

區域系集預報系統研究：物理參數化擾動

李志昕 洪景山

中央氣象局氣象資訊中心

(中華民國九十九年八月二十五日收稿；中華民國一百年三月二十五日定稿)

摘 要

系集預報系統設計的目的是要能涵蓋模式預報的不確定性。欲發展系集預報系統，須提供有效且合理的系集預報成員，以產生足夠的預報分歧。本研究利用 WRF 模式不同之積雲參數法、微物理參數法、邊界層參數法以及土壤模式等，產生 40 組以物理參數化擾動為主的系集成員進行數值模式預報實驗，並分析模式物理參數化擾動法是否能產生足夠的預報分歧，以建構有效的區域系集預報系統。

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，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。研究結果顯示，使用模式物理參數化擾動法產生之 40 組系集成員預報離散程度不足，顯示此一方法尚不足以提供足夠分散之系集成員，且預報可信度尚不足，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。

關鍵字：系集預報系統、離散

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不完美的模式系統，皆可能造成模式預報結果的不確定性。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完全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，期望系統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、不同模式物理參數法產生的擾動等。

現今國際各主要的數值天氣預報中心，不論就全球模式或區域模式，莫不極力發展系集預報系統，如歐洲氣象中心（ECMWF）作業中心每日產生 51 個成員、解析度為 T399，15 天預報的全球系集預報產品，該系集產品對於颱風路徑預報所提供之客觀的預報不確定性，在中央氣象局預報中心實際預報作業上扮演重要的角色。美國國家環境預報中心（NCEP）為 T190 解析度，每日 88 個系集成員，提供 16 天的預報。在亞洲地區，日本氣象廳（JMA）的 Medium-Range Ensemble Prediction Model 採用的預報樣本 51 組，利用 T319 的全球模式預報進行系集預報，

垂直方向為 40 層。韓國氣象局（KMA）則利用 T213 的全球模式預報進行系集預報，垂直方向為 40 層，預報樣本 32 組。

在區域系集預報系統方面，目前各作業中心的發展都正在起步當中，除了英國和法國之外，NCEP 利用多模式的預報，發展 SREF（Short Range Ensemble Forecast）的預報技術進行區域系集及極端天氣的預報，樣本的水平解析度為 32 公里。此一系統利用 ETA 和 Regional Spectral Model，並配合 Breeding method (Toth et al., 1997) 製造初始場的擾動，產生 10 組系集成員，並於 2001 年開始作業上的預報。Du et al. (2004) 為了瞭解模式物理參數法產生的擾動對系集預報系統的影響，將模式物理參數法擾動所產生的新成員，加入原本的短期區域系集預報系統中，產生 15 組系集成員，並進行預報實驗和校驗分析。研究結果發現，加入模式物理參數法的擾動之後，能提升 SREF 系統對於預報不確定性的掌握。爾後 NCEP SREF 系統持續進行更新 (Du et al., 2006, 2009)，系統中加入由 WRF-NMM 和 WRF-ARW 所產生之系集成員，因此目前系統中共有 21 組系集成員進行預報。

為了了解多重模式的系集預報結果，Zhou and Du (2010) 針對霧的預報進行系集預報的研究，系集預報成員使用區域模式 WRF-NMM 和 WRF-ARW，並配合 Breeding method 產生 10 組成員。預報結果顯示，使用多重模式的系集預報結果，其機率預報可信度會優於使用單一模式產生的系集預報結果；此外，當系集成員增加時，對於機率預報結果也會有所改善，但是其效果會隨著系集成員增加而降低。

Fujita et al. (2007) 針對不同之系集成員產生

方式進行實驗和分析比較，包含了物理參數法擾動、邊界條件和初始場擾動，以及兩者合併產生系集成員。分析結果發現，僅使用物理參數法擾動，其預報之溫度和露點溫度等熱力場的離散程度，較大於僅使用初始場擾動之預報離散度；風場之離散程度則小於初始場擾動之結果。而兩者合併所產生之系集成員，能產生最大的離散程度，且能獲得最佳的預報結果。

Toth et al. (2003)、Zhou et al. (2005) 及 Zhu et al. (2008) 介紹系集預報各種校驗方法，包含了 Root mean square error and ensemble spread、Histogram distribution、Continuous Ranked Probability Skill Score and Ranked Probability Skill Score 等，而 Zhou et al. (2005) 也利用這些校驗方法，進行低層風切系集預報的校驗測試。

在國內，也有許多學者進行系集預報的研究。Yang et al. (2004) 和 Chien and Jou (2004) 使用 MM5 進行 2000 年至 2002 年梅雨季的降水預報研究，透過不同的積雲參數法和微物理參數法產生六組系集成員進行預報，除了計算六個成員的預報平均之外，也透過線性迴歸法，和前次梅雨季觀測比較，進行最小平方近似計算，求得各成員預報值之權重係數，並以此權重計算整體預報，而以此方法能求得較佳的預報結果。

簡等人 (2005) 針對 2003 年梅雨期間進行系集降水預報，使用不同模式初始場、積雲參數法和微物理參數法，得到 17 組系集成員，進行預報。系集平均降水預報結果顯示，不論成員多寡，相對於單一之決定性預報有較佳的結果，且考慮所有變因，會得到較好的結果，而考慮的變因減少，則系集預報結果變差。而三個變因當中，以變動初始場最有利於系集降水預報，其次是積雲

參數法，最後為微物理參數法。

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法產生擾動，包含模式積雲參數法、微物理參數法、邊界層參數法與土壤模式等，共產生 40 組系集成員，並探討物理參數法擾動所建構之系集預報系統的預報統計特性，以了解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，網格點數為 222×128，模式範圍如圖 1 所示，垂直解析度設定為 45 層，模式頂為 30 hPa，使用之 WPS 和 WRF 版本為 3.1.1 版。實驗中沒有進行資料同化，採用之初始場為經過資料同化之 NCEP 全球模式分析場，此分析場廣為國際氣象研究人員做為中尺度模式初始場，在氣象局的內部研究中也指出，以 NCEP 全球模式為初始場之 WRF 預報具有高度的預報能力，而 NCEP 全球模式解析度為 0.5°。預報期間自 2008 年 6 月 1 日至 6 月 27 日每天 00 UTC 和 12 UTC 進行 72 小時預報。

WRF 模式提供多種物理參數法，其各方法及設定不盡相同，因此使用不同之物理參數法可提供模式系集物理擾動量，進而影響其他模式動力變數。為了產生預報擾動，本研究將改變模式物理參數法，藉由不同土壤模式、微物理、邊界層和積雲參數法，產生 40 組相異模式物理參數法組合的預報實驗。包括三種土壤模式，分別為 NOAH Land-Surface Model (LSM)、Rapid Update Cycle Model LSM (RUC)、Pleim-Xiu LSM (PX)；四

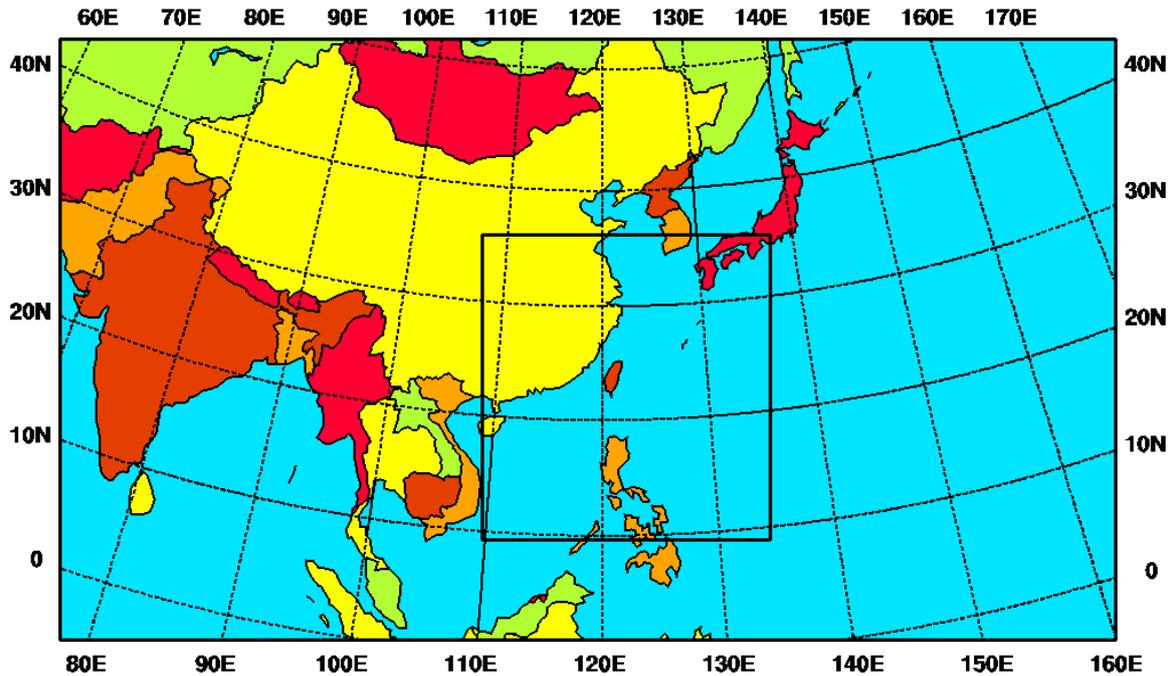


圖 1 模式的預報範圍，圖中內框為校驗範圍。

種微物理參數法，包括 WSM3、WSM5、Thompson et al.、Goddard Cumulus Ensemble Model (GCE)；兩種邊界層參數法，包括 Yonsei University (YSU) PBL 和 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) PBL；以及四種積雲參數法，包括 Betts-Miller-Janjic、Grell-Devenyi ensemble (GD)、Grell-3 (G3) 和 Kain-Fritsch (KF)。以下簡單介紹各參數法之差異，參數法之詳細介紹詳見 WRF 使用手冊 (Skamarock et al., 2008)。

土壤模式主要之差異為土壤變數和土壤層數不同，NOAH LSM 之土壤變數為溫度、水和冰，土壤層數為 4 層；RUC LSM 之土壤變數為溫度、水和冰，土壤層數為 6 層；PX LSM 之土壤變數為溫度和濕度，土壤層數為 2 層。

微物理參數法之差異在於各參數法包含之變數和各種微物理過程之描述，其中以 WSM3 微物

理參數法所涵蓋之變數最少，僅有 3 種，為水汽、雲水或雲冰、雨或雪；WSM5 微物理參數法包含了水汽、雨、雪、雲冰和雲水等 5 種變數；Thompson 微物理參數法將軟雹加入，包含 6 種變數，也將雨和雪等變數之非球形形態考慮進去；GCE 微物理參數法包含冰雹和軟雹等共 7 種變數。

兩種邊界參數法使用不同方法描述邊界層，YSU 邊界層參數法透過熱和溼度等通量並配合 K 剖面，來決定邊界層之不穩定混合過程，而邊界層頂由浮力通量剖面決定，此外於邊界層頂加入逸入層；MYJ 邊界層參數法則透過擾動動能 (TKE) 來決定邊界層頂和混合過程等。

積雲參數法在積雲產生過程和降水計算皆有所不同。Betts-Miller-Janjic 積雲參數法於深對流之建立時，將模式之熱力和濕度調整至一準平衡狀態；KF 積雲參數法之對流程度則透過格點上之

對流可用位能決定 (CAPE); GD 積雲參數法為一系集積雲參數法, 其對流之動力控制則由 CAPE、低層垂直風和濕度輻合等決定; G3 積雲參數法為 GD 積雲參數法之新版本, 主要改變在於, 此參數法所描述之下沉過程能影響至鄰近網格。

表一為物理擾動實驗設計, 包括兩大類。第一類組為固定土壤模式, 使用 Noah Land-Surface Model, 配合其他三種物理參數法的改變, 進行 32 組實驗 (PH01~PH32); 評估土壤模式時, 根據洪等人 (2006) 研究指出, 微物理參數法對系集預報的分歧影響最小, 因此第二類組固定微物理參數法, 根據目前線上作業設定, 使用 Goddard Cumulus Ensemble Model scheme, 配合三種土壤模式和兩組邊界層參數法, 而積雲參數法選擇 Grell-3 和 Kain-Fritsch 等兩種 (PH27、PH28、PH31、PH32, PH33~PH40), 總共包含 40 組實驗。

(二) 校驗方法

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預報離散是否足夠, 據以最大程度涵蓋可能的發生機率, 此時採用 Talagrand Rank Histogram、ensemble spread 與 member equal-likelihood。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 (Hamill, 2001; Toth et al., 2003)

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之合理性, 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。

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, 預報無法涵蓋所有可能發生的機率; 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. Ensemble spread (SPRD) (Toth et al., 2003; Zhu et al., 2008)

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, 可算出系集成員的分佈程度, 公式如下:

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

其中 $f(n)$ 為各成員預報值。

但是 SPRD 值沒有和真值進行比較, 雖能計算出離散度, 但無法得知離散度是否合理, 因此透過預報平均值和真值比較, 透過 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

表 1 模式物理參數化擾動法實驗設計

第一類組				
實驗名稱	土壤模式	微物理參數法	邊界層參數法	積雲參數法
PH01	NOAH	WSM3	YSU	Betts-Miller
PH02	NOAH	WSM3	YSU	GD
PH03	NOAH	WSM3	YSU	G3
PH04	NOAH	WSM3	YSU	New KF
PH05	NOAH	WSM3	MYJ	Betts-Miller
PH06	NOAH	WSM3	MYJ	GD
PH07	NOAH	WSM3	MYJ	G3
PH08	NOAH	WSM3	MYJ	New KF
PH09	NOAH	WSM5	YSU	Betts-Miller
PH10	NOAH	WSM5	YSU	GD
PH 11	NOAH	WSM5	YSU	G3
PH 12	NOAH	WSM5	YSU	New KF
PH 13	NOAH	WSM5	MYJ	Betts-Miller
PH 14	NOAH	WSM5	MYJ	GD
PH 15	NOAH	WSM5	MYJ	G3
PH 16	NOAH	WSM5	MYJ	New KF
PH 17	NOAH	Thompson	YSU	Betts-Miller
PH 18	NOAH	Thompson	YSU	GD
PH 19	NOAH	Thompson	YSU	G3
PH 20	NOAH	Thompson	YSU	New KF
PH 21	NOAH	Thompson	MYJ	Betts-Miller
PH 22	NOAH	Thompson	MYJ	GD
PH 23	NOAH	Thompson	MYJ	G3
PH 24	NOAH	Thompson	MYJ	New KF
PH 25	NOAH	GCE	YSU	Betts-Miller
PH 26	NOAH	GCE	YSU	GD
PH 27	NOAH	GCE	YSU	G3
PH 28	NOAH	GCE	YSU	New KF
PH 29	NOAH	GCE	MYJ	Betts-Miller
PH 30	NOAH	GCE	MYJ	GD
PH 31	NOAH	GCE	MYJ	G3
PH 32	NOAH	GCE	MYJ	New KF

表 1 模式物理參數化擾動法實驗設計 (續)

第二類組				
實驗名稱	土壤模式	微物理參數法	邊界層參數法	積雲參數法
PH 33	PX	GCE	YSU	New KF
PH 34	PX	GCE	YSU	G3
PH 35	PX	GCE	MYJ	New KF
PH 36	PX	GCE	MYJ	G3
PH 37	RUC	GCE	YSU	New KF
PH 38	RUC	GCE	YSU	G3
PH 39	RUC	GCE	MYJ	New KF
PH 40	RUC	GCE	MYJ	G3

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。

3. Member equal-likelihood (Zhou et al., 2005)

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 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 5）。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。

4. Continuous Ranked Probability Score

(CRPS) 和 Continuous Ranked Probability Skill Score (CRPSS) (Hersbach, 2000; Toth et al., 2003)

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閥值，計算預報值大於門閥值的機率和真值大於此

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

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

$$P(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(y) dy \tag{3}$$

$$O(x) = \begin{cases} 0 & , x < x_a \\ 1 & , x > x_a \end{cases} \tag{4}$$

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

$$CRPSS = \frac{CRPS_r - CRPS}{CRPS_r} \quad (5)$$

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 (Hamill, 1997; Toth et al., 2003; Bröcker, 2007)

Reliability diagram 能指出預報系統的可信度。訂定某一個門檻的條件下，在某個樣本中，統計大於門檻值之系集成員個數，並計算其佔總成員數之比例，此為預報機率。在擁有相同預報機率的樣本中，統計觀測值大於門檻值的個數，而此個數佔樣本數之比例，即為觀測機率。Reliability 是將預報機率和其相對應的觀測機率繪於圖上，橫軸為預報機率，縱軸為觀測機率，若觀測機率等於預報機率，表示此一預報系統具有可信度，則圖形應為對角線。

(三) 使用資料

本次研究所使用的校驗真值為 ECMWF 全球模式分析場資料（解析度為 0.25 度），透過 WRF 模式初始化，將資料內插至網格點，以此資料進行校驗分析。此外，使用 2007 至 2009 年 ECMWF TIGGE (the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble。其中 THORPEX 為 The Observing System Research and Predictability Experiment) 資料（解析度為 0.5 度）的平均值，利用雙立方內插法 (bicubic) 將資料內插至模式 45 km 網格點中，並以此當成氣候值進行 Reference Continuous Ranked Probability Score 之計算。

三、校驗分析與討論

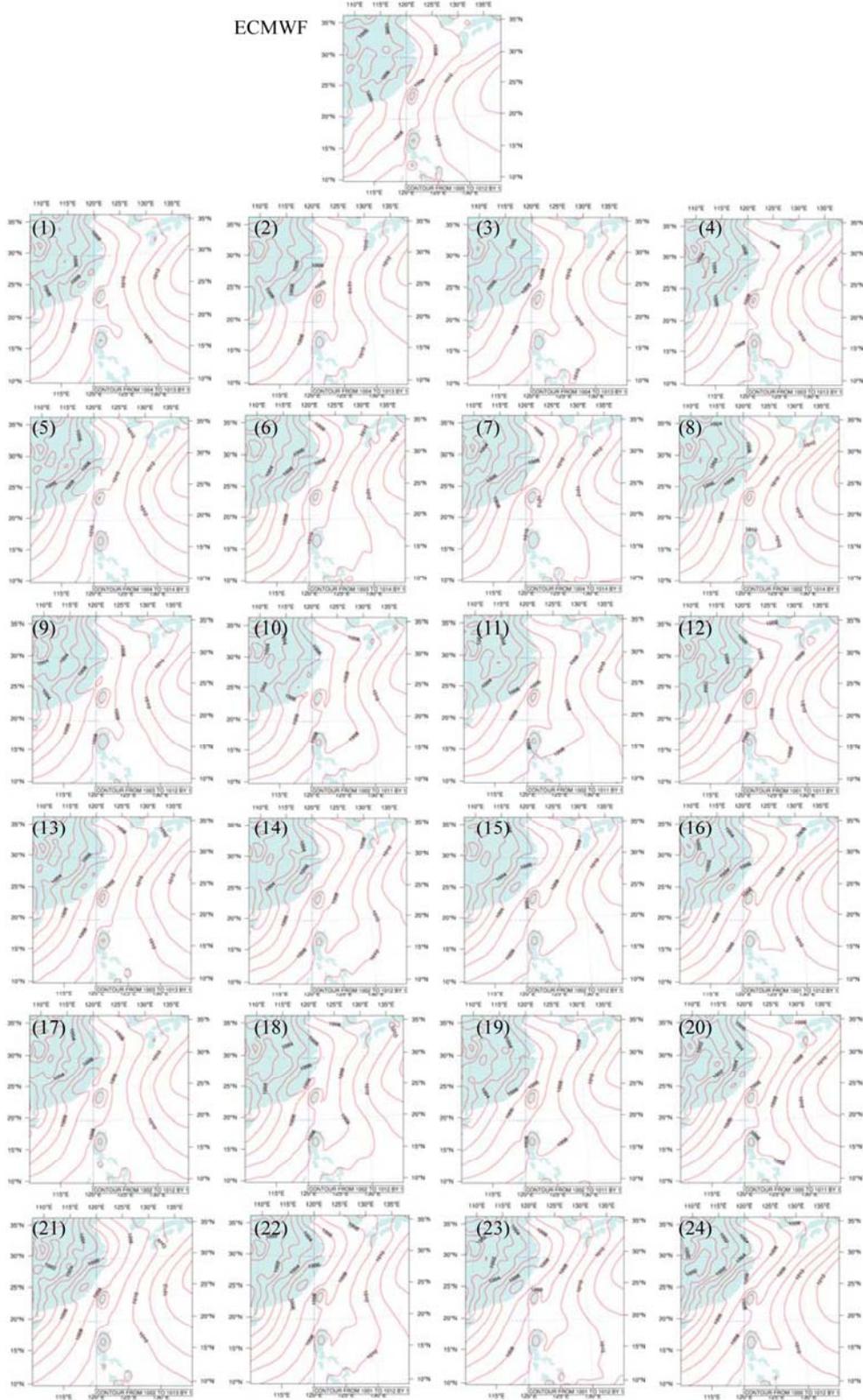
圖 2 為 ECMWF 分析場和本實驗 40 組系集成員在預報第 72 小時預報之月平均海平面氣壓

場。從圖中可以得知，實驗預報結果存在著差異，如實驗 PH01、PH02 和 PH04 之預報有所不同，但也有許多成員之預報結果是十分類似的，如實驗 PH02 和 PH03 之預報，因此若單看預報場，無法判斷離散程度是否足夠，因此需透過校驗系統進行分析。

本研究針對 40 組系集成員實驗透過第二章之系集校驗方法進行分析。本研究著重在評估系集預報系統於台灣附近之綜觀天氣系統的預報能力，同時也希望盡量減少模式邊界條件的影響，因此只針對本預報實驗的特定範圍（如圖 1 之內框）進行校驗分析。本研究將針對圖 1 內框之範圍進行兩米溫度場、500 hPa 高度場、海平面氣壓場校驗分析，因此主要是反應系集預報實驗在綜觀尺度之預報分歧。

圖 3 為兩米溫度場、500 hPa 高度場和海平面氣壓場之 Rank Histogram 分析圖。圖中顯示，各變數在不同預報時間的分析大致上呈現 U 型分布，表示此系集預報實驗的離散程度不足。更進一步分析，500 hPa 高度場的 Rank Histogram 分析圖顯示，在第一區間有最大的頻率值，且在靠左的區間也有較高的頻率值，顯示此預報實驗中，真值落在較小預報值區間的機率較大，甚至比所有預報值小，表示 500 hPa 高度預報值偏大。根據海平面氣壓場的分析圖顯示，在靠右的區間有較高的頻率值，且在最後一個區間有最大的頻率值，表示真值落在較大預報值區間的機率較高，甚至比所有預報值大，表示海平面氣壓場預報值偏小。因此，透過此分析可知，500 hPa 高度預報有偏大的情形，而海平面氣壓有預報偏小。此外，針對各變數場之離散程度隨預報時間的變化進行討論，圖 3 中各變數場的圖形分布，隨預報時間變化都不大，由於 Rank Histogram 僅能依

ECMWF



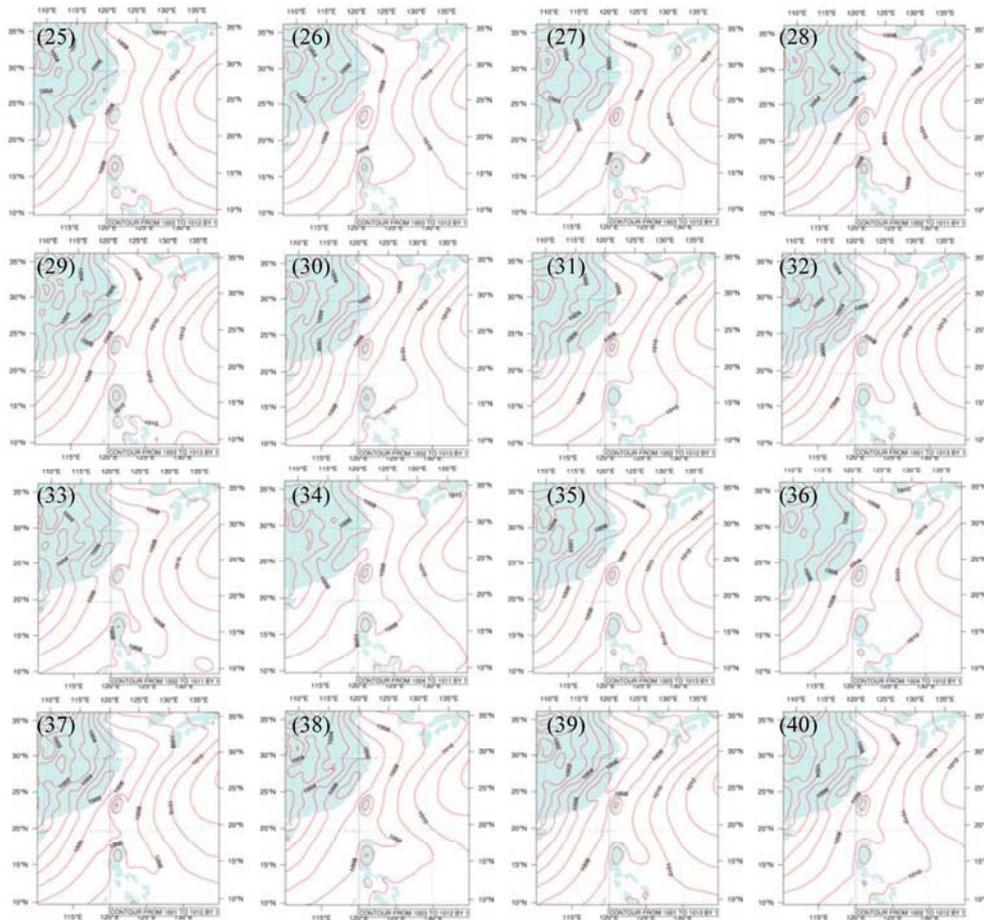


圖2 40組系集成員，預報第72小時之月平均海平面氣壓場。第一列為ECMWF月平均海平面氣壓場，第二列開始為系集成員預報值，圖中左上角為系集成員的編號，1表示為實驗PH01之72小時預報的月平均海平面氣壓場，依此類推。

據統計結果分佈的形狀（如U型、A型或平坦分佈）定性上判斷系集預報的離散程度，無法提供定量的資訊以供判斷。

為定量評估系集成員的離散程度，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，圖中顯示各變數隨著預報時間增加，SPRD值皆小於RMSE值，表示整個預報期間都有離散不足的狀況，此一結果和Rank

Histogram的分析結果一致。圖4(A)之兩米溫度場分析中顯示，RMSE和SPRD在不同預報時間的差值大致上差不多，表示在兩米溫度場，雖然為離散程度不足，但離散程度不足之情況並無加劇或減小。圖4(B)之500 hPa高度場之分析顯示，預報24小時之後，SPRD值隨預報時間增加而增加，意味系集成員和系集平均之分散程度隨預報時間增加而增加，這對於系集預報的離散程度是有幫助的。但隨著預報時間增加，RMSE也增加，這意味著系集平均和真值的距離隨預報時間增加

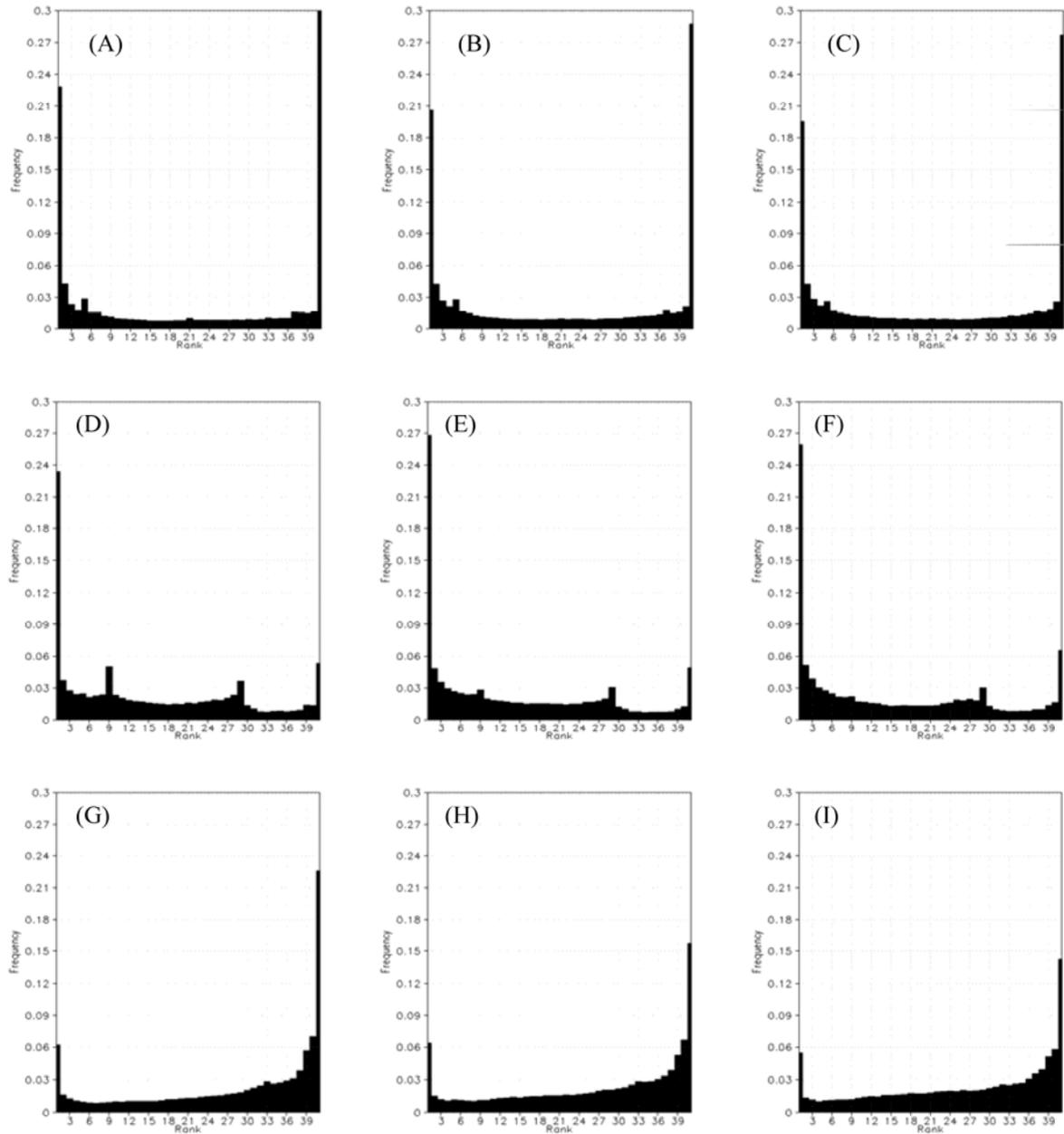


圖3 Rank Histogram 分析圖，橫軸為區間 (Rank) 編號，縱軸為頻率值。(A)至(C)分別為兩米溫度場在預報第 24、48、72 小時的 Rank Histogram 分析圖。(D)至(F)分別為 500 hPa 高度場在預報第 24、48、72 小時的 Rank Histogram 分析圖。(G)至(I) 分別為海平面氣壓場在預報第 24、48、72 小時的 Rank Histogram 分析圖。

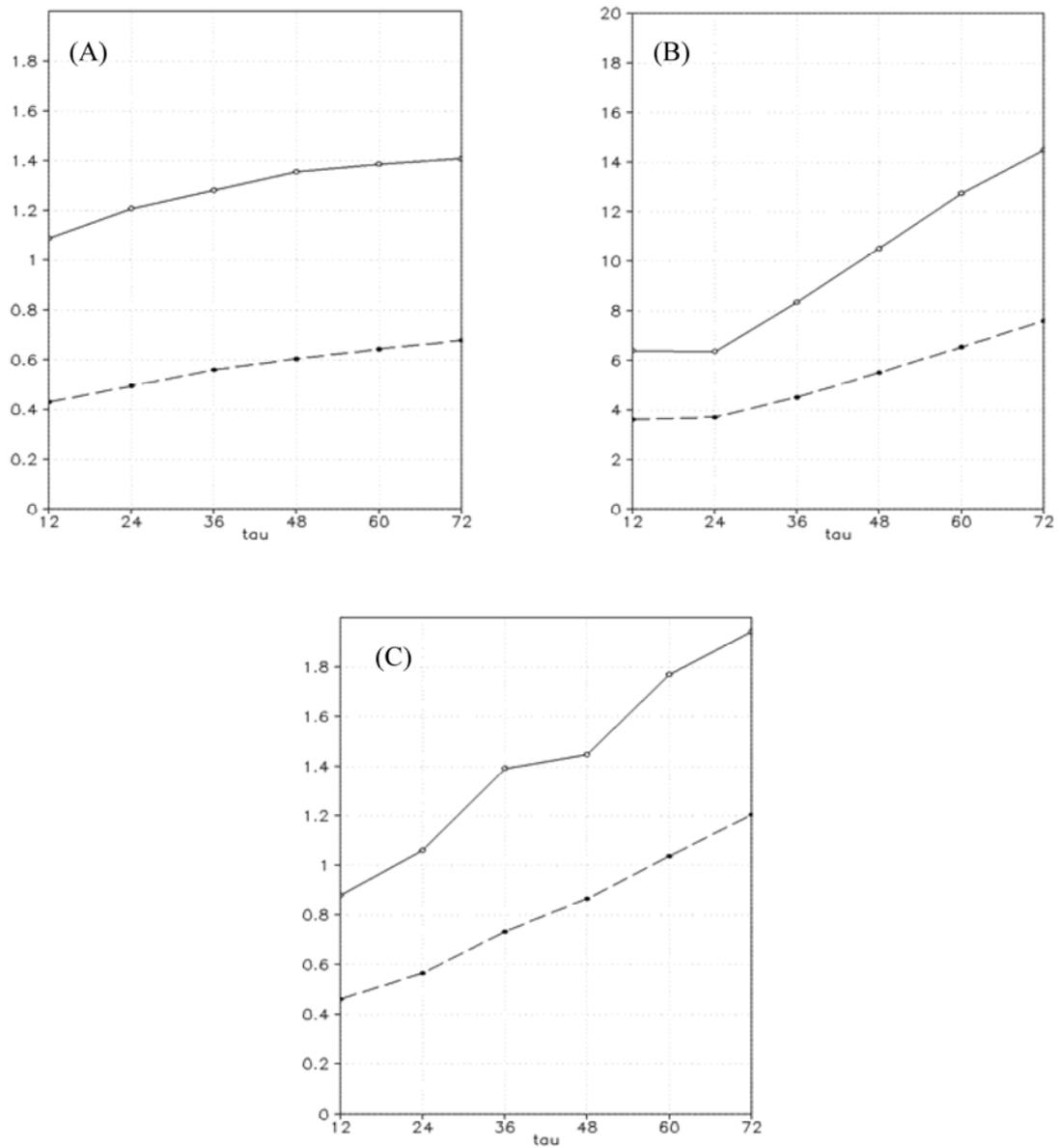


圖4 (A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場的 RMSE 和 SPRD 的比較圖，橫軸為預報時間。實線為 RMSE 值，虛線為 SPRD 值。

而增加，這是不利於系集預報系統的離散程度。由圖 4(B)中顯示，雖然 SPRD 值隨著預報時間增加，而 RMSE 增加的更多，表示系集預報所涵蓋之不確定性（離散度）雖增加，但此增加幅度仍趕不及模式預報誤差，造成離散程度不足之情況加劇。此一離散程度不足主要是系集平均和真值的差異所導致，換言之，系集系統是有某種偏差情形，此偏差可能是由於模式的物理參數化過程、初始條件和邊界條件不確定性所造成，而此一結果和 500 hPa 高度場使用 Rank Histogram 的分析結果一致〔圖 3(D)至(F)〕。圖 4(C)之海平面氣壓場顯示，隨著預報時間增加，RMSE 和 SPRD 之差值有些許增加，但變化情形不如 500 hPa 高度場之校驗結果明顯。RMSE 的增長趨勢稍大於 SPRD，可能也受到偏差所造成。

圖 5(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 member equal-likelihood 分析圖，以針對各成員對真值的預報命中率進行探討。好的系集預報，期望各成員的預報命中率一致，但圖中顯示各成員對於真值的預報命中率不一致，有些成員較佳，有些較差，表示此系統中之系集成員組合還有待改善。

圖 6 為針對兩米溫度場和 500 hPa 高度場進行預報可信度的校驗分析，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 5820 公尺。圖 6(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 6 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，顯示此實驗的預報

可信度不足。根據預報機率的算法，預報機率較低者，表示大多數的系集成員預報值較門檻值低，因此大於門檻值的個數較少，預報機率較低，以兩米溫度為例，預報機率較低者，以門檻值為標準，可視為預報較低溫者；同理，預報機率較高者視為預報較高溫。圖 6(A)顯示，兩米溫度場在預報機率較低者，其觀測機率大於預報機率，意味著，以門檻值為標準，預報較低溫者有偏低的偏差情形；而預報機率較高者，觀測機率小於預報機率，可視為預報較高溫者，溫度預報有偏高的趨勢。由於預報較低溫者有偏低的趨勢，預報較高溫者有偏高的趨勢，此分析結果和圖 3(C)中 U 型分布的結果一致。圖 6(B)顯示，500 hPa 高度場的觀測機率皆小於預報機率，表示 500 hPa 高度場預報值偏大，和 Rank Histogram 分析結果有相同結論。

圖 7(A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場的和氣候值比較之 CRPSS 圖，用以校驗系集系統的預報能力。圖中顯示，在三天預報中 CRPSS 值皆大於 0，表示此預報實驗的機率預報誤差小於氣候值的誤差，此一預報實驗相對於氣候場而言在預報期間具有預報能力。而 NCEP 全球系集預報系統之 CRPSS 分析，其氣候值為 NCEP 全球預報系統分析場資料 40 年之平均，雖然使用之資料和校驗分析區域不相同，但 NCEP 之分析結果仍可視為參考值。NCEP 全球系集預報系統預報之 500 hPa 高度場於 72 小時的 CRPSS 值約為 0.7，兩米溫度場約為 0.5，海平面氣壓場沒有進行校驗；本研究之 500 hPa 高度場於 72 小時的 CRPSS 值約為 0.5，兩米溫度場約為 0.25。比較顯示，本研究之系集預報系統雖然具有預報能力，但仍有改善之空間。此外，圖 7(D)至(F)分別為兩米溫度場、500 hPa 重

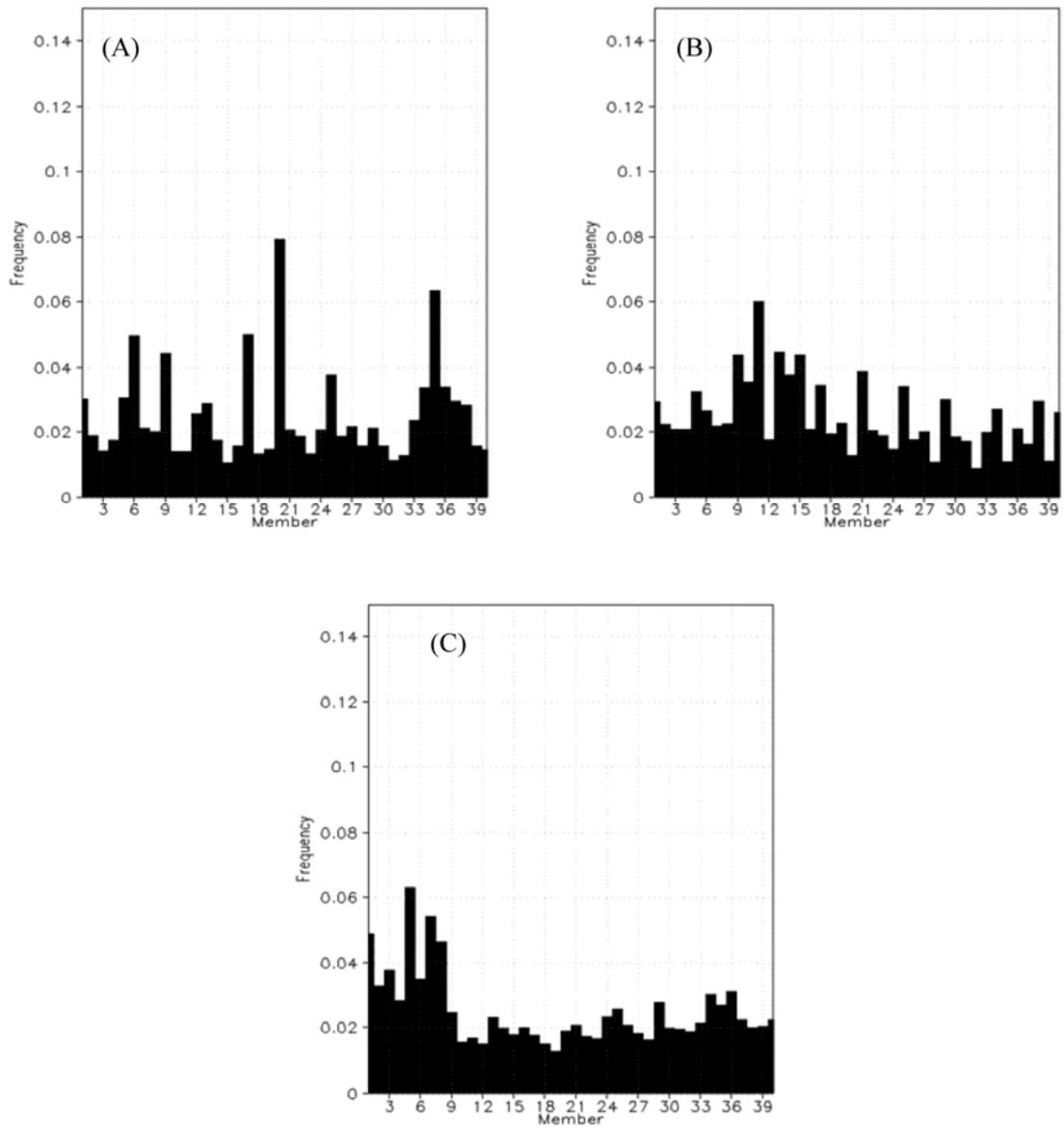


圖 5 (A)到(C)分別為兩米溫度場、500 hPa重力位高度場、海平面氣壓場，預報第72小時的member equal-likelihood圖，橫軸為系集成員編號，縱軸為頻率值。

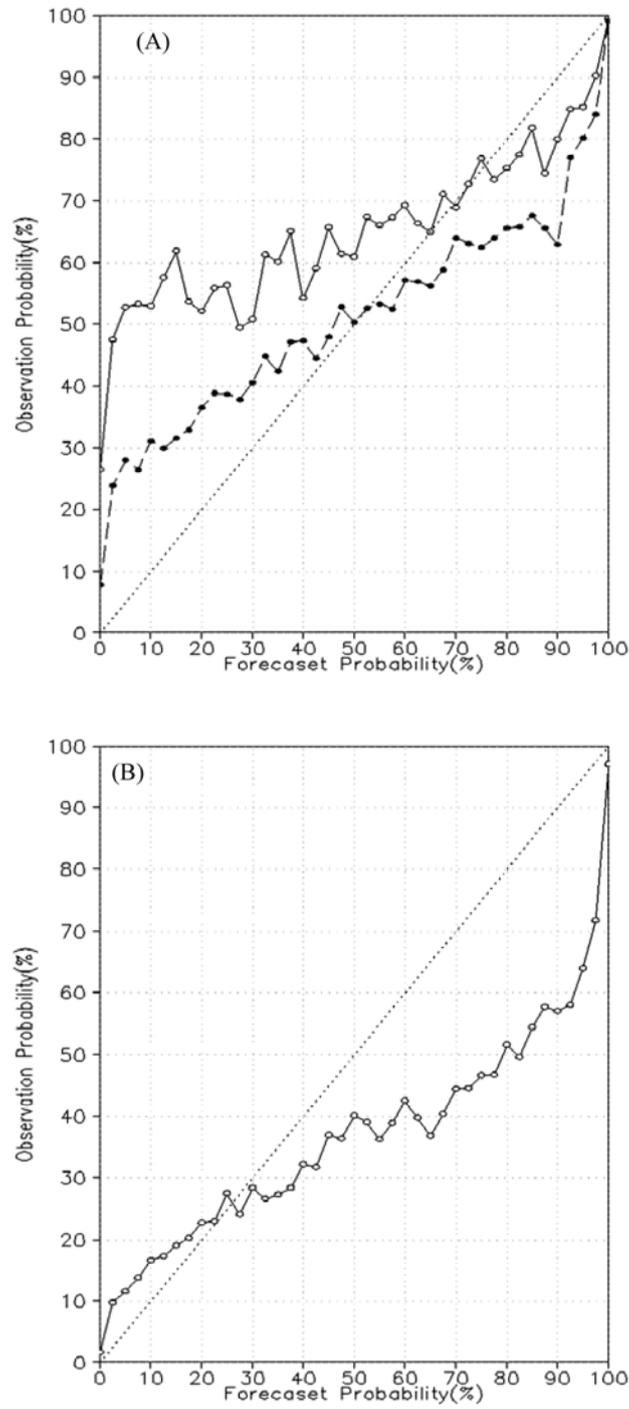


圖 6 為 Reliability Diagram，橫軸為預報機率，縱軸為觀測機率。(A)為兩米溫度場之 Reliability diagram，實線為門檻值 293K 時之分析曲線，虛線為門檻值 298K 時之分析曲線。(B)為 500 hPa 重力位高度場之 Reliability diagram 門檻值為 5820 重力位公尺。兩圖中的點虛線為最佳時的分析曲線。

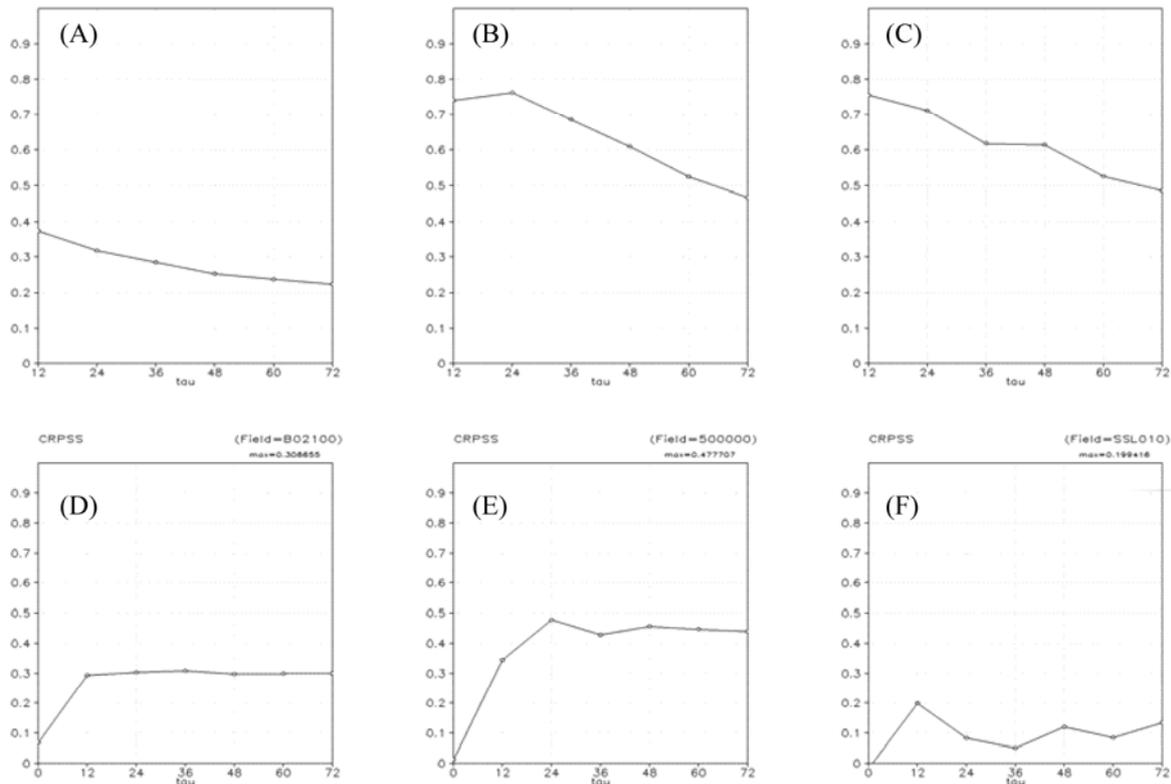


圖7 (A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場和氣候值相比的 CRPSS 值隨預報時間變化圖；(D)至(F)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場和單一模式預報（氣象局 WRF 模式線上作業預報）相比的 CRPSS 值隨預報時間變化圖。橫軸為預報時間。

力位高度場、海平面氣壓場的和氣象局 WRF 模式線上作業預報比較之 CRPSS 圖。結果顯示，CRPSS 值皆大於 0，表示此系集預報優於單一模式之預報。

圖 8(A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場之 RMSE 圖，其中灰色實線為各系集成員之 RMSE，黑色實線為系集預報平均之 RMSE。由圖中可知，隨著預報時間的增加，各成員的差異開始變大，顯示此系集預報系統之成員離散存在。各成員的 RMSE 也大致隨著預報成員增加而增加。此外，由系集預報平均之 RMSE 和各系集成員預報之 RMSE 比較顯示，系集預報平均之預報能力優於大部分之系集

成員預報，因此推測系集平均仍優於使用特定物理參數法且無擾動初始場之單一預報結果，而此一分析結果和使用單一模式進行 CRPSS 校驗之結果一致。

為了了解系集成員間是否具有系統性差異，因此試圖將成員進行分組比較，如圖 8(D)，將成員於 500 hPa 高度場之 RMSE，依照成員所使用之積雲參數法進行分組，結果顯示，使用不同參數化會造成 RMSE 的差異，其中若成員使用 Kain-Fritsch 積雲參數法，則 RMSE 較大。此外，使用 Grell-Devenyi ensemble 和 Grell-3 積雲參數法之成員，其 RMSE 相近。而成員於兩米溫度場之 RMSE，受到土壤模式之影響較大，如圖 8(E)

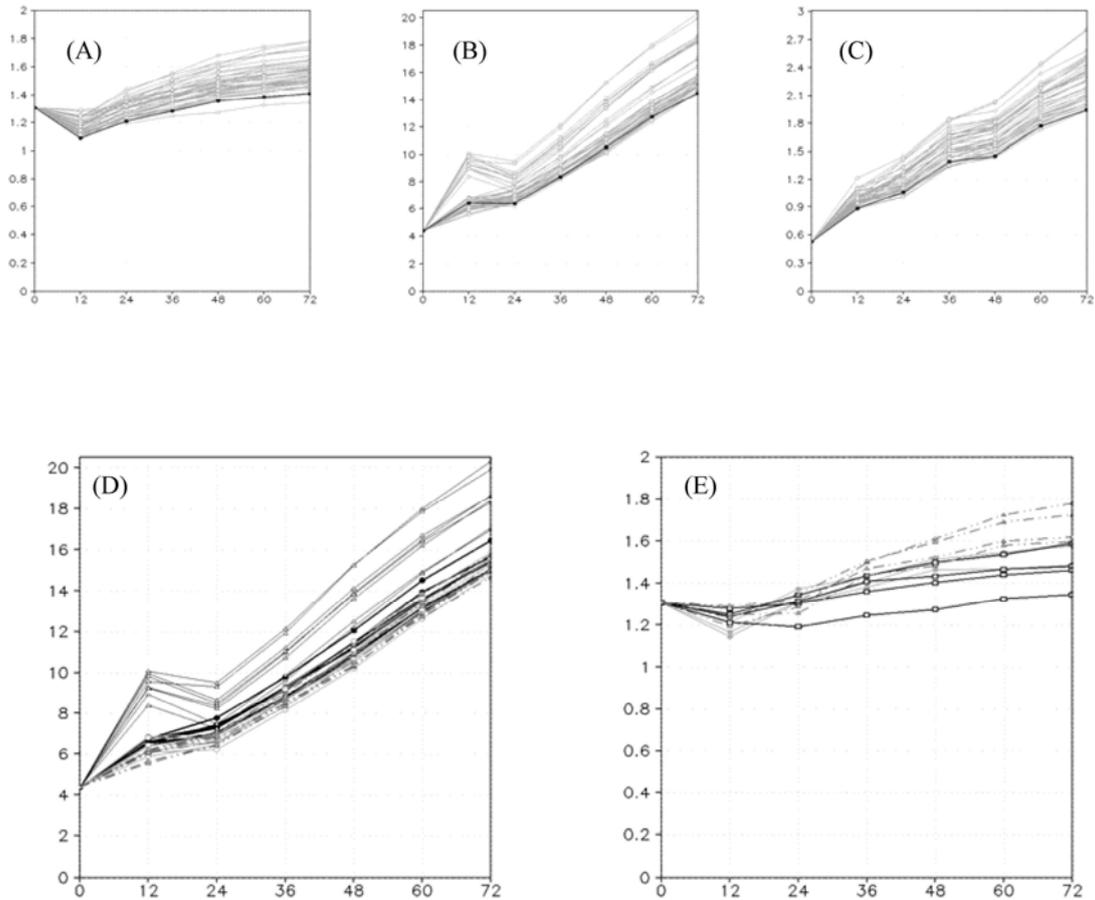


圖 8 (A)至(C)分別為兩米溫度場、500 hPa 重力位高度場、海平面氣壓場之 RMSE，灰色實線為各成員之 RMSE，黑色實線為系集平均之 RMSE。(D)500 hPa 高度場中，按照各成員所使用之積雲參數法，對各成員之 RMSE 分組，黑色細實線為使用 Kain-Fritsch 積雲參數法、黑色粗實線為使用 Betts-Miller-Janjic 積雲參數法、淺灰色實線為使用 Grell-Devenyi ensemble 積雲參數法、深灰色點虛線為使用 Grell-3 積雲參數法。(E)兩米溫度場中，按照成員使用之土壤模式分組，淺灰色實線為使用 Noah LSM、黑色實線為使用 Pleim-Xiu LSM、深灰色點虛線為使用 Rapid Update Cycle Model LSM。

所示。此一分析圖中，選擇第二類組成員，並加入第一類組中之 PH27、PH28、PH31、PH32，以比較三種土壤模式(Noah LSM、Rapid Update Cycle Model LSM、Pleim-Xiu LSM)之影響。在其他物理參數化皆相同的情況，若成員使用 Rapid Update Cycle Model LSM，則 RMSE 會較大。在地面氣壓場，物理參數化並未造成 RMSE 有系統性的影響。

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法組合產生擾動，進行 40 組的系集成員預報實驗，預報結果透過不同的校驗技術，分析此系集成員產生方法是否能產生合適之系集成員。進行系集預報實驗之評估時，分兩個層面進行評估，第一部分是評估系集離散是否足夠，據以最大程度涵蓋可能的發生機率，採用 Rank

Histogram、member equal-likelihood、ensemble spread 等校驗技術；第二部分是評估系集預報的預報能力和可信度，使用 Continuous Ranked Probability Skill Score 進行預報能力校驗，預報可信度則採用 Reliability diagram 進行分析。

本研究針對兩米溫度場、500 hPa 高度場、海平面氣壓場校驗分析，因此主要是反應系集預報實驗在綜觀尺度之預報分歧。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，且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。預報能力校驗結果顯示，此一系集預報實驗和氣候值相比之下，具有預報能力；和單一模式預報進行比較，結果顯視此一系集預報優於單一模式預報。而透過系集平均的方式，得到一組系集平均預報，計算其 RMSE，並與各個系集成員預報之 RMSE 進行比較，分析結果顯示，系集預報平均之預報能力優於大部分之系集成員預報，也表示使用系集平均之方法，能獲得優於單一預報之預報結果，此一比較結果和預報能力之校驗結果一致。

此外，更進一步發現，系集模式預報發生 500 hPa 高度偏高和海平面氣壓預報值偏小之頻率較高，而兩米溫度場，根據 293K 和 298K 的門檻值設定下，預報值低於門檻值者有偏低的偏差，預報值高於門檻值者有溫度偏高的趨勢。本文主要宗旨為探討物理參數法擾動所建構之系集預報系統的預報統計特性。有關 500 hPa 高度預報值偏大和海平面氣壓預報值偏小的頻率較高之結論，主要是探討偏差事件發生的頻率，因此這個結論不足以解釋個別系集成員預報的系統性偏差。然而此一統計分析結果的確也反應出，系集系統中可能某些成員有 500 hPa 高度和海平面氣壓預報

偏小的系統性偏差，此一系統性偏差可能由模式的物理參數化過程、初始條件和邊界條件不確定性所導致。未來可針對模式預報資料進行偏差值校正，再針對校正過的結果進行校驗分析。

本研究結果指出，現有的實驗設計對綜觀天氣預報仍無法產生足夠的離散分歧。然而，根據實驗結果得知，物理參數化對於預報結果具有系統性之影響，因此並不一定需要 40 組成員，即可達到相同程度之離散，此外，過多的相似成員，也可能影響到離散程度的計算結果，造成離散程度校驗結果偏低，因此未來將由其中找出最合適之物理參數法擾動設定，以產生有效的擾動。此外，僅使用物理參數法擾動無法提供足夠之系集擾動，可能是由於初始場和邊界條件皆未有擾動產生，因此未來將針對不同的系集成員產生方式進行實驗，包含使用不同初始場和邊界條件以及利用 EAKF (Ensemble Adjustment Kalman Filter system；系集調整卡爾曼濾波) 技術產生初始場擾動。期望配合模式物理參數法擾動、初始場和邊界條件擾動，能找到最佳之系集成員產生方式，建構更好之系集預報系統。

致謝

本研究在中央氣象局氣象資訊中心提供之計算支援以及國科會計畫 NSC 99-2625-M-052 -006 -MY3 支援下完成。

參考文獻

簡芳菁、柳懿秦、周仲島、林沛練、洪景山和蕭玲鳳，2005：2003 年梅雨季 MM5 系集降水預報。大氣科學，33，255 - 275。

- 洪景山、林得恩、簡芳菁、劉素屏、周仲島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎、雷銘中，2006：WRF 模式之敏感度測試，第一部分：探空測站上的校驗。大氣科學，34，241 - 260。
- 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.
- Chien, F. C., and B. J.-D. Jou, 2004 : MM5 Ensemble Precipitation Forecasts in the Taiwan Area for Three Early Summer Convective (Mei-yu) Seasons, *Wea. Forecasting*, **19**, 735-750.
- Du, J., et al, 2004 : The NOAA/NWS/NCEP short range ensemble forecast(SREF) system: evaluation of an initial condition vs multi-model physics ensemble approach. *16th Conference on Numerical Weather Prediction*. Seattle, WA, Amer. Meteor Soc.
- , J. McQueen, G. DiMego, Z. Toth, D. Jovic, B. Zhou, and H. Chuang, 2006: New Dimension of NCEP Short-Range Ensemble Forecasting (SREF) System: Inclusion of WRF Members, Preprint, WMO Expert Team Meeting on Ensemble Prediction System, Exeter, UK, Feb. 6-10, 2006, 5 pages.
- , G. DiMego, Z. Toth, D. Jovic, B. Zhou, J. Zhu, H. Chuang, J. Wang, H. Juang, E. Rogers, and Y. Lin, 2009: NCEP short-range ensemble forecast (SREF) system upgrade in 2009. *19th Conf. on Numerical Weather Prediction and 23rd Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Omaha, Nebraska, Amer. Meteor. Soc., June 1-5, 2009, paper 4A.4.
- Fujita, T., D. Stenstrud, and D. C. Dowell, 2007: Surface Data Assimilation using an ensemble filter approach with initial condition and model physics uncertainties. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1846-1868.
- Hamill, T. M., 2001: Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 550-560.
- , 1997: Reliability Diagrams for Multicategory Probabilistic Forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 736-741.
- Hersbach, H., 2000: Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems. *Wea. Forecasting*, **15**, 559-570.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297-3319.
- , O. Talagrand, G. Candille and Y. Zhu, 2003: Chapter 7: Probability and ensemble forecast, *Environmental Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, Edited by I. T. Jolliffe and D. B. Stephenson, John Willey & Sons.

- Skamarock, W. C., Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Stensrud, David J., Jain-Wen Bao, Thomas T. Warner, 2000: Using Initial Condition and Model Physics Perturbations in Short-Range Ensemble Simulations of Mesoscale Convective System. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2077-2107.
- Wang, W., and N. L. Seaman, 1997: A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 252-287.
- Yang, M.-J.; B. J.-D. Jou, S. C. Wang, J. S. Hong, P. L. Lin, J. H. Teng, H. C. Lin, Hui-Chuan, 2004: Ensemble prediction of rainfall during the 2000–2002 Mei-Yu seasons: Evaluation over the Taiwan area. *J. Geophys. Res.*, **109**, D18203. doi:10.1029/2003JD004368.
- 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
- and J. Du, 2010: Fog prediction from a multi-model mesoscale ensemble prediction system. *Wea. Forecasting*, **25**, 303-322.
- 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.

The Study of Regional Ensemble Forecast: Physical Perturbations

Jhih-Sin Li and Jing-Shan Hong

Central Weather Bureau

(manuscript received 25 August 2010 ; in final form 25 March 2011)

ABSTRACT

In order to represent the forecast uncertainties, the spread-enough ensemble products from a robust ensemble forecast system (EFS) became more and more important in the numerical weather prediction centers. The goal of this paper is to evaluate the forecast spread based on the physical perturbations from WRF model. One-month regional forecast experiment from 40 members was conducted in this paper, including the cumulus, microphysics, planetary boundary layer parameterization schemes, and land-surface models.

Verification techniques were applied to evaluate the ensemble spread qualitatively and quantitatively. The results show that there exist systematic bias in the ensemble system and therefore result in the not enough forecast spread from the physical perturbation based on WRF model. To further apply a bias correction and perturbed the ensembles from the other technique is under assessment to implement an effective EFS in Central Weather Bureau.

Key Words: ensemble forecast system, spread

