

愈多雨、預報愈準：2.5-km CReSS模式對侵臺颱風 定量降水預報之表現與特性

王重傑
國立臺灣師範大學地球科學系

摘要

自2010年來，作者以「雲解析風暴模式」(Cloud-resolving Storm Simulator, 簡稱CReSS)進行臺灣例行天氣預報之水平網格間距達2.5 km，足可解析對流雲之基本結構。目前每日即時進行四次78 h預報，並提供給「臺灣颱風洪水研究中心」之系集降水預報實驗。此成員為該實驗中解析度最高、且細網格區亦最大者。簡言之，作者採類似研究之設定來進行天氣預報，以改善對降水的掌握。本研究即評估此2.5 km模式，對2010-2012年所有15個侵臺颱風的24 h定量降水預報 (quantitative precipitation forecast, QPF) 表現、研究其特性、並討論此特性之意涵，以更瞭解傳統技術得分評估的本質、及適當評估的方法。

傳統評估模式QPF技術之得分，如預兆得分 (或T得分)，在個別預報中的普遍現象為，得分隨降水門檻值下降。此特性也同時意味，模式對愈大規模的事件 (兩區愈大) 之平均得分將愈高，即愈有預報能力。本研究將15個颱風個案期間每24 h (含00-24與12-12 UTC) 根據觀測雨量，由多雨至少雨分為A-D四級，各約佔總時段的1/4。另由A類中挑選5個最多雨颱風 (凡那比、梅姬、南瑪都、蘇拉、及天秤) 的最多雨時段，其中3個出現顯著災情。分類後之評估顯示，模式QPF對致災的Top-5個案得分最高，A級者次之，然後隨B、C、D逐步下降。針對Top-5時段的0-24 h QPF的平均TS，在50、130、200、及350 mm的豪大雨門檻值處，分別達0.67、0.58、0.51、及0.32；24-48 h QPF (針對相同時段，但提前24 h開始者) 為0.73、0.57、0.42、及0.17；而48-72 h (再前一日開始者) 亦有0.57、0.37、0.33、及0.22的高得分。因此，針對高致災性的時段，CReSS不但表現優異，且具有相當的前置時間 (約2-2.5天) 供防災應變準備，亟待進一步的積極應用。

本研究「愈多雨、預報愈準」的結果也表示，長期的平均得分、乃至常見針對個別颱風 (如莫拉克) 取一段時間內的多個預報的平均得分，都無法有效評估出模式對關鍵致災時段的真正表現。因為，此種平均包括了過多不重要時段 (例如本文中B-D類，佔3/4)，且這些時段雨區小，得分由少數測站計算，統計代表性亦低。模式能對高致災性的強降水時段有好表現，才是最關鍵而重要的，評估也應僅包括這些時段，才是針對重點評估。

關鍵字：定量降水預報，模式校驗，颱風，臺灣，雲解析模式，CReSS

一、前言

臺灣主要的氣象災害，是颱風與梅雨季的豪大雨，往往能在1-2日間，造成累積達500 mm以上的降雨，而引發大範圍淹水、山洪爆發、土石流等災情。例如2009年的莫拉克 (Morakot) 颱風，在8月6-9日的累積雨量高達2855 mm，逼近世界紀錄，也導致過去五十年來最嚴重的災害 (Wang et al., 2012; 2013b)。因此，為了防災減災，針對高致災性的持續強降水、或極端降水的定量降水預報 (quantitative precipitation forecast, QPF) 為目前全世界許多國家作業單位的改進重點，臺灣自也如此。在此過程中，模式QPF的評估與校驗為一關鍵環節，其所採用的方式必須要能與人為主觀評斷相符，亦即要能忠實反應模式的真正表現 (Davis et al., 2006)。長期以來，

最常用於評估模式QPF的方法，為建構於傳統2 × 2列聯表的多種技術得分，如預兆得分 (threat score, TS)、偏倚得分 (bias score, BS)、公正預兆得分 (equitable threat score, ETS)，乃至於命中率 (probability of detection, POD)、錯報率 (false alarm ratio, FAR) 等。雖此類方法對高解析度模式常造成「雙重懲罰」(double penalty) 而不公平 (Ebert and McBride, 2000)，可能將較好的預報反而評得低分，但因其方便計算、臺灣雨量站資料的侷限性、及地形對降雨的鎖定效果等因素，仍為主要評估模式QPF的手段。因此，除評估需謹慎為之外，對這些技術得分本質與特性的深入認識，無疑對適當詮釋評估結果與瞭解模式真正表現上，非常重要。

自2010年以來，作者以「雲解析風暴模式」(Cloud-resolving Storm Simulator, 簡稱CReSS模式，

Tsuboki and Sakakibara, 2007) 進行臺灣例行天氣預報之水平網格間距已達2.5 km, 足以解析對流雲之基本結構, 其網域原為1080 × 900 km² (432 × 360), 自2012年則放大至1500 × 1200 km² (600 × 480), 垂直向採40層。目前每日即時進行四次78 h預報, 結果除公布於作者個人網頁<http://vortex.es.ntnu.edu.tw/>, 也提供給「臺灣颱風洪水研究中心」(Taiwan Typhoon and Flood Research Institute, TTFRI) 作為其定量降水系集預報實驗的一個成員。事實上, 此2.5-km CReSS為TTFRI實驗所有成員中解析度最高、同時高解析度範圍也最大者, 為唯一的雲解析成員。換言之, 作者採類似研究之設定來進行例行天氣預報 (例如: Wang et al., 2011; 2012), 能解析並以外顯方法處理雲的演變, 以改善對對流與降水的掌握。本研究即針對此2.5-km CReSS對2010-2012年所有15個侵臺颱風24-h QPF的表現進行評估、研究其特性、並討論此特性在預報上所具有之重要意涵。

二、資料與研究方法

如前述, 本研究評估模式對2010-2012年的15個侵臺颱風的QPF的表現。模式預報資料包括00與12 UTC初始者之0-72 h預報, 含第1天 (0-24 h)、第2天 (24-48 h)、及第3天 (48-72 h) 之 QPF。所有預報均使用美國「國家環境預測中心」(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球預報系統 (Global Forecast System, GFS) 之即時分析與預報 (解析度為1° × 1°, 垂直向共26層), 內插至CReSS格點即進行預報。因此, 未做任何額外的資料同化, 或颱風渦旋強度、結構、或位置的調整。

針對2010-12年間所有15個侵臺颱風, 選取颱風接近臺灣之時段 (含00-24與12-12 UTC), 標準為各24 h時段必須處在氣象局發佈之海 (含陸) 上警報期間、本島降雨至少必須部分與颱風相關 (含外圍環流與遠距降水)、且每個颱風至少須選取一個時段。因此, 與颱風無關之降水不納入評估。隨後, 根據全台觀測雨量之多寡將各時段分類。由於災情主要與相當面積之總雨量有關, 本研究採全台約400個雨量站中, 至少有50個站 (約總數的1/8) 達到100、50、25 mm、或其餘未達到者, 分別為A、B、C、D等四級 (多雨至少雨)。各颱風個案與其分類結果示於表一, 共選取了99個24 h時段, 各類有21-26個時段, 各約佔總數的1/4。另外, 由A級中另挑出5個最多雨颱風 (凡那比、梅姬、南瑪都、蘇拉、及天秤) 的最多雨時段 (表一, 紅色粗體) 稱為Top-5時段, 其中有3個 (凡那比、梅姬、及蘇拉) 在此時段出現顯著災情 (至少死亡兩人)。換言之, 針對這些致災時段的預報才是最重要的, 也是本研究最想瞭解的部分。

在技術得分方面, 本文僅呈現TS與BS的結果, 並舉例與主觀判定比較。先將模式預報的24 h累積雨

量內插至雨量站位置 (總數為N), 在雨量站上評估。在任意降雨門檻值的在2 × 2列聯表中, 正確預報出現 (命中)、觀測出現但未預報 (未命中)、預報有但實際未出現 (錯報)、及正確預報不出現等四類, 分別以H、M、FA、及CN表示 (其和為N), 則 $TS = H/(H + M + FA)$ 而 $BS = (H + F)/(H + M)$ 。前者為觀測與預報兩區交集除以聯集之比 ($0 \leq TS \leq 1$), 後者則度量模式預報兩區是否不足或過大 ($0 \leq BS < \infty$)。值得注意的是, 一旦得分計算後, 就僅剩兩區相對大小的資訊, 而無法得知實際的大小。至於另一常用的ETS, 因其用在評估小區域的QPF (如臺灣) 有嚴重問題而必須修正 (Wang, 2014), 故暫不採用。至於門檻值則介於0.05-1000 mm (每24 h), 其中包括各豪大雨之門檻值 (50, 130, 200, 及350 mm)。

三、實際預報舉例

圖1為2.5-km CReSS對凡那比 (Fanapi) 颱風所做實際預報之例。本預報為9月17日00 UTC所做, 圖中則顯示預報第3日 (針對19日) 之結果。圖中可見, 模式預報雖較觀測略提早3-4 h, 但對颱風侵臺期間之路徑與演變有極佳掌握, 包括接近時段的對稱結構 (圖1a,b)、登陸前中心的突然南偏 (圖1c,d)、之後降雨轉為不對稱、以及離陸期間眼牆重組時, 由後側雨帶所造成在臺灣西南部沿海的強降水 (圖1e,f; 參見Wang et al. 2013a)。上述這些現象細節, 有時甚至在模擬中也不易掌握。因此, 模式在2-2.5日之前, 即做出非常高品質與參考價值的預報。

2010年9月17-19日的觀測降雨與上述預報的第1-3日降雨示於圖2a-f, 亦顯示模式對19日報出非常好的QPF, 其中台灣西南部沿海的降雨, 造成高雄都會區嚴重淹水 (Wang et al. 2013a)。其TS與BS技術得分亦非常理想 (圖3a,b), TS直到250 mm均在0.6以上, 在350 mm亦高達0.45, 與主觀判斷一致。但有趣的是, 此預報中第2日與第1日的QPF, TS得分卻偏低 (圖3a), 無法反應出預報的高品質。此現象在當降雨較弱時發生 (圖2a,b), 與19日相較, 當然明顯並不重要。但是究其原因, 則與得分的特性有關, 以下即進一步說明討論。

許多傳統上用於評估模式QPF之技術得分, 包括TS, 在個別預報中的一個普遍現象為, 其得分隨降水門檻值的升高而下降 (如圖3a)。其原因眾所周知, 在於當門檻值提高、兩區隨之變小, 模式就愈難以產生相同比例的命中區。此一特性也同時意味, 當我們考慮對不同量級降雨所做的預報, 若模式能力相當, 則愈大規模的降水事件, 達到相同門檻值的兩區愈大, 模式的平均得分將愈高, 亦即愈有預報能力; 反之, 對愈小規模的事件, 模式的平均得分將愈低, 但因不會致災, 其實並不重要。兩區愈小的事件, 代表導致降水的系統愈小, 其可預

報度原本就愈低，而模式愈難以正確預報其位置，也會因「雙重懲罰」等因素導致類似TS之得分降低。因此，此類得分將愈來愈無法反應模式真正的表現，亦即愈不適用。圖3a中，第1-3日得分間的差異，正在反應此一現象，而隨後18日00 UTC開始之預報，便以第2日 (24-48 h) 的QPF得分最佳 (圖3c,d)，19日者則以第1日 (0-24 h) 者最佳 (圖3e,f)。因此，由於技術得分與兩區大小的正相關，在對同一時段之個別預報中，得分常隨門檻降低；但對不同時段 (可為同一次預報或不同預報)，則是規模愈大者 (可達愈高門檻) 得分愈高，亦即「愈多雨、預報愈準」。因此，這兩個看似相互矛盾的現象，其實是同一現象的一體兩面。前者長期以來即眾所周知，但學界對後者卻所知有限，也容易造成詮釋結果的困擾。由於模式對不同等級的降雨事件有不同的預報能力，這也是吾人若欲瞭解模式對致災型或極端降雨 (最高等級事件) 的預報能力，必須依降雨規模加以分類的原因所在。

四、「愈多雨，預報愈準」

將所有15個颱風的24 h時段，按前述方法由多至少雨區分為A-D等四級後，其第1-3日QPF的平均TS得分如圖4a-c所示。果然，圖中清楚地顯示。模式對不同規模的降雨時段，預報能力明顯不同，且以Top-5時段得分最高，A級次之，之後隨B、C、D逐步下降。在25 mm，及50、130、200、及350 mm的豪大雨門檻值處，針對Top-5時段的第1日QPF (0-24 h，即在各時段開始時所做預報)，平均TS分別達到0.67、0.67、0.58、0.51、及0.32 (圖4a)；第2日 (24-48 h) QPF (針對相同時段，但提前24 h開始者) 分別達0.75、0.73、0.57、0.42、及0.17 (圖4b)；而第3日 (48-72 h，再前一日開始者，即在各時段開始前48 h時所做預報) 亦達到0.64、0.57、0.37、0.33、及0.22的高得分 (圖4c)。此與美國目前暖季平均0-24 h QPF在1 inch (約25 mm) 處約0.35的平均TS相比高出甚多，在1-3日均為其兩倍左右，且第1日在350 mm、第2與3日在250 mm處，得分均相當。故針對致災型降水的時段，模式不僅表現優異，且具有相當的前置時間 (約2-2.5天) 供防災應變準備。在實際預報中，例如針對梅姬 (Megi) 與蘇拉 (Saola) 颱風最多雨的致災時段 (參見表一)，2.5-km CReSS也在1.5-2.5天前，做出與後來實際發生非常接近的QPF (圖2g-j)。

2009年莫拉克颱風侵襲，當時作者使用的4-km CReSS，也在事前做出優異的預報 (Wang et al., 2013b)。但限於計算資源，當時每日僅能進行兩次48 h預報。在8月6日00 UTC所做預報，縱使初始與邊界條件含有全球模式的分析與預報誤差 (主要為移速過快)，但已報出未來48 h台灣南部山區最大累積降雨將超過1900 mm，達實際4天最大雨量 (2855 mm)

的2/3，且為作者所知當時所有作業模式預報雨量最高者 (Wang et al., 2013b)。對最多雨的8月8日00-24 UTC (達1560 mm)，在8月7日00 UTC所做的第2天QPF，及8日00 UTC所做的第1天QPF的TS得分，較Top-5者更高，在4個豪大雨門檻值處，分別達0.91、0.80、0.80、及0.68 (圖4b) 與0.80、0.74、0.62、及0.43 (圖4a)，世所少見，不僅再度印證「愈多雨，預報愈準」，且高得分正由於颱風侵臺時可非常多雨。

五、討論與總結

本研究提「愈多雨、預報愈準」的特性也代表，長期的平均得分、或針對個別颱風取一段時間內的多個預報的平均，都無法有效評估出模式在關鍵 (最多降雨) 時段的真正表現。因為，此種平均包括了過多不重要時段 (如本研究中屬B-D級者，佔總數的3/4)，且這些時段雨區小，得分由少數測站計算，統計代表性亦低 (圖4d)。再者，針對個別颱風 (如莫拉克)，任意選取數日內的所有預報做算術平均，則前後兩端之降雨，可能根本與颱風無涉，卻也納入。這些作法人為地過度膨脹不重要、不具統計代表性、甚至不相關時段的QPF得分，最重要的資訊已受掩蓋失落，評估結果如何可信？總之，模式能對高致災性的時段有好表現，才是最關鍵的，評估也應僅納入這些時段，才是針對重點進行。

因此，考慮「愈多雨、預報愈準」的重要現象，吾人欲瞭解模式對致災時段或極端降雨 (最高等級事件) 的預報能力，必須依降雨規模加以分類，才能真正有效評估。按此作法，作者評估了2.5 km CReSS對2010-2012年所有15個侵臺颱風24-h QPF的表現 (含0-24 h的第1天、24-48 h的第2天、及48-72 h的第3天)，並依各時段之全台觀測雨量，由多雨至少雨分為A-D四級，各佔約1/4。另由A類中選出5個最多雨颱風的最多雨時段 (其中，凡那比、梅姬、及蘇拉出現顯著災情)，作為Top-5個案。評估結果顯示，模式果然對Top-5個案的QPF得分最高，A級者次之，然後隨B、C、D逐步下降。針對Top-5的最多雨時段，在50、130、200、及350 mm的豪大雨門檻值處，第1日QPF之平均TS分別達0.67、0.58、0.51、及0.32；第2日QPF (針對同時段，但提前24 h開始者) 分別達0.73、0.57、0.42、及0.17；而第3日者 (再提前24 h之預報) 亦達0.57、0.37、0.33、及0.22的高得分。因此，針對致災性最高的時段，模式不但表現優異，且具有一定的前置時間 (2-2.5日) 供防災應變準備，亟待作業單位進一步的積極應用。

參考文獻

Davis, C., B. Brown, and R. Bullock, 2006: Object-based verification of precipitation forecasts. Part I:

Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1772-1784.

Ebert, E. E., and J. L. McBride, 2000: Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrol.*, **239**, 179-202.

Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2007: *Numerical Prediction of High-Impact Weather Systems: The Textbook for the Seventeenth IHP Training Course in 2007*. Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, and UNESCO, 273 pp.

Wang, C.-C., G. T.-J. Chen, and S.-Y. Huang, 2011: Remote trigger of deep convection by cold outflow over the Taiwan Strait in the Mei-yu season: A modeling study of the 8 June 2007 Case. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2854-2875.

Wang, C.-C., H.-C. Kuo, Y.-H. Chen, H.-L. Huang, C.-H. Chung, and K. Tsuboki, 2012: Effects of asymmetric latent heating on typhoon movement crossing Taiwan: The case of Morakot (2009) with extreme rainfall. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3172-3196.

Wang, C.-C., Y.-H. Chen, H.-C. Kuo, and S.-Y. Huang, 2013a: Sensitivity of typhoon track to asymmetric latent heating/rainfall induced by Taiwan topography: A numerical study of Typhoon Fanapi (2010). *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 3292-3308.

Wang, C.-C., H.-C. Kuo, T.-C. Yeh, C.-H. Chung, Y.-H. Chen, S.-Y. Huang, Y.-W. Wang, and C.-H. Liu, 2013b: High-resolution quantitative precipitation forecasts and simulations by the Cloud-Resolving Storm Simulator (CReSS) for Typhoon Morakot (2009). *J. Hydrol.*, **506**, 26-41.

Wang, C.-C., 2014: On the calculation and correction of equitable threat score for model quantitative precipitation forecasts for small verification areas: The example of Taiwan. *Wea. Forecasting*, **29**, 788-798.

表一 本研究15個侵臺颱風個案期間與分類結果(每年各5個颱風)。分類欄內容依時段順序排列，A-D(多雨至少雨)之標準請見內文，粗體表各颱風最多雨之時段，紅粗體字則表Top-5時段。

颱風	個案期間	分類結果
Lionrock	8/28 00Z-9/3 12Z	CC[CBAB]*CBACDD
Namtheun	8/29 00Z-8/31 12Z	CBAB
Meranti	9/6 00Z-9/11 12Z	DDDDCBBCDC
Fanapi	9/16 00Z-9/21 12Z	DDDDBA A ACD
Megi	10/19 00Z-10/24 12Z	BBBA A ABCDD
Aere	5/9 00Z-5/10 00Z	D
Songda	5/26 00Z-5/29 12Z	CCBCDD
Meari	6/24 00Z-6/26 12Z	BABC
Muifa	8/6 00Z-8/7 12Z	DD
Nanmadol	8/27 00Z-9/1 12Z	BAA A AAACCC
Talim	6/19 00Z-6/22 12Z	BAABCC
Doksuri	6/28 00Z-6/30 12Z	CCDD
Saola	7/30 00Z-8/3 12Z	BAAAA A AA
Tembin	8/22 00Z-8/28 12Z	CCBA A BCDDDBB
Jelawat	9/27 00Z-9/29 12Z	DCCD
合計	99 個 24-h 時段	A-D: 26, 21, 26, 26

*中括號內與南修颱風時段重疊，不重複採用。

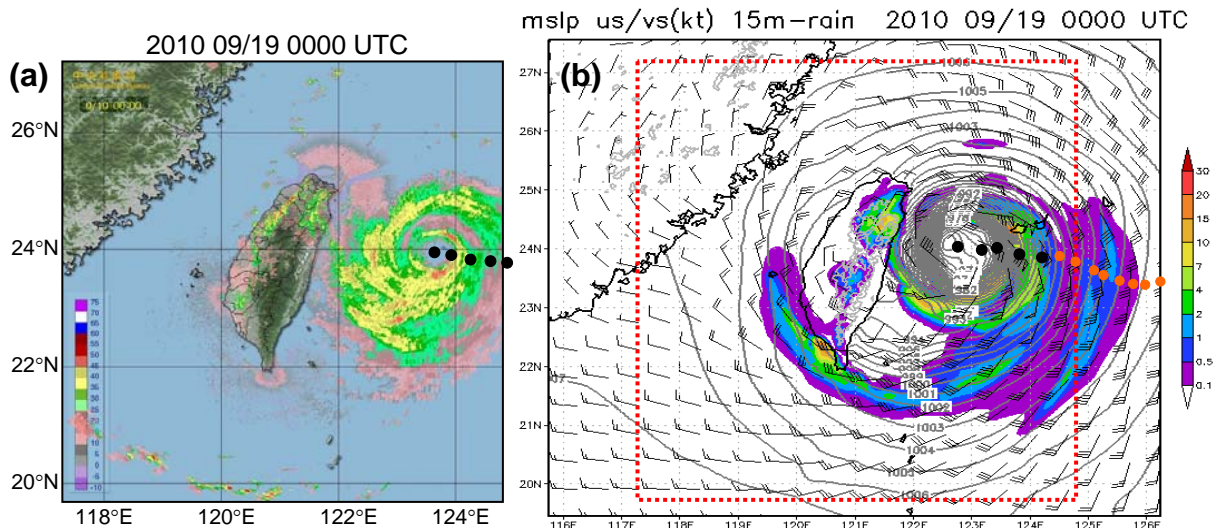


圖1 2010年9月19日凡那比颱風侵襲期間，雷達回波觀測 (dBZ) 與2.5-km CReSS模式在17日00 UTC所做預報 [第3日，含15-min降水 (mm)、地表水平風 (kts)、及海平面氣壓 (hPa)] 之比較。(a),(b) 為19日00 UTC，(c),(d) 為08 UTC，(e),(f) 則為16 UTC。每2 h之颱風中心以黑色點 (或橘色點) 表示，預報者以2 km高處訂之。

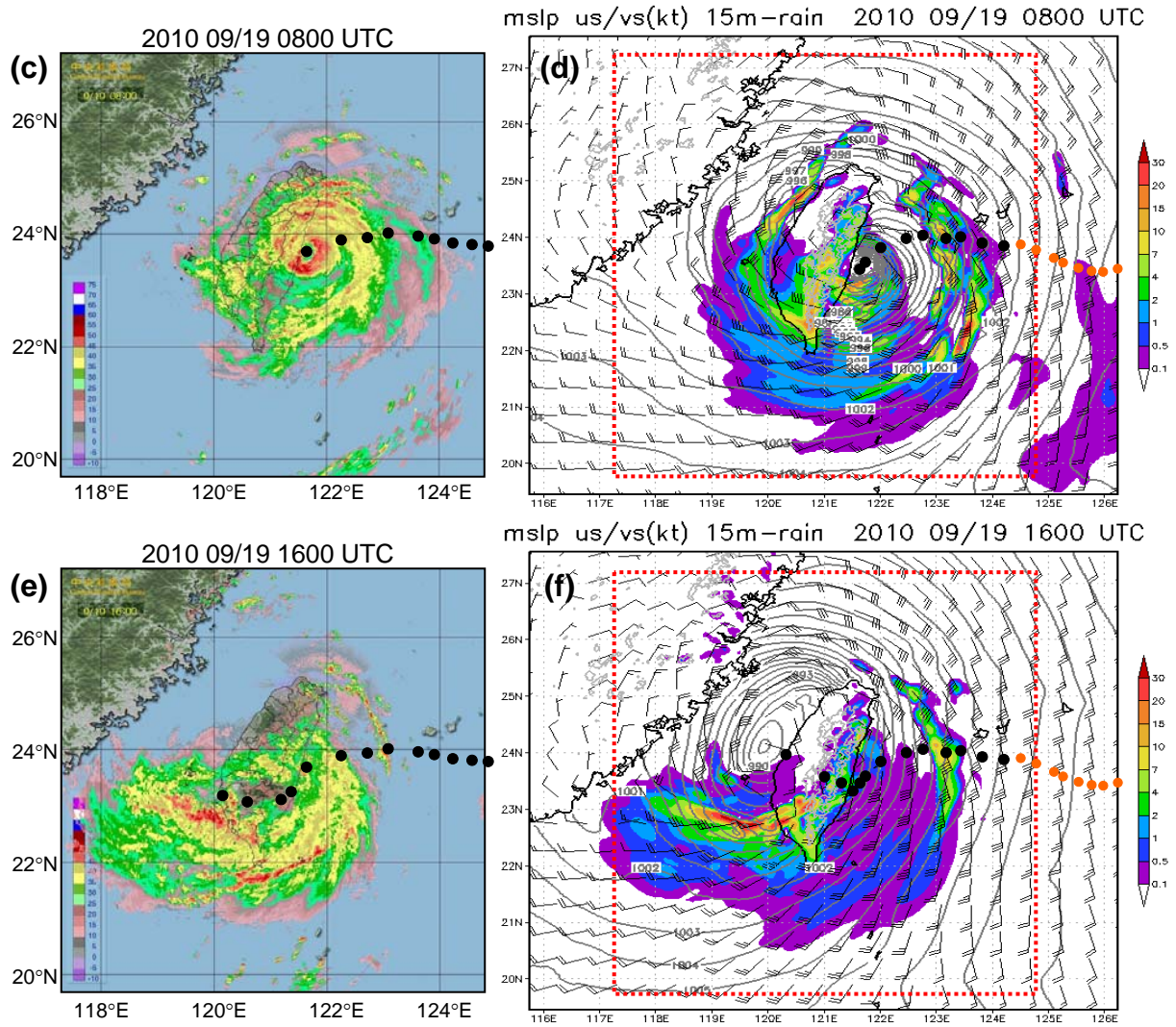


圖1 (續)

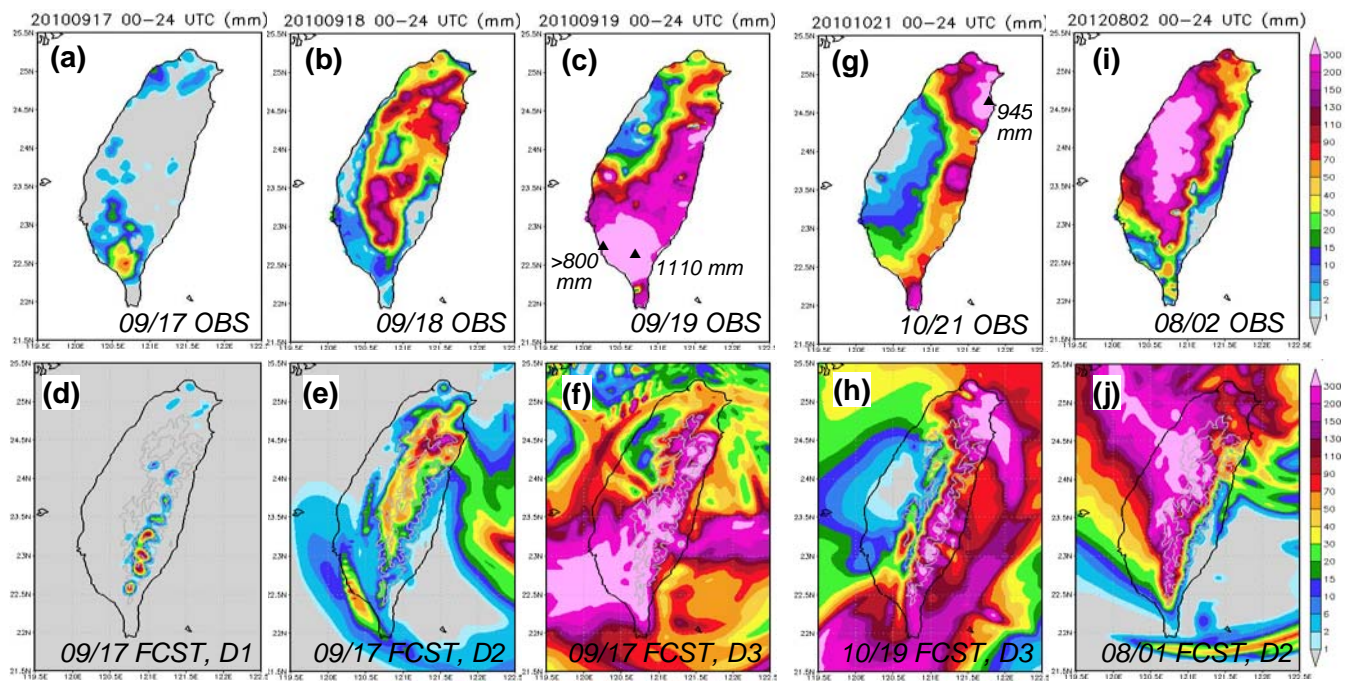


圖2 (a)-(c) 2010年9月17-19日之觀測逐日雨量與 (d)-(f) 9月17日00 UTC模式預報之第1-3日降雨 (單位均mm)。

(g) 2010年10月21日 (梅姬颱風) 之觀測日雨量與 (h) 10月19日00 UTC模式預報之第3日降雨, 及 (i) 2012年8月2日 (蘇拉颱風) 之觀測日雨量與 (j) 8月1日00 UTC模式預報之第2日降雨 (單位均mm, 色階示於右側)。

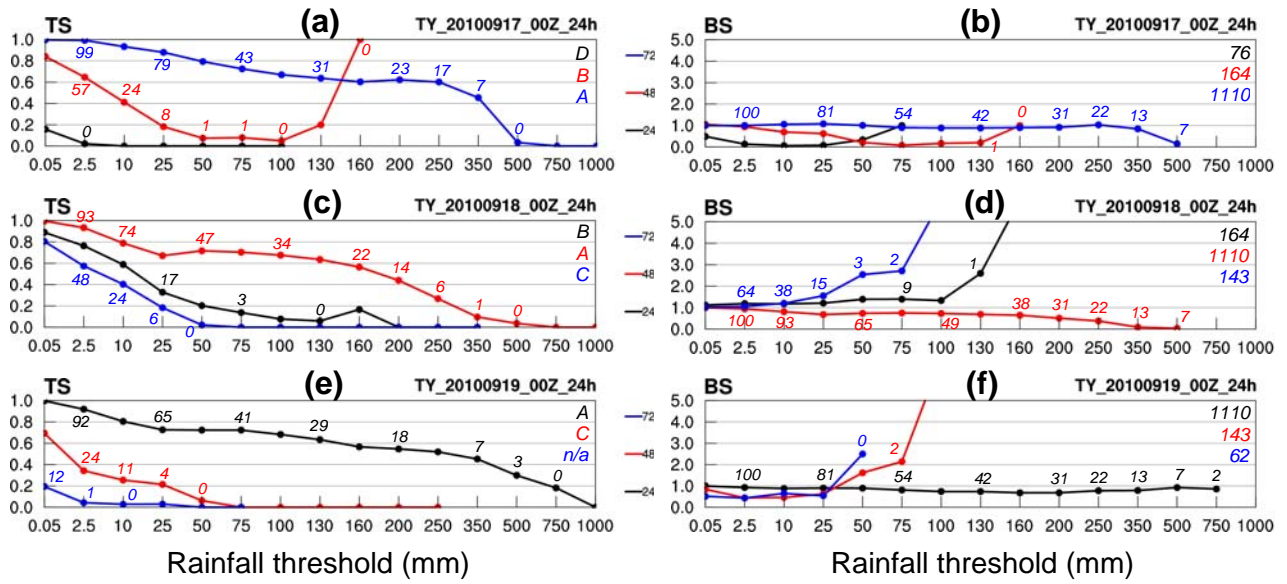


圖3 2010年9月17日00 UTC CReSS模式預報第1-3日QPF (分別為黑、紅、藍) 的 (a) TS與 (b) BS得分隨門檻值 (mm) 之分布。左圖右上角字母為各日之分類, 曲線點上數字為H/N (%), 取至整數; 右圖右上角數字為第1-3日之觀測最大雨量 (mm), 曲線點上數字為觀測雨區比例 (%), 即 (H + M)/N。 (c),(d) 與 (e),(f) 同 (a),(b), 但分別為9月18日與19日所做QPF之結果。

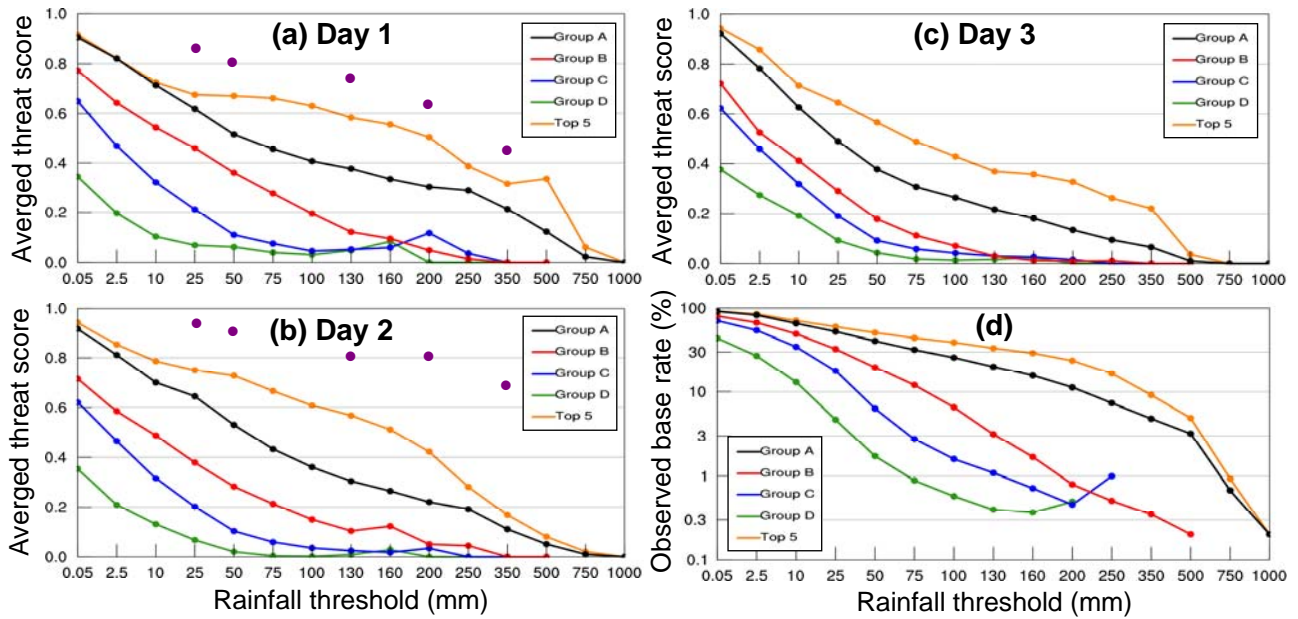


圖4 將所有15個颱風各時段依降水規模分類後, 模式對各類別 (a) 第1天, (b) 第2天, 及 (c) 第3天QPF平均 TS得分隨門檻值 (mm) 之分布。橘、黑、紅、藍、綠分別為Top-5、A、B、C、D類之結果。(a),(b) 中紫色點為2009年莫拉克颱風當時4-km CReSS之預報結果。(d) 為各類別平均之觀測雨區百分比 [即(H + M)/N, %] 隨門檻值之變化, 縱軸採對數坐標。所有平均均不納入無資料 (觀測與預報均未達門檻) 之樣本。