

# WRF-3DVAR HYBRID資料同化系統測試與分析

江琇瑛 陳美心 馮欽賜 洪景山

中央氣象局氣象資訊中心

## 摘 要

傳統三維變分法 (3DVAR) 之背景場誤差協方差 (background error covariance) 矩陣係以一長期的歷史個案預先計算出，屬於一種靜態的統計特徵，無法反映模式預報會因天氣 (環流) 條件不同而變化的真實情形。為了改進此一問題，近年來科學家提出一種在變分法摻入系集預報誤差統計資訊之混合式 (Hybrid) 資料同化技術，其概念是在變分法架構下利用系集預報群組的加入，使模式預報誤差的統計特徵產生動態，即流場相關特性 (flow dependent)，以能適當反映不同時期之天氣資訊，同時又保有長期天氣系統之平衡關係，進而改進資料同化效能，提升模式預報效益。

本研究使用中央氣象局發展之系集調整卡爾曼濾波同化系統 (Ensemble Adjustment Kalman Filter; EAKF) 和區域系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System; WEPS) 兩者系集預報模組進行 Hybrid 資料同化測試，除了評估 Hybrid 資料同化方法對 WRF 模式預報的影響，同時分析運用不同系集預報模組對於 Hybrid 資料同化之結果差異。結果顯示，使用 Hybrid 資料同化方法之模式預報準確度優於 3DVAR，且此優勢可持續至 48 小時預報；在颱風路徑校驗方面也顯示，Hybrid 資料同化方法可改善颱風路徑預報。另外由 EAKF 和 WEPS 兩者系集預報模組運用於 Hybrid 系統之實驗結果顯示，在預報得分校驗方面，兩者系集擾動策略實驗之結果表現相近；但在颱風路徑誤差校驗方面，應用 EAKF 系集模組之 Hybrid 實驗有較佳的颱風路徑預報表現。

關鍵字：Hybrid 資料同化、flow dependent

## 一、前言

模式初始場 (initial condition) 在數值天氣預報 (Numerical Weather Prediction; NWP) 中扮演重要之角色，它攸關於模式預報結果的準確度，故提升資料同化 (data assimilation) 技術深受許多國際單位與學術機構之重視。然而在資料同化方法裡，背景場誤差相關統計特性結構 (background errors covariance) 之表現更是主導資料同化效能的首要核心，因此系集卡爾曼濾波 (EnKF; Evensen 1994; Burgers et al. 1998; Houtekamer and Mitchell 1998) 同化方法備受矚目與討論，EnKF 同化方法的背景場誤差結構會隨時間更新，該方法係將系集成員預報場當作統計樣本，每次計算出新的背景場誤差，故背景場誤差結構與天氣型態有關聯，以能適當反映不同時期之天氣資訊，進而提升資料同化效能，改善模式預報準確度。現今有許多 EnKF 同化系統，包含 EAKF (ensemble adjustment

Kalman filter; Anderson 2001, 2009)、EnSRF (ensemble square root Kalman filter; Whitaker and Hamill 2002)、ETKF (ensemble transform Kalman filter; Bishop et al. 2001) 和 LETKF (local ensemble transform Kalman filter; Hunt et al. 2007) 等。

有別於 EnKF 同化方法，傳統三維變分法 (3DVAR; e.g., Parrish and Derber 1992; Lorenc et al. 2000; Barker et al. 2004) 之背景場誤差屬於一種靜態的統計特徵，係以一長期的歷史個案預先計算出，主要表現出長期天氣系統之平均狀態，例如熱力風平衡，透過係數調整決定其數量值，使背景場誤差為固定的，並且近乎呈現對稱分布結構，故無法反映模式預報會因大氣環流條件不同而變化的真實情形。

近幾年來科學家提出一種在變分法摻入系集預報誤差統計資訊之混合式 (Hybrid) 資料同化技術，其概念是在變分法架構下利用系集預報擾動場的加入，使

模式背景場誤差的統計特徵產生動態。Hamill and Snyder (2000) 首先提出 Hybrid 概念，說明在 3DVAR 之得分方程 (cost function) 中，靜態背景場誤差和由系統模組得出的動態統計特徵，兩者可透過線性方法組合起來。而後 Wang et al. (2007b) 證明出在得分方程加入新的控制參數 (Lorenz 2003; Buehner 2005)，可引入系集預報誤差資訊，使變分資料同化方法之背景場誤差結構模擬出流場相關特性。由於 Hybrid 方法結合傳統變分同化與 EnKF 之觀念，故 Hybrid 方法的背景場誤差統計特性結構同時包含長期大氣平衡狀態與短期流場相關特性，而靜態與動態兩者統計結構可透過權重設定，決定要趨向那一背景場誤差統計特性。

本研究使用中央氣象局發展之系集調整卡爾曼濾波同化系統 (Ensemble Adjustment Kalman Filter; EAKF) 和區域系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System; WEPS) 兩者系集預報模組進行 Hybrid 資料同化實驗測試，除了評估 Hybrid 資料同化方法對 WRF 模式預報的影響，同時分析運用不同系集預報群組對於 Hybrid 資料同化之結果差異。

## 二、研究方法

### (一) 實驗設計

本研究之預報模式使用 WRF 模式 V3.3.1 版本進行實驗，動力模組使用 WRF-ARW，單層巢狀網格架構，水平解析度設定為 45km，網格點數為 222x128，投影法為藍伯特 (Lambert)，網域分布如圖 1 所示，另外垂直解析度設定為 45 層，模式頂層為 30 hPa。物理參數法包括 NOAH 土壤模式、Goddard 微物理參數法、YSU 邊界層參數法、Kain-Fritsch 積雲、RRTM 長波/短波輻射參數法等，各參數法之介紹詳見 WRF 使用手冊 (Skamarock et al. 2008)。模式之側邊採用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 全球模式 0.5° x 0.5° 的預報場。

本研究實驗期間選取 2012 年 6 月之 1 個月的實驗，並採用部份循環更新 (partial cycle) 資料同化策略，如圖 5 所示，最開始的模式初始場來自前 12 小時由 NCEP GFS 分析場之冷啟動 (cold start)，然後

再進 2 次資料同化，這 2 次的模式初始猜測場來自 WRF 的 6 小時預報，也就是循環更新 (full cycle) 模式。而 Hybrid 實驗之系集擾動場資料則使用前 6 小時之系集 6 小時預報場，並在每個資料同化流程中加入，使每個資料同化流程的背景場誤差的統計特徵都含有動態流場相關結構，關於資料同化設定詳見下一小節。

### (二) 資料同化系統

本研究之資料同化系統使用 WRFVAR V3.3.1 版本，進行 3DVAR 和 Hybrid 資料同化實驗。然而在 Hybrid 實驗裡，又分為使用中央氣象局發展之系集調整卡爾曼濾波同化系統 (Ensemble Adjustment Kalman Filter; EAKF) 和區域系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System; WEPS) 兩者系集預報模組進行測試與分析，故本研究包含 3 個資料同化實驗，名稱分別簡稱 3DVAR、HEAKF 和 HWEPS。其中 EAKF 系集模組有 32 個系集成員，由進行 WRF/EAKF 每 6 小時之循環同化流程 (full cycle) 得到；而 WEPS 系集模組則是搭配邊界擾動和物理參數法擾動，產生 20 個系集 WRF 預報成員 (李等 2011)。

在 Hybrid 實驗中，靜態和動態背景誤差權重比例分別為 25% 和 75%，垂直 Localization 權重分配如圖 2 所示，是依據以下方程得出：

$$\rho(k, k_c) = \exp[-(k - k_c)^2 / L_c^2]$$

$$L_c = 10k_c / nz$$

其中， $k, k_c$  皆代表層面；

$nz$  代表模式總層數；

$\rho$  代表調整垂直相關同化範圍之權重值。

水平 Localization 範圍因子設定為 200 公里，其範圍分布可參考圖 3、4 所示。圖 3、4 分別為 HEAKF 和 HWEPS 實驗之單觀測點測試結果，實驗個案選取 2012 年 6 月 5 日 12 UTC 之瑪娃颱風，將 1°C 的溫度觀測增量和 1°C 觀測誤差放置於颱風環流區域進行單點測試，其經緯度為東經 137.143 度、北緯 28.2 度，主要位於模式網格點 (150, 69) 上，目的是排除觀測因子運算 (observation operator) 產生的誤差。首先由圖 3 分析增量分布得知，由於加入系集擾動場資訊，使背景誤差結構產生動態特徵，使分析增量之形狀呈

現流場相關特性，即溫度場的改變可驅使風場和水氣場有明顯的變化。進階比較圖 3 和圖 4 兩者結果，結果可看出 HWEPS 和 HEAKF 兩者分析增量分布明顯不同，尤其在水氣場方面特別顯著，HWEPS 顯示出溫度場與水氣場的相關性較薄弱，推論這可能是因為 WEPS 系統沒有進行資料同化，而系集初始場皆使用 NCEP 球模式分析場，即系集初始場都一樣，故水氣場方面有明顯的 spin up 的問題，導致水氣場無法有效表現出流場相關特性。

### 三、結果與分析

首先分析 Hybrid 資料同化方法對 WRF 模式預報的影響，圖 6 為 3DVAR 和 HEAKF 兩組實驗溫度場之 12 小時預報、48 小時預報與 72 小時預報對 NCEP 分析場的校驗結果，結果顯示，在第 12 小時預報結果中，HEAKF 的均方根誤差表現比 3DVAR 佳，從低對流層到 100 hPa 皆可看出；在 48 小時預報中，500 hPa 以上的均方根誤差表現仍有改善之現象；至 72 小時預報，兩者實驗之均方根誤差表現已相差不多。圖 7 同圖 6，但為 U 風場的結果，其結果與溫度場的結果相似，使用 Hybrid 資料同化方法在中高對流層，明顯有較好的模式預報表現。故以綜觀天氣角度總結來看，Hybrid 資料同化對 WRF 模式預報為正貢獻，大約持續至 48 小時預報。

圖 8、圖 9 含義同圖 6、圖 7，但為 HWEPS 和 HEAKF 兩組實驗之校驗結果，目的是分析使用不同系集預報群組應用於 Hybrid 資料同化之結果差異。結果顯示，HEAKF 和 HWPES 兩者 Hybrid 實驗之均方根誤差表現近乎一致，兩者的模式預報結果差異性非常小。

為了進階了解 Hybrid 資料同化之影響範圍，故將某兩個實驗在 2012 年 6 月期間，把分析時之層場進行相減，分別為圖 10 和圖 11。圖 10 為 3DVAR 與 HEAKF 兩者實驗之平均差異分布圖，分別有 200 hPa U 風場、850 hPa 溫度場和 850 hPa 相對濕度場，透過差值分布瞭解 Hybrid 資料同化主要在哪些區域，使模式分析場獲得改善，進而提升預報表現。由圖得知，

3DVAR 與 HEAKF 兩者同化系統之差值主要分布在熱帶洋面和東太平洋環流區。這些區域的觀測資料大都偏少，且觀測資料類型也不多，故由此結果推論出，即使洋面上的資料較不齊全，但可透過動態背景場誤差流場相關特性，提供實際大氣的資訊，改善因觀測資料缺乏而資訊不足之問題。

圖 11 同圖 10，但為 HWEPS 與 HEAKF 兩者實驗之平均差異分布圖，結果顯示，HWEPS 與 HEAKF 兩者實驗的溫度場和風場之差值皆非常小，水氣場則在熱帶洋面和東太平洋環流區可看出差異，此結果似乎可由圖 4 單觀測點結果說明之。雖然水氣場之差值明顯比溫度場和風場顯著，但如果與圖 10 (c) 進階比較，可看出圖 10 (c) 之差值明顯比圖 11 (c) 大，其主要是因為 3DVAR 靜態背景場誤差完全沒有水氣場的相關，故帶來的影響更大。

圖 12 為 2012 年 6 月谷超 (GUCHOL) 颱風預報路徑平均誤差，各資料同化實驗之路徑預報表現和此颱風最佳路徑 (best track) 位置如圖 13 所示。首先探討 3DVAR 和 HEAKF 實驗，結果顯示，Hybrid 路徑預報表現比 3DVAR 佳，尤其在颱風轉向時段特別顯著，整體而言，72 小時路徑預報誤差可再降低約 50 公里。再者為 HWEPS 和 HEAKF 實驗分析結果，由圖可看出 HEAKF 實驗的路徑預報表現優於 HWEPS 實驗，並且可持續至預報 72 小時。

### 四、結論與未來展望

本研究 EAKF 和 WEPS 兩者系集預報模組進行 Hybrid 資料同化測試，除了評估 Hybrid 資料同化方法對 WRF 模式預報的影響，同時分析運用不同系集預報群組對於 Hybrid 資料同化之結果差異。首先由 3DVAR 和 Hybrid 資料同化實驗 (HEAKF) 之結果顯示，使用 Hybrid 資料同化方法之模式預報準確度優於 3DVAR，且此優勢可持續至 48 小時預報。在颱風路徑校驗方面也顯示，Hybrid 資料同化方法可改善颱風路徑預報。

進階透過 3DVAR 和 Hybrid 兩者實驗之差值分布，

顯示 Hybrid 資料同化在熱帶洋面和東太平洋環流區之貢獻最大。這些地區的觀測資料比較少，且以短時天氣系統居多，若背景場誤差統計特徵只為靜態的，模式分析場將無法完整掌握這些地區的大氣資訊。由於 Hybrid 背景場誤差統計特徵導入了動態流場相關特性，可適時與不同時間之實際大氣狀態互相呼應，故改善模式分析場品質，提升模式預報準確度。

再者為 EAKF 和 WEPS 兩者系集預報群組運用於 Hybrid 系統之比較，結果顯示出，在預報得分校驗方面，兩者系集擾動策略實驗之整體預報表現相當；不過在颱風路徑誤差校驗方面，應用 EAKF 系集模組之 Hybrid 實驗有較佳的颱風路徑預報表現。由此結果說明，雖然在綜觀預報得分校驗中，HEAKF 和 HWEPS 實驗結果雷同，不過對於颱風環流，流場相關特性更甚為重要，故 Hybrid 系統如何有效運用系集預報模組資訊仍不可忽視。

本研究 WRF 模式解析度為 45 公里，未來將進一步提高模式解析度，探討在高解析度的模式環境設定下，Hybrid 資料同化方法對模式預報的影響程度，並透過進一步的分析評估，瞭解高解析度模式設定運用於 Hybrid 系統可能面臨問題與如何進行同化策略調整，期望能更發揮出 Hybrid 資料同化系統之優勢。

## 五、參考文獻

李志昕、洪景山，2011：區域系集預報系統研究：物理參數化擾動。《大氣科學》，**39**，95-116。

Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884–2903.

———, 2009: Spatially and temporally varying adaptive covariance inflation for ensemble filters. *Tellus*, **61A**, 72–83.

Barker, D. M., W. Huang, Y.-R. Guo, A. Bourgeois, and X. N. Xio, 2004: A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 897–914.

Bishop, C. H., B. J. Etherton, and S. J. Majumdar, 2001: Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 420–436.

Buehner, M., 2005: Ensemble-derived stationary and flow-dependent background error covariances: Evaluation in a quasi-operational NWP setting. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1013–1043.

Burgers, G., van Leeuwen, P. J. and Evensen, G. 1998: Analysis scheme in the ensemble Kalman filter. *Mon. Weather Rev.*, **126**, 1719–1724.

Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99** (C5), 10 143–10 162.

Hamill, T. M., and C. Snyder, 2000: A hybrid ensemble Kalman filter-3D variational analysis scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2905–2919.

Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 1998: Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 796–811.

Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112–126.

Lorenc, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—A comparison with 4D-VAR. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183–3203.

———, and Coauthors, 2000: The Met. Office global threedimensional variational data assimilation scheme. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2991–3012.

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

Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-475 1 STR, 113 pp.

Wang, X. C. Snyder, and T. M. Hamill, 2007b: On the theoretical equivalence of differently proposed ensemble/3D-Var hybrid analysis schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 222–227.

Whitaker, J. S., and T. M. Hamill, 2002: Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1913–1924.

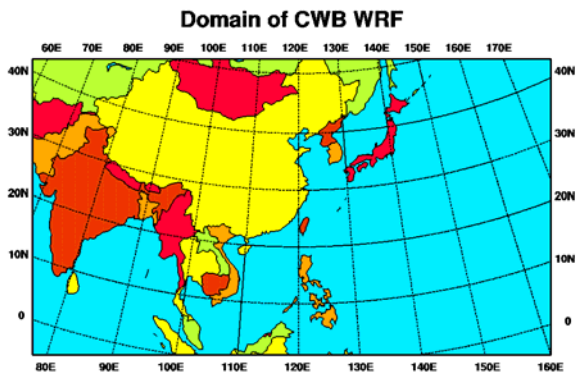


圖 1：本研究之模式積分範圍。

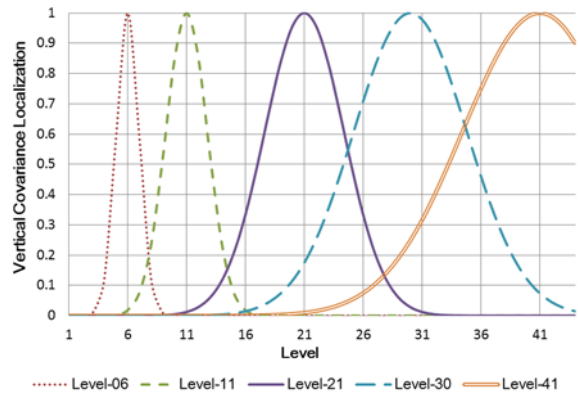


圖 2：不同模式層面之 $\rho$ 值垂直分布。其中 x 座標為模式垂直層面，y 座標為 $\rho$ 值（Vertical Covariance Localization）。

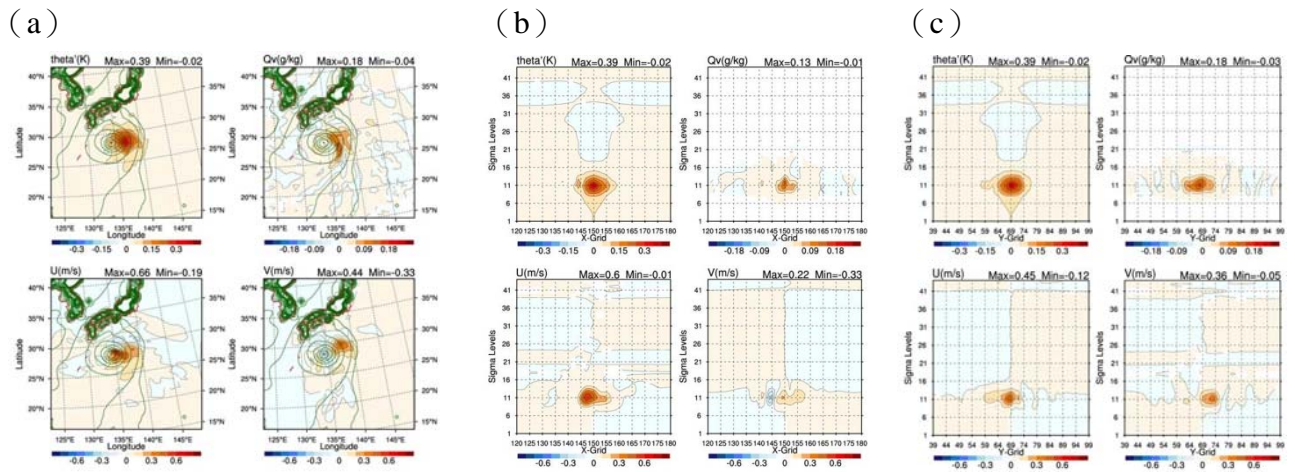


圖 3：HEAKF 單點觀測實驗之擾動位溫、混合比、U 風場與 V 風場之 (a) X-Y, (a) Y-Z, (a) X-Z 分析增量剖面圖，單點觀測垂直層為第 11 層約 860hPa，其中綠色曲線代表模式層面之氣壓分布。

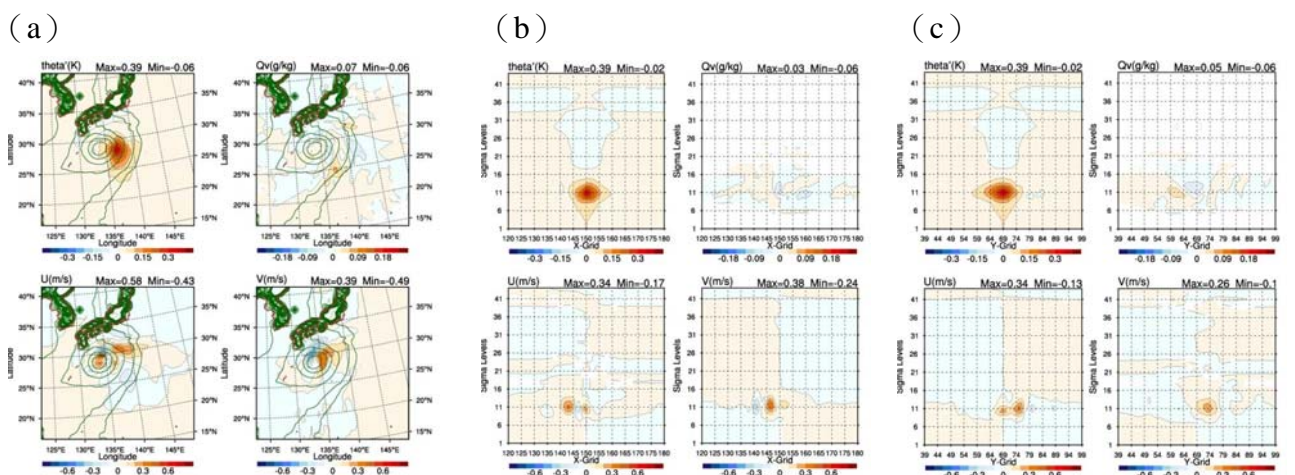


圖 4：同圖 3，但為 HWEPS 單點觀測實驗之結果。



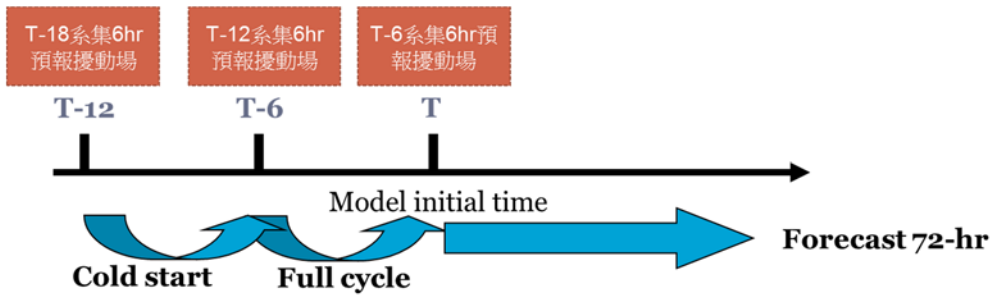


圖 5：部份循環更新（partial cycle）資料同化策略。

(a) 12-hr    (b) 48-hr    (c) 72-hr

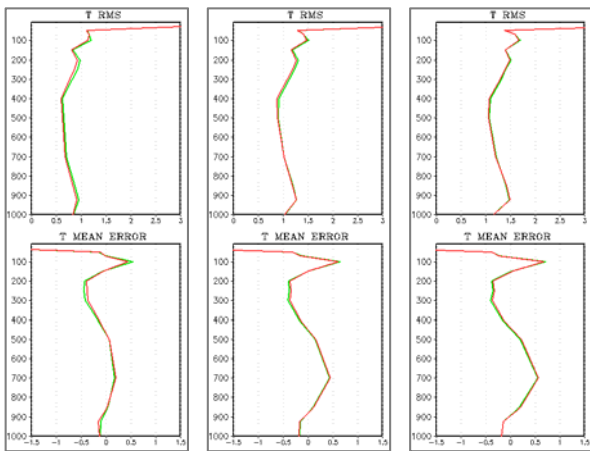


圖 6：溫度場 (a) 12 小時預報，(b) 48 小時預報，(c) 72 小時預報與 NCEP 分析場校驗之均方根誤差和平均誤差，綠線為 3DVAR，紅線為 HEAKF。

(a) 12-hr    (b) 48-hr    (c) 72-hr

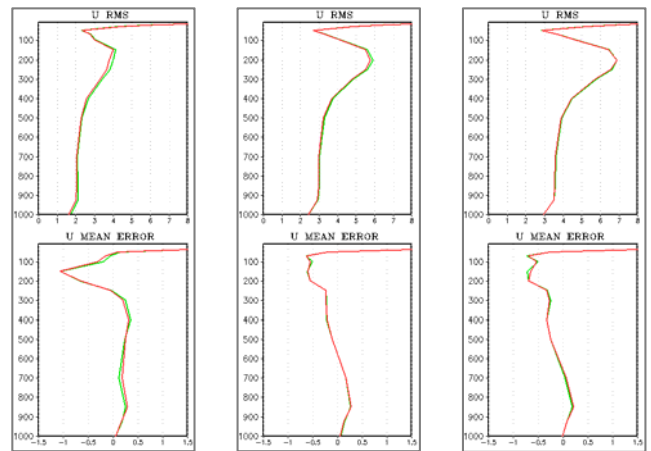


圖 7：同圖 6，但為 U 風場之結果。

(a) 12-hr    (b) 48-hr    (c) 72-hr

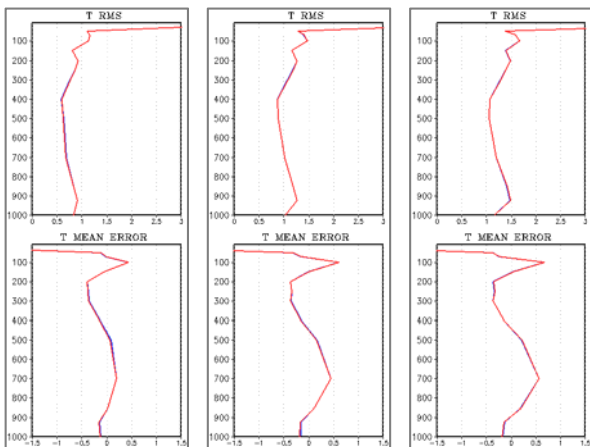


圖 8：溫度場 (a) 12 小時預報，(b) 48 小時預報，(c) 72 小時預報與 NCEP 分析場校驗之均方根誤差和平均誤差，藍線為 HWEPS，紅線為 HEAKF。

(a) 12-hr    (b) 48-hr    (c) 72-hr

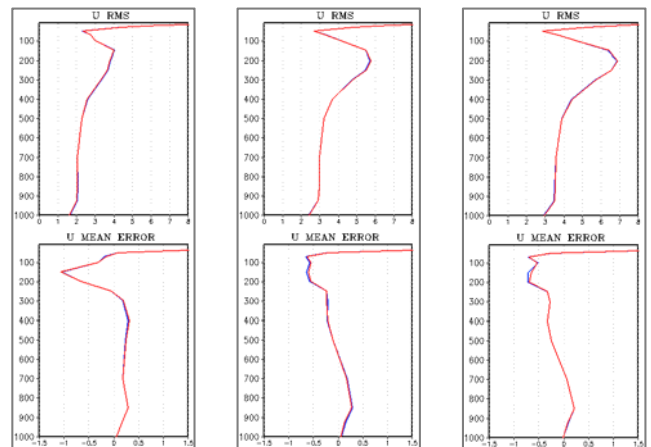


圖 9：同圖 8，但為 U 風場之結果。

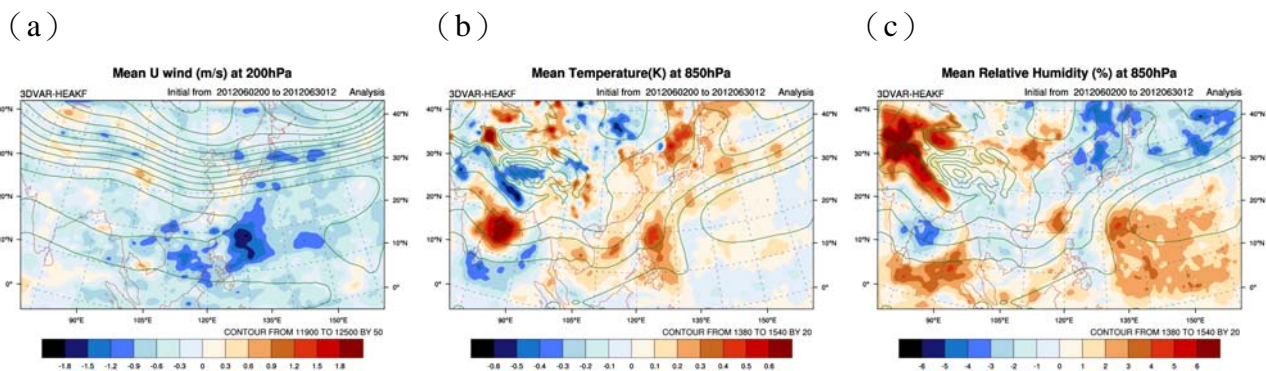


圖 10：2012 年 6 月分析時，HEAKF 與 3DVAR 兩者之 (a) 200 hPa U 風場，(b) 850 hPa 溫度場，(c) 850 hPa 相對濕度場之平均差異分布圖。

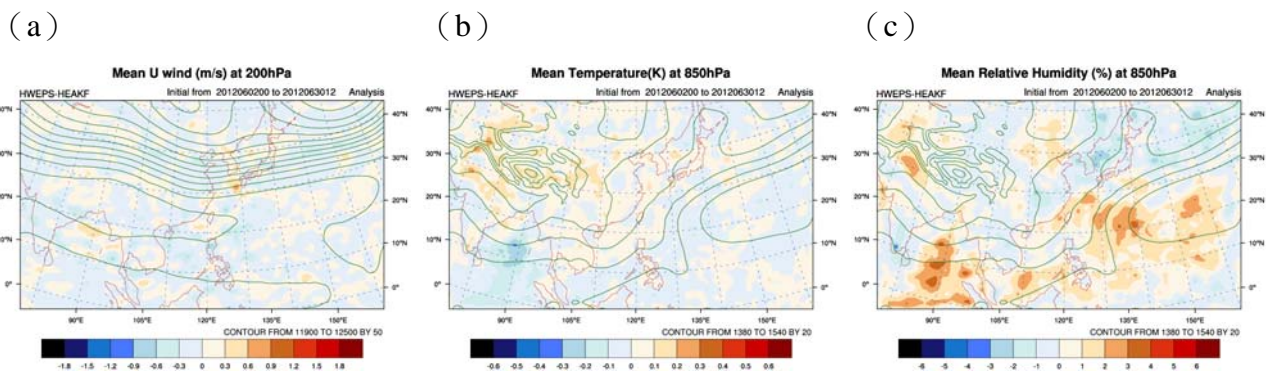


圖 11：同圖 10，但為 HEAKF 與 HWEPS 兩者之平均差異分布圖。

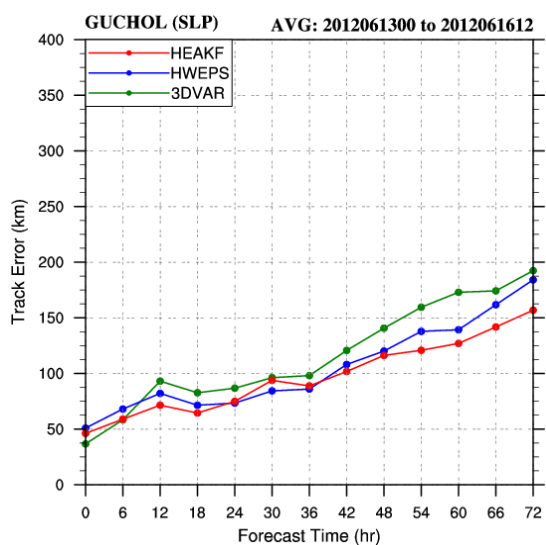


圖 12：2012 年 6 月谷超 (GUCHOL) 颱風預報路徑平均誤差，綠線為 3DVAR，紅線為 HEAKF，藍線為 HWEPS。

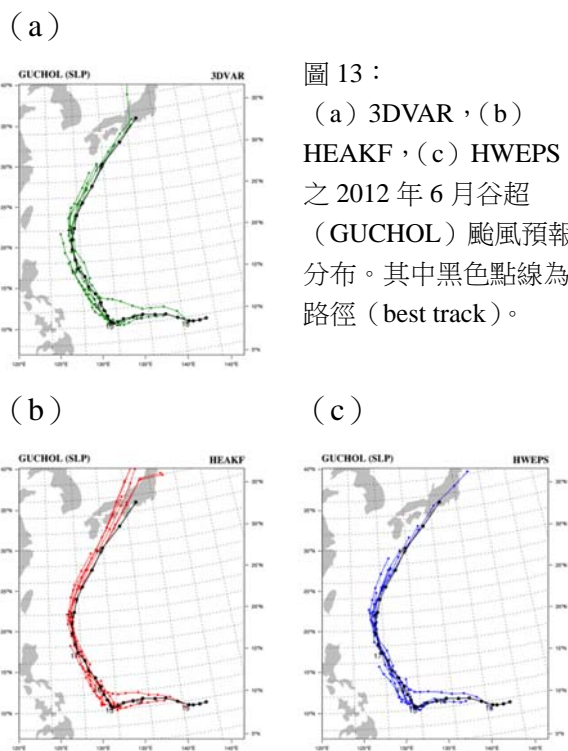


圖 13：  
(a) 3DVAR，(b) HEAKF，(c) HWEPS 實驗之 2012 年 6 月谷超 (GUCHOL) 颱風預報路徑分布。其中黑色點線為最佳路徑 (best track)。