

對流允許模式模擬中尺度對流系統降水個案之研究

宋偉國^{1*} 曹仕傑²

¹空軍航空技術學院一般學科部軍事氣象系

²國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘 要

2021 年 5 月 30 日鋒面通過臺灣地區，受伴隨生成的中尺度對流系統影響，臺灣西半部地區多數測站出現豪雨等級之降雨量，並造成淹水災情。當日臺灣地區低層(850-700 hPa)伴隨之低層噴流將南海暖濕空氣輸送臺灣地區，供應對流系統能量來源；500 hPa 顯示有槽線接近臺灣地區，有利上升運動，可見該日綜觀環境場提供了有利中尺度對流系統生成之條件。本研究使用 WRF 模式，並以對流允許模式研究 2021 年 5 月 30 日中尺度對流系統個案，以了解 WRF 在高解析度模式下模擬個案之表現。模擬結果顯示，豪雨模擬位置與實際觀測大致相符且 Threat Score、Bias Score 與 Fraction Skill Score 顯示，模式對於豪雨具有預報能力。

關鍵詞：中尺度對流系統，低層噴流，對流允許模式

Study on the precipitation event for the Mesoscale Convective System with a Convection-Permitting Model

Wei-Kuo Soong^{1*}, Shih-Jie Tsao²

¹ Department of Military Meteorology, Airforce Institute of Technology

² Department of Environmental Information and Engineering, CCIT, National Defense University

ABSTRACT

When Mei-yu fronts passed through Taiwan on 30 May 2021, mesoscale convective system (MCS) formed and developed, which affected Taiwan afterwards. The MCS produced heavy rainfall over the west regions of Taiwan including many meteorological stations, up to the standard of extremely heavy rain. It also caused severe floods in many areas. The strong low-level jet at the 850-700 hPa layer in Taiwan area bringing warm moist air to Taiwan from South China Sea provided the moisture and energy for the convective systems. The trough lines was approaching Taiwan at 500 hPa, and there was a strong divergence and obvious ascending motion at these upper levels of the atmosphere, which was a more conducive environment for the growth of MSC. For evaluating the performance of rainfall prediction for MCS in Taiwan, Weather Research and Forecast (WRF) Model with Convection-Permitting Models was carried out in this study. The result shows that the simulation of extremely heavy rain is close to the spot of observation and its skillful for extremely heavy rain through 3 skill scores (Threat Score; Bias Score; Fraction Skill Score).

Keywords: Mesoscale Convective System, Low Level Jet, Convection-Permitting Model

一、前言

臺灣位處副熱帶地區，可說是亞洲顯著之季風區域，每年暖季降雨來源除了颱風之外，5、6月的梅雨季，其鋒面豪雨天氣系統可說是次要來源，常常為臺灣地區帶來豐沛的雨量。衛星雲圖上常常可觀測到，地面鋒往往伴隨一明顯濃密雲帶，由日本南方海面往西南延伸經臺灣至華中，甚至是華南一帶。當梅雨鋒面通過臺灣地區前，往往鋒前的西南氣流會將南海一帶暖濕空氣輸送至臺灣地區，配合低層(850-700 hPa)出現 LLJ (Low-Level Jet; 風速 ≥ 25 kt) 時，臺灣海峽至臺灣地區環境場較為不穩定，容易促使 MCS(Mesoscale Convective System)在臺灣海峽一帶生成，當 MCS 隨鋒面通過臺灣地區時，容易肇致臺灣地區發生短延時強降雨並伴隨雷電與強陣風等較為劇烈之天氣現象，也增加了豪雨致災的可能性。

中尺度對流系統(MCS)是一個連續的積雨雲複合體，水平尺寸為幾百到幾千公里，持續時間可長達 10~24 小時不等[1]。Fritsch and Forbes (2001) [2]和 Houze(2004) [3]對這種類型的對流風暴進行了全面的回顧[4-6]。然而，許多 MCS 的對流和層狀降水區的排列更為複雜[7-8]。

徐(2004) [9]表示高低層中尺度噴流的發展是供應對流系統發展之重要動力機制之一，其結構完整表示整個 MCS 在低層能藉由 LLJ 不斷獲得暖濕空氣的供應，對流發展至高空並將水平動量帶往高層作輻散運動。由此可見，MCS 的結構與其發展和西南氣流、LLJ 及局部環流有密切之關係[10-11]。另外，MSC 發展後所釋放之潛熱加強低層輻合、高層輻散及上升運動，使得 MCS 能夠形成自我循環機制。此種結構特徵顯示，MCS 與一般孤立的對流系統不同，且其生長與消散過程其實是許多天氣現象特徵交互作用的結果。

隨數值天氣預報系統的發展與進步，具客觀性的數值預報能提升天氣預報的時效性與準確度，以掌握天氣變化，降低災害影響程度。不論是全球氣候模式(Global Climate Model, GCM)或是低解析度的區域氣候模式(Regional Climate Model, RCM)，或多或少皆為全球天氣預報提供了實質的幫助。然而，臺灣地區面積不大，卻深受複雜的地形特徵影響，天氣型態變化多，如只透過傳統的 GCM 是無法掌握中

小尺度的天氣系統，GCM 和低解析度的 RCM 因為使用對流參數化，導致了模擬水文循環的偏差[12]。RCM 模擬深層對流的結果不佳是氣候推估與區域氣候動力降尺度中的一個問題。為要避免模式中對流參數化方案所帶來的誤差，解決方法之一是使用高解析度模式，可明確解決對流問題，故使用區域模式進行中尺小尺度天氣系統的模擬是有其必要性。Lorenz (1969) [13]提出，10 公里或更小尺度之對流風暴可預測時間只有幾個小時或更短，這表明我們需要更高的時空解析度來解析其降水。Lim et al. (2014) [14]發現，高的解析度模擬降雨可以得到較細緻的結果或較小尺度的大氣現象。彭(2018) [15]使用 WRF 模式，以高解析度網格(1.67 km)模擬蘇迪勒颱風，在颱風路徑與強度變化表現佳，且掌握到颱風增強趨勢。Mittermaier et al. (2013) [16]和 Schwartz et al. (2009) [17]使用 FSS (Fraction Skill Score)評估 2 和 4 公里的模式，結果表明，在幾十公里到一百多公里的範圍內實現了合理的預報技能。

透過高解析度區域數值模式，我們可以透過模擬 MCS 個案，了解 MCS 的綜觀環境條件、演化過程以及在不同生命週期熱動力方面之結構，將提升對於豪雨的預報。以往受限於電腦計算資源，使用高解析度區域數值模式模擬 MCS，多採取槽狀網格方式處理，並在次網格內加入對流參數化來強化對流機制之處理。然而 Weisman et al. (1997) [18]研究發現指出，當水平網格間距 4 公里時，即可模擬出合理的 MCS，此種方式稱為對流允許模式(Convection-permitting models, CPMs)。由於模式採用 CPMs，可以比槽狀網格方式更節省電腦計算時間，且避免對流參數化造成降水預報的不確定性，因此在氣候模擬或短期天氣系統模擬已被大量使用[18-26]。Kopparla et al. (2013) [27]表明，WRF 在 4 km 高解析度模式下，更準確地模擬了 LLJ 的強度、位置和晝夜循環，表明 CPMs 的模擬具有更真實的物理和動力學，對降水模擬尤其重要。Squitiери and Gallus (2020) [24]用 WRF 模式的 CPMs 方式模擬 MCS 的冷池效應，發現 3 km 高解析度水平網格模擬 MCS 移動速度與觀測結果接近。Somses et al. (2020) [25]運用 WRF 模式的 CPMs 方式模擬強降雨個案，結果顯示 CPMs

方式已足以解析強對流降雨，若模式中增加對流參數化，與觀測結果比較，對流參數化的結果反而使模式模擬的降雨強度減弱。Zhu and Xue (2016) [22]設計 22 組實驗，其中包含 Morrison、Thompson 等微物理參數法組合，預報 2012 年 7 月 21 日北京極端降雨事件，該日 24 小時降 460 mm，顯示部分 CPMs 模組可以掌握到該極端降雨事件。

近年來電腦運算能力快速提升，如何在大範圍區域與高解析度網格間取得平衡，以致可以合理模擬 MCS 的結構與演變過程，甚至有能力達到定量降水預報，需要更多研究評估。CPMs 成為一種有潛力的工具，與具有較低解析度和對流參數方案的模式相比，CPMs 有機會模擬出更真實的區域到地方尺度的天氣系統。

2021 年 5 月 30 日鋒面前西南氣流影響下，於臺灣海峽中部區域上空生成中尺度對流系統並隨鋒面往東南通過臺灣地區，先於中部外海一帶形成東北—西南走向，具有組織的雷雨胞，以緩慢速度往東南方向移入中部地區，14~17 UTC(06~09 LST)期間在彰化地區降下豪雨等級之雨量，彰化員林測站三小時累積降雨量高達 106 mm，時隔數小時後，雷雨胞仍在中南部地區增強發展，14~17 UTC(06~09 LST)嘉義太保測站三小時累積降雨量高達 136.5 mm。本研究透過 WRF 模式搭配 CPMs 模擬 2021 年 5 月 30 日個案，除了解 CPMs 在臺灣地區表現外，也瞭解 MCS 發展過程、模擬與實際差異及降雨校驗情況，期望能提升對於 MCS 之預報能力。

二、研究工具與方法

2.1 研究使用資料

本研究透過中央氣象局官方網站所發布之地面天氣圖(00 UTC)分析綜觀天氣，如鋒面位置；高空天氣圖(850 hPa、700 hPa、500 hPa、300 hPa)判斷槽線位置與風場；局屬與自動地面觀測站資料分析地面測站逐時天氣變化，並與模式模擬資料進行評估校驗；Himawari 紅外線衛星雲圖確認鋒面位置與對流胞的發展，對於海上缺乏觀測站的點位尤其重要；雷達回波圖掌握降雨回波，尤其強降雨回波出現時，可於短時間內掌握其回波發展與影響位置；閃

電即時觀測圖可確認強降雨回波是否有閃電，掌握雷暴生成與消散時間。另外，使用 GES DISC(Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center)資料中心提供之衛星紅外線頻道資料(NCEP/CPC L3 half-hourly 4 km Global Merged IR V1 infrared Tb data)分析 MCS。

2.2 模式介紹與設定

本研究所使用的模式為中尺度數值天氣預報模式 Advanced Research WRF Version 4.1.2 版本，透過 ARW (Advanced Research WRF)動力核心進行 2021 年 5 月 29(00 UTC)~31(00 UTC)日個案模擬。模式初始、邊界資料引用美國國家環境預報中心全球預報系統(National Prediction Global Forecast System, NCEP-GFS)提供的全球分析資料(FNL)，簡稱 GFS_FNL，為 6 小時一筆資料，網格解析度為 $1^\circ \times 1^\circ$ 。WRF 模式設定乃參考 Feng et al. (2018) [12]。內文使用網格 4 km 間距之高解析度 CPMs，能夠避免積雲參數化的不確定性[28]。模擬時間共計 48 小時，模式層頂為 30 hPa，垂直層數為 65 層，網格為單層，網域包含臺灣及鄰近海域(圖 1)，水平網格點數為 342×339 ，時間解析度為每一小時一筆，資料每小時釋出，共計 48 次。本研究微物理參數法選用 Morrison scheme [29]，因使用 CPMs，故無需使用積雲參數法，邊界層參數法設定 YSU scheme [30]，長波輻射參數法設定 RRTM(Rapid Radiation Transfer Model, RRTM)，短波輻射參數法設定 Dudhia scheme，地表參數法設定 Monin-Obukhov scheme，土壤參數法設定 Noah land surface model [31]。

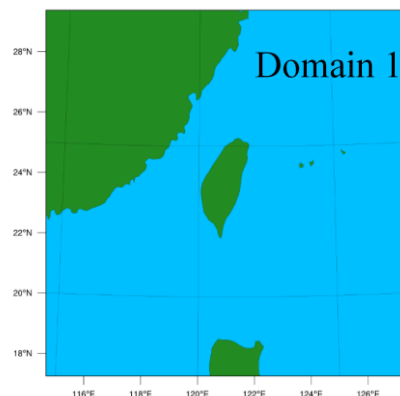


圖 1. WRF 模式積分網域設計圖

2.3 降水校驗法

本研究使用中央氣象局之局屬與自動雨量測站所提供的 24 小時累積雨量資料進行降雨校驗，測站點位共計 576 個（圖 2）。本研究預報的部分，降水技術評分的雨量門檻值設定為 24 小時累積雨量達 5、10、15、20、25、30、35、40、80、100、120、140、180、200 mm 等 14 個雨量門檻值，並使用三種技術得分評估模擬與實際降水預報表現，分別為 BS (Bias Score) [32]、TS (Threat Score) [33]與 FSS [34]，相關計算方式如下：

$$BS = \frac{R_{10} + R_1}{R_{10} + R_{11}} \quad (1)$$

$$TS = \frac{R_{10}}{R_{10} + R_1 + R_{11}} \quad (2)$$

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N f_i^2 + \sum_{i=1}^N O_i^2)} \quad (3)$$

TS 為預兆得分，BS 為偏倚得分，此兩種技術得分計算方式乃透過一 2×2 列聯表格（表 1）計算在不同累積降雨門檻值的情況下，觀測與預報降水達累積降雨門檻值之觀測點位數量及未超過降水門檻值之觀測點位數量，可分成四種不同的結果：觀測與預報均達該累積雨量門檻值（ R_{10} ）、觀測達但預報未達該累積雨量門檻值（ R_{11} ）、觀測未達但預報達該累積雨量門檻值（ R_1 ）、觀測與預報皆未達該累積雨量門檻值（ R_2 ）等四種。而 FSS 公式中， N 為中央氣象局之局屬與自動雨量測站點位數量， O_i 為測站降雨量觀測值， f_i 為模式預報相對應觀測站之點位預報雨量值。

TS 區間為 0~1，當 TS 越接近 1，表示模式在該雨量門檻的預報技術越好。若 TS 在 0.1 以下，表示模式對於該降雨門檻預報技術不佳，而在 0.1~0.2 區間，表示模式對於該降雨門檻值有一點預報技術；BS 大於 1 時，表示模式在該降雨門檻值有降水過度預報 (overprediction) 之情況，而小於 1 時，表示模式在該降雨門檻值有低估降水預報 (underprediction) 之情況。FSS 用來評估雨量分布與各雨量門檻值的相關性，為空間機率的觀念，FSS 區間乃在 0 與 1 之間，當 FSS 越趨近 1，代表在預報上有越高的表現，反之，當 FSS 越趨近 0，代表在預報上有越低的表現。

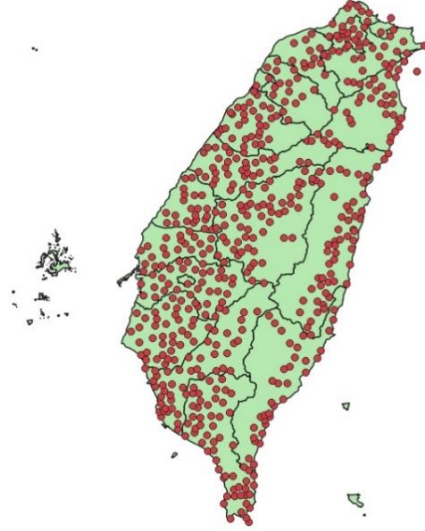


圖 2. WRF 模式降雨水校驗使用之中央氣象局局屬與觀測測站點位，共計 576 個（紅點）

表 1. 2×2 列聯表格， R_{10} 為預報與觀測皆達降雨量門檻值之測站點位數量， R_{11} 為預報未達降雨量門檻值，但觀測皆達降雨量門檻值之測站點位數量， R_1 為預報達降雨量門檻值，但觀測未達降雨量門檻值之測站點位數量， R_2 為預報與觀測皆未達降雨量門檻值之測站點位數量

降雨門檻數量	預報達門檻	預報未達門檻
觀測達門檻	R_{10}	R_{11}
觀測未達門檻	R_1	R_2

2.4 MCS 定義

本研究將自動雲體追蹤法 [35] 應用於衛星紅外線亮度溫度 (Brightness Temperature, BT)，以追蹤對流雲系統。透過該追蹤法先定義 CCSs (Cold Cloud Systems)，當衛星雲圖上顯示某雲塊之 $BT \leq 241$ K 則稱之 CCS (圖 3)。當一個 CCSs 的雲系統，其面積超過 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 且持續至少 4 小時，則為 MCS [36]。另外，為避免衛星雲圖之雲系可能為卷雲所致，故本文參考雷達回波與閃電即時觀測圖，佐證該雲系為深對流系統而非卷雲，同一時間之雷達回波與閃電即時觀測圖如第三章介紹，顯示該雲系水氣發展旺盛，並非卷雲雲系。

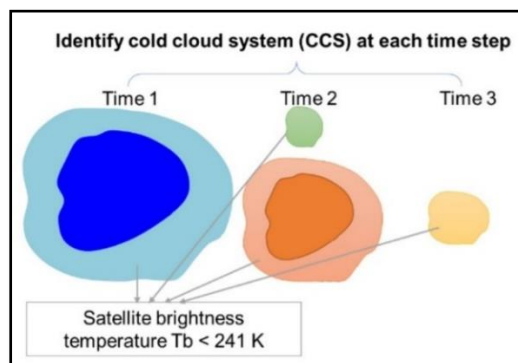


圖 3. CCS 定義與追蹤示意圖[37]

三、個案分析

3.1 綜觀天氣分析

地面天氣圖（圖 4）顯示，2021 年 5 月 29 日(00 UTC)滯留鋒面原位於臺灣北部外海，向西延伸至福建與江西一帶，隨後持續南壓通過臺灣地區，圖上可見在鋒面帶上持續有對流雲系生成。29 日臺灣地區位處鋒前暖區，風場為西南風；30 日鋒面通過臺灣地區，時序由臺灣北部開始，接連影響中南部地區。

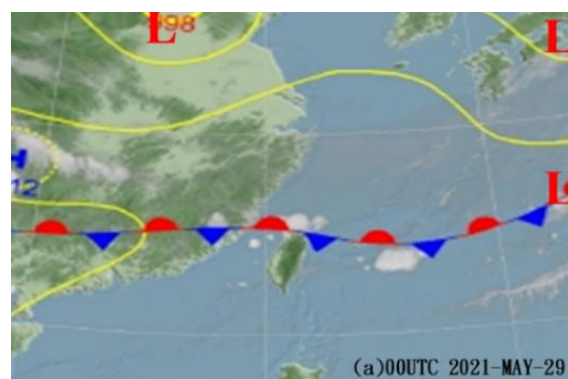
5 月 29 日 850 hPa 天氣圖（圖 5a）顯示，有一槽線位於河南至湖南一帶，臺灣地區風場為西南風，有暖平流現象，江西與廣東一帶有明顯 LLJ；700 hPa（圖 5b）顯示，槽線位於河南至湖南一帶，福建至臺灣北部地區有 LLJ，且有暖平流現象；500 hPa（圖 5c）顯示，槽線位於黃海，向西南延伸至福建一帶，東海一帶有強風區（風速 $\geq 60\text{ kt}$ ）分布；300 hPa（圖 5d）顯示，臺灣地區出現風場分流現象，另臺灣北方外海至東海一帶有強風區分布。

圖 6 顯示，5 月 30 日隨鋒面通過臺灣地區，在臺灣海峽中低層(700-500 hPa)附近出現短波槽（圖 6b,c），短波槽大致是從臺灣北邊沿著海岸線往西南延伸到臺灣中部海邊。臺灣地區位處短槽前，為西至西南向風，LLJ(850-700 hPa)將南海一帶水氣輸送至臺灣地區（圖 6a,b），配合高層(300 hPa)風場出現分流現象（圖 6d），有利高層氣流輻散，故當日環境場可說是非常有利 MCS 生成。

由紅外線衛星雲圖（圖 7）可見，臺灣地區受滯留鋒面通過影響，環境場趨於不穩定，5 月 30 日臺灣海峽有一強對流雲系發展，搭配

閃電觀測圖（圖 8）顯示，雲頂溫度低於 $-99\text{ }^{\circ}\text{C}$ (174 K)之對流中心與活躍對流區（雲頂溫度梯度大）皆伴隨有閃電，另該強對流雲系回波強度大於 45 dBZ（圖 9）並向東南擴散及移動，可見此雲系勢必為對流所致，非高層雲屬；00 UTC(08 LST)第一波強對流回波移入中部地區，而臺灣海峽可見，持續有強對流不斷生成且往東移入臺灣西半部地區；04 UTC(12 LST)南部地區有強回波($>45\text{ dBZ}$)移入，造成部分地區出現強降雨，直至 20 UTC(22 LST)後，臺灣海峽已無強回波生成移入，而中部山區與南部沿海強回波逐漸減弱。由此可見，30 日中部地區受強降雨回波影響，皆有明顯短延時強降雨；而南部地區強降雨主要集中於下午時段。

本研究採用美國太空總署 NASA/GSFC 所屬之 GES DISC 資料中心提供之衛星紅外線頻道資料(NCEP/CPC L3 half-hourly 4 km Global Merged IR V1 infrared T_b data)與中央氣象局降雨回波資料去追蹤 MCS 的生成與消散。由圖 10 可見，MCS 於 30 日 00 UTC(08 LST)生成，並通過臺灣地區往東南方向移動，搭配雷達回波圖可見 MCS 進入臺灣地區後，結構因受地形影響，04 UTC(12 LST)有減弱趨勢。然而，隨臺灣海峽仍持續有回波生成，往東南移動，移入臺灣南部地區，於 08 UTC(16 LST)MCS 主體結構明顯增強，造成南部地區出現強降雨，直至 12 UTC(20 LST)MCS 主體逐漸移出臺灣地區，除結構明顯鬆散外，對照降雨回波也有減弱趨勢。



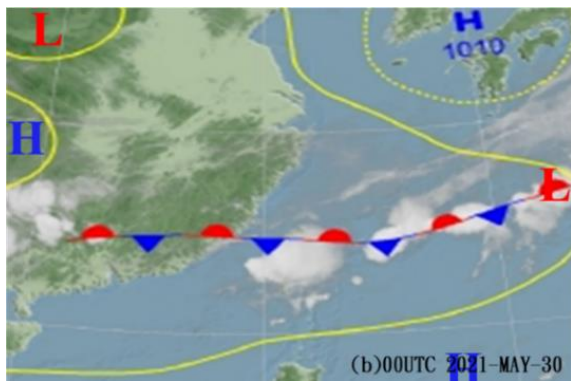


圖 4. 地面天氣圖（疊加雲圖）：(a)2021 年 5 月 29 00 UTC；(b)2021 年 5 月 30 日 00 UTC（摘自中央氣象局）

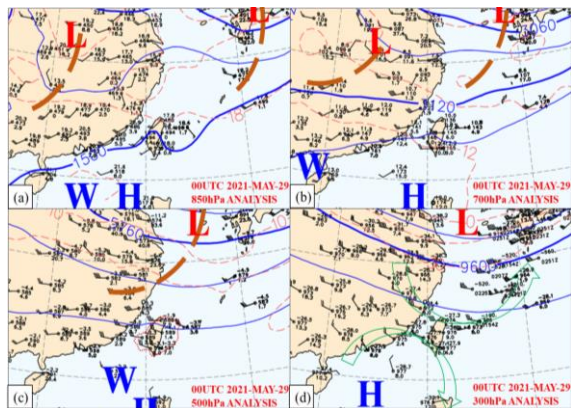


圖 5. 2021 年 5 月 29 日 00 UTC 高空天氣圖：(a)850 hPa；(b)700 hPa；(c)500 hPa；(d)300 hPa，棕色粗虛線為槽線位置，綠色箭頭為風場分流方向（摘自中央氣象局）

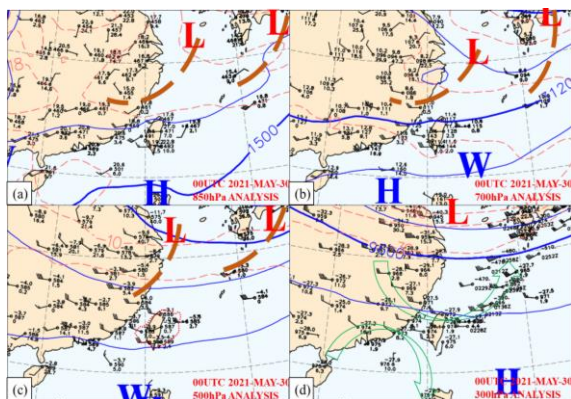


圖 6. 2021 年 5 月 30 日 00 UTC 高空天氣圖：(a)850 hPa；(b)700 hPa；(c)500 hPa；(d)300 hPa。棕色粗虛線為槽線位置，綠色箭頭為風場分流方向（摘自中央氣象局）

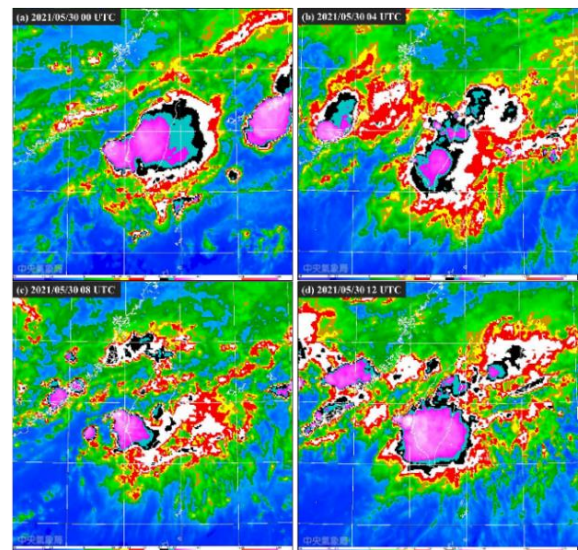


圖 7. 2021 年 5 月 30 日紅外線衛星雲圖：(a)00 UTC；(b)04 UTC；(c)08 UTC；(d)12 UTC。（摘自中央氣象局）

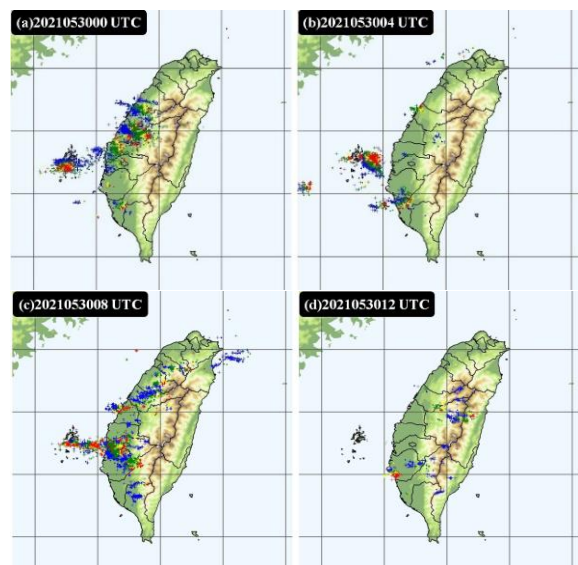
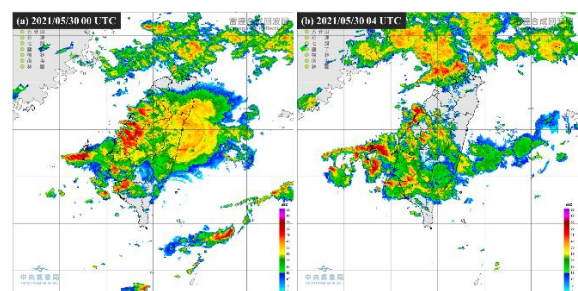


圖 8. 2021 年 5 月 30 日閃電即時觀測圖：(a)00 UTC；(b)04 UTC；(c)08 UTC；(d)12 UTC（摘自中央氣象局）



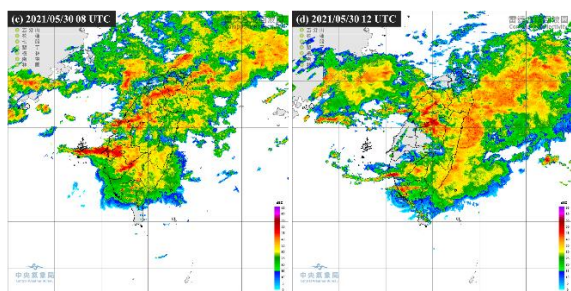


圖 9. 2021 年 5 月 30 日雷達回波圖。(a)00 UTC；(b)04 UTC；(c)08 UTC；(d)12 UTC（摘自中央氣象局）

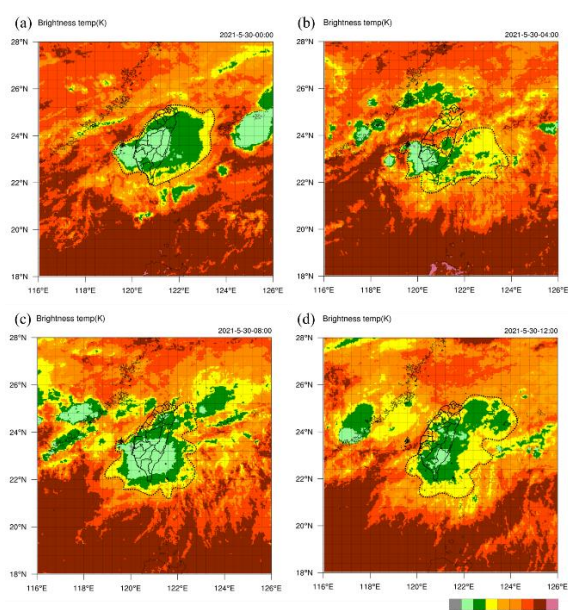


圖 10. 2021 年 5 月 30 日衛星紅外線頻道資料 (NCEP/CPC L3 half-hourly 4 km Global Merged IR V1 infrared Tb data)之亮度溫度圖。(a)00 UTC；(b) 04 UTC；(c)08 UTC；(d)12 UTC。圖中黑虛線為 MCS 輪廓

3.2 測站資料分析

2021 年 5 月 30 日臺灣地區受到滯留鋒面伴隨 MCS 通過影響，臺灣西半部地區部分地區均有出現大陣（雷）雨，短短 3 小時測站雨量竟達 100 mm 以上，達豪雨等級之降雨量。由於 MCS 首要影響地區為彰化縣、嘉義縣與雲林縣等三區域，故本研究個別選取三個區域之最大日降水量測站，分別有：秀水（彰化縣）、太保（嘉義縣）及蔦松（雲林縣）等三個測站（圖 11），以分析 MCS 通過時，測站之氣壓、風速及降雨量變化。

測站資料分析：29 日 16 UTC（30 日 00 LST）因低層(850-700 hPa)LLJ 加強地面輻合及提供豐富水汽，且 MCS 於臺灣海峽生成，秀水（圖 12）、太保（圖 13）及蔦松（圖 14）測站氣壓有下降趨勢，秀水測站於 19 UTC（30 日 03 LST）氣壓值最低 1001.8 hPa、太保測站於 19 UTC（30 日 03 LST）最低氣壓為 1002.6 hPa，而蔦松測站最低氣壓值出現在 20 UTC（30 日 04 LST），為 1003.6 hPa，後於 21 UTC（30 日 05 LST），隨 MCS 移入後，三站氣壓值逐漸回升；風場部分，30 日 09 UTC（17 LST）以前，三站的風向皆為南向風，且在強降雨前風速皆較強；雨量部分，可見秀水測站 29 日 22 UTC（30 日 06 LST）至 23 UTC（30 日 07 LST）僅僅一小時就降雨超過 100 mm，而太保及蔦松測站主要強降雨在 29 日 06 UTC（30 日 14 LST）至 09 UTC（30 日 17 LST），降雨量皆達豪雨標準。

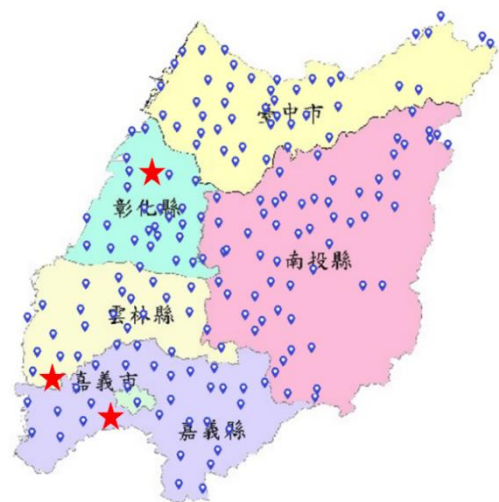


圖 11. 中央氣象局測站分布圖。藍色點位分別代表一個測站，而秀水（彰化縣）、太保（嘉義縣）及蔦松（雲林縣）等三個測站另外用紅色星點表示

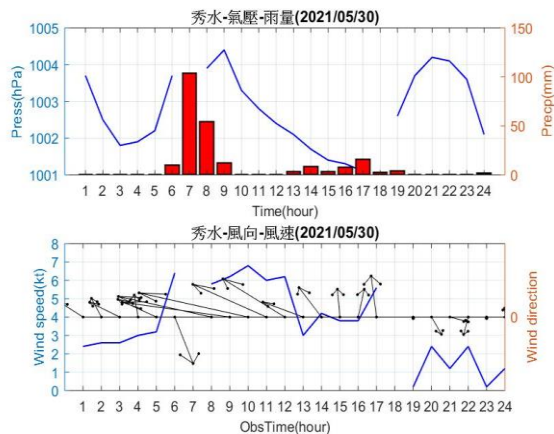


圖 12. 2021 年 5 月 30 日秀水（彰化縣）測站氣壓 (hPa)、降雨量(mm)與風速(kt)之逐時變化。橫軸為時間(LST)，07 與 18 LST 缺值，故無資料顯示

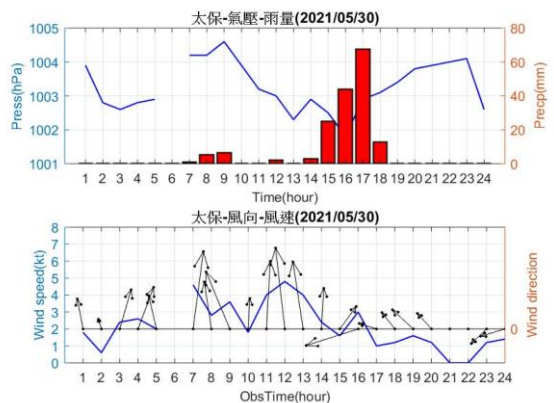


圖 13. 2021 年 5 月 30 日太保（嘉義縣）測站氣壓 (hPa)、降雨量(mm)與風速(kt)之逐時變化。橫軸為時間(LST)，06 LST 缺值，故無資料顯示

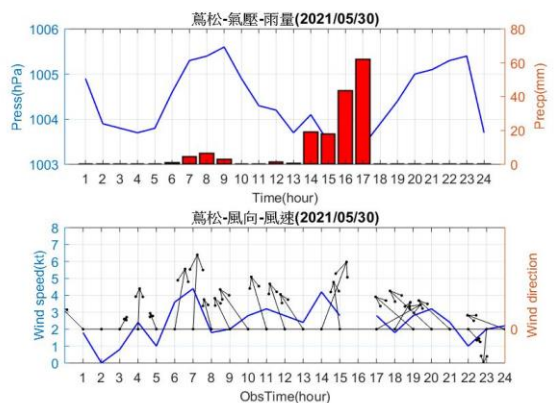


圖 14. 2021 年 5 月 30 日蔦松（雲林縣）測站氣壓

(hPa)、降雨量(mm)與風速(kt)之逐時變化。橫軸為時間(LST)，16 LST 缺值，故無資料顯示

四、模擬結果與降水校驗探討

本章為瞭解降水分布型態相關性之預報特性，將透過三種不同降水校驗方式（FSS、TS 與 BS），以模擬與觀測資料做比對，評估 WRF 模式使用 CPMs 模擬 MCS 個案在臺灣地區的降水表現。

為了討論 WRF 模式使用 CPMs 預報大雨等級以上之預報技術，故將剔除測站 24 小時累積雨量未達 80 mm 之點位，再將其他剩餘測站點位（161 個）進行降雨技術評估。

4.1 綜觀環境模擬分析 (D01; 4 公里網域)

比較 WRF 模式預報地面與高空顯示，5 月 30 日 00 UTC(08 LST)鋒面位置（圖 15）與實際大致相符。850 hPa 有一槽線由東海向西南延伸至臺灣北部，而臺灣海峽上出現另一短波槽向東移動，臺灣海峽中部與臺灣中部地區出現 LLJ（圖 16a）；700 hPa 有一槽線由東海向西南延伸至臺灣北部外海，而臺灣海峽上出現另一短波槽向東移動，臺灣海峽與臺灣西半部地區皆出現 LLJ（圖 16b）；500 hPa 有一槽線由東海向南延伸至臺灣海峽北部，另一槽線位於臺灣東部外海（圖 16c），強風區位於臺灣北部外海；300 hPa 顯示，臺灣海峽南部出現氣流分流之特徵（圖 16d），有利高層輻散。綜觀以上空層特徵，皆與中央氣象局綜觀天氣圖大致相似，有利 MCS 生成。不過，在實際 850 hPa（圖 6a）顯示，臺灣海峽上有出現大於 28 kt 的風標，但在模擬上（圖 16a）卻稍微偏弱，主要原因可能是因為使用之初始場資料 (NCEP/FNL) 的解析度較低，無法解析小區域範圍的強風帶，故造成初始場上空的風速較小。

模擬之雷達回波圖（圖 17）顯示，00 UTC(08 LST)臺灣中北部外海有強對流發展；04 UTC(12 LST)強對流(>45dBZ)向東南方向移入臺灣中部地區(台中、彰化、南投與雲林)，而臺灣北部對流減弱；08 UTC(16 LST)臺灣海峽中部有輻合區，仍有強對流發展，持續移入臺灣中部地區，臺灣中部地區（彰化與南投）有強對流；12 UTC(20 LST)臺灣海峽中部對流

減弱，強對流範圍減少，向南移動，臺灣中部地區（彰化、南投、雲林與嘉義）仍有強對流發展。整理而言，模擬之回波走向與實際一致，皆隨鋒面通過，回波往東南方向移動，且臺灣海峽上皆有新回波生成並移入臺灣西半部地區，符合 MCS 的內部結構多對流性之特徵，與實際一致，不過，在回波位置的部分，模擬比起實際情況，因 00 UTC(08 LST)中低層 700-850 hPa 出現的短波槽建立位置偏西，故造成回波有延遲移入的情況；回波強度部分，可見 00 UTC(08 LST)進入臺灣中部地區的第一波降水回波強度較實際強且範圍大，故在中部沿海一帶的累積降雨量可能會有高估情況，而下半天的部分，08~12 UTC 在台北與新北地區的降水回波較實際強，且範圍大，故也可能會有降雨高估情況。

4.2 模式降水校驗

2021 年 5 月 30 日臺灣地區觀測日累積降水量（圖 18a）達 150 mm 以上者，計有桃園市、台中市、雲林縣、彰化縣、嘉義縣與南投縣等多處，而模式的部分（圖 18b）為新北市、台中市、彰化縣、高雄山區與南投縣等地區，強降雨的分布位置大致上符合實際情況，不過，由圖上可見，模擬之累積降雨量在新北市、台中與彰化地區沿海一帶有高估情況，而嘉義地區沿海則是低估情況。搭配模擬之雷達回波圖（圖 17b）可見，在 MCS 進入中部地區後，其伴隨之強降水回波位置有偏南南東方向，與實際回波往東南方向有些差異，且回波強度甚強，故導致彰化沿海一帶累積之強降雨量出現高估情況。

本次降水校驗時段為 2021 年 5 月 30 日全日，共計 24 小時，測站點位共計 576 個。由日累積降雨量區分表（表 2）可見，0~80 mm 占比 59%，共計 338 個測站；80~200 mm 占比 39%，共計 216 個測站； ≥ 200 mm 占比 2%，共計 12 個測站，表 2 顯示，雖然該日達豪雨等級的測站占比並不高，不過達大雨等級以上的測站仍有達 41%。由 BS 技術得分與相對應門檻值之相關圖（圖 19）顯示，在 BS 方面，門檻值 40 mm 以下，預報得分為 0.9~1.0；門檻值 40~140 mm，預報得分為 0.8~0.9；門檻值 180 mm，預報得分為 1.7；門檻值 200 mm，預報得分為 2.6，顯示門檻值 180 mm 已

出現過度預報情況，而在 140 mm 以下技術得分皆與理想值(BS=1)較接近；由 TS 技術得分與相對應門檻值之相關圖（圖 20）顯示，在 TS 方面，門檻值 40 mm 以下，預報得分為 0.7~0.9；門檻值 40~140 mm，預報得分為 0.3~0.7，隨門檻值數值越大，分數越低；門檻值 180 mm，預報得分為 0.1；門檻值 200 mm，預報得分為 0.0，顯示門檻值 180、200 mm 已無預報技術，而對於大雨（累積雨量達 80 mm/24 hr）而言，模式模擬在 80~140 mm 仍具有預報能力。BS 在門檻值 80~140 mm，預報得分為 0.8~0.9，相當接近 1，具備預報大雨的能力，但由於預報區與觀測降兩區位置有部分差異，故 TS 在 100~140 mm 呈現之預報能力有相對較差情況(0.3~0.4)，不過仍具備預報大雨的能力。另外，為針對大雨等級以上降雨量進行預報能力評估，且減少點對點的校驗過程，因小的位移誤差而導致 TS 與 BS 技術得分有較低情況，我們使用 FSS 技術得分改善此情況。校驗結果顯示（表 3），針對日累積雨量達大雨等級之測站，其預報與觀測有相當接近的降水分布(0.82~0.85)，尤其是達豪雨標準之測站（累積雨量達 200 mm/24 hr），有最高分之表現 (FSS=0.85)。

另外針對降雨量大於 80 mm 的測站點位（161 個）進行降雨技術評估後，BS（圖 21）顯示門檻值 80、100、120 mm，預報得分為 0.6、0.7 與 0.7；門檻值 140 mm，預報得分為 0.8；門檻值 180 mm，預報得分為 1.5；門檻值 200 mm，預報得分為 2.4，顯示門檻值 140 mm 最接近 1，其預報能力最為理想，而門檻值 180 與 200 mm 有過度預報，偏離理想值(BS=1)；TS（圖 22）顯示門檻值 80、100、120、140 mm，預報得分為 0.6、0.5、0.4 與 0.3，有預報技術；門檻值 180、200 mm，預報得分皆為 0.1，無預報技術；FSS 顯示，預報與觀測也有相當好的表現（表 3）。

透過降水校驗可知，在 TS、BS 部分顯示，不論是針對全台 576 個測站點位或是日雨量達大雨等級的測站點位，模式皆有能力進行預報，而針對大雨的部分，門檻值在 100、120、140 mm 皆有預報技術得分，但是 140 mm 以上得分較低，原因可能在日雨量達 140 mm 以上的測站數量比例較低。然而，透過 FSS 的部分，改善了減少點對點的位移誤差，FSS 校驗結果顯示，預報與觀測降水的分布有相當接近

的情況，且針對豪雨的部分仍具有相當程度的預報能力。

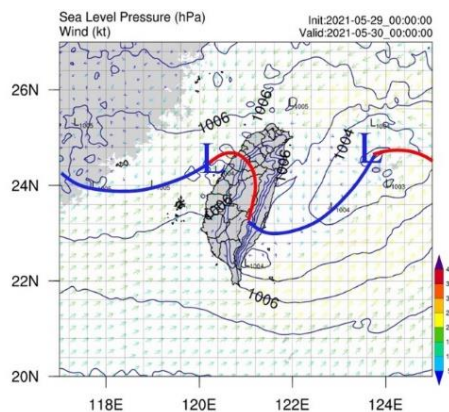


圖 15. WRF 模擬結果之地面天氣圖（預報時間：2021 年 5 月 30 日 00 UTC）；藍色等值線為海平面氣壓值(hPa)；風標單位為 kt，色階為風速大小；紅藍相接粗實線為鋒面位置

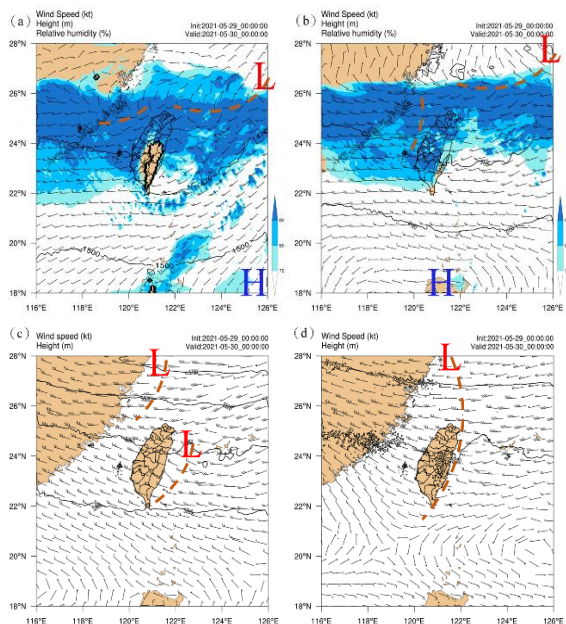


圖 16. WRF 模擬結果之高空天氣圖（預報時間：2021 年 5 月 30 日 00 UTC）：(a)850 hPa；(b) 700 hPa；(c) 500 hPa；(d) 300 hPa；黑色等高線為重力為高度，單位為百帕(hPa)；棕色粗虛線為槽線位置；風標單位為 kt

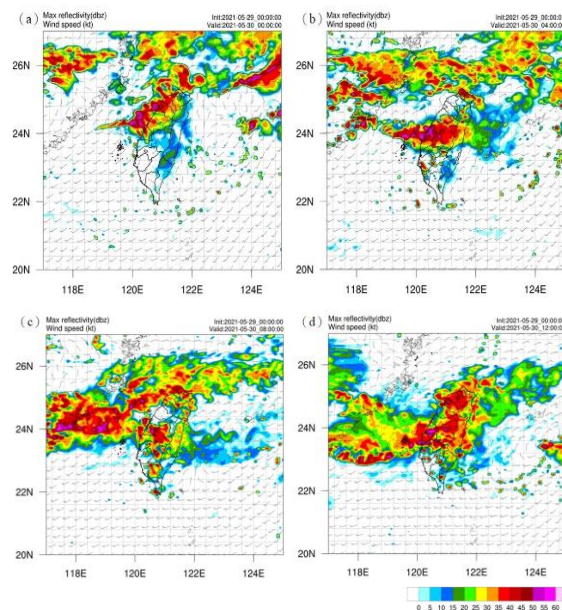


圖 17. WRF 模擬結果之雷達回波圖（預報時間：2021 年 5 月 30 日）：(a) 00 UTC；(b) 04 UTC；(c) 08 UTC；(d) 12 UTC；風標單位為 kt，色階為回波大小(dBZ)

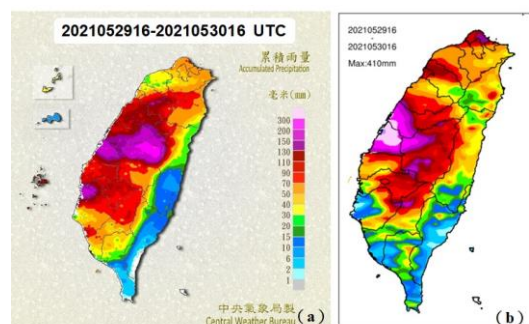


圖 18. 2021 年 5 月 30 日累積雨量圖(mm/24 hr)：(a)中央氣象局實際日累積雨量(00-24 LST)；(b)WRF 模擬之日累積雨量（預報時間：00-24 LST）

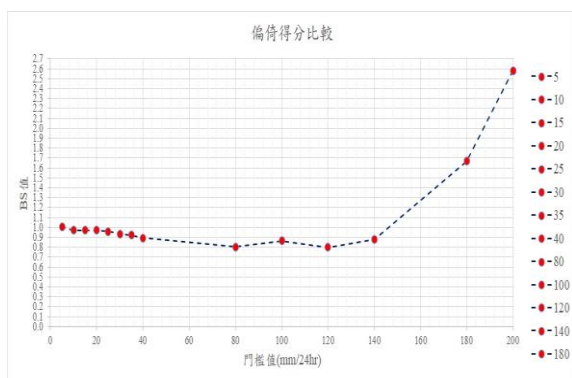


圖 19. 模式在模擬 2021 年 5 月 30 日臺灣地區 24 小時(00-24 LST)降水預報之 BS 技術得分折線圖(校驗點位為全台 576 個測站);橫軸為雨量門檻值,單位為公釐(mm);左邊縱軸為技術得分值;右邊縱軸為設定之雨量門檻值,對照圖中的每一個點

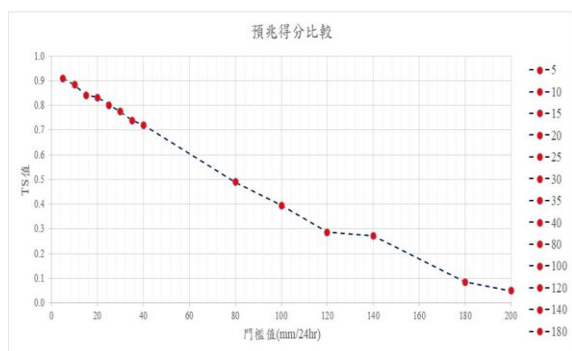


圖 20. 模式在模擬 2021 年 5 月 30 日臺灣地區 24 小時(00-24 LST)降水預報之 TS 技術得分折線圖(校驗點位為全台 576 個測站);橫軸為雨量門檻值,單位為公釐(mm);縱軸為技術得分值

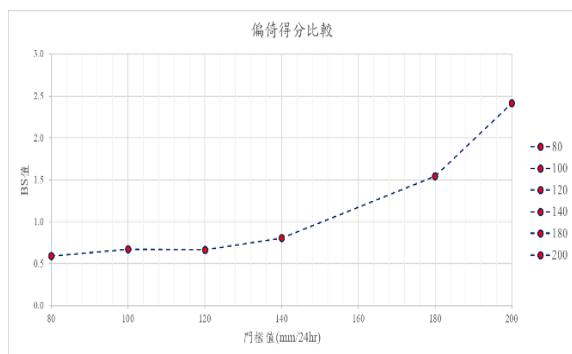


圖 21. 模式在模擬 2021 年 5 月 30 日臺灣地區 24 小時(00-24 LST)降水預報之 BS 技術得分折線圖(校驗點位為達大雨標準之測站);橫軸為雨量門檻值,單位為公釐(mm);縱軸為

技術得分值

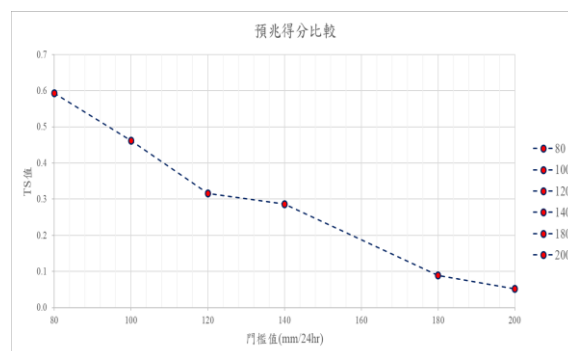


圖 22. 模式在模擬 2021 年 5 月 30 日臺灣地區 24 小時(00-24 LST)降水預報之 TS 技術得分折線圖(校驗點位為達大雨標準之測站);橫軸為雨量門檻值,單位為公釐(mm);縱軸為技術得分值

表 2. 2021 年 5 月 30 日測站日累積降雨區間表

降雨區間	0~80	80~200	≥200
數量	338	226	12
百分比	59 %	39 %	2 %

表 3. 模式在模擬 2021 年 5 月 30 日臺灣地區 24 小時(00-24 LST)降水預報之 FSS 技術得分表(校驗點位僅針對達大雨標準之測站)

Precipitation threshold (mm)	24 h FSS
80	0.83
100	0.83
120	0.82
140	0.82
180	0.83
200	0.85

五、結論與未來展望

2021 年 5 月 30 日鋒面通過臺灣地區,伴隨之 MCS 造成臺灣局部地區出現短延時強降雨情況,多數測站日累積降水量達到豪雨等級,肇致部分地區出現降雨災害。當日低層(850-700 hPa)出現暖濕空氣平流,將南海水氣引導至臺灣地區,搭配 LLJ 致使臺灣海峽至臺灣地區容易有對流生成,而高層配合風場有輻散,顯示綜觀環境皆有利 MCS 生成與發展。

本研究利用預報技術得分(BS、TS 與 FSS),評估 WRF 模式使用 CPMs(4 km)對於

2021 年 5 月 30 日 24 小時之降水預報技術，以了解降雨校驗結果。模擬結果顯示，預報的部分在綜觀環境上與實際相符，以利 MCS 生成，且大致有模擬出最大降雨區域及強降雨分布情況，不過，由於短波槽(850-700 hPa)建立位置偏西，且持續時間較長，故造成 MCS 有延遲現象，影響中部地區降水時間延長。BS、TS 技術得分皆顯示，模式對於大雨具有預報能力，但因為達豪雨等級的測站點為過少，對於豪雨的技術得分較低，但透過 FSS 的校驗，改善此情況，顯示模式模擬之降水分佈與實際有相當接近的情況，且對於站比較低之測站（達豪雨等級）而言仍有一定的預報能力。

以上利用不同的降水技術得分，了解 CPMs 在預報大雨，甚至豪雨的部分皆有相當程度的預報能力。由於本研究僅利用 WRF 模式進行 2021 年 5 月 30 日 MCS 造成臺灣地區出現大雨，甚至豪雨之初步預報，故無法針對此次個案做最佳化之參數調整。未來期望使用 CPMs 進行更多 MCS 個案之模擬，並分析其垂直剖面的動力機制，除驗證 CPMs 在其他個案的實用性外，也以提升對於 MCS 之預報能力。

誌謝

感謝所有指導與協助本研究在對流允許模式個案模擬之相關人員，僅此表達誠摯謝意。

參考文獻

- [1] Yang, Q., Houze, Jr. R. A., Leung, L. R., and Feng, Z. "Environments of long-lived mesoscale convective systems over the central United States in convection permitting climate simulations," *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 122, pp. 13 288–13 307, 2017.
- [2] Fritsch, J. M., and Forbes, G. S., "Mesoscale convective systems. Severe Convective Storms," *Meteor. Monogr.*, No. 50, Amer. Meteor. Soc., pp. 323-356, 2001.
- [3] Houze, R. A., Jr., "Mesoscale convective systems," *Rev. Geophys.*, Vol. 42, pp. 1-43, 2004.
- [4] Cotton, W.R., Bryan, G., and van den Heever, S., *Storm and Cloud Dynamics*, 2nd edition. Academic Press, Elsevier Publishers, The Netherlands, 820 pp, 2011.
- [5] Houze, R. A., Jr., *Cloud Dynamics*, 2nd Ed., Elsevier/Academic Press, Oxford, 432 pp, 2014.
- [6] Markowski, P., and Richardson, Y., *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*, Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 407 pp, 2010.
- [7] Houze, R. A., Jr., Smull, B. F., and Dodge, P., "Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 118, pp. 613-654, 1990.
- [8] Leary, C. A., and Houze, R. A., Jr., "The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster," *J. Atmos. Sci.*, Vol 36, pp. 437-457, 1979.
- [9] 徐文達、林沛練，"伴隨敏督利颱風的強烈西南氣流引發豪大雨之個案探討"，天氣分析與預報研討會論文彙編(94)，第 526-531 頁，2004。
- [10] Jou, B. J.-D., Lee, W.-C, Johnson, R. H., "An overview of SoWMEX/TiMREX operation," *Global Monsoon System* edited by CP Chang, Scientific World Publishing, pp. 214-232, 2011.
- [11] 宋偉國、陳泰然、郭英華，"低層噴流和中尺度對流系統間的相關性研究"，大氣科學，第 25 期，第 211-234 頁，1997。
- [12] Feng, Z., Leung, L. R., Houze, R. A., Hagos, S., Hardin, J., Yang, Q., Han, B. and Fan, J., "Structure and evolution of mesoscale convective systems: Sensitivity to cloud microphysics in convection-permitting simulations over the United States," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol. 10, pp. 1470-1494, 2018.
- [13] Lorenz, E. N., "The predictability of a flow which possesses many scales of motion," *Tellus*, Vol. 21, pp. 289-307, 1969.
- [14] Lim, K.-S. S., Hong S.-Y, Yoon, J.-H, and Han, J., "Simulation of the Summer Monsoon Rainfall over East Asia Using the NCEP GFS Cumulus Parameterization at Different Horizontal Resolutions," *Weather and Forecasting*, Vol. 29, pp. 1143-1154, 2014.
- [15] 彭欽旋，"外核海表熱通量對於颱風快速增強的影響"，國立臺灣大學大氣科學系，碩士論文，90 頁，2018。
- [16] Mittermaier, M., Roberts, N., and Thompson S. A., "A long-term assessment of precipitation forecast skill using the

- Fractions Skill Score. Meteor., Appl., Vol. 20, pp. 176-186, 2013.
- [17] Schwartz, C.-S., and Coauthors, "Next-day convection-allowing wrf model guidance: a second look at 2-km versus 4-km grid spacing," Mon. Wea. Rev., Vol. 137, No. 10, pp. 3351-3372, 2009.
- [18] Weisman, M.; Skamarock, W.; Klemp, J., "The Resolution Dependence of Explicitly Modeled Convective Systems," Mon. Weather Rev., Vol. 125, pp. 527-548, 1997.
- [19] Khairoutdinov, M. F. and Randall, D. A., "A cloud resolving model as a cloud parameterization in the NCAR community climate system model: preliminary results," Geophys. Res. Lett., Vol. 28, pp. 3617-3620, 2001.
- [20] Li, Y., Li, Z., Zhang, Z., Chen, L., Kurkute, S., Scaff, L., and Pan, X., "High-Resolution Regional Climate Modeling and Projection over Western Canada using a Weather Research Forecasting Model with a Pseudo-Global Warming Approach," Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., Vol. 23, pp. 4635-4659, 2019.
- [21] Prein, A. F., and Coauthors, "A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges," Rev. Geophys., Vol. 53, pp. 323-361, 2015.
- [22] Zhu, K., and Xue, M., "Evaluation of WRF-based convection-permitting multi-physics ensemble forecasts over China for an extreme rainfall event on 21 July 2012 in Beijing," Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 33, pp. 1240-1258, 2016.
- [23] Clark, P., Roberts, N., Lean, H., Ballard, S. P., and Charlton-Perez, C., "Convection-permitting models: A step-change in rainfall forecasting", Meteorological Applications, Vol. 23, pp. 165-181, 2016.
- [24] Squitieri, B.J. and Gallus, W.A., "On the forecast sensitivity of MCS cold pools and related features to horizontal grid spacing in convection-allowing WRF simulations," Weather and Forecasting, Vol. 35, pp. 325-346, 2020.
- [25] Somses, S.; Bopape, M.-J.M.; Ndarana, T.; Fridlind, A.; Matsui, T.; Phaduli, E.; Limbo, A.; Maikhudumu, S.; Maisha, R.; Rakate, E., "Convection Parametrization and Multi-Nesting Dependence of a Heavy Rainfall Event over Namibia with Weather Research and Forecasting (WRF) Model," Climate, Vol. 8, No. 10, pp. 112, 2020.
- [26] Kirthiga, S.; Narasimhan, B., and Balaji, C., "A multi-physics ensemble approach for short-term precipitation forecasts at convective permitting scales based on sensitivity experiments over southern parts of peninsular India," J. Earth Syst. Sci., Vol. 130, pp. 1-29, 2021.
- [27] Kopparla, P., Fischer, E. M., Hannay, C., and Knutti, R., "Improved simulation of extreme precipitation in a high-resolution atmosphere model," Geophys. Res. Lett., Vol. 40, pp. 5803-5808, 2013.
- [28] Sun, X., Xue, M., Brotzge, J., McPherson, R. A., Hu, X.-M., and Yang, X.-Q., "An evaluation of dynamical downscaling of Central Plains summer precipitation using a WRF-based regional climate model at a convection-permitting 4 km resolution," Journal of Geophysical Research-Atmospheres, Vol. 121(23), pp. 13801-13825, 2016.
- [29] Morrison, H., Curry, J.A. and Khvorostyanov, V. I., "A new doublemoment microphysics scheme for application in cloud and climate models. Part 1: Description," J. Atmos. Sci., Vol. 62, pp. 1665-1677, 2005.
- [30] Hong, S.-Y., Noh, Y., and Dudhia, J., "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes," Mon. Wea. Rev., Vol. 134, pp. 2318-2341, 2006.
- [31] Chen, F., and Dudhia, J., "Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation," Mon. Wea. Rev., Vol. 129, pp. 569-585, 2001.
- [32] Wilks, D. S., Statistical methods in the atmospheric sciences, 3rd Edition. Academic Press, 704 pp, 2011.
- [33] Clark, A. J., Gallus, W. A., and Weisman, M. L., "Neighborhood-based verification of precipitation forecasts from convection-allowing NCAR WRF model simulations and the operational NAM," Weather and Forecasting, Vol. 25(5), pp. 1495-1509, 2010.
- [34] Roberts, N. M., and Lean, H. W., "Scale-selective verification of rainfall

- accumulations from high-resolution forecasts of convective events,” *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 136(1), pp. 78-97, 2008.
- [35] Hagos, S., Feng, Z., McFarlane, S., and Leung, L. R., “Environment and the lifetime of tropical deep convection in a cloud-permitting regional model simulation,” *J. Atmos. Sci.*, Vol. 70, pp. 2409-2425, 2013.
- [36] Kane, R. J., Chelius, C. R. and Fritsch, J. M., “Precipitation characteristics of mesoscale convective weather systems,” *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 26, pp. 1345-1357, 1987.
- [37] Feng Z., and Coauthors, “A Global High-resolution Mesoscale Convective System Database using Satellite-derived Cloud Tops, Surface Precipitation, and Tracking,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 126, No. 8, 2021.