

同化GPS無線電掩星觀測 應用於中央氣象局全球預報系統之影響

陳御群¹ 楊明仁² 張忍成³ 曾建翰¹

中央氣象局¹ 國立中央大學大氣科學系² 私立中國文化大學大氣科學系³

摘要

FORMOSAT-3/COSMIC衛星已於2006年4月底成功發射，目前每日平均約可接收到1800個全球定位系統無線電掩星(Global Positioning System Radio Occultation, GPS RO)觀測探空資料。中央氣象局之全球預報系統(CWB/GFS)已建置完成偏折角(bending angle)、局地折射率(local refractivity)與非局地折射率(non-local refractivity)觀測算子於三維變分資料同化系統(GFS/3DVAR)中，並且成功地以局地折射率算子對2007年1月一整月和2007年7月一整月進行平行化作業測試。實驗結果，比較不納入GPS資料做同化分析(nogps)的控制組與納入GPS資料做同化分析(gps)的實驗組在預報得分上的表現可以發現到：(一)納入GPS資料做同化分析對於南半球各變數場在各個垂直層上均可見到對於預報得分具有正面的影響(改善)；(二)對於北半球的影響，雖不若南半球明顯，然而仍然可以發現到有正面的影響；(三)GPS RO觀測資料對於CWB/GFS的正面影響，在質量場(H)與熱力場(T)較為顯著，而風場(U)則不然；(四)GPS RO資料的影響，在2007年的1月與7月表現的並不盡相同，這也顯示了地球氣候系統本身的季節變異。另外，在gps與nogps反應在緯向平均的差異上，無論在2007年的1月或7月均可發現以下特徵：(一)GPS RO觀測資料對於CWB/GFS的影響，在表現於熱力場時，南半球均大過北半球，顯的集中在南緯50度以南，而在水氣場與風場則在低緯地區影響較為明顯；(二)加入FORMOSAT-3/COSMIC的GPS RO觀測資料較CWB/GFS模式表現的偏乾且偏暖；(三)同化分析GPS RO觀測後的增量，可在其風場、水汽場以及熱力場看出冬天與夏天明顯的季節性差異。

關鍵字：福爾摩沙衛星三號、GPS無線電掩星、資料同化、局地折射率

一、前言

「福爾摩沙衛星三號」(FORMOSAT-3/COSMIC)已於2006年4月15日成功的發射了6顆微衛星群組升空，其利用無線電掩星觀測技術來接收全球24顆GPS衛星訊號，目前每天約可提供約1600~2200筆地球大氣層熱力、質量及水汽場的臨邊探空(limb sounding)觀測資料。其導出的可用資料包含偏折角、折射率(refractivity)、溫度、氣壓以及水汽，由於其水平位置近乎全球均勻分布，能夠大量涵蓋傳統觀測較缺乏的海洋地區，且垂直向的資料解析度極高，可以彌補傳統探空及一般衛星觀測之不足。因此希望能夠GPS RO觀測資料的優勢應用在中央氣象局之全球預報系統上，以三維變分資料同化系統來有效提升模式預報的準確度。

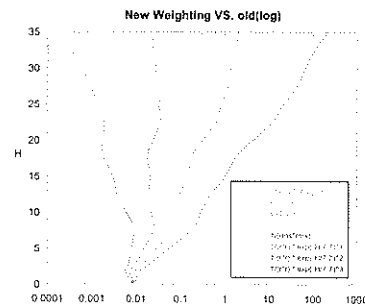
目前中央氣象局的GFS/3DVAR已建置完成了同化偏折角、局地折射率與非局地折射率所需之觀測、及其正切線性(tangent linear)暨伴隨(adjoint)算子，本文將針對FORMOSAT-3/COSMIC衛星的GPS RO觀測資料，以局地折射率算子來探討其對中央氣象局全球預報系統之影響。本文主要分為四大部分，第一部分為前言，第二部份為實驗概況：說明實驗的設定與資料，第三部份為實驗結果：探討模式預報得分的結果以及GPS RO在分析場的增量之緯向平均的冬夏特徵，第四部份為結論。

二、實驗概況

針對本文將進行的實驗，吾人定義出四組觀測誤差垂直權重(vertical weighting)，其定義如下：

$$w_0(H) = \frac{1}{RMS(N_{mod}(H) - N_{obs}(H))^2}$$
$$w_1(H) = \frac{1}{RMS(N_{mod}(H) - N_{obs}(H))^2} \cdot \left[\exp\left(-\frac{H}{7.7}\right) \right]$$
$$w_2(H) = \frac{1}{RMS(N_{mod}(H) - N_{obs}(H))^2} \cdot \left[\exp\left(-\frac{H}{7.7}\right) \right]^2$$
$$w_3(H) = \frac{1}{RMS(N_{mod}(H) - N_{obs}(H))^2} \cdot \left[\exp\left(-\frac{H}{7.7}\right) \right]^3$$

其中H為平均海平面高度(單位為km)，RMS為取方均根值，N mod及N obs分別是模式模擬及觀測之局地折射率，觀測誤差之垂直權重w0、w1、w2及w3如圖一所示。



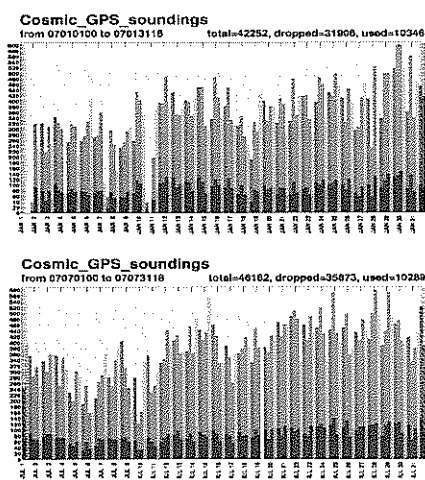
圖一 新垂直權重函數，橫座標為對數座標，縱座標為高度(單位 km)。藍線、綠線、橘線、紅線分別為 w_3 、 w_2 、 w_1 、 w_0 。

根據上述定義之垂直權重 w_2 ，吾人使用中央氣象局全球預報系統，藉由其三維資料同化系統，以局地折射率算子將福衛三號的GPS/RO折射率觀測資料納入同化，分別對2007年1月及2007年7月進行為期一整個月的作業後平行測試 (post run)，以代表冬天月份和夏天月份的同化結果，其實驗命名為 gps200701 及 gps200707，並且以中央氣象局作業全球預報模式之前6小時預報場為實驗初始場。

在進行資料同化實驗前，我們對GPS/RO 觀測資料進行了以下之品質控管(Quality Check; QC)步驟：

1. 剔除掉標示BAD的觀測。
2. 剔除觀測本身氣候平均變異過大者。
3. 剔除觀測水平向分佈距離過近(< 50 km)之較晚發生者。
4. 剔除掉模式模擬與觀測值差距太大者。
5. 剔除掉模式觀測差具有系統性的偏差者。
6. 北半球更進一步只保留觀測垂直最低高度達0.2 km者，並將其5km以下之觀測資料以模式初始猜測場(first guess)來取代。
7. 南半球只保留觀測垂直最低高度達到地形以上2km以內者。

觀測資料經過上述品質控管之後，實際納入同化分析的福衛三號GPS RO觀測資料數量如圖二所示。圖二上圖為2007年1月，下圖為2007年7月的GPS資料量。圖二中橫軸為日期，長條柱圖均有淺色及深色兩段，分別代表同化分析時窗內的所有可用觀測數量(剔除標示BAD的觀測數量)以及經過觀測資料品質控管後實際納入同化者的數量；紅、綠、藍、紫色的長條柱分別表示每日00 UTC時、06 UTC時、12 UTC時、18 UTC時的觀測資料數量。圖二顯示2007年1月與7月分別有25%與22%的GPS/RO觀測資料被同化納入CWB/GFS模式中。兩個實驗各自有完全沒有同化GPS/RO 資料的控制組實驗(命名為nogps200701及nogps200707)，吾人比較控制組與實驗組的差異來探討同化GPS/RO觀測資料，對於CWB/GFS模式之分析及預報場的影響。



圖二 上圖為 2007 年 1 月，下圖為 2007 年 7 月的 GPS 資料量

(一) 預報得分分析

以下將分別對於gps200701實驗與gps200707實驗做個別討論，每個實驗再依序對各變數於北半球、南半球及熱帶地區和其在不同垂直層的預報得分結果來做探討。以下各圖即為預報得分圖。以圖三為例，橫軸為時間，分別代表第零天預報至第七天之預報，縱軸為實驗組和控制組預報得分差異與控制組預報得分的相對比值 $[(\text{gps}-\text{nogps})/\text{nogps}]$ ，當圖表示異常相關係數(Anomaly Correlation; AC)時，圖中藍色曲線為整月得分的平均，正值表示加入GPS資料後改進模式預報(positive impact)，負值表示加入GPS資料後模式預報結果變差(negative impact)。當圖表示均方根誤差(Root Mean Square Error; RMSE)時，縱軸為控制組和實驗組預報得分差異與控制組預報得分的相對比值 $[(\text{nogps}-\text{gps})/\text{nogps}]$ ，圖中藍色曲線為整月得分的平均，正值依然表示加入GPS資料後模式預報結果變好，負值表示加入GPS資料後模式預報結果變差。圖三中藍色曲線上的紅色方塊範圍即表示逐日值取Student's t test統計分佈的95%信賴區範圍。

1. 冬天月份 —— gps200701實驗

圖三由上至下分別為北半球(20-80°N)重力位高度場AC score在100 hPa(、500 hPa、)及sea level的預報得分結果。圖中顯示加入了GPS RO資料後，對於北半球的100 hPa高度場在第三天後有少許的正面影響，對於500 hPa和sea level的高度場在第五天預報以後會有少許負面影響。圖四為南半球(20-80°S)重力位高度場AC score在100 hPa(、500 hPa、)及sea level的預報得分結果。圖四顯示，GPS RO資料對於100 hPa、500 hPa及sea level的高度場在第五天預報以後有少許的負面影響，而對於500 hPa和sea level在第五天預報以前，GPS RO資料則有少許的正面影響。圖五為熱帶地區(20°S ~ 20°N之間)重力位高度場AC score在100 hPa(、500 hPa、)sea level的預報得分；吾人可發現同化納入GPS RO資料在100 hPa及500 hPa並看不出有明顯的影響，然而在sea level則可發現GPS RO資料有些許的正面影響。

圖六為北半球溫度場RMSE score的850 hPa(上圖)、100 hPa(下圖)的預報得分，其顯示GPS RO資料對於北半球850 hPa的溫度場在第六天預報以前有些微的正面影響，對於100 hPa則有持續性的正面影響。圖七為南半球溫度場RMSE score的850 hPa(上圖)、100 hPa(下圖)的預報結果，其顯示GPS RO資料對於南半球850 hPa和100 hPa的溫度場在第五天以前預報均有正面的影響，且850 hPa的影響較100 hPa明顯。圖八為熱帶地區溫度場RMSE score在850 hPa(上圖)、100 hPa(下圖)的預報結果，其顯示GPS RO資料對於熱帶地區850 hPa溫度場並無顯著的影響，而對於熱帶地區100 hPa溫度場在第四天預報以前則有稍微正面的影響。

圖九為北半球(左圖)、南半球(中圖)、及熱帶地區(右圖)200 hPa的U風場RMSE score的預報改進情形。圖九中可發現，同化納入GPS RO資後，對於北半球第四天以前的200 hPa之U風場預報有正面的影響，對於南半球第五天以前的200 hPa之U風場預報有正面的影響，而對於熱帶地區第五天以前的200 hPa之U風場預報則有些微的正面影響。

2. 夏天月份 —— gps200707實驗

圖十由上至下分別為北半球重力位高度場 AC score 的 100 hPa、500 hPa、及 sea level 的預報改進情形。圖十顯示在高層 100 hPa，同化納入 GPS RO 資料同化後對於北半球重力位高度場會有負面的影響；在 500 hPa 於第四天以後的預報則出現明顯正面的影響；於 sea level 則在第三天預報以後即出現了正面影響。圖十一為南半球重力位高度場 AC score 的 100 hPa (上圖)、500 hPa、sea level (下圖) 的預報改進情形。圖十一顯示，GPS RO 資料對於南半球 100 hPa 之重力位高度場並沒有顯著的影響；在 500 hPa，GPS RO 資料對於第四天預報以前都有稍微正面影響；在 sea level，則 GPS RO 資料持續都有出現正面影響。圖十二由上至下分別為熱帶地區重力位高度場 AC score 的 100 hPa、(500 hPa、) sea level 的預報改進情形。圖十二顯示，GPS RO 資料對於熱帶地區 100 hPa 之重力位高度場沒有顯著的影響；在 500 hPa，GPS RO 資料對於第四天以前的重力位高度場預報則呈現負面的影響；在 sea level，則 GPS RO 資料對於重力位高度場於第六天預報前都有正面的影響。

圖十三為北半球溫度場 RMSE score 在 850 hPa (上圖)、及 100 hPa (下圖) 的預報改進情形。圖十三顯示，在 850 hPa 及 100 hPa，加入 GPS RO 資料對於北半球溫度場均有少許的正面影響。圖十四為南半球溫度場 RMSE score 在 850 hPa (上圖)、100 hPa (下圖) 的預報改進情形。圖十四顯示，加入 GPS RO 資料對於南半球溫度場在 850 hPa 於第四天預報以前都有正面影響，而於高層 100 hPa 則在第六天預報以前都有正面的影響。圖十五由上至下分別為熱帶地區溫度場 RMSE score 的 850 hPa、100 hPa 的預報改進情形。圖十五顯示，加入 GPS RO 資料對於熱帶地區溫度場在 850 hPa 出現了負面影響，而在 100 hPa 於第五天預報以前都是正面影響。

圖十六為北半球(左圖)、南半球(中圖)、及熱帶地區(右圖)在 200 hPa U 風場 RMSE score 的預報改進情形。由圖十六中可發現，同化納入 GPS RO 資料後，對於 CWB/GFS 模式於北半球第四天以前的 200 hPa 之 U 風場預報有正面的影響，對於南半球第四天以後的 200 hPa U 風場預報有負面的影響，而熱帶地區則有些微的負面影響。

(二) 分析場緯向平均垂直剖面分析

另外，吾人亦針對純粹由 GPS RO 資料作變分同化後對於分析場產生之增量的各種統計值，作一整個月的全球緯向平均，以探討 GPS RO 所影響的緯向特徵及其垂直特徵。作法為先對實驗組相對於控制組之增量的各種統計值逐日先做緯向的平均，再對逐日緯向平均求整月平均，並比較 GPS RO 資料在夏天月份與冬天月份對於分析場有何差異的現象。圖十七為 U 風場 GPS RO 分析增量的緯向平均之月平均，橫軸為緯度，由左至右為南極至北極，縱軸為 σ 層高度分布。圖中色階近紅色為正值，近藍色為負值，左圖為冬天月份 (2007 年 1 月)，右圖為夏天月份 (2007 年 7 月)。圖中可見，夏天及冬天的增量最大值均集中在赤道上空的高層。另外，在南半球中緯度地區約 60 度處，由底層至高層均有結構完整的正增量區域，這顯示出納入 GPS RO 資料做同化會加強分析場南緯 60 度處的西風，此亦暗示模式的預報結果在南半球中緯度處的西風稍弱。此南半球的西風增量帶

可明顯的看出夏天較冬天強，另外，在冬天的北半球中緯地區約 60 度處亦可發現類似南半球的西風增量帶，然而夏天的北半球中緯地區並無此現象。此亦或因為納入 GPS RO 觀測同化除了全年均增強分析場南半球中緯地區的西風外，另有季節性的變異，使得冬天增強北半球中緯度西風；夏天增強南半球中緯度西風所致，故而夏天的南半球中緯地區西風增量帶強度大於冬天。

圖十八為水汽場 GPS RO 分析增量的緯向平均之月平均，圖中可見，的增量最大值均集中在赤道上空的中低層，為一乾區，此乾區在夏天較冬天強，亦較冬天稍偏北。而在夏天南半球中高緯地區約 60 度處的中低層，另有一乾區，然冬天此處並不明顯。除了乾區之外，冬天及夏天均在赤道中層乾區上方有一濕區，冬天時此濕區較夏天稍偏南，除此濕區，在南半球約 30 度處低層亦有個較小的濕區，此濕區在冬天較強，夏天較不明顯。圖十九為水汽場 GPS RO 分析增量的緯向平均之逐日時間序列圖，橫軸為緯度，縱軸為日期，此圖高度切於 $\sigma = 0.86116$ 層。圖中可見，不論是冬天或夏天，全球大部份地區均為負值，僅有南半球中緯度地區為正值，這顯示出 FORMOSAT-3/COSMIC 的 GPS RO 觀測較模式預報為乾，此為全球普遍的現象。

圖二十為溫度場 GPS RO 分析增量的緯向平均之月平均，此圖顯示溫度增量較大區均集中在南緯 50 度以南，且其高層暖區和冷區有成層的結構。暖區及大值在冬天時出現於南極上空的中層，在夏天時則出現在南極上空的底層。圖二十一為水汽場 GPS RO 分析增量的緯向平均之逐日時間序列圖，此圖高度切於 $\sigma = 0.86116$ 層。圖中可見，不論是冬天或夏天，全球大部份地區均為正值，這顯示出 FORMOSAT-3/COSMIC 的 GPS RO 觀測較模式預報為暖，且增量較大區均集中在南緯 50 度以南。此為全球普遍的現象。

四、結論

綜觀上述兩個實驗 (gps200701 與 gps200707) 的結果，針對 GPS/RO 資料對於 CWB/GFS 模式預報進行影響評估 (impact study)，吾人得知：(一) GPS/RO 資料對於所有的氣象變數場在所有垂直層，於南半球有充足的證據可以顯示會有正面的影響，或說對於模式預報會有改進的效果；(二) 而對於北半球而言，其改進程度雖不如南半球那樣的明顯，但是仍然可以發現到 GPS/RO 資料對於北半球預報亦有所改進；(三) 就 GPS/RO 資料的正面影響程度而言，此影響在全球預報系統的質量場 (即重力位高度場) 上和熱力場 (溫度場) 之持續時間較長，而在風場之持續時間較短；(四) GPS/RO 資料的影響表現在 2007 年 1 月和 2007 年 7 月是有所差異的，這也顯示出了地球氣候系統內部的季節性變異特性。另外，在 gps 與 nogps 反應在緯向平均的差異上，無論在 2007 年的 1 月或 7 月均可發現以下特徵：(一) GPS RO 觀測資料對於 CWB/GFS 的影響，在表現於熱力場時，南半球均大過北半球，顯的集中在南緯 50 度以南，而在水氣場與風場則在低緯地區影響較為明顯；(二) 加入 FORMOSAT-3/COSMIC 的 GPS RO 觀測資料較 CWB/GFS 模式表現的偏乾且偏暖；(三) 同化分析 GPS RO 觀測後的增量，可在其風場、水汽場以及熱力場看出冬天與夏天明顯的季節性差異。

五、參考文獻

張忍成, 2003: 華衛三號衛星 COSMIC 子計畫三: GPS 導出大氣折射資料的驗證與同化研究。國科會國家太空計畫實驗室專題研究計畫報告 (NSC 90-NSPO(B)-RS3-FA07-01-C), 46 頁。

Anthes R, Berhardt P, Chen Y, Cucurull L, Dymond K, Ector D, Healy S, Ho S-P, Hunt D, Kuo Y-H, Liu H, Manning K, McCormick C, Meehan T, Randel W, Rocken C, Schreiner W, Sokolovskiy S, Syndergaard S, Thompson D, Trenberth D, Wee YK, Yen N, Zhang Z. 2008. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: early results. Bulletin of the American Meteorological Society 89: 313-333.

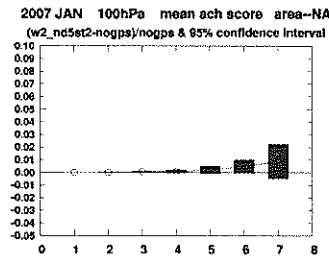
Chang, J.-C., C.-H. Tseng, and Y.-C. Chen, 2003: Some preliminary results on variational data assimilation of GPS/MET bending-angle profiles. In 2003

ROCSAT-3/COSMIC Science Workshop, Sept. 8, 2003, Taipei, Taiwan, 43-51.

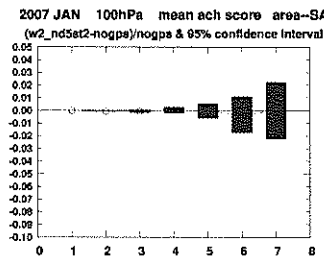
Chang, J.-C. J, Y.-C. Chen, L.-B. Chu, C.-H. Lu, X. Zou, C.-H. J. Tseng, C.-T. Fong, W. M. Chen, M.-D. Cheng, and M.-J. Yang, 2007: Preprint, The 2007 FORMOSAT-3/COSMIC Workshop, Long-Tan, Taoyuan County, 17 May 2007, National Space Project Office.

Yang, M.-J., J. J.-C. Chang, X. Zou, Y.-C. Chen, C.-H. Tseng, and M.-D. Cheng, 2008: Assimilation of global positioning system radio occultation observations into the CWB's global forecast system. Preprints, The 5th AOGS Annual General Meeting, Busan, Korea, 16-20 June 2008, Asian Oceania Geoscience Society (AOGS).

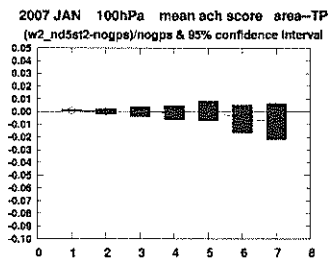
Zou, X.; Zeng, Zhen., A quality control procedure for GPS radio occultation data, J. Geophys. Res., Vol. 111, No. D2, D02112.



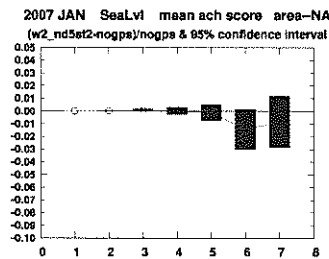
圖三 由上至下分別為北半球(20°N 以北) 重力位高度場 AC score 的 100hpa、sea level 的預報得分



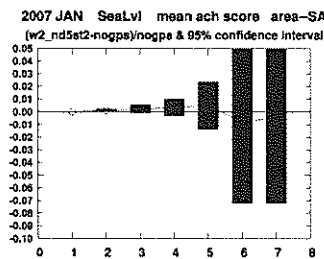
圖四 由上至下分別為南半球(20°S 以南) 重力位高度場 AC score 的 100hpa、sea level 的預報得分



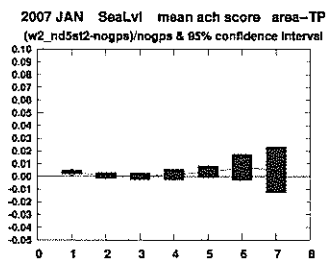
圖五 由上至下分別為熱帶地區(20°S ~ 20°N 間) 高度場 AC score 的 100hpa、sea level 的預報得分



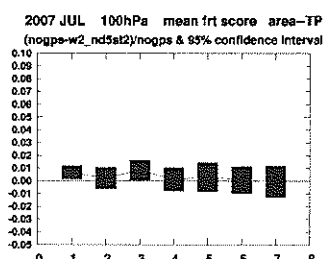
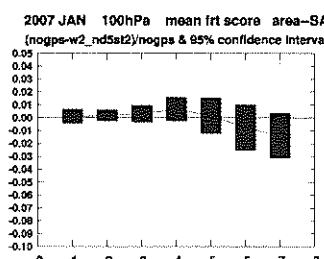
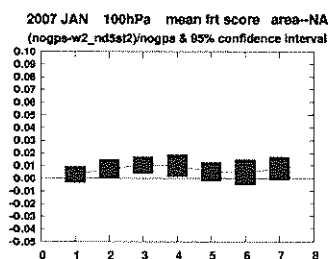
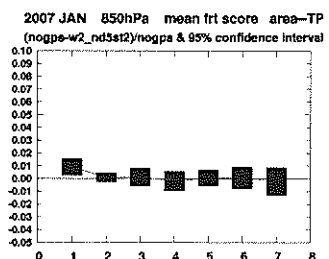
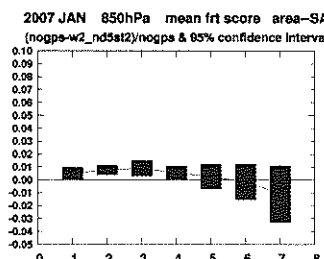
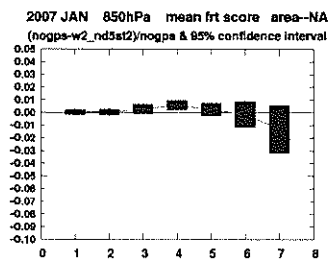
圖六 由上至下分別為北半球溫度場 RMSE score 的 850hpa、100hpa 的預報得分

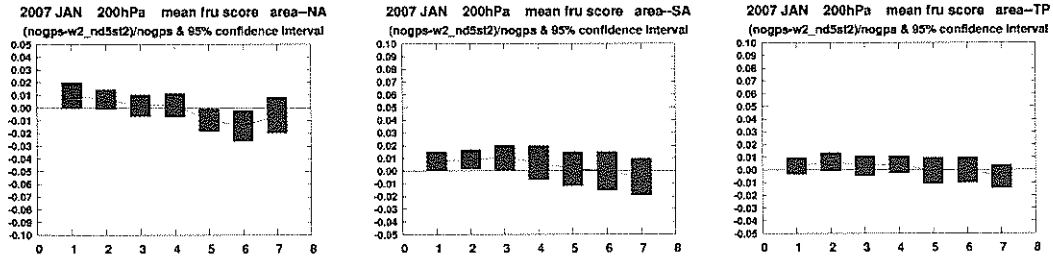


圖七 由上至下分別為南半球溫度場 RMSE score 的 850hpa、100hpa 的預報得分

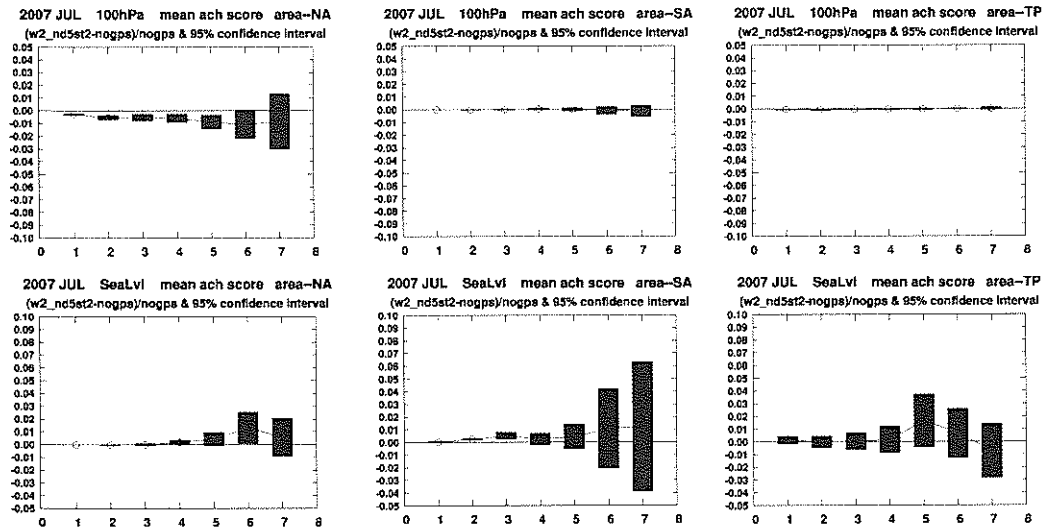


圖八 由上至下分別為熱帶地區溫度場 RMSE score 的 850hpa、100hpa 的預報得分





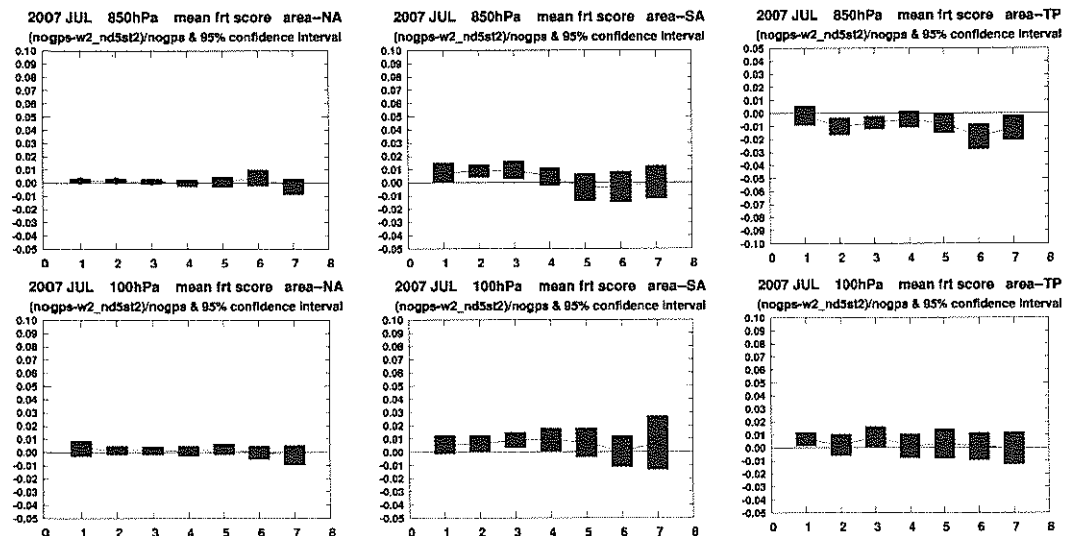
圖九 由左至右分別為北半球、南半球、熱帶地區位在 200hpa 的 U 風場 RMSE score 的預報得分



圖十 由上至下分別為北半球重力位高度場 AC score 的 100hpa、sea level 的預報得分

圖十一 由上至下分別為南半球重力位高度場 AC score 的 100hpa、sea level 的預報得分

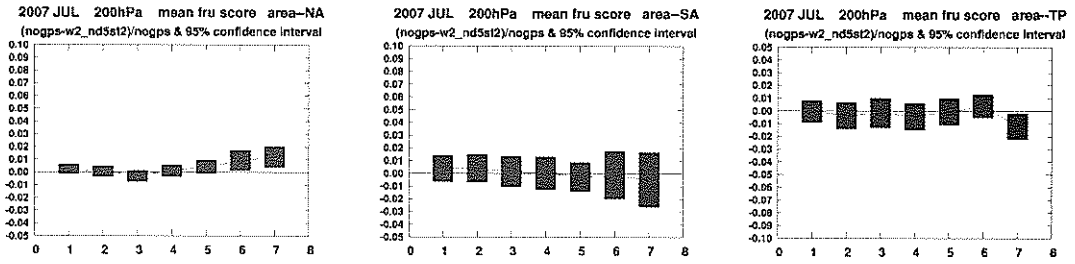
圖十二 由上至下分別為熱帶地區重力位高度場 AC score 的 100hpa、sea level 的預報得分



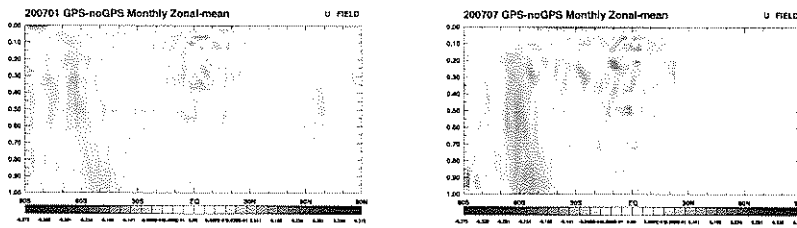
圖十三 由上至下分別為北半球溫度場 RMSE score 的 850hpa、100hpa 的預報得分

圖十四 由上至下分別為南半球溫度場 RMSE score 的 850hpa、100hpa 的預報得分

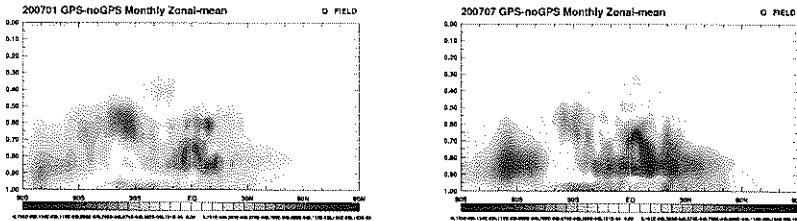
圖十五 由上至下分別為熱帶地區溫度場 RMSE score 的 850hpa、100hpa 的預報得分



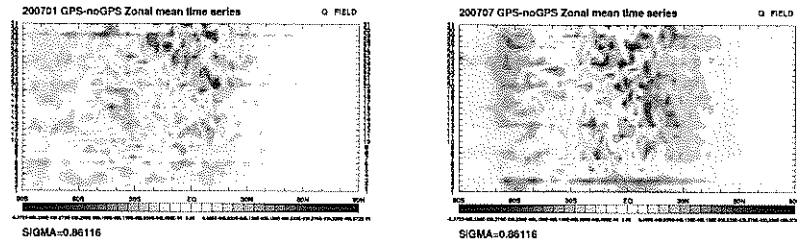
圖十六由左至右分別為北半球、南半球、熱帶地區位在 200hpa 的 U 風場 RMSE score 的預報得分



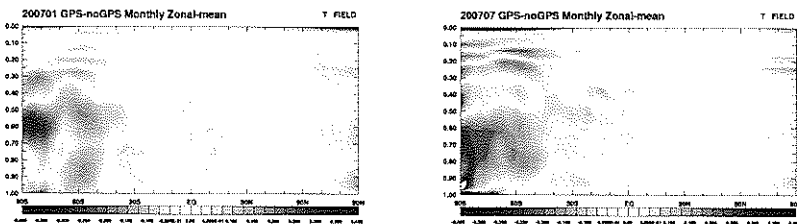
圖十七 為 U 風場 GPS RO 分析增量的緯向平均之月平均，左圖為冬天月份(2007 年 1 月)，右圖為夏天月份(2007 年 7 月)



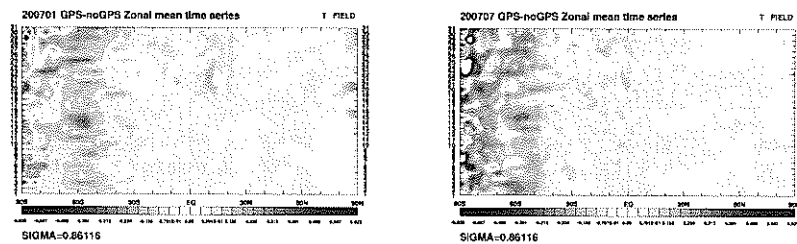
圖十八 為水汽場 GPS RO 分析增量的緯向平均之月平均，左圖為冬天月份(2007 年 1 月)，右圖為夏天月份(2007 年 7 月)



圖十九 為水汽場 GPS RO 分析增量的緯向平均之逐日時間序列圖，左圖為冬天月份(2007 年 1 月)，右圖為夏天月份(2007 年 7 月)



圖二十 為溫度場 GPS RO 分析增量的緯向平均之月平均，左圖為冬天月份(2007 年 1 月)，右圖為夏天月份(2007 年 7 月)



圖二十一 為溫度場 GPS RO 分析增量的緯向平均之逐日時間序列圖，左圖為冬天月份(2007 年 1 月)，右圖為夏天月份(2007 年 7 月)