

使用四維變分與都卜勒雷達資料改進短期定量降雨預報 —2008 年 SoWMEX 實驗期間一個鋒面系統的個案研究

戴聖倫 廖宇慶 張少凡

國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國九十九年十月八日收稿；中華民國九十九年十二月二十三日定稿)

摘 要

前人之研究中曾經利用美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research; NCAR) 所發展之都卜勒雷達變分分析系統 (Variational Doppler Radar Analysis System; VDRAS), 即時分析低層風場及輻合/散場以進行雷暴 (thunderstorm) 之預報, 也曾同化多部都卜勒雷達觀測資料以分析並預報超級胞 (supercell) 與飈線的演化, 但大多使用於廣大開闊的平原地區, 本研究則首次將 VDRAS 應用在臺灣及其鄰近地區。由於臺灣複雜的地形, 且儀器的觀測受到四面環海的限制, 這些條件預期會對 VDRAS 的適用性帶來相當大的挑戰, 所以本研究也嘗試為其尋求一適當的同化策略。

為了檢視此同化系統應用於本地的表現, 吾人選取 2008 年 SoWMEX (Southwest Monsoon Experiment; 西南氣流實驗) IOP8 (Intensive Observation Period 8; 第八次密集觀測期) 中 6 月 14 日的鋒面系統作為研究個案, 匯集探空、地面測站、與來自歐美作業中心的再分析場等資料建構背景場, 並且以四維變分法 (4DVAR) 同化中央氣象局七股及墾丁兩座 S-band 都卜勒雷達之回波以及徑向風觀測資料, 藉此完成雲模式初始化得到一最佳的分析場, 再由此分析場進行預報。同時, 為了較為妥善地處理地形對於降水預報的影響, 吾人將 VDRAS 之最佳分析場與具有地形解析能力的 WRF 模式進行結合, 並比較結合前後對預報降雨的差異。

檢視同化觀測資料後的分析場, 顯示出 VDRAS 能夠反演出對流系統中合理的動力及熱力結構。吾人亦發現低層輻合場的分佈與當地山脈走向呈現出一致性, 表示 VDRAS 可能具有反映地形效應的潛

力。在預報方面，VDRAS 模式對於造成降雨的主要線狀對流之移動方向有不錯的掌握。針對兩小時累計降水的預報，其 Equitable Threshold Score (ETS) 得分在 0.1~0.2 之間。如將 VDRAS 與 WRF 結合後再進行預報，則此得分較單獨使用 VDRAS 或 WRF 的預報都有很顯著的改善。

本研究中的同化策略，可做為在其它具有類似地理環境與觀測限制的區域，進行資料同化與預報時的參考。

關鍵字：四維變分同化、都卜勒雷達變分分析系統

一、前言

臺灣地區常會出現因午後熱對流、梅雨鋒面、颱風環流或旺盛之西南氣流所造成的豪大雨事件，對於這些極端降水現象，如能有較為精確之短期定量降水預報 (Quantitative Precipitation Forecast, QPF) 做為決策之參考資訊，相信對於防災減災之工作會有很大的助益。氣象雷達之觀測具有高時間及空間解析度的優點，所以對於中尺度或是對流尺度天氣系統的演化具有很好的掌握能力。而如何結合都卜勒雷達觀測資料 (徑向風與回波強度) 與數值模式以改善預報，則為資料同化的研究目標。

目前雷達資料同化的方法，主要包含有三維變分 (Three-Dimensional Variational Method; 3DVAR)、四維變分 (Four-Dimensional Variational Method; 4DVAR) 及系集卡曼濾波器 (Ensemble Kalman Filter; EnKF)，如：Snyder and Zhang (2003)、Dowell et al. (2004)、Xiao et al. (2005, 2007)、Hu et al. (2006)、Sun (2005a)、Kawabata et al. (2007) 等。他們的研究結果中指出，利用雷達資料初始化數值天氣預報模式，對於定量降水預報會有正面的影響。其中，由美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research; NCAR) 所研發之都卜勒雷達變分分析系統

(Variational Doppler Radar Analysis System; VDRAS)，可以使用 4DVAR 方法同化單一或是多部都卜勒雷達觀測資料。Sun and Crook (2001) 曾將此系統配合 WSR-88D 雷達觀測進行即時的低層風場分析。Crook and Sun (2002, 2004) 將其應用在 2000 年雪梨奧運期間之即時天氣預報。VDRAS 也參與了美國國防部關於五角大廈如果遭受核生化攻擊時，污染物會因氣象條件而如何傳送的研究 (Warner et al. 2007)。Sun and Zhang (2008) 則針對 International H₂O Project (IHOP) 實驗期間一個位於美國中西部大平原上的飈線系統，檢驗對其降水預報的能力。

相關研究結果顯示，VDRAS 在研究與作業應用上都有不錯的表現，但是由於該系統目前尚未擁有解析地形能力，故如欲將其用在臺灣地形複雜的地理環境，且觀測受限於四面環海的條件下，可能會面臨若干困難。本研究嘗試利用 VDRAS 系統同化且統整 2008 年西南氣流實驗 (Southwest Monsoon Experiment; SoWMEX) 中之觀測資料 (如探空、地面測站及都卜勒雷達等)，針對一梅雨鋒面個案進行分析及定量降水預報。此外，吾人也將 VDRAS 之最佳分析場經過轉換座標系統、權重平滑等調整後，與同為 NCAR 發展之 Weather Research and Forecasting Model (WRF) 結合並進行預報，以便利用後者較佳的地

形解析能力，進一步提高對於定量降水預報的精確度，並做為 VDRAS 日後應用在其它具有類似地理環境與觀測限制區域之參考。

二、個案簡介

本研究模擬的個案來自於 2008 年 SoWMEX IOP8 (Intensive Observation Period 8) 中的梅雨鋒面個案。IOP8 觀測期間為 2008 年 6 月 14 日 0000 UTC 至 6 月 17 日 0000 UTC，而根據 6 月 14 日 1200UTC 的 850 hPa 的綜觀天氣分析圖 (圖 1)，可以發現一個低壓中心位在長江下游的上海附近，在台灣海峽南部與巴士海峽海面上有旺盛之西南氣流。衛星雲圖 (圖未示) 顯示有中尺度對流系統於洋面上不斷生成，並移入台灣西南部陸地造成降雨，導致當日降雨最多的區域發生於台灣西南部與山區地區，日雨量普遍達到 100 至 150 mm 以上，在高屏地區及台南沿海其日累積雨量甚至達到 200 mm 以上。由 1154 UTC、1254 UTC 與 1354 UTC 的墾丁與七股雷達合成最大回波 CV 圖 (圖 2)，可以發現在台灣南

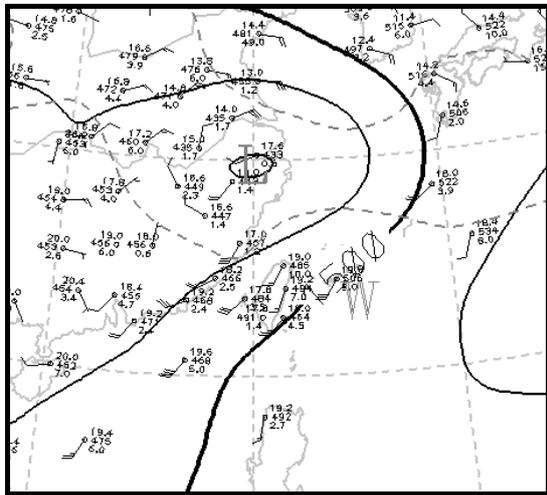


圖 1. 2008 年 6 月 14 日 1200UTC 之 850hPa 天氣分析圖

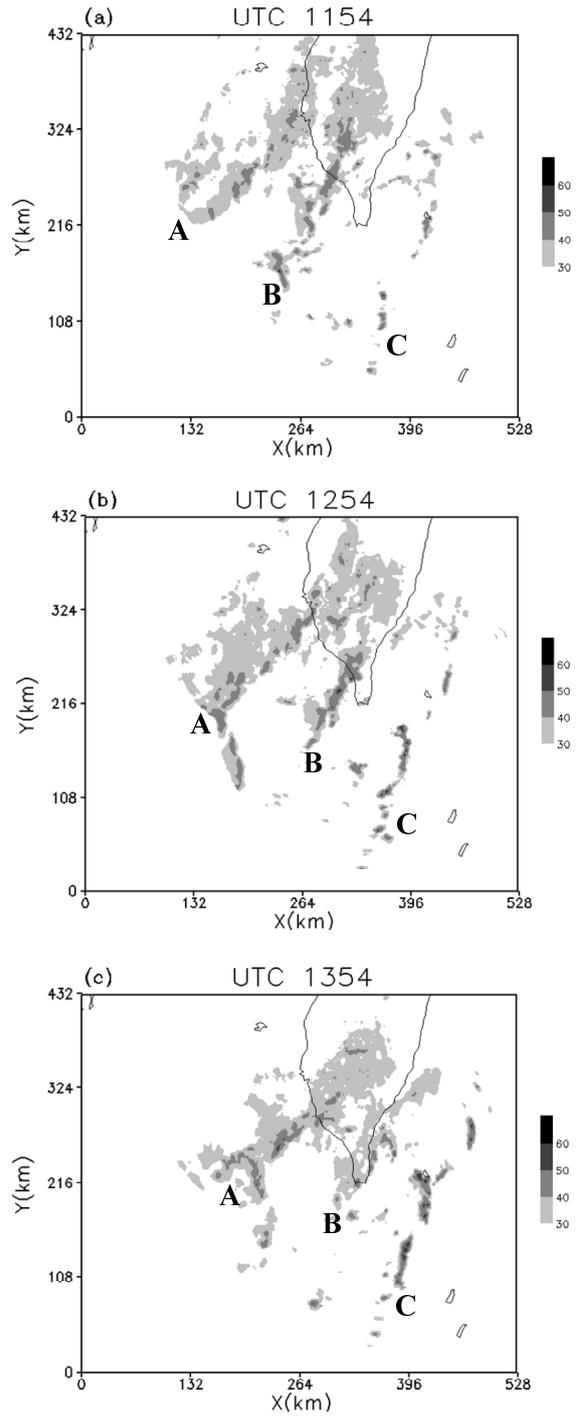


圖 2 七股與墾丁雷達合成最大回波圖，時間分別為：(a) 1154 UTC、(b) 1254 UTC、(c) 1354 UTC。陰影為回波值，單位為 dBZ。(僅顯示回波值 30 至 60dBZ 以上區域，間隔為 10dBZ)

部及附近洋面上有三條明顯的線對流系統，同時也是本研究模擬的主要系統，吾人將其各命名為 A、B、C 線狀對流，以利於文中進行討論。必須指出的是，A 線狀對流受限於雷達觀測距離，無法涵蓋其完整的結構，對於同化及後續的預報勢必有一定程度的影響。

三、研究方法與資料來源

(一)同化系統

在本研究中所使用的雷達資料同化系統為美國 NCAR 所發展之都卜勒雷達變分分析系統 (VDRAS)，對該系統詳細的說明可參見 Sun and Crook (1997)、Crook and Sun (2002)、與 Sun (2005) 等。基本上，其主要能力為可以整合探空、剖風儀及地面觀測站等資料得到背景場，並利用四維變分方法，同化高時間及空間解析度的都卜勒雷達觀測資料，以得到一最佳之分析場。而此同化系統的主要流程可分為四大部分，分別為(1)資料引入：即彙集探空、剖風儀、地面觀測站及主要同化之都卜勒雷達觀測資料；(2)資料前置處理：包括資料的品質控管 (QC)、內插、背景場製作等；(3)四維變分資料同化：包含雲模式向前積分、伴隨模式 (adjoint model) 之向後積分及價值函數 (cost function) 的極小化；(4)分析結果與預報：進行分析診斷、預報、及呈現圖示。

由於 VDRAS 主要同化都卜勒雷達觀測之徑向風與回波資料，故使用於變分計算中之價值函數可以下式表示：

$$J = (x_0 - x_b)^T B^{-1} (x_0 - x_b) + \sum [\alpha_v (v_r - v_r^o)^2 + \alpha_q (q_r - q_r^o)^2] + J_p \quad (1)$$

公式(1)中的 x 代表模式狀態變數，下標的 0 代表同化窗區開始的時間，下標 b 表示此為與背景場相關的變數，上標的 o 是觀測的變量，上標的 T 是矩陣的轉置，符號 B 意指背景場誤差協方差矩陣， α_v 和 α_q 分別代表徑向風與雨水混合比觀測誤差平方的倒數，用以拉近兩變數之價值函數值， v_r^o 是雷達觀測之徑向風， v_r 為將模式風場轉換而成之徑向風場，使用之轉換關係式如下：

$$v_r = \frac{x - x_{rad}}{r} u + \frac{y - y_{rad}}{r} v + \frac{z - z_{rad}}{r} (w - V_T) \quad (2)$$

其中， x 、 y 、 z 為觀測點位置， x_{rad} 、 y_{rad} 、 z_{rad} 為雷達位置， u 、 v 、 w 為模式三維風場， V_T 則為終端落速，單位為 ms^{-1} 。 q_r 與 q_r^o 分別為模式模擬與雷達觀測的雨水混合比，單位為 $g\ kg^{-1}$ ， q_r^o 可根據雷達觀測的回波 (η) 計算得之，如 Kessler (1969) 或 Sun and Crook (1997)：

$$q_r^o = \frac{1}{\rho} 10^{[(\eta - 43.1)/17.5]} \quad (3)$$

上式中之 η 為回波因數，單位為 dBZ ， ρ 為空氣密度，單位為 $kg\ m^{-3}$ 。另外 (1) 式中的 J_p 表示空間與時間的平滑懲罰項 (penalty term)，主要作用為讓模式對於觀測的擬合較為平滑。

雖然 VDRAS 的主要目的在於同化雷達觀測資料，但仍需要依靠其他種類的觀測資料以提供背景場分析。這是因為對於模式的範圍而言，雷達掃描由於觀測距離的限制以及缺乏反射粒子等因素造成資料涵蓋不足，此時就要透過其他如探空 (sounding)、地面測站 (surface station) 等儀器的資料來填補三維空間資料空缺區域。本研究主要依據 Crook and Sun (2002) 所使用之客觀分

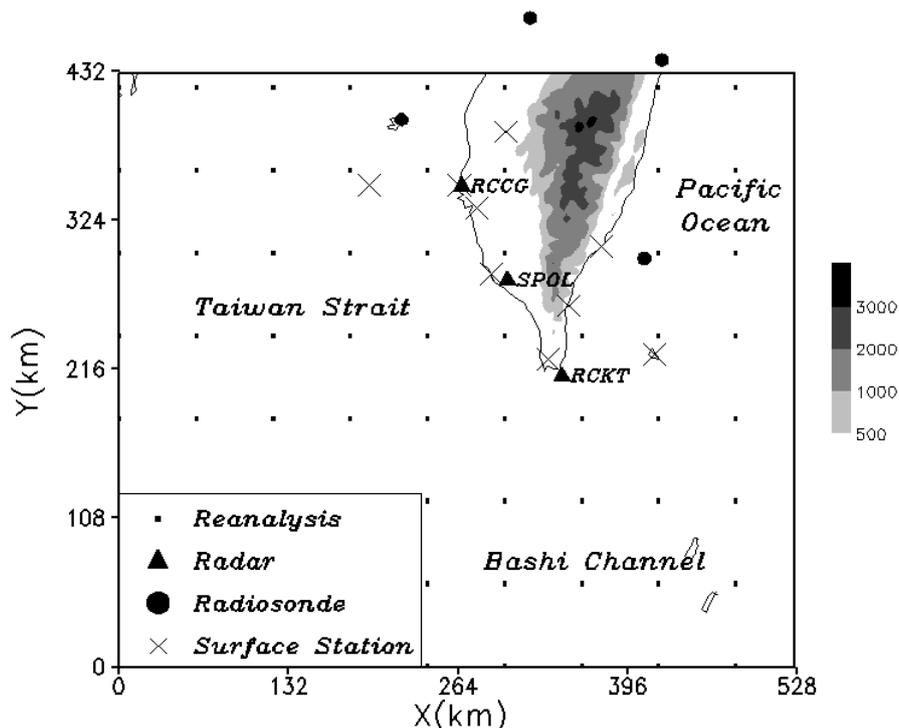


圖 3. 模式分析範圍，以及觀測與再分析場資料點的分佈位置圖。陰影表地形高度，各為 500、1000、2000 及 3000 公尺，其中花蓮及台中探空站於分析範圍外，但仍能利用距離權重納入進行格點分析。

析方法，將多個單點的資料進行內插，以得到三維空間的背景場。圖 3 中繪出本研究中模式的分析範圍，所使用到之觀測（包含都卜勒雷達站、探空站、地面觀測站），以及再分析資料點的分佈圖。

(二)降雨校驗方法

為了檢驗模式降雨預報的準確性，模式輸出量必須與觀測量進行比較，藉由誤差來評判預報是否準確。在觀測降雨量部分，資料來源為中央氣象局的自動雨量站統計資料，由於吾人所模擬之範圍並無包含臺灣全島，故僅挑選位於分析範圍內的自動雨量站進行降雨量之統計，分布圖可參考圖 4。而後文之降雨校驗，乃使用 Barnes 客觀分析法 (Barnes, 1973)，將位於模式網格點上預報之雨量資料，分析至各雨量站的位置，其中

影響半徑之設定為 10 公里。

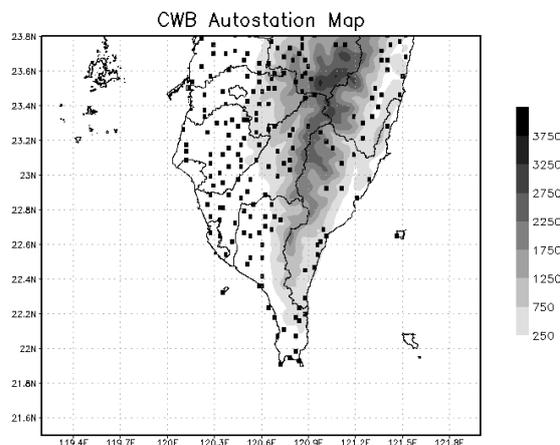


圖 4. 中央氣象局於分析範圍內自動雨量站分佈圖，黑點即為每站位置，另陰影為地形高度，自 250 至 3750 公尺，每 500 公尺為一間隔。

在校驗降水預報之得分方面，吾人利用廣被氣象作業及研究單位所採用的公正預兆得分 ETS

(Equitable Threat Score; Schaefer 1990)進行降水預報校驗。ETS 是在排除了隨機猜中的情況下，計算模式正確預測降水的的能力，ETS 分數愈高代表模式降雨預報愈準確，其定義如下：

$$ETS = \frac{H - R}{F + O - H - R} \quad (4)$$

上式的 F 為預測降雨的次數，O 為觀測降雨的次數，H 代表預報與觀測皆有降雨的次數，R = FO/N 為以隨機方式正確猜中降水的次數，N 為預報次數與觀測次數之和。

四、VDRAS 之分析與預報

(一)模式設定及實驗設計

VDRAS 模式的中心位於東經 120.0515 度、北緯 21.93484 度，水平網格沿 x 方向為 264 個、y 方向 216 個格點，間距皆 2.0 公里，故水平範圍為 528 公里×432 公里，大致包含台灣南部、台灣

海峽南部、及巴士海峽及鄰近台灣東部之太平洋海域(圖 3)。垂直方向的最低層高度為 0.25 公里，網格間距 0.5 公里，共 30 層，模式頂層高度約為 14.75 公里。實驗設計部分，使用 Sun and Zhang (2008)提出最佳之循環程序(cycling Procedure)，即於兩同化區間中加入一短時間之預報，可藉由模式方程式將同化之觀測資訊(動力、微物理)傳遞至熱力部分，有助於提升預報準確性。本研究中整個同化窗區總共包含三個四維變分同化子區間，中間再加入兩個預報區間，大致從 1046UTC 開始第一個同化子區間，至 1154 UTC 時結束第三個同化子區間，並得到最佳之分析場，詳細之同化流程可以參考圖 5。

台灣為一海島，島上地形複雜崎嶇且四周被海洋包圍，以致於氣象觀測受到很大的限制，觀測儀器如探空站、地面測站等大多設置於陸地上(如圖 3)，故很難掌握洋面之上的大氣狀態。對於 VDRAS 來說，中尺度背景場用來填補雷達觀

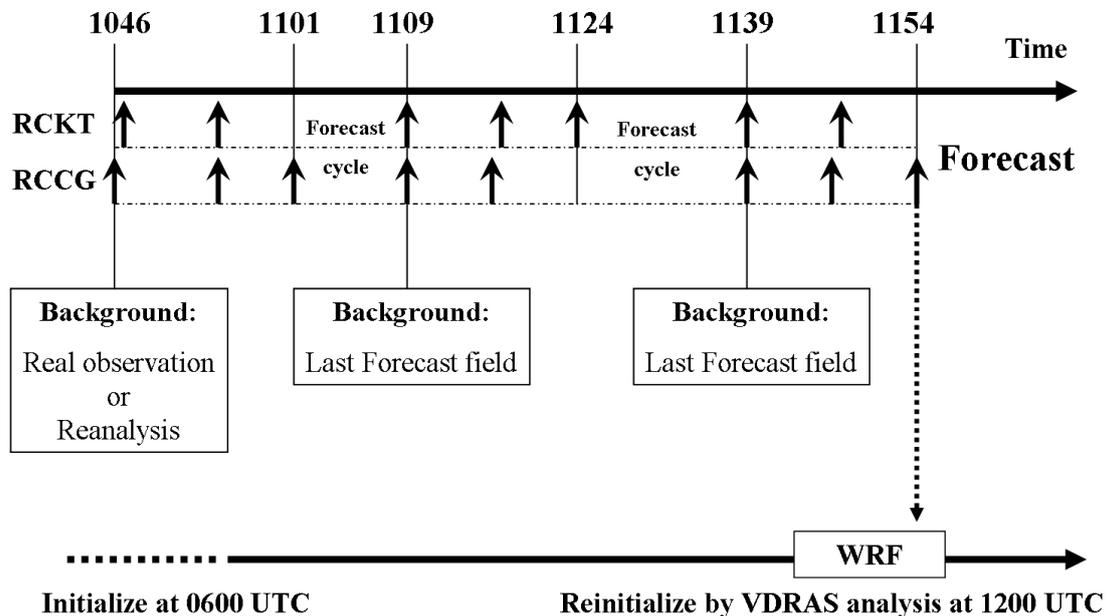


圖 5. VDRAS 同化循環程序(cycling Procedure)及與 WRF 模式結合示意圖。

測資料的空缺，所以可看作是雲模式初始分析場的重要來源之一，預期不同的中尺度背景場，對於預報結果將有一定的影響。因此，吾人進行以下相關敏感性實驗，(1)「CTL」：利用實際觀測資料（探空及地面觀測站）進行客觀分析後得到背景場，並同化雷達資料進行分析與預報；(2)「NCP」：使用 NCEP Global Final Analyses (FNL)（解析度 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ）於 1200 UTC 之再分析場，從中取出多個垂直剖線（如圖 3）當作虛擬探空資料，同樣經過客觀分析後得到背景場，並同化雷達資料進行分析與預報；(3)「ECM」：使用 ECMWF Atmospheric Model（解析度 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ ）於 1200 UTC 之再分析場，從中取出多個垂直剖線（如圖 3）當作虛擬探空資料，同樣經過客觀分析後得到背景場，並同化雷達資料進行分析與預報。

(二)分析結果

由於三組實驗產生的分析場都有類似的特徵，因此本節中以 CTL 實驗為例，對於 VDRAS 的分析結果（於 1154 UTC）進行討論。從分析之最大回波圖（圖 6）與同時時間觀測的最大回波圖（圖 2a）之比較可以了解，VDRAS 能夠正確同化雷達資訊，並且掌握住三條主要線對流系統的強度與位置。

如果比較同化雷達資料前後風場結構的變化可以發現，未同化雷達資料前之背景場（圖 7a）的水平風場較為均勻，並無太大變化，以輻散場量值來看，輻合最強的區域大約僅在 10^{-5} s^{-1} 左右，算是相當微弱。相對來說，在同化雷達資料之後（圖 7b），水平風場出現很多小尺度的變化，最強的輻散場量值則較背景場高出約 100 倍，顯示同化雷達資料能夠幫助模式解析中小尺度風場

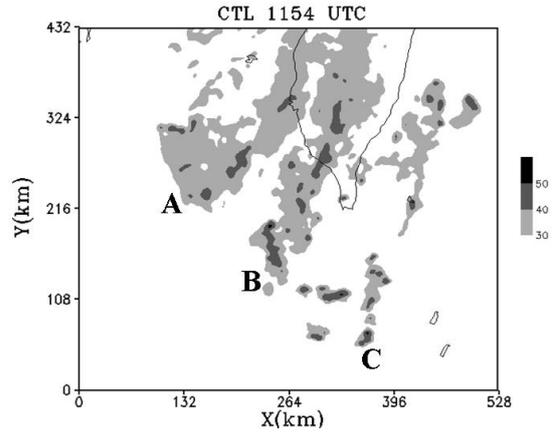


圖 6. CTL 實驗於 1154UTC 之分析場最大回波圖。陰影為回波值，單位為 dBZ，僅顯示 30 至 50dBZ，間隔為 10dBZ。

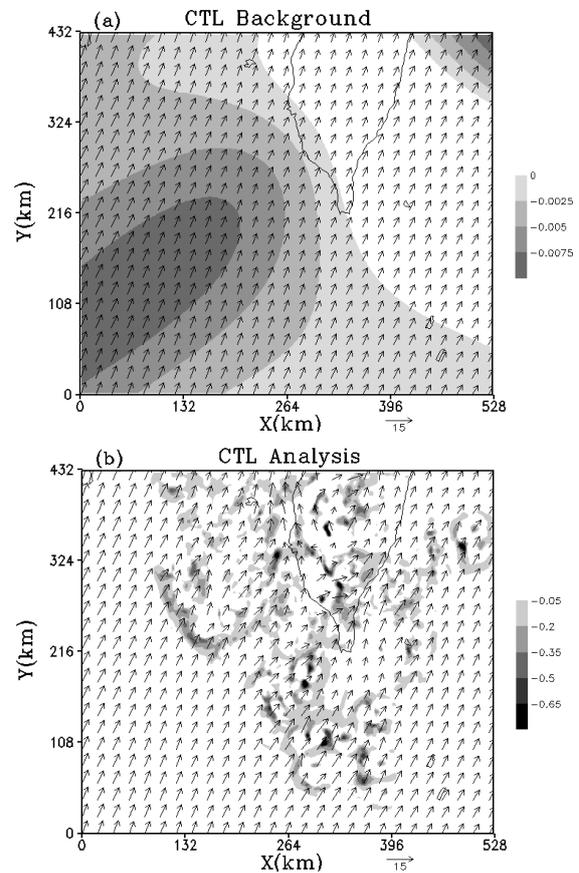


圖 7. CTL 實驗位於模式第一層（0.25 公里）之水平風場（向量）及輻合場（陰影，單位為 10^{-3} s^{-1} ）。(a)背景場；(b)以 4DVAR 同化雷達資料後的分析場。

的細微變化，增進模擬中小尺度對流系統的能力。

為了能夠更仔細地觀察分析場中動力、熱力與微物理變數之間的關聯，吾人挑選當時通過台灣西南部陸地及鄰近海域的 B 線狀對流，並鎖定範圍在東經 120 至 121 度、北緯 22 至 23.2 度內。在當日 1154 UTC 左右，B 線狀對流主要往東南方移動（如圖 8a 中箭頭方向），對照圖 8a 中垂直速度場，在被 NW-SE 剖線切過之對流胞移動方向的前側為一上升運動區（實線），同時在對流胞移動方向的後側，則為較明顯的下降運動區（虛線），強回波區（ > 40 dBZ）往往伴隨著上升運動。如果檢視低層（ $Z = 0.25$ 公里）的水平風場與輻散場（圖 8b），對流胞下方為一明顯的輻合運動區，與垂直運動形成相當合理之配置。特別的是，吾人從輻散場中觀察到在屏東的山前出現一個輻合區，位於圖 8b 中 $x \sim 333$ 公里、 $y \sim 255-288$ 公里處，和當地山脈的位置與走向相當吻合，這說明了雖然 VDRAS 並沒有解析地形的能力，但卻有可能藉由都卜勒雷達對於風場的觀測，來得到地形影響的訊息，這個結果與 Sun et al. (2010) 將 VDRAS 應用在 2008 年北京奧運有地形之環境的發現是一致的。除了動力場上的討論外，吾人利用圖 8a 中 NW-SE 剖線來檢視熱力的垂直結構。結果發現，VDRAS 可以合理反演出對流胞移動後方的冷池（cold pool）現象，如圖 9 中灰斜線區所示，這表示 VDRAS 為一分析天氣系統的有力工具。

(三) 預報結果

在預報場方面，CTL、NCP、ECM 三組實驗的結果則表現出較明顯的差別。觀察 CTL 實驗在預報 60 分鐘時（圖 10）與觀測（圖 2）的最大回波，除了 A 線狀對流位置稍微偏北，B、C 線狀

對流皆相當接近真實位置，這是由於 A 線狀對流受到雷達觀測範圍的限制所以沒有被完整的觀測到，以致同化雷達資料後仍無法得到接近真實的天氣系統結構。由此可知，雷達資料對於對流系統觀測完整性，將會反應在分析及預報的結果上。而在預報 2 小時後，模式仍掌握到 B 線狀對流位置以及其減弱的趨勢，但是 C 線狀對流卻已完全消散，與觀測有較大差距。相較之下，NCP 在預報 60 分鐘（圖 11a）之前，模式對於 B、C 兩個線對流的位置預報表現相當良好，惟線對流 A 因受限於雷達觀測範圍依然無法完整分析，並且在分析範圍左上角接近線對流 A 處，發現不真實的回波，強度介於 30 至 40 dBZ 之間。而在 120 分鐘的預報（圖 11b），雖然 C 線對流並無如 CTL 實驗中有消散情形，但整體回波強度增強幅度過於明顯，A、B 線對流在此實驗中並無如觀測有減弱趨勢，這必定會對於降水預報結果有一定的影響。最後，ECM 實驗與前兩實驗相似的地方在於，模式在 60 分鐘內的預報（圖 12a）都有很好的表現，似乎可以說明目前短期預報的極限所在。在預報 120 分鐘時（圖 12b），ECM 實驗預報之回波強度較 NCP（圖 10b）接近觀測，B 線狀對流預報的位置則與觀測結果相當吻合，至於對 C 線狀對流的預報中，ECM 則不論在回波強度或是位置都是三個實驗中表現最佳的實驗。

圖 13 比較 VDRAS 各實驗預報與自動雨量站觀測之降雨，在觀測的雨量分佈中（圖 13a），降雨的極值（ $> 35 \text{ mm } 2\text{hr}^{-1}$ ）出現在中央山脈山脊的西側以及山脈南部的尾端，山脈東側的台東一帶因地形的阻擋則僅有微弱的降雨。但是，VDRAS 模式預報的降雨量普遍高於觀測，並且降雨極值區域較為偏北、往山後延伸，顯示模式中無地形作用對於預報降雨會產生負面的影響。圖 13 的回

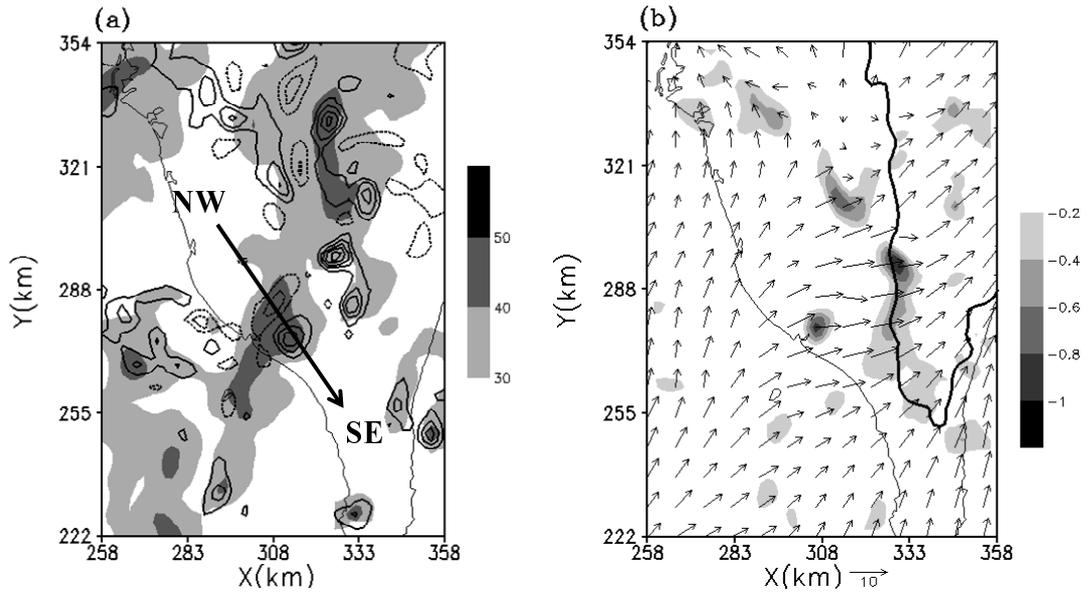


圖 8. CTL 實驗分析場於東經 120 至 121 度、北緯 22 至 23.2 度範圍內：(a)高度 2.75 公里之回波（灰階，30 至 50dBZ，間隔 10 dBZ）與垂直速度（等值線， -0.6 至 1.5 ms^{-1} ，間隔為 0.3 ms^{-1} ，實線為正，點線為負）；(b) 0.25 公里高度之輻合場（灰階，單位為 10^3 s^{-1} ，顯示範圍為 -1.0 至 -0.2 、間隔 0.2 s^{-1} ）與水平風場（向量），黑粗實線表 500 公尺等高線。

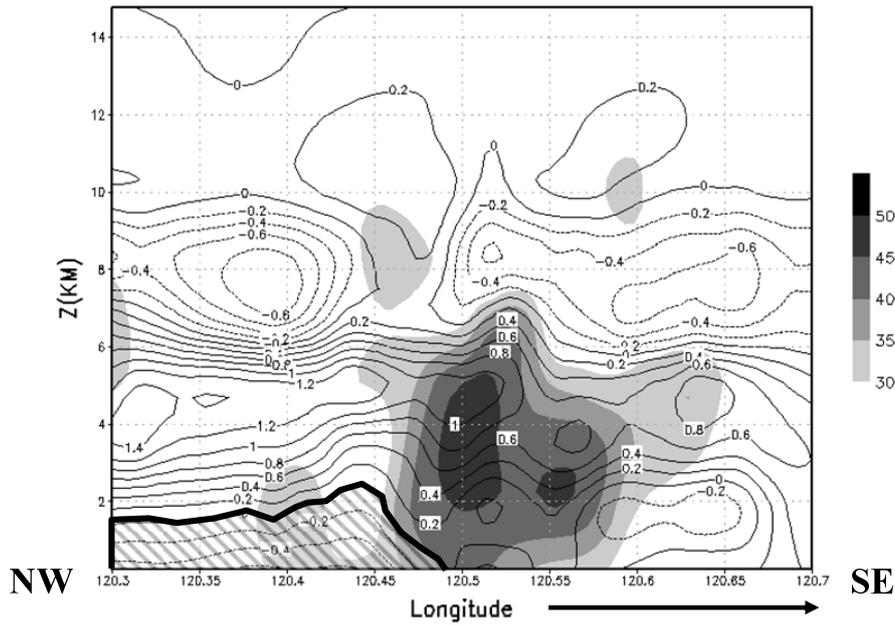


圖 9. CTL 實驗分析場沿 NW-SE 垂直剖面的回波（陰影，30 至 50dBZ，間隔 5dBZ）與溫度擾動場（等值線，單位為 K，間隔為 0.2K）。左下角斜線區為冷池的位置，右下角箭頭方向表示對流胞移動方向。

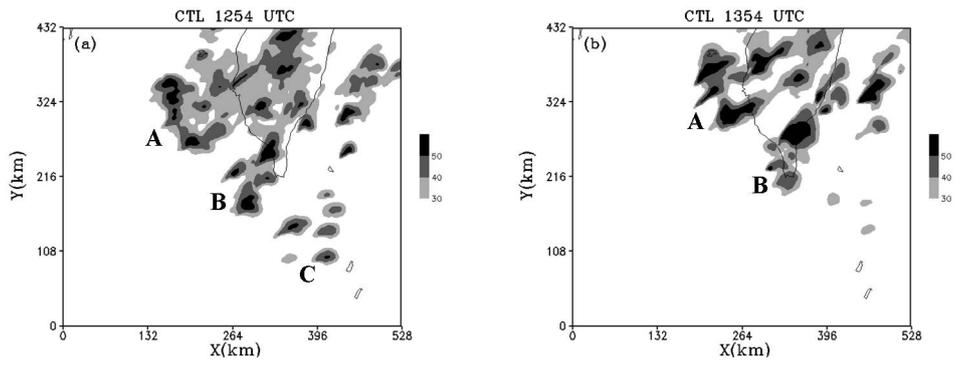


圖 10. CTL 實驗於(a)預報 60 分鐘 (1254UTC); (b)預報 120 分鐘 (1354UTC) 時之最大回波。陰影表回波值，自 30 至 50dBZ，間隔 10dBZ。

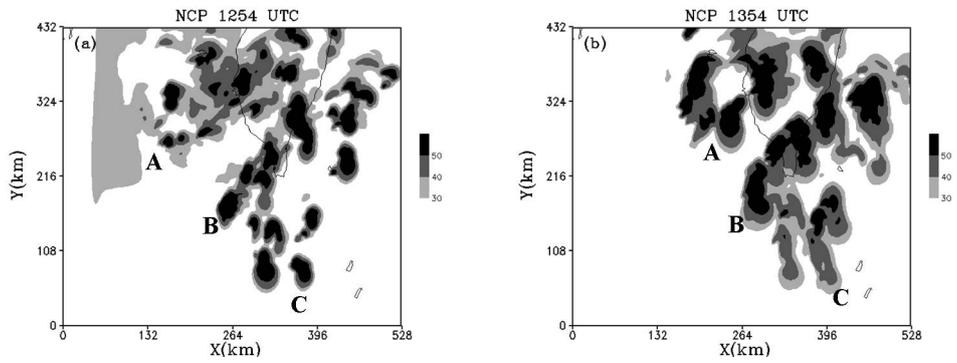


圖 11 同圖 10，但是為 NCP 實驗的預報結果。

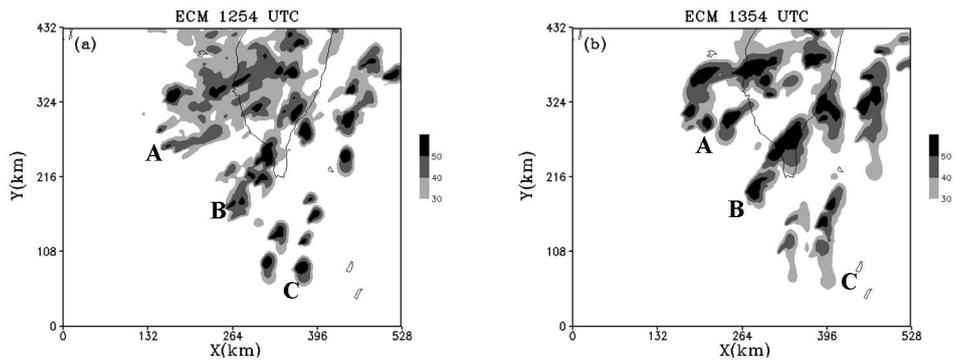


圖 12 同圖 10，但是為 ECM 實驗的預報結果。

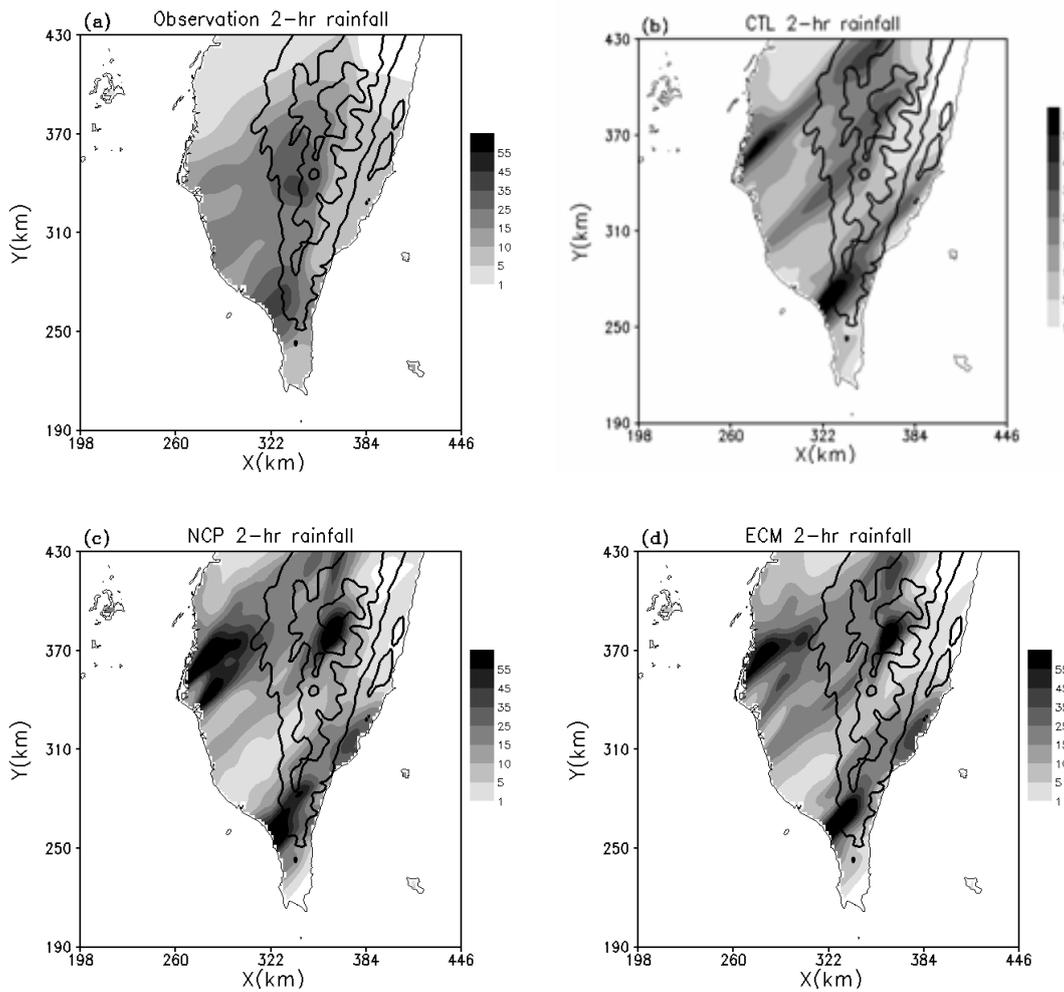


圖 13. VDRAS 背景場敏感度實驗與實際觀測之兩小時累積降雨圖：(a)自動雨量站觀測；(b)CTL；(c) NCP；(d) ECM。陰影表雨量值，單位為公厘(mm)，顯示區間如圖右灰階所示。圖中黑粗等值線分別為海拔 500、1500、2500 公尺等高線。

波強度亦說明 VDRAS 各實驗之降水預報普遍會屬於高估情形。定量上，吾人統計雨量之時間自 1154 UTC 開始共兩個小時，設定之降雨門檻各為 6、10、14 及 18 mm。結果發現，CTL 實驗之 ETS 得分（圖 14），除了在門檻為 14 mm 時較 ECM 低外，其餘皆是三者之中最高。而 NCP 之 ETS 是最低的，與前兩實驗有明顯差距。故以降水預報表現來說，CTL 實驗最好，其次為 ECM 實驗，最後才是 NCP 實驗，不過這些實驗的 ETS 值最

高都不超過 0.23。

五、VDRAS 與 WRF 結合預報

除了單獨使用 VDRAS 進行預報外，有鑒於 VDRAS 目前並無地形解析能力，故吾人在此研究中嘗試利用 VDRAS 之最佳分析場，令其與 WRF 預報場結合後重新初始化 WRF 模式，藉由 WRF 模式的地形解析能力以及較完備的微物理參數化方法，探討改進模式降水預報的可能性。

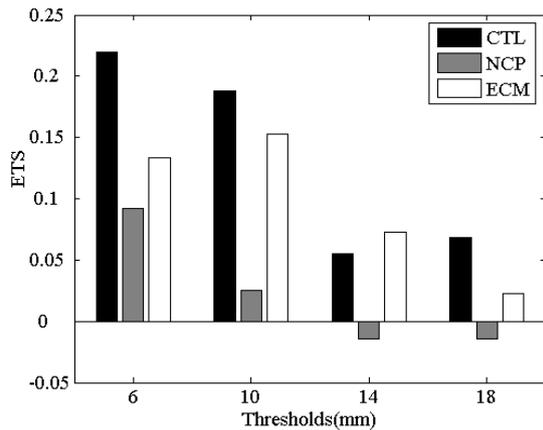


圖 14. VDRAS 背景場敏感度實驗 (CTL、NCP、ECM) 之兩小時累積降雨 ETS。

(一) 結合方法

本研究使用之 WRF 模式版本為 3.1.1，其網格設計為 Arakawa C 型交錯網格，垂直座標為跟隨地形的 σ 座標，並擁有多種微物理過程可供選擇。相較之下，VDRAS 之雲模式，網格設計同為 Arakawa C 型交錯網格，但垂直座標則是高度座標，沒有地形解析能力，並且使用屬於暖雲微物理過程的 Kessler scheme (Kessler, 1969)。

進行結合前，需先將兩者的資料重合以進行變數計算，主要是將 VDRAS 資料放置於 WRF 座標。如圖 15 所示，在水平方向上，因兩模式皆使用相同的網格配置，故使用巢狀網格進行模擬時，僅需調整 WRF 模式最細網格 (d02) 範圍之經緯度、格點數目以及解析度等與 VDRAS 之設定相等，即可完成水平資料點的結合。垂直方向上，利用 WRF 模式中各格點之重力位資訊，將其除以重力加速度 (9.81 m s^{-1}) 得到各格點所在之高度，在已知 VDRAS 模式各層水平高度的情形下，再使用最小平方擬合法 (least square fitting) 完成垂直方向的內插。但這只限於 WRF 在地形以上的格點，在地形以下的格點則不予計算，這是

一較簡單的方式，在此研究中地形的強迫抬升作用尚未納入計算。

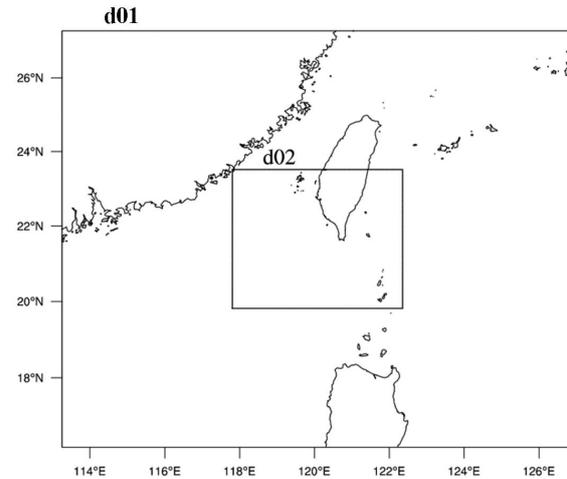


圖 15. WRF 模式巢狀網格範圍，d01、d02 分別為解析度 6 公里與 2 公里之網格，其中 d02 與 VDRAS 分析範圍之格點設計相同。

經過結合變數的測試，結合包括風場 (u 、 v 、 w)、位溫擾動 (θ')、水氣混合比 (q_v)、雨水混合比 (q_r)、雲水混合比 (q_c) 等變數。由於 VDRAS 並無冰相微物理變數 (冰、雪、雹)，但是在 WRF 模式中，可選擇較複雜之微物理過程 (即包含水相及冰相變數)，因此在結合微物理變數時，吾人雖然僅結合水相變數，但仍須將冰相變數在所有格點上都設為零，以避免 WRF 模式預報場所含之冰相粒子影響結合後之預報表現。

同時為了避免 VDRAS 分析場與 WRF 預報場差距過大，造成兩模式結合時交界處不平滑的現象，吾人將 WRF 預報場與 VDRAS 分析場都依照距離雷達觀測範圍給予各別的權重，其中距離兩雷達 100 公里內之資料均來自 VDRAS 分析場變數 (即 WRF 預報變數場權重為 0)，具體之權重值分佈可參考圖 16。每一網格點上，VDRAS 分析場變數權重值與 WRF 預報變數場之權重值相加必等於 1。而此結合後之變數場會更新 WRF

d02 之氣象場，並重啟預報共兩小時（流程可參考圖 5）。

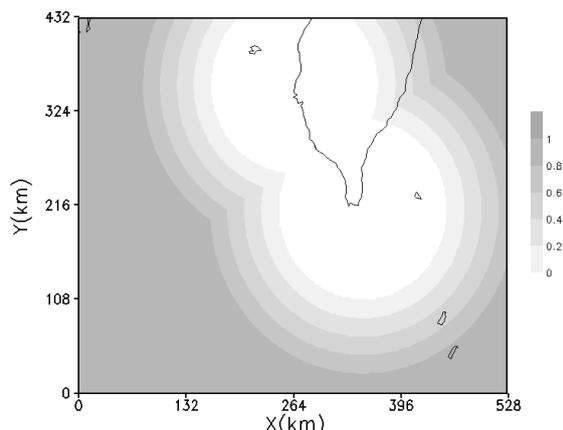


圖 16. 結合權重分佈圖，陰影值為 WRF 預報變數場權重值。每一網格點上，VDRAS 分析場權重值與 WRF 預報變數場權重值相加將等於 1。即越靠近兩雷達，則 VDRAS 分析場權重越大。

(二)實驗設計

所有使用 WRF 模擬之實驗，初始化時間皆為 2008 年 6 月 14 日的 0600 UTC，網格積分範圍是以台灣南部為主的兩層巢狀網格（圖 15），d01 與 d02 之水平解析度分別為 6 公里與 2 公里，其中 d02 與 VDRAS 之分析範圍相同，並開啟雙向互動(two-way interaction)以避免質量在邊界累積的問題，垂直方向採用追隨地勢的 σ 座標，共 46 層。微物理參數化採用 Lin et al. (1983)，邊界層參數化則使用 YSU scheme。

首先，吾人先進行兩組僅使用 WRF 預報之實驗，即分別利用 NCEP Global Final Analyses 及 ECMWF Atmospheric Model 再分析資料，於 0600 UTC 初始化 WRF 模式並預報。其餘與 VDRAS 分析場結合之實驗，主要將上一節中 VDRAS 背景場敏感度測試實驗所得到的三種分析場（CTL、NCP 與 ECM），與兩個利用 WRF 積分

到 1200 UTC 之預報場結合後並進行預報。總合來說，由於有兩個單純利用 WRF 預報之實驗，加上將三種 VDRAS 分析場分別結合兩種 WRF 預報場的六個實驗，故共有八組實驗。

(三)預報結果

仔細檢驗六個與 WRF 結合的預報實驗，發現使用權重平滑方式將 CTL 實驗（即 VDRAS 只使用地面站與探空計算背景場的設計）分析場與 WRF 預報場結合的模擬，皆會因為兩者之變數場差距過大而產生不真實的回波，連帶使得主要的對流系統受到影響，造成降水預報分數降低。

為了改善這個問題，吾人還嘗試了去調整 VDRAS 的變數，方法如下：

$$A'_{VDRAS} = A_{VDRAS} + \bar{A}_{WRF} - \bar{A}_{VDRAS} \quad (5)$$

A_{VDRAS} 為 VDRAS 中的 A 變數， \bar{A}_{WRF} 與 \bar{A}_{VDRAS} 分別是 WRF 與 VDRAS 中變數 A 的水平平均，加上修正項後得到新的 A'_{VDRAS} 。經過這樣的修正，我們有：

$$\bar{A}'_{VDRAS} = \bar{A}_{WRF} \quad (6)$$

亦即新的變數 A' ，其水平平均會等於 WRF 的水平平均。以這種方式修正後，的確可減少不真實回波的出現，不過當再置入 WRF 後，往後預報的雨量並沒有太明顯的改善，所以本文中不再詳細討論這組實驗的結果。

如利用 ETS 來檢視這六組模式結合的實驗，則發現將 ECM 實驗（即 VDRAS 使用 ECMWF 資料計算背景場的設計）的分析場，與以 ECMWF 資料初始化的 WRF 預報場相結合並預報之實驗表現會最佳，故接下來將利用此實驗（命名為 VDRAS+WRF），與前一節中的 ECM 實驗，亦即同樣使用 ECMWF 做為背景場，但只使用 VDRAS

預報的設計（本節中重新命名為 VDRAS (ECM)），以及利用 ECMWF 資料做為初始場的純粹 WRF 預報實驗（命名為 WRF），進行較詳細的比較。

觀察 1200UTC 至 1400UTC 之兩小時累計降雨（圖 17），在「WRF」實驗中其降雨極大值位於雲林、嘉義地區，與觀測（圖 13a）的主要降雨區域（高雄縣山區、屏東縣中部）比較，相對來說較為偏北，另外，在觀測的雨量分佈中（圖

13a) 所見到的，位在中央山脈南部尾端的降雨中心也沒有被模擬出來。

結合 VDRAS 分析場後進行預報的「VDRAS + WRF」實驗，因為同化了雷達資料，有助於掌握主要線對流系統的位置與移動方向，故降雨量也較接近觀測結果，不但中央山脈西側以及南端的降雨極值都有被模擬出來，先前「WRF」實驗中出現在雲嘉一帶錯誤的降雨極值也有明顯的改善。另外，圖 17 也指出這兩組有使用到 WRF 模式的預報結果，如與上一節只使用 VDRAS 預報之降水結果（圖 13b、13c、13d）比較，明顯發現 VDRAS 預報之降雨在山後地區較「WRF」或「VDRAS+WRF」模式預報為多，顯示出模式地形解析能力對於預報降水造成的差異。

在定量上進行討論，圖 18 繪出 WRF、VDRAS (ECM) 與 VDRAS+WRF 等實驗預報兩小時累計降雨的 ETS 分數。為了對照起見，圖 18 亦繪出第四節中，只用地面測站與探空建構背景場的純粹 VDRAS 實驗結果(命名為 VDRAS (CTL))，不過這組實驗雖然對陸地上的降雨預報有較佳的得分，但對海面上的回波卻沒有掌握好（如圖 10b

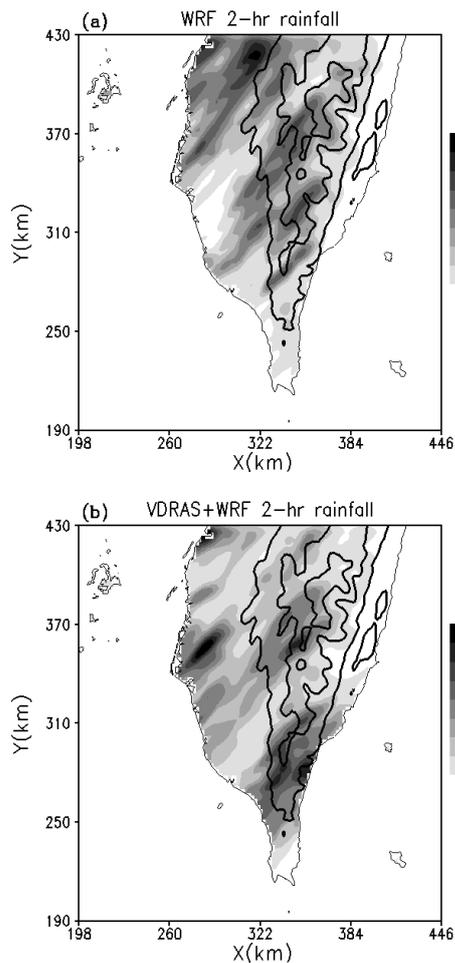


圖 17. (a) WRF 與(b) VDRAS+WRF 之兩小時累積降雨圖。陰影表雨量值，單位為公厘 (mm)，顯示區間如圖右灰階所示。粗黑等值線表海拔 500、1500、2500 公尺高度。

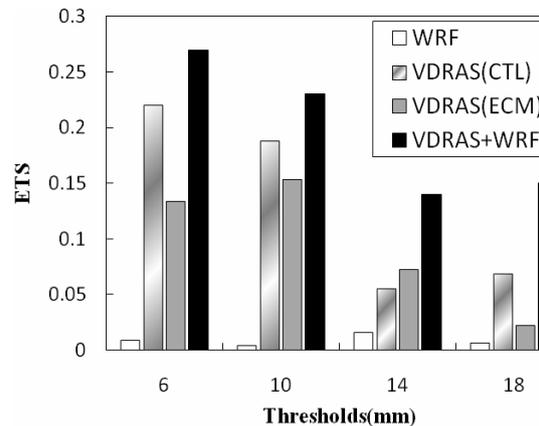


圖 18. WRF、VDRAS (CTL)、VDRAS (ECM) 與 VDRAS+WRF 兩小時累積降雨 ETS 分數比較。

所示)。比較之後可以發現，VDRAS+WRF 在所有門檻都很明顯地高於其它三種實驗，其中與 WRF 之差距更大。例如在門檻值 6mm (10mm) 時，VDRAS+WRF 實驗為 0.27 (0.23)、VDRAS (CTL)實驗為 0.22 (0.19)、VDRAS (ECM)實驗為 0.14 (0.15)、WRF 實驗則僅有 0.008 (0.003)。這樣的結果表示，結合 VDRAS 分析場與 WRF，對模式短期降水預報的能力會比單獨使用 VDRAS 或 WRF 都會有大幅度的提升。除此之外，為了更直接的檢驗 WRF 地形解析能力對於山區測站降水預報的影響程度，吾人另針對海拔 500 公尺以上自動雨量站（共約 54 站）計算 ETS（圖 19）。結果顯示，VDRAS+WRF 與 VDRAS(ECM)在所有降雨門檻上的差距還會再加大，再次證明 WRF 地形解析能力確實對於高山地區降水預報結果有非常正面之影響，未來 VDRAS 若能同樣擁有地形解析的能力，應當能夠提升台灣全島各地降水預報的能力，並期望做為台灣地區降水預報的有利工具。

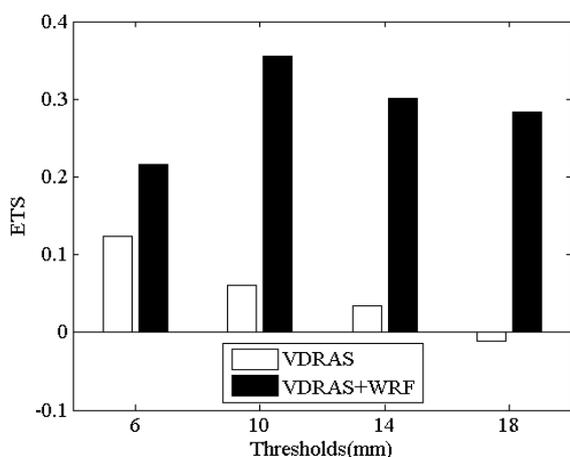


圖 19. VDRAS (ECM) 與 VDRAS+WRF 於海拔 500 公尺以上測站之兩小時累積降雨 ETS 分數比較。

六、結論與未來展望

本研究首次將 VDRAS 應用在臺灣地形複雜的地理環境，且觀測受限於四面環海的條件下，並為其尋求適用於本地的同化策略，研究的結果歸納如下：

- (1) VDRAS 可以在同化都卜勒雷達資料後，分析出合理的熱力與運動場結構。吾人亦發現低層幅合場的分佈，與當地山脈的走向具一致性，這顯示出 VDRAS 具有反映出地形效應的潛力。
- (2) 背景場對於 VDRAS 的分析與預報確實有很大的影響，使用實際地面站與探空觀測資料的 CTL 實驗，雖然沒有海面上大氣的觀測資料，但對位於陸地的主要線對流卻有比較好的掌握，使得其在降水預報表現最佳。使用 ECMWF 計算背景場的實驗 (ECM)，雖然於島上降雨預報稍微遜色，但對於在東南方海面上之線狀對流的預報，則相對較 CTL 佳。由此可推論，若能將兩種資料做一適當結合而成的背景場，可能會使 VDRAS 有更好的預報結果，此為後續的工作重點。
- (3) 藉由 VDRAS 納入雷達所觀測到的中小尺度對流系統的資訊，再結合 WRF 的地形解析能力，可進一步的提升降雨預報的表現，這會較單獨使用 VDRAS 或 WRF 預報，在各降雨門檻之 ETS 分數皆有很明顯的進步。
- (4) 本研究僅同化兩座雷達（七股、墾丁）資料，如遇對流系統範圍過於龐大時，將會受限於雷達觀測的距離，以致無法完整分析系統的動力與熱力結構，同時影響預報結果。未來可嘗試同化空軍所建置之清泉崗、馬公及綠島或其它雷達觀測資料，相信對於上游風場

與對流系統的結構會有更好的分析及預報結果。

- (5) 針對不同天氣系統的個案研究（如颱風、午後熱對流）有助於瞭解 VDRAS 的優勢與能力極限。此外，VDRAS 結合 WRF 之方法中，仍有若干步驟可以改進，例如可以將 VDRAS 分析場與 WRF 預報場以變分調整的方式進行結合。
- (6) 本研究中在進行 VDRAS 與 WRF 結合時，並未考慮如何將地形的強迫抬升作用納入計算，未來可針對此點予以進一步的改善。
- (7) 直接對 VDRAS 增加冰相微物理過程與地形解析能力亦是未來的研究方向。
- (8) 本研究中的同化策略，未來可做為在台灣中、北部，或其它具有類似地理環境與觀測限制的區域，進行資料同化與預報時的參考。

致謝

感謝兩位審查者寶貴的意見，使得本文內容更加完備。VDRAS 系統由 NCAR Dr. Juanzhen Sun 提供，謹此致謝。本文部份內容為作者（戴廖張）於 2010 年訪問 NCAR 時所完成。本文作者感謝參與 SoWMEX 外場實驗的所有成員，以及郭閃超先生協助圖表的製作。本研究由國科會計畫 NSC99-2625-M-008-001、NSC99-2111-M-008-003 與交通部中央氣象局 MOTC-CWB-99-2M-02 資助。

參考文獻

Barnes, S. L., 1973: Mesoscale objective map analysis using weighted time series

observations. *NOAA Tech. Memo.* Erl Nssl-62, 60pp.

Crook, N. A., and J. Sun, 2002: Assimilating radar, surface and profiler data for the Sydney 2000 forecast demonstration project. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 888–898.

Crook, N. A., and J. Sun, 2004: Analysis and Forecasting of the Low-Level Wind during the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. *Wea. Forecasting*, **19**, 151–167.

Dowell, C. D., F., Zhang, L. J. Wicker, C. Snyder, and N. A. Crook, 2004: Wind and temperature retrievals in the 17 May 1981 Arcadia, Oklahoma, supercell: Ensemble Kalman filter experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1982–2005.

Hu, M., M. Xue, J. Gao, and K. Brewster, 2006: 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 675–698.

Kawabata J., H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Wakazuki, 2007: An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloud-resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 255–276.

Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation, *Meteor. Monogr.*, **32**, Amer. Meteor. Soc., 84 pp.

- Lin, Y. L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill, *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Snyder, C., and F. Zhang, 2003: Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1663-1677.
- Sun, J., 2005: Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 793-813.
- _____, M. Chen, and Y. Wang, 2010: A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 Forecast Demonstration Project, *Wea. Forecasting*, **25**, 1715-1735.
- _____, and N. A. Crook, 1997: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observation using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1642-1661.
- _____, and N. A. Crook, 2001: Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, **16**, 117-132.
- _____, and Y. Zhang, 2008: Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2364-2388.
- Warner T., and co-authors, 2007: The Pentagon shield field program - Toward critical infrastructure protection, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, No. 2, 167-176.
- Xiao, Q., and J. Sun, 2007: Multiple radar data assimilation and short-range QPF of a squall line observed during IHOP_2002, *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3318-3404.
- Xiao, Q., Y.-H. Kuo, J. Sun, W.-C. Lee, E. Lim, Y. Guo, and D. M. Barker, 2005: Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 768-788.

Using Four Dimensional Variational Method and Doppler Radar Data to Improve Short Term Quantitative precipitation forecast – a case study of a frontal system observed during 2008 SoWMEX field experiment

Sheng-Lun Tai Yu-Chieng Liou Shao-Fan Chang

Institute of Atmospheric Physics National Central University, Taiwan

(manuscript received 8 October 2010 ; in final form 23 December 2010)

ABSTRACT

The Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS), developed by National Center for Atmospheric Research (NCAR), had been used to analyze low-level wind and convergence field in order to forecast thunderstorms at a real-time base. It was also applied to predict the evolution of supercells or squall line systems by assimilating multiple Doppler radar data. However, those studies were mostly performed over a wide open plain. In this research, it is for the first time that VDRAS is applied in the Taiwan and vicinity area. Since the complex terrain and limited observations due to the surrounding oceans pose great challenges, it is attempted in this research to find an appropriate strategy for using VDRAS under such conditions.

A real case observed during IOP8 (Intensive Observation Period 8) of SoWMEX (Southwest Monsoon Experiment) on 14, June, 2008 is selected. VDRAS uses the data collected by radiosondes, surface stations, and re-analysis data to construct a background field, followed by assimilating the radial winds and reflectivity detected by two Central Weather Bureau S-band Doppler radars (RCCG and RCKT). Through Four-dimensional variational (4DVAR) adjustment, one obtains an optimal initial field, from which the VDRAS starts to make forecast. In addition, for a proper treatment of the influences from the complex terrain, it is also attempted to combine the VDRAS analysis field with WRF, and let the latter continue the forecast.

It is found that VDRAS is able to retrieve reasonable kinematic the thermodynamic fields. The low layer convergence is consistent with the orientation of the local mountains, which implies that it is possible for VDRAS to reflect the topographic effects of the terrain. In terms of model forecast, VDRAS can correctly

capture the movement of the major precipitation system. The Equitable Threshold Scores (ETS) of predicted 2-hour accumulated rainfall are between 0.1 to 0.2. However, if VDRAS is merged with WRF, the resulting rainfall forecast skill can be significantly improved than that from using WRF or VDRAS alone.

This research provides a possible alternative if VDRAS is to be applied in another region with similar geographic environment and observational limitations.

Key Words: Four-dimensional Variational Method, Doppler radar data assimilation system

