

適用於臺灣流域之集流時間估算方法研究

A STUDY ON TIME OF CONCENTRATION ESTIMATION METHODS APPLICABLE TO TAIWAN WATERSHEDS

國立台灣大學
水工試驗所
專案助理研究員

欒順忠
Shun-Chung Tsung

國立台灣大學
水工試驗所
技士

詹明修
Ming-Shiou Jan

國立台灣大學
土木工程學系
博士生

楊旭宸*
Xu-Chen Yang

摘要

集流時間 (Time of Concentration) 為水文模擬與排水設計之關鍵參數，其正確性對洪峰流量計算與排水設施設計有顯著影響。目前台灣常用之集流時間估算公式多源自國外經驗，是否適用於本地集水區特性尚缺乏系統性實證。本研究蒐集彙整各類常用集流時間估算公式，並選定四處代表性集水區（宜蘭河西門橋、頭前溪內灣站、典寶溪五里林橋及八股排水延壽宮）進行歷年颱洪事件現地流量觀測，透過指標表面流速法推估集流時間並與公式計算結果比較。結果顯示，實測集流時間普遍高於估算值，尤以加州公路局與 Rziha 公式低估情形明顯。本文建議後續水文規劃可視實測資料為修正基礎，逐步建立本土化參數，以提升水文模擬可靠度。

關鍵詞：集流時間、加州公路局公式、洪峰流量、水文觀測。

A STUDY ON TIME OF CONCENTRATION ESTIMATION METHODS APPLICABLE TO TAIWAN WATERSHEDS

Shun-Chung Tsung
National Taiwan University
Hydrotech Research Institute

Ming-Shiou Jan
National Taiwan University
Hydrotech Research Institute

Xu-Chen Yang*
National Taiwan University
Department of Civil Engineering

ABSTRACT

Time of concentration is a key parameter in hydrologic simulation and drainage design. Most estimation formulas used in Taiwan originate from empirical models developed abroad, raising concerns about their applicability to local watershed characteristics. This study reviews commonly used Tc estimation formulas and evaluates their performance through field observations at four representative sites: Ximen Bridge, Neiwan, Wulilin Bridge, and Yanshou Temple. By applying the indicator surface velocity method with ADCP measurements, we derived Tc values from 70 typhoon events between 2012 and 2022. Results show that empirical formulas generally underestimate Tc compared to field data. Among the tested methods, the Rziha and California Department of Transportation formulas yielded conservative estimates only under certain topographic conditions. We recommend incorporating local rainfall-runoff data into model calibration to improve hydrologic prediction reliability in Taiwan.

Keywords: Time of concentration, California culvert practice, Peak discharge, Hydrologic measurement.

一、研究動機

集流時間 (Time of Concentration, T_c) 級指降雨後逕流自集水區最遠水力學控制點流達出口所需之時間，為評估流域逕流反應與洪峰預測之關鍵參數。與幾何上最遠距離不同，水力學上最遠點需綜合考量地形坡度及地表粗糙度等條件對水流遲滯的影響，具有較高水文意涵。由於集流時間直接影響設計降雨強度及洪峰流量估算，因此在各類排洪設施與集水區規劃中，扮演不可或缺之角色。

目前我國各項排水規劃與水文設計作業，包括《水土保持技術規範》、《河川治理及環境營造規劃參考手冊》、《區域排水整治及環境營造規劃參考手冊》以及《雨水下水道設計指南》等，皆已納入集流時間估算公式。然而，這些常用公式大多源自國外經驗，乃依特定地區集水區水文特性所建立，其參數設定與台灣山坡陡峻、降雨集中等特性不盡相符。實務上是否具有保守性或高估低估之情形，尚缺乏系統性研究與實證資料佐證。

此外，目前國內尚無針對實測水文事件所推估之集流時間與設計公式結果之差異進行全面性分析。因此，本研究以颱洪期間實測流量與雨量資料為基礎，檢驗國內常用集流時間公式於實際流域條件下之適用性與準確性，做為未來規劃與設計集流時間調整依據，

並促進國內水文參數在地化之推動。

二、國外及國內相關文獻之蒐集探討

集流時間 (Time of Concentration, T_c) 為逕流形成與水文模擬中極為關鍵的參數，其定義為水流自集水區內水力學上最遠點流至出口所需之時間。由於實務上取得實際集流時間頗具困難，傳統上常以圖形法或經驗公式法進行估算。McCuen *et al.* (1984) 依據降雨與逕流歷線的關係，提出六種不同定義方式，包括：(a) 超滲降雨結束至直接逕流歷線反曲點的時間；(b) 降雨質心至直接逕流質心；(c) 最大降雨強度至逕流高峰；(d) 降雨質心至總逕流峰值；(e) 降雨質心至直接逕流峰值；(f) 總逕流開始至其高峰時間等，皆可視為 T_c 的代表性時間參數。

此外，國際間廣泛使用之推估方法多為經驗公式，係以集水區幾何與地形因子，例如流路長、平均坡度、土地利用等為基礎。Mays (2010) 彙整多項常見的集流時間公式 (如表 1)，而 De Almeida *et al.* (2014) 進一步整理全球 30 種公式並評估其適用條件與敏感性參數。然此類公式多根據北美或歐洲地區特性建構，未必可直接應用於降雨劇烈且坡陡流急之台灣河川流域。

國內對於集流時間之應用主要涵蓋於各類排洪系統設計與規劃中，並已制定相關標準與技術規範。農

表 1 常用國外集流時間公式彙整

公式名稱及年代	集流時間公式	註解
Kirpich (1940)	$t_c = 0.0078L^{0.77}S - 0.385$ L = length of channel/ditch from headwater to outlet, ft S = average watershed slope, ft/ft	根據美國土壤保育局 (SCS) 對田納西州七個具明顯渠道且坡度陡峭 (3% 至 10%) 的鄉村集水區之資料所發展；若逕流發生於混凝土或瀝青鋪面，需將時間 t 乘以 0.4；若為混凝土渠道，乘以 0.2；對於裸露土壤或路邊排水溝的地表逕流則不做修正。
California Culverts Practice (1942)	$t_c = 60(11.9L^3/H)^{0.385}$ L = length of longest watercourse, mi H = elevation difference between divide and outlet, ft	Kirpich 公式的延伸；源自加州一個小型山區集水區 (美國灌溉局，1973、1987)。
Izzard (1946)	$t_c = [41.025(0.007i+c)L^{0.33}] / (S^{0.333}i^{0.667})$ i = rainfall intensity, in/hr c = retardance coefficient L = length of flow path, ft S = slope of flow path, ft/ft	由美國公共道路局 (Bureau of Public Roads) 在實驗室中進行道路與草皮地表逕流實驗所發展；阻滯係數 (retardance coefficient) 從非常平滑的鋪面 0.0070、混凝土鋪面 0.012，到密集草皮 0.06；求解需進行迭代運算；降雨強度 i 與長度 L 的乘積應小於 500。
Federal Aviation Admin. (1970)	$t_c = 1.8(1.1-C)L^{0.5}/S^{0.333}$ C = rational method runoff coefficient L = length of overland flow, ft S = surface slope, %	根據美國陸軍工兵團收集的空軍基地排水資料所發展：該方法原為解決機場排水問題而設計，但後來亦常用於城市集水區的地表逕流分析。

公式名稱及年代	集流時間公式	註解
Kinematic wave (1965/1973)	$t_c = 0.94L^{0.6}/(i^{0.4}S^{0.3})$ L = length of overland flow, ft n = Manning roughness coefficient i = rainfall intensity in/hr S = average overland slope, %	此地表逕流公式係由開發地表的表面逕流之動力波 (kinematic wave) 分析所發展；由於降雨強度 i 與時間 t 皆為未知，求解時需要進行迭代；可透過降雨強度—歷時—頻率曲線 (I-D-F curve) 疊合來直接圖解求得集水時間 t_c 。
SCS lag equation (1975)	$t_c = 100L^{0.8}[(1000/CN)-9]^{0.7}/(1,900S^{0.5})$ L = hydraulic length of watershed (longest flow path), ft CN = SCS runoff curve number S = average watershed slope, %	此公式由美國土壤保育局 (SCS) 根據農業集水區資料發展；後來被應用於面積小於 2000 英畝的小型都市集水區；若地區為完全鋪面，預測效果良好；但對於混合土地使用區則有高估傾向；可透過調整係數修正渠道整治與不透水面積的影響；該公式假設集水時間 $t_c = 1.67 \times$ 集水區延遲時間 (basin lag)。

資料來源：Mays, L. W. (2010). Water Resources Engineering. John Wiley & Sons.

村發展及水土保持署於《水土保持技術規範》中集流時間一般為流入時間與流下時間之和，建議天然河段之流下時間採 Rziha 公式估算；水利署水利規劃試驗分署則於《河川治理及環境營造規劃參考手冊》及《區域排水整治及環境營造規劃參考手冊》中，彙列多達 11 種集流時間推估公式，其中以 Rziha、加州公路局與周文德公式最常見。

都市排水部分則依據國土署與交通部所訂定之《雨水下水道設計指南》、《市區道路設計規範》與《公路排水設計規範》等進行規劃。針對不同管線層級建議不同集流時間推估值，例如：街道側溝與雨水進水井建議採 5 至 10 分鐘，排水支線 10 至 15 分鐘，地下道與高架道路則為 5 分鐘。

整體而言，國內目前雖已建立集流時間推估標準體系，但多數公式仍為國外引進，且缺乏與本地實測水文事件比對之研究，無法充分驗證其在台灣高強度、短延時降雨環境下的適切性。因此，有必要透過現地觀測資料檢視既有公式的適用性，以發展具在地化特徵之推估方法。

三、各集流時間公式計算結果之比較

3.1 臺灣目前的水道治理分類與集流時間估算應用

臺灣地形起伏劇烈且氣候屬於高強度降雨型態，使得水道治理與排洪設施設計在國土規劃中扮演極為重要的角色。依據不同地貌、功能與管理權責，臺灣目前水道治理大致可分為五大類型，包括河川、區域排水、野溪、灌溉圳路與下水道。各類水道在治理目的、設施型態與集水區特性上皆具差異，進而影響集流時間 (T_c) 之估算模式與保守性需求。

3.1.1 河川

根據《河川管理辦法》第 2 條，河川係指屬於水資源開發、國土保育或區域發展重大水系，經中央主管機關公告者。河川依管理權限區分為中央管河川、直轄市管河川與縣 (市) 管河川。實務上，河川系統涵蓋集水面積廣大，流路長、地形變化顯著，其集流時間通常以多段流速結合估算。在規劃設計上，常採用 Rziha 或回歸型經驗公式進行保守推估，以因應颱風暴雨可能造成之洪峰反應。

3.1.2 區域排水

《排水管理辦法》第二條規定，區域排水係指排洩農田、市區、事業等逕流之匯流區段，並經主管機關公告者。此類排水系統常分布於地勢低平地區，主要任務為預防積淹水災。由於集水區尺度與坡度相對較小，常以加州公路局公式或周文德公式推估集流時間。在都市發展密集地區，考量土地利用導致不透水面積增加，亦有規劃單位改採 SCS 公式，以更準確反映都市逕流形成過程。

3.1.3 野溪

根據《水土保持技術規範》第 64 條，野溪指位於中上游山坡地區，具有短流路、陡坡、高變動性等特性的自然溪谷。其逕流形成時間極短，對下游社區構成高度風險。為保守起見，相關計畫中多採用 Rziha 公式估算流下時間，並搭配土砂輸送模型與土石流潛勢分析進行綜合評估。

3.1.4 下水道系統

依《下水道法》第 2 條，下水道係指收集與處理雨水、家庭污水及事業廢水之設施，分為公共與專用兩類。雨水下水道設計常採定值集流時間 (如 5 ~ 15 分鐘) 作為設計依據，惟在部分新興社區開發或流域

式中，

T_c : 集流時間 (hr)

L : 流路長度 (公尺)

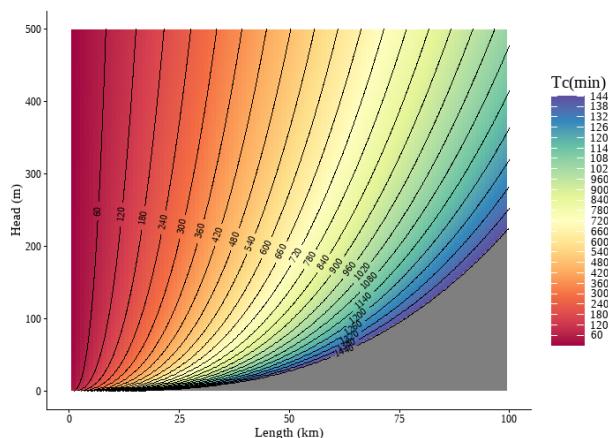


圖 1 加州公路局公式集流時間

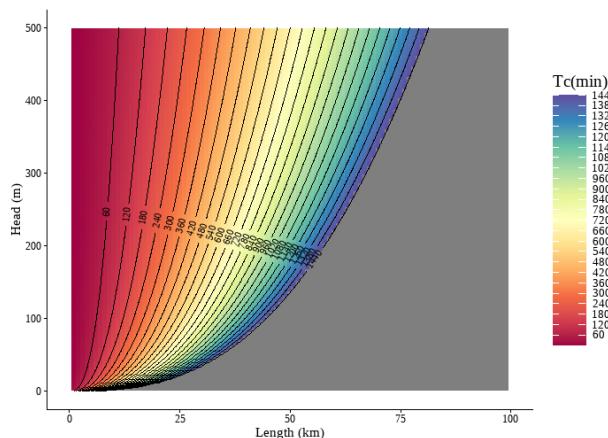


圖 2 Rziha 集流時間

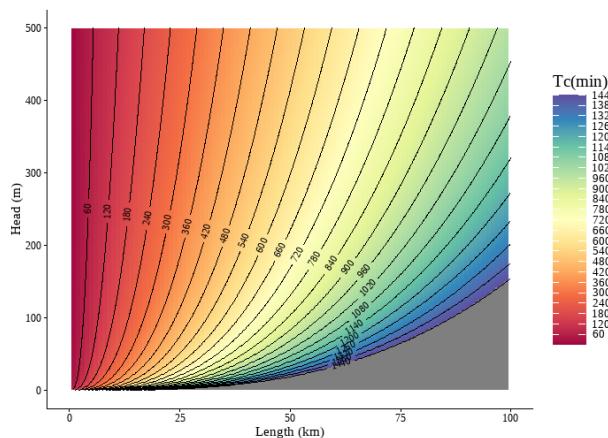


圖 3 周文德公式集流時間

S : 集水區地表平均坡度 (%)

CN : Curve number

SCS 集流時間公式因其考量土地使用，且公式中的坡度為集水區坡度與其它公式採流路坡度不同，多用在排水計畫書或淹水潛勢圖之計算，在實際規劃報告內較無應用。將高程差、水平距離及集流時間繪圖，其關係如圖 3 所示

由圖 1~3 可見，加州公路局公式、Rziha 及周文德公式集流時間公式均是坡度愈陡集流時間愈短，而流路愈長，集流時間亦同時增加。

3.3 各公式適用性比較與案例彙整

在實際河川、區域排水與野溪治理規劃中，除部分整治良好的人工渠道外，多數天然河道仍保留自然形貌，水文響應時間受地形與地表特性顯著影響。為降低洪峰估算之不確定性，工程實務上多採「保守原則」，同時計算多個集流時間公式，並取其最小值作為後續洪峰流量推估之依據。

為深入分析常用公式於不同場域條件下之適用性，本研究選定三個在國內最常用的集流時間估算公式：Rziha 公式、加州公路局公式、與周文德公式。由於這三個公式皆以流路長 (L)、高程差 (H) 或坡度 (S) 為主要參數，本研究統一將流路長作為橫軸，高程差作為縱軸，繪製出對應參數空間下的比較圖如圖 4。在圖上，我們進一步繪製各公式計算結果相等時的分界線，這些分界線就像是平面上的數學曲線，將整個圖面劃分為數個區域。每個區域代表某一公式在該區域內所估算的集流時間最短，也就是相對最保守的結果。這是因為在集水區設計中，集流時間愈短，對洪峰的估算值就會愈大，因而被視為較保守的設計。因

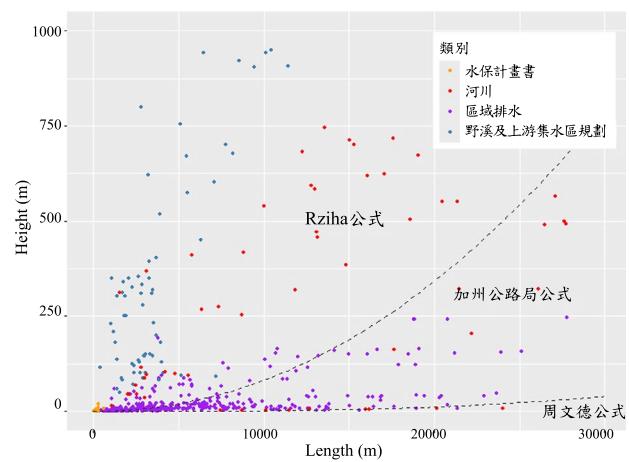


圖 4 各集流時間適用範圍及不同水路類別參數圖

此，透過這樣的圖示方式，能夠清楚辨別在不同地形條件（不同的 L 與 H 組合）下，哪一公式具有保守估算的優勢，有助於實務上依據地貌條件選擇合適的集流時間估算公式。依據圖 4 分析結果，Rziha 公式於坡度較陡之區域（高 H /低 L ）中預估之集流時間最短，適用於山區或自然水道等反應時間快速之集水環境；周文德公式則於地勢平緩區域（低 H /高 L ）中表現出較小之集流時間，顯示其較適合應用於都市平原或低坡度農田等人工排水系統。加州公路局公式則多位於兩者之間，適用於坡度中等集水區。此圖示與分類方式可提供工程實務於選擇集流時間估算公式時之依據，提升洪水推估之合理性與安全性。

此外，為了解不同水道治理類型在實務上選用公式的偏好與適用性，本研究進一步彙整多份政府核定之規劃報告，蒐集其集水區參數與公式採用情形。資料來源涵蓋四大類型：

3.3.1 區域排水規劃

共蒐集臺南市區 409 個子集水區資料，紀錄各點位流路長與高程差，以了解各參數組合下各公式應用趨勢。

22

3.3.2 水土保持計畫

自「水土保持計畫資訊公開平台」擇選具代表性之工程案件，包括銅鑼科學園區、台 19 甲線拓寬計畫與新竹科學園區寶山用地開發等。

3.3.3 野溪與上游集水區規劃

搜集玉峯溪、洋仔厝舊濁水員林大排等易淹水區排上游集水區、來吉及豐山地區、南投縣國姓鄉區內野溪上游集水區、九芎溪、南靖溪、葉子寮溪及三疊溪等集水區等 77 處天然流域。

3.3.4 河川治理計畫

彙整上坪溪、大里溪、草湖溪、北港溪、虎尾溪、和平溪等 15 條主要河川共 119 個控制點位。

若依據各報告書的條件，彙整分析結果顯示：

在區域排水規劃中，407 個區域排水的點位中，適用加州公路局公式點位最多，有 254 個點位，Rziha 公式有 147 點位，周文德公式點位僅有 7 點位。在河川規劃中，119 個點位中，35 個點位採用加州公路局較保守，餘 80 個點位均採用 Rziha 公式較為保守，僅 4 個點位採用周文德公式較保守。在水土保持計畫中，水路多屬於集流面積及流路長度較小，但坡度較大，各點位普遍以選用 Rziha 公式最為保守；而在所有「野溪或上游集水區規劃報告」點位中，流路長度較水保計畫長，除少數適用較保守的加州公路局外，餘大多數點位均採用 Rziha 公式較為保守。

本研究結果顯示，雖然三種公式均基於地形參數建構，但其結果對於流域條件具有高度敏感性，建議實務應用中應依據坡度分類或場域特性選擇適當公式，以提升工程設計安全性。

四、特定集水區降雨事件資料蒐集與集流時間估算

4.1 流域及測站介紹

本研究選定四個具代表性之集水區，涵蓋河川型與排水型兩類：宜蘭河流域、頭前溪支流油羅溪流域、典寶溪排水集水區與八股排水集水區，藉以分析不同地形與土地利用條件下集流時間估算公式之適用性。各測站之觀測期間、雨量與流量站配置如表 2 所示。

表 2 集水區內控制點與上游雨量站資訊

流域	控制點站名 站號	上游雨量站名 (站號, 管理單位)	颱洪事件 檢視時間範圍
宜蘭河	西門橋 2560H019	大礁溪站 (C0U870, 中央氣象局)	2012 - 2018
頭前溪支流 油羅溪	內灣義興橋 1300H013	鳥嘴山 (01D190, 水利署)	2021
典寶溪排水	五里林橋 1680H004	深水國小 (SSGX, 騭洪中心)	2012 - 2018
八股排水	延壽宮 D5	柯浦 (R2, 水利規劃試驗所)	2019-2022

4.1.1 宜蘭河 - 西門橋站

宜蘭河發源於大、小礁溪山一帶，流經礁溪、員山、宜蘭等地，最終匯入蘭陽溪，流域面積約 149 km^2 ，主流長 17.25 km 。流域地勢西高東低，土地利用涵蓋農業、保育、住宅等多元區塊。研究中選用西門橋水位流量站（編號：2560H019）與大礁溪雨量站（編號：C1U610）進行觀測分析，兩站分別設有微波雷達流速儀與氣象監測設備。

4.1.2 頭前溪支流油羅溪 - 內灣站

油羅溪為頭前溪上游重要支流，源自尖石鄉李棟山，全長約 26 km ，集水面積約 178 km^2 ，地形陡峻，屬 U 型山谷河川。研究採用內灣站（義興橋，編號：1300H013）作為流量觀測點，配合鳥嘴山雨量站（編號：01D190）進行資料比對。流域年雨量約 $2,023 \text{ mm}$ ，流況受颱風季節影響明顯。

4.1.3 高雄典寶溪排水 - 五里林橋站

典寶溪為中央管區域排水，流域總面積約 106 km^2 ，主流長 32 km ，地勢東高西低。中山高速公路為流域內重要分水線，其東西兩側坡降差異明顯。研究採五里林橋站（編號：1680H004）與深水國小雨量站（編號：SSGX）進行觀測，前者設有雷達表面流速儀。流域內工業、都市與農地分布廣泛，洪峰反應時間短。

4.1.4 新竹八股排水 - 延壽宮站

八股排水為新竹香山區主要排水系統，集水面積約 7.9 km^2 ，包含幹支線全長約 7.9 km ，平均坡降 0.00613 。地形自東向西漸降，土地利用以低矮丘陵與平原混合為主，部分地區尚無雨水下水道。延壽宮站（編號：D5）設於主流幹線，配合柯湳雨量站（編號：R2）進行長期觀測，為試驗流域中水文模型校驗之重要據點。

4.2 現場流量觀測與流量歷線推估

4.2.1 流量觀測作業流程

為提升洪峰流量推估精度，本研究參考水利署「全洪程觀測作業標準流程」，規劃五階段現場觀測作業，包括前置準備、啟動出勤、現地觀測、觀測解除及後續資料處理（圖 5）。前置階段整合多項氣象與水文預報系統，如水利防災中心、水利署水文即時資訊、中央氣象局定量降雨預報等，決定出勤時間並優先掌握颱洪期間之上升與退水段。

現場採用聲波都卜勒流速剖面儀（ADCP）進行

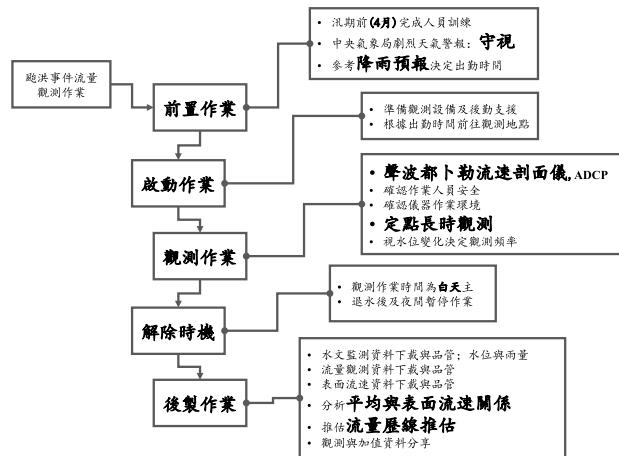


圖 5 現場流量觀測作業流程

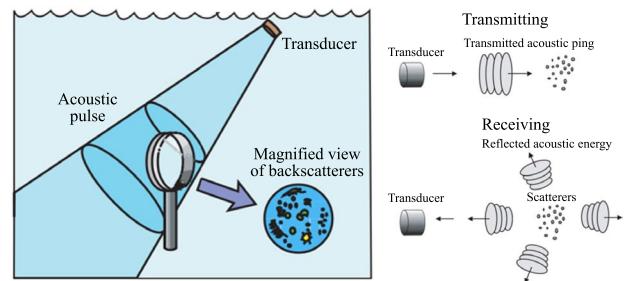


圖 6 聲波都卜勒流速剖面儀工作原理

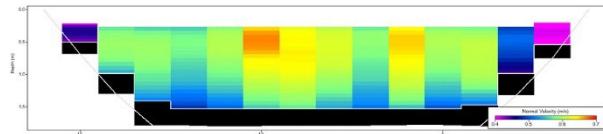


圖 7 RiverSurveyor M9 所觀測的通水斷面積流速分佈示意圖

定點長時流速量測，可快速獲得通水斷面各區流速，推估瞬時流量，單次觀測耗時少於 3 分鐘，顯著提升洪峰動態掌握效率。儀器量測原理基於聲波都卜勒效應（圖 6），可偵測水深 $0.2 \sim 80$ 公尺內之流速分佈（圖 7）。

4.2.2 流量歷線推估：指標表面流速法

本研究進一步結合流量與表面流速資料，採用指標表面流速法（Indicator Surface Velocity Method, ISVM）推估洪水歷線。方法核心為建構平均流速與表面流速之迴歸模型（圖 8），並整合雷達波表面流速儀資料品質控制作業（圖 9），包括上下限篩選、離群值剔除與補遺、噪訊平滑處理等，以提升推估精度與連續性。

ISVM 方法參考美國地質調查所（USGS）之指標

流速法 (Mueller *et al.*, 2013)，經率定後可應用於颱洪期間大範圍流量重建 (圖 10)。例如內灣站之平均與表面流速關係 (圖 11)，即可應用於 2021 年璨樹颱風期間推估洪峰歷線 (圖 12)。

4.2.3 集流時間推估方法

為推估各流域颱洪事件之集流時間 (T_c)，本研究基於「均勻降雨假設」條件，採三種常用方法進行比較分析，並分別定義為 t_{c1} 、 t_{c2} 與 t_{c3} ，如下：

1. 稽延時間除以 0.6 (USGS 方法)：此法假設總稽延時間為 $T_c \times 0.6$ ，反推可得集流時間。本研究定義此法所得之集流時間為 t_{c1} 。
2. 洪峰形成時間法 (角屋與福島, 1976)：即觀測逕流歷線開始上升至達洪峰流量的時間差，反映集水區對強降雨事件的初期逕流反應時間，定義為 t_{c2} (如圖 13)。
3. 反曲點法 (李光敦, 2005)：以有效降雨終止至直接逕流歷線退水段反曲點之時間間距推估集流時間，較能反映降雨結束後流域蓄排特性，定義為 t_{c3} (如圖 14)。

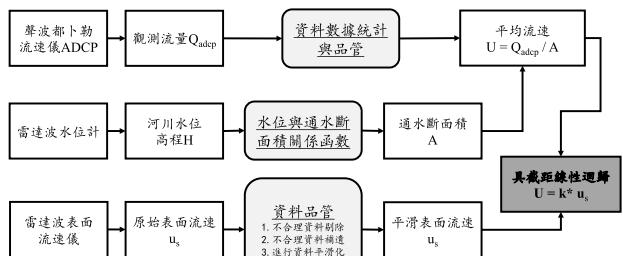


圖 8 雷達波表面流速儀平均與表面流速關係方式評估流程

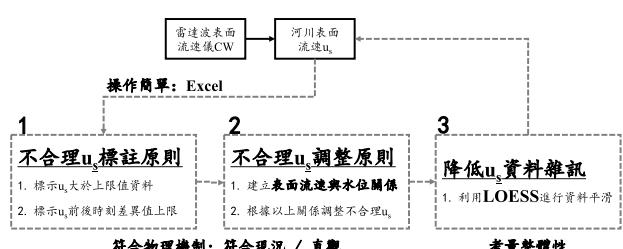


圖 9 表面流速資料品管作業流程規劃

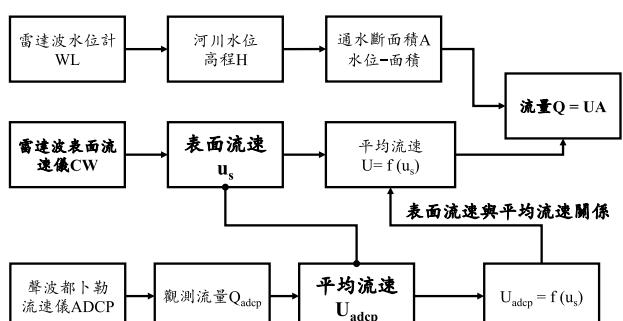


圖 10 流量推估作業流程：指標表面流速法

3. 反曲點法 (李光敦, 2005)：以有效降雨終止至直接逕流歷線退水段反曲點之時間間距推估集流時間，較能反映降雨結束後流域蓄排特性，定義為 t_{c3} (如圖 14)。

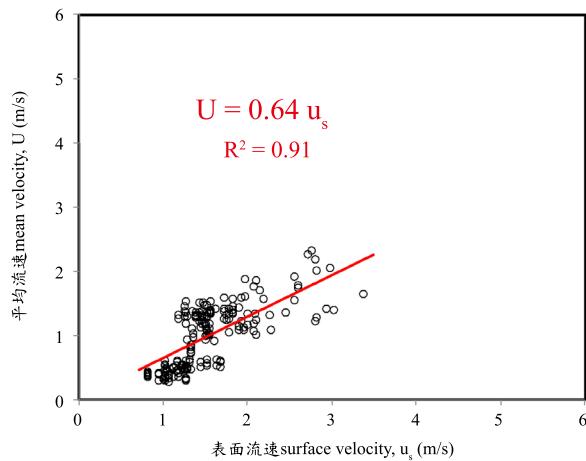


圖 11 內灣站全斷面平均與表面流速關係

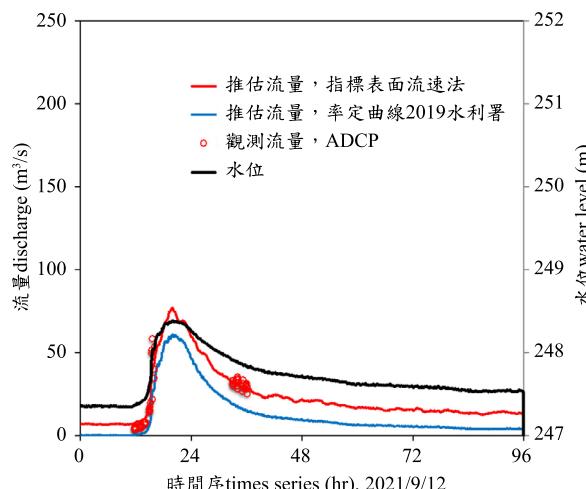


圖 12 流量推估成果 (內灣站為例)：2021/9/12–9/15 璞樹颱風

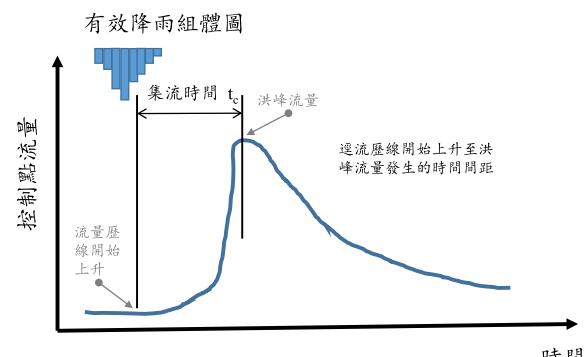


圖 13 集流時間推估方法：逕流歷線開始上升至洪峰流量發生的時間間距

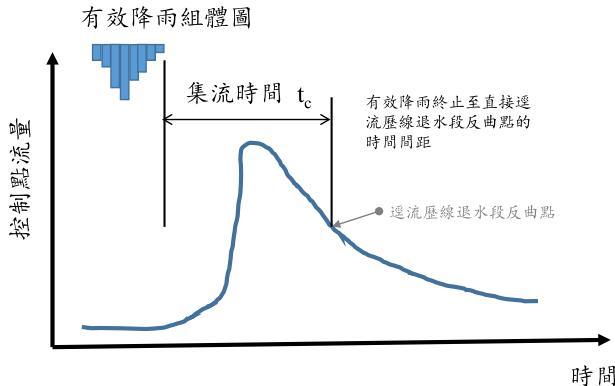


圖 14 集流時間推估方法：有效降雨終止至直接逕流歷線退水段反曲點時間間距

三者各具解釋力與應用彈性，結合流量與雨量歷線可用於推估不同颱風事件下集水區之實際 T_c 值，提供各集流時間公式驗證與參數調整之依據，亦可據此探討各經驗公式與實測結果間之保守性差異。

4.3 颱洪事件選擇與集流時間推估成果

本研究針對四處測站進行集流時間實測分析，分別為宜蘭河西門橋站、頭前溪油羅溪內灣站、典寶溪五里林橋站與八股排水延壽宮站，累計分析 70 場颱風與豪雨事件（各站案例數分別為 9、24、14 與 23 場）。本次推估僅考量控制點與上游雨量站間的逕流響應時間，未納入漫地流歷程，係因研究區域無相關觀測資料。

4.3.1 宜蘭河西門橋站

本站分析 9 場颱風事件，使用大礁溪雨量站與西門橋流量站資料進行集流時間推估。集流時間分析成果彙整如表 3，結果顯示採用「逕流歷線起升至洪峰發生時間」(t_{c2}) 法所得集流時間普遍偏大，排除後其餘方法推估平均集流時間約為 3.67 小時。與公式法比較，加州公路局、Rziha 與周文德等經驗公式皆低估實測集流時間，顯示其在本流域保守性不足。

4.3.2 頭前溪支流油羅溪內灣站

內灣站分析 24 場事件，涵蓋颱風、梅雨及豪雨期間。以鳥嘴山雨量站與內灣流量站為依據，進行流量與雨量歷線比對。分析中剔除 5 筆偏離明顯的事件 (N1、N9、N14、N17、N19) 後計算平均集流時間。集流時間分析成果彙整如表 4，結果顯示 t_{c2} 同樣偏大而排除，最終平均集流時間約為 6.79 小時，顯著高於三種公式法之估算值，顯示公式法於此山區型河川亦可能低估集流歷時。

4.3.3 高雄典寶溪排水五里林橋站

本站分析 14 場颱風及豪雨事件，採用深水國小雨量站與五里林橋水位流量站資料進行推估。與其他測站一致， t_{c2} （洪峰形成時間法）集流時間分析成果彙整如表 5，結果顯著偏大，排除後，其他方法平均所得之集流時間約為 2.85 小時。相較之下，加州公路局、Rziha 與周文德等經驗公式所得值皆顯著低估，顯

表 3 宜蘭河西門橋站集流時間分析成果

編號	事件 (起始日期)	颱風名稱	稽延時間 [hr]	集流時間 $t_{c1} (= \text{稽延時間}/0.6)$ [hr]	集流時間 t_{c2} (逕流歷線開始上升至洪峰流量發生的時間間距) [hr]	集流時間 t_{c3} (有效降雨終止至直接逕流歷線退水段反曲點的時間間距) [hr]
X1	2012/7/29	蘇拉 SAOLA	3.07	5.11	53.73	-
X2	2013/7/11	蘇力 SOULIK	2.17	3.61	9.17	5.67
X3	2014/9/19	鳳凰 FUNG-WONG	2.17	3.61	-	-
X4	2015/8/7	蘇迪勒 SOUDELOR	1.00	1.67	11.17	-
X5	2015/9/27	杜鵑 DUJUAN	4.83	8.06	29.83	1.50
X6	2016/9/26	梅姬 MEGI	2.00	3.33	11.67	-
X7	2017/9/29	0929 豪雨	3.50	5.83	4.67	0.17
X8	2017/10/13	1013 豪雨	4.00	6.67	11.83	-
X9	2018/11/1	玉兔 YUTU	3.67	6.11	-	-
平均值 (採用全部案例)			2.93	4.89	18.87	2.44
公式計算集流時間 [hr]				加州公路局公式	Rziha 公式	周文德公式
1.26				0.81	1.83	

備註：部分表格內容無資料者，係因欠缺洪峰流量發生時間或直接逕流歷線退水段反曲點的時間不易判斷所致

表 4 頭前溪支流油羅溪內灣站集流時間分析成果

編號	事件 (起始日期)	颱風名稱	稽延時間 [hr]	集流時間 tc1 (=稽延時間 /0.6) [hr]	集流時間 tc2 (逕流歷線 開始上升至洪峰流量發 生的時間間距) [hr]	集流時間 tc3 (有效降雨終 止至直接逕流歷線退水段 反曲點的時間間距) [hr]
N1	2021/4/28		17.50	29.17	31.83	22.50
N2	2021/5/24		4.00	6.67	3.83	3.17
N3	2021/5/30		4.33	7.22	6.00	-
N4	2021/6/4		8.67	14.44	-	-
N5	2021/6/7		2.33	3.89	6.00	7.50
N6	2021/6/12		2.67	4.44	9.33	-
N7	2021/6/22		4.17	6.94	-	-
N8	2021/7/21	IN-FA 烟花	2.50	4.17	63.67	3.67
N9	2021/7/29		-	-	-	-
N10	2021/8/2		2.17	3.61	4.00	1.00
N11	2021/8/6	LUPIT 廬碧	2.00	3.33	15.83	-
N12	2021/8/11		3.00	5.00	-	-
N13	2021/8/19		2.83	4.72	5.17	5.00
N14	2021/8/24		0.17	0.28	2.67	5.17
N15	2021/9/12	CHANTHU 環樹	8.83	14.72	8.50	6.33
N16	2021/10/11	KOMPASU 圓規	7.00	11.67	25.17	-
N17	2022/3/27		17.83	29.72	49.83	5.50
N18	2022/5/16		6.33	10.56	29.83	13.00
N19	2022/5/25		24.33	40.56	24.83	17.17
N20	2022/6/7		4.00	6.67	6.00	7.00
N21	2022/7/3		2.83	4.72	4.83	8.83
N22	2022/9/1	HINNAMNOR 軒嵐諾	2.00	3.33	-	-
N23	2022/9/11		4.50	7.50	50.17	6.67
N24	2022/10/16		2.50	4.17	10.17	13.17
平均值 (N1、N9、N14、N17 及 N19 未納入分析)			4.04	6.73	16.57	6.85
公式計算集流時間 [hr]				加州公路局公式	Rziha 公式	周文德公式
				1.17	0.72	1.73

備註：部分表格內容無資料者，係因欠缺洪峰流量發生時間或直接逕流歷線退水段反曲點的時間不易判斷所致

表 5 高雄典寶溪排水五里林橋站集流時間分析成果

編號	事件 (起始日期)	颱風名稱	稽延時間 [hr]	集流時間 tc1 (=稽延時間 /0.6) [hr]	集流時間 tc2 (逕流歷線開 始上升至洪峰流量發生的 時間間距) [hr]	集流時間 tc3 (有效降雨終 止至直接逕流歷線退水段 反曲點的時間間距) [hr]
W1	2012/8/2	蘇拉 Saola	2.33	3.89	-	-
W2	2013/8/29	康芮 Kong-Rey	4.00	6.67	14.68	0.05
W3	2014/8/8		0.93	1.56	-	-
W4	2015/8/7	蘇迪勒 Soudelor	2.00	3.33	4.17	4.17
W5	2016/6/10		1.17	1.94	4.67	0.17
W6	2016/7/7	尼伯特 Nepartak	2.00	3.33	2.83	1.33
W7	2016/9/14	莫蘭蒂 Meranti	2.00	3.33	-	-
W8	2016/9/26	梅姬 Megi	3.00	5.00	14.33	2.33
W9	2017/6/16		0.50	0.83	4.17	1.17
W10	2017/7/30	海棠 Haitang	2.33	3.89	-	-
W11	2018/6/14		2.67	4.44	21.00	5.00
W12	2018/6/17		2.17	3.61	-	-
W13	2018/7/1		2.17	3.61	2.67	2.33

編號	事件 (起始日期)	颱風名稱	稽延時間 [hr]	集流時間 tc1 (=稽延時間 /0.6) [hr]	集流時間 tc2 (逕流歷線開 始上升至洪峰流量發生的 時間間距) [hr]	集流時間 tc3 (有效降雨終 止至直接逕流歷線退水段 反曲點的時間間距) [hr]
W14	2018/8/23		3.17	5.28	11.50	-
平均值 (採用全部案例)			2.17	3.62	8.89	2.07
公式計算集流時間 [hr]			加州公路局公式		Rziha 公式	周文德公式
			2.24		1.97	2.96

備註：部分表格內容無資料者，係因欠缺洪峰流量發生時間或直接逕流歷線退水段反曲點的時間不易判斷所致

表 6 新竹八股排水延壽宮站集流時間分析成果

編號	事件 (起始日期)	颱風名稱	稽延時間 [hr]	集流時間 tc1 (=稽延時間/0.6) [hr]	集流時間 tc2 (逕流歷線 開始上升至洪峰流量發 生的時間間距) [hr]	集流時間 tc3 (有效降雨終 止至直接逕流歷線退水段 反曲點的時間間距) [hr]
E1	2019/7/22		2.33	3.89	-	-
E2	2019/8/8	利奇馬 Lekima	4.00	6.67	14.68	0.05
E3	2019/8/19		0.93	1.56	-	-
E4	2019/9/5		2.00	3.33	4.17	4.17
E5	2020/2/16		1.17	1.94	4.67	0.17
E6	2020/3/10		2.00	3.33	2.83	1.33
E7	2020/5/7		2.00	3.33	-	-
E8	2020/5/16		3.00	5.00	14.33	2.33
E9	2020/5/18		0.50	0.83	4.17	1.17
E10	2020/5/21		2.33	3.89s	-	-
E11	2020/5/28		2.67	4.44	21.00	5.00
E12	2020/8/3		2.17	3.61	-	-
E13	2020/8/11	米克拉 Mekkhala	2.17	3.61	2.67	2.33
E14	2021/2/11		2.67	4.44	3.33	-
E15	2021/3/6		3.83	6.39	3.67	4.00
E16	2021/3/24		2.00	3.33	9.67	-
E17	2021/4/28		4.33	7.22	5.17	5.33
E18	2021/5/31		0.50	0.83	6.83	0.50
E19	2021/8/7	盧碧 Lupit	1.00	1.67	7.33	-
E20	2022/5/14		1.83	3.06	-	-
E21	2022/5/24		0.83	1.39	4.67	3.00
E22	2022/6/6		1.00	1.67	3.17	3.50
E23	2022/9/2	軒嵐諾 HINNAMNOR	1.17	1.94	5.33	2.00
平均值			1.68	2.80	3.69	2.10
公式計算集流時間 [hr]			加州公路局公式		Rziha 公式	周文德公式
			1.12		0.88	1.66

備註：部分表格內容無資料者，係因欠缺洪峰流量發生時間或直接逕流歷線退水段反曲點的時間不易判斷所致

示公式法在此類平原型排水區的實際應用亦有高估風險。

4.3.4 新竹八股排水延壽宮站

本區屬小型集水區，面積僅約 8 km²，分析期間共彙整 23 場颱風、梅雨與短延時強降雨事件。利用柯湧雨量站與延壽宮水位流量站資料對應分析，集流時間分析成果彙整如表 6，發現 tc2 雖略高但仍不符本區地形

特性，故亦排除。綜合其他推估方法，八股排水延壽宮站之平均集流時間約為 2.45 小時。如同其他測站，經驗公式估算結果均明顯低於實測值，凸顯小型都市集水區在設計上需特別關注集流時間低估問題。

五、結論與建議

5.1 結論

5.1.1 常用集流時間公式比較結果

本研究彙整並比較 Rziha、加州公路局與周文德三種常用集流時間估算公式。結果顯示，當坡度較陡時，Rziha 公式普遍給出最小集流時間，具有較高保守性；而於坡度較緩地區則以周文德公式較為保守。根據水保計畫、河川與區域排水規劃實務，Rziha 公式在多數應用情境中為常見選擇，尤以野溪與山區流域更為顯著。由於地形坡度難以以單一指標量化，故本研究提出以集水區地文條件對應公式選用之參考依據。

5.1.2 實測站資料分析成果

本研究選定四個具代表性的測站，分別為宜蘭河西門橋、頭前溪內灣、典寶溪排水五里林橋及八股排水延壽宮，涵蓋河川型與排水型集水區。透過現地 ADCP 流量觀測及指標表面流速法重建流量歷線，並配合雨量資料分析 2012 至 2022 年間 70 場颱洪事件，估算各站實際集流時間。

5.1.3 集流時間推估與公式比較

本研究採用三種方式推估集流時間，包括稽延時間折算法 (除以 0.6)、洪峰到達時間法、及退水反曲點法。各站最終估得集流時間為：宜蘭河 3.67 小時、油羅溪 6.79 小時、典寶溪 2.85 小時、八股排水 2.45 小時。對照常用經驗公式結果，皆明顯低估實際值，顯示設計上雖可提供保守性，但亦有高估整治尺度與施工成本之風險。

5.2 建議

5.2.1 持續擴充規劃案例資料庫

本研究以可公開取得的規劃報告為分析基礎，未來應持續廣泛蒐集並系統化整理更多水道型態與區域之案例資料，以利建立更具代表性的集流時間推估參考依據。

5.2.2 實測資料應納為常態工作

本研究發現，實測資料推估之集流時間普遍大於經驗公式結果，反映實務設計與實際逕流過程可能存在落差。建議將颱洪事件期間之雨量與流量資料收集列為水文作業常態，逐步建立降雨特性與集流時間之實證關係模型，作為日後設計參考。

5.2.3 提升野溪與偏遠區域觀測能力

考量野溪與山區人工流量觀測困難，本研究所採用之「指標表面流速法」可有效結合非接觸式觀測與

人工率定，具高適用性。建議未來可持續推廣此技術至上游或感潮河段，並進一步探索其自動化應用潛力，以提升流量監測精度與覆蓋範圍。

致謝

本研究為農業部農村發展及水土保持署「適用臺灣之集流時間估算方式探討計畫」（計畫編號：ARDSWC-112-023）之研究成果，特此致謝。

參考文獻

1. Bureau of Reclamation. Water Measurement Manual. U.S. Department of the Interior, 1997.
2. Cleveland, W. S., & Devlin, S. J. Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83, pp.596-610, 1988.
3. Cleveland, W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74, pp.829-836, 1979.
4. Costa, J. E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C., & Barrick, D. Use of Radars to Monitor Stream Discharge by Noncontact Methods. *Water Resources Research*, 42(7), W07422, 2006.
5. Mueller, D. S., Wagner, C. R., Rehmel, M. S., Oberg, K. A., & Rainville, F. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. U.S. Geological Survey, 2013.
6. de Almeida, I. K., Almeida, A. K., Ayach Anache, J. A., Steffen, J. L., & Sobrinho, T. A. Estimation on Time of Concentration of Overland flow in Watersheds: A Review. *Geociências* (São Paulo, UNESP), 33(4), pp.661-671, 2014.
7. FLO-2D Software, Inc. FLO-2D user's manual, 2010.
8. Fukami, K., Yamaguchi, T., Iamura, H., & Tashiro, Y. Current Status of River Discharge Observation Using Non-contact Current Meter for Operational Use in Japan. In World Environmental and Water Resources Congress 2008. pp. 1-10, 2008.
9. Gupta, V. K., Waymire, E., & Wang, C. T. A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph

- from Geomorphology. *Water Resources Research*, 16(5), pp.855-862, 1980.
10. U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS 4.1 user's manual, 2010.
11. Herschy, R. W. Streamflow Measurement (3rd ed.). Taylor & Francis, 2009.
12. Hydrologic Engineering Center. Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, 2010.
13. Hydrologic Engineering Center. River Analysis System: Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, 2010.
14. Fulton, J. W. Guidelines for Siting and Operating Surface-water Velocity Radars. U.S. Geological Survey, 2018.
15. Lee, K. T., & Yen, B. C. Geomorphology and Kinematic-wave Based Hydrograph Derivation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(1), pp.73-80, 1997.
16. Sieck, L. C., Burges, S. J., & Steiner, M. Challenges in Obtaining Reliable Measurements of Point Rainfall. *Water Resources Research*, 43, W01420, 2007.
17. Glaudemans, M. J., Roe, J. M., & Tilles, P. S. The Ingest, Quality Control, and Processing of Hydro-meteorological Data at National Weather Service Field Offices. Paper J9.1, AMS 23rd Conference on Hydrology, 2002.
18. Mays, L. W. Water Resources Engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons, 2010.
19. McCuen, R. H., Wong, W. H., & Rawls, W. J. Runoff Curve Number Estimation Using Storm Rainfall and Runoff Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 110(4), pp.583-590, 1984.
20. Mueller, D. S., et al. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. USGS Techniques and Methods 3-A22, 2013.
21. Simpson, M. R. Discharge Measurements Using a Broad-band Acoustic Doppler Current Profiler. U.S. Geological Survey, 2001.
22. Nichols, M. N., & Anson, E. Southwest Watershed Research Center Data Access Project. *Water Resources Research*, 44, 2008.
23. Oberg, K. A., & Levesque, V. A. (2012). Computing Discharge Using the Index Velocity Method. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3-A23.
24. Plant, W. J., & Keller, W. C. Evidence of Bragg Scattering in Microwave Doppler spectra of sea return. *Journal of Geophysical Research*, 95, pp.16299-16310, 1990.
25. Plant, W. J., Keller, W. C., Hayes, K., & Spicer, K. Streamflow Properties from Time Series of Surface Velocity and Stage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(8), pp.657-664, 2005.
26. Polatel, C. Large-scale Roughness Effect on Free-surface and Bulk flow Characteristics in Open-channel Flows (Doctoral Dissertation). University of Iowa, 2006.
27. Rantz, S. E., et al. Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2175, 1982.
28. Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. Hydrology for Engineers. McGraw-Hill, 1982.
29. Rodriguez-Iturbe, I., & Valdes, J. B. The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response. *Water Resources Research*, 15(6), pp.1409-1420, 1979.
30. Rouse, H. Engineering Hydraulics. John Wiley, 1950.
31. Tamari, S., García, F., Arciniega-Ambrocio, J. I., & Porter, A. Laboratory and Field Testing of a Handheld Radar to Measure the Water Velocity at the Surface of Open Channels. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2013.
32. Sherman, L. K. Streamflow from Rainfall by the Unit Hydrograph Method. *Engineering News-Record*, 108, pp.501-505. 1932.
33. Smith, R. E., Chery, D. L., et al. Supercritical flow Flumes for Measuring Sediment-laden Flow. Technical Bulletin No. 1655, 1981.
34. Soil Conservation Service. Use of Storm and Watershed Characteristics in Synthetic Hydrograph Analysis and Application. U.S. Department of Agriculture, 1957.
35. Sommer. Discharge Measurement System: User manual RQ-30, RQ-30a, 2012.
36. U.S. Army Corps of Engineers. (n.d.). HEC-HMS Technical Reference.
37. Levesque, V. A., & Oberg, K. A. Computing Discharge Using the Index Velocity Method. U.S. Geological Survey, 2012.
38. Blackmarr, W. A. Documentation of Hydrologic, Geomorphic, and Sediment Transport Measurements on the Goodwin Creek Experimental Watershed, Northern Mississippi, for the Period 1982–1993 — Preliminary release. Research Report No. 3, 1995.

39. 內政部,「內政部風災震災勘災標準作業程序」,2009。
40. 台灣省水利局,「宜蘭河治理基本計畫 (蘭陽溪水系)」,1982。
41. 台灣省水利局,「水文觀測實務講義」,1982。
42. 徐義人,「應用水文學」,1996。
43. 朱木壽,「渠道高流量非接觸式量測及其準確度之研究」,博士論文,國立成功大學水利及海洋工程學系,台南,2010。
44. 李光敦,〈以反曲點法估算集流時間之研究〉,國立中興大學水土保持學系碩士論文,2005。
45. 李光敦、詹雅馨、黃品淳、黃仁國、何瑞益,「流域水情及淹水預報技術及資訊整合平台建置研究-子計畫:流域集塊式與分佈式降雨逕流模式之研發與應用(III)」,2009。
46. 林穎志、朱木壽、詹勳全、高昇敬、呂珍謀,「利用實測表面流速推估高流量之研究」,中華水土保持學報 24(1), 頁 23-26, 2011。
47. 檻順忠、張向寬、石欣軒,水位流量率定曲線產製改善之研究。111 年度農業工程研討會,桃園,臺灣,2022。
48. 檻順忠、李士強、李榮富、柳文成,「宜蘭河試驗流域長期水文監測」,農業工程學報 62(3), 頁 89-100, 2016。
49. 檻順忠、李士強、王毓麒,「應用指標表面流速法推估颱洪期間流量歷線」,108 年度農業工程研討會,彰化,臺灣,2019。
50. 檻順忠、李士強,「表面流速搭配流量觀測建立指標表面流速法」,水利工程研討會,台北,臺灣,2019。
51. 檻順忠、黃國文、張向寬、吳一平,颱洪期間流量觀測與推估作業調適改善研究中國土木水利工程學刊 35(1), 頁 69-77, 2022。
52. 水利署水文資訊服務網
<https://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/>
53. 王毓麒、檻順忠、石欣軒、李士強,「區域排水型試驗流域建置與梅姬颱風案例分析」,災害防救科技與管理學刊 7(1), 頁 49-82, 2018。
54. 農村發展及水土保持署,「適用臺灣之集流時間估算方式探討」,2023。
55. 經濟部水利署,「典寶溪及宜蘭河國家級防災測試基地監測及加值應用計畫」,2015。
56. 經濟部水利署,「宜蘭縣淹水潛勢圖第二次更新計畫」,2015。
57. 經濟部水利署,「新竹縣、新竹市以及苗栗縣淹水潛勢圖第二次更新計畫」,2015。
58. 經濟部水利署,「105 年典寶溪及宜蘭河防災監測及模式測試基地觀測」,2016。
59. 經濟部水利署,「頭前溪水系支流油羅溪治理計畫 (第一次修正)」,2017。
60. 經濟部水利署,「水文觀測作業評核與綜合分析服務」,2018-2019。
61. 經濟部水利署中區水資源局,「中水局轄區測站流量測定成果報告」,2007。
62. 經濟部水利署南區水資源局,「高屏堰穩定取水對策分析及水理資料調查」,2018-2019。
63. 經濟部水利署南區水資源局,「高屏溪流域中上游水文監測與水資源評估」,2019。
64. 經濟部水利署,「台灣地區雨量測站降雨強度—延時 Horner 公式分析」,2003。
65. 水利規劃試驗所,「高雄縣典寶溪整治計畫地質調查報告」,2008。
66. 水利規劃試驗所,「典寶溪排水治理計畫」,2009。
67. 第一河川局,「宜蘭縣自記式水位監測系統設立與淹水災損地理資訊系統整合規劃」,2011。
68. 第四河川局,「濁水溪流域逕流測預報監測控制系統」,2008。
69. 農村發展及水土保持署,「適用臺灣之集流時間估算方式探討」,2023。
70. 許盈松、周湘俊、曾鈞敏,「天然河川水位-流量率定曲線分類研究」,2006。
71. 許盈松、童琮志、周湘俊、張國強、李建君、喻秉輝、黃柏彰。「微波雷達流速儀觀測特性研究」,台灣水利 54(3), 頁 82-91, 2006。
72. 郭家炆、洪健豪、王豪偉、王毓麒、檻順忠、李士強,「聲波都卜勒流速儀觀測流速外延推估比較」,臺灣水利 64(1), 頁 35-46, 2016。
73. 角屋謹一郎、福島泰藏,「流出形分析におけるピーク時間の定義とその検討」,日本土木學會論文集,第 257 號, 頁 93-102, 1976。

收稿日期：民國 114 年 06 月 02 日

修改日期：民國 114 年 06 月 29 日

接受日期：民國 114 年 07 月 02 日