

南海季風實驗期間加密探空 對 MM5 模式模擬之影響

簡芳菁 羅靜瑜
國立台灣師範大學地球科學系

(中華民國九十年八月三十日收稿；中華民國九十一年二月八日定稿)

摘 要

本文使用國際南海季風觀測實驗計畫 (SCSMEX) 在 1998 年 6 月 5 日至 6 月 24 日期間的加密探空資料 (0600UTC 及 1800UTC)，探討其對中尺度模式 MM5 在梅雨期間豪/大雨預報的影響。

研究結果發現，透過客觀分析及四維資料同化(FDDA)的方法把加密探空加入MM5 模擬中，風場的預報可獲得顯著的改進，溫度、壓力、及溼度的預報也有幫助，不過僅在較低層之大氣及較長的預報時其效益才較明顯。當校驗的範圍縮小至僅包括華南及台灣地區時，加密探空資料有更明顯的效益，原來預報改進較不明顯的溫度場、海平面氣壓、相對溼度，甚至重力位高度，在模式預報 36 小時可以得到較正面幫助。

當我們把所有個案區分成多雨期（梅雨期間）及少雨期（梅雨結束後）進行分析時，發現加密探空資料對於模式在多雨期的預報，較少雨期的預報更能顯現其對各個氣象場預報的改善。另外，當我們僅針對初始時間為 1200UTC 的個案進行分析時，加密探空資料對於模式預報結果的貢獻比初始時間為 0000UTC 的個案之貢獻為明顯。在降水預報方面，全期的三組實驗在 12~24 小時降水預報以含有加密探空則表現最佳，最差的是有四維資料同化者。但是，當預報時間增長至 24~36 小時，四維資料同化對於模式的降水預測能力有了實質的幫助，為三者中最好的。

關鍵詞：南海季風觀測實驗，中尺度模式 MM5，四維資料同化

一、前 言

台灣地處歐、亞大陸與西太平洋交界，又位於中、低緯過渡的副熱帶地區，再加上島內中央山脈高聳，這樣獨特的地理位置與地形使得島內天氣多變。一般最常影響台灣地區進而造成災害的天氣型態以颱風及梅雨鋒面所伴隨之豪/大

雨為主。根據中央氣象局統計，最近 15 年來，因氣象災害在台灣地區所造成的直接財物損失，平均每年高達新台幣 157 億元(葉，1998)。梅雨雖不及颱風破壞力之強大，不過當有豪/大雨形成時，往往伴隨山洪及土石流之災害。例如 1981 年 5 月 28 日的豪雨個案，及 1984 年 6 月 3 日、

6月10日的豪雨個案等，均造成40~60億美元的損失(Chen, 1992)。

以往對於梅雨季在台灣地區所造成的豪/大雨現象所知相當有限，因此預報能力也偏低。丘等(1993)針對1992年5~6月進行的Post-TAMEX(陳與謝, 1992)期間發生的豪/大雨個案進行預報準確率之評估，他們發現對此期間內的豪/大雨個案中，屬於伴隨鋒面類型之豪/大雨預報之準確率已提升至48%，但對無強綜觀強迫的豪/大雨預報準確率則僅有25%(葉, 1998)。可見對於強綜觀強迫所導致的豪/大雨已有較深入的認知；而對於中、小尺度天氣系統所引致之降水，則仍是國內氣象預報作業最不易掌握而亟待進一步突破的課題。

Chen et al. (1998a)使用中尺度模式MM5成功地模擬1991年6月12~13日長江下游地區之暴雨個案，模擬的雨帶大小與強度和觀測結果相當接近。Chen et al. (1998b)也使用MM5模擬1991年6月21~25日在台灣中央山脈西側造成豪/大雨的梅雨鋒個案，其中尺度對流系統的發展及低層噴流加強的過程均能在模式中清楚顯現。另外，Yang et al.(2000)對1998年6月4~5日的梅雨鋒，使用MM5進行一系列數值模擬實驗，並評估了模式中不同的微物理過程與次網格積雲參數化對於梅雨鋒降水模擬的成效。

由過去的研究可見，如果能確切地掌握梅雨季節常見的中、小尺度系統，並進一步了解這些系統發生的機制，充分利用各種觀測資料，配合數值模式高解析的數值模擬(例如，MM5)，將可提高我們對於豪/大雨的預報能力。然而，台灣因四周環海，鄰近洋面上的觀測資料相當稀疏，對數值模式資料的初始化造成很大的限制。此種觀測資料不足的情形，若能透過觀測實驗的

進行，以獲致更多的觀測資料，期能了解真正影響模擬成效的因子，並進一步提昇模式模擬的能力。

南海季風觀測實驗(South China Sea Monsoon Experiment, SCSMEX)為東亞、東南亞及其鄰近國家和地區合作完成的一項大型研究計劃(王等, 1999; Lau et al. 2000)。此實驗研究的核心內容之一是進行為期四個月(1998年5月~8月)的外場觀測，使能更瞭解在南海周邊，包括東南亞、台灣及大陸等地區季風的肇始、維持和變化的主要物理過程，進而能改進春夏季風或東南亞及東亞的短期氣候預報。在SCSMEX的IOP期間於華南及台灣地區共有37個探空站執行每天四次的觀測，本論文即使用此加密探空資料以測試MM5模式對於梅雨季降水的預報能力，並研究加密探空對模式之模擬有何影響。同時，我們也將使用這些資料來評估四維資料同化(Four-Dimensional Data Assimilation, FDDA)是否有助於數值模擬及降水的預報。

二、模式、資料與研究方法

為了瞭解加密探空對數值模式的影響，我們使用中尺度模式MM5(全名為PSU/NCAR Mesoscale Model Version 5)來進行模擬。模式設計包括有兩個網格，粗網格(Domain 1)及細網格(Domain 2)的水平解析度分別為45km及15km(圖1)。垂直方向，使用 σ 座標，共27層。模式中使用的物理過程包括：Simple Ice雲物理參數化法，即不考慮過冷水及雪的瞬間融化；MRF邊界層參數化法；雲輻射法(Cloud-Radiation Scheme)，足以解釋長、短波輻射與雲、大氣間的交互作用，以及描述大氣的溫度趨勢，同時提供地面輻射通量；KF(Kain-Fritsch)積雲參數化法(Grell et al., 1994)等。

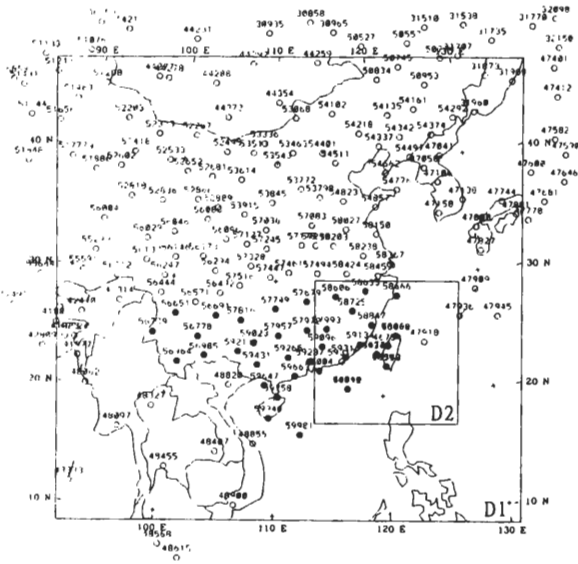


圖 1 MMS 模式使用的網格設定，D1 及 D2 分別表示粗網格 (Domain 1) 及細網格 (Domain 2)，其水平解析度分別為 45km 及 15km。模擬範圍內的探空測站也標示在圖中，其中有黑點者表示在 SCSMEX 期間一天釋放四次探空之測站。

本研究使用的初始資料及邊界條件(每 6 小時)來自中央氣象局全球模式之分析場，其水平解析度為 1 度，為了獲得較好的分析場，我們也另外使用一個中尺度的客觀分析程式(Rawins)在中尺度範圍內加入觀測資料進行客觀分析。資料共有兩組：第 1 組為使用傳統的觀測資料所得的分析場，每六小時一筆，一天共有四筆，時間為 0000 UTC、0600 UTC、1200 UTC、及 1800 UTC。第 2 組同第 1 組，但再加入前述 IOP 期間的加密探空資料於 0600 UTC 及 1800 UTC 兩個時間。第 1 組因未含加密探空，故在 0600 UTC 及 1800 UTC 的分析場大多以全球模式的六小時預報結果為主，而第 2 組則有探空資料加入該兩時段之客觀分析中，同時，此加密探空會透過全球模式六小時更新週期(update cycle)而影響到 0000 UTC 及 1200 UTC 之分析場。

本研究共進行三組實驗，分別是 Exp1、Exp2、及 Exp3(參見表一)。Exp1 使用前述的第 1 組資料，不含加密探空資料在內；Exp2 使用前述的第 2 組資料，所以含有加密探空資料；而 Exp3 除了使用加密之探空資料外，在模擬過程中也加入四維資料同化推進法(FDDA nudging)的功能。本文採用的為分析場推進法(analysis nudging, Stauffer and Seaman 1990; Stauffer et al. 1991)，即在每一網格點上利用分析場之資料來修正模式之模擬。不過，我們僅在第一層網格(D1)採用此法，因為我們希望在本文分析的網格(D2)中，不要含有這種強迫項。換句話說，第一層網格透過觀測資料同化的過程獲得較好之模擬，以提供較準確的邊界條件給第二層網格，而第二層網格則執行自由模擬。以上每組實驗各進行了 39 個模擬，初始時間包括 1998 年 6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC 期間每日的 0000 UTC 及 1200 UTC，每一個模擬的長度皆為 36 小時，總計三組實驗共有 117 個模擬。

表一 三組實驗之設計。第 1 組資料不含加密探空，第 2 組資料含有加密探空。

實驗名稱	使用資料	加密探空	四維資料同化
Exp1	第 1 組	無	無
Exp2	第 2 組	有	無
Exp3	第 2 組	有	有

方與陳(1989)針對天氣數值預報校驗方法進行評估，他們認為均方根誤差(Root Mean Square Error, 以下簡稱 RMSE)適用於連續場(例如海平面氣壓、高度場、溫度場等)的校驗。因此，我們將針對模擬中的細網格(Domain 2)的預報結果，比較各組實驗中不同氣象場在不同高度的 RMSE。本文為了簡化起見，把風場分成 U、V 分量，也同樣計算其 RMSE。

我們針對各組實驗第二層網格在模式預報 12、24 及 36h 於四個不同等壓面(1000、850、700 及 500 hPa)的氣象場，包括：風場(U、V)、溫度場(T)、重力位高度(H)、相對濕度(RH)及海平面氣壓(SLP)計算其 RMSE。RMSE 的計算方法如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - A_i)^2}{N}} \quad (1)$$

其中， F_i 及 A_i 分別是網格點 i 上之預報值及觀測值， N 為所校驗範圍內的總網格點數。我們以 Exp2 實驗每 12h 的分析場當作近似實際的觀測場(即上式中的 A_i)，而各組實驗的 MM5 模擬結果則為預報場(即上式中的 F_i)。當 RMSE 值越小，表示模式模擬的結果越好，亦即預報越接近分析場。

為瞭解加密探空資料在數值模式中對於不同區域的影響，我們也將細網格(D2)分成二個不同範圍的校驗區域：ALL 及 SCTW，分別求取各區域內所有網格點之氣象場的 RMSE，並比較兩者的 RMSE 有何異同。其中，ALL 區域的範圍包含整個 D2 的網格點；SCTW 則僅包括台灣及華南地區鄰近的網格點(如圖 2)。

因為 1998 年梅雨季的降水主要集中在 6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 10 日 1200 UTC 期間，因此，我們除了討論整個模擬期間(全期，6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC)所計算的 RMSE 之外，更進一步把全期分成多雨期(6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 10 日 1200 UTC)及少雨期(6 月 11 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC)，以探討加密探空資料對此兩個不同降雨特性時期

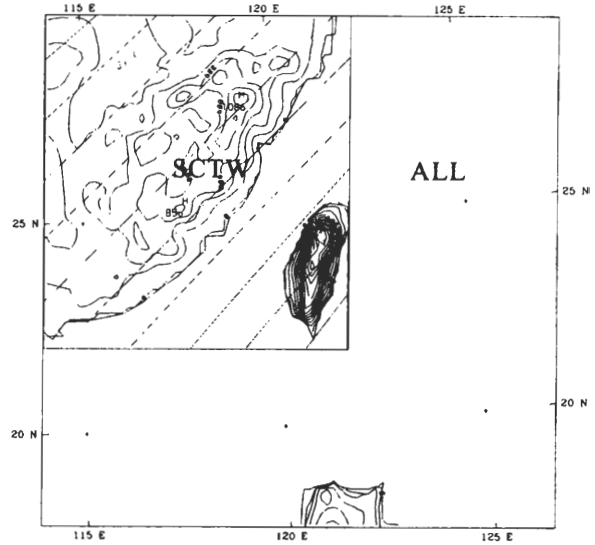


圖 2 細網格 (D2) 的地形高度，等值線間距為 200m。RMSE 計算之二個不同的區域也標示在圖中，ALL 包含整個細網格的網格點，SCTW 則只包含圖中右上-左下斜線所示之區域。

的影響(參見表二)。同時，為了探討模式初始時間不同時，加密探空資料是否對於預報結果會有不同的影響，我們也將全期的模擬分成另兩組，一組是以 0000 UTC 為初始時間的所有個案(以下簡稱為 0000 UTC runs)，另一組是以 1200 UTC 為初始時間的所有個案(以下簡稱為 1200UTC runs)，分別求取其 RMSE(參見表二)。

在雨量預報的校驗方面，我們將各組實驗在台灣地區陸地上的預報降水與全台自動雨量站的觀測值作比較，分別計算 6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC 期間，各組實驗的所有個案在台灣地區降水預報的公正預兆得分(Equitable Threat Score, Black 1994, 簡稱 ETS)。ETS 的計算方式如下(參考表三)：假設 x 為觀測與預報皆超過門檻的次數， y 為觀測有但預報沒有超過門檻之次數， z 則相反， w 為觀測與預報

表二 計算 RMSE 的各種組合。

計算 RMSE 之個案組合	6/5-6/10		6/11-6/24	
	0000UTC	1200UTC	0000UTC	1200UTC
全期	√	√	√	√
多雨期	√	√		
少雨期			√	√
0000 UTC runs	√		√	
1200 UTC runs		√		√

表三 降水預報校驗之狀況分布表。

		預測降水	
		是	否
觀測降水 是 否	是	x	y
	否	z	w

皆沒有達到門檻之次數，則

$$ETS = (x-c) / (x-c+y+z) \quad (2)$$

其中，c 為隨機即可正確預測之次數， $c = (x+y)(x+z)/(x+y+z+w)$ 。ETS 在降水預報的校驗上是一項比較公正的指標，不會因事件發生的機率而受到影響，在近年來廣為各作業和研究單位在討論降水預報校驗上所採用(葉，1998)。

三、各氣象場的均方根誤差及技術得分

本節我們將探討並比較當加密探空加入中尺度模式及使用四維資料同化時，對模擬的結果有何影響，我們選擇低層大氣(500mb 以下)為主要討論範圍。

(一) 全期的均方根誤差

圖 3 為全期的所有個案在 ALL 區域的 RMSE，其中共有 20 個小圖。第一列至第五列依次為東西向風速(U)、南北向風速(V)、溫度(T)、重力位高度(H)¹、相對溼度(RH)。第一行至第四行依序為 1000hPa、850 hPa、700 hPa、及 500 hPa。由 Exp1(斜線)與 Exp2(網狀)的風場預報(U 及 V)顯示，在 12h 時，Exp2 的 RMSE 都比 Exp1 大，但在預報 24h 及 36h 時，除了 500 hPa 較不明顯外，Exp2 的 RMSE 大部分皆比 Exp1 小，顯示在進行 MM5 模式的模擬之前，加入加密探空資料，將使預報風場隨預報時間的增長而有所改進。由於 12h 的預報為模式模擬之初期，以下我們將把主要討論的重點放在 24h 及 36h。

比較 Exp2 與 Exp3(黑色)可以發現，除了少數時間及高度(例如，850 hPa)外，Exp3 的 RMSE 均比 Exp2 低，尤其在 36h 時，可以清楚地顯現 Exp3 的預報誤差比 Exp2 小的多。因此，在模式模擬的過程中，充分利用加密探空資料，並且進行四維資料同化，把觀測資料同化至模式中，可以改善模式的風場預報，且在 36h 的預報達到最顯著之效果。同時，由這八個小圖我們也發現，Exp1 及 Exp2 的 RMSE 皆隨著預報時間的增長而明顯變大，而 Exp3 則否。亦即，就長時間的預報而言，四維資料同化的技術能有效地抑制模式在預報上誤差的成長。

比較各組實驗在溫度場(T)的預報表現，可見三組實驗的 RMSE 皆非常接近，加密探空資料及四維資料同化的效益僅在 850 hPa 或 36h 時有稍微顯現出來，不過總體而言，其幫助仍然有

¹ 第四列第一行例外，該圖為海平面氣壓(SLP)的均方根誤差。

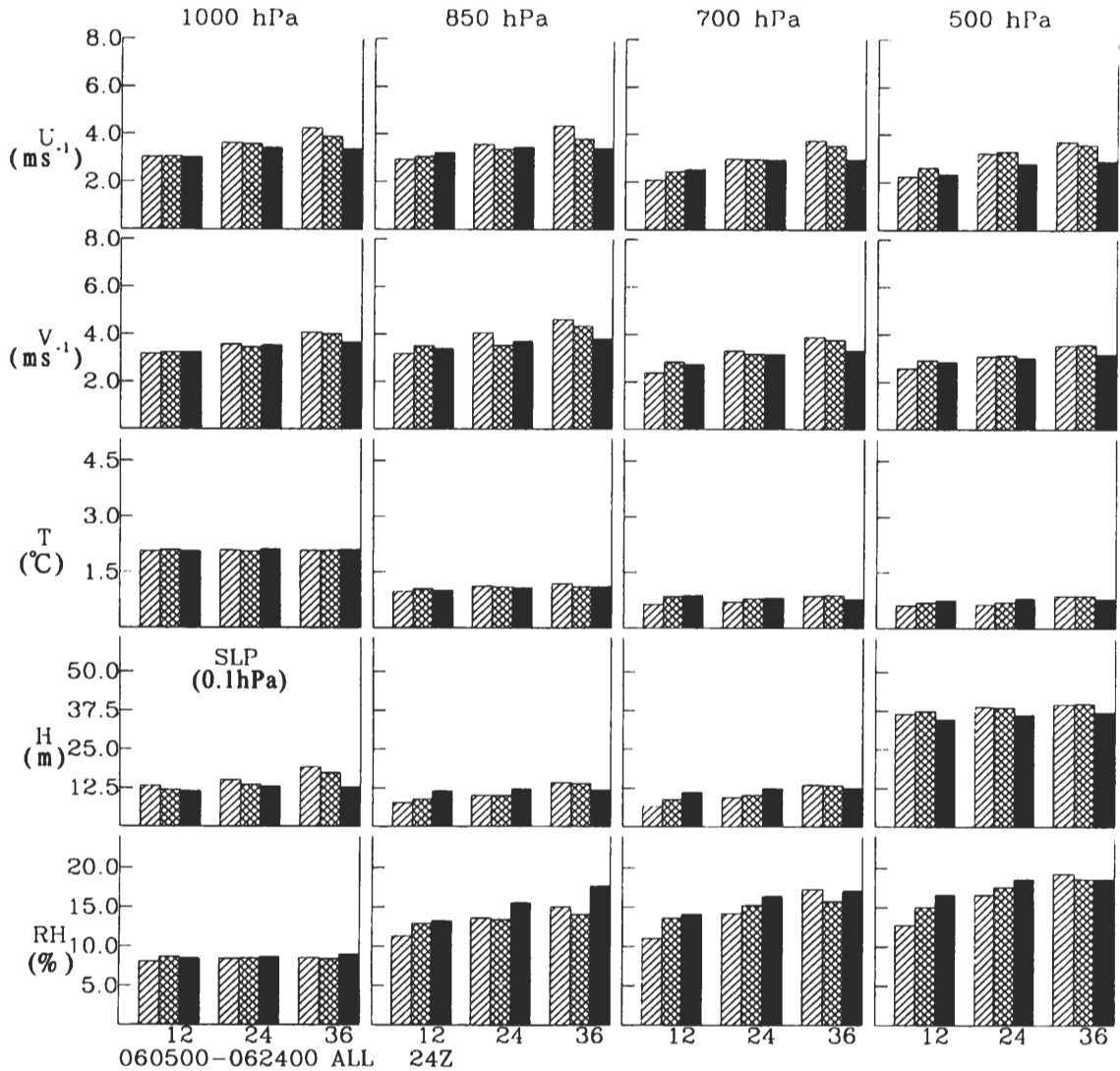


圖3 1998年6月5日0000UTC~6月24日0000UTC(全期)所有個案在ALL區域之各個氣象場的RMSE。第一列至第五列分別代表U、V、T、H、及RH的RMSE(例外:第四列第一行的圖為SLP),第一行至第四行分別對應1000、850、700、及500 hPa四個高度。每個小圖的橫座標代表預報12、24、及36小時,斜線、網狀、及黑色的長條圖分別代表Exp1、Exp2、及Exp3三組實驗的RMSE。

限。顯見加密探空資料或四維資料同化對於模式在溫度場的預報上並沒有太大的助益,僅在36h的預報中略有幫助。

在海平面氣壓(SLP)的表現上,Exp2在三個預報時段皆比Exp1的預報結果為佳,同時,

加入FDDA(Exp3)可以進一步降低其RMSE。在850hPa、700hPa、及500hPa重力位高度(H)的預報方面,我們發現,Exp2與Exp1的RMSE差距並不大,而且FDDA只有在36h時較有正面的效益,不過對500hPa的重力位高度而言,即使在12及24h時,Exp3的RMSE就已明顯較

小。顯見加密探空資料對於重力位高度的預報並無明顯助益，但加入 FDDA 之後，對於較長的預報，重力位高度的誤差可顯著降低。至於相對濕度(RH)的預報，僅在 36h 時可見 Exp2 表現較 Exp1 為好的結果，其餘大多是較差的結果，而 Exp3 的 RMSE 則均較 Exp2 為大。

綜而言之，針對三組實驗於全期在 ALL 區域的預報結果我們發現，使用加密探空資料，以及在模式模擬的過程中使用四維資料同化，對於模式在風場的預報有顯著改進，尤其是在模式預報 36h 時，改進的情形最明顯。但是，溫度場的預報僅在預報 36h 略有改善；海平面氣壓的預報顯示加密探空對模擬有正面幫助，若再加上 FDDA 的功能，進步就更明顯了。至於重力位高度，則僅在預報時間較長時有明顯助益。在相對溼度的預報上，加密探空資料的幫助並不大，只有在 36h 有些許助益。

為了更清楚顯現相對應於 Exp1, Exp2 的 RMSE 增加或減少了多少，我們進一步利用下式計算 Exp2 之技術得分(skill score, 簡稱 SS)：

$$SS = 1 - \frac{RMSE(Exp2)}{RMSE(Exp1)} \quad (3)$$

當 SS 是正值時，表示 Exp2 相對應於 Exp1 是有進步的(即 RMSE 減小)；反之，則為退步。Exp3 相對應於 Exp1 的技術得分也採用類似的計算方式。

圖 4 為在 ALL 區域全期的技術得分(折線 o)，其結果清楚地反映上述有關圖 3 的討論，例如風場的預報在 24h 及 36h，Exp2 的技術得分大於 0，表示加密探空對模擬有正面的幫助，同

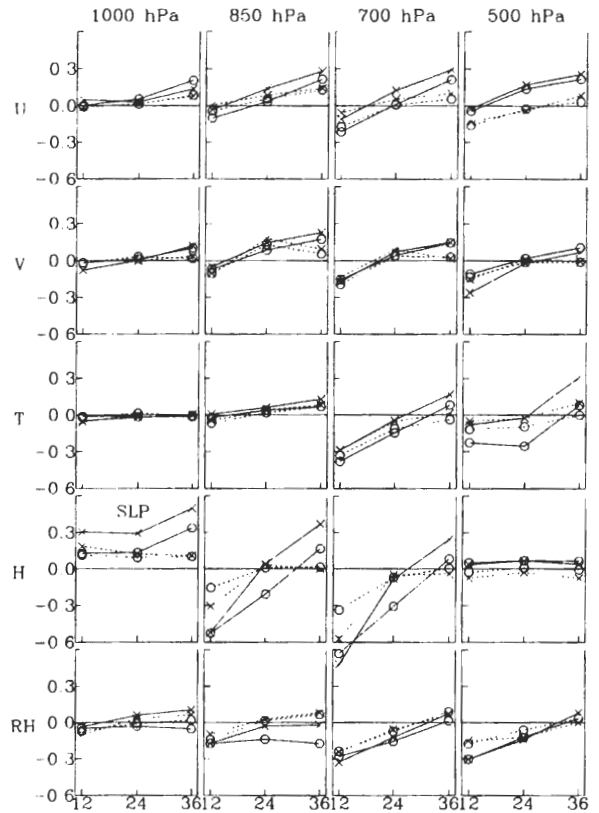


圖 4 同圖 3，但為全期的技術得分(Skill score)。虛線、實線分別為 Exp2 及 Exp3 的得分，標有 o 及 x 者分別為針對 ALL 區域及 SCTW 區域進行之平均。

時，Exp3 的得分一般又比 Exp2 高，表示 FDDA 可進一步改善模式之預報；另外，我們也看到圖中的折線都是往右上傾斜，正說明了加密探空或 FDDA 對模擬的影響隨模擬時間增長而增加。

圖 4 也包含了僅針對華南及台灣地區(SCTW 區域)的網格點進行平均的技術得分(折線 x)。與 ALL 區域(折線 o)比較可見風場的預報除了少數例外之外，SCTW 區域的技術得分均比 ALL 區域者為高。換句話說，當校驗點大多落在陸地上時加密探空資料與四維資料同化技術對風場預報的改進更為明顯。類似的結果也發

生在溫度的預報上，尤其是在較高層(例如，700hPa 及 500hPa)。

至於 SLP 與重力位高度的技術得分同樣顯現 SCTW 區域高於 ALL 區域的結果，尤其在低層更為明顯。同時，我們也發現這種結果以 Exp3 最為明顯(比較實線 o 及 x)。可見當校驗範圍侷限在陸地上時，因含有較多之觀測資料，可以明顯改進模式之模擬。而相對溼度的結果，雖然在 ALL 區域中可見其技術得分除了 36h 之外，皆相當低或為負值，但若針對 SCTW 區域計算得分，仍可見分數上升的情況。

綜合以上 SCTW 區域與 ALL 的比較我們發現，加密探空資料或四維資料同化在 SCTW 區域的結果，除了保留而且加大在 ALL 區域時對風場的預報的改進之外，對於在 ALL 區域預報原改進較不明顯的溫度場、海平面氣壓、相對溼度，甚至重力位高度，在 SCTW 區域於模式預報 36h 時均可以看到較正面的幫助。此結果正說明了當我們把分析的範圍縮小至 SCTW 區域時，洋面的網格點減少了，而陸地上的網格點因含有較多之觀測資料，故 FDDA 的模擬便顯示出正面的貢獻。

(二) 多雨期與少雨期的技術得分

圖 5 為針對多雨期(折線 o)及少雨期(折線 x)在 ALL 區域計算的技術得分，圖中可見在風場的預報上，Exp2 的技術得分在多雨期大多比少雨期為高，特別是在較長的預報時段(例如 36h)；Exp3 的技術得分也有類似的結果。也就是說，在多雨期間，加密探空資料及四維資料同化更明顯地改善模式風場的預報結果。

溫度場的預報也可見類似風場的結果，尤

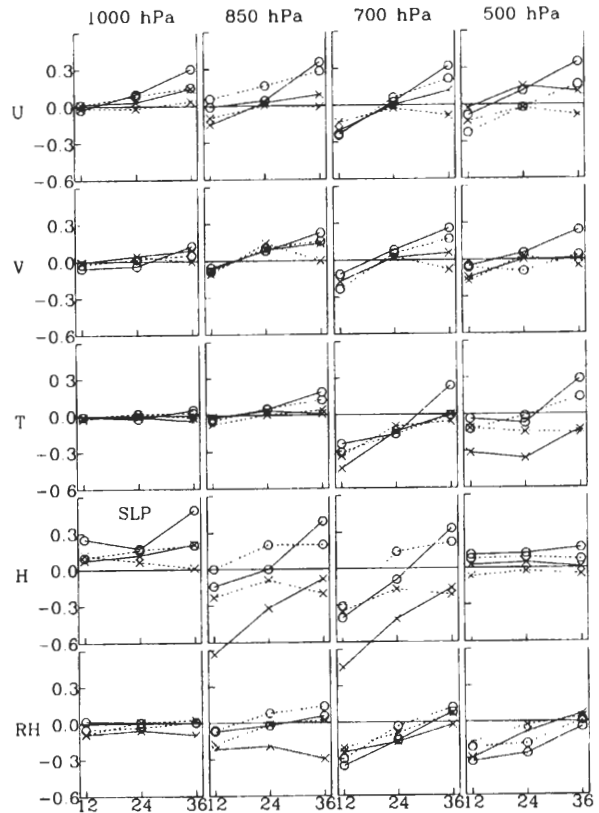


圖 5 同圖 4，但為針對 ALL 區域之平均，標有 o 及 x 者分別代表多雨期及少雨期之得分。

其在較高層(700hPa 及 500hPa)更為明顯。同樣地，FDDA 及加密探空對於模式在海平面氣壓的預報結果也在多雨期有比少雨期獲得較大的幫助。重力位高度也有類似的結果，尤其在 850hPa 及 700hPa，可以發現 Exp2 在多雨期的得分為正(24h 及 36h)，而在少雨期則為負的結果，若與圖 4 相較，全期 Exp2 在此兩層重力位高度的得分約等於 0，以致加密探空對模擬似無幫助；而從圖 5，我們才發現加密探空對多雨期的重力位高度的模擬其實是有幫助的，只是其貢獻被少雨期給抵消了。至於相對溼度的表現也可看出多雨期的得分高於少雨期之結果(500hPa 例外)。

總言之，由以上多雨期與少雨期的比較我們得知：平均而言，加密探空資料與四維資料同化對於模式在多雨期的預報，較能凸顯其對各個氣象場預報的改善。這顯然對災害天氣預報而言是個好消息，因為加密探空對於提昇豪／大雨期間的預報有正面的效益，無疑對於改進數值模擬技術而言提供了一個可行的方向。

(三) 不同初始時間 (0000 UTC 或 1200 UTC) 的技術得分

Chen and Yu(1985)分析 1965 ~ 1984 年梅雨期間發生在台灣北部的大雨事件，發現在此 10 年內的 37 個大雨事件中，有 27 個發生在晚上。不過，Chen(1992)也提到梅雨季期間的對流性降水主要發生在中央山脈西側的日間，可見豪／大雨的發生有明顯的日、夜變化。因此，我們進一步把全期各組實驗的模擬分成兩組，分別為 0000 UTC runs 及 1200 UTC runs，並對兩組實驗求取各氣象場之 RMSE，以探討模式中不同之初始時間對於預報結果有何不同之影響。

圖 6 為 0000 UTC runs(折線 o)及 1200 UTC runs(折線 x)在 ALL 區域之技術得分，比較可以發現，平均而言，加密探空與四維資料同化對於 1200 UTC runs 的貢獻比 0000 UTC runs 為大，即 1200 UTC runs 的得分高於 0000 UTC runs。因為一般而言，觀測資料的量在 0000 UTC 均比 1200 UTC 為多(洪，1999)，且在東亞地區 0000 UTC 是早上八點，而 1200 UTC 是晚上八點，由於日夜變化之關係，1200 UTC 的大氣會比 0000 UTC 含有較多中、小尺度的擾動，導致 0000 UTC 的初始資料優於 1200 UTC。因此，MM5 一般可以在 0000 UTC runs 中獲得優於 1200 UTC runs 的模擬。所以，1200 UTC runs 在沒有加密探空資料或四維資料同化的協助下會有較大的誤差，

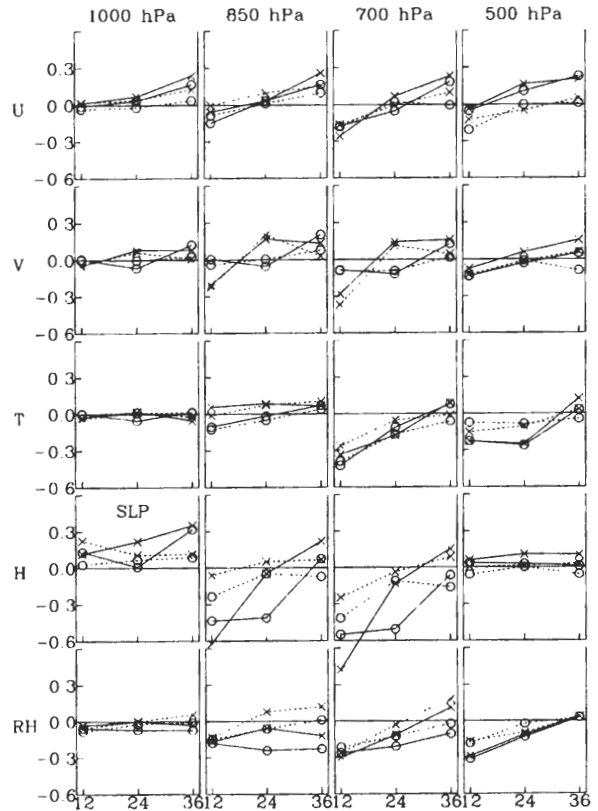


圖 6 同圖 4，但為針對 ALL 區域之平均，標有 o 及 x 者分別代表 0000 UTC runs 及 1200 UTC runs 之得分。

故更能顯現當加入加密探空或四維資料同化後所得的正面效益。

(四) 個案討論

以下我們舉兩個個案為例說明各組模擬之情況，其結果可以與上述之 RMSE 或 SS 結果相比較。圖 7a、b、及 c 分別為初始時間 1998 年 6 月 15 日 0000 UTC 個案在預報 36h，Exp1、Exp2、及 Exp3 的海平面氣壓及低層風場。圖 7d 則為 1998 年 6 月 16 日 1200 UTC 的海平面氣壓及最低層風場之分析場，可用來校驗上述三組實驗之模擬結果。由圖 7d 可見在大陸福建地區有一明顯的低壓帶，中心氣壓約為 999 hPa，伴

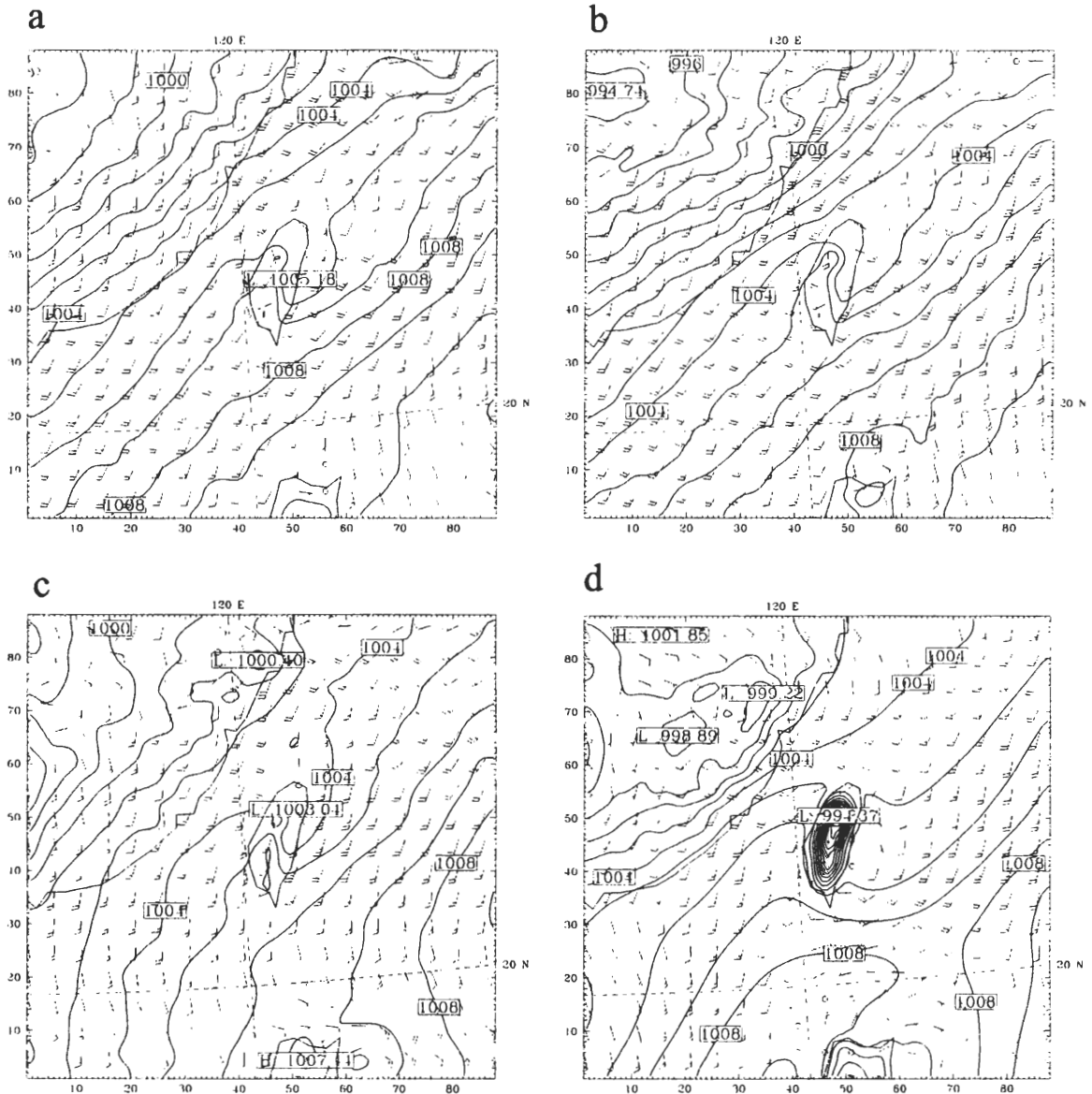


圖 7 初始時間為 1998 年 6 月 15 日 0000UTC 的個案在 36 小時預報的海平面氣壓(等值線,間距為 1hPa)及近地面風場(單位為 kt)。a、b、及 c 圖分別代表 Exp1、Exp2、及 Exp3 預報結果；d 則為觀測分析場,時間為 1998 年 6 月 16 日 1200UTC。

隨氣旋式環流；台灣以南及東南方向的洋面上則屬高壓區，風向以南風至西南風為主。

就前述低壓系統之預報而言，此個案在三組實驗的模擬結果中，Exp1(圖 7a)並沒有預報到此低壓，而 Exp2(圖 7b)則在較偏西的位置出現

一個強度較強(~ 995 hPa)的低壓系統，至於 Exp3(圖 7c)則在稍微偏北的位置預報一個強度接近的低壓(~ 1000 hPa)。因此，就此低壓之預報而言，Exp3 的預報結果雖然與觀測有些差距，不過，不論是在強度或是位置的掌握仍是三組中

表現最好的，其次則是 Exp2，雖然高估了系統強度且預報位置偏西，但仍優於 Exp1。另外，由其他地區海平面氣壓的分布可以看見，各組實驗預報結果中以 Exp3 的分布型態最接近分析

場。若以 1008 hPa 等壓線分布為例，Exp1 的預報比分析場偏西，而 Exp2 的預報位置雖然也比分析場偏西了一些，但比 Exp1 接近分析場；至於 Exp3 的預報則最接近分析的位置。整體而言，

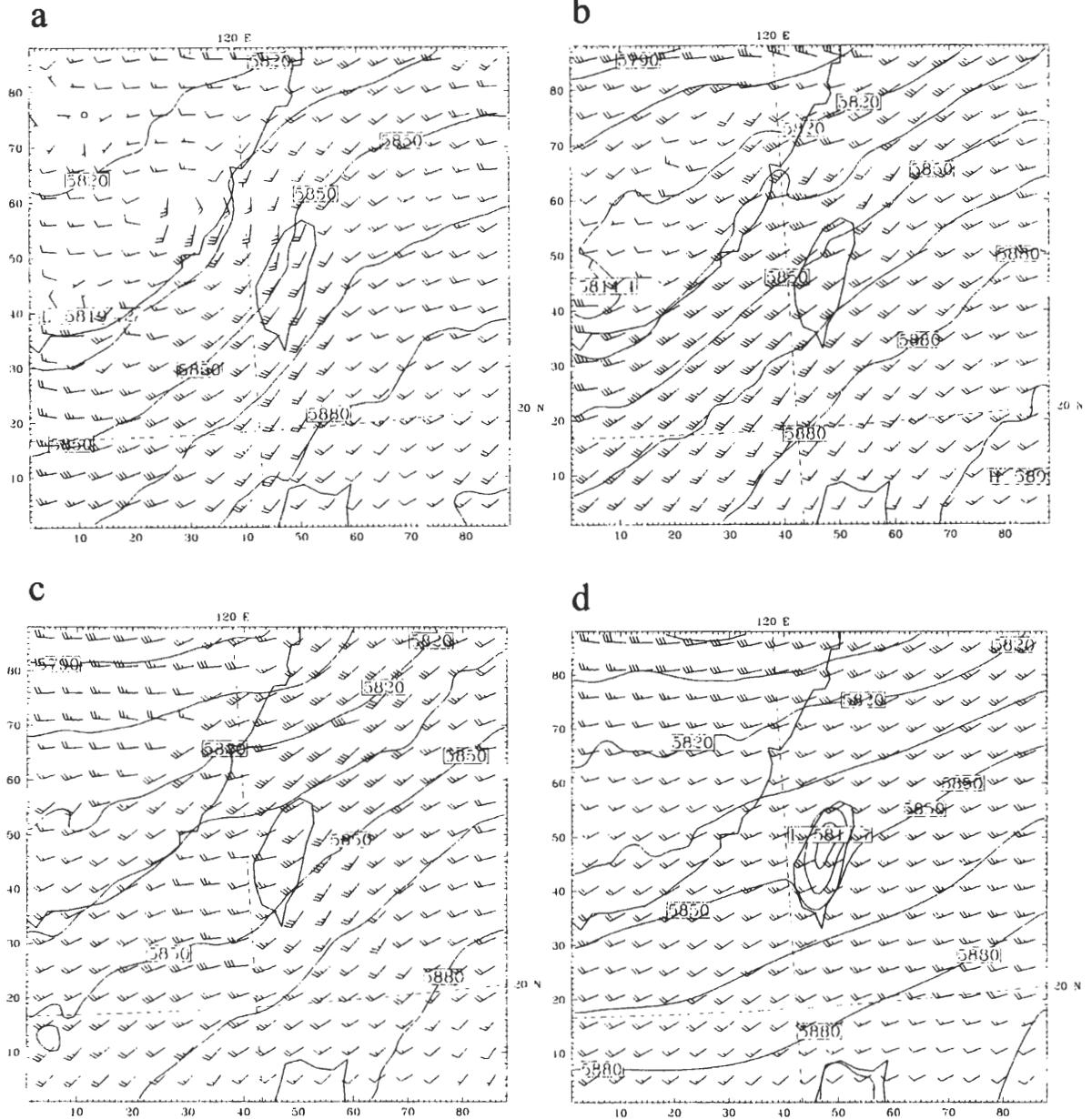


圖 8 初始時間為 1998 年 6 月 7 日 1200UTC 的個案在 36 小時預報的 500hPa 重力位高度（等值線，間距為 15gpm）及風場（單位為 kt）。a、b、及 c 圖分別代表 Exp1、Exp2、及 Exp3 的預報結果；d 圖則為對應之觀測分析場，時間為 1998 年 6 月 9 日 0000UTC。

海平面氣壓預報的表現以 Exp3 最佳，其次是 Exp2，最差則為 Exp1。

至於低層風場的表現，我們發現，除了 Exp3 在台灣西南方海域預報的風場偏南風，最接近分析的風場之外，其餘二組實驗的預報結果皆為偏西南風。而且，也只有在 Exp3 的預報結果中可看到在大陸福建地區有微弱的氣旋式環流存在。同時，Exp2 的風場預報雖然未及 Exp3，不過，仍比 Exp1 稍好一些。

圖 8a、b、及 c 分別為初始時間 1998 年 6 月 7 日 1200 UTC 預報 36h 時 Exp1、Exp2、及 Exp3 的 500 hPa 重力位高度及風場。圖 8d 則為 1998 年 6 月 9 日 0000 UTC 在 500 hPa 的重力位高度及風場之分析場，可用來校驗上述三組實驗之模擬結果。由圖 8d 可見風場的分布主要為偏西南風，在台灣東南方海域的風場強度較弱，往北有增強的趨勢。5880 gpm 等高線呈現東北西南走向通過巴士海峽，5850 gpm 等高線則通過台灣南方，並因地形作用而產生一低壓槽。另外，5820 gpm 等高線則由台灣北方海域通過大陸華南地區。

從三組模擬之預報結果我們發現，5880 gpm 等高線在 Exp1(圖 8a)的預報比分析場略偏南，而 Exp2(圖 8b)中 5880 gpm 等高線則略偏北，不過仍較 Exp1 接近分析場。但經過四維資料同化的 Exp3(圖 8c)，5880 gpm 等高線則太過偏南。5850 gpm 等高線在 Exp1 中的預報位置則比分析場偏北，在 Exp2 中的預報則往北偏經過臺灣北部，而在 Exp3 中則比分析場偏南。總而言之，仍以 Exp2 表現最佳，而 Exp1 最差。同樣地，5820 gpm 的等高線仍以 Exp2 的預報結果最接近觀測。由三組實驗在重力位高度預報的比較可以發現，Exp2 的預報比其他二組接近分析場，預報

能力最佳。

至於 500hPa 風場方面，在 Exp1 中可以看到在台灣地區及台灣海峽的風場為偏南風，且其強度平均而言比分析場強，同時，在大陸廣東地區有一明顯的氣旋式環流，這在分析場是沒有的；至於 Exp2 的預報風場有明顯較強的偏西南風，在大陸華南地區有微弱的輻合風場，與分析風場有些差距；Exp3 的預報風場雖然強度略比分析場強，不過，仍是三組實驗中最接近分析場的。

因此，整體而言，此個案 500 hPa 在 36h 的重力位高度預報以 Exp2 的表現最佳，而風場的預報則以 Exp3 的表現最好，Exp2 次之。由此個案可反映出加密探空資料及四維資料同化對於模式風場預報的實質貢獻；不過，在重力位高度的預測上，本個案似乎未能完全反應 Exp3 在重力位高度的預報上有最低 RMSE 的平均結果(參考圖 3)。

四、降水預報

由各組模擬的雨量預報結果裡，可獲得台灣地區所有網格點上預報的 12h 累積降水量；同時，我們以每一網格點為中心，取邊長約為 15 公里正方形範圍內的所有自動雨量站之觀測值的算數平均值作為觀測之雨量，兩者相互比較，以求得公正預兆得分(ETS)。以下我們分別就三組實驗所計算的 ETS 來探討加密探空資料及四維資料同化對於台灣地區降水預報的影響。

圖 9a、b 分別為全期三組實驗在台灣地區 12~24h 及 24~36h 降水預報的 ETS，用來判別有無降水之門檻(threshold)包括有 0.3、2.5、5.0、

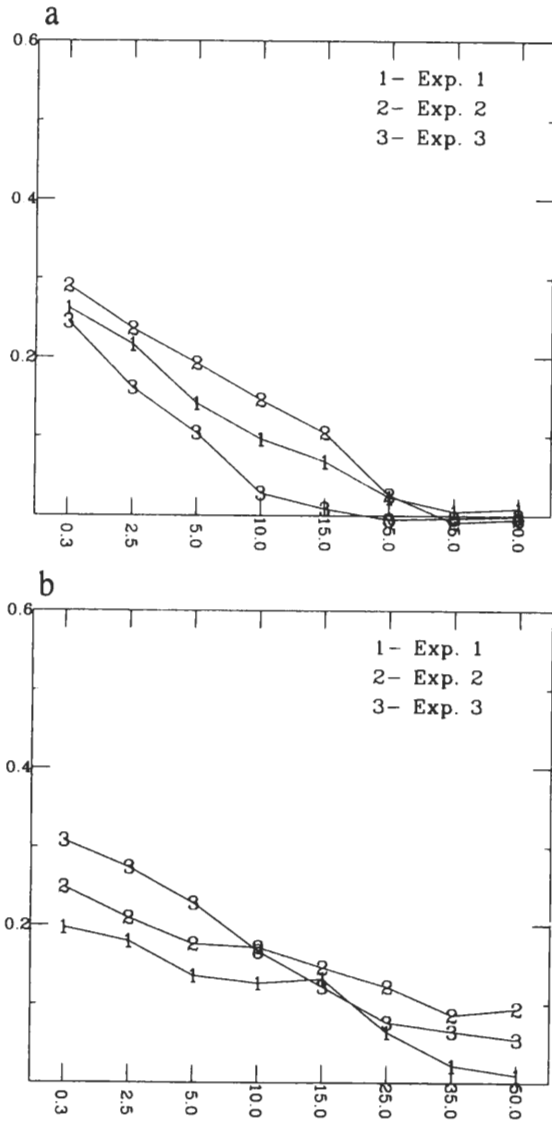


圖 9 1998 年 6 月 5 日 0000UTC~6 月 24 日 0000UTC 期間 (全期), Exp1、Exp2、及 Exp3 在台灣地區降水預報的公正預兆得分 (ETS)。橫座標表示不同的降水門檻(mm)。a 及 b 圖分別為 12-24h 及 24-36h 之降水預報。

10.0、15.0、25.0、35.0、50.0 mm。ETS 越大，表示降水預報越準確。首先，由圖中可見，當降水門檻越大時，三組實驗的降水預報之 ETS 越小，換句話說，模式對於大雨的預報能力較低。

對 12 ~ 24h 累積降水的預報(圖 9a)而言，在所有降水門檻皆以 Exp2 的降水預報結果最好，其次為 Exp1，最差的是使用四維資料同化技術的 Exp3。可見加入加密探空資料有助於提昇台灣地區降水之預報能力，而 FDDA 對 12~24h 之降水預報似乎沒有正面之幫助。不過，在預報 24~36h 之降水時(圖 9b)，降水門檻小於 10.0 mm 的預報結果以 Exp3 最接近觀測值，次佳為 Exp2，最差的是 Exp1。亦即，當預報時間增長時，四維資料同化對於模式的降水預測能力有了實質的幫助，同時，加密探空資料在 24~36h 仍然對於模式的預報有不錯的改善。降水門檻大於 10mm 時，Exp3 的得分略為下降，不過仍然比 Exp1 要高。可見使用四維資料同化的方法把加密探空資料輸入模式對於降水的長期預報能力會有明顯的貢獻。

以下我們舉一個案為例，說明各組實驗降水預報之校驗情況。圖 10a,b,c 是 1998 年 6 月 6 日 1200 UTC 為初始時間的模擬個案在 Exp1、Exp2、及 Exp3 預報 24h 時垂直累積的雲水、雲冰混合比之總和，此量可約略代表垂直方向雲量的多寡(以下簡稱累積雲量)，並可定性與衛星雲圖作比較。此種方法在資料稀少區，尤其是廣大洋面上作降水校驗時，不失為一客觀的方法。1998 年 6 月 7 日 1200 UTC 的衛星雲圖(圖 10d)顯示，有一滯留梅雨鋒面雲帶從日本東方海面向西南延伸至台灣南方海面，在其末端於臺灣西南部及以西的臺灣海峽、南海區域洋面上有明顯的中尺度對流系統(MCS)正在發展。

就對應衛星雲圖上較明顯的降水系統來看，Exp1(圖 10a)預測在臺灣海峽區域有一東北、西南走向之雲帶，其累積雲量極大值約為 8.14 g kg⁻¹，位置比觀測雲區偏北，同時，此雲帶通過

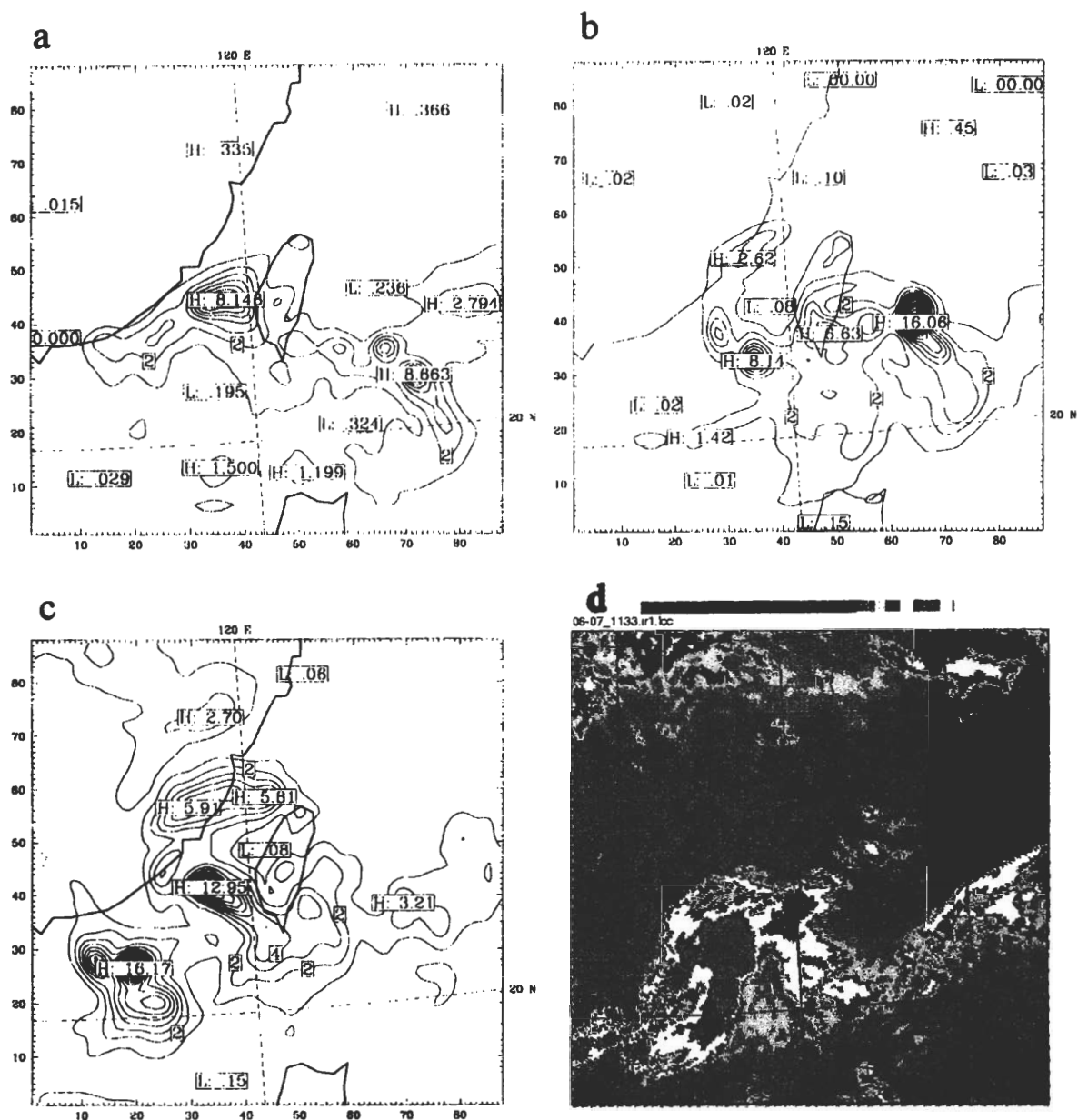


圖 10 初始時間 1998 年 6 月 6 日 1200UTC 的個案在預報 24 小時垂直累積雲量（雲水及雲冰之混合比，等值線間距為 1g kg^{-1} ）。a、b、及 c 圖分別代表 Exp1、Exp2、及 Exp3 的預報結果，d 則為對應之紅外線衛星雲圖，時間為 1998 年 6 月 7 日 1200UTC。

台灣南部向台灣東南海面延伸，併入梅雨鋒面之雲帶。由 Exp2(圖 10b)與 Exp1(圖 10a)的比較可以看到，加入加密探空之後，原本在 Exp1 中極值 8.14g kg^{-1} 累積雲量的位置往南移至與衛星雲圖上的對流系統較接近的位置。同時，在台灣中

南部的累積雲量增至約 6.63g kg^{-1} ，此區域在衛星雲圖上也是對流較強的區域。不過，海峽北部、福建沿海一帶的累積雲量增加，此在衛星雲圖上並無雲帶之分布。另外，原來在台灣東方太平洋海域上的累積雲量由 8.66g kg^{-1} 增至約 16.06g kg^{-1}

kg^{-1} ，與衛星雲圖上比較，在台灣東方的太平洋海域上的累積雲量似乎過強，位置也偏北。

至於經過四維資料同化的 Exp3(圖 10c)，在台灣海峽區域的累積雲量增至約 12.95 g kg^{-1} ，同時，在其西南方位於近南海區域有另一值約 16.17 g kg^{-1} 的累積雲量區域存在，定性而言與雲圖相近。同時，台灣東方太平洋海域上的累積雲量約 3.21 g kg^{-1} ，比 Exp2 的預報值 16.06 g kg^{-1} 降低許多，且位置與鋒面雲帶較吻合。就 Exp3 在此三處累積雲量較大的區域與圖 10d 的衛星雲圖比較可發現，衛星雲圖上對流系統的位置及雲量分佈較多的區域與 Exp3 的累積雲量較大的區域頗為吻合，顯見，Exp3 的預報結果與實際觀測的衛星雲圖最接近。不過，Exp3 在台灣海峽北方有一較大值的累積雲量，此區在衛星雲圖上則是幾乎無雲的。

圖 10 為 24h 預報的累積雲量模擬，其模擬結果將反應在 24h 之後可能的降雨情形。由以上的討論可以顯現出加密探空資料及四維資料同化有助於雲量之預測。若與圖 9b 比較，我們發現 24h 雲量預報的結果與 24~36h 降水預測之結果頗為類似，即以 Exp3 的結果最好，Exp2 次之，而 Exp1 為最差。

五、結 論

本文使用國際南海季風觀測實驗計劃在 1998 年 6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC 期間的加密探空資料及全台自動雨量站的觀測資料，經由三組不同的實驗設計，探討加密探空資料及四維資料同化對於中尺度模式 MM5 在梅雨期間降水預報的影響。

在各個氣象預報場的 RMSE 方面，我們將 6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC(全期)的所有個案，針對各個氣象預報場與其相對應之分析場求其 RMSE。同時，將全期的個案進一步分成多雨期(6 月 5 日 0000 UTC ~ 6 月 10 日 1200 UTC)及少雨期(6 月 11 日 0000 UTC ~ 6 月 24 日 0000 UTC)兩個階段以了解三組實驗在不同氣候狀態下之預報能力有何不同。另外，我們也將全期各組實驗的模擬分成兩組，分別為以 0000 UTC 及 1200 UTC 為初始時間的個案求其 RMSE，以探討模式中使用不同初始時間對於預報結果的差異。

整體而言，三組實驗於全期在整個細網格的預報結果顯示，在 MM5 模式模擬之中加入加密探空資料，對於模式在風場的預報有顯著改進，應用四維資料同化推進法(FDDA nudging)之技術可進一步降低風場模擬之誤差，尤其是在模式預報 36h 時，改進的情形最明顯。但是，溫度場的預報僅在 36h 的預報中略有幫助，其他時間則幾乎沒有幫助。至於海平面氣壓的預報，當加入加密探空時，模擬顯示 RMSE 會降低，若再加上 FDDA，則可進一步改進預報之誤差。而重力位高度之預報則僅在預報時間較長時會有正面之幫助。在相對濕度的預報上，僅在 36h 時可見加密探空之幫助，其餘都是較差的結果。不過，從技術得分(Skill score)可清楚看到，對以上所有的氣象場而言，加密探空及四維資料同化對模擬之幫助隨模擬時間之增長而增加。

同樣期間，加密探空資料及四維資料同化在華南台灣(SCTW)區域的預報結果，除了保留在 ALL 區域時對風場的預報有明顯的改進之外，對於在 ALL 區域預報改進較不明顯的溫度場、海平面氣壓、相對溼度，甚至重力位高度，

在 SCTW 區域於模式預報 36h 時可以看到較正面的幫助。此結果正說明了在洋面上因為觀測資料稀少，導致初始分析場較不可靠，因此模擬結果較差，也無法顯現加密探空及 FDDA 對模擬之幫助。當把校驗之範圍縮小至 SCTW 區域時，洋面的網格點大大地減少了，因此，密集探空對模式的模擬有正面之貢獻，在加入 FDDA 時，其幫助就更明顯了。

針對多雨期與少雨期個案所得的技術得分 (SS) 顯示，加密探空資料與四維資料同化對於模式在多雨期的預報，平均而言，比少雨期更能凸顯其對各個氣象場預報的改善。這顯然對災害天氣預報而言是個好消息，因為加密探空對於提昇豪/大雨期間的預報有正面的效益，無疑對於改進數值模擬技術，以達防災之效果提供了一個可行的方向。

另外，由不同初始時間的所有個案之技術得分得知，當我們針對初始時間為 1200 UTC 的個案進行分析時，加密探空資料及四維資料同化對於模式預報結果的貢獻比 0000 UTC 的個案明顯。因為一般而言，觀測資料的量在 0000 UTC 比 1200 UTC 為多(洪, 1999)，且在東亞地區 0000 UTC 是早上八點，而 1200 UTC 是晚上八點，由於日夜變化之關係，1200 UTC 的大氣會比 0000 UTC 含有較多中、小尺度的擾動，導致 0000 UTC 的初始資料優於 1200 UTC。因此，MM5 一般可以在 0000 UTC runs 中獲得優於 1200 UTC runs 的模擬。所以，1200 UTC runs 在沒有加密探空資料或四維資料同化的協助下會有較大的誤差，故更能顯現當加入加密探空或四維資料同化後所得的正面效益。

在降水預報方面，我們將模式預測所得在

台灣地區的降水量與全台自動雨量站每 12h 的累積降水量做比較，採用 ETS 校驗方法。結果顯示，全期的三組實驗中在 12 ~ 24h 降水預報以 Exp2(含加密探空)表現最佳，其次為 Exp1(無加密探空)，最差的是 Exp3(使用 FDDA)。可見加入加密探空資料有助於提昇台灣地區降水之預報能力，而四維資料同化對 12~24h 之降水預報似乎沒有正面之幫助。不過，當預報時間增長為 24 ~ 36h 時，四維資料同化對於模式的降水預測能力有了實質的幫助，同時，有加密探空的模擬仍然比不含加密探空的模擬要好。可見，雖然大部份的加密探空位於上游地區，不過，其對台灣地區降水之模擬仍有正面之幫助。因為，當對於上游大、中尺度環流有較正確之模擬時，模式對於其下游地區之降水必然會有較好之掌握。至於四維資料同化則僅在模擬時間較長時才對台灣地區之降水預報有正面之幫助。

此外，在美國西岸，由於主要的天氣系統均在太平洋上形成並向東移至陸地，因此天氣預報非常仰賴其上游東太平洋上的觀測資料。但是，受限於海洋上觀測資料相當稀少的事實，數值模擬及天氣預報的技術仍有很大的改進的空間；因此，美國氣象學家嘗試在當有天氣系統靠近時，利用 P3 飛機進行觀測或釋放 Dropsonde 在洋面上空，期望能獲得更多的觀測資料，藉此來改進中尺度數值預報模式的預報能力。台灣四面環海，天氣預報上所遭遇的難題——觀測資料有限——與美西的情形類似。因此，本文利用 SCSMEX 在華南地區的加密探空資料進行研究，已瞭解這些資料的確對中尺度模式的模擬及豪/大雨的預報有所幫助。故期望此研究的結果所提供的訊息不但有助於提昇台灣地區數值模式預報之技術，也能有助於世界上其他類似地區的

相關研究。

致 謝

本研究在國科會自然處研究計劃 NSC89-2111-M-003-003-AP7 及 NSC 89-2111-M-003-007-AP7 支助下完成。感謝中央氣象局提供研究期間所需之資料,以及王作台教授、周仲島教授、及鄒治華教授提供許多建議,使得本文得以順利完成,兩位審查者提供寶貴之意見也一併致謝。感謝鄭婷華小姐在本文備稿時提供之協助。

參考文獻

- 王作台, 謝信良, 莊文思, 1999: 南海季風實驗計劃國際合作研究成果。科學發展月刊, 27, 1031-1044。
- 方力脩與陳慧貞, 1989: 數值天氣預報之校驗方法綜評。氣象學報, 35, 1, 48-63。
- 丘台光、謝信良與林民生, 1993: 梅雨季中尺度對流系統預報作業化之研究。國家科學委員會防災科技研究報告 82 ~ 39 號, 37 頁。
- 洪景山, 1999: 中央氣象局 SCSMEX 期間全球觀測資料接收及使用之分析。大氣科學, 27, 341-357。
- 陳泰然與謝信良, 1992: 台灣地區中尺度實驗計劃1992年預報實驗之規劃與執行計劃: 預報實驗計劃辦公室(二)。國家科學委員會防災科技研究報告 81 ~ 12 號, 60 頁。
- 葉天降, 1998: 嘉南地區 1997 年梅雨期降水之特性與作業模式預測較驗。大氣科學, 26, 41-60。
- Black, T. L., 1994: The new NMC mesoscale Ets model: Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, 9, 265-278.
- Chen, G. T.-J., 1992: Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-Yu season. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 497-516.
- Chen, G. T.-J., and T. Y. Yu, 1985: Pilot study of "A Severe Regional Precipitation Observation and Analysis Experiment". Nat. Sci. Council, and Tech. of Disaster Prevention Program, 108 pp.
- Chen, S. J., Y. H. Kuo, W. Wang, Z. Y. Tao, and B. Cui, 1998a: A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2330-2351.
- Chen, C., W. K. Tao, P. L. Lin, G. S. Lai, S.-F. Tseng, and T. C. Chen Wang, 1998b: The intensification of the Low-Level Jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 349-371.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale modeling(MM5). *NCAR Tech Note*, NCAR/TN-398+STR, 138 PP.
- Lau, K. M., Y. Ding Ding, J. R. Johnson, T. Keenan, R. Cifelli, J. Gerlach, O. Thiele, T. Rickenbach, S.-C. Tsay, and P.-H. Lin, 2000: A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 1261-1270.
- Stauffer, D. R., and N. L. Seaman, 1990: Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale. *Data Mon. Wea. Rev.*, 118, 1250-1277.
- Stauffer, D. R., N. L. Seaman, and F. S. Binkowski, 1991: Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 734-754.
- Yang, M.-J., F.-C. Chien, and M.-D. Cheng, 2000: Precipitation parameterization in a simulated Mei-Yu front. *TAO*, 11, 393-422.

An Impact Study of Supplementary Soundings on MM5 Simulations during SCSMEX

Fang-Ching Chien Jing-Yu Lo

Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University

(Manuscript received 30 August 2001 ; in final form 8 February 2002)

ABSTRACT

This paper presents an impact study of supplementary sounding data on MM5 simulations during the second intensive observation period (5-25 June) of South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) in 1998. The data are soundings at 0600 UTC and 1800 UTC, in addition to the regular ones (0000 UTC and 1200 UTC), that were carried out by about 37 rawinsonde stations over southeastern China and Taiwan. The results show that the inclusion of the extra soundings does improve the MM5 simulations, especially on the wind field. Applying the Four-Dimensional Data Assimilation (FDDA) technique further reduces the simulation errors. As for temperature, pressure, and relative humidity, the assistance only shows up at low levels and increases slightly for longer integration. When the verified region is further shrunk into smaller areas (e.g., southeastern China and Taiwan) such that most grid points over ocean are eliminated, the improvement of the model simulations as a result of the supplementary soundings increase significantly.

We also divided the verified samples into two groups: one for a time period with intensive rainfall events (5-10 June), the other with nearly no rainfall (11-25 June). It is found that the supplementary data helped the MM5 simulations more significantly for the rainy period than the droughty one. In other words, if more observations could be obtained, the model is likely being able to do a better job in simulating the rainfall events. In another analysis, we found that the extra soundings have more positive impact on the simulations that are initialized at 1200 UTC than those started at 0000 UTC.

The supplementary soundings, though mostly located in the upstream, increased the model's skill in predicting rainfall over the Taiwan area. Adding the FDDA technique in the model further contributed to increasing the model performance in rainfall predictions as integration getting longer.

Key words : South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX), MM5, Four-Dimensional Data Assimilation (FDDA)