

統計氣象預報之發展

陳 毓 雷

Recent Development of Statistical Weather Prediction

by

Chen Yu-lui

Abstract

The statistical weather prediction has gradually become an independent area in the field of weather forecasting since the end of last World War. However, a great number of papers were published without giving the subject an over-all look. This article is therefore intended to make a brief summary about its principle and future development, while more or less detailed description is given to the different approaches, viz., the multiple regression method, graphical method, stratification method, residual method and mixed method, with a view of stimulating further study on these methods for people interested. The merits and demerits of statistical weather prediction over dynamical approach are also reviewed in the conclusion.

一、概 介

二次世界大戰以後，航空事業突飛猛進。然傳統天氣預報之準確率則未能作等量之進步。且作業程序遲緩，態度主觀，亦不合現代精神。氣象學者乃從事統計氣象預報 (Statistical Weather Prediction) 之研究，冀能達到「新、速、實、簡」之境界。

統計氣象預報之方法甚多，然其原則均在運用過去天氣之統計以顯示未來天氣之趨向。在實際作法上，大多以某一或若干氣象參數為對象，從過去之觀測結果希望求得未來該參數之值。一般言之，參數間相關之物理意義不必全盤瞭解，主要藉經驗及統計方法建立之。

與傳統之天氣預報相較，統計氣象預報（以下簡稱「統預法」）之方法可謂非常客觀。尤以對預報員而言為然。蓋任何預報員用同樣之「預報因子」（憑以預報某目標之氣象參數，Predictor），運用同一方法所獲得「預報目標」（所欲預報之氣象參數或事象，Predictand）之值，必皆相同。然在製訂方法之過程中，則仍不免有相當之主觀判斷攝入。例如，原始資料之歸類整理，等值線之目視分析等皆可滲入若干主觀因素入內。故嚴格言之，統預法尚不能真正稱為「客觀預報」，不過統預法之程序愈複雜，其客

觀性亦比例增加，殆無疑義。

製訂統預法之三重要步驟如下：

(一) 先行研究「預報目標」與諸「預報因子」間之關係深淺若何。然後選定其中優者採用之。

(二) 所用形式，無論其為文字、圖表、方程，力求其簡單易用。俾完成後之預報程序簡便，人人能用。

(三) 所得初步結果必先試用於另一套獨立資料上以覈驗其可靠性。有時將全部資料分為三部份。其一用於統預法之製作，其他分別用於修訂及覈驗。

二、預報因子之選擇

預報目標由實際需要決定，但預報因子則可自由選擇。而統預法成功之關鍵在預報因子之選擇是否至當。例如降水之機率感知其與垂直氣流及濕度有關。通常垂直氣流可藉經流分風速（南北向）或高空氣溫平流間接見其端倪。是以當計劃作降水預報時，宜採用某有關濕度之參數及氣溫平流之參數為預報因子。

僅憑氣象學理選擇因子仍嫌不足。以上例而言，所謂濕度之參數，究應採用濕球溫度、相對濕度、抑氣溫露點差為宜？又，應採用何高度者？此類問題可由過去資料中預報目標及因子間之統計量解答之。且各不同之統預法各具其特有之最優因子，固不可一概而論也。

其次，涉及預報因子之多寡問題。是否多多益善？理論上似應如此。但實際上每酌用較少因子。其理由在於引用過多之因子常易導致預報之不穩定性。況預報因子本身相互間常具因果關係，並非完全獨立不相關連者，故亦不必採用太多因子，徒增其繁。

最後討論預報因子觀測地點之問題。目前統預法所用因子之觀測資料類皆取諸於固定地點，或為某數測站，或為分析圖中之網格點。此可稱為「定點方法」(Fixed-point techniques)。其實，另一方法更合學理，即所謂「流徑方法」(Trajectory techniques)。此法先決定在預測時間將到達預測站之空氣現在應居何處。然後選擇若干因子足以影響此空氣者，就流徑首尾兩端之值尋求因子與目標間之統計關係。例如一地之能見度與其空氣源地能見度之差，乃該兩地間污濁因素及垂直穩定度之影響結果。而此兩項因子之值，即可據以為參數從事統預法之製訂。「流徑方法」之主要困難當在空氣流徑本身之預測在先。是否客觀、準確自為先決條件。氣象學者希望不久能藉數值預報，先行精確預測氣流之流徑，然後應用統預法作一般預報目標之預測，必能大為增進地方預報之準確率。此在氣溫、能見度、濕度等預報目標而言為尤然。

三、統計氣象預報方法分類

統預法之歷史不久。各學者分頭從事研究各具觀點，尚無統一結論。且目標性質不同，方法亦隨之而異。統預法之種類因而非常分歧。唯大致可分為如下五種。

(一)複式直線迴歸法 (Multiple regression method)

(二)圖式迴歸法(Graphical regression method)

(三)層分法 (Stratification method)

(四)殘餘法 (Residual regression method)

(五)綜合法 (Mixed method)

依次分節予以簡介如下。

四、複式直線迴歸法

複式直線迴歸或稱「多元一次迴歸」用於預報，自一九五〇年後風行一時。要之，為其客觀性及計算機之輻興使然。其結果盡在一方程式中，預報程序之簡單無以復加。或曰，高次迴歸豈不優於一次迴歸。何均不見採用？此例由於實驗再三證明，高次迴歸徒增方程之繁複，而未見預報準確率之對應提高故

也。

本法用於某種能以數值表示之變數場之預報，極見功效。例如，在一廣大地區內之氣壓、氣溫等是。其準確率較諸純以動力觀點或一般所謂之主觀預報均優。與純學理之動力預報相比較，本法之可取處在乎不需認真考慮大氣動力學之數理論據；其缺憾則在乎迴歸係數之未能持久不變。其實，由統計方法所獲之迴歸係數，應已自然包含大氣動力學原理在內，而天氣學中天氣類型之發展及動向，自然亦必切合動力學原理。故無論統預法抑動力預報，苟能繼續改進至相當程度，兩派實殊途而同歸者。

統計學中有關迴歸方程之討論，均假定自變數為已知。此種自變數在統預法中即預報因子。最困難者厥為如何選擇與預報目標最具關連之因子。利用計算機之快速性能，不憚其煩的將候選因子逐一與目標求出相關係數 r ，就其值之高低而定最後入選因子之優先次序，殆為目前最實際可行之途徑。

茲述本法步驟如次。

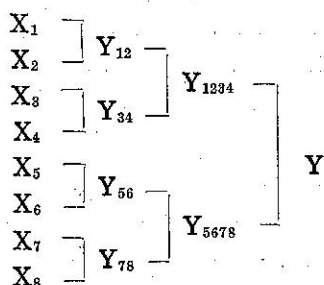
(一)首先將原始資料分為三部份。其中第一部份(製作用)通常為最大部份。將預報目標分別與每一因子計算其 r 。例如欲預報臺北之溫度(目標)時，可將附近測站24小時前之溫度、氣壓、或其他氣象參數(以上均為候選因子)，逐一與臺北溫度計算其相關係數。擇其 r 值最高者選為最優因子，構成單式(一元)迴歸方程。此單一之因子應已解釋目標變異數(variance)範圍之 r^2 部份。然後，擇 r 次高值之次優因子加入最優因子共同與目標構成二元迴歸方程。同時使目標變異數被解釋之範圍繼增。依此類推，可構成三元、四元、乃至任何元之複式迴歸方程。今姑假定已製就一元至十元共計十個迴歸方程。

(二)將以上方程逐一用於第二部份資料(訂正用)上以視何者效果最佳即定為我所將採用之預報方程。何以因子最多之方程未必為效果最佳者？蓋在製作階段因子過多時，可能產生「過慮」現象(overfit)。即過份考慮每個因子之資料價值以致將偶發性、局部性之變異亦加入於迴歸係數之謂。但決定「過」與「當」之界線何在，無法由方程本身見之，故祇得用實際之訂正資料試驗得之。

(三)將訂正階段試用結果最佳之迴歸方程再度就第三部份資料(覈驗用)試用之。視其所能解釋之變異數若何。假設該方程確屬穩定可用，則其在第二、第三部份試用時所得之值應大致相埒。

五、圖式迴歸法

本法仍以迴歸原理為依據，但不用方程而採圖解方式表示。其過程則類似球類比賽之淘汰秩序表。例如已選定8個預報因子 (X_1 、 X_2 …… X_8) 對預報目標 (Y) 求其間之關係，可用下列秩序「比賽」七場而得結果。



茲就上例說明本法製訂過程之步驟如下：

(一)將4雙因子分別作為4幅圖之縱、橫坐標。例如圖2以 X_3 (氣壓) 為縱坐標， X_4 (氣壓趨勢) 為橫坐標。但逢風向時宜以極坐標表示，例如圖1內之 X_1 (風向) 及 X_2 (風速)。

(二)將 Y 之對應值分別在4張圖內按坐標位置點入標明數值。然後作等值線分析。此4圖均可認之為預報 Y 之圖解迴歸法。我人稱 Y_{34} 時，表示係根據 X_3 與 X_4 推得之 Y 值。同理稱 Y_{78} 時，意指由 X_7 與 X_8 組成之圖上所推得之 Y 值。本階段可喻作「初賽」。

(三)進行「準決賽」階段。包括附圖之圖5及圖6兩幅。前者以 Y_{12} 、 Y_{34} 分別為為橫軸及縱軸之變數，後者以 Y_{56} 、 Y_{78} 為變數。將 Y 值再度點入此兩圖

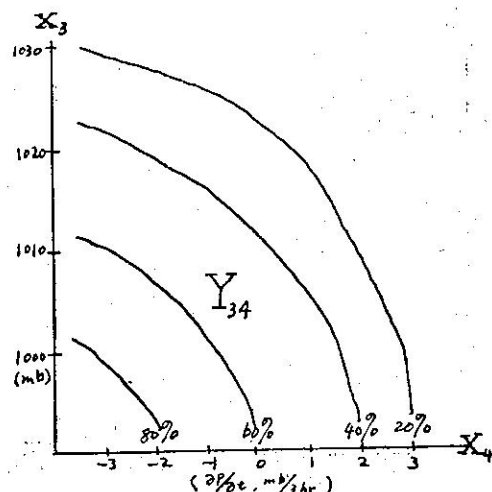


圖 2

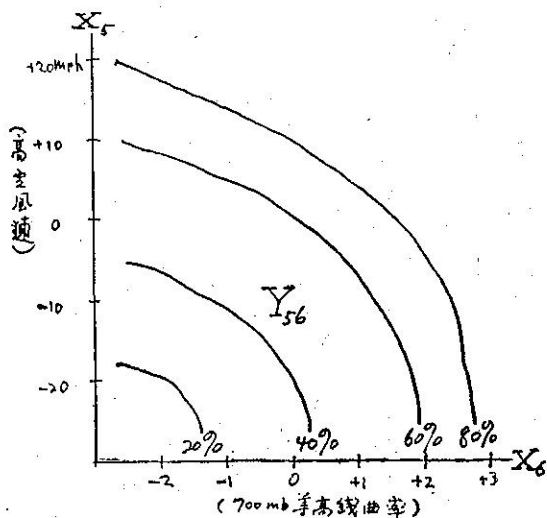


圖 3

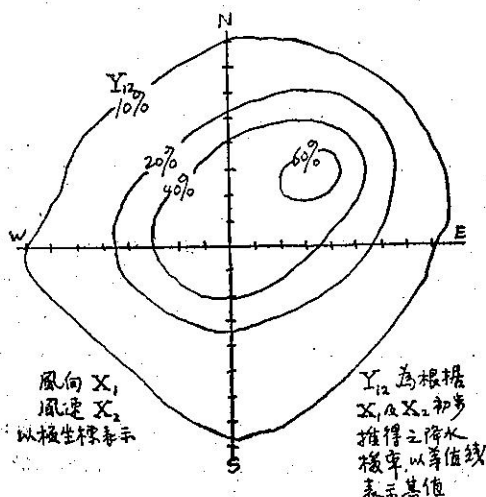


圖 1

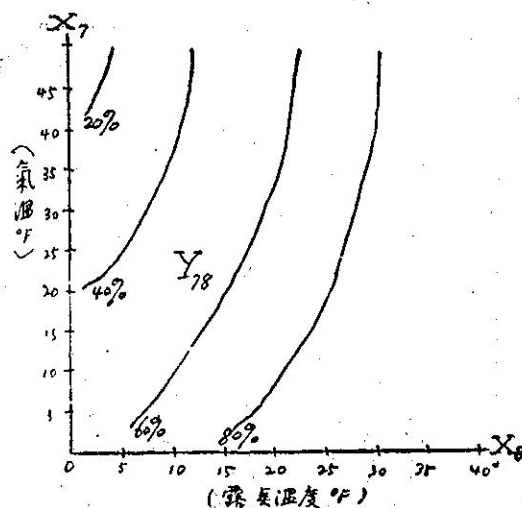


圖 4

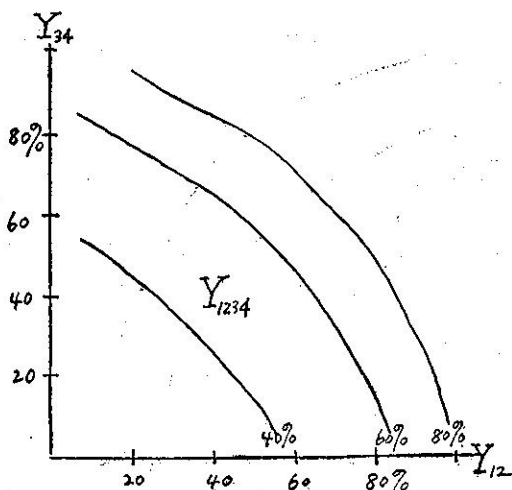


圖 5

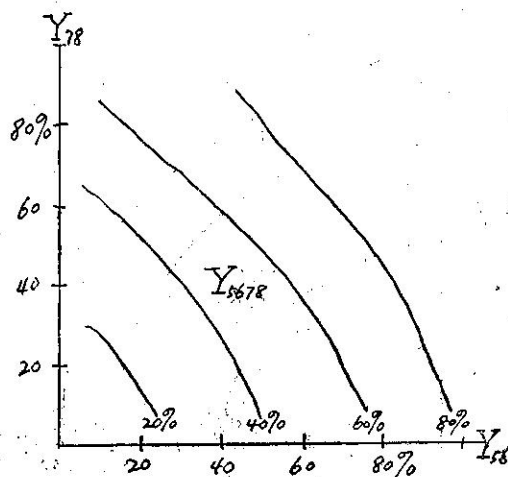


圖 6

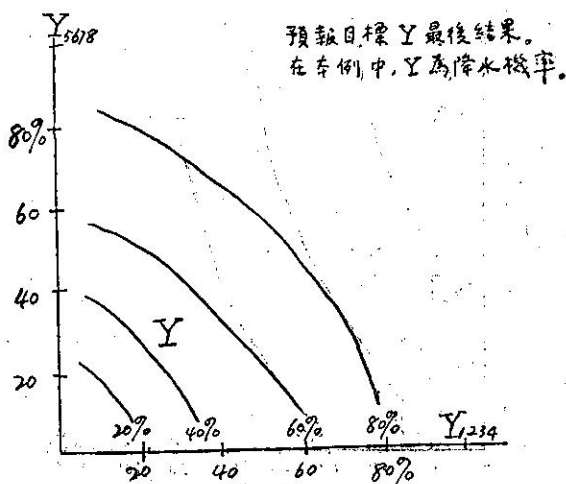


圖 7

中，加繪等值線分析。故圖 5 中之等值線現在已可認為係根據 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 4 個因子而推得之預報 Y 值，稱之為 Y_{1234} 。同理圖 6 中推得之預報 Y 值稱為 Y_{5678} 。

四晉入「決賽」。以 Y_{1234} 及 Y_{5678} 為坐標之圖 7 中又一次點入 Y 之對應值，經分析後所得之等值線即可認為對 Y 之最後預報矣。

至於預報員應用此結果從事預報時之步驟則如次述。首先分別就 8 個預報因子之觀測值在「初賽」4 圖中讀得 Y_{12} 、 Y_{34} 、 Y_{56} 、 Y_{78} 各值。復從「準決賽」兩圖內讀得 Y_{1234} 及 Y_{5678} 之值。再就該兩值在「決賽」圖中讀得最後之 Y 值。即為預報。一般言之，本法在須臾間即可獲得最後結果，堪稱便捷。以上雖屢以球類賽程比喻，然方法之實質意義決非「淘汰」某因子而係「融合」各因子對預報目標之關係，其意甚明。

設原始預報因子為奇數時，可擇其中若干個直接「晉級」，有若球賽中之「種子隊」然。

本法之優點在簡捷易用，不需計算機，亦毋需方程式等諸端。然缺點在於每加入新的預報因子時，無法觀察其對預報增進之程度何若。

又，選擇適當之因子在本法中仍為關鍵所在。在任一圖中如遇等值線呈垂直或水平傾向時，則兩個因子中必有其一與目標並無相關。如遇預報目標之觀測值 (Y) 點入某圖時呈現一片散漫，毫無系統可循，則指兩個因子均不適用。遇此情形時，應即摒棄該等因子不用。

不能用數值表示之預報因子雖亦勉強可用本法，但終覺不甚理想。故逢僅能以敘述性質表示之因子宜用下節所述之層分法為佳。

六、層分法

層分法 (Stratification method, 暫譯) 亦稱分組法 (Classification method)，其引用之統計原理與前述之迴歸大異其趣，係根據過去實際紀錄內某一預報目標隨某某數預報因子出現之機率作為預報之準繩。為細密詳盡計，每先將各預報目標及因子按種類、程度或等級分組，賦予符號。茲舉例說明之，較易瞭解。

X : 預報目標 (例如飛行天氣等級)
 A 、 B 、 C : 預報因子 (例如 A 指氣團種類， B 指相對濕度等等)

$X_1, X_2, X_3, \dots$
 $A_1, A_2, A_3, \dots$
 $B_1, B_2, B_3, \dots$

分組 (例如 X_1 為目視級天氣, A_1 為 MP 氣團, B_1 為相對濕度 90% 以上等等。)

$(A_1 B_3 C_2 \dots) = (U_m)$: 組合單位 (例如 MP 氣團, 相對濕度 80—85 等等聯合出現) 之頻數。

$(A_1 B_3 C_2 \dots X_k) = (U_m X_k)$: 指 X_k 隨 U_m 後聯合出現之頻數。

$(U_m X_k) / (U_m) = s/n$: X_k 隨 U_m 後出現之機率。若 n 趨於無限大則 $s/n = p$ 稱為「真機率」。

根據過去實際資料計算而得之機率, 用以預報此後同樣情形之天氣。如此而得之預報, 均以成功之比率數表示, 故稱為「機率預報」。

自電子計算機普及以來, 本法始能一展所長。蓋可儘量蒐集過去資料, 使用打孔卡整理各組合單位 (U_m) 及 ($U_m X_k$) 之出現頻數, 而使 s/n 儘量接近真機率也。

本法在選擇預報因子時亦復有前述各法之困難存在。創議此法之 I. I. Gringorten 氏另設計一公式專門計算預報因子與目標間關係之大小, 稱之為預報因子之績效指數。用以選擇因子之優劣, 頗具效果。

七、賸餘法

賸餘法 (Residual method) 亦為一種以圖式表示之迴歸法。但其原理在逐次用一新的預報因子來表示上一因子所未能表示出來之迴歸關係, 故稱賸餘法。蓋指一次迴歸必不能儘行表示其相關, 必有賸餘關係尚存於其他次要之因子間也。

預報之實際步驟可以下列說明之。

設有預報因子 X_1, X_2, X_3 三個, 預報目標 Y 。

(一) 以 X_1 (假定其為最佳因子) 對 Y 作圖, 求得迴歸線如圖 8。

(二) 實際 Y 值與迴歸 Y 值 ($\hat{Y}$) 之差稱其為 ΔY_1 , 求每一資料之 ΔY_1 。

(三) 以 X_2 (假定其為次佳因子) 對 ΔY_1 作圖, 求得迴歸線如圖 9。

四如第二步求得每一 ΔY_2 。

$$\Delta Y_2 = \Delta Y_1 - \Delta \hat{Y}_1$$

(五) 如第三步, 以 X_3 對 ΔY_2 作圖, 求得迴歸線如圖 10。

(六) 最後以下列公式聯合各賸餘之關係而求得預報目標之值。

$$Y = \hat{Y} + \Delta \hat{Y}_1 + \Delta \hat{Y}_2$$

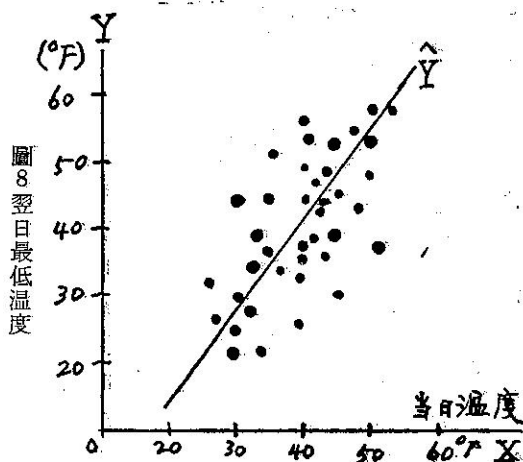


圖 8 翌日最低溫度

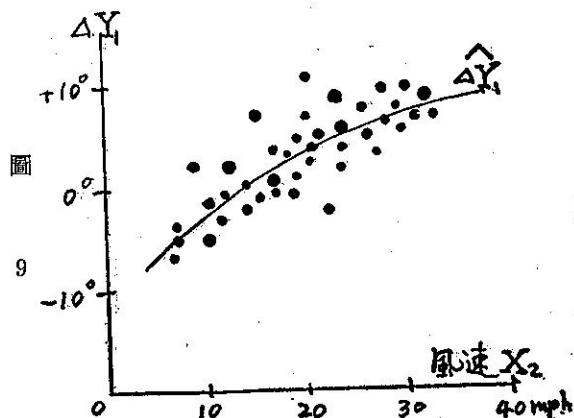


圖 9

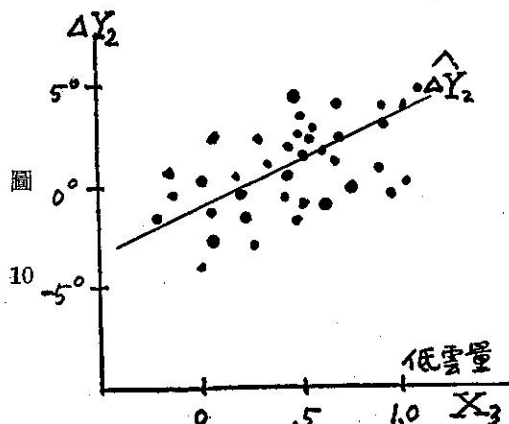


圖 10

本法雖可繼續不斷推至更多因子, 惟通常均以 3 個為度。本法之明顯優點在於每加入一新的因子, 立可察知其對預報實效有無增進。此正與圖式迴歸法之缺點相反。

當資料太多時, 用圖式步驟幾不可能。故在實際作業中每利用計算機將上述公式編成節目程序

(Programming) 求之。製作所需時間乃大為節省。錯誤亦難發生。

八、混合法

事實上氣象學家不必拘泥於上述某一方法。可就問題之性質取最適當之一法或數法混合使用之。例如預報目標僅能用文字敘述分類者，每採用層分法；能用「量」表示時多採用迴歸法或積餘法等是。

茲以地面氣旋移動方向之預測為例，某氣象機構即曾動用三種方法之多。首先以「該型氣旋之常態移向」及「該氣旋最近 6 小時移向」為因子用圖式迴歸法獲得初步之預報移向。次以「等變壓梯度指向」用積餘法作為修正因子。然後再以該氣旋行進時之轉向情形用層分法加以印證預報結果。可知統預法之目的祇在使預報準確率提高，而無一成不變之法則也。

九、結 論

統預法應用於各種預報目標，自最低溫度至機場飛行天氣等級之預報，均著實效。尤以地方性預報而言，統預法更較主觀預報方法之準確率為高。退一步言，縱令預報員經驗豐富，學養湛深，對主觀預報深具信心；統預法仍不失為一種良好之輔助預報工具。

其最大之優點厥為新進預報人員毋待熟悉一地之

特殊情形以後始能開始預報工作（方法本身已在製訂時自然將地方性因素包涵在內）。然而，此點正亦說明統預法之缺點所在：各地必須個別製訂其自有之統預法，不能轉假通用。職是之故，迄今應用統預法者仍局限於重要都市及航空基地。

有謂數值預報在近年來發展甚速，統預法之前途似乎悲觀。然數值預報即今能達到完美境界，其對象均屬大規模之綜覽天氣而不涉一地、一端之氣象事象。而統預法在此一方面獨擅勝場，固自有其燦爛前途也。

至於統預法在預測大規模之氣流方面是否亦可發揮其效用一節，迄尚難下定論。蓋此一問題胥視動力氣象學者與統計氣象學者間之學術競賽勝利誰屬？有動力氣象學者能發展一既切理論復合實際之大氣動力模式，使氣象觀測網均能用得其所，並能突破若干目前尚存在之若干物理困難問題，則統預法在該領域內似難獲地位。反之，苟統計氣象學者能不藉動力模式而自行發展正確之預報目標與因子間關係，則統預法即可問鼎於該一預報領域。亦有人認為兩派之聯合或折衷方式，可預期為此一領域內之唯一最佳預報方針。總之，誠如第四節所言，無論其為動力預報、統計預報，設能繼續改進達於相當完美程度，在理論上言必合殊途同歸之旨也。