103
船舶-離岸排放	12,076	9,085	1,277
總排放量	389,920	120,694	363,545

資料來源：景丰科技股份有限公司。本研究彙整。

若統計臺灣本島五大港口排放量，分別依船舶所在港口之港內與港口半徑 20 海浬內之範圍，計算其結果，其中 TEDS 港口排放量依據港口所在縣市之港區及離岸排放結果，整理結果如表 4-31。其中 2016 年 AIS 推估港口內 NO<sub>x</sub>總和為 4,454 噸，SO<sub>x</sub>總和為 1,015 噸，PM 總和為 147 噸，港外 20 海浬 NO<sub>x</sub>總和為 33,732 噸，SO<sub>x</sub>總和為 18,618 噸，PM 總和為 2,639 噸；TEDS10 推估港口內 NO<sub>x</sub>總和為 12,450 噸，SO<sub>x</sub>總和為 15,718 噸，TSP 總和則為 1,581 噸，港外 20 海浬 NO<sub>x</sub>總和為 10,633 噸，SO<sub>x</sub>總和為 7,899 噸，TSP 總和則為 1,118 噸。

表中可發現 AIS 推估與 TEDS 推估結果中，港內與港外推估結果有很大的差異，其中 AIS 推估港內排放量時有低估之情形，主要原因為有些船舶於港內航行時，部分船隻會關閉 AIS 系統，因此就會缺少這些船舶之排放量；而 TEDS10 於推估港外船舶排放量時會有低估之情形，其原因主要為 TEDS 推估港口排放量依據為船舶進出港記錄，亦即當船舶經過港口但未進港時，其排放量就不會納入計算。

另外，引擎使用燃油 AIS 推估中，主引擎使用含硫量 2.7% 之燃油，輔助引擎及鍋爐則均為 0.5% 之燃油；TEDS10 推估中，主引擎與鍋爐均使用含硫量 2.7% 之燃油，而輔助引擎則在航行與錨泊狀態下使用 2.7% 燃油，於調度與停泊狀態下使用 0.5% 之燃油。

**表 4-31 五大港口排放量比較**

	AIS 船舶排放量			TEDS 10		
	NO <sub>x</sub> (噸)	SO <sub>x</sub> (噸)	PM(噸)	NO <sub>x</sub> (噸)	SO <sub>x</sub> (噸)	PM(噸)
高雄港內	2,580	539	81	6,364	8,138	811
港口半徑 20 海浬	14,771	6,708	981	5,446	3,907	570
高雄港	17,351	7,247	1,063	11,809	12,045	1,382
臺中港內	1,015	294	37	2,500	3,457	340
港口半徑 20 海浬	8,041	4,903	689	2,006	1,575	213
臺中港	9,056	5,198	725	4,507	5,032	553
臺北港內	330	79	15	1,319	1,489	154
港口半徑 20 海浬	5,737	3,482	494	1,433	1,074	149
臺北港	6,068	3,560	509	2,752	2,563	304
基隆港內	491	93	13	1,910	2,202	230
港口半徑 20 海浬	3,051	2,133	276	1,483	1,126	156
基隆港	3,542	2,226	289	3,393	3,327	385
花蓮港內	38	10	1	357	432	46
港口半徑 20 海浬	2,131	1,392	198	265	217	30
花蓮港	2,169	1,402	200	623	650	75
港內總和	4,454	1,015	147	12,450	15,718	1,581
港口半徑 20 海浬	33,732	18,618	2,639	10,633	7,899	1,118
港口總和	38,186	19,633	2,786	23,083	23,617	2,698

資料來源：景丰科技股份有限公司。本研究彙整。

另外，AIS 計算船舶排放量與 TEDS10 計算結果差異，部分亦來自船舶數量統計的差異，以及燃油含硫率的設定，為避免排放量計算結果差異過大，未來將確認排放量計算方式及資料來源的一致性。各差異結果整理如表 4-32 所示。

表 4-32 排放量差異比較表

排放量差異比較	AIS	TEDS
港口內船隻	AIS 有記錄之船隻。	有船舶進出港記錄，以船舶進出港之時間差判定為港區內活動量(調度、停泊)。
港口外船隻	AIS 有記錄之船隻。	不包含經過但未進港之船隻。
排放量計算港口數	統計高雄港、台中港、台北港、基隆港及花蓮港。	TEDS 港區包含本島七座國際商港(包含蘇澳港及安平港)、一座國內商港(布袋港)、兩座工業港(麥寮港、和平港)、四座國營會特殊裝卸碼頭(深澳專用油港、沙崙外海卸油浮筒、永安液化天然氣接收站及興達電廠卸煤碼頭)。
引擎使用燃油含硫量	主引擎 2.7%，輔助引擎 0.5%，鍋爐 0.5%。	主引擎 2.7%，輔助引擎在航行跟錨泊狀態時 2.7%，調度與停泊狀態 0.5%，鍋爐 2.7%。
引擎使用狀況(港口半徑 20 海浬內)	負載 LF>20%時為主引擎。	包含主引擎及輔助引擎。

資料來源：景丰科技股份有限公司。本研究彙整。

## 4.7 CMAQ 性能評估

將 2016 年海域船舶排放量與 TEDS10 排放量資料，搭配 2016 年 WRF 氣象模式提供之風場條件，使用三維網格模式 CMAQ 模擬細懸浮微粒 PM<sub>2.5</sub>之影響，將 CMAQ 模擬 PM<sub>2.5</sub>結果與環保署 EPA 測站計算性能評估，全年結果如表 4-33。

PM<sub>2.5</sub>性能評估中，全臺 MFB、相關係數 R 及 MFE 依序為 0.3%、0.768 及 44.7%，各空品區 MFB 介於-29.3% ~ 18.5%之間，相關係數 R 介於 0.636 ~ 0.777 之間，MFE 則介於 37.7% ~ 49.0%之間，其中中部空品區有較好之結果，其 MFB 為 2.4%，相關係數 R 為 0.777，MFE 則為 39.9%。

SO<sub>2</sub>性能評估中，全臺 MFB、相關係數 R 及 MFE 依序為-25.2%、0.520 及 58.3%，各空品區 MFB 介於-59.4% ~ -5.4%之間，相關係數 R 介於 0.452 ~ 0.560 之間，MFE 則介於 49.4% ~ 69.2%之間，其中高屏空品區有較好之結果，其 MFB 為-5.4%，相關係數 R 為 0.514，MFE 則為 59.1%。

NO<sub>2</sub>性能評估中，全臺 MFB、相關係數 R 及 MFE 依序為-4.5%、0.671 及 38.9%，各空品區 MFB 介於-49.9% ~ 20.7%之間，相關係數 R 介於 0.588 ~ 0.773 之間，MFE 則介於 27.9% ~ 72.5%之間，其中雲嘉南空品區有較好之結果，其 MFB 為 3.4%，相關係數 R 為 0.742，MFE 則為 27.9%。

性能評估結果顯示，全臺均符合模式規範，其中宜蘭跟花東空品區有明顯低估之情形，其低估原因研判主要為境外污染之影響。由於花東空品區本身污染物濃度並不高，於性能評估計算時，位於分母的數值便相對較小，性能評估計算相除之後，其誤差便容易出現較大之情形，且因性能評估計算花東空品區，其測站僅有花蓮、臺東及關山等 3 站，故只要其中 1 站不符合，符合比例即大幅下降。

表 4-33 2016 全年 PM<sub>2.5</sub>性能評估

全年		MFB	符合站數比	MFE	符合站數比	R	R 符合比例
PM <sub>2.5</sub>	北部空品區	0.2%	92.0%	45.7%	100.0%	0.746	100.0%
	竹苗空品區	0.3%	83.3%	49.0%	83.3%	0.700	100.0%
	中部空品區	2.4%	100.0%	39.9%	100.0%	0.777	100.0%
	雲嘉南空品區	-11.1%	90.9%	37.7%	100.0%	0.769	100.0%
	高屏空品區	16.6%	93.3%	45.0%	86.7%	0.775	100.0%
	宜蘭空品區	18.5%	50.0%	41.1%	50.0%	0.636	100.0%
	花東空品區	-29.3%	66.7%	44.3%	66.7%	0.663	100.0%
	全台	0.3%	82.2%	44.7%	90.4%	0.768	100.0%
SO <sub>2</sub>	北部空品區	-26.0%	100.0%	54.2%	100.0%	0.526	92.0%
	竹苗空品區	-16.7%	100.0%	49.4%	100.0%	0.544	83.3%
	中部空品區	-28.0%	81.8%	57.8%	90.9%	0.488	90.9%
	雲嘉南空品區	-30.8%	100.0%	56.3%	100.0%	0.473	90.9%
	高屏空品區	-5.4%	86.7%	59.1%	86.7%	0.514	93.3%
	宜蘭空品區	-43.5%	50.0%	51.8%	50.0%	0.452	50.0%
	花東空品區	-59.4%	66.7%	69.2%	33.3%	0.560	66.7%
	全台	-25.2%	90.4%	58.3%	91.8%	0.520	89.2%
NO <sub>2</sub>	北部空品區	-23.4%	92.0%	41.3%	100.0%	0.635	92.0%
	竹苗空品區	4.5%	100.0%	30.5%	100.0%	0.662	100.0%
	中部空品區	9.5%	100.0%	32.8%	100.0%	0.752	100.0%
	雲嘉南空品區	3.4%	100.0%	27.9%	100.0%	0.742	100.0%
	高屏空品區	20.7%	93.3%	44.3%	93.3%	0.773	93.3%
	宜蘭空品區	-19.7%	100.0%	37.0%	100.0%	0.588	50.0%
	花東空品區	-49.9%	66.7%	72.5%	66.7%	0.570	66.7%
	全台	-4.5%	93.2%	38.9%	97.3%	0.671	90.4%

資料來源：本研究彙整。

#### 4.8 海域船舶影響

使用 CMAQ 模式模擬 2016 年船舶排放污染物的影響結果，並統計 2016 年海域船舶排放對環保署測站共 76 站位置之影響，測站分布位置如圖中之紅色三角形符號，依據個別測站之 UTM 座標與貢獻影響，

將其繪製成等濃度圖，同時切除臺灣本島外圍海域地區，即可得到等濃度影響空間分布圖，其中排放量為依據 2016 年 AIS 資料，計算臺灣周遭海域船舶之排放量，並未包含車輛或其他固定污染源的影響。

如圖 4.32 至圖 4.33 為 CMAQ 模擬 2016 年全年平均之細懸浮微粒、原生性、衍生性及氣態污染物之增量濃度，包含細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )、硫酸鹽( $SO_4^{2-}$ )、硝酸鹽( $NO_3^-$ )、銨鹽( $NH_4^+$ )、原生性、8 小時臭氧( $O_{3ave8}$ )、硫氧化物( $SO_2$ )及氮氧化物( $NO_x$ )等污染物種；圖 4.34 至圖 4.35 則為各污染物種全年平均之貢獻比例。

其中 8 小時平均臭氧負值之產生為臭氧被一氧化氮消耗之結果，亦即為 NO 滴定效應所引起；且由於衍生性污染物的生成，需要時間上的反應，故衍生性污染物的影響區域通常會比一般污染物種的影響區域有稍微的不同，因而大部分均會發生於下風處。

各污染物種增量濃度及影響情形說明如下：

細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )：增量濃度介於  $0.182 \sim 3.886 \mu g/m^3$  之間，平均增量濃度為  $2.215 \mu g/m^3$ ，最高位於小港測站，其次為潮州站之  $3.657 \mu g/m^3$ ，第三則為麥寮測站之  $3.602 \mu g/m^3$ ，主要分布範圍在中央山脈以西的臺灣西半部區域；貢獻比例則介於  $4.36\% \sim 16.36\%$  之間，平均貢獻比例為  $9.40\%$ ，最高位於麥寮測站，其次為崙背站之  $14.71\%$ ，第三則為臺西站之  $14.57\%$ ，主要分布範圍在中部沿海至臺灣南半部包含臺東地區一帶。

硫酸鹽( $SO_4^{2-}$ )：增量濃度介於  $0.085 \sim 0.909 \mu g/m^3$  之間，平均增量濃度為  $0.556 \mu g/m^3$ ，最高位於麥寮測站，其次為小港站之  $0.906 \mu g/m^3$ ，第三則為崙背測站之  $0.855 \mu g/m^3$ ，主要分布範圍在臺灣西半部之桃園以南至高屏沿海地區；貢獻比例則介於  $1.36\% \sim 6.92\%$  之間，平均貢獻比例為  $2.62\%$ ，最高位於臺東測站，其次為恆春站之  $6.24\%$ ，第三則為關山站之  $4.32\%$ ，主要分布範圍在臺灣中半部以南之沿海區域。

硝酸鹽( $NO_3^-$ )：增量濃度介於  $0.034 \sim 1.834 \mu g/m^3$  之間，平均增量

濃度為  $0.942 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高位於潮州測站，其次為屏東站之  $1.728 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三則為大寮測站之  $1.598 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布範圍在臺中以南至屏東北半部區域；貢獻比例則介於  $0.63\% \sim 6.77\%$  之間，平均貢獻比例為  $3.68\%$ ，最高位於麥寮測站，其次為潮州站之  $6.35\%$ ，第三則為崙背站之  $6.32\%$ ，主要分布範圍在桃園以南至屏東北半部區域。

銨鹽( $\text{NH}_4^+$ )：增量濃度介於  $0.040 \sim 0.809 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之間，平均增量濃度為  $0.477 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高位於潮州測站，其次為麥寮站之  $0.797 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三則為屏東測站之  $0.782 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布範圍在臺中以南至屏東北半部區域；貢獻比例則介於  $0.99\% \sim 3.61\%$  之間，平均貢獻比例為  $2.01\%$ ，最高位於麥寮測站，其次為崙背站之  $3.26\%$ ，第三則為朴子站之  $3.20\%$ ，主要分布範圍在彰化至嘉義沿海一帶。

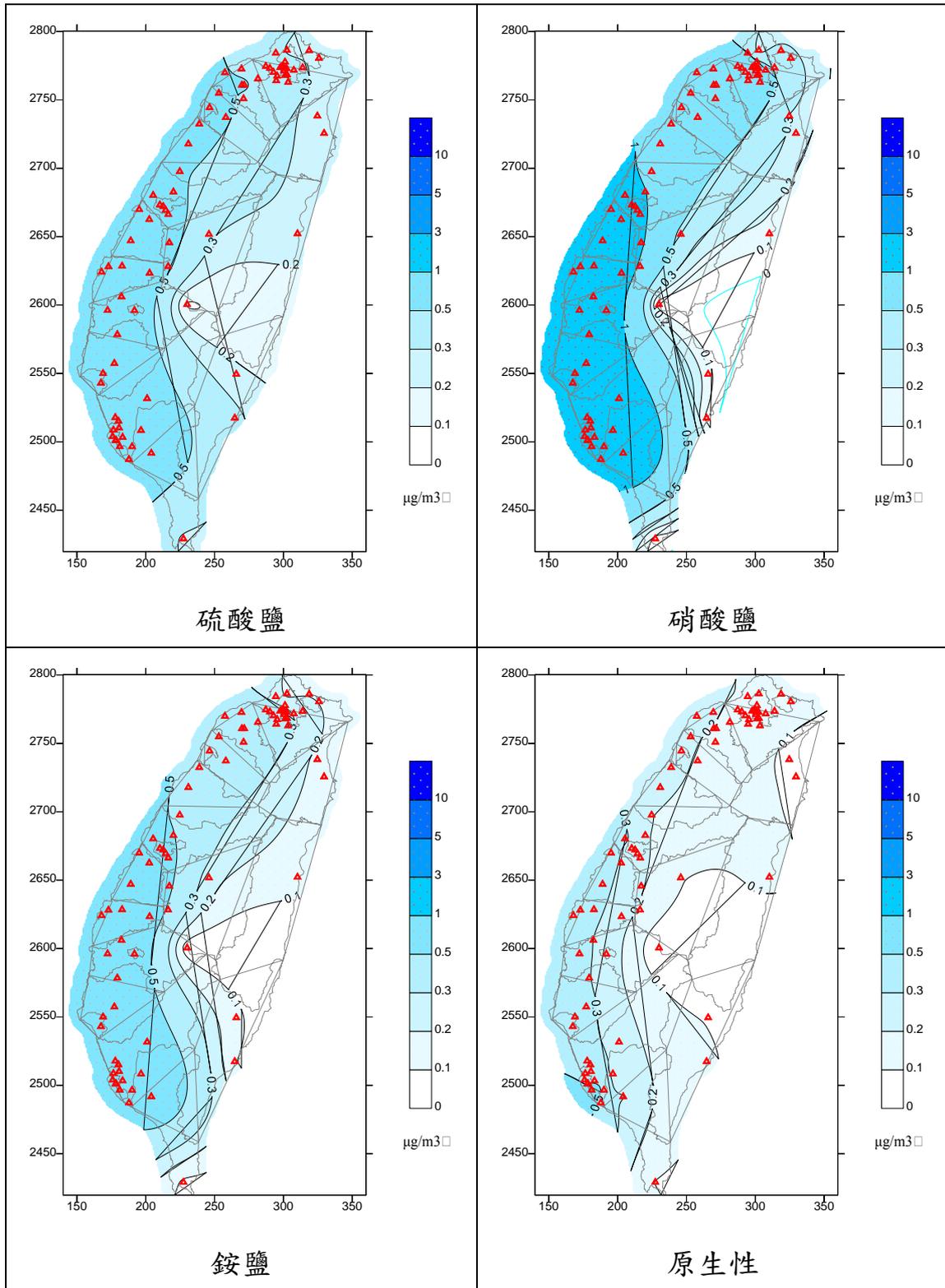
原生性：增量濃度介於  $0.021 \sim 1.029 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之間，平均增量濃度為  $0.241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高位於小港測站，其次為前鎮站之  $0.455 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三則為前金測站之  $0.437 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布範圍在臺中以南至屏東北半部區域；貢獻比例則介於  $0.53\% \sim 2.38\%$  之間，平均貢獻比例為  $1.09\%$ ，最高位於臺東測站，其次為恆春站之  $2.32\%$ ，第三則為小港站之  $1.95\%$ ，主要分布範圍在臺灣四周沿海一帶。

8 小時平均臭氧( $\text{O}_{3\text{ave}8}$ )：增量濃度介於  $-2.556 \sim 3.986\text{ppb}$  之間，平均增量濃度為  $1.589\text{ppb}$ ，最高位於臺西測站，其次為臺東站之  $3.570\text{pb}$ ，第三則為臺南測站之  $3.389\text{ppb}$ ，主要分布範圍在彰化至臺南沿海一帶；貢獻比例則介於  $-8.65\% \sim 7.92\%$  之間，平均貢獻比例為  $3.00\%$ ，最高位於臺西測站，其次為臺東站之  $7.69\%$ ，第三則為臺南站之  $6.77\%$ ，主要分布範圍在臺灣西半部及東半部沿海一帶。

硫氧化物( $\text{SO}_2$ )：增量濃度介於  $0.023 \sim 3.000\text{ppb}$  之間，平均增量濃度為  $0.358\text{ppb}$ ，最高位於小港測站，其次為大寮站之  $0.880\text{ppb}$ ，第三則為前鎮測站之  $0.825\text{ppb}$ ，主要分布範圍在高雄與屏東沿海交界地區；貢獻比例則介於  $7.06\% \sim 38.50\%$  之間，平均貢獻比例為  $12.85\%$ ，最高位於恆春測站，其次為臺東站之  $34.04\%$ ，第三則為麥寮站之

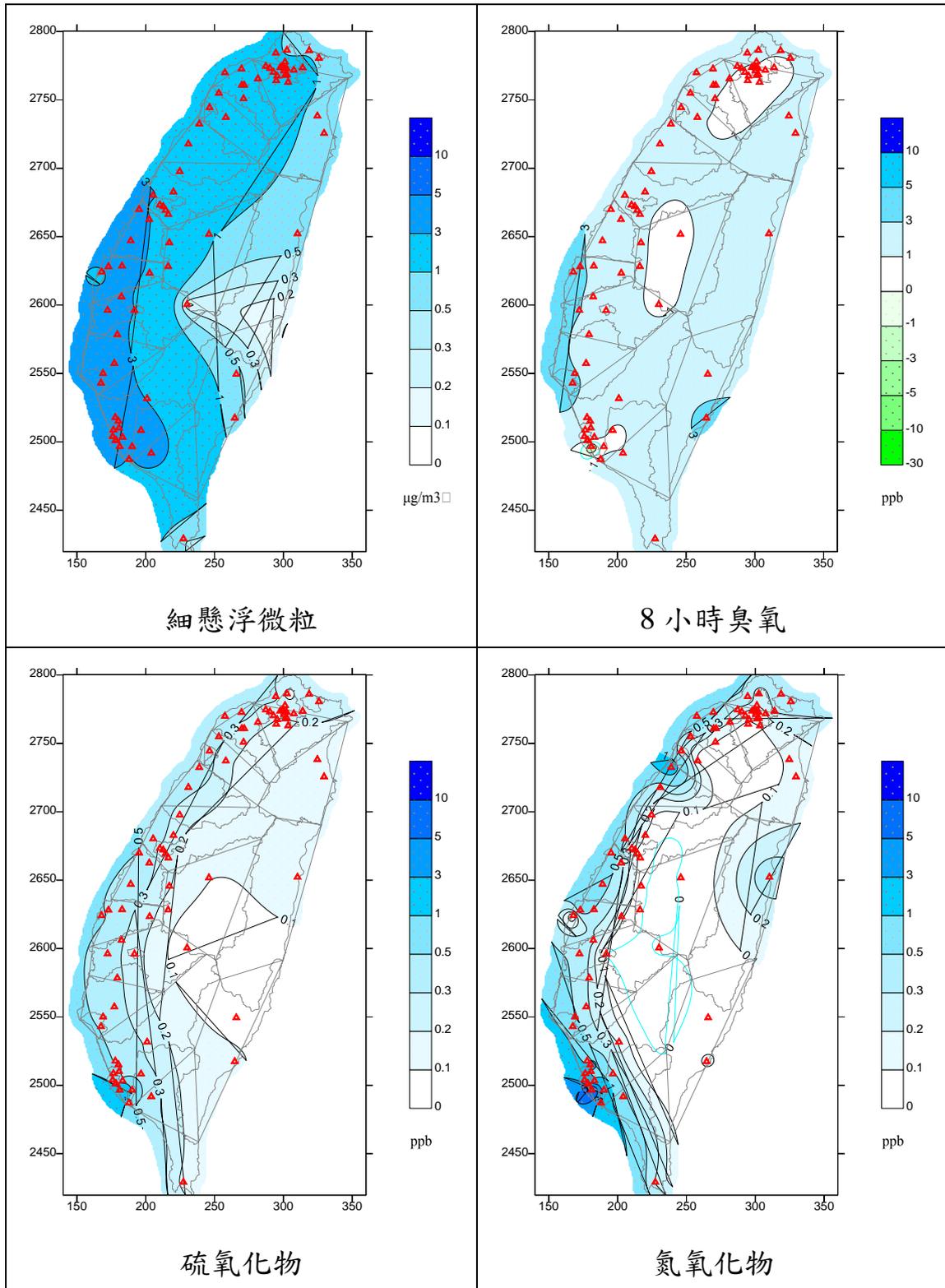
18.96%，主要分布範圍幾乎遍布臺灣整個地區，而部分高值落在臺東至恆春沿海一代。

氮氧化物( $\text{NO}_x$ )：增量濃度介於-0.009 ~ 8.887ppb 之間，平均增量濃度為 0.583ppb，最高位於小港測站，其次為前金站之 2.387ppb，第三則為前鎮測站之 2.330ppb，主要分布範圍在在西半部南高屏沿海一帶；貢獻比例則介於-0.38% ~ 27.10%之間，平均貢獻比例為 3.27%，最高位於恆春測站，其次為小港站之 15.99%，第三則為大寮站之 9.11%，主要分布範圍在恆春至高雄地區沿海一帶。



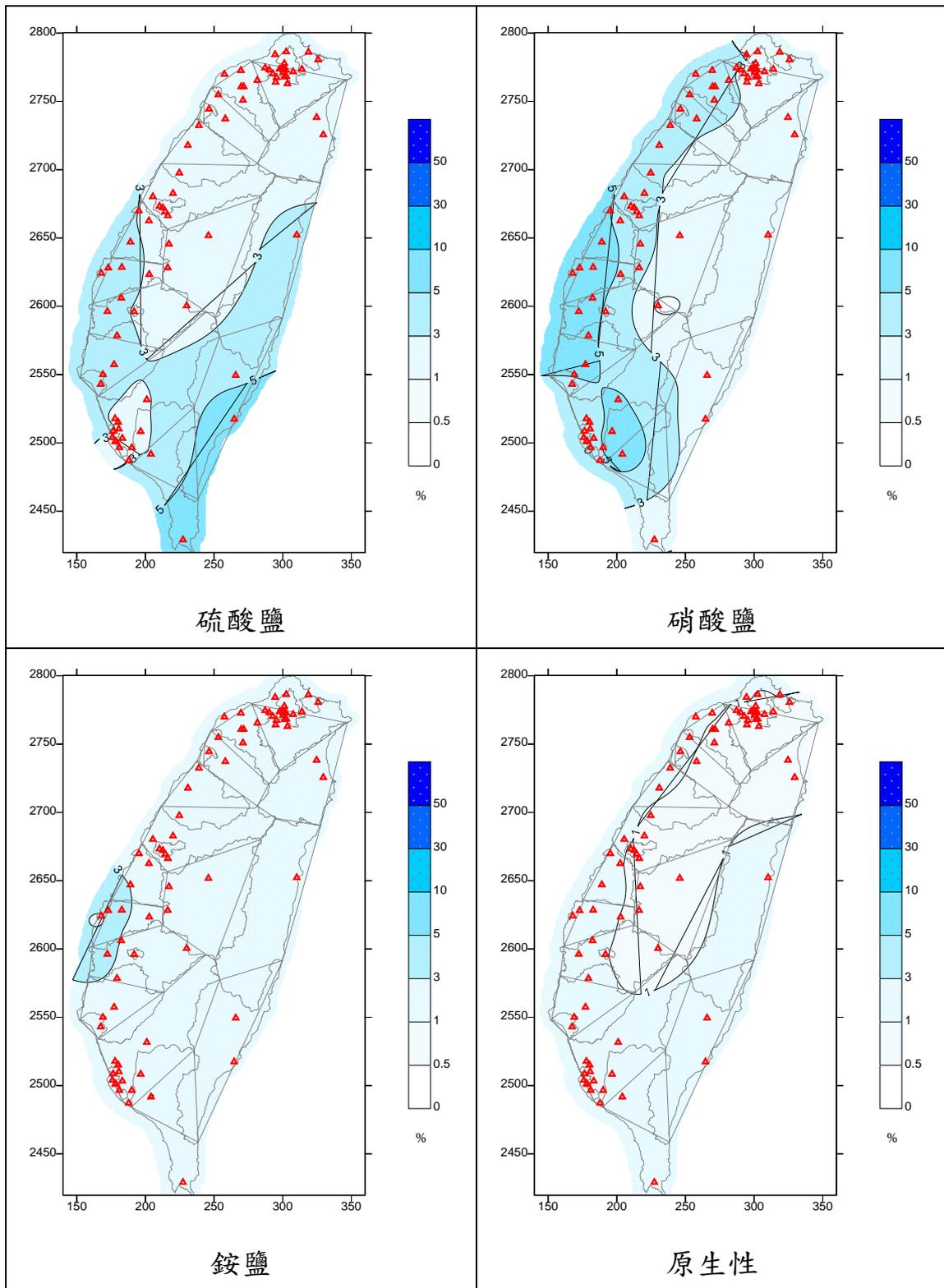
資料來源：本研究彙整。

圖 4.32 海域船舶 2016 年平均增量濃度(一)



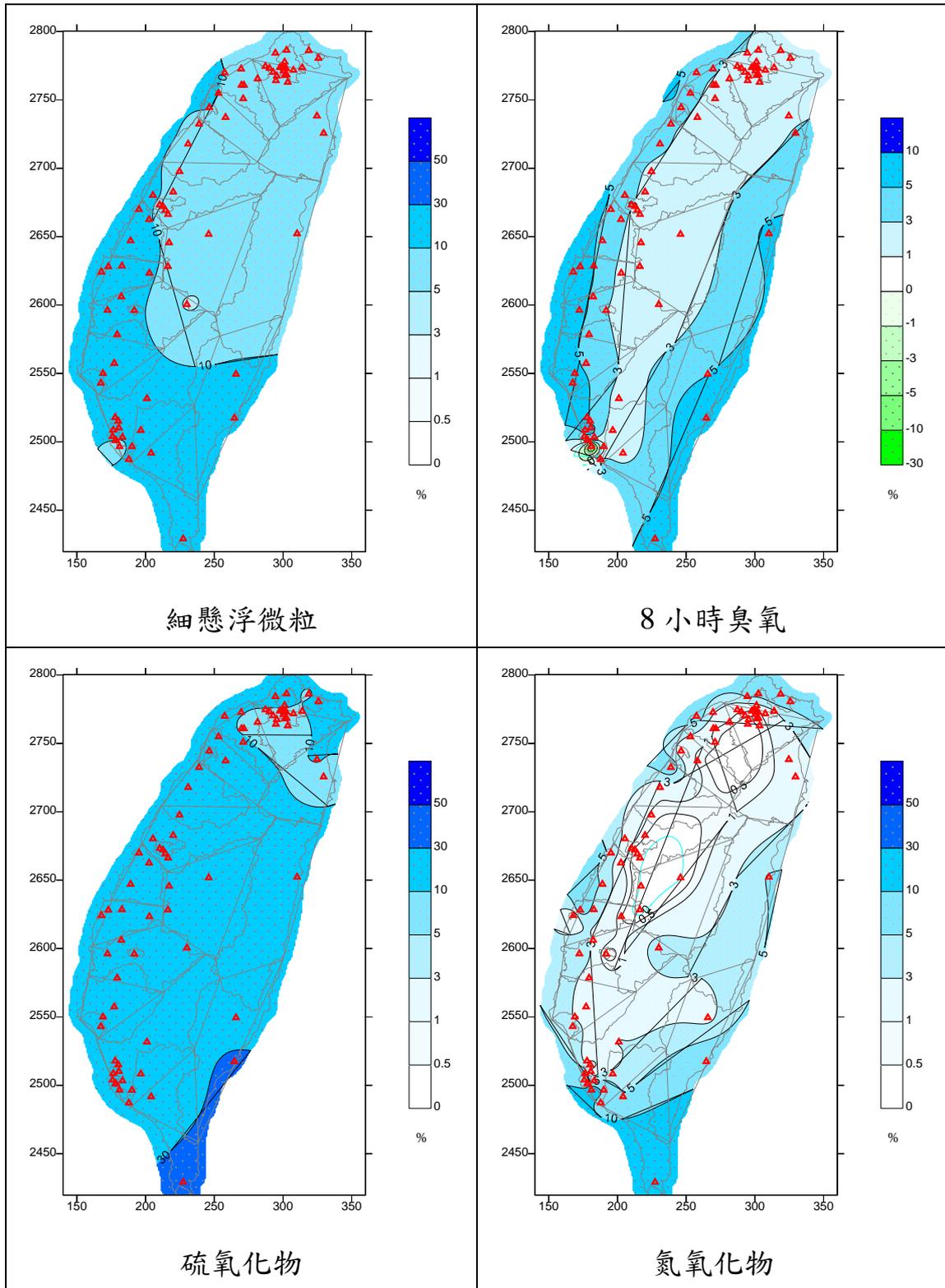
資料來源：本研究彙整。

圖 4.33 海域船舶 2016 年平均增量濃度(二)



資料來源：本研究彙整。

圖 4.34 海域船舶 2016 年平均貢獻比例(一)



資料來源：本研究彙整。

圖 4.35 海域船舶 2016 年平均貢獻比例(二)

## 4.9 港口排放影響

使用 CMAQ 模式分析 2016 年臺灣本島 5 大主要港口污染物排放量，其中港口之範圍包括港區內與以港口為中心半徑 20 海浬內之船舶，其位置由北至南，由西至東，依序為基隆港、臺北港、臺中港、高雄港及花蓮港等，模擬各港口污染物排放的影響結果，並統計其排放對環保署測站共 76 站位置之影響，測站分布位置如圖中之紅色三角形符號，依據個別測站之 UTM 座標與貢獻影響，將其繪製成等濃度圖，同時切除臺灣本島外圍海域地區，即可得到等濃度影響空間分布圖。

如圖 4.36 至圖 4.37 為 CMAQ 模擬 2016 年 5 大港口全年平均之細懸浮微粒、原生性、衍生性及氣態污染物之增量濃度總和，包含細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )、硫酸鹽( $SO_4^{-2}$ )、硝酸鹽( $NO_3^-$ )、銨鹽( $NH_4^+$ )、原生性、8 小時臭氧( $O_{3ave8}$ )、硫氧化物( $SO_2$ )及氮氧化物( $NO_x$ )等污染物種；圖 4.38 至圖 4.39 則為各污染物種全年平均之貢獻比例。

其中 8 小時平均臭氧影響負值之產生為臭氧被一氧化氮消耗之結果，亦即為 NO 滴定效應所引起；且由於衍生性污染物的生成，需要時間上的反應，故衍生性污染物的影響區域通常會比一般污染物種的影響區域有稍微的不同，因而大部分均會發生於下風處。

各污染物種增量濃度及影響情形說明如下：

細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )：增量濃度介於  $0.020 \sim 3.868 \mu g/m^3$  之間，平均增量濃度為  $0.575 \mu g/m^3$ ，最高位於小港測站，其次為前鎮站之  $2.216 \mu g/m^3$ ，第三則為前金測站之  $1.476 \mu g/m^3$ ，主要分布範圍在臺灣北部基隆、中部彰化以及西南部的高雄、屏東一帶；貢獻比例則介於  $0.45\% \sim 7.82\%$  之間，平均貢獻比例為  $2.26\%$ ，最高位於小港測站，其次為前鎮站之  $6.27\%$ ，第三則為前金站之  $5.02\%$ ，主要分布範圍在臺灣北部基隆與東部花蓮區域，以及臺灣西南部之高屏沿海一帶。

硫酸鹽( $SO_4^{-2}$ )：增量濃度介於  $0.016 \sim 0.921 \mu g/m^3$  之間，平均增量濃度為  $0.208 \mu g/m^3$ ，最高位於小港測站，其次為前鎮站之  $0.813 \mu g/m^3$ ，

第三則為前金測站之  $0.610 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布在臺灣西半部地區，由基隆往南延伸至臺中直至高屏地區；貢獻比例則介於  $0.28\% \sim 2.30\%$  之間，平均貢獻比例為  $0.84\%$ ，最高位於前鎮測站，其次為前金站之  $2.08\%$ ，第三則為小港站之  $1.86\%$ ，主要分布範圍為臺灣本島四周沿海區域。

硝酸鹽( $\text{NO}_3^-$ )：增量濃度介於  $-0.066 \sim 0.264 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之間，平均增量濃度為  $0.098 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高位於美濃及潮州測站，其次為汐止站之  $0.186 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三則為屏東測站之  $0.184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布範圍為基隆至桃園地區以及臺中以南至高屏內陸地區；貢獻比例則介於  $-0.13\% \sim 1.06\%$  之間，平均貢獻比例為  $0.42\%$ ，最高位於美濃測站，其次為汐止站之  $0.96\%$ ，第三則為潮州站之  $0.94\%$ ，主要分布範圍為基隆、新北地區，彰化沿海以及高屏內陸區域。

銨鹽( $\text{NH}_4^+$ )：增量濃度介於  $0.007 \sim 0.318 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之間，平均增量濃度為  $0.106 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高位於前鎮測站，其次為小港站之  $0.314 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三則為前金測站之  $0.234 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布範圍在基隆、新北、彰化以及高雄屏東地區為主；貢獻比例則介於  $0.16\% \sim 0.92\%$  之間，平均貢獻比例為  $0.43\%$ ，最高位於基隆測站，其次為前鎮站之  $0.90\%$ ，第三則為前金站之  $0.80\%$ ，主要分布範圍為基隆以及高雄至屏東內陸區域。

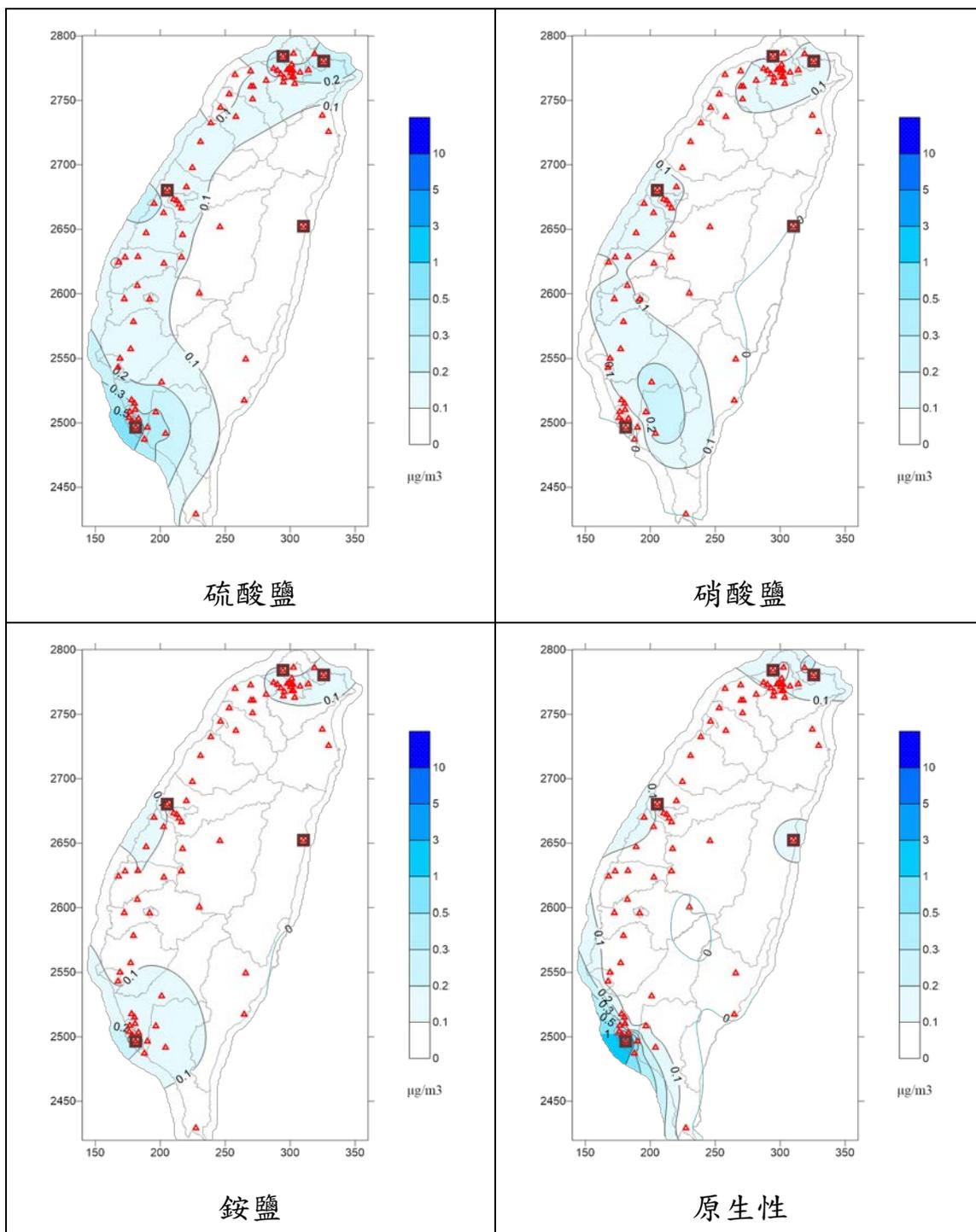
原生性：增量濃度介於  $-0.005 \sim 2.698 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之間，平均增量濃度為  $0.162 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最高位於小港測站，其次為前鎮站之  $1.053 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三則為前金測站之  $0.602 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，主要分布落在在臺灣西南沿海一帶，尤以高雄鄰近屏東沿海地區；貢獻比例則介於  $-0.12\% \sim 5.46\%$  之間，平均貢獻比例為  $0.58\%$ ，最高位於小港測站，其次為前鎮站之  $2.98\%$ ，第三則為前金站之  $2.05\%$ ，主要分布範圍在臺灣西南沿海一帶，部分位於基隆及新北與花蓮地區。

8 小時平均臭氧( $\text{O}_{3\text{ave}8}$ )：增量濃度介於  $-5.767 \sim 0.172\text{ppb}$  之間，平均增量濃度為  $-0.440\text{ppb}$ ，最高位於阿里山測站，其次為關山站之  $0.122\text{ppb}$ ，第三則為臺東測站之  $0.083\text{ppb}$ ，主要臭氧消耗區域位於臺灣西南部之高雄鄰近屏東之海岸區域；貢獻比例則介於  $-18.30\% \sim 0.36\%$

之間，平均貢獻比例為-1.04%，最高位於阿里山測站，其次為關山站之0.29%，第三則為臺東站之0.18%，主要臭氧消耗區域位於臺灣西南部之高雄海岸區域。

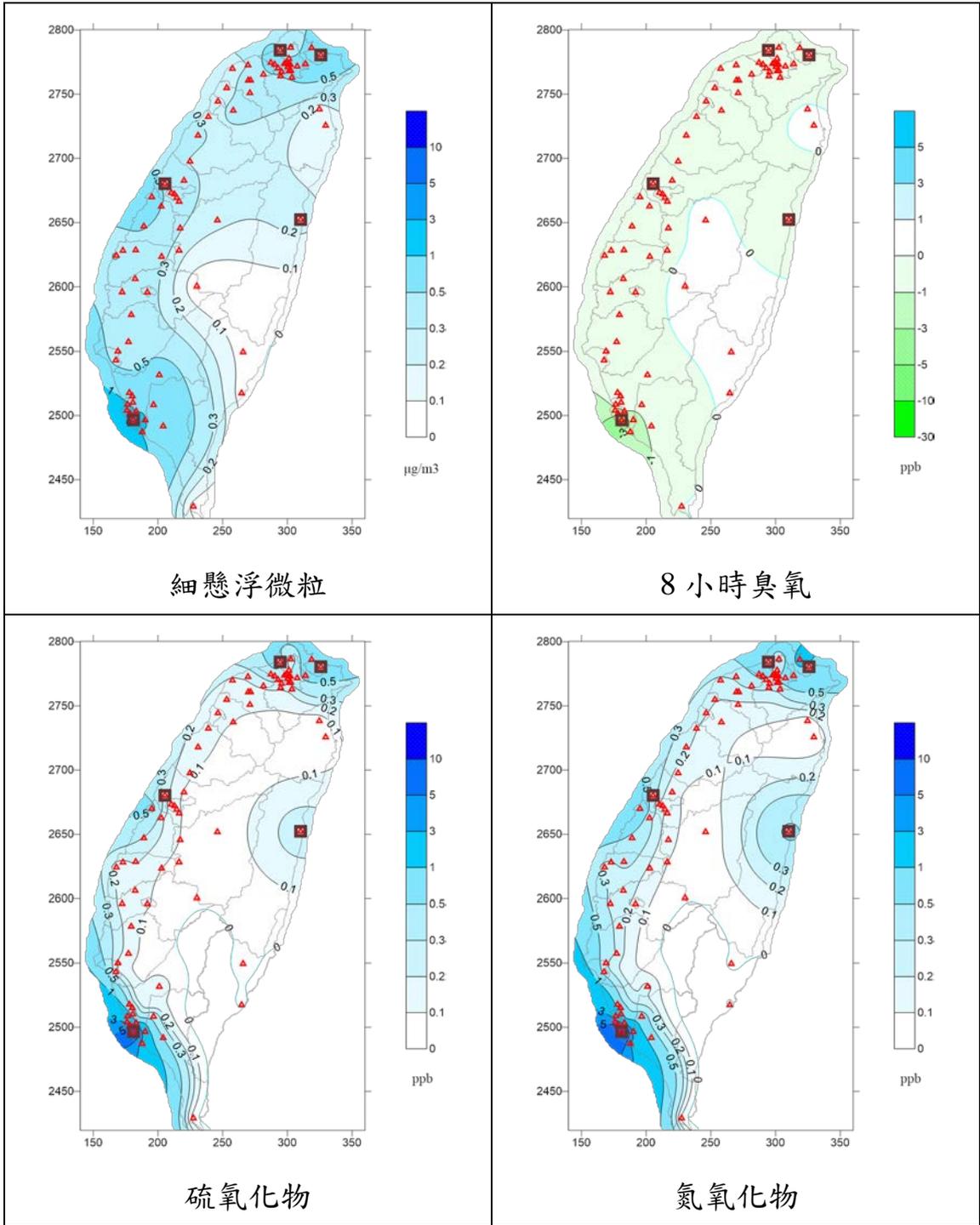
硫氧化物(SO<sub>2</sub>)：增量濃度介於0.010 ~ 8.523ppb之間，平均增量濃度為0.557ppb，最高位於小港測站，其次為前鎮站之3.834ppb，第三則為前金測站之2.644ppb，主要分布範圍則位於臺灣北部、中部沿海及高屏地區，尤以高屏沿海一帶有較高值；貢獻比例則介於2.34% ~ 52.91%之間，平均貢獻比例為13.10%，最高位於前鎮測站，其次為前金站之48.14%，第三則為小港站之46.09%，主要分布範圍為基隆包含新北市大部地區之臺灣北部，以及臺中以南延伸至高雄沿海與屏東地區，以及花蓮部分區域。

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)：增量濃度介於0.006 ~ 11.446ppb之間，平均增量濃度為0.792ppb，最高位於小港測站，其次為前鎮站之5.219ppb，第三則為前金測站之3.611ppb，主要分布位於臺灣北部基隆至南部屏東的西半邊沿海地區，且於高屏地區有較高濃度分布；貢獻比例則介於0.42% ~ 22.25%之間，平均貢獻比例為3.53%，最高位於小港測站，其次為萬里站之21.11%，第三則為基隆站之13.16%，其主要分布範圍位於基隆北部沿海以及中部以南至高屏沿海地區。



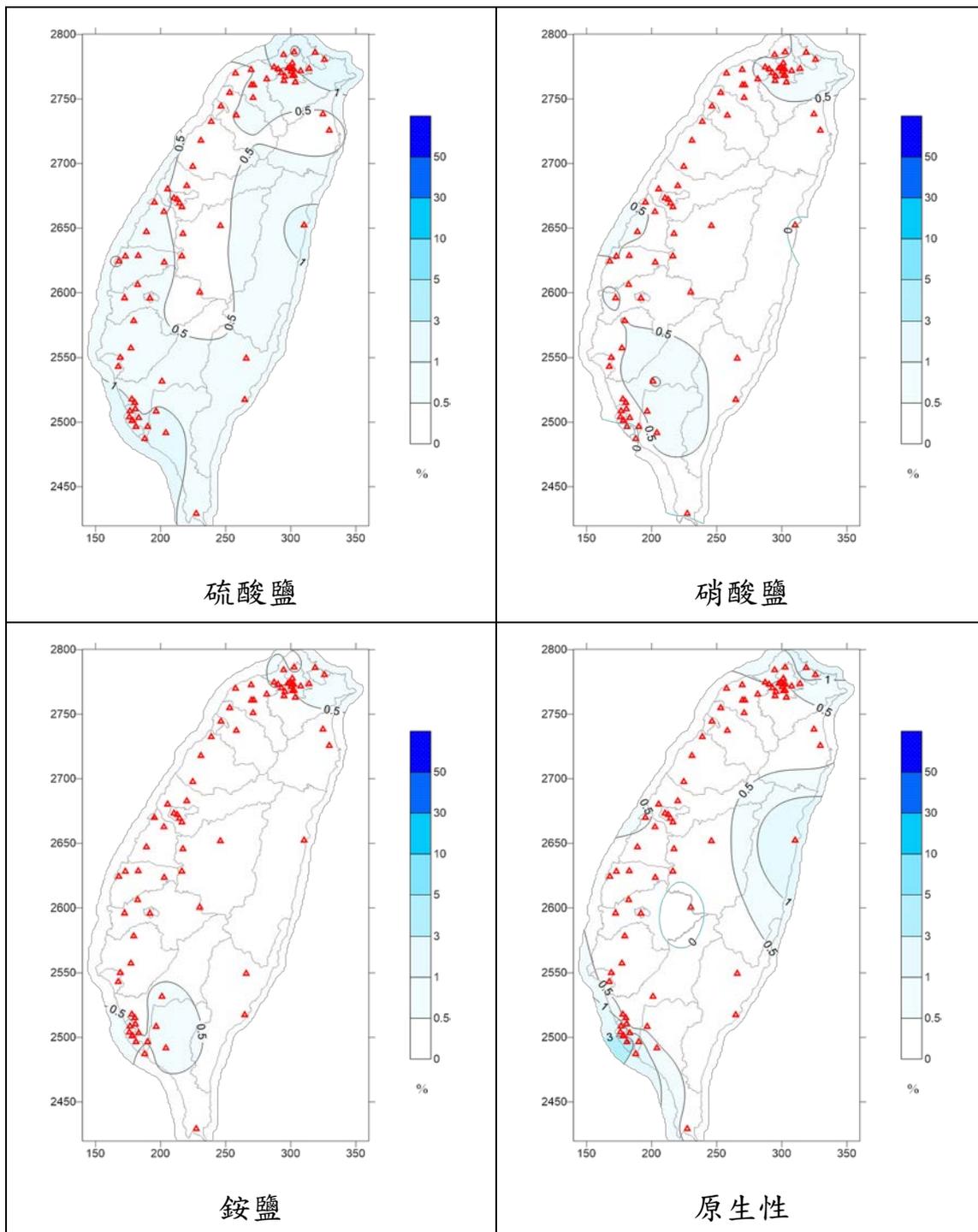
資料來源：本研究彙整。

圖 4.36 五大港口 2016 年平均增量濃度(一)



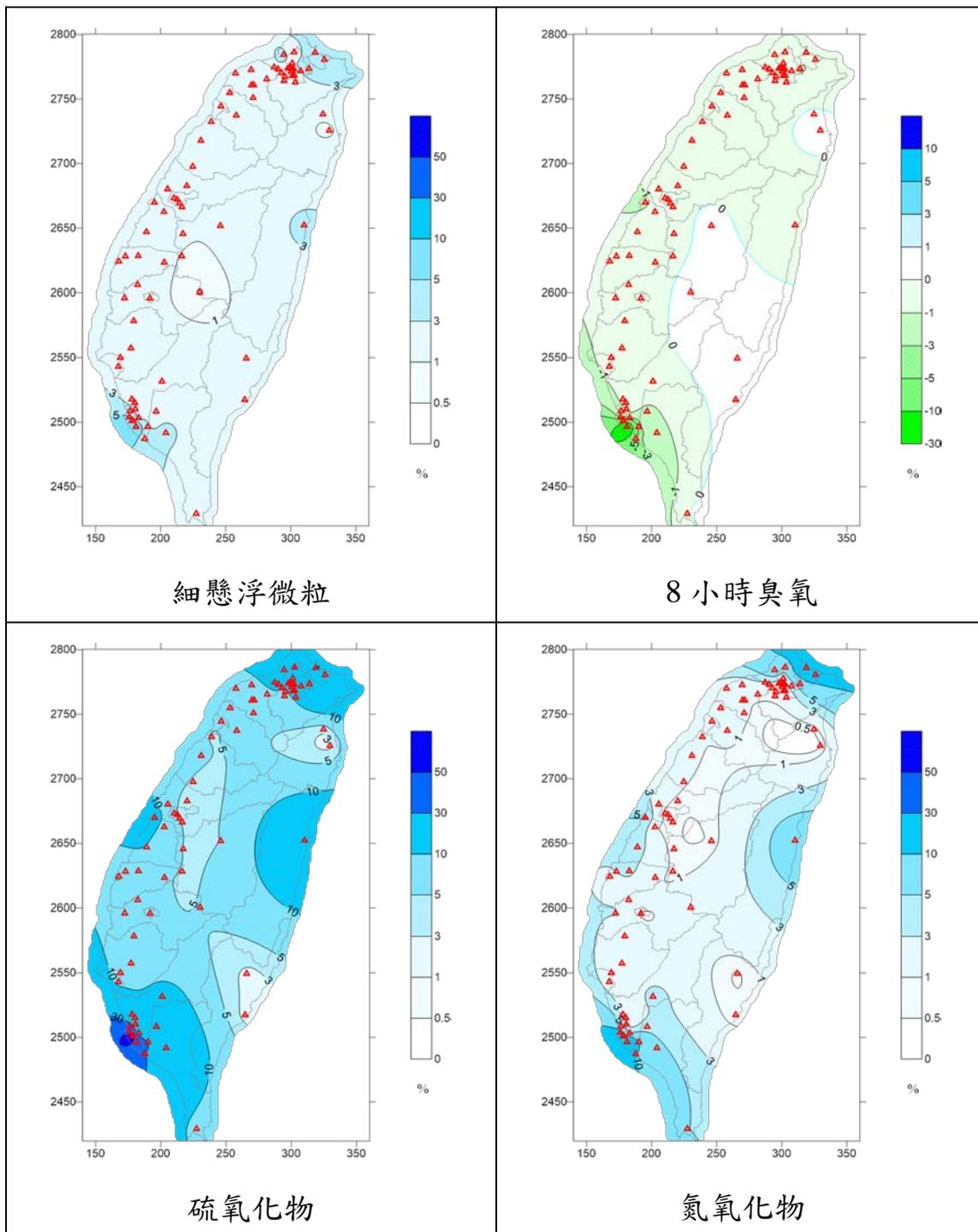
資料來源：本研究彙整。

圖 4.37 五大港口 2016 年平均增量濃度(二)



資料來源：本研究彙整。

圖 4.38 五大港口 2016 年平均貢獻比例(一)



資料來源：本研究彙整。

圖 4.39 五大港口 2016 年平均貢獻比例(二)

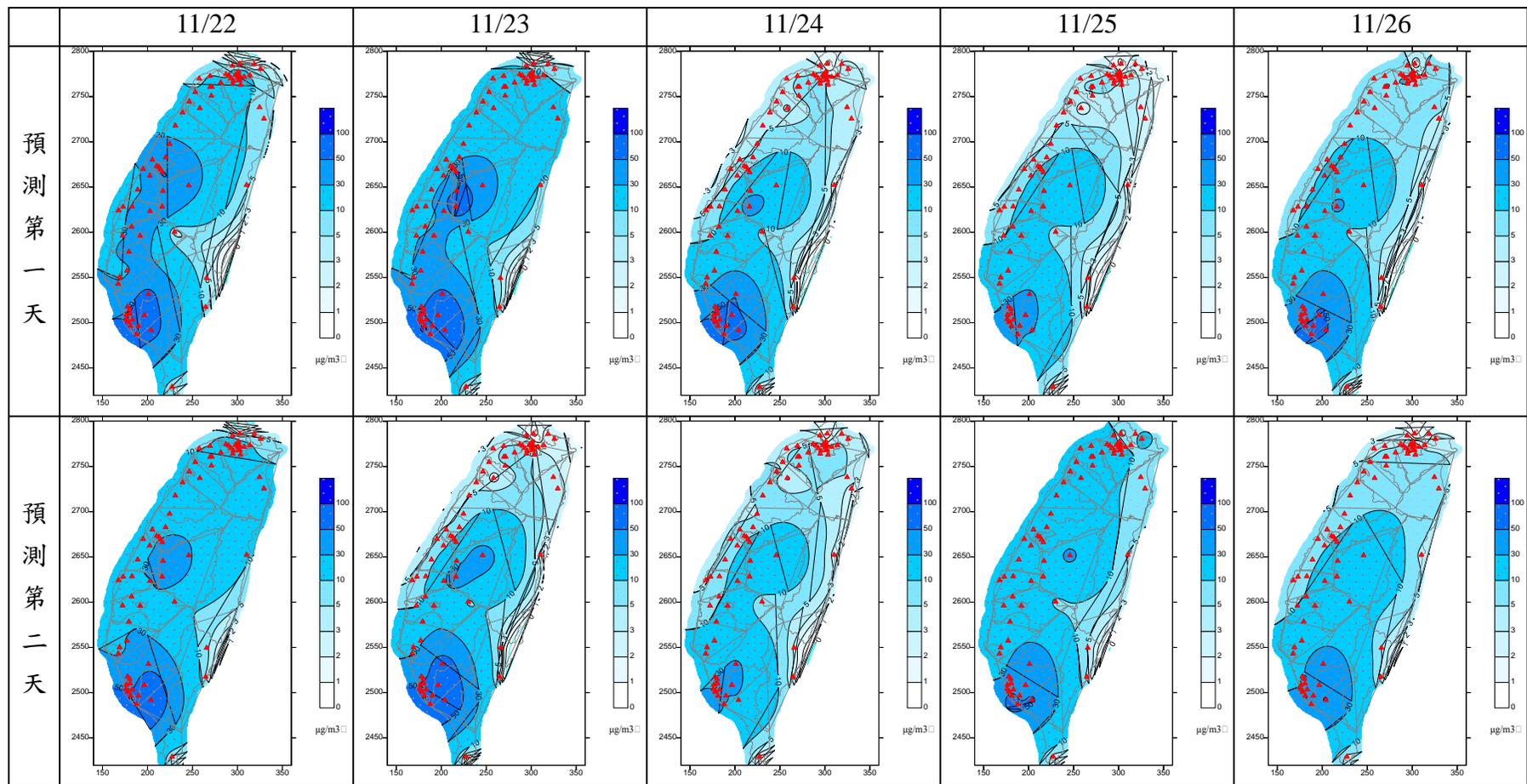
## 4.10 空氣品質預測

將 108 年 11 月 22 日至 11 月 26 日船舶排放量推估結果，搭配 TEDS10 與 WRF 預測氣象風場資料，預測未來第一天及第二天之空氣品質狀況，即 22 日預測 23 日(預測第一天)及 24 日(預測第二天)，26 日預測 27 日(預測第一天)及 28 日(預測第二天)，並將每日之  $PM_{2.5}$  濃度繪製成等濃度圖，如圖 4.39。

其中預測第一天，22 日高濃度分布於中部地區往南延伸至高屏地區，且於高雄與屏東鄰近區域有較高之濃度累積，往後 23 日一直到 26 日預測結果，中部地區高濃度有逐漸縮小的趨勢，且濃度分布亦有由北往南縮減的趨勢。

預測第二天結果中，22 日高濃度分布主要位於中部及高屏兩個地區，23 日持續維持在原來的區域附近，24 日則大幅縮小只剩高屏局部地區，25 日回複趨近於 22 日的狀態水準，26 日則維持中部以南至高屏地區有高濃度分布。

若同樣以排放量預測第二天的結果與隔日預測第一天的模擬結果比較，如 22 日預測第二天與 23 日預測第一天結果，高濃度部分均落在中部地區以其高屏地區，顯示模擬期間有相近的濃度分布結果。



資料來源：本研究彙整。

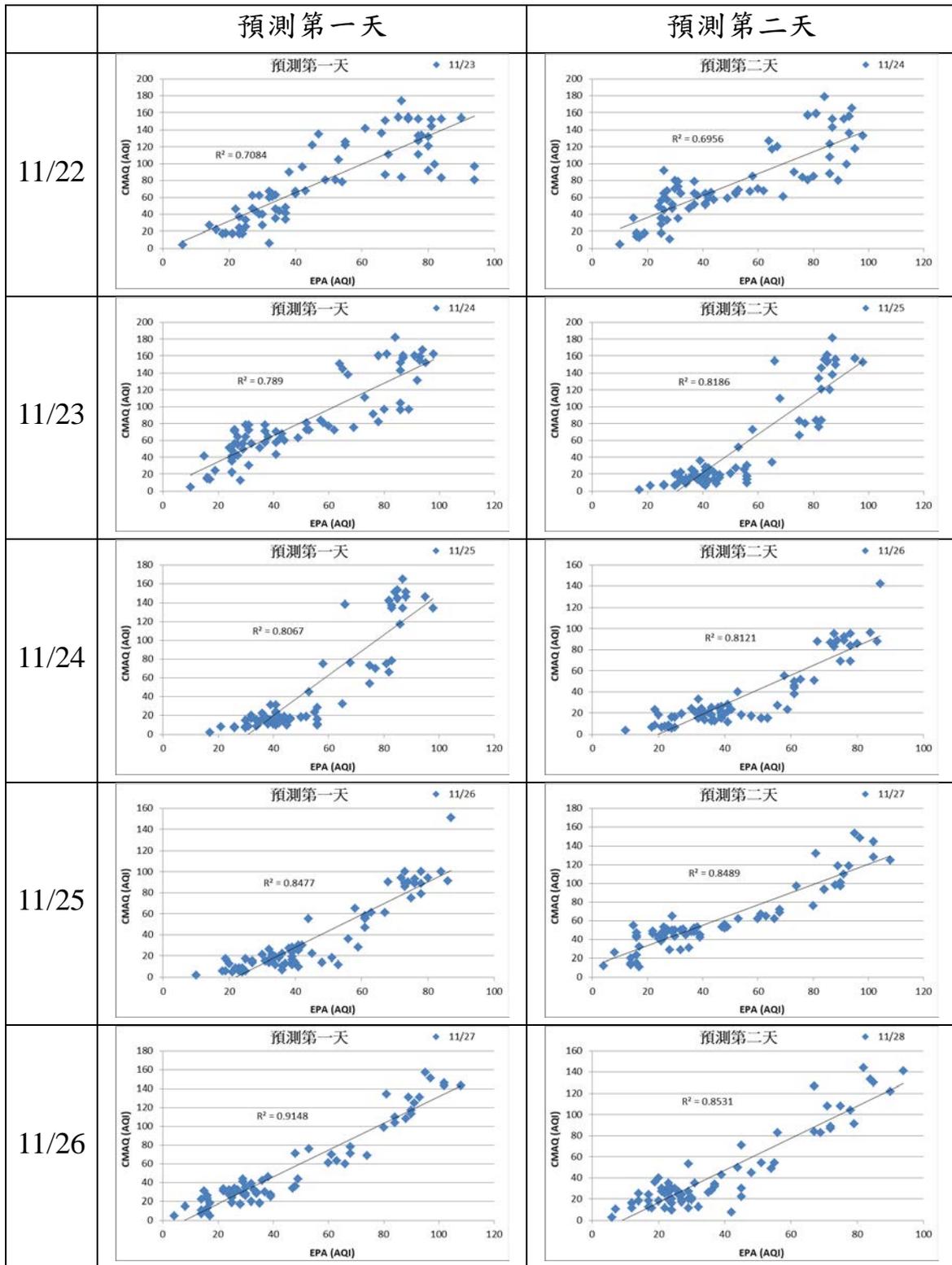
圖 4.39 CMAQ 模擬空氣品質預測結果

依據環保署空氣品質指標定義，若  $PM_{2.5}$  濃度在  $0.0 \sim 15.4\mu g/m^3$  之間，其空氣品質 AQI 指標為  $0 \sim 50$ ，為綠燈狀態”良好”的情形，其次若在  $15.5 \sim 35.4\mu g/m^3$  之間，則其空氣品質 AQI 指標為  $51 \sim 100$ ，為黃燈狀態”普通”的情形，若在  $35.5 \sim 54.4\mu g/m^3$  之間，則其空氣品質 AQI 指標為  $101 \sim 150$ ，為橘燈”對敏感族群不健康”的情形，而在  $54.5 \sim 150.4\mu g/m^3$  之間，則其空氣品質 AQI 指標為  $151 \sim 200$ ，為紅燈”對所有族群不健康”的情形。

若將模擬預測之  $PM_{2.5}$  濃度依照所模擬的日期平均，得到每日模擬之日平均，將日平均結果依照環保署空氣品質 AQI 指標的計算方式，計算所有測站逐日之 AQI 指標，此為 CMAQ 模擬預測之 AQI，另外亦從環保署網站下載對應測站及日期之  $PM_{2.5}$  濃度，依前述計算 AQI 方式計算其 AQI 值，得到實際觀測值之 AQI 指標。

將觀測值 AQI 與模擬預測之 AQI 指標繪製成散點圖，其中 X 軸為觀測值 AQI，Y 軸為模擬預測之 AQI，得到如圖 4.39。其中預測第一天 R-squared 值介於  $0.708 \sim 0.915$  之間，R-squared 最高為 26 日模擬預測 27 日之結果；預測第二天 R-squared 值則介於  $0.696 \sim 0.853$  之間，R-squared 最高亦為 26 日模擬預測 27 日之結果。

預測第二天結果，22 日預測於高 AQI 指標時，顯得較為離散；23 日預測結果於低 AQI 指標時，模擬 AQI 有明顯偏低之狀況；24 日預測結果與 23 日相近，皆於低 AQI 指標時，模擬 AQI 有明顯偏低之狀況；25 日預測結果則大致與趨勢線平行；26 日預測結果雖有大部分落在低 AQI 指標附近，大致上依舊是與趨勢線平行的結果。



資料來源：本研究彙整。

圖 4.39 空氣品質預測模擬值與觀測值 AQI 散點圖

將前述各測站結果依照 AQI 區間分類，分別為綠燈、黃燈、橘燈及紅燈等四個區間，並統計模擬值 AQI 所在區間與觀測值所在區間是否符合，將預測第二天之結果整理如表 4-34。其中綠燈狀態低估站數介於 0~8 站之間，高估站數介於 1~3 站之間，符合的站數則介於 17~53 站之間；黃燈狀態低估站數均為 0 站，高估站數介於 0~26 站之間，符合的站數則介於 8~18 站之間；橘燈狀態低估站數均為 0 站，高估站數介於 1~9 站之間，符合的站數則介於 0~3 站之間；紅燈狀態低估站數均為 0 站，高估站數介於 0~9 站之間，符合的站數則均為 0 站。模擬預測結果顯示在綠燈狀態時有較好的預測結果，而橘、紅燈時預測結果有偏高估的情形。

表 4-34 空氣品質預測 AQI 指標比較

排放量 日期	預測 第二天 日期	AQI 結果	良好	普通	對敏感族群 不健康	對所有族群 不健康
			0 ~ 50	51 ~ 100	101 ~ 150	151 ~ 200
11/22	11/24	低估	0	0	0	0
		符合	17	16	0	0
		高估	1	26	9	7
11/23	11/25	低估	7	0	0	0
		符合	42	8	0	0
		高估	3	0	7	9
11/24	11/26	低估	8	0	0	0
		符合	46	18	0	0
		高估	3	0	1	0
11/25	11/27	低估	0	0	0	0
		符合	39	13	3	0
		高估	2	12	6	1
11/26	11/28	低估	1	0	0	0
		符合	53	8	0	0
		高估	3	2	9	0

資料來源：本研究彙整。

## 第五章 結論與建議

本研究建置臺灣附近海域船舶之排放量資料，並以建置完成之三維網格 WRF 及 CMAQ 模式，模擬分析對臺灣地區原生性與衍生性污染物濃度之影響，將模式模擬結果輸出後處理成等值圖，本研究結論與建議分別詳述如下：

### 5.1 結論

1. 春節期間船舶排放量變化並不大，其排放係數均在  $1.0 \pm 0.1$  之間，而清明節排放係數約為 0.86，端午節排放係數約為 0.85，中秋節之排放係數則約為 0.88；特殊節日排放量預測係數放入排放量預測機制中的有春節期間與端午節。
2. 經由 2013 年及 2016 年颱風最接近臺灣時，統計船舶  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 PM 排放量依序為 2,071.5 噸、1,295.4 噸及 185.1 噸，顯示颱風接近臺灣時船舶有最低的活動量；颱風前後期間，船舶活動量則有被擠壓的情形，之後再慢慢回復到無颱風時的活動量，故排放量預測係數啟動時機為颱風警報發布時。
3. AIS 資料百分比反推中，2013 年日平均船舶數總和 2893 艘，2016 年日平均船舶數總和 3063 艘，均以散裝船、貨櫃船及油輪三種船舶類型為主要船種；2013 年引擎功率總和 35.4GW，2016 年引擎功率總和 38.2GW，其中貨櫃船所佔引擎功率均過半，依序為 19.0GW、20.8GW。
4. 因 AIS 資料收集頻率關係，實際進出港船舶數有可能高於統計數。可抓取 AIS 資料中無勞氏資料的船舶，搭配船舶進出港資訊，若進出港資訊中有此船舶資料，便可用來修正以增加 AIS 比對勞氏資料庫之可用率。
5. 統計 107 年 8 月 16 日截至 108 年 11 月 25 日排放量推估結果， $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 PM 排放量預測第一天誤差介於 -3.5% ~ -4.0% 之間，第二天

誤差介於-5.1% ~ -6.1%之間；而絕對誤差第一天介於 19.2% ~ 20.7%之間，第二天誤差則介於 25.9% ~ 28.4%之間。

6. 以 AIS 推估 2016 年臺灣周遭海域船舶空氣污染排放量，其中  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 PM 全年推估總排放量依序為 1,088,681 噸、705,843 噸及 99,756 噸。TEDS10 推估全國排放總量則為  $\text{NO}_x$  389,920 噸、 $\text{SO}_x$  120,694 噸及 TSP 363,545 噸。
7. 五大港口排放量推估中，AIS 推估  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 PM 依序為 4,454 噸、1,015 噸及 147 噸，港外 20 海浬則依序為 33,732 噸、18,618 噸及 2,639 噸；TEDS10 推估  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及 PM 則依序為 12,450 噸、15,718 噸及 1,581 噸，港外 20 海浬則依序為 10,633 噸、7,899 噸及 1,118 噸。
8. AIS 推估差異原因主要來自部分船隻會關閉 AIS 系統，導致與港口船舶進出港記錄有出入； $\text{SO}_x$  差異原因則來自輔助引擎及鍋爐使用含硫量不同，AIS 推估兩者均為 0.5%，TEDS 推估兩者則為 2.7%，僅有輔助引擎於調度與停泊狀態下為 0.5%。
9. CMAQ 性能評估逐月結果中，全臺 MFB 介於-14.8% ~ 11.7%之間，相關係數 R 介於 0.47 ~ 0.84 之間，MFE 則介於 40.8% ~ 52.1%之間。其中花東空品區有明顯低估之情形，由於花東空品區本身污染物濃度並不高，性能評估結果低估原因研判主要為境外污染之影響。
10. CMAQ 模擬 2016 年臺灣周遭海域船舶排放污染物年平均貢獻影響中，細懸浮微粒( $\text{PM}_{2.5}$ )平均增量濃度為為  $2.215 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，硫酸鹽( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 平均增量濃度為為  $0.556 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，硝酸鹽( $\text{NO}_3^-$ )平均增量濃度為為  $0.942 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，銨鹽( $\text{NH}_4^+$ )平均增量濃度為為  $0.477 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，原生性污染物平均增量濃度則為  $0.241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
11. CMAQ 模擬 2016 年臺灣五大港口污染排放，港口之範圍包括港區內與以港口為中心半徑 20 海浬內之船舶，其中年平均貢獻影響

中，細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)平均增量濃度為為 0.575  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，硫酸鹽(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)平均增量濃度為為 0.208  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，硝酸鹽(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)平均增量濃度為為 0.098  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，銨鹽(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)平均增量濃度為為 0.106  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，原生性污染物平均增量濃度為 0.162  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

12.CMAQ 模擬排放量預測第二天結果，顯示空氣品質 AQI 指標在綠燈狀態時有較好的預測結果，而當在橘燈及紅燈狀態時其預測結果有偏高估的情形。

## 5.2 建議

空氣品質模擬影響準確性主要來自於排放量的來源，若排放量來源存在著不確定性，則模擬的結果亦會有諸多的變化，故為了排放量預測未來能夠更精進，建議以下幾點說明：

1. 落實船舶 AIS 系統，以增加 AIS 原始資料之可信度。
2. 可透過實際擁有的船舶進出港資料，更新勞氏資料庫，以確保船舶基本參數可供應用。
3. 可透過其他計畫、研究，發展船舶排放污染物之本土化係數。
4. 依據船舶航行燃油相關規定，交通部已自 108 年 1 月 1 日起，限制國際航線船舶全面使用含硫量 0.5% 以下之低硫燃油，建議船舶航行時使用使用低硫油，以降低硫氧化物的產生。

## 5.3 成果效益及應用情形

國際海事組織於 2016 年 10 月 26 日在倫敦召開的海上環境保護委員會第 70 屆會議(MEPC70)，通過了 2020 年 1 月 1 號開始在全球海域實行船舶燃油硫含量不超過 0.5% 的決議，在控制排放區執行 0.1% 的燃油硫含量標準。使用低硫油可解決硫污染物問題，亦不會過度增加船舶改造成本，然而嚴格的含硫排放新規定，將對航運市場帶來深遠的影響，船舶航運公司必須選擇合適的技術措施，在降低硫氧化物排放

的同時，盡可能減少對航運的影響。

本研究使用 CMAQ 預測空污影響臺灣本島之情形，可透過每日預測影響較為嚴重之地區，對空污影響嚴重之該地區事先做防範之措施，例如疏散、事先警報、發放口罩等行動，以減少因空污所造成的影響，尤其對呼吸道敏感群眾，更能有事先預防之效果。

本研究著重在空氣品質預測系統的建置，管制策略並非本年度計畫之重點內容，研究之成果可供航港局、環保署等相關機關參考，以作為船舶空污嚴重時，可得知因船舶活動影響臺灣本島主要的地區範圍，使該地區採取必要之措施，或使船舶排放減量等事先預防之作業，以因應各機關團體未來可採取之空氣品質改善的參考依據；未來則可以此計畫為基礎，更新及修正排放量計算之過程，以及所使用之參數、資料來源等，以精進空品預測之準確性，如以下各點所述。

1. 可提供航港局、臺灣港務公司、縣市政府、環保署等機關參考，俾例擬定相關防治對策，以改善港域空氣品質，促進建立綠色港口之示範。
2. 歷年排放量建置所建立之排放量預測係數，搭配特殊節日以及颱風影響，第二天排放量預測誤差已小於 10% 以下，絕對誤差小於 30% 以下。
3. 船舶進出港記錄搭配 AIS 資料可改善 AIS 比對勞氏資料庫之可用率。
4. 建議後續計畫可依據本研究建置之空氣品質預測系統成果，研擬相關管制策略供參考。

## 參考文獻

1. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2007) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2005. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
2. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Kristiansson, J., and Wells, S. (2007) Puget Sound maritime air emission inventory. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
3. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2011) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2010. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
4. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2012) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2011. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
5. Aldrete, A., Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Muller, R. (2012) 2011 PUGET SOUND MARITIME AIR EMISSIONS INVENTORY. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
6. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2013) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2012. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
7. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2014) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2013. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
8. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
9. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory Highlights 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
10. 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 O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub>.  
Atmospheric Environment.

11. Li, X., and Rappengluck, B. (2014) A WRF-CMAQ study on spring time vertical ozone structure in Southeast Texas. *Atmospheric Environment*, 97, 363–385.
12. 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.
13. Wang, L., Wei, Z., Wei, W., Fu, J. S., Meng, C., and Ma, S. (2015) Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model. *Atmospheric Environment*, 122, 723–736.
14. Ruppert, L.; Becker, K. H. (2000). A product study of the OH radical-initiated oxidation of isoprene formation of C<sub>5</sub>-unsaturated diols. *Atmos. Environ.*, 34, 1529-1542.
15. Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley, New York.
16. 葉雨松、林清和、許真瑜(2015)，「高雄港區空氣污染擴散與監測系統規畫之研究」，交通部運輸研究所，MOTC-IOT-103-HIEB002。
17. 陳茂雄(2016)，「高雄港區空氣品質影響之模擬分析」，輔英科技大學環境工程與科學研究所碩士論文。
18. 張景皓(2015)，「南部二次衍生性氣膠形成速率與前驅物探討」，國立成功大學環境工程研究所碩士論文。
19. 吳義林、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。
20. 吳義林等(2001)，「衍生性氣膠與其前驅物之相關性研究」，行政院環境保護署專案計畫，EPA-90-FA17-03-90B025。
21. 吳義林、賴信志、蔡德明(2016)，「建置高雄港區105年即時空氣

- 品質推估系統」，交通部運輸研究所，MOTC-IOT-105-H1DB006。
22. 吳義林、賴信志、蔡德明(2017)，「船舶航行對沿岸及港域空污預測模式之建立」，交通部運輸研究所，MOTC-IOT-106-H2DB002a。
  23. 吳義林、賴信志、蔡德明(2018)，「港區及沿岸空氣品質受船舶航行之影響分析與即時推估系統建立」，交通部運輸研究所，MOTC-IOT-107-H2DB001f。
  24. 吳義林、蔡瀛逸、賴信志、蔡德明(2017)，「空氣污染物之綜合管制策略」，環保署專案計畫，EPA-106-FA18-03-A259。
  25. 交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站，<http://www.ihmt.gov.tw/>。
  26. 交通部航港局網站，<https://www.motcmpb.gov.tw/>。
  27. 中央氣象局颱風資料庫，<http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/>。
  28. 行政院環境保護署網站，<https://www.epa.gov.tw/>。



## 附錄一 期中報告審查意見處理情形表



交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期中報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-108-H2DB001f

計畫名稱：建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

審查日期：108 年 07 月 05 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<b>張木彬 委員</b>		
1. 報告中所列各數據應標示正確之單位，如表 3-9 所列排放係數。	感謝委員指導；將於報告中補充表 3-9 ~ 表 3-11 之排放係數單位。	同意。
2. 第四章所列特殊節日之 NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 及 PM 排放量其所對應之船舶數量及型式分佈建議也應增列。	感謝委員指導；將於報告中補充說明特殊節日之船舶數量及型式分佈，於 4.2.2 節。	同意。
3. 除了華人的特殊節日變化，建議也列入國際通行假日如 Christmas 至 New Year 期間之影響列入評估。	感謝委員指導；由於聖誕節至新年期間，每年均發生在西曆相同日期區間，即每年之 12 月 25 日至 12 月 31 日，故其變化趨勢應與每日排放量變化趨勢相同。	同意。
4. 表 4-19~表 4-32 所列 PM <sub>2.5</sub> 性能評估結果顯示，花東空品區之符合站數比率皆明顯偏低，原因為何及如何改進？宜加以說明。	感謝委員指導；已修正為表 4-33，因性能評估計算花東空品區，其測站僅有花蓮、臺東及關山等 3 站，故只要其中 1 站不符合，符合比例即大幅下降。	同意。
<b>顏有利 委員</b>		
1. 排放係數和符合站數比的定義是什麼？	感謝委員指導；排放係數為排放量預測係數，為應用 2013 年及 2016 年已知排放量之推估結果，計算次日排放量為今日排放量的比值，藉此預測未來之排放量；符合站數比為 CMAQ 性能評估中，所有 EPA 測站符合模式規範的站數比例。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
2. 計算符合比例平均時，Weighting 是否考量？	感謝委員指導；CMAQ 性能評估中，所有 EPA 測站符合模式之規範均相同，亦即所有測站之權重均相同。	同意。
3. 有了 AIS 更詳細評估後，和傳統的 CMAQ 模式有何系統性差異？有何優點？	感謝委員指導；CMAQ 模式模擬時，由於 AIS 為收集海上船舶實際資料，可修正及補足海上排放量的不足，藉此提升模式模擬的準確率。	同意。
4. 防制策略方面如何管制？	感謝委員指導；管制策略非本年度計畫之內容，本年度計畫內容為建置 AIS 排放量預測系統，預測船舶排放量對空氣品質的影響等。	同意。
5. 春節、端午節是否可以更細分哪些船有進港或直接過境？	感謝委員指導；將與船舶進出港記錄比較船舶數之差異，於 4.2.3 節。	同意。
6. 在東南風系時，太平洋中的船舶對臺灣影響如何？	感謝委員指導；吹東南風時，位於臺灣東南方太平洋中的船舶，其排放量將有一定程度的影響，然而由於距離較遠，依前期計畫研究結果，海域分區排放量影響，當距離臺灣越遠，其影響將越小。	同意。
<b>莊永松 委員</b>		
1. 各節日排放係數大約是一致性，節日前後兩天與環保署測站監測數據的相關性如何？	感謝委員指導；影響環保署測站監測數據之原因很多，故無法僅由節日前後之船舶排放量分析。	同意。
2. P.4-22 表 4-16，船舶港區或離岸所排放的 SO <sub>x</sub> 排放量約占 25%，船舶用油含硫量可再降低。	感謝委員指導；已修正為表 4-30，降低船舶用油含硫量為目前之趨勢，但是國際商船航行於各國間，故如何降低船舶用油含硫量需由各國協調。	同意。
3. 臺北港與基隆港重疊性以平均分配污染量，船舶排水量和其用油性質不同，是否排除其參數？	感謝委員指導；本研究依各港口之進出船舶資料以區別各港口之海域船隻，如 4.2.3 節所述。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<b>蔡立宏 委員</b>		
1. 請說明船舶主引擎與輔助引擎切油計算判斷方式，如船速或離港距離等。	感謝委員指導；本研究無法掌握船舶實際上是否有切油，僅以主引擎使用含硫量 2.7%、輔助引擎及鍋爐使用 0.5% 之燃油計算。	同意。
2. 分析結果顯示平假日、春節等假日及節日船舶量似乎變化不大，是否納入本系統計算？	感謝委員指導；本研究將春節等特殊節日納入排放量預測係數，以期提高排放量預測之準確率，如 4.1.1 節所述。	同意。
3. 颱風影響經分析，顯示船舶排放量有較大變化，建議後續深入分析，以提高預測準確率。	感謝委員指導；由於當前颱風路徑之預測範圍落差尚且過大，目前排放量尚無法為未來颱風影響預作推估，故僅以颱風警報發布時當作颱風預測係數啟動之依據，如 4.1.2 節所述。	同意。
4. 未來還有哪些影響因子可加入考量，以增加預測準確率？	感謝委員指導；目前排放量之預測誤差已經小於 35%，故本年度進行評估空氣品質 CMAQ 模式之預測系統，如 4.10 節所述。	同意。
5. WRF 氣象資料產出之物理量有哪些應用至本研究預測系統中？	感謝委員指導；WRF 模擬之所有氣象資料均納入於空氣品質 CMAQ 模式之預測系統。	同意。
6. 建議收集目前國際與國內對於船舶航行燃油相關規定納入期末報告中。	感謝委員指導；將收集船舶航行燃油相關規定，於期末報告 5.3 節。	同意。
<b>許義宏 委員</b>		
1. 今年度在排放資料更新為 TEDS10，目前在環保署網站似乎未公布該資料，建議補充說明資料取得方式。	感謝委員指導；本研究使用之 TEDS 資料來源為透過執行中計畫以及合作團隊所提供之。	同意。
2. 另外為瞭解排放資料庫更新內容，建議可進一步補充 TEDS10	感謝委員指導；TEDS9 基準年為 2013 年，NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 以及 PM 排放	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
相關資訊，例如基準年、與前一版本差異性、排放量分析結果等，並可就 TEDS9 與 TEDS10 背景排放資料差異性加以說明空污變化趨勢。	量依序為 410,587 噸、125,315 噸以及 386,079 噸；而 TEDS10 基準年為 2016 年，各污染物排放量則依序為 389,920 噸、120,694 噸及 363,545 噸。	
3. 第 4.1.2 節針對颱風對船舶排放量影響，建議進一步分析不同颱風路徑及強度等態樣的排放係數差異。	感謝委員指導；由於當前颱風路徑之預測範圍落差尚且過大，目前排放量尚無法為未來颱風影響預作推估，故僅以颱風警報發布時當作颱風預測係數啟動之依據，如 4.1.2 節所述。。	同意。
4. 第 4.2 節排放量預測誤差與去年計畫比較，誤差值似乎沒有改善，其原因為何？是否有改善方法？	感謝委員指導；已修正為 4.3 節，目前排放量之預測誤差已經小於 35%，故本年度將進行評估空氣品質 CMAQ 模式之預測系統，如 4.10 節所述。	同意。
5. 為了後續港區及船舶空氣污染防治對策之擬訂，建議可進一步蒐集國內外相關文獻，俾以提供相關機關應用參考。	感謝委員指導；管制策略非本年度計畫之內容，將列入後續計畫之建議。本年度計畫內容為建置 AIS 排放量預測系統，預測船舶排放量對空氣品質的影響等。	同意。
6. 另外，配合航港局推動低硫油政策，是否有辦法設定船舶在港區內使用低硫油之模擬情境，以利瞭解該政策之空污改善效益。	感謝委員指導；本年度計畫內容為建置 AIS 排放量預測系統，預測船舶排放量對空氣品質的影響等，故評估船舶在港區內使用低硫油之空污改善效益建議於未來後續計畫執行。	同意。
<b>黃茂信 委員</b>		
1. 有關 AIS 資料取得，請修正由港研中心介接航港局資料。	感謝委員指導；將於報告中修正 AIS 資料取得方式。	同意。
2. P.3-39，大陸地區之用語是否該正名為中國？	感謝委員指導；已修正為 P3-41，將於報告中修改大陸地區為中國。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
3. 於特殊節日考量船舶活動量，都無特別影響，是否還需一直強調，或是否用國際節日？	感謝委員指導；由於國際節日均發生在西曆日期，故其變化趨勢應與每日排放量變化趨勢相同，如4.1.1節所述。	同意。
4. 交通部已自 108 年 1 月 1 日起，限制國際航線船舶全面使用含硫量 0.5% 以下之低硫燃油，於本研究之成果，可否看出成效？	感謝委員指導；目前本研究排放量使用 AIS 以及 TEDS 資料，基準年為 2016 年，故尚無法看出差異。	同意。
5. 數字部份請標示清楚，如 163,917。	感謝委員指導；將於報告中修改阿拉伯數字之千位數逗號分隔。	同意。
6. 文字部份，統一使用，如 DS 非 DS，等請一併修正。	感謝委員指導；將於報告中修改文字說明，於 P3-40。	同意。
<b>行政院環境保護署</b>		
1. 本案期程為何是 9.5 個月，而非 11 個月？	感謝委員指導；本研究執行期程開始日期為 2 月 15 日至 11 月 30 日截止，故為 9.5 個月。	同意。
<b>臺灣港務股份有限公司</b>		
1. 相關意見已於歷次工作會議中提出，本公司對本案樂觀其成。	感謝委員指導。	—
<b>本所港研中心第二科蔣敏玲研究員</b>		
1. 中英文摘要內容不一致，請修改。另摘要及報告格式請依本所出版品規定。	感謝委員指導；將於報告中修改中英文摘要。	同意。
2. 部份圖表標題名稱過於簡略，請檢視修改，例如：圖 4.4~圖 4.7 等等。	感謝委員指導；將於報告中修改標題名稱過於簡略之圖表，於圖 4.16~圖 4.19。	同意。
3. 報告書部份內容為前期研究成果，宜加以區分，述明何為前期研究果，及何為本期研究內容與結果，避免混淆。	感謝委員指導；報告中內容若為前期研究成果，將於該小節補充說明之。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
4. 4.1 節計算特殊節日之排放係數多介於 0.8~1.1 之間，請說明如何春節亦同，請說明由數據如何判定要特別將春節排放係數特別拉出來，其判定基準為何？	感謝委員指導；依據 2013 年及 2016 年排放量 NO <sub>x</sub> 日平均約為 3000 噸左右，與春節期間排放量約 2000 多噸，有明顯之落差，又臺灣位於東南亞華人居多的區域，且春節系華人地區重大節日之一，故將其挑出特別討論之，於 4.1.1 節。	同意。
5. 4.6 節，針對表 4-19 至表 4-32 之模式模擬性能評估結果，宜補充文字進一步探討各個不同空品區之評估結果，而非僅有數據說明。	感謝委員指導；已修正為 4.7 節，並說明不同空品區的評估結果。	同意。

## 附錄二 期末報告審查意見處理情形表



交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-108-H2DB001f

計畫名稱：建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統

執行單位：國立成功大學

審查日期：108 年 11 月 05 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<b>邱濟民 委員</b>		
1. 計畫成果符合計畫目的;研究結果有助於港區空氣品質的改善。	感謝委員指導。	-
2. 建議補充 CMAQ 模式搭配船舶未來預測之排放量預測臺灣本島 48 小時時內空氣品質後,與環保署港區空氣污染現況作比對分析,以利未來的引用。	感謝委員指導;已補充納入期末報告 4.10 節,以比較分析預測誤差。	同意。
3. 請補充說明 AIS 在船舶進港後就關掉狀況下,所推估港區船舶污染情形,如何驗證其正確性。	感謝委員指導;船舶於進港後無 AIS 資料,可透過船舶進出港記錄比對,以修正無資料之船舶排放量,如 4.2.3 節所述。	同意。
4. 請補充說明本研究成果可供環保署參考的具體內容及在擬定相關港區空污防制對策時如何具體應用。	感謝委員指導;補充納入期末報告中 5.3 節。	研擬具體防制對策將列為明年計畫工作項目之一。
<b>鐘英鳳 委員</b>		
1. 頁 3-13 表 3-6 中貨櫃輪-7000,其 DWT 及功率均小於貨櫃輪-6000,是否正確?請查明。表 3-7、表 3-8 亦同。	感謝委員指導;表 3-6 至表 3-8 為缺值預設表,經查 2012 年及 2013 年洛杉磯港報告中指出,表中所呈現之數值均為當時所有進出洛杉磯港的船舶,再把其中相同或相似類型的船舶參數平均,當作缺值預設值。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
2. 頁 3-17 表 3-9 中 NO <sub>x</sub> 慢速排放係數比中速大，而 SO <sub>x</sub> 則慢速比中速小，請檢核是否正確。	感謝委員指導；經查 2012 年及 2013 年洛杉磯港報告中之表 3.5 顯示，NO <sub>x</sub> 於慢速引擎之排放係數比中速引擎大，而 SO <sub>x</sub> 排放係數則為慢速引擎比中速引擎小。	同意。
3. 對於春節以外之節日一般港口仍會繼續作業，且港口排船涉及下一港，此處作分析是否正確反應船舶數，仍待驗證及檢核。	感謝委員指導；各港口船舶數可透過船舶進出港記錄比對，以修正無資料之船舶排放量，如 4.2.3 節所述。	同意。
4. 颱風部份與其路徑有關，是否入侵臺灣亦有影響，表 4-11 說明建議加入路徑，侵臺與否之影響為何？其數值可能差距頗大。	感謝委員指導；由於當前颱風路徑之預測範圍落差尚且過大，而表 4-11 為歷史颱風之解析，目前排放量尚無法為未來颱風影響預作推估，故僅以颱風警報發布時當作颱風預測係數啟動之依據，如 4.1.2 節所述。	同意。
5. 本報告內容充足完善，可供作參考。	感謝委員指導。	-
6. 結論建議部份請予以強化本報告之結果及未來可用之處。	感謝委員指導；已於期末報告 5.1 節至 5.3 節補充說明。	同意。
<b>李崇垓 委員</b>		
1. 颱風入侵臺灣期間船舶排放量將有較大變化，請補充說明不同的颱風路徑及風力強度對於預測值之修正係數之影響。	感謝委員指導；由於當前颱風路徑之預測範圍落差尚且過大，目前排放量尚無法為未來颱風影響預作推估，故僅以颱風警報發布時當作颱風預測係數啟動之依據，如 4.1.2 節所述。	同意。
2. 請說明氣象場中之混合層高度輸入參數之計算方式，是否有取得實際之探空觀測資料值？	感謝委員指導；本研究氣象場所用的混合層參數為數值模式中處理大氣次網格紊流效應之參數法。WRF 模式中，兩個最常被延用之邊界層參數法為 Yonsei University (YSU PBL, Hong et al. 2006)及	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	Mellor-Yamada-Janjic (MYJ PBL, Janjic 1990, 1996, 2002) 參數法，本研究利用 YSU scheme 為模組化參數為設定依據。關於探空資料利用模式的資料同化方法將觀測探空進行初始場修正，說明於 P3-34。	
3. 本研究之預測模式是否具有類神經網路之相同特性(餵愈多的數據來訓練它，模式的預測將愈來愈準)? 請補充說明。	感謝委員指導;本研究之預測模式為三維網格模式 CMAQ，具有非類神經網路的特性，而是使用各污染物種的物理及化學特性所產生的各種反應、變化，以模擬各污染物種的影響情形，說明於 P3-47。	同意。
4. 報告編撰品質的部分請再檢視修改：(1)中英文摘要不一致，例如英文摘要中未翻譯中文摘要的第一段。(2)多張圖表中之不同趨勢線無法辨識，請修正。	感謝委員指導;將於期末報告中補充修正中英文摘要;亦將修正黑白列印下無法辨識之圖表。或以彩色列印之。	同意。
<b>簡仲璟 委員</b>		
1. 若船速為零時(例如已靠泊碼頭，或在錨泊區等待進港)，其排放量是否為零? 依報告中所示之式(3-1)、式(3-2)、式(3-3)等排放量計算方式應該是零，此與實際狀況是否符合?	感謝委員指導;依據洛杉磯港船舶排放量公式，排放量推估分為三個部分，分別為主引擎、輔助引擎及鍋爐;當船速為零時，其主引擎排放量即為零，而船舶會開啟鍋爐供應船上電力及其他熱能需求，故此時仍會有鍋爐的排放影響。	同意。
2. 表 3-21 所列之預測係數如何得知?	感謝委員指導;預測係數係將 2013 年與 2016 年之逐日排放量依照對應日期逐日平均，若以 n 代表第 n 日之排放量，則 n+1 日之排放係數即為(n+1)/n，說明於 P3-45。	同意。
3. 第 3-45 頁所述預測模擬數值與實際觀測值之比較，如何將觀測值中除船舶外其他可能之污染源	感謝委員指導;環保署測站觀測值為所有污染源的排放影響總和，若透過模式模擬將船舶排放與其他	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
去除？	污染源之影響為 A，其他污染源影響則為 B，則 $A-B=C$ 即為船舶排放之影響，而 C 值將小於觀測值，可透過 C 值解析船舶的影響，說明於 P3-47 及 P3-48。	
4. WRF 氣象模式之輸入參數有哪些？輸出資料有哪些？是否如第 3-33 頁所述包括地面氣溫及 10 公尺高度之風向、風速？請再補充說明。中央氣象局是否可提供這些資料？	感謝委員指導；本研究之 WRF 氣象場利用 NCEP 全球尺度氣象場作為初始場，初始場由大氣模式、海洋模式、陸地土壤模式等所組成，運用多種大氣物理參數方法進行模式設定，經由龐大數值運算後，產出空氣品質模擬模式所需要的大氣變數，如風速、風向、溫度及 154 個等大氣變數。然為檢核模式模擬之準確程度，則需要利用觀測值來做驗證；依環保署空氣品質模式模擬規範所列，利用中央氣象局每日提供預報場中每日地面溫度和 10 公尺高度風速和風向等數值與模式模擬數值進行驗證評估，若符合模式模擬之規範，其 WRF 模擬結果則可運用於空氣品質模式模擬，如 3.5 節所述。	同意。
5. 「…排放係數 1.0 正負 0.1…」之敘述建議改為「…排放係數 $1.0 \pm 0.1$ 」。結論第 6 點應該是本研究對區域之主觀劃設，並非研究成果，故建議刪除。	感謝委員指導；將於期末報告中修正文字「正負」為符號「 $\pm$ 」；另將刪除報告中原結論之第 6 點敘述。	同意。
<b>李俊穎 委員</b>		
1. 摘要內容請參閱「本所出版品規範說明」，重點摘要並敘明本研究成果之效益。	感謝委員指導；將於期末報告中英文摘要中補充說明。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
2. 本研究 WRF 採 4 尺度，除表 3-16 參數外，各尺度部分參數或地形資料是否也不同？請補充說明。	感謝委員指導；本研究 WRF 由解析度降尺度 81km 至 3km，使用物理、邊界、積雲化等參數選項皆一致；地形資料四個解析度是利用同一種 Modis 衛星資料進行內插，如 3.5 節所述。	同意。
3. 所劃分排放量區域及港口區域對各港影響為何？請補充說明。	感謝委員指導；補充於期末報告之 4.5 節。	同意。
4. 空品預測有無考量降雨量或溼度等，與其對空品影響為何？請補充說明。	感謝委員指導；降雨量、溼度等氣象因素均納入於 WRF 與 CMAQ 之模擬分析中，說明於 P3-32、P3-36 及 P3-37。	同意。
5. WRF 風場預報內是否已包含颱風資料？建議考量納入後續預報。	感謝委員指導；WRF 是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，此模式提供了廣泛的跨尺度氣象應用。本研究使用 NCEP 全球模式氣象場作為初始場，亦包含颱風模擬路徑，利用 WRF 四層網格降尺度將影響臺灣天氣的環境條件均包含於模擬範圍中，說明於 P3-33。	同意。
6. 本研究 AIS 船舶排放量與 TEDS10 差異蠻大，如何確保準確性？請補充說明。	感謝委員指導；AIS 計算船舶排放量與 TEDS10 計算結果差異，主要來自船舶數量統計的差異，以及燃油含硫率的設定，為避免排放量計算結果差異過大，未來將確認排放量計算方式及資料來源的一致性，如 4.6 節所述。	同意。
<b>許義宏 委員</b>		
1. 對節日預測係數部分，P.4-4 清明節排放係數為 0.86 與 P.4-5 端午節 0.85，其前後震盪幅度都是 1.0 正負 0.1，但前者不須納入，	感謝委員指導；特殊節日預測係數是否納入預測機制中，主要取決於該係數與正常值(1.0)的差值，若差值高過與標準偏差的數值，則設定	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
後者則須納入預測係數機制中。建議補充說明。	該節日需要額外納入預測機制中，將於期末報告中補充說明於4.1.1 小節。	
2. P4-19 比較 2013 及 2016 年的排放量，僅針對引擎功率作分析，似乎不足。建議進一步探討船速與船舶航行距離等因素是否亦有影響。	感謝委員指導；依據洛杉磯港船舶排放量公式，船舶引擎功率為排放量計算之主要不變之參數；而船速影響負載，航行距離則影響活動強度，皆於排放量計算式中表現其影響高低，說明於 P4-20。	同意。
3. 第 4.2.3 節比對 AIS 與各港進出港船舶數，分析之目的為何？似乎沒有分析與港口排放量影響的關聯性(與主題無關)。建議補充說明。	感謝委員指導；比對 AIS 與各港進出港船舶數，為確認 AIS 資料之準確性，以及可能短缺之船舶數，希望藉此修正船舶排放量的誤差，如邱委員等之意見；同時，依據進出港資料亦可修正勞氏資料，以精進船舶排放量之計算。	同意。
<b>黃茂信 委員</b>		
1. 有關港研中心 AIS 系統已於 107 年底移轉交通部航港局，若文章有述及，請定義說明使用資料年份。	感謝委員指導；將於期末報告中補充與修正，說明於 4.3 節。	同意。
2. 後續移轉港務公司，本預測系統所需之軟硬體，是否可整理清單以供參考。	感謝委員指導；預測系統所需之軟硬體設備，於教育訓練中補充，於該訓練中空氣品質模式介紹簡報之 P48 ~ P51。	同意。
3. 頁 4-33 於 108 年 5 月排放量突升部份，已知是介接航港局資料問題，應將「不正確」之排放量推估結果移除，避免衍生誤會。	感謝委員指導；排放量推估期間，108 年 5 月及 6 月之排放量異常，將於期末報告中修正並補充說明於 4.3 節。	同意。
4. 後續使用低硫油政策，相關預測數值如何修正？	感謝委員指導；由於無法確切得知船舶是否有切換低硫油，後續使用低硫油政策，排放量預測時可採用含硫率 0.5% 之燃油排放係數。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<b>行政院環境保護署</b>		
1. 模式性能評估各月份符合有非常差情形，其原因為何(NO <sub>2</sub> 或SO <sub>2</sub> 高低估？或是氣象條件影響)?對於性能結果如何解讀或修正後續預報結果(尤其本系統又是用「日」來看)?	感謝委員指導；雖然部分個別測站之性能評估結果不佳，尚均符合模式模擬性能評估規範。未來建議再分析如何提升部分個別測站，包括氣象條件與排放量資料之影響。	同意。
2. 本研究所進行預報評估，如何將基準年 2016 至今(2019 年)本土及境外排放量變化納入模式評估？	感謝委員指導；預測模式模擬時，其排放量將依照 TEDS10 基準年 2016 年，依照鄰近各國之經濟成長比例，推估 2019 年之排放量。	同意。
3. 建議本研究的預報情形可與本署預報情形比較優劣性，另應用源解析工具如 BFM、ISAM、DDM 評估相關管制空污供獻量評估。	感謝委員指導；將納入於未來工作。	同意。
<b>本所港研中心第三科蔣敏玲研究員</b>		
1. 中英文摘要內請加入一段文字述敘計畫效益與應用。另期末定稿報告書請依本所出版品規定，包含字體、段落、圖表名、文獻、目錄編排等。	感謝委員指導；將於期末報告中英文摘要中補充說明，並依出版品規定編排。	同意。
2. 部份圖表標題名稱過於簡略，請檢視修改，例如：表 3-22、表 3-23 等等。	感謝委員指導；將於期末報告中修改標題名稱於表 3-22、表 3-23。	同意。
3. 報告內所有英文縮寫首次出現時，請註明英文全名及中文全文。	感謝委員指導；將於期末報告中補充說明。	同意。
4. 1.2 節、1.3 節、1.4 節、第五章之描述過於簡略，請再補充具體內容。報告書內多處提及本研究「預計」……，請修正用語。	感謝委員指導；將於期末報告中補充、修正，已修正於 1.2 節、1.3 節、1.4 節及第五章。	同意。



### 附錄三 期末報告簡報資料



## 建立即時氣象模組及船舶排放之 三維空氣品質模擬系統

### 期末報告

吳義林 教授  
國立成功大學  
中華民國108年11月5日

## 簡報大綱

- 前言
- 計畫目的與工作項目
- 計畫執行流程與工作方法
  - 排放量推估及預測
  - 預測結果說明
  - 船舶數與引擎功率
  - 排放量比較
  - 三維網格式WRF及CMAQ
  - 空氣品質預測流程

## 前言

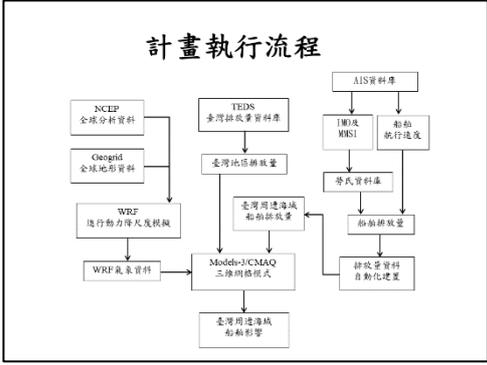
- 環保署最新之全國空氣污染物排放清冊顯示港埠相關活動於105年之PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NMHC與CO排放量佔全國排放量之比例分別為2.28%、4.26%、26.2%、8.72%、0.21%與0.51%，所以港埠相關活動排放SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>與PM<sub>2.5</sub>等污染物之比例已有一定程度之影響，應分析其對臺灣空氣品質之影響。

## 計畫目的

- 以AIS資料推估臺灣周遭海域與主要港口每日之船舶污染排放量。
- 以臺灣周遭海域與主要港口之船舶排放量，建置2016年港口之船舶排放源資料庫。
- 以CMAQ模式分析2016年臺灣地區周遭海域與主要港口船舶對臺灣地區空氣品質之全年影響。
- 建置空氣品質預測系統使用之WRF氣象模式與CMAQ模擬模式。
- 建置以CMAQ模式搭配船舶未來預測之排放量，預測臺灣本島48小時內之空氣品質預測系統。

## 工作項目

- 建置船舶於各港區與臺灣附近海域之即時排放量資料。
- 建置即時三維網格式氣象模式WRF(Weather Research and Forecasting Model)。
- 建置即時三維網格式空氣品質模式CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)。
- 以CMAQ模式分析對臺灣地區原生性與衍生性污染物濃度之影響。
- 模式模擬結果之輸出與後處理。



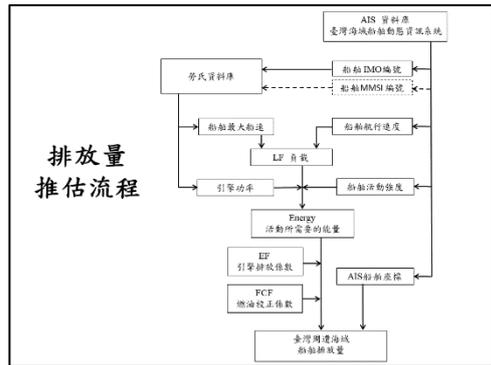
## 工作進度

工作項目	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次	預計
資料收集與文獻回顧	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
建置船舶即時排放量資料	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
建置臺灣排放源資料庫	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
建立即時三維網格式WRF氣象模式	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
建立即時三維網格式CMAQ空氣品質模式	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CMAQ模式分析污染影響	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
建置空氣品質模擬系統	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
期中報告	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
期末報告	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
成果發表/研討	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
核定經費/預算	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
核定經費/預算	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
核定經費/預算	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
核定經費/預算	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

## 目前已完成

- 海域船舶排放量推估及預測結果。
- 特殊節日與颱風影響排放量預測係數建置。
- TEDS 10.0 排放量資料彙整。
- WRF 氣象模式建置與性能評估。
- CMAQ 模擬建置與性能評估。

# AIS排放量推估



### 船舶排放量計算

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF$$

E: 引擎的排放量(g)  
Energy: 所需要的能量(kW-h)  
EF: 排放係數(g/kW-h)註1  
FCF: (HFO)燃料校正係數

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act}$$

MCR: 最大引擎動力(kW)註2  
LF: 自載係數  
Act: 活動量(hr)註3

自載 20% ~ 80%:  

$$LF = (\text{AS} / \text{MS})^3$$
 AS: 實際船速(節)  
MS: 最大船速(節)

註1: POLA  
 註2: 勞氏資料庫, POLA  
 註3: AIS  
 排放量計算方法同洛杉磯港研究

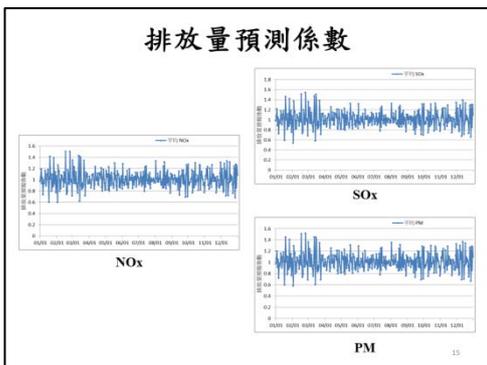
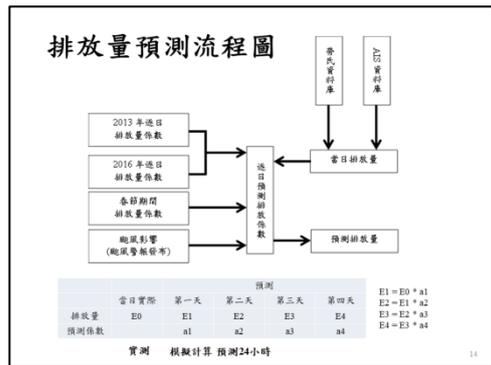
Field	Description
IMO_Number	(IMO Number) 國際海運組織編號
Call_Sign	(Call Sign) 呼號
MMSI	(MMSI, Maritime Mobile Service Identifies Code) 海上行動管理服務識別碼
Navigation_Status	(Navigation status) 航行狀態
SOG	(Speed Over Ground - SOG) 航速
Longitude	經度
Latitude	緯度
Ship_and_Comp_Type	(Type of ship) 船舶類型
Reference_Position_Alt	A+B = 船高
Reference_Position_Bt	
Based_Ship	此單列船舶航線

### Ship Traveling around Taiwan

#### Trajectory base emission inventory method

公噸	筆數	NOx	SOx	PM
全年	393,483,895	1,088,681	705,843	99,756
日平均	1,081,000	2,990.9	1,939.1	274.1
日最大值	1,944,267	5,322.0	3,474.0	494.8
日最小值	42,445	500.7	341.2	45.1

# 排放量預測





### 2013年與2016年比較(一)

日平均船舶數(艘)	散裝船	貨櫃船	一般貨輪	其他	冷藏船	漁業漁船	油輪	過海船	渡輪	混合船	總和	可利用率
平均	270.6	274.0	118.7	38.1	7.6	18.6	210.1	4.8	12.6	0.5	876.1	30.1%
最大值	340.0	274.0	153.0	57.0	15.0	28.0	276.0	18.0	18.0	3.0	1151.0	44.8%
最小值	152.0	138.0	70.0	18.0	0.0	3.0	138.0	0.0	3.0	0.0	574.0	18.4%
標準偏差	29.4	21.6	15.4	4.8	2.8	3.9	20.4	3.2	2.1	0.6	83.1	5.9%
平均	250.8	220.3	111.9	36.5	7.7	18.4	210.4	4.4	14.0	0.6	825.4	30.9%
最大值	395.0	343.0	152.0	79.0	16.0	33.0	343.0	21.0	29.0	2.0	1305.0	46.2%
最小值	66.0	61.0	20.0	10.0	1.0	1.0	30.0	1.0	3.0	0.0	212.0	19.7%
標準偏差	40.4	31.6	17.3	8.9	3.0	5.4	21.8	3.3	2.7	0.5	115.6	5.9%

日平均引擎功率(GW)	散裝船	貨櫃船	一般貨輪	其他	冷藏船	漁業漁船	油輪	過海船	渡輪	混合船	總和	可利用率
平均	2.38	5.75	0.41	0.15	0.02	0.17	1.60	0.03	0.19	0.00	10.71	30.3%
最大值	3.36	7.78	0.65	0.24	0.06	0.31	2.13	0.14	0.40	0.02	13.93	44.8%
最小值	1.34	3.32	0.24	0.05	0.00	0.03	0.81	0.00	0.05	0.00	6.51	18.4%
標準偏差	0.30	0.70	0.06	0.03	0.01	0.04	0.20	0.02	0.06	0.00	1.10	5.9%
平均	2.57	6.44	0.41	0.20	0.03	0.18	1.68	0.03	0.20	0.00	11.83	30.9%
最大值	4.32	9.74	0.61	0.41	0.06	0.34	3.13	0.13	0.41	0.03	18.06	46.2%
最小值	0.59	1.28	0.10	0.06	0.00	0.00	0.29	0.00	0.05	0.00	3.20	19.7%
標準偏差	0.44	1.01	0.07	0.05	0.01	0.06	0.30	0.02	0.07	0.00	1.82	5.9%

• 勞氏資料庫中實際可搜尋到之船舶資料

### 2013年與2016年比較(二)

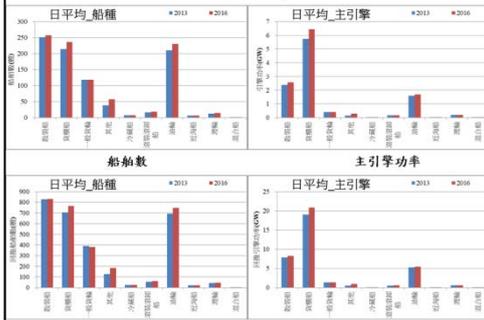
日平均(符合篩選)	散裝船	貨櫃船	一般貨輪	其他	冷藏船	漁業漁船	油輪	過海船	渡輪	混合船	總和	
船舶數(艘)	2013年	828.6	794.0	392.6	126.6	24.2	94.7	691.8	22.4	41.5	1.6	2893.4
	2016年	831.9	765.7	382.0	184.3	25.0	49.7	746.4	20.8	45.3	1.8	3062.8
引擎功率(GW)	2013年	7.88	19.01	1.35	0.49	0.08	0.55	5.28	0.11	0.64	0.01	35.4
	2016年	8.30	20.83	1.32	0.93	0.08	0.55	5.44	0.10	0.64	0.01	38.2
船舶數百分比(%)		106.4%	106.3%	97.4%	145.9%	99.1%	100.1%	107.6%	92.6%	109.2%	113.8%	108.0%
引擎功率百分比(%)		105.3%	109.6%	98.1%	189.7%	98.6%	104.5%	103.0%	91.2%	100.4%	109.2%	108.0%

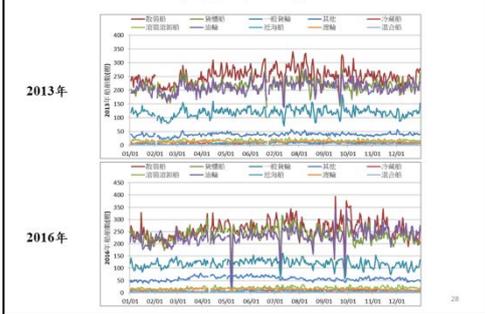
船種數量(噸)	區域百分比反推(噸)								
NOx	PM1								
2013年	501	118	44	2923	1875	264			
2016年	480	150	50	2997	1941	275			
增加百分比(%)				111.6%	112.9%	113.4%	102.5%	103.6%	104.0%

• 船種數量依可利用率百分比等比例反推。  
• 2016年對比2013年增加幅度約5%~10%。

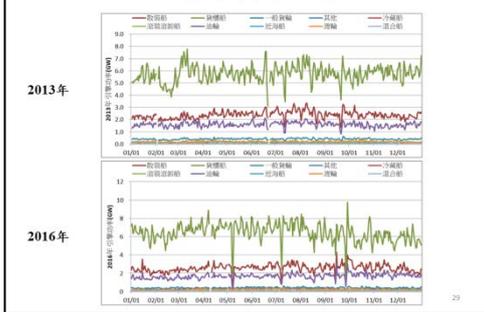
### 船種比較



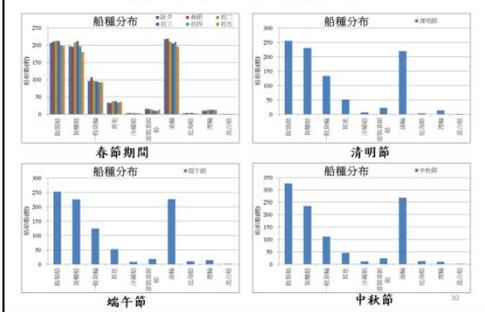
### 船舶數比較



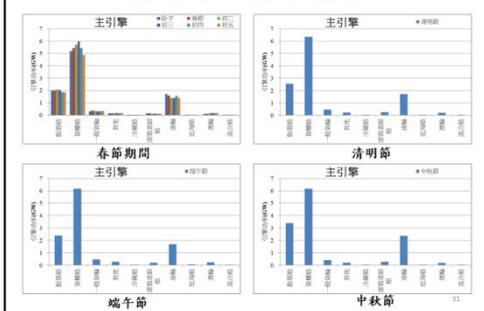
### 主引擎功率比較



### 特殊節日船種分布

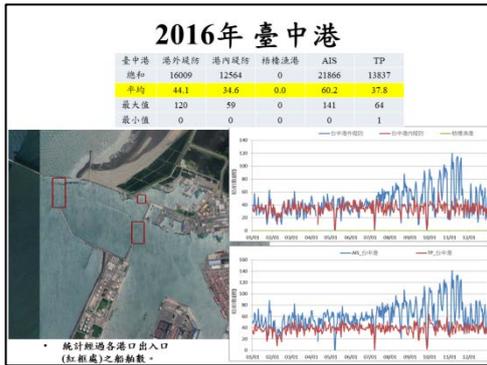
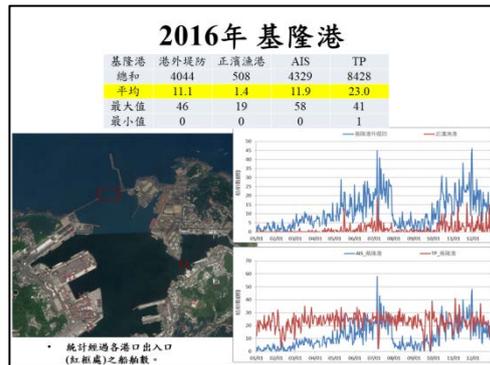
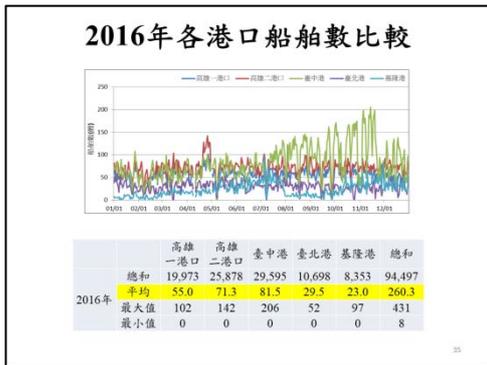
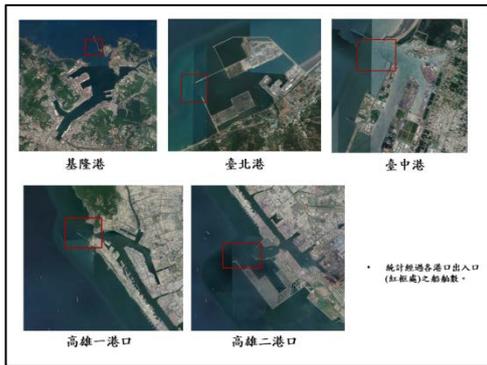


### 特殊節日引擎功率

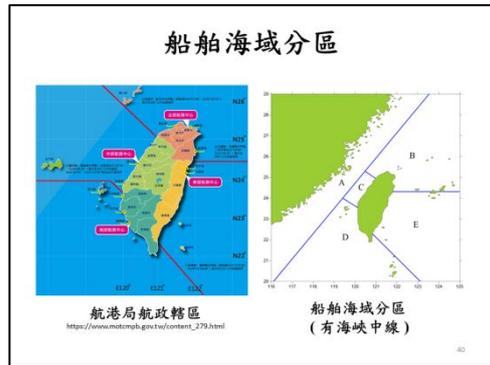


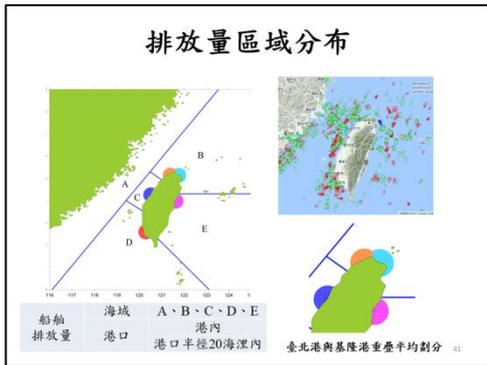
### 進出港船舶數





## 排放量比較





### 港口排放量

	AIS 船舶排放量			TEDS 10	
	NOx(噸)	SOx(噸)	PM(噸)	SOx(噸)	PM(噸)
高雄港內	2,580	539	81	6,364	811
港口半徑20海浬	14,771	6,708	981	4,446	3,907
基隆港	17,351	7,247	1,063	11,809	12,045
臺中港內	1,015	294	37	2,500	3,457
港口半徑20海浬	8,041	4,903	689	2,006	1,575
臺中港	9,056	3,198	228	4,507	5,012
臺北港內	330	79	15	1,319	1,489
港口半徑20海浬	5,737	3,482	494	1,433	1,074
臺北港	6,068	3,560	509	2,752	2,561
基隆港內	891	93	13	1,910	2,202
港口半徑20海浬	3,051	2,133	276	1,483	1,126
基隆港	3,542	2,226	289	3,393	3,227
花蓮港內	38	10	1	357	412
港口半徑20海浬	2,131	1,392	198	265	217
花蓮港	2,169	1,402	200	623	650
港內總和	4,454	1,015	147	12,450	15,718
港口半徑20海浬	33,732	18,618	2,639	10,633	7,899
港口總和	38,186	19,633	2,786	25,083	23,617

TEDS 港口排放量依據港口所在縣市之港區及離岸排放

### 港口排放量差異比較

排放量差異比較	AIS	TEDS
港口內航運	AIS 有記錄之航運。	船舶離港出港記錄，以船舶離港出港之時間判定是否為港區內航運量(調度、停泊)。
港口外航運	AIS 有記錄之航運。	不包含經離港未進港之航運。
排放量計算港口數	統計高雄港、台中港、台北港、基隆港及花蓮港。	TEDS 港區包含高島之鹿港兩港(包含最遠海及安平港)、一鹿港內兩港(布袋港、知港港)、四鹿港會社特殊航加碼頭(深澳專用油港、沙崙外海卸油浮筒、永安石化天然氣接收站及興達電廠卸油碼頭)。
引擎使用燃油含硫量	主引擎2.7%，輔助引擎0.5%，船機0.5%。	主引擎2.7%，輔助引擎在航行離港油機約2.7%，調查與停泊狀態0.5%，船機2.7%。
引擎使用狀況(港口半徑20海浬內)	負載LE=20%時為主引擎。	包含主引擎及輔助引擎。

### TEDS 10 各污染源排放量

	NOx	SOx	TSP
工業	150,157	82,807	34,528
車輛	184,275	141	30,257
非公路運輸	4,335	363	117
商業	3,577	2,598	3,439
管建/道路揚塵	0	0	285,667
露天燃燒	3,668	1,497	4,618
其他	9,894	1,131	1,139
船舶-港區內	21,938	23,073	2,103
船舶-離岸排放	12,076	9,085	1,277
總排放量	389,920	120,694	363,545

	NOx	SOx	PM
TEDS 10	389,920	120,694	363,545
2016年	1,088,681	705,843	99,756

- TEDS 10排放量基準年為2016年。
- 海域船舶排放量推估範圍的為臺灣本島之20倍。(海域面積約74萬平方公里)



### WRF 氣象模式設定與性能評估方式

- 本計畫建置即時三維網格式氣象模式，依據環保署TEDS10基準年進行2016年模擬建置，並利用中央氣象局測站進行性能評估。

**WRF 模式模擬範圍設定**

將模式模擬結果與中央氣象局測站的觀測資料進行驗證(不包含高山站)

- 校驗項目: 溫度、風速、風向
- 校驗統計項目: MBE、MAGE、RMSE、WNMB、WNME

$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$   
 $MAGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$   
 $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$   
 $WNMB = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100\%$   
 $WNME = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100\%$

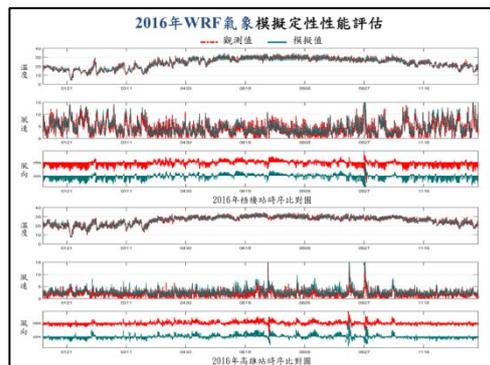
- 依照模式模擬結果將模擬範圍分為五個地區:
  - 北部地區(新北市、臺北市、基隆市、桃園市、桃園縣)
  - 中部地區(苗栗縣、臺中市、彰化縣、南投縣)
  - 南部地區(雲林縣、嘉義縣、嘉義市)
  - 東部地區(臺南市、高雄市、屏東縣)
  - 東部地區(臺東縣、花蓮縣)

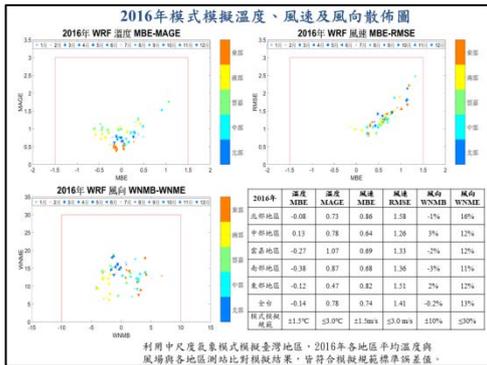
	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Grid Size	91 X 91	169 X 166	223 X 223	223 X 223
DDA	Yes	Yes	Yes	No

### 2016年WRF 氣象模擬定量性能評估

測站	溫度性能指標		風速性能指標		風向性能指標	
	MBE	MAGE	MBE	RMSE	WNMB	WNME
板橋	0.0	0.5	0.4	1.3	2.0%	14%
遠東	-0.1	0.4	1.0	1.7	-0.3%	14%
新莊	1.2	1.2	0.8	1.6	-11.0%	25%
臺北	0.2	1.1	0.5	1.1	0.5%	15%
竹子湖	0.4	0.5	1.2	2.0	3.9%	21%
基隆	-0.4	0.7	0.3	1.1	3.0%	11%
宜蘭	0.0	0.4	0.6	1.0	2.6%	11%
蘇澳	-0.7	0.8	0.5	1.2	2.2%	18%
宜蘭	0.0	0.6	0.1	0.9	1.4%	11%
臺南	0.1	1.1	0.6	0.9	-6.4%	12%
嘉義	0.2	1.2	0.1	0.9	1.6%	9%
高雄	-0.1	0.6	0.7	1.2	-3.0%	11%
屏東	-0.1	1.1	0.6	1.2	-8.1%	12%
臺中	0.7	1.1	0.7	1.1	2.5%	11%
阿里山	1.0	1.3	0.6	1.1	10.2%	27%
大武	-0.3	0.7	0.7	1.3	3.3%	11%
高雄	2.4	2.5	-0.4	1.7	-3.1%	11%
新竹	0.0	0.8	1.9	2.6	-0.5%	13%
基隆	-0.7	0.8	1.2	2.0	-2.1%	15%
鹿港	-0.1	0.4	0.7	1.3	2.7%	11%
蘇澳	1.0	1.1	-0.4	2.0	0.9%	10%
日月潭	0.3	1.1	0.2	0.8	3.5%	22%
嘉義	0.1	0.5	1.1	1.9	2.9%	12%
鹿港	-0.1	0.7	0.4	1.2	4.0%	10%
屏東	-0.2	0.5	0.6	1.4	0.3%	11%
屏東	0.2	0.9	0.5	1.4	0.8%	13%
Criteria	1.5-1.5	3.0	1.5-1.5	3.0	10.0%-10.0%	30%
合格率	90%	90%	100%	92%	100%	100%

模擬氣象場對各模式模擬結果的觀測站數百分之六十以上之觀察





## CMAQ模式

### CMAQ模式多層次網格式圖

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Vertical Layer	45	45	45	45
Grid Size	91 × 91	166 × 169	223 × 223	223 × 223
FDDA	Yes	Yes	Yes	No
Land use	20	20	20	20
PBL	YSU	YSU	YSU	YSU
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Vertical Layer	6	15	15	15
Grid Size	70 × 80	70 × 80	70 × 80	90 × 135
Aerosol Mod	Aero6	Aero6	Aero6	Aero6
Chemical	CB05	CB05	CB05	CB05

模式模擬採用的設定基準

### Models-3/CMAQ模式模擬性能評估結果

環保署2015年公告之模式模擬性能評估規範

- 模擬PM<sub>2.5</sub>時，需同時比較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
- 模擬臭氧時，需同時比較臭氧、NO<sub>2</sub>及NMHC濃度之模擬結果與觀測值

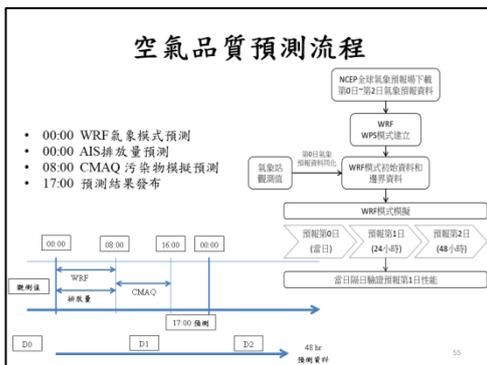
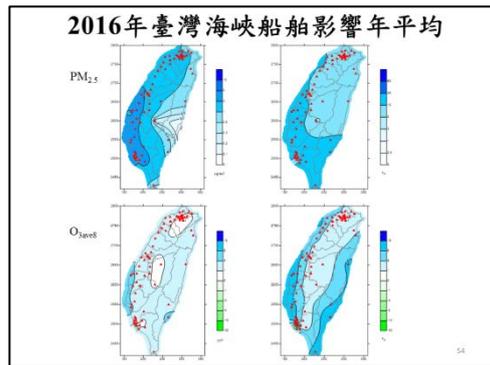
項目	MFB	MFE	R值
PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	±3.5%	<55%	0.50
SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub>	±6.5%	<85%	0.45

- MFB: 配對值分數偏差
- MFE: 非配對峰值常化偏差
- MFE: 配對值絕對分數偏差
- NB: 配對值常化偏差
- R: 相關係數
- MNE: 配對值絕對常化誤差

符合標準值之測站數須達到該模擬區域範圍內測站數百分之六十以上

### 2016年細懸浮微粒模擬性能評估結果

全年	MFB	符合率	MFE	符合率	R	良好率
PM <sub>2.5</sub>	0.2%	92.0%	45.7%	100.0%	0.746	100.0%
北部空品區	0.3%	83.3%	49.0%	83.3%	0.700	100.0%
竹苗空品區	2.4%	100.0%	39.9%	100.0%	0.777	100.0%
中部空品區	-11.1%	90.9%	37.7%	100.0%	0.769	100.0%
雲嘉南空品區	16.6%	92.3%	45.0%	86.7%	0.775	100.0%
宜蘭空品區	18.5%	50.0%	41.1%	50.0%	0.636	100.0%
花蓮空品區	-20.3%	66.7%	44.2%	66.7%	0.663	100.0%
全台	-0.3%	92.3%	44.7%	90.4%	0.768	100.0%
SO <sub>2</sub>	-26.0%	100.0%	51.2%	100.0%	0.525	92.0%
北部空品區	-16.7%	100.0%	49.4%	100.0%	0.544	83.3%
竹苗空品區	-23.0%	81.8%	57.8%	50.9%	0.488	90.9%
中部空品區	-36.3%	100.0%	56.3%	100.0%	0.473	90.9%
雲嘉南空品區	-5.8%	86.7%	59.1%	86.7%	0.514	93.3%
宜蘭空品區	-43.5%	50.0%	51.8%	50.0%	0.452	50.0%
花蓮空品區	-59.4%	66.7%	69.2%	33.3%	0.560	66.7%
全台	-24.2%	90.4%	58.3%	91.8%	0.529	89.2%
NO <sub>2</sub>	-23.4%	92.0%	41.2%	100.0%	0.615	92.0%
北部空品區	4.5%	100.0%	32.4%	100.0%	0.662	100.0%
竹苗空品區	9.5%	100.0%	32.8%	100.0%	0.752	100.0%
中部空品區	3.4%	100.0%	27.9%	100.0%	0.742	100.0%
雲嘉南空品區	20.7%	93.3%	44.2%	93.3%	0.773	93.3%
宜蘭空品區	-16.7%	100.0%	37.0%	100.0%	0.588	50.0%
花蓮空品區	-49.9%	66.7%	72.5%	66.7%	0.579	66.7%
全台	-4.8%	93.2%	38.0%	97.3%	0.671	90.4%



### 結論(一)

- 排放量預測係數於特殊節日如春節期間與端午節以及颱風警報發布時啟動修正原本預設之係數。
- 排放量實際推估與預測結果，第二天誤差約在10%以內，絕對誤差則在30%左右。
- 部分船隻會關閉AIS系統，導致與港口船舶進出港記錄有所出入，未來可透過進出港記錄等資訊改善勞氏資料庫抓取之可用率，以精進排放量之計算。
- CMAQ性能評估逐月結果中，花蓮空品區有明顯低估之情形，由於花蓮空品區本身污染物濃度並不高，性能評估結果低估原因研判主要為境外污染的影響。

## 結 論(二)

- 依據2013年與2016年AIS資料顯示，航行於海上之船舶引擎功率約在35GW~40 GW之間。
- AIS推估2016年臺灣周遭海域船舶空氣污染物排放量，其中NOx、SOx及PM依序為1,088,681噸、705,843噸及99,756噸；而五大港口之港內排放量依序為4,454噸、1,015噸及147噸，港外20海浬則依序為33,732噸、18,618噸及2,639噸。
- TEDS10 推估2016年全國污染物排放量，其中NOx、SOx及PM依序為389,920噸、120,694噸及363,545噸；而五大港口之港內排放量依序為12,450噸、15,718噸及1,581噸，港外20海浬則依序為10,633噸、7,899噸及1,118噸。

57

## 建 議

- 落實船舶AIS系統，以增加AIS原始資料之可信度。
- 可透過實際擁有的船舶進出港資料，更新勞氏資料庫，以確保船舶基本參數可供應用。
- 可透過其他計畫、研究，發展船舶排放污染物之本土化係數。
- 船舶航行時使用使用低硫油，以降低硫氧化物的產生。

58

***THANKS FOR  
YOUR ATTENTION***

59

## 附錄四 工作會議記錄



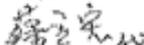
# 三月工作會議

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「MOTC-IOT-108-H2DB001」建立即時氣象模組及船舶排放之三種空氣品質模擬系統」

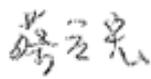
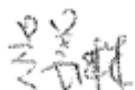
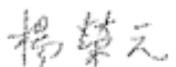
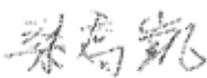
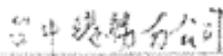
二、時間：民國 108 年 3 月 4 日(星期一)下午 3:00

三、地點：本中心 3 樓會議室

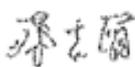
四、主席：朱金元主任 

記錄：蔣敏玲

五、出席：

單位	簽名
本所港研中心	  
合作研究單位： 國立成功大學	 
行政院環境保護署	
交通部航港局	
臺灣港務股份有限公司	 

景丰公司







討論事項：

(一) 行政院環境保護署：

1. 本研究模擬邊界條件使用方式為何？各模式模擬範圍是否也採用船舶排放量？
2. 如何驗證本研究船舶排放量結果？

(二) 交通部航港局：

1. 航港局於官網上有公告各航務中心轄區，建議可參考修改排放量之區域分布。

(三) 本所港研中心：

1. 為利後續研提改善空污短期因應對策，請思考海域分區是否調整。
2. 報告中之「預報」用詞，請統一改成「預測」。
3. 春節期間之排放係數，請再輔以數據於報告中撰文說明。
4. 有關協辦事項提供 AIS 資料部份，本所將配合辦理。

會議結論：

1. 請於下次工作會議提出海域分區如何調整之構想，再行討論定案。
2. 排放係數未來可再思考如何精進，如 machine learning 等。

# 四月工作會議

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「MOTC-IOT-108-H2DB001「建立即時氣象模擬及船舶排放之三維空氣品質模擬系統」

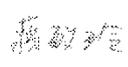
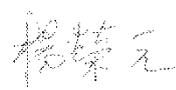
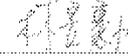
二、時間：民國 108 年 4 月 8 日(星期一)下午 3:30

三、地點：本中心 3 樓會議室

四、主席：朱金元主任 

記錄：蔣敏玲

五、出席：

單位	簽名
本所港研中心	 
合作研究單位： 國立成功大學	 
行政院環境保護署	   
交通部航港局	
臺灣港務股份有限公司	



討論事項：

1. 討論本月工作進度與執行情形。
2. 討論海域分區之劃定。
3. 討論排放係數之精進。
4. 討論颱風因素對排放係數之影響，及後續精進方向。

會議結論：

1. 請依本次討論定案之海域分區，進行後續模擬分析。
2. 春節、端午節、中秋節等特殊節日之排放係數說明，請納入後續報告書中。

# 五月工作會議

簽到表

單位	簽名
本所港研中心	蔣敏玲
合作研究單位： 國立成功大學	吳善財 楊榮元
行政院環境保護署	
交通部航港局	
臺灣港務股份有限公司	臺中港務分公司 洪國鑫



討論事項：

1. 討論本月工作進度與執行情形。
2. 討論截至 108 年 5 月 3 日之排放量預測結果。
3. 以 2013 年及 2016 年實例討論颱風因素對排放係數之影響，及後續精進方向。
4. 討論 WRF 氣象模式設定與性能評估結果。
5. 討論本研究與環保署 TEDS10 對港口排放量之差異比較。

會議結論：

1. 有關基隆港與臺北港之港口半徑 20 海浬範圍有重疊一節，請再釐清如何劃分，避免重疊。
2. 有關本研究與環保署 TEDS10 對港口排放量之差異，請再確認可能原因及相關假設條件之差異。

# 六月工作會議

簽到表

單位	簽名
本所港研中心	蔣正宏 蔣淑玲
合作研究單位： 國立成功大學	吳利 楊榮元
行政院環境保護署	
交通部航港局	
臺灣港務股份有限公司	凌曉霞



討論事項：

1. 討論本月工作進度與執行情形。
2. 討論截至 108 年 6 月 4 日之排放量預測結果。
3. 以 2013 年及 2016 年實例討論颱風因素對排放係數之影響。
4. 討論本研究與環保署 TEDS10 對港口排放量之差異比較。
5. 討論 CMAQ 模式性能評估結果，及花東空品區低估之可能原因。

會議結論：

1. 港務公司之 TPNet 可查詢進出港船舶之前一港及次一港資訊，請再思考如何運用此資訊改善船舶排放量預測。
2. CMAQ 模式性能評估結果顯示花東空品區偏向低估，請再探討可能原因。

# 八月工作會議

討論事項：

1. 討論本月工作進度與執行情形。
2. 討論截至 108 年 8 月 14 日之排放量預測結果。
3. 以 2013 年及 2016 年實例討論船種分布與引擎功率之影響。
4. 討論聖誕節至新年期間等特殊節日之排放係數影響，及其討論船種分布與引擎功率之影響。
5. 瞭解 CMAQ 操作與硬體設備。

會議結論：

1. 港務公司之 TPNet 之船舶進出港等資訊，請再思考如何運用此資訊改善船舶排放量預測。
2. 本年度教育訓練預定於港研中心舉行，日期另訂。

# 九月工作會議

## 簽到表



單位	簽名
本所港研中心	李俊穎 蔣紅玲
合作研究單位： 國立成功大學	吳美祥 楊榮元
行政院環境保護署	陳友珍
交通部航港局	
臺灣港務股份有限公司	白粉公司 凌國鑫

討論事項：

1. 討論本月工作進度與執行情形。
2. 討論截至 108 年 9 月 4 日之排放量預測結果。
3. 討論排放量精進、進出口船舶數比較等議題。
4. 簡介歷年計畫重點與成果。

會議結論：

1. 已發文向港務公司索取 2016 年船舶進出港等資訊，請研究團隊再思考如何運用此資訊改善 AIS 與勞氏資料庫比對之可使用率。
2. 請研究團隊再確認 AIS 資訊是否包含漁船、定置漁網等，以提升 AIS 資料辨識之可使用率。

# 十月工作會議

## 簽到表

單位	簽名
本所港研中心	李修穎 蔣淑玲
合作研究單位： 國立成功大學	吳美琳 楊榮元
行政院環境保護署	請假
交通部航港局	
臺灣港務股份有限公司	劉幸婷



討論事項：

3. 討論本月工作進度與執行情形。
4. 討論截至 108 年 10 月 3 日之排放量預測結果。
5. 討論 AIS 接收與港務公司提供之進出港船舶數比較。

會議結論：

1. 請再詢港務公司資訊處索取 2016 年各港船舶進出港等資訊，請研究團隊再思考如何運用此資訊改善 AIS 與勞氏資料庫比對之可使用率。
2. 請依合約於 10 月 25 日前提送期末報告初稿，預訂於 11 月上旬辦理期末報告審查會議，11 月 11 日辦理教育訓練。

## 附錄五 教育訓練簡報



## 教育訓練簽到表

### 「建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統」計畫教育訓練

主辦單位：交通部運輸研究所港灣技術研究中心

協辦單位：國立成功大學(環境工程學系)

時 間：108年11月27日(星期三)下午2時至4時

地 點：本所港研中心2樓簡報室(臺中市梧棲區中橫十路2號)

簽到表

編號	服務機關	姓名	職稱	身分證字號 (須終身學習時數者才填)	出席人員簽名
1	臺灣港務股份有限公司 臺中港務分公司	洪國鑫	助理工程師		
2	臺灣港務股份有限公司 高雄港務分公司	張憲章 6-██████-935	處長	張憲章	張憲章
3	臺灣港務股份有限公司 基隆港務分公司	葉家璋	助理工程師		葉家璋
4	環保署空保處	駱易琳	環境技術師		駱易琳
5	景丰科技	林昱勳	工程師		林昱勳
6	航港局 中部航務中心	林連志	技士		林連志
7	運研所	蔡世瑋	助理研究員		蔡世瑋
8	"	蔣敏玲	研究員		蔣敏玲
9	"	許義宏	副研究員		許義宏
10	"	劉清松	副研究員		劉清松

11	劉明鑫	劉明鑫	助理研究員		劉明鑫
12	運研所	林珂如	研究助理		林珂如
13	"	謝佳毓	研究助理		謝佳毓
14	"	李麗雯	研究助理		李麗雯
15	"	黃茂信	研究員		黃茂信
16	"	蘇青和	科長		蘇青和
17	"	李俊穎	科長		李俊穎
18	成大	吳善林	教授		吳善林
19	成大	楊榮元	研究助理		楊榮元
20	成大	賴力璋	研究員		賴力璋
21					
22					
23					
24					



會議現場照片一



會議現場照片二

# 空污模式介紹與 CMAQ 對本研究之應用

## 空氣品質模式

吳義林  
國立成功大學環境工程學系

2019年11月27日

1

## 大綱

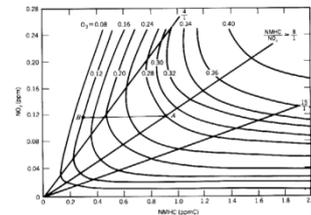
- 前言：空氣污染簡介
- 空氣品質模式
- 高斯擴散模式
- 三維網格模式
- CMAQ模擬結果
- CMAQ-ISAM模擬結果

## 空氣污染物之分類

原生性（一次）污染物：大氣中污染物為直接由污染源排放，經由擴散作用傳送者；例如SO<sub>2</sub>、CO，部分之懸浮微粒。

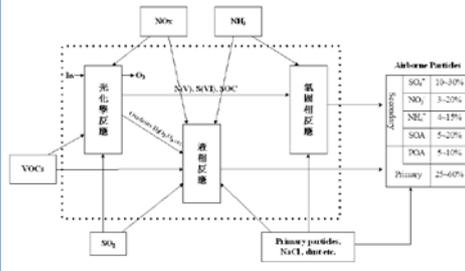
衍生性（二次）污染物：大氣中之污染物為由污染源排放之前驅物，在大氣經由化學反應而形成者；例如臭氧，部分之懸浮微粒。

## Precursors of O<sub>3</sub>: NO<sub>x</sub> and VOCs



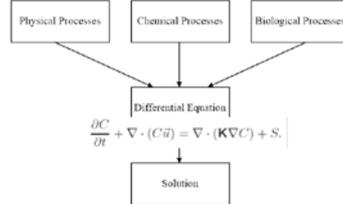
Ozone isopleths used in EKMA approach (from Dodge, 1977a)  
Nonlinear relationship between O<sub>3</sub> and its precursors

## Formation Pathways for the Atmospheric Aerosol

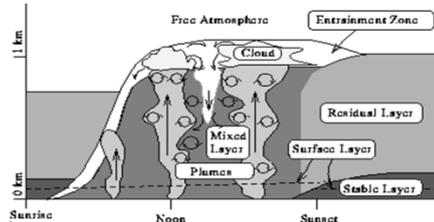


## Air Quality Models

Air quality models use mathematical and numerical techniques to simulate the physical and chemical processes that affect air pollutants as they disperse and react in the atmosphere. (<https://www.epa.gov/scr/am>)

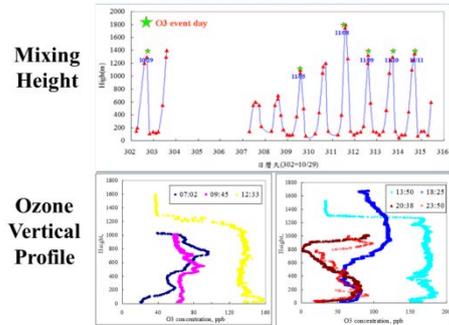


## Atmospheric Boundary Layer



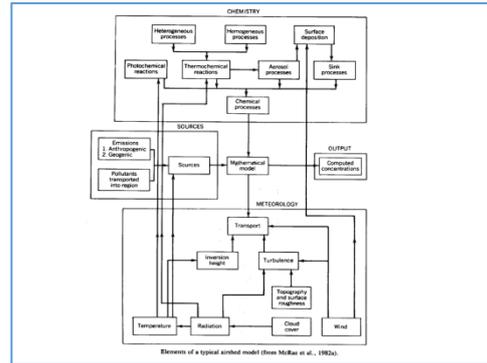
Stull (1988) defines the atmospheric boundary layer as "the part of the troposphere that is directly influenced by the presence of the earth's surface, and responds to surface forcings with a time scale of about an hour or less."

## Diurnal Variations

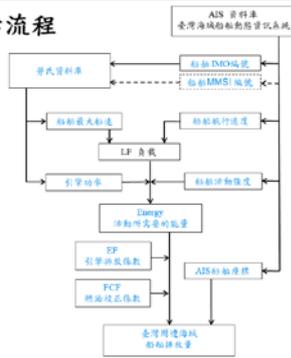


## Types of Air Quality Models

- Dispersion Models
  - A. Gaussian plume model
  - B. Box model
  - C. Lagrangian model
  - D. Three-dimensional Grid model
- Receptor Models
  - A. Principle Component Analysis
  - B. Chemical Mass Balance
  - C. Positive Matrix Factorization



## 排放量推估流程



## 船舶排放量推估

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF$$

E: 引擎的排放量(g)  
 Energy: 所需要的能量(kW-h)  
 EF: 排放係數(g/kW-h)  
 FCF: (HFO)燃料校正係數

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act}$$

MCR: 最大引擎動力(kW)  
 LF: 負載係數  
 Act: 活動量(hr)

$$\text{LF} = \left( \frac{\text{AS}}{\text{MS}} \right)^3$$

負載 20% ~ 80%  
 AS: 實際船速(節)  
 MS: 最大船速(節)

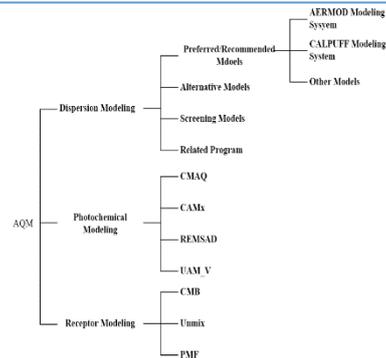
Field	Description
IMO_Number	(IMO Number) 國際海事組織編號
Call_Sign	(Call Sign) 呼號
MMSI	(MMSI, Maritime Mobile Service Identification Code) 海上行動業務識別碼
Navigation_Status	(Navigation status) 航行狀態
SOG	(Speed Over Ground - SOG) 航速
Length	長度
Latitude	緯度
Ship_and_Crew_Type	(Type of ship) 船舶類型
Reference_Position_A	A-B = 船長
Reference_Position_B	
Round_Slow	此單船速換算係數

## Air Quality Models

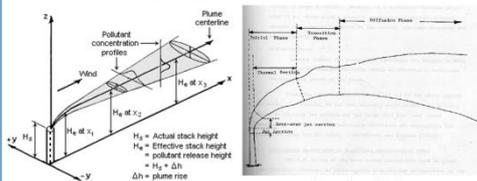
**Dispersion Modeling** - These models are typically used in the permitting process to estimate the concentration of pollutants at specified ground-level receptors surrounding an emissions source.

**Photochemical Modeling** - These models are typically used in regulatory or policy assessments to simulate the impacts from all sources by estimating pollutant concentrations and deposition of both inert and chemically reactive pollutants over large spatial scales.

**Receptor Modeling** - These models are observational techniques which use the chemical and physical characteristics of gases and particles measured at source and receptor to both identify the presence of and to quantify source contributions to receptor concentrations



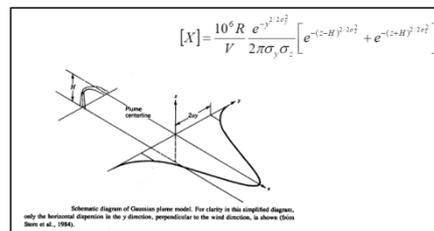
## Gaussian Plume



Gaussian plume dispersion from a continuous and steady stack emission of inert species into a uniform and stationary domain.

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi U r} \exp\left(-\frac{y^2}{4r}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4r}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{4r}\right) \right]$$

## Gaussian Plume Model



ISTST3  
 AERMOD

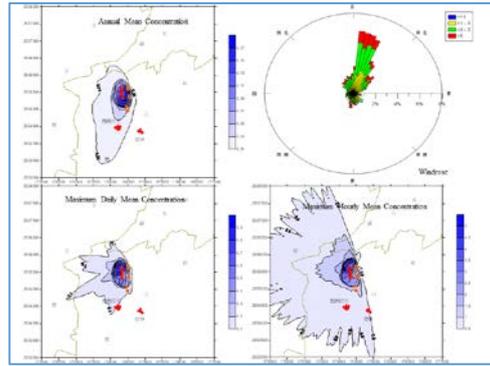
## Pasquill Dispersion Classes

Insolation/Cloud Cover		Surface Wind Speed (m/s)				
		<2.0	2 to <3	3 to <5	5 to <6	≥6
Day	Strong Insolation	A	A-B	B	C	C
	Moderate Insolation	A-B	B	B-C	C-D	D
Day or Night	Slight Insolation	B	C	C	D	D
	Overcast	D	D	D	D	D
Night	Thin overcast or ≥0.5 cloud cover	—	E	D	D	D
	≥0.4 cloud cover	—	F	E	D	D

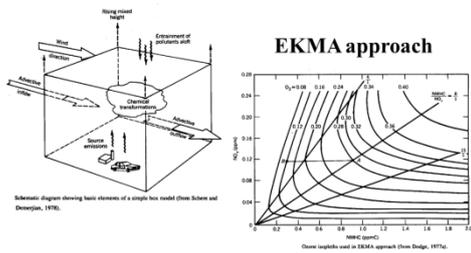
Notes: 1. Strong insolation corresponds to a solar elevation angle of 60° or more above the horizon. Slight insolation corresponds to a solar elevation angle of 15° to 35°.

2. Pollutants emitted under clear nighttime skies with winds less than 2.0 m/s, more recently defined to be class G, may be subject to unstable meandering which renders the prediction of concentrations at downwind locations unreliable.

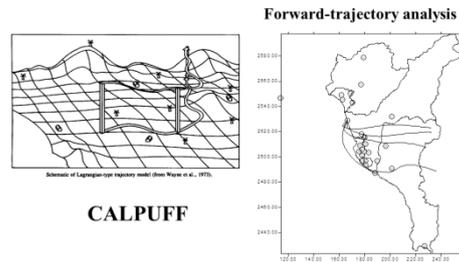
A: very unstable; B: unstable; C: slightly unstable; D: neutral; E: slightly stable; F: stable; G: very stable



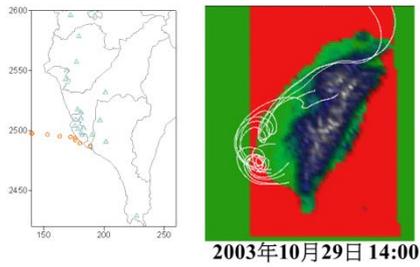
## Box Model



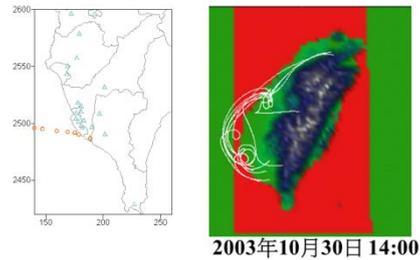
## Lagrangian Model



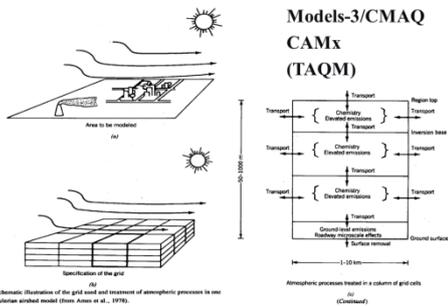
## Backward-trajectory Analysis



## Backward-trajectory Analysis



## Three-dimensional Grid Model



## Horizontal Coordinates

Coordinate	Units	Conversion	Map Scale (m)	Note
lat-long	NA	NA	NA	( $\lambda^2, \phi^2$ ) along latitude in degrees
Lat/long	$F_x = \lambda, F_y = \phi$	lat/long determine the projection onto meridian	$m = \frac{a \cos(\phi)}{\cos(\lambda)}$	( $x^2, y^2$ ) are in meters
Merisor	$F_x = \phi, F_y = \lambda$	lat/long of coordinate origin within the tangent circle	$m = \frac{a \cos(\phi)}{\cos(\lambda)}$	( $x^2, y^2$ ) are in meters
Stereographic	$F_x = \phi, F_y = \lambda$	lat/long of the point of tangency	$m = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)}$	( $x^2, y^2$ ) are in meters
UTM	$F_x = \text{UTM zone}, F_y = \text{UTM zone}$	UTM zone	NA	( $x^2, y^2$ ) are in meters

## Time Independent Terrain-Influenced Coordinates

### Terrain-influenced Height coordinates

$$\sigma_z = \frac{z - z_{ref}}{H - z_{ref}} \quad \sigma_r = \frac{r - r_{ref}}{H - r_{ref}}$$

Accounts for topography  
Time independent and intuitive  
Often used for non-hydrostatic atmosphere

### Terrain-influenced Reference Pressure

$$\sigma_p = \frac{p - p_{ref}}{p_{ref} - p_{ref}} \quad \text{Sigma-z with logarithmic transformation}$$

## Chemical Mechanisms

- Explicit chemical mechanism: list of all reactions of the individual primary and secondary pollutants
- Lumped chemical mechanism

The CBM (carbon bond mechanism) formulation divides the carbon atoms of the organics into four classes based on their chemical bonding:

- Single-bonded carbon atoms (e.g., alkanes) represented as PAR.
- Fast doubly bonded atoms (e.g., olefins, except ethylene) represented as OLE.
- Slow doubly bonded atoms (e.g., aromatics and ethylene) represented as ARO.
- Carbonyl carbon atoms (i.e., aldehydes and ketones) represented as CAR.

Portion of an Explicit Chemical Mechanism

Reaction	Rate Constant <sup>a</sup>
<b>Inorganic Reaction</b>	
(1) NO <sub>2</sub> + hv → NO + O( <sup>1</sup> P)	0.25-0.45 min <sup>-1</sup>
(2) O( <sup>1</sup> P) + O <sub>2</sub> → O <sub>3</sub>	2.4 × 10 <sup>8</sup>
(3) O <sub>3</sub> + NO → NO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2.7 × 10 <sup>8</sup>
(4) O( <sup>1</sup> P) + NO <sub>2</sub> → NO + O <sub>2</sub>	1.4 × 10 <sup>8</sup>
(5) O <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> → NO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	4.2 × 10 <sup>8</sup>
<b>Alkyl Radical Reaction and Peroxide Formation</b>	
(6) CH <sub>3</sub> CHO + hv → CH <sub>3</sub> CO + H	k
(7) CH <sub>3</sub> CO + OH → CH <sub>3</sub> COOH + H <sub>2</sub> O	2.4 × 10 <sup>8</sup>
(8) CH <sub>3</sub> CO + NO → CH <sub>3</sub> COONO	1.1 × 10 <sup>8</sup>
<b>Alkyl Radical Chemistry</b>	
(9) CH <sub>3</sub> COOH + OH → CH <sub>3</sub> COO + H <sub>2</sub> O	2.5 × 10 <sup>8</sup>
(10) CH <sub>3</sub> COOH + hv → CH <sub>3</sub> CO + H <sub>2</sub> O	r
(11) CH <sub>3</sub> COOH + hv → CH <sub>3</sub> CO + H <sub>2</sub> O + CO	r
<b>Toluene Abstraction Pathway</b>	
(12) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + OH → C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHOH + H <sub>2</sub> O	7.5 × 10 <sup>8</sup>
(13) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + NO → C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHOONO	8.6 × 10 <sup>8</sup>
(14) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + hv → C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + H	1.0 × 10 <sup>8</sup>
<b>Toluene Addition Pathway</b>	
(15) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + OH → C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHOH	8.7 × 10 <sup>8</sup>
(16) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + O <sub>2</sub> → C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHOONO	1.0 × 10 <sup>8</sup>
(17) C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO + NO → C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHOONO	4.4 × 10 <sup>8</sup>
<b>Carbonyl and Alkyl Radical Chemistry</b>	
(18) CH <sub>3</sub> CHO + OH → CH <sub>3</sub> CHOH	4.4 × 10 <sup>8</sup>
(19) CH <sub>3</sub> CHO + O <sub>2</sub> → CH <sub>3</sub> CHOONO	1.0 × 10 <sup>8</sup>

Source: Linn and Seinfeld, 1986.  
<sup>a</sup>Units of (ppm<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>) unless otherwise noted.  
<sup>b</sup>r = k × 10<sup>-10</sup> s<sup>-1</sup>.  
<sup>c</sup>r = k × 10<sup>-10</sup> s<sup>-1</sup>.

A Portion of the Carbon Bond Mechanism

Reaction	Rate Constant (ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )
NO <sub>2</sub> + hv → NO + O	k <sub>1</sub> <sup>a</sup>
O + O <sub>2</sub> (+ M) → O <sub>3</sub> (+ M)	2.08 × 10 <sup>-3</sup>
O <sub>3</sub> + NO → NO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	25.2
O + NO <sub>2</sub> → NO + O <sub>2</sub>	1.34 × 10 <sup>8</sup>
O <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> → NO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	5 × 10 <sup>-2</sup>
NO <sub>2</sub> + NO → NO <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub>	2.5 × 10 <sup>8</sup>
NO <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → 2HNO <sub>3</sub>	2.0 × 10 <sup>-3</sup>
HNO <sub>2</sub> + hv → NO + OH	0.19 k <sub>1</sub>
NO <sub>2</sub> + OH → HNO <sub>3</sub>	1.4 × 10 <sup>8</sup>
NO + OH → HNO <sub>2</sub>	1.4 × 10 <sup>8</sup>
CO + OH → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	4.5 × 10 <sup>8</sup>
OLE + OH → CAR + CH <sub>2</sub> O	3.8 × 10 <sup>8</sup>
PAR + OH → CAR + CH <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> O	1.3 × 10 <sup>8</sup>
ARO + OH → CAR + CH <sub>2</sub> O	8 × 10 <sup>8</sup>
OLE + O → HC(O)O <sub>2</sub> + CH <sub>2</sub> O	5.3 × 10 <sup>3</sup>
PAR + O → CH <sub>2</sub> O + OH	20
ARO + O → HC(O)O <sub>2</sub> + CH <sub>2</sub> O	37
ARO + NO <sub>2</sub> → products (aerosol)	1.0 × 10 <sup>2</sup>
OLE + O <sub>2</sub> → HC(O)O <sub>2</sub> + HCHO + OH	1.5 × 10 <sup>-2</sup>
CAR + OH → HC(O)O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	1.0 × 10 <sup>8</sup>
CAR + hv → αHC(O)O <sub>2</sub> + αHO <sub>2</sub> + (1 - α)CO	6.0 × 10 <sup>-3</sup> k <sub>1</sub>

Source: Whittem and Hago, 1977; Whittem et al., 1980.  
<sup>a</sup>Varies with light intensity.

## CB-4 Mechanism

36 species, 93 reactions and 11 photolytic reaction

PAR (paraffins): single-bonded carbon atom  
OLE (olefins): slow double-bonded carbon atom  
ETH: fast double-bonded carbon atom  
TOL: slow aromatics  
XYL: fast aromatics  
FORM: HCHO  
ALD2: other aldehyde  
ISOP: isoprene  
NR

## CB05

The core CB05 mechanism has 51 species and 156 reactions.

- Updated rate constants based on recent (2003–2005) IUPAC and NASA evaluations.
- An extended inorganic reaction set for urban to remote tropospheric conditions.
- NO<sub>x</sub> recycling reactions to represent the fate of NO<sub>x</sub> over multiple days.
- Explicit organic chemistry for methane and ethane.
- Explicit methylperoxy radical, methyl hydroperoxide and formic acid.
- Lumped higher organic peroxides, organic acids and peracids.
- Internal olefin (R-HC=CH-R) species called IOLE.
- Higher aldehyde species ALDX making ALD2 explicitly acetaldehyde.
- Higher peroxyacyl nitrate species from ALDX called PANX.
- Lumped terpene species called TERP.
- Optional mechanism extension for reactive chlorine chemistry.
- Optional extended mechanism with explicit reactions for air-toxics

Table 2-1. Species names for the CB05 core mechanism.

Species Name	Description	Number of Carbons
NO	Nitric oxide	0
NO2	Nitrogen dioxide	0
O3	Ozone	0
O	Oxygen atom in the O( <sup>1</sup> P) electronic state	0
O(D)	Oxygen atom in the O( <sup>1</sup> D) electronic state	0
OH	Hydroxyl radical	0
H2O2	Hydroperoxy radical	0
H2O	Hydrogen peroxide	0
NO3	Nitrate radical	0
NO2S	Dinitrogen pentoxide	0
HONO	Nitrous acid	0
HNO3	Nitric acid	0
PNA	Peroxyacetic acid (HNO <sub>3</sub> )	0
CO	Carbon monoxide	1
FORM	Formaldehyde	1
ALD2	Acetaldehyde	2
C2O3	Acetylperoxy radical	2
PAN	Peroxyacetyl nitrate	2
ALDX	Propionaldehyde and higher aldehydes	2
CXO3	C3 and higher acylperoxy radicals	2
PANX	C3 and higher peroxyacyl nitrates	2
XO2	NO to NO <sub>2</sub> conversion from alkylperoxy (RO <sub>2</sub> ) radical	0
XO2N	NO to organic nitrate conversion from alkylperoxy (RO <sub>2</sub> ) radical	0
NTR	Organic nitrate (RNO <sub>2</sub> )	1
ETOH	Ethanol	2

Species Name	Description	Number of Carbons
CH4	Methane	1
MEO2	Methylperoxy radical	1
MEOH	Methanol	1
MEPX	Methylhydroperoxide	1
FAO2	Formic acid	1
ETHA	Ethane	2
ROOH	Higher organic peroxide	1
AAO2	Acetic and higher carboxylic acids	2
FAO2	Peroxyacetic and higher peroxyacetic acids	2
PAR	Paraffin carbon bond (C-C)	1
ROR	Secondary alkoxy radical	0
ETH	Ethene	2
OLE	Terminal olefin carbon bond (R <sub>1</sub> C=C)	2
IOLE	Internal olefin carbon bond (R <sub>1</sub> C=C-R)	4
ISOP	Isoprene	5
ISDP	Isoprene product (lumped methacrolein, methyl vinyl ketone, etc.)	4
TERP	Terpene	10
TOL	Toluene and other monoalkyl aromatics	7
XYL	Xylene and other polyalkyl aromatics	8
CRES	Cresol and higher molecular weight phenols	8
TO2	Toluene-hydroxyl radical adduct	7
OPEN	Aromatic ring opening product	4
CRO	Methylperoxy radical	0
MGLY	Methylglyoxal and other aromatic products	3
SO2	Sulfur dioxide	0
SULF	Sulfuric acid (gaseous)	0



### 模式模擬性能評估

環保署2015年公告之模式模擬性能評估規範，模擬PM<sub>2.5</sub>時，需同時比較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。

微粒	項目	MFB	MFE	R值
	PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	±35%	<55%	0.50
SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub>	±65%	<85%	0.45	

- MFB：配對值分數偏差
- MFE：配對值絕對分數偏差
- R：相關係數

符合標準值之測站數須達到該模擬區域範圍內總測站數百分之六十以上。

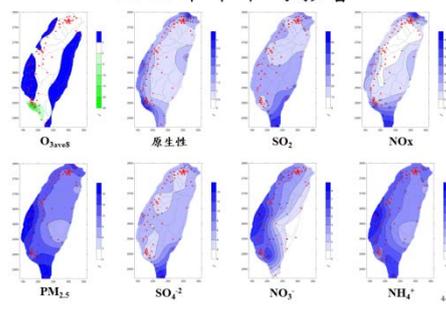
### 2013年細懸浮微粒模擬性能評估結果

污染物	地點	MFB	符合站數比	MFE	符合站數比	R	符合站數比
		PM <sub>2.5</sub>	1.1%	100.0%	40.9%	100.0%	0.67
	北部空品區	-1.1%	100.0%	40.9%	100.0%	0.67	100.0%
	中部空品區	-1.8%	100.0%	40.0%	100.0%	0.71	100.0%
	中部空品區	6.1%	100.0%	39.7%	100.0%	0.70	100.0%
	中部空品區	0.8%	100.0%	39.9%	100.0%	0.71	100.0%
	中部空品區	-0.9%	85.7%	41.6%	85.7%	0.70	100.0%
	中部空品區	-2.8%	85.0%	42.3%	100.0%	0.64	100.0%
	中部空品區	-33.8%	33.3%	53.4%	66.7%	0.59	100.0%
	中部空品區	-4.3%	94.4%	41.1%	94.4%	0.75	100.0%
	中部空品區	-11.7%	96.0%	40.2%	100.0%	0.67	100.0%
	中部空品區	-11.2%	100.0%	40.7%	100.0%	0.67	100.0%
	中部空品區	11.0%	100.0%	42.8%	100.0%	0.51	81.8%
	中部空品區	6.0%	100.0%	46.7%	100.0%	0.56	100.0%
	中部空品區	10.9%	83.3%	52.1%	83.3%	0.62	73.1%
	中部空品區	-4.4%	90.0%	38.2%	90.0%	0.68	90.0%
	中部空品區	-40.4%	33.3%	61.7%	33.3%	0.66	100.0%
	中部空品區	-16.1%	94.2%	36.4%	94.2%	0.60	82.3%
	中部空品區	-15.5%	100.0%	40.0%	100.0%	0.62	88.9%
	中部空品區	-7.3%	100.0%	36.0%	100.0%	0.58	83.3%
	中部空品區	1.3%	90.0%	38.0%	100.0%	0.75	100.0%
	中部空品區	0.2%	100.0%	32.0%	100.0%	0.60	90.9%
	中部空品區	3.1%	100.0%	44.5%	100.0%	0.71	90.9%
	中部空品區	-29.5%	100.0%	46.2%	100.0%	0.49	40.9%
	中部空品區	-43.7%	66.7%	78.8%	66.7%	0.59	66.7%
	中部空品區	-2.4%	97.3%	39.3%	98.6%	0.68	83.1%

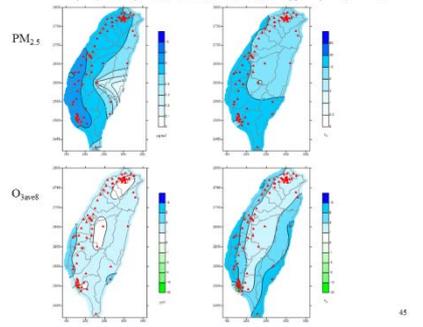
### 2016年細懸浮微粒模擬性能評估結果

PM <sub>2.5</sub>	地點	MFB	符合站數比	MFE	符合站數比	R	及符合比例
		北部空品區	0.2%	92.0%	45.7%	100.0%	0.746
	中部空品區	0.3%	83.3%	49.0%	83.3%	0.709	100.0%
	中部空品區	2.4%	100.0%	39.0%	100.0%	0.777	100.0%
	中部空品區	-11.1%	90.9%	37.7%	100.0%	0.769	100.0%
	中部空品區	16.6%	93.3%	45.0%	86.7%	0.775	100.0%
	中部空品區	18.1%	40.0%	41.1%	40.0%	0.658	100.0%
	中部空品區	-20.3%	66.7%	44.3%	66.7%	0.663	100.0%
	中部空品區	-0.3%	82.2%	44.7%	90.4%	0.708	100.0%
	中部空品區	-26.0%	100.0%	54.2%	100.0%	0.520	92.6%
	中部空品區	-16.7%	100.0%	49.4%	100.0%	0.544	83.3%
	中部空品區	-28.0%	81.8%	57.8%	90.9%	0.488	90.9%
	中部空品區	-38.0%	100.0%	46.3%	100.0%	0.473	60.9%
	中部空品區	-5.4%	86.7%	50.1%	86.7%	0.514	93.3%
	中部空品區	-43.5%	40.0%	51.8%	40.0%	0.442	40.0%
	中部空品區	-59.4%	66.7%	69.2%	33.3%	0.500	66.7%
	中部空品區	-25.2%	90.4%	58.3%	91.8%	0.520	89.2%
	中部空品區	-23.4%	92.0%	41.3%	100.0%	0.615	92.0%
	中部空品區	4.9%	100.0%	30.4%	100.0%	0.662	100.0%
	中部空品區	9.5%	100.0%	32.8%	100.0%	0.752	100.0%
	中部空品區	3.4%	100.0%	27.0%	100.0%	0.742	100.0%
	中部空品區	20.7%	93.3%	44.3%	93.3%	0.772	93.3%
	中部空品區	-19.7%	100.0%	37.0%	100.0%	0.588	60.0%
	中部空品區	-49.0%	66.7%	72.5%	66.7%	0.579	66.7%
	中部空品區	-4.9%	91.2%	38.9%	97.3%	0.671	90.4%

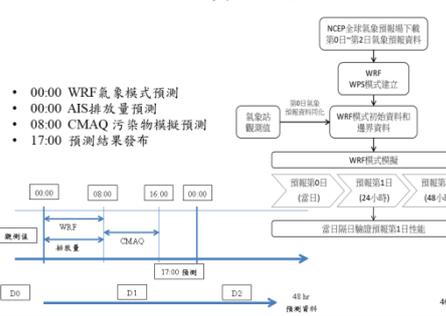
### 2013年年平均影響



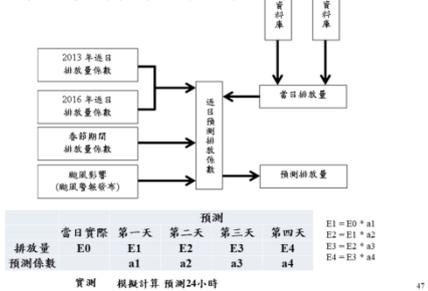
### 2016年臺灣海峽船舶影響年平均



### 空氣品質預測流程



### 排放量預測流程圖



### WRF/CMAQ 運算量與資料量

- 以一個案例月而言，所需要的資料量
  - WRF
    - 大約220G的容量(四層網格)
    - 單獨3km網格，則須85G左右
  - CMAQ
    - 大約1T的容量(四層網格)
    - 單獨3km網格，則須500G左右

### WRF/CMAQ 運算量與資料量(續)

- 以一個案例月而言，所需要的運算量
  - WRF
    - 使用 28 顆實體核心，跑一個案例月，仍須 9 個工作日才能跑完。
  - CMAQ
    - 使用 20 顆實體核心，跑四層網格，需要 2 個工作日才能跑完

### 運算主機

- 最好使用伺服器等級主機，搭配
  - 兩顆以上，具有 16 核心以上，核心時脈可達 2.8GHz 以上等級的 CPU
  - 記憶體至少 96G 以上
  - 具備 10G 網路埠口較佳
  - 使用 Linux 作業系統
  - 若需要同時多個案例月，則須添購多台設備

### 儲存主機

- 最好使用伺服器等級主機，搭配
  - 一顆以上，具有 8 核心以上，核心時脈可達 2.8GHz 以上等級的 CPU
  - 記憶體至少 96G 以上
  - 搭配 RAID6 磁碟陣列，可安插 24 bay 以上的 8T 硬碟較佳，總容量大於 100T。
  - 具備 10G 網路埠口較佳
  - 使用 Linux 作業系統
  - 可提供 NFS 等網路檔案系統協定

*Thanks for Your  
Attentions.*

# WRF 氣象模式介紹

## WRF 中尺度大氣模式

賴力瑋

長榮大學 環境資訊研究中心  
2019年11月27日

### 對大氣物理機制的了解\_空氣如何流動

## Gravity Force

在垂直方向上，重力由垂直壓力梯度力平衡。

空氣由稀薄處移向稠密處

## Pressure Gradient Force

水平方向的壓力造成空氣流動

溫差引起壓力梯度力，空氣將從高壓移動到低壓。

## Coriolis Force

科氏力是由地球自轉引起的一種虛擬力。

地球自轉造成南北向大尺度的空氣流動的偏轉

## Friction Force

摩擦力也是造成氣流偏轉與其中一個原因

## Physics & Chemistry in the Atmosphere

Source: [http://science.larc.nasa.gov/biomass\\_burn/images/appendix.gif](http://science.larc.nasa.gov/biomass_burn/images/appendix.gif)

### 彌補觀測資料的不足(空間、時間上)

環保署測站

氣象局測站

中環研暨行政院環境保護署

## 大氣模式簡介

- ✓ Limitation on Observation data Analysis
- ✓ Lack in Temporal, Spatial resolution
- ✓ Physics in flow dynamics, Continuity

Source: UK MET

### 大氣模式應用預報分析

- Forecasting (integrated in time domain)

氣象萬千

Source: CWB, Taiwan

### 大氣模式可運用領域

- The Most Important is: Applications

### What is the Meteorological Modeling System?

- Based on Primary Equations of Atmospheric Physics
- Go through by numerical methods and computer programming
- Gridded with Geography
- Re-analysis and forecasting
- Global model, mesoscale model, microscale model

### Governing Equations

- The GAS LAW.
- The HYDROSTATIC EQUATION.
- The EQUATION OF CONTINUITY.
- The EQUATION OF MOTION.
- The THERMODYNAMIC EQUATION.
- The CONSERVATION OF MOISTURE.

### Meteorological Modeling Systems

- Global Models
  - GCM (Global Climate Model) / NOAA
  - GFS (Global Forecasting System) / NCEP
  - ECMWF
- Mesoscale Models
  - MM5 (Mesoscale Modeling System, 5<sup>th</sup>), Penn. State/NCAR
  - WRF (Weather Research & Forecasting), /NCAR

### 全球大氣模式 GCM Global Model

http://www.cmap.ox.ac.uk/modelling/Wfaq2.html

### 全球大氣模式與中尺度區域模式相關性

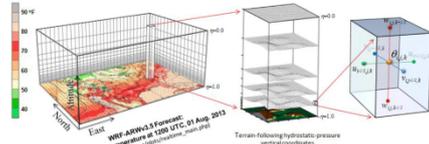
- 全球模式的解析度較低(1°x1°約111公里或0.5°x0.5°)，評估地區性地方需要較高解析度，代替方式為區域大氣模式(RCM)，研究更詳細氣象變化

Image source: F. Giorgi, WMO Bulletin 52(2), April 2008.

### WRF (Weather Research & Forecasting) 中尺度模式架構

## WRF中尺度模式原理

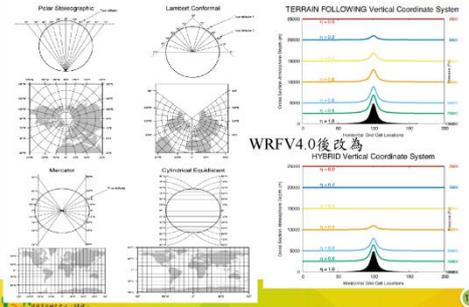
- WRF中尺度模式特點具備複合動力核心，具有彈性及高效率大區域模式。包含隨地形壓力垂直座標和物理和動力學選項(地表模式、微物理參數、積雲化參數、行星邊界層參數)提供不同型態的天氣現象進行模擬。
- 中尺度氣象模式利用WRF進階研究版(Advanced Research WRF, ARW)和非靜力平衡中尺度模式(Nonhydrostatic Mesoscale Model, NMM)進行數值網格計算，範圍在數公尺到數公里。



[http://bioearth.wsu.edu/wrf\\_model.html](http://bioearth.wsu.edu/wrf_model.html)

17

## WRF模式投影與垂直座標系統

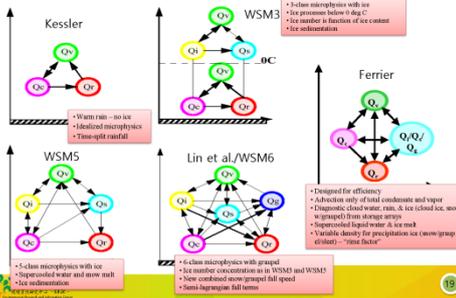


WRFV4.0後改為  
HYBRID Vertical Coordinate System

18

## 微物理參數(Microphysics)

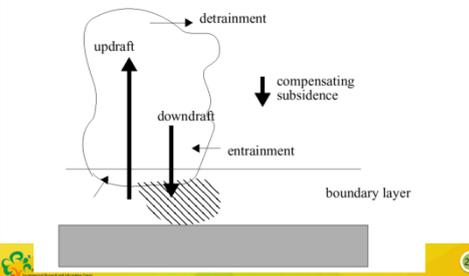
### Illustration of Microphysics Processes



19

## 積雲化參數 (Cumulus Parameterization)

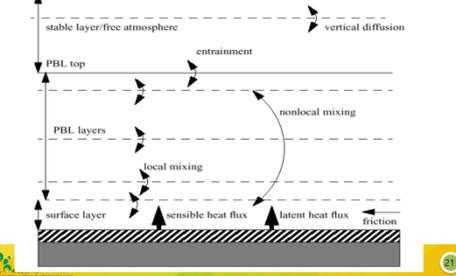
### Illustration of Cumulus Processes



20

## 行星邊界層參數 (Planetary Boundary Layer)

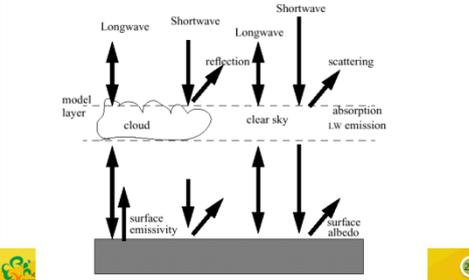
### Illustration of PBL Processes



21

## 輻射參數(Radiation)

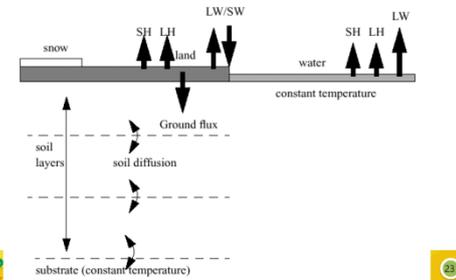
### Illustration of Free Atmosphere Radiation Processes



22

## 地表參數(Surface schemes)

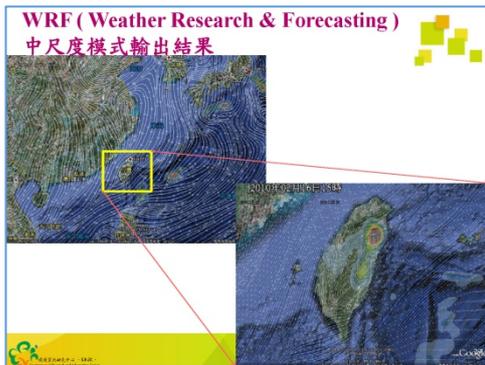
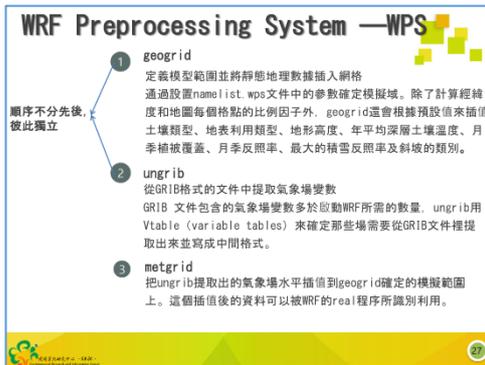
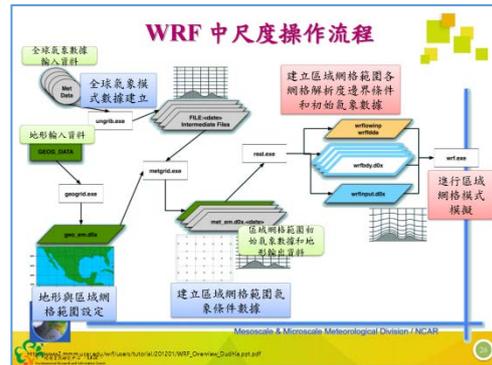
### Illustration of Surface Processes



23

## WRF物理參數選項

物類名稱	可用選項	物類名稱	可用選項
微物理 mp_physics	-0. 4 種微物理參數 -1. Kessler (經典方案) -2. Lin (雲、雨、雪、霰、冰晶) -3. WSM3 -4. WSM5 -5. Ferrier (雲、雨、雪、霰、冰晶) -6. WSM6 (雲、雨、雪、霰、冰晶) -7. Thompson	表面過程 sf_surface_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. 自變參數 -2. Edouard Yamada Long TRIP (2010) 方案 -3. NCEP Global Forecast System scheme -4. GFDL
長波輻射 ra_mps_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. RRTM -2. CAM3 -3. RRTMG -4. CRTM (Dua)	邊界層 bl_pbl_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. RRTM 方案 -2. Edouard Yamada Long TRIP (2010) 方案 -3. NCEP Global Forecast System scheme -4. GFDL
短波輻射 rs_mps_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. Duda -2. CAM3 -3. RRTMG -4. CRTM (Dua)	積雲化參數 cu_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. 自變參數 -2. Duda -3. CAM3 -4. Duda -5. CAM3 -6. CAM3 -7. CAM3 -8. CAM3 -9. CAM3 -10. CAM3
地表層 sf_surface_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. 自變參數 -2. Duda -3. CAM3 -4. Duda -5. CAM3	地表層 sf_surface_physics	-0. 不採用非自變參數 -1. 自變參數 -2. Duda -3. CAM3 -4. Duda -5. CAM3



### WRF性能評估方式

將模式模擬結果與中央氣象局測站的觀測資料進行驗證 (不包含高山站)

- 檢驗項目：溫度、風速、風向
- 檢驗統計項目：MBE、MAGE、RMSE、WNMB、WNME

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,t} - O_{i,t})$$

$$MAGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{i,t} - O_{i,t}|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,t} - O_{i,t})^2}$$

$$WNMB = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{i,t} - O_{i,t})}{N \times T \times 360} \times 100\%$$

$$WNME = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T |P_{i,t} - O_{i,t}|}{N \times T \times 360} \times 100\%$$

依照模式模擬範圍將模擬範圍分為五個地區：

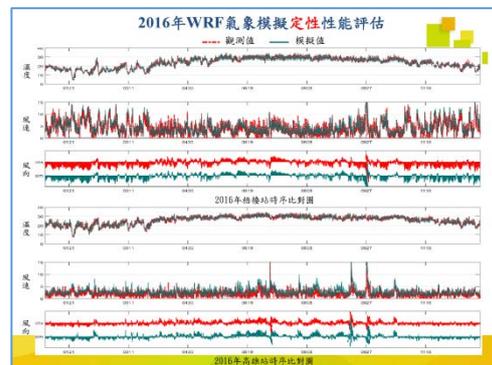
- 北部地區(新北市、臺北市、基隆市、桃園市、新竹縣、新竹市、宜蘭縣)
- 中部地區(苗栗縣、臺中市、彰化縣、南投縣)
- 雲嘉地區(雲林縣、嘉義縣、嘉義市)
- 南部地區(臺南市、高雄市、屏東縣)
- 東部地區(臺東縣、花蓮縣)

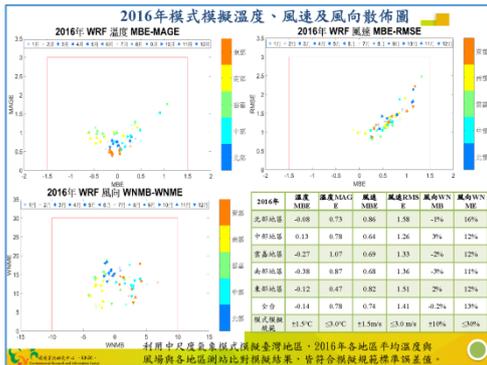
氣象變數	模擬指標	Benchmark
溫度	MBE	≤±1.5°K
	MAGE	≤3°K
風速	MBE	≤±1.5m/s
	RMSE	≤3m/s
風向	WNMB	≤±10%
	WNME	≤30%

### 2016年WRF氣象模擬定量性能評估

測站	溫度性能指標		風速性能指標		風向性能指標	
	MB	MAGE	MB	RMSE	WNMB	WNME
板橋	0.0	0.7	0.7	1.3	-2.0%	14%
淡水	-0.1	0.4	1.0	1.7	-0.3%	14%
鹿港	1.2	1.2	0.8	1.6	-11.0%	25%
臺北	0.3	1.1	0.3	1.1	0.0%	15%
竹子湖	0.4	0.6	1.2	2.0	1.9%	21%
基隆	-0.4	0.7	0.3	1.1	1.0%	13%
宜蘭	0.0	0.4	0.0	1.0	2.0%	14%
蘇澳	-0.7	0.8	0.5	1.2	2.2%	18%
臺南	0.0	0.6	0.1	0.9	1.4%	18%
臺南	0.1	1.1	0.0	0.9	-6.5%	12%
永康	0.2	1.2	0.1	0.9	-1.6%	9%
高雄	-0.1	0.6	0.7	1.2	-1.0%	11%
高雄	-0.1	1.1	0.5	1.2	-1.3%	12%
臺中	0.7	1.1	0.7	1.3	1.5%	14%
屏東山	1.0	1.3	0.6	1.1	-10.2%	27%
大武	-0.3	0.7	0.7	1.3	1.3%	13%
玉山	-2.5	2.5	-0.4	1.7	-3.1%	13%
關丹	0.0	0.8	1.9	2.6	-0.3%	13%
鹿港	-0.7	0.8	1.2	2.0	-2.1%	10%
成功	-0.1	0.4	0.7	1.3	2.7%	11%
蘭陽	1.0	1.1	-0.4	2.0	0.9%	10%
日月潭	0.3	1.1	0.2	0.8	-3.9%	22%
臺東	0.1	1.3	1.3	1.9	2.9%	12%
崎頂	-0.1	0.7	0.4	1.2	4.0%	10%
新港	-0.2	0.5	0.6	1.4	0.1%	8%
新港	0.2	0.9	0.5	1.4	-0.8%	14%
Overall	1.5-1.5	3.0	1.5-1.5	3.0	10.0%-10.0%	30%
合格率	50%	100%	50%	100%	50%	100%

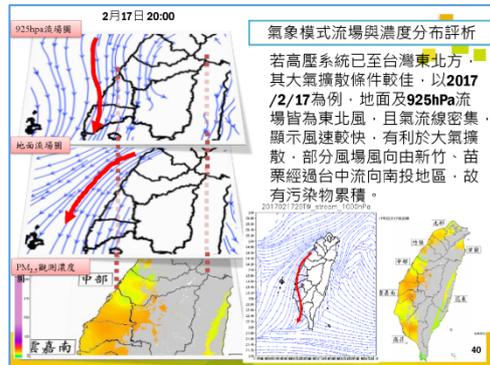
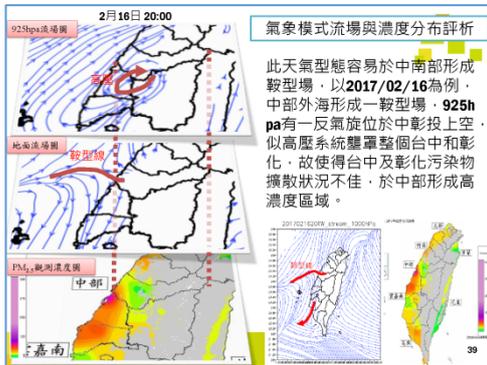
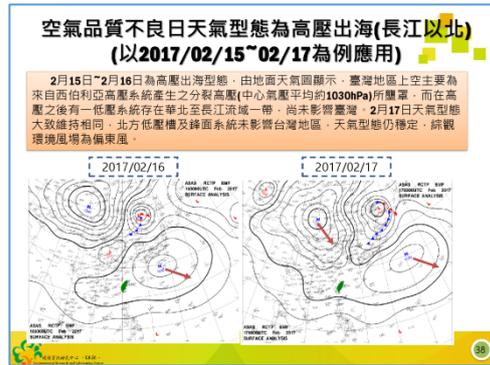
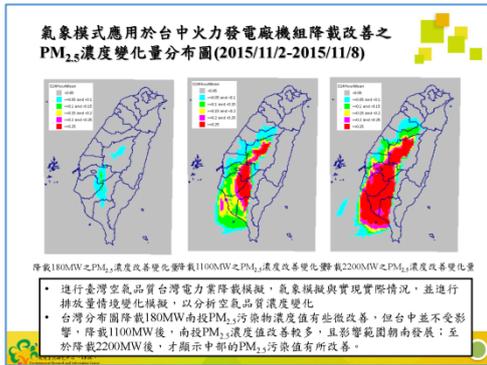
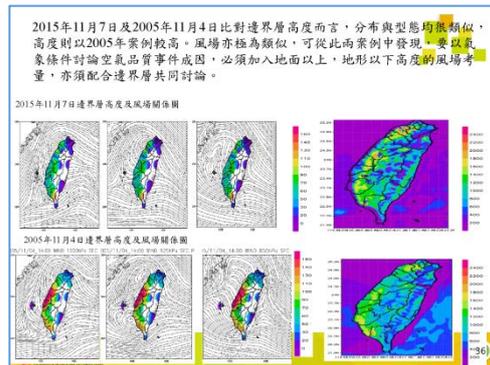
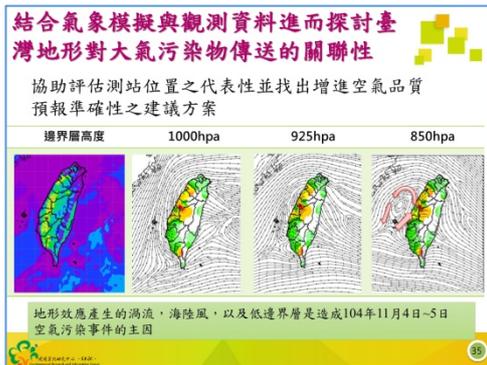
模擬氣象場符合模式模擬規格的測站數百分之六十以上之規定





### WRF 中尺度大氣模式應用

- 評估空氣品質氣候條件分析提供空氣品質模式模擬評估：
  - 20151104-20151107空品事件天氣因素分析與推估
  - 20170216-20170217空品事件天氣因素分析與推估
- 氣候變遷下未來年台灣空氣品質之演化



### 氣候變遷下未來年台灣空氣品質之演化

- 利用中尺度氣象模式模擬未來年變化，評估臺灣臭氧和懸浮微粒在氣候變遷下的演化

#### 2007排放量X2007氣象場

圖 2007年氣象場與2007年排放量模式模擬各季節臭氧之濃度分布

#### 2030排放量X2007氣象場

圖 2030年氣象場與2007年排放量模式模擬各季節臭氧之濃度分布

#### 2007年氣象場與2007年排放量模式模擬各季節懸浮微粒之濃度分布

#### 2030年氣象場與2007年排放量模式模擬各季節懸浮微粒之濃度分布

### 氣象模式在空氣污染上的應用

空氣模式類型	優點	弱點	所需氣象資料
軌跡模式 Hysplit	可得知污染源與受體之關係	較難模擬小尺度 沒有考慮到化學反應(衍生物)	將氣象模式(WRF、MM5)模擬資料經過後轉換為不同高度場資料
高斯擴散模式 ISC、AERMOD	適合小尺度模擬 模擬時間較短	風場資料為穩定均一的假設 沒有考慮到化學反應(衍生物)	<ul style="list-style-type: none"> <li>離五觀測氣象資料及高空觀測資料</li> <li>✓ 模擬氣象場：將NCEP或WRF等氣象模擬資料轉換</li> </ul>
網格式模式 CMAQ、CAMx	適合中尺度模擬 物理及化學機制考慮較為完整 可同時模擬原生及衍生物污染且具有三維空間分布	模擬時間長 檔案容量大	網格式氣象模式(WRF、MM5)模擬資料

### 氣象模式運用在空氣品質成因解析

中南部區域影響

各中地區污染物的傳輸效應

此套訓中，火力發電廠與交通移動源對於台中PM<sub>2.5</sub>濃度的影響範圍由風場所決定

(Lai et al., 2019)

### 氣象模式運用在空氣品質緊急應變

#### 進行火災污染物軌跡模擬

2018年4月8日桃園平鎮大火擴散及軌跡模擬

### 氣象模式運用在空氣品質預報

為了解未來空氣品質現況，需透過氣象及空氣品質模式模擬來推估未來三天空氣狀況，可釐清境外傳輸或本地污染，進而提供民眾健康影響與活動相關建議。

境外污染?

區域	PM <sub>2.5</sub> 濃度	PM <sub>10</sub> 濃度
北區	0.5-1.0 (1.0)	1.0-2.0 (2.0)
中區	0.5-1.0 (1.0)	1.0-2.0 (2.0)
南區	0.5-1.0 (1.0)	1.0-2.0 (2.0)
海峽	0.5-1.0 (1.0)	1.0-2.0 (2.0)

### 下一代氣象模式

#### MPAS

Model for Prediction Across Scales

- Fully-compressible, non-hydrostatic dynamics
- Finite volume discretization on centroidal Voronoi (nominally hexagonal) grids
- Single global mesh with seamless refinement to local scales
- Latest version: MPAS 6.0

#### FV3

Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core

- scalable and flexible dynamical core capable of both hydrostatic and non-hydrostatic atmospheric simulations

# THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

47

## 附錄六 西北太平洋颱風

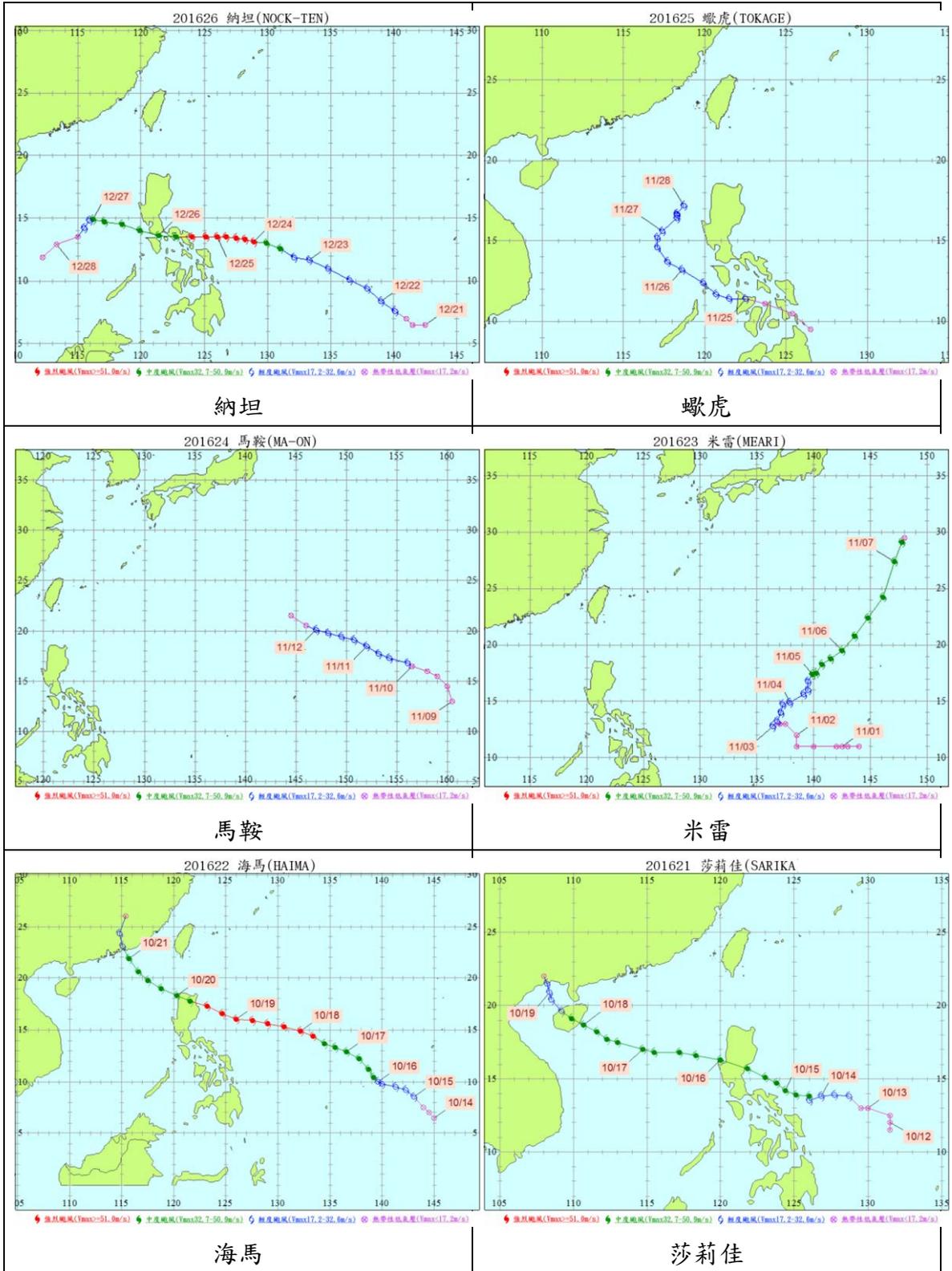


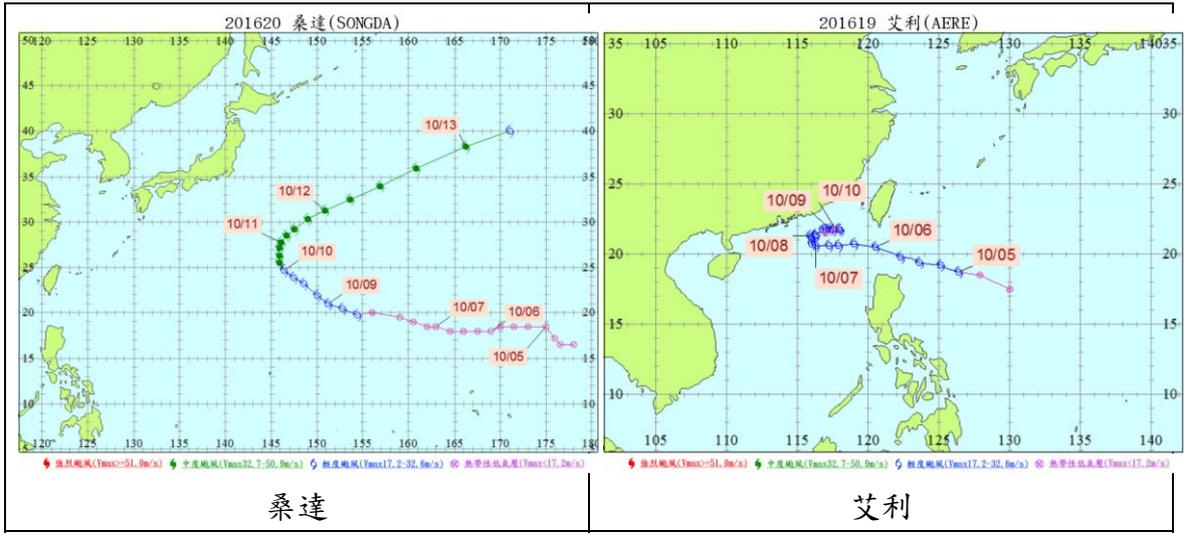
## 2016 年西北太平洋颱風

年份	編號	中文名稱	英文名稱	颱風生命期間	颱風生命期間				警報發布報數
					中心最低氣壓 (hPa)	中心最大風速 (m/s)	最大 7 級風暴風半徑 (km)	最大 10 級風暴風半徑 (km)	
2016	201626	納坦	NOCK-TEN	2016/12/21 18:00	910	55	180	70	---
				2016/12/27 18:00					
2016	201625	蠍虎	TOKAGE	2016/11/25 00:00	990	23	100	---	---
				2016/11/28 00:00					
2016	201624	馬鞍	MA-ON	2016/11/10 06:00	998	18	80	---	---
				2016/11/12 06:00					
2016	201623	米雷	MEARI	2016/11/3 00:00	955	40	180	50	---
				2016/11/7 12:00					
2016	201622	海馬	HAIMA	2016/10/15 00:00	905	58	280	100	---
				2016/10/21 18:00					
2016	201621	莎莉佳	SARIKA	2016/10/13 12:00	930	48	220	80	---
				2016/10/19 12:00					
2016	201620	桑達	SONGDA	2016/10/8 12:00	930	48	200	80	---
				2016/10/13 06:00					
2016	201619	艾利	AERE	2016/10/5 00:00	978	30	120	50	10
				2016/10/10 00:00					
2016	201618	芙蓉	CHABA	2016/9/27 18:00	910	55	200	80	---
				2016/10/5 12:00					
2016	201617	梅姬	MEGI	2016/9/23 00:00	940	45	250	100	23
				2016/9/28 12:00					
2016	201616	馬勒卡	MALAKAS	2016/9/12 18:00	940	45	180	60	20
				2016/9/20 12:00					
2016	201615	雷伊	RAI	2016/9/12 18:00	998	18	80	---	---
				2016/9/13 06:00					
2016	201614	莫蘭蒂	MERANTI	2016/9/10 06:00	900	60	220	80	21
				2016/9/15 06:00					
2016	201613	瑪瑙	MALOU	2016/9/6 00:00	998	18	100	---	---
				2016/9/7 18:00					

年份	編號	中文名稱	英文名稱	颱風生命期間	颱風生命期間				警報發布報數
					中心最低氣壓 (hPa)	中心最大風速 (m/s)	最大7級風暴風半徑 (km)	最大10級風暴風半徑 (km)	
2016	201612	南修	NAMTHEUN	2016/9/1 00:00	950	43	150	50	---
				2016/9/5 00:00					
2016	201611	圓規	KOMPASU	2016/8/20 00:00	995	18	150	---	---
				2016/8/21 18:00					
2016	201610	獅子山	LIONROCK	2016/8/19 12:00	938	45	250	80	---
				2016/8/30 18:00					
2016	201609	蒲公英	MINDULLE	2016/8/19 06:00	975	33	180	60	---
				2016/8/23 06:00					
2016	201608	電母	DIANMU	2016/8/18 00:00	980	23	120	---	---
				2016/8/19 12:00					
2016	201607	璨樹	CHANTHU	2016/8/13 18:00	980	25	150	---	---
				2016/8/17 12:00					
2016	201606	康森	CONSON	2016/8/8 18:00	985	25	150	---	---
				2016/8/15 00:00					
2016	201605	奧麥斯	OMAIS	2016/8/4 06:00	975	30	250	80	---
				2016/8/9 18:00					
2016	201604	妮妲	NIDA	2016/7/30 12:00	972	33	150	50	---
				2016/8/3 00:00					
2016	201603	銀河	MIRINAE	2016/7/26 06:00	985	25	100	---	---
				2016/7/28 12:00					
2016	201602	盧碧	LUPIT	2016/7/23 18:00	998	18	100	---	---
				2016/7/24 18:00					
2016	201601	尼伯特	NEPARTAK	2016/7/3 00:00	905	58	200	80	25
				2016/7/9 06:00					

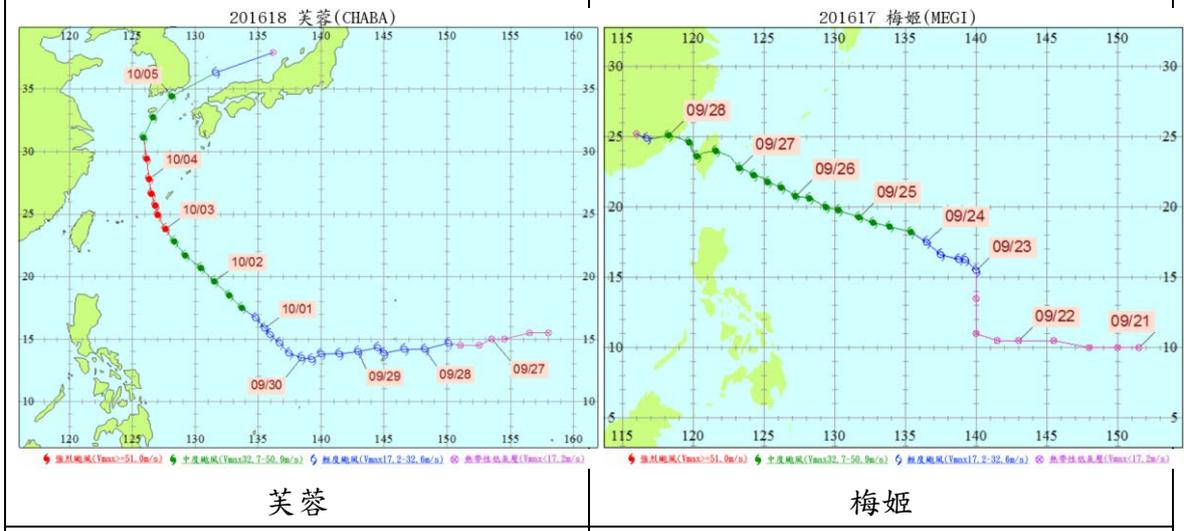
## 2016 年西北太平洋颱風路徑





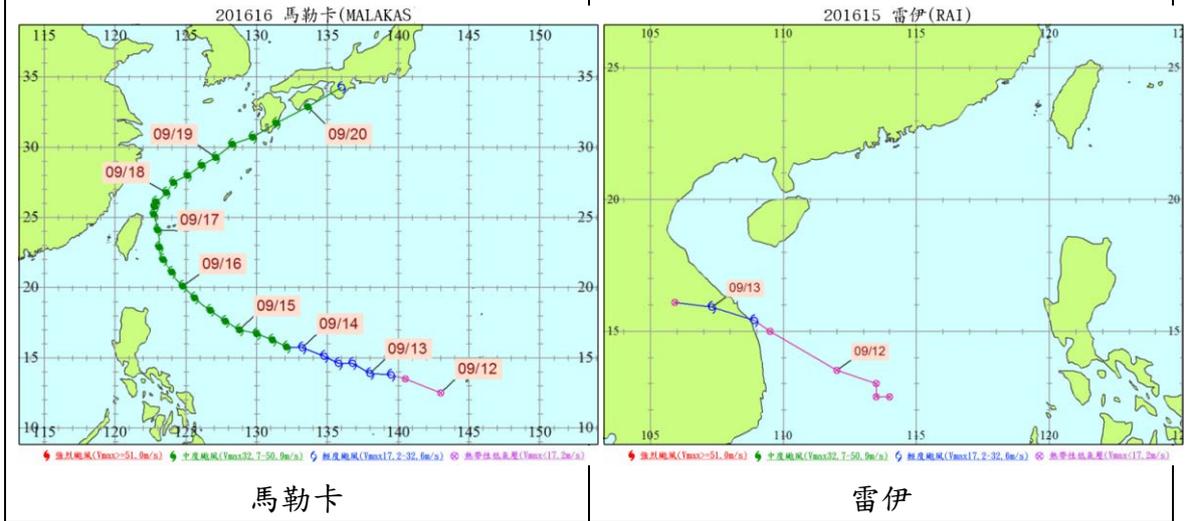
桑達

艾利



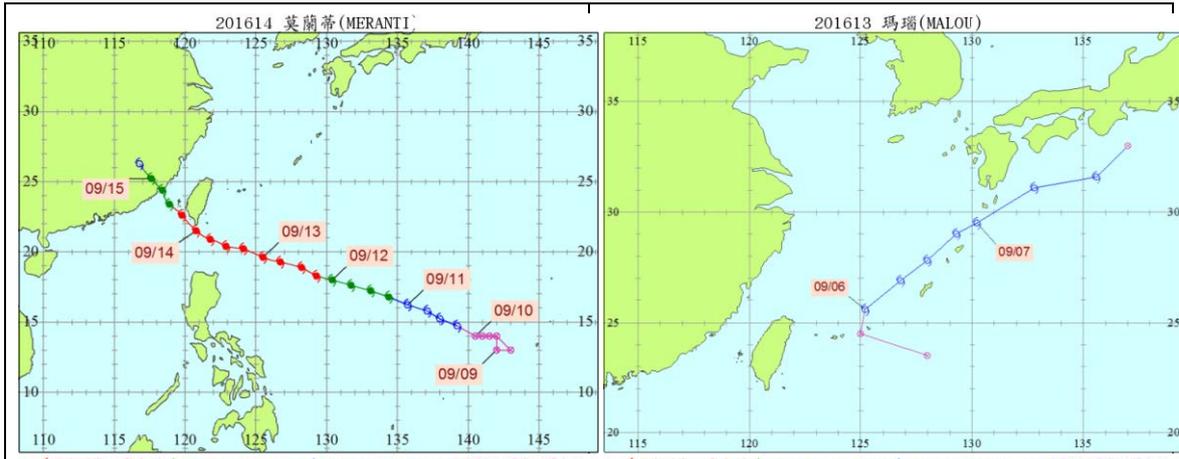
芙蓉

梅姬



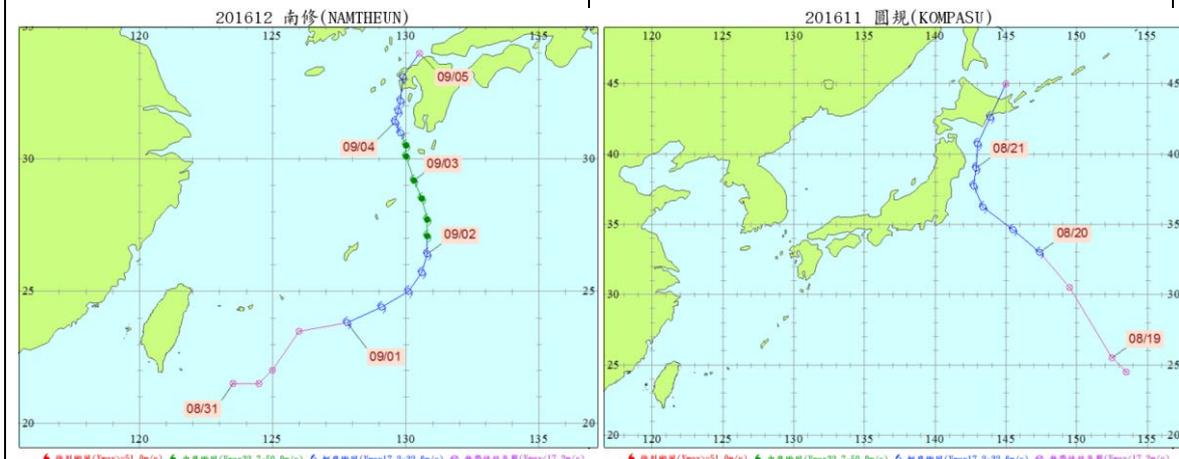
馬勒卡

雷伊



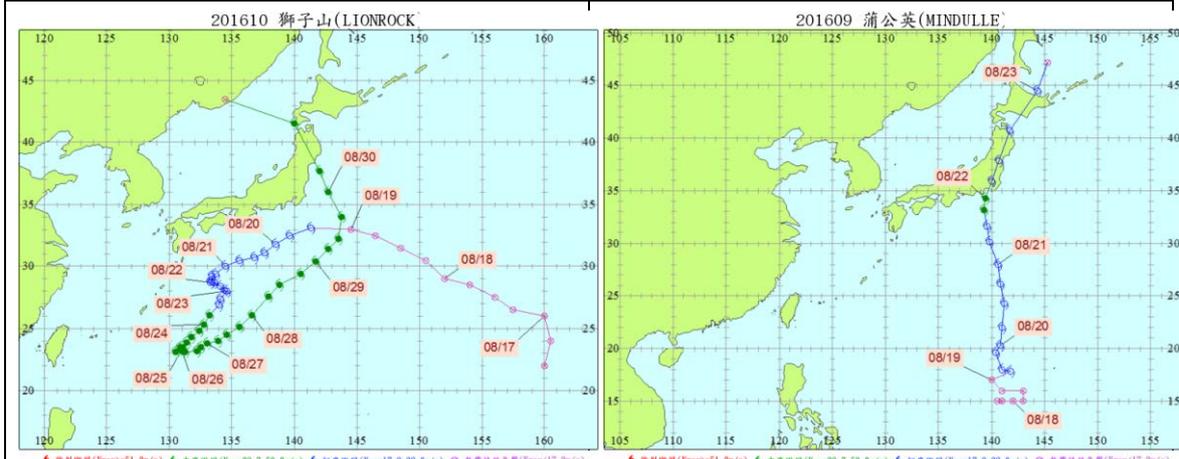
莫蘭蒂

瑪瑙



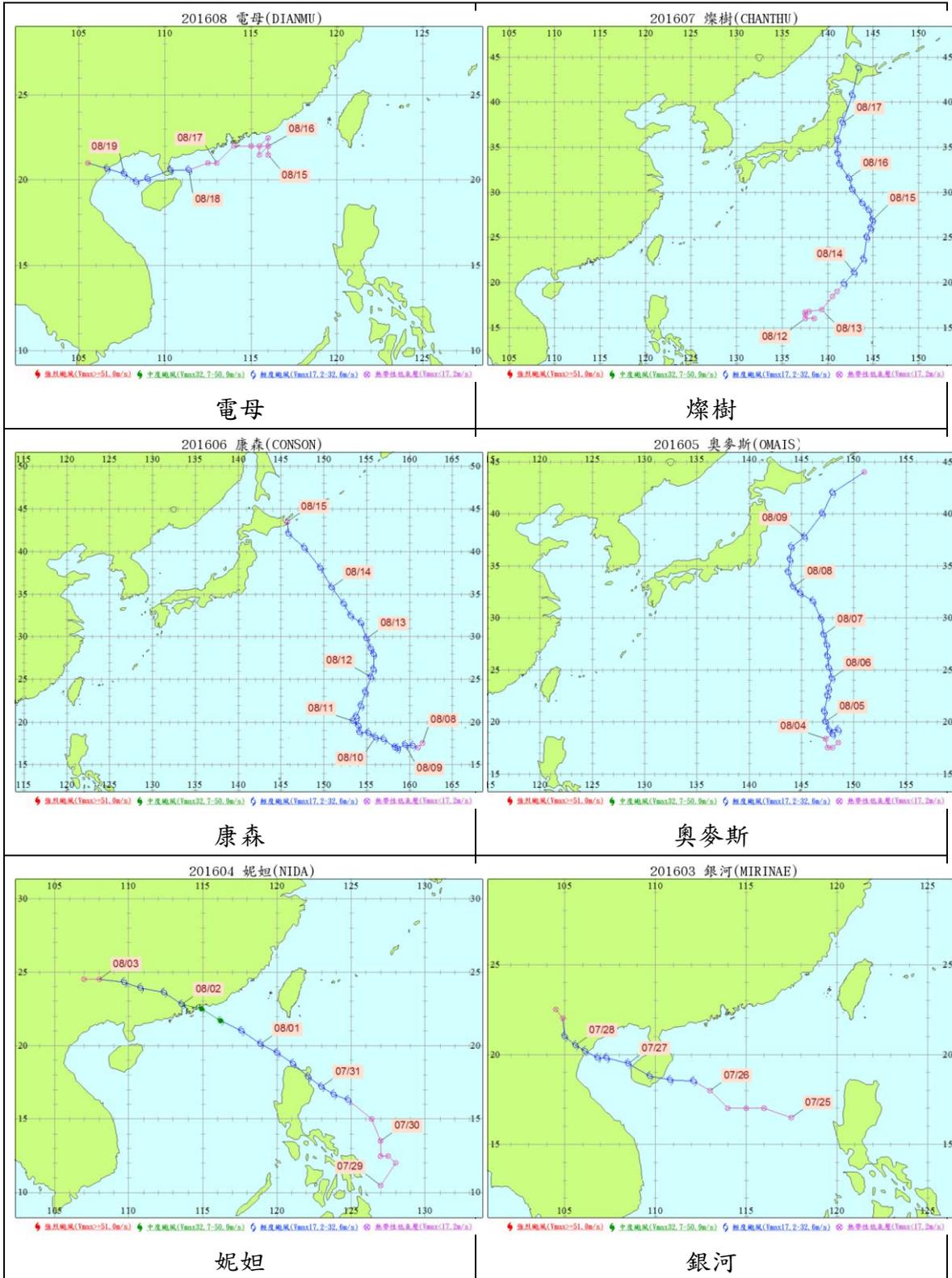
南修

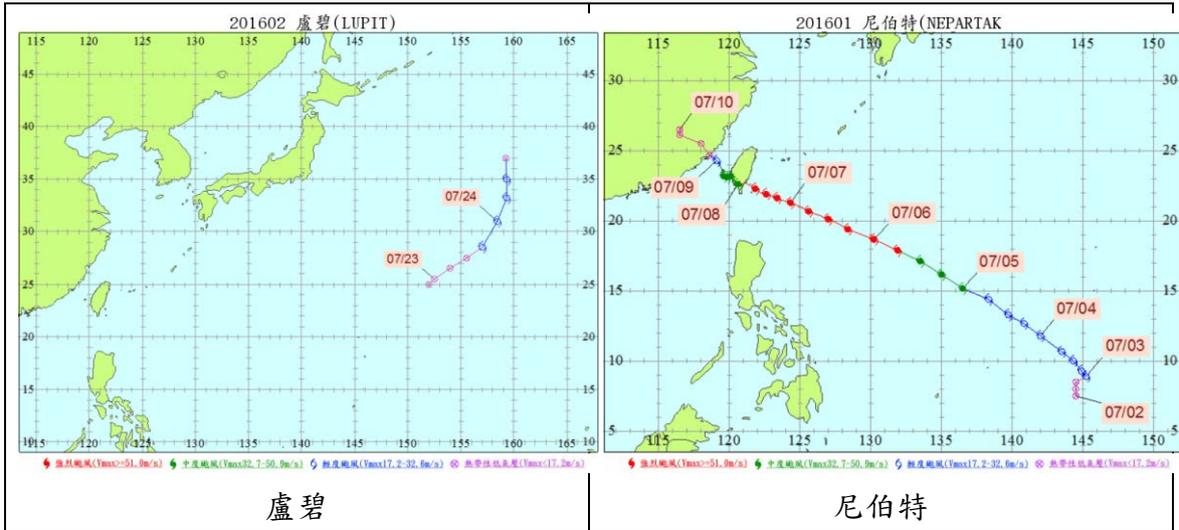
圓規



獅子山

蒲公英





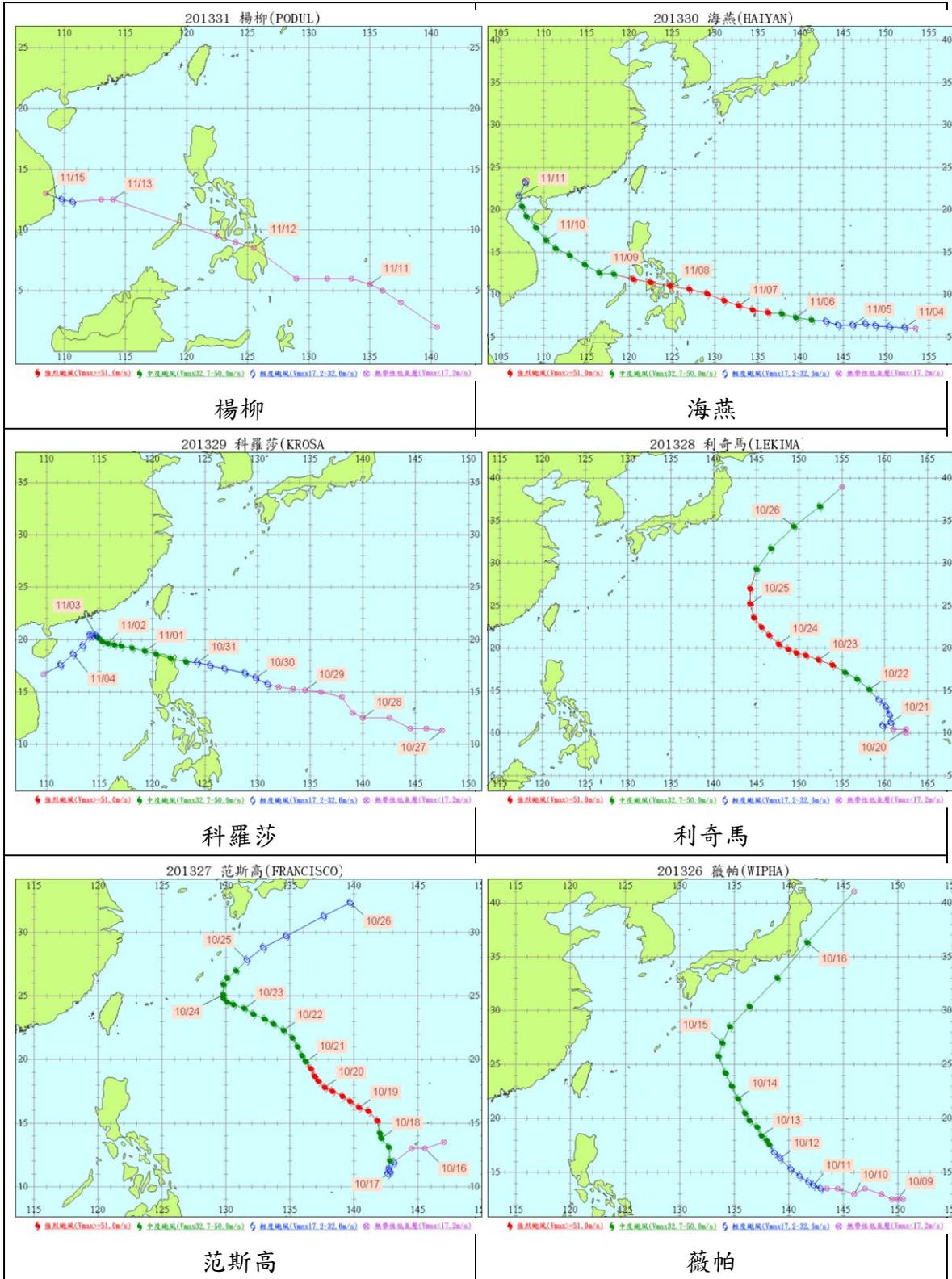
## 2013 年西北太平洋颱風

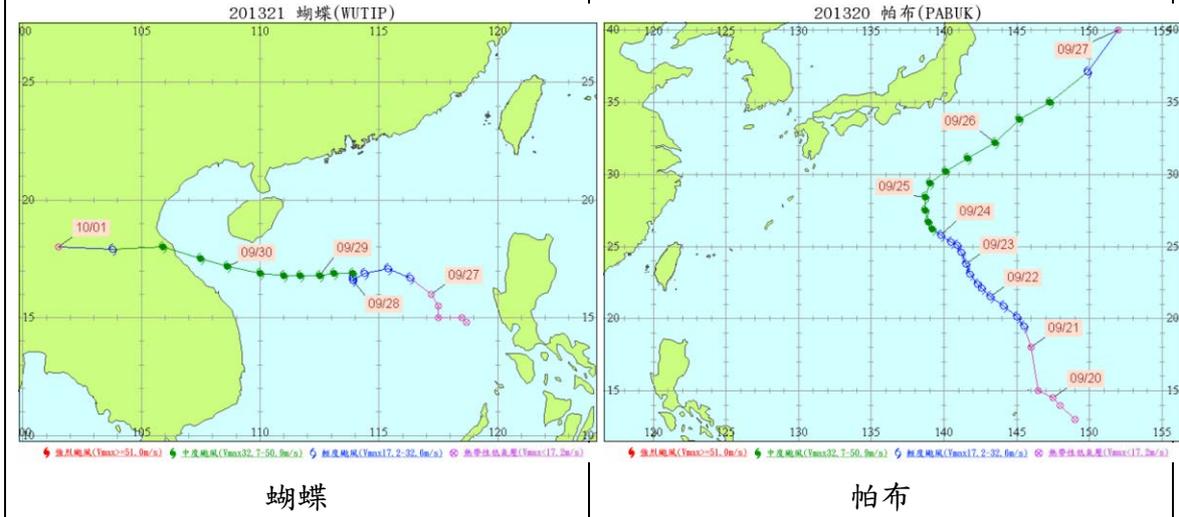
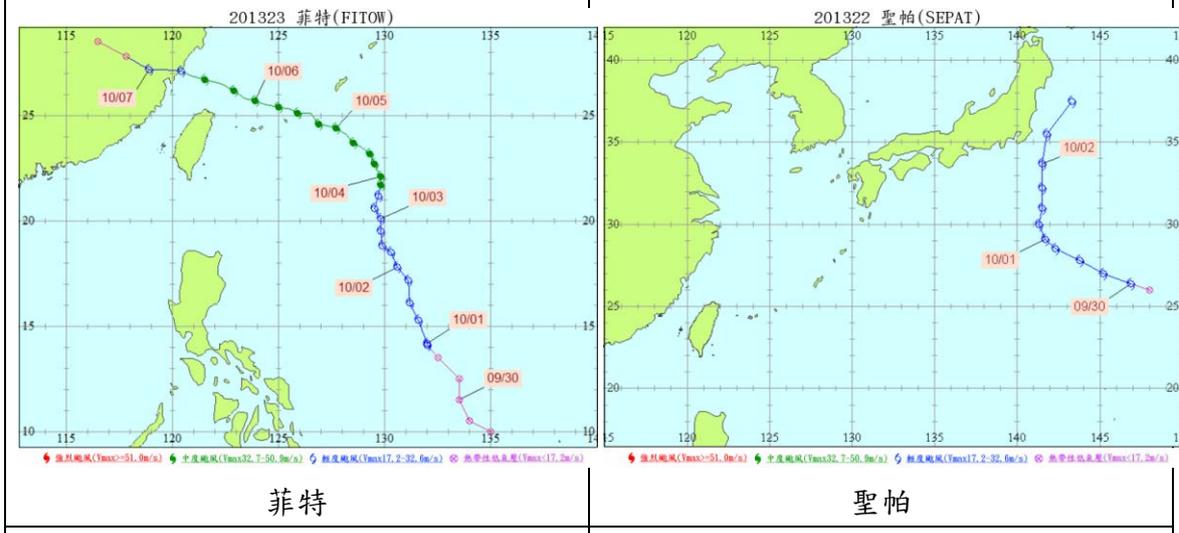
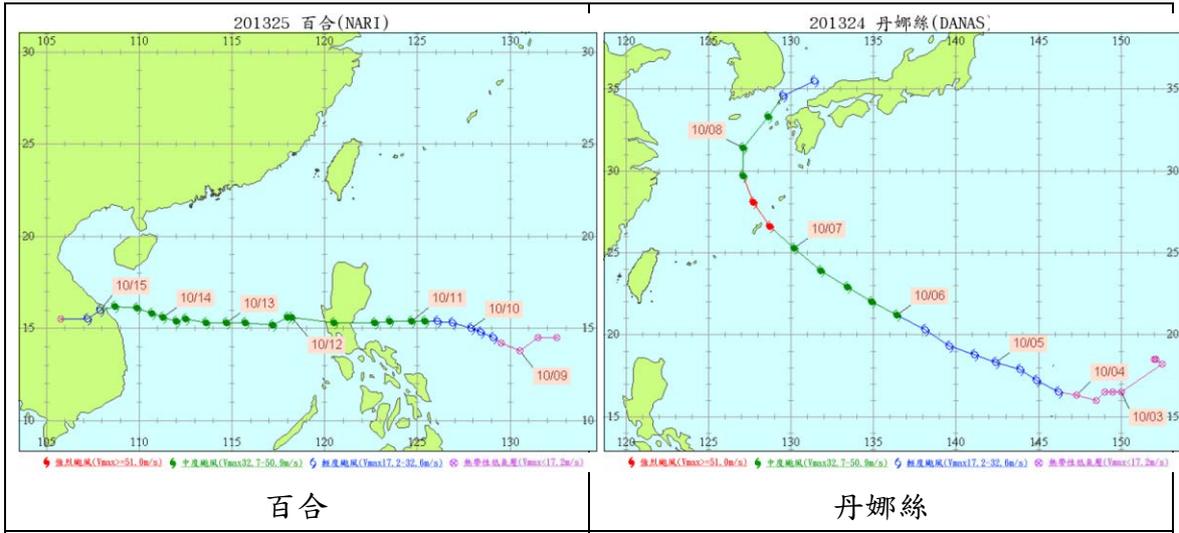
年份	編號	中文名稱	英文名稱	颱風生命期間	颱風生命期間				警報發布報數
					中心最低氣壓 (hPa)	中心最大風速 (m/s)	最大 7 級風暴風半徑 (km)	最大 10 級風暴風半徑 (km)	
2013	201331	楊柳	PODUL	2013/11/14 12:00	998	18	100	---	---
				2013/11/15 00:00					
2013	201330	海燕	HAIYAN	2013/11/4 00:00	895	63	280	100	---
				2013/11/11 12:00					
2013	201329	科羅莎	KROSA	2013/10/29 18:00	940	45	200	80	---
				2013/11/4 12:00					
2013	201328	利奇馬	LEKIMA	2013/10/20 18:00	905	58	250	80	---
				2013/10/26 12:00					
2013	201327	范斯高	FRANCISCO	2013/10/16 12:00	915	55	250	80	---
				2013/10/26 00:00					
2013	201326	薇帕	WIPHA	2013/10/10 18:00	935	48	300	100	---
				2013/10/16 06:00					
2013	201325	百合	NARI	2013/10/9 12:00	960	40	200	80	---
				2013/10/15 12:00					
2013	201324	丹娜絲	DANAS	2013/10/4 06:00	930	51	250	100	---
				2013/10/8 18:00					
2013	201323	菲特	FITOW	2013/9/30 12:00	960	38	250	80	20
				2013/10/7 06:00					
2013	201322	聖帕	SEPAT	2013/9/30 00:00	995	20	100	---	---
				2013/10/2 12:00					
2013	201321	蝴蝶	WUTIP	2013/9/27 06:00	965	35	150	50	---
				2013/10/1 00:00					
2013	201320	帕布	PABUK	2013/9/21 06:00	970	33	150	50	---
				2013/9/27 00:00					
2013	201319	天兔	USAGI	2013/9/16 18:00	910	55	280	150	22
				2013/9/23 06:00					
2013	201318	萬宜	MAN-YI	2013/9/13 00:00	980	28	180	---	---
				2013/9/16 12:00					

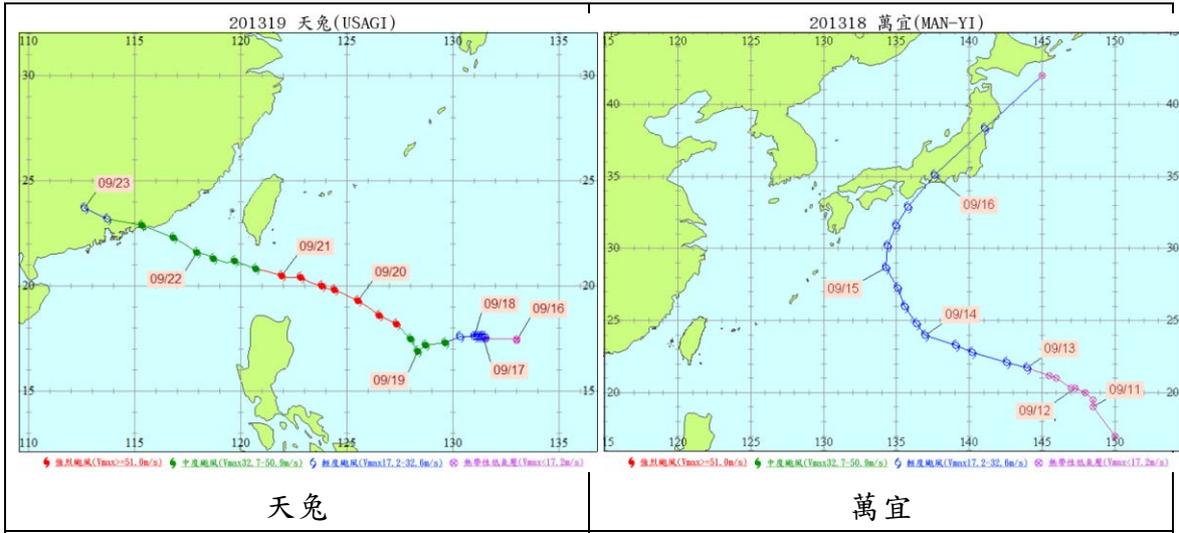
年份	編號	中文名稱	英文名稱	颱風生命期間	颱風生命期間				警報發布報數
					中心最低氣壓 (hPa)	中心最大風速 (m/s)	最大7級風暴 風半徑 (km)	最大10級風暴 風半徑 (km)	
2013	201317	桔梗	TORAJI	2013/9/1 18:00	992	23	100	---	---
				2013/9/4 00:00					
2013	201316	玉兔	YUTU	2013/9/1 00:00	998	18	100	---	---
				2013/9/4 00:00					
2013	201315	康芮	KONG-REY	2013/8/26 06:00	985	25	120	---	20
				2013/8/30 18:00					
2013	201314	尤娜拉	UNALA	2013/8/19 12:00	1002	18	100	---	---
				2013/8/19 18:00					
2013	201313	皮瓦	PEWA	2013/8/18 06:00	980	28	120	---	---
				2013/8/25 12:00					
2013	201312	潭美	TRAMI	2013/8/18 00:00	970	30	180	50	16
				2013/8/22 18:00					
2013	201311	尤特	UTOR	2013/8/9 18:00	925	51	220	80	---
				2013/8/15 12:00					
2013	201310	山竹	MANGKHUT	2013/8/6 12:00	995	20	150	---	---
				2013/8/8 00:00					
2013	201309	燕子	JEBI	2013/7/31 00:00	980	28	180	---	---
				2013/8/3 12:00					
2013	201308	西馬隆	CIMARON	2013/7/17 00:00	998	18	100	---	10
				2013/7/18 18:00					
2013	201307	蘇力	SOULIK	2013/7/8 00:00	925	51	280	100	22
				2013/7/14 00:00					
2013	201306	倫比亞	RUMBIA	2013/6/28 12:00	980	28	150	---	---
				2013/7/2 12:00					
2013	201305	貝碧佳	BEBINCA	2013/6/21 00:00	985	23	100	---	---
				2013/6/24 06:00					
2013	201304	麗琵	LEEPI	2013/6/18 00:00	992	20	100	---	---
				2013/6/21 00:00					
2013	201303	雅吉	YAGI	2013/6/8 12:00	990	23	100	---	---
				2013/6/12 18:00					

年份	編號	中文名稱	英文名稱	颱風生命期間	颱風生命期間				警報發布報數
					中心最低氣壓 (hPa)	中心最大風速 (m/s)	最大 7 級風暴風半徑 (km)	最大 10 級風暴風半徑 (km)	
2013	201302	珊珊	SHANSHAN	2013/2/22 00:00	998	18	80	---	---
				2013/2/23 06:00					
2013	201301	蘇納姆	SONAMU	2013/1/3 12:00	985	25	100	---	---
				2013/1/8 00:00					

## 2013 年西北太平洋颱風路徑

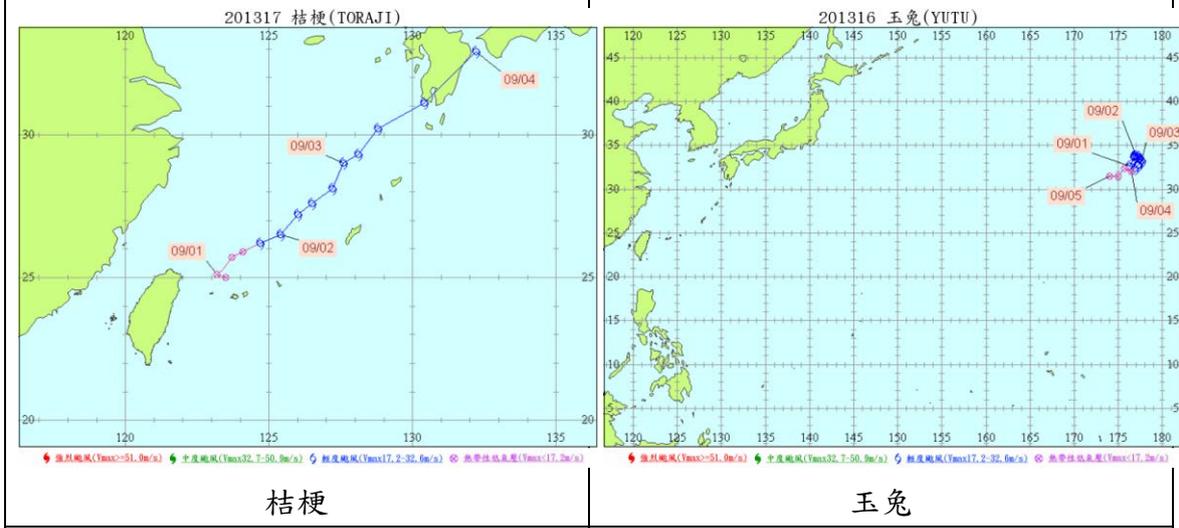






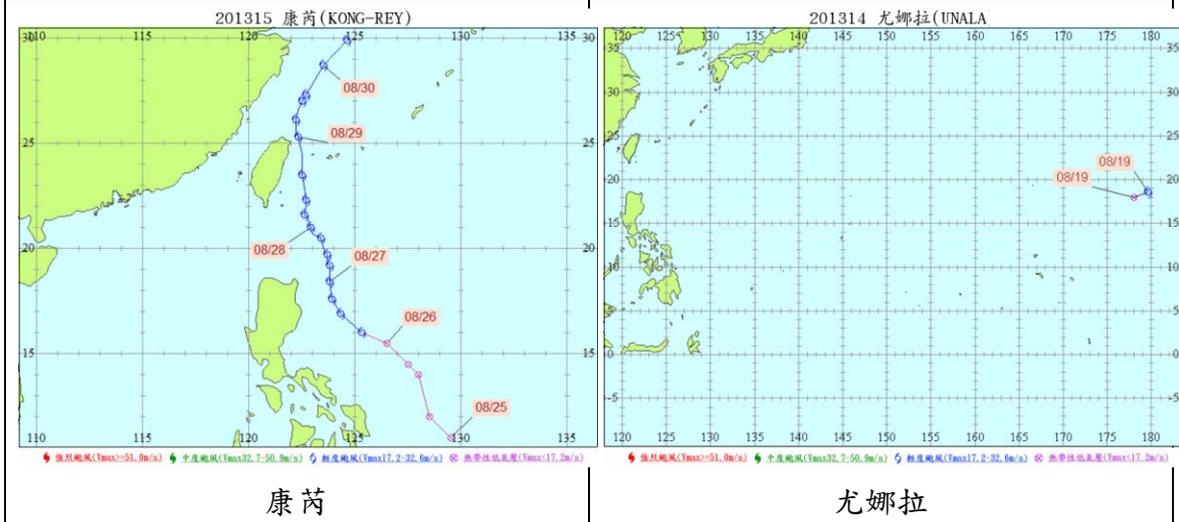
天兔

萬宜



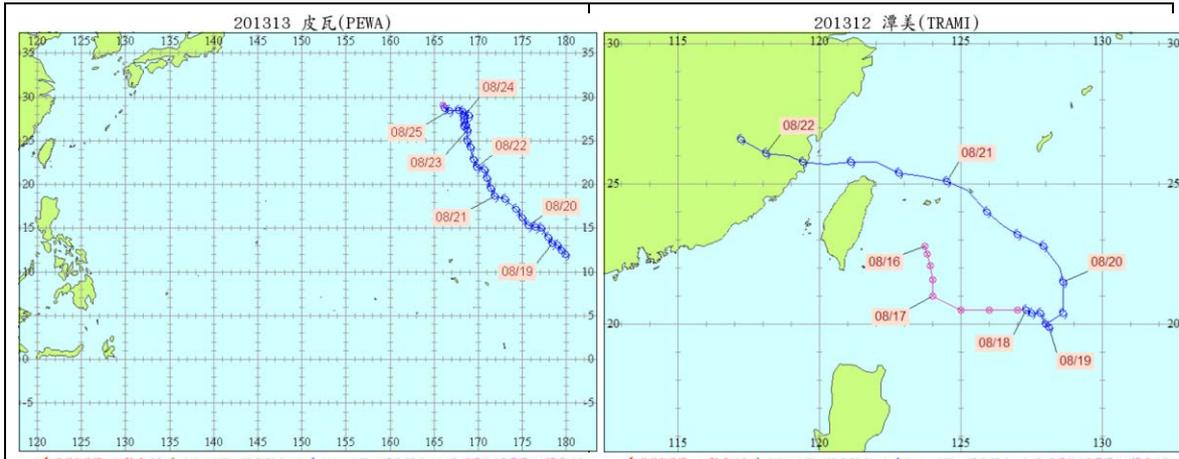
桔梗

玉兔



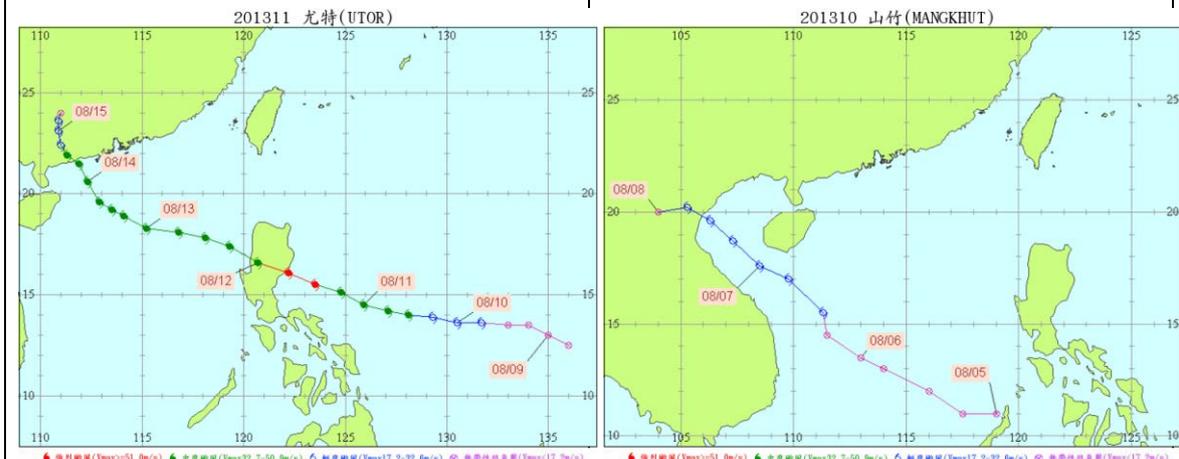
康芮

尤娜拉



皮瓦

潭美



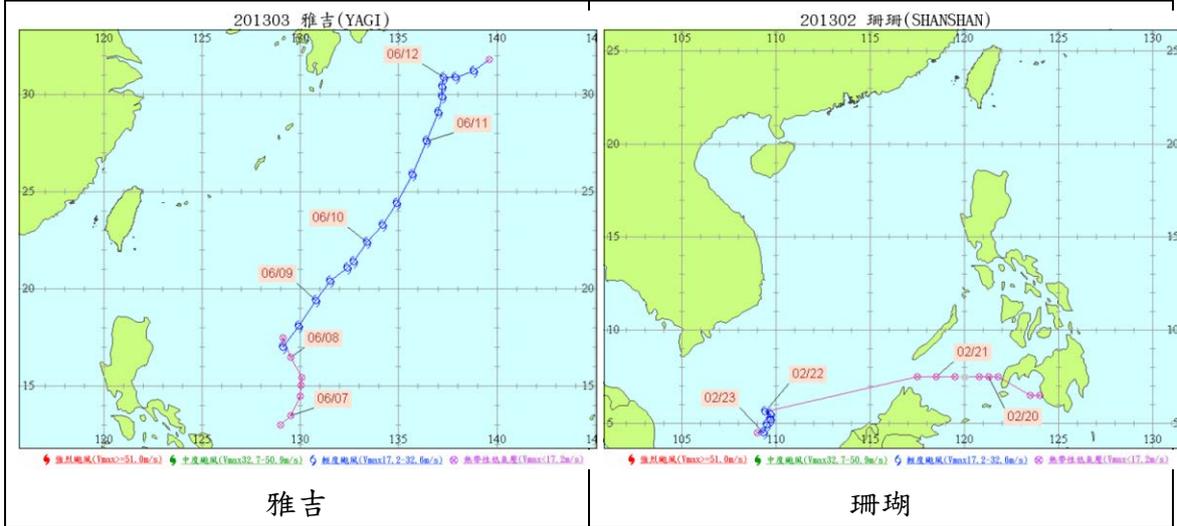
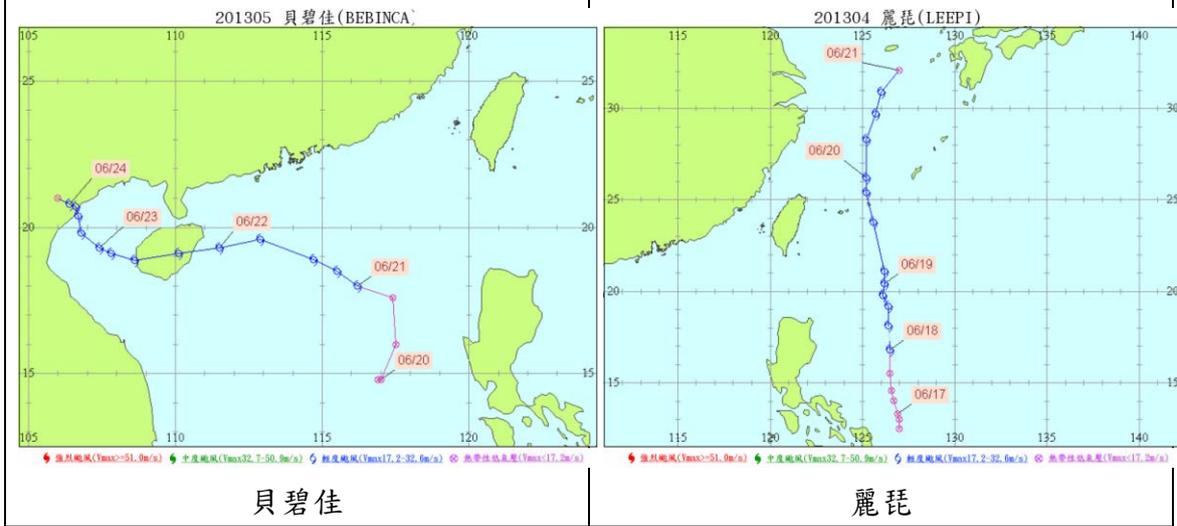
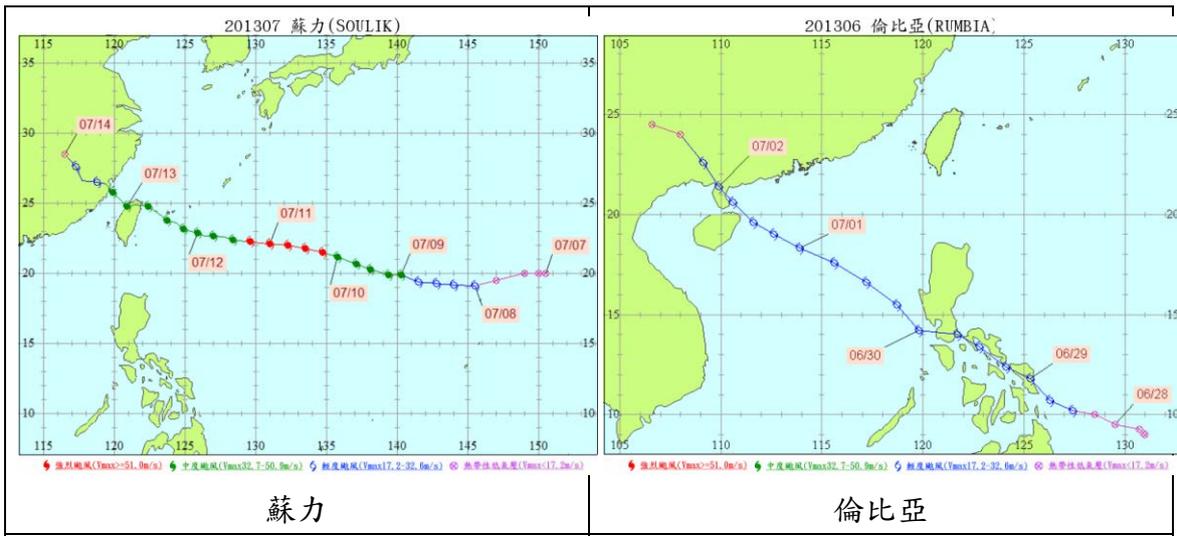
尤特

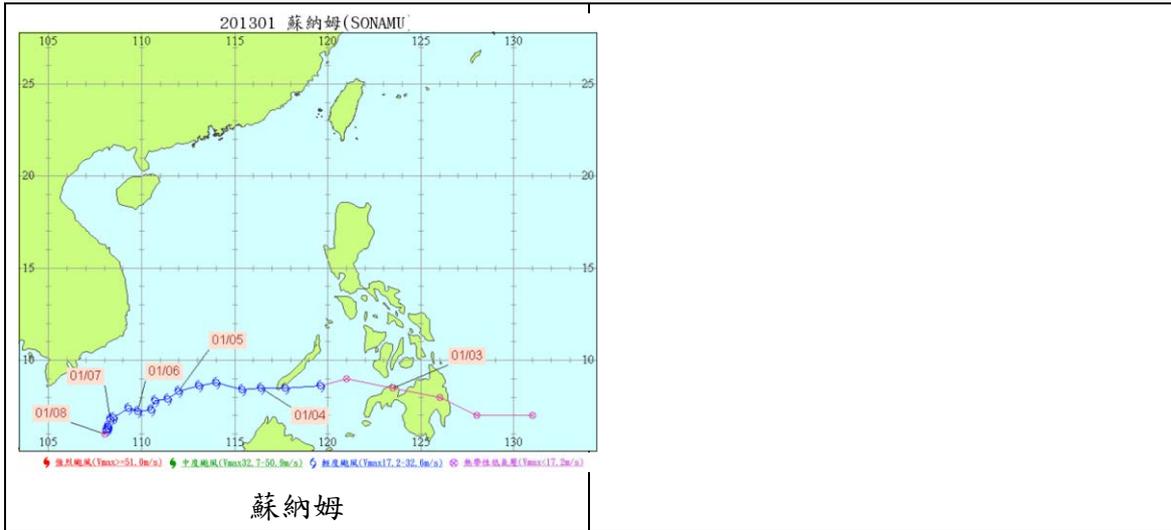
山竹



燕子

西馬隆

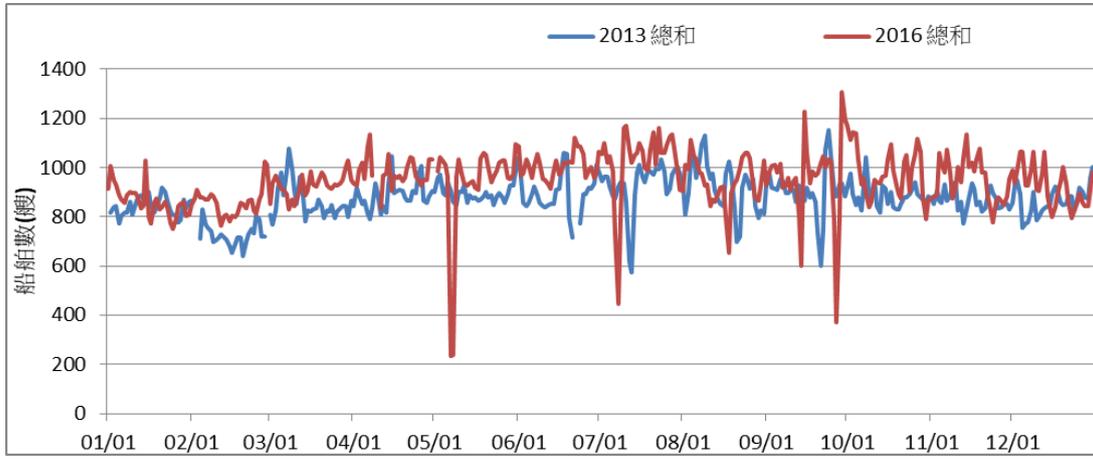




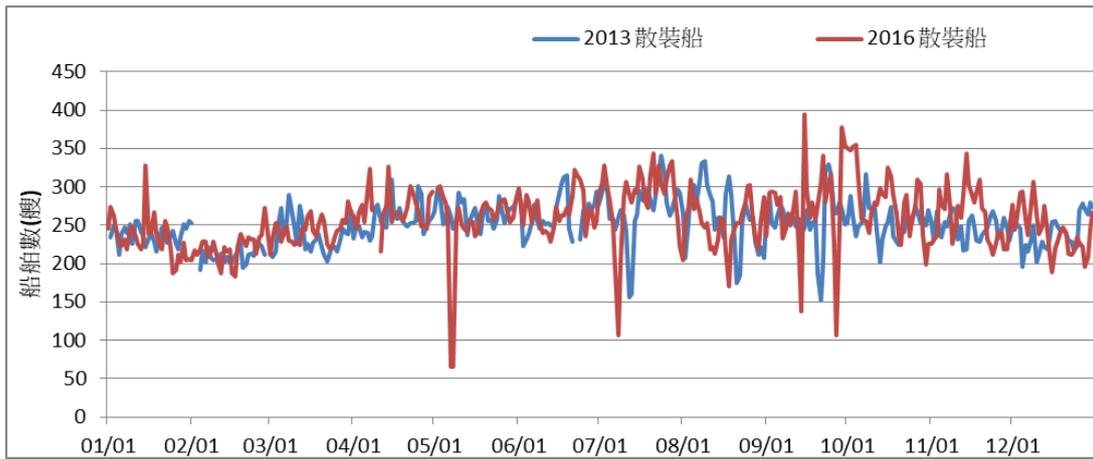
## 附錄七 逐日船舶數與引擎功率



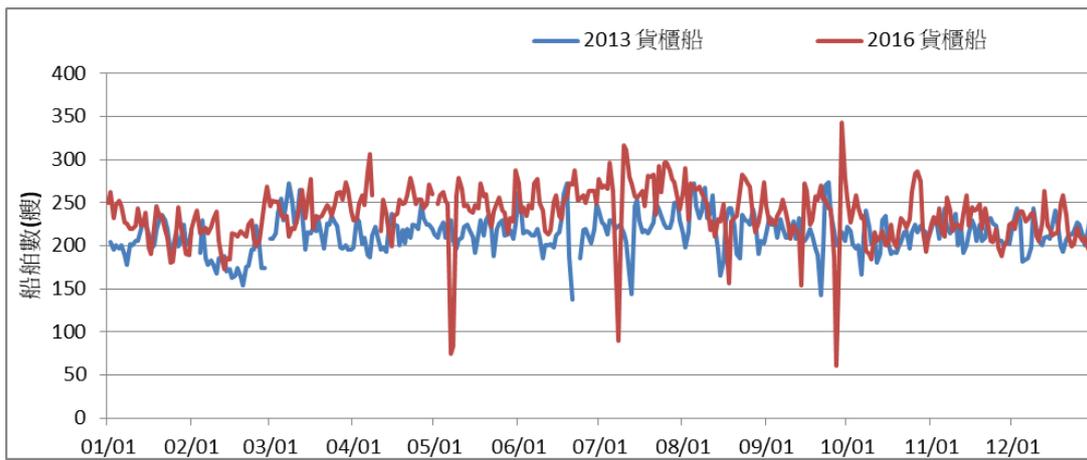
船舶數：



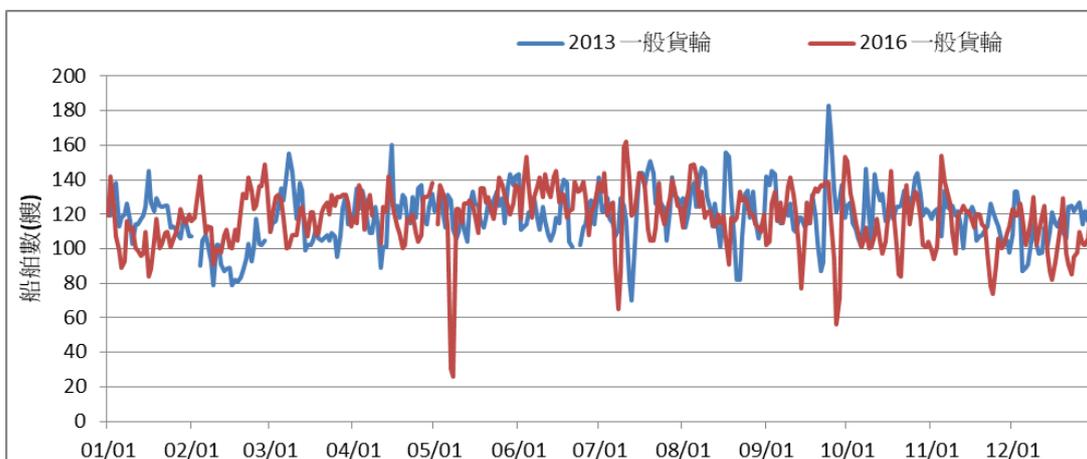
總和



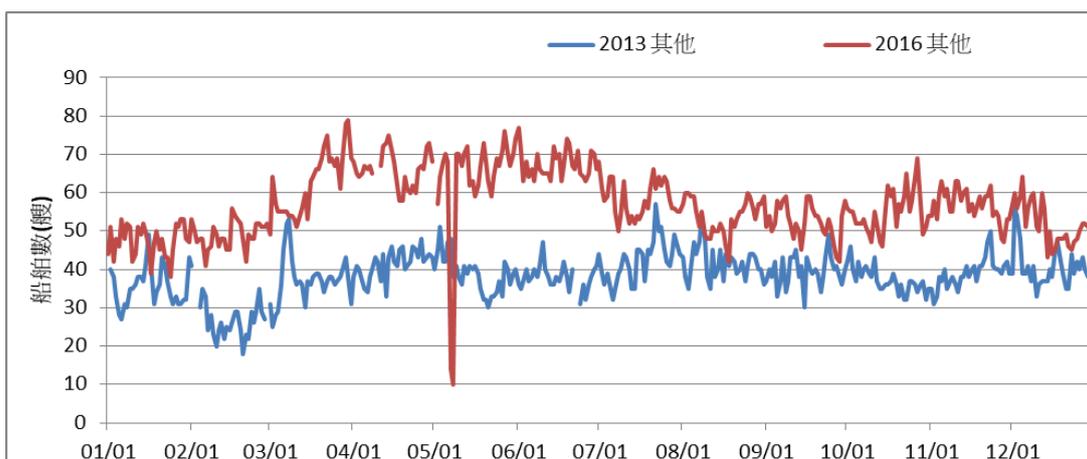
散裝船



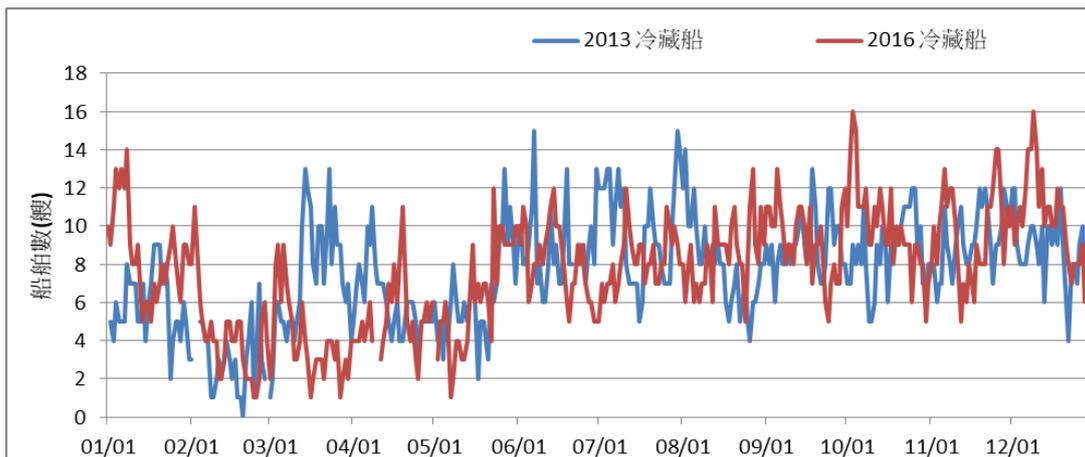
貨櫃船



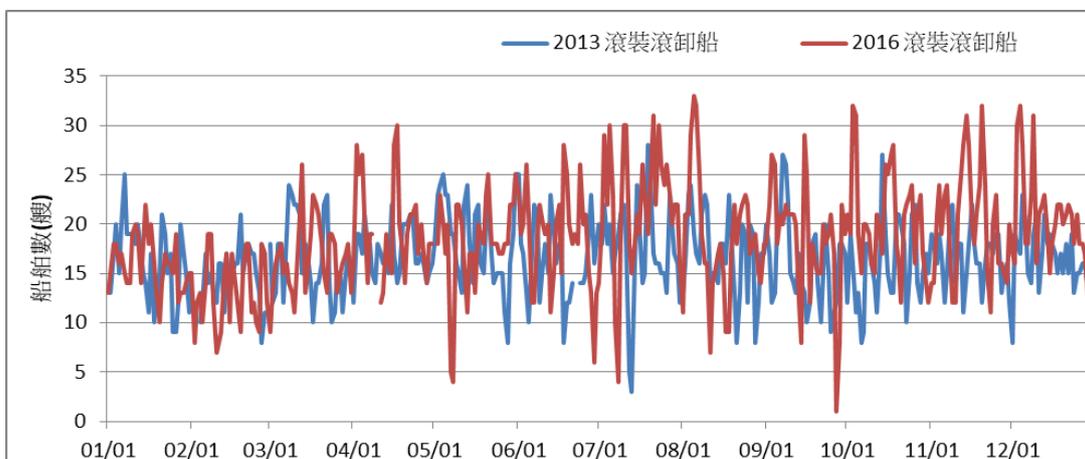
一般貨輪



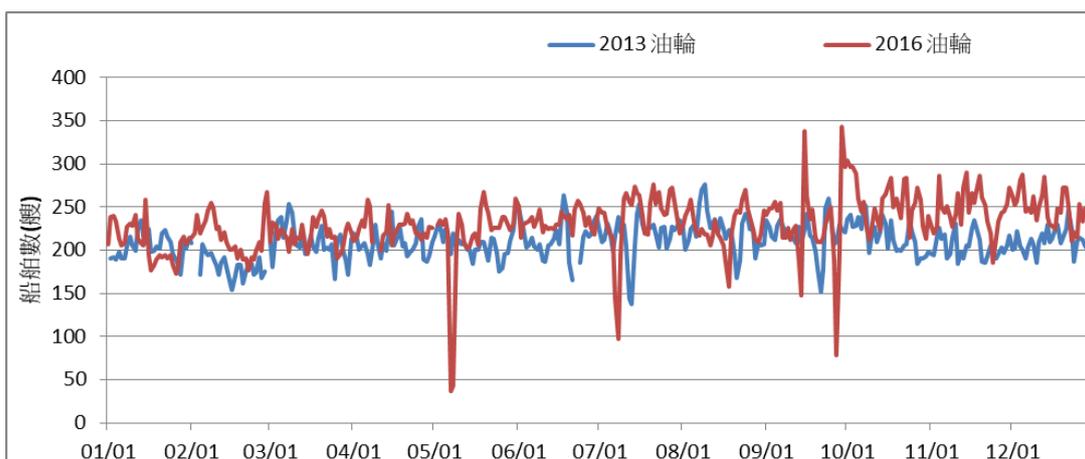
其他



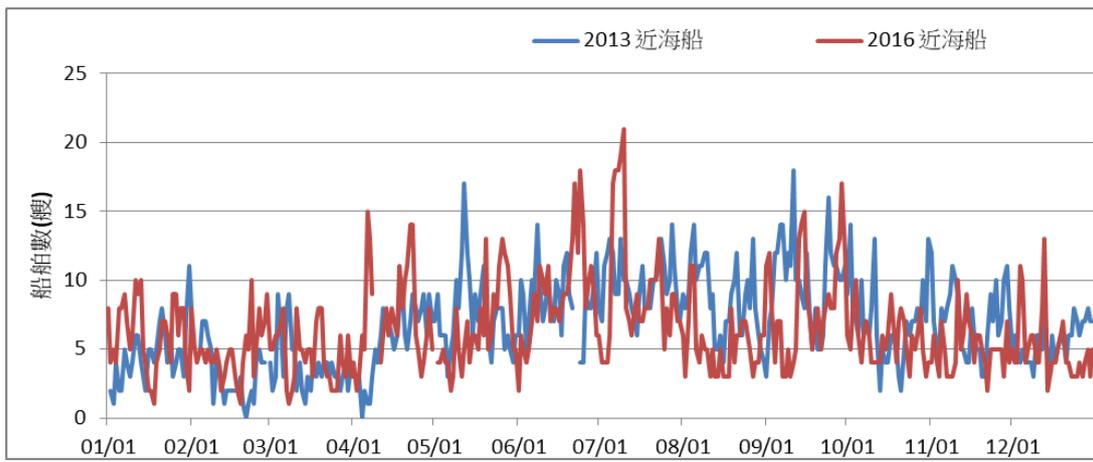
冷藏船



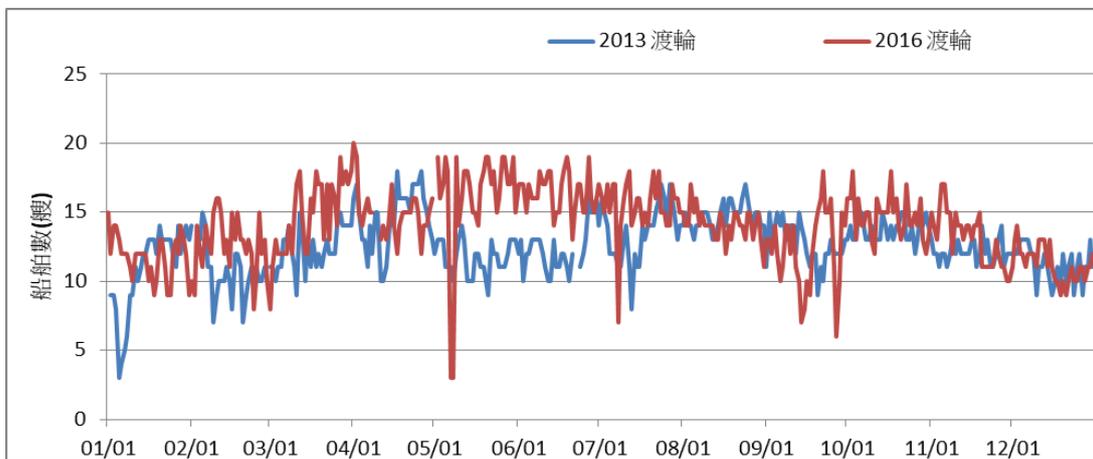
滾裝滾卸船



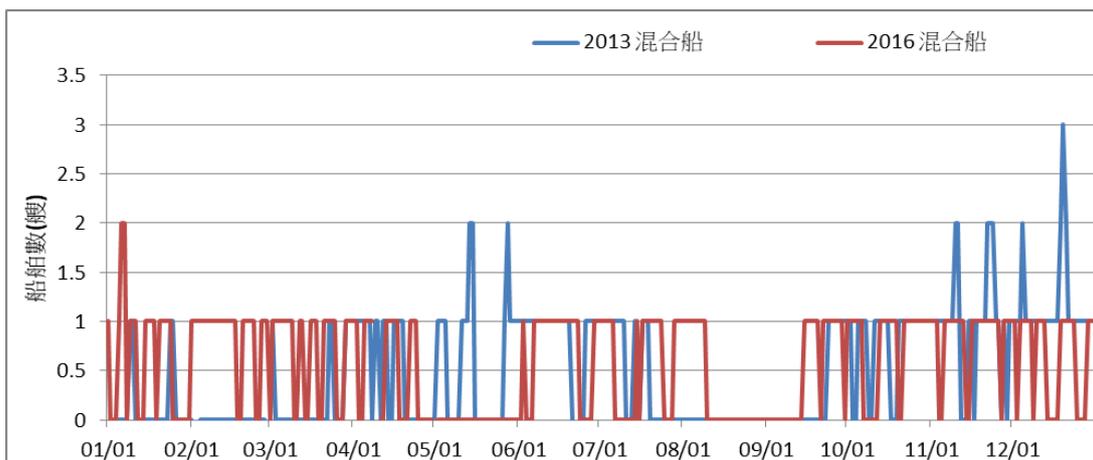
油輪



近海船

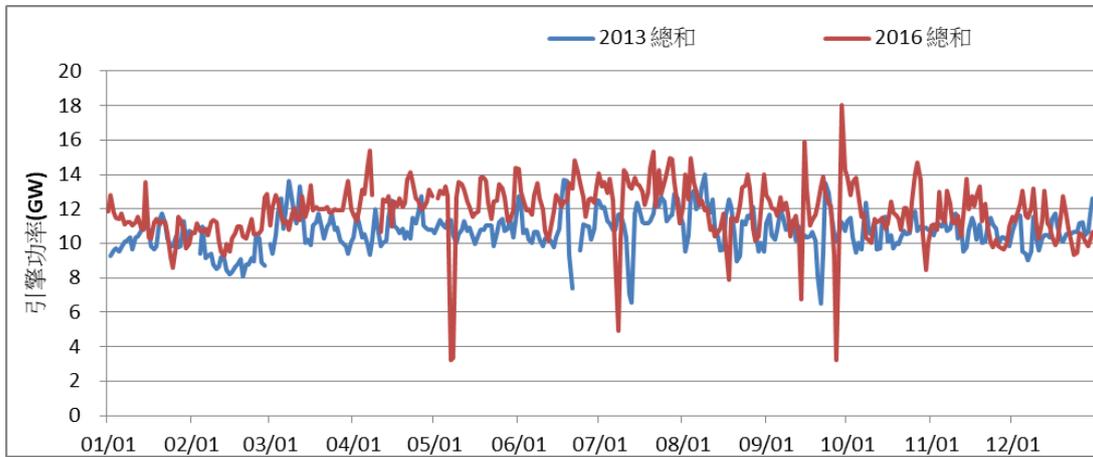


渡輪

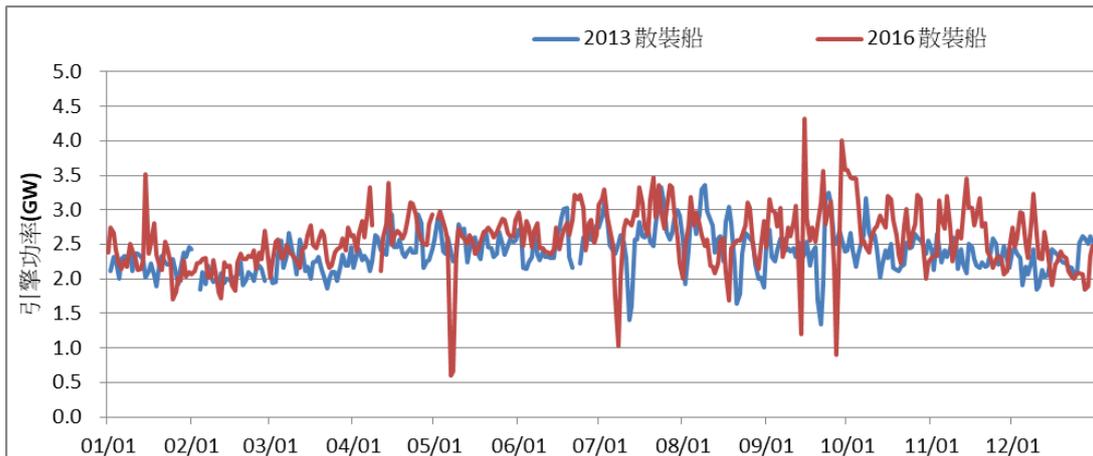


混和船

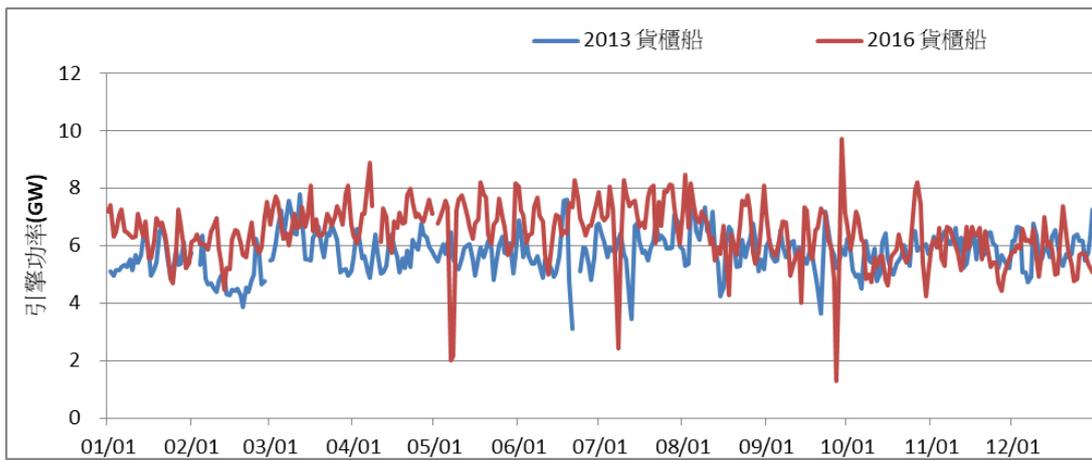
引擎功率：



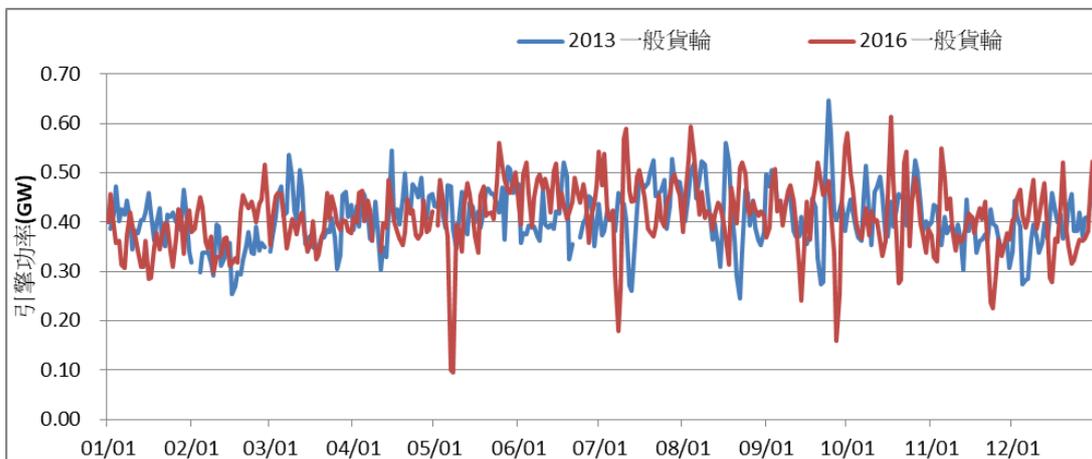
總和



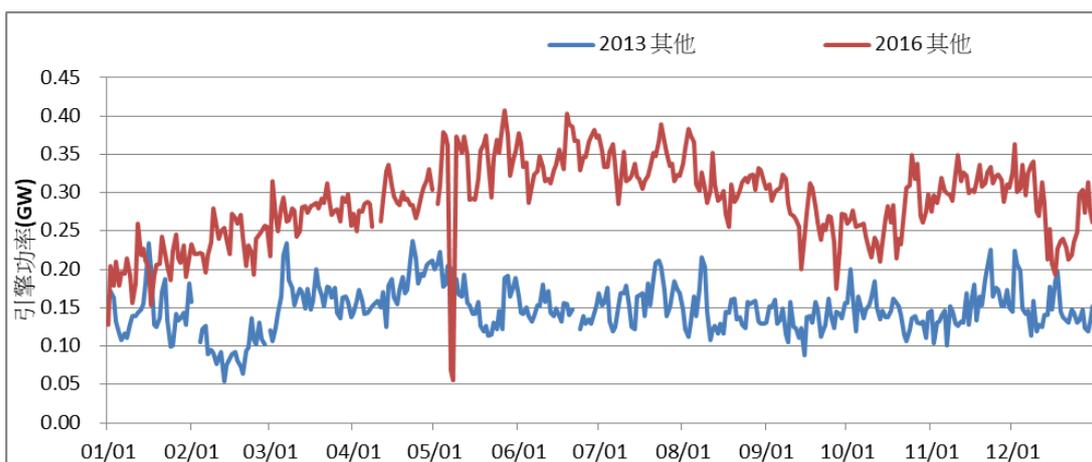
散裝船



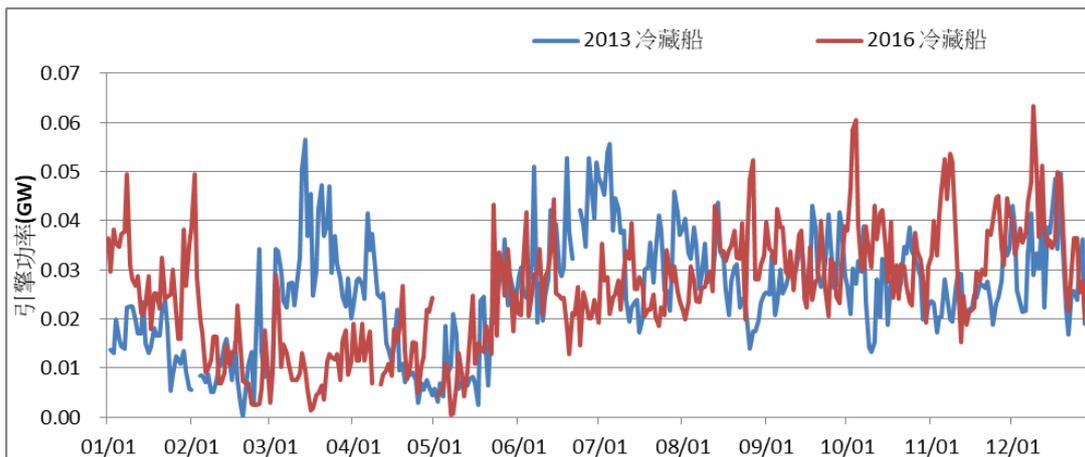
貨櫃船



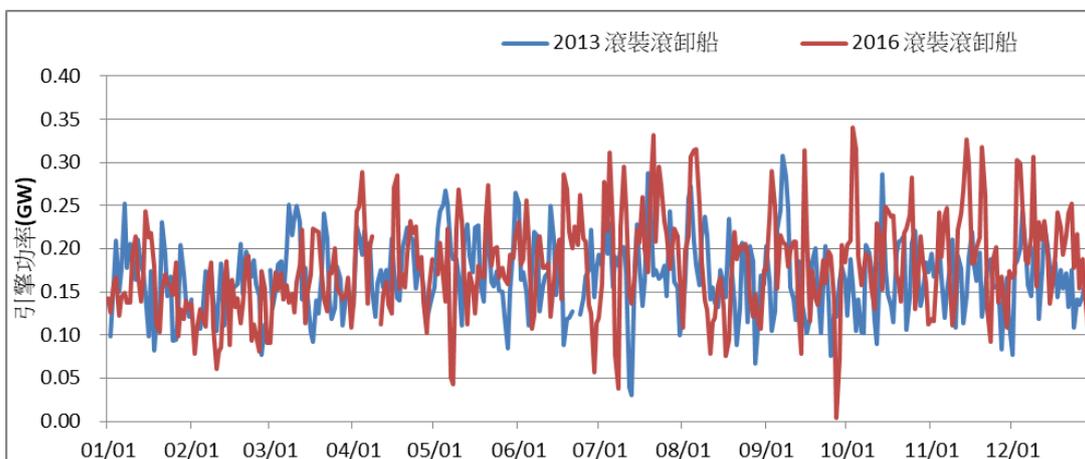
一般貨輪



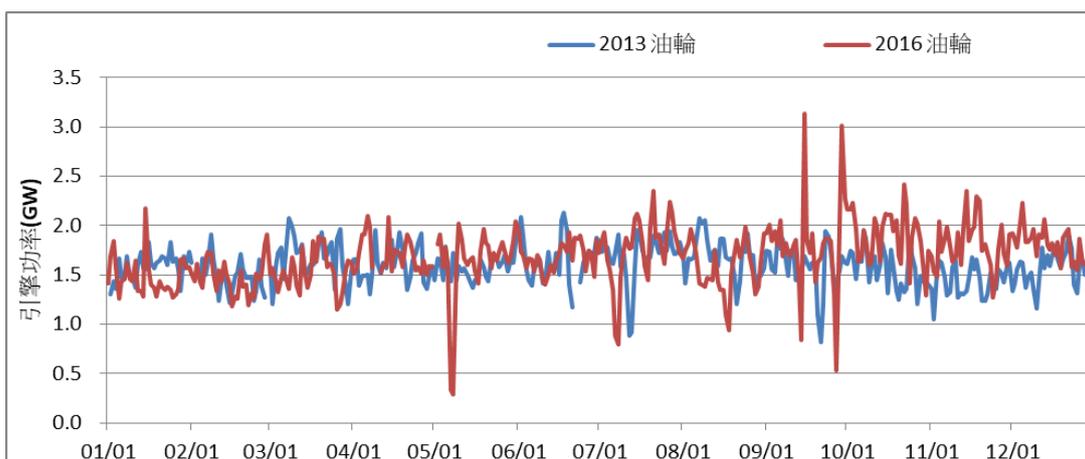
其他



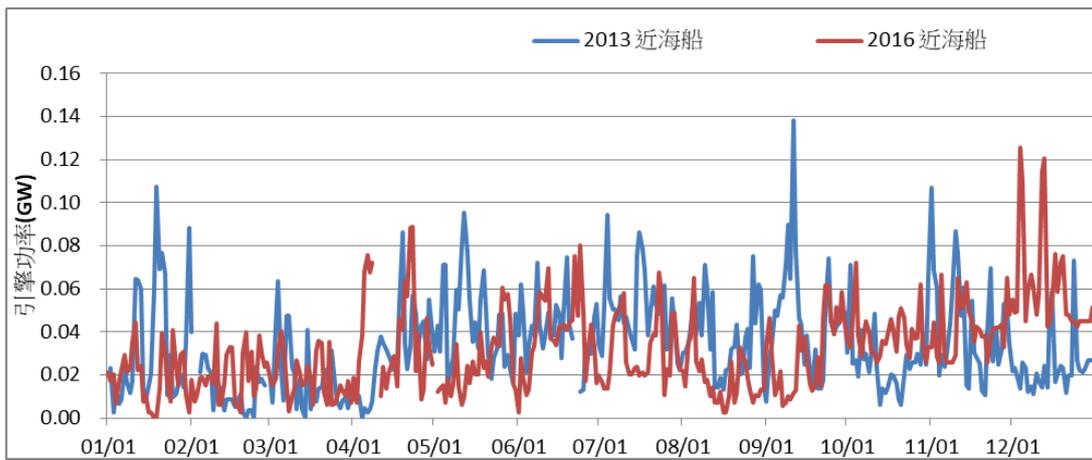
冷藏船



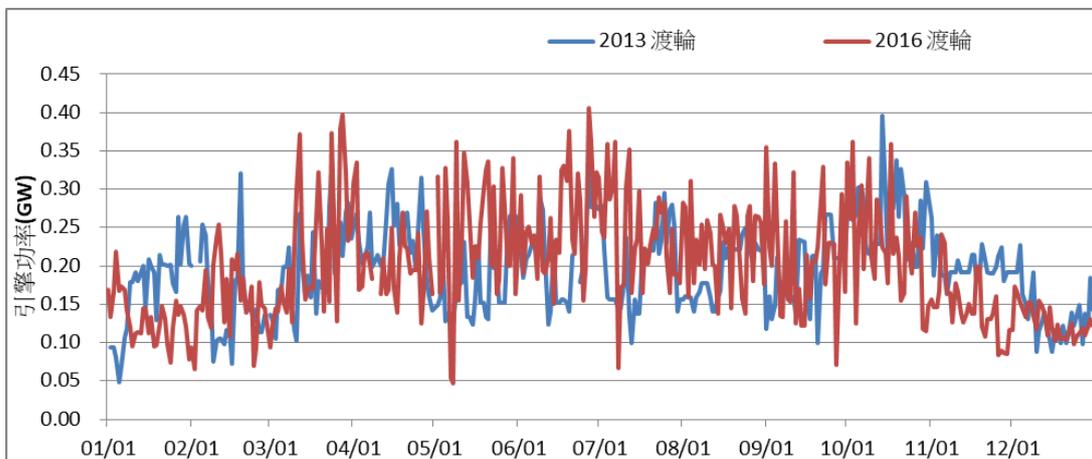
滾裝滾卸船



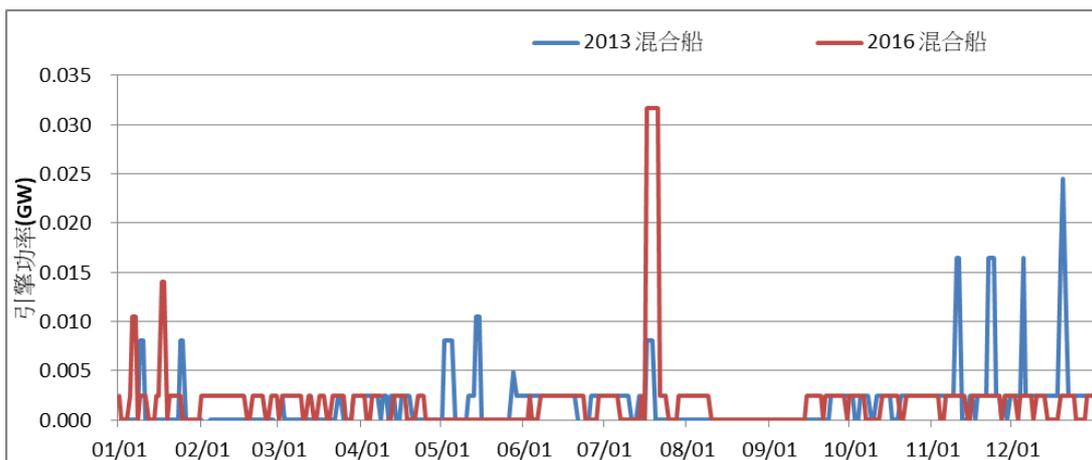
油輪



近海船



渡輪



混和船