

應用 GIS 與水文模型進行小型水力發電潛力分析-以卑南溪為例

鍾裕峯¹、余泰銓^{1*}、廖子龍¹、薛志勳²、朱宜芳³

摘要

本研究開發一套整合地理資訊系統（GIS）與水文模型之小型水力發電潛力評估流程，並應用於卑南溪流域。透過 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型模擬日流量以掌握水文特性，並運用 QGIS 分析地形水頭進行落差型站點評估。於子流域 5 篩選出 60 處潛力點，證實橫流式水輪機（Cross-Flow）之適用性，其年發電量多介於 50,000 至 100,000 kWh。此外，於子流域 29 導入 HEC-RAS 模擬流速（0.685 m/s），估算年發電量約 11,703 kWh。研究證明此系統化流程具備高度實用性，可作為山區小水力場址快速評估之有效工具。

關鍵字：小型水力發電、地理資訊系統(GIS)、SWAT 模型、HEC-RAS 模型、發電場址潛力評估

¹ 鍾裕峯，國立臺東大學綠能與資訊科技學系助理教授。E-mail: cyf1973@nttu.edu.tw

¹ 余泰銓(通訊作者)，國立臺東大學綠能與資訊科技學系學生。E-mail: 0976998728k@gmail.com

¹ 廖子龍，國立臺東大學綠能與資訊科技學系學生。E-mail: liao747815@gmail.com

² 薛志勳，國立中興大學電機工程系碩士班學生。E-mail: tony.george.xun@gmail.com

³ 朱宜芳，國立臺東大學綠能與資訊科技碩士學位學程學生。E-mail: apple121106547@gmail.com

Application of GIS and Hydrological Models for Small Hydropower Potential Assessment: A Case Study of the Beinan River Basin

Yu-Feng Chung¹, Tai-Chuan Yu^{1*}, Tzu-Lung Liao¹, Chih-Hsun Hsueh², Yi-Fang Chu³

Abstract

This study proposes a systematic framework integrating Geographic Information Systems (GIS) and hydrological modeling to evaluate SHP (Small Hydropower) potential in the Beinan River Basin. By utilizing the Soil and Water Assessment Tool SWAT (Soil and Water Assessment Tool) for daily runoff simulation and QGIS for head analysis, 60 potential sites for head-type turbines were identified in Sub-basin 5. Results indicated that Cross-Flow turbines are most suitable, with annual energy production (AEP) predominantly ranging from 50,000 to 100,000 kWh. Additionally, HEC-RAS was employed in Sub-basin 29 to simulate flow velocities (averaging 0.685 m/s), yielding an estimated AEP of 11,703 kWh for kinetic-type turbines. The proposed methodology provides a robust and practical approach for rapid SHP site assessment in mountainous terrains.

Keywords: Small hydropower, Geographic Information System (GIS), SWAT model, HEC-RAS, site potential assessment

¹Yu-Feng Chung, Assistant Professor, Department of Green Energy and Information Technology, National Taitung University. E-mail: cyf1973@nttu.edu.tw

¹Tai-Chuan Yu (Corresponding Author), Student, Department of Green Energy and Information Technology, National Taitung University. E-mail: 0976998728k@gmail.com

¹Tzu-Lung Liao, Student, Department of Green Energy and Information Technology, National Taitung University. E-mail: liao747815@gmail.com

²Chih-Hsun Hsueh, Student, Department of Electrical Engineering, National Chung Hsing University. E-mail: tony.george.xun@gmail.com

³Yi-Fang Chu, Student, Master Program of Green Energy and Information Technology, National Taitung University. E-mail: apple121106547@gmail.com

壹、前言

隨著人口成長與工業化發展，全球能源需求持續增加，人類對能源的依賴也日益加深。然而，長期大量依賴化石燃料發電，不僅造成資源逐漸枯竭，也因廢氣排放而引發氣候變遷與空氣污染等環境問題，使能源議題成為世界各國共同面對的重要挑戰。為了回應此一趨勢，各國近年來積極推動能源轉型，並持續尋求綠色低碳的再生能源發展方案。

在眾多再生能源之中，小型水力發電因具備潔淨、穩定及可持續利用等特性，近年逐漸受到重視。尤其在大型水力發電開發已趨近飽和，且對生態環境影響較為明顯的情況下，小型水力發電更被視為未來能源轉型的重要方向之一。台灣地形多山，河川普遍具有短流急的特性，加上年降雨量豐富，理論上具有良好的小水力發電發展條件。雖然全台多處流域支流及灌溉渠道皆具備潛力，但目前整體開發程度仍偏低，顯示國內小水力發電仍有相當大的發展空間。

然而，小水力發電在實際推動上，場址評估往往需要投入大量水文、地形與環境調查資料，資料蒐集及資料庫建置成本高，特別是在台灣山區地勢崎嶇的條件下，更增加了場址開發的困難度。此外，現階段仍缺乏一套兼顧技術可行性與經濟效益的標準化場址評估方法，使得小水力發電的推動效率受到限制。

基於上述背景，本研究以台東地區為主要探討範圍，嘗試運用 GIS 與水文模型，建立小水力發電潛力場址之評估流程，並分析其發展潛力，同時評估其在技術面與經濟面上的可行性。另一方面，本研究也希望進一步探討小水力發電在偏遠地區或能源供應不足地區中的應用價值，作為台灣未來能源規劃與政策發展的參考依據。

貳、文獻探討

依據國際再生能源機構（International Renewable Energy Agency, IRENA, 2022）統計，截至 2021 年，水力發電約占全球再生能源總裝置容量之 44%，顯示其在再生能源系統中具有關鍵地位。水力發電因具備穩定供電能力與成熟技術，被視為支撐再生能源發展的重要基礎。然而，隨著大型水力發電開發逐漸趨於飽和，且其建設過程可能對河川生態系統、土地利用及社會環境造成顯著影響，使相關開發面臨日益嚴格之環境與社會限制。在此背景下，近年研究逐漸將焦點轉向規模較小、環境衝擊較低的小型水力發電。

根據劉宏仁等人（2024）的研究指出，隨著全球能源轉型與淨零排放政策之推動，再生能源逐漸成為各國能源發展之核心，其中小型水力發電因具備低碳排放、運轉穩定、壽命長及適合分散式能源系統等優點，近年來受到廣泛關注。相較於大型水力發電，小水力發電通常不需大規模壩體工程，對環境與社會之衝擊較低，特別適合應用於地形起伏較大或偏遠地區。水頭與流量是決定水力發電潛力的核心要素，並直接關係到電能產出與發電效率（Areri & Bibi, 2023）。然而，隨著技術進步，流速型水輪機

逐漸發展，使得流速亦成為重要評估參數之一。因此，現代小水力發電評估已由傳統單一因子分析，轉向整合水頭、流量與流速之多因子評估架構。

在大尺度流域分析中，GIS 提供了一個有效整合空間資料之平台。GIS 可處理數值高程模型 (DEM)、河網、土地利用及集水區邊界等資料，並進行坡度分析、水頭計算與空間分布判釋。相關研究指出，GIS 能有效應用於小水力發電場址之初步篩選，透過空間分析快速辨識具潛力之河段，並建立潛力分布圖。國內研究亦顯示，利用 GIS 進行集水區尺度之場址評估，能顯著降低傳統人工調查之時間與成本。然而，多數研究仍偏重地形與幾何條件分析，對於流量與水文變化之考量相對不足。因此，將 GIS 與水文模型整合，已成為提升評估準確性之重要方向。

流量為小水力發電潛力評估之關鍵參數之一，但實際量測資料常受限於測站分布與時間長度，因此利用水文模型進行流量模擬已成為常見方法。根據鍾閔光等人 (2014) 的研究，SWAT 為廣泛應用之半分布式水文模型，可模擬降雨、蒸發散、地表逕流與地下水補注等水文過程。該模式透過子流域與水文反應單元之劃分，可有效描述流域內之空間異質性。Tapas 等人 (Tapas et al., 2025) 研究指出，SWAT 之模擬結果對參數設定具有敏感性，顯示模型校正對於提升模擬精度之重要性；此外，降雨資料品質與最佳化方法亦會影響模型預測能力。SWAT 具備長期流量模擬能力，吳蕙雯等人 (2014) 應用於缺乏實測資料區域之流量推估，並作為小水力發電場址評估之依據。

除了 SWAT 之外，TOPography-based MODEL (TOPMODEL) 亦為常見之水文模型之一。該模型以地形為核心，透過地形指數描述流域內不同區域之飽和程度與逕流生成潛勢。Maref 等人 (Maref et al., 2018) 的研究顯示，TOPMODEL 能有效反映地形對水文反應之控制作用，特別適用於坡度變化明顯之山區流域。相較於參數較多之模型，TOPMODEL 具有概念簡單與計算效率高之優點，但其對地形資料品質較為敏感，且理論假設偏向飽和逕流機制，因此在實務應用上常作為輔助分析工具。

另一方面，Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) 為常用之水文模擬系統，可模擬降雨轉換為逕流之過程，並支援多種損失模式與流量演算方法。Guduru 等人 (Guduru et al., 2024) 的研究顯示，HEC-HMS 在流域流量模擬與工程應用方面具有良好之適用性。由於其模組化設計，研究者可依流域特性選擇適合之方法，使其成為水文模型比較與驗證之重要工具之一。

然而，僅依賴流量與水頭進行評估仍不足以完整反映水力發電之可行性，河道內之水理條件，特別是流速分布，亦為重要考量因素。Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) 為常用之河川水理模擬工具，可進行一維與二維水流分析，並輸出水位與流速等資訊。在小水力發電研究中，HEC-RAS 常用於分析特定河段之流速條件，以評估流速型水輪機之適用性。特別是在低水頭但流量較大之河段，流速分析可補足僅以地形與流量判斷之不足，使評估結果更具完整性。

在水輪機選型方面，不同水輪機型式適用於不同水頭與流量條件，Pelton 水輪機適用於高水頭低流量環境，Francis 水輪機適用於中高水頭條件，而 Kaplan 與 Tubular 水輪機則適用於低水頭高流量環境 (JICA, 2011)；此外，Cross Flow 水輪機因其結構

簡單且適用範圍廣，在中低水頭條件下亦具有良好應用性。隨著流速型水輪機之發展，低水頭河段亦可透過流速進行能源開發，使小水力發電之應用範圍進一步擴展。因此，小水力發電場址評估應整合水頭、流量與流速等多項因素，以進行綜合判斷。

綜上所述，小型水力發電（SHP）之評估方法已由傳統經驗判斷，演進為結合地理資訊系統（GIS）、水文模型與水理模擬之整合式分析架構。儘管 GIS 空間分析與水文流量模擬已廣泛應用，但現有研究仍多侷限於單一模型分析，缺乏多模型協同運作之驗證；此外，評估範疇多聚焦於水頭落差，鮮少將流速型發電潛力納入整體框架。為彌補此研究缺口，本研究整合 SWAT、QGIS 與 HEC-RAS 建立一套系統化評估流程，同步考量「落差型」與「流速型」之發電潛能，旨在提升場址篩選之精準度與實用價值，為山區小水力資源開發提供更為完整的決策支持。

參、研究方法與材料

一、研究流程概述

本研究將從政府單位蒐集到的地形與水文資料，結合 QGIS 與水文模型進行數據分析，計算潛在場址的坡度與流量，並據此評估其發電潛力。接著再依據計算結果，對篩選出的地點進一步評估小型水力發電開發可能帶來的效益及其優缺點，最後選出適合進行小型水力發電開發的地點，如圖 1。

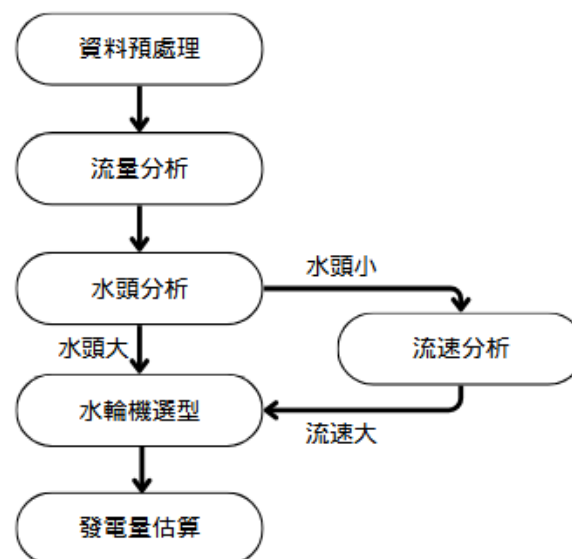


圖 1. 研究流程圖

二、QGIS 介紹

QGIS 是一款開源的地理資訊系統，提供強大的空間數據管理、分析與可視化功能，並支持各種空間分析操作。本研究中，QGIS 主要用於向量與柵格數據處理(如座標轉換與幾何運算)、地形分析(包括坡度、坡向計算與流域劃分)及空間統計分析相較於商業 GIS 軟體，QGIS 完全免費，且支持開放源碼，使用者可根據需求進行自定義

修改，特別是通過 Python 編程語言進行功能擴展，滿足特殊需求。QGIS 擁有直觀的圖形用戶界面(GUI)，降低了使用者的入門難度，並提供大量插件，支持多種功能擴展。此外，QGIS 的跨平台特性使其適用於不同操作系統，為協作研究提供便利。

三、水文模型介紹

水文模型係描述流域內水分循環與時空演變過程之關鍵分析工具。其核心價值在於整合數位高程模型 (DEM)、土地利用 (Land Use)、土壤物理特性及氣象驅動資料，藉由數學方程式表徵降雨—逕流 (Rainfall-Runoff) 之物理機制。在小型水力發電 (SHP) 之研究範疇中，水文模型不僅用於推估缺乏實測站點區域的日平均流量，更是進行場址初步篩選 (Site Screening) 與發電潛能評估 (Potential Assessment) 的決策基石，使研究者能在大尺度的流域範圍內，精確識別具備開發價值之高潛力子流域。

本研究針對卑南溪流域之特性，選定 SWAT、TOPMODEL、HEC-HMS 及 HEC-RAS 四套模型進行整合應用，各模型之技術定位說明如下：

- (一) SWAT (Soil and Water Assessment Tool)：長期連續性模擬之基礎 SWAT 為美國農業部 (USDA) 開發之半分布式 (Semi-distributed) 物理模型。其將流域劃分為多個水文反應單元 (HRUs)，並基於水量平衡方程 (Water Balance Equation) 模擬水分之入滲、蒸發散及地下水補注。由於其擅長處理長時間序列 (Long-term) 之日流量資料，本研究將其定位為卑南溪流域整體水資源時空分佈之評估核心，為落差型發電提供穩定之基流數據。
- (二) TOPMODEL (Topography-based Model)：地形驅動之空間差異分析由 Beven 與 Kirkby 提出之 TOPMODEL，其特色在於利用「地形指數」(Topographic Index, $\ln(a/\tan\beta)$) 描述流域內水分飽和區之空間分佈。對於地形起伏劇烈之卑南溪山區，該模型能有效分析局部坡度與集水面積對逕流形成之影響。相較於參數繁雜的分布式模型，TOPMODEL 提供了一種更為精煉且具備物理意義的方法，用以補強山區微型集水區之水文特徵描述。
- (三) HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)：降雨逕流轉換與事件分析 HEC-HMS 由美軍工程兵團 (USACE) 開發，具備高度模組化之特性。其針對單一降雨事件 (Event-based) 之洪峰流量與流量歷線 (Hydrograph) 具有極佳之模擬精度。在小水力評估中，HEC-HMS 扮演「穩定度測試」之角色，協助分析在不同降雨情境下河道的動態響應，進而評估發電設備在極端水文條件下的運行風險與可行性。
- (四) HEC-RAS (River Analysis System) — 局部斷面之水理特徵精化與前述水文模型不同，HEC-RAS 專注於河道內部之水理行為 (Hydraulic Behavior)。透過一維與二維之定常流 (Steady Flow) 或非定常流 (Unsteady Flow) 模擬，可精確計算斷面之水位高度、流速向量及水頭損失。在本研究中，其主要功用在於將水文模型推算之流量轉化為空間流速分佈，為「流速型水輪機」之佈建位置與選型提供關鍵之流場數據。

本研究透過上述模型之協同運作（Synergy），建構了從「大尺度流域模擬」跨越至「小尺度局部水力分析」的全方位框架。SWAT 與 TOPMODEL 負責提供廣域的水文背景與流量分佈，HEC-HMS 強化了時間序列的穩定性分析，而 HEC-RAS 則完成最後一哩路的流速場精化。此整合路徑有效克服了單一模型在物理描述上的侷限性，顯著提升了山區小型水力發電潛力評估的精準度與場址開發之技術完整性。

四、水頭分析

水頭分析的目的是基於流量數據選擇合適的小型水力發電場址，並為後續的水輪機選型提供依據。首先，根據水文模型模擬的流量數據，對卑南溪流域內的各河段進行初步篩選，選擇流量較大且穩定的區域。流量的穩定性是小型水力發電系統設置的基本前提，流量較大的區域通常具有更高的發電潛力。選擇出具有高流量的河段後，進一步結合當地的坡度資料進行水頭分析。

本研究將使用自政府資料開放平台下載的數值高程模型（DEM），並匯入 QGIS 進行分析。選用此 DEM 資料的主要原因，在於其具備免費且公開的特性，能夠降低研究成本，同時也可確保資料取得上的便利性。此外，政府提供的 DEM 資料通常具有一定程度的精度與可靠性，可作為水資源與地形分析的基礎，符合本研究的需求。

通過水頭分析，我們能夠確定每個場址的水頭值，並根據水頭的高低為水輪機的選型提供科學依據。這一過程能夠有效提高場址選擇的精確度，確保選擇出的場址具備最佳的發電效益。此流程為後續的流速分析和最終的水輪機選型提供了依據，從而進一步確保發電效能的最大化。

五、流速分析

在選擇小型水力發電場址的過程中，流速分析是確定合適水輪機型號的重要步驟。流速型水輪機的選擇依賴於流速較高的河段，而流速分析的主要目的是確定每個選定場址的流速，並為後續的水輪機選型提供依據。

本研究使用 HEC-RAS 模型來進行流速分析。HEC-RAS 可根據不同流量數據及河道斷面資料，模擬水流在河道中的分布與變化。然而，HEC-RAS 模型無法進行大範圍的流速模擬，僅能在較小範圍內進行精確的分析。為了彌補這一限制，本研究首先通過其他水文模型篩選出具有較高且穩定流量的河段，確保分析的河段具有足夠的發電潛力，再進行流速模擬。

首先根據水文模型模擬的流量數據，選擇出具有穩定且較高流量的河段，這些河段將作為 HEC-RAS 模型的輸入對象。接著，將這些選定的河段流量數據輸入 HEC-RAS，計算每個區段的流速分布。

在 HEC-RAS 中，流速的計算通常基於流量、河道斷面、坡度及水位等多個因素。通過模擬不同流量條件下的水流變化，我們能夠得到每個河段的流速數據，並根據流速的高低進一步篩選場址。對於流速較高的區域，將優先考慮選擇流速型水輪機，這類水輪機在高流速環境下能夠更高效地轉換水流能量。

六、發電潛力計算

傳統上，在評估水力發電場址時，初期往往需要投入相當高的成本，且必須仰賴具備經驗的人員進行判斷，這對小水力發電若想大規模推廣而言，無疑是一項重要阻礙。因此，近年來持續發展以電腦為基礎的評估工具。對於落差型小水力發電而言，主要是先找出水頭高度與水流量，再配合水輪機及發電機的效率，即可估算其發電潛力，如式(1)所示：

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times \eta \quad (1)$$

其中，P 為產生的電力(kW)， ρ 為流體密度(kg/m³)，g 為重力加速度 9.81 m/s²，Q 為河川流量(m³/s)，H 為水頭垂直落差(m)， η 為水輪機效率與發電機效率的總和值。至於流速型小水力發電，其發電量的估算公式如式(2)所示：

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times \eta \quad (2)$$

其中，P 為產生的電力(kW)， ρ 為流體密度(kg/m³)，A 為水輪機截面積，V 為水流速度(m/s)， η 為水輪機效率與發電機效率的總和值。

七、水輪機篩選

在小型水力發電系統的設計中，選擇合適的水輪機型式，對整體系統效益與運轉穩定性具有重要影響。不同種類的水輪機，適用的流速、水頭及流量條件各不相同，因此本研究將根據模擬所得的水頭與流量資料，針對潛在發電流域進行發電機適用性篩選。

表 1. 各水輪機合適情形對照表

水輪機類型	Water Head (m)	Flow Rate (m ³ /s)
Cross Flow	5~100	0.1~10
Francis Turbine	15~300	0.3-20
Kaplan	5~80	5-50
Pelton	15~500	0.1~3
Tubular	5~18	2~20

肆、結果

一、流量模擬結果

本研究目前已完成第一階段之水文基礎建模，重點在於建立卑南溪流域之核心流量基準。現階段以 **SWAT 模型** 為主軸，針對 2020 年全年度之日流量進行模擬分析。關於多模型間（如 TOPMODEL 與 HEC-HMS）之交互驗證與對比評估，將於後續研究階段逐步導入，以建構更完備的水文評估體系。

本研究選取 2020 年之模擬日流量作為代表性指標，藉此掌握流域內之水資源時空分佈趨勢。由圖 2 之模擬結果顯示，卑南溪流域之平均日流量呈現顯著之空間異質性：

(一) 中上游地區：受限於地勢陡峭及集水面積較小之物理特性，模擬流量普遍偏低，反映了典型山區河川之初期匯流特徵。

(二) 中下游地區：隨著支流匯流增加及集水面積擴張，配合地形趨於平緩，流量呈現明顯遞增趨勢。

整體而言，SWAT 模型之初步模擬結果展現出高度的空間合理性，符合該流域之實際物理水文趨勢。此階段性成果已為後續針對不同子流域進行「落差型」與「流速型」水力發電潛能之精確評估，奠定了堅實的數據基礎。

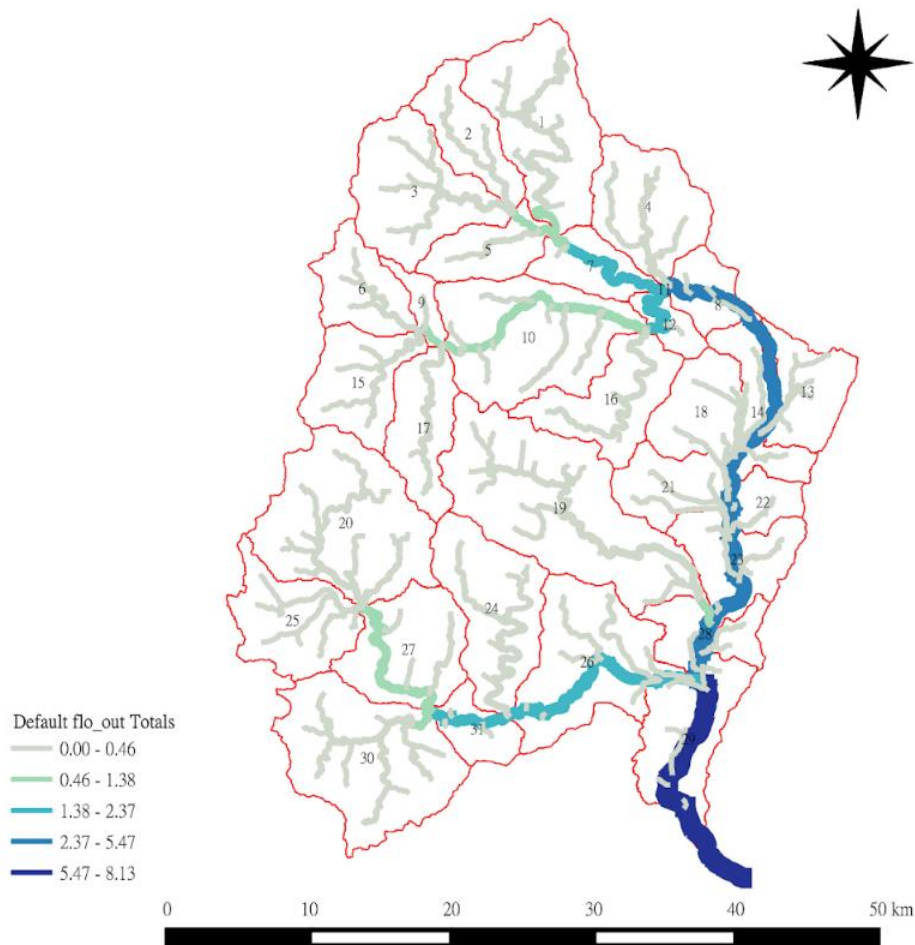


圖 2. 2020 年平均日模擬流量

二、水頭與流量篩選結果

本研究選定地形起伏顯著之子流域 5 作為重點研究目標(如圖 3 所示)，並採用 100 公尺空間間距進行河段離散化處理。透過整合 SWAT 模型之模擬流量與地形水頭數據，針對各潛力點位進行落差型水輪機之機組適配性分析。根據評估結果，本研究於該流域共篩選出 60 處具備開發潛力之點位。在選型分佈上呈現以下特徵：

- (一) 橫流式水輪機 (Cross Flow Turbine)：展現極佳的环境適應性，於 60 處潛力點均符合運行條件 (佔比 100%)，為該區域最適用之機型。
- (二) 佩爾頓式水輪機 (Pelton Turbine)：適用於高水頭、低流量之特定區段，共有 13 處點位符合其特徵指標 (約佔 22%)。
- (三) 其餘機型：由於水力條件未達啟動閾值或運行效率區間，故無符合之點位。
- 此外，針對「低水頭、高流量」之特殊河段，本研究進一步導入**流速場分析**，匹配流速型水輪機 (Kinetic Turbine) 以彌補落差型設備之局限。此種「雙軌化選型策略」不僅能針對多元水文條件提供客製化配置，更能有效優化整體流域之發電效益，確保水力資源開發之最優化運行。

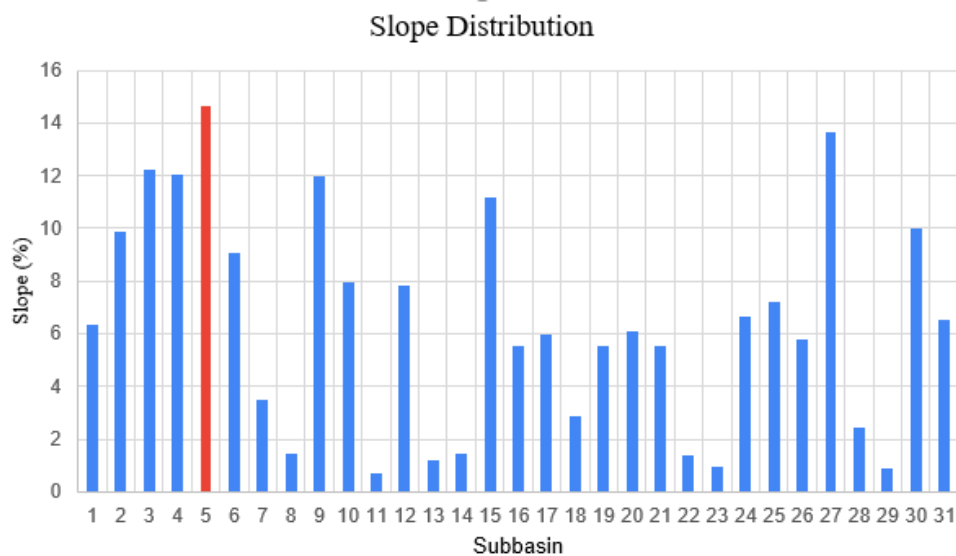


圖 3. 子流域坡度分析圖

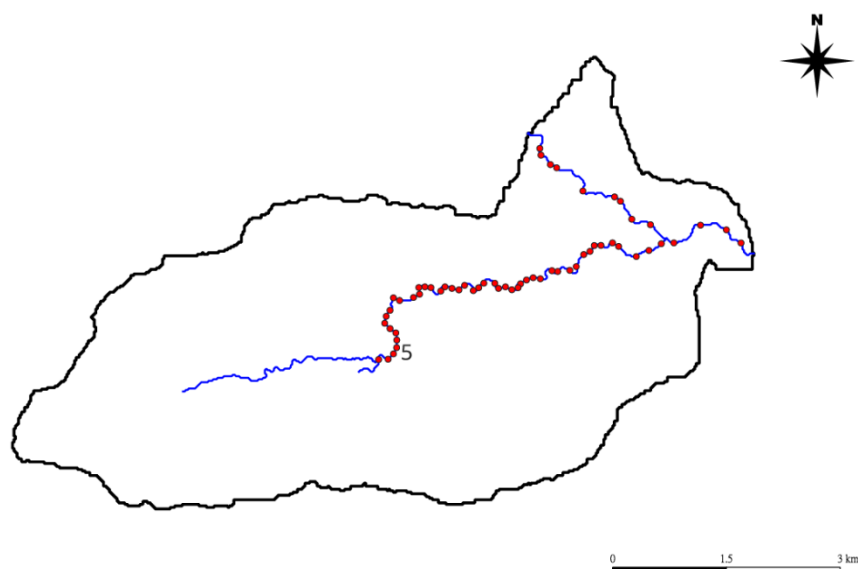


圖 4. Cross Flow 選型點位(共 60 個點位)

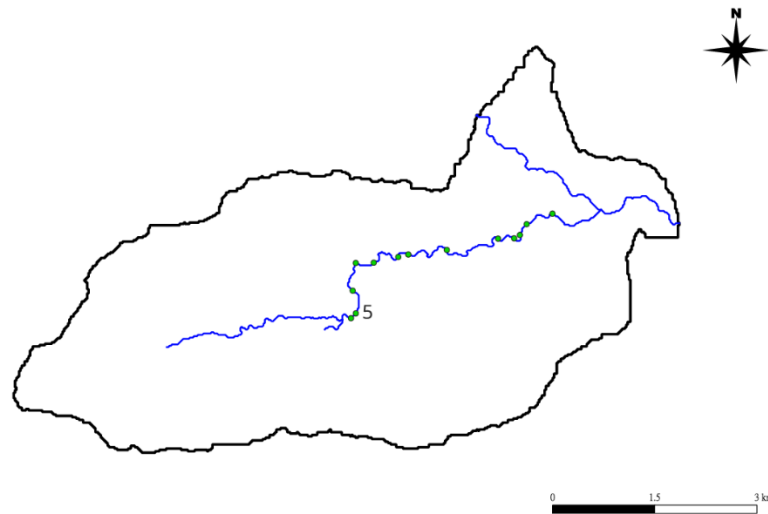


圖 5. Pelton 選型點位(共 13 個點位)

三、落差型水輪機

本研究基於初步獲取之水頭 (Head)、流量 (Discharge) 及流速 (Velocity) 數據，建構理論發電潛能評估模型。為初步掌握流域內之資源規模，本階段評估採取通用性能參數，暫不針對個別水輪機型號之效率曲線進行差異化修正。

各潛力點位之理論輸出功率 P (單位: kW) 係依據公式(1)進行估算，其中: η 為系統綜合效率，本研究保守設定為 0.7 (涵蓋水輪機與發電機之整合損失); ρ 為水的密度，取值為 1000 kg/m^3 ; g 為重力加速度，取值為 9.81 m/s^2 ; Q 為設計流量 (m^3/s); H 為有效水頭 (m)。

為量化各場址之經濟開發價值，本研究進一步假設機組維持全天候 (24 小時) 運轉，藉此計算其理論年發電量 (Annual Energy Production, AEP)，單位以 kWh 計。該指標將作為後續篩選優先開發場址與評估流域能源貢獻度之核心基準。

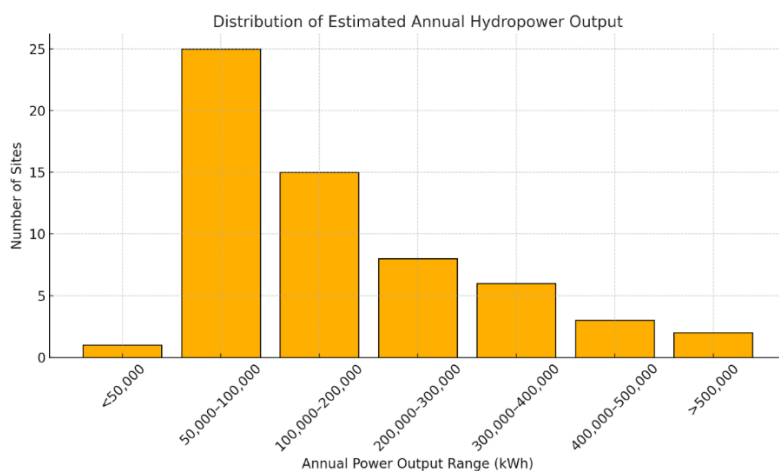


圖 6. 顯示子流域 5 中各潛力點位之預估年水力發電量的分佈情形，依年發電量 (kWh) 分級統計，橫軸為發電量級距，縱軸為各級距內之點位數量。

四、流速分析結果

本研究選定 SWAT 模擬流量表現較佳之子流域 29 作為流速特徵分析之代表性河段。為精確掌握該區段之水流動力特性，本研究採用 HEC-RAS 進行一維定常流（1D Steady Flow）水理模擬。

在模擬邊界條件（Boundary Conditions）之設定上，以 SWAT 模型推估之長年平均日流量 $Q = 8.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 作為初始輸入值，藉此反映穩定供水情境下之實際水文特徵。根據 HEC-RAS 模擬結果顯示，該代表性河段之平均流速分布穩定，其計算平均流速為 $V = 0.685 \text{ m/s}$ 。此量化數據將作為後續評估流速型水輪機（Kinetic Turbine）安裝可行性與功率輸出預測之關鍵參數，確保評估結果具備水理學上之實證基礎。

五、流速型水輪機

針對不具備顯著水頭落差之子流域 29，本研究進一步評估其河道動力能（Kinetic Energy）之開發潛力。將 HEC-RAS 模擬所得之代表性流速 $V = 0.685 \text{ m/s}$ 帶入公式(2)：

$$P_{kinetic} = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (3)$$

其中，系統綜合效率 η 設定為 0.7，水的密度 ρ 為 1000 kg/m^3 。經由能量轉換模型推算，並假設機組維持全天候（24 小時）穩定運行，該代表性河段之預估年發電量（AEP）約為 11,703 kWh。

此評估結果證實，即便在缺乏高水頭地理條件的平緩河段，透過流速型水輪機（Kinetic Turbine）仍能有效擷取河川動能並轉化為電力。此發現為低落差區域提供了具備實作價值的替代能源路徑，顯著提升了整體流域小水力開發之資源利用率與場址適應性。

伍、討論

一、研究成果總結：系統化評估流程之建構

本研究成功開發一套整合地理資訊系統（GIS）與物理性水文模型之小型水力發電（SHP）場址篩選流程，其學術價值與實踐潛力主要體現在以下維度：

- （一）系統化場址甄別邏輯：本流程擺脫了傳統依賴零星觀測站的侷限，透過 SWAT 模型與 GIS 空間疊置分析，建立了從資料蒐集、子流域篩選到潛力估算的標準化作業程序（SOP）。此架構能有效整合異質空間數據，為開發決策提供具備物理意義的科學依據。
- （二）多指標能量轉換預測：不同於過往僅關注水頭（Head）或流量（Discharge）的單一評估，本研究同步導入流速（Velocity）因子，針對卑南溪流域產出保守且具備可靠度的發電潛力預測。此多指標評估法能更精確地對應不同類型之水輪機組，提升資源利用率。
- （三）多模型協同分析架構之奠基：本研究初步實證了 SWAT 與 HEC-RAS 在大尺度的流量分佈與小尺度的水理精化上的互補性。此種整合分析架構為後續納

入更多物理機制模型（如 TOPMODEL 或 HEC-HMS）提供了可擴充的技術接口，旨在透過多模型整合（Multi-model Ensemble）極大化評估精度。

二、研究限制：極端氣候事件下之模擬挑戰

儘管本研究在常態水文模擬上表現優異，但透過 2020 年之模擬案例發現，SWAT 模型在應對短時強降雨（如 5 至 6 月間之颱風事件）時，存在明顯的流量低估現象。

根據中央氣象署之歷史觀測資料，該時段雖有顯著之颱風降雨紀錄，但 SWAT 之模擬曲線僅呈現平緩波動。此限制反映了半分布式模型在大時間尺度（Daily scale）下，可能忽略了短歷時、高強度逕流的瞬時響應。為彌補此缺陷，後續研究將導入事件導向模型（Event-based Model） HEC-HMS。藉由 HEC-HMS 卓越的降雨—逕流轉換能力與細緻的時間解析度，將能有效修正極端天氣下之流量歷線，進而提升系統在氣候變遷背景下的抗風險能力與評估時效性。

三、未來展望與擴展方向

基於目前的階段性成果，本研究建議未來可從以下三個方向深化：

- (一) 智能化與自動化決策系統：未來可進一步整合機器學習（Machine Learning）演算法，針對大數據環境下的氣候、地形及環境變遷進行自動化特徵提取。透過開發自動化評估平台，可大幅降低人工處理數據之成本，實現場址篩選之智能偵測與快速迭代。
- (二) 完善多維度永續評估指標：現有流程已初步考量環境與經濟因子，未來應進一步納入社會衝擊（Social Impact）、法規遵從性（Regulatory Compliance）及能源安全策略等質性指標。建構多準則決策分析（MCDA）框架，將能為 SHP 項目之可持續發展提供更為周全的決策支持。
- (三) 全球化場址評估工具之通用性研究：卑南溪之案例可作為典型山區河流之參考原型。未來研究將探索此流程在不同地理環境（如水文資料匱乏地區或不同氣候帶）的適應性。目標是將此評估框架優化為具備全球遷移性（Generalizability）的開放式工具，助力全球分散式再生能源之布局。
- (四) 數據精準化與模型校核優化：針對目前實測數據不足之挑戰，未來研究將致力於結合遙測技術（Remote Sensing）與低功耗物聯網傳感器（IoT Sensors），獲取更多現地觀測資料以進行模型參數校正（Calibration），並採用納許效率係數（NSE）、決定係數（ R^2 ）及 偏差百分比（PBIAS）等標準水文指標進行量化驗證。透過多模型比對分析，找出最契合目標流域特性的水文模擬路徑，持續提升發電潛能預測之準確度。

陸、致謝

本研究部分由台灣國家科學及技術委員會資助，項目編號為 NSTC 114-2222-E-143-002。

柒、參考文獻

一、中文

- 劉宏仁、林文勝、游景雲、陳谷汎 (2024)。小水力發電之發展歷程、現況與推動建議。中興工程，51 (1)，10-21。
- 鍾閔光、林俐玲 (2014)。土壤水文評估模式之介紹。中華水土保持學報，45 (3)，151-158。
- 吳蕙雯、鍾閔光、林俐玲 (2014)。SWAT 模式參數之敏感性分析——以來社溪集水區為例。中華水土保持學報，45 (3)，143-150。

二、外文

- IRENA (2022). Renewable energy statistics 2022. International Renewable Energy Agency.
- Areri, D. C., & Bibi, T. S. (2023). Identification of small-scale hydropower potential sites using geographic information system and hydrologic modeling technique: Awata river, Genale Dawa basin, Ethiopia. Energy Reports, 9, 2405-2419.
- Tapas, M. R., Etheridge, R., Tran, T. N. D., Le, M. H., Hinckley, B., Nguyen, V. T., & Lakshmi, V. (2025). Evaluating combinations of rainfall datasets and optimization techniques for improved hydrological predictions using the SWAT+ model. Journal of Hydrology: Regional Studies, 57, 102134.
- Maref, N., Korichi, K., & Mahfoud, Z. (2018). Modeling the rainfall-runoff relationship with TOPMODEL in the Wadi El Kebir watershed. Journal of Water and Land Development, 38, 81-88.
- Guduru, J. U., & Mohammed, A. S. (2024). Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. Environmental Challenges, 17, 101017.
- Japan International Cooperation Agency [JICA]. (2011). Guideline and manual for hydropower development vol. 2: Small scale hydropower. JICA; Electric Power Development Co., Ltd. pp. 135-137.