



香港天文台

HONG KONG OBSERVATORY

# 數值天氣預報 基礎課程

# 目錄

- § 1 數值天氣預報的發展歷程
  - 1.1 數值天氣預報發展史
    - 1.1.1 數值預報的工作先驅
    - 1.1.2 高速電腦及全球氣象觀測網
    - 1.1.3 總結發展
  - 1.2 香港的數值預報工作及產品
- § 2 數值天氣預報的模擬理念和策略
  - 2.1 物理及數學基礎
    - 2.1.1 基本物理方程
    - 2.1.2 物理參數化
    - 2.1.3 求解方案
    - 2.1.4 方程離散化
    - 2.1.5 數值技巧和限制
    - 2.1.6 業務預報模式的設計
  - 2.2 模式種類及應用範疇
    - 2.2.1 『原始』與『簡化』模式的比較
    - 2.2.2 靜力與非靜力模式
    - 2.2.3 離散化方案之間的比較
    - 2.2.4 中、短期預報模式
    - 2.2.5 分辨率與模式的應用
    - 2.2.6 不同垂直座標模式的比較
  - 2.3 總結
- § 3 數值天氣預報的數據處理和同化
  - 3.1 數值天氣預報模式使用的觀測資料
  - 3.2 各地氣象資料的傳送
  - 3.3 數值天氣預報模式的資料同化
  - 3.4 觀測資料的品質控制
  - 3.5 資料分析方案
- § 4 數值天氣預報的應用及限制
  - 4.1 數值天氣預報的應用
    - 4.1.1 天氣形勢預報
    - 4.1.2 氣象要素預報
    - 4.1.3 數值預報產品的加工(後處理)
  - 4.2 數值天氣預報模式的限制
    - 4.2.1 預報模式出現誤差的原因
    - 4.2.2 混沌系統
  - 4.3 集合預報

# § 1 — 數值天氣預報的發展歷程

## 引言

天氣源自大氣層的變化，這些變化受物理學各種定律制約。數值天氣預報技術是應用流體力學及熱力學方程描述大氣運動及其演變，並利用高速電腦運算求解這些繁複的方程組，從而得知未來大氣層的變化，以及相連的天氣。

隨著電腦運算能力的不斷提升及全球氣象觀測資料越趨全面，數值天氣預報模式的準確度得到大大提高，並成為現今天氣預報業務上不可或缺的工具。

## 1.1. 數值天氣預報發展史

### 1.1.1. 數值預報的工作先驅

數值天氣預報的觀念始於 20 世紀初期。1904 年，挪威氣象學家，皮葉克尼斯 (Vilhelm Bjerknes) 提出定量天氣預測是一個數學初值問題。他指出只要得知大氣層的初始狀況，便可以從求解一組描述大氣運動的數學方程得到天氣的未來變化。然而，這方程組涉及六個變數(包括風(垂直及水平分量)、溫度、氣壓及水汽含量)，而且方程式非常複雜，並無法直接求解，因此當時的氣象學家對有關方程解的特性所知仍相當有限。

1922 年，英國物理學家理查遜 (Lewis Fry Richardson)，嘗試以差分方法，計算這套方程組的近似解，才正式將數值天氣預報的概念實踐起來。由於當時電腦尚未發明，數值天氣預報是一項艱巨的挑戰，理查遜用了數月時間才算出一個不甚準確的六小時預測。他估計要動用 64000 人力，在一大房間內，每人負責計算方程組不同部分，日以繼夜不停工作，才能趕及在天氣發生前將預報結果算出。

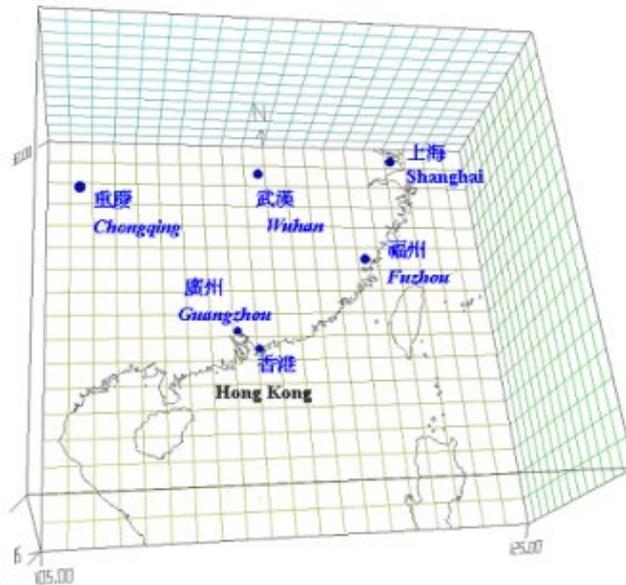
二次世界大戰後，電腦的發明及全球氣象觀測網的建立使皮葉克尼斯提出的數值天氣預報變得可行。1948年，美國理論氣象學家查尼（Jule Charney），成功地以一個簡化的數學模型來描述大氣運動。這組簡化了的方程組可以用來推算大氣中大尺度天氣系統的未來變化。

1950年，名數學家馮紐曼（John Von Neumann）在美國普林斯頓高等研究院和查尼等氣象學家，以電腦取代人工計算，重新進行理查遜的實驗。由於當時電腦的計算能力不足，他們先將查尼的方程進一步簡化，然後以數值方法計算方程式的近似解。在一連串的數值實驗中，他們準確地預測1950年感恩節美國東北部的大風雪。這個成功的預報使當時一些致力於數值預報的氣象學家增加了信心，並著手把數值預報從實驗室引進到實際的天氣預報業務上。在1954年，瑞典開始運行世界第一套業務用的數值天氣預報模式，接踵而來還有美國(1958年)及日本(1959年)的業務模式。

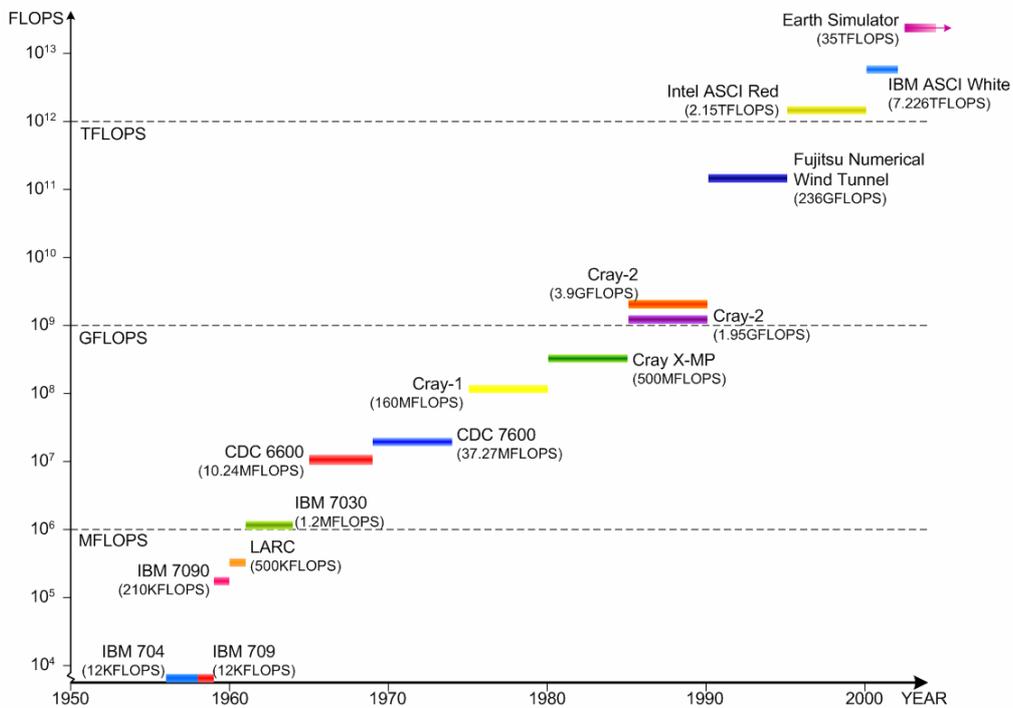
中國在五十年代亦開始發展數值天氣預報，國家氣象中心廖洞賢教授首次用圖解法兩層模式進行500百帕形勢數值預報試驗，成功預報導致大規模寒潮的天氣形勢演變特徵。到了1950年代末期，利用中國科學院計算技術研究所的電腦，並採用簡化了的大氣運動方程組，成功製作歐亞範圍的500百帕形勢預報。1961年更將範圍擴大到北半球範圍，並把運算結果提供給預報員參考。

### 1.1.2. 高速電腦及全球氣象觀測網

數值天氣預報是需要利用高速電腦運算的一種天氣預報技巧，透過數值模式內的方程式模擬反映大氣狀態的各項氣象要素之演變。模式內的大氣三維空間被分割成為排列整齊的網格點陣(圖(一))，而各網格點上氣象變數的數值則代表了當時大氣的整體狀態。網格點數量愈多，電腦運算量愈大，模式分辨率愈高，愈能夠細緻地勾畫出尺度較小的天氣系統(例如暴雨)。



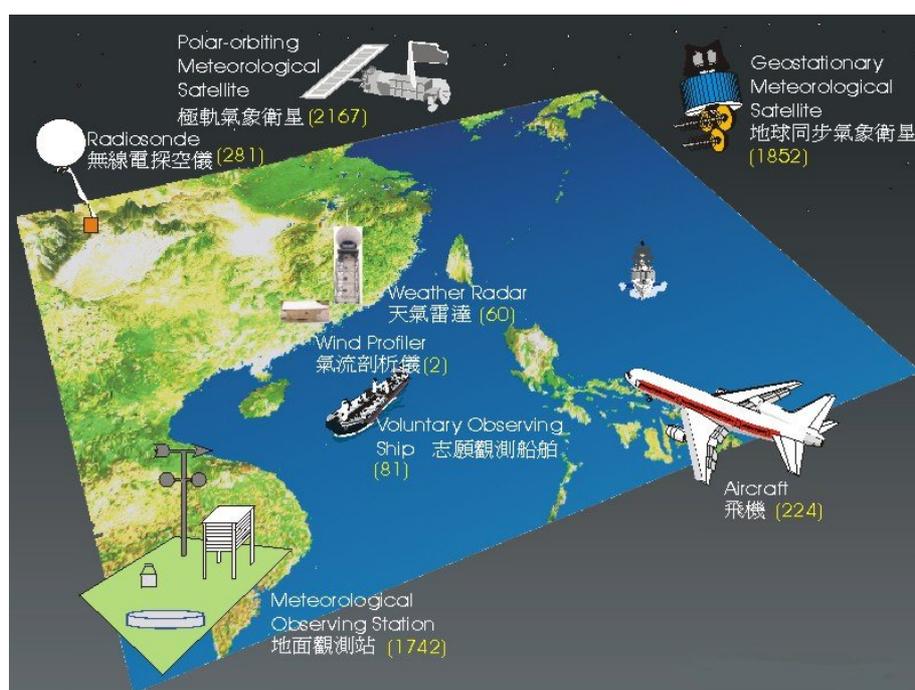
圖(一) 模式內的大氣三維空間被分割成爲排列整齊的網格點陣(100 公里乘 100 公里方格)



圖(二) 1950 年至 2004 年電腦運算速度的演進。圖中 FLOPS(floating operations per second)表示每秒鐘能處理的浮點計算。

1960 年代以後，電腦的進步一日千里(圖(二))，由於新型電腦有能力在短時間內處理更多的運算，氣象學家也逐漸將原先的數值模式，從單層擴展到多層，而且水平的分辨率(相同面積內的網格點數量)也越來越高，這些改進對數值天氣預報準確度的提升都有莫大的幫助。

除了電腦的發明外，全球氣象觀測網的建立及各種觀測儀器的發明(圖(三))也是數值天氣預報成功的主要關鍵。第二次世界大戰期間，探空氣球、飛機觀測與氣象雷達等儀器相繼發明，使天氣觀測從地面延伸到高空，也同時擴大了人們對大氣的認識。數值天氣預報作業初期，高空資料只限於一些北半球的高空氣球及無線電探空儀的觀測資料，而廣大的海洋，除了寥寥可數的觀測船隻和海上漂浮儀，觀測資料更是稀少。直到 1957 年人類成功發射第一枚衛星以後，各種用途的氣象監測衛星陸續加入觀測行列。透過衛星遙感觀測，海洋及高空的天氣觀測有突破性的進展。這些重要的資料使數值天氣模式較準確地掌握大氣層的初始狀況，進而改善預報結果。



圖(三) 應用於數值模式的各種氣象觀測儀器

### 1.1.3. 總結發展

以下列表概括由 1950 年至 2000 年數值天氣預報模式的發展：

年代	數值模式	電腦運算能力 (MIPS*)	預報期 (日)	分辨率 (公里)	垂直層數
1950	正壓，區域	0.01	1-2	300	1
1960	斜壓，準地轉風，半球範圍	1	2-3	150-300	2-5
1970		10	4-5	150-200	6-15
1980	原始方程組	50-100	5-6	120-150	15-20
1990	集合預報系統	>500	6-7	60-120	30-60
2000			10	20-40	>60

\*MIPS - Millions of instructions per second, 每秒鐘處理百萬次計算

過去 15 年來，數值天氣預報成功的主要因素包括：

- 數值模式能描述天氣變化的物理現象
- 預報模式分辨率不斷提高
- 電腦性能不斷提升
- 遙感觀測平台（衛星、雷達、風廓綫儀等等）
- 觀測數據激增
- 先進數據同化技術的發展

到目前為止，數值預報最長只能預測到一個星期左右，超過 7 天的數值天氣預報，其準確性還不可靠。數值預報最大的挑戰是模擬大氣的一些物理過程（例如有關雲形成的物理過程）及比網格點還小的天氣現象（例如積雲）。這些現象在觀測及分析上亦頗為困難，但對天氣預報卻有重大的影響。如何獲取更接近真實的初始大氣狀況，以及建立一套更完善的數值預報模式，以改善預報的準確度，將會是氣象學家未來的重要工作。

## 1.2. 香港的數值預報工作及產品

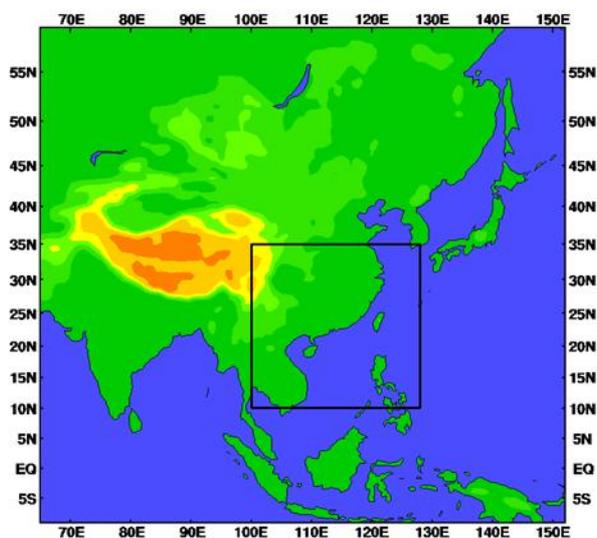
天文台自 1985 年便開始使用歐洲中期天氣預報中心及英國氣象局的全球數值天氣預報模式數據。數據的傳送是通過世界氣象組織的全球電信系統(Global Telecommunication System, GTS)以網格點數值形式發佈。自 1996 年起，天文台亦透過GTS及互聯網定時從日本氣象廳下載其全球譜模式的數值天氣預報產品。此外，自 1999 年開始亦經由北京及德國奧芬巴赫取得歐洲中期天氣預報中心以GRIB格式發放的較高分辨率數值產品，而 2002 年起更透過互聯網取得美國國家環境預報中心的全球模式產品。

香港天文台從海外接收的數值預報產品，在預報大尺度天氣系統方面（例如冬季季候風所引發的寒潮），效果一般尚算滿意。但是對於夾雜著惡劣天氣的中小尺度系統而言（例如暴雨），這些資料的分辨率就顯得不夠精細。為了得到高分辨率模式的輸出結果作為本地天氣預報的依據，1986 年香港天文台從日本氣象廳引進「有限區域模式」，成為香港第一個業務數值預報模式。1997 年再從日本氣象廳引進新一代的「區域譜模式」，以此建立了一套「業務區域譜模式」(Operational Regional Spectral Model，簡稱ORSM)。

ORSM 在 1999 年 12 月投入業務運作，以克雷電腦 (CRAY SV1-1A) 作為運算平台(圖(四))，電腦系統有 16 個中央處理器，最高速度可達 19.2 GFLOPS。與天文台八零年代後期安裝的主電腦相比，這台高速電腦的運算速度增加接近五千倍，記憶體的容量亦增加了一千倍。



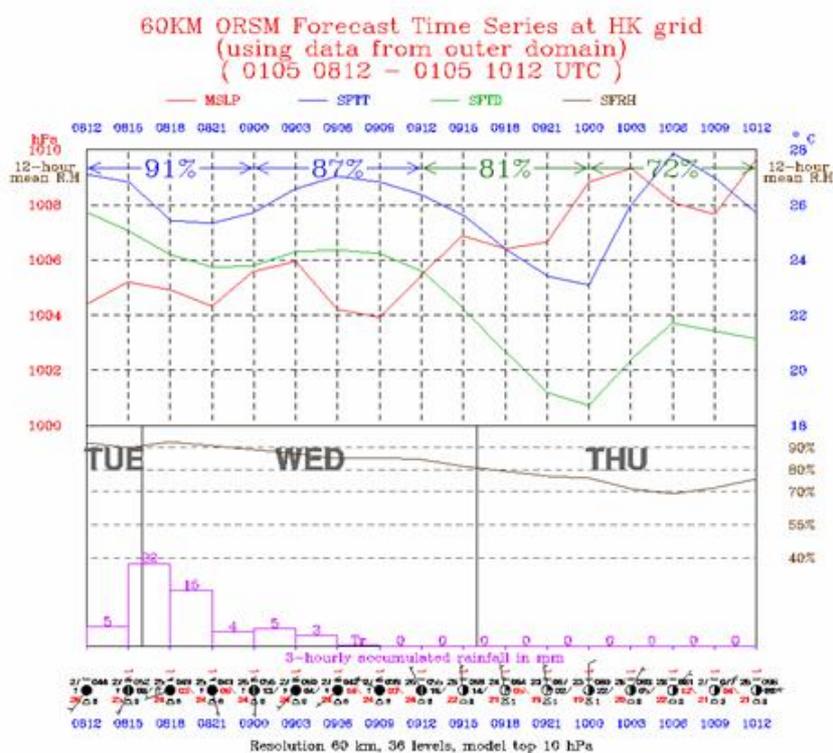
圖(四) 香港天文台克雷 SV-1 高速電腦



圖(五) 60 公里（外模式）及 20 公里（內模式）ORSM 範圍

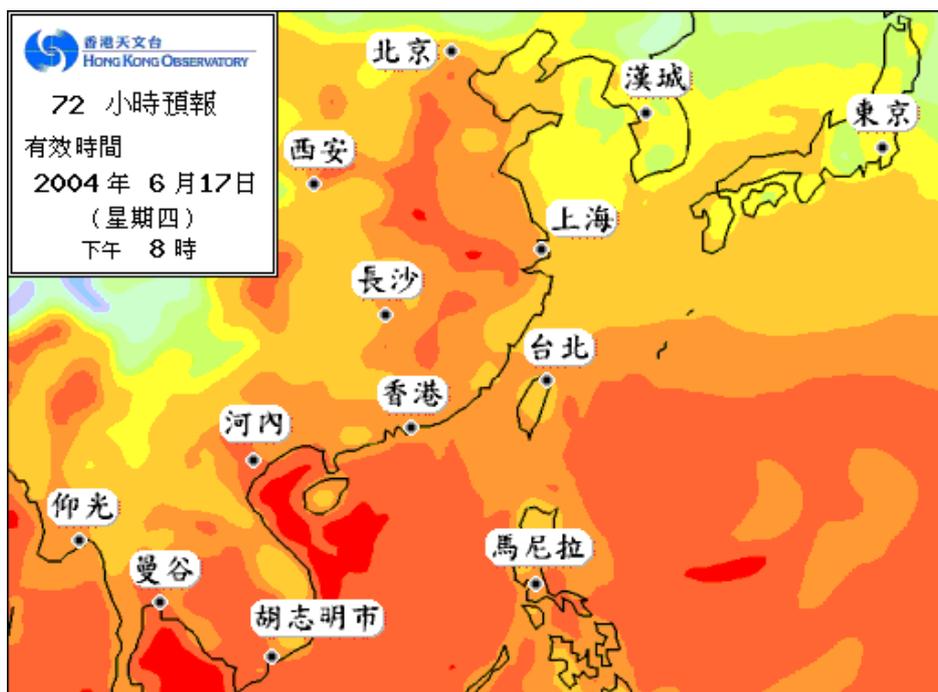
ORSM的主要任務是提供未來三天的短期天氣預報。ORSM的設定是包含了一個二重「套網格」，幅員一大一小，格距一粗一細，分別簡稱為外模式及內模式。內模式覆蓋香港及其鄰近地區，分辨率高達 20 公里，嵌套於涵蓋東亞及西太平洋的 60 公里分辨率外模式之內（圖(五)）。

為幫助預報員理解數值模式的結果，預報資料會被繪製成二維及三維的天氣圖像產品，經天文台內聯網發放。為方便製作本地天氣預測，後處理工序亦會從模式抽出有關的預報資料，包括香港的地面風、氣溫、濕度、雲量及累積雨量，整理成時間序列（圖(六)）。其他預報產品尚有區域氣溫預報、降雨指數、垂直廓線圖、氣象要素圖及特製天氣圖等等。

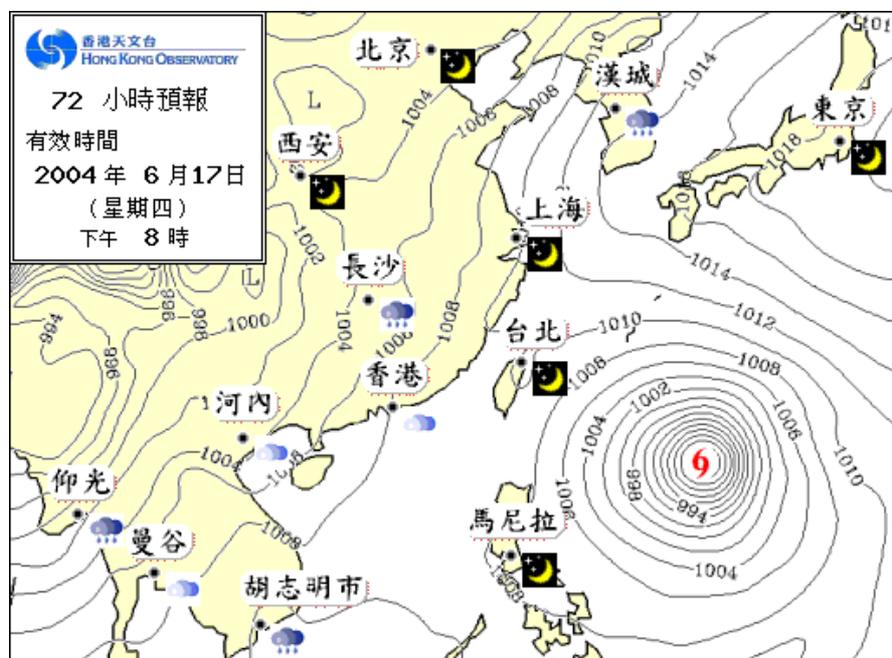


圖(六) 60 公里 ORSM 的預報時間序列，包括：地面風、氣溫、濕度、雲量及 3 小時累積雨量。

ORSM 的預報結果除了供預報員參考外，也會以簡明的天氣圖形式在香港天文台的「電腦模式預測天氣圖」網頁(網址: <http://www.weather.gov.hk/cgi-bin/hko/nwp.pl>) 發放。這些經電腦模式計算的天氣預測資料可以幫助市民瞭解香港及鄰近地區未來兩三天的天氣趨勢。天氣圖種類包括地面溫度(圖(七))、地面風向及風速、平均海平面氣壓(圖(八))及天氣的大致情況(圖(九))。電腦模式預測天氣圖每天更新兩次，其範圍涵蓋香港、中國南海、東亞及西北太平洋地區。



圖(七) 天文台網上發放的電腦模式地面溫度預測分佈圖，圖像中不同溫度以不同顏色顯示。



圖(八) 天文台網上發放的電腦模式平均海平面氣壓預測圖。



圖(九) 天文台網上發放的電腦模式天氣預報圖。

## § 2 — 數值天氣預報的模擬理念和策略

### 引言

香港位於東亞大陸南陲，與南海相鄰，是亞洲季候風盛行之地，氣候受到變化多端的熱帶及溫帶系統支配。天氣方面，由於香港地勢多山，海陸對比強，容易產生複雜的小尺度氣流，導致境內各區的天氣可以出現顯著差異。要掌握大如天氣尺度系統、小如區內地形效應等不同尺度氣象因素的萬千變化，必須依仗合適的預報工具。數值天氣預報模式，是其中最重要的預報工具之一。

天氣源自大氣層的變化，這些變化受物理學各種定律制約。數值天氣預報技術利用高速電腦運算代表這些定律的繁複方程組，從而得知大氣層的演變，以及相連的天氣。方程式中的氣象變數包括風、溫度、氣壓及水汽含量。原則上，從已知的初始狀況和邊界條件便足以進行計算，得出各項氣象變數隨時間的變化，作為天氣預報的依據。最常用的運算方法有「波譜變換法」及「有限差分法」，而有關的模式分別稱為「譜模式」和「差分模式」。為了減省計算量，模式往往採用某些近似和假設去簡化基本方程式，因此計算結果也就不是百分之一百真正大氣的寫照。

### 2.1 物理及數學基礎

對物理學家來說，大氣演變是一個流體力學加上熱力學的問題。而流體力學，簡而言之是把物理學中，牛頓力學的第二定律應用到流體上的一個特別課題。至於預報或預測，在數學上是一個初值問題。若有規範的空間範圍內求解，預報亦同時是一個邊值問題。由於操縱大氣演變的物理定律是非線性的微分方程，一般是沒有解析解(analytical solution)的。因此，在求解時必須要借助數值方法。

## 2.1.1 基本物理方程

地球的大氣是由多種化學氣體組成的混合氣體，主要包括氮氣、氧氣、二氧化碳、水氣及其他微量元素如臭氧等等。為簡化模式，在一般情況下，都會把氣體之間的化學作用忽略。因此，除了固態和液態水外，大氣基本上是一團流體。在旋轉座標系(rotating coordinate frame)上應用牛頓第二定律到一個單位質量的氣塊(air parcel)上，可獲得其動量方程：

$$\frac{d}{dt}\mathbf{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla P - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \mathbf{g} + \mathbf{F}_r \quad (1)$$

其中的三維向量 $\mathbf{V}$ 代表風場， $\rho$ 代表空氣密度， $P$ 代表氣壓，向量 $\boldsymbol{\Omega}$ 為地球自轉角動速度。在式(1)中，等號右邊第一項代表氣壓梯度力(pressure gradient force)，第二項為地球自轉偏向力(Coriolis force)，第三項的向量 $\mathbf{g}$ 是重力(包含離心力在內)，而第四項的向量 $\mathbf{F}_r$ 為摩擦力。若將式(1)中的向量對應局地直角座標(local Cartesian coordinates) $x$ -、 $y$ -、 $z$ -軸分解，可得描述緯向、經向及垂直方向的三條純量公式，記為(1)(a)、(1)(b)、(1)(c) (算式不贅)。根據大氣質量守恆，連續方程可寫成下列形式：

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

其中 $\nabla \cdot \mathbf{V}$ 項表示流場的散度，而 $\rho\nabla \cdot \mathbf{V}$ 就代表質量的輻散。換句話說，氣塊密度沿運動軌跡，隨時間的轉變，是受制於質量的輻散。

大氣既為流體，自然亦受氣體狀態方程所制約：

$$P = \rho RT \quad (3)$$

這裡 $R$ 為氣體常數， $T$ 為大氣溫度。如其他體溫高於絕對零度的物質一樣，氣塊能量的傳遞是受熱力學第一定律所支配：

$$c_v \frac{dT}{dt} + P \frac{d\alpha}{dt} = Q \quad (4)$$

式(4)中， $c_v$ 、 $\alpha$ 、 $Q$ 分別代表氣體的定容比熱(specific heat at

constant volume)、比容( $\alpha=1/\rho$ )及非絕熱加熱率(diabatic heating rate)。簡單來說，式(4)表示內能(internal energy)的轉變與氣體膨脹所作的工(work done)，兩者的總和相等於非絕熱加熱。

若同時考慮水汽在氣態與液態之間的相變，則狀態方程(3)及熱力方程(4)要改寫成

$$P = \rho RT_v \quad (3^*)$$

$$c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dP}{dt} = Q - L \frac{dq}{dt} - c_l m_l \frac{dT}{dt} \quad (4^*)$$

其中  $T_v = (1 + 0.608 q)T$  是虛溫(virtual temperature)， $q = \rho_v / \rho$  是比濕(specific humidity)， $\rho_v$  是水汽密度，而  $c_p$  是定壓比熱(specific heat at constant pressure)。此外， $m_l$  是單位質量空氣中的液體水分， $L$  是潛熱(latent heat)， $c_l$  是液態水的比熱。式(3\*)、(4\*)與(3)、(4)之間的主要分別，在於以虛溫代替氣溫，以及要考慮潛熱及液態水增溫所需的加熱。在式(4\*)中，非絕熱加熱率  $Q$  只包含除上述兩種形式以外的熱源。此外，還有描繪水汽含量變化的微分方程：

$$\frac{dq}{dt} = \frac{S}{\rho} \quad (5)$$

在式(5)中， $S$  是指水汽源或匯，表示在單位時間單位體積內，因凝結、蒸發或湍流擴散等物理過程所增加或減少的水汽含量。

算式(1)至(5)齊集了數值天氣預報模式的基本物理方程。經適當的簡化及數值求解後，一般業務天氣預報所需的天氣要素，如風向、風速、氣溫、濕度、降雨等，基本上已可以預測得到。正如『引言』第二段所提及，上述基本方程組，嚴格來說依然未臻完美。在前綫的研究領域中，特別是針對中尺度及對流尺度而言，數值模式專家仍然在積極尋找最適當的預報因子及其演變方程。舉例來說，在日本氣象廳近期研發成功並且已投入業務試行的非靜力模式中，除了水

汽及式(1)至(5)中其他的變數之外，預報因子還包括雲水 (cloud water)、雲冰 (cloud ice)、雪、雨及軟雹 (graupel) 五種水態的混合比 (mixing ratio)，以加強模式模擬與水汽相關的物理過程的能力。

## 2.1.2 物理參數化

如上文第§2.1.1 節末段所提及，模式的基本方程中仍存在未考慮的物理因素。原因主要為：

- (a) 模式不夠精細
- (b) 科學上仍有不解之謎
- (c) 業務操作上不可行

對於包括積雲對流所帶動的能量重新分佈、湍流所引發的動量、能量和水汽輸送、大氣與邊界層之間的各種交換等過程，研究結果顯示模式的分辨率 (model resolution) 往往需要低至 1 公里或以下的量級。對目前的氣象觀測網絡以致電腦科技來說，所要求的資料密度和運算能力，還是遙不可及的。表(一) 列舉全球主要的氣象中心，在業務上最高分辨率的數值天氣預報模式。

表(一) 各地業務運行的區域數值天氣預報模式(至 2002 年 11 月)

氣象中心	模式種類	最高水平分辨率
德國	格點模式	7 公里
法國	格點模式	9.5 公里
日本	譜模式	10 公里
英國	格點模式	12 公里
美國	格點模式	12 公里
澳洲	格點模式	12 公里
加拿大	格點模式	15 公里
香港	譜模式	20 公里
中國	格點模式	28 公里

從表中可見，最精細模式的分辨率，亦只達 10 公里的量級。故此，上述幾類對大氣演變非常重要的物理過程，對現今的業務數值模式來說，都是屬於次網格尺度(sub-grid scale)現象，是不能夠直接模擬出來的。

除了分辨率不足這個主要原因之外，仍有一些以現今科學水平還未能完全掌握的大氣變化因素。例如颱風或雷暴單體的內部結構與強度變化。當中涉及的物理過程非常複雜，而且因為缺乏詳盡的觀測資料，以致相關的理論也難以完善，目前仍是熱門的研究課題。另一方面，一些微觀物理過程，例如水汽的相變、雲的生消以及輻射交換等，雖然經已有一定的理論以至數值解的基礎，但礙於牽涉到龐大的運算量，所以一般不會放進業務預報模式中直接模擬。數值模式的業務運作，往往要與時間競賽。精細但太繁重的計算，會導致模擬微觀物理過程的代價變得太大而不實際。

現時主流的折衷辦法，是先根據理論與實驗研究結果，統計出次網格過程對模式預報因子在網格尺度(grid scale)上的影響。然後再將統計數字以參數的形式，回饋到模式的物理方程內。透過物理參數化，模式便能夠填補基本方程因忽略次網格過程所做成的不足之處，籍以減少對整體預報的影響。這些參數一般都可以根據模式預測的實質表現加以微調，以配合不同地域在業務運作上的需要，以提高模式預報的準繩度。

### 2.1.3 求解方案

上文第§2.1.1 節曾提及過，支配着大氣演變的基本方程是非綫性的微分方程，一般沒有解釋解。要得到預報資料，實際而可行的作法，可循以下兩方向進行：

- (i) 根據理論大幅簡化基本方程組，然後尋找有解釋解或數值解；
- (ii) 把基本方程離散化(discretization)後，進行數值求解。

在電腦尚未發明的年代，方案(i)是唯一可行的做法。透過分析大氣運動的水平和垂直尺度，以及比較主要物理項強度的量級，可以高度簡化基本方程組。最重要的兩套理論，相信是『准地轉近似』(quasi-geostrophic approximation)和『靜力平衡近似』(hydrostatic approximation)。前者有濾波作用，濾去動力慣性波等快波，而保留天氣尺度波動的作用。後者則把大尺度中，相對不重要而亦難以準確解出的垂直運動方程，從基本方程組中略去，而垂直流速則由連續方程診斷出來。一般來說，在絕熱和無摩擦的情況下，而移動速度遠大於聲速，或水平尺度遠大於垂直尺度時，靜力平衡是一個相當準確的近似。

除此之外，亦有一些較具針對性的近似法，例如『不可壓縮近似』(incompressible approximation)及『包辛內斯克近似』(Boussinesq approximation)。前者應用於連續方程，對研究對流問題，以及計算浮力都有用。後者則是一種處理密度擾動的近似。對尺度較小的運動，特別是在熱對流過程中，由氣塊受熱產生的密度擾動，即使是微小的，也往往可以產生較大的浮力，影響垂直運動。包辛內斯克近似能有效地簡化有關的方程。

從 50 年代起，自電腦科技發展蓬勃以後，直接以數值方法求解逐漸變得有可能。事實上，只有當模式保留所有方程的原始面貌，其物理性質才能接近真實，而其解才可以描繪出逼近真正大氣的寫照。這種簡化最少的模式，稱為「原始方程模式」(primitive equation model)，而經高度簡化的模式則可稱為「過濾模式」。就這兩大類模式的優劣，本章第 §2.2.1 節有更詳盡的討論。

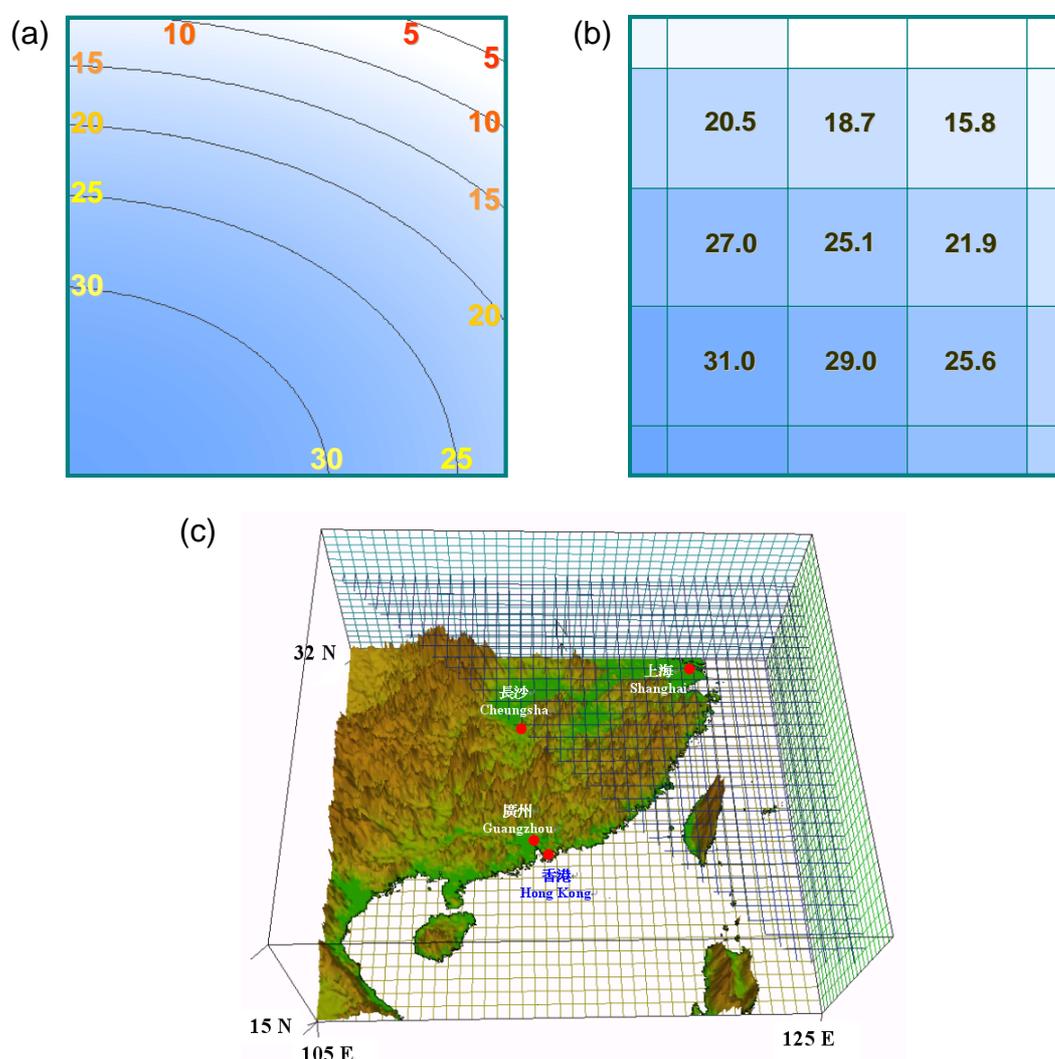
## 2.1.4 方程離散化

概念上，數值求解是指透過一些數學變換的手段，把原有的複雜問題，化繁為簡，或化整為零，變成有數值解的簡單問題。再根據已知的條件，把問題的答案整合，成為原

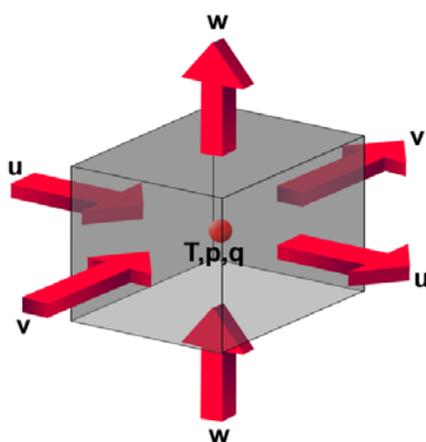
有問題的數值解。這種解題辦法，稱為離散化(discretization)。天氣模式採用的離散化方案主要有三種：

- (1) 有限差分法(Finite difference method)
- (2) 波譜變換法(Spectral transform method)
- (3) 有限元法(Finite element method)

有限差分法或簡稱差分法，是一種把方程化繁為簡的離散化辦法。當中牽涉到把連續的物理空間切割成如圖(一)所示的離散而有限的網格空間，以及利用差商代替微商，使微分方程變成差分方程，數值解得以用代數方法求得。



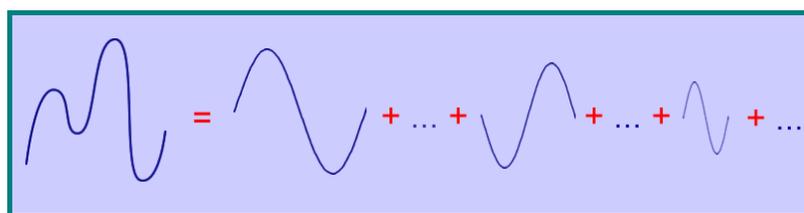
圖(一) 差分格點模式：(a) 連續的真實溫度場；(b) 離散化後的數值溫度場，每格中央的數值代表該格溫度的面積平均值；(c) 60 公里 ORSM 所採用的網格(只顯示香港及鄰近地區)。



圖(二) 川荒 C 跳點格式。

為節省計算時間和存儲量，以及提升差分法的精度與穩定性（下文第§2.1.5 節有進一步的闡譯），在計算差商時往往會利用到稱為『跳點格式』的交錯網格(staggered grid)。跳點格式有很多種類，而圖(二)所示的例子，是常見的『川荒 C 格式』(Arakawa C grid) (水平方向而言)。在這種跳點格式中，預報因子中的向量分量，會配置到跳點的網格面上，例如緯向風速  $u$  配置到圖(二)中網格的東、西兩面上，而經向風速  $v$  則配置到網格的南、北兩面上。至於純量預報因子，例如  $T$ 、 $P$ 、 $q$  等，則會放置在網格的中央。

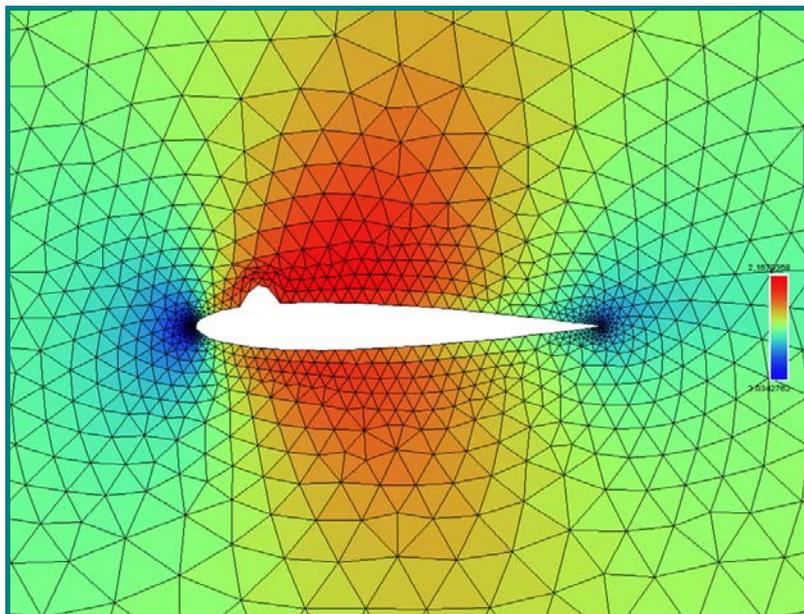
至於波譜變換法或簡稱譜方法，則是將方程的解化整為零的一種離散化手段，而模式的物理空間理論上仍然是連續的。一般的做法，是揀選一些如球諧(spherical harmonics)函數或正弦式(sinusoidal)函數作為基函數(basis function)，將預設的方程解展開成有限項的綫性組合(見圖(三))，使微分方程化為展開系數的代數公式。



圖(三) 譜方法把方程解展開成有限項基函數的綫性組合。

『傅里葉變換』(Fourier transform)便是其中一個主要的數學工具。值得強調的是，譜方法對於動量方程的解，理論上是連續的，但由於模式中有部分物理方程的計算如在譜空間上進行，會變得太複雜，故仍需要在物理空間上進行。故此，所有的數值解其實最終都要在離散的網格空間上定義。同時，因要減低運算量，在實際的計算中只會包括有限數量的基函數，導致模式最終的解析度都是有限的。

有限元法是一種集差分法與譜方法兩者優點於一身的離散化方案。如差分法一樣，有限元法把物理空間切割成有限而可以是不規則的單元(element)。在每單元上，又如譜方法般，以基函數去局地求解。有限元法最大的優點是可以處理複雜的邊界條件。如圖(四)的例子所示，有限元法模式可利用不規則的單元，仔細描繪出複雜的地形。由於早期模式的分辨率仍低，要面對的下邊界條件相對來說還不算太複雜，故在模式的發展歷程中，有限元法並沒有其他兩種離散化方案般流行。



圖(四) 「有限元法」利用不規則的單元以準確表達複雜的邊界條件。

如上文第§2.1.2節表(一)所示，很多業務預報中心所運行的區域模式都是以差分法或譜方法為基礎的。至於全球模式，除加拿大與英國分別應用有限元法及差分法外，則絕大部分是建基於譜方法的模式。雖然歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-range Weather Forecast)的全球模式都是建基於譜方法，然而在垂直方向的離散化，卻用了有限元法，是比較特別的一例。

## 2.1.5 數值技巧和限制

有了離散化的方案後，要真正具體落實及進行數值求解時，仍有不少的技術或技巧問題要面對。以應用最廣泛、最簡便的差分法為例，在一維的空間上就有至少三種表示差商的選擇，例如『向前差商』、『向後差商』和『中央差商』等。在時間的離散化方面，亦有如『迎風格式』、『向前差格式』、『歐拉向後差格式』、『蛙躍格式』和『隱式格式』等多種選擇。

數值計算技巧的選擇，要視乎所處理的微分方程種類、可承受的計算量、以及計算的一致性(consistency)、收斂性(convergence)和穩定性(stability)而定。一致性又稱相容性，是指當積分用的時間步長(time step)和網格格距(grid spacing)都趨向零時，差分方程是否逼近微分方程的問題。而收斂性是指在一定的條件下，差分解趨向微分解的情況。至於穩定性，則是指時間積分過程中，差分解的誤差會否隨時間增加或減少的問題。一般來說，『隱式格式』的計算是無條件穩定的，但計算量較多。而其他各種格式的計算量則較少，但要在特定的條件下才穩定。

此外，針對流體的平流(advection)運動，有『歐拉法』(Eulerian)及『拉格朗日法』(Lagrangian)兩種不同的描述觀點。前者以空間固定點的運動為對象，而後者則以流體質點沿其軌跡的運動為對象。一般來說，歐拉法會比較簡單，但

有上一段所提及的穩定性限制。拉格朗日法最好的地方，是時間積分上絕對穩定。但由於會牽涉到額外的質點運動軌跡計算，其模式中的網格亦需要根據流體密度的加減而變形，令業務上難以實行得到。現時一些先進的數值天氣預報模式會採納一套名為『准拉格朗日法』 (Semi- Lagrangian) 的方案，令積分過程既不需要把網格變形，又可享受高度的穩定性，而且容許快速的時間積分。舉例來說，已採用了准拉格朗日法的歐洲中期天氣預報中心的全球模式，其積分的時間步長可達 15 分鐘，比起一般採用歐拉法的模式快上好幾倍。

儘管如此，所有差分模式仍然存在一些共同的問題，包括以下各種現象：

- 波幅衰減
- 能量頻散
- 波速偏慢
- 產生計算波
- 非綫性不穩定

雖然透過縮小網格格距或採用精細的譜模式可以減輕問題，但在設計和應用數值模式時，還是要特別留意其局限性。

## 2.1.6 業務預報模式的設計

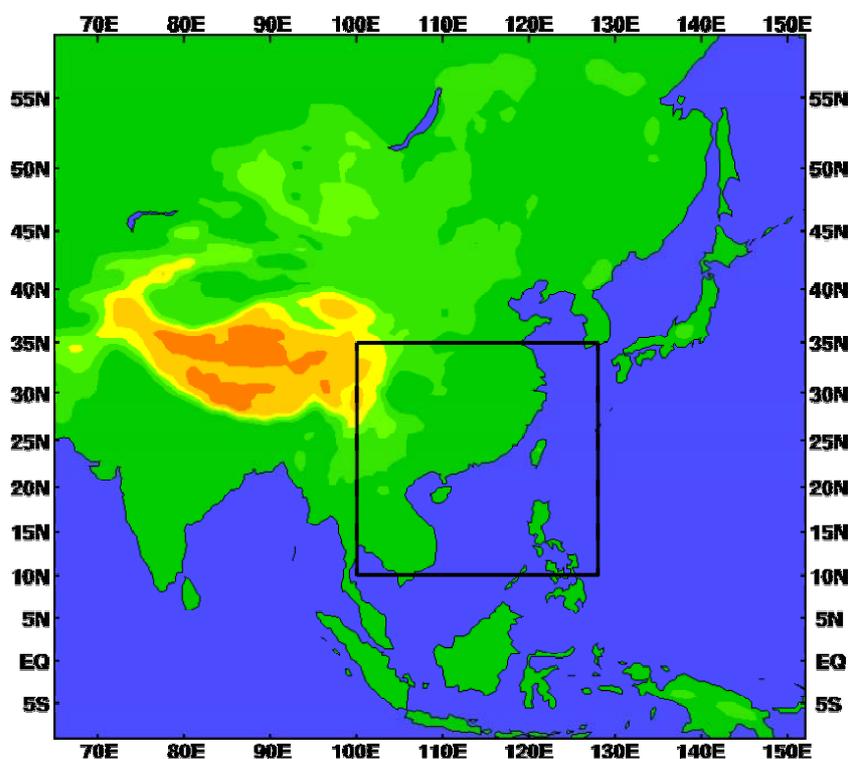
在設計一個業務運作的數值模式時，除了上述有關數值方法的問題值得注意之外，以下幾個能顯著影響模式操作表現的因素也需要一併考慮。這包括水平分辨率的設定、模式範圍及垂直座標系的選擇、側邊界條件的安排，以及初值的設定(亦即大氣分析)等等。

以天文台所運行的『業務區域譜模式』 (Operational Regional Spectral Model，簡稱ORSM) 為例，目前的設定是包含了一個二重、單向的「套網格」(nested grid)，幅員一大一小，格距一粗一細，分別簡稱為外模式及內模式。內模式覆

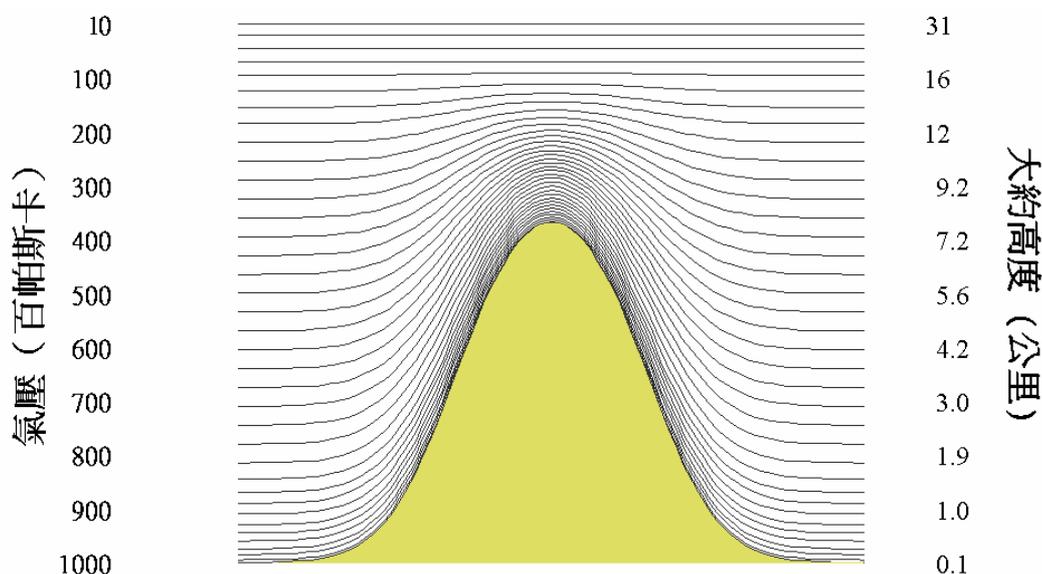
蓋香港及其鄰近地區，分辨率高達 20 公里，嵌套於涵蓋東亞及西太平洋，擁有 60 公里分辨率的外模式之內（見圖(五)）。

根據目前的設定，內、外模式在「麥卡托」地圖投影 (Mercator map projection) 上均有  $151 \times 145$  個水平格點，而垂直則分 36 層。垂直坐標是混合了氣壓坐標和依隨地形變化的坐標，上層傾向氣壓坐標，接近地面的層次則傾向依隨地形變化的坐標（見圖(六)）。下文第§2.2.6 節有進一步的描述。

至於側邊界條件方面，由於處理有關數學方程的數值方法，牽涉到預報因子在空間的分佈變化，故此亦需要另外提供模式範圍以外的網格點數值，從而按時間設定邊界條件，以完成基本方程組的運算。60 公里外模式的邊界條件，主要來自日本氣象廳全球譜模式輸出的數據，當中包括地面數據及 16 個標準等壓面的高空資料，頂層設在 10 百帕斯卡，即離地約 30 公里的高度。至於 20 公里內模式的邊界條件，則取自 60 公里外模式的輸出數據。



圖(五) 天文台 60 公里 ORSM 模式的覆蓋範圍(內框為 20 公里模式)。



圖(六) ORSM 模式的垂直坐標系 — 高層傾向氣壓  $p$  坐標，接近地表層則傾向依隨地形變化的  $\sigma$  坐標。

數值天氣預報中，初值的設定等同大氣狀態的分析，是另一門博大精深的學問，會留待下一課才作深入討論。在本章的論述中，我們假定初值經已存在。

## 2.2 模式種類及應用範疇

模式的分類辦法有很多，常見的可從以下幾個模式特質來考慮：

- (i) 近似法
- (ii) 靜力平衡
- (iii) 離散化方案
- (iv) 預報期
- (v) 分辨率
- (vi) 垂直座標

在以下幾節會逐一加以討論。

## 2.2.1 『原始』與『簡化』模式的比較

根據模式的近似法或簡化程度，我們可以籠統地把模式分為『原始方程模式』及『過濾模式』兩大類。前者可根據所採納的預報因子，再把模式細分為『運動方程』與『渦度、散度方程』兩種形式。而後者則根據尺度分析和能量守恆原理而設計，包括『靜力平衡模式』、『准地轉模式』及『正壓模式』等多種簡化模式。表(二)詳細比較『原始方程模式』及『過濾模式』兩者的優劣。

正如上文第§2.1.3節所提及，『原始方程模式』簡化較少，物理性質更接近真實的大氣，描述大氣運動能力相對較『過濾模式』完善，是數值天氣預報中較好的一種模式。不過，這種模式對初值很敏感，計算穩定性要視乎數值方法而定，運算量亦較龐大，而且如何使初值和模式協調並使快波在積分中不致過份地虛假增大，亦是一個關鍵問題。無論如何，在現今電腦科技發達的年代，『原始方程模式』經已成為一個主流的選擇。

表(二) 『原始方程模式』及『過濾模式』的比較

模式	『原始方程』	『過濾』
限制	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 較少</li> <li>▪ 靜力平衡或非靜力平衡</li> <li>▪ 天氣發展因子考慮得較完善</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 較大</li> <li>▪ 假設了靜力平衡、准地轉近似、無輻散近似等等</li> <li>▪ 較粗略</li> </ul>
風場與質量場之間的適應	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 通過物理過程實現(如透過動力慣性波等對能量的頻散而實現)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 強加</li> <li>▪ 即時調整</li> </ul>
時間尺度	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 可描寫快和慢過程</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 只能描寫慢過程</li> </ul>
空間尺度	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 視乎模式分辨率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 天氣尺度</li> </ul>
總絕對角動量	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 守恆(不考慮地形及摩擦)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 視乎情況</li> </ul>
對初值敏感度及計算穩定性	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 很敏感</li> <li>▪ 時間步長較短</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 相對不敏感</li> <li>▪ 時間步長較長</li> </ul>

## 2.2.2 靜力與非靜力模式

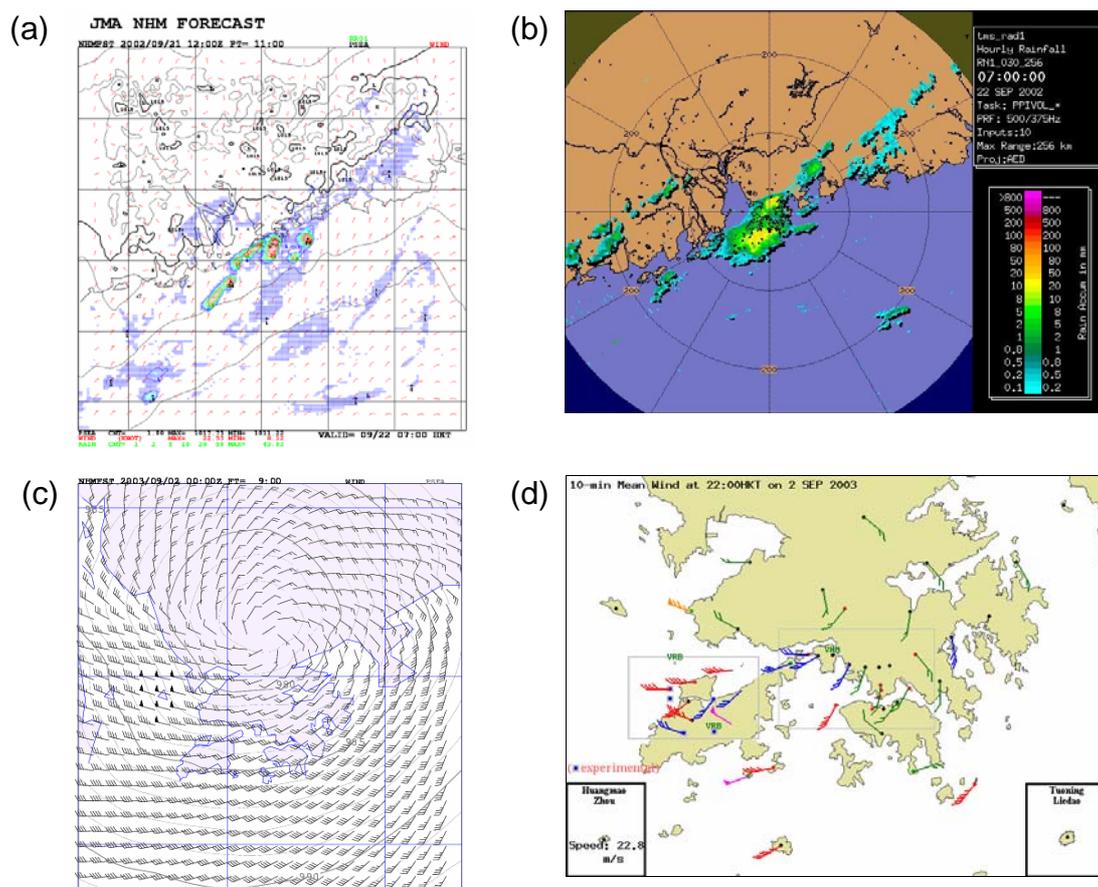
靜力平衡在行星尺度、天氣尺度，以致部分中尺度天氣現象上是很準確的一種近似法。因此，在業務數值模式的發展歷史中，靜力模式佔了絕大的比例。事實上，ORSM 模式亦屬於靜力模式。然而，對於像熱對流等尺度小但垂直運動非常重要的系統而言，靜力平衡近似是不適用的。

為針對這個問題，應用於對流尺度的模式都會把靜力平衡近似剔除，改而直接解出垂直運動的方程。當中會牽涉到非靜力氣壓擾動(non-hydrostatic pressure perturbation)、浮力(buoyancy force)與降水曳力(precipitation drag)等的計算。同時，由於浮力的釋出是與氣塊的距平氣溫(temperature anomaly)及水汽含量息息相關，雲物理與降水過程就變得非常重要，需要仔細的描繪。這解釋了上文第§2.1.1 節末段所提及，日本氣象廳需要在其非靜力模式當中包括五種水態混合比的原因。

香港由於位處東亞沿海地區，會受到包括西南季候風、颱風、海陸風等能觸發強對流天氣的系統所影響。再加上幅員狹小，且地勢山多，所以嚴格來說，在業務預報上亦需要非靜力模式的支援。天文台近年透過國際間的技術交流，開始了業務運行非靜力模式的實驗。如圖(七)所示，非靜力模式有能力預報出接近真實而仔細的降雨及風場分布，初步結果頗為令人滿意。然而，當中牽涉十分龐大的運算量，以目前天文台的電腦資源來說，仍然未能把非靜力模式完全投入業務運作中。

## 2.2.3 離散化方案之間的比較

差分格點模式(Grid point model)與譜模式(Spectral model)的數學物理基礎在前文第§2.1.4 節中已交代過，本節集中討論兩種模式的優劣點。

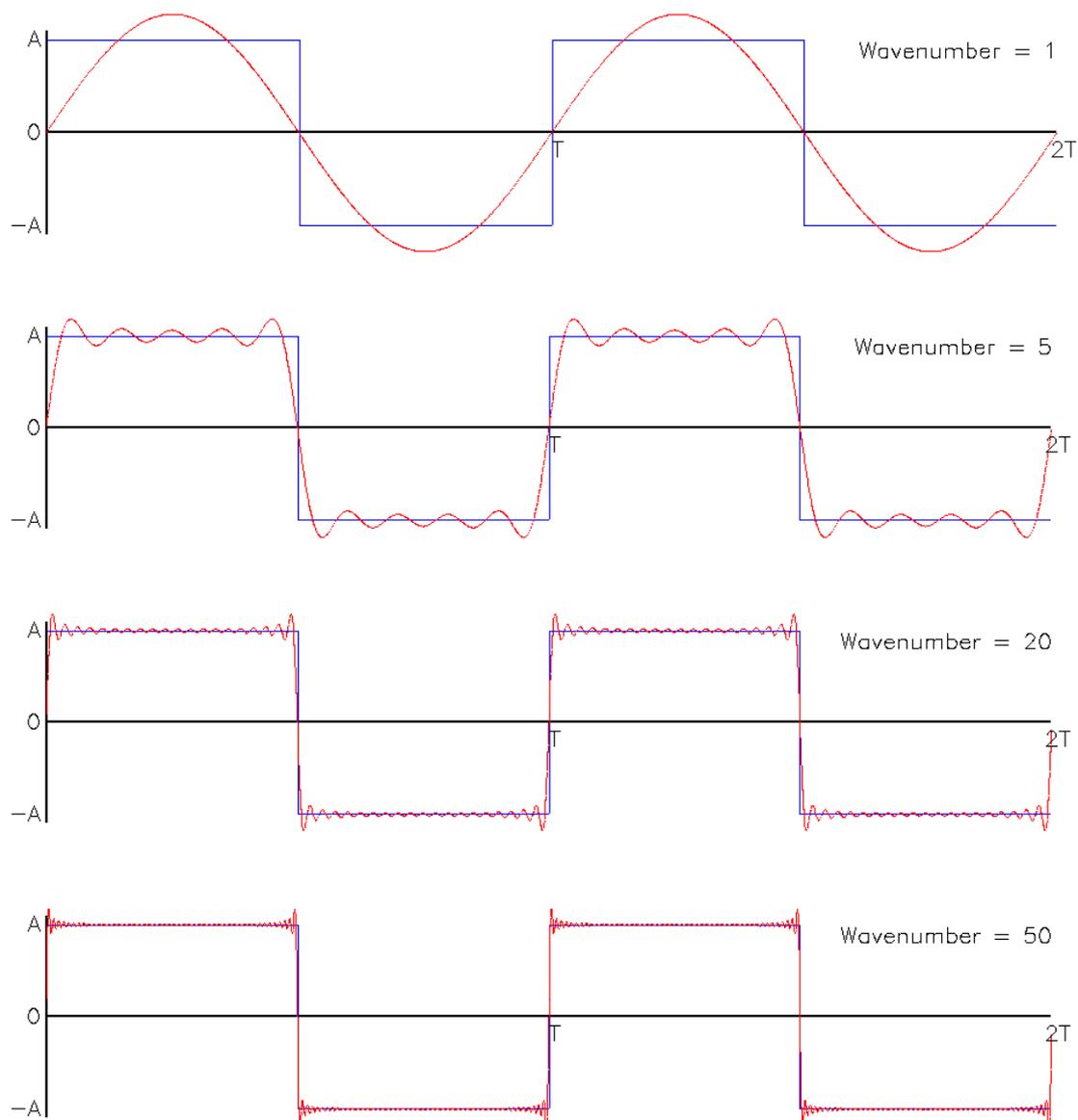


圖(七) 天文台的非靜力模式實驗結果：(a)雨量預報；(b)對應的雷達觀測實況；(c)地面風場預報；(d) 對應的自動氣象站測風計實況。

差分格點模式是建基於差分近似法。從業務操作上考慮，好處包括運算量及存儲量較少，亦易於在電腦上進行大規模的平行運算。此外，對於空間分佈不甚連續的物理量，例如水汽含量等，以及有限區域的邊界條件，亦較易處理。至於缺點方面，差分格點模式在處理緊密梯度及短波波速時，明顯較譜模式遜色。此外，能量守恆方面較難保證，同時亦有短波雜訊的問題等。

至於譜模式方面，由於建基於如球諧函數或正弦式函數等連續的基函數，所以能夠準確計算緊密梯度及波速，亦能保證能量守恆。此外，譜模式能自動並徹底地濾去短波雜訊，比一般差分法中，要作人工平滑較好。可是，譜模式涉及的運算量及存儲量較大，不利平行運算，在較小型的電腦

上不易運行。在數據處理方面，對於空間分佈不甚連續的物理量，容易產生如圖(八)所示的『吉布斯』現象(Gibbs phenomenon)，需要用較多的基函數才能有效表達。此外，有限區域譜模式側邊界條件的處理亦較為複雜。



圖(八) 以譜方法近似不連續函數所產生的『吉布斯』現象(Gibbs phenomenon) — 在正方波一升一跌的地方出現過沖的漣漪。

## 2.2.4 中、短期預報模式

在大氣運動中，時間尺度與空間尺度基本上成正比。故此，對模式的預報時效要求越長的話，所牽涉的計算域覆蓋範圍便越大。舉例來說，一道西風長波槽若以時速 50 公里自歐洲穩定向東移的話(即一天跑 1200 公里，約為 11 個經度距離)，約需時 10 天，便會抵達遠東地區。反過來說，若要為遠東地區預報在未來 10 天會否出現類似的長波槽的話，所需要的模式範圍至低限度也要覆蓋 110 個經度距離，即接近三分之一個地球圓周之巨。事實上，模式還需要兼顧大氣中其他波速較慢的運動，因此，實際的計算域一般都會覆蓋整個地球表面。這解釋了為何氣象中心需要運行全球模式，才能發出長達 10 天左右的中期天氣預報。

由於計算域覆蓋範圍大，為了減輕計算量，全球模式的分辨率也就不能太高，這亦侷限了全球模式的應用範疇。環顧現今業務運行的全球模式，以歐洲中期天氣預報中心的分辨率最高，但亦只有 40 公里左右。同樣道理，若果預報時效只需要兩至三天，又或者在電腦運算能力上有限制的話，模式計算域的覆蓋範圍可以收窄為有限區域。一般來說，有限區域模式的分辨率可設定得較高，而可描述的天氣現象也較仔細。就分辨率與模式的應用問題，下文第§2.2.5 節有更詳細的描述。除了有較長的預報時效之外，運行全球模式還有一個好處，就是可免除了因側邊界插值所引致的預報誤差。

## 2.2.5 分辨率與模式的應用

所謂模式的分辨率，一般來說，是泛指如差分模式的網格格距，或如譜模式的波譜數目。分辨率除了決定數值求解中的截斷誤差(truncation error)之外，在物理意義上，它取決了模式的解釋及預報的質素。表(三)總括了現時各類不同模式，一般所設定的分辨率和能夠描繪的天氣系統，及其有效解釋和預報的尺度。

表(三) 不同分辨率模式的應用

分辨率	模式類型	天氣系統	環流尺度
40-60 公里	全球靜力模式	高壓脊、低壓槽、冷鋒、高空急流、季候風、層雲降雨、溫帶氣旋、熱帶氣旋(路徑)	天氣尺度
10-20 公里	區域靜力模式	熱帶氣旋(降雨)、中尺度對流系統	中尺度
1-5 公里	區域非靜力模式	熱帶氣旋(強度與結構)、熱對流系統、積雲降雨	對流尺度
0.1-1 公里	局域非靜力模式	海陸風、地形波、地形降雨	局地尺度

值得一提的是，模式的分辨率並不等同它的有效解釋及預報尺度。舉例來說，若要以數值表達一個波長為 200 公里的短波擾動(假設是一維系統)，而且要求在數學轉換上不會產生歧義(ambiguity)的話，最少需要四個格點的資料來設定。在這情況下，模式分辨率的要求是 50 公里或更高。換句話說，若我們手上的模式只有 50 公里分辨率的話，我們可以有效解釋的最細微天氣現象，極其量只是一個尺度為 200 公里的系統。同時，由於所有數值模式在時間積分上都會出現不同程度的數值頻散，若要準確預報一個 200 公里波長的短波運動的話，所要求的分辨率其實比起 50 公里還要高。

模式分辨率的設定，除了要視乎目標天氣系統的尺度外，亦要考慮相關的物理過程是否模式方程所能描繪的。以熱對流系統為例，其牽涉的垂直速度可達每秒 1 米，近乎水平運動速度的量級。然而，一般的全球模式由於都採用了靜力平衡近似，這等於假設了垂直運動速度比水平運動速度小幾個量級。亦即是說，縱使我們可隨意把一個靜力模式的分辨率設定到 5 公里或以下，但它絕不能模擬出像真的熱對流現象。

## 2.2.6 不同垂直座標模式的比較

對大氣模式來說，最自然的垂直座標相信是海拔高度， $z$ 。然而從數學角度來看，任何變數，只要是 $z$ 的嚴格單調函數，便可作為一個垂直座標。所以，除高度 $z$ 外，氣壓 $P$ 、對數氣壓 $\pi = \ln P$ 、相對氣壓 $\sigma = P/P_s$  ( $P_s$ 為地表氣壓)，以至位溫(potential temperature,  $\theta = T(1000/P)^{R/c_p}$ )等，因受下列物理約束，都可以與 $z$ 嚴格單調改變，而成為垂直座標。

在整個大氣中，除了在外太空( $z \rightarrow \infty$ )，空氣密度總是大於零。在靜力平衡近似下，

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g < 0 \quad (6)$$

故 $P$ 座標系可以代替 $z$ 座標系的數學物理基礎。反過來說，若用 $P$ 座標，方程只能描寫准靜力的運動。例如垂直加速度比較劇烈的強對流活動，用 $P$ 座標是描寫不來的。此外， $\pi$ 和 $\sigma$ 座標由於是從氣壓衍生出來，它們亦受同樣的物理約束，所以可以作為垂直座標的選擇。在 $\sigma$ 座標系中，起伏的地面變成了座標面( $\sigma$ 值等於1)，氣流沿地表的運動可作為平面問題來考慮。至於 $\theta$ 座標系，由於在時間積分過程中，很難保證其隨高度變化的單調性。在應用方面的局限性就更加大，主要的用途是模擬冷鋒過程。鋒面所在處，等熵(entropy)面密集。在垂直方向，用同樣的分辨率， $\theta$ 座標系所表示的鋒面比 $z$ 、 $P$ 或 $\sigma$ 座標系都表示得更清楚。表(四)詳細比較各坐標系的優劣點。

除上述四種基本的垂直坐標系外，為針對非靜力模式及崎嶇的地形，還可採用以下兩種垂直坐標系：

$$z^* = \left( \frac{z - z_{sfc}}{z_{TOP} - z_{sfc}} \right) \cdot z_{TOP} \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\varphi - \varphi_{\text{TOP}}}{\varphi_{\text{sfc}} - \varphi_{\text{TOP}}} \quad (8)$$

其中下標符號『TOP』表示模式計算域的頂部，而『sfc』則表示地表。式(7)中， $z_{\text{TOP}}$  與  $z_{\text{sfc}}$  分別代表模式計算域頂及地形的高度，兩者都是常數。日本氣象廳的非靜力模式便採用了這種垂直坐標系。至於式(8)中的  $\varphi$ ，是指在高度  $z$  的靜力氣壓 (hydrostatic pressure)。由於靜力氣壓代表在單位面積上氣柱的總重量，故  $\zeta$  座標系亦可理解為一種『質量坐標系』 (mass coordinate)。美國近期研發的非靜力模式，Weather Research and Forecasting Model，便是建立於這種質量坐標系之上。

表(四) 模式垂直座標的比較

座標系	好處	缺點
$z$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 嚴格正交</li> <li>▪ 下邊界不隨時間而變</li> <li>▪ 等高面是水平面</li> <li>▪ 可描寫准靜力平衡和非靜力平衡運動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在地形起伏地區，等高面與山脈相截，出現許多空洞</li> <li>▪ 計算梯度困難</li> <li>▪ 選取邊界條件困難</li> <li>▪ 編程較複雜</li> <li>▪ 不能作譜展開</li> </ul>
$P$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P</math> 面接近水平</li> <li>▪ 氣壓梯度力項形式簡單</li> <li>▪ 連續方程在形式上便於計算</li> <li>▪ 和降水有關的物理量可直接得到</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 下邊界不是座標面</li> <li>▪ <math>P_s</math> 隨時間空間而變</li> <li>▪ 出現許多因地形起伏而引致的空洞，且範圍隨時間而變</li> <li>▪ 計算及編程同樣極為困難</li> <li>▪ 不能作譜展開</li> </ul>
$\sigma$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 下邊界是座標面</li> <li>▪ 氣流沿地面的運動變為平面問題考慮</li> <li>▪ 邊界條件簡單</li> <li>▪ 可用波譜展開</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在地勢陡峭地方，<math>\sigma</math> 面是非水平</li> <li>▪ 動力和熱力方程較複雜</li> <li>▪ 計算水平氣壓梯度誤差較大</li> </ul>
$\theta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在絕熱情況下沒有垂直運動</li> <li>▪ 鋒面所在等熵面密集處，在垂直方向，表示得更清楚</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在地形起伏地區，有 <math>P</math> 座標同樣問題</li> <li>▪ 在平坦地面上，<math>\theta</math> 面和地面交角有時也較大</li> </ul>

另一方面，在業務上使用的數值模式，都希望把各種垂直坐標的優點集於一身。事實上，天文台的 ORSM 模式便採用了一種混合座標系(見圖(六)) — 計算域的上半部傾向  $P$  座標，而下半部則傾向  $\sigma$  座標。這混合座標的好處，是既考慮地形的作用，又可避免在  $\sigma$  座標系中，於對流層頂附近，因溫度遞減率(lapse rate)隨高度的不連續變化，而令氣壓梯度力的計算變得困難等。

## 2.3 總結

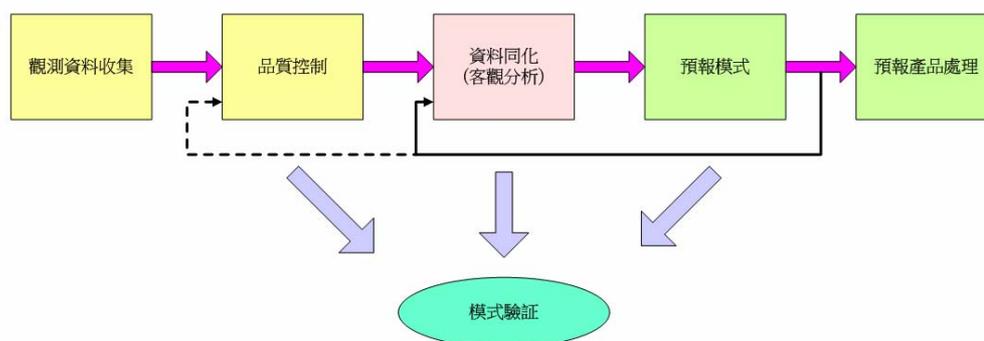
數值天氣預報，是建基於物理學和數值方法的一門科學。操縱大氣演變的物理定律經過適當的簡化及編程，便能利用高性能電腦計算出大氣的運動，從而推導出相連的天氣演變。其目的是要使天氣預報從主觀到客觀、從定性到定量、從粗略到仔細、從模糊到準確。

儘管當代的數值模式比起發展初期經已有顯著的進步，但為提供更多定量和定點的資訊以支援各式各樣的預報服務，模式專家仍然努力不懈，在數值模式各研究領域上尋求突破。隨著模式分辨率日趨精細，模式的物理過程變得更加精巧，模式對初始場的要求已變得愈來愈高。一些透過非傳統途徑及非定時收到的新類型數據，例如經精確調校的遙感平台所蒐集的觀測資料，要有效地應用於數值天氣預報，仍需要進一步研究具體的方案。相關的問題，下一章會有較詳盡的介紹。

## § 3 — 數值天氣預報的數據處理和同化

### 引言

天氣預報員若果沒有辦法掌握大氣現況，就很難準確預測未來的天氣。同樣地，數值天氣預報(NWP)模式要準確計算未來數小時以至數天之後的天氣狀況，除了須要把控制大氣運動的複雜方程組，透過各種數值方法轉化成電腦程序外，還要準確地分析大量觀測資料以確定大氣在某個時刻的狀況，或稱為模式的初始條件(initial condition)；情形恰如在茫茫大海上航行，首先要確定現時的位置，才可以推算出朝向目的地的方向一樣。NWP 的一項主要工序是處理觀測數據及把資料「同化」融入模式內，從而獲取更精確及一致性較強的大氣初始狀態。各氣象中心的業務 NWP 模式的資料分析系統，通常都會包含收集觀測數據、品質控制及資料同化等工作流程(圖(一))：



圖(一) 數值天氣預報的流程圖

### 3.1. 數值天氣預報模式使用的觀測資料

數值天氣預報模式主要是計算大氣中的氣壓、風速、風向、溫度及濕度等氣象要素的三維空間分佈及變化。現時全球數值天氣預報模式的水平分辨率普遍為數十公里，而天文台的業務區域譜模式(ORSM)的水平分辨率最高為 20 公里，模式整個計算範圍共有超過 80 萬個網格點。要準確地建立模式的初始條

件，我們便需要大量觀測資料去確定模式內每個網格點的大氣狀態。

簡單來說，觀測數據可由以下幾類系統收集：

1. 地面氣象站；
2. 船舶及浮標站；
3. 探空氣球；
4. 飛機；
5. 遙感觀測平台：例如氣象衛星、天氣雷達、氣流剖析儀和激光雷達等。

遙感觀測資料能提供覆蓋廣闊、高密度分佈及頻密的數據，彌補傳統氣象觀測網絡的不足，令原本資料貧乏的區域(例如海洋)，觀測數據與日俱增。觀測技術的開發亦越來越重視遙感觀測，近年很多預報中心在日常天氣預測及數值預報資料同化方面也相應地加強了遙感觀測資料的應用。

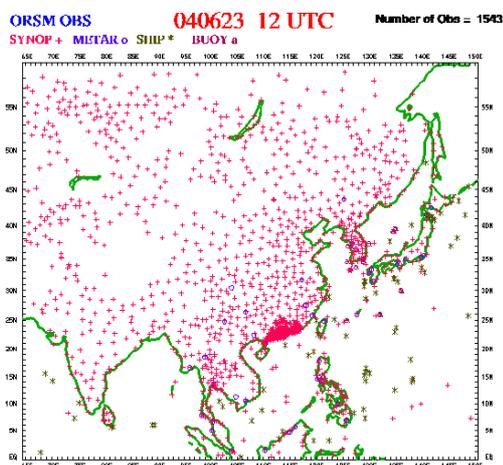
不同的觀測平台所能提供給數值天氣預報模式應用的氣象要素也略有差異，表(一)舉出部分例子：

表(一) 部分用於數值天氣預報(NWP)模式的氣象要素觀測

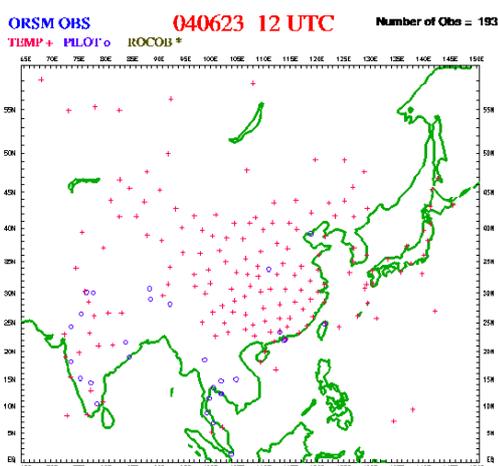
資料形式	用於 NWP 模式的氣象要素
地面氣象站	平均海平面氣壓
船舶觀測	平均海平面氣壓、風向和風速
探空氣球	風、溫度、濕度
飛機觀測	風、溫度
氣象衛星	風、溫度、濕度
天氣雷達	風、雨量

另外，由於海面觀測主要是倚靠遙感觀測資料，遇上熱帶氣旋的情況，往往仍需要把從其他客觀分析所推算出的氣旋強度及特性，透過「人造熱帶氣旋數據」(tropical cyclone bogus data)的手段放進模式內，使模式能夠更有效地模擬熱帶氣旋環流的演變。

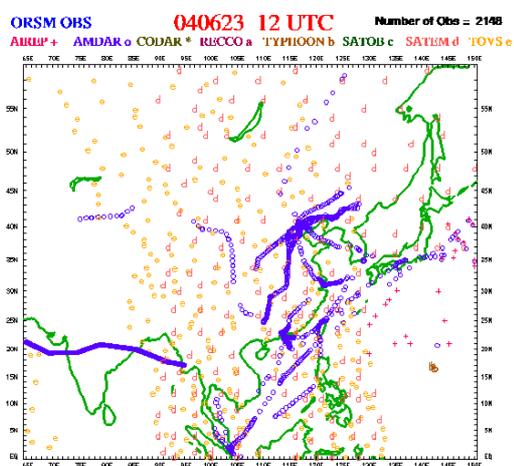
每天由不同觀測平台所獲得的資料達數以十萬計，ORSM 每次進行資料分析時，亦少不免要處理大量的觀測數據(圖(二))。



(a) 地面及海面



(b) 高空探測

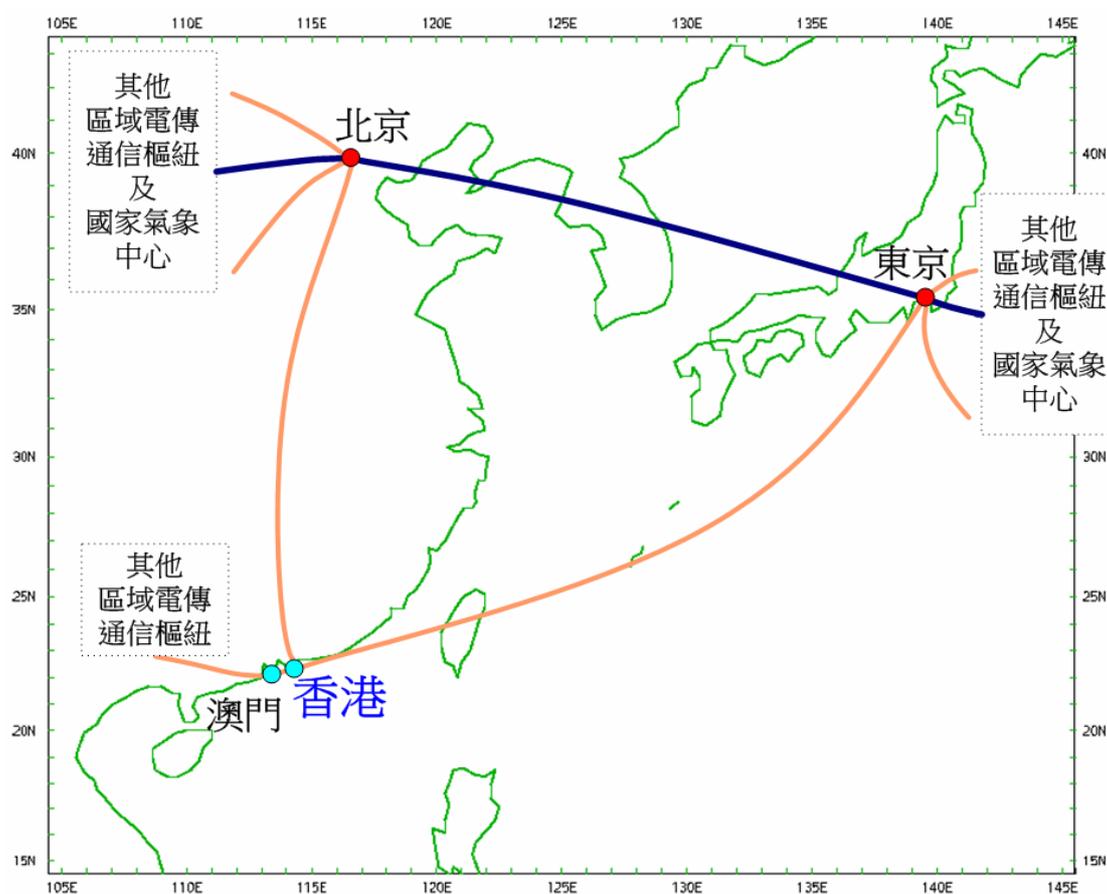


(c) 衛星及飛機

圖(二) 60 公里水平分辨率 ORSM 使用的觀測數據分佈

## 3.2. 各地氣象資料的傳送

為方便各地氣象中心提取資料進行天氣分析和預測，各地所測量及收集的氣象資料是經由全球電傳通訊系統(Global Telecommunication System，簡稱 GTS)向外發送，而各地氣象中心亦可以同時從 GTS 收到其他地方的氣象資料。GTS 除包括地面通訊網絡外，亦包含衛星通訊設施。目前天文台主要是透過 GTS 從北京及東京收到世界各地的天氣資料(圖(三))。



圖(三) 連接香港的 GTS 網絡線路

每個觀測點的氣象觀測資料經檢定後，首先經編碼(encode)過程，然後經由 GTS 往外傳送。編碼主要目的是令氣象數據能夠透過一套共同格式方便進行資料交換，同時亦節省資料訊息傳送的數量和時間。編碼格式可以是字母文字(alphanumeric)

(圖(四))或二進制格式(binary)。當接收資料的氣象中心利用電腦自動化程序將資料解碼(decode)後,便可以快捷地把原本的數據還原。

```
SMHK01 VHHH 240000
AAXX 24001
45007 12463 71905 10306 20236 30013 40022 51009 69902
84231 333 20293 58011 70012 81813 83825 =
```

圖(四) 編碼後的地面氣象站字母文字觀測資料

另外,天文台也利用衛星系統接收地球同步氣象衛星及極地軌道衛星的觀測資料,而天文台的天氣雷達系統更每小時提供雨量分析數據,使數值天氣預報模式能更有效地分析降雨系統的演變。

### 3.3. 數值天氣預報模式的資料同化

如何能夠歸納從各種途徑收集的觀測資料,建立準確的初始條件,並有效地運用在數值天氣預報模式中呢?

首先我們要明白觀測資料與數值天氣模式計算規格的分佈特點和數據特性:

1. 數值天氣模式計算的各種氣象要素是分佈在一個有規則的三維網格點陣,但觀測資料的分佈則非常不平均,例如常規地面資料比高空資料多,海面及高原的觀測資料相對地稀少。
2. 不同觀測平台所得的數據,由於測量儀器不同而在質量方面存在一定差異。例如由探空氣球和飛機量度的風向風速資料彼此會有分別。

3. 觀測資料在編碼、傳輸或資料檢定過程中可能會出現錯誤，令到資料無法使用，或影響到資料同化的計算。
4. 觀測資料的氣象要素與數值天氣預報模式的要求略有不同，遙感觀測資料的應用尤其困難。例如衛星主要是量度由地球往外發送的電磁波熱輻射量，由不同雲種和雲層高度所散發的熱輻射量值各有不同，從中可以用來估計大氣中水氣的分佈，但要把衛星量度的電磁波輻射量直接套入模式的水氣分佈運算就要經過相當複雜的反演程序。

綜合上述各點，任何數值天氣預報模式的資料同化系統必定要考慮觀測資料與模式的不同特點，並需要大量自動化的電腦程序才能有效地進行業務運作。

### 3.4. 觀測資料的品質控制

觀測資料的品質控制通常要經過一連串的檢定步驟或計算程序，準確度存疑的觀測資料大致上可經由以下的步驟被剔除：

1. 資料範圍檢測：根據氣象元素普遍容許的最大及最小值，把明顯錯誤的資料剔除。例如風向必須介乎 0-360 度，大氣低層的風速不能超過 100 米/秒等。此外，資料範圍檢測也可以根據不同地域的氣候平均值來判別錯誤的觀測資料。
2. 空間連續性：在指定範圍內，觀測資料的數值與鄰近地區的觀測數值或平均值不應相差太遠。
3. 時間連續性：同一個觀測站，相同的氣象要素在隨時間的變化不能超越既定的合理波幅。
4. 觀測地點的檢定：對於移動的觀測平台，例如船隻和飛機，航道路徑不應出現過大的偏離。

5. 符合大氣結構的平衡性質：天氣尺度系統所具備的平衡性質亦可用作判別異常的觀測資料，例如隨高度變化的溫度遞減率。

### 3.5. 資料分析方案

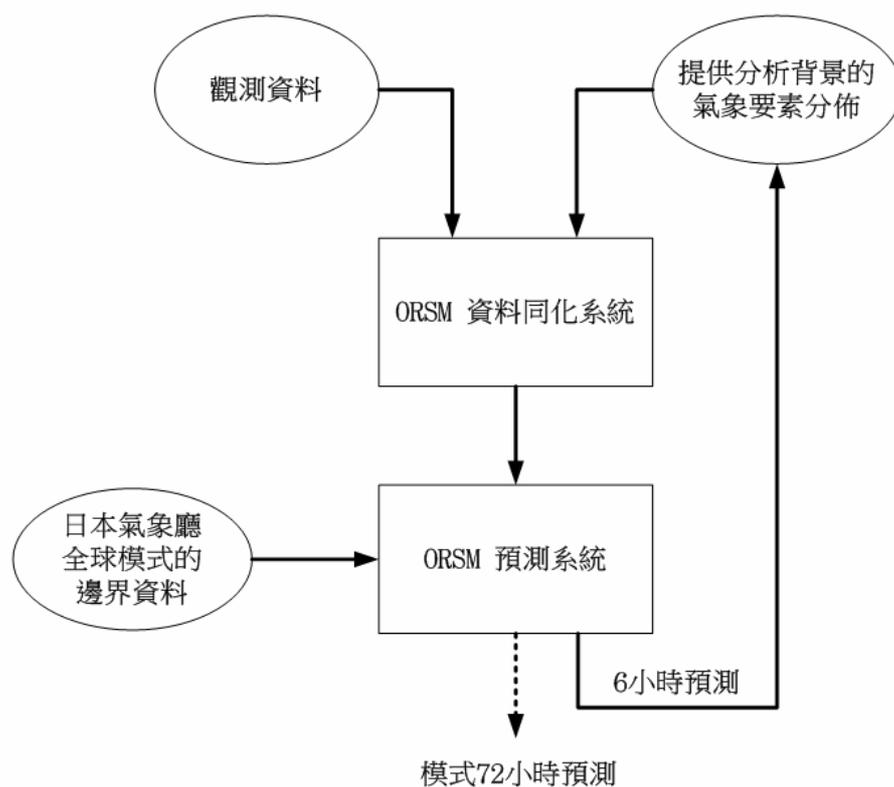
數據經品質檢定程序後，就會透過資料分析方案，或稱客觀分析(objective analysis)插值到數值天氣預報模式的網格點陣上。

數值天氣預報模式通常包含數以百萬計的網格點，但每次分析時段可供應用的觀測資料卻只有約數十萬個數據，捉襟見肘，實在難以滿足高分辨率模式的大量數據需求。因此現時普遍採用的客觀分析手段是要建立一套資料同化循環系統(data assimilation cycle) (圖(五))，利用模式的短期預測作為背景資料(background data)，透過客觀分析注入觀測數據，處理觀測資料和模式估值可能存在的誤差，在各個觀測點的位置及附近地區求出應有的氣象要素分析值，並對相應項目作出合理的調整。這個方法的好處，在於能夠在資料稀少的地方保持與模式一致的大氣狀態，而在資料密集的区域則可以盡用最新的觀測數據對模式背景場作出更貼近實況的調整(圖(六))。由此而生的大氣分析形勢，亦具備一定程度的連續性，以免當模式每次進行新一輪的運算時，在分析過程中受制於觀測數據的好壞多寡，而導致預報結果出現不必要的反覆現象。

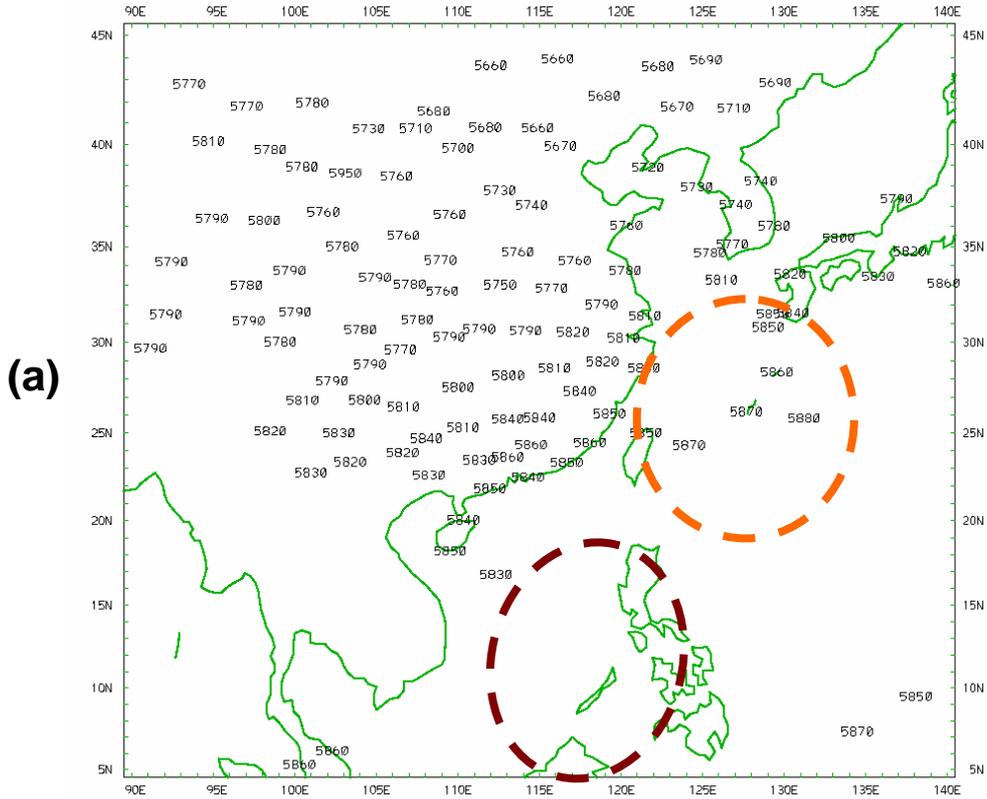
近十年隨著氣象衛星及雷達等遙感平台及非常規觀測資料的種類和數量日漸增多，很多研究及業務系統開發工作都集中於如何更有效地將不同種類的觀測資料應用到數值天氣預報模式上。ORSM 也把天文台天氣雷達的每小時雨量分析數據套用到模式內，讓模式可以掌握降雨系統的最新演變。

由於遙感觀測平台往往能夠提供比定時定點觀測更為頻密的資料，內容包含著大氣隨時間演變的信息，因此研究開發工作便需要引入更先進的資料同化技術，希望能夠成功地把大氣

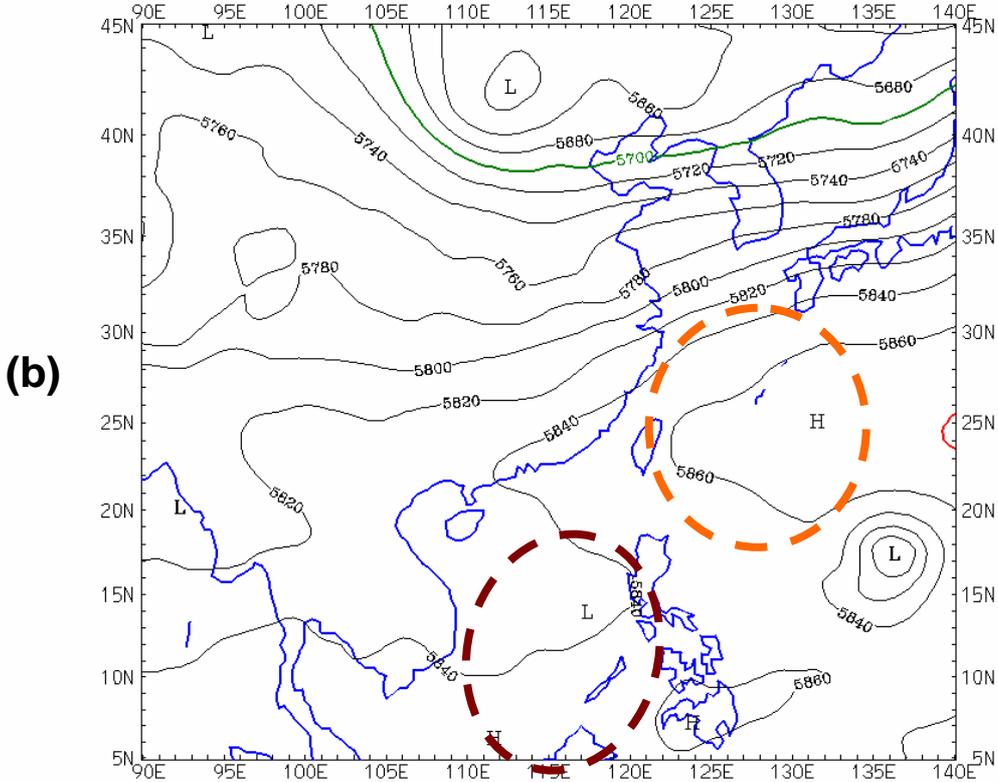
的四維(三度空間加時間)連續變化與模式分析結合，獲得更匹配的分析果效，減少數值天氣預報模式初始條件的誤差。但這類同化方案所需要的計算機效能亦相對地大幅提升。



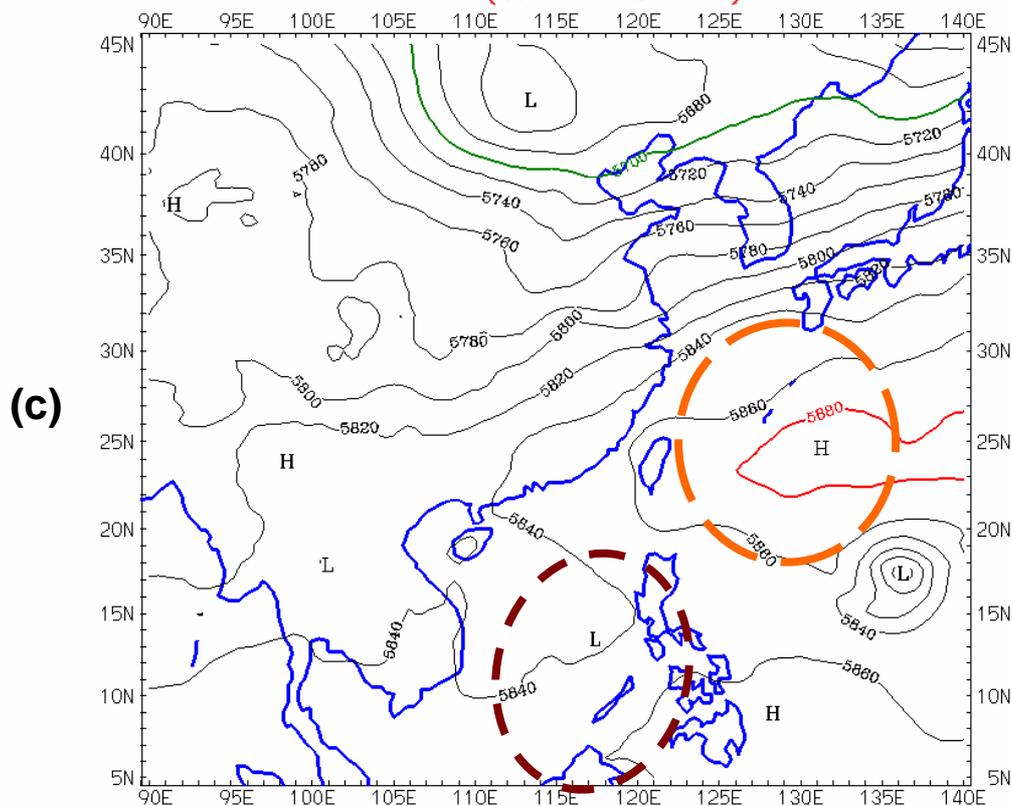
圖(五) 60 公里水平分辨率 ORSM 的資料同化循環系統



**60KM ORSM 06 HR F/C**      **040623 2000 HKT**      **HK Z = 5845 gpm**  
**500 HPA**      **Z**      **(WEDNESDAY)**



**60KM ORSM ANALYSIS 040623 2000 HKT (WEDNESDAY)** HK Z = 5849 gpm  
500 HPA Z



圖(六) 業務區域譜模式(ORSM) 60 公里水平分辨率的資料同化例子。圖(a) 為 2004 年 6 月 23 日下午 8 時的 500 百帕斯卡的高度觀測資料；(b) ORSM 上一次運算的 6 小時預測，作為客觀分析的背景資料；圖(c) 是綜合了所有觀測資料的分析結果。其中資料較多的區域(例如橙色圈部分)，模式的高度分佈得到調整。相比之下，資料較少的區域(啡色圈部分)，模式的分析保留了背景高度資料的分佈。

## § 4 — 數值天氣預報的應用及限制

### 引言

天氣預報是根據天氣學的基本知識，對主要天氣系統作推算，然後考慮地理條件影響下的地區性天氣，作出天氣預報。一個地方天氣的變化主要決定於天氣系統的變化，所以天氣形勢預報是天氣預報的基礎。以前預報天氣很大程度依靠預報員的經驗，客觀程度不足，出錯機會較大。近年隨著數值天氣預報的發展，天氣預測的準確度已較前大增。

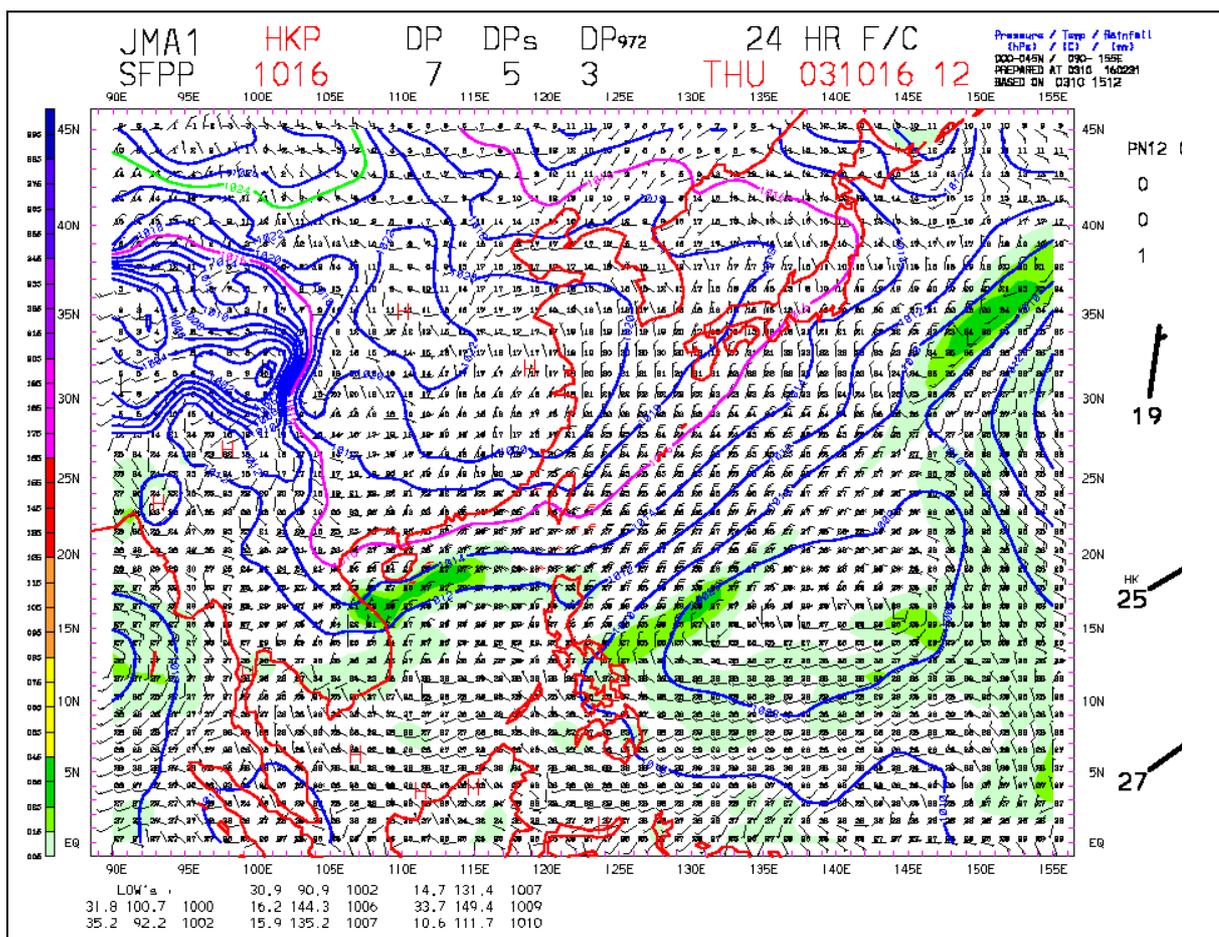
### 4.1 數值天氣預報的應用

#### 4.1.1 天氣形勢預報

天氣形勢預報從前利用的方法，多屬外推法、統計方法和動力學方法等，但現在一般都利用數值天氣預報產品(圖(一))。

數值天氣預報模式模擬大氣的演化，逐步將整個大氣內的天氣系統及氣團等，依照它們的移動趨勢及強度變化，來計算下一刻的位置與狀態，並將結果繪成預報產品，供預報員預測各種天氣系統的生成、消亡、移動及強度變化。

由於科技的限制，現時數值天氣預報的質量，仍未能盡善盡美。預報員應用數值天氣預報的好壞，和他們對數值預報的了解密切相關。他們需了解所用模式的性能和優缺點，模式中考慮和未考慮的物理過程，適用於什麼天氣，不適用於什麼天氣，以及存在問題等，恰當地結合預報經驗將數值天氣預報產品進行訂正，最大限度發揮數值天氣預報及預報員的潛能。



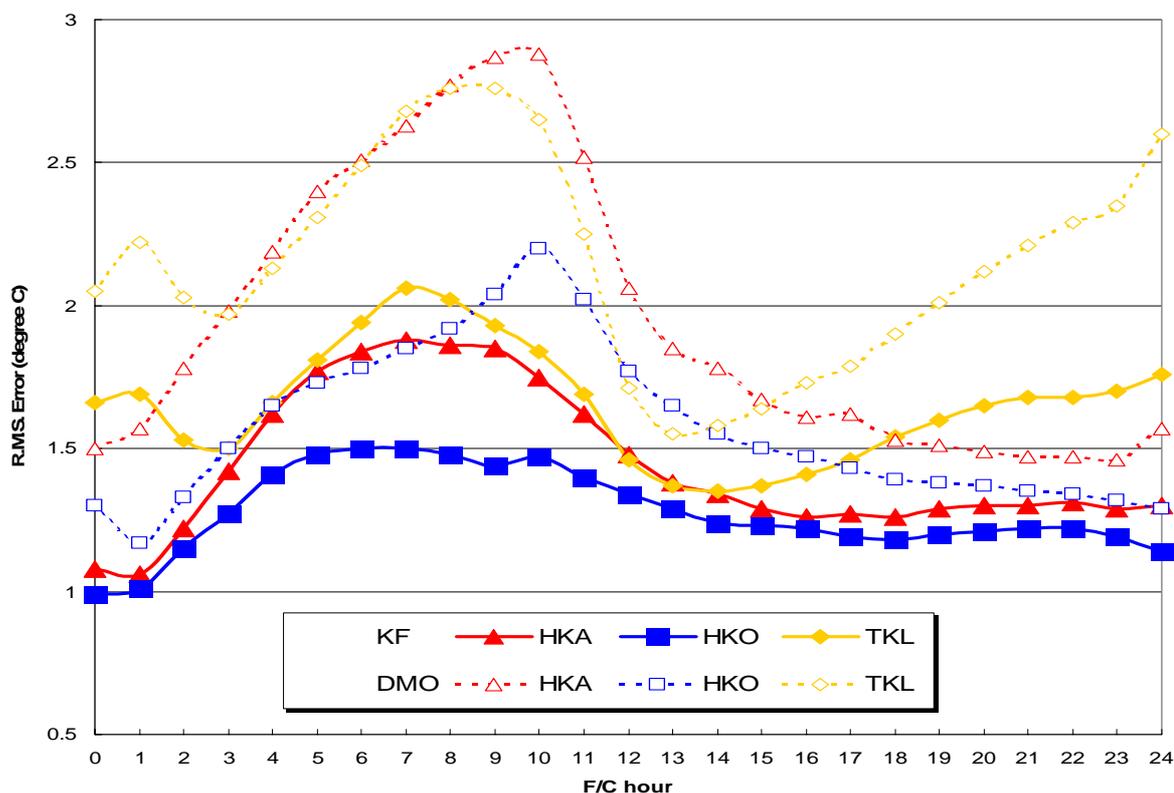
圖(一) 數值天氣預報圖

## 4.1.2 氣象要素預報

現時的數值天氣預報模式，除對天氣形勢外，對各種氣象要素(如風向、風速和溫度等)的預報(圖(二))，都能作出有用的指引。但必須指出的是，各種天氣要素的預報，由於科技的限制，其實際數值的準確度，仍有待改進，但其增加或減少的趨勢，則非常具有參考價值。



所有的數值天氣預報模式都或多或少帶有系統偏差 (systematic biases)，模式的直接輸出通常顯示該氣象要素的增加或減少的趨勢。如果要將它做定量預測，則有必要將系統偏差去除。在香港天文台，我們利用卡爾曼濾波將模式的直接輸出溫度的系統偏差去除，效果不錯 (圖(三))。



Verification results of Kalman-filtered ORSM temperature time series (00-UTC run, averaged over the period May 2000-June 2002)

圖(三) 經過卡爾曼濾波修正的 ORSM 模式溫度驗證結果時間序列 (2000年5月至2002年6月的平均)

目前有兩種方法把模式直接輸出，利用統計方法，解讀為具體的天氣情況。一種是完全預報法，即根據歷史資料選擇預報因子和預報量，建立統計預報關係式。使用時將數值預報的直接輸出放入建立的統計關係，求得所要預報的氣象要素。這個方法要求有較長的歷史觀察資料用以建立預報關係，同時要求預報結果相當精確。香港天文台利用完全預報法，建立了一個模式的「自動天氣預報」(圖(四))。

**AUTOMATIC WEATHER FORECAST**

8-DAY AUTOMATIC WEATHER FORECASTS  
(Using 18 Jul 2004 12 UTC JMA data and 18 Jul 2004 12 UTC ECMWF data)

Updated at 09:41 HKT 19 Jul 2004

Date		19/07/2004 (MONDAY)	20/07/2004 (TUESDAY)	21/07/2004 (WEDNESDAY)	22/07/2004 (THURSDAY)	23/07/2004 (FRIDAY)	24/07/2004 (SATURDAY)	25/07/2004 (SUNDAY)	26/07/2004 (MONDAY)
Weather	Model Ensemble								
		Sunny periods. A few Showers.	Cloudy. Showers.	Cloudy. Showers.	Mainly Fine. A few Showers.	Mainly Fine. A few Showers.	Fine.	Fine. A few Showers later.	Fine. A few Showers.
	JMA								
		Mainly Fine. Showers.	Cloudy. Showers.	Cloudy. Showers.	Fine. A few Showers.	Fine. A few Showers.	Fine.	Fine. A few Showers later.	Fine. A few Showers.
	ECMWF								
		Overcast. A few Showers.	Overcast. Showers.	Cloudy. Showers.	Cloudy. Heavy Showers.	Cloudy.	Mainly Fine.	Fine at first, becoming Cloudy later. A few Showers.	Cloudy with sunny periods. A few Showers.
Wind	Model Ensemble	South to Southeast Force 3 to 4.	Southeast Force 3.	East to Southeast Force 2 to 3.	East Force 2 to 3.	Light Winds.	Light Winds.	Light Winds.	East Force 2 to 3.
	JMA	South to Southeast Force 3 to 4.	Southeast Force 2 to 3.	East to Southeast Force 2 to 3.	East Force 2 to 3.	Light Winds.	Light Winds.	Light Winds.	East Force 2 to 3.
	ECMWF	Force 3 to 4, Occasional Force 5 Offshore.	Force 3 to 4.	Force 3 to 4, Occasional Force 5 Offshore later.	Force 3 to 4, Force 5 Offshore later.	Force 3 to 4.	Force 2 to 3.	Force 3 to 4.	Force 3 to 4.
Temp(°C) L - H	Model Ensemble	26 - 30	25 - 28	26 - 27	26 - 28	26 - 30	26 - 30	26 - 29	26 - 29
	JMA	26 - 30	25 - 28	26 - 27	26 - 28	26 - 30	26 - 30	26 - 29	26 - 29
	ECMWF	27 - 28	26 - 27	26 - 27	26 - 28	27 - 30	27 - 29	27 - 29	27 - 29
R.H. Range(%)	Model Ensemble	80-90	90-95	85-95	80-90	70-90	70-90	75-90	70-90

圖(四) 香港天文台的「自動天氣預報」

另外一種方法為模式輸出統計預報法。它是用歷史上數值預報得到的各種輸出，以及觀測資料和預報量之間建立統計關係式。使用時將模式直接輸出及觀測資料代入方程，就可得到預報量。這個方法可將預報模式的系統誤差在關係式內一并考慮，但若模式改進時，就需要另建統計關係式。

## 4.2 數值天氣預報模式的限制

### 4.2.1 預報模式出現誤差的原因

由於科技的限制，數值天氣預報的質量，仍未能盡善盡美。其原因有以下各點：

- (1) 首先，模式無論如何精細，它始終都只代表一個簡化了的大氣層，因此並不是每一個真實的物理過程都能表達。
- (2) 此外，模式的網格點雖已能精細至 10 公里以內，但始終仍有尺度較細小的天氣現象未能分辨。
- (3) 即使觀測沒有誤差，初始情況十足探知，大氣中某些物理過程或不能被模式表達、或會失真。更何況初始情況亦非十足探知，探測網絡的精密度不足是一個原因，例如海洋上的資料嚴重不足，而探測數據亦難免有誤差。
- (4) 最重要的一點可能是大氣根本是一個「混沌」系統，初始情況很微細的分別，隨時間的演變，有可能產生極不相同的結果。

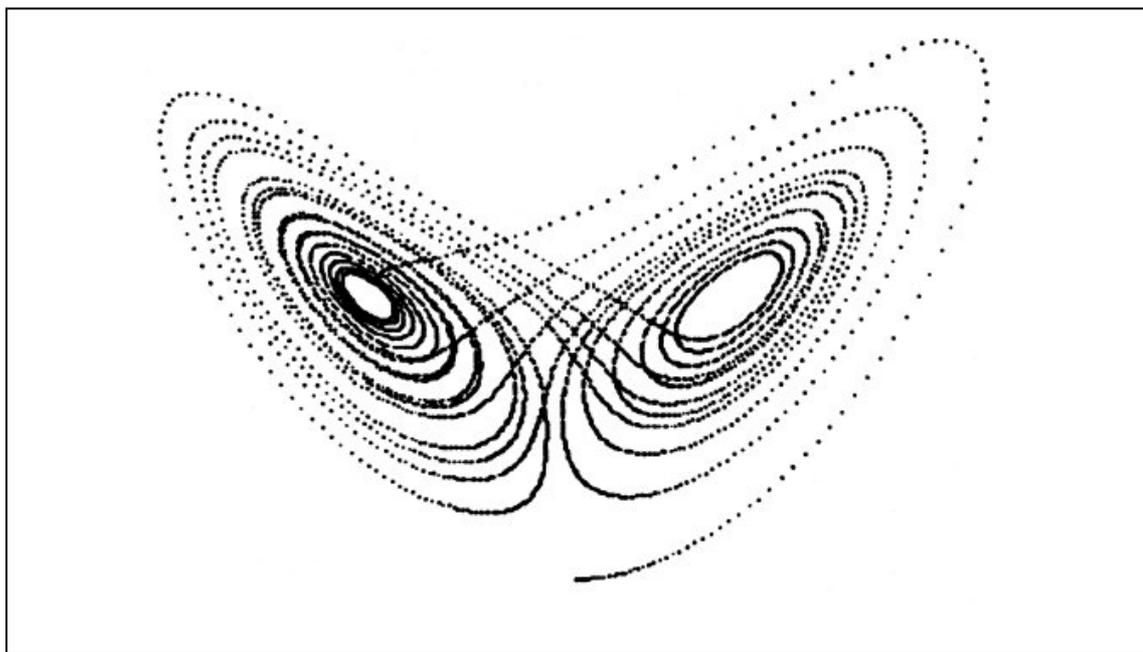
因此，數值天氣預報的預報時效有限。一些較大的天氣系統，例如冷暖氣團，預報時效可到一星期以上；但對較小的天氣系統如低壓槽和熱帶氣旋等，預報時效最多只有幾天；對香港夏季的暴雨，尺度就更小，而預測能力就更弱了。

所以我們使用數值天氣預報圖時，對數天後預報的尺度較細的天氣系統，如低壓槽和小型氣旋的位置，就要小心看待了。但數天後的大型環流狀況，則基本可信。

除預報時效的限制外，數值天氣預報模式對最初幾小數的預報亦有盲點。物理上，預報模式需要數小時的熱身 (spin-up)；實際上，初始資料亦需起碼一、兩小時才可傳到模式內。

## 4.2.2 混沌系統

發展「混沌」理論其中的一位先驅者是氣象學家愛德華·洛倫茲 (Edward Lorenz)。1960 年代初，洛倫茲利用計算機進行「數值天氣預報」試驗。他發覺只要輸入的資料存在些微差異，便足以令計算結果出現極大分別。這正表示，由於實際上氣象以至任何觀測都存在誤差，「數值天氣預報」在一定程度上也具有不可預測性。「差之毫釐，謬之千里」正好形容這種情況。洛倫茲這個發現，很多人稱為「蝴蝶效應」。這名稱或許出自洛倫茲在 1972 年以「可預測性：一隻在巴西翩翩起舞的蝴蝶可否於德克薩斯州引起龍捲風？」為題的演說，但它亦與洛倫茲的發現有明顯的關係。圖中酷似一隻蝴蝶的圖案其實就是洛倫茲的「數值天氣預報」試驗得出來的數據。蝴蝶左右兩翼代表了他發現的兩組由於些微的改變，而導致極不相同的計算結果。



圖(五) 洛倫茲的「數值天氣預報」試驗得出來的數據，圖案看來酷似一隻蝴蝶。

表面上，「混沌」理論看來非常深奧，但其實它與我們日常生活息息相關。從浪花的變化、水龍頭上水滴的節奏、閃電的位置、到股票市場的波動、「六合彩」攪珠的結果，都存在「混沌」理論所描述的不可預測性。

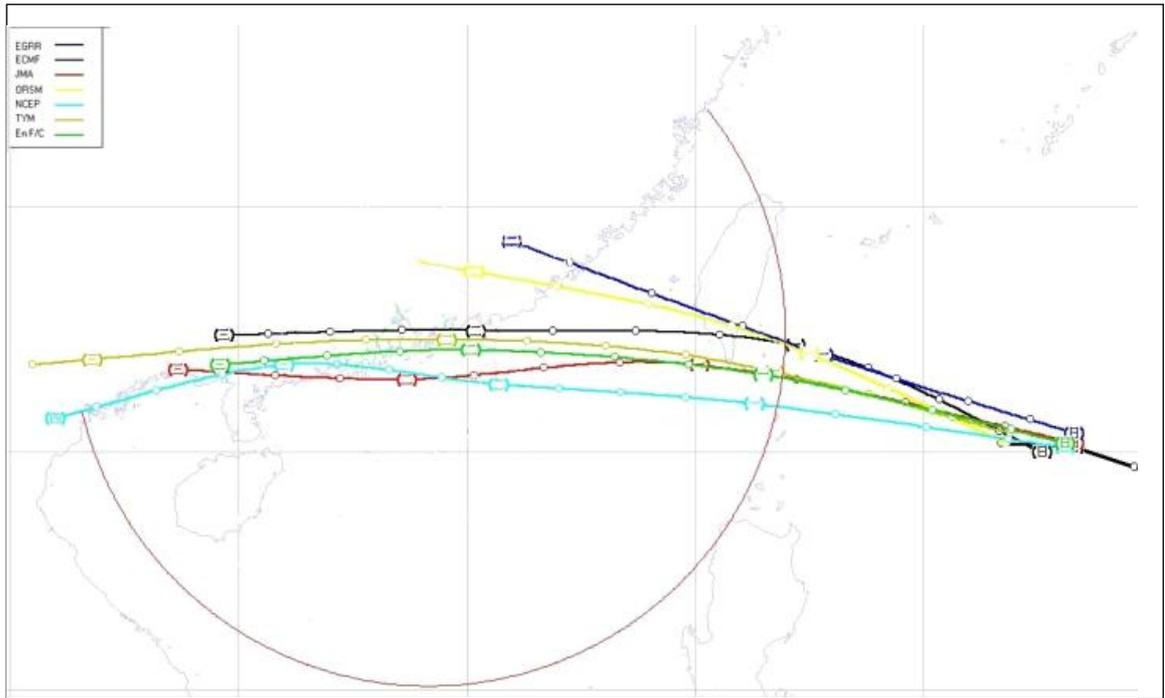
由於「混沌」理論的出現，氣象學家近年已考慮到觀測資料不足對「數值天氣預報」的影響，從而評估每一個預報的可信性。但無論如何，「混沌」理論已對長期天氣預報的發展起了很大的影響。它清楚地表示：我們在預測天氣或其他自然現象的能力頗為有限。在我們不斷努力追求更準確預測的同時，看來亦必須認識存在於大自然的極限。

### 4.3 集合預報

我們知道，初始情況稍有不同，數值天氣預報就可能得出完全不同的結果。此外，不同的模式可能得出不同的預報，那預報員如何選擇。現時一般都使用集合預報 (ensemble forecast) 去處理這個問題。

集合預報是將模式的初始情況稍微改變，然後再次做一次計算，作出預報。如是者再重複多次，得出一系列的預報，稱為集合預報。如果集合預報的結果基本吻合，預報的可信程度較高。相反，集合預報顯示可能出現的各種天氣情況，對預報員亦提供有用的參考價值。

由於需運算多次，集合預報對電腦的運算速度要求較高，不是每一個預報中心都能做到。另一方法是將不同模式的預報結果作為集合預報去應用，這稱為「窮人的集合預報」 (poor man's ensemble)。香港天文台近年利用不同模式的預報，建立了一套熱帶氣旋的路徑集合預報，有效地將預報熱帶氣旋路徑的誤差減低 (圖六)。



圖(六) 香港天文台的熱帶氣旋路徑集合預報