國 立 中 央 大 學

大 氣 科 學 學 系

碩 士 論 文

同化 GNSS RO 對 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面個案降雨預報之影響

Impact of GNSS RO assimilation on rainfall forecast for TAHOPE IOP3 Meiyu front case

研 究 生：區世明

指 導 教 授：陳舒雅 博士

張偉裕 博士

中 華 民 國 114 年 6 月

國立中央大學圖書館學位論文授權書

填單日期：2025 / 7 / 24　　2019.9 版

授權人姓名	區世明(Ao Sai-Meng)	學 號	111621023
系所名稱	大氣科學學系大氣物理碩士班	學位類別	■碩士 □博士
論文名稱	同化 GNSS RO 對 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面個案降雨預報之影響 Impact of GNSS RO assimilation on rainfall forecast for TAHOPE IOP3 Meiyu front case	指導教授	張偉裕(Chang,Wei-Yu)、陳舒雅(Chen,Shu-Ya)

學位論文網路公開授權

授權本人撰寫之學位論文全文電子檔：

・在「**國立中央大學圖書館博碩士論文系統**」

(√)同意立即網路公開

(　)同意 於西元＿＿＿年＿＿＿月＿＿＿日網路公開

(　)不同意網路公開，原因是：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

・在**國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」**

(√)同意立即網路公開

(　)同意 於西元＿＿＿年＿＿＿月＿＿＿日網路公開

(　)不同意網路公開，原因是：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

依著作權法規定，非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統與國家圖書館，不限地域、時間與次數，以文件、錄影帶、錄音帶、光碟、微縮、數位化或其他方式將上列授權標的基於非營利目的進行重製。

學位論文紙本延後公開申請 (紙本學位論文**立即公開者此欄免填**)

本人撰寫之學位論文紙本因以下原因將延後公開

・**延後原因**

(　)已申請專利並檢附證明，專利申請案號：

(　)準備以上列論文投稿期刊

(　)涉國家機密

(　)依法不得提供，請說明：＿＿＿＿＿＿＿＿

・**公開日期**：西元＿＿＿＿年＿＿＿＿月＿＿＿＿日

※繳交教務處註冊組之紙本論文(送繳國家圖書館)若不立即公開，請加填「國家圖書館學位論文延後公開申請書」

研究生簽名：區世明　　指導教授簽名：陳舒雅 張偉裕

*本授權書請完整填寫並親筆簽名後，裝訂於論文**封面之次頁**。

國立中央大學碩士班研究生
論 文 口 試 委 員 審 定 書

大氣科學學系大氣物理碩士班 學系/研究所 區世明 研究生

所提之論文 同化 GNSS RO 對 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面個案降雨預報之影響

經由委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人 蔡嘉偉

委 員 陳舒雅

張偉郎

中 華 民 國 114 年 7 月 21 日

國立中央大學碩士班研究生
論 文 指 導 教 授 推 薦 書

大氣科學學系大氣物理碩士班 學系/研究所 區世明 研究生所提之論文 同化 GNSS RO 對 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面個案降雨預報之影響

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 張偉毅 凍的雅 (簽章)

114 年 7 月 9 日

摘要

本研究旨在探討同化福爾摩沙衛星七號（FORMOSAT-7/COSMIC-2）全球導航衛星系統掩星觀測（GNSS RO）對梅雨鋒面個案降雨預報的影響。以 2022 年 6 月 6–7 日發生於臺灣的梅雨鋒面豪雨個案（TAHOPE IOP3）為研究對象，使用 WRFDA 混合資料同化系統（3DEnVar）進行同化實驗，同化 FORMOSAT-7 GNSS RO 資料及全球電信系統（GTS）常規觀測，並使用 ERA5 再分析資料進行預報效果驗證。

結果顯示，同化 GNSS RO 資料（EPH 組）顯著改善模式初始分析場的水汽與溫度結構，特別是在鋒面附近增加南側海洋上低層水汽含量，降低鋒面附近的溫度場誤差，改善了鋒面的結構特徵，使分析場更貼近 ERA5 再分析資料。此外，透過模式對不同降雨時段的詳細暴雨成因分析可知，同化 GNSS RO 資料可更準確捕捉鋒面附近的水汽輻合與對流發展過程，有效提升降水位置及強度的預報表現。同時，透過系集敏感度分析顯示，GNSS RO 資料的加入有助於降低系集預報的不確定性，增強系集成員間降雨預報的一致性，尤其對短期（0–24 小時）降雨預報的改善最為顯著。整體而言，EPH 組在各個預報時段內的均方根誤差（RMSE）均較僅同化 GTS 組顯著降低，空間相關係數（SCC）則顯著提升。

綜合而言，本研究證實同化 FORMOSAT-7 GNSS RO 資料能有效提升梅雨鋒面豪雨個案的預報性能，尤其在暴雨成因分析與系集預報穩定性方面的提升更具實際預報價值。

ABSTRACT

This study examines the impact of assimilating Global Navigation Satellite System Radio Occultation (GNSS RO) observations on the rainfall forecast of a Mei-Yu frontal heavy precipitation event that occurred on 6–7 June 2022 (TAHOPE IOP3). The Weather Research and Forecasting (WRF) model, coupled with the hybrid three-dimensional ensemble-variational (3DEnVar) data assimilation system (WRFDA), was employed to incorporate both GNSS RO and conventional observations into the model's initial conditions.

To evaluate the influence of GNSS RO assimilation, a simulation experiment that assimilated both GNSS RO and conventional data (referred to as EPH) was compared with a control experiment that assimilated only conventional observations (referred to as GTS). The results demonstrated that GNSS RO assimilation notably improved the moisture and temperature distributions near the Mei-Yu front, yielding a frontal structure more consistent with the ERA5 reanalysis.

Compared to the GTS experiment, the EPH simulation exhibited lower forecast errors and higher correlation coefficients for temperature, moisture, and wind fields. In terms of precipitation, the EPH experiment more accurately reproduced both the spatial distribution and intensity of the heavy rainfall along the front. Forecast verification metrics further confirmed that the EPH outperformed the GTS run.

In summary, assimilating GNSS RO observations significantly enhanced the model analysis and precipitation forecast for this Mei-Yu frontal heavy rainfall event.

誌謝

在苦惱如何寫誌謝，回首過去或許是最直接的方法。

在高中學地理，那時學到大氣科學，越學越覺得神奇和有趣，還記得當時我那學期每週最感興趣的課是地理，地球自轉會令地球上物件移動時受到科氏力影響、大氣壓力逼使空氣流動、溫度不同令空氣密度不同等，這對於當時學物理學數學不知有何用的我發現原來這就是可以通過物理解釋的身邊事，大自然確實太有趣了。「温度高、水汽蒸發、成雲降雨、再降低環境温度」這種地球生態自然調節，讓現在的我也感動萬分。所以高一時就選定了大氣科學。現在回想中學時要致謝的是物理和地理老師，同時興趣也是最好的老師。

然後到了大學的大一大二，當時上的課都是學習大氣研究的最最最基礎的知識，其中微積分、普通物理這兩個表面上與大氣毫不相關的科目大大磨去了我對大氣研究的熱誠，那段時間每天都在忙不同的課業，而且當年還有跑一些社團和活動(現在想起那時真應留多點時間去自我思考和沉澱知識)，一學期 25 學分的我每天為滿滿的課東奔西跑，所以學業一直都不太好也不知道自己的目標。轉機是我大三去了北京大學的大氣系交換一學期，在那認識了不少中國的同學，那邊學生都十分積極，能感受到他們對學習的熱誠，這種熱誠並不是只因競爭激烈而產生的內卷所驅使，而是對知識的渴求，會想了解更多、會舉一反三、會下課與同學討論課上的內容甚至去問老師問題，在課餘時間也會把看到現象的觀測資料分享在班群和大家討論，這些都是我沒想到的也是令我驚訝不已的。在那邊認識了幾個北大大氣系的朋友，他們幾個的目標都是繼續深造，直接攻讀博士。在那個氛圍下我過了大學最快樂的時光，也令我重燃起對大氣研究的興趣，也謝謝那幾位北大的朋友。大學大氣基礎知識較弱的我在研究所的課上也經歷了不少波折，這次我多了去思考如何去做和如何去理解，這次我更學會了尋求幫助和接受別人幫助。

在碩士期間遇到了許多好心人，第一位想要感謝的當然是我兩位指導老師-張偉裕老師和陳舒雅老師。我自知有許多不夠用心和懶惰的地方，他們在每週的討論都十分耐心地指出我研究上錯誤和給建議，引導思考並共同研究下一步的研究方向，讓我感受到自己研究和個人性格的成長。雖然有時候我愚蠢的行為使他們氣忿但下週依然繼續平心地指導，這我十分敬佩和感恩，而這三年跌跌撞撞又不斷被兩位拉起並教導，就猶如再生父母的恩德，能遇到嚴父與嚴慈並重的母親是我的福氣，衷心感謝並希望兩位老師事事一帆風順、身體健康。

第二位想謝謝我的家人，我父母、哥哥和奶奶，能有如此開明和聰慧的父母實於少見，並師並友的相處方法使我面對長輩也能做朋友一樣相處，凡事以理性討論。從小讓我自由選擇愛好到我大學選科也沒過多的插手，充滿歡樂和幸福感的家庭是養成我豁達樂觀個性的土壤，有誕下一個哥哥陪我成長也是一件值得感恩的樂事。

第三想感謝在碩士照顧過我的前輩、學長，碩士與大學部其中一樣差距較大的事是學習知識的方法，有許多事除了上課和翻書本學習外，還會從詢問前輩那邊學習到，在這方面十分感謝中央大學全球定位科學與應用研究中心(GPSARC)的 Quan 學長和修文學長的支援，他們手把手教我使用中心的伺服器去運行資料同化還解答許多程式上的問題，回想起來都真的不好意思麻煩了他們許多時間，衷心感謝對我的照顧。雷達實驗室的各位學長姐也常常給許多研究上的意見，讓我走少了許多岔路和走在正確的方向。

第四想感謝我的同儕們，碩士時課堂上許多想不懂的問題都有去同儕求助，謝謝郭良裔幫我補習了半個學期的資料同化課，讓上課一知半解的我變得尚能理解。謝謝吳孟杰在各課關於數學上的幫助，謝謝吳佳靜各種各樣大大小小的建議提醒和美術設計的意思，真的是大學第一大女兄弟了。謝謝黃子珊共同作為資料同化的戰友，在看你報告時時常也給了我靈感哈哈哈。我碩士有大部分時間是跟系上同學在市區住家庭式，在此我想謝謝我的室友長-楊濬宇，它對生活品質的追求比我高，在三人的住房時我們共同訂了許多生活規則，一開始我會覺得麻煩(畢竟大四時已習慣一個人住)，但在兩年的「調教」下確實我看見了我的成長，雖然有點不甘心但確實改了我不少生活壞習慣。

第五我想感謝我的長期戰友和好兄弟-劉豪聯，我倆同一所高中，高三時不約而同地同班，剛好也報考中央大氣。當時僑生筆試聯考，七個國家和地區搶中央大氣的三個名額，當時一起備考也很幸運地兩個同時錄取了，同樣僑生也同系的他當然地成為了我大學室友之一，其他兩位為洪華和胡恆為(stanley)，謝謝如此同頻的三位室友，常常聊天到深晚，三位都是我的交心好兄弟，謝謝你們。當中我和豪聯同學共同參加了港澳會、系學會廣器部、測站人員和壘球隊，之後也一起讀中央大氣碩士班，簡直是朝夕相對啊哈哈哈，很多時候他可靠的能力和理性明辯是非的性格幫了我許多決策，謝謝您。目前他在澳門氣象局工作，我目標也是考上那邊工作，或許未來當同事好幾十年也要麻煩你了，衷心感謝和感謝你的包容。

最後的最後我想感謝我自己，辛苦了，真興幸有捱下去，變得更強了。

目錄

摘要 ..... **I**

ABSTRACT ..... **II**

誌謝 ..... **III**

目錄 ..... **V**

圖目錄 ..... **VII**

表目錄 ..... **XI**

一、 前言 **1**

二、 研究方法與校驗資料簡介 **5**

2–1 資料來源 5

2–1–1 FORMOSAT-7 與 GNSS-RO 5

2–1–2 全球電信系統觀測資料(GTS) 6

2–1–3 臺灣區域豪雨觀測與預報實驗(TAHOPE) 6

2–1–4 歐洲中期預報中心第五代再分析場資料(ERA5) 7

2–2 模擬實驗設計 8

2–2–1 數值模式與同化系統 8

2–2–2 WRFDA 中 GNSS-RO 資料的前向觀測算子 9

2–2–3 實驗設計 10

2–3 校驗方法 10

2–3–1 均方根誤差(RMSE) 11

2–3–2 相對均方根誤差(RRMSE) 11

2–3–3 空間相關係數（SCC） 12

2–3–4 臨界成功指數（CSI） 12

2–3–5 公正預兆得分（ETS） 13

2–3–6 鄰域空間驗證法（FSS） 13

2–4 鋒面系統客觀定位方法 14

三、 模擬結果與討論 **15**

3–1 資料同化結果綜合討論 15

3–2 區域綜合驗證 17

3–3 梅雨鋒面位置預報驗證 19

3–4 降水預報驗證及成因分析 20

3–4–1 6 月 7 日 00-03UTC 暴雨分析 21

3–4–2 6 月 7 日 03-06UTC 暴雨分析 22

四、 系集同化預報 24
五、 微物理參數化敏感度測試 25
六、 結語 26
參考文獻 28
附表與附圖 31
附錄 66

圖目錄

圖 1　2001-2016 年 (a)臺灣降雨事件相關天氣事件百分比圖。(b)臺灣標準化降雨量(mm/station) 與相關天氣事件統計圖。(c)臺灣強降雨相關之天氣事件百分比圖。鋒面事件(FT)，颱風事件(TY)，其他事件(OT)。(張等人，2019).....31

圖 2　2006-2021 年期間臺灣坡地災害事件肇因的統計分析百分比圖。(氣象預報與分析，第 255 期).....32

圖 3　(a) 850hPa 2022 年 6 月 5 日至 9 日五日平均風場和平均降雨量(圖取自臺灣中央氣象署)，(b) 2022 年 6 月 5 日至 9 日五日累積雨量圖(圖取自臺灣中央氣象署).....32

圖 5　IOP3 期間雷達回波圖，時間順序為 2022 年 6 月 7 日(a) 00UTC、(b) 03UTC、(c) 06UTC、(d) 09UTC、(e) 12UTC 及(f) 2022 年 6 月 7 日 12UTC 的 12 小時累積雨量。.....34

圖 6　GNSS-RO 測量原理示意圖，灰線為幾何直線距離，紅線為經過大氣偏折後掩星觀測距離。(圖片及部分資料來自臺灣資料分析中心 TACC).....35

圖 7　24 小時同化所使用到的 GNSS RO 觀測點和預報資料校驗範圍，紅色十字點為 GNSS RO 點位置，共有 1019 筆 RO 資料加入同化。綠色框為大尺度環境場校驗範圍，藍色框為降雨校驗範圍。.....35

圖 8　WRF 兩層巢狀網格配置圖，外層網格區域水平解析度為 15 公里，內層網格區域為 3 公里。.....36

圖 9　(a)混合 WRFDA 資料同化系統流程圖(參考 Chen et al. (2021))。 (b)實驗設計圖。每次模擬採用 1 天循環資料同化，循環間隔為 6 小時，然後進行 5 天的預報。.....37

圖 10 梅雨鋒面系統客觀定位方法圖。這範例用 2025 年 6 月 6 日 18UTC ERA5 資料。(a) 975hPa 位溫圖。(b) 絕對值 975hPa 位溫水平梯度圖。(c)只採用地形高度 150 公尺以下的圖 b 。(d) 6 月 6 日 18UTC 一小時降雨量。(e)加上降雨權重的絕對值位溫梯度圖，其中綠色線為由 ERA5 資料判斷出來的鋒面位置。(f)中央氣象署 2025 年 6 月 6 日 18UTC 地面天氣圖。.....39

圖 11 在 6 月 4 日 18UTC 初次同化的分析場在(a,b) 700 hPa, (c,d) 850 hPa, (e,f) 925 hPa 的(a,c,e)水氣混合比和(b,d,f)溫度的 EPH-GTS 差異分佈。黑色十字點為加入同化的 GNSS RO 點位置，藍色線為當時鋒面位置，由 ERA5 資料用前文提及的定義方法定義出。.....40

圖 12 在 6 月 5 日 1800UTC 經過 24 小時同化後的最終分析場在(a,b) 850, (c,d) 925 hPa 的水氣混合比(a,c)和溫度(b,c)的 EPH-GTS 差異量，藍色線為當時的鋒面位置。.....41

圖 13 在平均 24 小時同化的分析場在(a,b) 850hPa, (c,d) 925hPa 的(a,c)水氣混合比和(b,d)溫度的 EPH-GTS 差異量，藍色線為 6 月 5 日 1800UTC 的鋒面位置。.....42

圖 14 2022 年 6 月 5 日 18UTC 經過 24 小時同化後的最終分析場在(a,b) 850hPa, (c,d) 925 hPa 的(a,c)水氣混合比和(b,d)溫度的 | EPH-ERA5 |-| GTS-ERA5 | 差異量，藍色線為當時的鋒面位置。.....43

圖 15 模式預報 00-48 小時每三小時(a,c,e)RMSE 得分和(b,d,f)SCC 得分以 ERA5 再分析場作校驗，計算範圍為圖 7 的綠框內(15–30˚N, 110–127˚E)。從上至下為在(a,b) 925 hPa 溫度、(c,d) 850 hPa 溫度（單位為 K）和(e,f) 850 hPa 水汽混合比（單位為 g/kg）。藍色線為 EPH，紅色線為 GTS，綠色線為 noDA。 44

圖 16 模式預報 00-48 小時每三小時(a,c) RMSE 得分和(b,d)SCC 得分以 ERA5 再分析場作校驗。從上至下為(a,b)925 hPa 緯向風(u 風)、(c,d)925 hPa 經向風(v 風)（單位為 m/s）。藍色線為 EPH，紅色線為 GTS，綠色線為 noDA。 45

\ 45

圖 17 EPH 組與 GTS 組在 15-30°N 和 110-127°E 內與 ERA5 校驗的 12 小時平均預報垂直 RMSE 差異量(EPH-GTS)，預報(a) 00-12 小時、(b) 12-24 小時、(c) 24-36 小時和(d) 36-48 小時平均。其中水汽（藍色）、溫度（紅色）、經向風（綠色）和緯向風（紫色）。0 值虛線左側為負值，右側為正值，負值代表 EPH 組 RMSE 更小更接近 ERA5（誤差較小）；反之正值表示 EPH 誤差較 GTS 更大。 46

圖 18 各實驗組梅雨鋒面客觀定義位置，藍色線為 EPH，紅色線為 GTS，綠色線為 ERA5。時間順序為(a) 6 月 6 日 00UTC(預報 6 小時)，(b) 6 月 6 日 06UTC(預報 12 小時)，(c) 6 月 6 日 12UTC(預報 18 小時)，(d) 6 月 6 日 18UTC(預報 24 小時)，(e) 6 月 7 日 00UTC(預報 30 小時)，(f) 6 月 7 日 06UTC(預報 36 小時)。.....47

圖 19 臺灣中央氣象署地面天氣圖，其中滯留鋒即為梅雨鋒面。時間順序為(a) 6 月 6 日 00UTC，(b) 6 月 6 日 06UTC，(c) 6 月 6 日 12UTC，(d) 6 月 6 日 18UTC，(e) 6 月 7 日 00UTC，(f) 6 月 7 日 06UTC。 .48

圖 20 2022 年 6 月 7 日 00-12UTC(預報 30 至 42 小時)累積雨量，左圖為 EPH 組，中間為 GTS 組，右圖為 QPESUMS 觀測資料。 49

圖 21　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC 累積雨量的(a)FSS 差異(EPH-GTS)，(b)ETS，(c)CSI，與 QPESUMS 觀測資料校驗，圖 b,c 的藍色線為 EPH 組，紅色線為 GTS 組。 50

圖 22　不同時間的可總降水量(a,d,g,j,m) EPH 組，(b,e,h,k,n) GTS 組，(c,f,i,l,o) EPH 組- GTS 組的差異量，圖上的風場為高度 850hPa 風，時間排序為(a,b,c) 6 月 5 日 18UTC，(d,e,f) 6 月 6 日 00UTC，(g,h,i) 6 月 6 日 06UTC，(j,k,l) 6 月 6 日 18UTC，(m,n,o) 6 月 6 日 21UTC。 51

圖 23 不同時間的 975hPa 位溫(a,d,g,j,m) EPH 組，(b,e,h,k,n) GTS 組，(c,f,I,l,o) EPH 組-GTS 組的差異量組，圖上風場為高度 975hPa 風，紫色輪廓線為 975hPa 10 m/s 和 12 m/s 風速，時間排序為(a,b,c) 6 月 5 日 18UTC,，(d,e,f) 6 月 6 日 00UTC，(g,h,i) 6 月 6 日 06UTC，(j,k,l) 6 月 6 日 18UTC，(m,n,o) 6 月 6 日 21UTC。 52

53

圖 24　三小時累積雨量圖，時間為(a,b,c) 6 月 7 日 00 至 03UTC 和(d,e,f) 6 月 7 日 03 至 06UTC。(a,d)為 EPH 組，(b,e)為 GTS 組，(c,f)為 QPESUMS 觀測資料用作驗證降雨。 53

圖 25　兩模擬組可總降水量和地表 10 米流場圖，白色線為 30、40、50 dBZ 雷達回波，(a,b,c)為 EPH 組和(d,e,f)為 GTS 組，時間為(a,d) 6 月 7 日 00UTC，(b,e) 6 月 7 日 01UTC，(c,f) 6 月 7 日 02UTC。 54

圖 26　兩模擬組 975hPa 位溫與風場圖，紫色線為 10、12 m/s 風速輪廓線，(a,b,c)為 EPH 組和(d,e,f)為 GTS 組，時間為(a,d) 6 月 7 日 00UTC，(b,e) 6 月 7 日 01UTC，(圖 c,f) 6 月 7 日 02UTC。 55

圖 27　兩模擬組(a,c)相當位溫與(b,d)水汽混合比垂直剖面，剖面位置參考圖 26，黑色虛線為-2、-4、-10 (單位10-5s-1)輻散場，(a,b)為 EPH 組和(c,d)為 GTS 組，時間為 6 月 7 日 02UTC(預報 32 小時)。 56

圖 28　兩模擬組(a,c)垂直風速與(b,d)經向絕對值風速垂直剖面，剖面位置參考圖 26，黑色虛線為-2、-4、-10 (單位10-5s-1)輻散場，(a,b)為 EPH 組和(c,d)為 GTS 組，時間為 6 月 7 日 02UTC(預報 32 小時)。 57

圖 29　兩模擬組 6 月 7 日 02UTC(預報 32 小時)地表相當位溫場，黑直線為圖 24,25 垂直剖面的位置，白色線為 30、40、50 dBZ 雷達回波，(a) EPH 組，(b)GTS 組。 57

圖 31　圖例設定與圖 23 相同，時間為(a,d) 6 月 7 日 03UTC，(b,e) 6 月 7 日 04UTC，(c,f) 6 月 7 日 05UTC。 58

圖 32　圖例設定與圖 24 相同，剖面位置參考圖 31，時間為 6 月 7 日 04UTC(預報 34 小時)。 59

圖 33　圖例設定與圖 25 相同，剖面位置參考圖 31，時間為 6 月 7 日 04UTC(預報 34 小時)。 60

圖 34　兩模擬組 6 月 7 日 04UTC(預報 34 小時)地表相當位溫場，黑直線為圖 24,25 垂直剖面的位置，白色線為 30、40、50 dBZ 雷達回波，(a)EPH 組，(b)GTS 組。 60

圖 35　各實驗組梅雨鋒面客觀定義位置，淺藍色線為 32 組各 EPH 組位置，深藍色線為 32 組平均 EPH 組位置，淺紅色線為 32 組各 GTS 組位置，深紅色線為 32 組平均 GTS 組位置，綠色線為 ERA5 位置。 時間順序為(a) 6 月 6 日 00UTC(預報 6 小時), (b) 6 月 6 日 06UTC(預報 12 小時), (c) 6 月 6 日 12UTC(預報 18 小時), (d) 6 月 6 日 18UTC(預報 24 小時), (e) 6 月 7 日 00UTC(預報 30 小時), (f) 6 月 7 日 06UTC(預報 36 小時)。 61

圖 36　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC(預報 30 至 42 小時)累積雨量，(a) EPH 系集平均雨量，(b) GTS 系集平均雨量，(c)QPESUMS 觀測資料，(d) EPH 系集標準差雨量，(e) GTS 系集標準差雨量。 62

圖 37　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC 累積雨量的(a) 32 組系集預報 ETS，(b) 32 組系集預報 CSI，與 QPESUMS 觀測資料校驗，藍色線為 EPH，紅色線為 GTS 63

圖 38　不同微物理參數化下預報 2022 年 6 月 7 日 00-12UTC(預報 30 至 42 小時)累積雨量，(a) Goddard 4-ice microphysics scheme，(b) Kessler scheme，(c) Thompson scheme，(d) WRF Single-Moment 6-class scheme，(e) WRF Double-Moment 6-class scheme，(f) QPESUMS 觀測資料。 64

圖 39　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC 累積雨量在不同物理參數化的統計分數。(a) 9 公里領域半徑 FSS，(b) ETS，(c) CSI，與 QPESUMS 觀測資料校驗。藍色線為 Goddard 4-ice microphysics scheme，綠色線為 Kessler scheme，紅色線為 Thompson scheme，淺藍色線為 WRF Double-Moment 6-class scheme，棕色線為 WRF Single-Moment 6-class scheme。 65

表目錄

表 1　模擬實驗設計。.....36
表 3　2022/06/07 00-12UTC 累積雨量統計分數。.....50
表 4　2022/06/07 00-12UTC 32 組預報平均累積雨量統計分數。.....62
表 5　不同微物理參化下預報 2022/06/07 00-12UTC 累積雨量統計分數。 64
表 b1 同化過程中使用的 GTS 所包含資料的詳細資訊。(Routray et al., 2016)
.....66

一、 前言

臺灣位於副熱帶，在亞洲季風系統影響下季節變化明顯且多元，年平均降雨量約2500 mm，為溫暖且多雨的海島型氣候 (中央氣象局 110 年氣候年報，2022)。每年 5 至 6 月臺灣進入梅雨季節，此時鋒面長時間滯留，加上西南季風水氣的持續供應，常引發綿延數日的強降雨。梅雨鋒面降雨具長時間、廣覆蓋且發展突然等特性，尤其在地形複雜的臺灣，在鋒面與西南氣流交互作用下易產生劇烈地形降雨進而引發洪水與土石災害。同時，由於梅雨鋒面中常帶有中小尺度對流系統和地形抬升效應，降雨時空變化多端，數值模式對其降雨位置和強度的預報能力有限(林，2023)。

臺灣周邊強降雨事件多為梅雨鋒系統和颱風侵襲。定義降雨強度達 0.1 mm/hr 以上為降雨事件，以兩大主要綜觀天氣系統而言伴隨鋒面發生的降雨事件佔全年降雨事件的20-25%(圖 1a) (張等，2019)，其整體佔比多於伴隨颱風發生的降雨事件。而標準化後之年累積降雨量分析(圖 1b)顯示，伴隨颱風與鋒面系統的累積降雨可達全年降雨之 40-50%。如果著眼在容易致災的強降雨事件，資料顯示伴隨鋒面的強降雨事件佔比其實較颱風更多(圖 1c)(張等，2019)。另外統計顯示 2006–2021 年間臺灣超過九成的重大坡地災害事件肇因於颱風（含颱風過後引入的西南氣流）或梅雨鋒面兩類天氣系統；其中僅梅雨鋒面就佔約 16%的比率(圖 2)。換言之除了颱風之外幾乎所有嚴重豪雨災害都是在梅雨季發生(林，2023)。例如 2005 年“六月十二日水災”與 2006 年“六月九日水災”等梅雨鋒面暴雨事件曾創下累積雨量紀錄並造成嚴重傷亡，即突顯此類鋒面豪雨的致災威脅與預報困難性。上述事實說明梅雨季鋒面降雨預報不確定性高，一旦預報失誤往往會帶來巨大災害損失，因而提升梅雨鋒面預報能力是氣象防災的重要課題。

因此，如何有效捕捉梅雨鋒面的水汽移動、對流增強與滯留雨區位置，成為長期以來氣象預報的重大挑戰。梅雨鋒面降雨預報之困難，部分源自觀測資料的不足。傳統地面測站與高空探空對鋒面結構的掌握有限，尤其梅雨鋒面經常橫跨海峽兩岸甚至位於海上時，海面上觀測相對匱乏，導致對鋒面位置和環境場的分析存有不確定性。即使氣象雷達可提供雷達回波監測，但對鋒面南側遠洋上的水氣輸送和垂直結構仍難以直接觀測。臺灣過去曾透過密集觀測實驗（如 2008 年的西南氣流實驗 Southwest Monsoon Experiment (SoWMEX)，以及本研究用到的臺灣區域豪雨觀測與預報實驗整合計畫 Taiwan-Area Heavy Rain Observation and Prediction Experiment (TAHOPE)來彌補常規觀測之不足，但這些人工密集觀測時空有限。上敘這些因素共同凸顯了進一步提升資料同化方法與引入新興觀測資料（如 Global Navigation Satellite System Radio Occultation (GNSS RO)）的必要性。

近年數值天氣預報模式（如 Weather Research and Forecasting (WRF)、European Centre

for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)、Global Forecast System (GFS)等）的數值解析度與物理參數化方案持續改進，加上計算能力提升，使得模式對流模擬與中尺度演變能力增強。與此同時，資料同化技術也從傳統的三維變分 Three-Dimensional Variational Data Assimilation（3DVar）演進到四維變分 Four-Dimensional Variational Data Assimilation（4DVar）、系集卡爾曼濾波 Ensemble Kalman Filter（EnKF）及混成同化方法等，不斷拓展可用觀測資料的種類與處理能力。各類遙感資料（衛星輻射、雷達觀測等）相繼被整合進同化系統，極大提升了初始場的精度。

近年國內外已有多項研究將 GNSS-RO 資料同化於預報來提升準確度並取得多項成果。許多研究證實同化掩星觀測能提升劇烈天氣（如梅雨鋒面豪雨、熱帶氣旋等）的預報準確性。其改進主要歸功於對初始場水汽和低層水汽場修正。例如，Chen et al. (2014) 在 SoWMEX 期間針對 2008 年 6 月 16 日強降水案例進行研究，發現同化 Global Positioning System Radio Occultation (GPS RO) Formosa Satellite Mission 3 / Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (FORMOSAT-3/COSMIC) 折射率資料能顯著改善分析場低層水汽的分析精度，進而提升對強降水的預報能力。Huang et al.(2010)以臺灣及西北太平洋海域為對象，在 WRF 模式中同化 FORMOSAT-3/COSMIC 的 RO 折射率資料，並針對 2007-2008 年的數個梅雨與颱風案例進行模擬。他們發現同化 GPS RO 資料後，模式初始場中中低層水汽分析得到改善進而使得預報的降水分佈更為合理，對於 2007 年 6 月梅雨鋒面個案，與未同化 RO 資料相比，同化 RO 的預報試驗成功壓制了對南臺灣降雨的過度預報誤差，在其第三天預報中南部降雨量的過度預報被明顯減弱。這表明 GPS 掩星觀測資料可能對梅雨鋒面強降水的預報產生影響；同化福衛三號 GPS-RO 的低空折射率/彎曲角資料後，可加強海上水汽輸送，提升低層大氣水氣含量與鋒面輻合，從而增進豪雨強度和位置預報。Chien and Kuo (2010)文中提及臺灣的 SoWMEX 試驗研究亦指出，加入 GPS-RO 與投落送探空資料有助於改善梅雨期間延伸 36 小時以上之降雨模擬，尤其對較小雨量閾值的預報技巧提升明顯。類似地，Chang and Yang (2022) 分析臺灣地區的颱風與梅雨系統，指出 Formosa Satellite Mission 7 / Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate-2 (FORMOSAT-7/COSMIC-2)衛星提供的 RO 資料能顯著增強南海北部及珠江口周圍的水汽含量，從而改善梅雨季降水預報的準確度。

在經研究得知 GNSS RO 能改善初始場外，更可進一步針對 GNSS RO 同化運算子的改變而更提升預報準確度。Chen et al. (2020)中比較兩種 GPS 掩星（RO）資料同化運算子：局地折射率 Local Refractivity（LOC）與非局地溢相位 Non-local Excess Phase（EPH），以評估其對熱帶氣旋預報的影響。研究發現，EPH 運算子在捕捉颱風的結構特徵（如颱風眼、眼牆和雨帶）方面表現更佳，並能提升颱風路徑和強度的預報準確度。此外，EPH 同化能更準確地調整初始場中的水汽和風場結構，從而改善預報性能。這表明在熱帶氣旋等高濕環境中，採用非局地溢相位運算子進行 GNSS RO 資料同化，能有效提升數值

天氣預報的準確性。另外，Chen et al. (2021)並利用裝有 Weather Research and Forecasting Data Assimilation (WRFDA)混成同化系統 Three-Dimensional Ensemble Variational Data Assimilation (3DEnVar)的 WRF 模式同化 GNSS-RO 資料，並採用考慮水平方向梯度的非局地溢相位算子，結果使用非局地運算子同化 GNSS RO 資料，能顯著提升颱風的路徑預報準確度。以 2020 年颱風海神（Haishen）為例，實驗結果顯示非局地運算子同化能更準確地捕捉颱風的潛在渦度變化，改善初始場的水汽與風場結構，進而提升預報性能。前人 Schwartz et al. (2013)使用三維變分法(3DVAR)和混合變分-系集資料同化來預報颱風路徑，他們發現混合方法的預報效果優於三維變分法。顯然，透過結合基於變分和基於系集的同化兩種方法來改進分析，使用 WRFDA 混合系集同化系統(3DEnVar)的 WRF 模式同化 GNSS RO 的非局地超額相位算運算子是最佳化的 GNSS RO 同化。為了研究 RO 資料的影響，本研究採用 3DEnVar 混成同化方法和非局地溢相位運算子同化 GNSS RO。

本文針對 2022 年 6 月 6 日梅雨期間之豪雨個案詳加研究，這次的梅雨鋒面為 2022 年第三波影響臺灣的梅雨鋒面(圖 3)，由圖 3a 看出降雨多集中北緯 20°至 30°梅雨鋒面位置，另外可由圖 4 的天氣圖看出梅雨接近、到達、滯留、最後北上的過程 (圖 4)。在 6 月 3 日至 6 月 5 日期間臺灣受西南風影響，高溫悶熱西南部迎風面有短暫陣雨。在 6 月 6 日午後鋒面南下滯留。這次的滯留鋒面為臺灣帶來 6 天的連續降雨，為 2022 年梅雨季影響最久的一波，6 月 11 日累積五天降雨全臺灣大部分地區都有達 50 毫米以上的降雨，特別是西北部更有達 300 毫米以上的豪大雨(圖 3b)。圖 5 的雷達回波圖可以更直觀地看到對流生成和移入的過程，在 6 月 7 日前北方移入對流，只南移到桃竹苗地區並一直往東，6 月 7 日 00UTC 開始西方一直移入系統，西北部沿岸帶來地區性強降雨和全台有雨，06UTC 西部沿岸發展出強對流，有多 MCS 一直發展出來由西往東移入(圖 5)。而本研究着研究的是 6 月 7 日 00 至 12UTC 臺灣西北部的強降雨，其中前 6 小時會分兩個時間段 00-03、03-06UTC 仔細分析降雨成因。6 月 7 日當天鋒面雲帶在臺灣上空，高壓由太平洋深入南海，水氣沿鋒面南側西南風到達臺灣。

而臺灣大氣科學界為透過研究增進對梅雨季及颱風的劇烈區域性豪雨的瞭解，故有「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(TAHOPE) 計劃，其為臺灣主導的大型觀測與預報實驗，其期執行三年 （2019 年 8 月到 2022 年 7 月）。其中 2022 年 5－8 月期間 TAHOPE 實驗是與美國 Prediction of Rainfall Extremes Campaign in the Pacific(PRECIP2022) 實驗及日本 Tropical Cyclones-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity Estimations/Forecasts (TPARC-II) 實驗三方共同推動國際聯合觀測實驗。National Center for Atmospheric Research S-PolKa Radar (NCAR SPOL)雷達及密集加放探空於 2022 年 5 月中旬至 8 月上旬在臺灣進行觀測實驗，在 TAHOPE 期間有特別對臺灣自主衛星（福衛 7 號）GNSS 掩星進行同化及預報的效益評估。

本研究旨在探討 GNSS RO 資料同化對梅雨鋒面降雨預報的影響，以 2022 年 6 月 7 日發生於臺灣的梅雨鋒面豪雨個案為對象。在第二章會概述研究方法和實驗設計，模擬結果見第三章。第四章討論系集同化結果和第五章的微物理參數化敏感度實驗討論在不同的初始條件下同化 GNSS RO 對梅雨的影響。第六章為結論。

二、 研究方法與校驗資料簡介

2－1 資料來源

2–1–1 FORMOSAT-7 與 GNSS-RO

福爾摩沙衛星七號（FORMOSAT-7/COSMIC-2）計畫是臺灣與美國合作的大型國際專案，由國家實驗研究院國家太空中心（National Space Organization, NSPO）與美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）共同執行。福衛七號計劃是福爾摩沙衛星三號（FORMOSAT-3/COSMIC）任務的升級與延續，以更多的衛星（福衛七號完整星座最多可達 12 枚）、更多掩星觀測數和更廣的觀測範圍進行大氣觀測（TASA/NSPO, 2023）。福衛七號星系共部署 6 顆近地軌道衛星 Low Earth Orbit satellite (LEO satellite)，搭載全球衛星導航系統接收機，可同時接收美國 GPS、俄羅斯 Global Navigation Satellite System (GLONASS)衛星和歐盟 Galileo Global Navigation Satellite System(GALILEO)衛星的訊號，以量測大氣垂直結構。

全球衛星導航系統無線電掩星（GNSS RO）技術提供了一種全天候的遙測觀測手段。有別於傳統遙測受雲雨影響，GNSS RO 透過接收低軌衛星對 GNSS 訊號的折射延遲，可反演大氣折射率並提取溫度、濕度與氣壓垂直剖面。其觀測具備高垂直解析度(100 至 200 公尺)，不受雲雨和電離層影響且分佈全球陸地海洋(特別是熱帶與副熱帶)，能有效彌補海上觀測空缺。自 2006 年福衛三號/ COSMIC 任務成功後，各國營運數值天氣預報中常規同化也加入 GNSS RO。後來福衛七號部署以來，每日可提供高達 6,000 筆以上的掩星觀測，且能同時接收多種 GNSS（GPS 與 GLONASS 等）訊號，傾斜角也達到 24°，能更密集地監測赤道與熱帶地區。因此能補強海洋及遠洋地區水汽和溫度場的觀測空白的特性，目前 GNSS RO 資料已被廣泛應用於大氣科學研究(eg., Lien et al. 2021)。

GNSS RO 其基本原理為當 GNSS 衛星發射電磁訊號穿過大氣層時，受大氣折射影響產生彎曲和延遲(圖 6)。若無大氣影響，信號從 GNSS 到 LEO 的相位只有經幾何距離與電離層延遲(這不在本研究範圍)，透過衛星星曆能精確掌握 GNSS 及 LEO 衛星的位置和速度，所以可計算訊號因大氣影響而產生的時間差去計出超額的相位（excess phase）。公式如下:

$$\Delta L = L_{實際} - L_{直線} = L_{實際} - \|x_{LEO}(t) - x_{GNSS}(t-\tau)\|$$

$x_{LEO}(t)$ 為低軌道（LEO）衛星在時間 t 的位置向量，$x_{GNSS}(t-\tau)$ 為 GNSS 衛星在較早時間 $t-\tau$ 的位置向量（因信號從 GPS 發出後延遲才被接收到），τ為信號從 GPS 傳到 LEO 衛星的實際傳輸延遲時間。ΔL 代表電磁信號因為穿越大氣而走多的那一段路徑，而接收端(LEO)觀察到的相位隨著大氣層變化。在局地球對稱的假設下，通過多普勒頻移可轉換為信號的偏折角 α(a)，其中 a 是影響參數，也就是信號近地層的最靠近高度。得到偏折角 α 對應 a 的函數（impact parameter）再做 Abel 轉換換成大氣折射指數剖面。因為折射指數的絕對變化量小，因此通常採用折射率（refractivity, N）代替，可進一步推算出與天氣預報相關的氣象參數，如溫度、氣壓和水氣壓等。Ware 等人(1996)的研究首先驗證了此掩星反演方法的可行性與精確度。

本研究採用非局地溢相位資料同化方案(詳細在 2-2-2 小節介紹)，使用 Sokolovskiy et al. (2005) 提出的觀測算子對 GNSS-RO 超額相位進行模擬，將反演所得的非局地溢相位作為同化變數。研究中同化的掩星資料時段為 2022 年 06 月 04 日 18UTC 至 06 月 05 日 1800UTC，涵蓋東亞地區（模式外層區域網格），共計 1019 筆掩星剖面（其空間分佈如圖 7 的紅十字點）。這些掩星探空資料包括了來自福衛七號／COSMIC-2(FORMOSAT-7/COSMIC-2）、歐洲氣象營運衛星 Meteorological Operational Satellite（MetOp）、韓國多用途衛星五號 Korea Multi-Purpose Satellite-5（KOMPSAT-5），以及西班牙地球觀測衛星（PAZ）(Spanish: Paz, meaning "Peace")。

2–1–2 全球電信系統觀測資料(GTS)

全球電信系統（Global Telecommunication System, GTS）由世界氣象組織於 1951 年建立，用於全球各氣象單位即時交換氣象觀測與預報資料。透過 GTS 可獲取全球各地多樣的氣象觀測數據，包括傳統地面測站（SYNOP）、高空探空（TEMP）、船舶觀測（SHIP/TEMPSHIP）、航空氣象報告（METAR）、海上浮標（BUOY）、高空測風（PILOT）、衛星風反演（SATEM/SATOB）以及飛機回報（AIREP）等資訊，GTS 觀測資料的描述請參考附錄中的表 b1（Routray et al., 2016）。這些資料為天氣分析和預報提供重要依據。在本研究中，我們全面同化了來自 GTS 的常規觀測資料（經標準品質管制後），相關資料篩選條件未在此詳細說明，且 GTS 觀測並非本文討論重點。

2–1–3 臺灣區域豪雨觀測與預報實驗(TAHOPE)

TAHOPE（Taiwan-Area Heavy Rain Observation and Prediction Experiment）是臺灣主導的大型天氣觀測與預報實驗。而在 2022 年梅雨季至夏季（5 月下旬至 8 月）中，TAHOPE 與美國 PRECIP2022 及日本 TPARC-II 計畫合作，針對臺灣地區的梅雨鋒面和颱風等劇

烈天氣進行密集觀測。此實驗旨在提升對臺灣地區劇烈天氣(如梅雨期中尺度對流系統、颱風結構與路徑，以及午後熱對流)之分析與預報能力(TAHOPE Project Office, 2022)。

觀測期間部署了多項特殊觀測設備，包括設置於新竹海岸的美國國家大氣研究中心移動式 S 波段都卜勒雷達（S-Pol)、桃園海岸的臺灣第一部實驗性大氣移動式雙偏極化都卜勒 X 波段雷達（Taiwan Experimental Atmospheric Mobile-Radar, Team-R)，以及新竹氣象站的自動探空施放系統（Auto-sonde）等。上述協同觀測提高了對降雨和強風等現象的捕捉能力（TAHOPE Project Office, 2022)。本論文選取了該實驗密集觀測時段（IOP3）中的一個個案進行研究。

2–1–4 歐洲中期預報中心第五代再分析場資料(ERA5)

ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 為歐洲中期天氣預報中心（ECMWF）提供的第五代全球再分析資料集，涵蓋從 1950 年代後期至今的氣象紀錄（Hersbach et al., 2020)。再分析資料透過數值模式結合歷史觀測（包含地面、遙測等）產生均一且完整的氣象場，因不需即時預報發布，可使用延遲觀測提高分析精度。ERA5 以 12 小時循環同化週期產出全球大氣最佳估計，每小時提供大氣、海洋和陸面多項變數的解析。其水平解析度約為 0.25°×0.25°（大氣變數）和 0.5°×0.5°（海洋浪場)，垂直共有 137 層自地表延伸至 80 公里高空。由於 ERA5 透過大量觀測同化逼近真實大氣狀態，由於 ERA5 透過大量觀測同化逼近真實大氣狀態，本研究將其視為真實場來驗證模式模擬結果，比較分析包括僅同化 GTS 資料(GTS 組)與同化 GTS 加 RO 資料(EPH 組)兩組實驗，相應的模式分析場與 ERA5 再分析場在位溫、溫度、水汽混合比以及水平風場等變數上的差異。同時，我們採用一致的方法辨識鋒面位置，對比兩組同化實驗與 ERA5 的鋒面位置，以評估掩星資料同化對鋒面的影響。

2－2　模擬實驗設計

2–2–1　數值模式與同化系統

本研究採用 WRF-ARW（Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF）模式模擬梅雨鋒面期間的天氣演變，設置兩層巢狀網格，系統水平解析度分別為 15 公里和 3 公里，外層網格區域涵蓋整個東亞地區，內層區域涵蓋臺灣及其鄰近海域(圖 8)，兩層網格分別包含 662×386 與 1161×676 個水平格點，積分時間為 60 秒與 12 秒。垂直方向上設定為 52 層，大氣頂層為 20 hPa。模式物理參數化方案採用 Goddard 雲微物理方案、Kain-Fritsch 積雲對流參數化、YSU 邊界層方案與 RRTMG 長短波輻射傳輸模式，以適切模擬梅雨鋒面系統中對流與降水的發展機制。這些模式設定與臺灣中央氣象署的區域作業預報系統一致。本研究後續分析使用的是內層網格區的預報結果。

資料同化部分則採用 WRF 官方提供之 WRFDA 第四版（v4.2），該系統支援多種同化方法，包括：

- ✓ 三維變分法（3DVar）：以單一時間點的背景場與觀測資料進行資料同化，計算效率高，適用於較穩定的氣候條件下；
- ✓ 四維變分法（4DVar）：透過時間上的背景誤差演化來引進時間資訊，理論上可更精確地捕捉非線性系統變化，但對計算資源需求高；
- ✓ 系集卡爾曼濾波器（EnKF）：基於多成員模式系集模擬，直接估算背景誤差協方差，具高度非線性適應性，適用於高頻率觀測更新，但較易受小樣本誤差影響。
- ✓ 系集轉換卡爾曼濾波器（ETKF）：為 EnKF 的一種變形，透過正交轉換避免系集更新過程中的不穩定性與擾動退化問題，具數值穩定性佳、計算效率高的特性，常用於生成流場相關的擾動背景場，並與變分法結合成混合同化架構。
- ✓ 混合變分法（Hybrid Var-EnKF / EnVar）：結合變分法的穩定性與系集法的流場依賴性，透過系集生成背景誤差結構，克服 3DVar 或 4DVar 固定背景誤差的限制。WRFDA 支援的 EnVar 系列包含 3DEnVar、4DEnVar 等形式。

本研究特別採用其中的混合型系集三維變分法（3DEnVar）。在此系統中利用 WRFDA 產生 32 組系集成員（ensemble members），用以計算 ETKF 所需的系集擾動。系集擾動是來自每 6 小時的系集預報，進而推估出隨天氣變化的背景誤差協方差(Background Error Covariances，BEC)。混合 BEC 設定採用 Hamill et al. (2011)與 Kleist et al. (2012)的方法，將流場相依的 BEC 權重設為 75%，靜態 BEC 權重設為 25%。所有系集成員與變分同化都採用相同的模式解析度。模式與資料同化的版本皆為 WRF-ARW v4.2 與 WRFDA v4.2。有關更多詳細描述，可參考 UCAR 官方網站（2020 年 7 月 8 日存取）(Chen et al., 2021)。3DEnVar 方法不需建立伴隨模式，透過集成由 ETKF 導出的

系集擾動場與傳統背景誤差統計結構，所以在分析場中同時保留流場依賴性與氣候穩定性。其最大優勢在於提供更現實的誤差分佈，尤其適用於如梅雨鋒面這類含有強烈切變與中尺度對流特徵的天氣系統。

2–2–2 WRFDA 中 GNSS RO 資料的前向觀測算子

為提升對梅雨鋒面等海面上中尺度天氣系統結構的掌握，本研究選擇採用由 GNSS 掩星觀測的 Excess Phase（溢相位）反演而得之非局地折射率作為 WRFDA 資料同化的觀測變數。傳統的 GNSS RO 資料常見反演變數包含折射率（Refractivity）與偏折角（Bending Angle），而其觀測算子多假設大氣具有球對稱性，屬於局地觀測算子（Local Operator），其折射率 N 可由下式表達：

$$\boldsymbol{N} = 77.6 \times \left(\frac{P}{T}\right) + 3.73 \times 10^5 \left(\frac{\mathrm{e}}{T^2}\right)$$

其中 P 為氣壓（hPa）、T 為溫度（K）、e 為水氣壓力（hPa）。大氣結構於對流區或鋒面區，常具有顯著的水平不均勻性，將模式三維格點上的氣壓、溫度及水氣壓計算出折射率再插分在掩星點時，若掩星點剛好於大氣水平梯度明顯處(如颱風、鋒面)，則模式計算出的局地折射率與 GNSS RO 觀測差異會較大，~~此~~時球對稱假設將產生系統性誤差。為克服上述局限，Sokolovskiy et al.（2005）提出非局地折射率觀測算子（Nonlocal Refractivity Operator），進而提升對水平變異性顯著的大氣場模擬能力。其定義如下：

$$\boldsymbol{S} = \int \mathrm{N}\, dl$$

其中 N 為大氣的折射率，積分沿著 GNSS 射線訊號路徑進行，並常假設其近似為直線。此定義表示 Pseudo Excess Phase (S) 為沿訊號路徑上折射效應的總積分值，能反映出訊號在穿越大氣過程中所受到的全部折射累積效應，因此具有非局地特性。Sokolovskiy et al.（2005）進一步指出，此非局地 Excess Phase 算子在測量強水平梯度（如鋒面、對流系統邊界）的大氣場時，明顯優於局地算子。其不僅能更真實地模擬訊號真實的折射過程，還能減少局地算子在邊界層附近造成的誤差。此外，此算子已由 NCAR 研究人員實作於 WRFDA 資料同化系統中，並應用於多項數值實驗，證實其對預報颱風強度、路徑及結構特徵具有顯著改善效果（Chen et al., 2020）。本研究中，RO 算子的觀測誤差和品質控制標準採用 WRFDA 的預設設置，近地表觀測誤差約為 1%，近對流層觀測誤差降至約 0.2%（Chen et al., 2009）。更多關於 WRFDA 中 GNSS RO 觀測誤差的詳細信息，可參見 Chen et al. (2020) 的研究。

2–2–3 實驗設計

在這次梅雨鋒面個案中，本研究設計兩組實驗進行同化比較分析，分別為 GTS-表示僅同化傳統 GTS 觀測資料。EPH-表示在同化 GTS 基礎上額外同化非局地 GNSS-RO 折射率資料 （如表 1），兩組實驗均以 NCEP 全球分析數據(FNL) 0.25 度分析場資料作為初始與邊界場，於 2022 年 6 月 4 日 1800UTC 至 6 月 5 日 1800UTC 期間進行資料同化，本研究使用 3DEnVar 進行同化，資料同化時長為 1 天，每 6 小時同化一次，總計進行 4 次同化迴圈，然後進行 5 天的模式預報模擬(Chen et al., 2021)，到 6 月 10 日 1800UTC 結束(圖 9b)。

初始條件為 2022 年 06 月 04 日 1200UTC 的 NCEP 全球分析數據，再使用 WRF 模型進行 6 小時預報(圖 9a)。然後使用 WRFDA 中的 RANDOMCV 函數對此預報進行擾動，在控制變數空間分析中加入隨機雜訊，產生 32 個系集成員，並採用系集平均值作為混合三維變分法 (3DEnVar) 的初始估計值。同時，從這些系集成員中導出了與氣流相關的背景誤差協方差（background error covariances，BEC）。混合三維變分法最小化產生的分析結果在 ETKF 處理後取代了系集平均值，從而確保了兩個同化系統（ETKF 和 3DEnVar）之間的大尺度環境相似。EPH 組總計同化 1019 筆 RO 觀測點，主要來自福衛七號掩星資料。另外在大尺度環境校驗時會加一組沒有經過同化的預報模擬，叫 noDA，相同的模式設定但沒有進行同化，是由 2022 年 6 月 4 日 1200UTC 開始模擬，一樣到 6 月 10 日 1800UTC 結束。(圖 9b)

在實驗設計上，3DEnVar 同化視窗設定為中心時次前後各三小時，涵蓋該時間段內的所有可用觀測資料，提升觀測對初始場的涵蓋範圍與代表性。此外，ETKF 所產生的 32 成員擾動背景場不僅有助於提升資料不確定性的呈現，也能有效避免系集崩潰與不實擾動的累積誤差，確保模擬初始場具備合理的大氣結構，並強化降水與鋒面動力場的預報能力。

2－3 校驗方法

為了評估同化實驗組對梅雨鋒面的預報效果，本研究引入實際觀測資料和 ERA5 資料進行對照分析。本研究所採用之降水觀測資料來源為中央氣象署建置之即時定量降水估計系統（Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors, QPESUMS），該系統綜合應用多部氣象雷達所觀測之反射率資料，並結合地面雨量站實測資料進行交叉校正與偏差修正之降水估計產品，降水估算方面使用經驗性 Z-R 關係式將雷達反射率（Z，單位：$mm^6\,m^{-3}$）轉換為降雨率（R，單位：$mm\,h^{-1}$）。本研究依據

Xin et al. (1997) 所提出之關係式：

$$Z = 32.5R^{1.65}$$

將雷達回波轉換為降雨率，進而計算逐時與累積降水量。為提升估算準確度，QPESUMS 有採用中央氣象署之地面自動雨量站觀測資料進行同化與校正。本研究降雨驗證範圍 20–27˚N, 118–123˚E (圖 7 藍框範圍)，這範圍包括整個臺灣本島和周邊的離島地區以及部分鄰近的海域，這範圍能夠有效地監測和預測可能影響臺灣的劇烈天氣系統，如颱風、梅雨鋒面等。而大尺度環境場校驗則是參考臺灣氣象署對梅雨鋒面降水預報常用梅雨的檢查表的範圍(15–30˚N, 110–127˚E)，圖 7 綠框範圍，這個範圍包括了華南地區、南海北部、巴士海峽以及臺灣本島和周邊海域，正是影響臺灣梅雨的重要氣象區域。分析這些區域的氣象資料，可以更準確地判斷梅雨鋒面的發展與移動，從而提升降水預報的準確性。

本研究的校驗方式分為兩類，第一類為「連續性驗證(Continuous Verification)」，評估空間上觀測值和預報值之間的差異。主要應用於大尺度的氣象場校驗，；另一類為「絕對校驗法(Categorical Verification)」則用於即時定量降水預報的評估。各種得分意義和用途在表 2。關於研究詳細的結果與討論分別呈現於第三章。

2–3–1 均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)

公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F - O)^2}$$

F是格點上預報值，O是格點上觀測值，n 表示所有納入計算之格點數。

RMSE 為模式模擬值與實際觀測值間差異的平方平均再開根號，用以衡量預報與觀測間的偏差程度，數值愈小代表預報表現愈精準。該指標對於誤差偏大的情況較為敏感，適合用於量化連續性變數（如溫度、降水量）的整體誤差表現。

2–3–2 相對均方根誤差(RelativeRoot Mean Square Error, RRMSE)

公式如下：

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F - O)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}O^2}} \times 100\% = \frac{RMSE}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}O^2}} \times 100\%$$

其中上式分母為觀測值的平均值。RRMSE 為 RMSE 經過標準化後的表現方式，能排除變數尺度的影響，使不同變數或不同地區的誤差具有可比較性。RRMSE 數值愈小，表示模式相對於觀測平均值的誤差比例愈低，預報表現愈佳。

2–3–3 空間相關係數（Spatial Correlation Coefficient, SCC）

公式如下：

$$SCC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(F - \bar{F}) \times (O - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(F - \bar{F}) \times (O - \bar{O})}}$$

其中F是格點上預報時間內的值，$\bar{F}$是預報值之平均，O是格點上觀測時間內的值，$\bar{O}$是觀測值之平均。而空間相關係數(Spatial Correlation Coefficient, SCC)考慮了整個空間中所有氣象參數資訊，評估預報與觀測值之間在空間分佈表現上的相關性，其值介於 0 至 1 之間，越接近 1 表示模擬結果與觀測之間的空間一致性越高，能有效反映降水或其他氣象要素的空間配置準確性。

2–3–4 臨界成功指數（Critical Success Index, CSI）

公式如下:

$$CSI = \frac{H}{H + M + F}$$

其中 H 為命中次數（Hit），M 為漏報次數（Miss），F 為誤報次數（False alarm）。CSI 也稱為 Threat Score，與 ETS 類似，用以衡量預報事件與觀測事件的一致程度，重點在於評估預報對於有發生事件（如強降水）之命中能力。與其他指標相比，CSI 不考慮正確無事件（即預報與觀測皆未發生事件）之情形，因此特別適用於分析低發生率或稀有事件的預報。CSI 的取值範圍為 0 到 1，數值愈高表示預報對事件的捕捉能力愈佳，愈接近 1 則代表預報準確度越高。

2–3–5 公正預兆得分（Equitable Threat Score, ETS）

公式如下:

$$ETS = \frac{H - R}{H + M + F - R}$$

$$R = \frac{(H + F)(H + M)}{H + M + F + S}$$

R（Random）為在預報與觀測獨立假設下之隨機命中數，S（Safe） 為準確預報無事件的次數。ETS 主要用於評估模式對特定降水強度事件的分類預報能力，其值通常介於 -1/3 到 1 之間，愈接近 1 表示模式預報能力愈佳；ETS 等於 0 為隨機預報，若 ETS 小於 0 則代表實際預報差於隨機預測，顯示預報效果不佳。

2－3－6 鄰域空間驗證法（Fraction Skill Score, FSS）

公式如下:

$$FSS = 1 - \frac{\sum(F - O)^2}{\sum F^2 + \sum O^2}$$

其中 F、O 為經鄰域（window size）平均後的預報與觀測的二值化降水機率。
FSS 為鄰域空間驗證法中常用的評分指標，用以考慮高解析度預報中可能因雨帶位置微小偏差而影響驗證分數的問題。以 5×5 的分析網格為例，假設觀測與預報的降水均分佈在 7 個格點上，然因其空間位置並未完全對應，若採用如 ETS、CSI 等傳統的二分類驗證方法進行評估，將導致該區域的技巧評分為 0，表示模型在該區無有效降水預報能力。然而，若從機率角度分析，在此空間範圍內觀測與預報的降水發生機率（即降水區域占總區域面積之比例）皆為 7/25，顯示二者在降水預報面積相同，僅在空間位置上略有偏差。該方法透過設定鄰域大小，對預報與觀測進行空間平滑處理，再計算兩者的差異程度，評估其在鄰近範圍內的一致性。FSS 值愈接近 1，表示模式模擬與觀測在空間上愈趨一致，能更真實地反映預報在局部區域的準確度。

2－4　鋒面系統客觀定位方法

鋒面位置的判定過去主要仰賴各地氣象機構的天氣分析員，根據觀測資料進行人工、主觀的繪圖分析（Lamb, 1950），這種主觀分析至今仍為全球多數天氣中心的標準作業流程（Pook et al., 2012）。然而，針對梅雨鋒面降雨的預報與研究，鋒面在大尺度上的準確定位對暴雨強度與位置的預測具有關鍵影響。因此，本文鋒面位置的判斷方法參考張等人（2019）《臺灣地區鋒面系統客觀辨識方法之比較》一文，採用 975 hPa 位溫（單位：K）的絕對梯度作為客觀診斷指標(圖 10)。考慮數值模式近地表資料可能因地形影響而導致熱力或動力參數產生系統性偏差，故僅納入地形高度在 150 公尺以下的格點進行計算。實際操作時，亦亦進一步參考張等人之建議，將降雨率（precipitation rate, PR）作為位溫絕對梯度的權重，其中把降雨率小於 1 的值調為 1，這樣能確保鋒面位置不會只在降雨帶，亦即以 $|\nabla\theta| \times PR$ 作為鋒面位置判斷的新依據。此方法經驗證能更精確對應中央氣象署地面天氣圖所標示的梅雨鋒面主軸。

具體作法是先於研究區域（21–27.5°N, 117.8–124°E）內，搜尋每個經度上$|\nabla\theta| \times PR$最大值對應的緯度位置。為避免因小尺度雜訊或局部異常值導致鋒面線出現不自然的鋸齒型態，本文進一步採用滑動平均（moving average）進行處理。以 202 個經度格點為例，選取總點數 15%（即 30 點）作為滑動視窗長度，於每一個經度點，取其前後各 15 個點的資料進行平均，將所得結果作為最終鋒面位置。對於位於邊界而無法取得完整視窗的點，則以缺值處理。經滑動平均後，所得鋒面線可有效濾除短尺度雜訊，平滑呈現鋒面主軸整體走向，有助於進行後續定量分析與與人工天氣圖結果進行比對。

三、 模擬結果與討論

3－1 資料同化結果綜合討論

為了解資料同化對於模式預報結果的影響，本節研究先分別由濕度、溫度、風場差異量討論 EPH 組減去 GTS 組初始場差異的分佈狀況。由於本研究是同化 24 小時，在同化期間模式同化後得到初始場後再預報，初始分析場與最後分析場之間的結果會夾雜預報和同化的影響，故還需要討論同化期間兩組模擬的平均差異量和最終分析場與再分析場比較來嘗試了解影響預報差異的原因。

圖 11(a)-(f)為顯示 2022 年 6 月 4 日 18UTC 首次同化後分析場在 700、850 和 925 hPa 高度的水氣與溫度的差異分佈。從圖中可以觀察到，GNSS-RO 資料的同化對初始場產生了顯著的水氣和溫度調整，主要集中在鋒面附近及 RO 觀測點所在區域。例如在鋒面南側（西南季風暖濕氣流一側）的 850 hPa 和 925 hPa 層，EPH 組相較 GTS 組呈現正的水汽差異，表示同化 GNSS-RO 後該區域的水汽混合比增加。這與 GNSS-RO 觀測提供了海上低層水汽資訊有關；相較僅同化傳統觀測的 GTS 組，EPH 組分析場明顯加強了鋒面以南海洋上空的水汽含量。增溼的結果使得鋒面附近水汽梯度更為明顯，為後續鋒面降雨的發展提供了更充足的水汽供給。溫度場方面，鋒面附近亦出現局部的溫度調整。在 925 hPa 層鋒面一帶可見 EPH 組略低於 GTS 組的溫度（負差異），反映掩星資料同化可能減弱了暖舌強度。整體而言，圖 11 指出 GNSS-RO 同化使初始分析場在鋒面區域的水汽增加、溫度場適當調整。一系列 RO 點分佈位置與差異場的對應也顯示觀測資料主要在先前觀測不足的海上與鋒面區域提供了關鍵資訊，從而修正了分析場中鋒面附近的水汽與溫度場。

圖 12 為顯示經過 24 小時循環同化後（即完成 5 個 6 小時同化循環）的最終分析場。與初始場相比，最終分析場的差異分佈主要反映在 GNSS-RO 資料對低層場影響的累積結果。在 850 hPa 和 925 hPa 高度，EPH 組相對 GTS 組依然維持較高的水汽含量，尤其是在鋒面南側及其上下游區域，可見廣泛的正水氣差異。這表示經過一整天的同化，EPH 組持續在鋒面環境輸送更多水汽，使分析場更潮溼。此一現象與前人研究指出同化掩星觀測可加強海上水汽輸送、提高近地表水氣含量的結果一致。另外在鋒面北側華中地區一帶有大片強負水汽差異，表示相比 GTS 組，EPH 組該區較乾水汽較少，增加了鋒面南北水汽梯度，強水氣梯度意味著鋒面兩側存在大量「潮濕對乾燥」的對流配置，低層西南氣流與鋒面抬升作用，使得鋒面容易形成對流和降雨區，進一步加強豪雨發展。溫度差異方面，EPH 組在鋒面附近的 925 hPa 層相對於 GTS 組呈現出略低的氣溫，暗示 GNSS-RO 同化使鋒面區域的冷暖對比更趨明顯；而在 850 hPa 層某些局部位置則可能

出現輕微正溫度差異，代表 EPH 組略為暖於 GTS 組，這些溫度場改變可能反映模式在同化過程中調整了鋒面垂直結構。

而整個同化期間的平均分析場差異，這樣的時間平均差異圖能濾除短期雜訊與個別時間的隨機變動，留下的是兩組系統在同化策略差異下造成的穩定性差異，即在某一段時間內模式模擬持續出現固定位置或方向的差異。由圖 13 可以看出，EPH 組相對 GTS 組的系統性偏差主要集中在梅雨鋒面鄰近區域。在水氣方面，850 和 925 hPa 平均差異皆顯示鋒面以南廣大區域水汽含量偏高(圖 13a,c)，尤以臺灣以南至南海北部一帶最為顯着。這意味著在整個同化週期中，GNSS-RO 資料持續引導模式增加該區域的濕潤程度，強化了南側暖濕氣團的水汽供應。相對地，鋒面北側大陸沿岸地區則隱約呈現負的水汽差異，表示 EPH 組略減少了北側冷空氣中的水汽含量，可能代表削弱了原本過濕的分析，此南增北減的水汽調整有助於提升鋒面兩側水汽梯度的對比，使鋒面位置更明確。

溫度場平均差異則顯示較複雜的區域分佈情況：在 925 hPa 層，鋒面附近局部呈現 EPH 組略冷於 GTS 組的特徵(圖 13d)，而在 850 hPa 層某些海上區域 EPH 組略暖(圖 13b)。這些平均溫度差異雖幅度不大，但集中於鋒面區域，顯示同化過程中模式不斷微調鋒面環境的熱力結構。例如，925 hPa 層南海附近的負溫差異，可能是同化導致該處略微冷卻，有利於鋒生過程；而 850 hPa 層局部正溫差，或許與大尺度環境場的調整有關。綜合而言平均場分析強化了前述觀點：GNSS-RO 資料同化對鋒面相關的水汽供給和溫度場結構帶來持續且系統性的影響。此影響在空間上與梅雨鋒面位置高度吻合，顯示掩星觀測有效矯正了傳統觀測不足下分析場的系統誤差。

前面的為兩模擬組的比較，沒有加入校驗所以不能確定其修正是否令分析場準確，故接下來用圖 14 比較兩組最終分析場與 ERA5 再分析的差異，以量化 GNSS-RO 同化對分析精度的影響。|EPH–ERA5|-|GTS–ERA5|之差異分佈（即兩組分析場相對 ERA5 誤差的差異）。若某區域顏色顯示負值，代表該處 EPH 組分析場更接近 ERA5（誤差較小）而 GTS 組誤差較大；反之正值表示 EPH 誤差較 GTS 更大。結果明確地顯示出，EPH 分析場相對 ERA5 更加準確的區域主要集中在梅雨鋒面附近。在 850 hPa 和 925 hPa 高度的鋒面帶上，大片區域呈現負值差異，表示 EPH 組的水汽和溫度分析場更貼近 ERA5，再分析誤差明顯小於 GTS 組。例如在臺灣以南至巴士海峽一帶的暖濕區域，EPH 組水汽場的誤差較 GTS 組降低，意味著掩星資料同化有效修正了 GTS 組可能存在的水汽偏差，使分析場水汽分佈更符合再分析場。而在鋒面附近的 925 hPa 層，EPH 組的溫度場也較 ERA5 更吻合（呈現負的誤差差異），顯示鋒面位置與強度經 GNSS-RO 同化後得到更準確的描述。整體而言，圖 14 證實 GNSS-RO 資料同化有助於提升分析場對真實大氣狀態的貼近程度，與未同化掩星資料的 GTS 組相比，EPH 組在鋒面位置、水汽梯度以及溫度場分佈上均更接近 ERA5 再分析。

綜合圖 11 至圖 14 關於 GNSS-RO 同化的對分析場影響的分析，可以明確看出引入 GNSS-RO 掩星觀測同化後，模式無論在分析場還是短期預報上均出現多方面的改進。首先在分析場階段，掩星資料有效填補了海上與高空觀測的不足，使梅雨鋒面區域的水汽分佈和溫度結構更貼近再分析場。EPH 組預報初始場南側水汽明顯增加而北側可能略減，增強了鋒面的濕度梯度；鋒面兩側的溫度差異經修正後，鋒生場更符合 ERA5 再分析。

3－2　區域綜合驗證

針對 0-48 小時的區域預報誤差評估（圖 15 和圖 16），三組實驗 noDA 組、GTS 組、EPH 組在各預報時段的表現呈現明顯差異。整體而言，無同化的 noDA 組誤差最大，均方根誤差（RMSE）明顯高於另兩組，而模式預報場與 ERA5 再分析場的相關係數（SCC）則最低，顯示缺乏資料同化會導致預報偏差累積。相對之下，傳統觀測同化的 GTS 組由於有透過同化引入地面與高空觀測，顯著降低了各氣象變數的 RMSE，同時 SCC 提高，證實了資料同化對預報精度的重要作用。

分時段來看，各變數在短期預報（0–12 小時）階段的同化效果尤為顯著。此時 noDA 組因初始場欠缺同化觀測調整，導致例如 925 hPa 溫度、850 hPa 溫度及 850 hPa 水汽混合比的預報誤差居高；兩同化組則明顯降低了這些變數的 RMSE，提升了預報場與再分析場的相關性。EPH 組在短期內進一步展現最佳表現；相關係數方面，EPH 組對各變數場型的掌握度最高，在鋒面區域的溫度場和濕度場相關係數均略高於 GTS 組，顯示 GNSS-RO 同化已在預報初期產生正面影響。特別是濕度場，EPH 組透過同化額外的掩星觀測，使鋒面附近的水汽預報場更貼近 ERA5 再分析，0–12 小時內水汽變化的預報趨勢與實際更為一致。

在 12–24 小時的預報中，整體趨勢與前 12 小時類似：有同化的兩組實驗依然明顯優於 noDA 組，且 EPH 組持續略勝於 GTS 組。隨著預報時間延長，三組實驗的 RMSE 皆有隨時間累積而增大的趨勢，但 noDA 組的增幅最大，尤以濕度和近地面溫度場的誤差擴大最明顯；相對地，GTS 與 EPH 兩組因起始場較佳，其誤差增長速率較緩。值得注意的是，EPH 組對 925 hPa 近地面風場的預報相關性在 12–24 小時內也略有提升，暗示 GNSS-RO 資料對低空風場結構的調整在一天內逐漸體現。

進入 24–36 小時的中期預報，前述各組表現的差異雖稍有縮小，但仍維持原有排序。noDA 組在大氣各層的預報 RMSE 依然最高，特別是在鋒面相關的變數（如 850 hPa 濕

度和 925hPa 經向風）上誤差持續偏大，顯示未同化觀測的預報在一天後難以捕捉正確的鋒面環境。GTS 組透過傳統觀測的作用，顯著抑制了此段時間內誤差的成長，RMSE 明顯低於 noDA 組，相關係數則保持在中等偏高水準。EPH 組則展現出最穩健的預報能力：在 925 hPa/850 hPa 溫度、濕度以及低層風場的 RMSE 方面皆持續略低於 GTS 組，同時 SCC 保持最高。例如，36 小時時 850 hPa 水汽混合比的 RMSE，EPH 組較 GTS 組進一步降低，表示掩星資料同化對鋒面水汽的影響在此時段仍然存在；經由 GNSS-RO 改善的初始濕度場可能使模式更有效地模擬出鋒面降水與水汽輸送，因而在 24–36 小時依然維持較小的水汽預報誤差。此外，風場預報方面兩組差距雖不如濕度明顯，但 EPH 組在 925 hPa 經向風的 RMSE 仍稍優，預示 EPH 在模擬鋒面南北風變化上比 GTS 更貼近實況。

到了長預報的 36–48 小時階段，各實驗的預報技巧均開始趨於下降，noDA 組在兩天預報結束時的 RMSE 最高，兩模擬組雖然逐漸受到預報誤差成長的影響，但相較 noDA 組仍能保持較佳的精度。尤其在 850 hPa 水汽方面，EPH 組較 GTS 組的 RMSE 改善在 36–48 小時後期依然明顯，可見掩星資料對低層濕度場的調整使模式即使運行兩日，仍保有更準確的水汽分佈。

總的來說，圖 15 與圖 16 顯示在整個 0–48 小時預報期間，資料同化實驗（GTS 與 EPH）大幅優於無同化實驗，而融合 GNSS-RO 觀測的 EPH 組表現最佳，在所有預報時段和氣象變數上均略勝一籌。在溫度場方面，EPH 組的 925 hPa 與 850 hPa 溫度預報誤差全程均比 GTS 組低約略的幅度，相關係數也略高，代表 EPH 組更好地重現了鋒面區的溫度梯度結構。改善幅度最大的要數是大氣濕度場，透過掩星觀測引入海上垂直濕度分佈資訊，EPH 組的 850 hPa 水汽混合比 RMSE 明顯小於 GTS 組，幾個預報時段內均呈現出最小誤差，顯示同化 GNSS-RO 對低層水汽的掌握有明顯助益。另外特別是 925 hPa 緯向風和經向風的 RMSE，EPH 組均略低於 GTS 組，同時風場的 SCC 也維持較高。這意味著掩星資料同化經由調整大氣熱力場，進一步動力地改善了水平風場的預報。

而除了看各水平預報誤差外，還要看垂直分佈特徵以評估 GNSS-RO 同化對各高度層預報的影響，雖然圖 17 中有分四張圖（代表四個時段），但整體結構是一致的，強調空間層次上的誤差結構差異。圖 17 進一步比較了 EPH 組相對 GTS 組在不同高度的垂直 RMSE 差異分佈，藍色曲線（水汽）特別在中低層（約 800–975hPa）負偏差最大，顯示 EPH 組在鋒面附近高度的濕度預報誤差明顯小於 GTS 組。同化掩星觀測所增強的低層水汽信息，使模式對鋒面南北兩側溼度梯度的刻畫更貼近現實，從而在該高度範圍內降低了預報濕度場的 RMSE。高層（如 700 hPa 以上）水汽含量本就較低且各組差異有限，因此高層水汽 RMSE 差異對降雨降報影響不大。紅色曲線（溫度）則顯示 EPH 與

GTS 組在大部分高度的溫度 RMSE 差異為負值略微偏小，表示 EPH 組的溫度預報在各層均略優於 GTS 組但幅度不大於近地面和中層大氣（約 850 hPa 及 500–700 hPa）。

風場方面，圖 17 中經向風（綠色）與緯向風（紫色）的 RMSE 差異曲線揭示了 GNSS-RO 同化對不同風向分量的影響差異。綠色曲線在 700–925 hPa 高度帶明顯為負，尤其在約 850 hPa 附近負值幅度最大，表示 EPH 組在低層經向風的預報誤差明顯小於 GTS 組，這反映 GNSS-RO 同化增進了對鋒面南北向風場（如西南季風氣流和鋒面鋒生風場）的模擬，使得預報的經向風更為準確。相比之下，紫色曲線（緯向風）大部分高度接近零軸，僅在局部高度略呈負值，顯示 EPH 組對東西向風場 RMSE 的改善相對有限，推測可能是因為梅雨鋒面主要呈東西走向，天氣系統的關鍵風場變化多為南北向，因此 GNSS-RO 資料對經向風的效益更突出，而對緯向風的改進不如濕度與經向風明顯。

由圖 17 得知 GNSS-RO 掩星觀測對預報濕度場與風場的改善具有高度相關性，特別在對流層中低層，EPH 組的水汽和經向風預報明顯優於僅同化傳統觀測的 GTS 組，證明了掩星資料對梅雨鋒面環境場的增益作用；而在其他變數（溫度與緯向風）上，EPH 組也保持小幅度的誤差優勢或與 GTS 相當。尤其是濕度場的預報，GNSS-RO 同化帶來的改善效果最為明顯，風場（特別是南北風向）亦因濕度溫度場的更準確描述而獲得間接提升。另外在時間段上分析得知，水汽 RMSE 在 12–24 小時時段的改善幅度最大和經向風的改善在 24–36 小時維持較佳，說明 GNSS-RO 對中短期預報的幫助特別明顯也有利於模擬鋒面風場結構。圖 15-17 這些結果印證了引入新型觀測資料（如 GPS 掩星）能夠有效強化模式對梅雨鋒面關鍵要素的預報能力。

3－3　梅雨鋒面位置預報驗證

研究梅雨鋒面降雨預報前，先驗證同化 GNSS RO 會否有利於預報梅雨鋒面位置的準確度，故本研究參考了張等（2019）的定義方法再進行修改，本研究梅雨鋒面判斷方法在 2-4 章節已列出。而圖 18 畫出的梅雨鋒面東西長度沒有超出東經 117.8 和 124 度，會定出這個規範是因為梅雨鋒面在陸上會受地形影響較難準確地判斷出位置，並且本文研究的主要區域為臺灣地區的降雨，故會着重於臺灣附近區域的鋒面位置。圖 18 比較了 EPH、GTS 與 ERA5 三組實驗在 2022 年 6 月 6 日 00 至 6 月 7 日 06UTC 的鋒面位置，可以看出各實驗對該時刻鋒面結構的模擬存在明顯差異。GTS 與 EPH 兩組預報對鋒面的判斷則有不同程度的偏差。其中 GTS 組的鋒面位置相對偏離實際位置，對比圖 19 的中央氣象署地表天氣圖鋒線位置可能較偏南，所以 GTS 導致鋒面在臺灣附近的定位與實況不符。在後文的分析相同，GTS 的相當位溫場梯度較為緩弱，暗示鋒面鋒區強度可能被低估。反之，EPH 顯示出鋒區結構更為清晰且強度較高，另外 EPH 實驗模擬的鋒面位置顯接近圖 19 所示實際鋒面位置，比 GTS 更偏北。

EPH 實驗能夠改善鋒面模擬，很大程度上歸功於 GNSS-RO 觀測資料的同化所帶來的物理改進。GNSS-RO 觀測提供了高垂直解析度的大氣折射率剖面，可轉換為對溫度和濕度的限制，尤其在傳統觀測資料匱乏的海洋及高空區域提供了關鍵資訊。透過同化這些 RO 資料，EPH 實驗更精確地模擬出鋒面兩側大氣的熱力和濕度結構，在本個案中經同化 RO 資料後對比 GTS 南側暖濕空氣與北側較涼乾空氣之間的位溫梯度更明顯(後文會提及)，RO 資料同化修正了 GTS 實驗中可能存在的熱力場偏差，使得鋒面區的氣壓場和溫度場分析更準確，進而影響風場和輻合線的位置。

3－4　降水預報驗證及成因分析

降水空間分佈的比較進一步說明了 EPH 與 GTS 模擬的差異，本文着重研究 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面的降水研究，在 2022 年 6 月 7 日 0000-1200UTC(預報 30 至 42 小時)臺灣發生豪大雨事件，觀測資料顯示降水區域主要在臺灣西北部和南部山區，其中西北部有地區 12 小時累積雨量最高達 150 毫米，造成西北部各地有不同程度的淹水。如圖 20 所示三組不同的 12 小時累積雨量，雨量觀測資料是用 QPESUMS 雨量資料。GTS 組累積降水分佈如圖 20(b)，顯示該主要降雨帶的位置在中部山區和南部地區，與觀測資料的西北部暴雨位置略有偏移且雨量明顯低於觀測值。相較之下，EPH 模擬的降水分佈與觀測更為接近（圖 17a）。為了進一步比較兩組試驗的降水預報，圖 21 和表 3 透過統計分數量化預報準確度，圖 21 列出了兩組同化試驗在不同降雨強度門檻下的 FSS,ETS 和 CSI。整體而言，EPH 模擬 FSS,ETS 和 CSI 在各雨量門檻上均高於 GTS，例如三組統計分數在大於等於 100 毫米門檻下 EPH 明顯優於 GTS，代表 EPH 對強降雨的捕捉更為準確，以及 ETS 分數在弱降雨下 EPH 也明顯優於 GTS。在 FSS 不同鄰域大小對判斷格點進行空間平滑處理下，EPH 依然優於 GTS，顯示同化 GNSS-RO 資料能有效提升降水事件的預報技術分數。此外，由表 3 所示 EPH 模擬的降水 RMSE,RRMSE 亦更低，SCC 亦更高，意味著預報的降水總量與觀測更為相符，改善了 GTS 模擬中對降水可能存在的強降雨位置偏移和雨量低估的情形。

為探討 GNSS-RO 同化對中尺度水氣傳遞與鋒面結構演變的影響，圖 22 展示了兩模擬組不同預報時間的可降水量 Total Precipitable Water(TPW)分佈與 EPH-GTS 差異。TPW 指的是大氣柱中若將所有水氣凝結成液態水，降落至地面的水深總量。計算方法是將大氣中各層的水氣含量(比濕)乘以氣壓差後積分，常用公式為：$\mathrm{TPS} = \frac{1}{\rho_w g}\int_{p_s}^{0} q(p)\,dp$。自 6 月 5 日 18UTC（圖 22a-c）起，EPH 模擬即已在臺灣西南側及巴士海峽北側建立起高值水汽區，且差異圖（圖 22c）顯示 GTS 在該區域水汽量較 EPH 低，表示 GTS 初始場無法充分捕捉該區水汽結構。隨預報推進至 6 月 6 日 00UTC 與 06UTC（圖 22d-

i)，EPH 模擬的高水汽區持續向臺灣南部延伸，而差異圖（圖 22f, i）進一步顯示 EPH 在臺灣陸地與南海的水汽量仍顯著高於 GTS，代表 EPH 能有效維持水汽供應。至預報第 24–27 小時（圖 22j-o），高可降水量區進一步移至臺灣中部與南部山區，並與觀測降水落區吻合。而圖 22o 顯示，

圖 23 呈現的 975 hPa 位溫場則揭示鋒面溫度梯度演變及潛在不穩定區之發展。6 月 5 日 18UTC（圖 23a-c）時，EPH 與 GTS 同樣位溫場相對平緩，差異圖量值較低，說明同化過後初始分析場溫度差異少。至預報 6 小時（圖 23d-f），EPH 與 GTS 整體溫度場和風場相似，差異圖中（圖 23f）呈現南部沿海與中部地區位溫較 GTS 高出 2–3K，表示 EPH 模擬更具潛在對流能。而預報 12 小時後差異圖(圖 23i)在臺灣北部有一正一負大值區，這從圖 23g,h 看到 GTS 溫度梯度密集區(即鋒面)南移且比 EPH 的位置較南，所以該區溫度 EPH 比 GTS 高出 5K 以上。預報 24-27 小時（圖 23j-o）期間，EPH 的高位溫區已進一步進入臺灣陸地，並與可降水量高值區疊合。差異圖（圖 23l、o）顯示在臺灣中部與西部山區附近，EPH 模擬的位溫顯著高於 GTS，EPH 模擬出更強的不穩定區與低層暖濕結構，對於觸發強降水具有關鍵作用。

總結而言，EPH 模擬相較 GTS，在前期即具備更濕潤的環境場與更明顯的鋒面位溫結構，並持續在預報過程中維持此優勢。這些源自 GNSS-RO 同化所帶來的分析場改進，使 EPH 模擬能更準確地捕捉強降雨的時間、區位與機制，說明 GNSS-RO 資料對中尺度鋒面與對流系統發展的正向影響。

針對 6 月 7 日 00-12UTC 的強降雨事件，分兩個時段去分析(EPH 模擬出暴雨而 GTS 沒有的成因) : 1) 6 月 7 日 00-03UTC、2) 6 月 7 日 03-06UTC。當時發生於臺灣西北沿岸（約東經 120.5°、北緯 24.5°附近）的局地強降雨事件。

3–4–1 6 月 7 日 00-03UTC 暴雨分析

分析第一個時段，從累積雨量分佈來看（圖 24(a)-(c)），EPH 組在 00–03UTC 的 3 小時累積降雨中成功模擬出臺灣西北沿岸的局地強降水中心（圖 24(a)），其位置和強度與觀測到的降雨區相當吻合，相較之下，GTS 組的降水模擬明顯偏弱且未能在該區域產生對應的降水中心（圖 24(b)），這波降雨範圍局限但強度顯著。

為深入了解兩組模擬在環境場條件上的差異，圖 25 和圖 26 分別為 EPH 組與 GTS 組在 6 月 7 日 00、01、02UTC 逐小時的可總降水量和 975 hPa 位溫分佈圖。00UTC 時，EPH 組與 GTS 組的可降水量場在臺灣西部海域略有差異：EPH 組已呈現出較高的整層

水氣含量，西北沿岸附近可降水量略高於 GTS 組，而 975 hPa 位溫場(圖 26)則顯示 EPH 組在沿岸地區具有稍高風速，位溫場兩組差異不大。至 01UTC 時，EPH 組的可降水量在臺灣海峽北部和西北沿岸明顯增加(圖 25)，形成一條水氣富集帶，反觀 GTS 組，01UTC 時的水氣增加幅度較小，西北部沿岸的可降水量仍明顯偏低。到了 02UTC，EPH 組的低層水氣進一步匯聚，西北沿岸一帶可降水量達到全域高值，同時 975 hPa 位溫場中風標顯示該處為高風速，在鋒面北側 EPH 溫度較低、風速更強，而且臺灣西部位溫高，意味著近地面鋒面結構完整且暖濕氣團存在，誘發對流的不穩定條件已成熟。相對地，GTS 組在 02UTC 時西北沿岸的水氣含量依舊偏少，低層熱力場缺乏明顯的梯度或不穩定區。上述時演變比較說明：EPH 組透過同化 GNSS-RO 資料，成功描繪出低層水汽的積聚和熱力不穩定逐漸增強的過程；反之，GTS 組因低層環境偏乾且穩定，未能產生足夠的對流觸發條件。

為進一步比較對流發生時兩組模擬的垂直結構差異，圖 27 和圖 28 呈現了沿圖 29 所示黑線位置的垂直剖面：圖 27 為相當位溫與水氣混合比剖面，圖 28 為垂直速度與經向風剖面。從 EPH 組的剖面結果（圖 27(a)、28(a)）可以明顯看到，對流中心所在位置低層具有高相當位溫和高水氣混合比的柱狀結構，表示暖濕不穩定能量近地面且水汽供應充足。在該區對流雲系之中，EPH 組出現了強烈的向上垂直速度（圖 28(a)中紅色區域，峰值超過 w = 10 m/s），對流雲頂可達 500hPa 以上，顯示出深對流的垂直發展；同時伴隨明顯的經向環流特徵：對流區域低層經向風場輻合（圖 28a），等值線在對流中心低層，且呈現垂直風速正負值相鄰，明顯有一個鋒面的流場。這意味著 EPH 組模擬的大氣環境提供了充沛的水汽和不穩定能量，使局地對流得以充分發展並維持強上升氣流。相比之下，GTS 組的剖面幾乎沒有出現上述對流結構：西北沿岸對流中心處的相當位溫等值線（圖 28(b)）排列較為平行，垂直方向上未見高相當位溫空氣向上凸起，水氣混合比在低層也明顯偏小，顯示大氣柱狀結構中缺乏充足的水汽和熱力條件。同時，GTS 組對應的位置幾乎沒有顯著的垂直上升氣流產生（圖 28(b)顯示 w 接近於 0），經向風場也沒有呈現明確的低層輻合-高層輻散對流環流特徵。缺乏 GNSS-RO 資料同化的 GTS 模擬在對流發生區域未能建立起深對流所需的動力和水汽支撐，因而無法模擬出實際發生的強降水。

3–4–2　**6 月 7 日 03-06UTC 暴雨分析**

分析第二個時段，圖 24(d、e、f)顯示 6 月 7 日 03–06UTC 期間 EPH 組、GTS 組與觀測的累積雨量。EPH 組（圖 24d）再現了臺灣西部暴雨分佈區，包括西部山區近山腳地帶有一條明顯的高雨強區帶；觀測（圖 24f）也呈現相同位置的強降雨，兩者在降雨位置與強度上較為一致。相比之下，GTS 組模式（圖 24e）對該區域的降雨強度明顯偏弱，降水區域的分佈範圍也與觀測不符，GTS 組未能在正確地點形成強對流雨帶。。

圖 30 與圖 31 分別為 EPH 組和 GTS 組在同一時段內（03–05UTC）的逐時可降水量與 975hPa 位溫場。EPH 組在臺灣西部近海連續出現一條高可降水量帶，並且位於其上具有明顯的高雷達回波區域，而 975hPa 位溫場中雖然兩者的位溫場相近，但 EPH 位溫梯度更密集和可由紫色輪廓線看出 EPH 位溫梯度密集處(鋒面)兩側的風速皆較強，這十分有利低層對流輻合，為對流生成產生了動力條件。與之對比，GTS 組模式的可降水量數值普遍較低而且鋒面也較偏南，沒有形成連續的高濕區，對流偏小且分佈較為分散，未能維持與 EPH 組同等的濕潤環境和低層輻合環境。這說明 EPH 組中尺度濕區的位置與強度以及低層動力能量明顯高於 GTS 組，為對流發展提供了充足的水汽和能量來源，而 GTS 組缺乏類似條件，因此對流觸發機會減少。

圖 32 與圖 33 呈現沿圖 34 所示黑直線的剖面結構。EPH 組剖面（圖 32b）顯示出低層（約 600–900hPa）有一個顯著的濕層，對應區域(約在緯度 24.5)同時伴隨強烈的上升運動(強垂直速度)(圖 33a)，上升氣流的產生是由此 EPH 有強南風和強北風(圖 30b)，令低層輻合、鋒面抬升效應更強，加上上升氣流主要分佈於地形迎風坡，暗示地形抬升結合鋒面抬升配合高水汽含量共同驅動了對流發展。相比之下，GTS 組剖面（圖 32d）中低層水汽含量較低和鋒面位置較南，上升運動也分散而弱小，未形成集中而強烈的上升氣流。綜合剖面結果可見，EPH 組在西部沿海低層維持了較強的垂直運動支持，GTS 組則缺乏此種明顯的上升驅動機制。

綜合上述圖 24–34 的暴雨成因的分析結果可以發現，EPH 模式在臺灣西部連續兩個暴雨時段均建立並維持了一條中尺度濕區，呈現較高的地區總可降水量和強南北輻合風場。這些條件代表了豐富的水汽供應和強大的低層輻合，使得對流系統在 00–03UTC 和 03–06UTC 均能得到觸發和增強。同時，如剖面圖所示，EPH 組在關鍵區域出現強烈的向上運動，進一步提供了充分的動力以支持對流持續增強。相對而言，GTS 模式水汽結構較為乾燥、低層水平輻合較低且缺乏連續的抬升作用，未能形成與 EPH 模式類似的對流動力環境。因此，EPH 組能夠成功預報 6 月 7 日 00–03UTC 與 03–06UTC 臺灣西部的兩場局地暴雨，而 GTS 組在缺乏足夠水汽與動力支持的條件下無法再現這兩場暴雨事件。

四、 系集同化預報

在數值天氣預報中，由於單一模式預報結果易受到初始條件和模式內部參數設定的不確定性影響，因此發展出系集預報方法。系集預報透過使用不同的初始條件或模式物理參數配置，產生多個獨立但又相關的預報，藉此探討預報結果的分佈情形和不確定性，從而獲取更穩定且可靠的預報結論。本段落針對 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面個案進行系集模擬，分別包含同化 GNSS RO 與 GTS 資料的系集實驗（EPH 組）和僅同化傳統 GTS 資料的控制組系集（GTS 組），每個組別各自包含 32 個系集成員，每個成員皆通過一天同化再進行預報。進行此設定的動機是期望證明引入 GNSS RO 資料的預報改善效果並非偶然或單一成員的特殊結果，而是普遍存在且穩定的改進現象，並且從系集整體角度驗證 GNSS RO 資料同化的預報價值。

從系集成員對鋒面位置的預報結果可以發現(圖 35)，含 GNSS RO 同化的 EPH 組（藍色線群）對鋒面位置的預報結果較為一致，其 32 個系集成員描繪出的鋒面走向多半聚集在接近實際分析（綠線）的區域，而不含掩星資料同化的 GTS 組（紅色線群）所繪的鋒面位置則分佈較廣散，平均位置（紅色粗線）與 ERA5 參考位置的偏差較大。這說明 EPH 組在捕捉梅雨鋒面位置方面具有明顯優勢，其系集預報結果的一致性和穩定性優於 GTS 組，也表明同化 GNSS RO 觀測資料後模擬結果整體上更加可靠，不會因少數成員的隨機波動而產生預報落差。

在降雨分佈方面，系集平均的分析指出，EPH 組平均預報的降雨範圍與強度更貼近觀測實況，特別是在臺灣北部及西部山區的強降雨區域預報優勢尤為明顯(圖 36a)。此外，EPH 組降雨量的系集標準差普遍較 GTS 組低(圖 36d,e)，表明其預報的空間分佈和降雨量級在系集成員間的差異較小。定量統計指標也支持這一結論，以空間相關係數（SCC）、均方根誤差（RMSE）與相對均方根誤差（RRMSE）來看，EPH 組的預報明顯優於 GTS 組(表 4)，例如 EPH 組的 SCC 明顯較高，而 RMSE 和 RRMSE 則明顯較低，充分顯示出 GNSS RO 資料的同化提升了模式對降雨空間分佈及累積量的預報能力。進一步透過 ETS 和 CSI 等降雨預報技巧指標的比較也可觀察到(圖 37)，EPH 組在各雨量閾值下的預報技巧皆優於 GTS 組，無論是對降雨發生區域的正確預測率還是誤報率，EPH 組皆具有明顯優勢。這一致性的預報改善現象凸顯了 GNSS RO 同化的優點，即透過改進整個初始場而非個別參數調整的方式，提升了整個系集預報的準確性和穩定性。

綜合以上分析，本研究透過 32 個系集成員的系集預報方式，明確驗證了 GNSS RO 資料同化對梅雨鋒面降水預報的正面影響。EPH 組的系集內預報一致性高、穩定性佳且整體預報技巧明顯優於傳統資料同化的 GTS 組，這一結果不僅說明了 GNSS RO 資料的同化價值，也為未來在高影響天氣事件的數值模式預報應用上提供了重要參考與依據。

五、 微物理參數化敏感度測試

在相同 WRF 模擬設定與同化流程下，本節比較 5 種不同雲微物理參數化方案對 6 月 7 日 00 至 12UTC 累積降水預報的影響。如圖 38 所示，不同方案在模擬的降雨空間分佈上存在明顯差異，WSM6 方案（圖 38d）下的降雨範圍和強度與 QPESUMS 觀測（圖 38f）最為接近；Goddard 4-ice 方案（圖 38a）次之，也能在臺灣西北沿岸形成較強降水帶；而不含冰雲過程的 Kessler 方案（圖 38b）對強降雨的模擬強度明顯偏低；Thompson 方案（圖 38c）的結果介於二者之間；WDM6（圖 38e）累積雨量最少，與其他方案差異較大。綜合空間分佈來看，WSM6 最能重現鋒面降雨特徵，其次為 Goddard 4-ice，其它方案明顯不足。統計分數方面，表 5 進一步量化了各方案預報效果的差異。WSM6 方案在誤差和相關性指標上表現最佳：其 RMSE 最低（25.5 mm）、RRMSE 最小（9.90%）、SCC 最高（0.452），均優於其他方案；其次為 Goddard 4-ice 方案，RMSE 為 25.7 mm、RRMSE 為 9.98%、SCC 為 0.415。相比之下，Kessler 和 Thompson 方案的 RMSE 約為 27 mm 以上，SCC 分別為 0.305 和 0.357；而 WDM6 方案表現最差，RMSE 最高、SCC 最低（約 0.252）。圖 39 的 ETS/CSI 曲線也反映了相同趨勢：WSM6 方案（棕色線）在各閾值下得分均最高，Goddard 4-ice（藍線）次之，其它方案得分均落後。由此可見，WSM6 方案的系集預報與觀測吻合度最高，Goddard 4-ice 次之，其餘方案則相對不足。

造成上述統計性能差異的可能物理機制包括：

- ✓ **WSM6 單變數六分類方案**：包含雨水、雲水、雲冰、雪、霰、雹等多種水相，對成雲的自動凝結和碰併聚合等過程的參數化較完善，使得豐富的水汽能迅速轉換為地面降水。在本案例中，WSM6 有效模擬了鋒面區的強對流環境，快速生成降水量，其平均累積雨量最接近觀測
- ✓ **Goddard 4-ice 方案**：同為單變數方案，具有冰晶、雪、霰、雹四種冰雲類別，也能捕捉主要冰相過程。其降雨量略低於 WSM6，可能是由於冰晶生成門檻值、沉降速度等微物理參數差異，使得降水強度稍微降低，但仍高於缺乏冰相的方案。Goddard 方案為本案例提供了充分的冰相沉降路徑，因此預報效果位居第二。
- ✓ **Thompson 方案**：含三種冰雲類別（冰晶、雪、霰），並對融雪和雹融等過程較為強調，對強對流中降雨生成的效率介於 WSM6 與 Kessler 之間，因而預報結果亦處於中等水平。
- ✓ **Kessler 暖雨方案**：僅模擬雨水凝結過程，不含雲冰與融化貢獻，因此在對流降雨事件中嚴重低估降水量。正因缺少冰相沉降，Kessler 方案的降雨累積最少，相關係數最低，表現最差。
- ✓ **WDM6 雙變數六分類方案**：雖可同步預報雨滴和雪晶的濃度（理論上更精細），但在本案例中可能導致大量水分停留在小顆粒中而未有效形成大滴（或分佈過於分散），使地面降水效率降低。此外，其微物理參數可能與強對流環境不完全

匹配，反而未能提升降雨預報效果，因此誤差最大、得分最低。

這些分析說明，WSM6 方案所參數化的冰凍與雨滴成長過程最適合此型態降水事件，因此在預報分數上優勢明顯；Goddard 4-ice 方案雖次佳，但仍保留了關鍵冰相過程；而缺乏冰相或過度複雜的方案在本次梅雨鋒面降雨預報中則表現較差。

六、 結語

本研究旨在探討同化 GNSS RO 資料對臺灣梅雨鋒面降雨預報的影響，以 2022 年 6 月 6 日至 7 日發生之 TAHOPE IOP3 梅雨鋒面豪雨個案作為研究對象。研究採用了 WRFDA 混合型系集三維變分法（3DEnVar）搭配非局地溢相位觀測算子進行 GNSS RO 資料同化實驗，並與僅同化傳統全球電信系統（GTS）觀測資料之實驗組進行比較，以探討額外引入 GNSS RO 觀測資料對梅雨鋒面降雨預報的實際成效。並且透過系集預報和微物理敏感度測試，深入探討資料同化和模式物理參數化對預報結果與不確定性的影響。

結果顯示，同化 GNSS RO 資料能顯著改善模式的初始分析場結構。相較於僅同化常規觀測的情況，EPH 組的分析場水汽與溫度分佈更加逼近 ERA5 再分析資料。尤其在鋒面南側的海面上，低層水汽含量明顯增加、鋒面兩側水汽梯度對比更鮮明，同時鋒面附近的溫度場得到適當調整，使得模擬鋒面位置及其熱力結構更貼近實際。這些改進有效填補了臺灣周邊海域和高空觀測的資料空缺，使初始場對鋒面位置和環境場的刻畫更精確。此外，在 0–48 小時的預報時段內，EPH 組對各氣象變數（溫度、水汽、風場）的預報能力普遍優於 GTS 組。例如，在低層大氣的水汽與溫度預報上，EPH 組的均方根誤差（RMSE）明顯小於 GTS 組，空間相關係數（SCC）則更高，顯示出 GNSS RO 同化對短期預報改善尤為顯著。其中 850 hPa 水汽混合比 0–24 小時預報的誤差在同化 GNSS RO 後明顯降低，而 925 hPa 與 850 hPa 的溫度場預報，EPH 組在各預報時段均勝過僅同化 GTS 的情形。風場方面，由於掩星觀測修正了鋒面附近的熱力結構，EPH 組對 925 hPa 經向風的預報精度也較佳。綜上所述，GNSS RO 資料的引入改善了梅雨鋒面分析場的水汽、溫度及風場結構，為後續降水預報打下更可靠的初始條件。

EPH 組對鋒面豪雨的模擬在位置和強度上都更為接近實況，預報技巧顯著優於僅同化 GTS 者。以 6 月 7 日清晨臺灣西北部的豪雨為例，EPH 成功捕捉到降雨落區和強降水中心的位置與強度，而 GTS 組則出現降雨位置偏移和強度低估等誤差。在較高降雨量級的閾值下（即極端強降雨事件），EPH 組的臨界成功指數 CSI 與等價威脅得分 ETS 均明顯高於 GTS 組，表示同化 GNSS RO 後對暴雨的命中率提升、虛警率下降。鄰域空間技巧分數 FSS 的提升也說明，EPH 組能更準確地預報降水的空間分佈。使用客觀鋒面

分析方法驗證兩組對鋒面位置的預報則發現，EPH 組在各預報時刻都更準確地再現了鋒面位置走向，鋒區的溫度梯度與鋒前鋒後風場結構也更符合天氣圖分析。尤其在預報初始時刻，EPH 組對鋒面鋒區的熱力梯度描繪明確，鋒面定位與中央氣象署地面天氣圖的鋒線高度一致。這些結果證實，同化 GNSS RO 資料有效增進模式對降雨的位置與強度預報的準確性，同時提升了鋒面結構和位置的預測能力。

在此個案中，我們的 EPH 組較傳統觀測的 GTS 組有更低的預報誤差與更高的相關性；系集預報結果進一步證實了這種改善並非單一成員的偶然，而是全體預報的一致進步。GNSS RO 的引入降低了初始場不確定性，使 32 組系集成員對鋒面和降雨的預報趨於集中，顯著增強了模式預報的穩健性。同時，微物理敏感度試驗則提醒我們，模式的物理參數化配置是預報不確定性的另一來源：在鋒面豪雨模擬中，適當的微物理方案（如 WSM6）能更充分地釋放大氣水汽、再現強降雨過程，而不恰當的方案可能導致預報失真。

綜合本研究之結果，同化福衛七號 GNSS RO 資料並使用 3DEnVar 及非局地折射率觀測算子，顯著提升了模式分析場與降水預報的準確性，有效填補了臺灣周邊海域與高空區域的觀測資料空缺。整體而言，透過 GNSS RO 資料之同化，不僅有效修正了初始場中的水汽、溫度及風場結構，也提升了模式對梅雨鋒面降水的預報技巧，尤其是在短期至中期預報階段內，顯現出明顯的優勢。展望未來研究為更進一步提高梅雨鋒面降雨預報的準確性與可靠性，建議可嘗試引入更多樣化的衛星觀測資料，如微波輻射計、主動式雷達及紅外頻道觀測資料，以更全面地掌握大氣的三維濕度與熱力結構。此外，亦可透過擴展實驗樣本數，對更多梅雨鋒面或其他劇烈天氣個案進行系統性的資料同化測試，以驗證本研究之方法是否具備普遍的預報改善效益。同時，也可考慮採用 4DEnVar、混合型 4DVar-EnKF 或其他新興的資料同化技術，進一步捕捉大氣狀態的動態變化與模式誤差的時空演變特性，以期提供更為精確且穩健的預報結果，增進對氣象災害的預警與防範能力。

參考文獻

Chang, C. C., & Yang, S. C. (2022). Impact of assimilating Formosat-7/COSMIC-II GNSS radio occultation data on heavy rainfall prediction in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **33**(7).

Chen, S., Kuo, Y., & Huang, C. (2020). The impact of GPS RO data on the prediction of tropical cyclogenesis using a nonlocal observation operator: An initial assessment. *Monthly Weather Review*, **148**, 2701–2717.

Chen, S. Y., Huang, C. Y., Kuo, Y. H., Guo, Y. R., & Sokolovskiy, S. (2009). Assimilation of GPS refractivity from FORMOSAT-3/COSMIC using a nonlocal operator with WRF 3DVar and its impact on the prediction of a typhoon event. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **20**(1), 45–61.

Chen, S.-Y., Chen, S.-H., Kuo, Y.-H., Huang, C.-Y., & Chen, C.-S. (2014). Evaluating the impact of the COSMIC RO bending angle data on predicting the heavy precipitation episode on 16 June 2008 during SoWMEX IOP8. *Monthly Weather Review*, **142**(10), 4139–4163.

Chen, S. Y., Nguyen, T. C., & Huang, C. Y. (2021). Impact of radio occultation data on the prediction of Typhoon Haishen (2020) with WRFDA hybrid assimilation. *Atmosphere*, **12**(11), 1397.

Chien, F. C., & Kuo, Y. H. (2010). Impact of FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation and dropwindsonde data on regional model predictions during the 2007 Mei-yu season. *GPS Solutions*, **14**, 51–63.

Cucurull, L., Derber, J. C., Treadon, R. E., & Purser, R. J. (2007). Assimilation of global positioning system radio occultation observations into NCEP's global data assimilation system. *Monthly Weather Review*, **135**(9), 3174–3193.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**(730), 1999–2049.

Hamill, T. M., Whitaker, J. S., Kleist, D. T., Fiorino, M., & Benjamin, S. G. (2011). Predictions of 2010's tropical cyclones using the GFS and ensemble-based data assimilation methods. *Monthly Weather Review*, **139**, 3243–3247.

Huang, C. Y., Kuo, Y. H., Chen, S. Y., Terng, C. T., et al. (2010). Impact of GPS radio occultation data assimilation on regional weather predictions. *Proceedings of International Workshop on GPS Radio Occultation*, Taipei, Taiwan.

Kleist, D. T. (2012). An evaluation of hybrid variational-ensemble data assimilation for the NCEP GFS. University of Maryland, College Park, MD, USA.

Kuo, Y. H., Liu, H., Guo, Y. R., Terng, C. T., & Lin, Y. T. (2008). Impact of FORMOSAT-3/COSMIC data on typhoon and Mei-yu prediction. In *Recent Progress in Atmospheric Sciences* (458–483).

Kursinski, E. R., Hajj, G. A., Schofield, J. T., Linfield, R. P., & Hardy, K. R. (2000). Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **105**(D23), 26961–26989.

Lamb, H. H. (1950). Types and spells of weather around the year in the British Isles: Annual trends, seasonal structure of the year, singularities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **76**(330), 393–429.

Ma, Z., Kuo, Y. H., & Sokolovskiy, S. (2010). Improvements of GPS radio occultation data assimilation at JCSDA: Nonlocal operator and bending angle formulation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **21**(4), 543–556.

Poli, P., Moll, P., Rabier, F., & Puech, D. (2002). Assimilation of GPS radio occultation data in the ECMWF system. *ECMWF Technical Memorandum*, No. 373.

Pook, M., McIntosh, P., & Meyers, G. (2012). The synoptic and mesoscale structure of cool season rainfall events in the coastal southeastern Australian region. *Weather and Forecasting*, **27**(1), 65–82.

Routray, A., Mohanty, U. C., Osuri, K. K., Kar, S. C., & Niyogi, D. (2016). Impact of satellite radiance data on simulations of Bay of Bengal tropical cyclones using the WRF-3DVar modeling system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **54**(4), 2285–2303.

Schwartz, C. S., Liu, Z., Huang, X. Y., Kuo, Y. H., & Fong, C. T. (2013). Comparing limited-area 3DVAR and hybrid variational-ensemble data assimilation methods for typhoon track forecasts: Sensitivity to outer loops and vortex relocation. *Monthly Weather Review*, **141**, 4350–4372.

Shao, Y., Derber, J., Treadon, R., & Joiner, J. (2009). The impact of GPS radio occultation data on NOAA's GSI system analysis and forecast. *Monthly Weather Review*, **137**(7), 1864–1880.

Sokolovskiy, S., Rocken, C., Hunt, D., & Schreiner, W. (2005). On the use of radio occultation data in meteorology. *Meteorologische Zeitschrift*, **14**(4), 145–154.

Su, S. H., Kuo, H. C., Hsu, L. H., & Yang, Y. T. (2012). Temporal and spatial characteristics of typhoon extreme rainfall in Taiwan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **90**, 721–736.

Ware, R., Exner, M., Feng, D., Gorbunov, M., Hardy, K., Herman, B., Kuo, Y. H., Meehan, T., Rocken, C., Schreiner, W., & Sokolovskiy, S. (1996). GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: Preliminary results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**(1), 19–40.

Xin, B., Zawadzki, I., & Fabry, F. (1997). A comparison of two techniques for the extraction of radar reflectivity–rain rate (Z–R) relationships. *Journal of Applied Meteorology*, **36**(4), 422–432.

陳泰然、王重傑與楊進賢（2002）。臺灣梅雨季對流降水之時空分佈特徵。*大氣科學*，**30**(1)，83–96。

黃清勇與迮嘉欣（2011）。GPS 掩星與其他資料同化對臺灣地區颱風和梅雨模擬之影響。*大氣科學*，**39**(1)，25–52。

張巧薇、江建霆、劉高源、蘇世顥（2019）。臺灣地區鋒面系統客觀辨識方法之比較。*大氣科學*，**47**(1)，1–29。

林得恩（2023）。梅雨鋒面肇致坡地災害之先兆環境研究。*氣象預報與分析*，**255**，1–16。

交通部中央氣象署（2023）。2022 年梅雨季東亞夏季季風分析。

交通部中央氣象署（2022）。中央氣象局 110 年氣候年報。臺北：交通部中央氣象署。

附表與附圖

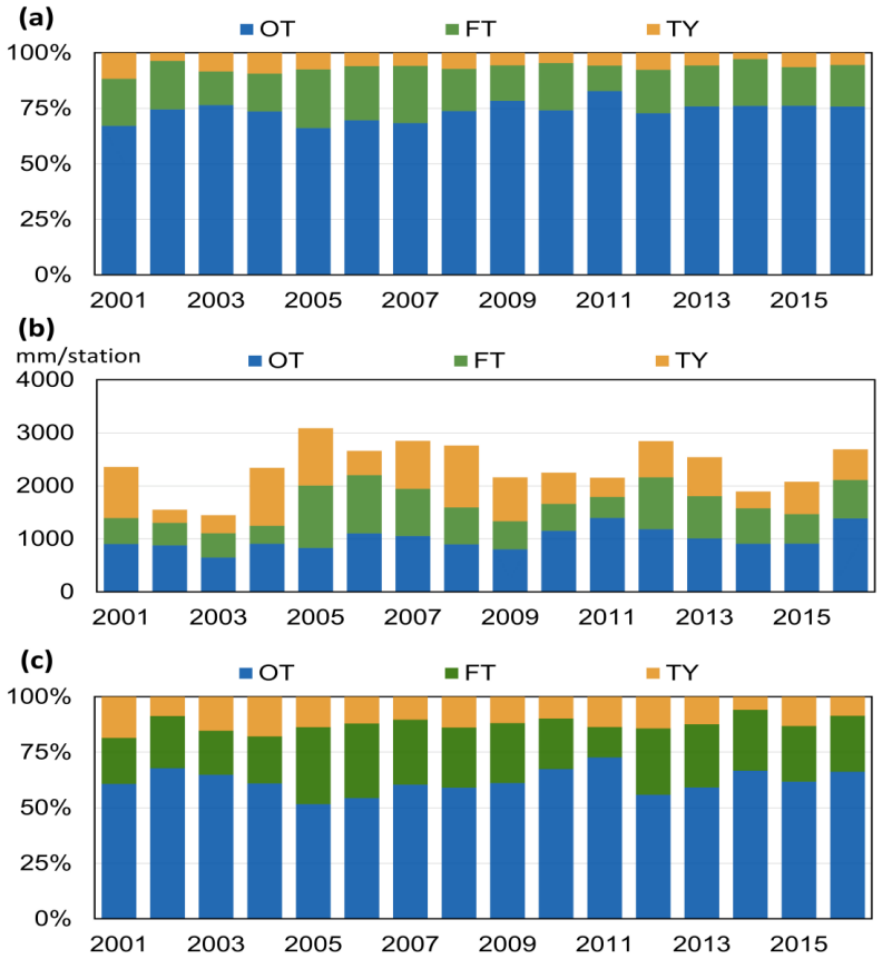

圖 1　2001-2016 年 (a)臺灣降雨事件相關天氣事件百分比圖。(b)臺灣標準化降雨量(mm/station) 與相關天氣事件統計圖。(c)臺灣強降雨相關之天氣事件百分比圖。鋒面事件(FT)，颱風事件(TY)，其他事件(OT)。 (張等人，2019)

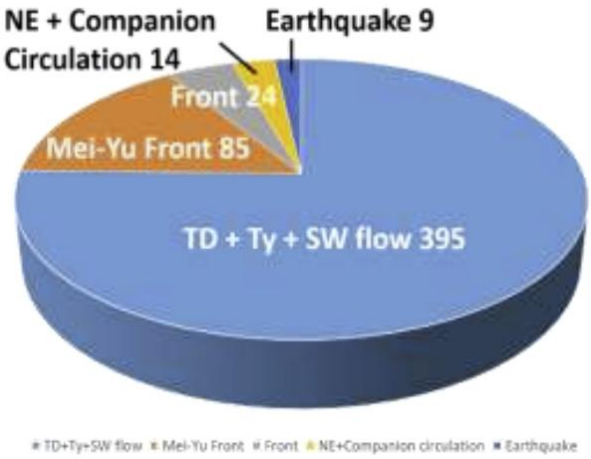

圖 2　2006-2021 年期間臺灣坡地災害事件肇因的統計分析百分比圖。(氣象預報與分析，第 255 期)

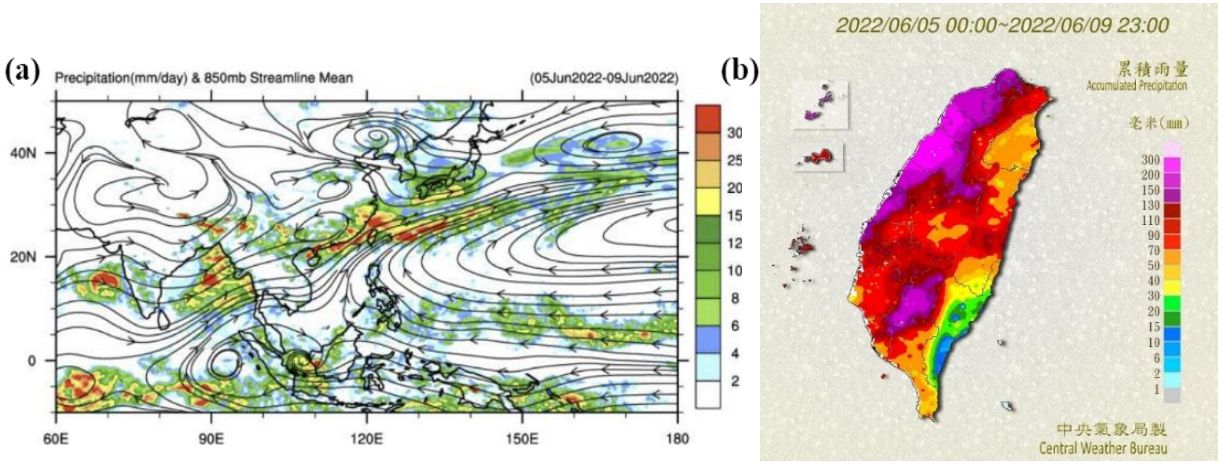

圖 3　(a) 850hPa 2022 年 6 月 5 日至 9 日五日平均風場和平均降雨量(圖取自臺灣中央氣象署)，(b) 2022 年 6 月 5 日至 9 日五日累積雨量圖(圖取自臺灣中央氣象署)

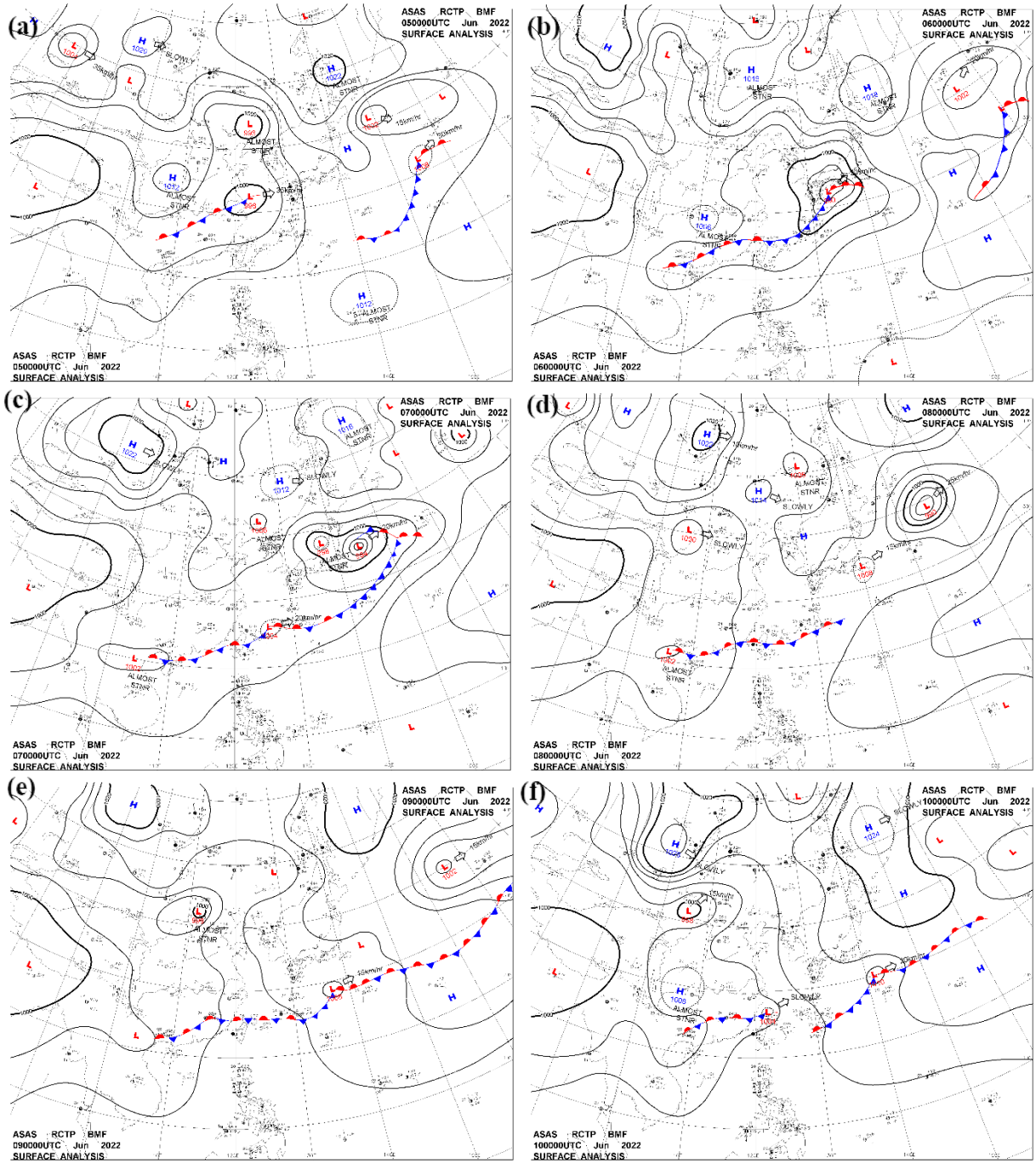

圖 4 臺灣氣象署地面天氣圖。時間順序由左至右、上至下為(a)2022 年 6 月 5 日、(b)6 月 6 日、(c)6 月 7 日、(d)6 月 8 日、(e)6 月 9 日、(f)6 月 10 日 00UTC。

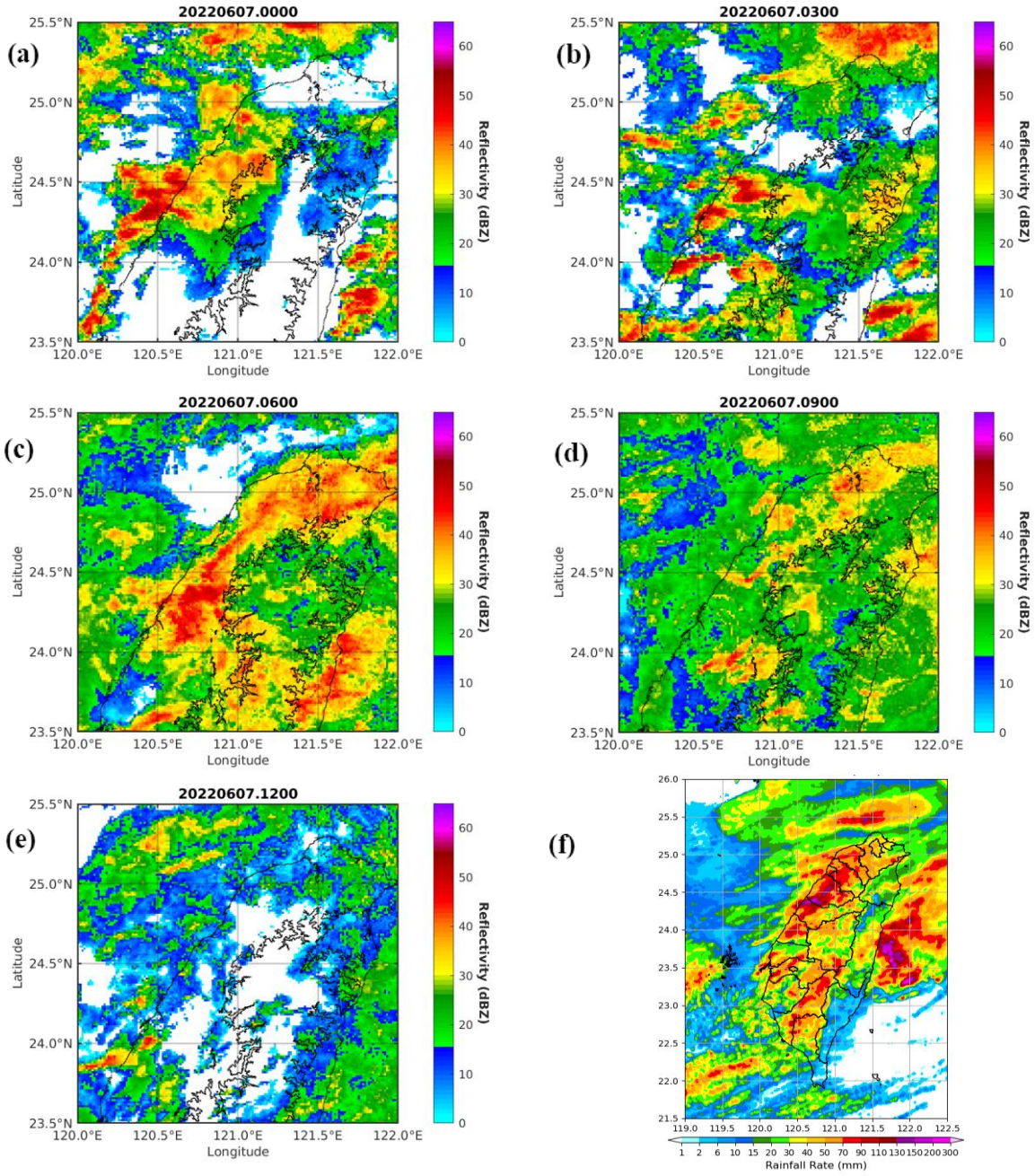

圖 5　IOP3 期間雷達回波圖，時間順序為 2022 年 6 月 7 日(a) 00UTC、(b) 03UTC、(c) 06UTC、(d) 09UTC、(e) 12UTC 及(f) 2022 年 6 月 7 日 12UTC 的 12 小時累積雨量。

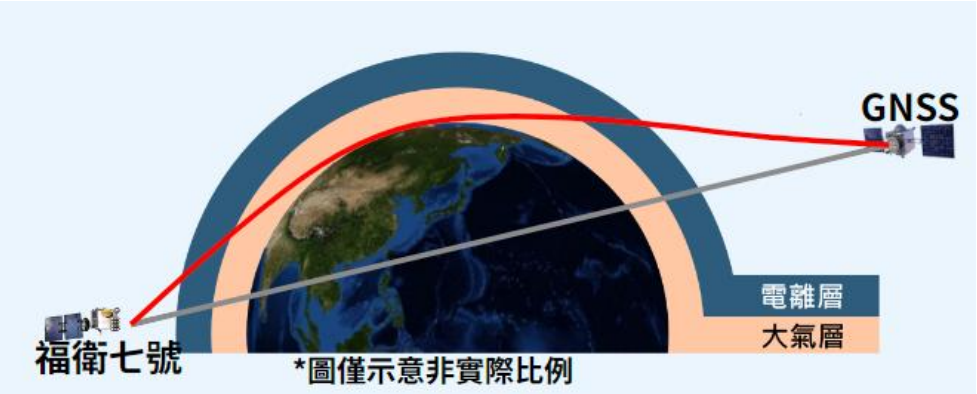

圖 6　GNSS-RO 測量原理示意圖，灰線為幾何直線距離，紅線為經過大氣偏折後掩星觀測距離。(圖片及部分資料來自臺灣資料分析中心 TACC)

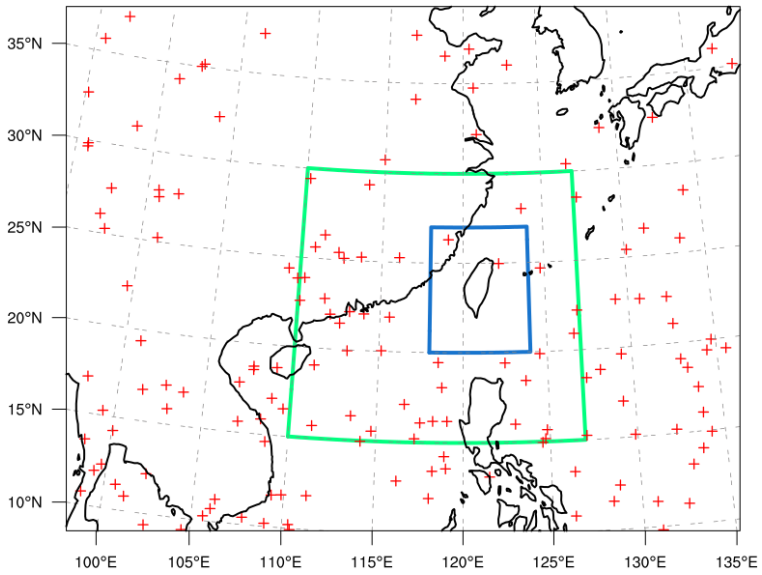

圖 7　24 小時同化所使用到的 GNSS RO 觀測點和預報資料校驗範圍，紅色十字點為 GNSS RO 點位置，共有 1019 筆 RO 資料加入同化。綠色框為大尺度環境場校驗範圍，藍色框為降雨校驗範圍。

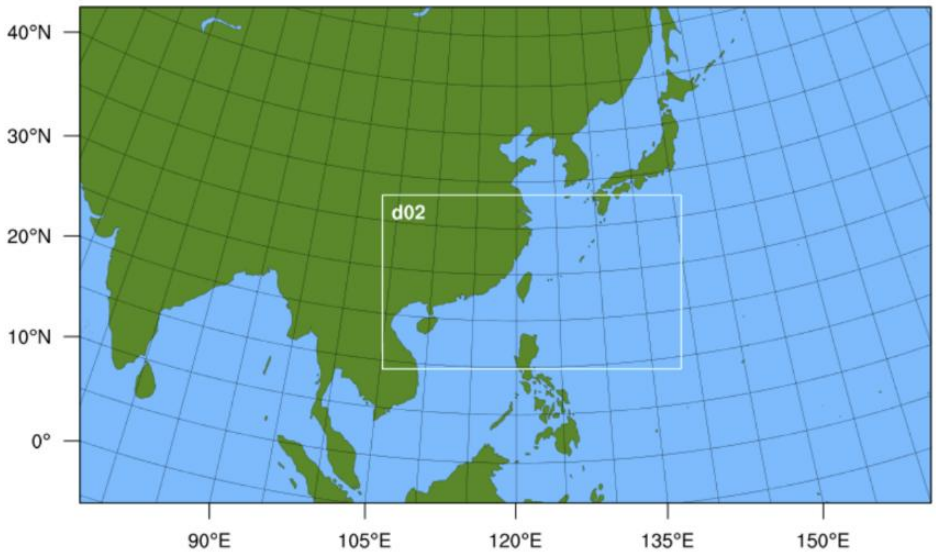

圖 8　WRF 兩層巢狀網格配置圖，外層網格區域水平解析度為 15 公里，內層網格區域為 3 公里。

表 1　模擬實驗設計。

實驗名稱	加入同化的資料類別
GTS	同化中央氣象局 GTS 資料，其中包括傳統地面觀測資料。
EPH	同化中央氣象局 GTS 資料 & GNSS RO 資料
noDA	沒有進行同化

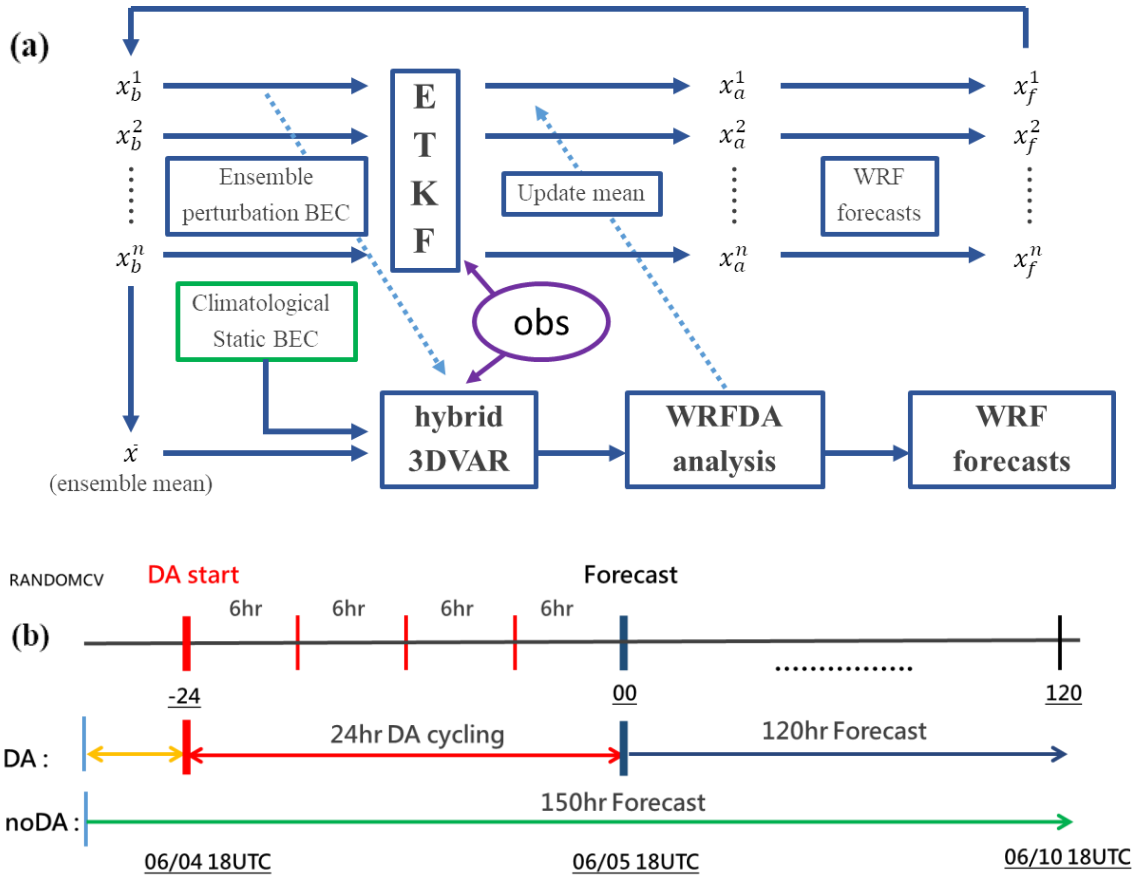

圖 9　(a)混合 WRFDA 資料同化系統流程圖(參考 Chen et al. (2021))。 (b)實驗設計圖。每次模擬採用 1 天循環資料同化，循環間隔為 6 小時，然後進行 5 天的預報。

表 2 本研究校驗中有使用統計得分。

驗證指標	中文名稱	意義	補充說明
Root Mean Square Error (RMSE)	方均根誤差	反映預報值與觀測值之間的差異大小，數值越小表示預報越準確。	適合場變數（如溫度、濕度、風速、累積降雨量）
Relative Root Mean Square Error (RRMSE)	相對方均根誤差	以 RMSE 除以觀測平均值或極值，反映誤差相對於觀測值的大小，便於不同變數或情境間比較。	相較 RMSE 能更直觀比較差異，方便判斷。
Spatial Correlation Coefficient (SCC)	空間相關係數	衡量預報場與觀測場在空間分布上的相似程度，範圍-1 至 1，越接近 1 代表型態越一致。	常用於格點降雨、溫度等空間分布的模式評估。
Critical Success Index (CSI)	臨界成功指數	評估二分法（如降水是否超過門檻）預報的準確性，考慮命中、漏報、誤報（不考慮正確無事件）。	分類性統計得分，特別適合降水或需設門檻的事件預報。
Equitable Threat Score (ETS)	公正預兆得分	衡量降水或其他閾值性事件的預報命中率，修正了隨機命中的影響，數值越高代表預報技巧越好。	有考慮到隨機事件，適合不均勻事件如強降水事件。
Fractions Skill Score (FSS)	鄰域技巧分數	比較預報與觀測在不同鄰域大小內二分法的差異，適合驗證空間分布類型降水等分散現象，能緩和空間格點不對應的懲罰。鄰域大小可調，能評估預報空間位置誤差	雷達降水、強降水區域、對流系統等空間不連續性降水事件。

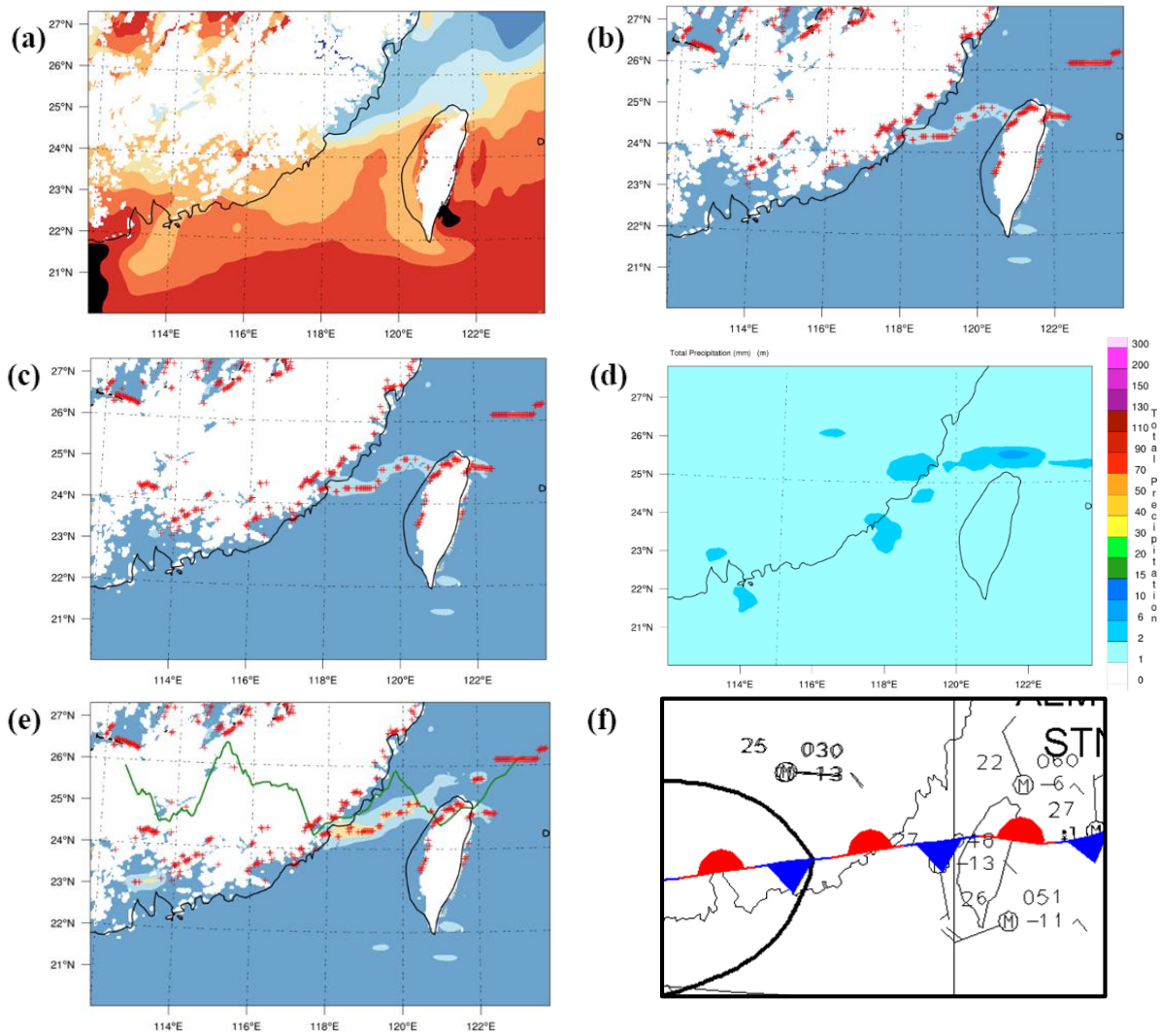

圖 10 梅雨鋒面系統客觀定位方法圖。這範例用 2025 年 6 月 6 日 18UTC ERA5 資料。(a) 975hPa 位溫圖。(b) 絕對值 975hPa 位溫水平梯度圖。(c)只採用地形高度 150 公尺以下的圖 b 。(d) 6 月 6 日 18UTC 一小時降雨量。(e)加上降雨權重的絕對值位溫梯度圖，其中綠色線為由 ERA5 資料判斷出來的鋒面位置。(f)中央氣象署 2025 年 6 月 6 日 18UTC 地面天氣圖。

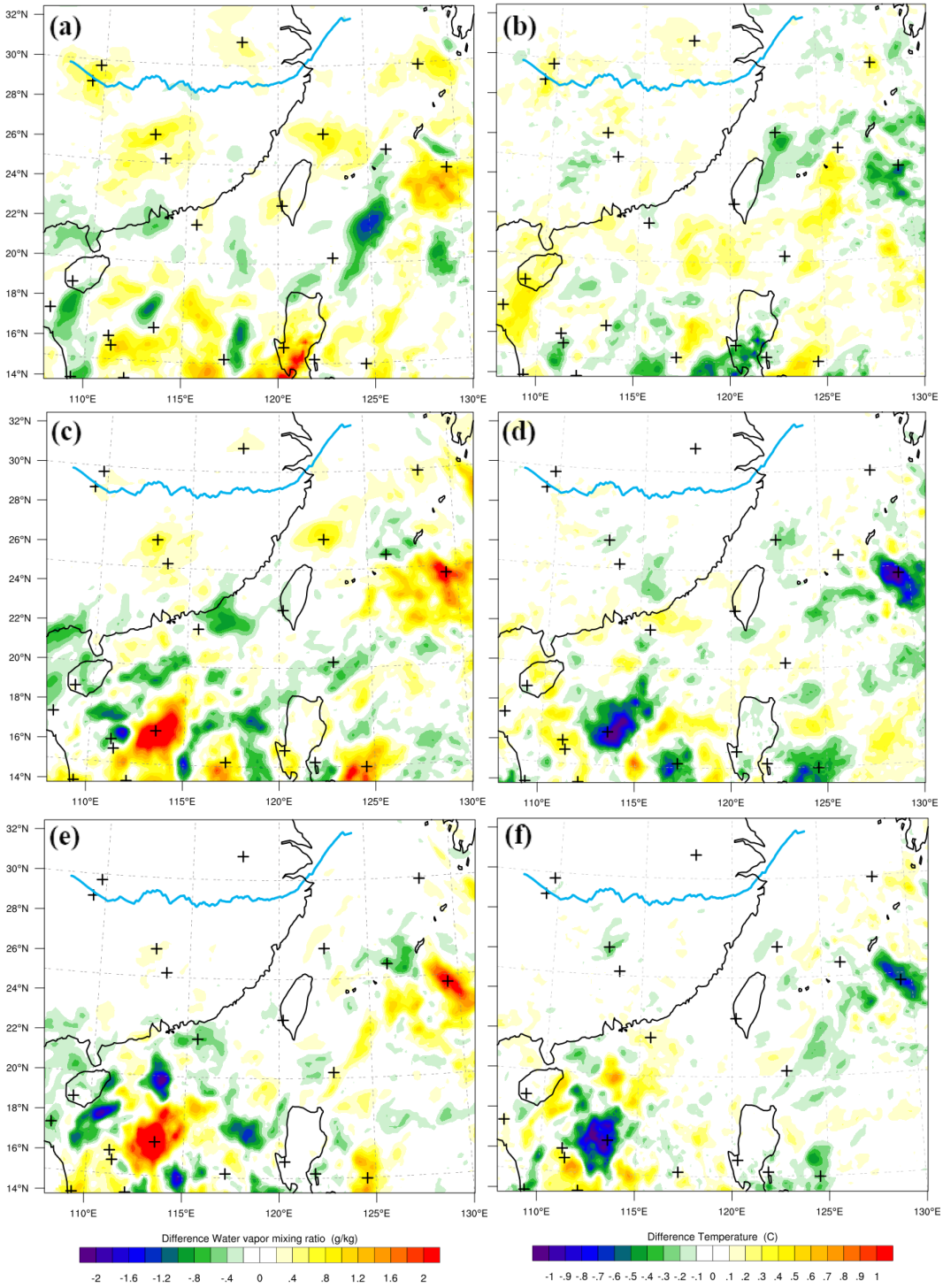

圖 11 在 6 月 4 日 18UTC 初次同化的分析場在(a,b) 700 hPa, (c,d) 850 hPa, (e,f) 925 hPa 的(a,c,e)水氣混合比和(b,d,f)溫度的 EPH-GTS 差異分佈。黑色十字點為加入同化的 GNSS RO 點位置，藍色線為當時鋒面位置，由 ERA5 資料用前文提及的定義方法定義出。

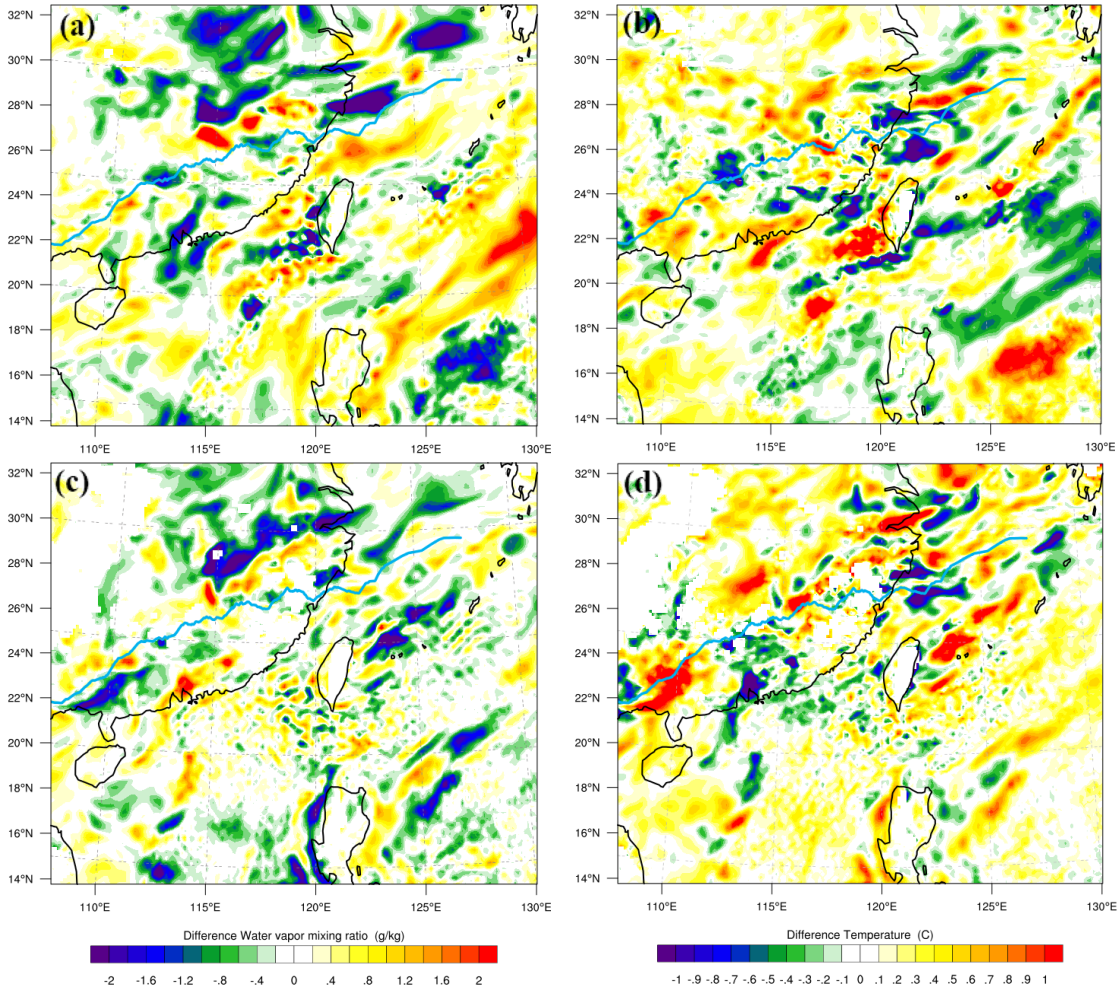

圖 12 在 6 月 5 日 1800UTC 經過 24 小時同化後的最終分析場在(a,b) 850, (c,d) 925 hPa 的水氣混合比(a,c)和溫度(b,c)的 EPH-GTS 差異量，藍色線為當時的鋒面位置。

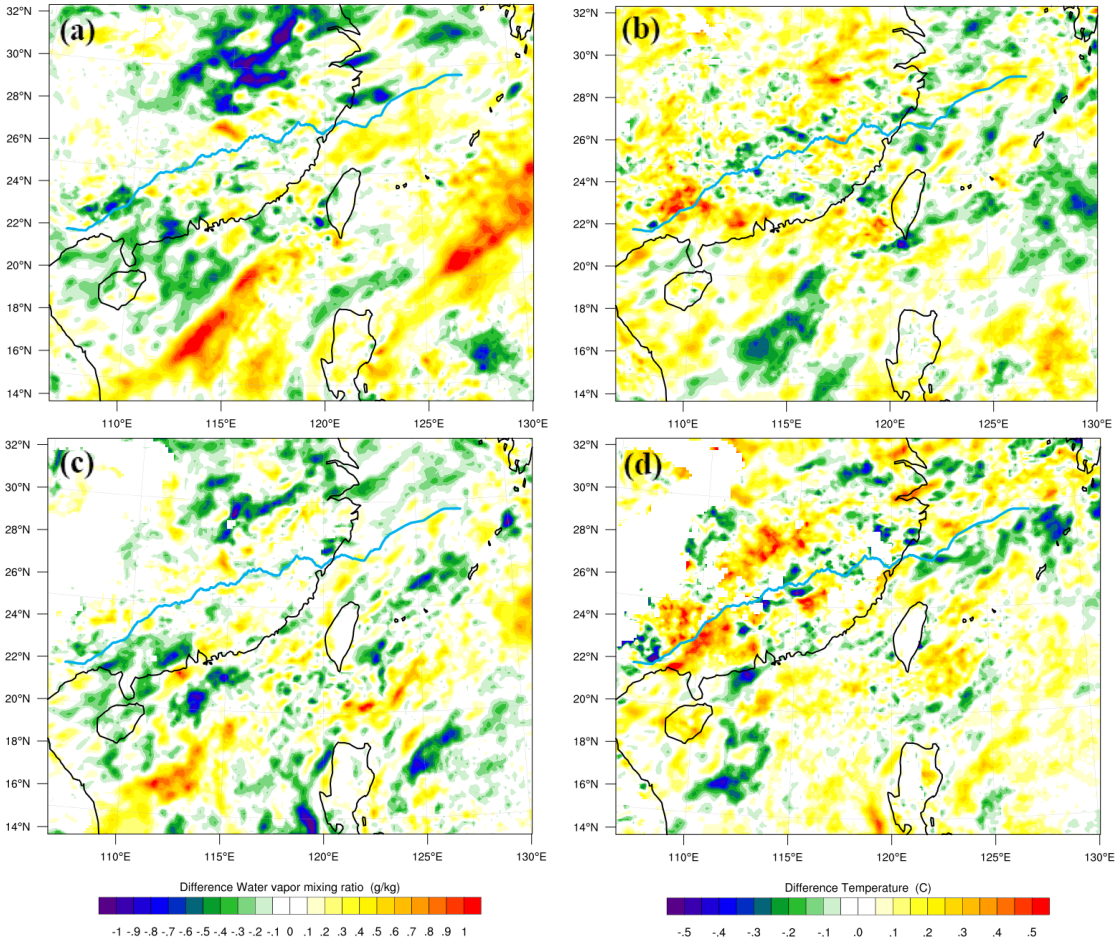

圖 13 在平均 24 小時同化的分析場在(a,b) 850hPa, (c,d) 925hPa 的(a,c)水氣混合比和(b,d)溫度的 EPH-GTS 差異量，藍色線為 6 月 5 日 1800UTC 的鋒面位置。

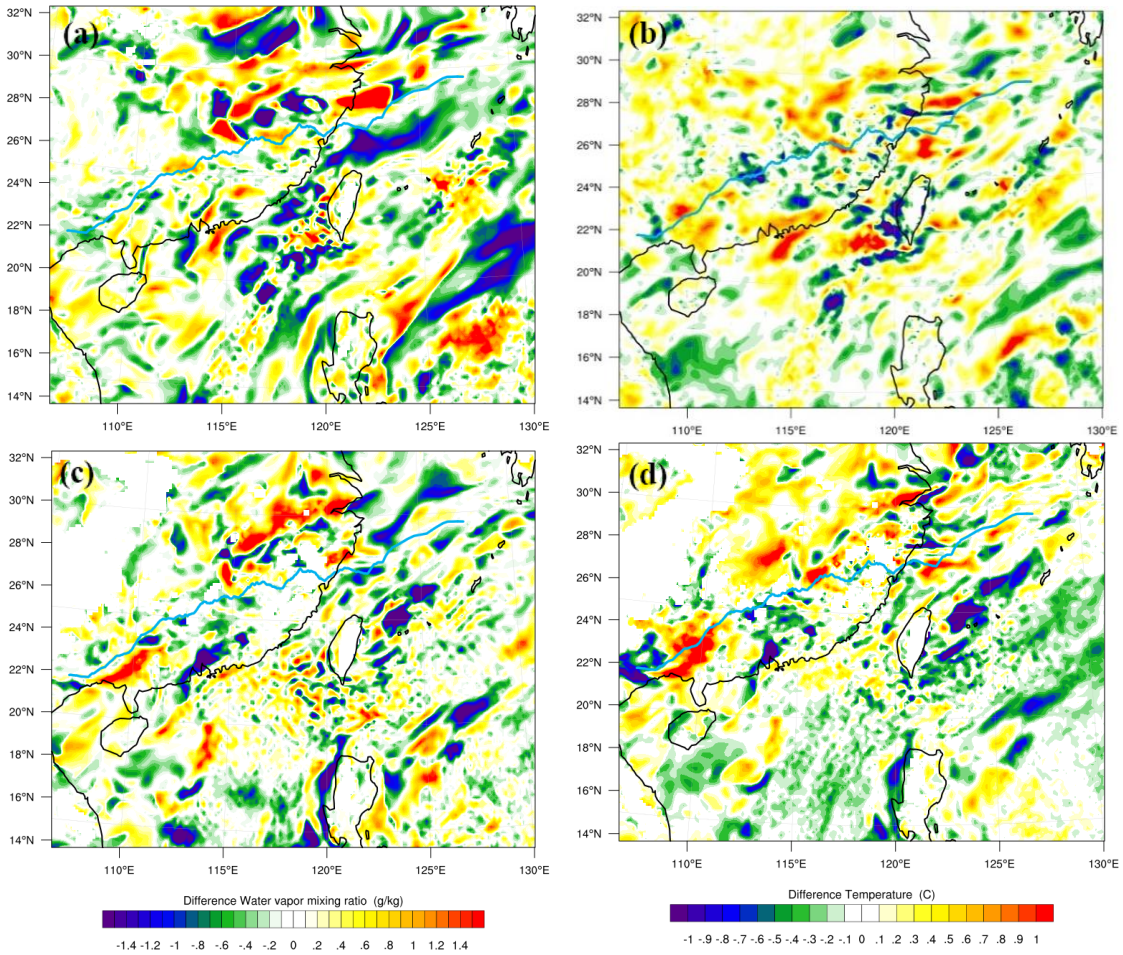

圖 14　2022 年 6 月 5 日 18UTC 經過 24 小時同化後的最終分析場在(a,b) 850hPa, (c,d) 925 hPa 的(a,c)水氣混合比和(b,d)溫度的 | EPH-ERA5 |-| GTS-ERA5 | 差異量，藍色線為當時的鋒面位置。

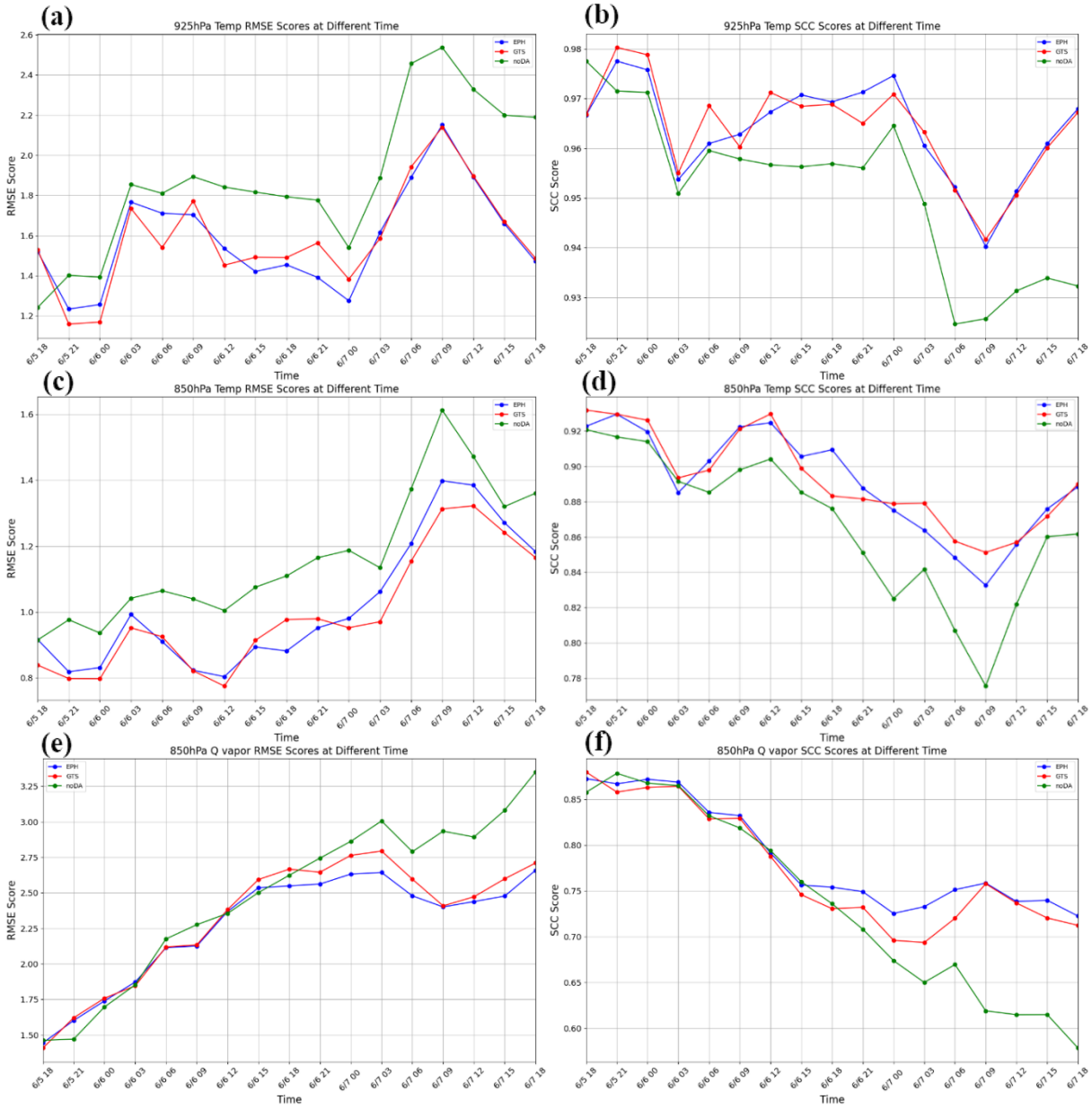

圖 15 模式預報 00-48 小時每三小時(a,c,e)RMSE 得分和(b,d,f)SCC 得分以 ERA5 再分析場作校驗，計算範圍為圖 7 的綠框內(15–30˚N, 110–127˚E)。從上至下為在(a,b) 925 hPa 溫度、(c,d) 850 hPa 溫度（單位為 K）和(e,f) 850 hPa 水汽混合比（單位為 g/kg）。藍色線為 EPH，紅色線為 GTS，綠色線為 noDA。

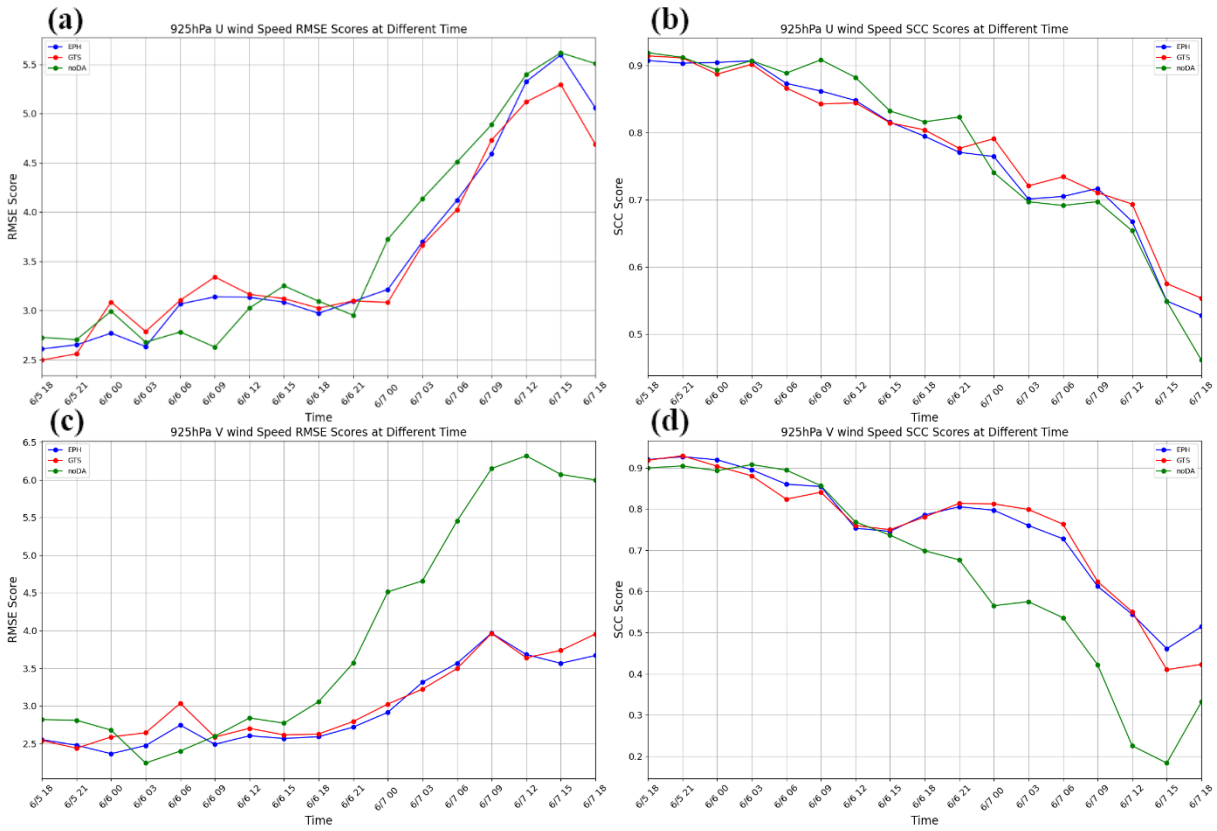

圖 16 模式預報 00-48 小時每三小時(a,c) RMSE 得分和(b,d)SCC 得分以 ERA5 再分析場作校驗。從上至下為(a,b)925 hPa 緯向風(u 風)、(c,d)925 hPa 經向風(v 風)（單位為 m/s）。藍色線為 EPH，紅色線為 GTS，綠色線為 noDA。

\

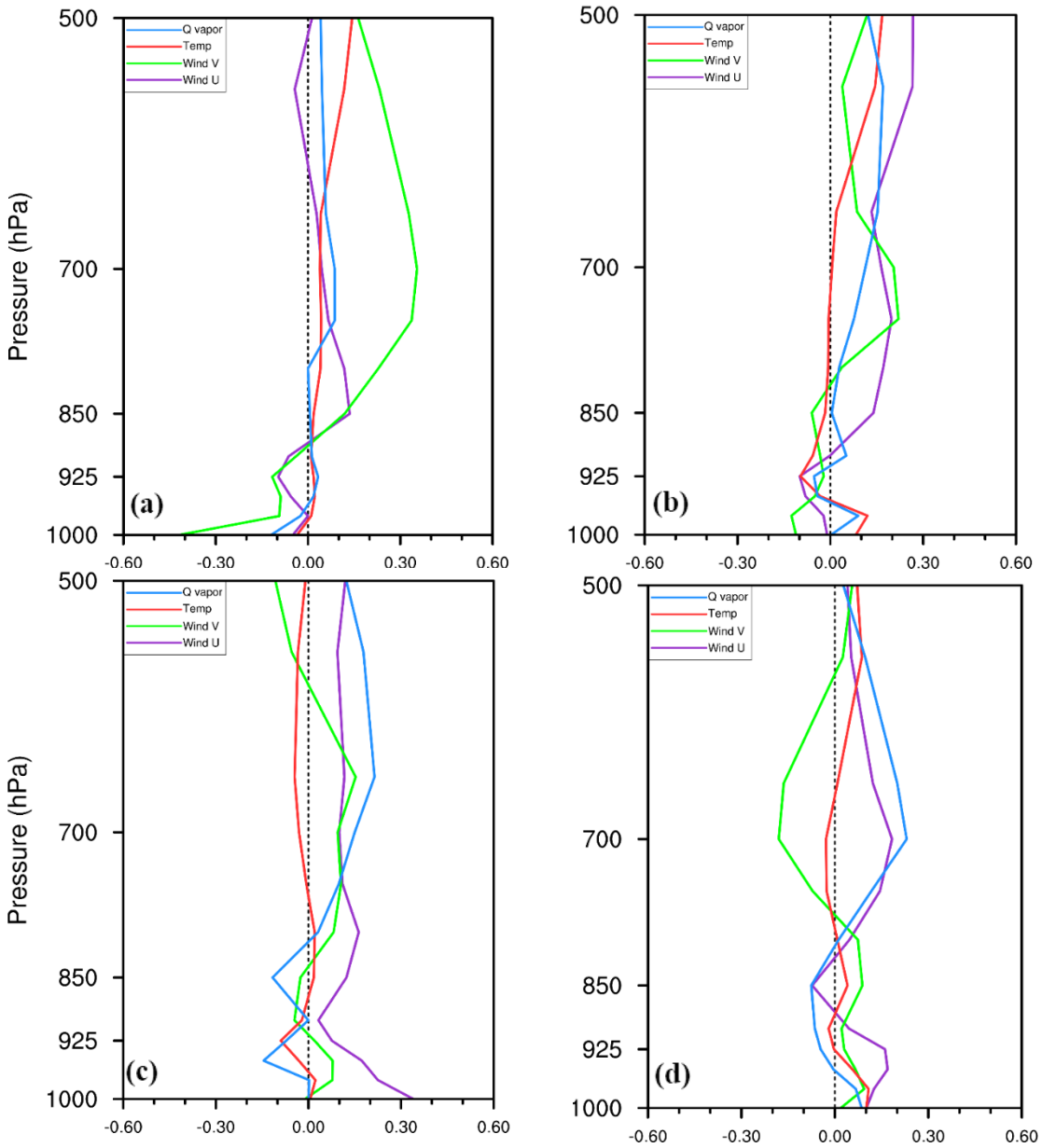

圖 17　EPH 組與 GTS 組在 15-30˚N 和 110-127˚E 內與 ERA5 校驗的 12 小時平均預報垂直 RMSE 差異量(EPH-GTS)，預報(a) 00-12 小時、(b) 12-24 小時、(c) 24-36 小時和(d) 36-48 小時平均。其中水汽（藍色）、温度（紅色）、經向風（綠色）和緯向風（紫色）。0 值虛線左側為負值，右側為正值，負值代表 EPH 組 RMSE 更小更接近 ERA5（誤差較小）；反之正值表示 EPH 誤差較 GTS 更大。

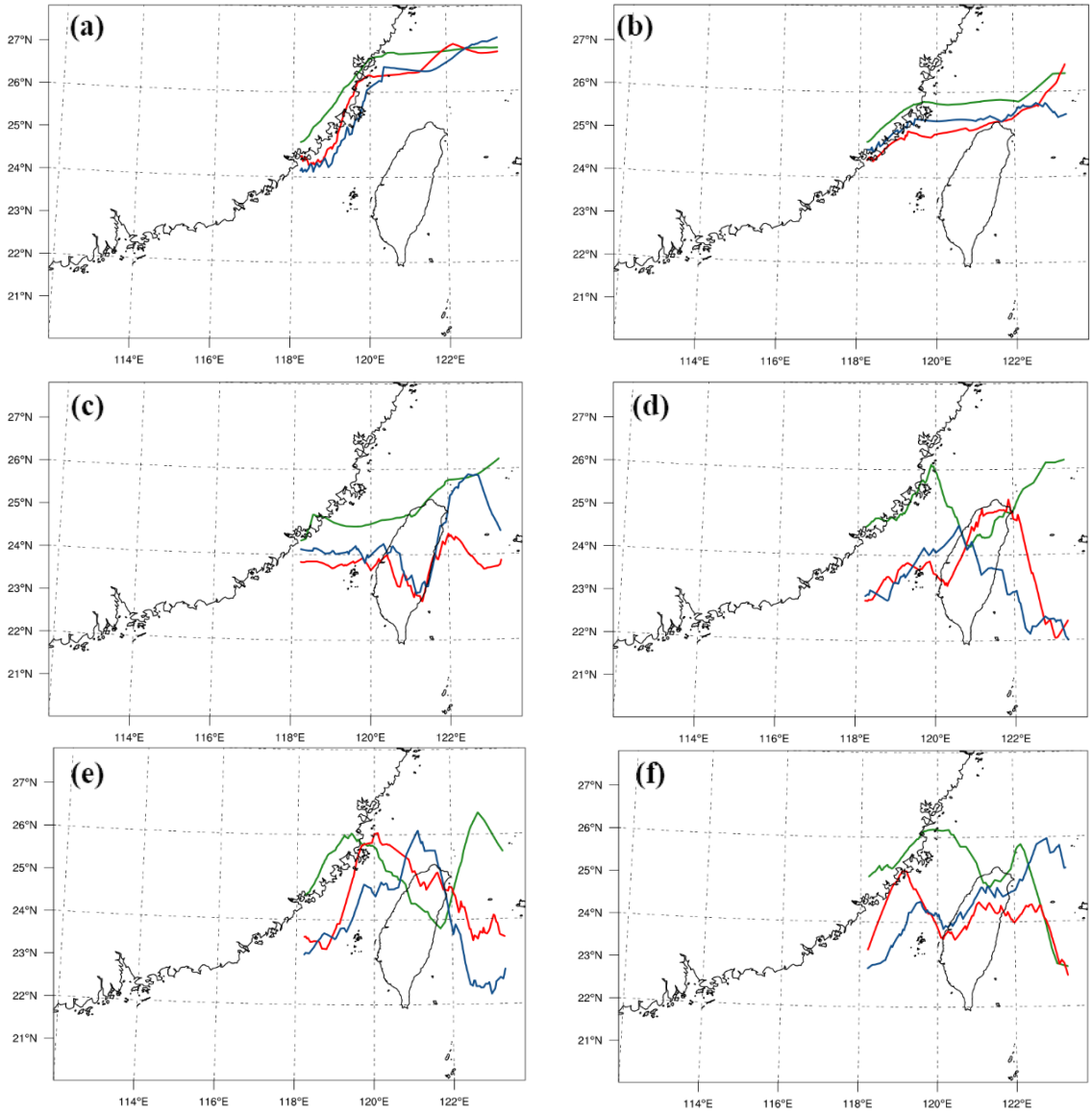

圖 18　各實驗組梅雨鋒面客觀定義位置，藍色線為 EPH，紅色線為 GTS，綠色線為 ERA5。時間順序為(a) 6 月 6 日 00UTC(預報 6 小時)，(b) 6 月 6 日 06UTC(預報 12 小時)，(c) 6 月 6 日 12UTC(預報 18 小時)，(d) 6 月 6 日 18UTC(預報 24 小時)，(e) 6 月 7 日 00UTC(預報 30 小時)，(f) 6 月 7 日 06UTC(預報 36 小時)。

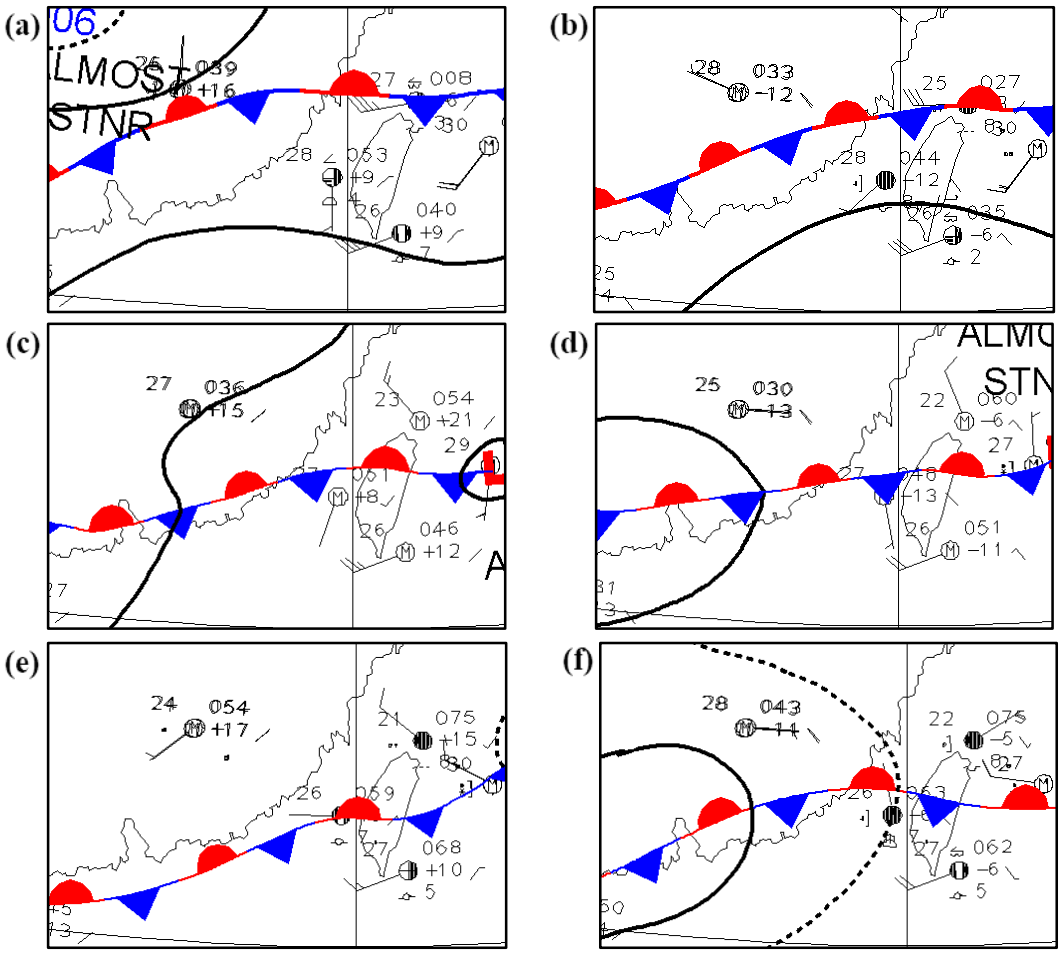

圖 19　臺灣中央氣象署地面天氣圖，其中滯留鋒即為梅雨鋒面。時間順序為(a) 6 月 6 日 00UTC，(b) 6 月 6 日 06UTC，(c) 6 月 6 日 12UTC，(d) 6 月 6 日 18UTC，(e) 6 月 7 日 00UTC，(f) 6 月 7 日 06UTC。

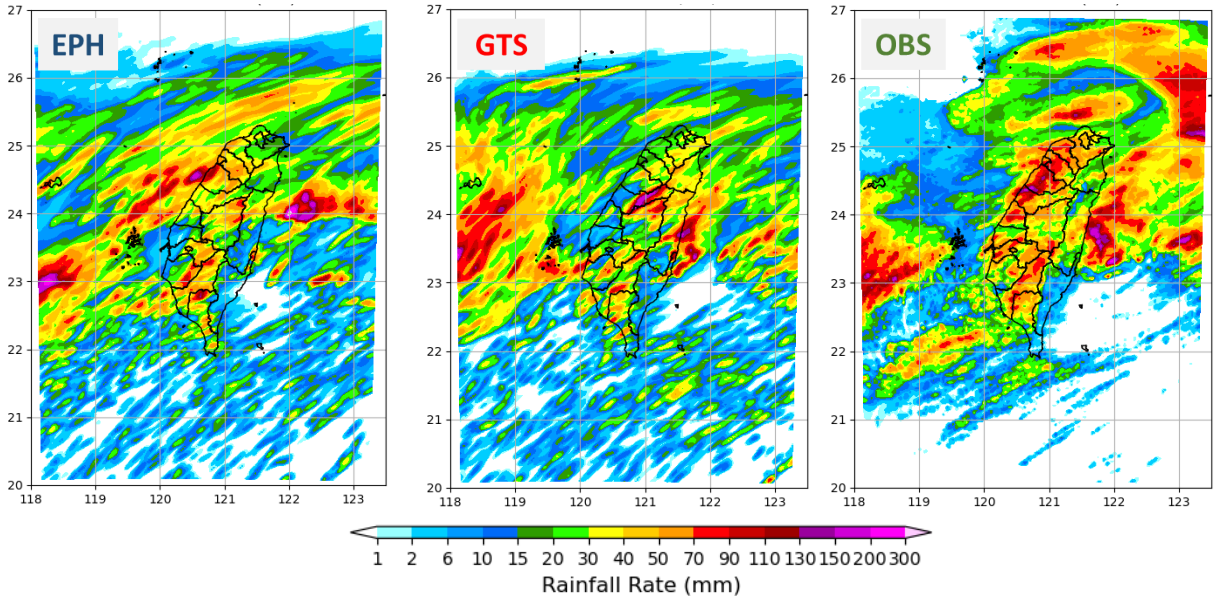

圖 20　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC(預報 30 至 42 小時)累積雨量，左圖為 EPH 組，中間為 GTS 組，右圖為 QPESUMS 觀測資料。

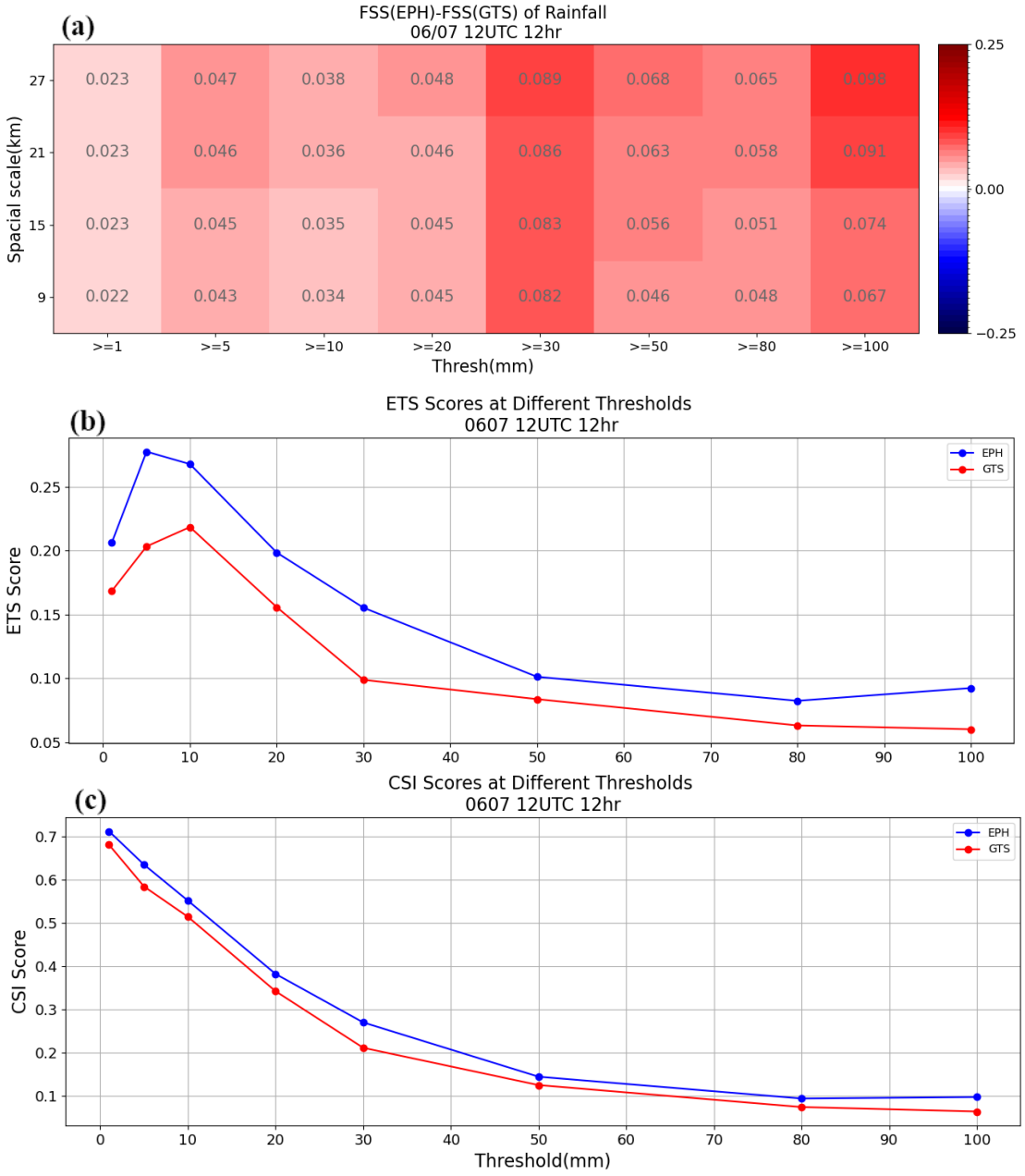

圖 21　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC 累積雨量的(a)FSS 差異(EPH-GTS)，(b)ETS，(c)CSI，與 QPESUMS 觀測資料校驗，圖 b,c 的藍色線為 EPH 組，紅色線為 GTS 組。

表 3　2022/06/07 00-12UTC 累積雨量統計分數。

	EPH	GTS
RMSE	25.7	26.56
RRMSE	9.98%	10.31%
SCC	0.415	0.338

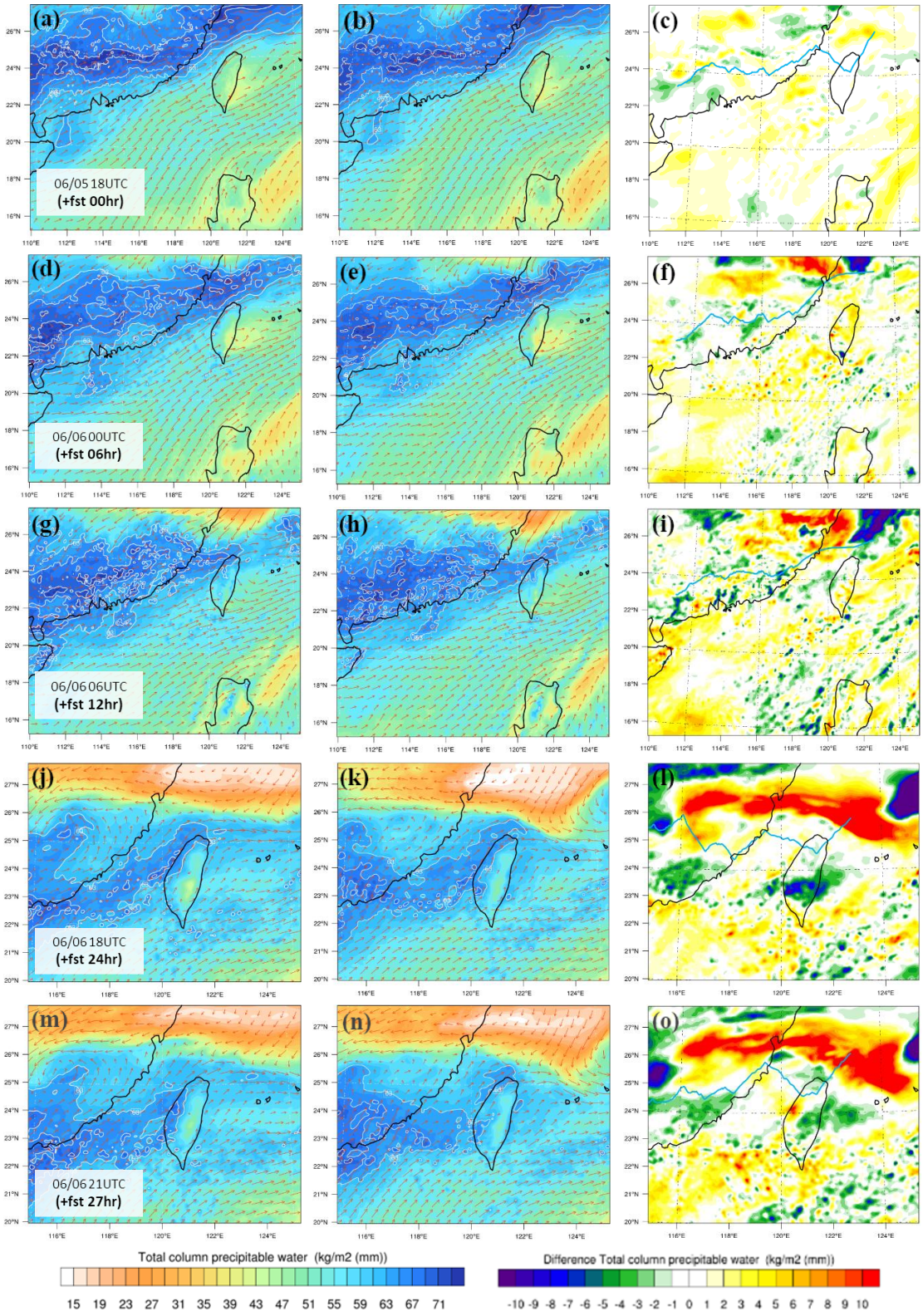

圖 22　不同時間的可總降水量(a,d,g,j,m) EPH 組，(b,e,h,k,n) GTS 組，(c,f,i,l,o) EPH 組- GTS 組的差異量，圖上的風場為高度 850hPa 風，時間排序為(a,b,c) 6 月 5 日 18UTC，(d,e,f) 6 月 6 日 00UTC，(g,h,i) 6 月 6 日 06UTC，(j,k,l) 6 月 6 日 18UTC，(m,n,o) 6 月 6 日 21UTC。

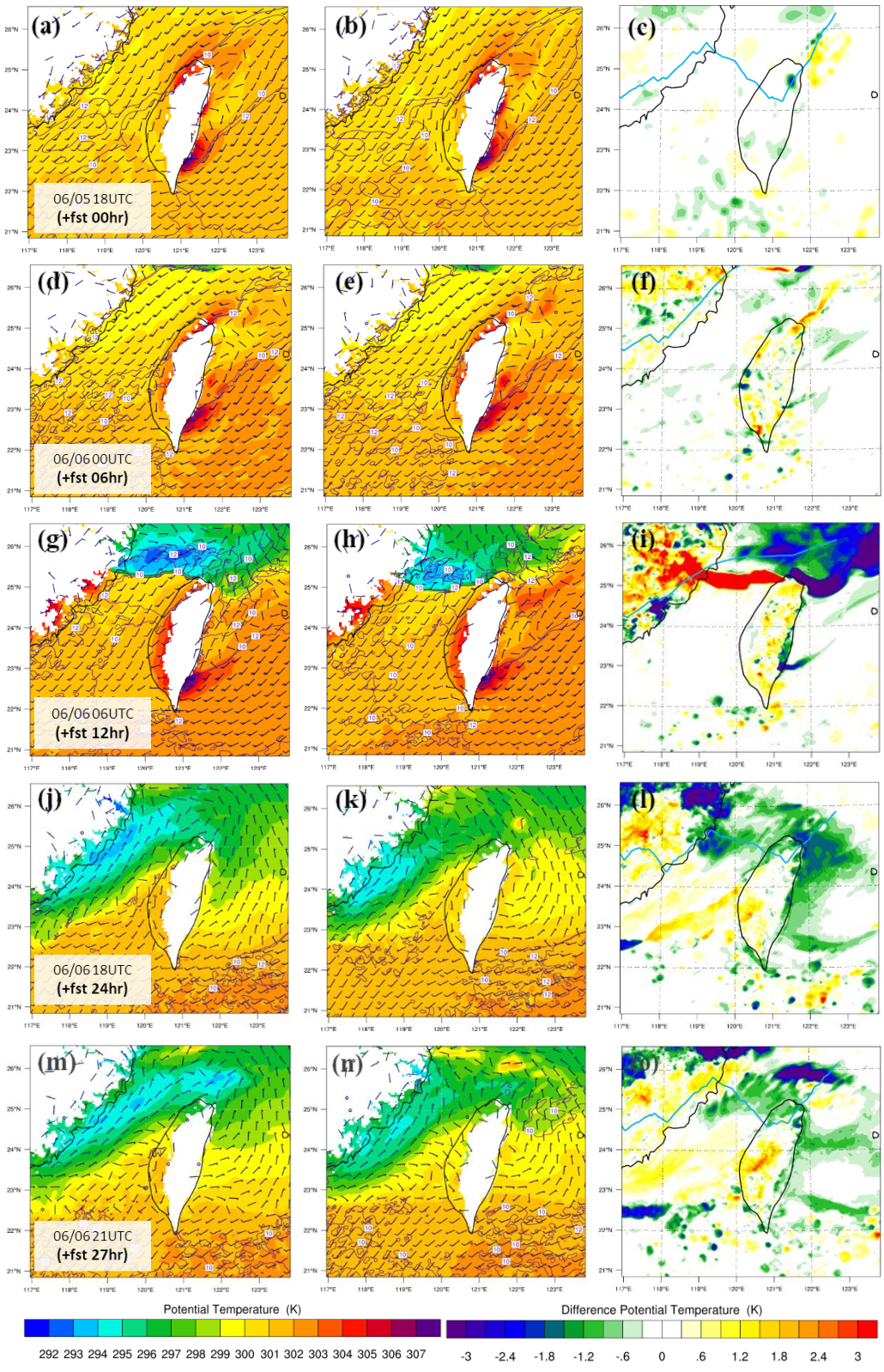

圖 23 不同時間的 975hPa 位溫(a,d,g,j,m) EPH 組，(b,e,h,k,n) GTS 組，(c,f,I,l,o) EPH 組-GTS 組的差異量組，圖上風場為高度 975hPa 風，紫色輪廓線為 975hPa 10 m/s 和 12 m/s 風速，時間排序為(a,b,c) 6 月 5 日 18UTC,，(d,e,f) 6 月 6 日 00UTC，(g,h,i) 6 月 6 日 06UTC，(j,k,l) 6 月 6 日 18UTC，(m,n,o) 6 月 6 日 21UTC。

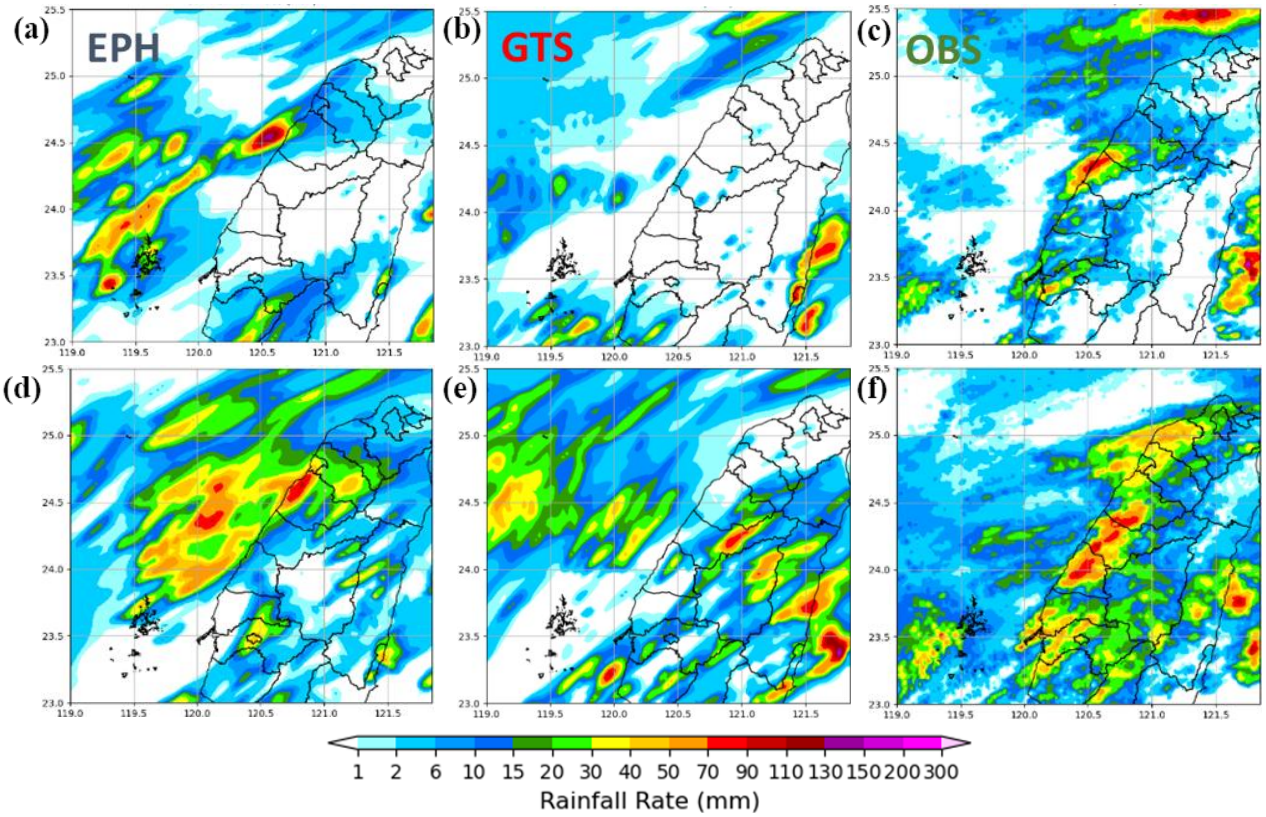

圖 24　三小時累積雨量圖，時間為(a,b,c) 6 月 7 日 00 至 03UTC 和(d,e,f) 6 月 7 日 03 至 06UTC。(a,d)為 EPH 組，(b,e)為 GTS 組，(c,f)為 QPESUMS 觀測資料用作驗證降雨。

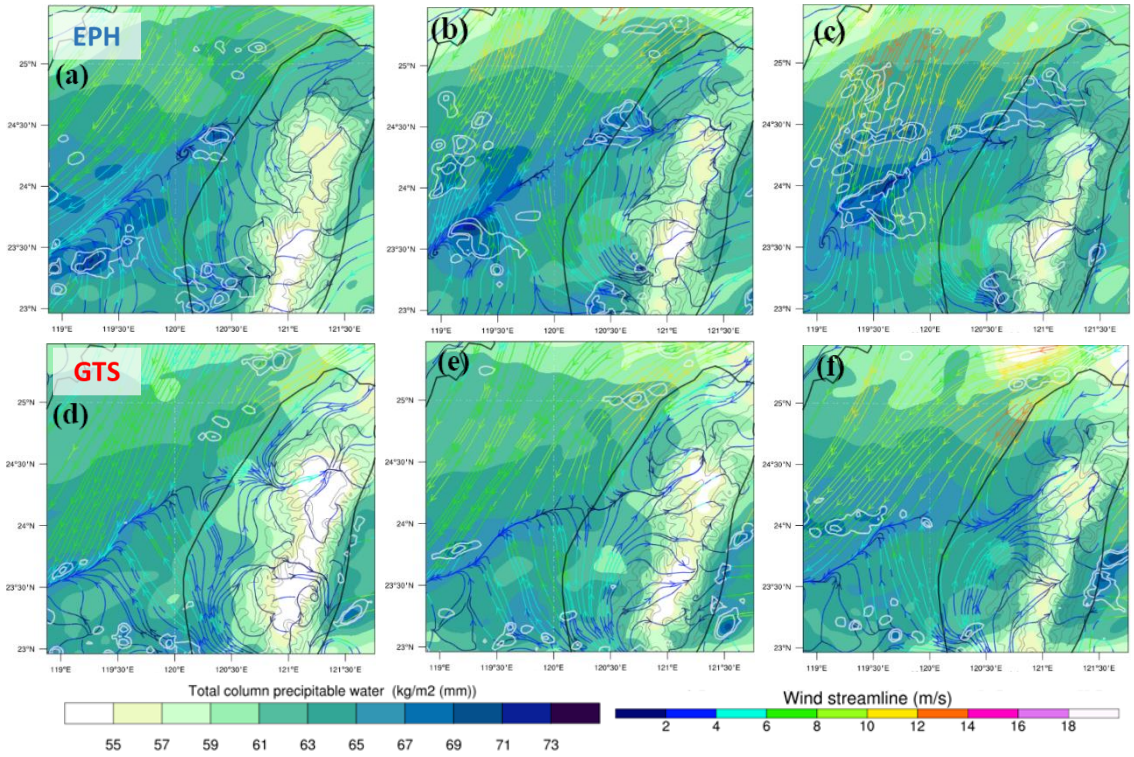

圖 25　兩模擬組可總降水量和地表 10 米流場圖，白色線為 30、40、50 dBZ 雷達回波，(a,b,c)為 EPH 組和(d,e,f)為 GTS 組，時間為(a,d) 6 月 7 日 00UTC，(b,e) 6 月 7 日 01UTC，(c,f) 6 月 7 日 02UTC。

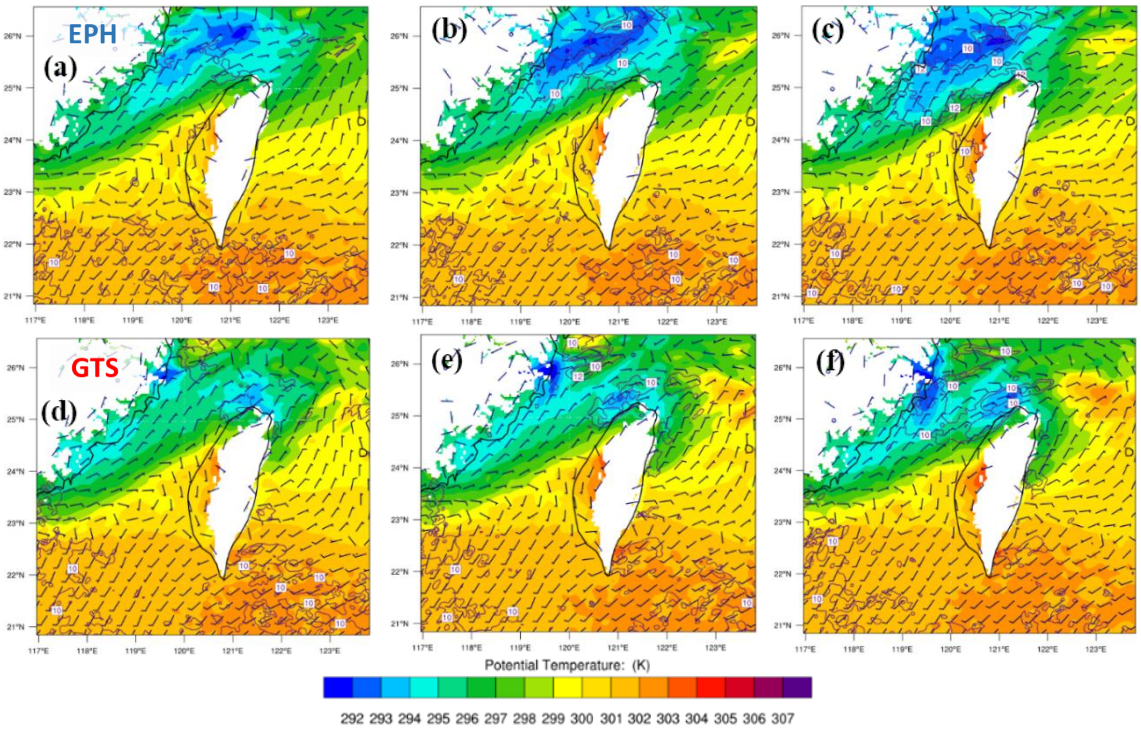

圖 26　兩模擬組 975hPa 位溫與風場圖，紫色線為 10、12 m/s 風速輪廓線，(a,b,c)為 EPH 組和(d,e,f)為 GTS 組，時間為(a,d) 6 月 7 日 00UTC，(b,e) 6 月 7 日 01UTC，(圖 c,f) 6 月 7 日 02UTC。

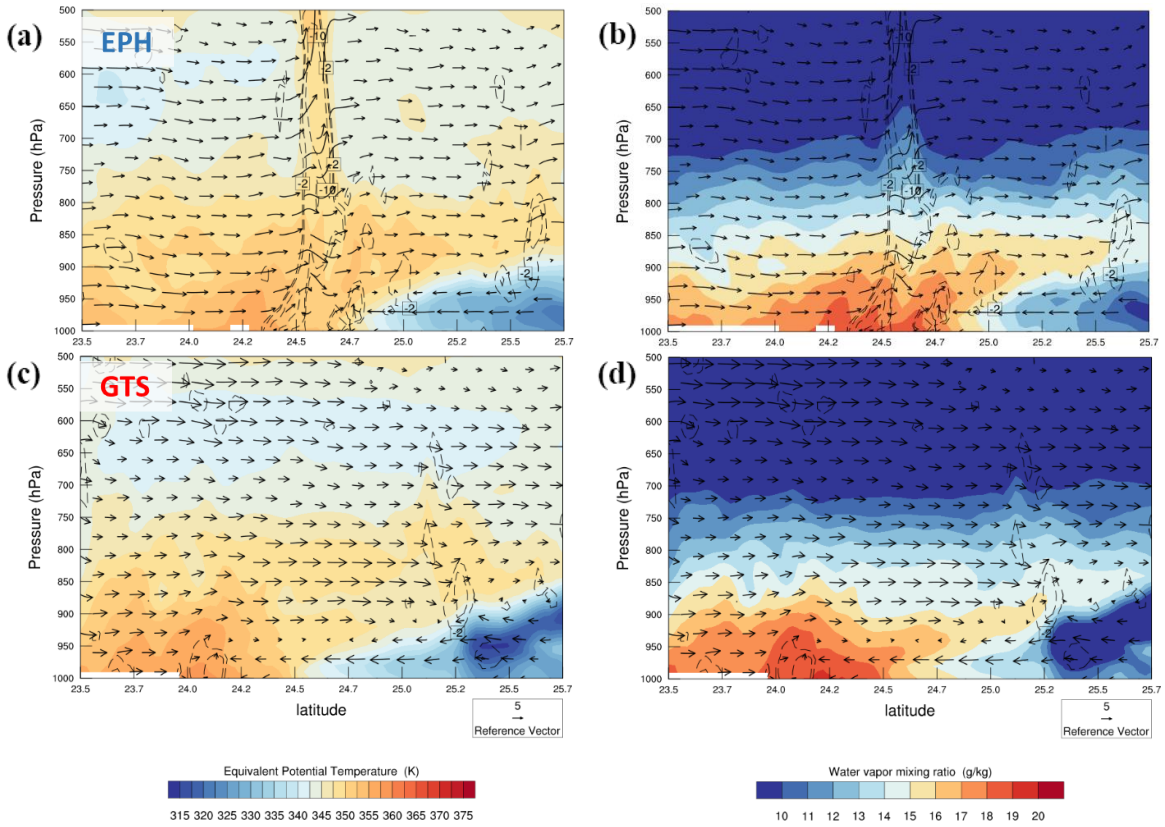

圖 27　兩模擬組(a,c)相當位溫與(b,d)水汽混合比垂直剖面，剖面位置參考圖 26，黑色虛線為-2、-4、-10 (單位$10^{-5}s^{-1}$)輻散場，(a,b)為 EPH 組和(c,d)為 GTS 組，時間為 6 月 7 日 02UTC(預報 32 小時)。

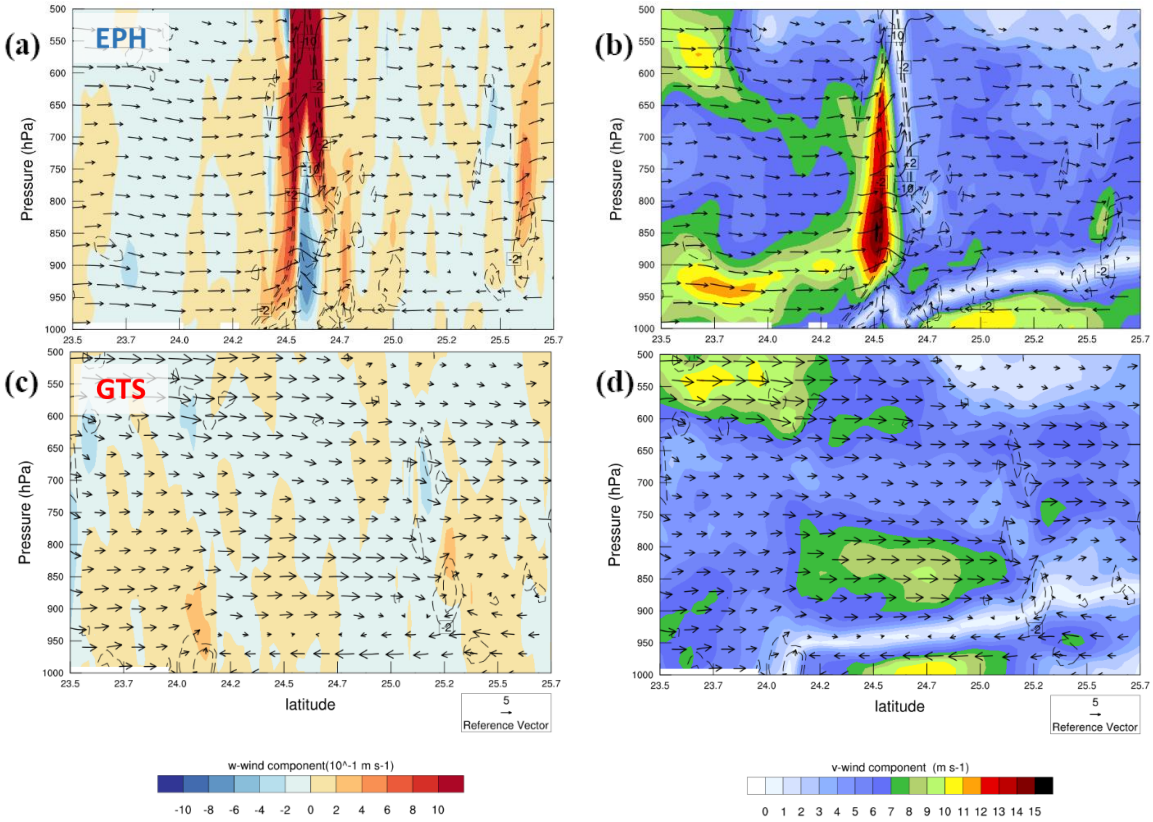

圖 28　兩模擬組(a,c)垂直風速與(b,d)經向絕對值風速垂直剖面，剖面位置參考圖 26，黑色虛線為-2、-4、-10 (單位$10^{-5}s^{-1}$)輻散場，(a,b)為 EPH 組和(c,d)為 GTS 組，時間為 6 月 7 日 02UTC(預報 32 小時)。

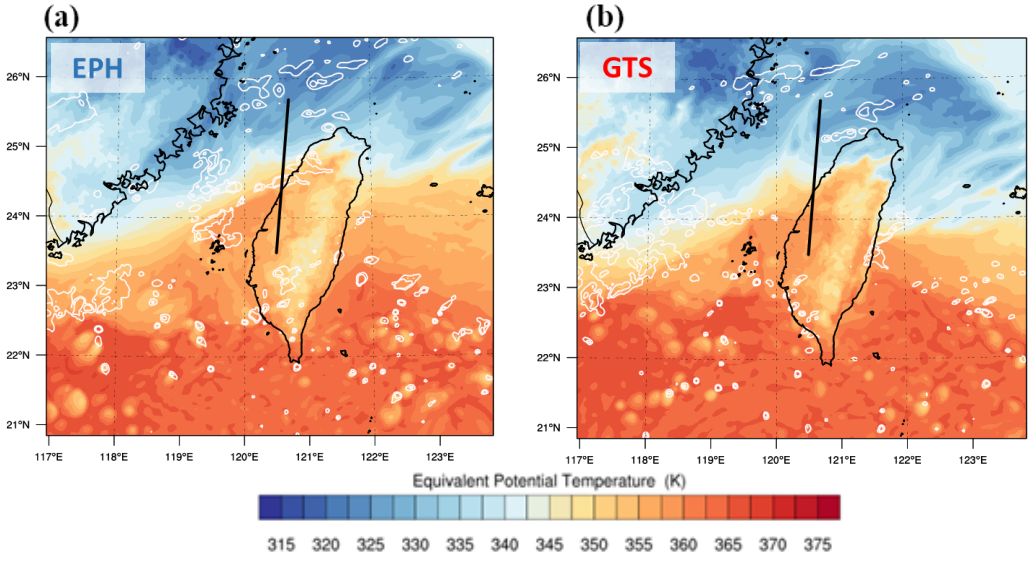

圖 29　兩模擬組 6 月 7 日 02UTC(預報 32 小時)地表相當位溫場，黑直線為圖 24,25 垂直剖面的位置，白色線為 30、40、50 dBZ 雷達回波，(a) EPH 組，(b)GTS 組。

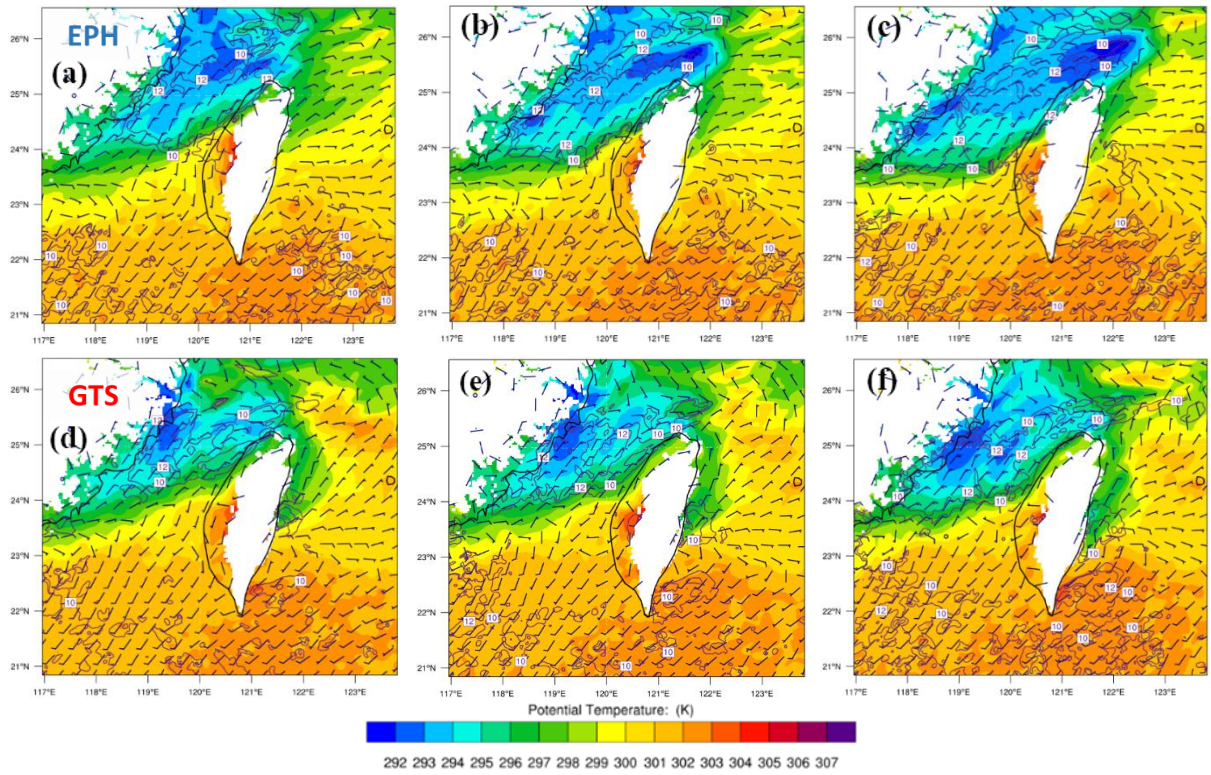

圖 30　圖例設定與圖 22 相同，時間為(a,d) 6 月 7 日 03UTC，(b,e) 6 月 7 日 04UTC，(c,f) 6 月 7 日 05UTC。

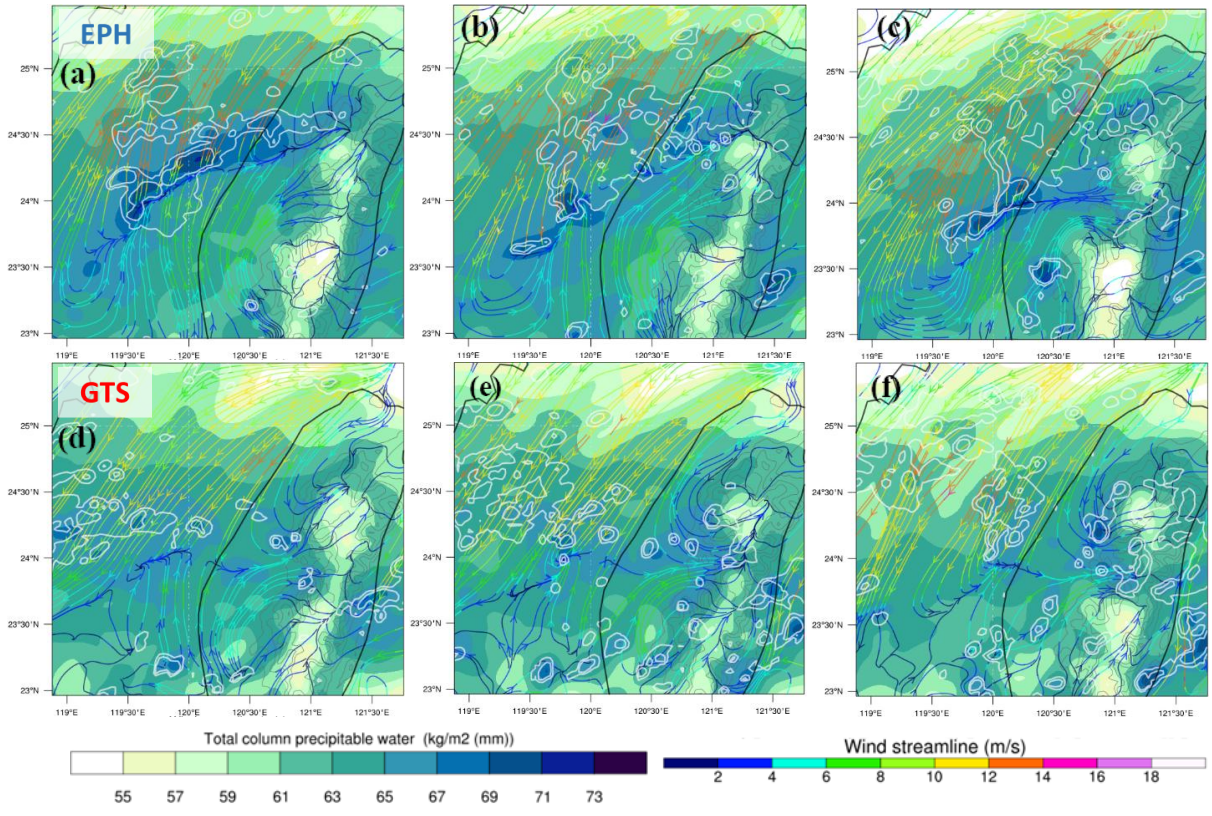

圖 31　圖例設定與圖 23 相同，時間為(a,d) 6 月 7 日 03UTC，(b,e) 6 月 7 日 04UTC，(c,f) 6 月 7 日 05UTC。

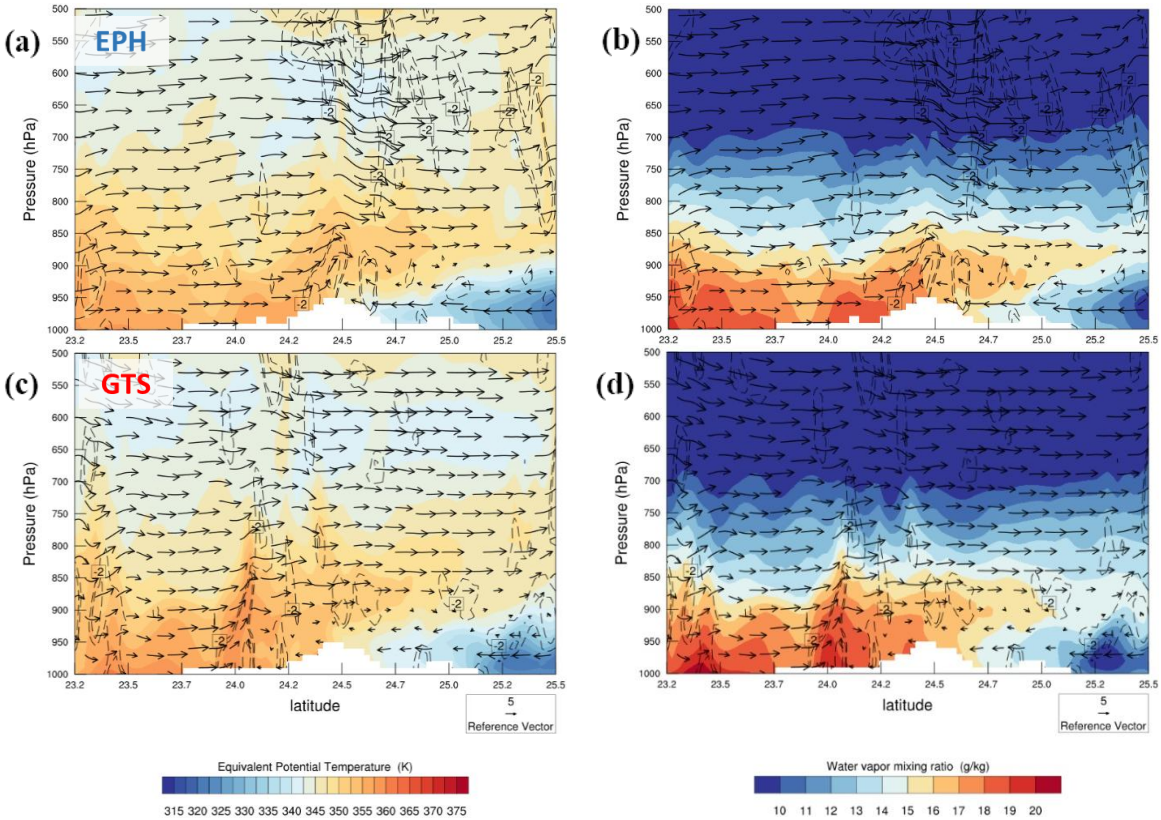

圖 32　圖例設定與圖 24 相同，剖面位置參考圖 31，時間為 6 月 7 日 04UTC(預報 34 小時)。

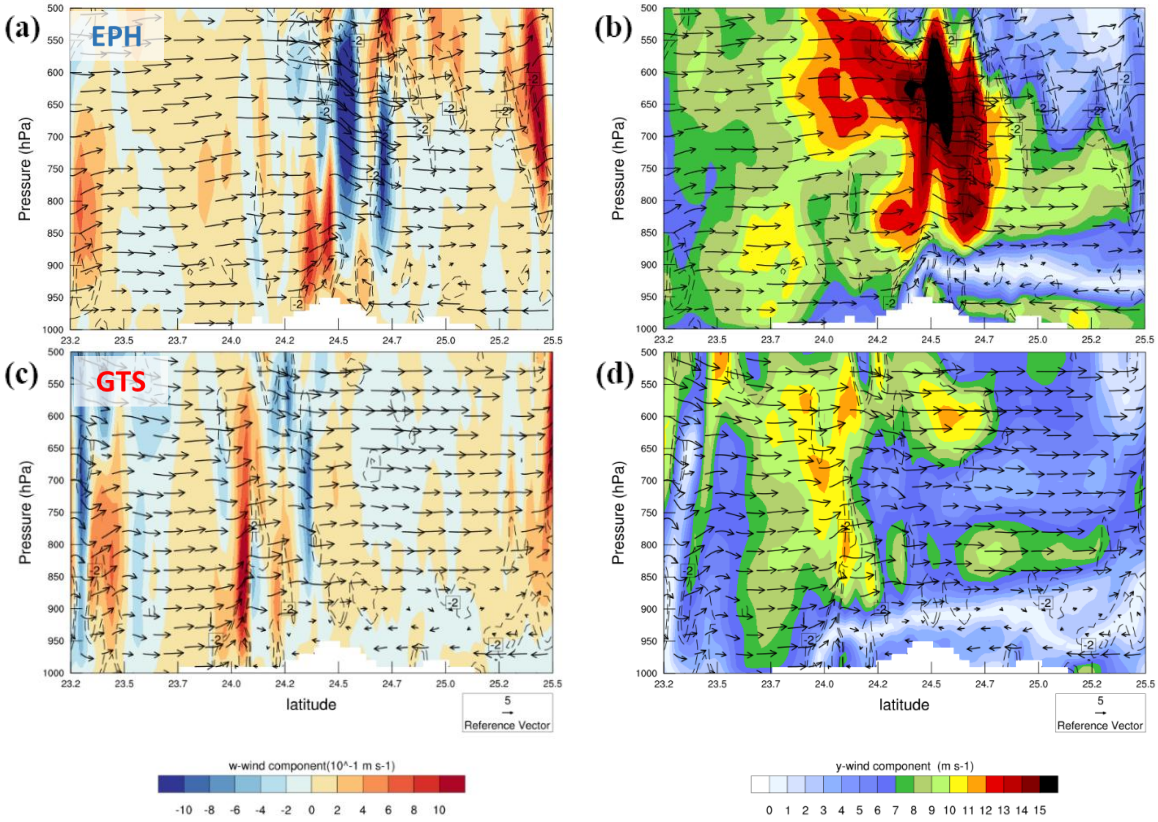

圖 33　圖例設定與圖 25 相同，剖面位置參考圖 31，時間為 6 月 7 日 04UTC(預報 34 小時)。

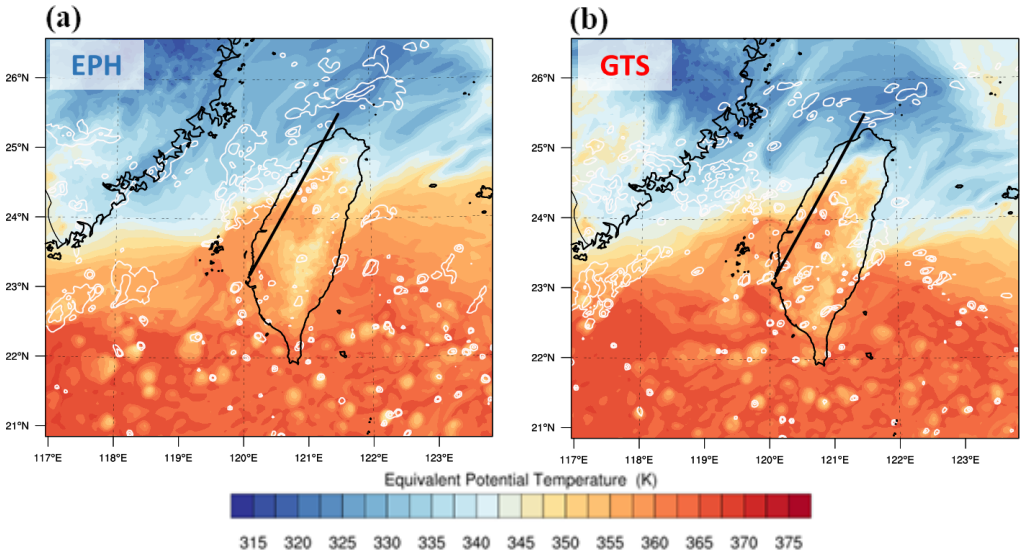

圖 34　兩模擬組 6 月 7 日 04UTC(預報 34 小時)地表相當位溫場，黑直線為圖 24,25 垂直剖面的位置，白色線為 30、40、50 dBZ 雷達回波，(a)EPH 組，(b)GTS 組。

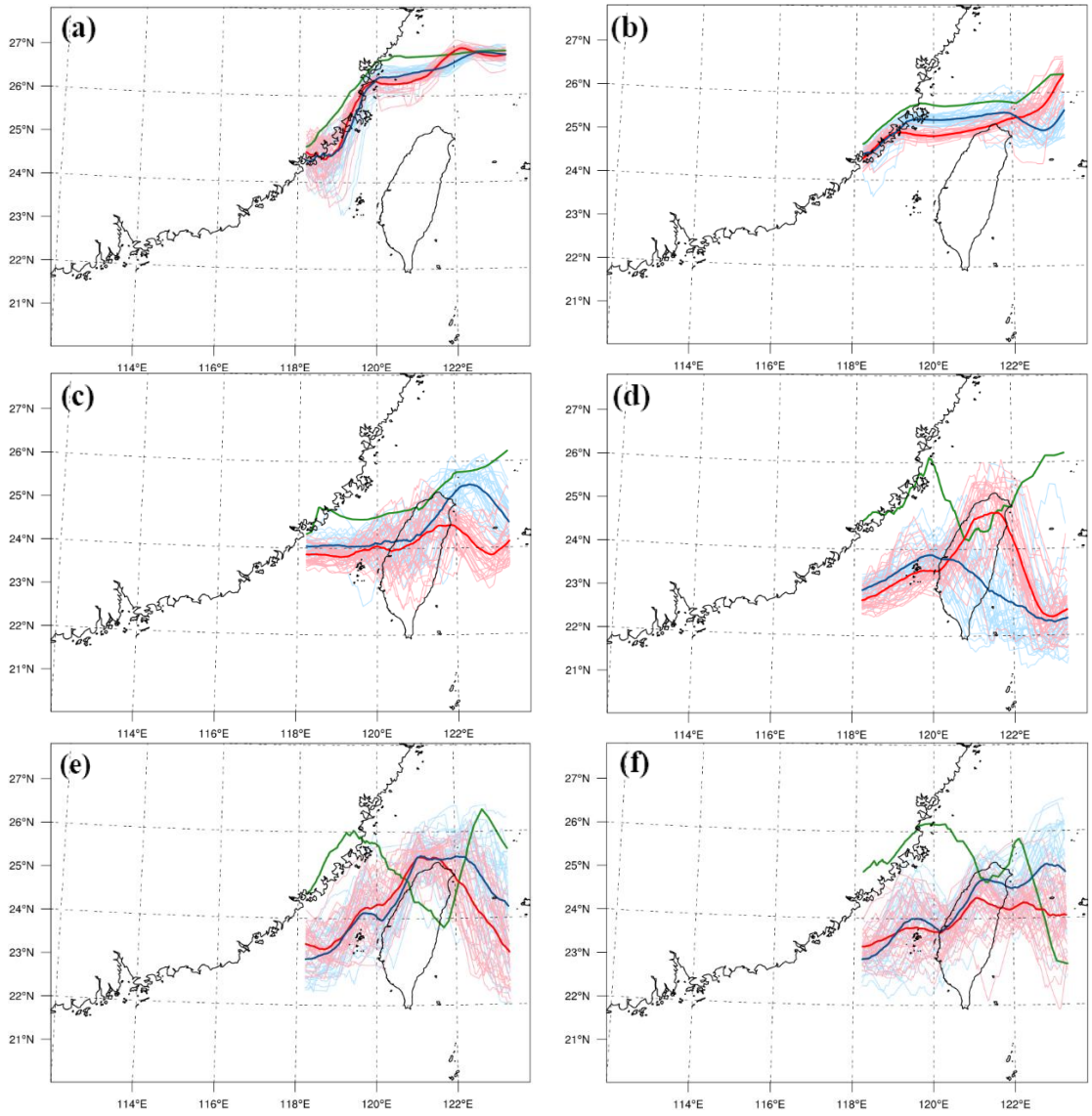

圖 35　各實驗組梅雨鋒面客觀定義位置，淺藍色線為 32 組各 EPH 組位置，深藍色線為 32 組平均 EPH 組位置，淺紅色線為 32 組各 GTS 組位置，深紅色線為 32 組平均 GTS 組位置，綠色線為 ERA5 位置。 時間順序為(a) 6 月 6 日 00UTC(預報 6 小時), (b) 6 月 6 日 06UTC(預報 12 小時), (c) 6 月 6 日 12UTC(預報 18 小時), (d) 6 月 6 日 18UTC(預報 24 小時), (e) 6 月 7 日 00UTC(預報 30 小時), (f) 6 月 7 日 06UTC(預報 36 小時)。

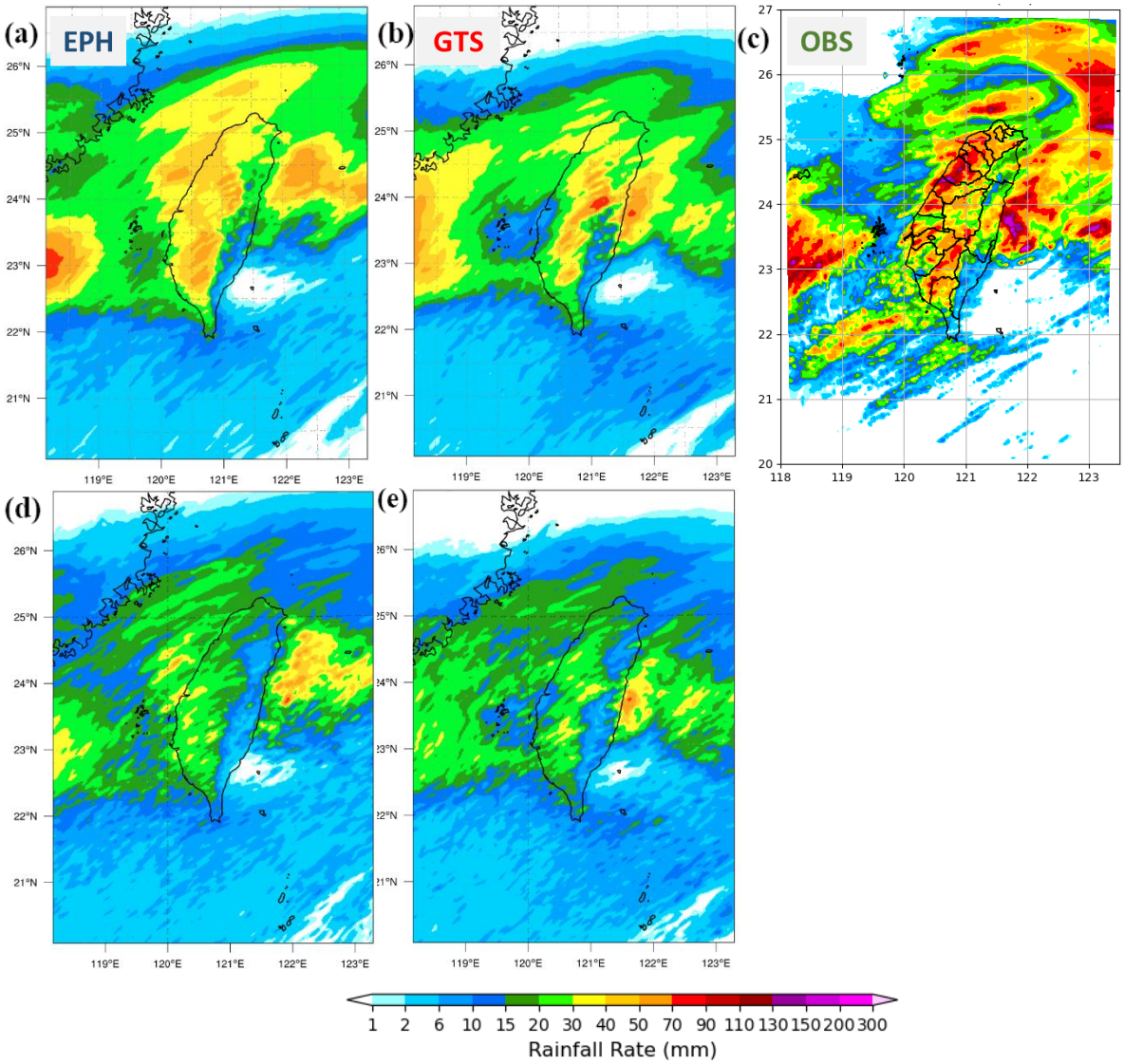

圖 36　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC(預報 30 至 42 小時)累積雨量，(a) EPH 系集平均雨量，(b) GTS 系集平均雨量，(c)QPESUMS 觀測資料，(d) EPH 系集標準差雨量，(e) GTS 系集標準差雨量。

表 4　2022/06/07 00-12UTC 32 組預報平均累積雨量統計分數。

	Avg EPH	**Avg GTS**
RMSE	25.31	26.17
RRMSE	11.58%	13.93%
SCC	0.427	0.360

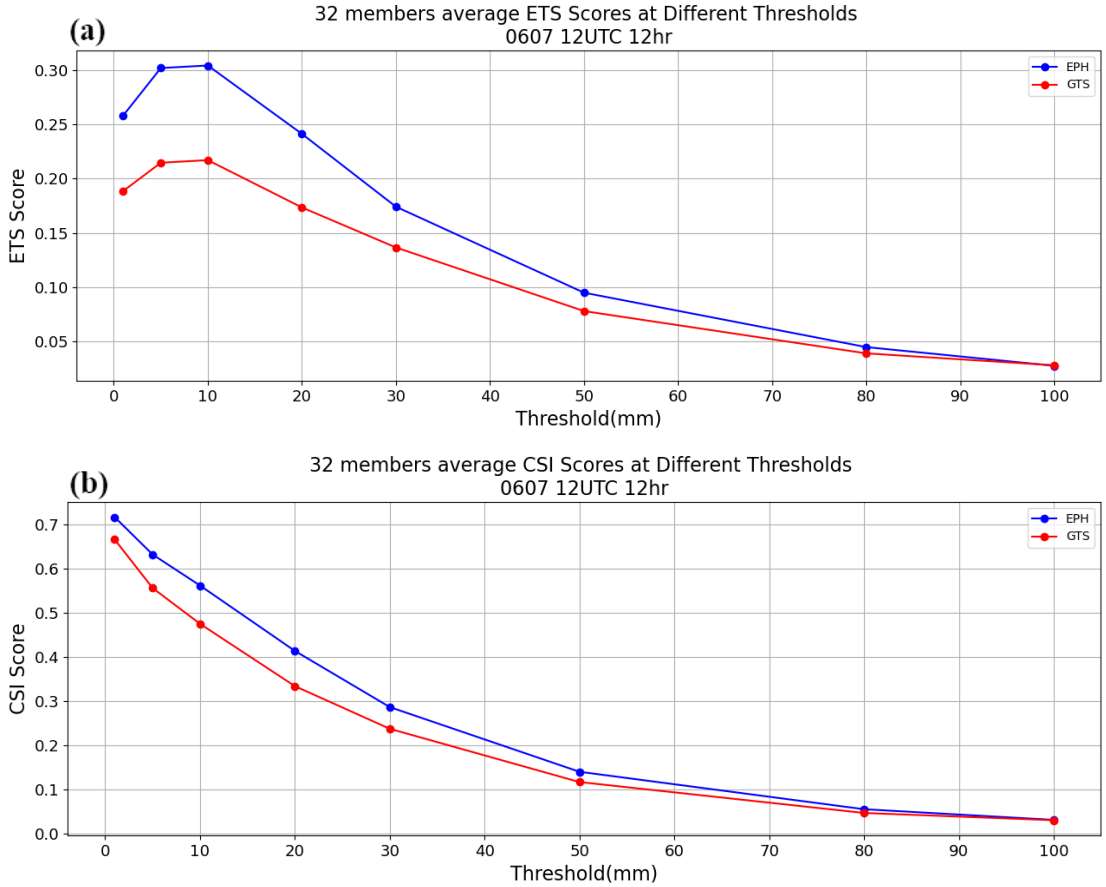

圖 37　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC 累積雨量的(a) 32 組系集預報 ETS，(b) 32 組系集預報 CSI，與 QPESUMS 觀測資料校驗，藍色線為 EPH，紅色線為 GTS

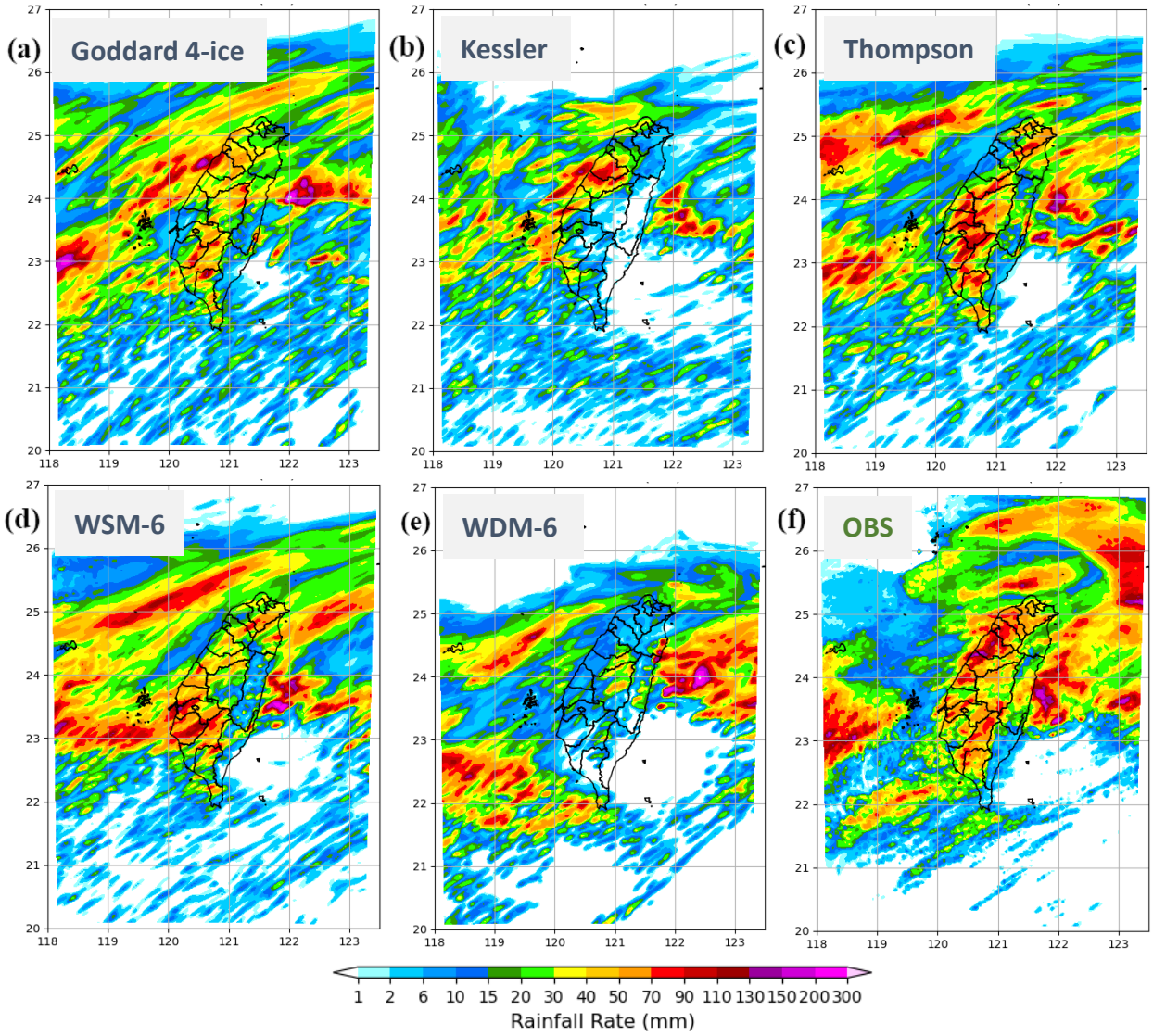

圖 38　不同微物理參數化下預報 2022 年 6 月 7 日 00-12UTC(預報 30 至 42 小時)累積雨量，(a) Goddard 4-ice microphysics scheme，(b) Kessler scheme，(c) Thompson scheme，(d) WRF Single-Moment 6-class scheme，(e) WRF Double-Moment 6-class scheme，(f) QPESUMS 觀測資料。

表 5　不同微物理參化下預報 2022/06/07 00-12UTC 累積雨量統計分數。

	Goddard 4-ice	**Kessler**	**Thompson**	**Wsm6**	**Wdm6**
RMSE	25.7	27.146	27.33	25.5	29.77
RRMSE	9.98%	10.51%	10.61%	9.90%	11.56%
SCC	0.415	0.305	0.357	0.452	0.252

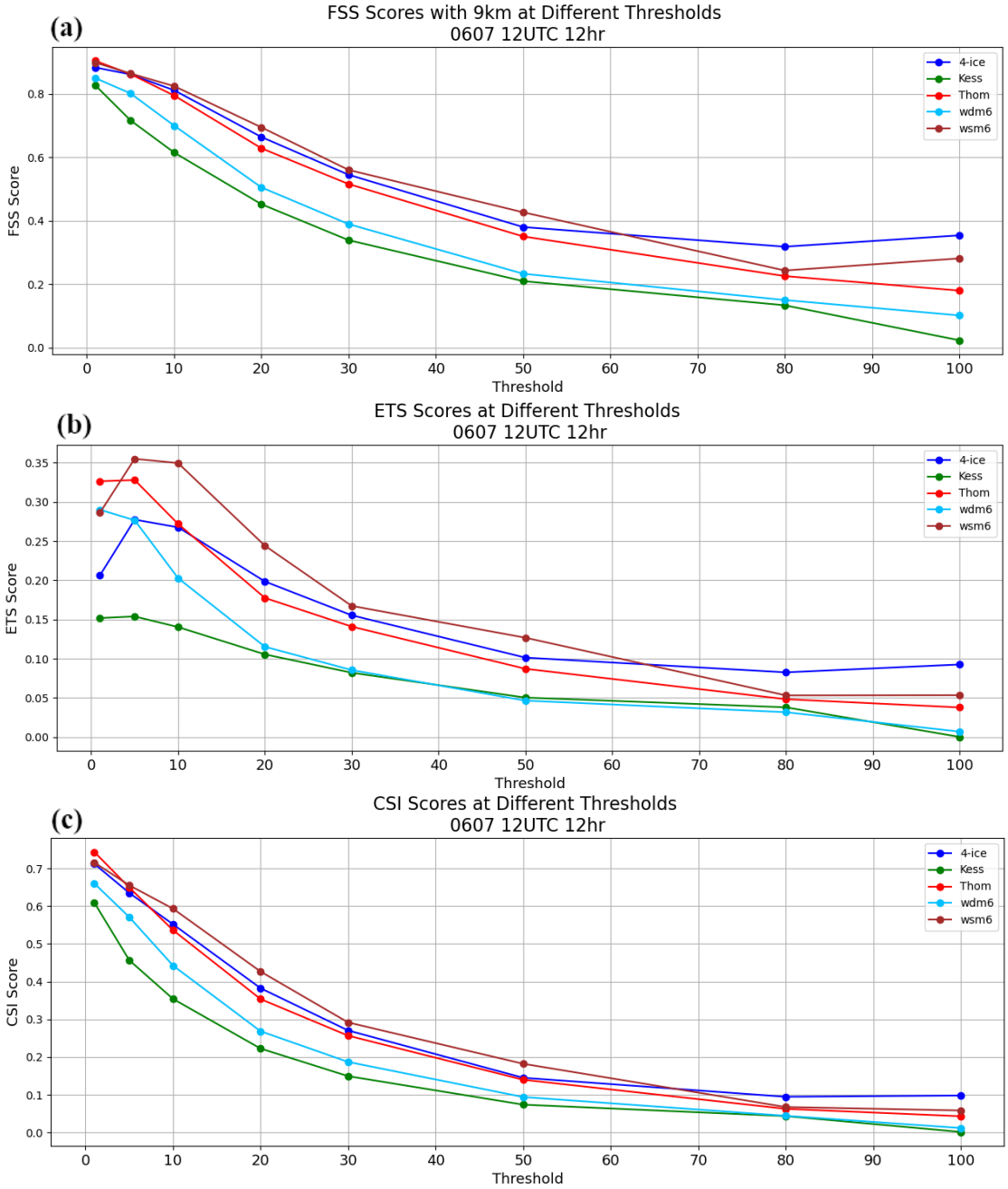

圖 39　2022 年 6 月 7 日 00-12UTC 累積雨量在不同物理參數化的統計分數。(a) 9 公里領域半徑 FSS，(b) ETS，(c) CSI，與 QPESUMS 觀測資料校驗。藍色線為 Goddard 4-ice microphysics scheme，綠色線為 Kessler scheme，紅色線為 Thompson scheme，淺藍色線為 WRF Double-Moment 6-class scheme，棕色線為 WRF Single-Moment 6-class scheme。

附錄

表 b1 同化過程中使用的 GTS 所包含資料的詳細資訊。（Routray et al., 2016）

資料來源	說明
SOUND （無線探空氣球）	利用附有儀器的氣球測量大氣溫度、濕度與氣壓的垂直剖面。
SONDE_SFC （地面觀測）	收集地表層的大氣資料，包括溫度、濕度、氣壓、風速與風向。
SYNOP （地面綜觀觀測）	提供來自地面觀測站的標準化天氣觀測資料，包含溫度、濕度、風與降水等定時觀測資料。
AIREP （飛機報告）	回報飛行中的氣象狀況，例如溫度、風速與風向、亂流與結冰情況。
PILOT （氣球觀測，或 PIBALs）	透過目視或雷達追蹤氣球以量測不同高度的風速與風向。
METAR （機場氣象觀測報告）	每小時或半小時提供機場的天氣更新，包含能見度、雲量、風、溫度與氣壓等資料。
船舶觀測	收集船舶上的氣象與海洋觀測資料，包含海面溫度、波高、風速風向與大氣壓力等。
散射儀風場 （Scatterometer winds）	來自衛星散射儀雷達，測量海面粗糙度以推算海上表面風速與風向。
PROFILER （剖風儀）	使用雷達或聲波雷達從地面站連續測量風速與風向垂直剖面。
浮標	透過海上浮標設備收集海面溫度、波高、大氣壓力與風的資料。