

由梅雨期間中小尺度對流系統 對臺灣南部劇烈降水之個案研究

侯昭平 陳智昇

國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘要

2020年梅雨鋒面於5月19日至24日影響臺灣地區，尤其以5月22日在臺灣西南部平原地區最大累積雨量達 415.5毫米，山區更高達 616.5毫米，已超越中央氣象局大豪雨標準。有別於典型梅雨鋒面，22日臺灣主要受到西南氣流增強影響，中尺度對流系統沿著盛行風，配合著大量的水氣通量與高相當位溫，由臺灣海峽南部不斷地移入臺灣西南部陸地，造成高屏地區不斷有淹水災情。

本研究利用NCDR提供的NCEP CFSR再分析資料、中央氣象局觀測資料及數值模擬，對於5月22日劇烈降水及水氣通量進行討論，藉以瞭解西南氣流的來源與中小尺度對流系統的成因。研究結果顯示，大尺度的大氣運動促使五月中旬的東亞夏季季風爆發，而孟加拉灣的超級氣旋風暴安攀(Amphān)建立所誘發的西南氣流，使南海地區西南風增強、水氣量增多，為臺灣5月下旬的梅雨季提供大量的水氣來源。大量的水氣來源配合著中層500 hPa槽線前緣的正渦度區，以及高層200 hPa南亞高壓的輻散場，使對流系統發展旺盛，甚至激發出連續性的中小尺度對流系統及飆線。

透過數值模擬發現，臺灣西南部的鋒面暖區中，地面風切線的位置與雨量大小較為相關，而鋒面的冷區，水氣含量雖然較低，但在沿海及山區都有雨量相對較大值，顯示地形對於鋒面冷區的降雨影響較關鍵。最後透過雷達回波通過地形前後的平均值分析發現，山脈後方的雨量開始逐漸隨著高度增加而減少。當海拔高於2000公尺的高山時，背風側雨量與水氣銳減，顯示地形效應對於水氣有明顯的阻擋作用。

關鍵字：梅雨鋒面、西南氣流、水氣通量、中小尺度對流系統、地形效應

1. 前言

2020年梅雨鋒面於5月19日至24日影響臺灣地區，由於鋒面徘徊臺灣地區近一週時間，並伴隨著西南氣流的增強，除臺灣東部地區外，西部地區由北至南都有明顯的降雨。主要的災情發生於南部低窪地區，從22日清晨透過衛星雲圖可清楚觀察到，臺灣西南外海存在中尺度對流複合體(Mesoscale Convective Complex, MCC)及中尺度對流系統(Mesoscale Convective System, MCS)不斷在海上發展(圖 1(a-c))，強回波伴隨著高密度的閃電，隨著西南氣流不間斷

地移入臺灣南部陸地，最大時雨量超過 60 毫米，超過當地淹水警戒值，短時間強降雨為本次淹水的主因。

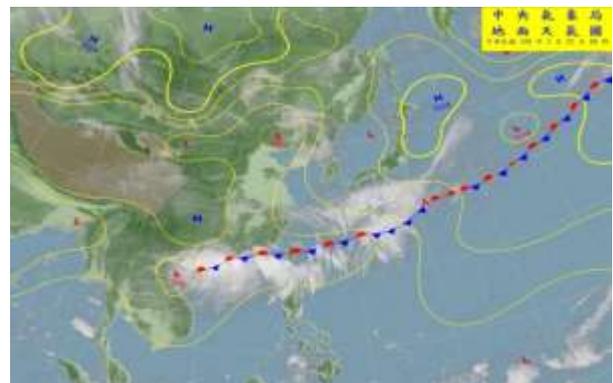


圖 1(a) 5月22日地面天氣圖。

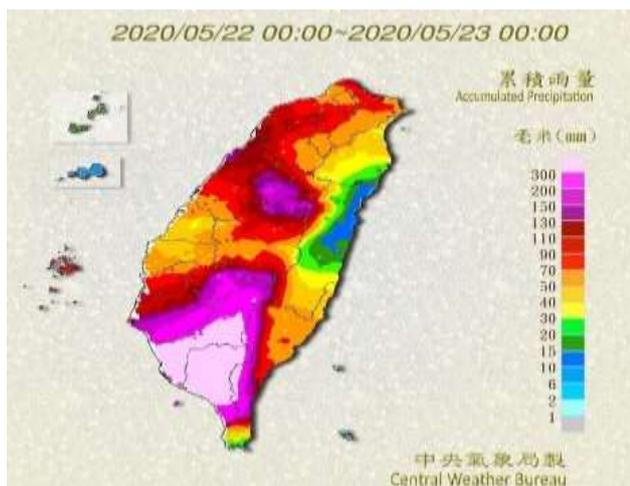


圖 1(b) 5 月 22 日累積雨量圖。

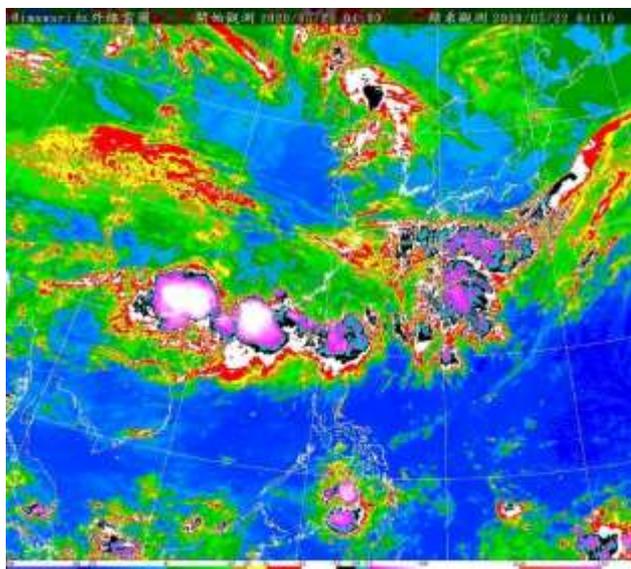


圖 1(c) 5 月 22 日 0400 LST 衛星雲圖。

2. 研究方法與資料來源

為瞭解造成中南部劇烈降水的原因，首先利用大尺度資料分析梅雨發生前後的綜觀環境演變，搭配衛星遙測資料、雷達回波等觀測資料，探討梅雨期間的水氣變化，最後，利用 WRF 數值模擬探討當日造成臺灣西南部地區劇烈降水生成的長距離水氣傳輸的主要原因，及水氣通量對於降雨物理機制，藉以討論隨著時間演進的動力及熱力過程。

NCEP-FNL Data 的初始場，時間為 2020 年 5 月 20 日 12 UTC 至 5 月 23 日 18 UTC，共 78 小時進行模擬。在 WRF 模擬個案發生的過程，先利用水氣通量分析臺灣周圍的水氣輸送

過程，再透過整體垂直水氣傳輸(Integrated Water Vapor Transport, IVT)及整體垂直水氣量(Integrated Water Vapor, IWV)，用以瞭解「孟加拉灣的水氣是否對於臺灣西南部強降雨是否有直接關聯」。水氣通量相關公式如下：

$$\vec{Q} = q \times \sqrt{(u^2 + v^2)}$$

其中 Q 是水氣通量、 q 是比濕、 u 是緯向風風速、 v 是經向風風速。

根據 Dacre et al.(2014)提到，因為 500 hPa 以上的水氣傳輸僅對網格的總貢獻很小($\sim 1\%$)，因此本文計算 IWV 及 IVT 的過程中只積分到 500 hPa。公式如下：

$$IWV = \frac{1}{g} \int_{sfc}^{500 \text{ hPa}} q dp \quad (1)$$

$$IVT = \frac{1}{g} \int_{sfc}^{500 \text{ hPa}} q \vec{V} dp \quad (2)$$

其中 g 為重力加速度，sfc 為地面氣壓， p 為氣壓， q 為比濕， \vec{V} 為水平風向量。

3. 研究結果分析與討論

3.1 觀測資料分析

3.1.1 季內震盪及南亞天氣分析

國外學者(Roman-Stork and Subrahmanyan, 2020)分析發現，孟加拉灣的安攀(Amphian)氣旋是促使 2020 年東亞季風肇始的關鍵條件。在氣旋發展前，開爾文波(Kelvin Wave)到達印度洋的赤道地區，再加上「馬登-朱利安振盪(Madden-Julian Oscillation, MJO)」的位置由 4 月底的「相位 3」移動至 5 月初的「相位 4」(圖 2)，建立了印度洋地區的赤道西風。在開爾文波及 MJO 的交互作用下，安攀氣旋於 5 月 18 日生成。隨著氣旋北上進入孟加拉灣，氣旋外圍風速較強的西南風挾帶著孟加拉灣的水氣，越過中南半島往大陸華南、南海地區輸送

，成為梅雨鋒面水氣的來源。

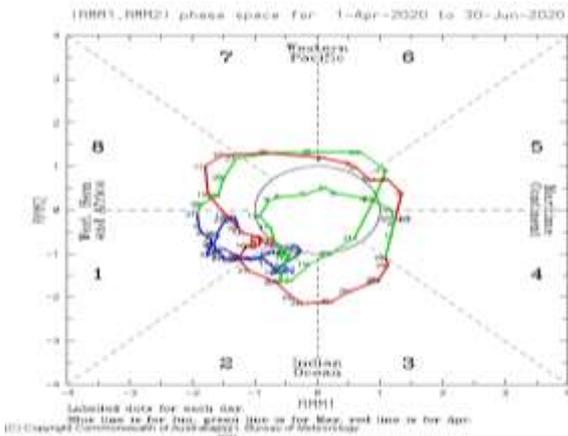


圖 2 MJO 相位監測圖(圖中線條顏色代表月份，紅色 4 月、綠色 5 月、藍色 6 月；伴隨著線條的數字為日期；大數字 1-8 為 MJO 的相位)(資料來源：澳洲氣象局)。

3.1.2 再分析場綜觀尺度分析

透過國家災害防救科技中心所提供的美國 NCEP Climate Forecast System Reanalysis(CFSR)再分析場資料發現，5 月 22 日臺灣底層大氣存在著風向不連續的滯留鋒，在 850 hPa 又有高相當位溫及高水氣通量從南海地區通過臺灣，為對流發展提供良好的水氣來源。500 hPa 因槽線東移使正渦度增加，配合著高層 200 hPa 的分流加強了高層輻散(圖 3(a-d))。在底層輻合與高層輻散的相互配合下，對流系統發展十分旺盛。

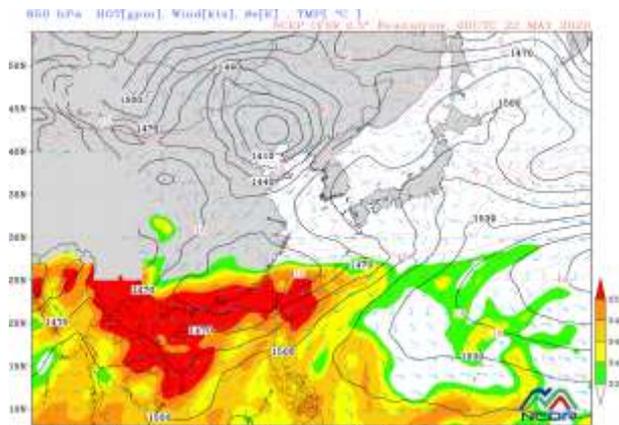


圖 3(a) NCEP CFSR 5 月 22 日 500 hPa 相當位溫圖。

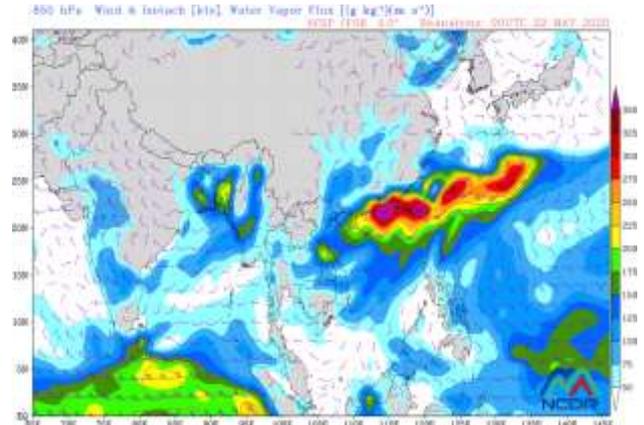


圖 3(b) NCEP CFSR 5 月 22 日 500 hPa 水氣通量圖。

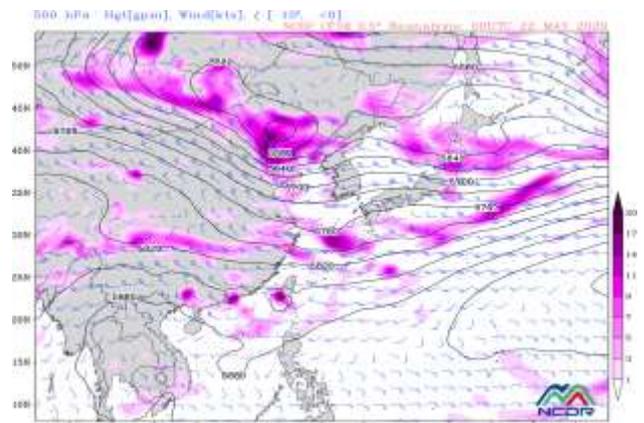


圖 3(c) NCEP CFSR 5 月 22 日 500 hPa 渦度圖。

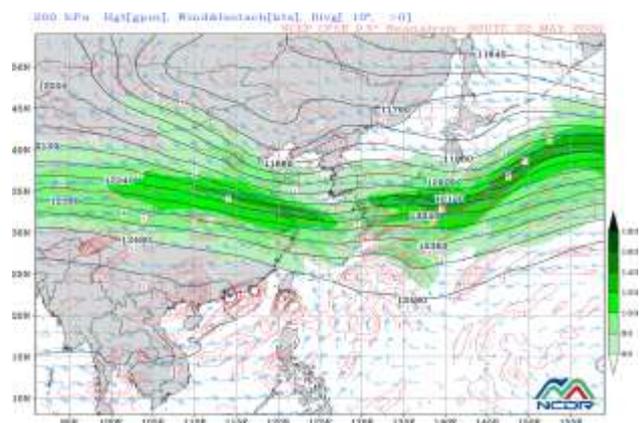


圖 3(d) NCEP CFSR 5 月 22 日 200 hPa 強風區及輻散場圖。

3.1.3 衛星遙測資料資料分析

在 SSMI 衛星整體氣柱水氣量觀測平均(圖 4(a))，在南海、西太平洋、臺灣周圍海

域屬於高水氣量地區，有長距離絲狀般、由低緯度往高緯度輸送的高水氣含量帶，與「大氣河」之觀測特徵相似。

從紅外線衛星雲圖分析(圖 1(c))，在 22 日鋒面滯留於臺灣上空、西南氣流影響下，臺灣西南方外海至華南地區，存在數個對流雲系，其雲頂溫度及分布面積，已達到中尺度對流系統的定義。在水氣頻道亦顯示(圖 4(b))，中尺度對流系統伴隨著大量的水氣，透過水氣的潛熱釋放的正回饋效應，讓槽線維持甚至加深，同時也導致非地轉風讓西南氣流增強，使臺灣中南部地區受明顯雨勢影響。

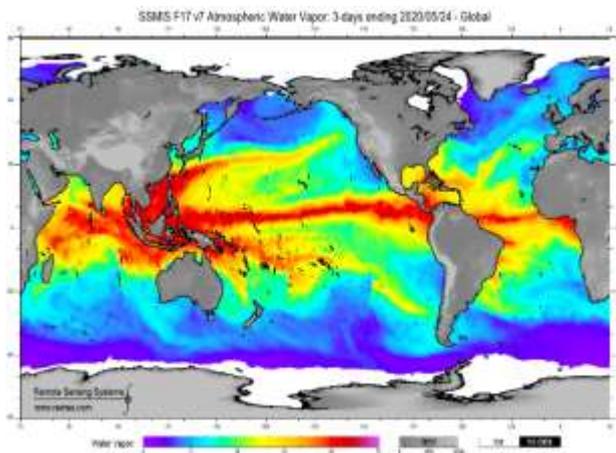


圖 4(a) 5 月衛星遙測資料 SSM/I 衛星 22 至 24 日 3 日觀測平均的大氣層內整體氣柱水氣量，色階為水氣含量，單位毫米。

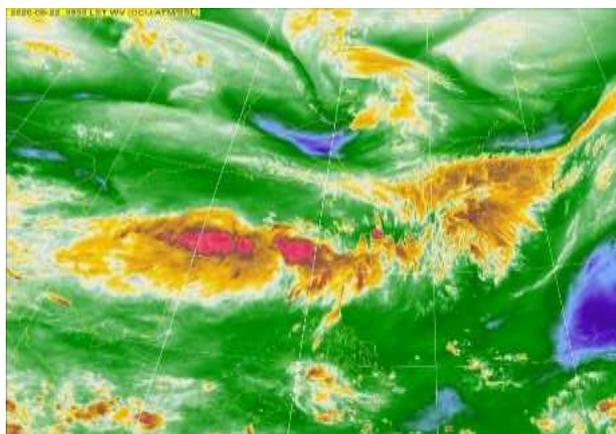


圖 4(b) 5 月衛星遙測資料 22 日 00Z 水氣頻道衛星雲圖。

3.1.4 雷達資料分析

依照 5 月 22 日時雨量變化，大致可分為三個時段的降雨，第一波在午夜 00-04LST，夜間強回波自嘉義、臺南沿海向內陸移動；第二波強降雨於 22 日上午 08-12LST 自臺南、高雄沿海移入，而且涵蓋的範圍相當寬廣，回波分佈範圍遍及整個南臺灣(圖 5(a-b))；第三波強降雨則是在 22 日午後至夜間 14-18LST，鋒面開始緩慢南移，回波則由高雄至屏東沿海移入。由於屏東地形呈狹長狀，丘陵山地眾多，當回波進入陸地時，先為沿海地區提供明顯的雨量，當強降雨的對流胞移至山區時，在地形抬升作用下對流發展增強、回波增強，時雨量跟著變大。

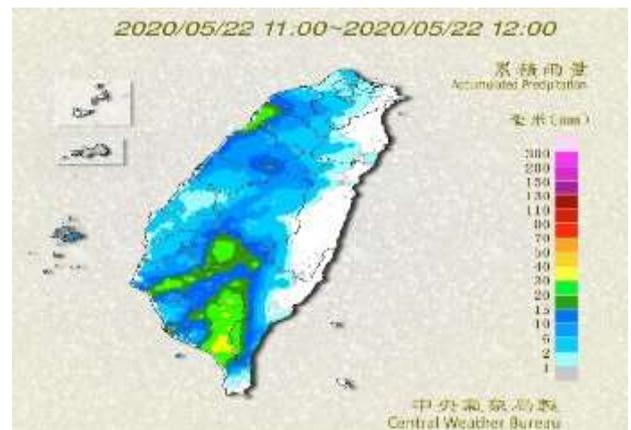


圖 5(a) 5 月 22 日觀測資料 1100 至 1200 LST 的氣象局時雨量圖。

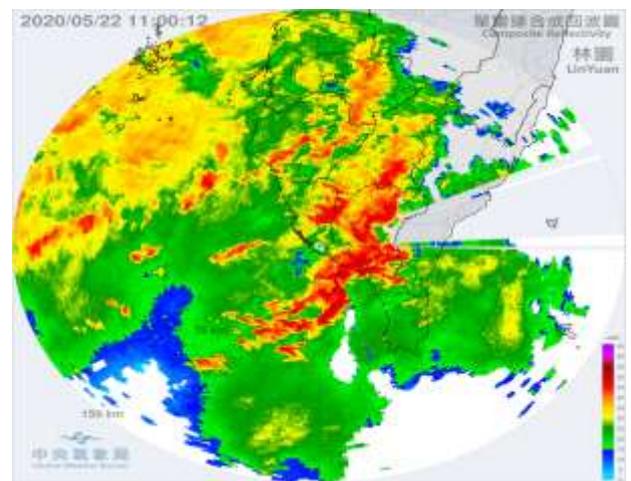


圖 5(b) 5 月 22 日觀測資料 1100 LST 的高雄林園降雨雷達圖。

3.2 模擬結果與分析

3.2.1 水氣與雨量模擬分析

透過 WRF 數值模擬水氣通量及累積雨量，無論是中南部 MCS 移入所造成的劇烈降水，或是中北部地區靠近沿海所激發出來的層狀降水，WRF 數值模擬均有相當好的掌握(圖 6(a-b))。

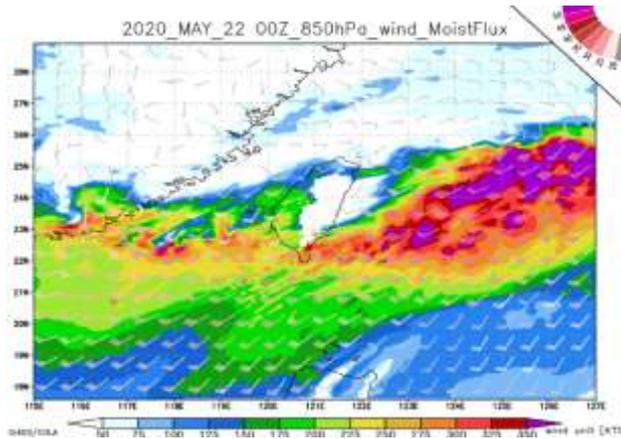


圖 6(a) 5 月 22 日水氣與雨量模擬圖 00Z 的 850 hPa 水氣通量圖(色階單位(g/kg)(m/s))。

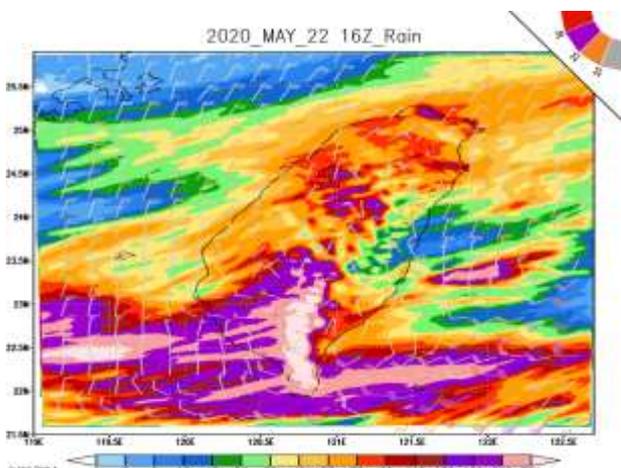


圖 6(b) 5 月 22 日水氣與雨量模擬圖 24 小時累積雨量(色階單位毫米)。

為瞭解空間內的水氣量、水氣傳輸與降雨三者之間的關聯，因此，本文將「水氣垂直積分 IWV」、「水氣傳輸垂直積分 IVT」、「時雨量」互相比較(圖 7(a-c))，並歸納出下列重點：

3.2.1.1 在風切線的南側，亦為鋒面的暖區，有 IWV 及 IVT 較大值，且 IWV 及 IVT 梯度較大的位置與地面風切帶的位置相符。

3.2.1.2 地面風切南側的雨量較大值區域，不一定代表有 IWV 或 IVT 最大值，反而雨量較大的位置，與地面風切線的位置較為相關。顯示沿著鋒面的水平風切大小，對於鋒面暖區所激發的強對流降雨，比水氣含量或風速增強有更顯著的影響。

3.2.1.3 地面風切的北側的鋒面冷區，在 22 日雖無明顯 IWV 及 IVT 較大值，但仍有較多沿著海岸線所激發的降雨，且在山區有較大值，顯示地形對於鋒面冷區所激發的降雨有顯著的影響。

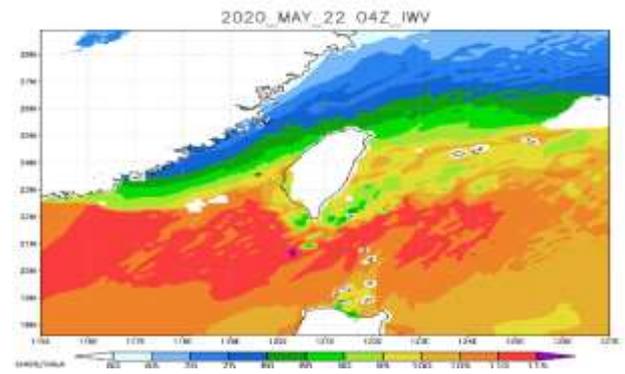


圖 7(a) 5 月 22 日 04Z 的水氣與雨量模擬圖 IWV 圖(單位 kg/(m*s)、ml)。

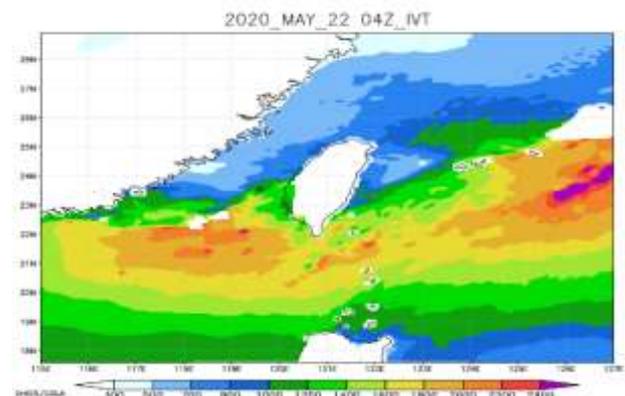


圖 7(b) 5 月 22 日 04Z 的水氣與雨量模擬圖 IVT 圖(單位 kg/(m*s)、ml)。

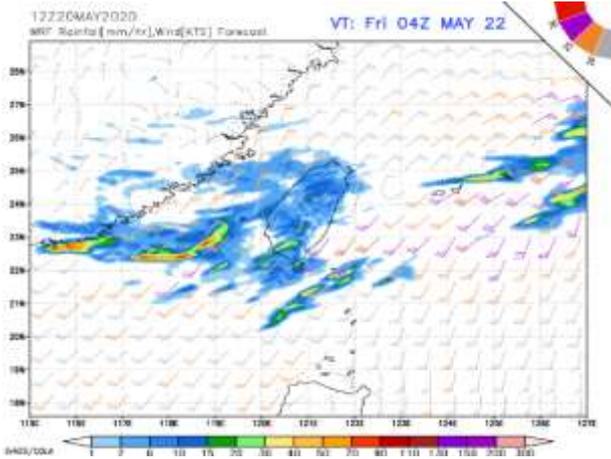


圖 7(c) 5 月 22 日 04Z 的水氣與雨量模擬圖
時雨量(單位毫米)。

3.2.2 雷達回波通過地形與雨量分佈之模擬分析

為瞭解 MCS 等發展劇烈的對流回波在移入臺灣的過程，地形對於對流系統的發展與阻擋，及最大累積雨量出現的位置，選定北緯 22.125° 至 23.0°，每隔 0.125° (約 13.8 公里) 為區間做劃分，搭配垂直運動及日累積雨量，以垂直剖面的方式，研究水氣遇到地形前後的變化及結果(圖 8)。結果如下：

3.2.2.1 山脈東邊的背風測，雷達回波強度與垂直速度，隨著山脈高度提升而逐漸減弱。

3.2.2.2 在迎風面上方的雷達回波與垂直速度，有平均最大值，顯示地形對於水氣抬升與對流運動有增強的作用。但是當海拔介於 1000 至 1500 公尺的山地時，山脈後方的雨量開始逐漸隨著高度而減少。當海拔介於 2000 至 2500 公尺的高山時，雨量與水氣銳減，顯示海拔高於 2000 公尺對於水氣就有明顯的阻擋作用。

3.2.2.3 在低海拔的丘陵，最高海拔僅介於 541 至 353 公尺，雷達回波除了在丘陵上有最大值外，在背風面亦有強回波的現象。而丘陵有助於水氣抬升，使雨量成長約 2 倍，對於水氣的阻擋效

應較小，反而使丘陵後方雨量增加。

3.2.2.4 地形前緣的平均回波多為對流型回波，上升運動較強。而背風面多為層狀型回波，上升運動較弱。回波值較大處，伴隨著累積雨量較大值，亦有較強的上升運動。

3.2.2.5 除迎風面因為地形抬升作用產生的垂直運動較大值外，在背風面的半山腰亦有垂直運動較大值，評估應為氣流過山震盪所造成，與累積雨量無明顯相關性。

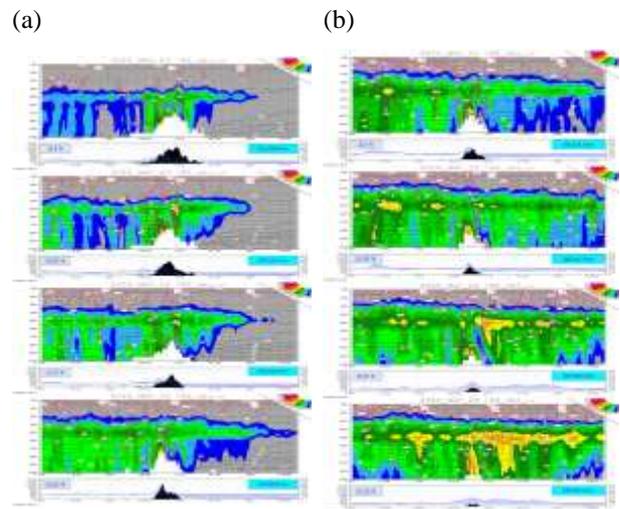


圖 8 雷達回波通過固定緯度 22 日平均值與總累積雨量分布示意圖。其中(a)為北緯 23.0° 至 22.625°，(b)為北緯 22.5° 至 22.125°。

4. 結果與討論

本研究使用 NCEP CFSR 再分析資料、中央氣象局雷達回波、氣象雲圖、衛星遙測資料及 WRF 數值模擬，對 5 月 22 日劇烈降水及水氣通量進行討論。

從觀測資料綜合分析可知，5 月下旬東亞夏季季風爆發，而安攀氣旋建立所誘發的西南氣流，為臺灣 5 月下旬的梅雨季提供大量的水氣來源。隨著 500 hPa 的槽線東移加深，帶動底層的低層噴流(Low Level Jet；LLJ)形成，低壓輻合配合 200 hPa 高層風場

輻散，在風向不連續帶附近發展出許多 MCS，甚至激發出連續性的中小尺度飆線，沿著盛行風不斷地移入臺灣西南部陸地。

透過 WRF 數值模擬發現，當「鋒面暖區」有雨量較大值時，不一定代表有 IWV 或 IVT 最大值，雨量較大的位置，與地面風切線的位置較為相關，而「鋒面冷區」的降雨則與地形較相關。最後透過雷達回波通過地形前後的平均值分析發現，在迎風面上方的雷達回波與垂直速度，有平均最大值，顯示地形對於水氣抬升與對流運動有增強的作用。而山脈後方的雨量開始逐漸隨著高度而減少。當海拔介於 2000 至 2500 公尺的高山時，背風側雨量與水氣銳減，顯示海拔高於 2000 公尺對於水氣就有明顯的阻擋作用。

5. 參考文獻

- 陳淡容、廖信豪、吳宜昭、于宜強(2020)。2020 年 5 月 19-24 日梅雨鋒面豪雨事件氣象分析。災害防救電子報，第 180 期。
- Dacre, H. and Clark, Peter and Lavers, David and Martínez-Alvarado, Oscar and Stringer, Marcus.(2014). How Do Atmospheric Rivers Form? Bulletin of the American Meteorological Society. 96.10.1175/BAMS-D-14-00031.1.
- Roman-Stork, H. L., and Subrahmanyam, B.(2020). The Impact of the Madden-Julian Oscillation on Cyclone Amphan(2020)and Southwest Monsoon Onset. Remote Sensing, 12(18), 3011.

A Case Study of Micro and Meso-Scale Convective Systems Induce Severe Rainfall in Southern Taiwan during the Mei-Yu front Period

Jou-Ping Hou, Chih-Yi Chen

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

Abstract

The Mei-yu front affected Taiwan from May 19 to 24, 2020. In particular, the maximum accumulated rainfall in the southwestern plains of Taiwan on May 22 reached 415.5mm, and the mountainous area reached 616.5mm, which has exceeded the torrential rain standard of the Central Weather Bureau (CWB). Different from the typical Mei-yu front, on the 22nd, Taiwan was mainly affected by the strong southwester airflow with a large amount of water vapor flux and high potential temperature. The mesoscale convective system moves along the prevailing wind from Taiwan Strait into the land of Taiwan and caused floods in Kaohsiung and Pingtung.

This study used the NCEP CFSR reanalysis data provided by NCDR, the observation data from CWB and numerical simulations to discuss the severe precipitation and water vapor flux on May 22 to understand the southwest airflow and multi-scale convective system. The study showed that the large-scale atmospheric circulation caused the southwest monsoon onset in mid-May. The southwesterly airflow which was induced by the Super Cyclone Storm Amphan in the Bay of Bengal had strengthened the southwest wind and increased water vapor in the South China Sea, providing a lot of water and vapor for Taiwan's rainy season in late May. The southwesterly airflow induced by Super Cyclone Storm Amphan in the Bay of Bengal caused the southwest wind strongly and increased water vapor in the South China Sea, which provided a lot of vapor for Taiwan rainy season. A lot of vapor cooperated with the positive vorticity in front of 500 hPa and the divergent field of 200 hPa to make the convective system grow large enough to affect the weather, and even continuously stimulate mesoscale and microscale convective system and squall lines.

Numerical simulations showed that the position of surface wind shears was more related to the rainfall in the warm frontal areas, although the vapor in the cold frontal areas was lower than warm areas, there was still large rainfall in the coastal and mountain areas. It showed that the topography had a critical influence on the rainfall in the cold frontal zone. Finally, through the analysis of the average value of radar echo, we found that the rainfall behind mountains gradually decreased as the terrain altitude increased. When mountains is higher than 2000 meters, the rainfall and moisture on the leeward side decreased sharply, indicating that the terrain effect had a significant blocking effect.

Keyword : Mei-Yu Front, Southwesterly Flow, Water Vapor Flux, Mesoscale and Microscale Convective System, Terrain Effect