

流域岩層水文地質單元調查技術

林榮潤* 許世孟** 林燕初*** 黃智昭****

摘要

台灣的河川流域發源自山區，山區的水文地質架構主要由岩屑層與裂隙岩盤所組成，其中岩屑層有利於山區地下水的蘊藏，如同天然的「綠色地毯」，而裂隙發達的岩層則提供地下水的通道，亦有可能富含地下水。在流域集水區的經營與管理上，因缺乏完善的地下岩層資料，著實影響後續的評估與政策的推動。因此，整體流域的相關水文地質調查工作，以及水文地質架構的建立是必要的。

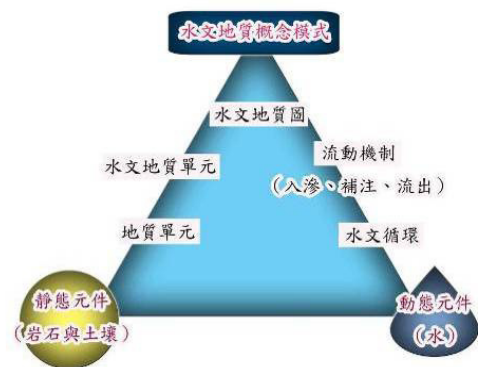
透過孔內井測試驗與封塞水力試驗，以獲取水文地質參數，除可降低水文地質的不確定性外，亦提升了後續模式在分析上之準確度；此外，以鑽孔岩心判釋所建置的地質單元為基本架構，整合水文地質參數，進而劃分流域的水文地質單元，並建置其基本資料，以反應現地的水文地質特性，有助於後續的相關研究、分析與模擬之參考。

關鍵字：水文地質架構、水文地質單元、地質單元、流域集水區、水文地質參數

一、前言

隨著台灣經濟與人口的成長，用水需求量亦大幅增加；此外，全球氣候的變遷影響各地水資源的分布，使得台灣地區飽受缺水之苦。聯合國教科文組織（UNESCO）指出，「水」將是 21 世紀重要的議題之一，世界各地國家為了讓水資源能永續利用與發展，積極地尋找替代性的水資源，以達到不同水源多系統聯合經營運用。過去，台灣多著重在流域下游沖積扇的調查與研究，而台灣流域上游集水區的地形、地貌與地質條件有利於地下水資源的補注與儲存，其地下水蘊藏豐沛的區域可作為地下水開發的場址，故整體流域地下水資源的調查、評估、保育與開發等工作是重要的課題。

在地下水資源的評估與管理方面，必須先瞭解區域的水文地質架構，以提供地下水模式的模擬與分析。如圖 1 可知，水文地質架構之基本與重要的靜態元件為地質單元與水文地質單元。因此，本文將說明如何透過水文地質的調查作業，以建立流域岩層水文地質單元與其基本性質，並提供相關案例與應用以供後續研究之參考。



修改自 Winkler *et al.* (2003)

圖 1 水文地質概念模式之組成元件

* 中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員
** 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質調查組組長
*** 經濟部中央地質調查所資源地質組薦任技士
**** 經濟部中央地質調查所資源地質組科長

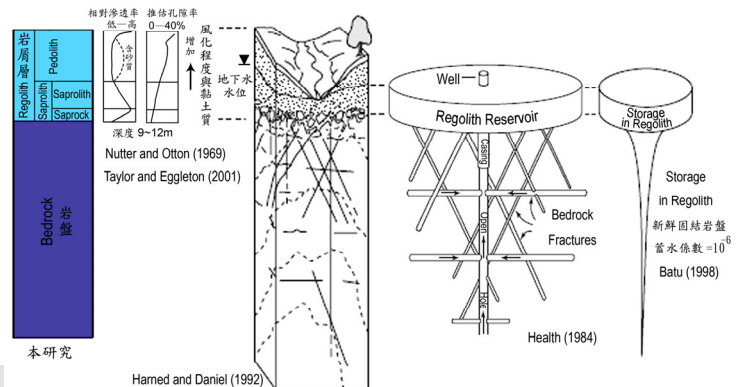
二、流域水文地質架構

台灣的河川流域發源自山區，因此水文地質架構與平原區有所不同。由於山區的基盤由固結岩層所組成，表層可能覆蓋一些未固結的地質材料。Merrill (1897) 在研究岩盤以上的地質中，隨深度變化有不同的地質材料分布，該地質材料乃由現地母岩風化作用下的產物，不論是自然或現地堆積的未固結岩層，皆屬於 Regolith，而 Regolith 字源來自希臘文 $\rho\epsilon\gamma\omicron\varsigma$ (Rhegos)，意指 Blanket (覆蓋) 與 Lithos (石頭)，國內將 Regolith 多翻譯為岩屑層或風化層，本文以岩屑層代表之。

由圖 2 可知，Eggleton (2001) 與 Goudie (2006) 將固結新鮮的岩石定義為岩盤，其餘覆蓋於岩盤以上的部分則定義為岩屑層。Harned 與 Daniel (1992) 提出美國北卡州山區與麓山帶的地下水系統架構模型，其中岩屑層包含土壤、岩屑與風化團塊狀岩盤 (Weathered Bedrock, Boulders) 等，而風化團塊狀岩盤另一個劃分名稱為 Transition Zone，包含部分風化岩石與高度破碎的裂隙岩石 (Highly Fracture Rock)，且保留該岩石的主要孔隙率與次生構造等，使得該區段的地下水流通性質較佳，而岩屑層下層則為裂隙岩盤 (Fractured Bedrock)。

水力特性方面，Nutter、Otton (1969) 與 Taylor、Eggleton (2001)，提出岩屑層各分層滲透率與孔隙率的垂直深度變化特性，並認為岩屑層厚度約可達 9~12 公尺。岩屑層上層因風化程度較高，孔隙率則較高，若含砂質成分較高，其相對滲透率亦較高，而腐土岩 (Saprolite) 與風化岩塊 (Saprock) 因岩體風化而成團塊，故相對滲透率則較高。Health (1984) 提出岩屑層與岩盤的地下水流通與儲水特性，其岩屑層的蓄水能力較佳，而 Batu (1998) 則提出新鮮岩盤的蓄水係數約為 10^{-6} ，故愈往深層的岩盤蓄水能力可能較差，然而地下水可藉由發達的裂隙所控制而流通。

由上述相關文獻分析可知，山區水文地質架構 (圖 2) 主要可分為岩屑層 (Regolith) 與裂隙岩盤 (Fractured Bedrock)，其中岩屑層有利於山區地下水的蘊藏，如同天然的「綠色地毯」，而裂隙發達的岩層則提供地下水的通道，亦有可能富含地下水。



修改自 Nutter (1969), Daniel (1992), Health (1984) 等人

圖 2 流域上游集水區水文地質架構圖

三、調查技術介紹

中興工程顧問社 (以下簡稱中興社) 致力於水文地質調查及分析技術發展，且已趨近成熟穩定的階段，歷年來已有相當豐富的調查研究與應用成果。透過中興社的水文地質調查技術，針對流域上游集水區為主，衍生另一套流域岩層水文地質單元調查技術，以建置流域的水文地質架構，其相關的調查工作有：(1) 地表地質調查與鑽探布孔規劃、(2) 水文地質鑽探與岩心紀錄、(3) 室內岩心基本物性試驗，以及 (4) 孔內井測與封塞水力試驗等。由於本調查技術著重在水文地質單元的建立，上述前兩項的調查重點方向有別於其他的水文地質調查，且該成果會影響其水文地質單元的劃分。茲以下分別詳細說明之：

(一) 地表地質調查與鑽探布孔規劃

地表地質調查可瞭解調查區域的地質概況，以提供鑽探布孔規劃與後續的水文地質單元劃分之參考依據。由於調查目的主要探討岩層的水文

地質特性，故除了一般的露頭（Outcrop）地表地質特性調查，亦包含其裂隙特性與滲水狀況，以及相關的水文特性調查，如鄰近的地表逕流、泉水位置與土地使用等，以作為初步評估鑽探場址的可行性。為符合調查研究之目的與最佳化的效益，本調查鑽孔布置原則如下：

1. 鑽孔布置應以公有地為主，且需考量交通路況與動線、鑽探作業安全性，以及用地取得可行性較高等區域。
2. 根據地調所出版之地質圖（比例尺為 1/50000）作為底圖，依地層與地質構造所劃分之地質單元進行布孔，並將調查範圍內依流域集水區進行鑽孔布置，其各高程分布皆須考量。
3. 調查範圍內主要與分布面積較廣的地層至少布置一孔，若鑽孔數量配置仍足夠時，其涵蓋面積分布較廣者或特殊地質構造區域，可視執行之可行性，予以增設之。
4. 為提升布孔之最佳效益，以獲取較多的水文地質單元的參數，其場址位置選擇可能獲得較多的地層單元之區域為主。
5. 若有特殊且重要的斷層構造區域，其上、下盤的地層至少各布置 1 處鑽孔，以利地下水流動概念模式建立。
6. 根據現地勘查或地下水資源潛勢分析，進行場址選則評估，以選定富含地下水之高潛勢區。
7. 考量計畫範圍內既有鑽孔位置與相關試驗資料，以及鄰近的 GPS 位移站、河川流量站、雨量站、河川與地下水質監測站、溫泉露頭等，作為爾後延伸性研究之應用。

（二）水文地質鑽探與岩心紀錄

1. 水文地質鑽探

水文地質鑽探（圖 3）主要以 HQ 規格之自轉式鑽機，配合劈管取樣器、薄管取樣器及岩心取樣器採樣，運用水洗旋轉式鑽進全程取樣法進行作業，其所取得之岩心依序排放於岩心箱中，並拍攝高解析度彩色照片以茲建檔。在鑽探過程中，相關試驗有：土層於每隔 1.5m 或地層變化

處進行標準貫入試驗（S.P.T. 依照 ASTM D1586 規範）求得土壤 N 值，以判定土壤之軟弱緊密程度，而在具代表性的區段採取土樣與岩樣，以供室內土壤及岩石物理性質和力學試驗；此外，各區段應記錄鑽探的迴水率，以大致瞭解該地質的破碎或軟弱泥質的滲漏情形，亦可在特殊區段施作呂琴（Lugeon）試驗以瞭解該區段的透水性。



圖 3 水文地質鑽探

2. 岩心紀錄

經由上述水文地質鑽探取樣作業所鑽取之未固結及固結土岩材料，乃採用一定標準化的鑑定方式，以得到具嚴謹且可信度較高的成果，其中未固結土岩材料係根據地質調查所「未固結沉積物之分類及地質鑽探岩心紀錄規範」；若屬固結岩層岩心，則依「工程地質探勘資料庫地質鑽探岩心紀錄規範」為原則進行描述。

本研究岩心紀錄（圖 4），除了針對岩層的岩性方面作判釋，弱面的特性亦為重要的記錄項目，例如：原生構造與次生構造、以及裂隙數量等；此外，鑽孔的地質單元分層為水文地質單元的基本架構，故在岩心判釋上應詳盡記錄之（20 公分記錄一筆為原則），以利後續的分層作業。



圖 4 岩心紀錄工作

3. 岩屑層厚度調查與鑽孔地質單元分層

岩屑層為山區地下水主要蘊藏帶之一，因此岩屑層的厚度調查亦為重要。山區地形與地質的變異性大，使得各地區的岩屑層厚度亦不同，而岩屑層的厚度調查必須先完成鑽孔地質單元的分層作業。本研究鑽孔地質單元分層主要可分為岩屑層（Regolith）與新鮮岩盤（Bedrock），其分界原則主要依據 ISRM（1981）風化等級，若該區段岩心判釋屬於新鮮（I），表示岩質新鮮，無可見岩質風化跡象，或僅在主要不連續面（節理）有輕微氧化鐵銹染變色，則該岩層則屬於新鮮岩盤，其判釋的鑽探深度則為岩屑層與新鮮岩盤的分層界線，其區間即為岩屑層的厚度。

而鑽孔地質單元分層作業程序如下：新鮮岩盤可依據不同產狀的岩石種類劃分出不同的地質單元，如：灰白色細砂岩、灰色中砂岩、砂頁岩互層、板岩、片岩、石英岩等；而岩屑層泛指新鮮岩盤以上地質材料，有輕微風化（II）等級（ISRM, 1981）以上之地質材料，以及人為或自然外力作用下所產生的堆積物，各類別可劃分成不同的地質單元，說明如下：

(1) 土壤層（Soil）

土壤為完全風化（V）與殘留的土壤（VI），可比對土壤分層的 A 至 C 層（Eggletton, 2001）。

(2) 回填物（Backfill）

泛指人為回填的產物，非自然現象所產生的堆積物。

(3) 沖積層（Alluvium）

卵礫石、砂或粘土等地質材料，經由河川搬運與堆積作用而沉積，故淘選度較佳，顆粒度成圓狀，而因成岩作用較不完全，故膠結度較差。

(4) 崩積層（Colluvium）

崩積層為地質材料經由滾動、滑動或崩塌等重力作用，使得大小不同的岩屑與岩塊堆積，故淘選度較差。由於未受河川搬運

作用，其堆積物的顆粒成角粒狀，故與沖積層的沉積特徵不同。

(5) 腐土岩（Saprolite）

Becker（1895）指出，Saprolite 一詞亦來自於希臘文為 σαπρος（Sapros），意指 Putrid（腐敗）與 Lithos（石頭），故岩盤受中度（III）至高度（IV）風化後的產物，有 20% 以上的岩石礦物受風化，而主要岩石結構仍保留。

(6) 風化岩塊（Saprock）

Saprock 為岩盤受輕微（II）風化的產物，其中低於 20% 的岩石礦物受風化，故岩石易形成團塊分布，故稱之風化岩塊。

（三）室內岩心基本物性試驗

鑽探所獲取之岩心除用以進行相關地質描述外，可進行一系列之室內試驗，試驗包括有：土壤與岩石一般物理性試驗、氬氣孔隙率測定、氣體滲透率檢測、雷射粒徑分析試驗、岩象薄片分析及岩石動態彈性參數測定等。試驗所獲取之參數除可用以瞭解研究區域地層所屬岩性、礦物組成、物理及水力特性外，亦可作為後續模式分析、水文地質單元及關聯性建立之重要依據。

（四）孔內井測與封塞水力試驗

台灣受板塊構造作用的影響，區域的地質變化複雜，使得所對應的水文地質特性也隨之不同，透過孔內井測試驗（圖 5）與封塞水力試驗（圖 6），以獲取水文地質參數，除可降低水文地質的不確定性外，亦提升了後續模式在分析上之準確度。試驗項目有：孔內裂隙岩體位態調查、孔內井測調查、孔內波速調查、孔內地下水流速與流向調查，以及封塞水力試驗。調查方式係將各式探測儀置於鑽孔中，並在吊放及拉升過程測錄不同物理訊號來判定地層特性。其探測所得之各項參數結合岩心紀錄，即可作為後續水文地質單元劃分與基本資料的建置。



圖 5 井測試驗



圖 6 封塞水力試驗

四、水文地質單元劃分與資料建置

整合上述的水文地質試驗成果與資料分析，茲以下詳細說明如何建置水文地質單元：

(一) 單元尺度

本調查主要以鑽孔岩心的地質單元分層為基礎，並結合水文地質試驗之成果，透過資料的彙整與分析，進而評比與劃分水文地質單元。

(二) 單元劃分與命名

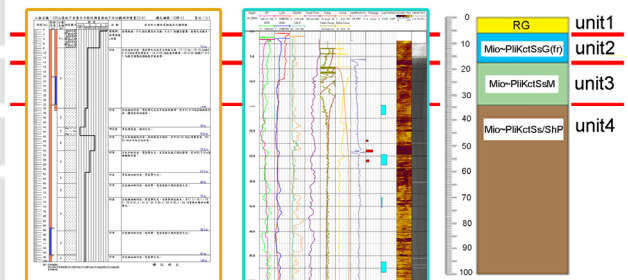
根據前人研究與分析，水文地質單元的劃分需依據調查成果的彙整與分析（圖 7），而各水文地質單元資料建置應包含有：水文地質單元名稱、簡碼、水文地質特性描述與水文地質參數等資料。因此，本文將詳細說明單元劃分與命名：

1. 劃分原則

- (1) 由於水文地質單元主要根據岩層的沉積環境、岩性、以及水文特性，故水文地質單元係以地質單元為基礎，再考量其水文特性。
- (2) 相關地表入滲試驗、地表採樣與鑽探岩心

地質材料分析、井測試驗成果、地表水與地下水水質分析，以及觀測井抽水試驗成果等，皆可輔助水文地質單元劃分之參考依據。

- (3) 岩屑層包含未固結岩層（沖積層、階地與盆地堆積層與土壤層等）、岩盤風化後的岩屑與岩塊（腐土岩與風化岩塊），以及崩積層等，其相對滲透性與蓄水能力較佳，故至少可將其劃分成一個水文地質單元。
- (4) 岩盤方面，根據表 1 可知，岩層的透水係數可劃分不同的含水層性質，其良好的含水層之相對滲透性高，透水係數約大於 10^{-4} (m/s)；較差的含水層之相對滲透性介於之間，透水係數約 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ (m/s)；而極差的含水層之相對滲透性差，透水係數約小於 10^{-9} (m/s)。此不同的含水層特性，可劃分出不同的水文地質單元。



岩心紀錄(地質單元) + 水文地質參數 → 水文地質單元

圖 7 水文地質單元劃分示意圖

表 1 各地質材料與含水層特性表

K (m/s)	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
相對滲透性	高				中				差				
含水層	良好的				較差的				極差的				
未固結地質材料	淘選度良好礫石				砂與礫，或有淘選度良好的砂				極細砂、黏土、或土壤				
未固結基質	-				泥礫				層狀紋理黏土				
固結岩層	高度裂隙岩石				儲油岩層				砂岩				
									新鮮石灰岩 與白雲岩				
									新鮮花崗岩				

修改自 Bear (1972)

2. 命名方式

簡錦樹與林道國 (1990) 建議水文地質單元命名方式可依照：(1) 地下水補注區、(2) 岩性，及 (3) 水文特性。Taylor、Hood 與 Zimmerman (1983) 於美國科羅拉多和沖積盆地

水文地質研究報告中，依據（1）地質年代、（2）地層，及（3）含水層特性，建立相關的水文地質單元，例如：Upper Mesozoic Confining Layers and Aquifers。美國地質調查所在小尺度的水文地質研究報告中，其水文地質單元劃分乃依據各單元的岩性，例如：北卡 Langtree Peninsula 地下水觀測站，其中一個水文地質單元為 Igneous, Felsic Intrusive，簡稱 IFI；而大尺度的研究方面，美國地質調查所（1987）在國家級研究「Water Supply Paper 2294」中，依據不同的集水區等級來進行水文單元的劃分，各單元的名稱應可反應其水文特性，故為掌握區域的水文特性，透過系統分類以（1）Regions、（2）Subregions、（3）Accounting Units，以及（4）Cataloging Unit 來建立單元名稱，其中 Regions 為地形分帶與主要河川集水區名稱，Subregions 為河系，Accounting Units 為水文與地質相關的邊界，而 Cataloging Unit 則為小河系與集水區名稱，例如：California Region, Sacramento, Upper Sacramento, Goose Lake。

由於調查精度的差異，各水文地質單元名稱有所不同，欲呈現流域岩層水文地質單元名稱的特性，本文結合美國地調所不同尺度與系統性的水文地質單元命名原則來建置之，並給予簡稱或代號，以利後續相關研究參考與使用。因此，本研究將流域岩層水文地質單元名稱（圖 8）依序以：（1）地質年代、（2）地層名稱、（3）岩性、（4）含水層特性，以及（5）補充說明等五個階段，來建立水文地質單元名稱。茲以下說明：

（1）地質年代

本研究區域的地質單元主要為新生代的地層，包含始新世至全新世的地層，故中新世（Miocene）簡稱三個字元為 Mio；若介於兩個地質年代，如始新世（Eocene）與漸新世者（Oligocene），則簡稱為 Eoc ~ Oli，依此類推。

（2）地層名稱

各地層簡稱則依據地質圖幅製作標準為

主，例如南莊層簡稱為 Nc。

（3）岩性

未固結岩層主要岩性有土壤、填方、沖積層、崩積層、腐土岩、風化岩塊等岩屑層（Regolith），可將此岩屑層化分成一個水文地質單元，簡稱為 R，根據地質單元分層作業，可再細分為：土壤層（R-s）、回填物（R-bf）、沖積層（R-a）、崩積層（R-c）、腐土岩（R-sl）與風化岩塊（R-sr）等；而固結岩層有：礫石（Gv）、砂岩（Ss）、頁岩（Sh）、泥岩（Ms）、砂頁互層（Ss/Sh）、板岩（Sl）、石英岩（Qtz）等。

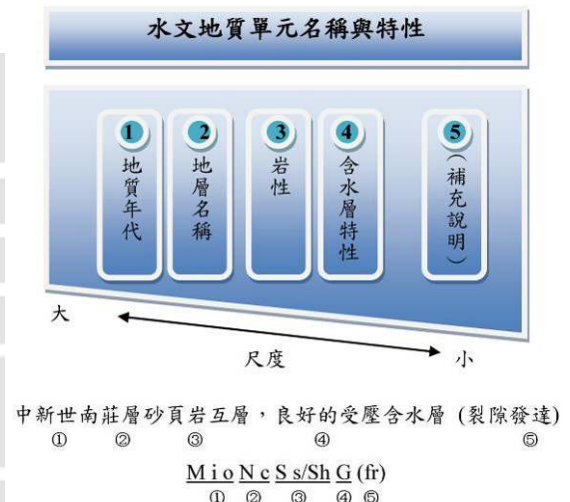


圖 8 水文地質單元命名與特性示意圖

（4）含水層特性

根據上述水文地質單元劃分原則，將相關試驗與分析得到的水文地質參數，建置於各水文地質單元，由此可瞭解各水文地質單元的水力特性，以分類其含水層的優劣等級。參照 Bear（1972）研究成果（表 1），初步將水文地質單元分成：「良好的」、「較差的」、「極差的」之三個等級含水層，分別簡稱為 G、M、P。

（5）補充說明

由於固結岩層含水層主要受裂隙等次生構造，地質構造產生的剪裂帶或破碎帶，以

及石英脈化石分布等因素，而影響含水層的特性。故建置的水文地質單元若有其相關特別地質現象影響該地質單元的水文特性，可進行補充說明，例如：「中新世南莊層砂頁岩互層，良好的受壓含水層（裂隙發達）」，簡稱 MioNcSsG (fr)。

因此，透過上述五個項目來命名水文地質單元，可清楚且快速瞭解該水文地質單元的地質與水力特性。例如：MioNcSs/ShG (fr) 與 Mio~PliKctSsG (fr) 兩個水文地質單元皆為裂隙發達的良好含水層，透水係數大於每秒 10^{-4} 至 10^{-5} 公尺，前者為中新世南莊層的砂頁岩，而後者為中新世至上新世桂竹林層大窩砂岩相的砂岩所組成。

（三）資料建置成果

根據上述的水文地質單元劃分原則與命名方式，以劃分流域各鑽孔的水文地質單元，並建置其基本資料表。其中，各場址的資料欄位應包含（1）單元深度、（2）地質單元、（3）水文地質單元、（4）土壤與岩石描述，及（5）水文地質參數等，而各場址的成果可彙整至該區域的地質年代與地層資料表，完成該流域的水文地質單元及其水文特性表，該資料欄位有：（1）地質年代、（2）地層、（3）水文地質單元，及（4）土壤與岩石描述以及水文地質參數等。圖資的展現方面，可將流域內的鑽孔水文地質單元，依據時代地質年代排序彙整於圖幅上，並呈現各單元的水文地質參數資料表，以供吾人瞭解流域的水文地質單元與水文地質參數之時間與空間上的分布情形，進而建置相關的水文地質模擬與分析。

五、案例應用

本文以中興社民國 99 年度執行的經濟部中央地質調查所「台灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置 (1/4)」計畫，作為

案例應用說明。該計畫有鑑於國內山區地下水蘊藏量及補注量現況，以及山區水文地質基本調查資料相當匱乏，故旨在針對台灣山區之地下水資源，進行各岩層水力特性及地下水流動特性調查與評估，且針對各項既有基礎資料進行資料蒐集與分析，期能瞭解山區地下水在地下岩層之流動特性及各種岩層與重要地質構造之蓄水能力，以建立台灣山區水文地質單元與岩層特性及出水量之關係，並建置地下水觀測站網，以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等，藉以掌握地面水與地下水在不同環境下的互動特性，俾利山區地下水資源保育，提高台灣山區水資源管理及永續經營之效能。

本案例研究區域（圖 9）主要以中段濁水溪流流域與北港溪上游集水區為主，而濁水溪流流域內有兩個重要的子集水區，亦即：清水溪與陳有蘭溪。流域面積約有 1,577 平方公里之多，分布的地層有始新世至更新世的地層，以及全新世的現代堆積物。依據鑽孔布置原則，共規劃孔數為 29 孔，總鑽探深度為 3000 公尺。

透過相關的水文地質調查與分析，本案例完成濁水溪中段流域之鑽孔水文地質單元圖（圖 10），其中包含了各水文地質單元之水文地質參數分布表，此外，將各場址的資料彙整於濁水溪中段流域之水文地質單元及其水文特性表（表 2），相關圖資可提供後續研究與參考之依據。

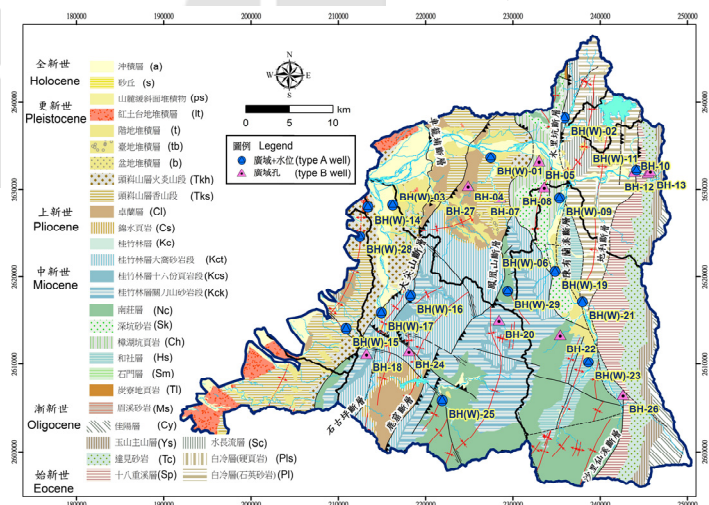


圖 9 案例研究區之地質與鑽孔分布圖

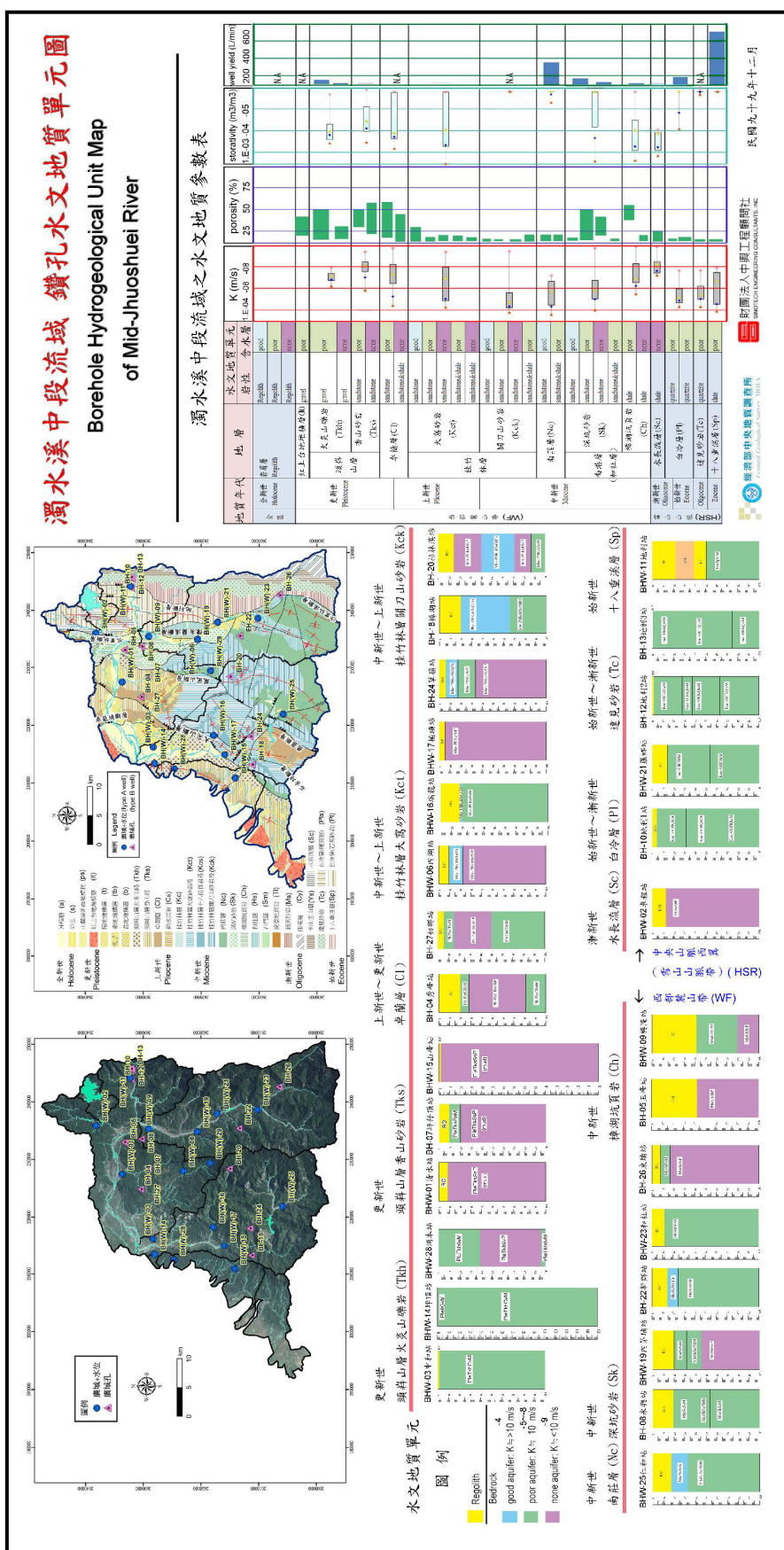


圖 10 濁水溪中段流域之鑽孔水文地質單元圖

表 2 濁水溪中段流域之水文地質單元及其水文特性表

地質分區與地質年代		地層與地層厚度(m)		岩性	水文地質單元	水文特性
全區	全新世	岩屑層	18±	土壤、回填物、崩積層、沖積層、腐土岩與風化岩塊等	RG RM RP	崩積層、腐土岩或風化岩塊等，洩透度較差的，較多破碎帶，透水性較佳。 土壤、沖積層或崩積層等岩屑或岩塊，含泥質較多，透水性較差。 土壤或崩積層等基質為泥質或細砂，透水性極差。
				紅土、紅壤化之礫石，砂，砂及粉砂之透鏡體	PkltGvM	紅土或夾土至粗礫與岩屑，現地推估孔隙率在20-40%，透水性較差。
					PkTkhGvM PkTkhGvP PkTksSsM PkTksSsP(mud)	黃灰或黃棕色礫石、砂與泥為主，膠結度與洩透度差，現地推估孔隙率約10-50%，礫石層較高，約20-40%，含泥質的區段約20-25%，透水係數約 $7.0 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較差。 黃灰色細至粗砂與灰色黏土為主，間夾細礫與礫石層，洩透度與膠結較差，有破層、漂流木或剪裂泥，現地推估孔隙率約10-30%，透水係數約 $6.6 \times 10^{-8} \sim 3.9 \times 10^{-9}$ m/s，透水性較差。 灰色細顆粒泥質砂岩與泥岩，洩透度良好，膠結較差，裂隙有輕微鑄染，現地推估孔隙率約30-50%，透水係數約 $1.7 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較差。 灰色細至粗顆粒泥質砂岩與泥岩或互層，洩透度及膠結良好，有斑紋狀構造與硬結，含貝殼化石、碎片與薄硬層，沈積相有塊狀砂岩相(Sm)與泥岩相(Mm)，甚至有沈積擾動的波狀紋理砂岩相(Sw)，現地推估孔隙率約20-60%，透水係數約 $6.4 \times 10^{-8} \sim 4.4 \times 10^{-10}$ m/s，透水性極差。
	更新世	頭嵵山層	400+	礫石夾砂岩之透鏡體	Pi-PleCISsM Pi-PleCISs/ShP	灰色細至中顆粒砂岩，砂岩多純淨，部分含泥質較多，或夾頁岩，洩透及膠結良好，有生物擾動現象與生痕化石，裂隙易產生輕微鑄染與夾泥現象，現地推估孔隙率約10-60%，夾粗砂岩20%以下，透水係數約 $4.1 \times 10^{-5} \sim 4.7 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較差。 淺灰色灰砂岩為主，間夾泥質砂岩，或暗灰色頁岩與灰色細粒砂岩互層，岩質新鮮，較少風化跡象，部分夾有顆粒較粗的砂岩，亦有生痕化石與薄層的化石密集帶分布，現地推估孔隙率約40%以下，透水係數約 $1.8 \times 10^{-8} \sim 2.5 \times 10^{-10}$ m/s，透水性極差。
					-	-
					-	-
		香山砂岩(Tks)	1,000+	砂岩、泥岩、砂頁岩互層	Mio-PliKctSsG(fr) Mio-PliKctSsM Mio-PliKctSsP Mio-PliKctSs/ShM Mio-PliKctSs/ShP	灰色細砂岩為主，含泥質，洩透度與膠結良好，生物擾動多，常見生痕化石，而部分沈積環境穩定成平行層理，現地推估孔隙率約30%以下，透水係數約 $6.2 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-7}$ m/s，透水性較佳。 灰色細砂岩為主，含泥質，洩透度與膠結良好，生物擾動多，常見生痕化石，而部分沈積環境穩定成平行層理，部分有化石密集帶或些微分布，現地推估孔隙率約15%以內，透水係數約 $5.2 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-6}$ m/s，透水性較差。 灰色細至粗砂岩，含泥質成分高，洩透度與膠結皆良好，裂隙與剪裂泥較多，現地推估的孔隙率各深度不同，多低於20%，其中裂隙較多的區段為20-45%，透水係數約 $9.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ m/s，透水性極差。 灰色中砂岩為主，間夾薄層頁岩，膠結良好，裂隙易沿層理發展而破碎夾泥，現地推估孔隙率則多低於20%，透水係數約 1.6×10^{-7} m/s，透水性較差。 灰色砂岩為主，夾深灰色頁岩，洩透度與膠結良好，含生痕化石，沈積環境較為擾動，有化石密集帶或些微分布，現地推估孔隙率約15%以內，透水係數約 1.8×10^{-9} m/s，透水性極差。
				砂岩、泥岩、頁岩互層	-	-
	上新世	卓蘭層(CI)	1,300±	砂岩、泥岩、頁岩互層	-	-
					-	-
					-	-
		錦水頁岩(Cs)	150±	頁岩夾薄層砂岩	-	-
					-	-
					-	-
		大窩砂岩(Kct)	1,050±	泥質砂岩、砂岩及頁岩互層	Mio-PliKctSsG(fr) Mio-PliKctSsM Mio-PliKctSsP Mio-PliKctSs/ShM Mio-PliKctSs/ShP	灰色細砂岩為主，含泥質，洩透度與膠結良好，生物擾動多，常見生痕化石，而部分沈積環境穩定成平行層理，現地推估孔隙率約30%以下，透水係數約 $6.2 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-7}$ m/s，透水性較佳。 灰色細砂岩為主，含泥質，洩透度與膠結良好，生物擾動多，常見生痕化石，而部分沈積環境穩定成平行層理，部分有化石密集帶或些微分布，現地推估孔隙率約15%以內，透水係數約 $5.2 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-6}$ m/s，透水性較差。 灰色細至粗砂岩，含泥質成分高，洩透度與膠結皆良好，裂隙與剪裂泥較多，現地推估的孔隙率各深度不同，多低於20%，其中裂隙較多的區段為20-45%，透水係數約 $9.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ m/s，透水性極差。 灰色中砂岩為主，間夾薄層頁岩，膠結良好，裂隙易沿層理發展而破碎夾泥，現地推估孔隙率則多低於20%，透水係數約 1.6×10^{-7} m/s，透水性較差。 灰色砂岩為主，夾深灰色頁岩，洩透度與膠結良好，含生痕化石，沈積環境較為擾動，有化石密集帶或些微分布，現地推估孔隙率約15%以內，透水係數約 1.8×10^{-9} m/s，透水性極差。
					-	-
					-	-
					-	-
					-	-
		桂竹林層	200±	頁岩夾薄層砂岩	-	-
					-	-
					-	-
		十六份頁岩(Kcs)	200±	頁岩夾薄層砂岩	-	-
					-	-
					-	-
		關刀山砂岩(Kck)	900±	泥質砂岩夾頁岩	Mio-PliKckSsG(fr) Mio-PliKckSsM Mio-PliKckSsP Mio-PliKckSs/ShM	灰色細至中砂岩為主，間夾薄層頁岩，洩透度及膠結度良好，有生痕化石與薄層化石密集帶，裂隙易沿層理發展而破碎夾泥，中砂裂隙與破碎帶亦較多，故現地推估孔隙率約10%以下，中粗砂岩段為20-60%，透水係數約 $1.8 \times 10^{-7} \sim 1.9 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較佳。 灰色細砂岩為主，膠結良好，有明顯生痕化石與生物擾動現象，現地推估孔隙率約10%以下，透水係數約 4.9×10^{-6} m/s，透水性較差。 暗灰色極細至細砂岩，上層受到強烈生物擾動而形成有殘存紋理的砂岩，裂隙有輕微鑄染，下層深部多貝類與生痕化石，現地推估孔隙率約10%以下，透水係數約 $5.8 \times 10^{-8} \sim 3.6 \times 10^{-10}$ m/s，透水性極差。 灰色中砂岩為主，間夾薄層頁岩，膠結良好，裂隙易沿層理發展而破碎夾泥，現地推估孔隙率則多低於20%，透水係數約 1.6×10^{-7} m/s，透水性較差。
					-	-
					-	-
	中新世	南莊層(Nc)	1,200±	砂岩及頁岩互層	MioNcSsG MioNcSs/ShM	灰色砂岩，夾深灰色頁岩，洩透度與膠結良好，岩質新鮮且純淨，現地推估孔隙率約40%以內，破碎帶有40-60%，透水係數約 $2.9 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-5}$ m/s，透水性較佳。 灰色砂岩為主，夾深灰色頁岩，洩透度與膠結良好，裂隙易沿平行層理破碎而夾泥，現地推估孔隙率約40%以內，破碎帶則40-60%，透水係數約 $2.3 \times 10^{-6} \sim 7.0 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較差。
					-	-
					-	-
		深坑砂岩(Sk)	450±	厚砂岩及頁岩，含化石富集層	MioSkSsG(fr) MioSkSsM MioSkSsP MioSkSs/ShM	灰色厚層細至中砂岩，洩透度良好，膠結中等，以及緻密深灰色砂岩為主，含深灰色頁岩，洩透度與膠結良好，岩質新鮮且堅硬，較多破碎帶與石英脈，裂隙有擦痕、石英結晶柱狀體或夾塑性高的泥土，現地推估孔隙率在10%以內，而破碎帶有10-40%，透水係數約 $1.1 \times 10^{-7} \sim 9.1 \times 10^{-9}$ m/s，透水性較佳。 灰色厚層細至中砂岩，部分夾暗灰色頁岩，洩透度與膠結良好，裂隙有擦痕、石英結晶柱狀體或黑色剪裂泥，現地推估孔隙率在50%以內，透水係數約 $1.1 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較差。 灰色厚層細至中砂岩，夾薄層暗灰色頁岩，洩透度與膠結良好，含石英脈，裂隙有擦痕與深黑色的剪裂泥，現地推估孔隙率約20-40%，透水係數約 $3.3 \times 10^{-7} \sim 2.1 \times 10^{-10}$ m/s，透水性極差。 灰色厚層中砂岩與暗灰色頁岩互層，膠結良好，裂隙易沿頁岩層理破碎，現地推估孔隙率低於10%，其中較為破碎區段為50%以下，透水係數約 $7.1 \times 10^{-6} \sim 2.1 \times 10^{-7}$ m/s，透水性較差。
					-	-
					-	-
					-	-
					-	-
		樟湖坑頁岩(Ch)	500±	厚層頁岩夾薄砂岩	MioChShM MioChShP	灰色粉砂岩與暗灰色厚層頁岩，洩透及膠結良好，砂岩較為破碎，易產生剪裂並充填剪裂泥，現地推估孔隙率約40-55%，透水係數約 $2.9 \times 10^{-7} \sim 2.9 \times 10^{-7}$ m/s，透水性較差。 暗灰色厚層細砂岩與頁岩互層，洩透及膠結良好，有較多的剪裂帶，易產生剪裂並充填剪裂泥，部分有CaCO ₃ 填充，現地推估孔隙率約20%以下，透水係數約 $5.3 \times 10^{-9} \sim 1.4 \times 10^{-10}$ m/s，透水性極差。
					-	-
		石底層	300±	厚層砂岩及頁岩，偶夾薄互層與化石富集層	-	-
					-	-
		大寮層	250±	厚層頁岩偶夾薄層砂岩	-	-
					-	-
雪山山脈(西)	漸新世	水長流層(Sc)	1,000+	厚層頁岩夾砂岩，含海綠石層	OBScShP	暗灰色厚層頁岩與粉砂岩，洩透度及膠結良好，多處有剪裂帶且夾泥，現地推估孔隙率在25%以下，透水係數約 $6.7 \times 10^{-9} \sim 1.5 \times 10^{-10}$ m/s，透水性極差。
					-	-
	始新世	白冷層(PI)	800+	厚層石英質砂岩與長石質砂岩，夾薄互層，部份砂岩為粗粒至細粒，頂部夾薄煤層	Eoc-OliPIQtzM Eoc-OliPISiM	淺灰色極細至細砂岩，含泥質，洩透度與膠結良好，有鑄染與石英脈填充，現地推估孔隙率約10%，而破碎層孔隙率則較高，透水係數約 $3.2 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10^{-3}$ m/s，透水性受岩性分布而變化，整體透水性較差。 灰色細砂岩，下層夾深灰色硬頁岩，洩透度與膠結度良好，岩質新鮮且純淨，較少風化跡象，裂隙含擦痕、石英結晶柱狀體，或夾塑性高的泥土，部分有泥球，現地推估孔隙率約15%以內，部分破碎帶有20-40%，透水係數約 $5.6 \times 10^{-7} \sim 4.9 \times 10^{-8}$ m/s，透水性較差。
					-	-
雪山山脈(東)	漸新世	佳陽層(Cy)	200+	板岩夾砂岩與粉砂岩	-	-
					-	-
					-	-
	始新世	玉山主山層(Ys)	400+	石英質砂岩、硬頁岩及其互層	-	-
					-	-
雪山山脈(東)	漸新世	達見砂岩(Tc)	400+	厚層砂岩與頁岩互層，偶夾薄層頁岩或互層	Eoc-OliTcQtzM	淺綠灰與灰色細至中粒變質砂岩、灰色板岩，偶夾薄層硬頁岩或互層，裂隙有石英填充，現地推估孔隙率為5%以下，透水係數約 $5.4 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10^{-3}$ m/s，透水性較差。
					-	-
雪山山脈(東)	始新世	十八重溪層(Sp)	300+	板岩與薄層砂岩或粉砂岩互層	EocSpSiM	暗灰色板岩，岩質新鮮，劈理面發達，裂隙多石英填充，有鑄染，現地推估孔隙率為5%以下，透水係數約 1.6×10^{-6} m/s，透水性較差。
					-	-

註 1：各地層內的水文地質單元上下無年代關係。註 2：「-」代表無試驗資料。

六、結 論

台灣地區受板塊造山運動的影響，使得流域上游集水區的地形、地貌與地質構造複雜，故相關調查與研究工作較為困難，而缺乏許多基本的水文地質資料。然而，在流域集水區的經營與管理上，缺乏完善的集水區資料，將著實影響後續的評估與政策的推動。因此，整體流域的相關水文地質調查工作以及水文地質架構的建立是必須且重要的。

透過孔內井測試驗與封塞水力試驗，以獲取水文地質參數，除可降低水文地質的不確定性外，亦提升了後續模式在分析上之準確度；此外，以鑽孔岩心判釋所建置的地質單元為基本架構，整合水文地質參數，進而劃分流域的水文地質單元以及建置其基本資料，以反應現地的水文地質特性，有助於後續的相關研究、分析與模擬之參考。

參考文獻

- Batu V. (1998) *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*, Wiley, New York, pp. 211-222
- Bear, J. (1972) *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publication
- Charles C., Daniel, III, and Paul R. Dahlen. (2002) Preliminary Hydrogeologic Assessment and Study Plan for a Regional Ground-Water Resource Investigation of the Blue Ridge and Piedmont Provinces of North Carolina, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Report 02-4105
- Ku Cheng-Yu, Hsu Shih-Meng, Chiou L.B., Lin Gwo-Fong (2009) Estimation of Hydraulic Conductivity of Highly Disturbed Fractured Rocks in Taiwan, *Engineering Geology*, Vol. 109, Issue 3-4, pp. 213-223
- Ollier C. and Pain C. (1996) *Regolith, Soils and Landforms*, Wiley, UK.
- Taylor, G. M. and Eggleton, R. A. (2001) *Regolith Geology and Geomorphology: Nature and Process*, Wiley, UK.
- Winkler, G., Reichl, P. and Strobl, E. (2003) Hydro-Geological Conceptual Model-Fracture Network Analyses to Determine Hydrogeological Homogeneous Units in Hard Rocks, *Materials and Geoenvironment*, Vol.50, No.1, pp. 417-420
- Harned, D. A., and Daniel, C. C., III (1992) The Transition Zone Between Bedrock and Regolith – Conduit for Contamination-in Daniel, C. C., III, White, R. K., and Stone, P. A., eds., *Ground Water in the Piedmont*, Proceedings of a Conference on Ground Water in the Piedmont of the Eastern United States, Charlotte, N.C., Oct. 16-18, 1989, Clemson, S.C., Clemson University, pp. 336-348
- Harry E. LeGrand (2004) A Master Conceptual Model for Hydrogeological Site Characterization in the Piedmont and Mountain Region of North Carolina, A Guidance Manual, North Carolina Department of Environment and Natural Resources Division of Water Quality Groundwater Section
- Hsu, S. M., Chung, M. C., and Cheng-Yu Ku (2008) A Rock Mass Classification Scheme for Estimating Hydraulic Conductivity of Fractured Rocks, *GeoCongress: Characterization, Monitoring, and Modeling of Geo-Systems*, ASCE Geotechnical Special Pub. #179, pp. 452-459
- Keith M. Scott, Colin F. Pain (2008) *Regolith Science*, CSIRO Publishing, Australia
- Merrill, G. P. (1897) *Rocks, Rock-Weathering and Soils*, New York, MacMillan Company, pp.411
- Nutter, J. L., and E. G. Otton (1969) Ground-Water Occurrence in the Maryland Piedmont, Maryland Geological Survey, Report of Investigations, No.10, Baltimore, MD, pp.56
- Paul R. Seaber, F. Paul Kapinos, and George L. Knapp (1987) Hydrologic Unit Maps, Water-Supply Paper 2294, United States Geological Survey
- Richard A. Eggleton (2001) *The Regolith Glossary*, Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration
- Singhal, B. B. S. and Gupta, R. P. (1999) *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, Kluwer Academic Publishers
- Taylor, O. J., Hood, J. W., and Zimmerman, E. A. (1983) Plan of Study for the Regional Aquifer Systems Analysis of the Upper Colorado River Basin in Colorado, Utah, Wyoming, and Arizona, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Report 83-4184, pp.23
- UNESCO (2009) *Water in a Challenging World*, the United Nations World Water Development, Report 3, London, United Kingdom, pp. 1-394
- 江崇榮、賴典章 (1991) 水文地質圖製作方法研究，經濟部中央地質調查所八十年度研究報告，經濟部中央地質調查所
- 吳銘志 (2003) 台灣地區地下水文圖，水文地質調查與應用研討會論文集，第 149-165 頁
- 許世孟、顧承宇、鍾明劍、蘇泰維、李錦發 (2008) 岩盤工址之水力特性調查與案例應用，*地工技術*，第 115 期，第 35-44 頁
- 楊萬全 (1987) 臺灣地區的地下水域劃分，*地理學研究*，第 11 期，第 41-68 頁
- 楊豐榮、顧承宇、譚志豪、許世孟、鍾明劍 (2007) 曾文越引隧道工程水文地質之調查與分析評估，*地工技術*，第 112 期，第 69-80 頁
- 經濟部水利署 (2007) 台灣山區地下水觀測網整體計畫先期研究成果報告書，財團法人成大研究發展基金會
- 經濟部中央地質調查所 (2008) 台灣山區地下水資源調查研究先期計畫-山區水文地質及地下水資源調查研究 (2/2)，財團法人成大研究發展基金會
- 經濟部中央地質調查所 (2008) 台灣山區地下水資源調查研究先期計畫 97 年度計畫-水文地質鑽探及孔內水文地質試驗分析研究計畫，財團法人工業技術研究院
- 簡錦樹、林道國 (1990) 臺灣之地層系統的水文地質單位劃分及其命名問題，經濟部中央地質調查所特刊，第 4 號，第 323-364 頁