**綜觀鋒面之重分析**

**摘要:**

半個多世紀以來，卑爾根學派對於氣旋結構和發展的概念模型一直主導著天氣學實踐，尤其是有關表面天氣圖分析技術的方面。儘管挪威的這種範式捕捉到了氣旋演變的一些基本特徵，但在過去60多年的研究和實際應用中揭示出了一些顯著的缺陷，其中本文討論了其中的一些。卑爾根模型還被應用於與其最初開發模型時完全不同的地區和條件。許多研究和操作社群對於這些問題的認識對於同等壓力圖的分析方式或在許多教科書中描述這一主題的方式幾乎沒有影響。在定義鋒面和分析表面天氣圖的一致和明確定義的程序方面，氣旋發展的概念模型的不足已經加劇。本文提供了幾個混亂和不一致的表面分析示例。

為了解決這些問題，氣象社群應該採取雙管齊下的方法。首先，過去半個多世紀獲得的研究和操作見解應該與最近的數值模擬和觀測研究相結合，建立改進的氣旋演變概念模型。其次，應該制定一個清晰且一致的方法來分析同等壓力圖。本文提供了幾種實施這些建議的可能途徑。

1. **介紹：**

將近70年前，卑爾根氣象學派在一系列著名的論文中（例如Bjerknes 1919; Bjerknes and Solberg 1922）提出了一個有關中緯度天氣尺度氣旋結構和演變的概念模型。這個概念模型及其相關的分析技術被注定主導同等壓力天氣學和操作性預報至今。在過去的半個多世紀中，同等壓力天氣學家使用各種觀測、分析和理論工具，這些工具是卑爾根研究人員所不具備的，迅速擴展了對中緯度氣旋動力學和結構發展的認識。這些新知識顯示，儘管挪威模型捕捉到了氣旋演變的許多重要方面，但模型需要進行一些重要修改。不幸的是，一個綜合的概念模型，整合過去半個多世紀所獲得的見解，並且同等壓力分析技術未隨著對氣旋結構和動力學認識的增加而同步演進，目前尚不存在。操作性和研究性氣象學家經常通過卑爾根學派的觀點解釋觀測數據，將"非經典"的發展錯誤地歸納為卑爾根學派的範疇，而未探討與挪威氣旋模型的明顯差異。

另一個令人擔憂的領域是在操作性和研究性同等壓力分析中經常不一致和不合邏輯地應用經典的挪威鋒面符號（由三角形和半圓形組合而成）。這些鋒面符號經常應用於原始挪威氣旋模型未包含的中、小尺度特徵。例如，挪威鋒面符號不僅用於具有下層大氣梯度的同等壓力鋒面，還用於淺層邊界層特徵。使用美國國家氣象中心（NMC）操作性的每3小時表面分析，就會發現許多複雜、不合理的前沿分析，這些分析在時間上缺乏連續性，且與挪威分析慣例不一致。第5節提供了一些此類問題分析的例子。

本文簡要回顧了卑爾根學派思想在同等壓力應用方面的歷史，指出在半個多世紀的研究和操作性預報中所顯現的缺陷，描述了一些糾正這種情況的嘗試，提供了一些有問題和不一致應用挪威分析技術的例子，並討論了解決這些問題的一些可能方法。作者希望本文能激發有關同等壓力社群所使用的分析技術的生動且建設性的辯論。本文並非用來批評操作性分析師，他們在嚴格的時間限制、通常不足夠的數據和老化的概念模型和分析技術的困境下努力工作。

1. **基於挪威氣旋模型的前線分析:**

儘管卑爾根學派的氣旋模型的許多組件在第一次世界大戰前已知（有關詳細回顧請參見Kutzbach 1979），但必須感謝卑爾根氣象學家（例如V.和J. Bjerknes，以及H. Solberg）建立了一個全面的氣旋發展概念，這個概念能夠經得起實際應用的考驗。他們的許多基本思想，摘要在Bjerknes和Solberg（1922）中，仍然存在於當今大多數入門教材中。圖1呈現了他們對波狀氣旋水平和垂直結構的經典概念，包括其溫暖和冷前線以及介在其間的暖區。圖中的垂直結構主要來自“間接空氣學”，即通過對雲觀察和地表數據的推斷獲得地表上方的特徵。

卑爾根學派最重要的貢獻之一在於他們對中緯度氣旋的提出的生命周期（見圖2）。他們認為氣旋是由極小的擾動在現有極地前線上發展而來，而極地前線則標誌著熱帶和極地空氣團的分界。這種擾動會放大成一個波動型氣旋，其中極冷空氣沿著冷前線向南推進，而溫暖的熱帶空氣則隨著暖前線向極地推進。由於冷前線的推進速度超過暖前線的後退速度，暖區逐漸變窄。在暖前線和冷前線相互衝突抬升暖區空氣的區域被稱為閉塞。如果兩個前線首次在氣旋中心以南某個距離相接觸，將發生將暖區空氣困住的隔離現象。Bjerknes和Solberg提出了兩種閉塞型態（冷閉塞和暖閉塞），取決於暖區空氣在暖區兩側的相對溫度。

儘管挪威氣旋模型在歐洲迅速獲得了接受，但直到20世紀30年代中期，美國氣象局才將這個概念模型及其相應的分析程序應用於實際操作（Bates 1989）。但是，一旦被接受，它以頑強的力量保持主導地位，即使相矛盾的信息不斷增加。顯然，一旦簡單的概念模型獲得廣泛接受，就極難進行修改或替換；即使面臨相互矛盾的信息，個人通常也會對挑戰這些模型的觀點保持抵抗或忽視。在下一節中，我們將回顧挪威氣旋模型在過去70年中變得明顯的一些問題。

1. **對挪威概念模型的修訂需求**

過去幾十年來進行的觀測和數值研究顯示，中緯度氣旋的結構和演變通常與卑爾根學派所建議的理想情況有很大不同。例如，現在清楚地知道，卑爾根學派描述的氣旋是從既有的環繞地球的極地錐形前線上微小擾動發展而來的理念通常是不正確的。相反，觀測、理論（例如，Eady 1949; Charney 1947）和數值建模研究（例如，Phillips 1956; Hoskins and West 1979; Schar 1989）顯示，氣旋只需要一個梯度區域進行發展，而氣旋演變的過程本身可以將弱散溫度梯度加強成強烈的錐形區域。因此，一般來說，氣旋發生和錐生必須視為不可分割的過程。可以認為在卑爾根氣旋模型中隱含的這些過程的分離對這一學科產生了不利影響，因為它使氣象學家的注意力從錐與與之相關的運動場的事實上移開。給予了錐及其相關天氣過多的強調。

另一個明顯的不足之處在於該經典模型的一個主要組成部分——暖鋒——在成熟和衰退的系統中通常是薄弱且水平範圍有限的，特別是在衰退階段（例如，Wallace and Hobbs 1977; Hoskins and West 1979）。此外，在衛星影像中通常無法確定明顯的暖鋒（Anderson et al. 1974）。

卑爾根氣旋模型在有關閉塞暖鋒演變的方面似乎是不現實的。大多數有關此主題的教科書和論文都重複了Bjerknes和Solberg的基本範例，即在氣旋發展過程中，當冷鋒趕上暖鋒時形成閉塞前線，閉塞前線有兩種變體，即溫暖和寒冷，取決於系統東側和西側的空氣相對溫度。然而，一些研究者指出，從冷暖鋒碰撞中形成閉塞前線的過程通常未經證實，閉塞前線也可以以其他方式形成。例如，Wallace and Hobbs（1977）指出，閉塞前線基本上是從暖鋒和冷鋒交匯處向北生長的新前線。Penner（1955）指出，“在北美和相鄰地區，真正的閉塞前線的情況極為罕見...可以通過空氣數據驗證的閉塞前線是氣象現象中罕見的。”Palmen（1951）指出，許多在表面圖上被分析為閉塞的氣旋實際上並未經歷真正的閉塞過程。經典的挪威氣旋演變也不包括現在被稱為“瞬時閉塞”的過程，即似乎成熟的閉塞系統在短時間內與開放波結合，形成明顯的閉塞系統。

不僅經典的閉塞過程難以記錄，而且各種觀測研究還表明，理想的閉塞前線結構很少完整觀察到。卑爾根學派閉塞前線模型的前線組件中經常缺少一個或多個，而在其他情況下，觀察到“非經典”的前線結構和中尺度特徵。例如，Kreitzberg（1968）指出，舊的和新的閉塞具有不同的結構，年輕的閉塞分為低層前線和相應的高空次生寒潮。在一系列的觀察研究中（參見Houze et al. 1976; Hobbs 1978），發現了與通過華盛頓海岸的閉塞相關的各種非經典結構。

在過去的幾十年中，幾位研究者（例如，Reed 1979）指出了在主要前線帶的冷空氣一側發生氣旋發生的存在；這種現象未包含在挪威氣旋發生模型中。這些干擾通常開始作為相對較小（-500-1000公里）的逗點狀強對流區域，有時會發展成與通常的大氣尺度氣旋難以區分的干擾。經常觀察到，當一個逗點雲及其相關的高空短波接近一個已存在的氣旋區域時，就會啟動氣旋發生。這個過程是Petterssen B型氣旋發生的一個例子（Petterssen and Smebye 1971），從未成為原始挪威氣旋模型的一部分。

卑爾根學派的模型缺乏對上對流層結構的描述，以及上層擾動與低層發展之間的相互作用。上對流層前線和上層短波與單個氣旋之間的關係從未成為經典範式的一部分。這些不足並不令人意外，考慮到這並非20世紀初期上空數據極少的時期。公正地說，必須指出隨著上空數據在1930年代和1940年代變得更加豐富，卑爾根的一些研究人員認識到上層特徵在氣旋發生中的重要性（Bjerknes 1937; Bjerknes and Palmen 1937; Bjerknes and Holmboe 1944）。即使在當今，上層前線的基本結構已經廣為人知（參見Keyser and Shapiro 1986，進行優秀的綜述），對於氣旋發展的上層前線演變的清晰理解仍然不存在。

1. **創建改進的概念模型和分析技術的嘗試**

在過去的70年裡，氣象學家在嘗試改進卑爾根學派模型時，主要遵循了兩條主要途徑。一種方法是試圖修改和改進模型，同時保留其基本的“前線”特點，其中大多數天氣被追溯到由前線表面引發的垂直運動。另一種方法（例如，準地轉診斷，等溫位位涡，急流條紋）基本上是動力學的。儘管在追蹤這兩種方法時取得了令人印象深刻的成就，但令人警覺的是，今天仍然沒有一個全面的、匯聚了過去70年集體見解的中緯度氣旋的三維結構和演變的整體圖像。由於有大量關於前線結構和發展的不相關的想法存在，這可靠的老式挪威氣旋模型仍然居於主導地位。在這一部分，我們將簡要回顧以上兩種方法的一些發現，因為它們與確立中緯度氣旋演變的全面概念模型有關。

**a. 前線方法**

Eliassen和Kleinschmidt（1957），Browning和Harrold（1969），Carlson（1980）和Browning（1985），等人，嘗試使用相對流等溫分析來定義氣旋中的三維氣流。他們的研究表明，氣流可以概念化為一系列“輸送帶”。一條暖空輸送帶始於冷前方的暖區低層，向上爬升到暖前方之上，而一條冷空輸送帶則向西下降，北面在暖前方。儘管這種方法可能是一個有用的概念工具，但它存在一些缺陷。例如，它假定系統平移而速度和形狀不變，或者等效地說，流線和軌跡在風暴相對坐標中是相同的；這種假設在氣旋系統快速發展的時期並不適用。它還假定濕熱過程是恆溫的。此外，還不清楚在少數等溫層（通常是三個）上的運動場是否足夠描述通過合成系統的復雜三維運動。

在過去的幾十年裡，有關前線結構和演變的進一步複雜化和混亂，源於anafront、katafront、trowal和split cold front模型，每一種模型似乎適用於不同的位置和氣旋系統生命週期的不同時期。第一次區分anafront（冷空下降和暖空上升）和katafront（前線兩側均下降，並在“暖”側上空有更強的沉降）的差異是由Bergeron（1937）提出的。他建議anafront在年輕氣旋中更普遍，而katafront在較老的封閉系統中更有可能出現。Miles（1962）和Browning和Monk（1982）提出了一種相關的前線結構，通常稱為split cold front模型。在這個模型中，由沉降產生的高空低溫空氣和暖區中的較高溫空氣之間的界限被標記為中層冷前，低層則有一個附加的冷前滯後。幾位加拿大氣象學家（例如，Penner 1955；Galloway 1960）提出了一種分析閉鎖的替代方法。在他們的分析方法中，高空暖空氣的底部被投影到地表並被分析為“trowal”。他們提出，trowal在氣象上通常比在地表留下的弱閉鎖前線更重要。最近，Hobbs等人（1990）提出了一個高空冷前的概念模型，融合了暖閉鎖和分裂冷前模型。在這個模型中，中層冷前表面後面是0e的急劇下降，一個表面槽滯後於高空特徵，而一個具有潛在不穩定性的高0e區域將兩個組件連接在一起。

最近對西大西洋上空氣旋發生的觀測研究（例如，Neiman等人1990；Shapiro和Keyser 1990），使用飛機、dropsondes和其他新的觀測技術，顯示了與挪威經典概念模型完全不同的結構和演變。例如，圖3呈現了1988年1月27日上午12時左右（協調世界時）東大西洋上空的一個氣旋的920毫巴溫度、地勢高度和前線分析（Shapiro和Keyser 1990）。此分析既使用了常規觀測，也使用了飛機和dropsonde數據。請注意，冷前向北延伸至暖前的地理區域，其中包含了獨特的元素，如冷大陸空氣在溫暖的海流上方的強烈平移。

應該注意到，使用理想化的基本狀態和現實的原始方程模擬的半地轉模型已複製了上述描述的一些非經典結構和演變。例如，Kuo等人（1990）使用NCAR/Penn. State（MM4）中尺度原始方程模型模擬了西大西洋上的QE11風暴的演變。這次模擬的海平面溫度和壓力表明了上面提到的“彎曲回來”暖前和“T骨”配置。Schar（1989）的非線性、半地轉模擬（無熱力學，無摩擦），從一個高度理想化的初始狀態開始，產生了類似的結構發展。

**b. 動力學方法**

在過去40年中發展起來的另一種觀點是檢視合成系統演變期間場之間的動態關係，並且不太關心特定結構（例如，前線）元素的定義和運動。在這種方法下，前線的發展和由此產生的垂直運動僅被視為偏差系統演變的一個組成部分。在過去40年中，主導的動力學方法一直是準地轉分析，它以物理上一致的方式關聯垂直運動、渦度、溫度和水平風的場（參見Holton 1979）。例如，使用準地轉方法，上升運動與水平渦度平流等數量相關，而不是與前線區域相關的幾何形狀和流動模式。

更近來，更準確的半地轉理論已被應用於理解前線的結構和演變（例如，Hoskins和Bretherton 1972）以及氣旋系統的演變（例如，Hoskins和West 1979）。

另一種動力學方法利用了伴隨強風有限區域的垂直環流，即急流核（jet streaks）（參見Uccellini等人的1987年的一個例子）。雖然這種觀點在直觀上令人滿意，但僅限於相對簡單的幾何形狀的情況，基本上對於非彎曲流動的情況與準地轉方法相同。另一種診斷技術利用了等溫位位涡（參見Hoskins等人的1985年的綜述）。通過注意上、下對流層位涡中心的演變和相互作用，可以深入了解氣旋系統的發展。儘管這些動力學方法可以為溫度梯度擾動的結構和相應的重要天氣特徵（例如，大範圍上升運動和大雨）提供“解釋”，但對於門外漢來說可能很難理解，並且它們的應用僅限於它們動力學相關並且存在相應數據集的尺度。

總的來說，合成氣象學家面臨著有關氣旋系統結構和演變以及相應前線的不同且常常矛盾的概念模型和方法的困惑陣列。所提出的結構模型的一些方面是否僅僅是不正確的，還是它們只適用於特定地理區域或氣旋發展的特定階段？是完全放棄前線，僅考慮基本場之間的動態關係更好呢？無論如何，迫切需要一個更新的、全面的、統一的氣旋發展概念模型，或者至少提供有關發展如何隨著環境和地理條件的變化而變化的信息。

1. 現行地表分析技術的缺陷

對操作性或回顧性地表分析的檢查揭示了一些令人不安的缺陷。問題始於使用一個概念模型（挪威氣旋模型）來分析和解釋大氣演變，該模型顯然在多方面都不能正確地表示中緯度氣旋的發展。值得注意的是，在海洋上，傳統數據稀缺的地方，氣旋幾乎總是以經典的挪威結構和演變來進行分析，而在陸地上，觀測數據相對豐富的地方，分析師通常被迫繪製複雜且非經典的結構（盡管他們似乎在可能的情況下努力克制這種趨勢）。氣象學家是否合理地應用於挪威氣旋模型，該模型是在一個海洋東端的相對較小區域開發的，應用於地形和地表條件差異巨大的全球範圍？

目前地表分析技術的問題不僅僅局限於一個有限、被濫用或不足的概念模型。時間的連續性在地表分析中常常缺乏，因為前線來回移動，並且表現為一種類型轉換為另一種類型，而這似乎幾乎沒有什麼原因。也許同樣嚴重的是，地父們確立的熟悉符號的使用不一致。對大量NMC操作地表分析的檢查顯示，熟悉的前線符號以各種方式使用：

* 對應於低層對流層的相當大範圍的與氣旋相關的前線區域（通常與挪威氣旋模型一致）。
* 對應於相對較淺的地形引起的特徵，例如冷空氣擋住邊界、海岸線前線、背風槽和由高山脈（例如洛磯山脈）造成的溫度不連續。
* 由於表面特性或雲量的不連續性而產生的溫度對比的淺區。例如，常常出現在大範圍的雪界上的溫度對比有時會被賜予挪威的前線符號（通常是一條靜止的前線）。

地表分析的操作或回顧性研究顯示了一系列令人擔憂的缺陷。問題的開始源於對前線符號的多樣使用，觀察地表合成圖的人通常不確定分析邊界的真正含義。當前線符號被過度無差別地使用時，地圖可能變成一團混亂、經常相交的線條，無法提供對低層對流層結構有意義的描繪。以下是一些例證案例的考慮。

案例一

1989年11月13日00:00 UTC的NMC地表圖（圖4）呈現了美國西部一個複雜的前線和槽系統。加拿大邊境附近的一條冷前即將與雙波前線系統相交，而槽和另一條靜止前線則位於這個集合區的南部。從地表觀測解釋這些前線中的一些是困難的。此外，在850 mb高度（圖5）的模式看似相對簡單，有一個位於北美北部的單一假相線和低壓中心。

案例二

1990年12月6日12:00 UTC的地表圖（圖6）呈現了美國中西部的“雙層”氣旋模式。兩個低壓中心都具有常見的短暖前線（通常在地表分析中發現），北方的氣旋被分析為迷你遮斷。儘管在大平原上分析了兩條前線，但北方的前線在風場中通常並不明顯，並且與一個壓力槽無關。它似乎將南部的溫度梯度較弱的區域與北部的降溫速度較快的區域分開。北方前線上的溫度對比的一些結果無疑是由於雲層在前線上的梯度：南部有雲層，北部有斷斷續續的晴朗天氣。然而，從這個時候的850 mb分析中（圖7），北方的特徵顯然非常淺，南方的前線代表真正的天氣學前線。

案例三

1990年3月5日06:00 UTC，NMC地表圖（圖8a）顯示了一個部分遮蓋在一個低壓中心上的冷/靜止/暖前線帶。六小時後（圖8b），與低壓相關的前線帶轉變為一條受到冷暖前線組合相交的冷前。向西，一條衰退的冷前被注意到。在這種情況下，既缺乏時間上的連續性，又違反了任何可想像的概念模型。

案例四

在1990年1月11日00:00 UTC，一個未遮蓋的978-mb低壓中心與加拿大邊境附近的冷暖前線一起被找到（圖9a）。六小時後，該系統被分析為遮蔽，並顯示了一條短的暖前，位於低壓中心以南數百公里（圖9b）。到1990年1月11日12:00 UTC（圖9c），遮蔽的前線部分已經收縮，短的暖前已經消失，一條靜止前線現在從東部進入低壓中心。到1990年1月12日00:00 UTC（圖9d），一條暖前重新出現，北部數度處於靜止前線的南部。顯然，這個序列在很大程度上偏離了經典的Bergen School演變，而前線（例如短的暖前）似乎毫無邏輯地來來去去。

這些評論的重點在於並非對操作性分析師進行嘲笑，而是上述例子對氣象界提出了一項挑戰，即設計一種更優越且更一致的天氣學分析系統。上述問題不僅限於NMC；在外國操作中心的產品以及研究界進行的回顧性分析中也可以找到類似的困難。例如，圖10顯示了由西德氣象局製作的歐洲氣象公報的地表分析。在大西洋上，前線分析是簡單且“經典”的。在陸地上，情況大不相同。例如，在蘇聯東部地區，有四條不同性質的前線交匯在一點附近。

盡管NMC的問題不是獨一無二的，但它們確實受到對三小時北美圖的自動化海平面壓力分析的使用的影響（Bosart 1989）。這些分析在海洋上經常嚴重錯誤；即使在陸地上，計算機分析的特徵也不能捕捉對人類分析師來說顯而易見的結構。因此，手動分析的前線位置經常與機器海平面壓力分析的特徵不一致。

1. **解決問題的一些方法**

儘管作者並未聲稱能解決上述問題，但以下步驟可能是一個合理的進展方向：

**a. 確定中緯度氣旋的詳細結構演變：**

建立一個修訂且更通用的氣旋發展概念模型。儘管距離卑爾根學派的開創性工作已有70年之久，我們仍然對中緯度氣旋的詳細空氣運動和演變缺乏全面的了解。我們不知道這種演變在不同區域和大尺度條件下的變化情況。我們對過冷面的演變尚未有清晰的記錄，甚至對其存在也意見分歧。如上所述，造成這種令人遺憾的情況的一個原因是對於氣旋結構和發展的大量且混亂的不相關觀念；結果，過度依賴老化的卑爾根學派範式及其幾乎未經修改地保留在教科書中。同時，氣象觀測的限制（即，一個粗糙的每日兩次的探空站網絡）也限制了這一領域的進展。

取代或修訂科學範式通常必須等到新數據超越了舊的概念模型。這就是今天挪威氣旋模型的情況。數值模型現在能夠以極高的保真度模擬氣旋的發展，並提供了一個強大的工具，用於診斷氣旋結構的詳細演變（參見Keyser和Uccellini 1987）。新的觀測平台（例如探空儀和NEXRAD）提供了在足夠的時間和空間細節中連續監測氣旋發展的潛力，以充分描述中緯度氣旋系統的演變和結構。地區性的實地實驗（如提出的冬季STORM項目或最近的ERICA實地計劃）將利用許多新技術，以提供大大增強的氣旋和前沿發展描述。

總之，應該利用新的觀測數據集和越來越準確的數值模型模擬，來建立氣旋演變的現實概念模型，並確定氣旋發展如何受到不同環境條件（例如地形、地表條件、大尺度流動等）的影響。

**b. 建立一個邏輯且一致的分析天氣圖的系統：**

一旦實現對中緯度氣旋演變的全面理解，並建立了相應的概念模型，就必須開發邏輯和一致的技術，來分析和展示天氣圖。由於表面天氣圖一直是顯示概念模型符號的工具，因此讓我們考慮一些可能的分析和顯示這些圖的方法。

* **呈現沒有前線或其他類型符號的分析場**

有人可能主張現實世界比任何簡單的概念模型都要複雜，因此將簡化模型強加於觀察結果是一種欺騙行為。這些人可能建議觀察、分析場（例如等溫線、等壓線、等熵線）以及可能一些衍生的動力學量（例如位渦）可以自說自話。他們會指出，氣象學家似乎對缺乏任何前線符號的數值模型輸出感到滿意，那麼為什麼不對觀測數據採取相同的方法呢？簡單的概念模型可能在上層數據稀缺的情況下有助於理解風流動時的工具，但是今天三維信息更容易獲得。刪除前線符號的另一個好處是，前線並不是明確定義的特徵。大氣中的梯度變化很大，應在什麼時候使用“前線”這個名稱？

儘管這種立場（沒有分析的前線）可能堅持簡單性的高地，但也有反對意見。即使存在明顯的缺陷，經典的挪威氣旋模型及其相應的分析技術確實表達了一些基本真理，其中一個特別是許多氣旋演變為相當相似的方式，即在溫度梯度相當大的區域中形成的波動。這一結論可從常規觀測數據、衛星圖像和數值模型輸出中明顯。概念模型有助於將一堆觀察整理成一幅連貫的圖像，並有助於視覺化和解釋復雜的三維運動；在觀測數據有限的地區（例如只有衛星數據和少數船舶和飛機報告的海洋地區）尤其有價值。前線符號提供了有關時間變化的信息（例如冷暖空氣團的移動），如果只顯示分析場，則需要多張圖。無符號方法的另一個問題是自動分析的場可能無法顯示或正確定位所有感興趣的特徵——例如，對於分辨率過低以無法捕捉到的中尺度前線。使用其他方法，如在單一站點的時間序列或衛星圖像的分析中，這樣的前線可能是清晰可見的。

最後，必須考慮放棄所有前線符號對一般公眾和媒體的影響。前線在電視天氣預報和報紙天氣圖上佔據重要位置，是向非氣象專業人士傳達天氣信息的簡單但有用的工具。公眾是否會接受僅具有等溫線或其他分析場的地圖？或者是否必須為非氣象學家保留某種符號？

不帶前線的表面圖可能包括站模型以及海平面等壓線和等溫線。圖11展示了1987年12月15日1200 UTC的這樣一張圖的示例。該時間的傳統NMC表面分析如圖12所示。在僅分析的圖中（圖11），冷錐和冷空氣壩的邊界相當明顯。在阿巴拉契亞山以西，還可以看到一個區域的隱蔽溫暖空氣。這個特徵在NMC分析中沒有很好地被分析，該分析顯示一個領先遮蔽的小暖前。

* **修改當前的分析技術以適應改進的範式**

另一個極端的方法是保留當前用於前線分析的一般方法（即，站模型、等壓線，以及表面圖上的前線（或其他）符號），但極大地提高使用的符號的清晰度和一致性。對當前實踐的以下修改和澄清將在很大程度上有助於減少當代分析中顯而易見的混亂：

傳統的挪威前線符號應僅用於表面基的前線，其延伸到較低對流層的相當深度。將古典前線符號應用於深層合成前線、較淺的輻射驅動的大氣溫度梯度區域和極地低壓的風變線，正如目前所做的那樣，是一個不一致且混亂的使用的典型例子。

前線符號應僅用於從根本上涉及水平密度（實際上是溫度）梯度的特徵。前線符號不應用於僅涉及濕度對比的區域。

這些符號的一種修改形式（或新符號）可以用於較淺的特徵，例如與陣風前、海風、地形阻擋和邊界層過程有關的特徵。Young和Fritsch（1989）提出了一套用於中尺度分析的符號。

分析必須在時間上保持一致，即應維持時間的連續性。

嘗試根據這些規則創建一張表面圖的例子如圖13所示。注意，在這個操作NMC分析中，一個隱蔽的溫暖空氣區域更清晰地被標示出來，而淺冷空氣壩的前沿則由Young和Fritsch（1989）提出的符號標誌，即在淺的、地形強制的部分上是垂直的條紋。

對於上述方法，還有許多可能的創意變化。例如，可以創建一套用於表面或高空的一般過渡類型（例如風變線、壓力槽、梯度變化線）的符號，而不是古典的前線符號（帶有所有它們的重要的包袱）。無論接受哪套符號，一致且合乎邏輯的使用將是成功的關鍵。

* **呈現分析場，僅對無法在分析中表示的特徵使用前線（或其他）符號**

第一種方法（沒有符號）所擁有的最嚴重的問題之一是自動分析的場將不可避免地錯過或不正確地表示一些對於人類分析師來說是相當明顯的小尺度特徵。此外，即使手動分析也可能無法清晰表示一些小尺度特徵。一種妥協的方法將通過使用前線（或其他）符號來指示被分析的場未解決或未正確定位的特徵。這種方法的一個可能問題是邊界（或符號）可能隨著它們的強度和水平尺度的變化而來來去去。此外，還必須制定一個普遍接受的標準，以決定是否顯示一個特徵。

到目前為止還沒有解答的一個主要問題是是否應該在天氣圖上注意到上層特徵，例如中層或上層對流層的前線。此外，人們經常觀察到，地表的一層薄薄的冷空氣可能會掩蓋一個重要的天氣特徵（例如，一個暖前）。在地表場中未清楚顯示的重要上層特徵應該以某種方式被注意到嗎？這種方法的一個例子是加拿大trowal模型（Penner 1955），其中與閉鎖相關的上層冷鋒的基底在地表被指示。不論採取哪種方法，修改挪威分析方法的障礙都很難被低估。它之所以如此長時間地占主導地位，是因為它的簡單性和易於應用；任何新的方法論或符號體系都必須在範圍上有所限制，並且足夠簡單以便易於

**c. 未實現的現代技術在氣象數據分析和展示方面的潛力**

一個主要原因是全面的氣旋發展概念模型進展緩慢且分析技術沒有取得顯著進展，是因為普遍難以可視化天氣系統的三維演變。將大量的水平地圖、橫截面和探空數據集成到一個對氣旋的三維結構演變的心智圖中是一個令人生畏的挑戰，很少有人能夠掌握。

在這個問題上，顯然氣象學家未能充分利用通信、分析和展示的現代技術潛力。同樣，天氣圖通常是質量較差的、單色的產品，在過去30年僅有輕微的改進。氣象學家需要理解高度復雜系統的三維演變；顯而易見的是，二維、單色的顯示（無論是紙張還是電子產品）今天甚至無法呈現足夠的信息，在未來增加觀測數據的時代肯定是不足夠的。傳統的演示模式未能發揮人類在以三維圖像呈現複雜結構時把握微妙之處的特殊能力。

幸運的是，那些承諾提供大量信息的技術也有望解決數據管理、分析和展示的問題。僅僅通過添加顏色，氣象學家就可以輕鬆地將多個場（例如地表的等溫線）添加到天氣圖中。三維圖形可以允許從各種角度查看天氣系統結構，並提供可能永遠無法使用傳統顯示達到的洞察力。許多可以解決顯示/可視化問題的軟件和硬件工具今天已經存在，並且在它們的應用中已經取得了一些進展（例如Mcldas和Profs互動系統）；不幸的是，這些能力在研究和操作社區中的傳播進展緩慢且不協調。

1. **摘要和結論**

在過去的半個多世紀中，卑爾根學派對氣旋結構和發展的概念模型主宰了天氣學的實踐，特別是在分析地表天氣圖的方式上。儘管挪威范式捕捉了氣旋演變的幾個基本特徵，但在過去的70多年的研究和操作經驗中揭示出了重大缺陷。例如，現在很明顯，氣旋的發展並不需要預先存在廣泛的極地錐，相反，只有一個雜質區對發展是強制的，而氣旋演變的過程本身會將模糊的溫度梯度變得更加劇烈，形成強烈的前線區。暖前，挪威氣旋模型的主要組成部分，通常是薄弱或有限的。挪威氣旋的經典演變也不包括“即時過渡”的過程，即逗號雲特徵與開放波相結合，在短時間內形成明顯成熟的閉合系統。最後，不僅經典的“追趕”封閉過程難以記錄，而且各種觀測研究表明，理想的封閉前線結構很少完整觀察到。儘管這些和其他缺陷為研究和操作社區的許多人所知，但這種知識對於分析天氣圖的方式甚至是在教科書中描述這一主題的方式幾乎沒有產生影響。

在過去的70年裡，氣象學家在試圖改進卑爾根學派模型的同時，已經走上兩條主要的道路。一種方法是試圖修改和改進挪威概念模型，同時保留其基本的前線“風味”，其中大多數天氣都可以追溯到被前線表面強迫的垂直運動。另一種方法基本上是動力學的。儘管在這兩個方法中都取得了顯著的進展，但對中緯度氣旋三維結構和演變的全面了解仍然不存在。氣象學家面臨著有關氣旋結構和發展的不連貫的一系列觀念，因此舊有的可靠的挪威氣旋模型一直處於主導地位。

氣象圖表分析的基本概念模型的問題已經加劇，因為缺乏一致和明確的程序。例如，經典的前線符號經常應用於原始挪威氣旋模型未包括的各種特徵，這是mesoscale和synoptic-scale特徵。前線符號不僅用於在整個下層對流層有相當範圍的條件的前線，而且也用於由雲和雪邊界產生的淺邊界層特徵。

為了解決上述問題，氣象學界應該採取雙管齊下的方法。首先，過去半個世紀以來所獲得的研究和操作見解應該與最新的數值模擬和觀測研究相結合（利用新技術，如多普勒雷達，降雨球，飛機和探測器），以建立一個修改過的，更普遍的概念模型，以描述氣旋的演變。先進的分析和顯示技術將是一個重要的工具，它將提供對氣旋演變的三維視圖。結果可能是氣旋的發展高度可變的，具體取決於地表條件，地形和其他因素。其次，應該制定清晰而一致