

梅雨鋒面及其他災變天氣降雨預報之數值模擬研究

楊明仁 董坤智

中國文化大學大氣科學系

摘要

本研究針對臺灣地區的梅雨鋒面、奧托颱風(Otto)、春季降雨、夏季午後對流、秋季冷鋒、及冬季寒潮暴發等六種災變天氣個案，使用 MM5 數值模式，透過技術得分（預兆得分、偏離得分、前估及後符等）及其他統計參數的比較，評估 Anthes-Kuo、Betts-Miller、Grell 及 Kain-Fritsch 積雲參數法在這些個案之降雨區域及降雨量的預報表現。

由 MM5 模式在 45 公里網域的綜觀環境預報場得知，MM5 模式對臺灣地區常見的豪大雨天氣系統之綜觀環境場有不錯的預報能力。在降水預報方面，Anthes-Kuo 及 Kain-Fritsch 參數法傾向於產生較弱的降雨強度與過大的降雨區域，Betts-Miller 參數法則產生太強的降雨強度，而考慮濕下衝氣流並使用準平衡閉合假設的 Grell 參數法在總體上有較佳的表現。

MM5 模式於降雨區域預報方面，除了暖季（春雨和夏季午後對流）個案以外，模式對臺灣地區的 6 小時累積降雨有相當好的預報能力（0.25 mm 門檻的預兆得分在 0.4 以上）。而且除了暖季及寒潮暴發個案之外，系集預報對發生降雨的區域有最好的掌握能力。在所有參數法當中，Anthes-Kuo 參數法傾向產生最大的假降雨面積，Betts-Miller 參數法則產生最小的假降雨面積，但降雨強度較大。在降雨量預報方面，除了春雨個案之外，模式皆低估降雨量，特別是對豪雨及午後對流個案低估情形更為明顯。在總降雨量方面，Grell 參數法於六個案中的四個案有最好的預報能力；在降雨極值方面，Betts-Miller 參數法於六個案中的三個案有最好的表現。研究發現，沒有任何一個積雲參數法可在所有的個案及技術得分方面有最好的表現，個別積雲參數法在不同個案間的降雨預報表現則有著明顯的差異。

1. 前言

在數值天氣預報中，降水一直被認為是最困難的預報參數之一。對於臺灣地區而言，模式降水預報的困難主要存在四方面。第一，大氣的運動為非線性的，而且產生降雨的物理過程對於環境之熱力場、風場及濕度場有高度的敏感性，以及目前吾人對於降水過程的理解仍然是十分有限。第二，臺灣地區周圍廣大洋面上觀測資料的缺乏，對於模式初始條件之準確度造成相當限制。第三，中尺度數值模式中對於可解析尺度和次網格式度之降水物理過程的處理，主要由雲微物理參數法及積雲參數法來擔任。但是，Arakawa (1993) 指出積雲參數法目前並沒有普遍概念上的架構存在，而且由於各種積雲參數法其本身的閉合假設(closure assumption)並不相同，所以當任何一種積雲參數法被應用在異於原始開發者所測試的大氣環境（即於不同的天氣形態及地區）時，它並不一定適用。第四，臺灣地形以中央山脈為主，有許多超過 3000 公尺以上的高山存在，故因地形的舉升作用及熱力作用所導致的局部環流相當顯著，但是除非有相當高的解析度，觀測上很難捕捉到這些中小尺度的天氣現象，數值模式也很難正確地模擬出來。

儘管降水預報存在著這麼多困難，然而基於社會需求，氣象作業單位提供準確的降雨預報仍是極為必要的。由於降雨預報不但影響著政府行政（特

別是防災及水利）體系的運作、民間經濟及社會活動的進行，甚至與民眾的生活作息密切相關，因此定量降水預報(Quantitative Precipitation Forecast; QPF)被美國天氣研究計畫(U.S. Weather Research Program)認定為最優先的研究主題之一(Fritsch et al. 1998)，也是我國的臺灣天氣研究計畫(Taiwan Weather Research Program; TWRP)的其中一項重要研究課題。

本研究針對臺灣地區常見之六種產生降雨的災變天氣系統，探討積雲參數法對於臺灣地區降雨數值模擬之敏感度，藉以瞭解積雲參數法的系統性特徵，以期在未來於臺灣地區之降雨預報上能有更好的表現。具體而言，本研究主要探討下列四個問題：第一，在不同的綜觀天氣條件下，中尺度數值模式中各種積雲參數法的降水模擬結果為何？第二，在不同的綜觀環境條件下，同一種積雲參數法的降水預報結果是否有一致或系統性的誤差？第三，對於原本設計使用於大尺度模式（網格式距大於 100 公里）的積雲參數法，當其被應用在中尺度數值模式時，會出現什麼樣的問題？第四，應用系集預報技術，可否提高降水預報的準確度？

2. 研究方法與資料來源

為了瞭解積雲參數法對於臺灣地區降雨數值模擬之敏感度情形，本研究共比較四個積雲參數法，各以水平網格式距 45 公里及 15 公里的巢狀網

格架構，對六個降雨個案做數值模擬測試。數值模式則使用美國賓州州立大學(Penn State University; PSU)與美國國家大氣科學研究中心(Nation Center for Atmospheric Research; NCAR)所共同合作發展出的第五代中尺度非靜力模式 PSU-NCAR MM5。本研究先行校驗各積雲參數法所模擬的綜觀天氣環境場，以確定 MM5 模式對產生降雨個案的綜觀環境有相當的模擬能力，然後再評估其降雨的面積分佈及其總量。

本研究選擇了四個較常用的積雲參數法，分別是 Anthes-Kuo 積雲參數法(AK; Anthes 1977)、Betts-Miller 積雲參數法(BM; Betts and Miller 1993)、Grell 積雲參數法(GR; Grell 1993)、Kain-Fritsch 積雲參數法(KF; Kain and Fritsch 1993)。選擇這四個積雲參數法是基於尺度考慮、閉合假設(closure assumption)的代表性與在數值模式中被使用的普遍性，以涵蓋一定範圍內的積雲參數法的複雜性和物理假設。

用於證實模式模擬結果的觀測資料，包含 1998 年 8 月 4-5 日、8 月 27-29 日、10 月 6-7 日、及 1999 年 1 月 11-12 日、2 月 18-19 日、5 月 27-28 日之中央氣象局的地面天氣圖，以及 850 hpa 高空圖、紅外線東亞衛星雲圖和臺灣地區的 343 個自動雨量站之雨量資料。

由於自動雨量站的空間分佈並不規則，而模式網格點所在的地理位置上，並不一定有觀測的降雨資料(圖 1)。因此為了能夠對模式在網格點上的預報降雨做校驗，本論文研究應用 Cressman (1959) 所提出的客觀分析方法，將不規則的自動雨量站降雨資料內插到網格間距 15 公里的 MM5 網域規則網格點上，以代表在網格點位置的觀測降雨量，藉以與 MM5 模式在網格點的預報降雨量做比較(Chien et al. 2001)。

本研究的降水預報評估重點放在 MM5 模式每 6 小時的累積降雨預報上。評估 MM5 模式於臺灣地區的降雨區域及降雨量之模擬結果，藉以瞭解積雲參數法對於臺灣地區降雨數值模擬之敏感度、特徵及系統性誤差情形。首先，為了確保 MM5 模式有適當能力去模擬降水事件發生時的綜觀尺度環境場，本研究比較模擬的預報場與觀測資料。其次，利用統計的技術得分，依設定的門檻值對模式的降水預報做評估。在降雨區域的預報校驗方面，使用預兆得分(threat score; TS)、預報偏離得分(bias score)、前估(prefiguration)、後符(postagreement)及假降雨個數等，來評估模式的臺灣地區降雨區域預報能力。在降雨量的預報校驗方面，則使用平均相對誤差、平均相對誤差百分比、平均絕對誤差、平均絕對誤差百分比、降雨總值百分比及降雨極值百分比等，來評估模式對於臺灣地區的累積雨量之預報能力。

3. 降水個案

臺灣地區處於歐亞大陸與太平洋之交接地帶，屬於副熱帶型氣候；在天氣學上位處於熱帶和中緯度系統的交互影響區域，故天氣變化十分顯著。又因為中央山脈地形山嶽的高聳與其分布的複雜，使得因地形抬升及局部熱力作用形成的降雨發生十分頻繁。大體而言，臺灣地區一年中主要天氣型態在春季為春雨型鋒面(變化大，較難掌握)；在梅雨季為滯留型梅雨鋒面；在夏季為午後熱雷雨與颱風；秋季則偶有冷高壓或伴隨熱帶低壓的鋒面系統；在冬季為寒潮暴發、東北季風型鋒面等。故針對臺灣地區發生降雨的主要災變天氣型態，本論文研究共選取了六個降雨個案(見表 1)，分別為春季鋒面降雨、夏季山區午後對流、秋季冷鋒、冬季寒潮暴發、奧托颱風(Otto)與梅雨個案。

4. 模式架構與實驗設計

MM5 模式為三維的中尺度數值模式(Grell et al. 1994)，具有可移動多重巢狀網格的功能，考慮非靜力平衡作用，並提供許多不同的物理參數化方法選擇，包括降水的物理過程(cumulus scheme 及 microphysics scheme)、地表能量收支(surface energy budget)、邊界層(planetary boundary layer)過程和大氣輻射過程(radiation)等。本研究所執行的非靜力 MM5 模式為 2.11 版，使用水平網格間距為 45 公里與 15 公里的兩層巢狀網格(圖 2)，其網格點數分別為 71x 81 及 91x 91；粗網域涵蓋整個東亞地區，細網域涵蓋大陸華南地區及臺灣本島，垂直 σ 座標共分 27 層。邊界層物理的處理選用 Blackadar 行星邊界層參數法(Blackadar 1979)；大氣輻射過程的處理則選用 Dudhia (1989)參數法，其考慮了雲和大氣間長短波的交互影響及地表的輻射通量變化。根據 Yang et al. (2000) 的研究發現，在 15 公里的水平解析度下不同的雲微物理參數法之選用對降雨的影響不大；因此為了計算簡便並考慮一定的冰態雲物理過程，在此選用 Simple Ice 參數法(Dudhia 1989)。所有的個案皆積分 36 小時(個案的積分期間與此期間內個案的降雨時期請見表 1)，初始場皆為中央氣象局全球模式的分析場，邊界條件為中央氣象局全球模式的預報場，而海平面溫度在整個積分期間則維持一定。

在積雲參數法方面，除了所選的四個積雲參數法各分為一組外，又另對四個積雲參數法所得到的網格點降水量做算術平均，將所得到的平均降雨資料另歸為一組(系集預報組; AG)，藉以瞭解模式積雲參數法系集預報對定量降雨預報的能力，因此共有五組參數法實驗。

5. 降水預報結果

MM5 模式對於此六個個案的綜觀環境具備相當程度的預報能力(圖略)，因此我們進一步討論

15 公里 MM5 模式之各組實驗於臺灣地區的降水預報情形。基於篇幅限制，在此僅討論主要結果，細部內容請見 Yang and Tung (2001)。

5.1 降雨面積的預報校驗

- 除了暖季個案（春雨和午後對流）外，MM5 模式對臺灣地區的 6 小時累積降雨區域預報有相當好的預兆得分（一般而言 $TS > 0.4$ ；見圖 3）。
- MM5 模式對冷季個案（寒潮暴發與秋季冷鋒）的預兆得分也比對暖季個案（春雨和午後對流）的預兆得分高（圖 3）。
- 除在暖季（春雨和午後對流）與寒潮暴發個案以外，系集預報組（AG）對於降雨的發生機率預報（即在 0.25 毫米的門檻）有最好的表現（圖 3）。
- 在所有 6 個個案中，AK 產生最多的假降雨個數，BM 則有最少的假降雨個數（表 2）。
- AK 及 AG 傾向預報較大的降雨區域面積，BM 則傾向預報較小的降雨區域面積，但強度較大。
- MM5 模式通常傾向於低估豪雨系統的降雨區域面積，及高估降雨較弱天氣系統的降雨面積。
- MM5 模式對豪雨（梅雨鋒面及奧托颱風）個案的後符得分比前估得分要高。
- 同一積雲參數法在 6 個降雨個案間的行爲有很明顯的差異；而所評估的 4 個積雲參數法中，並沒有任一個可在各項統計校驗參數上皆勝過其他 3 個積雲參數法。

5.2 降雨量的預報校驗

- 固定使用任一種積雲參數法而比較不同天氣型態下的降雨平均相對誤差情形時，則 GR 對奧托颱風個案有最好的準確度，KF 對寒潮暴發個案有最好的準確度，AK、BM 與 AG 則對梅雨鋒面有較佳預報（表 3）。
- 除了春雨個案外，MM5 模式皆低估降雨量，特別是對豪雨個案（颱風與梅雨鋒面）及夏季山區午後對流個案其低估情形更爲顯著（表 3 及表 4）。
- 在總降雨量預報上，GR 對 6 個案中之 4 個案（寒潮暴發、春雨、颱風與梅雨鋒面）有最好的預報能力；AK 對午後對流有最好的預報能力；BM 對秋季冷鋒有最好的預報能力（表 5）。
- 在降雨極值預報上，BM 在 6 個案中之 3 個案（夏季午後對流、秋季冷鋒春雨、及颱風）有最好的表現（表 6）。
- 固定使用任一種積雲參數法而比較不同天氣型態的降雨極值預報能力，則 AK 對春雨有最好的表現，GR 對秋季冷鋒有最好的表現，BM 與 AG 對颱風有最好的預報能力，KF 對梅雨鋒面有最好的預報能力（表 6）。

6. 結論

綜合以上討論，本研究的主要結論如下：

- 除了對暖季個案以外，四種積雲參數法及系集預報組普遍對於 6 小時累積降雨量有很好的預報能力，即使把門檻值提高時仍能有一定程度的預報能力。如前人研究（Wang and Seaman 1997）所預期地，四種積雲參數法及系集預報組的預報能力對冷季個案比暖季個案要好，且對暖季個案的預報能力在不同實驗組間有顯著差異。模式傾向於高估小雨的降雨面積但低估豪雨的降雨量。
- 研究發現，使用這四種積雲參數法及系集預報組時會有一些系統性特徵出現。雖然系集預報組在降雨面積預報之預兆得分方面有很好的表現，但其傾向於高估小雨的降雨區域。普遍而言，在暖季的個案中，Anthes-Kuo 積雲參數法對於小雨的降雨區域和最大降雨量有較好的預報能力，但是傾向於高估降雨區域面積。
- Betts-Miller 積雲參數法傾向於產生較強的降雨，故於高門檻值仍能有一定的預報得分，而對冷季的降雨總量掌握能力較佳。Betts-Miller 積雲參數法在所有個案中有最少的假降雨個數，但其傾向於低估降雨區域面積。
- 對冷季個案而言，Kain-Fritsch 積雲參數法在降雨面積上有最好的預報能力，且對寒潮暴發個案在降雨區域的準確性及降雨量的絕對誤差上的表現也明顯較其它實驗組表現要好，但對其它個案的表現卻不理想。
- 對梅雨及颱風個案而言，Grell 積雲參數法相對其它實驗組有較好的表現，且 GR 積雲參數法也在降雨總量上有較好的表現。

綜合言之，如何改善數值模式的定量降雨預報，仍然是一個科學上極具有挑戰性、且作業上十分困難的問題。同一積雲參數法在六個降雨個案間的行爲有很明顯的差異，而被評估的四個積雲參數法中，並沒有任一個可在各項統計校驗參數上皆勝過其他三個積雲參數法。考慮濕下衝流且閉合假設使用準平衡假定的 Grell 積雲參數法，應用於臺灣地區豪大雨系統（如梅雨鋒面及颱風）的降水預報時，可能具若干優勢。而綜合四種積雲參數法降雨預報而成的系集預報，亦可相當程度提高降雨發生機率之準確度。最後，吾人仍需進行更多研究，以進一步瞭解積雲參數法與數值模式的其它部份間之相互影響情形。

致謝

本研究主要依據董坤智先生的碩士論文研究成果，在此感謝周仲島教授、林沛練教授、及簡芳

菁教授的指教，劉清煌教授、丘台光主任、王時鼎顧問、鄧仁星博士提供及協助處理觀測資料，在此一併致謝。本研究由國科會計畫 NSC 90-2111-M-034-006-AP4 及 NSC 90-2625-Z-034-002 支持，電腦資源由中國文化大學大氣科學系提供。

參考文獻

- Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 270–286.
- Arakawa, A., 1993: Closure assumptions in the cumulus parameterization problem. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr.*, No. 46, Amer. Meteor. Soc., 1–15.
- Betts A. K., and M. J. Miller, 1993: The Betts–Miller scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr.*, No. 46, Amer. Meteor. Soc., 107–121.
- Blackadar, A. K., 1979: High resolution models of the planetary boundary layer. *Advances in Environmental Sciences and Engineering*. Vol. 1, Pfafflin and Ziegler, Eds, Gordon and Breach, 50-85.
- Bougeault, P., and J. F. Geleyn, 1989: Some problems of closure assumption and scale dependency in the parameterization of moist deep convection for numerical weather prediction. *Meteor. Atmos. Phys.*, **40**, 123–135.
- Chien, F.-C., Y.-H. Kuo, and M.-J. Yang, 2001: Precipitation forecast of the MM5 in Taiwan area during the 1998 Mei-Yu season. *Wea. Forecasting*, submitted.
- Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **87**, 367-374.
- 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.
- Fritsch, J. M., and co-authors, 1998: Quantitative precipitation forecasting: report of the eighth prospectus development team, U.S. Weather Research Program. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 285-299.
- Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764–787.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-3981STR, 138 pp.
- 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.
- Wang, W., and N. L. Seaman, 1997: A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 252-278.
- Yang, M.-J., and Q.-C. Tung, 2001: Rainfall forecast of cumulus parameterization schemes in the Taiwan area. *Wea. Forecasting*, submitted.
- Yang, M.-J., F.-C. Chien, and M.-D. Cheng, 2000: Precipitation Parameterization in a Simulated Mei-Yu Front. *Terr., Atmos., and Oceanic Sci.*, **11**, 393-422.

表 1：個案的積分期間及此期間內個案的降雨時期。

個案	積分期間	降雨時期
春雨	1999/2/18 00Z ~ 2/19 12Z	1999/2/18 06Z ~ 2/19 12Z
午後對流	1998/8/27 12Z ~ 8/29 00Z	1998/8/27 12Z ~ 8/29 00Z
秋季冷鋒	1998/10/6 00Z ~ 10/7 12Z	1998/10/6 00Z ~ 10/7 12Z
寒潮暴發	1999/1/11 00Z ~ 1/12 12Z	1999/1/11 00Z ~ 1/12 12Z
梅雨鋒面	1999/5/27 00Z ~ 5/28 12Z	1999/5/27 00Z ~ 5/28 12Z
奧托颱風	1998/8/4 00Z ~ 8/5 12Z	1998/8/4 00Z ~ 8/5 12Z

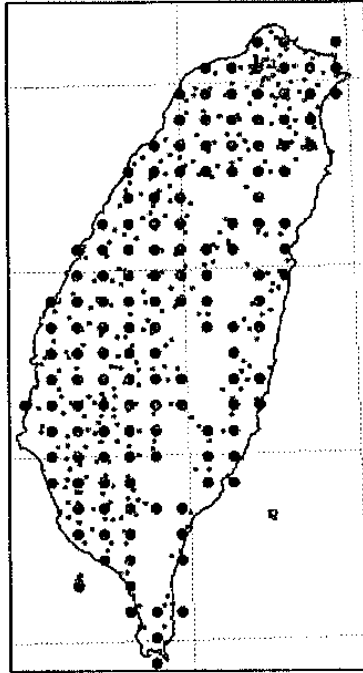


圖1：小圓點為客觀分析時所能選用的自動雨量站，共有343個；大圓點為經客觀分析後可被評估的網格點，共有141個。

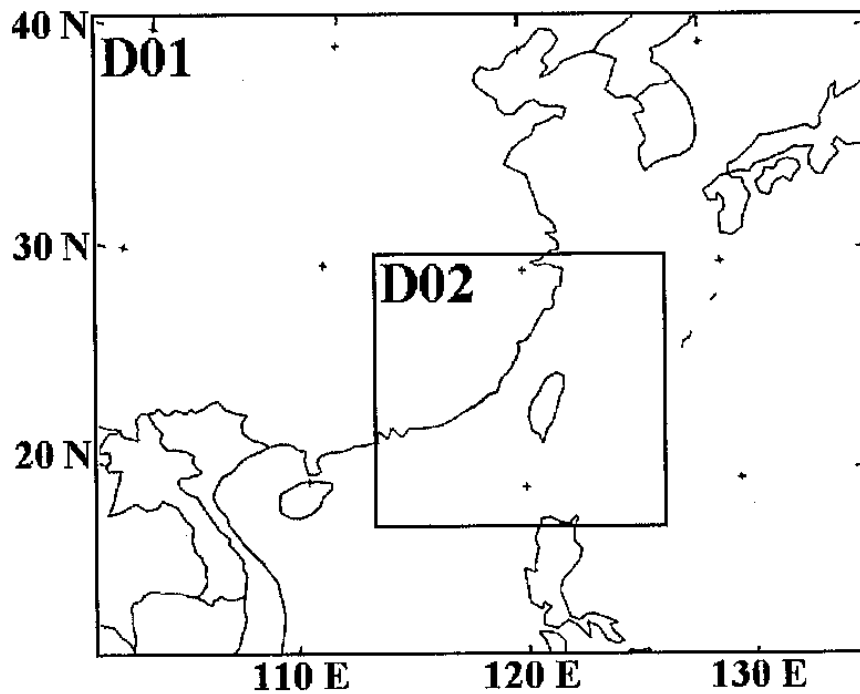


圖 2：MM5 模式的粗網域（D01；網格間距 45 公里）及細網域（D02；網格間距 15 公里）。

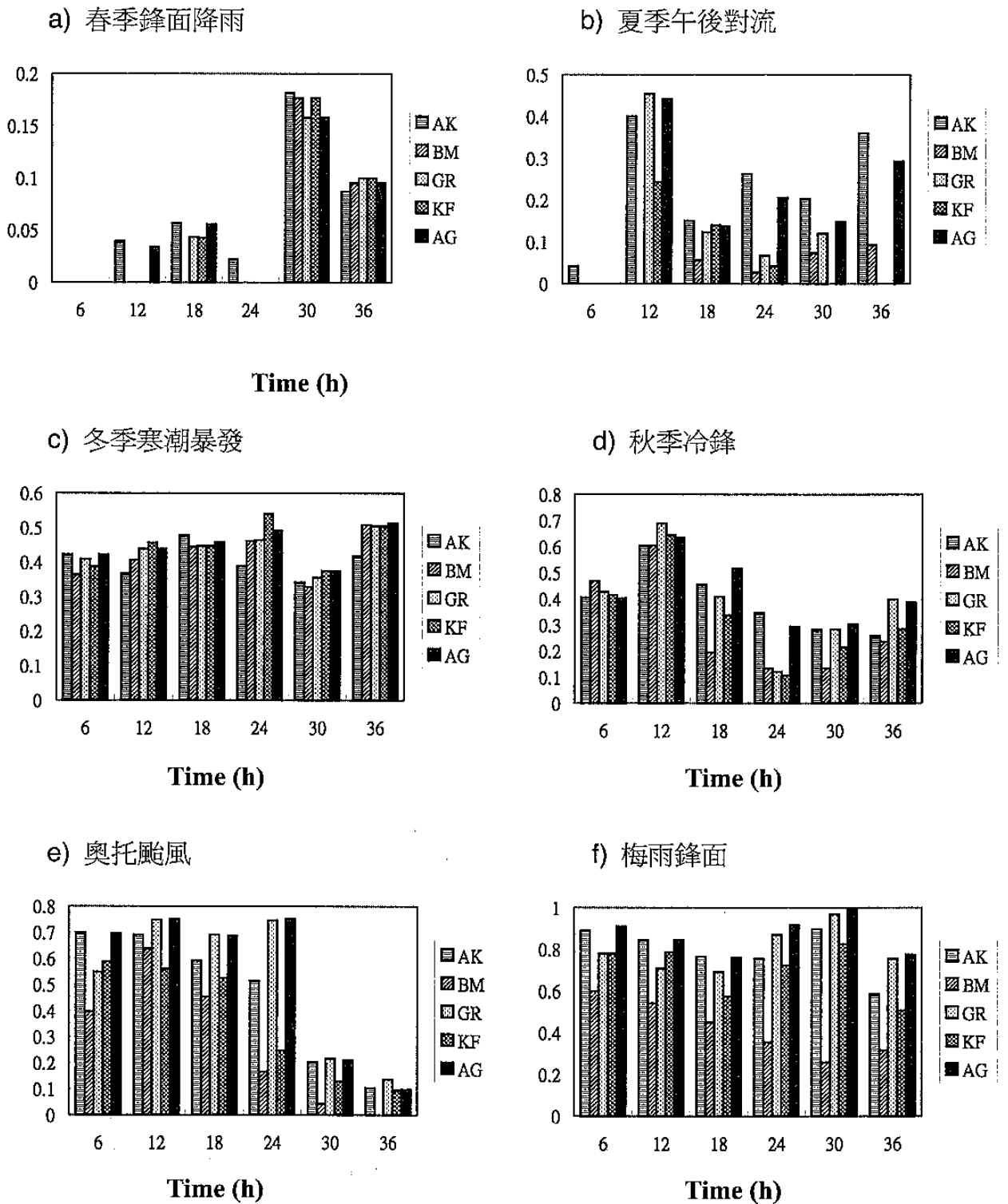


圖 3：15 公里 MM5 的各組積雲參數法實驗之 6 小時累積降雨量在 0.25 mm 門檻時的預兆得分直條圖：(a) 春季鋒面降雨，(b) 夏季午後對流，(c) 冬季寒潮暴發，(d) 秋季冷鋒降雨，(e) 奧托颱風，及 (f) 梅雨鋒面個案。橫軸上的數字為模式積分時間（小

時)。

表 2：各實驗組在不同天氣型態的 6 個時段平均的假降雨個數，其中星號 (*) 代表在該天氣型態時表現最好的實驗組。

個 案		AK		BM		GR		KF		AG	
春 雨	暖 季	25	24	16*	10*	17	14	18	14	21	21
午後對流		24		4*		12		10		21	
秋季冷鋒	冷 季	41	28	17*	16*	22	19	24	19	36	25
寒潮暴發		15		16		16		14*		15	
梅雨鋒面		7		5*		7		6		7	
奧托颱風		24		7*		30		11		32	

單位：網格點數

表 3：各實驗組的平均相對誤差，其中星號 (*) 代表在該天氣類型表現最好的實驗組。

個 案	AK	BM	GR	KF	AG
春 雨	0.4782	0.273	0.2585*	0.2808	0.3228
午後對流	-2.1165*	-2.6517	-2.3992	-2.431	-2.3995
秋季冷鋒	-1.6218	-1.0438*	-1.319	-1.4418	-1.3567
寒潮暴發	-0.385	-0.3772	-0.3557*	-0.3837	-0.3753
梅雨鋒面	-8.7065	-14.7308	-8.1248*	-9.7403	-10.3257
奧托颱風	-12.1770	-12.3084	-7.106*	-14.6754	-11.5666

單位：mm

表 4：各實驗組的平均絕對誤差，其中星號 (*) 代表在該天氣類型表現最好的實驗組。

個 案	AK	BM	GR	KF	AG
春 雨	0.655	0.4805	0.4665*	0.4883	0.5182
午後對流	3.152	2.9112*	3.0638	3.0933	3.0292
秋季冷鋒	4.1465*	4.8678	4.8608	4.5563	4.4597
寒潮暴發	1.0385	1.0417	1.0218	1.0005*	1.0202
梅雨鋒面	16.4712	16.976	18.4545	18.688	16.3828*
奧托颱風	15.4924*	16.6782	16.0056	16.5246	15.4944

單位：mm

表 5：各實驗組的總降雨量百分比，其中井號（#）代表該實驗組表現最好的天氣類型，星號（*）代表在該天氣類型表現最好的實驗組。

個案	AK	BM	GR	KF	AG
春 雨	541.321	352.026	338.762*	359.235	397.844
午後對流	25.055*	6.102	15.045	13.91	15.028
秋季冷鋒	57.139	72.415*#	65.139	61.899	64.147
寒潮暴發	64.145#	64.88	66.874*#	64.285#	65.048#
梅雨鋒面	52.198	19.122	55.392*	46.522	43.308
奧托颱風	29.248	25.725	51.487*	13.804	30.066

單位：%

表 6：各實驗組的降雨極值百分比，其中井號（#）代表該實驗組表現最好的天氣類型，星號（*）代表在該天氣類型表現最好的實驗組。

個案	AK	BM	GR	KF	AG
春 雨	80.541*#	72.461	50.789	63.261	50.323
午後對流	24.113	30.08*	16.861	13.859	19.237
秋季冷鋒	25.081	81.1*	79.472#	54.04	47.46
寒潮暴發	60.633*	58.062	57.164	58.102	56.785
梅雨鋒面	56.962	48.993	54.897	64.582*#	49.972
奧托颱風	58.775	102.086*#	71.329	49.355	61.598#

單位：%