

對機率天氣預報作業的一些看法

陳 泰 然

國立台灣大學大氣科學研究所

摘 要

中央氣象局自1992年開始，於局內進行主觀降水機率預報測試，並將於近期正式發佈此項預報。本文主要目的，在於對機率預報及其預報作業提出一些看法。首先討論對於降水機率意義不同詮釋的可能性，隨後介紹機率預報的產生方法。接著分析主觀機率預報的分析整合判斷過程與預報表達過程，最後討論預報校驗的方法及主客觀降水機率預報技術得分（預報能力）。

一．前言

目前國內各氣象作業單位的天氣預報，對於構成天氣主體的一些較具不確定性(uncertainty)的天氣現象(例如：降水、霧、豪雨、劇烈亂流....)，不論其預報期限的長短(長期天氣展望(月)、逐日預報、極短期預報(0~24 h))，對其發生的不確定性的表達方式，大多只做定性的描述，而未做定量的評估。在現今我國快速的經濟成長、普及的教育及開放的社會環境下，這些定性的天氣預報已漸漸無法滿足一般大眾及需使用這些預報以採取某些措施的決策者(decision maker)的需求，後者主要因為在決策理論裡，所需的資料是“定量”而非僅是“定性”而已。

對於不確定性事件發生與否的表達，最為客觀的方式即為發生機率(probability of occurrence)。雖然世界上有很多國家目前對於多種天氣現象的預報，已採用機率方式，但機率預報(probability forecast)最常用在降水方面的問題。中央氣象局為滿足社會需要，順應世界潮流，亦於今(1992)年開始進行降水機率(probability of precipitation, PoP)的內部預報(internal forecast，即不對外發佈)測試，據聞將於明年(1993)正式發佈台灣地區的降水機率預報。本文即在此種情況之下，提出對機率預報作業的一些看法，希望有助於對此項預報有興趣的研究員、預報員、媒體與使用者。

在美國，機率預報最初由一家私人氣象顧問公司 Traveler Weather Service 於1955年開始進行實際預報作業，當時僅做降水與溫度方面的機率預報，由於成效不錯，美國氣象局(National Weather Service, NWS)亦於1956與1957年分別在舊金山與洛杉磯試做，以降水預報為主，在1965年此種機率預報已推展到全國。1981年MSI Services, Inc.所做一般大眾對於降水預報表達方式的調查，發現偏好降水機率預報的人數與言詞(定性)表達降水的人數比例，約為2~3比1，足見大多數一般大眾對降水機率預報的接受。

在國內方面，陳(1970)提出機率預報的使用價值探討，本人亦於慶祝台大30週年校慶時做“機率天氣預報”專題演講(陳，1976)，又於1977年發表“台灣地區主觀機率天氣預報之氣候參考值分析”(陳，1977)，並於69學年在台大大氣系開授“機率天氣預報”選修課程，最近於去年(1991)11月14日應中央氣象局之邀在預報中心講解“主觀機率預報”。這些與機率預報有關的活動，相信對於促進國內降水機率預報的作業化均有直接或間接的影響及正面的意義。因中央氣象局近期將發佈的機率預報僅為降水機率(PoP)，即降水有無之機率，而並未打算進行降水等級機率預報(ranked probability forecast)，故本文討論亦將以PoP有關事項為主。

二．降水機率的意義

目前我們對於降水發生的原因和其相關現象的因果關係，尚未能完全了解，也就是說我們目前還未能完全了解產生降水的動力和物理過程，因此對於未來降水與否的預報，就沒有完全的把握而包含一些不確定性。以此觀點來說，對於降水現象發生與否，實僅能以機率表示之。例如明天降水的機率是0.3，就氣象觀點而言，其意義即為發生下雨的可能性是30%，或是下雨與不下雨之間的比例為3:7。Murphy and Winkler(1971)認為此處機率的意義，不能純就一般統計的觀點而認為在同樣的情況下100天中有30天會有降水，亦即不能以相對頻率來詮釋降水機率，因為在大氣裡僅有相似(similar)而無相同(identical)的情況發生，也就是說每一次情況均可視為獨特的情況(unique situation)。因而在此，機率只表示相信程度(degree of belief)，亦即預報員主觀的相信在某特定地點，某特定時間下雨，有三成把握，不下雨有七成的把握。

實際上降水機率(PoP)的意義，除了學術界與作業單位間有不同的解釋之外，學術界之間亦有不同的看法。Curtiss(1968)即認為PoP機率值的意義至少有四種可能性，如下：

1. 在預報時段內的某時刻，於預報區域內的某地方，將有降水發生的機率。
2. 降水將涵蓋所有預報區域的機率。
3. 在預報時段內，於預報區域內將有降水的部份(面積百分比)。
4. 在預報時段內的某時刻，於預報區域內的某一特定地點，將有降水的機率。

而美國氣象局(NWS)的PoP意義，亦非上述四種可能性之一。依據NOAA(1984)發佈的NWS作業手冊，PoP定義如下：

“在預報區域內，於任何特定地點發生降水的可能性(以百分比表示)。PoP機率值所適用的時段必須清晰陳述(或可由預報的文字不模糊的引申)，因若無預報時段，則PoP機率值即無意義。”

由上述NWS定義，Schaefer and Livingston(1990)進一步詮釋其對於預報員及使用者的意義，認為PoP的原始定義為點機率(point probability)，例如：以預報員的觀點而言，50%的降水點機率即指在100次相似天氣系統影響下，預報員判斷有50次在該點會發生降水。但NWS的PoP定義

實際上用來代表全部預報區域，而非僅區域內某一特定地點而已，亦即PoP實際上為一平均點機率(average point probability)，也就是說以一機率值代表區域內各點機率的平均或代表各點的機率。他們進一步證明平均點機率的PoP等於降水涵蓋面積期待值(expected areal coverage)。如此，PoP在作業上的意義可視為，對於某一特定PoP機率值若有足夠多的個案，平均涵蓋面積將等於PoP。例如：當考慮在某一季節所做的所有20%預報時，理想的PoP預報將指平均有20%區域有降水。這樣的PoP定義並不等於面積機率(area probability)，所謂面積機率係指在預報時段內於預報區域內某處將有降水的機率(Winkler and Murphy, 1976)，因為面積機率可證明大於或等於PoP(Schaefer and Livingston, 1990)。

由上述討論得知NWS對PoP的定義所引伸的兩項重要意義如下：

- (1) PoP為平均點機率，亦即以同一PoP機率值代表預報區域內每一地點。
- (2) PoP代表降水涵蓋面積期待值，亦即預報員在很多次某PoP機率值的預報裡，預期預報區域將有降水的面積百分比(%)。

個人認為中央氣象局的PoP定義，在理論上採用上述任何一種定義或再創造一新定義，均無不可，但實際上若採用與NWS相同的定義，則除在作業上有其方便之處之外，未來在宣導及教育訓練方面亦可收他山之石之效。

三. 機率預報的產生方法

在機率預報裡產生機率值的方法，可分為三類，即動力統計法、純統計法與主觀預報法，茲分述如下：

1. 動力統計法(dynamic-statistical method)

此類方法係利用數值預報模式(NWP)的產品(即預報結果)，與實際所發生的天氣現象求取統計迴歸來做預報。此類方法又分為兩種，一種為理想模式法(perfect prog)，另一種為模式統計法(model output statistics, MOS)。前者為假定模式預報結果與觀測無異，而將模式預報結果直接用於代表觀測環流參數與天氣關係的迴歸方程。後者基於模式並不完美故有誤差的現實，將模式預報結

果的誤差納入迴歸方程裡。前者效果欠佳當可預期，故NWS的技術發展部(Techniques Development Laboratory, TDL)自從1970年代初期發展出MOS之後，全國例行PoP預報即以MOS方法產生(Glahn and Lowry, 1972; Lowry and Glahn, 1976; Snellman, 1977)。

2. 純統計法(Statistical method)

在1968年原始方程模式正式作業之後(Shuman and Hovermale, 1968)，因數值模式已可產生可靠且準確的預報結果，故以往在預報上常用的純統計預報方法漸不受重視，但對於某些特殊現象仍具有價值，例如：颱風路徑預報，此法在各有關預報中心仍然使用。

3. 主觀預報法(Subjective method)

前述兩種方法雖均可產生客觀預報之機率值，但均非理想，特別是降水機率預報，若預報員利用客觀方法(上述兩種方法及其他NWP產品)所提供的預報，以及其所具有的氣象學識經驗，經過個人主觀判斷而得出預報值，即為主觀機率預報。雖然過去數值模式及MOS法不斷的改進，但是此種方法仍然得到較好的預報結果(例如：Sanders, 1963; Snellman, 1977)，Sanders(1963)曾認為「沒有任何客觀的預報是不能由預報員主觀的加以改進的，亦即主觀地修正客觀預報可以得到最好的預報結果」，此種觀點在今日雖模式已大幅改進，但仍然適用。若有多人同時進行此種預報，則其平均值預報(即衆意, Consensus)所得結果更佳，幾乎無人可以擊敗(Bosart, 1975; 1983; Sanders, 1963; 1979; 1986)。例如在MIT海洋氣象系師生所做的預報(Sanders, 1963)，5年12人所做的預報技術得分(與氣候值比較)，Consensus為22.9%，個人技術得分再做平均為15.6%，個人最好技術得分為17.8%。隨後在MIT及SUNYA所進行的預報試驗，亦得相似的結果。

四. 主觀機率預報的實作理念

在進行主觀機率預報的步驟裡，牽涉到兩個過程，即分析整合判斷過程(formulation process)與表達過程(expression process)，茲分述如下：

(一) 分析整合判斷過程

在做預報的開始，預報員利用個人主觀的

subjective)或直觀的(intuitive)診斷分析能力，以理解與整合過去、現在及未來(預報圖)各不同來源氣象資料(data)所提供之資訊(information)，以做為判斷未來天氣發生的依據，故亦可說是判斷過程(judgement process)。亦即預報員經過主觀的理解以後，可以將許多經判斷為有用的資料或其隱含的訊息組織起來，以做為預報未來天氣發生的依據，這就是分析整合判斷過程。實際上，所有發佈的主觀預報，都由這個過程開始。

(二) 表達過程

這個過程就是將經過直觀判斷的結果，轉變成預報並以機率的形式表示。如前所述，機率可有兩種不同的詮釋，即(1)相對頻率(relative frequency)與(2)相信程度(degree of belief)，茲再詳細分述如下：

1. 相對頻率

若純就一般統計的觀點而言，機率可以用發生的相對頻率來詮釋。例如：30%降水機率的意思，即是和目前完全相同(identical)的氣象條件下，若發生100次，則降水的機會有30次。但是，通常氣象條件只有相似(similar)的情況，而很少有或幾乎沒有完全相同的情況，因此機率預報的意義不能以此觀點視之。

2. 相信程度

以氣象觀點而言，機率實為預報員主觀的詮釋，在某氣象條件下於某段時間內某特定地點，對天氣現象發生與否的相信程度。例如：30%的降水機率，即指預報員主觀的判斷降水與不降水的機會為3與7之比。

因此，機率預報與範疇(式)預報(category forecast)的最主要差別，在於表達方式，前者以數值表示發生與否的機率，後者則僅由是(Yes)與否(No)來表達天氣的發生與否。換言之，前者可將判斷完全且無偏差的以所相信的機率值來表達其對未來的預報，但後者卻被迫需在發生(即100%)與不發生(0%)做一選擇。顯然，前者可使預報員所做的預報忠於其判斷而做出無偏差的預報(unbiased forecasting)，但後者卻迫使預報員必須做過度預報(overforecasting)，即若他相信降水機會較大時則預報發生(100%)，機會較小時則預報不發生(0%)。

由上述分析，中央氣象局即將發佈的降水機率

預報，對於預報員而言，實為促使他的預報忠於其判斷的最佳方法。在這層意義上，機率預報正可解除預報員在做範疇預報所面臨的壓力，並去除過度預報的缺點，使預報結果更能接近實際的觀測。

五. 預報校驗

對於天氣預報而言，預報準確度如何？預報有無改進？現階段預報能力如何？都是一般大眾、政府官員、氣象作業與研究人員所共同興趣及關心的問題，而預報校驗 (forecast evaluation) 即為提供這些問題答案的方法。校驗可以讓我們了解預報的好壞，在科學上可知道預報準確度，在經濟上可讓使用者了解預報的價值。因此，預報校驗實為整個預報過程裡不可缺少的一環，其目的可就下列四方面加以說明。

1. 經濟方面

校驗的一個主要目的，在於它可以決定某些預報在經濟上是否有價值，對於使用此項預報的人是否有幫助。

2. 行政方面

校驗可以知道不同預報員間的預報能力，以做為個人升遷或受訓的參考。對於某些困難或特殊的預報可以選擇適當的人選擔任，亦可以知道預報員在做預報時是否有進步，並可以發現隱藏的有才幹的人材。此外，校驗可以控制預報的水準，使預報員小心，並可知道預報員的傾向，以及了解使用某種新的方法以後，預報是否有進步。

3. 教學方面

校驗可以了解學生在預報能力上是否有進步，亦可以幫助教授來指導學生，例如某學生在預報方面較差，而在數學方面較好，則可以指導他改讀理論氣象方面的學程。

4. 科學方面

校驗可以幫助改進預報的偏差，並測試科學假設的準確性，亦可分析預報錯誤的原因和特性。此外，校驗可以指出到底那些天氣情況最難預報，而集中力量在此問題的研究。

在做預報校驗時，求取預報準確度所採用的參考標準有三：(1) 隨機值：假定天氣現象是沒有原因的任意發生，即隨機的 (random) 或機率性的 (by chance)；例如丟銅板，見頭或見尾無從預知

。(2) 持續值：假定天氣現象發生具有持續性，即 persistence。例如：今天下雨，則明天也必下雨。(3) 氣候值：假定天氣發生和氣候資料所顯示的統計值一樣。這三種數值均可採用做為校驗時的參考標準，而以預報值來和其比較，分析其與觀測值間之差異大小，則可得實際預報之能力或技術得分。上述三種參考值亦可做為預報方法，但在氣象上視其為無預報能力的方法。通常預報校驗，以氣候值做為參考標準。

對於降水機率 (PoP) 校驗所採用的方法, Brier (1950) 曾提出一個機率得分 (probability score, PS), 現在稱為 Brier Score (BS), 以機率預報的均方差 (mean square error) 表示, 可用以客觀校驗機率預報的準確性 (accuracy)。Murphy and

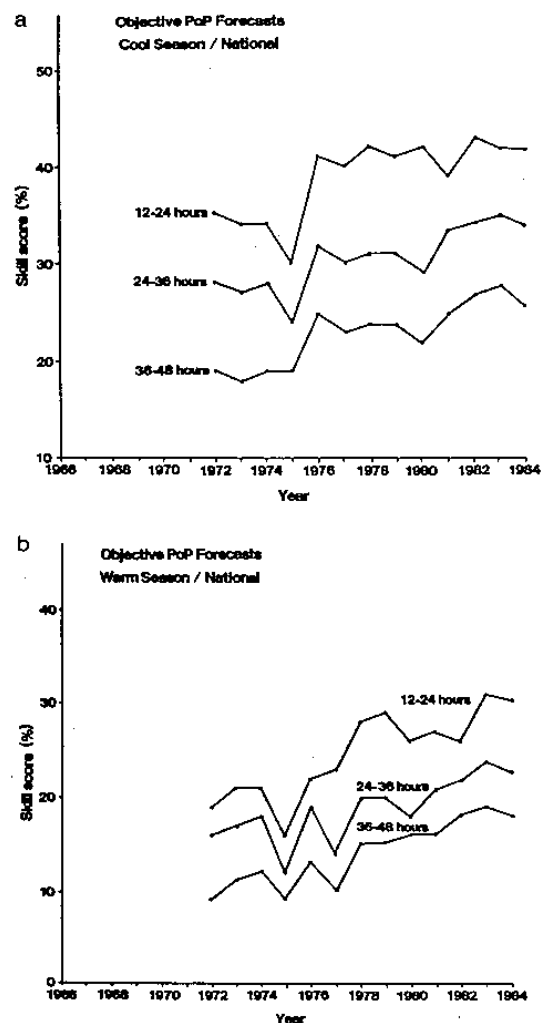


圖 1 (a) 1972~85年冷季與 (b) 1972~84年暖季全國不分區客觀 PoP 技術得分 3 個預報時段的時間分佈 (Murphy and Sabin, 1986)。

Winkler(1971) 分析 Brier Score，發現其為“確實適當得分法”(Strictly Proper Scoring Rule; SPSR)，亦即利用此法校驗時，預報員若要獲得好成績，僅在其預報忠於其判斷時才有可能，預報員無法投機或兩面下注(hedging)。

機率預報的技術得分(skill score, SS)，定義為實際預報準確性對於氣候值預報(視為無預報能力的方法)準確性改進的百分比，可用以表示 PoP 的預報能力。對於 PoP 的校驗，不論在學校的師生預報試驗(Bosart, 1975; 1983; Sanders, 1973; 1979; 1986)或 NWS 的客觀預報與主觀預報，均顯示技術得分在冷季較暖季為高且隨預報期限的增長而迅速減小。雖然技術得分有顯著的年際變化，但隨時間改進的趨勢至為明顯。圖 1 與圖 2 分別為 Murphy and Sabin(1986)對 1985 年之前 NWS 所

做客觀 PoP 與主觀 PoP 預報的技術得分，在 3 個預報時段(12~24 h, 24~36 h, 36~48 h)及冷暖季的全國不分區分佈。顯示的幾項重要特徵如下：

1. 對於任何預報時段，不論主觀或客觀 PoP，冷季技術得分均較暖季為高。
2. 不論冷暖季或主客觀 PoP，預報期限增長，則技術得分下降。
3. 不論冷暖季或不同預報時段，主觀 PoP 技術得分均較客觀 PoP 為高。
4. 客觀 PoP 冷季技術得分在 1976~77 年(圖內註於 1976)有顯著增加，之後增加較緩；暖季技術得分增加較冷季稍緩，但 1970 年代中期及 1980 年代初期改進顯著。
5. 主觀 PoP 冷季技術得分在 1970~71, 1972~73, 1976~77 有顯著增加；暖季技術得分年際變化較大，但在 1971~72, 1974~75, 1978~79 亦有顯著改進。

他們並進一步分析技術得分的趨勢，發現所有 PoP 總結果(主客觀、季節、時段、全國)在統計上有顯著的正趨勢。客觀 PoP 正趨勢在暖季較冷季稍大，而不論冷暖季皆以 12~24 h 時段正趨勢為最大。主觀 PoP 的正趨勢亦具統計顯著性，但冷季正趨勢較暖季為大。以 12~24 h 主觀 PoP 為例，冷季技術得分由 1967~68 的 38% 增加到 1984~85 的 48%，而暖季同期則由 24% 增加到 34%。對冷暖季及所有預報時段而言，客觀 PoP 的正趨勢較主觀 PoP 為大。

六. 結語

近年來不論數值預報模式或 MOS 法等所產生的客觀預報，在氣象預報(環流系統)與天氣預報方面均有顯著改進，預報員利用這些客觀預報產品做為指引，所做的主觀天氣預報除亦能跟著改進外，其技術得分亦顯較客觀預報為佳，此種現象在未來的天氣預報領域裡勢將延續，降水機率(PoP)預報亦不例外。中央氣象局已決定近期發佈 PoP 預報(external forecast)，並已於今(1992)年開始於局內測試(internal forecast)，此項預報雖較美國 NWS 的 PoP 預報作業晚了約 35 年，但在社會需求與世界潮流的雙重影響下，總算有了起步。

主觀降水機率預報，雖其涉及的分析整合判斷

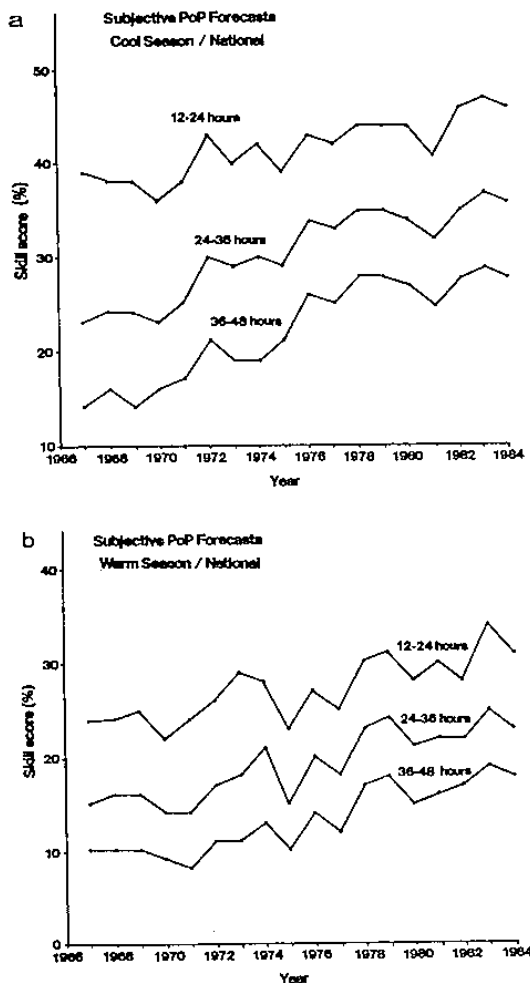


圖 2 (a) 1967~85 年冷季與 (b) 1967~84 年暖季全國不分區主觀 PoP 技術得分 3 個預報時段的時間分佈 (Murphy and Sabin, 1986)。

過程與預報表達過程皆為主觀的或直觀的，但其預報卻是客觀的，亦即預報員所做的預報可以且必須忠於其判斷。在預報校驗所使用的 Brier Score，係以均方差 (mean square error) 表示，為一“確實適當得分法” (Strictly Proper Scoring Rule)，預報員若要獲得好成績 (技術得分，skill score)，唯有讓其預報忠於其判斷一途，預報員在此種預報校驗方法之下無法投機，故其預報應屬在客觀氣象條件下的客觀結果。此外，在眾多的學校師生預報試驗裡，均顯示眾意 (Consensus，即多數預報者的平均預報) 具有最佳的預報結果，顯示主觀判斷的互補作用對於具有不確定性 (uncertainty) 的天氣發生的預報具有正面價值。

對於未來中央氣象局的 PoP 預報作業，個人認為在學術界及預報作業單位間，對於 PoP 可能出現多種不同詮釋的情況下 (美國經驗)，宜採用美國 NWS 的定義，以使預報員及使用者 (一般大眾、媒體、決策者...) 有所遵循，且易於教育及宣導。而在實際作業上，預報員只將目前範疇 (式) 預報 (是或否) 改由機率表示，除更能反應預報員對降水的判斷外，亦能減輕其各種內在及外在壓力。至於預報時段及預報分區，則內容可由簡入繁，分區可由大而小，預報時段可由短而長，累積經驗，循序漸進。當然，在 PoP 預報的改進則需要研究、預報與使用等上下游三方面的配合，希望本文有助於這三方面人士對於 PoP 預報的了解。

致謝

感謝王重傑先生在協助本文完稿所做的努力。

參考文獻

- 陳泰然，1976：機率天氣預報。台大30週年校慶專刊，165~174。
- 陳泰然，1977：台灣地區主觀機率天氣預報之氣候參考值分析。台大大氣科學系研究報告，85頁。
- 陳毓雷，1970：天氣預報使用價值之檢討與改進芻議。氣象學報，16，1，31~39。
- Bosart, L. F., 1975: SUNYA experimental results in forecasting daily temperature and precipitation. Mon. Wea. Rev., 103, 1013~1020.
- Bosart, L. F., 1983: An update on trends in skill of daily forecasts of temperature and precipitation at the State University of New York at Albany. Bull. Amer. Meteor. Soc., 64, 346~354.
- Brier, G. W., 1950: Verification of forecasts expressed in terms of probability. Mon. Wea. Rev., 78, 1~3.
- Curtiss, J. H., 1968: An elementary model for the interpretation of precipitation probability forecasts. J. Meteor., 7, 3~17.
- Glahn, H. R., and D. A. Lowry, 1972: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. J. Appl. Meteor., 11, 1203~1211.
- Lowry, D. A., and H. R. Glahn, 1976: An operational model for forecasting probability of precipitation-PEATMOS PoP. Mon. Wea. Rev., 104, 221~232.
- M. S. I. Services, Inc., 1981: Public requirements for weather information and attitudes concerning weather service. Washington, D. C., M. S. I. Services, Inc., Tech. Rep., 46 pp.
- Murphy, A. H., and T. E. Sabin, 1986: Trends in the quality of National Weather Service forecasts. Wea. Forecasting, 1&2, 42~55.
- Murphy, A. H., and R. L. Winkler, 1971: Forecasters and probability forecasts: the response to a questionnaire. Bull. Amer. Meteor. Soc., 52, 158~165.
- NOAA, 1984: Chapter C - 11, Zone and Local Forecasts. National Weather Service Operational Manual, NWS, Office of Meteorology, Silver Spring, Md.
- Sanders, F., 1963: On subjective probability forecasting. J. Appl. Meteor., 2, 191~201.
- Sanders, F., 1973: Skill in forecasting daily temperature and precipitation: Some experimental results. Bull. Amer. Meteor. Soc., 54, 1171~1179.
- Sanders, F., 1979: Trends in skill of daily forecasts of temperature and precipitation, 1966-78. Bull. Amer. Meteor. Soc., 60, 763~769.
- Sanders, F., 1986: Trends in skill of Boston

- forecasts made at MIT, 1966 - 84. Bull. Amer. Meteor. Soc., 67, 170~176.
- Schaefer, J. T., and R. L. Livingston, 1990: Operational implications of the "Probability of Precipitation". Wea. Forecasting, 5, 354~356.
- Shuman, F. G., and J. B. Hovermale, 1968: An operational six-layer primitive equation model. J. Appl. Meteor., 7, 525~547.
- Snellman, L. W., 1977: Operational forecasting using automated guidance. Bull. Amer. Meteor. Soc., 58, 1036~1044.
- Winkler, R. L., and A. H. Murphy, 1976: Point and area precipitation probability forecasts: some experimental results. Mon. Wea. Rev., 104, 86~95.

Some Considerations on Probability of Precipitation (PoP) Forecast

George Tai-Jen Chen

Department of Atmospheric Sciences
National Taiwan University

Abstract

Internal forecasts of the probability of precipitation (PoP) have been made this year (1992) at the Central Weather Bureau (CWB). It is expected that the PoP forecasts over Taiwan area will be routinely issued in the very near future. The main purpose of this paper is to overview some relevant issues regarding the probability forecast and its routine operation. Various possible interpretations for the PoP are discussed and various methods for generating PoPs are presented. The formulation process and expression process in the subjective PoP forecast are also discussed. Finally, method of forecast evaluation and skill score for both the objective and subjective PoP forecasts issued by the National Weather Service of the States are presented and discussed.

