

海岸氣象對空氣污染物擴散的影響

摘要

本研究利用 WRF 與 CALPUFF 探討台灣西南沿岸海岸氣象特性及其對污染物擴散的影響，研究方法是以前 WRF 進行 2011 年全年的氣象模擬，經 CALPUFF 的氣象前處理程式 CALMET 處理，並納入觀測資料進行客觀分析得到 CALPUFF 所需的氣象資料後，進行 2011 年 CALPUFF 全年模擬。

研究結果顯示高屏沿海區域因冬夏有不同的盛行風向，季節盛行風與海陸風加成或抵消，造成日間大都以海風為主，夜間則為微弱陸風，海風所出現之高度範圍在秋冬兩季最高約可至 200~400 公尺、春夏兩季最高約可至 250~600 公尺。

海陸風效應對污染物傳輸擴散的影響，在台灣西南高屏沿海地區，白天海風易有偏西的分量，夜間則有偏東的陸風，基本上海風的效應，風場偏西的效應會使得污染物易向陸地吹送，此特性冬夏皆然。夜間時，由於陸風的效應，會抵消盛行風偏西的分量，但由於冬、夏盛行風北、南的分量不同，使得污染物在冬季夜間時會吹向海上，夏季夜間時則吹向陸地。春、秋兩季則由於處於冬、夏季風的交替，平均來看污染物沒有明顯的傳輸方向，大致上由於盛行風偏西的分量與海風的加成效應，污染物易向陸地吹送，但在某一段時期，仍會因為主導的東北或西南季風比較盛行，會有接近冬季或夏季比較明顯的污染傳輸擴散行為。

關鍵字：CALPUFF、WRF、海岸氣象、季風、海陸風

一、前言

台灣地狹人稠，由於中央山脈貫穿，多數人口聚集於沿海平地。台北、新竹、台中、台南、與高雄等大型城市由北至南串聯整個西部走廊，台灣絕大部份的人口與工業皆位於此區域，使污染多集中於此。圖 1 為台灣地區硫氧化物與氮氧化物年排放量超過 500 噸之固定污染源分布圖，由圖中可見，多數大型固定污染源皆位於西部走廊地區，其中超大型（年排放量超過 10,000 噸）污染源皆位於西部沿海地區，且都在大型城市附近，因此這些大型污染源所排放的空氣污染物是否對附近居民造成影響，一直是環保議題之焦點。

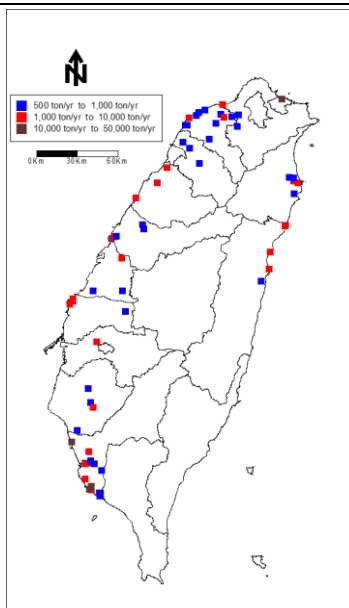


圖 1 台灣地區硫氧化物與氮氧化物年排放量超過 500 噸之固定污染源分布圖(圖片來源：梁，2014)

台灣屬季風氣候，冬夏季盛行風向明顯不同，台灣亦屬海島地區，海、陸差異對局部地區氣象的影響非常明顯，加上高聳的中央山脈之影響，山谷效應以及海陸效應，使台灣地區日夜風向常有很大差異。台灣西南沿海地區，冬季位於東北季風背風尾流影響區域（梁等，2014；鄭，2014），夏季則直接受到偏南風影響，故該區域風場隨著季節不同，加上海、陸與山、谷效應，日夜皆呈現不同之特性。此外高雄市人口較密集之區域亦處於靠海位置，根據 Lin et al. (2008) 之研究，台灣都會區在夏季時因熱島效應，大氣垂直上升運動 ($>0.4 \text{ m/s}$) 可達到約 1500 公尺之高度，如此更增加了高屏沿海地區風場在水平及垂直方向上之複雜特性。

台灣大型污染源多位於西部走廊，部分超大型污染源亦位於沿海地區，冬、夏季風效應加上海、陸、山、谷效應，使這些大型污染源所排放污染物的傳輸與擴散十分複雜，梁等 (2014) 與楊 (2010) 分析南部地區氣流與煙流特性發現污染物分布受到海陸風的影響，並可能有污染物迴流的現象。

為瞭解海岸附近之海陸風特性及其對沿岸大型污染源所排放空氣污染物傳輸擴散的影響，一般觀測並無法提供本研究所需之海岸附近密集風場資料，因此本研究採用氣象模式 WRF (Weather Research and Forecast model) 模擬高屏沿海氣象特性，並利用 CALPUFF (Exponent, 2011) 模擬大型污染源所排放空氣污染物之擴散情形。由於冬夏盛行風向不同，海陸風與山谷風在不同季節可能呈現不同的特性，故本研究進行全年模擬，以探討在各種氣象狀況下，污染物所呈現的各種傳輸擴散特性。

二、研究方法

本研究利用氣象與空品模式探討海岸氣象對沿岸大型空氣污染源所排放空

氣污染物擴散的影響，由於台灣西南高屏地區氣象特性複雜，一般穩態直線式的高斯擴散模式（如 ISC 與 AERMOD）因其多採用單一且均勻的氣象場，並不適合應用於本研究。在此考量下，本研究採用可考慮三維氣象結構的非穩態模式 CALPUFF，模擬污染物逐時擴散情形。CALPUFF 為美國環保署所建議與推薦的新一代空氣污染擴散模式，其氣象前處理程式 CALMET 能將氣象觀測資料客觀分析以得到三維氣象風場（李，2008），也能結合先進的三維氣象模式，產生更符合物理意義的氣象場，對於本研究而言，將是非常重要之特點。除此之外，CALPUFF 亦能對沿海地區因海陸表面熱力性質差異所形成的熱力內邊界層（Thermal Internal Boundary Layer），提供特別的處理機制，對本研究所探討的海陸風問題更有幫助。

本研究以 TEDS 8.1 版資料，選取高雄沿海地區某大型污染源為範例，模擬其所排放污染物的污染擴散特性。大氣運動在時間與空間上具多重尺度的特性，台灣位於東亞季風區，在較長時間尺度下會因季節更迭呈現不同的盛行風向，而本研究所模擬的台灣西南沿岸地區屬海陸交界，時間尺度較短的局地海陸風日循環現象也相當顯著，為瞭解台灣西南沿海地區在不同季節近地表風場之日夜變化特徵，本研究模擬時段為 2011 年全年，模擬範圍為高屏地區，座標 TWD97 E 144-244 km；TWD97 N 2454-2534 km，面積 80 km×80 km，如圖 2 所示，網格間距 1 km，垂直方向模擬範圍為地面至 4000 公尺高，各層依序為 20、60、100、200、400、800、1600、2400、3200、4000 m，共 10 層。

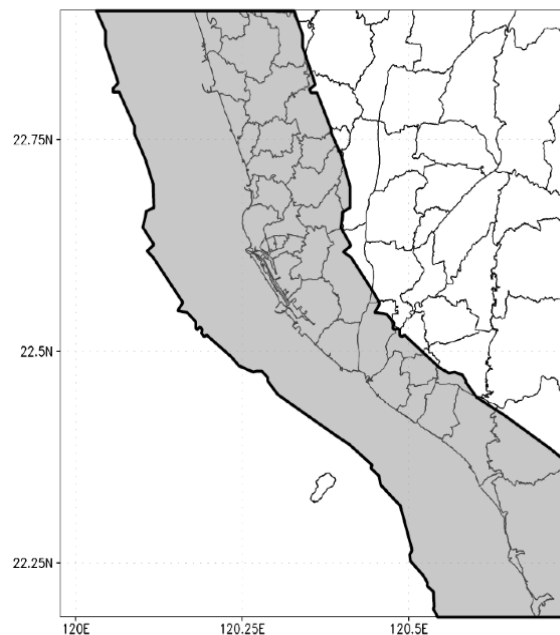


圖 2. 本研究 CALPUFF 模擬區域（灰階區域為海岸線東西向各 15 公里範圍內之區域）

本研究所使用的 2011 年三維氣象資料主要是來自於 WRF 模式，氣象網格模式採用 WRF 3.2.1 版，模擬時使用四層巢狀網格設定，各層網格位置詳圖 3，此四層網格之水平解析度由外而內依序為 81、27、9 及 3 公里，至於模式中垂直方向部分，由地面至 100 hPa 共分為 24 層，並採用追隨地勢座標。模式模擬時所

使用之邊界層參數化為 YSU scheme、輻射參數化為 RRTMG scheme、地面模式（Land Surface Model）為 Noah LSM，同時亦開啟 Urban Canopy Model。模式所使用之初始及邊界條件是來自於 NCAR/NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析資料，模擬時間始自 2010 年 12 月 31 日 12UTC，結束於 2012 年 1 月 1 日 00UTC，共計一年。

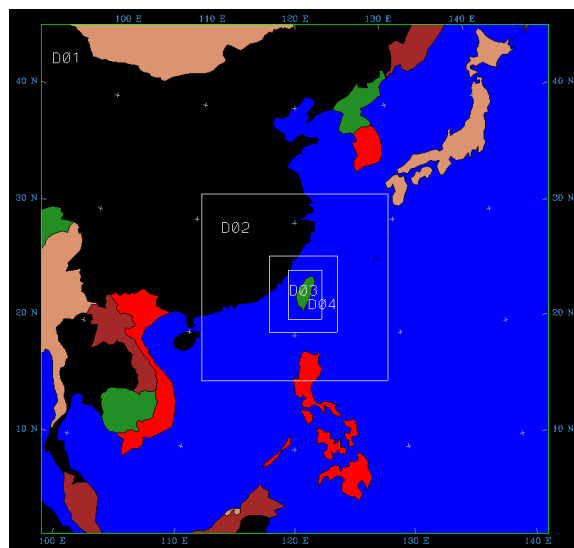


圖 3 本研究氣象網格模式之四層巢狀網格位置圖

WRF 所產生的氣象資料必須利用 CALPUFF 的氣象前處理程式 CALMET 處理後才能為 CALPUFF 使用，CALMET 產生風場之方法包含診斷模式及客觀分析。CALMET 首先讀入 WRF 所產生之氣象場作為初始風場，進行地形效應修正及質量守恆處理得到第一階段風場，之後植入觀測資料進行客觀分析，最後進行風場平滑化及質量守恆處理得到 CALPUFF 所需的第二階段風場。地形與土地使用分類資料來自內政部國土測繪中心，客觀分析使用之氣象觀測資料包含陸上地面資料、探空資料、海上資料三類，陸上地面資料來自高雄氣象站與高屏地區空氣品質測站，探空資料來自屏東探空站，海上資料來自小琉球浮標站。

以上模式之設定可參考梁等 (2014) 的研究，本研究各模式所產生的資料將應用於台灣西南高屏沿海地區氣象結構與污染物擴散特性分析。由於資料包括全年 8,760 小時之三維氣象與污染物分布，資料量非常龐大，無法一一逐時檢視，本研究將以各月份日夜風場之平均狀況或距平 (anomaly) 加以分析，但經檢視大部份資料後，大部分的現象都有季節的型態，並有各自的氣象與污染擴散傳輸特性，因此在本研究中，多數的分析僅會呈現 1 月、4 月、7 月及 10 月的分析結果，並以其分別代表冬、春、夏、秋各自季節的特性。

三、結果與討論

污染物擴散型態與氣象條件有非常密切的關係，尤其是風速與風向，局地海陸風日循環效應容易造成大氣中污染物在白天與夜晚之分布差異，而各季節大尺度盛行風場的迥異也可能是主導環境風場與污染物分布的主要因素，本研究首先檢視全年污染物擴散的分布結果，由於無法呈現逐時的結果，本研究以日夜月平

均地面污染物濃度分布圖(圖4)呈現,並以1月代表冬季時期,4月代表春季,7月代表夏季、10月代表秋季,其中(a)、(c)、(e)、(g)分別為1、4、7、10月的日間(上午9時至下午5時)月平均,(b)、(d)、(f)、(h)分別為1、4、7、10月的夜間(下午6時至隔日上午8時)月平均,其中污染物濃度以色階呈現,向量為地面平均風場,圖中綠點為煙囪位置。

1月代表冬季正是東北季風非常強盛的時期,但由於中央山脈阻隔,位於背風面的西南沿岸地區盛行風向以偏北風為主,如圖4(a)、(b)所示,此時因受較強烈季節風場影響,日間高屏沿海附近海面上平均風場大致是由西北向東南沿海岸線吹送,陸地上風向則因尾流效應影響,風速較低,風向紊亂,不過整體來說,由於盛行的北風仍然主導,因此大部份的污染物仍然是向南吹送。夜間海面上風向明顯偏向正北風,陸地上風速仍較為微弱,但由於海風退去,陸風效應稍為明顯,污染物幾乎全部往南方海面吹送。由1月日夜風場特性之差異可見,大尺度的季節風主導西南部地區外海的風場,但海陸風效應仍使沿海日夜風向有所不同,在如此之日夜海陸風效應影響下,污染物在日間大致是吹向海上,但由於海風效應使部分污染物沿海岸傳送,至於夜間由於陸風風向與盛行風的西風分量相抵消,污染物多向南吹向外海,內陸之濃度則較低。

接下來先討論夏季西南季風時,也就是圖4(e)與(f)所代表的7月,台灣西南沿岸的污染擴散傳輸現象,台灣在夏季常位於太平洋副熱帶高壓邊緣位置,風速偏弱,於此時節台灣西南沿海海面以西南風為主,面對盛行之西南風,不管日夜,多數污染物皆隨西南風吹送而分布於內陸;而日間由於海風的影響,風向更為偏西,故污染物甚至有往東南擴散之情形。夜間由於向西吹送之陸風與盛行風向東的分量相抵消,使得風向偏向正南風,故污染物向北吹送。

討論完1月與7月所代表的冬、夏東北與西南季風最盛行時污染的傳輸擴散現象,圖4(c)、(d)、(g)、(h)所示4月與10月所代表春、秋兩季的污染擴散傳輸現象也就不難理解,此二月份都介於冬夏季節交替轉換之時,所以污染傳輸現象基本上都有冬夏的特性,也就是春秋兩季之時,東北季風與西南季風都相對微弱,且互相交替更迭影響台灣的天氣,所以東北風稍盛行時,污染物的傳輸就與冬季類似,若西南風主導時,污染物的傳輸就與夏季類似,平均下來就會有冬夏兩者的特性,所以由圖中可以看出污染物並無明顯單一的擴散方向,不過東北、西南兩季風在此區域都有明顯偏西的分量,日間再加上海風的加成效應,所以日間污染物大致上還是會向東吹送,所以濃度較高的區域多位於污染源的東方。夜間則由於陸風抵消盛行風偏西的分量,所以污染物有向北或南擴散的趨勢。

由以上分析可見,由於台灣位於東亞季風區,季節盛行風與海陸風加成或抵消,造成不同季節風場日循環之差異,並進一步影響該地區排放污染物擴散與傳送的方向與區域。為更瞭解日、夜間不同時段海陸效應對風場及污染物傳送的影响,本研究計算1月、4月、7月、及10月每日各時間點污染物濃度之月平均,繪製不同時間點污染物的擴散分布情形。圖5即為1月(a)、4月(b)、7月(c)、及10月(d)污染物在一天內之不同時間分布,圖中不同顏色等值線代表不同時間點污染物濃度為0.5 ppb的等值線,等值線所標示之數字代表其時間點(即00代表凌晨零點,15代表下午3點)。由圖中可見在1月時,當下午海風效應最強時,污染源附近偏向西北風,並將污染物往東南吹送,夜間則由於陸風效應,風向偏

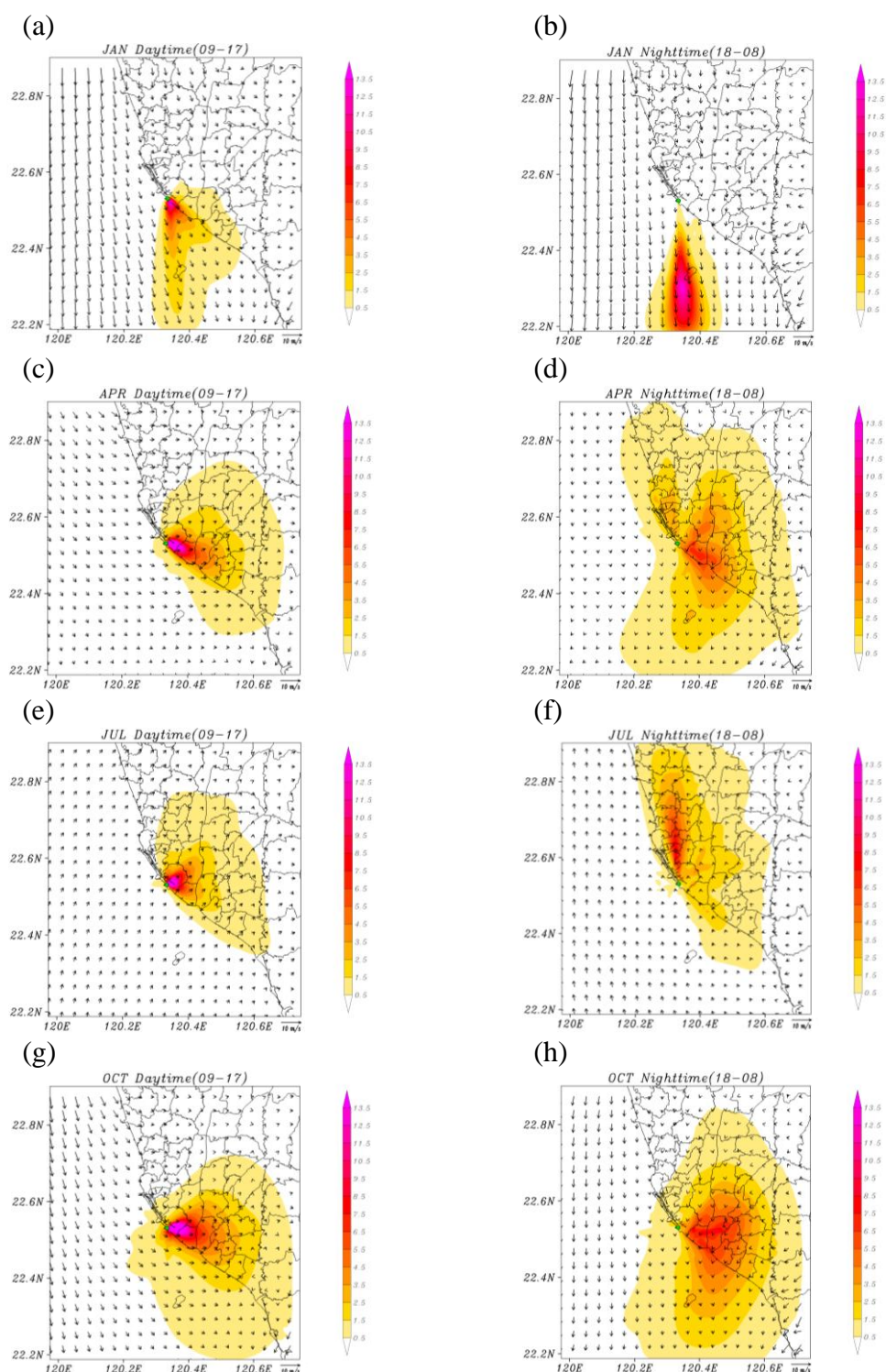


圖 4. 1 月、4 月、7 月、與 10 月日、夜污染物濃度（色階）分布與風場（向量）合成圖，其中(a)為 1 月日間平均，(b)為 1 月夜間平均，(c)為 4 月日間平均，(d)為 4 月夜間平均，(e)為 7 月日間平均，(f)為 7 月夜間平均，(g)為 10 月日間平均，(h)為 10 月夜間平均

正北，使污染物向南吹送。7月時，同樣在下午時段，海風效應使西南季風更形偏西，污染物會因此向偏東方吹送，夜間陸風則會抵消西南風的西風分量，使污染物向北吹送。至於4月與10月，就如同前面的討論一樣，保有冬季與夏季的特性，但又不像1月的夜間會向南、7月的夜間向北明顯的污染物傳輸擴散方向，但整體來看，春秋兩季污染物仍傾向於向陸地傳輸，且污染物多分布在污染源的東方。

由以上的分析可以看出，台灣西南沿海下午的時段海風的效應較強，風場偏西的效應也較強，使污染物易於向陸地吹送，夜間時，由於陸風的效應，抵消盛行風偏西的分量，但由於冬、夏之北、南盛行風分量不同，使得污染物在冬季夜間時會吹向海上，夏季夜間時則吹向陸地；而春、秋兩季則由於處於冬、夏季風的交替，平均來看污染物反而沒有明顯的傳輸方向，但在某一段時期，仍會因為主導的東北或西南季風比較盛行，而會有接近冬季或夏季比較明顯的污染傳輸擴散行為。

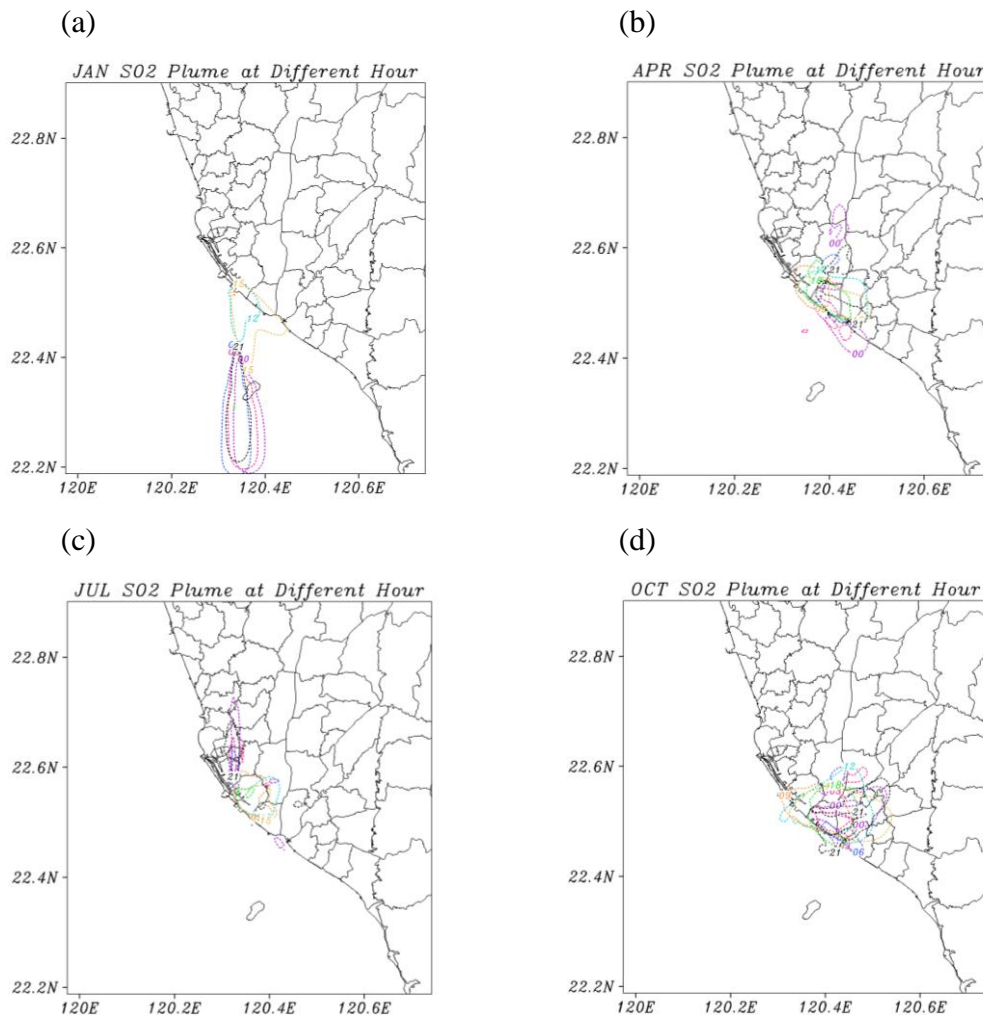


圖 5.1 月、4 月、7 月及 10 月不同時間點污染物濃度分布圖，等值線上的數字為時間點，其中(a)為 1 月，(b)為 4 月，(b)為 7 月，(b)為 10 月。

海陸風循環其實應是一立體的結構 (Stull, 1988)，為進一步探討台灣西南高屏地區沿海風場特性，本研究亦探討此區域垂直風場結構。針對高屏地區海岸線所在位置，將海岸線東西向各 15 公里範圍內（如上圖 2 所示之陰影區域）之垂直風場，由北至南逐一讀出後，計算此範圍內之東西向（30 公里）-垂直向（2 公里）風場剖面平均，並進一步計算各月份日夜（9:00~17:00 為日間，其餘時段為夜間）之東西向-垂直向風場剖面平均，以分析此區域內風場特性。

本研究在分析各月份東西向-垂直向風場剖面平均後，發現可用 1 月代表冬季，4 月代表春季，7 月代表夏，10 月代表秋季的日夜平均風向，其結果如圖 6 所示，圖中橫坐標 0 公里處代表海岸線所在位置，其右（東方）則為陸地，左邊（西方）為台灣海峽。由於垂直風速數值較小，為顯示方便將其垂直風速分量乘以 10。由圖中(a)、(c)、(e)、(g)可見各月份日間在近地面數百公尺高度內皆有海風（向東）之現象，秋冬兩季最高約可到達 200~400 公尺高度，春夏兩季則最高可至 250~600 公尺高度。此外，日間海風現象主要是因海陸表面溫度差異，造成陸地上空大氣出現垂直上升運動，使近地表空氣由海洋流向陸地，呈現海風之現象，而較高層大氣理論上則會呈現陸風之現象，故海風發生時陸地上空之大氣應會出現垂直上升運動 (Neumann and Mahrer, 1971)，如圖 6(a)中約位於離海岸線（圖中 0 公里處）東（右）方約 5 至 10 公里的陸地上。夏季時台灣的都會區，其垂直上升運動有時可到達約 1500 公尺高度 (Lin et al., 2008)，而由圖 6 之風場顯示冬季時日間垂直上升運動發生之位置較靠近海岸線，同時較高層陸風出現於模式中 600 公尺處，應屬海陸風環流結構之一部分。隨著季節接近夏季，垂直上升運動發生之位置逐漸向內陸移動，且較高層陸風出現之高度逐漸升高至模式中 1200 公尺處。此現象推測應是由於冬季時高屏沿海屬東北季風背風尾流區域，近海面風速之東西向分量在此區域較弱，故冬季垂直上升運動發生位置較接近海岸線。至於夏季時因海面上以偏南風為主，而高屏地區首當其衝，故海風可向內陸延伸至較遠之範圍，造成夏季垂直上升運動發生之區域離海岸線較遠，且因夏季陸地溫度較冬季高，故垂直上升運動可到達較高層之大氣，使高層陸風出現之高度較高。

2011 年 1 月及 8 月夜間（18:00 至 8:00）東西向-垂直向風場剖面平均如圖 6(b)、(d)、(f)、(h)所示，圖中可見夜間陸風皆較不顯著，但 8 月所代表的夏秋兩季陸地夜間近地面處大都為東風，而在近海岸處，近地面之東風則逐漸減弱，且大都在海岸線所在處出現風向轉變，進而在海面上呈現微弱西風之現象，但在稍高處皆呈現此季節盛行的西風。至於在 1 月所代表的冬春季一樣在近地面或海面處，呈現陸地上為東風，海面上為西風，此現象推測亦是因高屏沿海在冬春季時為東北季風背風尾流區域，造成夜間當地在背風尾流及陸風合成後，呈現海面上東西向風速微弱、陸地上則為東風之情形，但是在稍高處呈現此季節應有的盛行東風。

根據以上分析結果顯示，西南海岸線附近在冬春季時因位於東北季風尾流處，盛行風向較不明顯，故近地表處風向較為混亂，但夏季時西南沿海是面對盛行的西南風，白天時西南風及海風之加成使台灣西南沿海不管海陸風向都較為一致。以上利用 CALMET 所模擬之風場，除了可呈現水平方向細微之風場變化 (梁等, 2014)，亦可合理的描述垂直方向之風場結構，對於後續 CALPUFF 空氣品質模擬有相當程度之幫助。

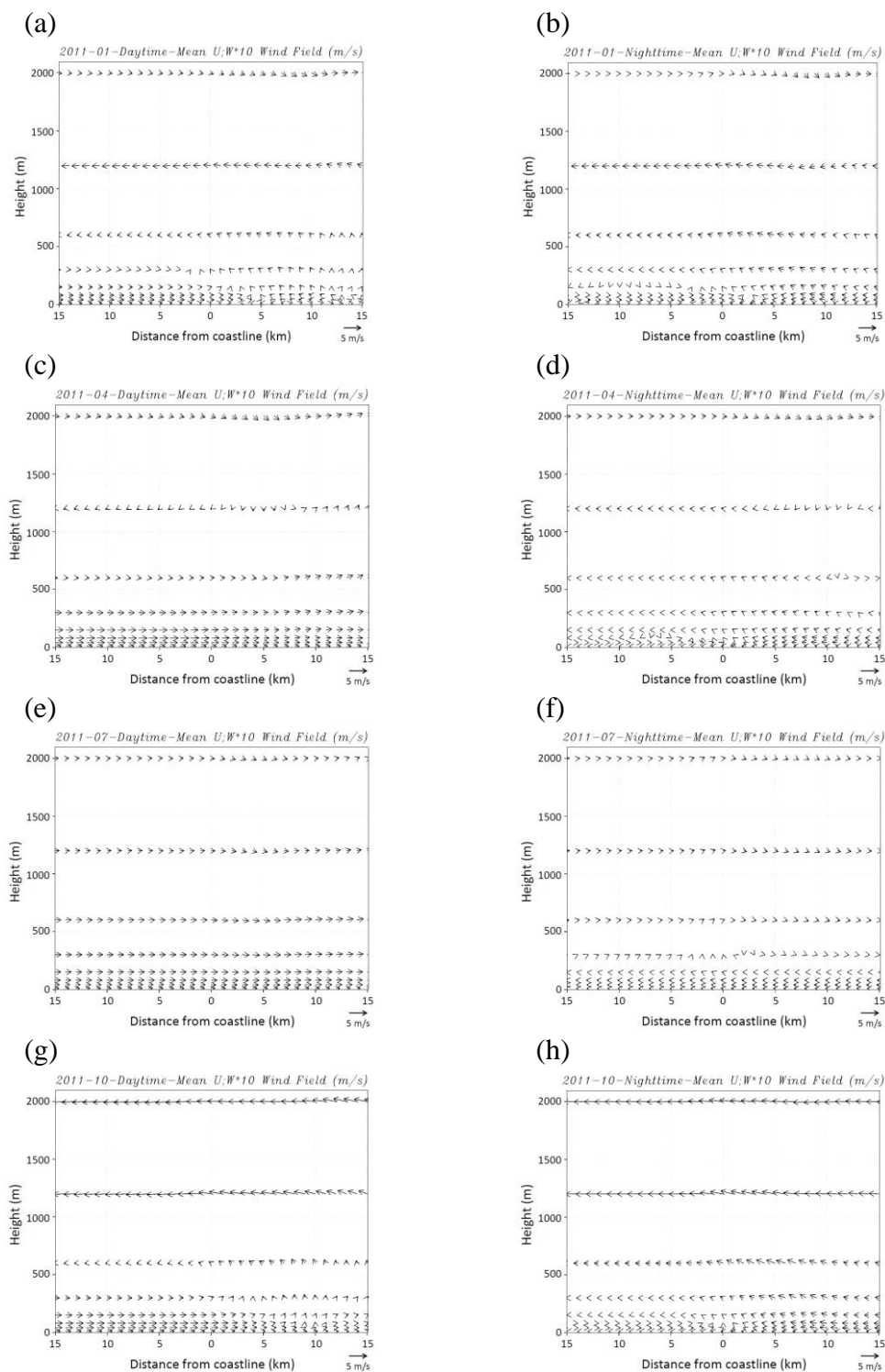


圖 6. 2011 年 1 月、4 月、7 月及 10 月日、夜海岸區域東西向一垂直月平均風場，其中(a)為 1 月日間平均，(b)為 1 月夜間平均，(c)為 4 月日間平均，(d)為 4 月夜間平均，(e)為 7 月日間平均，(f)為 7 月夜間平均，(g)為 10 月日間平均，(h)為 10 月夜間平均。

為更進一步呈現海陸風效應，本研究也分析各月份日、夜間風場的距平(anomaly)，圖 7 即為本研究模擬區域內日間(上午 9 時至下午 5 時)與夜間(下午 6 時至隔日上午 8 時)地面月平均風場減去當月份平均風場所得之各月份日間、夜間風場距平圖，此處同樣以 1 月代表冬季東北季風盛行時期，4 月代表春季東北季風較弱時期，7 月代表夏季西南季風時期，10 月代表秋季西南季風轉變為東北季風時期，由此圖可見在不同季節時模式中地表風場的日夜變化。冬季時，高雄附近的日間距平呈現西北風並大致沿海岸線向東南，並非垂直海岸向內陸吹送，而屏東附近的日間距平則呈現垂直向陸地的方向；夜間因陸地輻射冷卻效應而造成陸風現象，此時風場距平呈現東北風但非常微弱，整體而言海陸分布造成日夜風場變化，但在此季節變化幅度有限，此現象在 1 月與 12 月尤為明顯。

相較之下春季至夏季北半球輻射加熱效應日益增強，海陸比熱差異與加熱不均的現象更為顯著，因此造成海陸風日循環效應更為明顯。由圖中可見 7 月之日間風場距平風向由冬春的西北風轉變為西風或西南風，顯示此時白天陸地輻射加熱效應顯著，使海風距平幾乎垂直海岸線，且此時風速較大、較強勁的海風也能深入內陸地區；而夜間風場距平則呈現完全相反的狀態，從陸地向外海吹送，風向大致呈東北風至東風。

相較於 1 月的冬季距平，春、秋兩季的風場距平也非常明顯，尤其是日間陸地上的風場距平，也就是說 1 月所代表的冬季東北季風非常強盛，所以距平反而相對較小，而春、秋兩季雖然盛行風比較不明顯，距平反而突顯出來，尤其是日間更為明顯，這可能是由於冬季海陸溫差較不明顯，所以海陸風的效應不強，對盛行風場的影響不大，所以距平較小，但是其他季節由於日間陸地加熱比較明顯，所以距平較大，並突顯海陸風的效應。

由以上分析可知，利用各月日夜風場距平圖可看出此區域地表有明顯的海陸效應日循環現象，且各季節海陸風之強度與風向不盡相同，其中夜間陸風的距平強度無論在何季節皆較日間海風距平明顯偏弱；冬季因東北季風非常強盛，且日間陸地加熱不明顯，所以距平遠較其他月份為弱，海陸風對盛行風的影響也偏弱。

四、結論

本研究利用 WRF 與 CALPUFF 探討台灣西南沿岸海岸氣象特性及其對污染物擴散的影響，高屏沿海由於海陸日夜溫度差異，日間大都以海風為主，夜間則為微弱陸風。東北季風盛行期間，由於中央山脈阻隔，位於背風面的西南沿岸地區盛行風以偏北風為主，此時受較強烈的季節風場影響，日間海面上平均風場大致由西北向東南沿著海岸線吹送，陸地上風向則由於尾流效應，風向紊亂；夜間海面上風向明顯偏向正北風，陸地上風速仍較為微弱，但陸風效應稍為明顯；東北季風時期，大尺度的季節風主導西南部地區外海的風場，但海陸風效應仍使沿海處日夜風向不同。

西南季風時期，台灣西南沿海海面盛行西南風，然而台灣在夏季常位於副熱帶太平洋高壓邊緣位置，強度不強，故風速偏弱，但白天由於海風的影響，風向更偏西，晚上陸風向西的分量與盛行風向東的分量相抵消，使風向偏向正南風。由以上分析可知由於台灣位於東亞季風區，季節盛行風與海陸風加成或抵消，造成不同季節風場日循環之差異。

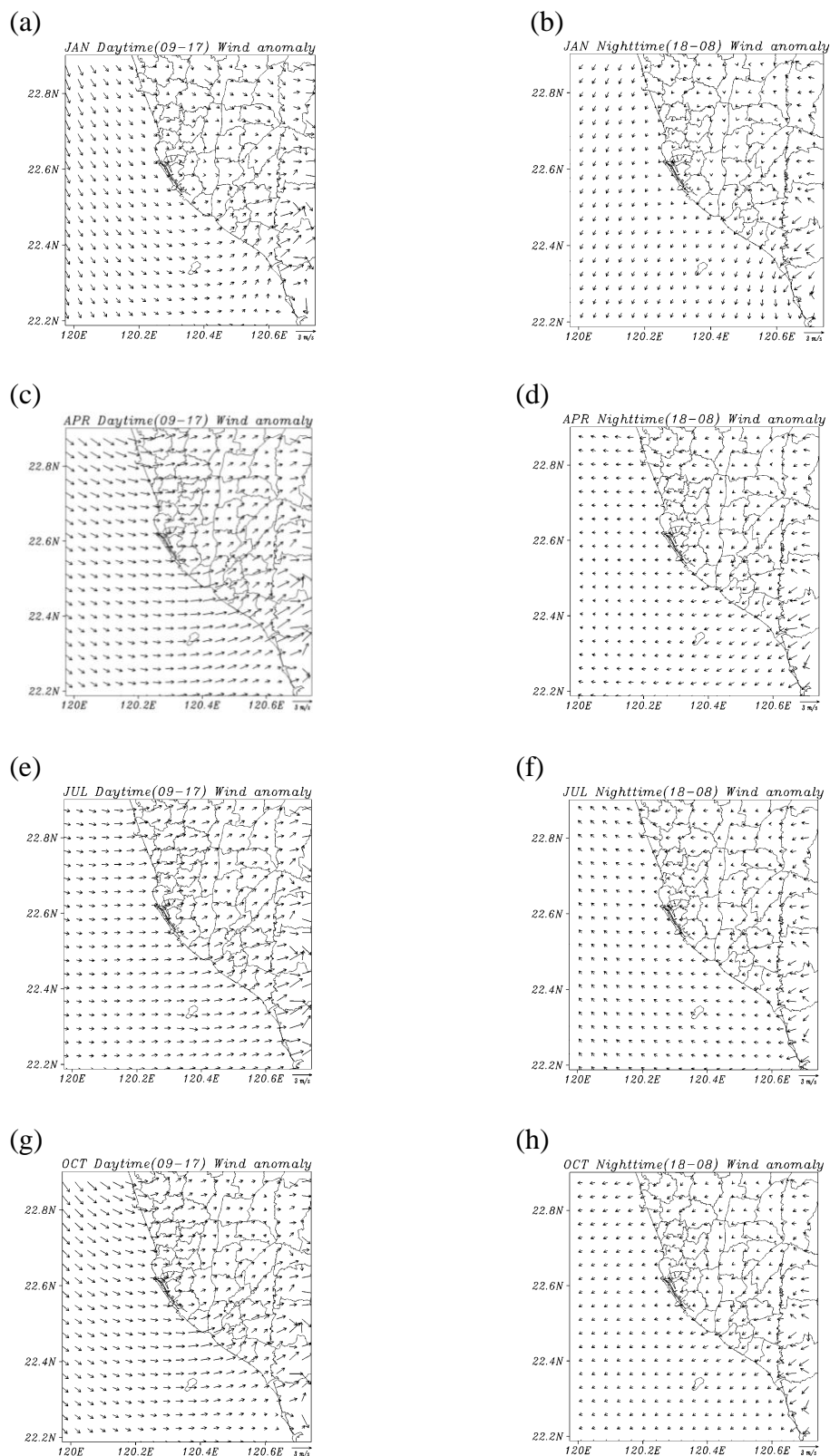


圖 7. 2011 年 1 月、4 月、7 月及 10 月日、夜風場距平，其中(a)為 1 月日間平均，(b)為 1 月夜間平均，(c)為 4 月日間平均，(d)為 4 月夜間平均，(e)為 7 月日間平均，(f)為 7 月夜間平均，(g)為 10 月日間平均，(h)為 10 月夜間平均。

海風所出現之高度範圍在秋冬兩季最高約可至 200~400 公尺、春夏兩季最高約可至 250~600 公尺。高屏沿海日間在秋冬兩季因海陸風及東北季風背風尾流合成影響，陸地加熱所造成上升運動之位置較接近海岸線，且高層陸風出現之高度較低；春夏兩季時因受偏南風影響，上升運動出現之位置離海岸線較遠，且高層陸風出現之高度較高。

整體而言，海陸風效應對污染物傳輸擴散的影響，在台灣西南高屏沿海地區，白天海風易有偏西的分量，夜間則有偏東的陸風。下午時段由於海風效應較強，風場較為偏西，故污染物易向陸地吹送，此特性冬夏皆然。夜間時，陸風效應可抵消盛行風偏西之分量，但由於冬、夏盛行風北、南之分量不同，使污染物在冬季夜間會吹向海上，夏季夜間時則吹向陸地。春、秋兩季則由於處於冬、夏季風的交替，平均來看污染物反而沒有明顯的傳輸方向，大致上由於盛行風偏西的分量與海風的加成效應，污染物易向陸地吹送，但在某一段時期，仍會因為主導的東北或西南季風比較盛行，而會有接近冬季或夏季比較明顯的污染傳輸擴散行為。

以上海陸風效應對污染擴散的影響分析，基本上只適用於本研究所探討位於高雄地區的某污染源，其他地區的污染源可能由於所在位置不同而有不同於本研究之海陸風循環特性；由於台灣大部份大型污染源皆分佈於沿海地區，故其他地區大型污染源在海陸風影響下，污染物擴散分布之特性，實值得更進一步之探討。

【參考文獻】

1. 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”，2014 年環境資源永續發展研討會，桃園縣(2014)。
2. 鄭福田，空氣污染控制與管理，高立圖書公司，新北市(2014)。
3. Lin, C.-Y., F. Chen, J.C. Huang, W.-C. Chen, Y.-A. Liou, W.-N. Chen, S.-C. Liu, “Urban Heat Island Effect and its Impact on Boundary Layer Development and Land-Sea Circulation over Northern Taiwan,” *Atmospheric Environment*, Vol. 42, pp. 5635-5649 (2008).
4. 楊亦德，應用 CALMET/CALPUFF 模式解析南部地區氣流場及煙流傳輸特性之研究，碩士論文(2010)。
5. Exponent，CALPUFF Modeling System Version 6，User Instructions (2011).
6. Neumann, J., and Y. Mahrer, “A Theoretical Study of the Land and Sea Breeze Circulation,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 28, pp. 532-542 (1971).
7. 李岳謙，近地風場分析方法對氣團軌跡計算結果之影響—CALMET 方法、變分分析方法以及 MM5 輸出方法比對，碩士論文(2008)。
8. Stull, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, 1st Ed., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands (1988).