

天氣預報技術之演進與大氣科學 研究之關係

陳泰然

A Perspective of Meteorological Research and Weather Forecasting

George T. J. Chen

一、前言

現今人類日常生活、農、林、漁、牧、工、商、國防、交通與政府等之運作均與天氣息息相關，有價值的天氣預報在這些運作過程中實屬不可或缺。正確的天氣預報與有效的傳播系統配合上適當的防範措施，當可減少災變天氣帶來的損失，維護人民生命財產的安全，確保國力。

天氣預報為大氣科學領域裡最為重要的一環。大氣科學界之研究、作業與技術人員絕大部分均與天氣預報有直接或間接的關係。大氣科學研究為推動天氣預報技術進步不可或缺之主要動力。本文除根據大氣科學之研究發展來探討天氣預報之演進外，並介紹預報極限與現今先進國家之天氣預報能力，以及未來研究發展趨勢。

二、推動預報技術演進之重要科學成就

從科學研究成果移植到技術應用過程的實例中，大氣科學研究到天氣預報要算最顯着，最直接且最有成效的一個。促使天氣預報進步的主要因素有三，包括觀測技術之革新，觀測知識之累積與理論之了解。

近代天氣學與天氣預報技術之演進可追溯到本世紀初葉。1917年V. Bjerknes由德國來比錫返回挪威卑爾根，創立地球物理學院，從事氣象研究。當年其子J. Bjerknes與同事共同完成氣團與鋒面學說。之後，這個學說成為天氣預報與分析的主要觀念基礎。

1922年L. F. Richardson提出控制大氣變化之物理定律方程式來預報天氣之構想並曾以實例試驗。雖然預報並未成功，在當時不受重視；但是却為今日之數值預報帶來一線曙光。1938年C. G.

Rossby提出渦旋度概念，應用於對流層氣流分析與波動移動，使天氣預報注入物理觀念，並導致初期正壓模式數值預報之實施。

1940年代J. Charney與J. von Neumann等人已預見數值預報技術性問題解決之可能性，隨後於普林斯頓高級研究院進行研究試驗，使數值預報能於1955年在美國氣象局正式加入預報作業。1950年代D. Fultz在實驗室之轉盤流體研究與N. A. Phillips的數值模擬，對於大氣環流之基本了解作出很大貢獻。1960年代J. Smagorinsky對原始方程式成功積分。以上所舉均為導致今日天氣預報科學化之重要成就。

三、天氣預報技術演進階段之畫分

我們對大氣狀態與演變之描述與了解可採結構的觀點或物理的觀點。前者注重在現象之描述，屬於運動學的範圍。後者基於大氣乃一物理系統受自然定律控制之認識，注重於物理學上的根據與解釋，屬於物理學的範圍。由此兩觀點發展出來對於大幅度系統之預報方法因而各異。天氣預報技術演進之歷史大略可分成三個階段，以運動學法預報最先發展，經一過渡時期，進入現今以物理學為基礎之數值天氣預報。茲將三個階段簡述如下：

1. 運動學法階段

自1917年卑爾根學派所提出之氣團與鋒面學說之後，氣象界即普遍以結構觀點來描述三度空間之綜觀幅度天氣形勢，產生以運動學為基礎之預報方法與技術。這些基於主觀直覺與經驗觀點之預報方法又可大略分為三類。持續法：假定未來天氣和現在一樣沒有變化。趨勢外延法：假定未來天氣變化依循過去變化之趨勢。循環法：假定過去出現之天氣現象將以相同方式重覆出現。前兩種方法用於

短時間綜觀幅度系統之預報往往十分成功。這種基於氣團與鋒面學說由結構觀點出發所發展出來的運動學法為1930、1940年代天氣預報之主要工具。J. J. George的「天氣預報學」(1960)與W. J. Saucier的「天氣分析原理」(1955)為本階段預報技術與天氣分析之代表作。此時之天氣預報可視為藝術的而非科學的。現今運動學法在天氣預報上之應用雖已式微，但氣象學家對於天氣之展望仍然具有這種特色。1940年代末期已察覺此法之預報能力無法超越1—2天，此時氣團與鋒面觀念來作預報工具之潛力差不多已發揮殆盡。此期間僅強調綜觀幅度系統，對中小幅度很少涉及且所知有限。同時，學術界已知行星幅度擾動，但此觀念很少應用於逐日天氣預報。有些人開始嘗試物理關連法來預報具有結構與物理關連的氣流形式與天氣之關係。

2 物理關連法階段

自1938年Rossby提出渦旋度觀念後，使得由物理觀點來描述與了解大氣之概念復活。此期注重在利用簡化形式之運動方程式來推論物理過程，以了解及預報綜觀幅度系統。主要觀念與預報技術可以S. Petterssen之「天氣分析與預報」(1956)一書為代表。此期為運動學法進入數值預報階段之過渡時期，雖已察覺中幅度系統之重要性，然其預報僅限於運動學法，缺乏理論基礎。

3 數值預報階段

1955年美國氣象局之數值模式正式加入預報作業，先由正壓模式進而斜壓模式。1960年代對原始方程式成功積分，於1966年原始方程模式正式作業。此時，物理關連法開始沒落，綜觀幅度系統之氣象預報進入科學的數值預報階段。現今數值預報法已能對行星幅度與綜觀幅度氣流做最佳預報，對於雲雨之預報亦有相當成績。

四、數值預報時代之預報能力改進

在說明預報能力改進之前，我們必須對氣象預報與天氣預報作一區分。嚴格地說，氣象預報是指對於大氣各層之氣壓（或高度）、溫度、濕度等氣象變數之預報。天氣預報則指對於地面天氣因子，例如：降水、溫度、風速等之預報。以美國為例，

現今前者利用數值模式，預報工作全部由電算機完成。後者主要利用客觀的數值—統計方法（Model Output Statistics, MOS）以及由預報員主觀之修正。

數值預報時代以前之氣象預報能力進步非常遲緩。1958年之後預報模式不斷改進，氣象與天氣預報能力亦顯著增加。首先有1958年北半球正壓模式，繼而有1962年三層斜壓模式，最後，1966年六層原始方程式（PE）正式作業。1971年後出現有限範圍細網格原始模式（LFM）。1958—1975年這段期間對於地面30小時綜觀幅度系統之氣流預報改進20%，對於36小時500毫巴氣流預報改進30%。高空大幅度系統之三天預報已非常準確，早期未能預報之阻塞形勢生成與消失以及割離低壓均能妥善處理。LFM模式對大西洋冬季強烈氣旋生成與發展亦能掌握。

天氣預報方面由於PE模式之作業與MOS之應用，使得最高溫度與最低溫度的預報在1968—1975年間24小時預報改進25%，48小時改進30%。1965—1975年間數值模式所做24小時降水預報無大用處，此期降水量的預報幾無改進，預報員仍需憑經驗技術及參考預報圖來判斷預報。但1955—1975年間對於降水與否之預報有些改進，以波士頓、芝加哥與華盛頓為例，準確率由80%增加到84%。LFM作業之後對於降水區域之預報已有顯著改進，但數值模式對於中小幅度天氣現象，如雷雨、豪雨等之預報仍然束手無策。導致本期預報能力改進之主因，除數值模式之運用外，亦歸功於觀測技術進步，大型電算機之革新，以及數值—統計法MOS之結合運用。

五、天氣預報能力之極限

大氣為一物理系統，若欲對此系統之變化做預報必先確知將要預報的對象，尋求切題的資料，並能依據物理定律對資料做有系統有組織的闡述，才能成功。因此，欲知天氣預報能力不能不對物理定律與資料之本質有所了解。在此我們所關心的問題是將來能否達到絕對正確的逐日天氣預報。答案可由以下四點求得。

1 控制大氣變化之物理定律，其數學方程式為非

線性微分方程，不具解析解（analytic solution）。

2 在電算機處理這些微分方程使用數值方法，產生截斷誤差（truncation error），隨時間增大。

3 初始資料不能完全正確觀測，誤差將隨時間增大。

4 我們無法處理個別亂流或雷雨等小幅度運動。故必須以參數化法將亂流等之統計特性以大幅度運動之函數表示。但是我們不知如何求得此函數，亦不能證明此必要之函數是否存在。

基於上述理由，我們將永遠無法達到完全正確的逐日天氣預報結果。E. N. Lorenz利用非線性能量交換的方法研究大氣可預報度極限，發現其長短與天氣系統生命期相當，雷陣雨幅度系統約在一二小時內，大幅度系統約為二週之內。

六、現階段之天氣預報能力

近一二十年來天氣預報準確率之提高主要由於數值預報的發展，電算機的革新，對大氣現況描述的改進以及現代觀測技術之引進，例如：雷達、人造衛星等。但近幾年的準確率提高已顯出平緩之勢，此乃因觀測網不夠密集來分析500公里幅度以下的系統，且數值模式亦無能力預報這些系統。最近細網格模式LFM之引進，對於這種較小系統之預報似有改進趨勢。一般說來，天氣預報能力與天氣形勢，地理位置和季節均有密切關係。我們對於各種預報方法之能力可客觀地以預報結果和持續法預報或氣候值預報比較求得。如果預報結果不如後兩者，則表示該方法無預報能力。

現以大氣科學最發達的美國為例：該國氣象學會對於目前一個受過良好訓練的氣象專業人員，在運用所有可用的適當資料後，對於北半球中緯度天氣預報能力所做的評估，可按預報時間長短分述如下。

1 48小時內：天氣預報技術與其效益均高，12—48小時之溫度預報可達80—90%準確率，降水預報可達70—80%。對於範圍1000公里以上的綜觀幅度系統之移動與其一般影響作用之預報能力最大。但對於綜觀幅度系統內包含的較小幅度系統所帶來的逐時天氣變化之預報能力極差，特別是在地形複雜地區，困難更大。對於重大天氣現象，例如：劇烈

雷雨、龍捲風等之確切發生地點仍無法在幾小時前正確預報，但是可在24小時前預報這些劇烈天氣發生之一般區域。對於較少發生之天氣現象，例如：豪雨、大雪、強風等通常可在24小時前預報。

2 2—5天：逐日溫度預報有相當技術（準確率60—70%），並有經濟效益。降水預報在第三天仍可達相當水準，但第4、5天之能力幾不存在，僅可以趨勢表示。

3 5天—1個月：平均氣溫預報有點技術（準確率50—60%），逐日或逐週氣溫預報尚未顯示任何預報能力。5—7天之總降水量亦有點預報能力，更長時間則無。

4 1個月以上：不存在逐日預報能力。季節展望與氣候預報能力亦極微。

熱帶地區預報技術比中緯度地區差，中緯度地區夏季受熱帶天氣系統影響時亦差。熱帶天氣預報在12—24小時以上幾無預報能力。

七、未來展望

1970年代發展的觀測技術，如海洋漂浮站、人造衛星紅外線感應器等，提供全球各地連續之溫度、氣壓觀測，將使得佔全球70%的海洋地區過去資料缺乏之問題得以解決。行星幅度與綜觀幅度氣流形勢之分析與預報在先進國家已完全自動化、科學化。雖然這種幅度系統之可預報度被認為是兩週，但目前實際作業僅能達到5天左右，所以數值模式之改進對於提高預報能力仍有潛力。目前長至兩週之預報已在大氣環流模式中試驗，並已知悉應將行星邊界層納入數值模式。LFM模式已顯示能改進預報，但此模式僅改變網格大小，未改變原始方程模式之物理。假若中幅度系統之重要參數可以合理測量，綜觀幅度數值預報將可再獲得改進。

按目前趨勢，大氣科學先進國家之數值預報為短期與展期氣流形式與天氣預報之唯一方法，曾經輝煌過的運動學法與物理關連法在預報上的地位已不重要。在科技較不發達的國家，這些傳統方法將再繼續一段時日，此期長短端視該國在國際氣象界之參與以及其所擁有的合格氣象研究與技術人員多寡而定。

中幅度系統之短期預報在將來仍有很多問題。

目前所處情況和早期綜觀幅度預報所面臨的問題相似，將來的發展亦必採相同步驟演進。雖然參數化問題仍在，但若有足夠的中幅度系統理論基礎，配合氣象界頂尖人物參與和電算機之改進，中幅度數值預報在可預見的將來亦獲得解決。

月、季之長期預報進步太少，希望將來能有所作為。海洋與大氣結合之模式可能將為長期或氣候預報提供一條途徑。

八、結語

天氣預報之發展基本上受到大氣科學研究之影響。由卑爾根學派 1917 年提出氣團與鋒面學說後，二三十年間之預報技術主要為運動學法。1938 年 Rossby 提出渦旋度觀念後，天氣預報進入以物理推論為主的物理關連法時代。1960 年代成功積分原始方程式後，氣象預報進入完全客觀與科學化境界的數值預報時代。目前數值模式對於綜觀幅度系統已能成功預報 5 天左右，但離可預報度兩週之極限仍遠，尚有發展潛力。氣象預報雖已進入客觀化、科學化、但天氣預報方面仍需利用數值—統計方法，降水預報則仍需依靠個人經驗技術對數值預報結果做主觀判斷與修正。未來將加重在為達成中幅度系統數值預報化與月季之長期氣候預報之科學研究與天氣預報研究。

台灣地區每年幾乎要受到災變天氣的侵襲，其中最顯著的有颱風、寒潮、乾旱與梅雨。因而，本地區之天氣預報顯得格外重要。本文除對過去大氣科學研究成果影響天氣預報技術之改進作一簡介外，亦說明現階段先進國家之預報能力以及未來展望期望氣象同好均能在歷史演變的軌跡扮演一個重要的角色。（作者通訊：台大大氣科學系）
編著註：本文為陳博士所講授「中緯度綜觀幅度天氣系統」之「緒論」承蒙博士允許特登於本刊以享同好。

參考文獻

1. Lee, R. 1972: A perspective of weather forecasting-present and future, BAMS, 53, 11, 1115-1117.
2. Reed, R.J. 1977: The development and status of modern weather prediction, BAMS, 58, 5, 390-401.
3. Pielke, R.A. 1977: An overview of recent work in weather forecasting and suggestions for future work, BAMS, 58, 6, 506-519.
4. Shuman, F.G. 1978: Numerical weather prediction, BAMS, 59, 1, 5-17.
5. BAMS, 1976: Policy statement of the American Meteorological Society on weather forecasting, BAMS, 57, 12, 1460-1461.
6. Fawcett, E.B. 1977: Current capabilities in prediction at the National Weather Service's National Meteorological Center, BAMS, 58, 2, 143-149.

（上接第50頁）

7. 劉廣英；1979：台灣地區寒潮之三維個案分析；氣象預報與分 第 79 期 P 1~P 12。
8. 曲克恭等；1968：中國天氣類型研究（低壓部份）研究報告 001，空軍氣象中心出版。
9. 劉廣英；1978：亞洲沿海地區冬季旋生及其對台灣北部短期天氣預報之影響，研究報告 014，空軍氣象中心出版。
10. 俞家忠；1976：冷季氣壓系統及台灣天氣客觀預報之研究（低壓部份），研究報告 010，空軍氣象中心出版。
11. 戚啟勳編；1974：中國氣候概論，交通部交通研究所出版。
12. 王時鼎；1977：西藏高原對其東側大氣下層所造成影響之實測研究；大氣科學第四期 P 11~P 21。
13. 沈 哇；1979：亞洲大陸春季割離低壓之研究；氣象預報與分析第 79 期 P 17~P 27。
14. 張利雄；1979：台灣附近地區氣流旋率與輻散場之客觀分析；氣象預報與分析第 78 期 P 19~29。
15. 蔡清彥、陳泰然；1978：台灣地區梅雨個案之中幅度系統觀測誤差與平衡 w 值之分析；研究報告 Mei-Yu-002，台大大氣科學系出版。