

私立中國文化大學  
地學研究所大氣科學組

碩士論文

桃芝(2001)颱風之系集模擬研究

指導教授：楊明仁

學 生：青 麟

中華民國九十二年六月

## 摘要

本研究使用 PSU/NCAR 的 MM5 中尺度模式，以 2001 年的桃芝(Toraji)颱風為研究個案，使用 3 層巢狀網格(最細網格間距為 6.67 公里)，探討初始渦旋參數設定與不同物理參數法對模擬桃芝颱風路徑、強度以及伴隨之風雨分佈的影響。並對物理參數法實驗組做系集分析，希望藉由系集平均方法，改善模擬的結果。

在初始渦旋參數測試實驗中，採用不同的最大暴風半徑與最大風速做 Rankine vortex 初始渦旋植入，無論是最大暴風半徑或是最大風速，對於模擬路徑的影響皆不大。初始渦旋最大暴風半徑對於颱風強度亦無明顯的影響，但植入之最大風速對渦旋強度有成正比的關係，即植入較大的風速會模擬出較強的颱風。

在物理參數法實驗中，我們分別對不同的積雲參數法、雲物理參數法及邊界層參數法做測試分析。在積雲參數法實驗中，颱風路徑模擬方面以 Grell 參數法模擬的路徑最好；在強度方面，Anthes-Kuo 和 Grell 積雲參數法皆有不錯的表現。在雲物理參數法實驗中，各實驗間模擬的路徑差距不大(皆與實際觀測接近)，其中路徑模擬表現最好為 Goddard Graupel 雲物理參數法；在強度方面，不同雲物理參數法間有明顯差距，其中 Warm-Rain 參數法的強度最強。在邊界層參數法比較測試中，不同邊界層參數法對於模擬桃芝颱風的路徑有相當的影響；在強度方面，MRF 邊界層參數法模擬出比較好的強度。

綜合物理參數法實驗測試比較結果，挑選出各組表現最好的參數法組合成最佳物理參數法組合，其中在積雲參數法選用

Grell 積雲參數法，在雲微物理參數法選用 Goddard Graupel 參數法，而在邊界層參數法選用 MRF 邊界層參數法。模擬結果顯示，在路徑方面仍有最好的表現，其中模擬颱風路徑在登陸前略有往西偏折之現象，此與王等(2001)之觀測分析結果一致。在強度方面，最佳物理參數法組合實驗模擬之強度略較實際觀測弱，但仍有模擬出颱風強度因過山而減弱之趨勢。對於降雨而言，最佳物理參數法組合實驗模擬之降雨分布與實際觀測降雨分佈相當接近，其模擬之最大降雨量雖為低估，但仍屬所有實驗中表現最好之實驗。總結而論，將各物理參數法組中表現最好的參數法組合成之最佳物理參數法組合實驗，無論在路徑、強度或降雨方面皆仍有最好的表現。

吾人進一步對物理參數法各組實驗結果做系集分析，結果顯示系集平均對於颱風路徑模擬有明顯的改進，但對於強度模擬的改善程度有限，這是由於各實驗模擬之強度在各時期皆較實際觀測弱所致。而在降雨模擬方面，降雨之水平分佈經過系集平均後可以有效地改善，但是其累積降雨量仍因為解析度不夠以致模式模擬之累積降雨量皆較實際觀測少，故累積降雨量依舊偏少。

## 致 謝

在碩士班的兩年求學過程中，感謝家人對我的協助，給予我精神上的關懷，以及物質上的支持，讓我能夠順利完成我的學業。

還要感謝我的指導教授楊明仁老師，在這兩年來對我的耐心教導與諄諄教誨，且不厭其煩地提供論文的修訂與意見，讓原非本科系的我得以如期完成論文，並於寫作過程中獲益良多。也要感謝口試委員劉廣英主任與劉清煌老師對於論文的審閱與提供寶貴的意見，並給予未來研究的建議。且感謝余嘉裕老師、張忍成老師、曾鴻陽老師與徐天佑老師對我的指導與協助。另感謝所有系上老師對我的循循善誘，引領我進入大氣科學的領域。在此也感謝中央氣象局王時鼎顧問及馮欽賜科長提供桃芝颱風相關觀測資料。

接著，感謝學長姐這兩年來的幫忙與解惑，尤其黃小玲學姐與王士杰同學給予我工作站與 MM5 模式操作上的協助。感謝許惠雯助教在教務上的幫助。還有我的同學王士杰、王煥文、林宇庭、李巨祥、余建隆、施鈞倫及張惟閔陪我度過許多愉快的時光，使我的研究生生活多采多姿。最後感謝沈雁萍給予我的幫助、支持與激勵。身為大氣人，要感謝的人太多了，那就謝天吧！

# 目 錄

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 摘要 .....                | i   |
| 致謝 .....                | iii |
| 目錄 .....                | iv  |
| 圖目錄 .....               | v   |
| 表目錄 .....               | vii |
| <br>                    |     |
| 第一章、前言 .....            | 1   |
| 1.1 研究動機 .....          | 1   |
| 1.2 論文回顧 .....          | 3   |
| 1.3 論文結構 .....          | 7   |
| <br>                    |     |
| 第二章、桃芝颱風個案分析 .....      | 8   |
| <br>                    |     |
| 第三章、模式介紹與實驗設計 .....     | 11  |
| 3.1 模式介紹 .....          | 11  |
| 3.2 實驗設計 .....          | 15  |
| <br>                    |     |
| 第四章、颱風植入 .....          | 18  |
| <br>                    |     |
| 第五章、實驗結果 .....          | 20  |
| 5.1 初始渦旋參數 .....        | 20  |
| 5.2 物理參數法實驗 .....       | 25  |
| 5.2.1 積雲參數法實驗組 .....    | 25  |
| 5.2.2 雲微物理參數法實驗組 .....  | 27  |
| 5.2.3 邊界層參數法實驗組 .....   | 29  |
| 5.2.4 最佳物理參數法組合實驗 ..... | 31  |
| <br>                    |     |
| 第六章、系集分析 .....          | 35  |
| <br>                    |     |
| 第七章、結論 .....            | 39  |
| <br>                    |     |
| 參考文獻 .....              | 44  |
| 附圖 .....                | 48  |
| 附表 .....                | 91  |

## 圖目錄

|      |   |    |
|------|---|----|
| 圖 1  | 中央氣象局發布之桃芝颱風路徑圖 .....   | 48 |
| 圖 2  | 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的衛星雲圖 .....                               | 49 |
| 圖 3  | 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的地面天氣圖 .....                              | 49 |
| 圖 4  | 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)<br>之地面分析場 .....       | 50 |
| 圖 5  | 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)<br>之 700hPa 分析場 ..... | 51 |
| 圖 6  | 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)<br>之 500hPa 分析場 ..... | 52 |
| 圖 7  | 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)<br>之 300hPa 分析場 ..... | 53 |
| 圖 8  | 2001 年 7 月 29 日 0000UTC 的衛星雲圖 .....                               | 54 |
| 圖 9  | 2001 年 7 月 29 日 24 小時累積雨量圖 .....                                  | 55 |
| 圖 10 | 2001 年 7 月 30 日 0000UTC 的衛星雲圖 .....                               | 56 |
| 圖 11 | 2001 年 7 月 30 日 0000UTC 的地面天氣圖 .....                              | 56 |
| 圖 12 | 2001 年 7 月 30 日 0000UTC 之雷達回波圖 .....                              | 57 |
| 圖 13 | 2001 年 7 月 30 日 24 小時累積雨量圖 .....                                  | 58 |
| 圖 14 | MM5 模式系統結構圖 .....   | 59 |
| 圖 15 | 模式三層巢狀網格示意圖 .....   | 60 |
| 圖 16 | 渦旋植入方法的流程圖 .....  | 61 |
| 圖 17 | 渦旋植入示意圖 .....   | 61 |
| 圖 18 | v40 實驗組之 60 小時路徑圖 .....   | 62 |
| 圖 19 | v40 實驗組之中心氣壓圖 .....   | 63 |
| 圖 20 | v40 實驗組之最大風速圖 .....   | 63 |
| 圖 21 | rm50 實驗組之 60 小時路徑圖 .....  | 64 |
| 圖 22 | rm50 實驗組之中心氣壓圖 .....  | 65 |
| 圖 23 | rm50 實驗組之最大風速圖 .....  | 65 |
| 圖 24 | rm60 實驗組之 60 小時路徑圖 .....  | 66 |
| 圖 25 | rm60 實驗組之中心氣壓圖 .....  | 67 |
| 圖 26 | rm60 實驗組之最大風速圖 .....  | 67 |
| 圖 27 | 積雲參數法實驗組之 60 小時路徑圖 .....  | 68 |
| 圖 28 | 積雲參數法實驗組之中心氣壓圖 .....  | 69 |
| 圖 29 | 積雲參數法實驗組之最大風速圖 .....  | 69 |
| 圖 30 | 積雲參數法實驗組之 30 日 24 小時累積降雨圖 .....                                   | 70 |
| 圖 31 | 雲物理參數法實驗組之 60 小時路徑圖 .....   | 71 |
| 圖 32 | 雲物理參數法實驗組之中心氣壓圖 .....   | 72 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 圖 33 | 雲物理參數法實驗組之最大風速圖 .....                     | 72 |
| 圖 34 | 雲物理參數法實驗組之 30 日 24 小時累積降雨圖 .....          | 73 |
| 圖 35 | 邊界層參數法實驗組之 60 小時路徑圖 .....                 | 74 |
| 圖 36 | 邊界層參數法實驗組之中心氣壓圖 .....                     | 75 |
| 圖 37 | 邊界層參數法實驗組之最大風速圖 .....                     | 75 |
| 圖 38 | 邊界層參數法實驗組之 30 日 24 小時累積降雨圖 .....          | 76 |
| 圖 39 | 最佳物理參數法組合實驗之 60 小時路徑圖 .....               | 77 |
| 圖 40 | 2001 年 7 月 29 日 1400UTC 桃芝颱風之地面氣壓場圖 ..... | 78 |
| 圖 41 | 最佳物理參數法組合實驗模擬第 24 小時台灣附近之地面氣<br>壓圖 .....  | 79 |
| 圖 42 | 最佳物理參數法組合實驗之中心氣壓圖 .....                   | 80 |
| 圖 43 | 最佳物理參數法組合實驗之最大風速圖 .....                   | 80 |
| 圖 44 | 最佳物理參數法組合實驗之 30 日 24 小時累積雨量圖 .....        | 81 |
| 圖 45 | 積雲參數法實驗組之系集分析路徑圖 .....                    | 82 |
| 圖 46 | 積雲參數法實驗組之系集分析中心氣壓圖 .....                  | 83 |
| 圖 47 | 積雲參數法實驗組之系集分析最大風速圖 .....                  | 83 |
| 圖 48 | 積雲參數法實驗組之系集分析 30 日 24 小時累積雨量圖 .....       | 84 |
| 圖 49 | 雲物理參數法實驗組之系集分析路徑圖 .....                   | 85 |
| 圖 50 | 雲物理參數法實驗組之系集分析中心氣壓圖 .....                 | 86 |
| 圖 51 | 雲物理參數法實驗組之系集分析最大風速圖 .....                 | 86 |
| 圖 52 | 雲物理參數法實驗組之系集分析 30 日 24 小時累積雨量圖 .....      | 87 |
| 圖 53 | 邊界層參數法實驗組之系集分析路徑圖 .....                   | 88 |
| 圖 54 | 邊界層參數法實驗組之系集分析中心氣壓圖 .....                 | 89 |
| 圖 55 | 邊界層參數法實驗組之系集分析最大風速圖 .....                 | 89 |
| 圖 56 | 邊界層參數法實驗組之系集分析 30 日 24 小時累積雨量圖 .....      | 90 |

## 表目錄

|      |                              |    |
|------|------------------------------|----|
| 表 1  | 聯合颱風警報中心 JTWC 所發布之桃芝颱風最佳路徑資料 | 91 |
| 表 2  | 初始渦旋參數實驗組設計表                 | 92 |
| 表 3  | 物理參數法實驗組設計表                  | 93 |
| 表 4  | v40 實驗組之路徑誤差表                | 94 |
| 表 5  | rm50 實驗組之路徑誤差表               | 94 |
| 表 6  | rm60 實驗組之路徑誤差表               | 94 |
| 表 7  | 積雲參數法實驗組之路徑誤差表               | 95 |
| 表 8  | 雲物理參數法實驗組之路徑誤差表              | 95 |
| 表 9  | 邊界層參數法實驗組之路徑誤差表              | 96 |
| 表 10 | 最佳物理參數法組合實驗之路徑誤差表            | 96 |
| 表 11 | 積雲參數法之特性比較表                  | 97 |
| 表 12 | 雲微物理參數法之特性比較表                | 98 |
| 表 13 | 邊界層參數法之特性比較表                 | 99 |

# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

在台灣的各種自然災害中，以每年都可能造成重大生命財產損失的颱風對台灣地區的影響最大。由於颱風可能會造成工業、農業及公共設施的嚴重損壞，強風暴雨亦可能引發土石流、造成淹水或停水停電，不但使人民的生命財產遭受威脅，更導致生活上極大的不便。雖然，颱風為台灣地區最主要的氣象災害來源，但其所帶來的豐沛雨量更是台灣地區重要的水資源之一，對於台灣地區人民的日常生活及經濟活動亦有相當大的影響。因此，對於這種氣象災害，如果能正確地掌握其動態、強度及風雨分佈，並能提供有效率的預警、救災及善後，一直是台灣地區人民共同的期待，也是各學術研究、作業單位所努力的目標。但由於颱風皆生成於廣大的洋面上，觀測資料十分缺乏，加上其降水過程非常複雜，且台灣為一海島，境內有中央山脈縱貫其間，故無論預報颱風之路徑及其所伴隨之風、雨分佈，皆是極為複雜的問題。因此，精確地掌握颱風的移動路徑及其伴隨的強風豪雨分佈之能力尚待開發，致提昇颱風預報能力至今仍為氣象作業預報及研究工作中極為重要的項目之一。

熱帶低壓能否發展成颱風，必須滿足下述四個條件。即：(一)低層要有一個原先存在的低壓擾動，颱風都是從一個原先存在的熱帶低壓擾動發展加強形成的。這實際上可歸之為原先已有低層氣旋性渦旋存在。(二)溫暖的洋面，熱帶海洋上低層大氣的溫度及溼度，主要決定於海面水溫(Sea Surface Temperature；SST)。海溫越高，則低層氣溫越高、且飽和水氣壓亦越大、潛

在不穩定越明顯。通常颱風必須形成於  $SST \geq 26 \sim 27^{\circ}C$  的暖洋面上。(三)生成位置在離赤道 3 到 5 度以外，以利於氣旋性渦旋的生成。(四)對流層風速垂直切變小。對流層風速垂直切變的大小，決定著一個初始熱帶擾動中分散的對流凝結釋放潛熱，能不能集中在一個固定的空間範圍之內。如果垂直切變小，即垂直通風條件不良，上下層空氣間相對運動很小。則凝結釋放的潛熱始終在加熱一個固定範圍內的同一氣柱，而使之很快增暖形成暖心結構，初始擾動可迅速發展而形成颱風。反之，若垂直切變大，上下通風良好，潛熱將被迅速輸送出初始擾動區的上空，形成不了暖心，也不可能由颱風生成。

根據中央氣象局的統計，從 1897 年到 1996 年間，共有 374 個侵台颱風，尤其以 7、8、9 月最多。在這百年間，平均每年約有 3 到 4 個颱風影響或登陸台灣。而在 2001 年中，就有陸續有西馬隆(Cimaron)、奇比(Chebi)、尤特(Utor)、潭美(Trami)、玉兔(Yutu)、桃芝(Toraji)、納莉(Nari)、利奇馬(Lekima)、海燕(Haiyan)等 9 個颱風侵台，其中以桃芝颱風和納莉颱風對台灣的傷害最大。桃芝颱風於 2001 年 7 月 30 日登陸花蓮，由於 921 大地震過後，台灣中部山區土質鬆軟，加上人為不當的開墾，災區尚未重建完成，而且桃芝颱風滯留陸地時間過長(約 10 小時)，降雨集中在中部。因此桃芝颱風造成台灣中部嚴重山崩、土石流及水患，全台一百多人死亡，近三百人失蹤或受傷，為 2001 年造成台灣地區傷亡最慘重的颱風。而在相隔不到 2 個月，納莉颱風以緩慢的移速、極為詭異的路徑侵襲台灣，在台灣停留時間更久，長達近 50 小時，亦導致各地嚴重災害，尤其在台北市造成非常嚴重的水災。

本研究以 2001 年桃芝(TORAJI)颱風作為研究個案；桃芝颱風在 2001 年 07 月 28 日至 31 日影響台灣地區，颱風中心行經的路線正好從台灣中部橫切而過，為 2001 年造成台灣地區傷亡最慘重的颱風。因此本文以桃芝颱風作為模擬個案，來探討模擬的颱風路徑、強度、及伴隨風雨分佈之情形，並與實際之觀測資料作分析比較。

## 1.2 論文回顧

對於颱風的生成機制、移動路徑、發展強度、伴隨風雨等，以及台灣地形對於颱風的影響，已有許多研究探討過相關課題。例如喬等(1996)使用中尺度數值模式 MM5，對侵台颱風路徑變化進行 36 小時的數值模擬，其實驗個案選取 1990 年的中度颱風黛特 (Dot)，並使用不同積雲參數法的測試。其結果顯示，颱風中心路徑會受到積雲參數法若干影響，但並不明顯。在靜力與非靜力的測試比較，則發現非靜力於 10 公里水平解析度模擬並無顯著效應。模擬的颱風路徑與觀測路徑比較相當合理，顯示中尺度模式 MM5 有相當潛力可以用於研究颱風的路徑。但颱風受到地形影響所生成的副中心強度仍未及觀測值，推測原因可能是由於目前 MM5 模式對颱風環流並無中尺度特別加強的初始化，因此無法克服颱風環流強度不足的問題。由 MM5 的實際個案模擬，清楚展現侵台颱風副中心生成的過程。原低層中心在山前受阻，其渦度逐漸被颱風繞流及強烈過山氣流平流至下游處，而產生新低壓或渦旋中心。此與過去的理想化個案研究文獻所提出的解釋是相當一致的。

周等(2001)以瑞伯(1998)颱風為研究個案，探討呂宋島與台

灣地形對於颱風的影響，以及中緯度斜壓系統的牽引與交互作用。其結果顯示呂宋島與台灣地形的存在會造成颱風移動路徑些微的偏折，台灣地形的分佈與模式地形解析，對於瑞伯颱風侵台期間的累積降水分佈亦有明顯的影響。他們並從位渦反演分析上發現，瑞伯颱風朝東北方向遠離台灣的加速過程中，中緯度斜壓系統-槽線，對瑞伯颱風有牽引的作用。

陳（2002）利用中央大學中尺度數值模式 NCU-MM，針對理想地形及真實台灣地形模擬，探討地形對颱風渦旋路徑之影響。其模擬結果發現，由東向西移入理想地形之強烈颱風渦旋，不論初始渦旋的半徑大或小，其路徑皆往南偏，若模式中加入冰相之雲微物理參數化法，則強烈颱風渦旋之南偏趨勢有減小現象。另外，假使模式中不加入邊界層參數法及地面摩擦或潛熱釋放作用等，其強度減弱並往北偏。對於由南向北移入地形之颱風渦旋，使用真實台灣地形模擬，結果顯示強烈颱風路徑往西偏移。若模式中除去邊界層參數法及地面摩擦效應或潛熱釋放作用等，則弱渦旋路徑反而往東偏移。其研究並模擬颱風渦旋不動，地形往渦旋中心方向移動，探討無駛流場與渦旋交互影響下之渦旋的偏折情形，發現偏移方向與移動渦旋個案之結果相同，但在接近真實大氣之條件下，移動地形的模擬結果之路徑南偏較大。此外，由動量收支之分析結果顯示，除去邊界層參數法及地面摩擦或潛熱釋放等作用，西向颱風向北偏移，主要是受到平流效應的影響，其次則為科氏力效應之影響。北向颱風之向東偏移亦是如此。

吳等(1999a；1999b)探討台灣地形對葛拉絲(1994)颱風影響的研究。當葛拉絲颱風移經台灣時是以西北西的方向運動，而非呈理想數值模擬所顯示之氣旋式運動軌跡，此顯示真實大氣

中颱風之運動遠較理想數值模擬複雜。在葛拉絲颱風侵襲台灣期間，根據中央氣象局所做之海平面氣壓分析，顯示在台灣西側中部平原一直有局部低氣壓的現象；而在台灣的東南部，只有當葛拉絲颱風環流接近台灣及登陸時，才分析出局部低壓之現象。經過分析後(吳等 1999a)，認為在台灣東南部之局部低壓是因颱風環流過山在台灣東南部造成下沉氣流絕熱增溫，引發焚風現象所導致。而當葛拉絲颱風登陸台灣以後，其颱風眼及眼牆因受台灣地形影響結構開始受到破壞，當葛拉絲颱風離開台灣時，其強度已明顯減弱，致使葛拉絲颱風的強度在台灣海峽海面上仍無法恢復。在預報結果方面(吳等 1999b)，GFDL 颱風模式大致已能掌握葛拉絲颱風的路徑運動。但當有明顯的地形存在時，颱風運動和駛流場間會有明顯的交角存在，透過此分析過程可發現以深層大氣平均流場來計算颱風駛流時，應考慮颱風發展的垂直高度，此與 Dong and Neumann (1986) 之結果一致。此外，由預報結果也顯示出半徑較大的颱風其受地形的作用較明顯且所受  $\beta$  效應的作用也較大，會造成模擬結果中颱風路徑北偏的程度較大。由渦度收支診斷中亦可得知，地形造成颱風登陸後強度的減弱的機制主要是透過摩擦作用直接或間接的效應和截斷水氣來源。另外，他們亦模擬到經由焚風效應所形成位於花蓮附近之副低壓，此與觀測分析所得的副低壓現象相當一致。

Lin et al.(2002)使用非靜力 COAMPS 中尺度模式，對碧利斯(2000) 超級颱風作數值模擬，以探討中央山脈對於颱風過山時所造成的地形降雨及路徑偏折的影響，並使用無因次參數討論颱風過山時所產生的偏折現象。他們使用  $V_{\max}/Nh$  及  $V_{\max}/Rf$  兩參數說明颱風路徑是否連續的情形，其中  $V_{\max}$  為颱風最大切向風

速， $R$ 為颱風半徑， $N$ 為布維頻率(Brunt Väisälä frequency)， $f$ 為科氏參數， $h$ 為最大山高。物理上而言， $V_{max}/Nh$ 可以表示為渦旋外圍環流的渦旋夫如數(Froude number)，而 $V_{max}/Rf$ 可表示為渦旋強度。Lin et al.(2002)研究指出，若此兩參數值皆很小，則颱風渦旋易受地形所阻擋，有較不連續路徑發生。當 $V_{max}/Nh$ 值大時，向西移動的熱帶氣旋會向北偏移，當 $V_{max}/Nh$ 值小時，向西移動的熱帶氣旋則會向南偏移。

吳與黃(2000)對於芙蘿(1990)颱風做初始資料及初始化方法影響的探討。其模擬結果顯示，不同初始資料及初始化方法所得之模擬颱風路徑有明顯的差異性。採用不同的初始資料，因初始場及模擬時對太平洋副高的趨勢掌握不同，導致對芙蘿颱風路徑的模擬有較大的差異。採用不同的初始化方法，即在初始時間採用不同的渦旋植入過程，造成颱風中心附近流場改變，模擬的路徑亦有相當程度的差別。大部份的模擬結果顯示，因事先已濾除分析場中不正確的颱風訊息，故以結合渦旋與經濾除颱風分量的環境場之模擬結果較佳。又所植入渦旋須經由預先模擬過程而產生，否則開始模擬時會因渦旋結構與模式動力不一致而需一段調整時期，導致模擬路徑不佳。

Braun and Tao (2000)以 Bob (1991)颶風做 72 小時模擬，其使用 3 層巢狀 MM5 模式(最高解析度為 4 公里)對颱風做邊界層參數法的敏感度測試研究，分別使用整體氣動法(Bulk-aerodynamic scheme)(Deardorff 1972)、Blackadar(1979)邊界層參數法、Medium-Range Forecast(MRF)邊界層參數法(Hong and Pan 1996)、及 Burk-Thompson(1989)邊界層參數法等四種邊界層方法比較測試。研究發現，若以近颱風中心最低氣壓與最大風速來定義颱風強度，則 Bulk-aerodynamic 參數法和

Burk-Thompson 參數法模擬出較強的颱風結構，而 MRF 參數法則模擬出較弱的颱風結構。在降水結構方面，發現使用不同的邊界層參數法，將模擬出不同的降水分佈及強度。因此對颱風模擬的降水預測而言，選擇合適的邊界層參數法，和選擇合適的雲微物理參數法一樣的重要。

黃（2001）參考 Braun and Tao（2000）的研究方法，探討瑞伯（1998）颱風的數值模擬對於邊界層參數法的敏感度，希望藉此敏感度研究能發現邊界層參數法的改變與模擬颱風結果之相關性，進而提供日後對颱風預報模擬時的參考。在路徑模擬結果中，發現模擬之結果對於颱風路徑的掌握大致可以，但是模擬之颱風移速偏慢與偏右，應與模擬之颱風強度偏弱有關。在模式對降水量的掌握方面，其研究發現加入複雜的邊界層參數法對於降水量的預報能力增加有限。在降水的分佈上，模擬實驗在對降水的分佈有不錯的模擬結果。綜合言之，加入邊界層參數法將有效提高模擬颱風之強度與對降水分佈之模擬。

### 1.3 論文結構

本論文共分七章，除第一章為前言外，第二章對桃芝颱風個案進行綜觀天氣及中尺度天氣現象的觀測分析，作為數值模擬之比對。第三章介紹所使用的 MM5 數值模式，並說明本系集模擬研究的實驗架構及設計。第四章說明研究使用的初始渦旋植入方法。第五章為各組實驗組的模擬結果，以瞭解各組實驗對個案颱風模擬的移動路徑、中心氣壓、最大風速及降雨分佈與累積雨量之影響。第六章將物理參數法實驗組做系集分析。第七章為結果討論，對所模擬之結果作一綜合討論。

## 第二章 桃芝颱風個案分析

在 2001 年 7 月中央氣象局就針對 4 個颱風發布颱風警報，其中潭美颱風與桃芝颱風皆登陸台灣。7 月 27 日輕度颱風桃芝在菲律賓東方海面上形成，且朝西北進行，並逐漸增強。圖 1 為桃芝颱風之路徑圖，資料來源為美軍聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warning Center；JTWC)所發布之桃芝颱風最佳路徑資料。由路徑圖中可以看到，桃芝颱風從菲律賓東方海面上生成，並朝台灣行進，於 7 月 30 日 0 時 10 分(當地時間)左右登陸花蓮秀姑巒溪口，越過中央山脈後於 7 月 30 日 10 時 20 分左右從新竹附近離開台灣，並於 31 日進入大陸且減弱為熱帶性低氣壓。

在 7 月 28 日 1200UTC 的衛星雲圖(圖 2)中，桃芝颱風位於台灣東南方的海面上，而台灣附近並無其他天氣系統；此亦可由 7 月 28 日 1200UTC 的地面天氣圖(圖 3)中看出，僅有一鋒面系統位於長江流域，且其後有一大陸性高壓向東移，太平洋高壓在台灣附近的勢力並不強。而在 7 月 28 日 1200UTC 歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)的地面分析場中(圖 4)也可以看到，台灣附近主要受到颱風外圍環流影響。在 7 月 28 日 1200UTC 的 ECMWF 700 百帕分析場中(圖 5)，台灣附近仍主要受到颱風外圍環流影響，700 百帕分析場中的颱風中心位置與地面分析場中的颱風中心位置幾乎一致；在 ECMWF 於 7 月 28 日 1200UTC 的 500 百帕分析場中(圖 6)，台灣仍受到颱風外圍環流影響，且颱風中心位置依舊與地面分析場一致；而在 ECMWF 於 7 月 28 日 1200UTC 的 300 百帕分析場中(圖 7)，颱風低壓已不明顯。綜合圖 4 至圖 7 得知，颱風環流垂直範圍主要在地面到 500 百

帕，而在地面到 500 百帕間颱風中心位置幾乎一致，表示此颱風中心並無垂直傾斜現象。此時(7 月 28 日 1200UTC)中央氣象局公佈之中心氣壓為 962 百帕，七級暴風半徑 250 公里，為桃芝颱風的最強盛時期。美軍聯合颱風警報中心 JTWC 公佈之中心位置(見表 1)為東經 123.7 度、北緯 19.7 度，其移動方向朝北北西前進，遙指台灣東北部陸地。

7 月 29 日 0000UTC 的地面天氣圖(圖 8)顯示，台灣東南部已進入颱風暴風範圍內，位於長江流域的鋒面系統仍未移動，颱風強度仍維持不變，JTWC 於 7 月 29 日 0000UTC 公佈之颱風中心位置為東經 122.8 度、北緯 21.3 度。而在 29 日整日主要降雨集中在台灣東部迎風面及台灣南部山區(由圖 9 可見)，在花蓮有最大降雨，但不到 100 公厘。

7 月 30 日 00UTC 的衛星雲圖(圖 10) 顯示，台灣全島已籠罩在颱風之中，此時桃芝颱風因登陸台灣而強度減弱(如圖 11 所示)，其中心氣壓回升至 975 百帕，強度減弱為輕度颱風，而在中央氣象局的雷達回波合成圖(圖 12)中看出，桃芝颱風環流產生之降雨幾乎涵蓋台灣全島。在王等(2001)對 2001 年四次颱風實例分析中提到，桃芝颱風在接近台灣時，因在台灣東北部之山脈迎風面產生高壓脊及西部背風面產生副低壓中心(圖 40)，此一因地形產生的中尺度氣壓梯度導致颱風行進方向自北北西轉為西北西，改從花蓮之南秀姑巒溪一帶登陸(氣象局原本發佈颱風中心將於宜蘭登陸)。因為在背風面形成副低壓中心，以致颱風登陸後原颱風中心被副中心取代。而在 30 日全天的累積降雨主要集中在苗栗、台中及中央山脈中部山區(如圖 13 所示)，且在台灣中南部山區有最大降雨量，超過 600 公厘。此中部山區豪雨造成山洪暴發、嚴重山崩及土石流，造成全台一百

多人死亡、近三百人失蹤或受傷，嚴重創傷台灣。

桃芝颱風在台灣本島停留約 10 小時後離去，進入台灣海峽北部之後，移動速度緩慢，使得台灣本島受到其暴風範圍影響的時間加長。31 日桃芝颱風在福建馬尾附近登陸，強度更迅速減弱，漸變為熱帶性低氣壓，台灣本島之海上陸上颱風警報亦告解除。

桃芝颱風登陸台灣造成非常嚴重的災情。由於颱風行進方向於登陸前突然改變，並挾帶著豐沛雨水向西行進，30 日中部山區在短短幾個小時內便降下數百公厘的豪雨，引發大規模的山洪爆發及土石流，造成中南部山區嚴重災情。另外，桃芝颱風出海後引起的強勁西南氣流，使苗栗、台中一帶雨勢驚人，溪水暴漲而釀成水災。桃芝颱風為 2001 年造成台灣地區傷亡最慘重的颱風。

## 第三章 模式介紹與實驗設計

### 3.1 模式介紹

本研究中所使用的數值模式為美國賓州州立大學 (Pennsylvania State University; PSU) 與美國國家大氣科學研究中心 (National Center for Atmospheric Research; NCAR) 共同研發的第五代中尺度靜力/非靜力數值模式 MM5 (The fifth generation PSU/NCAR Mesoscale Model)。MM5 模式最早由 Anthes 與 Warner 兩位學者在美國賓州州立大學開始發展 (Anthes and Warner, 1978)，目前 MM5 模式已發展到第三版。MM5 模式為三維、可考慮非靜力平衡的有限區域數值模式，具有多重巢狀網格，所使用之垂直座標為  $\sigma$  座標，應用於不同尺度間之交互作用可有較好的解析及模擬。對於複雜的中尺度天氣系統而言，藉由 MM5 的模擬可以彌補因觀測資料不足而無法充分掌握其在時間與空間上演變的缺憾。

由於 MM5 模式適用性廣，符合各種研究領域的需求，全世界已有許多研究機構或氣象作業單位採用 MM5 數值模式進行數值模擬及預報，因此 MM5 模式一直處於不斷改進與發展的狀態之中，是目前被廣泛使用的中尺度數值模式之一。

MM5 模式系統主要由許多輔助系統所構成，其系統結構如圖 14 所示，可分為前置處理系統 (pre-processing)、系統模擬中心 (MM5 model) 及後置處理系統 (post-processing)。前置處理系統是由 Terrain、Regrid/Rawins 及 Interpf 三個部分所組合而成，首先由 Terrain 模組處理模擬區域的地圖投影，此地圖投影的方式包括極座標 (Polar stereographic) 投影法、藍伯特保角 (Lambert conformal) 投影法以及麥卡托 (Mercator) 投影法，並讀取地形高

度(terrain)及地表特性(land use)資料，將其內插至模式之網格中。再由Regrid模組引進低解析度之全球觀測分析資料，包括NCEP、ECMWF/TOGA、NNRP、ERA、ETA等全球分析資料可供選擇，本研究所使用的資料為ECMWF/TOGA網格解析度為 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 的全球觀測分析資料，由之產生MM5模式的初始場(first guess field)，此時可做渦旋植入(bogus vortex)以得到較合理的渦旋初始結構。由於Regrid所產生的模式網格資料是經由低解析度的全球分析場經內插計算所得，對於某些中小尺度之天氣現象可能無法完全充分掌握，因此可再經由Rawins模組用客觀分析(objective analysis)方法將地面測站及高層探空的觀測資料加入模式網格資料中，可提高模式初始場(initial field)對中小尺度現象的掌握能力。再經由Interpf模組將Regrid (及/或Rawins) 模組產生之垂直氣壓座標資料內差至MM5 模式垂直 $\sigma$ 座標後，最後產生MM5 模式模擬/預報所需的初始條件(initial condition)及邊界條件(boundary condition)。前置處理系統產生模式初始場經由MM5 模擬/預報中心前進積分運算獲得結果，再透過後處理系統(post-processing)進行輸出處理，包括使用Graph、RIP或Grads等繪圖軟體將結果加以分析並進行各種氣象場之繪製。

在 MM5 模式中所採用的垂直座標為 $\sigma$ 座標，其定義為 $\sigma = (P - P_t) / (P_s - P_t)$ ，其中 $P_t$ 是模式上邊界的氣壓值， $P_s$ 是地面氣壓。因此，在上邊界的 $\sigma$ 為 0，下邊界(地面)的 $\sigma$ 為 1。由於假設參考氣壓是不隨時間改變的，所以此種座標系統可以完全相當於追隨地形的高度座標 ( terrain-following coordinate )。

MM5 三度空間巢狀靜力/非靜力中尺度數值模式是三維的原始方程模式，而靜力和非靜力模式的差別在於非靜力模式增

加了氣壓擾動場及垂直速度場的預報。由於非靜力模式使用可壓縮流體的連續方程，模式中允許聲波存在。故需以分割積分時間(time splitting)來處理，所以壓力項、動量項以及其間的交互作用項(與聲波有關)使用較小的時間間隔；而平流、擴散、科氏力項及水汽過程(與聲波無關)則使用較大的時間間隔。MM5 中尺度模式對不同的大氣物理過程提供許多不同的參數法選擇，包括與降水相關的積雲參數法及雲微物理參數法、行星邊界層參數法、地表物理過程處理、和大氣輻射過程參數法。因此運用 MM5 模式的另一優點是，針對不同的天氣現象使用者可以採用適當的物理參數法予以模擬/預報。

以下是 MM5 模式非靜力版本之探制方程組。參考狀態及擾動場的定義分別如下：

$$\begin{aligned} p(x, y, z, t) &= p_o(z) + p'(x, y, z, t), \\ T(x, y, z, t) &= T_o(z) + T'(x, y, z, t), \\ \rho(x, y, z, t) &= \rho_o(z) + \rho'(x, y, z, t). \end{aligned} \quad (3.1)$$

其垂直座標為  $\sigma$  座標， $\sigma$  的定義為

$$\sigma = \frac{p_o - p_t}{p_s - p_t}, \quad (3.2)$$

其中  $p_s$  及  $p_t$  分別為參考狀態之地表及大氣頂層氣壓，其值不隨時間變動。在網格點上的總氣壓為

$$p = p^* \sigma + p_t + p', \quad (3.3)$$

其中

$$p^*(x, y) = p_o(x, y) - p_t, \quad (3.4)$$

$p'$  為預報量，表三維之氣壓擾動場。

MM5 模式使用之預報方程(不包含降水物質；Dudhia 1993)如下：

水平動量方程為

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* u}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* u \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + uDIV \\ & - \frac{mp^*}{\rho} \left[ \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right] + p^* fv + D_u \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* v}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + vDIV \\ & - \frac{mp^*}{\rho} \left[ \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right] - p^* fu + D_v \end{aligned} \quad (3.6)$$

垂直動量方程為

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* w}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uw/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vw/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* w \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + wDIV \\ & + p^* g \frac{p_0}{\rho} \left[ \frac{1}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{T'_v}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} \right] - p^* g[(q_c + q_r)] + D_w \end{aligned} \quad (3.7)$$

氣壓方程為

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* p'}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* up'/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vp'/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* p' \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + p'DIV \\ & - m^2 p^* \gamma p \left[ \frac{\partial u/m}{\partial x} - \frac{\sigma}{mp^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{\partial v/m}{\partial y} - \frac{\sigma}{mp^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] \\ & + p_0 g \gamma p \frac{\partial w}{\partial \sigma} + p^* \rho_0 g w \end{aligned} \quad (3.8)$$

熱力方程為

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* T}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uT/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vT/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + TDIV \\ & + \frac{1}{\rho c_p} \left[ p^* \frac{D_{p'}}{Dt} - \rho_0 g p^* w - D_{p'} \right] + p^* \frac{\dot{Q}}{c_p} + D_T \end{aligned} \quad (3.9)$$

其中

$$DIV = m^2 \left[ \frac{\partial p^* u / m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v / m}{\partial y} \right] + \frac{\partial p^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (3.10)$$

且

$$\dot{\sigma} = -\frac{p_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v$$

由於在非靜力的過程中不可壓縮流體之連續方程假設不再成立，因此在非靜力模式模中  $p^*$  為常數的情形之下， $DIV$  代表氣壓趨勢，下標“0”表參考值，上標“ $\cdot$ ”表擾動值， $\rho$  為密度， $m$  為地圖投影比例， $\dot{Q}$  表非絕熱加熱作用，次網格亂流項以  $D_u$ 、 $D_v$ 、 $D_w$  及  $D_T$  表示，而  $g$ 、 $f$ 、 $T_v$ 、 $c_p$  及  $\gamma$  則分別是重力加速度、科氏參數、虛溫、定壓比熱、及定壓比熱與定容比熱之比值， $q_c$  及  $q_r$  分別表示雲水和雨水混合比。

## 3.2 實驗設計

本研究中所使用的非靜力 MM5 模式為 3.5 版，使用水平網格間距分別為 60 公里、20 公里與 6.67 公里的三層巢狀網格，網格點數分別為 65×71、109×109 及 199×163，粗網域 (D01) 涵蓋整個東亞地區，中網域 (D02) 涵蓋整個大陸華南地區及臺灣本島，細網域 (D03) 涵蓋大陸東南沿岸及臺灣本島 (見圖 15)，垂直座標為  $\sigma$  座標 (共 23 層)。所有系集模擬實驗皆以 2001 年 07 月 28 日 1200UTC 為初始時間，積分 60 小時。初始條件與邊界條件皆使用歐洲中期天氣預報中心 ECMWF/TOGA (European Center for Medium-Range Weather Forecasts/Tropical Ocean Global Atmosphere) 的全球分析資料，其解析度為  $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ ，而海平面溫度在整個積分期間則維持一定。由於細網

域的水平解析度(6.67 公里)相當高，假設網格尺度的雲物理參數法可以適當描述颱風環流的對流降雨，故在細網域不考慮次網格所產生的降雨，因此在各組實驗中的細網域皆不使用積雲參數法。表 1 為美軍聯合颱風警報中心 JTWC 所發佈之桃芝颱風最佳路徑資料，本研究採用其中心位置定位資料作為”觀測”之路徑資料，用以與 MM5 模式模擬颱風路徑比較。在本研究中颱風模擬結果皆以細網域(解析度 6.67 公里)作討論，並與實際觀測做比較。

本敏感度測試研究主要分成兩大類實驗：初始渦旋參數實驗組(表 2)及物理參數法實驗組(表 3)。初始渦旋參數實驗組(表 2)依不同的最大風速  $V_{\max}$  與最大暴風半徑  $R_{\max}$  做 Rankine vortex 渦旋植入分成三組(共 9 個實驗)，皆使用相同的物理參數法：次網格的積雲參數法使用 Grell 積雲參數法(Grell, 1993)，可解析尺度的雲微物理參數方法使用簡單冰晶法(Simple Ice; Dudhia, 1989)，邊界層參數化方法則使用 Medium-Range Forecast (MRF) 模式邊界層參數法(Hong and Pan, 1996)。而渦旋植入位置以 JTWC 公佈的最佳路徑為依據，第一組為固定最大風速為 40 公尺每秒( $V_{\max} = 40m/s$ )但改變其最大暴風半徑的 v40 實驗組，而其最大暴風半徑分別使用 40 公里、50 公里及 60 公里。第二組則固定最大暴風半徑為 50 公里( $R_{\max} = 50km$ )但改變其最大風速的 rm50 實驗組，而其最大風速分別使用 30 公尺每秒、40 公尺每秒及 50 公尺每秒。第三組為固定最大暴風半徑為 60 公里( $R_{\max} = 60km$ )但改變其最大風速的 rm60 實驗組，而其最大風速分別使用 30 公尺每秒、40 公尺每秒及 50 公尺每秒。

物理參數法實驗組亦分成三組，分別對不同的積雲參數法、雲微物理參數法及邊界層參數法做測試分析，表 3 為物理

參數法實驗組設計表，各參數法右側括號內為實驗代號。在積雲參數法測試實驗中，積雲參數法分別採用 Anthes-Kuo 積雲參數法(Anthes, 1977)、Grell 積雲參數法(Grell, 1993)、Kain-Frisch 積雲參數法(Kain and Frisch, 1993)、Betts- Miller 積雲參數法(Betts and Miller, 1986) 及 Kain-Frisch 2 積雲參數法(Kain, 2003)；可解析尺度的雲微物理參數方法皆使用簡單冰晶法(Simple Ice；Dudhia, 1989)，邊界層參數化方法則皆使用 Medium-Range Forecast 模式邊界層參數法(Hong and Pan, 1996)。表 11 為各積雲參數法之特性比較表。

在雲微物理參數法測試實驗中，雲微物理參數法分別採用暖雨降水法(Warm-Rain; 1984)、簡單冰晶法(Simple Ice; Dudhia, 1989)、混合相位法(Mixed-Phase; Reisner et al., 1998)、Goddard Graupel 參數法(Lin et al., 1983；Tao et al., 1993)和 Schultz 雲微物理法(Schultz 1995)；其次網格尺度的積雲參數方法皆使用 Grell 參數法(Grell, 1993)，邊界層參數化方法則使用 Medium-Range Forecast 模式邊界層參數法(Hong and Pan, 1996)。表 12 為各雲微物理參數法之特性比較表。

在邊界層參數法測試實驗中，邊界層參數法分別採用高解析邊界層參數法(Blackadar, 1979)、Burk-Thompson 邊界層參數法(Burk and Thompson, 1989)、Eta M-Y 邊界層參數法(Janjic, 1994)、Medium-Range Forecast 模式邊界層參數法(Hong and Pan, 1996)與 Pleim-Xiu 邊界層參數法(Xiu and Pleim, 2000)；其次網格尺度的積雲參數方法皆使用 Grell 參數法(Grell, 1993)，在可解析尺度的雲微物理參數化方法則使用 Goddard Graupel 參數法(Lin et al., 1983；Tao et al., 1993)。表 13 為各邊界層參數法之特性比較表。

## 第四章 颱風植入

颱風模擬在初期即面臨初始場的精確性問題。因短期數值天氣預報主要受到初始場的影響，因此初始場品質好壞直接影響到模式模擬結果的優劣。然而，全球分析場的解析度太低，其解析的颱風強度及結構偏弱，雖然模式即使未經渦旋植入步驟對於控制颱風運動的環境駛流場仍具有基本的掌握能力，但若使用颱風初始化方法以得到較合理的颱風初始結構，將更能掌握颱風的強度演變及其伴隨的風雨分佈。

本研究使用 Davis and Low-Nam (2001) 及 Low-Nam and Davis (2001) 對於 MM5 模式所發展套用於 Regrid 模組中的一種簡單的熱帶氣旋植入方法，用來增強初始熱帶氣旋的強度，並將初始熱帶氣旋放在適當的位置。這個方法主要分成兩個部份：

- (1) 從模式初始猜測場中找到並抽出較弱的熱帶氣旋，
- (2) 在最佳路徑位置植入較強的颱風渦旋並放入環境背景場中。

圖 16 為初始渦旋植入方法的步驟流程圖。

從粗解析度之全球觀測分析場得到的颱風渦旋往往範圍太寬、強度太弱，對於作為高解析度中尺度模式的初始場並不適合。要改善強度的預報，需要在環境背景場放入一個接近觀測強度的初始渦旋，原本在背景場中範圍較大、強度較弱的渦旋就需要先移除，不然在初始時可能同時存在兩個不同大小及強度的渦旋。因此，第一步要先在初始場之海平面氣壓場上搜索出最大渦度中心，把以此最大渦度中心為圓心、300 公里半徑的渦旋(即圖 17 中的灰圓)移除，並在最佳路徑的位置植入指定的理想颱風渦旋(如圖 17 中的虛線圓所示)。這個植入的理想渦

旋滿足幾個基本假設：

- (1) 軸對稱
- (2) 固定最大暴風半徑 (Radius of Maximum Wind ; RMW)
- (3) 質量場和風場間滿足非線性平衡關係 (Charney 1955)
- (4) 中心接近飽和
- (5) 由觀測之最大風速決定植入渦旋的最大風速

此理想颱風渦旋的風場採用 Rankine vortex 結構：

$$v = A(z)F(r)$$

$$F(r) = \frac{V_{\max}}{R_{\max}} r ; (r \leq R_{\max})$$

$$F(r) = \frac{V_{\max}}{R_{\max}^{\alpha}} r^{\alpha} ; (r > R_{\max})$$

其中  $v$  為切線風場， $V_{\max}$  為近中心最大風速， $R_{\max}$  為最大暴風半徑， $F(r)$  為切線風場的徑向變化函數， $A(z)$  為垂直權重函數。這裡我們設  $\alpha = -0.75$ 。

對於植入 Rankine vortex 渦旋的垂直結構由垂直權重函數  $A(z)$  決定。本研究中採用的垂直權重函數在 850 百帕以下為 1，850 百帕到 700 百帕間為 0.95，700 百帕到 500 百帕間為 0.9，500 百帕到 300 百帕間為 0.7，300 百帕到 200 百帕間為 0.6，200 百帕到 100 百帕間為 0.1，100 百帕以上為 0。因此切線風場的 Rankine vortex 結構會隨著高度逐漸減弱；此與 ECMWF 的全球觀測分析場的垂直風場結構一致(見圖 4 至圖 7)。

## 第五章 實驗結果

### 5.1 初始渦旋參數

在初始渦旋參數系集實驗中，我們希望了解在植入渦旋時，改變渦旋最大風速與最大暴風半徑時，其對於模擬桃芝颱風之路徑、強度的影響。對於颱風強度的定義，本研究中以中心最低海平面氣壓值與中心近地面( $\sigma=0.995$ ，高度約離地面 40 公尺)最大風速表示颱風強度。首先在 v40 實驗組中，由於中央氣象局發佈之最大風速為 38 公尺每秒，因此固定植入初始渦旋的最大風速為 40 公尺每秒，以瞭解初始渦旋的最大暴風半徑對模擬桃芝颱風的影響。圖 18 為 v40 實驗組的路徑圖，從圖中可以看到使用不同最大暴風半徑之初始渦旋的模擬颱風路徑彼此間並無太大差異。在登陸台灣前，模擬颱風皆較實際颱風之行進速度為慢，這是由於使用 Davis and Low-Nam 所發展的渦旋植入方法在模擬前期植入渦旋需先調整至與綜觀環境達到平衡，故造成模擬颱風之移速較實際颱風為慢，模擬颱風之強度較實際颱風為弱；而在登陸後，實際颱風在陸地停留時間較長(近 10 小時)，模擬颱風皆迅速穿過台灣，這是由於模式中之地形解析度仍較差、模擬颱風之強度偏弱、且 MM5 模式對於下邊界層的處理仍不盡完善，故模擬颱風較快穿過台灣。因此在移出台灣後，模擬颱風幾乎追上實際颱風(如實驗 v40rm40)，甚至超過實際颱風(如實驗 v40rm60)。表 4 為 v40 實驗組的路徑誤差表，路徑誤差即為各時間模擬颱風中心與實際颱風中心間的距離(以海平面氣壓中心來定)。從表 4 可以看到，在各組模擬之路徑誤差並無太大差異，除了實驗 v40rm60 在最後 12 小時模擬的路徑誤差超過 100 公里；而在模擬第 36 小時，各組實驗模擬

的路徑誤差皆較大，這是由於各組實驗模擬颱風穿越台灣的時間較實際颱風為短所造成。因此原本颱風模擬路徑通常會隨模擬時間的增長而增加誤差，但在本實驗中模擬之颱風在登陸前各時間皆較實際颱風為慢，穿越台灣時卻較實際颱風為快，所以使得模擬後期反而路徑誤差減少，在本研究中的許多實驗皆有此現象。而在平均路徑誤差方面，由於實驗 v40rm60 在最後 12 小時的模擬有較大的路徑誤差，因此其平均路徑誤差最大，有 71 公里的平均誤差；實驗 v40rm40 與實驗 v40rm50 的平均路徑誤差都不到 60 公里。

圖 19 為 v40 實驗組的中心氣壓時間序列圖，從圖中可以看出各組實驗間的中心氣壓強度差距不大，這表示使用 Rankine vortex 風場植入方法，不同初始渦旋最大暴風半徑對於颱風中心氣壓強度模擬的影響不大，其中以實驗 v40rm60 的中心氣壓強度在各時間皆最強。各組實驗模擬颱風的中心氣壓強度在實驗期間內(60 小時)皆較實際觀測為弱，但都模擬出颱風中心氣壓因登陸所造成的填塞(升高)現象。圖 20 為 v40 實驗組的最大風速時間序列圖，從圖中可以看到模擬颱風中心最大風速與初始渦旋最大暴風半徑並無明顯的相關性。而在前 24 小時(即登陸台灣前)，各組模擬實驗的最大風速皆與實際觀測相近，這是由於植入颱風渦旋時是根據發佈觀測資料植入風場，故初期模擬颱風之風場會與實際觀測相近。在後 24 小時(即颱風移出台灣後)，各組實驗的最大風速皆較實際觀測為低。綜合以上比較，我們可以瞭解到，植入的初始渦旋最大暴風半徑對於模擬桃芝颱風強度的發展並無明顯的影響。由於初始渦旋植入時為根據發佈觀測資料植入相近的軸對稱 Rankine vortex 風場，故剛開始積分時模擬風場可以與實際觀測風場相近，而氣壓場因

為是經由非線性平衡方程反求而得，故模擬颱風會先經過一段調節時間而逐漸與綜觀環境達到平衡，而且網格間距 6.67 公里仍然不夠細，因此模擬中心氣壓仍會較實際觀測中心氣壓為高。而在移出台灣後，無論中心氣壓或最大風速，各組實驗之模擬颱風皆因穿過台灣後結構被迅速破壞，導致模擬颱風之強度皆較實際觀測為弱。

由於在 v40 實驗組中，路徑模擬以實驗 v40rm50 最好，而強度方面，雖然各組實驗間的差距不大，但仍以實驗 v40rm60 的強度略強，故我們選取初始渦旋最大暴風半徑為 50 公里及 60 公里，來探討初始渦旋在相同暴風半徑下不同最大風速對於模擬桃芝颱風之路徑、強度的影響。而在 rm50 實驗組，從圖 21 中 (rm50 實驗組的路徑圖) 得知，各組實驗的颱風路徑亦無太大差異。而在表 5 中 (rm50 實驗組的路徑誤差表)，由於實驗 v50rm50 在最後 6 小時的路徑誤差超過 100 公里，因此其平均路徑誤差最差；而實驗 v30rm50 與實驗 v40rm50 的平均路徑誤差皆為 53 公里，但在第 48 小時，實驗 v30rm50 模擬的路徑與實際觀測的路徑僅有 9 公里的誤差，此現象即為前所述，乃因模擬颱風過山速度比實際為快所致。而在強度方面，圖 22 為 rm50 實驗組的中心氣壓時間序列圖。從圖中可以明顯地看出，使用本渦旋植入方法，植入之初始渦旋最大風速對於模擬的颱風中心氣壓有很大的影響；植入較強的最大風速其模擬的中心氣壓強度就較強，植入較弱的最大風速其模擬的中心氣壓強度相對地就較弱。因此在登陸前，實驗 v50rm50 模擬的中心氣壓就與實際觀測相當接近，實驗 v30rm50 模擬的中心氣壓就相當的弱；而在登陸後，雖然初始植入渦旋之最大風速對於模擬中心氣壓的影響仍然看得到，但是各組實驗間中心氣壓的差距已

縮小，且各組實驗模擬的中心氣壓皆比實際觀測高。圖 23 為 rm50 實驗組的最大風速時間序列圖，在登陸前實驗 v50rm50 模擬的最大風速最強，實驗 v30rm50 模擬的最大風速最弱，而實驗 v40rm50 模擬的最大風速與實際觀測最接近；而在登陸後，各組實驗模擬的最大風速皆較實際觀測弱。綜合中心氣壓與最大風速的比較，植入初始渦旋之最大風速對於模擬颱風的強度有明顯的影響；但在登陸後，即因模擬颱風穿過台灣後之結構被破壞的比實際颱風嚴重，導致模擬強度比實際觀測偏弱。

圖 24 為 rm60 實驗組的路徑圖。從圖中可以看到，在登陸前各組實驗模擬的路徑差距不大；而在登陸後，各組實驗模擬的路徑有明顯的差別。表 6 為 rm60 實驗組的路徑誤差表，如同路徑圖在登陸前各組實驗模擬的路徑誤差皆不大，在登陸後，實驗 v50rm60 所模擬的路徑與實際觀測就有非常明顯的差距，誤差幾乎都有 100 公里以上，在第 36 小時甚至有 174 公里的誤差，因此其平均路徑誤差有 91 公里；實驗 v40rm60 模擬的路徑在最後 12 小時也超過 100 公里的誤差，其平均路徑誤差亦有 71 公里。反觀實驗 v30rm60 在登陸後所模擬的路徑，比其在登陸前所模擬的路徑誤差還要小，因此其平均路徑誤差僅有 45 公里。在中心氣壓方面(如圖 25 所示)，如同 rm50 實驗組，植入之初始渦旋最大風速對於模擬的中心氣壓有很大的影響。在登陸前，實驗 v50rm60 模擬的中心氣壓甚至比實際觀測氣壓還低，而實驗 v30rm60 模擬的中心氣壓最高。在登陸後，各組實驗間的差距就明顯地縮小，且皆比實際觀測高，但仍以實驗 v50rm60 模擬的中心氣壓最強。圖 26 為 rm60 實驗組的最大風速時間序列圖，各組實驗在調整過後的最大風速都差距不大，在登陸前皆與實際觀測差不多，且以實驗 v40rm60 模擬的最大

風速最接近實際觀測；在登陸後，各組實驗模擬的最大風速都較實際觀測小。如同前述，模擬颱風的強度在過山後皆比實際觀測為弱。

經由本初始渦旋參數系集模擬實驗組比較得知，若使用軸對稱 Rankine vortex 植入初始颱風渦旋，初始渦旋之最大暴風半徑對於模擬的強度並無明顯影響，但是初始渦旋之最大風速對於模擬的強度則有相當顯著的影響。所有的模擬颱風在登陸後，其強度都有明顯的減弱，且皆比實際觀測為弱。各組實驗在登陸前模擬的移速皆較實際觀測慢，在過山時的移速則皆較實際觀測快，因此造成有些模擬在登陸後模擬的路徑誤差反而減少。吳等(1999) 在對葛拉絲颱風作模擬的研究中，比較依觀測資料植入渦旋之 B 實驗與將植入渦旋強度和大小皆加強 2 倍之 B2 實驗，以瞭解不同初始渦旋強度和大小對颱風路徑的影響，其結果顯示，在 B 實驗中，環境流場對其路徑影響較為顯著，而在 B2 實驗中，因強度較強，環境流場對其路徑影響較小，且移速較 B 實驗快。在本研究中亦有類似現象，無論在最大風速實驗組中(v40 實驗組，圖 18)或最大暴風半徑實驗組中(rm50 實驗組，圖 21；rm60 實驗組，圖 24)，強度較強之實驗的移速皆較快，而強度較弱之實驗的移速則皆較慢。

綜合本小節所有實驗，實驗 v30rm60 所模擬的路徑平均最好，但其強度卻明顯較弱；實驗 v50rm50 所模擬的強度較接近實際觀測，但其路徑誤差較大；實驗 v30rm50 與實驗 v40rm50 所模擬的路徑平均皆不錯，又以實驗 v40rm50 模擬的強度較好，且中央氣象局發佈之最大風速為 38 公尺每秒(較接近 40 公尺每秒)，故選取實驗 v40rm50 的渦旋設定作為下一節討論之物理參數實驗組的初始渦旋參數設定。

## 5.2 物理參數法實驗

### 5.2.1 積雲參數法實驗組

圖 27 為積雲參數法實驗組的路徑圖。從圖中可以看到，各組實驗間所模擬的路徑有明顯的差異，其中 KF 實驗模擬出較偏北的路徑，且在模擬後期有向東北移動的現象，此與實際觀測有相當大的差異。其他四組模擬對於颱風路徑就有不錯的掌握，AK 實驗僅在最後 12 小時模擬出較偏東北且誤差較大的路徑，在前 48 小時的路徑模擬皆與實際觀測相當接近；在 GR 實驗中，模擬的路徑與實際觀測相當接近，僅在移出台灣時有往西偏的現象產生；在 BM 實驗中亦模擬出不錯的路徑，僅在穿過台灣後移速較實際觀測為快，且路徑略偏東北；而在 KF2 實驗中，在登陸前模擬出較慢且偏西的路徑，登陸後則有過快且偏北的結果。表 7 為積雲參數法實驗組的路徑誤差表。由於 KF 實驗的模擬路徑與實際路徑有相當大的差距，因此其路徑誤差在各個時段皆較大，且平均亦超過 100 公里；在 AK 實驗中，雖然最後 12 小時有超過 100 公里的路徑誤差，不過其前 48 小時有相當好的模擬，因此其平均路徑誤差仍僅有 68 公里；而 KF2 實驗模擬的路徑在最後 6 小時有超過 100 公里的誤差，且在各時段的誤差亦不小，因此其平均路徑誤差有 70 公里；BM 在各時段模擬的路徑皆不錯，因此其路徑誤差僅有 62 公里；而 GR 實驗僅在移出台灣時有較大的誤差，其餘時段皆與實際觀測相當接近，因此其路徑誤差最小，僅有 53 公里。

在強度方面，從中心氣壓時間序列圖(圖 28)中可以看到，所有實驗的模擬中心氣壓皆比實際中心氣壓來得高，此因氣壓場是經由非線性平衡方程反求而得，故模擬颱風會先經過一段

調節時間而逐漸與綜觀環境達到平衡；其中 KF 實驗的模擬中心氣壓明顯地比其他實驗為高，其餘實驗間的差距較小。在登陸前以 KF2 實驗模擬的中心氣壓最低，BM 實驗模擬的結果也不錯；在登陸後各組實驗模擬之中心氣壓的差距縮小，其中以 GR 實驗模擬的中心氣壓最低，AK 實驗和 BM 實驗也有不錯的模擬結果。而在最大風速時間序列圖中(圖 29)，KF 實驗模擬的最大風速仍是明顯偏低。在登陸前，GR 實驗模擬的最大風速最接近實際觀測，KF2 實驗模擬的最大風速也有不錯的表現，AK 實驗與 BM 實驗則略較實際觀測偏弱；在移出台灣後，各組實驗模擬的最大風速皆比實際觀測低，以 AK 實驗模擬的最大風速最強，GR 實驗也有不錯的模擬。總結而論，各組實驗皆模擬出颱風碰到中央山脈強度減弱的現象，且其因過山造成的結構破壞皆比實際觀測顯著。各組實驗模擬之中心氣壓與最大風速皆無太大差距，此因所有實驗於細網域皆未使用積雲參數法，由於細網域的水平解析度(6.67 公里)相當高，假設網格尺度的雲物理參數法已可適當描述颱風環流的對流降雨，故在細網域不考慮次網格所產生的降雨。

在降雨方面，因為桃芝颱風於 7 月 30 日在台灣中部造成豪大雨，導致相當嚴重的災情，因此我們比較 7 月 30 日之全天 24 小時累積降雨。由於 MM5 模式使用國際標準時間 UTC，且本研究各實驗皆以每六小時輸出資料，因此選取 MM5 模擬第 30 小時到第 54 小時之累積雨量，其相當於台灣當地時間 7 月 30 日 02:00 到 7 月 31 日 02:00。圖 13 為中央氣象局於 7 月 30 日累積 24 小時的降雨圖。由圖中顯示，30 日主要降水集中在台灣中部，在台灣中部山區及苗栗、台中皆有 300 公厘以上的降水，而在台灣中南部山區有最大降水，高達 600 公厘以上。

圖 30 為積雲參數法實驗組之 30 日 24 小時累積雨量圖；由圖中可以看到，除了 AK 實驗有較接近實際觀測的降雨分佈外，其餘實驗的模擬降雨分佈皆與實際觀測降雨分佈有相當的差異。關於台灣中南部山區的最大降水，除 BM 實驗在該處無明顯降水外，其餘實驗皆有模擬出該區的強降水分佈，不過因解析度(6.67 公里)仍嫌不足，且模擬颱風之強度皆較實際觀測為弱，而地形解析度亦不夠細，故所有實驗的模擬累積降水皆比實際觀測偏少。

整體而言，在積雲參數法實驗組中，AK 實驗對於降雨的掌握較好，且模擬強度也有不錯表現，但模擬路徑的誤差略大；而 GR 實驗有最好的模擬颱風路徑，亦有不錯的模擬中心強度，降水分佈接近實際，僅在降雨量模擬方面偏少。

### 5.2.2 雲微物理參數法實驗組

圖 31 為雲微物理參數法實驗組的路徑圖，我們可以看到各組實驗間模擬的颱風路徑差距不大，皆與實際觀測接近。WR 實驗在登陸前移速較實際觀測慢，但行進路線與實際行進路徑接近，移出台灣後則較偏向東北；ICE 實驗模擬的路徑與實際觀測相當接近，僅在移出台灣時有往西偏的現象產生；MP 實驗亦模擬出相當好的路徑，且在最後 18 小時有非常好的模擬，且在穿過台灣時略有偏西的現象；GG 實驗模擬的路徑相當好，在各時段皆與實際觀測接近；SCH 實驗也有不錯的模擬路徑，在登陸前有偏西的現象，登陸後反而有偏北的現象。表 8 為雲微物理參數法實驗組的路徑誤差表，從表中顯示，各組實驗的平均路徑誤差皆不錯，誤差最大為 WR 實驗，僅有 59 公里，ICE

實驗與 SCH 實驗也各只有 53 公里與 47 公里；而 MP 實驗在第 54 小時時路徑誤差僅 3 公里，在第 60 小時亦僅有 8 公里，因此其平均路徑誤差僅 43 公里；平均路徑誤差最小的是 GG 實驗，其在第 42 小時時只有 2 公里的路徑誤差，且在各時段的路徑誤差皆相當小，因此其平均路徑誤差只有 38 公里而已。

圖 32 為雲微物理參數法實驗組的中心氣壓時間序列圖，圖中顯示各組實驗間的中心氣壓強度有明顯的差距，其中以 ICE 實驗模擬的中心氣壓強度最弱，WR 實驗模擬的中心氣壓強度最強；GG 實驗在登陸前也有較高的中心氣壓，但在登陸後卻有僅次於 WR 實驗的中心氣壓強度；MP 實驗與 SCH 實驗所模擬的中心氣壓相差不大，在登陸前其模擬中心氣壓與 WR 實驗結果相近，但在登陸後中心氣壓卻明顯較高。圖 33 為雲微物理參數法實驗組的最大風速時間序列圖。在登陸前各組實驗皆有模擬出接近實際的最大風速，其中以 ICE 實驗模擬的最大風速最接近實際觀測，GG 實驗模擬的最大風速略較實際觀測弱，而其餘 3 組則略較實際觀測強。在登陸後，僅有 WR 實驗仍有相當於實際觀測的最大風速，其餘 4 組皆較實際觀測的最大風速弱；其中以 GG 實驗模擬的最大風速最強，SCH 實驗模擬的最大風速最弱；ICE 實驗在剛移出台灣時模擬的最大風速還不錯，但在後期則減弱許多。整體而言，在強度方面，以 WR 實驗模擬的強度最強，而以 ICE 實驗模擬的強度最弱，其中 GG 實驗在登陸前模擬的強度雖然略為偏弱，但在移出台灣的強度僅次於 WR 實驗，明顯比其餘 3 組強。

在降雨方面(如圖 34 所示)，除了 ICE 實驗以外，其餘 4 組實驗皆有掌握到台灣中部山區與苗栗、台中的豪大雨現象。ICE 實驗僅模擬出台灣中南部山區的豪大雨，且降雨量明顯比實際

觀測少，此由於 Simple-Ice 參數法考慮在 0°C 以下為冰晶，而冰晶之終端速度較雨水及軟雹為慢，因此 ICE 實驗模擬之降雨量較其餘實驗為少；WR 實驗在台灣山區降下相當大量的雨量，範圍比實際觀測分佈還廣，且在中南部山區有模擬出 562.4 公厘的 24 小時累積雨量；MP 實驗模擬豪大雨的分佈略偏南，在中南部山區亦有模擬出較豪大雨的現象；GG 實驗模擬的雨量分佈與實際觀測較接近，不過其累積降雨量(472.6 公厘)仍比實際觀測少；SCH 實驗在台灣西部有模擬出較大降雨，且其累積最大降雨有 566.3 公厘，但其位置較實際觀測略為偏西。

整體而言，在雲微物理參數法實驗中，各組實驗模擬的路徑皆不錯，其中以 GG 實驗模擬的路徑誤差最小，GG 實驗在強度方面亦有不錯的表現，對於 30 日累積降雨分佈也有相當好的掌握，不過累積降雨量仍較實際觀測為少；WR 實驗雖然模擬出最強的颱風強度，並有不錯的累積降雨量，但在模擬路徑上有較大的誤差。

### 5.2.3 邊界層參數法實驗組

圖 35 為邊界層參數法實驗組的路徑圖。由圖所示，各組實驗間的模擬颱風路徑差距頗大，且大部份實驗皆模擬出略偏北的路徑，這是由於邊界層參數法決定底層大氣的垂直混合及地面通量的輸送，此決定海洋提供給颱風的能量多寡，故會改變颱風強度、影響颱風發展，因此各實驗模擬颱風之路徑差異性大。其中 PX 實驗甚至從台灣北部繞過，幾乎沒有登陸台灣；BT 實驗則從花蓮縣北端登陸，並在移出台灣後向北移動；BD 實驗模擬的路徑亦有偏東北現象，但較接近實際觀測；ETA 實

驗則在颱風移出台灣後模擬出過快的移速；MRF 實驗最接近實際觀測，也是在邊界層參數法實驗中唯一未模擬出向東北偏的路徑，且在各時段皆與實際觀測相當接近。表 9 為邊界層參數法實驗的路徑誤差表。PX 實驗由於從台灣北部繞過，因此在這段時期有超過 100 公里的路徑誤差，以至於其平均路徑誤差最大，有 88 公里；BT 實驗在登陸時有超過 100 公里的誤差，且在第 60 小時也有超過 100 公里的誤差，因此其平均路徑誤差有 84 公里；BD 實驗在最後 12 小時模擬的路徑誤差亦有 100 公里左右，其平均路徑誤差也有 66 公里；ETA 實驗在第 42 小時模擬的路徑誤差僅有 8 公里，但其餘時段其模擬的路徑誤差皆不小，因此其平均路徑誤差仍有 71 公里；MRF 實驗在第 42 小時時只有 2 公里的路徑誤差，且在各時段的路徑誤差皆相當小，因此其平均路徑誤差只有 38 公里而已。

圖 36 為邊界層參數法實驗組的中心氣壓時間序列圖。由圖可見，PX 實驗由於並未登陸，因此無因過山造成的強度減弱現象，但其中心氣壓強度則一直減弱；BT 實驗亦無明顯因過山造成的減弱現象，但在移出台灣後，其中心氣壓強度略為增強；BD 實驗模擬的中心氣壓亦無較好的表現；ETA 實驗在登陸前有最低的中心氣壓，並在移出台灣後亦有模擬出不錯的中心氣壓；MRF 實驗模擬的中心氣壓在登陸前略偏弱，但在移出台灣後就有比較強的中心氣壓強度。圖 37 為邊界層參數法實驗的最大風速時間序列圖，PX 實驗在中心氣壓方面明顯偏弱，在風速方面，卻有較強的最大風速；BD 實驗則仍模擬出較弱的最大風速；BT 實驗、ETA 實驗與 MRF 實驗在登陸前皆有模擬出接近實際觀測的最大風速，而在登陸後，MRF 仍有模擬出不錯的最大風速。

在降雨方面(如圖 38 所示)，除了 MRF 實驗與 BD 實驗以外，其餘 3 組皆未掌握到台灣中部山區與苗栗、台中的豪大雨現象，MRF 實驗模擬的雨量分佈與實際降雨分佈較接近，不過其累積降雨量仍比實際雨量少；BD 實驗在台灣中部山區與苗栗、台中有模擬出較大降雨，但在實際觀測最大降雨的中南部山區，卻沒有掌握到，這因與其路徑較偏北有關；ETA 實驗僅在苗栗有較大降雨現象，BT 實驗亦僅有在台灣西北部有較大降雨，此兩實驗皆未模擬出台灣中部山區的較大雨量；PX 實驗由於從台灣北部繞過，在台灣的降雨相當少，僅在新竹略有較大降雨。

整體而言，在邊界層參數法實驗組中各邊界層參數法實驗的模擬颱風路徑誤差甚大，其中 MRF 實驗模擬出最佳的颱風路徑，而模擬之中心強度亦不錯，並且掌握到台灣中部山區與苗栗、台中的豪大雨現象，為邊界層參數法實驗組中對桃芝颱風掌握最好的實驗。

#### 5.2.4 最佳物理參數法組合實驗

在前三節中，我們分別討論積雲參數法、雲物理參數法及邊界層參數法對模擬桃芝颱風的影響，可以得知使用不同的物理參數法所得到的颱風模擬結果也會不同，這時我們提出了一個疑問，在各物理參數法組中表現最好的參數法，組合過後是否也會有最好的表現？為了解答這個問題，我們先從各物理參數法實驗組中挑選出個別表現最好的參數法。

在積雲參數法實驗組中，AK 實驗對於降雨的掌握較好，且模擬強度也有不錯表現，但模擬路徑的誤差略大；GR 實驗模擬

的路徑與實際觀測之路徑最接近，亦有模擬出不錯的中心強度，僅在降雨量模擬方面偏少。由於 AK 實驗對路徑的掌握較差，而移動路徑對颱風模擬有最重要的影響，因此在積雲參數法中我們選擇使用 Grell(1993)積雲參數法。在雲微物理參數法實驗中，GG 實驗模擬的路徑誤差最小，在強度方面亦有不錯的表現，對於 7 月 30 日 24 小時累積降雨分佈也有相當好的掌握，因此在雲微物理參數法中我們選擇使用 Goddard Graupel 參數法。在邊界層參數法實驗中，MRF 實驗模擬出最佳的颱風路徑，其模擬之中心強度亦不錯，並且掌握到台灣中部山區與苗栗、台中的豪大雨現象，為邊界層參數法實驗組中對桃芝颱風掌握最好的實驗，因此在邊界層參數法中我們選擇使用 MRF 邊界層參數法。最後我們選出的最佳物理參數法組合實驗為積雲參數法使用 Grell 積雲參數法，雲微物理參數法使用 Goddard Graupel 參數法，而邊界層參數法使用 MRF 邊界層參數法。此最佳物理參數法組合實驗與雲微物理參數法實驗組中 GG 實驗及邊界層參數法實驗組中 MRF 實驗的物理參數法組合一致(見表 3)。

當我們從各物理參數法實驗組中挑選出表現最好的參數法組合成最佳物理參數法組合實驗時，此實驗的颱風模擬結果是否也有最好的表現呢?首先從路徑來看(圖 39)，圖中可以看到最佳物理參數法組合實驗所模擬的路徑與實際觀測的路徑相當接近，且平均路徑誤差僅 38 公里(表 10)，表示此最佳物理參數法組合實驗對於路徑的確有良好的掌握。最佳物理參數法組合實驗模擬的路徑在登陸前略有往西偏的現象，此與王等(2001) 觀測分析之結果一致。王等並對此偏移現象作分析探討，引用謝等(1998)在討論台灣地形影響颱風流場之「流型」(flow regime) 觀念，即颱風遇山影響必須分為颱風之外圈(outer part)及內圈

(inner part)兩部份。而在桃芝颱風登陸時的偏移現象，即因外圍氣流受山脈影響，而有迎風脊與背風副低壓之形成(圖 40)，此一因颱風環流與台灣地形交互作用生成的中尺度氣壓梯度，導致颱風在登陸時有西向偏移的現象產生。而最佳物理參數法組合實驗模擬路徑的偏移現象，也是因外圍氣流受中央山脈影響形成迎風脊與背風副低壓所導致。圖 41 顯示，在颱風登陸前，在宜蘭、花蓮地區有明顯的迎風脊，而在苗栗地區則有背風副低壓的形成，此與王等(2001)的分析一致，因此模擬颱風在登陸時亦有向西偏移的現象產生。在此顯示在 6.67 公里解析度及合適的物理參數法下，MM5 模式對於中央山脈地形所造成的桃芝颱風登陸前路徑偏移現象有相當不錯的掌握。

在強度方面，從中心氣壓時間序列圖(圖 42)中可以看到，最佳物理參數法組合實驗模擬之中心氣壓雖較實際觀測之中心氣壓為高，仍模擬出穿越台灣時造成強度減弱的現象，且其變化趨勢與實際觀測頗為一致。在最大風速時間序列圖中(圖 43)，亦有明顯因穿越中央山脈所造成強度減弱的現象，且在登陸前有相當接近實際觀測的最大風速，而在登陸後，雖然強度減弱，但在移出台灣地形後，其強度略有增強，以致與實際觀測並無太大差距。在降雨分佈方面(圖 44)，最佳物理參數法組合實驗模擬之降雨分佈與實際觀測(圖 13)相當接近，雨量皆集中在苗栗、台中及台灣中部山區；最佳物理參數法組合實驗模擬之降雨分佈略為偏南，此因最佳物理參數法組合實驗模擬之颱風路徑較實際颱風路徑略為偏南所致。而在降雨量方面，實際觀測之最大降雨量與最佳物理參數法組合實驗模擬之最大降雨量皆在中南部山區，實際觀測之最大降雨量超過 600 公厘，而最佳物理參數法組合實驗模擬之最大降雨量為 472.6 公厘，

此與實際觀測之最大降雨量仍然有所差異，不過各實驗在 6.67 公里水平解析度下對於模擬最大降雨量皆為低估，此最佳物理參數法組合實驗之降雨模擬於定性(水平分佈)及定量(降雨總量)上仍為最好表現。總結而論，將各物理參數法組中表現最好的參數法組合成之最佳物理參數法組合實驗，無論在路徑、強度或降雨方面皆仍為最好的表現。

## 第六章 系集分析

在各物理參數法實驗組中，表現各有不同，有些參數法對強度掌握較好，有些對降雨分佈掌握較好等。我們希望經由系集分析處理後截長補短，以改善數值模式對颱風實際天氣現象的掌握。本研究對物理參數實驗組中的三組實驗做系集分析，探討系集分析對路徑、強度與降雨分佈的影響。所使用的系集分析方法為對各實驗組結果取算術平均值，並求其標準差；在平均值加減一個標準差之間的範圍，我們稱做系集誤差範圍，期望在系集誤差範圍內能夠掌握到實際現象。對於路徑的系集分析，平均路徑是由各組實驗在各時間模擬之颱風中心經緯度的算術平均值，並計算其標準差；中心氣壓與最大風速的系集分析，則取其算術平均值及標準差；降雨量的系集分析，是以各網格點的雨量值做算術平均及標準差。

首先對積雲參數法實驗組做系集分析，圖 45 為其系集分析路徑圖。從圖中可見，在登陸前以及移出台灣在台灣海峽時系集誤差範圍較小，颱風在台灣本島時因受中央山脈地形影響使得系集誤差範圍增大。在剛開始前 18 小時，實際颱風路徑稍微落在系集誤差範圍外，系集模擬路徑較實際路徑偏西；之後實際觀測路徑就落在系集誤差範圍內，但可以看到平均路徑在颱風移出台灣後移速較實際颱風為快的情形。而在中心氣壓的系集分析方面(如圖 46 所示)，系集分析過的中心氣壓仍較實際觀測高，這是由於在積雲參數法實驗中各組實驗的模擬中心氣壓皆較實際中心氣壓高所致，但都顯示因過山造成颱風強度減弱現象。而在移出台灣後系集誤差範圍明顯變小，表示各組實驗模擬的中心氣壓差距不大。圖 47 為積雲參數法實驗之系集分析

最大風速時間序列圖，在登陸前，系集誤差範圍仍可掌握到實際觀測的最大風速；但在颱風移出台灣後，系集分析過的最大風速就較實際觀測弱，仍因為穿過台灣中央山脈後之颱風結構被迅速破壞，導致各模擬實驗強度皆比實際觀測偏弱，但因過山造成之強度減弱的趨勢仍有掌握到。圖 48 為積雲參數法實驗的系集分析 30 日累積雨量圖，經過系集分析後，平均雨量圖仍可掌握到台灣中南部山區與苗栗、台中的豪大雨，但累積雨量值明顯較少。而從累積雨量標準差圖中可以看到，各組實驗在苗栗、台中的累積雨量標準差較大，表示各組實驗對該區的降雨模擬差異較大。在平均值減標準差圖中，主要降雨都在中南部山區，表示各組實驗皆有掌握到該區的降雨。在平均值加標準差圖中，累積雨量仍不及實際觀測的累積雨量，顯示經過系集分析後的降雨，對於降雨分佈區域的掌握不錯，但對於累積雨量的掌握仍嫌不足。

在雲物理參數法實驗組的系集分析中，圖 49 為雲微物理參數法實驗的系集分析路徑圖。系集誤差範圍在各時段皆小，表示各組實驗間模擬的颱風路徑差距皆不大；雖然實際觀測在大部份時期皆在系集誤差範圍的邊緣或稍為在範圍外，但是平均路徑與實際觀測路徑相當接近，這是由於各組實驗皆可模擬出相當好的颱風路徑之緣故。而在中心氣壓的系集分析方面(如圖 50 所示)，由於各組實驗模擬的中心氣壓差異較大，因此中心氣壓的系集誤差範圍相當大；且與積雲參數法實驗組一樣，系集分析過的中心氣壓仍較實際觀測高，但颱風因過山造成之強度減弱的趨勢仍可掌握到。在最大風速的系集分析中(如圖 51 所示)，在前 30 小時中，在系集誤差範圍中可以掌握到實際觀測之最大風速，但在移出台灣後則無法掌握到實際觀測之最大風

速，此現象與積雲參數法實驗組一致。圖 52 為雲微物理參數法實驗組的系集分析 30 日累積雨量圖。在平均雨量圖中，降雨分佈對於中南部山區有不錯的掌握，在中南部山區的累積雨量有 439.7 公厘，但未掌握到苗栗、台中的較大雨量；從累積雨量標準差圖中可以看到，各組實驗在中部山區有較大的標準差。因此在平均值加標準差圖中，在中部山區與中南部山區皆有超過 500 公厘的累積降雨量，更為接近實際降雨量；而在平均值減標準差圖中，仍能掌握到中南部山區的較大降雨。

而在邊界層參數法實驗組的系集分析中，圖 53 為邊界層參數法實驗的系集分析路徑圖，實際觀測路徑幾乎都落在系集誤差範圍內，且平均路徑偏於實際觀測的東北邊，這是由於在這組實驗中，大部份的實驗皆有較偏東北的路徑模擬，且路徑系集誤差偏大。圖 54 為邊界層參數法實驗的系集分析中心氣壓時間序列圖，由於大部份實驗並未明顯的模擬出颱風過山前後中心氣壓變化的趨勢，因此平均中心氣壓在移出台灣前即產生一直減弱的趨勢；且與其他組實驗結果一致，系集分析過的中心氣壓仍較實際觀測之中心氣壓高。在最大風速的系集分析中(如圖 55 所示)，如同積雲參數法實驗組及雲微物理參數法實驗組，在颱風登陸前，系集分析仍可以掌握到實際觀測之最大風速，但在颱風移出台灣後則無法掌握到實際觀測之最大風速。在累積降雨的系集分析中(如圖 56 所示)，平均累積降雨較偏於北部，主要是因為大部份實驗模擬的路徑都較偏北，因此在苗栗及中部山區有較大的降雨。累積雨量標準差圖與平均累積降雨圖大致類似，表示各組實驗所模擬的累積降雨分佈差異相當大，因此在平均值減標準差圖中的累積降雨量相當小，而在平均值加標準差圖中，在苗栗及中部山區則有較大的累積降雨。

整體而言，在系集分析中，對於路徑模擬有明顯的改進，而對於中心氣壓而言，由於模式模擬之中心氣壓在各時期皆較實際觀測弱，因此在經過系集平均後，強度仍明顯的偏弱，並無法有效地改善，這突顯出颱風的強度(中心氣壓)預報仍為一極待克服的科學問題。在最大風速方面，經過系集分析後在颱風過山前可以掌握的到實際觀測之最大風速，但在颱風移出台灣後，由於模式模擬之強度較實際觀測弱，系集分析並無法有效地改善。而在降雨模擬方面，系集分析對於降雨分佈狀況可以有效地改善，但是累積降雨量也因為各實驗模擬之累積降雨量皆較實際觀測少，因此系集分析並無法有效地改善。

## 第七章 結論

本研究使用 PSU/NCAR 的第五代中尺度模式 MM5，以 2001 年的桃芝(Toraji)颱風作為研究個案，採用不同的初始渦旋參數與不同的物理參數法進行數值模擬實驗，探討初始渦旋參數與物理參數法對桃芝颱風模擬的敏感度。同時並對物理參數法實驗組做系集分析，希望藉由系集分析以改善數值模擬結果。

在初始渦旋參數實驗組中，採用不同的最大暴風半徑與最大風速做 Rankine vortex 風場的初始渦旋植入。對於固定最大風速的 v40 實驗組，模擬路徑在各組實驗間並無太大差異，其中以實驗 v40rm50 的平均路徑誤差最小；而各組實驗在強度方面的差異也不大，以實驗 v40rm60 較好。由此可知，使用 Rankine vortex 風場植入初始渦旋，初始渦旋的最大暴風半徑對於模擬颱風路徑的影響並不大，對於颱風強度亦無明顯的影響。而在固定最大暴風半徑的兩組實驗(rm50 實驗組和 rm60 實驗組)，各組實驗模擬的颱風路徑亦無太大差異，但在強度方面就有明顯的差異，植入較強的初始渦旋風速會模擬出中心氣壓較低的渦旋颱風，顯示使用 Rankine vortex 風場植入法，初始渦旋最大風速對颱風強度有成正比的關係。其中實驗 v30rm60 所模擬的路徑平均最好，但其強度卻明顯較弱，實驗 v50rm50 所模擬的強度較接近實際觀測，但其路徑誤差較大，而以實驗 v40rm50 模擬的路徑與強度皆有不錯的表現，且此實驗的初始渦旋設定與中央氣象局發佈數值最為接近。

在物理參數法實驗組中，本研究分別對不同的積雲參數法、雲微物理參數法及邊界層參數法做測試比較。在積雲參數法實驗組中，除了 KF 實驗外，其餘四組實驗對於颱風路徑就

有不錯的掌握，其中以 GR 實驗模擬的路徑最好；在強度方面，AK 實驗和 GR 實驗皆有不錯的表現，KF 實驗則明顯最差；在降雨方面，除了 AK 實驗有較接近實際觀測的降雨分佈外，其餘實驗的降雨分佈皆與實際觀測有相當的差異，而且各組實驗模擬的累積降雨量皆為低估。整體而言，KF 實驗在這組積雲參數法實驗中是表現最差的實驗，在各方面皆未能掌握，AK 實驗有模擬出不錯的中心強度與降雨分佈，但在路徑模擬則有較差的表現，GR 實驗雖在降雨分佈上未能掌握到，但對於路徑與強度的模擬都有不錯的表現。

在雲微物理參數法實驗組中，各組實驗間模擬的颱風路徑差距不大，皆與實際路徑相當接近，其中路徑模擬表現最差的為 WR 實驗，但其平均路徑誤差亦僅有 59 公里，而路徑模擬表現最好的 GG 實驗，其平均路徑誤差僅有 38 公里，顯示使用不同雲微物理參數法對於模擬桃芝颱風的行進路徑影響不大。在強度方面，各組實驗間的中心氣壓強度則有明顯的差距，其中以 ICE 實驗模擬的強度最弱，WR 實驗模擬的強度最強，GG 實驗也有不錯的表現。在降雨方面，除了 ICE 實驗以外，其餘 4 組實驗皆能掌握到實際的降雨分佈，且亦有不錯的累積降雨量。整體而言，WR 實驗對強度及降雨皆有相當好的表現，但在路徑模擬表現上就顯得較差，GG 實驗有最好的路徑模擬，且在強度及降雨亦有不錯的表現，而 ICE 實驗雖在路徑模擬表現上還不錯，但在強度及降雨的模擬就未能掌握到。

在邊界層參數法實驗組中，各組實驗間模擬的颱風路徑差距頗大，且大部份實驗皆模擬出偏向東北的路徑，其中 PX 實驗幾乎繞過台灣，MRF 實驗則最接近實際觀測，顯示使用不同的邊界層參數法對於模擬桃芝颱風的路徑有相當的影響，此結

果與 Braun and Tao (2000)及黃(2001)的結論類似。在強度方面，各組實驗模擬的強度皆偏弱，其中 PX 實驗模擬的強度最弱，MRF 實驗有模擬出比較好的強度。在降雨方面，除了 MRF 實驗與 BD 實驗外，其餘實驗皆未能掌握到實際的降雨分佈，且各組實驗模擬的累積降雨量皆為低估。整體而言，PX 實驗由於模擬出錯誤的路徑，以至於在各方面皆未能掌握到，而 MRF 實驗雖然對於累積降雨量未能有效地掌握到，但在路徑、強度及降雨分佈皆有相當好的表現。

一般而言，颱風模擬路徑會隨模擬時間的增長而增加誤差，但在本研究中，模擬之颱風在登陸前各時間皆較實際為慢，但穿越台灣時較實際為快，使得模擬後期反而路徑誤差減少，以至於本研究中的許多實驗在後期反而有相當接近實際觀測的颱風路徑。由於植入初始渦旋時為植入理想化的 Rankine vortex 風場，故剛開始模擬時最大風速可以與實際觀測相近，而模擬氣壓場則會先經過一段模擬動力調節時間，因此仍會較實際觀測中心氣壓為高。而在颱風移出台灣後，無論中心氣壓或最大風速，各實驗皆因穿過台灣地形後模擬颱風結構被迅速破壞，導致模擬之強度皆較實際颱風強度為弱。對於降雨而言，若模式模擬出不錯的颱風行進路徑與中心強度，即可掌握到降雨的分佈，但由於水平解析度(6.67 公里)仍嫌不足，且模擬颱風之強度皆較實際觀測為弱，而地形解析度亦不夠細，故所有的實驗對於累積降雨量的模擬皆為低估。

我們從各物理參數法實驗組中挑選出表現最好的參數法組合成最佳物理參數法組合實驗，其中選出之最佳物理參數法組合實驗在積雲參數法使用 Grell 積雲參數法，雲微物理參數法使用 Goddard Graupel 參數法，而邊界層參數法使用 MRF 邊界層

參數法。結果顯示，在路徑方面仍有相當好的表現，而模擬颱風路徑在登陸前略有往西偏折之現象，此與王等(2001)分析觀測之結果一致。王等(2001)分析討論此偏移現象，其認為是因為颱風外圍氣流受中央山脈影響，而有迎風脊與背風副低壓之形成，導致颱風在登陸時有路徑偏移的現象產生。而最佳物理參數法組合實驗模擬之偏移現象亦為颱風外圍氣流受中央山脈影響，分析模擬結果亦有模擬出迎風脊與背風副低壓之形成，與王等(2001)之分析結果完全一致。在強度方面，最佳物理參數法組合實驗模擬之強度略較實際觀測弱，但仍有模擬出颱風強度因過山而減弱之趨勢。對於降雨而言，最佳物理參數法組合實驗模擬之降雨分佈與實際觀測之降雨分佈相當接近，雨量皆集中在苗栗、台中及台灣中部山區；而最佳物理參數法組合實驗模擬之最大降雨量與實際觀測之最大降雨量有所差異，此因模式解析度仍過粗，所有模擬實驗之降雨量皆為低估，但其模擬之最大降雨量仍屬所有實驗中表現最好之實驗。總結而論，將各物理參數法組中表現最好的參數法組合成之最佳物理參數法組合實驗，無論在路徑、強度或降雨方面皆仍有最好的表現。

我們再進一步對物理參數法組模擬結果做系集分析中，期望能改善對實際現象的掌握。結果顯示，系集分析對於路徑模擬有明顯的改進。就強度而言，在中心氣壓方面，經過系集分析後仍明顯的偏弱，並無法有效地改善，這是由於各組實驗模擬之中心氣壓在各時期皆較實際觀測弱。在最大風速方面，經過系集分析後在颱風過山前可以掌握的到實際觀測之最大風速，但在颱風移出台灣後，由於模式模擬之最大風速皆較實際觀測為弱，經系集分析後改善程度有限。而在累積降雨方面，

對於降雨的水平分佈，經過系集分析後可以有效地改善模擬結果，但是在累積降雨量方面，仍由於各實驗模擬之累積降雨量因解析度不足皆較實際觀測為少，因此改善程度有限。

綜合而言，在本研究中我們嘗試探討初始渦旋參數以及物理參數法對於桃芝颱風模擬的影響，並應用系集分析技術以改善對實際颱風現象的掌握。而桃芝颱風對於台灣地區造成重大災情，與台灣獨特的中央山脈複雜地形應有相當密切的關係。而對於颱風模擬，海氣交互作用扮演著重要的角色；颱風所伴隨的降雨使得在眼牆附近的海溫降低，且颱風氣旋環流產生 Ekman Pumping 現象造成海洋的湧昇流，海水因混合而使得海洋邊界層之海溫降低，而颱風發展的能量來源即由海洋的可感熱及潛熱釋放所提供，因此若再增加考慮海氣交互作用的影響，相信應會改善桃芝颱風於海上的模擬結果。故進一步探討台灣地形效應對於桃芝颱風的影響，以及在模式加入海氣交互作用的考量，為我們未來的主要研究方向。

## 參考文獻

- 王時鼎、謝信良、鄭明典、鄧仁星、簡國基，2001： 台灣地形對侵台之中度以下颱風影響新例-對 2001 年潭美、桃芝、納莉、利奇馬四次颱風實例分析。 *天氣分析與預報研討會(90)*，論文彙編，51-70。
- 吳俊傑、黃葳芃，2000： 芙蘿颱風(1990)的數值模擬研究： 初始資料及初始化方法影響之探討。 *大氣科學*，**28**，293-315。
- 吳俊傑、卓瑜甄、王時鼎，1999a： 葛拉絲颱風(1994)及其受到台灣地形影響之研究 第一部份： 觀測分析。 *大氣科學*，**27**，1-27。
- 吳俊傑、卓瑜甄、顏自雄，1999b： 葛拉絲颱風(1994)及其受到台灣地形影響之研究 第二部份： 數值模擬。 *大氣科學*，**27**，29-59。
- 周昆炫、吳俊傑、顏自雄，2001： 瑞伯颱風(1998)之數值模擬探討。 *大氣科學*，**29**，291-313。
- 陳舒雅，2002： 地形對颱風路徑的影響之數值探討。 國立中央大學，大氣物理研究所，碩士論文，共 105 頁。
- 黃澤山，2001： 邊界層物理參數法對於瑞伯(1998)颱風數值模擬之敏感度研究。 私立中國文化大學，地學研究所大氣科學組，碩士論文，共 59 頁。
- 喬 森、黃清勇、郭英華，1996： 黛特 Dot 颱風的 MM5 數值模擬。 *大氣科學*，**24**，123-144。
- 謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降，1998： 百年侵台颱風路徑圖集及其應用—台灣地區颱風預報輔助系統建立之研究(六)。 中央氣象局專題研究報告 CWB86-1M-01，1-356。
- Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 270-286.

- Anthes, R. A., and T. T. Warner, 1978: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045-1078.
- Betts A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX, and Arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 693–709.
- Blackadar, A. K., 1979: Modeling the nocturnal boundary layer. *Preprints, Third Symp. on Atmospheric Turbulence, Diffusion, and Air Quality*, Raleigh, Amer. Meteor. Soc., 46-49.
- Braun S. A. and W. K. Tao, 2000: Sensitivity of high-resolution simulations of Hurricane Bob(1991) to planetary boundary layer parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3941-3961.
- Burk, S. D., and W. T. Thompson, 1989: A vertically nested regional numerical weather prediction model with second-order closure physics. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2305-2324.
- Charney, J. G., 1955: The use of primitive equations of motion in numerical prediction. *Tellus*, **7**, 22-26.
- Davis, C. A., and S. Low-Nam, 2001: The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme. A report prepared for the Air Force Weather Agency (AFWA). 12 pp. (Available from <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3/tc-report.pdf>).
- Dong, K., and C. J. Neumann, 1986: The relation between tropical cyclone motion and environment geostrophic flow. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 115-122.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1493-1513.

- Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764-787.
- Hsie, E.-Y., R. A. Anthes, and D. Keyser, 1984: Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2581-2594.
- Hong, Y.-H., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further development of the convection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr.*, No. 46, Amer. Meteor. Soc., 165-170.
- Kain, J. S., 2003: The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor.*, conditionally accepted.
- Kuo, H.-L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1232-1240.
- Lin, Y.-L., D. B. Ensley, S. Chiao, and C.-Y. Huang, 2002: Orographic influences on rainfall and track deflection associated with the passage of a tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2929-2950.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Clim. Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Low-Nam S., and C. Davis, 2001: Development of a tropical cyclone bogussing scheme for the MM5 system. Preprint, The 11<sup>th</sup> PSU-NCAR MM5 User's Workshop, 130-134.
- Reisner, J., R. T. Brientjes, and R. J. Rasmussen, 1998: Explicit forecasting of supercooled water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy.*

*Meteor. Soc.*, **124B**, 1071-1107.

Schultz, P., 1995: An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3331-3343.

Tao, W.-K., and J. Simpson, 1993: The Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model Description. *Terr., Atmos. and Oceanic Sci.*, **4**, 35-72.

Xiu, A. and J. E. Pleim, 2000: Development of a land surface model part I: Application in a mesoscale meteorology model. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 192-209.

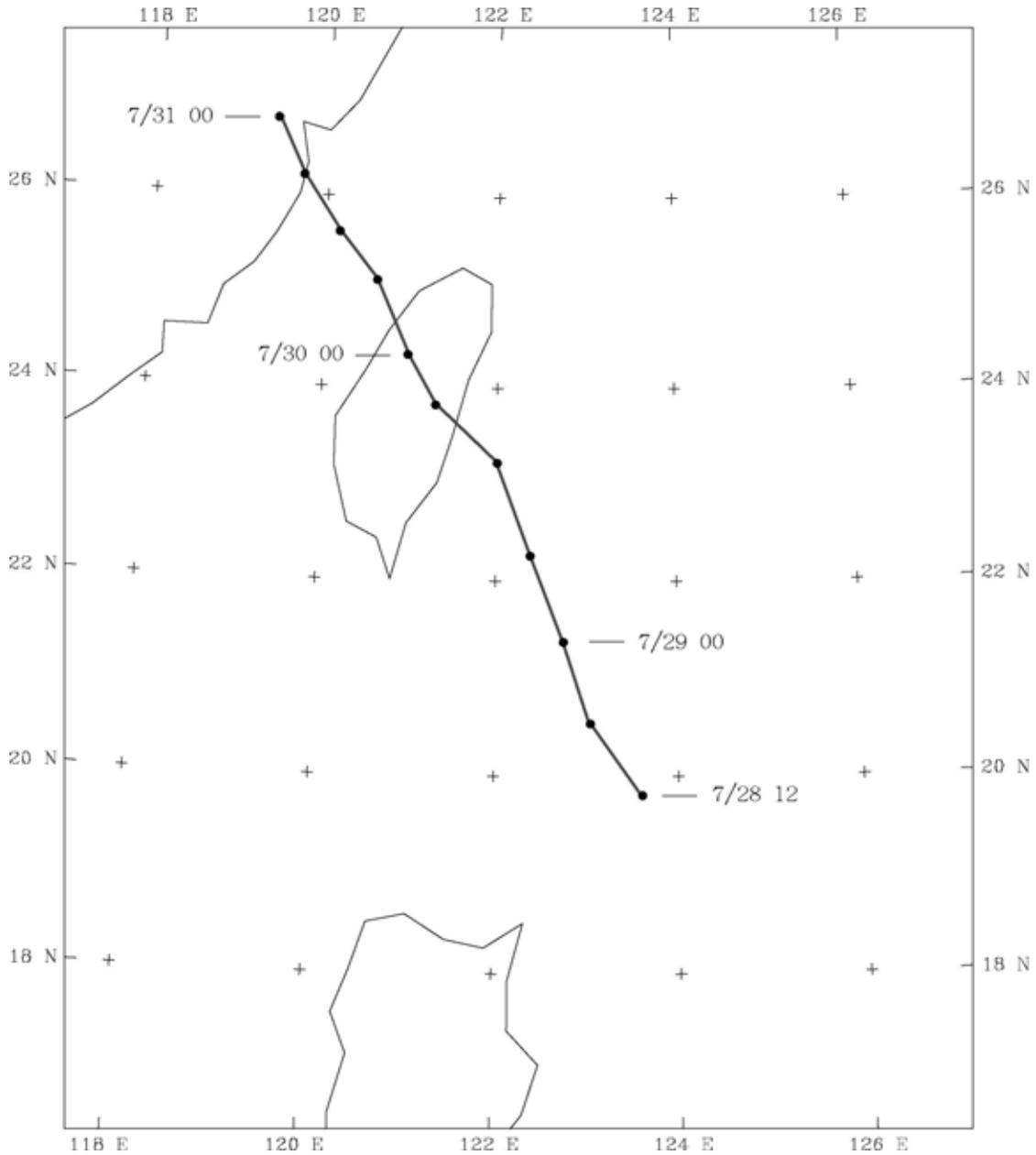


圖 1 桃芝颱風之路徑圖。時間為 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 到 2001 年 7 月 31 日 0000UTC。黑點表示每六小時的颱風中心位置。資料來源為美軍聯合颱風警報中心(JTWC)所發布之桃芝颱風最佳路徑資料，詳細資料見表 1。

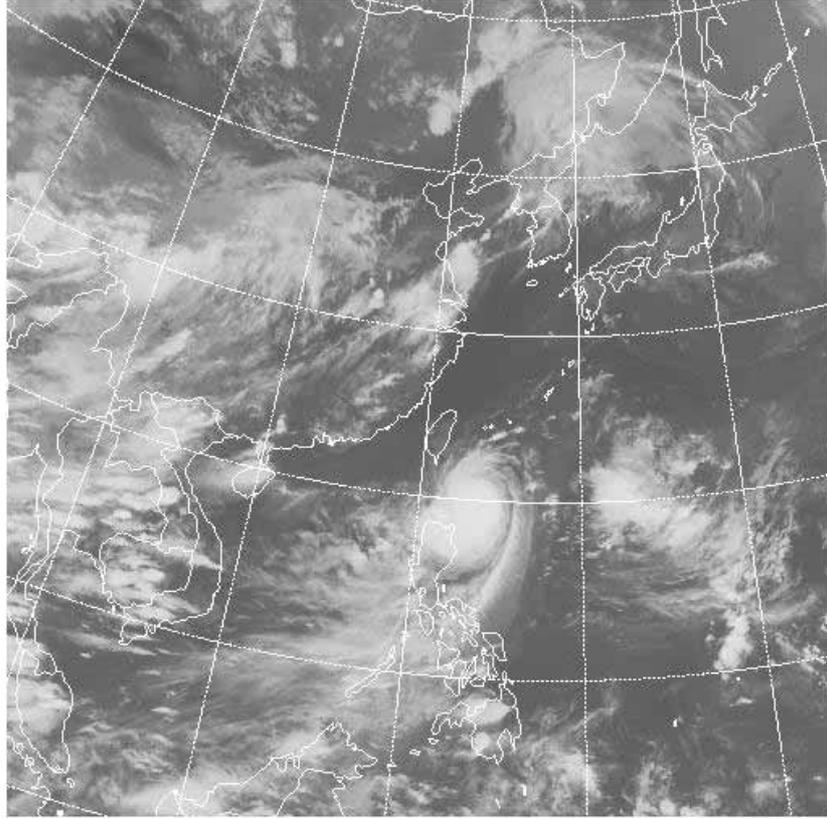


圖 2 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的衛星雲圖。

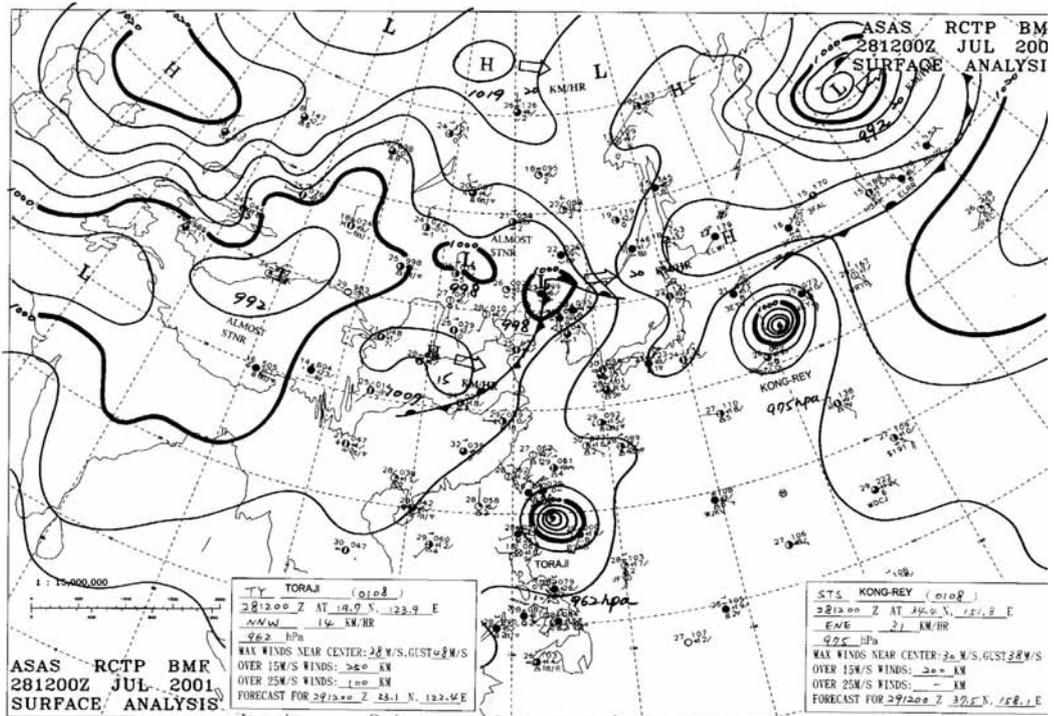


圖 3 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的地面天氣圖。

Dataset: ec RIP: rip ec Init: 1200 UTC Sat 28 Jul 01  
T + 0.00 h Valid: 1200 UTC Sat 28 Jul 01 (0600 MDT Sat 28 Jul 01)  
Temperature at sigma = 0.999  
Sea-level pressure  
Horizontal wind vectors at sigma = 0.999

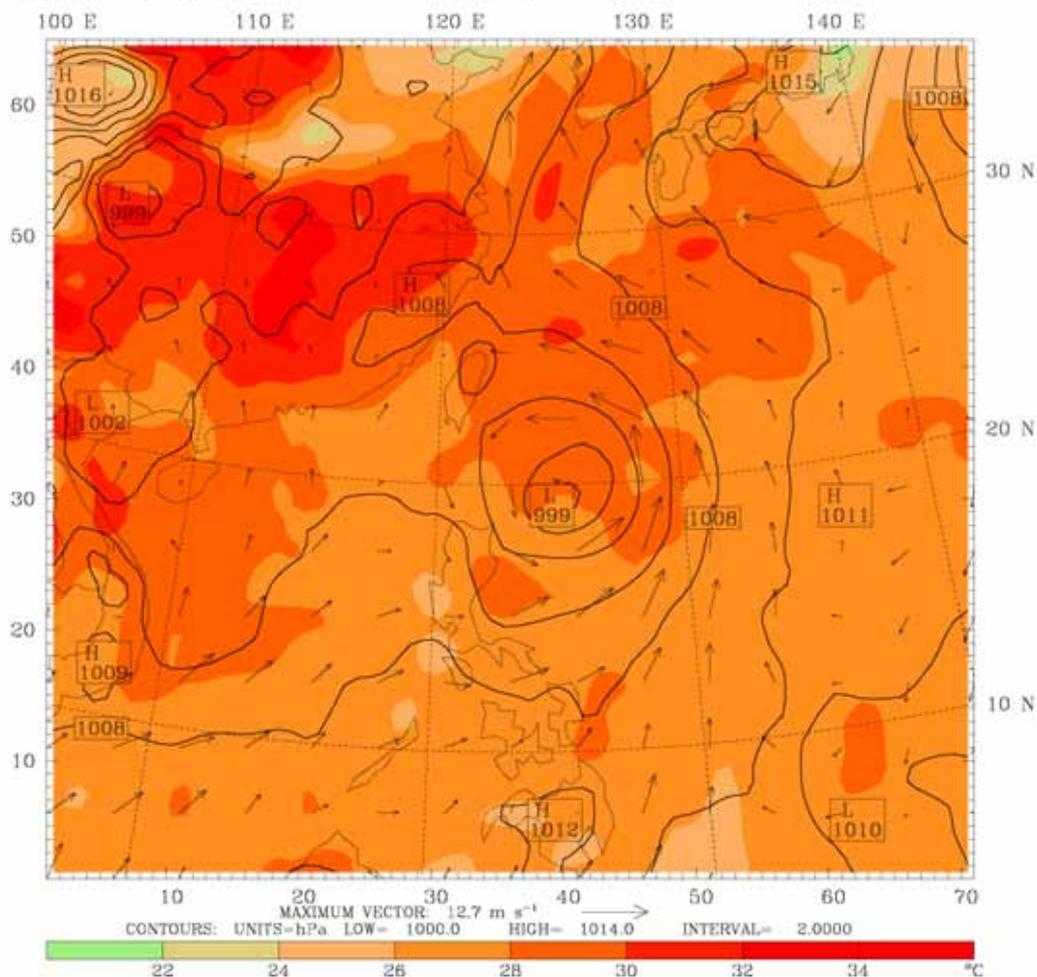


圖 4 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)之地面分析場。

Dataset: ec RIP: rip ec  
T + 0.00 h  
Temperature  
Geopotential height  
Horizontal wind vectors

Init: 1200 UTC Sat 28 Jul 01  
Valid: 1200 UTC Sat 28 Jul 01 (0600 MDT Sat 28 Jul 01)  
at pressure = 700 hPa  
at pressure = 700 hPa  
at pressure = 700 hPa

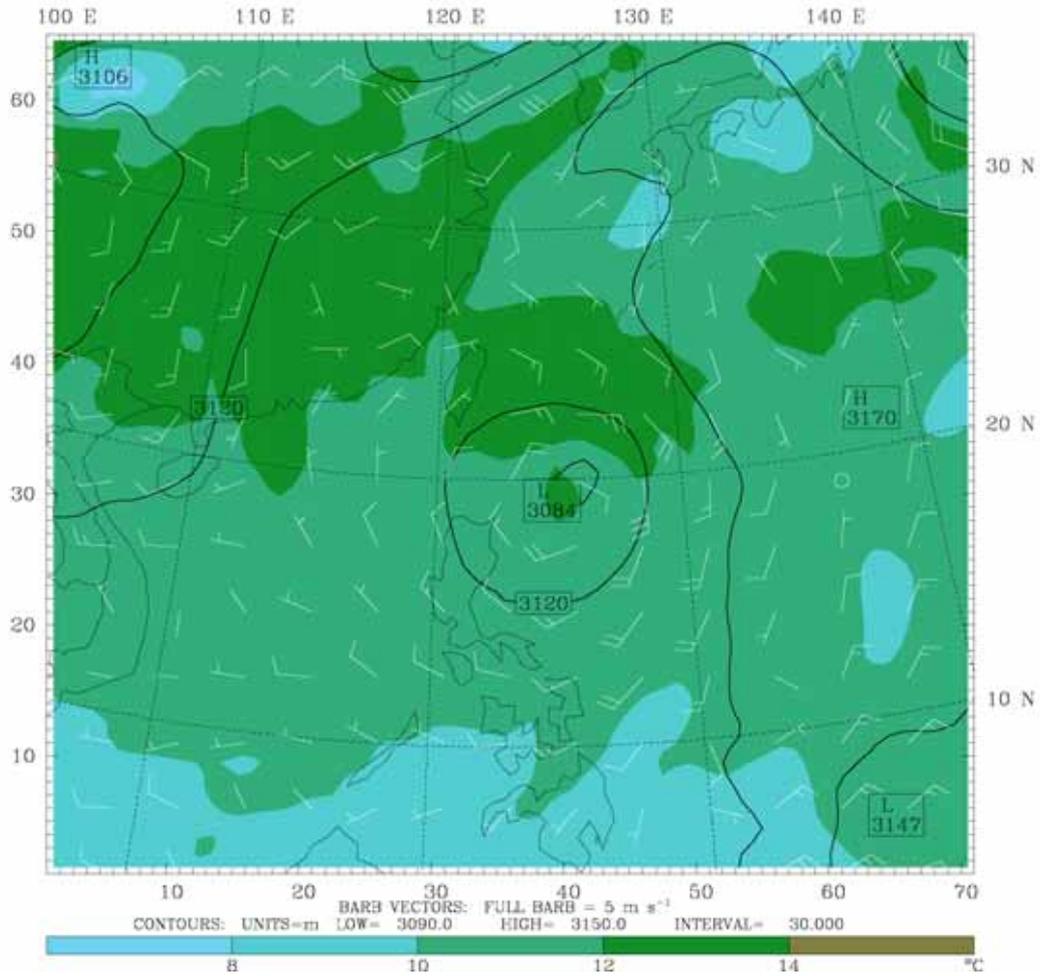


圖 5 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)之 700hPa 分析場。

Dataset: ec RIP: rip ec Init: 1200 UTC Sat 28 Jul 01  
T + 0.00 h Valid: 1200 UTC Sat 28 Jul 01 (0600 MDT Sat 28 Jul 01)  
Temperature at pressure = 500 hPa  
Geopotential height at pressure = 500 hPa  
Horizontal wind vectors at pressure = 500 hPa

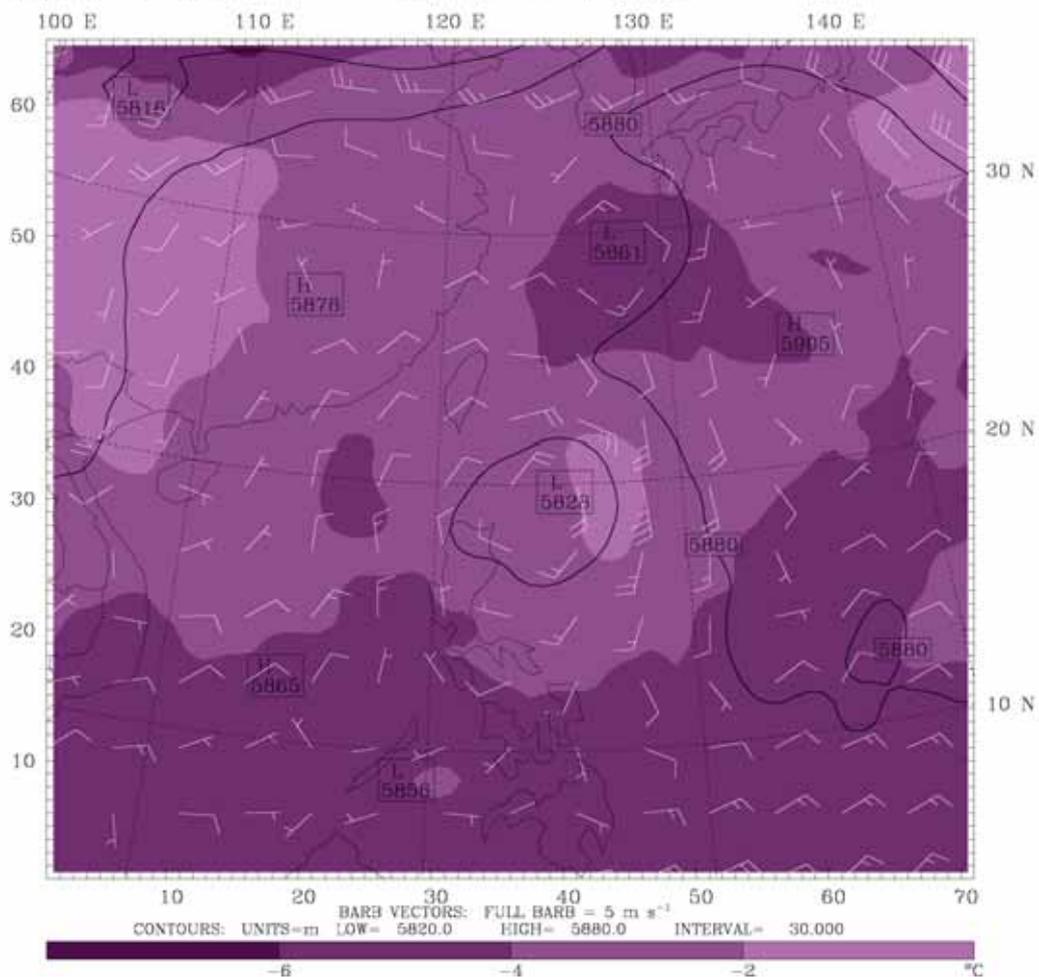


圖 6 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)之 500hPa 分析場。

Dataset: ec RIP: rip ec  
T + 0.00 h  
Temperature  
Geopotential height  
Horizontal wind vectors

Init: 1200 UTC Sat 28 Jul 01  
Valid: 1200 UTC Sat 28 Jul 01 (0600 MDT Sat 28 Jul 01)  
at pressure = 300 hPa  
at pressure = 300 hPa  
at pressure = 300 hPa

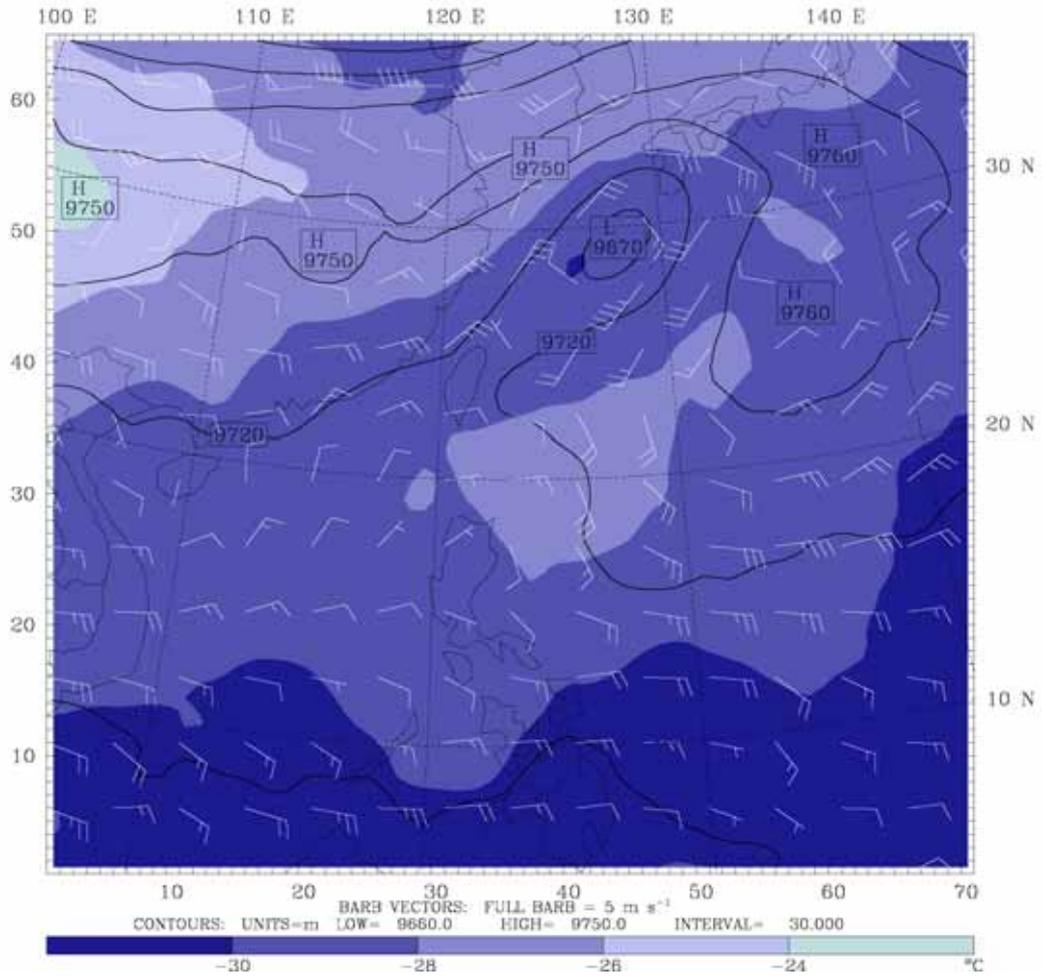


圖 7 2001 年 7 月 28 日 1200UTC 的歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)之 300hPa 分析場。

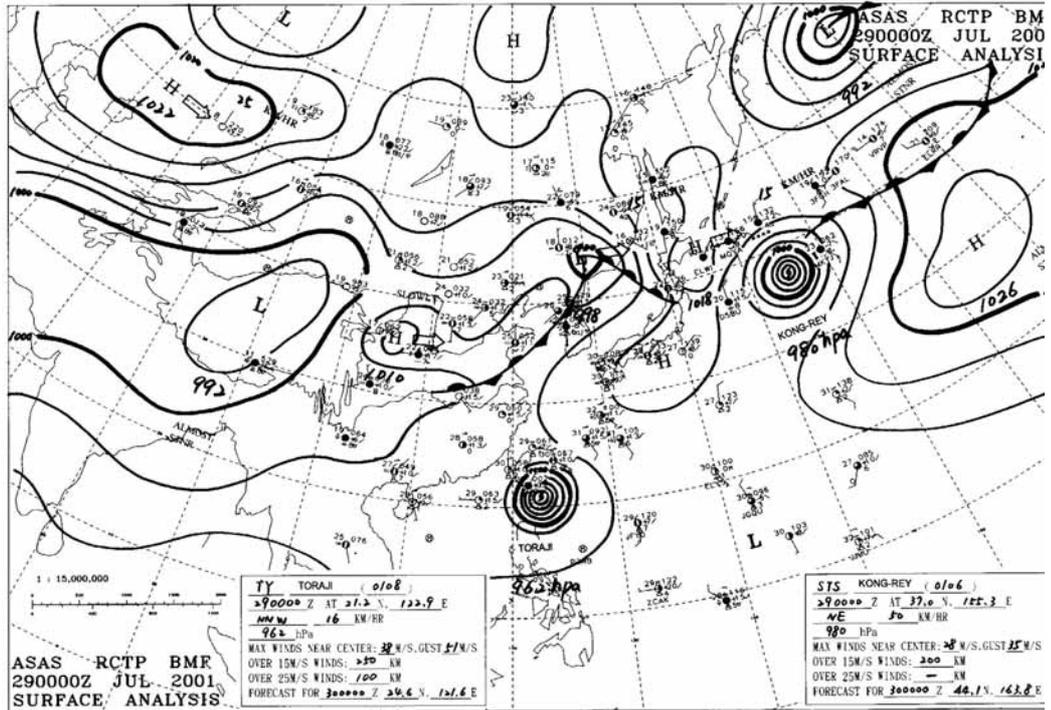


圖 8 2001 年 7 月 29 日 0000UTC 的地面天氣圖。

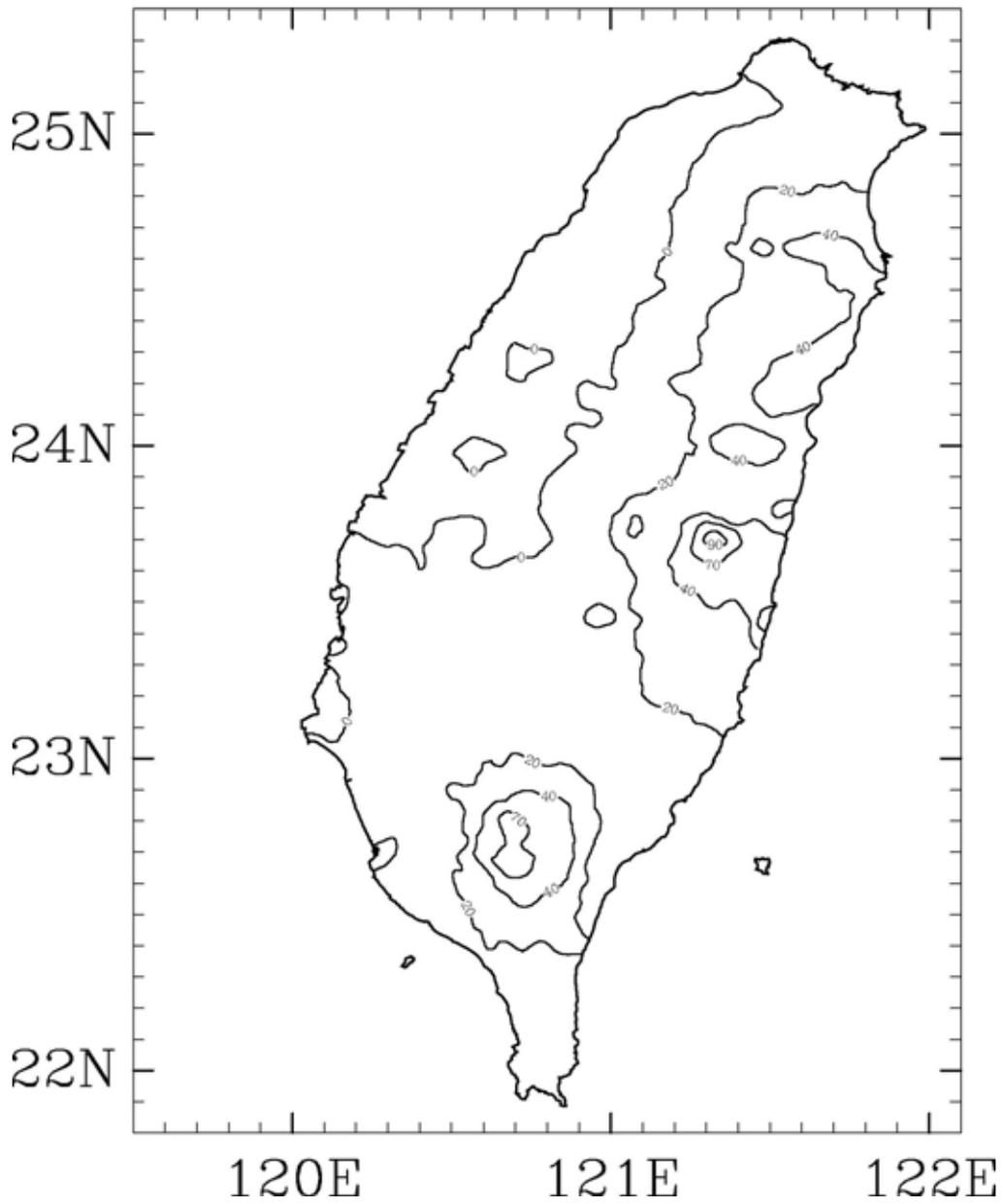


圖 9 2001 年 7 月 29 日 24 小時累積雨量圖。雨量等值線分別為 0、20、40、70、及 90 公厘。

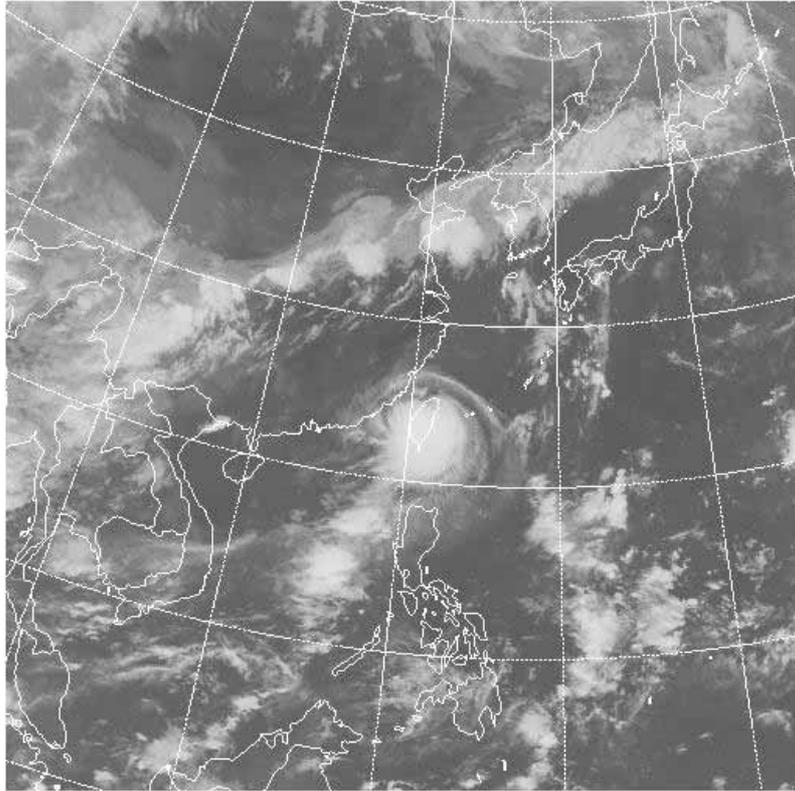


圖 10 2001 年 7 月 30 日 0000UTC 的衛星雲圖。

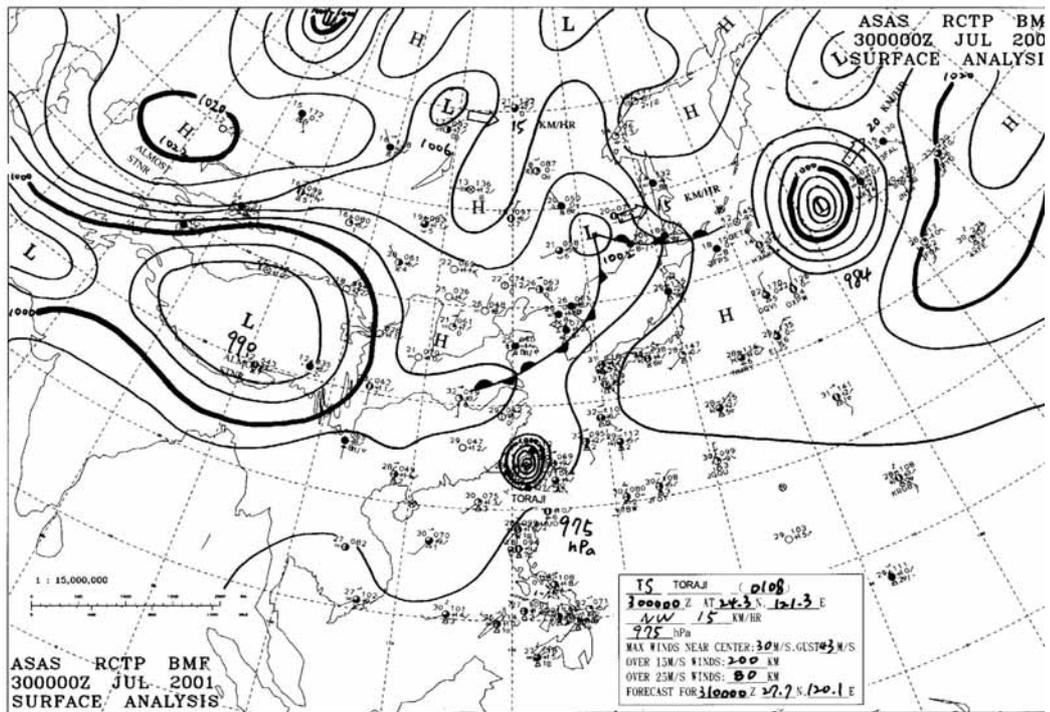


圖 11 2001 年 7 月 30 日 0000UTC 的地面天氣圖。

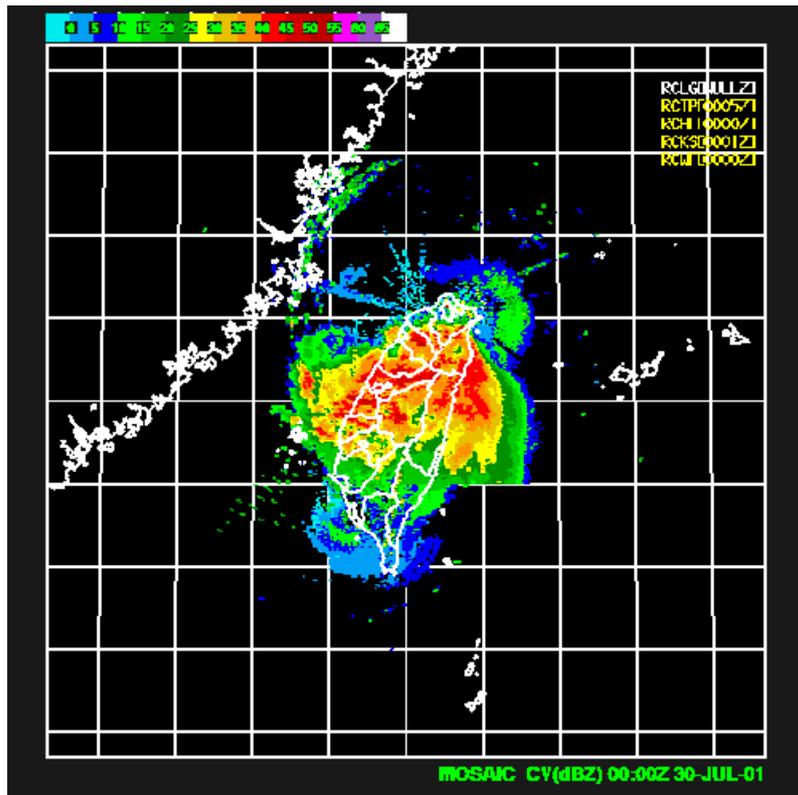


圖 12 2001 年 7 月 30 日 0000UTC 之中央氣象局雷達回波合成圖。

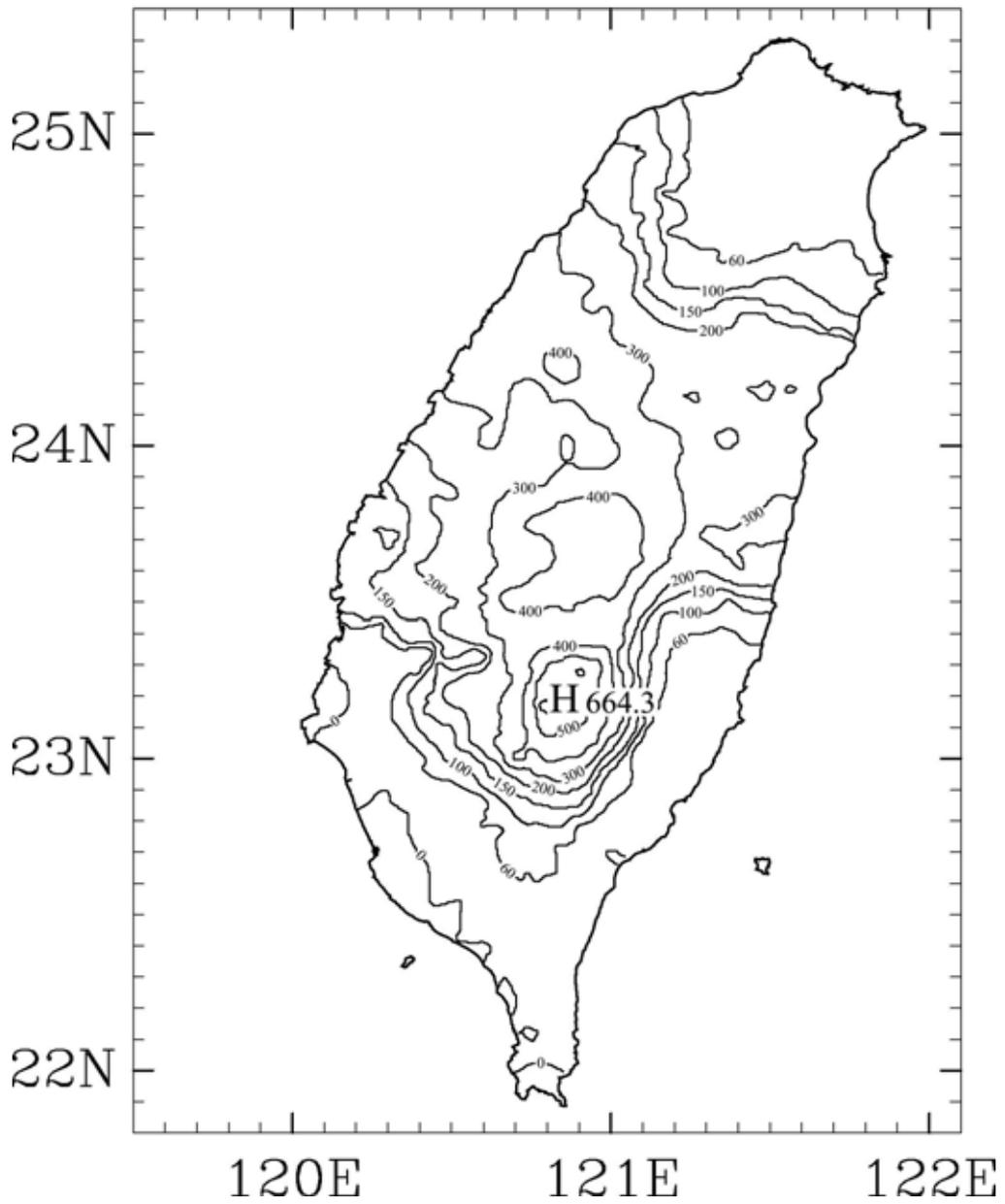


圖 13 2001 年 7 月 30 日 24 小時累積雨量圖。雨量等值線分別為 0、60、100、150、200、300、400、500、及 600 公厘。

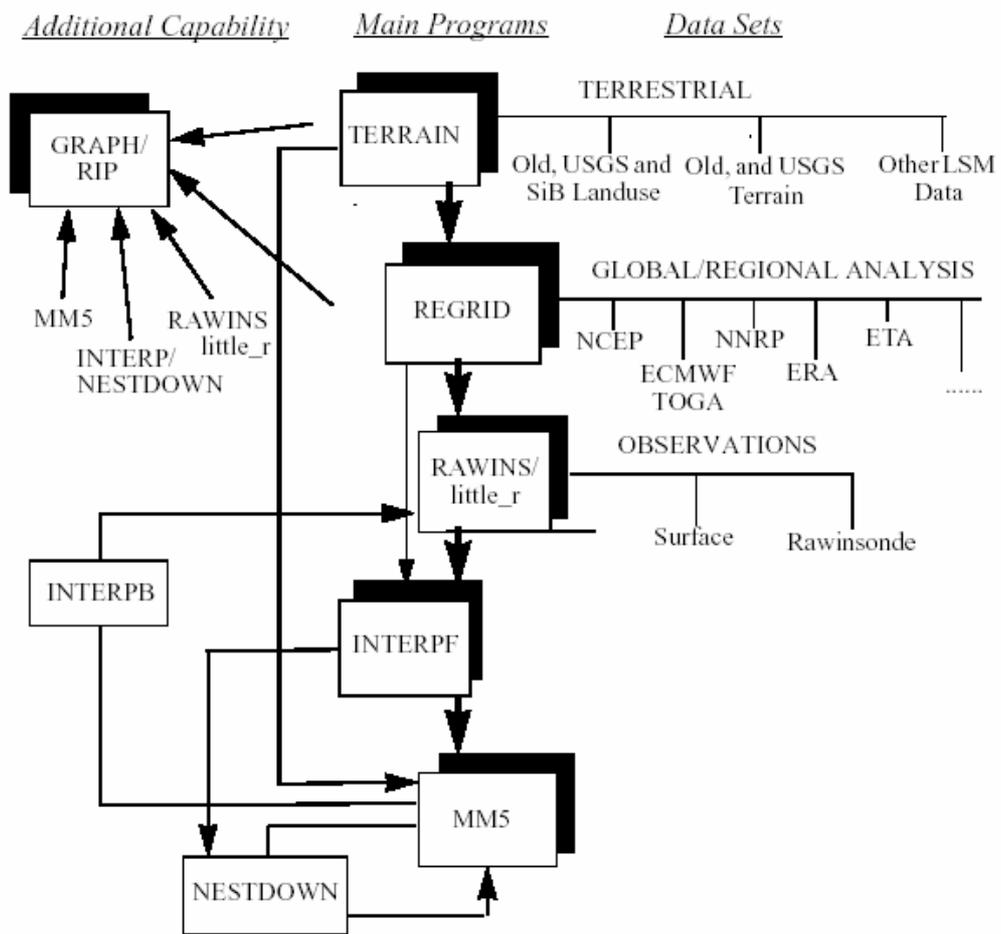


圖 14 MM5 模式系統結構圖[取自 MM5 V3.5 使用者手冊]。

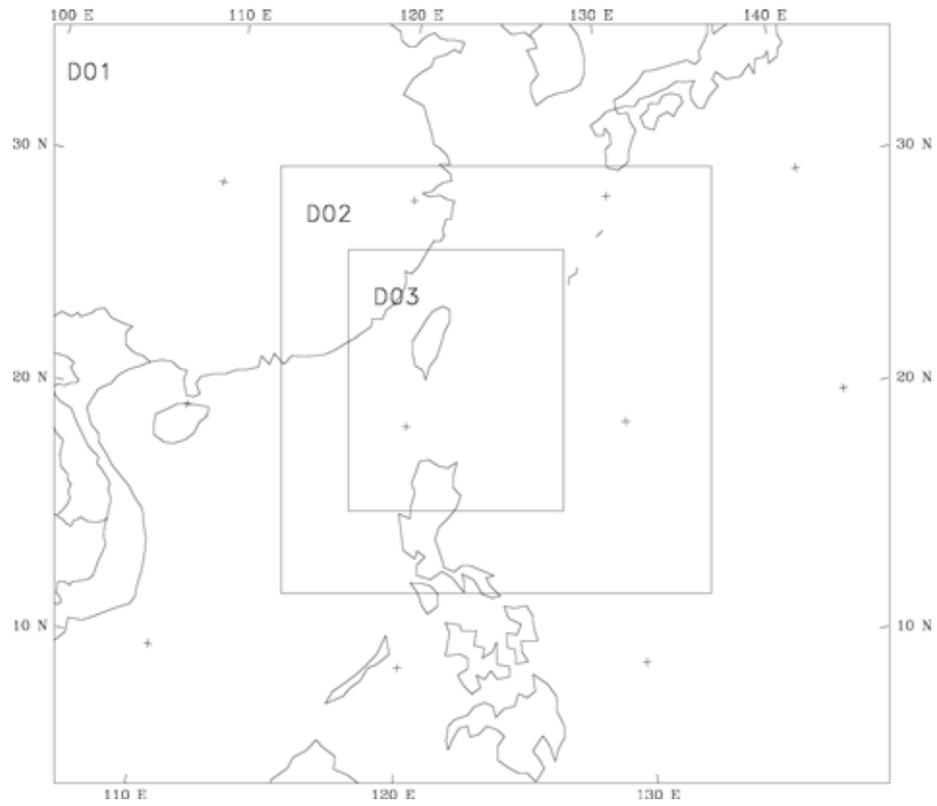


圖 15 模式三層巢狀網格示意圖。粗網域(D01)之水平解析度為 60 公里，中網域(D02)之水平解析度為 20 公里，細網域(D03)之水平解析度為 6.67 公里。

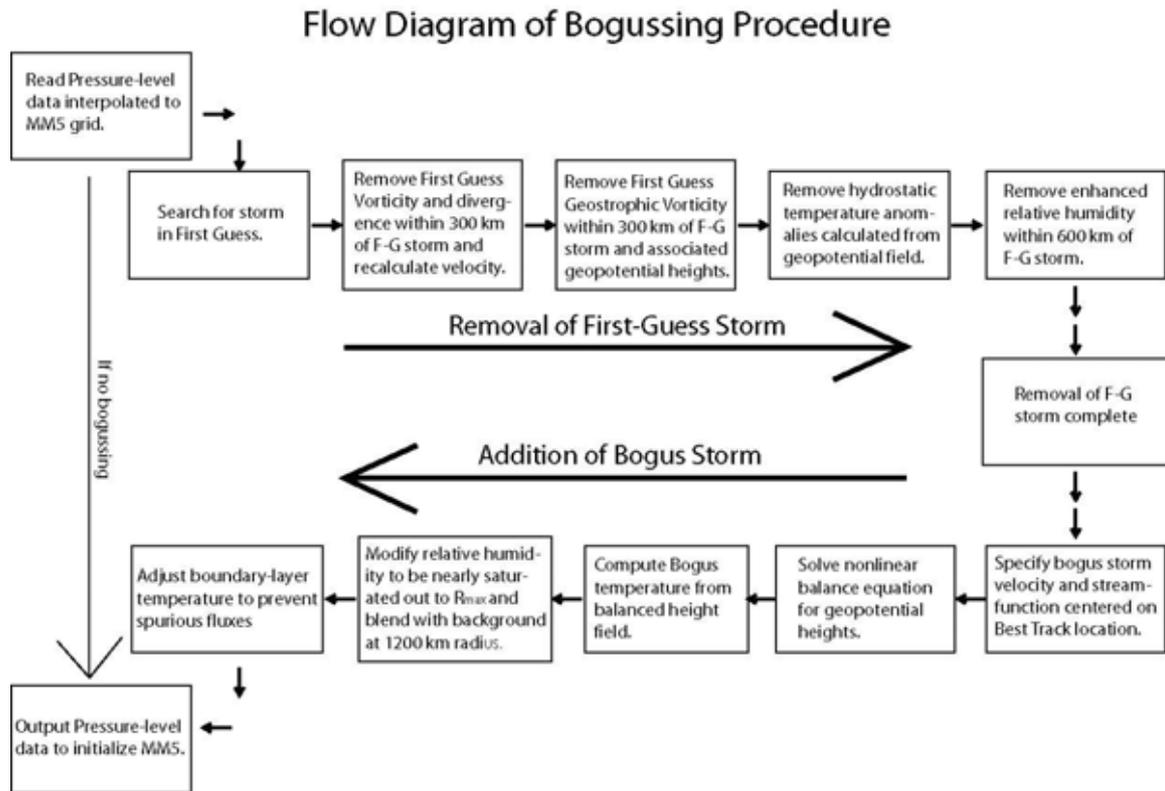


圖 16 渦旋植入方法的流程圖 [取自 Davis and Low-Nam(2001)]。

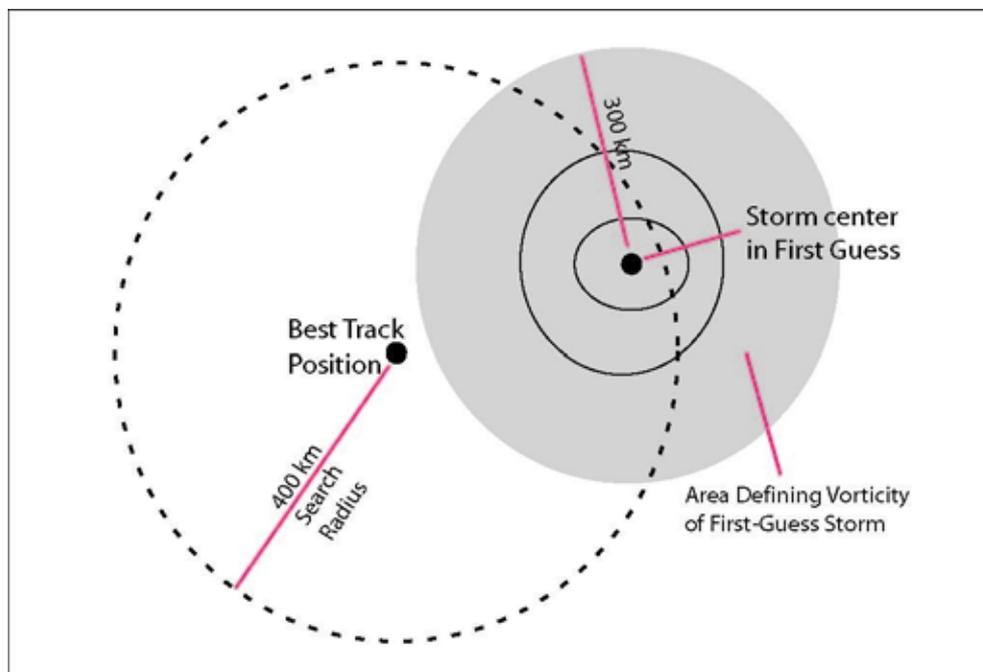


圖 17 渦旋植入示意圖 [取自 Davis and Low-Nam(2001)]。

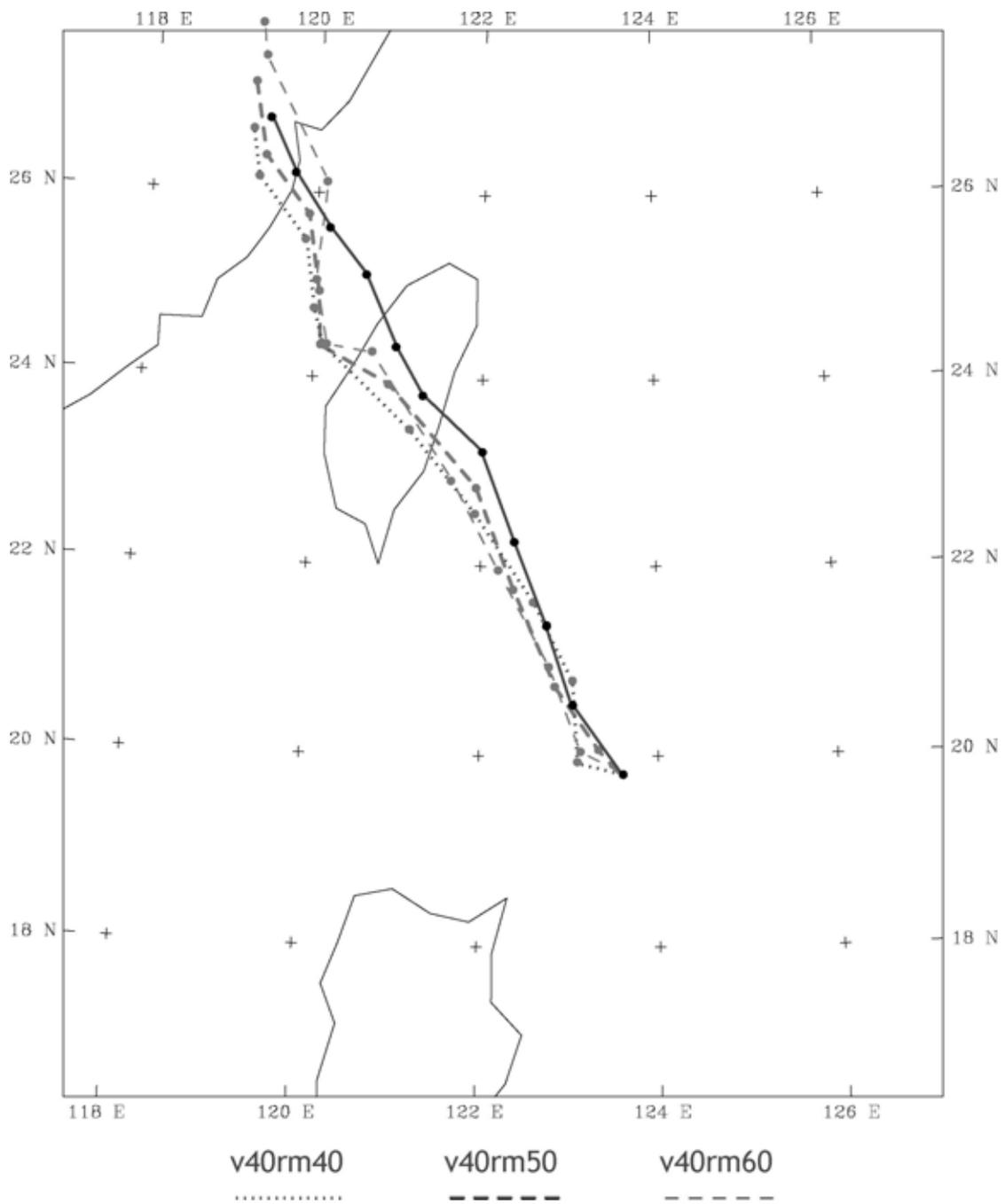


圖 18 v40 實驗組之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

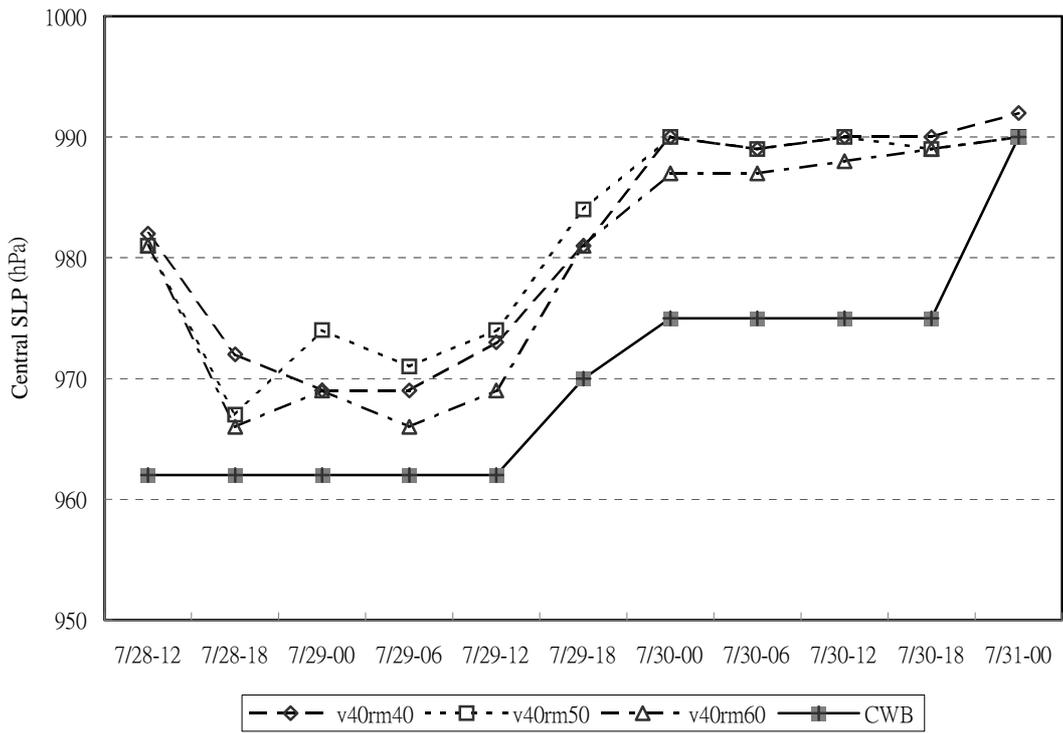


圖 19 v40 實驗組之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

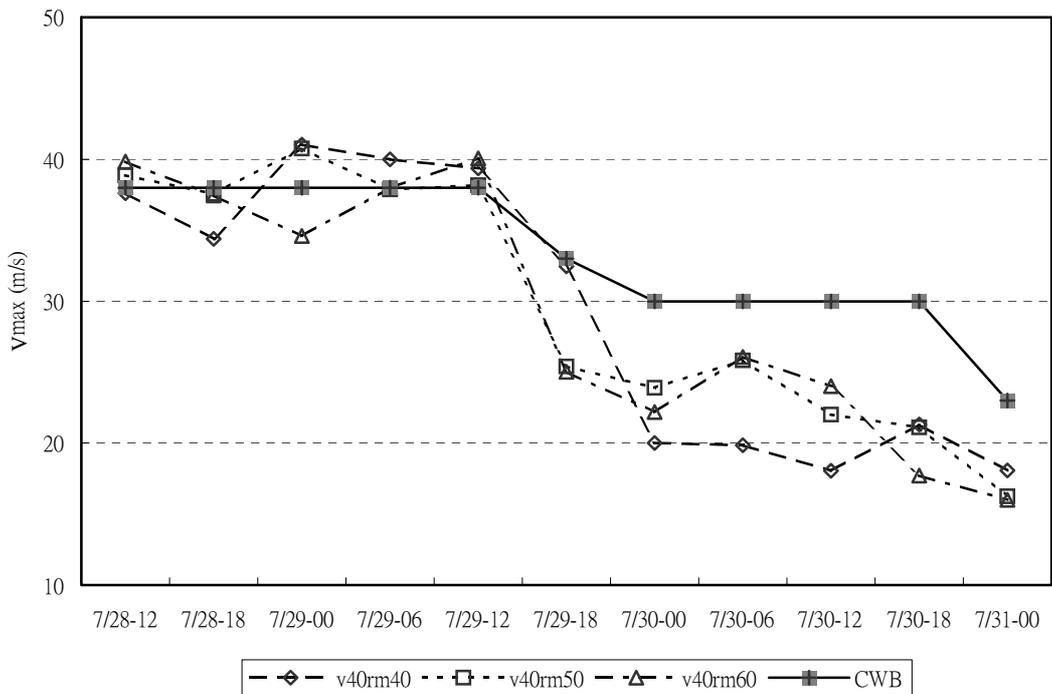


圖 20 v40 實驗組之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

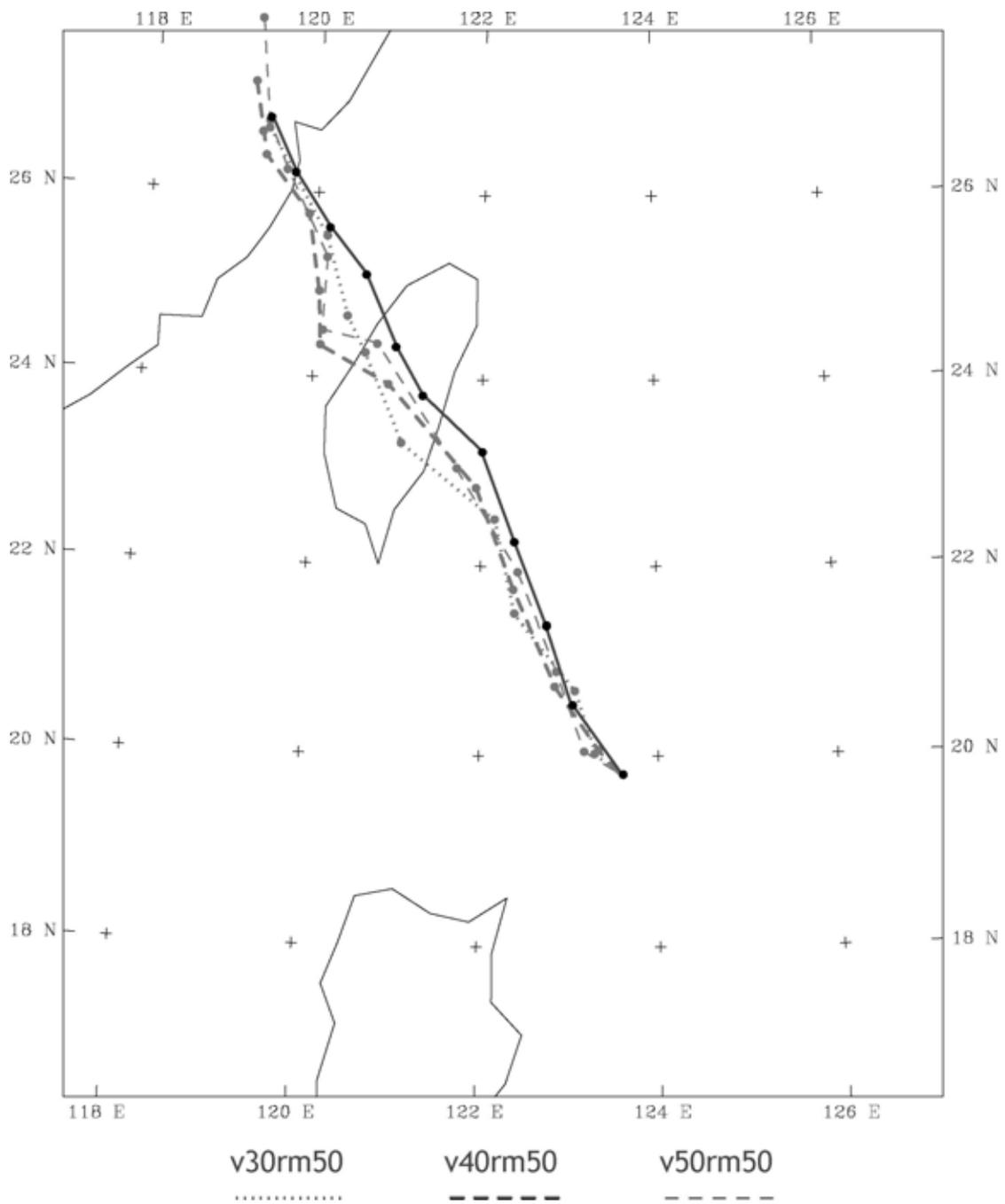


圖 21 rm50 實驗組之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

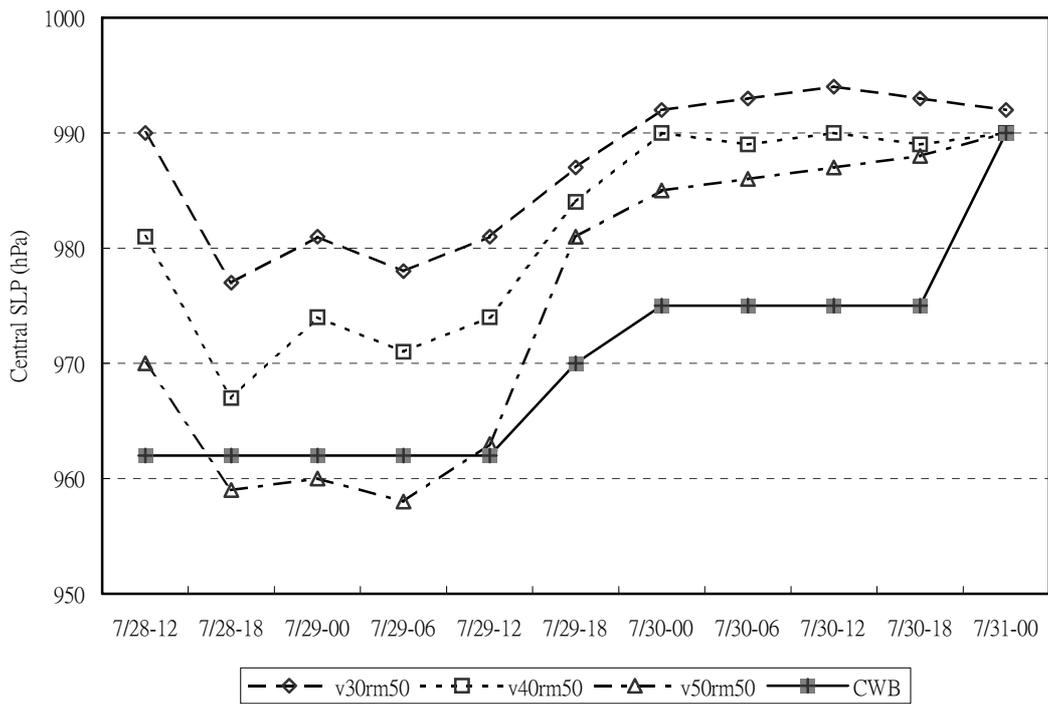


圖 22 rm50 實驗組之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

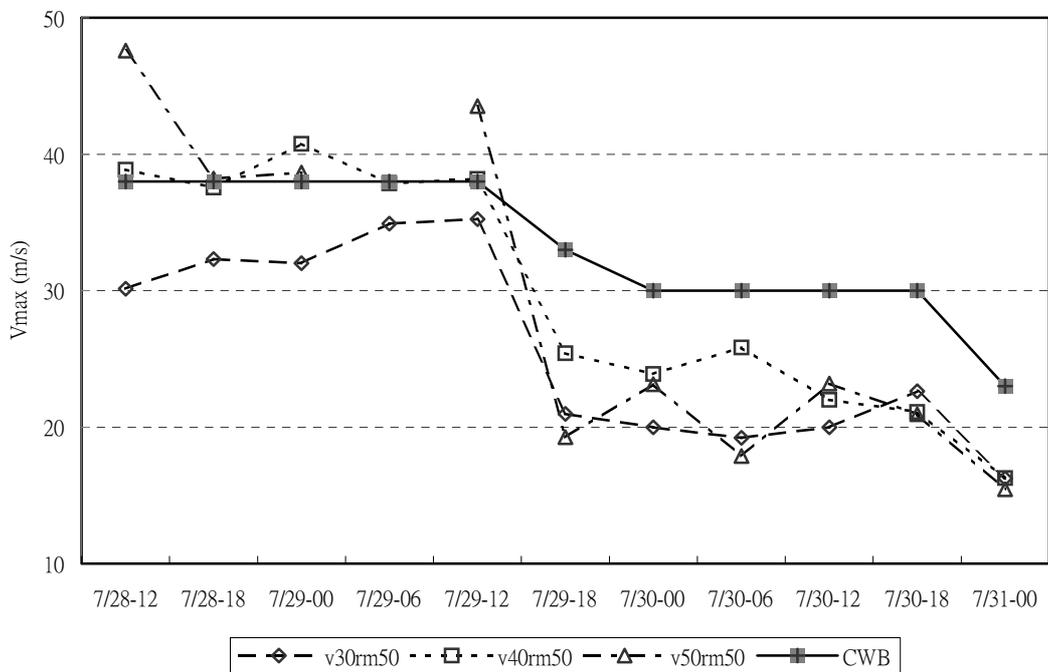


圖 23 rm50 實驗組之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

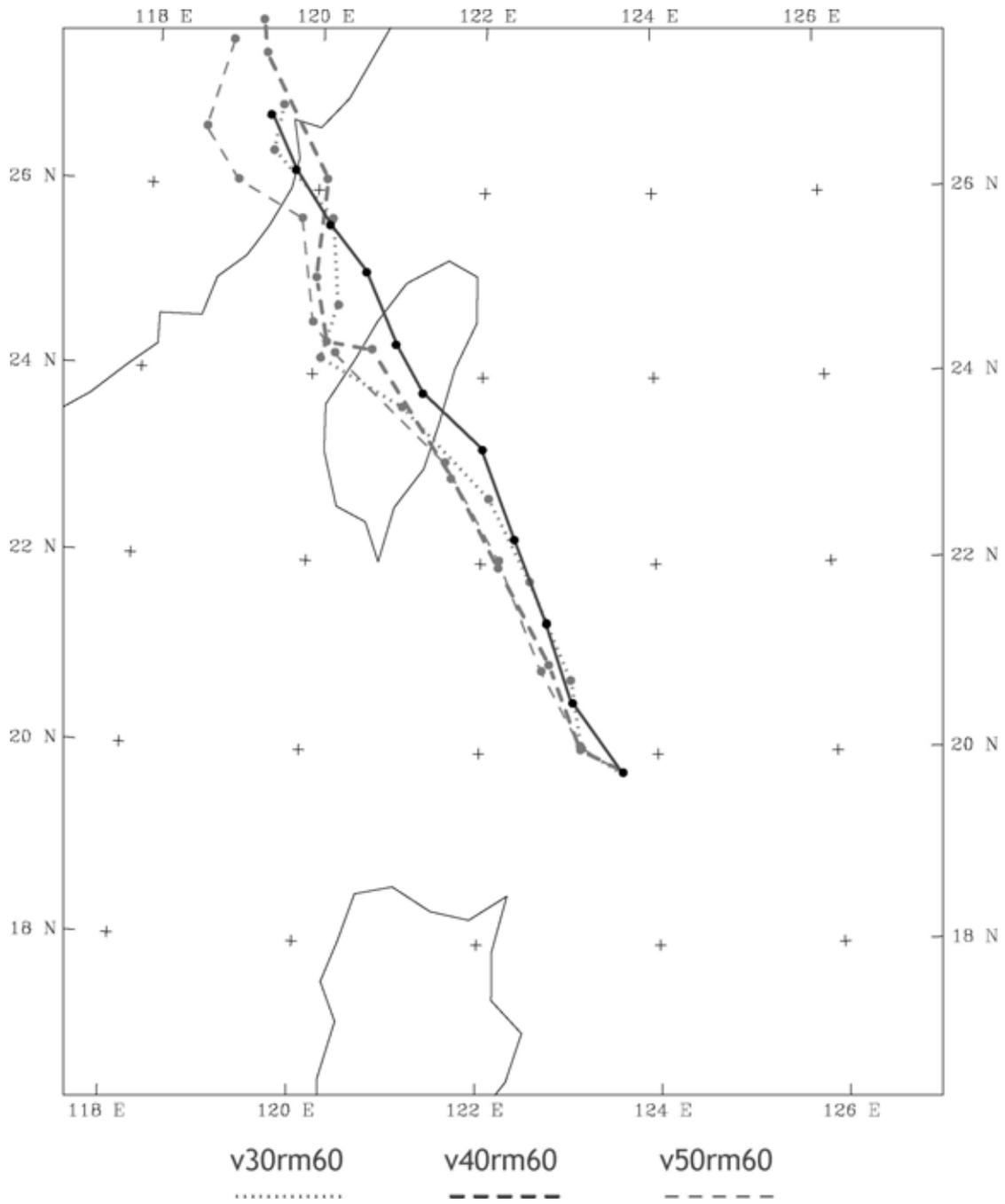


圖 24 rm60 實驗組之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

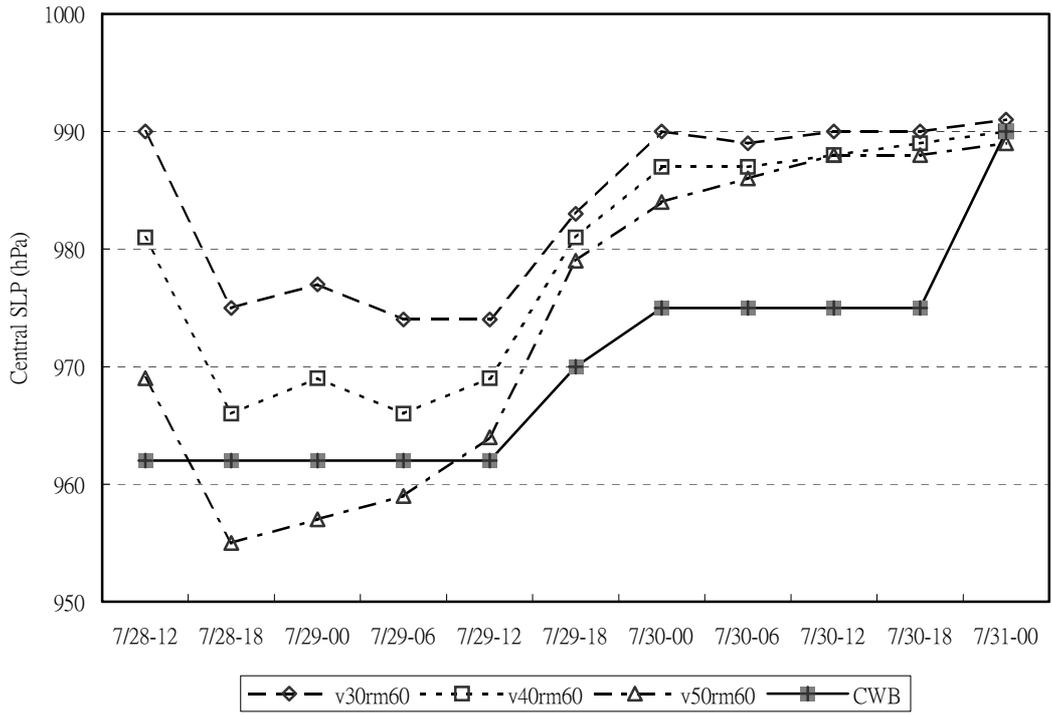


圖 25 rm60 實驗組之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

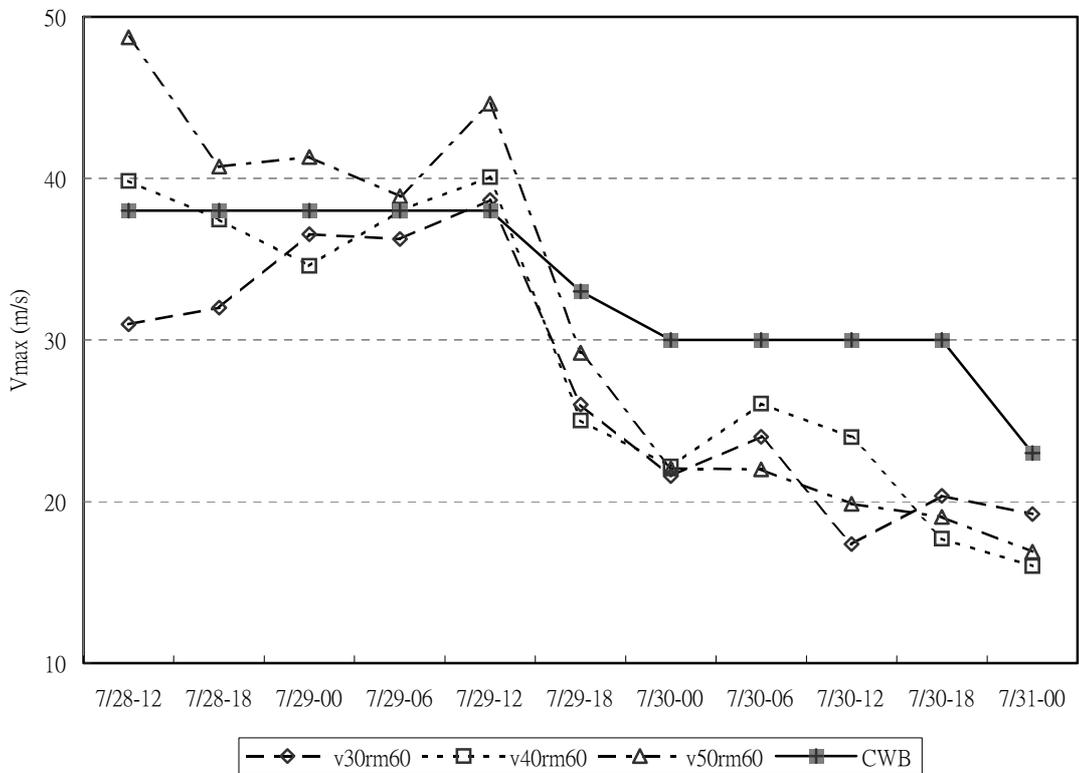


圖 26 rm60 實驗組之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

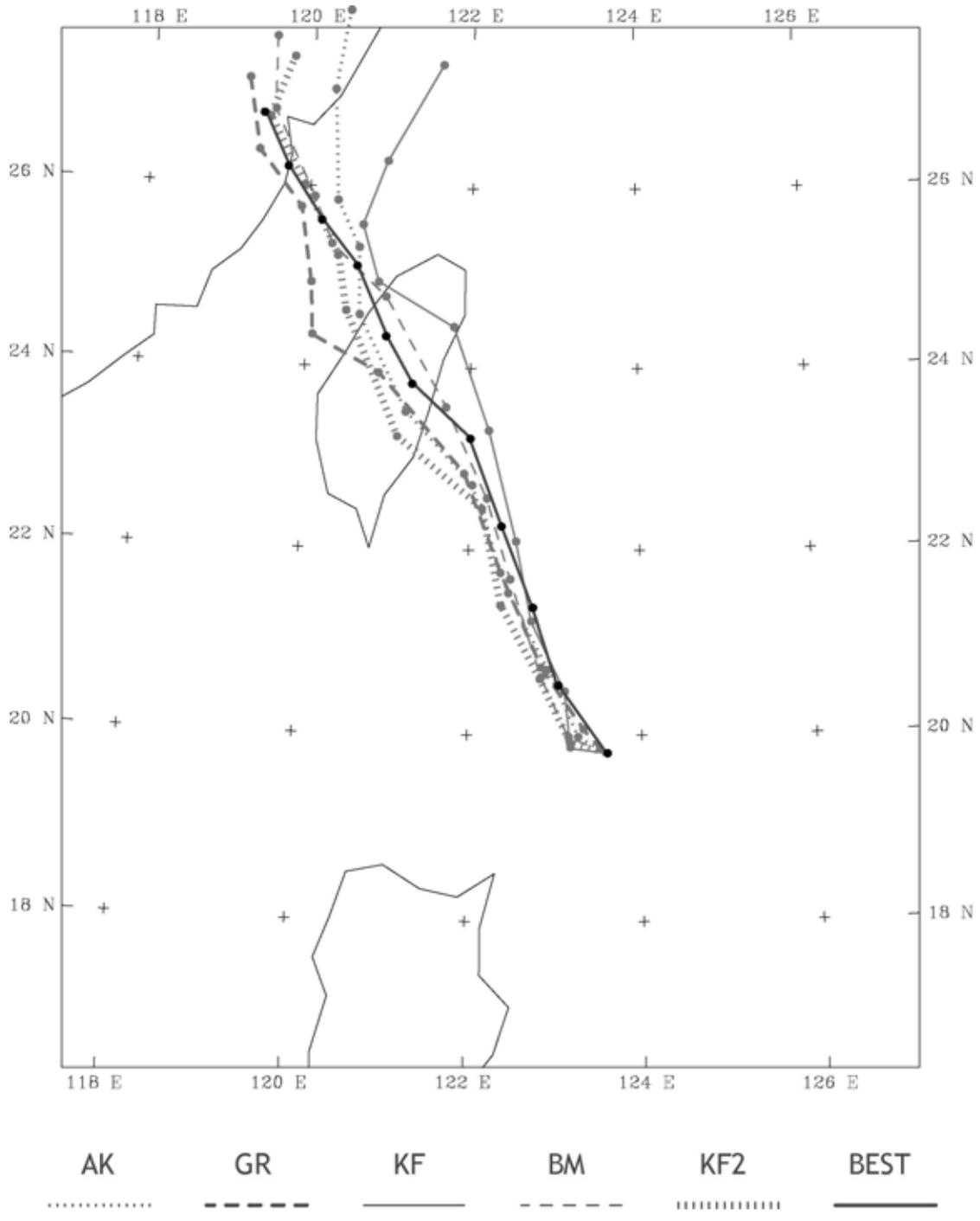


圖 27 積雲參數法實驗組之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

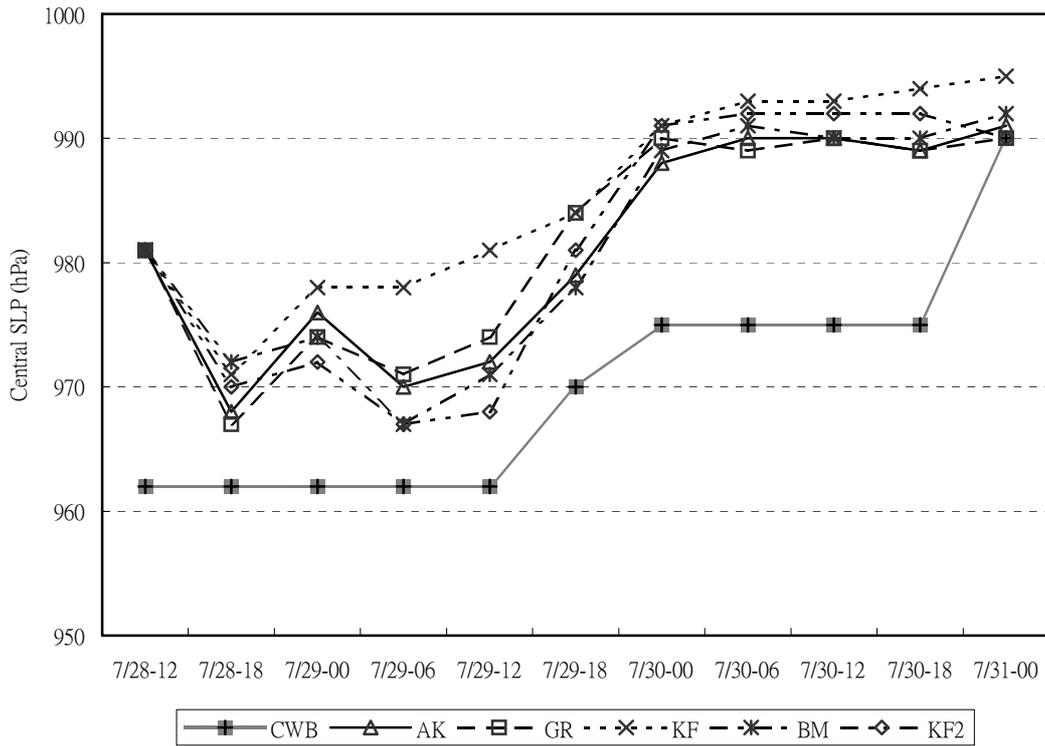


圖 28 積雲參數法實驗組之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

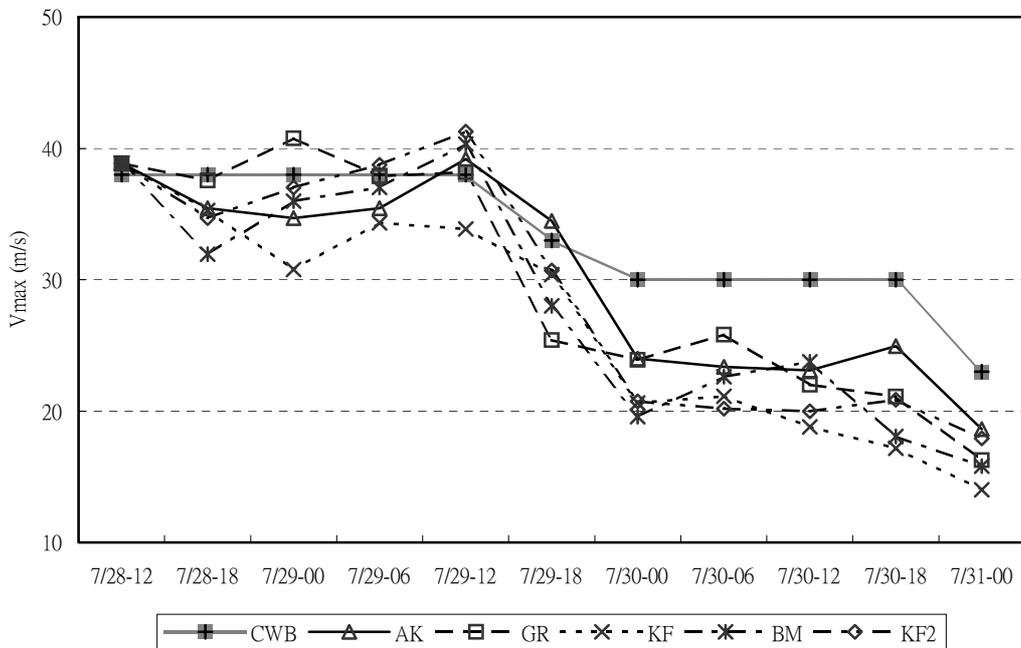


圖 29 積雲參數法實驗組之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

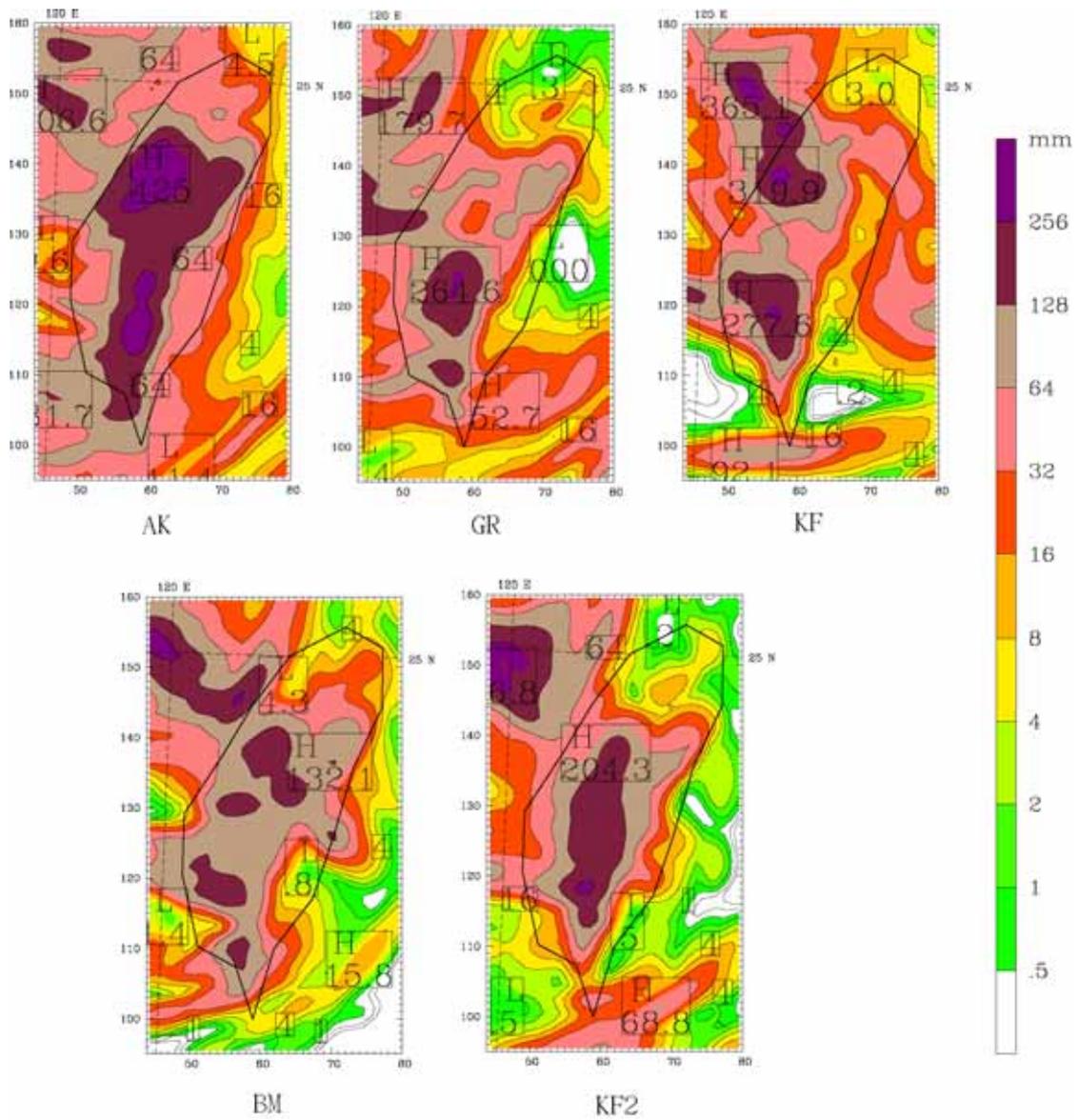


圖 30 積雲參數法實驗組之 30 日 24 小時累積降雨圖(30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)。

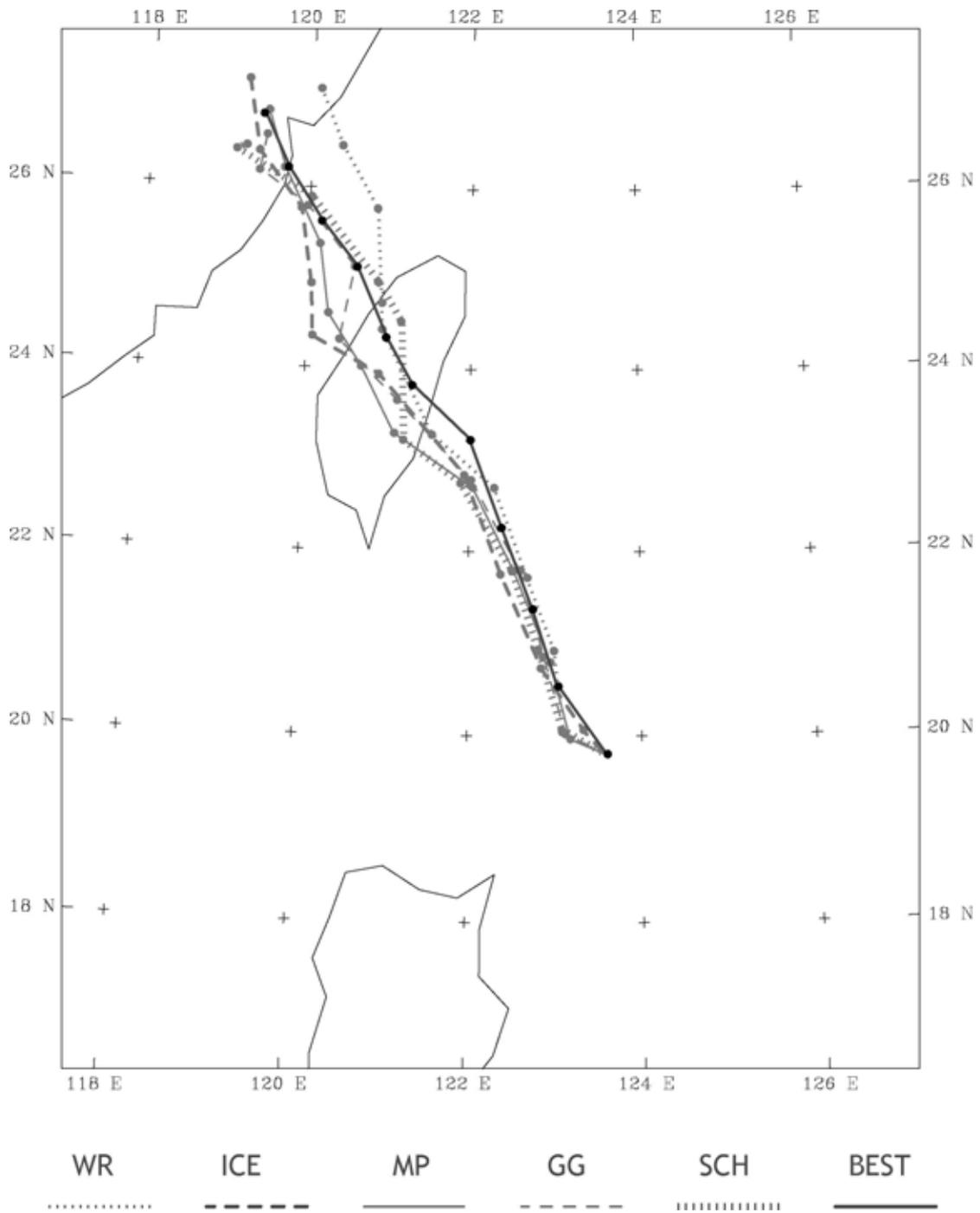


圖 31 雲物理參數法實驗組之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。

沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

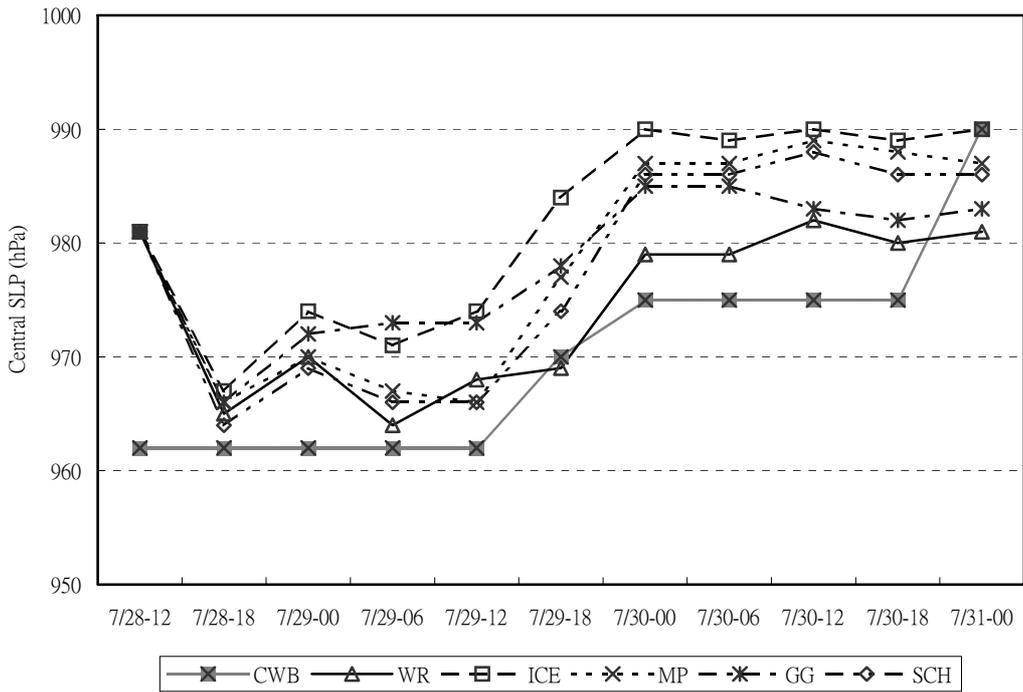


圖 32 雲物理參數法實驗組之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

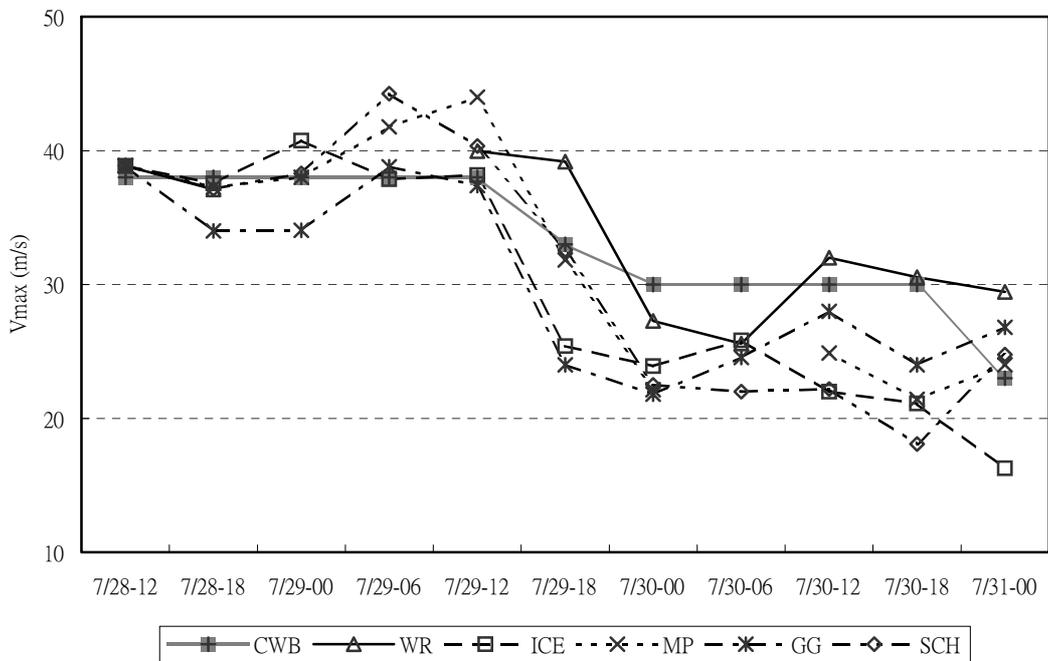


圖 33 雲物理參數法實驗組之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

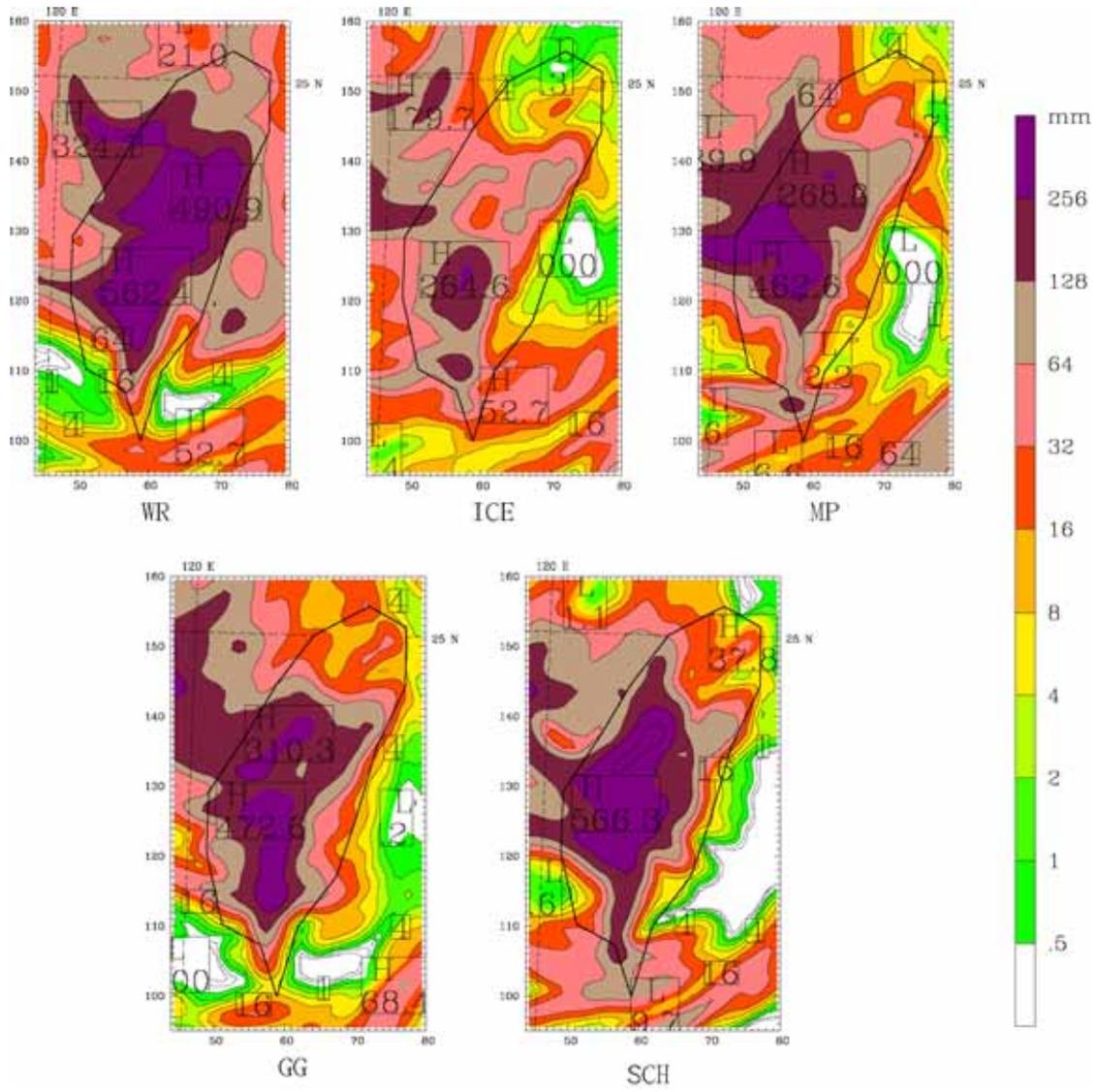


圖 34 雲物理參數法實驗組之 30 日 24 小時累積降雨圖(30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)。

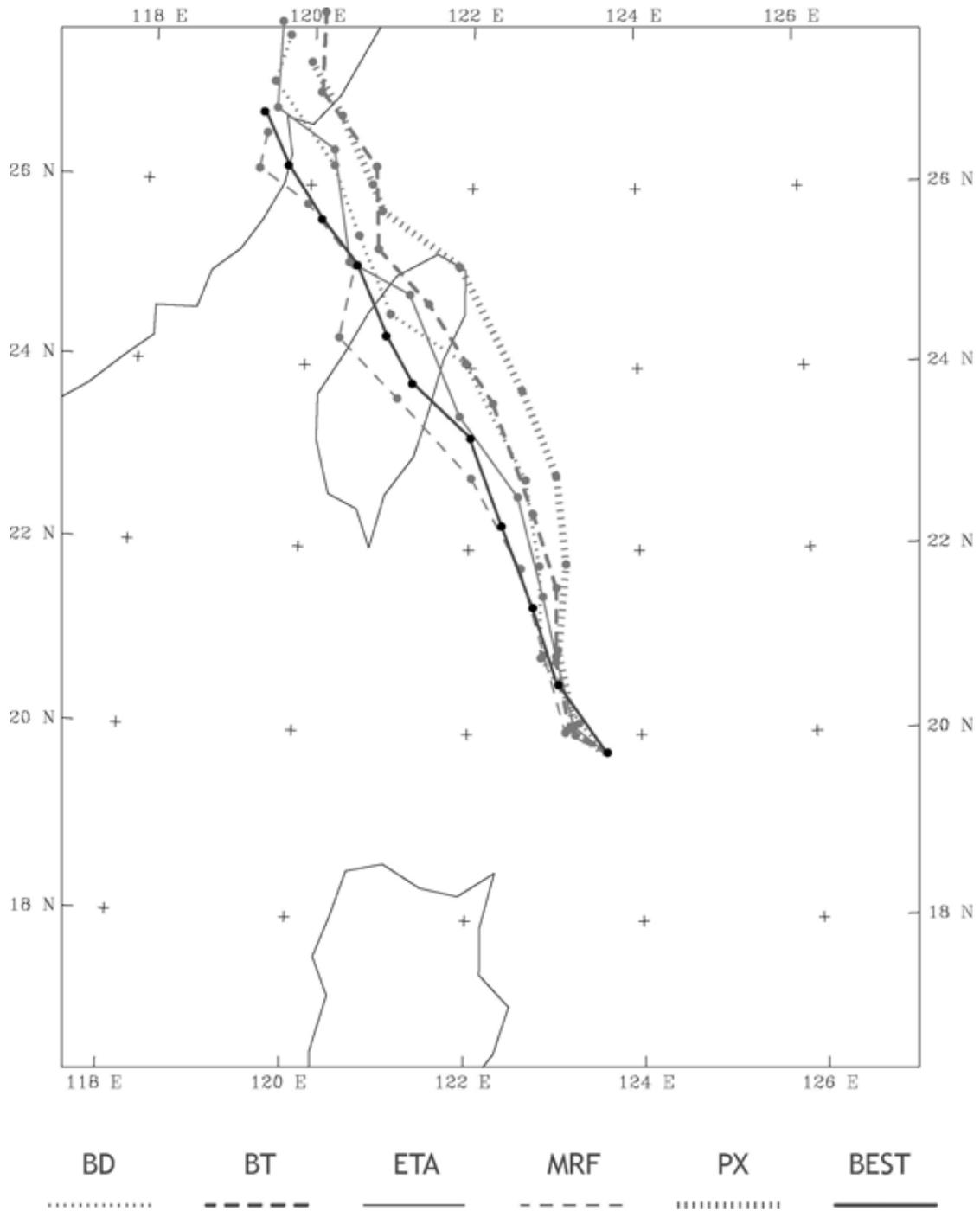


圖 35 邊界層參數法實驗組之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。

沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

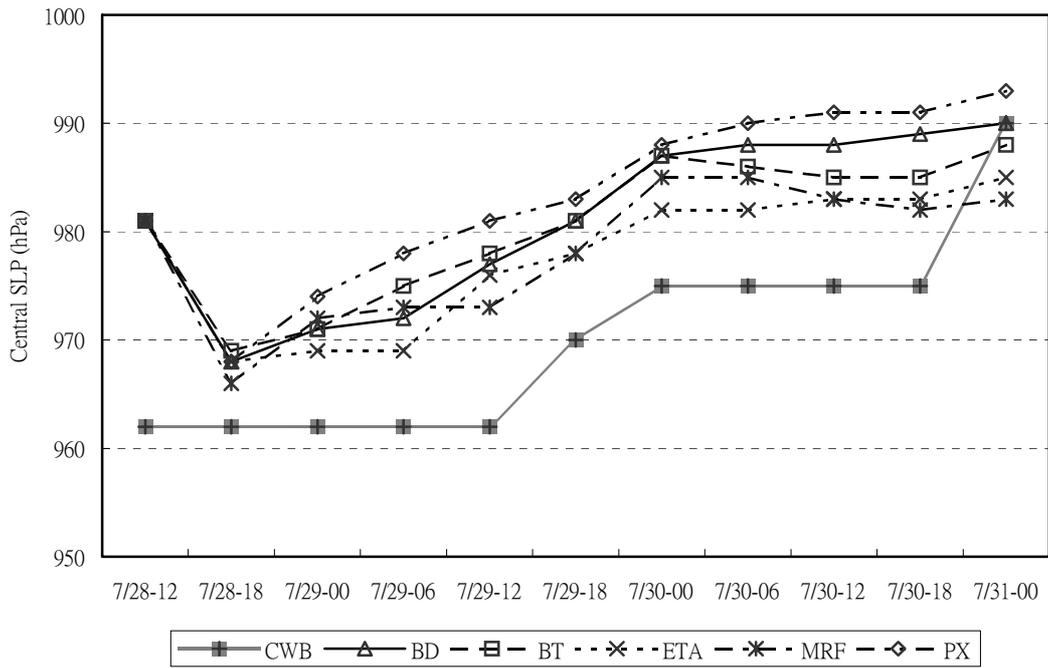


圖 36 邊界層參數法實驗組之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

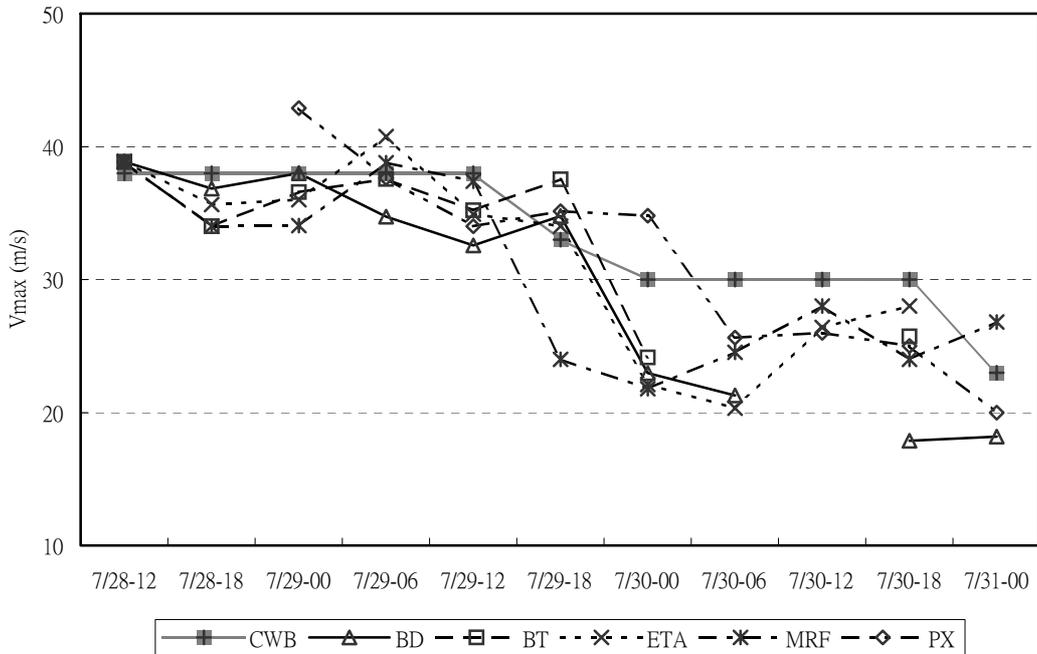


圖 37 邊界層參數法實驗組之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

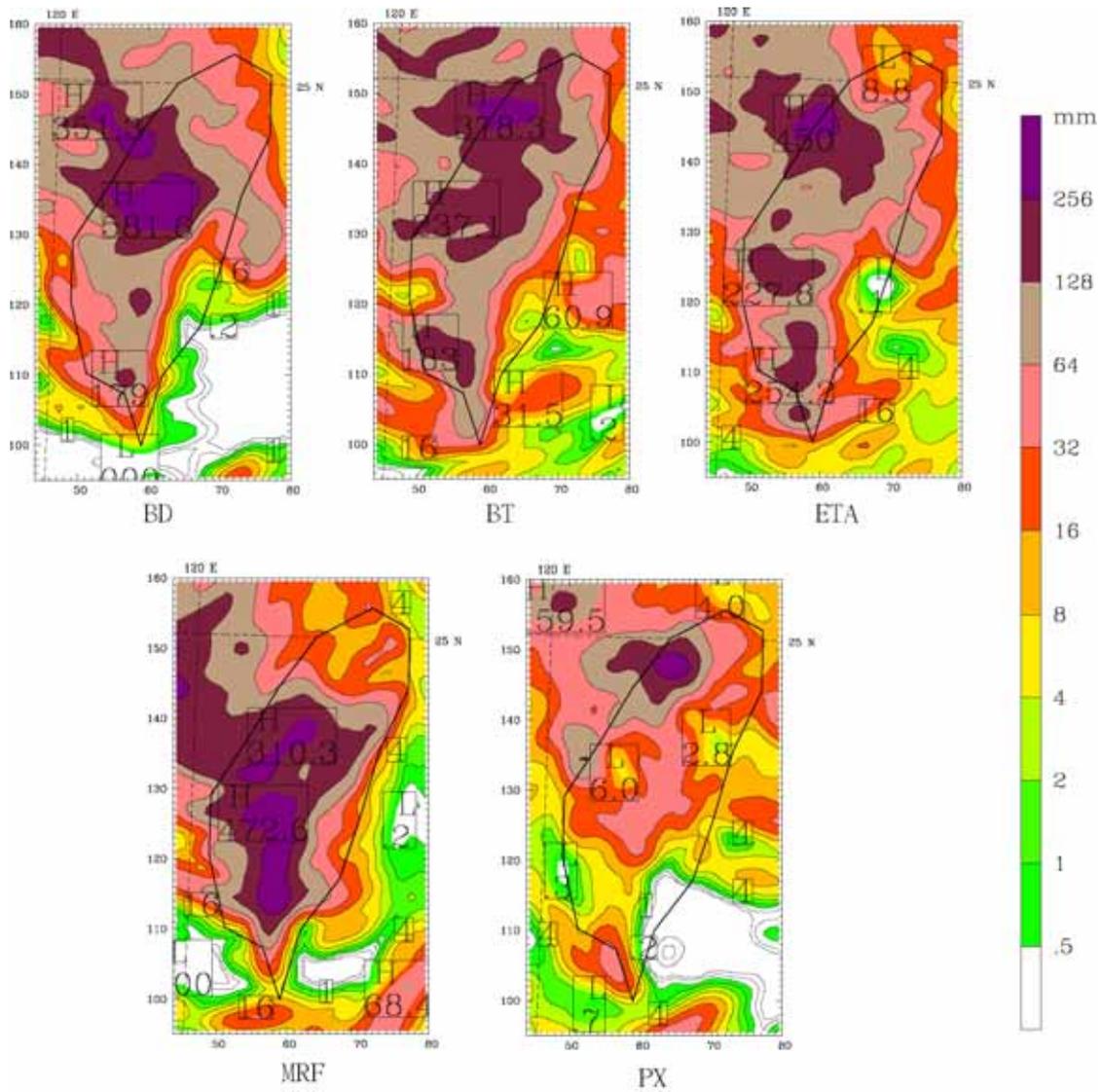


圖 38 邊界層參數法實驗組之 30 日 24 小時累積降雨圖(30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)。

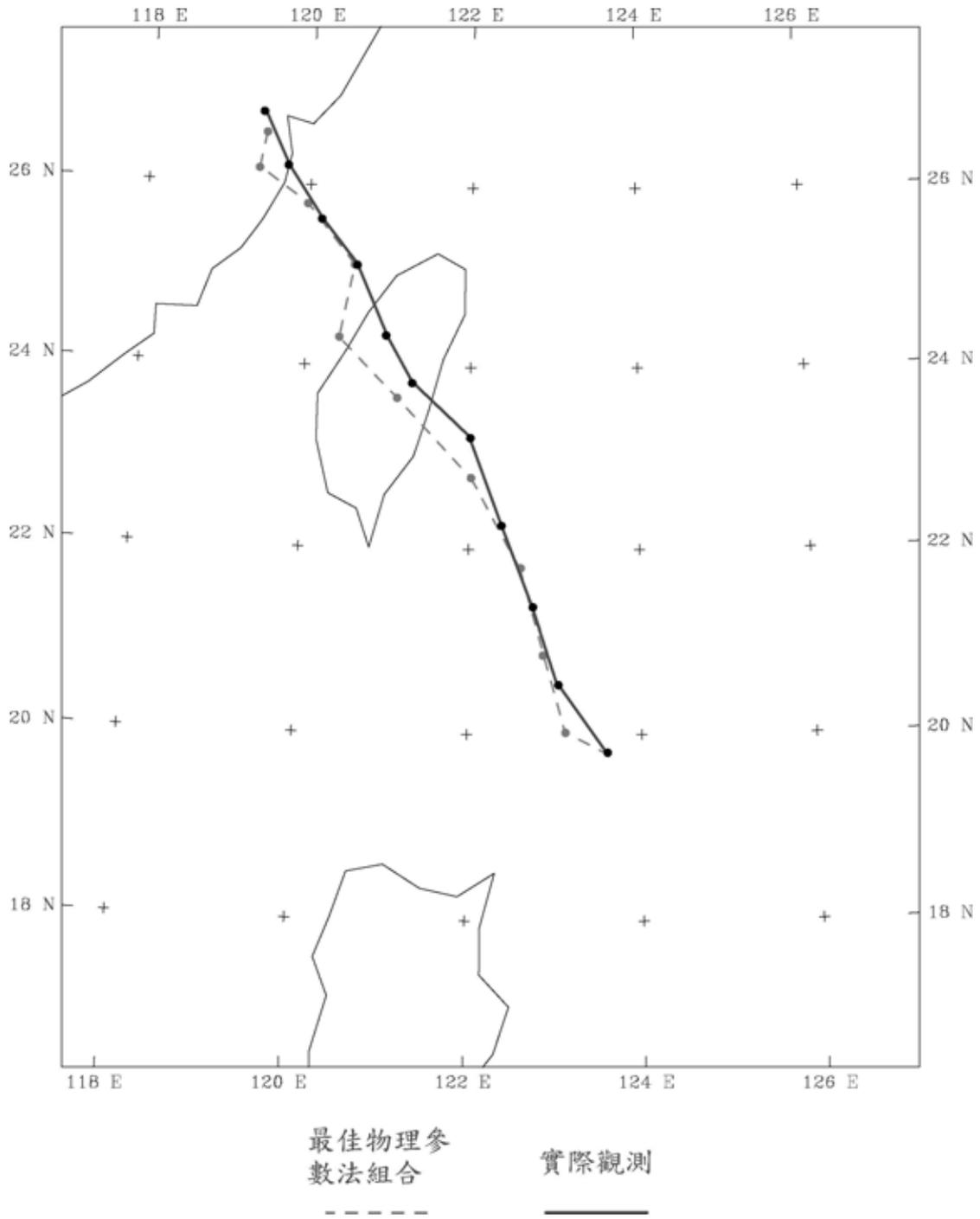


圖 39 最佳物理參數法組合實驗之 60 小時路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

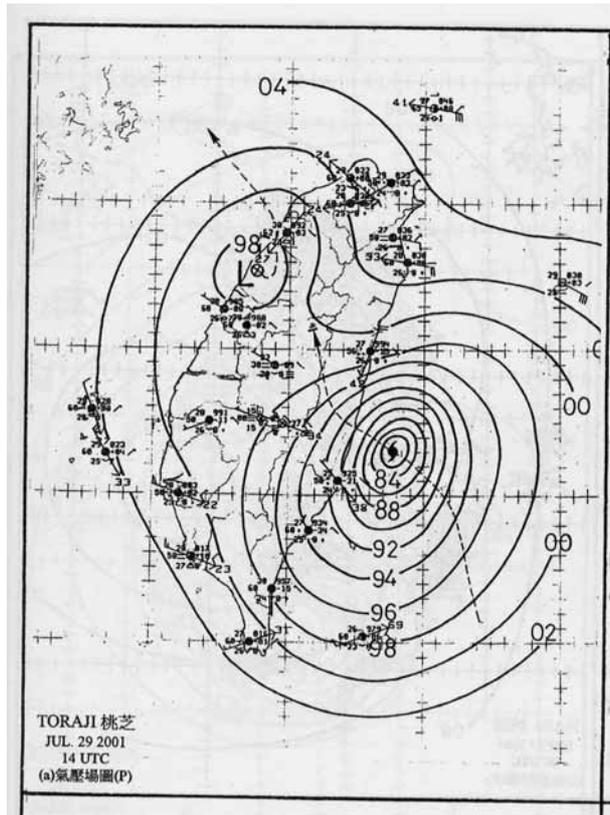


圖 40 2001 年 7 月 29 日 1400UTC 桃芝(Toraji)颱風之地面氣壓場圖。[取自王等(2001)]

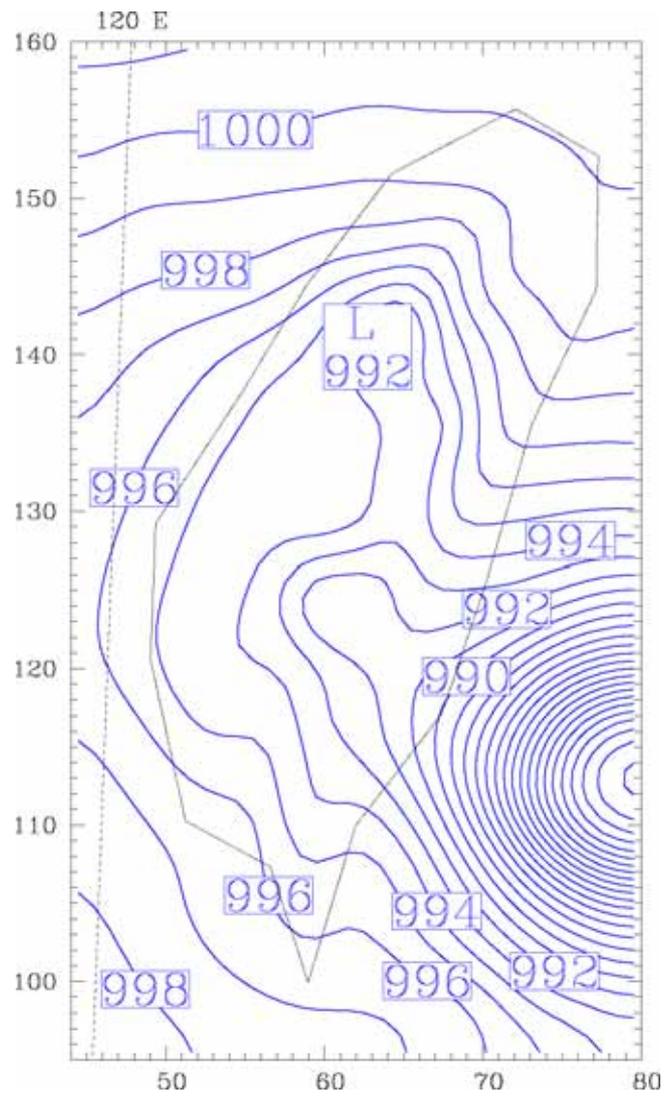


圖 41 最佳物理參數法組合實驗模擬第 24 小時台灣附近之地面氣壓圖。等值線間距為 1hPa。模擬第 24 小時即為 7 月 29 日 1200UTC，此時模擬之颱風中心位置位於台灣東南海面上。

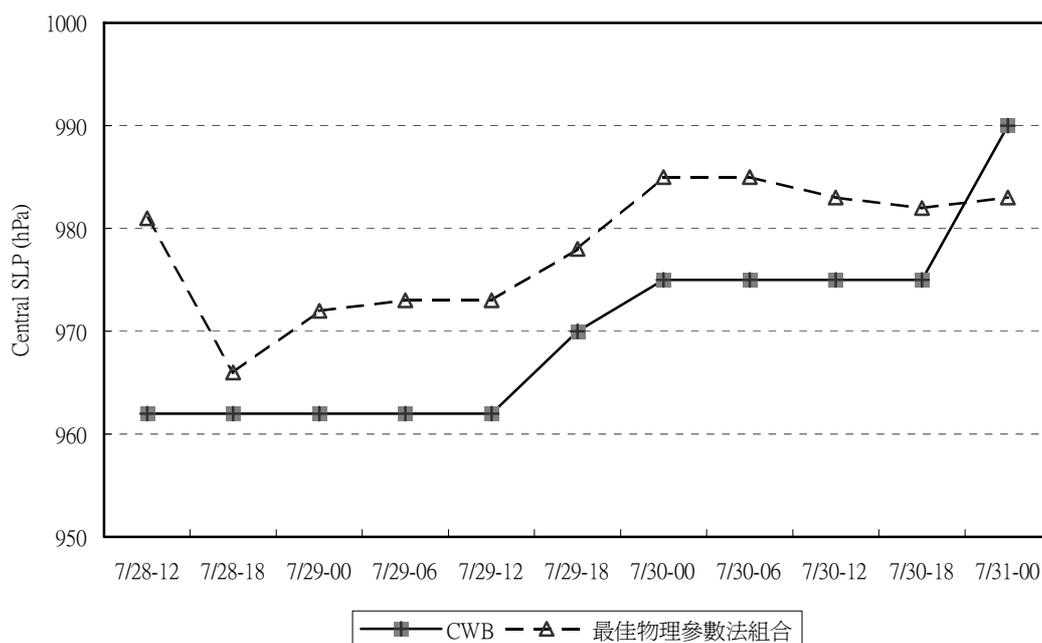


圖 42 最佳物理參數法組合實驗之中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

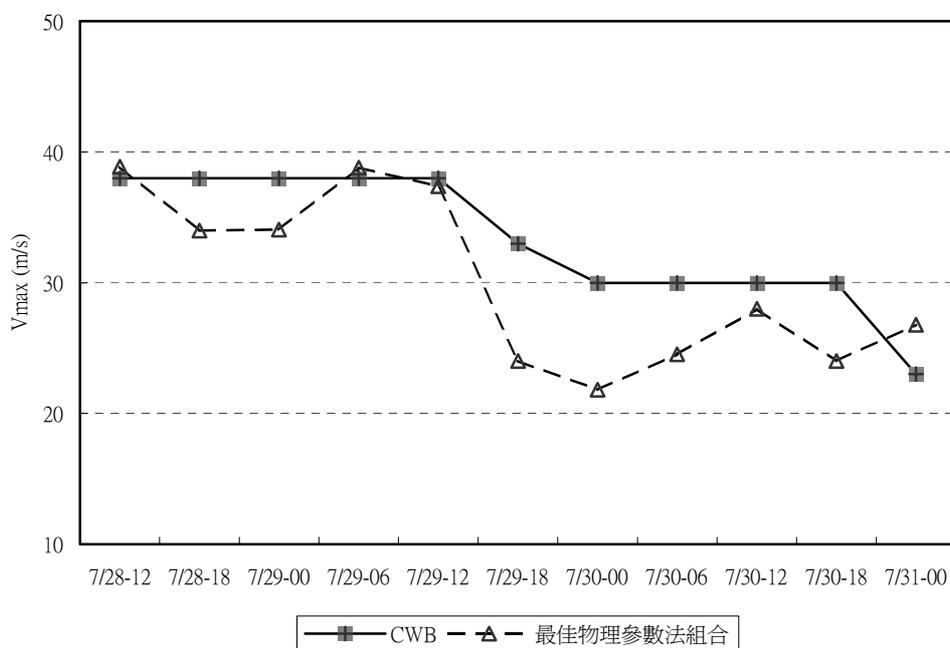


圖 43 最佳物理參數法組合實驗之最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。

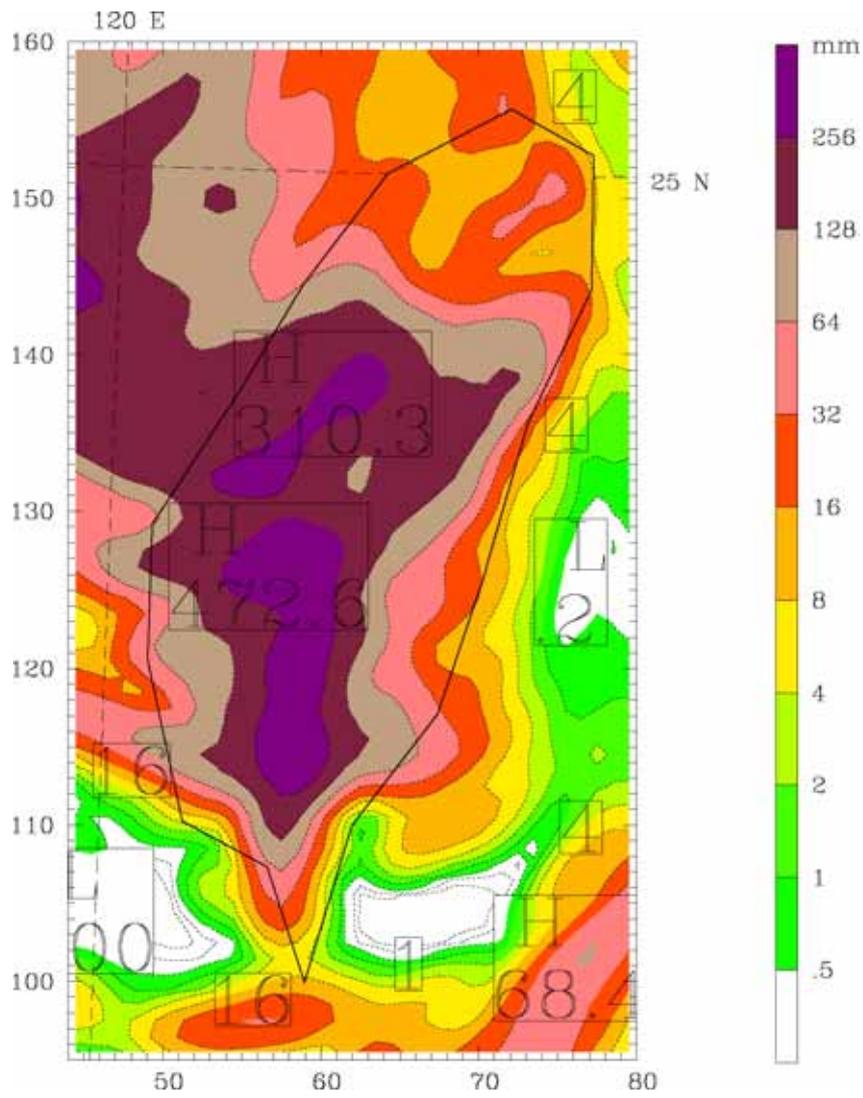


圖 44 最佳物理參數法組合實驗之 30 日 24 小時累積降雨圖(30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)。

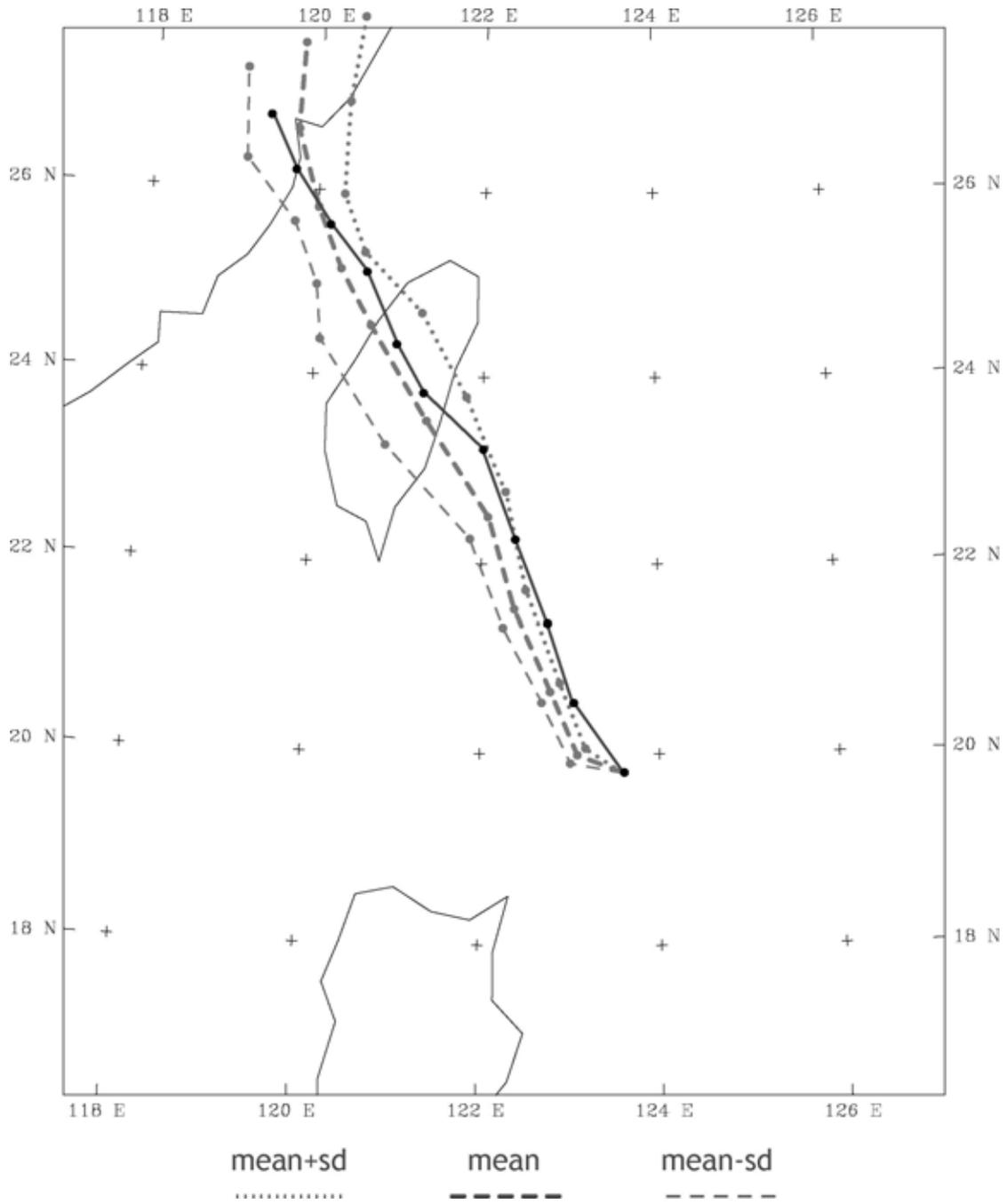


圖 45 積雲參數法實驗組之系集分析路徑圖。實線為最佳路徑。

沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

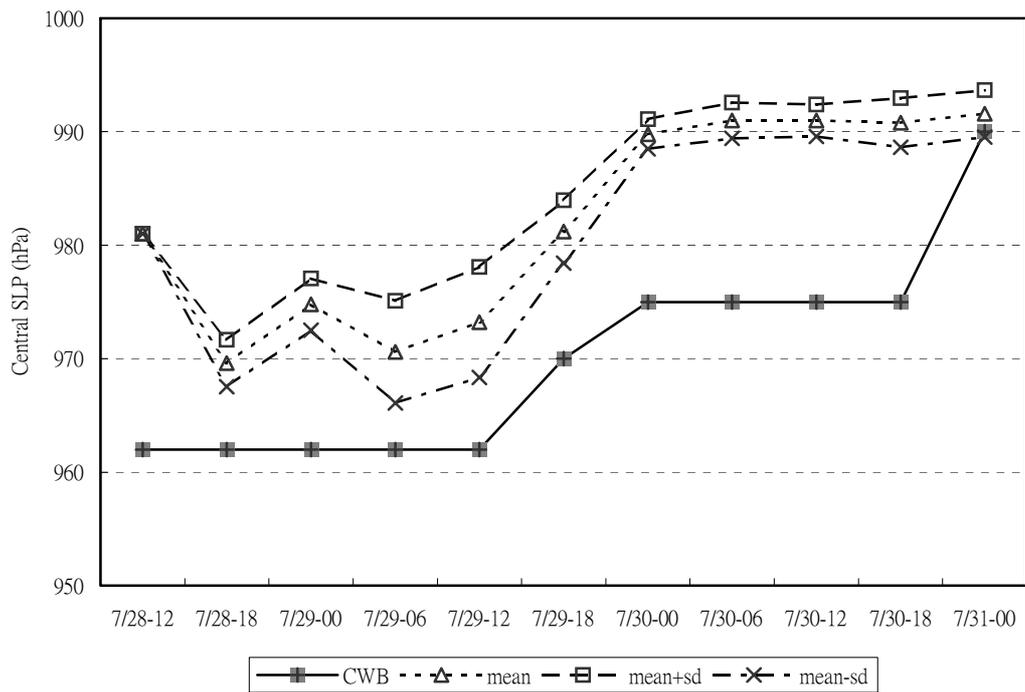


圖 46 積雲參數法實驗組之系集分析中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

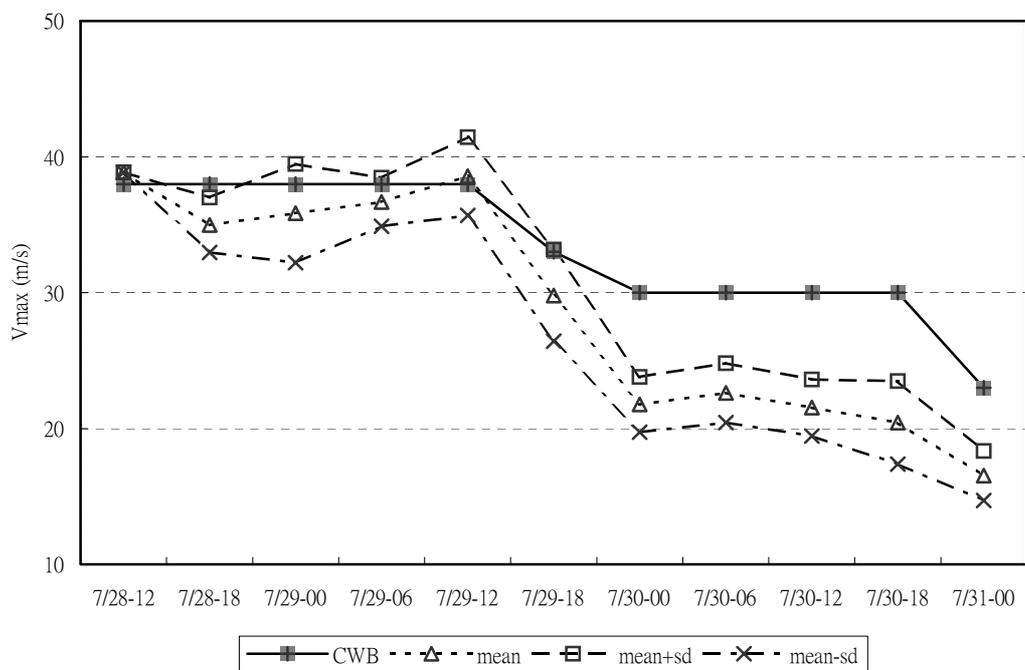
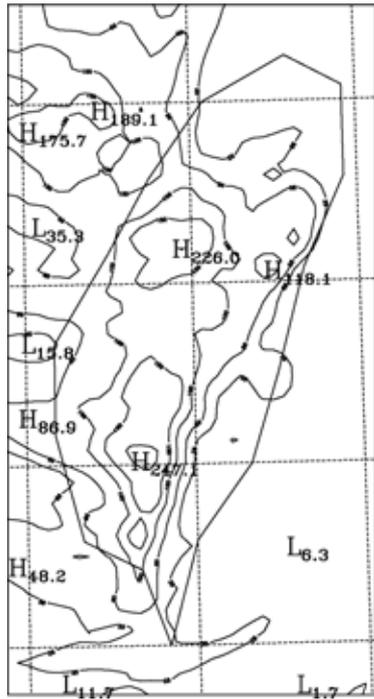
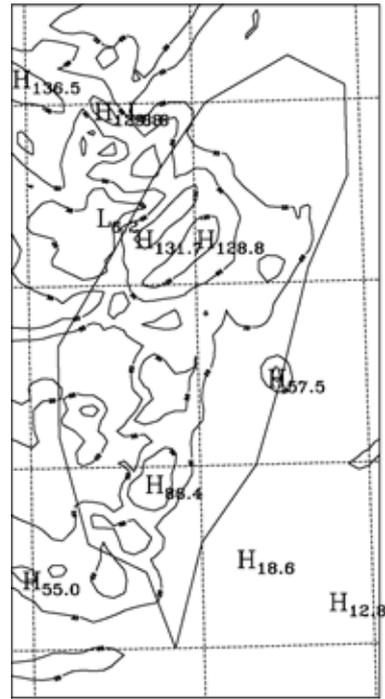


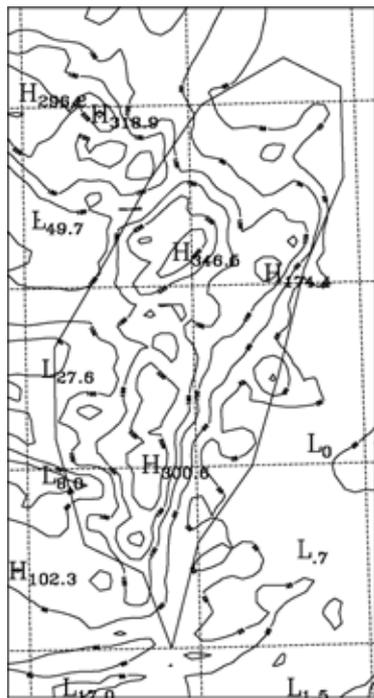
圖 47 積雲參數法實驗組之系集分析最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。



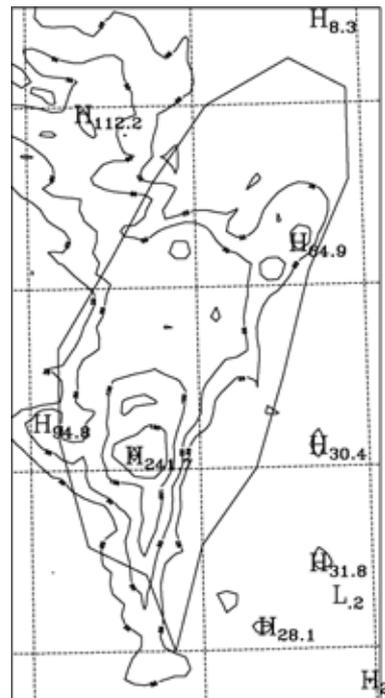
平均



標準差



平均+標準差



平均-標準差

圖 48 積雲參數法實驗組之系集分析 30 日 24 小時累積雨量圖(30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)，雨量等值線分別為 0、25、50、100、150、225、300、400、500、600 公厘。

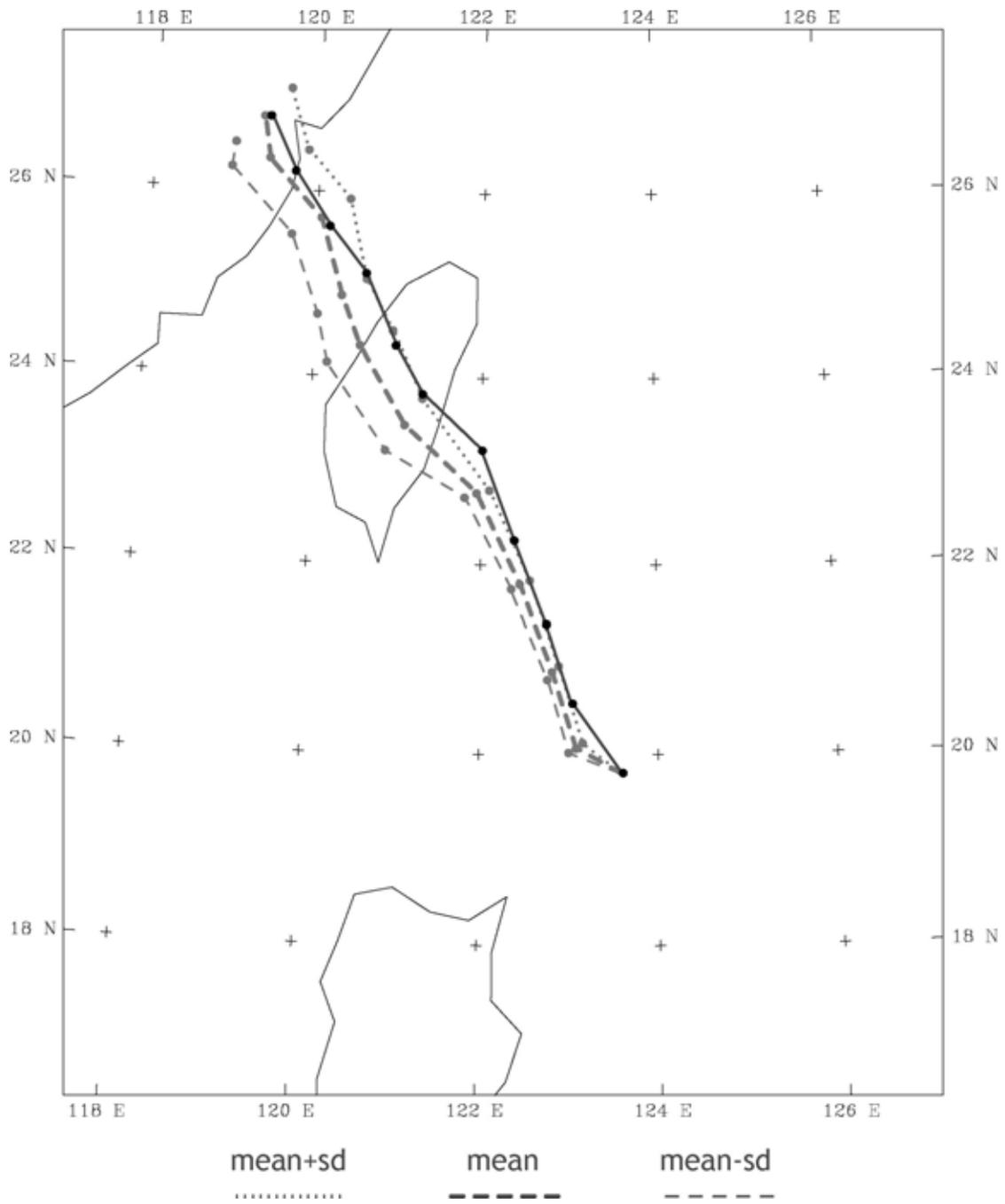


圖 49 雲物理參數法實驗組之系集分析路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

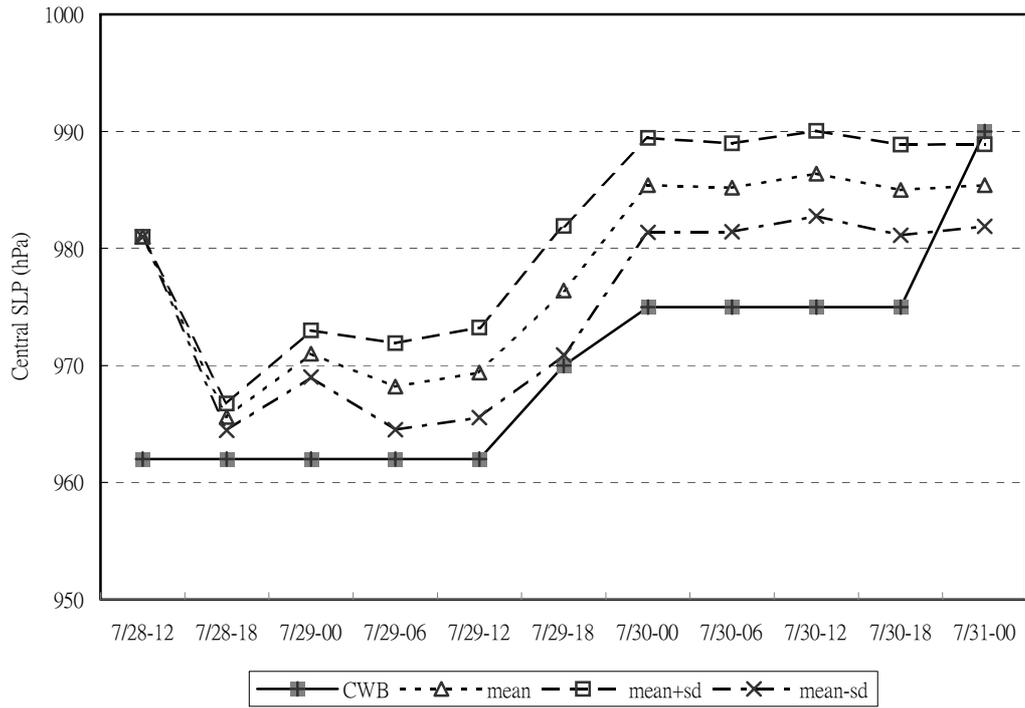


圖 50 雲物理參數法實驗組之系集分析中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

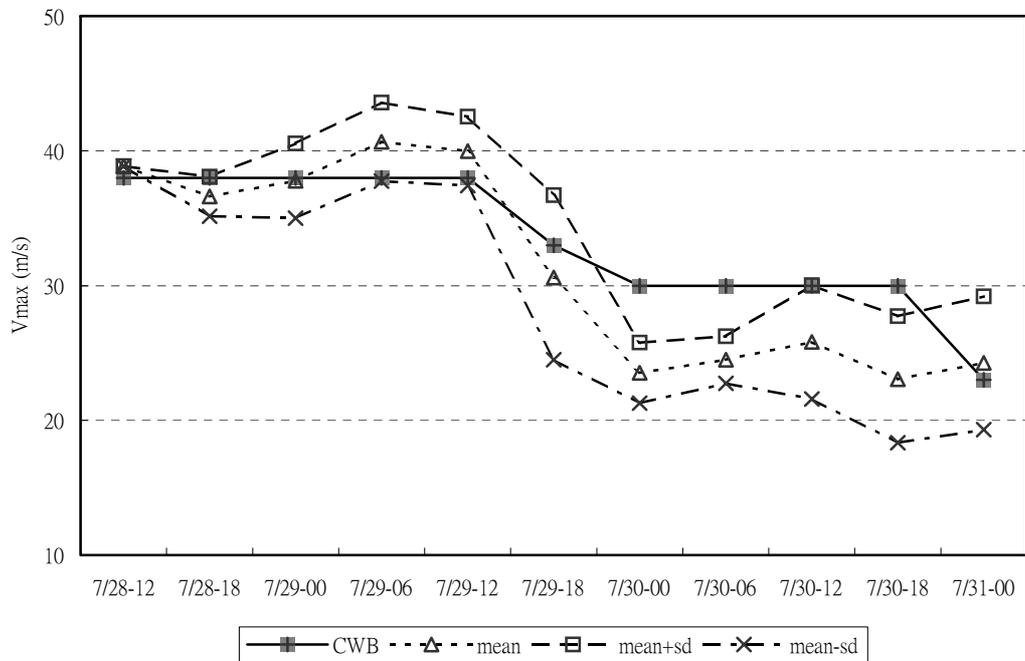
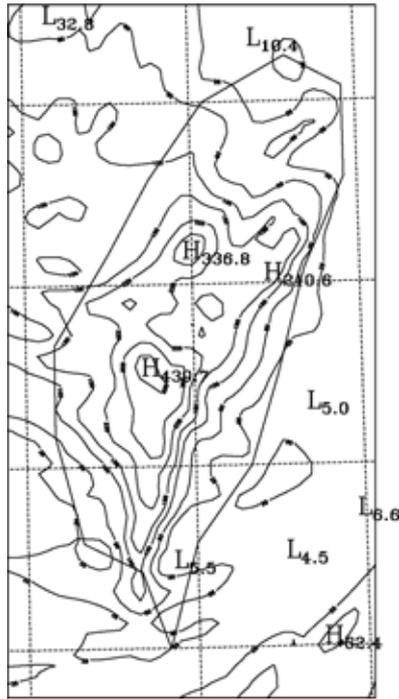
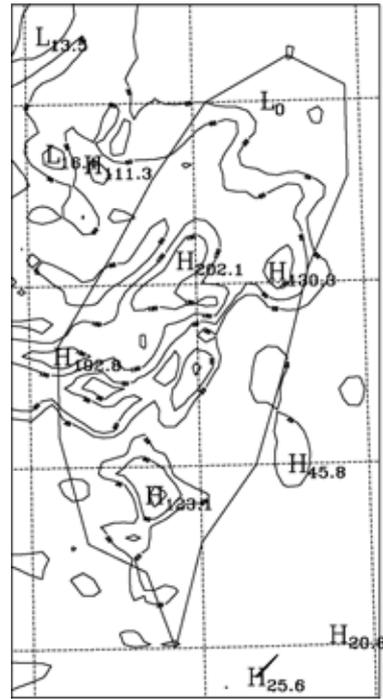


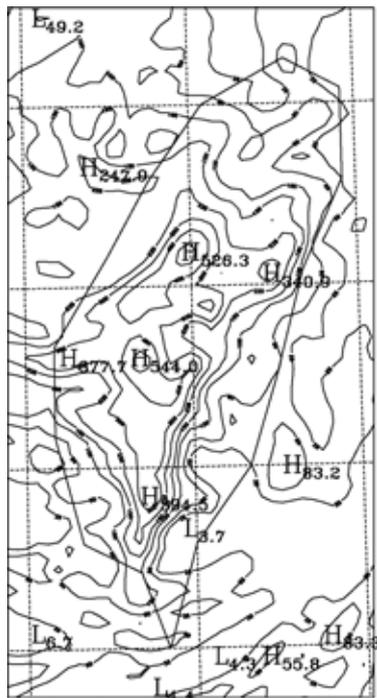
圖 51 雲物理參數法實驗組之系集分析最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。



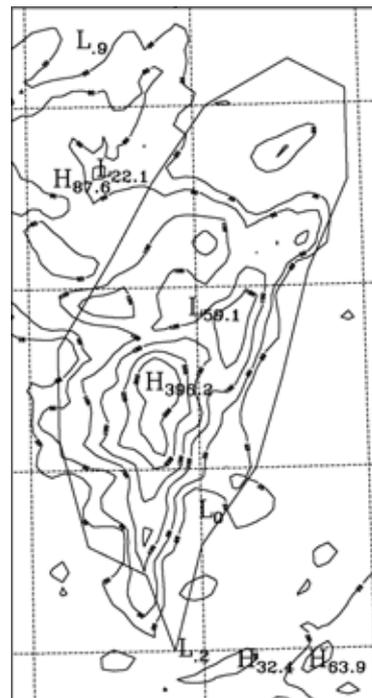
平均



標準差



平均+標準差



平均-標準差

圖 52 雲物理參數法實驗組之系集分析 30 日 24 小時累積雨量圖 (30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)，雨量等值線分別為 0、25、50、100、150、225、300、400、500、600 公厘。

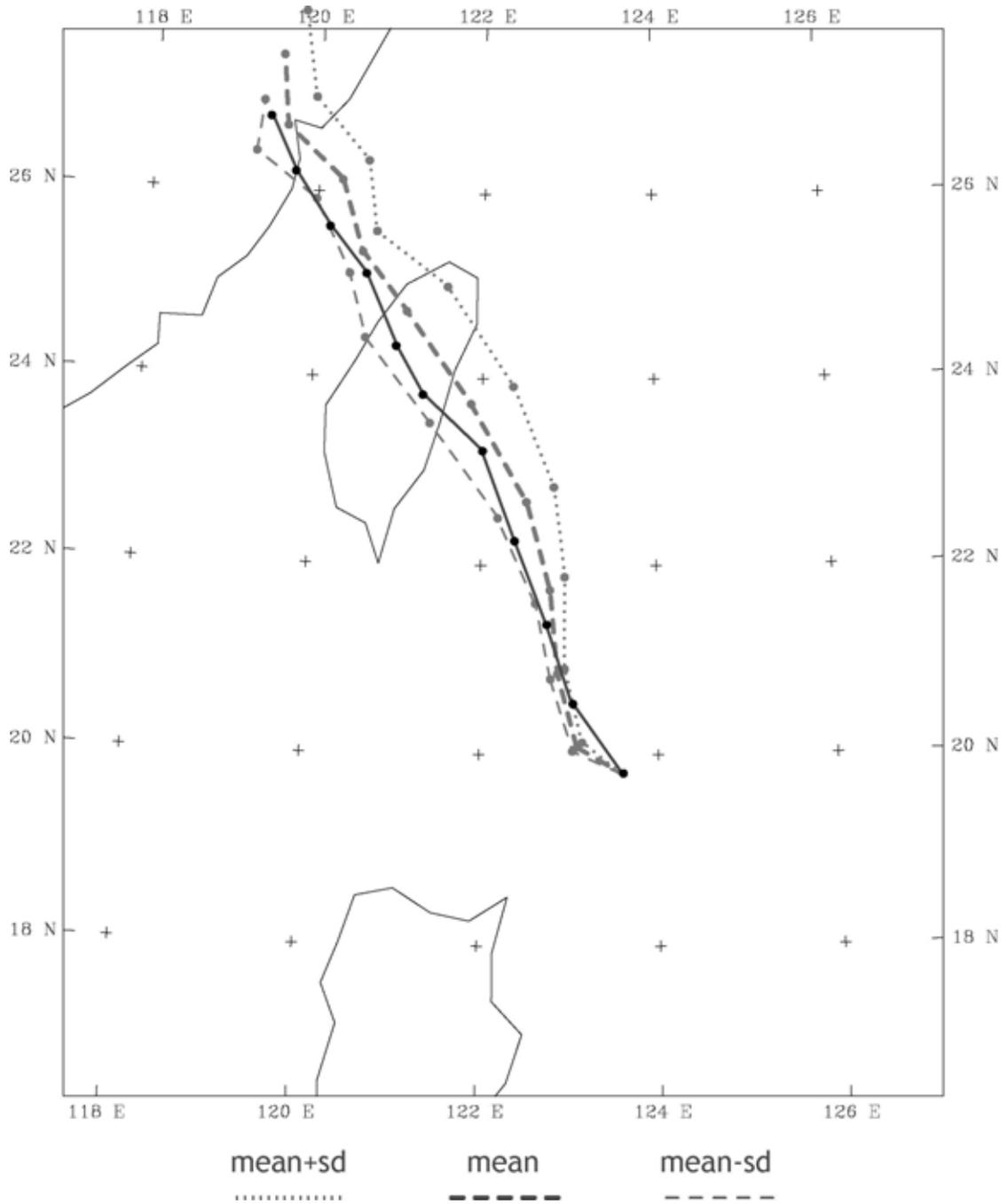


圖 53 邊界層參數法實驗組之系集分析路徑圖。實線為最佳路徑。沿著路徑圖上的圓點表示每六小時的颱風中心位置。

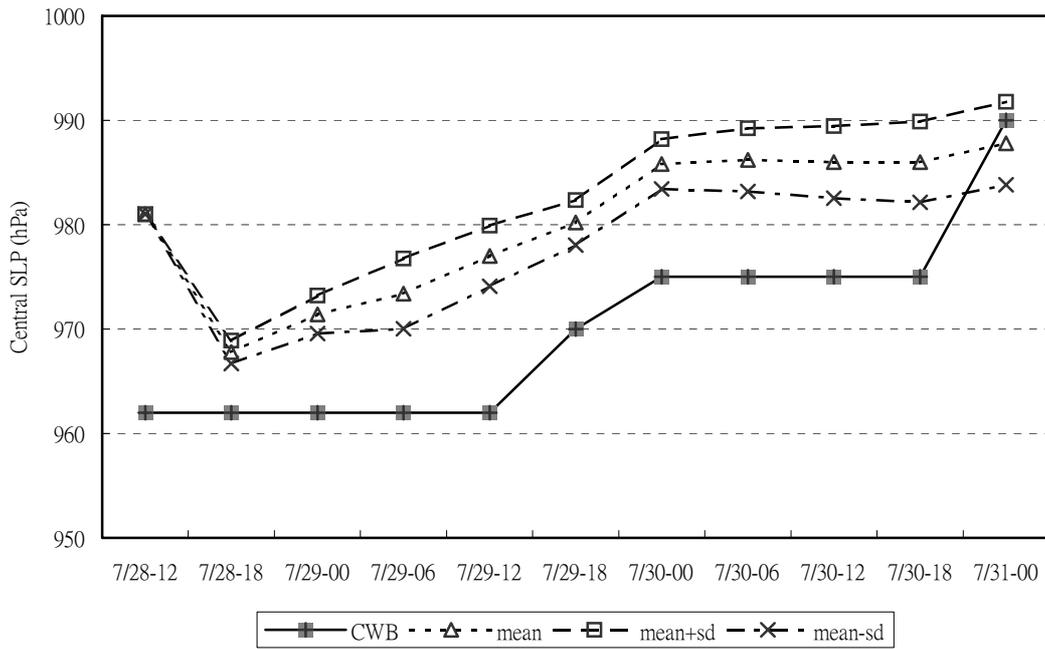


圖 54 邊界層參數法實驗組之系集分析中心氣壓時間序列圖。間格為 6 小時。

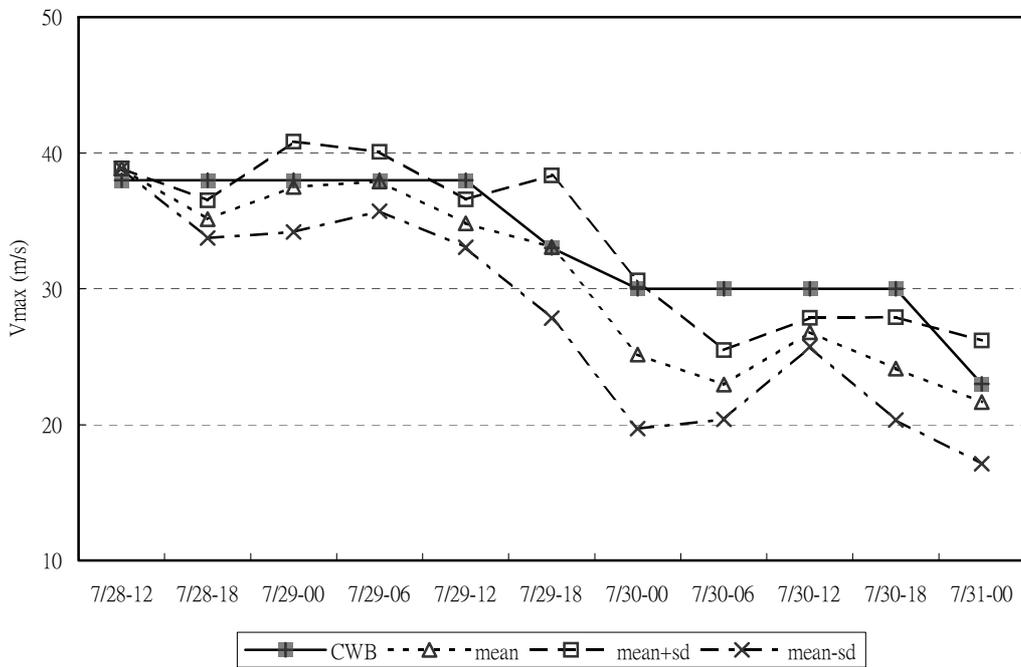
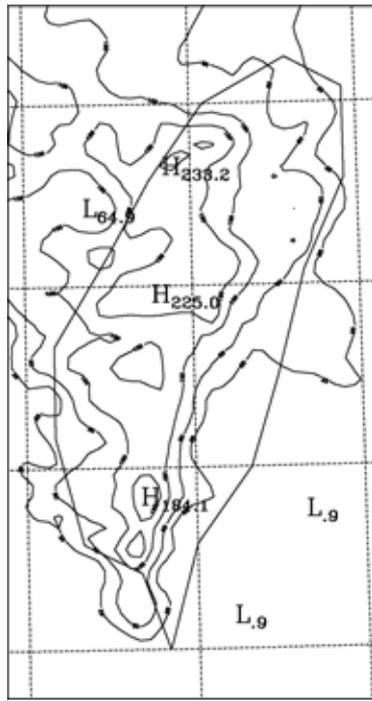
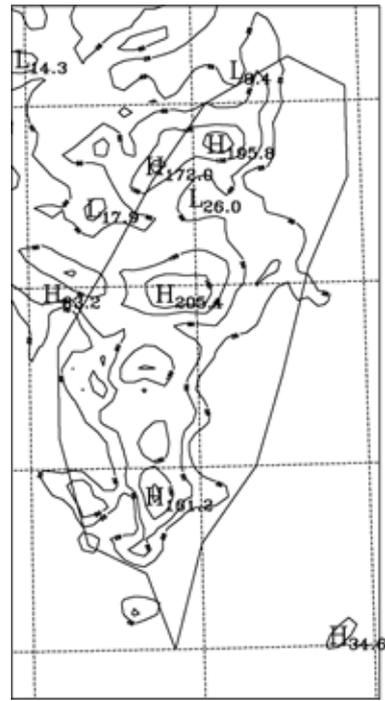


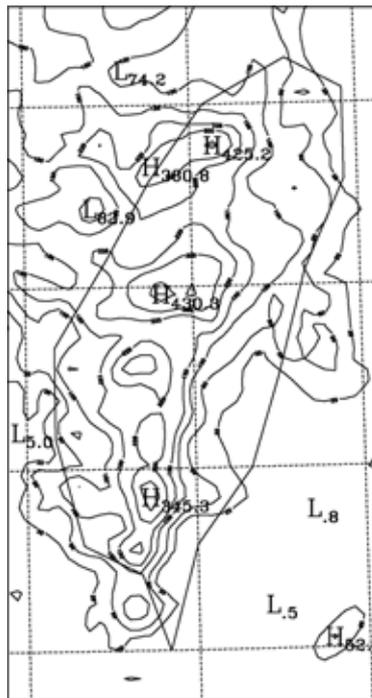
圖 55 邊界層參數法實驗組之系集分析最大風速時間序列圖。間格為 6 小時。



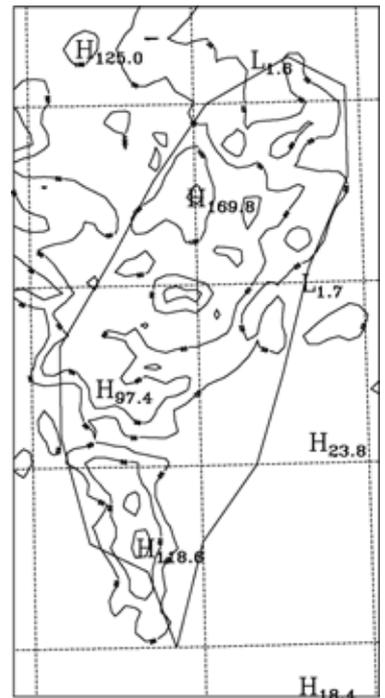
平均



標準差



平均+標準差



平均-標準差

圖 56 邊界層參數法實驗組之系集分析 30 日 24 小時累積雨量圖 (30 日 2 時到 31 日 2 時)。降雨單位為公厘(mm)，雨量等值線分別為 0、25、50、100、150、225、300、400、500、600 公厘。

表 1 聯合颱風警報中心 JTWC 所發布之桃芝颱風最佳路徑資料。

| 時間(UTC)    | 北緯<br>(度) | 東經<br>(度) | 最大風速<br>(kts) | 中心氣壓<br>(hPa) | 強度 | 最大暴風<br>半徑<br>(nm) |
|------------|-----------|-----------|---------------|---------------|----|--------------------|
| 2001072506 | 14.3      | 134.7     | 20            | 1005          | TD | 50                 |
| 2001072512 | 14.5      | 133.8     | 25            | 1002          | TD | 50                 |
| 2001072518 | 15.0      | 132.8     | 25            | 1002          | TD | 70                 |
| 2001072600 | 15.7      | 131.9     | 25            | 1002          | TD | 缺                  |
| 2001072606 | 16.2      | 130.8     | 25            | 1002          | TD | 60                 |
| 2001072612 | 16.6      | 129.6     | 25            | 1002          | TD | 50                 |
| 2001072618 | 16.8      | 128.3     | 35            | 997           | TS | 50                 |
| 2001072700 | 17.0      | 127.4     | 40            | 994           | TS | 50                 |
| 2001072706 | 17.2      | 126.8     | 50            | 987           | TS | 50                 |
| 2001072712 | 17.6      | 126.1     | 55            | 984           | TS | 45                 |
| 2001072718 | 17.8      | 125.6     | 75            | 967           | TY | 45                 |
| 2001072800 | 18.3      | 124.8     | 75            | 967           | TY | 45                 |
| 2001072806 | 19.1      | 124.2     | 90            | 954           | TY | 35                 |
| 2001072812 | 19.7      | 123.7     | 90            | 954           | TY | 35                 |
| 2001072818 | 20.5      | 123.1     | 90            | 954           | TY | 35                 |
| 2001072900 | 21.3      | 122.8     | 90            | 954           | TY | 35                 |
| 2001072906 | 22.2      | 122.4     | 90            | 954           | TY | 35                 |
| 2001072912 | 23.2      | 122.0     | 95            | 949           | TY | 35                 |
| 2001072918 | 23.8      | 121.3     | 100           | 944           | TY | 40                 |
| 2001073000 | 24.3      | 121.0     | 90            | 954           | TY | 35                 |
| 2001073006 | 25.1      | 120.6     | 75            | 967           | TY | 35                 |
| 2001073012 | 25.6      | 120.2     | 75            | 967           | TY | 35                 |
| 2001073018 | 26.2      | 119.8     | 55            | 984           | TS | 35                 |
| 2001073100 | 26.8      | 119.5     | 45            | 991           | TS | 缺                  |
| 2001073106 | 27.4      | 119.3     | 35            | 997           | TS | 缺                  |
| 2001073112 | 28.6      | 119.8     | 30            | 1000          | TD | 缺                  |

表 2 初始渦旋參數實驗組設計表。v40 實驗組為固定最大風速為 40 公尺每秒，rm50 實驗組為固定最大暴風半徑為 50 公里，rm60 實驗組為固定最大暴風半徑為 60 公里。

| 初始渦旋參數實驗組 | 最大風速 Vmax(m/s) | 最大暴風半徑 Rmax(km) |
|-----------|----------------|-----------------|
| v40       | 40             | 40              |
|           |                | 50 *            |
|           |                | 60              |
| rm50      | 30             | 50              |
|           | 40 *           |                 |
|           | 50             |                 |
| rm60      | 30             | 60              |
|           | 40             |                 |
|           | 50             |                 |

\*表示渦旋設定為公佈觀測值

表 3 物理參數法實驗組設計表。<>內為實驗代號。

| 物理參數<br>法實驗組       | 積雲參數法<br>CPS            | 雲微物理參數法<br>MP           | 邊界層參數法<br>PBL         |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 積雲參數<br>法實驗組       | Anthes-Kuo <AK>         | Simple-Ice              | MRF                   |
|                    | Grell <GR>              |                         |                       |
|                    | Kain-Fritsch <KF>       |                         |                       |
|                    | Betts-Miller <BM>       |                         |                       |
|                    | Kain-Fritsch 2<br><KF2> |                         |                       |
| 雲微物理<br>參數法實<br>驗組 | Grell                   | Warm-Rain<WR>           | MRF                   |
|                    |                         | Simple-Ice<ICE>         |                       |
|                    |                         | Mix-Phase <MP>          |                       |
|                    |                         | Goddard Graupel<br><GG> |                       |
|                    |                         | Schultz <SCH>           |                       |
| 邊界層參<br>數法實驗<br>組  | Grell                   | Goddard Graupel         | Blackadar <BD>        |
|                    |                         |                         | Burk-Thompson<br><BT> |
|                    |                         |                         | Eta M-Y <ETA>         |
|                    |                         |                         | MRF <MRF>             |
|                    |                         |                         | Pleim-Xiu <PX>        |

表 4 v40 實驗組之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr) | 6  | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 52  | 60  | 平均 |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|
| v40rm40  | 66 | 64 | 72 | 74 | 46 | 95 | 68 | 34 | 44  | 26  | 59 |
| v40rm50  | 58 | 65 | 52 | 48 | 42 | 91 | 53 | 32 | 41  | 44  | 53 |
| v40rm60  | 52 | 42 | 36 | 50 | 79 | 82 | 54 | 58 | 145 | 114 | 71 |

單位：公里

表 5 rm50 實驗組之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr) | 6  | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 52 | 60  | 平均 |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|
| v30rm50  | 57 | 73 | 79 | 78 | 63 | 37 | 52 | 9  | 64 | 22  | 53 |
| v40rm50  | 58 | 65 | 52 | 48 | 42 | 91 | 53 | 32 | 41 | 44  | 53 |
| v50rm50  | 52 | 45 | 29 | 35 | 85 | 95 | 47 | 87 | 72 | 117 | 66 |

單位：公里

表 6 rm60 實驗組之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr) | 6  | 12 | 18 | 24 | 30  | 36  | 42 | 48  | 52  | 60  | 平均 |
|----------|----|----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|
| v30rm60  | 52 | 63 | 46 | 58 | 26  | 89  | 45 | 13  | 34  | 20  | 45 |
| v40rm60  | 52 | 42 | 36 | 50 | 79  | 82  | 54 | 58  | 145 | 114 | 71 |
| v50rm60  | 52 | 54 | 28 | 46 | 116 | 174 | 97 | 122 | 118 | 99  | 91 |

單位：公里

表 7 積雲參數法實驗組之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr) | 6  | 12  | 18  | 24  | 30  | 36 | 42 | 48 | 52  | 60  | 平均  |
|----------|----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
| AK       | 65 | 72  | 76  | 57  | 35  | 45 | 25 | 32 | 110 | 161 | 68  |
| GR       | 58 | 65  | 52  | 48  | 42  | 91 | 53 | 32 | 41  | 44  | 53  |
| KF       | 79 | 103 | 116 | 139 | 109 | 85 | 36 | 50 | 120 | 176 | 101 |
| BM       | 62 | 78  | 59  | 76  | 52  | 50 | 38 | 32 | 73  | 94  | 62  |
| KF2      | 72 | 81  | 92  | 88  | 66  | 60 | 23 | 49 | 65  | 105 | 70  |

單位：公里

表 8 雲物理參數法實驗組之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr) | 6  | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 52 | 60 | 平均 |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| WR       | 56 | 49 | 62 | 65 | 64 | 15 | 54 | 72 | 72 | 76 | 59 |
| ICE      | 58 | 65 | 52 | 48 | 42 | 91 | 53 | 32 | 41 | 44 | 53 |
| MP       | 63 | 61 | 50 | 57 | 60 | 41 | 64 | 25 | 3  | 8  | 43 |
| GG       | 59 | 56 | 50 | 47 | 23 | 54 | 2  | 25 | 38 | 26 | 38 |
| SCH      | 52 | 45 | 47 | 52 | 68 | 33 | 22 | 36 | 68 | 44 | 47 |

單位：公里

表 9 邊界層參數法實驗組之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr) | 6  | 12 | 18 | 24  | 30  | 36  | 42 | 48 | 52  | 60  | 平均 |
|----------|----|----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|
| BD       | 50 | 55 | 62 | 84  | 73  | 30  | 38 | 70 | 105 | 98  | 66 |
| BT       | 53 | 66 | 95 | 123 | 103 | 66  | 36 | 93 | 68  | 139 | 84 |
| ETA      | 52 | 60 | 92 | 92  | 72  | 63  | 8  | 89 | 72  | 112 | 71 |
| MRF      | 59 | 56 | 50 | 47  | 23  | 54  | 2  | 25 | 38  | 26  | 38 |
| PX       | 61 | 53 | 84 | 114 | 135 | 128 | 75 | 77 | 69  | 83  | 88 |

單位：公里

表 10 最佳物理參數法組合實驗之路徑誤差表。

| 模擬時間(hr)      | 6  | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 52 | 60 | 平均 |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 最佳物理參<br>數法組合 | 59 | 56 | 50 | 47 | 23 | 54 | 2  | 25 | 38 | 26 | 38 |

單位：公里

表 11 積雲參數法之特性比較表

| 積雲參數法         | 動力控制         | 靜力控制                             | 反饋                                       | 淺對流 | 適合之水平解析度   |
|---------------|--------------|----------------------------------|--|-----|------------|
| Anthes-Kuo    | 對水氣輻合作垂直向積分  | 濕絕熱                              | 拋物線加熱剖面，濕化剖面為環境相對濕度的函數                   | 無   | 大於 30 公里   |
| Grell         | 準平衡假設        | 濕絕熱、考慮下衝流且無逸入現象                  | 補償下衝氣流，在雲頂與雲底有逸出現象                       | 無   | 10 ~ 30 公里 |
| Kain-Frisch   | 考慮對流可用位能     | 一維逸入逸出雲模式，考慮下衝流及冰態雲物理過程          | 補償下衝氣流，雲水和冰晶向外逸出                         | 無   | 20 ~ 30 公里 |
| Betts-Miller  | 朝對流平衡的參考剖面調整 | 參考探空的溫度場 ( $T_r$ ) 與比濕 ( $q_r$ ) | $(T - T_r) / \tau$<br>$(q - q_r) / \tau$ | 有   | 大於 30 公里   |
| Kain-Frisch 2 | 考慮對流可用位能     | 一維逸入逸出雲模式，考慮下衝流及冰態雲物理過程          | 補償下衝氣流，雲水和冰晶向外逸出                         | 有   | 20 ~ 30 公里 |

A：積雲所做的功， $\tau$ ：調整時間週期。

表 12 雲微物理參數法之特性比較表

| 雲物理<br>參數法         | 0°C 以下<br>容許液/<br>固態共存 | 考慮冰雹<br>/軟雹 | 考慮冰相<br>雲物理 | 降水物質種類                              |
|--------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| Warm Rain          | 無                      | 無           | 無           | 3( $q_v, q_c, q_r$ )                |
| Simple Ice         | 無                      | 無           | 有           | 5( $q_v, q_c, q_r, q_i, q_s$ )      |
| Mixed-Phase        | 有                      | 無           | 有           | 5( $q_v, q_c, q_r, q_i, q_s$ )      |
| Goddard<br>Graupel | 有                      | 有           | 有           | 6( $q_v, q_c, q_r, q_i, q_s, q_g$ ) |
| Schultz            | 有                      | 有           | 有           | 6( $q_v, q_c, q_r, q_i, q_s, q_g$ ) |

表 13 邊界層參數法之特性比較表

| 邊界層<br>參數法   | 邊界層垂直<br>解析度 | 預報紊流<br>動能(TKE) | 邊界層內垂<br>直混合 | 考慮逆梯度<br>垂直傳送 |
|--------------|--------------|-----------------|--------------|---------------|
| Blackadar    | 高解析度         | 無               | 局部混合         | 無             |
| Burk-Thmpson | 粗/高解析度       | 有               | 局部混合         | 有             |
| Eta M-Y      | 高解析度         | 有               | 局部混合         | 無             |
| MRF          | 高解析度         | 無               | 非局部混合        | 有             |
| Pleim-Xiu    | 高解析度         | 無               | 局部混合         | 無             |