

動 力 氣 象 的 進 步

Charney 著* 羅濟歐譯**

(軍委氣象局)

動力氣象這門科學——有明確的領域和一套清楚的指導原理——可以說只有半個世紀的歷史。在這期間，進步很快，但是我們必須承認，在今日，動力氣象還在萌芽階段，基本上，理論只是觀測底一個被動的解釋者。可是近來的發展，指出我們正步進另一個紀元，在這個新紀元裏，動力氣象，由於它有預報能力，將成爲選擇各種觀測的指導，因而變成一種成熟的理論科學，使理論和觀測將在平等的基礎上相互作用。

爲了證實這個信念我願追述一下，主要發展的簡史。這些發展在我看來已經叫我們更靠近這個信念了。

V. Bjerknes 及他的合作者的工作計劃 在 1904 年 V. Bjerknes 宣佈了一個研究動力氣象學的計劃，這個計劃可以說開始了近代氣象學的紀元。他老早看到，在氣象學裏，和其他科學裏一樣，各個理論的最後考驗是它的預報能力。照看這個意思，他把動力氣象的目的定成：預報大氣的未來狀態。他說這話，並不是指時間成爲一個重要因素的實際預報問題，而是指運用流體力學及熱力學的方程式作大氣各種變化的理論分析。天氣預報當時在他看來是一個用算學來作決定的問題：首先儘先能完全而清楚地把大氣的最初狀態代表出來，即分析的問題，然後把流體力學及熱力學諸方程式積分出來，以求出未來的狀態即預報的問題。

不用說 Bjerknes 當時明白這樣包羅萬象的工作計劃是不能馬上完成的。然而他和他的合作者沒有被計劃的龐大所遏止，依然有系統地進行着打下解決預報問題最終辦法的基礎第一件工作，很清楚地便是分析問題的處理。我們可以分別在 Bjerknes, Sandstörms, Hesselberg, 及 Devitk, 等人所著的（各在 1910 年及 1911 年出版）兩本書：“靜力學”及“運動學”裏找到他們的工作成果。不久他們明白他們將編著的第三本書“動力學”時機尚未成熟。在這第一第二兩本書內，給了我們各種圖解法一個廣泛而詳細的處理辦法，用這種辦法，我能夠按照最適合於氣象學家的方式來計算和表示各

* 本文作者是當代理論氣象名家。現在普靈斯頓高等研究所主持數值預報問題，貢獻很多，他本來學物理，後研究氣象，畢業加利福尼亞大學，洛杉磯分校氣象系研究部。

** 本文的註解是顧震潮同志加上去的。

種氣象變數。

Bjerknes 的努力很快就得到了證實。他所創造的氣象方法學便為氣象研究發展鋪平了一條道路而改變了整個研究的路徑。還在萊比錫 (Leipzig) 的時候，他的一個學生叫 M. H. Petzold 的便開始研究所謂“輻合線”，這種輻合線在當時只被認為是地面天氣圖上純粹幾何性特異物。Petzold 建議研究一個溫度不連續性伴有風不連續性的形勢。可是他被徵參加德軍，後來犧牲於凡爾登，他便不能繼續和完成他的工作。雖然戰爭奪去了 Petzold 的生命，但戰爭也預備了一套方法，把他所開始的研究工作，引向有成果的上去。Bjerknes 回到挪威去了；那時的挪威是一個中立國，一切外界氣象電訊都被切斷了的。在他的建議下挪威決定設立一個稠密的地面氣象網並決定儘量利用觀測，多多少少補償國外紀錄的損失。我們知道這結果創造了一頁氣象歷史。靠了這稠密的觀測網，V. Bjerknes 的兒子 J. Bjerknes 證明輻合線不過是分隔兩個不同氣團的斜的不連續面在地面上的交線，即所謂鋒。這種發現在動力氣象上的意義是它把一個能用理論方法收到精確效果的現實性的模型來代替一束亂雜無章的觀測紀錄。因為鋒是一種物質，也就是一種有保守性的面，預報的一般問題便可暫時簡化成決定以鋒面為界的各個氣團的移動及決定這些氣團移到新位置後的物理狀態的問題。

這個模型立刻被拿來做理論分析。V. Bjerknes 追求地研究下一步發展，正和許多別的發展一樣是讀了 Helmholtz 的幾篇流體力學的文章而得到啓示的。Helmholtz 曾經研究過在兩種流體層的不連續面間的動力穩定性把海洋中的風成波動及在大氣中的波狀雲的生成解釋做切變運動不穩定性的結果。這個說法，使 V. Bjerknes 想到大氣中大規模擾動作用也是從一些輕微的不穩定擾動開始的，而且可以用線性運動方程來研究。註一 他特別假想新生氣旋是從這種不穩定的發展所造成的。因為極鋒大約相當一個切變不連續面，我們自然而然就想到在鋒上找新生氣旋，而這也被 J. Bjerknes 和 H. Solberg 兩人真的在那兒找到了。動力氣象那時面對着的問題是要示明那些和天氣圖上所看到的波動性質相同不穩定波動可以用算學方法來預報。因為我們假定了這種不穩定波動在開始時振幅很小，我們便可應用微小擾動的方法；在這種方法內，運動方程式可以化為線性方程式，因此可用現有的方法來處理。在這個部門內的主要工作者就是 H. Solberg。Solberg 自己先研究在大氣內可能存在的各種波動，看看能否在這些波動中找到性質和新生氣旋波動相似的波動。他雖然沒有全部解決這問題，但是他發現一種波動，它的運動的性質和我們所看到的氣旋波動的性質非常相合。可是從

註一：由於技術上的困難，偏微分方程中只有線性偏微分方程，可以求得比較詳細完全的解答，而擾動法便假定擾動很小而把運動方程，化為線性微分方程來研究的。

他對於這些波動的敘述看來，這種相符之處顯然並沒有能使我們可以用這種理論當作一個預報的工具。

Solberg 的基本工作在 1920 年發表後，挪威動力氣象學家們^{註二} 沿着相似的路線繼續努力，即是把簡單的波動模型作進一步的研究；這工作在質上是形式主義的並且是演繹的。他們採用某種線性氣流作為基本模型，然後試解擾動方程，不管對他們所解釋的大氣運動有沒有關聯，式中各項都一概保留。他們這種辦法的優點是：我們總可以確定他們所研究的運動在物理上是可能的，而且對運動的一切可能影響都顧到了。它也有一個缺點，即分析工作弄得如此過分複雜，以致我們想得到答案時必須多方考慮過度簡化了的並和實際情形連繫很少的模型。因此動力氣象學家在兩種模型——一種能準確地反映實在情形的模型及另一種能夠作定量處理的模型——之間作選擇時，必須採取折衷辦法，不應該對某種特殊型式的演繹論證有所偏愛而弄得離題太遠，即遠離我們要解釋觀測的各種運動的目的。氣旋生成的波動學說，到那時為止已經大家認為氣旋是由於不穩定波所形成的，而對這個說法很少有懷疑的地方。^{註三} 不過如同樣的那個模型繼續研究下去，是否能夠得到一些新的結果，造成很大的進展到是值得懷疑的。報酬遞減率已經開始發生作用。那時所需要的是要從那迅速增加的觀測紀錄的蘊藏中得到新的啓示，這些觀測紀錄很清楚地證明了鋒只不過是彼此相互作用的各運動複雜物的一部份而已。

高空分析及正壓模型 正如想像一樣，隨着氣象觀測網在水平及垂直兩方面的擴展以及用直接高空氣象學代替了間接高空氣象學。^{註四} 大氣上層的狀態和運動便大為注意。高空運動在性質和範圍方面，都很快被發現是和地面上的運動大不相同。

J. Bjerknes 在 1937 及 1939 年所作的研究便是在這方面所作的第一批研究之一。他在尋找溫帶氣旋加深的原因時，他的注意力被引到與地面上有鋒的低壓相伴的高空波動。^{註五} 他的主要分析工具是梯度風方程及氣壓傾向方程。他把高空波動向東移動的理由歸之於槽前的梯度風的輻散及槽後的梯度風輻合作用。他把地面上低壓加深的原因歸之於在地面低壓中心上空高壓槽後退（對地面氣旋而言）所引起的佔優勢的水平質量輻散。這件工作對於後來的各種發展有雙重的意義。首先，這是一個完全經驗處理法，使得由此所建立一套模型和大氣的實際情形十分相近，並且這

註二：如高士蓋 (Godske) 何蘭特 (Høiland) 以及別國氣象學者如賽蓋拉 (Sekera,) 浩威茲 (Haurwitz) 等。

註三：不過最近有人 (Bergeron) (Rossby) 對氣旋是不穩定波的想法又有一些異議了。

註四：挪威派 (Bergeron) (瑞典人) 在二十年來主張儘量利用地面觀測，特別是降水，雲象等等來開接了解高空的結構，稱為間接高空學。

註五：這高空波動非“高空長波”，而是與低壓相伴的小波動。

套模型簡單到可以作理論上的處理。其次是 Coriolis 參變數的變化對於解釋大規模運動的重要性的認識。

C. G. Rossby 很快地便把握到這兩個貢獻的價值，並且動手把它們結合成一個最值得注意的理論。他用了許多重要的修改來開始這個工作其中最先的一個工作就是把高空波動和鋒面擾動完全分開來並且分別研究它們的運動。在這點上，他和 Bjerknes 不同，Bjerknes 一向認為兩者是難分難割地相聯的。我們在高空圖上看到的大規模的高空波動和地面氣旋常常不是一一對應的。這個事實，可以證明 Rossby 是對的。這就是說，對每一個高空波動在地面上可能有幾個低壓。其次爲了把分析簡化起見，他假定這種運動是正壓的，^{註六} 因此在各高度上水平流線都是一樣的。如果我們把這樣的運動，應用到實際大氣上去，就必需解釋爲平均運動。Rossby 並沒有把這點明白說出，但是我相信他會同意這是一個必需的解釋。第三個改進是沒有水平輻散的假定。我們很容易證明，在正壓運動中的輻散作用很小，可以不去管它。可是這第三個假定，使氣象工作者間發生一些誤解。有人覺得非輻散作用的假定是矛盾的，因爲如果沒有輻散作用，氣壓傾向方程式就告訴我們氣壓不會有變化。^{註七} 可是如果我們不把氣壓傾向方程看做是一種必需的因果關係而只當作一個敘述：說明運動是靜力的而且遵守物質不滅定律的，那末我們顯然可以看出一種運動可以很近似地滿足這兩個要求，但不能滿足氣壓傾向方程。我還要再補充一點，很多人對於氣壓傾向方程的相似的誤解，也可說對於說明氣壓變化等於總重量變化那個方程的誤解，已在其他的問題上引起混淆的情形。如果某層大氣裏的平流作用產生巨大的氣壓變化，而把氣壓變化的原因歸之於這一氣層內的運動。這顯然是一種錯誤的論斷，像受平流層某些學說一樣。氣壓的變化是由於流體系統各部份間動力性的相互作用而產生的，並不能用靜力方程式可以解釋的。

我們可以把動力氣象工作分爲兩大類。一類討論在某一時間內各氣象變數間的關係，另一類討論時間上外延的問題。這兩類工作相當於 V. Bjerknes 所訂下一般預報問題兩方面，即分析與預報兩方面。第一類包括下面這些研究工作如：由梯度

註六：若是流體的密度，只隨壓力而變，這流體稱做是正壓的；反之稱爲斜壓的。大氣若是正壓的話，等壓面和等溫面一致，等壓面上因此就沒有等溫線。斜壓的天氣又可以分做二種。一種是等壓面上雖有等溫線，但是等溫線是和等高線平行的（風的垂直切變和風平行），這種斜壓性並不直接影響到水平環流。並且可以化做正壓大氣來討論牠的平均運動。另種是等壓面上等溫線與等高線相交的斜壓情形，就比較複雜。

註七：而且氣壓傾向的方程不能用來計算氣壓變化，因爲在那方程式裏氣壓變化主要由質量輻合和質量輻散的差來表示，而這輻合輻散不但相差無幾而且兩者都不易準確決定。所以氣壓變化也就無法準確決定。用連續性方程或氣壓傾向方程來定垂直速度也有這毛病。

風關係^{註八}求風及風切變，氣壓傾向方程在分析上的應用，各種平流理論以及從水平論，速度場和質量場來決定垂直速度及水平輻散等等。這些統統可以稱做剖面性的理論因為時間在那時是一個不變數。第二類研究因果關係的演繹而包括波動傳播的研究及穩定性理論這一類工作。我剛才提到的 Rossby 的工作無疑是屬於第二類的。他所採用的大氣正壓而無輻散的模型對時間性外延工作提供了一個很簡單的工具——這種運動是由絕對渦度垂直成份的常定定律所支配的。他應用這個定律，得到了一個求高空波動傳播速率的公式。這個公式蘊含着波動速率隨波長的增加而減小，因此對於波長長到足夠的波動，它可能是靜止的或甚至是倒退的。這個結論的影響是很深遠的。它用緯圈風來定靜止波的波長因此對大氣中半永久性作用中心的相對式樣^{註九}給了一個解釋。同時它又證明這種式樣如何隨緯圈風的變化而變化。但是這件工作最重要的一方面也許是：它是經驗的歸納的，和過去比較形式化的理解相反。它給動力氣象注射了新的活力。照顧到大氣的“行星的”特性的動力理論這還是第一個。這個理論和觀測的一致，使人覺得對於大規模運動機構作用底糾纏不清的結束終於被人緊緊地抓住了，而且現在可以着手進行解明問題了。正壓模型後來所開拓的種種研究實在不勝枚舉。其中之一的等渦度路徑的概念已經在日常預報工作中找到應用了。

現在讓我說一說經過了正壓模型的研究後才成為可能的另外一個發展。在這以前動力氣象學家只研究過各個孤立系統的運動，可是在天氣方面愈來愈多的確切的證據，表明某一系統內的變化不能只歸之於在這個系統本身內的運動。我們常常看到，高空低壓槽加深之後，下游的高壓楔跟着加強，並且這種能量的傳播速度大於風的速度。Rossby 認識到研究這種效應的適當工具是色散觀念及羣速度，因為在一系列波動內，能量不是用小於風速的位相速度來傳播的，但是以大於風速的羣速度來傳播的。^{註十}

斜壓性模型的理論 可是正壓模型有一個嚴重的缺點。在正壓模型裏面，動能可以從一部份散開到其他一部份去，但並沒有辦法能徵取位能以補充必然被摩擦所破壞的動能。為尋找這種能量的來源，我們必須注意到運動的斜壓性。講到能量釋放的精確的情形，V. Bjerknes 得這樣一個概念，即是波動及漩渦的產生。起初為在動力不穩定的靜止氣流中的小型擾動。這個概念應用到純粹鋒面波動氣旋上的成就當然

註八：像表示靜力平衡方程式不能用來解釋氣象變化一樣，表示運動平衡的梯度風方程也不能用來解釋風的成因。一般普通氣象上所說“因為有氣壓差所以有風都是錯的”。

註九：例如活動中心的個數，位置等等。

註十：重要的是：即使動能總量沒有變化，但是由於波動的色散性各不同波長的波動成分之間的位相差時之不同，因為波幅波形還是可以有變化的。換句話說，即使在正壓大氣中合成波動的槽或脊還是可以減弱和加強的。

很是出名的，但是長的“行星的”波動的加深顯然不能用狹小的鋒內的切變不穩定性恰當的來解釋。這時我們必須要注意的是整個大氣層內的斜壓率，就是說要注意到大氣層各高度上的切變，討論這種不穩定性理論早已有人做過。Solberg, Høiland 及 Fjørtoff 曾經研究過圓形漩渦軸對稱運動的穩定性，並曾推演出一些穩定性的準則。但是這些準則雖然可以用來解釋大氣中緩慢的經圈環流我們卻很難想像這些準則怎樣能夠用到不對稱的波動擾動上面去。除此之外，還有一類穩定性理論，研究垂直切變不變的緯圈氣流中波動擾動。這些理論看來更切當一些，它們都指出在西風帶中有程度的不穩定性。這種不穩定性的確高到使人奇怪為什麼大氣不比現在更亂一些。郭曉嵐^{註十一}最近指出 Rayleigh, Tollmien 及林家翹等人的片狀氣流穩定性的流體動力理論，可以擴充到自轉地球上的切變運動上去，並且求出一些看來頗為合理的穩定性準則。Fjørtoff 對這種不穩定性曾給一個極清楚的物理解釋。^{註十二}

我們很不容易給這些不同的學說的精確的重要性予以評價。下面這個大氣運動的解釋或可幫助我們說明動力不穩定性。大氣似乎偏愛在比較低的緯度地方有大範圍的冷性氣旋漩渦及在比較高的緯度地方有暖反氣旋漩渦的那種準穩定狀態。這些漩渦用盡了可用的能力供應後，就漸漸被摩擦所耗散，直到造成某種帶有均勻起伏的緯圈氣流為止；這種氣流之下南北之間很少有熱量交流。這時輻射作用慢慢使南北的溫度差異增大直至斜壓不穩定性足以使小波動又能發展為漩渦為止。^{註十三}

大氣環流理論 因為缺乏時間，我沒法講述大氣整個環流理論的進步情形。我的大概的印象是這整個問題還沒有明確化，而且在使我們可能得到肯定的結果之先須對特殊運動作許多天氣學方面的工作及分析。可是我願意提一提現在美國有些研究機構正在從經驗方面研究這問題，這至少可以把問題的本身弄明白。我並且願意提一提 Rossby 的西風急流的工作。Rossby 認為西風急流是渦度不變的大規模水平混合作用的統計的結果。我們雖然必須承認在某些情形下，觀測和理論很是符合，我也得承認我願意更清楚地了解一下：為什麼這種由大規模的氣旋及反氣旋漩渦的混合作用所造成的統計結果，含有這麼明確的性質並且看來好像是這些環流的固有性質。

數值預報 現在讓我回顧一下歷史並談一談發生在 1922 年的一件工作，那時大家都去探查極鋒發現後所引起的種種觀念。所以對這一件工作比較不大注意。這就

註十一：郭曉嵐不但對西風的不穩定有一些相當合理的理論解釋，並且最近又創造了西風生長的理論。他和後面所說的林家翹現都在麻省理工大學。

註十二：這指的是 Fjørtoff 1950 年發表的博士論文。見挪威地球物理叢刊 (geofys publ)

註十三：這是大氣西風環流消長極為清楚的簡單描寫。想對大氣西風環流消長作理論解釋的應該緊抓着這種所說的現象。

是 Richardson 註十四。所著題名為“用數值計算的天氣預報”的那本書。不管 Richardson 是否有意，他直接開始了 V. Bjerknes 在 1904 年所宣佈的計劃底第二部分，即是用數值方法來把流體力學方程及熱力學方程積分起來。這本書包括得十分完全，問題的每一方面都分別討論到了。例如：差數方程式的選擇，有限差數網的選擇註十五 熱動量以及水汽的亂流輸送作用，平流層的影響等等。他並對積分過程每一步驟都給了詳細的指示，甚至給了最便於使用的表格。把 Richardson 所說到方法付之實用在那時時機尚未成熟，這一點對於這本書的恰當估價，無關重要。重要的是他看到遲早得用數值方法來計算大氣方程的積分，並且看到這是完全可以實行的。隨着近來高速度大規模的計算機的發展，Richardson 的工作再不是只有學院性興趣的東西了，它對於一切想用這些機器來求氣象問題解答的人都有極大的重要性。

像我在演講開頭所說的一樣，我相信現在我們可能用動力方法來攻研預報問題而今有成功的希望了。我的信念的理由如下：

1. 我們現在的觀測分佈得已夠廣闊。使我們對地球上某些地區特別是美國東部，大西洋及歐洲可作一日至三日的預報。

2. 隨着對大氣運動了解的增加，各種運動實在形成一個波長不同之譜系，大範圍的行星波運動在某些意義上是獨立存在的，我們還知道支配這種運動的主要因子，至少在短時間內還是支配這種運動的主要因子。

3. 我們所需要用來表示這些運動的起始狀態的那類資料是可以弄到的，很多人已經證明我們可以用地轉近似值來推出一組支配大規模系統的運動方程式，要知道的只是原始的氣壓場。

4. 在可以作算學處理的運動，特別是均勻氣流上的小型擾動方面，我們用簡單的正壓模型所得到的預報已經好到夠我相信他如果我們用比較更有代表性的斜壓模型，一定能使預報技術有肯定的改進。註十六

5. 最後，計算機的大量使用，將使用在算學方面的勞力大為減省並可以使我們能夠解決振幅不是無窮小的運動及大量紀錄的處理。註十七

註十四：他是英國氣象學家，在劍橋念算學時即注意到差數方程問題。第一次大戰時曾被徵入高射砲隊到法國作戰，他一方面就研究數值預報問題，戰爭結束後寫成下面所說的那本書。他為教友派教徒主張和平，本在英國氣象局，在氣象局改隸英國空軍時辭職鄉居，從此轉為研究經濟生物等問題。

註十五：因為運動微分方程中的微係數在實際計算時都需用差數來代替，所以我們要解的是差數方程。而且求差數時所取的時間和空間間隔，既不能太大也不能太小，所以也要考慮。

註十六：但是我們先得了解有限(波動振幅不是無窮小)的互相作用才能對再高空大氣的運動了解，即是我們雖然解決了一度擾動問題，我們還得再解正壓大氣中(兩度的)有眼波動問題。

註十七：關於這方面，最待改進的把氣象紀錄“鑲入”計算機的方法，因為現在試驗數值預報時大部份時間都用在這上面去了。

我並不期望在預報的準確性方面有什麼革命的改進我們所能相信的是在不久的將來我們可能對期限二三天的大範圍流線型式的預報比現在更要準確。這些運動於是便可當作產生天氣的小規模擾動如鋒面波動之類的引向氣流 (Steering Current)。

註十八 雲和降水的預報問題需要我們同時加以考慮，但是在這裏質點運動的知識乃是先決條件，這種知識對解決問題應該大有幫助。近來 Freeman 及 Tepper 等人有關大氣中水躍 (Hydraulic jump) 現象的工作，指出我們對颱風及龍卷風類小規模的大氣運動也許可以有更深一層的了解，我們有理由相信這些工作也許得助於數值方法的。

註十八：現在我們已經能夠這樣做了。