

台灣山區地下水資源調查與 評估技術之建立

許世孟* 柯建仲** 陳耐錦** 冀樹勇***

一、前言

受到全球氣候劇烈變化影響，台灣的地面水文環境產生極大的變化，已衝擊到系統性的水文循環，而地下水文環境也間接受到影響，導致水資源供給的穩定性產生問題；而人為的不當利用、生態環境的變遷，使得台灣地下水資源不但儲量大幅減少，水質也嚴重被污染，更加劇水資源匱乏問題；加上近年來水庫或集水區設施興建進度，因民眾環保意識高漲而受阻，政府對於水資源調配將面臨更大挑戰。因此，尋找台灣另一個可供調配之水資源，更凸顯此工作之重要性。

山區占全國面積的三分之二條件下，屬於平原地區地下水重要之補注來源，究竟蓄含多少地下水資源，是否有可替代之水資源，在政府提倡多水源多系統聯合經營區域性水資源策略下，使其成為水資源調配來源之一，值得進一步研究。

民國 96-97 年間經濟部中央地質調查所著手於山區地下水探勘，分別在清水溪及眉溪流域與埔里盆地設置 4 處水文地質調查站，開啟台灣在山區地下水的先期研究；依據兩年先期計畫研究成果，經濟部中央地質調查所於民國 98 年度向經濟部提出 12 年分區分期之「台灣山區地下水

資源調查研究整體計畫」，並獲得經濟部支持第一期之計畫（計畫執行期間：民國 99～102 年），該計畫針對台灣中段山區進行調查研究，規劃四項分支計畫，內容包括基礎資料調查、週期性觀測資料建立、資訊分析評估與模擬，以及資料庫建置工作。

中興社執行「台灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫」之其中一項分支計畫「台灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水觀測井建置」，僅著重於山區地下岩層進行地質鑽探與鑿井，並蒐集水文地質相關資料，如抽水量、地下水位、水文地質參數等資料，供整體計畫其他分支計畫使用，對於瞭解山區地下水資源之流場分布、可供調配之水量與其水質、地面水與地下水在不同環境下的互動特性、山區水資源管理及永續經營之效能等山區地下水資源調查與評估關鍵技術仍少有著墨。因此，本研究藉由山區地下水資源調查與評估技術建立過程，評估山區地下水資源及具開發潛能之區域，以供水資源調配及開發策略之用。同時，廣納國內外先進水文地質調查技術，蓄積先導性及實用性技術研發能量，以擴大中興社於國內在此議題之競爭優勢。

* 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質調查組組長

** 中興工程顧問社大地工程研究中心正研究員

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心經理

二、山區地下水資源調查與評估技術及其實際案例應用成果

本研究建立之山區地下水資源調查與評估技術，可區分為以下七大技術及其解決問題，如表 1 所示。

表 1 本研究建立之技術與解決之問題

本研究建立技術	解決問題
孔內水文地質調查技術	了解岩層水文地質特性與流場狀態
環境示蹤劑調查與分析技術	確定不同水體來源與關聯性
山區地下水補注潛勢技術	判斷地下水的補注潛能與空間分布
山區地下水水質脆弱性評估技術	劃設重要地下水保護區
地表與地下水互制分析	分析地表與地下水水環境系統之變化
山區地下水動態觀測分析與評估	掌握豐枯季地下水動態與趨勢
山區地下水分析模式與潛勢評估	評估山區各種岩層之蓄水潛能

以下針對各技術之建立過程、應用案例及其成果，詳細說明如下：

(一) 孔內水文地質調查技術

孔內水文地質調查技術可視為地球物理探勘的一環，透過不同型式的探測裝置和試驗方法，直接或間接記錄山區地下岩層所蘊含的物理訊號及水力參數，藉由探測結果得以獲知地質構造與岩性分布特徵、量化水力傳導與蓄存能力、掌握潛在優勢地下水流路徑、檢視井體結構完整性，甚至提供鑽探紀錄補遺之佐證，是山區地下水資源評估工作中相當關鍵的核心技術之一。

孔內井測調查係以地球物理探勘方式，將各式探測儀置於鑽孔或試驗井中，並在吊放或拉升過程直接記錄地層的各種物理訊號，並透過這些訊號界定地層岩性分布及裂隙位置、判斷地層滲透或含水層位置、推估地層孔隙、破碎及軟硬程

度等 (Paillet and Pedler, 1996; Helm-Clark *et al.*, 2004; Hung *et al.*, 2009)。本研究於孔內井測主要調查工具包括電測儀 (Electrical Log)、全波形聲波儀 (Full Waveform Sonic Log)、井徑儀 (Caliper) 及流體溫度及導電度儀，量測訊號包含正常態電阻率 (64" and 16" Normal Resistivity)、單點電阻 (Single-Point Resistance)、自然伽瑪 γ 射線 (Natural Gamma Radiation)、自然電位 (Spontaneous Potential)、聲波走時 (Sonic Travel Time)、井徑 (Borehole Diameter) 與溫度及導電度等，如圖 1 所示。

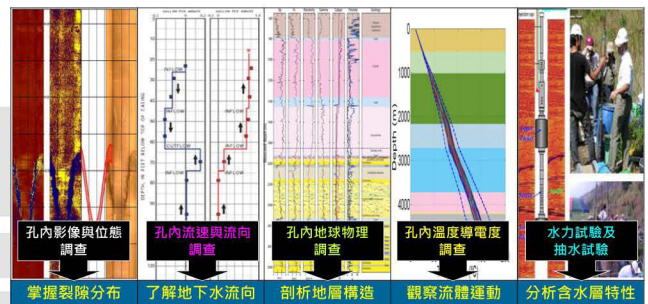


圖 1 孔內水文地質調查技術類型

依據孔內水文地質調查試驗，可進行試驗成果之整合與分析 (如圖 2)，可依序界定地層岩性分布並佐證鑽孔岩心資料、判斷主要透水層及蓄水層位置、評估不同岩層地下水流動特性及蓄藏潛能、指定主要地下水補注及流出裂隙位置，進而預測地下水開發潛勢區段。

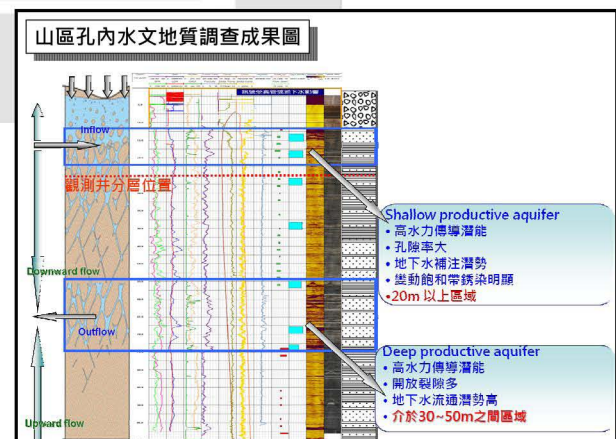


圖 2 孔內水文地質調查成果

(二) 環境示蹤劑調查與分析技術

本研究引進氫氧同位素 (Oxygen and Hydrogen Isotope) 之地球化學示蹤劑分析, 以評估山區地下水補注源或補注量, 進而瞭解含水層的補注與內在交互作用。氫 (H)、氧 (O) 是存在自然界中水 (H_2O) 中的同位素, 它們不僅是水的組成, 在物理、化學性質上比其他人工示蹤劑更能代表水的行為。同時, 不同環境之水體, 會因在形成的過程中水文氣象的條件不同, 或因存在環境條件的改變而發生同位素分化作用 (Isotope Fractionation), 使得不同環境的水體受不同種類或程度的同位素分化作用, 而有相異的氫、氧同位素組成特徵, 此種同位素組成的差異特徵就可提供作為天然的环境示蹤劑, 用來追溯山區地表溪水、地下水及雨水的關聯性及來源, 各水體氫氧同位素示意圖可表示如圖 3。

與地下水間不具關聯性; 若再比較斷層上下盤地下水井 $\delta^{18}O$ 值, 發現具相似之處, 代表兩口井的水體可能有水文相關或來自相同水體, 也可進一步說明地利斷層可能屬於導水斷層, 上盤的地下水經地利斷層流至下盤。



圖 4 鯉魚潭氫氧同位素分析成果

(三) 山區地下水補注潛勢技術

近年來由於地理資訊系統 (GIS) 技術及遙測影像 (Remote Sensing) 的進步, 國外已有許多學者利用遙測影像結合 GIS 系統來進行不同區域之地下水潛能區評估, 將各地下水補注潛能參數整合且給予適當權重關係, 用以判定大範圍之地下水流機制和地下水補注區域。

本研究利用遙測影像及 GIS 資料進行山區地下水補注潛勢分析, 並配合中興社執行「台灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水觀測井建置」計畫之相關成果加以驗證模式之準確度, 藉以精準掌握山區高補注潛勢區。研究中採用岩性、土地利用、坡度、線型-斷層、河系密度等 5 個因子 (如圖 5), 進行濁水溪中游山區地下水補注潛勢分析; 由成果顯示 (圖 6), 地下水補注來源較豐富地區, 大致分布於清水流域下游, 以及陳有蘭溪中段支流一十八重溪附近。

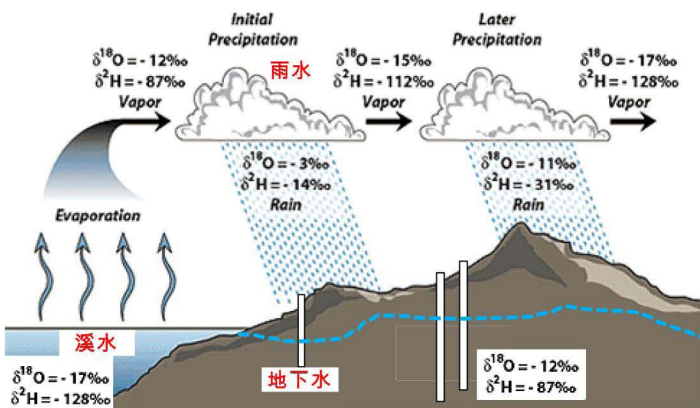


圖 3 氫氧同位素分布示意圖

本研究以烏河流域鯉魚潭為例 (如圖 4), 此區共有 2 處地下水水分層觀測井, 分別監測深淺含水層地下水位變化, 另 DH-14 井與 DH-15 井分別位於地利斷層下盤及上盤, 採集鯉魚潭附近雨水、潭水、河水及地下水水樣並進行分析; 結果顯示此區溪水與淺層地下水之氧同位素值 ($\delta^{18}O$) 相近, 顯示其關聯可能很密切, 另外比較鯉魚潭潭水與地下井水兩者氧同位素值 ($\delta^{18}O$), 結果顯示具明顯差異, 表示此區潭水

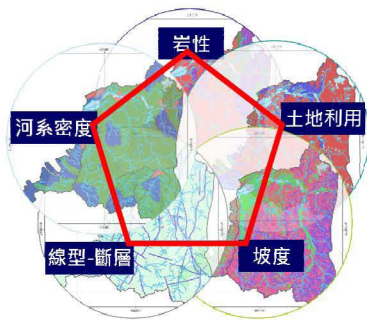


圖 5 山區地下水補注潛勢分析架構

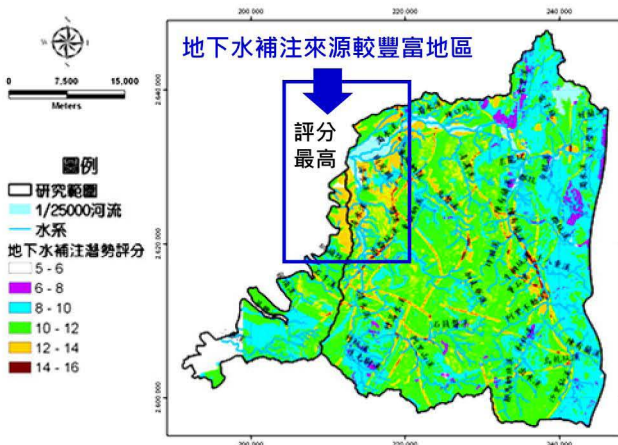


圖 6 濁水溪中游地下水補注潛能分布

式中 S_R 為電阻訊號特性指數； S_G 為伽瑪射線訊號特性指數； S_V 為聲波波速訊號； C_1 為飽和層水力阻抗係數因子； C_2 為地下水位變化因子。圖 7 為濁水溪中上游山區之地下水水質脆弱性評估成果，成果顯示南投縣仁愛鄉親愛村、南投縣水里鄉永興村以及雲林縣古坑鄉樟湖村等區域，含水層受汙染物影響的可能性較高，建議需優先進行保護。

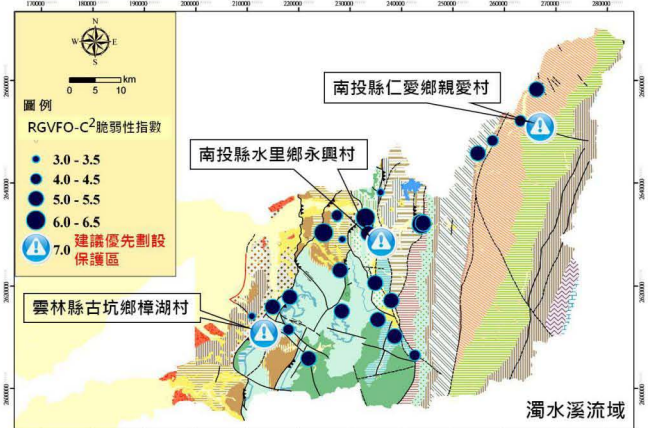


圖 7 濁水溪中上游山區 RGVFO-C² 成果

(四) 山區地下水水質脆弱性評估技術

為了彰顯地下水系統的內在水文地質特性，並萃取不同評估模式的建構概念，本研究從現地鑽孔調查與監測資料提出較能反映山區裂隙岩層現狀的地下水水質脆弱性指數 RGVFO-C²。該指數的組成必須仰賴的工作項目包括基本井下探測、孔內影像判釋、含水層水力試驗與長期地下水位觀測記錄，並藉由定量分析來建構七項因子，包括電阻訊號 (Resistivity Log)、伽瑪射線訊號 (Gamma Ray Log)、聲波速度訊號 (Acoustic Velocity Log)、不連續面出現頻率 (Frequency of Discontinuities)、開口裂隙比例 (Ratio of Open Fractures)、水力阻抗係數 (Hydraulic Resistance)、以及地下水位變化 (Changes in Piezometric Level)，可表示如下：

$$RGVFO-C^2 = S_R + S_G + S_V + C_1 + C_2 \quad (1)$$

(五) 地表與地下水互制分析

地表與地下水互制行為會受地形、降雨、逕流、入滲、補注、蒸散及截留、含水層材料與型態等因子影響，整個循環過程十分複雜。然而為了瞭解地下水資源，首要工作必須對於地表與地下水間之互動資訊確切的掌握。地表與地下水之互制主要有兩種方式，地下水透過河床流至河川 (Gaining Stream) 以及河川水經由入滲至地下水 (Losing Stream)。透過分析地表與地下水之互制行為，才能對含水層的補排狀態及其出水量作正確的評估。因此，本研究使用加拿大滑鐵盧大學發展的三維地下水數值程式 HydroGeoSphere，分析地表水與地下水之互制情形，以掌握山區地下水資源。

本研究選取合歡山武嶺小集水區為研究區域 (如圖 8)，武嶺小集水區受地形與坡度之影

響，降雨量較為豐富，降水易沿著坡面流入河川。HydroGeoSphere 由降雨量開始分析，當模式分析開始至穩態後，河道將會由網格不規則表面根據地表高程與水位高程之相對高差比較而生成。根據本研究計算出地下水補注量為 1.34 百萬噸/年，占總降雨量 4.32 百萬噸/年的 31%，與台灣長年平均穩定地下水補注量等比值圖顯示武嶺地區補注量占降雨量之 30% 至 40% 之間（經濟部水利署，2003），其結果顯相近。

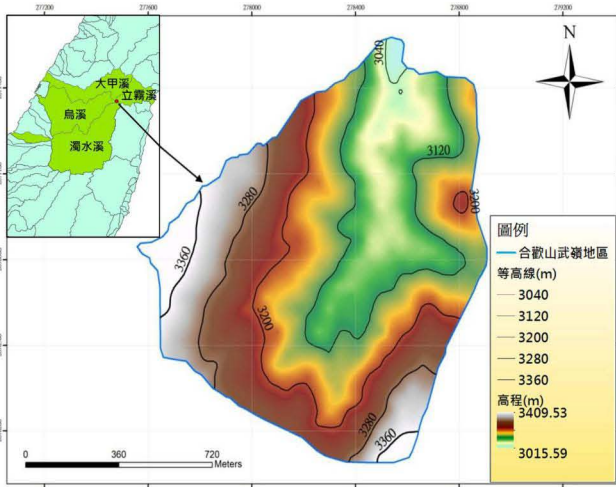


圖 8 武嶺小集水區研究區域分布圖

(六) 山區地下水動態觀測分析與評估

本研究首先利用自然環境因子分析建立地下水水位靜態之變動潛勢，依其影響水位變動潛勢高低劃分，再藉由實際地下水水位動態監測資料之回饋，雙向進行山區地下水動態行為之探討，藉以瞭解影響山區地下水水位變動之成因與類型，以提供建構山區地下水流場及地下水補注分析之用。研究中考量之影響因子包括高程、水系密度、坡度、土地利用、岩性、地下水深度、岩屑層（Regolith）厚度、孔隙率、以及含水層之透水係數等，並分類為地文因子、地質因子、水文地質因子等；本研究利用地理資訊系統 ArcGIS 空間分析模組，將各站井位置所對應之影響因子評分分數擷取出來，建構影響因子評分分數矩陣（26×8），再分別將豐枯水期之水位變動值當

作已知值（8×1），即可以反矩陣方式推估各因子之權重（Sabes, 2001），可表示如下式。

$$[P]_{26 \times 8} \times [W]_{8 \times 1} = [\Delta h]_{26 \times 1} \quad (2)$$

式中 [P] 為各站井位置所對應之影響因子評分分數；[W] 為欲推估之權重值；[Δh] 為實際水位變動值。由於 [P] 並非正方形矩陣，故以 Pseudo-inverse 推估權重係數（Sabes, 2001）。本研究於濁水溪中游區域依豐枯水期影響因子評分分數與權重加乘計算後，可獲得地下水水位變動潛勢高低分布，成果如圖 9 所示。若依照河川集水區分布，則可劃分成不同子區域，分數愈高表示地下水水位變動潛勢愈高，變動潛勢較高的區域顯示為濁水溪本流區域、清水溪上游靠近陳有蘭溪區域以及陳有蘭溪下游。

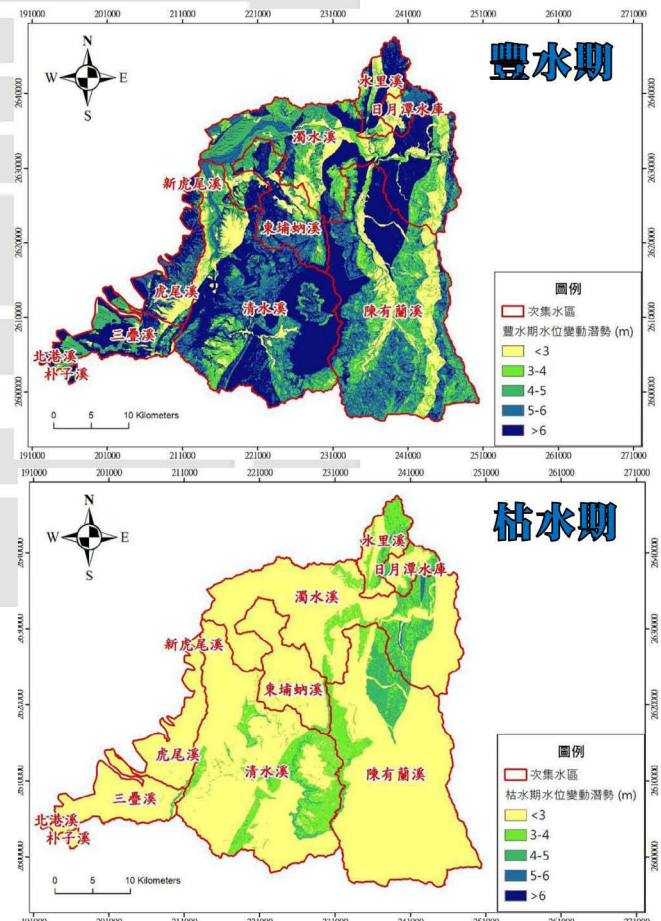


圖 9 濁水溪中游地下水水位變動潛勢分布圖

(七) 山區地下水分析模式與潛勢評估

地質構造對地下水流動特性往往扮演主宰角色，在山區地下水資源開發應是相當重要的一環，過去研究常以多孔隙介質 (Porous Media) 或裂隙岩體 (Fractured Rock Mass) 的概念來建構分析模型，而因山區地質環境複雜，若以單一模型來分析與探討，其結果較無法完全真實展現地質構造對地下水流動的影響，且因山區地下水資源主要蓄含於表層的岩屑層及與其相互連通之裂隙基岩層區域，故在模式設定上，採用兩種不同的分析模型並將之結合為一複合式的分析概念模型，其中將岩屑層及裂隙基岩層 (Fractured Bedrock) 分別以等效孔隙介質模型 (Equivalent Porous Medium, EPM) 及離散裂隙網路模型 (Discrete Fracture Network, DFN) 來建構複合分析模式 (Hybrid Approach)。本研究利用美國 Golder Associates 所發展的 FracMan 程式建構研究區之等效孔隙介質 (EPM) 與離散裂隙網路 (DFN) 之複合模式 (Hybrid EPM/DFN Model)。

經相關資料蒐集與現地調查後，本研究選定位於烏溪流域之地利斷層區為研究區，透過鑽孔岩心資料、水文地質調查成果及研究區之地表露頭調查成果來建立模式所需之基本輸入參數，主要探討地利斷層區之地下水孔隙蘊含量及地利斷層對研究區地下水流路徑之影響，模型如圖 10 所示，可推估地利斷層區淺層之地下水潛勢蘊含量為 14.9 百萬噸，及地利斷層應具有透水潛能且是區域優勢水流路徑之地質構造。

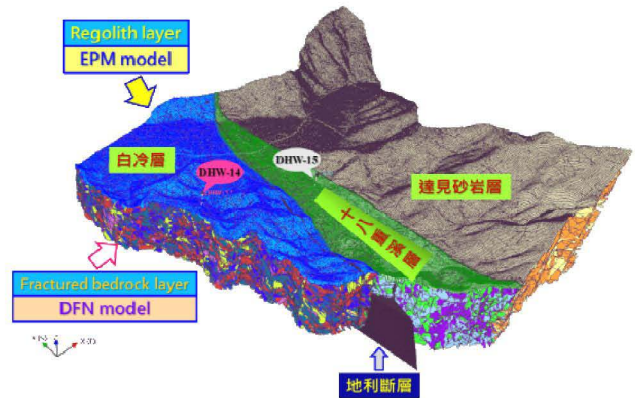


圖 10 地利斷層區裂隙岩體層狀複合模型

三、結 論

本研究透過調查技術整合、分析模式研發與評估方法創新三個層面建構出一套具系統性、可行性及應用性之山區水資源調查與評估技術，可應用至政府當前與未來將持續面臨到因氣候變遷效應所引致的缺水問題，將可協助政府落實「黃金十年，國家願景」計畫中的水資源保育、利用及環境永續的政策目標。

本研究建立完整廣域尺度的調查分析與評估技術，並初步掌握山區特有的水文地質特性，為能細緻化的詮釋中、小尺度水文地質特性，後續將以建置與規劃適當試驗井場，結合國外先進調查技術與長期監測資料來精進與提升調查成果之實用性與準確性為目標，以解決水資源供需問題。

謝 誌

本研究承蒙經濟部中央地質調查所資料提供以及地工中心水文地質調查組全體同仁全力投入，謹此致謝。

中興社研發叢書及電腦程式銷售

中興工程顧問社已發行研發、編譯叢書 297 種及電腦程式 23 套，多屬規劃、設計、施工、管理等方面之工程技術，其叢書及程式目錄、售價、摘要、申購表、繳款方式及信用卡繳費單等，皆已上「中興工程顧問社」之網站 www.sinotech.org.tw，歡迎上網查閱選購；若需進一步查詢請電話或傳真至電話：(02)8791-9198 轉分機 473，或傳真：(02)8791-2198