



臺灣地區地下水庫之永續經營

張良正／國立陽明交通大學土木工程學系 教授

江崇榮／經濟部中央地質調查所 前所長

林燕初／經濟部中央地質調查所 技士

陳祐誠／國立陽明交通大學土木工程學系 博士後研究員

活躍的地質與沖積活動，給予臺灣地區多處透水性佳且豐厚的含水層，而這些含水層之地下水也供應臺灣地區全部需水量之 1/3，為相當重要之水資源，惟在整體營運管理上仍有很大的改進空間。因此，本文先從系統層面出發，即以地質的角度及較大的尺度，對臺灣各地區含水層之供水潛力進行論述，並對礫石層最豐厚之中部地區加強說明其成因。具有河川補注之含水層適合做為地下水庫進行水源調配，又稱為在槽地下水庫，本文並以名竹盆地為在槽地下水庫營運案例，進行數值模擬其供水潛能，結果顯示在 3 至 5 月平均每天抽水約 22 萬 CMD，其他月份不抽的情形下，年末地下水位皆能回升至原來之水位高，符合永續營運之精神，這些抽水量在枯水期是珍貴的水資源，且抽水期間河川流量之降低量亦小於原流量之 10%，此案例說明在槽地下水庫之可行性。系統層面論述完後，本文接著從管理層面提出地下水庫之定義，及包括滾動式管理等永續營運基本原則，以為地下水庫永續營運之依循。

前言

根據經濟部水利署對臺灣地區水資源供需之整體統計，地下水供應了臺灣全部需水量之 1/3，比所有水庫供水總合略多，雖然此項數據仍有一定之不確定性，尤其是在地下水供水量部分，惟仍足以看出地下水在整體水資源之重要性，在地面水不足的枯旱年更是最經濟可靠的抗旱水源，值得我們更多的關注與投入。另外，臺灣先天之水文與地質條件，地質脆弱、降雨集中與坡陡水急等因素，使得臺灣地區之沖刷與淤積活動劇烈，這使得地面河川構造物，容易破壞且維護成本高，以最重要之水庫為例，根據水利署對全台重要水庫淤積情形之統計，除翡翠水庫外，全台重要水庫之淤積量皆已達設計容量 1/3 以上^[1]，鑒於臺灣本島適合之壩址已相當難尋，加上其他環境與社會因素之影響，臺灣地區要再新建水庫已相當不易，因此高水庫淤積量乃是相當急迫的問題，雖然主管單位

已有相對的因應措施如石門水庫、曾文水庫及其他水庫之清淤及排淤等^[2,3]。惟臺灣地區地形地貌之變遷，雖是地質發展上之必然，但變遷的過程並不是細水長流型慢慢形成，而是一連串大型水文事件與造山運動的結果，相對於漫長的地質時間尺度，我們的歷史很短，未來仍有機會遭遇超過歷史紀錄之水文事件，因此目前規劃執行之清排淤工程，未來仍要經歷相當的考驗，而這種挑戰是臺灣地面水利工程的宿命。

活躍的地質與沖積活動，在挑戰地面水工構造物之餘，也給予臺灣地區多處透水性佳、儲水性能高且豐厚的沖積層。然而相對快速的沖積過程，亦使含水層之水文地質構造，相對於大陸型的含水層複雜甚多，含水層中土壤之異質性高且粒徑變化大，這使得在臺灣地區進行地下水營運，需有更多調查評估。

因此，本文先從系統層面出發，即以地質的角度及較大的尺度，對臺灣各地區含水層之供水潛力進行論

述，並對礫石層最豐厚之中部地區加強說明，再提出適合做為在槽地下水庫之含水層型態，並以數值模擬案例，說明將名竹盆地作為在槽地下水庫營運下之供水潛能，以驗證在槽地下水庫之可行性及效益。接著再從管理層面提出地下水庫之定義，及包括滾動式管理等永續營運基本原則，以為地下水庫永續營運之依循。

臺灣地區含水層供水潛力概述

含水層為地下水庫之基礎，因此本節將先以影響含水層蓄水及供水潛力的因子，包括面積、飽和厚度、補注、透水性及可出水率等為出發，對全台地區之含水層依各因子進行全面性之概述。

1. 含水層容積：含水層面積廣厚度大則容積較大，臺中盆地及屏東平原飽和含水容積大，供水量豐富穩定，反觀新竹苗栗地區因沖積礫石層面積及厚度小，供水能力有限。
2. 補注源：降雨量豐富且全年分配平均，則補注水源量大而且穩定，研究顯示河水從山區流入沖積扇入滲水約佔補注水量之四成，而含水層地表雨水入滲水約佔補注水量之六成^[4,5]。桃園中壢台地因古大漢溪被台北盆地三峽溪襲奪，失去原沖積河流補注，含水層只靠降雨入滲補注，嚴重影響其供水潛力。
3. 透水係數（流通性）：含水層透水係數影響地下水補注及流動速度，因此其反應含水層整體的流通性。未固結孔隙性含水層透水系數在 10^{-3} 到 $10^{-5}m/s$ 之間。地表及含水層透水係數高，則地下水補注和流動較佳。含水層透水係數 K 乘上飽和厚度 D 等於導水係數 T ，代表單位寬度含水層在單位水力梯度下的流量，一口貫穿全含水層井的出水量與含水層導水係數成正比。沖積礫石層間隙填充砂，但常保有一些較大孔徑通路，因此其孔隙率和比出水率雖然比砂層的低，但是透水率卻常比砂層的高。嘉南平原主要沖積河川曾文溪、八掌溪等之集水區止於西部麓山帶砂頁岩分布區，沖積層以砂泥互層為主，甚少含礫石層，因此流通性不佳。反觀台北盆地、臺中盆地，濁水溪沖積扇，屏東平原、花東縱谷、宜蘭平原沖積之河川深入中央山脈亞變質或變質岩分布區，沖積層中礫石層分布廣，因此含水層流通性較佳（圖 1）^[6]。



圖 1 地質分區、地下水區及主要河川分布示意圖
(修改自何春蓀^[6])

4. 比出水率與蓄水係數：比出水率 (S_y) 為含水層非受壓 (unconfined) 區地下水位單位升可存入、降可排出的水量，未固結孔隙性含水層比出水率約 0.15 到 0.30 之間，比出水率大則含水層可排出水量較大，出水性能佳。在沖積扇頂附近巨厚礫石層組成非受壓含水層，至扇央漸相變為砂和泥之互層而呈現受壓 (confined) 狀態，受壓含水層蓄水係數 (S) 在 10^{-3} 到 10^{-4} 之間，不到 S_y 值的百分之一，因此在受壓含水層抽水易造成大幅度的洩降，出水性能差，然而所抽出的水大部分來自於其上游的非受壓區，非受壓區地下水位面 (groundwater table) 每年持續下降可為地下水超抽之指標；水位大幅度洩降可引起臨近泥層的永久性排水壓縮造成地陷，濁水溪沖積扇扇尾及扇央的地層下陷現象為典型例子。

彙整前述含水層容積、補注源及流通性等因子可得各地下水區之供水潛能概況（表 1）。

含水層的水量收支平衡可用表示為： $Q_r = Q_p + Q_l + \Delta Q_s$

Q_r ：補注量

Q_p ：抽水量

Q_l ：流失量，流入河、海以及蒸發散

ΔQ_s ：蓄水變化量

表 1 臺灣各地下水區供水潛能概況表

地下水區	容積	流通性	補注源	供水潛能
臺北盆地	中	中	低	中
桃園中壢台地	低	低	低	低
新苗臨海地區	低	低	中	低
臺中盆地	高	中	中	高
濁水溪沖積扇	高	高	高	高
嘉南平原	中	低	低	低
屏東平原	高	高	高	高
花東縱谷	高	高	高	高
蘭陽平原	中	中	高	中

地下水歷線法將乾季歷線退降線代表抽水量 (Q_p)，降雨事件所造成之歷線上升量代表補注量 (Q_r)，年底與年初之歷線差值代表蓄水變化量 (ΔQ_s)，殘餘值代表非線性變化的流失量 (Q_l)，其分析成果可提供數值模式水平衡總量之控制，縮小數值模式水量的不確定性。地下水歷線法分析中，水量的多寡取決於非受壓區的面積與比出水率，面積和比出水率越大，反應水位升降之收支量越大 [7,8]。

中部地區礫石層之分布與成因

臺灣在晚更新世以來有頗發達的礫石沖積層，尤其在中部地區分布最廣厚度最大，此區礫石層具高透水性而且臨近河川分布，易接受河水補注，此外壓縮性低，不會發生抽水而大幅度壓縮現象，成為地下水資源最豐富之含水層，因此本節乃對中部地區礫石層之分布與成因進行進一步論述。

本文中中部地區指北自大安溪起，南達北港溪，東西各以雙冬斷層和海岸為界之範圍，本區礫石層廣布於丘陵地、台地、盆地及沿海沖積平原（圖 2）。在頭嵙山層、台地堆積層、盆地沖積層、沿海沖積層中均有厚礫石層分布，為大安溪、大甲溪、烏溪和濁水溪將山區剝蝕地層材料向下游搬移，至平原起因流速減緩，礫石大量堆積於瓣狀河道中，造成河川反覆改道，終形成扇狀礫石層分布，復因相臨沖積扇疊合或是海浪作用，形成南北延展帶狀分布之礫石層。

中部地區礫石層的成因與造山運動有密切關係，約 600 萬年前菲律賓海板塊西北端撞上歐亞板塊，啟動了蓬萊造山運動，臺灣島漸漸冒出海面，已出露地層經剝蝕產生大量碎屑經河水搬運沉積於前陸盆地，沉積物向上漸漸變粗，至頭嵙山層底部起開始有礫石層分布，礫石量向上漸增厚，礫石材料主要源自雪山山脈之變質砂岩層，少部分來自麓山帶之砂岩層（圖 1）。中部地區更

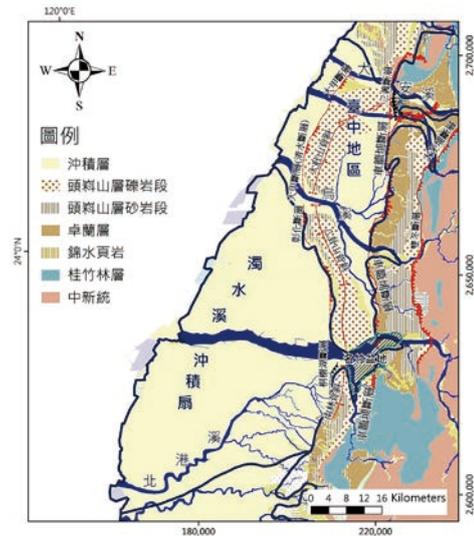


圖 2 中部地區地層、河川、地下水分區示意圖

新世約 100 萬到 1.2 萬年前年沉積之礫石層為頭嵙山層礫岩，與全新世 1.2 萬年前以來地表沖積礫石層岩性相似，交界面常不易分辨，本文統稱二者為礫石層，並依沖積年代和位置之差異將礫石層分成三期（圖 2 和圖 3）：

第一期礫石層：分布於雙冬斷層以西，頭嵙山至雙冬九九峰之間；本期礫石層於臺中草湖溪剖面出露厚度約 800 公尺，其岩層緻密略有膠結性因此透水係數和比出水率應為三期中最低者。

第二期礫石層：分布於車籠埔斷層以西，火炎山、大肚山、八卦山、斗六丘陵以及后里台地、臺中盆地和名竹盆地中；中油公司后里一、二號探井顯示本期礫石層厚達 800 公尺，其岩性緻密，透水係數和比出水率在一和三期之間。

第三期礫石層：分布於后里台地－大肚山－八卦山－斗六丘陵以西之沖積層，其岩性疏鬆，透水係數和比出水率為三期中最高的。

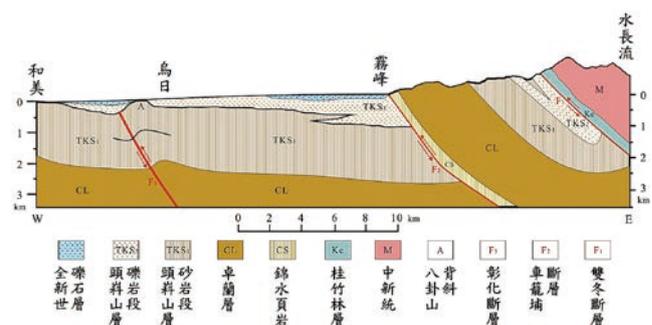


圖 3 沿烏溪附近之東西向地層（剝除地表全新世砂、泥層）剖面

本區晚更新世第一期造山帶以雙冬斷層為前緣，其西側前陸盆地沉積巨厚的陸相之第一期礫石層和淺海相砂泥岩層。之後隨著造山帶向西推進，車籠埔斷層以西成為二期前陸盆地，沉積第二期礫石層。在彰化斷層和大肚山－八卦山背斜形成後，前陸盆地再度向西遷移到現今的沖積扇及海岸平原，沉積第三期礫石。磁生物地層研究結果顯示第一期礫石層沉積年代介於 100 萬到 78 萬年前之間，而第二期礫石層沉積年代為 78 萬到 12 萬年前之間^[9]。熱螢光定年顯示八卦台地頂部沉積年代約 11 萬到 12 萬年前^[10]，與第二期礫石層頂部磁生物地層定年結果相當一致。因彰化斷層僅局部逆衝至地表，故第二期礫石層向西分布下伏於第三期礫石層下方。第三期礫石層相當於濁水溪沖積扇晚更新世 12 萬年以後沉積之第二含水層（F2）和全新世 1.2 萬年來沉積之第一含水層（F1），在扇頂第一二含水層礫石層合計厚度約 150 公尺，向西逐漸變薄，至海岸線已無第三及第二期礫石層之分布。

在槽地下水庫

臺灣地區缺乏大型水庫，在 109 年無颱風帶來降雨，接著 110 年 5 月底以前春雨和梅雨降雨不豐，水庫蓄水不足，河川流量幾近枯竭，造成西臺灣用水嚴重短缺，其中以中部地區苗栗縣、臺中市及彰化縣北部缺水最為嚴重。政府於是在尚無地陷問題的臺中盆地開鑿抗旱井，引用建築基地抽排之地下水，並在大安溪和烏溪開發伏流水渡過百年一見的大旱，蘊藏地下水之臺中盆地礫石層成為抗旱水庫。

地下水蓄水量雖然龐大，地下水抽用量卻受到含水層自然補注量、地層下陷或海水入侵等之限制，以中部

地區最主要含水層濁水溪沖積扇為例，因超抽導致地下水位自民國 64 年起到 78 年間累積下降 15 公尺以上，造成雲林和彰化局部地區發生嚴重地層下陷^[11]，雖然進行乾季河床築土堤蓄水補注以及地下水管制以減緩水位之洩降，迄今尚未能全面提升地下水位及抑制地層下陷。至於臺中盆地雖無地陷問題，然而其地下水位亦即蓄水量逐年降低（圖 4），顯示其地下水補注量低於抽水量，有違永續利用之原則。

名竹盆地為八卦山－內林背斜與車籠埔斷層間之構造盆地，總面積約 53 平方公里，盆地中新民及竹山地質鑽探深 210 公尺主要為礫石層^[12]，地物測勘結果顯示礫石層最大厚度約 400 公尺^[13]，主要為第二期礫石層上覆第三期礫石層，蓄水容積龐大。此外，名竹盆地位處濁水溪與清水溪會流區，地表下巨厚的礫石層極易得到補注；由於隘口濁水溪河床下背斜軸砂岩泥岩互層分布如同大壩阻擋低於壩頂之地下水向下游流失，因此盆地全年地下水深維持在地表附近，並且與濁水溪沖積扇等水位形成巨大落差^[14]，此類河床下含水層可做為「在槽地下水庫」進行供水調配。名竹在槽地下水庫長期處於近似滿庫狀態，其蓄水容積尚未被靈活運用。如果能規劃抽用名竹盆地地下水，補充彰化雲林地區之用水，抽水造成之水位洩降開創出的蓄水容積可獲得濁水溪和清水溪洪峰的補注，在水資源開發及減洪上發揮功效，並可減少濁水溪沖積扇抽水量，有助地下水位回升以及地陷控制。

名竹盆地地下水庫供水潛能模擬

為進一步說明前述在槽水庫之概念，本研究進一步以名竹盆地為例，以數值模擬方式評估在給定之

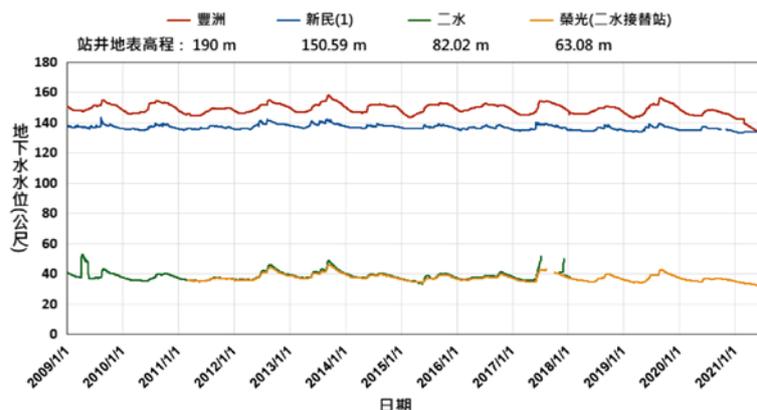


圖 4 臺中盆地豐洲站、名竹盆地新民站及濁水溪沖積扇二水、榮光站地表高程及 2009 年 1 月至 2021 年 7 月地下水位歷線

操作原則下之供水潛能。筆者曾於 2017 年協助中央地質調查所評估濁水溪沖積扇及名竹盆地之地下水庫活化方案與效益^[15]，本研究以當年度率定完成之 MODFLOW 地下水數值模式為基礎，將名竹盆地淺層河川沖積層下方之頭嵙山地層納入地下水庫營運範圍，數值模式於名竹盆地原第一分層下方增加第二分層，而分層厚度則參考中央地質調查所「臺灣中段山區地下水資源調查與評估」報告^[16]之地電阻探勘結果，假設厚度約介於 120 公尺至 160 公尺，因此，第二分層主要為頭嵙山礫岩組成，透水係數較淺層沖積層差，故水文地質參數設定上，假設水平向透水係數為 0.8 m/day，垂直向透水係數為 0.08 m/day，而比儲水係數設定為 9.18×10^{-6} ^[15]。

根據中央地質調查所「臺灣中段山區地下水資源調查與評估」模擬結果顯示，名竹盆地淺層井群全年抽水對地表水影響較大，故本研為減少抽水對枯水期河川流量之影響，抽水深度設定於第二分層，另為考量地表水系統常於枯水期發生缺水，故皆於枯水期 3 至 5 月進行抽水。抽水井空間分布則考量兩種方案，方案 1 為盆地隘口鄰近區域設立抽水井群，方案 2 則沿濁水溪主流河岸設立抽水井群，相關空間分布如圖 5 所示，抽水井群數量為 30 個格網，格網大小為 250 m × 250 m 至 500 m × 500 m 不等，每個格網抽水量則為 7,400CMD，井群總抽水量約 22.2 萬 CMD，枯水期供水效益大。為了解

兩方案抽水對於地下水環境之影響，第一分層隘口至集集攔河堰沿岸設置地下水位監測井，監測井空間分布如圖 5 所示。

兩方案監測井及觀測井之模擬水位變化如圖 6 所示，由模擬水位變化可看出，隘口西側的二水(1)及烏塗(2)觀測井，皆不受抽水影響，而監測井 01 至監測井 04 受方案 1 之抽水影響較大，而監測井 05 至監測井 08 受方案 2 之抽水影響較大，其中 5 月份皆為地下水洩降影響最大月份，然而停止抽水後地下水位即逐漸上升，12 月份時已相當接近抽水前之水位，顯示此種營運方式之永續性。

另外，本研究亦進一步評估抽水後對濁水溪及清水溪匯流口之河川流量進行影響評估，河川交換量統計結果如表 2 所示，結果顯示兩方案對於河川流量減少比例皆小於 10%，其中各月份減少比例，方案 1 皆比方案 2 小。

綜合以上分析結果，名竹盆地在枯水期於較深層抽水，除了可提供豐沛之供應水量外，對河川流量影響程度小，且停止抽水後，地下水位亦皆可於當年回復至抽水前水位，顯示此種操作情境確可滿足永續營運原則，名竹盆地之可能操作方式應不只前述兩種，本文在此無意探討名竹盆地之最佳營運方式為何，僅以永續可行的操作方式為例，說明名竹盆地在槽水庫之供水潛能。

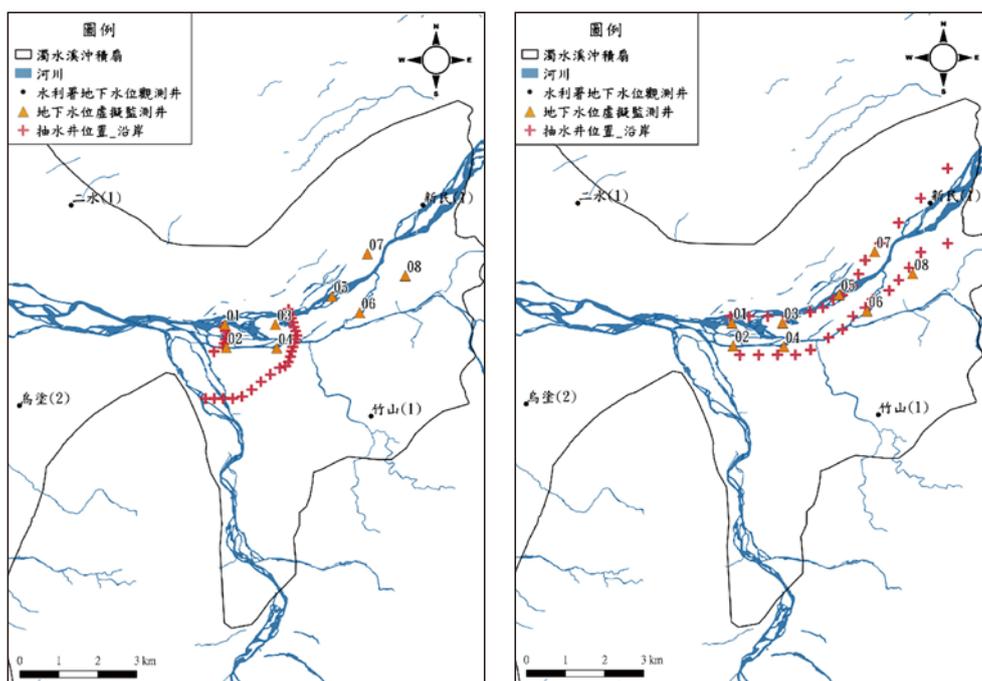


圖 5 方案 1 及方案 2 之抽水井群及監測井群分布圖

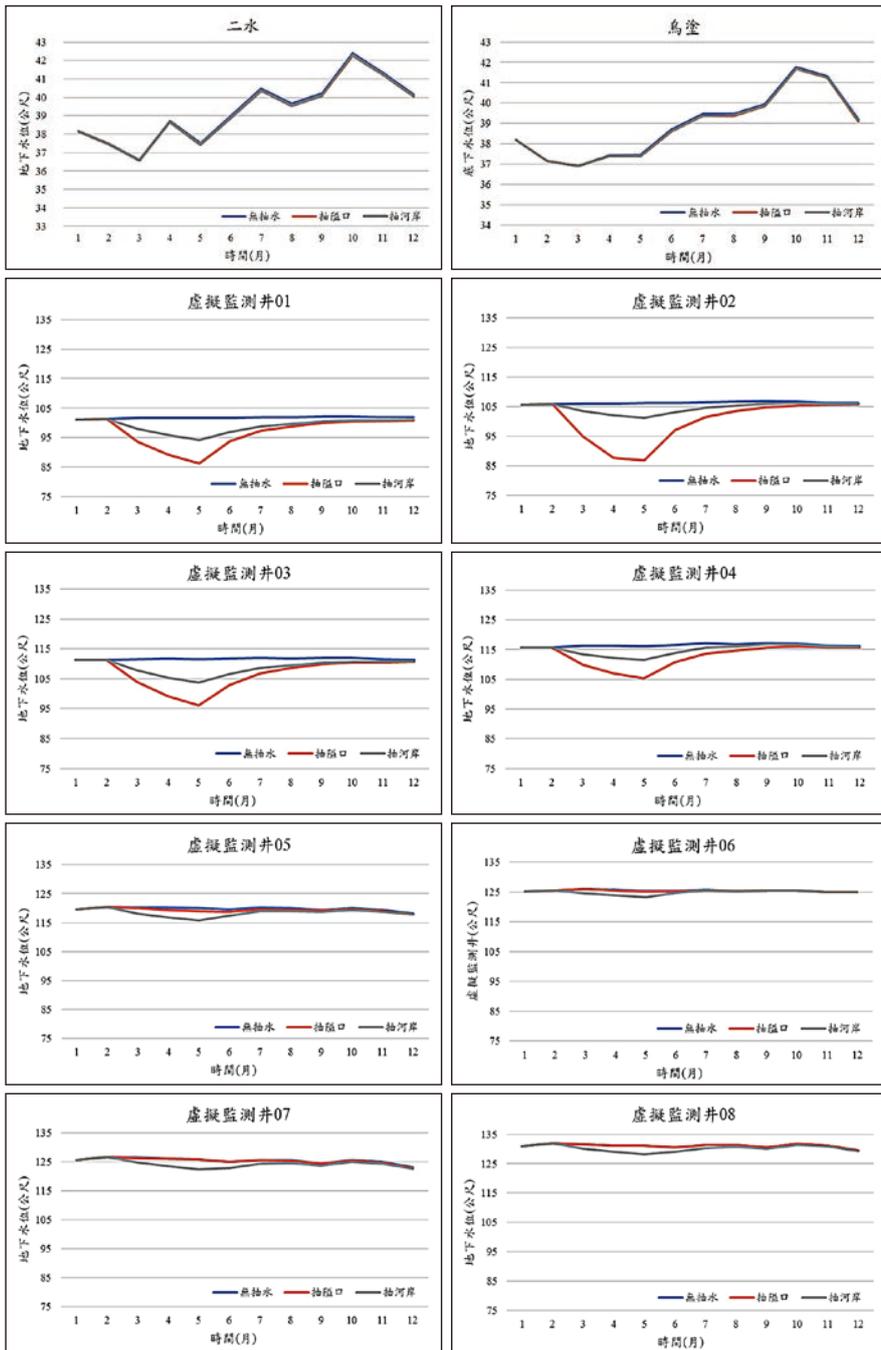


圖 6 各監測井及觀測井抽水後之模擬水位變化

表 2 不同方案之河川流量變化

	三月	四月	五月
零方案	9,360,000	5,330,000	1,290,000
方案 1	9,300,000	5,250,000	1,200,000
方案 2	9,280,000	5,220,000	1,180,000
方案 1 河川流量減少量	63,200	83,500	93,300
方案 2 河川流量減少量	80,900	110,000	115,000
方案 1 河川流量減少比例	0.7%	1.6%	7.2%
方案 2 河川流量減少比例	0.9%	2.1%	8.9%

(流量單位：CMD)

地下水庫永續營運原則

前述各節多少已提及地下水庫之概念，在此將對地下水庫進行更明確之定義，並論述地下水庫管理之基本原則。

地下水庫定義

本文對地下水庫定義為「具有天然或人工補注之含水層，在永續供水營運下不造成環境衝擊」。

由此定義可見含水層為地下水庫之基礎，惟含水層並不一定等於地下水庫，含水層為地下水系統本身客觀的描述，地下水庫則隱含了水源調配的意涵。適合進行地下水庫營運的含水層，必需有充分的補注來源，就有如地表水庫一般，需有入流水源，如此水量的取用才可獲得補充，配合庫容才能因應需求進行永續供水調配，含水層未必有良好之天然補注，如前述因河川被襲奪而失去河川補注之桃園中壢台地，則無穩定之天然補注來源。地下水庫之補注來源不僅是自然補注，亦可是人工補注或是兩者皆有，前述在槽地下水庫則是有良好之天然補注。另外，若能進行人工補注，則亦可對特定含水層進行地下水庫經營，這也意味著進行地下水永續營運之含水層

即為地下水庫。地下水庫雖然與地表水庫，都是在進行供水調配，惟地下水庫與地表水庫仍有本質上的不同，說明如下。

地下水庫邊界

地表水庫邊界及庫容定義清楚，水庫水位與蓄水量關係明確，因此可直接以蓄水量為狀態變數進行放水調配管理。地下水庫則邊界定義較彈性，其可為地質邊界，亦可在營運影響範圍外之水力條件邊界，其中之取捨則視分析或管理之需要而定。前述在槽地下

水庫之論述，皆以地質單元為對象進行說明，因此皆以各自對應之地質單元為範圍與邊界。

管理水位

地表水庫水位單一且水庫水位與蓄水量關係明確，因此以蓄水量或水位進行營運管理都是相同，地下水庫則因含水層之地質異質性，導致地下水流動之能量損失各處不同，因此不同位置之地下水頭（拘限含水層）或地下水位（非拘限含水層）並不相同，且抽取一單位水量所引起的水位（或水頭）洩降，拘限含水層之水頭變化亦遠大於非拘限含水層之水位變化。因此，地下水庫在地下水位與儲水能力各地不同及邊界視問題而異等因素下，不易於以儲水量做為系統之狀態做為管理的基礎。反之，地下水位可直接觀測，且抽水直接影響地下水位。另外，地層是否因過度抽水而下陷，是制約地下水供水量的主要因素，而這亦可由限制地下水位的洩降來控制。因此，地下水位適合做為地下水庫管理之基礎，在進行地下水庫營運管理之前需先定義管理水位，以規範地下水之運用，其作用類似於地表水庫之操作規線，以下為管理水位之定義及應考量因素。

管理水位定義

界定不同地下水位區間之水位標準，以規範地下水庫營運，不同水位區間可有不同操作原則，管理水位應至少包括可允許之最低與最高水位。

管理水位考量因素

- (1) 管理目的：地下水庫營運之目的，將影響訂定管理水位之考量機制。例如以供水為目的之地下水位變動範圍，或是以減緩地層下陷為目的之水位抬升範圍等，前者可以地下水位觀測資料之統計量為基礎定義之，例如最低水位可為超越機率90%之水位值等^[17]，後者則無法以過去之水位觀測資料統計分析而得，而需進行地層下陷分析^[18]。
- (2) 點和面之管理：地下水庫之營運需藉由抽補井、補注池或取水隧道等構造物達到，其對地下水位之影響，愈接近構造物愈顯著，並隨距離快速遞減。然而長期而言，亦將降低區域之地下水位，因此，嚴格而言應有鄰近營運區之監控井及其管理水位，與掌控全區之區域性管理水位，而此區域管理水位可為多口井之統計量，並視需要進行分區訂定管理。

滾動式管理

地下水系統由於地質異質性，因此其相關調查與分析，無可避免的會有較高的不確定性，尤其是相對於地表水系統，在同樣的投資與觀測密度下，一般而言不確定性會較高，而這較高的不確定性，常阻礙對地下水的進一步管理或開發，而停留在無止盡的調查分析中。事實上，地下水系統即使有水位觀測系統以觀測系統的狀態變化，但引起此變化的外部自然影響如地表補注及河川補注，甚至既有的抽水量等皆不易觀測，因此地下水系統之刺激與反應間之關係不易確認，然而，若是有人為營運加入，則營運後對系統新增之抽水量，及其引起之地下水位變化量皆可觀測，因此，我們可掌握新增之系統刺激及反應，逐步更新及增加對系統本身的認知，進而逐步降低不確定性。這也是地下水滾動式管理的基本原理。圖7為滾動式管理的流程圖，如圖中所示先進行第一階段觀測及調查，使我們對系統有一定程度之掌握後，再進行第一階段開發營運，接著再進行第二階段的資料或調查，然後進行第二階段營運規則或系統之修正更新，如此不斷逐步修正或更新，即為滾動式管理。由滾動式管理步驟可知，隨著不斷的更新修正，可掌握的系統刺激及反應也愈多，對系統特性的了解也可逐步提高，不確定性降低的同時系統管理也愈有效率，前述之管理水位也應在此流程下逐步檢討更新。

地面與地下水聯合營運

臺灣地區地面水系統已相當發達，因此實務上地下水系統勢必需與現有地面水系統聯合營運，圖8為地面地下聯合營運示意圖，由圖8中又可依地面水是否引水補注地下水系統而可分成以下兩大類。

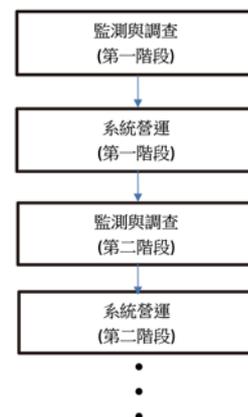


圖7 滾動式管理流程圖

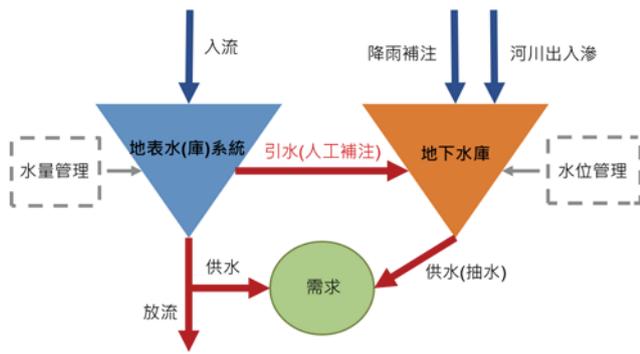


圖 8 地面地下水聯合營運示意圖

需求端聯合營運

地面與地下水系統在水源端不互動，即如圖 8 中，無地面引水至地下水，兩個系統僅依共同之需求端進行聯合營運，此為較簡單之情況，若再給定供水之優先順序，則整體系統供水能力為各自系統供水能力之合。前述名竹地下水庫供水能力分析之結果可為濁水溪流流域地面地下水聯合營運在需求端聯合營運下之參考。

供需端聯合營運

若地面與地下水在水源及需求端皆有連結如圖 8 所示，則地面與地下水有緊密互動，例如地下水系統若除了抽水外還有人工補注，則此人工補注勢必來自地面水，此時在水源端兩個系統將產生互動，供需端聯合營運下整體系統可有較大效益，產生一加一大於二之效能，惟此時地面地下水系統將無法切割，必須整體考量。

結論

綜合含水層之含水層容量、補注源、流通性等因素，各地下水區含水層供水潛能以屏東平原、蘭陽平原、濁水溪沖積扇、臺中盆地及花東縱谷等較佳。臺北盆地雖然含水層供水潛能中等，但淺層有區域性泥層分布，形成大面積之受壓含水層，濁水溪沖積扇自扇央以下亦有相當厚度之泥層出現，因此這兩區抽水都將引起地下水顯著下降，需謹慎營運。以較大之區域而言，中部地區礫石層厚、透水性高且河川補注容易，土層壓縮性亦低，為地下水資源最豐富之區域。有河川補注之含水層非常適合作為在槽地下水庫進行供水調配，經初步模擬分析顯示名竹盆地在槽地下水庫，確可在永續經營的原則下，在枯水期提供至少每天約 22 萬 CMD 的水量，效益顯著，名竹盆地之可能操作方式應不只本文所述兩種，本文在此僅以永續可行的操作方式為例，說明名竹盆地在槽水庫之供水潛能。地下水管理應以地下水

位為基礎，並應採滾動式管理策略，逐步降低不確定性並同時推動地下水管理實務，僅依靠調查監測本身去降低不確定性，至一般地表水系統之水準，實務上並不切實際。

參考文獻

1. 簡俊彥 (2015)，環境變遷對永續水資源之挑戰，土木水利，第四十二卷，第三期，第 20-23 頁。
2. 巨廷工程顧問股份有限公司 (2018)，石門水庫既有設施防淤功能改善工程計畫綜合報告，經濟部水利署北區水資源局。
3. 聯合大地工程顧問股份有限公司 (2012)，曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫曾文水庫防淤隧道工程基本設計報告，經濟部水利署南區水資源局。
4. 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注源。經濟部中央地質調查所彙刊第十五號，第 49-67 頁。
5. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭 (2005)，濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討。經濟部中央地質調查所彙刊第十八號，第 1-28 頁。
6. 何春蓀 (1986)，臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所出版，第 17-19 頁，第 110-117 頁。
7. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥、費立沅 (2004)，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估。經濟部中央地質調查所彙刊第十七號，第 21-51 頁。
8. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥 (2006)，以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支。經濟部中央地質調查所彙刊第十九號，第 61-89 頁。
9. 洪崇勝 (2009)，臺灣中部頭料山層之磁生物地層研究。行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告，共 17 頁。
10. 邵屏華、陳華玟 (2001)，南投地區第四紀地層之熱螢光對比及定年學研究報告。經濟部中央地質調查所，共 40 頁。
11. 江崇榮、林燕初、陳建良 (2011)，地下水位與地表高程互動模式之研究。經濟部中央地質調查所特刊第二十四號，第 1-35 頁。
12. 經濟部中央地質調查所 (1999)，臺灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告附錄，第 2-117 頁，第 2-120 頁。
13. 董倫道、蔣立為、陸挽中、黃智昭、王詠綸 (2017)，地電法應用在名竹盆地之地下水潛能評估，經濟部中央地質調查所特刊第二十九號，第 97-120 頁。
14. 江崇榮、陸挽中、林燕初、張閔翔、陳瑞娥 (2017)，八卦山-內林背斜之水文地質特性，經濟部中央地質調查所特刊第二十九號，第 1-18 頁。
15. 國立交通大學、嘉南藥理大學、中華民國地質學會 (2017)，地下水水文地質與水資源調查-地下水庫活化與效益評估 (1/4)，經濟部中央地質調查所。
16. 財團法人成大研究發展基金會 (2012)，臺灣山區地下水資源調查研究整體計畫-臺灣中段山區地下水資源調查與評估 (3/4)。
17. 國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 (2015)，臺灣地下水區可用水量調查分析及伏流水調查規劃前期作業成果報告，經濟部水利署水利規劃試驗所。
18. 美商傑明工程顧問臺灣分公司 (2017)，用水調查統計暨地下水可用水量調查分析試辦計畫，經濟部水利署水利規劃試驗所。