

雷達定量降雨估計技術研發與評估：以臺灣中南部為例

黃紹欽、廖信豪、于宜強

國家災害防救科技中心 氣象組

摘要

本研究利用 2019 至 2023 年的雙偏極化雷達、雨滴譜儀及雨量觀測資料，研發適用於臺灣中南部地區的雙偏極化雷達定量降雨估計 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 技術。此技術共建立 16 個雙偏極化參數的估計公式，並整合 1 個雷達回波估計公式，建立一套混合型雷達 QPE 技術。系統性評估結果顯示，此技術於平地與山區的平均估計誤差，較現行技術分別改善 13.3% 與 8.3%。其中，強降雨的改善程度最顯著，平地與山區的平均估計誤差可降低 45.8% 與 32.5%，顯示此技術在極端天氣情境下具高度應用潛力。整體而言，本研究研發的混合型雷達 QPE 技術可有效提升臺灣中南部地區的量估計準確性，未來將持續擴展至全臺其他區域，以強化短延時強降雨事件的預警成效。

一、前言

臺灣位於颱風與豪雨活動頻繁區域，沿海、都會區及山區經常面臨山崩、土石流與淹水等災害威脅。隨著極端天氣事件日益頻繁，準確且即時的降雨估計與預警技術在防減災工作中的重要性與日俱增。因此，提升定量降雨估計技術的能力，已成為防災科技發展的核心課題之一。氣象雷達憑藉其高時空解析度與觀測範圍廣的優勢，成為即時降雨監測的關鍵工具。早期，單偏極化氣象雷達僅能依賴雷達回波 (Reflectivity, Z_H) 與地面降雨量間的經驗公式 (Z-R 關係式) 來推估降雨量。但此方法未納入雨滴粒徑分布 (Drop Size Distribution, DSD) 等微物理特性，常導致雨量估計誤差偏大，特別是在地形複雜的山區。

1990 年代起，隨著雙偏極化雷達 (Dual-Polarimetric Radar) 的引進，雷達 QPE 技術的研發取得了重大進展。相較於傳統氣象雷達，雙偏極化雷達能透過同時發射與接收水平與垂直極化的微波訊號，直接觀測雨滴的形狀、大小與相位等物理特性。相關的觀測參數包含差異反射率 (Differential Reflectivity, Z_{DR})、相關係數 (Correlation Coefficient, ρ_{HV})、差異相位差 (Differential Phase Shift, Φ_{DP}) 及比差異相位差 (Specific Differential Propagation Phase Shift, K_{DP})。在 1990 年代與 2000 年代初期，已有許多研究證實雙偏極化雷達 QPE 技術可有效提升雨

量估計的準確性與穩定性(Ryzhkov and Zrnica, 1995; Ryzhkov and Zrnica, 1996; Brandes et al., 2002; Ryzhkov et al., 2005)。到了 2000 年代，雙偏極化雷達 QPE 技術發展已趨成熟，達到可以在全國性氣象雷達網中實際應用的程度(Ryzhkov et al., 2022)。

近年來，為提升短時強降雨的預警能力，國家災害防救科技中心(以下簡稱災防科技中心)致力於研發臺灣專屬的雙偏極化雷達 QPE 技術。藉由改善現有降雨估計的準確性，期能強化氣象資訊於即時災害預警中的應用成效。2022 年，災防科技中心整合全臺 7 座雙偏極化和 4 座傳統都卜勒雷達資料，並搭配安裝於高雄市燕巢區樹德科技大學的雨滴譜儀資料，建立一套適用於 5 月至 9 月、涵蓋全臺(含平地與山區)的通用型雙偏極化雷達 QPE 公式。目前，此技術已完成自動化作業模組開發，並透過災防科技中心天氣與氣候監測網對外服務，每 10 分鐘可更新一次最新的全臺雨量估計結果(農業部農村發展及水土保持署, 2022)。

在研發雙偏極化雷達 QPE 技術時，雨量估計的準確性與雨滴粒徑分布密切相關(Battan, 1973; Chang et al., 2009)。尤其在臺灣，降雨受到多種天氣系統及複雜地形的影響，導致雨滴粒徑分布變異性更加明顯，突顯在地化雨滴譜儀觀測資料對提升降雨估計準確性的價值

(Ryzhkov et al., 2014; Wang et al., 2015)。因此，2023 年，災防科技中心針對臺灣北部及東北部地區(臺北市、新北市、基隆市及宜蘭縣)，利用更完整的 10 座雙偏極化雷達、1 座傳統都卜勒雷達與 4 座在地化雨滴譜儀資料，建立符合當地秋冬季(10 月至翌年 2 月)氣候特徵的雙偏極化雷達 QPE 公式，進一步提升這四個縣市於非夏季期間的雨量估計準確性(農業部農村發展及水土保持署, 2023)。

前述研究成果已顯示，整合更完整的雙偏極化雷達和在地化的雨滴譜儀觀測資料，可有效提升雷達 QPE 的準確性。在全臺雙偏極化雷達網於 2023 年 5 月更新完成後，全臺雙偏極化參數的觀測盲區僅剩花蓮縣和臺中市交界一帶。因此，本研究選定中部(臺中市、彰化縣、南投縣及雲林縣)與南部(嘉義縣市、臺南市、高雄市及屏東縣)地區為示範區，結合雙偏極化參數、雷達回波和在地化雨滴譜儀資料，更新或建立梅雨季(5 月至 6 月)與颱風季(7 月至 10 月)的混合型定量降雨估計技術。另外，考量地形對降雨的影響，本研究針對平地與山區分別建立 QPE 公式。此研究成果將有助於強化極端降雨監測與預警產品開發，並可作為未來防災應用的重要依據。

二、 資料來源

本研究使用的資料包含時雨量、雨滴粒徑分布、雷達回波及雙偏

極化雷達參數等，分析時間為 2016 年至 2023 年。利用中央氣象署時雨量資料，挑選降雨事件與進行雨量估計校驗分析。降雨事件的選取標準則參照經濟部水利署訂定的全臺二級淹水警戒最低雨量門檻(每小時 30 毫米)，只要測站當日任一時間的雨量達此門檻，就視為強降雨日。統計結果(圖 1)顯示，分析期間的強降雨日共 448 日，其中有 399 日發生在 5 月至 10 月間，占總強降雨日的 89%。這些降雨事件主要由午後對流、熱帶氣旋、梅雨鋒面、西南氣流及低壓帶等天氣類型所造成。此外，為瞭解地形對 QPE 的影響，依中央氣象署訂定的 200 公尺高度，作為平地與山區之區分標準。

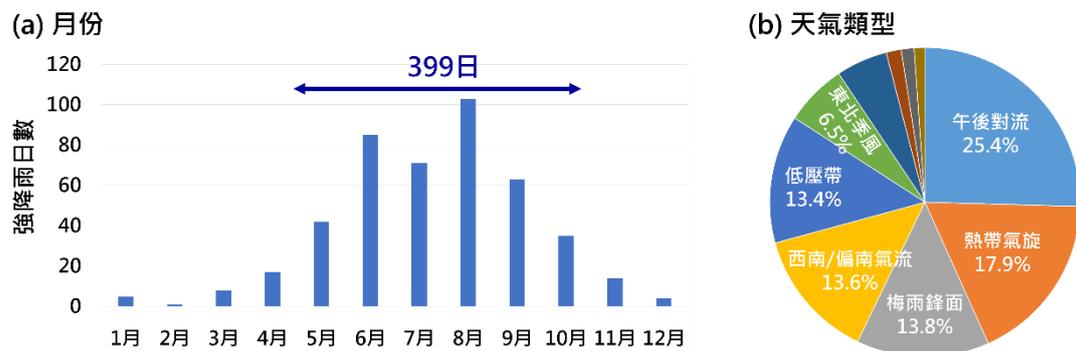


圖 1.2016 年至 2023 年，臺灣強降雨日數之(a)月份與(b)天氣類型分析。(資料來源：中央氣象署；繪製：國家災害防救科技中心)

雨滴粒徑分布資料來源為中央氣象署的第二代一維雷射光學式雨滴譜儀(PARTicle Size and VElocity, Parsivel²)。Parsivel² 會先透過偵測雨滴通過觀測區域時，近紅外光強度減弱程度與遮蔽時間，來計算雨滴的大小與終端落速(農業部農村發展及水土保持署, 2022; 2023;

2024)。接著，藉由資料接收軟體內建的對照表，將雨滴依粒徑大小劃分為 32 類，每一類別皆對應一組特定範圍的平均粒徑與終端落速，藉此來計算降雨量。Parsivel² 可偵測的雨滴直徑大小為 0.062 至 24.5 毫米，終端落速則介於每秒 0.05 至 20.8 公尺之間。

在過去的文獻中，光學式雨滴譜儀雖然容易高估降雨量(Angulo-Martínez and Barros, 2015; Park et al., 2017)。但最新研究指出，Parsivel² 在雨滴大小分類和終端落速的處理上有所改進，目前已能提供接近真實的雨量估計(Saha and Testik, 2023)。本研究使用 2019 年至 2023 年，5 至 10 月的雨滴譜儀資料，涵蓋不同地形高度的測站。選取的測站包含山區的日月潭站(中部)與阿里山站(南部)，以及平地中部的臺中站，南部的嘉義站、臺南站、高雄站及恆春站。根據統計，本研究共處理 288,000 筆觀測資料。然而，雨滴譜儀觀測資料可能因電力供應中斷或儀器本身故障而出現缺值。為確保資料品質，若測站的單日資料缺漏率超過 20%，該日資料將予以剔除，不納入後續處理與分析。

(a) Parsivel²外觀



(b) Parsivel²觀測原理示意

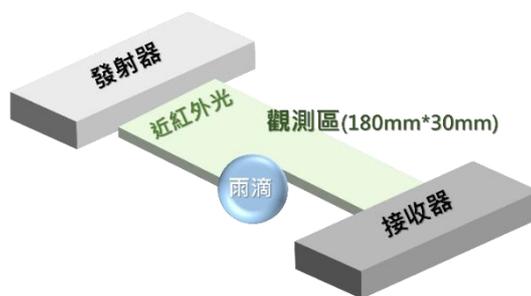


圖 2. Parsivel² 之(a)外觀與(b)原理。(繪製：國家災害防救科技中心)

雷達回波與雙偏極化參數資料來自全臺防災氣象雷達網(圖 3)的高時空解析度觀測。在中央氣象署 2023 年全面更新 3 座雙偏極化雷達後，目前全臺雷達網由 10 座雙偏極化雷達和 1 座傳統都卜勒雷達所組成，資料來源包含中央氣象署、經濟部水利署、空軍氣象聯隊及交通部民用航空局。在研發雙偏極化雷達 QPE 技術時， Z_{DR} 和 K_{DP} 扮演關鍵角色。然而，在 C 波段雷達中， Z_{DR} 易受電磁波能量衰減、雷達系統性偏差及粒子共振效應¹等因素影響，導致強降雨期間的 QPE 準確性較低(Ryzhkov and Zrnčić, 2005; Vulpiani et al., 2012)。相較之下， K_{DP} 具有不易受訊號衰減影響的優勢，即使在強降雨時，仍能提供較可靠的雨量估計。考量到臺灣現有雷達網的 C 波段雙偏極化雷達高達 6 座，本研究使用 2019 年至 2023 年，5 月至 9 月的雷達回波和 K_{DP} 觀測資料進行混合型雷達 QPE 技術研發。

¹ 粒子共振效應是指當粒子大小接近雷達波長時，會引發米氏散射，例如中大型雨滴、融化雪粒或冰粒等。此時，電磁波會在粒子內外反覆繞射與反射，形成干涉現象，導致散射特性出現非線性變化，進而使 Z_{DR} 值異常增高或降低。

防災氣象雷達網

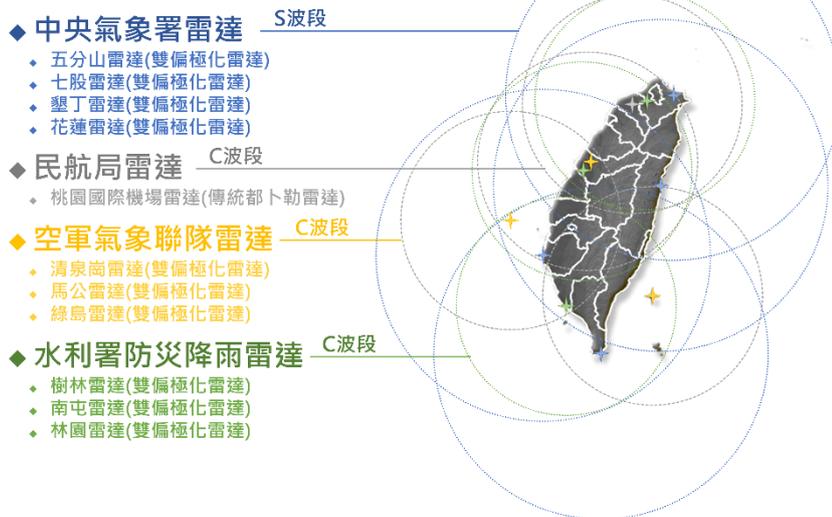


圖 3.全臺防災氣象雷達觀測網基本資訊。(繪製：國家災害防救科技中心)

三、 定量降雨估計技術研發

在研發雙偏極化雷達 QPE 技術的過程中，雨滴譜觀測是最重要的前置資料。唯有確保取得高品質的雨滴粒徑資料，才能有效提升 QPE 的準確性。一般而言，雨滴譜儀的觀測誤差主要來自強風干擾、雨滴撞擊儀器表面的水花濺起(Splashing effect)，以及雨滴位於觀測區邊緣(Friedrich et al., 2013)。災防科技中心於 2023 年參考 Tokay et al. (2013)所提出的方法，發展一套自動化的資料品質管理程序，並進一步建立雨滴譜儀資料庫(蔡等, 2024; 農業部農村發展及水土保持署, 2023; 2024)。

本研究首先使用中南部地區 7 個雨滴譜儀站的雨滴粒徑資料，來計算每筆觀測對應的雷達電磁波波長、雨滴粒徑軸比及降雨量。接著，根據相同時間點的地面溫度，運用 T-Matrix 方法，模擬非球形雨滴的雙偏極化參數(Vivekanandan et al., 1991; Mishchenko et al., 1996)，並計算相對於入射電場軸對稱介電粒子的散射場。最後，結合雨滴譜儀的估計雨量與雙偏極化參數 K_{DP} ，利用最小平方法進行回歸分析，進而推導出估計雨量(R ，單位為毫米)與雙偏極化參數(K_{DP} ，單位為 $^{\circ}/\text{km}$)的關係式。本研究共建立 16 個雙偏極化 QPE 公式(如表 1)，涵蓋不同的雷達波段(S 波段和 C 波段，波長分別為 10 和 5 公分)、區域、季節，以及地形高度。

表 1.臺灣中南部地區雙偏極化雷達定量降雨估計公式表

S 波段	梅雨季	中部	平地	$R(K_{DP}) = 52.1757 \times K_{DP}^{0.8139}$
			山區	$R(K_{DP}) = 47.0597 \times K_{DP}^{0.8051}$
		南部	平地	$R(K_{DP}) = 47.3283 \times K_{DP}^{0.8086}$
			山區	$R(K_{DP}) = 56.5692 \times K_{DP}^{0.7645}$
	颱風季	中部	平地	$R(K_{DP}) = 66.4814 \times K_{DP}^{0.8025}$
			山區	$R(K_{DP}) = 64.9225 \times K_{DP}^{0.8024}$
		南部	平地	$R(K_{DP}) = 66.8601 \times K_{DP}^{0.7973}$

			山區	$R(K_{DP}) = 70.6017 \times K_{DP}^{0.7274}$
C 波段	梅雨季	中部	平地	$R(K_{DP}) = 27.9523 \times K_{DP}^{0.8052}$
			山區	$R(K_{DP}) = 25.4892 \times K_{DP}^{0.8015}$
		南部	平地	$R(K_{DP}) = 25.4347 \times K_{DP}^{0.8005}$
			山區	$R(K_{DP}) = 31.017 \times K_{DP}^{0.7492}$
	颱風季	中部	平地	$R(K_{DP}) = 36.1324 \times K_{DP}^{0.79}$
			山區	$R(K_{DP}) = 35.2946 \times K_{DP}^{0.7922}$
		南部	平地	$R(K_{DP}) = 36.3898 \times K_{DP}^{0.7881}$
			山區	$R(K_{DP}) = 40.5504 \times K_{DP}^{0.7162}$

此外，考量雷達回波在估算小雨時的表現較佳，本研究亦納入雷達回波降雨估計公式。

$$R(Z_H) = 0.0344 \times Z_H^{0.678}$$

為提升雷達定量降雨估計的準確性，本研究整合雷達回波(Z_H)和雙偏極化參數(K_{DP})的降雨估計公式，建立 1 套混合型雷達 QPE 技術，詳細執行流程如圖 4。當某一網格點的 $Z_H < 10$ dBZ，視為無降雨，並予以特殊值標記。若 Z_H 大於或等於 10 dBZ，則進一步採用混合型 QPE 技術進行估算。接著，若網格點上缺少雙偏極化參數，就使用雷達回波的估計公式，反之，根據降雨強度選擇適用的估計公式。當 $Z_H > 30$ dBZ 與 $K_{DP} > 0.3^\circ/\text{公里}$ 時，採用雙偏極化參數公式，否則，仍以

雷達回波公式估算。

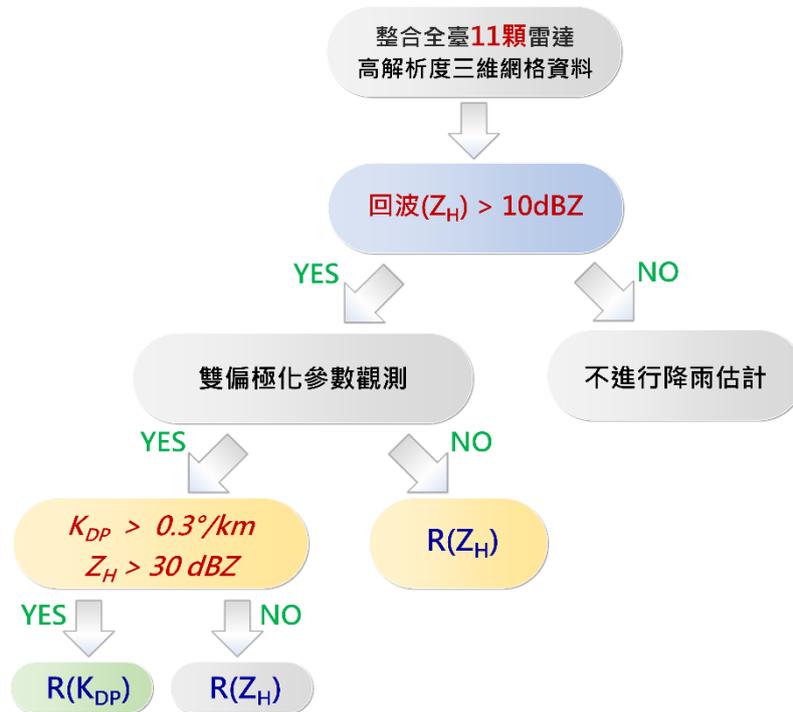


圖 4.混合型雷達 QPE 技術流程。(繪製：國家災害防救科技中心)

四、 山區及平地降雨估計成效評估

為瞭解雷達雨量估計在不同降雨強度下的表現差異，本研究將時雨量劃分為五個級距，分別為 0.5~9.9 毫米、10~19.9 毫米、20~29.9 毫米、30~39.9 毫米，以及 40 毫米以上。接著，以點對點比較的方法，評估混合型雷達 QPE 在山區與平地的雨量估計成效。在評估過程中，透過空間內插，將雷達 QPE 網格資料轉換為各個地面雨量站的雨量估計值，再與實際觀測雨量比較，作為估計誤差。除估計誤差外，本研究亦引入命中率作為輔助評估指標。命中率指的是雷達估計雨量與實測雨量同時落於相同雨量級距的比例。

梅雨季時(圖 5)，本研究提出的新技術在不同區域、地形高度及降雨強度下的表現，均優於現行 QPE 技術。尤其在強降雨情境下(時雨量 40 毫米以上)，新技術的平均誤差約較現行技術減少 5 至 10 毫米(改善幅度為 37.2%)。整體而言，新技術的雨量估計具有小雨高估、大雨低估、平地優於山區，以及強降雨的平均誤差較高等特性。在命中率分析中(圖未於文中呈現)，新技術於平地命中率大多在 60%以上，山區在時雨量小於 30 毫米也能保持 70%以上，表現明顯優於現行技術。然而，當時雨量超過 40 毫米時，新技術仍出現較大的平均誤差與較低的命中率，顯示其雖能有效改進雨量估計的準確性，但在強降雨時仍有進步空間。

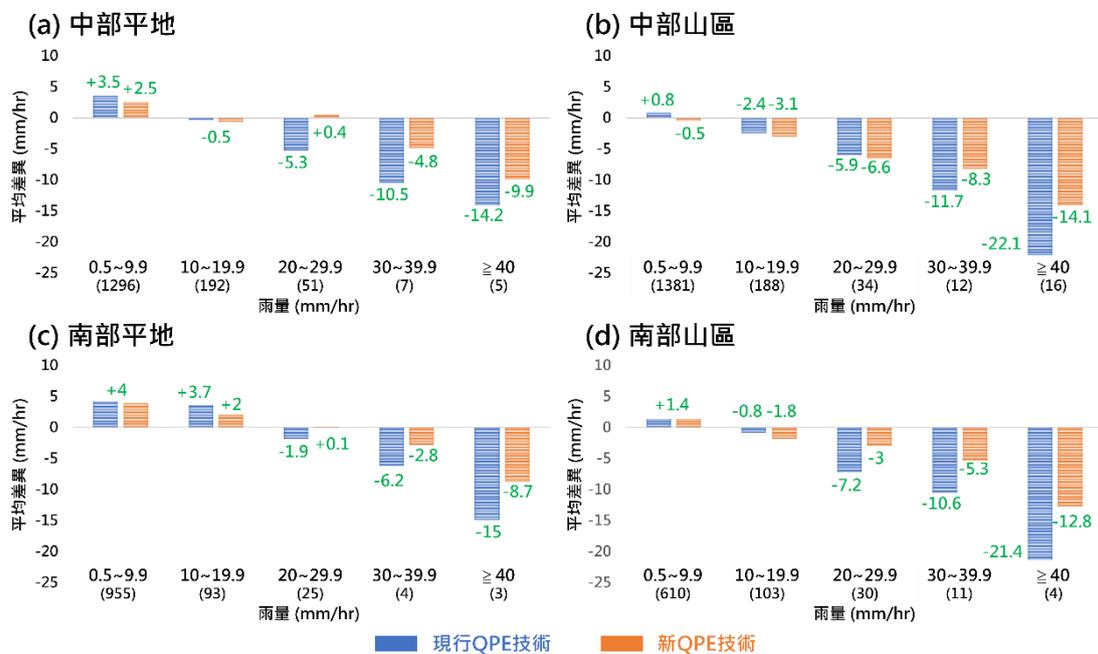


圖 5. 梅雨季期間，雙偏極化雷達 QPE 平均差異分析，雨量級距括弧內的數字為資料筆數。(繪製：國家災害防救科技中心)

在颱風季期間(圖 6)，雖仍有小雨高估和大雨低估的現象，但無論區域、地形高度或降雨強度，新技術的平均誤差皆低於梅雨季。整體而言，新技術在雨量估計上呈現明顯優勢，尤其是在短延時強降雨(時雨量超過 40 毫米)情境下，平均誤差可改善 41.2%。此外，平地的雨量估計表現優於山區，平地的平均估計誤差大多在 3 毫米以內，山區在小雨條件下表現尚佳，但當時雨量超過 30 毫米，平均誤差則上升至 9 至 15 毫米。新技術在命中率方面也有較好的表現，惟仍會隨降雨強度提升而逐漸下降。此結果再次顯示，在強降雨條件下，定量降雨估計結果仍可進一步調整與優化。

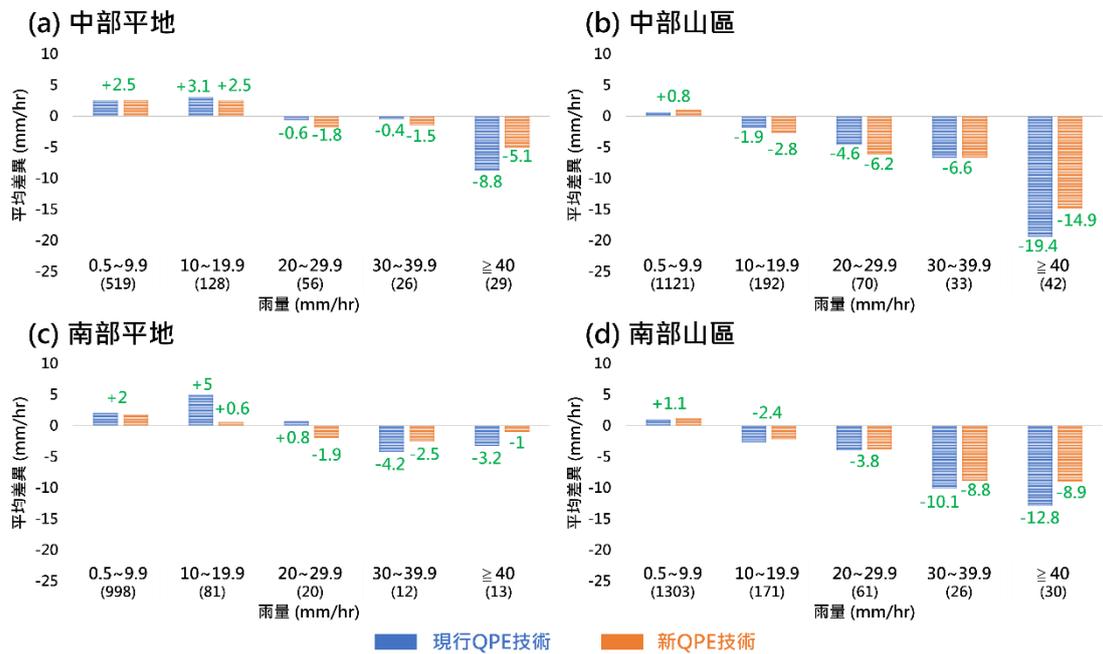


圖 6. 颱風季期間，雙偏極化雷達 QPE 平均差異分析，雨量級距括弧內的數字為資料筆數。(繪製：國家災害防救科技中心)

五、 結論

本研究針對臺灣中南部地區 2019 年至 2023 年，5 月至 10 月期間的雨量、雨滴譜儀及雷達資料，進行混合型 QPE 技術的研發與評估。透過系統性分析，本研究共建立 16 個雙偏極化參數的雨量估計公式，並整合 1 個雷達回波的雨量估計公式，完成 1 套混合型 QPE 技術。整體的雨量估計成效評估結果顯示，新技術在降雨估計準確性方面明顯優於現行雨量估計結果，平地與山區的平均改善幅度分別達 13.3% 與 8.3%。進一步分析亦顯示，當時雨量超過 40 毫米時。雖然新技術的估計仍存在低估現象，但與現行降雨估計技術相比，新技術在平地和山區的平均誤差改善幅度可分別提升 45.8% 及 32.5%。顯示新技術在極端降雨事件中具有更好的應用潛力。

本研究發展的雷達 QPE 技術，在梅雨季與颱風季的估計表現略有差異。梅雨季期間，時雨量 20 毫米以下的估計誤差大多在 2 毫米以內。然而，隨著降雨強度增加，估計誤差亦隨著上升，當時雨量超過 40 毫米時，山區的誤差可達 10 毫米以上。儘管如此，與現行估計結果相比，仍可發現在強降雨時，本技術於平地及山區的平均誤差改善幅度分別為 36.2% 及 38.2%。颱風季期間，雨量估計誤差比梅雨季小，僅在時雨量超過 40 毫米時，估計誤差才會明顯增加(5~10 毫米)，

顯示颱風季的雨量估計準確度較高。此外，在強降雨時，本技術於平地及山區的平均估計誤差可改善 55.4%及 26.9%。

透過系統性的校驗分析，本研究建立的混合型 QPE 技術，展現出良好的準確度，且在不同區域與地形高度皆有穩定的估計表現，特別是在強降雨情境下。準確的降雨估計對於短延時降雨預警、坡地崩塌和土石流警戒，以及積淹水預警等防災作業具有關鍵影響。若能持續研發臺灣北部和東部地區的混合型 QPE 技術，將有助於提升全臺雨量估計精確度與即時應變能力，以支援地方政府與相關單位的防救災應變作業。

致謝

誠摯感謝交通部中央氣象署提供雷達、雨滴譜儀與雨量觀測資料，以及經濟部水利署、國防部空軍氣象聯隊及交通部民用航空局提供寶貴的雷達資料。此外，特別感謝農業部農村發展及水土保持署的經費支持(計畫編號：113 保發-5.1-保-01-04-01-001)，使本研究得以順利完成。

參考文獻

1. 行政院農業部農村發展及水土保持署，2022：111 年坡地科技防災落實應用成果報告書。

2. 行政院農業部農村發展及水土保持署，2023：112 年坡地科技防災落實應用成果報告書。
3. 行政院農業部農村發展及水土保持署，2024：113 年坡地科技防災落實應用成果報告書。
4. 蔡直謙、廖信豪、劉嘉騏、林欣弘與于宜強，2024：高時空解析度暴雨雨淹水預警技術評估。國家災害防救科技中心技術報告，NCDR 113-T17，66pp。
5. Angulo-Martínez, M., Barros, A. P., 2015: Measurement un-certainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using Parsivel disdrometers in the southern Appalachian Mountains. *Geomorphology*, 228, 28–40.
6. Brandes, E., Zhang, G., Vivekanandan, J., 2002: Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment. *J. Appl. Meteorol.*, 41, 674–685.
7. Chang, W.-Y., Wang, T.-C. C., Lin, P.-L., 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. Ocean. Technol.* 26, 1973–1993.
8. Friedrich, K., Higgins, S., Masters, F. J., Lopez, C. R., 2013: Articulating and stationary Parsivel disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 30, 2063–2080.
9. Park, S. -G., Kim, H. -L., Ham Y. -W., and Jung, S. -H., 2017: Comparative evaluation of the OTT PARSIVEL2 using a collocated two-dimensional video disdrometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 34, 2059–2082.
10. Ryzhkov, A., Diederich, M., Zhang, P., Simmer, C., 2014: Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 31, 599–619.
11. Ryzhkov, A., Zrnić, D., 1995: Comparison of dual-polarization radar

- estimators of rain. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 12, 249–256.
12. Ryzhkov, A., Zrnić, D., 1996: Assessment of rainfall measurement that uses specific differential phase. *J. Appl. Meteorol.*, 35, 2080–2090.
 13. Ryzhkov, A., Giangrande, S., Schuur, T., 2005: Rainfall estimation with a polarimetric prototype of the WSR-88D radar. *J. Appl. Meteorol.*, 44, 502–515.
 14. Ryzhkov A., Zrnić, D., 2005: Radar polarimetry at S, C, and X bands comparative analysis and operational implications, 32nd Conference on Radar Meteorology.
 15. Ryzhkov, A., Zhang, P., Bukovčić, P., Zhang, J., Cocks, S., 2022: Polarimetric Radar Quantitative Precipitation Estimation. *Remote Sens.*, 14, 1695.
 16. Saha, R., Testik, F. Y., 2023: Assessment of OTT Parsivel2 Raindrop Fall Speed Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 40, 557–573.
 17. Vulpiani, G., Montopoli, M., DelliPasseri, L., Giola, A., Giordano, P., Marzano, F., 2012: On the Use of Dual-Polarized C-Band Radar for Operational Rainfall Retrieval in Mountainous Area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 405–425.
 18. Wang Y., Zhang, J., Chang, P.-L., Langston, C., Kaney, B., Tang, L., 2015: Operational C-band dual-polarization radar QPE for the subtropical complex terrain of Taiwan. *Advances in Meteorology*. 73, 4793–4815.