

# 系集平均場置換在系集雷達資料同化之研究

江琇瑛 洪景山

中央氣象局 氣象資訊中心

## 摘要

傳統都卜勒雷達觀測可提供對流尺度之徑向風場和回波，但雷達回波與水相變數（如雨水、雪等變數）的關係相當複雜，故在傳統三維變分資料同化（3DVAR）中，想要透過靜態的模式背景誤差協方差矩陣（background error covariances；BECs）以有效發揮雷達資料同化之優勢，具有相當大的挑戰。

系集卡爾曼濾波（Ensemble Kalman Filter；EnKF）之 BECs 具有流場相關之特性，因此雷達回波與徑向風場可透過模式變數之間的相關統計特性，更新分析變數。局地系集轉換卡爾曼濾波器（Local Ensemble Transform Kalman Filter；LETKF）為 EnKF 方法之一，本研究使用 LETKF/WRF 系集資料同化系統，進行對流尺度雷達資料同化實驗，透過不同模數參數更新、系集放大因子、系集協方差局地化等設定，評估對模式降水預報之影響；同時也探討有效引入綜觀尺度的流場資訊如何改善高解析度資料同化的預報效能。

本研究選取 2012 年 6 月 10 日 0600 UTC 個案進行實驗分析，結果顯示，模式在地形上之降水預報不足的現象特別顯著，即使進行不同資料同化策略，在地形上之降水預報準確度仍無法有效提升。然而，透過 blending 方法引入綜觀尺度的流場資訊，置換系集預報平均場進行 LETKF/WRF 同化，其模式在地形上的降水預報明顯獲得改善。

關鍵字：背景誤差協方差矩陣，局地系集轉換卡爾曼濾波器

## 一、前言

台灣因地理位置及地形分布，深受颱風、梅雨等劇烈天氣系統影響，所以發展短期降水預報對於防災有重要助益，而雷達觀測之高時空解析度非常適用於短期天氣預報，因此希望能發展出快速的雷達資料同化系統，透過雷達觀測資料對模式預報之調整，所得之分析場進行即時短時降水預報。

有別於傳統變分資料同化，系集卡爾曼濾波（EnKF, Burgers et al. 1998；Houtekamer et al. 2005）模式背景誤差協方差矩陣（BECs）具有流場相關之特性，因此雷達回波與徑向風場可透過模式變數之間的相關統計特性，更新分析變數。為了讓系集預報場有效建立起不同模數變數之間的相關特性，使用全循環同化流程（full cycling）進行 EnKF 資料同化，但全循環同化流程可能因觀測資料分布不均勻，尤其在海平面上，這些區域可能沒有觀測資訊對模式預報場進行調整與更新，將使模式系統性誤差愈來愈顯著，造成

嚴重的模式系統性誤差問題，進而降低模式預報效益。

近幾年中央氣象局與美國國家大氣科學中心（National Center for Atmospheric Research; NCAR）發展出改善模式初始場之方法，運用結合不同數值預報模式環流場資訊之技術，將全球預報模式之大尺度環流資訊，結合於區域預報模式層場中（Yang, 2005），對於此方法稱為 Blending。此目的是希望透過 Blending 方法，使區域預報模式初始場可有效掌握大尺度環流特徵結構，並且減少模式系統性誤差，提升模式預報準確度。

局地系集轉換卡爾曼濾波器（LETKF, Hunt et al. 2007；Yang et al. 2009）為 EnKF 方法之一，本研究使用 LETKF/WRF 系集資料同化系統，進行對流尺度雷達資料同化實驗，透過不同模數參數更新、系集放大因子、系集協方差局地化等設定，評估對模式降水預報之影響；同時也探討透過 Blending 方法有效引入綜觀尺度的流場資訊如何改善高解析度資料同化的預

報效能。在本文中，第二部分為實驗設計，第三部分討論實驗結果，第四部分為結論。

## 二、實驗設計

本研究選取 2012 年 6 月 10 日 0600 UTC 之梅雨個案進行實驗測試與分析，因考慮到 LEAKF/WRF 系集同化系統運轉啟動 (spin up) 所需時間，故自 2012 年 6 月 9 日 1800 UTC 由 NCEP 全球模式之分析場冷啟動，先由隨機擾動產製 32 組系集成員，再以每 1 小時之更新週期，進行雷達觀測循環資料同化，然後於 2012 年 6 月 10 日 0600 UTC 進行系集平均分析場之模式預報。

本研究之 WRF 預報模式使用 V 3.3.1 版本進行實驗，該動力模組採用 WRF-ARW，使用單層巢狀網格式結構，其水平解析度設定為 2 km，網格式點數為 421 x 421，投影法為藍伯特 (Lambert)，模式網域分布如圖 1 所示，另外垂直解析度設定為 52 層，模式頂為 20 hPa。此外，預報模式使用 NOAH 土壤模式、Goddard GCE 微物理參數法、YSU 邊界層參數法、Kain-Fritsch 積雲參數法和 RRTMG 長波、短波輻射參數法，各參數法之介紹詳見 WRF 使用手冊 (Skamarock et al. 2008)。模式的側邊界採用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 全球模式 0.5° 解析度的預報場。

關於雷達觀測資料，本研究使用五分山、花蓮、七股和墾丁雷達，在 PPI (plan position indicator) 上之徑向風與回波資料，為提升 LETKF 計算效率，並且避免相鄰間的觀測誤差相依 (如：Berenguer and Zawadzki 2008)，進行超級觀測化 (super observation，蔡 2014)，其徑向間距為 5 公里，方位角間距為 5 度，而徑向風和回波的觀測誤差，分別採用經驗值  $3 \text{ m s}^{-1}$  和 5 dBZ。在模式變數更新設定方面，本研究設定更新之變數有 U、V、W 風場、雨水 (Qr)、雪 (Qs) 和軟雹 (Qg)，此外不同變數可給予不同協方差局地化半徑 (Localization)，風場變數皆設定 36 公里，Qr、Qs 和 Qg 皆設為 12 公里，而系集放大因子 (Inflation) 設為 1.08。

## 三、分析與討論

圖 3 分別為 QPESUM 和 LETKF/WRF 系集平均預報 (簡稱 CTL) 之 6 小時累積降水，圖中顯示，CTL 實驗在南部雨帶之表現不錯，不過對於地形上的降水預報表現就非常差，尤其在南投地形上模式降水預報不足之現象特別顯著。本研究進階進行不同 LETKF/WRF 雷達同化策略之實驗，討論對此個案實驗預報之影響，其設定分別有：同化更新變數加入擾動位溫 ( $\theta'$ ) 與水氣 (Qv)、系集放大因子改為 2.0、各模式變數之協方差局地化半徑提升 2 倍，以及使用不作超級觀測化之雷達觀測資料進行資料同化，共四組同化策略實驗，實驗分別簡稱 w\_TQv、inf2、Lx2 和 obsALL，這四組 LETKF/WRF 同化實驗之啟動時間皆與 CTL 實驗相同，而各同化實驗之系集平均 6 小時預報累積降水如圖 4 所示。在 w\_TQv 實驗中，擾動位溫與水氣場的協方差局地化半徑和系集放大因子皆與風場變數相同。圖 4 結果顯示，這四組同化策略實驗在南部雨帶可看出實驗之間的差異，其中以 w\_TQv 實驗和 inf2 實驗最明顯，w\_TQv 實驗的南部雨帶範圍較大，但地形上的降水明顯變少；inf2 實驗的南部雨帶範圍則最窄。不過這四組同化策略實驗在地形上的降水預報皆表現不佳，即使將所有雷達觀測進行資料同化 (obsALL 實驗)，模式仍沒有預報出顯著的降水。

圖 5 為 w\_TQv 同化實驗模式第 1 層水平風場分析增量，以及與 NCEP 分析場之差異分布，首先由圖 5 (A) 顯示，LETKF/WRF 模式分析場西南風明顯偏弱，尤其在臺灣西南部和東部一帶，即使到 700 hPa 仍可看出 (未圖示)；然而從圖 5 (B) 可知，同化雷達觀測資料確實有提升分析場臺灣西南部的西南風，但涵蓋範圍卻不及於圖 5 (B) 數百公里的差異分布，因此仍造成模式分析場西南風偏弱之情形。圖 6 同圖 5，但為水氣場之結果，水氣場的結果和水平風場的結果雷同，由圖 6 (A) 與 NCEP 分析場的差異分布同樣可看出大範圍的差異分布，並且差異值可達到  $2.5 \text{ g/kg}$  以上，相對於水氣分析增量，如圖 6 (B)，不論是分布範圍或差異值方面，分析增量皆明顯不如與 NCEP

分析場之差異，此現象到模式中對流層仍是如此。其他模式變數也都有此情形。

由上述結果可知，LETKF/WRF 模式在綜觀尺度天氣系統之表現明顯較差，雖然每次資料同化循環有雷達觀測資料對模式預報場進行調整，但由分析增量結果可看出，雷達觀測資料只有在臺灣周圍才有較完整的資料，在海平面上幾乎無雷達觀測資料對模式預報場進行調整，此將造成這些區域沒有觀測資訊對模式預報場進行同化更新，使模式系統性誤差愈來愈顯著，造成嚴重的模式系統性誤差問題，如圖 5 (A) 之模式西南風偏弱所示。

本研究將運用 Blending 方法有效引入綜觀尺度的流場資訊，然而 Blending 方法的基本原理是運用低階 spatial filter 方法 (Raymond and Garder, 1991)，結合不同數值預報模式之環流場資訊，首先將大氣環流場分離出不同波長結構，而後再擷取各個模式環流場所需的波長資訊，以將不同模式變數之環流分布重新結合，得出全新的模式層場，其公式如下所示：

$$X_A^{NEW} = X_A - \overline{X_A}^{sf} + \overline{X_B}^{sf} \quad (1)$$

其中， $X_A$  代表模式 A 環流場， $X_B$  代表模式 B 環流場，而上標 sf 代表 spatial filter，即要進行環流波長結構替換之模式層場。因此，如果將模式 B 大尺度環流波長結構置換到模式 A，則全新模式 A 環流資訊將如圖 7 所示，其同時包含模式 B 之大尺度環流結構 (黃色區塊)，和本身模式 A 之小尺度環流資訊 (紅色區塊)。本研究將運用 Blending 方法，對 LETKF/WRF 系集預報場進行平均場置換之個案實驗分析，透過 Blending 方法置換 NCEP 分析場之大尺度環流資訊，探討其對模式降水預報之影響為何。

本研究 Blending 的擷取波長 (Blended Cut-off Length Scale) 設為 900 公里，置換之 WRF 模式變場有：U 風場、V 風場、擾動位溫、水氣、擾動重力位、擾動氣壓、擾動乾空氣柱質量 (perturbation dry air mass in column)、和地面氣壓，其模式 6 小時預報累積降水結果如圖 8 所示，圖中顯示，除了南部雨帶預報表現仍不錯，在地形上的降水預報表現也顯著提升。為了

瞭解不同變數之大尺度環流資訊對模式降水預報之影響程度，本研究進階進行置換不同變數之敏感度測試，共 5 組實驗，各實驗置換之變數設定和系集平均預報 6 小時累積降水結果，分別如表 1 和圖 9 所示。首先由圖 9 (A) 顯示，只置換 U/V 風場，仍無法有效率改善地形上的降水預報，然而由圖 9 (B) - (D) 結果顯示，在已經有效引入較正確的水平風場之綜觀資訊的情況下，水氣場修正對降水預報之影響顯然比溫度場修正來得高，這意味著水氣場對於此個案之模式降水表現相當重要，不過要有效利用回波資料調整模式水氣仍具有相當大的挑戰。最後由圖 9 (E) 顯示，雖然已經有效引入較正確的水氣場之綜觀資訊，但如果沒有伴隨較正確的水平風場之綜觀資訊，地形上降水預報表現仍不佳。

## 四、總結與未來展望

本研究選取 2012 年 6 月 10 日 0600 UTC 個案進行 LETKF/WRF 對流尺度雷達資料同化實驗進行初步分析與探討，同時透過不同模數參數更新、系集放大因子、系集協方差局地化等設定之同化策略，評估對模式降水預報之影響。由 6 小時累積降水預報結果顯示，模式在臺灣地形上的降水預報表現就非常不好，幾乎無預報出降水；然而在不同資料同化策略實驗中，雖然台灣南部雨帶位置及形狀的預報可看出差別，但在地形上的降雨預報皆無明顯的改變，在地形上模式降水預報不足之現象仍然存在。

進階探討分析增量，以及與 NCEP 分析場之差異分布，結果顯示，模式預報的系統性偏差無法有效地透過雷達觀測資料進行調整。由於雷達觀測資料只有在臺灣周圍才有較完整的資料，在海平面上幾乎無雷達觀測資料，此將造成這些區域沒有雷達觀測資訊對模式預報場進行同化更新，進而使模式系統性誤差愈來愈顯著。

本研究透過 Blending 方法置換 NCEP 分析場之大尺度環流資訊，使區域預報模式初始場可有效掌握大尺度環流特徵結構，以減少模式系統性誤差，提升

模式預報準確度。實驗結果顯示，模式除了在南部兩帶預報仍表現不錯，在地形上的降水預報表現也明顯得到改善；透過置換不同變數之敏感度測試結果顯示，對於這個案而言，同時有效引入水平風場和水氣場之綜觀資訊，才能有效提升模式 6 小時降水預報表現。

由上述結果呈現出，雷達資料同化需要大尺度的環境訊息，在循環更新的資料同化系統中尤為重要，本研究成功引用 Blending 方法，用以進行系集平均場之置換，並有效改善地形上之定量降水預報。未來將探討如何設計 Blending 系集平均場置換策略，有效引入綜觀尺度的流場資訊，建置一套快速更新的 LETKF / WRF 對流尺度雷達資料同化系統，進行逐時的即時短時降水預報。

## 五、參考文獻

蔡直謙，2014: 利用局地系集轉換卡爾曼濾波器雷達資料同化系統改善定量降水即時預報: 莫拉克颱風(2009)。國立中央大學大氣物理所博士論文，1 - 71。

邵彥銘，2015: 利用局地系集轉換卡爾曼濾波器雷達資料同化系統改善短期定量降雨預報: SoWMEX IOP8 個案分析。國立中央大學大氣物理所碩士論文，1 - 95。

Berenguer, M., and I. Zawadzki, 2008: A study of the error covariance matrix of radar rainfall estimates in stratiform rain. *Wea. Forecasting*, **23**, 1085-1101.

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

Hunt, B., E. Kostelich, I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112-126.

Houtekamer, P., G. Pellerin, M. Buehner, and M. Charron, 2005: Atmospheric data assimilation with an ensemble Kalman filter: Results with real observations. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 604-620.

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

Yang, S-C, M. Corazza, A. Carrassi, E. Kalnay, and T. Miyoshi, 2009: Comparison of ensemble-based and variational-based data assimilation schemes in a quasi-geostrophic model. *Mov. Wea. Rev.*, **137**, 693-709.

Yang, X., C. Petersen, B. Amstrup, B. Andersen, H. Feddersen, M. Kmit, U. Korsholm, K. Lindberg, K. Mogensen, B. H. Sass, K. Sattler and N. W. Nielsen, 2005: *The DMI-HIRLAM upgrade in June 2004*. DMI Technical Report, 05-09, pp 35.

	U	V	T	Qv
(A) UV	■	■		
(B) UV+T+Q	■	■	■	■
(C) UV+T	■	■	■	
(D) UV+Q	■	■		■
(E) Q				■

表 1：置換不同變數敏感度測試之模式變數設定。

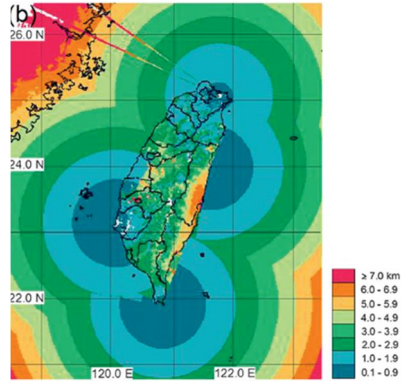
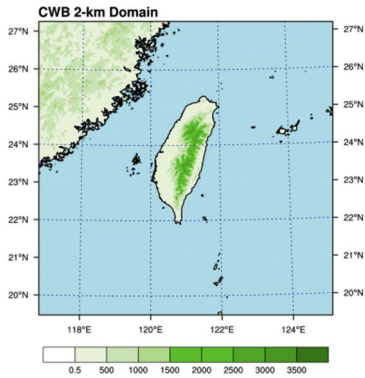


圖 1：2 公里解析度 WRF 模式積分範圍。 圖 2：五分山、花蓮、七股和墾丁雷達各仰角掃描範圍。

(A) QPESUM

(B) LETKF/WRF

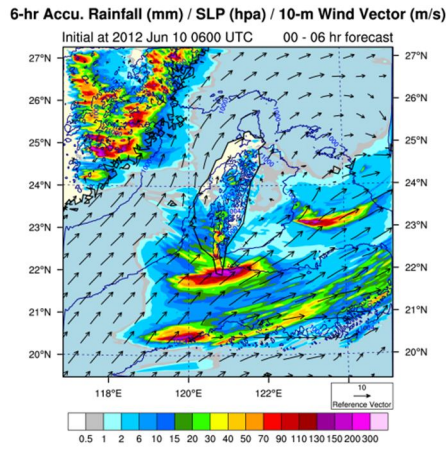
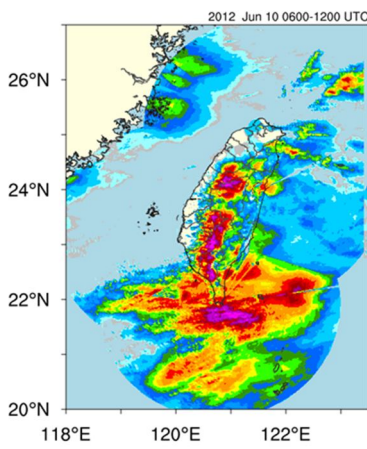


圖 3：

(A) QPESUM (B) LETKF/WRF 系集平均預報之 6 小時累積降水。

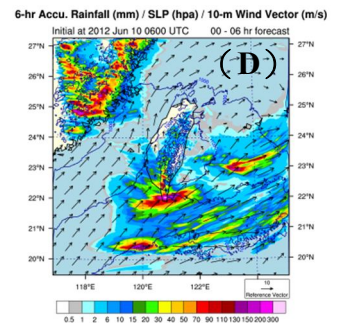
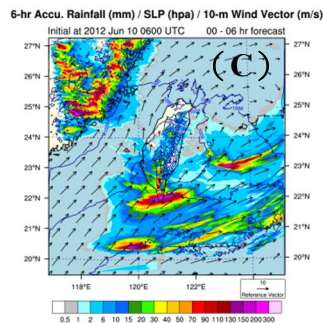
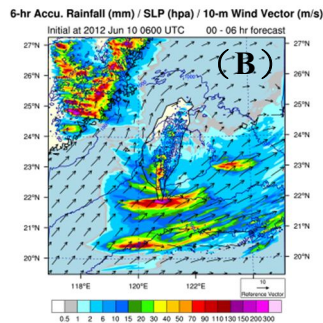
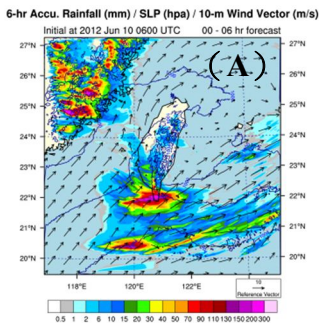


圖 4：不同 LETKF/WRF 雷達同化策略實驗之系集平均預報的 6 小時累積降水，其中 (A) 為 w\_TQv 實驗，(B) 為 inf2 實驗，(C) 為 Lx2 實驗，(D) 為 obsALL 實驗。

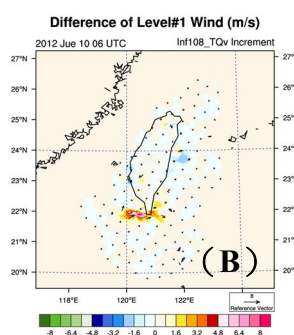
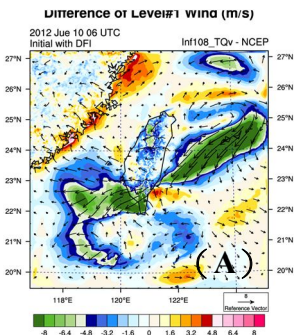


圖 5：

w\_TQv 同化實驗模式第 1 層水平風場之 (A) 與 NCEP 分析場的差異分布，(B) 分析增量。其中，色階代表風速，風標代表風向。



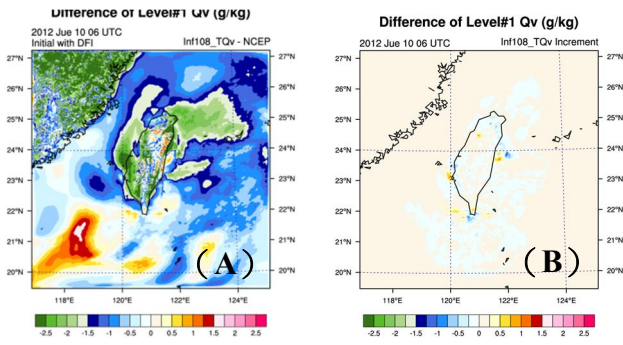


圖 6：  
w\_TQv 同化實驗模式第 1 層水氣 Qv 之 (A)  
與 NCEP 分析場的差異分布，(B) 分析增量。

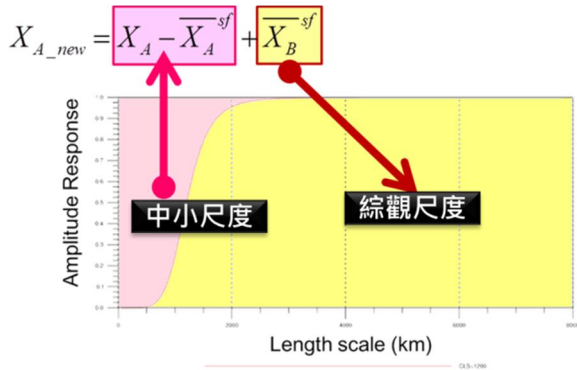


圖 7：結合不同模式環流波長結構示意圖，其中 x  
軸為環流波長大小，y 軸代表振幅大小。

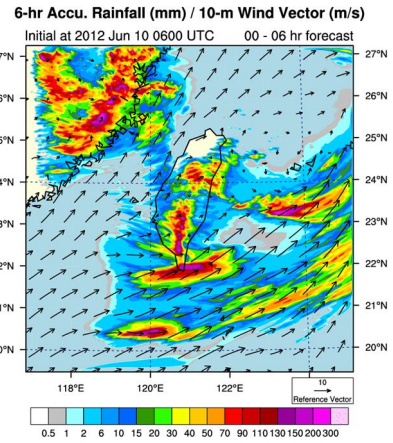


圖 8：進行平均場置換實驗之系集平均預報 6 小  
時累積降水。

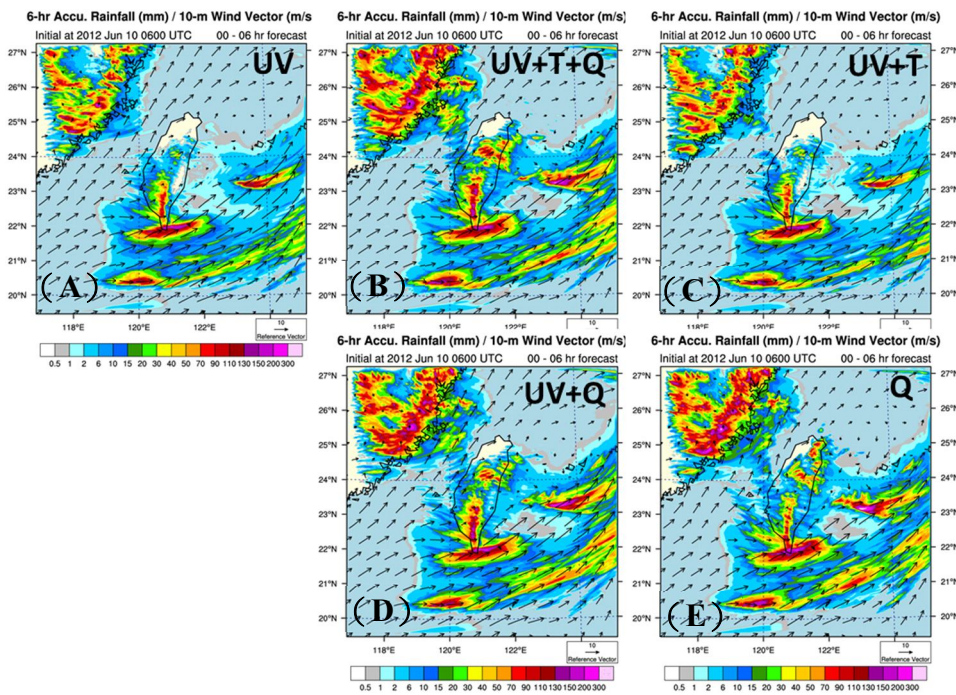


圖 9：置換不同變數敏感度測試之系集平均預報 6 小時累積降水，各組實驗置換之變數如表 1 所示。