

地形效應對空氣污染物傳輸影響之模擬研究

賴信志¹ 盛揚帆²

長榮大學環境資訊研究中心¹ 中央氣象局科技研究中心²

摘要

本研究使用 PSU/NCAR MM5 中尺度氣象模式來模擬討論台灣地形對空氣污染的影響，並進一步分析地形造成氣流變化之動力與熱力影響。以高臭氧濃度好發的春、秋兩季為模擬時段，藉由模擬微弱的天氣系統下之氣流狀態，來討論地形效應對空氣品質的影響。

經由模擬個案發現，MM5 氣象模式利用四維資料同化(FDDA)的技術可求得相當良好的模擬結果，大尺度氣象場環境的模擬掌握了當時影響台灣的天氣條件系統，且僅有些微的誤差。而在細網格模擬結果的分析中可看出，當典型的大陸性高壓出海過程中，台灣地形在動力上扮演的阻擋角色，及地形熱力對比效應所產生的局部環流，對於空氣污染物濃度的時空分布，均有重要的影響。當東來氣流經中央山脈之阻擋，台灣西部地區低層（1000m以下）大氣的流場呈現繞流、尾流與局部環流所產生的向岸流型態，台灣海峽並會形成一背風渦旋，此渦旋之時空變化與臭氧濃度的時空分布有相當密切的相關。顯示地形效應在形成空氣污染所扮演的角色是非常具有關鍵性的。

關鍵字：MM5，地形效應，空氣污染

一、前言

南高屏地區的空气污染居全國之冠，尤其是臭氧污染的問題更是嚴重，綜合以往的研究顯示，此區域之臭氧污染多發生於 10 月至隔年 3 月，臭氧事件日發生時，在綜觀天氣尺度上是屬於微弱的天氣系統，夜間整個區域受大尺度天氣系統主控，多為北風或東北風，白天有海陸風環流之發展（Yu and Chang, 2000），多為西風或西南風，此局部環流對於污染物之傳輸及擴散有重要的影響，尤其是混合層內之平均風速及混合層高度，應該是控制此區域空氣污染最重要之氣象參數。目前南部地區有相當密集的地面測站可提供逐時之地面風速、風向、溫度及溼度等資料，但是垂直剖面上的觀測只有空軍東港測站每日二次的探空資料，此探空資料能提供高空之溫度、壓力、溼度、風向及風速等資料，能精確估算觀測期間之混合層及混合層高度內之平均風速，但是目前東港探空觀測之時間為上午 8 時至下午 8 時，此一次的觀測時間均是屬於大尺度天氣系統主控的天氣形態，顯然與白天由海陸風環流主控的邊界層特性有很大的差異。然而由於探空資料的缺乏，目前南高屏地區各項空氣污染的模擬分析所需的混合層計算僅能由東港的探空高空資料配合白天的地面資料來內差求取，其中所涉及之誤差是可預期的。因此，利用一個精良的中尺度氣象模式來進行南高屏地區高臭氧污染季節的模擬，是發展南高屏地區空氣污染防治策略之重要前置工作。

影響局部環流形態與強度的因素中最主要的是地形（海岸線分布、山地地形）及地表通量的傳輸。林與盛（1990）研究 TAMEX 三個 IOP 時段（IOP 5, IOP 9, IOP 11）的觀測資料時發現梅雨季綜觀尺度微弱的情形下，海陸風環流一直都是盛行之現象。林（1996）以一理想化的模式模擬探討梅雨季在太平洋高壓系統影響下午後對流與台灣地形的關係，發現在不同的環境風場條件下，午後對流發生的地點與環境風場有很大的關聯；文中並強調不同的環境風場條件下，午後對流發生的機制並不相同。而這些環流的強度與型態，在空氣污染防治的過程中，因為主導區域氣象場的變化而顯得格外重要。

二、研究方法

本研究使用 MM5 中尺度氣象模式來進行模擬研究，模式採用的設定以四層網格將影響台灣天氣的環境條件均包含於模擬範圍中（圖 1），最小網格的解析度為 3 公里。初始場建立時模擬過程中使用資料四維同化的技術，將觀測資料融入模式的初始條件中，以期在較長時間的模擬過程能較精確的掌握模擬結果。

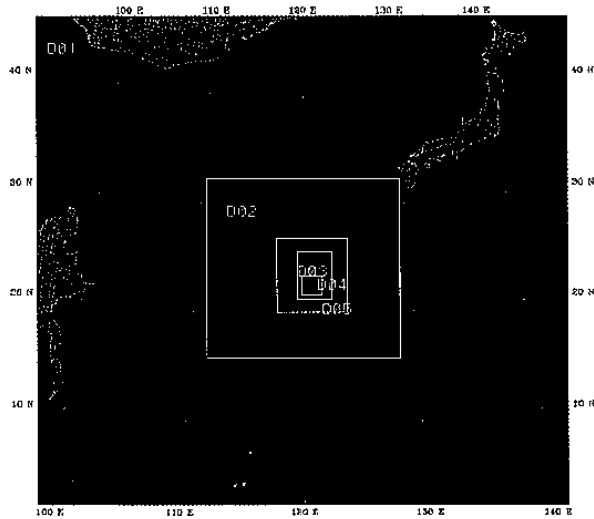


圖1 四層網格將影響台灣天氣的環境條件均包含於模擬範圍

三、模擬結果與討論

● 綜觀天氣描述

本計畫以 2005 年 10 月 31 日 - 2005 年 11 月 6 日為研究時段，因為配合觀測的結果，2005 年秋季所量測到的天氣型態與污染物分布結果以這個時段最完整，因此模擬實驗以此為主，以期有良好的觀測資料為比對。IOP2 密集觀測時間影響台灣的天氣系統為一從大陸發展出來的高壓向東移向太平洋的過程，10 月 30 日一個冷鋒通過台灣後，開始隨著高壓移動的過程從 10 月 31 日(圖 2~4)形成臭氧高污染事件，此段期間之天氣概述如下：1. 階段一，10 月 31 日~11 月 01 日，台灣一帶為東北風影響，低層水汽主要在南海附近，台灣附近在東半部水汽較多。北方的乾燥區域正逐漸接近台灣。2. 階段二，11 月 02 日~11 月 03 日，台灣各地及澎湖、金門、馬祖為多雲到晴的天氣，各地白天天氣偏暖，中南部日夜溫差大。台灣一帶為東風至東南東風。太平洋高壓脊線通過呂宋島，逐漸向西伸展。850 hPa 為一高壓環流，台灣一帶為偏東風。3. 階段三，11 月 04 日~11 月 05 日，台灣各地及澎湖、金門、馬祖為多雲到晴的天氣，各地天氣偏暖，中南部日夜溫差大。華南至台灣附近風場維持偏南風。

在上面的分析中得知，此次高污染事件的環境氣象場是大陸型高壓向太平洋的移動過程。從地面分析圖來看影響台灣的風場，從 10 月 31 日開始到 11 月 5 日整段的高污染期間，似乎可以分成三種環境氣流影響的階段：階段一是從 10 月 31 日~11 月 01 日，環境風場為東北風漸轉為東北東風；階段二則是從 11 月 02 日~11 月 03 日，環境風場已由為東北風轉為東風，而且由地面風的觀測得知風速亦減弱；階段三則是從 11 月 04 日~11 月 05 日，由於高壓脊分裂出高壓中心的位置造成 環境風場為東風轉為東南風，風速又更減弱。

要了解局部地區的大氣狀況與條件，首先必須知道環境的天氣系統特性，還有區域性的地形特性，綜合解析之後，才能釐清影響當地大氣環境條件的重要

因素，以及明白區域天氣的演化。然後對於空氣污染物的傳輸與擴散的過程與原因，才能有完整的背景來討論。因此，要探討台灣西側的空氣品質問題，首先要了解影響台灣西側大氣條件的重要因子，一是環境氣流，二是地形 (賴信志，2004)。

● 模擬結果分析

MM5 模式模擬時間從 2005 年 10 月 30 日 12Z 開始，一直模擬到 2005 年 11 月 6 日為止。由於採用了 FDDA 的技術，每隔 6 小時即進行一次觀測資料的融入，因此對於中長期模擬的掌握有一定程度的修正，較不易因模擬計算的損耗能量而失去對天氣系統的掌握。模式第一層大範圍之驗證以海平面氣壓場來分析，發現通過日本上方的高壓系統、台灣東南方太平洋上的低壓系統、以及延伸至台灣的高壓槽都模擬的非常良好。不論系統的位置或強度，均與觀測分析的非常接近，大範圍的模擬結果給予分析中小尺度系統相當好的信心。

目前台灣的大氣觀測時空解析度並不足以解析完整的中尺度環流，因而必須透過中尺度氣象模式來協助。本研究利用 MM5 模式模擬本研究進行討論的個案，來詳細討論海陸風的形成、範圍及演變，有助於了解台灣南部地區高污染的成因。現依據環境氣流場的特性與演變過程，分成三個階段來討論環境氣流、地形以及海陸風的特性對空氣污染物傳輸的影響。

1. 階段一：環境氣流東北風

台灣一年當中受到東北季風的影響時間約有 8~9 個月，其中南部地區空氣品質惡劣的時段不論是春季或秋季，台灣的環境風場均以東北風居多。然而當環境氣流通過台灣地形時，台灣西南側的氣流場則會呈現出相當特別的現象，不若中部以北的東北風向，西北風出現的頻率相當高，而且風向之日夜變化明顯，此點可由 2005 年的觀測分析中得知。而這樣的氣流特性與空氣品質之間的時空關聯，過去一直無法僅由地面的大氣觀測來解釋，因此本研究利用本次環境風場一直都在轉變，而且台灣西部一直存在高污染現象的個案，來探討氣流、地形的影響。

階段一之環境風場為東北風，高壓剛剛出海的時候，本身受到海洋變性的調節度比較小，因此維持的環境氣流特性與冬季季風比較類似：風速較強且氣溫較低。中央山脈以北北東-南南西的走向貫穿台灣，最高地形達約 4000m。因此當東北風通過台灣時，就好像水流通過一艘船一般，在迎風面產生分流與逆流現象；而背風面，亦即台灣的西南側，則會有尾流(wake vortex)以及背風(lee vortex)渦旋的產生。圖 5 是本階段 MM5 模式模擬第四層風場的結果，從地面流場的時間變化來看，00Z 的空間分布很明顯的在台灣的西南端產生尾流的現象，而這個區域，就剛好是林園工業區的西南端外海(22.5N, 120.5E)，也就是本計劃觀測實驗的區域。尾流之所在通常風速較弱，而且風向與盛行環境風場之風向亦有不同。當白天日照漸強，局部環流漸次明顯的時間，背風面的尾流會受到海風的交

互作用而修正範圍與強度，因此林園地區的臭氧會因向岸風的增強而向內陸傳輸，從圖 5 亦可看出地面臭氧濃度極大值區的位置在日間漸次向內陸分布。

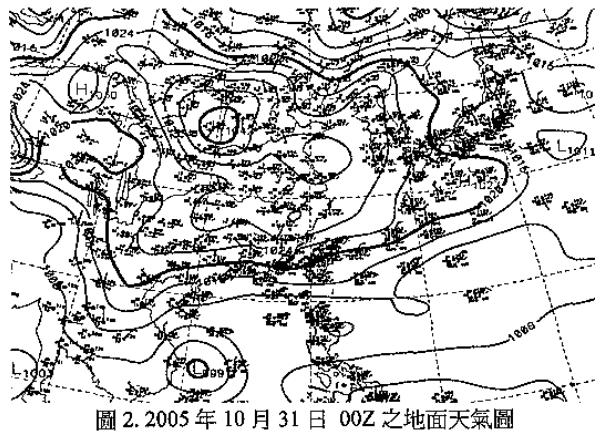


圖 2. 2005 年 10 月 31 日 00Z 之地面天氣圖

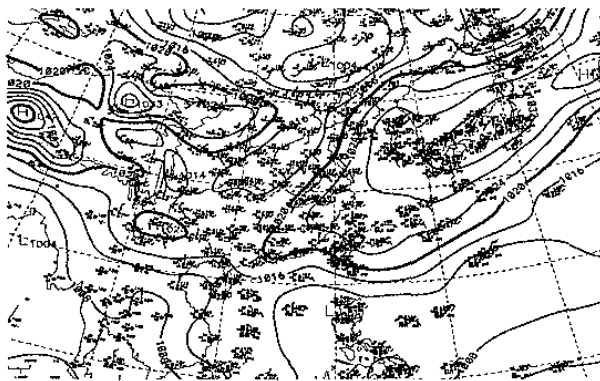


圖 3. 2005 年 11 月 2 日 00Z 之地面天氣圖

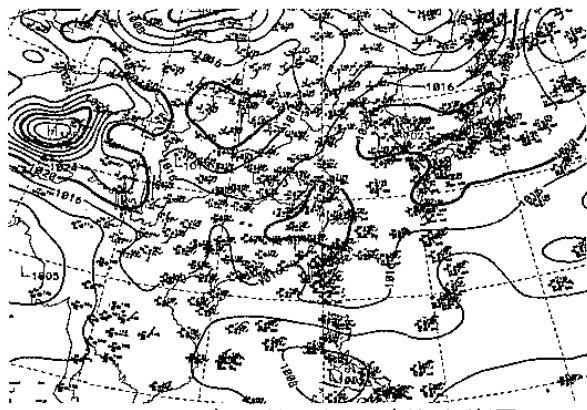


圖 4. 2005 年 11 月 4 日 00Z 之地面天氣圖

特別的是，由於中央山脈到高屏交界之後，高度迅速降低，從模擬的結果可看到，地面氣流在此可直接越過地形，也因此南端尾流的區域就剛好位於林園地區的下方。這個特殊的地形配置，導致林園工業區的空氣污染物因尾流靜滯點的產生而無法向外流出，導致日間在高屏內陸地區形成高污染的現象。

而夜間原應由海風轉成陸風的局部環流，由於盛行風場較強，因此陸風並不明顯，而造成最後是由尾流主導此區域之流場。從(c)、(d)的風場與污染物的配置來看，尾流形成的向岸風帶來乾淨的空氣(fresh air)，使得岸邊的臭氧濃度亦較山地地形處為低。

為了解流場在垂直方向的分布情形，將臭氧污染

最嚴重時的流場以不同的高度進行分析。圖 6 顯示出在 1.5 公里以下的盛行風場整層都是東北風，在台灣西南端地區形成背風的渦旋，愈靠近地面，渦旋的位置愈靠南端；而渦旋影響的範圍，則是愈高愈廣泛。從此圖來看，整個渦旋的垂直分佈是向上向西北傾斜，在 Smolarkiewicz et al. (1998) 研究夏威夷島的地形雲過程中，曾提及在地形具有加熱效應的影響下，日間氣流通過地形後形成的尾流或背風渦旋會有向上傾離地形的趨勢。此點與本研究模擬的結果相當接近。此項模擬結果也說明了要解決台灣的空氣品質問題，必須先對環境流場造成的現象有全面的了解，才能擬定完整的策略。

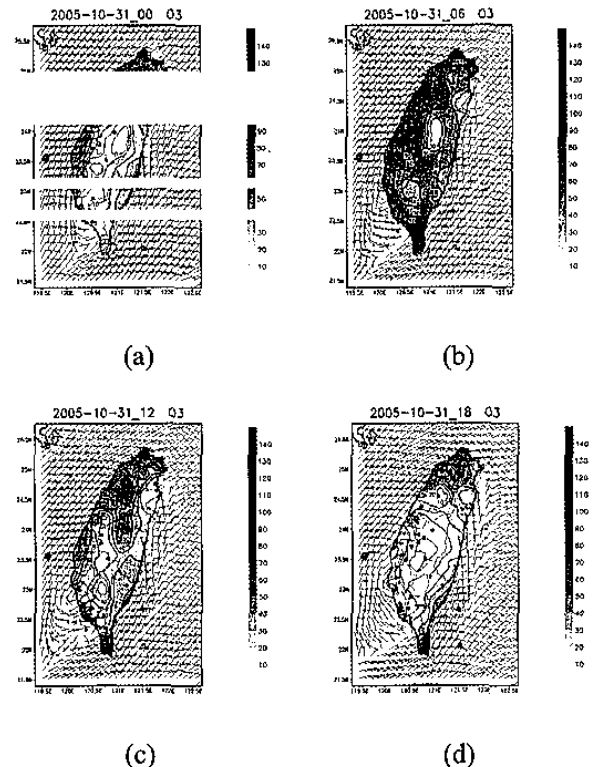


圖 5 階段—MMS 模擬 10 月 31 日之風場與 O₃ 分布圖。(a) 00Z (b) 06Z (c) 12Z (d) 18Z

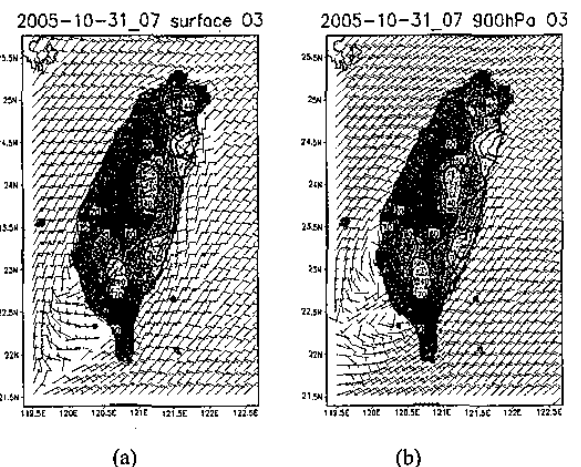


圖 6 階段—MMS 模擬 10 月 31 日 07Z 之風場與 O₃ 分布。(a) 地面，(b) 900hPa

接下來檢視模式模擬海陸風環流的型態，在階段一的時候，由於空氣團屬於大陸性高壓，因此環境氣

流是屬於較冷較乾的狀況。從圖 7 的垂直剖面來分析，可以發現以下幾項階段一的海風環流特色：

1. 日間由於陸地加溫的過程，陸地上的邊界層會先發展起來，但由於海風的入侵，在(b)圖中可以看到 400m 以下有類似像重力流(gravity current)的海風鋒面(sea breeze front)的現象。
2. 由海風形成之內邊界層(internal boundary layer)現象相當明顯。
3. 水氣會被海風鋒面前緣的上升速度區向上傳送，並藉由上層迴流往離岸方向回傳。但是階段一此現象並不明顯，由夜間的水氣含量較日間多的情形來看，應是由於氣團不斷在變性之中，因此水氣的含量也一直在增加之中，上下層水氣的差異也漸漸增大，但此論點仍需進一步證實。

2. 階段二：環境氣流東風

在過去的研究結果發現，台灣南部海陸風環流的型態相當顯著，而且伴隨海陸風所產生之邊界層變化與內邊界層的發展，都會影響高屏地區污染物的傳輸與擴散的型態。而對造成台灣空氣污染問題的天氣型態研究中(Chen, 2001)，分析統計結果認為發生高汙染臭氧事件時，環境風場是東風的機率是第二高的，顯示不論是大陸性高壓或是南方太平洋低壓所造成的東風，對於產生高臭氧污染是相當重要的因子。而本研究個案中的階段二即提供了一個很好的機會來進行東風環境下，臭氧在大氣中傳輸與擴散的情形。

圖 8 顯示環境氣流在 1.5km 以下均為東風的型態，迎風面產生逆流的現象，而分流的位置則在宜蘭的南端。從模擬的結果顯示，當東風流過中央山脈時，背風面的渦旋因山脈走向的關係，而呈現在西南端，其中北端的渦旋較南端的渦旋要來的明顯。從地面到 1.5km 高的氣流場中，靠近地面的渦旋範圍較廣，愈向上愈小，北端渦旋的中心位置約在 23°~23.5°N 之間，而南端的渦旋中心位置則是在 22°N。配合地面臭氧的分布來看，渦旋形成的靜滯點與臭氧濃度最高的位置幾乎一致，而渦旋與海風合成的向岸風處，則呈現臭氧濃度較小的情形。

如果將範圍縮小到只檢視高屏地區的話，可由圖 9 發現，日出之前，由於環境風場繞流以及陸風的影響，高屏地區的風向以西北、北極東北風為主。等到下午日射強烈，海陸風環流在理論上發展至成熟階段。由模擬結果可發現原來的離岸風向全部轉成向岸風場，海風的型態非常顯著，在 11 月 2 日時的風向呈現西偏西南的型態，並且在地形降低處，與越山之流場形成一個明顯的尾流渦旋(wake vortex)，圖 9b。由局部地區的流場配置變化可知，地形扮演決定污染物傳輸與擴散過程的重要角色。

以圖 10 說明海風環流的演化，早上 0800LST(00Z)時，海風尚未形成，地面風場雖呈現出離岸的型態，但是 200 m 以則出現向岸風，直到 1km 的高度左右又轉向成東風，由此可知陸風雖然成型，但是厚度相當低且強度頗弱。下午日照強烈之時，圖(b)顯示出 400m 公尺以下轉成明顯的向岸風且風速增強，迴流區因與上層之繞流區合併故無法明確區分，但上層離岸風的

高度約為 1km。在地形處有明顯的上升氣流，而在平原區及海岸線附近則有下降氣流區，海風鋒面明顯的將水氣抬昇到 1 公里以上，並藉由上層的迴流將水氣網離岸方向傳輸。因此在 120.3E 處，明顯的看出濕度向上有減少又增加分布情形。

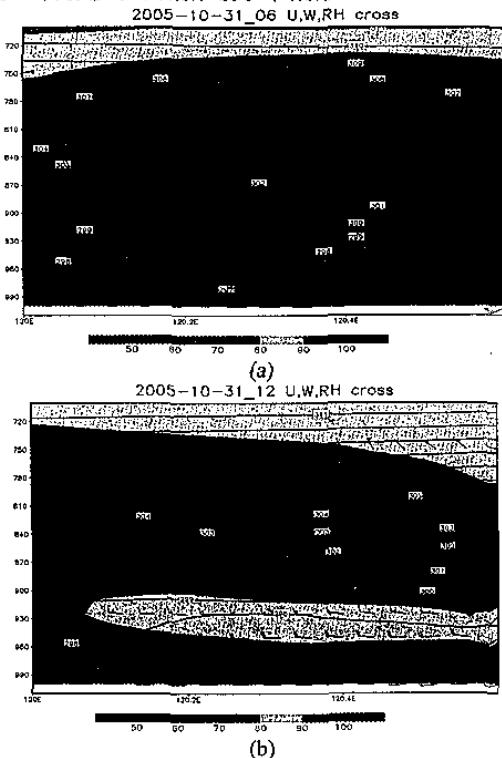


圖 7 階段一，通過林園測站至山地地形前之垂直剖面圖，陰影為水氣 (RH)，實線為位溫，風標為緯向風 (U) 與垂直風 (V) 之合成，(a) 06Z (b) 12Z

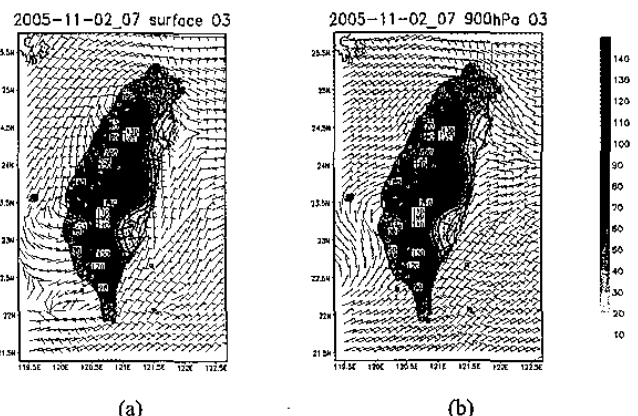


圖 8 階段二 MM5 模擬之風場與 O3 分布，11 月 02 日 07Z (a) 地面 (b) 900hPa

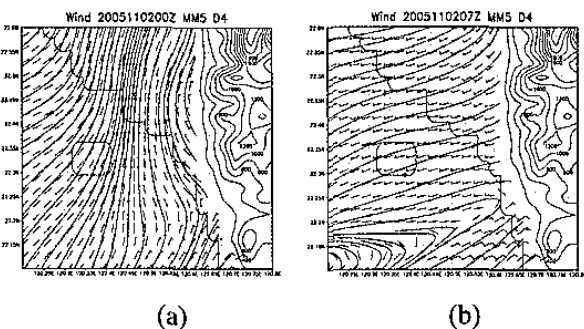


圖 9 模式第四層模擬之台灣南部氣流場，時間為 2005 年 11 月 02 日，(a) 00Z，(b) 07Z

夜間海風強度雖減弱，然而勢力範圍已經延伸進更內陸及更外海，且上層之迴流將原本低層經海風鋒面向上抬昇豐盛的水氣往離岸方向帶得更遠了，在 1000 ~ 1200 km 的高度水氣有相當明顯的變化。到了深夜，陸風開始發展，由圖(d)中可看到 0200LST 時強度頗弱的陸風只存在 300m 以下的陸地表面上，其它範圍仍是海風的殘留形態。值得注意的是，2 km 左右有一乾空氣團移進此區域，風速增加且穩定度增大，此氣團之來源值得進一步探討。

3. 階段三：環境氣流東偏南風

2005 年 11 月初的這個嚴重空氣品質事件中，大氣環境條件比較特殊的是，高壓脊向南方延伸的很長，甚至形成了一個小分裂高壓通過台灣向東移動，而這個分裂高壓造成在事件的後段，形成環境東偏南風的氣流，是大陸性高壓引發臭氧高污染較不常看到的過程。

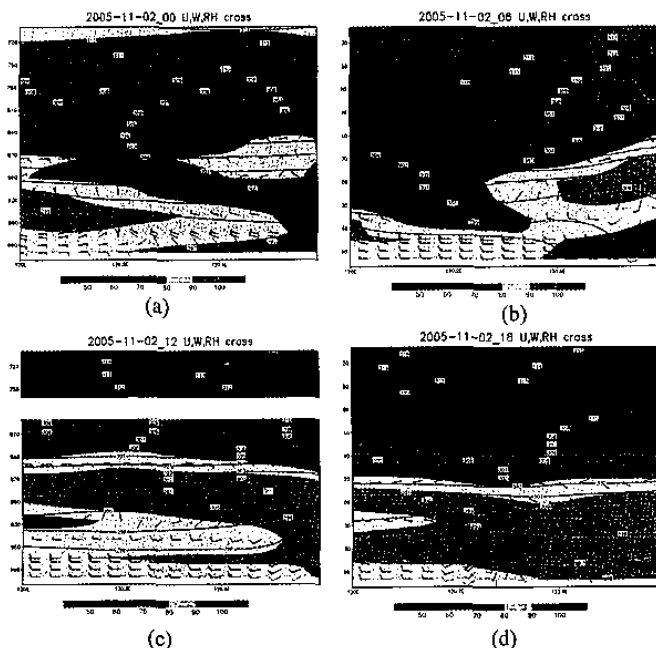


圖 10 2005 年 11 月 02 日，通過林園測站至山地地形前之垂直剖面圖，陰影為水氣(RH)，實線為位溫，風標為緯向風(U)與垂直風(W)之合成，(a)00Z (b)06Z (c)12Z (d)18Z

檢視模式第四層模擬的地面風場發現，11 月 4 日地面風場偏向東南東風，迎風面的分流區已由宜蘭南端移至花蓮台東的交界，風速亦漸顯微弱。在這樣的環境氣流條件下，下午 1500LST(07Z)的背風面氣流呈現出與前兩個階段有明顯差異的情況，北端的背風渦旋出現在台灣西北外海，至於南端的尾流則仍是存在於 22.5N 以南的區域。背風渦旋受到海陸風環流的影響，以及山脈地形的作用，在不同高度有相當明顯的差異。然而與前兩個階段相同的是，在背風渦旋與海陸風環流交互作用下形成的靜滯點，一直都是地面臭氧濃度最高所在的地區。比對圖 6、8、11，可以發現這個共通的特性。而且如果是渦旋向岸與海風向岸的區域，臭氧濃度分佈是愈向內陸濃度愈高，海岸的工業區反而是濃度比較低的地區。而在環境氣流偏東南的情形下，臭氧污染發生的區域由南向北增加，前兩個階段並沒有高污染發生的台北地區，在本階段也產

生了高臭氧濃度的情形，顯示臭氧的累積與分佈，跟環境風場與地形間的交互作用，有非常密切的相關。

研究結果發現，台灣南部海陸風環流的型態相當顯著，而且伴隨海陸風所產生之邊界層變化與內邊界的發展，都會影響高屏地區污染物的傳輸與擴散的型態。由於模擬範圍的第一層解析度只有 81 公里，無法正確描述中小尺度天氣系統的演變，因此在解析局部地區的特殊氣流環境或熱力演變時，必須以細的模式時空解析度來分析。圖 12 為模式第四層空間

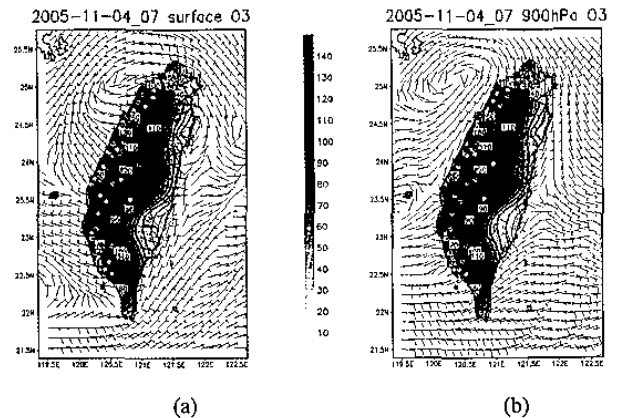


圖 11 階段三 MM5 模擬之風場與 O3 分布，11 月 04 日 07Z (a) 地面 (b) 900hPa

解析度為 3 公里的模擬結果，由早上 00Z (08LST) 的風場來看，高屏地區受到綜觀尺度風場以及夜間陸風的影響，尚未呈現向岸風的型態，此點與觀測結果相當吻合(圖 a)。但是有兩點值得注意：(1) 隨著高壓系統向東移動的過程，環境氣流由東北轉東再轉東南，在台灣西部產生繞流後的形態與位置也會不同，因此在夜間局部環流強度較弱的條件下，高屏地區的風場亦有不同。從圖中可以發現 11 月 2 日呈現偏東北風的型態(圖 9)，到了 11 月 4 日則呈現偏西北風的型態。(2) 在北緯 22.2°，東經 120.7°處，由於中央山脈至此高度開始大幅降低，因此東來的氣流是以越山的方式通過此處而形成一個風速較強的東北風區域。

等到下午日射強烈，海陸風環流在理論上發展至成熟階段。由模擬結果可發現原來的離岸風向全部轉成向岸風場，海風的型態非常顯著，當環境風場變換成東南風之後，由於越山的型態與位置改變，而且風速變弱，因此從圖 b 中看到尾流渦旋並沒有形成，但是高屏地區的北方則似乎有一個背風渦旋(lee vortex)的產生，因而向岸風的方向轉為西偏西北的型態。

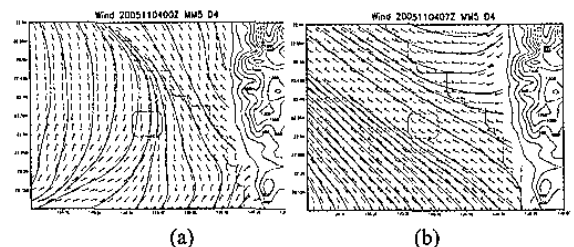


圖 12 模式第四層模擬之台灣南部氣流場，時間為 2005 年 11 月 04 日，(a) 00Z，(b) 07Z

影響本次個案的大陸性氣團在受到海洋溼度調節後，低層的水氣增加，但是由於高空槽的經過，乾冷空氣移入台灣上空，形成相當穩定的大氣環境。比對

11月2日與11月4日同一時間的垂直剖面可發現，1.2km以上高度的相對溼度相差約10%以上。在這個像蓋子(lid)的穩定層環境下，海風發展的過程更加明顯，海風造成的海風內邊界層、海風鋒面都可由圖13a清楚的發現。以水氣的傳輸來代表化學反應速度慢的空氣污染粒子的話，可以看到空氣粒子被海風從近地層傳輸到1km左右的高空，而海風鋒面的後緣因沉降氣流作用所產生的不連續現象，以及高層水氣被迴流向離岸方向傳輸的現象均與海陸風環流的理論一致。

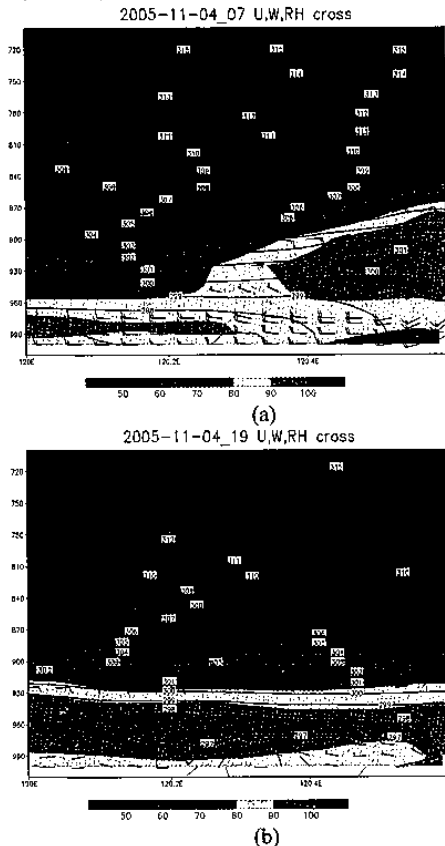


圖13 2005年11月04日，通過林園測站至山地地形前之垂直剖面圖，陰影為水氣(RH)，實線為位溫，風標為緯向風(U)與垂直風(V)之合成，(a) 07Z (b) 19Z

四、結論

2005年10月31日至11月05日，台灣南高屏地區發生高臭氧污染事件，污染事件過程中，環境風場由東北風轉成東風又轉成東南風，給與本研究一個相當好的機會來探討，空氣污染發生的區域與環境風場、地形、以及局部環流之間的關係，並利用良好的中尺度模式，來解析高屏地區3維的氣流場，並解析完整的空氣污染物傳輸與擴散過程。由以上之分析結果可知，模式模擬的結果在定性上非常良好，不論是縱觀尺度的系統特徵，或是詳細的海陸風環流型態，都與觀測有一致的結果。分析結果有以下之結論：

1. 氣流通過台灣地形後，在背風面所產生的渦漩的位置與強度，與地面空氣污染物累積的位置有非常密切的相關。偏北氣流造成渦旋較偏南方，而偏南的環境氣流則會造成背風渦旋偏向台灣海峽北端的情況。
2. 海陸風環流非常明顯，日間的海風環流所引發之

海風鋒面、海風迴流以及內邊界層對於空氣污染物的擴散與傳輸有相當大的作用。

3. 海陸風環流與背風渦旋或尾流渦旋的交互作用結果，會產生氣流的靜滯點，靜滯點的位置所在與臭氧局地最高值(local max.)的位置有相當好的一致性；也因此污染物累積的位置在偏北氣流時，會較傾向在南端靠近內陸的地方，而偏南氣流則會造成北部的高污染情況。

五、參考文獻：

- 林沛練、盛揚帆，1990：TAMEX 期間台灣地區海陸風特性之初步分析。天氣分析與預報研討會論文彙編，p.133-144，台北，中華民國氣象學會。
- 林傳堯，1996：梅雨季太平洋高壓系統影響下台灣地形與午後降水關係之研究。國立中央大學，大氣物理研究所博士論文，pp.241。
- 賴信志，2004：高屏總量管制區空氣品質改善效益與地區因素之關連性研究。子計畫一：地形效應對高屏總量管制區空氣污染物傳輸影響之模擬研究。國科會/環保署九十三年度『空氣污染防治科技合作研究計畫』研究報告。
- Cheng, W-L., 2001: Synoptic weather patterns and their relationship to high ozone concentrations in Taichung Basin. Atmos. Environ., 35, 4971-4994.
- Smolarkiewicz, P. K., R. M. Rasmussen, and T. L. Clark, 1988: On the dynamics of Hawaiian cloud bands: island forcing., J. Atmos. Sci., 45, 1872-1905.
- Yu, T. Y., and L. F. W. Chang, Selection of the scenarios of ozone pollution at southern Taiwan area utilizing principal component analysis, Atmos. Environ., 34, 4499-4509, 2000.