

利用 MM5 4DVAR 模式探討同化虛擬渦旋和掩星折射率資料對於珊珊颱風(2006)數值模擬之影響

黃清勇^{1,2} 吳俊澤¹

¹ 國立中央大學大氣科學系

² 國立中央大學全球定位科學與應用研究中心

(中華民國一百年十二月七日收稿；中華民國一〇一年九月二十九日定稿)

摘 要

本研究利用 MM5 4DVAR 模式，探討渦旋的虛擬資料同化(Bogus Data Assimilation, BDA)和 GPS 掩星觀測資料同化對於初始分析場的改進及颱風預報的影響，模擬個案為珊珊颱風(2006)。本文的 BDA 包括氣旋的海平面氣壓及三維平衡風場與近地面徑向入流，可以有效地強化模式初始颱風，更能幫助維持颱風垂直結構，模擬結果顯示對颱風預報有明顯的改善。

個案實驗結果顯示，加入 GPS 掩星折射率資料可以修正模式初始場，只是調整的幅度遠不及虛擬渦旋同化大。個案模擬結果亦顯示，虛擬渦旋同化主導颱風的路徑及強度預報，遠較無同化時要好很多，而僅同化 GPS 掩星折射率在路徑預報亦有一些的影響。同時同化虛擬渦旋及折射率，則較單純 BDA 在路徑預報上可進一步改善，同時亦改善台灣地區的劇烈降雨預報。

關鍵字：四維變分、虛擬資料同化、GPS 掩星折射率

一、前言

台灣所位處的地理環境，是屬於副（亞）熱帶和熱帶的氣候。北回歸線正好落於台灣本島的嘉義附近，其以北是屬於副（亞）熱帶季風氣候區，以南是屬於熱帶季風氣候區。而且台灣又是海島，容易受到周遭的海洋洋流和暖濕氣流影響，使得台灣的氣候環境為之複雜。由 Neumann (1993) 研究指出西北太平洋是全球熱帶氣旋活動最旺盛的地區，而台灣恰巧位於西北太平洋上颱風移動路徑之要衝，使得平均每年約有六個對台灣有影響的颱風，其中有三到四個係侵台的颱風（謝等，1998）。另外，台灣氣候的複雜性及所處位置在太平洋副熱帶高壓影響範圍的邊緣，讓接近台灣時的颱風路徑常常變化難測。而且，颱風常生成於廣大的海洋上，距離陸地非常的遙遠。因此，不像陸地上有很多氣象觀測的儀器設備，可以提供許多颱風相關的氣象場資料。Zou et al. (1995)、Kursinski et al. (1995) 和 Kuo et al. (2000) 藉由 GPS 衛星掩星觀測的資料，如：折射率或偏折角，來提供更多大氣的相關資訊，如：氣壓、溫度及水氣等，進而改善傳統氣象觀測資料缺乏的情況。台灣福衛三號已於 2006 年 4 月發射，透過 6 顆星系聯網的全球掩星觀測，可以提供全球高垂直解析度的氣象觀測資訊，尤其是在寬廣遼闊的海洋上。關於福衛三號及其觀測應用，參見黃和朱(2004)及 Anthes et al. (2008)。目前福衛三號的 GPS 掩星觀測資料已被大量利用，藉以改善大氣模式的初始場，進而提高颱風、梅雨等劇烈天氣的預報準確度，可參見介紹文章(Huang et al. 2010)。

在改善颱風初始場的研究上，由於海上觀測資料相當稀少，Guo et al. (2000) 指出四維變分資

料同化可以將有限的真實或虛擬的觀測資料有效地同化於模式，使初始分析場和模式動力取得一致性。Zou and Xiao (2000) 和 Xiao et al. (2000) 利用 MM5 4DVAR，提出虛擬資料同化(Bogus Data Assimilation, BDA)方法，結合颱風觀測資訊及估計參數，例如最低的海平面氣壓和最大風速的半徑等，將虛擬的渦旋同化到模式初始場，成功地產生較強烈且接近實際的颱風，個案研究顯示此 BDA 對颱風的路徑乃至強度模擬都有相當顯著的改善。此外，Park and Zou (2004) 更進一步利用觀測提供的颱風中心位置和最低氣壓及暴風半徑，作為 BDA 參數的客觀估計。Wu et al. (2006) 亦根據 MM5 4DVAR，研究熱帶氣旋的初始化和其對預報影響，指出 BDA 參數之敏感度，對不同變數的同化有不同的影響，例如同化風場比同化氣壓場，更能改善颱風的結構與強度，這顯示個案颱風的地轉調整較傾向為風場所主宰，反映出較低緯度的氣旋具有較大的羅士比變形半徑，符合理論上質量場（氣壓場）應向初始風場調整。

前述颱風的研究顯示為改善全球初始分析場的颱風強度，乃至不對稱結構，應考慮加入適當的真實或虛擬的資料同化。4DVAR 可在一段同化時間窗區內同化觀測資料，透過模式的動力限制和向前模式及伴隨模式的積分，使分析場與觀測資料二者的差異極小化，提供一個和模式動力較為一致的初始場，對颱風預報的改善有一定幫助。除颱風本身的 BDA 外，可再結合其它實際觀測來進一步改善環境分析場。在海洋上，GPS 掩星觀測無疑是寶貴的資源，提供了高垂直解析度和精確的大氣反演參數（如折射率），特別是在上對流層及低平流層，對大氣溫度場的分析有明顯的效益(Anthes et al. 2008)。本文研究的主要目的即在探討 BDA 與福衛三號 GPS 掩星觀測的

同化對於颱風個案的模式初始場之改善及模擬的影響。本文選擇侵台颱風珊珊(Shanshan) (2006)，第二節介紹研究方法及實驗設計與個案簡介，第三節提供模擬結果討論，最後為本文結論。

二、研究方法和實驗設計及個案簡介

(一) 研究方法

1. MM5 4DVAR 簡介

本研究使用的MM5 4DVAR系統是由賓州州立大學及NCAR的MM5模式3.7版與Zou et al. (1997)依據此版所發展的伴隨模式所組合（此伴隨模式為簡化起見，只包括 simple ice 雲微物理及Blackadar邊界層參數化），在進行預報時則使用MM5 3.7.4版（包含完整的物理過程，見Dudhia et al. 2005）。MM5 4DVAR在變分問題的數學處理上，是採用一個客觀函數的最小化（即價值函數）來獲得最佳的初始分析場，其價值函數的定義如下：

$$J = \frac{1}{2} [x(t_0) - x_b]^T B^{-1} [x(t_0) - x_b] + \sum_{t_r (r=0, R)} \frac{1}{2} \{h[x(t_r)] - y_{obs}\}^T \cdot O^{-1} \{h[x(t_r)] - y_{obs}\}$$

其中

x_b 是背景場（或初猜場）

$x(t_0)$ 是初始分析場

y_{obs} 是觀測場

B 是背景誤差斜方差矩陣

O 是觀測誤差斜方差矩陣

h 是觀測運算子

t_R 是同化資料窗區的時間長度（從初始分析時間 t_0 開始）。

在背景誤差斜方差矩陣方面，是根據 NMC 方法（即利用 12 h 前及 24 h 前兩個不同時間的預報誤差）來計算背景誤差。此外在觀測誤差斜方差矩陣方面，海平面氣壓使用權重係數為 0.2 hPa 即是氣壓誤差為 2.2 hPa。水平風速 u 、 v 使用權重係數為 0.04 即風速誤差為 5 ms^{-1} 。而在 GPS 掩星觀測折射率誤差方面與 Huang et al. (2005) 相同，近地面為 3%（約 10 N-unit），隨高度呈指數遞減（e-folding 尺度約在 10 公里高）。

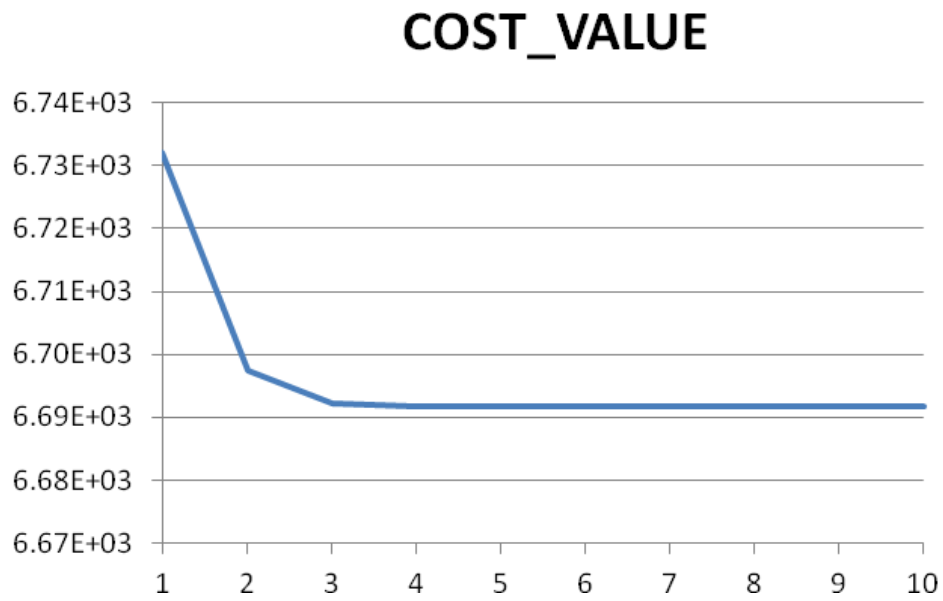
此 MM5 4DVAR 可以將虛擬渦旋及 GPS 折射率的資料，在一同化時間窗區內，藉由模式動力為約束條件來調整，使同化的資料與分析場變數的誤差在模擬區域之總和達到最小值，以改進模式的初始分析場。在本研究中，須先針對最小化的演算，檢查伴隨模式積分的梯度與否正確。如果模式積分所得到的梯度正確，則梯度的比值如右式 $F(\alpha) = \frac{J^o(x_0 + \alpha h) - J^o(x_0)}{\alpha h \nabla J^o(x_0)} = 1 + O(\alpha)$ ，

$F(\alpha)$ 應隨著擾動 α 逐漸減小而趨近於 1（ h 為選取距離）。經過梯度的測試，梯度的比值隨著初始條件的擾動之變小而趨近於 1，而且梯度量值隨著疊代次數的增加呈現快速地下降，顯示觀測算子及資料導入均正確無誤。圖 1 顯示價值函數值（同化 GPS 及虛擬渦旋）急遽地遞減而趨於常數，得知在同化過程中的價值函數隨疊代次數明顯地收斂。大致而言，本研究個案在疊代次數 10 次時，價值函數已接近收斂，因此本研究設定疊代次數為 15 次。

2. BDA 方法

為了得到較佳的颱風初始化條件，Zou and Xiao (2000) 研究根據 4DVAR，提出使用 BDA 方法來改善颱風初始的結構及強度。Park and Zou (2004) 則進一步利用觀測的颱風中心位置、最低

(a)



(b)

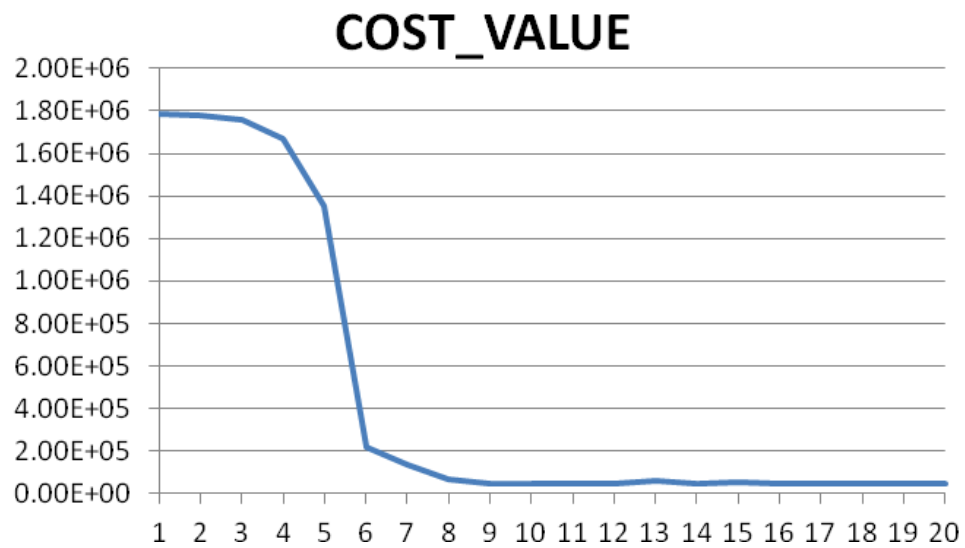


圖 1 價值函數隨著疊代次數的變化，(a)同化 GPS 掩星資料，(b)同化虛擬渦旋。

氣壓值及暴風半徑，來作為 BDA 的估計參數，使分析的颱風加入客觀的資訊。對於虛擬的颱風氣壓場，則是使用 Fujita (1952)的經驗公式來導入海平面氣壓：

$$P_0(r) = P_c + \Delta P \left\{ 1 - \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\}$$

上式中之參數說明如下：

$$\Delta P = P_\infty - P_c$$

P_c 是颱風中心氣壓

P_∞ 是距颱風中心無窮遠處的氣壓

R_0 是估計最大氣壓梯度處之半徑

r 是颱風渦旋的半徑， $0 \leq r \leq R_{out}$

R_{out} 是海平面閉合的等壓線的最外圈之半徑

$$R_0 = 0.38R_{34kt} - 3.8$$

上式為 Park and Zou (2004)所歸納出的線性關係式，其中 R_{34kt} 為颱風 34-knots 風速的半徑(可由氣象作業中心提供)。在決定海平面氣壓後，水平風場之求得可藉由梯度風平衡：

$$V_{GR}(r) = \left(\frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{f^2 r^2}{4} \right)^{1/2} - \frac{r|f|}{2}$$

其中 r 為離颱風中心的距離， f 為柯氏參數。本研究同時加入徑向風分量，使合成風場與純旋轉風產生 15 度的夾角，以考慮近地面內之邊界層摩擦輻合作用。實驗中，每 3 分鐘一次，導入此虛擬渦旋進行同化，總共同化 30 分鐘，同化期間假設颱風中心不隨時間移動，因為在 30 分鐘內颱風的位移甚小。另外，亦加入三維的風場(垂直分層約 500 公尺)，共有 15 層，分別為 1000, 950, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300 hPa，同時考慮颱風強度隨高度遞

減，將各層對應的權重係數設為 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.98, 0.965, 0.95, 0.925, 0.90, 0.875, 0.85, 0.75, 0.65, 0.5, 0.35。此三維風場是指垂直有 15 層且滿足梯度風平衡的水平風場，其先由計算虛擬渦旋的海平面氣壓，得出軸對稱的海平面氣壓分布，再依梯度風平衡得出水平風場，最後再做梯度風的垂直權重變化，使其強度隨高度遞減。本文根據觀測資訊設定的參數有颱風中心氣壓值 955 hPa、颱風最外圈海平面閉合等壓線的氣壓值 1008 hPa、颱風最外圈海平面閉合等壓線的半徑 500 公里及 34-knots 風速的半徑 200 公里。

(二) 實驗設計

本研究使用中尺度數值模式 MM5 的 3.7.4 版進行個案模擬，選擇侵台珊珊颱風(2006)。模式模擬的網域範圍如圖 2 所示，珊珊個案用三層 151×151 、 151×151 及 79×79 的巢狀網域，水平解析度分別為 45、15 及 5 公里，垂直分層都是 23 層。MM5 模式初始背景場與邊界場使用 NCEP/FNL 全球分析場，模式的物理參數方法使用 Grell 積雲參數化、MRF 邊界層參數化、Dudhia (simple ice)雲微物理參數化與 Dudhia 長短波輻射參數化(詳見 Dudhia et al. 2005)。珊珊個案由 2006 年 9 月 14 日 0000 UTC 起進行 72 小時預報(至 2006 年 9 月 17 日 0000 UTC)。4DVAR 實驗的資料同化窗區設定如下，在 GPS 掩星資料同化窗區的設定為 173 分鐘，在 BDA 的部分是設定為 30 分鐘，在 GPS 和 BDA 同時同化實驗，則設定較長的時間(173 分鐘)以同時包含兩種資料。珊珊個案共設計 4 組的模擬實驗，如表 1 所示，在模擬範圍內，在同化窗區 173 分鐘內共有 14 筆福衛三號 GPS 掩星觀測，GPS 實驗僅作第一層網域的同化，其餘的實驗皆進行兩層網域的同化。

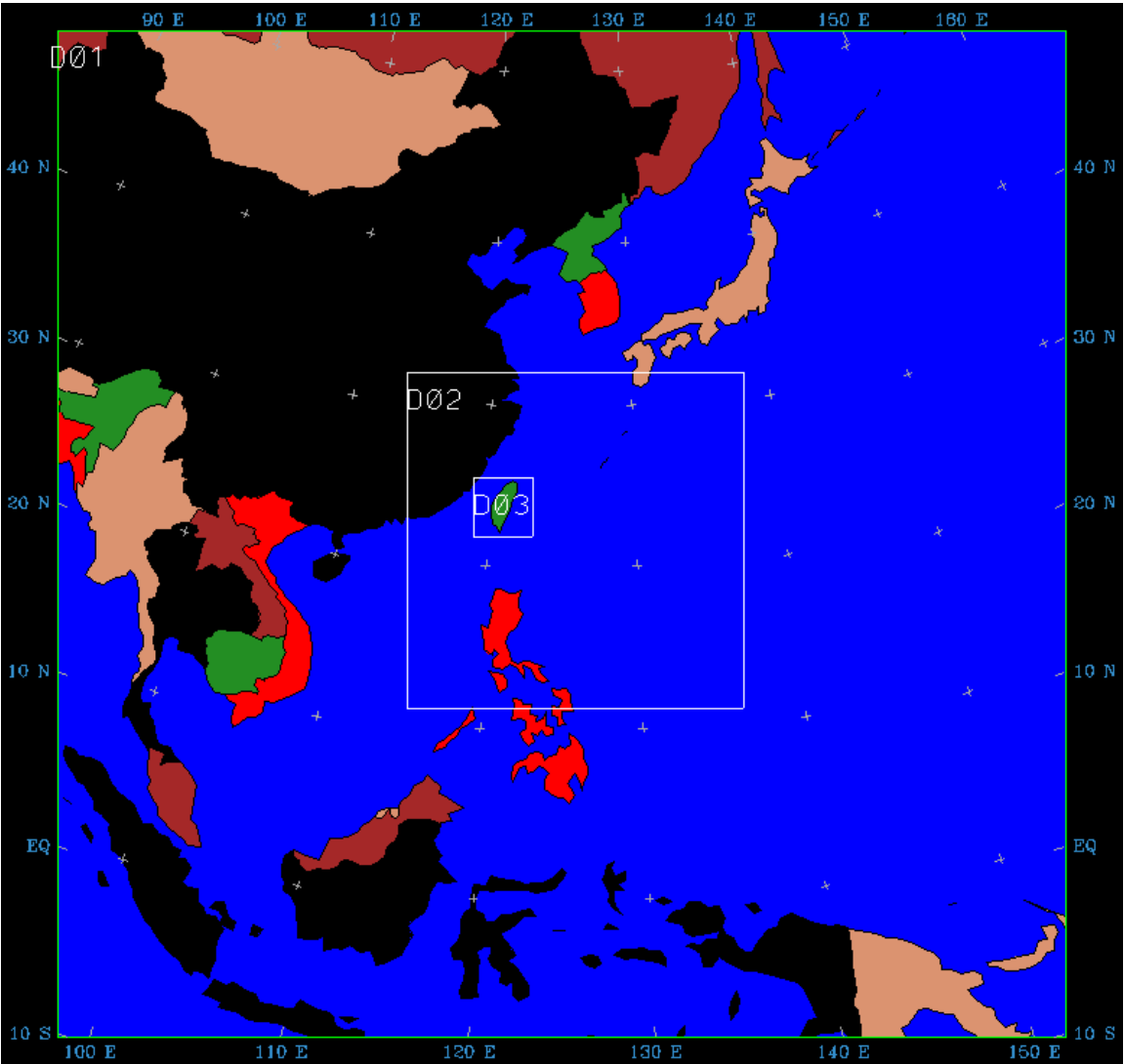


圖 2 本文 MM5 模式選取網域範圍的示意圖。

表 1 珊珊颱風個案的實驗設計。

Control	使用 NCEP FNL 全球分析場提供 MM5 模式初始場，進行 72 小時的模擬。
GPS	同 Control，但在模式初始時間 173 分鐘內同化 14 筆 GPS 掩星折射率探空至第一層網域。
BDA	同 Control，但在模式初始時間 30 分鐘內同化虛擬的渦旋至兩層網域。
GPS-BDA	同 Control，但在模式初始時間 173 分鐘內同時同化 14 筆 GPS 掩星折射率探空至第一層網域和虛擬的渦旋至兩層網域。。

(三) 個案簡介

珊珊颱風於 2006 年 9 月 10 日在關島西方的海面生成，朝西北方向前進。於 12 日增強為中度颱風，並逐漸轉偏西方向移動。在 15 日左右颱風移速減慢且移向轉為偏北，其接近台灣的時間為 16 日前後，通過台灣東方的海域，沒有直接登陸侵襲台灣，其近中心的最大風速值可達 58 m s^{-1} 。由紅外線衛星雲圖（圖略），可以見到清楚的颱風雲系結構及中心的颱風眼，在 16 日以後颱風中心通過石垣島附近，加速往北北東方向朝日本移動，在日本造成重創，造成 48 萬戶停電及多數人員的傷亡。

三、模擬結果討論

(一) 初始場分析

圖 3 顯示初始時間同化資料對溫度場分析的影響，其 GPS 掩星資料的影響由 GPS 實驗減 Control 實驗可見，在模式最底層溫度場的水平差異量可達 1°C ，於掩星點附近都有差異量。在掩星事件點 (24.3°N , 119.2°E) 附近的直線 AB 垂直剖面，其高度 1 公里以下有較大的溫度差異量約 1.1°C ，而上空的溫度差異則較小，顯示 GPS 資料調整的幅度是些微的。再者，同化虛擬資料的影響由 BDA 實驗減 Control 實驗可見，在模式最底層溫度場的水平差異量可達 14.5°C ，其差異量集中於渦旋範圍。由渦旋位置的東西向直線 AB 垂直剖面來看，在高度 1 公里以下有不合理的溫度差異量約 32.5°C ，這溫差過大的問題亦見於 Zou and Xiao (2000)，因虛擬渦旋和初始背景場二者的不平衡所導致。不過經模式積分後，此溫差迅速地調整且變小，其第 6 及 12 小時的溫度差異分別為 7.5°C 及 6.5°C （圖略）。此外，在高空 3

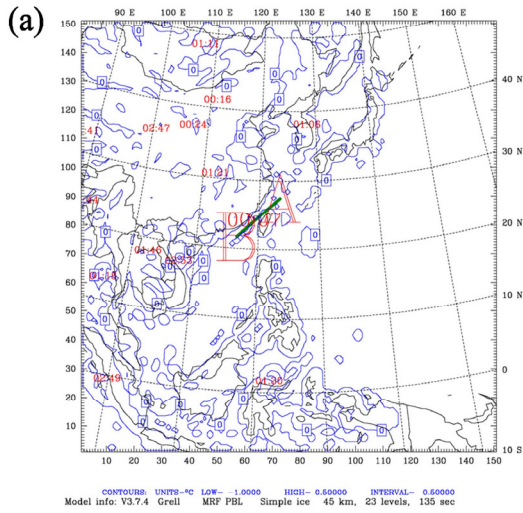
公里及 7 公里處各有 11.1°C 及 10.1°C 的增溫，可見渦旋內有明顯的高溫暖心結構，其高溫的能量有助於渦旋的維持、乃至發展。

圖 4 顯示初始時間同化資料對水氣混合比的影響，首先見 GPS 實驗減 Control 實驗，在低層 850 hPa 面上水氣混合比的水平差異量可達 -2.3 g kg^{-1} ，於掩星點附近都可見到明顯的差異量。在掩星事件點 (24.3°N , 119.2°E) 附近的直線 AB 的垂直剖面，其高度 4 公里以下水氣混合比有較大的差異量 (-1.6 g kg^{-1} 、 -2.4 g kg^{-1})，而更高空處的水氣混合比差異則較小 (-0.6 g kg^{-1})，這顯示位於台灣海峽該 GPS 資料掩星點觀測的同化，對水氣混合比的調整多集中於掩星點附近的中低層大氣。再者是 BDA 實驗減 Control 實驗，在低層 850 hPa 面上水氣混合比的水平差異量可達 3.1 g kg^{-1} ，其差異量全集中於渦旋的範圍。在渦旋位置的東西向直線 AB 的垂直剖面，其地面到高度 7 公里處都有水氣混合比的差異量，而高度 2 公里處有極值的差異量 3.7 g kg^{-1} ，顯示透過動力調整機制，渦旋在中低層大氣產生較為潮濕的結構，此為一般使用 3DVAR 分析所未見（見 Huang et al. 2005）。

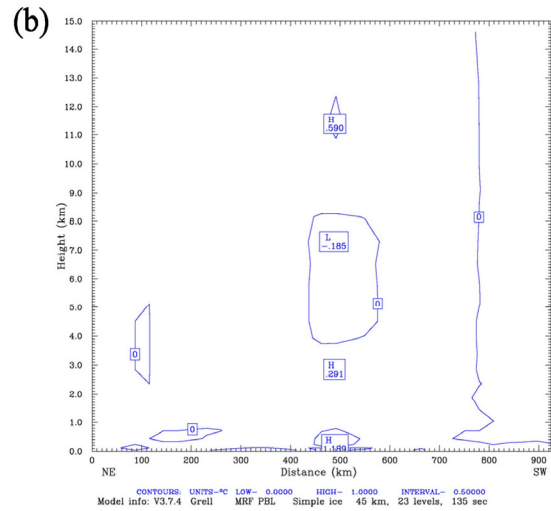
(二) 路徑及強度模擬

在模擬 72 小時的路徑預測（圖 5），各實驗結果的路徑趨勢大致與最佳路徑類似，都先朝向西北方移動，稍後於台灣東側外海轉彎北上，最後朝向東北方前進至日本附近。Control 及 GPS 實驗的路徑在模擬時間的前段，因為颱風中心的氣壓微弱，造成路徑出現比較不連續或跳動的情況。BDA 實驗的路徑與 GPS-BDA 相似，皆非常貼近觀測路徑，顯示出 BDA 對於颱風路徑模擬有明顯的影響，遠大於 GPS 掩星資料影響的程

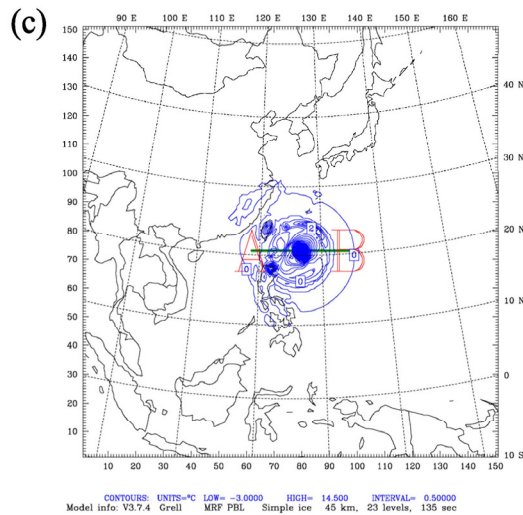
Dataset: FNL-GPS-Dom1 RIP: tmc Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Temperature at k-index = 23
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)



Dataset: FNL-GPS-Dom1 RIP: GPS-points Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Temperature XY= 72.8, 89.1 to 57.1, 75.9
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: tmc Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Temperature at k-index = 23
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: tmc Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Temperature XY= 62.0, 73.0 to 97.0, 73.0
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)

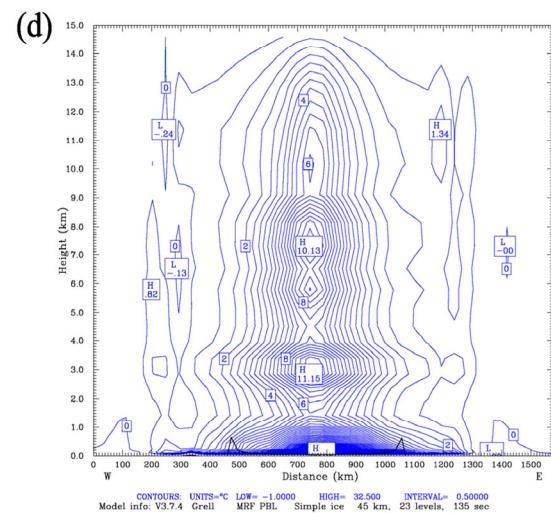
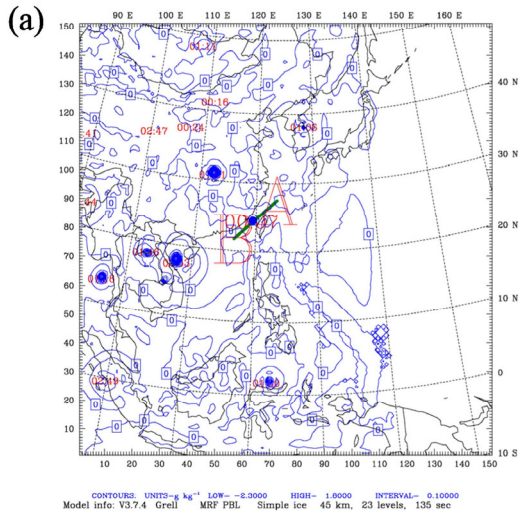
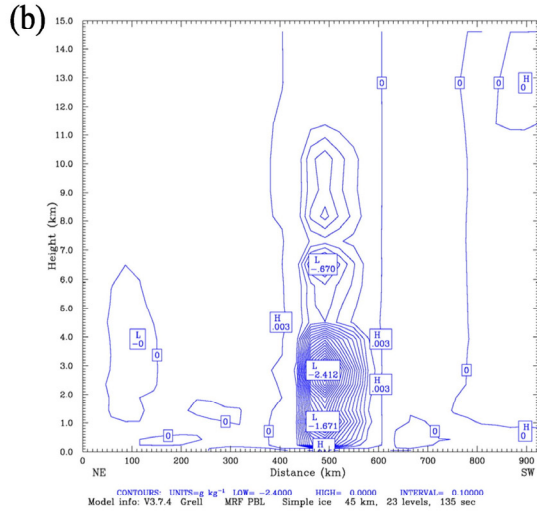


圖 3 珊珊颱風 GPS 和 BDA 實驗初始時間的溫度水平差異量及垂直剖面差異（等值線間距為 0.5°C ）。GPS 實驗減 Control 實驗，(a)在底層（模式第 23 層，約 38 公尺高）溫度場的水平差異量，其 GPS 掩星折射率資料的位置及時間以紅色數字（小時：分鐘）標示，和(b)在掩星點（ 24.3°N , 119.2°E ）附近沿直線 AB 的溫度垂直剖面差異。BDA 實驗減 Control 實驗，(c)在底層（模式第 23 層，約 38 公尺高）溫度場的水平差異量，和(d)在掩星點（ 24.3°N , 119.2°E ）附近沿直線 AB 的溫度垂直剖面差異。使用第一層網域 45km 資料。

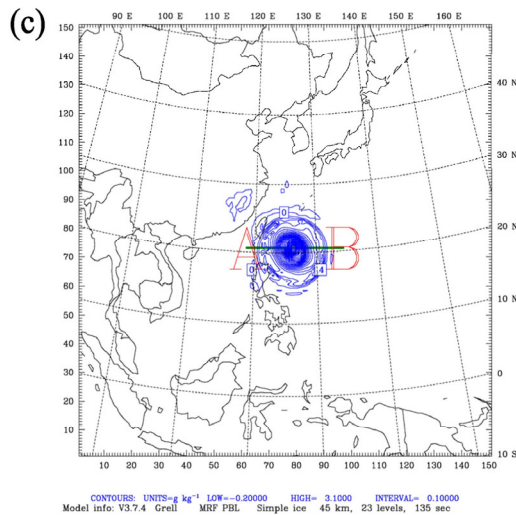
Dataset: FNL-GPS-Dom1 RIP: qvp Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Water vapor mixing ratio at pressure = 850 hPa
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)



Dataset: FNL-GPS-Dom1 RIP: GPS-points Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Water vapor mixing ratio XY= 72.8, 89.1 to 57.1, 75.9
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: qvp Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Water vapor mixing ratio at pressure = 850 hPa
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: qvp Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Fest: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
Water vapor mixing ratio XY= 62.0, 73.0 to 97.0, 73.0
(diff. from case=FNL-control, time= 0.00)

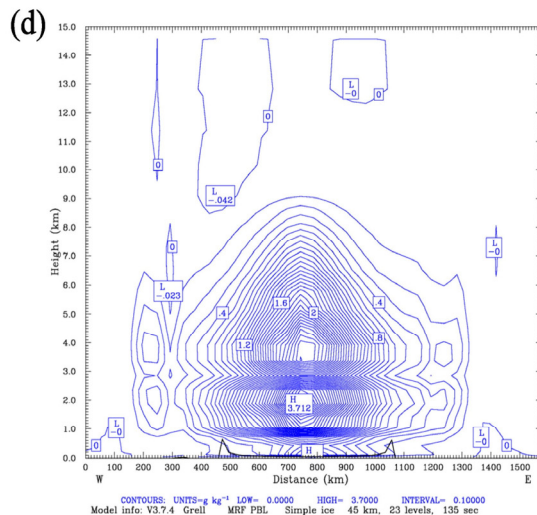


圖 4 珊珊颱風 GPS 和 BDA 實驗初始時間的水氣混合比(等值線間距為 0.1 g kg^{-1})水平差異量及垂直剖面差異。GPS 實驗減 Control 實驗, (a)在底層 850hPa 面上水氣混合比的水平差異量, 和(b)在掩星點(24.3°N , 119.2°E)附近沿直線 AB 的水氣混合比垂直剖面差異。BDA 實驗減 Control 實驗, (c)在底層 850 hPa 面上水氣混合比的水平差異量, 和(d)在掩星點(24.3°N , 119.2°E)附近沿直線 AB 的水氣混合比垂直剖面差異。使用第一層網域 45km 資料。

Dataset: FNL-control RIP: Track all 6h Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
 Fcst: 72.00 h Valid: 0000 UTC Sun 17 Sep 06 (0800 LST Sun 17 Sep 06)
 Terrain height AMSL

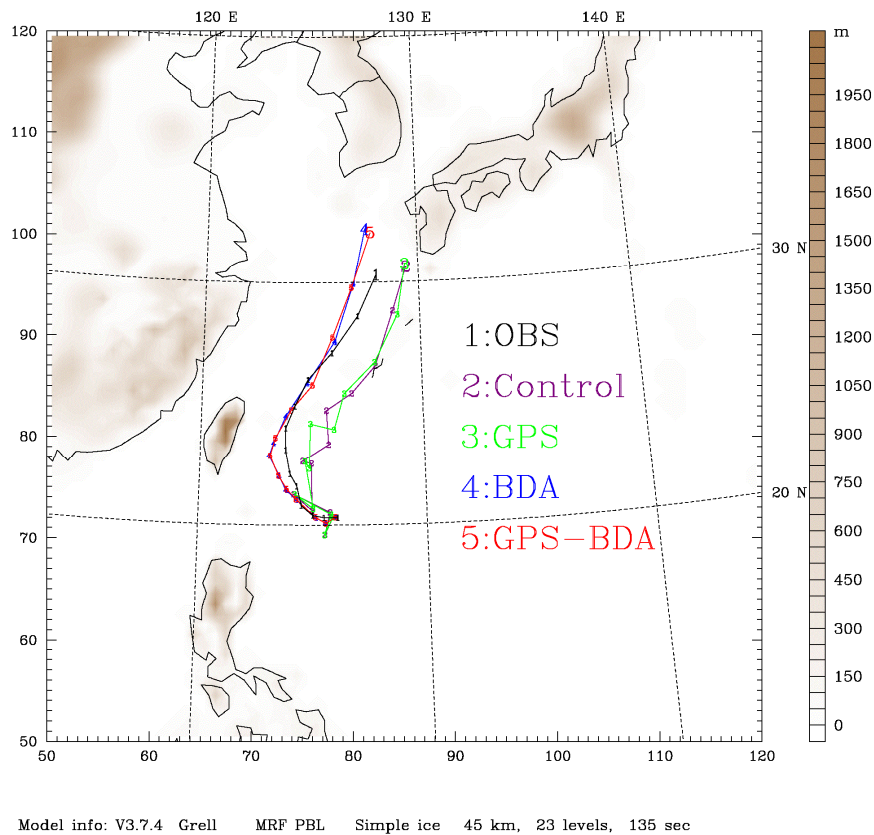


圖 5 珊珊颱風個案 4 個實驗預報 72 小時的路徑及最佳的觀測路徑圖。1 表示最佳觀測路徑 OBS、2 表示 Control 實驗、3 表示 GPS 實驗、4 表示 BDA 實驗、5 表示 GPS-BDA 實驗，圖中路徑的每個間隔為 6 小時。使用第一層網域 45km 資料。

度。統計各實驗模擬 72 小時的平均路徑預報誤差（表 2），顯示 GPS 掩星折射率資料對於路徑預報有些微的改善，由 Control 和 GPS 實驗及 BDA 和 GPS-BDA 實驗比較得知，其 72 小時平均路徑誤差約減少 3~4 公里。但加入 BDA 的實驗，BDA 和 GPS-BDA 兩實驗，均大幅減少路徑誤差，其 72 小時平均的路徑誤差與 Control 實驗相比，可以改善 80~90 公里之多，顯出 BDA 對於颱風路徑的模擬有主要的影響。然而，本個案的各實驗 72 小時路徑模擬誤差均低於 150 km，可能使 GPS

的實驗更不易進一步改善 Control 實驗。

表 2 珊珊颱風個案在 24 小時、48 小時、72 小時颱風的平均路徑預報誤差之比較。

珊珊颱風 (Shanshan)	24 h	48 h	72 h
Control	81.9 km	120.2 km	139.1 km
GPS	81.2 km	118.9 km	136.5 km
BDA	40 km	42.6 km	51.6 km
GPS-BDA	40 km	37.6 km	47 km

在顯示個案實驗颱風中心強度的模擬誤差，我們先了解資料同化對初始颱風渦旋分析的影響。在初始時間（圖 6），Control 實驗的海平面氣壓為 1003 hPa，近地面風場為 15.8 m s^{-1} ，GPS 實驗二者則與 Control 實驗相當接近，而 BDA 實驗的颱風中心氣壓值最低為 961 hPa，相較於 Control 與 GPS 實驗（圖 6a），呈現明顯的強烈颱風的特性，近地面最大風速值達 43 m s^{-1} 。在 BDA 實驗第 24 及 48 小時，颱風渦旋分別仍保有海平面氣壓 966 hPa 與近地面風場 43.1 m s^{-1} 以及 960 hPa 與 35.8 m s^{-1} ，顯示經由 BDA 的颱風，在長時間的模擬仍能維持相當的強度（與觀測較為接近）。

圖 7 顯示各實驗的海平面颱風中心氣壓及近地面最大風速的時間序列，Control 和 GPS 實驗的模擬結果近似，其氣壓和風速各別隨時間下降和上升，但是兩實驗的數值差異不大，說明僅同化 GPS 掩星折射率資料對於颱風氣壓及風速的調整是相當有限的。而 BDA 和 GPS-BDA 實驗的模擬結果近似，亦顯示相較於 BDA，同化 GPS 掩星折射率資並無明顯的影響，二者模擬的颱風強度（最大風速達 35 m s^{-1} 與最低海平面氣壓值約 960 hPa），都比 Control 實驗更接近觀測許多，顯示 BDA 對颱風強度模擬有相當的助益。然而，BDA 實驗模擬雖維持一定的颱風強度，但未能預報出第二天實際颱風中心氣壓的加深。另一方面，透過有利颱風發展的機制，Control 和 GPS 實驗的模擬仍逐漸取得增強的颱風中心氣壓及近地面風速，使在模擬結束時，接近 BDA 實驗的模擬強度。

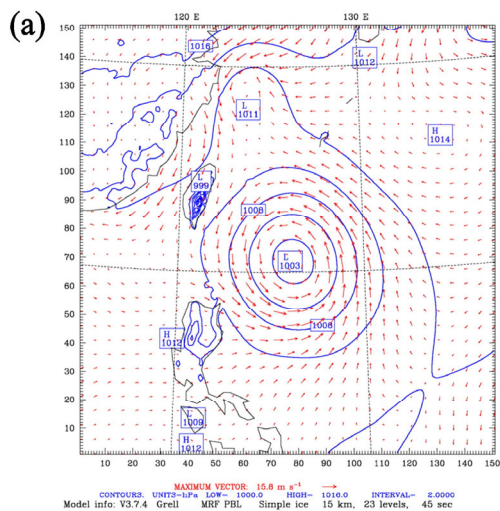
（三）降雨模擬

珊珊颱風從台灣的東方海域經過時，其外圍

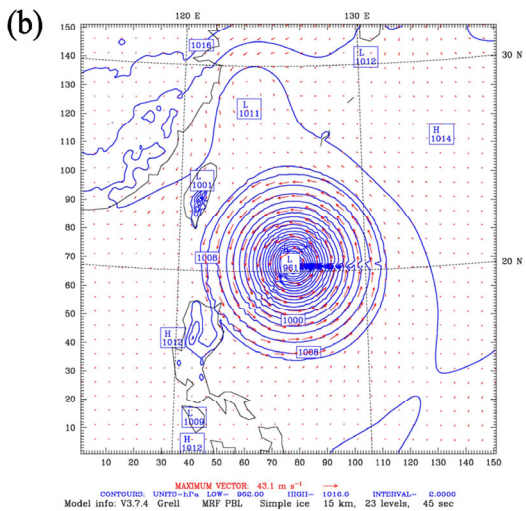
環流挾帶充足水氣，在台灣的迎風面山區帶來明顯的降雨。圖 8、9 顯示各個實驗模擬和實際觀測的累積降雨量（單位：mm）。在模擬第二天（9/15 0000 UTC 至 9/16 0000 UTC）的 24 小時累積降雨量（圖 8），各個實驗的模擬雖有掌握到東北部和中部發生的降雨位置，但是降雨量與觀測值（184.2 mm）仍有許多偏差。Control 和 GPS 實驗的累積降雨量分別為 78.9 mm 和 90.7 mm，都有低估雨量的情況，不過 GPS 較 Control 有增加些微降雨量，顯示 GPS 掩星觀測對模式定量降水模擬的影響。BDA 和 GPS-BDA 實驗有過度高估雨量至 700 mm，這與其初始渦旋較強以及模擬的路徑較偏近臺灣等因素有關。在模擬第三天（9/16 0000 UTC 至 9/17 0000 UTC）的 24 小時累積降雨量（圖 9），各個實驗仍能繼續掌握北部和中部山區的主要降雨位置，但該日累積降雨量和觀測值（156.4 mm）相比，Control 和 GPS 實驗，都有低估雨量的情況，這與其後期較大的路徑誤差應有關係。而 BDA 和 GPS-BDA 實驗的累積降雨量分別為 142.8 mm 和 173.2 mm，較為接近觀測，這與其後期的路徑預報誤差較小亦應有關係。

我們依中央氣象局 24 小時累積雨量分級定義（0~1 mm 小雨，1~50 mm 中雨，50~130 mm 大雨），設定各個降雨門檻值，利用 Threat Score (TS)，對降雨模擬進行客觀校驗 (Jolliffe and Stephenson, 2003)。Threat Score 定義為 $TS = A / (F + O - A)$ ，A 為預報和觀測都超過門檻值的格點數，F 為預報超過門檻值的格點數，O 為觀測超過門檻值的格點數。圖 10a 可見模擬第二天，BDA 和 GPS-BDA 在各降雨門檻值的技術得分明顯優於 Control，顯示同化渦旋的效益，而加入 GPS 掩星觀測同化，使 GPS-BDA 在中雨的預報呈現多出一些技術得分。GPS 在中小雨的技術得分略

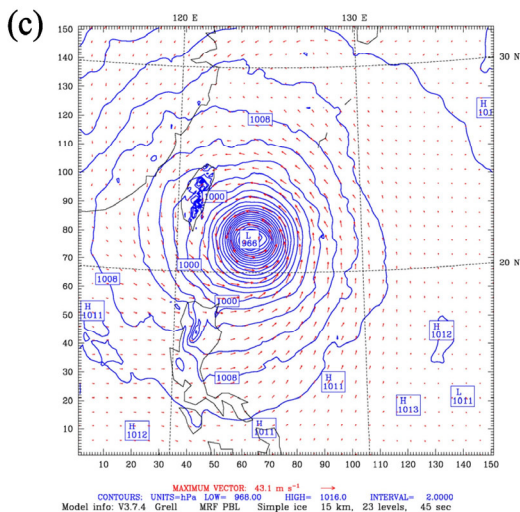
Dataset: FNL-control RIP: slp-uv Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
 Fcst: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
 Sea-level pressure
 Horizontal wind vectors at k-index = 23



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: slp-uv Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
 Fcst: 0.00 h Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)
 Sea-level pressure
 Horizontal wind vectors at k-index = 23



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: slp-uv Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
 Fcst: 24.00 h Valid: 0000 UTC Fri 15 Sep 06 (0800 LST Fri 15 Sep 06)
 Sea-level pressure
 Horizontal wind vectors at k-index = 23



Dataset: FNL-BDA-Dom2 RIP: slp-uv Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
 Fcst: 48.00 h Valid: 0000 UTC Sat 16 Sep 06 (0800 LST Sat 16 Sep 06)
 Sea-level pressure
 Horizontal wind vectors at k-index = 23

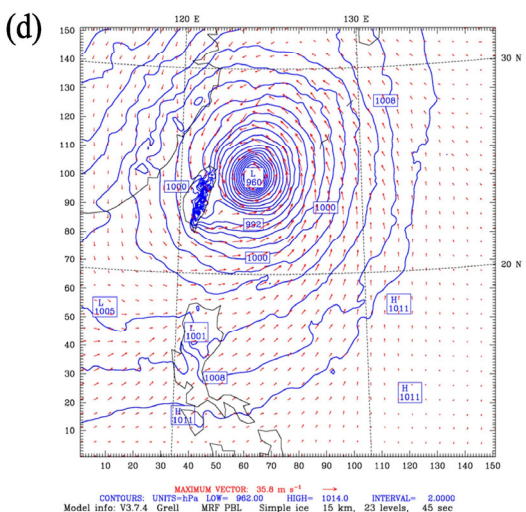


圖 6 珊珊颱風個案的實驗 Control 及 BDA 所模擬的海平面氣壓及近地面風場的初始場和預報場，圖 a、b 各為 Control、BDA 的初始分析場、圖 c、d 分別為 24、48 小時的 BDA 預報場。氣壓間距為 2 mb，風速單位為 m s^{-1} 。使用第二層網域 15km 資料。

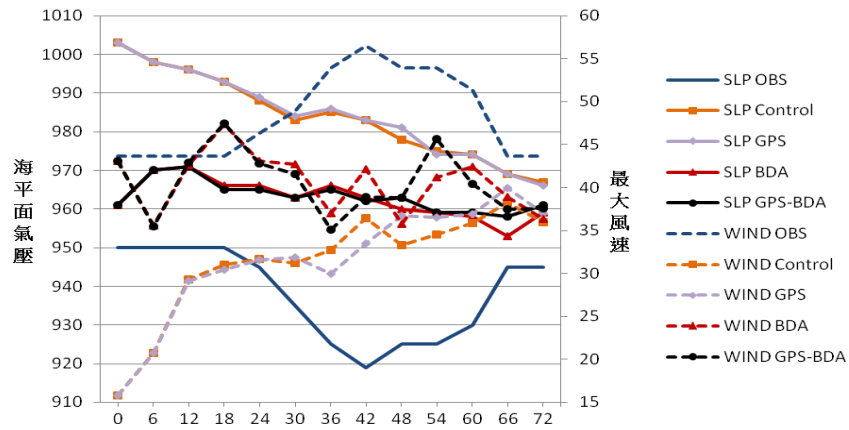


圖 7 珊珊颱風個案實驗模擬海平面颱風中心氣壓 (SLP, 單位: hPa) 和近地面 (模式第 23 層, 約 38 公尺高) 最大風速 (WIND, 單位: m s^{-1}) 的 72 小時時間序列圖。其中 OBS 代表觀測資料, 而 Control 代表 Control 實驗, GPS 代表 GPS 實驗, BDA 代表 BDA 實驗, GPS-BDA 代表 GPS 加上 BDA 實驗, 各實驗設計詳見內文。使用第二層網域 15km 資料。

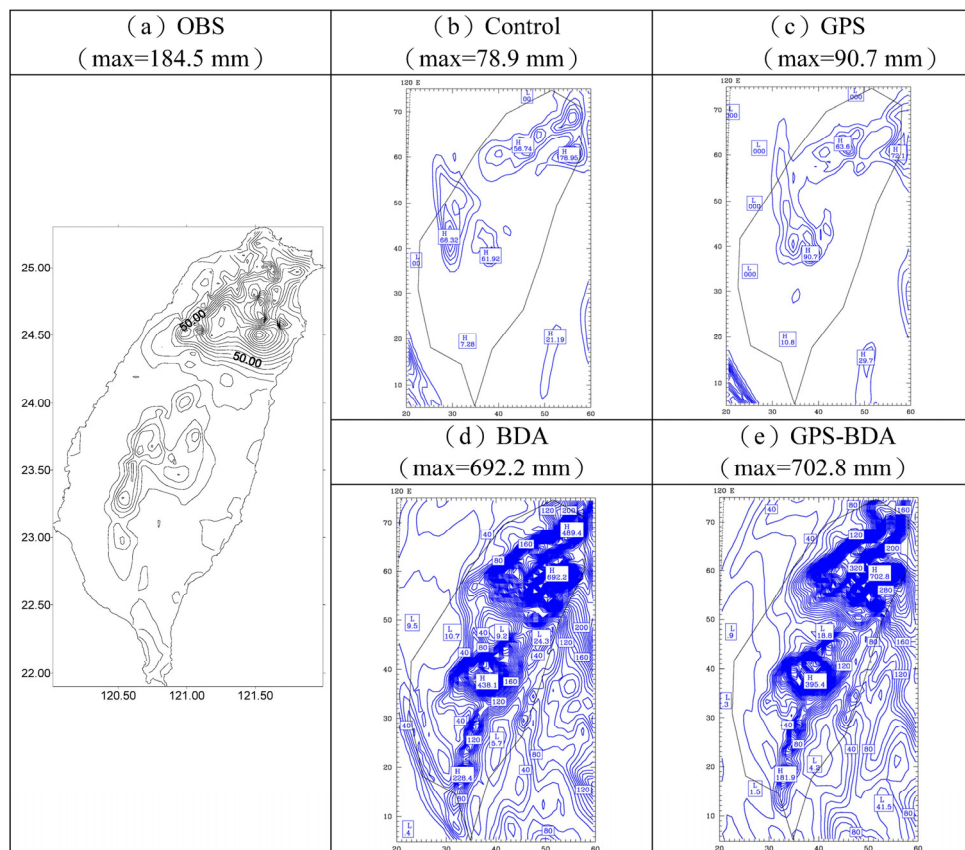


圖 8 珊珊颱風模擬第二天 (2006/9/15 0000 UTC 到 2006/9/16 0000 UTC) 的累積降雨量 (等值線間距皆為 10 mm)。圖分別為(a)觀測值、(b) Control、(c) GPS、(d) BDA、(e) GPS-BDA。圖中括號內之值為降雨量最大值。使用第三層網域 5km 資料。

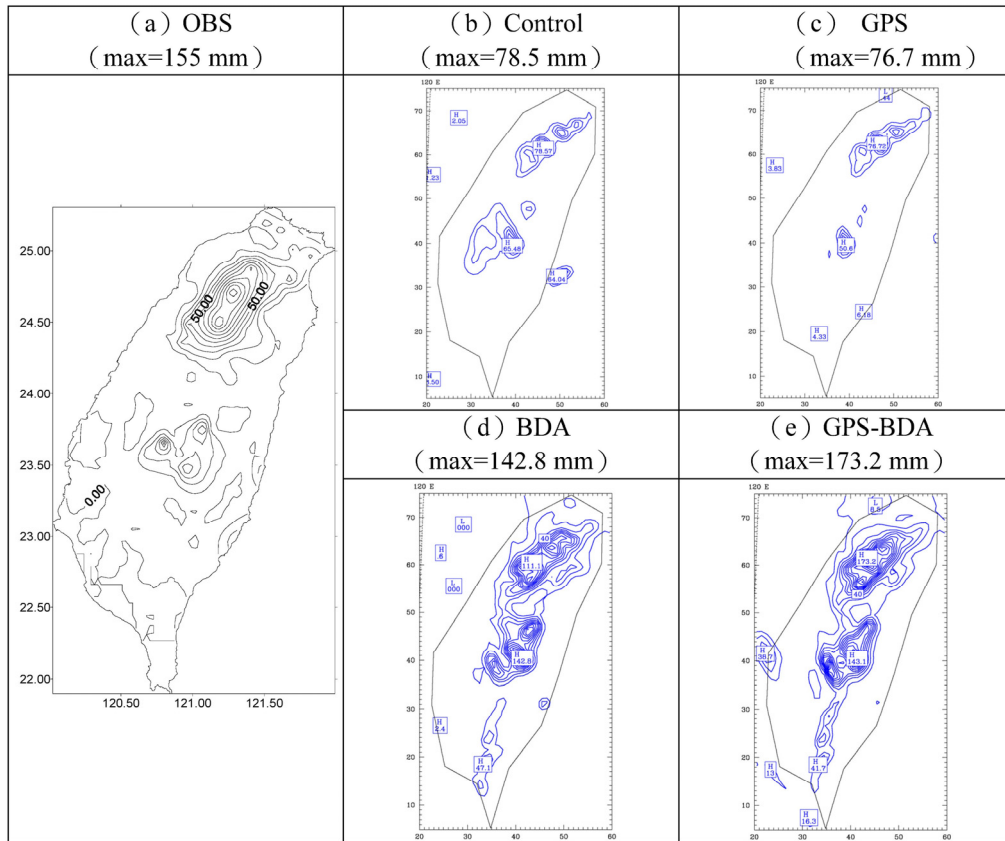


圖 9 同圖 8，但為模擬第三天（2006/9/16 0000 UTC 到 2006/9/17 0000 UTC）的累積降雨量。

優於 Control，顯示 GPS 掩星觀測同化仍對降雨的模擬有所助益。GPS-BDA 有最高的技術得分，說明兩者資料提供正面的效益。在模擬第三天（圖 10b），相較 Control 實驗，GPS 在小雨的技術得分較差，但在 20 和 50 mm 門檻值則略優。BDA 與 GPS-BDA 的技術得分仍然取得明顯的優勢，顯示同化渦旋的效益。

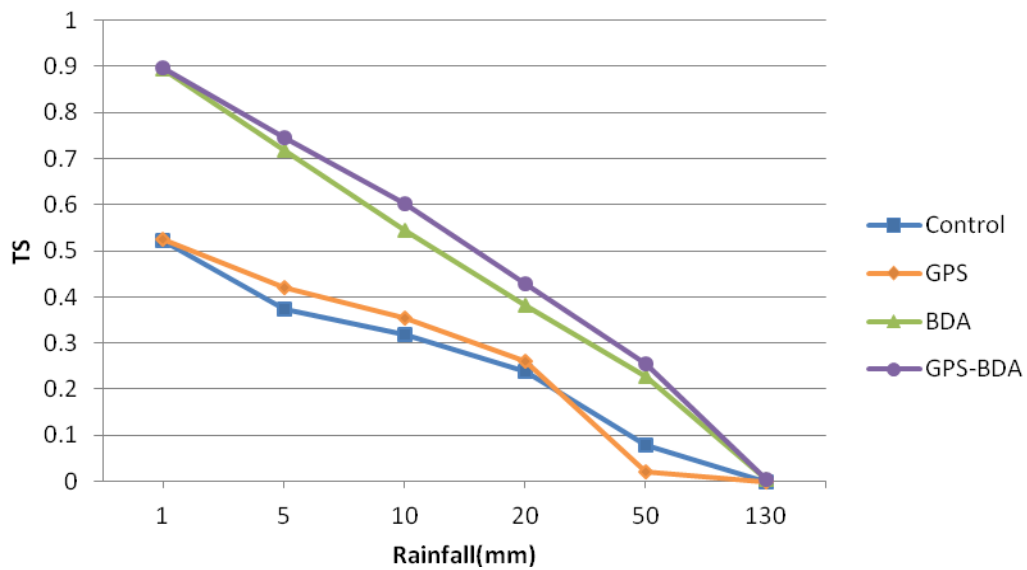
四、結論及展望

對於颱風的作業預報，由於觀測資料不足，初始分析場常無法呈現颱風的真實狀況，因此降低模式預報能力。為補足觀測資訊，Zou and Xiao (2000) 和 Xiao et al. (2000) 首先利用 MM5

4DVAR，提出渦旋的虛擬資料同化(BDA)方法，結合颱風觀測資訊及估計參數，例如最低的海平面氣壓和最大風速的半徑等，將虛擬的渦旋同化到模式初始場，產生較強烈且接近實際的颱風。為使颱風垂直結構在模式積分後不至於消弱過快。本文除使用虛擬渦旋資料同化(Park and Zou 2004)，另加入颱風的三維風場及近地面徑向風分量，進行模式同化，探討此 BDA 對颱風路徑及強度模擬的影響。本文選定珊珊颱風(2006)個案，MM5 模擬結果顯示 BDA 對颱風路徑、強度乃至台灣島上的降雨預報均有顯著的改善。

本文另一主要目的，在於探討我國福衛三號 GPS 資料同化對於模式初始場的改善，進而了解

(a) 2006/9/15 0000 UTC-2006/9/16 0000 UTC



(b) 2006/9/16 0000 UTC-2006/9/17 0000 UTC

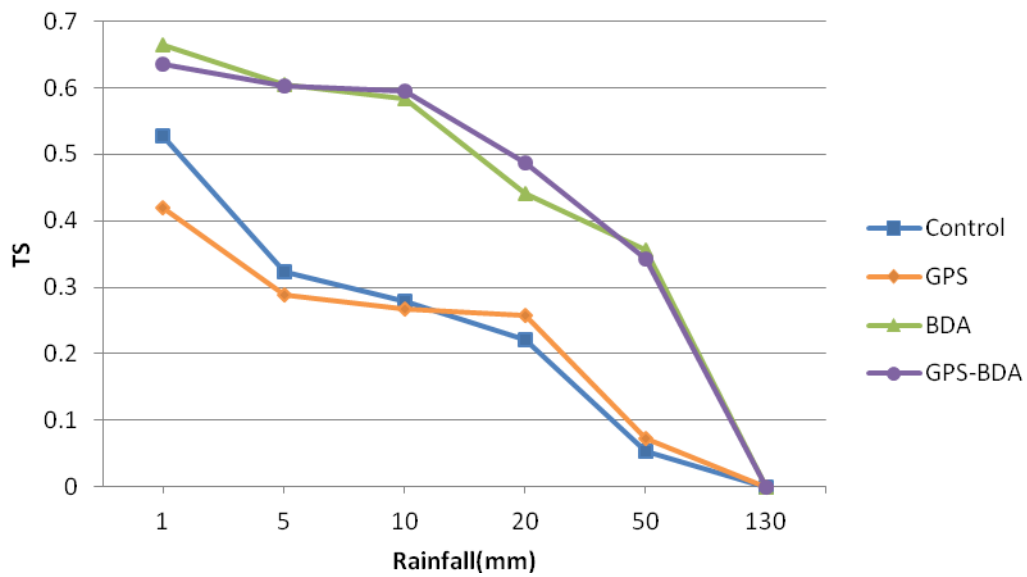


圖 10 珊珊颱風在各降水門檻值（1、5、10、20、50 及 130 mm）上的 Threat Score (TS)技術得分，(a)模擬第二天（2006/9/15 0000 UTC 到 2006/9/16 0000 UTC），(b)模擬第三天（2006/9/16 0000 UTC 到 2006/9/17 0000 UTC）。使用第三層網域 5km 資料。

對颱風預報的影響。使用同化窗區（173 分鐘），在珊珊颱風(2006)個案的模擬範圍共有 14 筆掩星點資料，但絕大多數皆位於颱風環流外。同化 GPS 掩星折射率後，顯示在掩星位置附近可對模式初始場進行修正，模擬結果顯示此環境場的修正對颱風模擬可產生一些影響，略優於無同化 GPS 掩星折射率之實驗，但仍遠不及於虛擬渦旋同化的正面影響。同時進行 BDA 及折射率同化，則顯示較單純 BDA 在路徑預報上亦可取得些微改善，兩種資料的結合實際上也是有最佳的表現。

福衛三號每天可提供全球分佈的探空資料約 2000 筆，其高垂直解析度之大氣折射率探空對改善大氣的溫、溼度分析幫助甚大。在 2011 年，由於衛星開始老化，福衛三號每日的探空數目已降至 1200 筆以下。目前，台灣與美國正在推展福衛三號的後續計畫（即福衛七號），預計於 2016 年底前發射 6 顆低傾角衛星，2018 年底前再發射 6 顆高傾角衛星，屆時共可提供全球每天至少 8000 筆的掩星觀測，在區域模式模擬範圍約可有 100 筆以上的探空。本文透過 4DVAR，僅能同化福衛三號提供之十餘點 GPS 掩星觀測，對模式初始場分析及預報已呈現一定程度的正面改善的訊息，因此我們樂觀期待福衛七號所提供更廣泛的大氣探空觀測，結合其他有利的雷達及衛星觀測，可以進一步提昇侵台颱風預報能力。

參考文獻

- 黃清勇、朱延祥，2004: FORMOSAT-3/COSMIC 科學研究簡介，大氣科學，第 3 期，第 3 號，293-328 頁。
- 謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降，1998: 百年侵台颱風路徑圖集及其應用。中央氣象局，台北。
- Anthes, R. A., and Coauthors, 2008: The COSMIC / FORMOSAT-3 mission: Early results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 313-333.
- Dudhia, J., D. Gill, K. Manning, W. Wang, and C. Bruyere, 2005: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3, available on the web site <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes.html>.
- Fujita, T., 1952: Pressure distribution within a typhoon. *Geophys. Mag.*, **23**, 437-451.
- Guo, Y.-R., Y.-H. Kuo, J. Dudhia, D. Parsons, and C. Rocken, 2000: Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 619-643.
- 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.
- Huang, C.-Y., et al., 2010: Impact of GPS radio occultation data assimilation on regional weather predictions. *GPS Solutions*, **14**, 35-49.
- Jolliffe, I. T., and D. B. Stephenson, 2003: Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. Wiley, Hoboken, NJ, 240 pp.

- Kuo, Y.-H., S. V. Sokolovskiy, R. A. Anthes, and F. Vandenberghe, 2000: Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **11**, 157-186.
- Kursinski, 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**, 2365-2368.
- Neumann, C. J., 1993: Global overview. Chapter 1, Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. *WMO*, 1.1-1.56.
- Park K., and X. Zou, 2004: Toward developing an objective 4DVAR BDA scheme for hurricane initialization based on TPC observed parameters. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2054-2069.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, Y. Wang, and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2383-2395.
- Xiao, Q., X. Zou, and B. Wang, 2000: Initialization and simulation of a landing hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2252-2269.
- 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., and Q. Xiao, 2000: Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 836-860.
- Zou, X., W. Huang, and Q. Xiao, 1997: A user's guide to the MM5 adjoint modeling system. NCAR TN-437+IA. MMM division, NCAR, 92pp. [Available from UCAR Communications, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307.]

The Impact of Assimilation with a Bogus Vortex and Radio Occultation Refractivity Data on Simulation of Typhoon Shanshan (2006) Using MM5 4DVAR

Ching-Yuang Huang^{1,2} and Chun-Tze Wu¹

¹ **Department of Atmospheric Sciences, National Central University**

² **GPS Science and Application Research Center, NCU**

(manuscript received 7 December 2011 ; in final form 29 September 2012)

ABSTRACT

This study employs the MM5 4DVAR to investigate influences of assimilation with GPS radio occultation (RO) data and a bogus vortex on initial analysis and prediction of Typhoon Shanshan (2006). In this study, the bogus data assimilation (BDA) includes sea-level pressure, 3-D wind, and surface balanced gradient wind and radial inflow component of a symmetric cyclone. The BDA appears helpful to intensify the initial typhoon and maintain its vertical structure.

Results of the experiments show that assimilation with GPS refractivity data improves the initial field in the vicinity of the RO surroundings but with smaller magnitudes as compared to those from the BDA which significantly improves the weak initial typhoon vortex from the control experiment without BDA. Assimilation with GPS refractivity data only has some minor impacts on the track and intensity prediction. However, the combined assimilation with both GPS refractivity data and a bogus vortex further improves the track from BDA only. This in turns improves the skill scores on prediction of severe rainfall over Taiwan.

Key words: 4DVAR, Bogus Data Assimilation (BDA), GPS RO Refractivity