

颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之 發展研究成果

葉天降¹、李清勝²、楊明仁³、何台華⁴

馮欽賜¹、洪景山¹、鳳雷⁵、張保亮¹

¹中央氣象局 ²國立臺灣大學 ³國立中央大學

⁴龍華科技大學 ⁵台灣颱風洪水研究中心

摘 要

「颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展」為國家科學委員會支助，以提升颱風預報作業能力、減低氣象災害損失為目標之一整合型研究計畫，研究之進行包含「颱風都卜勒速度觀測與地面風力關係之研究及都卜勒風場反演之作業化」、「全球數值模式於颱風路徑預報之應用與發展」、「颱風中尺度定量降雨預報技術之改進」、「颱風雷達降雨氣候模式研究」、「颱風豪雨及洪水藕合預報技術之研究」、「臺灣東南近海颱風受地形影響的中尺度結構分析」、「WRF模式土壤過程之改進對登陸颱風之風雨結構的影響」、「建置WRF模式於颱風預報作業應用之研究」等8部分。

研究主要成果包括完成雙都卜勒雷達風場反演產品之研發建置與作業測試、建立日本嶼那國島剖風儀即時資料的接收與分析、改善中央氣象局全球預報系統物理過程與資料同化系統提升其颱風路徑預報、分析與進一步了解投落送與掩星觀測資料對颱風路徑預報的影響、建立臺灣地區土壤資料同化技術改善模式土壤溫度和濕度初始場、以及建立TWRF模式供中央氣象局颱風預報作業應用。而在氣候模式方面，完成西行、北行及東北季風共伴颱風降雨氣候模式之建立，與利用SSM/I衛星資料改進颱風降雨氣候資料庫，並整合颱風衛星降雨氣候模式與集水區颱風降雨模式為集水區颱風降雨模式。另外，研究也發展使用雷達參數搭配降雨關係式推估降雨之方法，並以雷達回波估計之颱風降雨壯值以改進颱風降雨氣候模式，發展結合氣象與水文模式模擬集水區河川逕流，同時透過都卜勒氣象雷達資料，分析颱風在臺灣地形影響下的演變過程以建立實用的中尺度概念模式等。

關鍵詞：颱風、颱風雨量預報、颱風路徑預報、資料同化、渦旋移置技術、雙都卜勒雷達反演分析、東北季風共伴、流量模擬、中尺度概念模式

一、前言

臺灣平均每年由於颱風所造成的災害損失，超過新臺幣100億元，如90年納莉颱風、97年卡玫基颱風、98年莫拉克颱風、99年梅姬颱風等都造成非常嚴重的損失。加強對侵臺颱風之研究，進而改進預報技術與提高預警能力，是臺灣地區颱風防災課題中的重要工作。侵臺颱風所導致之災害，主要肇因於其所伴隨之豪雨。局部性之豪雨常導致該區域之山崩、土石流，較大區域之豪雨更會造成河水暴漲與淹水。近年颱風在臺灣所致之累積雨量動則逾1000毫米，98年莫拉克颱風更在警報發布期間（8月6至10日）於嘉義與高屏山區累積雨量逾2500毫米。

就氣象防災之需求，最主要任務在提供正確的颱風路徑和伴隨風雨之觀測和預報資訊，因此探討如何進一步提高颱風路徑預報的準確度與提升颱風豪雨的預警能力並改善與下游水文模式之銜接，成為提升氣象服務與增進氣象防災效能非常重要的項目，此也是國家科學委員會推動防災氣象領域之重點研究課題。

颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展，為在此重點研究課題中之一項整合型研究，此研究包括3個主要部分，分別是颱風路徑動力模式之改進及颱風豪

雨、洪水動力模式預報技術的建立；應用都卜勒雷達觀測資料，建立雷達颱風降雨氣候資料，並發展颱風伴隨強風即時分析和顯示之作業化技術；颱風降雨氣候模式的校驗、改進與整體風雨預報技術之落實。葉等（2011a）曾說明該研究於2009年之研究成果，本文再就研究於「颱風都卜勒速度觀測與地面風力關係之研究及都卜勒風場反演之作業化」、「全球數值模式於颱風路徑預報之應用與發展」、「颱風中尺度定量降雨預報技術之改進」、「颱風雷達降雨氣候模式研究」、「颱風豪雨及洪水藕合預報技術之研究」、「臺灣東南近海颱風受地形影響的中尺度結構分析」、「WRF模式土壤過程之改進對登陸颱風之風雨結構的影響」與「建置WRF模式於颱風預報作業應用之研究」等8子研究於整合型研究全程（2010年）完成之主要成果做摘要說明，更完整之說明可參見葉等（2011b）。

二、研究進行與主要成果

「在颱風都卜勒速度觀測與地面風力關係之研究及都卜勒風場反演之作業化」方面，主要工作為利用中央氣象局都卜勒雷達與空軍雙偏極化雷達資料，進行雙都卜勒雷達風場反演、產品上線測試與校驗分析，另進行颱風之垂直風力剖面分析

(張, 2010)。其中雙都卜勒雷達反演上線測試部分, 已將相關技術應用於實際作業QPESUMS系統中進行測試。由2010年颱風個案萊羅克(Lionrock)、莫蘭蒂(Meranti)、凡那比(Fanapi)、梅姬(Megi)的作業測試顯示, 雙都卜勒風場合成分析(部分圖如圖1)提供颱風雨帶區域的環流特性, 颱風中心位置、強度與暴風範圍等的變化趨勢均具參考價值。

在雙都卜勒雷達反演風場校驗分析方面, 由與剖風儀、探空、dropsonde的觀測校驗發現, 反演風場與其它觀測值具有相當佳的一致性。其中又以與剖風儀風場觀測的一致性最為顯著, 由颱風辛樂克(Sinlaku 2008)、蕃蜜(Jangmi 2008)、莫拉克(Morakot 2009)的比較發現(見圖2), 其西風與南風分量的均方根誤差別為2.6 m/s與3.2 m/s。由2008年辛樂克與蕃蜜颱風的風力垂直剖面分析顯示, 在辛樂克颱風侵襲期間, 日本嶼那國島之陣風風速與高度3公里雙都卜勒反演風速接近, 比值約0.93, 與平均風速比值0.66。在蕃蜜颱風個案中, 嶼那國島之陣風風速與高度3公里雙都卜勒反演風速比值約0.84, 與平均風速比值0.56。

由此研究結果亦發現, 現有臺灣地區都卜勒雷達網連的密度, 已具有雙都卜勒分析的作業化環境與價值, 未來如能持續改進都卜勒速度場資料反折錯處理等品質管制處理, 並進行颱風個案垂直風力剖面分析, 透過高空與地表風力經驗公式的建立, 可進一步將雙都卜勒風場的反演結果

應用於海面與地面風力的推估, 對於相關的颱風風雨預報作業與數值模式資料同化將能提供更多的風場參考資訊, 藉以提升對於海面風力的監測與預報準確度。

「全球數值模式於颱風路徑預報之應用與發展」方面, 主要重點在改進氣象局全球預報模式颱風路徑預報, 並探討物理過程及不同觀測資料對颱風路徑預報的影響(馮, 2010)。中央氣象局全球預報系統(CWBGFS)在2009年7月對邊界層及積雲對流參數化兩項物理進行大幅度的更動, 依實驗結果顯示這更動對熱帶風場的系統性誤差產生相當明顯的改進, 新物理版本也改善了舊版對副熱帶高壓預報過強的系統性誤差, 使預報強度的掌握較為平穩。另外對舊版的積雲參數化容易過度預報熱帶低壓渦旋的問題也在新版獲得改善, 不過相較之下新版在颱風系統強度的發展上有限, 因此預報熱帶渦旋強度, 舊版的變化幅度要比新版大許多。以2008年7個測颱風個案分析此次物理參數化變動對颱風路徑預報之影響顯示(見圖3), 新版的路徑預報較舊版有所進步, 但個案間有所差異, 分析顯示誤差偏大的路徑與使用虛擬渦旋植入法作颱風初始化方案有關, 進一步測試也發現新版在一些個案施加虛擬渦旋植入法後反而對路徑預報產生負面效果, 顯示颱風初始化方案在模式物理特性變動後, 颱風渦旋初始化方式還有必要再做調整。

在進行TPARC實驗飛機加強觀測資料對颱風路徑預報的影響分析, 以辛樂克

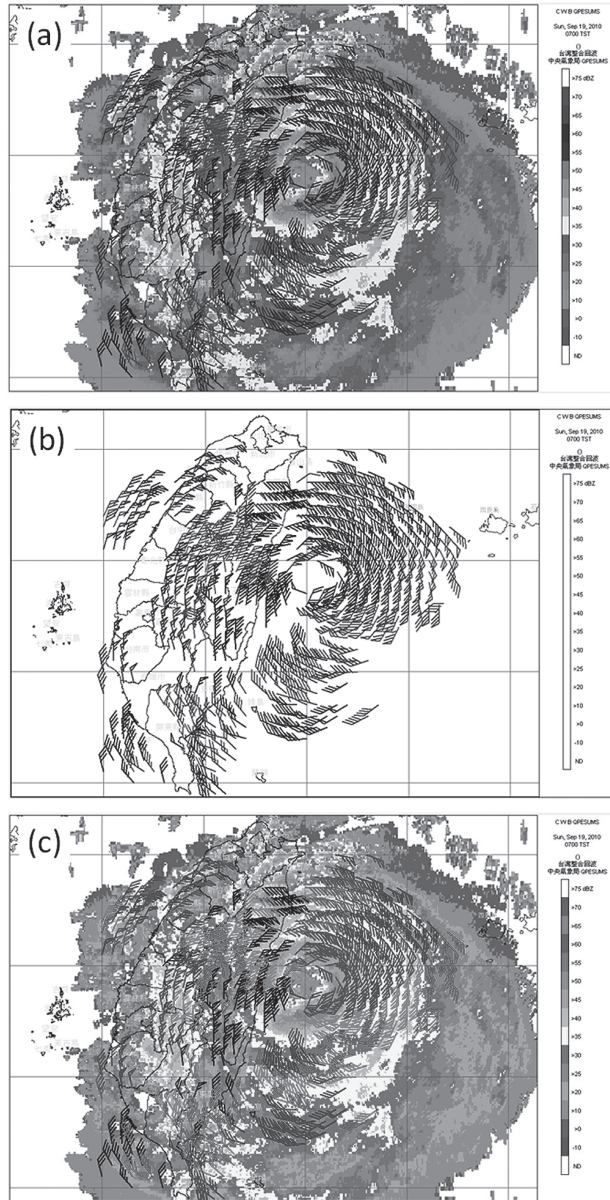


圖1 雙都卜勒風場在中央氣象局QPESUMS系統對2010年凡那比颱風9月19日7時 (a) 風場 (單位為knots) 與雷達迴波在灰階圖之顯示情形，圖 (b) 僅含風場，圖c則可於彩色顯示圖中分辨風場於不同高度上之分布，風標顏色紅、藍、桃紅、白色分別表示於高度1-2公里、3-4公里、5-6公里，以及7公里以上。

Figure 1: The dual-Doppler radar wind analyses for Typhoon Fanapi at 2300 UTC 18th September 2010. (a) Composite wind fields on different levels and the radar reflectivity. (b) Same as (a), except for winds only. (c) Same as (a), except for in colour print. Wind speeds are indicated by wind bars with full/half bars 10/5 m/s. The wind bars in red, blue, pink, and white in (c) indicate winds on the levels of 1-2, 3-4, 5-6, and above 7 km, respectively.

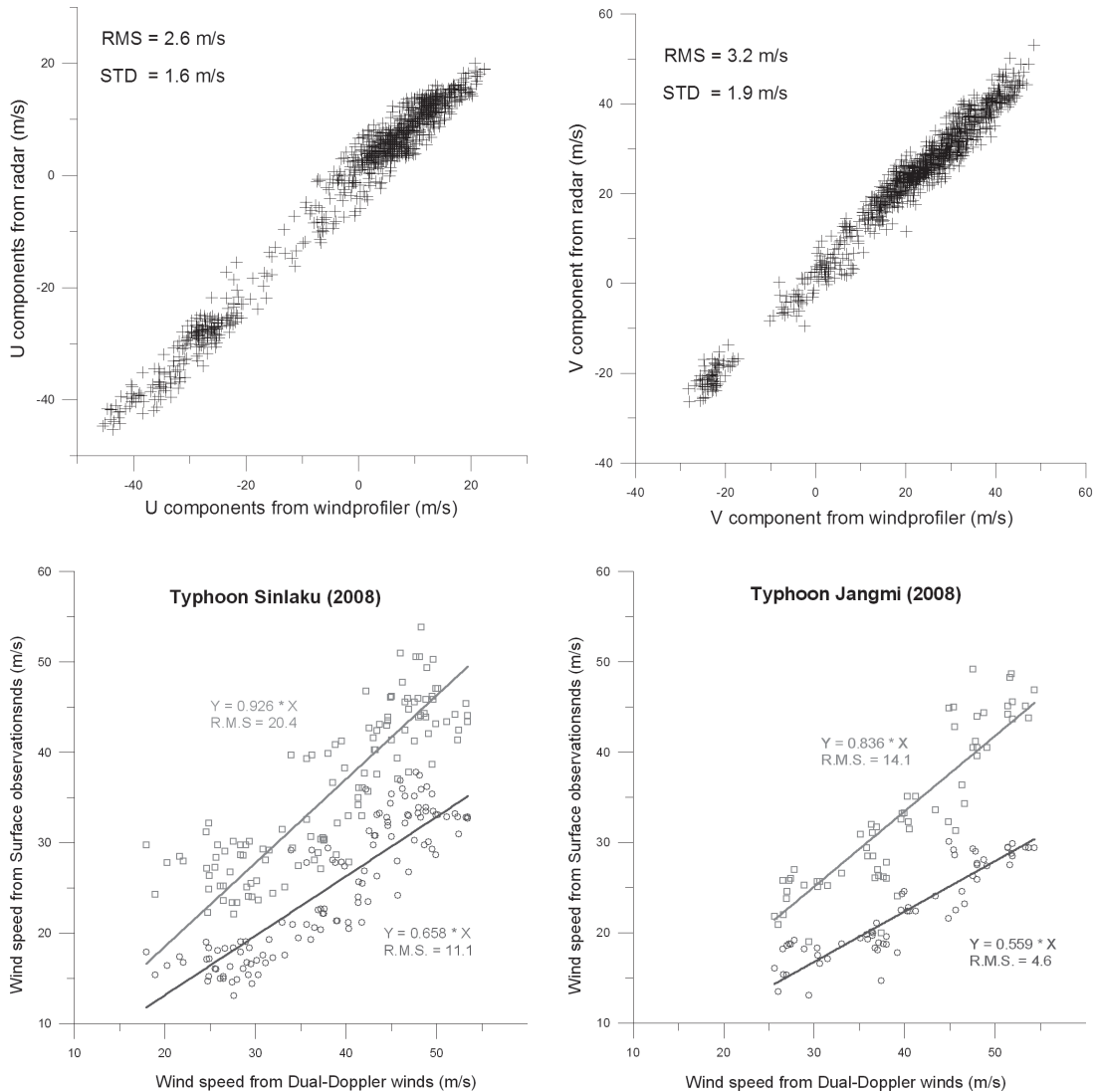


圖2 辛樂克、薈蜜、莫拉克3颱風雙都卜勒反演風速與嶼那國島剖風儀風速觀測散布圖（圖左上為西風分量，右上為南風分量）及辛樂克颱風（左下）與薈蜜颱風（右下）在高度3公里雙都卜勒反演風速與嶼那國島地面觀測陣風風速（方形標示）與平均風風速（圓形標示）散布圖。

Figure 2: Scattering diagrams of the west-east component (upper left) and the south-north component (upper right) wind speeds between the dual-Doppler radar analyses and the observations from wind profiler for Typhoons Sinlaku, Jangmi, and Morakot. In bottom panels, the scattering diagrams of the gust speeds (squares) and the average wind speeds (circles) are at 3-km level for Typhoon Sinlaku (bottom left) and Typhoon Jangmi (bottom right). The linear regression information is also included in bottom panel.

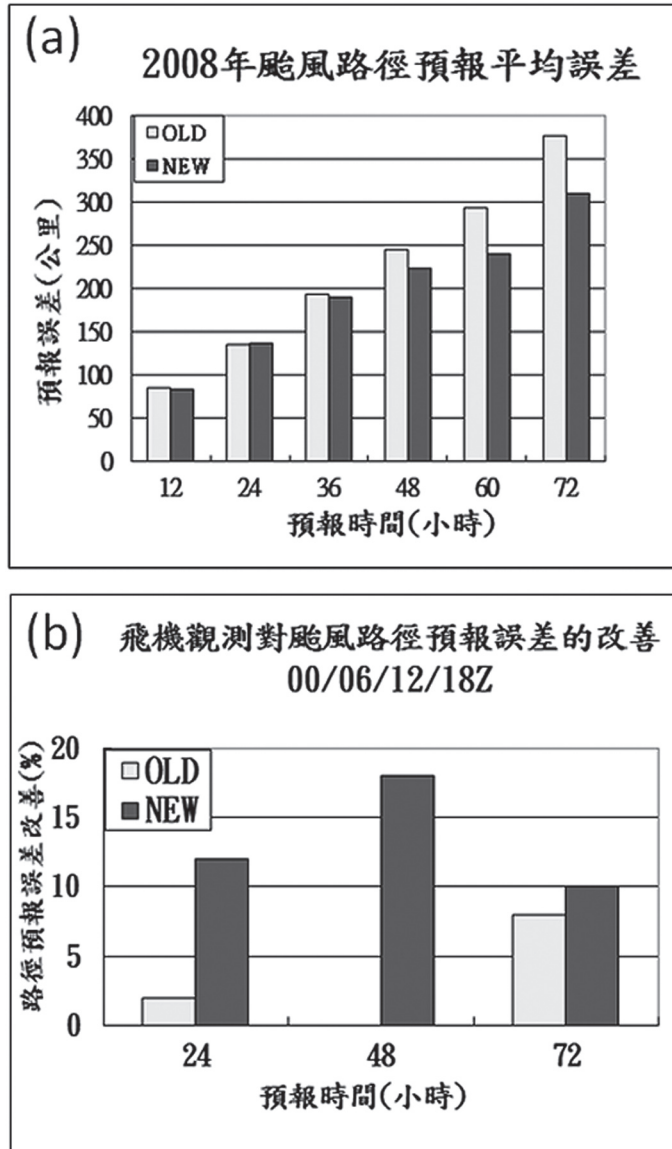


圖3 利用中央氣象局全球預報系統邊界層及積雲對流物理參數化之新舊版本，(a) 測試2008年7個颱風之路徑預報影響，舊模式(圖中標示OLD)與改進模式(圖中標示NEW)在不同預報時間之路徑預報誤差統計。(b) 測試飛機觀測資料對模式預報誤差之影響，因物理參數化之不同，新版的72小時內路徑預報，加入飛機資料可改善10-18%的誤差，舊版只有2-8%。

Figure 3: (a) The averaged track distance forecast errors (vertical axis, units in km) of the operational (OLD) and the testing version (NEW) global forecast model at Central Weather Bureau for the 7 typhoons affecting Taiwan in 2008. (b) The percentage for the improvement on track forecast when the dropsonde observations were included in the analysis. Horizontal axes are the forecast time in hours.

颱風侵臺前個案研究發現，新物理版本能比舊版發揮更大的資料效益。在TPARC實驗加強觀測期間，新版的72小時內路徑預報，因飛機資料加入可改善10-18%的誤差，舊版只有2-8%。並且不論是在傳統觀測資料較充裕的00/12UTC或在傳統觀測資料匱乏的06/18UTC，飛機資料對新版均有減小路徑誤差的顯著效果，但舊版在兩個階段的資料效益並不均勻，只在00/12UTC呈現改善效果，06/18UTC則反而出現負面影響，這可能與新版模式的預報對大尺度環流的掌握較佳，能提供較佳的猜測場，使飛機資料在分析過程更具效用，有助突顯資料對颱風路徑預報的改進程度。進一步測試分析不同資料使用條件下對辛樂克侵臺前路徑預報的影響，發現若改使用間斷式資料同化方式加入TPARC觀測資料，資料對路徑預報的影響度都較連續式明顯降低，顯示連續性的飛機投落送資料，透由連續式資料同化過程會累積資料效果，有助預報準確性的提升。以新一代全球資料同化系統（GSI）評估福衛3號GPS RO資料對颱風路徑預報的影響，由2008年至2010年期間侵襲臺灣或威脅性較大的11個颱風個案顯示，RO資料的影響有時不易彰顯，進一步從路徑類別做分析，則可發現資料正面效應較多集中在含有路徑轉彎的預報時段上，顯示路徑轉彎時因對綜觀天氣系統的因素較敏感，此時RO資料可有相當正面的助益（如圖4）。

「颱風中尺度定量降雨預報技術之改

進」方面，李（2010）利用1989-2006年個案進行氣候模式整體特性之評估，結果顯示由於氣候模式之降雨預估採用網格平均值，因此出現些微低估的情形。進一步建立西行、北行颱風與東北季風共伴颱風之降雨氣候模式，其結果顯示此分類模式較原始氣候模式為佳，惟以2007年獨立個案校驗結果顯示，不論是降雨量值或降雨分布，東北季風共伴模式的表現反而較差，顯示颱風外圍環流與東北季風交互作用產生之共伴效應，常僅侷限於較小的範圍，而且不同個案的共伴效應所影響之區域，很可能亦不相同。

進一步利用SSM/I衛星颱風降雨量，建立侵臺颱風衛星降雨氣候，並發展依據衛星降雨潛勢修正颱風降雨模式之方法，完成集水區颱風降雨模式（Ver.2.1），此模式可利用颱風路徑、強度、七級風暴風半徑以及衛星降雨潛勢等條件，篩選具有類似特徵的颱風，調整降雨模式之預報結果。利用1.無篩選、2.用颱風路徑分類篩選類似個案、3.用颱風路徑與強度分類篩選類似個案、4.用颱風路徑與二分法之衛星降雨潛勢篩選類似個案、以及5.用颱風路徑與三分法之衛星降雨潛勢篩選類似個案等五種設定，表1列示此些設定對2004年至2008年共8個顯著影響臺灣之颱風降雨在不同門檻值之Threat Score（TS得分），顯示經篩選類似之颱風個案並進行調整後，原本氣候模式低估降雨之情形有顯著改善，而用颱風路徑與二分法之衛星降雨潛勢調整之降雨模式設定較其他調整

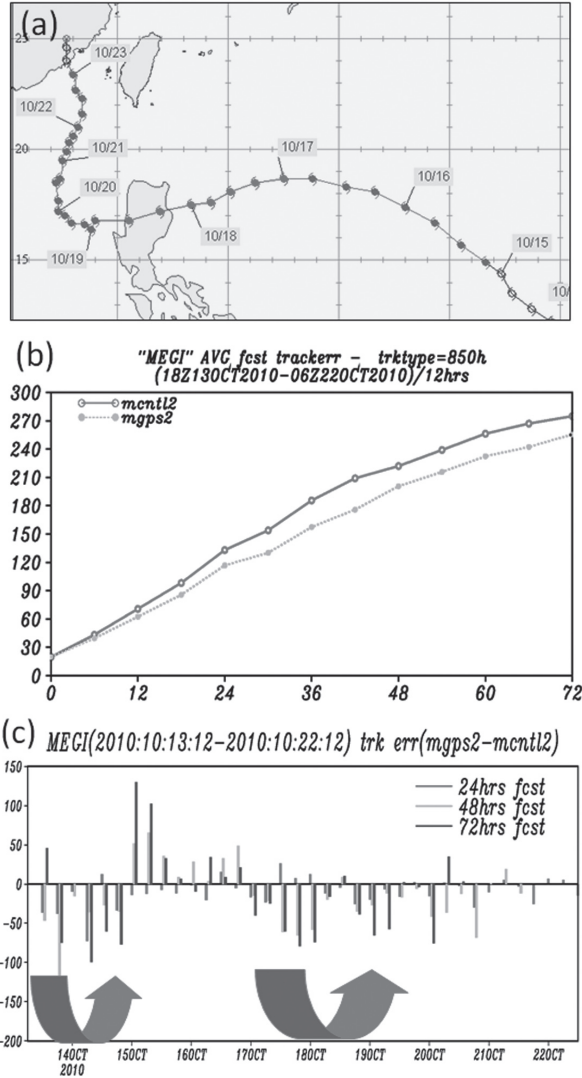


圖4 (a) 梅姬颱風實際路徑，(b) 梅姬颱風有（圖標示mgps2）無（圖標示mcntl2）福衛3號GPS RO資料條件下之颱風路徑預報誤差統計。(c) 梅姬颱風從10月14日至22日每個初始場所呈現GPS RO資料對24、48與72小時路徑預報影響的時序分布，負值代表資料有正面影響，箭頭標示路徑轉彎時段。

Figure 4: (a) The best track of Typhoon Megi (2010), and (b) the average track distance forecast errors (vertical, in km) of CWBGFS forecasts with (mgps2) and without (mcntl2) GPS RO observations included in the analysis. The track in (a) are marked in 6 hours intervals starting 00 UTC, and the numbers indicate the month/date. (c) Difference of the track forecast errors (vertical, in km) at 24, 48, and 72 hours forecast (see caption) between the CWBGFS forecasts with and without GPS RO observations included in the analysis. The forecasts start from 14th to 22nd October (horizontal) with four forecasts per day. Two arrows on the bottom of figure mark the periods when Typhoon Megi moved with larger direction changes.

表1 氣候模式與新發展模式對8個顯著影響臺灣之颱風個案在不同降雨門檻值之TS得分 (Threat Score)。

Table 1: The threat scores on different thresholds of the climate model forecast and the new developed model forecast, respectively, for the eight significant typhoons affecting Taiwan.

	氣候模式	設定一	設定二	設定三	設定四
模式設定 TS 門檻	CLIMATE	V2_track	V2_track, intensity	V2.1_track, rainrate (1/2)	V2.1_track, rainrate (1/3)
130 mm	0.5	0.55	0.53	0.54	0.53
200 mm	0.34	0.45	0.44	0.47	0.45
300 mm	0.14	0.30	0.29	0.32	0.29
350 mm	0.09	0.24	0.24	0.28	0.25
400 mm	0.06	0.17	0.18	0.19	0.19
500 mm	0.01	0.17	0.16	0.2	0.19
平均	0.19	0.31	0.31	0.33	0.32

方式有更佳之預報能力。以此種設定對鳳凰颱風降雨預報為例，除了在降雨區分佈的預報上有相當不錯的表現外，模式更可適當掌握宜蘭山區與西南部山區之降雨極大值。圖5顯示對於鳳凰颱風，在350毫米（超豪大雨）以上門檻值皆有較佳之表現，對於500毫米門檻值之TS得分達0.5，詳見李（2010）。

在「颱風雷達降雨氣候模式研究」方面，鳳（2010）發現莫拉克颱風與海棠颱風相當類似，兩者在颱風登陸後均在臺灣西南部的海外形成垂直於中央山脈的滯留性雨帶，雨帶中深厚且強勁的西風與山區發生豪雨有很高的相關性。此外，在強勁西風發生（風速高於25~30 m/s）時，山區的降雨會越過中央山脈，

這使得太麻里河流域上游會有很大的降雨量，類似路徑的颱風但是風速較低時，此處則是處於焚風的環境中。由2005年的海棠（Haitang）、泰利（Talim）及龍王（Longwang）3西行登陸的颱風，分析其在臺灣西南部山區的降雨與颱風降雨氣候模式間的關係，則顯示海棠颱風屬於嚴重低估型、龍王颱風屬於平均值型、而泰利颱風則介於兩者之間為低估型。而利用颱風降雨壯度的概念是可以有效改進颱風登陸前的山區降雨低估現象，但仍無法改善臺灣西南部山區因颱風引進西南氣流造成豪雨的低估。圖6為颱風降雨氣候模式海棠颱風整場降雨的預測雨量與實際觀測雨量的散佈圖，可見颱風降雨壯度修正模式對臺灣西南部地區的降雨低估有相

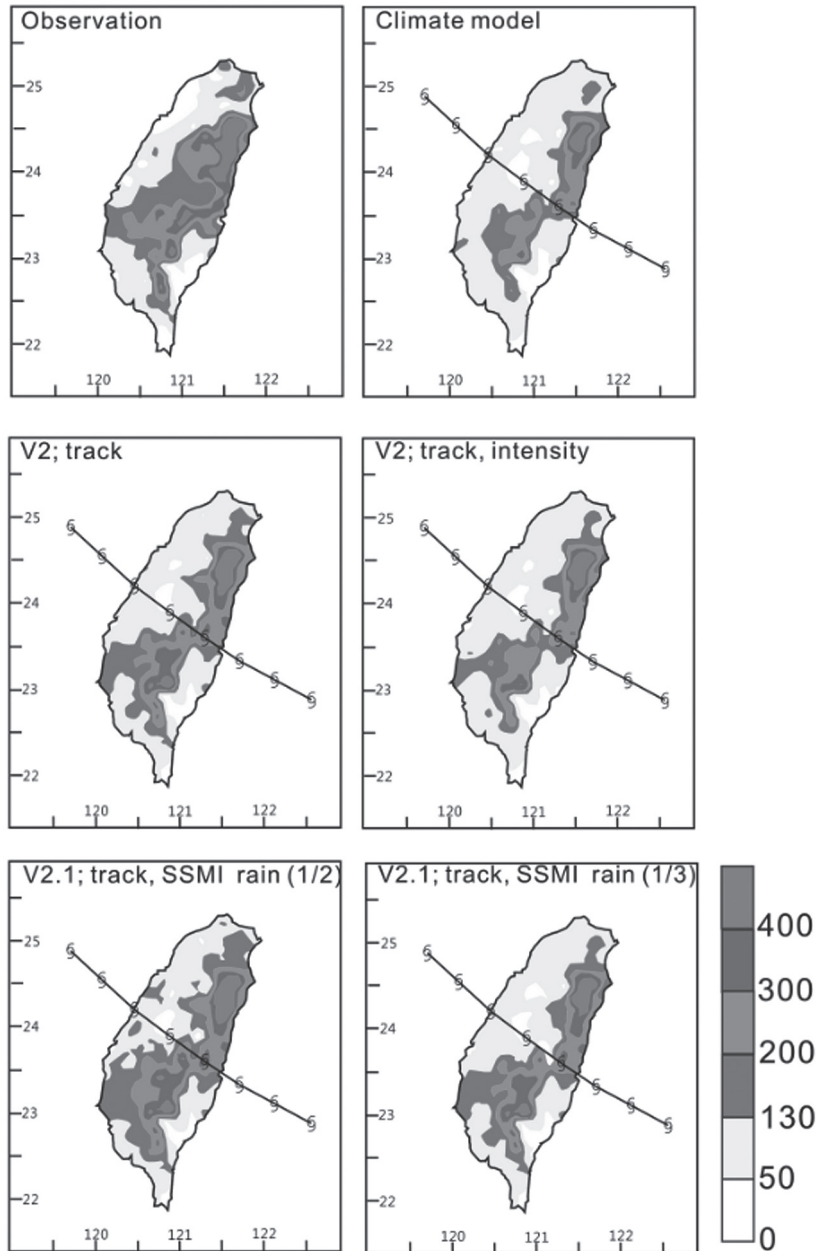


圖5 2008年鳳凰颱風侵臺期間，7月27日12 UTC至28日12 UTC之24小時觀側累積雨量（左上）及5種集水區颱風降雨模式設定（見文中說明）之重預測結果，預測圖中並標註觀測之颱風路徑。各圖雨量值尺標顯示於右下（單位毫米）。

Figure 5: The observed accumulation rainfalls of Typhoon Fung-wong in 2008 (top left, scale on bottom right, units in mm) and the corresponding forecasts (other panels) from 5 different typhoon rainfall forecast models based on climatologic approach. The track of Typhoon Fung-wong was also shown on the diagrams.

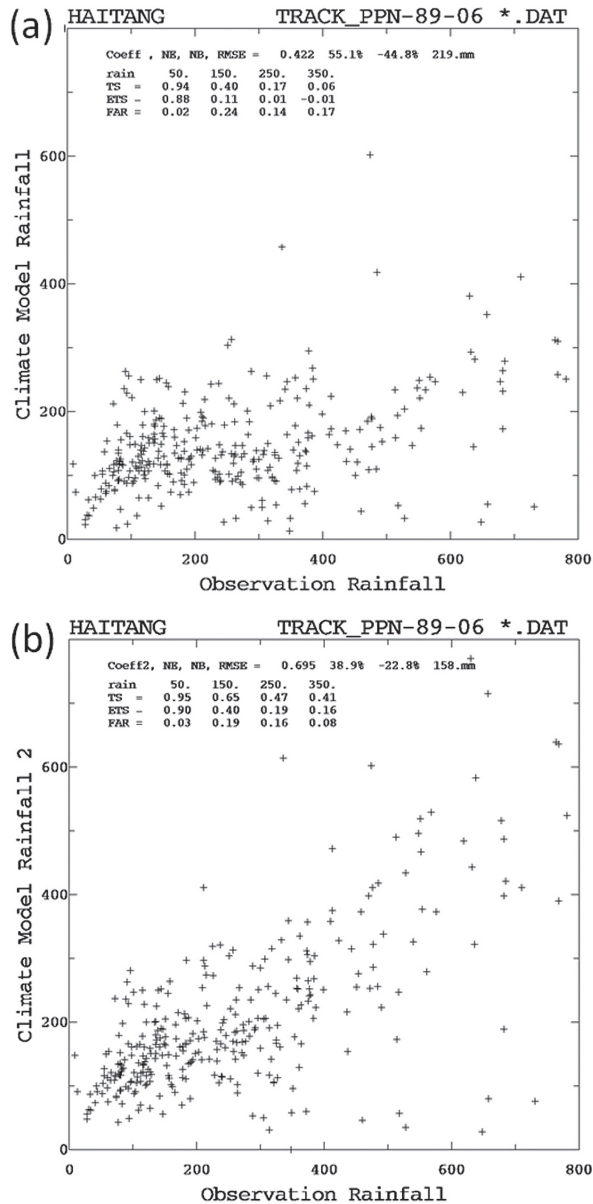


圖6 為颱風降雨氣候模式海棠颱風整場降雨的預測雨量與實際觀測雨量的散佈圖，其中 (a) 為颱風降雨氣候模式標準輸出值；(b) 為採用高颱風降雨壯度值及引進西南氣流的修正模式輸出值，由散佈分析圖可知修正模式的輸出對臺灣西南部地區的降雨低估有相當不錯的改善。

Figure 6: Scattering diagrams of the observed total rainfall versus model forecasts (in mm) from (a) classic climate forecast model, and (b) modified climate forecast model for Typhoon Haitang in 2005. In the modified climate forecast model, there are different groups of typhoon based on the typhoon rainfall parameter from radar reflectivity and the strength of the accompanying southwesterly monsoon.

當不錯的改善。對於整場降雨量大於150毫米之預報TS得分從0.40提升至0.65，整場降雨大於350毫米的TS得分從0.06提升至0.41。然而，對於降雨型態比較接近平均值的龍王颱風，颱風降雨壯度修正模式卻有高估的情形，即颱風降雨壯度值仍未能完全反應臺灣西南側山區豪雨的成因，初步發現進一步利用雷達EVAD技術所反演的垂直風速變化，對於山區豪雨的規模估計是有相當的大發展空間（鳳，2010）。

「颱風豪雨及洪水耦合預報技術之研究」方面，研究使用雷達參數搭配降雨關係式做降雨推估，並且輸入至水文模式（CASC-2D）以模擬石門水庫霞雲集水區河川逕流（楊，2010）。以2006年碧利斯（Bilis）颱風，使用中央大學雙偏極化雷達資料，顯示（圖7）對碧利斯颱風使用 K_{DP} ，特別是在時雨量達5 mm/h以上時，估計降水都在5 mm/h以下，應用 Z_H 、DSD等雷達參數推估降雨也有相同明顯低估情形（圖略），而以 Z_{DR} 雷達參數推估降雨，對小雨部分有高估，惟較接近於實際觀測雨量值，特別是以3km之參數推估降雨。利用此 Z_{DR} 雷達參數推估降雨帶入水文模式模擬流量與水位，結果顯示洪峰流量值較實際觀測流量高估約30~40%（圖8）。而當雷達參數推估降雨之水平分佈與實際降雨分佈接近時，依據水文模式推估之流量水平分佈亦與觀測流量分佈接近。

由楊（2010）研究也得知使用雙偏

極化雷達參數推估降雨對於集水區的雨量分佈推估有明顯的改善；應用雷達 K_{DP} 參數推估降雨時，雖然雨量推估有低估的現象，但較其他雷達回波參數（ Z_H 、DSD、 Z_{DR} ）推估為穩定。而 Z_{DR} 推估降雨則明顯的高估，對於實際雨量值較小的個案上反而有較好的結果。因此，對於大雨量個案的雨量推估以應用 K_{DP} 回波參數較佳，而小雨量個案的雨量推估應用 Z_{DR} 回波參數較為適合，在實際作業應用時，可配合即時觀測雨量資訊做為雨量大小的評斷標準。於不同CAPPI高度的雷達參數回波推估降雨結果，會由於雨帶沿著山區傾斜，導致於不同高度雷達回波估計降雨量的位置也會不同，因而影響到流量模擬結果。將4種雷達參數（ Z_H 、DSD、 Z_{DR} 、 K_{DP} ）推估降雨結果做系集平均後再與觀測值比較，所得降雨推估結果有明顯改善。另外逕流模擬受到雨量分佈情況及累積雨量值的多寡影響相當大，若雨量差異 ± 14 mm/h左右，則流量的差異約 ± 1000 m³/h。假使再加上土壤及土地利用的不同而導致流量差異，整體可達 $\pm 1000\sim 2000$ m³/h左右明顯流量變化。

在「臺灣東南近海颱風受地形影響的中尺度結構分析」方面主要是以綠島都卜勒氣象雷達觀測資料為主，針對2000年強烈颱風碧利斯（Bilis）為研究對象，分析此颱風在外海期間降水雨帶之結構（何，2009）。圖9顯示在碧利斯颱風的中尺度主觀地面氣流與2km定高面徑向風場（m/s）合成圖以及2km定高面回波強

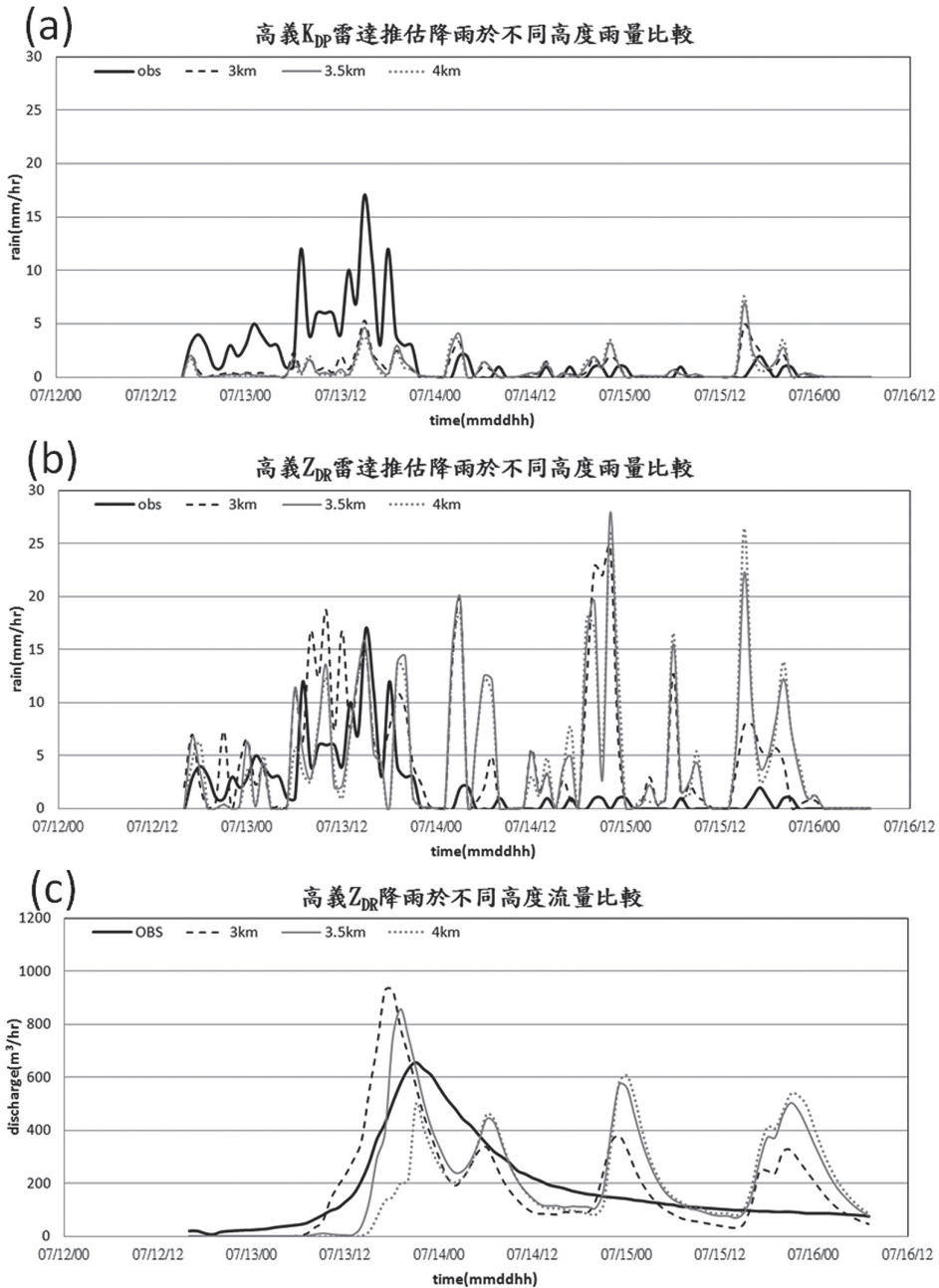


圖7 2006年碧利斯颱風以不同高度（3 km、3.5 km、及4 km，見圖標示）雷達參數（a）KDP與（b）ZDR推估高義降雨與實際觀測降雨（OBS）隨時間（橫軸）之演變。（c）為以ZDR推估降雨帶入水文模式推估高義流量與高義實際觀測流量站分布。

Figures 7: Time series (horizontal axis) of the observed rainfall rate (OBS, in mm/h) at station Gauyi and the corresponding derived rainfall rates by radar parameter (a) KDP, and (b) ZDR at levels of 3, 3.5, and 4 km. (c) As in (b), except for the flow discharge simulated by the model.

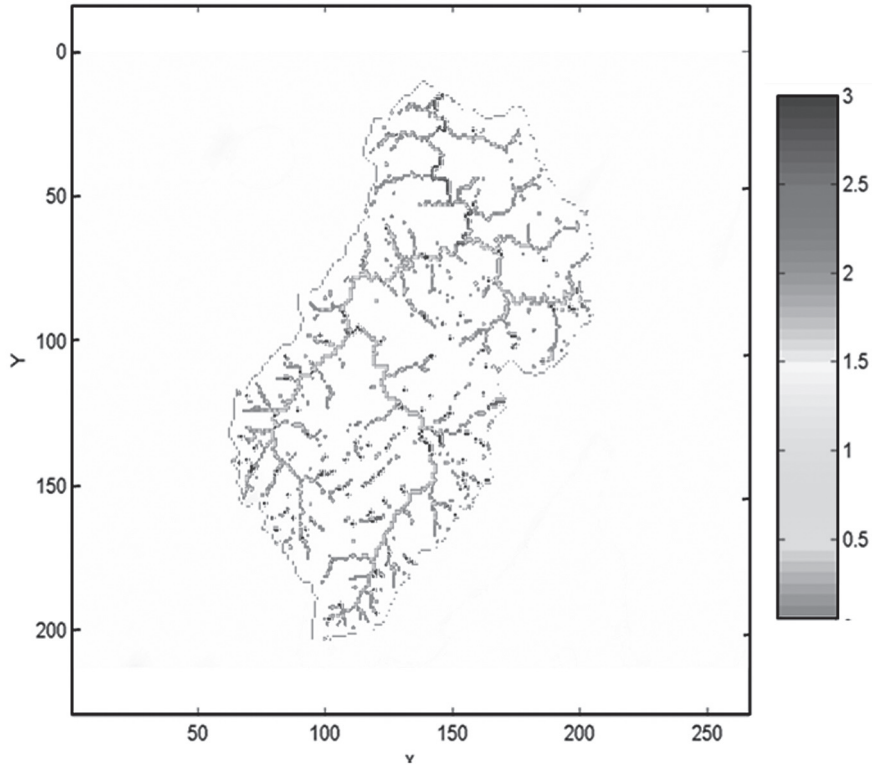


圖8 2006年碧利斯颱風由CASC-2D水文模式模擬所得震雲集水區於7月12日16 UTC時的河川水位分佈（水位高度見右側指標；單位公尺）。

Figure 8: The river water level (in m, colored scale on the right) over the Hsiayun watershed simulated by CASC-2D model at 1600 UTC 12 July during the invasion of Typhoon Bilis in 2006.

度 (dBZ) 圖，說明碧利斯颱風中心與環流往西北方向逐漸移入臺灣陸地時，出現雙眼牆特性，低層入流區（第一與第四象限）之向岸風場與離岸風場（第二與第三象限）相當，並無低層風速呈現逆轉的現象。研究結果亦顯示，颱風雨帶受地形影響，主要有地形阻擋 (blocking)、管道 (channeling) 與角隅 (corner) 效應，且颱風愈接近臺灣東南部山區，地形效應也愈明顯，且其雙眼牆特性在逐漸接

近臺灣東南部地形時也有明顯變化。

何 (2009) 進一步以 WRF 模式探討在臺灣地形影響下，邊界層過程對颱風雨帶結構、降雨分布的影響。研究係以不同邊界層參數化法，搭配有、無地形的組合，對2007年柯羅莎颱風 (Krosa) 進行模擬，經分析得知，臺灣地形不只透過高度影響颱風在陸上的降雨量及其分布，同時也透過繞流效應及海峽兩側地形分布，分別影響到臺灣東、西兩側海

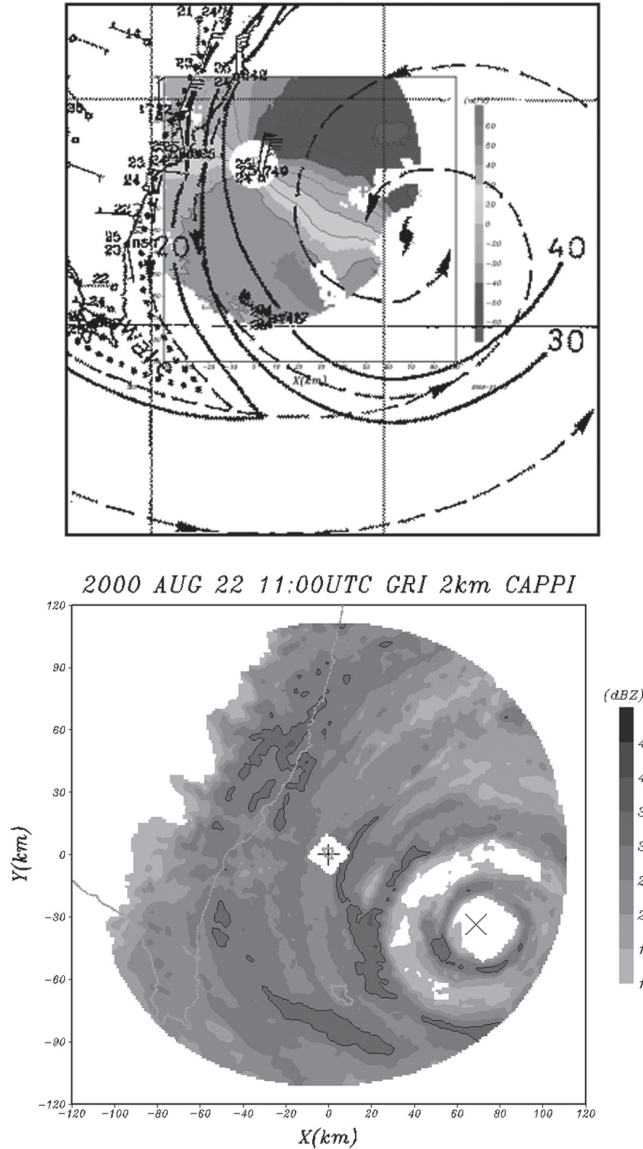


圖9 上圖為在2000年8月22日11 UTC 強烈颱風碧利斯 (Bilis) 的中尺度主觀地面氣流與2 km定高面徑向風場 (m/s, 值見尺標) 合成圖。圖中颱風符號代表颱風中心位置, 白色圓區中心為距臺灣東南海岸33 km綠島雷達站位置, 虛線是氣流線, 實線是等風速線 (m/s)。下圖為同時間的2km定高面回波強度 (dBZ) 圖, 圖中符號X代表颱風中心位置, 符號+代表綠島雷達站位置。

Figure 9: The composite diagram (upper panel) of the subjective analyzed surface wind streamlines (dashed) and isotaches (solid) with radial direction wind speed at 2-km level observed by Ludao radar at 1100 UTC 22nd August 2000 before Typhoon Bilis (marked with typhoon symbol) made landfall in Taiwan. For lower panel delineates the reflectivity (dBZ) at 2-km level. The symbol "X" indicates the typhoon center and symbol "+" stands for the radar site.

上雨帶的發展，此點發現可以驗證碧利斯颱風（2000）移入臺灣東南近海時，繞流效應對第二與第三象限的離岸風風場強度有明顯的加強作用。圖10說明就柯羅莎颱風個案而言，WRF模式搭配WRF Single-Moment 6-class（WSW6）微物理參數法、Asymmetric Convective Model version 2（ACM2）邊界層參數法和Grell-Devenyi ensemble（GD）積雲參數法，可獲得台灣地區降雨模擬的較佳表現，同時在颱風第二與第三象限的雨帶發展明顯增大。

在「WRF模式土壤過程之改進對登陸颱風之風雨結構的影響」方面，研究在改善WRF模式的地表處理過程，評估此改善對模式颱風定量降水預報的影響（洪，2010）。其中包括取用高解析度之臺灣土地利用型態資料，取代WRF模式內建之資料，以及引進最新之高解析度土壤資料同化系統HRLDAS。在導入臺灣地區高解析度土地利用資料部分，係採用中鼎工程顧問公司將2001年內政部所出版的經建版1/25,000基本地形圖數位化，再進一步整合MODIS Landuse Data所得結果，再進一步整合MODIS所觀測之森林和灌溉農田的土地利用資料。由原始WRF（USGS）以及修改後（IOCT）之土地利用分佈圖（圖11）顯示，兩者主要的差別在於都市、灌溉農田和森林的分佈。大陸地區的差異主要是灌溉農田和森林，這是MODIS觀測和USGS資料庫的差異所導致；臺灣地區的差異則為都市、灌

溉農田和森林，這是整合MODIS、內政部數位化土地利用資料後，和USGS的差異。採用USGS和IOCT土地利用資料對莫拉克颱風模擬的影響，在72小時預報時，IOCT組的颱風強度仍明顯較USGS組強，而且移動速度也較快（圖12），由於颱風環流結構較USGS組完整，因此颱風雖移動速度較快，但引進之西南氣流較強，導致在臺灣地區的降水較USGS組來得強。

在引進土壤資料同化系統HRLDAS方面，係利用WRF模式每6小時之地面溫度、長短波輻射等預報輸出做為大氣逐時地面觀測，並使用逐時QPESUMS的估計降水等資訊，透過積分的過程得到模式土壤的較合理溫、濕度分析場。圖13是HRLDAS同化分析結果、觀測和中央氣象局WRF原作業模式於恆春站2009年8月至2010年8月之土壤溫度。圖中顯示WRF原作業模式的土壤溫度顯著偏暖，透由HRLDAS的分析場則有明顯改善。針對2009年莫拉克颱風（初始場在8月6日06 UTC）和2010凡那比颱風（初始場在9月18日00 UTC）之預報實驗顯示，透由HRLDAS之模擬和WRF作業之地表溫度在臺灣地區溫差可達4~8°C（圖略），72小時預報後地表溫度差異仍可達2~4°C，第一層土溫差可達4°C，第一層土壤濕度的差異則約為0.12。改善模式地表過程有助於更精確掌握可感熱和潛熱通量的傳送，進而影響近地層的局部環流，以致有較佳颱風的定量降水預報（詳見洪，2010）。

Krosa WSM6+GD+ACM2 Rainfall 0716Z

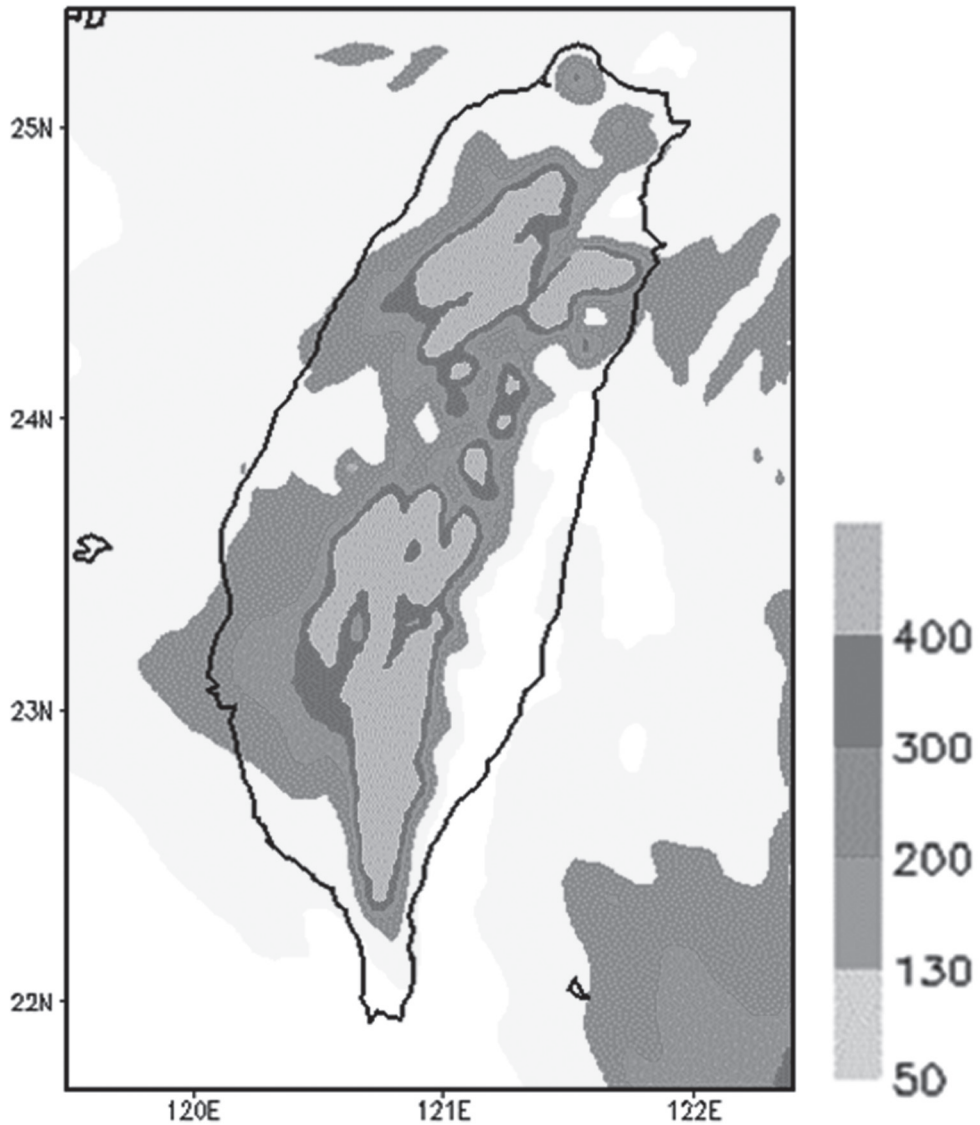


圖10 以WRF模式模擬2007年柯羅莎颱風10月5日00UTC至7日16UTC 64小時的累積雨量（右側尺標，單位毫米），其中使用WRF single-moment 6-class微物理參數法搭配Grell-Devenyi ensemble積雲參數法和asymmetric convective model version 2（ACM2）邊界層參數法。

Figure 10: The 64-hour accumulated rainfall (scale on right in mm) simulated by the WRF model for the period Typhoon Krosa affecting Taiwan from 0000 UTC 5th to 1600 UTC 7th October 2007.

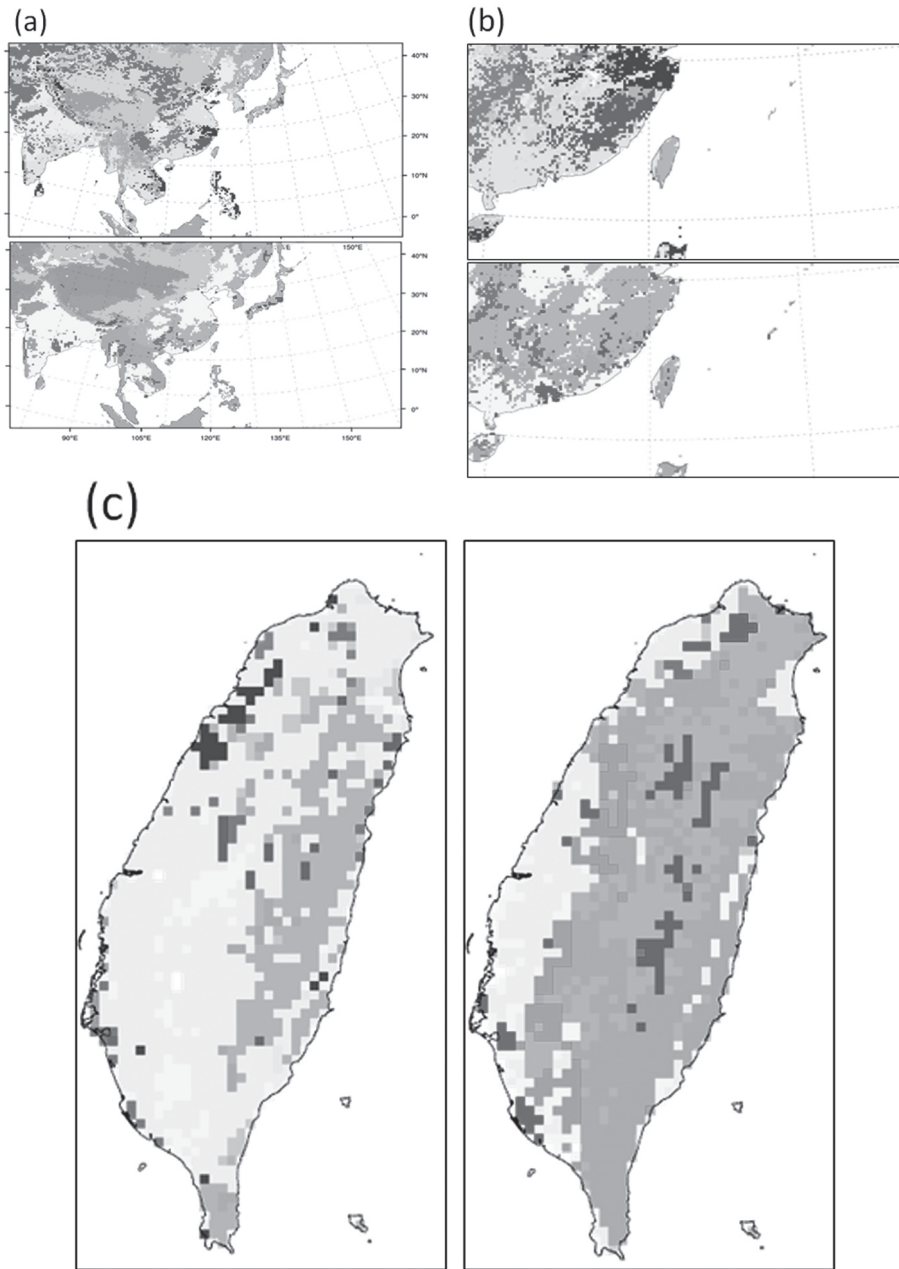


圖11 概略顯示在中央氣象局WRF模式三層嵌套網格 (a) 45公里、(b) 15公里於臺灣附近、與 (c) 5公里於臺灣使用USGS (上或左) 和IOCT (下或右) 的土地利用分布之差異 (詳細略)。

Figure 11: Diagram to compare the USGS (upper or left) and IOCT (bottom or right) land cover datasets in the WRF (a) 45 km, (b) 15 km, and (c) 5 km grid mesh.

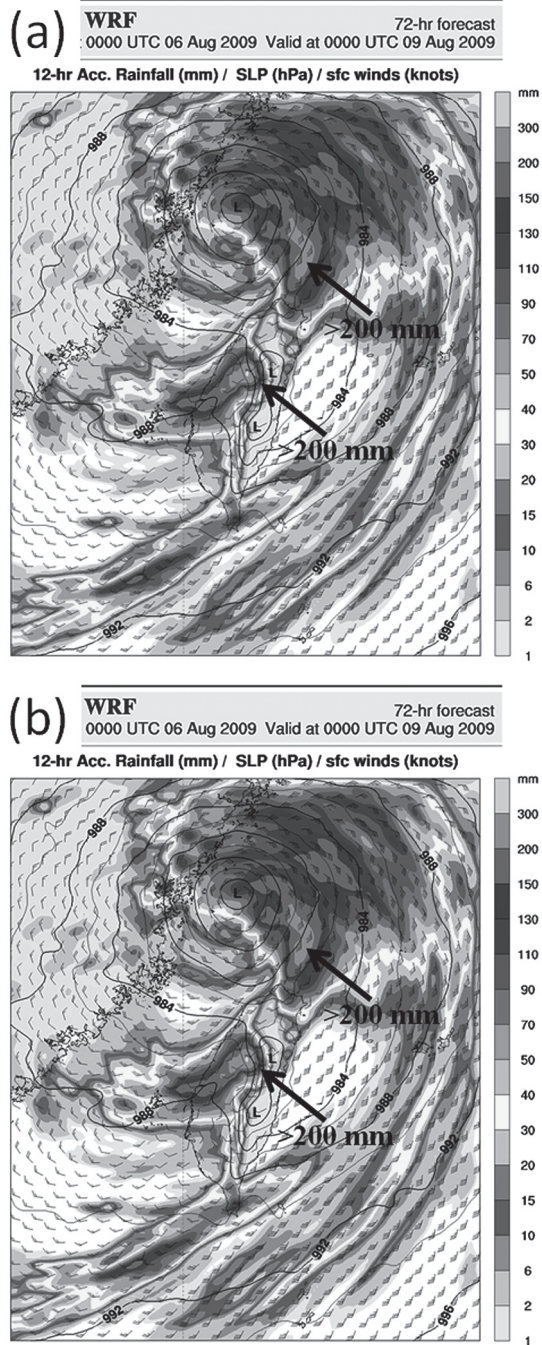


圖12 使用(a) USGS和(b) IOCT土地利用資料對莫拉克颱風模擬之第72小時預報的12小時累積降雨分佈（色系，尺標置於圖右側）和地面氣壓（等值線）。

Figure 12: The 12-hour accumulated rainfall (scale on the right, in mm) and the surface pressure (contours) at 72-hour simulation by the WRF model with the (a) USGA, and (b) IOCT land cover for Typhoon Morakot.

「建置WRF模式於颱風預報作業應用之研究」方面，研究主要項目包括測試與建立WRF模式資料同化、渦旋移置處理（relocation）等於颱風路徑預報作業應用，並以不同積雲參數化、不同初始與邊界條件組成系集模式預報，了解其在預報作業應用之可行性（葉，2010）。在颱風渦旋移置技術方面，研究發現WRF模式使用渦旋移置技術的颱風初始位置較接近觀測位置，且強度與結構較為接近觀測，若未使用颱風移置技術，當颱風初始位置和同化颱風資料的位置距離較大時，颱風結構有明顯拉伸變形的趨勢（圖14），造成預報較大誤差。

在資料同化部分，研究主要目標是在中央氣象局作業環境測試四維變分分析WRF-4DVAR。研究期間進行以海棠颱風登陸臺灣前之個案，使用NCEPGFS做為初始場與邊界條件，對45公里解析度WRF模式進行4DVAR、3DVAR以及未作變分分析做比較測試。以辛樂克颱風個案，在WRF-4DVAR分析同化植入質量場和動量場的渦旋，得到較好的熱力和動力的初始結構，經由低層輻合產生中層的上升運動，造成水氣凝結並釋放潛熱，路徑和結構都有較好的模擬結果。經此研究，WRF-4DVAR已於中央氣象局系統中建置完成，並可使用CWBGFS和NCEPGFS的

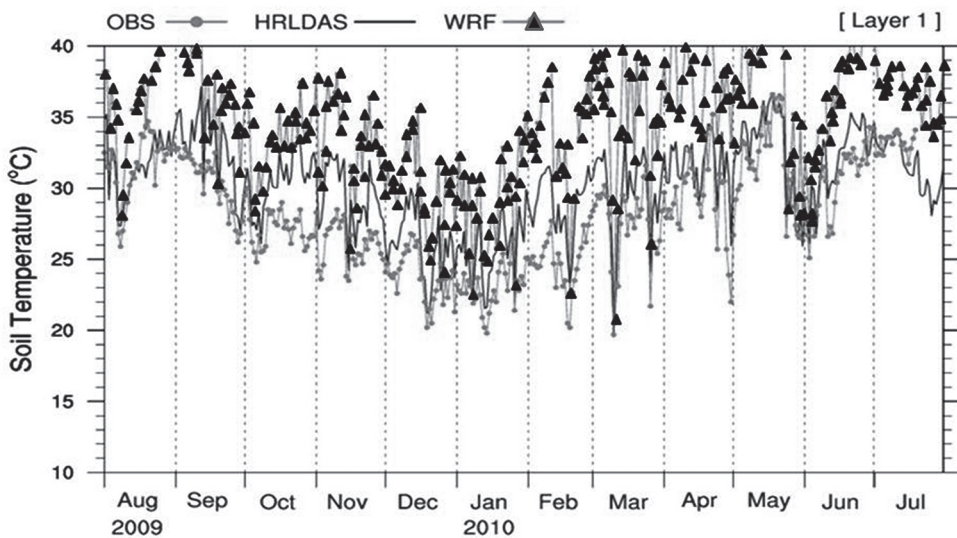


圖13 恆春站於2009年8月至2010年8月之土壤溫度觀測分布（OBS圓點線，見圖上側說明）及中央氣象局WRF作業模式之模式初始值（WRF三角點線）與透由HRLDAS同化之模式初始值（HRLDAS無點線）。

Figure 13: Distribution of the soil temperature observed (OBS, line with dots) at Hengchun for the period from August 2009 to August 2010, and the corresponding model initial value generated by WRF data assimilation system (solid line) and the HRLDAS analysis (line with triangles).

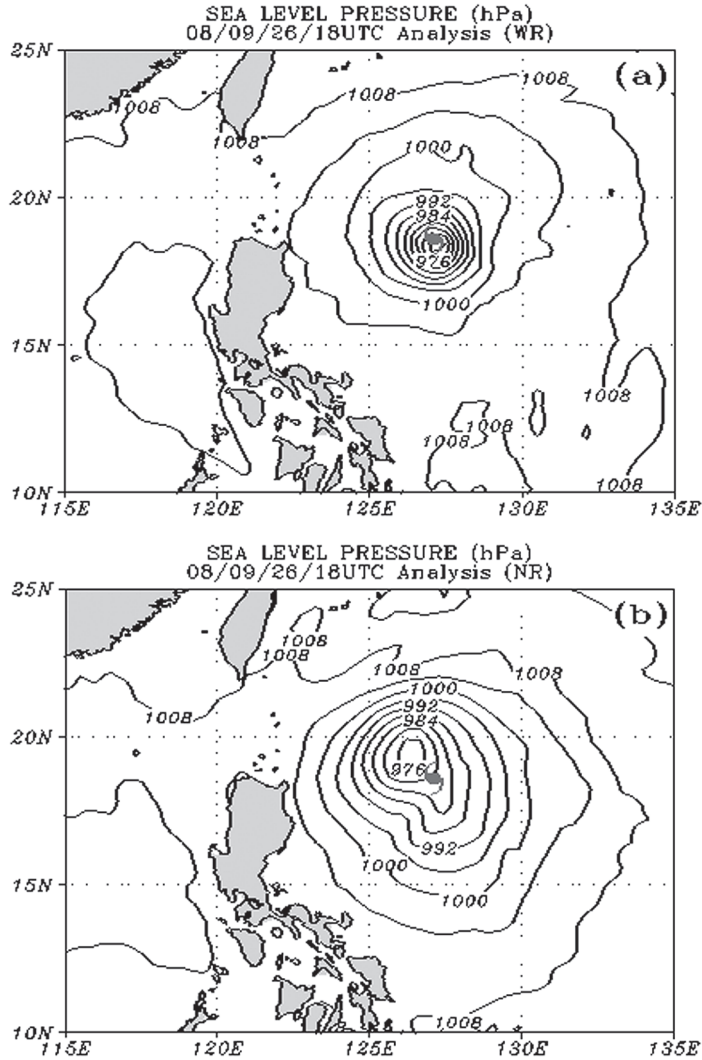


圖14 (a) 加入渦旋移置與 (b) 未加入渦旋移置，對9月26日18 UTC海平面氣壓分布，颱風標記表示颱風觀測中心位置。

Figure 14: The sea level pressure analyses (a) with, and (b) without vortex (center at typhoon symbol) relocation at 18 UTC 26th September.

資料作為初始場和邊界條件。

為使WRF預報更為準確，測試於WRF颱風bogus時加入含質量場、風場、濕度場之bogus資料以改進WRF颱風bogus；測試digital filter initialization (DFI) 與不同積雲參數化處理對WRF

颱風預報之影響；進行WRF-3DVAR之outer loop、使用不同背景誤差協方差、使用partial cycling對預報影響之測試；並測試GPSRO資料對於WRF颱風路徑預報影響。研究結果顯示：1、加入含質量場、風場、濕度場之bogus資料及使用

relocation scheme可改善WRF颱風初始結構；2、在WRF-3DVAR資料同化系統中使用CV5背景誤差協方差及outer loop可同化較多觀測資料；3、在WRF積分過程中採用Kain-Fritsch (KF) 積雲參數化法較Grell-Devenyi (GD) 法有利於維持模式颱風強度；4、使用partial cycling可達到修正初始場氣候系統性誤差的效應。以上四點，皆可增進WRF模式對颱風預測路徑的掌握，降低預測誤差。

圖15為對WRF模式改變變分分析中用CV3或CV5、積雲參數化以KF或GD、採full或partial cycling之實驗，針對2008與2009年西北太平洋的11個颱風（其中10颱風中央氣象局對其發佈警報），共計247個案之測試結果。其中採partial cycling之實驗結果以'Par'加註，full cycling者則省略。圖中可看出，以WRF_CV5_KF_Par預報誤差較小，即含outer loop，加DFI，relocation並用質量

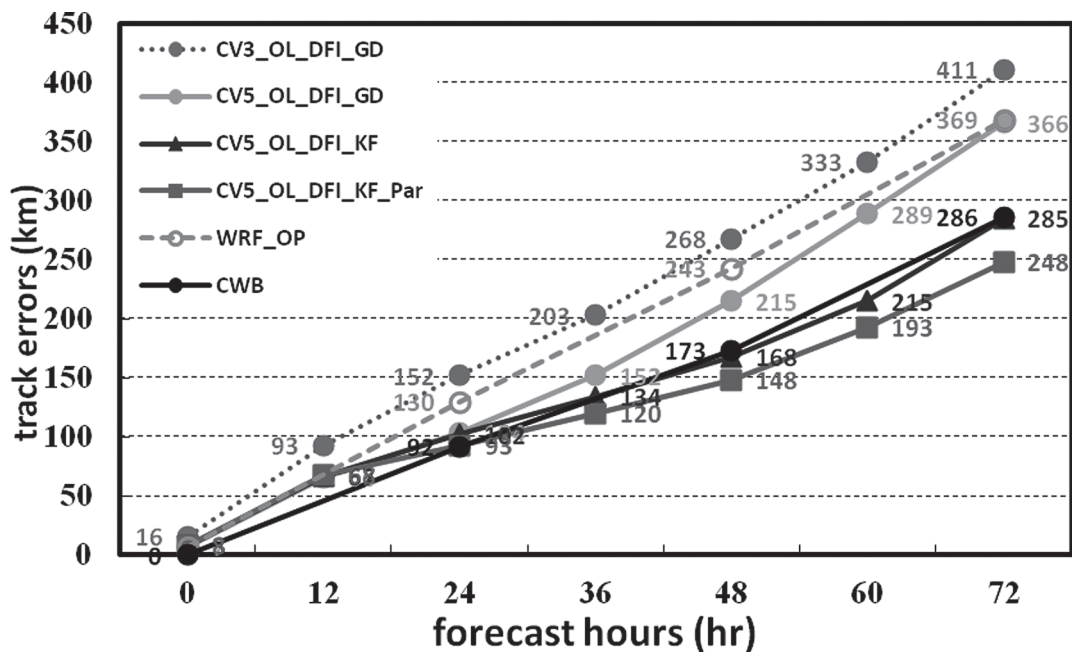


圖15 WRF各版本針對2008、2009年西北太平洋11個颱風，共計247個案之平均颱風預測路徑誤差。CWB為中央氣象局官方預報、WRF_OP為中央氣象局WRF模式作業預報、OL_DFI表示有包含outer loop與digital filter initialization（詳見文說明）。

Figure 15: The averaged typhoon track forecast errors of the CWB official forecast (CWB) and five WRF model forecasts. WRF_OP stands for the CWB operational WRF system, OL_DFI represents the one with outer loop and digital filter initialization included in the data analysis. Others include those with different background error covariance (CV3/CV5) and different cumulus parameterization process (KF/GD) tested. Total case number is 247, and the 11 typhoons are issued warnings by CWB in 2008 and 2009.

與風場之Bogus，以CV5，用KF積雲參數處理法，並為partial cycling測試結果最佳。WRF_CV3_GD與WRF_CV5_GD的差異在背景誤差的選取，也會對平均颱風路徑預測有15%~30%左右的影響。Outer loop則因可採用更多觀測資料而使分析場更接近觀測，KF積雲參數化法則有利於維持模式中颱風的強度，使颱風與大尺度環境場有更正確的交互作用，而使誤差減少。而full cycling，置換成partial cycling，可達到修正初始場誤差累積的功效，使誤差降幅約9%~13%。WRF_CV5_KF_Par，因測試結果最佳，經評估後中央氣象局將其於2010年6月起正式上線作業，定名為TWRF。

為了解各地颱風降雨極端時雨量，研究也利用中央氣象局資料，分析各地當颱風中心在21°N到 27°N, 119°E到 123°E範圍，且至少有一地時雨量大於 15 mm/h時，極端時雨量（最大1%）分布（圖略），發現颱風極端時降雨發生時，約90%是在距颱風中心2.5度半徑內，並主要在7-10月。對非颱風中心2.5度半徑內之極端時降雨主要發生在當颱風之中心位置在北部外海（121-122°E與 26-27°N）、南部外海（120.5-121.5°E與 21.0-22.5°N）及119-121°E與 24.5-27°N，3區域，特別值得注意（詳見葉，2010）。

三、結語

為提升颱風預報能力、增進氣象防災

效能，進行颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展整合研究。研究之進行包含「颱風都卜勒速度觀測與地面風力關係之研究及都卜勒風場反演之作業化」、「全球數值模式於颱風路徑預報之應用與發展」、「颱風中尺度定量降雨預報技術之改進」、「颱風雷達降雨氣候模式研究」、「颱風豪雨及洪水耦合預報技術之研究」、「臺灣東南近海颱風受地形影響的中尺度結構分析」、「WRF模式土壤過程之改進對登陸颱風之風雨結構的影響」、「建置WRF模式於颱風預報作業應用之研究」等8部分。整合研究於2010年完成，主要之成果包括：

「在颱風都卜勒速度觀測與地面風力關係之研究及都卜勒風場反演之作業化」方面，完成中央氣象局都卜勒雷達與空軍雙偏極化雷達資料雙都卜勒雷達風場反演產品發展，經上線測試與校驗顯示，研究所得雙都卜勒反演風速與剖風儀等實際觀測結果相當一致，所發展之雙都卜勒風場合成分析可供中央氣象局作業應用。此外，未來利用日本與那國島剖風儀資料增加侵臺颱風個案之風力垂直剖面分析，將有助於雙都卜勒風力與近地表風力關係的了解，進一步提升對於海面風力的監測與預報準確度。

「全球數值模式於颱風路徑預報之應用與發展」方面，研究發現，目前飛機投落送觀測受限於經費、航路等條件，對一颱風大都只能進行1最多2次間斷式的飛機觀測，不易發揮此觀測對數值預報的

效益，若能進行連續性的飛機觀測可擴大飛機投落送觀測的功效。評估福衛3號GPSRO資料對颱風路徑預報的影響，發現在路徑轉彎時，路徑對綜觀天氣因素較敏感，RO資料之加入可有較明顯的助益。

「颱風中尺度定量降雨預報技術之改進」方面，由於簡單的颱風降雨氣候模式雖可大致掌握颱風侵臺時各地降雨的分布情形，但在降雨量值及細部分佈上仍有差距，本研究針對特殊類型颱風建立類型氣候模式，並利用SSM/I估計颱風降雨量，建立侵臺颱風衛星降雨氣候資料庫，發展依據衛星降雨潛勢修正颱風降雨模式之方法。新完成模式可利用颱風路徑、颱風強度、颱風之七級風暴風半徑以及衛星降雨潛勢等條件，篩選具有類似特徵的颱風並調整颱風降雨模式之預報結果，使用這些條件做篩選後，模式更能掌握颱風環流之大小等，對颱風之降雨量有更合理的預報。

「颱風雷達降雨氣候模式研究」方面，以2005年3個西行強烈颱風的分析發現，加入以雷達回波資料估計颱風降雨壯值能改進颱風降雨氣候模式，尤其對颱風登陸前的雨量估計有明顯改善，但對臺灣西南側之豪雨估計則不理想。研究也發現颱風引發西南氣流造成臺灣西南部山區豪雨的情形，在許多個案有相似特徵，例如2005年海棠颱風與2009年莫拉克颱風在地形上游中央山脈垂直的方向有持續性之雨帶，雨帶深厚且有強勁的西風（約

30~35 m/s）時，會使降雨越過中央山脈而造成太麻里溪水暴漲，與一般西行颱風在臺東地區產生焚風現象不同。

「颱風豪雨及洪水藕合預報技術之研究」方面，發現使用雙偏極化雷達參數推估降雨對於集水區的雨量分佈推估有明顯的改善，使用中央大學CPOL雙偏極化雷達回波參數推估降雨的結果於不同颱風個案中仍有明顯的差異。應用雷達 K_{DP} 參數推估降雨時，雖然於雨量推估有低估的現象，但其雨量估算結果與其他雷達回波參數（ Z_H 、 DSD 、 Z_{DR} ）推估雨量比較上較為穩定。另外也發現逕流模擬受到雨量分佈及累積雨量值的多寡影響相當大，若雨量差異在 ± 14 mm/h左右，流量的差異約為 ± 1000 m³/h，加上土壤及土地利用的不同，流量差異可達到 $\pm 1000\sim 2000$ m³/h。

「臺灣東南近海颱風受地形影響的中尺度結構分析」方面，利用綠島雷達站之都卜勒雷達資料進行颱風中尺度結構的分析與環流反演，發現碧利斯颱風中心與環流往西北方向逐漸移入臺灣陸地時，其外圍雨帶會受到臺灣山脈地形影響，第一、四象限所呈現的低層風速有減弱趨勢，而第二、三象限的低層風速則有加強趨勢，另外也發現碧利斯颱風擁有雙眼牆特性，內眼牆為近似直徑35km的圓形，旋轉周期約2小時，外眼牆向外傾斜明顯，與內雲帶向外傾斜程度相似，且內雲帶逐漸向外眼牆接近，使外眼牆強度增強，而內眼牆逐漸減弱。

「WRF模式土壤過程之改進對登陸颱風之風雨結構的影響」方面，完成土壤資料同化系統建置與測試，研究並顯示不論是引用更正確之土地利用資料，或是土壤溫度、濕度初始場的改善，都會影響模式預報中大氣邊界層內之溫度與水氣的結構以及陸表和大氣之間能量的交換，有助於改善颱風登陸過程時颱風環流和地形的交互作用，並對模式颱風結構與定量降水的模擬產生顯著的影響。研究所發展之新版的土地利用資料庫已於中央氣象局WRF預報模式作業應用。

「建置WRF模式於颱風預報作業應用之研究」主要成果包括經過測試WRF渦旋移置技術、不同資料分析與模式積雲參數處理方法等，選取最佳方案建立TWRF模式供中央氣象局作業應用。TWRF包含颱風中心relocation，含颱風加入含質量場、風場、濕度場之bogus資料，WRF-3DVAR中採outer loop、CV5、使用partial cycling與digital filter initialization，積雲參數處理採用Kain-Fritsch方法。另外，研究也完成WRF-4DVAR之建置與測試，未來在經更完整之測試改進後，可為作業應用。

誌謝

感謝行政院國家科學委員會對本整合研究計畫之資助與中央氣象局對研究所用資料與設備之提供。第一作者另要感謝中央氣象局陳得松、黃康寧與王惠民及台灣颱風洪水研究中心蕭玲鳳博士之協助與參

與。第四作者特別感謝國防大學環境資訊及工程學系魏志憲教授、汪建良教授與大氣科學研究所蔡明憲同學的全力協助始能完成。

參考文獻

- 李清勝，2010，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：颱風中尺度定量降雨預報技術之改進（III），國家科學委員會研究報告，NSC98-2625-M-002-002，123頁。
- 何台華，2009，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：臺灣東南近海颱風受地形影響的中尺度結構分析（I），國家科學委員會研究報告，NSC97-2625-M-262-001，30頁。
- 洪景山，2010，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：WRF模式土壤過程之改進對登陸颱風之風雨結構的影響（III），國家科學委員會研究報告，NSC98-2625-M-052-004，37頁。
- 張保亮，2010，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：颱風都卜勒速度觀測與地面風力關係之研究及都卜勒風場反演之作業化（III），國家科學委員會研究報告，NSC 98-2625-M-052-005，21頁。
- 馮欽賜，2010，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：全球數值模式於颱風路徑預報之應用與

發展 (III)，國家科學委員會研究報告，NSC98-2625-M-052-002，38 頁。

葉天降，2010，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：建置 WRF 模式於颱風預報作業應用之研究 (III)，國家科學委員會研究報告，NSC98-2625-M-052-008，93 頁。

葉天降、李清勝、楊明仁、馮欽賜、張保亮與何台華，2011a：颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展研究 2009 年成果。氣象學報，48-3，43-58。

葉天降、李清勝、楊明仁、馮欽賜、張保亮、洪景山與何台華，2011b：颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展三年研究成果綜整。行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告，33 頁。

楊明仁，2010：侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：颱風豪雨及洪水藕合預報技術之研究 (III)，國科會專題研究完整報告 NSC 98-2625-Z-008-002，52 頁。

鳳雷，2010，颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展—子計畫：颱風雷達降雨氣候模式之研究 (II)，國家科學委員會研究報告，NSC98-2625-M-492-001，40 頁。

Some Findings of the Forecast Technique Development Studies on the Typhoon Track, Rainfall and Winds Forecast over Taiwan Area

¹T.-C. Yeh, ²C.-S. Lee, ³M.-J. Yang, ⁴T.-H. Hor,

¹C.-T. Fong, ¹J.-S. Hong, ⁵L. Feng, ¹P.-L. Chang

¹Central Weather Bureau ²National Taiwan University ³National Central University

⁴Lunghwa University of Science and Technology ⁵Taiwan Typhoon and Flood Research Center

ABSTRACT

“The Forecast Technique Development Studies on the Typhoon Track, Rainfall and Winds Forecast over Taiwan Area” is one of the integrated research studies supported by the National Science Council aimed to improve the capability of typhoon forecasting and thus to reduce the damage losses from destructive typhoons. Tasks of the study include: Doppler radar wind analysis and implementation of the wind analysis scheme into the Central Weather Bureau (CWB) operational environment, application and development of a global numerical model in typhoon track forecasts, improvement of the typhoon mesoscale quantitative precipitation forecast, study of the forecasting technique for coupling typhoon-associated heavy rainfall and severe flooding, study on the improvement of the land data initialization and implementation of WRF typhoon forecasting component in the operational environment of CWB.

The results of the studies are fruitful and include a Doppler radar data control procedure and the dual Doppler radars wind analysis algorithm have been successfully implemented in CWB for operational usage. The new physical processes and data assimilation system, GSI/NCEPS, have been implemented in CWB Global Forecast System to improve typhoon track forecasts. The impacts of physical changes and observational data such as dropsondes and GPS RO data on track forecasts have also been explored. Land data assimilation system and a new version of WRF model, called TWRF, have been implanted in CWB. For improving typhoon rainfall forecast, the typhoon rainfall forecast model has been improved by using the satellite-data-derived typhoon rainfall climatology and upgraded the typhoon rainfall statistics model by using the satellite rainfall potential. Finally, a scheme to integrate the rainfall into the water flow simulation has also been developed and refined.

Keywords: typhoon, typhoon rainfall forecast, typhoon track forecast, data assimilation, vortex relocation, dual Doppler radars analysis, typhoons accompanied by the northeasterly monsoon, water flow simulation, mesoscale conceptual model.