

樹林降雨雷達即時資料在防災上的應用

高聿正¹ 鍾吉俊² 周仲島²

¹臺北市政府消防局 ²國立臺灣大學大氣科學系

ynow37@gmail.com

摘要

北市災害應變中心於2021年1月起介接中央氣象局樹林C波段降雨雷達最低三個仰角的即時數據資料〔降雨回波(Z_H)、都卜勒徑向風場(V_R)、差異反射率(Z_{DR})、比相位差(K_{DP})、及相關係數(ρ_{HV})〕並進行加值應用，初期主要包含產製即時圖像及定量降雨估計(QPE)產品。這組觀測資料除可提升劇烈天氣系統運動場結構及降水粒子特徵的解讀能力外，亦可快速且完整的獲得大範圍區域的降雨強度資訊，對於短延時強降雨的監測、預警與即時應變均有相當大的助益。2021年6月4日北市午後短延時強降雨，市中心三個行政區3小時累積雨量達200毫米，六個行政區時雨量超過100毫米，造成多處道路及民宅積淹水，為北市歷年午後強降雨範圍最廣的災例，同時也是北市介接樹林雷達即時資料後的第一個短延時強降雨個案。本文利用此一個案，針對不同雷達定量降雨估計方法進行測試，並與臺北盆地內地面雨量站的10分鐘降雨率進行比對，結果顯示以 K_{DP}/Z_H 參數組合型公式搭配氣象局作業用之係數有最佳的表現(均方根差4.7及相關係數0.86)。另外亦針對臺灣大學雨量計所量測到的歷史極端時雨量209毫米進行驗證，透過與臨近雨量站、雷達QPE及雨滴譜儀的資料進行相互比對，結果顯示臺灣大學雨量計所量測的雨量，在降雨最顯著的時段中有50-124%的高估。

關鍵字: 樹林降雨雷達、雨滴譜儀、雷達定量降雨估計、極端降雨

一、前言

在全球暖化及都市熱島效應背景下，近年來臺北都會區發生豪雨型午後雷暴(周等 2016)的頻率及規模日益提升，104年0614、107年0908、108年0722及110年0604強降雨事件，北市多個行政區時雨量均達到100毫米以上，甚至3小時累積雨量達到大豪雨等級(200毫米)，造成大範圍的道路及民宅積淹水。根據統計，104至110年北市災害應變中心因短延時強降雨而提升至二級或一級開設年平均1.1次(颱風年平均1.7次)，接獲災情通報案件平均313件。

北市府於104年起推動強降雨防減災工作方案，強調民眾與政府共同參與防災工作，由政府專案補助積淹水潛勢區民眾裝設防水閘門，並透過LINE及App提供即時雨量或防汛預警訊息，讓民眾及防災單位能夠快速應變以降低災害損失。目前雨量預警訊息的提供主要是仰賴北市轄區內密集雨量站的即時訊息(86個雨量站，每分鐘更新10分鐘降雨率)，然雨量站仍有空間分布不均勻(部分行政區僅有1至2個雨量站)

及資料傳輸錯誤等問題，都可能影響後續的防災應變工作。

北市災害應變中心於2021年1月起介接中央氣象局樹林防災降雨雷達的即時數據資料並進行加值應用，除可提升劇烈天氣系統運動場結構及降水粒子特徵的解讀能力外，亦可快速且完整的獲得大範圍區域的降雨強度資訊，對於提升短延時強降雨的監測預警效能有相當大的潛力。本文以2021年6月4日北市豪雨型午後雷暴個案為例，展示及評估樹林防災雷達定量降雨估計(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)的表現，並針對臺灣大學雨量站的209毫米極端降雨強度進行驗證。

二、0604午後雷暴北市降雨及應變概況

110年6月4日受彩雲颱風北上、鋒面接近及午後熱力作用影響，北臺灣地區大氣環境相當不穩定，午後大臺北盆地出現範圍廣且強度集中的短延時強降雨，時間主要集中在12至15時(時間均為當地時間)，臺北市區有11個行政區(北投區除外)雨量達豪雨等級

(三小時累積雨量達 100 毫米)，其中大安、信義、文山區達大豪雨等級(三小時累積雨量達 200 毫米)，6 個行政區(大安、信義、文山、南港、內湖及松山區)19 個雨量站連續 60 分鐘累積雨量超過 100 毫米，信義區 6 個雨量站均超過 110 毫米。其中降雨強度最大在「臺灣大學」雨量站，3 小時累積雨量 322.5 毫米(超越 93 年 0911 豪雨、90 年納莉颱風、93 年艾利颱風及 107 年 0908 豪雨)。另外連續 6 個 10 分鐘累積雨量 209.0 毫米(超越 107 年 0908 豪雨信義挹翠 138 毫米)、最大 10 分鐘雨量 45.5 毫米(超越 104 年 0614 豪雨大安公館 33.0 毫米) 均創下歷史第一的紀錄。圖 1 為臺北盆地 6 月 4 日 11 至 17 時累積雨量分布圖。

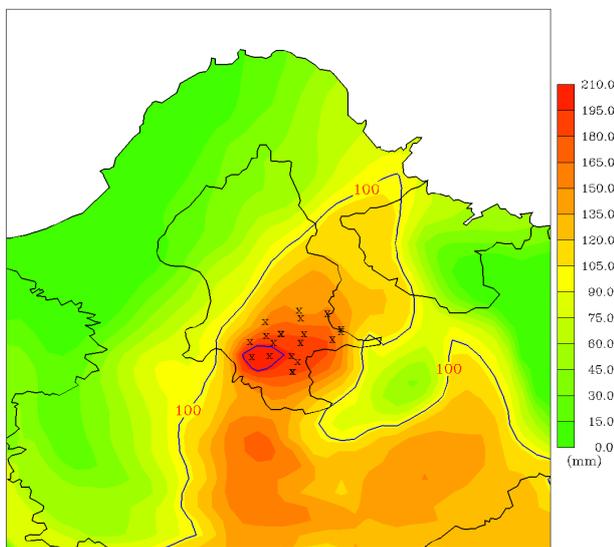


圖 1 110 年 6 月 4 日 11 至 17 時累積雨量分布圖。X 標示連續 60 分鐘累積雨量大於 100 毫米雨量站點位。

由於預報資訊持續顯示 4 日午後北市有顯著的降雨訊號，因此市災害應變中心於 4 日上午即通報市府防災單位於 12 時前完成各項整備應變措施(包含:強降雨檢核表填報、成立緊急應變小組待命、抽水機組待命出動)，11 時 40 分對流胞開始發展並由市區西南側移入，13 時 08 分市災害應變中心提升至三級強化開設(信義、大安區時雨量超過 50 毫米、10 分鐘雨量超過 20 毫米，且對流不斷持續移入增強)，13 時 57 分提升至二級開設(大安及信義區時雨量超過 130 毫米，信義車行地下道完全淹沒)，14 時 24 分提升至一級開設(淹水災情不斷湧入，市災害應變中心首次因午後強降雨提升至一級開設)，傍晚降雨雖明顯趨緩，但由於淹水案件過多(超過 500 戶民宅積淹水)，市災害應變

中心持續運作至 6 日上午才完成全數積淹水案件的處理。

三、 定量降雨估計與評估

雙偏極化雷達除了回波(Z_H)，都卜勒徑向速度(V_R)之外，亦提供了包含比相位差(K_{DP})，差異反射率(Z_{DR})及相關係數(ρ_{HV})等偏極化參數資訊，利用相位參數對降水較為敏感及差異反射率反應雨滴粒徑分佈(Drop Size Distribution, DSD)等特性，可以有效改善傳統雷達利用回波(Z - R 關係式)進行定量降雨估計的準確度(Chang et al. 2009;周等 2015)。林等(2018)利用 2018 年 6 月 19 日梅雨鋒面個案，進行高雄林園 C 波段防災降雨雷達(RCLY)QPE 效能的評估，結果顯示降雨量在時雨量 10 毫米以上的區域，其準確度有顯著的提升。

陳等(2017)利用中央大學長時間二維雨滴譜儀的資料，建立春雨、梅雨、午後對流、冷鋒鋒面及颱風五種降雨類型的 DSD 特性，並透過 T-Matrix 方法進行中央大學 C 波段雷達參數(Z_H 、 K_{DP} 、 Z_{DR})與降雨關係式的擬合，結果顯示 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 的組合公式有最佳的 QPE 表現。

本文選用陳等(2017)所建立的梅雨及午後雷雨 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 關係式、梅雨 $R(K_{DP}, Z_{DR})/R(Z_H)$ 關係式及中央氣象局現行作業用的 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 關係式(Chang et al. 2021)，如式(1)-(3)，係數如表 1，應用於 0604 個案樹林 C 波段防災降雨雷達的資料進行 QPE 計算，並利用地面雨量站評估其表現。

$$R = aZ_H^b \quad (1)$$

$$R = aK_{DP}^b \quad (2)$$

$$R = aK_{DP}^b Z_{DR}^c \quad (3)$$

表 1 不同類型降雨關係式係數表。

關係式		梅雨	午後對流	氣象局
$R(Z_H)$	a	0.0316	0.0710	0.0434
	b	0.6558	0.5761	0.6138
$R(K_{DP})$	a	25.8619	26.4884	35.4
	b	0.7784	0.7590	0.799
$R(K_{DP}, Z_{DR})$	a	30.4106	29.9747	
	b	0.9563	0.9381	
	c	-0.5334	-0.5132	

(一) 定量降雨估計方法

以樹林雷達最低三個仰角(0.5°、1.4°、2.4°)極座標的回波(Z_H)，比相位差(K_{DP})及差異反射率(Z_{DR})資料(採用最低仰角資料，若最低仰角無資料則使用第二層仰角，再無資料則使用第三層)，搭配偏極化雷達參數組合公式(式 1-3)及係數(表 1)進行 QPE。在 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式部分，當使用 $R(K_{DP})$ 關係式計算出的降雨率小於 13 毫米時，則以 $R(Z_H)$ 關係式取代；在 $R(K_{DP}, Z_{DR})/R(Z_H)$ 組合公式部分，當 Z_{DR} 大於 0 時以 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 關係式計算，當 Z_{DR} 小於 0 時以 $R(Z_H)$ 關係式取代。

(二) 定量降雨估計結果評估

將四組降雨公式所求得的雨量換算成 10 分鐘降雨率，與大臺北盆地中的 116 個地面雨量站的 10 分鐘降雨率進行比對(雷達雨量估計值為地面雨量站上方所對應的 9 個極座標點位的平均值)，分別計算均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)，平均偏差誤差(Mean Bias Error, MBE)及相關係數(correlation coefficient, CC)。圖 2 顯示四組降雨公式比對結果，其中氣象局 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式表現最佳，有最低的 RMSE(4.7)、MBE(22.0)及最高的 CC(0.86)。圖 3 為 6 月 4 日 13 時 30 分氣象局 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式所估計的 10 分鐘降雨率分布圖。

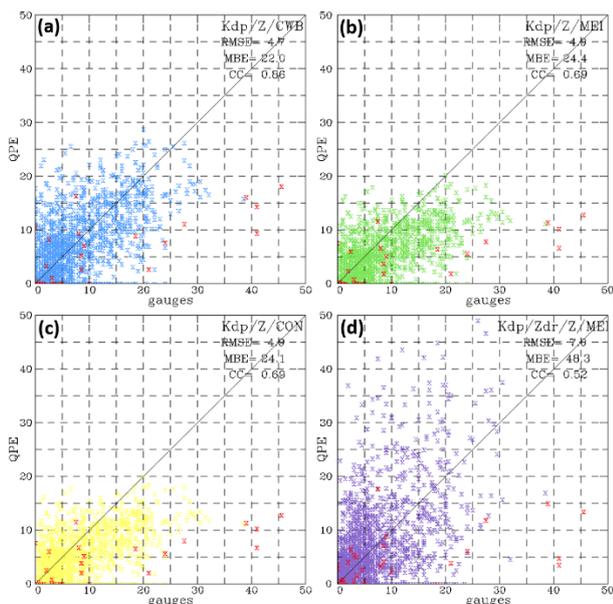


圖 2 四組雷達降雨公式所估計雨量與地面雨量比對的結果。(a)為氣象局 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式、(b)為梅雨 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式、(c)為午後雷雨 $R(K_{DP})/R(Z_H)$

組合公式、(d)為 $R(K_{DP}, Z_{DR})/R(Z_H)$ 組合公式。X 標示臺灣大學雨量站的數值。

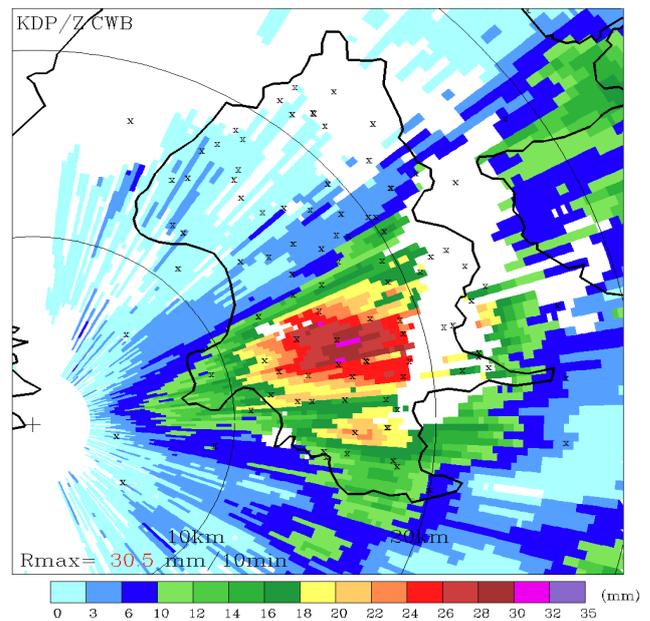


圖 3 110 年 6 月 4 日 13 時 30 分，樹林雷達以氣象局 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式所估計的 10 分鐘降雨率分布圖，最大值為 30.5 毫米。X 為地面雨量站位置。

四、臺灣大學極端降雨強度的驗證

在全球氣候變遷及暖化的背景下，本次 0604 強降雨事件臺灣大學雨量站的極端降雨強度格外受到矚目，除了社群及媒體引用相關數據報導之外，氣象及防災界也想進一步了解降雨強度的真實性以及未來該如何調整策略來因應越來越頻繁的極端降雨事件。以下透過鄰近地面雨量站、樹林雷達 QPE 及雨滴譜儀的觀測數據來驗證臺灣大學雨量站的降雨強度。

(一) 鄰近地面雨量站比對

選取鄰近臺灣大學的 4 個地面雨量站(大安森林、福州山、三興國小及仁愛國小，最遠距離為 2.6 公里)在分析時段中(6 月 4 日 11 至 17 時)的 10 分鐘降雨率進行比對，圖 4 顯示在降雨最顯著的時段(12 時 50 分至 14 時)，臺灣大學的降雨趨勢變化與其他 4 個雨量站相當一致，惟降雨强度高出約 13-14 毫米，連續 6 個 10 分鐘最大值則是高出約 71-130 毫米。在小區域範圍內有如此顯著的降雨強度梯度，可能為對流系統中強降雨區的空間分布差異所造成，因此進一步利用雷達資料進行檢視。

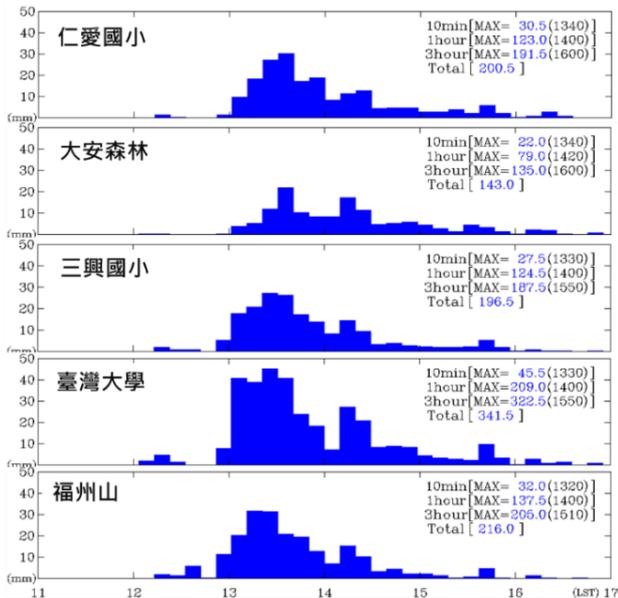


圖 4 臺灣大學與鄰近雨量站 6 月 4 日 11 至 17 時逐 10 分鐘降雨率時序圖。雨量站的相對位置標示於圖 5。

(二) 雷達估計雨量比對

圖 5(a)為分析時段樹林雷達最低仰角回波值大於 40 dBZ 出現頻率分布圖，5 個雨量站均位於頻率值介

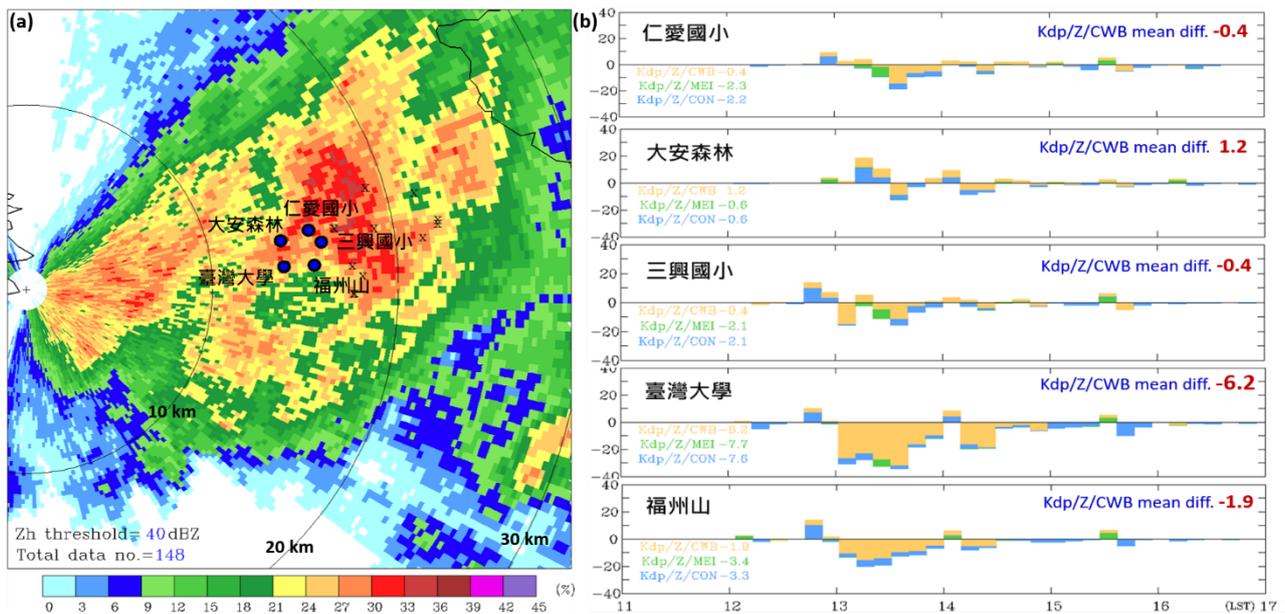


圖 5 (a) 6 月 4 日 11 至 17 時樹林雷達最低仰角回波大於 40 dBZ 出現頻率分布圖，統計資料筆數 148 筆。(b)雷達 QPE 與 5 個地面雨量站雨量值的偏差(黃色、綠色及藍色分別代表氣象局、梅雨及午後雷雨 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式的結果)。

(三) 雨滴譜儀雨量比對

一維雷射式雨滴譜儀 Parsivel 觀測近地面雨滴粒徑及數量分布，除了可以進行降雨率的計算之外，亦可反演雷達觀測參數(e.g. Tokay et al. 2014)。中央氣象局在全臺建置有 Parsivel 觀測網(盧等 2020)，臺灣大

於 24-33%的區域中(其中大安森林及仁愛國小位於 27-33%區域，甚至較臺灣大學高)，即 5 個雨量站受到強降雨區影響的頻率大致上是一致的，臺灣大學的極端降雨強度似乎不是強降雨空間分布差異所造成。

圖 5(b)為四組降雨公式所求得的 QPE 與 5 個地面雨量站 10 分鐘降雨率的偏差值時序圖，氣象局 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式有最佳表現，在臺灣大學之外的 4 個站的平均偏差為-1.9 至 1.2 毫米，但在臺灣大學的平均偏差則是達到-6.2 毫米(在降雨最顯著的時段，10 分鐘降雨率偏差值可達-20 至-30 毫米)，代表臺灣大學量測的雨量有明顯過高的情況。

若將福州山站雨量與其對應的雷達 QPE 的偏差值套用至臺灣大學的雷達 QPE，重新修正臺灣大學的地面雨量，得到的結果是最大 10 分鐘降雨率為 32.2 毫米，最大連續 60 分鐘累積雨量為 137.3 毫米，即臺灣大學雨量站所量測的 10 分鐘降雨率(連續 60 分鐘累積雨量)有 41%(52%)的高估。

學大氣科學系亦在校園內執行 Parsivel 觀測。圖 6 為在「臺北」及「臺灣大學」所設置的雨滴譜儀所估計的降雨率與雨量計觀測值的比較：臺北站雨滴譜儀所估計的雨量不論是在趨勢及降雨率均與雨量計的量測值有相當一致的對應關係，最大 10 分鐘降雨率僅有-

1.2 毫米的偏差(14 時 20 分), 在分析時段 10 分鐘降雨率的平均偏差值為-0.3 毫米; 而在臺灣大學站, 雨滴譜儀所估計的雨量則是明顯較雨量計低, 降雨最顯著的 4 個 10 分鐘(13 時 10 至 40 分), 雨量偏差值均超過 -20 毫米(最大為-25.3 毫米), 可以合理推論臺灣大學雨量計有高估的情況。若以雨滴譜儀所估算的雨量代表地面所量測到的降雨, 則臺灣大學地面最大 10 分鐘降雨率為 20.9 毫米, 最大連續 60 分鐘累積雨量為 96.9 毫米, 即雨量計所量測的最大 10 分鐘降雨率(最大連續 60 分鐘累積雨量)有 124%(42%)的高估。

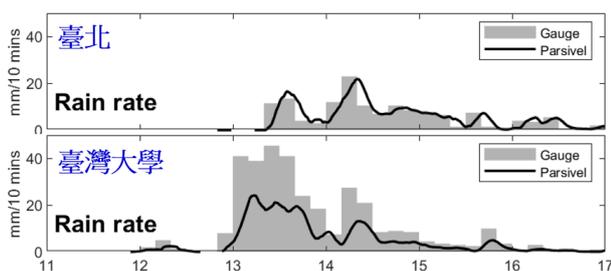


圖 6 6 月 4 日 11 至 17 時, 臺北及臺灣大學雨滴譜儀(黑色實線)及雨量計(灰色條)10 分鐘降雨率時序圖。

五、結論

本文以 110 年 6 月 4 日臺北都會區豪雨型午後雷暴個案, 進行樹林防災降雨雷達 QPE 產品的展示及結果評估, 同時針對臺灣大學雨量站的極端降雨強度進行驗證。

在與高密度的地面雨量資料進行比對後, 結果顯示雷達 QPE 以氣象局 $R(K_{DP})/R(Z_H)$ 組合公式表現最佳, 有最低的均方根誤差(4.7)及平均偏差誤差(22.0), 有最高的相關係數(0.86), 代表雷達 QPE 能夠相當程度的反應實際的降雨強度。同時又由於雷達資料可以完整涵蓋觀測範圍內的空間平面, 因此對於沒有雨量站的地區也可以提供合理的降雨強度估計值, 對於即時雨量資訊的精準投遞及提升防災應變效能都具有相當大的潛力(可視為北市轄區每 250 公尺即有一個雨量站)。除了定量降雨估計之外, 偏極化雷達參數在劇烈天氣系統的極短期預警(30 分鐘內)也具有相當潛力, 透過比對地面雨量站、雨滴譜儀及所對應點位上的 K_{DP} 及 Z_{DR} 時序, 發現在地面降雨率開始快速增強前的 10-20 分鐘, K_{DP} 及 Z_{DR} 即有顯著的增強趨勢, 有做為地面最大降雨率的預兆指標及提升防災應變效能的潛力(可做為災害應變中心提升開設層級決策的重要參

考依據)。

在臺灣大學極端降雨強度值驗證的部分, 不論是利用鄰近地面雨量站、雷達 QPE 或是雨滴譜儀估計雨量進行比對, 結果均顯示臺灣大學雨量計(最大 10 分鐘降雨率 45.5 毫米, 最大連續 6 個 10 分鐘累積雨量 209 毫米)有明顯高估的情況。利用雷達修正後的最大 10 分鐘降雨率為 32.2 毫米, 最大連續 60 分鐘累積雨量為 137.3 毫米; 而雨滴譜儀估計的最大 10 分鐘降雨率為 20.9 毫米, 最大連續 6 個 10 分鐘累積雨量為 96.9 毫米, 亦即臺灣大學雨量計所量測到的雨量值在降雨最顯著的時段中有 50-124%的高估。

致謝

特別感謝中央氣象局提供樹林降雨雷達即時數據資料予臺北市災害應變中心應用, 對於防災應變有莫大的助益。雨滴譜儀資料分別來自中央氣象局與臺灣大學大氣科學系, 在此一併致謝。

參考文獻

- 林品芳、張保亮、陳姿瑾及秦新龍, 2018: 區域防災降雨雷達之高時空降雨估計評估。107 年天氣分析與預報研討會論文集編, A1-2。
- 周仲島、鍾吉俊及修榮光, 2015: S 波段雙偏極化雷達在梅雨季豪大雨天氣系統定量降雨估計之應用。大氣科學, 43(2), 91-113。
- 周仲島、高聿正、修榮光、鍾吉俊、李宗融、郭鴻基, 2016: 臺北都會區豪雨型午後雷暴的觀測特徵與預報挑戰: 2015 年 6 月 14 日個案研究。大氣科學, 45(1), 57-82。
- 陳如瑜、張偉裕、陳台琦, 2017: 北台灣 S 與 C 波段偏極化雷達定量降雨估計之比較。大氣科學, 44(1), 57-81。
- 盧可昕、唐玉霜、林品芳、陳姿瑾、張保亮, 2020: 中央氣象局雨滴譜儀觀測網資料品質管與分析。大氣科學, 48(1), 44-92。
- Chang, P.-L., J. Zhang, Y.-S. Tang, L. Tang, P.-F. Lin, C. Langston, B. Kaney, C.-R. Chen, and K. Howard, 2021: An Operational Multi-Radar Multi-Sensor QPE System in Taiwan. Bull. Am. Meteorol. Soc. 102(3), E555-E577.
- Chang, W.-Y., T.-C. C. Wang, and P.-L. Lin, 2009: Characteristics of the raindrop size distribution and

drop shape relation in typhoon systems in the western Pacific from the 2D video disdrometer and NCU C-band polarimetric radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1973-1993.

Tokay, A., D.B. Wolff, and W.A. Petersen, 2014: Evaluation of the New Version of the Laser-Optical Disdrometer, OTT Parsivel². *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**, 1276–1288.