中央氣象局數值天氣預報作業系統(二) 預報模式概況

葉天降 馮欽賜 柳再明 陳得松 黃康寧 陳雯美 汪鳳如 洪景山 中央氣象局

摘 要

中央氣象局於1976年開始引進電腦設備,發展氣象作業自動化系統, 至今已35年,葉等(2012)曾就其發展過程做說明。本文概要的整理近年間, 中央氣象局數值天氣預報作業全球、區域、與颱風路徑預報模式之改進情形 與現況,以期對其有進一步認識。由中央氣象局之發展經驗顯示,近年數值 預報準確度之提升主要是由於模式解析度之提高、模式動力及物理之改善、 引進三維變分分析方法並於分析中加入如衛星觀測輻射場等非傳統觀測資料 之應用,另外在颱風渦旋處理及簡單系集預報之應用也都改進了颱風路徑預 報與降水量預報。

關鍵詞:數值天氣預報、颱風路徑預報、模式、客觀分析、三維變分

一、前言

中央氣象局(CWB)數值天氣預報 (NWP)作業系統發展至今已近35年,葉等 (2011)曾說明其發展過程大致可分為5階 段,1984年以前系統係在迷你型電腦上執 行,由1976年起包括即時資料接收、解 譯、氣象觀測資料查詢、填繪圖、東亞相 當正壓模式48小時預測、及氣象觀測資料 錄存等都逐步在中央氣象局作業應用。

1984年中央氣象局業務電腦化計畫開 始全面推動,在1984年至1989年間發展數 值天氣預報第一代系統,包括於1987年6 月建置CYBER 205超級電腦,並逐步發 展客觀分析、全球預報、區域預報、颱風 路徑預報等系統,完成之第一代數值天氣 預報系統於1990年正式作業。民國1990年 至1994年,中央氣象局發展數值天氣預報 第二代系統,包括1992年6月建置第二代 超級電腦系統CRAY YMP8I,並發展最佳 內差客觀分析取代逐次修正分析、發展全 球波譜預報模式取代全球定差格點預報模 式、發展新的多層巢狀(nest)網格組區域 預報模式與颱風路徑預報等系統,完成之 第二代數值天氣預報系統於1995年正式作 業。第三代數值天氣預報系統發展計畫是 於1995年至2001年執行,包括於1999年 12月更新超級電腦為含15個中央處理器之 FUJITU VPP5000系統,發展三維變分分 析取代最佳內差分析、改進全球波譜預報 模式、發展新的多層網格非靜力平衡區域 預報模式等系統,完成之第三代數值天氣 預報系統於2002年正式作業。

2002年後中央氣象局推動氣候變異與 劇烈天氣監測預報系統發展計畫,於2002 年至2009年發展第四代數值天氣預報系 統,其於2006年10月更新超級電腦為含 2,496個中央處理器之IBM P5-575 Cluster 1600系統,並以第三代數值天氣預報系 統為基礎,持續進行系統之改進,並引 進WRF (Weather Research and Forecast) 區域數值預報模式,目前中央氣象局正推 動「災害性天氣監測與預報作業建置計 畫」,發展第五代數值天氣預報系統,而 在第五代數值天氣預報系統未完成前,第 四代建置之系統仍為日常作業所用。本文 謹就中央氣象局全球預報系統、區域預報 系統、及颱風路徑預報系統相關之進展與 現況做進一步之說明。

二、全球預報系統

配合數值天氣系統的發展歷程與電 腦運算效率的提升,中央氣象局全球預 報系統(Global Forecast System, GFS)自 1988年完成並逐步正式上線作業至今, 無論在分析方法、模式架構、物理參數化 及解析度的提升都歷經許多變動而逐步進 展,表1與表2簡列系統發展過程的主要遞 變。在CWB第一代全球預報系統時期, 全球預報模式乃植基於當時美國加州大學 洛杉磯分校(UCLA)所發展之定差網格型 態大氣環流模式,水平解析度為經、緯 各2.5度,垂直分布有9層,在客觀分析上 採用Barnes (1964)方法,詳見Liou et al. (1989)。1994年更替為第二代全球預報系 統上線作業,系統各個部分已作重新的設 計,全球預報模式之動力架構除改為世界 主要氣象作業中心所採用的典型三角截斷 式波譜型態,並引進不同的物理參數化 方案(Liou et al. 1997), 主要特徵如表1所 示,不過近年來又陸續更新了當初的物理 參數化方案。

近十幾年間,大體而言中央氣象局全

球預報模式都是在此版本上作為發展的延 續,不過模式之水平解析度隨著電腦運算 能量的更迭,已從剛建置時的T79(約相 當於1.5度)提升為2011年的T319(約相當 於0.375度),垂直分布則由18層增加至40 層。另外,在電腦發展的新趨勢下,自 1998年起中央氣象局引進的第三、四代新 超級電腦均屬分散式平行化架構,為此全 球預報模式的程式均被大幅調整以加入分 散式平行運算的功能,與電腦運算的新趨 勢接軌,這項改變使全球預報模式在此類 電腦上具備極佳的平行化執行效率(馮與 李 2000)。其次,第二代全球預報系統 在客觀分析方法較第一代全球預報系統時 有重大的變革,它採用最佳統計內插法, 這方法具有建立統計上最小誤差分析場的 特性,此外資料同化循環區間也在稍後由 12小時改為6小時,以進一步改善分析場 的品質。

國外氣象預報作業,近二十年來得益 於衛星資料的大量運用,取得相當大幅度 的提升,但中央氣象局卻在客觀環境的阻 滯,長期難以即時取得這些大量、非傳統 觀測資料的條件下,導致全球預報系統的 發展一直存在不易突破的瓶頸。長期以來 GTS (Global Telecom- munication System) 是中央氣象局獲得全球即時觀測資料的最 主要源頭,比較其他國外作業中心能運用 的資料量與種類,CWB GTS的資料內容 除在傳統資料的提供上與國外作業中心差 距不大之外,但在飛機風場報之數量則 是相當不足,而在衛星輻射通量資料上 則更是付諸闕如。表3為以2002年11月20 日12Z及2011年8月12Z為例,列示CWB GTS資料量與NCEP (National Center for Environmental Prediction,美國國家環 境預測中心)、ECMWF (European Center 表1、中央氣象局全球預報系統(GFS)發展過程紀要。

全球預報系統(GFS)的發展			
1988年	第一代系統正式作業		
	●定差格點模式,水平格距為2.5度垂直9層		
	●Barnes客觀分析		
1994年	第二代系統正式作業		
	●波譜模式T79,水平格距約1.5度垂直18層		
	●最佳內差客觀分析		
1997年	分析週期由12小時提高為6小時		
1998年	水平解析度提高為T119格距約1度		
1999年	建置第三代平行處理式超級電腦		
	●模式具平行運算功能		
2002年	垂直解析度提高為30層		
2003年	引進NCEP SSI三維變分分析方法,並加入颱風中心relocation方案		
2004年	水平解析度提高為T179格距約0.66度		
2005年	更新土壤模式		
2006年	建置第四代平行處理式超級電腦		
2007年	水平解析度提高為T239 格距約0.5度		
	●增加雲水預報變數		
	●採用雲微物理降水參數化		
2008年	更新輻射參數化		
2009年	更新積雲對流參數化與邊界層參數化		
2010年	引進NCEP新一代三維變分分析方法GSI		
2011年	水平解析度提高為T319格距約0.375度,垂直解析度提高為40層		

Table 1: Milestones of the Development of the Central Weather Bureau Global Forecast System.

for Medium Range Weather Forecasting, 歐盟中期天氣預報中心)兩個主要作業中 心可用資料量的情形,由此表可發現在傳 統觀測上最重要的探空(TEMP)及一般地 面綜觀觀測(SYNOP)、海洋船報(SHIP)、 PILOT風場等資料上,CWB GTS數量雖 稍少但接近,且隨時間之變化較不明顯。 不過那些在空間及時間密度較高、非傳統 的飛機報、衛星雲導風(SATOB)及衛星原 始輻射量資料則嚴重偏少或缺乏,這種差 異並隨時間增長。所幸,在2002年NCEP 將其全球預報系統所使用的完整觀測資料 放置於網路上,中央氣象局得以由網路從 NCEP每日定時取得過去欠缺之各類、豐 富的衛星資料,不過這些資料有6小時的 延遲,CWB僅是將其運用於作業上的後執 行階段,詳見馮等(2003)。在此同時,為 使資料同化過程能更有效率及妥善地運用 衛星輻射觀測資料,CWB亦開始投入三 維變分分析之發展,並經過測試後於2003 年5月引進NCEP的SSI三維變分分析法 (Deber et al. 1991),取代最佳統計內插法

表2、中央氣象局全球預報系統(GFS)模式架構。

Table 2: The model configuration of the Central Weather Bureau Global Forecast System in 2004 and the major differences between the configurations in 2004 and in 2010.

2004年系統的架構					
動力	物理				
●三角截斷179波,垂直30層	●單層土壤模式包含地表通量參數化處理				
●非線性正模初始化	●垂直紊流為 TKE- ε 方案				
●預報變數:	●積雲參數化為 Relaxed Arakawa-Schubert方案				
- 垂直速度	●簡單大尺度降水處理				
- 水平幅散場	●淺積雲效應為Li and Wang (2000)				
- 地表氣壓	●重力波效應為類似Palmer et al. (1986) 方案				
- 虛位溫與溼度	●輻射處理為Harshvardhan et al. (1987) 方案				
●時間積分採Semi-implicit法					
2011年月	與2004年系統架構之差異				
動力	物理				
●三角截斷319波,垂直40層	●類似Mahrt and Pan(1984)之兩層土壤模式方案				
●預報變數增加雲水項	● 垂直紊流採用含非局部 (nonlocal) 紊流通量之一				
	階閉合邊界層參數法(Troen and Mahrt 1986)				
	●積雲參數化為Pan and Wu (1995) 之簡化A-S				
	積雲對流參數法(Simplified Arakawa- Schubert				
	scheme)				
	●大尺度降水參數化採用Zhao and Carr (1997) (1997)				
	提出之預報方案,預報雲水(雲冰),並透過雲				
	物理過程決定降水				
	●輻射參數化使用二向式(two-stream)之計算結構,				
	但長波万面使用Fu et al. (1997)的二向\四向混				
	合法以提局其精確性。關於大氣氣體吸收係數與 工計期時間,在約,4,7,4,4,6,5,5,4,6,5,5,4,6,5,5,5,5				
	雲光學特性的參數化乃參考Fu and Liou(1992;				
	1993) •				

客觀分析模式;為擴充對陸續新增之衛星 輻射觀測資料的同化能力,於2010年7月 再度引進NCEP最新三維變分分析作業系 統GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 更新分析模式(陳等,2010),同時對臺灣 所發射的福衛三號(Formosat-3/COSMIC) 氣象衛星的GPSRO資料亦於評估測試後 (沈等,2010)納入同化分析作業中。另一 方面,為提升颱風路徑預報的成效,全球 預報系統在實施客觀分析之前,先對猜 測場的颱風環流依當時氣象局之颱風中 心的定位報告進行重置(relocation),此項 技術與NCEP所使用的方法雷同(Liu et al. 2000)。 表3、CWB、NCEP、ECMWF三作業中心之各類觀測資料量的比較。2001年為2001年11月 20日12Z之資料量,2011年CWB及NCEP的資料量為2011年8月份12Z時段的平均量, ECMWF為9月13日12Z之單日資料量。資料類型之括號內說明為觀測報告類別簡稱。

Table 3: Numbers of data used in the operation of the numerical model forecasts at CWB, NCEP and ECMWF, respectively. The values were counted at 12UTC November 20 for 2001, and were the mean of 12UTC August for CWB and NCEP and at 12UTC September 13 for ECMWF, respectively, in 2011.

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		2001年			2011年		
貝科類型			NCEP	ECMWF	CWB	NCEP	ECMWF
地面褶	觀測(SYNOP)	8277	10400	13706	12408	17591	18834
機場地區	面觀測(METAR)				29854	43271	13081
船泊報告(SHIP)		1509	1885	1510	2819	1361	2938
海洋浮標觀測(BUOY)			16	2524	8517	13287	9096
探空雷送(TEMP)		530	566	561	634	670	628
探空風標(PILOT)		129	135	318	321	78	307
剖風儀(PROFILER)			165	477		161	1687
飛航報告(AIREP)		1185	748	3387		3329	2949
ASDAR/AMDAR- aircraft			4069	7119	13772	14672	24777
ACAR-aircraft			25296	27014		36607	38574
	VAD					1683	
	SCAT					0	285810
	SATOB-satellite wind	19751	20247	12433	78425	425658	574176
	RADIANCE-AMSUA		~150000	235760		608405	615364
衛星觀測與反演資料	RADIANCE-AMSUB/MHS	1				152991	346114
	RADIANCE-HIRS	]				164266	470363
	RADIANCE-IASI	-				1167119	70228
	RADIANCE-AIRS					614034	71116
	OZONE					18200	72057
	GPSRO				131358	131358	62048

圖1是CWB GFS 從1995至2010年 間對北半球20至80度範圍內500hPa高度 場第5日預報值相較分析值之距平相關 (anomaly correlation),如前所述CWB GFS在過去數年投入各種改進努力下,已 從1999年平均距平相關得分大約為0.65, 至2002年漸提升至0.7左右。2003年經過 非傳統觀測資料及三維變分法之應用等變 動,使平均距平相關得分往上推升至0.73 左右,相較之前漫長的歷程,短期獲致如 此幅度的改進確是效益顯著;而2010年 的更新也有顯著的效益,使年平均距平相 關自2009年的0.78提昇至2010年的0.82左 右。於後再簡要說明模式改進情形。

改善模式的系統性誤差是發展數值預 報模式另一項重要的工作,由於預報誤差 的來源錯綜複雜,從數值模式初始場的誤 差到模式內部數值方法及物理參數化的不





Figure 1: Monthly mean anomaly correlations of the CWB GFS model day-5 geo-potential height forecast over northern hemisphere between 20 to 80 degree latitudes on 500 hPa, from 1995 to 2010. The 12-month running mean is shown in the smoothed curve. (Figure provided with help from Mr. H.-M. Kuo, Central Weather Bureau)

完善,都是引起預報誤差的可能來源,這 也使得釐清誤差的來源並不容易,不過就 系統性誤差而言,往往與物理參數化過程 的不完善有相當關連。圖2為CWB GFS從 1998年7月至2001年9月期間,第五天預報 在850hPa至500hPa大氣溫度的系統性誤 差隨緯度之分布,顯示GFS預報結果主要 特徵是GFS對北半球20度以北,夏季時節 屬於預報偏暖而冬季時節屬於預報偏冷, 低緯度帶GFS預報偏差則無季節變化特 性,溫度預報處於穩定不變的過暖偏差。 馮(2001)以收支計算法,利用模式一日預 報中加熱或冷卻收支不平衡的現象作為診 斷的基礎,追蹤系統性誤差與物理參數化 過程之間的關連,發現夏季溫度預報過暖 的問題與模式過強的長波雲輻射作用力有 關,原因出自模式對雲垂直疊合的假設一 律視為隨機疊合,因此有高估雲量的作 用,使得對中低層大氣產生過多的長波溫 室效應。針對此問題的修正,新作法改為 對於伴隨積雲降水的雲層假設最大垂直疊 合,如此使得夏季溫度預報過暖的問題已 獲得許多改善,詳見馮(2001)。

Li and Wang (2000)的研究也指出 CWB GFS淺積雲參數化在垂直紊流混合 上之反應較實際大氣過度,使東太平洋 ITCZ上源信風帶之邊界層水氣不能有效積 聚,導致低層水氣通量輻合偏弱、ITCZ降





Figure 2: Trends, from July 1998 to September 2001, of the day-5 CWB GFS model forecast error of the zonal averaged mean temperature (°C) between 850 hPa and 500 hPa.

水過弱的現象。CWB GFS在納入他們的 修正方案之後,新版淺積雲對流相較於舊 版,對信風區邊界層頂會產生遠較舊版明 顯的水氣與相當位溫梯度結構,同時邊界 層表現較淺且水氣增多,有利下游ITCZ產 生較多的水氣輻合與產生對流。

此外,鑒於CWB GFS原先使用的地 表過程參數化為單層土壤模式,其過於簡 化,無法涵蓋地表覆蓋物的影響及土壤層 之間的交互作用,而可能引進地表溫度與 濕度的預報誤差,所以在顧全物理的詳實 及實際作業在運算資源的限制上,於2005 年進行以Mahrt and Pan (1984)發展的OSU 多層土壤模式作為更新的版本。OSU多 層土壤模式的預報變數涵蓋了各土壤層的 土壤溫度及單位體積土壤含水比例,植物 表面承接水量、地表溫度及雪的厚度均在 此模組內預報。它除了涵蓋較詳實的物理 過程,對土壤溫度及含水量做預報,另外 還考慮了植物覆蓋(canopy)的影響,因此 地表至大氣的蒸散量是由3個部分共同決 定:土壤表面的直接蒸散、植物表面水分 的再蒸散、透過植物根部上傳水分的蒸散 (evapotranspiration)作用,其中並考慮了4 種植物阻泥因子。從預報實驗結果顯示, 此土壤模式因為考慮了較切實的植物覆蓋 率及合理的飽和蒸發量計算方式,大幅降 低了作業單層土壤模式在夏季對青康藏高 原區及各沙漠區蒸發量的高估傾向(圖3), 這有助於GFS對北半球中低層大氣預報偏 暖系統性誤差的再次改善。

隨著地表過程對大氣影響之議題日漸



- 圖3、以2002年7月進行中央氣象局全球預報模式預報實驗,模式第五天平均地面潛熱通量分 別以作業的單層土壤模式(上圖)及多層土壤模式(下圖)之預報結果。差值之正區(有色階) 代表模式對地面潛熱通量預報有高估傾向,等值線間距為50 W/m2。
- Figure 3: CWB GFS model, with single-layer soil model in upper panel and multi-layer soil model in lower panel, monthly mean day-5 latent heat flux forecasts during the operational test on July 2002. Areas of over forecast are shaded. Contour intervals are 50 W/ m2.

受到重視,地表模式的研究近十年亦有蓬 勃的進展,Noah地表模式(Ek et al. 2003) 即為其中一代表,建構於OSU地表模式之 上的Noah地表模式,針對冰及雪的部分 作了加強,除了預報土壤水含量,另外增 加了土壤含冰量的計算。有關雪的預報, 也引進了較完整的積雪(snowpack)概念, 將溫度對積雪密度的影響加入。對於降雪 情況,增加了因降雪溫度與地面溫度差異 而產生的熱量交換,另外增加了凍雨的考 慮,即當大氣條件判斷為降雨,但地面溫 度低於零度,於此情況則視為凍雨,將額 外考慮水結冰的相位變化所釋放之熱量, 因此對於雪面溫度之計算更接近真實。基 於Noah地表模式較完整的冰雪處理,全球 模式也正嘗試引進,目前處於測試評估階 段,測試結果顯示此版地表模式對模式冬 季預報偏冷之誤差有顯著的改進(圖4)。

模式對於降水過程的掌握,是影響大 氣模式預報之關鍵環節,為提升模式對於 網格尺度降水的模擬,全球模式於2007年 將原本的診斷方案更新為預報方案(Zhao and Carr 1997),於預報方案中考慮了雲 水(或雲冰)的生成消散機制以預報雲水(或 雲冰),最後再透過雲物理過程決定雲水 轉換為網格尺度降水的量。此雲水預報方 案同時提供預報之雲水作為計算雲輻射效 應的參考變數。配合雲水預報過程的納



圖4、中央氣象局全球模式使用OSU兩層土壤模式(上圖)與Noah土壤模式(下圖)之12月份預報 實驗比較。圖為相對分析場,一個月平均下1000hPa溫度場之5日預報偏差(℃),前者在北 半球冬季之陸地區域有明顯偏冷系統性誤差。

Figure 4: CWB GFS model, with OSU two-layer soil model in upper panel and Noah soil model in lower panel, monthly mean day-5 1,000 hPa temperature forecast errors during the operational test on December 2009. Scales (°C) are shown in right panel.

入,於2008年也更新輻射模式,新版將短 波及長波輻射的計算統一在兩向式(twostream)之計算結構(馮 2001),並採用較合 理的雲垂直疊合處理以及雲光學特性參數 化,能改善雲輻射作用的模擬。

另外有關對流降水過程,亦於 2009年引進NCEP全球模式使用之SAS (Simplified Arakawa Schubert)積雲參數 法(Pan and Wu 1995),此方案將雲水在雲 頂的逸出計算含蓋於內,同時增加了下沖 流(down draft)過程及對流過程的動量傳 而言,降水過程的更新使得降水的配置比 例產生變化,網格尺度降水比例提高後接 近總量的33%,更接近實際大氣。另外對 於熱帶系統的模擬亦有正面影響,原來於 500hPa等壓面太平洋高壓隨預報過強的 現象獲得改善(見圖5),也進一步改善颱 風路徑預報的品質(馮等 2009)。配合SAS 積雲參數法的更新,邊界層過程的參數化 方案同時也作了更新,引進NCEP全球模 式使用的非局部(nonlocal)方案(Troen and Mahrt 1986), 此方案考慮了大渦流(large eddy)產生的非局部傳送,使得低層水氣 能有效率的向上傳送,改善模式原本近地 層的過濕現象。整體而言,得益於積雲及 邊界層參數化的更新,全球預報系統預報 品質獲得相當明顯的進展(汪與馮 2010)。

## 三、有限區域預報系統

中央氣象局第一代有限區域預報模 式包含一區域模式(RFS)、一中尺度模式 (MFS)與一颱風路徑預報模式(TFS)。三 者相似,差別在水平格點解析度與含蓋區 域。區域模式解析度為90公里含9層111 X 81格點於1989年7月1日起作業,中尺度模 式解析度為45公里亦含9層但為101 X 81 格點於1990年1月1日起作業,颱風路徑預 報模式亦於1990年1月1日起作業,先採60 公里解析度後因電腦計算能力不足採70公 里解析度垂直7層121 X 88格點。有關第 一代有限區域預報系統詳細資料見Jeng et al. (1991)、Peng et al. (1993)、與Peng et al. (1995)。

中央氣象局第二代有限區域預報模 式(LAFS; Local Area Forecast System)於 1994年發展完成,與第一代有限區域預 報模式相較,其在動力模組與時間積分處 理方式上相類似,唯第二代有限區域預報 模式已將區域與中尺度模式提高解析度為 垂直20層,並整合為一含粗與細網格距組 之2層巢狀模式(nest model), 粗網格組格 距60公里,含蓋161 X 121格點,細網格 組格距20公里,含蓋91 X 91格點。在物 理處理上第二代有限區域預報模式與第一 代有限區域預報模式有較大差異,包括地 表邊界層採用較完整、多層之TKE E-ε 參數化處理,輻射效應採用Harshvardhan et al. (1987) 參數化處理,積雲效應除 有Kuo (1974) 參數化處理外,增加Betts and Miller (1986) 之參數化處理,相關之 說明見葉等(1994)、張與葉(1994)、吳等 (1994)、童與彭(1994)。另外,第二代有 限區域預報模式之資料分析係採用最佳 內插法(OI),並經非線性正模初始化處理 後才進行積分預報,相關之說明見黃等 (1994)、柳與張(1994)。

中央氣象局於第三代數值預報系統發展計畫時,自行發展四階定差、三層巢狀網格、垂直30層之非靜力平衡預報系統(Non-hydrostatical Forecast System),簡稱NFS,三層巢狀網格之格距分別為45、15、與5公里,格點數分別為191x127、145x139、與61x91,因此模式最高解析



圖5、中央氣象局全球模式使用舊版積雲與邊界層參數化(上圖)與新版(下圖)之預報實驗比 較。圖為2週平均之下,500hPa高度場5日預報場(虛線)與分析場(實線)之對照,前者在北 半球副高有明顯偏強之系統性誤差。

Figure 5: 14-day mean observed (solid lines) and the CWB GFS model day-5 forecast (dash lines) 500 hPa geopotential heights. On upper (lower) panel, the original (revised) version of the cumulus and planetary boundary layer parameteriza- tions was applied in the CWB GFS. Contour intervals in 60 meters.

5公里涵蓋之範圍為以臺灣為中心,東西 300公里、南北450公里。預報模式對水汽 的動力平流方面,為顧及水汽量為正值, 因此除了一般的四階定差法,尚有Hsu與 Arakawa正定法(Hsu and Arakawa 1990)可 供選擇,此法當網格解析度到達對流尺度 時,更能凸顯正定水汽平流法的重要性, 尤其是在垂直平流方面。當然較之四階定 差法,正定法會花費較多的電腦計算時 間。預報模式時間積分採用split-explicit 法處理前三組速度較快的重力波,也使用 四階頻散讓模式積分穩定。模式的物理部 份,輻射參數化方面採Harshvardhan et al. (1987)法; 邊界層參數化方面採TKE E-ε 法處理;而降水模擬部份,對流性降水參 數化方面有Kuo (1974) 以及Arakawa and Schubert (1974)兩種方法供選擇;大尺度 降水參數化方面有層狀降水參數法以及 Zhao et al. (1997)雲冰與雲水的降水參數 法,現行NFS作業採用Kuo (1974)對流性 降水參數化法與雲冰雲水法大尺度降水參 數化法。

CWB NFS於2001年取代第二期電 腦化計畫時發展之區域預報系統LAFS成 為CWB之區域預報作業模式,圖6與圖 7分別是NFS與LAFS新舊兩預報系統在 2001年9月至11月平行測試期間時高度場 預報標準差以及溫度場預報平均誤差的 比較。圖6顯示LAFS在850hPa、500hPa 及300hPa各層高度場預報標準差值皆較 NFS者大,尤其在中上層更明顯。圖7顯 示NFS在850hPa溫度場預報平均誤差為 負值,亦即NFS在下層大氣有預報偏冷趨 勢,但LAFS在850hPa溫度場預報平均誤 差為正值,亦即LAFS在下層有預報偏暖 趨勢,惟兩者偏離量約略相等。LAFS在 500hPa及300hPa兩層溫度場預報平均誤 差仍為正值、並較850hPa偏離更多,反 之NFS在500hPa及300hPa兩層溫度場預報 平均誤差則在零值附近,顯示與LAFS相 較,NFS有相當程度的改進,中高層之預 報尤其明顯。

圖8顯示NFS中層網格組與LAFS 第二 層網格組對SCSMEX在1998年5月11日至6 月10日一個月期間降水預測結果之比較, 為使模式有一致之水平解析度,此部份 之比較時NFS中層網格組格距設定為20公 里。圖8降水預測結果之比較其格式是參 考Mesinger (1996)將24小時降水依水量大 小分成大於0.01、0.1、0.25、0.5、0.75、 1.0、1.5及2.0英吋共八等級(相當於大於 0.25 × 2.54 × 6.35 × 12.7 × 19.05 × 25.4 × 38.1、50.8毫米) 來計算公正降水得分 (Equitable Treat Score, ETS)。校驗所用 觀測值是取自中央氣象局在全省自動雨量 站觀測資料,圖中橫軸標示的數值最下 一行是各雨量區隔的採樣點。圖8顯示, NFS對日雨量小於2.0英吋(50.8毫米)降水 之ETS大都在0.1以上,明顯較LAFS者為 高。大致來說,NFS對小雨的ETS數值也 較大雨的ETS數值高,這和其它國外作業 預報模式之結果相似。兩模式對同期間降 水預報之偏差值則顯示NFS對於較大雨量 有過度預報的情形,LAFS雨量的預報則 是明顯低估。

為進一步提高NFS對臺灣地區之天 氣預報能力,中央氣象局於2003年6月將 NFS模式5公里格組之涵蓋範圍由61x91格 點擴充至91x121格點,使模式最高解析 範圍為以臺灣為中心,東西450公里、南 北600公里。在提升降水預報能力方面, 中央氣象局針對CWB NFS 15公里與45公 里解析度的降水預報做系集(ensemble)方 式的定量降水預報測試,主要有兩類系



圖6、NFS(X線)與LAFS(O線)新舊兩區域預報系統在2001年9月至11月(橫軸)平行測試期間時在 850hPa(上)、500 hPa (中)及300 hPa (下)三層之高度場標準差值(單位為公尺)。

Figure 6: The error standard deviations (in meters) of the geopotential height forecast of models NFS (curves with Xs) and LAFS ( with Os) on 850 hPa (upper), 500 hPa (middle), and 300 hPa (lower) during the operational test period from September to November 2001.

集方式:一是混合使用郭氏積雲參數法 與Arakawa and Schubert積雲參數法的結 果、一是混合使用NFS前後時段的預報。 圖9顯示在此測試期間NFS採用郭氏積雲 參數法,比採用Arakawa and Schubert積 雲參數法有較佳的ETS得分,而以兩參數 法預報結果做算數平均其ETS得分不論在 雨量大或小都較原先兩者為優。另外不論 是採用郭氏積雲參數法或是採用Arakawa and Schubert積雲參數法,混合使用前後 時段預報結果的ETS得分都優於原來單一 時段者,因此以兩積雲參數法預報結果做 算數平均,加上混合使用前後時段預報結 果平均的ETS得分,是最佳的預報。另由 降水預報偏差值來分析也得到相同之結 論,因此此種系集預報方法在2004年間曾 納入CWB NFS日常作業裡,以供定量降 水預報參考。NFS並一直作業應用至今, 有關NFS詳細資料見Liou et al. (2009)。

WRF (Weather Research and Forecasting model, Michalakes et al. 2001)是美國近年來集合美國學術界和作 業單位人力所發展之中尺度數值模式, 中央氣象局最先於2002年開始試用此模 式(葉與戴2003),經進一步測試(戴2005) 後決定投入此模式之發展,以供下一代





Figure 7: As in figure 6, the standard deviations of temperature forecast error (in °C) from model NFS (Xs) and LAFS (Os) on 850 hPa (upper), 500 hPa (middle), and 300 hPa (lower) during the operational test period from September to November 2001.

預報作業應用。於2005年正式引進WRF 3DVAR客觀分析和WRF模式,歷經2年之 測試、改進(洪等2006以及簡等2006),並 使其融合於中央氣象局數值天氣預報模 式作業環境,建構一完整之中尺度數值 天氣資料同化系統。WRF資料同化系統 於2007年5月1日進行6個月之平行作業測 試,於11月15日正式上線作業,稱為CWB WRF。

CWB WRF資料同化系統主要是由 WRF 3DVAR和WRF模式組成(如表4), 其中包括前置處理、客觀分析、預報模式 和後處理模組等。CWB WRF為三層巢狀 網格,解析度分別為45/15/5公里,其中 45和15公里兩層網格之模式涵蓋範圍與 NFS相同,但5公里網格之範圍則由NFS 之91x121擴充至148x178。CWB WRF垂 直分層則由NFS之30層增加至45層,期由 增加垂直解析度與擴增高解析度積分範 圍以改進模式在臺灣地區的預報能力。 模式物理參數法包括NOAH土壤模式、 Goddard微物理參數法、YSU邊界層參數 法、Kain-Fritsch積雲、RRTM長波輻射和 Goddard短波輻射參數法等,各參數法之 介紹詳見WRF使用手冊(Skamarock et al. 2008)。

CWB WRF模式目前每日進行4次預報,每次預報時間達84小時。CWB WRF



圖8、NFS中層網格(■線)與LAFS (◆線)第二層網格對SCSMEX在1998年5月11日至6月10日一 個月期間降水預測結果在各降水區間(橫軸)之ETS值(上圖)與偏差值(下圖)。

Figure 8: The ETS (upper) and bias (lower) of the NFS middle meshes (■s) and LAFS inner meshes (♦s) model precipitation forecasts during 11 May to 10 July 1998 during SCSMEX.

資料同化系統採用所謂的部份循環更新 (partial cycle)資料同化策略,也就是每 一個模式的初始場均自12小時前由NCEP GFS的分析場冷啟動(cold start),然後每 6小時進行一次WRF 3DVAR客觀分析, 其中模式的初始猜測場來自WRF的6小時 預報,也就是循環更新(full cycle)模式。 這樣做的目的是經由間斷式的資料同化策 略以避免中尺度模式累積系統性預報偏 差;而12小時的循環更新可以在資料同化 過程中掌握模式背景場與觀測所提供的中 尺度資訊,此將有利於模式對中尺度天氣



- 圖9、NFS以不同處理對SCSMEX在1998年5月8日至6月10日一個月期間降水預測結果在各降水區間(橫軸)之ETS值。不同處理包括NFS採用郭氏積雲參數法(◆)、採用Arakawa and Schubert積雲參數法(■線)、或以兩參數法算數平均(▲線)、以兩積雲參數法算數平均加上混合使用前後時段預報(●線)。
- Figure 9: The ETS of the precipitation forecasts in different model configurations (line patterns indicated on right upper corner) of NFS cumulus parameterization. The period of the model forecast examined was 8 May to 10 July 1998 during SCSMEX, and model horizontal resolutions are 20 km.

表4、CWB WRF資料同化系統的組成模組。

Table 4: Modules of the Central Weather Bureau WRF forecast system.

功能	組件名稱	功能說明		
前置處理	WDE WDS	將全球模式資料水平內插至WRF模式格點,以產製		
	WKF WF5	模式的邊界條件		
客觀分析	WRF 3DVAR	三維變分客觀分析		
預報模式	WRF	WRF預報模式		
後處理	N2d64	$\sigma$ 內插至P座標,並輸出各式導出量場		

系統的預報能力。其中採用WRF 3DVAR 內建之背景誤差斜方差矩陣(CV3選項), 此亦為NCEP網格統計內插分析(Gridpoint Statistical Interpolation,GSI)使用之背景 誤差斜方差矩陣,主要是用NCEP全球模 式24和48小時預報誤差,使用Parish and Derber (1992)方法推估所得。

CWB WRF自2007年底上線作業後,

中央氣象局相關人員致力於改善整個資料 同化系統,包括觀測資料的使用、三維變 分法的調校和模式預報效能的改進等,模 式預報能力逐年有顯著的改善。圖10為 2008年至2010年,針對850 hPa溫度場和 500 hPa高度場之72小時預報場的均方根 誤差,圖中顯示CWB WRF的預報能力每 年均有10%以上的改善程度,3年來,850 hPa溫度場改進了25%,500 hPa高度場則 改進達35%。

為提高模式解析度與改進模式預報, WRF區域模式水平解析度20/4公里之版本 已於2009年12月上線為一個WRF模式系 列之系集成員模式,於每日00/06/12/18 UTC亦執行84小時預測。目前CWB WRF 的研發重點主要在持續改善三維變分分析 的效能、局地觀測資料的應用(如地基GPS 觀測資料),建立土壤資料同化系統以改 善地表參數的預報,持續改進模式的定量 降水預報能力,以及發展系集預報系統 等。

#### 四、颱風路徑預報

颱風所造成之災害損失佔臺灣地區天 氣災害損失中最大部分,因此颱風路徑預 報是中央氣象局天氣預報作業中最重要的 項目之一,也是數值天氣預報作業最重要 的項目之一。歷年來中央氣象局颱風路徑 預報模式與有限區域預報模式在整體架構 上兩者相似,但因為預報作業之需求不同 而有不同之解析度、模式涵蓋範圍,以及 資料初始處理。

Peng et al. (1993)曾對中央氣象局 第一代颱風路徑數值預報系統(Typhoon Forecast System, TFS)做詳細說明,葉 等(1999)、黃等(2000)、及葉等(2002)則 分別對中央氣象局第二代颱風路徑數值預 報系統與第一代間之主要差異、第二代颱



圖10、CWB WRF在2008年至2010年,針對850 hPa溫度場和500 hPa高度場之72小時預報場的 均方根誤差。

Figure 10: Root mean square errors of CWB WRF 72-hour 850 hPa temperature (°C) and 500 hPa geo-potential height (meter) forecasts in 2008 to 2010.

風路徑數值預報系統資料初始處理方法及 TFS預報誤差與作業概況做詳細說明。表5 為1994年至2003年TFS作業預報逐年誤差 平均值,由表可見經數年之改善,TFS 24 小時颱風路徑預報誤差由早期接近200公 里減少到130至170公里之間,48小時颱風 路徑預報誤差也由早期接近400公里減少 到270至330公里之間。

配合第三代數值預報系統之發展, NFS也加入颱風路徑預報之能力,颱風路 徑預報與一般天氣預報最主要的差異是初 始處理方法之不同。由於颱風大部份皆形 成於廣闊熱帶海洋面上,在颱風附近常欠 缺傳統觀測資料,因而在模式初始分析場 中,常無法正確解析颱風位置及其環流 結構,增加了預報模式對颱風預測之困 難度。針對此情形,當颱風生成或移入 模式預報範圍時,TFS是加入整個虛擬渦 旋(葉等1999), CWB NFS則是採用只在 颱風中心附近60內植入虛擬觀測資料共 41點之作法,以得到較佳之初始場。詳 細虛擬觀測資料產生程序與做法為:首先 針對風場之初始猜測場(first guess fields) 做濾波,以去除不完整之颱風渦旋、保留 颱風附近之大尺度駛流,而後在1000hPa 至 400hPa 各層給定41點風場,其值是由 7級風、10級風暴風半徑及中心最大風速 所定之Rankine渦旋並加上颱風過去6小時 移動速度。而此41點之分布為中心1點, 離中心0.5o之東、西、南、北方個1點, 離中心1o之東北、東南、西南、西北方 各1點,離中心2o、3o、4o、6o再分別等 間、交錯各置8點。在質量場結構方面, 是由上述虛擬渦旋風場,由梯度風平衡反 演出1000hPa至700hPa各層之高度場及質 量場。此41點虛擬觀測資料和其它傳統及 遙測觀測資料一起提供客觀分析法進行分

析,以取得含有完整颱風環流之模式初始 場。

為進一步展示NFS對颱風路徑之預測 能力,圖11為NFS、TFS及中央氣象局官 方預測(CWB) 對2002及2003年共17個颱 風101個案之平均預報誤差比較。17個颱 風為2002年Rammasun、Nakri、Sinlaku 及2003年Kujira、Nangka、Soudelor、 Imbudo · Morakot · Krovanh · Dujuan · Melor等11個中央氣象局曾發布警報的颱 風,再加上離臺灣較遠之Halong、Koni、 Etau、Maemi、Ketsana、Nepartak等6 個颱風。圖11顯示NFS/TFS/CWB 對這 些颱風24、48、72小時路徑預報平均誤 差分別為134/141/109、251/281/207、 369/417/350公里,NFS與TFS兩個客觀數 值動力模式在24、48、72小時之預測能力 皆低於中央氣象局官方主觀預測。而NFS 為一新建置之區域模式,相對TFS而言動 力及物理處理方法皆有改進,使對此17個 颱風101個案,在3天內路徑預測平均誤差 表現皆優於TFS。

2003年在臺灣地區曾在9月1日 06UTC對颱風杜鵑(Dujuan)及在11月2 日06UTC對颱風米勒(Melor)進行投落送 (dropsonde)觀測實驗,NFS亦針對上述 資料進行模擬測試。圖12可見NFS對9月 1日06UTC杜鵑颱風路徑模擬,不論是否 有加入投落送觀測資料皆在12時後之路徑 有偏北誤差,未加入及加入投落送資料之 24/48小時路徑預測誤差分別為175/168公 里及169/177公里,對此個案,加入投落 送資料後,對NFS之颱風路徑預測影響不 大。NFS對11月2日06UTC米勒颱風路徑 模擬結果則顯示NFS在未加入投落送資料 時模擬之路徑有偏慢偏左誤差,加入投落 送資料後,NFS對颱風移速之預測稍好,

- 表5、TFS由1994至2003年對颱風12、24、48小時路徑預報年平均誤差。當年模式之格距、各 年西北太平洋之颱風個數、與TFS進行路徑預報之颱風個數列於第一列,模式預報之個案 數則列於刮號內。
- Table 5: Forecast errors of 12 hours, 24 hours and 48 hours typhoon track forecast from CWB Typhoon Forecast System in 1994 to 2003. The model grid resolutions, numbers of typhoon, and numbers of forecast cases are also indicated.

	12hr	24hr	48hr
1994 – 60 km	97 km	210 km	452 km
17 of 34 typhoons	(130 cases)	(129)	(121)
1994 – 45 km (rerun)	104 km	185 km	369 km
17 of 34 typhoons	(130)	(129)	(121)
1995 – 45 km	111 km	203 km	421 km
18 of 25 typhoons	(168)	(159)	(128)
1996 – 45 km	94 km	172 km	338 km
24 of 29 typhoons	(231)	(209)	(164)
1997 – 45 km	97 km	162 km	264 km
20 of 31 typhoons	(180)	(162)	(129)
1998 – 45 km	108 km	183 km	369 km
14 of 17 typhoons	(106)	(92)	(68)
1999 – 45 km	93 km	161 km	270 km
15 of 23 typhoons	(96)	(83)	(55)
2000 – 45 km	86 km	149 km	299 km
21 of 23 typhoons	(187)	(168)	(128)
2001 – 45 km	88 km	162 km	314 km
23 of 26 typhoons	(229)	(211)	(163)
2002 – 45 km	83 km	147 km	293 km
19 of 26 typhoons	(175)	(158)	(126)
2002 – 45 km /15km nest	88 km	137 km	268 km
19 of 26 typhoons	(175)	(158)	(126)
2003 – 45 km/15km nest	99 km	163 km	326 km
21 of 21 typhoons	(218)	(200)	(161)

未加入及加入投落送資料之12/24/36小時 路徑預測誤差分別為61/211/383公里及 43/115/300公里。其它關於模式預報之改 進測試可參見Hsiao et al. (2009)。 配合WRF模式之建置,中央氣象局 也將颱風虛擬資料處理、颱風中心定位等 功能建置於WRF模式中,使其具有颱風 路徑預報能力,於2007年測試於2008年



圖11、NFS(左)、TFS(中)、CWB(右)對2002與2003年17個颱風之24、48及72小時颱風預測路徑 平均距離誤差。

Figure 11: The mean forecast errors of 24-h, 48-h, and 72-h typhoon track forecasts of NFS (in left of each group), TFS (middle) and CWB (right). The cases were selected from 17 typhoons in 2002 and 2003.

颱風季正式作業,而後顧及颱風預報仍 須與一般天氣預報在處理上有所不同, 中央氣象局嘗試改進此模式之颱風預報 能力。主要改進項目包含引進含質量場 之颱風渦旋植入(bogus scheme)及渦旋移 置(relocation scheme)技術之颱風渦旋初 始化流程(參見Hsiao et al. 2010)、partial cycling作業流程、三維變分資料同化系統 中之背景誤差(background error)與outer loop、Kain-Fritsch積雲參數化(參見Hsiao et al. 2011)。結果顯示採用這些改進技術 之WRF模式對2008, 2009年11個颱風247 個案之00/24/48/72小時颱風路徑預測誤差 為8/93/148/248公里,呈現了不錯之颱風 路徑預報能力,中央氣象局據此於2010年 建置TWRF模式並於同年6月正式上線作

業。圖13為1994年至2010年中央氣象局 颱風路徑主要作業模式對西北太平洋颱風 路徑預報之誤差平均值,其中主要作業模 式在1994至2003年為TFS,2004至2007年 為NFS,2008年為WRF,2009為WRF與 NFS系集預報,2010年為TWRF。由圖可 見20年間24與48小時颱風路徑模式預報 之誤差值,約由200與400公里縮小至100 與200公里,約為原來的二分之一。72小 時颱風路徑模式預報之誤差值,約由500 公里縮小至300餘公里,約為原來的五分 之三。其中,在2005年前有比較明顯之改 進,而後維持在一定程度。近年颱風路徑 預報模式除提供路徑預報供作業參考外, 也提供降雨量預報供作業參考。



- 圖12、NFS對2003年(上圖) 9月1日06UTC 杜鵑颱風與(下圖) 11月2日06UTC米勒颱風之路徑模擬結果,標線N、W分別為未加入及加入投落送資料之48小時預測路徑,粗黑線為杜鵑颱風實際路徑。
- Figure 12: Observed (with typhoon symbols) and NFS model forecast tracks of (upper panel) Typhoon Durjun (2003) at 06 UTC September 1 and (lower panel) Tropical storm Milor (2003) at 06 UTC November 2. Two forecast tracks are with (curves with Ws) and without (with Ns) including dropsonde observations in model initial fields.



圖13、1994年至2010年中央氣象局颱風路徑主要作業模式對西北太平洋颱風路徑之24、48與 72小時預報之平均誤差值。

Figure 13: Trends of the CWB typhoon track model forecast errors, in 24, 48, and 72 hours forecasts, from 1994 to 2010.

#### 五、未來展望

中央氣象局全球模式的水平解析度雖 已接近40公里,但相較歐美日先進氣象作 業單位已進展至20公里,仍有段差距。中 央氣象局預計於2012年起採購新一代超 級電腦,屆時全球模式的水平解析度將可 提升至25公里,並且計劃引進半拉格朗日 (semi-Lagrangian)平流法一併改善數值方 法的效率與精確性。模式物理過程往往與 解析度有關,也需持續尋求更佳的方案, 尤其全球模式的解析度已能掌握類似颱風 的渦旋結構,加上全球模式不像區域模式 般受邊界條件的影響,可以合理地掌握大 尺度駛流場與颱風間之交互作用,強化全 球模式在颱風路徑預報的應用已是國外氣 象作業中心的一種趨勢,而物理參數化也 與颱風路徑預報的成效息息相關。在區域 預報模式方面則逐漸重視在結合系集預 報,將結果應用在定量降雨以及機率預報 上,以提供各地之雨量、溫度和風速之精 緻化鄉鎮預報服務。

資料同化是目前提升數值天氣預報的 關鍵,由於網路的便利已使中央氣象局目 前可取得即時的衛星觀測資料,此外臺 灣正規劃福衛3號衛星的後續計畫,預計 2014年將有更多的掩星觀測資料可供利 用,尤其在熱帶地區增加最多,因此加強 衛星觀測資料的應用必將是未來中央氣象 局資料同化工作的重點。由颱風之路徑預 報顯示近年裡颱風路徑之預報誤差並未明 顯改進,此可能也與模式初始場仍不夠理 想有關,因此加強3Dvar之應用、研究發 展與引用4Dvar或EnKF (Ensemble Kalman Filter)四維資料同化技術也是後續進一步 提升區域模式預報能力之關鍵。

提升對短期氣候預報能力與增進對定 量降水預報能力是中央氣象局未來施政之 重點項目,對短期氣候預報方面,除了統 計預報方法之發展,中央氣象局目前也以 全球波譜模式為基礎,發展氣候模式,以 期此氣候模式預報結果能提供月、季、或 6個月長期天氣預報作業參考。

#### 誌謝

近10年來全球預報系統在資料同化及 物理參數化方面的更新與改善,得力於吳 婉淑博士、潘華陸博士、莊漢明博士及李 瑞麟博士等人甚多協助,區域與颱風路徑 預報系統方面則得力於劉其聖博士、彭順 台博士及張偉正博士之協助或建議,特致 上由衷的謝意。另數值預報除模式外,其 他之支援如自動控制、資料接收處理、繪 圖、資料傳輸等等也都是非常關鍵要素, 這些工作歷年來係由中央氣象局氣象資訊 中心負責,部分發展工作並委託資訊工業 策進會等財團法人或其他民間機構進行。 此外,藉由與美國UCAR的合作協議,由 郭英華博士帶領的科學團隊對WRF數值預 報系統的發展亦貢獻良多。

## 參考文獻

- 吳石吉、葉天降、張偉正,1994:大氣輻 射效應:兩種輻射參數化方法在有現區 域預報模式之比較,天氣分析與預報 研討會論文彙編,1994年11月24-26 日,臺北,133-140。
- 沈彦志、馮欽賜、陳雯美、曹伶伶、陳 御群、楊明仁,2010:以GSI同化 GPSRO資料對中央氣象局全球預報 系統之影響。天氣分析與預報研討 會。2010年6月28-30日,臺北,247-252。
- 汪鳳如、馮欽賜,2010:中央氣象局全 球模式物理參數化之更新:邊界層 及積雲參數化。大氣科學,38,213-236。

- 柳再明、張偉正,1994:中央氣象局有限 區域巢狀模式之初始化過程,天氣分 析與預報研討會論文彙編,1994年11 月24-26日,臺北,69-78。
- 洪景山、林得恩、劉素屛、簡芳菁、周仲 島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致 穎、雷銘中,2006:WRF模式之敏感 度測試,第一部分:探空測站上的校 驗,大氣科學,34,241-260。
- 陳雯美、沈彦志、曹伶伶、馮欽賜、吳婉 淑,2010:中央氣象局全球資料同 化系統之更新評估。天氣分析與預報 研討會。2010年6月28-30日,臺北, 4-8。
- 葉天降、戴俐卉,2003:臺灣地區颱風 侵臺綜觀天氣分析與侵臺颱風之數值 模擬研究。吳俊傑彙整國家科學委員 會颱風重點研究研究報告,NSC91-2119-M-002-032,子計畫三,12-15。
- 葉天降、陳得松、黃康寧、彭順台、謝信 良,1999:颱風數值預報模式初始 處理:兩種方法對模式預測誤差之比 較。大氣科學,27,171-190。
- 葉天降、陳得松、黃康寧、謝信良, 2002:中央氣象局颱風路徑預報模式 之預報檢討及改進。氣象學報,44, 31-75。
- 葉天降、滕春慈、黃麗玫、馮欽賜、張庭
   槐,2012:中央氣象局數值天氣預報
   作業系統(一)歷史演進。氣象學報,48,53-68。
- 葉天降、林淑卿、李尚武、陳雯美、張偉 正、彭順台,1994:中央氣象局第二 代有限區域預報系統之建置與現況, 天氣分析與預報研討會論文彙編, 1994年11月24-26日,臺北,11-20。

- 張美玉、葉天降,1994:中央氣象局有限 區域預報模式邊界層參數化處理之個 案測試,天氣分析與預報研討會論文 彙編,1994年11月24-26日,臺北, 311-315。
- 馮欽賜,2001:中央氣象局全球模式系統性誤差之分析與改進。中央氣象局研究發展專題第CWB90-1A-18號報告,21頁。
- 馮欽賜,2001:部份雲量條件下輻射加 熱率之參數化。大氣科學,29,125-140。
- 馮欽賜、李長華,2000:中央氣象局全球 模式之平行計算處理及在新超級電腦 上之測試。天氣分析與預報研討會論 文彙編,2000年7月10-12日,臺北, 294-297。
- 馮欽賜、陳雯美、黃曉薇、鄭明典, 2003:中央氣象局全球預報系統之近 況與發展-2003年之報告。天氣分析 與預報研討會論文彙編,2003年9月 15-17日,臺北,321-325。
- 馮欽賜、陳雯美、陳建河、汪鳳如, 2009:物理參數化變動對颱風路徑預 報之影響與分析。天氣分析與預報研 討會論文彙編,2009年9月8-10日, 臺北,33-37。
- 童雅卿、彭順臺,1994:兩種積雲參數化 法在颱風模式之診斷分析,天氣分析 與預報研討會論文彙編,1994年11月 24-26日,臺北,329-336。
- 黃麗玫、滕春慈、劉其聖,1994:最佳客 觀分析法於中央氣象局第二代有限區 域模式之使用現況,天氣分析與預報 研討會論文彙編,1994年11月24-26 日,臺北,95-106。

- 黃康寧、陳得松、葉天降、謝信良,
   2000:1999年中央氣象局颱風路徑
   數值預報模式作業概況。氣象學報,
   43,46-60。
- 簡芳菁、洪景山、張文錦、周仲島、林沛 練、林得恩、劉素屏、繆璿如、陳致 穎,2006:WRF模式之敏感度測試,
  第二部分:定量降水預報校驗。大氣 科學,34,261-276。
- 戴俐卉,2005:中美氣象資訊自動監測技 術發展合作-LAPS-WRF Hot Start建 置。中央氣象局出國報告,33pp。
- Arakawa, A., and M. Suarez, 1983: Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates. Mon. Wea. Rev., 111, 34-45.
- Barnes, S., 1964: A technique for maximizing details in numerical map analysis. J. Appl. Meteoro., 3, 395-409.
- Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convection adjustment scheme. Part II: Observational and theoretical basis. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112, 677-691.
- Derber, J. C., D. F. Parrish and S. J. Lord, 1991: The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. Wea. and Forecasting, 6, 538-547.
- Ek, M., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesocale 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 nonhomgenuous 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.
- Harshvardhan, R. Davies, D. Randall, and T. G. Corsetti, 1987: A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. J. Geophys. Res., 92, 1009-1016.
- Hsiao, L.-F., Melinda S. Peng, Chen, D.-S., K.-N. Huang, T.-C. Yeh., 2009: Sensitivity of typhoon track predictions in a regional prediction system to initial and boundary conditions. J. Appl. Meteor. Climatol., 48, 1913-1928.
- Hsiao, L.-F., C.-S. Liou, T.-C. Yeh, Y. R. Guo, D.-S. Chen, K.-N. Huang, C.-T. Terng, J.-H. Chen, 2010: A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF. Mon. Wea. Rev., 138, 3298–3315.
- 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, 2011: Testing of WRF 3DVAR
  for model initialization and its application
  on operational typhoon prediction in
  Taiwan. Paper submitted to Mon. Wea.
  Rev.
- Hsu, Y.-J., and A. Arakawa, 1990: Numerical modeling of the atmosphere with an isentropic vertical coordinate. Mon. Wea. Rev., 118, 1933-1959.

- Jeng, B.-F., H.-J. Chen, S.-C. Lin, T.-M. Leou, M. S. Peng, S. W. Chang, W.-R. Hsu, and C.-P. Chang, 1991: The Limited-Area Forecast System at the Central Weather Bureau in Taiwan. Wea. Forecasting, 6, 155-178.
- Kuo, H. L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection in large scale flow. J. Atmos. Sci., 31, 1232-1240.
- Li, J.-L. F. and F.-J. Wang, 2000: Improved shallow cumulus process in the Central Weather Bureau global forecast system。 天氣分析與預報研討會(大氣部 份),2000年7月10-12日,臺北,288-293。
- Liou, C.-S., T. Terng, W.S. Kao, T. Rosmand, C. Chen, J. H. Chen, and C. Y. Tsay, 1989: Global Forecast System at Center Weather Bureau. *Papers in Meteorology Research*, 12, No.2, 205-228.
- Liou, C.-S., J.-H. Chen, C.-T. Terng, F.-J.
  Wang, C.-T. Fong, T.E. Rosmond, H.-C.
  Kuo, C.-H. Shiao, and M.-D. Cheng, 1997: The second-generation global forecast system at the central Weather Bureau in Taiwan. *Wea. Forecasting*, 12, 653-663.
- Liou, C.-S., Y.-F Sheng, T.-M. Leou, S.C.
  Lin, T.-C. Yeh, C.-T. Terng, D.-S. Chen,
  K.-N. Huang, and M.-Y. Chang, 2009:
  A Method of Upgrading a Hydrostatic
  Model to a Nonhydrostatic Model, *Terr.*Atmos. Ocean. Sci., Vol. 20, No. 5, 727-739.
- Liu, Q., T. Marchok, H. L. Pan, M. Bender and S. Lord, 2000: Improvements in hurricane

initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL) models. *Technical Procedures Bulletin No. 472.* Available at: http://www.nws.noaa.gov/ om/tpb.

- Mahrt, L., and H. -L. Pan, 1984: A two-layer model of soil hydrology. Boundary Layer Meteorol., 29, 1-20.
- Mesinger, F., 1996: Improvement in quantitative precipitation forecasts with the Eta regional model at the National Centers for Environmental Prediction: The 48-km upgrade. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 2637-2649.
- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock (2001): "Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model" in Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwieflhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore. pp. 269-276.
- 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, H.-L. and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC Medium-Range Forecast model. NMC Office Note 409, 40pp.

- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992 : The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. Mon. Wea. Rev., 120, 1747-1763.
- Peng, M. S., B.-F., Jeng, and C.-P. Chang, 1993: Forecast of typhoon motion in the vicinity of Taiwan during 1989-90 using a dynamical model. Wea. Forecasting, 8, 309-325.
- Peng, M. S., D.-S. Chen, S. W. Chang, C.-P. Chang, and B.-F. Jeng, 1995: Improvement of numerical prediction of typhoon tracks in the western North Pacific basin near Taiwan. Wea. Forecasting, 10, 411-424.
- Skamarock, W. C., Coauthors 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensivity 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.
- Zhao, Q., T. L. Black, and M. E. Bladwin, 1997: Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at NCEP. Wea. Forecasting, 12, 697-712.

# The Numerical Weather Prediction System of the Central Weather Bureau(II): Overview of Forecast Models

Tien-Chiang Yeh, Chin-Tzu Fong, Tzay-Ming Liou, Der-Song Chen, Kang-Ning Huang, Wen-Mei Chen, Feng-Ju Wang, and Jing-Shan Hong Central Weather Bureau

# ABSTRACT

35 years have passed since the first introduction of the computer system at the Central Weather Bureau (CWB) in 1976 to build up the automatic facilities for weather service. An overview of the system development has been documented in Yeh et al. (2012). In this report, the evolution and current condition of Numerical Weather Prediction (NWP) models of the CWB were reviewed. The improvements of the numerical forecast system in CWB were found to be mainly associated with the increase of the model resolutions, progress of the model dynamics and physics, employment of 3-dimensional variation analysis scheme in objective data analysis, and the incorporation of the near real-time non-traditional observations, such as the radiance data detected by satellites, in the analysis. The refinement in typhoon vortex bogussing and relocation methods and application of ensemble forecast techniques in the regional forecast were also contributed to the improvement of the typhoon track forecast and rainfall forecast at the service of the CWB.

**Key words:** Numerical Weather Prediction, typhoon track forecast, model, objective analysis, 3-dimensional variation