

# 美國豪雨預報之研究、發展與作業

陳 泰 然

國立台灣大學大氣科學研究所

## 一、前 言

過去一、二十年來台灣地區，因為經濟的迅速發展，故由災變天氣所導致的財物損失也隨著快速增加，其中最顯著的一項災變天氣就是豪雨（heavy rainfall；excessive rainfall）及其導致的暴洪（flash flood）。例如：1981年5月28日桃竹地區豪雨，1984年6月3日及10日台北地區的豪雨，導致的財物損失（包括直接及間接）估計約在新台幣百億級。因此，改進豪雨之偵測系統、預報系統與傳播系統以及伴隨之暴洪警報系統，遂為當今台灣地區氣象及水文作業上面臨的最重要課題之一。

美國豪雨及暴洪導致的災害亦十分嚴重。在1970年代已變為最嚴重的氣象災害，1971～1977年全國發生1000次大小規模之暴洪事件。根據美國氣象學會會刊（BAMS）1978年報告，美國自1968年後每年平均因洪水及豪雨導致的暴洪死亡人數約200，此數目約為1960年代的2倍，1940年代的3倍。財物損失平均每年約10億美元，約為1940年代的10倍。而美國總統所發佈的主要災害事件中，洪水及暴洪約佔85%。估計在處理洪水問題方面若沒有改進，則在2000年代平均每年財物損失將達35億美元，約為現在平均損失的3.5倍。

豪雨之定義，定性而言並無問題，在某特定區域某特定時間內有大量降水就可稱為豪雨。若大量降水發生在短時間內，則將伴隨暴洪現象。顯然，大部份暴洪係由豪雨而來，但因水庫或防洪堤破裂之暴洪例外。定量而言，豪雨之定義有些困難，因

在實用上需考慮可否導致災害而定。如此將牽涉到各行各業對於降水量之敏感程度問題，顯然不可能找出一個在各方面均很實用的定義了。例如，過去國內很多氣象學者以及中央氣象局的預報作業，常以每天降水量超過100公厘為豪雨之定義。吳等（1984）以水稻災害為準，分析24小時，12小時，6小時及3小時累積雨量導致的稻作災害，發現以3小時大於20公厘或6小時大於30公厘來定義豪雨要比24小時大於100公厘更為理想。此種定義在其他各行各業是否適用，有待進一步調查分析。

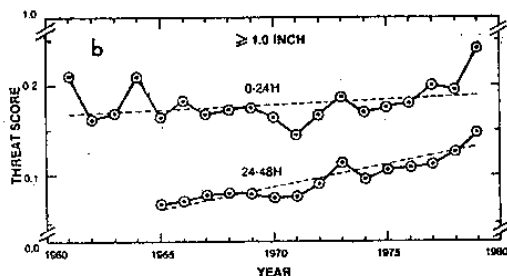
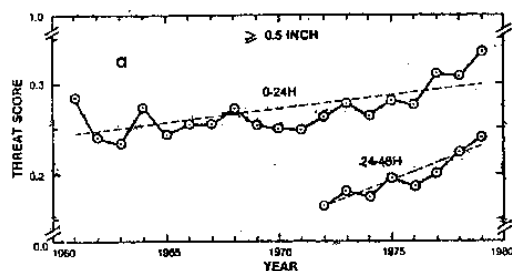
美國國家氣象中心（NMC）之豪雨組（Heavy Precipitation Branch）發佈豪雨潛勢展望（excessive rainfall potential outlook）之標準訂為當降水量在預報時段內3～6小時之降水量相等於或超過產生暴洪之量（由河流預報中心定義，RFC）或在展望期間降水量超過5吋（美國西部定為2吋）時（NWS，1983）。

我們已熟知，局部天氣預報之準確率似與該天氣現象之劇烈（程）度成反比。此點在過去如此，現在如此，未來也將如此，似乎已可看成“天氣預報第一定律”，即危害性劇烈天氣難報律。豪雨預報的問題應可適用這一定律。當然，我們知道空間尺度及時間尺度較小之天氣現象，在觀測上及理論了解上目前均仍存有極大的困難，此種情況在劇烈天氣現象（例如豪雨）更為明顯。由於此種潛在的困難，目前豪雨預報準確率不論國外或國內均仍偏低。一般大眾對於這種現況的態度，若以“天有不測之風雲”加以解釋，似乎是很了解現階段氣象學術界及氣象作業單位的能力。

鑑於目前豪雨預報準確率偏低及豪雨導致之財物損失將隨經濟成長而增加，豪雨研究及預報技術發展乃成當前氣象界之重要課題。本文目的在於評介美國在豪雨研究與作業之現況，其中某些觀點或技術或可做為今後我國在處理豪雨問題時之參考。本文首先將討論美國氣象局(NWS)有關之定量降水預報問題以及豪雨與暴洪問題，然後評介美國豪雨之應用研究、預報技術發展及預報作業，最後提出一些個人看法。

## 二、美國氣象局定量降水預報校驗

美國氣象局(NWS)自1961年開始發佈定量降水預報(QPF)，並在NMC成立任務小組負責2天的QPF及16小時大雪預報。Charba and Klein (1980)以司瑞得分(Threat Score; TS)校驗1961~1979年NMC所發佈的主觀定量降水預報技術，結果發現定量降水預報相當困難，但有改進趨勢。TS定義為 $C/F+O-C$ ，C為正確預報(面積)，F為預報，O為觀測。若預報完全正確則 $TS=1$ ，完全錯誤則 $TS=0$ ，即TS值愈大表示預報準確率愈高。圖1為

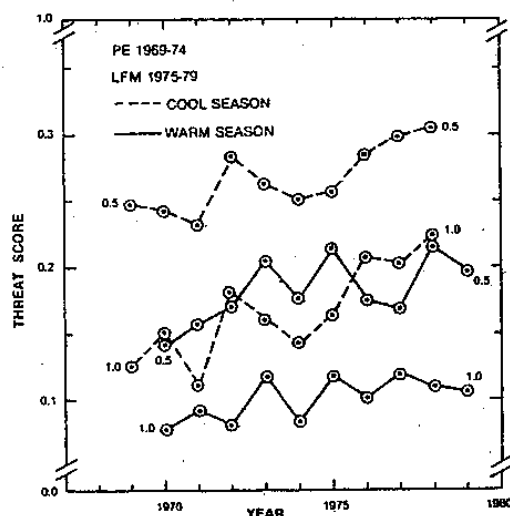


Annual (calendar year) areal threat scores for centralized QPFs of a)  $\geq 0.5$  in and b)  $\geq 1.0$  in produced subjectively at NMC. Trend lines are dashed as before.

圖1 NMC主觀QPF之TS值年分佈，虛線為趨勢。(Charba and Klein, 1980)

0~24 h.及24~48 h.之降水量 $\geq 0.5$  in及 $\geq 1.0$  in之TS逐年變化。顯見，預報期限愈長準確率愈差，雨量愈大預報準確率愈差。例如：對 $\geq 1.0$  in之預報，0~24 h.準確率約為24~48 h.之2倍； $\geq 0.5$  in之24~48 h預報準確率約與 $\geq 1.0$  in之0~24 h預報相同。預報準確率有改進的趨勢，且改進速率24~48 h較0~24 h為大，前者約為後者3~4倍。

Charba and Klein亦分析冷暖季由PE (1969~74)及LFM (1975~79)數值模式之12~36 h QPF差異(圖2)，發現TS之逐



Seasonal threat scores of 12-36 h PE and LFM forecasts of  $\geq 0.5$  in and  $\geq 1.0$  in. These threat scores are based on forecasts made once daily (from 0000 GMT) for 230 United States stations. The seasons are defined as in Fig. 7 and the plotting convention as in Fig. 4.

圖2 NMC 12~36h PE與LFM之QPF之冷季TS值年分佈(230站平均)。(Charba and Klein, 1980)

年變化趨勢與圖1所示之NMC主觀QPF相同。他們認為主觀QPF之改進主要係由NWP指引之改進而來，這些指引包括NWP模式預報之QPF及1975年開始之MOS預報QPF。圖2顯示冬季預報準確率較夏季為高， $\geq 1.0$  in之TS冬季約為夏季的2倍。顯然，導致大量降水之冬季中尺度系統一般存在於強烈氣旋式環流內，NWP對這種系統之預報能力較強，而夏季伴隨大量降水之小尺度系統則在較弱且較少組織性之環流系統裡，NWP對這類系統之預報能力較差。

由上述 Q P F 校驗顯示，定量降水預報之困難度比有無降水之預報更高， $\geq 1.0$  in Q P F 之 T S 還不及有無降水預報 T S 之半。唯因 NWP 之改進亦使 Q P F 有所改進，且降水量較大之預報準確率改進速率比降水量較小者更大，故今後對大雨或豪雨預報準確率之提高似可預期，且有大幅提高之餘地（目前能力仍低）。

### 三、最近一二十年來降水預報準確率改進了嗎？

數值預報作業化以前，環流系統預報（即氣象預報）能力進步相當緩慢，且預報期限及準確度均幾達上限。1955 年美國氣象預報作業正式步入數值預報時代，Shuman（1978）分析 1958~1975 年環流系統預報準確度發現，30 小時地面綜觀尺度系統之環流預報改進 20%，36 小時 500 mb 環流預報改進 30%，這段期間之預報技術約增加一倍（圖 3）。在天氣預報方面，由於原始方程模式之作業化（1968）及數值—統計法（M O S）之應用，使得最高溫度及最低溫度之預報在 1968~1975 年間之校驗，24 小時預報改進 25%，48 小時改進 30%（圖 4；Fawcett, 1977）。

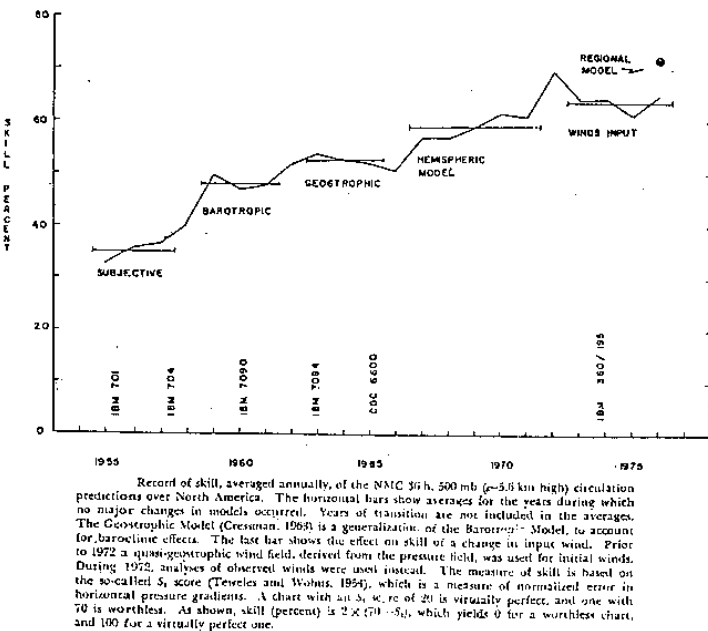


圖 3 NMC 36h 北美 500mb 環流預報技術年平均變化。(Shuman, 1978)

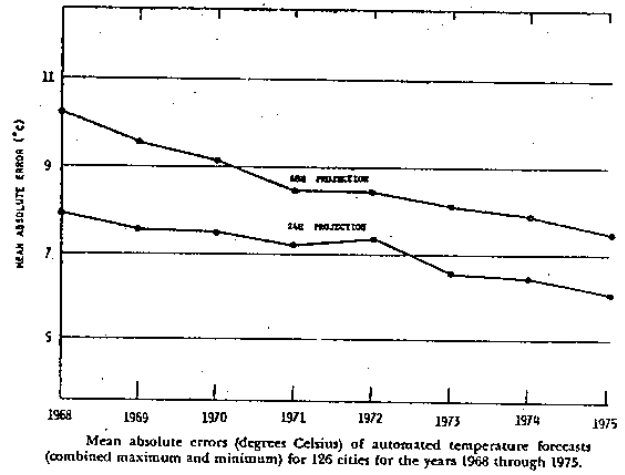


圖 4 NMC 126 個城市之最高與最低氣溫預報之平均絕對誤差。(Fawcett, 1977)

Shuman（1978）分析 1954~1975 年間華盛頓、芝加哥及波士頓 0~12h，12~24h 及 24~36h 三個時段有無降水之預報發現，這段期間預報準確率由 80% 提高至 84%（圖 5）。對

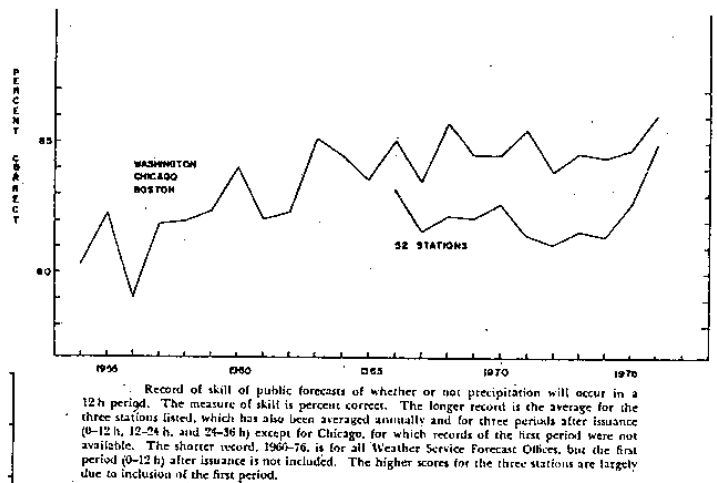


圖 5 華盛頓、芝加哥及波士頓三城市三個預報時段（0~12h，12~24h，24~36h）之有無降水預報準確度年平均及 52 個 WSFO 預報。(Shuman, 1978)

於 1958~1976 年間 24 小時累積雨量  $> 25$  公厘之 T S 得分分析發現，1960 年 9 月 NMC 成立定量降水預報小組以善加利用數值預報產品後，預報技術立刻有顯著改進，唯後來改進趨於緩慢（圖 6）。1966~1977 年間 NWS 對 NMC 及 WSFO / WSO 之有無降水預報準確率校驗結果如圖 7 所示（Cooley et al., 1981），顯見區域天氣

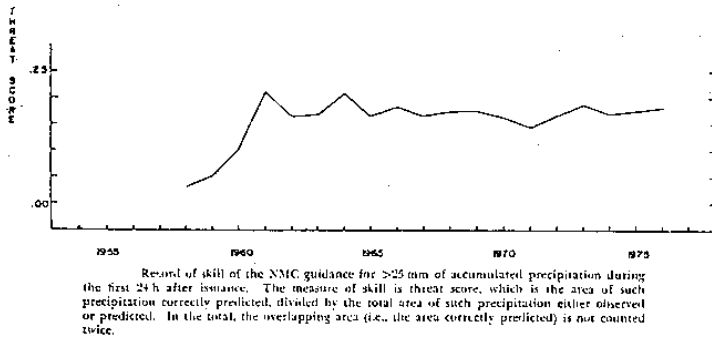
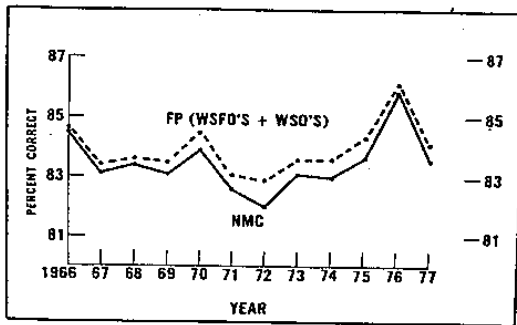


圖6 NMC > 25mm之24小時雨量主觀預報 TS值年變化。(Shuman, 1978)

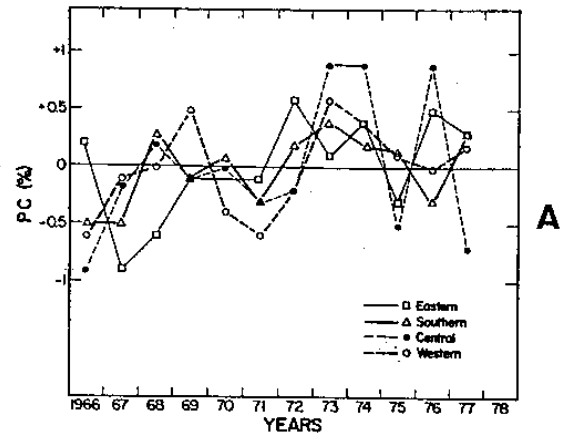


Percent correct of National Meteorological Center (NMC) and Weather Service Forecast Office's (WSFO) plus Weather Service Office's (WSO) precipitation and no-precipitation forecasts for 1966-77. Yearly (April-March) averages for the contiguous United States include morning (0600 GMT) and afternoon (1800 GMT) forecasts for all three periods (Table 1). From Cooley et al. (1981).

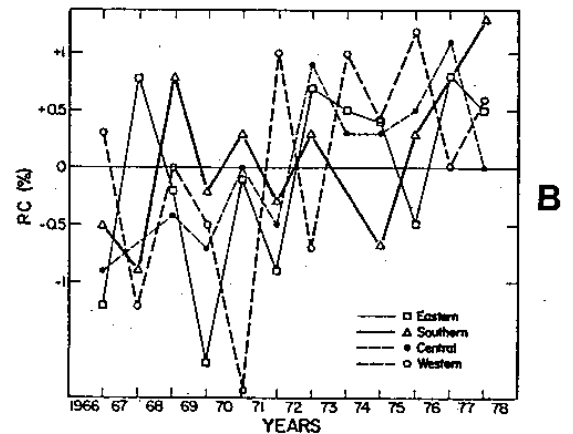
圖7 NWS對NMC及WSFO/WSO之有無降水預報準確率校驗。(Cooley et al., 1981)

預報中心在參考NMC各種預報指引所做的降水預報較NMC發佈之降水預報準確率高。Ramage (1982)進一步分析這段期間NWS區域預報中心之有無降水預報，結果再度證實過去已知的一些現象。他再度發現夏季預報準確率較冬季為低，且預報準確率與相對降水頻率有關(相對於總預報時間或次數)，相對頻率愈高，則準確率愈低。他進一步去除相對頻率對方差(variance)之貢獻，求得真正的預報準確率趨勢如圖8所示。顯見，冬季有一點正趨勢而夏季趨勢很小，改進速率冬季為1%/8年，而夏季為1%/18年，如此約需53年才能使夏季準確率達到目前冬季預報之水準。

Sanders (1979)校驗在MIT氣象系師生所做的12年主觀機率條件性定量降水預報(分



Trend (1966-78) in percent of correct precipitation forecasts (PC) with contribution of relative precipitation frequency to the variance removed. Summer.

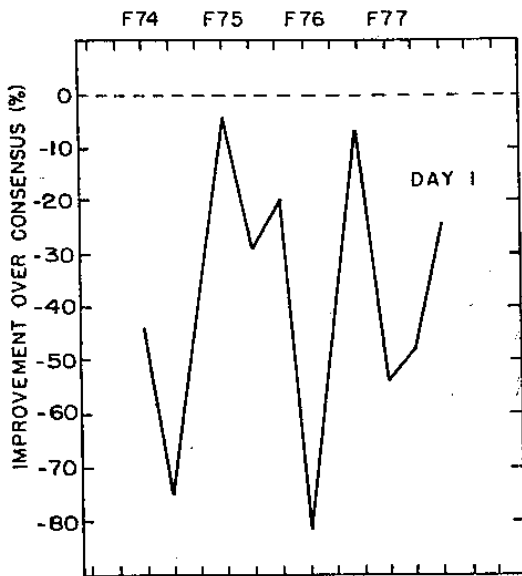


Same as Fig. 5, but for Winter.

圖8 去除相對降水頻率對方差之貢獻所得之(A)夏季(B)冬季有無降水之預報準確度趨勢。(Ramage, 1982)

6個等級)試驗發現，在這12年裡所做的4天逐日預報中第一天並無改進，第2~4天每年平均改進0.6%。NMC條件性定量降水預報指引之技術較公意預報(Consensus,即參與預報者之平均預報)及長期資料之中數(median)預報為差。NMC之條件性定量降水預報(第1天)相對於公意。預報之表現如圖9所示，顯見預報員可改進NWP預報指引來提高準確率。預報員參考NWP產品指引所作2天之後的預報改進，主要乃歸因於NWP對環流系統預報的不斷改進，現階段1~2天降水預報能力似乎在NWP作業化之前即已存在(Riehl et al., 1952)。

由上述過去一、二十年來天氣預報與氣象預報(環流系統預報)之校驗發現，天氣預報之改進速率要比氣象預報(NWP)之改進速率為慢，特別



Same as Fig. 4, but for conditional quantitative precipitation forecasts.

圖9 NMC之條件性QPF對MIT氣象系師生公意預報之表現。(Sanders, 1979)

是降水預報。基於決定天氣變化因子繁雜（大氣不同尺度運動系統、局部地形、山脈、海陸差異、日夜變化……）的考慮，此點在未來似乎亦將成立，故似可視為“天氣預報第二定律”。基於此點事實以及複雜的NWP模式與較簡單的統計預報模式（Bauer and Kutzbach, 1974）或正壓——統計預報模式（Leith, 1974）之校驗結果相近，Ramage（1976）很悲觀的認為NWP對天氣預報沒有多少改進故應該放棄，要改進天氣預報則需訓練預報員使能辨認天氣發生之徵兆。當然，美國氣象界並未接受Ramage的看法而放棄NWP，在天氣預報上NMC則採用以NWP產品與天氣迴歸關係之MOS方法，在區域預報中心則預報員利用NMC所發佈NWP（SMG3C, LFM II, MFM）及MOS預報產品為指引，了解模式限制及誤差，以做主觀判斷（採用或修正），來改進天氣預報，此即人機（器）組合預報系統（man-machine mix）的觀念。此處機器所指除由電腦產生之NWP及MOS產品外，當亦包括雷達及人造衛星等觀測資料。

#### 四、豪雨與暴洪

所謂暴洪即指在短時間內（數小時）因過量降

水（即豪雨）或水庫（水壩）、防洪堤等破壞所導致之洪水而言。美國在1971年由國會正式通過天然災害防範計畫，當時主要係針對颱風，後來該計畫擴大包含局部劇烈風暴、冬季風暴、洪水及暴洪。由於該計畫之存在而發展出主要的大眾安全與教育計畫，使一般大眾對災變天氣之警覺性提高，並增加對警報之反應（Mogil et al., 1978）。

美國的暴洪守視/警告計畫（flash flood watch/warning program）裡，係由WSFO負責發佈暴洪守視而由WSFO/WSO發佈暴洪警告。NMC的定量降水預報小組（QPB）每天發佈6次降水預報指引，指出將發生某特定降水量之區域，此預報資料傳至河流預報中心（RFC）及WSFO。此預報指引主要乃依據綜觀尺度之分析及預報再經主觀修正，不能用以確定局部地區發生之大量對流降水。WSFO根據一些由綜觀尺度資料診斷所做的雷雨降水潛勢預報指引（例如：Maddox, 1979；Maddox and Doswell III, 1982），在豪雨發生前發佈有效時間≤12小時之暴洪守視。當暴洪已經觀測到或將導致暴洪之豪雨已明顯的由雷達或自動雨量測站觀測指示出來時，則由WSFO/WSO發佈暴洪警告，有效時間通常≤4小時。WSFO/WSO並利用雷達資料（包括雷達羣回波主觀評估，人工數字雷達（MDR），雷達數字化及處理機（RADAP）等資料）及衛星降水量估計來發佈有關雷雨降水量。

美國氣象學會有鑑於暴洪之嚴重性，呼籲美國各界應採取以下9項行動，以謀求改進對豪雨及暴洪問題之處理（BAMS, 1978）。

- (1)對暴洪區增設使用規則。
- (2)水庫安全性之檢查。
- (3)改進在設計及規畫方面所需之最大降水量頻率及伴隨之逕流資料。
- (4)規畫並執行廣泛且連續之一般大眾警覺計畫。
- (5)氣象、水文、工程、社會各方面專家及政府有關單位間之關係及連繫應該加強。
- (6)增加對地面自動觀測、雷達及衛星等資料之利用，以改進對暴洪條件之偵測。
- (7)增進對降水發生地點及降水量之預報能力。

\* (8) 增進對強烈小尺度現象之預報能力。

(9) 改進社區警報系統，並注重在鼓勵對警報之個別反應防範行動。

Mogil 等人 (1978) 認為在改進暴洪警告及防洪措施方面，在氣象上之配合至少應包括下列四點：

(1) 發展並改進對劇烈降水預報之統計指引。

(2) 增加對對流尺度過程之了解。

(3) 繼續發展以衛星資料估計降水量之技術。

(4) 繼續利用降水量觀測以校準雷達，並利用強度之外的其他雷達參數（例如：回波高度，LWC 垂直積分值……）來估計雨量。

## 五、豪雨之應用研究

陳 (1985) 分析美國有關大氣科學 (或氣象學) 研究性質類別及主要推動、策畫與經費支援的單位發現，研究目的及性質與天氣預報 / 氣象預報直接有關的研究略可分為四類。(1) 基礎研究：屬上游研究工作，注重在因果關係之基本了解，主要支援單位為國家科學基金會 (NSF)，相當於我們的國科會 (NSC)。(2) 應用研究：屬中上游研究工作，注重在基礎研究成果移植到預報作業之可行性及理論結果與實測關係之研究。主要支援單位為各氣象業務專責機構，例如：國家海洋大氣總署 (NOAA)，相當於我們的中央氣象局，大空總署 (NASA)，海空軍主管氣象業務發展單位 (例如：海軍環境預報研究院，NEPRF) 等。(3) 技術發展：屬中下游研究發展工作，當應用研究成果證實預報作業系統內可行，即可進行預報技術 (即方法) 發展 / 開發工作。此項工作支援單位主要為實際負責預報作業之機構，採取內部研究方式或外部 (包) 研究方式或內外合作研究方式 (與我們之建教合作構想相似) 進行。(4) 作業化：屬下游作業化工作，使現存已被證實具有預報能力 (技術) 之預報方法 (或技術) (例如：某數值模式) 成為氣象預報單位作業化系統一部份之建置工作。目前中央氣象局進行的全面業務電腦化有關數值預報作業化之建置即屬於此類作業化工作，主要支援單位當非使用單位莫屬。

大氣現象繁雜，其研究內容及性質之波譜寬廣，因而各學者及預報實作人員對研究性質之歸類可能因其所在領域及觀點而異，上述分類僅能提供歸類指引。豪雨屬一種相當特殊的天氣現象，有關豪雨研究方面之分類相當困難，本文僅以預報實作人員面臨豪雨預報問題之觀點，舉例介紹有關豪雨方面之研究，並試圖將它們歸到應用研究、技術發展及預報作業三個範疇。

美國全國風暴計畫 (National STROM Program) 第一階段的 STROM Central 實驗計畫主要目標為中尺度對流系統 (MCS) 的基礎研究、應用研究及作業技術發展。在應用研究及作業技術發展方面，該計畫確定的三個目的如下 (NCAR, 1984)。

(1) 改進伴隨 MCS 之降水發生時間、地點及降水量之預報準確度。

(2) 改進伴隨 MCS 之強風、冰雹、龍捲風、暴洪、閃電及危險性低空風切等之發生時間、地點、大小及強度等之預報準確度。

(3) 增進為未來進一步改進 MCS 與伴隨天氣現象之預報以及改進伴隨劇烈天氣現象之偵測與警報等所需之觀測與預報作業系統之了解。並開始發展及測試新的作業預報技術 (方法)。

在改進豪雨預報之應用研究，可約略分為中尺度數值預報模式之研究及豪雨 / 暴洪個案之觀測資料診斷分析兩方面。前者例如：Nickerson and Richard (1981) 之三維中尺度模式，後者例如：Bosart and Carr, 1978; Bosart and Sanders, 1981; Carr and Bosart, 1978; Fritsch et al., 1981; Grice and Maddox, 1982; Hales, 1978; Maddox et al., 1978; 1979; Maddox and Doswell III, 1982; Whitney, 1977 等。

Nickerson and Richard (1981) 之中尺度模式範圍為  $230 \times 230 \text{ Km}$ ，水平解析度為  $\Delta x = 10 \text{ Km}$ ，垂直 15 層，積分時距  $\Delta t = 15 \text{ s}$ ，雲微物理過程參數化，包含地形近地層模擬，其 QPF 結果一般與觀測之區域大小一致。他們認為誤差主要可能由初始資料之空間解析度不足而來。這類

模式目前實際應用於預報作業之困難仍多，主要問題在於所需計算時間太長且初始化需大量準確資料，但目前作業化之觀測系統對此種資料之提供仍無能為力。但在某些綜觀形勢下由地形引發之中尺度系統，例如：地形雨過程，Pielke (1981) 認為中尺度模式預報可提供很有價值之預報指引。

Whitney (1977) 研究春季 5 個發生劇烈天氣之個案發現，這些劇烈天氣發生區域與副熱帶噴流息息相關，均發生在噴流條出區北側，南側則否。此項觀測可由 Uccellini and Johnson (1979) 提出中尺度地轉動量近似模式之兩層質量調整過程獲得合理的解釋。Maddox and Doswell III (1982) 研究春夏之交三個組織性對流降水個案發現，在中對流層渦度平流機制微弱而高低層噴流適當偶合 (coupling) 情況下，此種組織性對流將在低對流層持續之暖平流及條件不穩定區發展。

Maddox et al. (1979) 利用 1973~77 年之風暴及暴洪資料，研究 151 個伴隨豪雨/暴洪之氣象條件發現，伴隨之氣象形勢及參數 (特別是高層風) 變率極大，故在辨認導致暴洪之豪雨產生之必要條件上非常困難。但是，對大部份之豪雨事件而言，仍有一些共同之氣象特徵。他們發現中對流層移動之短波槽常激發雷雨發展，且豪雨經常發生在中對流層大尺度脊區附近，也發生在微弱的地面氣壓系統內。這些豪雨很多是發生在夜間時段。這些導致暴洪之豪雨共同氣象特徵則包括：

- (a) 豪雨由對流風暴而來。
- (b) 地面露點很高。
- (c) 深厚對流層內含有大量水氣。
- (d) 在雲厚度範圍內僅具微弱至中度之垂直風切。

這些豪雨在綜觀形勢上可歸類(1)綜觀型 (Synoptic type)，(2)鋒面型 (frontal type)，(3)中尺度高壓型 (mesohigh type) 及(4)西部型 (Western type)，茲分別將其各層 (地面、850 mb、500 mb) 綜觀形勢及季節頻率分佈簡述如下：

(1) 綜觀型

此類約佔總數 20%，發生頻率之季節分佈如圖 10 所示。顯見最多發生於春秋季節；主要乃因此時具有動力過程及熱力過程之有利組合。圖 11

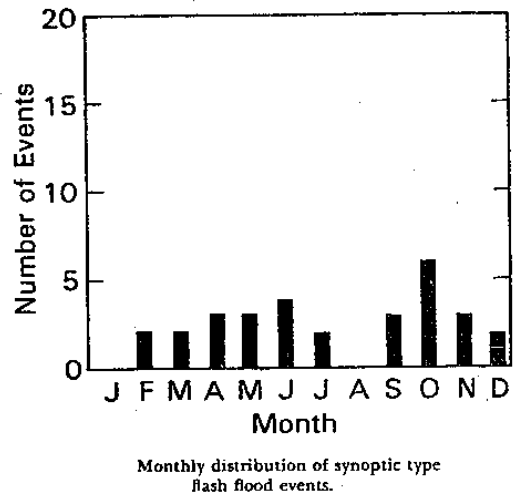
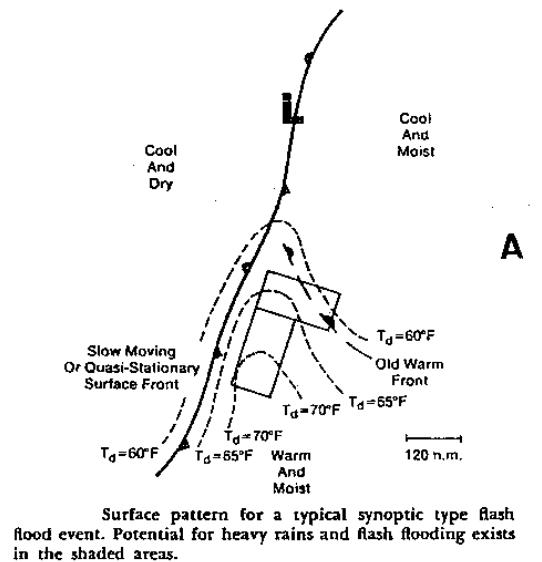
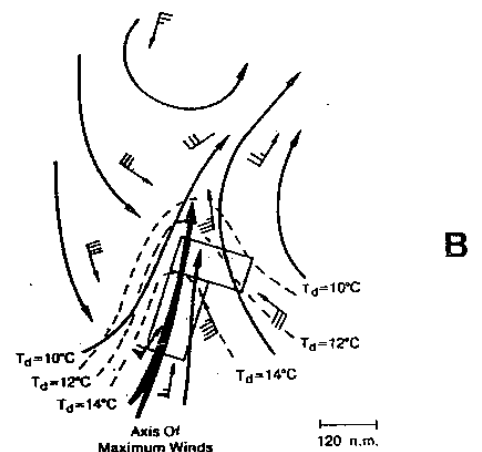


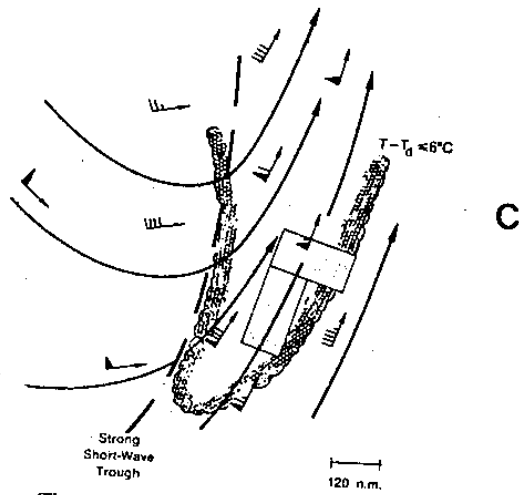
圖 10 綜觀型豪雨/暴洪頻率之季節分佈。(Maddox et al., 1979)



Surface pattern for a typical synoptic type flash flood event. Potential for heavy rains and flash flooding exists in the shaded areas.



The corresponding 850 mb flow pattern for a typical synoptic type flash flood event. Winds are in knots with full barb = 10 kt and flag = 50 kt.



The corresponding 500 mb flow pattern for a typical synoptic type flash flood event.

圖 11 綜觀型豪雨 / 暴洪發生之(A)地面, (B) 850 mb, 及(C) 500mb之綜觀形勢。  
(Maddox et al., 1979)

為地面、850mb及500mb之綜觀氣流形勢，豪雨潛勢區為在鋒前長方形範圍內。此類豪雨發生係伴隨地面相當強的綜觀尺度氣旋或鋒面系統。500mb主槽通常緩慢東移或東北移，伴隨之地面鋒常屬滯留性。豪雨潛勢區向東延伸乃因暖鋒常限制豪雨之向北擴張而有利於激發新對流之往東發展。

(2) 鋒面型

此類約佔總數 25%，發生頻率之季節分佈如圖 12 所示。顯見除 6 月外（可能取樣太少），此類在 3~9 月間發生機率相近。圖 13 為地面、850mb及500mb之綜觀氣流形勢，豪雨發生於

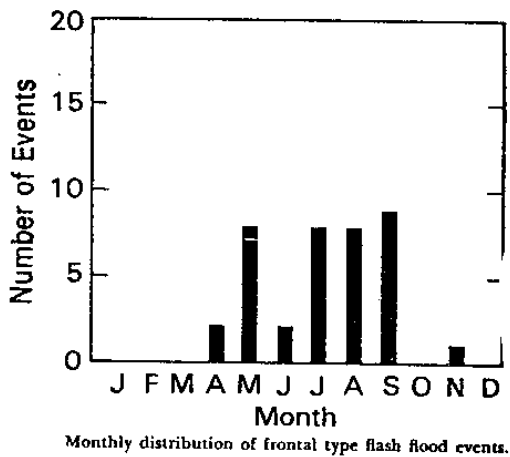
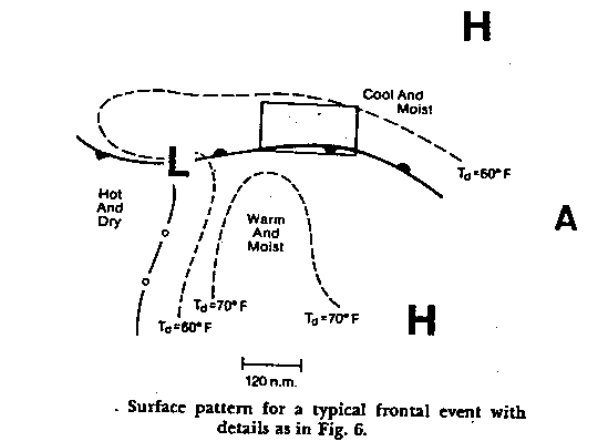
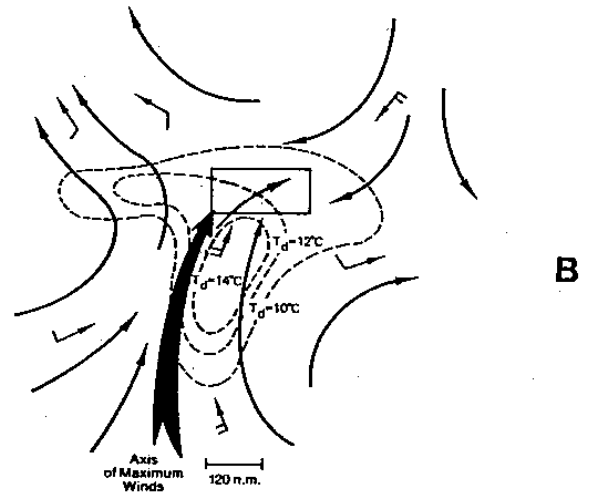


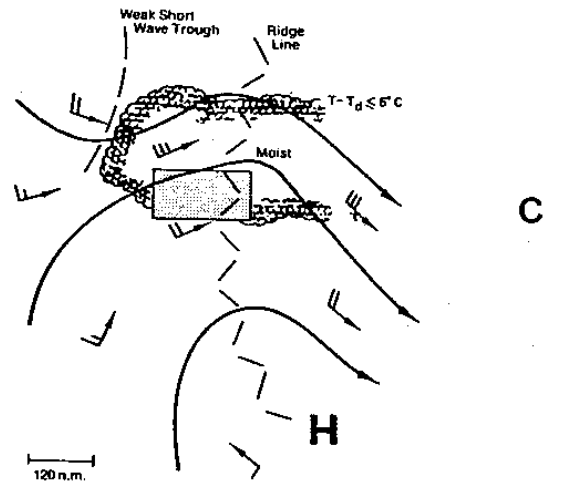
圖 12 鋒面型豪雨 / 暴洪頻率之季節分佈。  
(Maddox et al., 1979)



Surface pattern for a typical frontal event with details as in Fig. 6.



Corresponding 850 mb pattern for a typical frontal event.



Corresponding 500 mb pattern for a typical frontal event.

圖 13 同圖 11, 但為鋒面型。

地面鋒之冷空氣側且常在 500mb 大尺度脊附近。此類最顯著之特徵為有一滯留性或移動緩慢之綜觀尺度鋒面區（通常為東西向）幫助激發豪雨。有時在鋒面上有一微弱之中尺度低壓東移，可增強小尺度輻合及風暴區之內流。通常（85% 機率）有一 500mb meso- $\alpha$  尺度短波槽在增強鋒面舉升及



激發對流。

(3)中尺度高壓型

此類約佔總數 34%，發生頻率之季節分佈如圖 14 所示。顯見主要發生在 6、7、8 月，偶而也

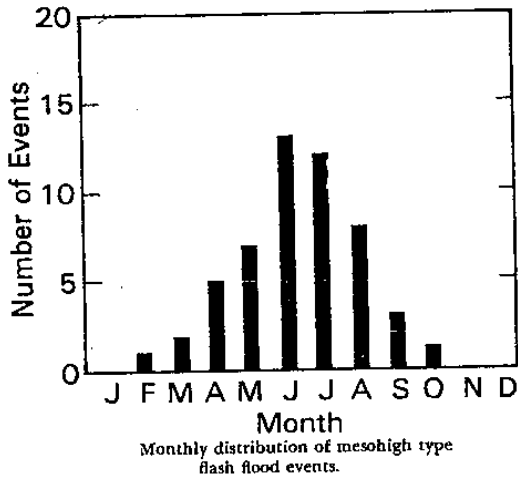
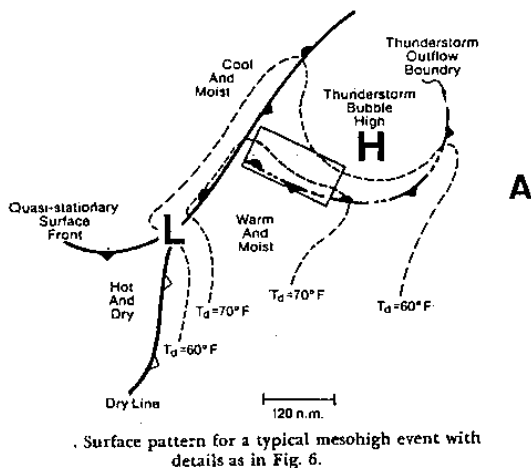


圖 14 中尺度高壓型豪雨 / 暴洪頻率之季節分佈。  
(Maddox et al., 1979)

在春秋月份發生。圖 15 為地面、850mb 及 500mb 之綜觀氣流形勢，豪雨發生在鋒面冷空氣側且通常位於中尺度高壓中心之南或西南。此類約有 60% 伴隨 500mb meso- 尺度短波槽，唯豪雨發生區通常在大尺度脊附近。



Surface pattern for a typical mesohigh event with details as in Fig. 6.

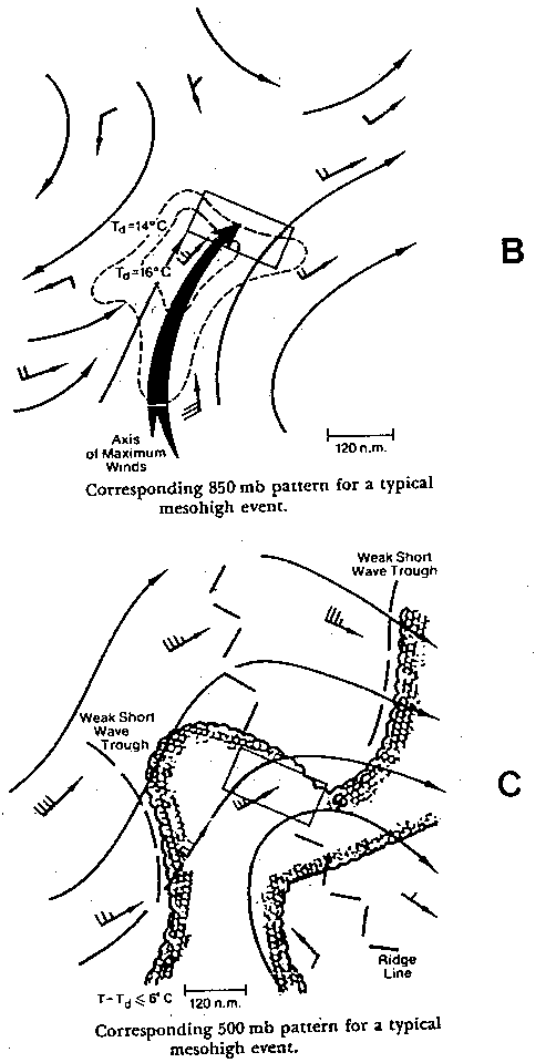


圖 15 同圖 11，但為中尺度高壓型。

(4)西部型

此類計有 31 個個案，約佔總數 21%，其中 5 個個案與其他的 26 個非常不同，故不包括在平均裡。此類大部份發生在相當微弱的大尺度形勢且無組織性之地面系統情況下。大部份也許可按前三型加以歸類，唯因缺乏地面觀測資料，故無法做詳細分類。這些個案之豪雨大都由消散之鋒面雷雨外流邊界或地形等與大尺度現象交互作用而來。圖 16 為發生頻率之季節分佈，顯見最大值發生在 7 月及 8 月，此指示這些豪雨與該區季風季節大量水氣入侵之強烈關連。

六、豪雨預報技術 (分法) 之發展

目前豪雨預報技術之發展似可分為兩大類別，一為外延法，另一為綜觀法。外延法係利用地面自

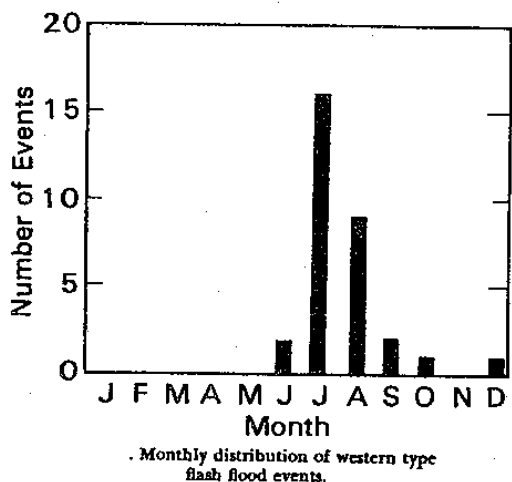


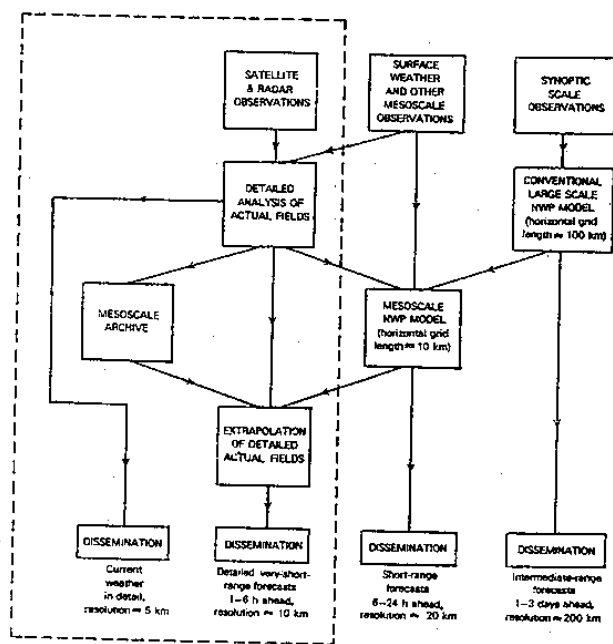
圖 16 西部型豪雨 / 暴洪頻率之季節分佈。  
( Maddox et al., 1979 )

動測站、雷達及衛星等資料組合，外延做即時及超短期之 0~3 h 或 0~6 h 預報，例如：日本的 AMeDAS ( Automatic Meteorological Data Acquisition System ) 與數字化雷達回波組合 ( Tatehira et al., 1981; Tatehira et al., 1981 )，加拿大的 SHARP ( Short-term Automatic Radar Prediction ) 及 RAINSAT ( Austin, 1981 )。其他國家目前亦正在加緊發展此種即時預報作業系統，例如：美國的 PROFES ( BAMS, 1979 ) 及英國的 FRONTIERS ( Forecasting Rain Optimized using New Technique of Interactive Enhanced Radar and Satellite ) 系統 ( Browning, 1979 ) 即為其示範性系統。綜觀法係利用綜觀分析資料及數值預報產品辨認豪雨發展潛勢，做 0~12h ( 或 0~18h ) 之短期預報，例如：Maddox ( 1979 ) 之豪雨預報法，Rodgers et al., ( 1984 ) 之 MCC 預報法，Soptei and Henry ( 1981 ) 之美國東南部豪雨預報法。

日本氣象廳之即時降水預報 ( 0~3 h ) 即採用數字化雷達資料及其與 AMeDAS ( 1979 作業 ) 各雨量站求得之校準因子，以 NWP 預報之 700 mb 風場平流來預報 0~3 h 之降水量，結果發現在 24 個個案裡此種方法較由持續法所做預報改進 40%。( Tatehira et al., 1981 )。加拿大

1976 年開始作業之 SHARP 預報法係利用雷達回波圖外延，此法先對所有可能的回波位移求交叉相關係數值找出最大相關係數，然後在最大相關之方向平流雷達回波，發現超過 3~4 h 即無預報能力。1981 年夏季 RAINSAT 開始作業，利用雷達及 SMS / GOES - E 資料預報降水 ( Austin, 1981 )，預報範圍擴大至雷達網涵蓋範圍之外。

美國的 PROFES ( Prototype Region Observing and Forecasting Service ) 系統包括觀測、預報、通信及發佈部份，主要目的係為改進未來局部性即時及超短期天氣預報而設計，目前仍由 ERL / NOAA 發展測試中。英國的 FRONTIERS 注重在當時天氣分析及由雷達與衛星資料辨認出來的趨勢外延，為整個預報作業系統的一部份，如圖 17 所示 ( Browning, 1979 )。此

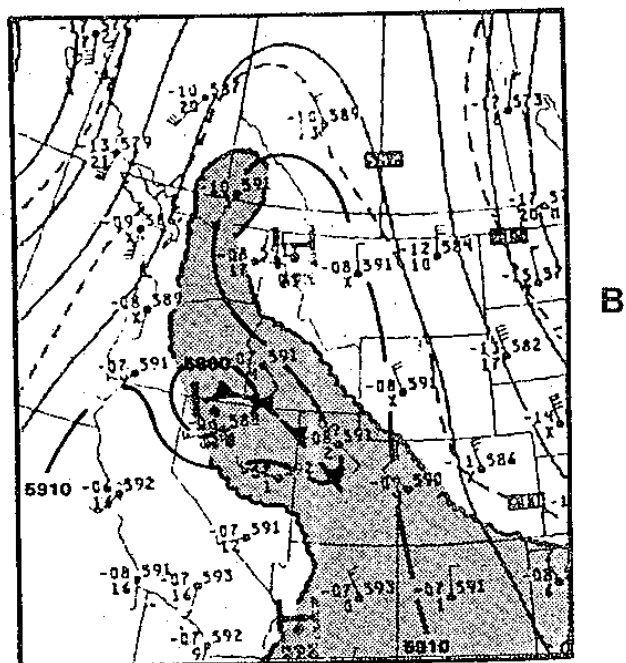


Integrated forecast system (this paper deals with the part enclosed within the dashed rectangle). NWP = Numerical Weather Prediction.

圖 17 英國未來天氣與氣象預報作業系統，FRONTIERS 為虛線內部分。  
( Browning, 1979 )

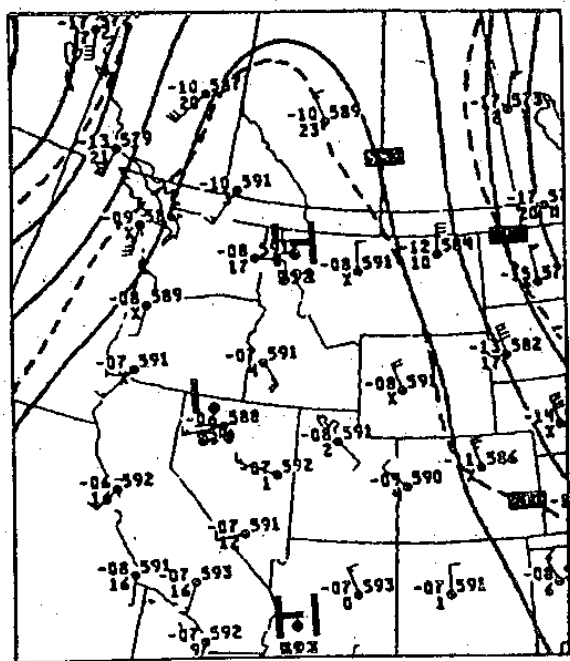
FRONTIERS 系統在作業上將與中尺度數值模式相串連且為雙向交互系統，FRONTIERS 所得結果由中尺度數值預報產品修正，同時亦提供模式所需之初始資料。

Soptei and Henry (1981) 為改進美國東南部暴洪預報所需之豪雨預報，分析發生豪雨時之綜觀形勢，發現1000~500mb厚度為一重要參數，故以此發展出0~12h之預報指引，校驗結果發現可改進NMC發佈之MOS及QPF預報指引。Maddox (1979) 提出0~12h 豪雨預報的綜觀方法，利用有關豪雨應用研究結果，例如：Maddox et al., (1979) 豪雨/暴洪氣象條件四大類型，強調對NMC所發佈的地面及高空分析與NWP產品進行再分析(即加強並充實分析內容)以及繪製豪雨預報合成圖之觀念與方法。由於客觀分析的先天限制且其主要目的在綜觀尺度之分析，故需再分析以確定重要之中尺度現象，例如：低層噴流(LLJ)、溫度及濕度脊、顯著不穩定區、氣層水氣含量豐富區、垂直風切微弱區及中對流層(500mb)短波槽等。例如圖18為NMC之500mb分析及再分析。此再分析指出在脊內之微弱割離低壓及短波槽以及脊內中層高水氣含量區清楚顯現。圖19為NMC 850mb分析及再分析，由等溫線分佈形式、等高線及風場即可分析其鋒面，另潮濕區亦明顯表示出來。地面再分析目的在正確分析鋒面、乾線、中尺度氣壓系統、雷雨外流邊界及颱風等。例如圖20為NMC之地面分析

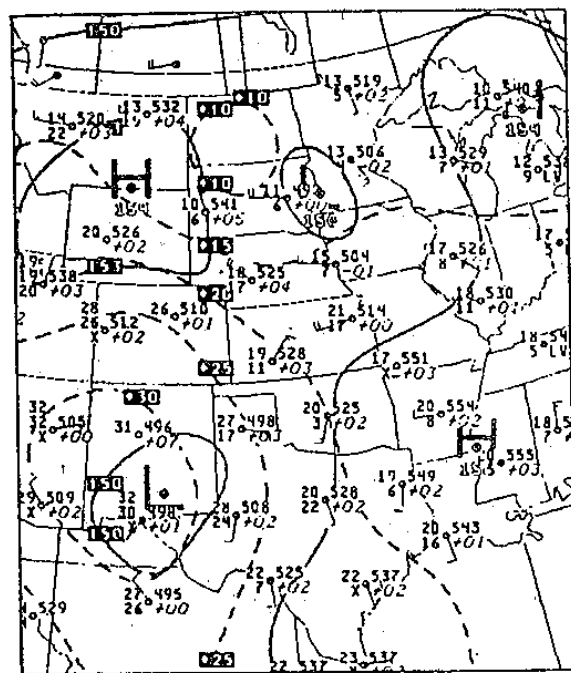


Enhanced 500 mb chart for 1200 GMT, 11 July 1975. Short-wave trough position is indicated; moist regions are shaded; and additional height contours are shown.

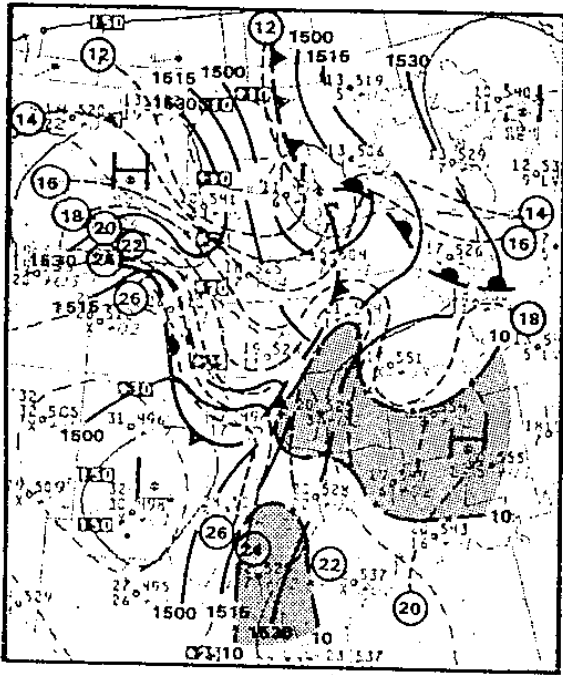
圖 18 NMC之500mb分析(A)及預報員之再分析(B)範例。(Maddox, 1979)



NMC 500 mb chart for 1200 GMT, 11 July 1975.

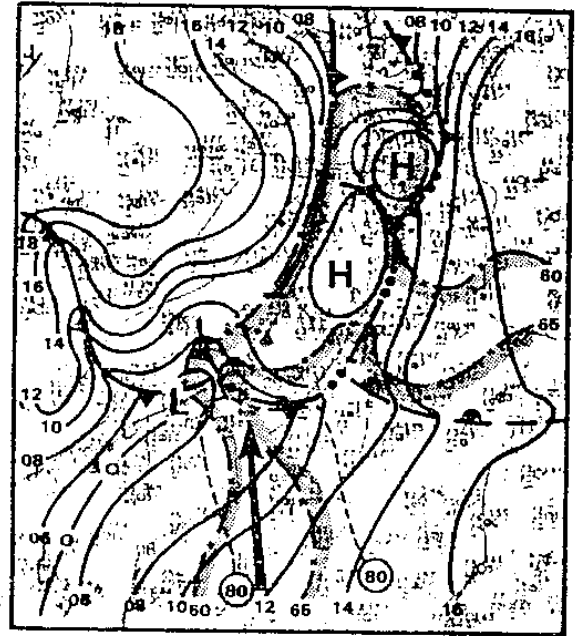


NMC 850 mb chart for 0000 GMT, 31 May 1977.



Enhanced 850 mb chart for 0000 GMT, 31 May 1977. Contours have been redrawn; frontal positions are shown, as are two °C isotherms; and regions with  $T_d \geq 10^\circ\text{C}$  are shaded.

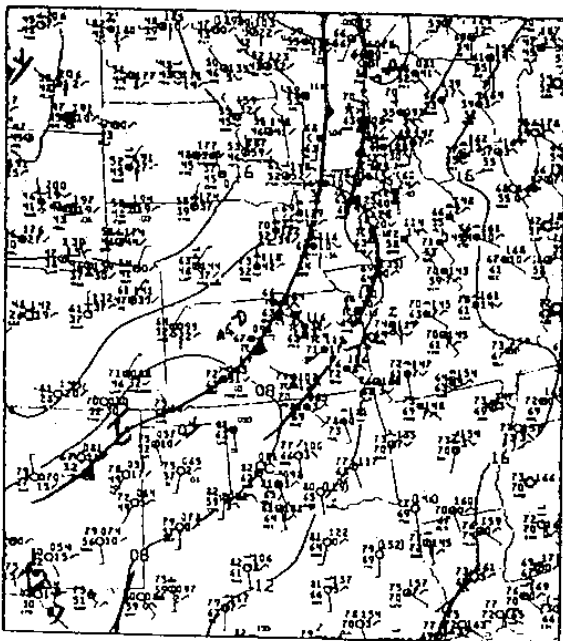
圖 19 NMC 之 850 mb 分析(A)及預報員之再分析(B)範例。(Maddox, 1979)



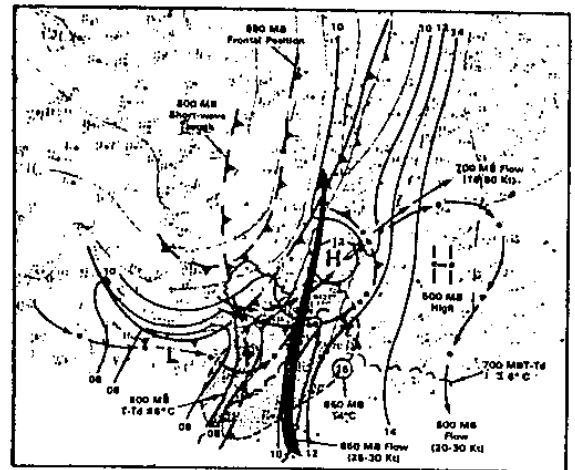
Enhanced surface chart for 0600 GMT, 20 June 1978. Squall-line positions are indicated with barbs added to denote direction of movement; pressure field reanalyzed at 2 mb increments;  $80^\circ\text{F}$  isotherm is shown as are  $60$  and  $65^\circ\text{F}$  dewpoint analyses.

圖 20 NMC 之地面分析(A)及預報員之再分析(B)範例。(Maddox, 1979)

及再分析。此再分析顯示鋒面向北沿洛磯山東側伸展而非在 New Mexico 消失。另有一些顯著的雷雨中尺度高壓。由這些再分析圖即可建立三維合成圖，如圖 21 所示。而合成圖可能包含的參數可分



NMC surface chart for 0600 GMT, 20 June 1978.



Black and white composite chart for a Mesohigh type flash flood situation. Upper-air features are from reanalyzed 0000 GMT, 18 June 1976, standard level charts. The enhanced surface chart used as a base map is for 0900 GMT, 18 June 1976.

圖 21 中尺度高壓型豪雨 / 暴洪合成圖範例。(Maddox, 1979)

下列5項：

(1) 500mb：氣流線、等風速線、短波槽位置、濕區。

(2) 700mb：短波槽位置、濕區、+10°C等溫線（在平地測站中層溫度高於10°C常抑制對流發展）。

(3) 850mb：鋒面位置、氣流線、等風速線、+10°C等露點線。

(4) 水氣：≥1 in之可降水量分析、>50°F（或60°F）之地面露點分析。

(5) 穩定度：≥30之K指數分析。

利用由豪雨/暴洪應用研究所獲結果（例如：Maddox et al., 1979; Maddox 1980, 1983; Maddox et al., 1983; Rodgers et al., 1983）Rodgers等人發展出對MCC之預報方法（表一），並在1982及1983年6~8月由WRP/ERL及SFSS/NWS（Satellite Field Services Station）研究/預報人員合作試驗，發現利用傳統綜觀尺度資料及NWP產品

表一 MCC預報作業之工作表。（Rodgers et al., 1984）

MCC Forecast Worksheet

MCCWKST7  
MOUSSO DMK 310600

MCC WORKSHEET

DATE/TIME (FORECAST VALID 00-12Z)

A. CONSTRUCT COMPOSITE CHART AND PROG AND THEN IDENTIFY PRELIMINARY THREAT AREA(S), IF ANY. USE PART E OF WORKSHEET AS GUIDANCE.

B. IS THERE A THREAT OF MCC DEVELOPMENT TONIGHT(0000Z TO 1200Z)?  
(YES....) (NO....)

C. IF NO, STATE YOUR REASONING.

D. IF YES, USE THE LOGIC QUESTIONS TO REFINE THE AREA(S) AND RANK HOW EACH FEATURE/ASPECT INFLUENCED YOUR FINAL DECISION. THE FOLLOWING RANKING CODE SHOULD BE USED:  
S = STRONG INFLUENCE; M = MODERATE INFLUENCE; L = LITTLE INFLUENCE.

E. USING THE CSIS WPG (LPM,SPH,EXPERIENCE) WILL THERE BE THE FOLLOWING?:

	(YES)	(NO)	(RANKING)
1. A LOW LVL BNDRY TO FOCUS CNVY DVLPT.....	{ }	{ }	{ }
2. 850/700 MB MARK ADVECTION.....	{ }	{ }	{ }
3. LOW LEVEL JET IN AREA.....	{ }	{ }	{ }
4. MOIST/UNSTABLE AIR OVER/UPSTREAM OF AREA.....	{ }	{ }	{ }
5. AREA IN DEEP MOISTURE REGION.....	{ }	{ }	{ }
A. THRU 850 MB (YES....) (NO....)	{ }	{ }	{ }
B. THRU 700 MB (YES....) (NO....)	{ }	{ }	{ }
C. PRECIPBL WATER > 145% OF NORMAL.....	{ }	{ }	{ }
6. UPWARD VERT MOTION OVER REGION.....	{ }	{ }	{ }
7. MEAK HS SHORTWAY FOR TRIGGER.....	{ }	{ }	{ }
8. UNDER MVZ SHEAR NEAR UPR RDG AXIS.....	{ }	{ }	{ }

F. FORECASTERS REMARKS: (GO INTO YOUR REASONING AS DEEPLY AS POSSIBLE. LIST SPECIFIC VALUES OF PARAMETERS THAT INFLUENCED YOUR DECISION.)

G. THE FOLLOWING ARE SPECIFIC PARAMETERS TO CONSIDER WHEN MAKING THE MCC FORECAST:

- SFC DEW POINTS ≥ 65 DEG F.
- KI > 30.
- TOTALS > 50.
- 850 MB DP DEPRESSION < 5 DEG C.
- 700 AND 500 MB DP DEPRESSION ≤ 6 DEG C.
- MEAN RH SFC-500 ≥ 70%.

H. 1. FORECAST TO THE RIGHT OF A LINE THE AREA EXPECTED TO BE COVERED BY THE CONTINUOUS COLD (LESS THAN -52 DEG C) CLOUD SHIELD.  
2. THIS AREA FORECAST SHOULD BE FOR WHEN THE SYS IS EXPECTED TO BE MOST ACTIVE (LARGEST C) SHIELD) AND SHOULD HAVE A TIME ATTACHED (I.E. 00Z OR A RANGE NO STR THAN 3 HRS 00Z-03Z).  
3. SIGNIFICANT SHOULD BE LOOSELY DEFINED AS ANY MESOSYSTEM WHOSE COLD CLOUD SHIELD (LESS THAN -52 DEG C) EXCEEDS 100,000 SQ KM FOR AT LEAST 3 HRS.  
4. THIS COULD CLEARLY INCLUDE SQUALL LINES. THE DISCUSSION AND SHAPE OF FORECAST THREAT AREA SHOULD SERVE TO INDICATE THE TYPE OF ACTIVITY EXPECTED.

指引，在12~18h前對組織性對流系統具有可預報度（Rodgers et al., 1984）。

## 七、豪雨預報作業

美國NMC之定量降水預報（QPF；Quantitative Precipitation Forecast）係由預報組之劇烈降水小組（HPB；Heavy Precipitation Branch）來負責。該小組負責發佈6h及24h QPF，12h降雪量及豪雨潛勢區展望。在QPF的作業上最後的預報發佈，係由預報員參考了所有NWP及MOS產品指引，考慮了綜觀形式及局部條件，利用預報員的專業知識、學識經驗主觀判斷而來。這些NWP模式預報之QPF包括：

(1) LFM II：每12h做一次0~48h之QPF預報，預報時間解析度為6h及12h。大尺度降水過程每6min計算一次，次網格對流過程每1h計算一次。

(2) SMG3C（波譜模式）：有全球及半球模式（準確度約與191Km之網格模式相當），做0~48h之QPF預報。

(3) MFM：移動細網格模式僅在颶風預報或當有洪水或豪雨對某特定區域構成威脅時使用。Δx = 60 - 100Km，做0~48h QPF預報，解析度6h。

MOS則係利用線性複迴歸方程做劇烈局部性風暴及雷雨之短期預報。實際上同時採用傳統統計及MOS方法預報100×100Km範圍內預報發佈後2~6h之劇烈天氣現象發生機率。預報因子包括：地面觀測變數、數字化雷達資料、劇烈天氣之局部氣候頻率及LFM預報之基本變數等。

最後經由預報員判斷發佈QPF，其方法及程序簡述如下（NWS, 1983）。

在考慮QPF預報問題時，預報員首先徹底檢討過去1~2天之觀測與預報，並特別注重在最近0~6小時。然後對當時可用的資料（傳統、雷達、衛星）做詳盡的分析與解釋。實際上分析當時之大氣狀態應屬一種連續性的過程，包括應在天氣活躍區進行詳盡之逐時地面分析，並適當考慮雷達及

衛星資料。高空資料通常須再做主觀分析，並須做得較客觀分析更為詳盡。新的分析結果應與過去預報小心比較，以確知當時預報校驗結果是否正確，並注意對該預報之後段部份做訂正或修改。需小心檢查衛星照片並與模式之初始場及預報場比對，以偵查出顯然的矛盾所在。

在分析與診斷結束時，預報員開始考慮未來預報問題。首先依據分析及趨勢判斷作環流之短期主觀推演，以提供預報時段內之初始場。預報員需多花一些時間及精力來評估不同模式之預報結果，不同模式結果間之相互比較，並與模式先前預報及初始場比較。有時需依據先前模式典型誤差及在預報時段頭幾個小時內之發展，考慮對模式所預報之環流做大幅修改。

最後發佈之主觀 Q P F 乃融合數值預報模式產品，客觀 M O S 指引及預報員個人專長、學識、經驗而成。

H P B 對豪雨預報之基本觀念，在於認識以現階段的豪雨預報技術尚非常困難在豪雨發生前，做太長時間之豪雨發生時間、地點、強度、範圍大小等之確切預報。雖然現行作業上之觀測系統之時間及空間尺度均不足以解析對流雨暴尺度，但仍可發現有些情況有利於劇烈降水之發展。豪雨展望 ( Outlook ) 即針對這些具有某些可預報度之風暴系統 ( 在中尺度範疇內 ) 而作，例如春夏之 M C C 。

## 八、總 結

我國台灣地區最近一、二十年來由於經濟迅速發展，使得由災變天氣導致的財物損失也相對的變得較過去更為嚴重，其中尤其以豪雨導致的災害增加最為顯著，例如：1981年5月28日桃竹豪雨，1984年6月3日及6月10日台北地區豪雨，損失約在新台幣百億級。因此，改進豪雨預報技術以提高預報準確度，使能事先採取適當防範措施以減小豪雨之損害程度，遂成為台灣地區當前在氣象預報作業上的一項重大課題。

我們已知天氣預報準確率與該天氣現象之劇烈程度成反比 ( 可謂預報第一定律 ) ，且知天氣預報準確度之改進速率較氣象預報 ( 環流預報；NWP

) 者為慢 ( 可謂預報第二定律 ) ，此顯示對豪雨預報而言，未來不論在應用研究，技術發展及作業化上均為有待大力開展之領域。

在豪雨之即時及超短期預報 ( 0~3小時或0~6小時 ) 方面，利用地面稠密的自動測站網、數字化雷達資料及人造衛星資料，透過外延觀念及人機對話系統 ( man-machine interactive system ) 將成為未來各國作業化之趨勢。稍長時間之豪雨預報 ( 0~12小時或0~18小時 ) 則利用 NWP 及 M O S 產品指引配合綜觀法技術之人機組合系統 ( man-machine mix ) 將成為未來之主流。

## 致 謝

感謝台大大氣科學系黃中成先生幫忙校稿及編輯工作。

## 參 考 文 獻

- 吳宗堯、陳泰然、謝信良、喬鳳倫、陳正改、蕭長庚、朱曙光，1984：台灣地區春至初夏之局部性豪雨及其對水稻災害之初步分析。大氣科學，11, 29~44。
- 陳泰然，1985：國內近年大氣科學研究成果納入實際氣象預報作業之可行性研究 ( 續 ) 。國科會防災科技研究報告 73-16 號，376 頁。
- Austin, G.L., 1981: Combining satellite and radar data for the short-range forecasting of precipitation. Nowcasting, Proc. Intern. Symp., IAMAP, Aug. 25-28, Hamburg, Germany, 183-192.
- Bauer, K.G., and J.E. Kutzbach, 1974: Evaluation standards for dynamical prediction models. J. Appl. Meteor., 13, 505-506.
- Browning, K.A., 1979: The FRONTIERS plan: a strategy for using radar and satellite imagery for very-short-range precipitation forecasting. Meteor. Mag., 108, 161-184.
- Bosart, L.F., and F.H. Carr, 1978: A case study of excessive rainfall centered around Wellsville, New York, 20-21 June 1972. Mon. Wea. Rev., 106, 348-362.

- Bosart, L.F., and F. Sanders, 1981: The Johnstown flood of July 1977: A long-lived convective system. J. Atmos. Sci., 38, 1616-1642.
- Bull. Amer. Meteor. Soc., 1978: Flash floods—A national problem. 59, 585-586.
- Bull. Amer. Meteor. Soc., 1979: PROFS design team. 60, 244.
- Carr, F.H., and L.F. Bosart, 1978: A diagnostic evaluation of rainfall predictability for tropical storm Agnes, June 1972. Mon. Wea. Rev., 106, 363-374.
- Charba, J.P., and W.H. Klein, 1980: Skill in precipitation forecasting in the National Weather Service. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, 1546-1555.
- Cooley, D.S., F.S. Zbar, D.F. Dubofsky, and A.K. Campbell, 1981: National Weather Service public forecast verification summary April 1973 to March 1978. NOAA Tech. Memo. NWS FCST - 25, Wash. D.C., 136 pp.
- Fawcett, E.B., 1977: Current capabilities in prediction at the National Weather Service's National Meteorological Center. Bull. Amer. Meteor. Soc., 58, 143-149.
- Fritsch, J.M., R.A. Maddox and A.G. Barnston, 1981: The character of mesoscale convective complex precipitation and its contribution to warm season rainfall in the U.S. Fourth Conf. Hydromet. Oct. 7-9 Reno, Nev., Amer. Meteor. Soc., 94-99.
- Grice, G.K., and R.A. Maddox, 1982: Synoptic aspects of heavy rain events in south Texas associated with the westlies. NOAA Tech. Memo., NWS SR-106, 21 pp.
- Hales, J.E. Jr., 1978: The Kansas City flash flood of 12 September 1977. Bull. Amer. Meteor. Soc., 59, 706-710.
- Leith, C.E., 1974: Spectral statistical-dynamical forecast studies. Intern. Conf. on Spectral Methods in Numerical Weather Prediction, Copenhagen.
- Maddox, R.A., 1979: A methodology for forecasting heavy convective precipitation and flash flooding. Natl. Wea. Dig., 4, 30-42.
- Maddox, R.A., 1980: Mesoscale convective complexes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, 1374-1387.
- Maddox, R.A., 1983: Large-scale meteorological conditions associated with mid-latitude mesoscale convective complexes. Mon. Wea. Rev., 111, 1475-1493.
- Maddox, R.A., and C.A. Doswell III, 1982: An examination of jet stream configurations, 500 mb vorticity advection and low-level thermal advection patterns during extended periods of intense convection. Mon. Wea. Rev., 110, 184-197.
- Maddox, R.A., L.R. Hoxit, C.F. Chappell and F. Caracena, 1978: Comparison of meteorological aspects of the Big Thompson and Rapid City flash floods. Mon. Wea. Rev., 106, 375-389.
- Maddox, R.A., C.F. Chappell and L.R. Hoxit, 1979: Synoptic and meso- $\alpha$  scale aspects of flash flood events. Bull. Amer. Meteor. Soc., 60, 115-123.
- Maddox, R.A., D.M. Rodgers, K.W. Howard, B. Heckman, N. Johnson and M. Mathews, 1983: An experiment in forecasting mesoscale convective weather systems. 13th Conf. on Severe Local Storms, Oct. 1983, Tulsa, OK. 13 pp.
- Mogil, H.M., J.C. Monro and H.S. Groper, 1978: NWS's flash flood warning and disaster preparedness programs. Bull. Amer. Meteor. Soc., 59, 690-699.
- National Center for Atmospheric Research, 1984: STORM-CENTRAL phase: Preliminary program design. 147 pp.
- National Weather Service, 1983: Operations of National Meteorological Center, Forecast Division, Heavy Precipitation Branch. Tech. Proc. Bull. 403, 6 pp.
- Nickerson, E.C., and E. Richard, 1981: On the distribution and evolution of clouds and rain over the Vosges and Black Forest Mountains: a three-dimensional mesoscale simulation with parameterized microphysics. Fifth Conf. Numerical Weather Prediction, 223-227.
- Pielke, R.A., 1981: The use of mesoscale meteorological and climatological information in nowcasting and short-range prediction. Nowcasting, Proc. Intern. Symp. IAMAP, Aug. 25-28, Hamburg, Germany, 223-230.
- Ramage, C.S., 1976: Prognosis for weather forecasting. Bull. Amer. Meteor. Soc., 57, 4-10.
- Ramage, C.S., 1982: Have precipitation forecasts improved? Bull. Amer. Soc., 63, 739-743.
- Riehl, H.J. Badner, J.G. Hovde, N.E. La Seur, L.L. Means, W.C. Palmer, M.J. Schroeder, L.W. Snellman and others, 1952: Forecasting in middle latitudes. Meteor. Mono. Vol.1, No.5, Amer. Meteor. Soc., 80 pp.
- Rodgers, D.M., K.W. Howard and E.C. Johnson, 1983: Mesoscale convective complexes over the United States during 1982—Annual summary. Mon. Wea.

- Rodgers, D.M., D.L. Bartels and R.D. Menard, 1984: Experiments in forecasting mesoscale convective weather systems. 10th Conf. Wea. Fcst. & Analy., June 25-29, Clearwater Beach, Fl, 486-491.
- Sanders, F., 1979: Trends in skill of daily forecasts of temperature and precipitation, 1966-78. Bull. Amer. Meteor. Soc., 60, 763-769.
- Shuman, F.G. 1978: Numerical weather prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 59 5-17.
- Soptei, R.J., and W.K. Henry, 1981: Technique for forecasting heavy precipitation in the southeastern United States. Natl. Wea. Dig., 6, 8-17.
- Tatehira, R., Y. Makino and M. Hitsuma, 1981: Combined use of radar with mesoscale surface network for very-short-range prediction of precipitation. Nowcasting, Proc. Intern. Symp., IAMAP, Aug. 25-28, Hamburg, Germany, 199-200.
- Tatehira, R., M. Hitsuma and Y. Makino, 1981: The mesoscale observational network in Japan. Nowcasting, Proc. Intern. Symp., IAMAP, Aug. 25-28, Hamburg, Germany, 341-346.
- Uccellini, L.W., and D.J. Johnson, 1979: The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. Mon. Wea. Rev., 107, 682-703.
- Whitney, L.F. Jr., 1977: Relationship of the subtropical jet stream to severe local storms. Mon. Wea. Rev., 105, 398-412.