

同化地基 GPS ZTD 資料在午後對流個案 之定量降水預報

蔡雅婷 洪景山*

中央氣象局

(中華民國一百年十二月十九日收稿；中華民國一〇一年三月三十一日定稿)

摘 要

本研究主要是評估同化地基式 GPS 天頂總延遲 (zenith total delay, ZTD) 資料對臺灣地區夏季午後對流之模式定量降水預報的影響。研究結果顯示，同化地基式 GPS ZTD 可明顯增加分析場中距離臺灣半徑約 400 公里範圍之水氣，同時可以改善受西南季風影響下，分析場水氣由南向北遞減的現象。

在模式預報方面，同化地基式 GPS ZTD 可改善模式在臺灣地區及周圍海域偏乾及降水預報不足的現象。在定量降水預報校驗方面，同化地基式 GPS ZTD 後，0~12 小時預報之 ETS 得分在各個降水門檻都大幅改善，能夠有效提升模式短期定量降水預報能力。

關鍵字：地基 GPS、天頂總延遲、定量降水預報

一、前言

GPS (Global Positioning System) 衛星發出的訊號抵達地面被接收後，通常可以作為定位與導航之用。中央氣象局目前在臺灣地區已建立完整的即時地基 GPS 觀測網，總觀測站數目達 80 站，此一地基 GPS 觀測網的建置原本是為監測臺

灣地區地殼變動的相關資訊。然而地球大氣層的存在對衛星測量而言卻是一種干擾，在實際 GPS 資料處理中，最重要的工作即是進行大氣訂正。GPS 訊號在穿越大氣層時，由於大氣折射指數比真空大，因此在對流層與電離層中導致路徑延遲，而天頂方向的光學延遲量稱為天頂總延遲 (zenith total delay, ZTD)。ZTD 和地面上空單位

面積的總空氣重量有關，此一總重量可由地面氣壓進行估計，求得所謂的天頂靜力延遲（zenith hydrostatic delay, ZHD），ZTD 和 ZHD 的差值稱為天頂濕延遲（zenith wet delay, ZWD），ZWD 則主要取決於大氣平均溫度以及地面上空單位面積的大氣含水量（integrated water vapor）。而地基 GPS 氣象學中最重要的議題即是如何由 GPS 資料決定大氣的垂直總含水量。

藉由電磁波的延遲量可以估計大氣可降水量（Precipitable Water Vapor, PWV），且已發展出相當成熟的水氣訂正經驗公式，例如 Saastamoinen (1972)、Davis et al. (1985)、Bevis et al. (1992, 1994) 和 Duan et al. (1996) 等。Rocken et al. (1993, 1995)、Emardson et al. (1998)、Tregoning et al. (1998)、劉和楊(1999)、Liou et al. (2001)、Hase et al. (2003)、Van Baelen et al. (2005)、Yang et al. (1999) 等均指出，地基 GPS 反演之大氣可降水量可以和探空與微波輻射儀有相同等級的精確度。例如 Hase et al. (2003) 分析兩年的資料指出，GPS 與探空資料推導之 ZTD 的平均偏差約為 7 mm，標準差為 12 mm。Van Baelen (2005) 利用微波輻射儀和 GPS 反演的可降水量進行比較則顯示，兩者之差異有輕微的日夜變化，在白天平均偏差為 2 mm，晚上則為 0.5 mm，但這個偏差仍相當小。Liou et al. (2001) 則針對臺灣地區的 GPS 觀測進行比較，發現其和微波輻射儀的差距在 1~2 mm 之間，以上之研究均顯示反演之可降水量有實際應用的可行性。

由於利用地基 GPS 資料反演之 PWV 具有相當之準確性，因此也大大提升其應用價值，包括在氣候研究（Foster et al. 2000）與天氣分析均扮演重要的角色，甚至擴及即時天氣預報（Gutman 1999、Gutman et al. 2003）。地基 GPS 觀測資料的

另一個重要應用則是同化至數值天氣預報模式中，藉以改善數值模式初始場中水氣資訊的不足之處。地基 GPS 觀測有許多參數可以在變分分析中做為同化的變數，例如反演之可降水量（Kuo et al. 1993, 1996、Zou and Kuo 1996、Deblonde et al. 2005、Smith et al. 2001）和 ZTD（Cucurull et al. 2004、De Ponte and Zou 2001a, b、Vedel and Huang 2004）等，Smith et al. (2000) 與 Gutman and Benjamin (2001) 更將地基 GPS 反演之可降水量進行作業性測試，並評估其在模式預報中的影響。

由於 GPS 反演可降水量需要導入 GPS 測站之地面大氣觀測，因此可使用之 GPS 站往往會大幅減少，此外，在反演過程中必須參考測站的地面壓力和溫度，因此可能導入更多的不確定因素而造成誤差的來源。而同化 ZTD 則不需地面大氣觀測資料以進行反演計算，但在觀測運算子中需要計算模式在 GPS 測站上的地面參數以求得模式 ZTD 的初始猜測值，這個部分會因為模式地形高度與測站高度的差異而導致顯著的誤差，特別是測站壓力，這是要額外特別小心處理的地方（Cucurull et al. 2004）。而研究指出（Cucurull et al. 2004、De Ponte and Zou 2001a, b），同化 ZTD 的確會比同化 PWV 資料得到更好的結果，因此在資料同化系統中同化 ZTD 是 GPS 觀測資料應用的主要趨勢。

由於地基 GPS 觀測僅涵蓋水氣資訊，因此，同化地基 GPS 觀測時如果能同時同化其他輔助觀測，則可以得到更好的效果。例如，De Ponte and Zou (2001a, b) 指出 ZTD 配合 wind profiler 觀測的風場和 radio acoustic sounding system (RASS) 所觀測之虛溫可以得到最好的預報。Cucurull et al. (2004) 則指出，同時同化 ZTD 與地面測站之觀測，且在循環更新（update cycle）下

可以得到最好的分析場。他們也建議，如果在地基 GPS 測站同時設置地面觀測站，這對於解析劇烈對流與定量降水預報都可以得到最好的效果。

臺灣地區四面環海，局部環流受地形影響顯著，然而有關水氣場之觀測卻非常缺乏，由於在數值模式中無法掌握水氣場的時、空分布特性，因而導致模式準確定量降水預報的瓶頸。中央氣象局目前在臺灣地區已建立完整的地基 GPS 觀測網，總測站數目達 80 站，具有每 30 秒鐘一筆的即時觀測資料，這些資料所反演出來之水氣資訊不僅對即時天氣分析預報助益甚大，對數值天氣預報而言，當然更是值得進一步研發應用。中央氣象局目前作業之區域資料同化系統為 WRF/WRF VAR，由於 WRF VAR 本身即可同化非模式變數，因此非常適合用以同化地基 GPS 觀測資料。本研究針對午後對流個案進行資料同化研究，評估與分析地基 GPS 觀測對模式定量降水預報的影響，第二、三章簡介本文所使用的資料和研究方法，其次為結果與分析，最後是結論。

二、資料簡介

中央氣象局之地基 GPS 觀測網可提供即時之 GPS 觀測資料，總觀測站數目達 80 站，具有每 30 秒鐘一筆的即時觀測資料，觀測所得之天頂角總延遲量可以提供高解析度區域模式所需的水氣資訊以進行資料同化之用。而其中共有 30 個觀測站附加設置氣象觀測儀器 MET3A，提供溫度、壓力和相對濕度之觀測，再搭配中央氣象局自動氣象觀測網所觀測之溫度和壓力觀測資料，經由數值內插到各個 GPS 觀測站後即可反演得到可降水量資料，提供臺灣地區天氣監測之用，本文所使用之地基 GPS 觀測站分布如圖 1 所示。

Ground Base GPS Station

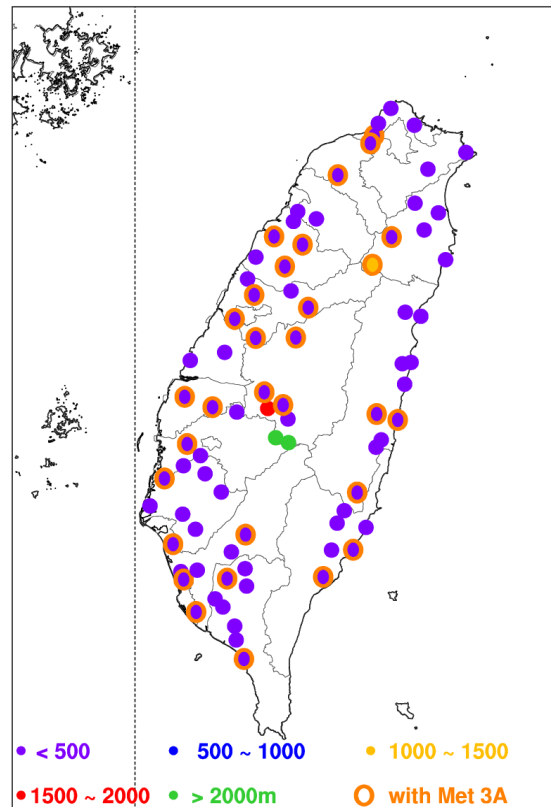


圖 1 中央氣象局地基式 GPS 觀測站分布，顏色表示測站高度，橘色圓圈為架設有 MET3A 氣象觀測儀器之 GPS 觀測站。

三、研究方法

(一) 實驗設計

本研究使用 WRF 模式(Weather Research and Forecasting model, Michalakes et al., 2001)，配合 WRF 3DVAR (Barker et al., 2004) 建構一完整的資料同化系統，用以評估同化地基式 GPS ZTD 資料對模式定量降水預報的影響。模式水平採三層巢狀網格，網格間距分別為 45/15/5 公里，網域分布如圖 2。垂直層數為 45 層，模式頂設為 30 hpa。模式物理參數法包括 NOAH 土壤模式、Goddard 微物理參數法、YSU 邊界層參數法、

Domain of CWB WRF

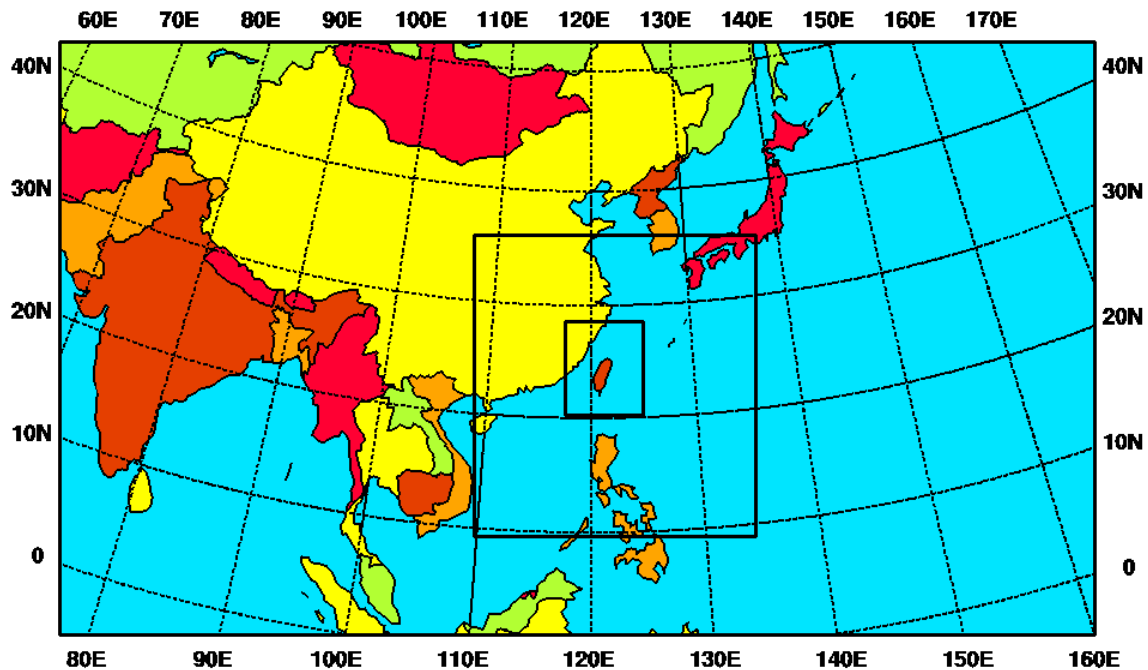


圖2 本研究之模式積分範圍。

Kain-Fritsch 積雲、RRTM 長波輻射和 Goddard 短波輻射參數法等，各參數法之介紹詳見 WRF 使用手冊（Skamarock et al., 2008）。

模式之側邊界採用 NCEP 全球模式 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的分析與預報場，模式初始場則經由 WRF 和 WRF 3DVAR 所建構之資料同化系統產生。模式的 3 個網域均獨立進行資料同化，採用部份循環更新（partial cycle）資料同化策略，也就是每一個模式的初始場均自 12 小時前由 NCEP GFS 的分析場冷啟動（cold start），然後每 6 小時進行一次 WRF 3DVAR 客觀分析，其中模式的初始猜測場來自 WRF 的 6 小時預報，也就是循環更新（full cycle）模式。這樣做的目的是經由間斷式的資料同化策略，每個分析場均由 12 小時前的全球分析場冷啟動，藉以避免中尺度模式累積系統性預報偏差；而 12 小時的循環更新可以在資料同化過程

中掌握模式初始猜測場與的中尺度資訊，此將有利於模式對中尺度天氣系統的預報能力。本研究採用 WRF 3DVAR 內建之背景誤差斜方差矩陣（CV3 選項），此亦為 NCEP 網格統計內插分析（Gridpoint Statistical Interpolation, GSI）使用之背景誤差斜方差矩陣，主要是用 NCEP 全球模式 24 和 48 小時預報誤差，使用 NMC 方法（Parish and Derber 1992）推估所得。

本研究包含控制組（CTL）和實驗對照組（ZTD）2 個資料同化實驗。在 CTL 組中，同化探空觀測、地面綜觀觀測、衛星風觀測、高空風觀測、機場觀測觀測、船舶觀測、漂浮站觀測、飛機觀測、衛星探空觀測、福衛三號 GPSRO 觀測等。在 ZTD 組中則除了控制組所同化的觀測資料外，額外加入地基式 GPS ZTD 資料。Eresmaa et al. (2005) 指出地基式 GPS ZTD 之觀測誤差會隨

著季節而改變，其中夏季為 11.06 mm，冬季為 7.2 mm，年平均值為 9.7 mm，本研究在三維變分分析中所使用之 ZTD 的觀測誤差值設定為 10 mm。

(二) 個案選取

為評估同化地基式 GPS ZTD 資料對臺灣地區夏季午後對流定量降水預報的影響，本研究選取 2009 年至 2011 年總共 22 個個案進行資料同化實驗，個案的選取首先排除鋒面移入和受颱風環流所影響的情況，並且為 6 月至 9 月連續 2 天都有午後對流情形之夏季個案。此一策略主要是簡化問題的複雜性，避免強綜觀天氣系統之平流效應對模式預報的影響，以凸顯同化局地 ZTD 觀測對模式定量降水預報預報的效益。

所有個案的模式初始時間均為 0000 UTC，進行 48 小時預報，所以在預報時間內可以包含 2 次發生午後對流的時段，分別為發生第一次午後對流時段，定義為 A 時段，其預報長度為 06~12 小時；與預報長度為 30~36 小時之 B 時段，此為模式初始時間之後第二天發生午後對流的時段，A 時段與 B 時段均為臺灣當地時間 14 時至 20 時。個案選取時間如表一。

(三) 校驗資料與校驗方法

本研究使用中央氣象局 467 個自動雨量站提供的雨量觀測（測站分布如圖 3），用以評估同化地基式 GPS ZTD 資料對臺灣地區午後對流定量降水預報的影響。在此我們將模式預報的雨量內差至雨量站，並利用廣被氣象作業及研究單位所採用的公正預兆得分（Equitable Threat Score，ETS，Schaefer 1990）及偏離指數（Bias）進行定量降水預報校驗。ETS 是在計算針對特定雨量閾

表一 本研究選取之夏季午後對流個案

模式資料同化實驗之初始時間 (0000 UTC)					
2009 年	6 月 18 日	6 月 26 日	6 月 27 日		
	6 月 21 日	6 月 27 日	6 月 28 日	7 月 12 日	7 月 13 日
2010 年	7 月 16 日	7 月 17 日	8 月 14 日	8 月 17 日	9 月 4 日
	6 月 12 日	6 月 13 日	6 月 14 日	6 月 15 日	6 月 17 日
2011 年	6 月 18 日	6 月 19 日	7 月 1 日	7 月 2 日	

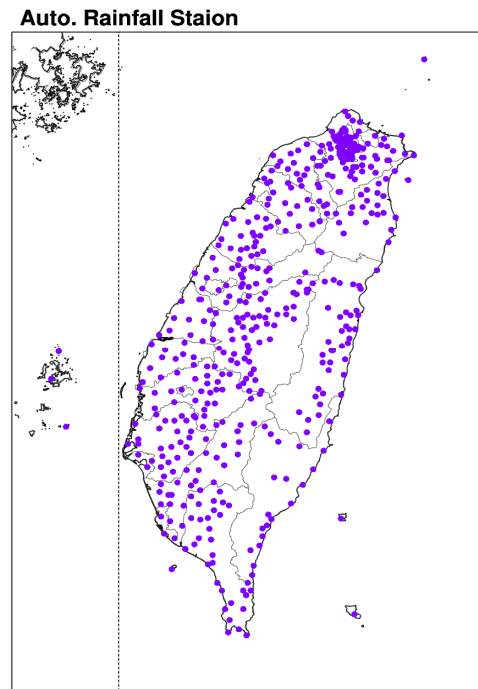


圖 3 中央氣象局自動雨量站分布圖。

值，除了模式與觀測皆無降水且不是隨機猜中的情況下，模式正確預測降水的機率，ETS 分數愈高代表模式降雨預報愈準確，其定義如下：

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

上式的 H 代表預報與觀測皆有降雨的點數， F 為針對特定雨量閾值，統計預測降雨的點數， O 為觀測降雨的點數， $R = FO/N$ 為隨機可正確預測降水的點數， N 為預報點數與觀測點數之和。偏離係數 $Bias = F/O$ ，即模式預測降水點數與觀測降水點數之比，當 $Bias$ 值大於 1 代表模式高估降水點數，小於 1 則代表模式低估降水點數，綜合 ETS 與 $Bias$ 得分的結果，可判斷降水預報的正確性。

四、結果與分析

為了瞭解同化地基式 GPS ZTD 資料對於模式預報所造成的影響，在此分為兩個部份，分別採用冷啟動與部份循環更新之資料同化策略，探討同化 ZTD 對分析與預報的影響。

(一) 冷啟動實驗

所謂的冷啟動資料同化策略，意指模式之初始猜測場來自 NCEP GFS 的分析場，模式的 3 個網域均獨立進行三維變分分析，其模式設定同於第三章的實驗設計所述。冷啟動實驗設計的目的是要排除循環更新過程中模式預報誤差對分析的影響，而只單純評估三維變分分析對同化 GPS ZTD 觀測資料的效能。個案選取為 2010 年 9 月 12 日 0000 UTC 與 2011 年 6 月 13 日 0000 UTC 兩個個案。

為說明 WRF 3DVAR 同化 ZTD 觀測資料之效果，在此移除所有的觀測資料，僅在台灣中部的神岡觀測站(圖 4 圓點所示)放入一個 47.8 mm 的 ZTD 觀測增量。圖 4 為 3DVAR 針對此一單點 ZTD 觀測所得到的模式各層水氣分析增量，此一

分析結果即反應 3DVAR 背景誤差協方差矩陣對分析的影響。圖 4 顯示，單點觀測增量經由背景誤差協方差矩陣投射至模式網格後，分析增量之影響半徑即大約在 200~300 公里左右，此為三維變分根據大量模式預報誤差所得到的統計結果。此外，WRF 3DVAR 中仍考慮同向性的假設，也就是觀測增量對分析的影響是沒有方向性的，所以分析增量為同心圓分佈(因為地圖投影和地形的關係，所以圖 4 顯示的不是絕對的同心圓)。

圖 5、6 為上述兩個個案之最底層水氣混合比分析增量，此為分析場和初始猜測場的差異。比較兩組實驗的結果發現，同化地基式 GPS ZTD 資料會使得水氣分析增量增加，並且此資料經過三維變分分析後可以影響到約臺灣周圍 300 至 400 公里半徑的距離。如圖 4 所示，同化單一 ZTD 觀測，其對分析的影響大約 200~300 公里，且呈現大約同心圓的結構，當同化全臺灣島的 ZTD 觀測後，每個單一 ZTD 觀測對分析的影響總合，其整體的分析增量亦呈現大約同心圓分佈，或是以臺灣為中心之同向分佈，如圖 5、6 所示。和 CTL 組比較，在 2011 年 6 月 13 日 0000 UTC 個案中(圖 5B)顯示，受到 ZTD 的影響，主要在臺灣西半部平原地區得到最大的分析增量，而個案 2010 年 9 月 12 日 0000 UTC(圖 6B)，則在臺灣西南部與東南部海域可得到較大的分析增量。

圖 7 和圖 8 分別為上述兩個個案之模式預報 0 至 12 小時累積降水與相對應時段之觀測累積降水。在 2011 年 6 月 13 日 0000 UTC 個案中，比較 ZTD 組與 CTL 組發現，同化地基式 GPS ZTD 資料後可增加模式的預報降水，尤其在宜蘭、花蓮和南投地區之模式降水最為明顯(圖 7D)，此和圖 5B 中 ZTD 組在上述區域有較大水氣分析增量一致，與觀測(圖 7C)相比，ZTD 組也得到

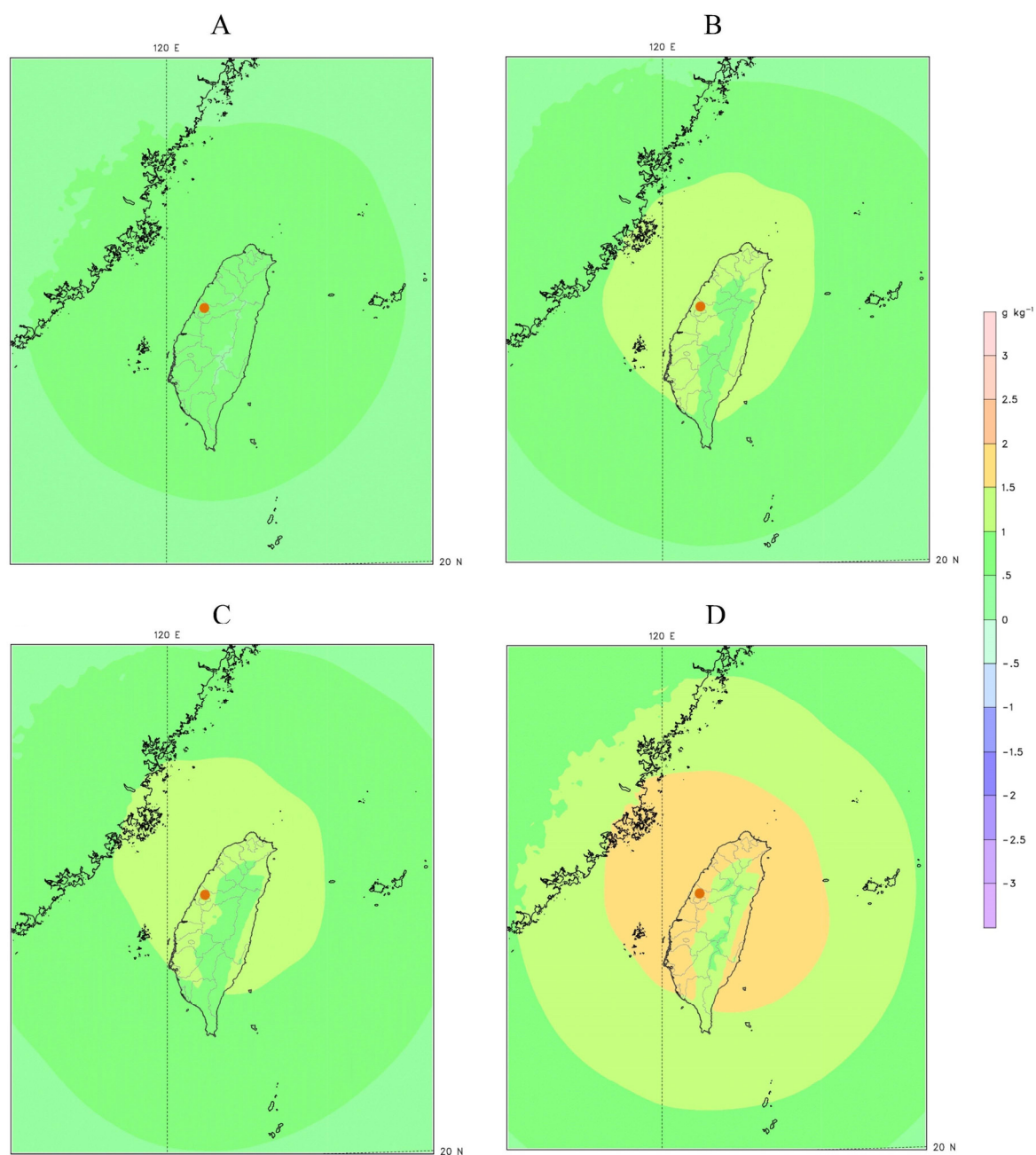


圖4 單點 ZTD 觀測（神岡觀測站，如圓點所示，觀測增量為 47.8 mm）所得到的水氣混合比分析增量（g/Kg）。
A 為模式第 1 層，B 為第 3 層，C 為第 5 層，D 為第 7 層。

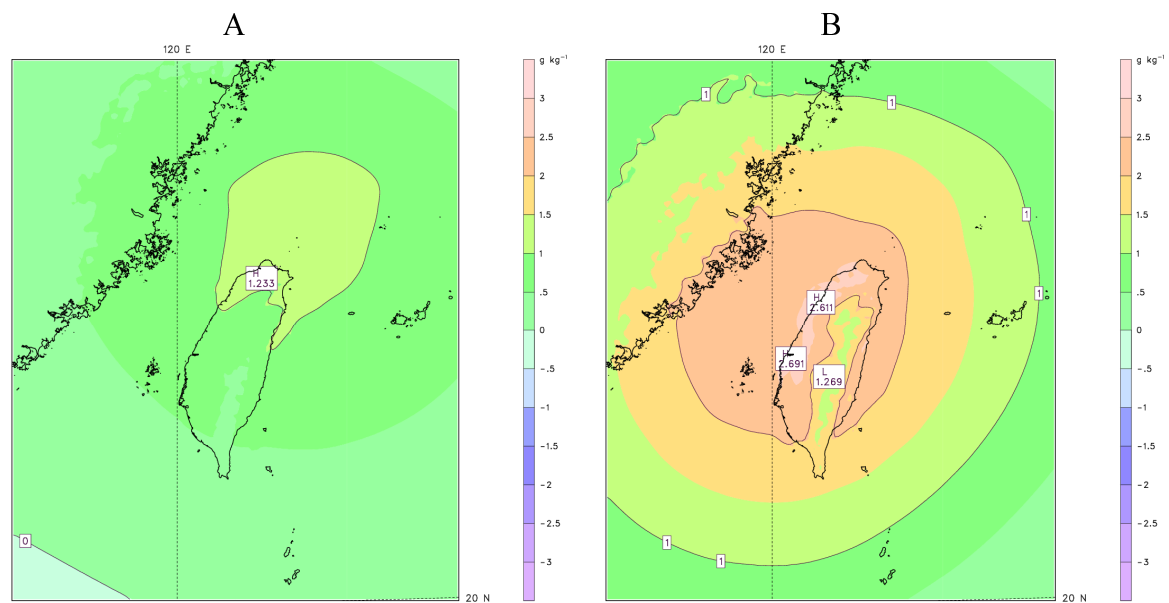


圖5 初始時間為 2011 年 6 月 13 日 0000 UTC 之模式最底層水氣混合比分析增量。A 為 CTL，B 為 ZTD。

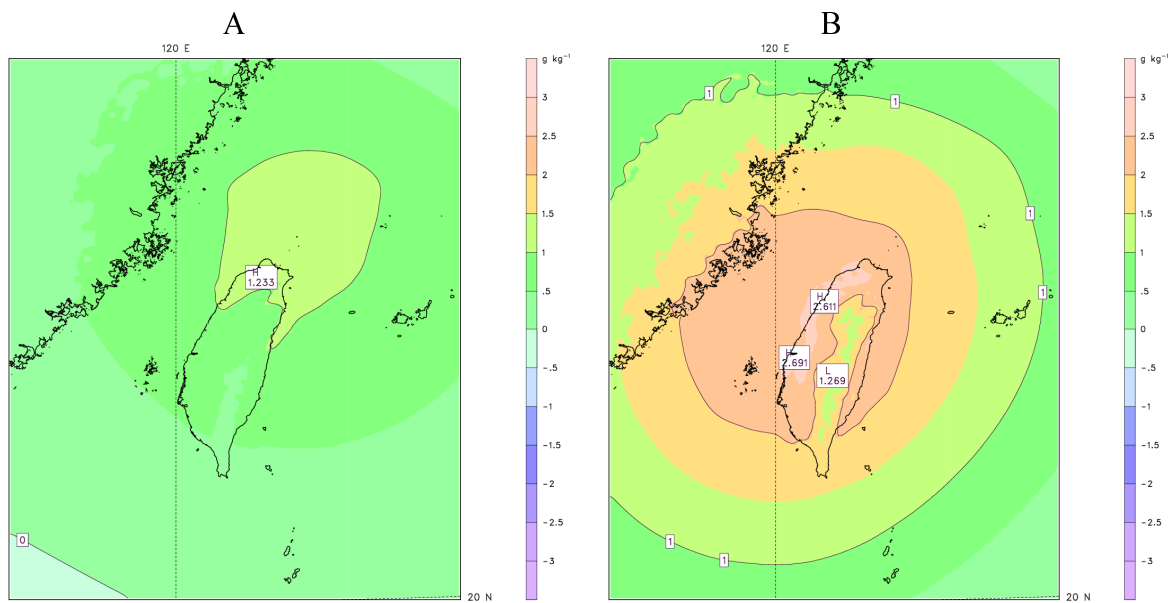


圖6 同圖5，但初始時間為 2010 年 9 月 12 日 0000 UTC。

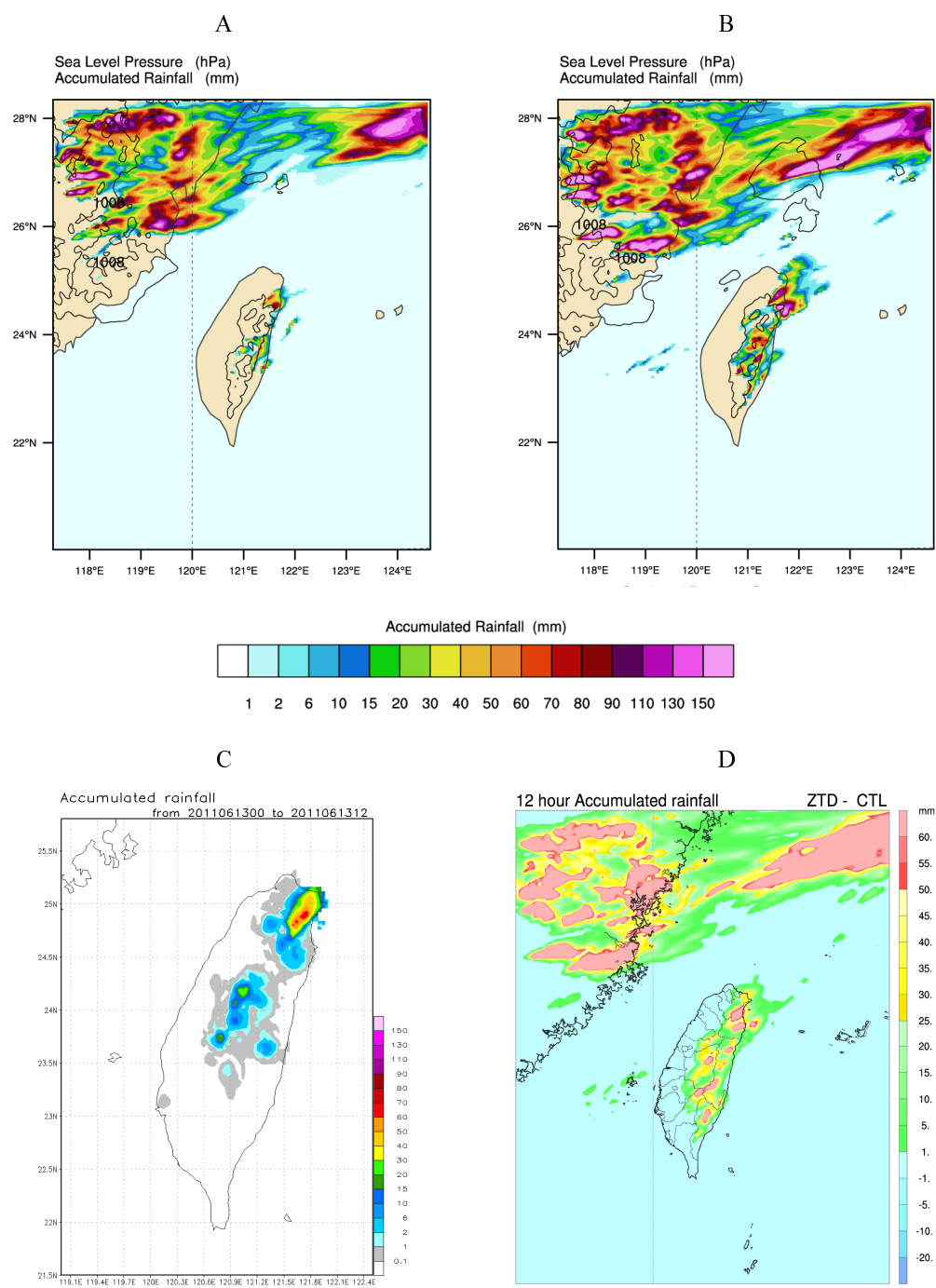


圖 7 個案 2011 年 6 月 13 日 0000 UTC 之模式預報 0 至 12 小時累積降水，A 為 CTL，B 為 ZTD，C 為觀測 12 小時累積降水，D 為 ZTD 組與 CTL 組 0 至 12 小時累積降水差異。

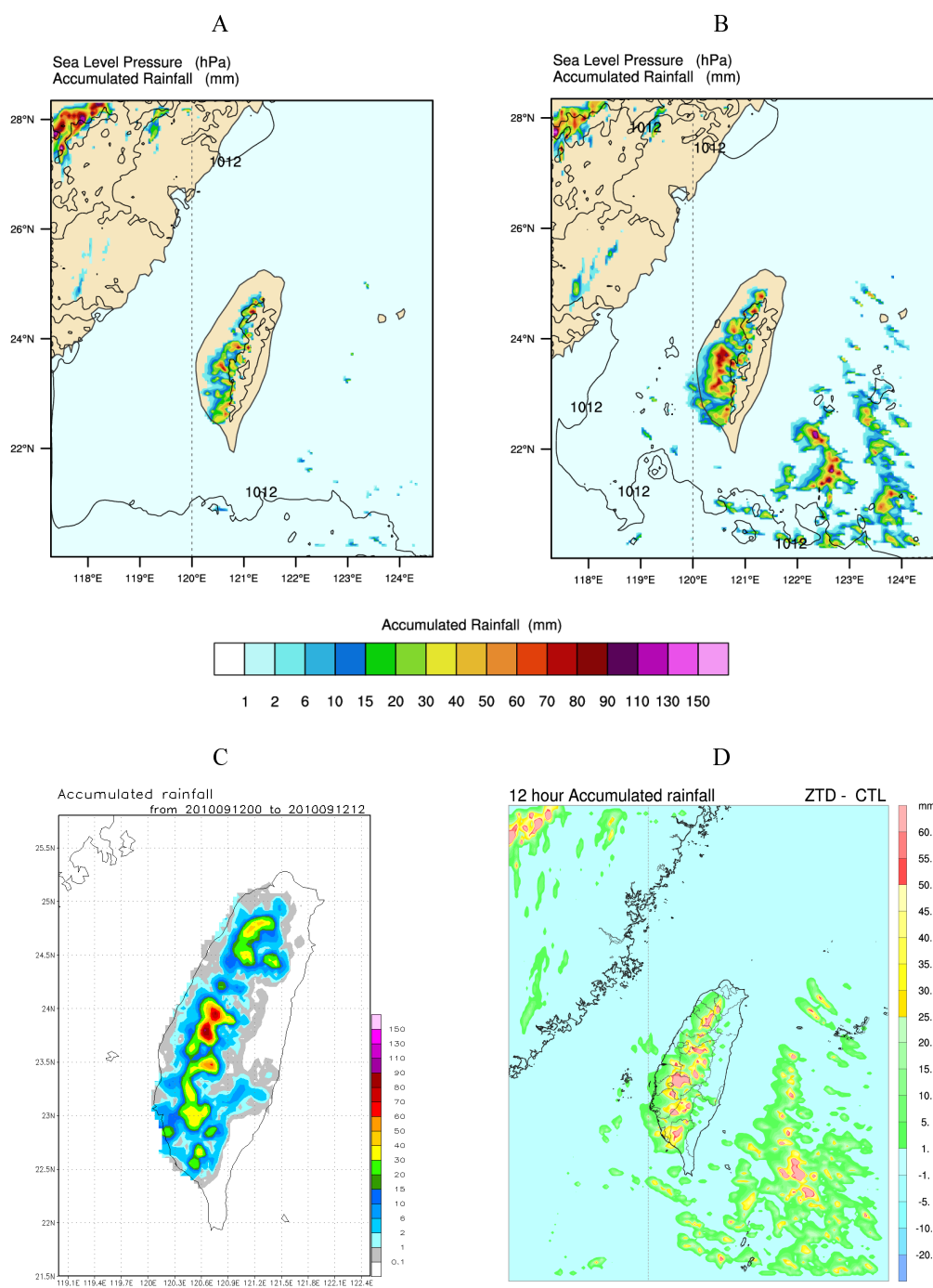


圖8 同圖7，但為2010年9月12日0000 UTC 個案0至12小時之模式預報累積降水。

較好的預報降水。同樣地在 2010 年 9 月 12 日 0000 UTC 個案中，同化地基式 GPS ZTD 資料後也得到與觀測（圖 8C）較相近之預報降水，尤其是臺灣西部地區（如圖 8D 所示）。此外，在臺灣東南部海面上亦有明顯的對流降水產生，此和紅外線雲圖（圖 9）於 2010 年 9 月 12 日 0200 UTC 觀測到之臺灣東南部外海的降水系統一致。此模式降水預報之改善和圖 5B 中 ZTD 組較 CTL 組在臺灣西南部和東南部有較大水氣分析增量有關，特別是經由三維變分分析改進了巴士海峽的水氣分析後，進一步改善了模式海上對流系統的預報。

（二）部份循環更新實驗

由冷啟動個案的分析結果發現，同化地基式 GPS ZTD 資料對模式的水氣分析有顯著的影響，並據以導致更好的定量降雨預報。在此更進一步採用部份循環更新策略來進行模式預報實驗，探討在此同化策略下同化地基式 GPS ZTD 資料對夏季午後對流個案的影響。

以下之分析皆為本研究所選用的 22 個午後對流個案之統計結果，圖 10 為 2 組實驗在 22 個個案平均之分析場可降水量差值，計算方式為

$Aztd - Actl$ ，A 為分析場，下標 ctl 為控制組， ztd 為實驗對照組。圖中顯示 CTL 組較 ZTD 組低估水氣含量，特別是在東部沿岸與西南平原地區，兩組實驗之水氣分布的差異和冷啟動實驗之水氣分析增量類似，為臺灣附近約 400 公里半徑。此現象反映出模式的預報有偏乾的趨勢，這可能和

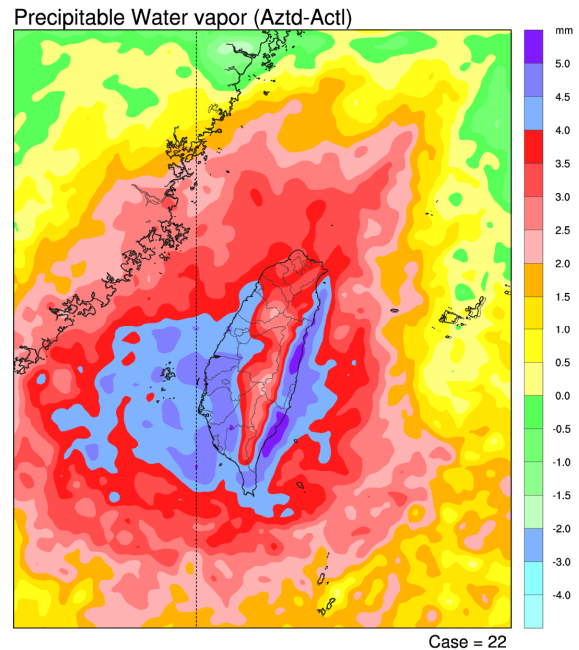


圖 10 22 個個案之 ZTD 組和 CTL 組分析場 PWV 的差值。



圖 9 個案 2010 年 9 月 12 日 0200 UTC、0600 UTC、1000 UTC 之紅外線雲圖觀測。

微物理參數法有關。同時，傳統地面觀測數量有限（臺灣地區約 31 站），而其對分析的影響主要反映在模式低層大氣；探空觀測數量則更是有限，因此在 CTL 組中無法透過傳統觀測資料同化的過程來改善初始猜測場偏乾的預報誤差。而本研究使用之地基 GPS 測站數目達 80 站，且 ZTD 觀測的是整層大氣的水氣量，因此同化後會調整整層大氣的水氣分析，這也是同化 ZTD 後會有效增加模式分析場之水氣量的原因。

當採用部份循環更新策略同化地基式 GPS ZTD 資料時，會在 2 次的循環更新後導致 2 組模式在分析時間的初始猜測場不同，因此地基式 GPS ZTD 資料對分析場的影響，可表示為 2 組實驗之分析增量的差值，其計算方式為 $(A-Fg)_{ztd} - (A-Fg)_{ctl}$ ，A 為分析場、Fg 為初始猜測場，下標 ctl 為控制組，ztd 為實驗對照組。 $(A-Fg)_{ctl}$ 代表 CTL 組中所有觀測資料的分析增量， $(A-Fg)_{ztd}$ 則為 CTL 組再加入地基式 GPS ZTD 觀測資料的分析增量，二者之差，即為 ZTD 觀測資料在循環更新同化策略下對分析場的影響。圖 11 為 2 組實驗的可降水量分析增量之差值，可看出同化地基式 GPS ZTD 資料會明顯增加臺灣地區及周圍海域之可降水量，尤其中部山區、東部沿岸和南部地區都有可降水量相對較大值，圖 11 亦顯示同化 ZTD 後，分析場可降水量的增加量存在著顯著的南北差異。圖 12 為地基 GPS 測站上 22 個個案平均的 PWV 觀測，圖中顯示，不論是 PWV 的南北分布或緯度平均，皆顯示出西部平原地區的 PWV 由南向北遞減，這和臺灣西部平原地區夏季水氣來源主要是受到西南季風的影響是一致的。需注意臺北盆地和南陽平原之 PWV 有局部的大值，此一現象應和西南季風較無直接的關係，而是和局部地形有關。圖 11 之水氣分析增

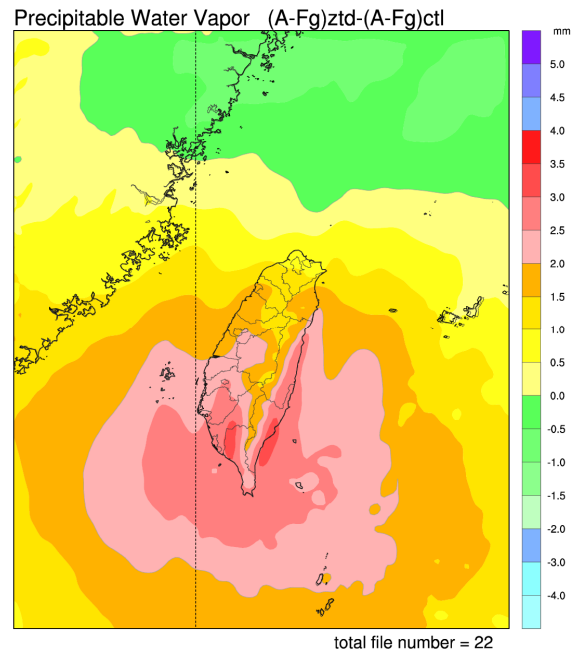


圖 11 22 個個案合成之 ZTD 組和 CTL 組分析增量的差值。

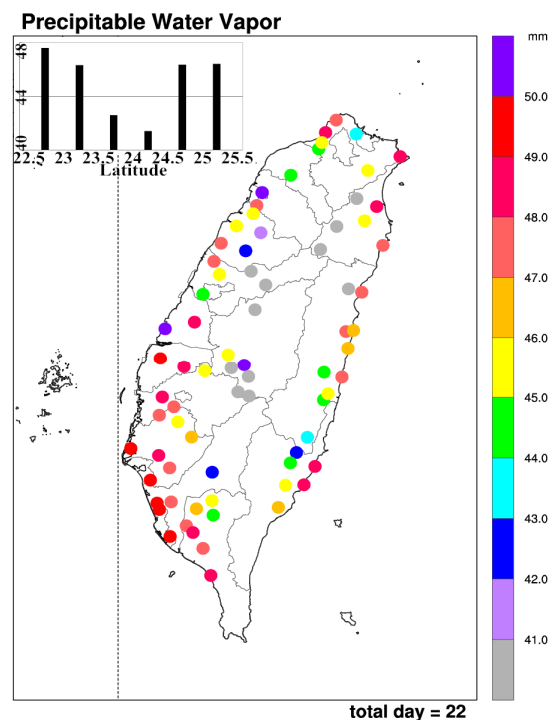


圖 12 地基 GPS 測站上 22 個個案之平均 PWV 觀測值。左上角柱狀圖為每間隔緯度 0.5° 內且高度小於 500 公尺之緯向平均。

量由南往北遞減之現象反映出，模式對水氣的預報不僅有偏乾的趨勢，而且無法預報出西南季風對南臺灣水氣的影響。因此，當同化 ZTD 後，不僅增加了臺灣地區分析場之水氣含量，同時也反映出 ZTD 觀測中西南季風對臺灣地區水氣分布的影響，進而導致水氣分析增量由南往北遞減的結果。

圖 13 為 2 組實驗分別在模式預報 00 至 12 小時與 24 至 36 小時之 12 小時累積降雨，其中 00 至 12 小時可包含整個 A 時段，而 24 至 36 小時則包含整個 B 時段。圖中顯示不論 CTL 組或 ZTD 組，在兩個時段之模式預報累積降水分布，皆與圖 14 所對應相同時段的實際累積降水分布一致，主要在臺灣北部與中南部山區有較大降水區域。在 00 至 12 小時時段，ZTD 組的模式預報雨量（圖 13B）明顯大於 CTL 組（圖 13A），並且與實際累積雨量（圖 14A）相比後發現 2 組實驗在山區的預報雨量皆有過多的現象，特別是在北部山區更為明顯，而 CTL 組在西部平原地區的預報雨量明顯不足，相較之下 ZTD 組則與實際雨量較為相近。此外，CTL 組顯示在臺灣周圍約 150 公里半徑之海域，存在一明顯的預報雨量較少的區域，此現象可能是模式的降水過程在積分初期，模式初始場僅只有水氣量，沒有其它水相存在，例如雲水、雨水、冰、雪和軟雹等，模式的微物理過程需要一段時間的運作之後才能產生以上之水相，進而導致降水，這也就是所謂模式降水的 spin-up 問題（Kasahara et al. 1992）。ZTD 組在同化 ZTD 資料後，會使分析場的水氣增加，進而減少 spin-up 所需的調整時間。圖 13C、D 則為 24 至 36 小時之模式累積降水，顯示出 2 組實驗不論在分布與極值位置都很相似，與實際降水相比發現北部地區皆有預報雨量過多的現象，又因

為 5 公里網域的定量降水預報在模式預報 24 至 48 小時時，主要是受到邊界條件和模式降水過程參數化的影響，所以局部的 GPS 觀測對初始場的影響，經過較長時間預報後，已無法顯示出初始場的差異對模式預報的影響。

圖 15 為 A、B 兩時段在不同降雨門檻值之 ETS 與 Bias。由 Bias 顯示出，在 A 時段 ZTD 組為正偏差，CTL 組則為負偏差，意即 CTL 組之模式預報雨量有低估的情形，而 ZTD 組則高估雨量，與圖 12 在 00 至 12 小時時段所示 CTL 組之預報雨量不足的情形一致。如圖 11 所述，模式的預報有偏乾的趨勢，加入 ZTD 觀測資料後，可增加初始場之水氣量，並導致較好的定量降水預報效能。此一偏乾的趨勢可能和模式的 spin-up 有關，也和僅同化傳統地面觀測資料不足以修正模式預報之乾偏差有關。在 B 時段則顯示兩組實驗皆為低估雨量，且 Bias 差異不大，再次呼應了局部 GPS 觀測之效應，無法在較長時間預報後顯現出來。圖 15 亦顯示 2 組實驗在兩時段之 ETS 得分皆隨著降雨門檻值的增加而遞減，並且 A 時段之 ETS 得分優於 B 時段，ZTD 組相較於 CTL 組而言，幾乎在各降雨門檻值皆可獲得較好的 ETS 得分，由 ETS 得分之結果得知，同化 GPS ZTD 資料可有效的提升模式對於台灣地區夏季午後對流之短期降水預報能力。

五、結論

本研究主要是分析同化地基式 GPS ZTD 資料對於臺灣地區夏季午後對流之定量降水預報的影響，期望藉由改善模式分析場的水氣資訊，提升模式降水預報能力。

在冷啟動實驗中，同化地基式 GPS ZTD 資料

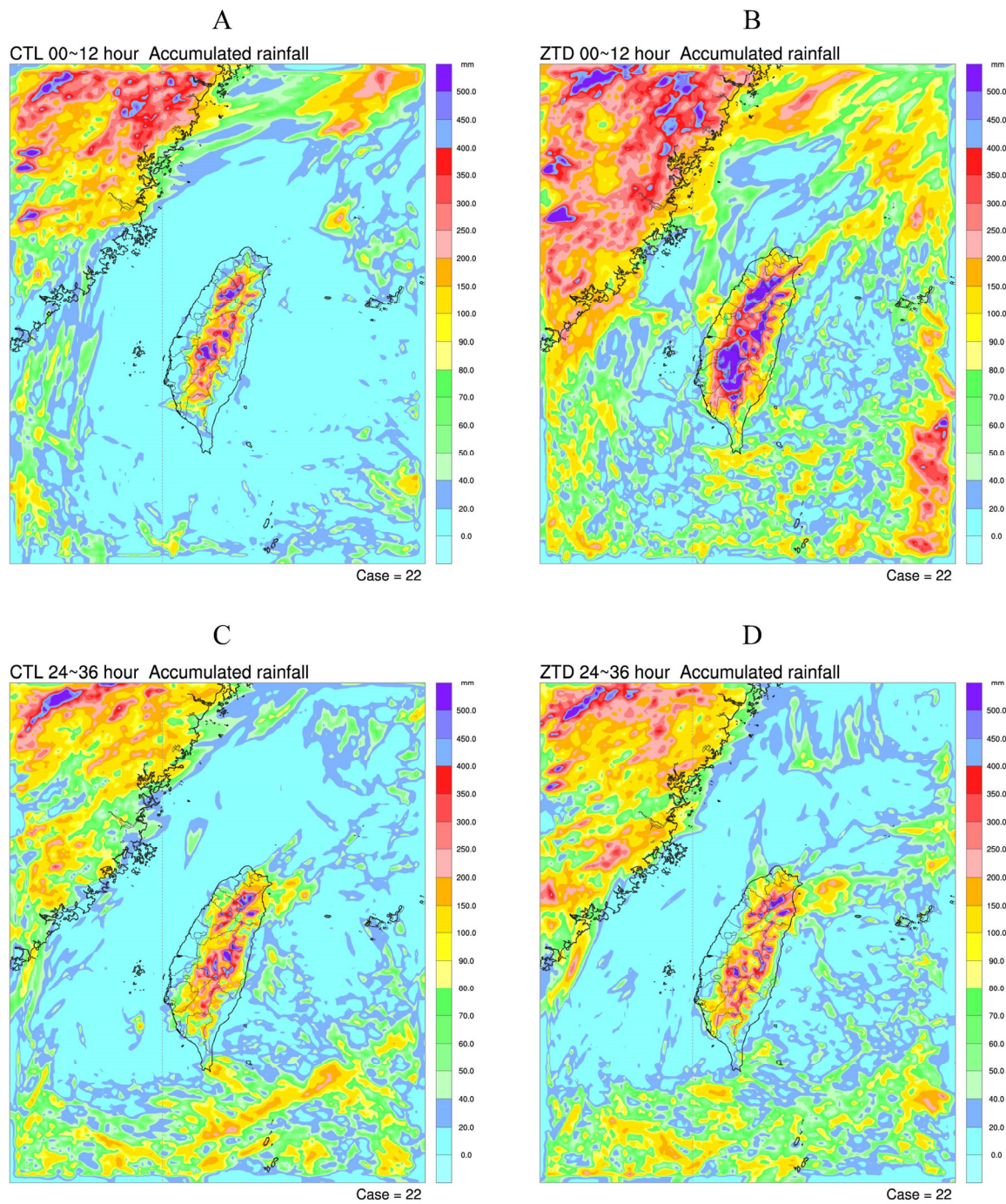


圖 13 22 個午後對流個案之模式 12 小時累積降雨。A 和 B 分別為 CTL 和 ZTD 之 00~12 小時累積降雨，而 C 與 D 則分別為 CTL 與 ZTD 之 24~36 小時累積降雨。

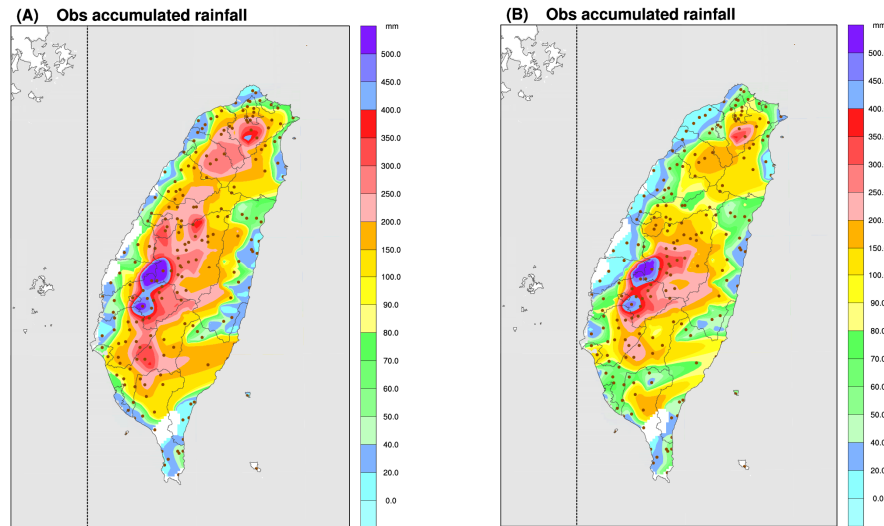


圖 14 22 個午後對流個案之觀測累積降雨。A 為 2 個個案中模式 00~12 小時預報時段所對應的累積降水，B 則為 24~36 小時所對應的累積降水。棕色點為使用到的雨量站。

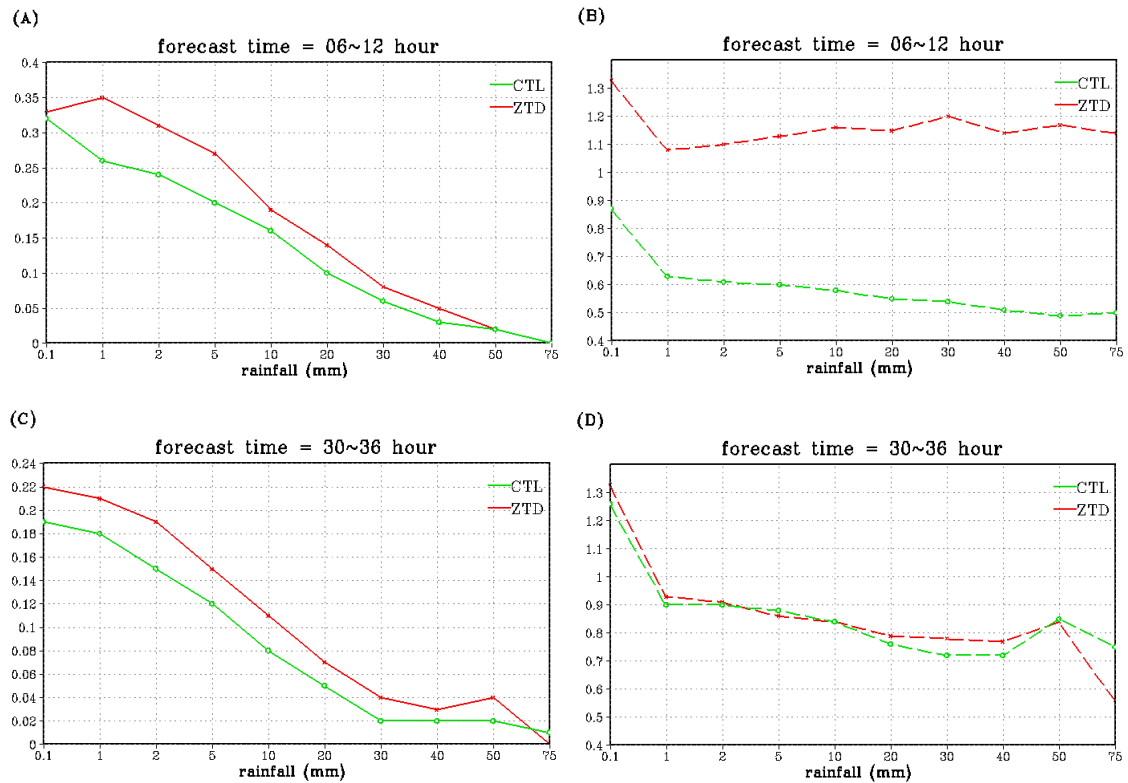


圖 15 2 個發生午後對流時段之 ETS 和 Bias 校驗結果。A 與 B 分別為發生第一次午後對流時段之 ETS 和 Bias，而發生第二次午後對流時段之 ETS 與 Bias 則為 C 和 D。綠色為控制組，紅色為實驗對照組。實線表示 ETS 得分，虛線為 Bias 值。

後，可明顯增加分析場中距離臺灣半徑約 400 公里範圍之水氣資訊，並改善模式在臺灣地區及周圍海域的降水預報。此現象反映出模式的預報有偏乾的趨勢，這可能和模式降水的 spin-up 問題以及模式微物理參數法有關。臺灣地區的傳統地面觀測數量有限（約 31 站），其對分析的影響主要反映在模式低層大氣；而探空觀測則更是有限，因此在 CTL 組中無法透過資料同化的過程來改善初始猜測場的預報誤差。

本研究針對 22 個午後對流個案進行部份循環更新策略實驗，結果顯示，同化地基式 GPS ZTD 資料不但會明顯增加分析場中臺灣周圍之可降水量，同時 ZTD 觀測資料對分析的影響也存在著顯著的南北差異。而觀測顯示臺灣西部平原地區的 PWV 由南向北遞減，這和臺灣地區夏季水氣來源主要是受到西南季風的影響有關。本研究結果亦顯示，同化 ZTD 後不僅增加了臺灣地區分析場之水氣含量，同時也反映出西南季風對臺灣地區水氣分布的影響。

在模式定量降水預報方面，由於 ZTD 組分析場之 PWV 較 CTL 組高，進而導致 ZTD 組在 00 至 12 小時預報雨量高於 CTL 組，也較為接近實際雨量，並且有效減緩臺灣周圍約 150 公里半徑海域之 spin-up 的問題。而在模式 24 至 36 小時預報中，因為 5 公里網域的定量降水預報，主要是受到邊界條件和模式降水過程的影響，所以局部的 GPS 觀測對初始場的影響，經過較長時間預報後，已無法顯示出初始場的差異對模式預報的影響，然而即便如此，定量降水預報校驗結果顯示，ZTD 組在各個降雨門檻值皆獲得高的 ETS 得分。總體而言，同化地基 GPS ZTD 資料，可以有效的改善模式分析場的水氣資訊，並且提升模式短期定量降水預報能力。

致謝

本研究特別感謝 NCAR Dr. J. Braun 協助處理地基 GPS 資料，以及 Dr. Y. R. Guo 在使用 WRF 3DVAR 進行 ZTD 資料同化之相關諮詢。本研究在中央氣象局氣象資訊中心提供之計算支援以及國科會計畫 NSC 99-2625-M-052 -006 -MY3 支援下完成。

參考文獻

- 劉說安、楊名，1999：GPS 估算可降水量：WVR 約束法，*大氣科學*，**27**，131-140。
- Barker, D. M., W. Huang, Y. R. Guo, and Q. N. Xiao., 2004: A Three-Dimensional (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 897-914.
- Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, and R.H. Ware, 1992: GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787-15801.
- , M., T.A. Herring, R.A. Anthes, C. Rocken, and R.H. Ware, 1994: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 379-386.
- Cucurull, L., et al., 2004: Three-dimensional variational data assimilation of groundbased GPS ZTD and meteorological observations during the 14 December 2001 storm event over the western Mediterranean Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 749-763.

- Davis, J. L., *et al.*, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, **20**, 1593-1607.
- Deblonde G., S. Macpherson, Y. Mireault, P. H  roux, 2005: Evaluation of GPS. Precipitable Water over Canada and the IGS Network. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 153-166.
- De Ponte, M.S.F.V. and X. Zou, 2001a: A case study of the variational assimilation of GPS zenith total delay observations into a mesoscale model. *J. Appl. Meteor.* **40**, 1559-1576.
- , M.S.F.V. and X. Zou, 2001b: Moisture retrievals from simulated zenith delay "observations" and their impact on short-range precipitation forecasts. *Tellus*, **53 A.**, 192-214.
- Duan, J., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. VanHove, R. Ware, S. Mc Clusky, T.A. Herring, and R.W. King, 1996: GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 830-838.
- Emardson, T. R., G. Elgered, and J. Johansson, 1998: Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of GPS receivers. *J. Geophys. Res.*, **103**, 1807-1820.
- Eresmaa, R, E JÄRVINEN, 2005: Estimation of spatial global positioning system zenith delay observation error covariance. *Tellus*, **57A**, 194-203.
- Foster, J., M. Bevis, T. Schroeder, M. Merrifield, S. Businger, and S. Dorn, "El Nino, water vapor, and the Global Positioning System", *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2697- 2700.
- Gutman S. I., and K. L. Holub, 1999: Ground-based GPS Meteorology at the NOAA Forecast Systems Laboratory", *4th Symposium on Integrated Observing Systems*.
- , S.I., and S.G. Benjamin, 2001: The Role of Ground-Based GPS Meteorological Observations in Numerical Weather Prediction. *GPS Solutions*, **4**, 16-24.
- , S.I., K.L. Holub, S.R. Sahn, J.Q. Stewart, T.L. Smith, S.G. Benjamin, and B.E. Schwartz, 2003: Rapid Retrieval and Assimilation of Ground Based GPS-met Observations at the NOAA Forecast Systems Laboratory : Impact on Weather Forecasts, *Proceedings of the International Workshop on GPS Meteorology: Ground-Based and Space-Borne Applications*.
- Haase, J., Ge, M., Vedel, H., and Calais, E., 2003: Accuracy and Variability of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapour in the Western Mediterranean, *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1547.
- Kasahara, Akira, Arthur P. Mizzi, Leo J. Donner, 1992: Impact Of Cumulus Initialization on the Spinup of Precipitation Forecasts in the Tropics. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1360-1380.
- Kuo, Y.-H, Y.-R. Guo, and E. R. Westwater, 1993: Assimilation of precipitable water into Mesoscale

- numerical model. *Mon. Wea. Rev.* **121**, 1215-1238.
- , Y.-H. X. Zou, and Y.-R. Guo, 1996: Variational assimilation of precipitable water using nonhydrostatic mesoscale adjoint model. *Mon. Wea. Rev.* **124**, 122-147.
- Liou, Y.-A., Y.-T. Teng, T. Van Hove, and J. Liljegren, 2001: Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. *J. Appl. Meteor.* **40**, 5-15.
- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock 2001: Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. *Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, Singapore. pp. 269-27
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992 : The National Meteorological Center's spectralstatistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747-1763.
- Rocken, C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, and S. Businger, 1993: Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2631-2634.
- C., T. Van Hove, J. Johnson, F. Solheim, R. Ware, M. Bevis, S. Chiswell, and S. Businger, 1995: GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **12**, 468-478.
- Saastamoinen, J., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Geophys. Monogr. Ser., 15, edited by S. W. Henriksen *et al.*, pp. 247-251, AGU, Washington, D. C.
- Schaefer, J. T., 1990 : The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Skamarock, W. C., Coauthors 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp.
- Smith, T.L., S.G. Benjamin, B.E. Schwartz, B.E., and S.I. Gutman, 2000: Using GPS-IPW in a 4-D data assimilation system. *Earth Planets Space*, **52**, 921-926.
- Tregoning, P., R. Boers, D. O'Brien, and M. Hendy, 1998: Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations. *J. Geophys. Res.*, **103**, 28 701-28 710.
- Vedel, H. and X.-Y. Huang, 2004: Impact of ground based GPS data. on numerical weather prediction. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **82**, 459-472.
- Van Baelen, J. S., Aubagnac, J.-P., and Dabas, A., 2005: Comparison of Near-Real Time Estimates of Integrated Water Vapor Derived with GPS, Radiosondes, and Microwave Radiometer *J. Atmos. Ocean. Technol.* **22**, 201-210.
- Yang, X. H., B. H. Sass, G. Elgered, J. M. Johansson, and T. R. Emardson, 1999: A comparison of precipitable water vapor estimates by an NWP

simulation and GPS observations, *J. Appl. Meteor.*, **38**, 941-956.

boundary conditions in a limited-area mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.* **124**, 2859-2882.

Zou, X. and Y.-H. Kuo, 1996: Rainfall assimilation through an optimal control of initial and

Assimilation of Zenith Total Delay on Improving the Model Quantitative Precipitation Forecast for Afternoon Thunderstorms

Ya-Ting Tsai and Jing-Shan Hong

Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan

(manuscript received 19 December 2011 ; in final form 31 March 2012)

ABSTRACT

To improve the model quantitative precipitation forecast (QPF), the better model moisture analysis in the model initial condition is the most important. Taiwan, an island with complicate terrain, always exist a great challenge on the model QPF due to the limit atmospheric moisture observation. The ground base global positioning system (GPS) observation is able to provide useful moisture information on nowcasting and data assimilation purpose with the high density both in time and space. This paper is to study the impact of GPS zenith total delay (ZTD) observations on the data assimilation and model QPF performance.

A total of 22 afternoon thunderstorm cases were selected to assess the impact of the GPS ZTD data assimilation the model QPF performance. The results show that the moisture filed in the initial condition is increased around the Taiwan area with radius about 400-km as assimilating the GPS ZTD. In particular, the assimilation of the GPS ZTD results in the increase of the moisture more in southern Taiwan. Due to the moisture was supplied by the southwest monsoon during summertime, therefore, the assimilation of the GPS ZTD does not only increase the amount but also the distribution of the moisture filed in the initial condition in a more reasonable way.

The impact of the GPS ZTD data assimilation shows the improvement of the model QPF does not only over island but also the ocean area in the cases study. The statistics over the 22 afternoon thunderstorm cases show that, assimilating the ZTD GPS can reduce the model spin-up problem significantly. The verification results indicate model QPF performance is also improved as revealed by the equitable threat score in both 06-12 and 30-36 forecasts. This study demonstrates that the GPS ZTD data assimilation is able to provide useful moisture information for the numerical weather prediction application.

Key Words: Quantitative precipitation forecast, Zenith total delay, Data assimilation