

中央氣象局第二代動力統計氣候預報系統之動力降尺度預報

蕭志惠 胡志文

中央氣象局科技中心

摘要

本局第二代動力統計氣候預報系統主要包含 5 個子系統，分別為最佳化全球海溫預報系統(Optimum Global SST Forecast version 2, OPGSSTv2)、大氣模式前處理系統、2 步法大氣環流模式預報系統(GFS2Tv2)、統計降尺度預報系統(v2)與動力降尺度預報系統(RCMFv2)。本報告的目的在於說明第二代預報系統中動力降尺度子系統之作業規劃及發展現況。

第二代的動力降尺度預報系統，除具有較高的預報解析度外，預報模式亦將全面本土化，並與本局全球氣候預報系統有緊密的連接。動力降尺度預報所需的初始場及背景場將使用本局第二代 2 步法大氣環流模式預報系統中的 1 組積分，即初始場為美國國家環境預報中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)氣候資料同化系統(Climote Data Assimilation System, CDAS)分析場、海溫為 NCEP 第二代氣候預報系統(Climote Forecast System version 2, CFSv2) 全球預報海溫，動力降尺度預報使用的模式為水平解析度 15 公里、垂直 40 層 sigma 座標之本局第二代區域氣候模式(CWB/RSMv2)。預報變數主要為東亞地區降水距平及二米溫度距平，並配合統計計算將提供臺灣本島 21 個測站的降水及二米溫度之三分類(高於、低於及接近正常)機率預報。

一、前言

本局自民國 91 年起進行為期 8 年的「氣候變異與劇烈天氣監測預報系統發展」計畫，為因應短期氣候預報的需求計畫中發展了「動力統計氣候預報系統」，此系統主要設計是以短期氣候預報為主，主要預報時間為未來一季。經過 8 年的研發與建置「動力統計氣候預報系統」(下簡稱第一代系統)已於民國 99 年正式上線作業(胡等，2009)。第一代系統包含下列 5 大子系統：最佳化全球海溫預報系統(Optimum Global SST Forecast, OPTSST)、大氣模式前處理系統、2 步法大氣環流模式預報系統、統計降尺度預報系統與動力降尺度預報系統(圖 1)。

統，因此本局在民國 99 年起推動為期 6 年的「災害性天氣監測與預報作業建置計畫」(以下簡稱 P5 計畫)中，以增加對易造成臺灣地區災害系統的解析能力，及增加對這些系統的統計特性的能力預報為目標，建置完成本局第二代的動力統計氣候預報系統。

第二代動力統計氣候預報系統(下簡稱第二代系統)的主要架構與第一代系統相同，也有 5 個子系統，分別為：第二代最佳化全球海溫預報系統、大氣模式前處理系統、第二代 2 步法大氣環流模式預報系統、第二代統計降尺度預報系統與第二代動力降尺度預報系統(圖 2)。

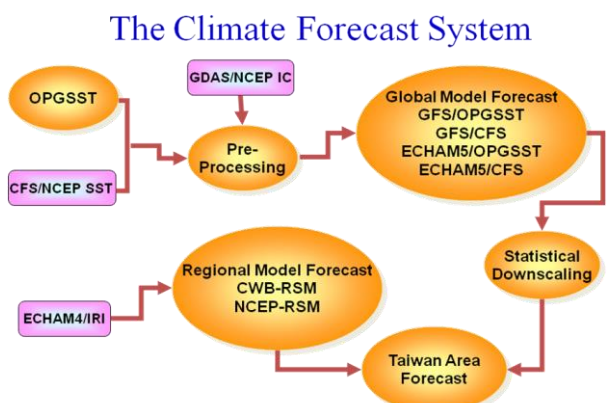


圖 1、第一代動力統計氣候預報系統流程圖。

基於大氣環流模式及統計方法的隨時間的進步，及本局第一代中所用的大氣環流模式(T42(2.8125°x2.8125°，垂直方向有 18 層)的解析度不足以解析颱風及季內震盪等易造成臺灣地區災害的系

2nd Generation Monthly and Seasonal Climate Forecast System

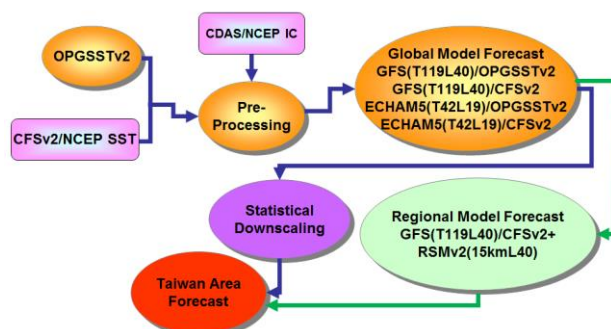


圖 2、第二代動力統計氣候預報系統流程圖。

子系統 1 的詳細介紹請參考童(2013)。

子系統 2 主要的功能將是將觀測場與海表面溫度預報場處理成大氣環流模式的初始場與下邊界條件，所用的方法為單純的水平線性內插。第二代系統所用的大氣觀測場為美國國家環境預報中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)第二

代氣候預報系統(Climate Forecast System version 2, CFSv2) 中氣候資料同化系統(Climate Data Assimilation System, CDAS)的分析場。所使用的海表面溫度預報則有 2 組，分別是本局發展的第二代最佳化全球海溫預報系統(Optimum Global SST Forecast version 2, OPGSSTv2)，及 NCEP CFSv2 的全球海溫預報。

子系統 3 的大氣候環流模式有 2 組，分別是本局發展的第二代全球大氣動力模式(GFSv2, T119L40)及與德國 Max Planck Institute 發展的 ECHAM(第五版)模式(T42L19)。第二代動力統計氣候預報系統中採用了兩組預報海溫(CWB OPGSSTv2, NCEP CFSv2)，及兩組大氣環流模式(CWB GFST119L40, MPI ECHAM5)組成 4 組的全球動力模式預報，分別為 GFST119L40/OPGSSTv2、GFST119L40/CFSv2、ECHAM5/OPGSSTv2 及 ECHAM5/CFSv2 之多模式系集預報(Multi-Modle Ensemble forecast, MME)。所使用的初始條件均為 CDAS/NCEP 的 1200UTC 分析場，每組預報的長度為 280 天。胡等(2014)對兩代系統中大氣候環流模式的事後預報的結果有初步的比較分析。

子系統 4 的第二代統計降尺度系統使用 SVD 方法並考慮預報因子隨時間的演變，詳細請見資拓宏宇國際股份有限公司 103 年度「改進統計降尺度並開發以測站為目標之統計動力預報方法」期中進度報告(32pp)。

子系統 5 於第一代預報系統中是以美國國際氣候研究院提供之全球大氣與海洋動力預報(IRI/ECHAM)，作為美國國家環境預報中心區域波譜模式(NCEP/RSM)及本局區域波譜模式(CWB/RSM)之初始場及背景場，進行東亞地區 60 公里水平解析度之動力降尺度季節預報(吳與蕭, 2011; 蕭等, 2011; 蕭等, 2014)。第二代的動力降尺度預報系統將有大幅的改變，預報模式的全面本土化及與本局全球氣候預報系統緊密的連接將是主要的發展方向。

本文第二節中將介紹第二代動力降尺度預報系統，第三節介紹第二代區域氣候模式，第四節將對全球預報與動力降尺度的預報結果做初步的比較，第五節介紹臺灣本島降水與二米溫度機率預報的雛形，第六節為結論。

二、 第二代動力降尺度預報子系統

在第二代的系統中，本局區域波譜模式(CWB/RSMv2)將是唯一的區域氣候模式。CWB/RSMv2 的水平解析度為 15 公里，垂直為 sigma 座標 40 層，預報範圍涵蓋 105.2°E-147.8°E 至 3.6°N-41.7°E。除了預報模式的解析度提升為第一代的 4 倍外，預報範圍在太平洋地區增加了 10 個經度、赤道及中緯度方向也各擴展了 5 個緯度。第二代的動力降尺度預報子系統與第一代之主要差異如表一所示。

由於動力降尺度運算所需的計算時間較長，考慮到預報結果的發布具有時效性，因此無法對所有 MME 的成員均進行降尺度。初步的規劃將使用 GFST119L40/CFSv2 每月 1 日至 15 日的預報結果，每個月進行 15 個成員的動力降尺度積分，每個成員預報積分的長度為 153 天。

第二代系統 GFS 模式的事後預報時間為 1982 到 2011 年共 30 年，每個系集預報有 30 個成員，三分類的區間改為 3, 3, 3。動力降尺度系統理應使用與 GFS 相同的設計，但為了縮短準備事後預報資料所需時間，短程目標將優先完成 2002 到 2011 年共計 10 年、每個月 15 個成員的 RSMv2 事後預報，以期動力降尺度預報能盡早進入作業化測試的階段。

在預報產品方面，首先將以事後預報的平均做為降尺預報的氣候場，進行積分第 2、3、4 個月東亞地區月平均降水及二米溫度的距平預報。臺灣本島除了距平預報外，同時將由逐年之事後預報中定義出的三分類(低於正常、接近正常、高於正常) 閾值，進行降水及二米溫度的三分類機率預報。預測系統亦將每月更新各月平均之預報命中率(Hit Rate)、RPSS (Rank Probability Skill Score)、BSS(Brier Skill Score) 等預報參考指標，供下游使用者參考。

表 1、動力降尺度預報系統的比較

	第一代	第二代
作業時程	2003年9月至2017年3月	2018年夏季預報作業測試
全球預報資料來源	IRI-ECHAM4.5(T42L18)+SSTs ~300km	CWB-2TGFs(T119L40)+NCEP-CFSv2 SST ~100 km
區域氣候預報模式	CWB-RSM (60kmL18) NCEP-RSM (60kmL18)	CWB-RSMv2 (15kmL40)
每個月預報樣本數	30	15
模式預報範圍	104-136°E ~ 8-37°N	105-148°E ~ 4-42°N
臺灣氣候預報	4分區	本島21個氣候站
預報變數	東亞地區之降水及二米溫度距平 臺灣本島降水及二米溫度距平類 別之機率預報	東亞地區之降水及二米溫度距平 臺灣本島降水及二米溫度距平類 別之機率預報

三、 第二代區域氣候模式(CWB/RSMv2)

Shiao and Chen(2017) 分析第一代動力降尺度預報作業系統中，2011 年 1 月至 2016 年 12 月期間 RSMs(CWB/RSM、NCEP/RSM) 臺灣本島四分區與全球模式(IRI/ECHAM)之降水與二米溫度機率預報命中率，發現(RSMs)動力降尺度於冬春季降水有優於全球模式(ECHAM)的預報能力，二米溫度則是在夏秋二季有較佳的預報能力。但 RSMs 的預報能力明顯的受限於 ECHAM，在訊號顯著的高於正常及低於正常分類，RSMs 與 ECHAM 機率預報值的相關係數在降水及二米溫度高達 0.83 及 0.62。

第二代動力降尺度系統所使用的區域氣候模式(CWB/RSMv2)及全球模式(GFST119L40/CFSv2)是一個全新的組合，二者之間的資料連結是否適合進行穩定的氣候積分，動力降尺度的效益如何，都是第二代系統發展期間最首要的考量。

新動力降尺度區域波譜模式(CWB/RSMv2)係由 CWB/RSM(Juang et al., 2003)於 P5 計畫期間全面更新而得。物理參數化包括增加新 GWDP 參數化方法(Kim and Arakawa, 1995)、增加雲水/雲冰的預報方程、更新大氣輻射參數化及植入新邊界層與 4 層土壤模式，背景資料方面包括建立高解析度地表植被資料、建立高解析度次網格地形資料，及整合程式集、提高運算速度、簡化積分流程等，並建立與 GFS 資料連結的界面。RSMv2 之物理參數化與 GFST119L40 有相當高的一致性，表 1 為全球與區域氣候模式物理參數化的比

較。垂直方向與 GFST119L40 是相同的 40 層 sigma 座標。

表 1、全球與區域氣候模式物理參數化的比較

	GFST119L40	RSMv2(15kmL40)
Radiation	Unified two-stream calculation with K-correlated method (Fu and Liou 1992,1993; Fu et al. 1997)	Unified two-stream calculation with K-correlated method (Fu and Liou 1992,1993; Fu et al. 1997)
Cumulus	Simplified Arakawa-Schubert (Pan and Wu 1994)	Simplified Arakawa-Schubert (Pan and Wu 1994)
Large scale precipitation	Predict cloud water scheme (Zhao and Carr 1997)	Sub-grid scale precipitation (qt _c , qt _r) (Sundqvist et al. 1989, Zhao and Carr 1997)
Vertical turbulence mixing	First-order closure of nonlocal scheme (Troyen and Mahrt 1986, Hong and Pan 1996) Turbulent diffusion-based approach Li (1994)	First-order closure of nonlocal scheme (Troyen and Mahrt 1986, Hong and Pan 1996) Turbulent diffusion-based approach Li (1994)
Land model	Noah land surface model - 4 layers (Ek et al. 2003)	Noah 4 layer land surface model (Ek et al. 2003)
Shallow convection	Shallow convection parameterization, vertical mixing of t and q (Hogen et al. 1990, Tiedtke, et al., 1988)	Shallow convection parameterization, vertical mixing of t and q (Hogen et al. 1990, Tiedtke, et al., 1988)
Gravity wave drag	Palmer et al. (1986)	Orographic gravity wave drag (kim and Arakawa 1995)

四、動力降尺度積分測試

首先由動力降尺度積分的個案測試，從 100 公里解析度全球預報中將東亞地區預報解析度提高至 15 公里，探討動力降尺度過程對積分結果造成的影響以及效益的分析。實驗期間為 2014 年至 2017 年，積分起始日期為 5 月 1 日，RSMv2 的預報時間為 6 月至 8 月 (JJA)，預報變數為降水及二米溫度。

圖 3 為 GFST119L40 與 RSMv2 的模式地形高度。RSMv2 的臺灣中央山脈高度達 1500 公尺以上，地勢及高度的分布均較 GFS 接近真實。

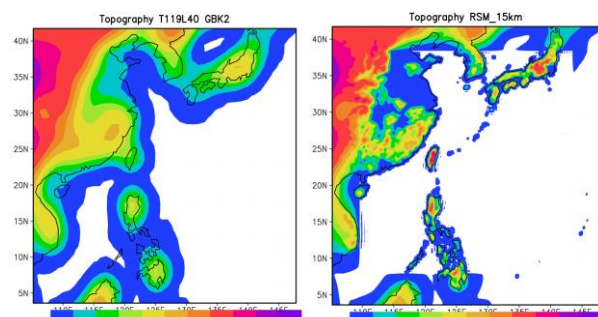


圖 3、GFST119L40 與 RSMv2(15kmL40)模式地形高度。

圖 4 為以 5 月 1 日為初始條件，2014 年至 2017 年 6-8 月 (JJA) 季節平均日降水(mm/day)之年際變化。比較動力降尺度前(GFST119L40)後(RSMv2)之降水分布及強度可發現，RSMv2 於西北太平洋上有較多的降水；除 2015 年外，主要降水帶均由日本南方的太平洋，經過臺灣的南方，向西南延伸至南海。GFS 的主要降水則是集中在臺灣附近，西北太平洋上的降水明顯的較 RSM 偏少。2015 年的預報降水同樣顯示降尺度後西北太平洋上的降水有增強的情形，南海的降水同樣是強度較 GFS 強且位置較偏南。

RSMv2 在陸地比 GFS 有較高的地勢，因此明顯反應出較低的二米溫度(圖 5)。GFS 在 2014 年至 2017 年期間並沒有太大的年際變化，RSMv2 則是可以看出 2016 年是華南丘陵地區相對較冷、2015 年是長江流域相對較暖的年份。

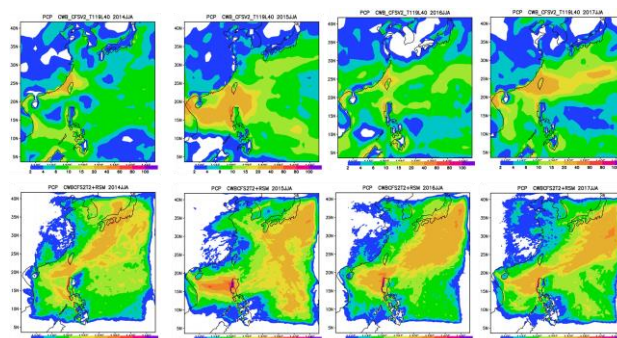


圖 4、以 5 月 1 日為初始條件，2014 年至 2017 年 6-8 月 (JJA) 平均日降水(mm/day)季節預報。上圖為 GFS T119L40、下圖為 RSMv2。

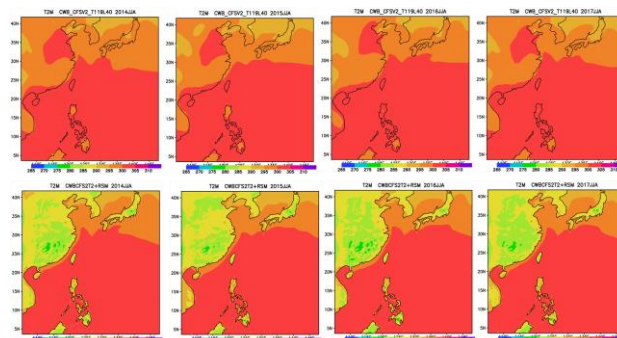


圖 5、同圖 4，但為二米溫度。

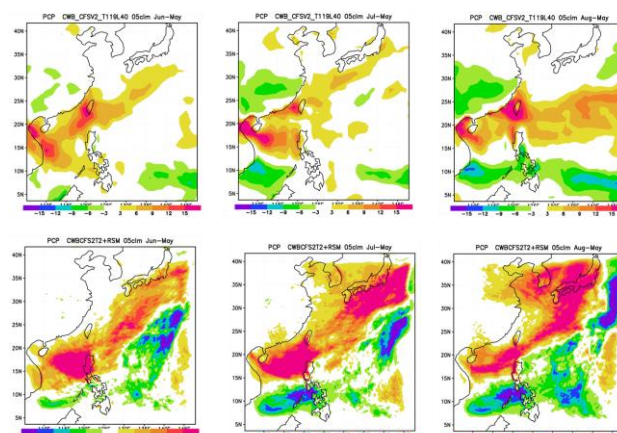


圖 6、以 5 月 1 日為初始條件，2014 年至 2017 年平均之 6-8 月平均日降水(mm/day)季節變化預報。上圖為 GFST119L40、下圖為 RSMv2。

為去除 GFS 及 RSMv2 之模式系統性誤差，在此取 2014 年至 2017 年平均之 5-8 月預報，再分別將 6-8 月的預報結果減去初始月份，分析 GFS 及 RSMv2 對於季節變化的預報情形。圖 6 顯示 GFS 與 RSMv2 的主要降水帶在 6 至 8 月都有增強的趨勢，熱帶地區的降水則是均有減少的趨勢；RSMv2 的降尺度積分對於降水趨勢有明顯的加強作用。GFS 顯示東亞大陸南部的降水持續減少，RSMv2 顯示日本、韓國附近的降水明顯增加中，二個模式的預報有較大的差異。

圖 7 為二米溫度 6 至 8 月的季節變化趨勢，整體而言，RSMv2 與 GFS 對洋面上二米溫度的變化趨勢有相當高的一致性。GFS 之東亞大陸二米溫度在 7 月達最高，RSMv2 則是持續性的在長江以北為增溫、華南

丘陵及臺灣南部地區為降溫的趨勢。

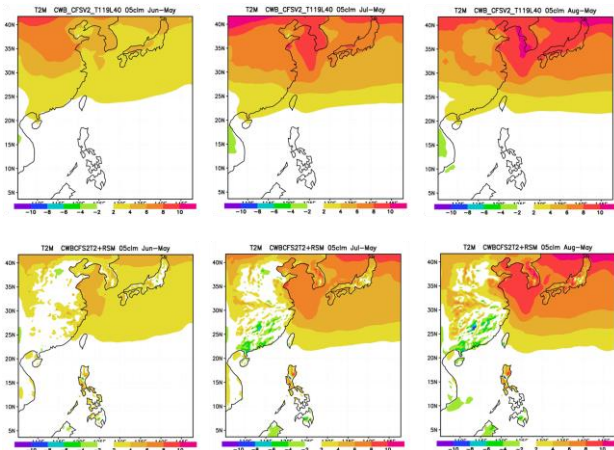


圖 7、同圖 6，但為二米溫度。

五、臺灣本島機率預報的雛形

在本報告中，由於尚未進行事後預報的積分，為展現第二代動力降尺度預報系統中臺灣本島機率預報作業的雛形，在此以假設的降尺度氣候場及分類閾值來說明。

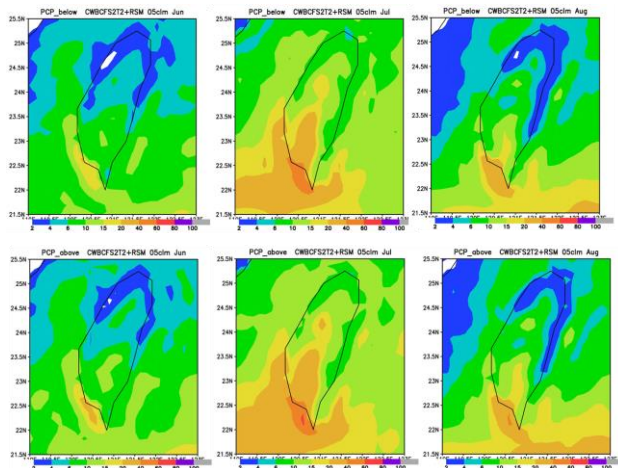


圖 8、預報降水之分類閾值，上圖為低於正常，下圖為高於正常。

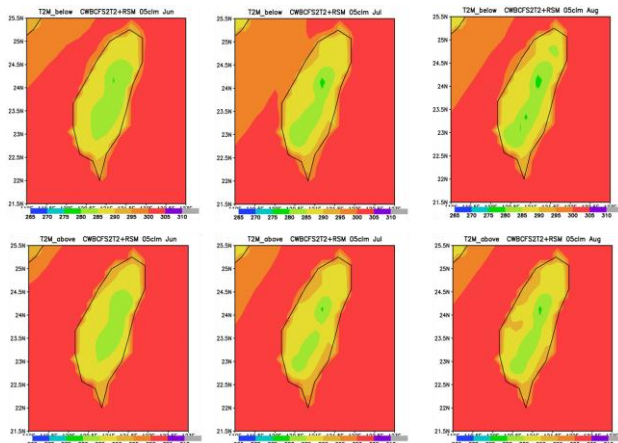


圖 9、同圖 8，但為二米溫度。

假設 2014 年至 2016 年 RSMv2 降尺度積分的平均

值相當於降尺度氣候場，並定義每個格點降水氣候值的正負 5% 及每個格點二米溫度氣候值的正負 0.2% (約 0.6°C) 分別為降水及二米溫度之高於正常、低於正常的閾值。以預報初始月份為 5 月之預報為例，圖 8 及圖 9 為 J-J-A 各月降水及二米溫度的低於正常與高於正常的閾值分布。

第二代的動力降尺度預報系統預計進行 15 個成員的機率預報。在本次報告中 2017 年的預報只有 1 個成員，因此以 1 天的時間差將預報結果分散為 12 筆假設的預報，以便進行機率的預報。機率預報的原始資料為 15 公里解析度，測站位置的預報以附近 4 個格點資料之平均為代表，將可提供臺灣本島 21 個測站的機率預報。

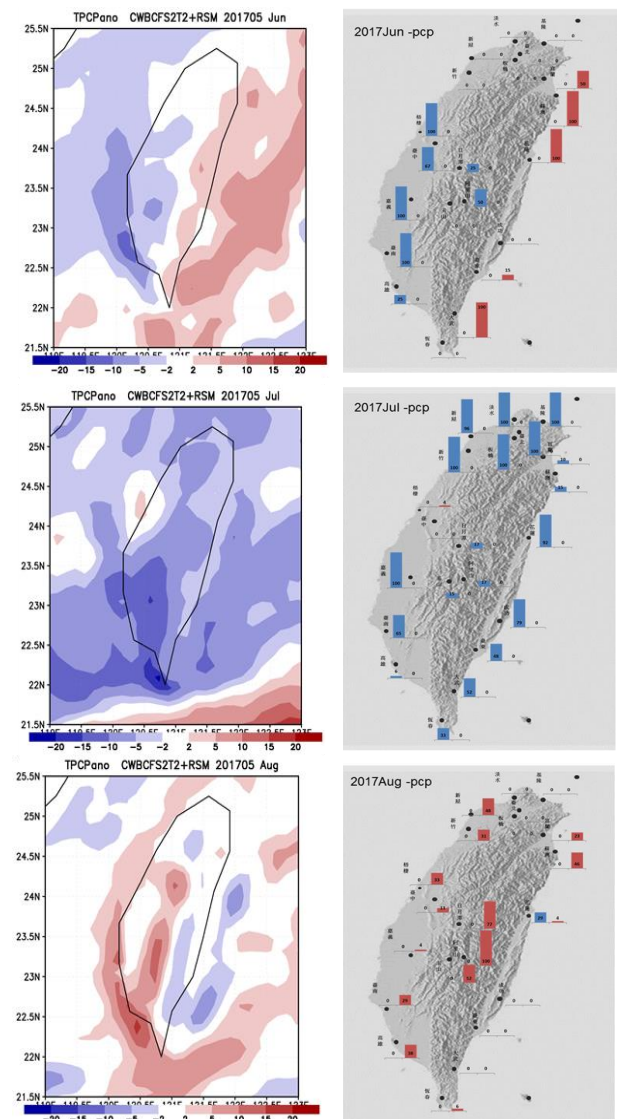


圖 10、2017 年 5 月動力降尺度預報之降水距平(左圖)及機率預報(右圖)。其中藍色為低於正常、紅色為高於正常，右圖長條圖下方的數字為機率值(%)。

圖 10 左圖為 2017 年 6 月至 8 月之逐月降水距平預報。2017 年 6 月，臺灣本島呈現東濕西乾的距平分布。7 月，除中部沿海地區為接近氣候平均外，全島均呈現負降水距平，尤其是臺灣的西南部地區。到了

8 月，降水距平明顯減弱，此時西南沿海及中南部山區轉為正降水距平。臺灣地區由 6 月微弱的東濕西乾，經過 7 月的全島偏乾，於 8 月轉為微弱東乾西濕的距平分布。圖 10 右圖為 2017 年 6 月至 8 月臺灣 21 個測站降水之逐月機率預報。預報顯示，6 月在臺灣東北地區的花蓮、蘇澳、宜蘭及東南地區的大武有顯著的機率出現偏濕，西半部的梧棲、臺中、嘉義、臺南及山區的阿里山則是偏乾的機率較為顯著。7 月，臺灣北部、東部及嘉南地區呈現偏乾的機率相當顯著，梧棲、臺中、中部山區、宜蘭、蘇澳、高雄及恆春等地則是以接近正常的機率為主。到了 8 月，中部山區在偏濕有較顯著機率，除新屋及蘇澳接近正常及偏濕的機率相當外，其他各站都明顯地呈現接近正常。當距平值為正同時在偏濕類別有較高的機率時，表示降水高於正常的訊號相當顯著；反之亦然。

圖 10 為 2017 年 6 月至 8 月之逐月二米溫度距平及機率預報。預報顯示：6 月，臺灣西北部至中部山區有顯著的訊號在偏暖的類別；7 月，除了阿里山、玉山、臺南等站出現偏冷的訊號外，臺灣本島以偏暖的訊號為主，尤其是北部地區。到了 8 月，臺灣西南部轉為偏冷的訊號，西北部各站則是維持偏暖。

整季來看，臺灣全島並沒有顯著的降水變化趨勢，臺灣北部則是出現將持續性偏暖的訊號。

六、 結論

本文的旨在敘述本局第二代動力統計氣候預報系統中，動力降尺度預報子系統的未來作業規劃及發展現況。

第二代動力降尺度預報系統，將以 CWB/RSMv2 為主要的區域氣候模式，水平解度為 15 公里、垂直為 40 層的 sigma 座標。動力降尺度所需的初始場及背景場資料，將使用本局第二代 2 步法大氣環流模式預報系統(GFST119L40/CFSv2)之全球季節預報結果。每月進行一次 15 個成員的東亞地區動力降尺度預報，預報時間長度為未來一季，主要預報變數為東亞地區的降水距平及二米溫度距平，和臺灣本島的降水及二米溫度三分類(低於正常、接近正常及高於正常)機率預報。

距平預報及定義三分類之閾值均須要有一組 CWB/RSMv2 的降尺度氣候場。降尺度氣候場的建立將來自 30 年的事後預報積分，需要使用大量的電腦資源及耗費相當多的時間。為了縮短準備事後預報資料所需時間，第一階段將優先完成 2002 到 2011 年共計 10 年的事後預報，以期動力降尺度預報能盡早進入作業化測試的階段。而後再陸續完成 1982 到 2001 年的事後預報，建置完整的降尺度氣候場。三分類的閾值，以 33%、34%、33%的區間將從 30 年事後預報的排序中定義出。

在本報告中，首先以 2014 年至 2017 年的 5 至 8 月積分進行動力降尺度的測試，比較 GFST119L40 與 RSMv2 對於夏季(JJA)預報的差異。由於現階段尚未進行 RSMv2 事後預報的積分，在此只能假設性的以 2014 年至 2016 年的平均做為降尺度氣候場，並以偏差值(5%及 0.6°C)來定義降水及二米溫度的三分類閾值。主要目的是要呈現出第二代動力降尺度預報系統中，臺灣本島降水及二米溫度之距平及機率預報的雛形。

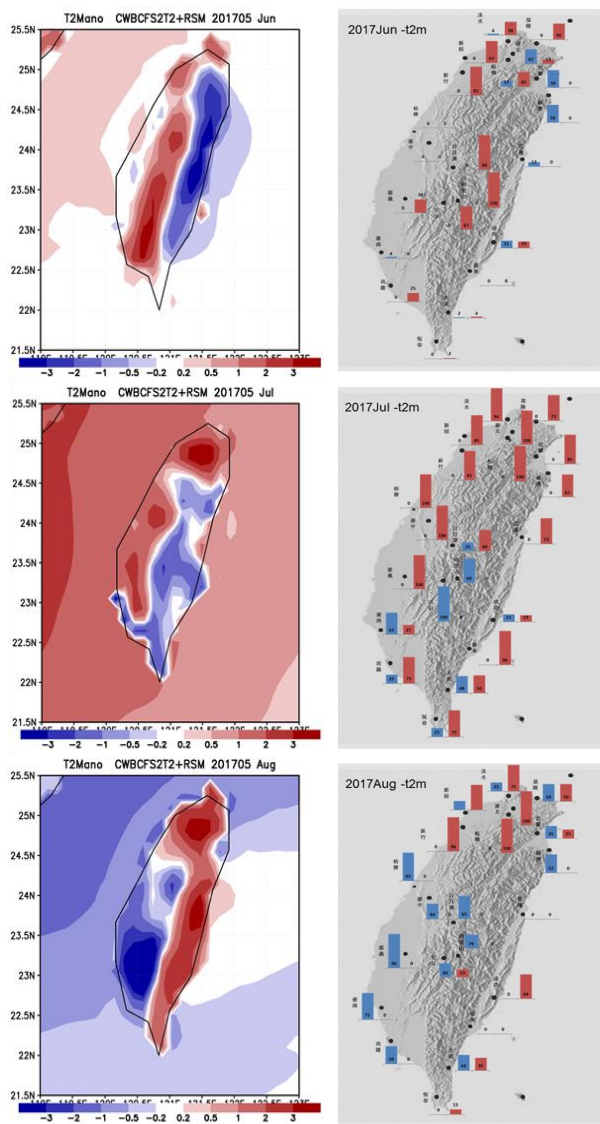


圖 11、同圖 10，但為二米溫度。

參考文獻：

- 吳慧玲，蕭志惠，2011：中央氣象局動力區域氣候預報系統之現況與產品。*建國百年天氣分析預報與地震測報研討會論文彙編*，322-327。9月20-22日，台北。
- 胡志文、童雅卿、任俊儒、鄭凱傑、黃文豪、施宇晴，2009：中央氣象局動力統計氣候預報系統之預報校驗。*98年天氣分析與預報研討會論文彙編*，407-409。
- 胡志文、黃文豪、鄭凱傑、施宇晴、李清滕，2014：中央氣象局第二代動力統計氣候預報系統簡介。*103年天氣分析與預報研討會論文彙編*，A3-1。
- 童雅卿，2013：第二代全球海溫預報系統之發展與測試。*102年天氣分析與預報研討會論文彙編*，A3-76-A3-81。
- 蕭志惠、林原堂、陳世欽，2014：中央氣象局動力區域氣候預報系統之改進方案。*103年天氣分析與預報研討會論文彙編*，A3-22。

- 蕭志惠, 吳慧玲, 林欣怡, 2011: 動力區域氣候預報系統之短期氣候預報與校驗。2011年海峽兩岸災害性天氣分析與預報研討會論文彙編, 189-194。11月28-29日, 台北。
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, P. Grunmann, E. Rogers, G. Gayno, and V. Koren, 2003: Implementation of the upgraded Noah land-surface model in the NCEP operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, **108**.8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Fu, Q., and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.
- Fu, Q., and K. N. Liou, 1993: Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2008-2025.
- Fu, Q., K. N. Liou, M. C. Cribb, T. P. Charlock, and A. Grossman, 1997: Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2799-2812.
- Hogen et al., 1990:
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- Juang, H.-M., C.-H. Shiao and M.-D. Cheng, 2003: The Taiwan Central Weather Bureau Regional Spectral Model for Seasonal Prediction: Multi-Parallel Implementation, and Preliminary Result. *Mon. Wea. Rev. (SCI)*, **131**, 1832-1847.
- Kim, Y.-J., and A. Arakawa, 1995: Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1875-1902.
- Li, J.-L., 1994: On shallow cumulus parameterization scheme for large-scale planetary boundary layers, Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, pp203.
- Palmer, T. N., G. Shutts, and R. Swinbank, 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1001-1039.
- Pan, and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC Medium-Range Forecast model. NMC Office Note 409, 40pp.
- Shiao C.-H. and S.-C. Chen, 2017: Preliminary Validation of the Dynamically Downscaled Regional Climate Forecast System of CWB. (投稿準備中)
- Sundqvist, H., E. Berge, and J. E. Kristjánsson, 1989: Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1641-1657.
- Tiedtke et al., 1988:
- Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensitivity to surface evaporation. *Bound. Layer Meteor.*, **37**, 129-148.
- Zhao, Q., and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1931-1953.