

臺灣山區地下水水文循環概念模型建置之研究-以立霧溪與花蓮溪流域為例

許世孟¹、李鳳梅²、林燕初³、黃智昭⁴

¹財團法人中興工程顧問社高級研究員兼組長

²財團法人中興工程顧問社助理研究員

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

摘要

過去許多研究多著重在調查平原區之地下水系統，而賦存在山區之地下水則較少著墨，通常山區地下水由於含水層地質介質與構造等特性，會流竄於岩石孔隙與裂隙中，其水文流場與產狀相對於平原地區地下水系統則複雜許多。本研究為瞭解臺灣山區地下水水文循環架構，初步選擇臺灣東部立霧溪與花蓮溪流域中、上游為研究範圍，彙整研究區域內十處鑽探岩心資料、現地水文地質試驗(孔內攝影與地下水流速量測)與地下水位監測成果，歸納出研究區域所屬流域內可能之三種不同地下水水文循環模型，最後透過地下水位監測資料驗證本研究所提之水文循環概念模型正確性，同時針對深淺層地下水位變動型態進行探討。

關鍵詞：山區、地下水位、水文地質試驗、地下水水文循環概念模型。

一、前言

地下水為水文循環的一部分，由於隱藏在地層中，並無法由肉眼觀察其流動與儲存狀態或變化，而地下水資源之開發，則必須先對地下水水文循環之機制有所瞭解，才得以擬定後續之水資源開發策略。過去許多研究多著重在調查平原區之地下水系統，而賦存在山區之地下水則較少著墨，通常山區地下水由於含水層地質介質與構造等特性，會流竄於岩石孔隙與裂隙中，其水文流場與產狀相對於平原地區地下水系統則複雜許多(許世孟等人，2010)。根據前人研究(Daniel and Dahlen, 2002; Heath, 1984; 經濟部中央地質調查所，2008)，山區地下含水層水文地質架構主要由岩屑層

(Regolith)與裂隙岩體所構成，上半部的岩屑層因受應力及風化作用，形成一淺部破碎帶，此區帶擁有較高之孔隙率，可提供山區雨水入滲、蓄涵及流通的空間，如同天然的『綠色地毯』，並穩定滲出成為河川基流量之來源，對河川生態支撐及平原區地下水水量之補注具有重要地位；而下層裂隙岩體會受地質構造、岩性、裂隙密度、裂隙寬度等所控制，可提供地下水通道，亦有可能富含地下水，然而此區域之地下水文循環之樣態則較少被討論。為瞭解臺灣山區岩層內地下水的補注來源及建立水文循環概念模式，本研究以水文地質鑽探提供岩心資料、孔內攝影提供裂隙網絡訊息、地下水流速量測提供裂隙連通性指標及地下水補注與流出之位置分布、地下水位監測資料提供地下水動態

行為掌握，因為其資料可反應自然與人為作用下地下水流動過程中流量、梯度隨著時間與空間的變化情形，此種變化乃是綜合含水層邊界條件與地下水流動條件之過程。最後整合所有成果與交叉比對分析後，藉以解析區域地下水的補注來源及其水文循環概念模式。另本研究初步選擇臺灣東部立霧溪與花蓮溪流域中、上游為研究範圍，進行相關分析，期望勾勒出山區地下水流動樣態，可作為地下水模式建模之重要依據。

二、研究區域概述

本研究區主要位於臺灣中段東側，主要流域包含立霧溪流域、花蓮溪流域及其鄰近流域，面積總和約為 2,410 平方公里；研究範圍主要位於中央山脈以東，太平洋以西，和平溪流域以南，秀姑巒溪流域以北。本研究區之行政區範圍皆位於花蓮縣境內，行政轄區包含有：秀林鄉、新城鄉、花蓮市、吉安鄉、壽豐鄉、鳳林鎮、光復鄉以及萬榮鄉等 8 鄉(鎮、市)，其交通地理位置分布如圖 1 所示。

本研究區之水文概況為立霧溪流域之歷年雨量資料顯示流域內各測站年平均降雨量約介於 2,200mm 至 2,500mm 之間，降雨量較為均勻；花蓮溪流域歷年雨量資料顯示流域內各測站年平均降雨量介於 2,000mm 至 4,000mm 之間，降雨量為由下游往上游遞增趨勢；而一般來說，一年中降雨多集中在 6 至 10 月之豐水期，大約佔全年雨量的 55~65%，主要因夏季時之颱風所造成，而 9 月為單月降雨相對最多的月份(經濟部中央地質調查所，2012)。

研究區位處臺灣東部花東地區之北段，地質構造與地層大致以東北—西南走向分布，地質年代由古生代晚期迄今，其地質分布詳圖 2。依據地質發育史及岩層性質，可區分為：(1)中央山脈西翼、(2)中央山脈東翼、(3)花東縱谷及海岸山脈等三個主要地質區，其中，中央山脈西翼主要分為雪山山脈及脊樑山脈，本研究區主要位於脊樑山脈地質區，脊樑山脈地質區西邊以眉溪斷層(砂岩)與雪山山脈地質區相隔，東面則以不整合方式和部份零星斷層與中央山脈東翼相隔。其出露之岩石，大部份由堅硬或經輕度變質的第三紀

泥質沉積岩組成。此區主要出露以厚層變質泥質岩層為主的始新世黑岩山層與中新世大禹嶺層，在研究區東端合歡山東峰北側尚有小區塊的中新世廬山層板岩出露；中央山脈東翼主要出露古生代晚期至中生代以片岩及大理岩為主的先第三紀變質岩，其中以九曲大理岩、高嶺片岩(以石英雲母片岩為主，夾有石英片岩、綠泥石片岩與大理岩透鏡體)與虎頭山片岩(以石英片岩、雲母石英片岩為主)出露面積最大，此外，尚有得克利片麻岩、開南崗片麻岩、谷園片岩(以黑色片岩為主)、白楊片岩(以綠色片岩、大理岩、矽質片岩為主)、天長大理岩、大觀片岩(以黑色石英雲母片岩為主)以及中生代碧綠層(以千枚岩、變質砂岩、石英岩為主)，由於緊密褶皺構造的影響，地層大多呈東北—西南走向條帶狀延伸。另外在萬榮地區有一小塊打馬燕構造地塊，由蛇紋岩等變質基性岩與變質超基性岩所組成；在花東縱谷及海岸山脈地區方面，花東縱谷地區之河谷兩側有更新世至全新世之階地堆積層分布；由未固結的砂、泥、土石所組成的現代沖積層，填滿於縱谷平原地區以及主要溪流的寬廣河道中，此外，花蓮市的美崙山係由米崙礫岩所構成。海岸山脈地區出露地層主要有中新世中期至上新世早期都巒山層(以安山岩質角礫岩與凝灰岩為主)、上新世蕃薯寮(以砂頁岩互層為主)，與上新世晚期至更新世八里灣層。八里灣層可細分為同時異相的水璉段與泰源段，前者岩性以礫岩夾厚層砂岩為主，後者則由砂頁岩互層、礫岩、泥岩所組成。

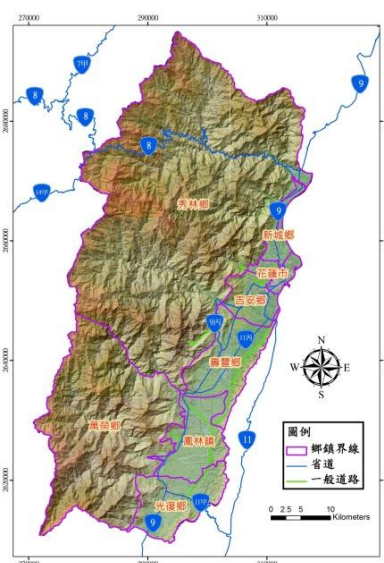


圖 1 研究區交通地理位置圖

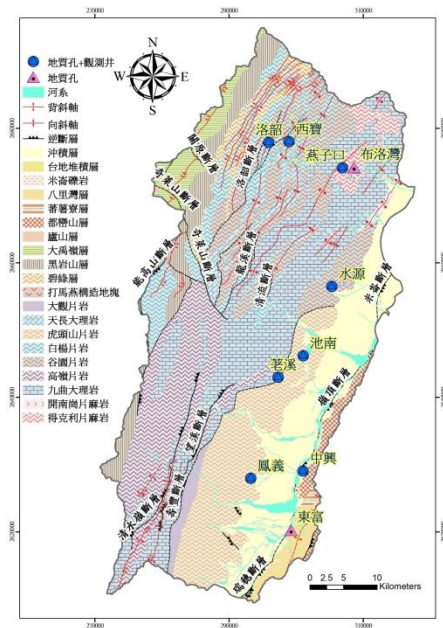


圖 2 研究區區域地質圖(經濟部中央地質調查所, 2012)

三、理論應用

3.1 水文地質鑽探

本研究於研究範圍內，依據中央地調所出版之流域地質圖(比例尺為五萬分之一)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，其各高程分布亦納入考量；透過鑽探取樣之岩心樣本，了解地層岩性以及不連續面分布，而完成後之鑽孔，進行相關水文地質試驗，藉以了解地層水文地質特性，最後於孔內安裝監測設備，藉以進行長期水文地質監測工作。

本研究依據上述水文地質鑽孔布置之原則，於研究區域內規劃水文地質鑽探孔數共計 10 個，各鑽孔的分布如圖 2 所示，鑽孔高程介於 92m-1118m 之間。另本研究統計鑽孔位置所在地質單元，涵蓋古生代至中新世的地層地質，共計 7 種地質單元，包含虎頭山片岩(EHW-06 池南、EHW-08 鳳義；主要岩性為石英片岩、雲母石英片岩)、白楊片岩(EHW-01 洛韶；主要岩性為綠色片岩、砂質片岩、層狀大理岩)、谷園片岩(EHW-02 西寶、EHW-05 水源；主要岩性為千枚岩、雲母片岩、石英雲母片岩)、九曲大理岩(EHW-03 燕子口、EHW-07 荖溪；主要岩性為層狀大理岩)、得克利片麻岩(EH-04 布洛灣；主要岩性為片麻岩及花崗片麻岩)、八里灣層(EH-10 東富；主要岩性為礫岩夾厚層

砂岩及砂頁岩互層)與都巒山層(EHW-09 中興；主要岩性為火山岩流、火山角礫岩與再積性火山碎屑岩)。

3.2 孔內裂隙位態調查

孔內裂隙位態調查主要在獲取鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布情形，評估岩層破碎程度與主要含水層位置，結合地下水流速調查成果，可瞭解裂隙的導水特性。本研究採英國 Robertson Geologging 公司發展之音射式孔內攝影儀 (high resolution acoustic televiewer, ACTV) 搭配光學式孔內攝影儀 (optical televiewer, OPTV) 進行孔內影像裂隙位態調查；孔內攝影係於鑽孔中置入一攝影設備，直接攝錄孔壁情形，以即時研判地層狀況、節理及裂隙分布及位態等資料。由於探測儀內建數位羅盤儀，可用以記錄各探測深度掃瞄影像的方位，當一個平面型弱面與鑽孔斜交時，所呈現的影像為一正弦軌跡，以垂直鑽孔為例，可將此正弦軌跡表示如下式。

$$z = \text{depth} + \rho \sin(x - \phi) \quad (1)$$

上式中存在 3 個待定參數分別為深度、振幅 ρ 及相位角 ϕ ，其中深度用以決定弱面所在之鑽孔深度；振幅 ρ 反應弱面傾角，當傾角愈大，振幅 ρ 愈大。水平弱面之振幅為零，垂直弱面之振幅為無限大。相位角 ϕ 則代表弱面之方位角，以正北方為零度，順時針方向增加。根據上述表示式，即可藉由後處理程式標示影像中之正弦軌跡，反推求得弱面位態資料。此外，由於音射式孔內攝影需藉由水作為傳遞聲波之介質，僅能在鑽孔有地下水的條件下施測，若遇地下水過低之情況，應以光學式孔內攝影的施測來補足音射式孔內攝影之限制；反之，倘若鑽孔內地下水過度混濁導致光學式孔內攝影裂隙影像辨識不易，則需以音射式孔內攝影影像作為裂隙判釋之依據。

3.3 地下水流速調查

本研究在地下水流速調查方法上，規劃以英國 Robertson Geologging 公司發展之流速儀來量測鑽孔內地下水流速及垂直流向分布，可用以判定地層之滲透性、裂隙連通性及地下水的循環(補注或流出)潛勢等。一般，流速儀包括熱脈衝式流速儀(heatpulse flowmeter)及葉片式流速儀(impeller flowmeter)，兩者

的區別主要在於量測方式的不同，熱脈衝式流速儀主要是以定點的方式量測鑽孔地下水的垂直流速及流向分布；葉片式流速儀則是連續測錄探測儀的葉片轉速。因精度考量，本研究係採用熱脈衝式流速儀進行地下水補注或流出區域循環之探測，其儀器原理係利用內部之柵狀發熱線圈發熱以加熱附近流體，由於流體的流動將帶動熱線產生一向上或向下的運動，而發電圈上下方之熱感應器可偵測其溫度之差異，並以熱脈衝曲線顯示。若熱脈衝曲線向上，反應上方熱感應器感應到溫度上升，表示流體向上方流動，反之，若熱脈衝曲線向下，則代表流體向下方流動，如透過溫度差異的傳導時間可計算流速。由於儀器的吊放會在量測區段的水體中產生亂流，因此在量測前需先將探測儀靜置一段時間，待水流穩定、熱感應器與周遭流體溫度達到平衡後方可進行施測；此外，熱脈衝流速儀會受到孔徑的不定性、流體黏滯性等影響、而流體繞過感應器亦造成量測流速被低估(bypass flow effect)，因此在孔壁不完整、破碎岩層或地下水混濁的鑽孔條件下施測應將此影響考量之。

3.4 分層觀測井建置

依據鑽探岩心資料顯示，山區主要是由岩屑層、風化裂隙岩層與新鮮岩盤等三層所組成之地下含水層系統，第一層與第二層相互連通組成一自由含水層，第三層獨立形成一受壓含水層，地下水頭壓力受裂隙分布多寡所控制。為此，本研究地下水觀測井的建置擬採分層監測的方式，分別於岩屑層及與其連通之裂隙岩體區域內設置淺層地下水位觀測井，而最下層的新鮮岩盤區域範圍內設置深層地下水位觀測井，此項將有助於監測山區深淺層地下水系統之差異，藉以分析不同含水層地下水循環機制。

四、結果與討論

本文最後整合上述水文地質鑽探、兩種水文地質試驗調查與地下水位時序資料之成果，探討(1)深淺部不同地下含水層地下水位變動型態之差異；(2)裂隙岩體地下水循環樣態。茲將各種分析成果說明如下：

4.1 分層地下水位變動型態探討

不同地下含水層之地下水位變動形成原因可能不相同，例如：淺層含水層之補注可能來自於地表入滲、河川入滲或者人工補注，然而深層含水層之地下水位變動則可能為地表荷重、遠處推壓流或者優勢流所致(陳宗顯, 2006)。山區地下水位型態受所處不同地層、地質特性影響，造成水位變化具差異性，各地下含水層之分層水位對於降雨亦會產生不同反應程度的呈現。本研究針對深淺井地下水位之變化趨勢，進行分層特性之探討，因淺層主要觀測岩屑層及與岩屑層連通之裂隙岩體區域之地下水位變化，深層則是觀測裂隙岩體之地下水位變化，故可利用水位波動幅度推測其含水層連通性、地下水補注來源是否相同以及是否受荷重影響。

監測 2013 年 7 月至 2014 年 6 月十口地下水位資料顯示(各站起始時間略有差異)，十口監測站深淺井地下水位圖明顯顯示出深淺井地下水位受降雨導致不同波動的情況，根據統計成果，深淺井水位變動大部分亦步亦趨有一致性(如圖 3 所示)，少數幾站呈現不一致性，在不同監測深度之地下水位變化趨勢一致，可推測其含水層連通性較佳或者可能具有相同的地下水補注來源或來自荷重影響；而深淺井地下水位高程之差異，部分觀測站顯示淺井地下水位高程高於深井(如圖 4 所示)，部分則兩者地下水位高程經長時間監測後約略一致，推測可能同一含水層，一口井則出現深井地下水位高程高於淺井，推測觀測站深部含水層有來自於本身觀測站更高處的補注源頭所致。另將地下水位資料與鄰近雨量站資料進行比對，由圖 3 或 4 可知，深淺井地下水位變化會受降雨所影響，地下水位變化幅度與雨量大小呈現正相關趨勢。

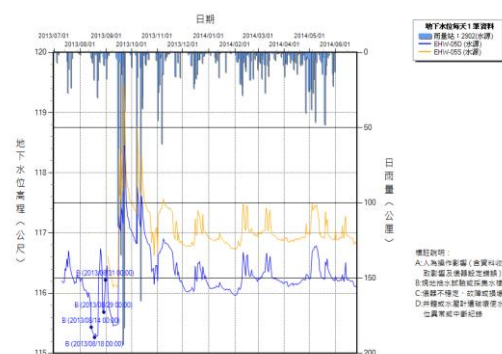


圖 3 水源站深淺井地下水位變化與降雨量分布圖

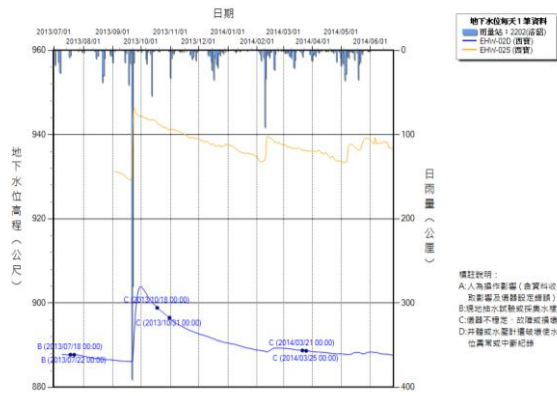


圖 4 西寶站深淺井地下水位變化與降雨量分布圖

4.2 裂隙岩體地下水循環型態探討

裂隙岩體中的裂隙提供地下水流通的管道，地下水會選擇在連通的裂隙間由高水頭往低水頭流動，建構出獨特的地下水文循環系統，本研究利用孔內攝影資料獲得每個水文地質鑽孔內，每個裂隙的分布位置，再利用地下水流速儀每一米量測一筆流速數據，進行兩種資料交相比對，藉以確認導水裂隙可能存在位置，同時導水裂隙之地下水流流動之方向也一併被標定(補注至井內或井內水流到地層)。

依據研究區域內十口水文地質鑽井探測結果顯示，裂隙岩體地下水循環模型大致可歸納成三類：模型 I 是井內水流向下，淺部有地下水流經導水裂隙補注至井內(此意謂與此導水裂隙連通之地下水頭高於地下水井水頭)，然後向下流向深部地層，再由某一導水裂隙流回地層(此意謂與此導水裂隙連通之地下水頭低於地下水井水頭)，補注至更下游河川；模型 II 與模型 I 剛好相反，井內水流向上，深部有地下水流經導水裂隙補注至井內(此意謂與此導水裂隙連通之地下水頭高於地下水井水頭)，然後向上流向淺部地層，再由某一導水裂隙流回地層(此意謂與此導水裂隙連通之地下水頭低於地下水井水頭)；模型 III 則不像上述兩模型地下水有明顯透過導水裂隙進出情況，無明顯進出現象。本研究進一步檢視各地下水循環模型隸屬之鑽孔地質狀況，模型 I 及 II 所對應的岩性是片岩，裂隙網絡較發達，流速調查結果地下水進出現象暗示有兩種水頭控制井內地下水的流動，可能存在兩種地下含水層，此由圖 4 深井最高地下水位高程在 948 公尺及淺井最高地下水位高程在 904 公尺獲得呼應；模

型三則對應到是火山岩流、火山角礫岩與再積性火山碎屑岩，類似多孔隙介質，流速調查結果地下水無明顯進出，暗示僅有一種水頭控制井內地下水的流動，可能存在單一地下含水層，此也由地下水位深淺井監測資料(深淺井地下水位高程約略相同)獲得印證。

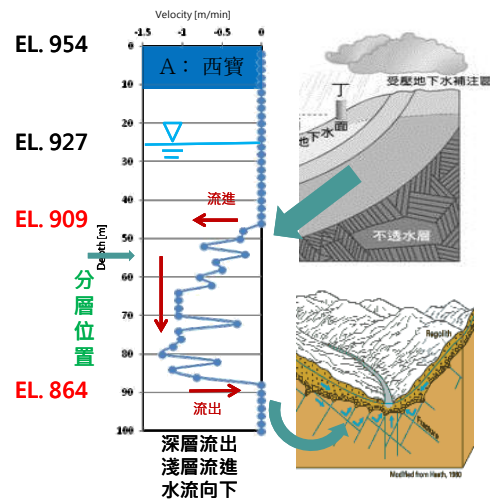


圖 5 裂隙岩體地下水循環模型 I

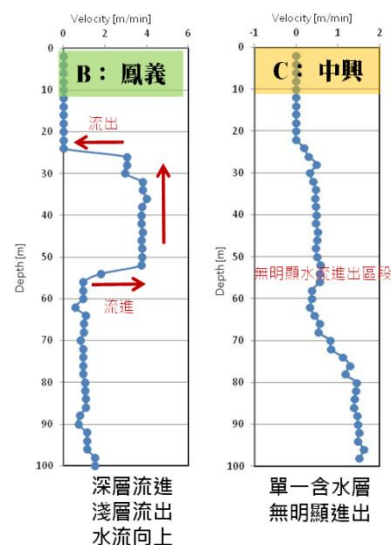


圖 6 裂隙岩體地下水循環模型 II 及 III

五、結論與建議

綜合本研究所得之各項研究結果，茲摘要提出下列幾點結論與建議：

1. 本研究彙整區域內十孔鑽探岩心資料與現地水文地質試驗(孔內攝影與地下水流速量測)成果，歸納出研究區域所屬流域內可能之三種不同地下水水

文循環模型，最後透過地下水水位監測資料驗證本研究所提之水文循環概念模型之正確性，此成果同時也說明水文地質試驗成果適合作為地下水位分層與否或數量判斷之依據。

2. 本研究透過分層地下水位監測資料，釐清地下水分層特性與各含水層可能地下水補注來源。
3. 經由本研究所建立之調查方法，已初步勾勒出山區地下水流動樣態，可作為地下水模式建模之重要依據，未來可以複製於其他流域場址，除了驗證此三種模式之再現性外，另可以發掘臺灣山區是否具有其他可能潛在的循環機制。

參考文獻

1. 許世孟、柯建仲、冀樹勇、林燕初、黃智昭、王詠綸 (2010)，「台灣山區地下水資源探勘」，土木水利，Vol. 37, No.6，第 11-18 頁。
2. 經濟部中央地質調查所，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」。
3. 經濟部中央地質調查所，2012，易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置第 3 期 101 年度-集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估 (2/3)報告，台北。
4. 陳宗顯，2006，地下水位變化之研究-以那菽、六甲與東和地下水位站為例，國立成功大學水利及海洋工程學系博士論文，243 頁。
5. 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 Report02-4105, p.60.
6. Heath, R.C., (1984). Ground-water regions of the United States, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2242, pp. 78.