

CWB/GFS Tco383L72大氣模式系集預報測試

Testing for Tco383L72 Global Ensemble Prediction

郭珮萱¹ 陳登舜² 劉邦彥³ 陳建河²

¹中央大學大氣科學系 ²中央氣象局氣象資訊中心 ³中央氣象局氣象科技研究中心

摘要

本研究主要使用CWB/GFS Tco383L72大氣模式進行35天之系集預報測試，Tco383L72大氣模式使用八面體網格、水平解析度25km、垂直72層、模式層頂0.1 hPa。系集預報之20組系集成員使用系集卡爾曼濾波法(Ensemble Kalman Filter, EnKF)產生，系集預報過程中，也加入了隨機擾動參數化趨勢(Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies, SPPT)及隨機動能反向散射(stochastic kinetic energy backscatter, SKEB)機制來增加系集預報的不確定性。在三個案例測試結果顯示，Tco383L72大氣模式之系集預報在熱帶地區有明顯改善，包括500 hPa重力位高度場、850hPa溫度場、850 hPa風場U及200 hPa風場U之系集均方根誤差及系集分歧度皆有改善。而在SPPT隨機擾動之標準差值敏感度測試中，模式系統對SPPT第一項參數(500 km/6 hr)之隨機擾動標準差值較不敏感，對第二項參數(1000 km/3 day)隨機擾動之標準差值較敏感，增加隨機擾動標準差可增加系集分歧度。

關鍵字：系集預報

一、前言

109年起CWB GFS模式作業系統改以octahedral Gaussian grid網格架構(Tco網格)進行16天之短期天氣預報作業，Tco639L72(水平解析度15Km，垂直72層)之5天預報結果明顯較原T511解析度之模式結果為好。目前全球模式展期天氣(45天)系集預報系統(Global Ensemble Prediction System, GEPS)使用的全球波譜大氣模式，仍然是過去舊作業模式的尤拉預報方程組，解析度為T319L60相當於水平解析度為40公里、垂直有60層，模式的層頂在0.1mb，模式物理參數化也是舊的參數化模組。因此，配合短期作業模式更新，展期天氣之系集預報系統亦將進行更新，本研究以短期天氣作業模式CWBGFS-TCO639L72為基礎，建立新的展期天氣(45天)系集預報系統，新的預報系統模式之解析度預計為Tco383L72(水平解析度25 Km，垂直72層)，並進行20組成員之系集預報(CWB/GEPS-Tco383，其後稱為GEPS-Tco383)，並對此系統進行系集預報測試。

此外，近年NCEP EMC (Environmental Modeling Center, National Centers of Environmental Prediction, National Weather Service (NWS), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA))團隊對SPPT的擾動方式也有更新(Zhu et al., 2018)，此一更新對模式

應也有不同影響。因此，在GEPS-Tco383系統之建置過程中，亦將測試使用EnKF系集成員及新的SPPT擾動方式，並了解其對系集展期預報結果之影響。

二、研究方法

規劃的新系集系統主要執行流程如圖1所示，初始場資料使用系集卡爾曼濾波器(Ensemble Kalman Filter, EnKF)法進行每6小時的更新週期進行預報計算，更新週期之預報計算包括36個成員，解析度為Tco383L72。由EnKF所產生36個成員中選取第1-20個成員作為GEPS之初始場。其後，在預報過程中使用Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT)隨機擾動方式(Palmer et al, 2009)，對模式物理機制所計算的趨勢項進行擾動，利用隨機擾動方式以增加模式的不確性，最後進行系集成員的平均值計算及分歧量計算，以了解系集系統的預報分佈。

EnKF法之資料同化系統中(36組成員) (Evensen, 1994; Houtekamer and Mitchell, 1998; Whitaker and Hamill, 2002)，假設當Gridpoint Statistical Interpolation (GSI)系統準備好同化新的觀測資料時，利用某段時間的一組系集預報來估計當時狀態，將EnKF的分析更新分為平均場更新和擾動場更新。每筆觀測資料逐次依序同化，如此一來，同一筆觀測後更新的平均場和擾動場則用來當作同化第二筆資料的背景場。因EnKF之

作業主要在Tco383之解析度上進行，因此在GEPS-TCo383系集預報模式作業過程中，我們選取其中20組成員進行系集預報，如此可以減少系集預報的步驟、加快預報的運行。

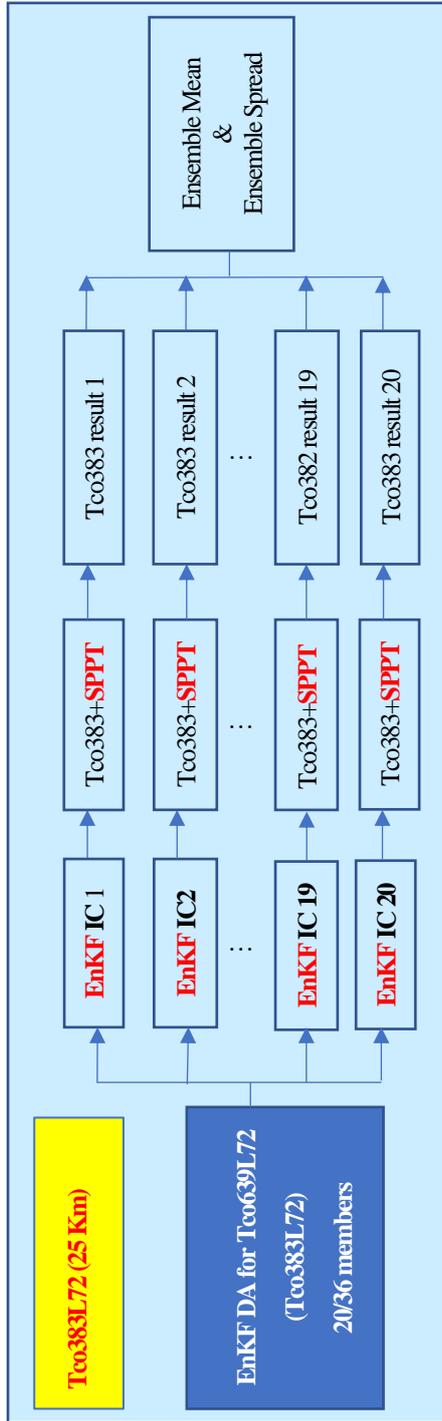


圖 1、GEPS-Tco383 系集預報流程示意圖。

SPPT使用的主要目的是用來隨機擾動物理過程所造成的不確定性，期望藉此可提高模式預報的分佈，SPPT法主要是由Palmer等人(2009)所發展，主要是對物理模式積分時的趨勢項(tendency terms)進行擾動，使得系集成員的分佈增加，依據Palmer等人的敘述，對於網格上的亂數擾動量可表示為

$$r = \sum_{mn} \hat{r}_{mn} Y_{mn} \quad (式 2.1)$$

r 是在網格上的亂數擾動，而 \hat{r} 是存在於spectral座標上的亂數，是 Y_{mn} 是球面調和係數 (spherical harmonic), m 是zonal wavenumber (緯向波數), n 是total wavenumber (總波數), \hat{r} 隨時間的變化為，

$$\hat{r}_{mn}(t + \Delta t) = \phi \hat{r}_{mn}(t) + \sigma_n \eta_{mn}(t) \quad (式 2.2)$$

η_{mn} 是具有單位變異數及平均值為0的獨立高斯隨機數， \hat{r}_{mn} 受 ϕ 控制，

$$\phi = \exp(-\Delta t/\tau) \quad (式 2.3)$$

Δt 為設定模式的每時步(timestep)的時間間隔， τ 為影響的時間長度。 \hat{r}_{mn} 的變異數與設定的時間尺度有關，為

$$var(Re\hat{r}_{mn}) = \frac{\sigma_n^2}{1-\phi^2}, \text{ 標準偏差 } \sigma_n \text{ 為}$$

$$\sigma_n = F_0 \exp(-\kappa T n(n+1)/2) \quad (式 2.4)$$

$$F_0 = \left(\frac{var(r)(1-\phi^2)}{2 \sum_{n=1}^N (2n+1) \exp(-\kappa T n(n+1))} \right)^{1/2} \quad (式 2.5)$$

$var(r)$ 為擾動的變異數， κT 為空間尺度衰減係數， $\kappa T = \frac{L^2}{2R_e^2}$ ，其中 R_e 是地球半徑， L 是選取的影響水平長度，可為 10 km-1500km。

本研究中的 SPPT 法仿照 EMC 朱等人(Zhou et al., 2018)之方式，參考 SPPT 的原理，針對模式物理過程所計算的變數(u, v, t)之變化趨勢項，利用時間及空間分佈的設定，計算出隨機擾動係數，並此擾動係數加入原本的趨勢項內，擾動前後的趨勢計算可表示如式 2.6 及式 2.7。

$$\hat{P} = (1 + r')P \quad (式 2.6)$$

\hat{P} 為擾動後的趨勢項， P 為物理機制所計算的趨勢項， r' 為網格上的亂數擾動項，由五個時間、空間設定所計算出網格上的隨機擾動係數 r (式 2.1)，此擾動係數遵循 Gaussian 分佈，但由於擾動後的趨勢項若改變了原本物理機制所計算的趨勢方向，對模式會產生很大的不穩定度，因此，在計算出擾動係數後，經過指數計算，將擾動係數 $(1+r')$ 控制在 $[0, 2]$ 之間，以維持趨勢項擾動後也與原本物理機制所計算的趨勢方向相同。

$$r' = \left(\frac{2}{\exp(r)+1} \right) - 1 \quad (式 2.7)$$

本研究中，希望可增加目前模式系集成員之間的 Spread，此spread可能會隨著SPPT的設定而有不同的分佈結果，為瞭解目前所使用的SPPT法各時間空間之隨機擾動趨勢對模式的影響量，進行SPPT random pattern的敏感度測試，主要是調整不同時間、空間的隨機數(random number)的標準偏差量，來測試系集Spread隨標準偏差改變的結果。由於GEPS預報以45天以內為主，隨機擾動的參數中，可能尺度較小、時間較快的scale1及scale2對預報結果影響較大，因此先針對scale1及scale2進行敏感度測試，其中因scale 1之預設值為0.8，為確認模式使用指數計算可減緩過大或反向之趨勢擾動量，針對尺度較小之scale 1還進行超過1倍之1.2倍及2倍標準偏差的隨機擾動測試。本研究測試的TCo383L72模式主要設定如表1，敏感度測試使用的

擾動標準偏差設定如表2所示，其中，GEPS-T319版與GEPS-Tco383之SPPT計算中，對於隨機變數子的獲得方式、空間尺度之波數分配排列計算等皆不同。

測試之系集結果(GEPS-Tco383)將與正在作業之系集結果(GEPS-T319)進行比較，並利用系集平均、系集平均均方根(root-mean-square, rms)、及系集分歧(ensemble spread)之結果來判斷，其之計算方式如式2.8至式2.10 (Whitaker and Lough, 1998)。

$$\bar{\psi}(\lambda, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \psi_j \quad (\text{式 2.8})$$

$$E(\lambda, \phi) = \left[\left(\psi_a(\lambda, \phi) - \bar{\psi}(\lambda, \phi) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{式 2.9})$$

$$S(\lambda, \phi) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\psi_j(\lambda, \phi) - \bar{\psi}(\lambda, \phi)]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{式 2.10})$$

N 是成員數， ψ_a 是觀測值由模式自己的分析場資料提供， $\bar{\psi}(\lambda, \phi)$ 是系集平均， $E(\lambda, \phi)$ 是系集的均方根誤差， $S(\lambda, \phi)$ 是系集分歧量(spread)。

表 1、T319L60 與 Tco383L72 模式比較表

	T319L60 (operation)	Tco383L72
Grid	(1) Reduced Gaussian grid (960x480, 40 km) (2) vertical : S-P hybrid 60 layers	(1) octahedral reduced Gaussian grid (1552x768, 25 km) (2) vertical : S-P hybrid 72 layers
Dy-core	Eulerian	Non-iteration Dimensional-split Semi-Lagrangian(NDSL)+Semi-implicit (Juang 2007, Juang 2008)
convection	revision Simplified Arakawa-Schubert (Han and Pan, 2011)	scale- and aerosol- aware Simplified Arakawa-Schubert (Han et al., 2017; Arakawa and Wu, 2013)
radiation	RRTMG (Iacono et al., 2008)	RRTMG (Iacono et al., 2008)
PBL	(Han and Pan, 2011)	Eddy Diffusivity/Mass Flux (EDMF) Monin (Han et al., 2016)
Gravity wave drag	(1) Orographic: Palmer (1986) (2) Convective: Scinocca (2003)	(1) Orographic: Kim & Arakawa (1995), Lott and Miller (1997) (2) Convective: stationary convectively forced gravity wave drag (Chun and Baik, 1998)
SST setting	Fixed SST (=initial SST)	Tendency of SST: (1) $\pm 30^\circ\text{N}$: SIT (a one-column sea model) (2) $\pm 30-40^\circ\text{N}$: SIT & MOM3 weighting(>1day) (3) $\pm 40-90^\circ\text{N}$: MOM3 (1-25 day) + OISST climatology weighting (after 25 day)

表 2、GEPS-T319、GEPS-Tco383L72 模式 SPPT 隨機擾動主要設定

SPPT scale	L/τ	GEPS-T319	GEPS-Tco383
member source		SV	EnKF
1	500km/6hr	0.8	0.8 or 1.2 or 2
2	1000km/3day	0.4	0.4 or 0.6 or 0.8
3	2000km/30day	0.1	0.1
4	2000km/90day	N/A	0.08
5	2000km/1year	N/A	0.04
	Random seeds	Renew every timestep	Setup at first timestep and keep after
	Random Dist.	Gaussian PDF	Gaussian PDF

三、結果與討論

目前的測試結果顯示，在模式的初始場之系集成員分布部分，圖2為2018年3個初始場(2018-11-28, 2018-12-01, 2018-12-05 00Z)之系集成員重力位高度、溫度及風場初始場之系集成員分歧量，可看出目前三個初始場之結果一致，整體而言，EnKF(紅線)初始場 spread 明顯較 GEPS-T319 使用之初始場(黑線)大。黑線重力位高度場 spread 在近地表最小，之後隨高度增加模式上層(100 hPa)處達到最大，溫度場在近地表及高層之 spread 皆小，最大值在 500 hPa 附近，而風場垂直方向上的 spread 都很小不到 0.2。目前 EnKF 的 spread 明顯較原 GEPS-T319 大，且無論是在近地表或是高層都保有一定的 spread，EnKF 重力位高度場最大 spread 在 300 hPa 附近，溫度場在 850 hPa 附近，最大風場 spread 也在 300 hPa 附近。

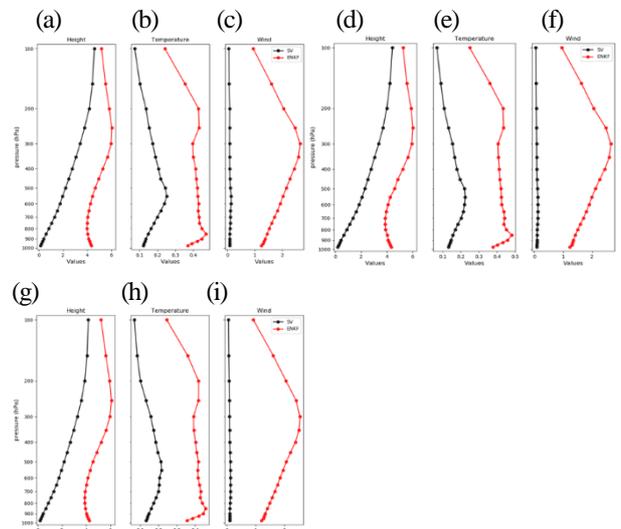


圖 2、2018 年 3 個案例初始場系集成員分歧量之垂直剖面(圖(a)-(c)為 2018-11-28, 圖(d)-(f)為 2018-12-1, 圖(g)-(i)為 2018-12-5。

針對 scale1 及 scale2 之敏感度測試，測試之初始時間為 2020-11-11, 11-14, 11-18, 11-22 及 12-2 00Z 共 5 個初始場，並分析 500 hPa 重力為高度(H500)、850 hPa 溫度(T850)、850 hPa

風場 U(U850)、200hPa 風場 U(U200)系集平均 RMSE 及系集 Spread。

為確認目前模式 SPPT 所計算出之 5-scale 擾動趨勢的標準偏差與目標設定值是否符合，圖 3 為在 scale1=0.8、scale2=0.4、scale3=0.1、scale4=0.08、scale5=0.04 的設定下，在式 2-7 指數計算之前模式所計算出的擾動變數標準偏差範例，顯示目前之擾動標準差量預期設定量相似，且總標準偏差量約為 1，也符合預期。

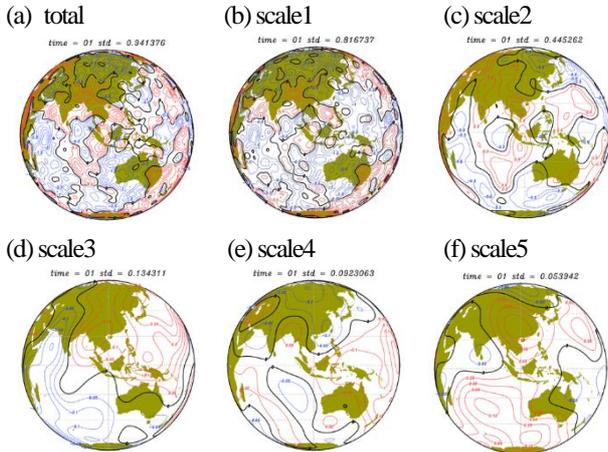


圖8、GEPS-Tco383 SPPT Total及5個scale隨機擾動係數範例

(a) Scale1 (500km/6hr)

針對 scale1 的擾動測試，圖 4、圖 5 為 scale1 敏感度測試的結果，圖中黑線為 GEPS-T319 之結果作為背景，藍線、綠線及紅線分別為 scale 1 的設定為 0.8, 1.2 及 2.0 之結果。500km/6hr 屬於較快速且較小尺度的變化，改變 scale1 是測試改變小尺度、快速變化的擾動量，是否可在預報的前幾天就可增加系集的 spread。而測試結果顯示，改變 SPPT scale1 對預報系集平均的 RMSE 影響不明顯，預報的前 10 日的 (RMSE-spread) 差值線中，H500 及 T850 的結果對 scale1 的反應較不明顯(圖 4)，僅風場 U850、U200(圖 5)略有隨 scale1 的值增加而下降但差異還是不大，且在預報 20 天後，scale1 的改變對(RMSE-spread)的結果反應不明顯，顯示目前系集 spread 對 scale1 的變化較不敏感。

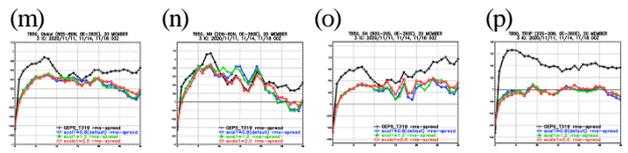
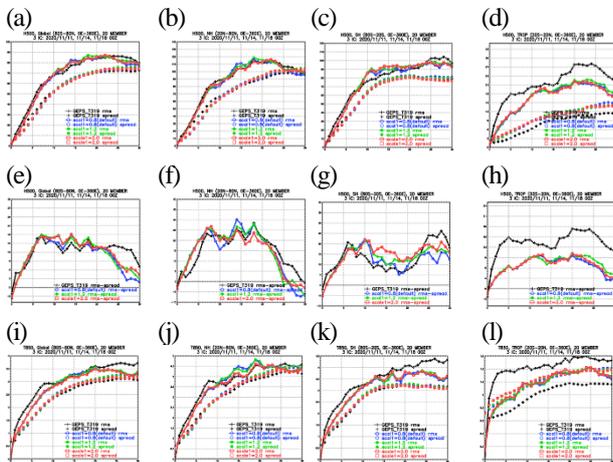


圖 4、為 SPPT scale1 參數測試 H500、T850 各區域系集平均 RMSE(圖(a)-(d), (i)-(l)中實線)、系集 spread(圖(a)-(d), (i)-(l)中黑線)及系集平均 RMSE 與 spread 之差值(圖(e)-(h), (m)-(p)中實線)，圖(a)-(h)為H500之結果，圖(i)-(p)為T850之結果。

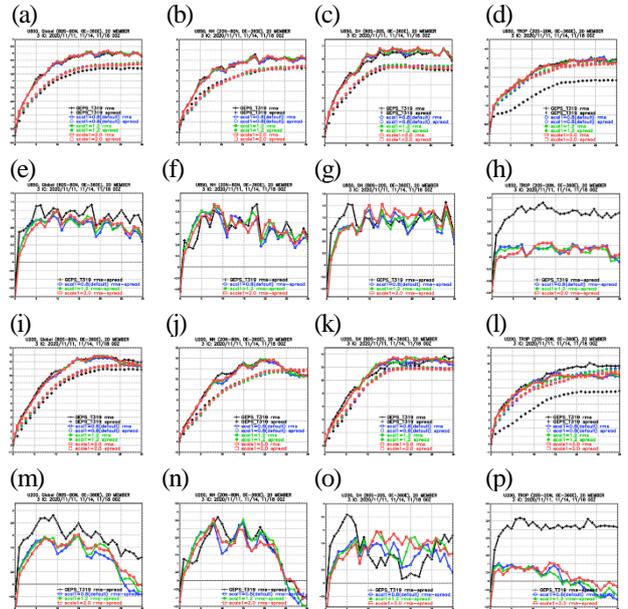
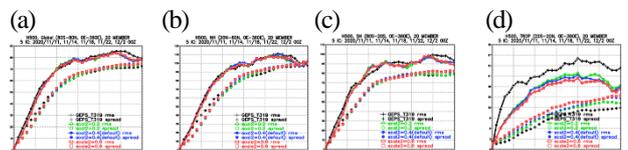


圖 5、為 SPPT scale1 參數測試 U850、U200 各區域系集平均 RMSE(圖(a)-(d), (i)-(l)中實線)、系集 spread(圖(a)-(d), (i)-(l)中黑線)及系集平均 RMSE 與 spread 之差值(圖(e)-(h), (m)-(p)中實線)，圖(a)-(h)為 U850 之結果，圖(i)-(p)為 U200 之結果。

(b) Scale2 (1000km/3day)

針對 scale2 的擾動測試，圖 6、圖 7 為 scale2 敏感度測試的結果，圖中黑線為 GEPS-T319 之結果作為背景，藍線、綠線及紅線分別為 scale 2 的設定為 0.2, 0.4 及 0.6 之結果。Scale2 屬於偏向中尺度變化，由 scale2 的調整可測試增加隨機擾動趨勢的變異數、模式受到較強的中尺度隨機擾動後，是否可提高系集之 spread。由(RMSE-spread)的結果差值圖中，預報前 10 日之 spread 即可看出 scale2 不同係數的影響，增加 scale2 之係數可增加系集的 spread，熱帶地區的 spread 變化更顯著。scale2=0.6 的設定下，H500 及 T850 皆有較高的 spread(圖 6)，但對風速 U850 及 U200 之變數(圖 7)，scale2=0.6 的設定在預報後期(20 天後)會有 spread 過高的現象，因此，目前建議 scale2 不應超過 0.6。



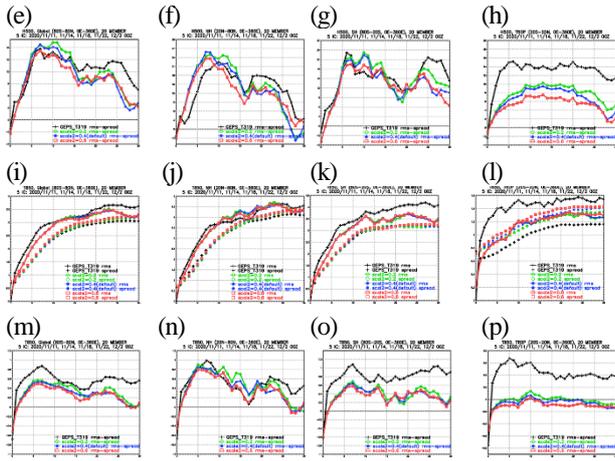


圖 6、為 SPPT scale2 參數測試 H500、T850 各區域系集平均 RMSE(圖(a)-(d), (i)-(l)中實線)、系集 spread(圖(a)-(d), (i)-(l)中黑線)及系集平均 RMSE 與 spread 之差值(圖(e)-(h), (m)-(p)中實線),圖(a)-(h)為 H500 之結果,圖(i)-(p)為 T850 之結果。

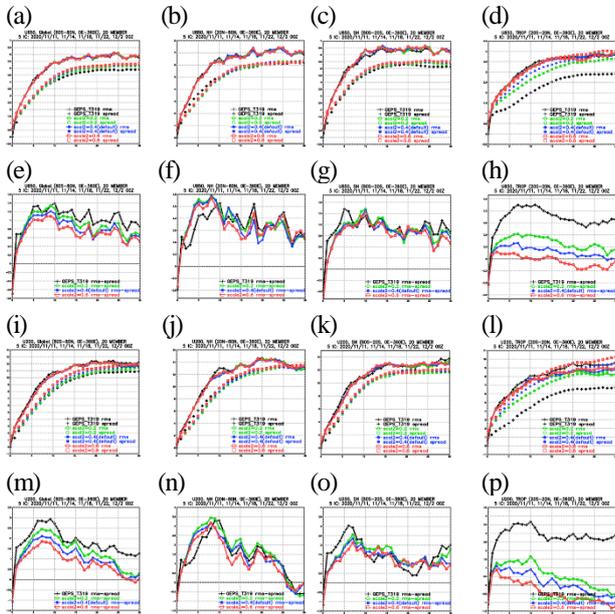


圖 7、為 SPPT scale2 參數測試 U850、U200 各區域系集平均 RMSE(圖(a)-(d), (i)-(l)中實線)、系集 spread(圖(a)-(d), (i)-(l)中黑線)及系集平均 RMSE 與 spread 之差值(圖(e)-(h), (m)-(p)中實線),圖(a)-(h)為 U850 之結果,圖(i)-(p)為 U200 之結果。

以 2020-11-11 之實驗作為案例,不同 scale2 的設定下,預報第 5、10、15 及 20 日之系集 spread 隨高度差異如圖 8 所示,其中可發現 scale2 對整層的大氣皆有影響,且在預報前 10 日內改變量較明顯,預報 15 日後,不同 scale2 的設定對不同高度的溫度場 spread 仍有敏感度,而對重力位高度及風速之 spread 敏感度較低。此外,在 2020-11 至 2020-12 的案例測試中,GEPS-TCO383 在熱帶的表現明顯較 GEPS-T319 好,且熱帶的 T850 及風場之系集 spread 也明顯與系集 RMSE 較接近,目前 GEPS-TCO383 應較 GEPS-T319 有更好的預報結果及且可提供較大的不確定性分佈。

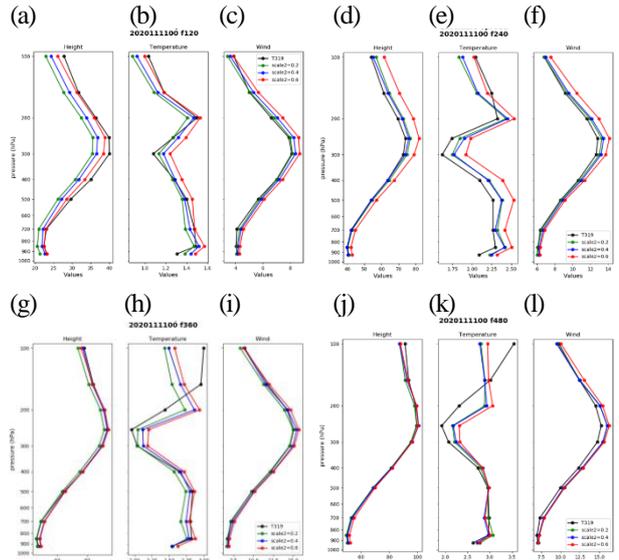


圖 8、SPPT scale2 參數測試之重力位高度、溫度、風速隨預報時間、高度之系集 Spread,圖(a)-(c)為預報 120 小時、圖(d)-(f)為預報 240 小時、圖(g)-(i)為預報 360 小時、圖(j)-(l)為預報 480 小時之結果。

四、結論與未來工作

CWBGFS 短期天氣預報作業模式已更新為 Tc_{639L72}(水平解析度 15 Km, 垂直 72 層),隨著短期天氣預報模式的更新,目前已初步完成 (CWB/GEPS-Tco383) 的 GEPS 系統流程建置,預報模式將以 Tc_{639L72} 為基礎,並降解析度至 Tc_{383L72}(水平解析度 15 Km, 垂直 72 層),由系集預報測試結果顯示,GEPS-TCO383 在熱帶地區有明顯的改進,北半球及南半球雖改進量不大,但系集平均 RMSE 也略較 GEPS-T319 降低。

GEPS-Tco383 調整測試工作中,目前完成測試由 36 個 EnKF 系集成員中,選取 20 個成員資料作為 GEPS-Tco383 初始場之可能性,顯示使用 EnKF 作為系集之初始場,有助於提高系集初始時間的 spread,以提高系統的不確定性。而針對預報過程中物理機制的不確定的測試中,對物理 tendency 進行隨機擾動之 5-scale SPPT 敏感變測試結果顯示,新的 SPPT 機制使用後的確可略增加系集的 spread,而隨機擾動係數之敏感測試結果顯示,改變小尺度、較快之 scale1 (500km/6hr) 隨機係數對系集 spread 的影響較不顯著,而中尺度之 scale2 (1000km/3day) 之擾動係數對系集 spread 較有影響,增加 scale2 的係數可增加系集 spread,模式預報前 10 日就可開始增加,但 scale2 也建議不超過 0.6,不然對於熱帶之風場可能會有 spread 過大的情況。

由於目前僅為個案測試,GEPS-Tco383 系統的整理表現還未明確,後續在 GEPS-Tco383 測試調整工作中,將會持續利用更多案例進行測試,及進行系集系統相關的統計分析。

五、參考文獻

1. Arakawa, A., & Wu, C. M. (2013). A unified representation of

- deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(7), 1977-1992.
2. Chun, H. Y., & Baik, J. J. (1998). Momentum flux by thermally induced internal gravity waves and its approximation for large-scale models. *Journal of the atmospheric sciences*, 55(21), 3299-3310.
 3. 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.
 4. Han, J., & Pan, H. L. (2011). Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system. *Weather and Forecasting*, 26(4), 520-533.
 5. Han, J., Wang, W., Kwon, Y. C., Hong, S. Y., Tallapragada, V., & Yang, F. (2017). Updates in the NCEP GFS cumulus convection schemes with scale and aerosol awareness. *Weather and Forecasting*, 32(5), 2005-2017.
 6. Han, J., Witek, M. L., Teixeira, J., Sun, R., Pan, H. L., Fletcher, J. K., & Bretherton, C. S. (2016). Implementation in the NCEP GFS of a hybrid eddy-diffusivity mass-flux (EDMF) boundary layer parameterization with dissipative heating and modified stable boundary layer mixing. *Weather and Forecasting*, 31(1), 341-352.
 7. Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell (1998). Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 796–811.
 8. Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13).
 9. Juang HMH. (2007). Semi-Lagrangian advection without iteration. In *Proceedings of the Conference on Weather Analysis and Forecasting*. Central Weather Bureau: Longtan, Taoyan, Taiwan; 277.
 10. Juang HMH. (2008). Mass conserving and positive semi-Lagrangian tracer advection in NCEP GFS. In *Proceedings of the Conference on Weather Analysis and Forecasting*. Central Weather Bureau: Taipei. Taiwan; 225– 227.
 11. Kim, Y. J. and Arakawa, A. (1995). Improvement of Orographic Gravity Wave Parameterization Using a Meaoscale Gravity Wave Model. *J. Atmos. Sic.*, 52, 1875-1902
 12. Lott, F., & Miller, M. J. (1997). A new subgrid-scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123(537), 101-127.
 13. Palmer, T. N., Buizza, R., Doblas-Reyes F., Jung T., Leutbecher M., Shutts G.J., Steinheimer M., Weisheimer A. (2009). Stochastic Parametrization and Model Uncertainty. Tech. Rep. 598. European Centre for Medium-Range-Weather Forecasts.
 14. Palmer, T. N., Shutts, G. J., Swinbank, R. (1986). Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parametrization. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, 1001-1039.
 15. Scinocca, J. F. (2003). An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *Journal of the atmospheric sciences*, 60(4), 667-682.
 16. Whitaker, J. S., & Lough, A. F. (1998). The relationship between ensemble spread and ensemble mean skill. *Monthly weather review*, 126(12), 3292-3302.
 17. Whitaker, J. S., and T. M. Hamill (2002). Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 1913-1924.
 18. Zhu, Y., Zhou, X., Li, W., Hou, D., Melhauser, C., Sinsky, E., ... & Tallapragada, V. (2018). Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for environmental prediction global ensemble forecast system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(13), 6732-6745.