

濁水溪流域內集水區地下水流動性與交換量評估

Evaluation of Inter-catchment Groundwater Flow in Choshui River Basin

國立成功大學資源工程學系
碩士生

陳信宇
Hsin-Yu Chen

國立成功大學資源工程學系
副教授

葉信富*
Hsin-Fu Yeh

摘要

水文模式通常假設集水區之間地下水流在邊界沒有交換，稱為封閉式模式，然而這種假設經常不符合實際狀況。因此，本研究選擇濁水溪流域五個相鄰的集水區作為研究區域，利用 2011 年至 2020 年水平衡資料計算有效集水區指數，判斷集水區是否有地下水進出的情況，同時以開放式降雨-逕流模型探討地下水交換量。結果顯示，內茅埔集水區從外部接收地下水，龍門橋集水區則向外輸出地下水。研究結果發現開放式模式表現大多優於封閉系統模式表現，內茅埔集水區在乾季時期，封閉模式有低估流量的現象，在開放模式即能準確地預測流量。全年尺度下，內茅埔集水區年均地下水交換量為 472 mm，佔年均降雨 22 %；龍門橋集水區年均地下水交換量為 340 mm，佔年均降雨 11 %。其中，乾季時期內茅埔集水區與龍門橋集水區地下水交換量佔同時期降雨的比例高達 55 % 與 19 %，本研究結果顯示地下水交換量在整體水文循環中為重要的組成，評估地下水交換量能提升水平衡估計水資源與其應用上的準確性。

關鍵詞：地下水流、水平衡、降雨-逕流模式、濁水溪流域。

* 通訊作者，國立成功大學資源工程學系副教授
701 台南市大學路 1 號 · hfych@mail.ncku.edu.tw

Evaluation of Inter-catchment Groundwater Flow in Choshui River Basin

Hsin-Yu Chen

National Cheng Kung University Department of
Resources Engineering

Hsin-Fu Yeh*

National Cheng Kung University Department of
Resources Engineering

ABSTRACT

The hydrological model, often known as the closed model, typically assumes that there is no groundwater exchange at the boundaries between catchments. Yet, this assumption is rarely satisfied. Therefore, this study selected five adjacent catchments in Choshui River Basin and calculated the effective catchment index to determine whether there is groundwater exchange using water balance data from 2011 to 2020. In this study, an open rainfall-runoff model was used to quantify groundwater exchange. Nei Mao Pu catchment receives groundwater, while the Long Men Bridge catchment exports groundwater. The performance of the open rainfall-runoff model was superior to that of the closed model. During the dry season, streamflow in the Nei Mao Pu catchment was overestimated by the closed model while being accurately predicted by the open model. Annual average groundwater exchange in the Nei Mao Pu catchment is 472 mm, accounting for 22% of the annual average rainfall. Annual average groundwater exchange in the Long Men Bridge catchment is 340 mm, accounting for 11% of the annual average rainfall. In the dry season, the proportion of groundwater exchange to the rainfall was 55% and 19% in Nei Mao Pu and Long Men Bridge catchment, respectively. This study suggests that groundwater exchange is an important component of the hydrological cycle. The evaluation of groundwater exchange may increase the precision of water balance estimation and related applications.

Keywords: Groundwater flow, Water balance, Rainfall-runoff model, Choshui river basin.

一、前言

集水區 (catchment) 是根據地表地形，流向河道某特定截面或是低地的排水區域，也是低級序河川所對應之流域 (basin)，在分析上經常視為一個獨立水文系統。該系統的上邊界為地表，側邊界由山脊稜線，又稱分水嶺 (divide) 垂直往下所圍繞而成 (Chow *et al.*, 1988)，下邊界理論上為零流量邊界 (no-flow boundary)，實際常以表土基部，其滲透係數大幅下降的深度，或是地下水系統底部，意指未風化基岩的深度等方法來界定，然而集水區的深度目前尚未有一致的定義 (Condon *et al.*, 2020)。

水平衡是將質量守恆定律套用在集水區，用途包含預測流量、土壤含水量以及地下水可用量等，是評估潛在水資源重要方法。完整水平衡方程式應考量流量、降雨、昇華、蒸發散、通過側邊界的地下水流 (Inter-catchment Groundwater Flow, IGF)、跨越分水嶺的人為抽注水以及儲水量變化等 (Kampf *et al.*, 2020)，通過側邊界的地下水流受到技術限制，不易量測而常忽略，忽略儲水量變化的恰當性與時間尺度有關，在多年尺度下，儲水量變化佔降雨量不到 1% (Wang, 2012)，而在年度尺度或更短的時間尺度下，忽略儲水量變化可能是有疑慮的 (Rice and Emanuel, 2019; Safeeq *et al.*, 2021)。簡化後的水平衡僅考慮流量、降雨以及蒸發散等三個通量，稱為封閉式水平衡，常見的 Budyko 架構與 L'vovich 兩階段水平衡都是建立於封閉式水平衡的概念 (Budyko *et al.*, 1974; L'vovich, 1979)。

集水區之間的地下水流 (IGF) 除了影響河川水質、農業污染變動、礦物的生成與遷移、集水區生態功能以及乾旱傳遞以外，也會影響水平衡在地下水補注與水資源評估上的應用，因此雖然評估 IGF 很困難，但有其必要性 (Ameli *et al.*, 2018; Bouaziz *et al.*, 2018; Hellwig *et al.*, 2022)。研究指出事件尺度下 IGF 可佔降雨量 20% ~ 30% (Egusa *et al.*, 2021; Le Mesnil *et al.*, 2021)；年度尺度下，IGF 佔降雨量 10% (Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014; Bouaziz *et al.*, 2018)，因此，IGF 在不同時間尺度下，都可能成為水平衡中重要的組成 (Frisbee *et al.*, 2016; Le Mesnil *et al.*, 2020)。

在簡化的區域水文地質架構中，假設地下水行為僅受到地形梯度所控制，區域地下水流 (regional groundwater flow) 會從上游集水區流向下游集水區，因此上游集水區會傾向輸出地下水，而下游集水

區則傾向接收地下水 (Fan, 2019)。集水區之間地下水連通效果還會受到許多因素影響，在地下水位較低，補注量較少的乾燥氣候區域，IGF 越顯著 (Schaller and Fan, 2009)，Liu *et al.* (2020) 進一步指出乾燥係數 (aridity index) 越大的集水區越傾向於排出地下水。面積也是影響地下水在集水區之間流動因素，面積越小的集水區，越有可能發生地下水交換的情形，相反地，面積越大的集水區則傾向於獨立系統 (Schaller and Fan, 2009)。其它與水力梯度的相關因子，包含滲透係數或是覆蓋材料的孔隙率都會影響地下水在集水區之間連通效果。此外，地質條件與不連續面也扮演重要的角色，包含沉積岩層面、斷層系統內裂縫、喀斯特系統內的地下通道都能提供地下水良好的通道，過去研究也證實 IGF 在沉積岩與火成岩環境集水區的重要性 (Charlier *et al.*, 2011; Frisbee *et al.*, 2016)。

由於地下水在集水區之間交換量 (IGF) 無法直接量測，量化困難，因此要了解 IGF 行為僅能透過間接資訊獲得。目前分析的方法大致有三類 (Bouaziz *et al.*, 2018)，分別是地球化學法 (Charlier *et al.*, 2011; Frisbee *et al.*, 2016; Alvarez-Campos *et al.*, 2022)、分布式模擬法 (Ball *et al.*, 2014; Danapour *et al.*, 2019) 以及水平衡法 (Le Moine *et al.*, 2007; Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014; Bouaziz *et al.*, 2018)。地球化學法主要是利用示蹤劑追蹤水分來源，但水質的採樣到檢驗須消耗成本較高，使得這種方法無法大量應用。分布式模擬法則需要研究區域詳細條件，例如：各地層分布及其水力傳導係數、地質構造等，並假設合理的邊界條件下進行模擬。而水平衡方法所需的資料較易取得，常作為初步分析，除了可以利用有效集水區指數 (Effective Catchment Index, ECI) (Liu *et al.*, 2020) 等指標來評估 IGF 顯著性外，也常利用集塊式降雨-逕流模型來評估 IGF，例如：喀斯特模型 (Lumped Karst Simulation Models) (Hartmann *et al.*, 2014)、GR 系列模型 (日尺度 GR4J 和月尺度的 GR2M) (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier, modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) (Le Moine *et al.*, 2007; Le Moine *et al.*, 2008; Lerat *et al.*, 2012)、SMAR (Soil Moisture Accounting and Routing) 模型 (Le Moine *et al.*, 2007)、abcd 模型 (Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014) 以及考慮水文遲滯的概念模型 (Bouaziz *et al.*, 2018) 等。

雖然許多研究利用示蹤劑或分布式模型評估 IGF，但上述兩種方法在資料取得與分析上具有較大

的門檻，因此本研究透過較便捷之水平衡方法評估 IGF。藉由蒐集降雨、流量以及潛勢蒸發散等水文資料，提出同時以有效集水區指數 (Effective Catchment Index, ECI) 與地下水交換參數 (groundwater exchange parameter, x_g) 雙指標來辨別地下水在各個集水區流動狀態。此外，本研究提出能取得更具有代表性參數組的流程，運用修正型 abcd 集塊式降雨逕流模型 (Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014) 推估 IGF 的大小與流向。本研究以濁水溪流域內的集水區作為研究對象，目的是評估 IGF 在水平衡中的重要性，探討忽略 IGF 是否合理等問題，增進水平衡的理解程度，提升藉由水平衡估計水資源及其應用上的準確性。

二、研究區域與方法

2.1 集水區地下水流動狀態

本研究利用有效集水區指數 (effective catchment index, ECI) (Liu *et al.*, 2020)、地下水交換參數 (groundwater exchange parameter, x_g) (Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014) (於 2.2 節介紹) 探討地下水在各個集水區流動狀態，ECI 定義如下

$$ECI = \log\left(\frac{Q}{P-E}\right) \dots\dots\dots(1)$$

其中： Q 為年均流量 (mm/year)， P 為年均雨量 (mm/year)， E 為年均實際蒸發散 (mm/year)。ECI > 0 表示進入集水區的地下水量多於離開集水區的地下水，為接收地下水的集水區 (gaining catchment)；而 ECI < 0 表示離開集水區的地下水量多於進入集水區的地下水，為輸出地下水的集水區 (leaking catchment)；若 ECI 趨近於 0 表示集水區可視為獨立系統。

2.2 封閉系統 abcd 模型與開放系統 abcd 模型

abcd 模型為 Thomas (1981) 提出月尺度集塊式降雨-逕流模型，該模式僅需降雨、總流量以及潛勢蒸發散等三個水平衡時序資料，不需考量土壤含水量、地下水位等較難取得的資料，藉由決定 a 、 b 、 c 以及 d 等四個參數，如表 1 所示，將降雨量輸入至模型後，即可模擬出流量、實際蒸發散以及儲水量等水文過程在時間上變化，為簡單且概念易懂的模型。

該模型具有兩個儲水量，分別是上層土壤含水量 (S) 與下層地下水含水量 (G)，如圖 1 所示。在第

表 1 abcd 模型參數說明與率定限制範圍

參數	意義	單位	範圍
a	上部土壤層飽和前形成逕流的傾向	無因次	$0 \leq a \leq 1$
b	上部土壤層儲水量上限	mm/month	$0 \leq b \leq 4000$
c	上部土壤層補給給下部地下水層的比例	無因次	$0 \leq c \leq 1$
d	下部地下水層形成間接逕流的比例	無因次	$0 \leq d \leq 1$
x_g	地下水交換參數	無因次	$x_g \geq 0$

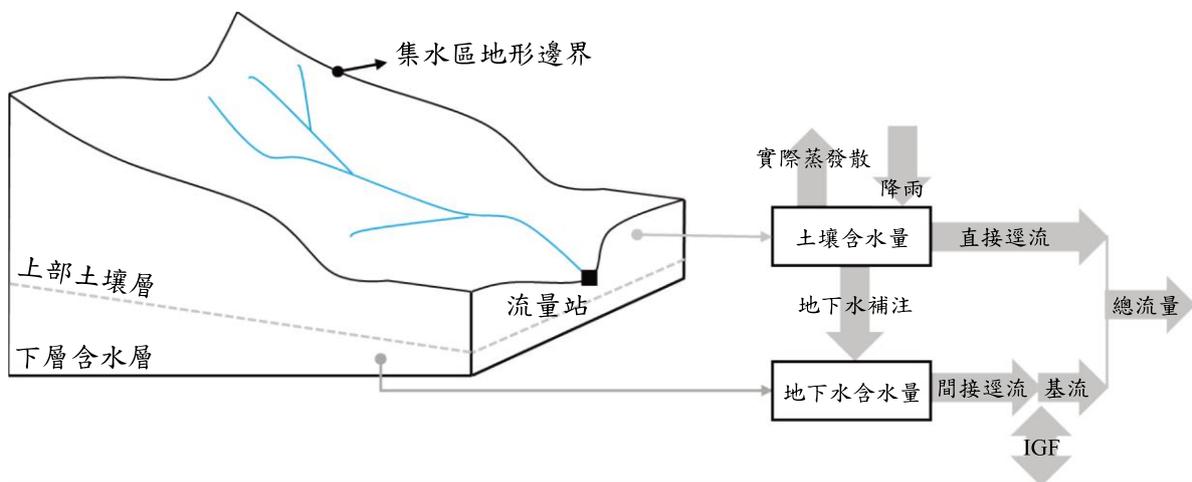


圖 1 可考慮側向地下水流(IGF)之開放式 abcd 模型示意圖

t 個月，上層土壤含水量的輸入僅有降雨量 (P_t)，而輸出有實際蒸發散 (E_t)、直接逕流 ($Q_{d,t}$) 以及地下水補注 (R_t)。上層土壤的水平衡可記作

$$S_t - S_{t-1} = P_t - E_t - Q_{d,t} - R_t \dots\dots\dots(2)$$

abcd 模式中，定義可能蒸發散量 (evapotranspiration opportunity, Y_t) 為當月實際蒸發散與當月土壤含水量之總和 ($Y_t = E_t + S_t$)，意義為能以蒸發散形式離開集水區的最大水量；另外定義有效水量 (water availability, W_t) 為當月降雨與上月土壤含水量之總和 ($W_t = P_t + S_{t-1}$)，意義為上層土壤可能最大輸出量。可能蒸發散量 (Y_t) 會隨著有效水量 (W_t) 增加而提升，但增加速率會遞減最後趨於定值，兩者的關係由 a 和 b 參數決定，如圖 2 所示

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}} \dots\dots\dots(3)$$

其中： a 為上層土壤飽和前形成逕流的傾向，範圍介於 0 至 1 之間； b 為土壤層含水量上限。

假設可能蒸發散量 (Y_t) 分配給當月實際蒸發散 (E_t) 與當月土壤含水量 (S_t) 的狀況受到土壤層含水量上限 (b) 與潛勢蒸發散 (E_p) 影響。當土壤層含水量上限 (b) 越大，可能蒸發散量偏重於分配給土壤含水量；相反地，當潛勢蒸發散 (E_p) 越大，可能蒸發散量偏重分配給實際蒸發散，因此土壤含水量與實際蒸發散分別假設為：

$$S_t = Y_t \left[\exp\left(-\frac{E_{p,t}}{b}\right) \right] \dots\dots\dots(4)$$

$$E_t = Y_t \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{p,t}}{b}\right) \right] \dots\dots\dots(5)$$

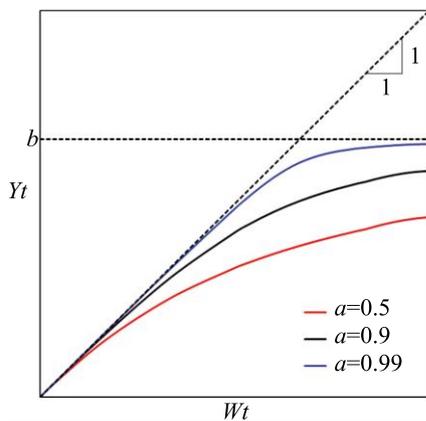


圖 2 abcd 模型中可能蒸發散 (Y_t) 與有效水量 (W_t) 的關係由 a 和 b 兩個參數控制

有效水量與可能蒸發散量的差異分配給直接逕流與地下水補注 ($W_t - Y_t = Q_{d,t} + R_t$)，是藉由參數 c 來分配，直接逕流與地下水補注分別如下：

$$Q_{d,t} = (1-c)(W_t - Y_t) \dots\dots\dots(6)$$

$$R_t = c(W_t - Y_t) \dots\dots\dots(7)$$

參數 c 表示上層土壤含水量補注給下部地下水層的比例，負責控制進入下層地下水的水量。

不考慮地下水交換的封閉式水平衡系統中，下層地下水系統的水平衡可記作

$$G_t - G_{t-1} = R_t - Q_{g,t} \dots\dots\dots(8)$$

由地下水含水層排出的間接逕流 (Q_g) 與下層地下水含水量 (G) 假設為線性水庫關係

$$Q_{g,t} = dG_t \dots\dots\dots(9)$$

參數 d 決定水在下部地下水層的平均停留時間

將第 (7) 式與第 (9) 式代入第 (8) 式整理後，地下水含水層儲水量為：

$$G_t = \frac{c(W_t - Y_t) + G_{t-1}}{1+d} \dots\dots\dots(10)$$

在原始的 abcd 模型中，不考慮集水區之間流通性，將集水區視為獨立系統，而本研究採用 Pellicer-Martínez and Martínez-Paz (2014) abcd 改良模式，考慮到從下部地下水層排出的間接逕流 (Q_g) 到抵達河川成為基流 (Q_b) 的過程中可能受到 IGF 的影響，因此將間接逕流與基流記做下列關係

$$Q_{b,t} = x_g Q_{g,t} \dots\dots\dots(11)$$

其中 x_g 為地下水交換參數。

若 $x_g = 1$ 表示間接逕流與基流相同，表示集水區不受到 IGF 影響，為獨立系統；若 $x_g < 1$ 表示基流小於間接逕流，這是因為一部分間接逕流往集水區外流動所導致，代表 IGF 往集水區外流動；若 $x_g > 1$ 表示基流大於間接逕流，這是因為此時基流的來源不僅只有間接逕流，還有來自相鄰集水區供給的 IGF 所共同組成，代表 IGF 往集水區內流動的現象。根據 IGF 出流為正、入流為負的習慣 (Bouaziz et al., 2018)，IGF 可藉由下式獲得

$$IGF_t = (1 - x_g) Q_{g,t} \dots\dots\dots(12)$$

因此， $IGF = 0$ 表示集水區為獨立系統，離開與進入集水區的地下水量相近； $IGF > 0$ 表示離開集水區的地下水量多於進入集水區的地下水，為輸出地

下水的集水區； $IGF < 0$ 表示進入集水區的地下水量多於離開集水區的地下水，為接收地下水的集水區。

2.3 參數的率定驗證與評估模型表現

分開試樣法 (split-sample) 是決定水文模型參數典型的方法 (Klemeš, 1986)，這種方法將樣本資料分割為兩段，一段用於率定，另一段用於驗證。分割方法包含除了最常見的 50/50 或 70/30 之外，也有透過隨機抽樣產生率定與驗證樣本後再決定出多個參數組的方法 (mixed-bag approach) 與適用非穩定條件下的奇偶法 (odd-even approach) 等分開試樣法 (Arsenault *et al.*, 2018)。本研究率定參數程序首先利用適用於月資料的 Mann-Kendall 趨勢檢定法 (季節性 MK test) (Hirsch *et al.*, 1982) 來檢定流量趨勢，若有流量具有顯著趨勢 ($\alpha = 0.05$) 則採用奇偶法，否則採用 50/50 分開試樣法。

為了使水文模型能適當描述各個集水區降雨-逕流過程，本研究藉由單目標函數最佳化策略決定出各個集水區在封閉系統與開放系統的參數，並以體積效率 (Volumetric Efficiency, VE) 作為模型最佳化的目標函數。VE 意義為模型模擬出觀測流量的比例， $VE = 1$ 為最理想模型， $VE > 0.66$ 、 $0.33 \leq VE < 0.66$ 、 $0 \leq VE < 0.33$ 以及 $VE < 0$ 分別代表非常好、好、平均以及差四種等級 (Ecrepont *et al.*, 2019)，與

其他效率指標相比，VE 具有意義明確且不會偏重於高流或是消退時期等特性，其計算方式為 (Criss and Winston, 2008)

$$VE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n |Q_{t,sim} - Q_{t,obs}|}{\sum_{t=1}^n Q_{t,obs}} \dots\dots\dots(13)$$

其中： $Q_{t,sim}$ 為的 t 個月的模擬流量，是直接逕流與基流之總和； $Q_{t,obs}$ 為第 t 個月觀測流量； n 為研究時期月份數。

本研究使用 2011 年一月至 2020 年十二月，共 10 年月資料來率定 abcd 降雨-逕流模型，率定參數的程序，如圖 3 所示。本研究採用 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution- University of Arizona) (Duan *et al.*, 1992) 演算法來最大化目標函數 VE。決策變數除了 a, b, c, d 等四個參數之外，還有初始土壤含水量 (S_I)、初始地下含水量 (G_I) 以及開放式水平衡中地下水交換參數 (x_g) 需要率定。研究指出 S_I 與 G_I 等初始值的改變僅對於一開始預熱期 (warm-up period) 影響較大，對後續討論沒有太大的影響，因此本研究將 S_I 與 G_I 設定為 200 mm (Zhang *et al.*, 2020)，其餘參數限制條件 (可行解範圍) 設定如下： $0 \leq a, c, d \leq 1$ 、 $0 \leq b \leq 4000$ 、 $x_g \geq 0$ (Martinez and Gupta, 2010; Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014)。值

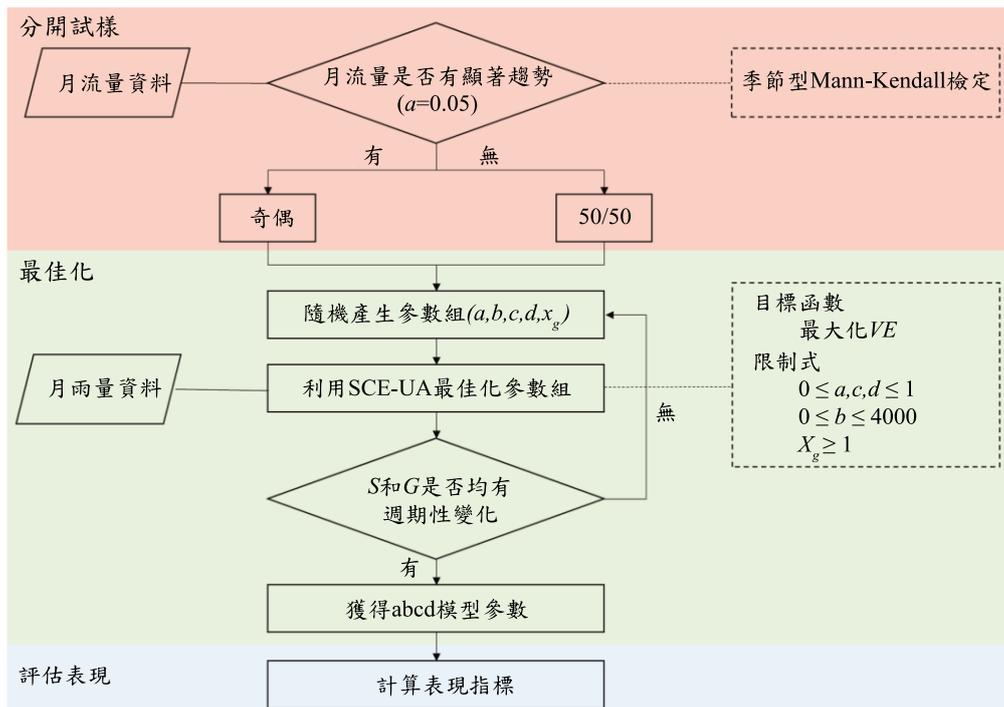


圖 3 率定參數流程

得注意的是在率定集塊式降雨-逕流模式時，多數研究只有在意模型輸出流量的準確性，對於模型內部狀態很少討論。本研究為了避免流量模擬表現極佳但模型內部發生不合理的行為，例如地下水含水層儲水量隨時間單調遞減並趨近於 0 等現象，因此在獲得最佳參數組之後，還會確認土壤儲水量 (S) 與地下水儲水量 (G) 是否隨時間呈週期性變化，目的是希望能找出具有代表性之參數組。

本研究透過 VE 、 NSE (Nash Sutcliffe Efficiency) (Nash and Sutcliffe, 1970) 以及 KGE (Kling-Gupta Efficiency) (Gupta *et al.*, 2009) 等三個指標來評估模擬流量與觀測流量之合適度，為了避免受初始值影響造成模擬流量不穩定，將第一年視為預熱期且不納入評估模型表現，當模型完美預測觀測值時，上述三個指標皆會等於 1。 NSE 是評估水文模型表現最常見的指標之一，其範圍介於 $-\infty$ 至 1 之間， $NSE = 1$ 表示模型完美預測觀測值， $NSE > 0$ 表示模型預測值優於以平均值作為預測值，通常 > 0.5 即可視為滿意的結果 (Moriasi *et al.*, 2007)， > 0.75 表示模型表現良好 (Martinez and Gupta, 2010)。 NSE 計算方式為

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{t,sim} - Q_{t,obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{t,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \dots\dots\dots(14)$$

其中： $Q_{t,sim}$ 為第 t 個月的模擬流量； $Q_{t,obs}$ 為第 t 個月觀測流量； \bar{Q}_{obs} 為平均觀測流量； n 為月份數。

本研究另外使用 KGE 來診斷模型表現， KGE 相較於傳統的相關係數，能更可靠地衡量模型預測值與觀測值之間的一致性。 KGE 考慮相關性 (correlation)、變異性 (variability) 以及偏差 (bias) 等三個特性，其範圍也是介於 $-\infty$ 到 1 之間。雖然 $KGE = 1$ 與 $NSE = 1$ 都表示模型完美重現觀測值，但兩個指標是無法直接比較的 (Knoben *et al.*, 2019)。 $KGE > 0.6$ 即可將模型參數視為滿意的結果 (Patil and Stieglitz, 2015; Zhu *et al.*, 2016)。 KGE 計算方式為

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \dots\dots\dots(15)$$

其中： r 是模擬值與觀測值線性關係， σ_{sim} 與 σ_{obs} 為模擬值與觀測值的標準差， μ_{sim} 與 μ_{obs} 為模擬值與觀測值的平均值，而第 (14) 中的 \bar{Q}_{obs} 即為第 (15) 式中的 μ_{obs} 。

2.4 半分布式模型

本研究藉由 ECI 與 x_g 雙指標與開放式模式判斷集水區狀態後，根據輸出地下水集水區一部份流出地下水，會形成相鄰接收地下水集水區基流的概念，建立半分布式模型 (Pellicer-Martínez and Martínez-Paz, 2014)，藉以估計 IGF 的可能流向與大小。在半分布式模型中，對於接受地下水集水區 (G 集水區) 而言，模擬流量的模型參數沿用開放系統模型參數來取得，並設定 IGF 為關閉狀態 (*i.e.* $x_g = 1$)，缺少 IGF 輸入的部分，則由相鄰且輸出地下水集水區的 IGF 來取代，因此模擬流量為

$$Q_G = RR(P, a, b, c, d, x_g = 1) + \sum_{L=1}^m F_{LG} \times IGF_L \dots\dots\dots(16)$$

Q_G 為 G 集水區的模擬流量， RR 為 abcd 降雨逕流模式，搭配 a 、 b 、 c 、 d 以及 x_g 等開放式系統參數，其中 x_g 設定為 1， P 為降雨，與任一 G 集水區相鄰輸出地下水的集水區 (L 集水區) 有 m 個， F_{LG} 為 IGF 從 L 集水區流動到 G 集水區的分配參數，範圍介於 0 到 1 之間， IGF_L 為 L 集水區流出的地下水。而對於輸出地下水集水區 (L 集水區) 而言，模擬流量的模型參數沿用開放系統模型參數來取得

$$Q_L = RR(P, a, b, c, d, x_g) \dots\dots\dots(17)$$

Q_L 為 L 集水區的模擬流量， RR 為 abcd 降雨逕流模式，搭配 a 、 b 、 c 、 d 以及 x_g 等開放式系統參數， P 為降雨。對於特定 L 集水區而言，所有分配參數之總和為 1。最後藉由最大化各個開放式集水區的 VE 總和來決定出分配參數，建立半分布模式，以決定 IGF 的流向與大小。值得注意的是，這種方法雖然可以考慮可能流出研究區域外的地下水流，但無法考慮來自研究區域外部的地下水流入。

2.5 濁水河流域

濁水溪發源於中央山脈的合歡山並向西流動至臺灣海峽，全長約 187 公里，是全臺灣最長的河川，流域面積約 3,157 平方公里，是臺灣第二大的流域。濁水河流域的高程由東往西遞減，本研究選擇中上游的五個相鄰的集水區作為研究對象，面積介於 81 平方公里至 2,090 平方公里，其中以寶石橋測站控制的集水區平均高程最大 (1,956 公尺)，而平均高程最低的為延平橋測站所控制的集水區 (818 公尺)。寶

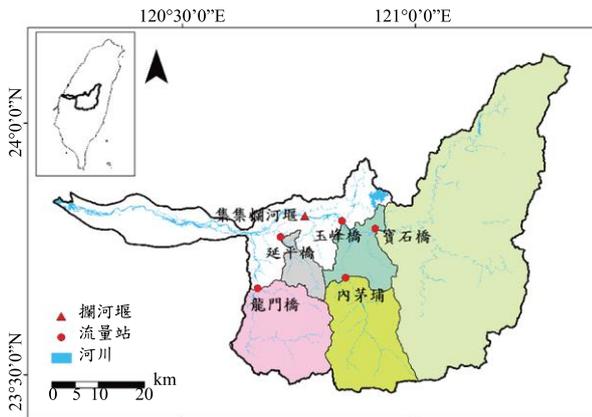


圖 4 研究區域

石橋集水區與內茅埔集水區位於玉峰橋集水區內部，另外兩個集水區（延平橋集水區與龍門橋集水區）則與內茅埔集水區、玉峰橋集水區相鄰，如圖 4 所示。

五個集水區的主要岩性分布由東向西為變質岩（板岩、千枚岩）漸變至沉積岩（砂岩、頁岩、砂頁岩互層）。受到造山運動影響，臺灣許多區域的斷層與褶皺系統內具有複雜網絡的裂隙岩體（Hsu, 2021），而岩體中的裂隙提供地下水流動良好的通道與集水區之間連通性。

2.6 資料

本研究蒐集濁水溪流域五個集水區 2011 年 1 月至 2020 年 12 月，共 10 年的雨量、流量以及潛勢蒸發散資料。雨量資料來自於臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP）提供的網格日資料，單位為 mm/day，其空間解析度為 5 km × 5 km。流量資料則是來自於經濟部水利署提供的水文年報，單位為 cms，本研究根據地形分割出的集水區面積，將單位轉換成 mm/day。潛勢蒸發散月資料則是來自於歐洲太空總署（European Space Agency, ESA）等機構共同建立之 GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model) 資料庫，單位為 mm/month，空間解析度約為 25 km × 25 km (Miralles *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2017)。本研究將上述三種資料整理成單位為 mm/month 之共 120 筆的月時序資料以進行後續分析。

三、結果與討論

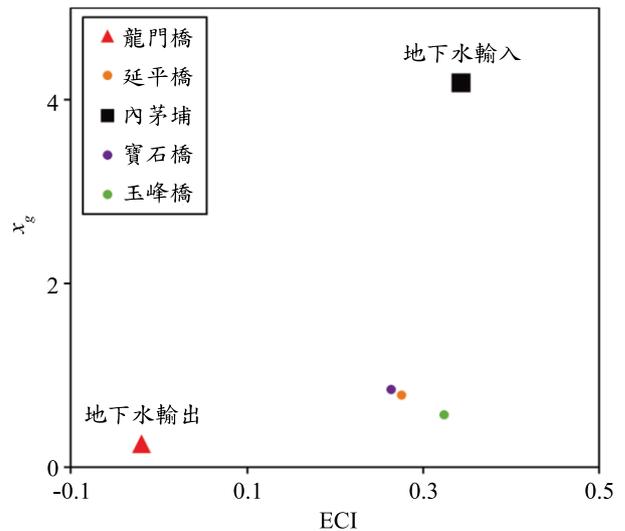


圖 5 有效集水區指數(ECI)與地下水交換參數(x_g)關係圖，推測龍門橋與內茅埔集水區有明顯的地下水交換(IGF)情形

3.1 集水區地下水流動狀態

本研究利用有效集水區指數 (ECI) 與地下水交換參數 (x_g) 兩個指標衡量 IGF 重要性與集水區狀態。ECI > 0 與 $x_g > 1$ 表示淨地下水是向外流出地形集水區邊界，ECI < 0 與 $x_g < 1$ 則表示淨地下水是向內流入地形集水區邊界。兩指標關係如圖 5 所示，兩指標呈正相關 ($r=0.5$)，且一致顯示龍門橋集水區為輸出地下水的集水區，內茅埔集水區為接受地下水的集水區，而其餘三個集水區無法確定地下水流的方向，但因地下水交換參數接近 1，因此本研究則初步將這三個集水區假設為與相鄰集水區沒有發生地下水交換的獨立水文系統，並在率定出模型參數後，以開放式模型檢驗該假設的合理性。

3.2 參數率定與模型表現

本研究利用 2011 年 1 月至 2020 年 12 月，共 120 個月的雨量、流量以及潛勢蒸發散資料率定五個集水區模型參數，其中第一年視為預熱期。首先利用季節性 MK 檢定法 (Hirsch *et al.*, 1982) 檢驗流量是否有顯著趨勢，作為穩定狀態之參考。檢定結果顯示，在顯著水準為 0.05 條件下，內茅埔、龍門橋以及玉峰橋皆具有顯著趨勢，如表 2 所示，對於非穩定狀態的時間序列，若利用前半段率定，後半段驗證的策略可能導致參數無法反應後半段的變化，雖然其餘兩站可視為穩定狀態，但為了避免不同的分開

表 2 季節性 MK 趨勢檢定 p 值

龍門橋	延平橋	內茅埔	寶石橋	玉峰橋
0.023	0.278	<0.001	0.535	0.020

試樣策略影響結果，因此本研究採用對於所有集水區皆採用奇數月率定，偶數月驗證的策略，取得能夠反應變化趨勢的 abcd 模式參數。

封閉、開放系統 abcd 模型以及半分布式模型表現，如圖 6 所示。作為目標函數的體積效率 (VE) 介於 0.57 至 0.73 之間，平均約六成的流量能夠正確模擬。NSE 介於 0.51 至 0.86 之間，KGE 介於 0.47 至 0.85 之間，除了內茅埔與玉峰橋驗證期之 KGE 未達到滿意標準 (0.6) 以外，其餘多數時期所有集水區的 NSE 與 KGE 都優於滿意標準，圖 7 顯示五個集水區模擬流量結果，龍門橋與內茅埔是利用開放系統模擬的結果，其餘集水區則為封閉系統的結果。

開放模式在地下水交換顯著的龍門橋與內茅埔兩個集水區，其表現大多優於封閉模式，如圖 6 所示。內茅埔的 NSE 在率定期與驗證期表現，開放模式與封閉模式表現相同，而 VE 與 KGE 在率定期與驗證期都有開放模式優於封閉模式表現的現象，VE 在率定期與驗證期分別從 0.71 增加至 0.73 與 0.58 增加至 0.6，增加幅度約 2.8% 與 3.0%，而 KGE 在率定期與驗證期分別從 0.77 增加至 0.8 與 0.52 增加至 0.57，增加幅度約 3.5% 與 9.6%，進步的原因是開放式模式能夠更準確估計乾季時流量，如圖 8 所示。龍門橋在率定期，三個指標均顯示開放模式優於封閉模式表現，NSE 從 0.68 增加至 0.75，增加幅度約 9.7%，VE 從 0.57 增加至 0.62，增加幅度約 9.0%，KGE 則從 0.75 成長至 0.81，增加幅度也達 8.4%，然而，龍門橋在驗證期，NSE 與 VE 顯示開放模式與封閉模式表現相同大約相同，KGE 卻顯示開放模式劣於封閉模式表現，從 0.92 下降至 0.85，下降幅度達 8.0%。

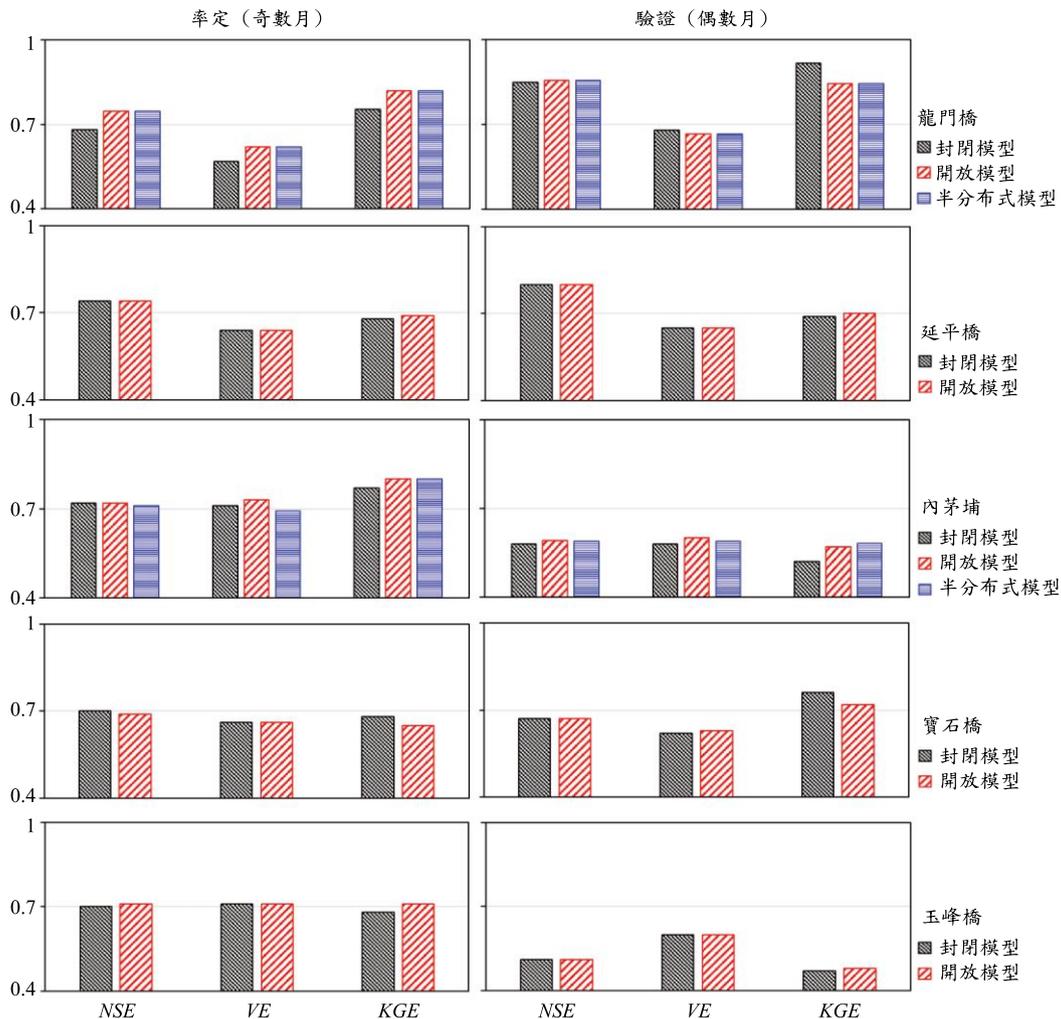


圖 6 五個集水區利用封閉模式、開放模式以及半分布式模式在率定期與驗證期的表現指標

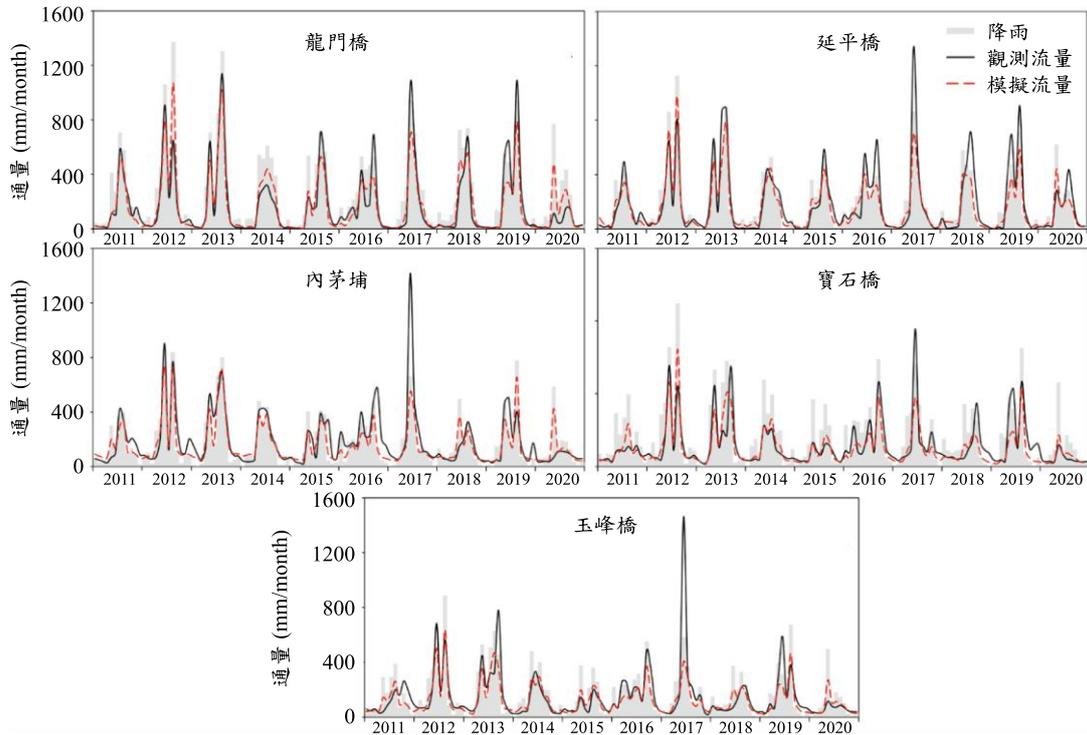


圖 7 模擬流量、觀測流量以及雨量組體圖，龍門橋與內茅埔是開放模式的模擬結果，其餘三個集水區則是封閉模式的模擬結果

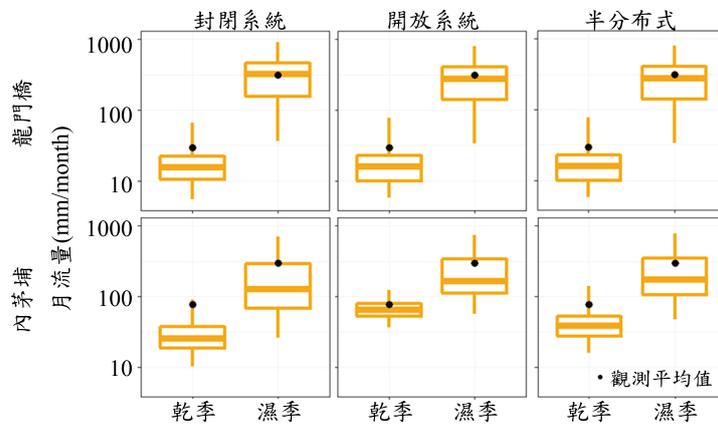


圖 8 地下水交換明顯的龍門橋和內茅埔集水區在乾濕季，利用封閉模式、開放模式以及半分布式模式模擬月流量(橘色)與觀測流量(黑色)

相較於封閉模式，考慮地下連通性的開放模式，表現大多有進步的現象，而龍門橋驗證期表現雖然有劣化的情況，但由於其驗證期表現優於率定期表現，本研究仍將該組參數視為穩健的結果。

半分布式模式是藉由輸出地下水集水區的 IGF 會形成相鄰接收地下水集水區基流的一部份此概念所建立，在半分布式中，輸出地下水的龍門橋集水區模型結果與開放模式相同；接受地下水的內茅埔集

水區則關閉開放模式中的 IGF，並由相鄰龍門橋流出的地下水取代。圖 6 顯示內茅埔站半分布式模式與開放方式模式表現幾乎相同，除了 VE 在率定期與驗證期下降約 2% ~ 3% 之外。半分布模式在乾季時期模擬表現雖然劣於開放式模式，但仍優於封閉式模式，劣於開放式模式可能原因是流進內茅埔集水區來源可能來自於研究區域以外，受到方法限制無法考量來自研究區域外輸入通量所導致，但也顯示

考慮地下水交換在內茅埔站的必要性與封閉系統的缺點。

3.3 IGF 大小與流向

在 3.1 節利用有效集水區指數 (ECI) 與地下水交換參數 (x_g) 推論龍門橋集水區為輸出地下水的集水區，內茅埔集水區為接收地下水的集水區後，本研究利用開放式模式評估其餘三個集水區的年均地下水交換量，分別為延平橋 0.6 mm，寶石橋 31.2 mm 以及玉峰橋 62.6 mm，分別佔年降雨僅有 0.0 %、1.5 % 以及 3.0 %，顯示假設該三個集水區為獨立水文系統的合理性。

開放式模式估計龍門橋集水區與內茅埔集水區之年均 IGF 如圖 9 (a) 所示，而 IGF 與隨時間變化如圖 10 (a) 所示。龍門橋集水區平均每年約 340 mm 的地下水通過集水區地形側邊界離開集水區，約佔

降雨之 11 %，如圖 10 (b) 所示。內茅埔集水區平均每年約 472 mm 的地下水通過集水區地形側邊界流進集水區，約佔降雨之 22 %，如圖 10 (b) 所示，並解釋流量超過降雨的情況 (表 3)，地下水的來源除了來自於龍門橋之外，也可能來自於研究區域外 (例如內茅埔南部)，但這部分通量在半分布模式中無法被考慮。

分配參數 (F_{LG}) 決定了地下水在半分布模式中的流向，本研究有兩個分配參數需要率定，如圖 9 (b) 所示，分別是由龍門橋流至研究區域外的 F_{1X} 與流至內茅埔的 F_{13} ， $F_{1X} + F_{13} = 1$ 是半分布式模型中限制條件。經過率定程序後，分配參數 F_{1X} 與 F_{13} 分別為 0 與 1，顯示龍門橋集水區向外流出的地下水全部流往內茅埔集水區，如圖 9 (c) 所示，再次解釋內茅埔集水區流量超過降雨 (表 3) 的可能原因。

開放式模式中，龍門橋集水區與內茅埔集水區地下水交換量 (IGF) 隨時間變化如圖 10 (a) 所示。

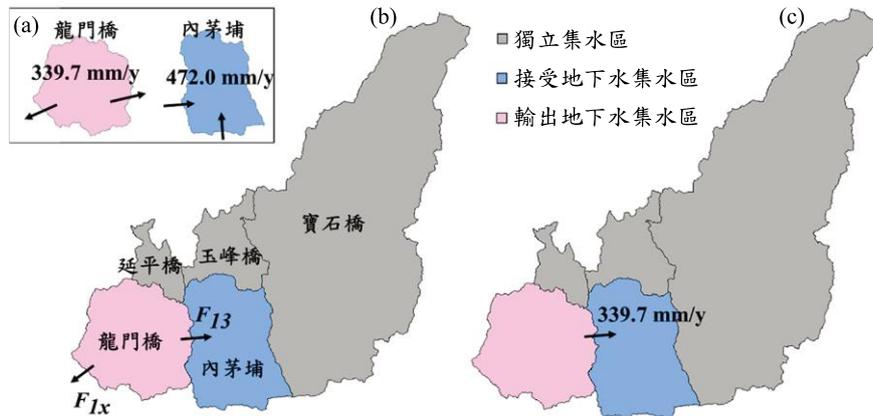


圖 9 (a)開放式模型模擬年均 IGF、(b)半分布式模型需率定的分配參數(F_{LG})、(c)半分布式模型模擬集水區之間的 IGF

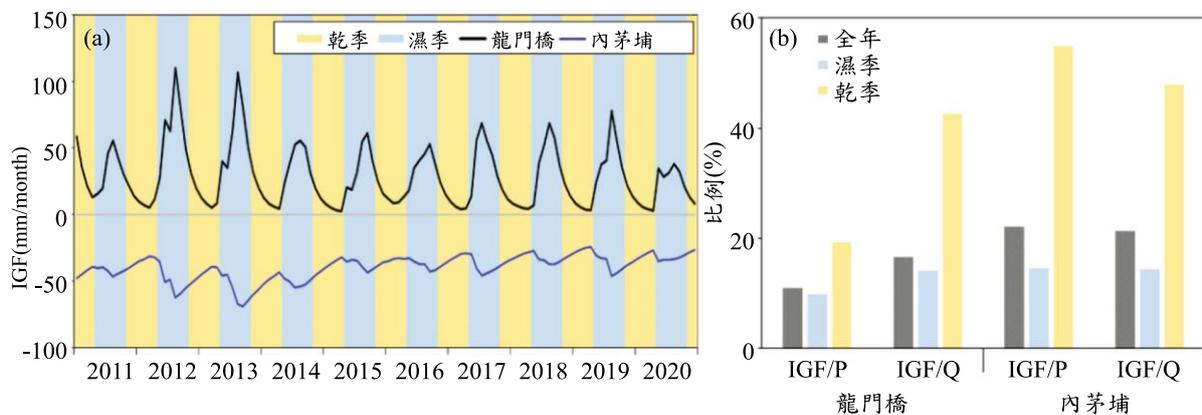


圖 10 (a)龍門橋與內茅埔集水區的 IGF 隨時間變化，正表示流出，負表示流入、(b) IGF 在不同時期 (乾季、濕季與全年) 佔降雨與流量比例

表 3 集水區面積與 2011 年至 2020 年之年均水文學

編號	流量站	面積 (km ²)	雨量 (mm/y)	流量 (mm/y)	實際蒸發散 (mm/y)	潛勢蒸發散 (mm/y)
1	龍門橋	362.5	3125.1	2070.9	958.5	980.6
2	延平橋	80.8	2312.3	2193.6	1148.3	1154.6
3	內茅埔	365.0	2154.2	2237.2	1139.1	1142.1
4	寶石橋	1565.1	2056.2	1382.9	1303.2	1303.7
5	玉峰橋	2089.5	2069.5	1752.1	1238.5	1240.3

濕季時期 IGF 高於乾季，然而在乾季時期，龍門橋與內茅埔的 IGF 分別佔同時期雨量 19 %與 55 %，流量 43 %與 48 %，遠高於濕季時期佔雨量 10 %與 14 %，流量 15 %與 14 %，如圖 10 (b) 所示，顯示相較於濕季時期，IGF 在乾季時期為水文循環中更為重要的水文通量。

四、結論

本研究分析濁水河流域，中上游的五個子集水區評估地下水交換流動的情形，利用 2011 年至 2020 年水平衡月資料，透過雙指標 (ECI 和 x_g) 與修正型降雨逕流模式檢測與量化因不易量測而經常忽略的集水區之間地下水流 (IGF)。在檢測階段，兩指標一致顯示內茅埔集水區為從外部接收到地下水的集水區，龍門橋集水區是輸出地下水的集水區。在量化階段，首先使用季節性 MK 檢定法確認流量時序的穩定性，結果顯示五個集水區之中有三個集水區有顯著的變化趨勢，因此使用奇數年率定，偶數年驗證的策略來提升參數的可信度。模型參數是透過最大化體積效率 (VE) 來率定，模型表現則是用 NSE 與 KGE 來評估。結果顯示無論是封閉、開放與分布式模型，NSE 與 KGE 大多優於滿意標準 (0.5 與 0.6)，而考量 IGF 的開放系統模式相較於封閉系統模式表現大多有提升，尤其是內茅埔集水區在乾季時期能提供更為準確的模擬。全年尺度下，內茅埔集水區年均 IGF 為 472 mm，佔年均降雨 22 %；龍門橋集水區年均 IGF 為 340 mm，佔年均降雨 11 %。在乾季時期，內茅埔集水區與龍門橋集水區 IGF 佔同時期降雨的比例分別提高至 55 %與 19 %，顯示在濁水河流域內的集水區，IGF 是水文循環中重要的角色，尤其在乾季更是不可忽略。

參考文獻

- Alvarez-Campos, O., Olson, E. J., Welp, L. R., Frisbee, M. D., Zuñiga Medina, S. A., Díaz Rodríguez, J., Roque Quispe, W. R., Salazar Mamani, C. I., Arenas Carrión, M. R. and Jara, J. M. "Evidence for High-elevation Salar Recharge and Interbasin Groundwater Flow in the Western Cordillera of the Peruvian Andes". *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 26, No. 2, pp. 483-503, 2022.
- Ameli, A., Gabrielli, C., Morgenstern, U. and McDonnell, J. "Groundwater subsidy from headwaters to their parent water watershed: A Combined Field-modeling Approach". *Water Resources Research*, Vol. 54, No. 7, pp. 5110-5125, 2018.
- Arsenault, R., Brissette, F. and Martel, J.-L. "The Hazards of Split-sample Validation in Hydrological Model Calibration". *Journal of Hydrology*, Vol. 566, No., pp. 346-362, 2018.
- Ball, L. B., Caine, J. S. and Ge, S. "Controls on Groundwater flow in a Semiarid Folded and Faulted Intermountain Basin". *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 8, pp. 6788-6809, 2014.
- Bouaziz, L., Weerts, A., Schellekens, J., Sprokkereef, E., Stam, J., Savenije, H. and Hrachowitz, M. "Redressing the Balance: Quantifying Net Intercatchment Groundwater Flows". *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 12, pp. 6415-6434, 2018.
- Budyko, M. I., Miller, D. H. and Miller, D. H. *Climate and life*. Academic press, New York, 1974.
- Charlier, J.-B., Lachassagne, P., Ladouche, B., Cattan, P., Moussa, R. and Voltz, M. "Structure and Hydrogeological Functioning of An Insular Tropical Humid Andesitic Volcanic Watershed: A Multi-Disciplinary Experimental Approach". *Journal of Hydrology*, Vol. 398, No. 3-4, pp. 155-170, 2011.
- Chow, V., Maidment, D. and Mays, L. *Applied Hydrology*, Chapter 1, p. 8, Mc-Graw Hill. 1988.
- Condon, L. E., Markovich, K. H., Kelleher, C. A., McDonnell, J. J., Ferguson, G. and McIntosh, J. C.

- “Where is the Bottom of a Watershed?”. *Water Resources Research*, Vol. 56, No. 3, e2019WR026010, 2020.
10. Criss, R. E. and Winston, W. E. “Do Nash values have value? Discussion and Alternate Proposals”. *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 14, pp. 2723-2725, 2008.
 11. Danapour, M., Højberg, A. L., Jensen, K. H. and Stisen, S. “Assessment of Regional Inter-basin Groundwater Flow Using Both Simple and Highly Parameterized Optimization Schemes”. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, No. 6, pp. 1929-1947, 2019.
 12. Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. “Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-runoff Models”. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031, 1992.
 13. Ecrepont, S., Cudennec, C., Ancil, F., & Jaffrézic, A. “PUB in Québec: A Robust Geomorphology-based Deconvolution-reconvolution Framework for the Spatial Transposition of Hydrographs”. *Journal of Hydrology*, Vol. 570, No. 378-392, pp. 378-392, 2019.
 14. Egusa, T., Oda, T., Sato, T. and Kumagai, T. o. “Estimation of Sub-annual Inter-catchment Groundwater Flow Using Short-term Water Balance Method”. *Hydrological Processes*, Vol. 35, No. 9, e14368, 2021.
 15. Fan, Y. “Are Catchments Leaky?”. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 6, No. 6, e1386, 2019.
 16. Frisbee, M. D., Tysor, E. H., Stewart-Maddox, N. S., Tsinnajinnie, L. M., Wilson, J. L., Granger, D. E. and Newman, B. D. “Is There a Geomorphic Expression of Interbasin Groundwater flow in Watersheds? Interactions Between Interbasin Groundwater Flow, Springs, Streams, and Geomorphology”. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, No. 3, pp. 1158-1165, 2016.
 17. Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F. “Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling”. *Journal of Hydrology*, Vol. 377, No. 1-2, pp. 80-91, 2009.
 18. Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J. and Weiler, M. “Karst Water Resources in a Changing World: Review of Hydrological Modeling Approaches”. *Reviews of Geophysics*, Vol. 52, No. 3, pp. 218-242, 2014.
 19. Hellwig, J., Liu, Y., Stahl, K. and Hartmann, A. “Drought Propagation in Space and Time: The Role of Groundwater Flows”. *Environmental Research Letters*, Vol. 17, 094008 2022.
 20. Hirsch, R. M., Slack, J. R. and Smith, R. A. “Techniques of trend analysis for monthly water quality data”. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 107-121, 1982.
 21. Hsu, S.-M. “Quantifying the Hydraulic Properties of Fractured Rock Masses Along a Borehole Using Composite Geological Indices: A Case Study in the Mid and Upper Choshui River Basin in Central Taiwan”. *Engineering Geology*, Vol. 284, 105924, 2021.
 22. Kampf, S. K., Burges, S. J., Hammond, J. C., Bhaskar, A., Covino, T. P., Eurich, A., Harrison, H., Lefsky, M., Martin, C. and McGrath, D. “The Case for an Open Water Balance: Re-envisioning Network Design and Data Analysis for a Complex, Uncertain World”. *Water Resources Research*, Vol. 56, No. 6, e2019WR026699, 2020.
 23. Klemesš, V. “Operational Testing of Hydrological Simulation Models”. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 13-24, 1986.
 24. Knoben, W. J., Freer, J. E. and Woods, R. A. “Inherent Benchmark or Not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta Efficiency Scores”. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, No. 10, pp. 4323-4331, 2019.
 25. Le Mesnil, M., Charlier, J.-B., Moussa, R., Caballero, Y. and Dörfliger, N. “Interbasin Groundwater Flow: Characterization, Role of Karst Areas, Impact on Annual Water Balance and Flood Processes”. *Journal of Hydrology*, Vol. 585, 124583, 2020.
 26. Le Mesnil, M., Moussa, R., Charlier, J.-B. and Caballero, Y. “Impact of Karst Areas on Runoff Generation, Lateral Flow and Interbasin Groundwater Flow at the Storm-event Timescale”. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 25, No. 3, pp. 1259-1282, 2021.
 27. Le Moine, N., Andréassian, V. and Mathevet, T. “Confronting Surface-and Groundwater Balances on the La Rochefoucauld-Touvre Karstic System (Charente, France)”. *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 3, 2008.

28. Le Moine, N., Andréassian, V., Perrin, C. and Michel, C. "How Can Rainfall-runoff Models Handle Intercatchment Groundwater Flows? Theoretical Study Based on 1040 French Catchments". *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 6, 2007.
29. Lerat, J., Perrin, C., Andréassian, V., Loumagne, C. and Ribstein, P. "Towards Robust Methods to Couple Lumped Rainfall-runoff Models and Hydraulic Models: A Sensitivity Analysis on the Illinois River". *Journal of Hydrology*, Vol. 418, pp. 123-135, 2012.
30. Liu, Y., Wagener, T., Beck, H. E. and Hartmann, A. "What is the hydrologically effective area of a catchment?". *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 10, 104024, 2020.
31. L'vovich, M. I. World water resources and their future. American Geophysical Union, Washington, 1979.
32. Martens, B., Miralles, D. G., Lievens, H., Schalie, R. v. d., De Jeu, R. A., Fernández-Prieto, D., Beck, H. E., Dorigo, W. A. and Verhoest, N. E. "GLEAM v3: Satellite-based Land Evaporation and Root-zone Soil Moisture". *Geoscientific Model Development*, Vol. 10, No. 5, pp. 1903-1925, 2017.
33. Martinez, G. F. and Gupta, H. V. "Toward Improved Identification of Hydrological Models: A Diagnostic Evaluation of the "abcd" Monthly Water Balance Model for the Conterminous United States". *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 8, 2010.
34. Miralles, D. G., Holmes, T., De Jeu, R., Gash, J., Meesters, A. and Dolman, A. "Global Land-surface Evaporation Estimated from Satellite-based Observations". *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 2, pp. 453-469, 2011.
35. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations". *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900, 2007.
36. Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. "River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles". *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290, 1970.
37. Patil, S. D. and Stieglitz, M. "Comparing Spatial and Temporal Transferability of Hydrological Model Parameters". *Journal of Hydrology*, Vol. 525, pp. 409-417, 2015.
38. Pellicer-Martínez, F. and Martínez-Paz, J. M. "Assessment of Interbasin Groundwater Flows Between Catchments Using a Semi-distributed Water Balance Model". *Journal of Hydrology*, Vol. 519, pp. 1848-1858, 2014.
39. Rice, J. S. and Emanuel, R. E. "Ecohydrology of Interannual Changes in Watershed Storage". *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 10, pp. 8238-8251, 2019.
40. Safeeq, M., Bart, R. R., Pelak, N. F., Singh, C. K., Dralle, D. N., Hartsough, P. and Wagenbrenner, J. W. "How Realistic are Water-balance Closure Assumptions? A Demonstration from the Southern Sierra Critical Zone Observatory and Kings River Experimental Watersheds". *Hydrological Processes*, Vol. 35, No. 5, e14199, 2021.
41. Schaller, M. F. and Fan, Y. "River Basins as Groundwater Exporters and Importers: Implications for Water Cycle and Climate Modeling". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 114, D4, 2009.
42. Thomas, H. A. "Improved Methods for National Water Assessment Water Resources Contract: WR15249270". pp. 21-28, US Water Resources Council, Washington, DC, 1981.
43. Wang, D. "Evaluating Interannual Water Storage Changes at Watersheds in Illinois Based on Long-term Soil Moisture and Groundwater Level Data". *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 3, 10759, 2012.
44. Zhang, X., Dong, Q., Zhang, Q. and Yu, Y. "A Unified Framework of Water Balance Models for Monthly, Annual, and Mean Annual Timescales". *Journal of Hydrology*, Vol. 589, No., 125186, 2020.
45. Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X. and He, P. "Approach for Evaluating Inundation Risks in Urban Drainage Systems". *Science of the Total Environment*, Vol. 553, No., pp. 1-12, 2016.