

# GSI中TLNMC對中央氣象局全球數值預報系統之影響

陳雯美<sup>1</sup> 吳家苓<sup>1</sup> 沈彥志<sup>1</sup> 吳婉淑<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中央氣象局氣象科技研究中心

<sup>2</sup>美國國家環境預報中心環境模擬中心

## 摘要

數值天氣預報中初始分析場各變數間的不平衡可能會導致不真實的內重力的傳送，影響數值預報的品質。美國國家環境預報中心(NCEP)全球預報作業系統的三維變分分析系統(GSI)發展過程中為了改善各分析變數間平衡的問題，在GSI中建置了正切線性正模約束(tangent-linear normal-mode constrain; TLNMC)，在分析模組中進行類似正模初始化的功能，此功能對NCEP全球預報模式的預報成效有明顯的改善。本報告的目的即在探討TLNMC對中央氣象局全球數值預報模式的影響。

關鍵字：格點統計內插(GSI)，正切線性正模約束(tangent-linear normal-mode constrain)

## 一、前言

模式初始分析場的品質對數值模式的預報是非常重要的。中央氣象局全球數值天氣預報作業系統目前是採用NCEP的分析系統SSI(Spectral Statistical Interpolation, Parrish and Derber, 1992)進行資料同化以提供預報模式之初始分析場。而GSI(Grid Statistical Interpolation, Wu et al., 2002)則是NCEP在SSI的基礎上所發展且已於2008年5月在NCEP作業的新一代三維變分分析系統，二者最主要的不同在於SSI是在波譜空間進行分析，GSI則是在物理網格空間進行分析。

在物理空間進行分析的GSI主要優勢在於背景場誤差可以是非均向性(anisotropic)及非均勻性的(inhomogeneous)，可以與真實大氣特性較接近，但要有效率應用線性平衡關係卻是很困難的(Wu et al., 2002)，所以發展之初雖然各分析變數間經由統計關係已維持相當程度的平衡，其平衡關係並不如使用線性平衡關係的SSI(Parrish and Derber 1992; Wu et al., 2002)，而存在之不平衡仍有可能導致模式產生非真實的重力波，影響預報的品質。針對此問題NCEP在GSI中加入正切線性正模約束(Tangent Linear

Normal-Mode Constrain, TLNMC, Daryl et al., 2009)，TLNMC在NCEP的全球數值預報中有相當不錯的表現，也是促使GSI在NCEP得以作業的因素之一。本報告的目的即在探討GSI中TLNMC之功能及其對中央氣象局全球數值預報系統的影響。報告的第二部分將介紹GSI中的TLNMC，第三部分是實驗及結果，最後則是結論與討論。

## 二、TLNMC簡介

GSI中的TLNMC基本上是在分析模組中進行如預報模式中的初始化程序，目的在調整質量場和風場之間的關係。數值預報模式的初始化對數值預報有正面的影響是肯定的，但初始化在調整質量場與風場間的平衡過程中，可能犧牲了部分資料同化取自觀測資料的資訊。在分析模組中加入TLNMC的目的就是在避免分析完成後再做初始化所犧牲的觀測訊息前提下，藉由三維變分分析中的強約束(strong constrain)，提供預報模式一個質量場與風場有一定程度平衡關係的初始場，以提高預報的成效。

GSI是一個三維變分分析系統，所以其基本原理是藉由極小化一價值函數(cost function)，以得到趨近初始猜測場及觀測資料之最佳分析場，加入TLNMC

後，其價值函數  $J$  如下

$$J = \frac{1}{2} x_u^T B^{-1} x_u + \frac{1}{2} (Hx_c - y)^T R^{-1} (Hx_c - y) \quad (2.1)$$

其中  $x_u$  為非平衡分析增量、 $x_c$  為 TLNMC 平衡分析增量， $x_c = Cx_u$ 。B 是背景場誤差協方差(background error covariance)、y 為觀測偏差(即觀測資料與初始猜測場差)、R 為觀測誤差協方差、H 為觀測運算子(the observation operators)，目的在轉換分析變數為觀測變數及其位置。C=I-DFT 為一 TLNMC 運算子，其中的 D 為用來減少重力波趨勢的修正矩陣，GSI 採用 Machenhauer-style，F 為投影至重力波的矩陣，T 則為正切線性趨勢模式。

以  $x_c$  來表示(2.1)式，則可以寫成

$$J(x_c) = \frac{1}{2} x_c^T (CBC^T)^{-1} x_c + \frac{1}{2} (Hx_c - y)^T R^{-1} (Hx_c - y)$$

所以  $CBC^T$  可以看成是 TLNMC 平衡增量  $x_c$  的有效背景場誤差協方差(effective background error variance)，對 GSI 而言，溫度與風場間的關係是用 NMC method 統計導出的參數(Wu et al. 2002)，也就是 B 是固定的且為緯度與高度的函數，與初始猜測場無關，而  $CBC^T$  則是一與初始猜測場相關的協方差。

### 三、 實驗及結果

由於單點觀測資料實驗簡單且容易解釋，常被用來評估同化系統中觀測誤差及背景誤差權重的影響及其結構，也可以用來診斷同化系統改變所造成的影響。在完成 GSI 在中央氣象局全球數值預報系統建置後，針對 GSI 中的 TLNMC 進行了單點觀測資料實驗。圖一為單點溫度觀測實驗的結果，觀測資料位於 45°N、180°E 的 500hPa 等壓面上，觀測與初始猜測場的差是 1°K。圖一(a)到(c)分別是不用 TLNMC 及使用 TLNMC 的分析增量(分析場與初始猜測場之差)以及二者分析場的差值。結果顯示二者分析增量的結構非常近似，均呈現以觀測資料為中心向外遞減的結構，由(c)圖二者的差異可知使用 TLNMC 所造成的差異約為 2%。圖二(a)到(c)是此溫度增量引發的風場東西分量的分析增量及其分析場的差值，二者都顯示一較暖的溫度上方對

應的反氣旋環流結構，最強的地方出現在約 300hPa 處，圖(c)的差異場則顯示使用 TLNMC 有加強此反氣旋環流的效果，使用 TLNMC 使分析增量增加約 12%。因此，雖然統計多變數背景場誤差可以描述大部分的質量場與風場間的平衡關係，但結果顯示 TLNMC 可以進一步加強此平衡關係。這與 NCEP 的測試結果一致(Kleist et al, 2009)。

GSI 的背景場誤差是用 NMC method 統計導出的參數(Wu et al. 2002)，目前背景場誤差，即(2.1)式中的 B，是緯度及高度的函數，且是固定的、與初始猜測場無關，這可以由圖三(a)的結果顯示。圖三(a)選取地表氣壓相近的兩點(45°N、175°E 及 45°N、193°E)進行 500hPa 等壓面上的單點溫度觀測實驗，結果顯示兩個觀測點分析增量的結構及大小在同一緯度是相同的。而使用 TLNMC 的結果如圖三(b)，由於這兩個觀測點位置上的初始猜測場並不完全相同，所以造成二者分析增量的極值及結構的不同，與圖三(a)未使用 TLNMC 的極值及結構也略有不同，也就是前述使用 TLNMC 時，其有效背景場誤差  $CBC^T$  是與初始猜測場相關的。

接著利用不同分析場經預報模式中初始化過程所做的調整差異來進一步了解 TLNMC 對分析的影響。圖四為分析場進入模式後初始化過程前後地表氣壓的差異。以目前作業的 SSI 經模式初始化過程所做的調整做參考(圖四(a))，SSI 的結果顯示地表氣壓的調整值約為-0.4 至 0.4hPa 之間，主要分佈在傳統資料較多的北半球的陸地。圖四(b)則是 GSI 未使用 TLNMC 的調整值，相對而言其調整值較 SSI 的大，且在傳統觀測資料分佈較少的南半球，也有明顯的調整，這應該是初始猜測場間存在質量場與風場的不平衡所致。圖四(c)則顯示 GSI 使用 TLNMC 後的調整值較小，與 SSI 的值接近。由此可知，TLNMC 確實加強了分析場與風場間的平衡關係，因此模式初始化流程所需調整的量就較小了，與 SSI 較不同的是在傳統觀測資料分佈較少的南半球也有相當的調整。

前面的結果顯示 TLNMC 對分析場各變數間的平衡的貢獻，但資料同化最重要的任務是提供預報模式最佳之初始場以提升其預報成效，因此須進一步探討其對預報的影響。GSI 中 TLNMC 的設計中有一參數

NVMODES\_KEEP 用來調整初始化使用的正模個數，這是一個可以調整的經驗參數，目前 NCEP 的設定是 8，但中央氣象局全球數值預報模式的解析度 (t240130) 與 NCEP (t382164) 的差異很大，怎樣的值才有利於我們的模式，需要進一步的測試。針對此我們以中央氣象局全球數值預報系統進行相關的平行測試，平行測試的時間是 2007 年 12 月 21 日 00Z 至 2008 年 1 月 31 日 12Z，進行每天四次、間隔 6 小時的資料同化流程 (6 小時 update cycle)，同時於每天 00Z 及 12Z 進行 120 小時的預報。以測試初始的 10 天左右做為系統改變的調整期 (spinup)，只分析 2008 年 1 月 1 日至 31 日的結果，使用的觀測資料是包括探空、地面、飛機及反演衛星風等傳統觀測資料，共進行三組實驗，一為未使用 TLNMC 的比較組實驗 (實驗 NoTLNMC) 及另兩組分別取 NVMODES\_KEEP 值為 4 (實驗 TLNMC4) 及 1 (TLNMC1) 的實驗。圖五是北半球及南半球一到五天預報的平均 500hPa 高度場距平相關，圖五 (a) 顯示實驗 TLNMC4 結果較實驗 NoTLNMC 差，但實驗 TLNMC1 的結果則較 NoTLNMC 的略好。以五天預報為例，實驗 NoTLNMC、TLNMC4 及 TLNMC1 一月的平均距平相關分別為 0.812、0.809 及 0.813，TLNMC1 的結果最好，但相差非常小，僅 0.1% 左右；在南半球 (圖五 (b)) 使用 TLNMC 的實驗 TLNMC4 及 TLNMC1 則明顯較實驗 NoTLNMC 差許多。圖六南、北半球 500hPa 高度場五天預報的均方根誤差日變化圖顯示各實驗日變化趨勢相當一致，實驗 NoTLNMC、TLNMC4 及 TLNMC1 的一月份的平均均方根誤差分別為 73.00、73.22 及 72.77 公尺，以 TLNMC1 的為最好，但差異也只有 0.3% 左右；與距平相關結果相同的是南半球 500hPa 高度場五天預報的均方根誤差，使用 TLNMC 的實驗 TLNMC4 及 TLNMC1 均較實驗 NoTLNMC 差許多 (圖六 (b))。圖七是熱帶地區 250hPa 及 850hPa 三天預報之風場東西分量的均方根誤差日變化圖，各實驗日變化趨勢相當一致，但隨個案各實驗的誤差值大小互現，整個月的平均值差異雖然不大，仍以未使用 TLNMC 的兩組實驗之誤差略大。

以上的結果顯示對預報的影響而言，在中央氣象局全球預報系統的測試結果與 NCEP 的結果非常不同，NCEP 的測試結果顯示不論南、北半球使用 TLNMC 均能改善預報結果，南半球的改善尤其明顯 (Kleis-

et al, 2009)。比較我們與 NCEP 的實驗，除了使用的預報系統不同及其解析度不同外，NCEP 除使用傳統觀測資料外並大量同化非傳統觀測的各類衛星資料 (如衛星輻射觀測及 GPS 觀測)，而氣象局現階段的測試考慮與預報作業的比較，只用傳統觀測資料做測試，二者資料量及分佈的差異都非常大，這可能是造成 TLNMC 無法發揮的可能原因，值得進一步測試。

#### 四、結論與討論

模式初始分析場的品質對數值模式的預報是非常重要的。NCEP 在發展 GSI 過程中為了加強各分析變數間的平衡關係，並避免在完成分析後再進行初始化會損失取自觀測資料的寶貴訊息，在 GSI 中發展了 TLNMC，TLNMC 在 NCEP 的全球數值預報中有相當不錯的表現，本報告的目的即在探究 TLNMC 對中央氣象局全球預報模式的影響。

溫度單點觀測資料實驗的結果顯示 TLNMC 對會加強其所引發的反氣旋環流，並使有效背景場誤差具有與初始猜測場相關的特性，在不同位置背景場誤差會因初始猜測場不同而調整，模式初始化過程前後的差異也證實 GSI 中之 TLNMC 能加強分析場之質量場與風場間的平衡關係。但平行測試顯示 GSI 使用 TLNMC 的分析結果對中央氣象局全球數值預報的影響不若 NCEP 有明顯改善，結果顯示對北半球有非常小的改善，對南半球則反而變差，探究其可能的原因為 (1) 平行測試只使用傳統觀測資料，觀測資料量較少且分佈不均勻；(2) 目前使用的背景場誤差是由 NCEP 移植而來的，所用的設定也是參考 NCEP 的，針對氣象局的作業模式仍須作進一步的修正，這也可能影響 TLNMC 的效果。以上均為未來本局 GSI 使用 TLNMC 必須探究的方向。

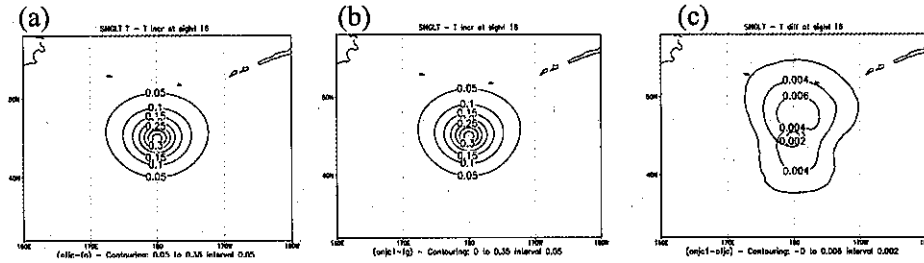
#### 參考文獻

- Kleis D.T., J.C. Derber, R. Treadon, D. Parrish, R. Errico, and R. Yang, 2008: Improving incremental balance in the GSI 3DVAR analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, in preparation.
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral

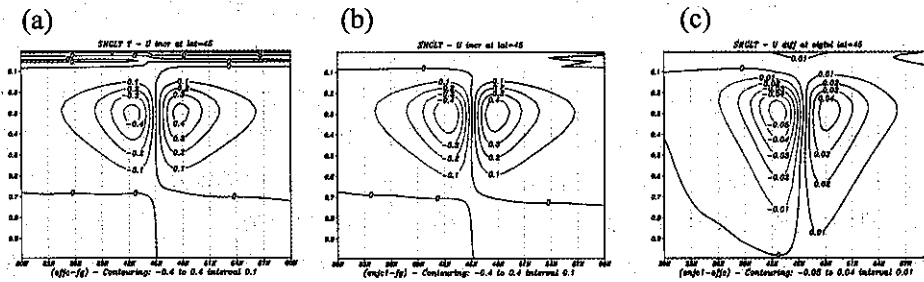
statistical-interpolation analysis system.  
 Mon. Wea. Rev., 120, 1747-1763.

Three-dimension variational analysis with  
 spatially in homogeneous covariances. Mon.  
 Wea. Rev., 130, 2905-2916.

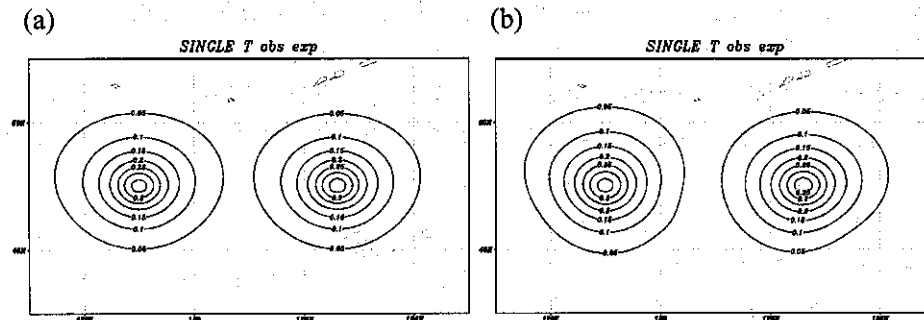
Wu, W.-S., R. J. Purser, and D. F. Parrish, 2002:



圖一：溫度觀測資料位於 45°N、180°E 的 500hPa 等壓面單點觀測資料實驗，模式 sigma 第 16 層之 (a)未使用 TLNMC 之溫度分析增量 (b)使用 TLNMC 之溫度分析增量 (c) 使用與未使用 TLNMC 之溫度分析場差。

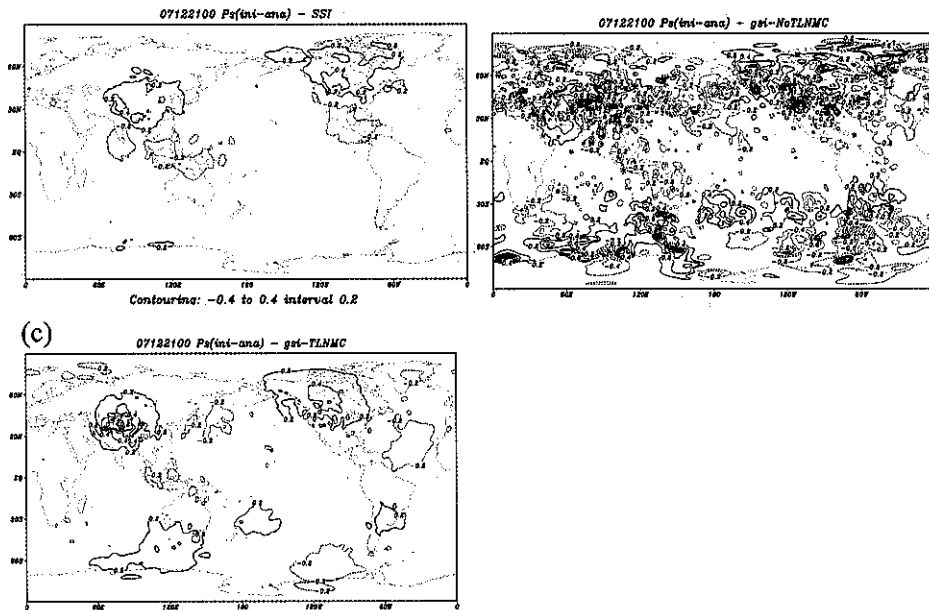


圖二：同圖一之單點觀測資料實驗，但為 180°E 風東西分量之 (a)未使用 TLNMC 分析增量 (b) 使用 TLNMC 分析增量 (c) 使用與未使用 TLNMC 分析場差。

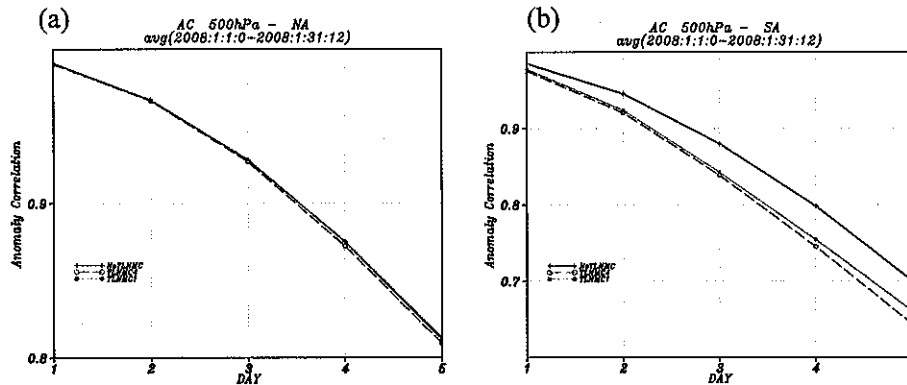


圖三：溫度觀測資料分別位於 45°N、175°E 及 193°E 的 500hPa 等壓面的兩組單點溫度觀測實驗之溫度 (a) 未使用 TLNMC (b) 使用 TLNMC 分析增量。

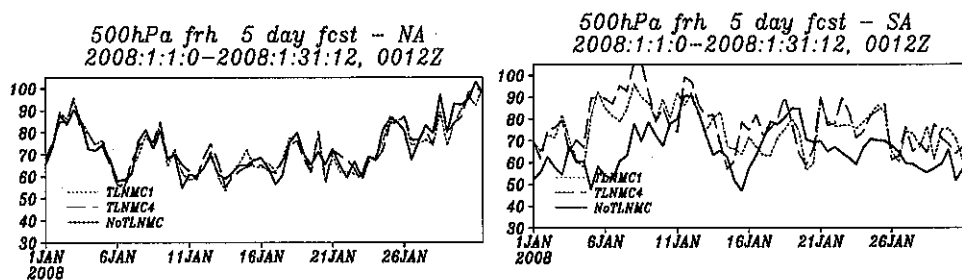
(a) (b)



圖四：地表氣壓模式初始化後與分析場的差值 (a) SSI，等值線間距為 0.2hPa (b) GSI 未使用 TLNMC，等值線間距為 0.4hPa (c) GSI 使用 TLNMC，等值線間距為 0.2hPa。



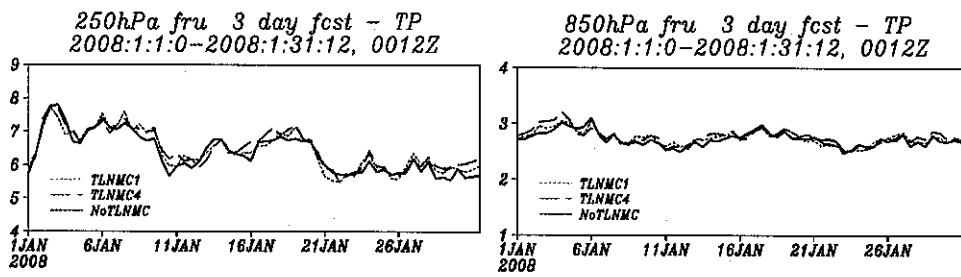
圖五：2008 年 1 月 1 日 00Z 至 31 日 12Z 一到五天預報平均 500hPa 等壓面高度場距平相關 (a) 北半球 (b)南半球。



圖六：2008 年 1 月 1 日 00Z 至 31 日 12Z 五天預報 500hPa 等壓面高度場均方根誤差 (a)北半球 (b) 南半球。

(a)

(b)



圖六：2008年1月1日00Z至31日12Z五天預報風場東西分量之均方根誤差 (a)250hPa (b)850hPa 等壓面。