

# 區域預報系統氣壓梯度力與水汽分析之研究

林淑卿  
中央氣象局

彭順台  
美國海軍研究院

## 摘要

對數值模式採 $\sigma$ 座標而言，計算氣壓梯度力時，大項小差值造成頗大的截斷誤差的問題，是氣象學者至今尚未解決的問題之一。關於此方面的研究大體上分二類：一類是在 $\sigma$ 座標上，想辦法減小造成截斷誤差大的因素，例如將重力位分解為一水平無變化的平均參考場及與平均場之偏差值；另一類就將計算氣壓梯度力部份退回等壓座標上，如此失去了由 $p$ 轉換成 $\sigma$ 座標的優點，且會增加許多電腦之計算時間，對於每天預報模式而言，此法不經濟且不適合。Zheng and Lion(1986)提出方法是綜合上述二種之優點，將重力位分為初始值及與初始值之偏差，初始值是在積分尚未開始時在等壓座標上計算，偏差值才在 $\sigma$ 座標上計算。區域預測系統的客觀分析變數為高度場，風場與溫度場，然而水汽場之分析可改進降水之預報，水汽場較具局部性變化，相對於質量場與風場之代表性尺度而言，水汽場之尺度較小，因此其客觀分析方法有所不同。代表水汽之變數有露點溫度，汽壓與相對濕度等，客觀分析所採用之變數研究結果，選擇相對溫度做客觀分析之變數對buddy check及cross check之範圍有較合理的定義，分析結果較容易控制。以上二種修改對區域預測系統之降水分佈有所改進，對於預報場邊界產生大梯度的問題，亦有所改進。

## 一、前言

氣象之觀測資料是在等壓面上觀測，因此若將控制成程式之垂直標座標轉換到等壓面上，除了對於資料之使用較簡便外，質量守恒之連續方程式的形式較簡單；但對於下邊界地形高低起伏不定不容易處理，Phillips(1957)提出對地面氣壓作無因次化的 $\sigma$ 座標。採用 $\sigma$ 座標為垂直座標時，地球表面永遠為座標面，故地形高低起伏變化可自動納入而不會導致山脈附近非中差問題，在地形變化劇烈的區域特別有用。許多數值模式均採用此種可完成處理下邊界問題的 $\sigma$ 座標，然而附帶也在模式計算方面產生一問題，就是水平氣壓梯度力的計算。在 $\sigma$ 座標上之水平氣壓梯度力分為二項：一為等 $\sigma$ 面上之重力位差，另一為因座標轉換所產生地形高度差所造成之地形氣壓梯度。不幸地，在陡峭山脈地區，此兩項通常是符號相反大小相當，即所謂大項小差值，所以此種表示法會產生大的截斷誤差，許多學者專家從事於消除此誤差之研究，但到目前為止，尚未能發展出完全消除此截斷誤差之方法。Gray

(1973), Phillips(1974)定義一水平沒有變化，絕熱等熵之一參考大氣，然後將重力位場及溫度場分為參考大氣平均值及與參考值之偏差值，同理水平氣壓梯度力亦分成兩大部份一為平均場，一為擾動場，由於平均場水平方向之值沒有變化，因此平均場並沒有水平梯度之存在，只剩下擾動場之水平氣壓梯度力，此擾動場 $\sigma$ 面座標的水平氣壓梯度力項變成了絕對值較小，但符號仍相反的兩項。相對於大項小差值我們可稱之為小項小差值，其截斷誤差較小，也就是可提高計算氣壓梯度力之精確度。此方法有一缺點即如何定此平均參考場，因為以等熵面為參考場之擾動值仍很大。早期 Snagorinsk et al.(1967)所提出之方法是將計算氣壓梯度力時，將重力位內插到等壓面上計算，等壓面上之氣壓梯度力只有一項，然而此方法是在預報的每一時距(time step)均做 $\sigma-p$ 之內外插，除了太耗計算時間外，對於由前所提由 $p$ 座標轉換成 $\sigma$ 座標之優點也被埋沒了，即對上下邊界處理問題之優點。此種方法是將重力位分解為二部份，一為初始值，

另一為與初始值之偏差值。初始值是指模式尚未開始積分時 ( $t=0$ ) 之重力位高度場，此部份只在初始等壓面上計算一次即可，而在往後每一預報時距 ( $t=1$ ) 裡，則只計算偏差值在  $\sigma$  座標上之氣壓梯度力項。如此做法，可減小  $\sigma$  座標的兩項梯度值，因此在峻峭地區偏差所求得之氣壓梯度力項誤差較小。

目前中央氣象局區域預報系統中採用 Barnes 的客觀分析方法對風場，溫度場及高度場做客觀分析，唯缺水汽場之客觀分析。我們對此客觀分析系統做適度之修改，建立水汽場之客觀分析。

本報告，分別就 Zheng 及 Liou (1986) 所提出之水平氣壓梯度力計算方法進行討論且測試之，此為實驗一；並探討加入水汽場之客觀分析實驗，此為實驗二；第二章將描述實驗一的方法，第三章為實驗二加入水汽場之客觀分析實驗測試之探討，實驗三則為同時加入實驗一與二之測試；第四章則比較實際資料的測試結果；討論與結論敘述於第五章。

## 二. Zheng and Liou 方法之描述

在 Zheng and Liou (1986) 在右氣環流模式中  $\sigma$  座標系動量方程式中的處理，即將重力位分解為二項，一為積分初始之初始場，一為與初始場之偏差值，原作者在水平方向採用球面座標，若將此技巧應用在中央氣象局區域預測系統中，水平方向採用直角座標，垂直座標為  $\sigma$  座標系，氣壓梯度力採通量式，以  $x$ -分量為例，則為

$$P_x = -p_s \left[ \frac{\partial \phi_0}{\partial x} \right]_p - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (p_s \phi') \right]_\sigma - \left[ (RT' - \phi') \frac{\partial p_s}{\partial x} \right] - p_s \left[ \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right] \quad (1)$$

其中  $\phi_0$  為初始重力位， $\phi'$  為與初始重力位之偏差值， $p_s$ ：地面氣壓， $R$ ：氣體常數， $T'$  為與初始溫度之偏差值，下標表為所採用之垂直座標系。

其中  $p_0$  指  $t=0$  時之重力位，在  $t=0$  之氣壓梯度力在等壓面座標系上計算，計算過程是氣象變數在經客觀分析後，經過初始化之初始場已經在  $\sigma$  面上，我

們採用一有效的反覆內插以消除在  $\sigma - p$  面間內插所造成之誤差 (Zheng and Liou 1986)，將變數(包括重力位及溫度)內插回等壓面上；等壓面有(1000 mb, 925 mb, 850 mb, 700 mb, 500 mb, 400 mb, 300 mb, 250 mb, 200 mb, 150 mb 及 100 mb 等) 11 層上計算這幾層的氣壓梯度力，往後在每一積分時距 (time step) 中再計算預報所推算得之重力位與初始值差的偏差值，此時即在  $\sigma$  座標上計算。

若直接應用 (1) 式，則隱含了一個假設，即初始的 surface pressure 與往後積分的每一 time step 之 surface pressure 均相等，即  $p_{s0} = p_s$ ，但在數值模式採  $\sigma$  座標中，質量守恆--連續方程中有一方程就是 surface pressure 之預報方程，顯然 (1) 式是不對的，必須要加入因為  $p_{s0}$  與  $p_s$  之不同所造成之差異項，如下式

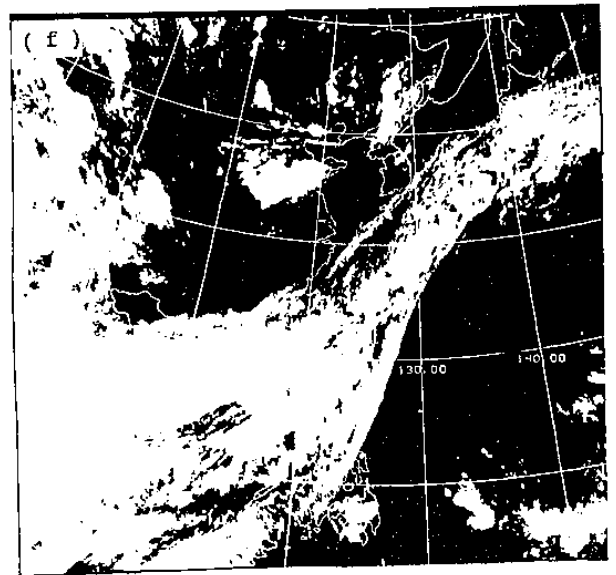
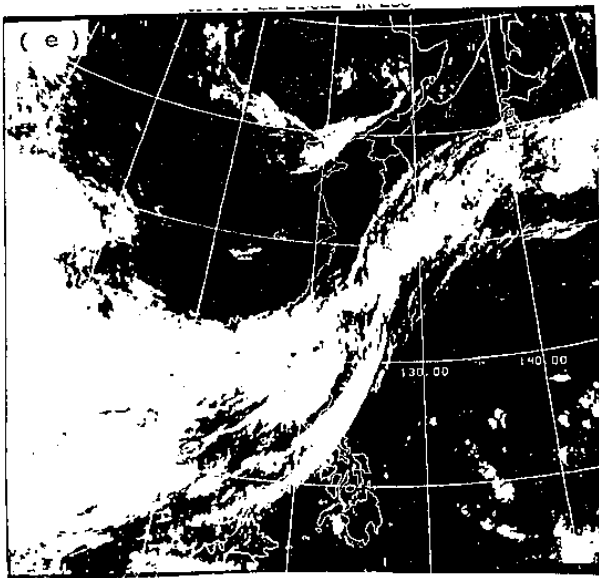
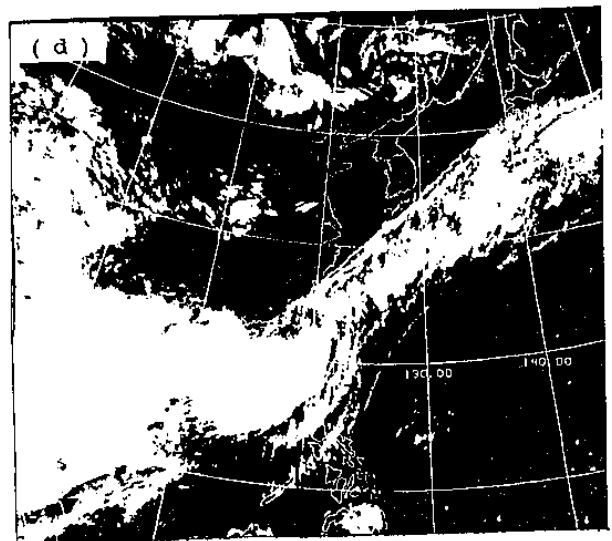
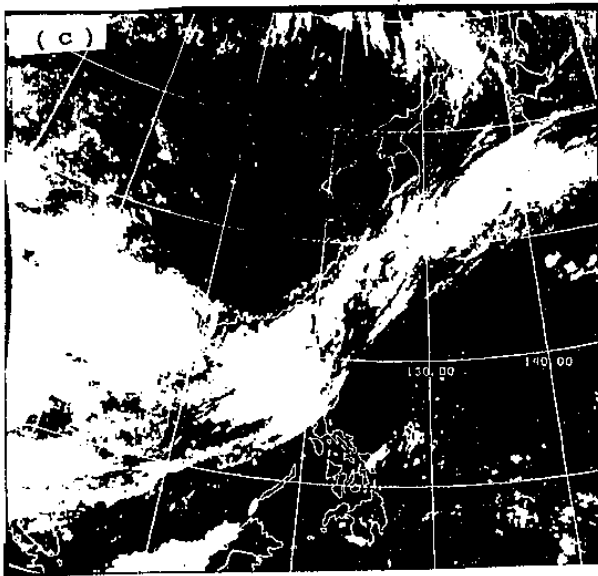
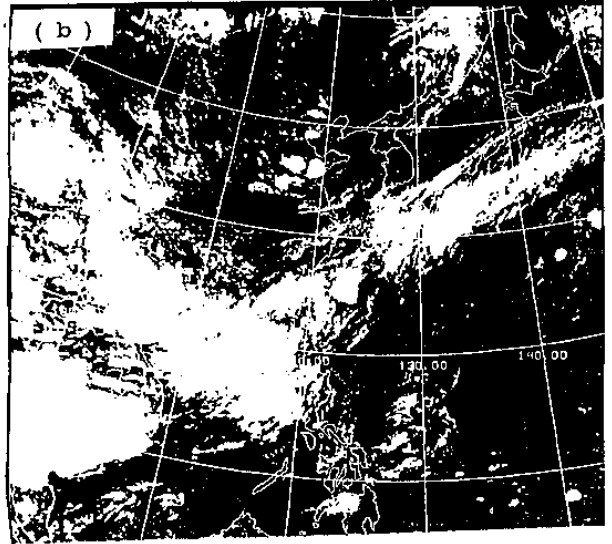
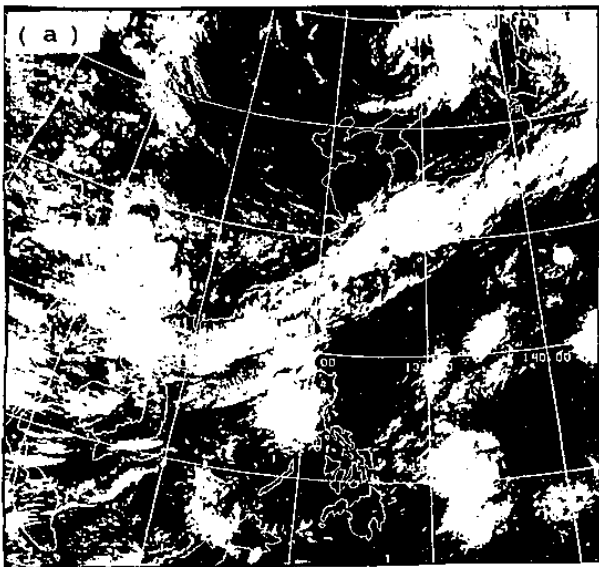
$$P_x = -p_s \left[ \frac{\partial \phi_0}{\partial x} \right]_{p_0} - RT_0 \left[ \frac{p_s}{p_{s0}} \frac{\partial p_{s0}}{\partial x} - \frac{\partial p_s}{\partial x} \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (p_s \phi') \right]_\sigma - \left[ (RT' - \phi') \frac{\partial p_s}{\partial x} \right] - p_s \left[ \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right] \quad (2)$$

在此想強調一點是原作者 (Zheng and Liou, 1986) 並未討論此問題，他們所使用的方程式中顯然是隱含了嚴重的假設。Zheng and Liou 方法可減少截斷誤差，但不幸地，加入此項則會增加截斷誤差，因此此方法對氣壓梯度力截斷誤差之改進有限。

## 三. 水汽場之客觀分析方法

水汽是大氣的主要成份之一，和大氣其它組成成份最大不同在於其含量並非固定，而是隨時間，空間有很大的變化。在數值天氣預報上水汽也扮演重要角色，Askins (1974) 及 Perker (1976) 指出在數值預報模式中，儘管水汽的最終分佈決定於動力場的分佈，水汽分佈對模式初期的雨量預報有很大的影響，而不正確的雨量預報亦會經由潛熱釋放，影響模式對整個大氣環流的預報結果。

目前區域預報系統採用 Barnes 的客觀分析方法對風場，溫度場及高度場做客觀分析，唯缺水汽場



圖一：80年6月21日至23日之衛星雲圖。(a)和(b)分別為21日00z及12z；(c)和(d)為22日00z和12z；(e)和(f)則為23日00z和12z之衛星雲圖。

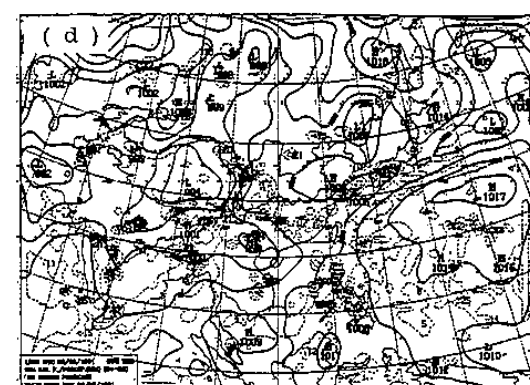
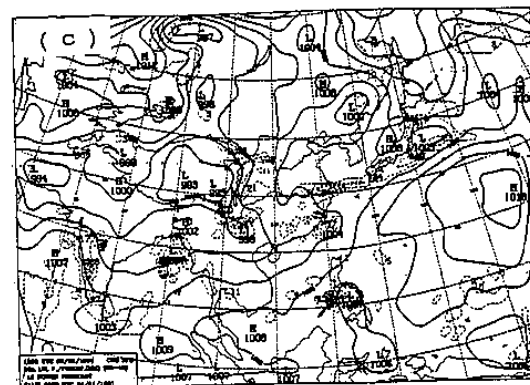
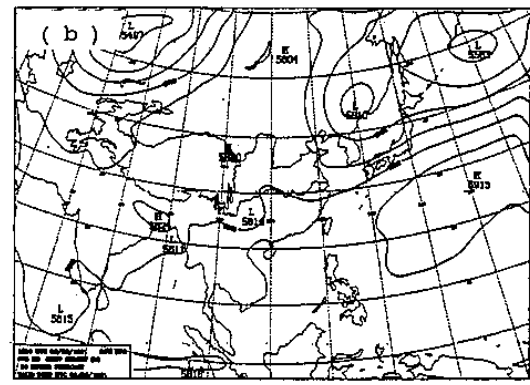
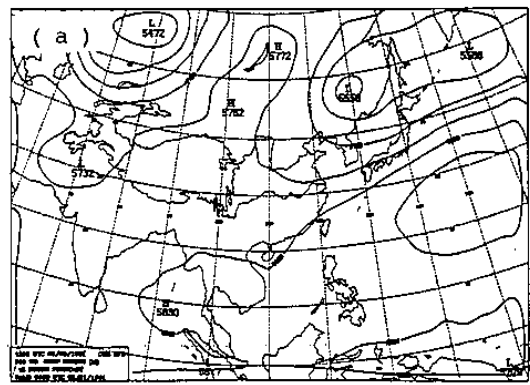
之客觀分析。吳對此客觀分析系統做適度之修改，建立水汽場之客觀分析，此為實驗三。水汽場客觀分析變數採用相對濕度(  $RH$  )，客觀分析中對觀測資料正確性之檢定有二，一為buddy 檢定，另一為cross 檢定。對水汽場而言，容許值在低層(100mb, 925mb, 850mb及700mb)定為30%，中高層(500mb, 400mb及300mb)定為20%，最高層(250mb, 200mb, 150mb及100mb)則定為10%。影響半徑由1600km改為800km。

#### 四. 實際個案之討論

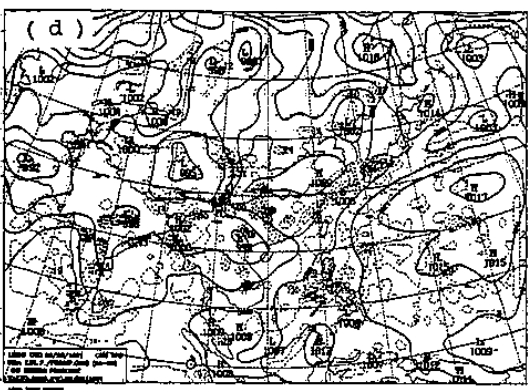
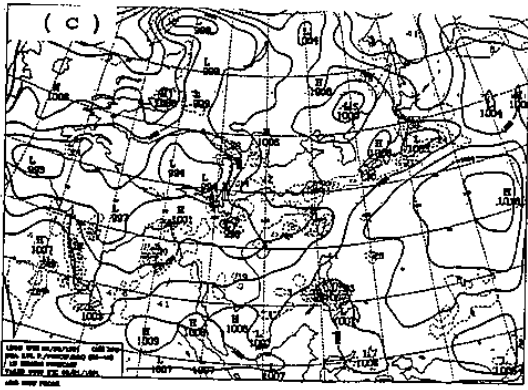
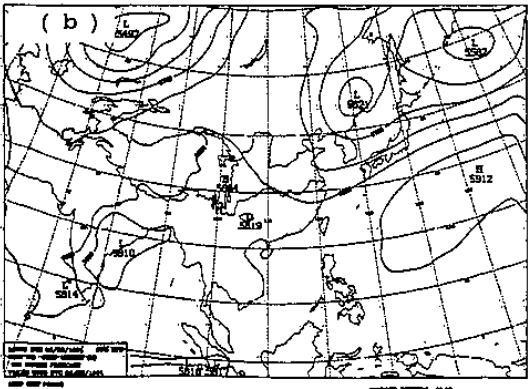
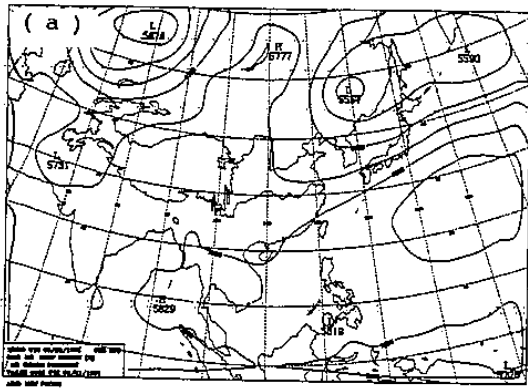
本研究將以民國80年梅雨季末期異常大降水，時間是80年6月20日開始至6月24日止，圖一為21日，22日及23日這段時間之衛星雲圖，由圖可知，這段期間台灣全省均沈沒於雲海之中，此異常降水帶來豐沛的水量全省從南部到北部均有降水，但由於水量過大造成大台北地區排水系統失控，市區到處積水，導致交通頓時癱瘓。以這段時間做研究，是因為取許多專家學者研究導致模式降水分佈預報不正確的原因可能是因為氣壓梯度力以及地形之處理不當所造成的，在春夏之間除了颱風降水外就是梅雨之雨季了。

我們的作法是下磁帶 TTPARC 的 SWFC7B 資料及觀測資料，重新跑(cold start 91062000 開始)做一個作業版及三個實驗，如圖二為作業版以1991年6月20日12z當初始場之預報場，圖二(a),(b)為500mb之12小時及36小時之預報場，圖二(c),(d)為地面氣壓場及降雨之12小時及36小時之預報場。實驗一是加入新氣壓梯度力處理( Zheng and Liou ) 即結果如圖三，圖三之(a),(b),(c),(d)分別對映於圖二之(a),(b),(c),(d)。由圖二與圖三可看出加入新的氣壓梯度力處理對預報結果不會產生不良效應，我們的觀念是只要不使模式之預報結果變差就表示是對的。

實驗二為加入水汽場之客觀分析實驗測試之探討，結果如圖四，圖四之(a),(b),(c),(d)分別對映於圖二之(a),(b),(c),(d)。由圖二與圖四



圖二: 80年6月20日12z作業版之預報場。(a)和(b)分別為500mb高度場12小時36小時之預報場，(c)和(d)實線分別為地面氣壓之12小時及36小時之預報場，虛線則是降水之12小時及36小時之預報場。

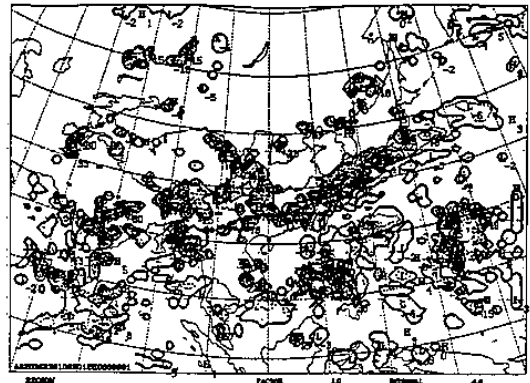


圖三：與圖二同，但為加入特殊氣壓梯度力處理。

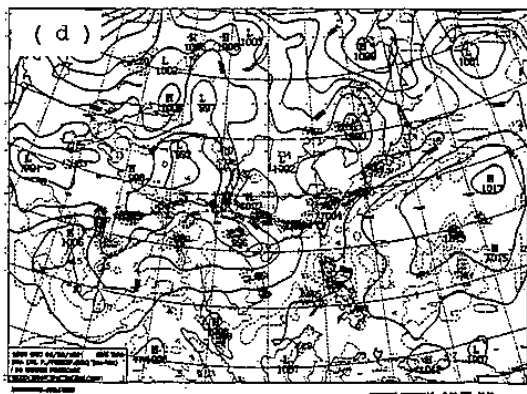
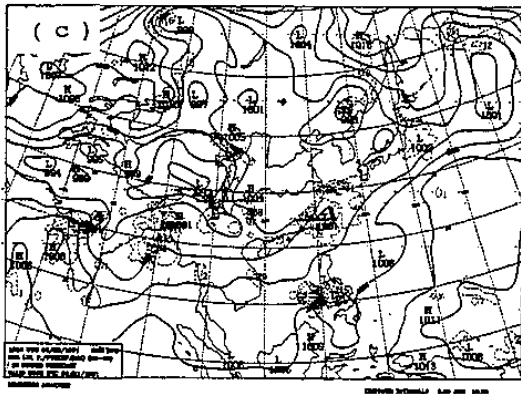
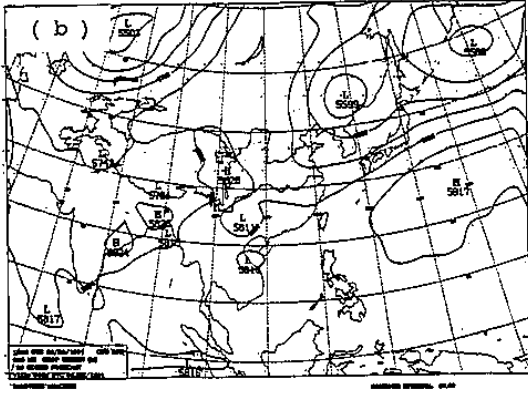
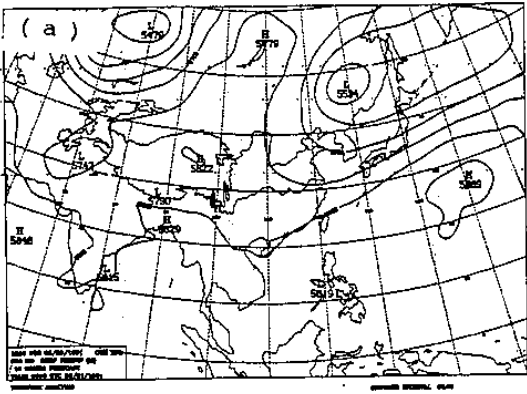
可看出加入水汽場之客觀分析對預報結果影響頗大，例如地面氣壓場之12小時預報場(比較圖二(c)，圖三(c)及圖四(c))，在太平洋邊界等值線密集的現象改進許多。另外對梅雨鋒面降水分佈之預報，分析結果顯示，加入水汽場之客觀分析實驗之預報較接近實際衛星雲圖，例如由日本向西南延伸經臺灣到華南地區之雲雨帶(比較圖一(a)，(c)，圖二(c)，(d)及圖四(c)，(d))。圖五為實驗二之36小時降水分佈預測與作業版之差異，由圖五的梅雨鋒面區域之極大極小值，可知兩實驗之降水帶位置有所差異。對於在太平洋邊界等值線密集現象的改進，我們的解釋是因為區域預報系統對風場，溫度場及高度場做客觀分析，唯缺水汽場之客觀分析，加入水汽場之客觀分析則使模式中預報變數在預報之初即達成平恆，因此在往後預報中變數間之調整較快。

實驗三乃綜合實驗一與實驗二，結果如圖六所示，受水汽場之客觀分析影響較大，因此在太平洋邊界等值線梯度大的現象有所改進，對梅雨鋒面降水分佈之預報亦掌握得較佳。圖七為實驗三之海平面氣壓36小時預測與作業版之差異，最大值達5.77 mb位於東邊界太平洋地區，最小值達-4.38mb位於黃河地區。

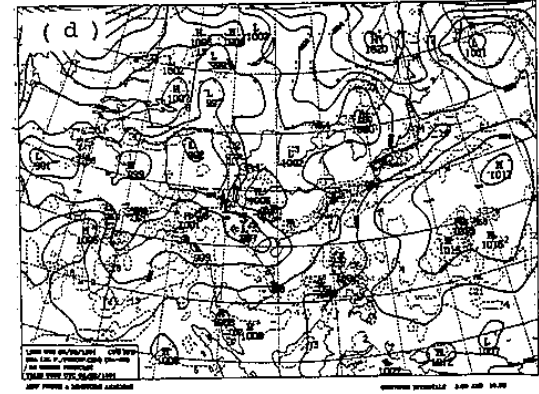
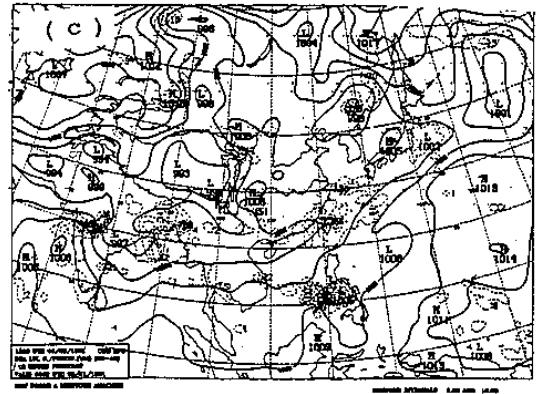
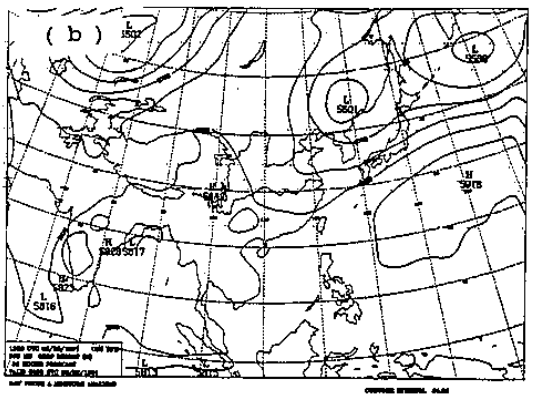
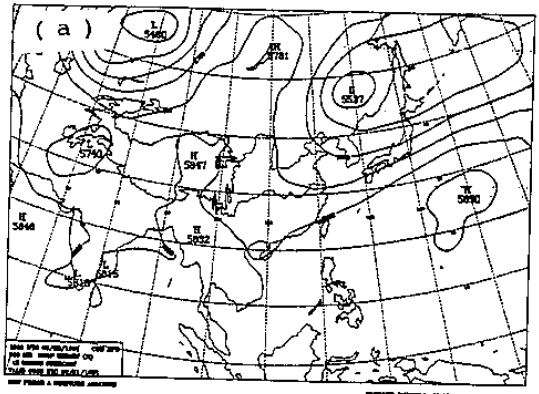
由以上之分析，我們所採用的觀念是只要不使模式之預報結果變差就表示是對的，加入特殊的氣壓梯度力之處理，對海平面氣壓而言，大至上沒有大的改變，加入水汽場之客觀分析實驗，在太平洋



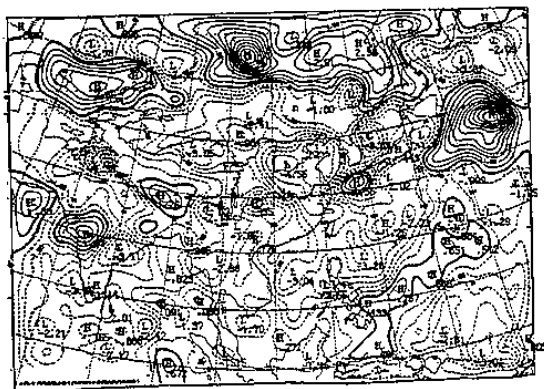
圖五：實驗二與作業版降水分佈之36小時預報場之差異。(實驗二減作業版)



圖四：與圖二同，但為加入水汽場之客觀分析。



圖六：與圖二同，但為加入特殊氣壓梯度力處理及水汽場之客觀分析。



圖七：實驗三與作業版海平面氣壓場之36小時預報場之差異。(實驗三減作業版)

邊界等值線密集的現象改進許多，對梅雨鋒面降水分佈之預報較接近實際衛星雲圖。

## 五. 討論與結論

Zheng and Liou(1986)所提出氣壓梯度力之處理方法，理論上似乎可減少截斷誤差。由於原作者對於公式之推導有所誤，後來雖然發現公式有誤，但是結果又不令人滿意(即對預報場影響似乎不大)，心中不經起許多疑點，為何原作者認為有助模式之模擬結果，猜想原因為可能是原作者模式等壓面座標的解析度相當高，以至於在每一時距預報所得之 $p_s$ 均可對應到初時所定的 $p_{s0}$ ，因此在 $p_s = p_{s0}$ 的假設下不會發生嚴重的誤差，而對於本局區域預報模式而言，等壓面座標僅1000mb, 925mb, 850mb, 700mb, 500mb, 400mb, 300mb, 250mb, 200mb, 150mb 及 100mb等11層，解析度不夠高。

在數值天氣預報上水汽扮演重要角色，加入水汽場之客觀分析，除了充分利用觀測資料外，並對模式之預測有所幫助。

## 參考文獻

Atkins, M. J., 1974: The Objective analysis of relative humidity, *Tellus*, 26, 663-671.

Gray, J. M., 1973: Estimate of truncation error in transformed coordinate, primitive equation atmospheric models, *J. Atmos. Sci.*, 30, 223-233.

Perkey D. J., 1976: A description and preliminary results from fine mesh model for forecasting quantitative precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1513-1526.

Phillips, N. A., 1957: A Coordinate having some special advantages for numerical forecasting. *J. Meteorol.*, 14, 184-185.

Smagorinsky, J., R. F. Strickler, W. E. Sangster, S. Manabe., J. I. Holloway, Jr., and G. D. Hembree, 1967: Prediction experiments with a general circulation model, *Proc. Internat. Sympos. on Dynamics of large scale atmospheric processes (Moscow, 1965)*, Izdatel'stvo Nauka, Moscow, pp. 70-134.

Zheng, Q. and K. N. Liou, 1986: Dynamic and thermodynamic influence of the Tibetan plateau on the atmosphere in a general circulation model. 43, 1340-1354.

# STUDY OF PRESSURE GRADIENT FORCE AND MOISTURE ANALYSIS OF REGIONAL FORECAST SYSTEM

Shwu-ching Lin  
Central Weather Bureau

Melinda S. Peng  
Naval Postgraduate School

## ABSTRACT

In the terrain following coordinate such as the  $\sigma$ -coordinate in numerical model the horizontal pressure gradient forces in the momentum equations as two terms. One is the geopotential gradient evaluated on the  $\sigma$  level. The other one is the correction to it due to elevated terrain which is computed by the terrain pressure gradient. Unfortunately, these two terms on the steep mountain area usually have opposite signs and have approximately equal magnitudes. Therefore large errors can be aroused from this expression. Many studies have been devoted to eliminate this errors in the past. However, none of the scheme proposed has been proved to be completely free of this error.

Two types proposed are a aiming to reduce error : one is proposed that only the deviation from some reference levels are used in pressure gradient term. The other one is proposed to interpolate the geopotential back to the pressure level at each time step and the pressure gradient force is thus computed on the level  $\sigma$ -surfaces. This scheme suffers a substantial computer time and also extrapolation are need in the bottom and top layers. In this study the scheme proposed by Zheng and Liou(1986) where the initial pressure gradient is computed on pressure surfaces and only the deviation from the initial part are computer on the  $\sigma$ -surface in following time step.

In the original configuration of RFS, the geopotential height, wind and temperature analysis were included, except moisture analysis. The relative humidity is the objective analyzed variable, and observed dry ball and dew point temperatures are used to computed the relative humidity. Tolerance levels for buddy and gross checks are reasonable. The impact of the moisture analysis on RFS is decidedly positive. After the implementation, the RFS consistently predicts better precipitation patterns, and the large gradient on boundary has been improved.