

Dual-resolution混合式三維系集變分法 於高解析度區域模式資料同化系統的應用

¹陳文柔 ¹陳盈臻 ²洪景山
¹中央氣象局氣象資訊中心、²科技中心

摘 要

由於高解析度的系集預報十分耗費計算資源，要在高解析度模式應用 Hybrid 3DEnVAR 資料同化法是個挑戰，為解決計算資源的問題，Gao et al., 2008 提出 Dual-Resolution 方法，將較低解析度的系集背景誤差協方差（簡稱 BEC）內插至高解析度，如此一來，可藉由較低解析度系集預報所提供之 BEC，建構高解析度網域的 Hybrid 3DEnVAR 資料同化系統。

本研究將探討 Dual-Resolution Hybrid 3DEnVAR 資料同化如何應用在氣象局 3 公里高解析度區域模式，首先藉由單觀測點實驗來瞭解 single resolution 動態 BEC 的特性，接著調校 dual-resolution 內插出來的 BEC 之離散度和水平影響尺度，也將評估靜態 BEC 的控制變數選項（WRFVAR cv5 & cv7），最後進行 Hybrid 預報實驗。

一、前言

中央氣象局決定性區域預報模式為 WRF 二層巢狀網格的設計，外層解析度為 15 公里，內層為 3 公里（圖一），其中 15 公里解析度的資料同化系統為混合式三維系集變分法，其背景誤差協方差（簡稱 BEC）同時結合了靜態 BEC 以及來自於 15 公里解析度的 EAKF 系統 32 個成員所提供的動態（流場相關）BEC（圖二）；而 3 公里解析度的資料同化系統為三維變分法，為了增進其同化效能，有必要如同 15 公里系統考慮流場相關 BEC 的資訊，然而要在高解析度運行一個系集模式非常耗費運算資源，要達到作業化的混合式系集變分同化分析，以目前的運算資源考量下是有困難的。

為解決計算資源的問題，Gao et al. 在 2008 年提出 Dual-Resolution hybrid 方法，Dual-Resolution 的內涵為將較低解析度的系集動態 BEC 內插至較高解析度，供較低解析度的模式背景場進行混合式系集變分同化分析，如此一來，不用維運昂貴的高解析度系集模式，也可以在高解析度資料同化系統達到擁有動態 BEC 特性之目的，詳細的演算式可見 Gao et al., 2008。

然而較低解析度的動態 BEC 是否足以代表較高解析度的特性？這是在應用 dual-resolution 方法的過程

中最需要考慮的問題，要驗證 dual-resolution 的效能，最直接的方法就是額外進行一組高解析度的系集預報（single resolution），使得 dual-resolution 盡可能與單一高解析度的特性接近。

二、實驗設計

現有兩組高解析度的動態 BEC，一組為 Dual-resolution 方法內插而來，實驗名稱為”DR”，另一組為單一高解析度（Single Resolution）系集模式預報，實驗名稱為”SR”（表一）。

單觀測點實驗是瞭解模式 BEC 特性的主要診斷方法，由於觀測對模式背景場的影響取決於觀測誤差及 BEC，只要給予固定的觀測誤差及觀測增量（O-B, innovation），透過單點分析增量的水平影響範圍以及量值大小即可瞭解背景誤差協方差矩陣中的水平相關及自相關特性。

然而系集的 BEC 具有流場相關性，也就是不同時空的特性都不同，故也稱為動態 BEC。探討動態 BEC 特性時，若只在特定一點進行單點實驗將無法代表整體特性，因此本研究分別在模式第 14、25 和 32 層（約為 850、500、300 百帕高度）隨機挑選 65 點，使用 DR 和 SR 兩組動態 BEC 進行 2 個分析時的單觀測點實驗，

觀測變數包含 U (x 分量風場)、 T (溫度)、 Q (水氣)，換而言之，每一組BEC的單觀測點實驗總樣本數為1170個 (3層 \times 65單點 \times 3變數 \times 2分析時=1170)，期望這多個樣本的統計結果能夠代表系集動態BEC的整體特性 (圖三)。

三、實驗結果分析與BEC調校

(一) 分析增量

整體而言 DR 和 SR 分析增量的型態 (pattern) 相似，顯示 DR 方法可成功在變分系統中執行 (示意圖如圖四)；另外在量值部分，DR 的分析增量整體而言約比 SR 小 1.6 倍 (圖五)，代表 DR 的動態 BEC 離散度較 SR 小，可能的原因為 DR 的原始解析度為 15 公里，相較於 3 公里模式，對於小尺度擾動的解析較為平滑。因此在應用 DR 時，其系集離散度須再按比例放大。

(二) 水平影響尺度

在討論水平影響尺度時，常使用 e-folding length 的概念，也就是當分析增量衰減到原有的 $1/e$ 倍時，所在的位置距離單點中心的長度，然而流場相關的背景誤差協方差所決定的單點分析增量形狀不規則且量值有正有負，要界定其水平影響尺度具有挑戰性。

原構想在單點附近的 600 公里見方內，將分析增量大於 e-folding 值的格點累加，再乘上格點解析度的平方換算成總面積，再由總面積回推其相當半徑，然而此方法受到雜訊的影響，最後算出的影響半徑會相當大，例如：高層水氣的分析增量本就為小值，就算是很小的雜訊，其量值也很容易大於 e-folding 值而被累加，最後推算出的 300 百帕水氣影響半徑竟為數百公里，明顯不符合主觀期待。

經測試，本研究進一步使用簡單的距離平均擬合，將距單點中心同一距離的分析增量取平均，可得分析增量隨單點中心距離的分布，將其擬合得到一條類似於鐘形分布的平滑曲線，再由此曲線找出 e-folding

length，所得數值便較為合理 (圖六)，其中 U 風場為 218 公里、 T 為 53 公里、 Q 為 71 公里，三變數平均而言為 120 公里，後續也將以此作為 DR 系集背景誤差的水平影響尺度。

(三) 靜態 BEC

在 Hybrid 3DEnVAR 資料同化系統中，除了著重流場相關 BEC 特性外，也須檢視靜態 BEC 部分，在 WRFDA 中，靜態 BEC 的控制變數 (control variable) 選項有兩種，一為 cv5 (cv options = 5)，其控制變數為 ϕ 、 χ_u 、 T_u 、pseudo RH、 $P_{s,u}$ ，為多變數分析；另一為 cv7 (cv options = 7)，其控制變數為 u 、 v 、 T 、pseudo RH、 P_s ，為單變數分析 (下標 "u" 指的是 "unbalanced part")。根據前人研究 (林等人, 2014)，單變數分析的 cv7 能避免變數間轉換所導致的誤差，較適用於對流尺度，而 cv5 在解 Poisson 方程式時會遇到邊界條件的問題，較不適合使用在範圍小的網域，然而本研究的網域範圍較大，因此兩種靜態選項都將納入測試，而兩組靜態背景誤差協方差也分別經過調校。

四、預報影響

本研究的 Dual-resolution hybrid 3DEnVAR 系統結合 75%權重的動態 BEC 和 25%的靜態 BEC 進行分析，BEC 相關的調整因子如表二所示。為檢視 Dual-resolution hybrid 3DEnVAR 對於預報的影響，設計四組實驗，控制組的資料同化方法為 3DVAR，這也是現行作業的方法，實驗命名為 "op"；第一組實驗不進行資料同化，3 公里的預報場直接從 15 公里降尺度而來，實驗名稱為 "no DA"；第二組實驗為使用 DR hybrid 3DEnVAR 資料同化法，其中靜態誤差選項為 cv5，實驗名稱為 "DR_cv5"；第三組實驗同第二組，只是靜態誤差選項改為 cv7，實驗名稱為 "DR_cv7" (表三)。

(一) 綜觀校驗

綜觀大氣層場的得分卡 (score card) 顯示實驗組相較於控制組的 RMSE 改善程度，底色為改善的百分比，綠色區塊為改善；紅色區塊則反之，其中 RMSE 是與 NCEP 分析場做校驗；而實心三角形、空心三角形和圓點分別代表通過 95%、99% 和 99.9% 的統計顯著性，灰色區塊則沒有通過統計顯著性。

由圖七(a)所示，得分卡顯示 no DA 實驗組在各層場的表现幾乎都較差，代表沒有進行資料同化會使預報能力下降；而使用 hybrid 資料同化法的兩組實驗，不管是 DR_cv5 (圖七 b) 還是 DR_cv7 (圖七 c)，其 RMSE 在預報第 24 小時大約可改善 3~5%，在預報 48、72 小時雖然有好有壞，但是幅度相對而言較小，整體而言 dual-resolution hybrid 相較於 3DVAR 的預報結果好。而 DR_cv7 在預報第 24 小時較 DR_cv5 好，到了預報第 48、72 小時則稍差 (圖八)，其可能的原因仍需進一步檢視。

五、結論與未來展望

本研究應用 Dual-Resolution Hybrid 3DEnVAR 資料同化法於高解析度區域模式，以 single resolution 的系集預報為基準來調校 dual-resolution 的系集背景誤差協方差，結果相較於 3DVAR，可對於預報帶來正面影響，而兩種靜態背景誤差協方差選項的差別和影響仍需進一步的評估；未來將持續進行強降水或是颱風個案實驗以瞭解 Dual-Resolution Hybrid 3DEnVAR 法於高解析度的預報表現，並以此資料同化系統後續進行福衛七號掩星觀測同化影響研究。

參考文獻

Gao, J., & Xue, M., 2008: An Efficient Dual-Resolution Approach for Ensemble Data Assimilation and Tests with Simulated Doppler Radar Data, *Monthly Weather Review*, **136(3)**, 945-963. Retrieved May 20, 2021

林勤芳、林忠義、劉嘉騏、洪景山 (2014 年 9 月)。
對流尺度資料同化之研究：背景誤差斜方差研究。

表一、高解析度系集 BEC 實驗設計

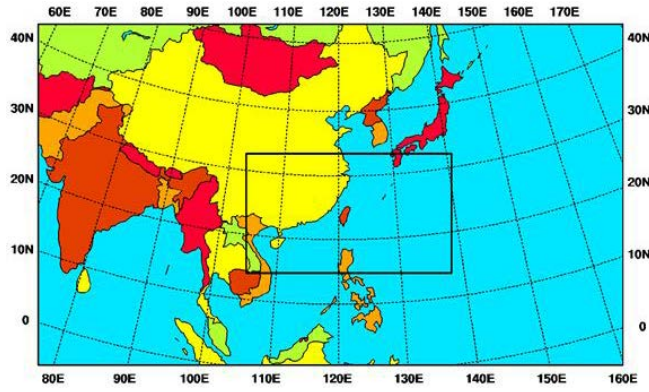
| 實驗名稱 | 內容描述 |
|-----------|--|
| DR | Dual-Resolution full ensemble analysis, with 15km ensemble at 3km resolution |
| SR | Single Resolution full ensemble analysis, with 3km resolution |

表二、Hybrid BEC 調校(in WRFDA)

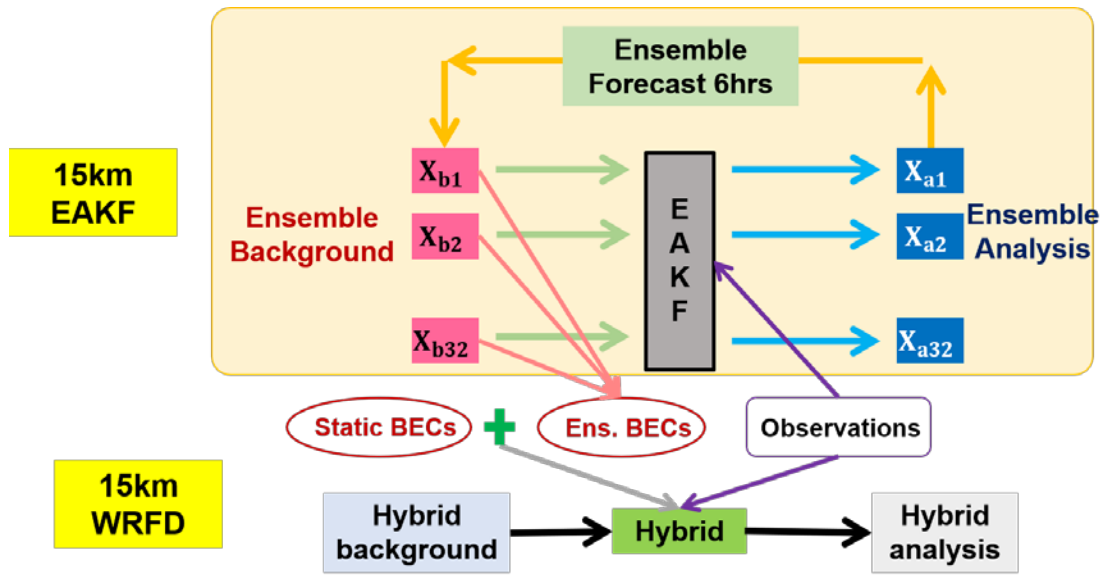
| # | Name | 3km hybrid | | | |
|---|---------------|------------------|---------------|--|--|
| | | Ensemble BEC | | Static BEC | |
| | | alpha_corr_scale | alpha_std_dev | VAR_SCALING | LEN_SCALING |
| 1 | DR_cv5 | 120 km | 1.6 | (cv5: psi, chi, T _u , RH, P _{su}) 0.30, 0.30, 0.80, 0.45, 1.0 | (cv5: psi, chi, T _u , RH, P _{su}) 0.2, 0.2, 0.7, 1.2, 1.0 |
| 2 | DR_cv7 | 120 km | 1.6 | (cv7: u, v, T, RH, Ps) 0.60, 0.60, 0.80, 0.45, 1.0 | (cv7: u, v, T, RH, Ps) 0.8, 0.8, 0.6, 1.2, 0.2, 1.0 |

表三、預報實驗設計

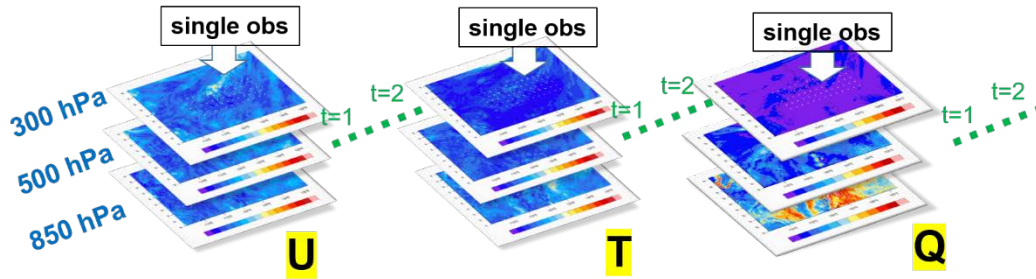
| Name | 3km | | |
|---------------|-------------------|------------------|-----------|
| | DA method | OBS assimilated | static be |
| op | 3DVAR | conventional obs | cv5 |
| no da | N/A | conventional obs | N/A |
| DR_cv5 | DR Hybrid 3DEnVAR | conventional obs | tuned cv5 |
| DR_cv7 | DR Hybrid 3DEnVAR | conventional obs | tuned cv7 |



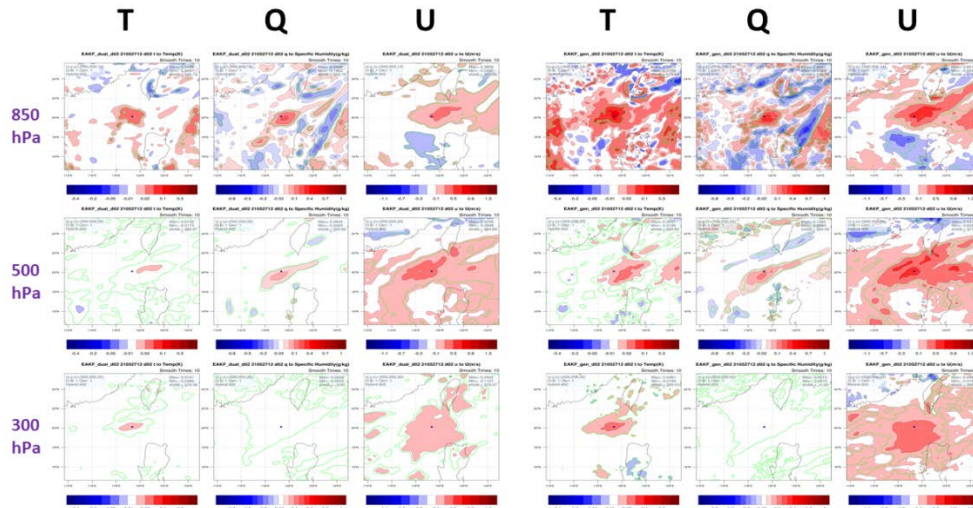
圖一、中央氣象局決定性區域預報模式網域，外層解析度為 15 公里，內層為 3 公里



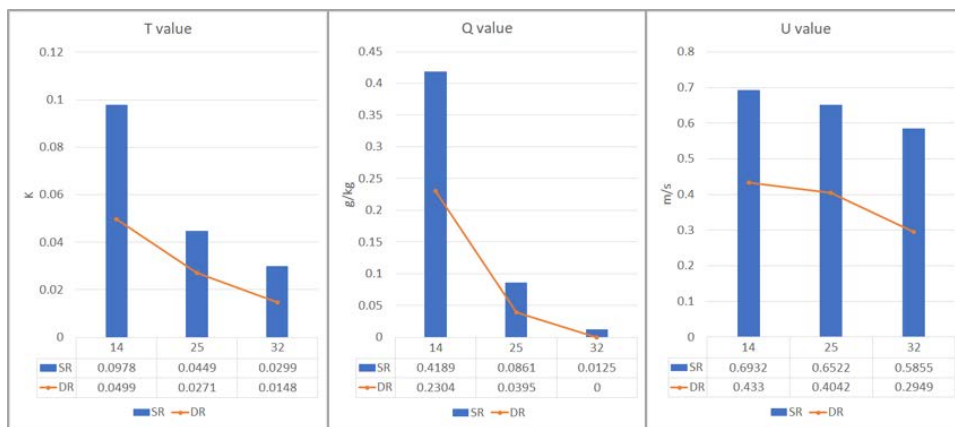
圖二、混合式三維系集變分資料同化系統示意圖



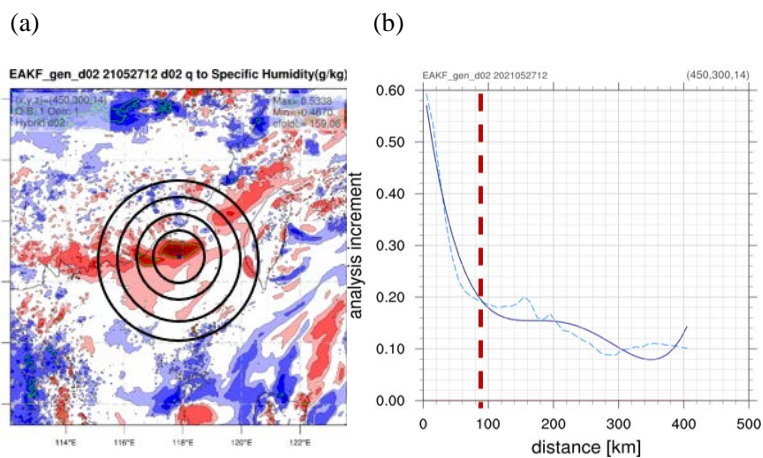
圖三、單點實驗樣本示意圖 (3 層 × 65 單點 × 3 變數 × 2 分析時)



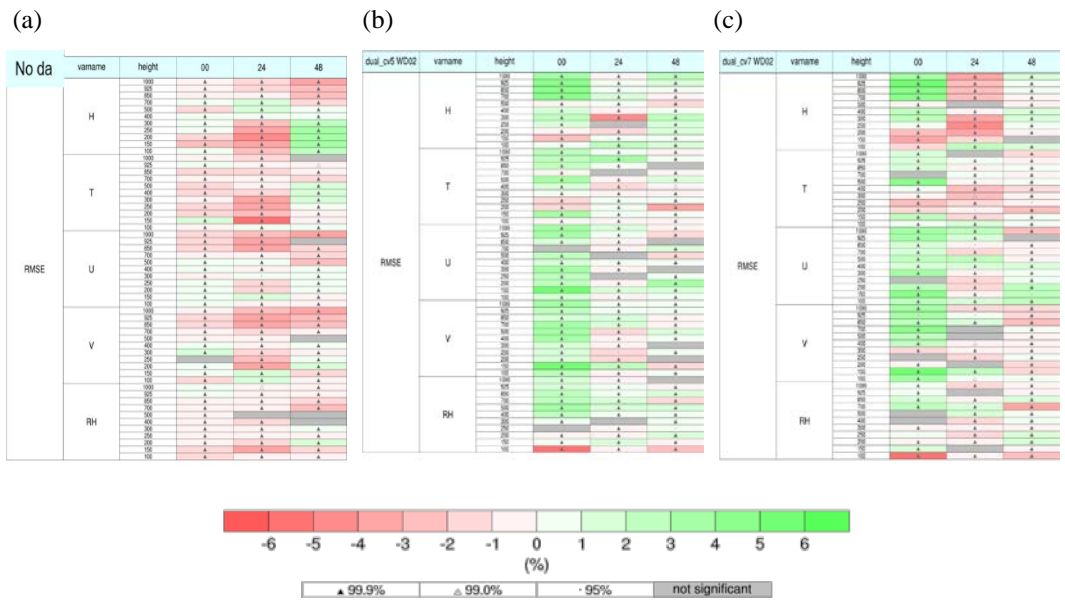
圖四、DR (圖左) 和 SR (圖右) 分析增量的型態，可見兩者的 pattern 相似，因單點樣本眾多，僅以臺灣附近的一點作為示意圖



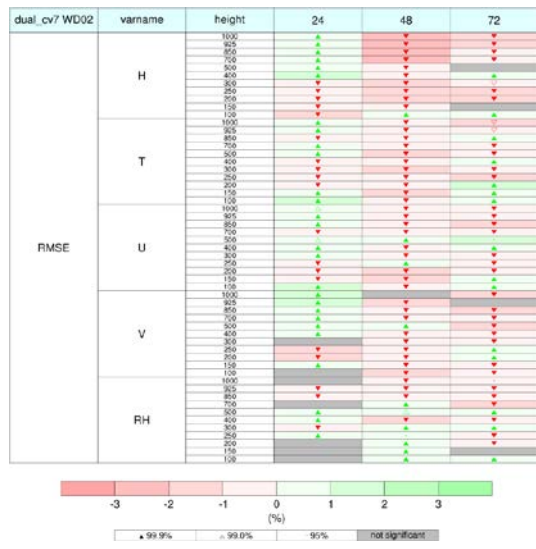
圖五、DR 和 SR 各層場的分析增量量值比較。從左到右依序為 T、Q、U，橫軸為模式第 14、25、32 層，縱軸為分析增量量值



圖六、(a) 流場相關背景誤差協方差所決定的單點分析增量，黑色同心圓為統計範圍的示意圖 (b) 淺藍線為分析增量的距離平均曲線，深藍線為擬合曲線，垂直紅色虛線為 e-folding length 所在位置



圖七、綜觀大氣層場得分卡 (a)no da 實驗 (b) DR_cv5 (c) DR_cv7 各層場 RMSE 相較於 op 的改善程度與統計顯著性



圖八、綜觀大氣層場得分卡，DR_cv7 各層場 RMSE 相較於 DR_cv5 的改善程度與統計顯著性