

氣象局全球模式再分析簡介

黃崇惟¹、黃文豪¹、林原堂¹、林宗翰¹、吳佳瑩²、陳建河²、連國淵¹、張庭槐²

氣象科技中心¹ 氣象資訊中心²
中央氣象局

摘要

本文介紹中央氣象局(以下稱本局)所做的再分析產品，使用本局作業版本的全球模式，解析度為T511(約25公里)垂直60層，以及資料同化系統為根據美國國家環境預報中心(NCEP)所研發之格點統計內插(GSI)混合三維系集變分而成的系集資料同化系統(hybrid 3D ensemble-variational data assimilation; hybrid 3DEnVar)，系集成員有36個並使用時間延遲法(time lag)增加一倍至72個成員，系集解析度則為T319(約40公里)。規劃產製的資料週期從1999年至2018年共20年，目前先產製2009至2018年，所產製的分析場將提供給系集模式預報系統作為初始場，進行事後(hindcast)預報及後續的許多應用使用。內文概述再分析過程中使用的資料及所遭遇到的種種問題，文末用ERA-interim資料比較，展示我們執行再分析期間所做的監測與校驗，包括垂直剖面溫度與風場及海平面氣壓場，差異較大的地方大部分在平流層，比較莫拉克颱風個案的中心氣壓強度相較之下較觀測及ERA5弱，位於颱風眼牆區的風速差異較大。因再分析使用最新的預報模式及資料同化技術，因模式解析度、動力與物理過程、資料同化技術相對於過去作業的進步，品質也相對提升，從模式的5天預報結果顯示預報技術得分明顯進步，例如過去作業模式500 hPa高度5天預報ACC於2010年2月為0.832，使用再分析初始場的預報結果ACC提升為0.908，2010年7月則由0.776提升為0.85，2015年2月由0.858提升為0.903，2015年7月由0.829提升為0.858。

關鍵字：再分析、中央氣象局全球數值預報系統、混成變分系集分析

一、前言

中央氣象局(以下稱本局)從2017年7月開始發展第1代的全球系集預報系統(Global ensemble prediction system, GEPSv1.0)，每日一趟於00z (UTC)有21個成員的45天系集預報(Tseng et al. 2019)，其提供了中長期的季內尺度天氣預報，應用中長期預報資料時，通常會做過去長期的再預報(Reforecast)來統計系統性誤差進行誤差校正，而此系集模式的初始場來自於本局的全球預報系統，目前的全球預報系統及資料同化系統於2016年3月開始上線，由於在此之前的系統較舊解析度也不同，為了使統計資料樣本取得一致性，本局於2019年開始規劃產製再分析(Reanalysis)資料以提供第2代的GEPSv2.0做事後預報的初始場。

再分析於氣候分析及氣候研究領域廣泛的使用，氣候的研究對於資料品質比較要求，需要長時間且穩定的資料，並且使用一致的方法去產製資料，避免人為因素造成資料誤差，以保障後面分析的氣候變遷研究結果的正確性。

日常的模式作業，需要趕在6小時的資料同化週期內將觀測資料同化成模式格點資料完成結果，這期間可能會遭遇到觀測資料延遲或從缺、機器維修或故障。另外過去長時間，可能會遇到模式之改版、模式解析度調整、及資料同化技術進步，等等因素會造成長時間的資料品質不佳與資料有不連續性跳躍，再分析也可以補足前述的資料缺失。

最早的再分析因為要進一步的氣候研究，需要長時間高品質且連續的資料，但是如果使用作業模式的分析場，則會經歷非常多次的模式改版，有時改版會調整解析度，或者修正物理或動力過程，這些變化皆會造成後面做氣候分析的複雜度及資料可能產生不連續性，1991年開始美國的環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)與大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)因此開始製作了再分析(NCEP/NCAR R1) (Kalnay, E. et al. 1996)產品，隨後歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)也跟著腳步於1993年二月開始製作了ERA15的產品(Gibson et al. 1997)。之後陸續有許多單位產製再分析產品，使得

氣候研究學者可以方便的使用資料，甚至直到近日。

後來NCEP/R1因為程式及流程瑣碎，發現了有部分程式及流程操作造成的人為錯誤，於1998年開始製作了第二代再分析產品Reanalysis II (Kanatmitsu et al. 2002)，其中也順便更換了較新的物理及觀測的土壤水含量，而Reanalysis II資料則從有衛星觀測的時代1979年開始產製。NCEP後來也有因為需求，而製作了更適合氣候研究使用的二十世紀再分析20C Reanalysis (Compo et al. 2006)，其涵蓋了整個二十世紀，由於早期的觀測資料沒那麼多，20C再分析所使用的觀測資料相對的就比較少，僅僅使用了海平面氣壓觀測來進行資料同化。除此之外，NCEP還有另一氣候再分析為CFSR(Saha et al. 2010)，使用的模式是氣候預報模式，也是本局的全球再分析的許多邊界資料的來源，而因為再分析是經過觀測資料同化的過程，額外的也提供了數值預報模式的初始場做預報，本局製作再分析也是為了準備之後的再預報(Reforecast)或事後預報(hindcast)，協助模式進行診斷及做誤差修正之用。

除了NCEP之外，國外其他主要幾家權威的數值預報作業中心，已有產製再分析的產品，並且隨著模式及技術進步，後續也有重做新版本的再分析產品，如：NASA的MERRA (Schubert et al. 2008)、MERRA-2 (Bosilovich et al. 2015)、歐洲中心的ERA40 (Uppala et al. 2005)、ERA-interim (Dee et al. 2011)及ERA5 (Hersbach et al. 2019)、日本氣象廳的JRA-25 (Onogi et al. 2007)、JRA-55 (Kobayashi et al. 2015)……等，因此本文章的再分析結束後，未來也可能會規畫用較新版本的模式及資料同化系統製作下一個版本的再分析。

二、 資料及準備

本局再分析使用的模式為穩定版本的本局全球預報系統(CWBGFS)版本，水平解析度與作業相同約為25公里(T511)，格點為 Reduced Gaussian Grid(陳等，2015)，垂直使用hybrid sigma-pressure 60層，模式頂為0.1 hPa，積分步長為90秒，動力使用Semi-implicit Eulerian之波譜模式，預報6小時循環做資料同化窗區，物理過程則於(表1.)，陸表面溫度及水含量沒有進入資料同化，而使用前一趟預報的陸表面模式結果，使模式自由預報自己平衡，所以分段跑需要注意小心陸面溫度的結果。資料同化系統使用NCEP GSI 3DEnVar (Kleist et al. 2009) 系集成員共72個EnKF，其中模式只跑36個成員，利用Time-Lag法預報12小時，將前12小時預報的36個成員加上前6小時預報的36個成員，使得系集成員從36個加倍成72個系集成員(趙等，2017)，成員解析度相對於決定性預報有降低為40公里解析度(T319)。

表1.本局全球預報系統使用之物理參數方法。

Model Physics	T511L60
Land momdel	Noah Land surface model
PBL	Hong and Pan (2011)
Deep/Shallow convection	Simplified Arakawa-Schubert (Han and Pan 2011)
Grid scale precipitaion	Zhao and Carr (1997)
Orographic gravity wave drag	Palmer (1986)
Convective gravity wave drag	Scinocca (2003)
Radiation	RRTMG (Mlawar and Clough 1997; Hou 2002)

1998-2016年觀測資料使用Bufr資料，Bufr資料從美國NCEP的CFSR網站下載，其中傳統觀測PrepBufr一開始是使用CFSR，然而跑了一段時間之後，發現資料同化跑出來的全球海平面氣壓會一直上升，且是緩慢上升不易察覺，最後經過比較後發現CFSR的PrepBufr資料裡面缺少了QC的標籤資訊，於是將資料替換成NCEP的GDAS(Global Data Assimilation System)中包含的PrepBufr資料，此資料也比較接近本局作業資料同化系統所使用的資料。衛星Bufr資料則繼續使用CFSR，而同化的衛星資料有amsua、airs、gpsro、iasi、atms共5種。於2016年4月後的資料則因為考慮到當時的全球模式T511解析度剛上線，跟現今的模式作業有重複，所以衛星資料除了原本的5種，另外新增了NOAA19、METOP-A、METO P-B之MHS微波濕度及Suomi NPP的CrIS，為本局2019年所上線的資料同化系統(林等，2019)，除了觀測資料外，因為本局的全球模式屬大氣模式，邊界有部分資料沒有做資料同化，另外準備了格點資料有OISST海溫與海冰，雪深及臭氧使用CFSR資料，而CFSR資料只到2014，之後則用CFSRv2。

而本局全球模式之資料同化系統，在00Z及12Z的同化會使用EC的層場資料稱EC Bogus，而本文章的再分析則依照本局資料同化系統的方法，也使用EC Bogus，而使用的層場則是EC再分析資料ERA-interim，因為有6小時資料，所以一天4趟皆有使用，層場則有850、700、500、200hPa風，850hPa溫度、比濕。

三、 初步分析比較

本文章的再分析結果與 ERA-interim 比較，而寫文章時因為再分析還在執行，(圖 1a.)為 2009-2017 年全球 80 度 S 到 80 度 N 的平均海平面氣壓，本局再分析(紅色線，其中 2013-2015 尚未執行)會特別注意全球平均海平面氣壓，因為前述的資料問題，發現全球海平面氣壓越來越高，後來主要是針對氣壓做監

測，圖上藍色線為 ERA-interim 的海平面氣壓，其中會有季節變化，而本局的紅色線大致上接近 ERA-interim，也有季節變化，而在每年的七月開始上升幅度會偏大，到大約 3 月又會降回來，而在 2015 年後上升幅度又有增加，這部分我們暫時當作為模式特性，我們也有看過現行作業也有這現象，我們除了監測海平面氣壓外，另外還有監測 500hpa 高度場 80°S-80°N 的平均偏差(Bias)及均方根誤差(RMS)(相對於 ERA-interim，圖 1b.)，可以概略的監測從底層到中層大氣間的質量，的圖中紅線為 RMS 大致維持在 3-6 之間偶有忽高忽低，而 2010 年 2 月 9 日到 13 日幾天則因為使用衛星資料則資料同化系統會有問題，最後僅使用 PrebBufr 及 GPSRO 資料，黑線 Bias 則是越接近零越好，也有稍微與海平面氣壓類似的季節變化高低。比較垂直各層風場(圖 1c.)的平均 RMS，中低層 850hPa 至 500hPa 非常低，主要與 ERA-interim 差異較大的為高層 30hPa 以上。

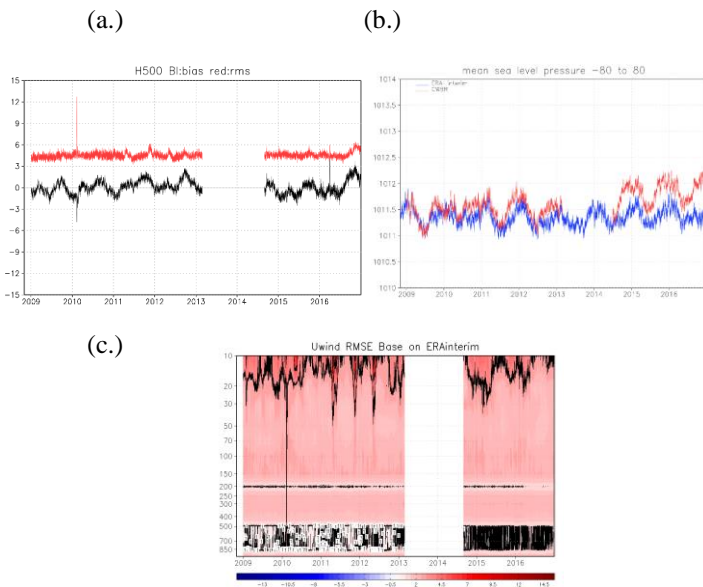


圖 1，(a.)80°S~80°N 平均海平面氣壓，藍線為 ERA-interim，紅線為 CWB 再分析 (b.)500hPa 高度場以 ERA-interim 為基礎之紅線為 RMS，黑線為 Bias (c.) 為以 ERA-interim 為基準之風場 RMS

垂直緯向剖面可以綜觀的檢查模式各層的偏差分布狀況，如下圖 2(a)、(c)為北半球夏季(JJA)，僅合成 2009-2011 及 2015-2016 共 5 年，大致上的分布與 ERA-interim 差不多，在 JJA 時本局全球模式的溫度在 30hPa 以上的高層相對於 ERA-interim 偏低，其中又以南極比較低，高層大氣的差異推論在於觀測資料比較少，而且衛星觀測資料也沒有到這麼高層，等於是模式自己跑出來的結果，另外 200 到 300hPa 之間也有稍微偏低的情況，最底層 850hPa 以下的溫度雖然也有不少地區差異大，但這可能跟模式本身的地形與地面模式溫度有關，而北半球冬季(DJF)(圖 2(b)、

(d))也有高層溫度偏低的情況，反過來為北極較低，200 到 300hPa 及 850hPa 以下也與 JJA 類似。

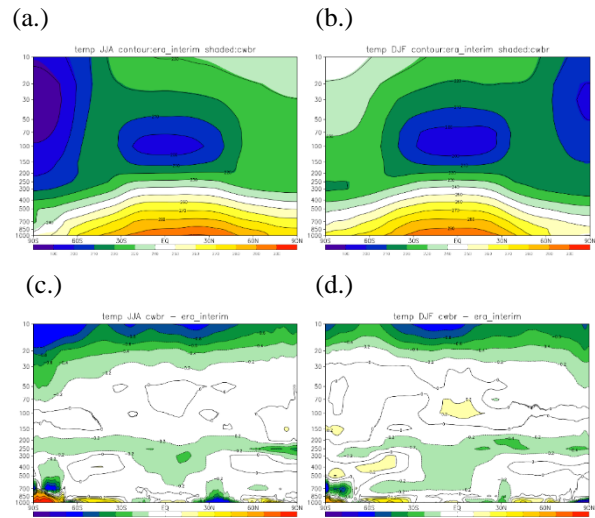


圖 2，溫度垂直剖面由南到北分布 2009-2011 加 2015-2016 共 5 年平均(a)夏季(JJA)平均，等值線為 ERA-interim 色階為本局再分析，(b) 冬季(DJF)溫度分布，(c)JJA 溫度垂直分布減去 ERA-interim 差值，(d)DJF 溫度差值垂直剖面由南到北分布。

(圖3.)為本局與ERA-interim東西向量風場的緯向垂直剖面圖與ERA-interim差異比較大的地方在熱帶南北緯20度內的100hPa以上高層，其中30hPa以上主要是吹東風，而本局再分析結果有西風向量，代表本局再分析的熱帶平流層的東風相對於ERA-interim偏弱，整體看來大部分集中在熱帶及高層，這部分其中一個原因是平流層觀測資料較少，也有可能是模式的對流重力波物理參數化或垂直解析度不夠所造成的。

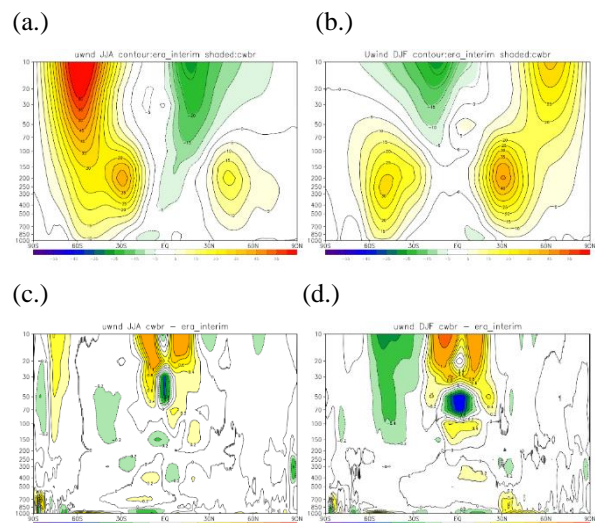


圖 3，U 風場垂直剖面由南到北分布(a) 2009-2011 加 2015-2016 共 5 年夏季(JJA)平均，等值線為 ERA-interim，色階為本局再分析，(b) 冬季(DJF)的 U 風場分布，(c)JJA 的 U 風場垂直分布減去 ERA-interim

差值，(d.)DJF 的 U 風場差值垂直剖面由南到北分布。

進一步比較各主要層場，500hPa高度(圖4.)的北半球夏季(JJA)，南亞高壓比ERA-interim強；北半球冬季(DJF)於北美地區一直延伸到西伯利亞區域的高度場偏低，南極區域高度場略為偏高，整體差異大致在正負4之間。

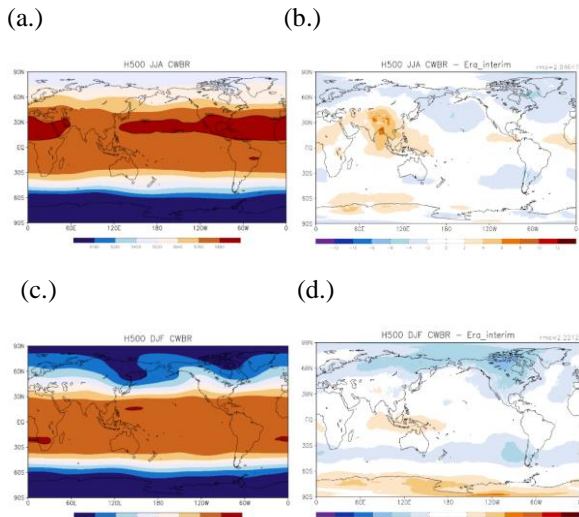


圖4. 本局再分析之平均500hPa高度，2009-2011加2015-2016共5年(a.)夏季(JJA)平均(b.)JJA減去ERA-interim之差異(c.)冬季(DJF)500hPa高度平均(d.)DJF減去ERA-interim差異。

在850hPa溫度的分析(圖5.)，北半球夏季(JJA)在熱帶東太平洋及大西洋有略為偏高，其他大部分區域為地形差異，南極部分差異基本上也是地形造成的；北半球冬季(DJF)差異較小，但是也在地形較高的區域會有部分差異，整體比較差異不大，主要地形部分的差異可能為模式的地形差異及內差結果造成的。

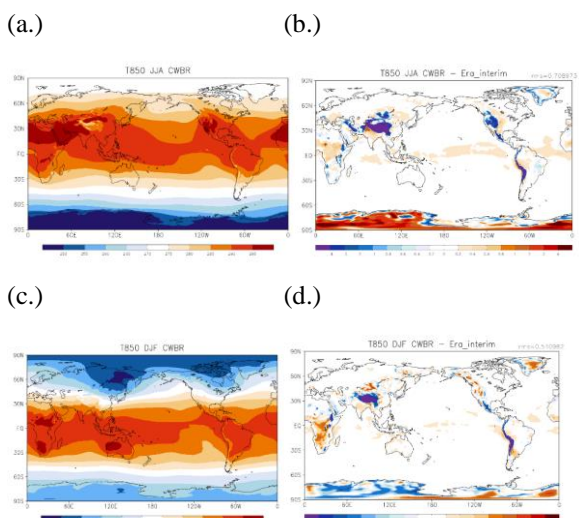


圖5. 本局再分析之平均850hPa溫度，2009-2011加2015-2016共5年(a.)夏季(JJA)平均(b.)JJA減去ERA-interim之差異(c.)冬季(DJF)850hPa溫度平均(c.)DJF減去ERA-interim差異。

015-2016共5年(a.) 夏季(JJA)平均(b.)JJA減去ERA-interim之差異(c.)冬季(DJF)850hPa溫度平均(c.)DJF減去ERA-interim差異。

水平海平面氣壓(圖 6.)北半球夏季明顯看出北太平洋的副熱帶高壓及北大氣洋副高，減去 ERA-interim 後顯示出南亞大陸到北非相對偏高，北半球冬季(圖 6c)明顯看出西伯利亞高壓及阿留申低壓的分布，而相對於 ERA-interim 在北半球陸地及阿拉斯加陸地有部分氣壓偏低。

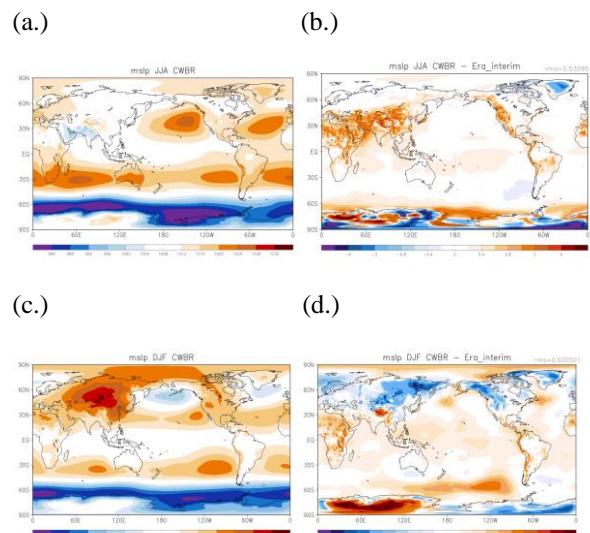


圖 6. 本局再分析之平均海平面氣壓，2009-2011 加 2015-2016 共 5 年(a.)夏季(JJA)平均(b.)JJA 海平面氣壓減去 ERA-interim 之差異(c.)冬季(DJF)平均海平面氣壓(d.)DJF 海平面氣壓減去 ERA-interim 差異。

針對颱風個案比較，這裡比較莫拉克 2009 海平面氣壓，(圖 7.)時間為 12Z06Aug2009，水平圖(圖 7a)顯示本局再分析(黑線)與 ERA-interim(紅線)兩者大致上接近，而相對於颱風中心橫切面(圖 7b)顯示颱風中心氣壓與 ERA-interim 接近，而 ERA5 則相對低很多，而當時的地面天氣圖中心為 955hPa，以 ERA5 較為接近。比較中心風速橫切面(圖 7c)，850hPa 風速本局較接近 ERA-interim，而 ERA5 的眼牆風速較大，而在進中心眼牆的西方還有另一個眼牆，雙眼牆的結構較為明顯，本局的再分析結果有部分接近 ERA-interim 猜測與本局的資料同化系統有使用 ECbogus 資料的緣故，本局也持續努力未來將把資料同化系統裡使用的 ECbugus 拿掉，比較沒有此束縛框架。

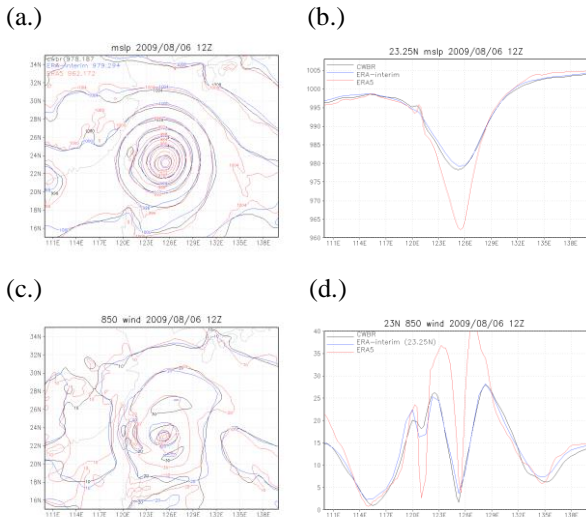


圖7. 圖內黑線為本局再分析、藍線為ERA-interim、紅線為ERA5在2009年8月6日12Z，(a.)海平面氣壓之水平分布 (b.)通過莫拉克中心之23.25°N海平面氣壓(c.)風速之水平分布(d.)23.25°N之風速。

四、 預報品質比較

本段以再分析結果產出的分析場，當作模式初始場做預報，以五天預報的結果分別比較夏季(JJA)及冬季(DJF)，以及分拆的兩段各自500hPa以距平相關(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)做校驗，如(圖8.)黑線為當時2010及2015的作業，當時作業模式為T319約40公里解析度，冬季使用2月整個月的00Z做預報計算平均，其中2010年的5天預報ACC為0.832，圖中藍線為T319模式使用再分析의 初始場做預報，ACC提升為0.890，相對於當時的作業，差異較大為目前資料同化系統技術的提升，2010年當時的資料同化系統還沒有使用系集成員EnKF，另外圖中紅線則使用目前本局最新作業的模式TCo639約15公里解析度，並將再分析의 初始場內插後做預報，ACC明顯的上升至0.908，本模式使用新的動力及解析度也提升，所以預報的結果也較好。夏季則使用7月，夏季天氣系統變化比較小，預報成長的空間則較不明顯，作業為0.776，使用TCo639模式則0.85。而2015年時間較接近，及資料同化技術與再分析差異較小。

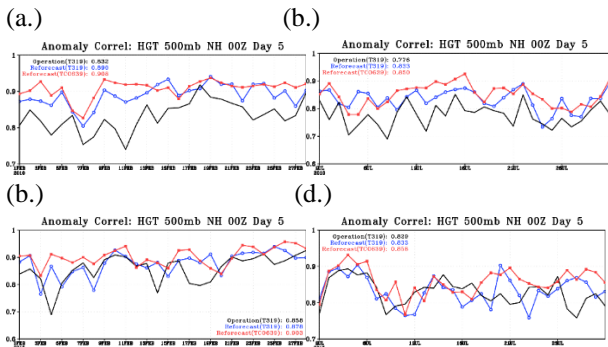


圖8.五日預報之500hPa的ACC，紅線為本局最新研發的TCo639解析度模式預報，藍線為T319模式，黑線為當時作業，(a.)2010年2月 (b.)2010年7月 (c.)2015年2月 (d.)2015年7月。

五、 建議與討論

製作再分析之前，事前的準備蠻多的，首先準備觀測資料，由於一次需要準備好幾年的觀測資料，而且通常來源都在其他國家，網路速度會慢些，下載資料的時間非常長，基本上要提前準備。而NCEP他們在製作CFSR時，事前準備了很多觀測資料，並且將觀測資料轉成bufr格式，未來如果有辦法的話，也可以額外準備一些觀測資料加入。其次模式解析度也需要評估，解析度太高，跑的速度會沒那麼快，而本局的全球再分析平均一個工作天約跑模式的三天左右，儲存空間也需要準備非常多，本局跑完後會在硬碟暫存模式3個月的量，最後存到磁帶上，而ENKF的成員因為容量較大，所以模式每個月的月中與月底會存一次到磁帶，以防有問題需要重跑時的還原點，以上部分的硬碟及計算資源非常感謝本局資訊中心提供非常多的協助。

執行再分析時也需要使用一致的方法去產生再分析資料，因為時間效率的考量，會把再分析分段平行跑，本局參考其他單位的再分析產品也有這樣分段的方法，而分段也建議不要切太細，怕會產生不連續性，如NCEP/CFSR為每5年切一段平行跑。本文章的再分析分兩條線平行跑，2009-2014及2015-2019年去執行，預估下一期會跑1999-2004及2005-2009，跑再分析之前，會提前一個月預留一段冷啟動的時間，如產製2009年資料，則會選擇從2008年12月1日開始跑，到2009年才開始使用。

再分析資料其實主要是在做觀測資料的資料同化，利用模式的物理及動力過程將觀測資料最佳化成全球格點資料，資料同化的工作蠻吃重的，部分衛星過去的也有退役時間等訊息，有點像在考古一樣，本局在執行時，偶而需要資料同化的團隊協助進行調整資料上的問題，也感謝NCEP資料同化的顧問指點。

六、 參考文獻

Bosilovich, M. G., and Coauthors, 2015: MERRA-2: Initial evaluation of the climate. *NASA Tech. Rep.* NASA/TM-2015-104606, Vol. 43, 136 pp.

Compo, G. P., J. S. Whitaker, and P. D. Sardeshmukh, 2006: Feasibility of a 100-year reanalysis using only surface pressure data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**,175–190.

Dee, D.P., with 35 co-authors., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of

- the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597 (DOI: 10.1002/qj.828)
- Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Hernandez, A. Nomura, and E. Serrano, 1997: ERA description. ECMWF Re-Analysis Project Report Series, Vol. 1, 89 pp.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2019: Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. ECMWF, doi:10.21957/vf291hehd7. <https://www.ecmwf.int/node/19027>.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. of the Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-472.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kleist, Daryl T., D. F. Parrish, J. C. Derber, R. Treardon, R. M. Errico, and R. Yang, 2009: Improving incremental balance in the GSI 3DVAR analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1046-1060.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. of Japan. Ser. II*, **93**, 5-48.
- Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Met. Soc. Jap.*, **85**(3), 369-432.
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 8, 1015-1057.
- Schubert, S. D. and Coauthors, 2008: Assimilating earth system observations at NASA: MERRA and beyond. *Third WCRP Int. Conf. on Reanalysis*, Tokyo, Japan, WCRP, 1-6.
- Tseng, C. H. J., J. H. Chen, T. H. Chang, C. W. Huang, Y. S. Lai, C. C. Wang, 2019: The 45 Days CWBGFS Ensemble Prediction System Based on Singular Vectors. *Workshop on Prediction, dynamics and applied research using the TIGGE and S2S ensemble*, ECMWF., Reading., UK.
- Uppala, S. M., and Coauthors, 2005: The ERA-40 Re-Analysis. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012.
- 林宗翰、陳登舜、黃子茂、鄧雯心、趙子瑩、陳建河，2019: CWBGFS 資料同化系統 2019 年 3 月更新簡介。天氣分析研討會論文彙編。A4-9。
- 陳建河、陳雯美和汪鳳如，2015: The recent improvement of high resolution model T511L60 of CWBGFS。天氣分析研討會論文彙編。
- 趙子瑩、陳登舜、鄧雯心、曾建翰、陳建河、沈彥志和黃清勇，2017: 使用時間延遲及偏移系集對中央氣象局全球資料同化系統的影響。天氣分析與預報研討會。A2-21。