

衛星遙測資料三維變分同化對於颱風模擬的影響

黃清勇 王潔如

國立中央大學大氣科學系

(中華民國九十七年四月二日收稿；中華民國九十七年十一月十日定稿)

摘 要

本文使用 NCAR MM5 三維變分同化 3DVAR(Three-Dimensional Variational Data Assimilation)方法，將多種衛星觀測(GPS 掩星、AMSU、QuikSCAT)及傳統探空觀測資料同化於中尺度模式中，以了解同化這些觀測資料對於改善數值天氣預報準確度的影響。選取兩個颱風個案，包括 2003 年 8 月中度颱風杜鵑(Dujuan)及 2004 年 6 月中度颱風敏督利(Mindulle)，每個颱風個案皆分成兩組模擬，一為同化傳統探空觀測資料，另一組同時加入 GPS 掩星觀測及傳統探空觀測資料。

兩個颱風個案模擬皆使用 3 層巢狀網域，最高水平解析度為 5 公里。在最外圍的網域，CHAMP 衛星於模擬初始時間窗區內約有 4~6 個探空點，可提供溫濕度的資訊剖面。就 Dujuan 颱風個案，同化 GPS 掩星折射率資料及傳統探空觀測資料的模式初始場，所模擬出來的颱風路徑大致上與實際路徑相符，對於颱風移速的模擬也是相當不錯，但是模擬的中心氣壓強度則偏弱。Dujuan 颱風掃過台灣南端，觀測的最大降雨量出現在東部地區，這與模擬的累積降雨量分布一致。就 Mindulle 颱風，同化 GPS 折射率資料的個案模擬，比只使用傳統探空觀測資料的模擬在登陸前 48 小時有將近 40 公里的路徑修正，颱風移動方向也更接近實際。由觀測累積降雨量來看，所模擬之颱風在登陸前後 threat scores 及 root mean square errors 都有不錯的表現。同時加入 QuikSCAT 資料(二維海平面風場)同化，模擬的環流更接近實際，而使降雨預報得到改善。另外，同時加入 AMSU 反演的三維風場資料同化，使颱風結構變得更紮實，因而在路徑模擬上有明顯的進步。

關鍵詞：三維變分同化、GPS 掩星折射率、AMSU

一、前言

颱風強度、路徑與降雨預報為國際的重要預報問題，也是我國目前氣象研究與天氣預報作業所面臨的重要課題。台灣地理位置特殊，除西方鄰近中國大陸，有密集的傳統探空觀測資料網外，其餘皆濱臨廣大洋面，以致於當颱風位於台灣周圍海域，只有偏重衛星與雷達的觀測，幾乎無其他傳統觀測資料可以用於分析颱風。

近年來，許多研究使用以全球定位系統為基礎所發展一種新的遙測水汽方法。最早的概念是來自於 Jet Propulsion Laboratory (JPL)與 Stanford University 在 1960 年末期，研究行星大氣所發展出的無線電掩星 (Radio Occultation) 技術，運用在全球定位系統訊號探測地球大氣。美國大學大氣研究聯盟(UCAR)於 1993 年開始一項名為全球定位系統氣象實驗 (Global Positioning System/meteorology, GPS/MET)之計畫，並於 1995 年發射一枚低軌衛星(MicroLab 1)以證實該實驗概念可行，該枚衛星載有適於太空飛行之全球定位系統接收器(GPS Receiver)，已獲得成功之驗證。自從衛星發射之後，有許多學者使用 GPS/MET 折射角資料反演的變數垂直剖面與傳統探空觀測系統比較，例如 Kursinski et al. (1995) 指出在低緯度地區，若使用 GPS/MET 折射角資料，則可在高度 6 公里以下反演出誤差約 10~20 %的水氣剖面，在邊界層中更達到 5%。Ware et al. (1996) 使用 11 筆 GPS 折射角反演溫度垂直剖面(假設為乾大氣)，與鄰近探空儀及 NCEP 分析資料比較，可得反演的溫度剖面範圍從 5 公里到 40 公里，且與其他資料相比差距在 1°C 內。Leroy (1997) 指出 GPS/MET 估計等壓面的重力位高度和歐洲中期天氣預報中心(European Center for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)分析的

結果，在觀測資料足夠的地方，均方根誤差在 20 公尺以內。Kuo et al. (1997) 的研究結果顯示 GPS/MET 折射角在垂直方向的高密度分布可以完整解析出由天氣預報中心的全球分析所無法看到的尺度現象。

概括上述，GPS 掩星觀測具有準確性高，高垂直解析度，以及不受到洋面限制的優點，更因為低軌衛星的增加，可提供高頻率的觀測。若我們能有效的利用這些資料，則可解決觀測資料缺乏問題。依據資料處理程度 GPS 掩星折射率觀測資料至少可分為(1)相位延遲、(2)偏折角、(3)大氣折射率、(4)溫度及濕度剖面。前 3 種資料並非傳統探空觀測的氣象變數，目前模式設計上無法直接使用，根據 Zou et al. (1999)提出使用 GPS 折射率，需假設乾大氣或是已知溫度，才能反演出溼度或溫度垂直剖面，所以誤差比其他種類來的大，因此如何將這些非傳統的資料導入模式中為現在一項重要的課題。目前採用的方式是以變分同化為主軸，像是 Zou et al. (1995)提出以四維變分資料同化(4DVAR)系統將大氣的折射率同化進模式中，進行一系列的觀測系統模擬實驗 (observing system simulation experiment; OSSE) 評估 GPS 反演折射率資料的影響。選用 1992 年 3 月美洲大陸上冬天風暴 (20 公里解析度) 的模擬結果當作控制實驗，其結果顯示大氣折射率同化可以有效地反演出水汽垂直剖面，所反演出水汽場的準確性比傳統的反演技術良好許多。同時，大氣折射率的同化也提供了有用的溫度資訊，對於預報結果有相當正面的影響。Liu et al. (1995) 藉由與鄰近的 56 個無線電探空儀之量測，證實只同化 GPS/MET 偏折角或彎角(bending angle)可改善 850 毫巴以上的溫度場和比濕場的分析。Zou et al. (1999) 運用變分同化技術同化

GPS/MET 原始偏折角資料到數值天氣分析與預報系統，使用觀測算子模擬折射角與實際 GPS 測量的觀測做比較，發現在 20 公里以下誤差約為 5~10%。

3DVAR 為 4DVAR 的降階系統，只用初始時間附近觀測資料來調整初始場，沒有預報的共軛 (Adjoint) 模式，比起 4DVAR 所耗費的電腦計算資源，要來的節省很多，另外一個優點為可使用多層網域的數學架構，有助於巢狀網格模式模擬更小尺度現象。Zou et al. (2000) 將 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 的 Spectral statistical interpolation (SSI) 分析系統加入 GPS ray-tracing operator 修改後，測試將 30 個真實的 GPS/MET 折射角觀測使用 3DVAR 系統導入模式中。因為 GPS/MET 折射角資料量少以及零散的位置分布，對於估計 GPS/MET 折射角觀測分析影響是困難的，所以作者選用只有在 GPS/MET 折射角資料附近的 500km 內 radiosonde 資料與同化折射角模擬的結果跟背景場比較，發現溫度及風場有些微改善，有加入 GPS 折射角所模擬出來的結果與實際觀測的結果較接近。Huang et al. (2005) 對 MM5 3DVAR 的可行性及效益做評估，所使用的資料包含探空及船舶觀測資料，以及 GPS 掩星觀測的大氣折射率資料，對於數個真實個案做模擬比較，其結果對於預報的路徑頗為接近實際路徑，而且定量降水估計與真實降水較為符合。

綜合以上回顧，因為觀測資料的不足，而導致颱風研究與數值預報能力的困難度，為改善預報結果，需要更多的資料來源，來提供洋面上的特徵。可是模式並不直接預報 GPS 掩星觀測，所以須利用變分同化的方式將它導入模式，以探討 GPS 掩星觀測之折射率資料扮演的角色。

由於 GPS 折射率並未能提供其它大氣變數 (如風場)，因此本文使用 MM5 3DVAR 同化多種種類的觀測資料，包括德國 CHAMP 掩星觀測之折射率、AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) 反演的三維風場資料、QuikSCAT (Quick Scatterometer) 海平面風場資料、傳統探空資料。本文選取 Dajuan 與 Mindulle 颱風個案，探討這些資料對颱風預報的改善程度。

二、研究方法

(一) GPS 掩星技術

所謂 GPS 掩星觀測是指，GPS 衛星發射電磁波，其中有部分電磁波會穿越過地球大氣被低地球軌道衛星上裝載的 GPS 接收器所接收，可以利用所接收的相位延遲資料估計電磁波射線的彎角 (bending angle, α)，再利用 Abel inversion

$$\ln(n(a)) = \frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(\xi)}{\sqrt{\xi^2 - a^2}} d\xi \quad (\text{假設折射指數為球}$$

對稱分布) 計算出大氣折射指數 (refractive index, n) 的垂直分佈，其中 ξ 為碰撞參數 (impact parameter) 及 a 為折射半徑。由 Thayer (1974)，折射率 (N) 與氣象變數的關係式：

$$N = (n-1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (\text{其中}$$

P_w 為水氣壓)，所以假設乾大氣情況下可反演出所需的溫度剖線，或是已知溫度的三維變數場反演溼度剖面。

(二) 三維變分資料同化系統之簡介

MM5 3DVAR 是由 NCAR/MMM 所設計於 MM5 模式加入的三維變分資料同化系統，此系統可同化多種觀測資料進而改進模式的初始分析場，使其更接近於實際大氣狀態，提升數值天氣

預報之準確性。

MM5 3DVAR 在變分問題的數學處理上，採用卡爾曼濾波法(Kalman filter)提供了一個客觀函數的最小化(即 cost function 價值函數)，定義為：

$$J = \frac{1}{2} \left\{ (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + [y_{obs} - H(x)]^T O^{-1} [y_{obs} - H(x)] \right\} \quad (1)$$

其中

- x : 分析變數 (n 維向量)
- x_b : 背景變數 (n 維向量)
- y_{obs} : 觀測變數 (m 維向量)
- B : 預報誤差協方差矩陣 (n×n)
- O : 觀測誤差協方差矩陣 (m×m)
- H : 非線性算子，將分析的變數向量轉換成觀測向量

上述函數 J 的極小值可以使分析變數 x 與背景變數 x_b 的誤差在引進觀測資訊時有最佳的調整。目前 3DVAR 中的求 J 極小值的方法，容許 H 為非線性的算子。

(三) 實驗設計

採用數值天氣預報模式 MM5 3.6 版模擬，共選取 Dujuan 以及 Mindulle 兩個案分別探討。Dujuan 颱風個案採 3 層巢狀網格的配置，模式所用的物理參數化分別為：邊界層參數化使用 Medium-Range Forecast (MRF) scheme (Hong and Pan 1996)，雲微物理參數化使用 Goddard microphysics(Tao et al. 1989, 1993)，大氣輻射冷卻參數使用 Cloud-radiation scheme，積雲參數化則使用 Kain-Fritsch (KF) scheme (Kain and Fritsch 1993)，其中第 3 層沒有使用積雲參數化。Domain 1 的網格數為 151×151，其解析度為 45 公里；

Domain 2 的網格數為 151×163，其解析度為 15 公里，Domain 3 的網格數為 151×151，其解析度為 5 公里，進行 48 小時預報。MM5 模式中使用 NCEP AVN [aviation version of the NCEP/ MRF (Medium Range Forecast)] model 的資料，其中資料網格解析度為 1°×1。

本研究為探討導入 GPS 掩星觀測於 3DVAR 同化系統中對改進數值天氣預報結果的影響，設計了兩組對照模擬實驗。一為使用 3DVAR 同化將傳統探空觀測資料導入模式初始場(文內統稱 GTS)。另一組是使用 3DVAR 同化加入 GPS 掩星觀測及傳統探空觀測資料(文內統稱 BOTH)，比較加入 GPS 折射率所產生的差異性。

在 Dujuan 颱風個案中另外設計了同化傳統探空觀測資料、GPS 掩星觀測及 QuikSCAT 海平面風場資料(QSCAT)的探討(個案文內統稱為 GTS+GPS+QSCAT)，這是因為 GPS 掩星觀測不包含風場的資訊。GPS 折射率為 CHAMP 衛星所反演的大氣折射率(refractivity)資料，同化窗區選擇初始時間正負 3 小時內的所有觀測，其中共有 6 筆觀測落於 Dujuan 颱風個案的最大網域 (Domain 1)內，其觀測位置、時間參見表一。

Mindulle 個案設計 Domain 1 與 2 中使用 Grell 的積雲參數化法，其他物理參數化設計與 Dujuan 個案相同，在同化時間窗區內共有 3 筆 GPS 掩星觀測(表一)落在最大的最大網域 (Domain 1)範圍內。風場的資訊則是設計同化傳統探空觀測資料、GPS 掩星觀測及 AMSU 所反演的三維風場資料(文內統稱 GTS+GPS+AMSU)。

(四) 雨量校驗方法

本文採用 TS 評分(Threat Score)進行雨量校驗：

表一 同化模擬個案及所使用之 GPS 折射率資料

天氣個案	同化暨 數值模式	GPS 掩星 衛星	觀測時間	緯度，經度
Dujuan Typhoon (2003/08/31/12-09/02/ 00)	MM5	CHAMP	09:00	(4.24 ⁰ , 129.91 ⁰)
			10:29	(10.47 ⁰ , 102.36 ⁰)
			10:34	(-2.40 ⁰ , 133.31 ⁰)
			11:54	(49.05 ⁰ , 83.74 ⁰)
			11:57	(42.39 ⁰ , 104.01 ⁰)
			13:32	(27.04 ⁰ , 86.15 ⁰)
Mindulle Typhoon (2004/06/29/06-07/02/ 06)	MM5	CHAMP	04:19	(9.10 ⁰ , 141.05 ⁰)
			07:18	(35.68 ⁰ , 97.08 ⁰)
			08:48	(48.79 ⁰ , 80.24 ⁰)

$$TS = \frac{H}{H + F + O}$$

對某一特定雨量門檻值， F 代表校驗區域內模式雨量值大於門檻值的網格點數， O 代表校驗區域內觀測雨量值大於門檻值的網格點數， H 為模式雨量值和觀測雨量值均大於門檻值的網格點數，若在校驗區域內的實際降雨未被模式所預報，或是模式降雨位置偏移，皆會降低 TS 分數。當 $TS > 0$ 表示有技術得分， $TS = 1$ 表示完美預報， $TS < 0$ 則表示沒有技術得分。做校驗時，首先將中央氣象局的 362 個自動雨量站觀測雨量值插分至模式網格點上。客觀分析方法為 Cressman scheme，選用 20 公里作為影響半徑。

三、個案模擬與分析

(一) Dujuan 颱風

Dujuan 颱風被中央氣象局歸為中度颱風，生成地點大約在菲律賓東方海面，近中心最大風速

估計達 43 m s^{-1} 。Dujuan 颱風於 8 月 29 日菲律賓東方海面形成後，北邊的高壓勢力略有減弱，因此颱風一度偏往西北移動，且強度一直迅速地增強；31 日 2 時，Dujuan 遂增強為中度颱風。上午 8 時，Dujuan 移動到了北緯 19.2 度，東經 131.1 度，此時高壓開始有自日本南方海面向華中一帶增強延伸的趨勢，使得 Dujuan 開始轉向西北西，朝台灣東南部海面穩定行進，移動速度並加快。氣象局隨即在 11 時發佈了海上颱風警報，晚間 8 時更針對花東及恆春等地區發出陸上颱風警報。

中度颱風 Dujuan，雖然颱風眼並沒有登陸台灣，但它是繼 2000 年的碧利斯颱風及 2001 年的利奇馬颱風之後，出現難得一見的「雙眼牆」颱風結構。所謂雙眼牆，就是在颱風眼的外部存在著一個次強風的對流環（即所謂外眼牆所在位置），因為颱風受到加熱而增強，外部的次強風對流環也會跟著收縮，當次強風對流環將內眼完全包住後，內眼會失去增強的機制，此時內眼會開始消散，而次強風對流環即取代原先的眼，成為

新的眼，由雷達回波（圖略）可清楚看出眼牆收縮現象。雙眼牆的出現與演化與平衡梯度風最大值的徑向變化可能有關係，如 Willoughby (1990)。

本研究自 8 月 31 日 1200UTC 開始模擬 48 小時。為了探討 GPS 折射率對於初始場的影響，我們將 BOTH 個案的 Domain 1 減去 GTS 個案的 Domain 1，以獲得其差異量。選取折射率增量在台灣西南方的掩星事件點（緯度 10.473；經度 102.362），沿東西向做一剖面（圖 1a），增量的水平範圍大約 600~700 公里，這是 3DVAR 對於單一探空觀測的典型調整反應(Huang et al. 2005)。折射率大小約為 5.21 個 N-units。水氣增量分布（圖略）與折射率分布相似，最主要的增量集中在 5 公里以下，最大值大約在 2.9 公里，其值為 1.1gkg^{-1} ，該層的水氣分布大約為 $6\sim 8\text{gkg}^{-1}$ ，所以水氣增量占總量約 15%，因此對初始場的水氣分佈有明顯改變。其它掩星事件(緯度-2.39;經度 133.32)中，溫度增量最大值僅 0.18°C （圖 1b），最大值大約在 7 公里，該層的溫度分布大約為 $9\sim 11^\circ\text{C}$ ，增量占總量的 1.8% 左右，最大風速增量為 0.1ms^{-1} （圖略）。

圖 3 為 GTS 個案 Domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場。颱風在模擬 30 個小時左右登陸鵝鑾鼻，這與實際路徑有所差距（颱風未登陸），但在預報的路徑移動方向，顯示颱風行徑方向在前 6 小時是往西北西，6~12 小時往西北方向，之後轉為西北西，大致上的模擬走向是相當不錯的。在颱風強度方面，因為 AVN 分析場提供的颱風初始強度為 999 毫巴，與當時 Dujuan 颱風已發展成為 965 毫巴的中度颱風強度相差太大，因此即使經過 48 小時積分颱風強度仍不足。

圖 4 為 BOTH 個案 Domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場，此與 GTS 個案結果比較相似，但於登陸前圖中顯現出些微的路徑差異，在

登陸後不明顯，推測原因是因為 GPS 掩星觀測的落點位置皆在 Domain 2 的範圍之外，因為變數增量的影響半徑不在天氣系統附近，需要時間傳送增量才能影響下游天氣系統，所以當落點位置距離颱風太遙遠，會使得影響預報結果的延後。而此個案剛好在颱風登陸前有些微的影響，但隨後受到地形作用，所以路徑上沒有明顯的修正。

經由路徑圖（圖 5）之比較，發現所模擬的 Dujuan 颱風於初期其路徑都較北偏，對此採用不對稱量來探討颱風移動方向，不對稱量的計算是以方位角平均當作對稱量，完整的風場扣掉對稱量剩下的為不對稱量，而計算的中心是以颱風的環流中心為定位，當登陸地形時颱風的中心定位會不明確，只選前幾個小時的分析場做為討論，如此可扣除颱風本身的環流影響，也就是考慮颱風的不對稱量與環境風場對於行進方向的變化。圖 6b、6d 為 BOTH 個案，31 日 1200UTC 在 $\sigma = 0.995$ 以及 $\sigma = 0.725$ 兩層上水平風場(m s^{-1})的不對稱量，在底層颱風中心位置的風場不對稱量有微弱向北的分量，而高層則顯示颱風中心有向西北之運動，因此不對稱量之分析說明個案初期的北偏是由於駛流場作用造成模擬的颱風移動方向為偏北。

在降雨預報方面，圖 7 是 BOTH 模擬之預報累積降雨量，與圖 2 實際觀測的累積雨量比較，在前 12 小時預報的累積降雨量，明顯的少於實際觀測，可是 BOTH 有預報到雨量高值的分布位置，雨量集中在東部（有一塊雨量較大值），與 GTS 的預報相似，但雨量高值是 BOTH 較接近真實雨量。後 12 小時的預報結果顯示，在降雨量分布上 BOTH 的結果類似觀測雨量，都集中在東半部地區。

Fcst: 0.00 Valid: 1200 UTC Sun 31 Aug 03 (2000 LST Sun 31
 Wet Refractivity XY= 16.6, 45.4 to 38.3, 40.5 sm= 1
 (diff. from case=T1GTSD1, time= 0.00)

DUJUAN 3D-VAR INCREMENT DIFF DUE TO BOTH-NO Init: 1200 UTC Sun 3
 Fcst: 0.00 Valid: 1200 UTC Sun 31 Aug 03 (2000 LST Sun 31
 Temperature
 (diff. from case=T1GTSD1, time= 0.00)

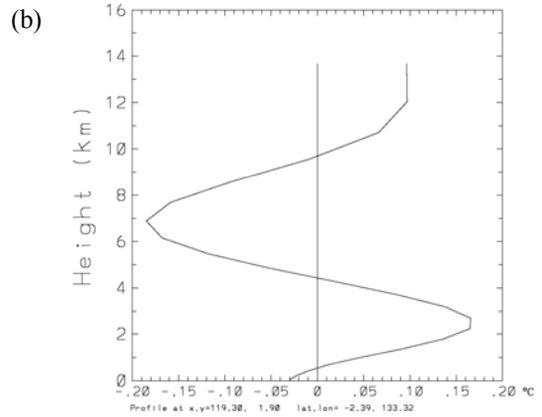
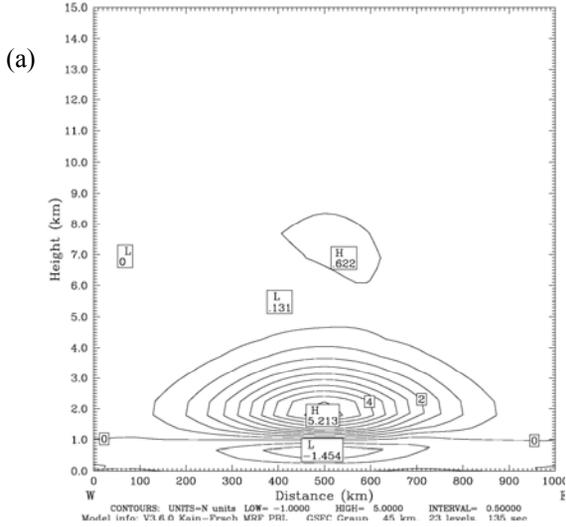


圖 1 Dujuan 個案，使用 3DVAR 同化 GPS 折射率資料及傳統探空觀測資料與同化傳統探空觀測資料結果相減(BOTH-GTS)，(a)以西南邊掩星事件點(緯度 10.473;經度 102.362)為中心東西向做一剖面，折射率增量隨高度的變化。(b)在緯度-2.39;經度 133.32 的掩星事件點中溫度增量垂直分佈。

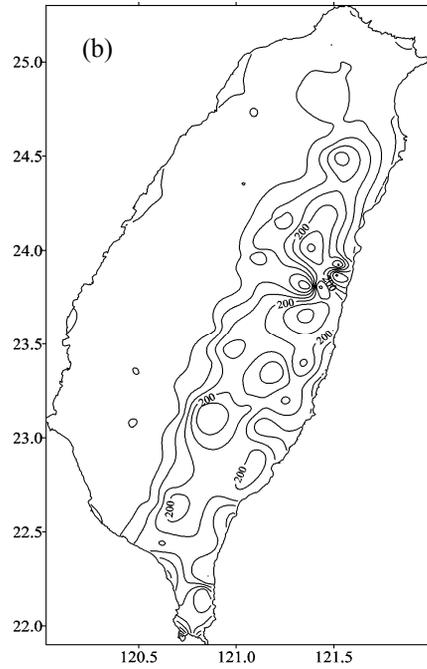
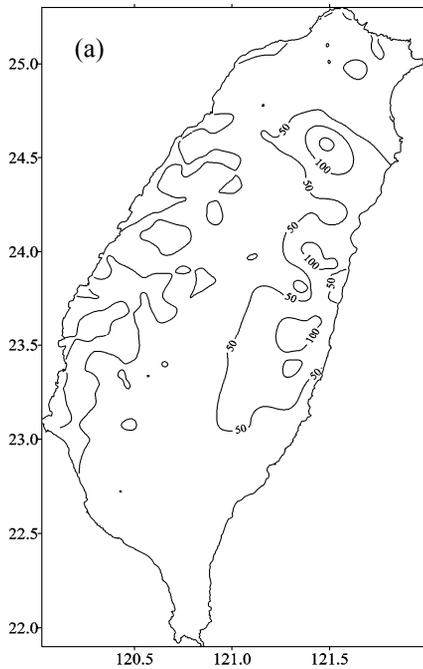
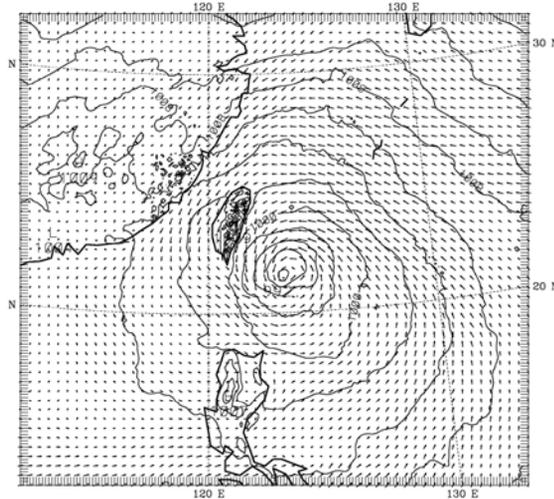


圖 2 颱風 Dujuan 實際觀測的累積雨量圖，時間為 (a) 0000~1200 UTC 1 September 2003 (167 mm)，(b) 1200~2400 UTC 1 September 2003 (306 mm)。括號內的數值表示最大降雨量。等值線為 50mm。

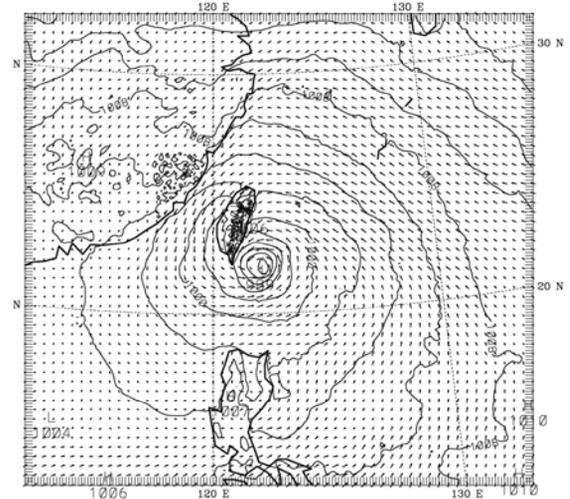
IA = 1.020 SEA PRES (mb) | 2003-09-01 06:00:00 = 2003-09-01_12 + 18.00H SMOOTH= |
 IA = 0.995 BARB UV (m/s) | 2003-09-01 06:00:00 = 2003-09-01_12 + 18.00H SMOOTH=

IA = 1.020 SEA PRES (mb) | 2003-09-01 12:00:00 = 2003-09-01_12 + 24.00H SMOOTH= |
 IA = 0.995 BARB UV (m/s) | 2003-09-01 12:00:00 = 2003-09-01_12 + 24.00H SMOOTH=



DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR GTS
 CONTOUR FROM 984.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3.31)= 1005.2 20.2

(a)

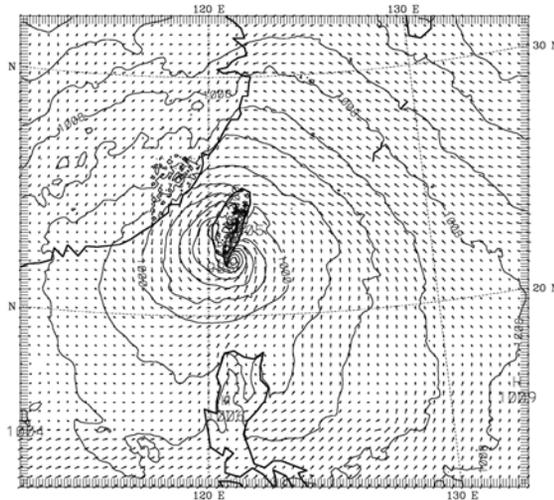


DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR GTS
 CONTOUR FROM 984.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3.31)= 1005.3 24.1

(b)

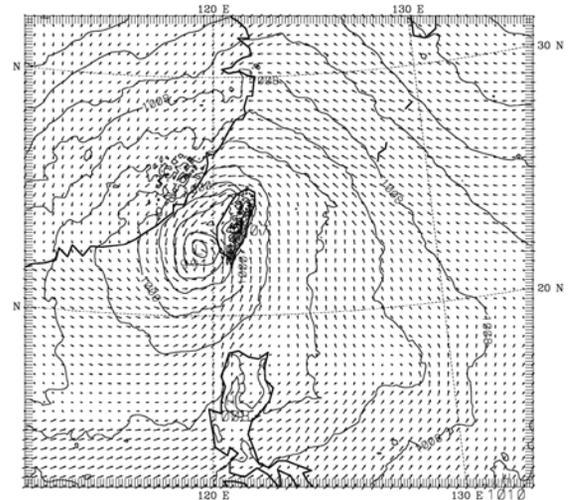
IA = 1.020 SEA PRES (mb) | 2003-09-01 18:00:00 = 2003-09-01_12 + 30.00H SMOOTH= |
 IA = 0.995 BARB UV (m/s) | 2003-09-01 18:00:00 = 2003-09-01_12 + 30.00H SMOOTH=

IA = 1.020 SEA PRES (mb) | 2003-09-02 00:00:00 = 2003-09-01_12 + 36.00H SMOOTH= |
 IA = 0.995 BARB UV (m/s) | 2003-09-02 00:00:00 = 2003-09-01_12 + 36.00H SMOOTH=



DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR GTS
 CONTOUR FROM 984.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3.31)= 1005.2 23.2

(c)



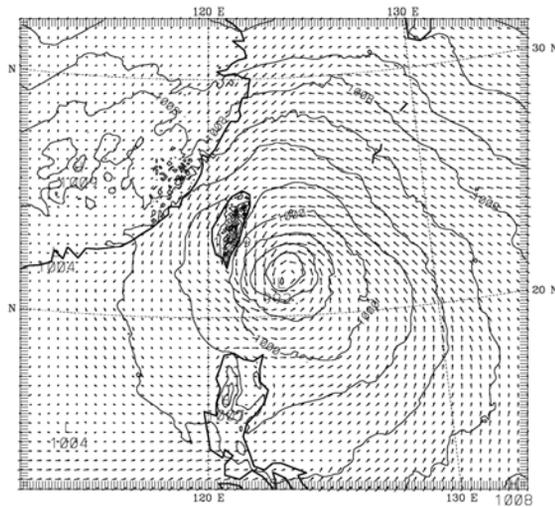
DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR GTS
 CONTOUR FROM 984.00 TO 1016.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3.31)= 1006.2 28.4

(d)

圖 3 颱風 Dujuan 個案，同化傳統探空觀測資料後之 Domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場 (a) 18 小時，(b) 24 小時，(c) 30 小時及(d)36 小時預報場。

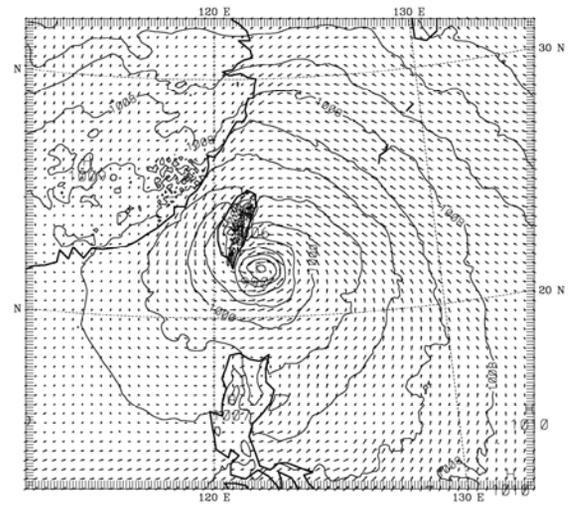
IA = 1.000 SEA PRES [mb] | 2003-09-01_06:00:00 = 2003-09-31_12 + 18.00H SMOOTH=
 IA = 0.995 BARB UV [m/s] | 2003-09-01_06:00:00 = 2003-09-31_12 + 18.00H SMOOTH=

IA = 1.000 SEA PRES [mb] | 2003-09-01_12:00:00 = 2003-09-31_12 + 24.00H SMOOTH=
 IA = 0.995 BARB UV [m/s] | 2003-09-01_12:00:00 = 2003-09-31_12 + 24.00H SMOOTH=



DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR BOTH(GTS+GPSRF)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT13.31+ 1005.2 19.3

(a)

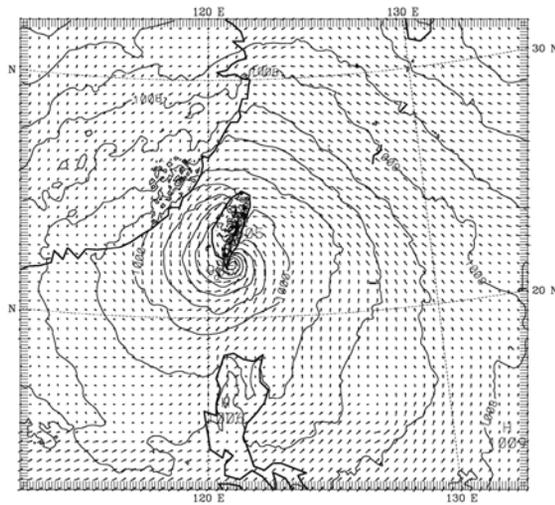


DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR BOTH(GTS+GPSRF)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT13.31+ 1005.2 23.3

(b)

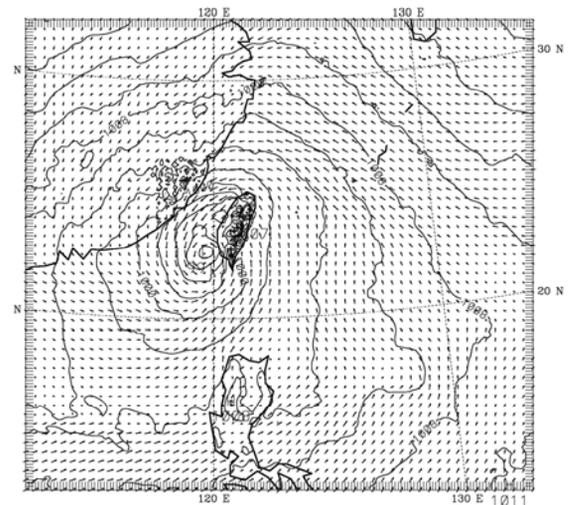
IA = 1.000 SEA PRES [mb] | 2003-09-01_18:00:00 = 2003-09-31_12 + 30.00H SMOOTH=
 IA = 0.995 BARB UV [m/s] | 2003-09-01_18:00:00 = 2003-09-31_12 + 30.00H SMOOTH=

IA = 1.000 SEA PRES [mb] | 2003-09-02_00:00:00 = 2003-09-31_12 + 36.00H SMOOTH=
 IA = 0.995 BARB UV [m/s] | 2003-09-02_00:00:00 = 2003-09-31_12 + 36.00H SMOOTH=



DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR BOTH(GTS+GPSRF)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT13.31+ 1006.1 23.7

(c)



DUJUAN (2003/08/31) --- 3DVAR BOTH(GTS+GPSRF)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1016.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT13.31+ 1006.2 21.8

(d)

圖 4 颱風 Dujuan 個案，同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料後之 Domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場 (a) 18 小時，(b) 24 小時，(c) 30 小時及(d)36 小時預報場。

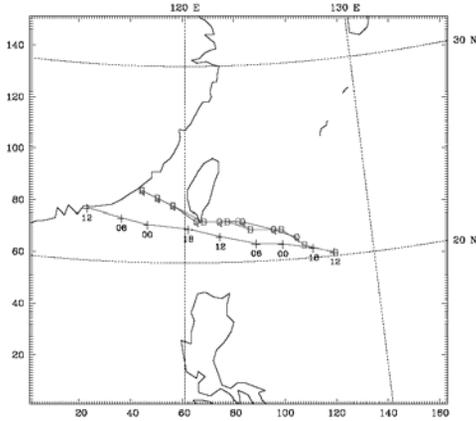


圖 5 Dujuan 颱風個案路徑圖，由 1200 UTC 31 Aug. 2003 開始，中央氣象局最佳路徑圖（標記號為十字），同化傳統探空觀測資料模擬之路徑（標記號為 G），同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料之路徑（標記號為 B），同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 QSCAT 海平面風場資料之路徑（標記號為 Q），除了同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 QSCAT 海平面風場資料之路徑。各路徑之每個點間格為 6 小時，但路徑 Q 第一點為模式模擬的初始時間 2100 UTC，與第二點間距 3 小時，之後每個點間格為 6 小時。

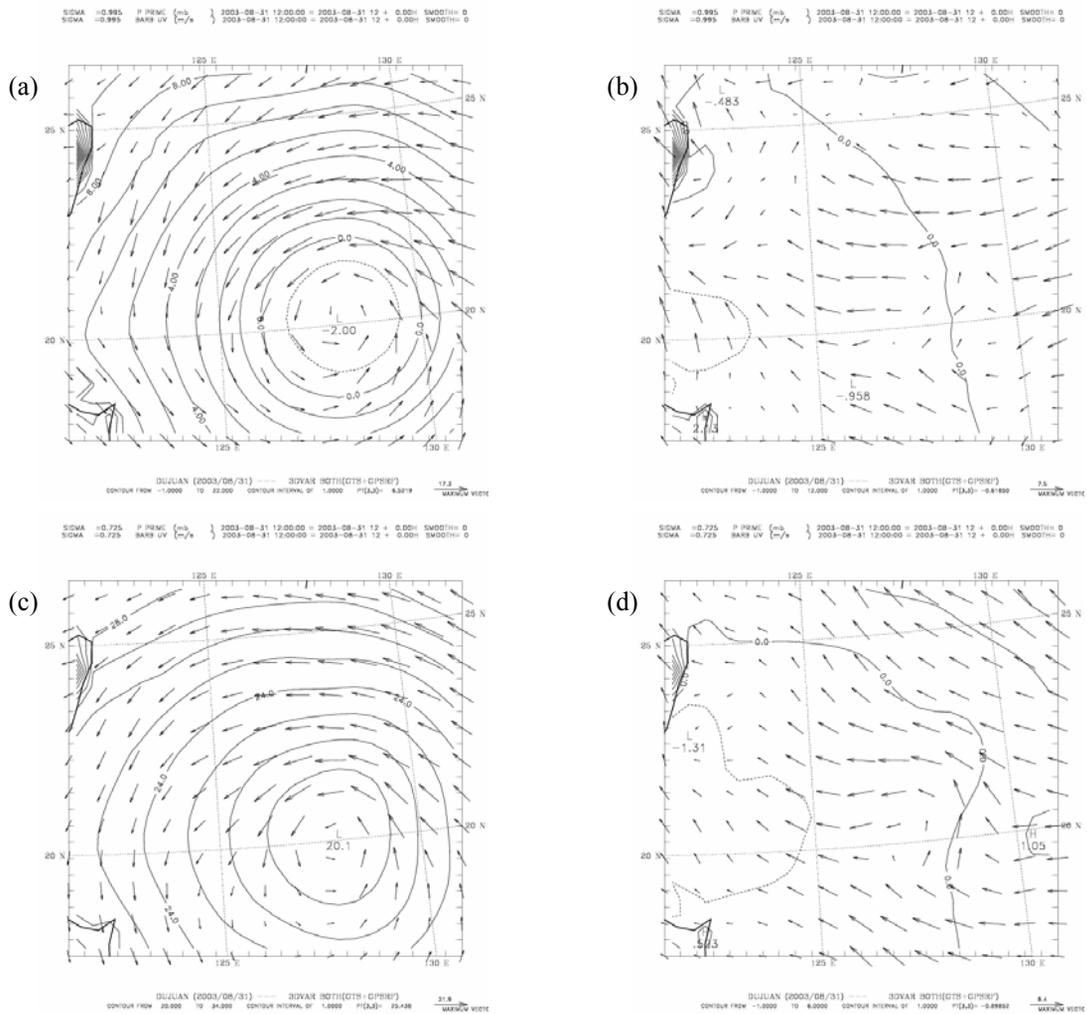


圖 6 颱風 Dujuan，同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料模擬在 $\sigma = 0.995$ 層初始場之(a)擾動氣壓以及水平風場、(b) 擾動氣壓以及水平風場的不對稱量，(c)及(d)分別同(a)及(b)圖，但為同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料模擬在 $\sigma = 0.725$ 層。

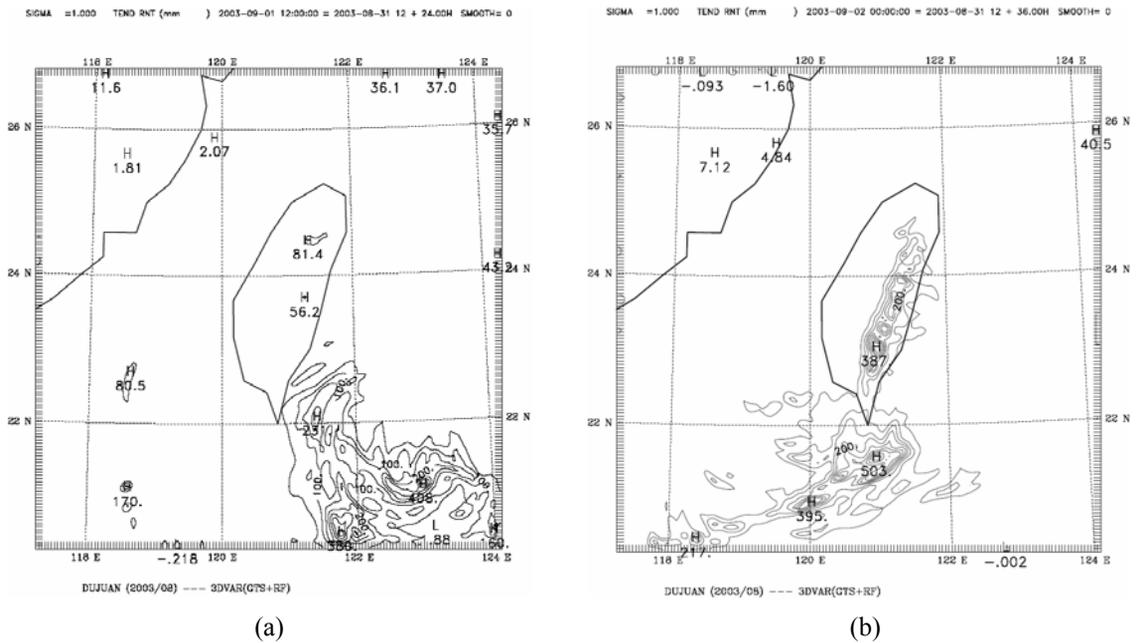


圖 7 颱風 Dujuan 個案，使用 3DVAR 同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料模擬後，每 12 小時的觀測累積降雨量，時間為(a) 0000~1200 UTC 1 September 2003 (81.4 mm) (b) 1200~2400 UTC 1 September 2003 (387 mm)。等直線間距為 50 mm。

利用 Threat Score 來計算降雨預報的技術得分(表二)，在 GTS 個案中，高低門檻值的分數皆比 BOTH 好。

(二) Cycling 3DVAR with QSCAT wind

根據地轉調整(geostrophic adjustment)理論，在低緯地區，中尺度系統的地轉調整是由質量場調整至風場，所以低緯度地區的颱風分析中風場扮演很重要的角色，但是同化所使用的 GPS 掩星觀測並未包含風場訊息。前述的兩個個案，初始場的颱風渦旋都比觀測強度弱。雖然模擬的低壓中心經 12 小時積分後增強到 995 毫巴，這仍然比觀測的 965 毫巴弱。因此增加同化 QSCAT 海面風場資料修正初始場，其資料為 QSCAT 反演的近海平面 10 公里風場，水平解析度是 25 公里。因為文中 Dujuan 個案模擬的初始時間內衛星沒有掃描過臺灣附近，所以使用 cycling 3DVAR 的方

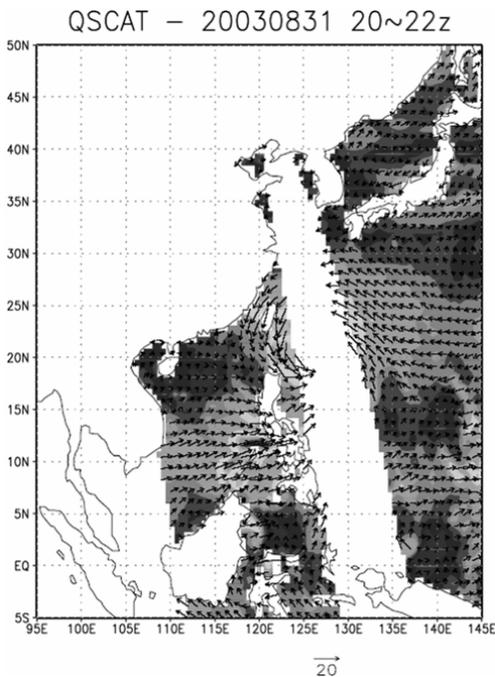
表二 Dujuan 颱風每 24 小時累積降雨之預報得分(threat score, TS)、均方根誤差(root mean square error)與最大累積雨量值。其中 GTS 為同化傳統探空觀測資料的個案，BOTH 為同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率的個案，GTS+GPS+QSCAT 為同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 QSCAT 海面風場資料的個案。

Threat scores	Dujuan		
	0-24h		
	GTS	BOTH	GTS+GPS QSCAT
0.5 mm	0.413	0.409	0.426
10 mm	0.288	0.276	0.301
20mm	0.087	0.082	0.104
50 mm	0.0	0.0	0.0
RMSE	73.93	73.91	73.50
Max (mm)	438.3	468.4	514

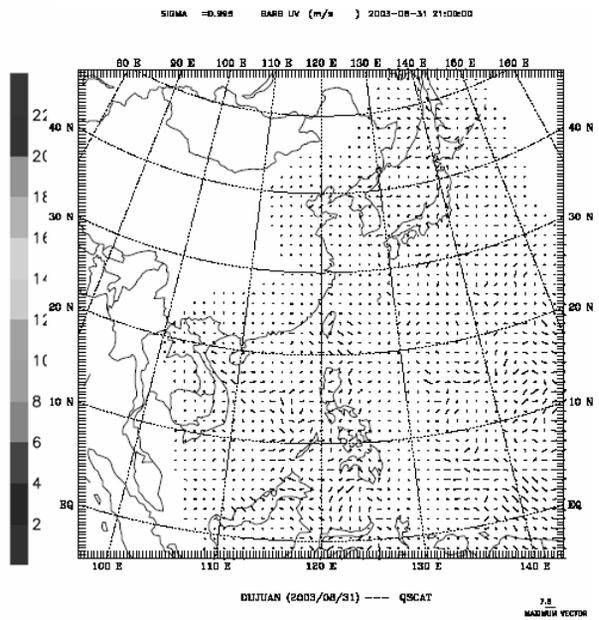
式同化 QSCAT 資料，也就是先以 BOTH 的分析場放入模式積分 9 小時後，再將預報結果取出做為 3DVAR 的背景場(background)，再次將同化新觀測資料後的分析場當作模式初始場，繼續積分。本文選用 2100UTC 加減 1 小時內的資料做為同化的時間窗區，其風場分布如圖 8a 所示，而圖 8b 是使用 3DVAR 同化 QSCAT 資料初始風場的增量，最大調整值為 7.8ms^{-1} 。圖 9 為 GTS+GPS+QSCAT 個案模擬在 Domain 3 的海平面氣壓及近地面水平風場的結果，颱風在預報 21 小時前（時間是 9 月 1 日 1800UTC）登陸，由圖 5 獲得颱風在 cycling 3DVAR 後中心位置北偏，表示同化 QSCAT 二維風場資料不能立刻修正偏移的中心。預報前 15 個小時是向西前進，一樣通過鵝鑾鼻，路徑走勢大致上與 BOTH 同，颱風模

擬前 12 小時的移速較實際快，但在 1 日 1200-1800UTC 期間，颱風移速與中心位置較其它個案佳，此個案很可惜沒有提供完整的颱風渦漩的風場資料，所以其同化後颱風中心的強度與 BOTH 並沒有很大的差異。

圖 10 是模擬之預報 24 小時累積降雨量，其分布與 BOTH 大致相同，但在累積降雨量的最大值比 BOTH 更接近觀測。由表二獲得，加入 QSCAT 風場資料同化，不管是在高低門檻值的 TS 分數都比其他個案好，而且均方根誤差比其他個案小，這是因為使用 cycling 3DVAR 同化 QSCAT 風場資料，所模擬的環境流場接近實際分佈，進而使降雨預報改善（雖然中心氣壓強度預報並無顯著改善）。



(a)



(b)

圖 8 (a) 2003 年 8 月 31 日 2000~2200 UTC 的 QSCAT 海平面風場資料及(b) 使用 3DVAR 同化 QSCAT 資料初始風場的增量，在 $\sigma = 0.985$ 的高度層。

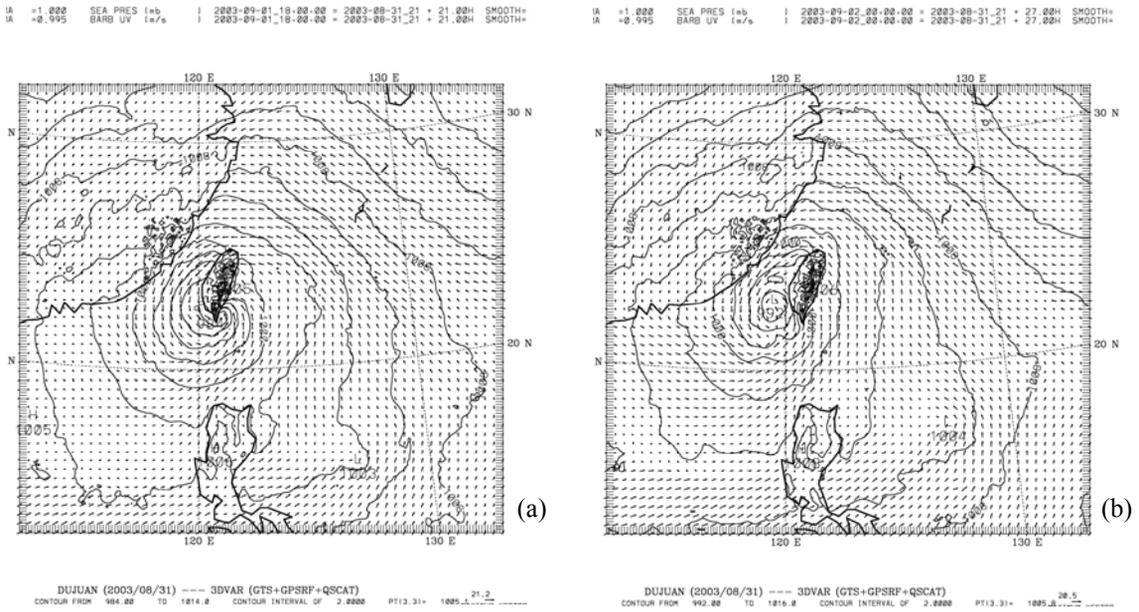


圖 9 颱風 Dujuan 個案，同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 QSCAT 海平面風場資料後之 Domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場 (a) 21 小時及(b) 27 小時預報場。海平面氣壓間距 2 mb，近地面水平風場的等值線間距為 3 m s^{-1} 。

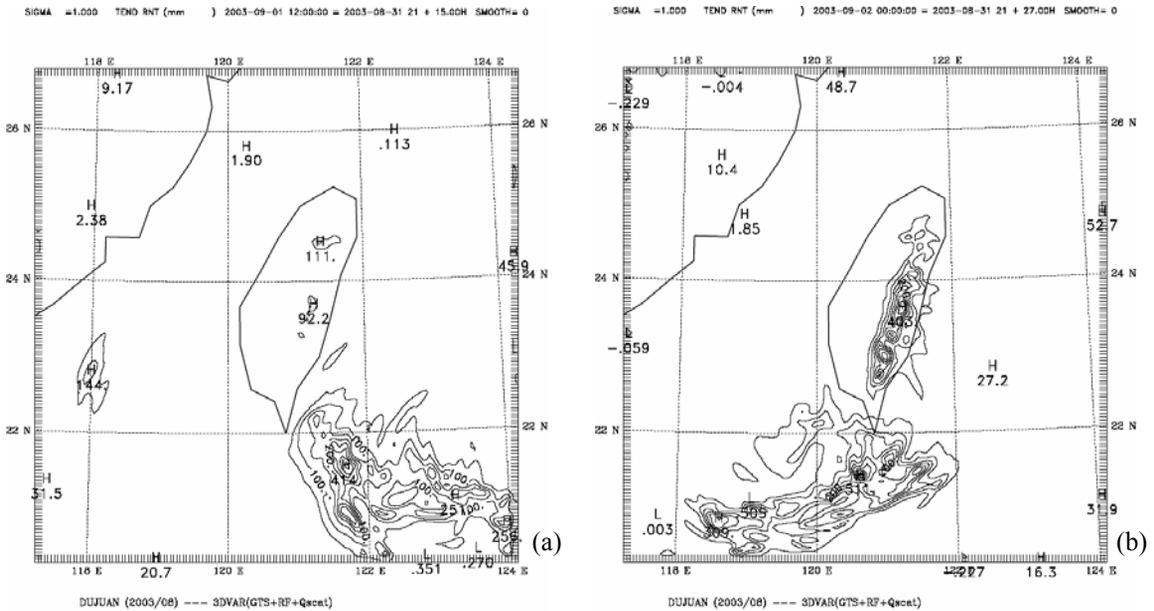


圖 10 颱風 Dujuan 之預報累積降雨量，(a)、(b)圖為同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 QSCAT 海平面風場資料個案，時間分別是 (a) 0000~1200 UTC 1 September 2003 (111 mm)及(b) 1200~2400 UTC 1 September 2003 (403 mm)。括號內的數值表示最大降雨量。等值線為 20 mm。

(三) 敏感度測試

本研究選用的模式 MM5，對於不同之大氣物理過程提供許多不同的選擇，包括降水的物理過程、地表能量收支、地表邊界層的處理和大氣輻射過程。因此對於不同的天氣現象可以採用適當之物理過程加以模擬，當然選擇不同的大氣物理過程，模擬相同個案造成的結果也不一樣，所以 Dujuan 颱風對於 explicit cloud scheme 與積雲參數化的敏感度有多高，會不會是因為選擇錯誤的大氣物理過程，造成路徑預報上誤差很高的原因。以 BOTH 個案當作 control run，分別將 explicit cloud scheme 改為 simple-ice 與 warm-rain 兩組，還有改變積雲參數化為 Grell 一組。其中 warm rain 在微物理的過程中僅考慮雲(cloud)和雨水(rain water)，沒有冰相的過程。而 simple ice 加入冰相，但不考慮過冷水的存在。採用簡易的微物理過程，溫度高於 0°C 為水，而溫度低於 0°C 為冰。Grell 則是利用單一雲胞的上升氣流、下降氣流與補償運動的質量通量做計算。考慮風切對降雨的影響，適用於網格距 10~30 公里，欲了解詳細訊息請見 Grell et al.(1994)。比較發現到 simple ice 與 warm rain 兩者的結果相同，在這 3 個測試(圖略)中模擬路徑最大的差異在 1 日 1200~2400 UTC 之間，颱風的移速較慢，在 1800UTC 時中心位置還在台東外海，但實際路徑正在同過鵝鑾鼻南方海域，而且這 3 個路徑結果也都有登陸台灣，表示本研究中所選用的大氣物理過程是合理的。

(四) Mindulle 颱風個案

第二個模擬的個案為中度颱風-Mindulle。6 月 23 日，Mindulle 於關島西北方海面生成，由於此時颱風北邊的太平洋高壓相當強勁，因此

表三 模擬颱風 Mindulle 個案每 24 小時平均路徑誤差(單位 km)。其中 GTS 為同化傳統探空觀測資料的個案，BOTH 為同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料的個案，GTS+GPS+AMSU 為同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 AMSU 三維風場資料的個案。

Mindulle	24h	48h
GTS	242.22	225.83
BOTH	207.78	182.88
GTS+GPS+AMSU	124.88	75.51

Mindulle 自生成後就一直偏西甚至西南西方移動。27 日 20 時，Mindulle 進入菲律賓東北方海面，並增強為中度颱風，緩慢地朝西北西的方向前進。28 日移動中的 Mindulle 颱風似乎受到呂宋島地形影響，出現了路徑偏西的現象。在 30 日上午，Mindulle 受高壓西緣導引，幾乎是轉了個直角，路徑由西轉北移動。7 月 1 日晚間 10 時左右，颱風中心在花蓮壽豐登陸。2 日 8 時，Mindulle 颱風移到了北緯 25.0 度，東經 121.6 度，而在竹苗外海一帶已經有較明顯的副中心出現，並逐漸取代這個位於台北東方的主中心，之後颱風北上沿著大陸浙江沿岸進入東海。

實驗自 6 月 29 日 0600 UTC 開始模擬。圖 12 為 GTS 個案，模擬的海平面氣壓及近地面水平風場結果，圖 12a (模擬時間相當於 30 日 0600UTC)，顯示颱風中心尚位於台灣東南方海面上，最低氣壓可達 980 毫巴。圖 12b 為積分 36 小時後(相當於 30 日 1800 UTC)，此時模擬之颱風中心在台東外海約 50 公里處，且模擬之颱風登陸(圖 12c)為 1 日 0600UTC 左右為預報第 48 個小時，圖 12d 為積分 60 小時後(相當於 1 日 1800UTC)，颱風穿越中央山脈，中心已出海，說

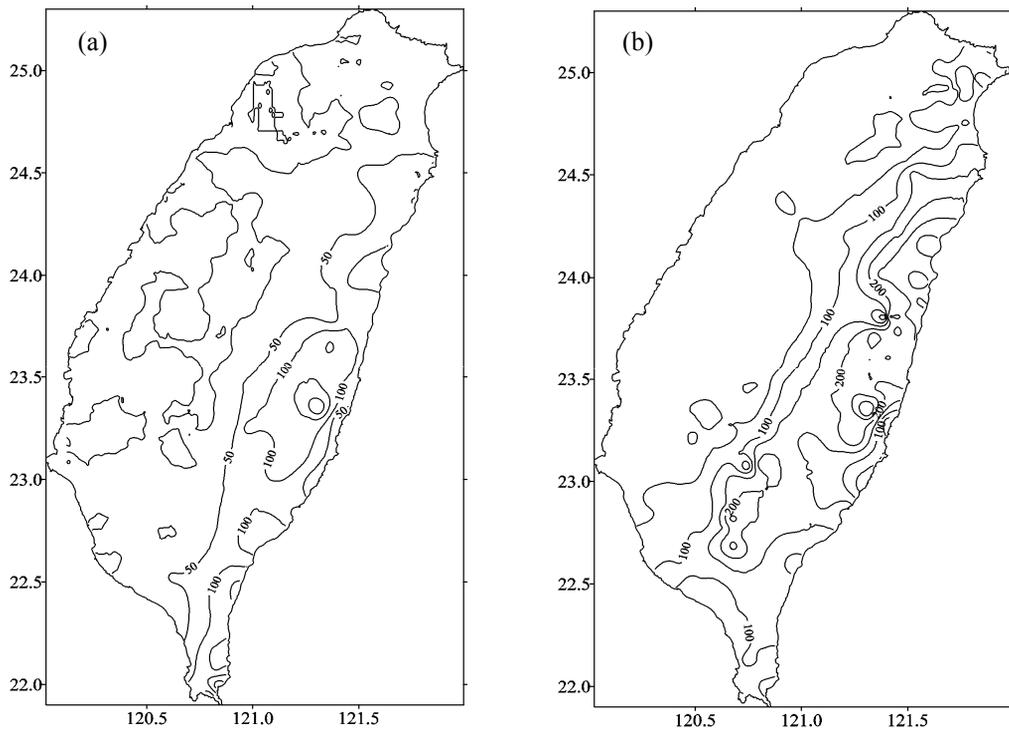


圖 11 Mindulle 個案實際觀測的累積雨量圖時間為 (a) 0000 UTC 30 June -1 July 2004 (240 mm), (b)0000 UTC 1 July -2 July 2004 (356 mm)。等值線為 50 mm。

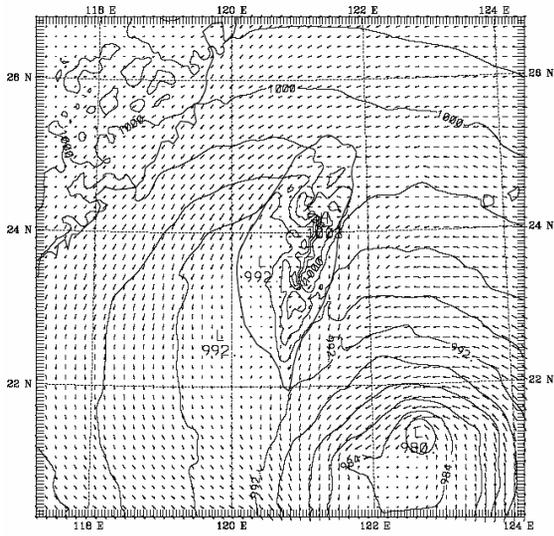
明模擬之颱風移動速度較觀測快。雖然模擬的颱風移速較快，但中心登陸的位置接近觀測。圖 13 為 BOTH 個案，海平面氣壓及近地面水平風場的模擬結果，圖 13a 顯示颱風中心位置與 12a 相似，中心氣壓（達 974 毫巴）較 GTS 個案強。由圖 13b 與 12b 相比，此時模擬之颱風中心更為接近台灣台東陸地，13c 顯示模擬的颱風中心已穿越中央山脈，圖 13d 颱風中心出海。比較 2 組個案得知在前 48 小時，BOTH 的預報較接近最佳路徑，但預報 48 小時以後 BOTH 模擬的颱風移速較快，且登陸位置較南偏。圖 14 為使用上述兩組不同設定的模擬路徑圖，可以清楚的發現，模擬的 Mindulle 颱風路徑在轉折的部分都確實有模擬出來，只是登陸的時間較早且位置較實際偏南。

在前 48 小時的預報中 BOTH 的路徑比 GTS 個案平均修正了 35~40 公里左右（表三），也就是加入 GPS 掩星折射率資料有助於改善路徑預報。

圖 11 為實際之累積降雨量，圖 11a 顯示 30 日主要降水多集中東半部，最大值可達 240mm，隔日（圖 11b）仍集中於東半部地區，但雨量明顯增加。將其與模擬相較，第一及第二日的主要降水位置集中於東部山區，個案預報皆有表現出來，顯示 Mindulle 颱風的模擬結果掌握了主要降雨量分布的特徵。而所模擬的 Mindulle 颱風移動速度較觀測快，開始影響台灣的時間提早，且穿越過中央山脈中心出海（但真實路徑僅沿中央山脈東側北上），主要雨帶活躍在陸地上，所以 GTS(15a、b)與 BOTH 兩種實驗(15c、d)的累積降

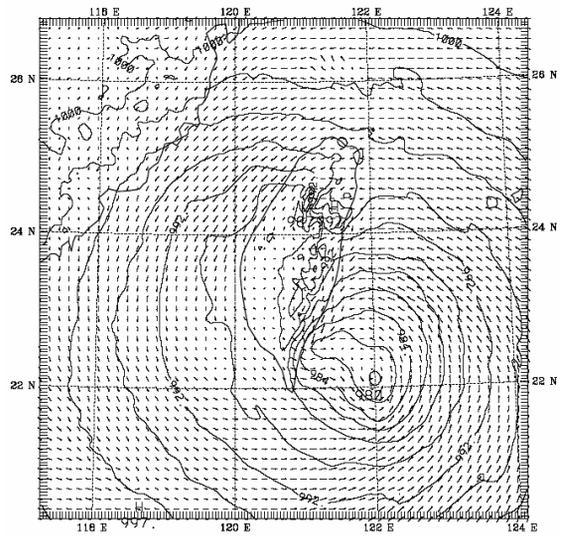
SIGMA = 1.000 SEA PRES |mb | 2004-06-30_06_00.00 = 2004-06-29_06 + 24.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV |m/s | 2004-06-30_06_00.00 = 2004-06-29_06 + 24.00H SMOOTH= 0

SIGMA = 1.000 SEA PRES |mb | 2004-06-30_18_00.00 = 2004-06-29_06 + 36.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV |m/s | 2004-06-30_18_00.00 = 2004-06-29_06 + 36.00H SMOOTH= 0



Mindulle(2004/06)--3DVAR (gta)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1004.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3,3)= 998.0 KMH/HR VECTOR

(a)

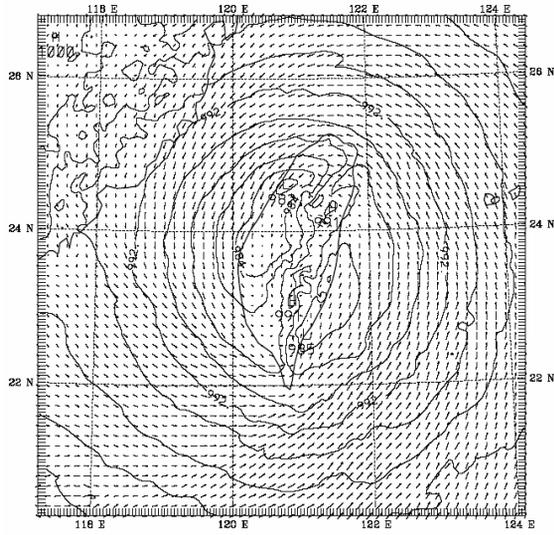


Mindulle(2004/06)--3DVAR (gta)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1002.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3,3)= 997.0 KMH/HR VECTOR

(b)

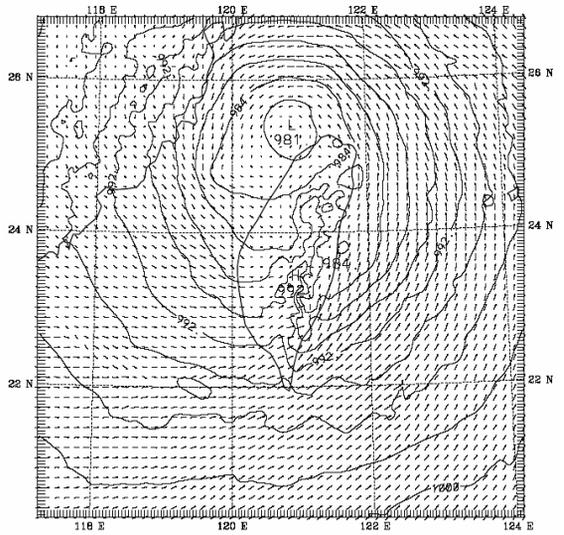
SIGMA = 1.000 SEA PRES |mb | 2004-07-01_06_00.00 = 2004-06-29_06 + 48.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV |m/s | 2004-07-01_06_00.00 = 2004-06-29_06 + 48.00H SMOOTH= 0

SIGMA = 1.000 SEA PRES |mb | 2004-07-01_18_00.00 = 2004-06-29_06 + 60.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV |m/s | 2004-07-01_18_00.00 = 2004-06-29_06 + 60.00H SMOOTH= 0



Mindulle(2004/06)--3DVAR (gta)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1002.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3,3)= 1000.0 KMH/HR VECTOR

(c)

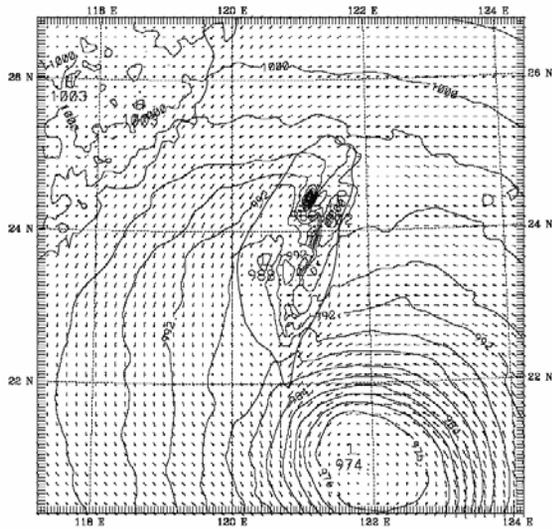


Mindulle(2004/06)--3DVAR (gta)
 CONTOUR FROM 998.00 TO 1002.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 PT(3,3)= 999.0 KMH/HR VECTOR

(d)

圖 12 颱風 Mindulle 個案 (初始時間 0600 UTC 29 June 2004)，使用 3DVAR 同化傳統探空觀測資料後，模擬 domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場。(a) 24 小時，(b) 36 小時，(c) 48 小時及(d)60 小時預報場。

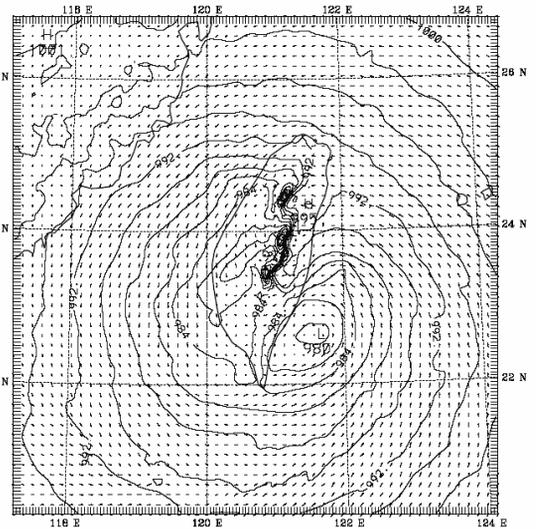
SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb I 2004-06-30 06:00:00 = 2004-06-29 06 + 24.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s I 2004-06-30 06:00:00 = 2004-06-29 06 + 24.00H SMOOTH= 0



Mindulle(2004/06)--3DVAR (start)
 CONTOUR FROM 974.00 TO 1000.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 FT(3.31) 977 49°/h VECTOR

(a)

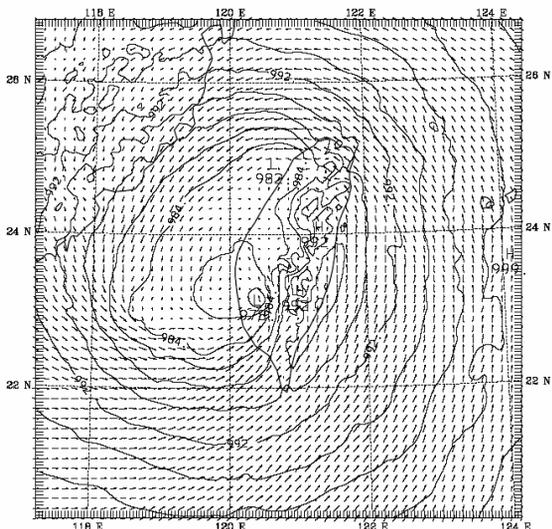
SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb I 2004-06-30 10:00:00 = 2004-06-29 06 + 36.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s I 2004-06-30 10:00:00 = 2004-06-29 06 + 36.00H SMOOTH= 0



Mindulle(2004/06)--3DVAR (start)
 CONTOUR FROM 970.00 TO 1000.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 FT(3.31) 995 49°/h VECTOR

(b)

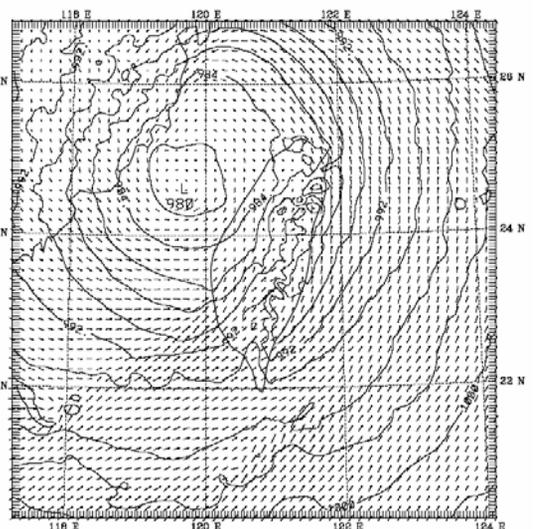
SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb I 2004-07-01 06:00:00 = 2004-06-29 06 + 48.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s I 2004-07-01 06:00:00 = 2004-06-29 06 + 48.00H SMOOTH= 0



Mindulle(2004/06)--3DVAR (start)
 CONTOUR FROM 970.00 TO 1000.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 FT(3.31) 977 49°/h VECTOR

(c)

SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb I 2004-07-01 10:00:00 = 2004-06-29 06 + 60.00H SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s I 2004-07-01 10:00:00 = 2004-06-29 06 + 60.00H SMOOTH= 0



Mindulle(2004/06)--3DVAR (start)
 CONTOUR FROM 980.00 TO 1000.0 CONTOUR INTERVAL OF 2.0000 FT(3.31) 1000 49°/h VECTOR

(d)

圖 13 颱風 Mindulle 個案 (初始時間 0600 UTC 29 June 2004)，為使用 3DVAR 同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料後，模擬 domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場。(a) 24 小時，(b) 36 小時，(c) 48 小時及(d)60 小時預報場。

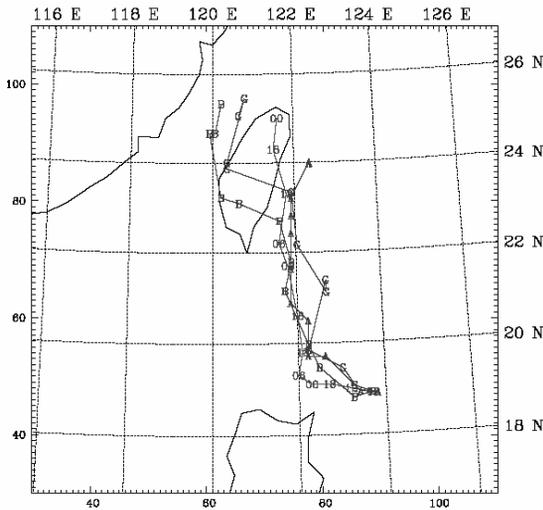


圖 14 颱風 Mindulle 個案路徑圖 (初始時間 0600 UTC 29 June 2004), 數字為中央氣象局最佳路徑圖, 記號 G 為同化傳統探空觀測資料模擬之路徑, 記號 B 為同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料之路徑, 記號 A 為同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料與 AMSU 三維風場資料之路徑。路徑每個點間格 6 小時。

雨量皆比實際累積降雨量高出很多。從 Threat Score 所算計算出的分數 (表四) 得知, 在前 24 小時之累積降雨量, 不管對高低門檻值, BOTH 模擬的結果都優於 GTS 的表現, 在後 48 小時 BOTH 只有門檻值 0.5mm 的分數表現的比較差一些, 整體來講還是比 GTS 來得好, 而且其均方根誤差也是 BOTH 較小。

(五) AMSU 三維風場

本研究所使用的 AMSU 三維風場是依據 Chou et al.(2008)所使用的方法求得, 因為 AMSU 的亮度溫度與大氣溫度之間有近似線性的對應關係, 可由 AMSU 資料反演溫度剖面。且在假設靜力平衡與梯度風平衡的條件下, 再使用反演的溫度場推出三維的梯度風場的分布。圖 16 為分析場經 3DVAR 同化 AMSU 三維風場資料之風場垂直

表四 Mindulle 颱風每 24 小時累積降雨之預報得分(Threat Score, TS)、均方根誤差(root mean square error)與最大累積雨量值。其中 GTS 為同化傳統探空觀測資料的個案, BOTH 為同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料的個案, GTS+GPS+AMSU 為同化傳統探空觀測資料、GPS 折射率資料與 AMSU 三維風場資料的個案。

Threat scores	Mindulle					
	0-24h			24-48h		
	GTS	BOTH	GTS+GPS+AMSU	GTS	BOTH	GTS+GPS+AMSU
0.5 mm	0.639	0.728	0.556	0.869	0.854	0.733
10 mm	0.576	0.707	0.436	0.703	0.717	0.562
20mm	0.360	0.565	0.100	0.503	0.528	0.330
50 mm	0.043	0.161	0.0	0.136	0.159	0.028
RMSE	19.03	18.07	20.75	50.58	49.82	55.01
Max (mm)	695	906	377	1096	1028	673

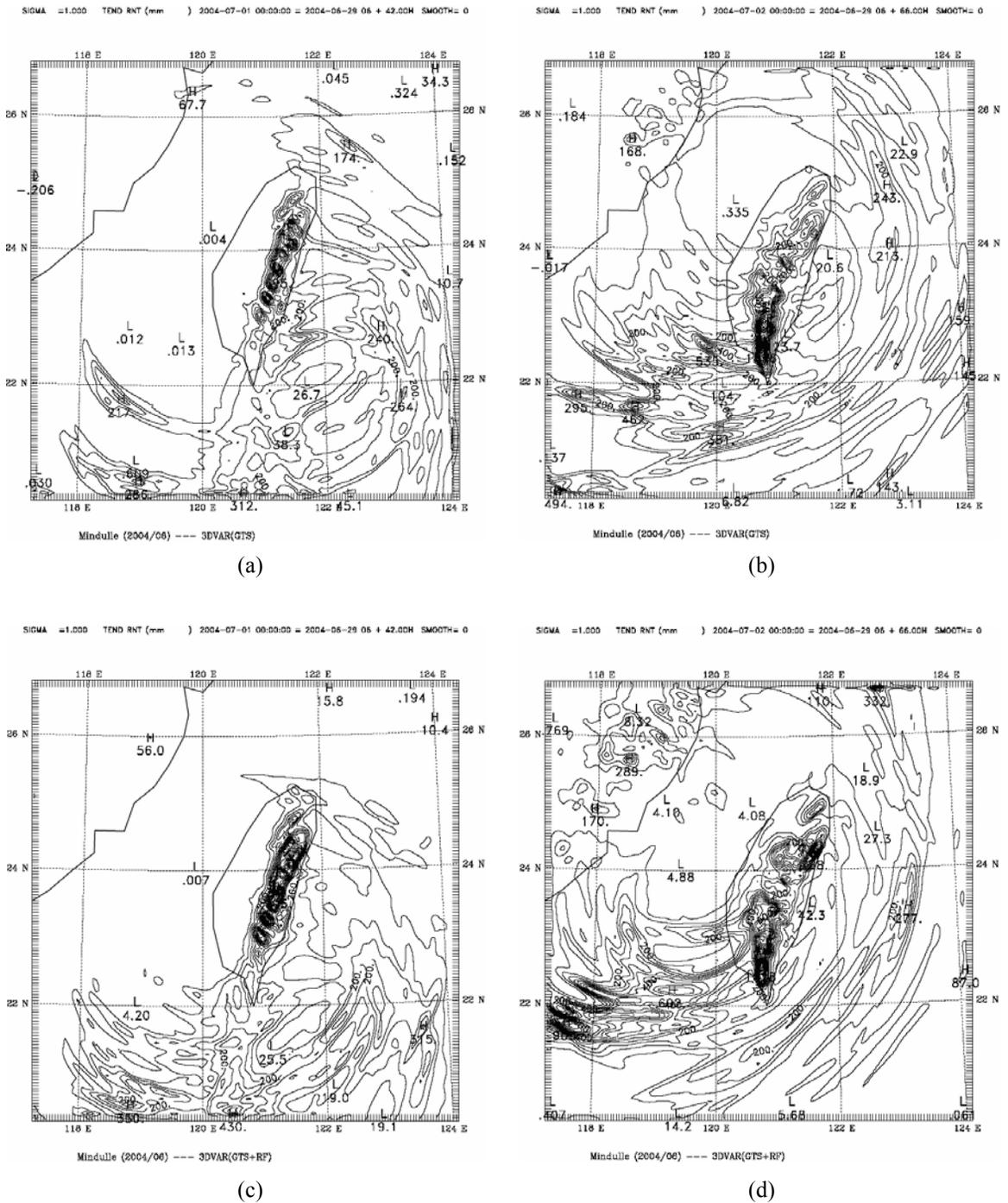
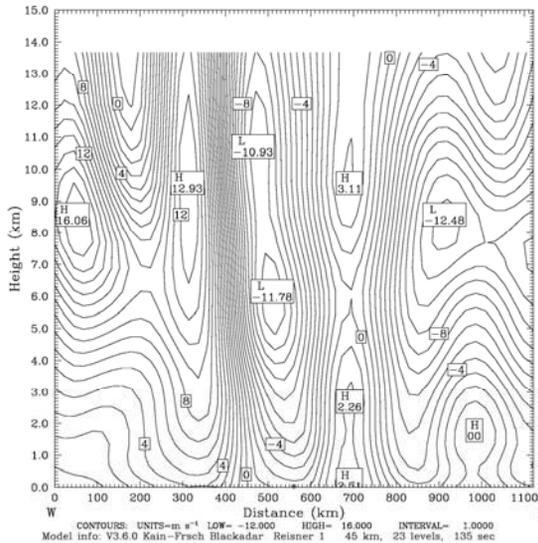


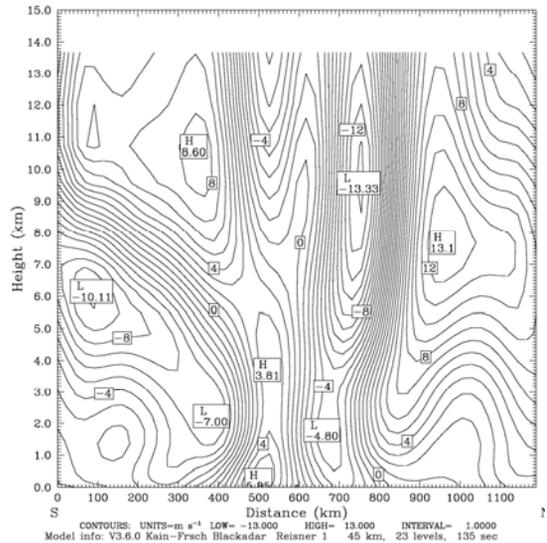
圖 15 颱風 Mindulle 個案 (初始時間 0600 UTC 29 June 2004)，使用 3DVAR 同化傳統探空觀測資料後，每 24 小時的觀測累積降雨量，時間為 (a) 0000 UTC 30 June -1 July 2004 (695 mm)、(b) 0000 UTC 2-1 July 2004 (1096 mm)。 (c) (906 mm)與 (d) (1028 mm)同圖(a)、(b)為使用 3DVAR 同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料模擬。等直線間距為 50 mm。

MINDULL 3D-VAR INCREMENT DIFF DUE TO AMSU-NO Init: 0600 UTC Tue 2
 Fest: 0.00 Valid: 0600 UTC Tue 29 Jun 04 (1400 LST Tue 29
 Horizontal wind (y-comp.) XY= 72.8, 60.3 to 97.6, 61.4 sm= 1
 (diff. from case=no, time= 0.00)



(a)

MINDULL 3D-VAR INCREMENT DIFF DUE TO AMSU-NO Init: 0600 UTC Tue 2
 Fest: 0.00 Valid: 0600 UTC Tue 29 Jun 04 (1400 LST Tue 29
 Horizontal wind (x-comp.) XY= 85.9, 46.5 to 84.6, 72.9 sm= 1
 (diff. from case=no, time= 0.00)



(b)

圖 16 初始時間 (0600 UTC 29 June 2004) 使用 3DVAR 同化 AMSU 三維風場資料 (a) 以颱風為中心東西向做一剖面, 南北風分量垂直分布, 與(b)以颱風為中心南北向做一剖面, 東西風分量垂直分布。其中颱風中心以實心圓表示。

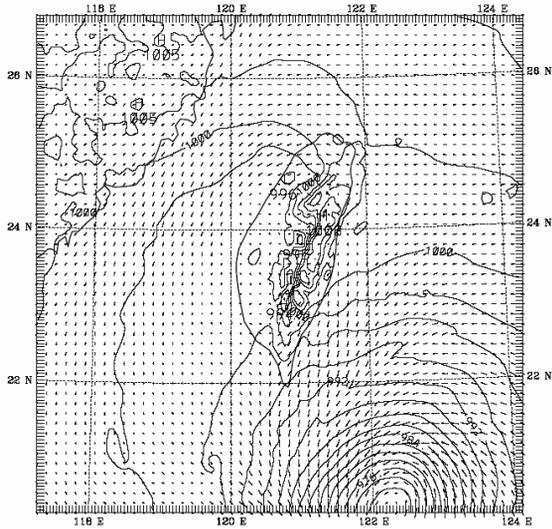
分佈, 近颱風中心東邊為南風增量, 西邊為北風增量, 北邊為東風增量, 南邊為西風增量, 呈氣旋式環流, 且隨著高度向上增加, 在 10 公里附近, 東西風分量增量最大為 13.35m s^{-1} 。而在 6 公里附近, 南北風分量增量最大為 11.13m s^{-1} 。在外圍則是呈反氣旋式環流, 同樣隨高度增加, 在 7.5 公里附近, 東西風分量增量最大為 13.1m s^{-1} 。而在 9.5 公里附近, 南北風分量增量最大為 12.93m s^{-1} 。在加入 AMSU 風場資料後的颱風走向 (圖 17) 與實際觀測更接近, 颱風由初始位置菲律賓東北方海面, 轉向台灣東部海域前進, 然後在宜蘭、花蓮一帶登陸, 穿越台灣在新竹一帶出海。颱風初始強度 (973 毫巴) 比起未加入 AMSU 資料同化的個案較接近實際颱風 (950 毫巴), 但整體移動速度偏慢。

在降雨預報上, 與圖 18 實際觀測的累積雨量相比較, GTS+GPS+AMSU 的個案模擬結果, 在 7 月 1 日, 雨量集中在東部 (有一雨量較大值), 與實際分佈相似, 但比觀測雨量大。於 7 月 2 日, 模擬結果在台東地區有高達 673mm 的日雨量最大值, 而這與實際不符, 這是因為模擬的颱風移速緩慢許多, 影響東半部時間較實際久, 因此台東地區落下豪大雨。

四、結 論

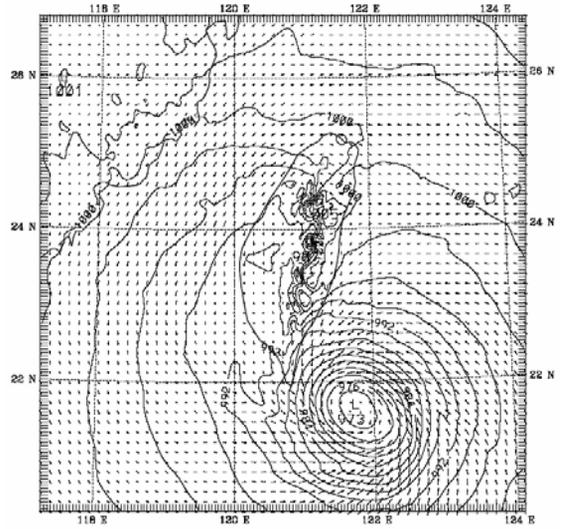
影響數值天氣預報準確度的兩大因素, 一者是數值模式本身, 另外則為模擬的初始條件。當使用的模式具有良好且完整的物理內容時, 能夠提供模式最接近真實大氣狀態的初始條件, 對模

SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb ; 2004-06-30 06:00:00 = 2004-06-29_06 + 24.00h SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s ; 2004-06-30 06:00:00 = 2004-06-29_06 + 24.00h SMOOTH= 0



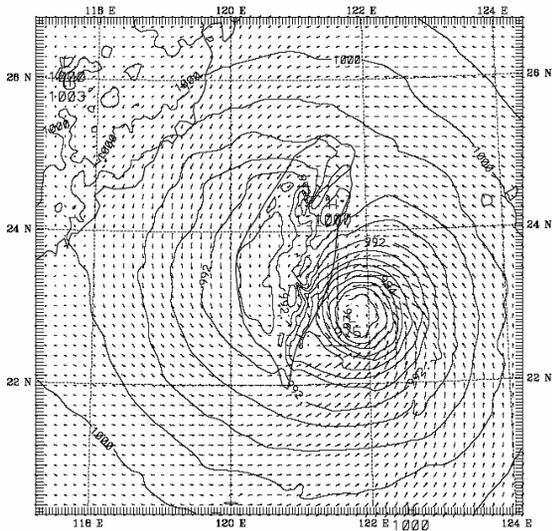
(a)

SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb ; 2004-06-30 18:00:00 = 2004-06-29_06 + 36.00h SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s ; 2004-06-30 18:00:00 = 2004-06-29_06 + 36.00h SMOOTH= 0



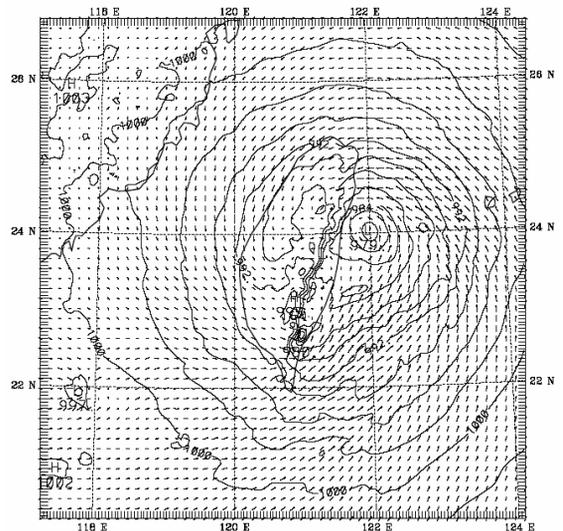
(b)

SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb ; 2004-07-01 06:00:00 = 2004-06-29_06 + 48.00h SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s ; 2004-07-01 06:00:00 = 2004-06-29_06 + 48.00h SMOOTH= 0



(c)

SIGMA = 1.000 SEA PRES 1mb ; 2004-07-01 18:00:00 = 2004-06-29_06 + 60.00h SMOOTH= 0
 SIGMA = 0.995 BARB UV 1m/s ; 2004-07-01 18:00:00 = 2004-06-29_06 + 60.00h SMOOTH= 0



(d)

圖 17 颱風 Mindulle 個案 (初始時間 0600 UTC 29 June 2004)，為使用 3DVAR 同化傳統探空觀測資料與 GPS 折射率資料與 AMSU 衛星資料風場資料後，模擬 domain 3 之海平面氣壓及近地面水平風場。(a) 24 小時，(b) 36 小時，(c) 48 小時及(d)60 小時預報場。

射率的資料尚不充足。

同化傳統探空觀測資料、GPS 掩星觀測及 QSCAT 海平面風場資料的模式初始場，模擬出來的颱風路徑移動方向大致上與同化傳統探空觀測資料以及同化傳統探空觀測資料與 GPS 掩星觀測資料的個案相符，模擬的颱風移速也相當不錯。但對於同化 QSCAT 海平面風場資料，仍無法有效增強颱風中心強度，這可能是因為在 Dujuan 的個案中 QSCAT 的風場並未涵蓋完整的颱風結構，另外 QSCAT 為近海平面二維風場，無法提供垂直上的變化資訊。由累積降雨預報方面，Threat Scores 所算得的分數比其他 2 種個案佳，而且均方根誤差值為所有個案中最小的，這是因為使用 cycling 3DVAR 同化 QSCAT 風場資料，所模擬的環境流場接近實際分佈，使降雨預報改善。

在另一實驗中，颱風 Mindulle 使用 GPS 折射率模擬，在登陸前 48 小時比起 GTS 模擬結果有將近 40 公里的路徑修正，颱風移動方向更接近實際路徑，不過，颱風中心氣壓強度仍不足，由觀測累積降雨量來看，由於模擬之颱風在登陸前後路徑較實際觀測差，登陸位置偏南，移動速度較觀測快，所以累積降雨量皆比實際之累積降雨量來的多。

增加同化 AMSU 反演的三維風場資料，颱風強度與實際觀測接近，對路徑預報有改善，但在雨量模擬方面較其它實驗個案差，是因為 GTS+GPS+AMSU 的個案路徑預報後期偏離台灣，而且未登陸。

目前所顯示的結果加入 GPS 掩星折射率觀測資料的影響程度與個案之不同有關，但普遍來說，同化 GPS 掩星折射率資料同化對水氣分佈有

較明顯的改變，而同化 QSCAT 風場對氣壓強度的改善沒有同化 AMSU 反演的三維風場資料明顯，但是同化 QSCAT 風場有助於使模擬的颱風環流更接近實際颱風，而有助於提升降水預報。而同化 AMSU 的三維風場資料，對強度、路徑有明顯的改進，未來將能針對更多個案進行探討，了解其對颱風預報的正面影響。

參考文獻

- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 117 pp.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- Huang, C.-Y., Y.-H. Kuo, S.-H. Chen and F. Vandenberghe, 2005: Improvements on typhoon forecast with assimilated GPS occultation refractivity. *Wea. Forecasting*, 20, 931-953.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 246 pp.
- Kursinki, E. R., G. A. Hajj, K. R. Hardy, L. J. Romans, and J. T. Schofield, 1995: Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system. *Geophys. Res. Letter*, 22, No. 17, 2365-2368.
- Kuo, Y.-H., X. Zou, S.-J. Chen, Y.-R. Guo, W. Huang, R. A. Anthes, D. Hunt, M. Exner, C. Rocken, and S. Sokolovskiy, 1998: A

- GPS/MET sounding through an intense upper-level front. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 617-626.
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's Spectral Statistical Interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747-1763.
- Leroy, S. S., 1997: Measurement of geopotential heights by GPS radio occultation. *J. Geophys. Res.*, 102(D6), 6971-6986.
- Liu, H., X. Zou, R. A. Anthes, J. C. Chang, J. H. Tseng, and B. Wang, 2001: Impact of 837 GPS/MET bending angle profiles on assimilation and forecasts for the period June 20-30, 1995. *J. Geophys. Res.*, 106, 31771-31786.
- Tao, W.-K., J. Simpson, and M. McCumber, 1989: An ice-water saturation adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231-235.
- Tao, W.-K. and J. Simpson, 1993: Goddard Cumulus Ensemble Model. Part I: Model Description. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 4, 35-72.
- Thayer, G. D., 1974: An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci.*, 9, 803-807.
- Ware, R., and Coauthors, 1996: GPS soundings of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 19-40.
- Willoughby, H. E., 1990: Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, 47, 242-264.
- Zou, X., Y.-H. Kuo, and Y.-R. Guo, 1995: Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic adjoint model. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2229-2249.
- Zou, X., F. Vandenberghe, B. Wang, M. E. Gorbunov, Y.-H. Kuo, S. Sokolovskiy, J. C. Chang, J. G. Sela, and R. Anthes, 1999: A raytracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *J. Geophys. Res.*, 104, 22301-22318.

Impact of Three-Dimensional Variational Assimilation of Satellite Remote Data on Typhoon Simulations

Ching-Yuang Huang Chieh-Ju Wang

Department of Atmospheric Sciences, National Central University

(Manuscript received 2 April 2008; in final form 10 November 2008)

ABSTRACT

This study uses NCAR MM5 3DVAR (Three-Dimensional Variational Data Assimilation) to ingest various satellite observations (GPS radio occultation, AMSU, QuikSCAT) and conventional soundings into a mesoscale model for understanding the impact of these data on improvement of numerical weather prediction. Two typhoons were selected for simulation, including the August 2003 moderate Typhoon Dujuan and the June 2004 moderate Typhoon Mindulle. Numerical simulations consist of two comparative group experiments with assimilated data, one with the conventional soundings only, and the other with both GPS RO soundings and the conventional soundings.

Both cases apply three nested domains with the highest horizontal resolution of 5 km. In the outermost domain there are 4-6 soundings from the CHAMP satellite to provide temperature and moisture profile information. For Dujuan, in the run assimilating both GPS RO refractivity and conventional soundings the simulated typhoon track and moving speed are more consistent with the observed track and movement than those from the assimilation of conventional soundings only, in spite that the simulated central pressure intensity is still considerably lower than the observation. The simulated accumulated rainfall is also more consistent with the observation with a maximum over east Taiwan since Dujuan's circulation passed by the southern end of Taiwan. For Mindulle, the simulation with additional GPS refractivity gives an improvement of 40 km on track (together with a more coincident movement) 40 h prior to landfall when compared to the simulation with conventional soundings only. The threat scores and root mean square errors of simulated accumulated rainfalls are promisingly good compared with the observations, but additional QuikSCAT data (oceanic 2D near-surface wind speed) assimilation further improves the typhoon circulation and hence results in more improvement on rainfall prediction. On the other hand, additional assimilation of the 3D wind retrieved from AMSU makes the typhoon structure even more consolidated and thus leads to a significant improvement on track prediction.

Key words: 3DVAR, GPS RO refractivity, AMSU

