



臺灣山區水文地質特性以及 地下水資源分布概況

李振誥／國立成功大學資源工程學系 特聘教授

林宏奕、龔文瑞／國立成功大學大地資源研究中心 研究員

台灣地處亞熱帶季風區，加上地形陡峭多山，造就豐枯期鮮明之氣候，受迎風面與地形之影響，由北到南豐枯條件差異甚大，豐枯季降雨比例由北部 3：1 至中部 7：3 至南部 9：1，如此懸殊的降雨分配造成全台水資源分配的差異，也提升水資源供給的難度。地下水與地面水過去即扮演台灣地區主要水資源供應之角色，水庫供水、地面引水與地下水抽用供應台灣主要水資源需求。以 2021 年度上半年大旱為例，地面水供應受氣候影響急遽下降，地下水遂成無水可用時唯一緊急救援水源（海淡、再生水還待長期規劃），枯水季時期地面水量銳減，則是近年水資源窘迫之主要原因。而台灣豐枯期降雨差異顯著，枯水季降雨稀少，而枯水季地面水量之來源則為上游山區蓄存地下水流，顯示地面水量與山區地下水息息相關，加上平原地下水在供水系統原本就佔有相當比例，山區地下水同樣為平原區補注來源之一，如此顯見山區地下水資源對台灣之重要性。

前言

因應平原區地下水資源之保育及開發，經濟部水利署與經濟部中央地質調查所共同推動「臺灣地區地下水觀測網整體計畫（81～97 年）」以臺灣九大地水分區為主要標的進行水文地質測勘與地下水位觀測資料庫建置，成為臺灣地區地下水管理以及研究之重要依據。而台灣山區佔全島面積的三分之二，遠大於平原區之面積，過去研究亦顯示其為台灣平原地區地下水資源的重要補注來源區域，為了解本島地區山區地下水賦存量、滲流通道以及監測其變動，經濟部中央地質調查所遂推動「臺灣山區地下水資源調查研究整體計畫」，用以瞭解台灣山區地下水概況並設立觀測網以掌握山區地下水動態，該工作進程包括三期，分別為臺灣中段山區（99～102 年）、臺灣南段山區（103～106 年）以及臺灣北段山區（107～110 年）（圖 1）。工作中針對山區地下水資源進行基本調查、匯整分析，建構水文地質架構及概念模式等重要工作，顯示對整體水資源之評估概念，已由傳統地下水分區延伸至集水區範圍，藉由整體計畫的

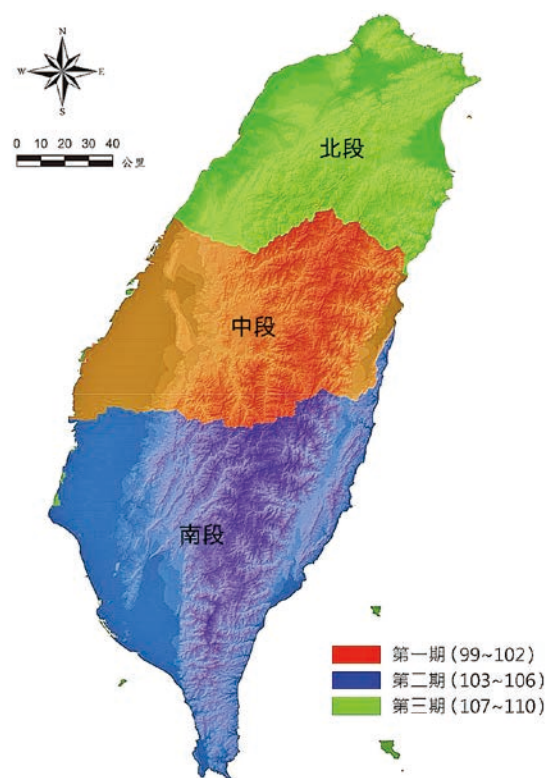


圖 1 台灣山區地下水資源整體計畫調查分區圖

推動，可釐定台灣山區之水文地質架構，據以評估地下水資源的蘊藏量，進一步掌握其與平原區的地下水系統的交互關係，並將完成之相關成果彙整於山區水文地質資料庫，分析山區地下水資源取用潛勢、區位及方式，研擬永續經營策略。

台灣山區水文地質架構

藉由前述「台灣山區地下水資源調查與評估」整體計畫，前後為期十二年至今，針對台灣山區水文地質進行鑽探、觀測、地球物理、地球化學以及應用各項分析技術，已對於架構台灣山區地下水水文地質架構進行探查與分析，瞭解山區地下涵水層特性以及降雨、補注、流出概況。

過去文獻指出，山區地層構造相對簡單，覆蓋在山區新鮮基岩之上的岩石碎屑層，即所謂的岩屑層（Regolith），主要由地底下的基岩經過風化、侵蝕作用而形成，以及經由重力、流水、風、冰河等介質搬運及堆積而來。由於岩屑層與基岩（Bedrock）的邊界乃許多地下水文現象與生物作用的重要自然界限，根據圖 2 所示，山區水文地質分層可視為岩屑層與基岩之劃分。岩屑層厚度即為地表至新鮮岩盤（Bedrock）頂部的厚度，包括有：土壤、回填物、沖積層、崩積層、殘餘土（Saprolite）與破碎底岩（Saprock）等。

最直接獲得岩屑層厚度之方法為現場鑽探，然山區鑽探工作不易且成本甚高，資料點甚為有限，故「台灣山區地下水資源調查與評估」利用岩心資料與地電

阻探測結果推估岩屑層厚度，可於山區範圍內獲得較多岩屑層後度資料，然此法同樣受限於鑽探點位數量與地電阻探測位置，欲獲得廣域之岩屑層厚度，則需進一步之推估方法。岩屑層空間分布推估之方法，一般而言有 3 種方法：(1) 物理模式：利用物理性質如風化、侵蝕與堆積速率以及基岩的性質推估；(2) 經驗統計模式：應用統計方法利用關聯變數來推估；(3) 資料點內插。而經由多年資料分析與驗證，「經驗統計模式」於台灣山區可獲得較佳成果。利用資料點位岩屑層厚度與地表地形相關因子（坡度、曲率、地形濕度指數、距水系距離等）及土地利用建立關聯模型，並利用經驗統計方法建立廣域岩屑層等厚度線。

過去文獻指出影響岩屑層厚度之因素包括坡度、土地利用、地形曲率、母岩性質、風化速率、氣候、植被、上坡面集水面積及岩性等因素^[2]。而推估岩屑層厚度之方法大致可分為物理模式（physically-based）、經驗統計模式（empirico-statistical from environmental correlates）及觀測點內插（interpolation from point samples）等 3 種方法。多元迴歸分析之「逐步迴歸法」是目前運用甚廣之複迴歸分析法之一，此法結合順向選擇法以及反向淘汰法兩種程序之優點，同時也是多元迴歸分析中使用最頻繁的一項預測變項方法，使用多元迴歸法搭配台灣山區資料，可建立適用之迴歸模式。台灣山區分析成果指出，影響岩屑層最主要因素為岩性以及坡度二項因子，控制岩屑層厚度主要因素為基岩的性質以及地體構造，不同的岩性其岩屑

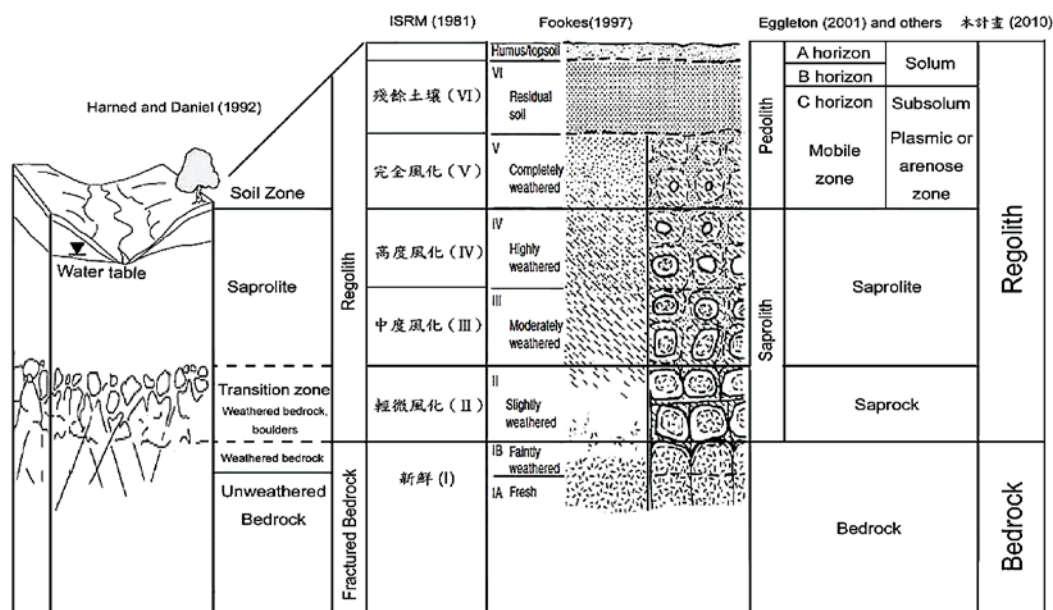


圖 2 岩屑層示意圖（修改自 Roach^[1]）

層厚度即有很大的變異性。而在相同岩性中，岩屑層之空間變異則主要受地形因素及地表覆蓋影響。

分析成果顯示除大型山間盆地、主要河川河谷堆積範圍外，山區岩屑層厚度約為 60 公尺以下，地形越陡則岩屑層越薄，最低僅約 3 公尺厚度。配合山區鑽探與地下水觀測成果，以及前述山區分層概念，顯示山區地下水系統單純，主要為單層非承壓含水層結構，第一含水層厚度直接影響山區地下水之利用與蓄存。

山區地下水流動特性

由前述山區調查與評估成果，顯示山區水文地質架構相對平原區單純，山區岩盤深度淺且透水性不佳，岩盤以上僅有厚度數公尺至數十公尺岩屑層形成單一非侷限含水層，地下水受重力影響匯於河谷低地，上游地下水流動匯集蓄存於河床沖積層中，受陡峭地形影響出滲為河川水向下游流動，直至地形趨緩河段河川沖積物堆積，沖積層範圍增加、增厚，河川水因豐枯水期水量變化以及沖積物顆粒漸細下，於河段中發生河川水與河床地下水出入滲之混合情況，最終穿越麓山帶形成沖積平原。

由前述架構顯示，由於山區含水層蓄存有限且地形變化甚大，山區地下水與地面水系統關聯性甚高且交換頻繁，不同區域之地下水流動特性不同，依坡度、岩屑層厚度以及地下水－河川水關係，可沿河川剖面由上游往下將其分為三段如圖 3 概念圖所示，其地下水流動特性以及概念整理如下：

1. 山區地下水流出段：本段位於最上游河段，地形陡峭而岩屑層厚度甚薄，受地形影響地下水位年變動幅度相對較大，地下水於濕季降雨補注後於枯水季持續釋出，河谷沖積層由於搬運作用顯著，同樣較薄且沉積顆粒以礫石為主，粒徑大透水性佳，河床地下水穩定向下游流動，僅於河道坡度變化處有局部地面水－地下水交換發生，然而其規模甚小。
2. 山區河川水與地下水交換帶：受地形趨緩影響，本段河谷坡度較為平緩，沉積物顆粒漸細且沖積範圍較廣，河床沉積物仍以礫石與砂為主，然因枯水季河川流量降低，河床質中偶有薄層細沙或泥，造成垂向透係數低於水平透水性之異向性情況，在河川水量開始消退之枯水季初期，由於河床水平透係數佳故地下水持續向下游流動，然河川水量水位

下降以致於河川入滲地下水量減少導致河床地下水位下降，河川補注量雖可能小於地下水流失量，然仍為河川水補注地下水狀態，持續至枯水季末時可能形成河床地下水位甚低於河川水位之懸浮河現象；而豐水季來臨時，降雨帶來之充沛河川水量除增加河川水位外，大量河川水造成河床沖刷故河川水迅速補注地下水，此時河川水量甚豐，然由於河床地下水位同樣甚高，多形成河床水流出補注河川水狀態如圖 4。

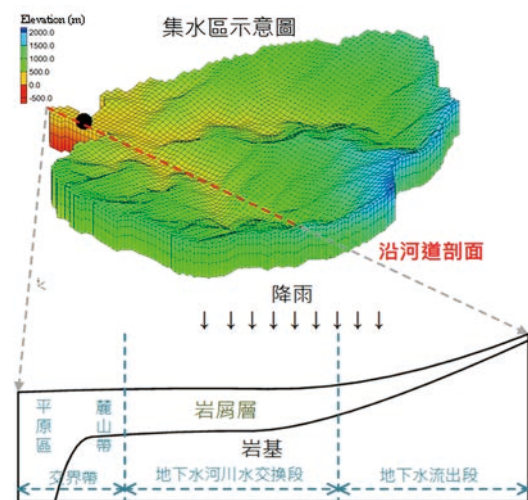


圖 3 山區水文地質概念分區圖

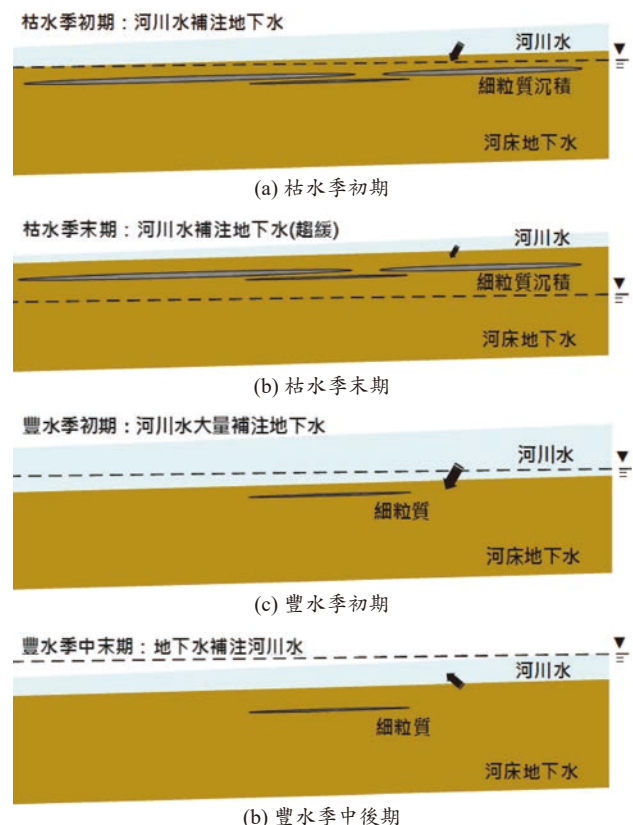


圖 4 豐枯季下河川交換段示意圖

3. 山區與平原區交界帶：山區河系穿越麓山帶後，由於坡度驟減形成沖積扇平原，在山區與平原區交界帶區域，最主要差異在於岩盤深度變化，麓山帶區域內岩盤深度多約數十公尺以內，麓山帶以下平原岩盤深度則為數百公尺以上，由於地形趨緩形成沖積扇，而沖積扇扇頂由於沉積顆粒較大，透水性佳以致於河川水於此區域內入滲於含水層中。此交界帶中，若麓山帶岩盤較淺，或是地質構造影響，以致於河床地下水通水斷面減少，則上游形成盆地地形，上游河段地下水位甚淺，地下水於麓山帶區域出滲至河川中，通過麓山帶後則入滲於沖積扇扇頂如名竹盆地、台中盆地；若岩盤深度與上述山區交換段相當，則自中段至麓山帶交界主要皆為河川水補注地下水狀態如荖濃溪、隘寮溪、林邊溪等。

由上述山區概念分區可知，主要水系位置即為地下水與地面水匯流區域，加以河川堆積層較厚，蓄存體積足夠，應為地下水取用之優良場址。

山區地下水資源潛能區

山區資料甚為有限，要完整進行地下水或伏流水場址調查評估工作往往費時且所需不貲，利用潛能指標系統可針對大區域快速篩選出相對高潛能區域，合理挑選可能場址並縮小調查評估區位，節省時間經費以提高水資源評估效率。

地下水是自然水循環中一部份，受自然補注將會再生而提供利用，故合適之地下水利用場址，並不決定於蓄存量多寡或是區域大小，而是開發利用後易受降雨、河川、其他地下水補注而恢復水位區域，即為適宜之地下水開發場址，建置山區地下水資源開發潛能評估系統，目的在比較山區各區域間地下含水層可供地下水開發之潛力。在資源永續利用考量下，地下水資源開發須對區域地下水環境降低衝擊，並可維持於預設之可容許改變限制下，考慮在自然條件下，經過人為開發後，含水層水位恢復之能力，視為其地下水開發潛能，當此項指標越高時，代表其含水層恢復之能力越高，即經過地下水開發造成之衝擊越低，且代表其補注效率較佳，可能成為較優良之地下水可開發區域。

山區地下水資源開發潛能評估系統參考 Foster^[3] 架構之地下水脆弱度指標 (groundwater vulnerability)，考慮補注源指標 (groundwater occurrence rating)、地表

入滲指標 (overlying infiltration rating) 以及地下水深度指標 (depth to water rating)，合稱 GOD 指標。其中區域地下水補注能力，將影響地下水開發後含水層之自我恢復能力，影響地表入滲包括氣象因子如降雨分布，以及地表提供入滲之能力 (地下水補注潛能)，而地下水位深度代表入滲水補注至含水層之難易程度。本潛能指標考量單一自由含水層架構，故地下水補注來源為降雨入滲，且補注潛能因子是以台灣山區條件進行篩選，依據 GOD 評估模型之概念，將其三項指標轉化為：

1. 補注源指標 (Groundwater Occurrence Rating)

年補注深度代表在降雨事件發生下，年度補注量之總和，包含考慮不同區域氣象條件差異以及地質、地形等因素，年補注深度代表在自然不同區域每年進入含水層之補注量，故選定為補注源指標。補注量之評估則基於水平衡分量之假設，利用河川基流分析法求得地下水補注率，並配合降雨量資料，計算山區地下水補注量分布，而由過去工作成果顯示，由於分析區域包含山區區域部份平原區，受地形影響導致降雨量常呈現數倍差距，為免單一因子成果之偏態分布影響整體開發潛能，故補注源指標之計算方式，是將各網格之入滲深度取對數後，除以分析區內最大補注深度之對數值。

2. 地表入滲潛能指標 (Overlying Infiltration Rating)

地下水補注潛能代表雨水穿過地表補注至含水層之能力，當補注潛能越高時，代表降雨越容易補注至含水層，當地下水開發後，越容易因為補注而恢復水位，故本分析架構採用山區地下水補注潛能 (Yeh *et al.*^[4]) 來代表地表入滲指標，依各網格之補注潛能成果，除以分析區內所有網格補注潛能之最大值，完成地表入滲指標。

3. 地下水深度指標 (Depth to Water Rating)

地下水位深度 (與地表之距離) 越小，代表補注水越容易進入地下含水層中，此外，地下水位資料顯示，離水系距離越近，通常其地下水位深度越小，故地下水位深度與含水層在開發地下水資源後之恢復能力有關，本項分析利用「台灣山區地下水資源調查與評估」計畫之山區地下水位資料以及既有地下水觀測水位，進行地下水深度指標設定。

依上述三項主要評估因子邏輯，可建立山區地下水開發潛能評估架構，並參考 GOD 指標評估方法，將三項因子轉化為 0 ~ 1 之數值，利用指標互乘之方法，以

評估區域可開發潛能（圖 5），此方法可避免採用因子權重評估方式所造成之主觀判斷因素，而正確依照其相互大小關係評定出計畫區可開發潛能分布。

上述整體工作「台灣山區地下水資源調查與評估」已完成全台灣山區地下水開發潛能評估成果整合如圖 6 所

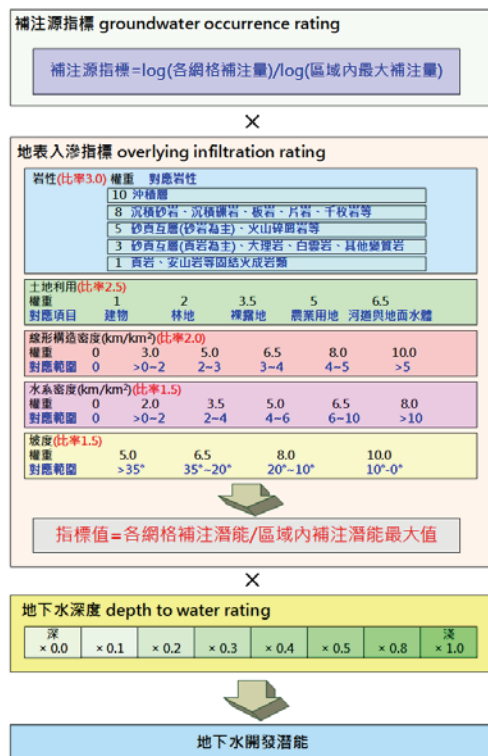


圖 5 山區地下水資源開發潛能評估架構

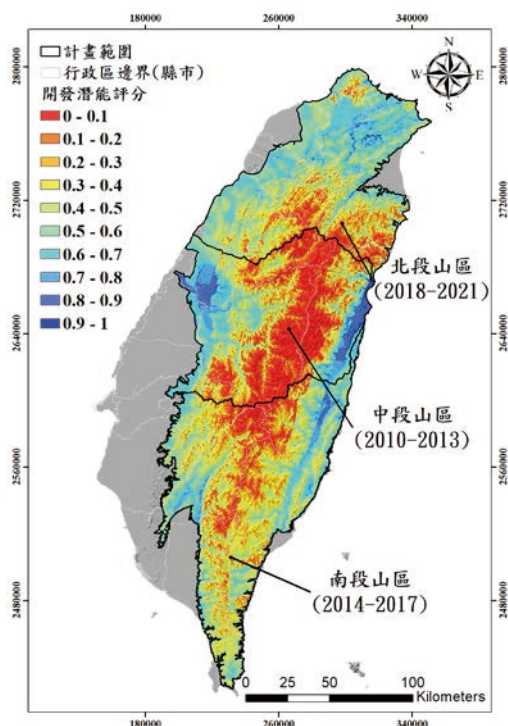


圖 6 全台灣山區範圍地下水開發潛能評分分布圖

示，圖中可見，自然河川系統本就為地面水與地下水匯集、交換區位，尤其主要河系河谷沖積範圍、山間盆地皆為地下水開發潛能相對較高位置，其中規模最大且潛能最高為台中盆地與花東縱谷區段，其餘則分布於主要河系河谷範圍中。由於山區資料甚為有限，要完整進行地下水場址調查評估工作費時且成本甚高，利用潛能指標系統可針對分析區域快速完成潛能評估以篩選出相對高潛能區域，可供不同尺度下選址參考，合理挑選可能場址並縮小調查評估區位，整體而言可供大區域水資源規劃參考運用，局部區域則可篩選相對較高潛能區域，縮小範圍後投入調查以節省時間經費，提高水資源取用評估效率，是為本工作之重要貢獻。

結語

在整體計畫諸多團隊的努力下，台灣山區水文地質工作已留下了相當的背景資料以及調查、分析成果，對於山區地下水的特性、賦存以及動態，都有更深入的瞭解，然對於台灣整體地下水資源的運用以及保育，也留下了多項課題，相信未來山區地下水在整體水資源架構上將扮演更重要的角色，包括局部區域的供水利用、抗旱備援用水、水資源枯旱預警等，都是相當重要的延伸應用，在期待山區地下水工作開花結果的同時，也歡迎有興趣的人員加入，一同為台灣的水資源環境努力，以期台灣水資源永續與安全之未來。

參考文獻

1. Roach (2008), Explanatory notes for the canbelego 1:100,000 regolith-landform map new south wales, CRCIeme open file report 238.
2. Minasny, B. and McBratney, A.B. (2001). A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development: II. A two-dimensional model. *Geoderma* 103, 161-179.
3. Foster, S. (1987), Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H.G., Eds., *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, Committee on Hydrological Research, The Hague, 69-86.
4. Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, K.C., and Chang, P.H. (2009), GIS for the assessment of groundwater recharge potential zone. *Environmental Geology* 58, 185-195.
5. 經濟部中央地質調查所 (2013)，臺灣中段山區地下水資源調查與評估（總報告）。
6. 經濟部中央地質調查所 (2017)，臺灣南段山區地下水資源調查與評估（總報告）。
7. 經濟部中央地質調查所 (2021)，臺灣北段山區地下水資源調查與評估（總報告）。