

海陸效應對燃煤電廠二氧化硫擴散影響範圍探討

黃俊彥¹、徐子貽²、羅國誠³、林正直³、洪崇軒⁴

¹空軍航空技術學院教務處

²空軍航空技術學院學員生指揮部

³空軍航空技術學院一般學科部軍事氣象系

⁴國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系

摘要

本文分別選擇 2018 年 1 月（冬）、4 月（春）、7 月（夏）、9 月（秋）等四季案例，利用氣象模式 WRF (Weather Research and Forecast model, WRF) 及空氣品質模式 (California Puff Model, CALPUFF) 對高雄燃煤電廠之煙囪擴散進行模擬，探討執行海陸風效應對區域空氣品質之影響。結果顯示：多數時間日間至下午夜間均有較高的污染物從海面吹入境內，此時污染物多累積於沿海陸境內直至次日晨間，而各月份的盛行海陸風濃度分布因風向轉換日夜間不同，呈現大範圍扇形擴散，其中 1 月夜間濃度則因日夜間皆為單一風向轉換；另外，日出時間越晚的月份，午後有較大區域的污染物團，在陸地與海洋邊界處來回擺動，甚至向內陸累積，本質上不利於都會區或沿岸釋放污染物的往外海擴散，為要加以關切之處。

關鍵字：海陸風效應、WRF、CALPUFF、二氧化硫。

1. 前言

能源生產造成的空氣污染是一個重要問題，基於燃料經濟性的考量，二氧化硫(SO₂)空氣污染物的排放，對於使用煤炭為發電能源的國家，仍為廣泛關切的議題。火力發電目前仍為臺灣地區主要的電力供應方式，約佔總發電量的 80%，由於燃燒過程中會形成 SO_x，就二氧化硫的排放而言，燃煤電廠仍是其主要污染源(Wey et al., 2001)；SO₂ 在對流層中與霧、霾和光化學煙霧等大氣複雜過程中起著重要作用，硫化合物的氣態形式會氧化成次級硫酸鹽顆粒，進而導致顆粒物 (PM 和氣候變化(Kajino et al., 2011))。

臺灣四周環海，電廠、工業區等均設置

於臨海地區，但因人口密集，許多大型事業、特殊工業空氣污染源多在沿海地帶，且大型污染源多位於西部（如圖 1），其中以大型固定污染源 1000 噸/年以上排放分佈，故西部的污染物濃度高於臺灣東部的污染物濃度，冬天受蒙古高氣壓影響、夏季受西亞附近的大陸熱低氣壓中心的影響，加上海陸風效應，使這些大型污染源所排放污染物的傳輸與擴散十分複雜（江與張，2007）。相關研究中分析臺灣南部地區氣流與煙流特性，其中指出污染物分布，會受到海陸風的影響，並可能會導致污染物迴流與累積（底與袁，2008）。

本文為瞭解沿海地區大型固定污染源所

排放空氣污染物與海岸所發生之海陸風擴散傳輸的影響，囿於一般觀測資訊無法提供本文所需海岸附近密集風場資料，故利用氣象模式 WRF(Weather Research and Forecast model, WRF)，模擬南部沿海氣象特性，並運用空氣品質模式(California Puff Model, CALPUFF)模擬上述污染物的擴散情形；希望藉由 WRF 天氣研究和預報模式結合 CALPUFF 模式可準確預測得知海陸風對沿海地區影響衝擊範圍及擴散行為，助於改善研究區域的空氣品質。

2. 研究方法

2.1 研究流程

本文研究流程(如圖2)係利用中央氣象局、環保署(EPA)氣象測站、空軍氣象聯隊氣象數據導入氣象模式WRF生成中尺度氣象數據，提供不同型態的天氣現象，並採用環保署所設立監測站資訊以CALPUFF擴散模式模擬於生成模型中的氣象數據，輸入於CALMET模型在三維(3D)網格化建模域上計算每小時的風和溫度場，進行大氣擴散模擬，並依照結果界定出影響範圍，另產生混合高度、表面特性和分散特性(Tartakovsky et al., 2013)。排放量和 CALMET 輸出是 CALPUFF模型的輸入數據。最後，CALPOST 程序是CALPUFF模擬結果的後處理器。

高空探測資料和降水資料都來自氣象模式WRF，並通過CALWRF 轉換程序轉換WRF 模式的輸出結果，用於運行CALMET 模式生成三維逐時氣象場CALMET。特別的是，空氣污染物的擴散會受到風向極大影響，因此瞭解工業和都市的氣象條件非常重要。換句話說，關於空氣污染物濃度分佈和擴散的研究必須根據廣泛的區域內所有監測

站氣象數據加以分析。

2.2 CALPUFF模式與氣象場前處理運作

本文選用CALPUFF 擴散模式6.42 版本和WRF 氣象模式 (ARW3.2.1 版本)。模式採用蘭伯特投影三層巢狀網格之設定，中央經緯度為東經120°8、北緯23°58之水平網格解析度由外而內依序為第一層Domain(D1) 設定水平網格解析度81km；第二層Domain(D2) 設定水平網格解析度27km；第三層Domain(D3)設定水平網格解析度9km，地形解析度為近地面500公尺。

地面氣象數據、高空探測資料和降水資料都來自氣象模式WRF，並通過CALWRF轉換程序轉換WRF 模式的輸出結果，產生風場的方法包含診斷模式及客觀分析，用於運行CALMET 模式生成三維逐時氣象場。CALMET 模式中垂直方向包含10層，從最高至低層度分別為20、40、80、160、320、640、1200、2000、3000、4000m。

2.3 個案篩選

本文將選定臺灣2018年1、4、7、9月之個案分析，當年因受熱帶熱帶性低氣壓影響，導致氣候悶熱，海陸風效應明顯變化，大氣擴散作用不良，雲嘉南跟高屏的境內污染物持續累積，造成空氣品質惡化。

2.4 區域模擬

可由圖觀察2018年興達電廠為各燃煤機組硫氧化物平均排放濃度最高，且鄰近沿海，可加以探討海陸風效應對污染物之擴散影響範圍，彙整環境保護署(Taiwan Environmental Protection Agency, TEPA)環境監測站排放源資料、中央氣象局(Taiwan Central Weather Bureau, TCWB)大氣觀測站資料、空軍氣象聯隊高空氣象資料以及探空監測資料

等。

個案將選用臺南地區測站點(如圖3)，利用上述資料與模擬輸出結果逐一比對。

3. 個案分析與討論

3.1 冬季案例區域海陸風場變化分析及SO₂擴散行為

本文於環保署空氣品質自動監測臺南測站冬季案例為2018年1月3日，使用資料以1月2日0000至1月4日2300LST連續72小時，由中央氣象局提供地面氣象圖(如圖4)可知監測期間大陸冷高壓覆蓋臺灣地區，盛行穩定之東北風，但因等壓線梯度稀疏，風力越小，所以較不受大陸高壓及鋒面影響，且天氣型態穩定，可明顯呈現海陸風效應變化。

依照永安區日照觀測資訊區分日出及日落表(如表1)，執行SO₂污染物濃度及風向、風速監測，並配合空氣品質自動監測站監測資料，以各點之風速、風向監測值，逐一將向變化彙整為趨勢圖(如圖5)。風向監測結果顯示，大致上風向為海風的時間介於日間0900至1800LST、陸風則介於夜間1900至0800LST時。另由高雄地區空氣品質監測站之風玫瑰圖顯示(如圖6)，連續觀測期間明顯受海陸風，平均風向約分佈於340度與50度兩種方向。

由圖7濃度變化趨勢圖可得知，在興達電廠附近沿海地區有發生海陸風時，在二氧化硫濃度平均狀態下，日間海風時濃度較高，夜間陸風時濃度較低；另針對1月2日至4日實施濃度與風速之相關係數探討(如圖8)，分別為0.204033389、0.100763618、0.017854187，均無顯著相關性，推測發生海陸風效應污染物濃度與風速無關。

1月3日CALPUFF模擬海陸風結果最為

顯著，興達電廠區域0000LST及1200LST風向均盛行北風，但風速較薄弱導致污染物擴散朝東西向緩慢移動，且範圍含括大多在內陸；0600LST濃度開始增加，呈現海陸風逐漸轉換，污染濃度靠近沿海區域，0900LST濃度為當日最高，風向轉變成海風，污染範圍由沿海區域向內陸擴散(如圖9)。

3.2 春季案例區域海陸風場變化分析及SO₂擴散行為

本文於環保署空氣品質自動監測臺南測站春季案例為2018年4月11日，使用資料以4月10日0000至4月12日2300LST連續72小時，由中央氣象局提供地面氣象圖(如圖10)可知大陸冷高壓出海後，高壓中心持續向東移動的過程，影響臺灣地區之風場由東北風轉為偏東風，等壓線梯度仍稀疏，風力小，所以較不受高壓及鋒面影響，且天氣型態穩定，可明顯呈現海陸風效應變化。

依照永安區日照觀測資訊區分日出及日落表(如表2)，將監測資料蒐集後加以彙整，監測風向顯示結果(如圖11)，大致上風向為海風的時間介於0900至1800LST；陸風時間則為1900至0700LST。另外由高雄地區空氣品質監測站之風玫瑰圖(如圖12)顯示，連續觀測期間明顯受海陸風，風向約分佈於270度、180度與90度。

由濃度變化趨勢圖(如圖13)顯示，在興達電廠附近沿海地區有發生海陸風時，二氧化硫濃度平均狀態下，日夜間海風、陸風濃度高低振盪，相較不受海陸風效應影響；另針對4月10日至12日實施濃度與風速之相關係數探討(如圖14)，分別為0.159365565、-0.478008818、0.013636197，其中4月11日污染物濃度與風速呈現負相關，可推測代表風

速越低污染物不易擴散導致高濃度現象。

以CALPUFF模擬4月10日海陸風最為顯著(如圖15)，興達電廠排放區1300及1600LST風向均盛行西風，海風效應強烈，圖中顯示污染物涵蓋內陸面積廣大；0300LST濃度開始增加，陸風較弱導致污染物靠近沿海區域，無法帶離內陸地區，0500LST濃度為當日最高，風向仍為陸風型態日出後因比熱差異漸漸轉變海風，但污染範圍由沿海區域向內陸擴散進而累積。

3.3 夏季案例區域海陸風場變化分析及SO₂擴散行為

本文於環保署空氣品質自動監測臺南測站夏季案例為2018年7月27日，使用資料以7月26日晚間0000至7月28日2300LST連續72小時，由中央氣象局提供地面氣象(如圖16)，如同4月高壓中心持續向東移動的過程，暖高壓覆蓋臺灣地區此時天晴炎熱，等壓線梯度稀疏，風力小，不受高壓及鋒面影響，且天氣型態穩定，可明顯呈現海陸風效應變化。

依照永安區日照觀測資訊區分日出及日落表(如表3)，將監測資料蒐集後加以彙整，監測風向顯示結果(如圖17)，大致上風向為海風的時間介於0900至1900LST；陸風時間為2000至0800LST；另外由高雄地區空氣品質監測站之風玫瑰圖顯示(如圖18)，連續觀測期間明顯受海陸風，風向約分佈於270度與80度。

由濃度變化趨勢圖(如圖19)顯示，得知在興達電廠附近沿海地區有發生海陸風時，二氧化硫濃度平均狀態下，日夜間海風、陸風濃度高低振盪，相較不受海陸風效應影響；針對7月26日至28日實施濃度與風速之相

關係數探討(如圖20)，相關係數分別為-0.075399198、-0.519112182、0.068052183，其中7月27日污染物濃度與風速呈現負相關，可推測代表風速越低不易污染物擴散所以濃度越高。

以CALPUFF模擬7月27日海陸風最為顯著日(如圖21)，興達電廠排放區0800及1900LST風向均盛行北風，圖中顯示0800LST污染物涵蓋內陸面積密集；1900LST涵蓋內陸面積大；0400LST濃度開始增加，陸風較弱導致污染物靠近偏北向沿海區域，無法帶離內陸地區，2200LST濃度為當日最高，涵蓋海面及內陸面積大，污染物擴散範圍由內陸吹向海洋。

3.4 秋季案例區域海陸風場變化分析及SO₂擴散行為

本文於環保署空氣品質自動監測臺南測站秋季案例為2018年9月2日，使用資料以9月1日0000至9月3日2300LST連續72小時，由中央氣象局提供地面氣象圖(如圖22)，靠近臺灣地區此時有熱帶低氣壓氣旋及秋天鋒面，但等壓線梯度稀疏，風力小，不受高壓及鋒面影響，且天氣型態穩定，可明顯呈現海陸風效應變化。

依照永安區日照觀測資訊區分日出及日落表(如表4)，將監測資料蒐集後加以彙整，監測風向顯示結果(如圖23)，大致上風向為海風的時間介於1000至1800LST，陸風時間為1900至0900LST；另外由高雄地區空氣品質監測站之風玫瑰圖(如圖24)，連續觀測期間明顯受海陸風，風向約分佈於280度與100度。

由濃度變化趨勢圖(如圖25)顯示，得知在興達電廠附近沿海地區有發生海陸風

時，二氧化硫濃度平均狀態下，日間海風時濃度微高，夜間陸風時濃度微低，變化不明顯，相較不受海陸風效應影響。另針對9月1日至3日實施濃度與風速之相關係數探討(如圖 26)，相關係數分別為 0.01421013、-0.029609766、-0.13473696，均無顯著正負相關，得推測發生海陸風效應污染物濃度與風速無關。

陸風最為顯著日(如圖 27)，興達電廠排放源區域於 0700 及 1600LST 風向均盛行北風，圖中顯示 0700LST 污染物涵蓋海面及內陸面積大；1600LST 污染物累積於內陸；0400LST 濃度開始增加，陸風較弱導致污染物靠近偏北向沿海區域，無法帶離內陸地區，0900LST 濃度為當日最高，涵蓋內陸累積密集。

4. 結論

模擬區域污染物時序圖，橫坐標代表為一日的 0000 至 2300LST，由上述四個案例中呈現日間至下午夜間有較高的污染物從海面吹入境內，至隔天早晨之前會有較多的污染物累積於沿海陸境內。結果與海陸風吹拂時段相符合，印證吹海風的時候，促進污染物傳移的現象，污染物會傾向於流入臺灣。

海陸風盛行月份夜間的濃度分布因日夜間風向轉換，呈現大範圍盛行風之扇形分布 7 月及 1 月夜間濃度則因日夜間皆為單一風向，呈現狹長形狀，表示海陸風盛行月份污染物可能有迴流、累積的現象。

本文發現除了日出時間愈晚的月份(7 月與 9 月)，愈傾向於下午會有較大的污染物團在陸地與海洋來回擺動，甚至往內陸擴散不易往外海，本質上不利用都會區或沿岸釋放污染物的往外海擴散，為需要加以關切之

處。

污染物的迴流量與海風有正向的關係，但 4 及 7 月污染物流入或流出量比較不確定，可能受季風效應影響，未來可再深入探討。

5. 參考文獻

- 江宙君、張時禹，海陸風對臺灣沿海地區空氣品質之影響，碩士論文，臺灣：國立中央大學(2007年7月)。
- 底宗鴻、袁中新，高雄地區陸域及鄰近海域懸浮微粒物化特性分析及時空分佈探討，碩士論文，臺灣，國立中山大學(2008年8月)。
- 梁佳修、葉富豪、陳昱均、劉遵賢、陳錦煌，以 WRF 及 CALPUFF 之全年模擬探討南部沿海地區之風場及煙流傳輸特性，環境資源永續發展研討會，桃園縣(2014)。
- Kajino, M., Ueda, H., Sato, K., Sakurai, T. (2011). Spatial distribution of the source-receptor relationship of sulfur in Northeast Asia, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, pp. 6475-6491.
- Wey, M., Ou, W., Liu, Z., Tseng, H., Yan, W. (2001). Pollutants in incineration flue gas. *J. Hazard. Mater.*, 82, pp. 247-262. Lo, K.-C.; Hung, C.-H., (2012): The development and application of weather research forecast chemistry model, *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 4, 138-145.

6. 圖表彙整

表1 高雄市永安區1月的日出日落時間表。

日期 ^①	日出 ^②	日落 ^③	日照時長 ^④
2018年1月2日 ^⑤	06:39:51 AM ^⑥	05:26:07 PM ^⑦	10h 46m 16s ^⑧
2018年1月3日 ^⑤	06:40:08 AM ^⑥	05:26:46 PM ^⑦	10h 46m 38s ^⑧
2018年1月4日 ^⑤	06:40:23 AM ^⑥	05:27:26 PM ^⑦	10h 47m 3s ^⑧

表2 高雄市永安區4月的日出日落時間表。

日期 ^①	日出 ^②	日落 ^③	日照時長 ^④
2018年4月10日 ^⑤	05:43:09 AM ^⑥	06:17:38 PM ^⑦	12h 34m 29s ^⑧
2018年4月11日 ^⑤	05:42:15 AM ^⑥	06:18:01 PM ^⑦	12h 35m 46s ^⑧
2018年4月12日 ^⑤	05:41:21 AM ^⑥	06:18:23 PM ^⑦	12h 37m 2s ^⑧

表3 高雄市永安區7月的日出日落時間表。

日期 ^①	日出 ^②	日落 ^③	日照時長 ^④
2018年7月26日 ^⑤	05:27:33 AM ^⑥	06:43:37 PM ^⑦	13h 16m 4s ^⑧
2018年7月27日 ^⑤	05:27:58 AM ^⑥	06:43:11 PM ^⑦	13h 15m 13s ^⑧
2018年7月28日 ^⑤	05:28:24 AM ^⑥	06:42:43 PM ^⑦	13h 14m 19s ^⑧

表4 高雄市永安區9月的日出日落時間表。

日期 ^①	日出 ^②	日落 ^③	日照時長 ^④
2018年9月1日 ^⑤	05:41:24 AM ^⑥	06:16:49 PM ^⑦	12h 35m 25s ^⑧
2018年9月2日 ^⑤	05:41:42 AM ^⑥	06:15:52 PM ^⑦	12h 34m 10s ^⑧
2018年9月3日 ^⑤	05:42:01 AM ^⑥	06:14:54 PM ^⑦	12h 32m 53s ^⑧

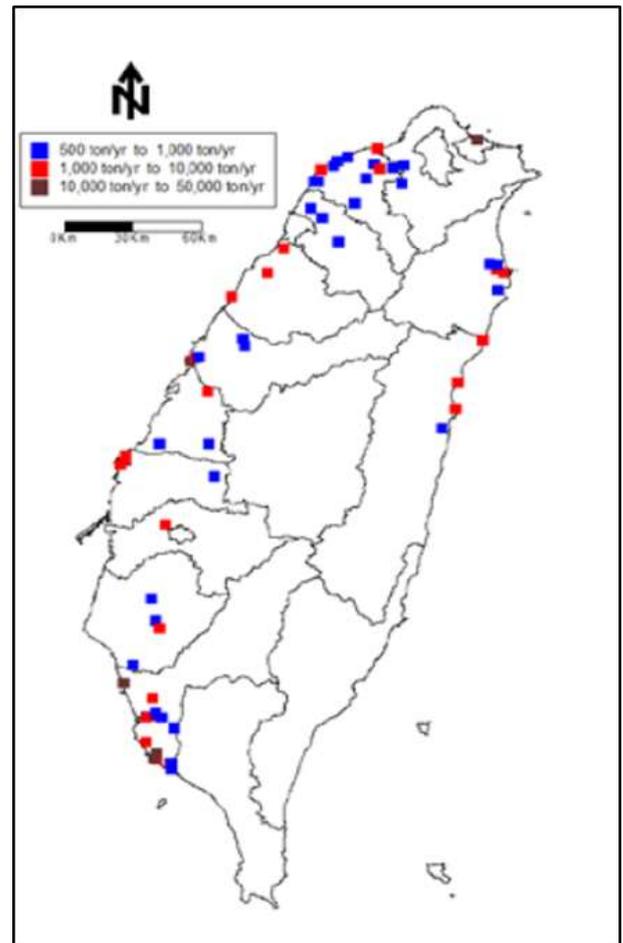


圖 1 臺灣地區硫、氮氧化物排放分佈。

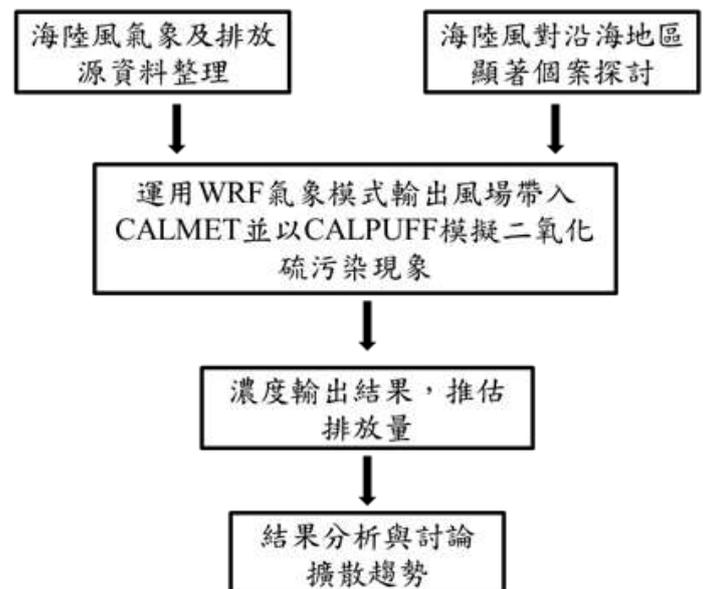


圖 2 研究流程圖。



圖 3 環保署空氣品質監測站 (圖片來源: GOOGLE 地圖)。



圖 4 2018 年 1 月 3 日天氣圖 (資料來源: 中央氣象局)。

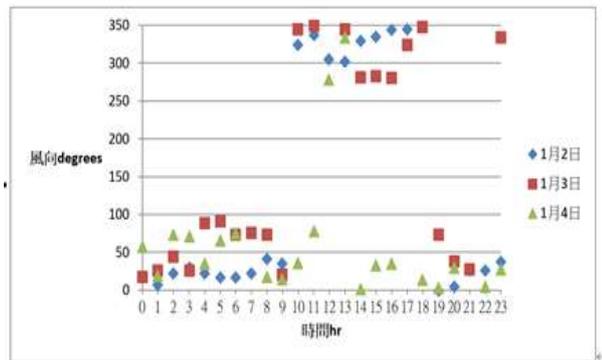


圖 5 1 月 2 日至 4 日風向變化趨勢圖。

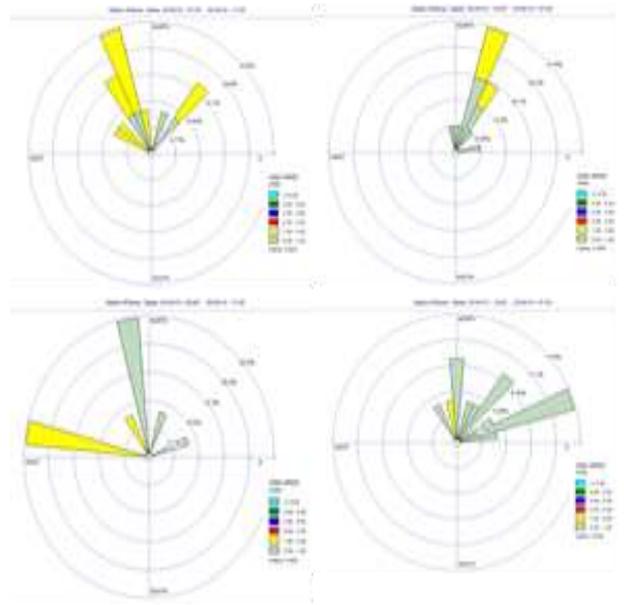


圖 6 1 月 2 日至 4 日風玫瑰圖。

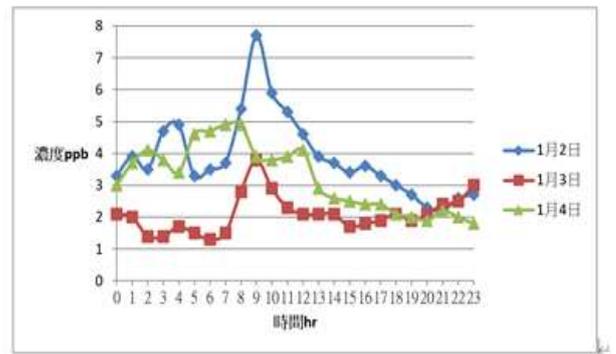


圖 7 1 月 2 日至 4 日 SO₂ 濃度變化趨勢圖。

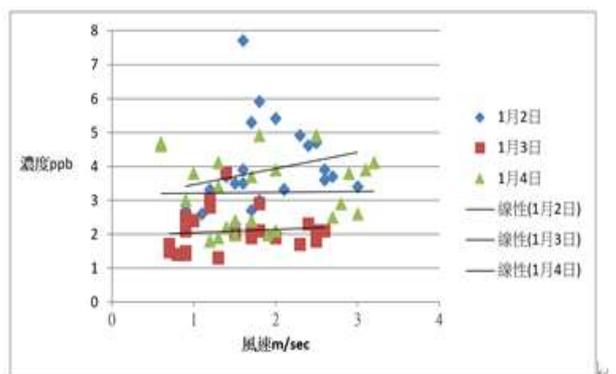


圖 8 1 月 2 日至 4 日風速與濃度關係圖。

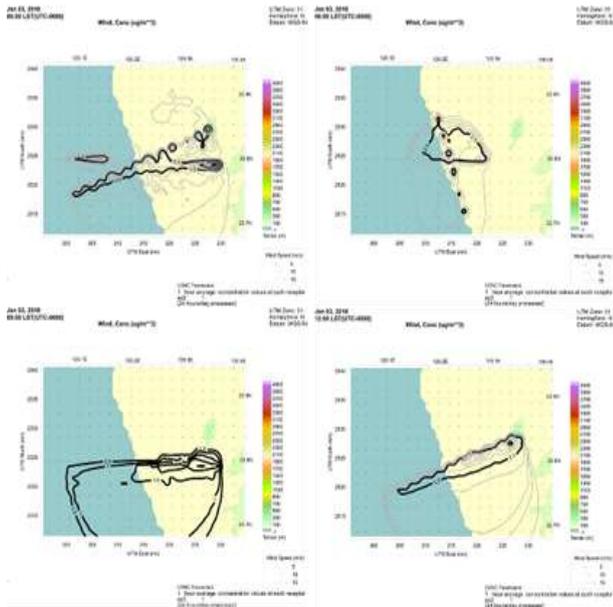


圖 9 1 月 3 日 SO₂ 濃度擴散圖。

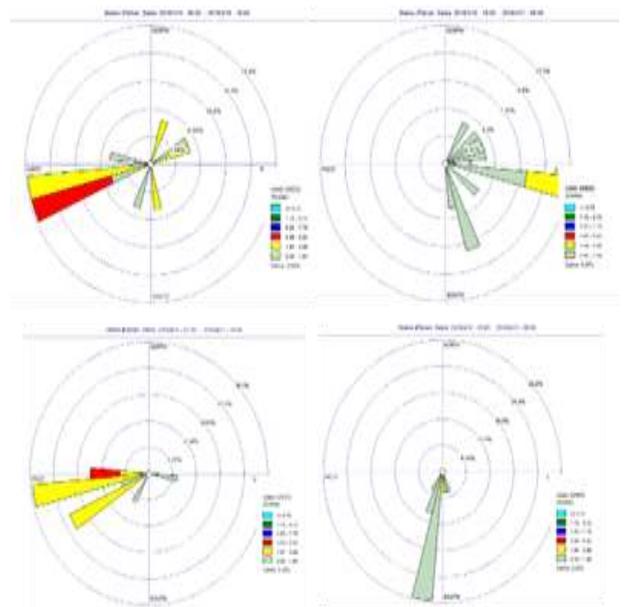


圖 12 4 月 10 日至 12 日風玫瑰圖。



圖 10 2018 年 4 月 11 日天氣圖(資料來源：中央氣象局)。

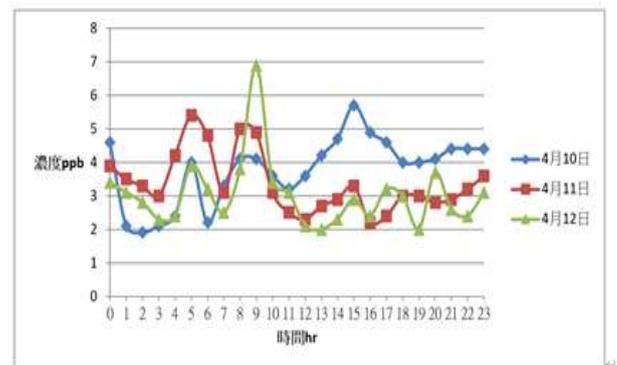


圖 13 4 月 10 日至 12 日 SO₂ 濃度變化趨勢圖。

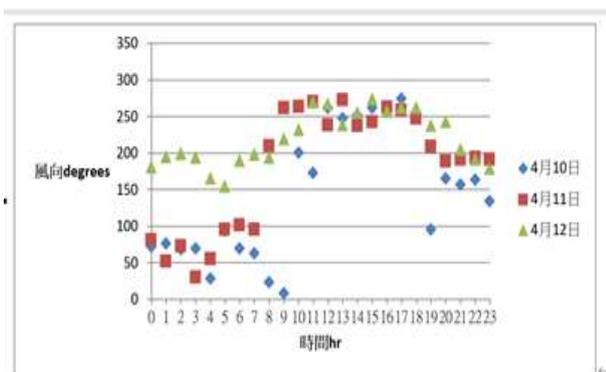


圖 11 4 月 10 日至 12 日風向變化趨勢圖。

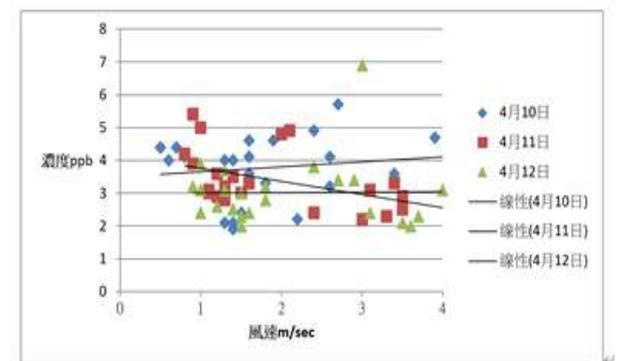


圖 14 4 月 10 日至 12 日風速與濃度關係圖。

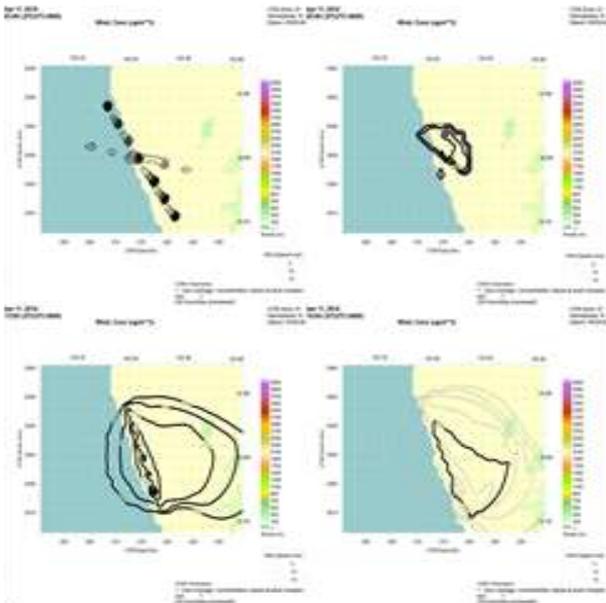


圖 15 4 月 11 日 SO₂ 濃度擴散圖。

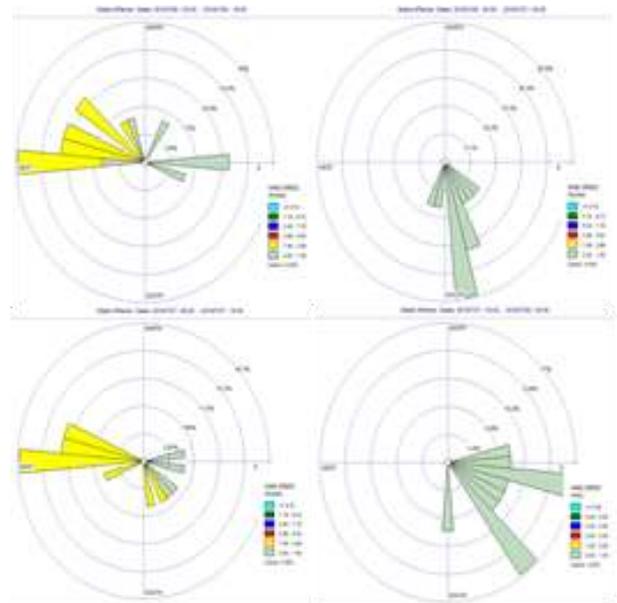


圖 18 7 月 26 日至 28 日風玫瑰圖。



圖 16 2018 年 7 月 27 日天氣圖(資料來源：中央氣象局)。

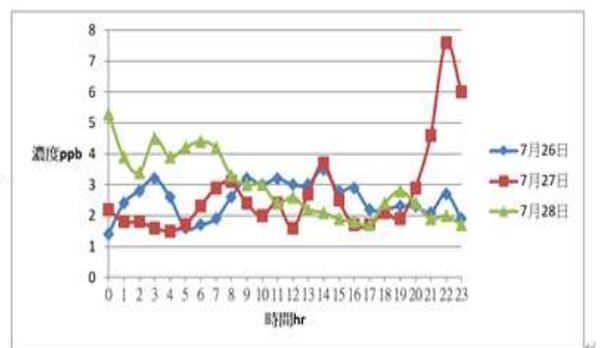


圖 19 7 月 26 日至 28 日 SO₂ 濃度變化趨勢圖。

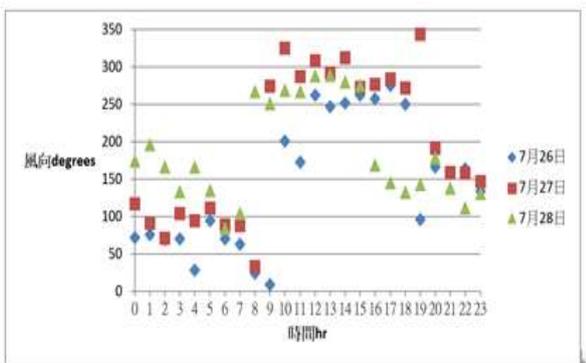


圖 17 7 月 26 日至 28 日風向變化趨勢圖。

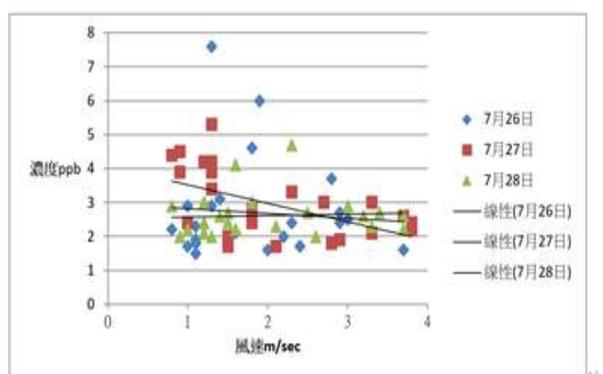


圖 20 7 月 26 日至 28 日風速與濃度關係圖。

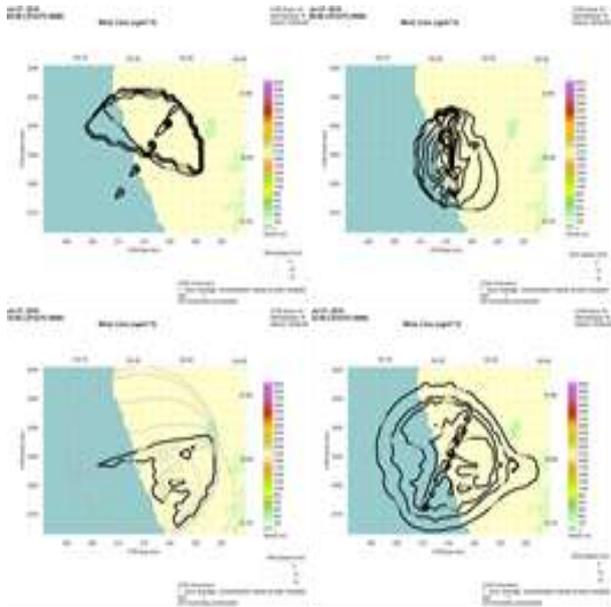


圖 21 7 月 27 日 SO₂ 濃度擴散圖。

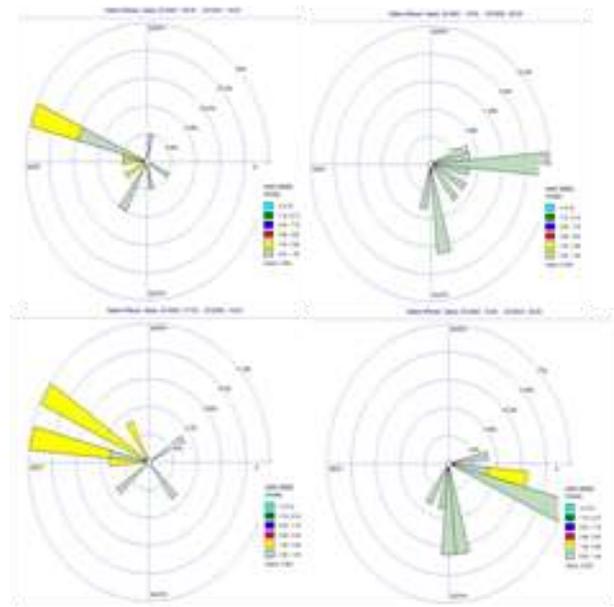


圖 24 9 月 1 日至 3 日風玫瑰圖 18 年 9 月 2 日天氣圖(資料來源:中央氣象局)。

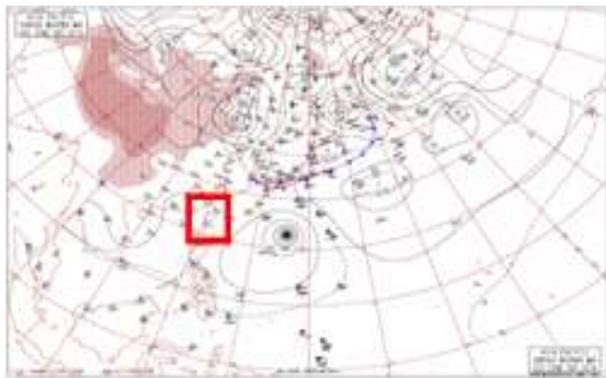


圖 22 2018 年 9 月 2 日天氣圖(資料來源:中央氣象局)。

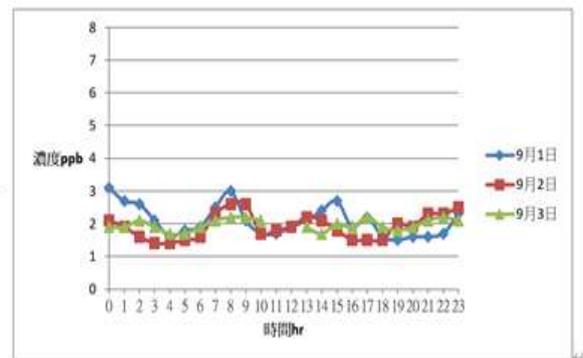


圖 25 9 月 1 日至 3 日 SO₂ 濃度變化趨勢圖。

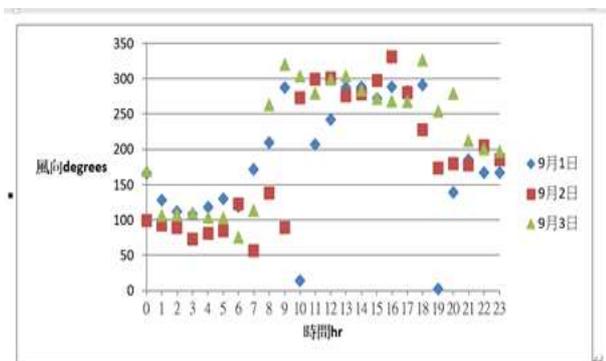


圖 23 9 月 1 日至 3 日風向變化趨勢圖。

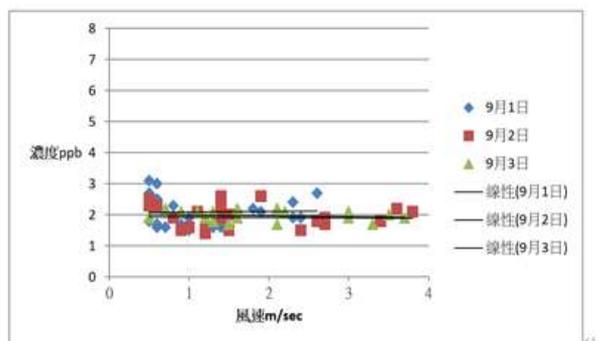


圖 26 9 月 1 日至 3 日風速與濃度關係圖。

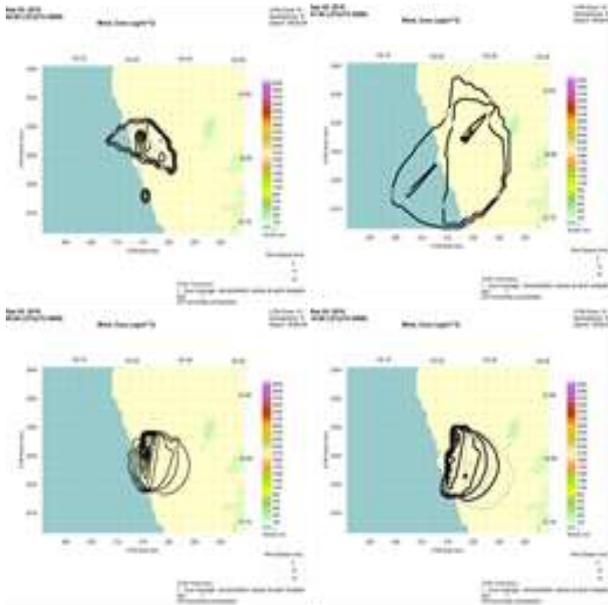


圖 27 9 月 2 日 SO₂ 濃度擴散圖。

The Influence of Sea-Land Breeze Effects on the Dispersion of SO₂ Emitted from a Coal-Fired Power Plant

Jun-Yan Huang¹ Tzu-Yi Hsu² Kuo-Cheng Lo³ Cheng-Chih Lin³ and Chung-Hsuang Hung⁴

¹Academic Affairs Division, Air Force Institute of Technology

²The Officer and Cadet Command, Air Force Institute of Technology

³Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

⁴Department of Safety, Health, and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology

Abstract

In this study investigates the effects of sea-land breeze in January, April, July, and September of 2018 on the dispersion of SO₂ in the ambient air of southern Taiwan. The SO₂ was emitted from a coal power plant. Both WRF weather model and CALPUFF air quality model were applied. In general, In January, the nighttime concentration manifests a narrow and long expansion due to the change of single wind direction during the day and night, indicating the pollutants flowing back and forth and accumulating near coastal area. Moreover, in the month when the sunrise time is later (July and September), it is more likely that larger pollutant mass swings back and forth at the land-sea border in the afternoon, and even accumulates inland. All these phenomenon basically hinder the dispersion of air pollutants emitted from coastal area.

Keywords: Sea and Land Breeze Effects, WRF, CALPUFF, SO₂