



雷達與雨量站 降雨資料融合於 都市水文 之應用

汪立本／國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組 助理教授

Susana Ochoa Rodriguez／RainPlusPlus (Rain++) Ltd., UK. Senior Hydrometeorologist

都市水文傳統上多使用地面雨量站觀測資料作為主要降雨資訊來源，然而雨量站資料有其地理位置限制，無法提供足夠之空間降雨資訊。近年來，隨著資訊科技之進步，都市排水模型之解析度越來越高，為了得到最好之模擬結果，也需要高品質、高解析度之降雨資訊，僅使用雨量站數據可能無法滿足都市排水模擬之需求。隨著訊號處理技術之進步及硬體設備之升級，雷達降雨於大尺度水文模擬之應用逐漸普及，然而在都市水文之應用還是相對有限，主要原因還是因為雷達降雨之準確度不足。本研究透過二個位於英國之都市集水區案例，分享透過雷達、雨量站降雨資料融合技術，可以生成高解析度、高準確度之降雨數據，並透過都市排水模擬，展示融合降雨資訊可以產出較使用原始雷達降雨或是僅使用雨量站降雨資料更好品質之流量模擬結果。此外本研究也分析在不同降雨型態及模擬不同雨量站密度等情況下，對於融合結果品質產生之影響，此分析結果可以作為實務上使用資料融合技術之參考。

Abstract

Rainfall estimates of high accuracy and resolution are required for urban hydrological applications, given the high imperviousness, small size and fast response of urban catchments. Despite significant progress in rainfall measurement in recent decades, the resolution and accuracy of the rainfall estimates typically available from national meteorological services are still insufficient for urban hydrological applications. The work focuses upon the techniques that can help improve radar rainfall accuracy, with the aim to provide guidance on the application of radar-rain gauge merging techniques at urban scales, so that high-accuracy rainfall estimates which meet urban requirements can be obtained. Three merging techniques, namely Mean Field Bias (MFB) correction, kriging with external (KED) and Bayesian (BAY) data merging, are selected for testing on grounds of performance and common use. Results suggest that all merging methods improve the applicability of radar estimates to urban hydrology. Overall, KED displays the best performance, with BAY a close second and MFB providing the smallest benefits.

前言

都市洪水管理

都市雨水、洪水之適當管理可以有效降低人員和基礎設施受洪水侵襲之風險，也可以讓水資源之利用更加有效率。然而近年來隨著都市化及氣候變遷加速，大幅增加了都市雨水、洪水管理（urban stormwater management）之迫切性及挑戰性^[1]。目前世界上已經有超過一半的人口居住在都市，而且預計都市化之速度將持續加快，這對於都市水資源管理及排水系統造成了巨大壓力，並加劇了洪水和乾旱等水相關災害發生時帶來之影響^[2]。而氣候之快速變遷更是導致極端氣候事件的頻率和強度增加，而且此增加趨勢預計將持續下去^[3,4]。尤其觀測資料顯示，在過去幾十年中，在世界上許多地方（尤其在北半球地區），極端降雨事件的發生頻率，以及造成災害之嚴重程度都不斷攀升^[5]；而氣候變遷模擬推估（climate projection）更進一步顯示此增加之趨勢未來沒有減緩之跡象^[6]。此趨勢將增加

大幅都市極端降雨及洪水發生之頻率和影響程度，例如英國相關評估報告顯示，英國都市地區將有超過 200 萬人^[7] 受到極端降雨及洪水之影響，相關之經濟損失預計將超過 2.7 億英鎊。

為了應對以上挑戰，許多先進國家已經立定相關計畫以有效管理都市水資源（例如歐洲議會^[8,9] 及英國議會^[10]）；而其中都市排水管理方面之實施核心部分，即是要建置可靠的都市排水模型，可以準確地模擬都市逕流之歷程，並可以用來分析在不同環境條件下，都市排水系統之性能、反應，從而做出最佳之雨水、洪水管理決策。

降雨是都市排水模型的主要輸入，由於都市集水區之特色，包括其面積通常相對較小（與河流流域相比）、地表土地使用變化很大且通常不透水，因此，都市排水對降雨之反應相當迅速（即降雨轉換成逕流門檻值低且快速），對於降雨之時空變化非常敏感^[11-13]。降雨之準確性因此大幅決定都市逕流估算的準確性及可靠度，無論是降雨資料之解析度或是準確度，都市排水模擬都需要使用最高標準之降雨估算作為輸入值^[14-18]。

都市排水模擬之降雨需求

都市水文應用傳統上多使用地面雨量站數據作為主要雨量資料來源，雖然雨量站可以提供近地面準確地點位降雨估算值（point rainfall estimates），不過無法完全捕捉降雨的空間變異性（spatial variability），此限制對於都市逕流模擬之準確度有不可忽視之影響^[17-19]。近年來，由於雷達影像資料具有良好捕捉降雨空間分布及其隨時間之演變等特點，許多文獻已經證明雷達定量降水估計（Quantitative Precipitation Estimation, QPE）應用於都市水文之潛力^[13,17,20-22]。然而，雷達定量降雨產品往往是由國家級氣象單位提供，在設置、營運成本及涵蓋範圍等考量下，勢必對於產品之時空解析度有所取捨（常見時空解析度為 1 公里 / 5 ~ 10 分鐘），且無法針對特定區域提供客製化降雨產品，因此雷達定量降雨之準確度及解析度並不總是能夠滿足都市水文之需求。

長期以來，有許多研究針對都市排水模擬所需之降雨解析度作探討，而近年來隨著高解析度都市排水（水文 / 水力）模型之普及，且逐漸在實務上被大量使用，解析度相關主題再次成為研究重點^[23,24]。然而受

限於使用資料之真實解析度或是實驗設計之侷限性，過去研究對於都市水文所需之降雨解析度並沒有定論。直到近年來雷達及資訊技術之快速發展，Ochoa-Rodriguez *et al.*^[25] 可以利用高時空解析度 X-band 雷達定量降雨產品（100 公尺 / 1 分鐘），搭配高解析度都市排水模型，在多個不同的都市集水區、利用不同時空解析度之降雨產品，測試都市排水模擬之變化，該研究歸納出以下結論：

1. 空間解析度：除非是很小的集水區（ ≤ 1 公頃），目前常見雷達定量降雨產品的 1 公里空間解析度普遍上是足夠的，而當降雨空間解析度低於 3 公里時，都市排水模擬計算之誤差會大幅增加。由於地面雨量站之平均距離通常超過三公里，此結論也可用來推論，利用雨量站內插產生之降雨量當作排水模擬輸入值時，可能會有不可忽視之排水流量估算誤差。
2. 時間解析度：目前雷達定量降雨產品常見之 5 分鐘解析度，對於都市排水模擬是不足的，此結論與前人研究一致^[26]。Ochoa-Rodriguez *et al.*^[25] 進一步探討誤差原因，發現主要是因為雷達影像是固定時間間隔（例如每 5 或 10 分鐘）做一次「瞬間」降雨分布掃描（snapshot image），當這樣的降雨產品直接做為排水模擬輸入值時，背後隱含之假設是，在此時間間隔內的降雨強度是維持不變的。然而事實上，降雨是一個時空上持續變化的過程，所以用「瞬間」雷達降雨產品直接當成輸入值會有很大的時間抽樣誤差（temporal sampling error）。文獻中有提出減少時間抽樣誤差影響之方法，例如 Wang *et al.*^[27] 透過電腦視覺技術（computer vision），將 5 ~ 10 分鐘雷達降雨產品內插至 1 分鐘高解析度雷達降雨影像來降低抽樣誤差，結果顯示可以得到更好的都市排水模擬結果。

關於準確性，過去文獻普遍認為雷達 QPE 產品的準確性無法滿足都市水文應用之需求，尤其常常低估極端降雨量，此缺點可能導致都市逕流計算出現較大誤差^[15,17,28]。準確性不足之原因，主要是因為雷達降雨是間接降雨測量值（indirect measurements），是從量測的雷達回波（radar reflectivity）推估出降雨強度（radar rain rate），此推估過程需要經過一連串訊號處理、校正（correction）步驟，而這些步驟的參數許多是根據統

計歸納或是理論推估出之數值，因此有許多誤差來源（uncertainty sources）；加上有些區域會有特定地理因素（orographic effect），造成雷達 QPE 之品質在時空分布上不甚穩定^[13,29,30]。過去幾十年來，在雷達訊號處理及硬體發展上取得了長足進展，包括近年來許多國家級氣候單位都正在或是已經將原本之氣象雷達升級為雙極化雷達，藉以獲得更好之降雨量測品質^[31,32]。然而，即便有新的雷達硬體或是處理技術，雷達 QPE 還是有無可避免之誤差，因為並沒有改變雷達作為降雨量測量工具固有之侷限，即雷達降雨量是間接測量值、雷達之掃描平面通常遠高於地面，還有訊號之品質及有效解析度通常會隨著跟雷達之距離增加而逐漸下降。為了有效提高雷達 QPE 之準確度，以及其作為水文應用之合適性，又同時保留其對空間降雨描述之優勢，利用地表雨量站資料（動態）調整雷達降雨量測（gauge-based radar rainfall adjustment，或是也經常被稱為雷達、雨量站降雨資料融合（radar-rain gauge data merging））是廣泛應用之技術。然而，過去的相關應用大多專注於大尺度水文應用（large-scale hydrological applications）；直到近年來，隨著高解析度都市排水模擬逐漸普及，為了增進都市降雨估算品質，融合技術逐漸被應用至都市水文範疇。然而相關文獻還是相對有限，且多半專注於評估降雨品質之改善程度，較少結合排水模擬來進一步評估對於都市排水估算之影響及可能帶來之效益。

本文將針對雷達、雨量站降雨資料融合技術於都市水文之應用做深入探討。以下將先介紹常用之雷達、雨量站降雨資料融合技術；然後利用位在英國的二個都市集水區作為案例探討，分別就不同型態之降雨事件，測試資料融合可能帶來之都市水文模擬效益做分享。

雷達、雨量站降雨資料融合技術

如前所述，雷達、雨量站降雨資料融合已經被廣泛應用於大尺度水文模擬，因此已經有許多技術被提出，而文獻中也提出數種將不同融合技術加以分類之方法。例如 Wang *et al.*^[33] 根據融合技術背後不同理論假設之差異，將融合技術分為偏差減少法（bias reduction）和誤差方差最小化（error (co-)variance minimisation）等二種方法。此分類後來也被 McKee and Binns^[34] 和 Lo Conti *et al.*^[35] 採用。Erdin^[36]、Goudenhoofd and Delobbe^[37] 和 Jewell and Gaussiat^[38]

等則是將融合技術區分為地理統計（geostatistics）與非地地理統計，其中地理統計法被之定義取決於該技術是否有使用變異函數（variogram）。不同於上述二種分類專注於融合技術之理論，Decloedt *et al.*^[39] 提出以融合結果之數據來源（即雷達和雨量站降雨資料）作為分類方式，共分為調整（adjustment）和整合（integration）兩種分類。前者之融合結果主要是根據地表雨量站數值來調整雷達降雨估算；後者則是實際上兩種數據來源之權重組合。

由於上述分類各有其侷限性，Ochoa-Rodriguez *et al.*^[40] 延伸 Decloedt *et al.*^[39] 的分類，並導入 Wang *et al.*^[33] 的理論分類法，提出更完善之融合技術分類方法，將融合技術共分為三類：(1) 雷達降雨偏差調整法；(2) 以雷達空間關聯作為附加資訊之雨量站降雨量內插法；(3) 雷達、雨量站降雨數據整合法。以下將講述各分類技術之融合原理，以及實務上最常見、最具代表性之方法。

雷達降雨偏差調整方法

這類方法的原理為假設地面雨量站之量測值能夠以某種形式代表真實降雨（例如其空間平均可以當作真實區域降雨量），然後用來校正對應之雷達降雨估算偏差（bias）。此類方法推估出之融合降雨量通常以整個雷達空間降雨作為背景，然後透過乘法或是加法應用校正因子來簡單調整雷達數值。校正因子之計算通常是依據給定時間段內雨量站和雷達降雨之差值，可能是由長期（靜態）或是短期（動態）觀測值推估而成^[21,29,41,42]。

此類方法中最簡單也是最常被使用的方法是平均偏差調整法（MFB, Mean Field Bias correction）。此方法假設雷達降雨誤差在特定空間範圍內為均勻分布，產生偏差之原因可能是由於雷達訊號校正時的數值偏移。這種方法經常使用乘法校正因子，而校正因子最簡單、常用的估算方式為求取固定時間段內雨量站和相對應雷達降雨量空間平均值之比例，然後將此比例值作為校正因子與整個空間範圍內之雷達降雨相乘^[21,29]。文獻中還有許多更複雜之偏差調整方法，例如考慮偏差的空間變異性^[43]，或是利用卡門濾波演算法（Kalman filter）估算偏差於時間上之演變^[44,45]，不過其應用原則上都與 MFB 相差不大。

以雷達空間關聯作為附加資訊之雨量站降雨量內插法

不同於偏差調整法，內插法並不使用雷達空間降雨作為背景；相反地，這類方法是利用雷達降雨之空間關聯性，來幫助雨量站資料進行空間內插（spatial interpolation）；此類方法皆由地理統計理論發展而來，大多為克利金法（kriging）之延伸。由於克利金法為無偏差最佳線性估算法（unbiased best linear estimator），因此此類方法之特色是估算出之融合降雨與雨量站降雨觀測值沒有數值上的偏差。

此類方法中最被廣泛使用的為外部趨勢克利金法（Kriging with External Drift, KED）^[46]。KED 是克利金法之延伸，其中外部趨勢變量（在此為雷達降雨量）會提供內插時的輔助資訊，因此內插之過程，會受到目標值與雨量站位置，以及與雷達降雨值之間的空間關聯性之影響。

此類方法中另一個被廣泛使用的是條件融合法（conditional merging），由 Ehret ^[47] 首先提出，然後 Sinclair and Pegram ^[48] 改善及測試，在文獻中也稱為克利金雷達誤差校正法（kriging with radar-based error correction, KRE）。KRE 法首先利用位於雨量站位置之雷達網格資料進行克利金內插，然後將內插之雷達雨場和原始雷達雨場相減，此相減之差可以用來代表克利金內插之誤差分布，相差值較大的地方，通常離雨量站位置較遠，該處之內插品質也較低，需要較多誤差校正；然後 KRE 法將以上雷達相差分布值添加至雨量站之克利金內插雨場，如此雷達之空間結構就被納入了基於雨量站內插所產生之雨場。

雷達、雨量站降雨數據整合法

不同於以上兩類方法，整合法並不特別偏向使用雷達或雨量站（內插）資料作為背景參考值，而是藉由找到將降雨估算之整體不確定性（overall estimation uncertainty）降到最低之方式，將兩種降雨數據作數值上的實質結合。因此融合降雨估算量通常為雷達和雨量站降雨量測值之加權平均（weighted average），而相關權重則是根據雷達、雨量站降雨數據之相對不確定性來求取。例如，在雨量站稀少的地區，利用雨量站資料估算該處降雨之不確定性相對較高，因此最終融合之降雨場自然與雷達降雨場較為相似；而在雨量

站密度高的地區，最終融合之降雨場就與雨量站（內插）降雨場較為類似^[49]。

聯合克利金法（Co-kriging, CoK）為文獻中主要的降雨數據整合方法之一。CoK 將雷達和雨量站降雨數據合併至單一（聯合）克利金矩陣系統中，求解該矩陣系統之過程，等同於將估計誤差之變異性最小化。CoK 是克利金法的多變量版本延伸，目的是利用有良好空間分佈之共同（或是次要）變量（例如雷達 QPE）來幫助空間分布不佳之主要變量（例如雨量站資料）完成空間內插^[50]。CoK 之概念與前述之 KED 相似，皆是將雷達資料納入雨量站資料內插之克利金矩陣系統，然而根本區別在於，KED 僅使用雷達數據的空間關聯來影響內插值之（線性）權重，因此本質上，所有的融合數值都還是雨量站數據之線性組合。而在 CoK 中，最終融合數值是雷達與雨量站數據之（線性）組合。

貝式資料融合（Bayesian data merging, BAY）^[51] 為另一個主要的降雨數據整合方法；不同於 CoK 整合雷達、雨量站資料至單一矩陣系統，BAY 則是分別量化雷達及雨量站降雨估算之不確定性，然後透過比較兩者不確定性之相對大小，推估出將整體不確定性最小化之方式來融合降雨數據。BAY 資料融合法包含三個步驟：(1) 利用克利金法內插出雨量站空間降雨場，並利用克利金法估算之誤差共變異數矩陣（error covariance）來代表雨量站降雨之不確定性；(2) 將雷達降雨場與雨量站內插降雨場相減，以獲得降雨估算偏差場，此偏差場之共變異數矩陣可用來推導出雷達降雨之不確定性；(3) 利用卡門濾波演算法分析雷達、雨量站之相對不確定性、按比例組合出融合降雨數值。

融合技術對於都市排水模擬之影響

實驗案例概述

本案例設計旨在評估融合降雨數據對於都市排水模擬準確度之影響，根據上述資料融合方法分類，挑選各分類最具代表性的一種方法，來探索不同資料融合方法之特性，及當作排水模擬降雨輸入值之表現。選擇之融合方法包括：平均偏差調整法（MFB）、外部趨勢克利金法（KED）和貝式資料融合（BAY）。此外，原始雷達降雨資料（Radar, RD）以及實務上常用的雨量站內插法：（區塊）克利金（block kriging, BK）

及徐昇多邊形網法 (Thiessen's Polygon, TP)，也會用來產生降雨估算值作為比較參考。

根據 Ochoa-Rodriguez *et al.* [40]，資料融合之結果會受到降雨型態 (storm types) 以及雨量站密度 (gauge network density) 之影響，因此本研究也將案例降雨事件根據季節分為冬季及夏季降雨事件，以及 (由高至低) 模擬六種不同之雨量站密度，分析資料融合在不同降雨型態、不同雨量站密度之表現差異。本研究之案例集水區為位於英國的二個都市集水區 (請參考圖 1)：愛丁堡-洛錫安 (面積 254 平方公里) 和伯明罕-黑鄉 (面積 431 平方公里)，融合後之降雨估算將作為這兩個都市集水區排水模型之輸入值，流量模擬結果會與實際流量觀測值比較。(圖 1(a))

案例集水區

愛丁堡-洛錫安 (Edinburgh-Lothian, EL) (圖1(a))

此集水區位於蘇格蘭東南部，包括愛丁堡市中心，以及中、東洛錫安鄰近郊區，主要是住宅區。集水區的高程變化範圍達 230 公尺。集水區面積約為 254 平方公里，其中 144 平方公里由下水道系統排水；排水面積中，約 47% 為不透水鋪面 (impervious surface)。都市排水系統由數個獨立下水道結合。雖然主要由重力驅動，但有數百個控制元件，其中包括 132 個抽水站。

伯明罕-黑鄉 (Birmingham-Black Country, BC) (圖1(b))

此集水區位在英格蘭的西米德蘭 (West Midlands)，覆蓋了整個伯明翰地區及黑鄉工業區，主要為住宅、商業和工業用地。集水區的高程變化範圍達 200 公尺，集

水面積約 431 平方公里，其中 325 平方公里為下水道系統。排水面積中，約 68% 為不透水鋪面。與愛丁堡-洛錫安一樣，伯明翰-黑鄉的都市排水系統由數個獨立下水道結合。雖然主要由重力驅動，但有數百個控制元件，其中包括 166 個抽水站。

都市排水模擬系統 (urban drainage models)

本研究兩個實驗集水區的排水模型皆為半分布式 (semi-distributed)；在半分布式模型中，整個集水區表面被分成許多非常小的子集水區單元 (sub-catchment units)；模擬時，每個集水區子單元被視為一個集總式水文模型 (lumped model)，施加在每一個單元上之降雨會被假設為均勻分布，演算之徑流量會被引導至子集水區出口 (outlet)，此出口通常會對應到下水道系統的入口。本研究使用之模型是依照英國標準構建和校準 [52]，愛丁堡-洛錫安及伯明罕-黑鄉集水區分別被劃分為 18,105 及 97,764 個子集水區單元，排水透過 InfoWorks ICM 軟體模擬。

降雨、流量資料集

本研究之雨量站及流量測站資料來自於當地水公司 (water company) 每五年一次之集水區排水監測活動，這些監測活動通常歷時 4~6 個月，水公司可以收集大量降雨及流量數據，用校正及驗證都市排水模型。本研究利用此難得之降雨、流量監測資料集，搭配英國氣象局之高解析度 C-band 氣象雷達產品 Nimrod (1 公里 / 5 分鐘) [53]，測試並比較不同雷達、雨量站降雨融合技術結果，以及對於都市排水模擬之影響。

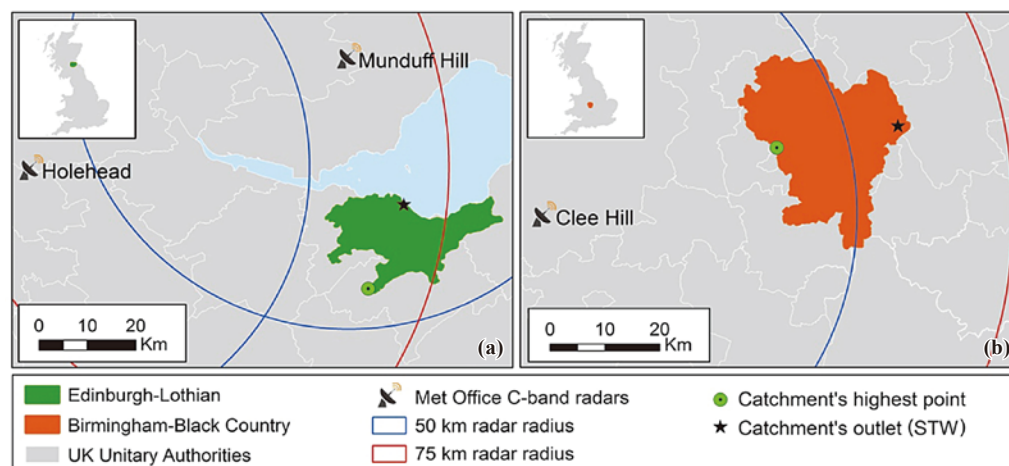


圖 1 本研究兩個案例集水區之地理位置，以及附近英國氣象局雷達站位置：(a) 愛丁堡-洛錫安，(b) 伯明罕-黑鄉。如圖所示，兩個案例集水區附近都有英國氣象局之 C-band 氣象雷達，且大部分區域都在雷達掃描半徑 50 公里範圍內。

愛丁堡-洛錫安之集水區排水監測活動介於 2013 年 12 月至 2014 年 4 月之間，共設置了 96 個傾斗式雨量計 (tipping-bucket rain gauge, TBR) 和 233 個流量監測站 (每個站都有一個水位和流速感測器，據此估算流量) (設置位置詳見圖 2)。伯明罕-黑鄉之集水區排水監測活動則是介於 2011 年 12 月至 2012 年 9 月期間，共設置了 84 個 TBRs 及 66 個流量監測站 (設置位置詳見圖 3)。

本研究從兩個案例集水區皆個別挑選了 15 個雨量站作為獨立驗證融合結果使用 (請參考圖 2(a)、圖 3(a))，挑選原則為盡量能夠涵蓋整個集水區域，如此能不偏重特定區域。流量資料之品質比較不穩定，本研究根據流量資料之品質、所在位置 (涵蓋上、中、下游區域)，在愛丁堡-洛錫安及伯明罕-黑鄉集水區各挑選了 14 及 8 個測站之流量資料作為結果驗證 (請參考圖 2(b)、圖 3(b))。降雨及流量資料更進一步後處理確保資料品

質，其中雨量站資料採用 Luyckx and Berlamont^[54] 提出之傾斗式雨量計校正方法，有效減少高降雨強度之低估現象；流量資料部分，則是參考 Rico-Ramirez *et al.*^[55] 提出之後處理方式，使用 10 分鐘寬度之均值濾波 (mean filter) 來降低原始流量資料之雜訊比例。

結果分析

本研究將從以下三個層面分析資料融合結果，並探討降雨事件型態、雨量站密度對結果之影響。

資料融合結果於不同降雨型態、不同雨量站密度情況下之空間結構變化

圖 4、圖 5 分別顯示冬季及夏季降雨型態下，不同降雨融合、內插結果隨著雨量站密度改變 (圖中由上至下代表密度由高到低)，其空間降雨結構之變化。從圖 4、圖 5 之降雨事件案例，我們可以觀察到：

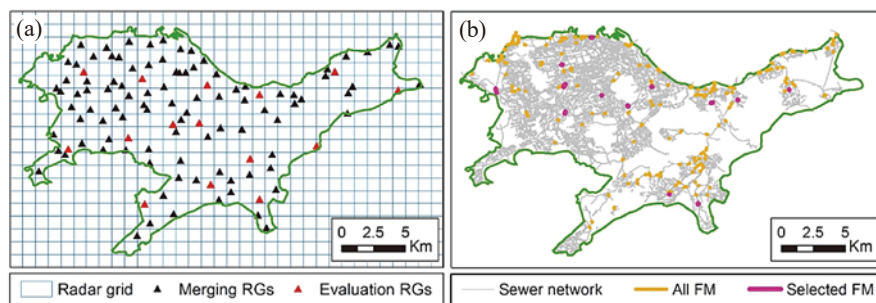


圖 2 (a) 愛丁堡-洛錫安集水區雨量站、(b) 下水道網路分布及流量測站位置分布。
圖 (a) 中，以紅色三角形標示之雨量站會用來評估資料融合結果，不會用作資料融合使用；圖 (b) 中，粉紅色標示為評估流量模擬結果之流量測站位置。

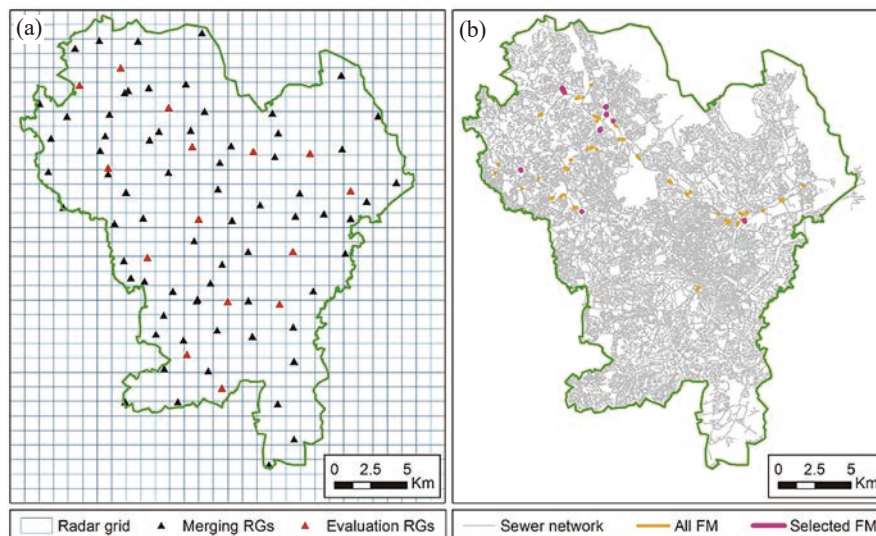


圖 3 (a) 伯明罕-黑鄉集水區雨量站、(b) 下水道網路分布及流量測站位置分布。
圖 (a) 中，以紅色三角形標示之雨量站會用來評估資料融合結果，不會用作資料融合使用；圖 (b) 中，粉紅色標示為評估流量模擬結果之流量測站位置。

1. MFB 的降雨空間輪廓基本上跟原始雷達 RD 一致，只是隨著雨量站密度變化而造成雨量站估算之區域平均降雨不同，MFB 整體降雨估算值跟著上下變動。
2. 相較於內插法 (BK 和 TP)，KED 能夠產生空間上更真實之降雨分布；然而，類似內插法，KED 對於雨量站密度變化相對敏感。當夏季對流降雨集中在某個小區域、加上雨量站密度低時，可能會因此沒有捕捉到降雨之核心雨胞 (參考圖 5)，此時 KED 及內插法就可能大幅低估真實降雨。冬季降雨之分布通常涵蓋較大之空間範圍，因此即便處於雨量站密度較低之情況，雨量站錯失捕捉到降雨之機率還是相對較低 (圖 4)，因此發生大幅低估真實降雨之機率較低。
3. 相較於 KED，BAY 採用更多雷達資訊，因此 BAY 對於雨量站密度變化較為不敏感，此優勢於夏季型態降雨事件特別明顯。此外，當雨量站密度高的時候，BAY 降雨跟 BK 內插較為類似，因為此時雨量站降雨估算值之不確定性較低；不過隨著

雨量站密度變低，BAY 降雨之空間結構逐漸轉變成較類似 RD。

4. 不同內插法之間，我們可以觀察到 BK 較 TP 展現出更高之空間降雨變異性。此外，類似 KED，內插法在冬季降雨型態表現較好，且對於雨量站密度變化相對敏感。

資料融合技術於不同降雨型態、不同雨量站密度情況下預測未知位置降雨表現之變化

圖 6 顯示不同資料融合、內插方法，在不同雨量站密度條件下，預測驗證雨量站 (圖 2、圖 3 紅色三角形標示點) 降雨數據之結果，此處選用平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE) 做為評估指標。我們可以觀察到：

1. 所有的資料融合技術都能有效地提高原始雷達降雨資料之品質；提高之程度與採用之融合方法、降雨型態及雨量站密度息息相關。大致上來說，融合方法對於冬季降雨之預測力較高。
2. 從冬季降雨事件之結果可以發現 (圖 6 左)，利用

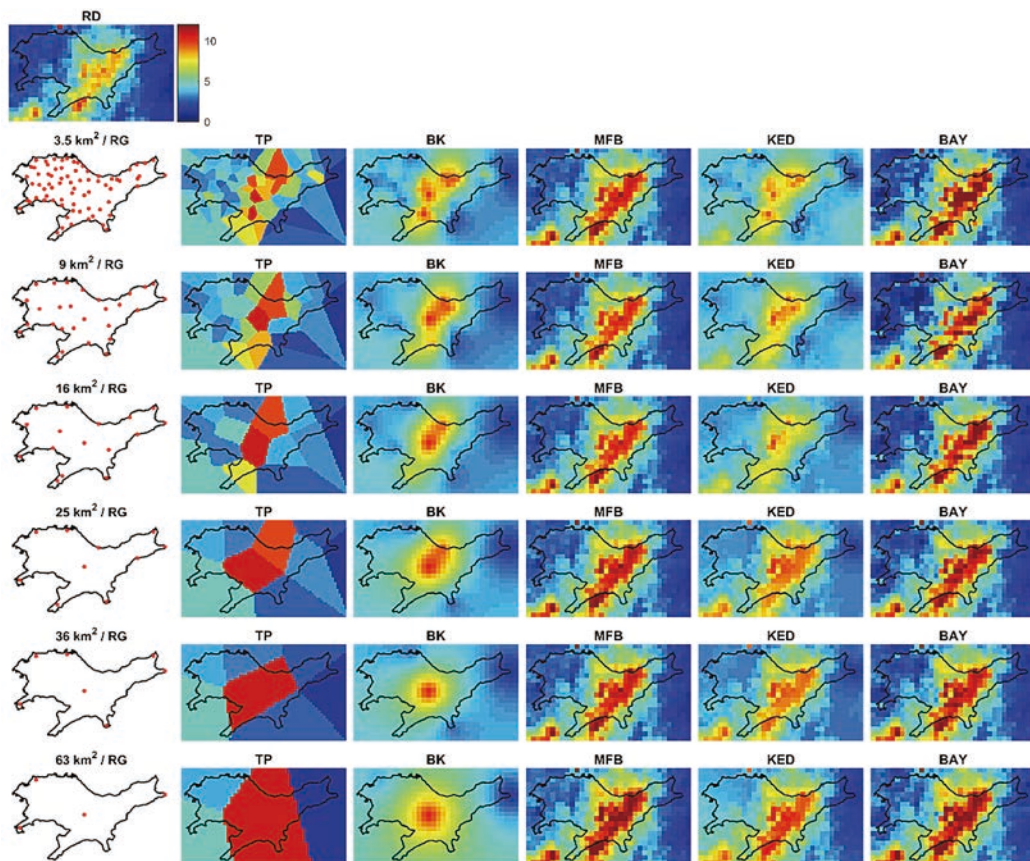


圖 4 不同資料融合、內插技術於愛丁堡-洛錫安集水區產出之 (冬季) 降雨空間分布 (2013/12/30 09:40 UTC)，隨不同雨量站密度 (由上至下由高至低) 之空間結構變化。

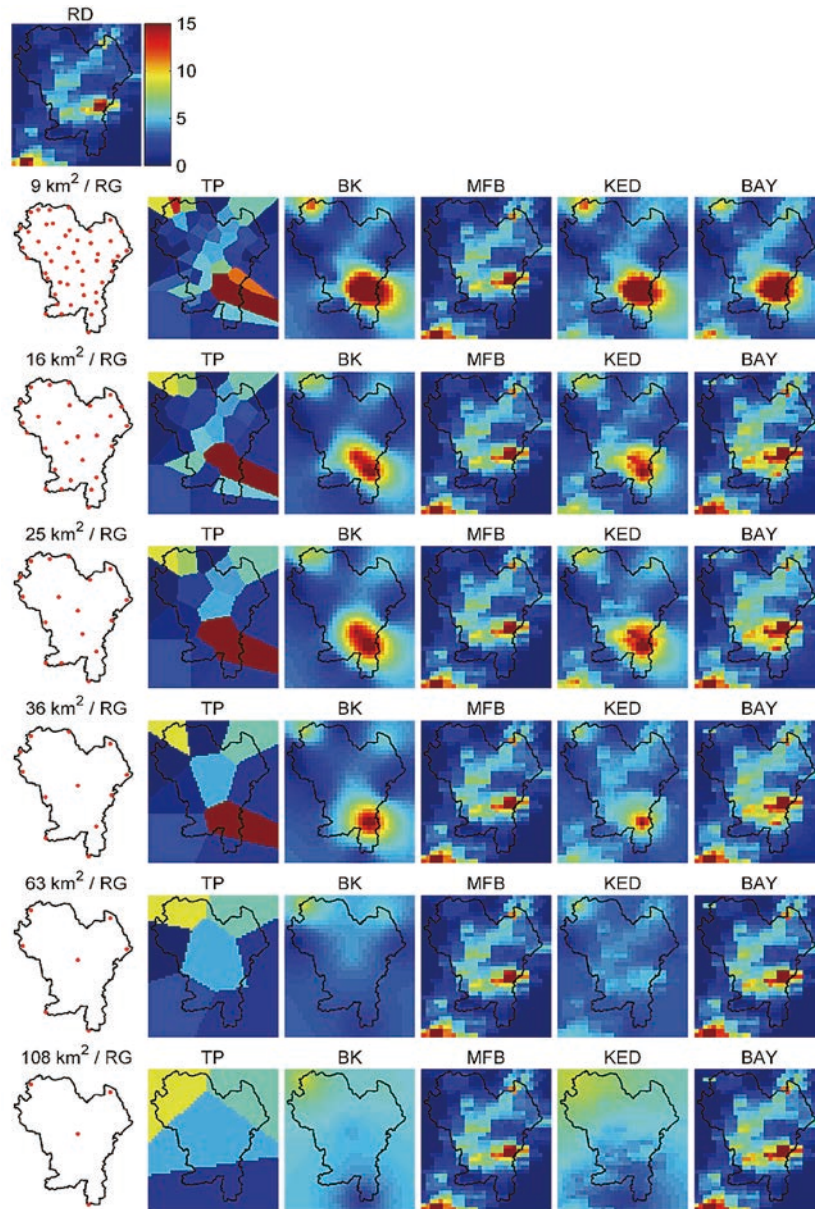


圖 5 不同資料融合、內插技術於伯明罕-黑鄉集水區產出之(夏季)降雨空間分布(2012/06/06 16:40 UTC)，隨不同雨量站密度(由上至下由高至低)之空間結構變化。

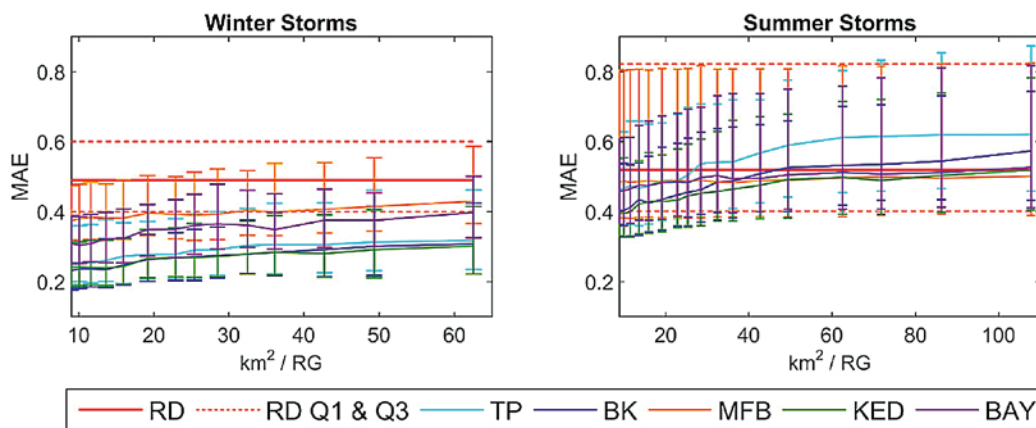


圖 6 不同資料融合、內插技術在冬季(左圖)及夏季(右圖)降雨事件中,平均絕對誤差(MAE)評估指標隨不同雨量站密度(由高至低)之變化。

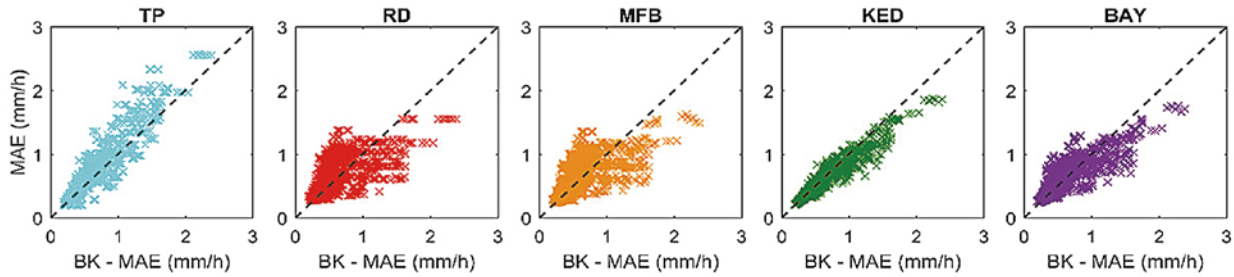


圖 7 不同資料融合、內插技術與 BK 內插法之平均絕對誤差 (MAE) 比較。45° 斜虛線代表其他方法與 BK 之表現一樣；斜虛線右下之區域，表示其他方法表現較佳 (MAE 較低)；左上區域則表示 BK 表現較佳。

雨量站降雨資料做空間內插，即便在雨量站密度很低的情況下，還是較原始雷達降雨資料有更佳之預測能力。如前所述，這主要是因為冬季降雨型態通常在空間上涵蓋較大之範圍，而且降雨量之空間變異性較小，所以內插效果很好。

- 相反地，使用雷達的效益在夏季降雨型態就很明顯。圖 6 右可以觀察到，僅使用雨量站內插之結果只有在雨量站密度很高的時候，有較雷達降雨更好的預測能力。而融合氣象雷達之結果，即使在雨量站密度很低的情況下，還是有較原始雷達更好的預測能力。
- 整體來說，KED 融合結果的預測能力最好，然後是 BAY；MFB 的效益僅在夏天降雨型態較為明顯。
- BK 內插法由於考量降雨空間關聯性，因此其預測能力較 TP 佳，尤其在夏季降雨型態特別明顯。

由於 BK 的良好預測性，水文實務上常常被用來產生空間降雨，文獻中也常被當作資料融合或是雷達降雨之參考比較對象^[48]，因此我們進一步比較 BK 與其他融合結果，藉此分析資料融合技術於實務應用上之附加價值。如圖 7 所示，我們比較 BK 預測驗證雨量站之 MAE (圖 7 水平軸) 與其他內插、融合方法 (圖 7 垂直軸) 之 MAE；45° 斜虛線代表其他方法與 BK 之表現一樣；斜虛線右下方之區域，表示其他方法表現較佳 (MAE 較低)；左上區域則表示 BK 表現較佳。我們可以觀察到：

- BK 與 TP 之比較，可以發現資料點幾乎都集中在左上區域，尤其當 BK 的 MAE 數值較大 (> 2 mm/h) (表示內插效果較差的情況)，BK 展現出較佳之降雨預測能力。
- BK 與原始雷達降雨之比較，當 BK 的 MAE 數值較小 (< 1 mm/h) (表示內插效果較佳的情況)，

BK 是比較好之降雨估算方法選擇。但是相反地，當 BK 的 MAE 數值較大 (> 2 mm/h)，使用雷達降雨之效益開始浮現，而這種情況多半為夏季降雨型態。

- MFB 之結果跟 RD 幾乎一樣。
- KED 和 BAY 之結果顯示，資料融合技術結合了內插法與雷達降雨之優勢。當 BK 的 MAE 數值較小 (< 1 mm/h) 時，KED 和 BAY 可以將雷達降雨之誤差降低；而當 BK 的 MAE 數值較大 (> 2 mm/h) 時，融合技術可以善用額外之雷達降雨資訊，提供較佳之預測能力。

資料融合技術於不同降雨型態、不同雨量站密度情況下水文模擬準確度變化

圖 8 顯示不同資料融合、內插方法在最高雨量站密度之條件下，於伯明罕 - 黑鄉集水區 (夏季降雨型態) 上游測站 (M34)、BB-07 (2012/06/06) 事件之流量模擬與觀測值比較。我們可以觀察到：

- 所有的流量模擬都可以良好地反應出觀測流量之變化趨勢，這表示所使用之都市排水模型有經過良好之校正過程，模擬之流量具有一定代表性。
- 都市水文實務上經常使用之 TP 內插法大幅地高估尖峰流量觀測值，推測是因為 TP 直接使用最接近之雨量站資料、缺乏考量空間降雨之變異性，因此較容易出現高估或是低估降雨及流量之情況。BK 內插法展現出較好之流量模擬結果及穩定性。
- 原始雷達降雨與 MFB 之流量模擬都大幅低估尖峰流量觀察值，不過整體流量之變化趨勢跟觀測值一致性很高，展現出雷達降雨之潛力。
- 透過 KED 及 BAY 等資料融合技術，雷達降雨之準確性有所提升，其流量模擬結果也展現出與觀測值最高之一致性。

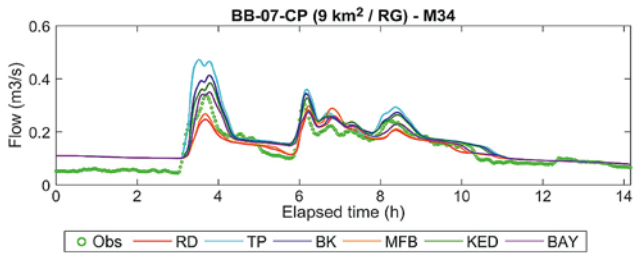


圖 8 不同資料融合、內插技術於伯明罕-黑鄉（夏季降雨型態）集水區上游測站（M34）、BB-07 事件（2012/06/06）之流量模擬與觀測值比較。

除了單一事件之模擬結果比較，我們進一步比較所有事件之結果，分析在不同降雨型態、不同雨量站密度等條件下，流量模擬結果之變化。從圖 9 之評估指標（流量峰值相對誤差（RE Peak Flow）及線性相關係數（ r ），我們可以觀察到：

1. 無論是冬季或是夏季降雨型態，所有的資料融合方法都改善了原始雷達降雨之流量模擬結果。
2. 使用資料融合技術之價值在夏季降雨事件及低雨量站密度時尤為明顯。
3. 整體來說，KED 的流量模擬結果最佳，然後是 BAY；MFB 的效益在夏天降雨型態較為明顯。不過值得注意的是，BAY 對於夏季型態降雨之流量峰值模擬有最好之結果，此結果值得都市防災模擬參考。
4. 相較於內插法（TP 和 BK）之流量模擬結果，KED 和 BAY 對於雨量站密度之變化，比較不敏感。只有在夏季型態降雨、雨量站密度極低的情況下，KED 的表現會突然大幅下降。

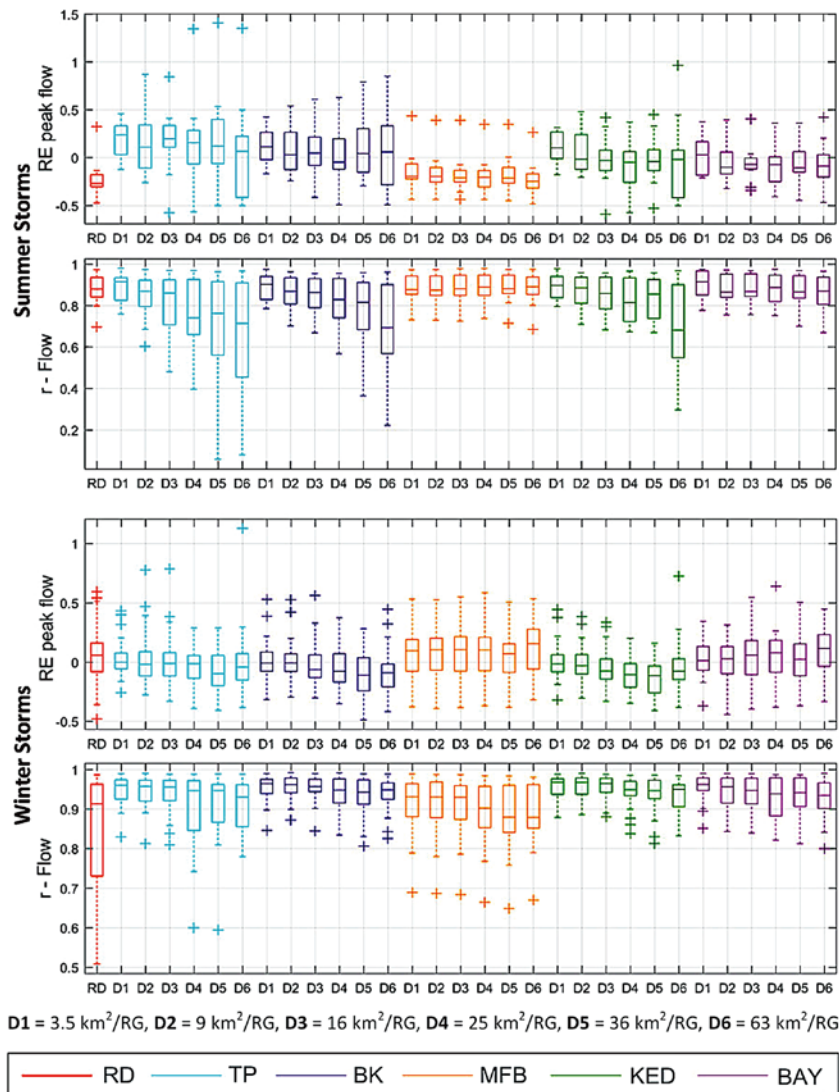


圖 9 不同資料融合、內插技術於伯明罕-黑鄉（夏季，上二圖）及愛丁堡-洛錫安（冬季，下二圖）之流量模擬結果，隨不同雨量站密度（D1 至 D6，密度由高至低）之評估指標變化。展示之評估指標包括：流量峰值相對誤差（RE Peak Flow）及線性相關係數（ r ）。

結語

本研究分享利用雷達、雨量站降雨資料融合提高都市降雨估算準確性，並透過實際集水區案例證明融合技術可以有效增進雷達降雨於都市水文應用性的。此外，並針對實務上會有不同氣候、雨量站密度等條件，評估可能對融合結果造成之影響，藉此提供實務上應用融合技術之參考。本研究主要結論包括：

1. 案例結果顯示，所有的資料融合方法都可以獲得較原始雷達資料更好之降雨估算量，從而得到更好地都市排水模擬結果，有效提高雷達降雨在都市水文之應用性。此外，在大部分的情況下，融合降雨估算也優於僅使用雨量站降雨之內插降雨值，此結果證明雷達降雨可以提供有效之降雨資訊。不過，雷達降雨能夠提供額外資訊之程度，因使用不同資料融合方法而異，而且在不同氣候及雨量站密度條件下，融合結果之變化程度也會有所差異。
2. 雷達降雨資料的附加價值在夏季降雨事件，以及當雨量站密度較低之情況下尤為明顯。在這些條件下，雷達、雨量站降雨融合產品都明顯優於僅用雨量站內插之降雨估計值。
3. 總體而言，KED 融合降雨之表現最好，BAY 緊隨其後。不過，KED 之表現對於氣候條件及雨量站密度之變化較為敏感。而因為採用較 KED 更多的雷達降雨資訊，BAY 對於氣候條件及雨量站密度之變化較不敏感，當雨量站沒有捕捉到降雨資訊時，BAY 還是可以利用雷達資訊提供有效之降雨估算。
4. 根據案例結果，本研究建議在雨量站密度相對高（平均每 30 km² 或是更小的面積有一個雨量站），或是已知雷達降雨品質不佳時，可以使用 KED，如此使用較多雨量站降雨數據。相反地，當雨量站密度較地，且雷達降雨資料之品質合理時，BAY 可能是更合適的選擇。而 MFB 方法之結果雖然沒有其他兩個方法好，大部分情況下還是比原始雷達 QPE 及僅用雨量站內插之結果好，建議可以做為除了以上兩個融合方法以外之最後選擇。

參考文獻

1. Yazdanfar, Z. and Sharma, A. (2015). Urban drainage system planning and design – challenges with climate change and urbanization: a review. *Water Science and Technology*, 72 (2), 165-179.
2. UN. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. United Nations, New York, US.
3. Smith, K. and Petley, D. (2009). *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster* (Fifth ed.). Routledge - Taylor & Francis Group, UK.
4. OECD. (2014). *Managing water for future cities*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
5. Lloyd's Emerging Risk Team. (2010). East London extreme rainfall: Importance of granular data. In London, UK.
6. IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA.
7. Houston, D., Werritty, A., Bassett, D., Geddes, A., Hoolachan, A., and Marion, M. (2011). Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: the invisible hazard. In J. R. Foundation (Ed.), York, UK.
8. European Parliament. (2000). Directive 2000/60/EC Establishing a framework for community action in the field of water policy. Document available online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000L0060:20011216:EN:PDF>
9. European Parliament. (2007). Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union, Strasbourg, France. Document available online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:EN:PDF>
10. UK Parliament. (2010). Flood and Water Management Act 2010. UK Legislation.
11. Syed, K.H., Goodrich, D.C., Myers, D.E., and Sorooshian, S. (2003). Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff. *Journal of Hydrology*, 271 (1-4), 1-21.
12. Segond, M.L., Neokleous, N., Makropoulos, C., Onof, C., and Maksimović, Č. (2007). Simulation and spatio-temporal disaggregation of multi-site rainfall data for urban drainage applications. *Hydrological sciences journal*, 52 (5), 917-935.
13. Villarini, G. and Krajewski, W. (2010). Review of the Different Sources of Uncertainty in Single Polarization Radar-Based Estimates of Rainfall. *Surveys in Geophysics*, 31 (1), 107-129.
14. Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.-D., and Oblé, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299, 166-179.
15. Einfalt, T., Jessen, M., and Mehlig, B. (2005). Comparison of radar and raingauge measurements during heavy rainfall. *Water Science and Technology*, 51 (2), 195-201.
16. Golding, B.W. (2009). Uncertainty propagation in a London flood simulation. *Journal of Flood Risk Management*, 2 (1), 2-15.
17. Schellart, A.N.A., Shepherd, W.J., and Saul, A.J. (2012). Influence of rainfall estimation error and spatial variability on sewer flow prediction at a small urban scale. *Advances in Water Resources*, 45 (0), 65-75.
18. Del Giudice, D., Honti, M., Scheidegger, A., Albert, C., Reichert, P., and Rieckermann, J. (2013). Improving uncertainty estimation in urban hydrological modeling by statistically describing bias. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (10), 4209-4225.
19. Gires, A., Onof, C., Maksimović, Č., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., and Simoes, N. (2012). Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban runoff through multifractal downscaling: A case study. *Journal of Hydrology*, 442, 117-128.
20. Vieux, B.E. and Vieux, J.E. (2006). Statistical evaluation of a radar rainfall system for sewer system management. *Atmospheric Research*, 77 (1/4), 322-336.

21. Smith, J.A., Baeck, M.L., Meierdiercks, K.L., Miller, A.J., and Krajewski, W.F. (2007). Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources*, 30 (10), 2087-2097.
22. Krämer, S. and Verworm, H.-R. (2009). Improved radar data processing algorithms for quantitative rainfall estimation in real time. *Water Science & Technology*, 60 (1), 175-184.
23. Salvatore, E., Bronders, J., and Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62-81.
24. Pina, R., Ochoa-Rodríguez, S., Simões, N., Mijic, A., Marques, A., and Maksimović, Č. (2016). Semi- vs. Fully-Distributed Urban Stormwater Models: Model Set Up and Comparison with Two Real Case Studies. *Water*, 8 (2), 58.
25. Ochoa-Rodríguez, S., Wang, L.-P., Gires, A., Pina, R. D., Reinoso-Rondinel, R., Bruni, G., Ichiba, A., Gaitan, S., Cristiano, E., Assel, J. v., Kroll, S., Murlà-Tuyls, D., Tisserand, B., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Onof, C., Willems, P., and ten Veldhuis, M.-C. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. *Journal of Hydrology*, 531, 389-407.
26. Notaro, V., Fontanazza, C. M., Freni, G., and Puleo, V. (2013). Impact of rainfall data resolution in time and space on the urban flooding evaluation. *Water Science & Technology*, 68 (9), 1984-1993.
27. Wang, L.-P., Ochoa-Rodríguez, S., Van Assel, J., Pina, R. D., Pessemier, M., Kroll, S., Willems, P. and Onof, C. (2015). Enhancement of radar rainfall estimates for urban hydrology through optical flow temporal interpolation and Bayesian gauge-based adjustment. *Journal of Hydrology*, 531, 408-426.
28. Collier, C. G. (2009). On the propagation of uncertainty in weather radar estimates of rainfall through hydrological models. *Meteorological Applications*, 16 (1), 35-40.
29. Harrison, D.L., Scovell, R.W., and Kitchen, M. (2009). High-resolution precipitation estimates for hydrological uses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 162 (2), 125-135.
30. Krajewski, W. F., Villarini, G., and Smith, J. A. (2010). Radar-Rainfall Uncertainties: Where we are after thirty years of effort. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91 (1), 87-94.
31. Bringi, V.N., Rico-Ramirez, M.A., and Thurai, M. (2011). Rainfall Estimation with an Operational Polarimetric C-Band Radar in the United Kingdom: Comparison with a Gauge Network and Error Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 12 (5), 935-954.
32. Chandrasekar, V., Keränen, R., Lim, S., and Moiseev, D. (2013). Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. *Atmospheric Research*, 119, 97-111.
33. Wang, L.-P., Ochoa-Rodríguez, S., Simoes, N., Onof, C. and Maksimović, Č. (2013). Radar-raingauge data combination techniques: a revision and analysis of their suitability for urban hydrology. *Water Science & Technology*, 68 (4), 737-747.
34. McKee, J.L. and Binns, A.D. (2015). A review of gauge-radar merging methods for quantitative precipitation estimation in hydrology. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 41 (1-2), 186-203.
35. Lo Conti, F., Francipane, A., Pumo, D., and Noto, L.V. (2015). Exploring single polarization X-band weather radar potentials for local meteorological and hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 531, 508-522.
36. Erdin, R. (2013). Geostatistical methods for hourly radar-gauge combination: An explorative, systematic application at MeteoSwiss - Scientific Report MeteoSwiss No. 92. MeteoSwiss, Zurich, Switzerland.
37. Goudenhoofd, E. and Delobbe, L. (2009). Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 195-203.
38. Jewell, S.A. and Gaussiat, N. (2015). An assessment of kriging-based rain-gauge-radar merging techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141 (691), 2300-2313.
39. Decloedt, L.C., Willems, P., and Gires, A. (2013). Review document: Methods and experiences in radar based fine scale rainfall estimation. Deliverable of EU RainGain's Project Work Package 2, Leuven, Belgium.
40. Ochoa-Rodríguez, S., Wang, L.-P., Willems, P., and Onof, C. (2019). A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. *Water Resources Research*, 55 (8), 6356-6391.
41. Wright, D.B., Smith, J.A., Villarini, G. and Baeck, M.L. (2014). Long-Term High-Resolution Radar Rainfall Fields for Urban Hydrology. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50 (3), 713-734.
42. Borup, M., Grum, M., Linde, J.J., and Mikkelsen, P.S. (2016). Dynamic Gauge Adjustment of High-Resolution X-Band Radar Data for Convective Rain Storms: Model-Based Evaluation against Measured Combined Sewer Overflow. *Journal of Hydrology*, 539, 687-699.
43. Cole, S.J., and Moore, R.J. (2008). Hydrological modelling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall. *Journal of Hydrology*, 358, 159-181.
44. Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.-J., and Miller, D.A. (1998). The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 13 (2), 377-395.
45. Chumchean, S., Sharma, A., and Seed, A. (2006). An Integrated Approach to Error Correction for Real-Time Radar-Rainfall Estimation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23 (1), 67-79.
46. Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics, An Introduction with Applications* (3rd ed.). Springer, Heidelberg.
47. Ehret, U. (2002). Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany.
48. Sinclair, S. and Pegram, G. (2005). Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, 6 (1), 19-22.
49. Kitzmiller, D., Miller, D., Fulton, R., and Ding, F. (2013). Radar and Multisensor Precipitation Estimation Techniques in National Weather Service Hydrologic Operations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18 (2), 133-142.
50. Journel, A.G. (1989). *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons - Short Course in Geology*. AGU, Washington, US.
51. Todini, E. (2001). A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 187-199.
52. WaPUG. (2002). *Code of Practice For The Hydraulic Modelling of Sewer Systems*, Wastewater Planning Users Group.
53. Golding, B.W. (1998). Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteorological Applications*, 5, 1-16.
54. Luyckx, G. and Berlamont, J. (2001). Simplified method to correct rainfall measurements from tipping bucket raingauges. In *Proceedings of Urban Drainage Modelling*, Florida, US.
55. Rico-Ramirez, M.A., Liguori, S., and Schellart, A.N.A. (2015). Quantifying radar-rainfall uncertainties in urban drainage flow modelling. *Journal of Hydrology*, 528, 17-28. 