

國立中央大學

大氣物理研究所

碩士論文

結合都卜勒雷達觀測及反演氣象變數  
與 COSMIC RO 資料  
以改進模式預報之 可行性研究

研究生：吳子榆

指導教授：廖宇慶 博士

中華民國 一〇〇 年 六 月



# 國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(98 年 4 月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，為本人於國立中央大學，撰寫之碩/博士學位論文。(以下請擇一勾選)

- () **同意** (立即開放)
- (  ) **同意** (一年後開放)，原因是：\_\_\_\_\_
- (  ) **同意** (二年後開放)，原因是：\_\_\_\_\_
- (  ) **同意** (三年後開放)，原因是：\_\_\_\_\_
- (  ) **不同意**，原因是：\_\_\_\_\_

以非專屬、無償授權國立中央大學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、公開陳列、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用，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：\_\_\_\_\_ 吳子榆 \_\_\_\_\_ 學號：\_\_\_\_\_ 966201008 \_\_\_\_\_

論文名稱：結合都卜勒雷達觀測及反演氣象變數與 COSMIC RO 資料以改進模式預報之可行性研究

指導教授姓名：\_\_\_\_\_ 廖宇慶 \_\_\_\_\_

系所：\_\_\_\_\_ 大氣物理 \_\_\_\_\_ 所  博士班  碩士班

日期：民國 100 年 7 月 7 日

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，應依著作權法相關規定辦理。

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 吳子榆 研究生所提  
之論文

結合都卜勒雷達觀測及反演氣象變數與

COSMIC RO 資料以改進模式預報之 可行性研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 廖宇慶 (簽章)

100 年 6 月 12 日

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 吳子榆 研究生所

提之論文

結合都卜勒雷達觀測及反演氣象變數與

COSMIC RO 資料以改進模式預報之 可行性研究

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

委

員

林沛緯  
廖宇慶

楊明仁

中華民國 一 百 年 六 月 二 十 二 日

## 摘 要

在 OSSE 架構下利用 Gal-Chen(1978)提出的熱力反演方法，將雷達觀測風場帶入動量方程、解一個與壓力有關的包桑方程，得到標準化氣壓擾動量和虛雲位溫擾動量的水平平均及其水平平均偏差量( $\pi' - \langle \pi' \rangle, \theta'_c - \langle \theta'_c \rangle$ )，經由公式轉換推得氣壓和溫度的擾動量在水平平均及其水平平均偏差量( $P' - \langle P' \rangle, T' - \langle T' \rangle$ )。引入海洋上在雷達觀測區域內含有壓力、溫度垂直剖線的 GPS RO 探空資料，可得知一個三維的溫度、壓力分佈，再經由水汽調整後同化到模式中。本文根據同化變數多寡和同化雷達個數、區域範圍實驗設計探討對預報結果的影響。同化變數多寡實驗以同化 U、V、W 風場、回波場和經由熱力反演得知變數的氣溫和壓力，預報結果最好。同化雷達個數與範圍實驗中，以不同的雷達個數和不同的同化範圍各別進行實驗，發現不同同化區域彼此之間的差異，同化雷達各數少的差異大於同化雷達各數多的差異，且同化區域涵蓋越多天氣系統，預報結果達到最佳。

## Abstract

This study is conducted on an Observation System Simulation Experiment (OSSE) framework. The purpose is to investigate the feasibility that by using the traditional thermodynamic retrieval technique with a combination with the GPS RO data, it is possible to recover the complete temperature and pressure fields from three-dimensional wind field. The latter can be obtained through multiple-Doppler synthesis. By assimilating the wind and thermodynamic fields into a model, one can improve the accuracy of the model quantitative precipitation forecast (QPF).

Experimental results indicate that the best results are achieved when variables such as  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $q_r$ ,  $t$  and  $p$  are all assimilated into the model. Assimilating  $q_r$  has an immediate modification on the locations of the convections. The impact of the radar coverage provided by different radar stations in Taiwan on the model QPF is also explored.

## 致 謝

在碩士生涯的幾年，首先必須感謝我的指導教授廖宇慶老師!帶領對研究領域、龐大模式架構下新手的我慢慢進入這些世界，曾經坐在旁邊教導我如何對那些艱深的程式下手，在書報前總是不厭其煩地聽我試報，謝謝廖老師那麼有耐心和包容心。謝謝兩位口試委員楊明仁老師、林沛練老師，對我的論文提出許多建議。

做研究苦悶之餘，班上同學總是會一起去吃飯、開 party，謝謝嘟嘟、金成、奕如、阿克、豪大、老蔡，還有全部 98 級同學們!!!沒有你們，我的碩士生活不會這麼多采多姿、那麼開心!!!還有雷達實驗室的正紀、雅茹、雅茜、雅亭、偉裕、少凡、紀董等學長姊、黑輪、玉霜、薇鈞、大頭、郭閔超、鯨魚、小蔡、佩瑜等學弟妹、小鈺，沒有你們就沒有那麼多八卦可以聽(開玩笑的)，謝謝你們的支持與鼓勵、貼心的小禮物，也總是在有困難、需要幫忙時兩肋插刀!!當然還有哲伶，謝謝你拉我加入肥滋滋旅行團，讓我有玩有吃又有得拿!

最後感謝總是在身旁支持我的家人媽媽、姊姊和阿豫，我當了那麼久的米蟲，在家裡有難時又沒有在身旁陪你們，你們都不曾責怪過我!只會鼓勵我!雖然應付媽媽打來的電話很累，謝謝姊姊居中調節，母親節還來中壢一起過，真的很感激!很開心我成為爸爸的驕傲!

## 目錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
致謝 .....	III
目錄 .....	IV
圖表說明 .....	VI
第一章 緒論 .....	1
1-1 前言 .....	1
1-2 文獻回顧.....	1
1-3 研究動機與方向.....	3
第二章 研究方法 .....	5
2-1 熱力場反演.....	5
2-2 水汽調整.....	7
第三章 個案介紹 .....	10
3-1 2008 年西南氣流實驗.....	10
3-2 綜觀天氣.....	10



第四章 檢驗方法.....	12
4-1 同化結果檢驗.....	12
4-2 定量降水預報檢驗.....	13
第五章 MM5 模擬與預報結果分析.....	15
5-1 模式設定.....	15
5-2 同化資料.....	15
5-2-1 資料結合.....	16
5-2-2 調整方法.....	16
5-3 實驗設計與結果分析.....	17
5-3-1 實驗一：同化變數測試.....	17
5-3-2 實驗二：同化雷達個數與範圍測試.....	19
第六章 結論與未來展望.....	23
6-1 結論.....	23
6-2 未來展望.....	23
參考文獻.....	25
附表附圖.....	27

## 圖表說明

附表：

表 4.1 降雨事件之機率分類

表 5.1 模擬時間及同化時間示意圖

表 5.2 實驗一：同化變數測試

表 5.3 實驗二：同化雷達個數與範圍測試

附圖：

圖 3.1 2008 年 5 月 30 日綜觀地面天氣圖(a)00UTC (b)06UTC (c)12UTC (d)18UTC。

圖 3.2 MM5 模擬 2008 年 5 月 30 日 NTR 的雷達回波(a)11:00UTC (b)11:40UTC (c)12:40UTC (d)13:00UTC (e)13:30UTC (f)13:50UTC。

圖 5.1 置換資料以雷達為中心，隨半徑越大 NTR 權重遞減的分布圖，顏色越深(淺)NTR 權重越大(越小)、non-NTR 權重越小(越大)。

圖 5.2 GPS RO 觀測點。

圖 5.3 同化完成的回波分析場 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

圖 5.4 預報 30 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

圖 5.5 預報 60 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW  
(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

圖 5.6 預報 90 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW  
(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

圖 5.7 預報 120 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW  
(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

圖 5.8 預報 3 小時的累積雨量(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW  
(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

圖 5.9 累積雨量預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

圖 5.10 U 風場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

圖 5.11 V 風場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

圖 5.12 W 風場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

圖 5.13 溫度場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

圖 5.14 回波場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

圖 5.15 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP  
(h)TP 3 小時累積雨量大於 2mm 以上。

圖 5.16 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP  
(h)TP 3 小時累積雨量大於 4mm 以上。

圖 5.17 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d) UVW (e)UVWQr (f)UVWTP

(g)QrTP (h)TP 3 小時累積雨量大於 6mm 以上。

圖 5.18 累積降雨 3 小時的 (a)ETS 與 (b)Bias。

圖 5.19 實驗二各組預報 6 小時回波場的相關係數 (a)Exp. 2-1 (b)Exp. 2-2  
(c) Exp. 2-3 (d)Exp. 2-4 (e)Exp. 2-5。

圖 5.20 實驗二各組預報 6 小時累積雨量的相關係數 (a)Exp. 2-1 五分山、  
清泉崗、七股 (b)Exp. 2-2 清泉崗、花蓮 (c) Exp. 2-3 五分山  
(d)Exp. 2-4 五分山、清泉崗、花蓮 (e)Exp. 2-5 五分山、清泉崗、  
七股、花蓮。

圖 5.21 Exp2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料權重給予的範圍 (a)150NTR100r  
(b)200NTR100r (c)100NTR100r。

圖 5.22 Exp2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料預報 60 分鐘的結果 (a)NTR  
(b)150NTR100r (c)200NTR100r (d)100NTR100r。

圖 5.23 Exp2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料預報 120 分鐘的結果 (a)NTR  
(b)150NTR100r (c)200NTR100r (d)100NTR100r。

圖 5.24 Exp. 2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料預報降雨累積 180 分鐘的 (a)  
ETS (b) Bias。

圖 5.25 Exp. 2-5 同化五分山、清泉崗、七股、花蓮雷達資料預報降雨累積  
180 分鐘的 (a)ETS (b)Bias。

# 第一章 緒論

## 1-1 前言

將綜觀天氣分析的氣象變數輸入到天氣數值預報模式(Numerical Weather Prediction, NWP)，能模擬並預報某一區域的中尺度天氣現象。為使模擬和預報更接近真實大氣，近年來許多科學家利用資料同化方法，如：3DVAR(three-dimensional variational data assimilation)、4DVAR(four-dimensional variational data assimilation)、EnKF(Ensemble Kalman Filter)等，把高時間、空間解析度的觀測資料同化到天氣數值預報模式中。高時間、空間解析度的觀測資料如雷達(徑向風、回波場)等。

## 1-2 文獻回顧

RO(Radio Occultation)技術從1960年代發展於行星大氣的研究上，Gurvich and Krasil'nikova(1987)和Yunck et al.(1988)建議將GPS(Global Positioning System)使用在掩星觀測上，促使RO技術在大氣的應用逐漸成熟。在1993年5月UCAR(University Corporation for Atmospheric Research)與JPL(Jet Propulsion Laboratory)、美國亞桑那州立大學合作提出全球定位氣象實驗(GPS/MET)，利用GPS/MET收集的資料，Kursinski et al. (1995)發現在低緯地區高度6公里以下，反演的水氣剖線誤差10~20%，且邊界層中誤差為5%；

Ware et al.(1996)指出低對流層到40公里的溫度曲線誤差範圍約1k；Leroy (1997)利用GPS估算重力位高度與ECMWF(歐洲中期天氣預報中心，European Center for Medium-Range Weather Forecast)分析結果比較誤差約為10~20公尺，Kuo et al. (1998)研究指出垂直方向高解析的分布能充分表現中尺度現象。2000年德國和阿根廷各發射一顆衛星執行GPS RO任務，分別為CHAMP和SAC-C RO，一天約能接收到350筆資料，兩顆衛星折射率剖面在5到25公里有最高的準確度(Kuo et al. 2004,2005)。以上研究證實在大氣層中使用RO技術反演探空的可行性。美國與台灣合作提出FORMOSAT-3/COSMIC計畫(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)，並於2006年4月15日發射福爾摩沙衛星三號，全球一天約有2500筆資料，能彌補海洋缺乏探空資料的不足，將其運用在客觀分析和模式模擬上。

另外有部分科學家致力發展壓力場及溫度場反演技術，反演三維熱動力場，正確的三維熱動力場能改進數值預報模式初始場，提高預報準確度。其中 Gal-Chen(1978，簡稱 GC78)利用雷達觀測到的徑向風場為邊界條件，解壓力擾動場的包桑方程(Poisson equation)，獲得擾動量與水平平均偏差量( $\pi' - \langle \pi' \rangle$ ， $\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle$ )的方法最被廣泛運用。Roux(1985,1988)提出在反演的區域內若有一點觀測的氣壓和溫度，就能夠解出根據動量方程、簡化

的熱力方程所決定一組氣壓和溫度的擾動場與真正擾動場所差的常數，並得到氣壓和溫度擾動量在空間上的三維分布。Roux and Sun(1990)進一步提出改進方法，可得到在水平、垂直方向的溫度梯度。Yu et al.(2001)和 Cai and Wakimoto (2001)分別利用 Roux(1993)提出的改進辦法研究對流線及分析機載雷達觀測到超級胞，證實此方法的可用性。Liou(2001)利用三維變分的方式，解一個包含三維動量方程、簡化熱力方程的價值函數，經由變分使價值函數極小化，可得到最佳的壓力及溫度，文章中反演一理想不包含水汽的冷池，測試其精準度。Liou et al.(2003)將 Liou(2001)的方法進一步考慮水汽效應，並在垂直動量方程加入浮力項，且浮力項可經由雷達觀測回波反推的雨水混和比( $q_r$ )得知。

### 1-3 研究動機與方向

探空站分布在海洋的個數比起陸地甚少，架設在洋面的測站都是以測量海洋流速、海表的溫度和風向風速為主，若要得到一個在海洋上面的探空資料，往往都在實驗期間將船舶開到定點，在船舶上釋放探空氣球，或者要利用飛機在台灣附近的海域飛行釋放投落送等。而在台灣附近的 GPS RO 資料每天會有兩筆資料，能夠彌補在海洋缺乏的探空資料，不需在實驗期間或者颱風經過期間就能取得，且上述諸位學者研究證實 GPS RO 的準確性，因此利用 GPS RO 資料扮演海上探空的角色的這個概念進行研究。

以 GC78 提出熱力反演方法作為研究方法，將雷達觀測的回波場和風場資訊代入動量方程、解包桑方程，並引入 GPS RO 得知海上一點包含溫度、壓力垂直剖線的資料，推得三維氣壓、溫度分布後進行水汽調整，針對不同的實驗設計檢驗對模式預報的改善程度。



## 第二章 研究方法

### 2-1 熱動力場反演

本研究方法考慮包含水汽的暖雨過程之熱動力場反演，此方法根據 GC78 的理論為基礎，解一個與壓力場擾動有關的包桑方程，邊界條件可從雷達觀測的風場得知。

動量方程在笛卡爾座標的表示如下，並分別定義為 F、G、H:

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla u - fv + turb(u) \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} \equiv -F \quad (1)$$

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v + fu + turb(v) \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial y} \equiv -G \quad (2)$$

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot w + turb(w) + gq_r \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \frac{\theta'_c}{\theta_0 \theta_{v0}} \equiv -H \quad (3)$$

方程式的變數下標 0 是水平均質性的基本狀態，上標一撇是相較於基本狀態的擾動量。(1)~(3)式中的 $\vec{V}$ 由三個方向風(u,v,w)所組成，f 為科氏參數，g 是重力加速度，turb()為次網格亂流參數化的運算子， $\pi$ 則是經過標準化的氣壓，定義如下:

$$\pi = C_p \left( \frac{P}{P_{00}} \right)^{R/C_p} \quad (4)$$

P 為氣壓， $P_{00}=1000\text{hpa}$ ，R 是氣體常數， $C_p$  為定壓比熱。除此之外， $\theta_v$  為虛位溫 (virtual potential temperature)， $\theta'_c$  為虛雲位溫 (virtual potential temperature)可表示成:

$$\theta_v = \theta(1 + 0.61q_v) \quad (5)$$

$$\theta'_c = \theta' + (0.61q'_v - q_c)\theta_0 \quad (6)$$

$q_v$  為水汽混和比(water vapor mixing ratio)， $q_c$  為雲水混和比(cloud water mixing ratio)。

在公式(3)中的 $gq_r$ 為浮力項，其中 $q_r$ 為雨水混和比，可藉由雷達觀測的回波估計。根據 Sun and Crook(1997)假設雨滴粒徑分布是 Marshall-Palmer 的形式，可推得一Z -  $q_r$ 關係式：

$$\frac{35}{2} \log(\rho \times q_r) + 43.1 = Z(\text{dbz}) \quad (7)$$

上式的 $\rho$ 為空氣密度(單位: $\text{gm}^{-3}$ )。

風場代入動量方程式(1)、(2)、(3)，得到 F、G、H。利用變分極小化下列價值函數(cost function):

$$J = \frac{1}{2} \iint \left[ \left( \frac{\partial \pi'}{\partial x} - F \right)^2 + \left( \frac{\partial \pi'}{\partial y} - G \right)^2 \right] dx dy \quad (8)$$

變分後可整理成：

$$\begin{aligned} \delta J = & \int \delta \pi' (\pi'_x - F) |_{x_1}^{x_2} dy + \int \delta \pi' (\pi'_y - G) |_{y_1}^{y_2} dx \\ & - \iint \delta \pi' \left( \frac{\partial^2 \pi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \pi'}{\partial y^2} - \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial G}{\partial y} \right) dx dy = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

公式(9)前兩項根據 Neumann-type 邊界條件得知：

$$\frac{\partial \pi'}{\partial x} = F \quad (10)$$

$$\frac{\partial \pi'}{\partial y} = G \quad (11)$$

公式(9)第三項為零，移項後得到包桑方程：

$$\frac{\partial^2 \pi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \pi'}{\partial y^2} = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \quad (12)$$

並利用垂直動量方程：

$$-(H - \langle H \rangle) = -\frac{\partial(\pi' - \langle \pi' \rangle)}{\partial z} + g \frac{(\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle)}{\theta_0 \theta_{v0}} \quad (13)$$

得到擾動場及其水平平均的偏差量，也就是 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 。將 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 代入利用垂直動量方程取水平平均相減後的式子，推得 $\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle$ 。

## 2-2 水汽調整

本研究所使用的水汽調整方法是依據尤 (2009)當中提出的方法。督卜勒雷達只能觀測到徑向風場、回波，水汽無法從觀測得到，因此設計一個水汽調整的方法。當水汽達飽和時，即對網格點進行調整，步驟如下：

1.從熱動力場反演可得到 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 、 $\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle$ ，經過推導可由下列公式

表示：

$$\pi' - \langle \pi' \rangle \approx \frac{R}{P_0} \left( \frac{P_0}{P_{00}} \right)^{R/C_P} (P' - \langle P' \rangle) \quad (14)$$

$$\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle = \theta' - \langle \theta' \rangle + \{0.61[q'_v - \langle q'_v \rangle - (q_c - \langle q_c \rangle)]\} \theta_0 \quad (15)$$

$$\theta' - \langle \theta' \rangle = \left( \frac{P_{00}}{P_0} \right)^{R/C_P} (T' - \langle T' \rangle) - \frac{R}{C_P} \frac{\theta_0}{P_0} (P' - \langle P' \rangle) \quad (16)$$

公式(13)的水汽混和比擾動量( $q'_v$ )、雲水混和比( $q_c$ )的初始猜測值由模式預報到當時的值給定。由公式(12)可推知氣壓擾動量及其水平平均的差值( $P' - \langle P' \rangle$ )，如公式(15)。

$$P' - \langle P' \rangle = (\pi' - \langle \pi' \rangle) \frac{P_0}{R} \left( \frac{P_{00}}{P_0} \right)^{R/c_p} \quad (17)$$

(13)、(14)式移項後，

$$\theta' - \langle \theta' \rangle = \theta'_c - \langle \theta'_c \rangle - \{0.61[q'_v - \langle q'_v \rangle - (q_c - \langle q_c \rangle)]\} \theta_0 \quad (18)$$

$$T' - \langle T' \rangle = \frac{P_0}{P_{00}}^{R/c_p} \left[ \theta' - \langle \theta' \rangle + \frac{R}{C_p} \frac{\theta_0}{P_0} (P' - \langle P' \rangle) \right] \quad (19)$$

將 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 、 $\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle$  帶入(15)~(17)式即可求得每一層氣壓擾動場與氣壓擾動平均場的差( $P' - \langle P' \rangle$ )和溫度擾動場與溫度擾動平均場的差( $T' - \langle T' \rangle$ )。

2.在模擬區域內若有一點 GPS RO 反演的垂直剖線之氣壓(P)和溫度(T)和已知基本場的氣壓、溫度( $P_0$ 、 $T_0$ )，利用(18)、(19)式：

$$P' = P - P_0 \quad (20)$$

$$T' = T - T_0 \quad (21)$$

求得氣壓、溫度的擾動場( $P'$ 、 $T'$ )。又 $P' - \langle P' \rangle$ 、 $T' - \langle T' \rangle$ 為已知，代入已知的 $P'$ 、 $T'$ ，即可推知此點每一層的氣壓、溫度擾動場的平均( $\langle P' \rangle$ 、 $\langle T' \rangle$ )。知道每層的 $\langle P' \rangle$ 、 $\langle T' \rangle$ ，可以求得其他點的氣壓、溫度擾動場( $P'$ 、 $T'$ )。再代回公式(18)、(19)，在三維網格點上剩下未知氣壓、溫度的值即可求出。

3.判斷網格點的是否達飽和依據三個判別條件:達舉升凝結高度、大於雷達回波的門檻值、高於垂直速度門檻值。符合前面三個條件方可視為達飽和進行水汽調整。

$$H \approx \left( \frac{T - T_d}{8} \right) \quad (22)$$

公式(20)由 Rogers and Yau(1989)提出，根據地表溫度與露點溫度的差

值可估算出舉升凝結高度  $H$ (單位:km)。其中露點溫度計算方式:

$$T_d = \frac{B}{\ln\left(\frac{A\varepsilon}{(q_{v0}P)_{sfc}}\right)} \quad (23)$$

常數  $A = 2.533 \times 10^8 \text{ kpa}$  ,  $B = 5.417 \times 10^3 \text{ K}$  ,  $\varepsilon = 0.622$  。

4.對於判斷已達飽和的網格點，利用此網格點反演溫度計和上述提到的常數  $A$ 、 $B$  代入(22)、(23)式計算飽和水汽壓( $e_s$ )、飽和水汽混和比( $q_{vs}$ )，最後可推知飽和水汽擾動量( $q'_v$ ，24 式):

$$e_s(T) = A \cdot e^{-B/T} \quad (24)$$

$$q_{vs} = \varepsilon \frac{e_s}{P} \quad (25)$$

$$q'_v = q_{vs} - q_{v0} \quad (26)$$

將推知的飽和水汽壓擾動量帶回公式(13)，重複步驟 1~4，可計算新的溫度擾動場與溫度擾動平均場的差( $T' - \langle T' \rangle$ )，求得新的溫度擾動場、溫度場的三維分布，判斷是否達舉升凝結高度(LCL)，最後對達飽和的點求出新的飽和水汽擾動量，此過程即為疊代，使飽和水汽場擾動量與溫度場達到設定門檻值，代表結果收斂、完成水汽調整步驟，可得到最佳水汽混和比在三維的空間分布。

經過熱動力反演、水汽場調整後同化到模式當中，探討此方法對於模式初始場改進的程度。

## 第三章 個案介紹

### 3-1 2008 年西南氣流實驗簡介

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 日進行西南季風環境下豪雨個案密集觀測和分析診斷研究，實驗地點為南中國海北部和台灣本島及臨近海域。

台灣位於西太平洋西側和亞洲大陸東南方處在副熱帶地區且四面環海，在暖季受西南季風影響甚深。夏季以梅雨、颱風兩種天氣型態含有完整的中尺度對流系統系統，在有利於中尺度天氣系統發展的大尺度雲帶下，或位於鋒前暖區不斷生成發展，易形成許多雨帶與多個降水中心，帶來的雨量常使台灣各地發生重大災情。實驗目的是為了改進鄉鎮或集水區 0 到 36 小時以內的定量降雨估計與預報能力，使防救災發揮到最大效用。要正確模擬出豪大雨降水區，較為準確的西南氣流描述是不可或缺的條件之一，有助於確立模式初始場。

### 3-2 綜觀天氣

本研究模擬個案時間於 IOP3 內，IOP3 密集觀測時間為 2008 年 5 月 29

日 21:00UTC 到 2008 年 5 月 31 日 21:00UTC。從圖 3.1. a 綜觀地面天氣圖看到 5 月 30 日 00UTC 有一滯留鋒面在台灣北部外海上空，30 日 06:00UTC(圖 3.1. b)此滯留鋒面移入台灣北部上空，30 日 12:00UTC(圖 3.1. c)鋒面滯留在台灣北部，30 日 18:00UTC(圖 3.1. d)鋒面向南移到台灣中部。MM5 模擬的 Natural run(後簡稱 NTR)雷達回波在 30 日 11:00UTC(圖 3.2. a)對流胞 B 生成，到 11:40UTC(圖 3.2. b)持續增強並和對流胞 A 合併，對流系統由西向東緩慢移動。12:40UTC (圖 3.2. c)對流系統分裂為兩個(A 和 B)。13:00UTC(圖 3.2. d)對流胞 B 分為兩個對流系統，移動方向的前方為 B 後面為 C，對流胞 B 持續影響基隆台北一帶。13:30UTC(圖 3.2. e)對流胞 B 和 C 合併，此時對流系統較對流胞 A 和 B 合併時的窄細(圖 3.2. b)。13:50UTC(圖 3.2. f)再度分裂為對流胞 B'和 C'，隨滯留鋒停在台灣的時間越長，新生的對流胞 D 與對流胞 B'和 C'陸續移入使台灣中北部降雨。

## 第四章 檢驗方法

本研究在 OSSE(Observation System Simulation Experiments)架構下進行，模擬一組較好的結果作為「虛擬真實大氣」(NTR)，其優點在於能與其他不同實驗模擬結果進行定量上的分析，評估實驗方法的可行性。

### 4-1 同化結果檢驗

同化結果的定量分析方法包含空間相關係數 SCC(Spatial Correlation Coefficient)、相對均方根誤差 RRMSE(Relative Root Mean Square Error)。

$$SCC(A) = \frac{\sum(A_r - \bar{A}_r)(A_t - \bar{A}_t)}{\sqrt{\sum(A_r - \bar{A}_r)^2 \sum(A_t - \bar{A}_t)^2}} \quad (27)$$

A 為任一氣象變數，如溫度、氣壓、回波場等，下標 r 為實驗組模擬所得的數值，下標 t 則為 NTR 的數值， $\bar{A}$  為模擬區域內三維空間的平均值，如此一來就能計算出實驗組與 NTR 的相關係數。SCC 數值分布為-1~1，當數值越接近 1 即與 NTR 越相似為正相關。

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum(A_r - A_t)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum A_t^2}} \quad (28)$$

N 為模擬區域內三維空間的網格點總數，A 為任一氣象變數，如溫度、氣壓、回波場等，下標 r 為實驗組模擬所得的數值，下標 t 則為 NTR 的數



值。RRMSE 數值分布在 0 以上，越接近 0 代表與 NTR 相對誤差越小，若數值越大則表示與 NTR 的相對誤差越大。

#### 4-2 定量降水預報檢驗

突如其來的劇烈對流系統，常使市區、山區降下超大豪雨的雨量，使其淹水，嚴重甚至發生土石流，造成人民生命財產上的安危，短時間內的定量降水估計 QPF(Quantitative precipitation forecast)在防災與減災上扮演重要的角色。目前較多人使用公正預兆得分 ETS(Equitable threat score)(Schaefer, 1990；也被稱為 Gilbert skill score)與偏離指數 Bias 做為定量降水預報檢驗的指標，以下就 ETS 與 Bias 進行介紹。

將降雨事件做分類時(表 4.1)會設定雨量門檻值，當雨量大於所設門檻值視為” yes”，雨量小於門檻值為” no”。降雨事件可分為 a:預報和觀測皆大於雨量門檻值，稱之達到；b:預報大於門檻值，觀測小於門檻值，即為錯誤預報；c:觀測大於門檻值，預報小於門檻值，misses；d:觀測和預報皆低於門檻值。ETS 表示如下：

$$ETS = \frac{a - a_r}{a + b + c - a_r} \quad (29)$$

$$a_r = \frac{(a + b)(a + c)}{a + b + c + d} \quad (30)$$

其中 $a_r$ 代表隨機可正確預報降雨的次數。ETS 排除模式預報隨機猜中降水的

因素檢驗其得分，當 ETS 越高代表預報與觀測越接近。另外 Bias 所指的是預報降雨有達到門檻值與觀測有達到降雨門檻值的比值：

$$\text{Bias} = \frac{a + b}{a + c} \quad (31)$$

當 Bias 小於 1 時，表示模式預報低估降雨次數；大於 1 時，表示模式預報高估降雨次數。

## 第五章 MM5 模擬與預報結果分析

本研究使用的模式為 MM5 中尺度模式預報系統(The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model) 3-7-4 版，包含多重巢狀網格、非靜力動力平衡、四維變分同化、不同物理機制選項且快速的平行化運算功能。

### 5-1 模式設定

模式使用的三維空間網格點數為 151×151×31，採單層網格，水平解析度為 4 公里；垂直為 sigma 座標設為 1.0, 0.997, 0.993, 0.989, 0.983, 0.976, 0.967, 0.956, 0.942, 0.927, 0.910, 0.886, 0.860, 0.83, 0.796, 0.756, 0.714, 0.668, 0.620, 0.570, 0.520, 0.47, 0.42, 0.37, 0.32, 0.27, 0.22, 0.17, 0.12, 0.08, 0.04, 0.00，共 31 層。積分時間間距為 9 秒。積雲參數化使用 Grell(1993)方法。另外，本研究當中沒有考慮地形。

### 5-2 同化資料

本研究的同化過程指在同化時間點上將同化雷達觀測區域內的 NTR 及熱動力反演的資料取代 non-NTR 資料，即吾人所謂的同化資料。

### 5-2-1 資料結合

同化資料後為避免數值差異過大造成梯度過大形成邊界，同化資料時以雷達為中心 150 公里內皆設 NTR 權重為 1，151 公里到 250 公里隨半徑越大 non-NTR 的權重越接近 1，NTR 權重越皆 0(兩者權重相加為 1)。當距離雷達中心的半徑超過 251 公里時，non-NTR 的權重皆為 1，如圖 5.1 所示。

### 5-2-2 調整方法

上述給予權重的方法雖能使置換資料較為平滑，若置換前後的資料平均值差異過大，置換後會產生許多擾動，因此需要對每一層 sigma 做平均值調整。第一步，求出每一層 non-NTR 和反演結果( $x_{retv}$ )的平均值差異：

$$\Delta_k = \langle x_{non-NTR} \rangle_k - \langle x_{retv} \rangle_k \quad (32)$$

$\Delta$ 為水平平均的差異量，下標  $k$  為模式中某一層垂直座標中的  $xy$  平面， $\langle x_{non-NTR} \rangle$ 為 non-NTR 水平平均， $\langle x_{retv} \rangle$ 為反演結果的水平平均。解出每層水平平均差異量後，加到各層每個網格點上可維持結構不變，即

$$x'_{retv} = x_{retv} + \Delta_k \quad (33)$$

加上水平平均差異量的新變數場 $x'_{retv}$ 總和平均和 non-NTR 總和平均值相等。經過水平平均值調整後，再經過上述權重調整方法能使置換資料更為平滑。經過測試後發現，如果需要同化溫度、氣壓、水汽混和比，這些變數在同

化前要做平均值調整，使得置換前後差異較小，才不會造成梯度過大模式無法模擬。

### 5-3 實驗設計與結果分析

利用 NCEP 每 6 個小時再分析場做為模式初始場進行模擬，NTR 模擬時間從 5 月 28 日 00UTC 到 5 月 31 日 00UTC，共模擬 72 小時；non-NTR 模擬時間為 5 月 30 日 05UTC 到 5 月 31 日 05UTC，共計 24 小時。兩組以不同的起始時間進行模擬，兩組皆將 5 月 30 日 11UTC 做為同化時間(表 5.1)。首先 NTR 5 月 30 日 11UTC 的資訊帶入熱力反演公式並假設當時有 GPS RO 反演出來的溫度及壓力的探空資料，GPS RO 觀測點經緯度設為北緯 25 度、東經 122 度(圖 5.2)，並以 06UTC 探空做為背景場，經過熱力反演及水汽調整後進行同化，同化後各組實驗皆預報 6 小時。

#### 5-3-1 實驗一:置換變數測試

以觀測變數如風場、回波場和熱力反演變數如溫度、壓力的配對組合找出置換哪些變數能使同化達到最佳效果，實驗組別如表 5.2。此 6 組實驗皆從 5 月 30 日 11UTC 同化後預報 6 個小時。

圖 5.3 為同化完成的分析場，可看到圖 5.3.d(UVW)、圖 5.3.f(UVWTP)和圖 5.3.h(TP)沒有同化包含 Qr 資訊的變數，所以回波與 non-NTR(圖 5.3.b)

一樣，其他有同化 Qr 另外三組(圖 5.3. c, e, g)，同化範圍內與 NTR(圖 5.3. a) 一樣。預報 30 分鐘時(圖 5.4)，所有同化的組別在台灣北部外海的回波有減弱趨勢，模式還在調整中。預報 60 分鐘(圖 5.5)，NTR 和 non-NTR(圖 5.5. a, b)主要差異在於東北外海回波的完整性，UVWQrTP 和 UVWTP 這兩組包含觀測和熱力資訊(圖 5.5. c, f)，對流系統發展較其他組別接近 NTR；而 UVW(圖 5.5. d)預報的降雨系統強度與位置和 NTR 差距大；UVWQr(圖 5.5. e)結果優於 UVW，但對流系統比起 NTR 較為零散且對流胞較小。預報 90 分鐘，UVWQrTP (圖 5.6. c)對流系統已經開始分裂，UVW 和 UVWTP(圖 5.6. d, f)對流系統仍持續維持，且與 NTR 較為接近(圖 5.6. a)，而 UVWQr(圖 5.6. e)逐漸發展，此時對流系統較為接近 UVWQrTP。預報 120 分鐘，UVWQrTP 和 UVW (圖 5.7. c, d)各對流胞強度減弱，UVWQr(圖 5.7. e)對流位置雖沒有完全正確，比前 30 分鐘的對流胞強度強，UVWTP(圖 5.7. f)強度持續維持但與 NTR 比較，其對流系統位置並不正確。累積 3 小時雨量部分，UVWQrTP、UVWTP(圖 5.8. c, f)兩組累積雨量的極大值較接近 NTR(圖 5.8. a)。同化 TP、QrTP 兩組不管在回波或者雨量，與 NTR 相差甚遠。

從三維空間相關係數(SCC)和相對均方根誤差(RRMSE)來看，UVWQrTP、UVW、UVWQr、UVWTP 四組在累積雨量(圖 5.9)和 U、V 風場(圖 5.10, 11)比現較佳，又以 UVWQrTP、UVWTP 兩組和 NTR 最接近。垂直速度和溫度方面(圖

5.12,13), UVWQrTP、UVWTP 兩組和 NTR 較為相似。回波(圖 5.14)則為 UVWQrTP 和 NTR 差距較小。

定量降水檢驗的部分,計算雨量區域如圖 5.15 所示,為整個模擬區域。圖 5.15 到 5.17 則是依據不同雨量門檻值所畫的累計 3 小時雨量圖。圖 5.18 底部橫座標為雨量門檻值(單位:mm),直座標數值代表各組實驗的 ETS 和 Bias 值。門檻為 2 和 4mm 時(圖 5.18),UVWQrTP、UVW、UVWQr、UVWTP 得分皆在 0.3 以上且高於 non-NTR(在台灣根據其他學者論文中算出的 ETS 大約在 0.2~0.3),且 3 小時累積雨量為 2mm 以上的圖 5.15 和累積雨量 4mm 以上圖 5.16 的(c)、(d)、(e)、(f)也比較接近 NTR(圖 5.15.a、圖 5.16.a),但由 Bias 可看出各組預報降雨都有低估的情形;圖 5.17 門檻值為 6mm 時,雖然各組累積雨量不顯著,仍然以 UVWQrTP、UVW、UVWTP(圖 5.17.c, d, f)降雨位置較接近 NTR(圖 5.17.a),其中 UVWTP(圖 5.17.f)累積雨量的位置和範圍最接近,因此在 ETS 門檻值為 6mm 的得分最高(圖 5.18)。

由雷達回波圖、三維空間相關係數、均方根誤差、定量降水檢驗的整體分析得知,同化 U、V、W 風場、回波場和經由熱力反演得知的氣壓和溫度,能使預報結果最接近 NTR。

### 5-3-2 實驗二:同化雷達個數與範圍測試

此實驗主要探討同化雷達個數多寡和範圍對同化後預報的影響。參考實驗一分析結果以 UVWQrTP 這組結果最好，作為置換變數的依據。測試組別如表 5.3，第一欄為同化雷達的名稱，第二欄到第四欄分別設計不同範圍。參考圖 5.1，以雷達為中心 NTR 權重等於 1，隨距離雷達中心越遠、半徑越大、顏色越淺，NTR 權重由 1 往 0 慢慢遞減。以 150NTR100r 為例，可拆成” 150NTR” 和” 100r”。150NTR 是指距離雷達中心 150 公里以內 NTR 的權重皆為 1，也就是圖 5.1 顏色最深的區域半徑為 150 公里；100r 代表 NTR 權重為 1(non-NTR 權重為 0)和 NTR 權重為 0(non-NTR 權重為 1)之間距離 100 公里，隨半徑越大 NTR 權重由 1 到 0 遞減， non-NTR 權重由 0 到 1 遞增，即圖 5.1 深藍慢慢變成淺藍的區域半徑為 100 公里，也就是整個同化區域的半徑為 250 公里，200NTR100r(同化半徑 300 公里)和 100NTR100r(同化半徑 200 公里)以此類推。

從 6 小時回波場相關係數來看(圖 5.19)，同化雷達個數較少的兩組實驗 Exp2-2、Exp. 2-3(圖 5.19. b, c)，相關係數曲線在前 3 小時的預報，不同同化半徑的結果差異大，而同化雷達個數 3 座以上的實驗 Exp2-4、Exp2-5，前 3 小時不同同化半徑彼此的結果差異小(圖 5.19. d, e)。同樣同化 3 座雷達的兩組實驗 Exp. 2-1(五分山、清泉崗、七股，圖 5.19. a)比 Exp. 2-4(五分山，清泉崗、花蓮，圖 5.19. d)前 3 小時不同同化半徑之間差異大是因為 Exp2-4 雷達觀測區域覆蓋主要對流系統，對流系統主要影響範圍在台灣中



北部、中北部及東北部外海。單獨比較一座雷達 Exp2-3(圖 5.19. c)和四座雷達 Exp2-5(圖 5.19. e)兩個結果可以發現，預報到 120 分鐘以 Exp2-5 結果優於 Exp2-3。圖 5.20 預報 6 小時累積雨量的相關係數曲線，也發現同化雷達個數少的 Exp. 2-2(清泉崗、花蓮，圖 5.20. b)，三種不同同化半徑彼此的結果差異大，雷達觀測對流系統的覆蓋區域相對低於 Exp2-3(五分山，圖 5.20. c)，因此 Exp2-3 不同同化半徑彼此差異會小於 Exp2-2。比較一座雷達 Exp2-3(圖 5.20. c)和四座雷達 Exp2-5(圖 5.20. e)可以看出，預報第 1 小時以 Exp2-5 結果優於 Exp2-3。

以同化清泉崗、花蓮雷達資料的實驗組別 Exp. 2-2 為例，圖 5.21 為三種不一樣同化半徑設定的同化區域示意圖，圖 5.22、圖 5.23 分別為預報 60 分鐘和 120 分鐘的雷達回波圖，三張圖互相比照可以發現，圖 5.21. c 的同化區域沒有涵蓋圖 5.22. a 所有天氣系統，預報 60 分鐘的圖 5.22. d 和預報 120 分鐘的圖 5.23. d 在台灣北部外海的回波有缺口產生。視不同的天氣系統、同化的雷達個數、同化的區域大小，當同化區域及雷達個數使涵蓋的天氣系統越多，則同化結果越能接近 NTR。

從檢驗定量降雨預報的角度，同化個數少且沒有完全包含對流系統區域的 Exp. 2-2(同化清泉崗、花蓮雷達資料)的 ETS(圖 5.24. a)，三種不同同化半徑彼此間差異大，而同化雷達個數多且涵蓋對流系統的 Exp. 2-5(同化五分山、清泉崗、七股、花蓮雷達資料，圖 5.25. a)，不同同化半徑間的

ETS 得分差異比  $\text{Exp}2-2$  的差異小，也就是當雷達個數越多，對同化半徑敏感度較低。

綜合以上結果得知，同化雷達個數越多且覆蓋對流系統的資料量越多時，同化區域的半徑大小對預報的結果影響越小；當同化雷達個數越少、覆蓋對流系統的資料量越少、同化區域的半徑越大，預報結果越能接近真實對流系統。

## 第六章 結論與未來展望

### 6-1 結論

以 GC78 提出的熱力反演方法結合雷達觀測、GPS RO 反演的溫度、壓力反演出三維空間的溫度和壓力場，經由水汽調整後同化到模式當中。根據不同的實驗設計探討對模式預報和定量降水預報的影響。

實驗一：置換變數的測試，目的在於找出置換哪些觀測和熱力反演變數預報的表現會最好。根據雷達回波、相關係數、均方根誤差、定量降雨檢驗的結果整體而言，以 UVWQrTP 與 NTR 最接近。

實驗二：置換雷達區域及權重給予的測試，探討同化不同雷達個數和給予不同的同化區域半徑對預報的影響。從回波場和累積雨量的相關係數與均方根誤差的結果發現同化雷達個數少，不同同化區域半徑結果差異大，同化雷達個數 3 座以上，對不同同化區域半徑的敏感度不高。另一方面，若同化雷達個數少且同化區域沒有完全包覆對流系統，同化區域半徑越大結果越好；同化雷達個數多且同化區域包含整個對流系統，同化區域半徑對預報結果影響較小。

### 6-2 未來展望

找出熱動力反演經過水汽調整的水氣混和比經由同化後，使模式預報的回波減弱的原因與解決辦法。在雷達觀測的區域內引入一般探空、投落送等資料，比較引入 GPS RO 資料的差異。由於本實驗測試皆在移除地形情況下，未來將加入地形，為實際模擬做準備，且本研究假設皆在 OSSE 下進行模擬，接下來會以真實的 GPS RO 資料和雷達觀測資料進行熱力反演、水汽調整，同化到模式當中探討其預報結果。

## 參考文獻

- 尤心瑜、廖宇慶，2011：使用都卜勒氣象雷達資料改善模式定量降雨預報之可行性研究—以模擬資料測試之實驗結果。大氣科學，第 39 期，1–24。
- Gal-Chen, T. J., 1978: A method for the initialization of the anelastic equations: Implications for matching models with observations. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 587–606 .
- Kuo, Y.-H., T.-K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes, 2004: Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 507–531.
- Kuo, Y.-H., W. S. Schreiner, J. Wang, D. L. Rossiter, Y. Zhang, 2005: Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L05817, doi:10.1029/2004GL021443.
- Kursinki, E. R., G. A. Hajj, K. R. Hardy, L. J. Romans, and J. T. Schofield, 1995 : Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2365–2368.
- Leroy, S.S., 1997: Measurement of geopotential heights by GPS radio occultation. *J. Geophys. Res.*, **102**, 6971–6986.
- Liou, Y.-C., 2001 : The derivation of absolute potential temperature perturbations and pressure gradients from wind measurements in three-dimensional Space. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 577–590.
- \_\_\_\_\_, T.C. Chen Wang, and K.S. Chung, 2003: A three-dimensional variational approach for deriving the thermodynamic structure using Doppler wind observations—An application to a subtropical squall line. *J. Appl. Meteor.*, **42**,

1443–1454.

Roux, F., 1985: Retrieval of thermodynamic fields from multiple-Doppler radar data using the equations of motion and the thermodynamic equation. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 2142–2157.

\_\_\_\_\_, 1988: The West African squall line observed on 23 June 1981 during COPT 81: Kinematics and thermodynamics of the convective region. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 406–426.

Roux, F., and J. Sun, 1990: Single-Doppler observations of a West African squall line on 27-28 May 1981 during COPT 81: Kinematics, thermodynamics and water budget. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1826–1854.

Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570–575.

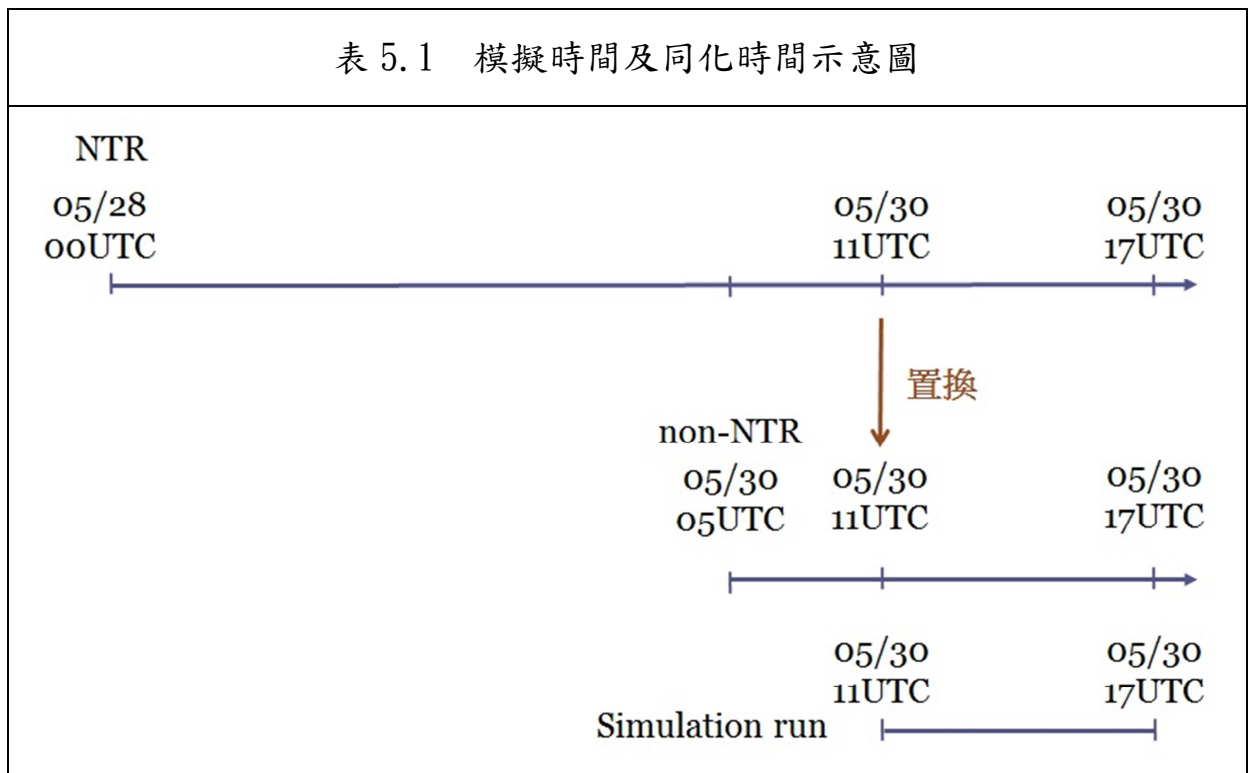
Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, Y.-H. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R.A. Anthes, S. Businger, and K. Trenberth, 1996: GPS sounding of the atmosphere: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 19–40.

Yunck, T.P., G.F. Lindal, and C.-H. Liu, 1988: The role of GPS in precise Earth observation, *IEEE Position Location and Navigation Symposium(PLANS 88)*, 251–258.

表 4.1 降雨事件之機率分類

		Observed	
		yes	no
Forecast	yes	a	b
	no	c	d

表 5.1 模擬時間及同化時間示意圖

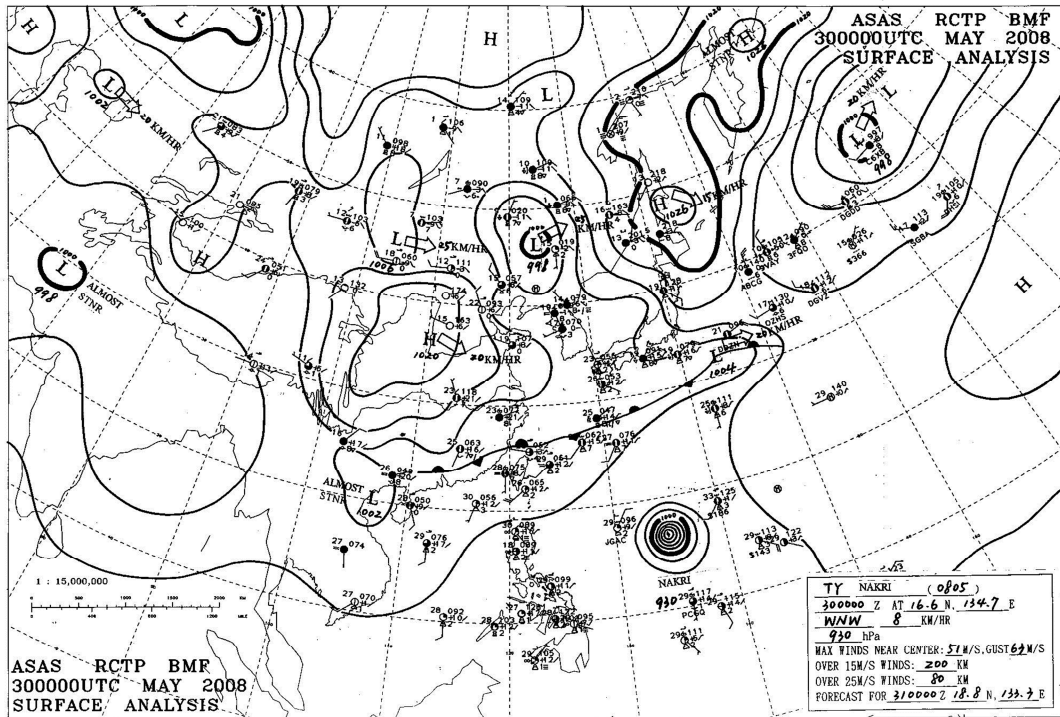


實驗組別	同化變數名稱
Exp. 1-1	UVWQrTP
Exp. 1-2	UVW
Exp. 1-3	UVWQr
Exp. 1-4	UVWTP
Exp. 1-5	QrTP
Exp. 1-6	TP

置換雷達	範圍設定		
	150NTR100r	200NTR100r	100NTR100r
五分山、清泉崗、七股	Exp. 2-1-1	Exp. 2-1-2	Exp. 2-1-3
清泉崗、花蓮	Exp. 2-2-1	Exp. 2-2-2	Exp. 2-2-3
五分山	Exp. 2-3-1	Exp. 2-3-2	Exp. 2-3-3
五分山、清泉崗、花蓮	Exp. 2-4-1	Exp. 2-4-2	Exp. 2-4-3
五分山、清泉崗、七股、花蓮	Exp. 2-5-1	Exp. 2-5-2	Exp. 2-5-3



(a)



(b)

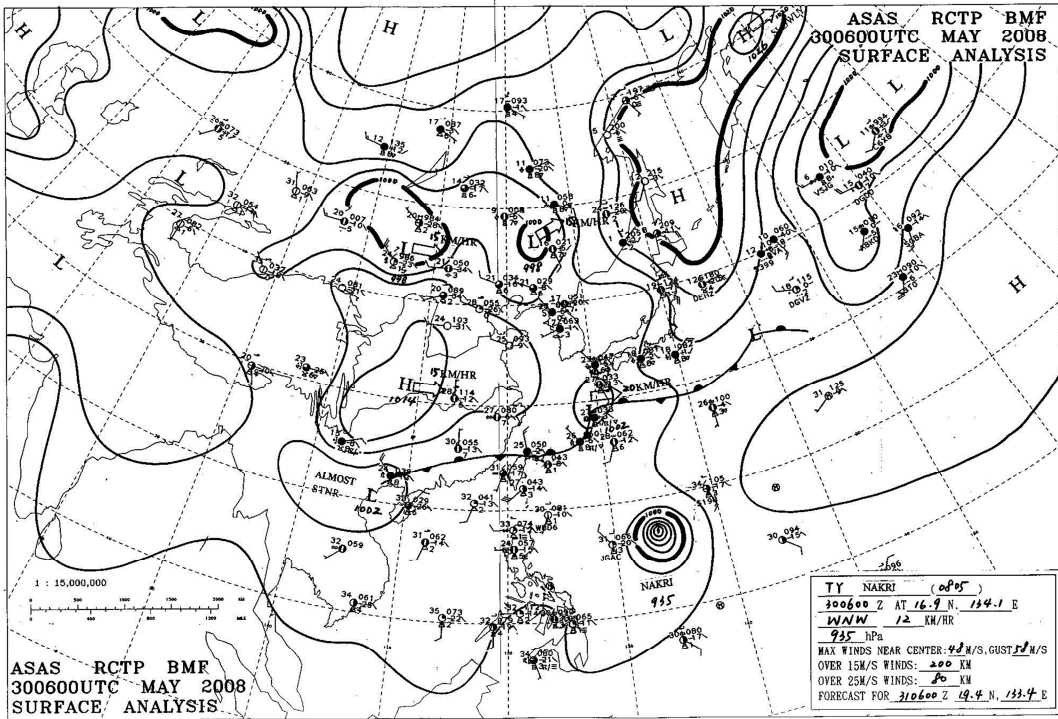
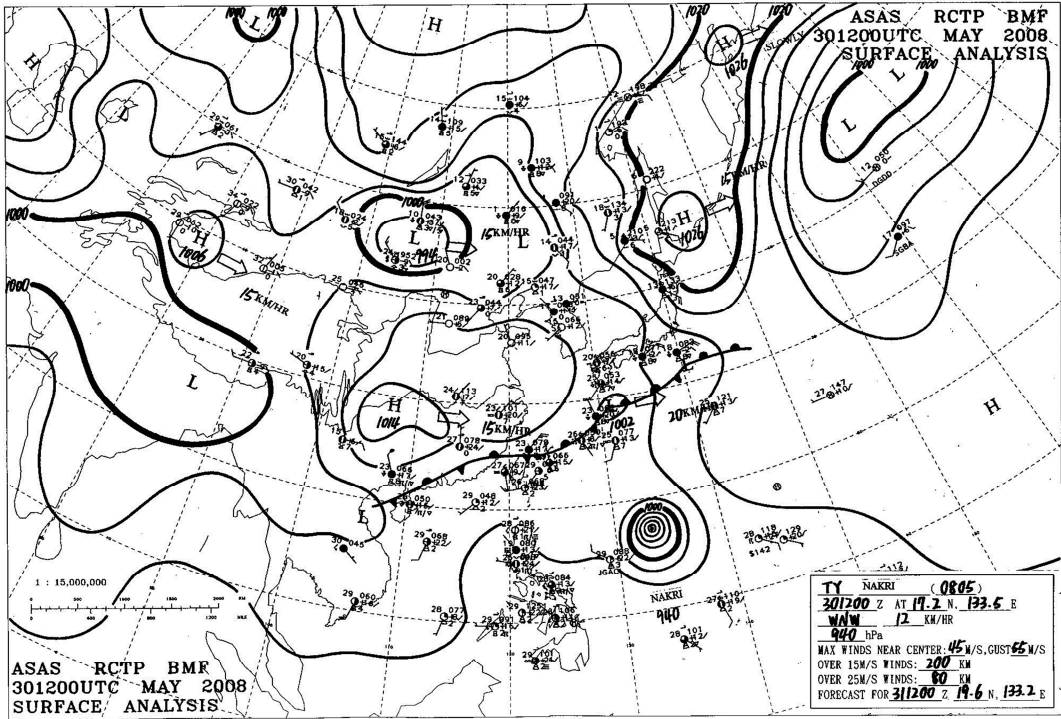


圖 3.1 2008 年 5 月 30 日 綜 觀 地 面 天 氣 圖 (a)00UTC (b)06UTC

(c)



(d)

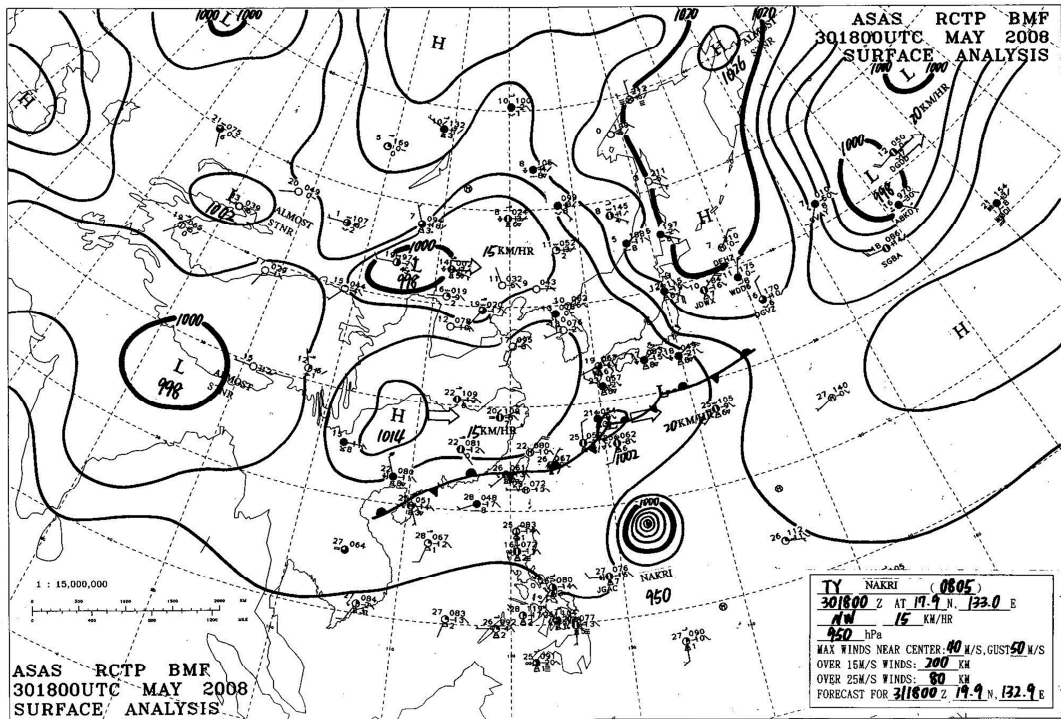
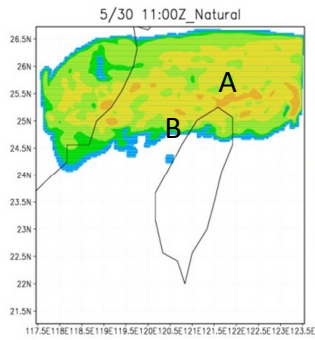
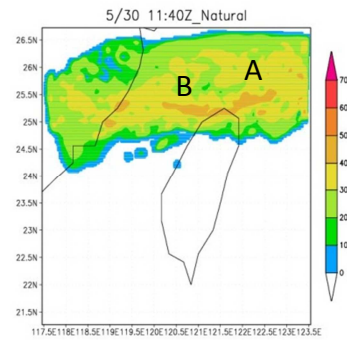


圖 3.1 2008 年 5 月 30 日綜觀地面天氣圖 (c)12UTC (d)18UTC。

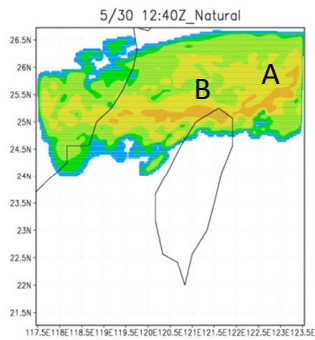
(a)



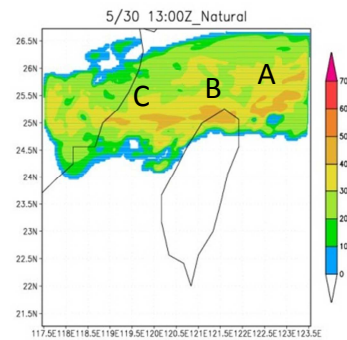
(b)



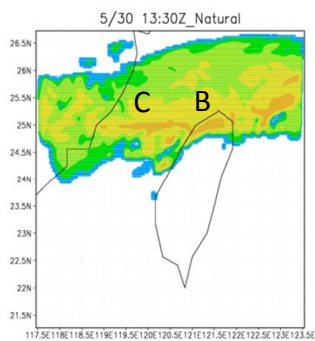
(c)



(d)



(e)



(f)

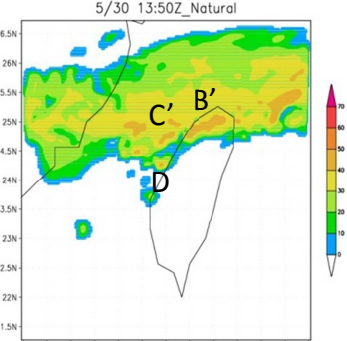


圖 3.2 MM5 模擬 2008 年 5 月 30 日 NTR 的雷達回波(a)11:00UTC (b)11:40UTC (c)12:40UTC (d)13:00UTC (e)13:30UTC (f)13:50UTC。

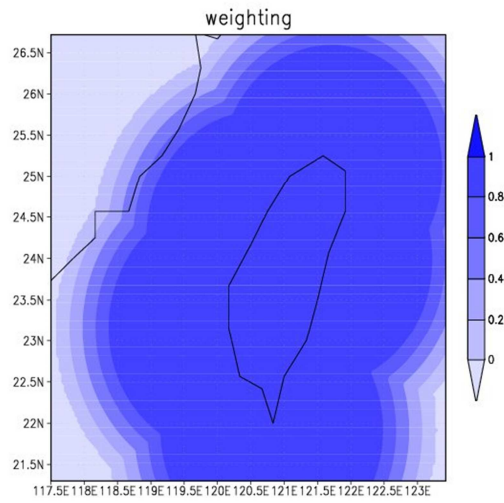


圖 5.1 置換資料以雷達為中心，隨半徑越大 NTR 權重遞減的分布圖，顏色越深(淺)NTR 權重越大(越小)、non-NTR 權重越小(越大)。

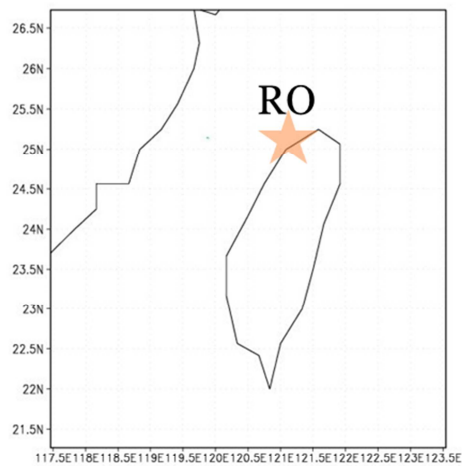
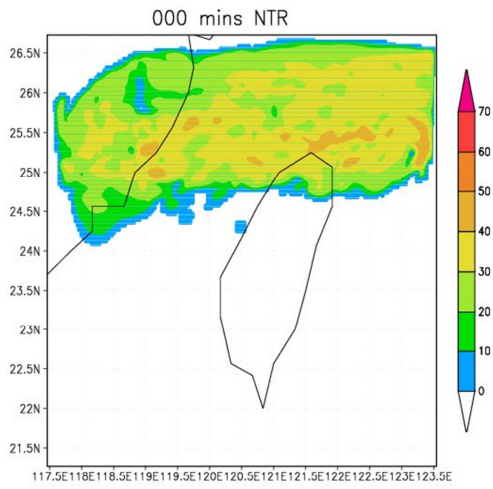
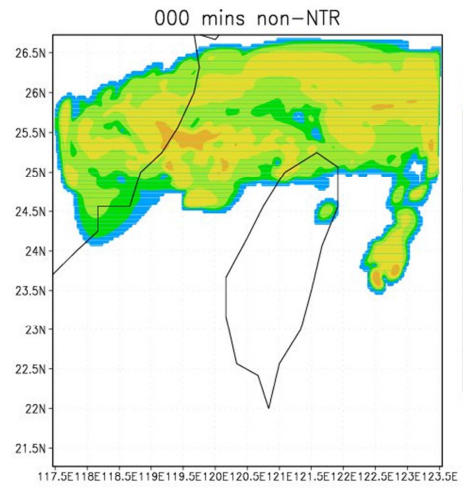


圖 5.2 GPS RO 觀測點。

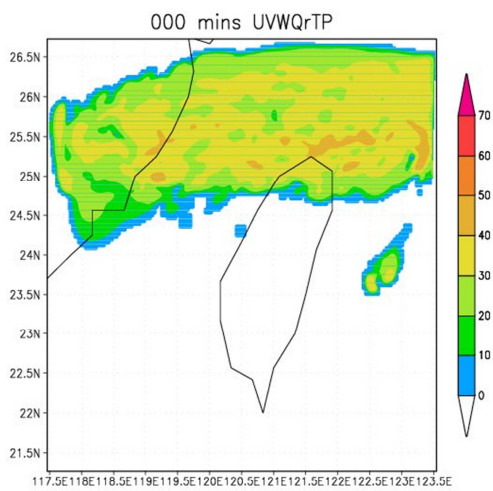
(a)



(b)



(c)



(d)

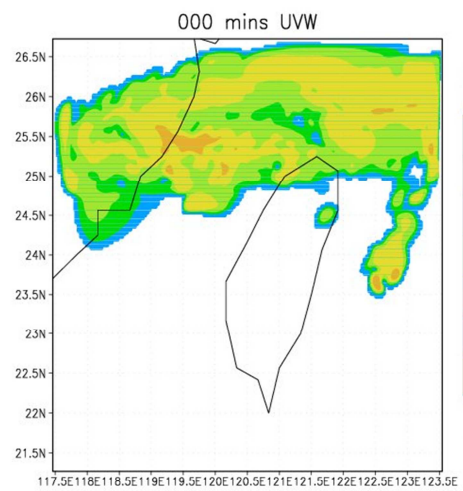
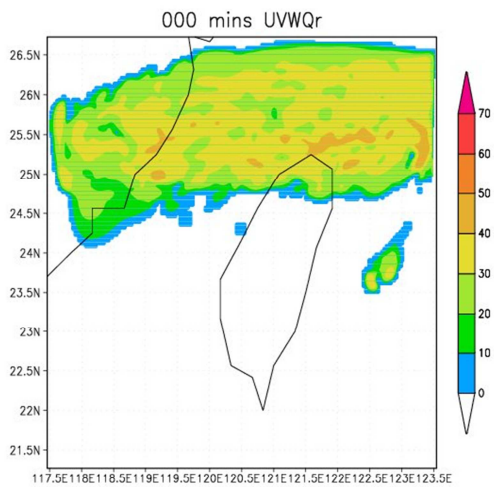
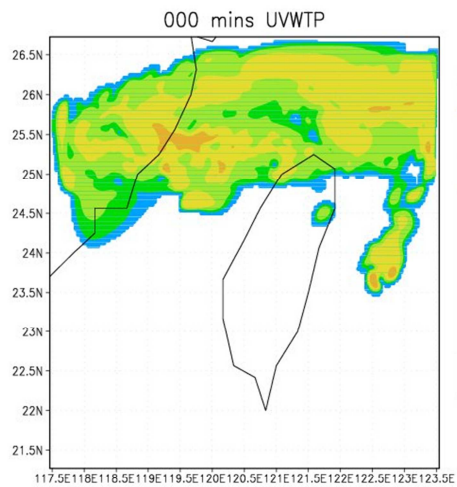


圖 5.3 同化完成的回波分析場 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW

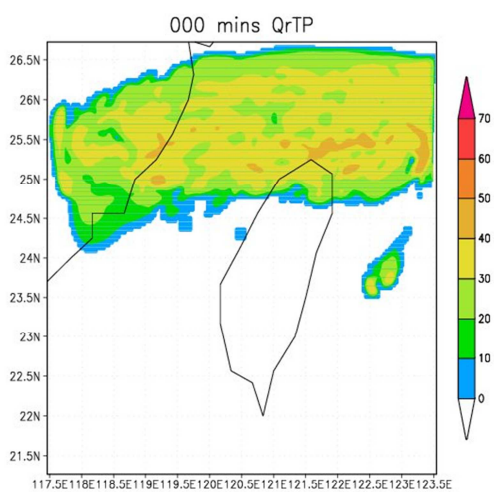
(e)



(f)



(g)



(h)

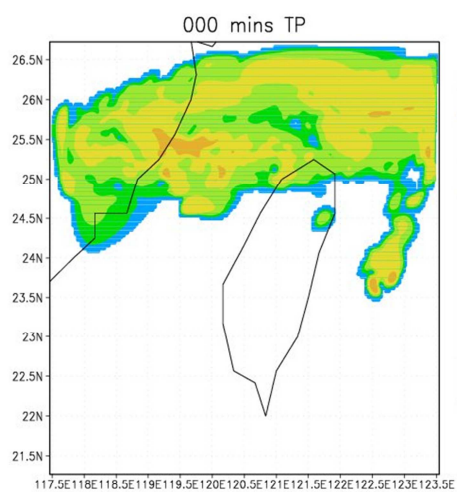
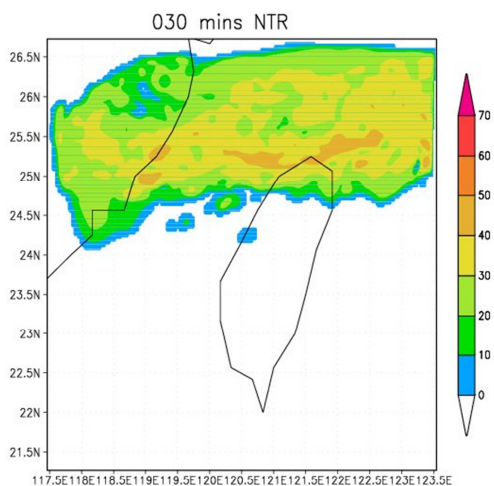
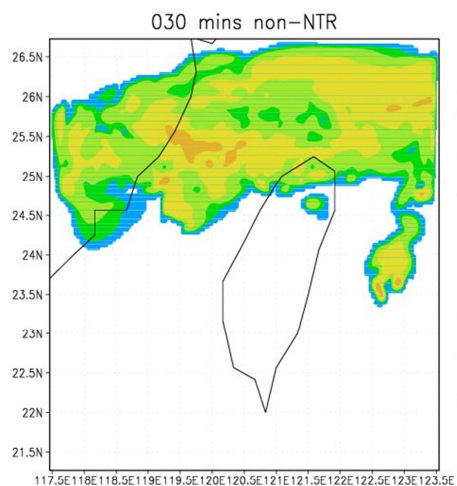


圖 5.3 同化完成的回波分析場 (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

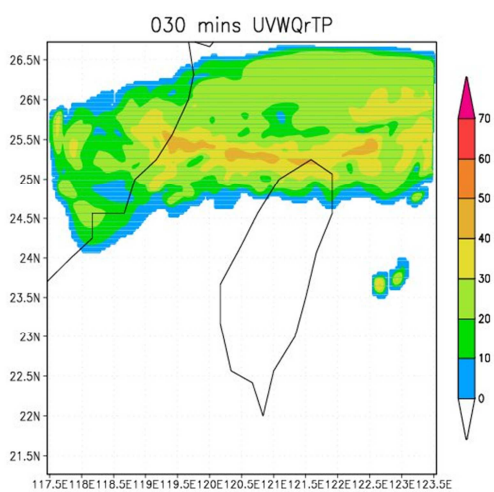
(a)



(b)



(c)



(d)

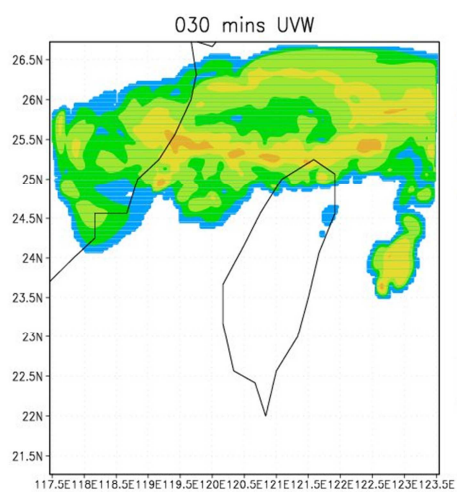
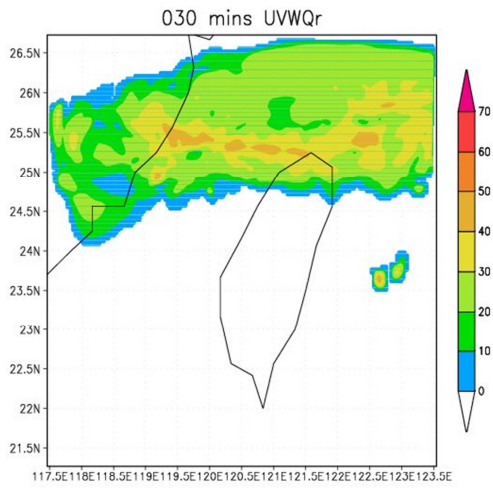
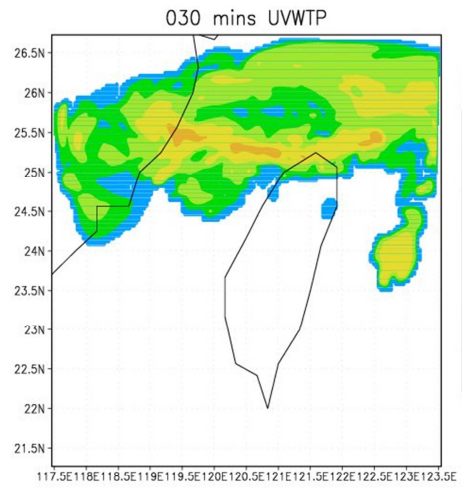


圖 5.4 預報 30 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW

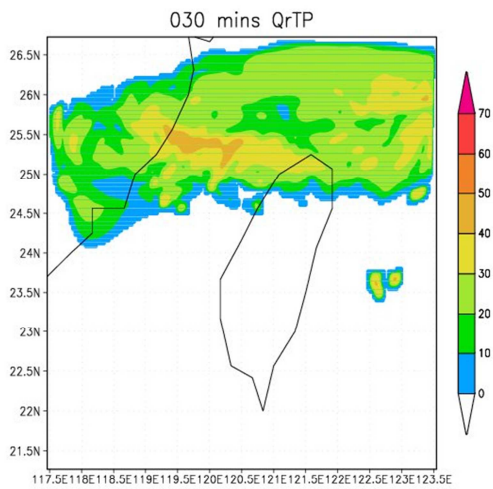
(e)



(f)



(g)



(h)

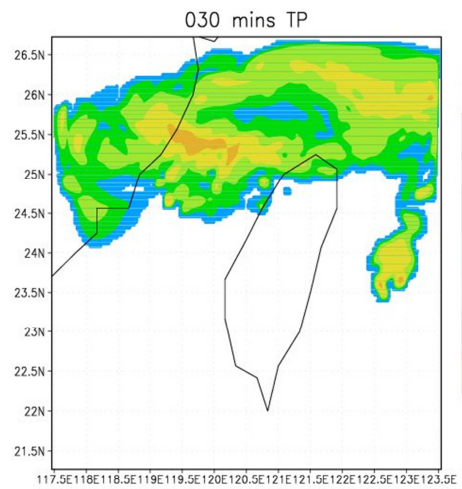
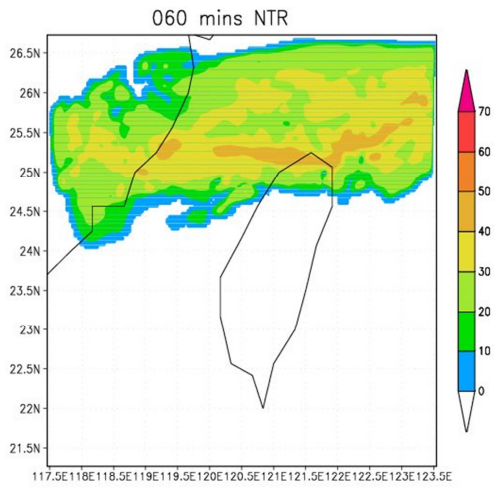


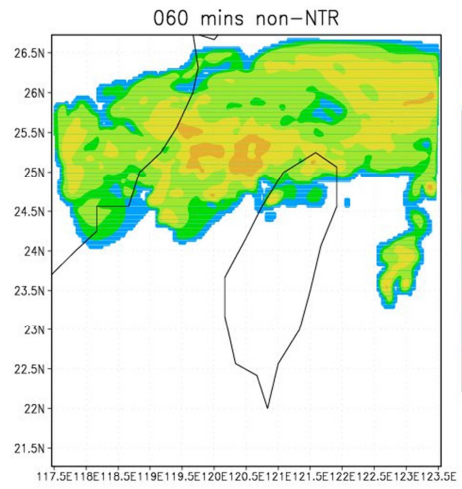
圖 5.4 預報 30 分鐘的回波分析場(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。



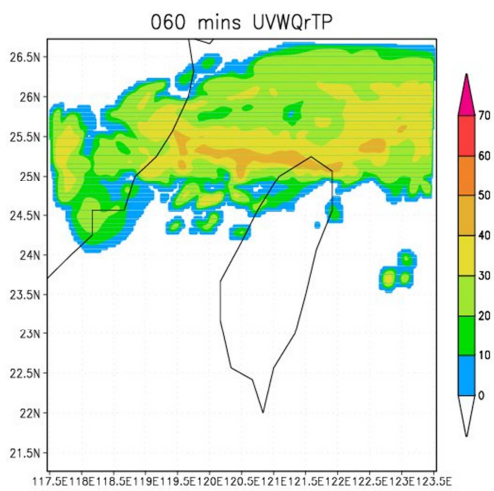
(a)



(b)



(c)



(d)

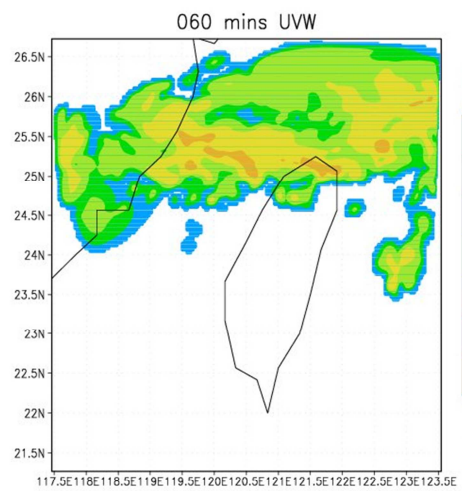
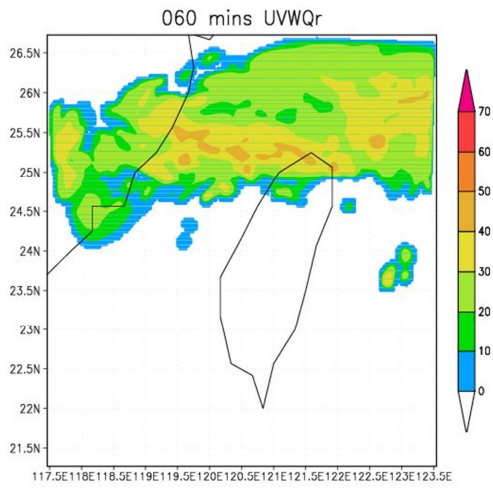
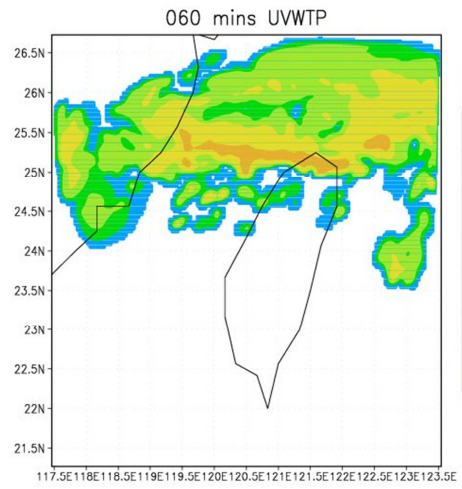


圖 5.5 預報 60 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW

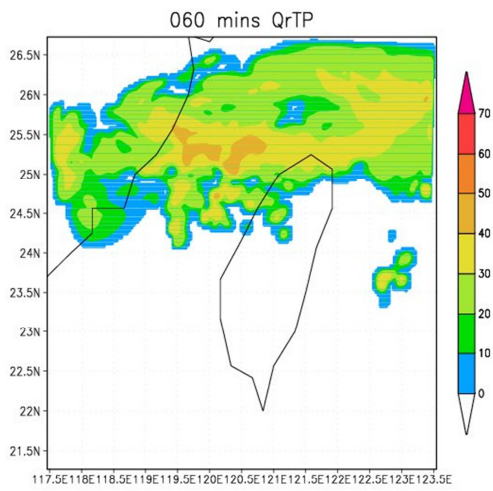
(e)



(f)



(g)



(f)

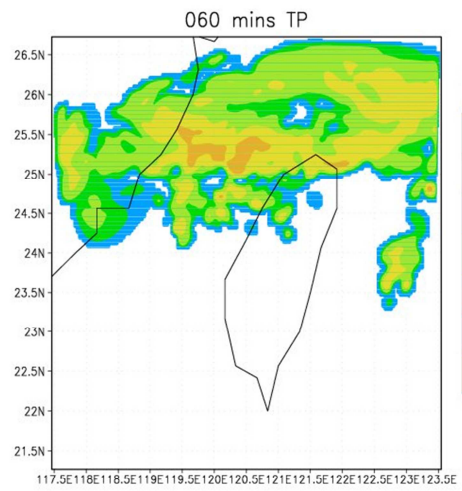
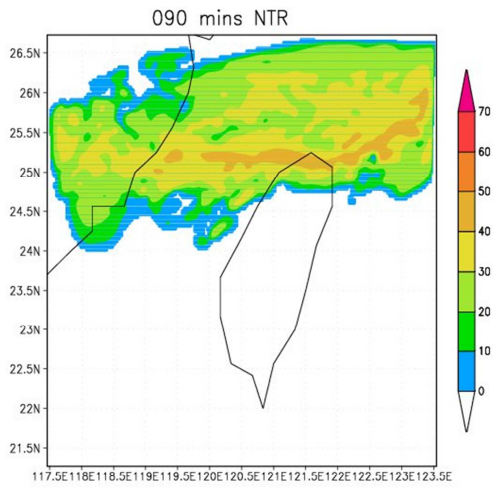
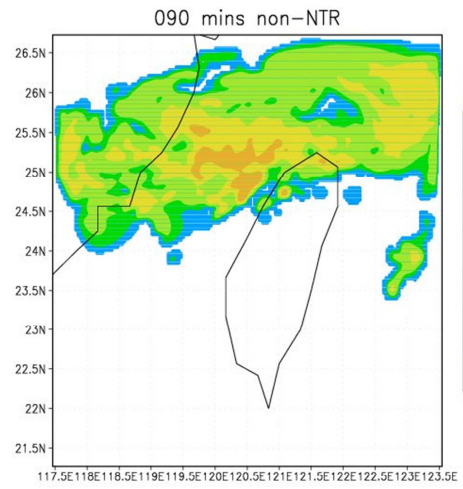


圖 5.5 預報 60 分鐘的回波分析場(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

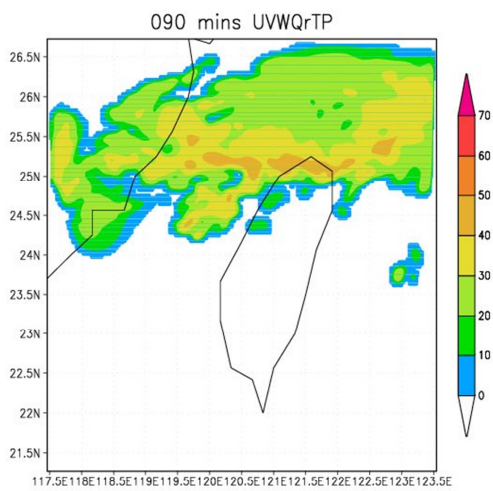
(a)



(b)



(c)



(d)

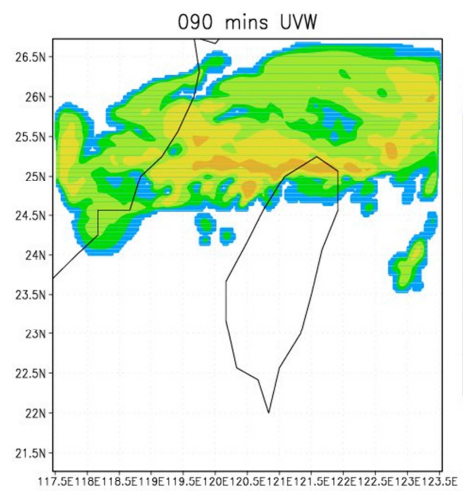
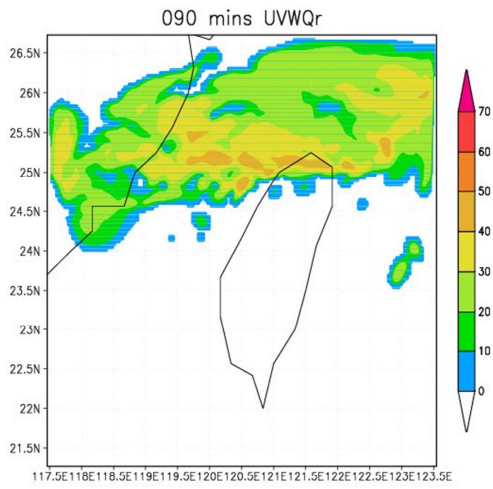
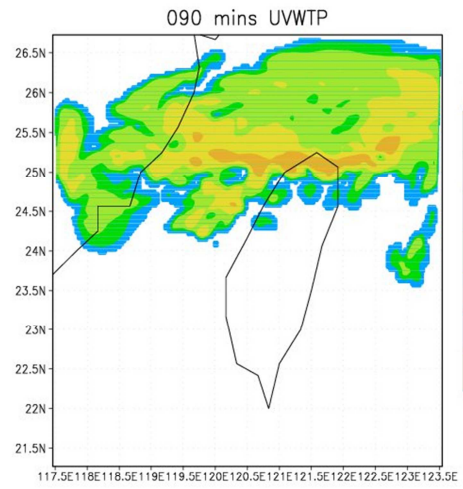


圖 5.6 預報 90 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW

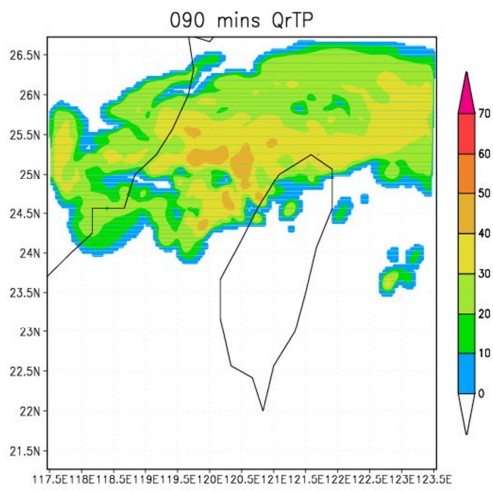
(e)



(f)



(g)



(h)

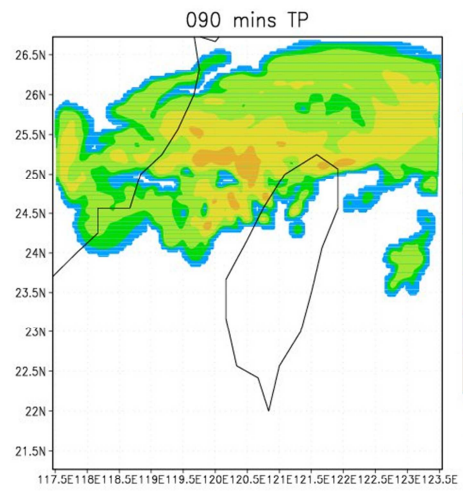
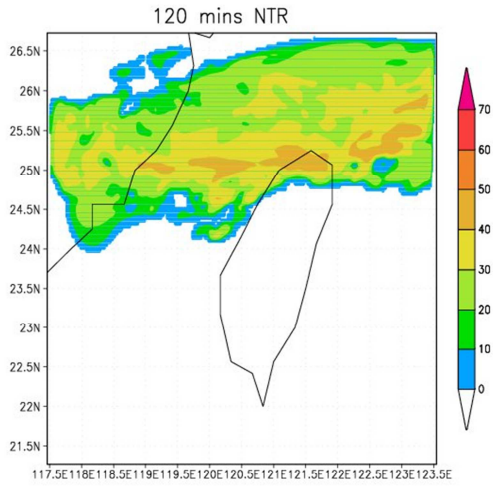
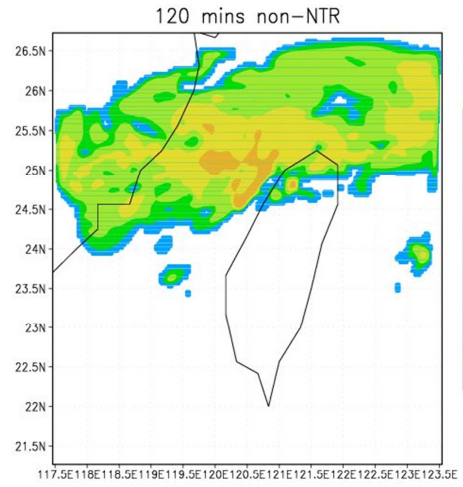


圖 5.6 預報 90 分鐘的回波分析場(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

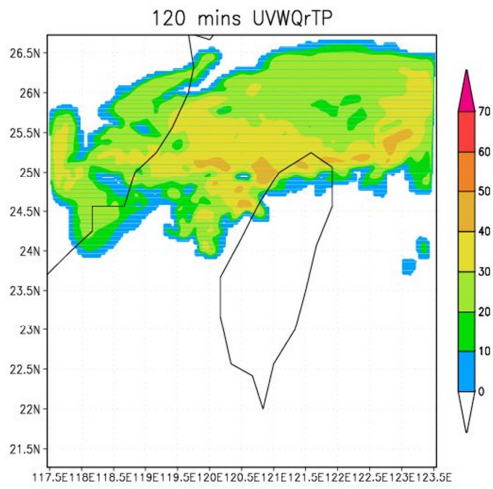
(a)



(b)



(c)



(d)

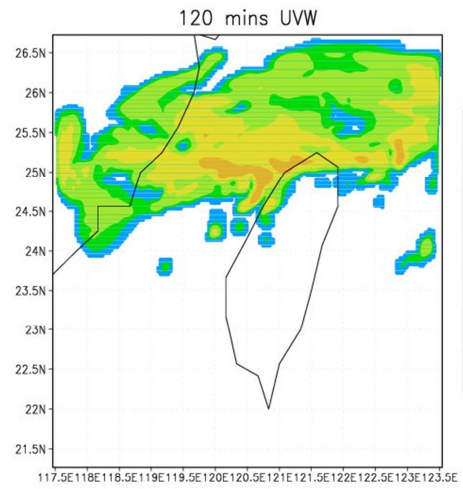
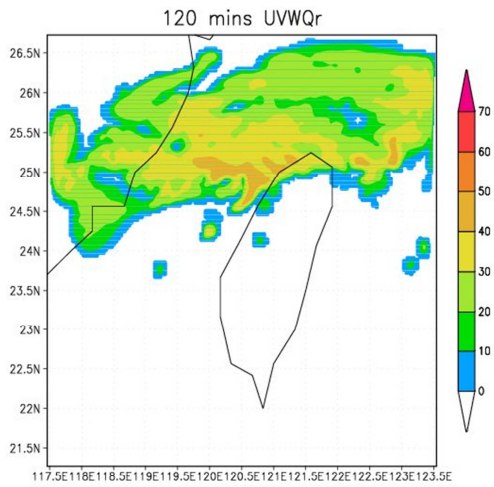
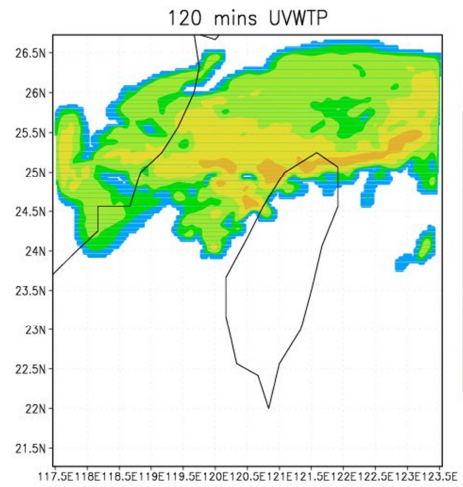


圖 5.7 預報 120 分鐘的回波分析場(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW

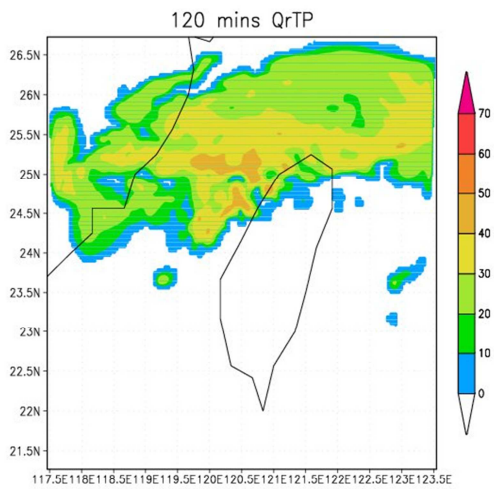
(e)



(f)



(g)



(h)

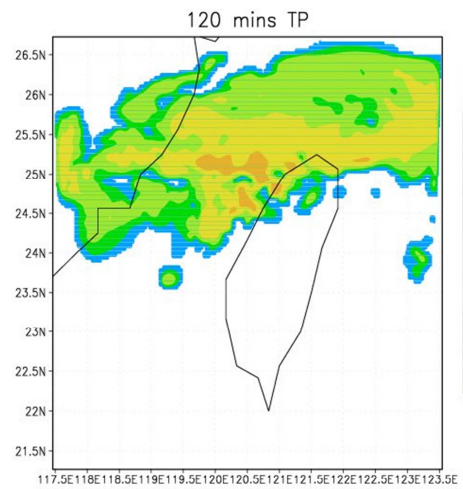
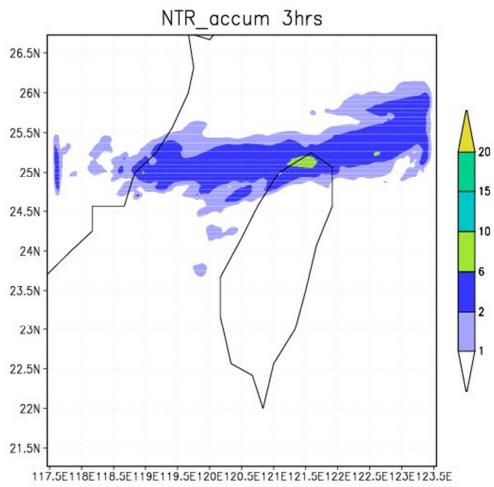
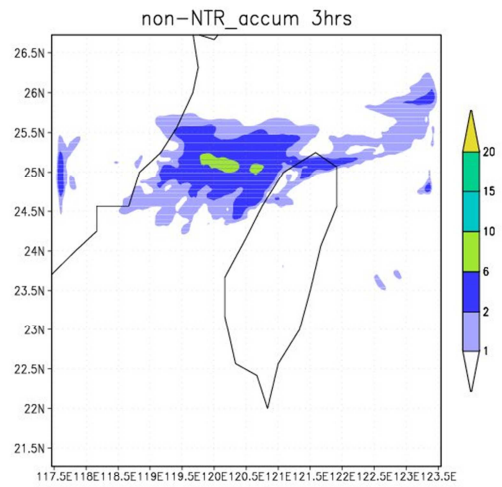


圖 5.7 預報 120 分鐘的回波分析場(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。

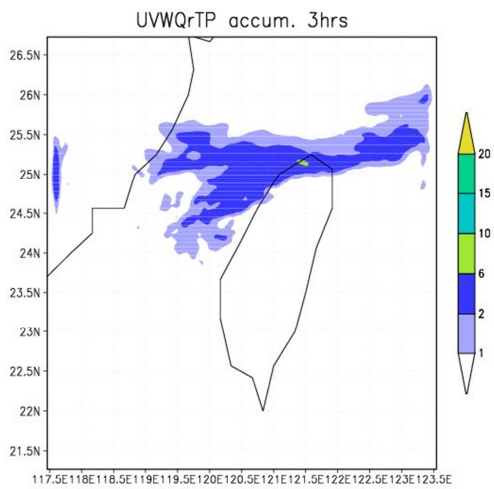
(a)



(b)



(c)



(d)

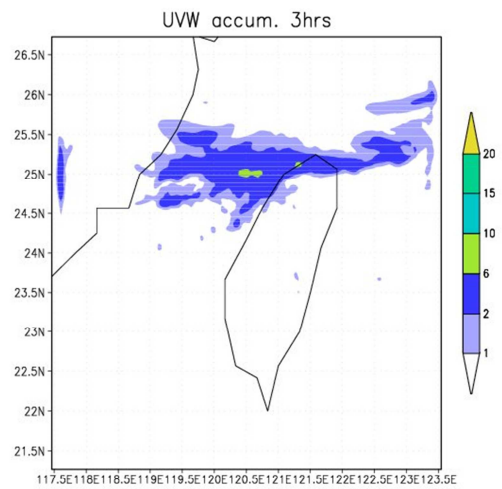
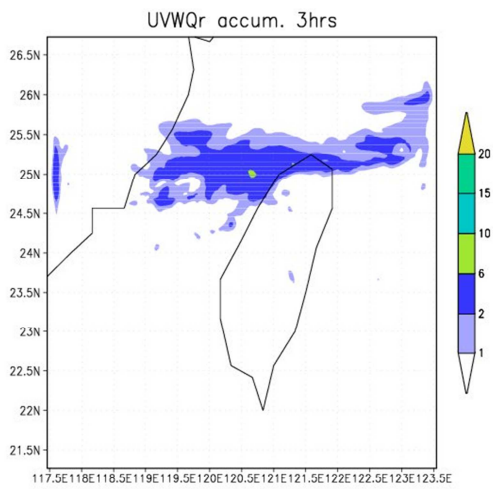
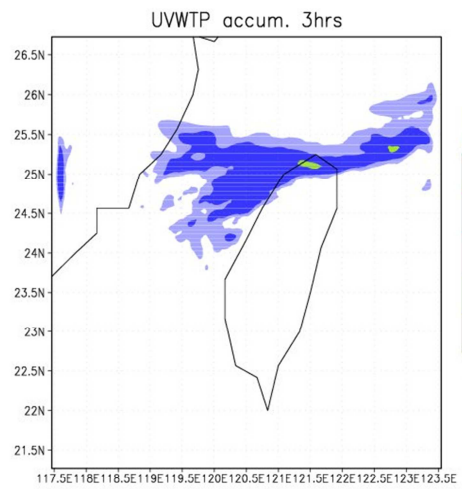


圖 5.8 預報 3 小時的累積雨量(a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW

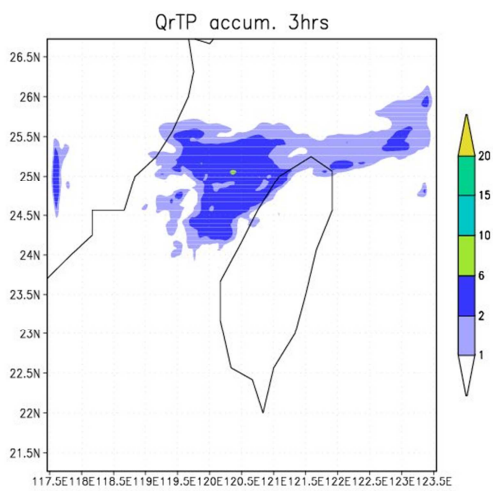
(e)



(f)



(g)



(h)

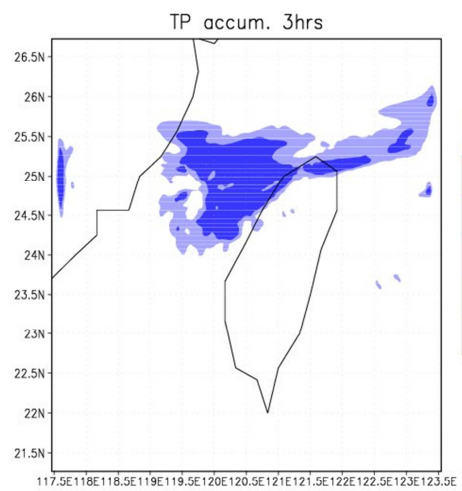
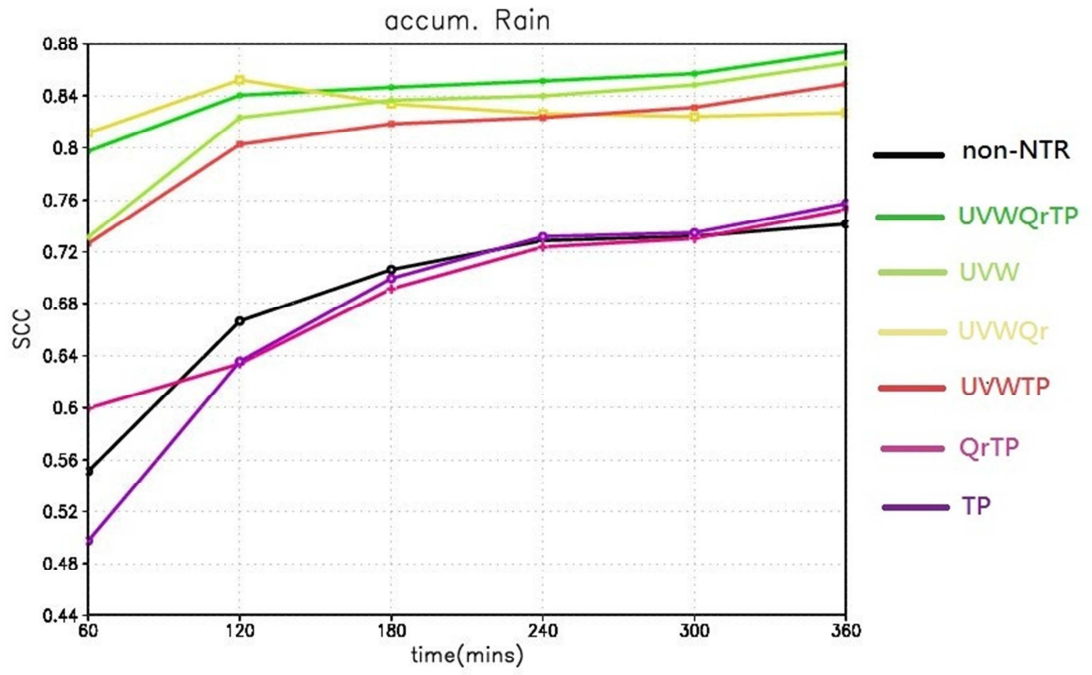


圖 5.8 預報 3 小時的累積雨量(e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP。



(a)



(b)

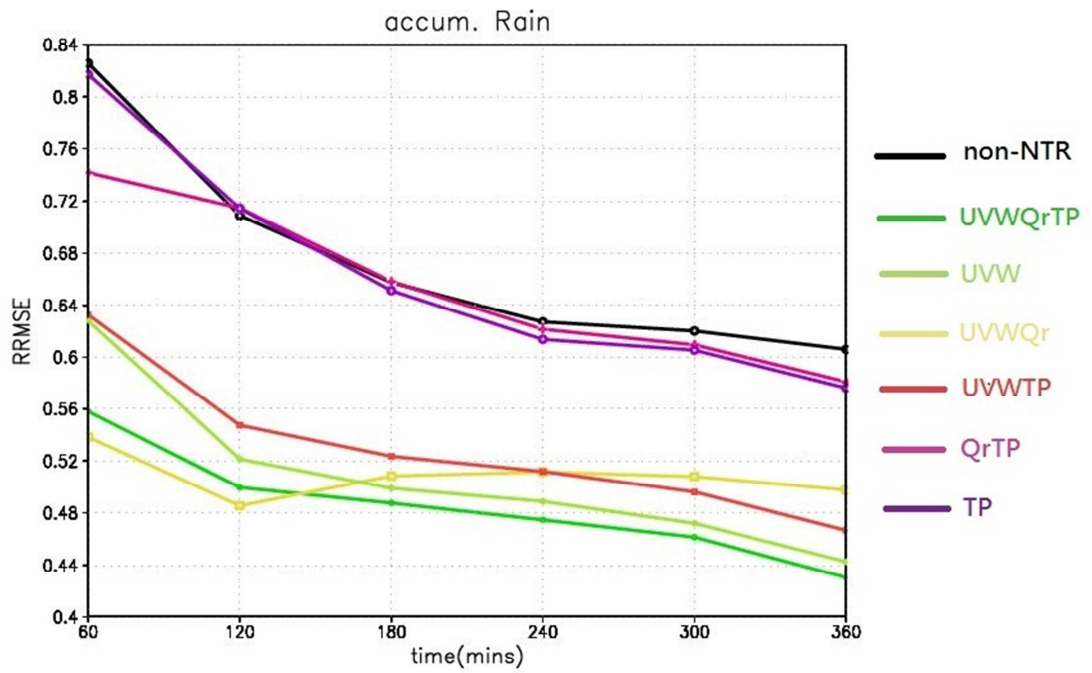
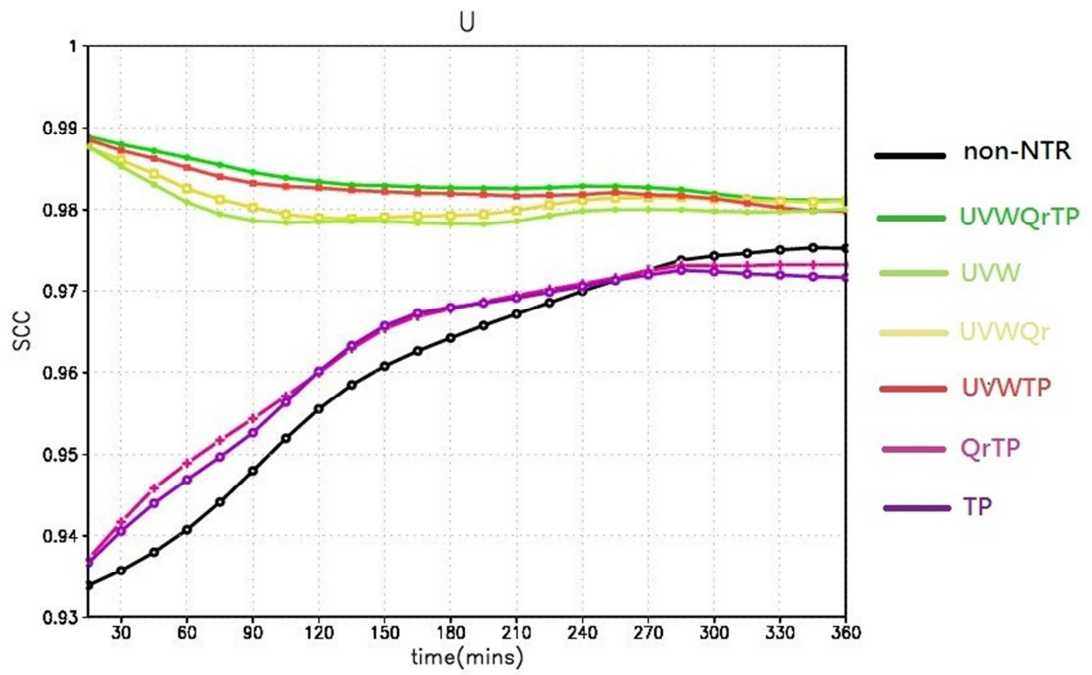


圖 5.9 累積雨量預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

(a)



(b)

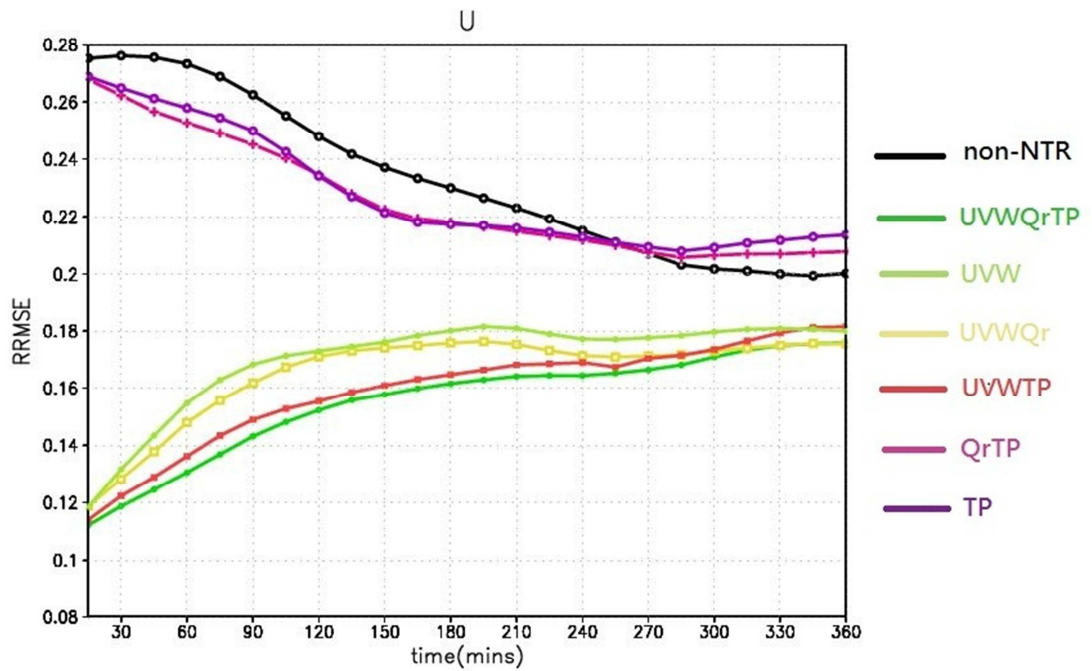
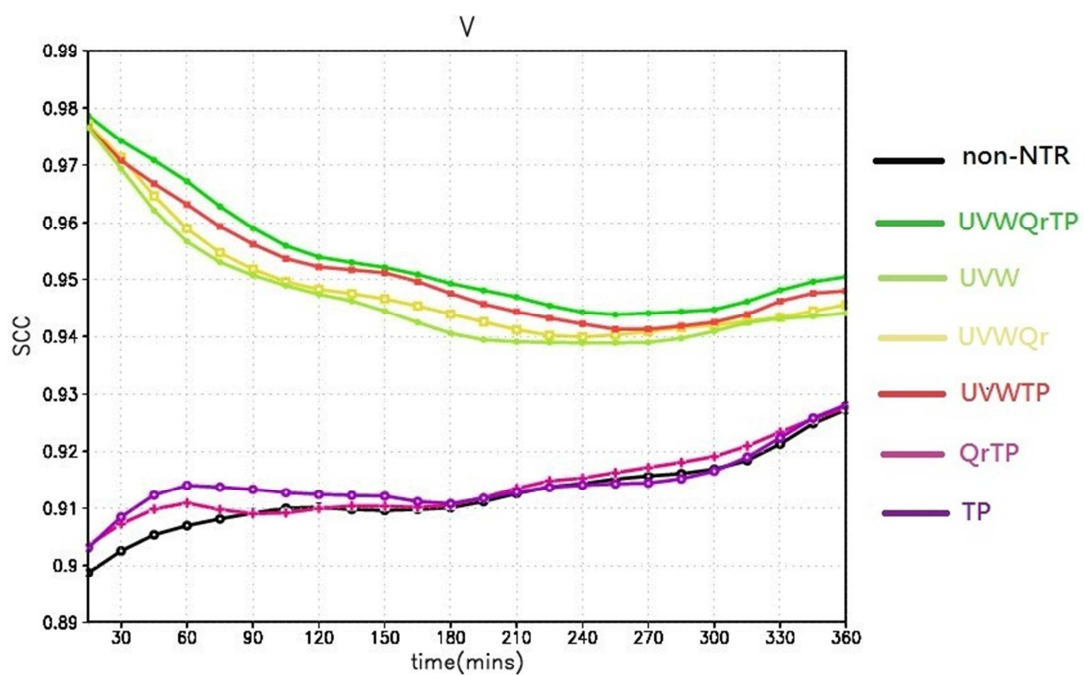


圖 5.10 U 風場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

(a)



(b)

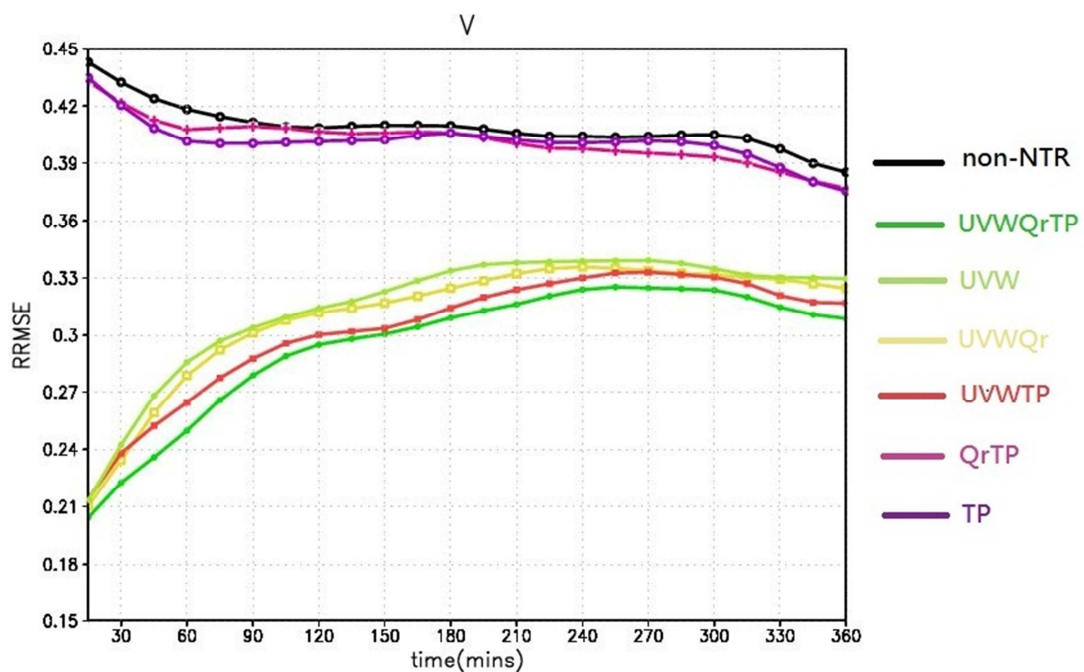
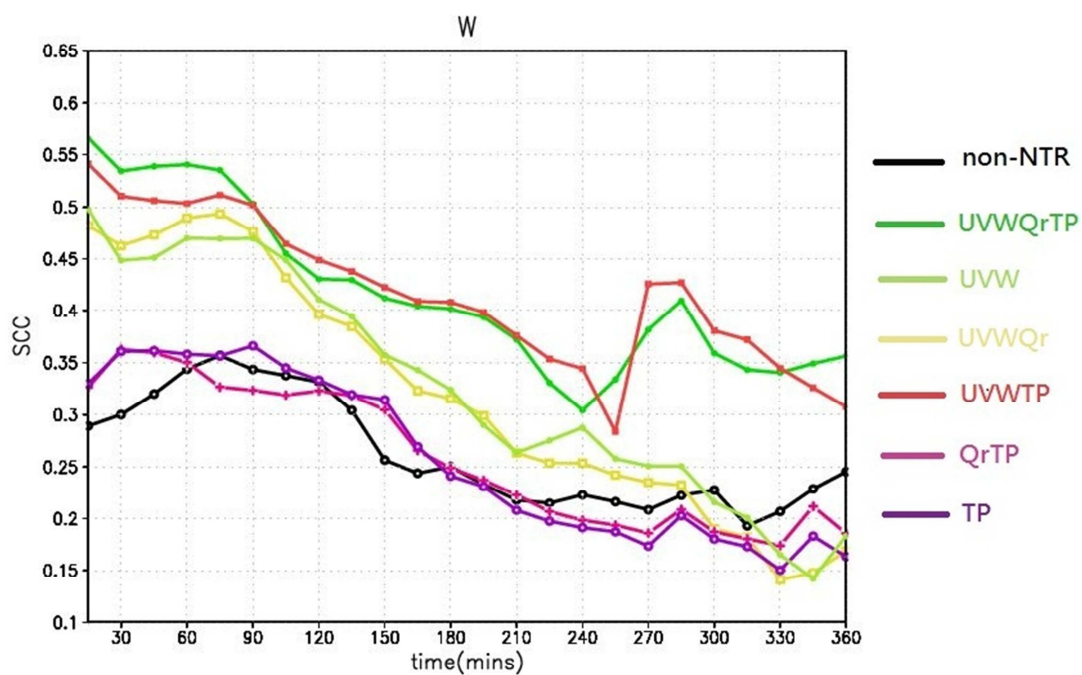


圖 5.11 V 風場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

(a)



(b)

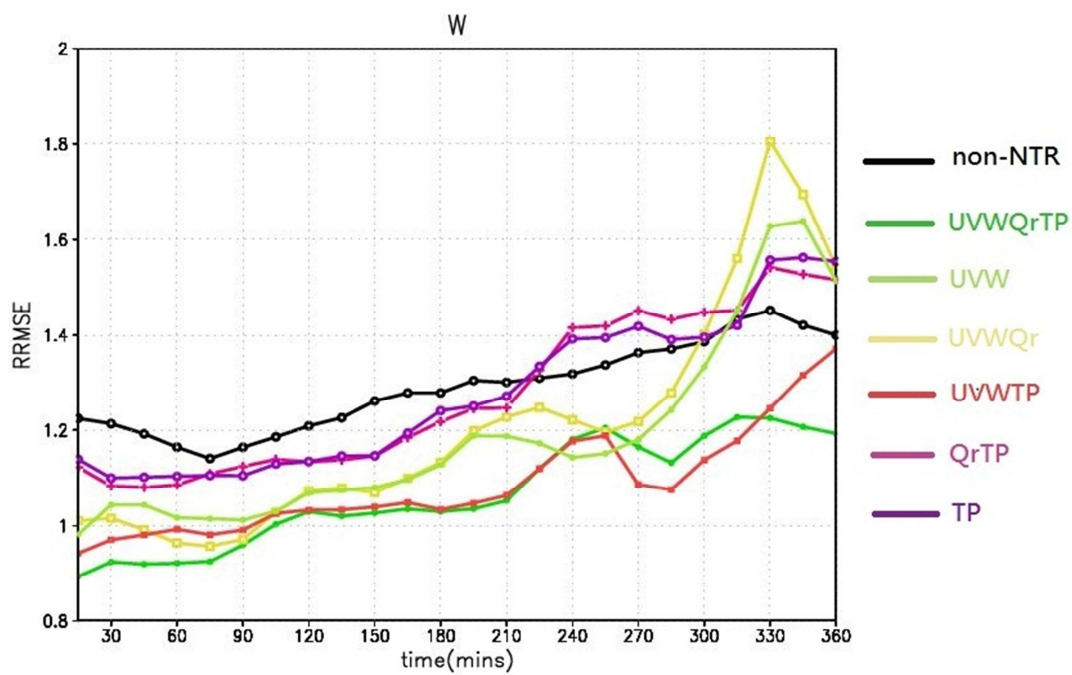
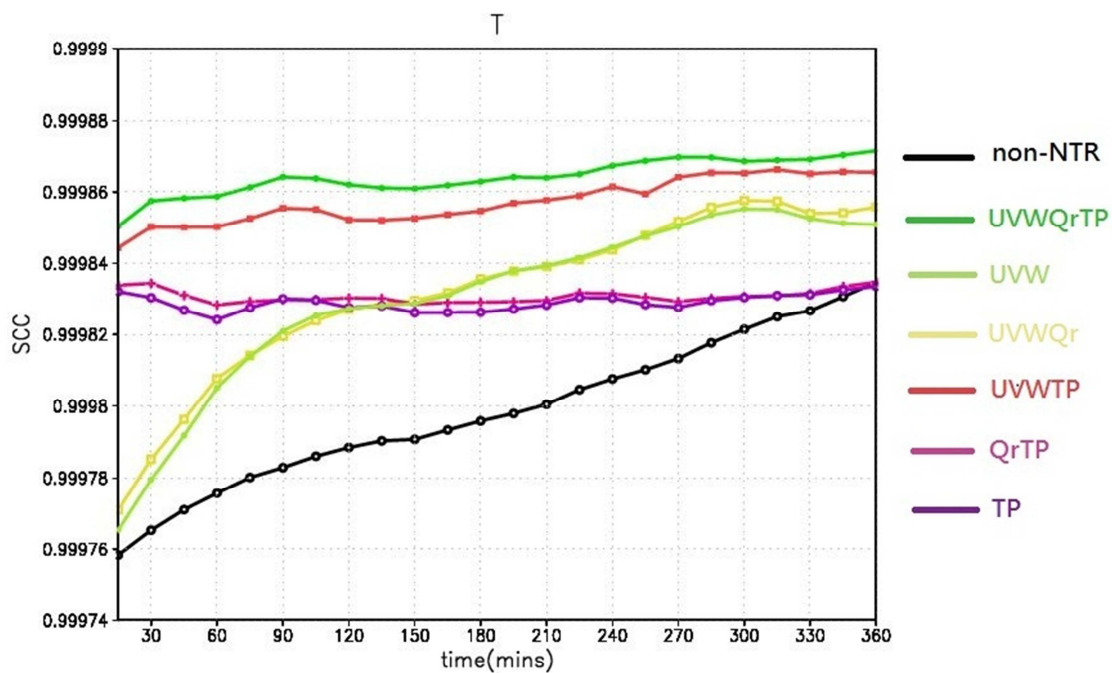


圖 5.12 W 風場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

(a)



(b)

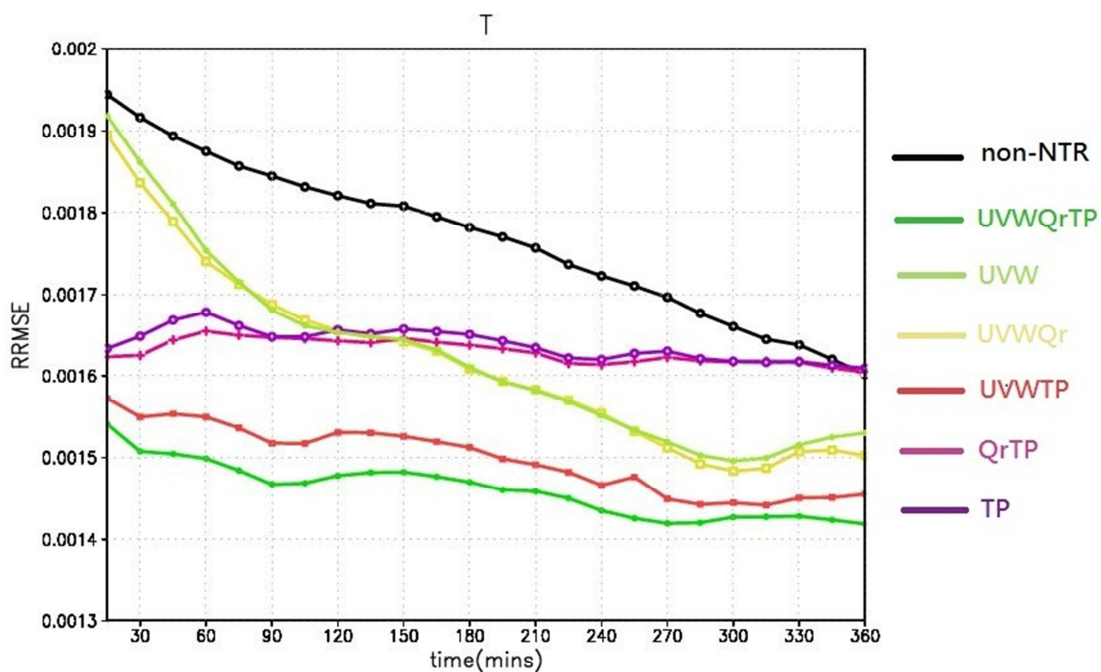
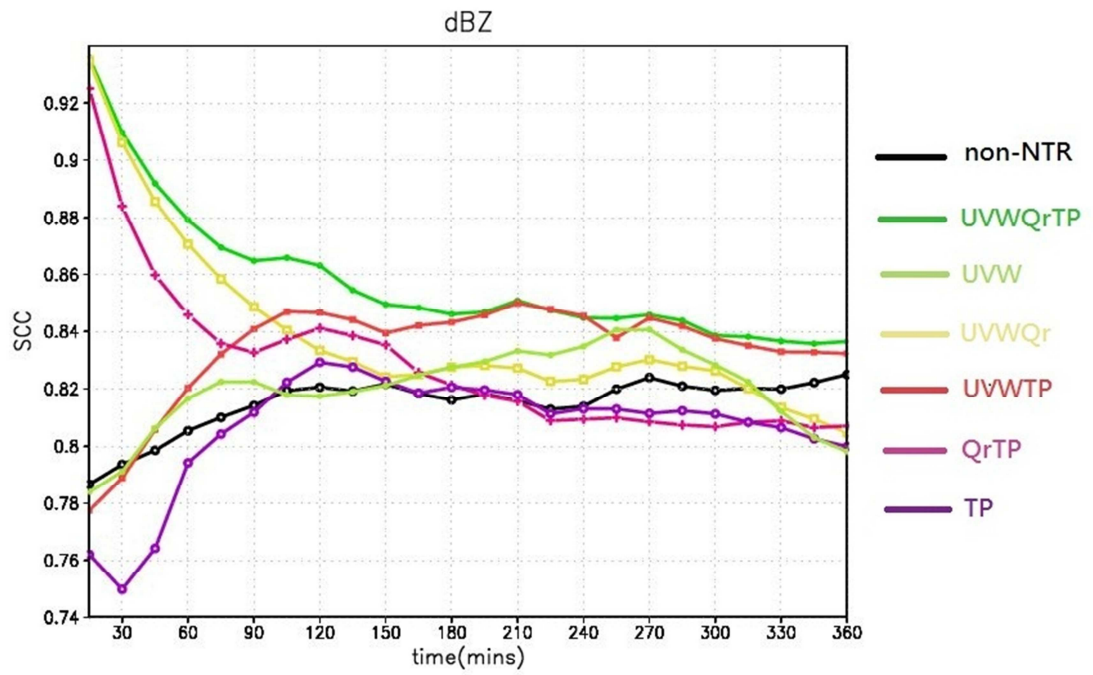


圖 5.13 溫度場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

(a)



(b)

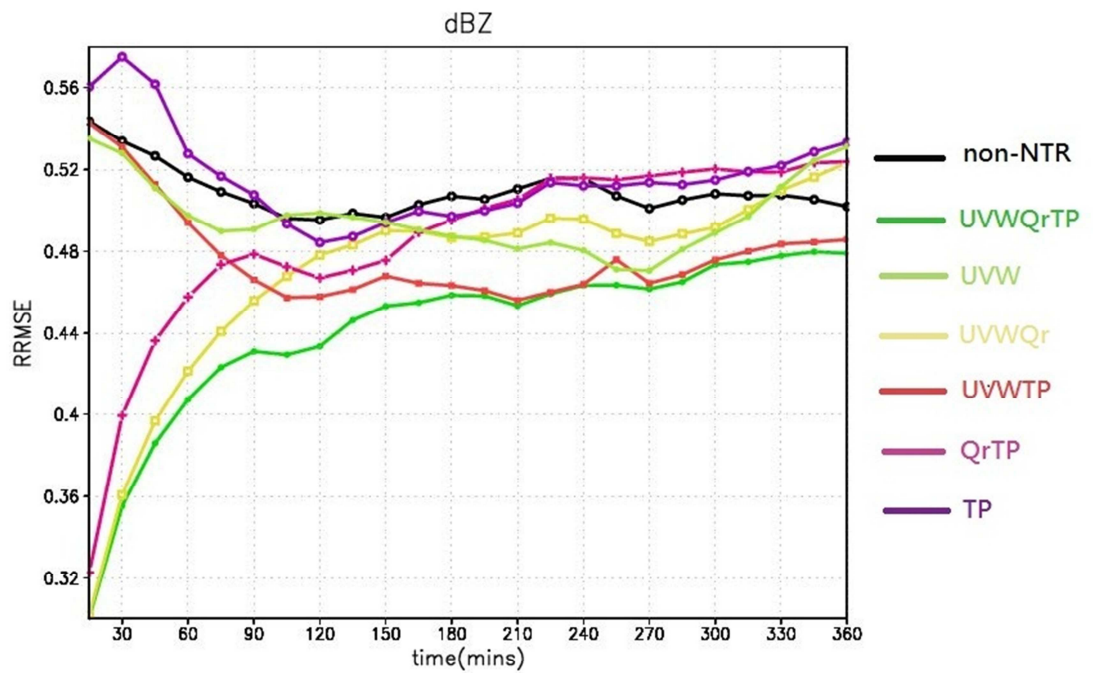
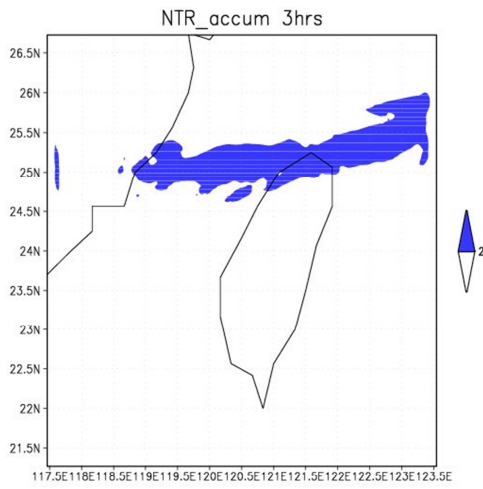
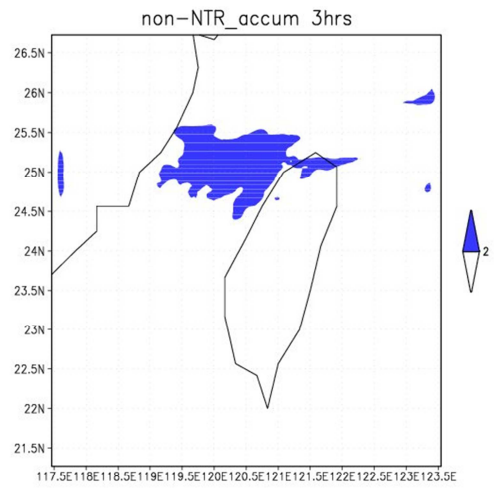


圖 5.14 回波場預報 360 分鐘的(a)相關係數和(b)相對均方根誤差。

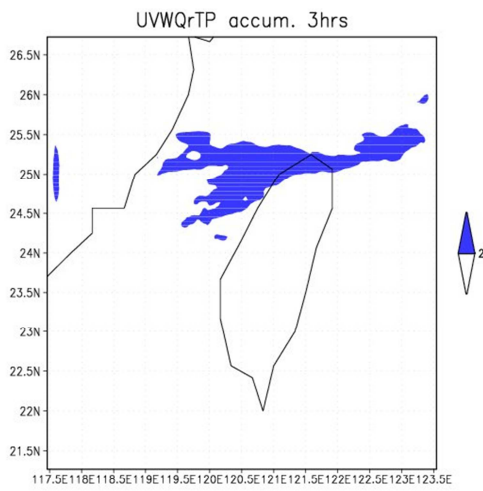
(a)



(b)



(c)



(d)

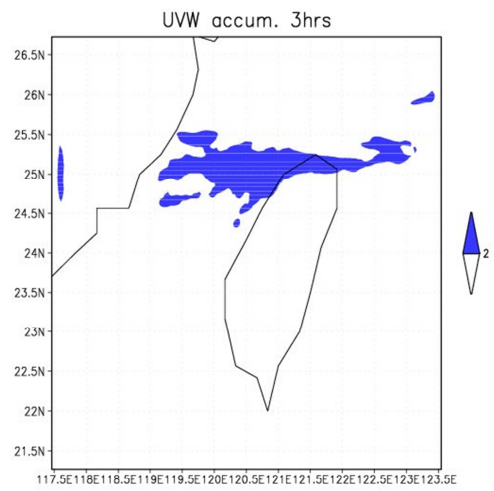
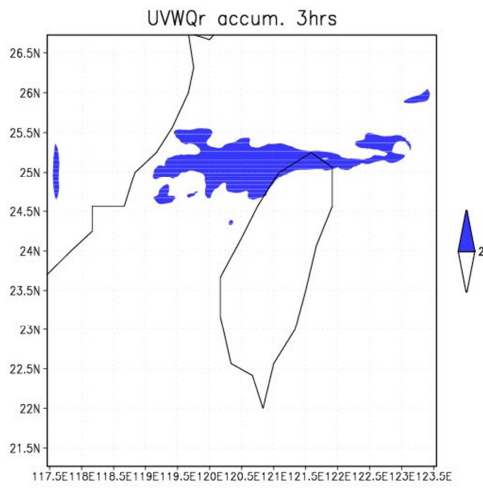
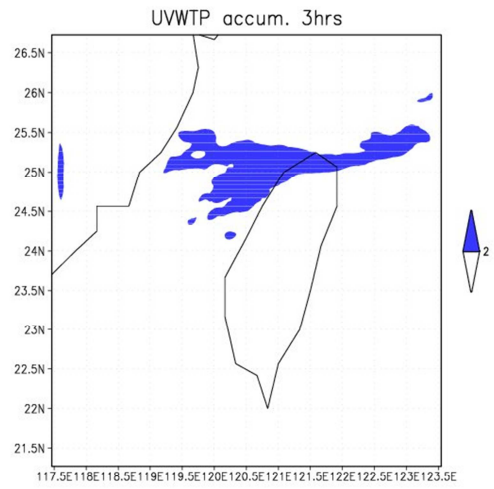


圖 5.15 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW 3 小時累積雨量大於 2mm  
以上

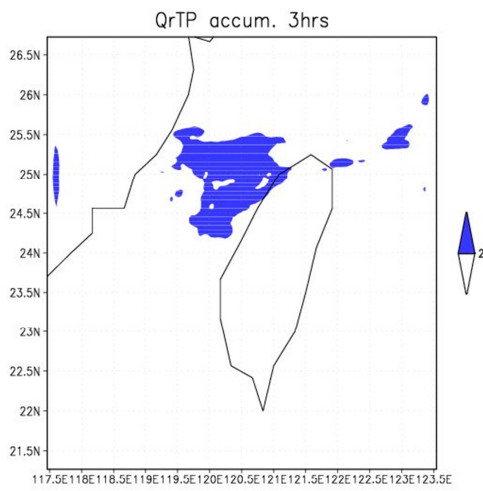
(e)



(f)



(g)



(h)

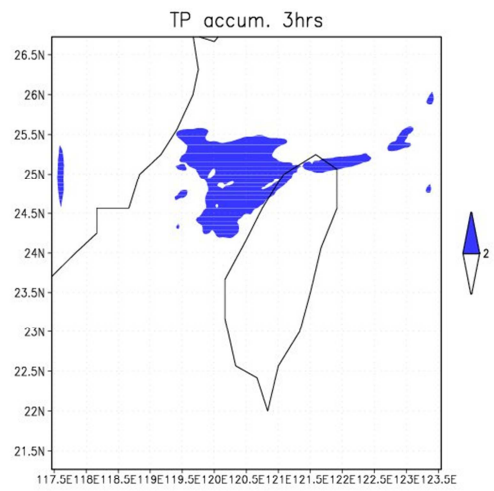
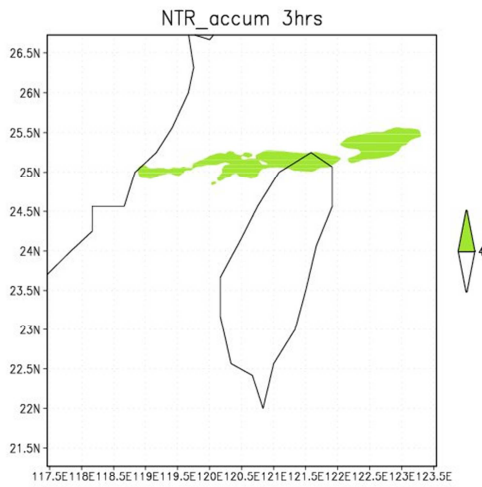


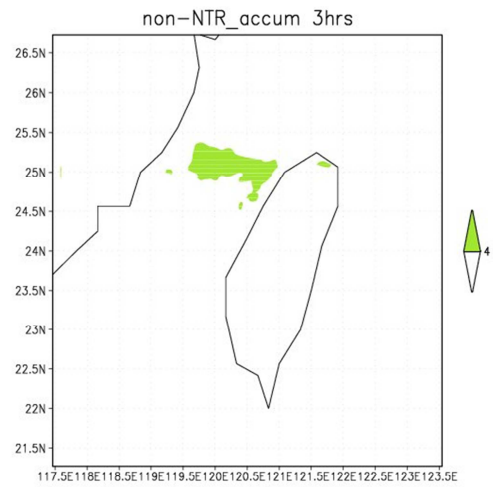
圖 5.15 (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP 3 小時累積雨量大於 2mm 以上。



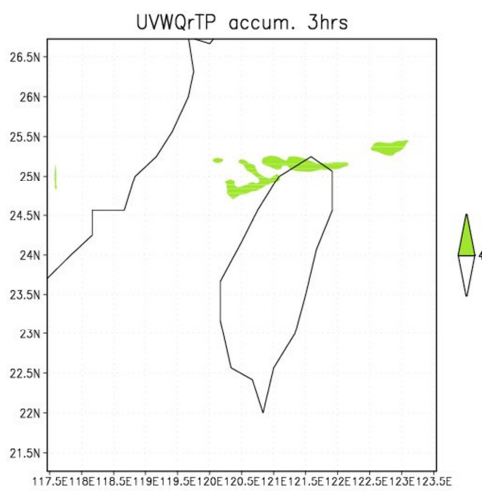
(a)



(b)



(c)



(d)

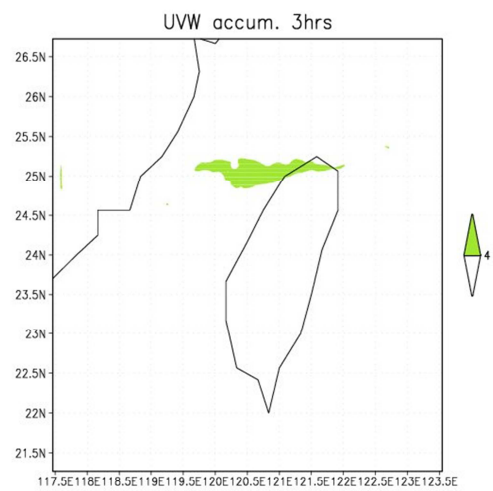
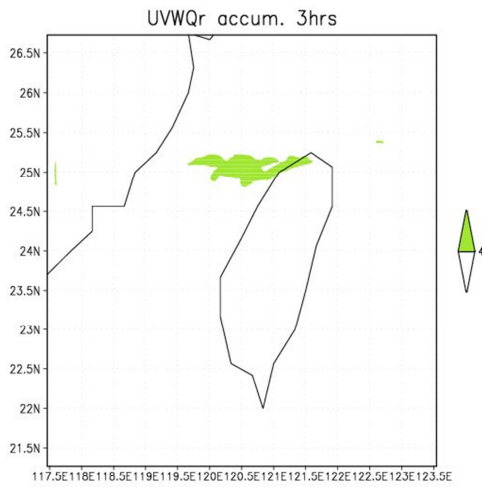
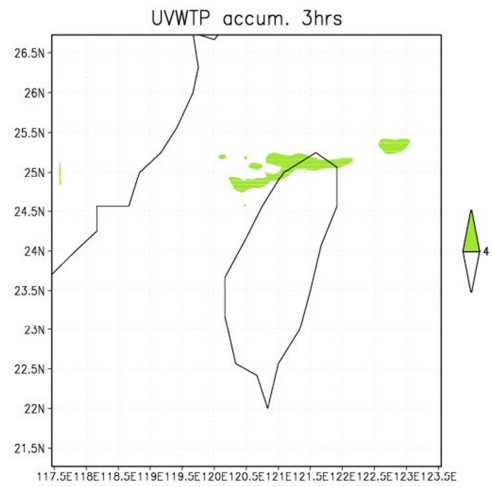


圖 5.16 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d)UVW 3 小時累積雨量大於 4mm  
以上

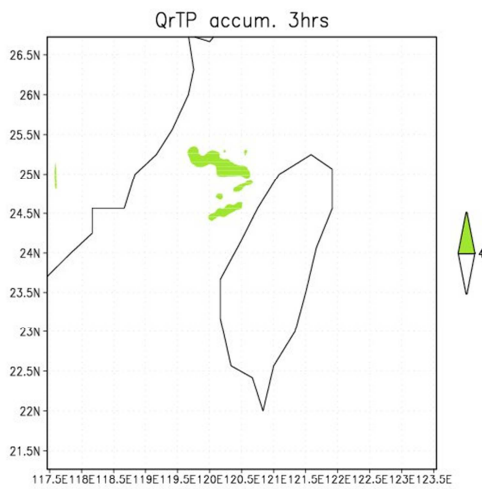
(e)



(f)



(g)



(h)

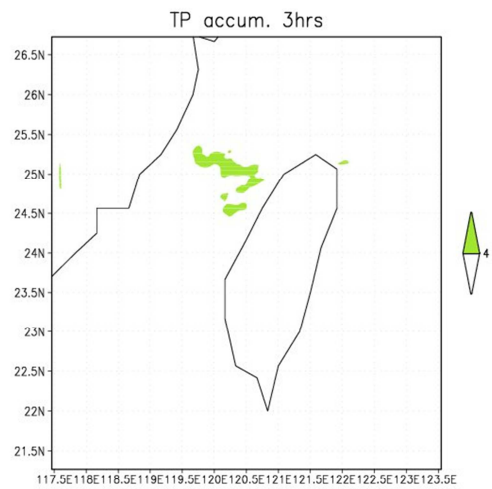
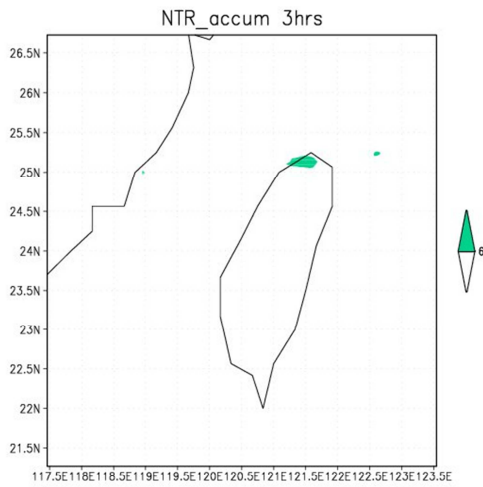
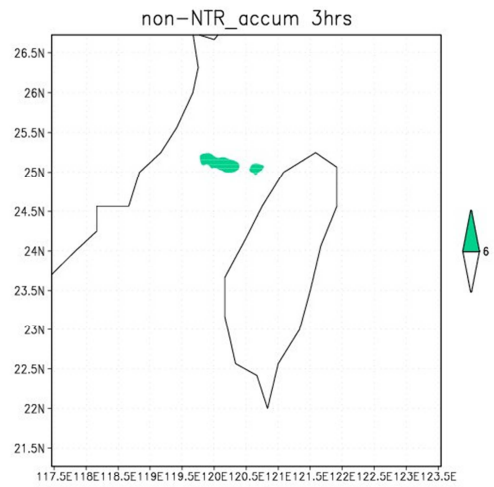


圖 5.16 (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP 3 小時累積雨量大於 4mm 以上。

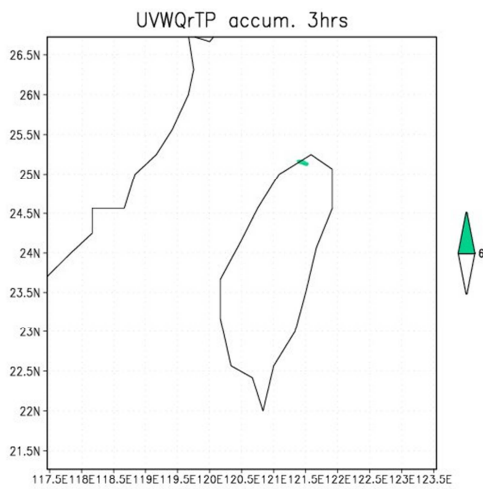
(a)



(b)



(c)



(d)

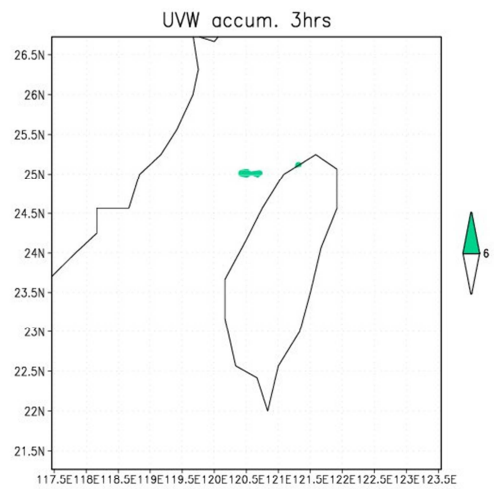
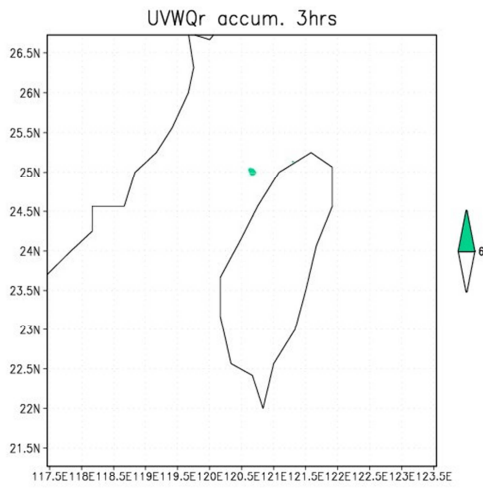
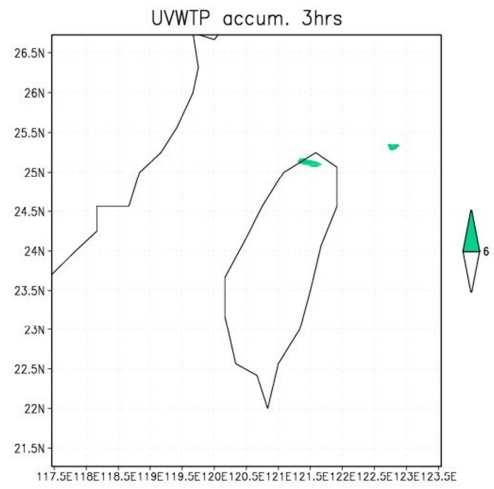


圖 5.17 (a)NTR (b)non-NTR (c)UVWQrTP (d) UVW 3 小時累積雨量大於 6mm  
以上

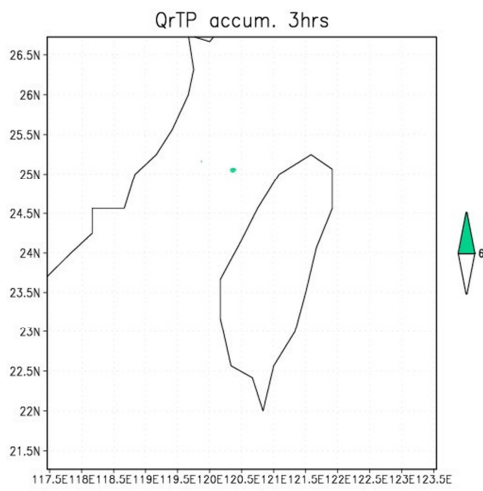
(e)



(f)



(g)



(h)

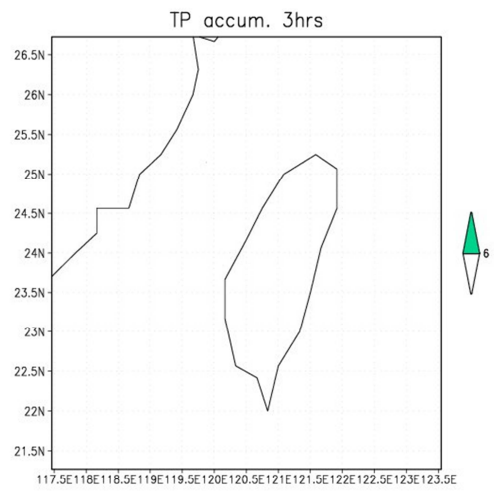


圖 5.17 (e)UVWQr (f)UVWTP (g)QrTP (h)TP 3 小時累積雨量大於 6mm 以上。

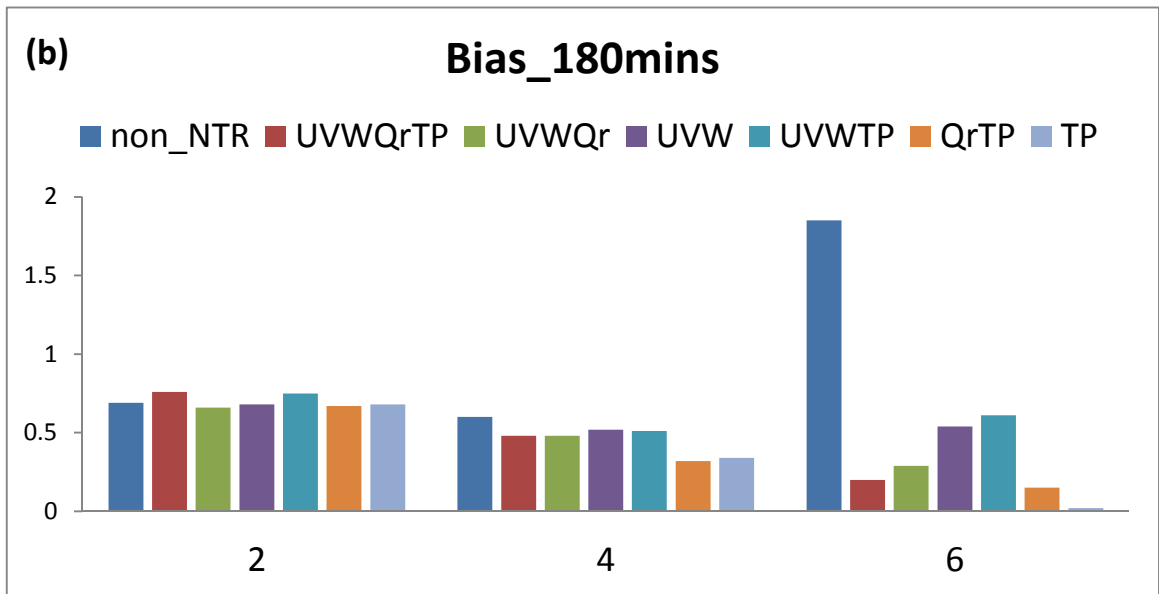
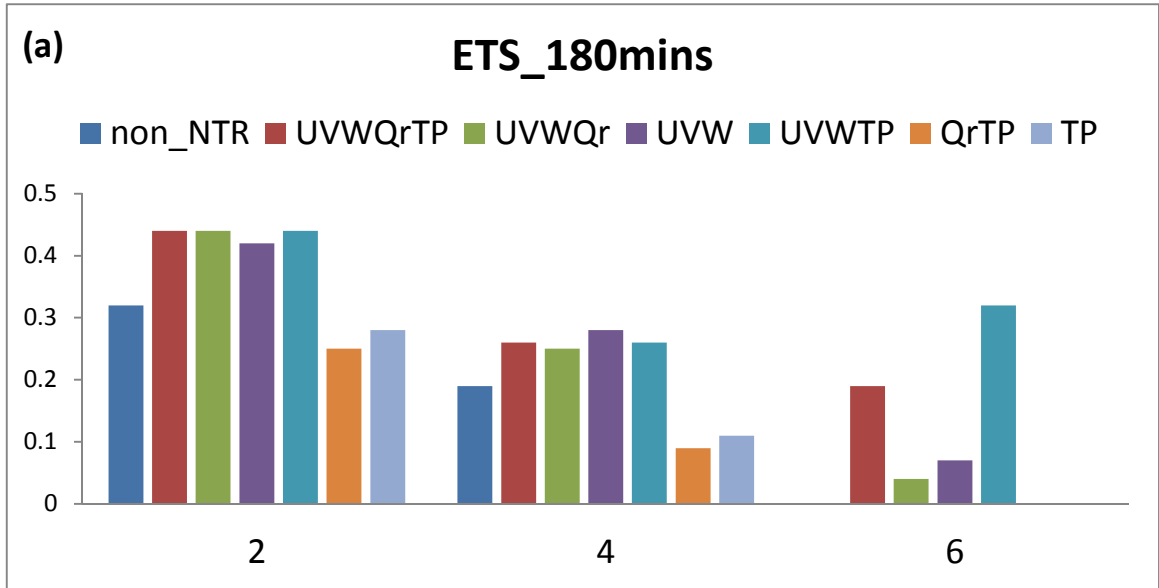
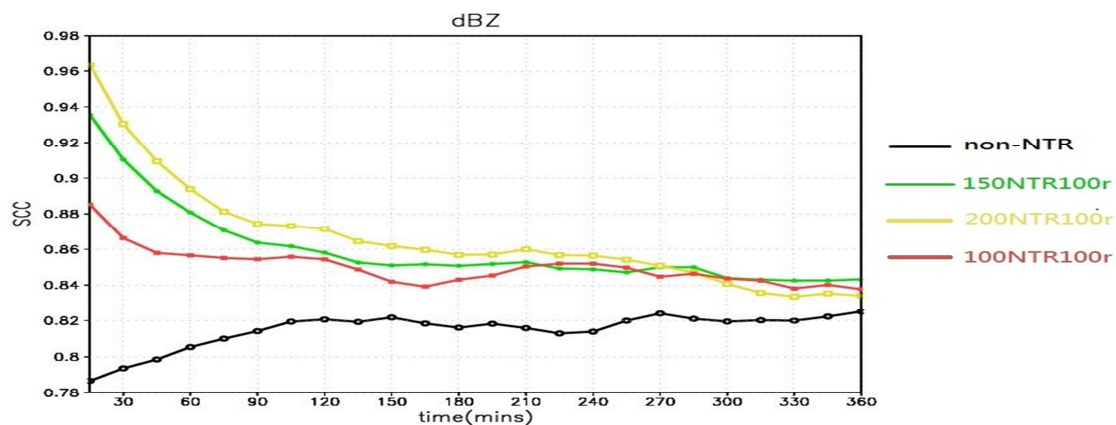
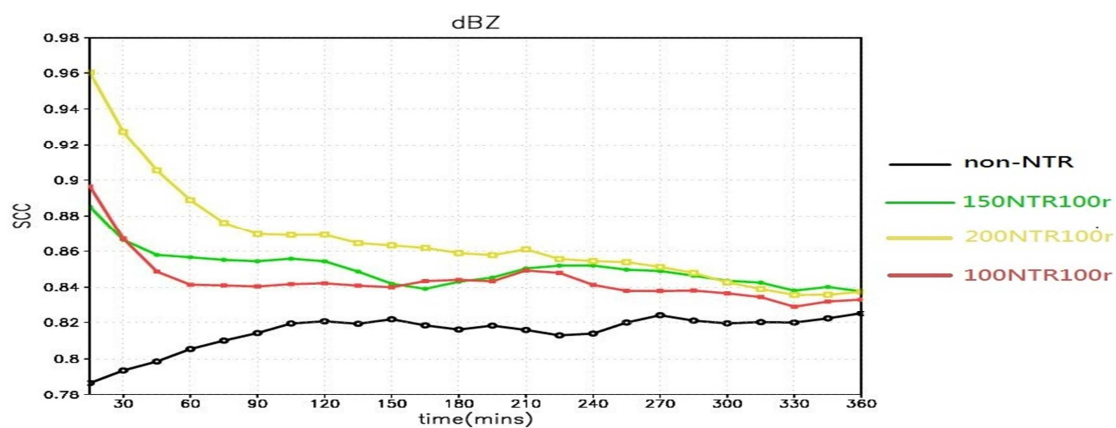


圖 5.18 累積降雨 3 小時的 (a)ETS 與 (b)Bias。

(a)



(b)



(c)

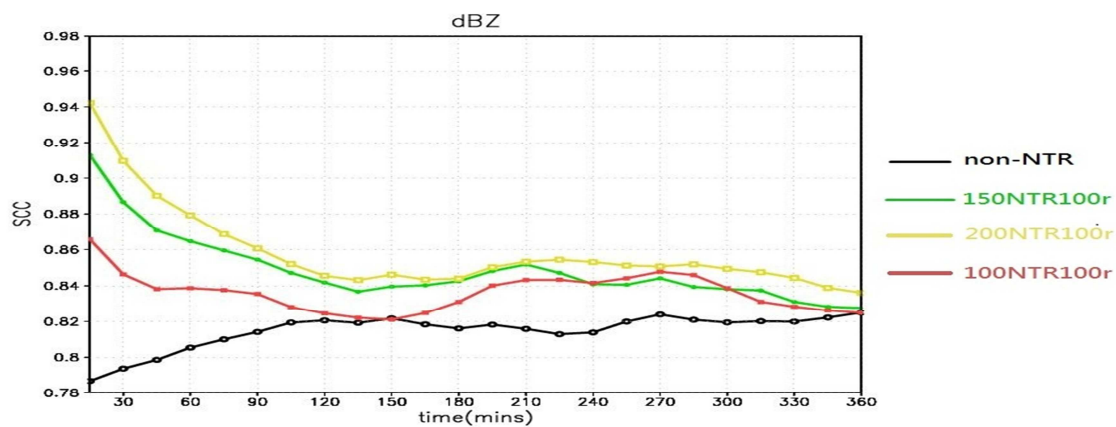
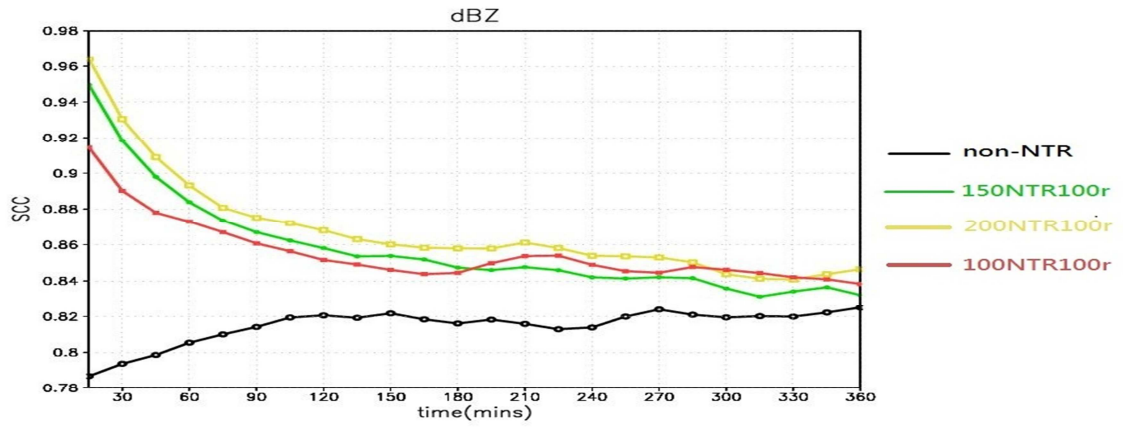


圖 5.19 實驗二各組預報 6 小時回波場的相關係數 (a)Exp. 2-1 (b)Exp. 2-2

(c) Exp. 2-3

(d)



(e)

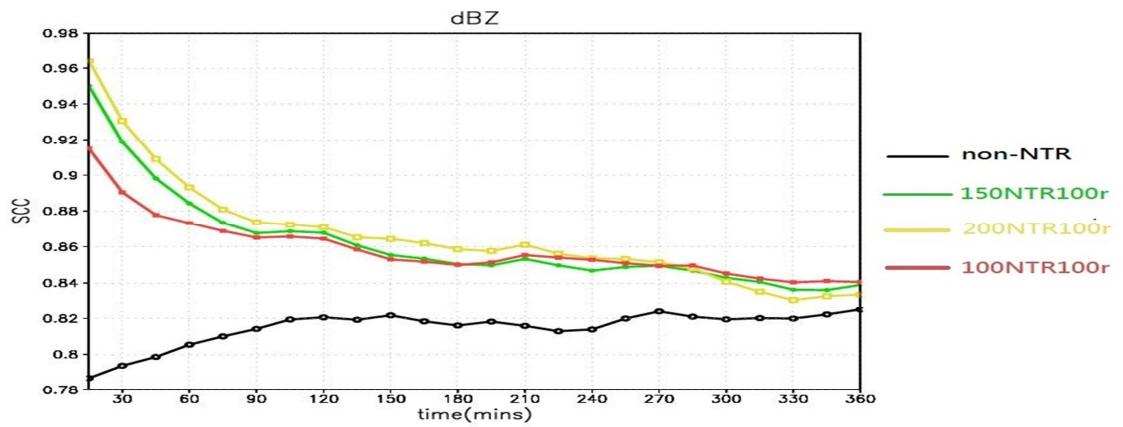
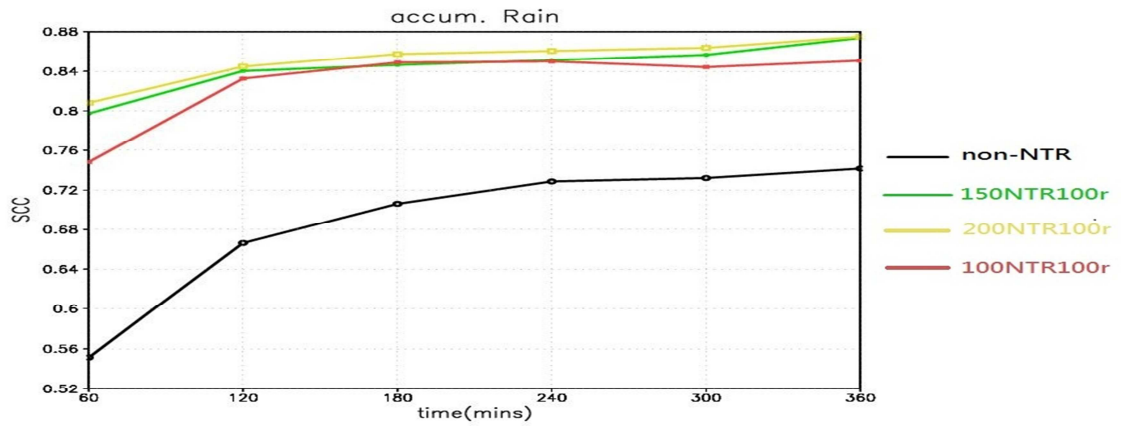


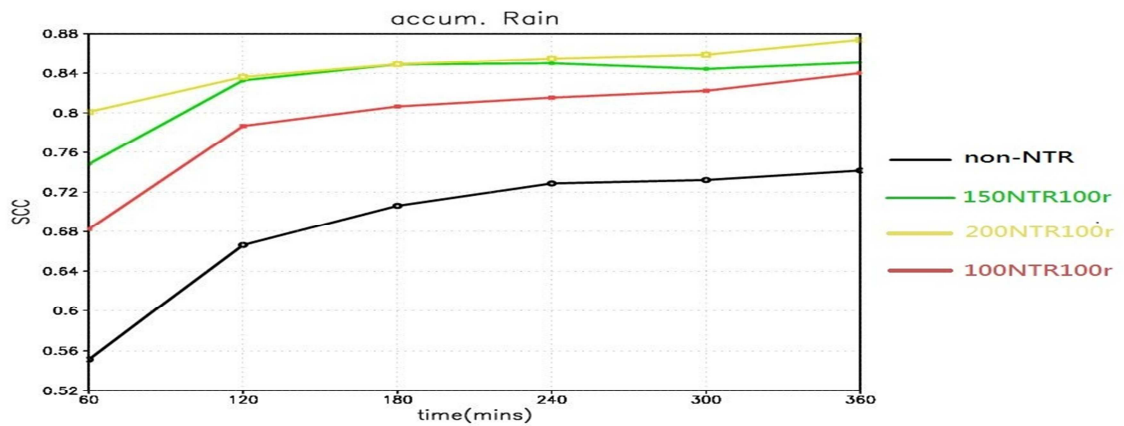
圖 5.19 實驗二各組預報 6 小時回波場的相關係數 (d)Exp. 2-4

(e)Exp. 2-5。

(a)



(b)



(c)

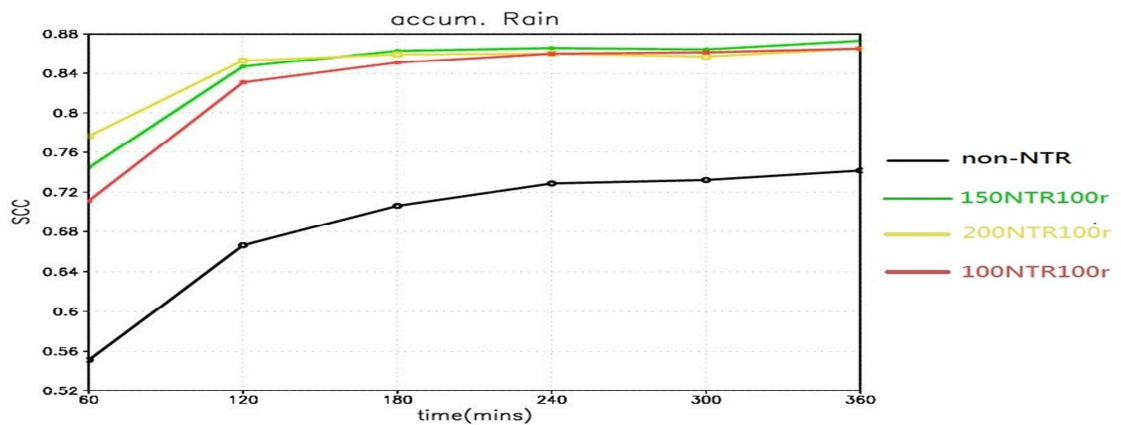
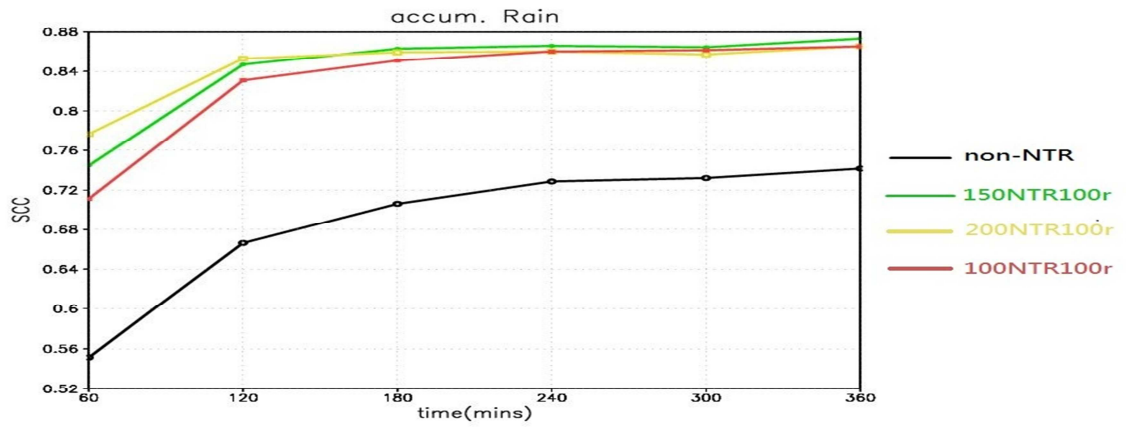


圖 5.20 實驗二各組預報 6 小時累積雨量的相關係數 (a)Exp. 2-1 五分山、清泉崗、七股 (b)Exp. 2-2 清泉崗、花蓮 (c) Exp. 2-3 五分山



(d)



(e)

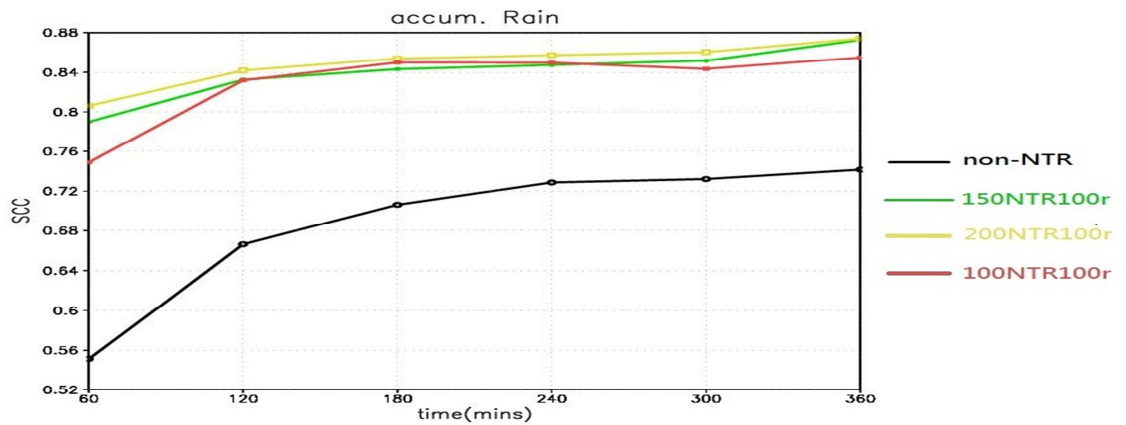
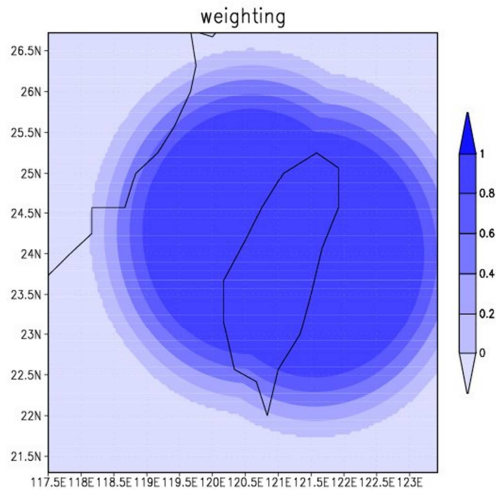
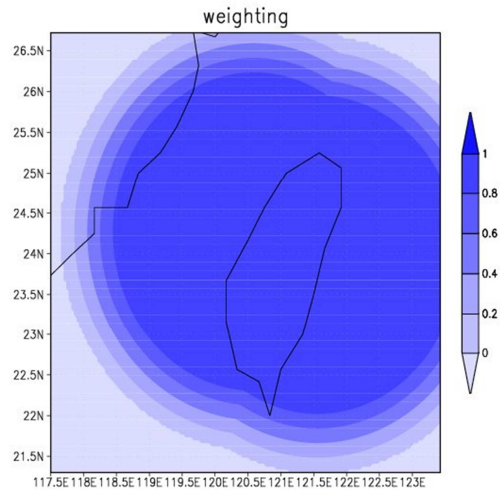


圖 5.20 實驗二各組預報 6 小時累積雨量的相關係數 (d)Exp. 2-4 五分山、清泉崗、花蓮 (e)Exp. 2-5 五分山、清泉崗、七股、花蓮。

(a)



(b)



(c)

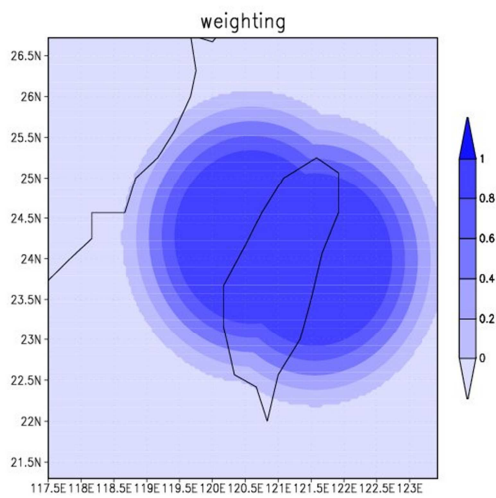
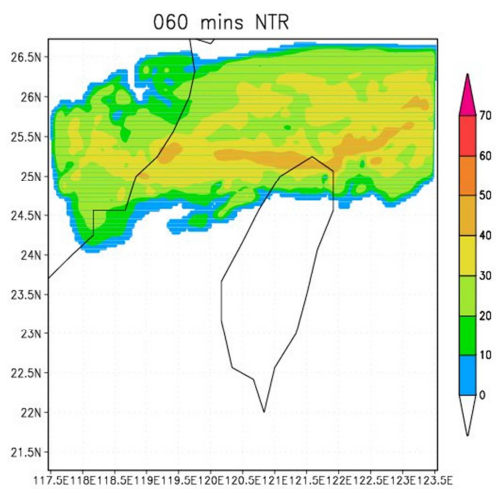
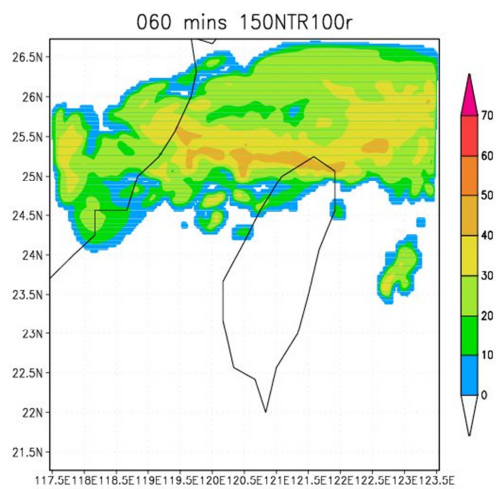


圖 5.21 Exp2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料權重給予的範圍 (a)150NTR100r (b)200NTR100r (c)100NTR100r。

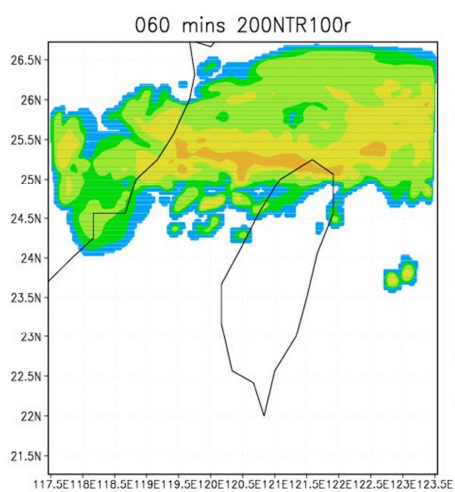
(a)



(b)



(c)



(d)

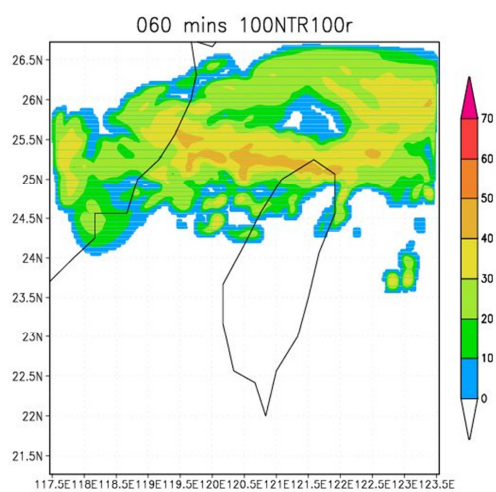
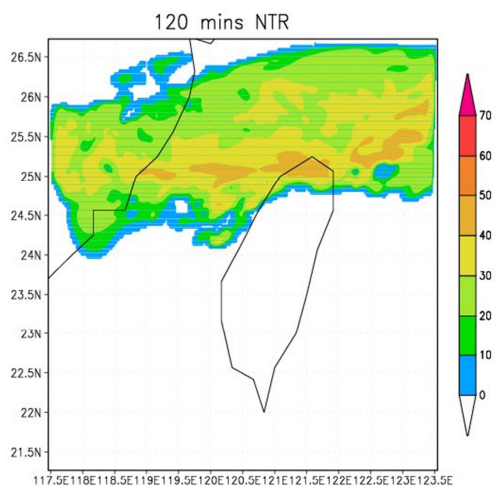
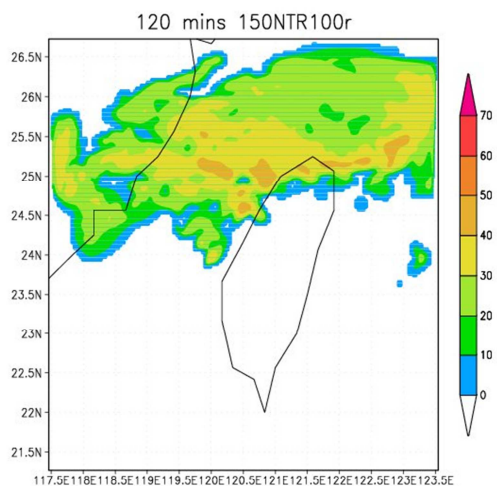


圖 5.22 Exp2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料預報 60 分鐘的結果 (a)NTR (b)150NTR100r (c)200NTR100r (d)100NTR100r。

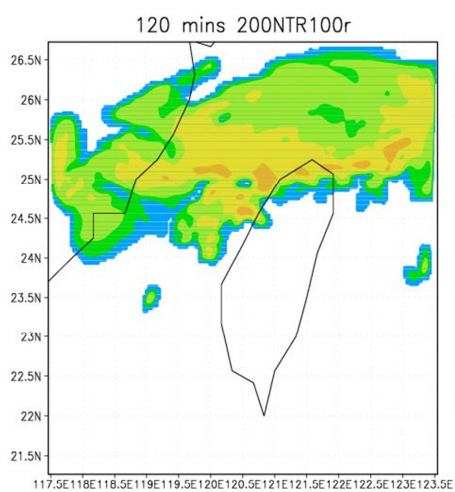
(a)



(b)



(c)



(d)

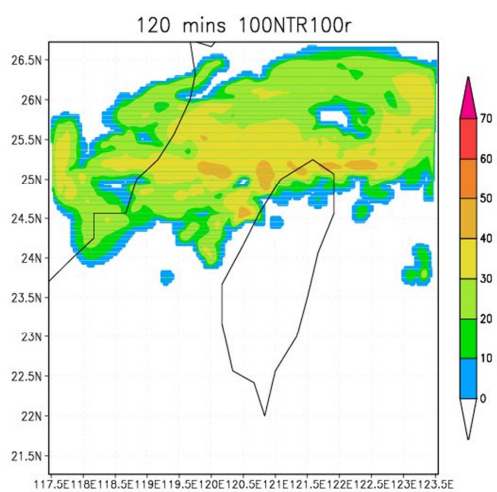


圖 5.23 Exp2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料預報 120 分鐘的結果 (a)NTR (b)150NTR100r (c)200NTR100r (d)100NTR100r。

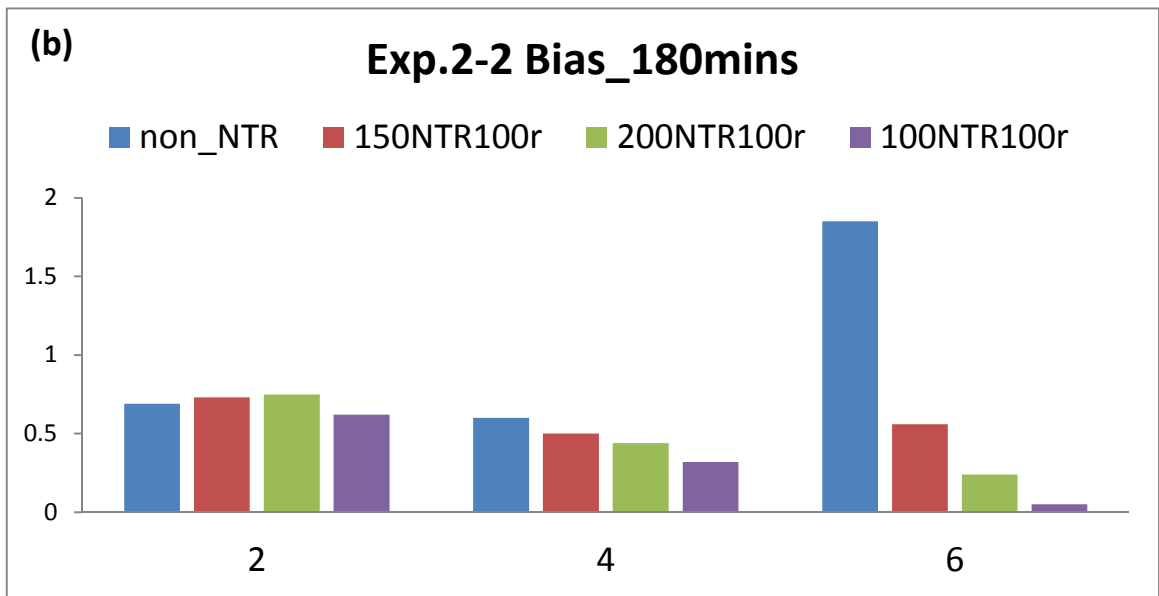
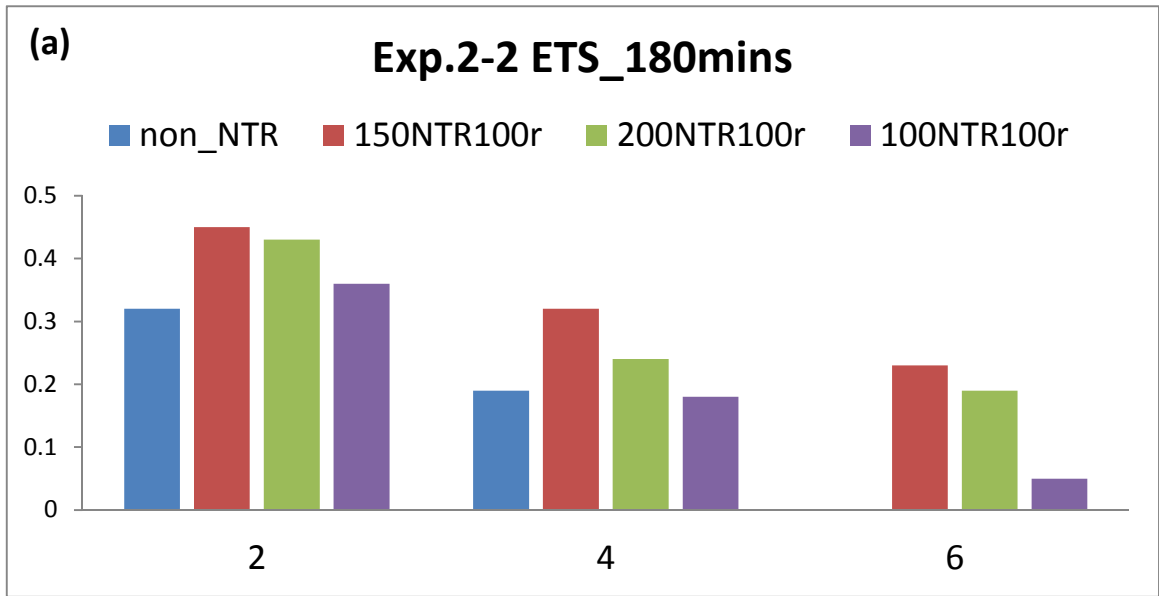


圖 5.24 Exp. 2-2 同化清泉崗、花蓮雷達資料預報降雨累積 180 分鐘的 (a) ETS (b) Bias。

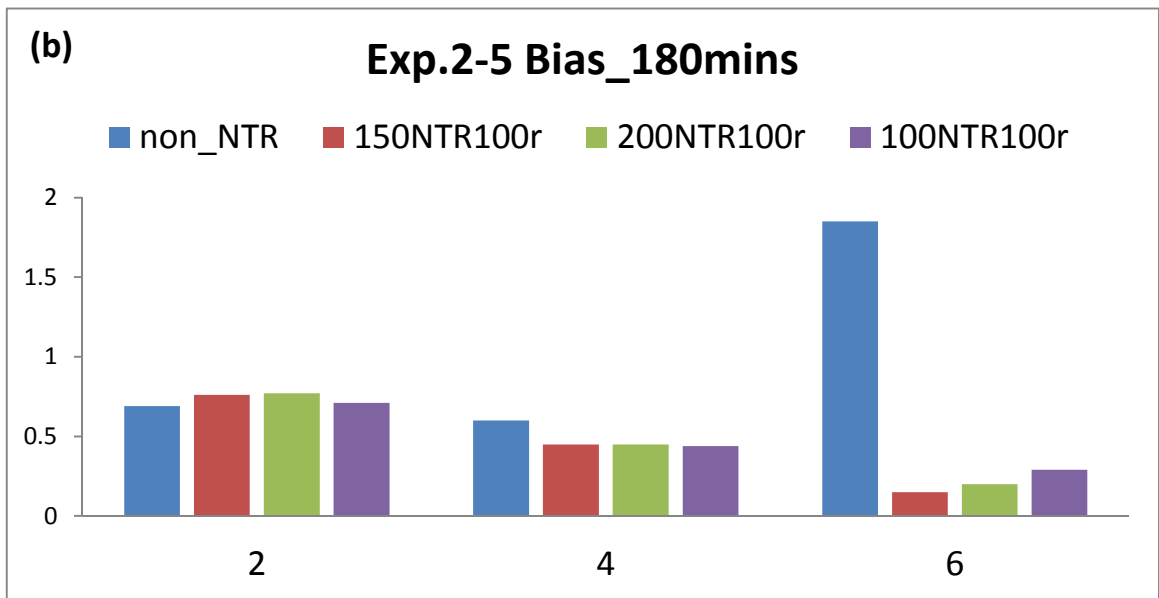
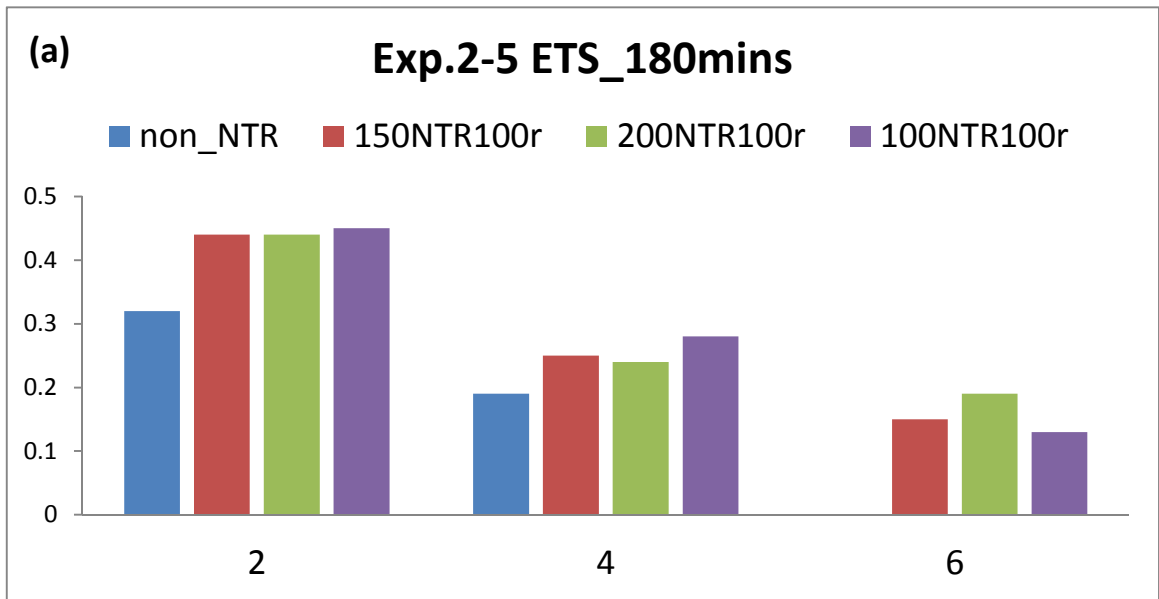


圖 5.25 Exp. 2-5 同化五分山、清泉崗、七股、花蓮雷達資料預報降雨累積 180 分鐘的 (a)ETS (b)Bias。