

三維變分分析法在中央氣象局全球資料同化系統之 應用研究

陳雯美¹ 周鑑本¹ 馮欽賜¹ 吳婉淑²

¹中央氣象局

²美國國家環境預報中心

摘要

本文主要在探討三維變分分析(3DVAR)在中央氣象局全球資料同化系統之應用研究。三維變分分析以其在有限的資源下對非傳統資料的同化能力及各氣象場間平衡關係的維持，成為目前世界各數值預報中心所積極發展採用之分析方法。中央氣象局全球資料同化系統在引進美國國家環境預報中心(NCEP)所發展的三維變分分析模式 SSI(Statistical Spectral Interpolation)後，積極進行各項應用測試。初步的測試結果顯示，較之本局目前作業採用的最佳客觀分析法(OI)而言，SSI 的分析增量具有較大空間範圍的結構性，且無論溫度場、風場及溼度場 SSI 的分析結果均較接近觀測資料。此外，亦同時以本局全球預報模式的歷史資料建置與模式相關之背景誤差資料，做為後續研究對 3DVAR 分析影響甚鉅之背景誤差對分析結果的影響。

一、簡介

近年來，三維變分分析法(3DVAR)已逐漸取代傳統的最佳客觀分析法(OI)，成為世界各主要數值預報中心資料同化系統中所使用的客觀分析方法。3DVAR 與傳統 OI 分析法主要的差異是 3DVAR 可以選擇與預報模式的預報變數密切相關的分析變數，例如以模式預報的 σ 面上的渦度、輻散度、溫度、地表氣壓(log 值)及混合比為分析變數，減少因變數轉換或內插所引進的誤差。其次，SSI 可以使用任何可以由分析變數導出的觀測資料類別，且在有限的計算機資源下使用鉅量的觀測資料，無須作資料的篩選。這在觀測技術精進，非傳統資料量遽增的今日尤其重要。

本局在人力及各項資源的考量評估下，決定引進最早使用 3DVAR 於預報作業，技術已趨成熟且成效卓著的美國國家環境預報中心(National Center For Environmental Prediction; NCEP)所使用的三維變分分析模組

——波譜統計內插分析法(Spectral Statistic Interpolation analysis; SSI)於本局的全球資料同化系統中。本文將介紹 SSI 及其在本局的建置與應用研究。文中第二節為 SSI 的簡介，第三節為結果，最後為討論。

二、波譜統計內插分析法(SSi)

SSI(Parrish and Derber,1992; Rizvi and Parrish,1994)與傳統 OI 的原理相同，即藉著最小化價值函數(cost function)而得到最佳的分析場。而價值函數乃由欲求得之分析場與背景場及與觀測資料之差值組成，二者的權重則分別由背景場誤差及觀測誤差決定。背景場一般取用預報模式的 6 小時預報。SSI 的價值函數寫成如下

$$J = \frac{1}{2} [x^T B^{-1} x + (Lx - y)^T O^{-1} (Lx - y)] \quad (1)$$

其中：

x 為 N 維的分析增量向量；

B 為 $N \times N$ 的預報誤差協方差矩陣(covariance matrix);

O 為 $M \times M$ 的觀測誤差協方差矩陣;

L 為將分析變數轉換成觀測變數的運算子;

y 為 M 維的觀測增量向量, 即

$$y = y_{obs} - Lx_{guess};$$

N 為分析的自由度;

M 為觀測點的個數。

求最小化 J 的 x , 即是求使 $\frac{\partial J}{\partial x} = 0$ 之 x 。

所以由(1)式得到

$$B^{-1}x + L^T O^{-1}(Lx - y) = 0 \quad (2)$$

將此式乘上矩陣 B , 重整後得到

$$(I + BL^T O^{-1}L)x = BL^T O^{-1}y \quad (3)$$

為了確保式中與 x 相乘的矩陣為對稱性且求解時有較好的收斂, 定義矩陣 C 使

$$CC^T = B, \text{ 並定義變數 } w \text{ 使 } w = C^{-1}x。$$

則(3)式可寫成

$$(I + C^T L^T O^{-1}LC)w = C^T L^T O^{-1}y$$

或簡寫成

$$Aw = f \quad (4)$$

其中

$$A = I + C^T L^T O^{-1}LC$$

$$f = C^T L^T O^{-1}y$$

(4)式即是 SSI 要解的方程式, 在 SSI 中採用線性共軛梯度法(linear conjugate-gradient algorithm; Gill et al., 1981)來求解 w , 一旦求得 w , 由 $x = Cw$ 即可得到分析場 x 。

SSI 的分析變數為 σ 面上的渦度(ζ)、輻散度的非平衡部分(D' unbalanced or fast part)、溫度的非平衡部分(T')、地表氣壓的非平衡部分($[\ln(P_s)]$)及混合比(q)之經驗正交函數(empirical orthogonal functions; EOFs)的振幅的波譜係數。質量變數的平衡部分與動量變數間以線性平衡關係聯結, 因此線性

平衡的限制條件(constrain)隱含於其中。SSI 這樣的分析變數選擇策略使得的分析結果可以直接為預報模式所使用, 無須經過變數轉換及內差的處理, 避免了這些過程可能引進的誤差。

預報誤差(B)及觀測誤差(O)決定背景場與觀測資料提供給分析場之訊息的相對權重, 在三維變分分析中是極為重要的。預報誤差的估算與三維變分分析的分析變數的選用有關, SSI 所使用的預報誤差是直接在波譜模式的 σ 面上由 45 個個案的 24 小時與 48 小時預報的波譜係數差計算得到(Rizvi and Parrish, 1994), 再依經驗將此預報誤差由 24 小時轉成 6 小時(為其資料同化週期)而應用於 SSI 的分析中, 根據 NCEP 初步的研究結果顯示此預報誤差受季節變化的影響並不顯著, 但預報誤差的使用仍有相當的研究空間。在觀測誤差方面則直接使用 DiMego(1988)及 Dey and Morone(1985)得到的統計結果。

三、結果

(一) SSI 在中央氣象局的建置

SSI 在中央氣象局建置的主要工作有: 配合不同的計算機系統所需的程式及應用程式庫的修改、與本局數值預報環境之聯結(使用本局的觀測資料及預報模式之預報為初始猜測場)以及由於預報模式解析度不同所需的修改。前二者屬技術層面, 在此不加贅述。由於模式解析度不同所需的修改最主要是在於背景誤差的使用, 為了驗證整個系統的建置無誤並且在以本局預報模式之預報場計算之預報誤差完成前之使用, 必須先將 NCEP 以其 T126 垂直 28 層的全球預報模式計算的預報誤差轉成本局模式 T120 垂直 18 層的解析度, 才能執行配合本局模式解析度的 SSI 之分析。由於 SSI 的背景誤差乃直接以波譜係數計算得到, 因此在改變解析度的轉換之後, 最好的驗證方法就是單點觀測資料的測試,

以其在物理空間的實際表現來驗證之。圖一及圖二分別是以垂直 28 層及垂直 18 層單點風東西分量觀測資料之測試的溫度及風場分析增量。觀測點位於西經 30 度、北緯 50 度的 250hPa 等壓面上。比較兩組圖顯示各變數的分析變量的形式(pattern)一致，只有增量值略為不同，這是由於位於 250hPa 上的觀測資料在不同垂直解析度上的相對位置略有不同所致。此結果確定 SSI 初步的建置成功。

(二) 個案測試

任取本局全球預報模式(Liou et al, 1997)的一個個案(在此所取之個案為 1999 年 12 月 1 日 00Z)進行個案分析，目的在比較已完成初步建置的 SSI 系統與本局目前作業使用的最佳客觀分析系統(滕等, 1988)之分析結果的特性。

圖三為此個案 OI 及 SSI 風場南北分量在第 8 層 σ 層上的分析增量。由於是使用同一組初始猜測場及幾乎相同的觀測資料，二者之正負區分布相當一致，但二者的尺度則有顯著的差異，相較之下，SSI 的分析增量較平滑，具有較大空間範圍的結構性，相對的，OI 的分析增量中則有較多的小尺度的系統且梯度較大。風場的東西分量及質量場的溫度分量也都有相同的特性(圖未示)。事實上，分析場的校驗是非常困難的，因為我們並不知道真實大氣的全貌，而決定分析結果與初始猜測場或觀測資料接近的程度的預報誤差與觀測誤差仍有諸多假設及取樣差異等有待開發研究，因此是可以調整的，且對數值預報作業而言，欲得的是最佳於預報模式的分析，因此檢驗預報結果是校驗分析結果很好的方式。圖四為 OI 及 SSI 之分析結果及其 24、48 小時預報的風向量及溫度以探空觀測資料校驗所得的垂直均方根誤差，由圖可以看到不論是分析或預報均以 SSI 的結果較為接近探空觀測資料。所以，由以上兩組圖的比較顯示 SSI 較 OI 之分析增量尺度

較大且較平滑，同時也較接近探空觀測資料，而預報誤差也有顯著的改進。但目前所建置的 SSI 仍沿用 NCEP 所使用的背景誤差及相關參數，因此並不是每個個案均有這樣的表現，以另一個個案(1999 年 12 月 5 日)而言(比較圖五中實線及虛線部分)，則以 OI 的預報有較好的表現。如果將由 24 小時預報誤差導成 6 小時的經驗參數調成原來的 2/3，也就是背景誤差變小，則其結果如預期般的分析場相對於探空觀測的誤差變大(比較圖五之虛線及點線部分)，但 24、48 小時則較原先參數設定所得的預報結果有顯著的改善，因此 SSI 必須針對本局的預報模式及觀測資料進行更多的研究測試，以得到最佳於本局的分析場。圖六是以本局全球預報模式約 20 個個案所建立的預報誤差統計資料進行單點風之東西分量觀測的測試結果，與圖一及圖二比較，各場增量的主要形式與之一致，但顯得有較多的雜訊，這可能是因為取樣個數太少造成。目前仍在持續收集資料以便得到較穩定的結果進行測試。

四、討論

SSI 已在本局完成初步的建置，但仍有許多參數有待進一步的測試研究，作適當的調整，以便得到適合本局全球預報模式的參數，而得到最佳於本局全球預報模式的分析場。因此，後續的研究測試大致可以區分為兩大類：一為 SSI 系統參數的調整與測試研究，一方面建立本局全球預報模式的預報誤差統計，一方面根據現有的基本觀測資料調整各參數以便產生對於模式的最佳分析場。其次則是觀測資料的使用。由於 SSI 不像 OI 本身即含有資料品質控制(QC)功能，因此其 QC 必須另外進行，目前我們擬採用的方式是仿照 NCEP 的，即採用 OI 形式的 QC，包含 gross check 及 buddy check，但在測試階段暫時先使用目前作業的 OI 所使用的觀測資料經其

QC 後輸出的資料，這樣的資料是經過 OI 限於計算機資源而篩選過的資料，且部分資料經過超觀測(supobs)的處理，但對 SSI 而言，則希望直接使用未經篩選及 supobs 處理的觀測資料。此外溫度觀測資料並非 OI 所使用，因此未經 QC。這些在在都顯示對 SSI 而言，觀測資料的 QC 是亟待解決的。當然，一旦本局可以取得更多的非傳統觀測資料，各資料的 QC 亦將是首要問題。

參考文獻：

滕春慈、劉其聖，1988：中央氣象局最佳客觀分析法的發展現況。天氣分析與預報研討會論文集編，17-22。

Dey, C.H., and L.L. Morone, 1985: Evolution of the National Meteorological Center global data assimilation system: January 1982-December 1983. Mon. Wea. Rev., 113, 304-318.

Dimego, G. J., 1988: The National Meteorological Center Regional Analysis

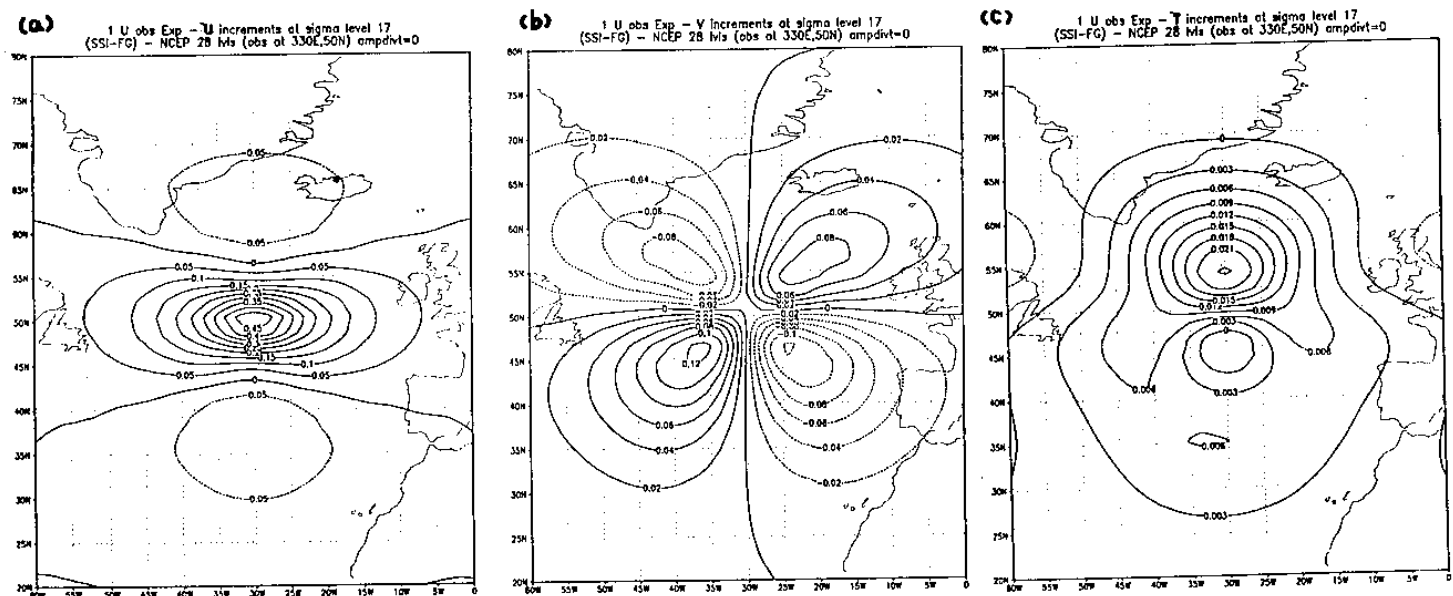
System. Mon. Wea. Rev., 116, 977-1000.

Gill, P. E., W. Murray, and M. H. Wright, 1981: Practical Optimization. Academic Press, 401 pp.

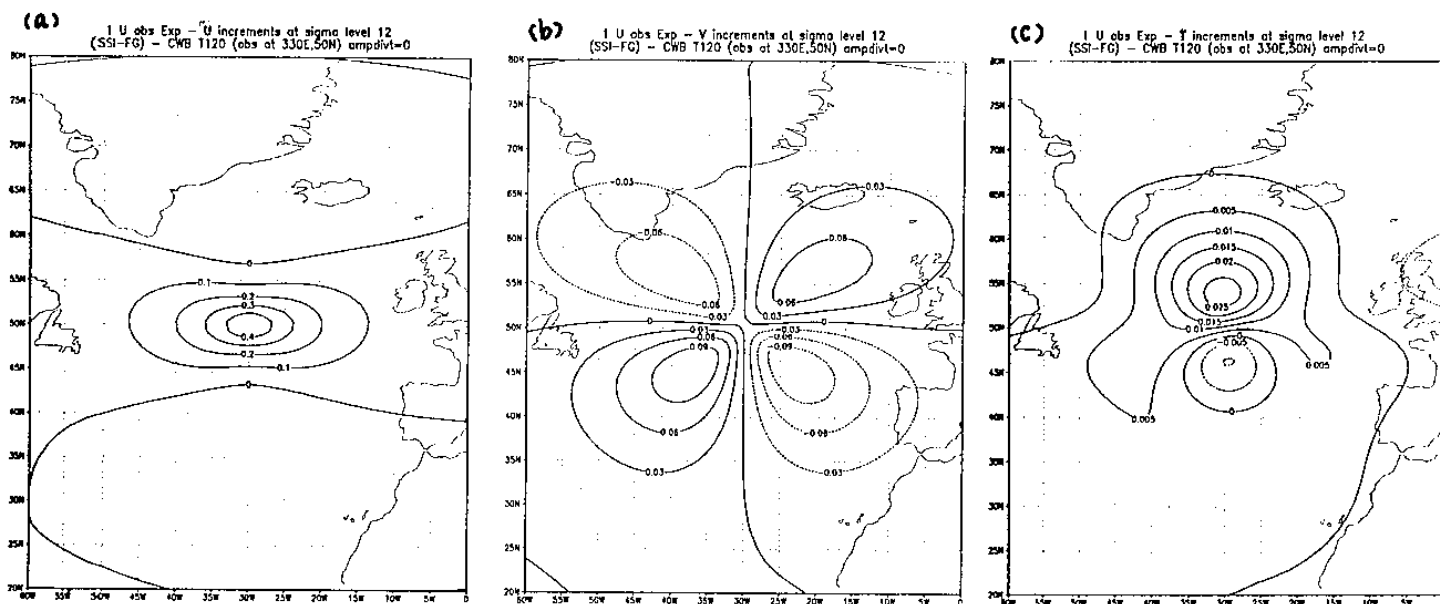
Liou, C.-S., J.-H. Chen, C.-T. Terng, F.-J. Wang, C.-T. Fong, T.E. Rosmond, H.-C. Kuo, C.-H. Shiao, M.-D. Cheng, 1997: The second-generation global forecast system at the Central Weather Bureau in Taiwan. Wea. Forecasting, 12, 653-663.

Parrish, D. and Derber, J., 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. Mon. Wea. Rev. 120, 1747-1763.

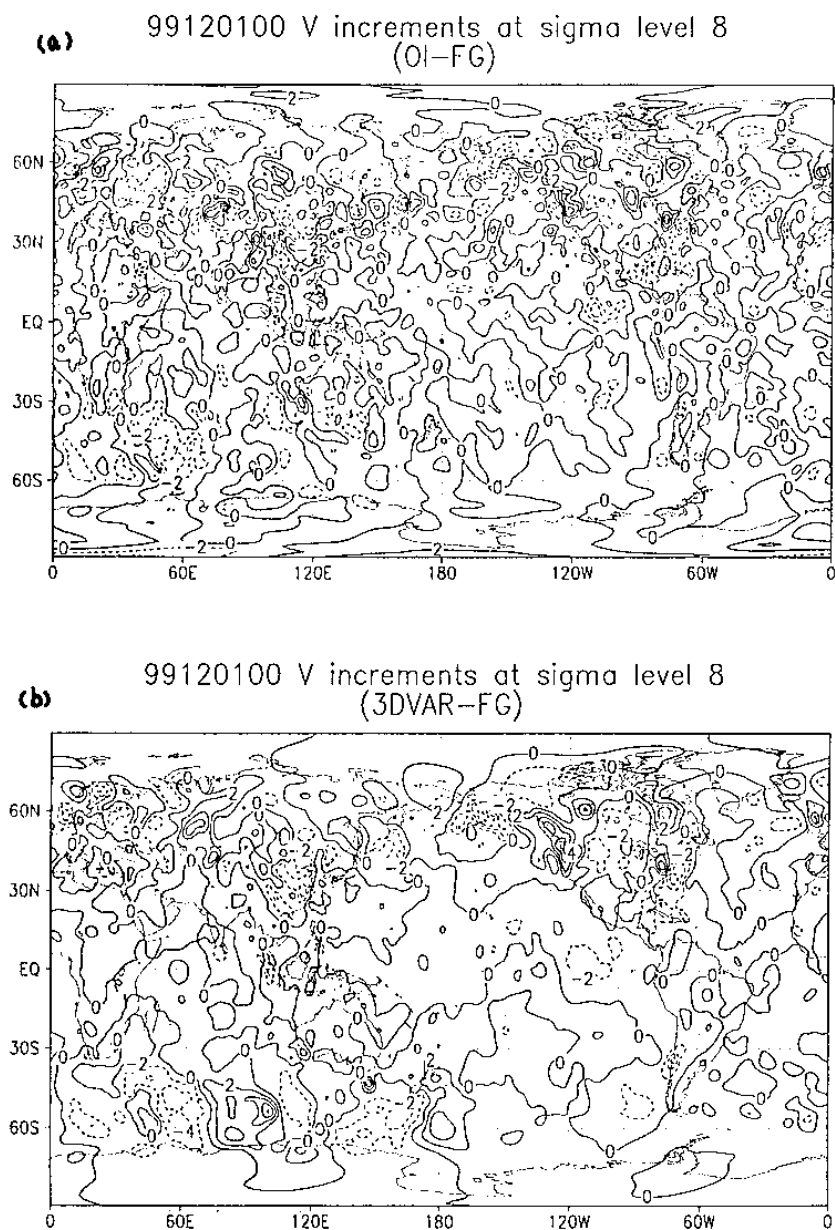
Rizvi S. R. H. and D. F. Parrish, 1994: Documentation of the Spectral Statistical Interpolation (SSI).



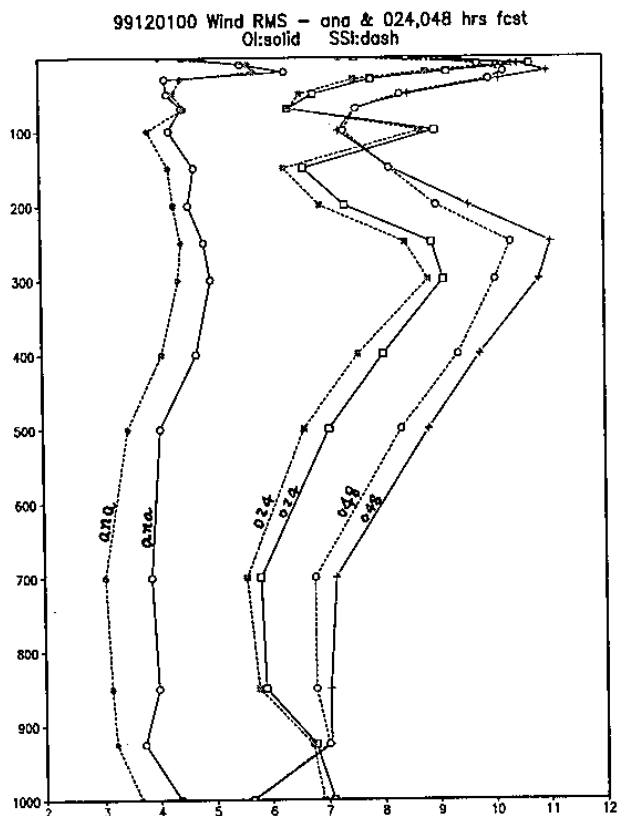
圖一、NCEP 垂直 28 層 U 觀測單點測試在第 17 層 σ 面上的分析增量。(a) U (b) V (c) T。



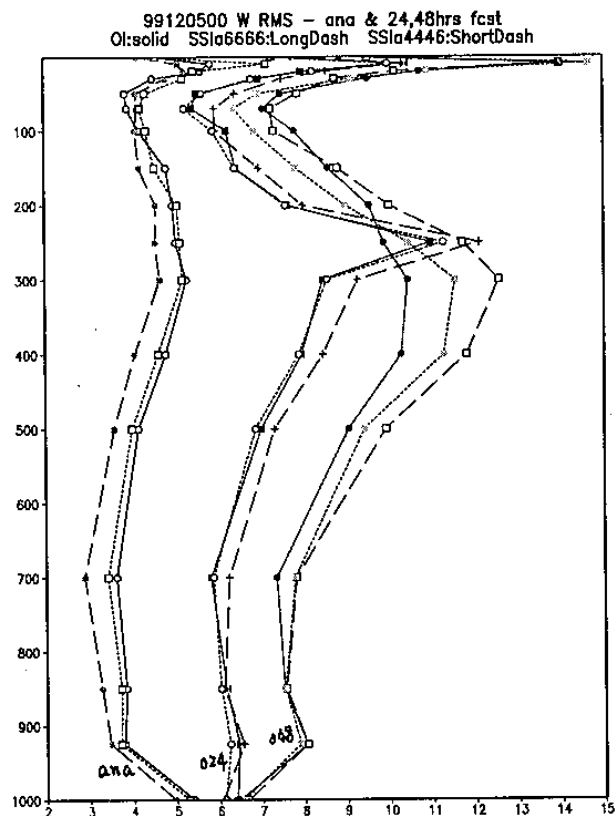
圖二、CWB 垂直 18 層 U 單點測試在第 12 層 σ 面上的分析增量。(a) U (b) V (c) T 。



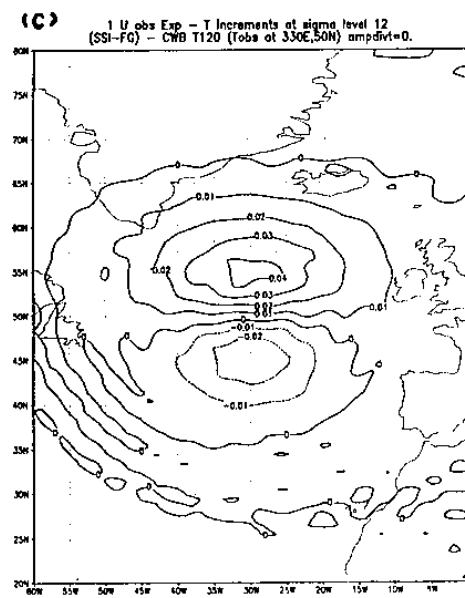
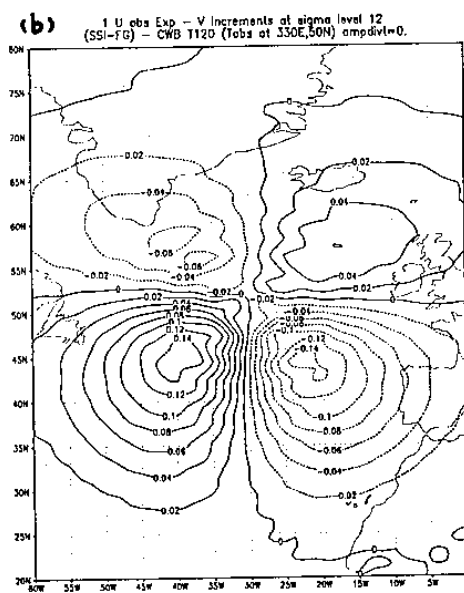
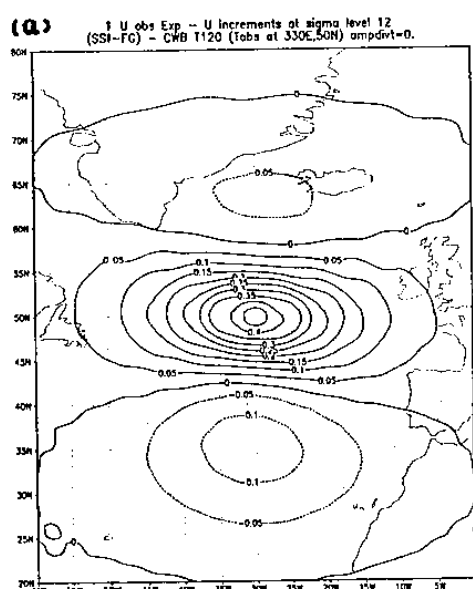
圖三、民國 88 年 12 月 1 日 00Z 個案在第 8 層 σ 面上 V 的分析增量。(a) OI (b) SSI。



圖四、民國 88 年 12 月 1 日 00Z 個案以探空資料為校驗資料得到的風場分析及 24、48 小時預報之均方根誤差垂直分布圖。圖中實線為 OI 的均方根誤差，點線則為 SSI 的。



圖五、民國 88 年 12 月 5 日 00Z 個案以探空資料為校驗資料得到的風場分析及 24、48 小時預報之均方根誤差垂直分布圖。圖中實線為 OI 的均方根誤差，虛線為 SSI 原始設定參數的，點線則為將 SSI 參數代以原先之 2/3 的誤差。



圖六、以本局全球預報模式之預報初步建立的預報誤差統計資料進行之 U 觀測單點測試的分析增量。(a) U (b) V (c) T。