

山區地下水資源取用潛勢、區位及方式之評析

許世孟^{1,*}、李鳳梅²、林燕初³、黃智昭⁴

摘要

台灣目前在水資源問題方面所面臨的威脅是，全球氣候劇烈變化導致地面水環境產生的極端變化、水庫興建受阻、既有水庫之庫容日減及平原區地下水的不當使用等。這些不利因素將導致國家長遠經濟發展停滯、人民生活用水匱乏、地層下陷災害、洪水與土石流等災害。除了加強水資源的管理外，另外在台灣山區佔了全島面積三分之二的條件下，屬於平原區重要補注來源的山區，究竟蓄涵多少地下水資源，是否有可以替代性之水資源，值得進一步研究。本研究透過水文地質鑽探、孔內地球物理探測、封塞水力試驗及抽水試驗等方法，評估山區可開發之地下水蘊藏量及區位，並以台灣中段山區—濁水溪、大甲溪及烏溪流域等為應用區域，最後研擬山區可行的地下水開發方式，期能提供台灣政府因應未來水資源匱乏所需之策略。

關鍵字：山區地下水資源、全球氣候變遷、孔內地球物理探測、封塞水力試驗、抽水試驗

¹中興工程顧問社大地工程研究中心組長

²中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員

³經濟部中央地質調查所技士

⁴經濟部中央地質調查所科長

一、前言

水是萬物生命的源頭，亦是人類生活與經濟活動所賴。長期以來，台灣政府相當重視水利建設發展，以提供穩定且量足質優的民生與產業用水，作為台灣經濟發展的重要基礎。但因近年來地球暖化，造成全球氣候變遷，極端水文事件發生頻率增加，影響到系統性的水文循環，加上平原區地下水的不當使用，台灣目前正面臨水資源管理及調配危機的嚴重考驗，當務之急應儘早尋找台灣可替代之水資源。

由於台灣山區佔了全島面積三分之二，遠大於平原區之面積，其亦屬台灣地區地下水資源的重要補注來源區域，究竟蓄涵多少地下水資源，值得進一步研究。從過去山區隧道工程大量湧水案例(交通部台灣區國道新建工程局，2000)、山區河水補注比例研究(江崇榮等，2002)、台灣山區地下水資源調查研究先期計畫成果(財團法人成大研究發展基金會，2007&2008)等，指出台灣山區應存在可觀之地下水資源。除了國內研究外，國外許多國家在進行區域地下水資源評估時，於山區部份亦有諸多的考量，例如：美國、俄羅斯、中國大陸等國家(中國水利電力部水文局，1987; Daniel et al., 2002)。因此，山區地下水資源作為台灣水資源調配選項，應有其可行性。

本研究目的在透過水文地質鑽探、孔內地球物理探測、封塞水力試驗及抽水試驗等方法，評估台灣山區可開發之地下水蘊藏量及區位，並以台灣中段山區—濁水溪、大甲溪及烏溪流域等為應用區域，最後研擬山區可行的地下水開發方式，期能提供台灣政府因應未來水資源匱乏所需之策略。

二、地下水資源調查與評估方法

本研究為瞭解台灣山區地下水資源蘊藏量及分布，採用水文地質鑽探、孔內水文地質試驗、抽水井建置、抽水試驗及地下水潛能分類

等調查與評估方法，各方法詳細說明如下。

2.1 水文地質鑽探

水文地質鑽探目的主要掌握區域性水文地質狀況與條件，經由鑽探所獲得之岩芯資料與試驗紀錄，獲得地層的岩性、構造、層數、厚度、水力特性及地下水分布等資訊，可作為地下水資源蘊含量評估或場址開發設計時之重要參考依據。

本研究水文地質鑽探場址位置之主要考量的原則可分為：(1)不同的水文地質單元、(2)交通及機具可到達處、(3)考量富含地下水之高潛勢區、(4)聚落或觀光區之需求性等。其中，不同的水文地質單元可參考經濟部中央地質調查所出版之五萬分之一的流域地質圖；富含地下水之高潛勢區域則考量集水區面積、水系密度、線形密度、岩性、斷層、向斜、裂隙網絡密度、地下水有效集水面積、順向坡、岩屑層厚度、場址與河道距離、坡度、高程及河川密度等 14 個影響地下水資源蘊藏之因子(Hsu et al., 2012)，作為場址挑選之參考。另外每一場址之鑽探深度則以 100 m 為原則，此深度將涵蓋岩屑層(Regolith)與岩盤(Bedrock)，藉此瞭解此兩種地層，其地下水之各自蘊藏潛勢。此外，100 m 內之地下水資源可開發深度，也可透過本研究調查一併獲得。

2.2 孔內水文地質試驗

由於山區地層存在諸多複雜構造及岩性差異，往往導致所對應的水文地質特性也隨之不同，傳統的岩心採集搭配室內試驗之分析成果已無法滿足此需求，取而代之是透過孔內試驗直接獲取山區各項水文地質參數，除能釐清水文地質的不確定性外，亦增加了在地下水蘊含量評估上的精準度。有鑒於此，本研究於每一鑽孔進行一系列孔內水文地質試驗，包括地下水位調查、孔內裂隙岩層位態調查、孔內電井

測調查、孔內波速調查、地下水流速與流向調查，以及封塞水力試驗等。透過上述試驗可用以界定地層岩性分布、弱面分布與位態狀況；判斷地層滲透或蓄水層位置、推估地層孔隙、破碎及軟硬程度；判定地層之滲透性、裂隙連通性及地下水的循環(補注或流出)潛勢；推估各種岩層及構造之滲透係數等。孔內井測施測原理及資料在地質上之判釋可參考中興工程顧問社「台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立」成果報告(許世孟等人，2013)。

2.3 抽水井建置與抽水試驗

完成上述 100 m 鑽探與鑽孔水文地質試驗後，可依據調查成果揭露每一鑽孔調查範圍內地層之水文地質狀況，例如地下水位深度、高透水區段、裂隙分布狀況、裂隙密度、開孔裂隙比例等，藉以瞭解地下水富含之潛在區段，進而決定抽水井鑿井深度與開篩的位置等。然後再依據上述井體之設計進行抽水井鑿井作業，包含鑽鑿、埋管、濾料填充及封層、洗井擴水等，而井體部分可分為井管、篩(濾)管與沉泥管三部份。其建置的抽水井井體尺寸與材質為 6 吋的 PVC(聚氯乙稀) SCH80，完成井體建置後，各抽水井依據水利署地下水觀測井建置與維護作業規範(經濟部水利署，2004)之標準進行現地抽水試驗，以獲得場址的井出水量與透水係數，進而瞭解不同地層之地下水資源產能。

另外，為分析現地抽水試驗所獲得之試驗資料，採用數值分析程式(AQTESOLV)自動進行理論曲線與試驗觀測資料匹配工作，匹配過程係找出某一理論模式與觀測資料具最小誤差，求解過程以自動化行之，故可迅速利用不同之解析解得到對應之水力參數值，取代傳統利用手動之圖解法。試驗完成後，亦放置水壓計以觀測每十分鐘一筆之地下水位資料，作為後續地下水位變化之分析。

2.4 地下水潛能評估

依據每口井之定量抽水試驗成果，可進行各場址地下水潛能之分類，作為未來進行水資源工程開發之依據。為此，本研究依據 Struckmeire 與 Margat(1995)提出的地下水資源產能分類表，如表 1 所示，進行產能之分類。Struckmeire 與 Margat 以定量方式，依據導水係數、透水係數、井出水量，以及比出水量等四種水力參數，將地下水產能分成四級：當導水係數 $> 0.05 \text{ m}^2/\text{min}$ 、透水係數 $> 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、井出水量 $> 600 \text{ L/min}$ ，以及比出水量 $> 3.6 \text{ cmh/m}$ 時，地下水資源具高潛能，此產能能提供區域性供水，抽水量可提供城鎮與灌溉所需；當導水係數在 $3 \times 10^{-3} \sim 0.05 \text{ m}^2/\text{min}$ 、透水係數在 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、井出水量在 $60 \sim 600 \text{ L/min}$ ，以及比出水量在 $0.4 \sim 3.6 \text{ cmh/m}$ 之間時，地下水資源屬於中度潛能，此產能能提供地方性供水，抽水量可提供小社區與地方灌溉所需；當導水係數在 $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{min}$ 、透水係數在 $2 \times 10^{-8} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、井出水量在 $0.6 \sim 60 \text{ L/min}$ ，以及比出水量在 $4 \times 10^{-3} \sim 0.4 \text{ cmh/m}$ 之間時，地下水資源屬於低度潛能或僅部分地區較佳，此產能僅提供局部地方性供水，抽水量只可提供個人所需；當導水係數 $< 3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{min}$ 、透水係數 $< 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 、井出水量 $< 0.6 \text{ L/min}$ ，以及比出水量 $< 4 \times 10^{-3} \text{ cmh/m}$ 時，地下水資源相當微量，此為地下水資源匱乏區域。透過以上之分級，本研究可進行研究區域之地下水潛能評估工作。

三、案例應用及調查成果

本研究選擇台灣中段山區大甲溪、濁水溪與烏溪流域之山區作為地下水資源潛勢調查案例分析區域，調查區域概述及相關調查成果說明如后。

3.1 調查區域概述

本研究調查範圍主要位於大甲河流域、烏

溪流域與濁水溪流域中、上游區段。研究區涵蓋面積約 6522 平方公里。地質分帶從西到東涵蓋西部麓山帶、雪山山脈及脊樑山脈。各分帶之岩性為西部麓山帶以礫岩、泥岩、砂岩以及頁岩或互層為主；雪山山脈以硬頁岩、板岩、厚層白色石英岩質砂岩；脊樑山脈則以硬頁岩、板岩、千枚岩為主。本研究共規劃於 13 種不同地質單元(包含頭嵙山層火炎山礫岩、卓蘭層、南莊層、猴洞坑層、深坑砂岩、石門層、十四股層、水長流層、白冷層、達見砂岩、佳陽層、十八重溪層及廬山層)上進行地下水潛勢調查，總計 40 處調查場址，如圖 1 所示。

3.2 山區岩層水文地質特性及可開發深度

藉由研究範圍內 40 處孔內水文地質調查試驗成果之整合與分析，已依序界定地層岩性分布並佐證鑽孔岩心資料、判斷出主要透水層及蓄水層位置、評估出不同岩層地下水流動特性及蓄藏潛能，而山區水文地質架構也大致揭露出來，主要包含岩屑層與岩盤，岩屑層由風化的岩屑所組成(本研究依據國際岩石力學學會 ISRM(1981)所定義之風化等級，劃定岩屑層為輕微風化(II)等級以上的風化產物)，岩屑層厚度平均約為 15 m，隨深度滲透率與孔隙率有所變化，然而整體蓄水係數較高，故為一豐富的蓄水層或含水層；岩盤為固結的岩層，在淺層與岩屑層連通之裂隙岩體區段，因裂隙網絡發達，地下水亦可透過裂隙流通與蘊藏，故該區段的岩層亦為重要的含水層，而深層的部分亦有可能受地質構造使得岩層較為破碎，或岩層的原生構造與次生構造發達，使得該區段透水性較佳，而成為岩體另一個重要的含水層。水力試驗成果顯示，對不同岩性之透水係數進行統計，得知在固結岩盤中以變質岩及石英岩最高，研判此類地層在岩盤破碎且裂隙網路(fracture network)發達時具備較佳的水力傳導

性，使得地下水容易在裂隙網路產生流動；砂岩的透水係數次之，其透水係數分布甚廣，相形之下砂頁岩互層、頁岩及泥岩的透水係數則較低；此外，由各岩層的分布可知岩性並非唯一控制透水性之因素，其受裂隙特性控制之潛在影響亦不可忽視；另山區岩層主要透水區段裂隙通路之透水係數 K (藍色圓圈)多呈現 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ m/s 等級範圍，而岩石基盤的透水係數 K' 相對較低(灰色方塊)，多分布在 $10^{-11} \sim 10^{-9}$ m/s 等級範圍，而若以每十公尺為間距統計分層裂隙通路之透水潛能，可知裂隙透水潛能隨深度呈現冪次遞減(如圖 2 所示)，而蓄水潛能則約集中在 30m 以上岩盤與岩屑層交界帶，以及深度在 40~60m 處的裂隙岩盤(如圖 3 所示)。以上成果可作為山區地下水開發深度之參考，基本上以 60 m 以內深度較為適當且經濟效益最高，但依據本研究調查經驗顯示，具開發潛勢的實際深度，仍需依現地的地質與地形狀況而決定。

3.3 山區可開發之地下水蘊藏量及區位

根據研究區不同地質單元抽水試驗成果，40 處抽水試驗之井出水量介於 0.2-900 L/min，如以每人每天需求水量 250 公升估算，每口井可滿足 1-5184 人每日所需用水，所能供給的水量變異很大，此亦顯示空間上之地下水產能變化極度不均勻，如要進行水資源工程開發時，須審慎評估開發場址之地下水潛勢，才能確保計畫之目標供水量能夠達成。

圖 4 顯示各場址實際之供水潛能，依據抽水量分成由小到大四種供水等級或可能受益人口及標的，圖中亦可看出研究區域空間上的地下水產能與潛勢，以地理位置來看，在草嶺、杉林溪、同富、羅娜、地利、魚池、鯉魚潭、惠蓀、環山等山區地下水資源蘊含量相對較高潛勢，而該地區亦多分布溫泉露頭、觀光風景區與山區部落，應值得相關單位關注地下水資源的開發與保育課題等。

以地質分帶與地層岩性分析，在西部麓山帶中，山前的地區有較多的地下水資源，包括八卦山等台地以及車籠埔斷層與雙冬斷層之間的山前補注區，再則為濁水溪支流的清水溪與陳有蘭溪上游的砂岩層，而雪山山脈分帶中，地下水資源蘊藏豐富的岩層為石英岩砂岩、板岩或砂岩與板岩互層等，該分帶範圍由北到南分布逐漸變窄，本研究於此分帶試驗出較多的井出水量，而過去相關隧道工程開挖遭，例如雪山隧道，遇到大量的地下水湧水等問題，亦可驗證該地區係蘊藏豐富的地下水資源，因此雪山山脈分帶可能為台灣地區重要的地下水資源蘊藏的區域。

四、地下水開發方式研擬

過去台灣水資源的開發方式，多以開發地表水資源為主，普遍利用水庫、攔河堰等方式開採，對於地下水資源的部份，多以鑿井抽水方式處理，但也僅限於平原地區，對於山區地下水開發方式少有著墨。依據本文筆者幾年於山區走訪調查經驗，擬定出可行之地下水開發方式，可作為未來政府於山區地下水資源開發時之參考。針對山區地下水蘊藏潛勢較豐富區域，本研究擬訂以下四種開發方式供參，各種方法詳細說明如下。

1. 橫向集水管工程

橫向集水管工程通常運用在邊坡穩定工程中，在地勢較陡或落差較大且有湧水之處多採此工法，進行地下水的排水排除工作，加強邊坡穩定性。以水資源開發觀點，如能將地下排除的水，再藉由其他集水設施保存，將可作為後續水資源之利用。圖 5 是花蓮縣西寶國小附近既有的橫向集水管設施，係由台電公司經費支持建置，提供西寶國小及附近部落居民使用。此工法則以蒐集淺層地下水為主。

依據許世孟等人之研究(Hsu et al., 2012)，地下水於山區裂隙岩體會傾向沿者著層面或主

控弱面之方向流動，為了使橫向集水管集水效益能夠提升，施作集水管工程前，可進行岩層裂隙位態調查工作，依據其成果決定橫向集水管施作方位，而非依據經費等距離的方式施作。

2. 集水井

集水井工程也常見於邊坡穩定工程中，主要以排除深層地下水為目的。如該工程以水資源利用方向考量，可將其用來匯集及蓄存地下水，工程的作法是先開鑿大口吋的水井，之後於井下適當位置鑽設集水管，藉此收集地下水，最後透過適當設備，將水資源分配至用戶端使用。

3. 集水廊道

集水廊道又稱為地下堤堰取水工程，利用場址有大量礫石存在，且具較高之補注率等特性，汲取地下水源，台灣最有名的集水廊道工程是屏東二峰圳，在台灣山坡地區，極具應用價值。而本文所要闡述的集水廊道，並非如前述設置於沖積扇邊緣山坡地，而是在深層裂隙岩體中，其設置工法略為不同，其主要構造是先建造廊道，接著於廊道內打設縱向之集水管，加速深層汲水之效能。其實目前類似的工法在梨山賓館下方設有兩個廊道，主要排除梨山地區深層地下水，穩定梨山地滑地之安全性，因為此工程之目標是在降低地下水位，而以排水廊道稱之，圖 6 為筆者參訪梨山排水廊道時之留影。

4. 井群

井群係透過開鑿多個抽水井所建構的取水方式，此工法首先需要建立計畫區之三維地下水數值模式，包含模式的率定與驗證，接著透過模式於空間上配置不同數量、尺寸抽水井，模擬不同情境抽水時地下水流場之變動情形，同時模擬井群抽水對鄰境水文地質環境之影響，最後依據計畫目標水量，找出最佳之抽水井數量與布設之空間位置。

五、結論

本研究透過水文地質鑽探、孔內地球物理探測、封塞水力試驗及抽水試驗等方法，評估山區可開發之地下水蘊藏量及區位，並以台灣中段山區—濁水溪、大甲溪及烏溪流域等為應用區域，最後研擬山區可行的地下水開發方式，可獲致下列幾點結論：

1. 本研究40處孔內水文地質調查試驗成果之整合與分析顯示，山區地下水主要蘊藏在岩屑層、岩盤與岩屑層交界帶，以及具岩盤破碎且裂隙網路發達之地層內。因此，岩屑層厚度較厚及以變質岩和石英岩為主地層之區域，通常存在較高水資源蘊藏潛勢；而山區地下水開發深度則建議60m以內，開發效益最高。
2. 研究區內地下水產能與潛勢成果顯示，雪山山脈分帶可能為台灣地區重要的地下水資源蘊藏的區域。以地理位置而言，在草嶺、杉林溪、同富、羅娜、地利、魚池、鯉魚潭、惠蓀、環山等山區地下水資源蘊含量相對較具高潛勢，而該地區亦多分布溫泉露頭、觀光風景區與山區部落，應值得相關單位關注地下水資源的開發與保育課題。
3. 本研究提出橫向集水管工程、集水井、集水廊道及井群等山區可行的地下水資源開發方式，以上工法可提供台灣政府開發山區地下水資源參考。

參考文獻

1. 交通部台灣區國道新建工程局 (2002)，「北宜高速公路施工階段坪林隧道湧水問題評估調查服務工作—第三期評估調查報告」。
2. 江崇榮、汪中和 (2002)，「以氫氧同位素組成探討屏東平原之地下水補助源」，經濟部中央地質調查所彙刊，第15期，第49-67頁。
3. 財團法人成大研究發展基金會 (2007)，「臺灣山區地下水資源調查研究先期計畫96年度計畫—水文地質鑽探及孔內水文試驗分析研究計畫」，經濟部中央地質調查所。
4. 財團法人成大研究發展基金會 (2008)，「臺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試驗分析研究計畫」，經濟部中央地質調查所。
5. 中國水利電力部水文局 (1987)，「中國水資源評價」。
6. 許世孟、柯建仲、陳耐錦 (2013)，台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立，中興工程顧問社。
7. 經濟部水利署 (2004)，規劃、設計及監造「93年度地下水觀測站井建置維護計劃」與地下水試驗分析。
8. Daniel, C. C. III and Dahlen, P. R. (2002), "Preliminary hydrogeologic assessment and study plan for a regional ground-water resource investigation of the blue ridge and piedmont provinces of North Carolina", USGS, Water-Resources Investigations Report 02-4105, p. 60.
9. ISRM (1981). Rock Characterization, Testing and Monitoring, ISRM suggested methods. ed. E.T. Brown. publ. Pergamon Press, Oxford, 211 Elsevier, 200 pp.
10. Shih-Meng Hsu, Jung-Jun Lin, Nai-Chin Chen, Yen-Tsu Lin, Chi-Chao Huang (2012):

Identification of Groundwater Potential Site
in Taiwan Mountainous Region. American
Geophysical Union 45th annual Fall Meeting,
San Francisco, California.

表 1 地下水資源產能等級分類表

含水層分類	地下水資源產能等級與簡稱	導水係數 (m ² /min)	透水係數 (m/s)	井出水量 (L/min)	比出水量 (cmh/m)
Class 1	高(H) ：區域性供水，抽水量可提供城鎮與灌溉所需。	>0.05	>4E-5	>600	>3.6
Class 2	中等(M) ：地方性供水，抽水量可提供小社區與地方灌溉所需。	3E-3~0.05	2E-6~4E-5	60~600	0.4~3.6
Class 3	低，部分地區較佳(L) ：局部地方性供水，抽水量只可提供個人所需。	3E-5~3E-3	2E-8~2E-6	0.6~60	4E-3~0.4
Class 4	微量(P) ：地下水資源缺乏。	<3E-5	<2E-8	<0.6	<4E-3

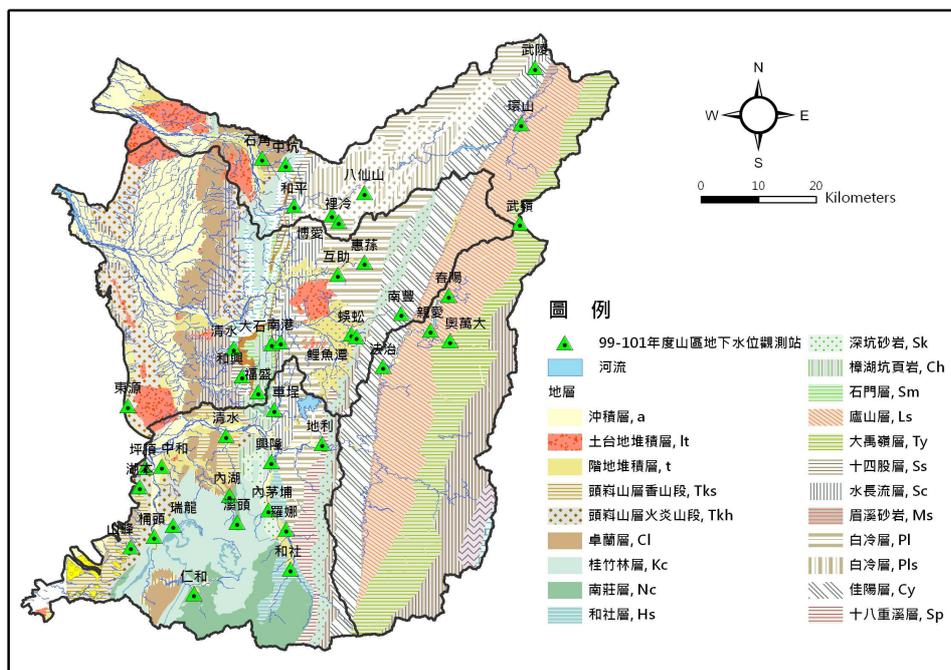


圖 1 地下水調查場址分布及各場址所處地質單元

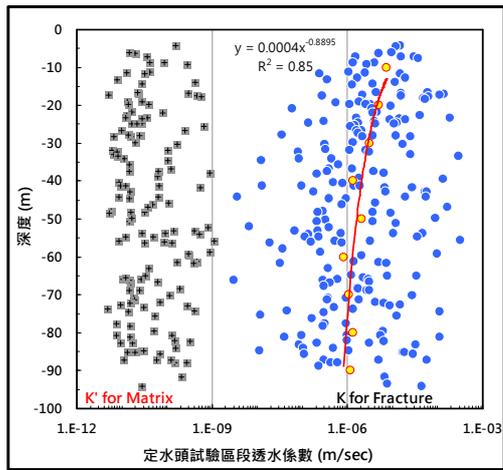


圖 2 裂隙/基岩之透水係數隨深度的分布與變化



圖 5 西寶國小附近橫向集水設施

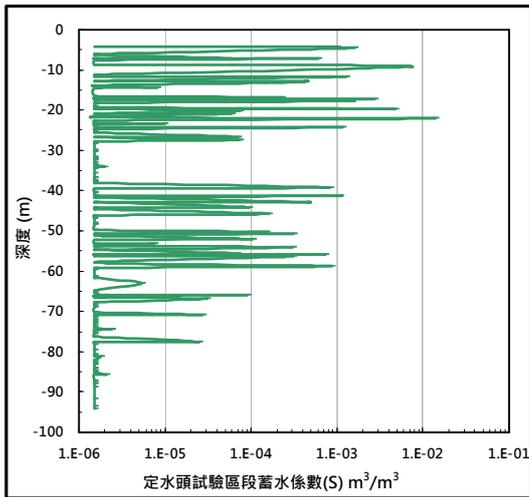


圖 3 蓄水係數隨深度的分布與變化



圖 6 梨山排水廊道及廊道內橫向集水設備

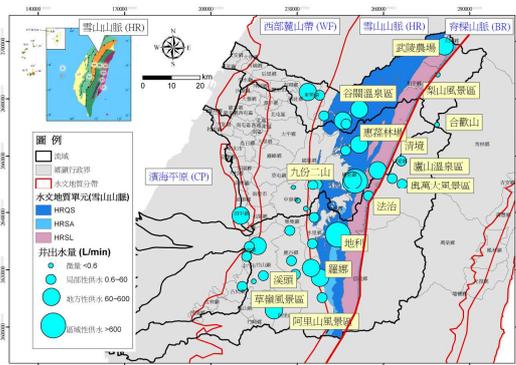


圖 4 山區高潛勢地下水蘊藏之水文地質單元與部落及觀光景點分布圖