

90年7月

中部地區海陸風環流與高臭氧污染之相關分析

黃超群* 程萬里* 郭冠廷*

摘 要

中部地區背山面海，東依中央山脈，西臨台灣海峽，且位於副熱帶及熱帶氣候區的交會區，一到夏半年，由於白天日照強烈造成海、陸及山、谷間的溫差大，加上盛行季風弱，區域環流主導中部地區近地面的氣象環境，其中以海陸風環流最為明顯。為探究中部地區在海陸風盛行下的空氣品質狀況，本文分析 1997-1999 中部地區各氣象及空氣品質監測站的資料，結果顯示在污染事件日發生時，氣象環境大多受海陸風環流影響，春、秋二季中部地區高臭氧污染事件日發生率為 51.3%。

為了解在海陸風盛行下內陸地區熱力邊界層垂直結構及污染物的垂直分布，選擇夏、秋二季不同的綜觀氣象環境下分別進行二次探空實驗，探空實驗結果顯示，在海陸風盛行日中部內陸地區的熱力邊界層大致分為三層，（ ）最下層為混合層，位溫變化大，在混合層頂常存在一逆溫層，混合深度夏季較秋季深。（ ）中間為海風與上層環境風的轉換層，此層位溫的變化小，夏季由混合層頂至約 1200 公尺高，秋季由混合層頂至約 700 公尺高。（ ）最上層為綜觀環境風，其位溫、溼度、風速及風向代表綜觀的氣象環境。臭氧濃度的擴散受混合層上的逆溫限制，最高值出現在 100 公尺及 250 公尺高。在夏季海陸風影響下，中部地區的空氣品質良好；然而在秋季海陸風影響下，中部地區的空氣品質不良。

關鍵詞：中部地區、臭氧、海陸風環流、熱力邊界層。

一、前 言

海陸風環流 (sea-land breeze circulation) 為一種濱海地區常見的天氣形態，白天太陽輻射進入地表後加熱，因為海、陸比熱不同，造成陸地溫度高於海洋，這種溫度差異差因發斜壓力管效應 (solenoid effect) ，在海風進入陸地後，因海風氣流溫度較低、溼度較高和陸地空氣物理特性不同，使得海風具有重力流 (gravity current) 的特性，並在形成一中尺度的封閉熱力環流(Simpson et al., 1977, Simpson and Britter, 1980, Simpson, 1987, Reible, 1993) 。

理論上白天的海風由海面垂直於海岸線吹入陸地，夜晚的陸風由陸地垂直於海岸線吹向海洋，但受限於地形及背景環境風的影響，海風及陸風的行進軌跡會所改變，柳氏和蘇氏（1997）研究台北及高雄地區的區域環流，結果顯示台北地區的海風及陸風都是沿著基隆河谷與淡水河谷行進，凌晨至早上 10：00 為陸風時期，10：00 之後為海風時期，海風風速在 14：00 達到最強，高雄地區的海風及陸風都是垂直於海岸線行進，海風風速在 15：00 達到最強。

海陸風環流為一種封閉熱力環流，在熱力邊界層的結構上大致可分為三部份，底層為混合層（mixing layer），中間層為海風與環境風的轉換層，最上層為自由大氣（free atmosphere），層與層之間皆存在穩定區（林氏，1990）。

當綜觀環境存有一定強度的環境風時，會影響海陸風環流的發展，向岸風會增強海風邊界層的發展，回流風與向岸風作用，在環流上層形成一穩定成層，離岸風會加強海風鋒面的溫度梯度，斜壓增強使海風環流更加強勁（張氏，1992）。陳氏（1997）的研究指出，當有適當背景風與海風鋒面相向時，海風風速較強且邊界層發展較高，上下坡風（mountain/valley wind）海陸風環流有強修飾作用。Helmis et al.（1995）觀測背景風對雅典海陸風環流的影響，發現當綜觀風場存在向岸風（on-shore flow）時，海風的風速較強，鋒面結構較不完整且弱；當綜觀風場存在離岸風（off-shore flow）時，海風的風速較弱，鋒面結構較完整且強。

世界上許多大都市都位於濱海地區，中尺度環流海陸風深深的影響著這些都市的天氣形態，以及他們及鄰近地區的空气品質狀態，Blumenthal et al.（1978）研究指出當海陸風環流主導洛杉磯（Los Angeles）的氣象環境時，洛杉磯市區東方 50 公里遠的下風處山區，監測到臭氧濃度可達到 250ppbv。Chang et al.（1989）發現在海陸風環流的天氣形態下，當東京（Tokyo）市區的臭氧測值為 60ppbv 時，遠在下風處 150 公里的郊區，卻測到 160ppbv 的臭氧高值。蘇維中（1995）研究台灣地區海陸風對臭氧污染的影響時，統計出台北盆地南方及高雄東北方的測站發生高臭氧污染的機率高於台北、高雄市區，這些測站同時也是台北、高雄地區白天海風的下風處。Suppan et al.（1998）的研究報告指出，當海陸風環流在雅典盆地（Athens basin）發展時，盆地內的臭氧測值比盆地外的測值高 66%，且有由南到北遞增的趨勢，而海風的吹向也是由南到北。Hastie et al.（1999）當湖風（lake breeze）由安大略湖（Lake Ontario）吹向內陸時，鋒面經過的空氣品質測站污染物測值有突然增高

的現象，尤其已臭氧有數十 ppbv 的增加最明顯。上述這些研究顯示，海陸風環流影響世界上許多濱海大都市的氣象環境，並有將都會區的空氣污染物帶往鄰近郊區的現象，並造成許多郊區的空氣污染。

臭氧為造成中部地區空氣污染的主要原因（程氏等，1998），臭氧是一種氧化性極高的二次光化學產物，其前驅污染物（precursor）為 NO_x 及 NMHC（Non-Methane Hydrocarbon），經一系列複雜的化學反應產生臭氧，中部地區背山面海，東依中央山脈，西臨台灣海峽，且位於副熱帶及熱帶氣候區的交會區，由於白天日照強烈造成海、陸及山、谷間的溫差大，加上盛行季風弱，區域環流主導中部地區近地面的氣象環境，其中以海陸風環流（sea-land breeze circulation）最為明顯，本文主旨為收集中部地區環保署、台灣電力公司及氣象局地面空氣品質及氣象測站的資料，對中部地區的臭氧污染及氣象因子進行相關統計分析，希望能藉此找出臭氧污染與海陸風環流的相關性，並探究中部地區海陸風環流的水平及垂直結構及其對臭氧污染的影響。

二、資料收集

本文收集 1997、1998、1999 年台中縣、台中市、彰化縣、南投縣、雲林縣的氣象測站資料，包含環保署、台電公司及氣象局 21 個（如表 1），測站分布如圖 1；在空氣品質監測資料方面，本研究收集 1997、1998、1999 年環保署及台灣電力公司中部 20 個測站的空氣品質監測資料。

表 1 中部五縣市氣象及空氣品質測站基本資料(圖 1)

| 編碼 | 名稱 | 屬性 | 監測項目 |
|----|----------|--------|--|
| 1 | 梧棲 | 氣象局測站 | 風向、風速 |
| 2 | 豐原EPA028 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 3 | 沙鹿EPA029 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 4 | 大里EPA030 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 5 | 忠明EPA031 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 6 | 西屯EPA032 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 7 | 彰化EPA033 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 8 | 線西EPA034 | 環保署空品站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 9 | 二林EPA035 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |

| | | | |
|----|----------|--------|--|
| 10 | 南投EPA036 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 11 | 台西EPA041 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 12 | 崙背EPA038 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 13 | 竹山EPA069 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 14 | 斗六EPA037 | 環保署空品站 | O ₃ 、NO _x 、SO ₂ 、風向、風速、溫度 |
| 15 | 伸港C02 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |
| 16 | 和美C03 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |
| 17 | 鹿港C04 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |
| 18 | 梧棲C05 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |
| 19 | 大肚C06 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |
| 20 | 東大C07 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |
| 21 | 清水C09 | 台電空品測站 | NO _x 、SO ₂ 、風向、風速 |

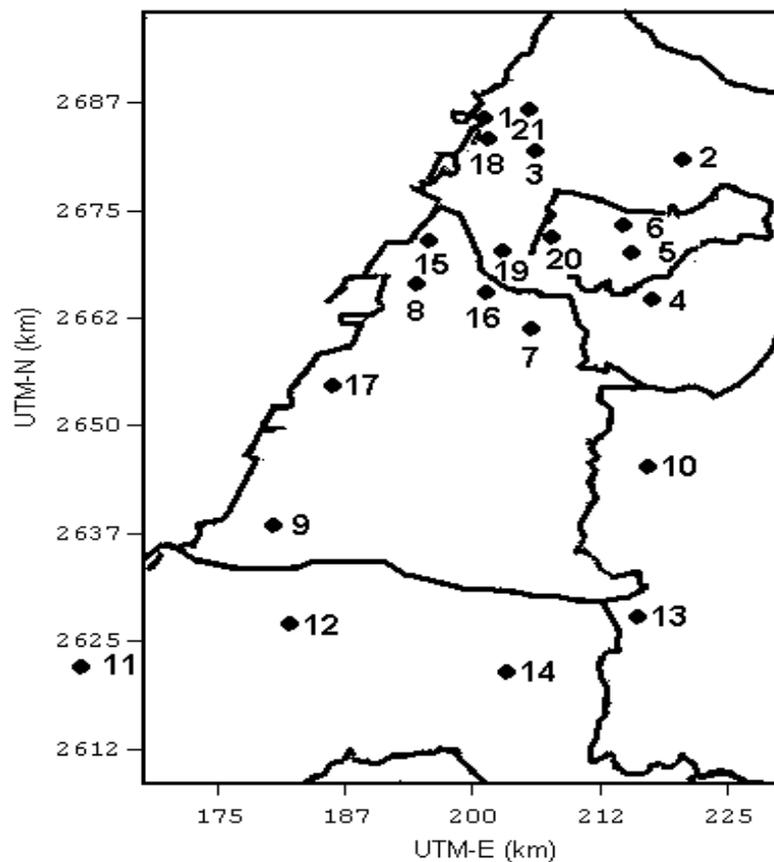


圖 1: 中部五縣市氣象及空氣品質測站分布圖

三、觀測實驗

(一) 綜觀天氣

台灣地處副熱帶及熱帶氣候區的交會區，夏季受西擴的太平洋副熱帶高壓的影響，綜觀環境地面風場主要以西南風和東南風為主，冬季則受西伯利亞高壓南下的影響，綜觀環境地面風場主要以東北風為主，因此為了解在不同綜觀環境風場的影響下，中部地區海陸風環流對內陸區地面風場轉變及熱力邊界層的發展對污染物垂直擴散的影響，本文選擇在二種不同的天氣形態下進行探空實驗，第一次實驗選擇在 8 月 27-29 日台灣地區氣候受太平洋副熱帶高壓西擴的影響（圖 2），第二次實驗選擇在 10 月 30 日-11 月 7 日台灣地區氣候受西伯利亞高壓南移的影響（圖 3）。

(二) 觀測地點

第一次觀測實驗地點為彰化縣芬園鄉茄荖國小，西側為海拔約為 300 公尺的八卦山，緊臨貓羅溪旁約 500 公尺，位於省道台 14 線旁，往東可達埔里鎮，往南可達南投市、竹山鎮，往西可達彰化市，往北可達大里市、台中市。於彰化縣芬園鄉茄荖國小及南投縣草屯鎮敦和國小施放繫留探空儀。第二次觀測實驗因為 921 地震的關係，茄荖國小收容其他受災國小的學生就讀，無可借用的校舍，實驗地點改為 5 公里遠的南投縣草屯鎮敦和國小，同樣也濱臨貓羅溪旁約 1500 公尺，位於省道台 14 線旁（圖 4）。

(三) 實驗儀器

1. 探空儀器

(1) **繫留探空儀**(Tethersonde): Model TS-5A-SP(AIR, Boulder, Colorado), s/n:7j0356, 探測各項氣象資料並將數值傳回地面器接收器。

(2) **資料接收器** ADAS(Atmosphere Data Acquisition System) : IS-5A-RCR 400-406 MHz (AIR, Boulder, Colorado), 接收繫留探空儀所發出的微波訊號，並轉換成可讀取格式

化的氣象資料。

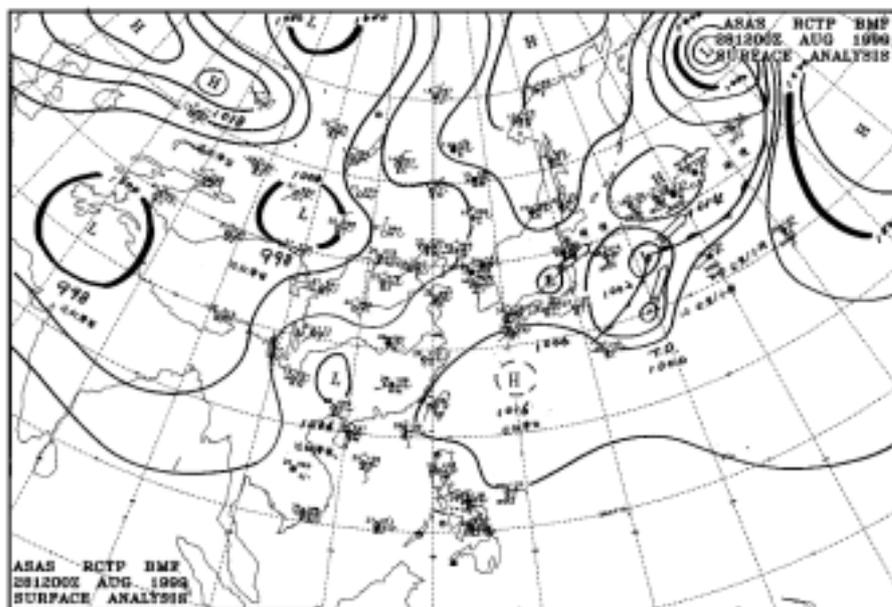


圖 2: 1999 年 8 月 28 日 20 : 00 天氣圖 (中央氣象局)

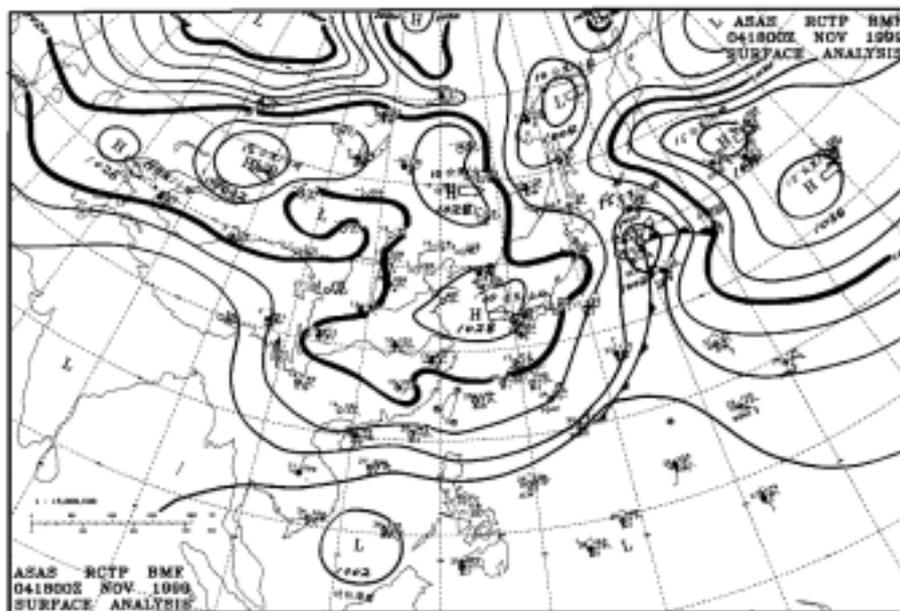


圖 3: 1999 年 11 月 5 日 12 : 00 天氣圖 (中央氣象局)

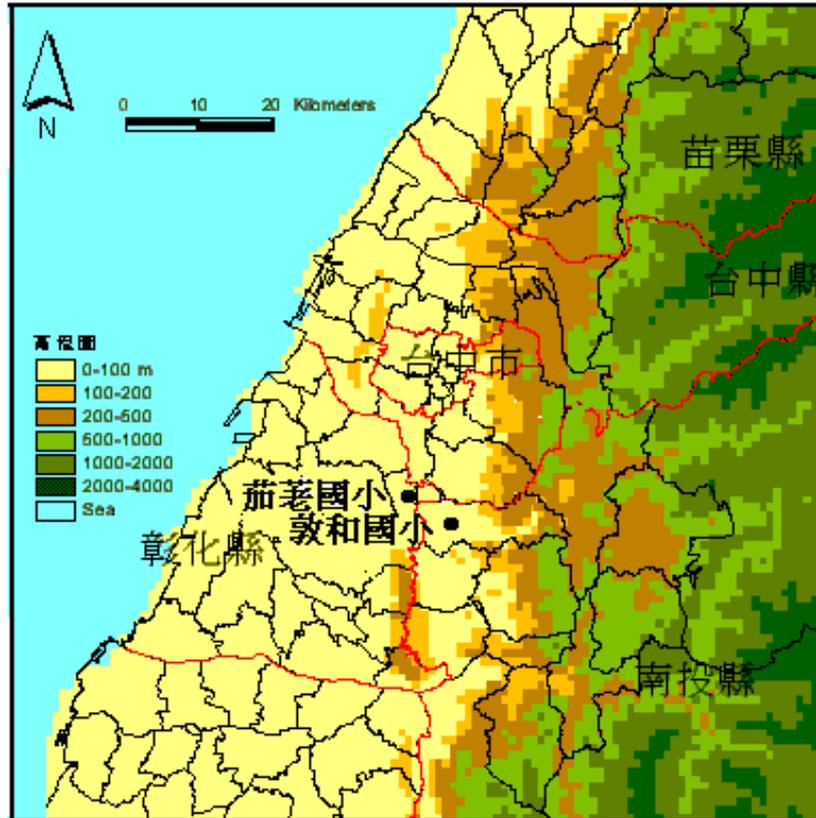


圖 4: 繫留探空實驗地點 (1) 茄荖國小、(2) 敦和國小

2. 空氣採樣設備

- (1) 空氣採樣器：電源以 2 個 1.5V 乾電池提供，採樣器 (含電池) 重約 580 公克，抽氣氣流流量約為 0.056 公升/秒，體積為 14×7×3.5(cm)。
- (2) 採樣袋：實驗採用 SKC sample bags 232-08，Tedlar 材質的透明 10L 採樣袋，採樣接頭為 PE 的材質。

3. 空氣品質分析儀

- (1) 氮氧化物分析儀：API 公司生產 MODEL-200A，s/n：110，採用化學發光法 (Chemiluminescence method) 測定
- (2) 臭氧分析儀：API 公司生產 MODEL-400，s/n：426，採用紫外線光度計法 (Ultraviolet

photometric method)

(四) 實驗流程及數據分析

繫留探空氣球的施放，由於作業時間十分消耗時間，因此三小時施放一次，施放時間分別為 00:00、03:00、06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00 天八次，繫留探空氣球須由絞線與絞盤牽引其上升及下降，在靜風狀態下，氣球上升速度由絞盤控制約為 1.0 m/s，一般而言，繫留探空氣球施放（上升停滯到下降到地面）過程約需 70 分鐘，在環境風速較強時，上升及下降速度會約為減緩，施放時間則會加長。繫留探空氣球上升的高度視環境風速強弱而不同，因為絞線的長度固定，風速強時，絞線與垂直線有夾角，因此所能上升的高度減低，但至少都能到達 1500 公尺的高度。繫留探空儀的氣象資料傳遞，設定為每 1 秒鐘 1 筆。空氣樣品的收集高度分別為地面、100、250、500、1200 公尺，每個高度以二個採樣帶（10 公升）採集空氣樣品，收回地面，以空氣品質分析儀分析。

繫留探空儀的氣象資料每 1 秒鐘 1 筆，每 5 公尺取平均，如此每一個時間點約有 200-300 筆不同高度資料，由於上升至頂點停滯到下降時的時間差約 20 分鐘，因此視為二筆不同時間點的資料分開處理，本文選用上升時的探空資料當作該時間點的探測值。

四、結 果

(一) 統計分析

本研究針對中部地區 1997、1998、1999 年春、秋二季環保署與台電測站的空氣品質及氣象資料進行統計分析，目的為找出高臭氧污染日與海陸風盛行日之相關性，為了統計上的方便，對高臭氧污染日、高臭氧污染事件日及海陸風盛行日的定義：

- (1) **高臭氧污染日 (High Ozone Day)**：在選定的 14 個環保署測站中，一天（0 時至 23 時）中只要其中任一測站之臭氧濃度日高值大於 80 ppb，就定義此日為該測站**高臭氧污染日**。
- (2) **高臭氧污染事件日 (High Ozone Episode)**：在選定的 14 個空氣品質測站中，4 個測站以上在該日發生高臭氧污染，就定義此日為中部地區高臭氧污染事件日。
- (3) **海陸風盛行日 (Sea Breeze Day)**：海陸風風向依其發生原因應是垂直於海岸線，但

由於台灣中部海岸線呈現北北東、南南西走向，且在背景盛行風的作用下，海陸風風向往往不是垂直於海岸線。為了統計與分析上的方便，選定台西(11)測站為基準，只要一天 24 小時中(1)風速有明顯日夜變化，且最大風速不超過 5.0 m/s；(2)風向有明顯日夜海、陸風變化，且變化角度超過 90°，就定義此日為**海陸風盛行日**（殷達中等，1997）。

1997、1998、1999 年春、秋二季共 549 天，中部地區發生高臭氧污染事件日共 254 天，高臭氧污染事件日發生率為 46.3%。在海陸風盛行日各測站發生高臭氧污染的機率如表 2，濱海測站由於位處海風上風處，因此發生高臭氧污染的機率較低，如沙鹿(3)的 28.2%、二林(9)的 27.4%，靠內陸的測站位處海風下風處，因此發生高臭氧污染的機率較高，如南投 56.5%、竹山 74.4% 及大里 63.5%。

表 2: 中部地區 1997、1998、1999 年海陸風盛行日各測站發生高臭氧污染的機率（*原有 339 日各測站扣除缺值及降雨日數）

| 站名 | *海陸風日數 | 高臭氧日數 | 海陸風日發生高臭氧污染機率 |
|--------|--------|-------|---------------|
| 豐原(2) | 324 | 142 | 43.8 % |
| 沙鹿(3) | 312 | 88 | 28.2% |
| 大里(4) | 319 | 198 | 63.5% |
| 忠明(5) | 327 | 149 | 45.6% |
| 西屯(6) | 322 | 86 | 26.7% |
| 彰化(7) | 326 | 65 | 19.9% |
| 二林(9) | 329 | 90 | 27.4% |
| 南投(10) | 308 | 174 | 56.5% |
| 竹山(13) | 273 | 203 | 74.4% |

(二) 觀測實驗

1. 氣象

(1) 第一次觀測實驗

1999 年 8 月 27 日 8 月 29 日三天的日最大風速在 6.0 m/s 8.0 m/s，明顯有白日風速高、夜間風速低的特徵，三天的風向變化幾近一致，白日吹海面來的西風，夜間吹陸地來

的南風，一天的風向變化超過 90 度，為明顯的海陸風現象（圖 5）。

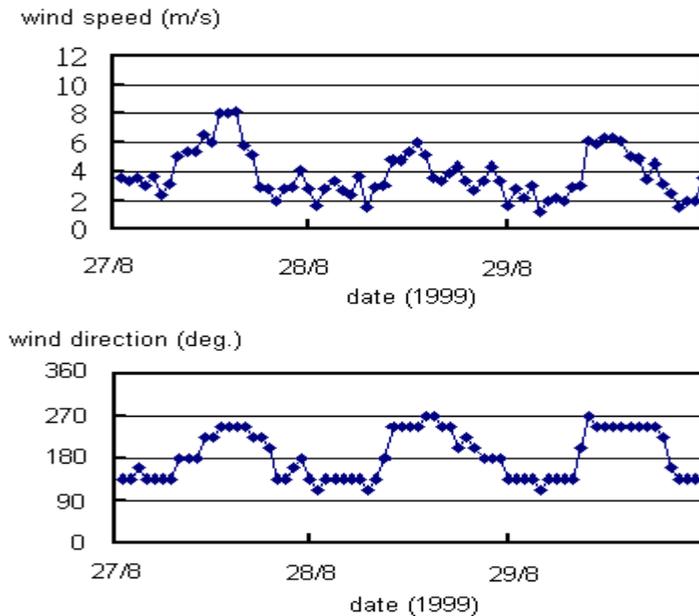


圖 5: 1999 年 8 月 27 日 8 月 29 日氣象局梧棲(1)測站逐時風速與風向

圖 6 顯示 1999 年 8 月 28 日茄荖垂直位溫、風速、風向，8 月 28 日 06:00 吹陸風風速微弱，風速在地面幾近 0.0 m/s，之後隨高度升高而增強，至 100 公尺時風速達到 5.0 m/s，100 公尺以上風速維持在 5.0 m/s 左右，地面風向為南風，隨高度逐漸轉變為西南風。09:00 地面因太陽輻射溫度快速升高，200 公尺以下因熱對流旺盛，垂直位溫變化大呈現高度不穩定，200 公尺到 600 公尺垂直位溫變化小呈現中度穩定度，風速在 500 公尺內近乎靜風狀態，500 公尺以上風速急速增強，700 公尺以上風速維持在 5.0 m/s，風向在 300 公尺內十分紊亂，在 180°到 360°之內變動，300 公尺以上風向漸趨穩定，維持在 180°到 270°。12:00 時 100 至 600 公尺垂直位溫變化大呈高度穩定度，600 公尺以上存在一厚度超過 600 公尺的不穩定層，風速在 1200 公尺內穩定維持在 3.0 m/s 左右，而風向在 1200 公尺內穩定維持在西風。15:00 在 100 公尺以下呈現高度不穩定，在 100 公尺至 600 公尺內垂直位溫變化小呈中度穩定度，風速穩定維持在 5.0 m/s 左右，600 公尺至 700 公尺風速減弱至 4.0 m/s，700 公尺以上風速急劇減弱至 0.0 m/s，風向在 1200 公尺內穩定維持在 270°到 337°之內變動。18:00 整體大氣垂直結構和 15:00 一致，除地面 100 公尺內的風速降至 2.0 m/s

外，並無太大變化。

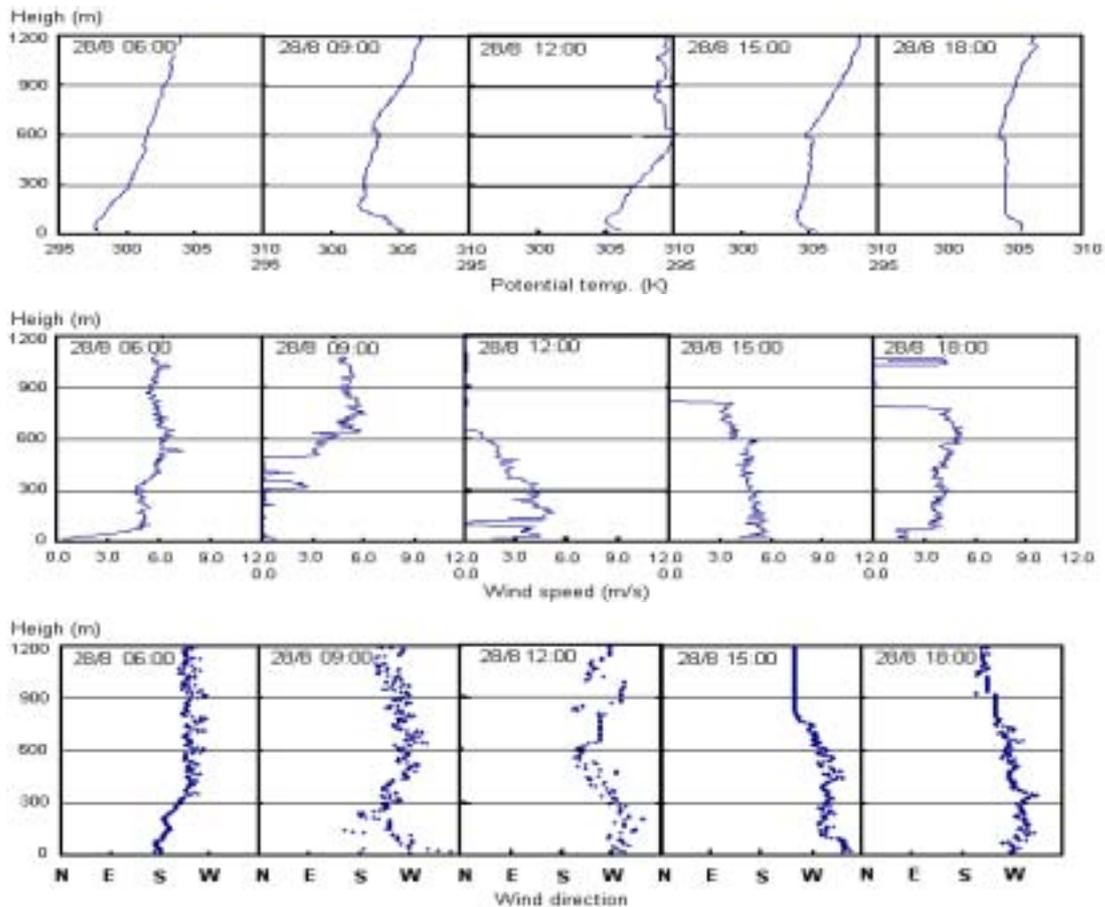


圖 6: 1999 年 8 月 28 日 06 : 00 18 : 00 茄萇國小垂直位溫、風速、風向

(2) 第二次觀測實驗

實驗開始時 10 月 30、31 日，天氣狀況良好，風速低於 6.0 m/s，風向為白天西北向、夜間東南向的日夜變化，直至 11 月 1 日中午以後，風速急劇加強，最高風速大於 10.0 m/s，風向維持北向，11 月 5、6 日風速恢復日強夜弱的變化，最高風速在 5.0 m/s-6.0 m/s，風向為白天西北向、夜間東南向的日夜變化，11 月 7 日風速開始增強，白天最高風速達 8.0 m/s 以上，風向維持在北向（圖 7）。

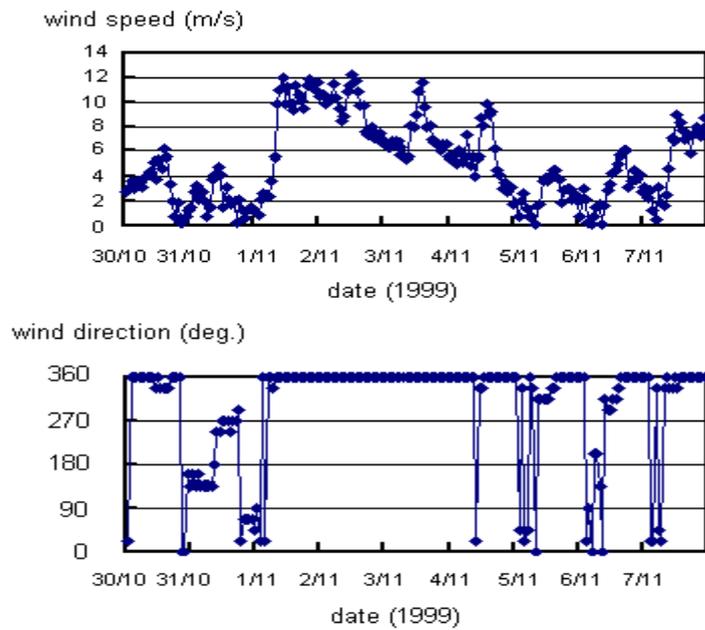


圖 7: 1999 年 10 月 30 日 11 月 7 日氣象局梧棲(1)測站逐時風速與風向

圖 8 顯示 11 月 5 日 06:00、09:00 整個低層大氣風速皆在 3.0 m/s 以下，在 600 公尺左右有突然變動的現象，風向 500 公尺以下為南風，但在 200 公尺高突然往東偏，600 公尺以上風向轉變為西南風。12:00 時各高度的位溫變化十分穩定，垂直位溫變化較小，上空整層風速皆在 3.0 m/s 以下，在 100 公尺、600 公尺左右風速有急劇變化的情形，風向在 600 公尺以下紊亂在 270°到 360°之間變動，900 公尺以上為南風。15:00 各高度的位溫變化趨於穩定，上空整層風速皆在 2.0 ~ 3.0 m/s 左右，風向在 600 公尺以下穩定為北風，600 公尺以上隨高度增加呈順時鐘旋轉，西北 ~ 西南。18:00 地面位溫降至 297 K，風速 600 公尺以下維持在 3.0 m/s 左右，之後急速降低到 750 公尺高的 1.0 m/s，之上緩慢增強，風向由地面北風穩定的順時鐘旋轉至 750 公尺東北風、900 公尺南風，再往上穩定維持南風。

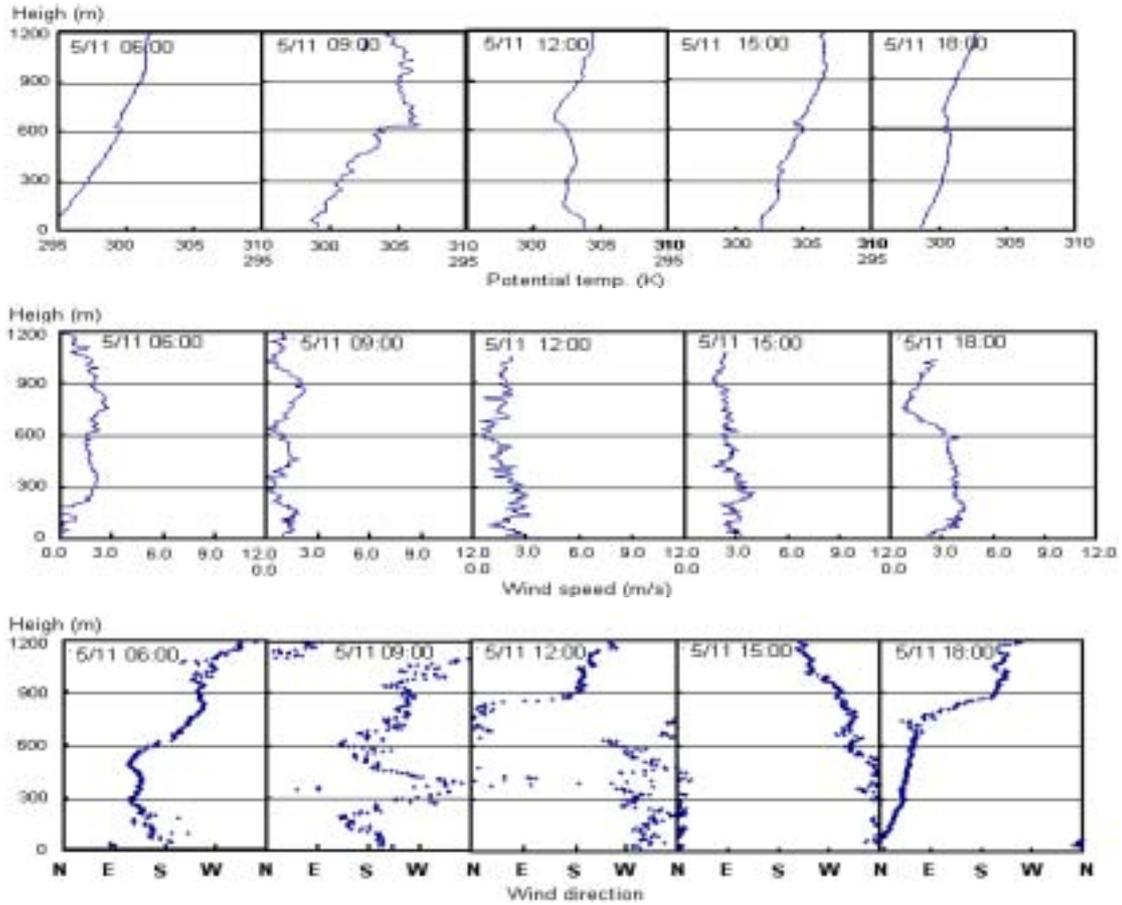


圖 8: 1999 年 11 月 5 日 06 : 00 18 : 00 茄荖國小垂直位溫、風速、風向

2. 空氣品質

地面 為了了解實驗期間整個中部地區的空气品質狀況，選取 5 個具代表性測站—沙鹿(3)代表北部濱海測站且位於中部最大污染源鄰近、台西(11)代表南部濱海測站且位於平原區、彰化(7)位於大肚山與八卦山隘口、大里(4)位於台中盆地內代表都會區、竹山(13)位於斗六丘陵附近代表山區，期望藉由這些測站的污染物濃度變化，能了解整個中部地區的空气品質狀況。

圖 9 為 1999 年 8 月 27 29 日中部地區臭氧 (O_3) 逐時濃度圖，各測站均可明顯的可以看出臭氧濃度白日高、夜間低的「單尖峰」特徵，實驗期間整個中部臭氧濃度值遠低於警戒值。

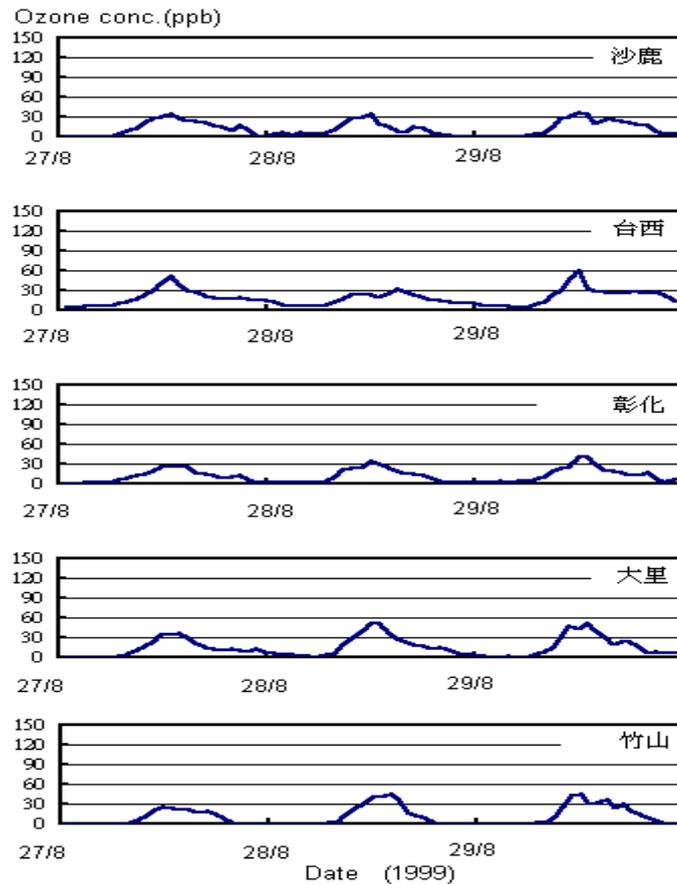


圖 9: 1999 年 8 月 27 日 8 月 29 日中部地區臭氧 (O_3) 逐時濃度圖

圖 10 為 1999 年 10 月 30 日 11 月 7 日臭氧 (O_3) 的逐時濃度圖，明顯的可以看出臭氧濃度白日高、夜間低的「單尖峰」特徵，在 10 月 30 日、10 月 31 日、11 月 5 日、11 月 6 日及 11 月 7 日的日間臭氧濃度值高於警戒值 80 ppb，夜間各測站的臭氧濃度值都接近 0 ppb。

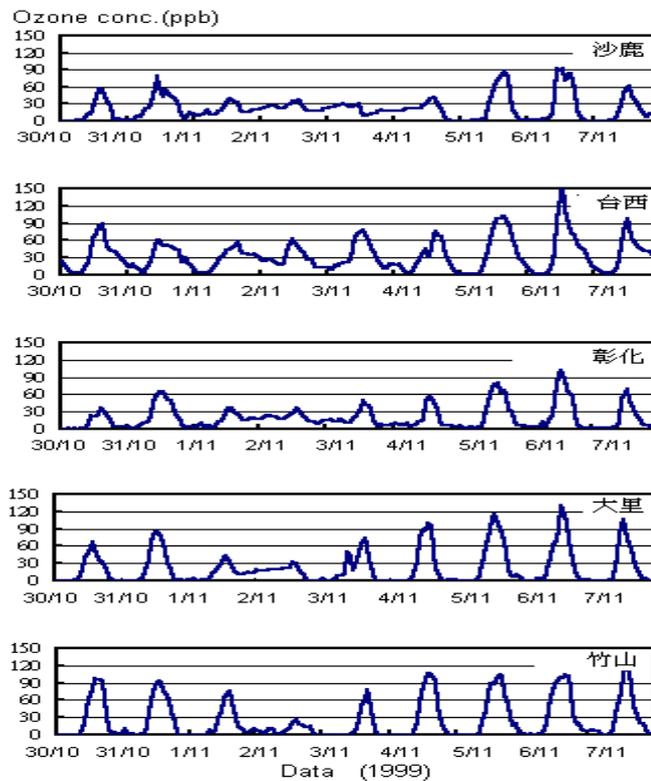


圖 10: 1999 年 10 月 30 日 11 月 7 日中部地區臭氧 (O_3) 逐時濃度圖

高空 1999 年 11 月 5 日氮氧化物濃度值有由地面隨高度增加而減少的趨勢(圖 11), 在下午 18:00 地面的濃度值達到最高, 且與 500 公尺的濃度值相差近 50 ppb。臭氧在 06:00 濃度由地面隨高度增加而緩慢增高, 09:00、12:00 時出現 100 公尺到 500 公尺之內濃度較高的現象, 15:00 臭氧濃度分布和 12:00 相似, 但 1200 公尺的臭氧濃度值卻和 250 公尺相去不遠, 18:00 臭氧濃度由地面隨高度增加而緩慢增高, 各時間點的出現臭氧濃度高值的高度分別為 500 公尺、100 公尺、100 公尺、100 公尺、500 公尺。

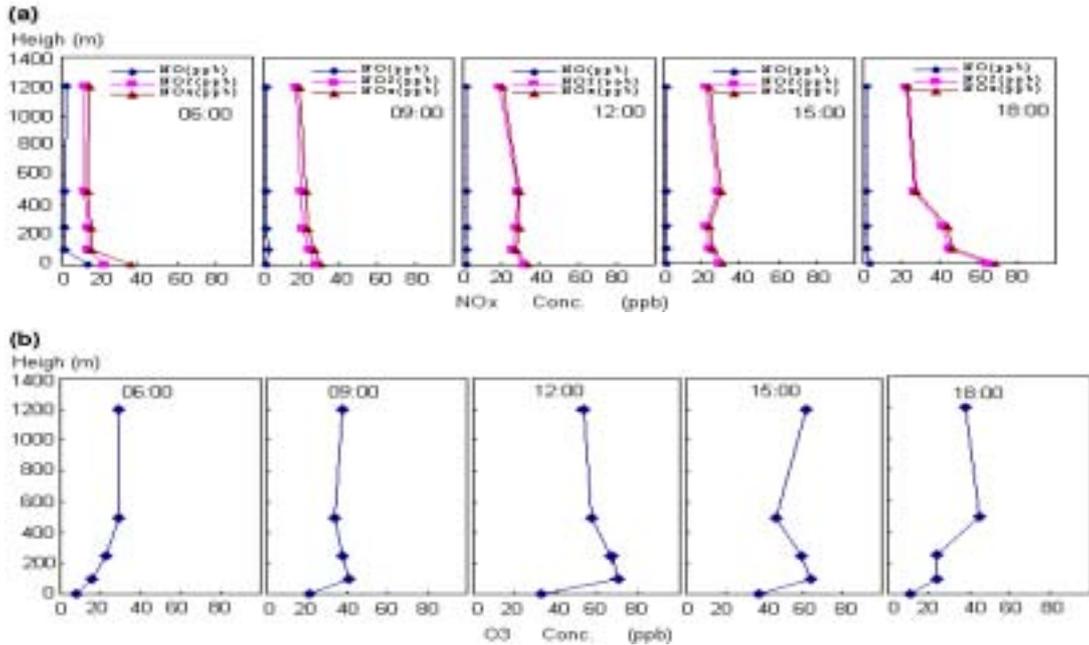


圖 11: 1999 年 11 月 5 日 06 : 00 ~ 18 : 00 茄萇國小(a) NOx、(b) O3 濃度垂直分布圖

五、結果討論

(一) 夏、秋二季海陸風氣象環境及空氣品質比較

為了便於分析夏、秋二季海陸風氣象環境的不同，本節挑選二個夏季海陸風盛行日（1999 年 8 月 28、29 日）及二個秋季海陸風盛行日（1999 年 11 月 5、6 日），將其 12 : 00 的位溫、溼度、風速及風向會製成垂直分布圖，如圖 12、圖 13、圖 14 及圖 15，分析結果如下：

(1) **背景環境風** 台灣地區夏季受西擴的太平洋副熱帶高壓的影響，綜觀環境地面風場主要以西南風和東南風為主，冬季則受西伯利亞高壓南下的影響，綜觀環境地面風場主要以東北風為主，在夏季海陸風發展時，從風向的垂直分布圖（圖 4.13d）可以明顯的觀測在 700 公尺以下為西風（海風），1100 公尺以上為南風與澎湖 12 : 00 時的風向相同，判斷為背景環境風，因此夏季海陸風的背景環境風為南風。在秋季海陸風發展時，從風向的垂直分布圖（圖 15d）可以明顯的觀測到在 600 公尺以下為西北風（海風），600 公尺以上為

東北風與澎佳嶼 12:00 時的風向相同，判斷為背景環境風，因此秋季海陸風的背景環境風為東北風。

(2) **水平風場** 夏季海風的風向為西風且風速較強，海風進入陸地後不易受到地形影響，而發生風向、風速的變化，在 U、V 向量風速座標軸上呈現逆時鐘變化（圖 16a）；秋季海風的風向為西北風且風速較弱，海風進入陸地後受到地形影響，在內陸地區發生風向改變、風速減弱的現象，在 U、V 向量風速座標軸上呈現順時鐘變化（圖 16b）。

(3) **熱力邊界層** 無論在夏季或秋季中部內陸的熱力邊界層可分為三個部份，（ ）最下層為混合層，夏季由地表至約 600 公尺高，秋季由地表至約 250 公尺高，太陽輻射加熱地表，熱力作用產生的對流，使混合層內的空氣均勻混合，層內大氣十分不穩定，位溫垂直變化大，此外在混合層頂常存在一逆溫層。（ ）中間為海風與上層環境風的轉換層，此層位溫的變化小，呈現中性穩定，風速隨高度增加減弱，風向逐漸由海風轉變為環境風，夏季由混合層頂至約 1200 公尺高，秋季由混合層頂至約 700 公尺高。（ ）最上層為環境風，位溫、溼度、風速及風向代表綜觀的氣象環境（圖 12、圖 13、圖 14 及圖 15）。

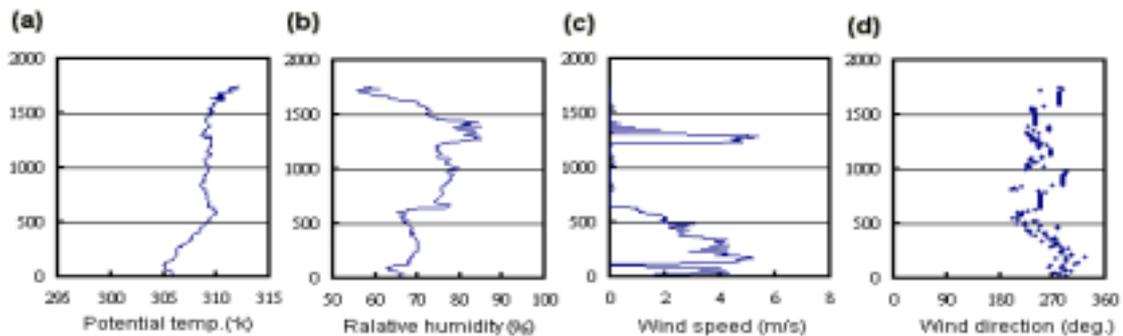


圖 12: 1999 年 8 月 28 日 12:00 茄荖國小(a)位溫、(b)相對溼度、(c)風速、
(d)風向垂直分布圖

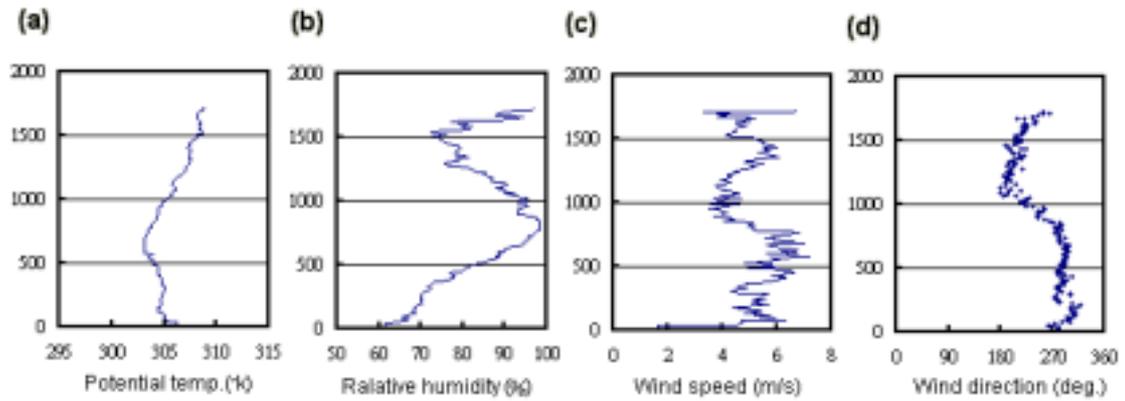


圖 13: 1999 年 8 月 29 日 12:00 茄荖國小(a)位溫、(b)相對溼度、(c)風速、(d)風向垂直分布圖

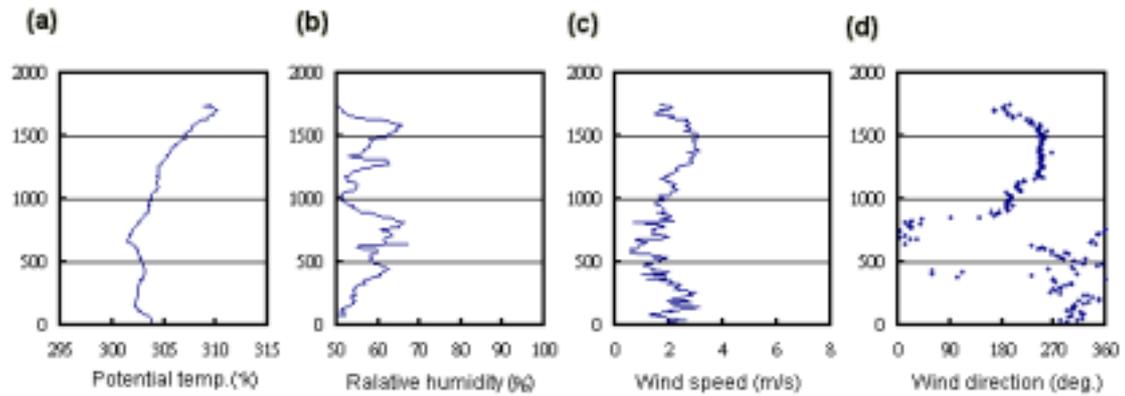


圖 14: 1999 年 11 月 5 日 12:00 敦和國小(a)位溫、(b)相對溼度、(c)風速、(d)風向垂直分布圖

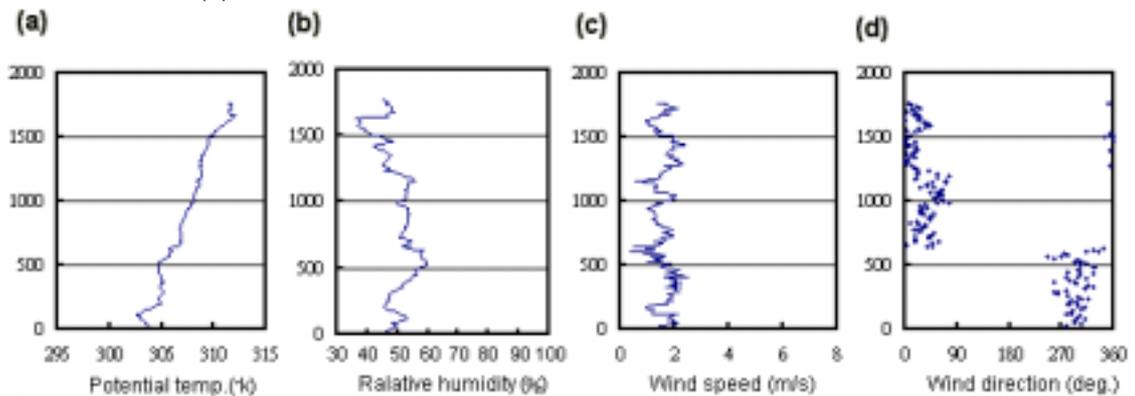


圖 15: 1999 年 11 月 6 日 12:00 敦和國小(a)位溫、(b)相對溼度、(c)風速、(d)風向垂直分布圖

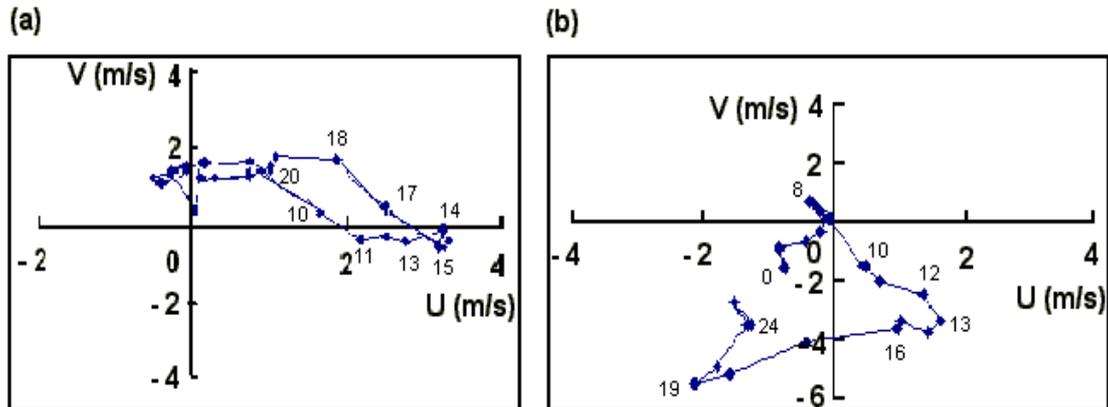


圖 16: 1999 年 8 月 28 日 (夏季海陸風) (b) 1999 年 11 月 6 日 (秋季海陸風)

梧棲(1)測站 U、V 向量風速逐時分布圖

(4) **空氣品質** 在夏季海陸風影響下，中部地區風向的轉變是由凌晨的南風順時鐘轉變為中午的西風，且風速較強，污染物傳輸路線的下風處為研究區域的東北方，大致是人口稀少的台中縣北部及苗栗縣的東部山區，因此整個中部地區的空氣品質良好；然而在秋季海陸風影響下，中部地區風向的轉變是由凌晨的東北風逆時鐘轉變為中午的西北風，風速較夏季弱，污染物傳輸路線的下風處為研究區域的東南方，大致是人口密集的台中縣南部及南投縣西部，造成中部地區的空氣品質不良。為印證上述推論，選擇二個分別位於研究區域的東北方及東南方的測站，比較四季臭氧濃度的不同，圖 17 為東北方的豐原(2)及東南方的南投(10)測站 1998-1999 四季臭氧日最高值平均的比較，在春、秋及冬季時皆是南投測站高於豐原測站，唯獨在夏季是豐原測站高於南投測站。

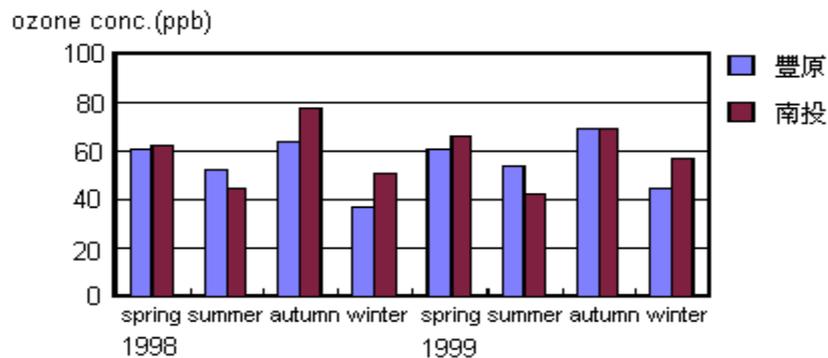


圖 17: 1998-1999 豐原(2)、南投(10)各季臭氧日最高濃度均值分布圖

(二) 污染物的垂直分布與熱力邊界層之相關

實驗中發現 O_3 濃度明顯隨高度而變化， O_3 的乾沈降及 NO_x 對 O_3 的滴定效應及熱力邊界層的結構對污染物擴散的限制等因素，在在影響著 O_3 濃度的高度變化，本小節將就此次實驗結果與先前的研究報告相對比較，冀希望能得到較好的結果。(Gusten et al., 1998、Kambezidis et al., 1998、Sahashi and Hieda, 1996、Kitada and Kitagawa, 1990、Lalas et al., 1983)

臭氧 第二次實驗的邊界層結構、臭氧濃度的最高、最低值及其所在的高度列於表一，在實驗期間每日的正午在 100-200 公尺高皆存在一逆溫層，臭氧的最低值較常出現在地面，其次為 1200 公尺高，推測是因為 O_2 的乾沈降作用或地表污染源排放的 NO 透過 $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$ 的機制將 O_3 破壞，造成地表臭氧的低值；最高值出現的高度較不固定，但如單就臭氧污染事件日的 09:00 及 12:00 來探討，臭氧最高值大都出現在 100 公尺及 250 公尺高，在上一小節提到的混合層高度之下，推論因混合層上的逆溫限制臭氧的擴散，導致臭氧最高值出現在 250 公尺之下。

六、結 論

本研究收集 1997、1998、1999 年中部地區各氣象及空氣品質監測站資料進行統計分析，並於 1999 年在內陸地區進行二次探空實驗，目的為了解中部地區的海陸風環流的特性及其對臭氧污染生成的影響，並針對臭氧污染情形較為嚴重的內陸地區，分析其熱力邊界層的發展與各污染物垂直分布的相關性。

(一) 統計分析

- (1) 1997、1998、1999 年春、秋二季中部地區高臭氧污染事件日發生率為 46.3%。在海陸風盛行日時，內陸的測站位於白日海風的下風處，發生高臭氧污染的機率較濱海測站高出許多。
- (2) 1997-1999 年春、秋二季中部地區發生高臭氧污染事件日時，風速、風向有明顯日夜變化，且最大風速普遍在 5.0 m/s 以下，風向有明顯日夜海、陸風變化，因此在中部地區發生高臭氧污染事件日時，氣象環境大多受海陸風環流影響。

(二) 夏、秋二季海陸風的特性

- (1) 夏季的綜觀背景風向為南風，秋季的綜觀背景風向為東北風。
- (2) 夏季海風的風向為西風且風速較強，海風進入陸地後不易受到地形影響，而發生風向、風速的變化；秋季海風的風向為西北風且風速較弱，海風進入陸地後受到地形影響，在內陸地區發生風向改變、風速減弱的現象。
- (3) 夏季海風逐時變化在 U、V 向量風速座標軸上呈現逆時鐘變化，秋季海風則呈現順時鐘變化
- (4) 在海陸風盛行時，白天中部內陸的熱力邊界層大致分為三層，() 最下層為混合層，位溫變化大，在混合層頂常存在一逆溫層，混合深度夏季較秋季深。() 中間為海風與上層環境風的轉換層，此層位溫的變化小，風速隨高度增加減弱，風向逐漸由海風轉變為環境風，夏季由混合層頂至約 1200 公尺高，秋季由混合層頂至約 700 公尺高。() 最上層為綜觀環境風，位溫、溼度、風速及風向代表綜觀的氣象環境。
- (5) 在夏季海陸風影響下，污染物傳輸路線的下風處為人口稀少的台中縣北部及苗栗縣的東部山區，故整個中部地區的空气品質表現良好；然而在秋季海陸風影響下，污染物傳輸路線的下風處為人口密集的台中縣南部及南投縣西部，加重中部地區的空气品質不良之情況。

(三) 污染物垂直分布

臭氧的最低值較常出現在地面，推測是因為 O_3 的乾沈降作用或地表污染源排放的 NO 透過 $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$ 的機制將 O_3 破壞；臭氧最高值大都出現在 100 公尺及 250 公尺高，恰恰在混合層高度之下，推論因混合層上的逆溫限制臭氧的擴散，導致臭氧最高值出現在 250 公尺左右。

致 謝

本研究為國科會 NSC-89-EPA-Z-029-001、環保署 EPA-89-FALL-03-231 補助下之成果，同時感謝中興大學大氣研究室團隊的支援與合作，本研究得以完成。

引用環保署之空氣品質監測數據、中央氣象局及台電測站之氣象資料，特此申謝！並感謝研究助理白珽玲小姐與謝國發先生協助整理。

參考文獻

- [1] Blumenthal, D.L., White, W.H., and Smith, T.B. (1978) "Anatomy of A Los Angeles Smog Episode: Pollutant Transport in the Daytime Sea Breeze Regime," *Atmospheric Environment* **12**, pp. 893-907.
- [2] Chang, Y.S., and Carmichael, G.R. (1989) "The Transport and Formation of Photochemical Oxidants in Central Japan," *Atmospheric Environment* **23**, pp. 363-393.
- [3] Gusten, H., Heinrich, G., and Sprung, D. (1998) "Nocturnal Depletion of Ozone in the Upper Rhine Valley," *Atmospheric Environment* **32**(7), pp. 1195-1202.
- [4] Hastie, D.R., Narayan, J., Schiller, C., Niki, H., Shepson, P.B., Sills, D.M.L., Taylor, P.A., Moroz, W.J., Drummond, J.W., Reid, N., Taylor, R., Roussel, P.B., and Melo, O.T. (1999) "Observation Evidence for the Impact of the Lake Breeze Circulation on Ozone Concentrations in Southern Ontario," *Atmospheric Environment* **33**, pp. 323-335.
- [5] Helmis, C.G., Papadopoulos, K.H., Kalogiros, J.K., Soilemes, A.T., and Asimakopoulos, D.N. (1995) "Influence of Background Flow on Evolution of Saronic Gulf Sea Breeze," *Atmospheric Environment* **24**, pp. 3689-3701.
- [6] Kambezidis, H.D., Weidauer, D., Melas, D., and Ulbricht, M. (1998) "Air Quality in the Athens Basin During Sea Breeze and Non-Sea Breeze Days Using a Laser-Remote-Sensing Technique," *Atmospheric Environment* **32**(12), pp. 2173-2182.
- [7] Kitada, T., and Kitagawa, E. (1990) "Numerical Analysis of the Role of Sea Breeze Fronts on Air Quality in Coastal and Inland Polluted Areas," *Atmospheric Environment* **6**, pp. 1545-1559.
- [8] Lalas, D.P., Asimakopoulos, D.N., and Deligiorgi, D.G. (1983) "Sea-Breeze Circulation and Photochemical Pollution in Athens, Greece," *Atmospheric Environment* **17**, pp. 1621-1632.
- [9] Reible, D.D., Simpson, J.E., and Linden, P.F. (1993) "The Sea Breeze and Gravity Current Frontogenesis," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119**, pp. 1-16.
- [10] Sahashi, K., and Hieda, T. (1996) "Nitrogen-Oxide Layers Over the Urban Heat Island in Okayama City," *Atmospheric Environment* **30**, pp. 531-535.
- [11] Simpson, J.E. (1987) *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory*, Chichester: Ellis Horwood, 244 pp.

- [12] Simpson, J.E. (1994) *Sea Breeze and Local Wind*, Cambridge University, Inc., 234 pp.
- [13] Simpson, J.E., Mansfield, D.A., and Milford, J.R. (1977) "Inland Penetration of Sea Breeze Front," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **103**, pp. 47-76.
- [14] Simpson, J.E., and Britter, R.E. (1980) "A Laboratory Model of an Atmospheric Mesofront," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **106**, pp. 485-500.
- [15] Suppan P., Fabian, P., Vyras, L., and Gryning, S.E. (1998) "The Behavior of Ozone and Peroxyacetyl Nitrate Concentrations for Different Wind Regimes During the Medcaphot-Trace Campaign in the Greater Area of Athens, Greece," *Atmospheric Environment* **32**, pp. 2089-2102.
- [16] 林沛練、張隆男、陳景森 (1990) 海風邊界層之發展與污染物濃度的日變化。大氣科學，第十八期，第四號，pp. 287-307。
- [17] 程萬里、莊秉潔、林明德 (1998) 台中縣地區 O₃ 前驅污染物 NO_x 及 NMHC 分布與趨勢之調查期中報告。台中縣環保局，120 pp.。
- [18] 陳焱煌 (1997) 西北台灣局部環流與邊界層發展之研究。中央大學大氣物理研究所碩士論文。桃園。
- [19] 殷達中、劉萬軍、李傭佐 (1997) 遼東半島西岸海陸風及熱內邊界層的觀測研究。氣象，第 23 卷，第九期，pp. 8-11。
- [20] 張美玉 (1992) 海陸風對邊界層結構及污染物擴散之影響。中央大學大氣物理研究所碩士論文。桃園。
- [21] 柳中明、蘇維中 (1997) 區域氣象環境與高臭氧之相關分析。大氣科學，第二十五期，第一號，pp. 27-49。
- [22] 蘇維中 (1995) 區域風場與高臭氧生成之相關分析與模擬。台灣大學大氣科學研究所碩士論文。台北。

Characteristics of Sea-land Breeze Circulation and Its Influence on High Ozone Pollution in Central Taiwan

C.-C. Huang* W.-L. Cheng* K.-T. Kuo*

Abstract

The region of central Taiwan is located in the western of Central Mountain and the eastern of Taiwan Strait. Both subtropical and tropical climate influenced its climate. When summer comes, sunlight caused the difference of temperature between sea and land. The difference of temperature caused local circulation and dominates meteoric environment of central Taiwan under weak monsoon. Sea-land breeze circulation is dominant. The purpose of this paper is to analyze the effect of the sea-land breeze on ozone concentration in central Taiwan. The data of air-quality and meteoric monitoring stations of EPA and Taichung power plant for 1997-1999 were collected and analyzed in this study. The results showed that high concentrations of ozone occurred mainly under sea-land breeze. The frequency of occurrence of high ozone episodes is 51.3% in central Taiwan in spring and autumn.

For understanding the vertical structure of the boundary layer and distribution of pollutant, two experiments has been performed in two different synoptic weather. The results showed that there were three parts in the boundary layer of inland area in central Taiwan in sea-land breeze days. () The lower part was mixing layer and potential temperature reduced fast with altitude. There was always an inversion in the top of mixing layer. The mixing depth in summer was thicker than in autumn. () The middle part was entrainment zone of sea breeze and free atmospheric wind and potential temperature reduced slowly with altitude. The depth of entrainment zone in summer was from the top of mixing layer to 1200m and from the top of mixing layer to 700m in autumn. () The higher part was free atmosphere. The higher ozone concentration was found in 100m or 250m in autumn, it meant that ozone dispersion was limited by mixing layer. During summer sea-breeze days, the air quality over Taichuang is fine, but during autumn the air quality is poor.

Keywords: Central Taiwan; Ozone; Sea-land breeze; Boundary layer.

* Department of Enviromental Sciences, Tunghai University, Taichung 407, TAIWAN.