

海葵颱風 (2023) 雲凝結核

影響臺灣地區降水數值模擬研究

曾健承、沈鴻禧

國防大學理工學院

摘要

本研究透過WRF(Weather Research and Forecasting)模式，以2023年海葵颱風為個案，探討不同雲凝結核(Cloud Condensation Nucleus Concentration, CCN)濃度，對颱風降水模擬結果的影響，透過分析氣溶膠粒子，在雲凝結核中的作用，對不同CCN 濃度下的模擬情況進行分析，深入了解CCN 濃度對颱風模擬結果的影響程度，以提供更準確的預測和防災措施，以應對臺灣地區可能遭受的颱風災害。

研究結果顯示，再分析場模擬的累積雨量結果較佳，與GFS相較，在4km 解析度網格下，南部山區有明顯低估情形，加入CCN後有明顯獲得改善；依颱風中心碰觸陸地時機改變CCN濃度模擬，當中心未碰觸陸地時，使用 $1,000 \text{ cm}^{-3}$ CCN濃度，然而，當中心碰觸陸地時，改為 $10,000 \text{ cm}^{-3}$ CCN濃度則可達較佳模擬結果，使降雨量更接近真實情況，加入CCN雖使降雨量更接近真值，但從回波剖面發現，CCN使部分回波強度增強，但分布結構產生改變，導致降雨區域產生落差。

本研究成果有助於深入了解CCN濃度對颱風模擬的影響，並提供更準確的預測和防災措施，以因應臺灣地區可能遭受的颱風災害。

關鍵字：WRF 模式、海葵颱風、雲凝結核(CCN)

1. 前言

臺灣位於西北太平洋颱風生成和活動的主要區域，每年平均受4至5個颱風影響，颱風所挾帶的強風暴雨，對臺灣地區造成嚴重破壞，強風會吹倒樹木、房屋等建築物，暴雨會導致洪水和土石流，並可能造成人員傷亡和財產損失。因此，加強颱風監測並及時發布颱風警報和預報，為民眾做好防颱準備提供信息支持，強化防災減災措施，提前加固海堤、疏通河道、修建防洪牆等，提高防災減災能力並提高民眾防災意識，指導民眾在颱風來臨時做好防護措施，就可大大減少颱風所帶來災害之影響。

大氣中水是以三態存在，藉由相變過程

，水氣凝結成水滴，其過程大多是以透過異質成核(Heterogeneous Nucleation)作用影響，雲凝結核(CCN)在此過程中起關鍵作用，需有氣溶膠粒子做為凝結核心，並在特定過飽和環境下才能使雲凝結核活化成雲，Hudson(1993)提出對於雲凝結核(CCN)相關概念，由於區域氣象特性及近年來空氣污染增加日益嚴重，隨著污染物的排放使空氣懸浮微粒濃度增加，造成雲凝結核濃度增加。CCN是指能夠提供水氣凝結的核，當大氣中的水氣達到飽和狀態時，水氣就會凝結成水滴，CCN可以提供這種凝結核，使水氣更容易凝結成水滴，暖雲中的模擬增強了雨滴的形成，特別是在淺對流條件下，其作用主要

有以下幾點：

1. 可以提供水氣凝結的核，使水氣凝結成水滴，從而促進雲的形成。
2. 濃度和性質會影響雲的微物理特性，例如雲滴的數量、大小，降雨的形成和強度，濃度越高，對雲和降雨的影響越大。
3. 大氣環境條件變化量，例如溫度、濕度和氣壓，也會造成CCN對雲和降雨的影響。

自2019年以來，臺灣過去4年未受到颱風的侵襲，然而，2023年海葵颱風的出現，再次提醒人們，不能忽視自然災害的威脅，受到海葵颱風及其外圍環流影響，東半部及高屏地區出現強風豪雨，因此，對於颱風降水形成機制的研究變得特別迫切。了解不同氣溶膠粒子濃度，對模擬結果的影響，將有助於提高對颱風的降水預測準確性，進而加強防災、減災措施，保障人民生命財產安全。

本研究以2023年海葵颱風為個案，在探討不同雲凝結核(Cloud Condensation Nucleus Concentration, CCN)濃度對颱風降水模擬結果的影響。我們通過分析氣溶膠粒子在雲凝結核中的作用，對不同CCN濃度下的模擬情況進行系統性分析，以深入了解CCN濃度對颱風模擬結果的影響程度。

研究方法包括使用高解析度的數值天氣預報模型，並結合觀測數據進行驗證。模擬過程中，我們調整CCN的濃度參數，以評估其對降水強度、降水分佈以及颱風結構的影響。研究結果將有助於提高颱風預報的準確性，並提供有價值的資訊以制定更有效的防災措施，從而減少臺灣地區可能遭受的颱風災害影響。

2. 模式設定

在模式設定方面，本研究選用全球或區域分析資料(NCEP GFS、FNL)作為初始場進行比對分析，並選取較佳結果作為初始場

條件後，加入參數化調整。整體實驗共分為三組(CCN1 至 CCN3)，用以比較不同濃度下颱風降雨及影響特性，最後再透過定量公式校驗預報準確性，不同CCN濃度設定(如表1)。

模擬時間為2023年9月2日06 UTC到2023年9月6日00 UTC，共90小時，積分時間間隔為20秒，以確保模擬的穩定性和精確性。模擬範圍的中心位置在22.857°N、119.949°E，採用單層巢狀網格結構，水平網格間距設定為4公里，以提供細緻的區域模擬。網格涵蓋範圍包括中國大陸東南部及臺灣本島。

在物理參數化方案方面，選用WDM6(WRF Double-Moment 6-class scheme)為微物理參數化方案。WDM6方案能夠預測六種水相粒子：水氣、雲水、雲冰、雪花、雨水及軟雹。該方案特別強調對雲水、雨水及雲凝結核濃度的預測，以更合理地描述其分布和演變。

3. 綜觀天氣分析

海葵颱風於2023年8月28日0800 LST 於關島西北方洋面生成(如圖1)顯示，隨後向西北西朝臺灣東方洋面接近，9月1日2030 LST 由中央氣象局發布海上颱風警報。9月2日1130 LST暴風圈逐漸接近臺灣東方洋面，對臺灣東半部構成威脅，陸續發布陸上颱風警報。9月3日1540 LST 颱風中心於臺東縣東河鄉登陸，受到颱風暴風圈籠罩之地形降雨影響，在臺灣東半部地區降下超大豪雨等級之雨量，其中以花蓮縣玉里鎮664毫米最高，海葵颱風同日2000 LST 於高雄市梓官區出海，出海後於高雄沿海滯留打轉，9月4日0400 LST於高雄市左營區第2次登陸，9月5日持續朝西往中國閩粵交界沿海登陸，於0530 LST解除陸上颱風警報，0800 LST 減弱為熱帶性低氣壓，並於0830 LST解除海上颱風警報。

從大環境場來看，西北太平洋地區被大低壓帶籠罩(如圖2)，低壓環流中包含蘇拉

、海葵和鴻雁三個颱風。位處於季風低壓內的颱風，除了副熱帶高壓會影響颱風外，季風環流內部的低壓系統亦會影響颱風的移動，導致導引氣流不明顯，增加颱風路徑預測的難度。

4. 模擬結果分析

4.1 不同雲凝結核濃度下回波探討

經模擬結果顯示，FNL 再分析場總體表現較佳，利用 FNL 再分析場作為控制組 (CCN_CTRL)，並設定不同的雲凝結核 (CCN) 濃度 (1,000、10,000、100,000 cm^{-3})，分析其對 WRF 模式模擬颱風海葵回波結構與累積雨量的影響。

根據雷達回波與模擬回波的比較結果 (圖 3) 所示，2023 年 9 月 3 日 1400 LST，海葵颱風中心位於臺灣東方洋面。模擬結果顯示，50 至 55 dBZ 的最強回波位於宜蘭帶狀回波及颱風中心眼牆南側，而 45 至 50 dBZ 的回波則分布於花蓮地區及颱風中心眼牆周圍 (圖 a)。在 CCN_CTRL 的模擬中，50 至 55 dBZ 最強回波位於颱風中心眼牆的南北側，45 至 50 dBZ 回波集中於花蓮地區。值得注意的是，在花蓮地區的回波強度略有高估，而宜蘭地區的帶狀回波仍有改進空間 (圖 b)。對於 CCN_1 的模擬，50 至 55 dBZ 的最強回波位於颱風中心眼牆南側，45 至 50 dBZ 的回波分布於花蓮地區及颱風眼牆周圍。相較於對照組，花蓮地區的回波分布更為廣泛，強度略減 5 dBZ。加入適量的 CCN 濃度後，宜蘭地區的帶狀回波模擬情況顯著改善，增強了外圍環流的帶狀回波雨水反應，加強了回波強度 (圖 c)。在 CCN_2 的模擬中，50 至 55 dBZ 的最強回波仍位於颱風中心眼牆南側，45 至 50 dBZ 的回波則位於花蓮及臺東地區。與對照組相比，增加較多的 CCN 濃度後，花蓮地區 50 至 55 dBZ 的回波範圍顯著增大，但也抑制了宜蘭外海帶狀回波的發展 (圖 d)。最後，CCN_3 的模擬結果

顯示，50 至 55 dBZ 的最強回波位於颱風中心眼牆南側，45 至 50 dBZ 的回波分布於宜蘭、花蓮地區及颱風眼牆周圍。與對照組相比，增加較多的 CCN 濃度後，花蓮地區 45 至 50 dBZ 的回波強度明顯減弱，反而抑制了陸地區域의雨水反應 (圖 e)。這些結果表明，不同的 CCN 濃度對回波強度和分布有顯著影響。適當的 CCN 濃度調整可以改善模擬的精準度，而過多的 CCN 濃度可能導致不利的模擬結果。進一步的研究應該集中於量化 CCN 濃度對各種氣象條件下的影響，以優化模式的預測能力。根據 (圖 4) 所示，2023 年 9 月 4 日 0600 LST 海葵颱風通過臺灣時，由於中央山脈的影響，其結構受到破壞，颱風中心位於高雄沿海。(圖 a) 50 至 55 dBZ 最強回波出現在花蓮沿海的帶狀回波，而 45 至 50 dBZ 的回波則位於宜蘭地區。在 (圖 b) CCN_CTRL 顯示，50 至 55 dBZ 回波位於巴士海峽及臺東一帶，但在宜蘭地區的回波強度較實際觀測值來的弱，且東部外海的回波強度低估了約 5 dBZ。(圖 c) CCN_1 顯示，50 至 55 dBZ 回波位於巴士海峽、花蓮及宜蘭外海的帶狀回波。與對照組相比，巴士海峽及花蓮地區的回波有明顯增強，並增強了宜蘭外海的帶狀回波。(圖 d) CCN_2 顯示，模擬的 50 至 55 dBZ 回波位於巴士海峽、花蓮及宜蘭一帶。與對照組相比，巴士海峽及花蓮地區的回波有明顯增強。相比 CCN_1，加入較多的 CCN 濃度後，宜蘭及花蓮一帶的回波更接近真實的回波狀況。(圖 e) CCN_3 顯示，50 至 55 dBZ 回波位於巴士海峽、花蓮及宜蘭一帶。與對照組相比，巴士海峽及花蓮地區的回波有明顯增強。但與 CCN_2 相比，加入更多的 CCN 濃度後，宜蘭地區的帶狀回波強度明顯減弱。整體來說，這些模擬結果表明，CCN 濃度的變化對於颱風回波強度和分布有顯著影響。

由 2023 年 9 月 3 日 0600 LST 颱風中心

回波剖面比較圖(單位: dBZ)(圖 5)所示, CCN_CTR 顯示 50 至 55 dBZ 回波在 7,500 公尺以下, 回波強度由底層向上逐漸遞減, 颱風中心結構分布合理(圖 a)。CCN_1 東北面回波強度有明顯增強 5dBZ, 且西南面回波強度範圍明顯擴大(圖 b)。CCN_2 與 CCN_CTR 相較之下, 東北面底層回波強度明顯增強達 62dBZ(圖 c)。CCN_3 與 CCN_CTR 相較之下, 東北面 2000 公尺以下回波強度增強達 62dBZ, 但發展範圍明顯縮小(圖 d)。由(圖 6)所示, NCDR 雷達合成回波, 50 至 55 dBZ 回波在 7,000 公尺以下, 較強回波分布在高雄小港及臺東地區(圖 a)。CCN_CTR 顯示 50 至 55 dBZ 回波也分布在 7,000 公尺以下, 較強回波集中在屏東至臺東山區(圖 b)。CCN_1 顯示加入 CCN 後, 50 至 55 dBZ 回波集中在 7,500 公尺以下, 較強回波分布在臺東大武, 高雄小港至屏東回波結構較為零星鬆散(圖 c)。CCN_2 顯示 50 至 55 dBZ 回波在 7,500 公尺以下, 較強回波分布在屏東至臺東山區(圖 d)。CCN_3 顯示 50 至 55 dBZ 回波在 7,500 公尺以下, 較強回波分布在屏東至臺東大武(圖 e)。

4.2 不同雲凝結核濃度下累積雨量探討

根據日累積雨量圖(圖 7)所示, 實測最大累積雨量位於花蓮玉里, 達 664 毫米。控制組(CCN_CTR)模擬花蓮地區累積雨量達 745 毫米, 偏高約 80 毫米, 但高屏及西半部地區雨量明顯低估。適當 CCN 濃度(CCN_1)可使雨量預估更接近實測值(640 毫米, 低估 24 毫米), 惟高屏、西半部雨量仍略低估。(CCN_2 及 CCN_3)模擬之最大雨量均明顯低估(約低估 100 毫米), 並導致高雄地區降雨更趨減少。由(圖 8)所示, 實測最大雨量為花蓮秀林鄉之 592.5 毫米。CCN_CTR 模擬結果略低於實測約 35 毫米, 屏東地區亦有低估情形。(CCN_1)模擬雨量明顯偏高達 655 毫米(高估 62 毫米), 屏東及臺東降雨範圍亦擴

大;(CCN_2)預報最接近實測(低估 24 毫米), 尤其在高屏地區累積雨量預測較準確(CCN_3)則導致花蓮地區雨量大幅高估(676 毫米, 高估 113 毫米), 並增加屏東地區累積降雨。

在 2023 年 9 月 3 日至 4 日的回波及累積雨量比較中, 根據不同 CCN 濃度的模擬測試結果(表 2)所示, 我們可以看到一些有趣的現象。在海葵颱風的案例中, 9 月 3 日颱風位於洋面上時, 未加入 CCN 的 CCN_CTR 在宜蘭地區的帶狀回波強度較弱。加入 CCN_1 和 CCN_2 濃度後, 回波強度明顯增強; 然而, 在 CCN_3 濃度下, 反而抑制了雨水反應, 使回波強度減弱, 結構變得零星和鬆散。

4.3 不同雲凝結核濃度下衛星亮溫探討

由 2023 年 9 月 2 日 1400 LST 的 NASA 衛星亮溫及模擬亮溫比較圖(單位: K)(圖 9)所示, NASA 衛星亮溫, 溫度低於 210 K 的區域集中在颱風的東側, 這表明東側上風處的雲系發展較高(圖 a)。CCN_CTR 模擬結果, 顯示溫度低於 210 K 的區域也集中在颱風的東側, 這與實際的衛星亮溫觀測結果相近(圖 b)。CCN_1 模擬結果, 加入 CCN 後, 颱風東側亮溫升至 225 K(圖 c), 與 CCN_2 及 CCN_3 模擬結果均相近, 這些結果顯示, 加入 CCN 後, 會影響颱風東側的亮溫變化, 導致雲系發展的高度降低。

4.4 850hPa 水氣通量分析

根據 2023 年 9 月 3 日 1400 LST 850 hPa 水汽通量模擬結果(圖 10)所示, CCN_CTR(圖 b)颱風環流結構完整, 暴風圈緊密環繞颱風中心, 且東南側與臺灣海峽地區水汽通量明顯, 顯示此區域具顯著水汽輸送特徵。相較之下, CCN 敏感性實驗組 CCN_1、CCN_2 及 CCN_3, 分別對應(圖 c)、(圖 d)、(圖 e)之颱風眼牆附近水汽通量變化不顯著, 但臺灣海峽地區水汽通量則明顯減

少。此結果顯示，CCN 濃度變化能有效影響颱風第二象限之水汽通量，可能進一步改變臺灣區域的天氣型態與降雨分布。

4.5 850hPa 相當位溫分析

(圖 11)顯示 2023 年 9 月 3 日 1400 LST 850 hPa 之相當位溫 (Equivalent Potential Temperature) 空間分布，以探討不同 CCN 濃度敏感性試驗 (CCN_CTR、CCN_1、CCN_2 與 CCN_3) 對颱風眼牆區域熱力結構的影響。從 CCN_CTR (圖 b) 可清楚觀察到颱風眼牆區域具有顯著的相當位溫高值區，且眼牆內外之相當位溫梯度明顯，反映出颱風核心區域旺盛的對流活動與顯著的潛熱釋放特徵。

在提高 CCN 濃度的敏感性試驗中 (圖 c、d、e)，眼牆區域之相當位溫梯度進一步增大，尤以 CCN_2 (圖 d) 最為明顯。此結果顯示，當 CCN 濃度增加時，颱風眼牆內外之相當位溫差異加大，反映颱風核心區域內外的溫濕梯度變得更為明顯，可能增強眼牆附近的熱力結構不穩定性，有助於颱風的對流活動增強或重新組織，進而可能影響颱風強度及結構的演變。由上述結果可知，CCN 濃度變化確實能影響颱風內核區域的熱力動力特徵，尤其透過調整颱風眼牆內外的相當位溫梯度，可能間接改變颱風的強度與發展趨勢。

4.6 雨量校驗

本研究的校驗時間訂定為 2023 年 9 月 3 日 0000 LST 至 4 日 2400 LST，總計 48 小時。雨量校驗由荖溪、太安、赤柯山及成功測站分別執行，並計算各測站在此期間內的降雨機率。降雨機率的計算方式為：校驗期間內，該測站出現降雨 (時雨量超過 0.1 mm) 的總時數除以校驗總時數。降雨強度依據時雨量劃分為六個等級：0.1 - 2 mm、2 - 5 mm、5 - 10 mm、10 - 20 mm、20 - 40 mm 及 40 mm 以上。其中，時雨量低於 10 mm 者定義為弱降雨，反之，時雨量大於 10 mm 以上屬強降

雨。各模擬測站公正預兆得分 (ETS) 比較圖 (圖 12) 所示，各模擬結果顯示荖溪 (Laoxi)、太安 (Tai an)、赤柯山 (Chike Mountain) 在 ETS 上皆有 8 成的表現，唯獨在成功 (Chenggong) 測站表現不佳。推測原因在颱風眼中心回波模擬差異變化較大，各模擬結果又以 CCN2 表現來的最好。

各模擬測站偏倚得分 (BS) 比較圖 (圖 13) 所示，各模擬結果顯示荖溪 (Laoxi)、太安 (Tai an)、赤柯山 (Chike Mountain) 在 BS 上皆落在 1.049~1.2 範圍，唯獨在成功 (Chenggong) 測站表現不佳。原因是成功測站較靠近颱風中心登陸區域，在颱風眼中心回波模擬差異變化較大，在時雨量校驗時，模式模擬弱降雨發生，實際多數未發生，使出現模式過度預報所致。

由降雨強度機率表 (表 3) 所示，CTR 與 CWB 在弱降雨及強降雨機率表現上較相近，在 CCN1 至 CCN3 模擬結果顯示，較高濃度的 CCN 使弱降雨 2-5 mm 時雨量較 CWB 分別增幅，CCN1(39.9%)、CCN2(31.3%) 及 CCN3(31.5%)，5-10 mm 分別增幅，CCN1(76.9%)、CCN2(26.9%) 及 CCN3(61.2%)，在強降雨 20-40 mm 時雨量較 CWB 減少，CCN1(27.2%)、CCN2(22.6%) 及 CCN3(35.0%)，>40 mm 時雨量較 CWB 減少，CCN1(52.7%)、CCN2(34.6%) 及 CCN3(75.6%)，由 (圖 14) 所示，加入較高濃度 CCN 使弱降雨 2-5 mm 至 5-10 mm 時雨量大幅度增加，以及強降雨大於 20mm 時雨量大幅度減少，由此可知，較高濃度的 CCN 會導致更多的雲滴形成，這些雲滴可能更小，有利於弱降雨的形成，但過多的雲滴也可能抑制雲滴的碰撞合併，從而減少強降雨的發生。

4.7 臺灣地區颱風劇烈降雨天氣檢查

本次個案海葵颱風在 2023 年 9 月 3 日在臺灣東半部地區降下超大豪雨等級之雨量，此期間共造成 143 人受傷、169 處積淹水、

超過 28 萬戶停電，以及新臺幣 14 億 1,563 萬元的農損（表 4）所示，依林(2022)臺灣地區颱風劇烈降雨天氣檢查表，在項次 1 發生坡地災害 0 至前 12 小時均符合檢查要項表，除 24 小時前颱風移動速度 11 海浬/時略高於要項表標準；另在第 6、9 項次均符合要項表標準，結果顯示符合要項表標準，所帶來之劇烈降雨量越明顯。

5. 結論

本研究採用 WRF V4.2.1 模式模擬海葵颱風不同 CCN 濃度下對臺灣地區降水之影響，模擬時間為 2023 年 9 月 6 日 0600 UTC 至 2023 年 9 月 6 日 0000 UTC，共計 90 小時，模式模擬結果與實際觀測分析後，得到結果如下：

1. 再分析場模擬的累積雨量結果較佳，與 GFS 相較，在 4km 解析度網格下，南部山區有明顯低估情形，加入 CCN 後有明顯獲得改善。
2. 依颱風中心碰觸陸地時機，來改變 CCN 濃度模擬，當颱風中心在洋面時，選用 CCN1 濃度，然而，當颱風中心碰觸陸地時，改為 CCN2 濃度則可達較佳模擬結果，使最大降雨量更接近真實情況。
3. 加入 CCN 雖使最大降雨量更接近真值，但從回波剖面發現，CCN 使部分區域回波強度增強，但分布結構產生改變，導致降雨區域產生落差，進而影響單點測站降雨量誤差。
4. 透過不同 CCN 濃度的敏感度測試，發現 CCN 濃度的增加對降水總量、降水分布及回波強度皆有顯著影響。本研究結果與 Lim and Hong (2010) 之研究一致，即在 CCN 濃度介於某特定範圍時，降水量會增加，但超過該範圍後，降水反而減少。

5. 在 NASA 衛星亮溫模擬中，發現加入 CCN 後，使颱風東側亮溫升高，顯示降水強度集中，發展高度降低。
6. 在單點測站發現，在 9 月 3 日三測站皆有明顯低估降水預報情況，在 RMSE 表現上以 9 月 4 日 CCN_2 表現較好，推測加入 CCN 後對於降雨量及區域發生改變，使單點測站在累積雨量上誤差較大。
7. 在模擬結果顯示，ETS（公正預兆得分）三測站皆達近 8 成的降雨預報表現，惟成功測站表現不佳。推測原因在颱風眼中心回波模擬差異變化較大。
8. 在 BS（偏倚得分）：三測站在模擬結果顯示沒有高估及低估預報的情況，在成功測站均顯示模擬結果有高估預報，推估模式在颱風中心降水量較為高估預報。
9. 降雨機率表顯示，CWB 與 CTR 表現相近，提高 CCN 濃度後，在弱降雨(2-5 mm、5-10 mm)時雨量機率皆有明顯提升，反之，在強降雨(20-40 mm、>40 mm)時雨量機率則明顯降低，由此可知，隨 CCN 濃度增加，在 CCN1 弱降雨(0.1-2.0 mm)部分雨滴增強，也使強降雨(>40 mm)部分雨滴受到抑制。

6. 參考文獻

- Hudson, J. G. (1993). Cloud condensation nuclei. *Journal of Applied Meteorology*, 32(4), 596–607.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032<0596:CCN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032<0596:CCN>2.0.CO;2)
- Chang, S. W. (1982). The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 110(9), 1255–1270.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<1255:TOEIRI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<1255:TOEIRI>2.0.CO;2)

- 982)110<1255:TOEIBA>2.0.CO;2
- 張瑞昌 (2005)。泰利颱風 (2005) 侵臺期間結構特性之數值模擬研究 (碩士論文)。國防大學理工學院大氣科學碩士班，桃園。
- Wu, C. C., & Kuo, Y. H. (1999). Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 67–80. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0067:TATCUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0067:TATCUA>2.0.CO;2)
- Tsai, H. C., & Lee, T. H. (2009). Maximum covariance analysis of typhoon surface wind and rainfall relationships in Taiwan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 997–1016. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1963.1>
- 周柿均 (2017)。渦旋初始化方法對熱帶氣旋模擬之影響 – 蘇迪勒颱風 (2015) 個案 (碩士論文)。國立中央大學大氣科學學系，桃園。
- Gayatri, K., Patade, S., Fan, J., & Prabhakaran, T. (2022). Pathways of precipitation formation in different thermodynamic and aerosol environments over the Indian Peninsula. *Atmospheric Research*, 266, 105934.
- Khain, A., Lynn, B., & Dudhia, J. (2010). Aerosol effects on intensity of landfalling hurricanes as seen from simulations with the WRF model with spectral bin microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67, 365–384.
- 陳文彬 (2010)。懸浮微粒數量濃度對梅雨鋒面降雨的影響 (碩士論文)。中央大學水文與海洋科學研究所，桃園。
- Willoughby, H. E., Jorgensen, D. P., Black, R. A., & Rosenthal, S. L. (1985). Project STORMFURY: A scientific chronicle 1962–1983. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 66(5), 505–514.
- Zhang, H., McFarquhar, G. M., Saleeby, S. M., & Cotton, W. R. (2007). Impacts of Saharan dust as CCN on the evolution of an idealized tropical cyclone. *Geophysical Research Letters*, 34, L14812.
- Zhang, H., McFarquhar, G. M., Cotton, W. R., & Deng, Y. (2009). Direct and indirect impacts of Saharan dust acting as cloud condensation nuclei on tropical cyclone eyewall development. *Geophysical Research Letters*, 36, L06802.
- 黃竹君 (2012)。氣膠衝擊颱風之模擬：納莉颱風 (碩士論文)。臺灣大學大氣科學研究所，臺北。
- 吳昱德 (2019)。雲凝結核濃度敏感度對尼伯特颱風 (2016) 數值模擬影響之研究 (碩士論文)。國防大學理工學院大氣科學碩士班，桃園。
- Lim, K.-S. S., & Hong, S. Y. (2010). Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, 138, 1587–1612.
- 陳文彬 (2010)。懸浮微粒數量濃度對梅雨鋒面降水影響之敏感度研究 (碩士論文)。國立中央大學水文與海洋科學研究所，臺灣。
- 陳震 (2014)。雲凝結核濃度對於納莉 (2001) 颱風於海洋環境之影響 (碩士論文)。國立中央大學大氣物理研究所，臺灣。
- Garrett, T. J., & Zhao, C. (2006). Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes. *Nature*, 440, 787–789.
- Fan, H., Zhao, C., & Yang, Y. (2020). A

- comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018. *Atmospheric Environment*, 220, 117066.
- Li, G., Wang, Y., & Zhang, R. (2008). Implementation of a two-moment bulk microphysics scheme to the WRF model to investigate aerosol-cloud interaction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113.
- Masrouf, P. F., & Rezazadeh, M. (2023). Aerosol–cloud–precipitation interaction during some convective events over southwestern Iran using the WRF model. *Atmospheric Pollution Research*, 14, 101667.
- Xiao, H., Liu, X., Li, H., Yue, Q., Feng, L., & Qu, J. (2023). Extent of aerosol effect on the precipitation of squall lines: A case study in South China. *Atmospheric Research*, 292, 106886.
- Wang, J., Wang, T., Yasheng, D., Wang, X., Lei, Y., Li, X., ... & Shi, B. (2024). Modulations of dust aerosols on precipitation: Evidence from a typical heavy sandstorm event. *Atmospheric Research*, 107411.
- Deng, L., Xue, L., Huang, W., Wu, W., Thompson, G., Gao, W., ... & Geresdi, I. (2024). A numerical investigation of aerosol effect on cloud microphysics in an idealized tropical cyclone using the WRF piggybacking framework. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=4442559>
- Hong, S.-Y., Yign, N., & Jimmy, D. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318–2341.
- 黃詣軒、楊明仁 (2024)。快速增強與緩慢增強颱風的雲微物理特徵與降雨類型之比較研究。大氣科學，52(1)。
- Fischer, M. S., Reasor, P. D., Dunion, J. P., & Rogers, R. F. (2025). Are rapidly intensifying tropical cyclones associated with unique vortex and convective characteristics? *Monthly Weather Review*, 153(2), 183–197. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-24-0118.1>
- 林得恩 (2022)。劇烈降雨系統對高山陣地之風險評估。氣象預報與分析，250, 12 頁。
- 大氣科學研究與應用資料庫。 (2023, September 3). Retrieved from <https://asrad.pccu.edu.tw/dbar/>
- 國家災害防救科技中心。 (2023, September 3). Retrieved from <https://ncdr.nat.gov.tw/>
- 美國國家航空暨太空總署。 (2023, September 3). Retrieved from <https://www.nasa.gov/>
- Dudhia, J. (2010). WRF software infrastructure. WRF-ARW Technical Note. Retrieved from http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf microphysics scheme with prognostic hail for the Weather Research and Forecasting (WRF) model, *APJAS*, 55, 233–245.

6. 表附錄

表 1 CCN 濃度設定

項次	實驗組別	雲微物理參數法	CCN 濃度設定($1/m^3$)
1	CCN_CTR	WDM6	100
2	CCN_1		1,000
3	CCN_2		10,000
4	CCN_3		100,000

表 2 不同 CCN 濃度模擬測試結果

颱風中心 位置	洋面		陸地	
	回波	累積 雨量	回波	累積 雨量
CCN_CTR	宜蘭 低估	次之	宜蘭 低估	次之
CCN_1	佳	佳	花蓮 高估	差
CCN_2	花蓮 高估	較差	佳	佳
CCN_3	佳	差	宜蘭 低估	較差

表 3 降雨強度機率表

降雨強度機率表			CWB	CTRL	CCN1	CCN2	CCN3
降 雨 機 率 (%)			82.81	77.08	87.50	82.29	84.90
	弱 降 雨 (%)		40.25	42.57	52.38	47.47	56.44
		0.1-2.0 mm	11.32	14.19	6.55	10.13	14.11
		2-5 mm	14.47	15.54	20.24	18.99	19.02
		5-10 mm	14.47	12.84	25.60	18.35	23.31
	強 降 雨 (%)		59.75	57.43	47.62	52.53	43.56
		10-20 mm	22.64	27.03	23.81	25.32	24.54
		20-40 mm	24.53	21.62	17.86	18.99	15.95
		>40 mm	12.58	8.78	5.95	8.23	3.07

表 4 臺灣地區颱風劇烈降雨天氣檢查

項次	層別	檢查項目	0時	前6 小時	前12 小時	前24 小時	備考
1	低層	颱風移動速度 低於10 kTs 海浬/時					周等·2010
2	低層	颱風近臺7級暴風半徑大於200公里					呂等·2009
3	低層	850hPa 西南風大於25kTs					趙·2013
4	低層	700hPa 西南風大於30kTs					Chen et.al.,2017
5	低層	颱風路徑，中心以 距離臺灣200公里範圍之內					蔡·2012
6	低層	SST大於28°C					周等·2014
7	低層	垂直風切小於5ms ⁻¹					李等·2018
8	低層	850hPa水氣通量 大於200gkg ⁻¹ s ⁻¹					朱等·2010
9	低層	500hPa渦度場有 大於5x10 ⁻⁵ s ⁻¹					周等·2010
10	低層	颱風本身的強度為中度以上					李等·2004

7. 圖附錄

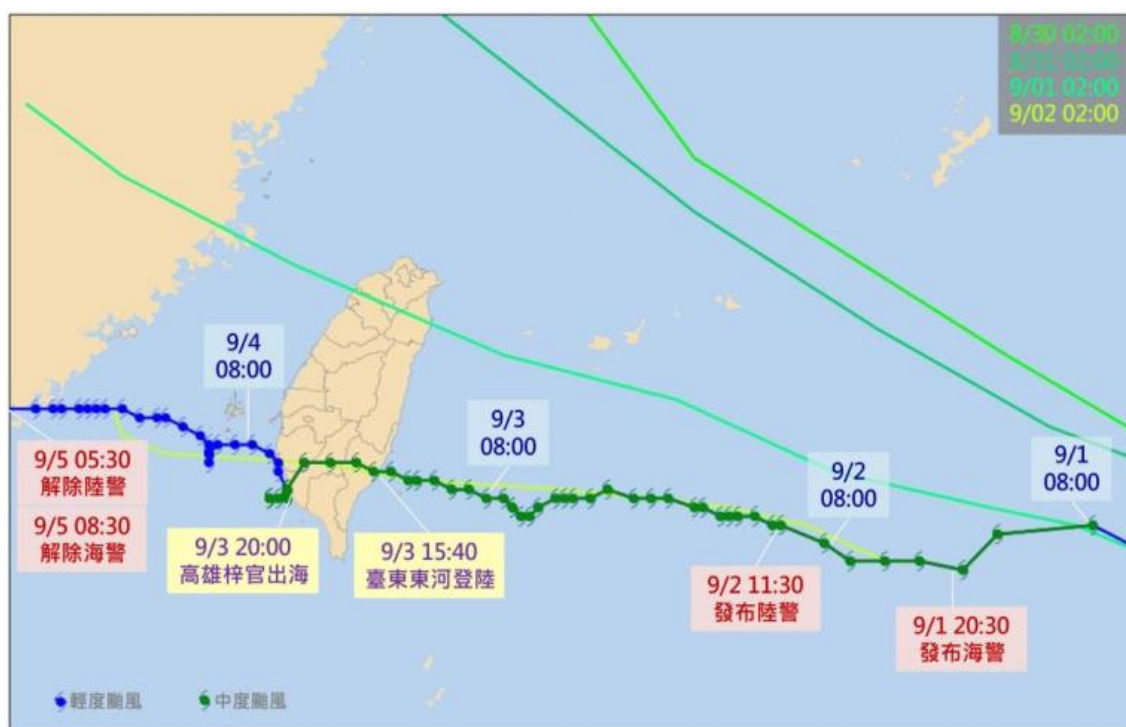


圖 1 2023 年海葵颱風路徑及強度變化圖

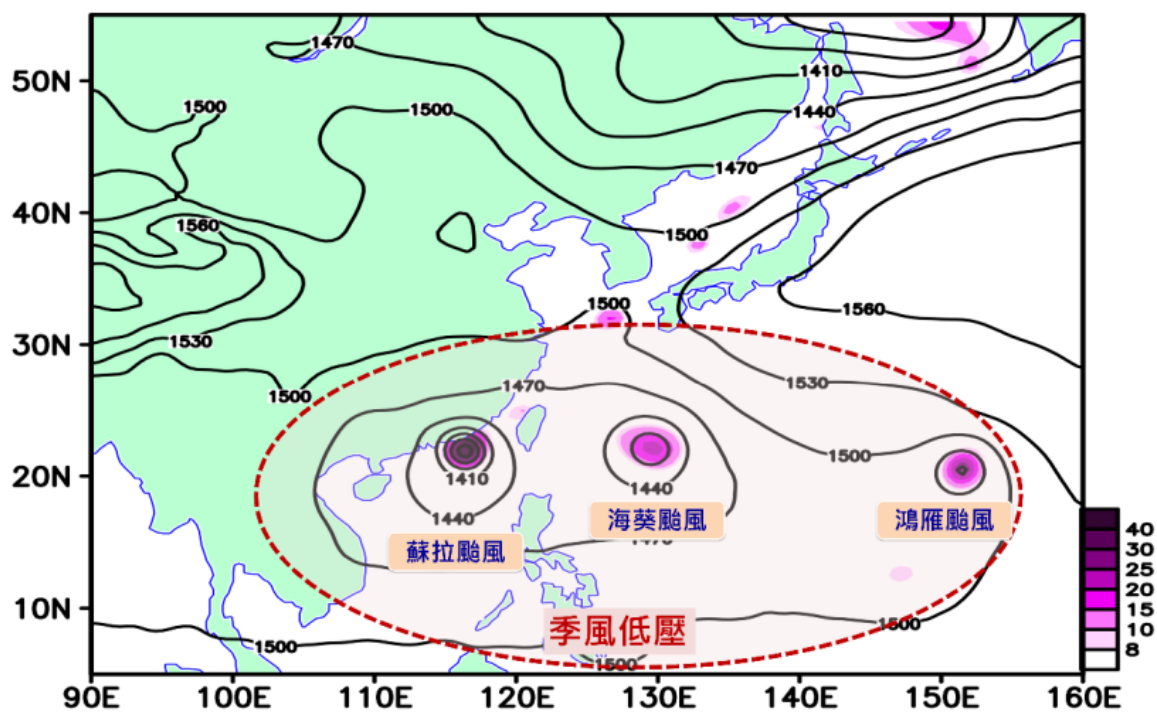


圖 2 2023 年 9 月 1 日 0000 UTC 850 hPa 高度場(黑色實線)及渦度場(色階)

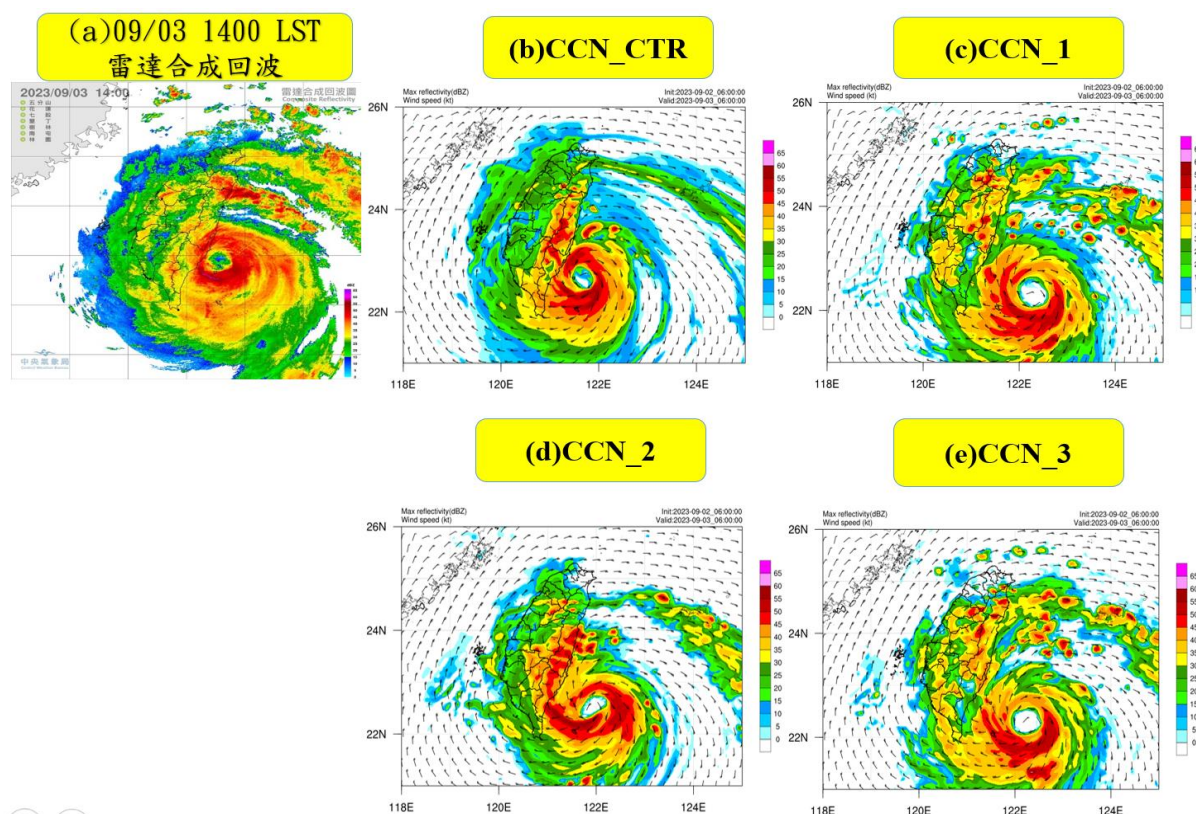


圖 3 2023 年 9 月 3 日 1400 LST 雷達回波與模擬回波比較圖

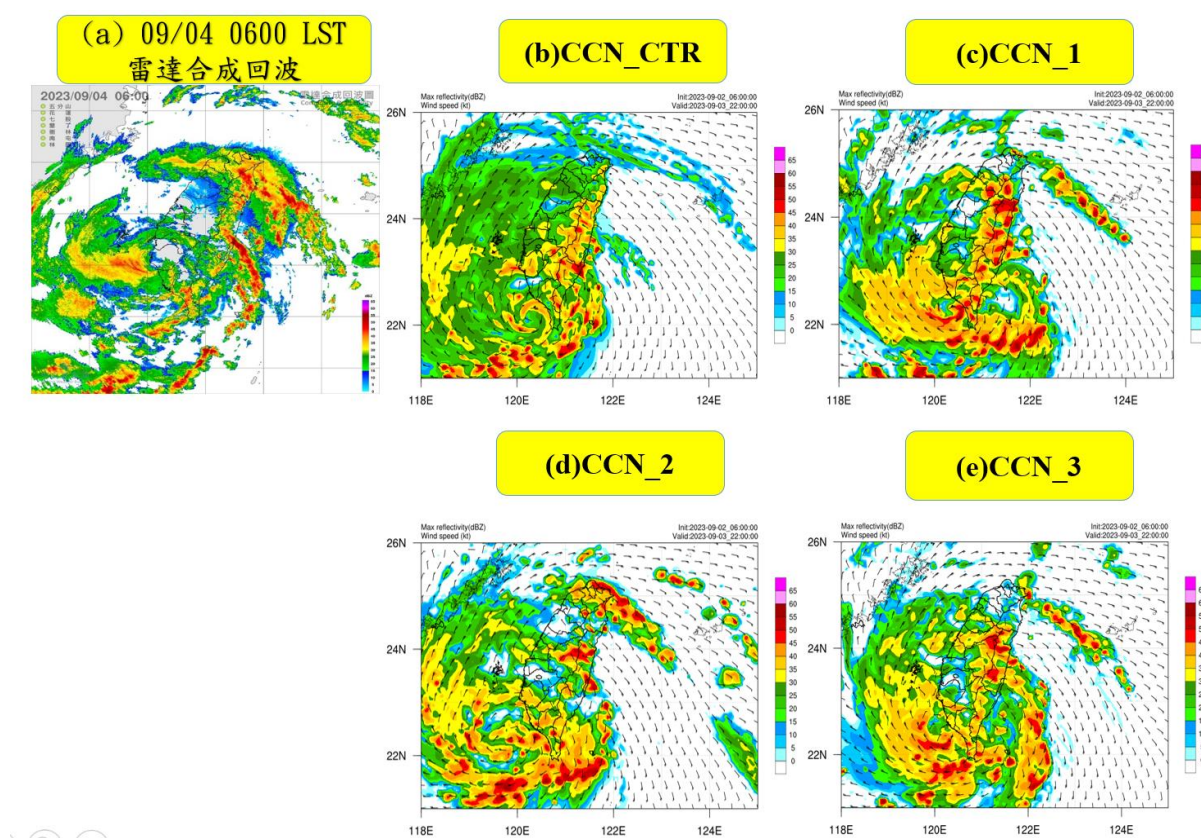


圖 4 2023 年 9 月 4 日 0600 LST 雷達回波與模擬回波比較圖

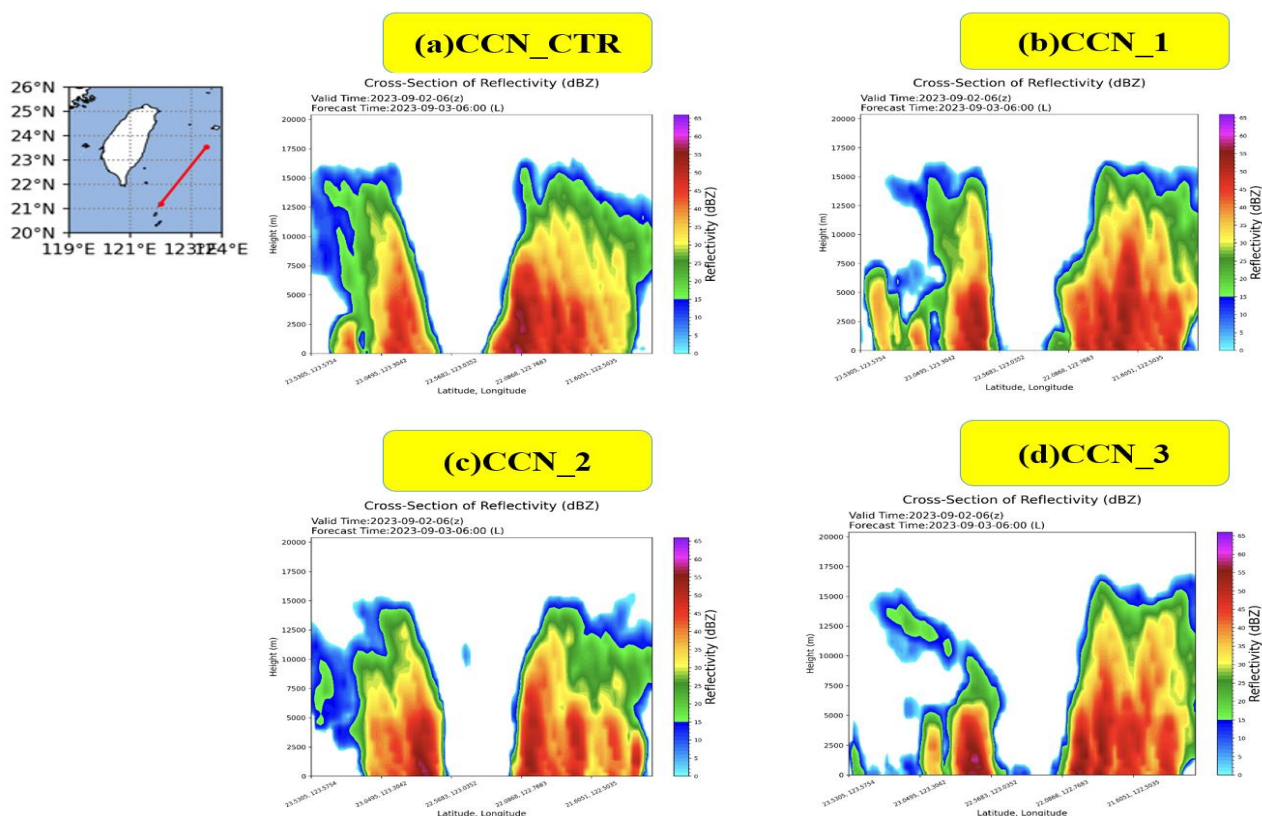


圖 5 2023 年 9 月 3 日 0600 LST 海葵颱風中心回波剖面比較圖

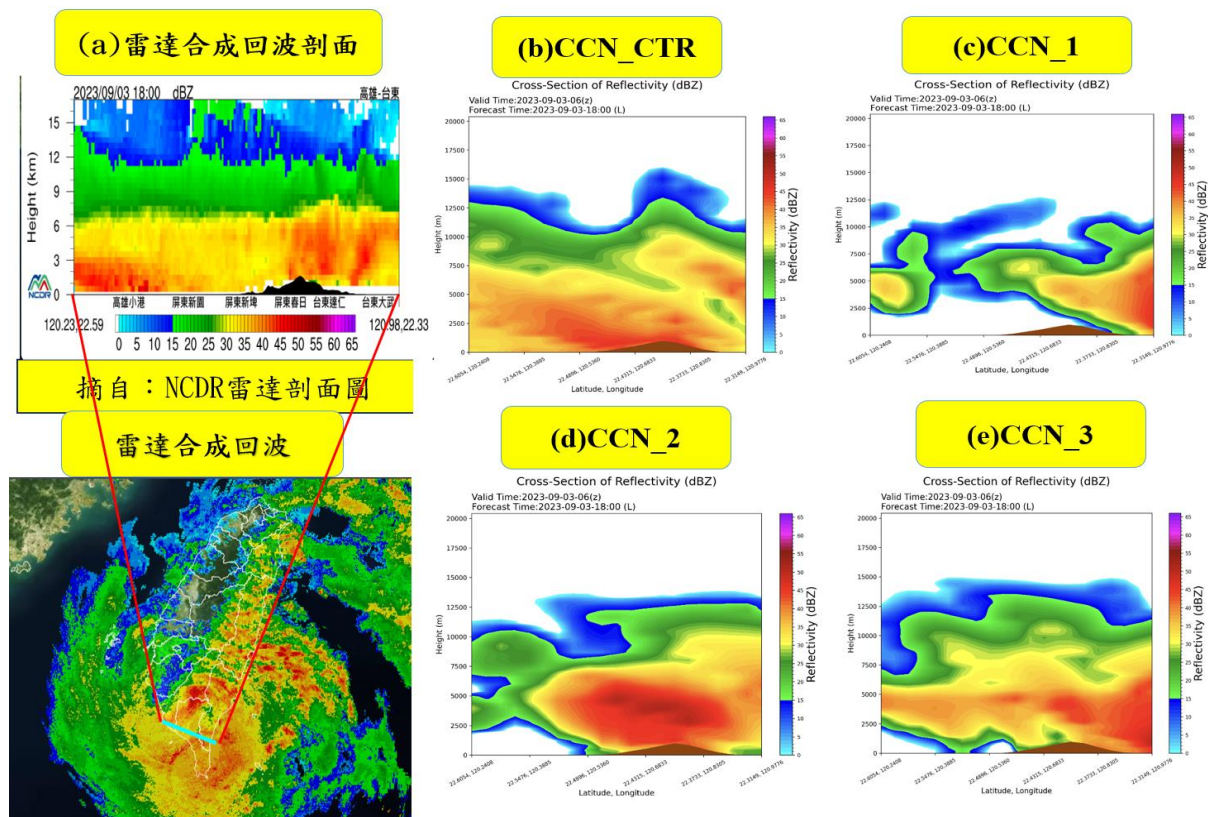


圖 6 2023 年 9 月 3 日 1800 LST 海葵颱風回波剖面比較圖

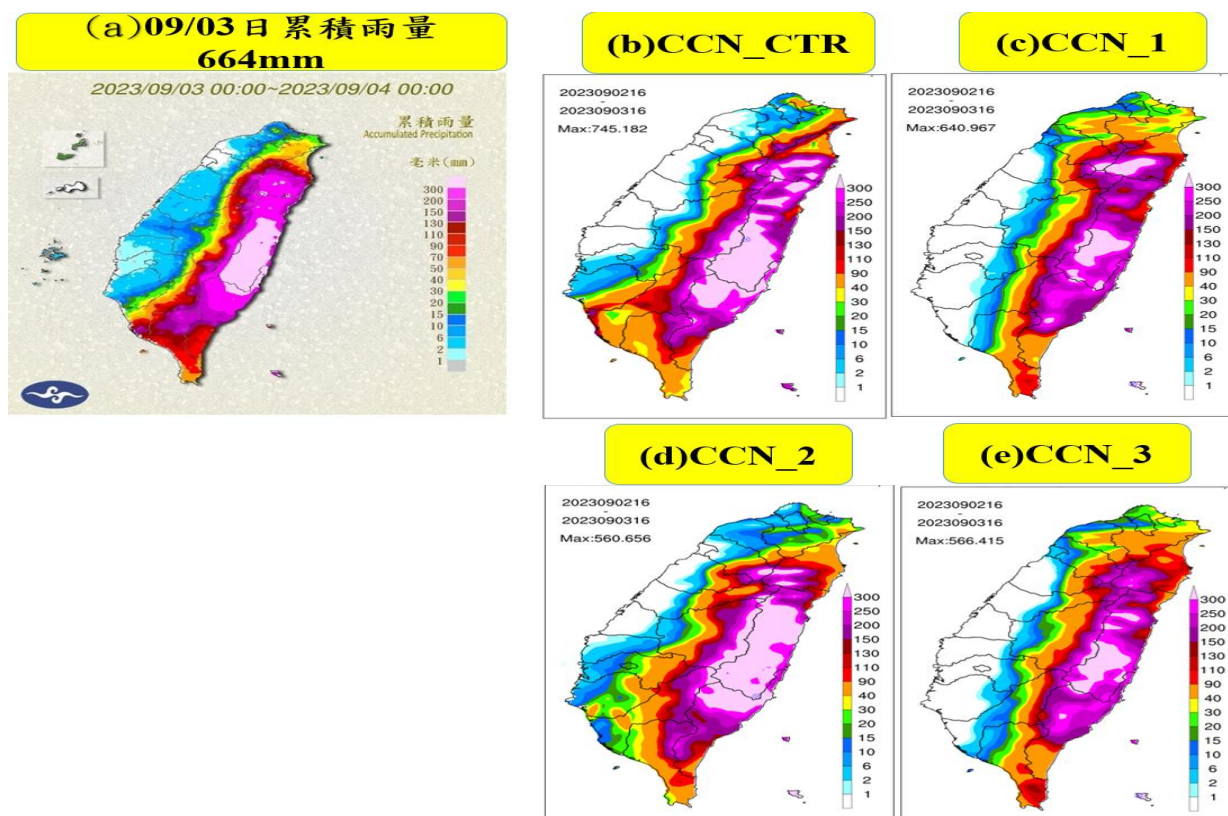


圖 7 2023 年 9 月 3 日累積雨量及模擬累積雨量比較圖

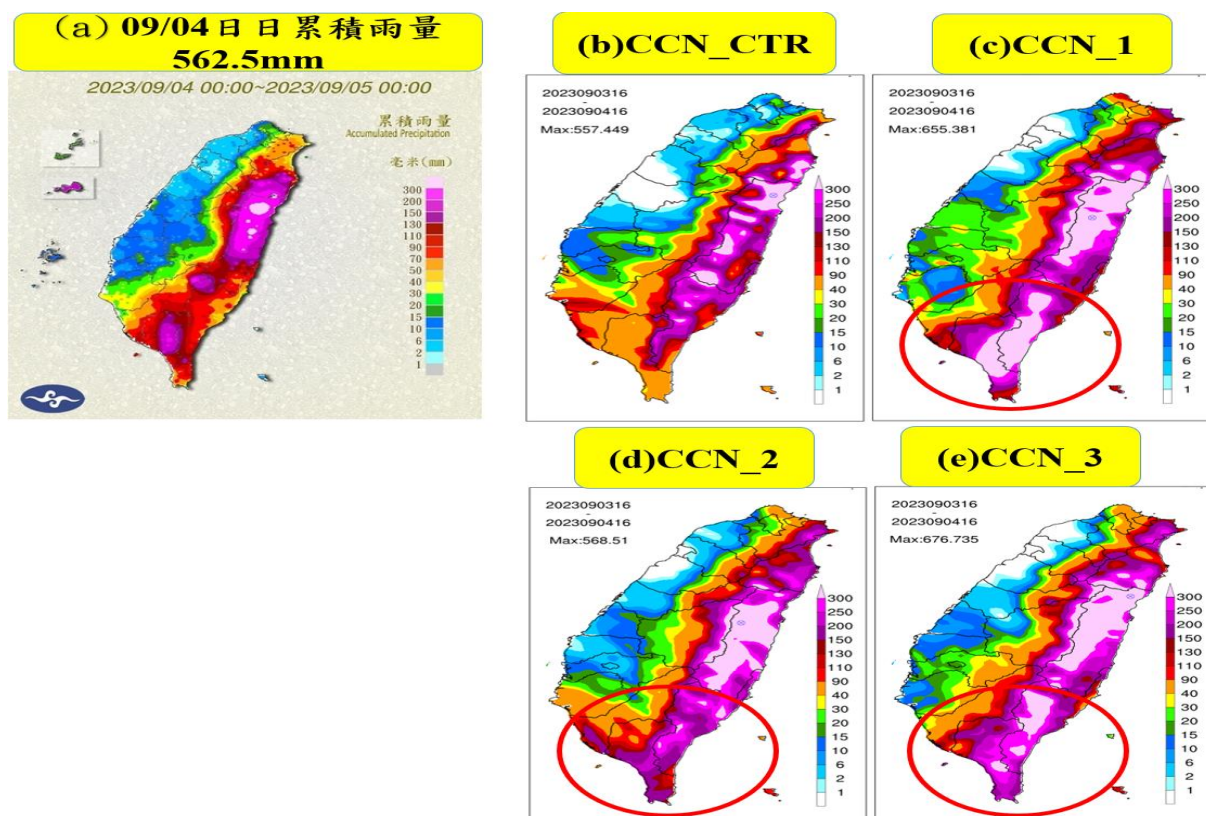


圖 8 2023 年 9 月 4 日累積雨量及模擬累積雨量比較圖

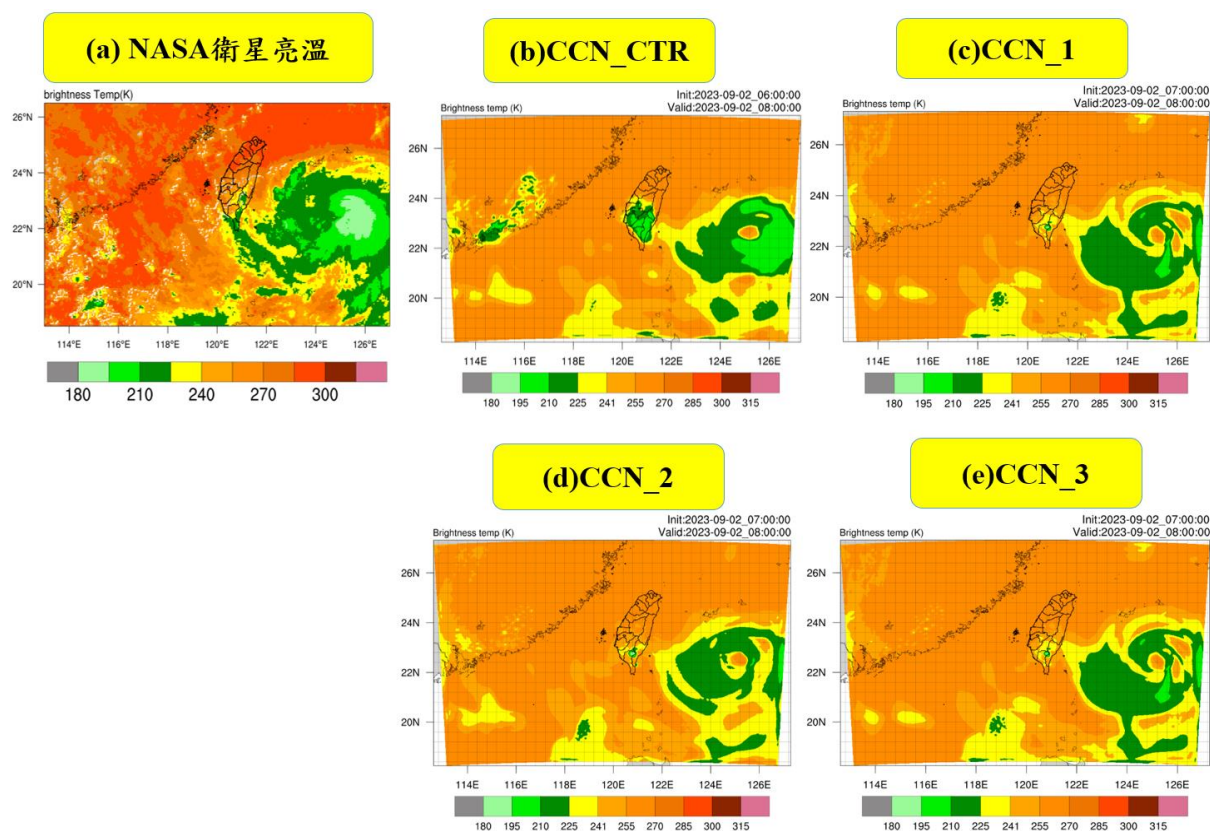


圖 9 2023 年 9 月 2 日 1600 LST NASA 衛星亮溫及模擬亮溫比較圖

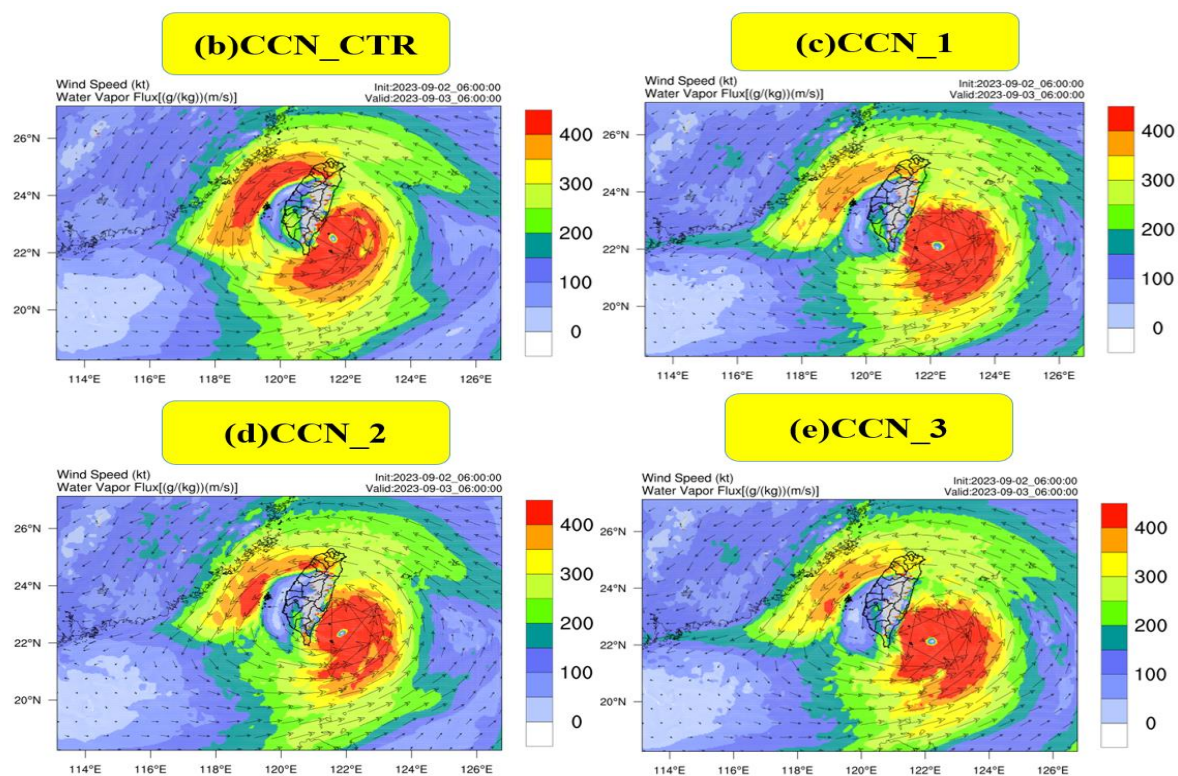


圖 10 2023 年 9 月 3 日 1400 LST 850hPa 水氣通量模擬圖

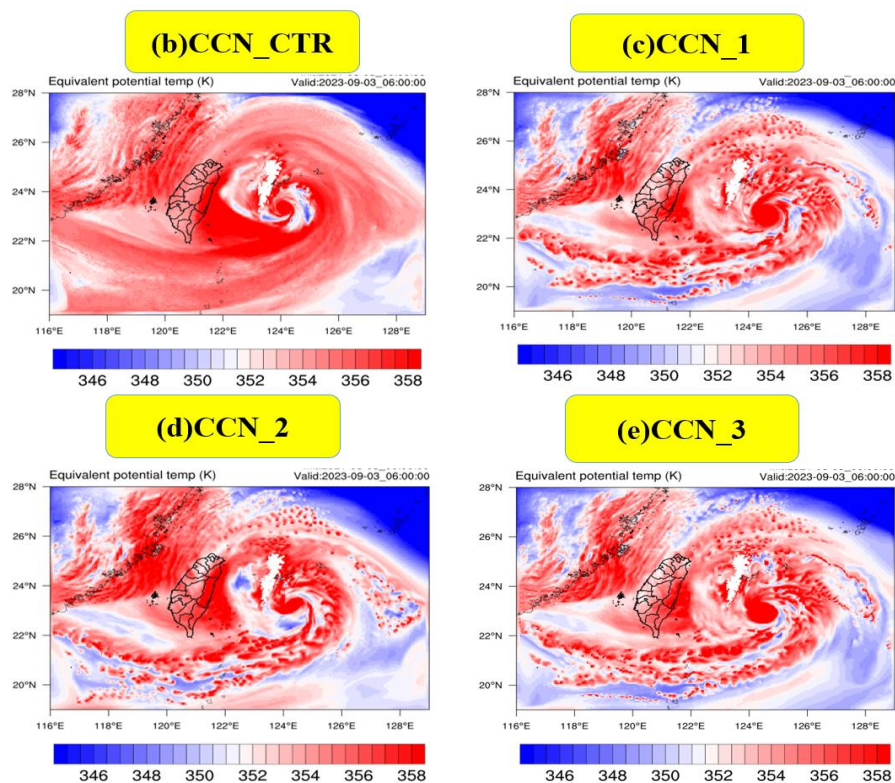


圖 11 2023 年 9 月 3 日 1400 LST 850hPa 相當位溫模擬圖

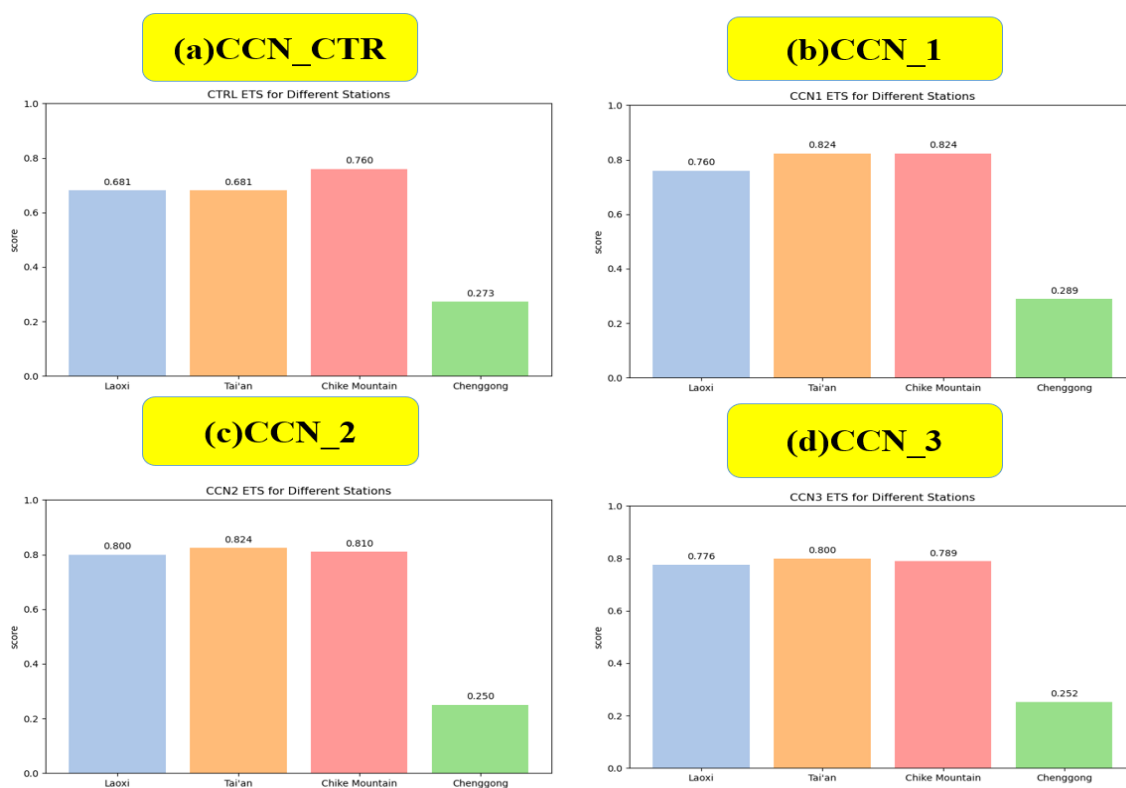


圖 12 各測站公正預兆得分(ETS)比較圖

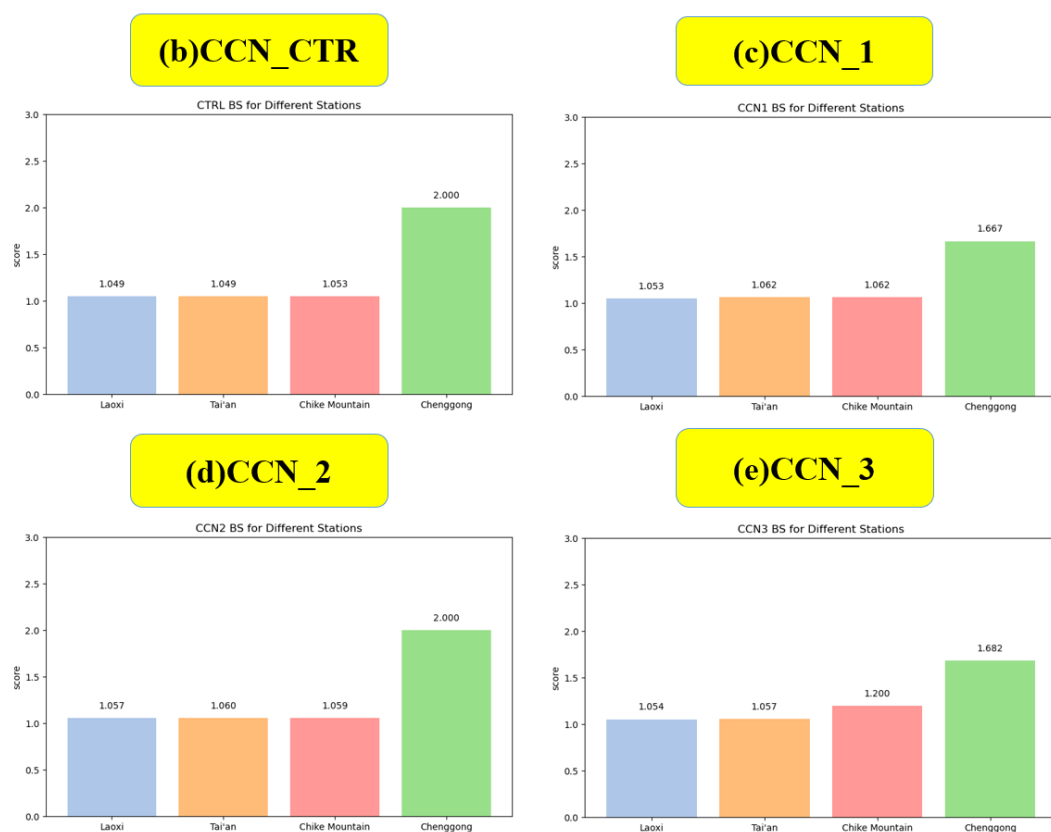


圖 13 各測站公正預兆得分(ETS)比較圖

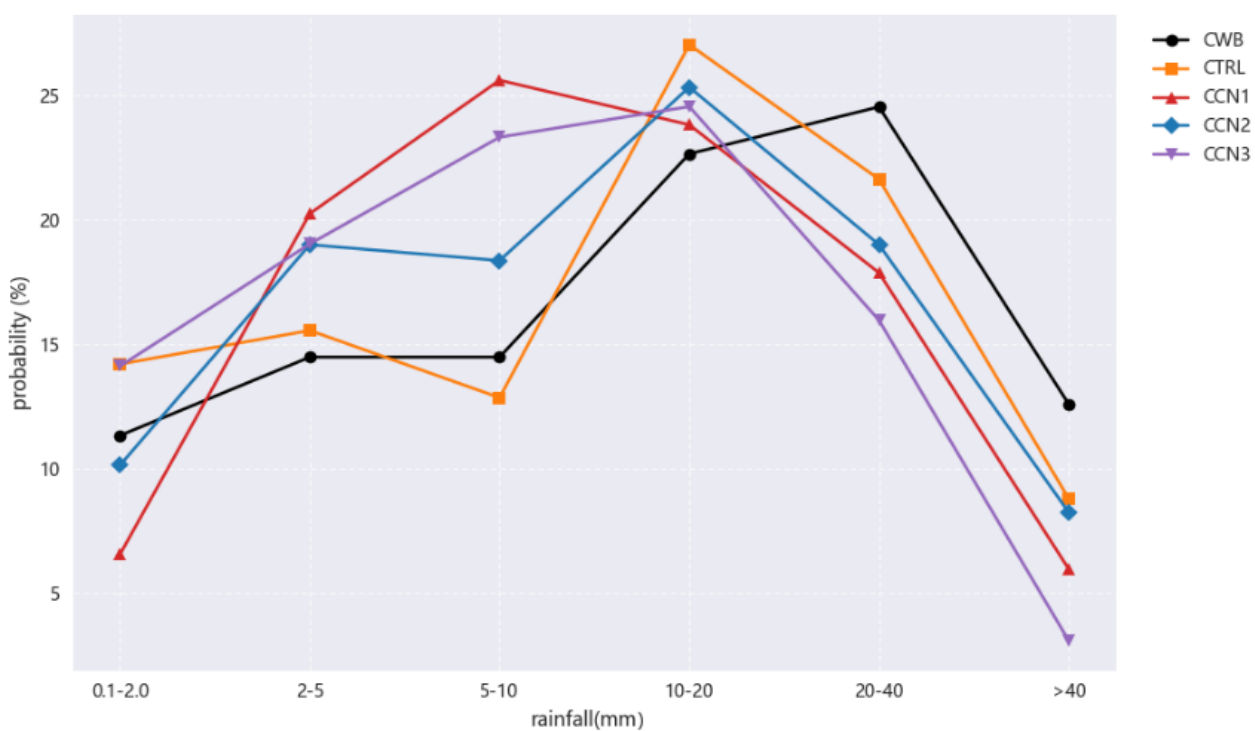


圖 14 降雨強度機率散佈圖

Numerical Simulation Study on the Impact of Cloud Condensation Nuclei on Precipitation in Taiwan during Typhoon Haikui (2023)

Chien-Cheng Tseng, Hung-Hsi Shen

National Defense University

Abstract

This study utilizes the Weather Research and Forecasting (WRF) model, focusing on Typhoon Haikui in 2023 as a case study, to investigate the impact of varying Cloud Condensation Nucleus (CCN) concentrations on typhoon precipitation simulation results. By analyzing the role of aerosol particles in cloud condensation nuclei, the study examines simulations under different CCN concentrations to gain a deeper understanding of how CCN concentration affects typhoon simulation outcomes. The aim is to provide more accurate predictions and disaster prevention measures to address potential typhoon hazards in Taiwan.

The research findings indicate that the accumulated rainfall simulated by the reanalysis field yields better results. Compared to GFS, there is a significant underestimation in the southern mountainous areas under a 4km resolution grid, which is notably improved after incorporating CCN. By modifying CCN concentrations based on the timing of the typhoon's center making landfall, the study found that using a CCN concentration of 100 cm^{-3} before landfall, and switching to 1000 cm^{-3} upon landfall, produces optimal simulation results, bringing the rainfall amounts closer to actual conditions. While the inclusion of CCN brings the simulated rainfall closer to true values, analysis of the echo profile reveals that CCN intensifies some echo strengths but alters the distribution structure, leading to discrepancies in rainfall areas.

The outcomes of this study contribute to a deeper understanding of how CCN concentrations influence typhoon simulations and offer more accurate predictions and disaster prevention measures to address potential typhoon hazards in Taiwan.

Keywords: WRF Model, Haikui Typhoon, CCN