

台灣東南部地區複雜地形局部環流的模擬研究

錢之駿 林沛練

中央大學大氣物理研究所

一、摘要

台灣東南部地區地形十分複雜，由於過去並沒有良好的觀測可供分析研究之用，使得我們對於此地區局部環流的發展與演變了解不深。而 2001 年的 GIMEX 實驗(綠島中尺度實驗, Green Island Mesoscale Experiment) 提供了時間與空間上良好解析度的觀測資料，可用來分析此地區複雜地形的局部環流變化情形。

本研究利用 GIMEX 密集觀測期 2001 年 5 月 24 日的觀測資料進行分析，希望了解該地區局部環流的變化特性，並進一步使用數值模式進行模擬研究，期望能更深入來探討局部環流發展與演變的物理過程。

二、英文摘要

Taiwan is surrounded by ocean and two-thirds of the land mass is covered by mountain. Ocean can provide moisture. Mountain can supply moisture and heat source. Mountain also act as a barrier to the airflow thus induce upward motion. Under this condition, many precipitation systems can occur in Taiwan area or intensify when moved from Hua-Nan or Taiwan strait into Taiwan island. To study what are the important factors to influence the occurrence of the precipitation system and the initiation of lash flood in Mei-Yu season. We first start from the analysis of different condition of environmental flow and boundary layer characteristics. Past studies found several precipitation systems taking place in Taiwan area when synoptic forcing was weak while some flash flood cases associated with the approaching of the Mei-Yu front system, and accompanied with the approaching of the mesoscale convective system embedded in the southwesterly monsoon flow.

In this study we want to proceed observational studies of local circulation, boundary layer characteristics in initiation flash flood and simulate the occurrence and development mesoscale convective systems in those events by using Penn

State - NCAR Mesoscale Model. Through this study we hope to obtain some important factors such as wind, thermodynamic field, and physical processes to influence the occurrence of the topographically induced circulations in initiating a flash flood observed during Mei-Yu season. Base on the development of boundary layer data assimilation and the improvement of the boundary layer and surface processes treatment, we hope to establish the Quantitative Precipitation Prediction (QPF) capability of mesoscale model.

三、前言

台灣是位於亞洲大陸與太平洋交界處的島嶼，四面環海，海陸的對比很清楚。島上的地形型態從平原、盆地、縱谷甚至到超過三千公尺的高山都有，地形可說是相當複雜。在四面環海以及地形起伏很大的兩大因素影響之下，由海陸和地形差異加熱所引起的局部環流，在台灣地區是相當明顯而重要的。因局部環流會影響中尺度系統的演變、邊界層的發展及污染物的擴散與傳送，故研究局部環流是有必要的。

過去在台灣觀測主要著重在西半部(例如 1987 年 TAMEX)，比較缺乏東半部的相關資料；另外中央氣象局測站數在東部也比西部少很多。綠島中尺度實驗計畫 (Green Island Mesoscale Experiment, 簡稱 GIMEX)，在 2001 年 5~6 月間於台灣東南部地區進行密集觀測實驗，觀測資料提供了良好的時空解析度可用來探討台灣東南部地區大氣環境和局部環流。雖然 GIMEX 實驗提供了在時間和空間上解析度不錯的資料，但是仍只侷限於幾個密集觀測點，因此要更進一步探討局部環流在時間、空間上的發展與演變特性，必須以模式模擬來補觀測上的不足。本文使用 MM5 來模擬台灣東南部地區的局部環流，希望結合密集的觀測以及模式模擬之結果來了解此地區局部環流以及大氣邊界層的發展與演變特徵。

四、資料來源與模式介紹

4.1 綠島中尺度實驗(GIMEX)

過去氣象局梅雨季豪大雨預報，東部地區的降雨預報得分特別不理想(周, 2001)，為改善上述情形，由「台灣天氣研究計畫」於台灣東南部地區進行密集觀測實驗，藉由資料收集分析和數值模擬實驗，增加對台灣東南部大氣環境的瞭解，尤其是島嶼地形對氣流和降水的影響。實驗進行時間為2001年5月16日至6月15日，密集觀測期為5月24日至5月30日；實驗範圍以台灣東南部地區以及至綠島之間的海域為主要實驗區域。在GIMEX實驗中使用之觀測設備，除了原有作業單位的例行觀測測站於時間上加密觀測之外，另外有許多輔助儀器加入觀測。原有作業單位之觀測有：中央氣象局(CWB)、空軍和民航局的地面氣象站，中央氣象局所屬之自動雨量站，CWB和軍方之探空站。密集觀測之觀測項目：原有之探空站增加觀測密度(三小時一次)，在成功設置整合探空系統(ISS-Integrated Sounding System)、通量儀(FluxPAM)，於池上、東河、霧鹿、鹿野和台東設置經緯儀測風氣球(Pibal)(圖1)。

4.2 模式介紹

本研究所使用的數值模式為美國國家大氣研究中心與美國賓州州立大學所發展的第五代中尺度模式(簡稱MM5, Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)，此模式使用經過中尺度運動特性簡化的原始方程，追隨地勢座標，多重的巢狀網格(nested domain)，目前屬於三維空間的非靜力中尺度模式。

本研究中模式使用的初始場資料為2001年5月的ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasting) TOGA(Tropical Ocean Global Atmosphere Programme) Global Analysis Data，每日有兩筆資料，分別為00UTC和12UTC，解析度為 2.5×2.5 度，為了能同時掌握大尺度天氣系統的變化以及台灣東南部地區小尺度且地形複雜區域的天氣變化，模式進行模擬時採用四層多重巢狀網格，水平網格點數分別為 79×79 (D1)、 73×73 (D2)、 100×100 (D3)、 112×112 (D4)，網格解析度依照粗網格比細網格為3比1的比率，分別為54km、18km、6km、2km，所使用的地形資料解析度分別為10min、5min、30sec、30sec。模式中垂直方向追隨地勢座標層數為24層。

本文控制組所使用參數化的原理簡介以及設定部分參考賴(2000)，簡述如下：積雲參數化第一層使用Anthes-Kuo的方法，第二層使用Grell的方法，第三和第四層因網格解析度比積雲尺度小，故採用直接計算的方法；邊界層參數

化使用MRF的參數法；輻射參數化使用考慮有雲情況的參數法；水氣參數化使用簡單冰相參數法(simple ice)。

五、模式結果分析

5.1 控制組結果分析

(a) 綜觀天氣的比較

在綜觀天氣系統的表現上，模式掌握了大部分綜觀天氣系統的變化，從模式第一層網格的海平面氣壓場、地面溫度場以及地面風場與ECMWF分析場的比較大致上相當吻合(圖2)。從模式第一層網格的850hPa相對濕度場與ECMWF分析場的比較中也得到不錯的結果(圖3)，而不同處則是在第一層網格南方的區域中模式模擬的相對濕度較為偏高。在模式第三層網格的風場流線與QSCAT海面風場流線比較中(圖4)，模式模擬的上游風場與QSCAT的上游風場有很好的的一致性。由於QSCAT只能得到海面上的風場資料，因此在陸地上則使用中央氣象局的測站資料來與模式結果比較(圖4(a))，台灣東部沿海測站呈現出環境風遇到地形產生分流和海風發展的情形，與模式結果相吻合，而台灣西部沿海測站北部呈現偏北風的情形，而南部則呈現海風(西風)的風向，這和模式模擬的風場流線有很好的的一致性。

(b) 地面測站的比較與分析

在5月24日地面測站與模式結果的地面溫度場比較，模式結果與地面測站有很好的的一致性(圖5)，模擬的溫度有很明顯的日變化情形，雖然在溫度最大值與最小值不完全吻合，但是大致上在不同地區的溫差變化模式都能掌握到。從地面測站與模式結果的地面風場比較，大致上在山坡、縱谷以及沿海地區白天風場轉向的時間點都能夠掌握到(圖6)。而模擬有掌握到風場轉變的時間，而隨著地表持續加熱觀測的風場有轉為偏南風的分量，但是模式結果仍是偏北風的分量。

(c) 風場垂直剖面的比較與分析

從沿海的成功和台東兩測站的風場垂直剖面看，在成功站的模式風場垂直剖面中(圖7(a))，可以清楚的看到風場有分層的現象，分界高度大約在2500公尺，在分界線高度以上主要是受到綜觀的環境風場影響，此一結果與實際成功站探空氣球吻合(圖略)，而分界高度以下則是受到低層大氣環流影響以及近地面處有因地表加熱冷卻所產生的日夜風場改變，而在近地面的風場受到地表熱力作用的影響呈現明顯的日夜變化，在夜間(22Z之前)，近地面風場呈現盛行陸風的情形，在20Z陸風環流因地表逐漸冷

卻而發展至最強，陸風的厚度大約可達到 250 公尺高度，到 21Z~22Z 為轉換期，23Z 之後近地面風場轉為海風風向，隨著時間地表持續受到太陽短波輻射加熱，海風的風速有逐漸加強的現象，因環境風場的東北風與海風方向相同，海風發展的高度不容易分辨出來，海風的厚度在 06Z 大約可達到 700 公尺，而觀測的 06Z 海風發展厚度為 600 公尺（圖略），但是在觀測上海風隨高度有轉向為偏南風分量，等到超過海風發展的高度後就馬上轉為偏北風分量，在模式結果中並無轉向為偏南風分量，而是直接由最底層的東風轉為東北到北風。近地面的海風至 08Z 之後開始漸漸轉為平行海岸線的偏北風分量之後轉成為陸風。

在縱谷內的池上站。在池上站的模式風場垂直剖面中（圖 7 (c)），風場垂直方向也是有分層的情形，分界高度約為 2000 公尺，上層會受到綜觀環境風場改變的影響，風向改變和之前敘述的相同，下層則是因池上站位於縱谷內，左右兩側皆為高山受到地形影響較大，在夜間近地面處主要為沿縱谷往地勢較低處方向的山風（東北風），山風發展的高度為 500 公尺，至 19Z 之後 250~500 公尺的風場轉為西北風，可能是左側中央山脈斜坡上的下坡風增強所導致，而 250 公尺以下仍是維持山風的風向，日出之後（21Z）近地面風場開始轉向變為上坡風（東風），至 02Z 偏南風分量增強，縱谷內從山風改為吹谷風（東南風），此時谷風發展的高度約 750 公尺，02Z~08Z 為谷風盛行的時間，到 09Z 之後風向再度轉變成山風（東北風）。比較池上站和成功站低層的風場變化，當環境風場為東北風時，成功站沒有地形的阻擋風場會隨環境風場改變而有相同變化，池上站則是因為有海岸山脈的阻擋作用，環境風可能越過或繞過海岸山脈進入縱谷內變成東風。

(d) 位溫剖面的比較與分析

成功站的探空氣球和池上站的繫留氣球能夠量測到垂直方向上溫度場的變化，因此可以比較模式結果與觀測的邊界層發展情形。比較在成功站和池上站觀測（圖 8 (a) and (b)）與模式模擬（圖略）的位溫曲線，在觀測與模式模擬同樣都可以看到靠近海邊和縱谷內位溫曲線差異很大，靠近海邊容易受到海洋調節溫度的影響，使得溫度的變化幅度不如縱谷內來的大，而模式模擬的邊界層高度也可以看出兩地的不同，在池上站白天邊界層發展至最高可到達 1500 公尺，而成功站只有 1000 公尺，晚上的邊界層高度則是很相似。霧鹿站的模式模擬結果顯示溫度的變化幅度很大（圖略），而白天邊界層發展高度可到 1800 公尺，比縱谷內和海邊都來的高，但是晚上的邊界層高度則是很淺的一層，比其他兩站低

了許多。

5.2 影響局部環流的因素探討

(a) 地形解析度

本研究利用不同網格解析度和不同的地形資料來探討地形對於此地區局部環流的重要性。不同網域所解析出的地形高度與分佈明顯有很大的差別（圖略），第二層網域和第四層網域地形相差很多，完全沒有綠島地形的存在，中央山脈周圍原本存在許多的山凹變得很平滑，而海岸山脈以及縱谷地形在此也無法解析出來，第三層網域的地形在海岸山脈的南端高度降低至幾乎與縱谷同高，使得縱谷地形只剩下靠近北邊的一小段。第二層網域的地面風場在夜間呈現吹下坡風和陸風的情形（圖 9 (a)），在白天則是呈現上坡風和海風的情形（圖 9 (b)），可以看到當地形只有山坡、平原和海洋的分佈時，風場的日夜變化呈現出很單純的上下坡風和海陸風環流的交替。第三層網域的地面風場在夜間時山區斜坡上皆為下坡風（圖 9 (c)），沿海地區則是陸風的情形，池上以北的縱谷區是吹由南往北的山風，池上以南縱谷地形沒有解析出而成為一個斜坡地形，因此原本向南的山風變成下坡風往沿海地區和陸風會合，在白天山區斜坡上變為上坡風（圖 9 (d)），沿海地區風場也轉向為海風，池上以北的縱谷內可見微弱的谷風存在，而池上以南則是上坡風。從不同網域地面風場的分析可以瞭解地形分佈會改變局部環流發展後氣流的走向，因此確實有使用高解析地形資料搭配高解析網格來得到更接近真實地形的必要性。

(b) 地表通量傳輸

局部環流的發展主要是由加熱不均所產生的水平溫度梯度所引起，再加上地形分佈會改變局部環流氣流的走向，以及盛行風遇到地形所產生的抬升與繞流也會和局部環流發生交互作用，前一節已經討論過地形的重要性，因此本小節將模式中地表通量控制項關閉來探討地表通量傳輸對於局部環流的影響。當地表沒有熱通量傳輸時，地面溫度的日變化很小（圖 10），日夜只有相差不到 1 度，反之地表允許熱通量傳輸時，在池上站日夜溫差可達到 7.5 度。從無地表通量的地面風場可以看到在內陸地區夜晚和白天的風速都很微弱（圖 11 (a) and (b)），且風向沒有一定的規則可循，而海面上風場則是大致上維持著盛行東風，靠近海岸處遇到地形阻擋有繞流的情形，和控制組的地面風場相比（圖 11 (c) and (d)），由於控制組會有海陸風環流的發生，而海陸風環流會與盛行風產生交互作用，夜間陸風發展會阻擋盛行風，而白天海風發展與盛行風結合會增強盛行風風速，在內陸則是有山谷風環

流使得風速與風向會隨時間變化。從垂直速度的比較也可以發現當地表沒有通量傳輸時，微弱的氣流遇到地形抬升或是氣流過山的下沉所產生的垂直速度都非常小，反之在有地表通量時垂直速度的值就大了許多。從以上分析的結果可以得到地表通量對於局部環流是非常重要的，原因是海陸風環流和山谷風環流都是靠溫度差異所驅動的熱力直接環流，若無地表的溫度變化則不會有日夜局部環流的產生。

六、結論與展望

台灣東南部地區地形十分複雜，由於過去並沒有良好的觀測可供分析研究之用，使得我們對於此地區局部環流的發展與演變了解不深。而2001年的綠島中尺度實驗提供了時間與空間上良好解析度的觀測資料，可用來分析此地區複雜地形的局部環流變化情形。

分析的結果發現，當盛行風場為東風時，沿海、縱谷以及山坡地區局部環流的日變化都相當明顯，夜間的地面風場在沿海地區為陸風，在山坡地區為下坡風，在縱谷內則是隨地勢向下的山風；白天的地面風場情況剛好相反，在沿海地區為海風，在山坡地區為上坡風，在縱谷內則是由南北端的入口往中央地勢較高處吹的谷風。大約在早上7時沿海地區會由陸風轉變為海風，山坡地區也是在這個時間內由下坡風轉變為上坡風，縱谷內則是先隨著山坡地區的上坡風發展而由山風轉為上坡風，至早上11時才轉變成谷風，而位於縱谷兩端出口的沿海地區受到山風轉為谷風時間較晚的影響，由陸風轉變為海風在時間上比其他沿海地區晚二到三小時。傍晚6時沿海地區由海風轉變為陸風，山坡地區也是在此時由上坡風轉變為下坡風，縱谷內則是到了晚上10時才由谷風轉為山風，縱谷兩端出口的沿海地區和白天情形相同，會受到縱谷內氣流影響，使其由海風轉變為陸風的時間晚了兩小時。風場剖面的分析結果發現，在垂直方向上風場有明顯的分層情形，大約3000公尺以上是受到大尺度的環境風場影響，在此高度之下和低層風場與地形作用有關，近地面處則是受到局部環流影響最大的區域。

除了分析觀測資料的局部環流變化外，本文使用數值模式對2001年5月24日台灣東南部地區複雜地形的局部環流進行模擬研究，從模式模擬結果與觀測資料比較發現，模式對於大尺度系統變化的掌握能力很好，單點測站的比對也呈現出模式可以模擬出地面溫度日變化趨勢和沿海與山區日夜溫差不同的情形，地面風場的轉變時間和風向變化雖然有一些誤差存在，但是模式能夠掌握到大部分的變化情形，風場剖面得到與觀

測很類似的在垂直上有分層的情形，而位溫曲線也有模擬出與觀測相符的結果。從上述大尺度到小尺度的比較可知模式的結果很不錯，大致上可模擬出局部環流在此複雜地形影響之下的變化情形。

分析模式模擬的結果發現，在沿海地區夜間的陸風發展高度為250至500公尺，白天的海風發展高度在台東站為1000公尺，而成功站為600公尺；在縱谷內夜間的山風發展高度為500公尺，白天的谷風發展高度為750公尺；在山坡地區夜間的下坡風發展高度不到250公尺，白天的上坡風發展高度超過1000公尺。在夜間的局部環流型態為：中央山脈東側山坡和海岸山脈吹下坡風，沿海地區則是吹陸風，而縱谷內山風氣流分為兩支，一支由霧鹿所在山凹經池上後往縱谷北方，另一支則是經池上後轉往縱谷南方；在白天的局部環流型態為：中央山脈東側山坡和海岸山脈吹上坡風，且海岸山脈高度較低處氣流有跨越的分量，在沿海地區吹海風，縱谷內谷風氣流由南北兩端進入往池上方向。沿海地區的位溫曲線日夜差異較小，縱谷內和山坡地區的位溫曲線日夜差異較大，且縱谷內和山坡地區白天邊界層發展高度都比沿海地區來的高。

在影響局部環流的因素探討上，當地形解析度降低使得縱谷地形不明顯甚至是消失時，該地區的局部環流就只有單純的上下坡風環流存在，證明了此地區的局部環流受到複雜地形存在的影響很大，也顯示出在模式中使用高解析地形資料是影響局部環流模擬結果好壞的主要因素；當把模式中地表通量傳輸項關掉之後，對局部環流產生相當大的影響，即局部環流變成沒有日夜變化的發生，可見地表的通量傳輸是驅動局部環流發生的主要動力。

實驗期間通量儀所觀測對於影響邊界層發展的各種熱通量、水氣通量和輻射通量資料並未作分析以及模式的比對，是本研究需要補強的部分。而模式的初始場直接使用全球的分析資料，並未加入探空資料來作初始場的修正與調整，另外模擬沒有針對不同盛行風風向以及有降水發生來作測試，也是本研究需要繼續努力的地方。

參考文獻

- 周仲島，2001：台灣天氣研究計畫與綠島中尺度實驗簡介。《科學發展月刊》，29，568-578。
- 賴信志，2000：台灣梅雨季中尺度對流系統之數值模擬研究-TAMEX IOP8個案。國立中央大學博士論文。

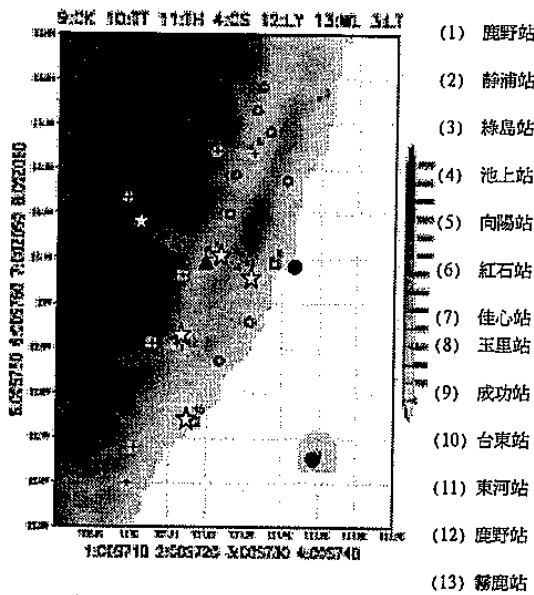


圖 1 綠島中尺度實驗觀測網，包括氣象局標準站(□)、自動氣象站(+)、自動雨量站(○)。密集觀測期之加設觀測項目，星號★為測風氣球觀測位置，三角形▲為繫留氣球觀測位置，圓形●為探空氣球設置位置。

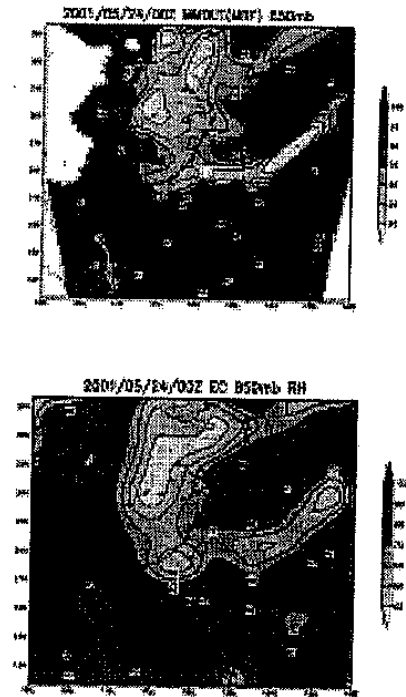


圖 3 2001 年 5 月 24 日 00Z~12Z ECMWF 分析場與模式結果 850hPa 相對濕度場比較圖，(a)24 日 00Z 模式結果，(b)24 日 00Z 分析場。

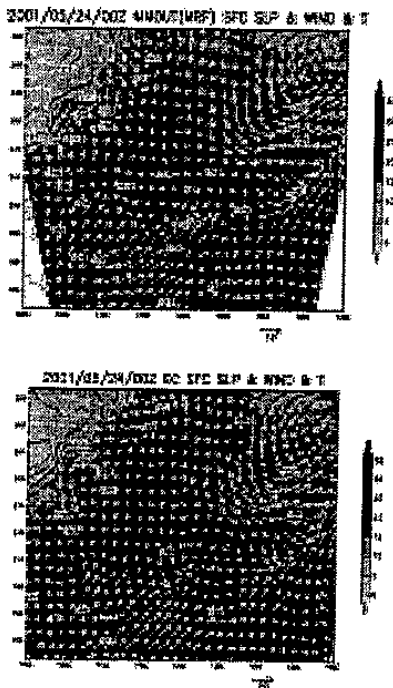


圖 2 2001 年 5 月 24 日 00Z~12Z ECMWF 分析場與模式結果比較圖，陰影區為地面溫度場，等值線為海平面氣壓場，箭頭為地面風場，(a)24 日 00Z 模式結果，(b)24 日 00Z 分析場。

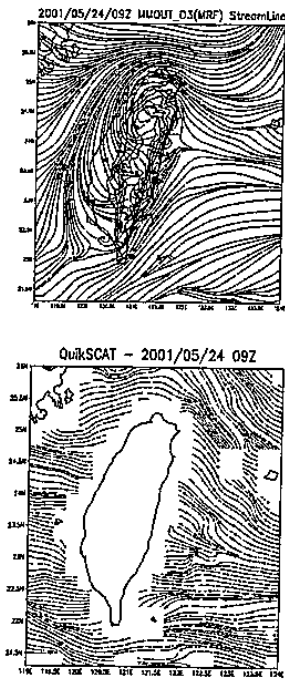


圖 4 2001 年 5 月 24 日 09Z QSCAT 海面上風場與模式結果比較圖，(a)模式結果的風場流線，風標為中央氣象局測站的地面風場，(b)QSCAT 海面 10 公尺的風場流線。

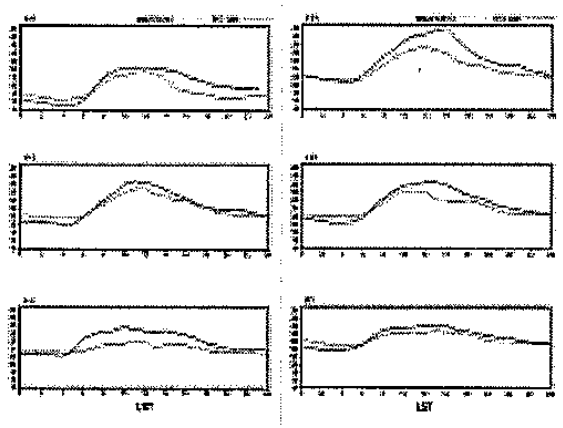


圖 5 2001 年 5 月 24 日當地時間地面測站與模式結果的溫度場比較圖，黑色實線為地面測站，灰色虛線為模式結果，單位 $^{\circ}\text{C}$ ，(a)霧鹿站，(b)玉里站，(c)池上站，(d)鹿野站，(e)成功站，(f)台東站。

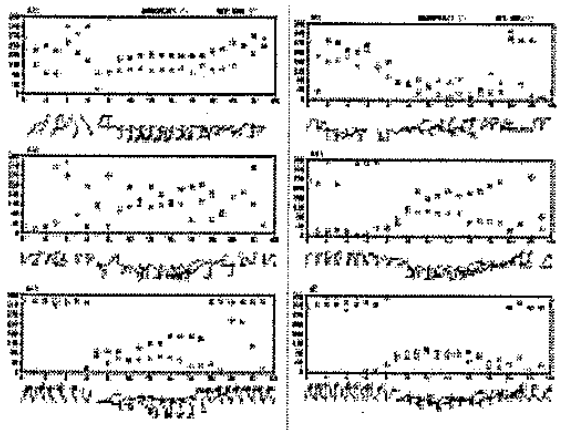


圖 6 2001 年 5 月 24 日當地時間地面測站與模式結果的風場比較圖，黑色方形為地面測站，灰色圓形為模式結果，下方風標黑色為地面測站，灰色為模式結果，(a)霧鹿站，(b)玉里站，(c)池上站，(d)鹿野站，(e)成功站，(f)台東站。

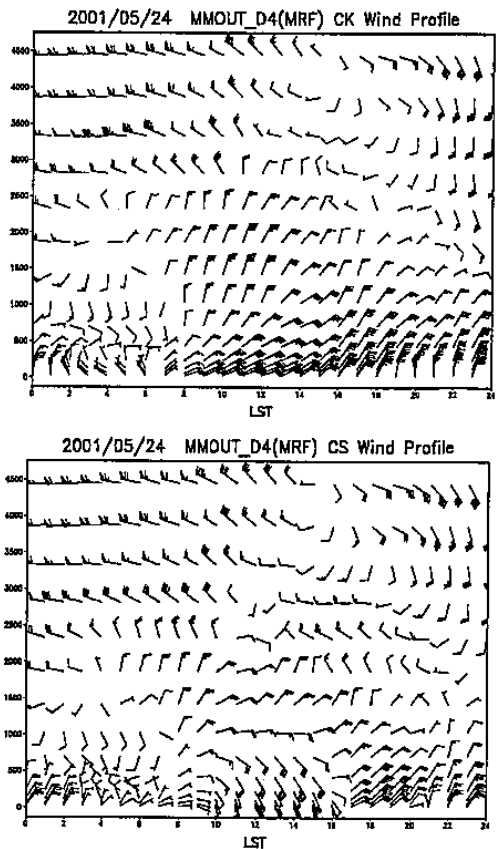


圖 7 2001 年 5 月 23 日 16Z 至 5 月 24 日 16Z 模式的水平風場垂直分佈圖，(a)成功站，(b)池上站。

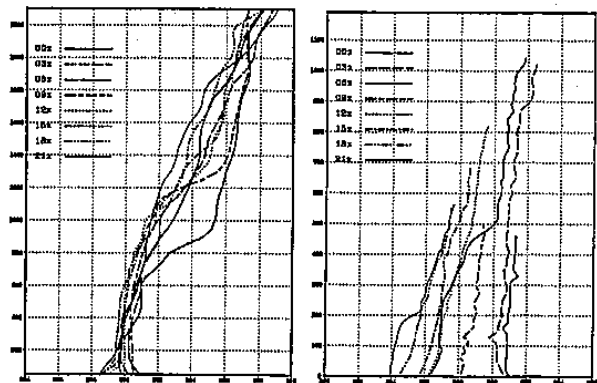


圖 8 2001 年 5 月 24 日成功站和池上站的位溫曲線圖，(a)成功站，(b)池上站。

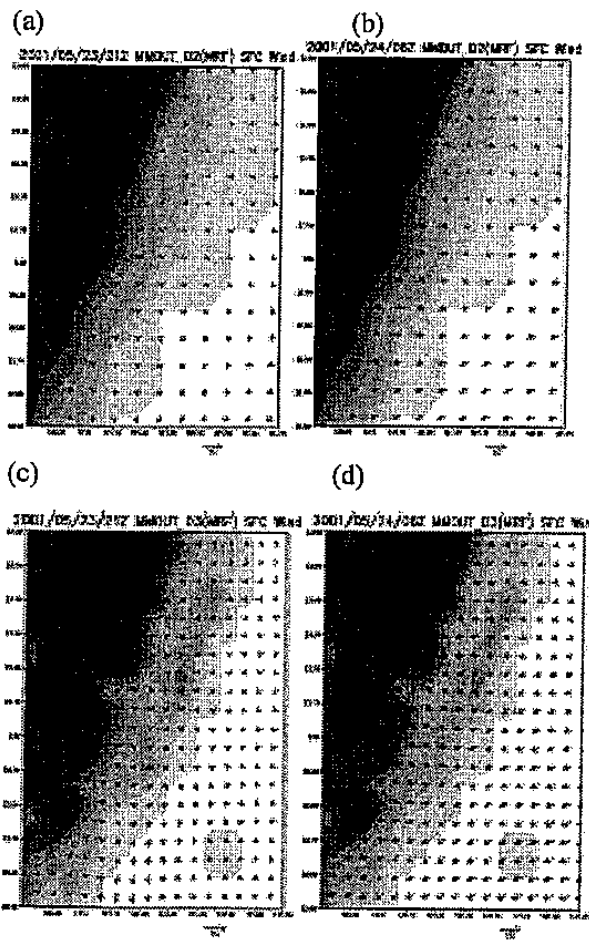


圖 9 模式第二和第三層網域地面風場分佈圖，
 (a) D2-2001/05/23/21Z，
 (b) D2-2001/05/24/06Z，
 (c) D3-2001/05/23/21Z，(d)
 D3-2001/05/24/06Z。

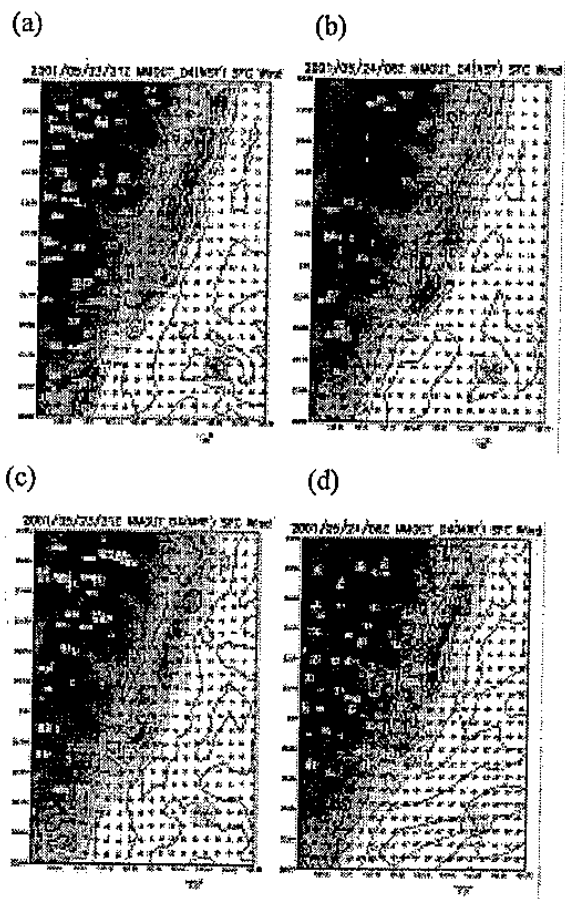


圖 11 模式無地表通量傳輸(a、b)和控制組(c、d)的地面風場和垂直速度分佈圖，時間分別為 2001 年 5 月 23 日 21Z 和 2001 年 5 月 24 日 06Z，箭頭代表風場，等值線代表垂直速度(m/s)。

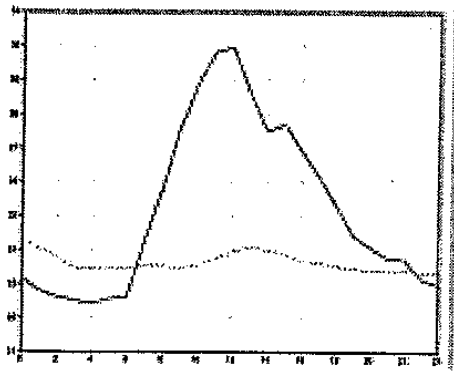


圖 10 池上站控制組和無地表通量傳輸的地面 2 公尺溫度日變化圖，時間為 2001 年 5 月 24 日，實線為控制組，點線為無地表通量。