

區域系集預報系統設計之初步研究

李志昕、洪景山、曹嘉宏
中央氣象局氣象資訊中心

摘要

區域系集預報系統的發展，主要是期望此系統能包含模式預報的不確定性。欲發展區域系集預報系統，須產生有效且合理的系集預報成員。產生系集預報成員的方法，包含初始場擾動法、邊界擾動法、模式物理參數化擾動法等。本研究利用WRF模式進行預報實驗，配合物理參數化擾動法，針對模式積雲參數化、微物理參數化、邊界層參數化以及土壤模式等，產生40組系集成員，並分析模式物理參數化擾動法能否提供合適之系集預報成員。欲找出合適之系集預報成員，需發展統計校驗技術。進行系集預報系統效能之評估時，必須分兩個層面進行評估，第一部分是評估系集成員分歧是否足夠，據以最大程度涵蓋可能的發生機率；第二部分是評估系集預報系統的預報能力和可信度。根據初步分析結果，使用模式物理參數化擾動法產生之40組系集成員離散程度不足，顯示此一方法尚不足以提供足夠分散之系集成員，因此未來需針對其他系集成員產生方式進行實驗和評估分析，以期望找出最合適之系集預報成員組合方式。

一、前言

數值天氣預報系統中存在著非線性過程，任何微小的變化，皆有可能導致預報結果產生巨大的差異。然而，預報系統中存在著許多不確定性，包含初始資料的誤差或是模式中的缺陷，皆可能造成模式預報結果的變化。傳統的數值天氣預報為單一模式預報，期望由最佳的單一初始資料，獲得最佳之模式預報結果。這種決定性的預報無法掌握預報過程中的不確定性，同時亦無法提供預報過程中的不確定性資訊，因此期望單一模式掌握所有可能的天氣變化有其困難度。

系集預報的發展是為了彌補單一模式預報的不足，藉由多個不同的系集成員預報，期望能包含模式預報的不確定性，並且將不確定性量化，以提供未來的預報機率。因此欲發展系集預報系統，需產生有效且合理的系集預報成員。針對區域模式，產生系集預報成員的方法，包含藉由不同初始場產生的擾動、邊界條件差異的擾動、不同模式物理參數化產生的擾動等。

本研究使用WRF模式進行預報實驗，配合不同之

模式物理參數化產生擾動，包含模式積雲參數化、微物理參數化、邊界層參數化與土壤模式等，共產生40組系集成員，並分析此一系集成員產生的方法能否提供合適之系集預報成員。

二、研究方法

(一) 實驗設計

本實驗使用WRF模式進行實驗，水平解析度設定為45 km，垂直解析度設定為45層，模式頂層為30 hPa，使用之WPS和WRF版本為WPS3.1.1版和WRF3.1.1版。實驗中沒有進行資料同化，採用NCEP-GFS作為背景分析場，每天00Z和12Z作72小時的預報，針對2008年6月1日至6月27日進行預報。

為了產生預報擾動，本研究將改變模式物理參數化，藉由不同土壤模式、微物理參數化、邊界層參數化和積雲參數化，產生40組相異模式物理參數化組合的預報實驗。土壤模式使用三個模式，分別為Noah Land-Surface Model、Rapid Update Cycle Model、Pleim-Xiu Land-Surface Model；微物理參數化WSM3 scheme、WSM5 scheme、Thompson et al. scheme、Goddard Cumulus Ensemble Model scheme等四種；

邊界層參數化使用兩個參數化，Yonsei University (YSU) PBL 或 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) PBL；積雲參數化則採用 Betts-Miller-Janjic scheme、Grell-Devenyi ensemble scheme、Grell-3 scheme 和 Kain-Fritsch scheme 等，共 4 種。

但此種設定將須進行 96 組實驗，有實驗過多的情況，在保有原始設計初衷和減少個案的考量下，進行分組實驗。第一個實驗組為固定土壤模式為 Noah Land-Surface Model，配合其他三種物理參數化的改變，進行 32 組實驗；第二個實驗組為固定微物理參數化為 Goddard Cumulus Ensemble Model scheme，使用三種土壤模式和兩組邊界層參數化，而積雲參數化選擇 Grell-3 scheme 和 Kain-Fritsch scheme 等兩種。在第二個實驗組中將進行 12 組預報實驗，但土壤模式 Noah Land-Surface Model 的實驗與第一個實驗組中有所重複，因此第二個實驗組實際須執行 8 組預報實驗。包含第一組實驗與第二組實驗共進行 40 組預報實驗。

(二) 校驗技術

為了找出合適的系集預報成員，須透過校驗分析來判斷此一組系集成員是否合適。進行系集預報系統之評估時，分兩個層面進行評估，第一部分是評估系集分歧是否足夠，據以最大程度涵蓋可能的發生機率，欲採用 Talagrand Rank Histogram、The member equal-likelihood 與 ensemble spread。第二部分是評估系集預報系統的預報能力和可信度，採用 Continuous Ranked Probability Skill Score (CRPSS) 進行預報能力的校驗；在可信度評估上採用 Reliability diagram。

1. Talagrand Rank Histograms

針對已知的真值而言，Talagrand Rank Histogram 能評估系集預報系統相對於該真值的離散程度，也能了解系集預報的偏差(Bias)情形。在系集預報系統中，假設有 M 個成員，因此會有 M 個預報結果，接著將預報值由小自大排列，產生 M+1 個區間(Rank)，第一個區間為小於最小預報值，第 M+1 個區間為大於最大預報值。預報值與真值進行比較，紀錄真值落於哪個區間，即在該區間累加一次。統計完所有時間和網格點上的資料後，便可得到 Rank Histogram 圖(如圖

2)。

若統計結果顯示，圖形呈現 U 型分布，表示此系統離散程度不足，真值總是落於較大或是較小值的區間；倘若圖形呈現 A 型分布，表示離散程度太大，系統擁有的不確定性大於真實情形；當圖形為平坦，表示此系統離散程度為合理的情形。

2. The member equal-likelihood

一般而言，好的系集預報系統，期望每個系集成員對於真值的預報命中率是平均的，而 Rank Histogram 無法得知此訊息，因此透過 The member equal-likelihood 進行校驗。此法的分析，以真值和各成員預報值進行比較，若系集成員預報值和真值最接近，則此系集成員累加一次，統計完所有時間和網格點的資料之後，即可得到此圖(如圖 3)。由於期望每個成員對於真值的預報命中率一致，因此圖形平坦時，為最佳的情形。

3. Ensemble spread (SPRD)

Rank Histogram 對於離散程度的評估較為定性判斷，因此透過 ensemble spread 提供一個定量的數值協助判斷。ensemble spread 和標準差所代表的意義相同，由各個成員預報值和預報平均值的差異進行平均計算，可得知系集成員的分佈程度，公式如下：

$$SPRD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\bar{f} - f(n))^2}$$

其中 f(n) 為各成員預報值。

但是 SPRD 值沒有和真值進行比較，無法得知離散程度是否合理，因此透過預報平均值和真值比較，此分析為 Root Mean Square Error (RMSE) 計算，可得知預報平均值和真值的差異。若 RMSE 和 SPRD 相等時，表示 ensemble spread 離散程度合理；當 RMSE 大於 SPRD 時，表示離散不足；當 RMSE 小於 SPRD 時，表示過度離散。

4. Continuous Ranked Probability Score (CRPS) and Continuous Ranked Probability Skill Score (CRPSS)

CRPS 是由 Brier score 演變而來，能計算機率預報誤差。Brier score 的計算須先訂定一門檻值，計算預報值大於門檻值的機率和真值大於此門檻值的機

率之差值。而 CRPS 值針對所有可能的門檻值(x)進行預報機率和觀測機率之差值積分，其公式如下： #

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} [F(x) - O(x)]^2 dx$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \rho(y) dy$$

$$O(x) = \begin{cases} 0 & x < x_0 \\ 1 & x > x_0 \end{cases}$$

其中 $O(x)$ 稱為觀測機率， $F(x)$ 為累積機率分布， $\rho(y)$ 為機率密度分布， x_0 為觀測值。

若只求 CRPS 值，還不能得知其預報能力，只能知道機率預報誤差，若欲知預報能力，則必須有能夠比較的數值，為 Reference Continuous Ranked Probability Score(簡寫為 $CRPS_r$)，此值可由計算氣候值的 CRPS 值得到，亦可使用最佳的確定性預報(deterministic forecast)。經過比較之後才可知預報能力為何，稱為 Continuous Ranked Probability Skill Score(CRPSS)。

$$CRPSS = \frac{CRPS_r - CRPS}{CRPS_r}$$

若 CRPSS 值大於 0 時表示此系統具有預報能力；若 CRPSS 等值 1 時為最佳情形。

5. Reliability diagram

Reliability diagram 能指出預報系統的可信度(如圖 5)。在訂定某一個門檻的條件下，計算大於此一門檻之預報機率，並求所對應之觀測機率，若觀測機率等於預報機率，表示此一預報系統具有可信度。

三、校驗分析與討論

本研究針對 40 組系集成員實驗透過 Talagrand Rank Histogram、The member equal-likelihood、ensemble spread、Reliability diagram 等校驗技術進行分析，校驗真值採用 ECMWF 全球模式分析場資料。分析範圍並非整個模式範圍，因為不同地區的氣候等差異，可能會造成校驗結果的差異，因此分析時只採用較小範圍分析，而分析範圍如圖 1 中的小方框。

圖 2(A)到(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場，預報第 72 小時的 Rank

Histogram 分析圖。根據圖中顯示，各變數分析皆呈現 U 型分布，表示此系集系統的離散程度不足。此外 500 hPa 高度場的 Rank Histogram 分析圖顯示，真值主要落在靠左的區間，顯示真值比大部分的預報值小，也表示系統對於 500 hPa 重力位高度預報偏大；根據海平面氣壓場的分析圖顯示，靠右的區間有較大的頻率值，表示真值比大部分的系集成員預報值大，顯示系集預報系統對於海平面氣壓預報偏低。

圖 3(A)到(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場，預報第 72 小時的 The member equal-likelihood 分析圖。圖中顯示各成員對於真值的預報命中率不平均，有些成員較佳，有些較差。

為瞭解系集成員離散程度隨時間變化，因此計算各個預報時間之 RMSE 和 SPRD 值，並繪於同一張圖上，如圖 4。圖 4(A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場的 RMSE 和 SPRD 的比較圖，圖中顯示隨著預報時間增加，SPRD 值皆小於 RMSE 值，表示不僅僅在預報 72 小時有離散不足的情形，整個預報期間都有離散不足的狀況。而客觀的數值顯示為離散不足的現象，也印證了 Rank Histogram 的分析結果。

預報可信度的校驗分析針對兩米溫度場和 500 hPa 高度場進行，兩米溫度場之校驗門檻值取 293K 和 298K，而 500 hPa 高度場之校驗門檻值取 5880 重力位公尺。圖 5(A)、(B)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場之校驗結果，x 軸為預報機率，y 軸為觀測機率，若分析結果圖形為一對角線圖形，表示預報機率和觀測機率相等，即預報可信度為最佳。但圖 5 中顯示，無論兩米溫度場或是 500 hPa 高度場圖形皆不在對角線上，且離對角線有一段距離，顯示此系統的預報可信度不足，而 500 hPa 高度場的線段圖形在對角線的下方，表示 500 hPa 高度場預報值偏大，和 Rank Histogram 分析結果有相同結論。

四、總結與未來展望

本研究採用 WRF 模式進行實驗，藉由模式不同的參數化組合產生擾動，進行 40 組的系集成員預報實驗。預報結果透過 Rank Histogram、The member equal-likelihood、ensemble spread、Reliability diagram 等校驗技術進行分析。分析結果顯示，利用

此一擾動法產生之系集成員離散程度不足，此外各個成員對於真值的預報命中率不平均。在預報可信度校驗結果顯示，預報可信度尚不足。

因此利用模式參數化變化產生擾動的方法，不足以提供合適之系集成員，因此未來還須進行其他實驗，包含使用不同初始場和邊界條件以及利用 EAKF 技術產生初始場擾動，期望能夠得到最合適之系集預報成員組合。

五、 參考文獻

Bröcker J., Leonard A. Smith, 2007: Increasing the Reliability of Reliability Diagrams. *Wea. Forecasting*, **22**, 651-661.

Candille G., C. Côté, P. L. Houtekamer, G. Pellerin, 2007: Verification of an Ensemble Prediction System against Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2688-2699.

Hamill, T. M, 2001: Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 550-560.

Hersbach H., 2000: Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems. *Wea. Forecasting*, **15**, 559-570.

Zhu, Y. and Z. Toth, 2008: Ensemble Based Probabilistic Forecast Verification. *19th AMS conference on Probability and Statistics*. New Orleans, LA, 20-24 Jan. 2008.

Zhou, B., J. McQueen, J. Du, G. DiMego, Z. Toth and Y. Zhu, 2005: Ensemble forecast and verification of low level wind shear by the NCEP SREF system. *21st Conference on Weather Analysis and Forecasting/17th Conference on Numerical Weather Prediction*. Washington, D.C., Amer. Meteor. Soc., 11B.7A

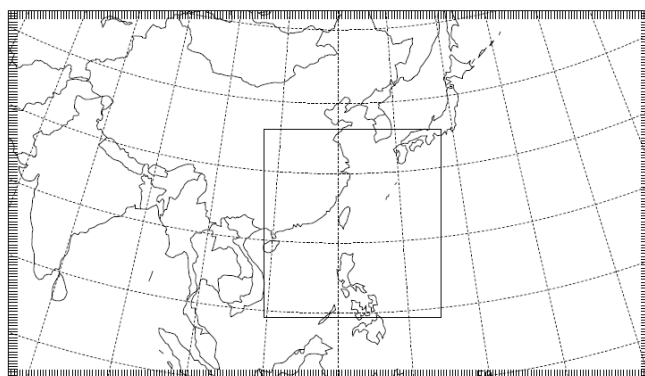


圖 1、模式的預報範圍，圖中小方框為校驗範圍。

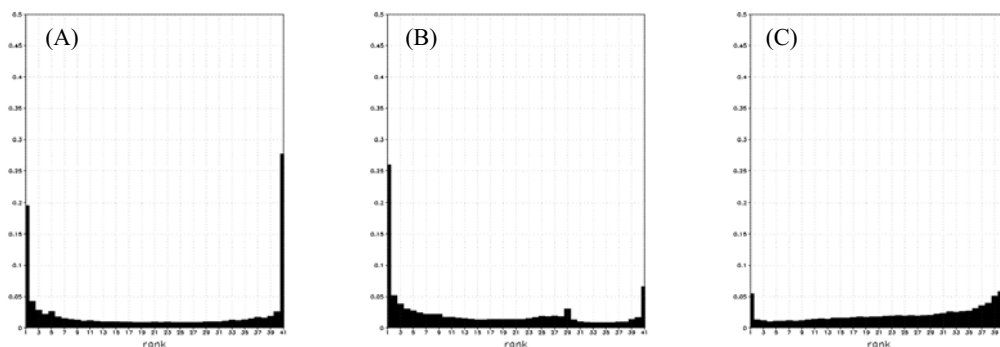


圖 2、(A)到(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場，預報第 72 小時的 Rank Histogram 分析圖。

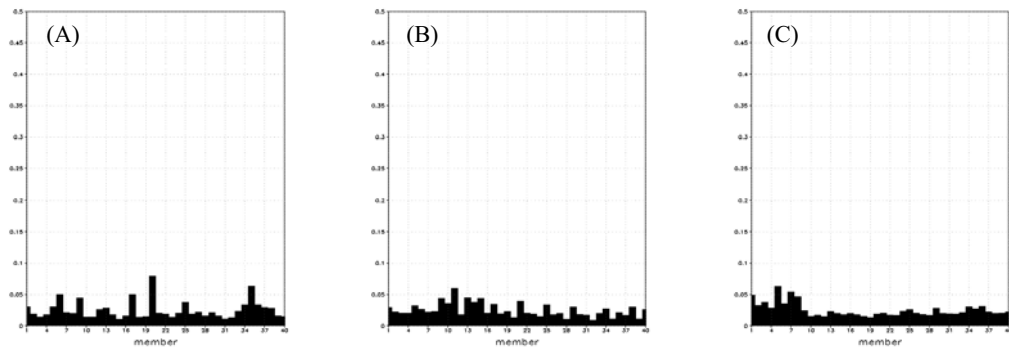


圖 3、(A)到(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場，預報第 72 小時的 The member equal-likelihood 圖。

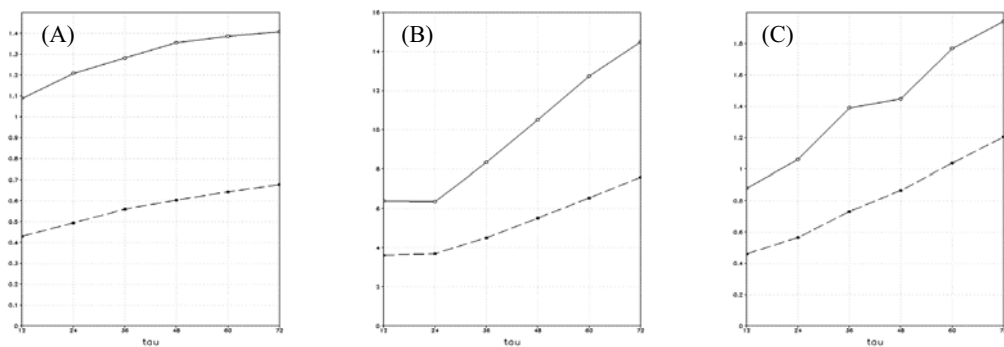


圖 4、(A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場的 RMSE 和 SPRD 的比較圖。實線為 RMSE 值，虛線為 SPRD 值。

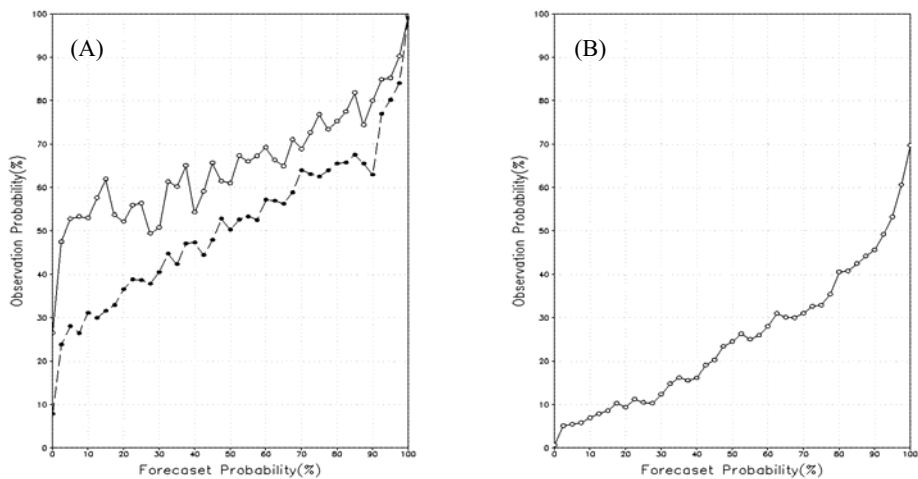


圖 5、(A)為兩米溫度場之 Reliability diagram，實線為門檻值 293K 時之分析曲線，虛線為門檻值 298K 時之分析曲線。(B)為 500 hPa 重力位高度場之 Reliability diagram，門檻值為 5880 重力位公尺。