

以觀測模擬實驗評估福衛七號資料效益

陳盈臻^{1,2} 黃子茂² 林沛練¹

國立中央大學大氣科學系¹ 國立中央大學全球定位科學與應用研究中心²

摘要

本研究以 15 km 解析度模擬真實大氣做為 OSSE 實驗之 Natural run，並在 45 km 解析度使用 Hybrid 資料同化系統進行 OSSE 之 Control run 和 Assimilation run，藉以評估福衛七號兩組星系掩星資料對劇烈天氣系統預報效能的影響。根據同化的資料類型可分為 GTS、GTS+PHI 以及 ALL 等三種 Hybrid 實驗組，藉以比較各同化各種資料對於 2012 年 6 月的梅雨個案預報的效益。從累積雨量的分佈和降雨強度來看，隨著同化越多的觀測資料，特別是 GPSRO 的加入，有助於模式更精確掌握降雨極值發生的位置，降水強度也有明顯的提升。從 ETS 的變化可以發現有做資料同化的實驗組們具有較高的預報技術，從 BS 的修正也顯現 GPSRO 資料對於模式大雨的預報表現有明顯地改善。

關鍵字：掩星、資料同化

一、前言

本計畫依據「福衛七號執行計畫 (2011-2018)」規劃，並延續之前的研究內容，結合交通部中央氣象局、國家實驗研究院颱風洪水研究中心合作發展掩星資料運用與系統性評估技術，強化國內在掩星資料處理與運用的自主研究能量，提昇及評估我國目前福衛三號及未來福衛七號掩星觀測應用於劇烈天氣預報之價值。

二、方法

GPSRO (Global Positioning System Radio Occultation)係利用小型低軌道(low-earth-orbit, 簡稱 LEO)的衛星接收全球定位系統(Global Positioning System, 簡稱 GPS)訊號，經由無線電掩星(Radio Occultation, 簡稱 RO)技術來估計電磁波穿過大氣圈時的偏折角(bending angle)，再據反演原理以算出大氣折射率(refractivity)的分布。GPSRO 技術具有高垂直解析度，不需校驗，且平均分布於全球等特性。福衛三號(FORMOSAT-3/COSMIC)及後續計畫福衛七

號(FORMOSAT-7/COSMIC2)之氣象研究目標主要在充分使用 GPSRO 觀測資料於預報模式，藉以了解其對區域天氣預報及全球分析或預報改善之程度。由於福衛七號尚未發射，我們無法取得福衛七號的掩星資料進行研究評估，而觀測模擬實驗(Observation System Simulation Experiments, OSSE)具有可以針對同化及預報實驗需求，產生所需的特定觀測資料的特性，因此我們可需藉由 OSSE 評估福衛七號掩星資料對天氣預報之影響。

在本計畫中，圖 1 和圖 2 分別為 MM5 和 WRF 模式的 domain 設定：MM5 的 domain 1 為 242x148，domain 2 為 664x382，domain 3 為 151x181。解析度分別為 45km、15km 及 5km。垂直座標為 45 層 eta 座標。domain 1 提供 mm5 to wrf 的初始條件與邊界條件，domain 2 作為 Nature run 並提供 OSSE 實驗的觀測資料，domain 3 則作為台灣地區的降水驗證。WRF 的模擬結果則視為 Control Run，其 domain 1 為 222x128，domain 2 為 184x196，domain 3 為 151x181。解析度分別為 45km、15km 及 5km。垂直座標為 45 層 eta 座標。domain 3 同樣作為台灣地區的降水驗證。

OSSE 實驗設流程如圖 3 所示，首先 MM5 模式

以 15 公里解析度的 domain2 模擬結果當作 Natural run，而 MM5 模式 45 公里解析度的 domain 1 模擬結果則提供 WRF 模式的初始條件與邊界條件，最後 WRF 的模擬結果稱為 Control Run。另外在同化實驗中，觀測資料則由 Natural run 提供，由於福衛七號尚未發射，我們必須藉由 ray tracing 模式產生福衛七號的掩星資料，另由 Natural run 中差分出 GTS 資料，提供給 Hybrid 同化系統使用。經過比較 Control Run 在不同初始模擬時間和 Natural Run 結果之差異，最後本實驗之梅兩個案選定由 MM5 模式以 2012 年 6 月 7 日 00 Z 作為 Natural run 的初始時間，模擬時間從 2012 年 6 月 7 日 00 Z 至 2012 年 6 月 15 日 00 Z，其中我們將 MM5 於 2012 年 6 月 7 日 12 Z 的 45 公里解析度結果取出，當作 WRF 實驗的初始條件與邊界條件，並轉至 WRF 模式中模擬至 2012 年 6 月 15 日 00 Z，此結果設為 Control Run。

Natural Run 和 Control Run 實驗設計如圖 4 所示，最後兩個模式降尺度至 3 公里解析度之模擬結果則做為台灣地區的降水驗證。本計畫選定 2012 年 6 月 10 日的梅兩個案作為實驗的強降水研究對象，為了比較同化不同資料對於梅兩個案的降水模擬結果，我們將分別討論 2012 年 6 月 10 日 06Z 至 2012 年 6 月 11 日 06Z 的 24 小時累積降水(Day1)，以及下一個 24 小時 2012 年 6 月 11 日 06Z 至 2012 年 6 月 12 日 06Z 的 24 小時累積降水(Day2)表現。

針對 OSSE 實驗的需求，首要目標為產生理想的 GPS RO 資料，且資料符合實際觀測之理論，我們使用二維射線追蹤模式(ray tracing model)，主要是利用模式氣象場(如：氣壓、溫度和水汽)的三維分布，計算模式大氣中各網格點的折射率及其梯度，再給定近地點的位置、高度和射線的方位角，即可決定射線穿越模式大氣的軌跡，並以幾何方式求得偏折角，再利用 Abel transform 的逆變換，將模式偏折角轉換成非局地的大氣折射率，此接近於 GPS 掩星觀測到的大氣折射率。

除了 GPSRO 資料之外，我們也轉換出 OSSE 實驗所需的 GTS 資料，包含了地面測站(SYNOP)、探空資料(SOUND)、船舶(SHIP)與飛機(AIREP)資料。因 INTERPB 轉出來的 FILE_MMOUTP 資料包含了

等壓座標下的水平風場、溫度、相對濕度、水氣等資料，因此我們擷取真實 GTS 資料中的地面測站(SYNOP)、探空(SOUND)、船舶(SHIP)與飛機(AIREP)資料的經緯度資料，此外為了避垂直內差造成的誤差累積，我們將 FILE_MMOUTP 的 27 層等壓層資料直接內差至與真實資料相對應的經緯度，進而得到 OSSE 實驗所需的 GTS 資料。

建構 WRF 3DVAR 以及 NCU LETKF 所合成的 Hybrid 系統，亦是本計畫的另一項研究目標。WRF 3DVAR 為 NCAR 所設計於 WRF 模式加入的三維變分資料同化系統，並以 MM5 3DVAR 系統為基礎來建構，和 MM5 3DVAR 使用共同的觀測算子。此系統可以同化多種觀測資料以求出模式最佳初始場，進而改善預報準確度。局地系集轉換卡爾曼濾波器(Local Ensemble Transform Kalman Filter, LETKF)，此方法針對數值模式預報模式的任一網格點，一次同化其附近局地化半徑(做用於觀測誤差斜方差矩陣)內的所有觀測點，每個網格點獨立分析，其優點為預報系集所計算的背景誤差斜方差為流場相依，比 3DVAR 使用的固定背景場誤差斜方差更能代表當下的誤差結構，且使用完整的非線性模式與線性算符，一定程度符合大氣的非線性過程(蔡，2014)。而本計畫使用的 LETKF 則是經由中央大學楊舒芝老師所發展之 NCU LETKF 版本(詳見 Yang et al. (2014))。

本研究的 Hybrid 系統由兩個部份構成，第一部份為 NCU LETKF，負責產生系集預報成員，本實驗共使用 40 個系集成員，依據各成員的變數場得到一組背景誤差協方差，因為背景誤差協方差隨時間會更新，所以這組以系集組成的背景誤差協方差具備 flow-dependent 的特性。第二部份為 3DVAR，和單純的變分同化系統不一樣的地方即在於這個部份所使用的背景誤差協方差包含了第一部份所提供的背景誤差協方差。圖 5 為我們建構的 Hybrid 流程，梅兩個案的 Hybrid 實驗設計流程如圖 6 所示，NCU LETKF 從 2012 年 6 月 7 日 12 Z 開始做 12 小時的 Spin up，在 2012 年 6 月 8 日 00 Z 至 2012 年 6 月 10 日 00 Z 期間內，每六小時當作一個同化窗區，共進行 9 次 Hybrid 同化，除了第一次的 Hybrid 同化使用系集平均當做初始猜測場(first guess，簡稱 fg)，其他

都是以每次同化後的 6 小時預報當作 fg。為了比較 Hybrid 系統同化不同資料的預報效益，因此本研究共設立了五種實驗組：Natural Run、Control Run、GTS、GTS_PHI 以及 ALL，各組實驗意義如表 1 所列。最後一次做 Hybrid 同化為 2012 年 6 月 10 日 00 Z，接著做 72 小時預報，取其中兩個 24 小時累積雨量時段做分析比較，第一個時段為 2012 年 6 月 10 日 06 Z 至 2012 年 6 月 11 日 06 Z(後面簡稱 Day1)，第二個時段為 2012 年 6 月 11 日 06 Z 至 2012 年 6 月 12 日 06 Z(後面簡稱 Day2)。

三、 成果

Hybrid 同化系統可自行調整 NCU LETKF 和 3DVAR 在同化時的協方差(covariance)權重分配，本實驗的 Hybrid 權重設定為 NCU LETKF 的比重佔 75%，3DVAR 的比重為 25%。

圖 7 為 Day1 期間五組實驗的 24 小時累積雨量預報結果比較。相對 Natural Run 的結果，Control Run 雖然有抓到中部山區的降水，但是南部山區的降雨偏弱且範圍較狹窄，而宜蘭外海的強回波則是沒有抓到。Hybrid 同化 GTS 資料的結果明顯比 Control Run 偏濕，中部及南部山區的降雨範圍較 Natural Run 廣，且累積雨量超過 250mm 的地方也比 Natural Run 廣，但是同化 GTS 資料有抓到宜蘭外海的強降水，只是強度較為不足，另外在鵝鑾鼻外海則是出現額外的強降水區域。GTS_PHI 這組有稍微改善 GTS 的結果，宜蘭外海的回波同樣有抓到，但是強度依然不足，然而鵝鑾鼻外海的的降水區域強度變弱，台灣山區的雨區也較 GTS 明顯分出兩大區塊，但是在降水極值的掌握上還是略為高估。ALL 的雨量就更接近 Natural Run 的結果，相較 GTS_PHI 這組實驗對於降雨的極值掌握更佳。

圖 8 為 Day2 期間五組實驗的 24 小時累積雨量預報結果比較。Natural Run 的累積雨量比 Day1 更少，降水明顯分成兩區，這兩區都集中在山區且極值出現在南部，此外在台灣的東北方外海也有降水發生。Control Run 雖然雨區也明顯分成中部和南部兩個區域，但是這兩個雨區的範圍太大且雨量太多，南

部極值的位置發生位置雖然有抓到，但是降雨涵蓋區域太大且過強。Hybrid 同化 GTS 資料的雨量也是明顯過多，範圍甚至比 Control Run 還大，特別是南部及鵝鑾鼻外海都有過量的雨勢表現，台北附近也有 100mm 多的雨量累積，但是中部山區的降水強度則比 Control Run 弱許多。隨著 GPSRO 資料加入同化之中，原本南部的大範圍降水極值區域明顯有縮小的變化，Natural Run 在南部的降雨極值位置也有掌握到，但是強度仍然過高。另外一個明顯改善的地方則是北部和中部的降水，只同化 GTS 資料的實驗組在北部有錯誤的降雨累積，但是加入 GPSRO 資料之後北部及中南部的雨量強度和分布區域皆變得和 Natural Run 相近。加入 GPSRO Phase2 的資料後更是提高南部地區的降水表現，特別是鵝鑾鼻外海的雨量明顯減少許多。

下一步，我們計算各實驗組的公正預兆得分(Equitable Threat Score，簡稱 ETS)和偏倚得分(Bias Score，簡稱 BS)。ETS 為 0 代表模式不具有預報技術，1 則代表完美的預報模式。BS>0 表示模式傾向表現高估，BS<0 表示模式傾向表現低估。

從 Day1 各實驗組的 ETS(圖 9)表現來看，雨量閾值低於 25mm 以下時每個實驗組的表現都不佳，主要是因為 Natural Run 小雨的範圍本身就不大，所以其他組實驗都很難掌握。同時也可以看到有做 Hybrid 的實驗組其 ETS 都較 Control Run 高，甚至同化 GPSRO 資料後在 25mm 至 200mm 的雨量預報能力，GTS_PHI 和 ALL 都有不錯的表現，特別是 ALL 這個實驗組在雨量閾值介於 50mm~150mm 之間的 ETS 最高。圖 10 的 BS 顯示每個實驗組在各個降水門檻都是預報高估表現，有同化 GTS 資料的實驗組在 35mm 以上門檻都很容易高估，但是加入 GPSRO 資料的 GTS_PHI 和 ALL 的 BS 值就開始減小，特別是 ALL 在 150mm 以上 BS 的值下降最為明顯，表示加入 GPSRO 的資料有助於模式掌握大雨雨量的預報表現。Control Run 的 BS 值雖然平均都在 1 以下，但是搭配圖 9 的 ETS 表現，可以得知 Control Run 的預報技術得分除了 50~100mm 之外並不高，表示 Control Run 是由於整體雨量偏弱，所以在雨量大於 100mm 以上的 BS 值才會減小，而不是擁有較好的

預報技術。

從 Day2 的 ETS(圖 11)和 BS(圖 12)來看，可以發現 Day2 的 ETS 值都明顯低於 Day1，不過 GTS_PHI 這組仍然在 35~150mm 之間有相對較高的 ETS，而 BS 同樣也顯示出各組在每個雨量閾值都傾向預報高估的表現，特別是 50mm 以上的雨量就更為明顯，但是 Hybrid 加入 GPSRO 資料後 BS 同樣開始減小，其意義代表 GPSRO 資料可以增強 50mm 以上雨量預報的掌握能力，其中又以 GPSRO 的 Phase1 資料更能凸顯這樣的特徵。

四、 結語和未來工作規畫

本研究利用 OSSE 來測試尚未發射的福衛七號 GPSRO 資料對於劇烈降水天氣系統的預報之效益，並發展由 NCU LETKF 和 3DVAR 混成的 Hybrid 系統，以評估和提升福衛七號掩星資料之價值。我們選擇測試的個案是 2012 年 6 月的梅雨個案，測試方式為以 MM5 的模擬作為 Natural Run，WRF 的模擬作為 Control Run，根據同化不同資料的 Hybrid 系統可分為 GTS、GTS+PHI 以及 ALL 等三種 Hybrid 實驗組，藉以比較各同化各種資料對於預報的效益。

Day1 的 Control Run 的降雨分佈雖然和 Natural Run 相近，但是整體強度偏弱。其他實驗組的降雨值都偏強，但極值出現的位置掌握比 Control Run 好，特別是隨著同化越多的 GPSRO 資料，模式的預報結果有明顯改善。Day2 期間的各組雨量都有偏多的狀況，Control Run 雖然降雨分佈類似但是極值的地點沒有抓到；其他同化實驗組雖然整體環境看起來偏濕，但是同樣隨著 GPSRO 資料的加入，降雨的強度和範圍都明顯趨近 Natural Run。

再來從各實驗組的 ETS 表現來看，Day1 雨量閾值低於 25mm 以下每個實驗組的表現都不佳，主要是因為 Natural Run 小雨的範圍本身就不大，所以其他組實驗都很難掌握。同時也可以看到有做 Hybrid 的實驗組其 ETS 都較 Control Run 高，搭配 BS 的表現，顯示加入 GPSRO 的資料有助於模式掌握大雨雨量的預報表現。Control Run 的 BS 值雖然平均都在 1 以下，但是 Control Run 整體雨量偏弱，所以在雨量

大於 100mm 以上的 BS 值才會減小，而不是擁有較好的預報技術。雖然 Day2 的 ETS 值都明顯低於 Day1，但是 Day2 的 BS 同樣也看到各實驗組在每個雨量閾值都傾向預報高估的表現，特別是 50mm 以上的雨量就更為明顯，但是 Hybrid 加入 GPSRO 資料後 BS 同樣開始減小，其意義代表 GPSRO 資料可以增強 50mm 以上雨量預報的掌握能力，有助於模式在大雨情況的預報表現。

五、 圖表

實驗組名稱	代表意義
Natural Run	MM5 模擬結果
Control Run	WRF 模擬結果
GTS	Hybrid 同化 GTS 資料
GTS_PHI	Hybrid 同化 GTS 和福衛七號 GPSRO 第一組星系(Phase 1)資料
ALL	Hybrid 同化 GTS、福衛七號 GPSRO 第一組星系(Phase 1)和第二組星系(Phase 2)資料

表 1. 為了比較 Hybrid 系統同化不同資料的預報效益，因此本研究共設立了五種實驗組，各組實驗意義如上表中所示。

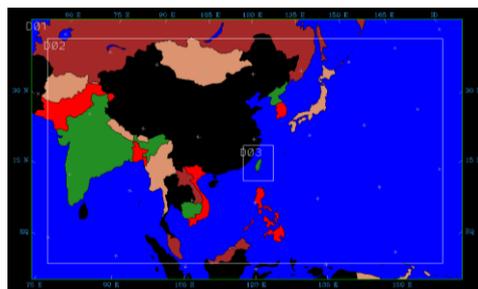


圖 1. MM5 在梅雨個案的 domain 設定。

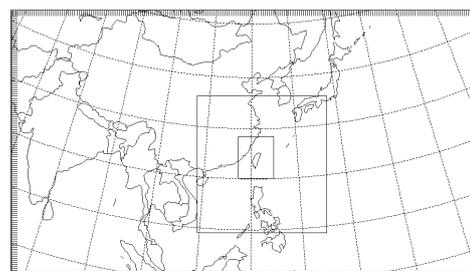


圖 2. WRF 在梅雨個案的 domain 設定。

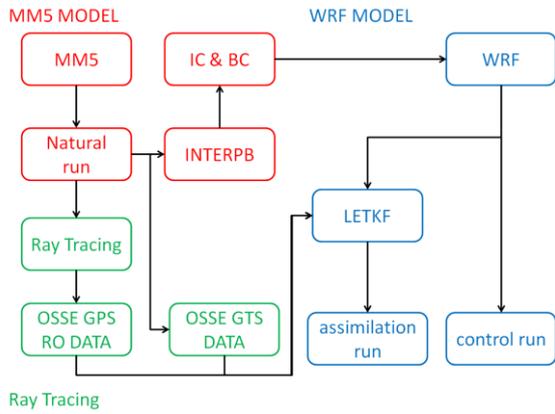


圖 3. OSSE 實驗設計流程。

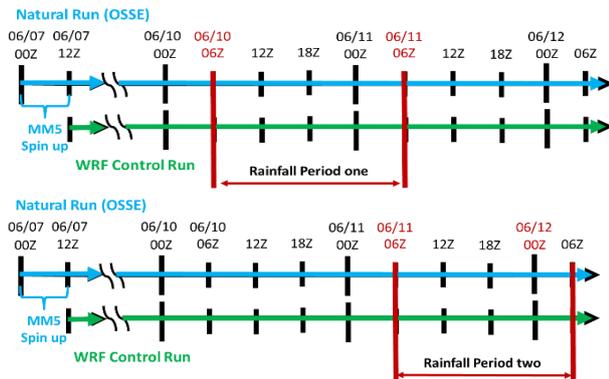


圖 4. 梅雨個案的 Natural Run 和 Control Run 實驗設計。

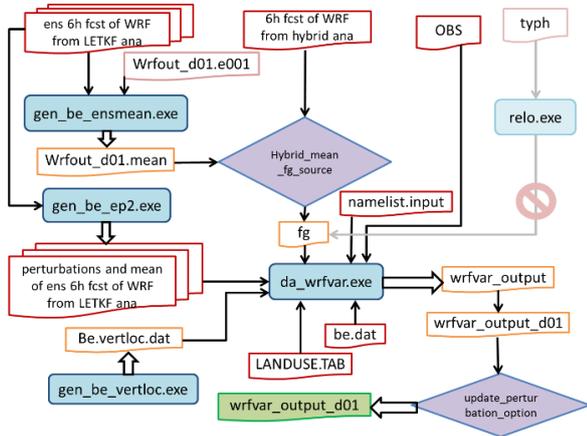


圖 5. 本計畫使用的 Hybrid 流程圖。

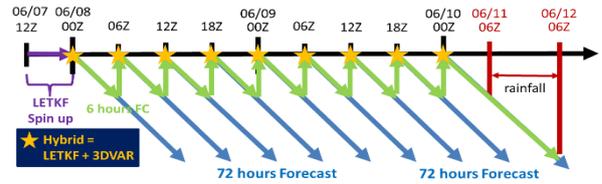


圖 6. 梅雨個案的 Hybrid 實驗設計流程。星號代表有做 Hybrid 的時間點，本研究共取兩個 24 小時累積雨量時段做分析。

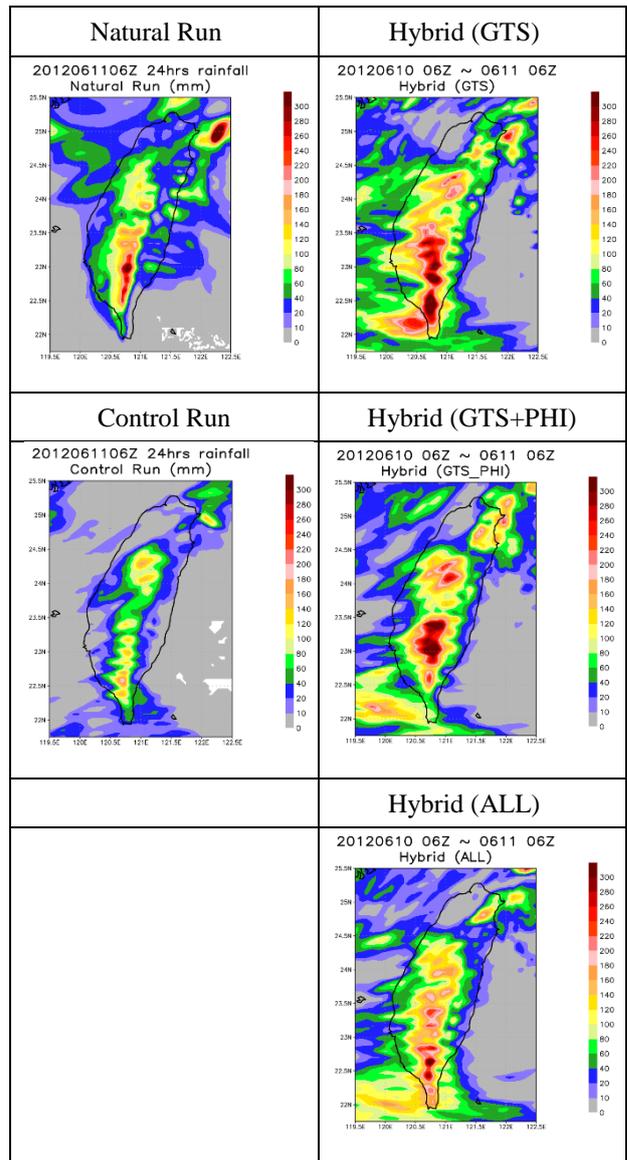
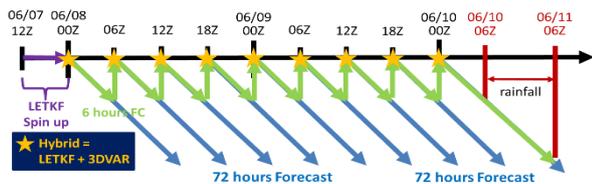


圖 7. Day1 期間內的 24 小時累積雨量。



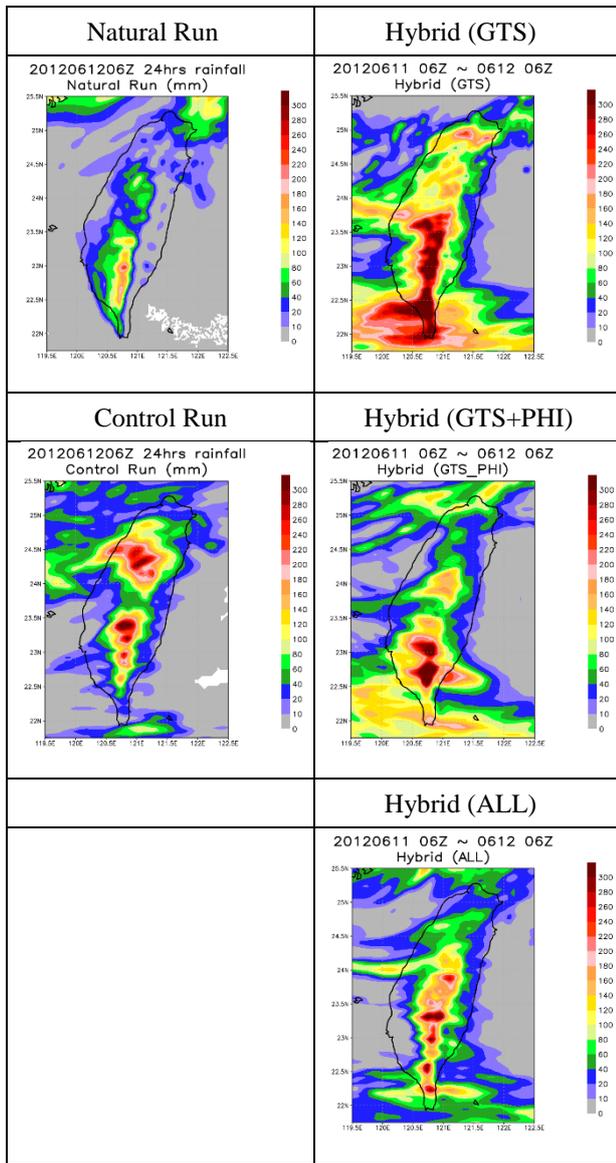


圖 8. Day2 期間內的 24 小時累積雨量。

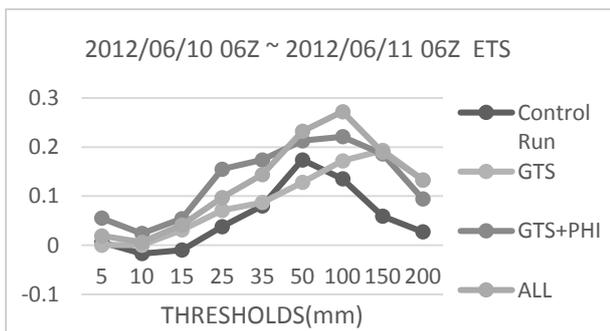


圖 9. 各實驗組在 Day1 期間內的降雨公正預兆得分(ETS)表現。

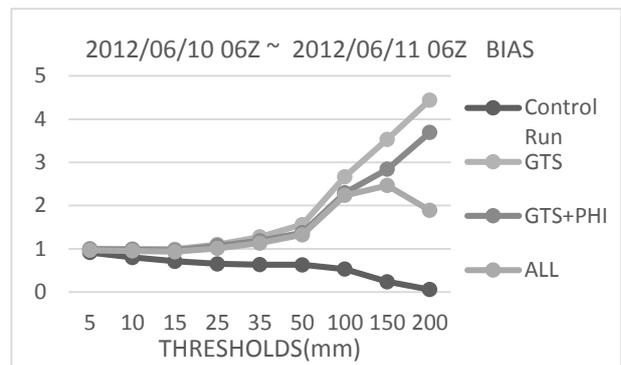


圖 10. 各實驗組在 Day1 期間內的偏倚得分(BS)表現。

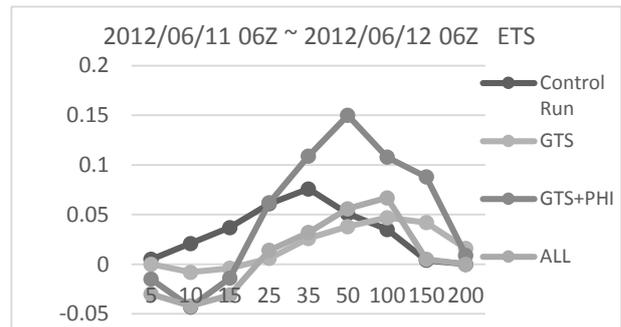


圖 11. 各實驗組在 Day2 期間內的降雨公正預兆得分(ETS)表現。

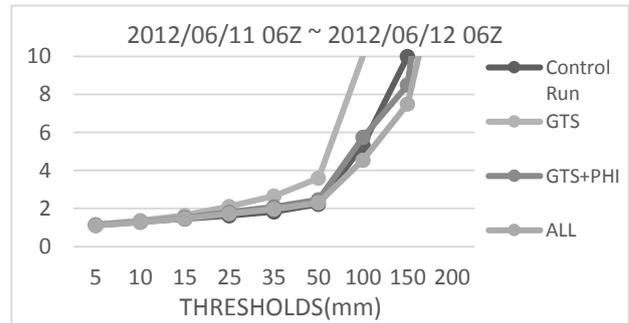


圖 12. 各實驗組在 Day2 期間內的偏倚得分(BS)表現。

六、 參考文獻

蔡直謙, 2014: 利用局地系集轉換卡爾曼濾波器雷達資料同化系統改善定量降水即時預報: 莫拉克颱風(2009), 博士論文, 國立中央大學, 大氣物理研究所, 8-9

Yang, S.-C., S.-H. Chen, S.-Y. Chen, C.-Y. Huang and C.-S. Chen, 2014: Evaluating the impact of the COSMIC-RO bending angle data on predicting the heavy precipitation episode on 16 June 2008 during SoWMEX-IOP8. Mon. Wea. Rev., 142, 4139-4163.