

# 中央氣象局區域系集預報系統採「系集片段循環同化」新架構之評估

連國淵<sup>1</sup> 李志昕<sup>2</sup> 鄧雯心<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中央氣象局氣象科技研究中心 <sup>2</sup>中央氣象局氣象資訊中心

## 摘要

中央氣象局已發展具備全球與區域模式的決定性與系集預報系統，然而，氣象局全球與區域模式系統的發展與介接尚不夠緊密。本研究探討全球與區域系集預報系統的銜接策略，提出一套稱為「系集片段循環同化」的區域系集預報初始化新方法，建置於氣象局的作業環境上。個案實驗結果顯示，此新方法與現行基於EAKF系集資料同化系統做系集初始化的作業區域系集預報系統(WEPS)相比，在多數系集預報校驗指標上皆有所改善，得到更佳的系集離散度與平均誤差關係。藉由此新提出的區域系集初始化方法，將有機會促成氣象局區域系集預報系統銜接本局的全球系集預報系統，達成更自主的數值天氣預報發展。

**關鍵詞：**區域系集預報、系集初始化、數值天氣預報

## 一、前言

中央氣象局數值天氣預報經多年發展，已具備全球模式預報系統、區域模式預報系統、對流尺度快速更新預報系統等針對不同時空尺度的天氣預報系統。同時，對於全球與區域尺度，除提供決定性預報之外，亦皆發展系集預報，以提供機率預報指引與更多元的應用。全球模式與區域模式預報系統各有其不可取代的長處：全球模式提供綜觀尺度中期以上的預報，並且是唯一不需要依賴其他大氣模式資料的首要系統；區域模式則為關注的區域提供全球模式無法做到的高解析度短期預報，並通常會考慮較複雜、完整的物理過程，但區域模式無法獨立運作，其執行過程需依賴全球模式

提供多種上游資料，而其預報表現也與所依賴的全球模式資料準確度與使用方式有密切關聯。

區域模式銜接全球模式資料的方式可分為多種策略。首先，若全球模式與區域模式分別做各自獨立的連續分析—預報循環，則區域模式至少需使用到全球模式的分析與預報資料作為其側邊界條件(lateral boundary condition)。然而，若在區域模式系統中完全獨立進行循環資料同化，由於在區域網格中所能使用的觀測資料受限與區域模式長期積分可能導致的偏差累積等緣故(例：Schwartz et al. 2021)，經常不一定能得到優於全球模式資料同化系統的分析結果，因此，部分區域模式系統採取不運行連續分析—預報循環的策略，而

是每趟預報皆使用全球模式的分析場做初始化。此方式又包含多種做法，除最簡單的直接內插做冷啟動 (cold start) 之外，亦可執行所謂的「片段循環 (partial cycle) 同化」(Hsiao et al. 2012; Benjamin et al. 2016)，即每個預報週期的源頭都取自全球模式的分析場，再透過少數幾個資料同化循環起轉 (spin up) 區域模式預報並做較高解析度的分析，可得到與區域模式特性較一致的分析場，同時也可避免長期在區域模式中做連續循環可能產生的偏差累積。進一步考量到全球模式分析的長處在於大尺度資訊，而區域模式分析的長處在於小尺度資訊，前人亦提出以「blending」技術 (Yang 2005; Hsiao et al. 2015) 結合全球模式分析場的大尺度資訊與區域模式分析場的小尺度資訊，適當使用此方法可加強全球模式與區域模式的銜接應用。上述片段循環同化與 blending 的方法在氣象局現行的區域決定性與系集預報系統中皆有廣泛的使用，詳細運用方式與設定將於第二節中說明。

以上討論主要針對銜接全球與區域決定性預報的情境，但對於系集預報系統，除注重系集預報平均之準確度外，系集預報成員分布之品質，如系集離散度 (ensemble spread) 等，亦相當重要。一般而言，系集離散度與平均誤差的量值應越接近越好，代表此系集預報具可靠性 (reliability)。為得到良好的系集離散度，需在系集預報的多個環節引入擾動，包括初始條件擾動、邊界條件擾動與模式擾動等。在產製初始條件擾動方面，主要方法包括以奇異向量 (singular vector; Buizza and Palmer 1995; Barkmeijer et al. 1999) 方法由決定性分析場產製系集初始場、直接使用系集卡爾曼濾波器 (Ensemble Kalman Filter; EnKF; Evensen 1994、

2003) 之系集分析場、與由 Ensemble of Data Assimilation (EDA; Buizza et al. 2008; Isaksen et al. 2010) 方法產製等。其中後兩者 (EnKF 與 EDA) 與資料同化技術密切結合，為目前多數作業單位採用的方法。特別指出，EDA 方法為每個系集成員運行獨立的資料同化，目前主要使用在全球系集預報系統中 [如 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 的全球系集預報系統]，具有多項優點，但就我們所知，此方法在區域系集預報系統上的應用不多 (Vié et al. 2011 為少數相關研究)。

在邊界條件擾動方面，要運作一個區域模式的系集系統，若僅有單一全球決定性分析與預報資料予以銜接，會導致許多缺點，例如區域系集在側邊界附近的系集離散度不足等 (Torn et al. 2006; Vié et al. 2011; Saito et al. 2012)，而與全球模式系集成員一對一的銜接即成為最自然的解決方式。Torn et al. (2006) 的實驗結果指出，在區域 EnKF 資料同化系統中，雖然亦存在不依賴全球模式系集的執行方法，如在側邊界添加各式隨機擾動等，但直接銜接全球模式系集可得到最好的區域 EnKF 分析結果。最後，模式擾動則在模式預報過程中加上隨機擾動，用以彌補因模式本身動力或物理過程的不完美，產生低估部份系集離散度的效應。

氣象局基於 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock et al. 2008) 模式發展 WRF 區域系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System; WEPS; Li et al. 2020; 李與洪 2011、2014; 李等人 2015、2018、2022)，已獲得良好的成果與作業運用。本研究之目的為 WEPS 初始化方法之討論與改進，並

改善其利用全球模式分析與預報資料之策略。目前氣象局區域系集預報系統之初始條件擾動是由一套以 Ensemble Adjustment Kalman Filter (EAKF; Anderson 2001; 屬於 EnKF 的其中一種執行方案) 為核心, 運行連續分析—預報循環的系集同化系統 (以下稱為 EAKF) 提供, 但為了提升系集平均預報的準確度, 使用了 blending 技術, 將 EAKF 系集的小尺度資訊與本局區域決定性預報系統分析場的大尺度資訊結合; 而在邊界條件擾動方面, 使用美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction; NCEP) 的 Global Ensemble Forecast System (GEFS) 全球系集預報資料作為 WEPS 區域系集預報過程中的邊界條件, 更多關於 WEPS 初始化流程、方法與系集擾動方案的說明詳見第二、2 小節。

然而, 目前 WEPS 的初始化方法可能導致初始系集離散度不足的問題, 且依賴國外單位全球模式資料之設計, 長遠來看不利於氣象局自主之技術開發, 並會衍生全球模式資料時效性差的問題。考量目前作業架構的既有問題, 並綜合考量本局各尺度數值天氣預報發展之整體規畫、各系統之開發與維運難度, 在本研究中, 我們將提出一套適用於氣象局之由全球系集預報銜接區域系集預報的嶄新架構, 稱為「系集片段循環 (ensemble partial cycles) 同化」, 並於氣象局作業環境上進行過去個案的測試, 與現行作業區域系集預報系統之結果做比較。除測試以此新方法做 WEPS 區域系集初始化本身帶來的影響外, 也將測試在使用此新方法的條件下, 如目前使用美國 NCEP GEFS 全球系集預報資料, 與改使用本局開發之基於 NCEP FV3GFS 模式 (NGGPS Dynamical core Test Group 2016) 的新一代全球預報系統 (連

等人 2021; Lin et al. 2022) 之系集預報資料作為上游資料, 對 WEPS 區域系集預報表現的影響。

後文第二節將進一步介紹氣象局現行區域決定性與系集預報系統的架構, 著重於此二系統的初始化流程與方法, 與系集預報系統的系集擾動方案; 第三節將提出可應用於氣象局區域系集預報系統未來發展的「系集片段循環同化」新架構, 介紹其執行方法與理論基礎; 第四節將呈現此方法於氣象局 WEPS 區域系集預報系統上的個案實驗結果; 第五節為總結與未來展望。

## 二、現行區域決定性與系集預報系統架構

### (一) 現行 WRF 決定性預報系統初始化流程與方法

氣象局對東亞大範圍與西北太平洋區域進行預報的 WRF 決定性預報系統 (WRF Deterministic prediction system; WRFD / CWB-WRF; 黃與洪 2020) 之模式網格範圍如圖 1a, 使用兩層巢狀網格, 解析度分別為 15 公里與 3 公里。初始場產製之策略為片段循環資料同化 (Hsiao et al. 2012; Benjamin et al. 2016), 如圖 2 所示, 由分析時間前 12 小時的 NCEP Global Forecast System (GFS) 全球模式分析場為起始, 進行 2 個片段循環共 3 次同化, 同化的資料除了傳統 (conventional) 觀測資料, 也同化福爾摩沙衛星 7 號無線電掩星 (radio occultation) 資料與地基式 GPS 天頂向總延遲 (zenith total delay) 資料。在 15 公里解析度母網格採用的資料同化的方法為混合三維系集—變分資料同化 (hybrid 3D-EnVar; Wang 2010), 其隨流場變化 (flow-dependent) 的系集背景誤

差協方差 (background error covariance) 來自於氣象局一套 EAKF 系集同化系統之 6 小時系集預報，此 EAKF 系統將於下一小節中介紹；而在 3 公里高解析度網格採用的資料同化方法目前為三維變分資料同化 (3DVar；預計近期將升級為與 15 公里網格相同之 hybrid 3DEnVar)。此外，並在每個同化步驟後，以「blending」技術擬合全球模式分析場中的大尺度氣象場與區域模式分析場中的小尺度氣象場資訊。自最末片段循環的分析場起，運行 126 小時的決定性預報。目前作為首次同化用的初始場、blending 用的大尺度分析場、與預報用的側邊界條件，皆來自於美國 NCEP GFS 全球模式的分析與預報資料。

氣象局系統中的「blending」技術 (Yang 2005；Hsiao et al. 2015) 採用空間濾波 (spatial filter) 的方式分離兩系統分析場各自的大尺度與小尺度資訊，再將一系統的大尺度資訊與另一系統的小尺度資訊結合：

$$X_{\text{bld}} = X_{\text{small}} + \overline{X_{\text{large}}^{\text{sf}}} - \overline{X_{\text{small}}^{\text{sf}}} \quad (1)$$

其中  $X_{\text{bld}}$ 、 $X_{\text{small}}$ 、 $X_{\text{large}}$  分別表示 blending 結果、欲保留小尺度資訊的模式場、欲保留大尺度資訊的模式場；頂線代表經低通 (low-pass) 空間濾波後的模式場，僅保留大於給定的截斷長度尺度 (cutoff length scale) 的資訊，濾波方法採用六階低通 Raymond 切線隱性濾波 (tangent implicit filter) 方法 (Raymond and Garder 1991)，振幅反應方程式如下：

$$H(L) = \left[ 1 + \varepsilon \tan^6 \left( \frac{\pi \delta x}{L} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

其中  $L$  為長度尺度，而  $\varepsilon$  可由下式計算：

$$\varepsilon = \tan^{-6} \left( \frac{\pi \delta x}{L_x} \right) \quad (3)$$

其中  $\delta x$  為模式網格間距， $L_x$  為截斷長度尺度。使用此方法，氣象局 WRFD 系統在每個片段循環資料同化之後，擬合 NCEP GFS 全球模式分析場的大尺度資訊與 WRFD 自身分析場的小尺度資訊 (如圖 2)，經實驗測試得到最佳的截斷長度尺度為 1200 公里，可得到比沒有做 blending 更好的預報結果 (Hsiao et al. 2015)。

## (二) 現行 WRF 系集預報系統初始化流程、方法與系集擾動方案

氣象局亦針對與 WRF 決定性預報系統相同區域範圍發展一系集同化與預報系統，稱為 WRF 系集預報系統 (WEPS；圖 1b)，系集成員數為 20 個，提供每 6 小時循環的 108 小時區域系集預報。WEPS 的系集初始場來自於氣象局一套基於美國 University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Data Assimilation Research Testbed (DART) 的 EAKF (Anderson 2001) 系集同化系統，但為了提升系集平均預報的準確度，在 WEPS 中亦使用了 blending 技術，將 EAKF 系統的系集資料與 WRFD 決定性分析場結合，其中大尺度資訊來自 WRFD 分析場，小尺度資訊來自 EAKF 各別系集成員的 6 小時預報場。區域系集預報之側邊界條件使用 NCEP GEFS 全球系集預報之 10 組系集成員，以每 2 個 WEPS 系集成員共用 1 個 GEFS 系集成員的方式串接，此設計非出於科學原因，而是受氣象局下載遠地 NCEP GEFS 系集預報資料的傳輸時間所限制，為因側邊界條件使用 NCEP GEFS 全球系集預報之 10 組系集成員，以每 2 個 WEPS 系集成員共

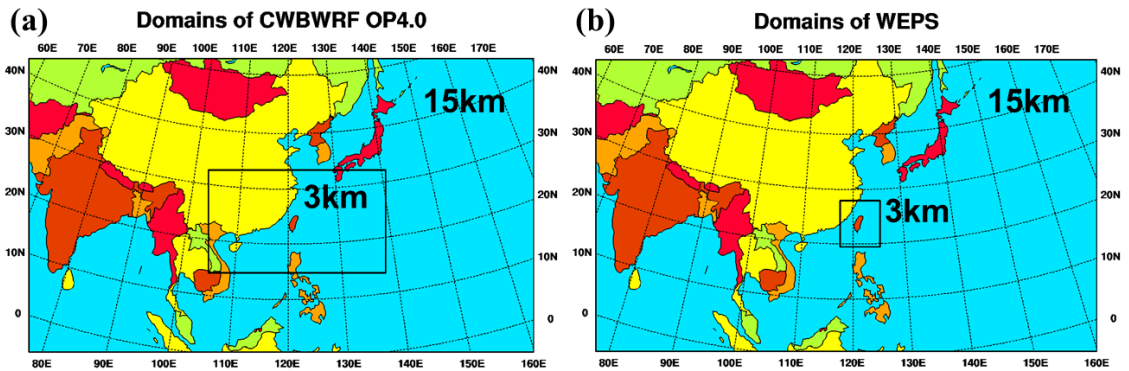


圖 1、(a) 氣象局 WRF 決定性預報系統 (WRFD) 之 15 公里與 3 公里解析度兩層模式網格範圍。  
 (b) 氣象局 WRF 系集預報系統 (WEPS) 之兩層模式網格範圍。

Fig. 1. (a) The model domain coverage of the CWB WRF deterministic prediction system (WRFD) for its 15- and 3-km resolution domains. (b) The coverage of the two model domains of the CWB WRF ensemble prediction system (WEPS).

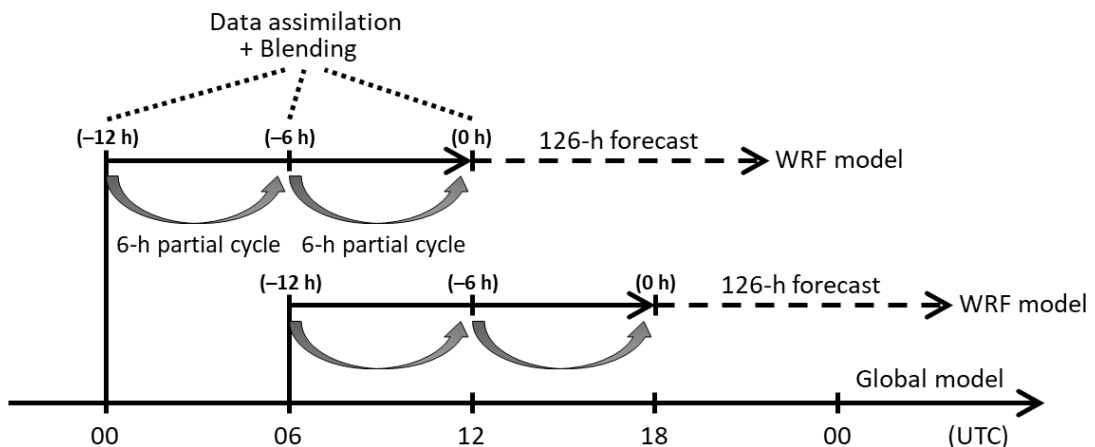


圖 2：氣象局 WRF 決定性預報系統之片段循環 (partial cycle) 資料同化架構。每個預報起始自分析時間前 12 小時的全球模式分析場，先進行 2 次每 6 小時循環之片段循環共同化 3 次區域範圍內的觀測資料，並以 blending 方法擬合全球模式的大尺度分析場與區域模式的小尺度分析場，之後進行 126 小時預報。

Fig. 2: The partial cycle data assimilation framework of the CWB WRF deterministic prediction system. Every regional forecast is initialized from the global model analysis 12 hours prior to its analysis time, followed by two 6-hourly partial cycles with a total of 3 assimilations of observational data within the regional domain. After each data assimilation, the blending method is used to merge the large-scale field in the global model analysis with the small-scale field in the regional model analysis. Finally, a 126-hour forecast is conducted after the last partial cycle and blending is completed.

用 1 個 GEFS 系集成員的方式串接，此設計非出於科學原因，而是受氣象局下載遠地 NCEP GEFS 系集預報資料的傳輸時間所限制，為因應僅來得及獲得 10 組系集預報資料所作之變通方法。在預報階段會以內插方式啟用 3 公里解析度的高解析度巢狀網格（圖 1b），受限於本局高速運算資源，此 3 公里網格的範圍較 WRFD 決定性預報中 3 公里網格的範圍小。此外，在預報階段亦會加上模式隨機擾動，目前 WEPS 採用合併多物理系集（multi-physics ensemble）、Stochastically Perturbed Physics Tendencies（SPPT；如 Palmer et al. 2009）與 Stochastic Kinetic Energy Backscatter（SKEB；如 Bowler et al. 2009）方案之複雜設計（Li et al. 2020），以獲得足夠之系集離散度。

前文所述之氣象局 EAKF 系統運行連續循環更新之系集資料同化，使用 15 公里解析度單一網格，與 WRF 和 WEPS 系統的外層母網格相同，以同化傳統觀測資料為主。為做分析系集的重新置中（re-centering），每個循環中會先以 blending 的方式結合 WRFD 的大尺度分析場與 EAKF 系集平均的小尺度分析場，再以此結果來重新置中各 EAKF 系集成員。此 EAKF 系統除提供 WEPS 的系集初始場之外，亦提供 WRFD 15 公里解析度網格 hybrid 3DEnVar 同化所需之系集背景誤差協方差。

### 三、「系集片段循環同化」新架構

檢視前一節所述之目前氣象局區域系集預報系統的初始化與邊界擾動方法，可發現有一些缺點，包括 (1) 使用同一個 WRFD 分析場的大尺度資訊產製系集成員之初始場，容易產生系集離散度不足的情況；(2) 需要依賴一套 EAKF 系集同化系統，但最終只取用系集成

員的小尺度資訊；(3) 側邊界條件依賴外單位（NCEP）全球系集預報系統的資料，除無法依自身需求主動開發外，更受限於資料傳輸速率的緣故，在作業時間限制內僅能取得有限成員數，無法完全一對一介接全球與區域模式系集成員；(4) 3 公里巢狀網格的初始場直接由 15 公里母網格資料在預報初始時間內插而來，可能有一定程度的起轉問題。基於以上缺點，本研究希望尋求其他產製系集初始與側邊界擾動的替代方式。

參考國際上各單位做區域系集預報時常採用的方法，我們認為以一對一的方式銜接全球模式與區域模式系集成員，提供系集初始條件與側邊界條件，是最直截了當又具成效的區域系集初始化方式。然而，在本研究中我們提出更進階的想法：在單純一對一銜接全球與區域系集方式的架構基礎之上，進一步對每一個區域系集成員，各自運行如同區域決定性預報系統的片段循環同化與 blending 流程（與各對應成員的全球系集模式資料做 blending），並在每個系集成員的片段循環同化中可考慮對同化的觀測資料依其觀測誤差加上隨機擾動；我們將此新方法稱為「系集片段循環同化」，其示意圖如圖 3。此方法之構想一方面啟發於氣象局過去在 WRFD 決定性預報系統使用片段循環同化與 blending 的成功經驗，我們認為既然此流程是適用於作業區域數值預報中得到良好區域決定預報表現的方法，那若運行此方法的系集版本，使每一個系集成員都經歷片段循環與 blending 做初始化，亦應可得到良好的區域系集預報表現；另一方面，此方法與目前國際上一些單位用於全球系集預報系統中成效良好的 EDA 方法在多方面有相似之處，更是讓我們對此一新方法抱持高度期望的另

一主因；附帶一提，此方法亦有利於在其片段循環中提早啟用（起轉）高解析度巢狀網格。我們認為此系集片段循環方法是可能結合片段循環與 EDA 兩者長處的區域系集預報初始化方法。如此以一對一銜接全球模式與區域模

式系集成員來建構區域系集預報系統的方式在德國的 COSMO-DE-EPS 上有被研究與實作過（Peralta et al. 2012；Kühnlein et al. 2014），但方法不完全一樣，並且在 COSMO-DE-EPS 上沒有進一步執行 EDA 的設計。

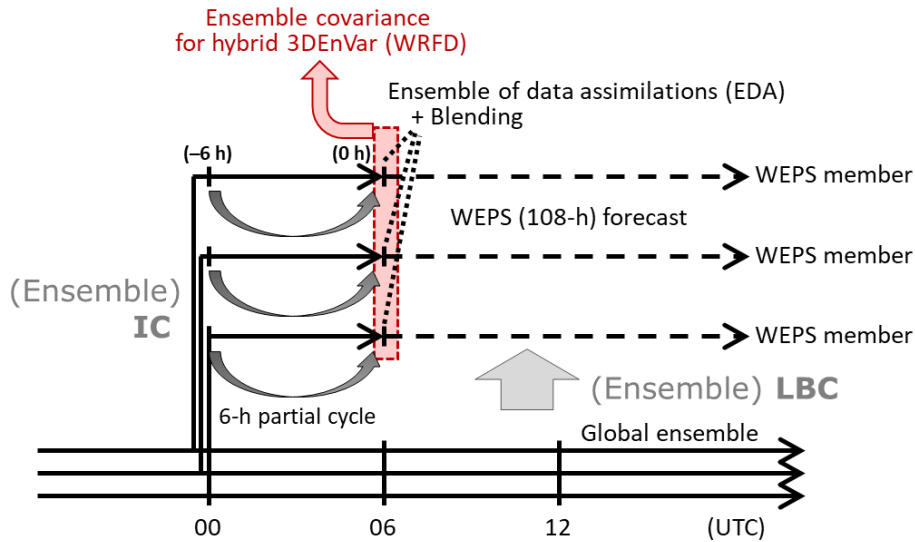


圖 3、以「系集片段循環（ensemble partial cycles）」方法初始化氣象局 WEPS 區域系集預報系統的執行流程：以一對一的方式銜接全球模式與區域模式系集成員，提供系集初始條件與側邊界條件，並以類似 EDA 方式分別為每個系集成員執行片段循環資料同化。此外，在系集片段循環中的短期系集預報可能作為系集背景誤差協方差，提供 WRFD 系統執行 hybrid 3DEnVar 同化。

Fig. 3. The workflow of the “ensemble partial cycle” method to initialize the CWB WEPS regional ensemble prediction system: The global ensemble members are connected with the regional ensemble members in a one-to-one manner to provide ensemble initial conditions and lateral boundary conditions, and partial cycle data assimilation is conducted separately for each ensemble member, which is similar to the idea of EDA. In addition, the short-term ensemble forecasts in the ensemble partial cycles can potentially be used as the ensemble background error covariance for the hybrid 3DEnVar data assimilation in WRFD.

#### 四、實驗結果與討論

##### (一) 實驗設計

針對前一節提出之基於系集片段循環方

法的區域系集初始化新架構（圖 3），本研究在氣象局的作業系統上完成此新架構之初步建置開發，並測試其對 WEPS 系集預報表現的影響，包括對系集平均預報準確度與系集離散度的影響等。在此需要說明的是，本研究的實

驗設計中，此系集片段循環每一個成員的流程與 WRFD 系統的片段循環流程（圖 2）有幾個不同之處，包括在本研究之系集片段循環中僅運行 1 次片段循環與 blending，且同化觀測資料的方法為 3DVar，而非 WRFD 中使用的 hybrid 3DEnVar。此流程調整的主要考量是計算成本，由於運行多組系集成員的片段循環同化需要花費大量的計算，因此我們先對其計算方案進行簡化，此選擇是否適當仍待未來更多的探討。此外，本研究中尚未對系集片段循環中同化的觀測資料添加隨機擾動，亦即在這部份尚未完整仿照 EDA 方法。另一方面，我們也將測試在此系集片段循環新架構下，改介接本局新一代 FV3GFS 全球預報系統之系集預報資料作為上游資料，對此實驗區域系集預報表現的影響，以了解在此新架構下使用不同全球系集模式資料來源對結果的敏感性，並評估未來 WEPS 使用本局自主開發與維運之全球模

式資料的潛力。

我們選定 2021 年 7 月 19 日至 7 月 28 日作為個案實驗期間，每日 00 UTC 進行一次系集預報，共 10 個預報個案，此期間涵蓋烟花（In-Fa）、查帕卡（Cempaka）與尼伯特（Nepartak）3 個颱風，並進行 72 小時之預報實驗。所有實驗之設計如表 1，首先注意所有實驗的 WEPS 區域系集成員數皆為 20 個，但各實驗使用的全球系集成員數卻有所不同（10 或 20 個）；當僅使用 10 個全球系集成員時，全球系集成員以 1 對 2 的方式介接區域系集成員。其中 OP 為與氣象局 WEPS 作業相同的設定，以 EAKF 加上與 WRFD blending 的方法產製系集初始場，其使用的全球系集成員數為 10 個（見第二、2 小節）。其他 4 個實驗皆為以新提出的系集片段循環方法產製系集初始場之實驗：NCEP10 與 NCEP20 為與 OP 同樣使用 NCEP GEFS 作為全球系集資料來源的實驗，

表 1、實驗設定。所有實驗的 WEPS 區域系集成員數皆為 20 個（未列於表），但各實驗使用的全球系集成員數有所不同（10 或 20 個）；當僅使用 10 個全球系集成員時，全球系集成員以 1 對 2 的方式介接區域系集成員。

Table 1. Experimental design. Note that the number of WEPS regional ensemble members for all experiments is 20 (not shown in the table), but the numbers of global ensemble members used in each experiment are different (either 10 or 20); when only 10 global ensemble members are used, the global ensemble members are connected with the regional ensemble members in a one-to-two manner.

實驗名稱	系集初始化方法	系集邊界條件來源（全球系集預報資料）	使用的全球系集成員數
OP	氣象局 EAKF + WRFD blending	NCEP GEFS	10
NCEP10	系集片段循環	NCEP GEFS	10
NCEP20	系集片段循環	NCEP GEFS	20
CWB20	系集片段循環	氣象局 FV3GFS EPS	20
CWB20_new	系集片段循環	氣象局 FV3GFS EPS，新版	20

使用的 GEFS 系集成員數分別為 10 和 20 個（受限於氣象局下載 NCEP GEFS 系集預報資料的傳輸時間，NCEP20 的設定僅能用於事後研究）；CWB20 與 CWB20\_new 為使用氣象局發展中的 FV3GFS 全球預報系統之系集預報（CWB FV3GFS EPS）作為全球系集資料來源的實驗，使用的系集成員數皆為 20 個（因使用氣象局自有的全球模式系集資料不會有時間延遲的問題），惟兩者使用的 CWB FV3GFS EPS 預報產品為不同版本，CWB20 使用較早期的版本，而 CWB20\_new 使用較新版本，透過此二實驗，可了解全球系集預報資料差異對區域系集預報造成的影響。

為了公正評估實驗的預報表現，綜觀尺度天氣預報之校驗真值採用 ECMWF 之全球模式分析場資料（為較獨立之模式分析資料），解析度為 0.25 度，而近地面預報之校驗真值則使用臺灣區域地面測站資料（約 330 個地面測站）。

## (二) 新系集初始化方法（系集片段循環） 對 WEPS 系集預報的影響

首先透過個案實驗期間平均之系集預報初始場離散度平面圖，來觀察兩種系集初始化方法所得之初始條件擾動特性的差異。圖 4 顯示 850 hPa 高度場之平均初始系集離散度，可明顯看出 OP 採用的 EAKF 加 WRFD blending 方法產生的系集初始場離散度過小（圖 4a），而採用新提出之系集片段循環方法則可大幅增加系集離散度（以 CWB20 實驗為例；圖 4b）；此系集離散度的整體差異在颱風區域以及颱風之外的環境皆然。更可發現，在靠近側邊界的位置，OP 初始場傾向有極小的系集離散度（如圖 4a 側邊界附近之灰色色階區域），應為作為來源資料的 EAKF 系統側邊界擾動處理不佳所致，而採用新方法的 CWB20 實驗初始場中則無此問題。我們認為此 OP 實驗中不合理小的系集初始場離散度，可能會在 WEPS 系集預報中帶來不良影響，而此問題在新方法中可獲得大幅改善。

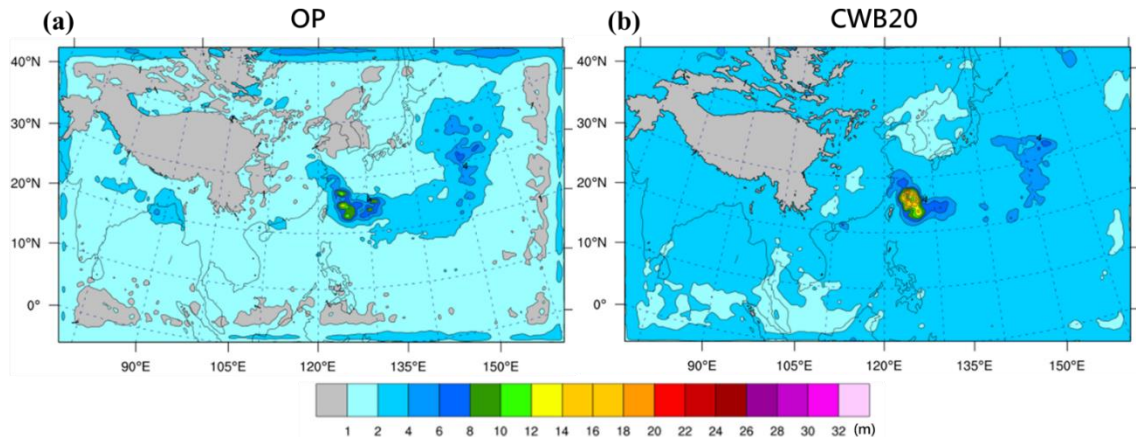


圖 4、WEPS 系集預報初始場之 850 hPa 重力位高度場系集離散度，為 2021 年 7 月 19 日至 7 月 28 日期間共 10 個初始時間之平均。(a) OP 實驗；(b) CWB20 實驗。

Fig. 4. Ensemble spreads of 850-hPa geopotential height in the initial conditions for WEPS forecasts, averaged for 10 initial times during the period from 19 to 28 July 2021. (a) Experiment OP; (b) Experiment CWB20.

圖 5 為各實驗外層網格的區域平均校驗結果，實線為系集平均方均根誤差（root-mean-square error；RMSE），虛線為系集離散度（ensemble spread），並分別顯示重力位高度、溫度、緯向風速在分析場（預報第 0 小時）、預報第 24 小時與 72 小時的校驗結果；方均根誤差越小越好，且系集離散度與方均根誤差的量值越接近越好，代表此系集預報具可靠性。可發現與 OP 相比，採用新提出之系集片段循環方法的各組實驗，因繼承自前述其較合理大小的系集初始條件擾動，在預報時間初期之系集離散度皆較大，系集離散度與平均誤差的關係亦較佳（實線與虛線較接近），此為系集片段循環方法所帶來的最大好處，彌補現行方法因將 EAKF 成員 blend 至 WRFD 決定性分析場所帶來的初始系集離散度不足之缺點；並且在多數實驗的多數校驗指標中，亦可帶來系集平均誤差的改善（RMSE 降低），亦即更準確的預報結果。另一方面，在 4 組系集片段循環實驗中，採用 NCEP GEFS 全球系集預報資料的實驗結果（NCEP10、NCEP20）大多比採用 CWB FV3GFS EPS 全球系集預報的實驗結果（CWB20、CWB20\_new）好，特別是在系集平均 RMSE 上，採用 CWB FV3GFS EPS 全球系集預報的實驗結果普遍有較大誤差，此為預期之中的結果，顯示氣象局開發中的 CWB FV3GFS EPS 與成熟的 NCEP GEFS 相比仍有很大的改善空間，但好消息是採用新版 CWB FV3GFS EPS（CWB20\_new）的結果與舊版（CWB20）相比，已有顯著改善（詳述於下一小節）。而使用完整 20 組全球系集成員與使用 10 組相比（NCEP20 vs. NCEP10），對初始時間的表現影響較不顯著，但在預報後期，使用 20 組全球系集成員的中上層溫度場預報誤差

有較大的改善。

圖 6 為各實驗 3 公里解析度內層網格對臺灣區域地面測站資料所作之地面觀測校驗。在地面校驗上，採用系集片段循環方法的 4 組實驗與 OP 實驗的差異亦主要呈現在預報時間 0 至 6 或 12 小時內的預報初期，各地面變數的系集平均 RMSE（實線）皆有明顯改善，特別是在 2 米高濕度上，OP 有初始誤差最大而預報後減小的不合理現象（圖 6b），應為模式起轉問題所致，可能與前述 3 公里網格初始場直接由 15 公里母網格內插而來的缺點有關；相比之下，採用系集片段循環做初始化的實驗則皆無此問題，推測主要受惠於其 3 公里網格在片段循環中已啟用，亦即（同母網格）在預報初始時間前已經歷了 6 小時的起轉調整。而在系集離散度上，新方法帶來的提升則僅在 2 米高溫度的預報初期較為顯著（圖 6a 虛線）。整體而言，新方法在預報初期各地面變數的系集離散度與誤差關係皆有改善，而對於 12 小時以上預報，各組實驗之平均誤差與系集離散度的變化不大（除 10 米風速的預報後期之外），推測是因為各實驗雖在系集初始化方法上有異，但在與地面變數預報最相關的下邊界條件擾動處理方式上皆相同所致。

進一步探討對颱風路徑預報的影響，圖 7 呈現 OP、NCEP10 及 CWB20 此 3 組實驗在兩個不同初始時間所做的系集颱風預報路徑。可以發現以新提出之系集片段循環方法對於烟花颱風（圖 7a-c）與尼伯特颱風之路徑轉彎（圖 7d-f）的掌握似乎比現行 WEPS 作業好，各系集成員之預報路徑分布較有參考價值。統計實驗期間所有個案，則其平均路徑預報誤差在 3 組實驗間的差異不大（圖未示）。需指出由於目前實驗的個案數太少，在颱風預報上尚未能

做出有統計意義的結論，未來需要做更多實驗探討。但理論上而言，以系集片段循環方法來產製系集預報初始場，受惠於每個系集成員的初始化過程都是獨立進行的，可避開如目前

WEPS 作業流程中因對系集成員做 **blending** 以及 EAKF 中的 **re-centering** 所導致的潛在問題，在颱風之系集預報上亦有機會顯現其優勢。

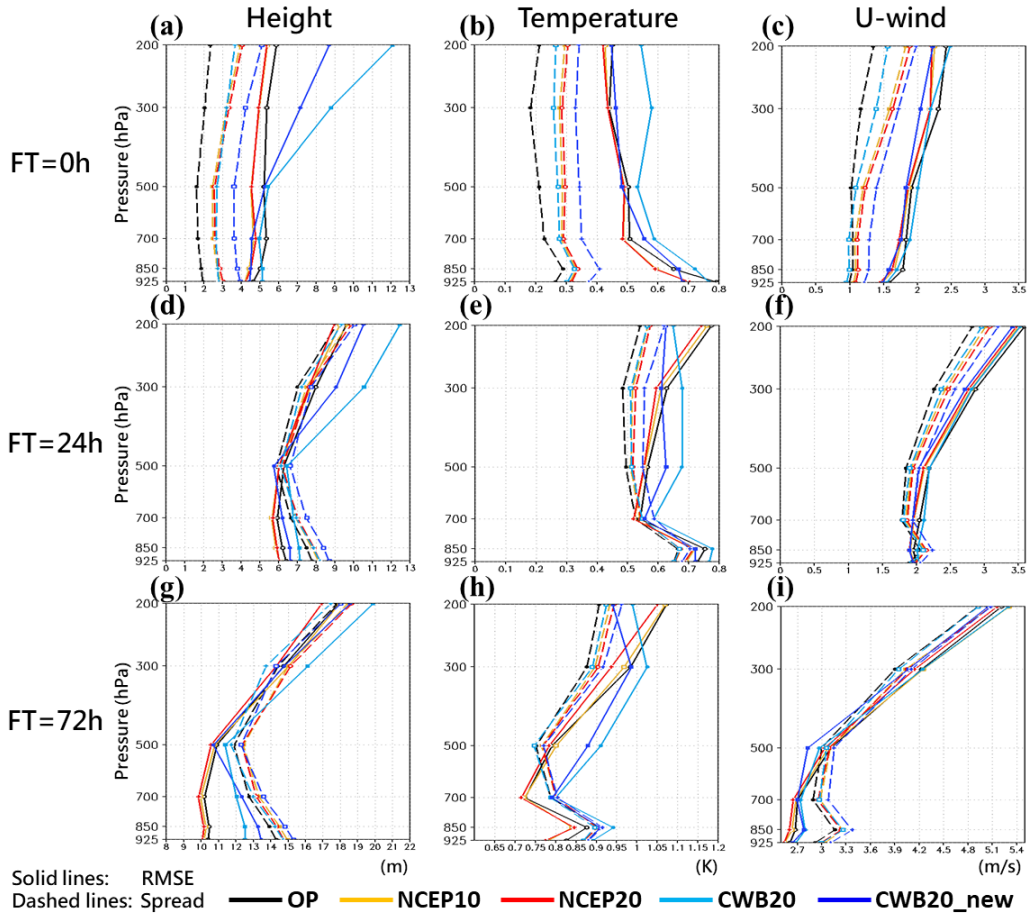


圖 5、各 WEPS 系集預報實驗在外層 (15 公里) 區域網格範圍內的系集平均方均根誤差 (RMSE；實線) 與系集離散度 (Spread；虛線)，分別呈現 (a)(d)(g) 重力位高度、(b)(e)(h) 溫度、(c)(f)(i) 緯向風場之 (a)–(c) 分析場、(d)–(f) 預報第 24 小時、(g)–(i) 預報第 72 小時的校驗結果。實驗包括 OP (黑線)、NCEP10 (橘線)、NCEP20 (紅線)、CWB20 (水藍線) 與 CWB20\_new (藍線)。預報初始時間為 2021 年 7 月 19 日至 7 月 28 日每日 00 UTC 共 10 個個案，校驗真值選用 ECMWF 分析場。

Fig. 5. Root-mean-square errors (RMSEs) of the ensemble mean (solid lines) and ensemble spreads (dashed lines) in the outer (15-km) domain of WEPS in each experiment, shown separately for (a)–(c) analyses, (d)–(f) 24-hour forecasts, and (g)–(i) 72-hour forecasts of (a) (d) (g) geopotential height, (b) (e) (h) temperature, and (c) (f) (i) zonal wind fields. The experiments include OP (black lines), NCEP10 (orange lines), NCEP20 (red lines), CWB20 (cyan lines), and CWB20\_new (blue lines). The forecast initial times of 10 cases range from 19 to 28 July 2021 (every 00 UTC). The verifying truth is the ECMWF analysis.

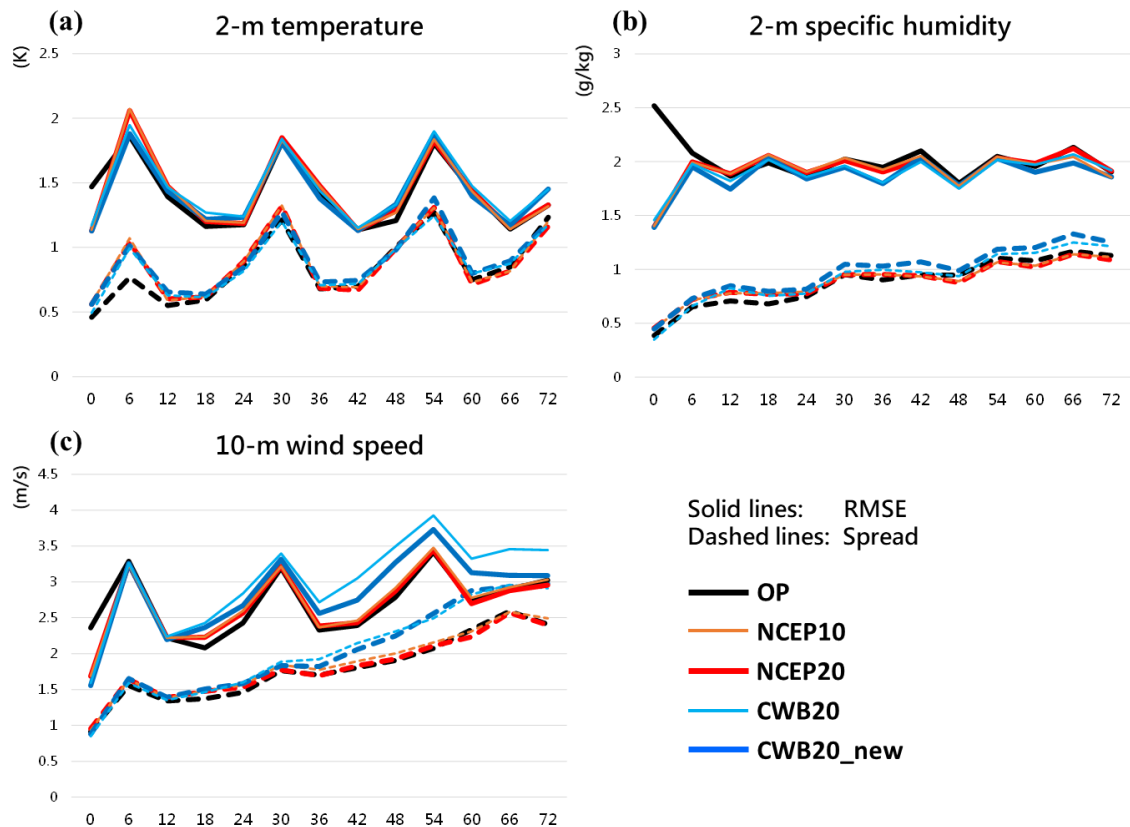


圖 6、同圖 5，但為 3 公里解析度內層網格對臺灣地面站點觀測之系集平均方均根誤差（RMSE；實線）與系集離散度（Spread；虛線）校驗，橫軸為預報時間（0 至 72 小時）。(a) 2 米高溫度；(b) 2 米高比濕；(c) 10 米高風速。

Fig. 6. Same as Fig. 5, but for the RMSEs of the ensemble mean (solid lines) and ensemble spreads (dashed lines) of the 3-km resolution inner domain verified against Taiwan-area surface station observations, with respect to forecast time (0 to 72 hours; x-axis). (a) 2-meter temperature; (b) 2-meter specific humidity; (c) 10-meter wind speed.

### (三) 氣象局 FV3GFS 全球系集預報改進的影響

前述 CWB20 與 CWB20\_new 實驗相比，後者有更好的 WEPS 系集預報表現。這兩個實驗的差異僅為所銜接的 CWB FV3GFS EPS 全球系集預報的版本：CWB20 使用開發過程中較早期的版本；而 CWB20\_new 使用改進後的版本。對於兩個版本的全球系集預報，我們已

先在全球尺度上做系集預報校驗，證實新版在多方面有所改善，例如在高對流層高度場與溫度場之系集平均偏差與 RMSE 有明顯改善等（圖未示）。這些改善的來源，最主要來自全球模式中使用的 New SAS 積雲參數化之改進（Lin et al. 2022），以及新版全球系集在 EnKF 預報—同化循環中亦啟用隨機物理過程方案，改進系集背景場的離散度進而改善同化效果。

如前圖 5、6 所示，以此二版本 CWB FV3GFS EPS 全球系集預報資料透過系集片段循環方法銜接至 WEPS 區域系集預報的結果，採用新版資料的實驗 (CWB20\_new) 與採用舊版資料的實驗 (CWB20) 相比，在大部份的校驗上皆有所改善，特別大的改善出現在高對流層的高度場與溫度場之系集平均 RMSE 上 (圖 5a、b、d、e、g、h；藍色 vs. 水藍色實線)，與前述在全球系集預報上的校驗結論相符；另外，

在臺灣區域 10 米高風速的系集平均 RMSE 上 (圖 6c 實線)，CWB20 實驗的預報後期結果明顯較其他銜接 NCEP GEFS 資料的實驗 (OP、NCEP10、NCEP20) 差，為使用氣象局全球系集預報之實驗特別劣勢的地方，但在採用新版 CWB FV3GFS EPS 的 CWB20\_new 實驗中，已有明顯改善 (雖然還是不如使用 NCEP GEFS 資料的實驗)。

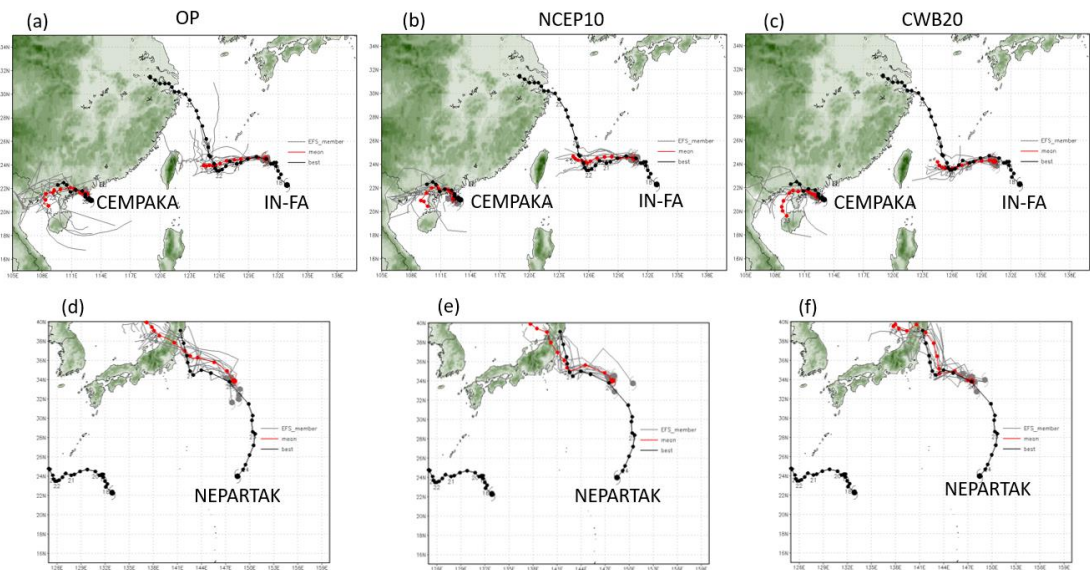


圖 7、(a) (d) OP、(b) (e) NCEP10、(c) (f) CWB20 實驗的系集颱風預報路徑，粗紅線為系集平均預報路徑，細灰線為各系集成員之預報路徑，粗黑線為觀測路徑。上、下列為不同初始時間之預報：(a)–(c) 2021 年 7 月 20 日 00 UTC 起始之預報；(d)–(f) 7 月 26 日 00 UTC 起始之預報。每 6 小時的系集平均預報與觀測之颱風中心位置分別以紅色與黑色點呈現。

Fig. 7. Ensemble typhoon track forecasts in experiments (a) (d) OP, (b) (e) NCEP10, and (c) (f) CWB20. The ensemble mean track forecasts, track forecasts of each ensemble members, and observed tracks are shown in thick red lines, thin gray lines, and thick black lines, respectively. (a)–(c) Forecasts initialized at 00 UTC 20 July 2021; (d)–(f) Forecasts initialized at 00 UTC 26 July 2021. The 6-hourly typhoon center locations in the ensemble mean forecast and in the observation are shown in red and black dots, respectively.

上述結果皆顯示氣象局的 CWB FV3GFS EPS 全球系集預報在開發過程中有所改善，且透過此新提出的系集片段循環方法，確實可能將全球模式系集預報中的改進傳遞至區域模式系集預報中。值得一提的是，在 CWB20\_new 實驗所使用的 CWB FV3GFS EPS 版本之上，近期本局全球系集同化系統更新為 Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) 同化方法，以及其系集解析度由 50 公里提升至 25 公里等之規畫，皆有機會更為改善前述採用氣象局全球系集預報之實驗不足的地方。

基於以上觀察，往後若氣象局 WEPS 作業區域系集預報系統可改銜接使用本局開發之全球系集預報系統資料，則氣象局全球系集預報系統的改進，亦可望對本局區域高解析度系集預報系統的改進有所貢獻，藉此將更有機會提升全球模式系統成果於實務作業預報中的貢獻。

## 五、結論與未來展望

本研究針對氣象局 WRF 區域系集預報系統 (WEPS) 之系集初始化方法進行探討，提出一套銜接全球與區域系集模式以初始化區域系集預報的嶄新方法與架構，稱為「系集片段循環同化」，完成於氣象局作業系統上的初步建置開發，並進行個案實驗。實驗結果證實此新方法與現行基於 EAKF 系集成員與 WRFD blending 做系集初始化的作業 WEPS 系統相比，在多數系集預報校驗指標上皆有所改善，包括系集平均 RMSE 與系集離散度的改進，相應有最佳的系集離散度與平均誤差關係。在使用此系集片段循環方法的條件下，亦進行介接不同全球系集模式資料來源的測試，結果顯示改使用本局新一代 FV3GFS 全球預報系統之系集預

報資料作為上游資料，結果雖劣於使用 NCEP GEFS 系集預報資料，但新系集初始化架構的優勢在改用本局 FV3GFS 全球系集資料的實驗中仍可清楚顯示出來，且使用新、舊兩版本局 FV3GFS 全球系集預報資料的實驗可發現新版的結果有明顯改善。

綜合以上實驗結果，本研究新提出之系集片段循環架構確實可回應目前氣象局 WEPS 區域系集預報系統中的幾項關鍵問題：(1) 克服現行架構中因使用 WRFD 決定性分析場大尺度資訊做 blending 所產生的初始系集離散度不足的情況；(2) 不再需要 EAKF 系集同化系統提供初始條件擾動，移除 WEPS 對 EAKF 系統的依賴（氣象局 EAKF 為一套未來可能維運不易的系統）；(3) 藉由此新架構，有相當大的潛力可以使 WEPS 系統改介接本局全球預報系統資料，移除對國外單位 (NCEP) 全球系集預報資料的依賴，達成更自主的開發；(4) 亦有助於改善系集預報中高解析度巢狀網格預報初期的起轉問題。因此，系集片段循環架構在氣象局的應用上大有前景，值得繼續深入研究與開發。

目前工作僅為此系集片段循環方法在 WEPS 上的初步個案實驗測試。欲更加了解此方法，並達成取代現行 WEPS 系集初始化方法而作業化的目標，仍需進行更多的實驗。在方法的層面上，本研究尚未對其中同化的觀測資料添加隨機擾動，亦即在這部份尚未完整仿照 EDA 方法；因而我們將執行更多實驗以深入探討在此架構上 (1) 僅單純由全球系集分析與預報資料初始化區域系集預報、(2) 加上系集片段循環、(3) 再加上 blending (本研究進行之實驗)、與 (4) 再加上觀測擾動 (最相近於 EDA 方法) 等各項構成要素分別對區域系集預報結

果的影響，以更加了解此新方法優勢的關鍵來由。在作業評估上，需要進行更多不同季節、天氣系統之個案測試，調校各項設定以優化預報結果。

而在 WEPS 系統之外，系集片段循環中的短期系集預報有機會可作為系集背景誤差協方差提供 WRFD 系統執行 hybrid 3DEnVar 同化(如圖 3 之紅色部份)，若此進一步的構想能夠實現，則氣象局各預報系統可完全移除對 EAKF 系統的依賴，得以在未來停止維運此套系統。最後，本工作將與氣象局 FV3GFS 全球預報系統之發展息息相關，區域系集預報系統介接全球系集預報系統的實驗結果，將能回饋給全球預報系統開發團隊；而全球系集分析與預報之持續發展改進，亦將可透過介接至區域系集預報系統的實驗結果來作為驗證項目之一。綜上所述，本研究提出之 WEPS 新架構，對氣象局未來數年之數值天氣預報發展具有重大意義。

## 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。

——、——，2014：區域系集預報系統研究：系集成員產生方式之評估。*大氣科學*，**42**，153–179。

——、——、江琇瑛，2015：區域系集預報系統強化研究：介接系集調整卡爾曼濾波分析場。*104 年天氣分析與預報研討會*，臺北，臺灣，A2-18。

——、——、江琇瑛，2018：區域系集預報系統之初始場擾動強化研究。*107 年天氣分析與預報研討會*，臺北，臺灣，A3-19。

——、蘇奕叡、洪景山、張保亮，2022：中央氣象局區域系集預報系統之模式擾動及模式物理過程強化研究。*氣象學報*，**57(1)**，1–20。

連國淵、鄧雯心、黃子茂、趙子瑩、林宗翰、張志謙、陳建河、楊舒芝，2021：FV3GFS 全球預報系統於氣象局之資料同化進展與作業化測試。*110 年天氣分析與預報研討會*，臺北，臺灣，A2-44。

黃小玲、洪景山，2020：地表粗糙度調整對模式大氣及預報效能之評估。*109 年天氣分析與預報研討會*，臺北，臺灣，A2-30。

Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884–2903, [https://doi.org/10.1175/1520493\(2001\)129<2884:AEAKFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520493(2001)129<2884:AEAKFF>2.0.CO;2).

Barkmeijer, J., R. Buizza, and T. N. Palmer, 1999: 3D-Var Hessian singular vectors and their potential use in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2333–2351, <https://doi.org/10.1002/qj.49712555818>.

Benjamin, S. G., and Coauthors, 2016: A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The Rapid Refresh. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1669–1694, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0242.1>.

Bowler, N. E., A. Arribas, S. E. Beare, K. R. Mylne, and G. J. Shutts, 2009: The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 767–776, <https://doi.org/10.1002/qj.394>.

- Buizza, R., and T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434–1456, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<1434:Tsvsot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<1434:Tsvsot>2.0.co;2).
- Buizza, R., M. Leutbecher, and L. Isaksen, 2008: Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 2051–2066, <https://doi.org/10.1002/qj.346>.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10143–10162, <https://doi.org/199410.1029/94JC00572>.
- , 2003: The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dyn.*, **53**, 343–367, <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9>.
- Hsiao, L.-F., D.-S. Chen, Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo, T.-C. Yeh, J.-S. Hong, C.-T. Fong, and C.-S. Lee, 2012: Application of WRF 3DVAR to operational typhoon prediction in Taiwan: Impact of outer loop and partial cycling approaches. *Wea. Forecasting*, **27**, 1249–1263, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00131.1>.
- , and Coauthors, 2015: Blending of global and regional analyses with a spatial filter: Application to typhoon prediction over the western North Pacific Ocean. *Wea. Forecasting*, **30**, 754–770, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00047.1>.
- Isaksen, L., M. Bonavita, R. Buizza, M. Fisher, J. Haseler, M. Leutbecher, and L. Raynaud, 2010: Ensemble of data assimilations at ECMWF. ECMWF Technical Memoranda No. 636, 48 pp.
- Kühnlein, C., C. Keil, G. C. Craig, and C. Gebhardt, 2014: The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 1552–1562, <https://doi.org/10.1002/qj.2238>.
- Li, C.-H., J. Berner, J.-S. Hong, C.-T. Fong, and Y.-H. Kuo, 2020: The Taiwan WRF Ensemble Prediction System: Scientific description, model-error representation and performance results. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 1–15, <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00127-8>.
- Lin, C.-H., M.-J. Yang, L.-F. Hsiao, and J.-H. Chen, 2022: The impact of scale-aware parameterization on the next-generation global prediction system in Taiwan for front predictions. *Atmosphere*, **13**, 1063, <https://doi.org/10.3390/atmos13071063>.
- NGGPS Dynamical core Test Group, 2016: Dynamical core evaluation test report for NOAA’s Next Generation Global Prediction System (NGGPS). 93pp.
- Palmer, T. N., R. Buizza, F. Doblas-Reyes, T. Jung, M. Leutbecher, G. J. Shutts, M. Steinheimer, and A. Weisheimer, 2009: Stochastic parametrization and model uncertainty.

- ECMWF Technical Memoranda No. 598, 42 pp.
- Peralta, C., Z. B. Bouallègue, S. E. Theis, C. Gebhardt, and M. Buchhold, 2012: Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **117**, <https://doi.org/10.1029/2011JD016581>.
- Raymond, W. H., and A. Garder, 1991: A Review of Recursive and Implicit Filters. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 477–495, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0477:ARORAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0477:ARORAI>2.0.CO;2).
- Saito, K., H. Seko, M. Kunii, and T. Miyoshi, 2012: Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction. *Tellus A*, **64**, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.11594>.
- Schwartz, C. S., G. S. Romine, and D. C. Dowell, 2021: Toward unifying short-term and next-day convection-allowing ensemble forecast systems with a continuously cycling 3-km ensemble Kalman filter over the entire conterminous United States. *Wea. Forecasting*, **36**, 379–405, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0110.1>.
- Skamarock, C., and Coauthors, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). Univ. Corp. Atmospheric Res., <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
- Torn, R. D., G. J. Hakim, and C. Snyder, 2006: Boundary conditions for limited-area ensemble Kalman filters. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2490–2502, <https://doi.org/10.1175/MWR3187.1>.
- Vié, B., O. Nuissier, and V. Ducrocq, 2011: Cloud-Resolving Ensemble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 403–423, <https://doi.org/10.1175/2010MWR3487.1>.
- Wang, X., 2010: Incorporating ensemble covariance in the Gridpoint Statistical Interpolation variational minimization: A mathematical framework. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2990–2995, <https://doi.org/10.1175/2010MWR3245.1>.
- Yang, X., 2005: Analysis blending using spatial filter in grid-point model coupling. HIRLAM Newsletter No. 48, 7 pp.

# Evaluation of a new “ensemble partial cycle” framework for use in the regional ensemble prediction system at Central Weather Bureau

Guo-Yuan Lien<sup>1</sup>, Chih-Hsin Li<sup>2</sup>, Wen-Hsin Teng<sup>1</sup>

Research and Development Center, Central Weather Bureau<sup>1</sup>  
Meteorological Information Center, Central Weather Bureau<sup>2</sup>

## Abstract

Central Weather Bureau (CWB) has developed its global and regional numerical weather prediction systems, for both the deterministic and ensemble forecasts; however, the development in the global and regional model systems at CWB and the connection between the two systems have not yet been close enough. This study investigates the strategy for connecting global and regional ensemble forecast systems. A new regional ensemble initialization method named “ensemble partial cycle” is proposed and implemented in CWB’s operational environment. Case study results show that this new method is superior to the current operational WRF Ensemble Prediction System (WEPS) that is based on an Ensemble Adjustment Kalman Filter (EAKF) data assimilation system, in terms of a better ensemble spread-error relationship and improved ensemble forecast performance. With this newly proposed regional ensemble initialization method and encouraging results, it becomes possible to promote the change for CWB’s regional ensemble forecast system to connect to its own global ensemble forecast system, which will facilitate an environment that is more suitable for independent development of numerical weather prediction systems at CWB.

**Key words:** regional ensemble forecasting, ensemble initialization, numerical weather prediction