國 立 中 央 大 學

大 氣 科 學 學 系
碩 士 論 文

改善四維變分都卜勒雷達變分分析系統 (VDRAS)與天氣研究預報模式(WRF)結合流程 以提升台灣之定量降水預報

研 究 生：楊伯謙
指導教授：廖宇慶 博士

中 華 民 國 一〇三 年 六 月

國立中央大學圖書館
碩博士論文電子檔授權書

(101 年 9 月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

(✓)同意 (立即開放)

(　　)同意 (請於西元 _____年_____月_____日開放)

(　　)不同意，原因是：_____

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

(✓)同意 (立即開放)

(　　)同意 (請於西元 _____年_____月_____日開放)

(　　)不同意，原因是：_____

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館，基於推動「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名: 楊伯謙　　學號：101621013

論文名稱: 改善四維變分都卜勒雷達變分分析系統(VDRAS)與天氣研究預報模式(WRF)結合流程以提升台灣之定量降水預報

指導教授姓名：廖宇慶

系所 ：大氣物理 所 □博士班 ■碩士班

備註：

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔，紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定，採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽，如您有申請專利或投稿等考量，不同意紙本上架陳列，須另行加填聲明書，詳細說明與紙本聲明書請至 http://thesis.lib.ncu.edu.tw/ 下載。
2. 本授權書請填寫並**親筆**簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁（全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替）。
3. 請加印一份單張之授權書，填寫並親筆簽名後，於辦理離校時交圖書館（以統一代轉寄給國家圖書館）。
4. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應遵守著作權法規定。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

大氣物理 學系/研究所 楊伯謙 研究生所提之論文 改善四維變分都卜勒雷達變分分析系統(VDRAS)與天氣研究預報模式(WRF)結合流程以提升台灣之定量降水預報 係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 廖宇慶 (簽章)

103 年 6 月 27 日

101.06.15

國立中央大學碩士班研究生

論文口試委員審定書

大氣物理 學系/研究所 楊伯謙 研究生

所提之論文

改善四維變分都卜勒雷達變分分析系統(VDRAS)與天氣研究預報模式(WRF)結合流程以提升台灣之定量降水預報

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人 陳台琦

委　　員 廖宇慶

林沛練

中華民國 103 年 7 月 7 日

101.06.15

中文摘要

台灣的地形複雜且四面環海，氣象上因海上無測站觀測資料可以提供分析，所以雷達扮演了重要的角色，而高聳的山脈也增加了預報的困難度。由美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR）發展的都卜勒雷達變分分析系統（Variational Doppler Radar Analysis System,VDRAS），是藉由雷達所得到的徑向風和回波的資料，經四維變分資料同化方法(4DVAR)來反演出天氣系統之三維動力場及熱力場，並進行預報。前人研究曾在台灣使用 VDRAS 檢視同化雷達資料後的預報能力，並與 WRF（Weather Research and Forecasting）模式結合並進行預報，其預報的表現有很明顯的改善。本研究的目的是延續前人以結合 VDRAS 與 WRF 來進行預報的方式，但改善整個流程中出現的若干問題，具體而言，包括如何加入 VDRAS 產生的氣壓場到 WRF 中，如何消除邊界上的錯誤回波，以及如何改善預報回波減弱等問題，期望能進一步提升短期的定量降水預報（Quantitative Precipitation Nowcasting）。

本研究利用的個案為 2008 年台灣西南氣流實驗（SoWMEX/TiMREX）第八次密集觀測期間(IOP8)中 6 月 14 日的梅雨鋒面進行研究分析。第一部分，是對於 VDRAS 同化前的背景場相對濕度進行調整，目的為了解決模式邊界上的錯誤回波，目的是為了使預報的回波不會受到其影響。第二部分則是 VDRAS 的分析場與 WRF 模式作結合的修正，先前的研究並無更新 WRF 壓力場，對於壓力分布的動力結構只能用其他變數場對其影響，效果較為緩慢，但壓力為 WRF 模式的診斷變數，故本實驗修改程式以加入更新的壓力場到 WRF 進行測試，另一方面，在兩模式結合後會發生預報回波減弱的問題，故將結合時 VDRAS 的相對濕度進行一些調整，其結果發現有提升的實驗可以將回波減弱的區域調整回來，對於定量降水預報有明顯改善。

Abstract

The topography of Taiwan is complex. Taiwan is surrounded by sea, where no observation data can be found; besides, tall mountains make the difficulty higher in weather forecast. Thus, radar plays a crucial role in the observation. The Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) developed by National Center for Atmospheric Research (NCAR) is a system that uses the 4DVAR technique to assimilate the radar reflectivity and radial wind observations, which is capable to inverse the three-dimensional kinematic and thermodynamic fields within a weather system. Then, the forecast comes out. Previous studies in which the analysis fields from VDRAS were merged with MRF showed prominent improvement in results. The purpose of this study is to continue the model of combing VDRAS and WRF. But a few problems arise in the process of the improving. In fact, problems like how to put the pressure field derived from VDRAS into WRF, how to eliminate wrong reflectivity, and how to improve the weakening of radar reflectivity are waiting to be fixed. The study is expected to promote the short-term of Quantitative Precipitation Nowcasting.

A real case of Mei-Yu front occurred on 14 June 2008 during Southwest Monsoon Experiment (SoWMEX) IOP8 is selected. In the first part of experiment, the relative humidity in the background field of the VDRAS before assimilation would be adjusted, which is done to avoid wrong reflectivity from boundary of model and make reflectivity not affected. The second part is to correct the VDRAS analysis field merged with WRF model. Previous studies do not update the WRF pressure field. The pressure-distributed dynamic structure can only be affected by other variable fields, so the results come out slowly. Since pressure is the diagnostic variables in the WRF model, this study corrects the formula, adding a updated pressure filed to the WRF model. On the other hand, two models merged will produce the problem of the weakening reflectivity, so relative humidity of VDRAS is adjusted when they are merged.

The promoted experiment turns out to adjust back the domain where the reflectivity is weakened, and suggests an effective way of Quantitative Precipitation Nowcasting.

致謝

在中央大學的生活也邁向了第六年，終於要在這個地方再次畢業了！首先要先感謝我的指導教授廖宇慶老師，不管在研究方向上或是遇到程式上的瓶頸時，給了我許多的建議和幫助，也謝謝老師時常有耐心指正我犯許多小錯誤，讓我在研究這條路上學到了很多事物。感謝陳台琦老師，常常分享許多經驗給我們這些懵懂無知的小毛頭，對於天氣的分析上或我的研究上也給予很多建議。最後還要感謝林沛練老師，能在滿滿的行事曆上抽空擔任我的論文口試委員，對於論文也提供了許多建議。

待在雷達實驗室的日子真的非常開心，感謝少凡學長、老蔡學長、olan 學長、鯨魚學姊在研究上給了我許多的建議，在程式上的幫助更是不少，討論的過程中也學到如何寫出較完善的方法以及在尋找錯誤上能更為有效率。還要感謝豪大大學長以及珮瑜學姊在我寫程式遇到瓶頸時，給予我鼓勵，還有實驗室的夥伴大柯柯跟浩南哥容忍我崩潰的時候在實驗室胡鬧，還有兩名碩一的學弟詠霖、彥銘的隨傳隨到，讓我在研究上走得更為順利。

而在平常的日子，要感謝大物所 103 級的同學們，時常一起吃飯，一起安排紓壓行程，在崩潰的時候互相地給予鼓勵，雖然很多同學都是大學就已經認識的，但在研究所的日子也因為有你們，能在研究生活中更多采多姿。也要感謝中央排球隊的各位學弟學妹，能讓我在閒暇之餘可以動一動懷念以前的練球生活，以及許多陪我打球的各位好球友，讓我在研究所生活中不至於胖到免役。

最後，也是最重要的是要感謝我的父母，在這兩年的研究所生活，能夠讓我生活無後顧之憂，在我背後默默地相信我、支持我以及鼓勵我，讓我終於完成我的碩士學位，可以畢業囉！

目錄

中文摘要 i

英文摘要 ii

致謝 iv

目錄 v

圖表說明 vii

第一章　緒論 1

1.1 前言 1

1.2 文獻回顧 2

1.3 研究目的 3

第二章　資料控管及模式介紹 5

2.1 雷達資料品質控管及處理 5

2.2 都卜勒雷達變分分析系統 VDRAS 5

2.2.1 中尺度背景場 6

2.2.2 雲模式 7

2.2.3 四維變分資料同化 8

2.3 WRF 模式系統 10

2.4 校驗方法 11

第三章　個案介紹 14

3.1 2008 年西南氣流實驗 14

3.2 IOP8 個案介紹 15

第四章 改善 VDRAS 之中尺度背景場之敏感度實驗 18
4.1 VDRAS 模式設定及實驗設計 18
4.2 分析場的結果分析 20
第五章 改善 VDRAS 與 WRF 結合過程之定量降水預報實驗 22
5.1 壓力變數的取代以及調整濕度 22
5.2 預報結果及檢驗定量降水 24
第六章 結論與未來展望 27
6.1 結論 27
6.2 未來展望 28
參考文獻 30
附錄 33
附表 35
附圖 36

圖表說明

表 4.1　實驗列表

表 4.2　VDRAS 中使用之觀測資料

表 5.1　VDRAS 與 WRF 模式設定

圖 3.1　2008 年 6 月 14 日地面天氣分析圖，時間為(a)1200UTC；(b)1800UTC。

圖 3.2　2008 年 6 月 14 日 1200UTC 之 850hPa 天氣分析圖。

圖 3.3　2008 年 6 月 14 日 1200UTC 之 200hPa 天氣分析圖。

圖 3.4　2008 年 6 月 14 日中央氣象局全台雷達合成最大回波圖，時間為(a)1000UTC；(b)1500UTC。

圖 3.5　2008 年 6 月 14 日色調強化紅外線衛星雲圖，時間為(a)0957UTC；(b)1457UTC。

圖 3.6　2008 年 6 月 14 日 1100 至 1500UTC 之自動雨量站四小時累積圖。

圖 3.7　2008 年 6 月 14 日中央氣象局當日累積雨量圖。

圖 3.8　2008 年 6 月 14 日中央氣象局劇烈天氣監測系統合成最大回波圖，陰影為回波值，單位為 dBZ，時間分別為：(a)1000UTC；(b) 1100UTC；(c) 1200UTC；(d) 1300UTC；(e) 1400UTC；(e) 1500UTC。

圖 4.1　VDRAS 模擬範圍以及製作中尺度背景場所使用的資料，包含地面測站(正方形標示)，再分析資料(點標示)，探空(大點標示)，還有同化所使用的雷達(三角形標示)。

圖 4.2　VDRAS 同化雷達資料設計圖，同化墾丁(RCKT)、七股(RCCG)、S-POL 三顆雷達資料，同化過程中使用兩個窗區，每個窗區內同

化三筆雷達資料，黑色箭頭表示一筆雷達全體機掃描資料，而在1022UTC 的背景場來自於中尺度背景場。

圖 4.3　比較同化過程中所使用的雷達資料(a) 七股雷達觀測最低仰角回波圖，陰影為回波值；(b) VDRAS 同化雷達資料範圍示意圖；(c)本研究所同化雷達資料範圍示意圖。

圖 4.4　改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於1102UTC 之高度 4.25 公里之回波圖，陰影為回波值，單位為dBZ。

圖 4.5　改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於1102UTC 之最大回波圖，陰影為回波值，單位為 dBZ。

圖 4.6　改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於1102UTC 高度 4.25 公里之雲水混和比(色階，gkg^{-1})與水平風場(向量，ms^{-1})。

圖 4.7　改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於1102UTC 高度 7.25 公里之雲水混和比(色階，gkg^{-1})與水平風場(向量，ms^{-1})。

圖 5.1　VDRAS 分析場與 WRF 結合實驗設計圖。

圖 5.2　VDRAS 與 WRF 結合取代壓力測試：(a)、(d)VDRAS；(b)、(e) VDWRF；(c)、(f) VDWRF_P 於 1102UTC 之壓力場，其中(a)、(b)、(c)為高度 1.25km，(d)、(e)、(f)為高度 4.25km，陰影為壓力，單位為 hpa。

圖 5.3　VDRAS 與 WRF 結合取代壓力測試：(a)、 (b) VDWRF；(c)、(d) VDWRF_P 於預報一小時後之壓力場，其中(a)、(b)為高度 1.25km，(c)、(d)為高度 4.25km，陰影為壓力，單位為 hpa。

圖 5.4　VDRAS 與 WRF 結合之預報 1 小時最大回波圖：(a)QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

圖 5.5　VDRAS 與 WRF 結合之預報 2 小時最大回波圖：(a) QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

圖 5.6　VDRAS 與 WRF 結合之預報 3 小時最大回波圖：(a) QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

圖 5.7　VDRAS 與 WRF 結合之預報 4 小時最大回波圖：(a) QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

圖 5.8　WRF 預報 0 小時，高度 1.25 公里之輻合輻散場(色階，$10^{-3}s^{-1}$)：(a)VDWRF；(b) VDWRF_P；(c) VDWRF_PRH 。

圖 5.9　WRF 預報 1 小時，高度 1.25 公里之輻合輻散場(色階，$10^{-3}s^{-1}$)：(a)VDWRF；(b) VDWRF_P；(c) VDWRF_PRH 。

圖 5.10　1100UTC 至 1200UTC 累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

圖 5.11　1200UTC 至 1300UTC 累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

圖 5.12　1300UTC 至 1400UTC 累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

圖 5.13　兩小時累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

圖 5.14　三小時累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

圖 5.15　預報累積雨量之空間相關係數(SCC)。其中包含 WRF_only、VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，橫軸為預報時間(小時)。

圖 5.16　預報累積雨量之方均根誤差(RMSE)。其中包含 WRF_only、VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，橫軸為預報時間(小時)，RMSE 單位為 mm。

圖 5.17　3 小時預報累積雨量之 ETS 分數。其中包含 WRF_only、VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，橫軸為門檻值，單位為 mm。

第一章　緒論

1.1 前言

台灣的地形複雜且四面環海，根據中央氣象局的資料顯示，台灣的年平均降雨量約為 2500 公釐，而主要的降水集中在每年的梅雨季及颱風季，這兩個時期為台灣帶來豐沛的降水，加上夏季旺盛的西南氣流，使得台灣常發生劇烈降雨，造成水災及土石流等災害，造成嚴重的損失，如何提早防範這些劇烈降水系統帶來的負面影響，精確地預測降水位置以及強度，改善短期定量降水預報(Quantitative Precipitation Nowcasting, QPN)，對於防災工作的事前準備是一個現今的重要課題。

近三十年來，台灣的氣象界為了對於鋒面梅雨系統有更多的了解，推動了許多的觀測實驗，像是 1987 年的台灣地區中尺度實驗計畫(Taiwan Area Mesoscale Experiment, TAMEX)為第一個台灣與美國共同合作針對中尺度氣象，包含颱風及梅雨季所造成豪雨問題的計畫，而之後 1998 年的梅雨實驗計畫(Mei-Yu Experiment in 1998, MYEX98)和 2008 年的西南氣流實驗計畫(Southwest Monsoon Experiment, SoWMEX)都提供了多種觀測儀器和相關的觀測數據，對於梅雨季期間的中尺度系統的分析及模擬皆有相當大的幫助。

在台灣，因海上無測站觀測資料可以提供分析，高聳的山脈也增加了預報的困難度，而主要的劇烈降雨系統皆來自於海上，所以都卜勒雷達在觀測上扮演了重要的角色，而且都卜勒雷達具有高時間及空間解析度的觀測能力，對於中小尺度的系統皆能對其風場、回波場有良好的掌控能力，可以對於模式之初始場有相當程度的改善，提升模式定量降水預報的能力。本研究使用美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric

Research, NCAR)所發展的都卜勒雷達變分分析系統(Variational Doppler Radar Analysis System, VDRAS)，藉由同化多筆都卜勒雷達資料進行資料同化，並結合同為美國國家大氣研究中心所發展之天氣研究與預報模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)進行定量降水預報，分析一個 2008 年西南氣流實驗中的梅雨個案。

1.2 文獻回顧

都卜勒氣象雷達能提供高時空解析度的徑向風場及回波場的資訊，Lin et al. (1993)首次將雷達觀測資料用來初始化雲模式，並且由觀測的徑向風得到三維的風場，回波場經由 Gal-Chen (1978)的熱力反演過程，來得到三維的溫度及壓力場，藉由這些資訊對於一個雷暴雨個案進行模擬，其結果表示雷達資訊對於模式的預報具有相當大的幫助。而在之後電腦的資源以及資料同化的發展日漸純熟，Sun and Crook (1997,1998)發展一套藉由雷達所得到的徑向風和回波的資料與中尺度背景場，經四維變分資料同化方法(Four-Dimensional Variational Data Assimilation, 4DVAR)來反演出天氣系統之三維動力場及熱力場的系統，稱為都卜勒雷達變分分析系統(VDRAS)，而中尺度背景場是經由測站、探空及再分析場經由客觀分析所得到，藉由這個系統，使得模式分析場與雷達觀測及背景場之間的差異達到最小，來得到較佳的初始場進行預報。

前人曾經使用 VDRAS 進行許多的個案分析及研究，Sun and Crook (2001)藉由同化單一都卜勒雷達資料進行低層風場的分析，Warner et al. (2000)將 Sun and Crook (1997,1998)之四維變分技術應用在美國 Baffalo Cree, Colorado 的洪水個案上，其預報結果與觀測相當吻合，另外，在 2000 年雪梨奧運期間，藉由使用 VDRAS 同化兩座都卜勒雷達來分析不同系統的低層風場變化， (Crook and Sun, 2002,2004)，而在 2008 年的北京奧運期間，

使用 VDRAS 來對於北京複雜地形進行分析並提供當地氣象局進行即時預報的依據(Sun et al., 2010)。Sun and Zhang (2008)也藉由 VDRAS 同化多部都卜勒雷達資料，模擬 IHOP_2002 實驗期間的一個颮線系統其模擬結果相當成功。

由於台灣四面環海，天氣系統大部分皆由海上移入，但在海上的觀測資料相當有限，所以雷達在台灣的氣象預報上扮演一個重要的角色，Tai et al. (2011)則是首次在台灣使用 VDRAS 檢視同化雷達資料後的預報能力，但因台灣地形複雜，而 VDRAS 並無地形解析能力，故與具有地形解析的 WRF 模式結合並進行預報，其結果發現相較於單獨以 VDRAS 或 WRF 進行預報的表現，有很明顯的改善。

而在楊(2012)分別對於在台灣使用 VDRAS 結合 WRF 進行一些修正及測試，其結果發現使用兩個同化窗區會相較於單一同化窗區或是三個同化窗區的效果好，這些結果皆有助於改善 VDRAS 結合 WRF 的預報表現。

1.3 研究目的

本研究主要的目的是延續前人以結合 VDRAS 與 WRF 來進行預報的方式，但改善整個流程中出現的若干問題，具體而言，包括下列三點:(1)如何加入 VDRAS 產生的氣壓場到 WRF 中，(2)如何消除邊界上的錯誤回波，以及(3)如何改善預報回波減弱等問題，並以分析 2008 年台灣西南氣流實驗(SoWMEX/TiMREX)期間的梅雨鋒面個案進行研究，期望能進一步提升短期的定量降水預報(QPN)。

本研究一共分為六個章節，第一章為緒論，包含了前言、文獻回顧及研究目的。第二章為研究方法，首先對於模式使用的資料來源以及雷達資料的品質控管做介紹，接下來為 VDRAS 模式的介紹以及 WRF 模式的介紹，最後為分析及預報結果之驗證方法。第三章為介紹 2008 年西南氣流實驗

第八次密集觀測的個案進行分析及詳細介紹。第四章為改善 VDRAS 的分析場，目的是如何消除邊界上的錯誤回波，第五章則是對於加入 VDRAS 產生的氣壓場到 WRF 中和如何改善預報回波減弱等問題進行測試，並對其結果進行分析及討論。最後第六章為結論與未來展望。

第二章　資料控管及模式介紹

2.1 雷達資料品質控管及處理

由於雷達觀測資料在未處理前可能包含許多非氣象的資訊，例如地形雜波(Ground Clutter)、海洋雜波(Sea Clutter)以及風場摺疊(Folding)等，所以在品質控管(Quality control)上，需要特別的謹慎小心，以避免資料誤判影響到模式的結果。

本研究所使用的雷達包含了兩座中央氣象局 S 波段的七股雷達、墾丁雷達以及美國大氣研究中心所提供的 S 波段雙偏極化都卜勒雷達(S-POL)的徑向風場及回波觀測資料，經由 RASTA(Radar Analysis System for Taiwan Area)(鄧，2000)來進行雷達資料品質的控管。

首先使用 RASTA 將雷達徑向風場的資訊，利用空間連續法進行反摺疊(unfolding)，再進行濾除地形雜波，而一般濾除地形雜波可以利用高回波、低風速為條件來濾除，故本研究設定為：回波高於 30dBZ 且徑向風絕對值小於 $2ms^{-1}$，最後再將處理好的資料轉成 PPI 格式。由於本研究所使用的 VDRAS 讀取雷達資料的格式為：水平方向為直角坐標，而垂直方向以仰角來分層，因此必須將剛經由 RASTA 處理好的 PPI 資料進行內插，內插以雷達為中心，範圍為 500km×500km，間距為 1km 的水平網格上，才能供給 VDRAS 使用。

2.2 都卜勒雷達變分分析系統 VDRAS

本研究所使用的都卜勒雷達變分系統(VDRAS)是由美國國家大氣研究中心(NCAR)所發展，此系統能夠對於各種傳統觀測資料(探空、地面測站等)、非傳統觀測資料(剖風儀、再分析資料等)進行中尺度背景場的整合分

析，以作為同化時的背景場或是初始場，然後利用一個雲解析模式(Sun and Crook 1997,1998)與其伴隨模式經由四維變分資料同化的方法來同化都卜勒雷達資料，最後獲得最佳分析場來進行預報。

對於此系統，以下分為「中尺度背景場」、「雲模式」以及「四維變分資料同化」來做更詳細的說明。

2.2.1 中尺度背景場

都卜勒雷達觀測資料其優點為高時空解析度，但也有其限制，限制為必須在有降水系統下才能觀測到，雷達最大觀測範圍也有限，因此在沒有雷達觀測資料覆蓋的區域，需要藉由傳統觀測資料或是再分析場資料來填補資料的空缺。

在 VDRAS 同化雷達資料之前，必須給予 VDRAS 一個中尺度背景場來做為模式的初始猜測場，而本研究使用的觀測資料包含 6 個觀測探空(sounding)、14 個地面測站(surface station)以及歐洲中期天氣預報中心(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析資料(Reanalysis)，製作初始猜測場的流程如下：

(1) 將解析度$1.125° \times 1.125°$的 ECMWF 再分析資料，在本研究的分析區域中，每 60km 尋找出一組最近的垂直剖線資料，做為一個虛擬探空。

(2) 使用 Barnes 客觀分析方法對於剛取出的虛擬探空資料進行內插，先對於垂直方向內插至模式每層的高度，再內插至模式水平網格點上。內插變數包含水平風場(u、v)、壓力(P)、溫度(T)、水氣混合比(qv)，其中傳統觀測探空的水氣混和比(gkg^{-1})可以藉由相對濕度轉換而來，轉換的公式如下：

$$q_v = RH(\frac{3.8}{p})\exp(17.72 \times \frac{T-273.16}{T-35.86}) \tag{2.1}$$

其中 T 為溫度(K)，RH 為相對濕度(%)，p 為壓力(hpa)

(3) 使用 Barnes 客觀分析將地面測站資料內插至模式第一層之所有網格上。

(4) 最後以線性最小平方擬合法將地面測站資料與探空資料結合，即為中尺度背景場。

2.2.2 雲模式

VDRAS 所使用的雲模式為暖雲模式，其微物理參數化是使用 Kessler scheme(Kessler, 1969)，該參數化不考慮冰相粒子及其微物理過程。此雲模式包含六個預報方程式，其中動力場為三維動量方程、熱力場為熱動力方程、水氣場為雨水混合比及總液態水混合比預報方程。

三維動量方程式：

$$\frac{d\bar{\rho}u}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + \nu\nabla^2\bar{\rho}u \tag{2.2}$$

$$\frac{d\bar{\rho}v}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + \nu\nabla^2\bar{\rho}v \tag{2.3}$$

$$\frac{d\bar{\rho}w}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + g\bar{\rho}\left(\frac{T'}{T} + 0.61q_v' - q_c - q_r\right) + \nu\nabla^2\bar{\rho}w \tag{2.4}$$

此外，此模式為不可壓縮模式，所以必須滿足質量連續方程：

$$\frac{d\bar{\rho}u}{dx} + \frac{d\bar{\rho}v}{dy} + \frac{d\bar{\rho}w}{dz} = 0 \tag{2.5}$$

其中 u、v、w 為三維風場，ρ、p、T分別為空氣密度、大氣壓力、溫度，ν為渦流黏滯係數，g 為重力加速度，q_v、q_c、q_r分別為水氣、雲水、雨水混合比。變數右上方一撇為擾動場，變數上方一橫線為水平平均場。由於

在(2.2)~(2.4)中的擾動壓力p'為診斷變數，可以藉由包桑方程式(Poisson Equation)解出該變數：

$$\nabla^2 p' = -\nabla(v\nabla\bar{\rho}v) + g\bar{\rho}\frac{\partial}{\partial z}(\frac{T'}{T} + 0.61q_v' - q_c - q_r) \tag{2.6}$$

熱動力方程式(Tripoli and Cotton 1981)：

$$\frac{d\bar{\rho}\theta_l}{dt} = -\frac{L_v\bar{\rho}}{C_pT}\frac{\theta_l^2}{\theta}\frac{dV_Tq_r}{dz} + \kappa\nabla^2\bar{\rho}\theta_l \tag{2.7}$$

其中θ_l為液態水位溫，L_v為蒸發潛熱，C_p為氣體定壓比熱，θ為位溫，V_T為終端落速，κ為液態水位溫之擴散係數，當液態水位溫在蒸發及凝結時，為一守恆量。

雨水混合比及總液態水混合比之預報方程：

$$\frac{d\bar{\rho}q_r}{dt} = R_c + R_a + R_e + \bar{\rho}\frac{dV_{Tm}q_r}{dz} + \kappa\nabla^2\bar{\rho}q_r \tag{2.8}$$

$$\frac{d\bar{\rho}q_t}{dt} = \bar{\rho}\frac{dV_{Tm}q_r}{dz} + \kappa\nabla^2\bar{\rho}q_t \tag{2.9}$$

其中q_t為總液態水混和比，R_c是因雨水與雲水碰撞，使雲水變成雨水的轉換速率，R_a是因雲水間的相互碰撞，使雲水變成雨水的轉換速率，R_e是因蒸發，使雨水變成水氣的轉換速率。藉由上述的方程式即可以對於風場、熱力場、水氣場進行預報，關於本研究所使用的雲模式，可以參考Sun and Crook (1997,2001)。

2.2.3 四維變分資料同化

VDRAS 中所使用同化雷達資料的方法為四維變分資料同化(4DVAR)，其目的在於藉由雷達資料使模式初始場更接近於真實大氣的狀態，4DVAR主要是藉由預報模式以及預報之伴隨模式(Adjoint Model)的來回積分中，加入觀測的資訊，使得價值函數(cost function)達到最小，而本研究的預報

模式為 2.2.2 所介紹之 VDRAS 雲模式，而伴隨模式則是利用 VDRAS 雲模式所對應之切線線性模式(Tangent Linear Model)所寫。此方法的優點是有助於模式的收斂，便能得到較好的初始分析場，對於本研究之目的是為了改善短期定量降水預報，有很大的幫助。

四維變分之價值函數的通式：

$$J=(x_0-x_b)^T B^{-1}(x_0-x_b)+$$

$$\sum_{\sigma,t}[(Hx-y)^T O^{-1}(Hx-y)]+J_p \qquad (2.10)$$

其中 x 表示模式變數，y 表示觀測變數，H為觀測運算子，主要是對於模式變數單位轉換成觀測變數單位以及將模式變數內插至觀測格點上，下標 0 為資料同化開始的時間，下標 b 表示背景場的資訊，B為背景誤差協方差矩陣，O為觀測誤差協方差矩陣，J_p為時間、空間平滑項。價值函數的第一項為背景項，由於真實狀況下雷達觀測並不會包含所設定的網格範圍，所以背景項除了能提供部分當時大氣的狀態外，也能對於缺乏觀測資料的部分進行調整，第二項為觀測項，由於觀測資料是比較接近真實大氣的資訊，故必須對於觀測點進行比較，所以必須將模式資料轉換成觀測格點上，進行比較，第三項為平滑項，可以對於模式中的雜訊做平滑，使其不影響模式的進行。

本研究模式中並沒有輸出雷達回波(Z)以及徑項風(V_r)的變數，單位為 dBZ 及 ms^{-1}，所以必須使用轉換運算子的過程來同化雷達觀測資料，轉換運算子透過(2.11)及(2.12)進行轉換。

$$Z=43.1+17.5\log(\rho q_r) \qquad (2.11)$$

$$V_{r,i}=\frac{1}{r_i}[u(x-x_i)+v(y-y_i)+(w-V_T)\cdot(z-z_i)] \qquad (2.12)$$

其中ρ為空氣密度(kgm^{-3})，q_r為雨水混和比(gkg^{-1})，r 為觀測資料與雷

達中心的直線距離(m)，下標 i 為雷達的編號，而 x、y、z 為觀測點位置，x_i、y_i、z_i 為雷達位置，u、v、w 為轉換至觀測點上的三維風場(ms^{-1})，V_T 為終端落速(ms^{-1})，其計算的方法可以參考 Sun and Crook(2001)如(2.13)式：

$$V_T = 5.4a \times 10^{0.00714(Z-43.1)} \tag{2.13}$$

$$a = (p_0/\bar{p})^{0.4} \tag{2.14}$$

其中 Z 為回波強度(dBZ)，p_0為地面氣壓，$\bar{p}$為該層的平均氣壓，單位為 hpa，藉由(2.11)及(2.12)式，可以由模式變數轉換成觀測變數，使 VDRAS 能進行雷達資料同化。

在觀測項中除了同化雷達回波外，VDRAS 也同化觀測的雨水混合比，而實際上觀測並無此資料，所以必須由雷達回波轉換才能得到該變數，假設回波與雨水混合比的關係式之雨滴粒徑分布為 Marshal-Palmer 的形式，而觀測的回波轉換成雨水混合比的公式如下(Sun and Crook 1997,1998；Xiao et al. 2005)：

$$q_r = \frac{1}{\rho} 10^{[(z-43.1)/17.5]} \tag{2.15}$$

其中q_r為雨水混合比(gkg^{-1})，Z 為雷達回波(dBZ)，ρ為空氣密度(kgm^{-3})。

2.3 WRF 模式系統

本研究除了利用 VDRAS 同化雷達資料，並且將 VDRAS 同化後之分析場與天氣研究與預報模式(Weather Research and Forecasting Model；WRF)模式做結合，期望藉由 WRF 的地形解析能力以及較為完善的微物理，以提升短期定量降水預報能力。WRF 為建立在可壓縮且非靜力的一個中尺度氣象數值模式，並且水平座標採用 Arakawa C 網格，而垂直座標方面，採用隨地形而變化的 η 座標，故有解析地形的能力。在時間積分方

面，採用 3 階或 4 階之 Runge-Kutta。另外對於跟種天氣狀況的需要，WRF 模式可依不同的大氣環境狀態及天氣尺度提供多種參數化方法，使用者可以選擇不同的參數化來達到較準確的預報與模擬，其中參數化包含：積雲參數化、邊界層參數化、土地利用參數化、輻射參數化、雲微物理參數化，參數化的介紹可經由 WRF 網站得到詳細的資訊。

2.4 校驗方法

在本研究中對於預報結果的表現，除了定性的檢視結果外，使用定量的公式進行驗證也是相當的重要，而本研究主要是對於降雨預報來進行驗證，降雨觀測資料取自於中央氣象局的自動雨量站，圖 2.1 為本研究分析範圍內的自動雨量站分部，由於自動雨量站的位置與模式的網格點位置並不一定相同，所以在區域降雨分布的表示上，是將自動雨量站資料內插至分析之網格點上，在降雨量上則是將模式資料內插至自動雨量站上做比較，內插方法同樣使用 Barnes 的客觀分析方法，影響半徑為 10km，並以雨量站及網格點距離作為權重，再進行驗證定量降雨，而本研究使用了檢驗方法主要分為：1. 偏離係數 Bias ，2. 公正預兆得分(Equitable Threat Score；ETS)，3. 空間相關係數(Spatial Correlation Coefficient；SCC)，4.均方根誤差 RMSE(Root mean square error)，對於這些驗證方法，以下做更詳細的介紹。

偏離係數 Bias：

$$\mathrm{Bias} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{O}} \tag{2.16}$$

由(2.16)式，F 表示預報有降水的次數，O 為實際觀測有降水的次數。藉由這個公式可以得知，當 Bias 等於 1 時，表示預報與實際觀測的降水次數相等，而大於 1 表示模式高估降水次數，小於 1 表示模式低估降水次

數，此方法的優點在於可以簡單評估模式的降雨是否跟實際觀測差距過大，而缺點是無法反映空間的降水分布。而在使用偏離係數以及稍後介紹的公正預兆得分時，通常會設定一個降雨的門檻值(Threshold)，藉由門檻值的不同，可以對於降雨強度做分析，本研究所使用的門檻值為 2、6、10、15、20。

公正預兆得分 ETS：

$$\mathrm{ETS} = \frac{\mathrm{H-R}}{\mathrm{F+O-H-R}} \tag{2.17}$$

由(2.17)式，F 表示預報有降水的次數，O 為實際觀測有降水的次數，H 為預報及觀測皆有降雨的次數，而$\mathrm{R} = \frac{FO}{N}$表示經由隨機預報可正確預測降雨的次數，N 為所有使用的雨量站個數。ETS 分數的優點為考慮模式隨機猜中降水所造成的誤差，進行去除，當 ETS 越高，表示模式預報的越好。

空間相關係數 SCC：

$$\mathrm{SCC} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{F_i}-\overline{\mathrm{F}})\times(\mathrm{O_i}-\overline{\mathrm{O}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{F_i}-\overline{\mathrm{F}})^2\times\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{O_i}-\overline{\mathrm{O}})^2}} \tag{2.18}$$

由(2.18)，F 代表觀測點上預報時間內的累積雨量，O 為觀測點上觀測時間內的累積雨量，$\overline{\mathrm{F}}$代表預報累積降雨的平均值，$\overline{\mathrm{O}}$代表觀測累積降雨的平均值，下標 i 表示雨量站的編號，n 表示雨量站的總數，當這個係數較高時，表示對於整個降雨分布大致的狀態是與觀測相近的。

均方根誤差 RMSE：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\mathrm{Rain_{model}}-\mathrm{Rain_{obs}})^2}{\mathrm{N}}} \tag{2.19}$$

由(2.19)式，Rain 代表累積的降雨值，下標分別為模式以及觀測的降

雨值，為了對降雨量的偏差做校驗，藉由計算模式位於觀測點的降水量與觀測點上的降水量之差異，N 為所有納入計算的觀測點數，可以獲得整體的誤差值。綜合上述的所有驗證方法 Bias、ETS、SCC、RMSE 的結果，可統整並判斷降雨預報的準確性。

第三章　個案介紹

3.1 2008 年西南氣流實驗

台灣處於歐亞大陸以及太平洋的邊界，並且在亞洲地區受到顯著的季風影響，在春末夏初時，是台灣梅雨季節盛行得時候，梅雨的範圍由日本的南方海面延伸到台灣最後到中國華南地區，原因是歐亞大陸中高緯度的乾冷氣團以及太平洋熱帶海域的暖濕氣團相互作用便造成豪大雨的現象，而梅雨的主要特徵為天氣圖上的滯留鋒，而在衛星雲圖中，則可以看見在滯留鋒地附近伴隨著明顯的雨帶，而在滯留鋒內，通常伴有許多良好組織的中尺度對流系統，帶來劇烈降雨，對台灣造成土石流、淹水等重大災害。為了針對西南氣流對台灣造成劇烈降水天氣系統的基礎科學認知，改進短期定量降水估計與預報對於豪雨預警和防災需要，國內氣象界與美國大氣研究中心(NCAR)以及各個相關單位科學家們，於 2008 年進行西南氣流觀測與豪雨預測實驗，簡稱西南氣流實驗，英文縮寫為 SoWMEX(Southwest Monsoon Experiment)，又稱 TiMREX(Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment)。實驗時間為 2008 年 5 月 15 日至 6 月 30 日，實驗地點為南中國海北部和台灣本島及臨近海域。西南氣流實驗的科學目標包括：

(1) 瞭解西南氣流之熱動力性質與其和梅雨鋒面與中尺度對流系統之發展、組織、以及維持等物理過程之關係。

(2) 探討中尺度對流系統的運動熱力以及微物理降雨過程特徵尤其是與豪大雨有關之微物理過程。

(3) 台灣地形與海陸交界對中尺度對流系統的激發與消散之影響。

(4) 發展雷達資料同化技術以及極短期定量降雨預報技術。

此實驗期間包括增加南中國海和台灣海峽大氣探空（機載投落送和船舶探空）、環島都卜勒雷達、國科會新增車載 X-波段(3 公分)雙偏振雷達(Taiwan Experimental Atmospheric Mobile-Radar；TEAM-R)、美國大氣研究中心 S-波段(10 公分)雙偏振雷達(S-band Dual Polarization Radar；S-POL)，以及測雨雷達、自動氣象測站和地面 GPS 測站等儀器，藉由上述的密集觀測資料來進行在台灣受到西南季風環境下豪雨個案的影響和分析診斷研究。除了利用這些觀測資料可以有助於增加對於梅雨季發生劇烈降水的原因和深入了解西南氣流本身的熱動力特徵，引發劇烈降水的機制，以及中尺度對流系統（MCS）本身內部之雲微物理和雲動力結構和天氣系統的隨著時間的發展與消散中的物理過程之瞭解，亦可作為數值模式參數化的設定基礎以及對於個案的分析進行模擬或是做為結果的校驗資料，該實驗同時也將進行高解析度定量降雨預報數值模擬與雷達資料同化實驗，其目的在於改善現有模式之定量降水預報能力。

3.2 IOP8 個案介紹

本研究利用的個案為 2008 年台灣西南氣流實驗(SoWMEX/TiMREX)第八次密集觀測期間(Intensive Observation Period 8；IOP8)的梅雨鋒面系統進行研究分析，此密集觀測期間為 6 月 14 日 0000UTC 至 6 月 17 日 0000UTC，共三天，而本實驗同化及模擬分析的時間為 6 月 14 日 1000UTC 至 1500UTC。

首先，先對於該梅雨個案的天氣系統做一些介紹，從 6 月 14 日 1200UTC 的地面天氣圖(圖 3.1(a))中，我們可以發現在台灣的西北方有一低壓的存在，而滯留鋒的位置也位於台灣的北方，此時台灣受到強烈的西南風影響，而在 6 月 14 日 1800UTC 的地面天氣圖(圖 3.1(b))，此時鋒面已經移至台灣北方外海，而風向也因低壓的靠近風向轉為偏西風，而圖

3.2(a)和圖 3.2(b)分別為 850hpa 和 200hpa 的縱觀天氣分析圖中，台灣底層受到低壓的影響，而高層為高壓的壟罩，此壓力場配置使得中尺度對流系統在低層有輻合運動，能將暖濕空氣從海上帶進系統中，高層在台灣的西南部有輻散運動，能維持系統內部的氣流運動，使對流胞能不斷生成，這些條件使得天氣系統容易在台灣生成，而之後因低壓移至台灣北方，使風向改變為偏西風，使系統容易由西南部向西影響至東南部，並降下豪大雨。

從中央氣象局在 06 月 14 日 1000 UTC(圖 3.3(a))與 1500UTC(圖 3.3(b))的最大合成雷達回波圖，可以發現在圖 3.3(a)的最大回波圖中，有一道梅雨鋒面正移入台灣中南部上空，而主要影響台灣的有 A、B、C 三條雨帶，並且橫跨台灣南部，此時主要為 B 雨帶影響台灣，到了 1500UTC(圖 3.3(b))雨帶開始向西移動，B 雨帶逐漸遠離台灣，此時為 A 雨帶開始影響台灣。在紅外線天氣雲圖(圖 3.4(a))中，從圖中可以發現，這道梅雨鋒面系統的 A、B 雨帶的雲頂溫度大約 190K，可以判斷為一個成熟的深對流系統，開始對南部造成降雨，而 C 雨帶則是不太明顯，6 月 14 日 1457 UTC(圖 3.4(b))梅雨鋒面逐漸向西移動至台灣東南部地區。

圖 3.5 為 6 月 14 日 1100UTC 至 1500UTC 四個小時自動雨量站的累積雨量圖，可以由紅外線雲圖推斷此區的降雨極值主要由 B 雨帶通過造成的。圖 3.6 為中央氣象局 6 月 14 日 0000LST 至 6 月 15 日 0000LST 的當日累積雨量圖，從圖中可以發現降雨量最大發生在台灣西南部，當日累積雨量達到 100mm 以上，高雄、台南沿海地區日累積雨量更高達 200mm 以上。在日累積降雨圖(圖 3.7)上，有兩個極值區，而黑色圓圈標示的降雨極值區，與圖 3.5 降雨位置相符，為本研究預報模擬的目標。

本研究實驗從 1040UTC 開始進行同化雷達資料，於 1100UTC 結束同化，開始進行四個小時的定量降水預報。而從中央氣象局劇烈天氣監測系

統合成最大回波圖，從 1000UTC 至 1500UTC 隨時間變化(圖 3.8(a)~(f))中，可看見有 A、B、C 三條雨帶橫跨台灣南部，而在 B、C 回波在一開始皆有觀測到整條回波帶，但 A 回波因受限於雷達的觀測距離，所以觀測到的回波並不完整，而這三條回波帶隨著時間往東邊、東南邊移動，B 回波帶在 1000UTC 影響台灣，開始在南部降下大雨，而到了 1400UTC 從台灣東南部出海，而 A 回波則是在 1200UTC 移入台灣直到 1500UTC。所以降雨主要分為兩個部分，在 1000UTC 至 1300UTC 主要是由 B 回波所帶來的降雨，而從 1300UTC 至 1500UTC 則是由 A 回波所主導台灣的降雨。

第四章　改善 VDRAS 之中尺度背景場之敏感度實驗

由於前人使用 VDRAS 同化雷達資料後，在雷達觀測以外的網格邊界上，常發生有錯誤回波的資訊存在，本章節將對於調整相對濕度來進行幾組實驗，表 4.1 為實驗列表。本章節將對 VDRAS_RH100、VDRAS_RH90、VDRAS_RH80 三組不同調整門檻的實驗進行研究。

4.1 VDRAS 模式設定及實驗設計

根據 Sun and Zhang(2008)的研究結果中，以 VDRAS 同化雷達資料，分析發生於 2002 年 IHOP(International H2O Project)期間的一個颮線(squall line)的個案中，對於 VDRAS 同化窗區做敏感度實驗，結果發現使用循環程序(Cycling Procedure)多個同化窗區的設計，比使用冷啟動(Cold Start)單一同化窗區的設計所得到的結果較佳，其原因為同化過程中，同化回波場是一個高非線性的過程，如果使用單一窗區會使價值函數極小化的結果較差，所以在 VDRAS 的同化窗區間，加入一短時間預報也對於真實個案中的預報結果有所改善。

在 Tai et al.(2011)首次將 VDRAS 系統帶入台灣進行預報，由於在 Sun and Zhang(2008)的研究中，所使用的個案發生在美國 Oklahoma-Kansas 兩洲的邊界，其該區域為廣大的平原，並且雷達網可以完整地觀測整個系統，但在台灣四面環海且擁有複雜地形，雷達對於海上移入的系統，觀測上有所限制，模擬的條件相對較為嚴苛，而 VDRAS 系統是建立在直角座標(Cartesian coordinate system)上，並無地形解析的能力，故加入另一個中尺度模式 WRF 來進行結合，期望可以利用 VDRAS 同化雷達資料所得到的分析場與 WRF 擁有地形解析能力以及豐富的各種參數化來得到較好的短期定量降水預報，而在楊(2012)的碩士論文中，測試同化窗區的多寡，

來分析模式的預報結果，發現使用兩個同化窗區，同化的效果會較單一同化窗區或是三個同化窗區有更好的分析場，而在與 WRF 結合的過程中，以直接取代結合的方法會得到較好的預報結果。

故本研究為接續上述的研究，VDRAS 模式模擬的範圍如圖 4.1 所示，模式設定可參考表 4.2，模式的中心經緯度：東經 120.20 度、北緯 22.5 度。水平網格 x 方向為 231 個格點，y 方向為 249 個格點，水平解析度為 2 公里。垂直網格第一層為 0.25 公里，垂直解析度為 0.5 公里，共 30 層，總高度為 14.75 公里，邊界為開放式邊界條件，微物理參數為 Kessler Scheme 過程，其中微物理變數僅有 q_r(雨水混合比)、q_c(雲水混合比)。

所使用方法流程如圖 4.2 所示，首先，在 6 月 14 日 1022UTC 開始利用 VDRAS 進行雷達資料同化並且利用 6 顆探空資料，14 個地面測站，以及再分析場的資料詳細的資料可參考表 4.3，位置分別在圖 4.1(a)所示，給予 VDRAS 製作中尺度背景場。同化的雷達分別為中央氣象局的七股雷達(RCCG)、墾丁雷達(RCKT)以及美國大氣研究中心(NCAR)的 S-POL 雷達，位置分別如圖 4.1(b)所示。同化的過程主要分為兩個同化窗區，並且兩個同化窗區間有 6 分鐘的短期預報，而圖 4.1 的黑色箭頭表示一筆雷達全體積掃描(volume scan)，所以在每個同化窗區內皆提供三座雷達的各三筆雷達資料進行同化，而在 1039UTC 產生第一個窗區的分析場，在進行完 6 分鐘的短期預報後，將該預報場作為新的背景場再進行第二個窗區的同化，最後在 1102UTC 得到 VDRAS 的最佳分析場 。

為了去除在模擬的過程中，網格邊界上會出現錯誤的弱回波值，這些弱回波通常產生在雷達觀測之外的區域，這些區域的資訊主要來自於 VDRAS 透過探空、地面測站以及再分析場的資料所製成之中尺度背景場，可能會因為再分析場的品質或是內插過程所造成比較大的差異，為了防止這些弱回波在往後模擬時，對於分析場造成影響，進而影響到模擬的

結果，本研究設計一個實驗，將 VDRAS 製造出來的中尺度背景場資訊進行修正，將算出每個網格點的相對濕度，而利用 4.1 式來進行修正：

$$\begin{cases} RH = x \quad ，\text{if } RH > x \\ RH = RH，\text{if } RH \leq x \end{cases} \tag{4.1}$$

上式為對於相對濕度來進行調整，當相對濕度在大於某個標準值的網格，降低至該標準值，而在小於該標準值的網格，相對濕度則不作任何更動，藉由這個方法可以對於中尺度背景場相對濕度過濕的地區進行抑制，而該實驗分成 3 組，分別為 VDRAS_RH100、VDRAS_RH90、VDRAS_RH80，對應的標準值為相對濕度 100%、90%、80%，最後輸出 VDRAS 同化完成後的分析場結果進行比較。

另外在 VDRAS 同化的過程中，台灣雷達觀測範圍內常受到地形的阻擋，造成資料上的不連續，容易產生錯誤的回波值，為了解決這個問題，可以對於雷達資料進行分類，主要可以分為地形區以及非地形區，在非地形區的地方除了觀測到的回波資訊以外並不是沒有資訊，而是代表該地區是 0dBZ 的值，地形區則是無法觀測的部分，應為無效值，由圖 4.3(a)表示七股雷達最低仰角所觀測到的回波值，而圖 4.3(b)是 VDRAS 進行資料同化權重圖，有顏色的地方是 VDRAS 會進行資料同化的部分，白色的部分則是不會進行同化並設定為無效值，我們可以藉由圖 4.3(a)來判斷七股雷達被地形阻擋區域來濾除圖 4.3(b)的東半部區域，藉由這個方法便可以利用 0dBZ 的資訊來抑制雷達資料範圍內的錯誤回波資訊，但本研究目前的作法是將所有沒被觀測到的資訊皆列為無效值不進行同化(圖 4.3(c))。

4.2 分析場的結果分析

在改善 VDRAS 中尺度背景場實驗對於分析場結果的影響，將會對於回波與雲水混合比的分析場來進行討論。圖 4.4 為經由 VDRAS 同化雷達

資料後，各實驗組在高度為 4.25 公里的回波場，從 VDRAS_RH100 (圖 4.3(a))的結果，也是未做任何修改的實驗組，可以發現在網格的西邊界存在一些弱回波值，大約是 10 到 15dBZ 左右，而在 VDRAS_RH90 (圖 4.4(b))則可以發現在西邊界的弱回波資訊已經有大部分去除，但效果並沒有很好，而在 VDRAS_RH80(圖 4.4(c))的邊界已經完全去除錯誤弱回波的資訊，只保留雷達觀測之回波。另外，在圖 4.5 中的最大回波圖可以發現 VDRAS_RH90 (圖 4.5(b))對於左邊界仍然殘留著一些弱回波的資訊，相較於 VDRAS_RH80 (圖 4.5(c))的效果，VDRAS_RH80 這個實驗組可以完全去除邊界上的錯誤回波。

而從高度為 4.25 公里的雲水混合比(圖 4.6)，則可以更明顯的發現 VDRAS_RH90 實驗在西邊界以及東北部仍殘餘大量非雷達觀測的雲水混合比，而在 VDRAS_RH80 實驗則可以對於整個網格內的雲水混合比比有較好的修正，其結果在高度為 7.25 公里處(圖 4.7)，不僅對於西邊界有所改善，對於東北部的過強雲水混合比的地方也有所改善，在此可以得到一個小結論：藉由本實驗發現，利用此方法門檻值設為 80%可以有效地對於邊界上的錯誤回波資訊進行改善，所以接下來的實驗 VDRAS 的設定都是以 VDRAS_RH80 實驗的設置來進行。

第五章　改善 VDRAS 與 WRF 結合過程之定量降水預報實驗

由於在 Tai et al. (2011)的研究中，將 VDRAS 使用於台灣，同化雷達資料，並將 VDRAS 分析場與 WRF 結合，在兩個小時的定量降水預報有好的表現。但該研究中發現，將 VDRAS 之最佳分析場與 WRF 結合後，模擬的結果會使回的波消散的情形，本研究除了對 VDRAS 的中尺度背景場進行敏感度測試之外，期望改善 VDRAS 與 WRF 結合方式，藉由 WRF 模式的地形解析能力以及較完備的為物理參數化方法，提升短期定量降水預報的能力。

5.1 壓力變數的取代以及調整濕度

根據 Tai et al.(2011)的結合方式為 VDRAS 分析場與 WRF 模式，使用了權重取代，而在 WRF 中使用兩層巢狀網格進行預報，但其結果發現使用兩層巢狀網格可能在 VDRAS 分析場與 WRF 模式結合後，在大網格與小網格之間可能會有有不連續的狀況，造成嚴重誤差；另外採用權重取代的方式結合，是為了減少 VDRAS 與 WRF 結合的雷達資料邊界有不連續的狀況，但這些不連續會在網格邊界與結合的雷達資料邊界有不連續的狀況，產生雜訊，影響預報結果。為了改善此結合方式，在楊(2012)提到將 WRF 使用單一網格來進行預報，並以直接取代結合的方法，來結合 VDRAS 模式與 WRF 模式，其結果表現不錯。

本研究所使用的 WRF 模式版本為 3.3.1，在 VDRAS 分析場與 WRF 結合的實驗中，使結合後的 WRF，使用 VDRAS 分析場的垂直速度為初始垂直速度進行模擬。VDRAS 與 WRF 的模式設定之比較如表 4.2：WRF 模式使用的水平網格設計與 VDRAS 相同，模擬範圍如圖 4.1 所示，模式中心

經緯度：東經 120.20 度、北緯 22.25 。水平網格 x 方向為 231 個格點，y 方向 249 個格點，水平解析度為 2 公里。WRF 有地形解析能力，垂直網格使用地勢追隨(η)座標，共 45 層，模式頂層壓力為 50hpa，並使用單一網格，開放式邊界條件進行預報，微物理過程使用含有冰相的 Lin scheme 過程，其中微物理變數包含雨水混合比(q_r)、雲水混合比(q_c)、冰混合比(q_i)、雪混合比(q_s)及軟雹混合比(q_g)。

為了改善 Tai et al. (2011)結合方法所遇到的邊界問題。圖 5.1 為結合實驗之設計圖，首先利用 VDRAS 在 1022UTC 開始進行資料同化，經過兩個同化窗區，而在兩個同化窗區之間，進行一個 6 分鐘的預報，而在 1102UTC 獲得最佳分析場，此時與在 0600UTC 開始初始化至 1100UTC 的 WRF 所製造的 wrfinput 進行結合，進行預報四小時，另外有一個從 0600UTC 直接預報至 1500UTC 的純 WRF 預報來做為比較。其中實驗列表可參考表 4.1，WRF_only 為單純使用 WRF 以兩層巢狀網格從 0600UTC 進行初始化並且預報至 1500UTC；VDWRF 則是使用前人研究所用之方法，結合過程取代的變數有三維風場、位溫場、水氣場；VDWRF_P 則與 VDWRF 差別在有無取代 WRF 之壓力變數，而 WRF 的壓力變數在模式中是以其他變數診斷出來，最後 VDWRF_PRH 的實驗除了對於更新 WRF 之壓力變數外，在將 VDRAS 與 WRF 結合的過程中，對於其相對濕度做了些微的調整，目的在於將強回波的區域容易發生相對濕度不易飽和，使的模式的回波在預報的過程中容易消散，調整的方法如下：

$$\begin{cases} \mathrm{RH} = 100 \text{，if } \mathrm{RH} > 90 \\ \mathrm{RH} = \mathrm{RH} \quad \text{，if } \mathrm{RH} \leq 90 \end{cases} \tag{5.1}$$

而在圖 5.2 中分別為高度 1.25 公里和 4.25 公里，可以發現在 VDWRF 未做取代壓力前的壓力分佈其實與回波有很大的相關性，但不管是底層跟中層在對流區的地方皆是高壓，不利於系統的發展，藉由更新壓力變數後則可

以對於當時的動力場進行一些改善，而在圖 5.3 中為 VDRAS 結合 WRF 後預報一小時後的壓力場分布，可以發現在加入壓力場後的一小時，VDWRF_P 壓力場的分布對於沒取代壓力場的 VDWRF 並沒有相差很多，表示取代壓力的效果大約只能持續 1 小時左右，但對於模式初始預報場仍有一定的幫助，這部分會在 5.2 做討論。

而 VDWRF_PRH 除了加入更新壓力變數外，對於當時的相對濕度也做了調整，調整條件式當該網格點的相對濕度大於 90%時，則將該網格點的相對濕度提高到 100%，而其餘則是不做改變，目的是為了要讓回波不容易消散。

5.2 預報結果及檢驗定量降水

圖 5.4 至圖 5.7 為 WRF 預報廠之最大回波圖，在預報第一個小時的結果中，WRF_only 對於 A 回波的位置有表現出來，但對於 B、C 回波則是無法預報出來，相較於有經過資料同化後的 VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，皆對於 B、C 回波有較好的表現，但對於A回波的預報皆是不盡理想，可能的原因是對於A回波底層的風場因離雷達較遠，觀測資料較少，單由背景場所提供的資訊效果有限，所以即使同化過後對於A回波的預報表現都不太好，但是比較 VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH 這三組實驗，對於強回波的表現可以發現 VDWRF_PRH 對於 B、C 回波的表現得較為完整，對於 A 回波的前端，也有預報出來，而在預報第二小時以及第三小時，VDWRF、VDWRF_P 這兩組實驗對於A回波的強度及位置都有很大的偏差，而在 VDWRF_PRH 則可以發現A回波的前段部分移入台灣，與實際觀測結果相符。

圖 5.8、圖 5.9 分別為預報 0 小時和預報 1 小時高度 1.25 公里的輻合輻散場從 VDWRF 的圖中可以發現在 A 回波的位置有一較強的輻散區域，在

底層有輻散的現在容易造成系統不好發展，而這個位置正雖然是雷達所能觀測的範圍，但因為雷達發射的最低仰角通常會高於 0 度，隨著離雷達距離越遠，觀測所得到的資訊也會比較高，所以在該區域高度 1.25 公里處，其實雷達是觀測不到的，而單獨使用背景場的資訊所獲得的預報誤差通常就會比有雷達觀測的區域來的差，然而在 VDWRF_P 藉由更新壓力場，可以明顯發現該區域的輻散程度有減輕，但對於該區域 VDRAS_P 在第一個小時後並沒有將 A 回波的資訊預報出來，而 VDWRF_PRH 在第一個小時後在 A 回波的位置開始有輻合的現象產生，與雷達觀測到的強回波位置較為吻合。

而圖 5.10 至圖 5.12 為逐時的降水累積，分別為 1000UTC 至 1500UTC 中個小時的降雨累積分布，結果可以發現 WRF_only 的表現都不盡理想，而在使用兩個模式的結果皆能對主要降水的西南部有相當的吻合，而在第二小時及第三小時的圖發現，VDWRF_P 的降雨強度 VDWRF 來的較低，而在調整完相對濕度的 VDWRF_PRH 則可以將降雨修正回來，並且在最後一小時對於台南東部的降雨也有預報到，而 VDWRF 則否，而在圖 5.13、圖 5.14 分別為累積二、三小時的累積雨量則發現 VDWRF 的降雨分布有分為網格的南北兩部分，網格的北方降雨相較於觀測來的過強，而在 VDWRF_PRH 網格北部相較於 VDWRF 則降低了許多，這也是藉由更新壓力場使的動力場的完整性較為符合真實大氣的結果。

最後比較定量降水預報的空間相關係數(SCC)(圖 5.15)、方均根誤差(RMSE)(圖 5.16)以及公平預兆得分(ETS)(圖 5.17)，從 SCC 分數可以發現單純使用 WRF 進行預報的結果其實是不盡理想的，在加入資料同化後的結果可以發現分數差異並不大，而在第二與第三小時可以發現 VDWRF_PRH 的分數有較高的趨勢，而在 RMSE 中，分數也是大致相同，在 VDWRF_P 的誤差為最低，這也得到藉由更新壓力場對於模式的預

報有一定程度的幫助，最後則是 ETS 的表現可以發現在門檻值為 15 和 20mm 時，VDWRF_PRH 的分數皆高於 0.4，故藉由本研究所做的改善，能使短期定量降雨有明顯的改善。

第六章　結論與未來展望

6.1 結論

本研究使用都卜勒雷達變分分析系統(VDRAS)，其主要的目的是因為在台灣，主要的天氣系統皆來自於海上，所以雷達對於海上較缺乏觀測資料上有極大的優勢存在，所以本研究藉由同化雷達的三維徑向風及回波資料，可以用來初始化分析場進行預報，但台灣擁有複雜且陡峭的地形，而VDRAS 模式並無地形解析的能力，故使用 VDRAS 與 WRF 做結合的方法除了可以獲得經由 VDRAS 同化雷達觀測資訊所得到的較佳分析場，加上WRF 的地形解析能力及較完整的微物理過程，對於短期定量降水的預報能給予相當程度的改善，而在前人的研究中，對於此方法進行一連串的測試，結果為 VDRAS 使用兩個同化窗區，而在同化後直接取代 WRF 變數，對於短期定量降水預報有不錯的表現。而本研究對於 VDRAS 的分析場與 WRF 的結合方法進行改善，為了解決如何加入 VDRAS 產生的氣壓場到 WRF 中，消除邊界上的錯誤回波以及改善預報回波減弱等問題，期望提升短期定量降水預報的能力，其結果歸納出以下幾點：

(1) 由於 VDRAS 在製作中尺度背景場的過程中，使用的 ECMWF 的再分析資料的解析度較低在內插的過程中，容易造成雷達觀測範圍外的濕度過高，而本研究主要目的是對於雷達觀測範圍內的資訊進行預報，為了避免雷達觀測範圍外的錯誤回波資訊的干擾，所以將網格中相對濕度大於某定值的地方，降低為該定值，而在實驗中 VDRAS_RH80 的結果比 VDRAS_RH90 可以更有效的去除邊界上的弱回波資訊，避免影響到分析場的正確資訊。

(2) 雖然 WRF 的壓力變數為診斷變數，但將 VDRAS 分析場的壓力變數直

接取代 WRF 的初始壓力變數中，雖然持續的效果不超過一個小時，但是仍可以對於當時的環境動力場有更好的解釋，由 VDWRF_P 及 VDWRF 輻合輻散場的比較中可以發現對於 A 回波的底層福散的現象有明顯的改善，使得 A 回波在之後預報中可以發展起來，對預報的結果也有改善。

(3) 而在 VDRAS 分析場與 WRF 結合的過程中將分析場相對濕度大於 90% 的網格，將其提高至 100%使其飽和，除了可以改善前人回波減弱的問題以外，也可以對於一開始同化時降低相對濕度的方法，有平衡的效果，其 VDWRF_PRH 的結果可以發現對於 B 線狀回波的預報有明顯的改善，由於雷達觀測以外的資訊較不完整，所以A回波的改善並不明顯。

6.2 未來展望

本研究對於 VDRAS 與 WRF 的結合的過程進行改善，目的是為了提升短期定量降水的精準度，以防範劇烈天氣系統可能造成的各種災害，藉由此方法可以有效地改善同化雷達資料後 3 小時的預報，但其中仍有許多地方需要改進：

(1) 由於同化雷達資料的過程中，皆是同化有回波資料的地區，而觀測範圍內的零回波也是可以利用的另一種資訊，所以可以對於雷達觀測範圍內的零回波也進行同化或是進一步的對於同化零回波的權重進行測試，對於結果可否對於預報的結果有所改善來進行更多個案的分析與討論。

(2) 為了使此方法可以運用在各個天氣系統下對於整個台灣進行預報，未來可以進行同化台灣所有作業化的雷達來對於全台的天氣進行預報，而並加入同化中大車載式移動雷達來補足一般雷達所無法觀測的死

角，像是雷達基線上的資訊或是地形中的資訊等，來改善預報效果，並且進行更多不同類型的個案分析以及模擬。

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.

____, and J. Sun, 2004: Analysis and Forecasting of the Low-Level Wind during the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. *Weather and Forecasting,* **19**, 151-167.

Gal-Chen, T., 1978: A method for the initialization of the anelastic equations : Implications for matching models with observations. *Mon. Wea. Rev.*, **106**,587–606.

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-dimensiojnal variational data assimilation system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 255-276.

Kawabata, T., T. Kuroda, H. Seko, and K. Saito, 2011：A cloud-resolving 4D-Var assimilation experiment for a local heavy rainfall event in the Tokyo metropolitan area, *Mon. Wea. Rev.*, AMS early release version.

Lin, Y., P. Ray, and K. Johnson, 1993: Initialization of a modeled convective storm using Doppler radar derived fields. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2757–2775.

Sun, J., 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, 1998: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II:

Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 835–852.

Sun, J., and N. A. Crook, 2001: Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, **16,** 117–132.

____, 2005a: Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. *Mon. Wea. Rev.*, **133,** 793–813.

____, 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.

____, M. Chen, and Y. Wang, 2010: A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesocale model data for the Beijing 2008 Forecast Demonstration Project. *Wea. Forecasting*, **25**, 1715-1735.

Warner, T. T., E. E. Brandes, C. K. Mueller, J. Sun, and D. N. Yates, 2000: Prediction of a flash flood in complex terrain. Part I: A comparison of rainfall estimates from radar, and very short range rainfall simulations from a dynamic model and an automated algorithmic system. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 815–825.

Tai, S.-C., Y.-C. Liou, J. Sun, S.-F. Chang, and M.-C. Kuo, 2011: Precipitation Forecasting Using Doppler Radar Data, a Cloud Model with Adjoint, and the Weather Research and Forecasting Model: Real Case Studies during SoWMEX in Taiwan. Wea. Forecasting, 26, 975–992.

Xiao, Q., Y. H. Kuo, J. Sun, W. C. Lee, E. Lim, Y. R. 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.

____, 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.

楊靜伃，2012：使用四維變分都卜勒雷達變分分析系統(VDRAS)與WRF改善短期定量降水預報。

鄧仁星，2000：RASTA(Radar Analysis System for Taiwan Area)使用說明書。

附錄

VDRAS 與 WRF 結合流程：

1. 改善中尺度背景場之相對濕度：對於整個中尺度背景場相對濕度大於80%的地區降低至 80%。

   (VDRAS/adjointmain.f　1946 行)

```
if (ICYCLECNT.eq.0.) then              同化過程中，第一個窗區才使用此方法
    print*,'RH>80,let RH=80'
    do i=0,NXP1
    do j=0,NYP1
    do k=1,NZ
    qvtest(i,j,k)=3.8/pm(k)*EXP(17.67*(tm(k)+t0(j,i,k)-273.15)/
  $         (tm(k)+t0(j,i,k)-29.65))/0.001
    qv0(j,i,k)=qv0(j,i,k)/qvtest(i,j,k)*100.
    if (qv0(j,i,k).gt.80.) then            門檻值設定值
    qv0(j,i,k)=80.                         超過門檻值之相對濕度降低值
    endif
    qv0(j,i,k)=qv0(j,i,k)/100.*qvtest(i,j,k)
    enddo
    enddo
    enddo
    endif
```

2. 更動同化雷達資料範圍內之 0dBZ 之權重

   (VDRAS/adjointmain.f)

```
    DO M=1,NZE
    DO L=0,NYP1
    DO K=0,NXP1
      DISTH=SQRT(((FLOAT(K)-XK(IRAD))*DX)**2
  *       +((FLOAT(L)-YL(IRAD))*DY)**2)        雷達最大觀測距離
C.. IN REGIONS OF NO RADAR RETURN WITHIN THE RANGE OF THE RADAR,
C.. SET QR TO ZERO INSTEAD OF BAD.
    IF(CS(L,K,M,IVOL,IRAD).EQ.BADPT.AND.DISTH.LE.225000.) THEN
    CS(L,K,M,IVOL,IRAD)=0.0
```

PZ(L,K,M,IVOL,IRAD)=0.0　　權重大小(有回波的區域為 50)

在雷達觀測範圍內(距雷達中心小於 225 公里，可設定)，有雷達資料的地區同化權重是 50，而沒有雷達資料的地區初始設定之同化權重是 0 也就是不進行資料同化，如果要同化 0dBZ 的地區，可以更動該權重，但應小於有回波的地區(權重小於 50)，除此之外地形的阻擋應視為無效值，權重為 0。

```
END IF
END DO
END DO
END DO
```

3. 將 VDRAS 壓力放入 WRF 模式中：

(WRF/dyn_em/start_em.F　536 行)

```
!bcyang
!     grid%p(i,k,j)=p1000mb*( (r_d*(t0+grid%t_1(i,k,j))*qvf)/     &
!      (p1000mb*(grid%al(i,k,j)+grid%alb(i,k,j))) )**cpovcv        &
!      -grid%pb(i,k,j)                          更改前是診斷變數
!bcyang
     grid%p(i,k,j)=grid%p(i,k,j)        更改後為直接讀取
!bcyang
```

更改後 WRF 在一開始的壓力場便會讀取 wrfinput 內的壓力場，而不是經由其他變數所算出之診斷壓力，而在(vdras2wrf_new/ vdras2wrf_wrfinput.f90)中的 921 行，可以選擇是否將 VDRAS 的變數場取代 wrfinput 的變數場，目前取代的變數為風場、壓力場、溫度場、水氣場。

附表

表 4.1　實驗列表

實驗名稱	實驗描述
VDRAS_RH100	調整 VDRAS 中尺度背景場濕度，門檻值為 100
VDRAS_RH90	調整 VDRAS 中尺度背景場濕度，門檻值為 90
VDRAS_RH80	調整 VDRAS 中尺度背景場濕度，門檻值為 80
WRF_only	純 WRF 預報
VDWRF	VDRAS 與 WRF 結合
VDWRF_P	VDRAS 與 WRF 結合，更新 WRF 壓力
VDWRF_PRH	VDRAS 與 WRF 結合，更新 WRF 壓力及調整相對濕度

表 4.2　VDRAS 與 WRF 模式設定

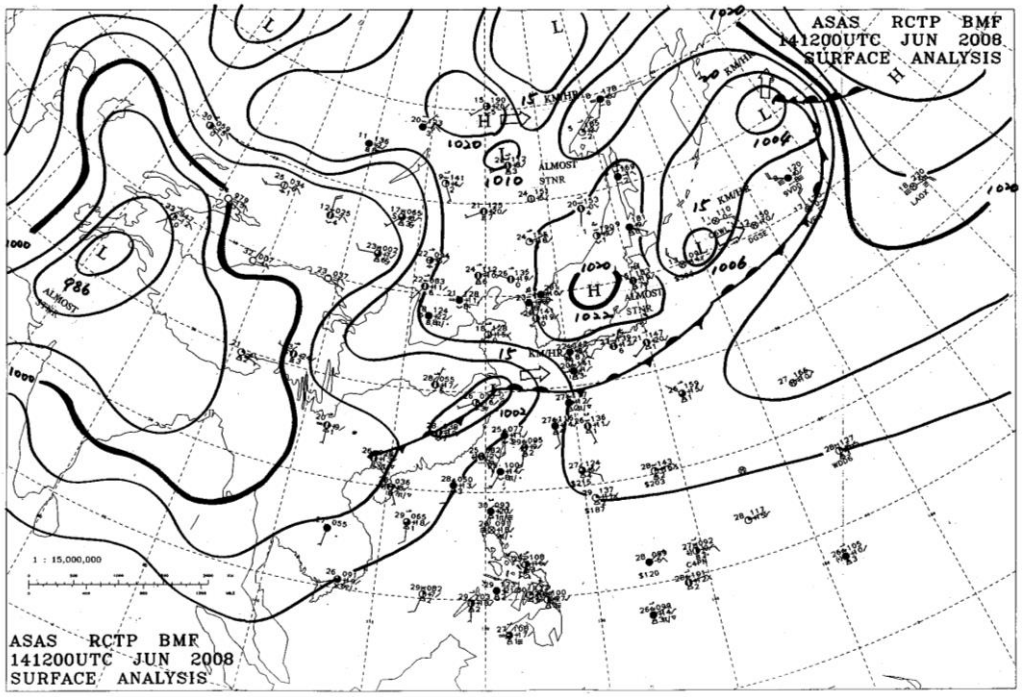
模式	VDRAS	WRF
網格數	nx=231, ny=249, nz=30	nx=231, ny=249, nz=30
解析度	水平 2km 垂直 0.5km(第一層 0.25km)	水平 2km 垂直為 η 座標(頂層 50hpa)
地形解析	無	有
微物理參數	Kessler Scheme(Qc, Qr)	Lin scheme(Qc, Qr, Qi, Qs, Qg)
邊界條件	Open boundary condition	使用巢狀網格 結合後使用 Open boundary condition

表 4.3　VDRAS 中使用之觀測資料

資料種類	資料來源
雷達資料	七股雷達(RCCG)、墾丁雷達(RCKT)、S-POL
地面測站	台中、梧棲、嘉義、七股、台南、高雄、恆春、成功、大武、台東、花蓮、澎湖、蘭嶼、東吉島
探空	台中、六龜、花蓮、馬公、綠島、南船
在分析資料	ECMWF Atmospheric Model $1.125° \times 1.125°$

附圖

(a)



(b)

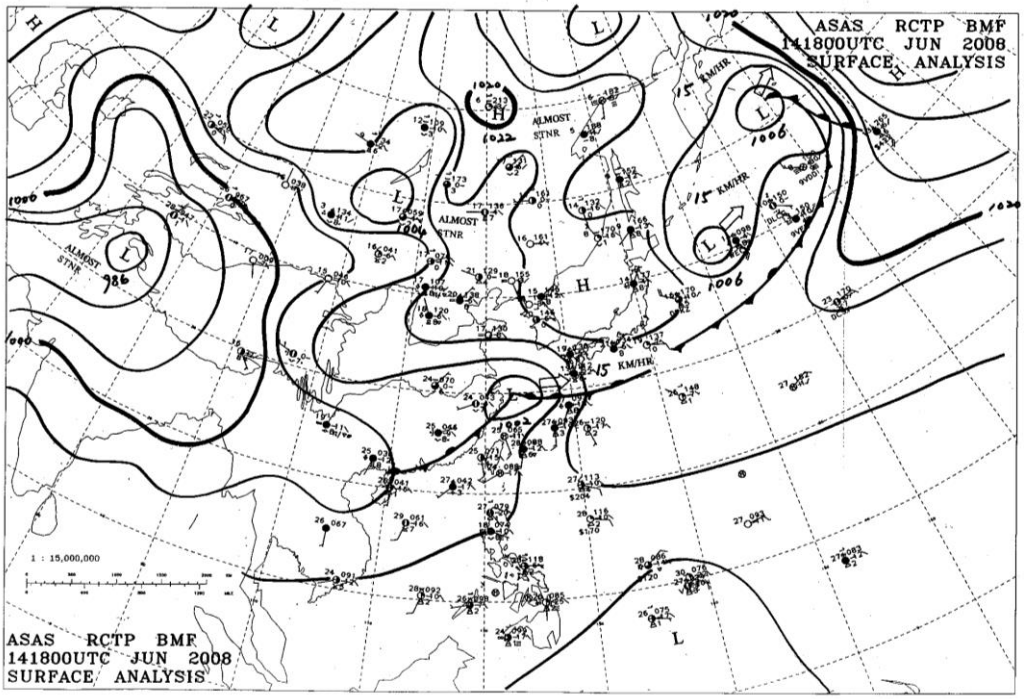


圖 3.1　2008 年 6 月 14 日地面天氣分析圖，時間為(a)1200UTC；(b)1800UTC。

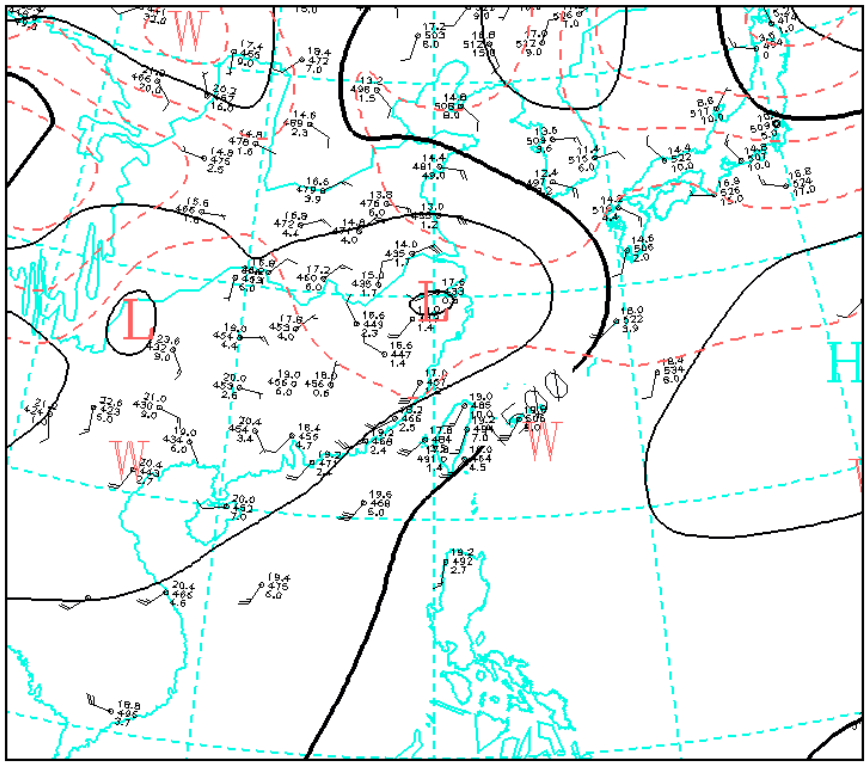


圖 3.2　2008 年 6 月 14 日 1200UTC 之 850hPa 天氣分析圖。

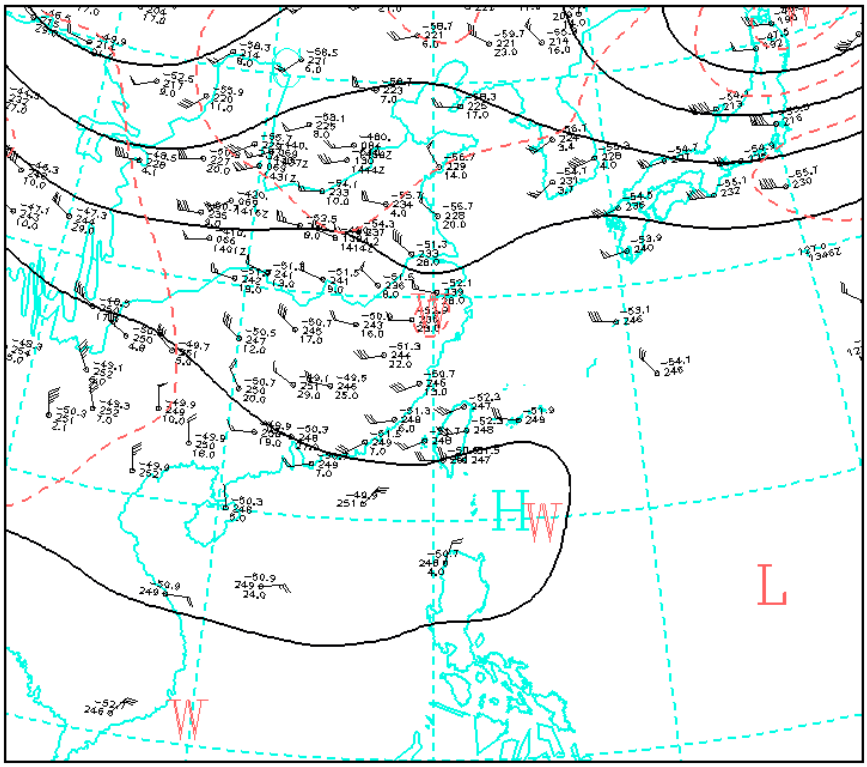
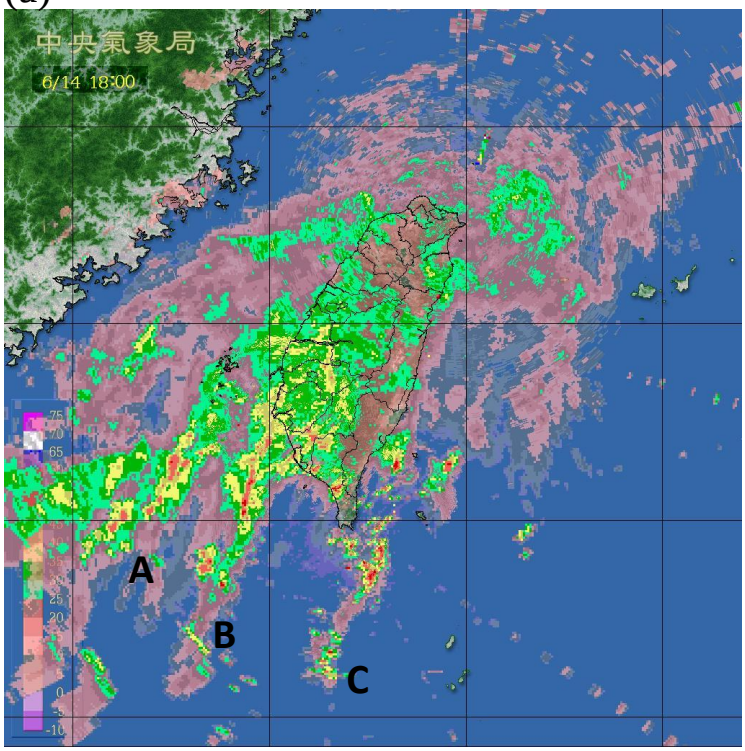


圖 3.3　2008 年 6 月 14 日 1200UTC 之 200hPa 天氣分析圖。

(a)



(b)

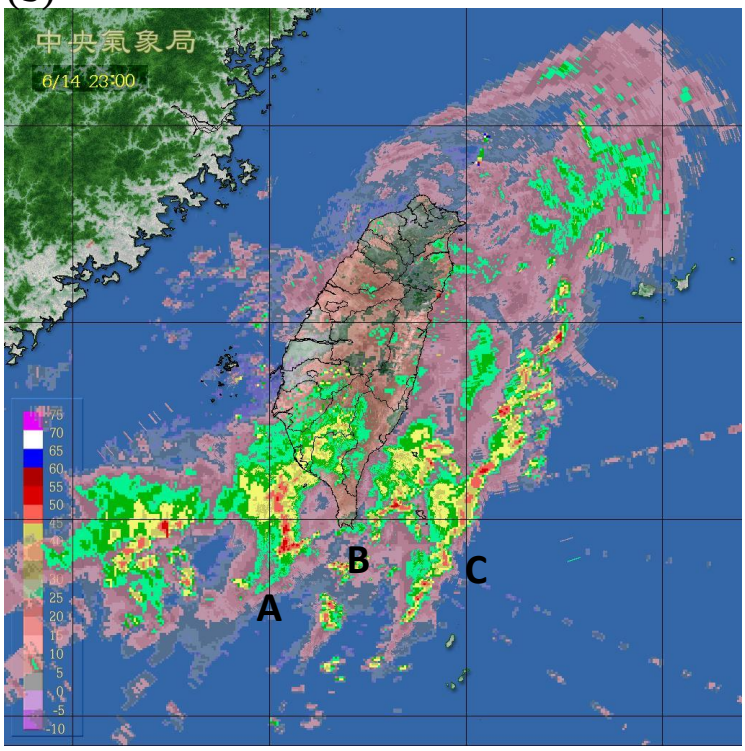
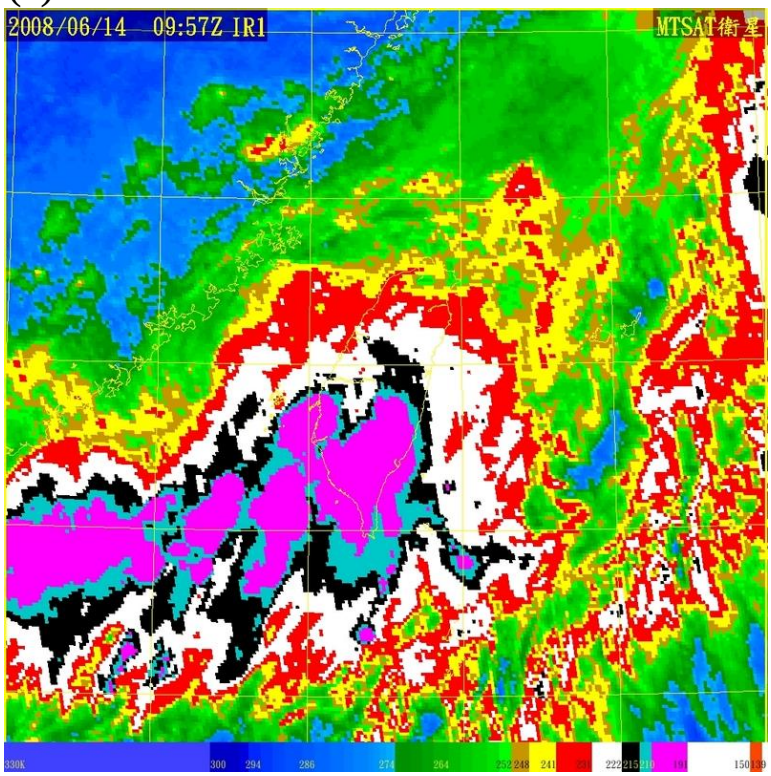


圖 3.4　2008 年 6 月 14 日中央氣象局全台雷達合成最大回波圖，時間為(a)1000UTC；(b)1500UTC。

(a)



(b)

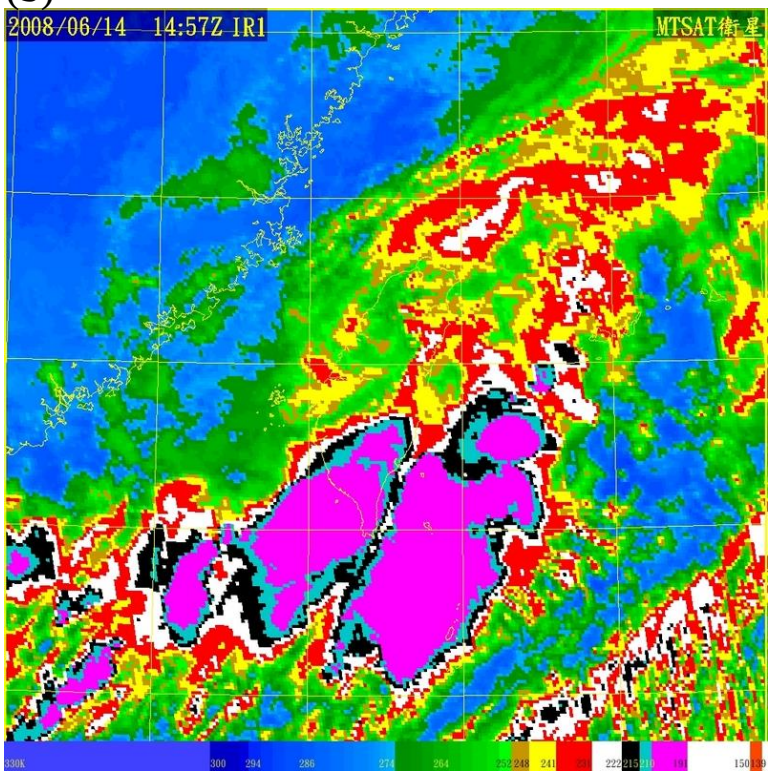


圖 3.5　2008 年 6 月 14 日色調強化紅外線衛星雲圖，時間為(a)0957UTC；(b)1457UTC。

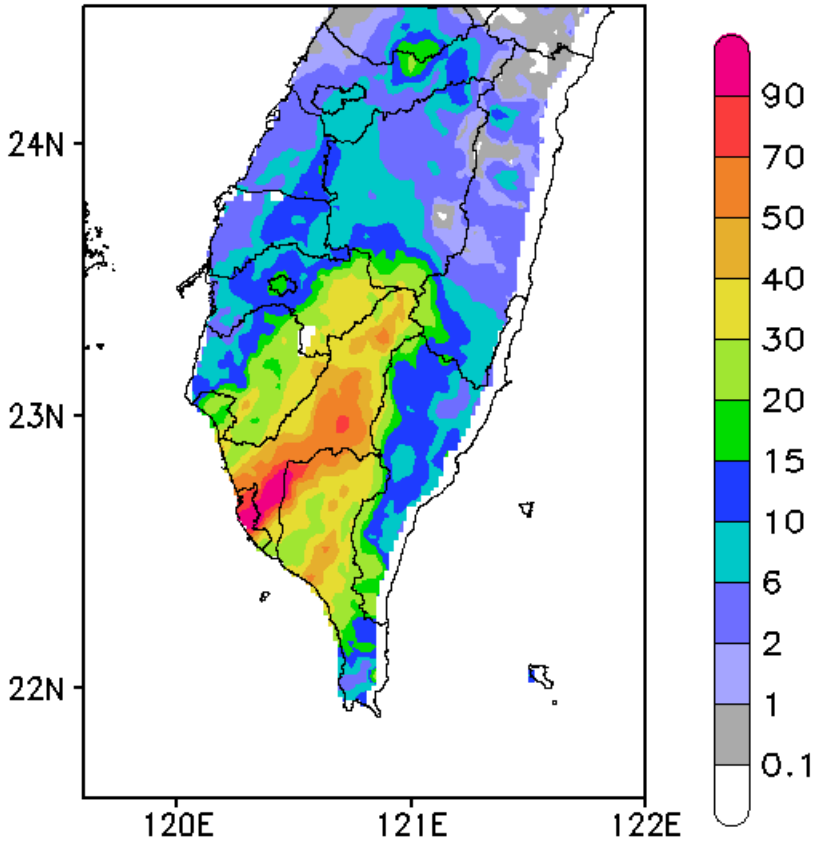


圖 3.6　2008 年 6 月 14 日 1100 至 1500UTC 之自動雨量站四小時累積圖。

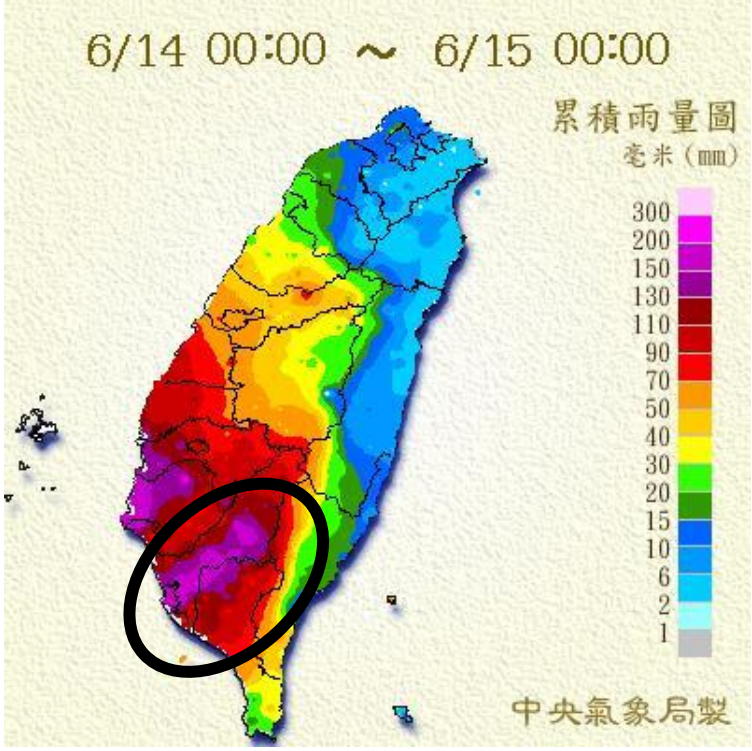


圖 3.7　2008 年 6 月 14 日中央氣象局當日累積雨量圖。

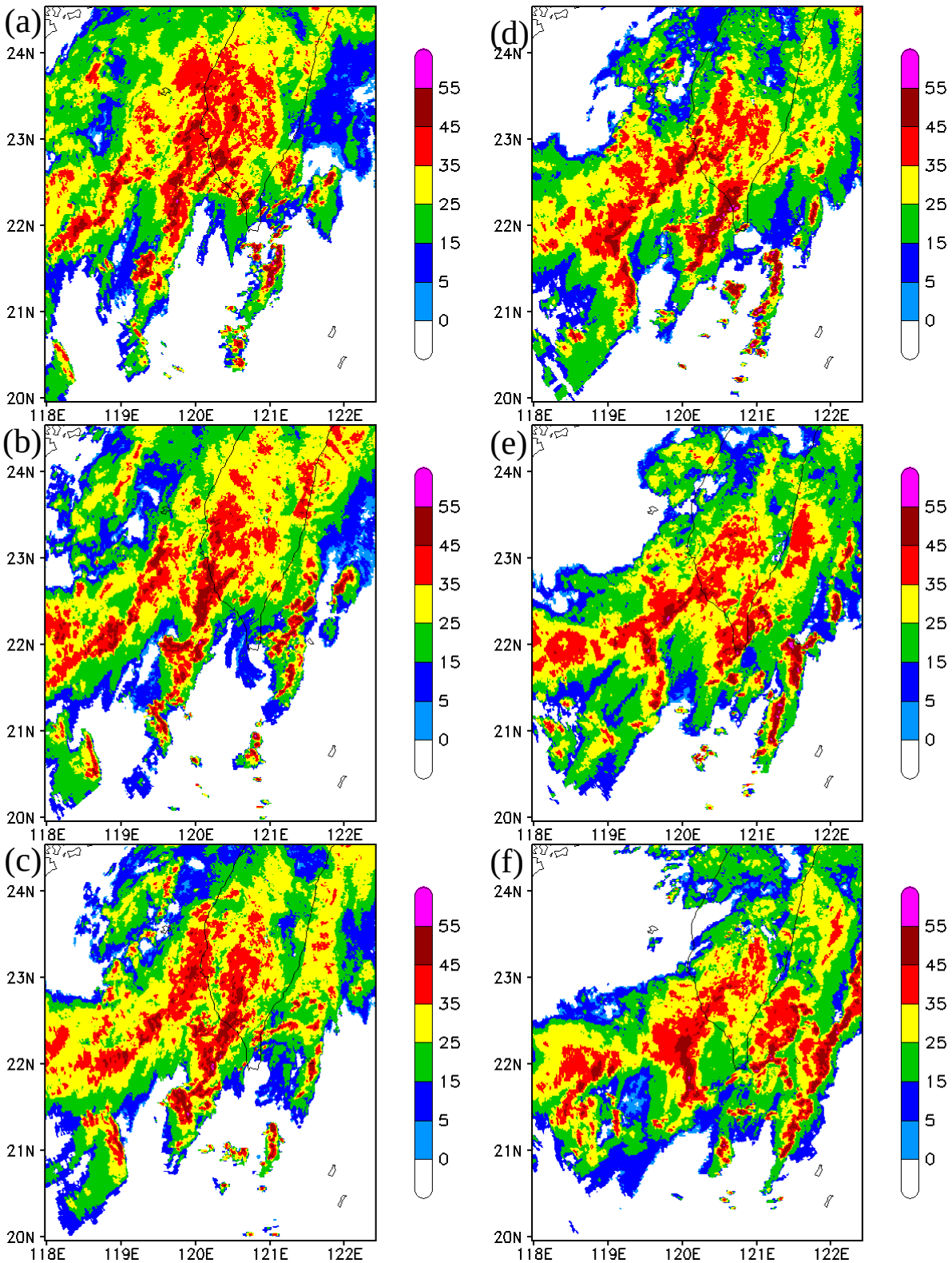


圖 3.8　2008 年 6 月 14 日中央氣象局劇烈天氣監測系統合成最大回波圖，陰影為回波值，單位為 dBZ，時間分別為：(a)1000UTC；(b) 1100UTC；(c) 1200UTC；(d) 1300UTC；(e) 1400UTC；(e) 1500UTC。

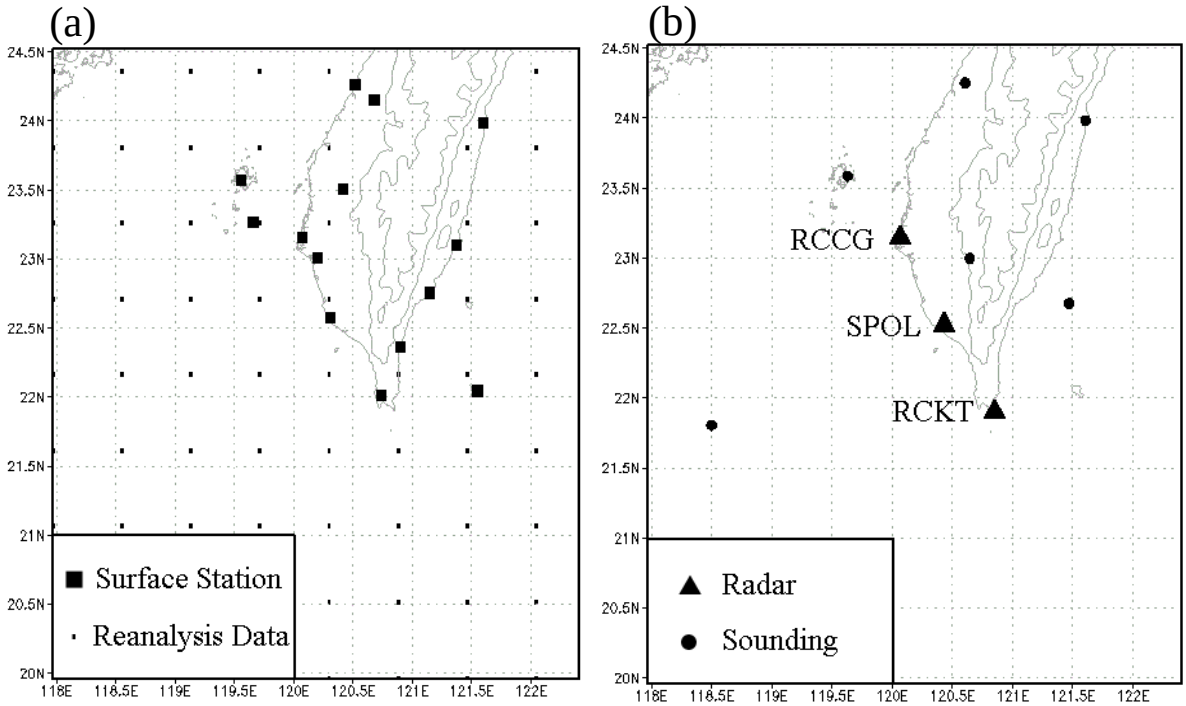


圖 4.1　VDRAS 模擬範圍以及製作中尺度背景場所使用的資料，包含地面測站(正方形標示)，再分析資料(點標示)，探空(大點標示)，還有同化所使用的雷達(三角形標示)。

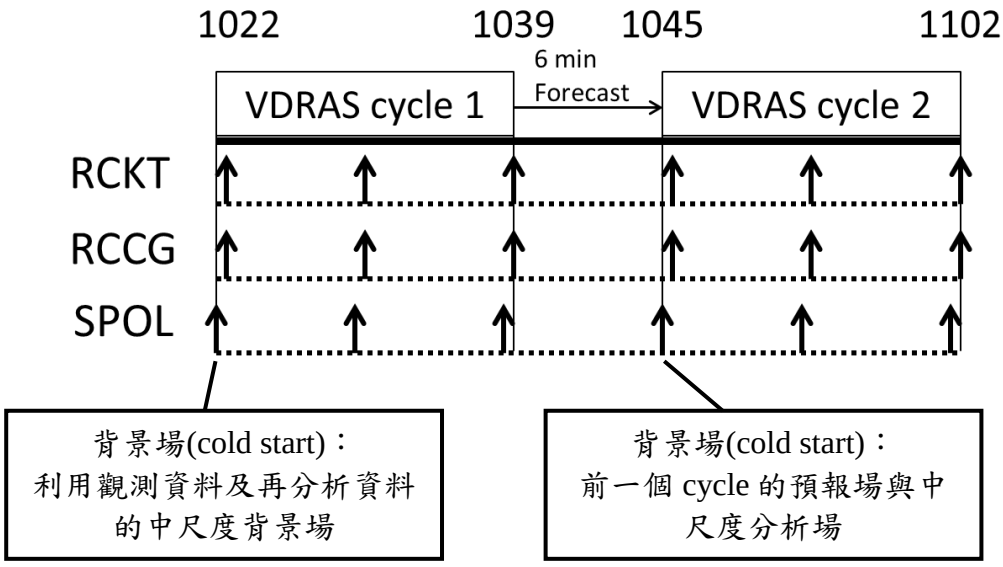


圖 4.2　VDRAS 同化雷達資料設計圖，同化墾丁(RCKT)、七股(RCCG)、S-POL 三顆雷達資料，同化過程中使用兩個窗區，每個窗區內同化三筆雷達資料，黑色箭頭表示一筆雷達全體機掃描資料，而在 1022UTC 的背景場來自於中尺度背景場。

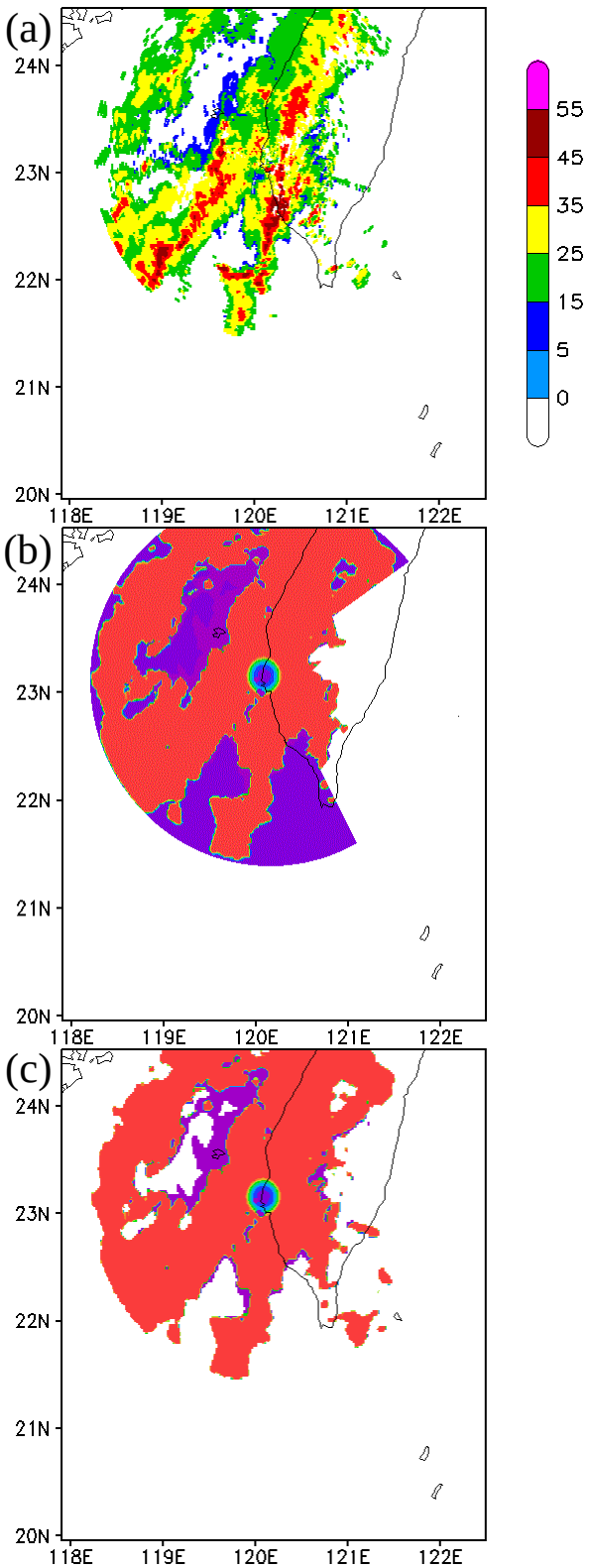


圖 4.3　比較同化過程中所使用的雷達資料(a) 七股雷達觀測最低仰角回波圖，陰影為回波值；(b) VDRAS 同化雷達資料範圍示意圖；(c)本研究所同化雷達資料範圍示意圖，高度為 0.25 公里，陰影為權重。

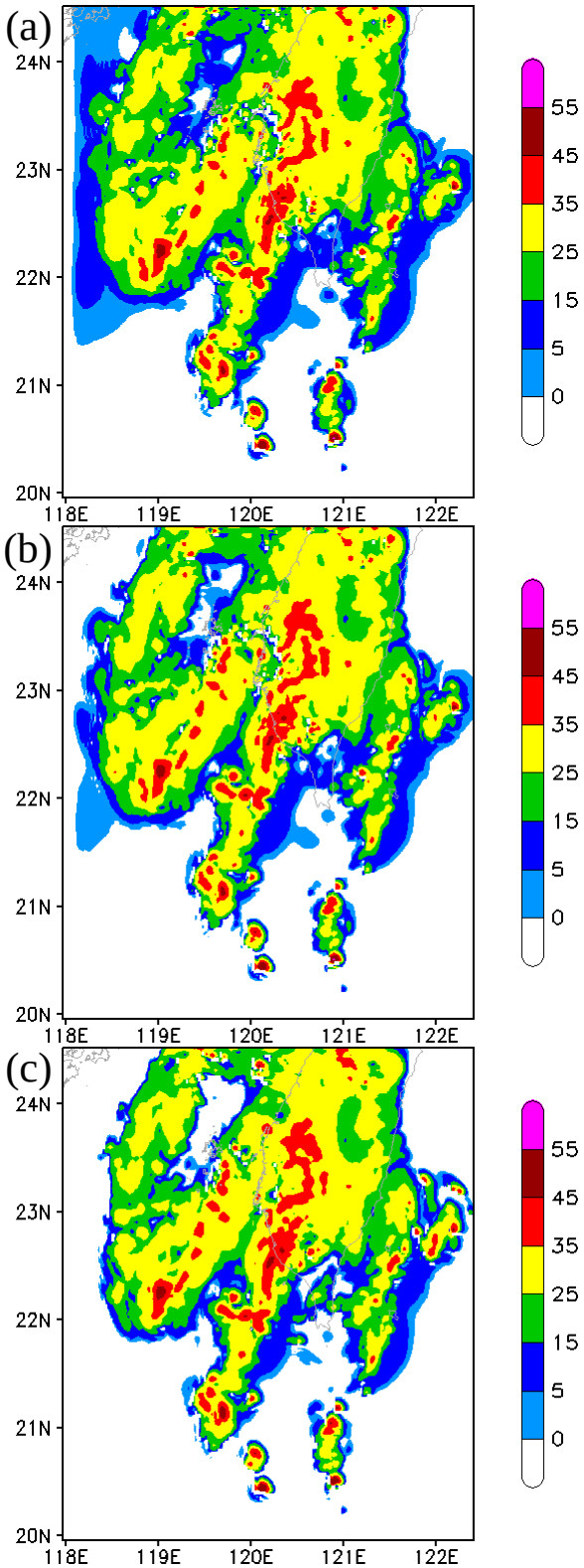


圖 4.4改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於 1102UTC 之高度 4.25 公里之回波圖，陰影為回波值，單位為 dBZ。

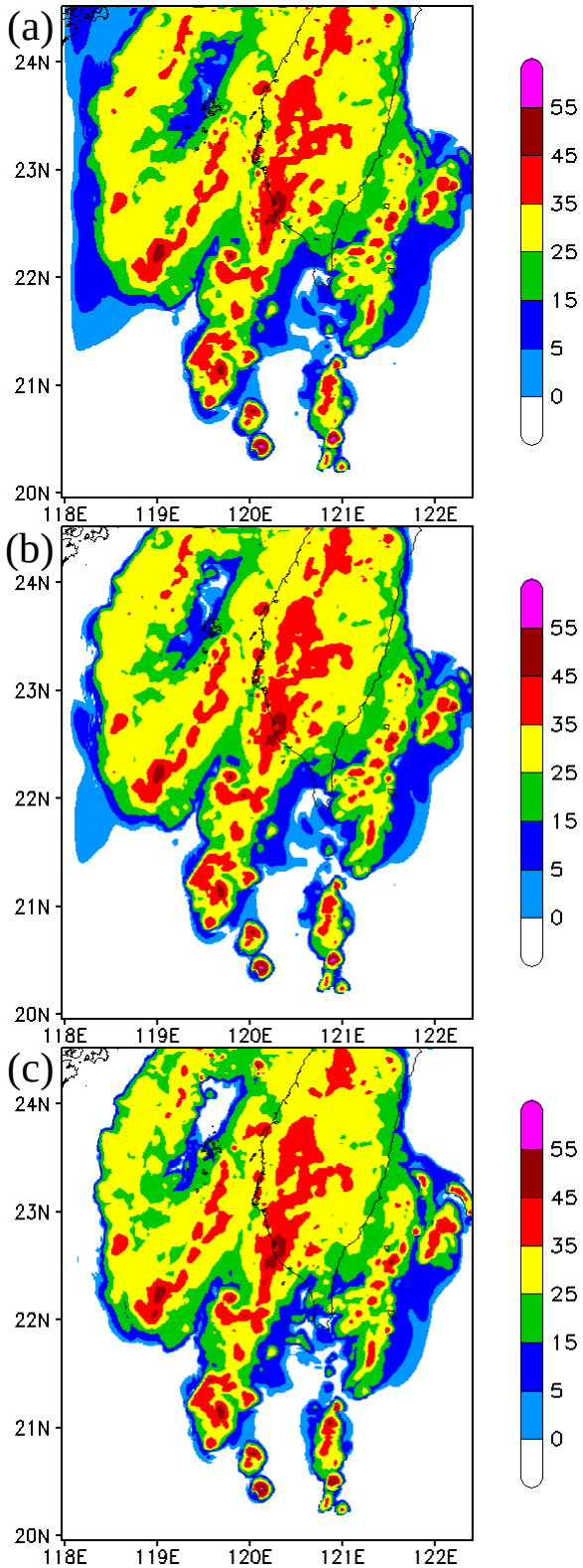


圖 4.5改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於 1102UTC 之最大回波圖，陰影為回波值，單位為 dBZ。

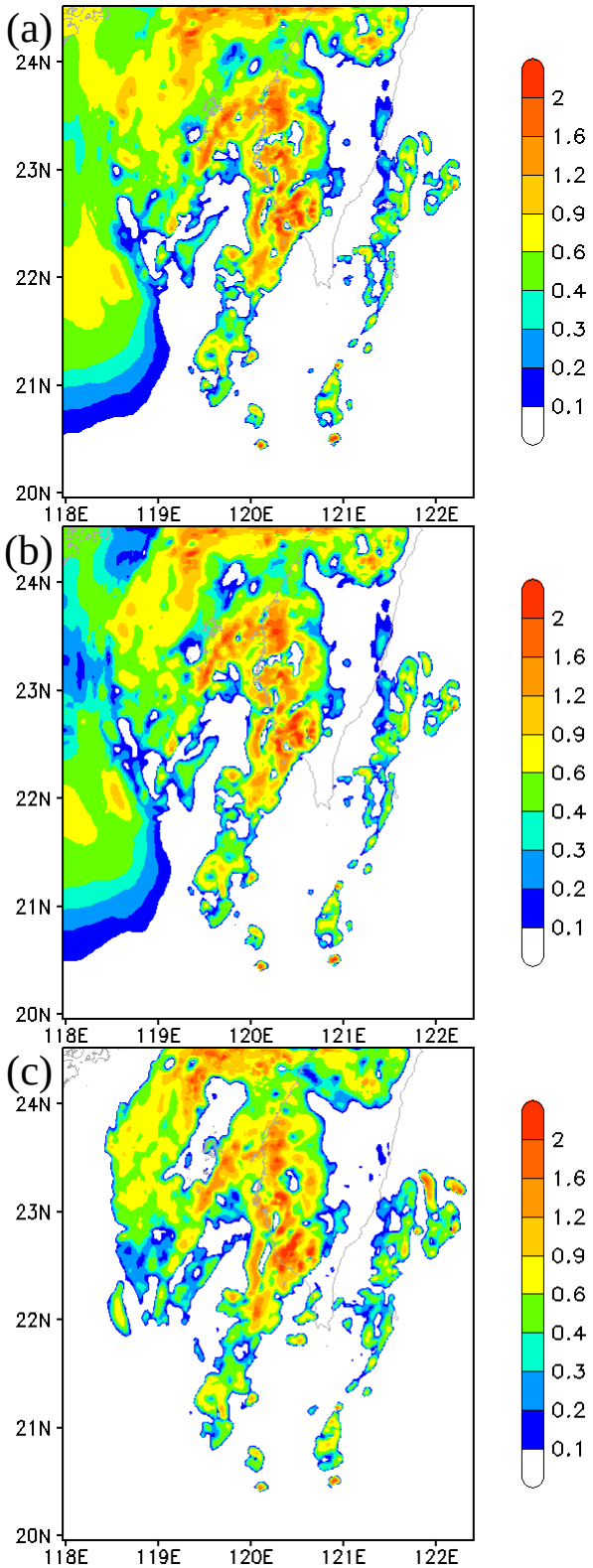


圖 4.6改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於 1102UTC 高度 4.25 公里之雲水混和比(色階，gkg^{-1})與水平風場(向量，ms^{-1})。

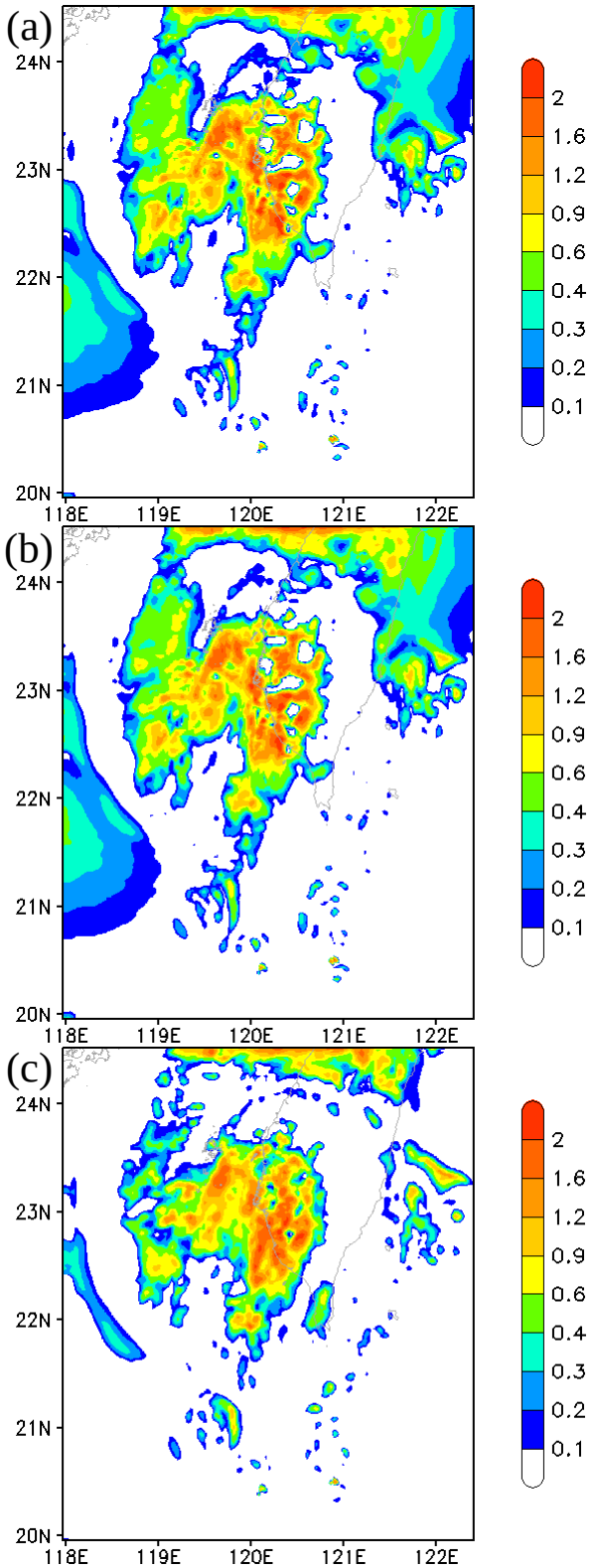


圖 4.7改善 VDRAS 中尺度背景場敏感度實驗分析場：(a)VDRAS_RH100；(b) VDRAS_RH90；(c) VDRAS_RH80 於 1102UTC 高度 7.25 公里之雲水混和比(色階，gkg^{-1})與水平風場(向量，ms^{-1})。

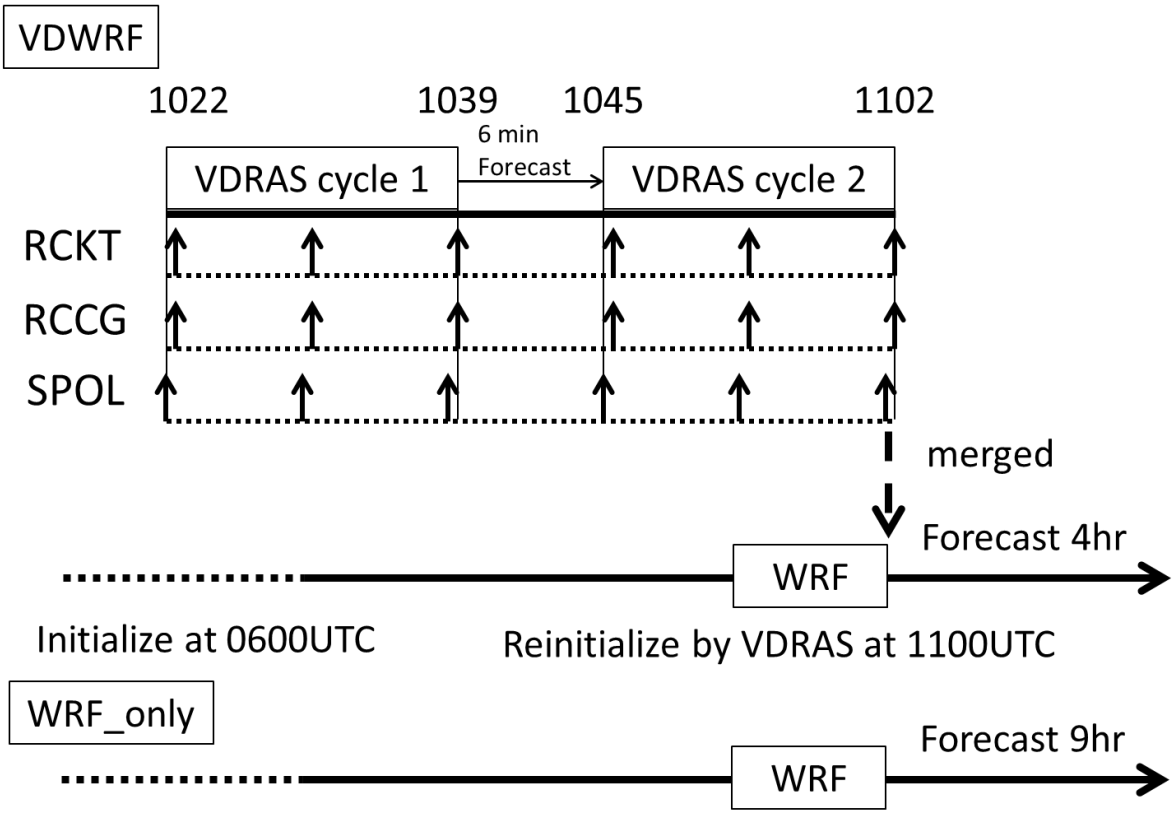


圖 5.1　VDRAS 分析場與 WRF 結合實驗設計圖。

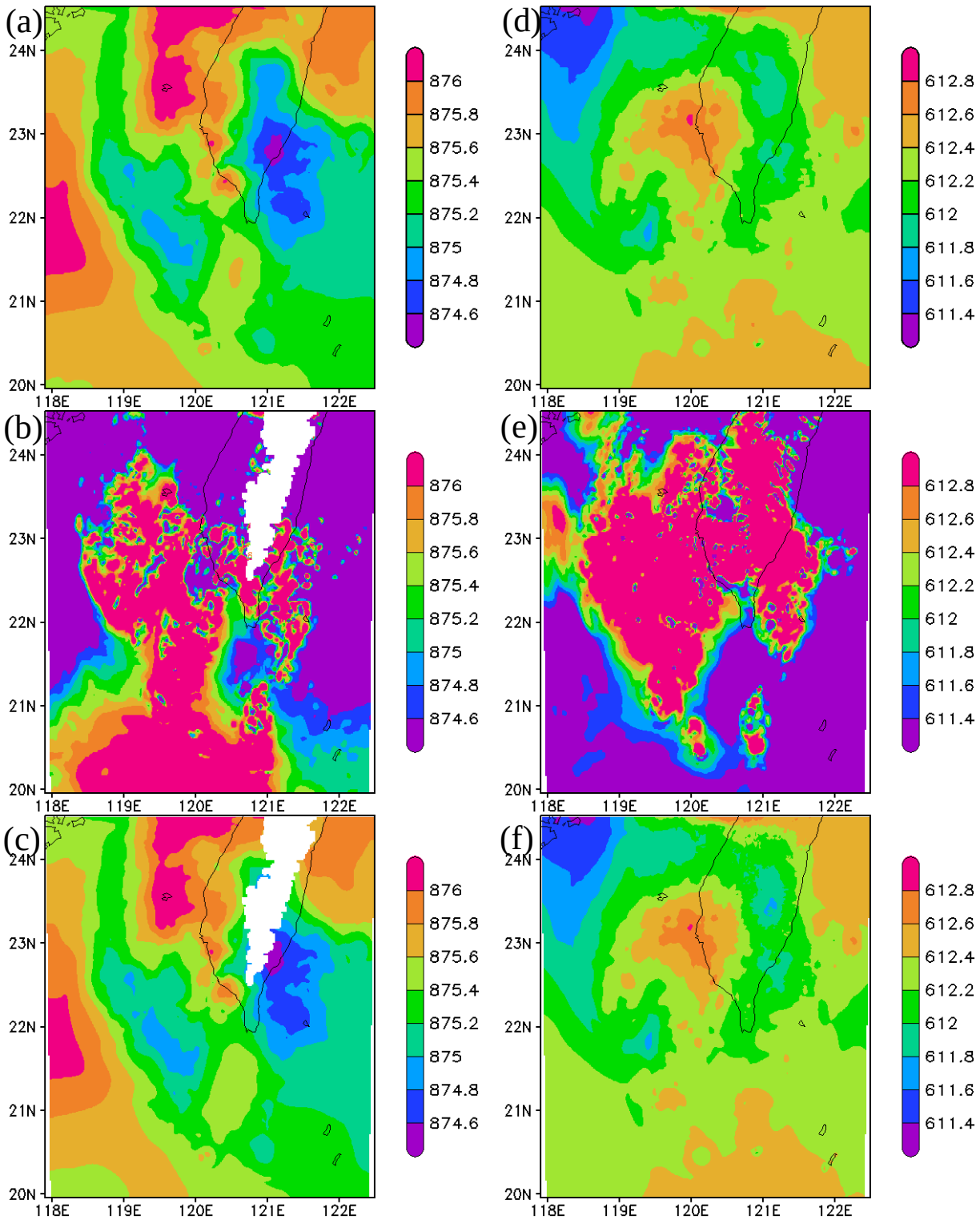


圖 5.2　VDRAS 與 WRF 結合取代壓力測試：(a)、(d)VDRAS；(b)、(e) VDWRF；(c)、(f) VDWRF_P 於 1102UTC 之壓力場，其中(a)、(b)、(c)為高度 1.25km，(d)、(e)、(f)為高度 4.25km，陰影為壓力，單位為 hpa。

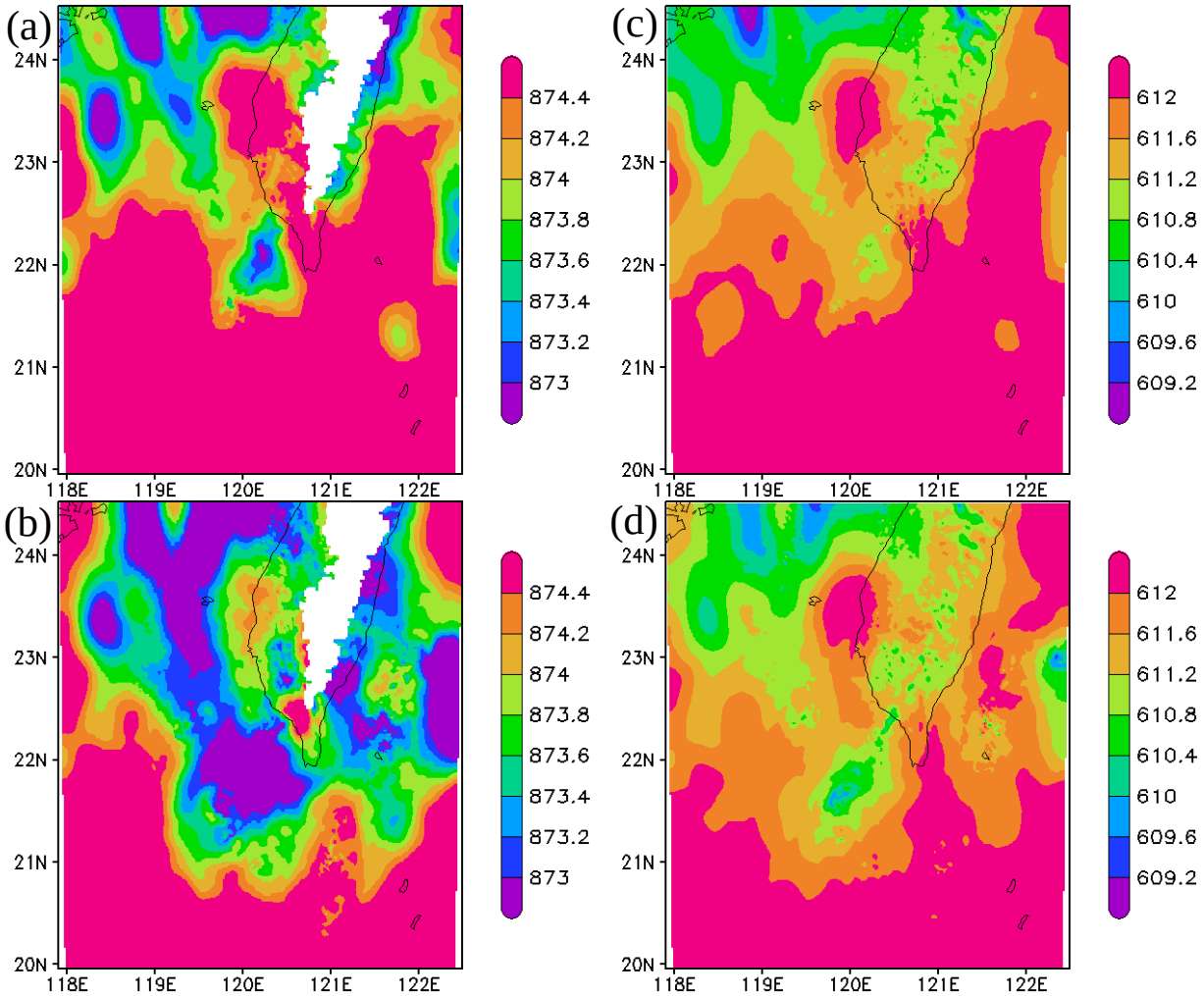


圖 5.3　VDRAS 與 WRF 結合取代壓力測試：(a)、 (b) VDWRF；(c)、(d) VDWRF_P 於預報一小時後之壓力場，其中(a)、(b)為高度 1.25km，(c)、(d)為高度 4.25km，陰影為壓力，單位為 hpa。

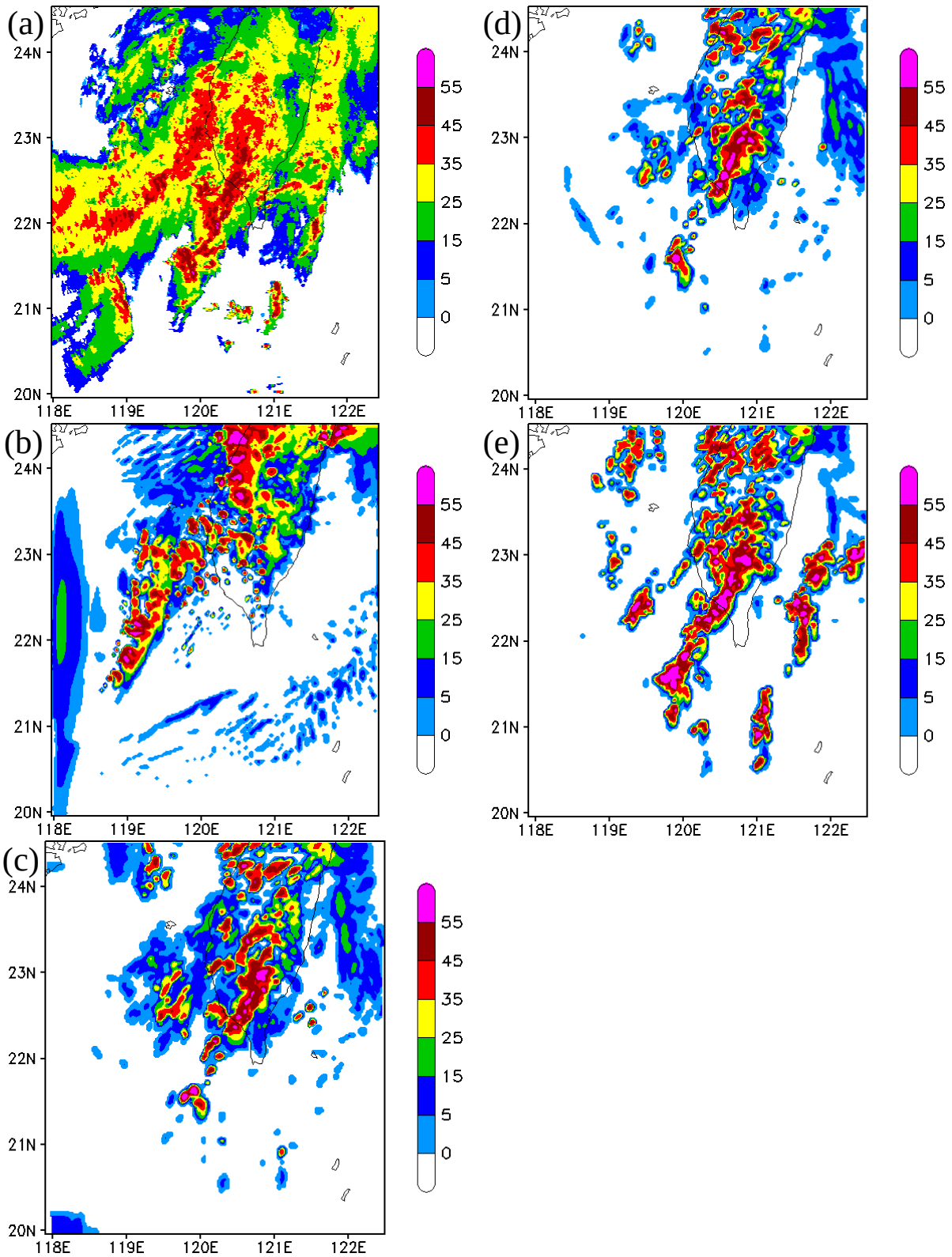


圖 5.4　VDRAS 與 WRF 結合之預報 1 小時最大回波圖：(a)QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

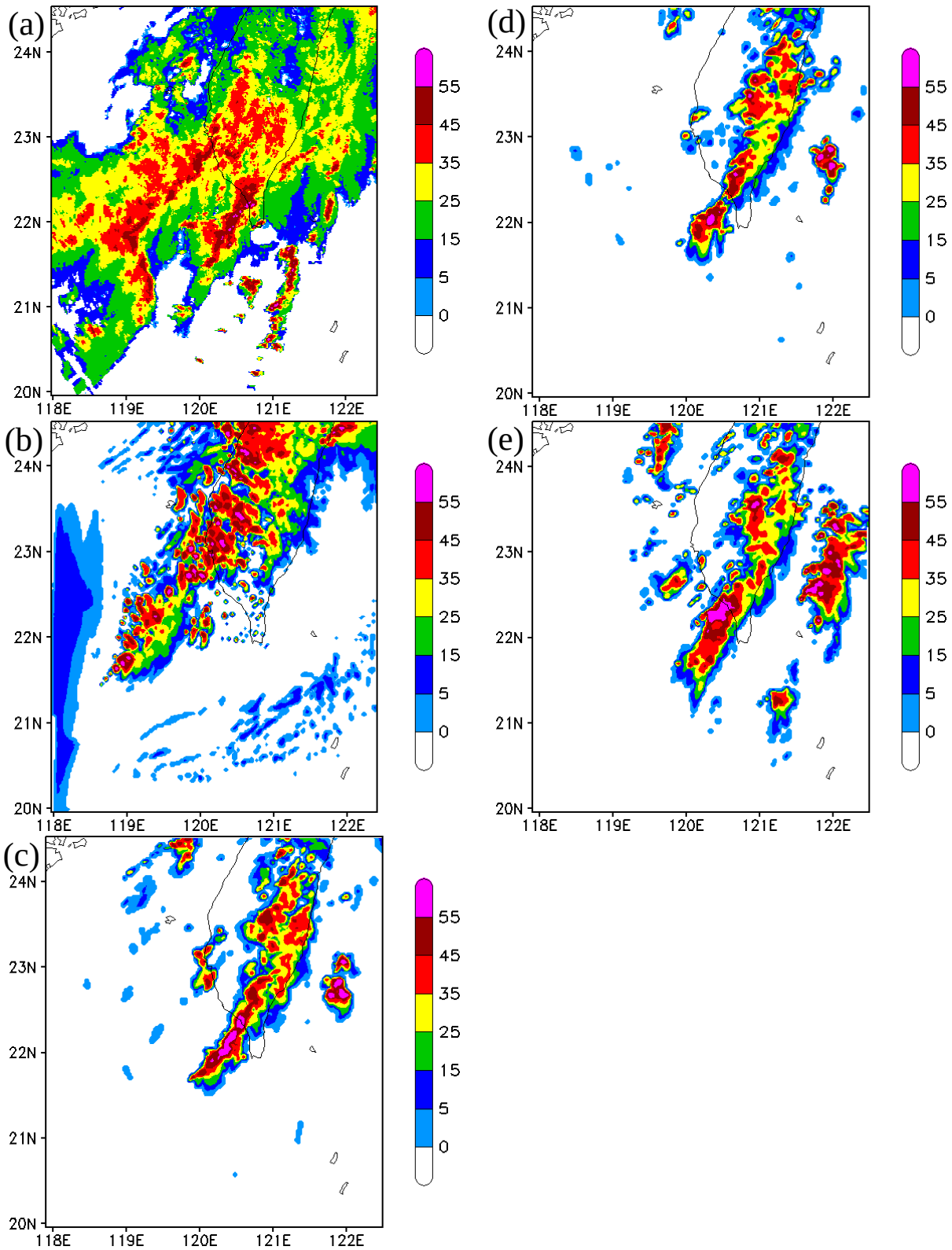


圖 5.5　VDRAS 與 WRF 結合之預報 2 小時最大回波圖：(a) QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

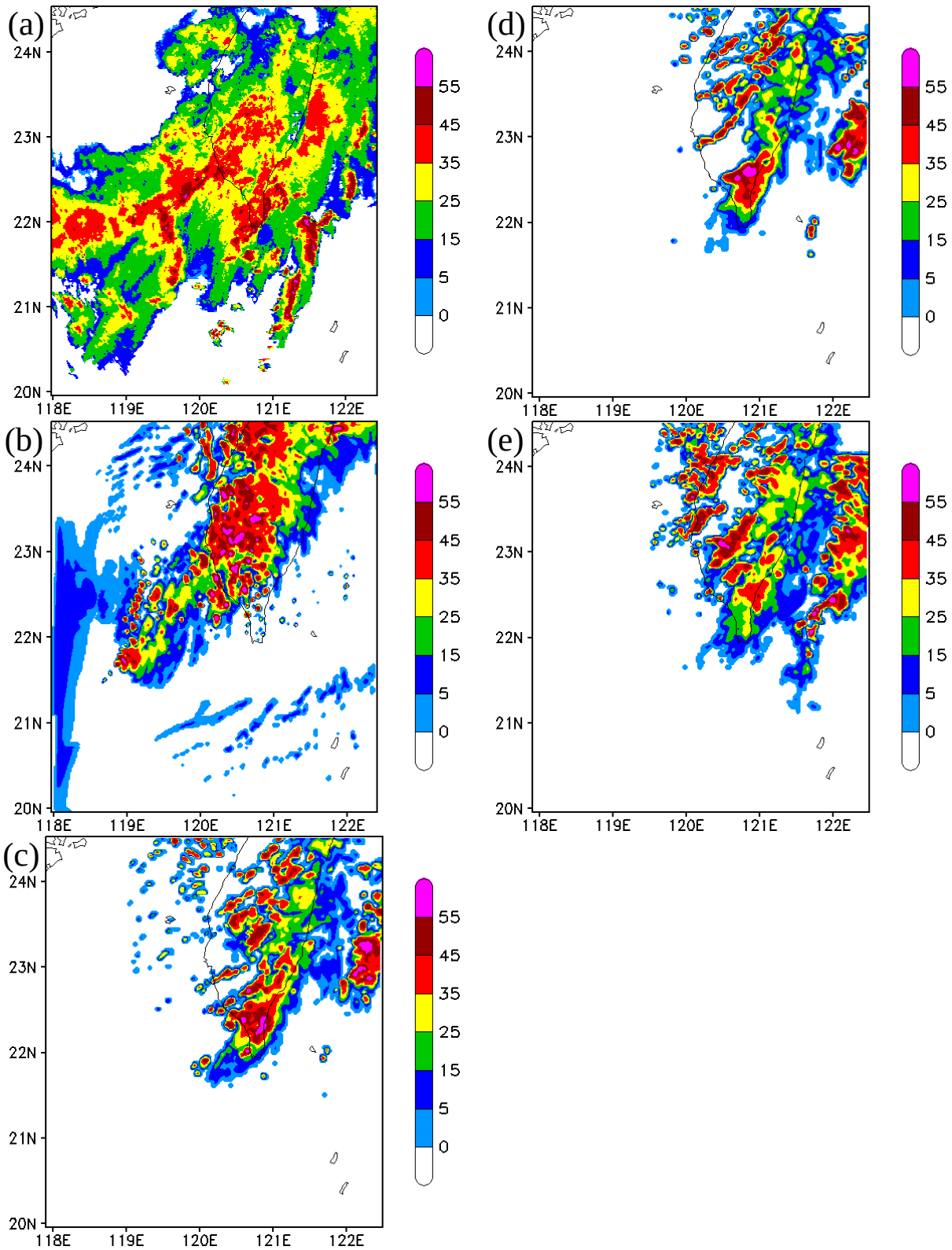


圖 5.6　VDRAS 與 WRF 結合之預報 3 小時最大回波圖：(a) QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

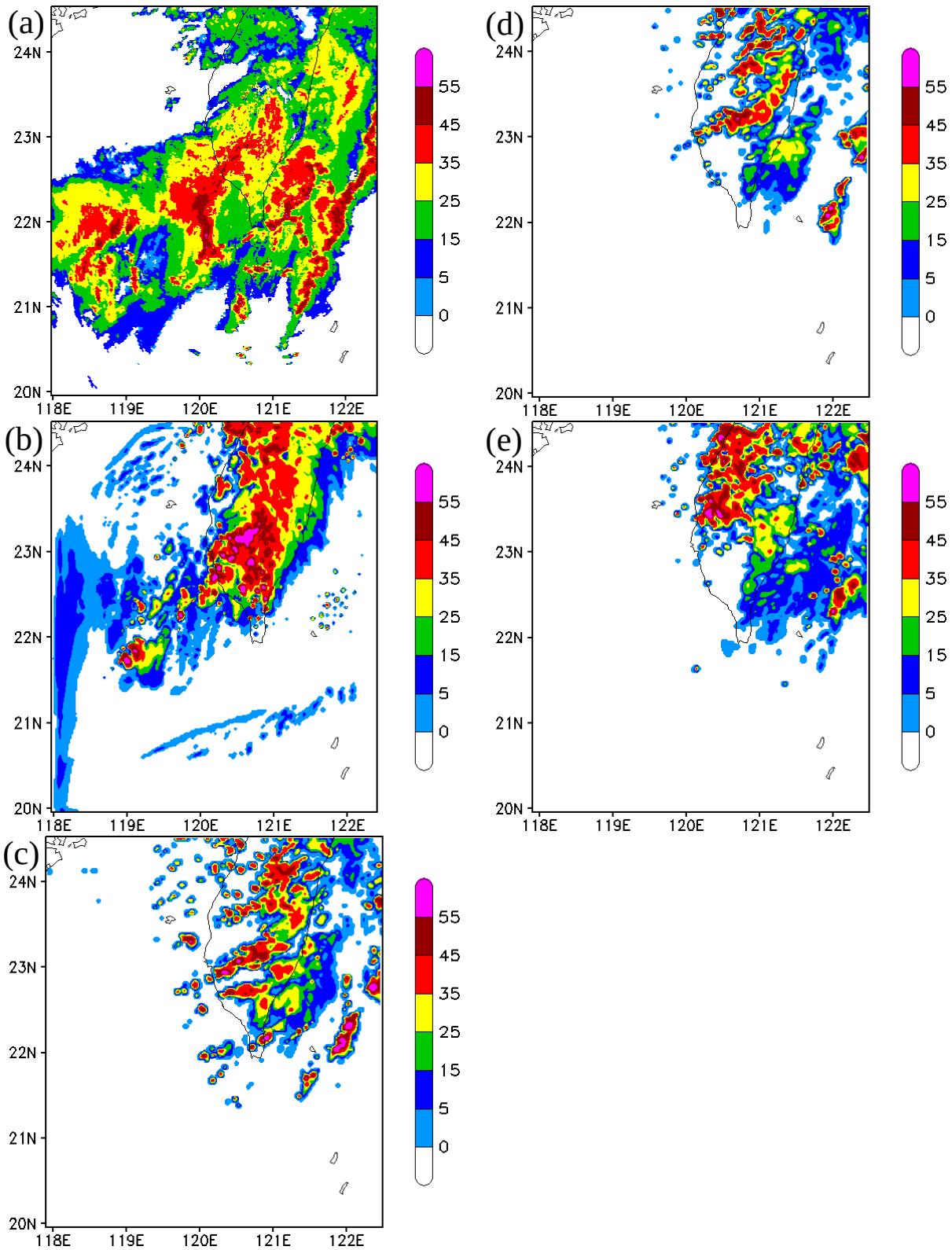


圖 5.7　VDRAS 與 WRF 結合之預報 4 小時最大回波圖：(a) QPESUMS；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 dBZ。

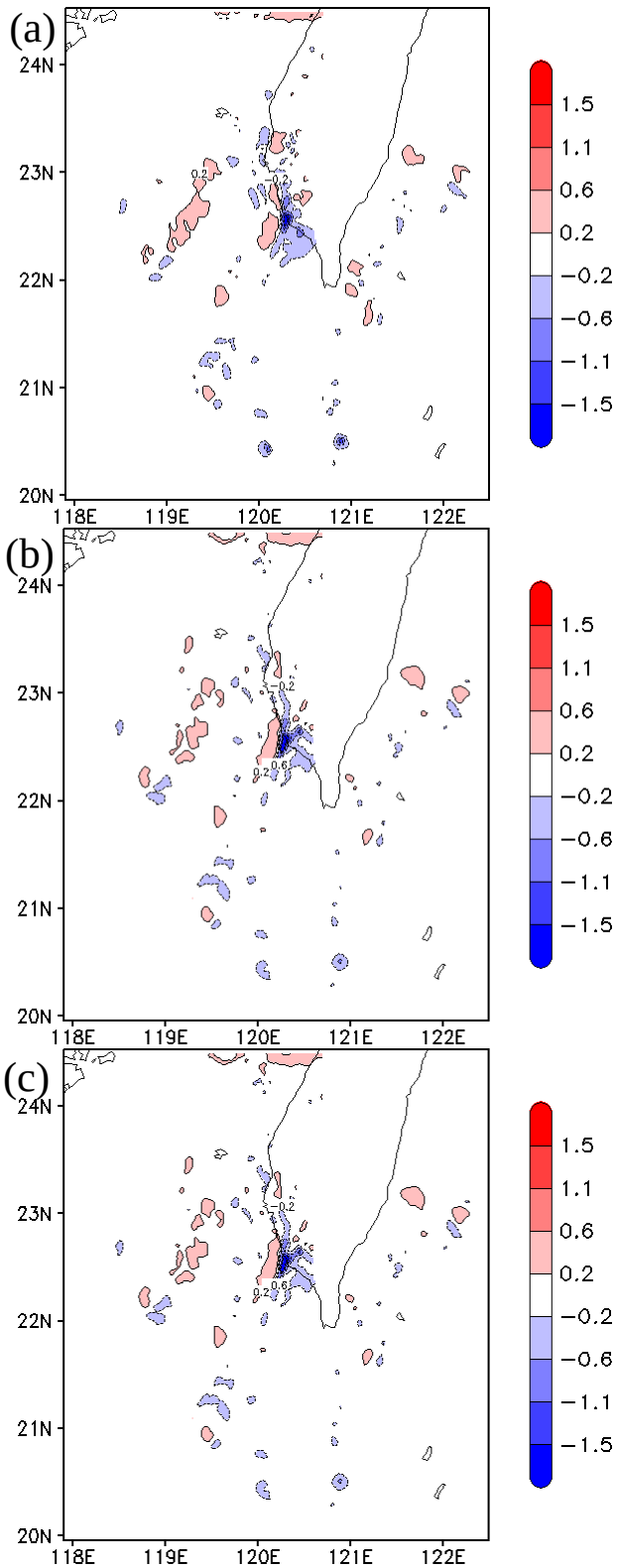


圖 5.8　WRF 預報 0 小時，高度 1.25 公里之輻合輻散場(色階，$10^{-3}s^{-1}$)：(a)VDWRF；(b) VDWRF_P；(c) VDWRF_PRH 。

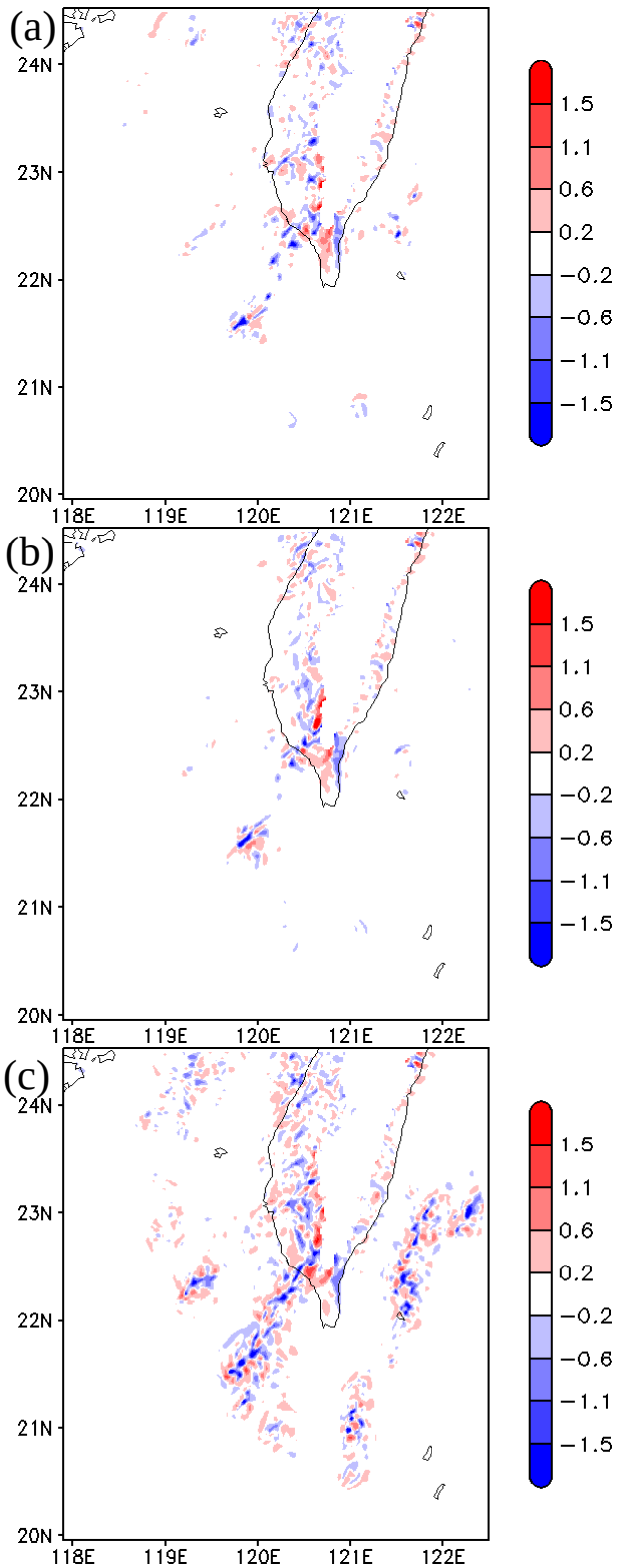


圖 5.9　WRF 預報 1 小時，高度 1.25 公里之輻合輻散場(色階，$10^{-3}s^{-1}$)：(a)VDWRF；(b) VDWRF_P；(c) VDWRF_PRH 。

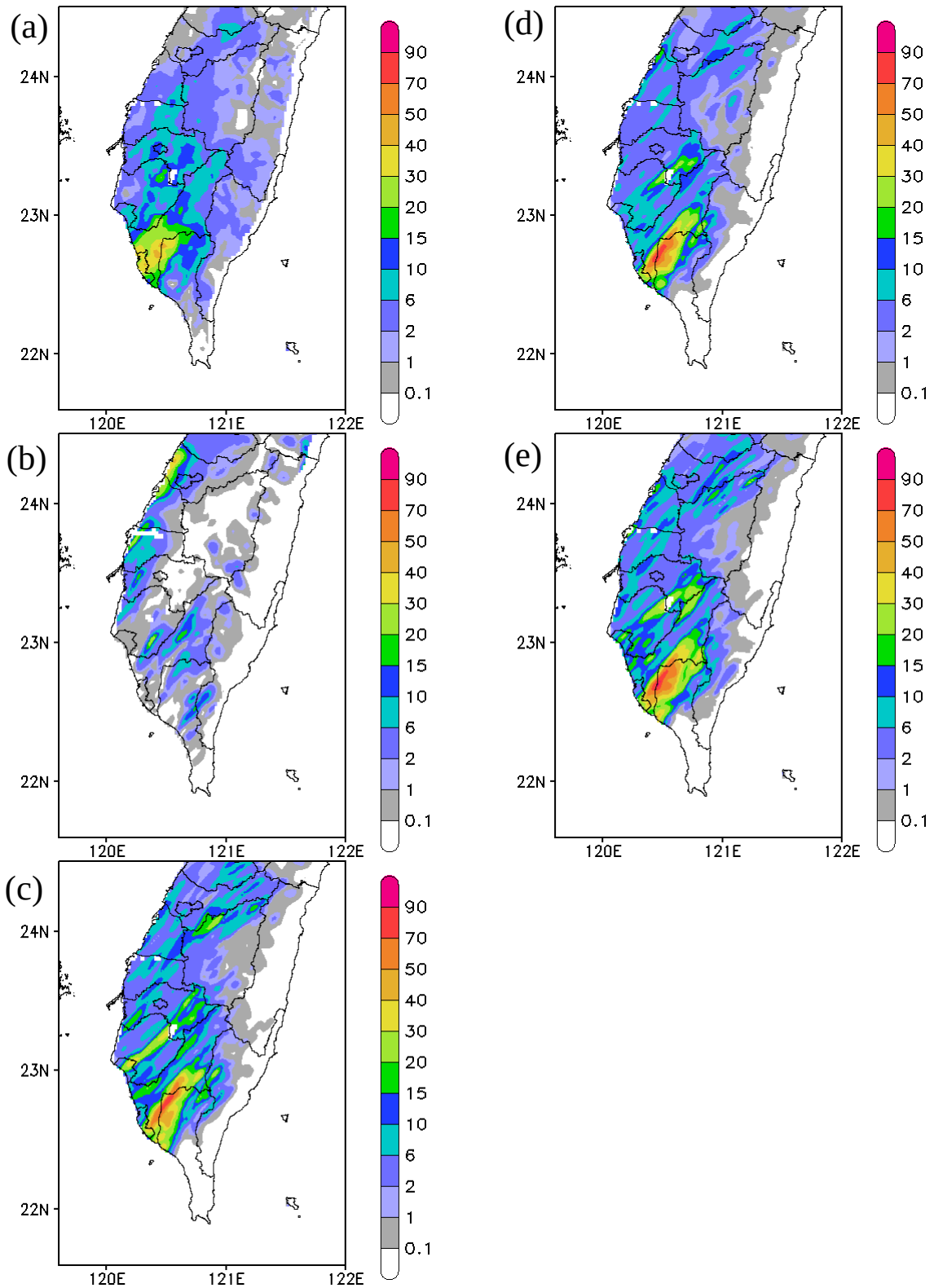


圖 5.101100UTC 至 1200UTC 累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

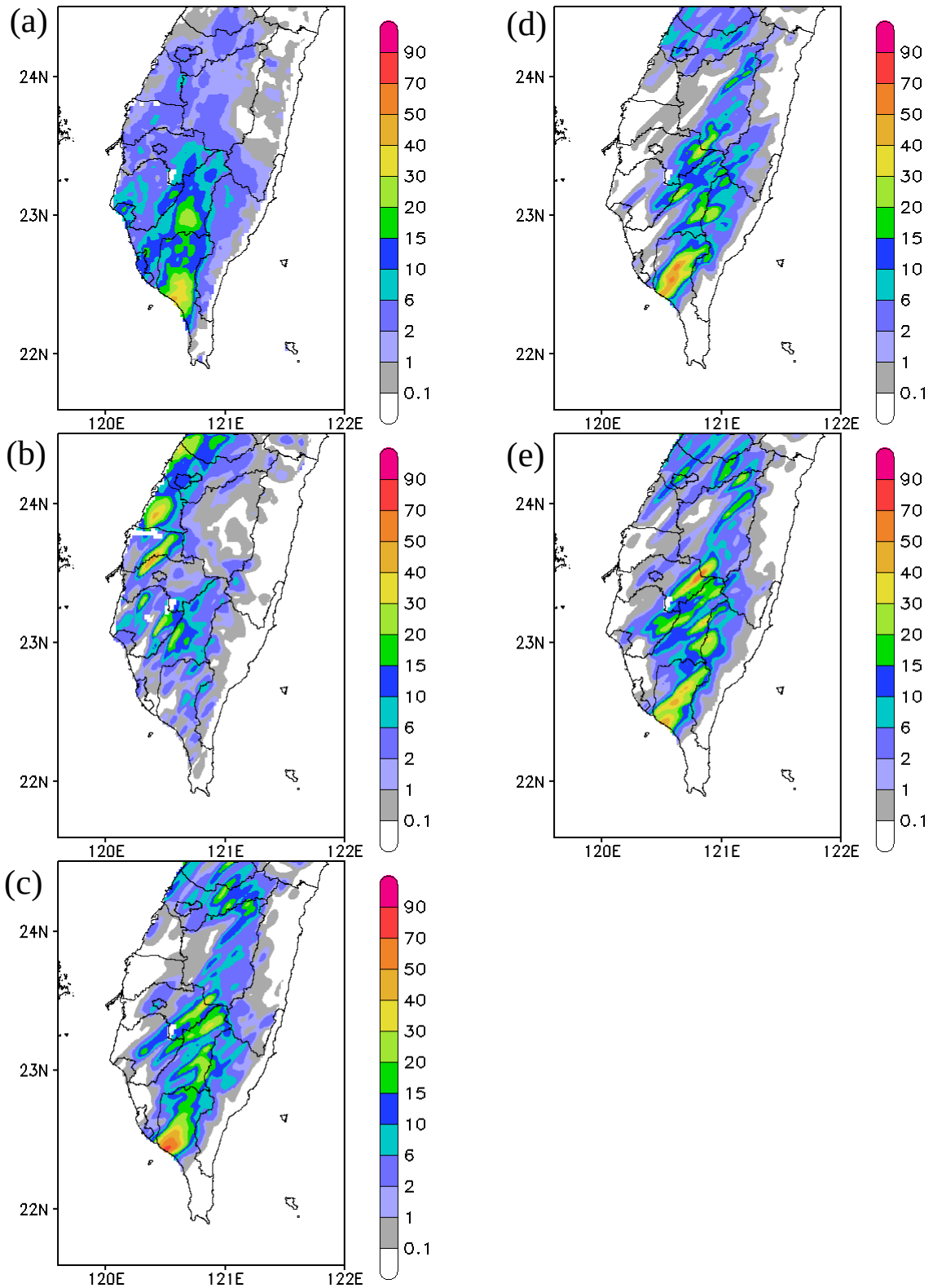


圖 5.11 1200UTC 至 1300UTC 累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

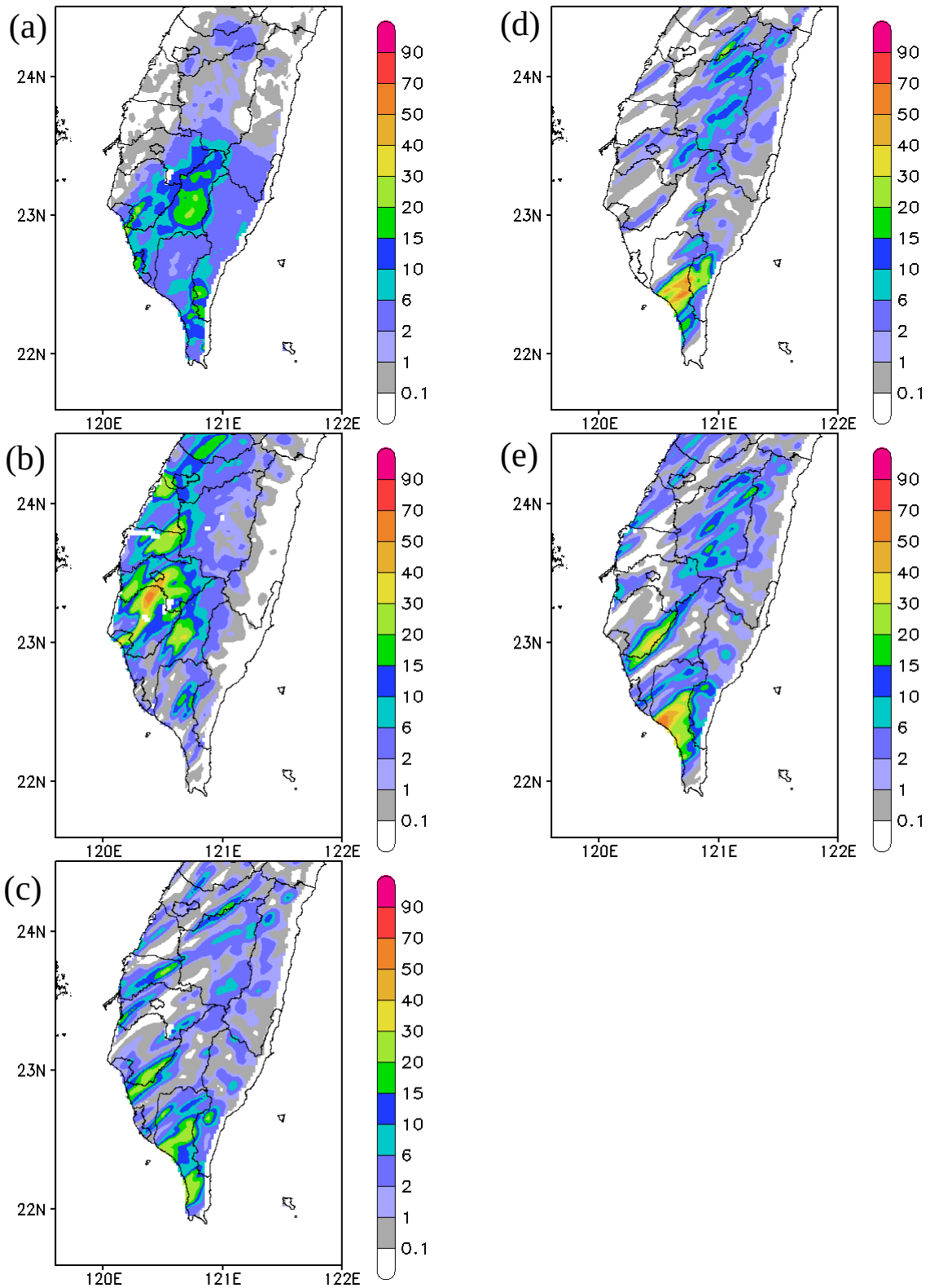


圖 5.12 1300UTC 至 1400UTC 累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

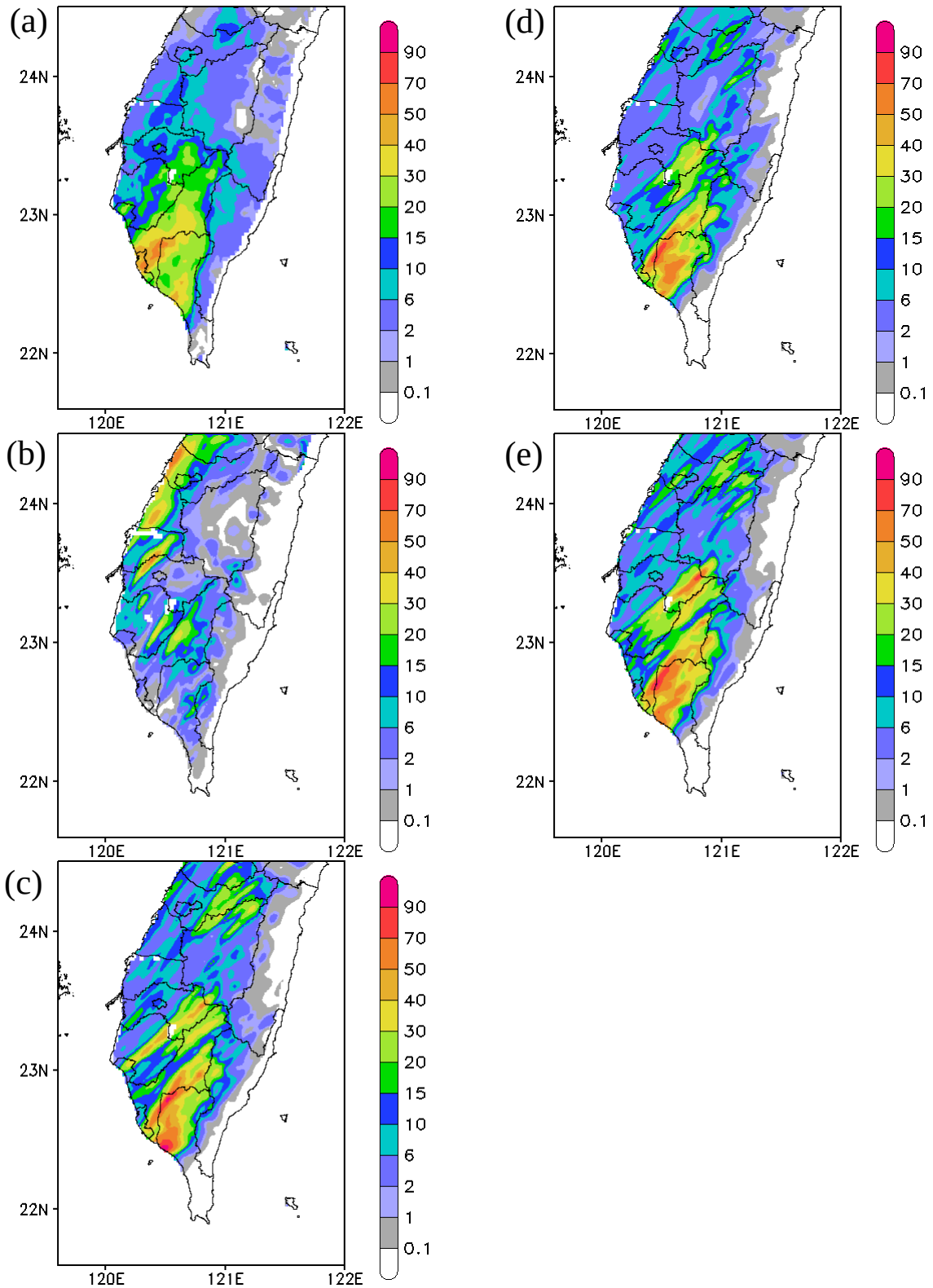


圖 5.13　兩小時累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P ；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

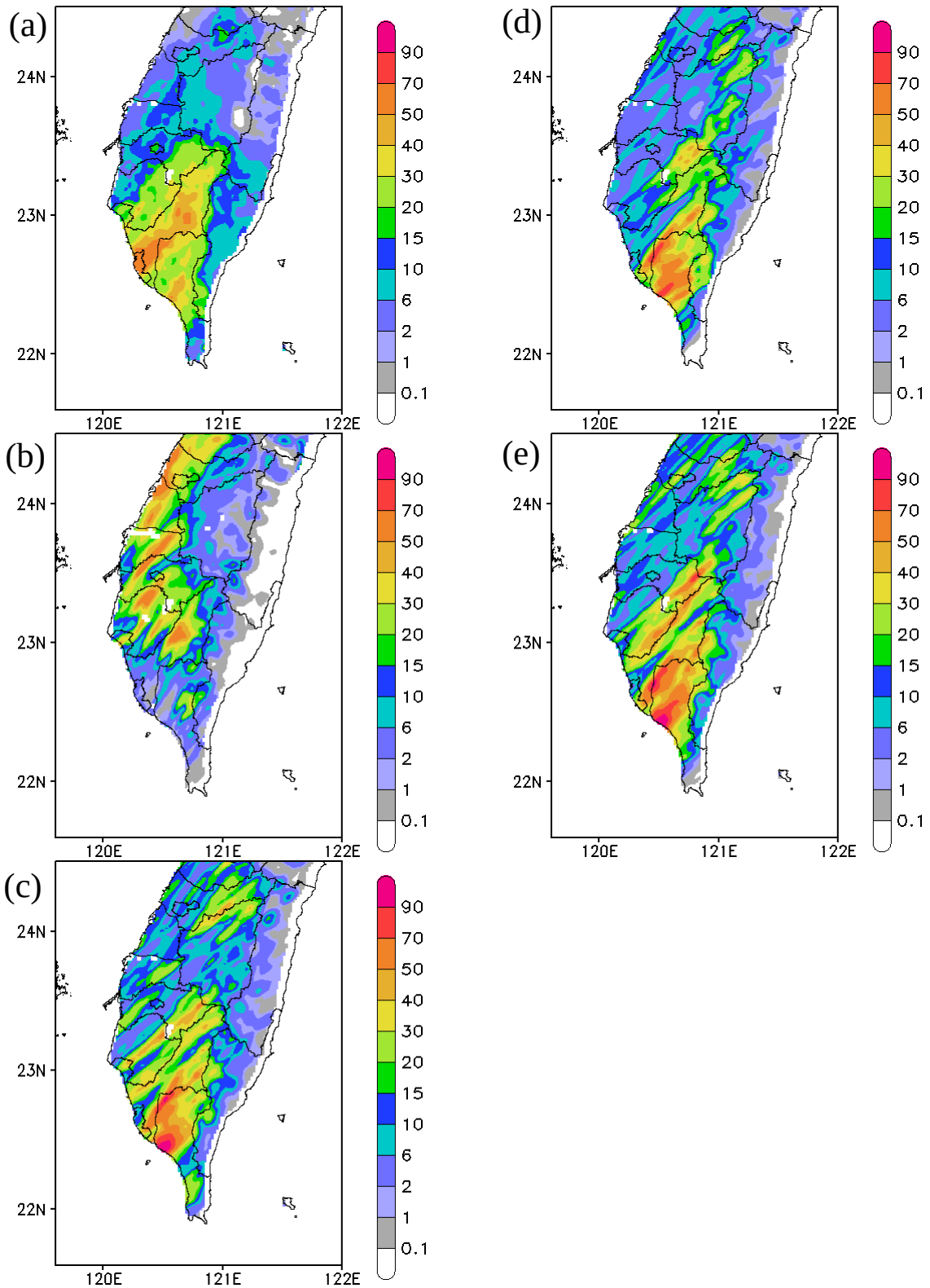
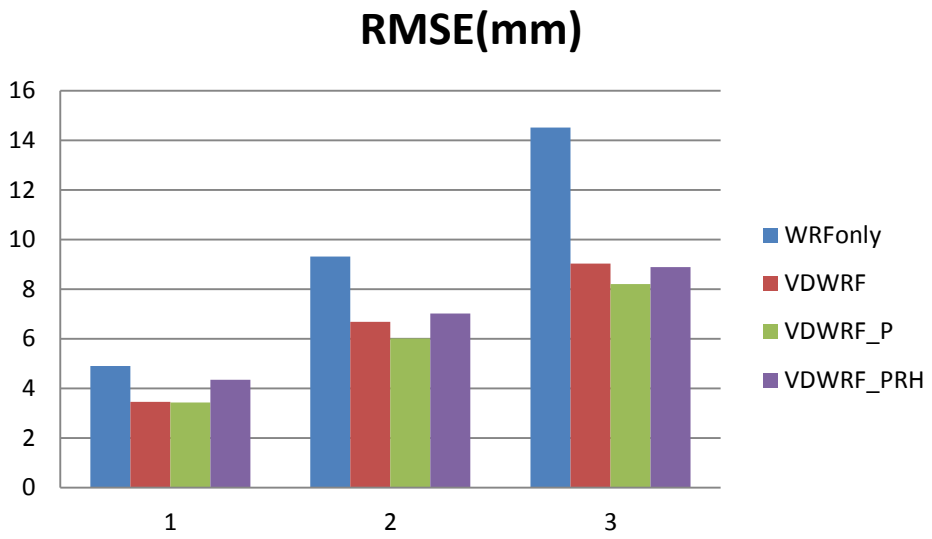


圖 5.14 三小時累積雨量：(a)自動雨量觀測；(b)WRF_only；(c)VDWRF；(d) VDWRF_P；(e) VDWRF_PRH，單位為 mm。

圖 5.15 預報累積雨量之空間相關係數(SCC)。其中包含 WRF_only、VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，橫軸為預報時間(小時)。



VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，橫軸為預報時間(小時)，RMSE 單位為 mm。

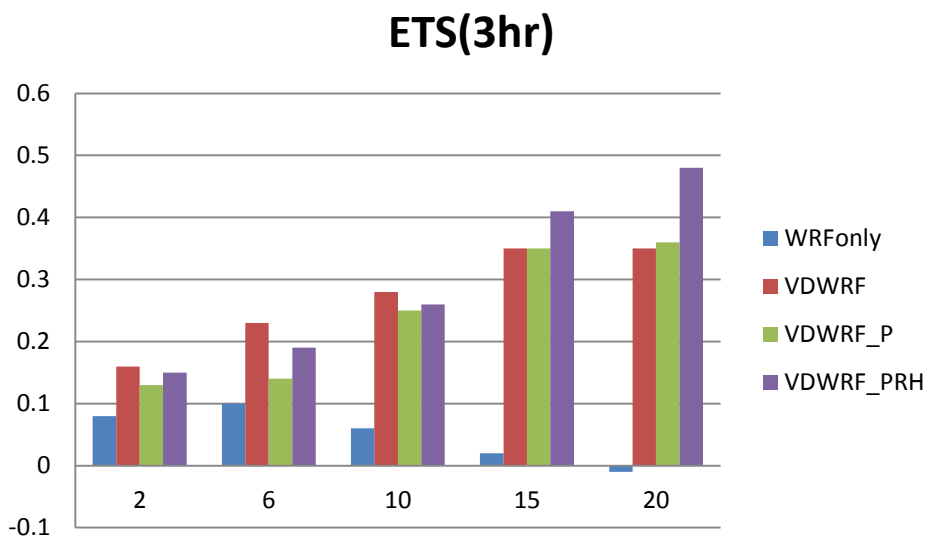


圖 5.17　　3 小時預報累積雨量之 ETS 分數。其中包含 WRF_only、VDWRF、VDWRF_P、VDWRF_PRH，橫軸為門檻值，單位為 mm。