

石門水庫人工增雨作業成效監測與分析 -以 2023 及 2024 年春季個案為例

藍尚鑫¹、蔡世樵²、侯昭平²

¹ 空軍氣象聯隊、² 國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘要

本研究以 HYSPLIT 模式模擬 2023 年 3 月 25 日(個案一)及 2024 年 3 月 11 日(個案二)兩次施作案例,分析焰劑施放後的軌跡與濃度變化,並結合 ERA5 雲水資料進行比對。結果顯示,焰劑濃度上升與雲水增加時間具有一致性,且 ERA5 雲底高度亦有下降趨勢。另以 WRF 模式進行初始場與雲微物理方案(MORRISON、WSM5)敏感度測試,結果指出以距離施作日 24 小時的初始場,垂直高度 1 km 左右相對才有雲水分布(與 ERA5 較為接近),代表模擬雲水仍需考量 spin up 時間,同時透過沒有加入凝結核參數的模擬,確實驗證低層雲水含量是有受到焰劑影響,;另雨量模擬則以愈接近施作日作為初始場較為適宜。觀測方面,樹林與新竹雙偏極化雷達資料顯示,個案一於焰劑施放後回波強度有明顯增強,且差異反射率呈現橫向大於縱向的水平橢圓形分布,進一步驗證人工增雨成效;個案二則未見明顯增強。

綜合 HYSPLIT 模擬、ERA5 資料、WRF 敏感度測試與雷達觀測結果,證實個案一人工增雨作業對提升雲水量及降雨量具正面效果。未來建議結合本院溫濕度剖面儀觀測資料與 AI 技術,建立基於歷史案例的決策支援系統,以提升人工增雨作業的精準度與成效驗證能力。

關鍵詞：人工增雨、HYSPLIT、ERA5、WRF、雲水

1.前言

隨著全球氣候變遷的加劇,降雨模式逐漸變得不穩定,導致水資源管理面臨嚴峻挑戰,水庫的蓄水能力和供水穩定性受到季節性降雨不均的嚴重影響,人工增雨技術是一種有潛力的解決方案,通過在地面燃燒或雲層中播撒催化劑,例如氯化鈣、碘化銀等,促使雲滴凝結和降水,以達到增加降水量的目的。然而,經濟部水利署於石門水庫集水區實施人工增雨作業並非總是理想,受多種因素的影響,包括氣象條件、地形特徵、作業技術等,因此,對於石門水庫人工增雨作業進行系統性的

成效監測與分析,對於提升技術應用的有效性至關重要。

本研究旨在通過綜合運用氣象再分析資料、雷達探測和地面降水觀測等數據,結合 HYSPLIT 模式與 WRF 模式,對石門水庫區域的人工增雨作業進行詳細的成效評估,量化人工增雨對該地區降水量的具體影響,將重點關注在不同氣象條件下,人工增雨的有效性變化,並探索影響作業成效的關鍵因素。此外,本研究亦將藉由空軍現有之新竹降雨雷達、水利署樹林防災降雨雷達、HYSPLIT(Hybrid Single Particle

Lagrangian Integrated Trajectory Model)、WRF(Weather Research and Forecasting model)等結果進行分析及校驗。

2. 研究資料與模式參數設定

2.1 資料蒐集

實際天氣資料部分，本文自中央氣象署氣候觀測資料查詢服務下載測站資料，主要針對與石門水庫集水區鄰近測站及 ERA5 網格點鄰近測站降水量統計分析，與 WRF 模擬結果進行定量比較；另自大氣科學研究與應用資料庫(ASRAD)天氣圖庫中，針對各種累積降雨圖及降雨雷達圖進行個案圖資收整，以利與 WRF 模式模擬進行定性比較；其中，本文將空軍新竹降雨雷達低仰角各產品觀測數據，作為 HYSPLIT 模式模擬空氣粒子軌跡結果之上空降水回波變化的輔助驗證資料。再分析場部分，選擇 ERA5「自 1940 年至今每小時壓力層數據」，使用雲液態水含量、溫度、u & v 向量風場等四項變數進行 PYTHON 繪圖分析；另 HYSPLIT 模式選擇國家環境預報中心及美國國家大氣科學研究中心(NCEP/NCAR)合作的再分析場作為大氣背景數據，以進行焰劑施放後之前推軌跡及濃度模擬，將 ERA5 及 HYSPLIT 模擬結果，作為驗證人工增雨對空中雲水含量之影響。WRF 模擬則選用 NCEP 全球預報系統(GFS)最終網格分析資料集(Final Reanalysis Data; FNL)，針對地面降雨量及空中雲水含量，進行不同時間初始場及不同雲微物理方案的敏感度測試。

2.2 模式參數設定

本研究針對水利署人工增雨個案一及個案二進行模擬焰劑在空氣中的擴散情況，模擬起始時間分別為 2023 年 3 月 25 日 1600 LST 以及 2024 年 3 月 11 日 1400 LST，模

擬 12 小時，使用解析度為 0.25° 的 NCEP/NCAR 再分析數據；焰劑燃燒位置均為霞雲測站，設定焰劑成分為氯化鈣(CaCl_2)，速率為每小時 10 億個粒子，持續 1 小時，且位於離地表 3,000 m 以下擴散；粒子特性粒徑為 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和密度為 6 g/cc 。(HYSPLIT 參數設定如表 1)。WRF 參數設定初始時間分別為，個案一 2023 年 3 月 22, 23, 24, 25 日 2000 LST 及個案二 2024 年 3 月 8, 9, 10 日 2000 LST 進行初始場敏感度測試，巢狀範圍設定 27 km、9 km 和 3 km 三種不同解析度的網格，以便精細描述小尺度天氣現象，並使用 NCEP GFS FNL 0.25° 資料作為初始和邊界條件。(WRF 參數設定如表 2)。

3 研究結果

3.1 個案模式模擬分析與驗證方法

利用 HYSPLIT 還原當初人工增雨個案環境場焰劑粒子軌跡及濃度分布，並將模擬結果疊加 ERA5 網格點，依粒子濃度模擬涵蓋與否選取網格點(如圖 1)，及與之相鄰中央氣象署觀測站(如圖 2)，並透過分析此三個網格點 ERA5 雲水含量變化驗證 HYSPLIT 可信度，作為後續還原個案環境場基底。雨量部分，將鄰近 ERA5 網格點之測站地面雨量統計分析，以定量方式與 WRF 模擬結果比對；另以中央氣象署雨量圖與 WRF 模擬出圖結果，執行定性比較。雲水部分，透過 ERA5 網格點 ERA5 雲水含量數值變化及時序圖，與 WRF 模擬空中雲水變化結果，進行定性及定量驗證。其中，WRF 模擬選用兩個雲微物理方案進行測試，分別為 MORRISON 及 WSM5(WRF Single-Moment 5-class)方案。

3.2 HYSPLIT 模式模擬結果

石門水庫個案兩次施作時間分別為

2023 年 3 月 25 日 1730 LST 及 1920 LST。HYSPLIT 模擬結果，焰劑施放 1 小時後走向均為西南方，高度分別為 445.3 m 至 452.5 m 之間（如圖 3），及 442.6 m 至 451.4 m（如圖 4），與之最相鄰且有濃度擴及者為 ERA5 網格點 1，而濃度未擴及者為 ERA5 網格點 2，ERA5 雲底高度得知兩次焰劑施放 1 小時後，雲底高度雖未有持續往下降趨勢，但高度仍然維持在偏低的位置，1800 LST 及 2000 LST 為兩度焰劑施放後雲底高度下降最低時間點（如圖 5）。

3.2.1 ERA5 網格點 1 地面雨量模擬分析

定性角度，以初始場 2023 年 3 月 25 日模擬結果色塊分布，與中央氣象署雨量圖較相近（如圖 6）；定量角度，鄰近 ERA5 網格點 1 測站累積降雨時序圖（如圖 7），兩次爬升時間點位於兩次焰劑施放後 1 小時內；WRF 模擬結果與鄰近測站數值比對，顯示初始場 2023 年 3 月 25 日降雨量模擬值為 14.34 mm，鄰近 ERA5 網格點 1 測站觀測值分別為，復興測站 19.0 mm 及 烏嘴山測站 15.5 mm，測站雨量平均值為 12.25 mm，雖略低於模擬值，但相較初始場 3 月 23 日及 24 日卻是最相近（如表 3），故模擬地面雨量初始場以施作日模擬表現最貼近實際狀況。

3.2.2 ERA5 網格點 1 空中雲水含量剖面時序模擬分析

ERA5 雲水含量表現（如圖 8 d），第一次焰劑施放（即圖中紅色陰影區），雲水含量 0.14 g/kg 增加至 0.2 g/kg，高度持續下降至地面；第二次焰劑施放（即圖中綠色陰影區），雲水無明顯持續下降至地面情況，而兩次焰劑施放高度與 HYSPLIT 模式軌跡高度涵蓋範圍均相重疊（即圖中紫色陰影區），推論可能受到部分焰劑施放影

響。定性角度，WRF 模擬結果以初始場 2023 年 3 月 24 日（如圖 8 c 及圖 9 c）1 km 以下有些微雲水分布，定量分析亦同（如表 4 及表 5），故雲微物理方案選擇以 3 月 24 日初始場進一步探討。MORRISON 方案初始場 2023 年 3 月 24 日模擬結果（如圖 8 c），第一次焰劑施放 1 小時（即紅色陰影區）後，最低雲水高度小於 0.5 km，無持續下降趨勢，且於 1 km 以下最大雲水含量為 0.2 g/kg，另第二次焰劑施放 1 小時（即綠色陰影區）後，雲水最低高度小於 1.5 km，且於 1 km 以下最大雲水含量為 0.16 g/kg（如表 4）；WSM5 方案初始場 2023 年 3 月 24 日模擬結果（如圖 9 c），第一次及第二次焰劑施放 1 小時（即紅色及綠色陰影區）後，雲水最低高度小於 1 km，無持續下降至地面趨勢，於 1 km 以下最大雲水含量分別為 0.14 g/kg 及 0.12 g/kg（如表 5）。故透過未加入凝結核參數的 MORRISON 方案及 WSM5 方案模擬結果，驗證 ERA5 低層之雲水含量應為受到人工增雨焰劑施放後的影響；另空中雲水有別於地面累積雨量模擬表現，需距離施作日 24 小時的初始場模擬結果，較能表現出 1 km 以下雲水含量，故模擬雲水相較地面累積雨量反而需要相對長的 spin up 時間（參考 3.2.1 節結論）。

3.2.3 ERA5 網格點 1 降水雷達驗證分析

樹林降水雷達回波圖分析得知，兩次焰劑施放前無回波通過 ERA5 網格點 1（如圖 10 a,c），而第一次焰劑施放時，降水回波從 ERA5 網格點 1 西到西北面經過（如圖 10 b），第二次焰劑施放時，降水回波以西南往東北方向通過 ERA5 網格點 1（如圖 10 d）；兩次焰劑施放 1 小時後，降水回波持續由西南往東北方向通過 ERA5 網格點

1，回波強度無明顯增強（如圖11）。另空軍新竹降水雷達反射率分析得知，第一次焰劑施放1小時後，回波強度有明顯增強變化，回波強度數值10至20 dBZ增強至30至40 dBZ之間（如圖12 a,b,c），第二次焰劑施放1小時後，回波強度未有明顯增強情況（如圖12 d,e,f），而差異反射率分析得知，第一次焰劑施放1小時後，色階自綠色變為黃色（即數值0至2之間）（如圖13 a,b,c），表示觀測到水平極化回波強度大於垂直極化回波強度，此時水滴粒子形狀為水平拉長，如雨滴在重力作用下的扁橢圓形狀，第二次焰劑施放1小時後，維持於綠色色階（如圖13 d,e,f）。由此推論，ERA5網格點1於焰劑施放前較無明顯劇烈天氣系統影響，當第一次焰劑施放1小時後，降水回波強度確實有增強的變化趨勢，且差異反射率亦同步增加，顯示環境中的水滴粒子，可能因受到焰劑施放而增加水滴粒徑大小並達到有效碰撞。

3.2.4 ERA5網格點2地面雨量模擬分析

ERA5網格點2為HYSPLIT模擬結果之濃度未擴及範圍點，其定性分析結果同ERA5網格點1（如圖6）。定量角度，透過WRF模擬結果與鄰近測站逐時雨量圖數值比對分析（如圖14），顯示初始場2023年3月25日降雨量為16.31 mm，而鄰近ERA5網格點2測站觀測值分別為，桃山測站1.5 mm、雪山東峰測站4.0 mm及雪山圈谷測站6.0 mm，測站雨量平均值為3.8 mm，明顯低於模擬值（如表6），故ERA5網格點2未受到地面焰劑施放影響可能性高。

3.2.5 ERA5網格點2空中雲水含量剖面時序模擬分析

從ERA5網格點2雲水剖面圖（如圖15）與ERA5網格點1雲水剖面圖（如圖8 d）相較

得知，ERA5網格點2雲水表現之雲底高並未隨著焰劑施放時間點後下降趨勢，與ERA5網格點1之雲水表現截然不同，故由此驗證ERA5網格點2確實如HYSPLIT模擬結果，並非為焰劑粒子軌跡及濃度擴及範圍處。

3.3 2024年3月11日個案HYSPLIT模式模擬結果

個案二HYSPLIT模式模擬結果，焰劑施放後走向由南往北遠離石門水庫集水區，行經軌跡高度為428.9 mm至453.2 mm之間（如圖16），且與之最相鄰且有濃度擴及點為ERA5網格點3，而濃度未擴及點為ERA5網格點1，分別作為各參數正反對照組。個案二同個案一，同為地面燃燒焰劑方式，得知焰劑施放2小時後（即1600 LST），雲底高度於1600 LST至1700 LST下降幅度最大，自75 m下降至50 m以下（如圖17）。

3.3.1 ERA5網格點3地面模擬分析

定性角度，以初始場2024年3月10日模擬結果色塊分布，與中央氣象署雨量圖較相近（如圖18）；定量角度，將WRF模擬結果與鄰近測站降雨時序圖比對分析（如圖19），顯示初始場2024年3月10日模擬降雨量為13.4 mm，而鄰近ERA5網格點3測站觀測值分別為，八德蔬果測站16.5 mm、中壢測站19.0 mm及農工中心測站18.0 mm，測站雨量平均值17.8 mm，略高於模擬值，但相較初始場3月8日及9日卻是最相近的（如表7），故模擬地面雨量初始場以愈接近施作日模擬表現愈接近實際狀況。

3.3.2 ERA5網格點3空中雲水含量剖面時序模擬分析

ERA5空中雲水表現（如圖20 d及圖21 d），雲底高度隨焰劑施放2小時後（即紅色陰影區），於1600 LST至1700 LST之間

有一塊雲水垂直高度約0.5 km，無持續下降趨勢，該區塊最大雲水含量為0.06 g/kg，無持續增加情形，且焰劑施放期間高度與HYSPLIT模式軌跡高度涵蓋範圍並無重疊（即圖中紫色陰影區），推斷此個案未明顯受到焰劑施放影響。定性角度，WRF模擬結果初始場2024年3月10日（如圖20 c及圖21 c）1 km相對其他兩個初始場（即3月8日及9日，如圖20 a,b及圖21 a,b）有雲水分布，而定量分析表現亦同（如表8及表9），故雲微物理方案選擇以3月10日初始場進一步探討。MORRISON方案初始場2024年3月10日模擬結果（如圖20 c），焰劑施放2小時（即紅色陰影區）後，最低雲水高度低於1 km，無持續下降趨勢，且於1 km以下最大雲水含量為0.14 g/kg，大於ERA5雲水含量，顯示此次人工增雨成效有限（如表8）；WSM5方案初始場2024年3月10日模擬結果（如圖21 c），焰劑施放2小時（即紅色陰影區）後，雲水最低高度高於1 km，無持續下降趨勢，且於1 km以下幾乎無雲水含量（如表9）。與個案一結論相同，藉由未加入凝結核參數MORRISON方案及WSM5方案模擬結果，更能突顯與證實ERA5低層雲水含量有無受到人工增雨焰劑影響；另一結論同個案一，空中雲水相較雨量模擬，更需要一定spin up的時間（約24小時），才能表現出1 km左右的雲水反應。圖20 ERA5網格點3 MORRISON方案各初始場雲水模擬結果（a,b,c圖）及ERA5雲水含量時序圖（d圖）

3.3.3 ERA5網格點3降水雷達驗證分析

ERA5網格點3相對空軍新竹降水雷達，距離樹林降水雷達較接近，應當以樹林雷達為主要圖資分析來源，惟2024年3月

11日樹林降水雷達於1351 LST之後因裝備問題，導致無圖資產生，故本文個案二後續部分選用整合雷達圖資進行分析。從整合降水回波圖分析得知（如圖22），整體回波為西往東走向，與HYSPLIT模式分析結果由南往北走向不同（如圖16）；另ERA5網格點3上空之回波強度變化並無增強趨勢，強度數值維持於15至30 dBZ之間（綠色色階）。

3.3.4 ERA5網格點1地面雨量模擬分析

ERA5網格點1為個案二為HYSPLIT模擬結果之濃度未擴及範圍點，其定性角度分析結果同ERA5網格點3，以初始場2023年3月10日最接近中央氣象署雨量圖（如圖18）。定量角度，將WRF模擬結果與鄰近測站逐時地面降雨時序圖比對分析（如圖23），顯示初始場2024年3月11日模擬降雨量為18.6 mm，而鄰近ERA5網格點1測站觀測值，復興測站及烏嘴山測站均為13.0 mm，即測站雨量平均值13.0 mm，明顯低於模擬值（如表10），ERA5網格點1未受到地面焰劑施放影響之可能性高

3.3.5 ERA5網格點1空中雲水含量剖面時序模擬分析

ERA5網格點1雲水剖面圖（如圖24）與ERA5網格點3雲水剖面圖（如圖20 d及圖21 d）比較得知，1530 LST至1800 LST（約焰劑施放2小時後）位於垂直高度1 km處，最大雲水含量為0.08 g/kg，高度無持續下降趨勢，而HYSPLIT模擬之焰劑軌跡高度僅約500 m左右，顯示此區雲水變化應與焰劑無關。

4. 結論

整體研究結果可以清楚得知，WRF針對地面降水量模擬，初始場以愈接近施作

日或是施作日當天，模擬結果與觀測資料最為吻合；另WRF針對雲水含量模擬，對於初始場敏感度測試結果可以得知，距離施作日前24小時初始場，1 km左右空層相對有些雲水分布，而對於雲微物理方案測試，不論是MORRISON或WSM5方案，兩者在距離施作日前24小時初始場，與ERA5雲水表現相較之後，得知WRF除能表現環境場本身雲水狀況外，亦能表現出未受到焰劑施放影響雲水狀態，此結果與有受到焰劑影響的ERA5雲水剖面時序圖，成了明顯對比驗證結果。同時，藉由ERA5資料驗證HYSPLIT模

擬結果可信度，焰劑粒子前推軌跡路徑與ERA5雲底高度與雲水剖面時序圖有相關性表現，加上透過降水雷達產品，瞭解HYSPLIT模擬焰劑粒子軌跡上，各項降水產品低仰角的空中降水回波變化情況。

本文依研究成果擬定石門水庫成效分析量表（如表11）判斷個案一及個案二有無成效，從第一、二項次，兩個案雨量均為上升且雲底高度處於底層甚至下降情況；但第三項次兩個案卻有不同的變化，個案一雲水表現除含量數值增加外，垂直高度甚至降至地面，個案二雲水卻只有停滯情形；第四項次，個案一明顯較個案二HYSPLIT模式軌跡走向偏往集水區，表示地面燃燒焰劑粒子確實往目標區移動，這點對於成效來說極為重要；最後，第五項次降水回波變化，個案一有增強情況，個案二無增強情形。綜上所述，於本研究發現，個案一相對於個案二是比較有成效的

5. 參考文獻

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)., 2016, 2014–2016 El

Niño event, WIKIPEDIA.。

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)., 2022, 2020–2023 La Niña event, WIKIPEDIA.。

NOAA Climate Prediction Center., 2015, “ENSO Diagnostic Discussion.”。

NOAA Climate.gov., 2022, November 2022 La Niña update: Let's get some exercise.。

Hatfield, C., 1915, Rainmaking experiments in California, Journal of Weather Modification, 2(1), 22-30.。

Schaefer, V. J., 1946, The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets, Science, 104(2707), 457-459.。

陳鴻志，(2009)：臺灣天氣修改實驗之高解析度數值模擬，氣象應用，16(2)，205-217。

林育成，(2022)：東亞地區人工增雨之觀測與模擬，大氣科學期刊，79(4)，1123-1141。

經濟部水利署，(2023)：臺灣人工增雨作業成效報告。

蔡世樵、鄭育昆、魏志憲、王中鼎、葉南慶、毛正氣，(2012)：人工增雨技術探討國軍防救災應有之精進作為，第 21 屆國防科技學術研討會，桃園，臺灣。

高煜中、鍾志成、周啟中，(2021)：樹林雨量雷達即時資料於防災應用之研究，天氣分析與預報研討會論文集。

林佩芳、張博倫、陳東成、金弘力，(2018)：區域性防災雷達高時空解析降雨估計之評估，天氣分析與預報研討會論文集。

經濟部水利署，(2019)：北部地區（樹林）防災雨量雷達啟用典禮資料彙編，臺北：經濟部水利署。

- 葉乃荃、林金和、陳天任、林天明，(2010)：空軍雙偏極化氣象雷達之觀測效能與應用，第十四屆大氣科學學術研討會論文集。
- 呂佳鴻，(2010)，：利用雙偏極化雷達資料分析梅雨鋒面降水粒徑分布之物理特性，碩士論文，國立中央大學大氣科學系，桃園，臺灣。
- 葉乃荃、林金和、陳天任、林天明，(2010)：空軍雙偏極化多普勒氣象雷達資料特性分析，第十四屆大氣科學學術研討會論文集。
- 國立台灣大學大氣資源與災害研究中心，(2023)：112 年度人工增雨作業成果報告 (MOEAWRA1120243)，經濟部水利署委託，台北：國立台灣大學。
- NOAA Air Resources Laboratory, 2021, HYSPLIT Model User's Guide.。
- Kringlebotn Nygaard, B. E., Kristjánsson, J. E., & Makkonen, L., 2011, Prediction of in-cloudicing conditions at ground level using the WRF model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(12) 5,2445-2459.。
- 中央氣象局，(2022)：年度天氣報告：降水與乾旱趨勢。
- 經濟部水利署，(2024)：石門水庫集水區雨量測站觀測資料，水利署水文資訊網站。
- 石門水庫網站，(2024)：石門水庫歷史水位查詢圖表。
- 李子儀、曾德晉、黃國禎、吳俊緯，(2021)：氣象 X-band 降雨雷達對機場天氣守視效益，氣象預報與分析，第 249 期。

6.表附錄

表 1 HYSPLIT 模式參數設定表

HYSPLIT settings		
CASE	CASE 1	CASE 2
Start Time	1600 LST 25 Mar 2023	1400 LST 11 Mar 2024
Duration	12 hours	
Meteorology	NCEP/NCAR Reanalysis 0.25 degree	
Source Location	霞雲測站	
Latitude	24.8054°N	
Longitude	121.3684°E	
Height	261 m AGL	
Direction	Forward	
Vertical Motion	Input model data	
Time Step	10 min	
Pollutant	CaCl ₂	
Emission rate	100000000(1/hr)	
Hours of Emission	1	2
Release Duration Time	1 hours	2 hours
Concentration height of levels	3000 m AGL	
Particle Diameter, Density	5(μm),6(g/cc)	
Radioactive decay half-life	1 day	

表 2 WRF 模式參數設定表

WRF settings		
CASE	CASE 1	CASE 2
Initial Data	2000 LST 25,24,23,22 Mar 2023	2000 LST 10,9,8 Mar 2024
Simulation Data	1200-2400 LST 25 Mar 2023	0800-2000 LST 11 Mar 2024
Meteorology	NCEP GFS FNL 0.25 degree	
Domains	27km(320x320)	
	9km(298x352)	
	3km(106x160)	
mp_physics	Morrison(2 moments), WSM5	
ra_lw_physics	rrtm scheme	
ra_sw_physics	Dudhia scheme	
sf_sfclay_physics	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme	
sf_surface_physics	Unified Noah land-surface model	
bl_pbl_physics	YSU scheme	

表 3 ERA5 網格點 1 測站觀測值與 WRF 預測值比較表

網格點 1 中央氣象署測站觀測值	
觀測時間：2023 年 3 月 25 日 1200 LST – 3 月 25 日 2400 LST	
測站名稱	降雨量(mm)
復興測站	19.0
鳥嘴山測站	15.5
網格點 1 WRF 模式預測值	
模擬時間：2023 年 3 月 25 日 1200 LST – 3 月 25 日 2400 LST	
初始場	降雨量(mm)
3 月 23 日	2.07
3 月 24 日	3.42
3 月 25 日	14.34

表 4 2023 年 3 月 25 日個案集水區降水及雲層條件評估項目表 (MORRISON 方案)

目標集水區(ERA5網格點)	石門水庫(ERA5網格點1)					
評估項目	ERA5		WRF MORRISON			
			3/22	3/23	3/24	3/25
集水區12小時累積降水量(mm)	17			2.07	3.42	14.34
焰劑施放後最低雲底高度(km)	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放	None	None	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放
	0	<0.5			<0.5	<1.5
焰劑施放後1km以下最大雲水含量(g/kg)	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放	None	None	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放
	0.2	0.1			0.2	0.16
是否與焰劑施放高度相重疊(紫色陰影區)	yes					
綜合比較結果	累積降水量以3/25數值最貼近集水區雨量站最大值； 雲層條件以3/24底層相對有雲水分布。 ※None表無數值					

表 5 2023 年 3 月 25 日個案集水區降水及雲層條件評估項目表 (WSM5 方案)

目標集水區(ERA5網格點)	石門水庫(ERA5網格點1)					
評估項目	ERA5		WRF WSM5			
			3/22	3/23	3/24	3/25
集水區12小時累積降水量(mm)	17			2.07	3.42	14.34
焰劑施放後最低雲底高度(km)	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放	<1.5	None	<1	
	0	0.5				
焰劑施放後1km以下最大雲水含量(g/kg)	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放	None	None	第一次 焰劑施放	第二次 焰劑施放
	0.2	0.1			0.14	0.12
是否與焰劑施放高度相重疊(紫色陰影區)	yes					
綜合比較結果	累積降水量以3/25數值最貼近集水區雨量站最大值； 雲層條件以3/24底層相對有雲水分布。 ※None表無數值					

表 6 ERA5 網格點 2 測站觀測值與 WRF 預測值比較表

網格點2 中央氣象署測站觀測值	
觀測時間：2023年3月25日1200 LST – 3月25日2400 LST	
測站名稱	降雨量(mm)
桃山測站	1.5
雪山東峰測站	4.0
雪山圈谷測站	6.0
網格點2 WRF模式預測值	
模擬時間：2023年3月25日1200 LST – 3月25日2400 LST	
初始場	降雨量(mm)
3月23日	0.61
3月24日	1.19
3月25日	16.31

表 7 ERA5 網格點 3 測站觀測值與 WRF 預測值比較表

網格點3 中央氣象署測站觀測值	
觀測時間：2023年3月25日1200 LST – 3月25日2400 LST	
測站名稱	降雨量(mm)
八德蔬果測站	16.5
中壢測站	19.0
農工中心測站	18.0
網格點3 WRF模式預測值	
模擬時間：2023年3月25日1200 LST – 3月25日2400 LST	
初始場	降雨量(mm)
3月8日	4.9
3月9日	6.3
3月10日	13.4

表 8 2024 年 3 月 11 日個案集水區降水及雲層條件評估項目表 (MORRISON 方案)

目標集水區(ERA5網格點)	石門水庫(ERA5網格點3)			
評估項目	ERA5	WRF MORRISON		
		3/8	3/9	3/10
集水區12小時累積降水量(mm)	17.8	4.9	6.3	13.4
焰劑施放後最低雲底高度(km)	0.5	2.5	2.5	<1
焰劑施放後1km以下最大雲水含量(g/kg)	0.06	None	None	0.14
是否與焰劑施放高度相重疊(紫色陰影區)	no			
綜合比較結果	累積降水量以3/10數值最貼近鄰近測站雨量平均值； 雲層條件以3/10底層相對有雲水分布。 ※None表無數值			

表 9 2024 年 3 月 11 日個案集水區降水及雲層條件評估項目表 (WSM5 方案)

目標集水區(ERA5網格點)	石門水庫(ERA5網格點3)			
評估項目	ERA5	WRF WSM5		
		3/8	3/9	3/10
集水區12小時累積降水量(mm)	17.8	4.9	6.3	13.4
焰劑施放後最低雲底高度(km)	0.5	<1	2.5	<1
焰劑施放後1km以下最大雲水含量(g/kg)	0.06	0.12	None	0.1
是否與焰劑施放高度相重疊(紫色陰影區)	no			
綜合比較結果	累積降水量以3/10數值最貼近鄰近測站雨量平均值； 雲層條件以3/10底層相對有雲水分布。 ※None表無數值			

表 10 ERA5 網格點 1 測站觀測值與 WRF 預測值比較表

網格點1 中央氣象署測站觀測值	
觀測時間：2024年3月11日0800 LST – 3月25日2000 LST	
測站名稱	降雨量(mm)
復興測站	13.0
烏嘴山測站	13.0
網格點1 WRF模式預測值	
觀測時間：2024年3月11日0800 LST – 3月25日2000 LST	
初始場	降雨量(mm)
3月8日	8.9
3月9日	13.3
3月10日	18.6

表 11 石門水庫人工增雨成效分析量表

石門水庫成效分析		
驗證個案	個案一(2023/03/25)	個案二(2024/03/11)
復興測站逐時雨量	焰劑施放1小時後上升	焰劑施放2小時後上升
ERA5雲底高度	焰劑施放1小時後維持在底層	焰劑施放2小時後下降
ERA5雲水表現	焰劑施放後雲水明顯增加，垂直高度持續降至地面	焰劑施放後雲水無明顯增加，垂直高度維持在1km處
HYSPLIT模擬結果	軌跡及濃度走向趨勢往集水區	軌跡及濃度走向趨勢遠離集水區
集水區雷達回波變化	有增強情況	無增強情況

7.圖附錄

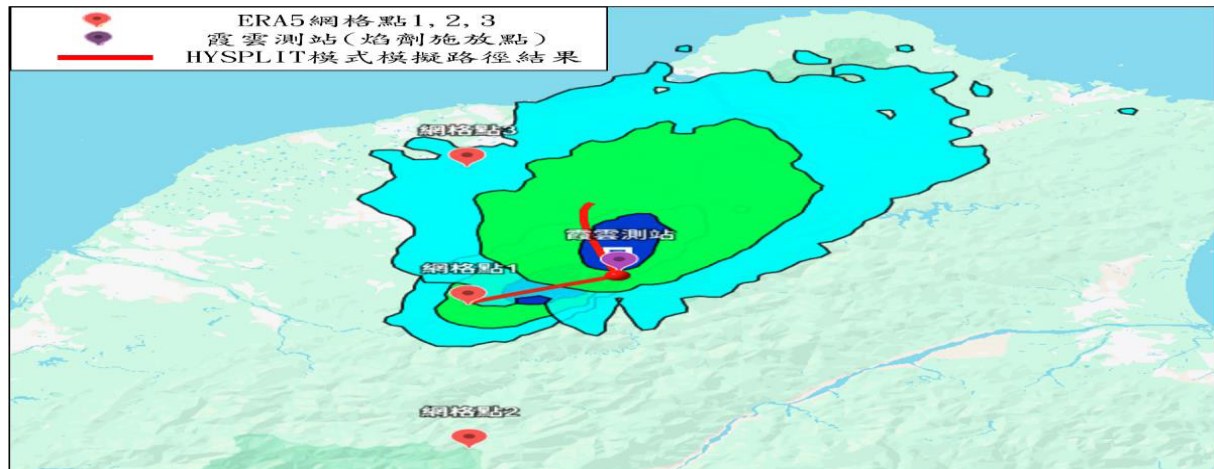


圖 1 HYSPLIT 模擬結果與 ERA5 網格點疊加示意圖

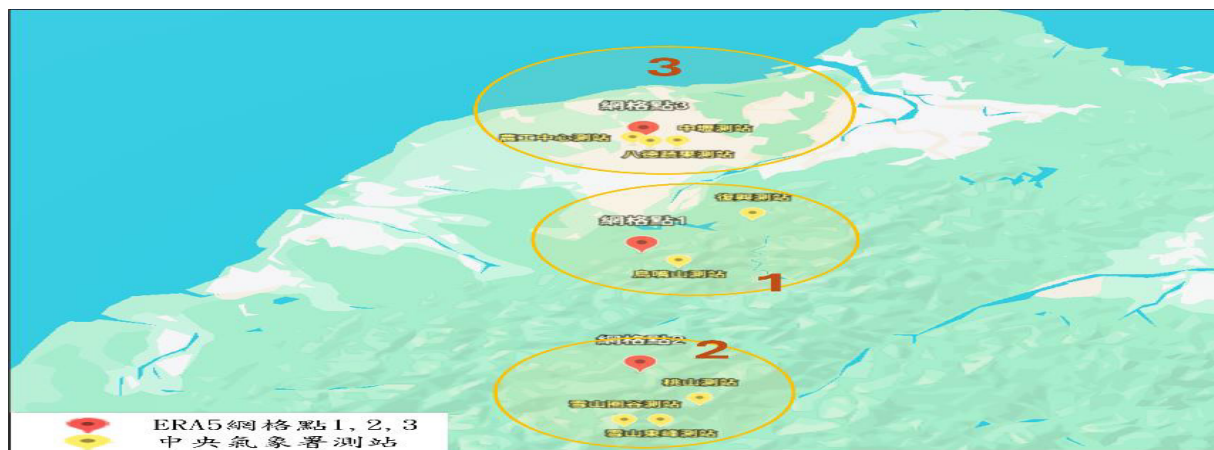


圖 2 鄰近 ERA5 網格點 1 至 3 中央氣象署測站示意圖

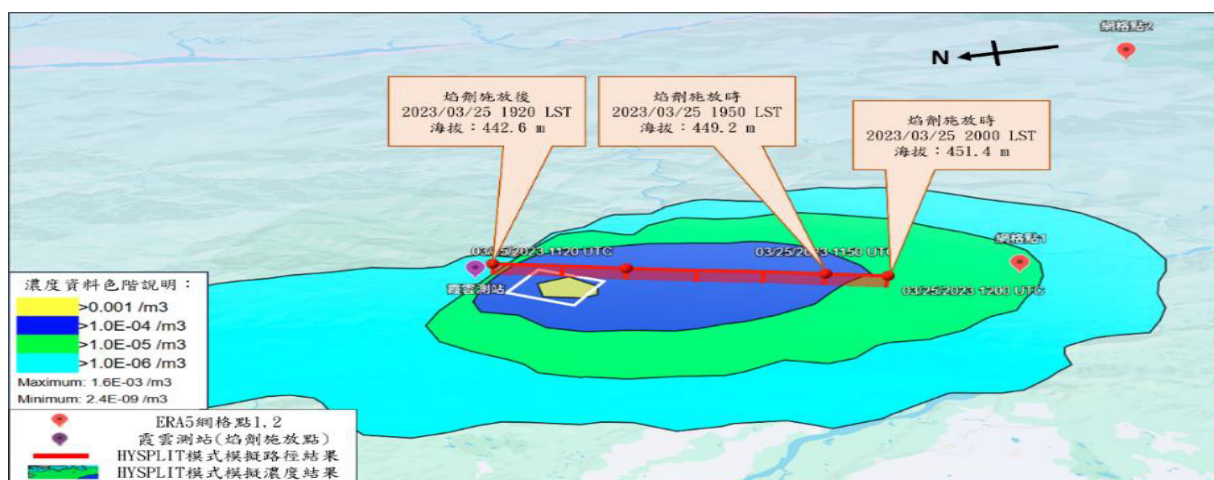


圖 3 2023 年 3 月 25 日個案第一次焰劑施放 HYSPLIT 模擬結果

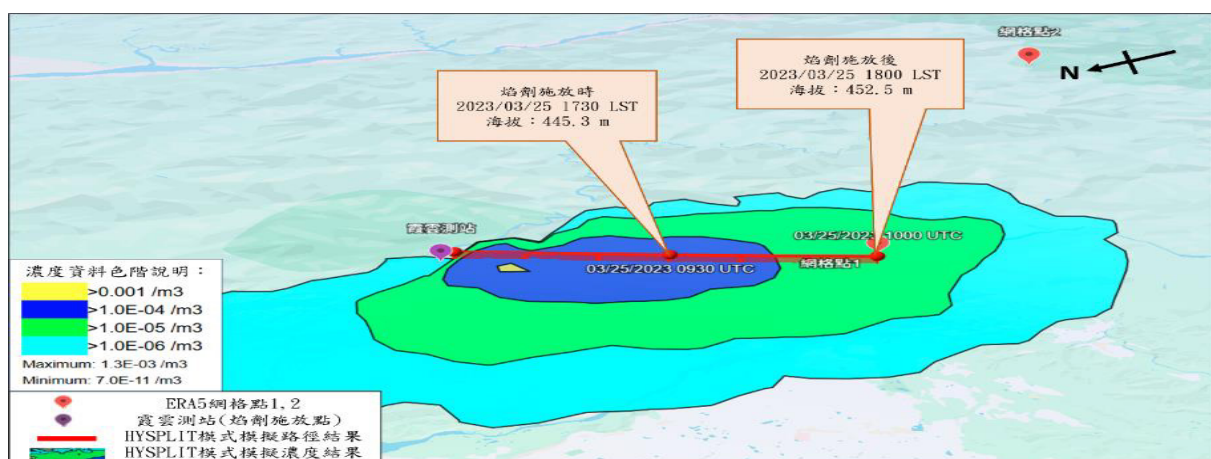


圖 4 2023 年 3 月 25 日個案第二次焰劑施放 HYSPLIT 模擬結果

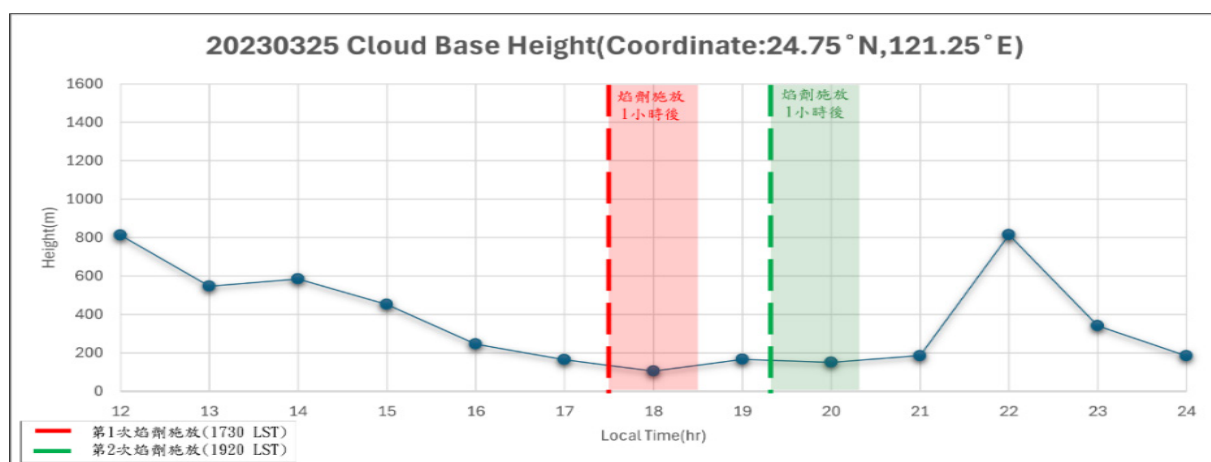


圖 5 ERA5 網格點 1 雲底高度變化時序圖

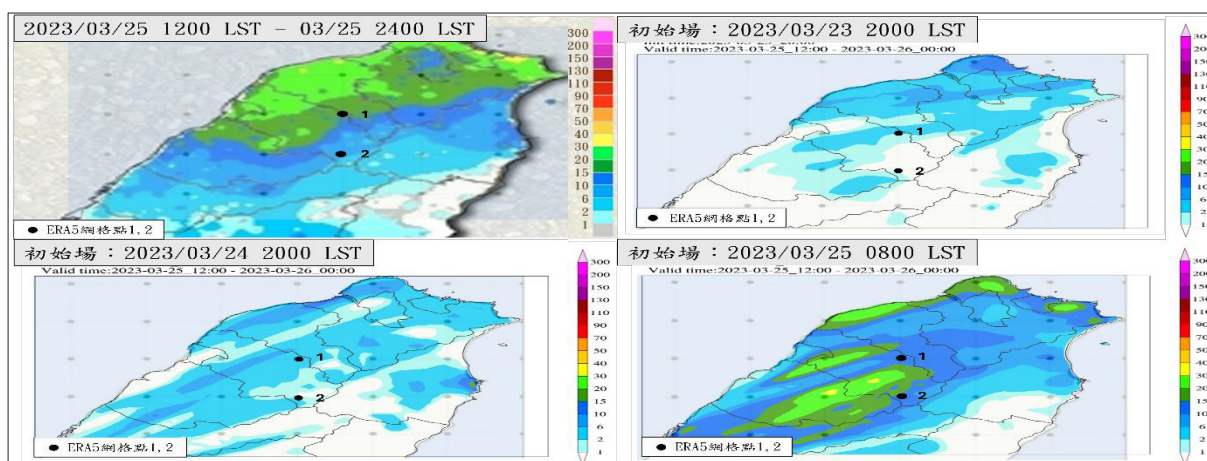


圖 6 中央氣象署地面降雨 (a 圖) 與 ERA5 網格點 1 和 2 各初始場 WRF 雨量模擬 (b,c,d 圖)

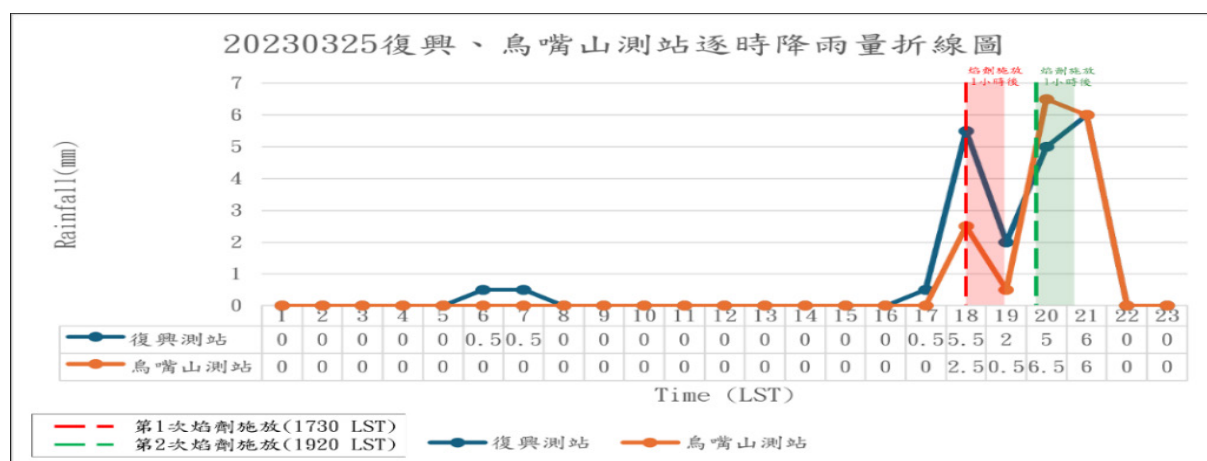


圖 7 ERA5 網格點 1 鄰近測站雨量時序圖

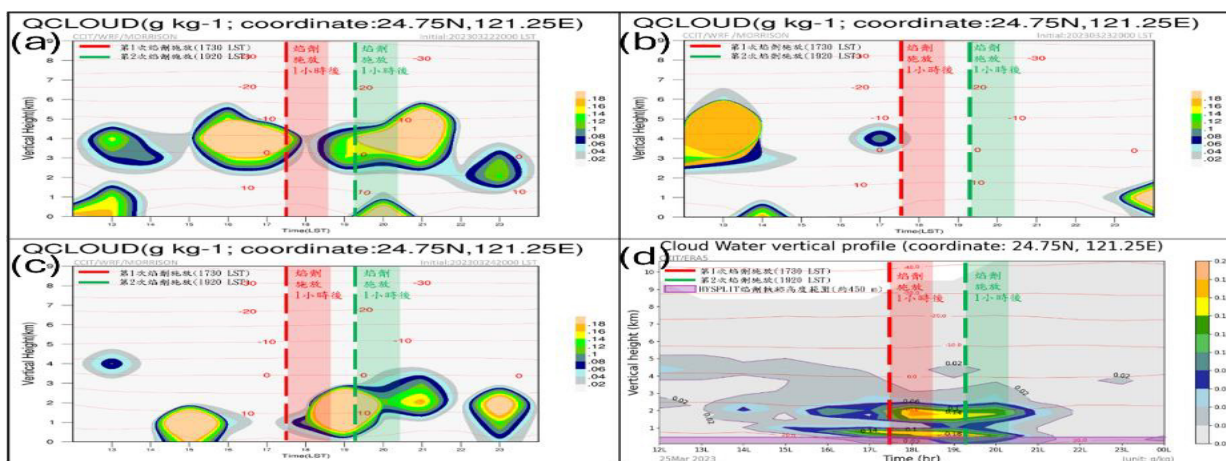


圖 8 ERA5 網格點 1 MORRISON 方案各初始場雲水模擬結果 (a,b,c 圖) 及 ERA5 雲水含量時序圖 (d 圖)

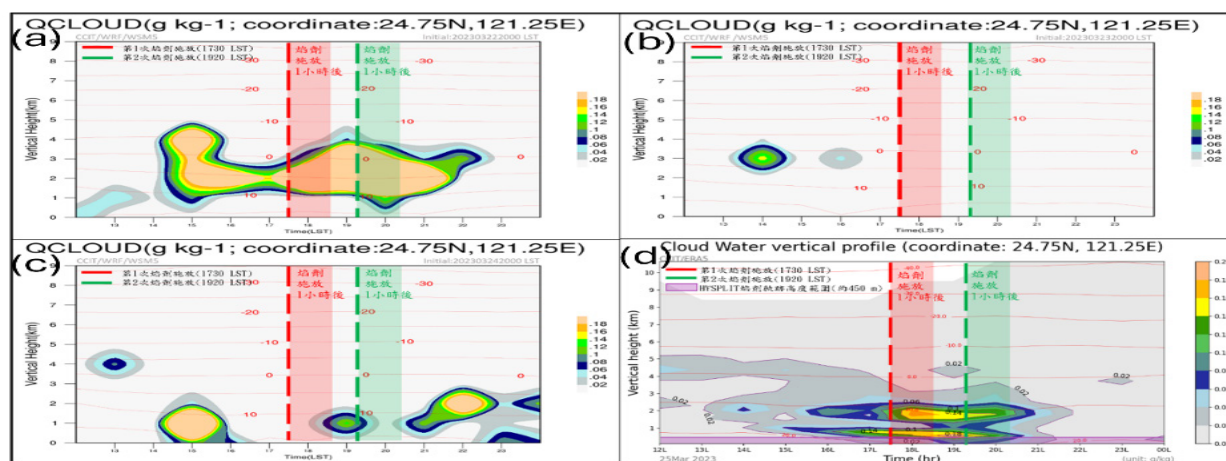


圖 9 ERA5 網格點 1 WSM5 方案各初始場雲水模擬結果 (a,b,c 圖) 及 ERA5 雲水含量時序圖 (d 圖)

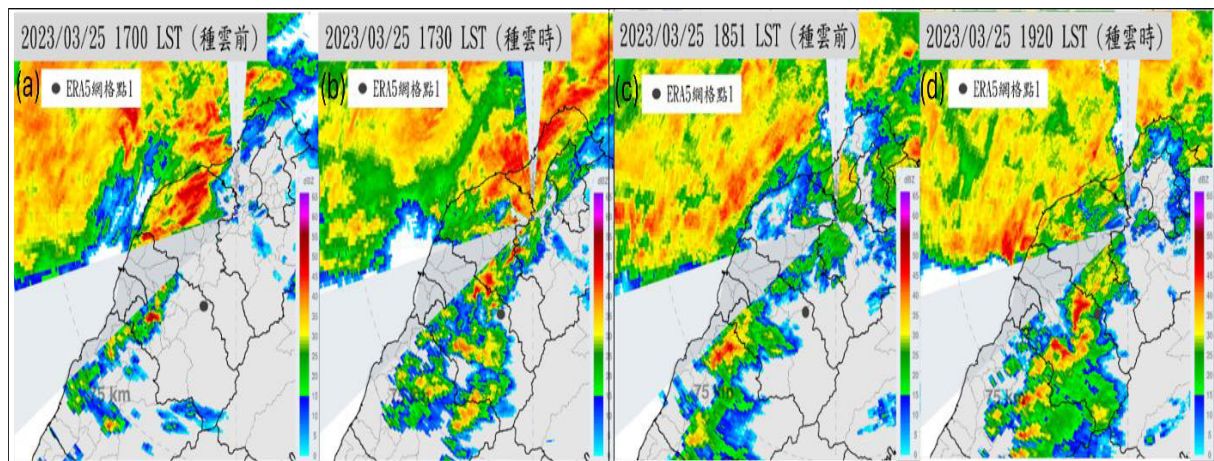


圖 10 2023 年 3 月 25 日個案焰劑施放前、中樹林降水雷達整合回波圖（第一次焰劑施放為 a,b 圖、第二次焰劑施放為 c,d 圖）

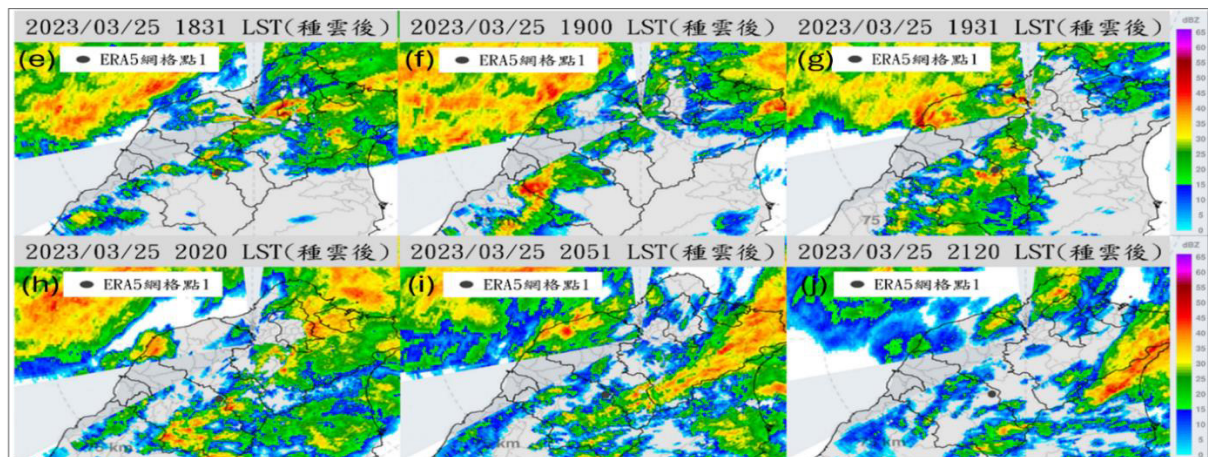


圖 11 2023 年 3 月 25 日個案焰劑施放後樹林降水雷達整合回波圖（第一次焰劑施放為 e,f,g 圖、第二次焰劑施放為 h,i,j 圖）

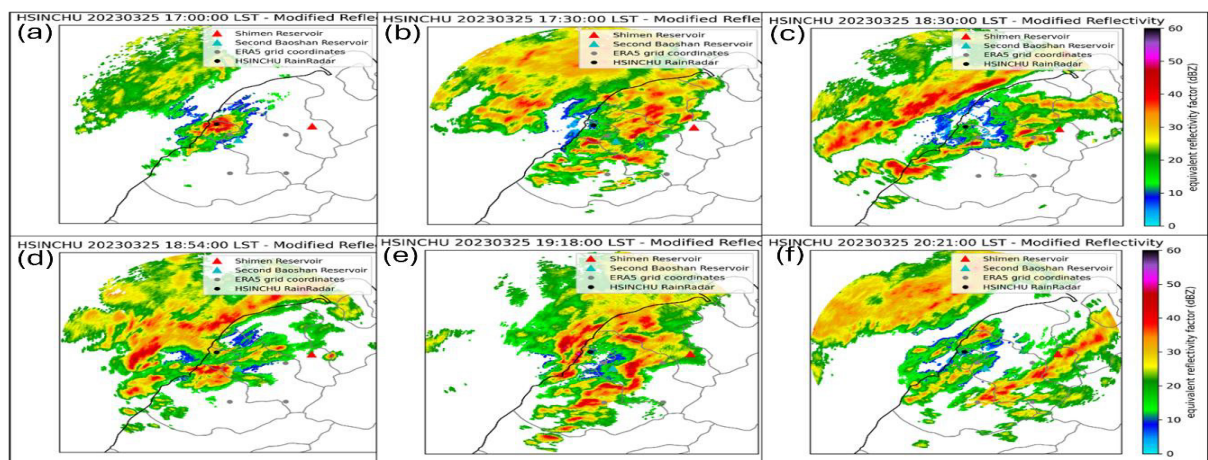


圖 12 2023 年 3 月 25 日個案空軍新竹降水雷達反射率整合回波圖（a,b,c 圖為第一焰劑施放前、中、後；d,e,f 圖為第二次焰劑施放前、中、後）

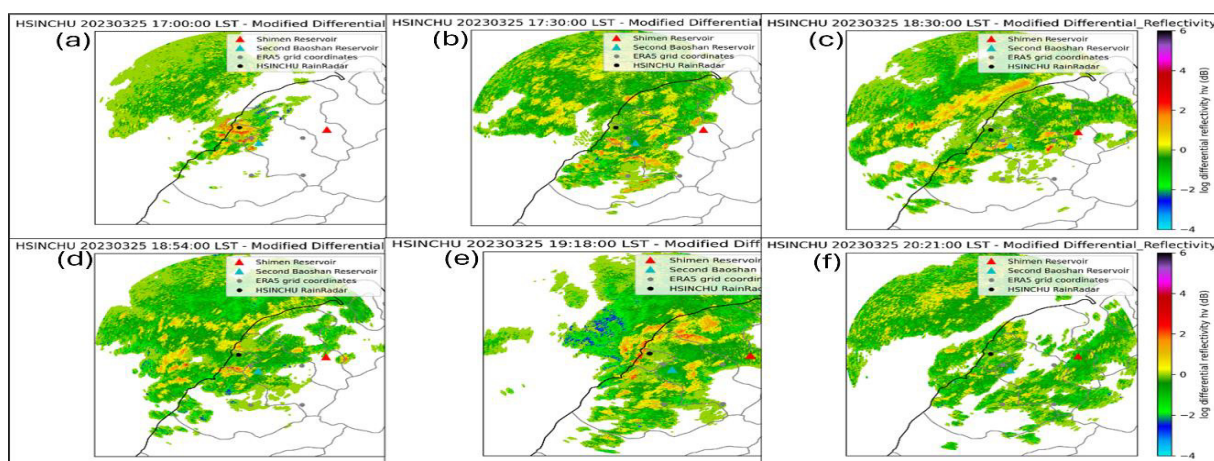


圖 13 2023 年 3 月 25 日個案空軍新竹降水雷達差異反射率整合回波圖 (a,b,c 圖為第一焰劑施放前、中、後；d,e,f 圖為第二次焰劑施放前、中、後)

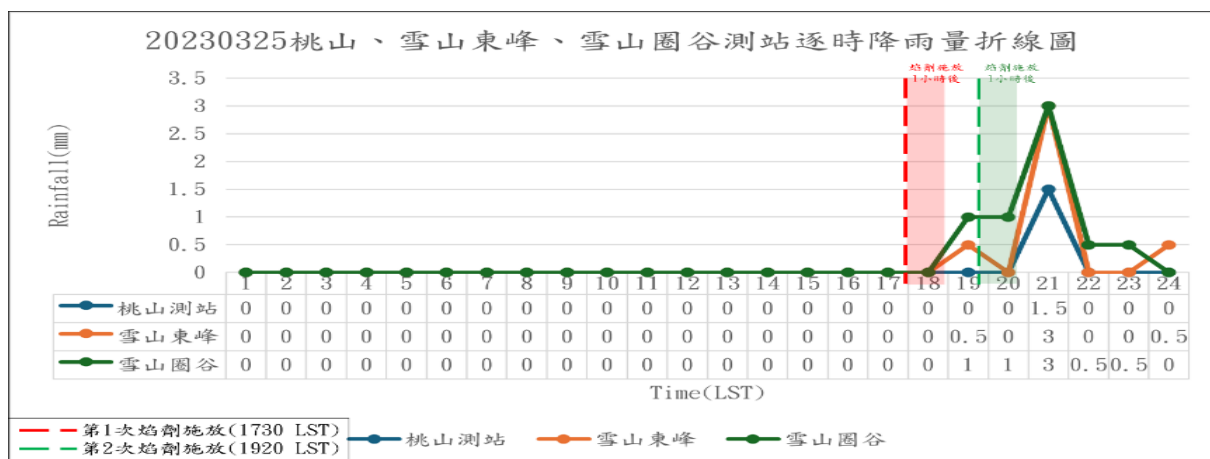


圖 14 ERA5 網格點 2 鄰近測站雨量時序圖

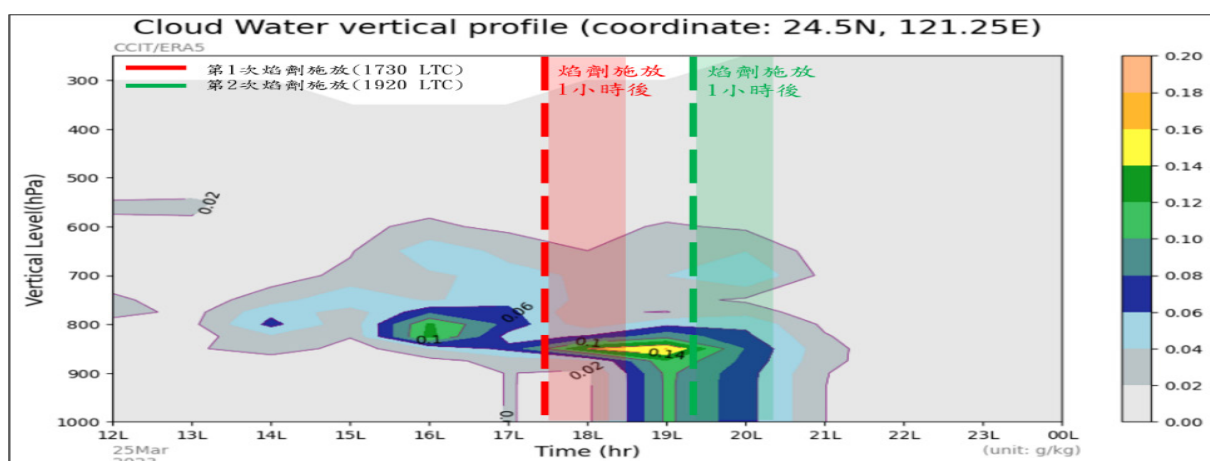


圖 15 ERA5 網格點 2 雲水剖面圖

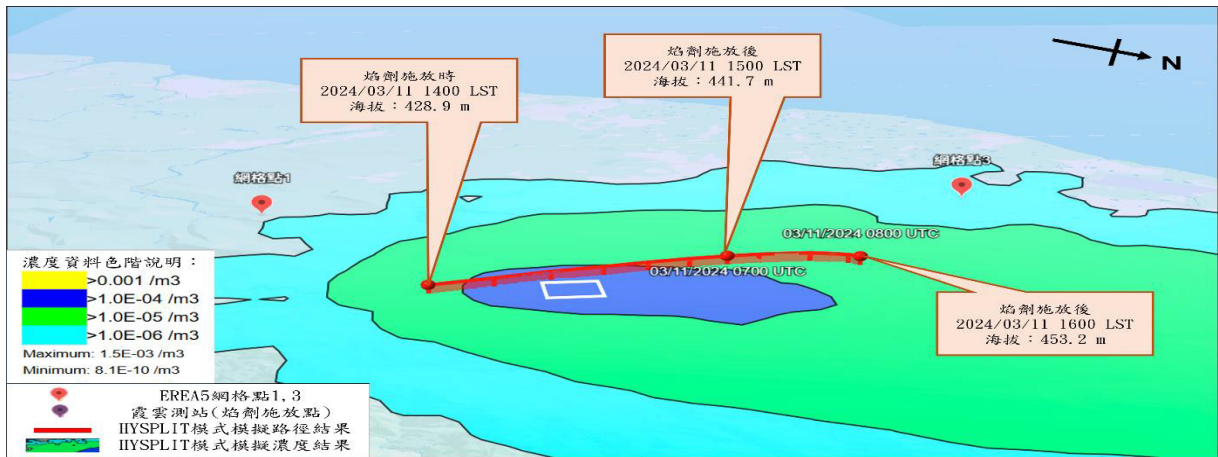


圖 16 2024 年 3 月 11 日個案焰劑施放 HYSPLIT 模擬結果

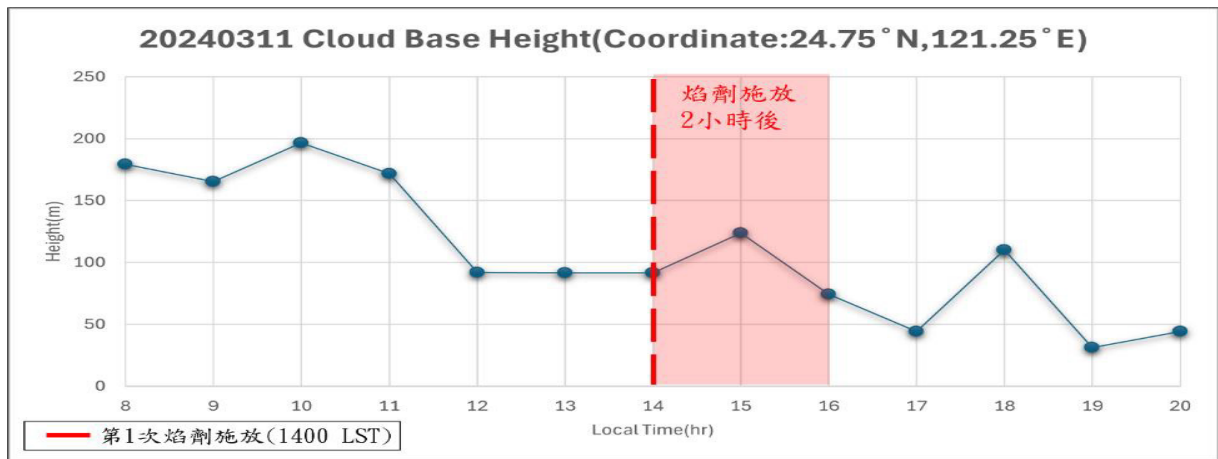


圖 17 ERA5 網格點 3 雲底高度變化時序圖

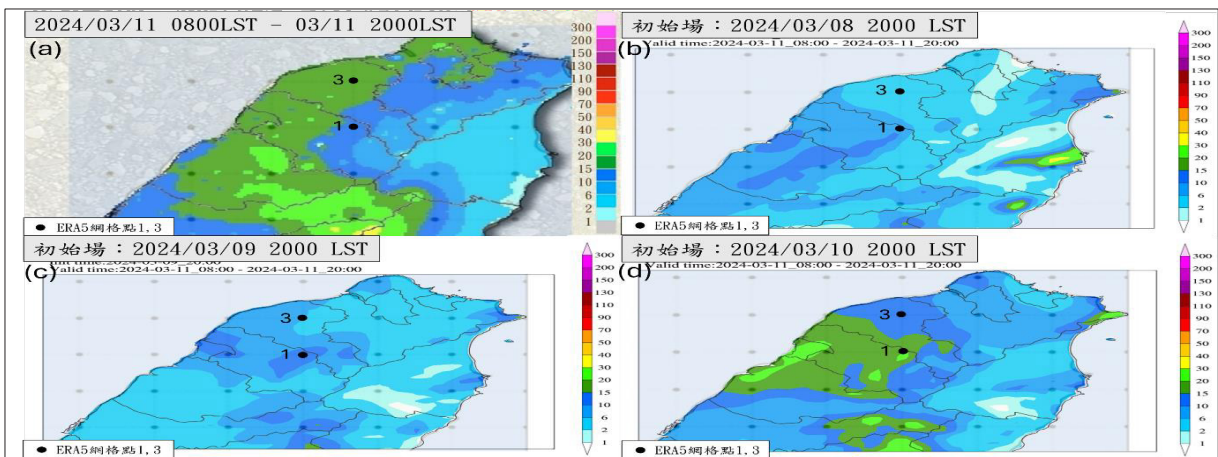


圖 18 中央氣象署地面降雨 (a 圖) 與 ERA5 網格點 1 和 3 各初始場 WRF 雨量模擬 (b,c,d 圖)

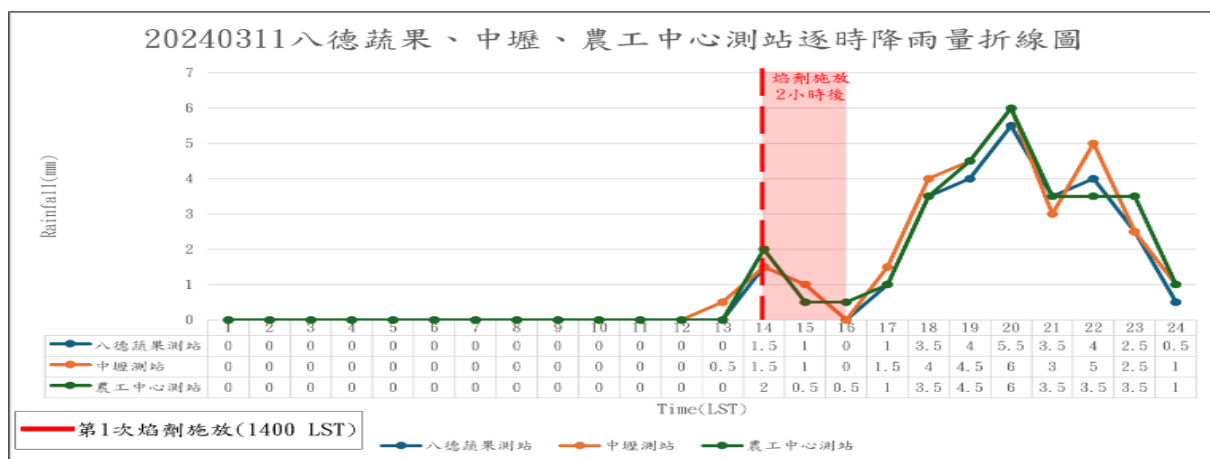


圖 19 ERA5 網格點 3 鄰近測站降雨時序圖

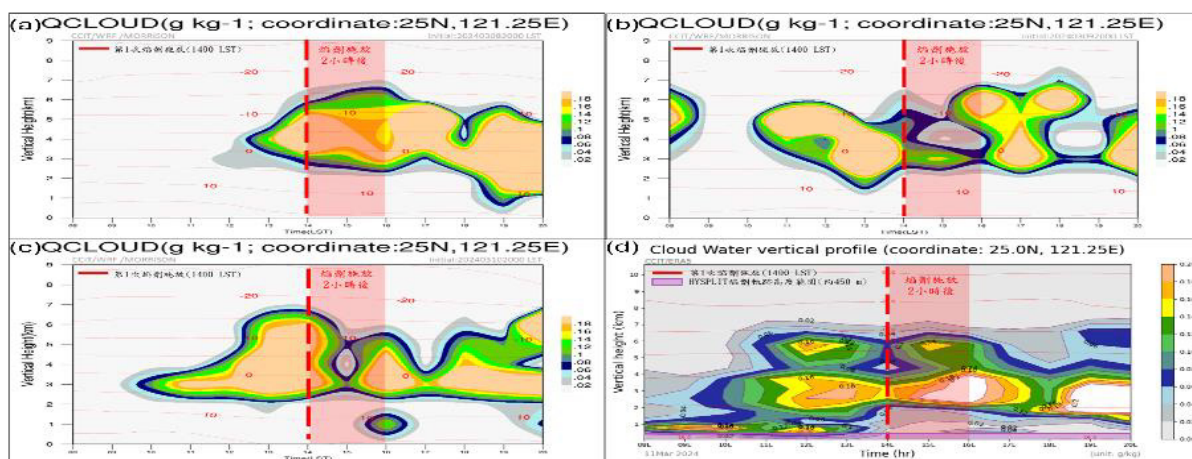


圖 20 ERA5 網格點 3 MORRISON 方案各初始場雲水模擬結果 (a,b,c 圖) 及 ERA5 雲水含量時序圖 (d 圖)

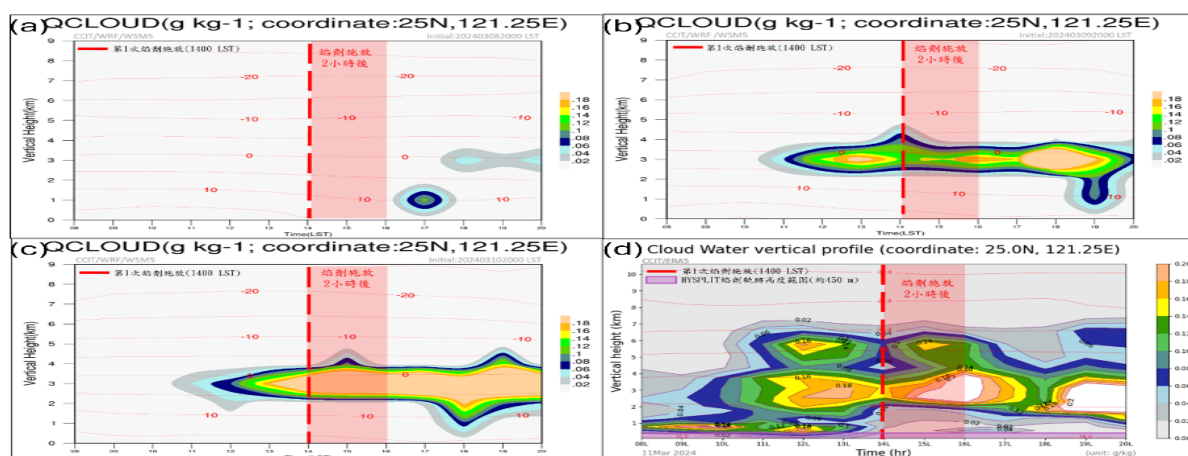


圖 21 ERA5 網格點 3 WSM5 方案各初始場雲水模擬結果 (a,b,c 圖) 及 ERA5 雲水含量時序圖 (d 圖)

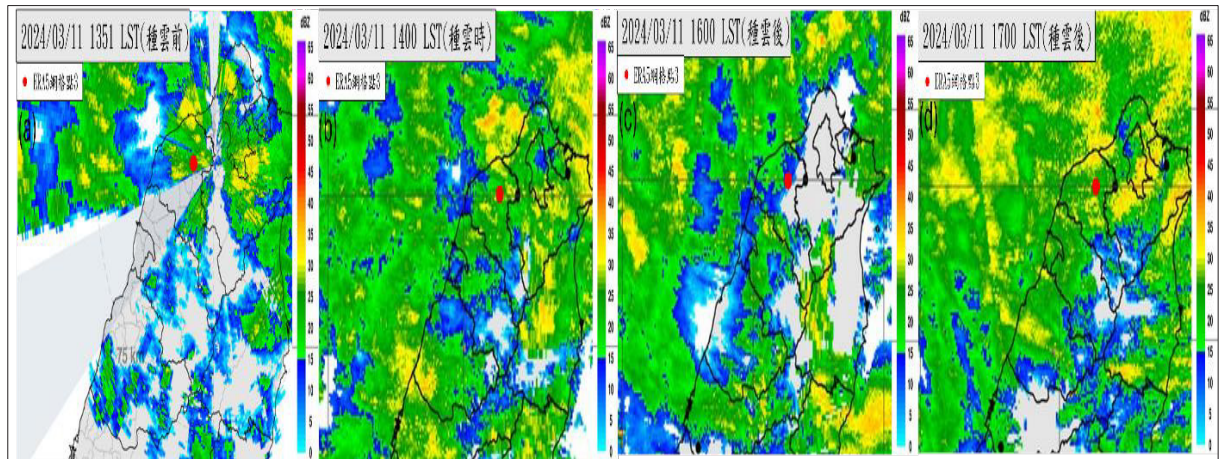


圖 22 2024 年 3 月 11 日個案焰劑施放前、中、後降水雷達回波圖（a 圖為樹林降水雷達，b,c,d 圖為整合降水雷達）

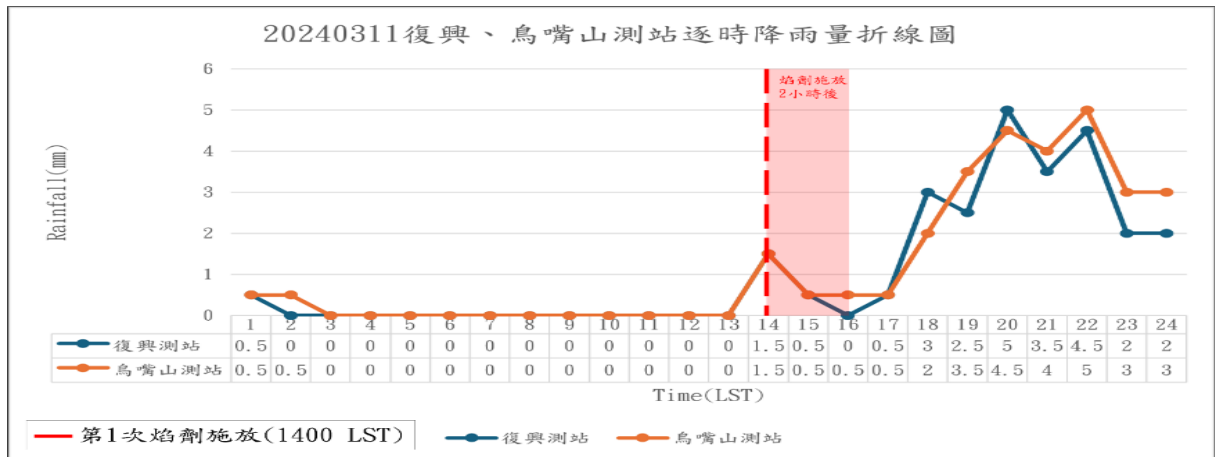


圖 23 ERA5 網格點 1 鄰近測站雨量時序圖

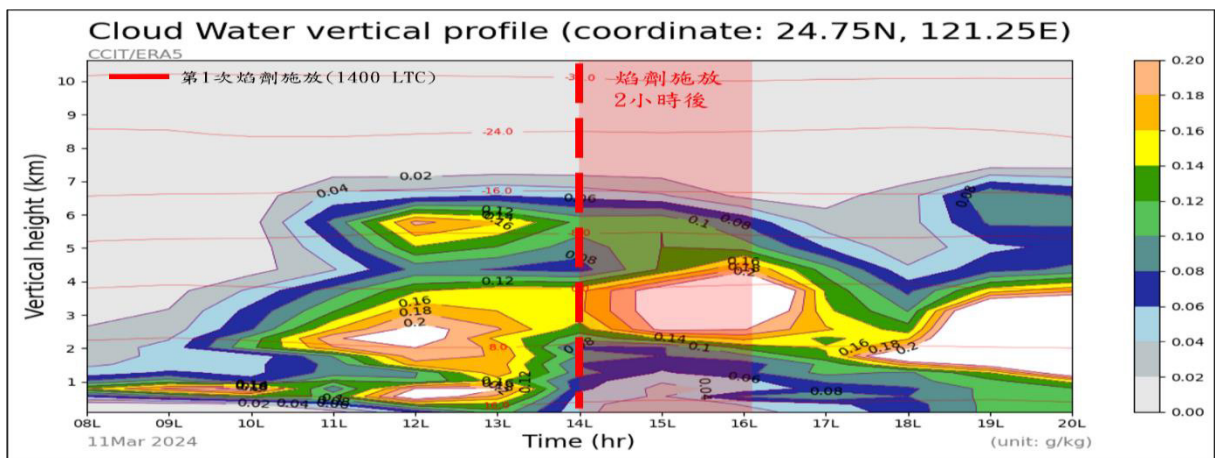


圖 24 ERA5 網格點 1 雲水剖面圖

Monitoring and Analyses of the Effectiveness of Cloud Seeding at Shimen Reservoir —A Case Study of Spring in 2023 and 2024

Shung-Shin, Lan¹、Shih-Chiao, Tsai²、Jou-Ping, Hou²

¹ The Weather Wing, R.O.C.A.F

² Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of
Technology, National Defense University

Abstract

This study investigates two cloud seeding cases conducted on March 25, 2023, and March 11, 2024, using a combination of trajectory modeling and meteorological analysis. The HYSPLIT model was employed to simulate the dispersion and concentration of seeding agents, while ERA5 reanalysis data were used to assess changes in cloud liquid water and cloud base height. The results show a temporal correlation between the increase in seeding agent concentration and elevated cloud water content, accompanied by a reduction in cloud base height. Furthermore, sensitivity experiments using the WRF model, incorporating different initial times and microphysical schemes (MORRISON and WSM5), indicate that simulations initialized 24 hours prior to the seeding event are more likely to produce realistic cloud water distributions at approximately 1 km altitude. Simulations excluding cloud condensation nuclei (CCN) also suggest that the increase in ERA5 cloud liquid water is likely attributable to the seeding effect. Rainfall simulations demonstrate better performance when the initial conditions are closer to the seeding date. Radar observations from dual-polarization systems in Shulin and Hsinchu further support the findings. In Case 1, enhanced reflectivity and horizontally elongated differential reflectivity (ZDR) patterns were observed following seeding, indicating cloud droplet growth and supporting the seeding's effectiveness. Case 2, however, showed no significant radar response.

In conclusion, Case 1 demonstrated a measurable enhancement in cloud water and precipitation as a result of cloud seeding. The study highlights the importance of integrating meteorological modeling, reanalysis data, and radar observations to evaluate cloud seeding performance. Future work is recommended to incorporate temperature and humidity profile measurements and AI-based decision support systems trained on historical events to improve the precision and validation of seeding operations.

Keywords: cloud seeding, HYSPLIT, ERA5, WRF, cloud water