

以河床出入滲試驗探討東港溪流域地下水與 河川交換量季節性特徵

USING RIVER RECHARGE AND DISCHARGE EXPERIMENTS TO DISCUSS THE SEASONAL INTERACTIONS BETWEEN
GROUNDWATER AND RIVER WATER IN DONGGANG RIVER WATERSHED

國立中央大學
應用地質研究所
碩士

莊信宏
Sin-Hong Jhuang

國立中央大學
應用地質研究所
地球科學學系
副教授

王士榮*
Shih-Jung Wang

摘要

東港溪流域位於屏東平原，地面水量豐沛且河岸具有許多湧泉，顯示出地面水與地下水之交互作用相當頻繁。因此，了解地面水與地下水的交互作用，為東港溪水資源開發與利用的重要課題。本研究藉由不同河床出入滲試驗及地下水位與河川水位觀測資料，進行地下水與地面水的季節性特徵分析，探討東港溪流域不同河段的地面水與地下水交互作用。根據滲流儀試驗與地溫資料分析之結果顯示，東港溪中游主要為地下水出滲段，上游則為地下水入滲段。再比較地下水位與地面水位資料後發現，潮州大橋的左岸有出滲轉入滲的現象，推測此區為出入滲交界帶。河床傳導係數推估結果顯示，東港溪河床傳導係數介於 $2.34 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 之間，數值的空間分布呈現上游高、中游低的態勢；時間的分布則呈現濕季大於乾季的趨勢。本研究結果可提供東港溪流域地下水流數值模擬之參數設定依據，並可作為研究區未來水資源開發與利用之參考。

關鍵詞：河床傳導係數、河床出入滲試驗、地溫量測、地面與地下水交互作用、東港溪流域。

* 通訊作者，國立中央大學應用地質研究所地球科學學系副教授

32001 桃園市中壢區中大路 300 號 · sjwang@ncu.edu.tw; sjwang1230@gmail.com

USING RIVER RECHARGE AND DISCHARGE EXPERIMENTS TO DISCUSS THE SEASONAL INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER WATER IN DONGGANG RIVER WATERSHED

Sin-Hong Jhuang

Graduate Institute of Applied Geology,
National Central University

Shih-Jung Wang*

Graduate Institute of Applied Geology,
Department of Earth Sciences,
National Central University

ABSTRACT

The Donggang River watershed is located in the Pingtung Plain, with abundant surface water and many springs along the river bank, which indicates that the interaction between surface water and groundwater is quite frequent. Therefore, understanding the interaction between surface water and groundwater is an important issue for the development and utilization of Donggang River water resources. In this study, the seasonal characteristics of groundwater and surface water were analyzed based on infiltration tests of different riverbeds and observation data of groundwater level and river water level, and the interaction between surface water and groundwater in different sections of the Donggang River watershed was discussed. According to the results of the infiltration test and the analysis of ground temperature data, the midstream of Donggang River is mainly the groundwater discharge section, while the upstream is the groundwater infiltration section. After comparing the data of groundwater level and surface water level, it is found that the left bank of Chaozhou Bridge has the phenomenon of discharge turning into infiltration. It is speculated that this area is the junction zone of infiltration and discharge. The estimation results of riverbed conductivity show that the riverbed conductivity of Donggang River is between 2.34×10^{-8} and 1.37×10^{-3} m/s. The spatial distribution of values is higher in the upstream and lower in the midstream. The values tend to be larger in the wet season than in the dry season. The results of this study can provide the basis for parameter setting of the numerical simulation of groundwater flow in the Donggang River watershed. They can also be used as a reference for the future development and utilization of water resources in the study area.

Keywords: River bed conductance, Riverbed infiltration experiments, Thermal gradient test, Surface water and groundwater interactions, Donggang River watershed.

Jhuang, S.H., & Wang, S.J.* (2024). "Using River Recharge and Discharge Experiments to Discuss the Seasonal Interactions Between Groundwater and River Water in Donggang River Watershed" *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 70(1), 39-49. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202403_70\(1\).0004](https://doi.org/10.29974/JTAE.202403_70(1).0004)

一、前言

台灣是多雨的島嶼，年平均降雨可達 2,500 公厘 (李光敦, 2002)，為世界平均值的 2.5 倍。但因地形呈現坡陡流急，導致地面水的儲蓄不易；時間上，乾濕季明顯，南部地區乾濕季降雨比可達 2:8。先天不利的條件加上極端氣候的發生，為台灣南部水資源調配與管理帶來了挑戰 (Wang *et al.*, 2021)。近年來台灣受到極端氣候的影響，降雨日數減少且降雨量集中，導致降雨強度增加，使得乾濕季更加明顯，讓水資源的調配更加困難。如 2018 年的春季有乾旱事件，8 月發生強降雨。又如 2020 年 5 月發生致農損的 0522 及 0527 豪雨 (國家災害防救科技中心, 2021)，而隔年春季又發生乾旱。為了克服異常氣候引起的水資源調配問題，政府近年開始開發新興水源，如伏流水，以作為可能的解決方案。然而，降雨帶來的水量沒有顯著變化的情況下，水資源的取用若未能進行有效的管理，將會對生態環境造成不可逆的傷害 (王士榮, 2019)。

東港溪流域位於屏東平原，流域內有許多天然湧泉，長年有穩定的地下水出流補注河川，因此地面水量相當豐沛。惟水質受到上游畜牧廢水與生活用水的影響，無法直接作為水資源的利用 (南水局, 2017)。未來若能解決水質問題，東港溪流域的水資源將可提供高雄與屏東地區的使用 (南水局, 2021)。為能有效利用區域內的水資源，了解當地的水文環境，釐清東港溪流域地下水與河川之間的交互關係，為不可或缺的一環。然而，過往的文獻中，針對此區域的現地河床水力特性資料較為稀少，針對河川水與地下水的調查與評估也略顯不足。因此，本研究針對東港溪流域中上游地區進行河床現地試驗與相關觀測，以了解該河段的河川與地下水間的交互作用關係，提供未來東港溪流域水資源開發與管理之參考。

二、研究區域與資料蒐集

2.1 研究區域介紹

東港溪下游河段為感潮河段，且通常下游較無地面水與地下水的交互作用，因此本研究區域選在東港溪的中上游位置，研究區範圍如圖 1 所示。東港溪流域位於南台灣的屏東平原，於屏東縣境內介於高屏溪與林邊溪之間。東港溪發源於隘寮溪斷層崖南邊，北大武山西側支脈，上游各支流分佈於瑪家鄉及泰武鄉，

經支流牛角灣溪與萬安溪支流合流後，流經內埔、萬巒、竹田、潮州、萬丹、崁頂等鄉鎮，於新園鄉南側流入台灣海峽。主流長約 44 公里，流域面積約 472.2 平方公里 (詹景欽, 2014)。

東港溪流域屬於氣候炎熱的熱帶季風氣候，全年溫差不大，豐水期約為每年 5 ~ 9 月，降雨量約占 90%。東港溪的年逕流量約為 9.56 億立方公尺，豐水期的逕流量約佔 70%，而在中上游段的潮州站最小旬流量仍有 250.45 萬立方公尺，每秒約為 2.77 立方公尺，顯示東港溪逕流量相當豐沛 (水利署第七河川局, 2012)。

2.2 水文資料蒐集

本研究蒐集水利署水文資訊網的東港溪流域河川水位資料，流域內共有 6 座河川水位站進行即時水位觀測。為了更加了解東港溪上下游間的河水水位變化，本研究增設手動觀測點位。選址依據水利署水位測站間與重要主支流交會處 (南水局, 2017)，共增加了 7 個點位進行河川斷面與水位量測。水利署自記式河川水位站與本研究手動式量測點位總共 13 點，分布如圖 1 所示。其中，手動量測之興社大橋點位與水利署的河川水位站共點，以了解手動量測結果與水利署觀測結果之差異。

南水局於 103 年執行「東港溪地下水及伏流水調查規劃」計畫，該計畫於東港溪沿岸建置了 8 口臨時觀測水井進行觀測，鑽井深度為 20 ~ 24 公尺，皆於第一含水層內。本研究為了解東港溪沿岸的地下水分布情況，使用 Rugged TROLL 100 自記式地下水位計，並搭配 BaroTroll 自記式氣壓計，於該八口井進行水位觀測。為避免觀測誤差，每隔一段時間將資料讀取出，並同時以水尺手動量測地下水水位面，作為自記式水位計之初始水位設定與資料修正依據。八口井之空間分布如圖 1 所示。

三、研究方法

3.1 滲流儀試驗與微型壓力計試驗

滲流儀 (seepage meter) 是一種普遍用來量測河床出入滲的方式，最早的文獻可以追溯到 1944 年，用於量測農田水圳內的水量損失。Lee (1977) 設計的滲流儀與現今使用的滲流儀大致相同，其設計包含了一個半密閉空間與連接已知水量的水袋。關於水袋對實

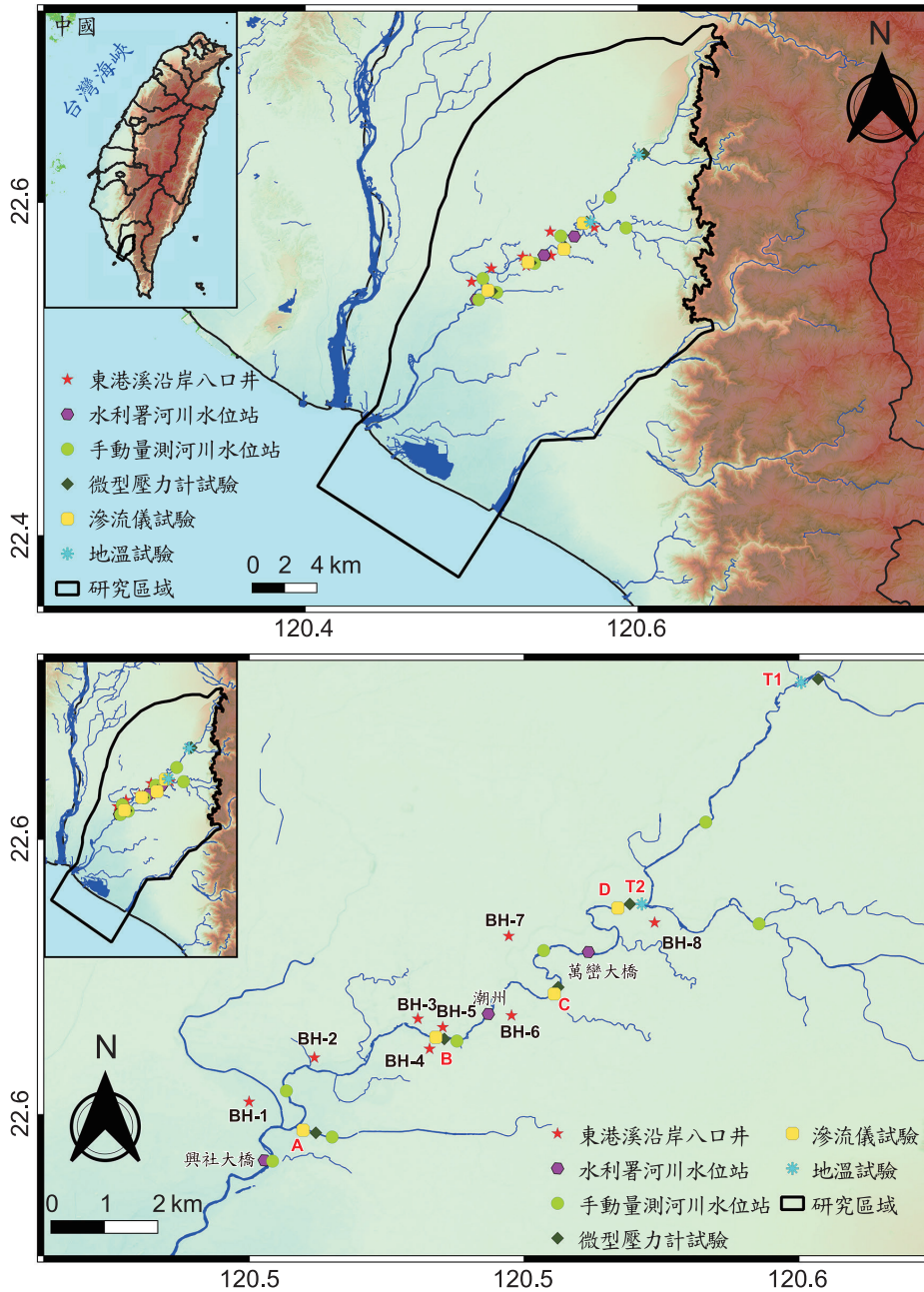


圖 1 研究區域與各試驗位置分布圖

驗的影響已有許多文獻提供了解決方式，例如 Shaw and Prepas (1989) 提出，選用 4 公升大小的袋子，並預先加入 1 公升左右的水來降低記憶效應的影響。Murdoch and Kelly (2003) 提出，以較薄的塑膠袋減少因厚度而阻擋水流流入的發生。

微型壓力計 (Mini-piezometers) 亦可稱為 Hydraulic Potentiomanometer，用以量測垂直水體下方的水頭梯度，藉由將儀器探頭插入河床下方，量測該處的水頭，比較地表水體的水頭，便可得知兩量測點間的水頭差。此方法雖無法直接測量河床沉積物中地下水與地表水

間的交換量，但可確認沉積物內地下水與地表水間的流動方向。參考 Martinez (2019) 的作法與理論，將滲流儀搭配微型壓力計，以達西定律推估東港溪流域各河段的河床的垂直水力傳導係數。達西定律寫為：

$$Q = K \times i \times A \dots\dots\dots(1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \dots\dots\dots(2)$$

其中 K 為河床垂直水力傳導係數，Q 為滲流儀所測得流量，A 為滲流儀斷面積，i 為水力梯度。其中數值 Q

與 A 為滲流儀試驗中所求得, i 為微型壓力計所求得, 其 Δh 為河川水頭與河床沉積物中的水頭差, Δl 為探頭插入河床沉積物的深度。

本研究考量現地河川流速, 預先將滲流儀的集水袋內裝入 600 毫升的水, 以減少實驗時所造成的誤差。相較於粗顆粒的沉積環境, 細顆粒能提供滲流儀較佳的密封性, 減少實驗的誤差, 因此本研究選擇在中下游段, 進行滲流試驗, 地點位於如圖 1, 共 4 點。另外以微型壓力計進行水力梯度的量測, 一側插入河床以量測地下水頭, 另一側放在河床上, 以量測河川水頭, 之後以真空泵將管內減壓來抬高水位面, 記錄兩者的水頭差, 水頭差值除以距離即為水力梯度 (宋瑞君, 2018)。微型壓力計試驗主要提供滲流儀與地溫梯度試驗之水力梯度資訊, 但因滲流儀與地溫梯度試驗有一共點, 因此微型壓力計共施作 5 個點位 (圖 1)。

3.2 地溫梯度試驗

Davis *et al.* (1980) 定義示蹤劑為, 可用來反映地下水流動的流速、方向、或污染物移動路徑等問題的物質與能量。為能了解地下水流的方向, 人們便使用示蹤劑進行研究與分析。示蹤劑可依來源的不同分為溫度、化學、同位素等, 本研究以溫度作為示蹤劑來推求水在河床的垂直流速。

地溫梯度試驗的原理為, 假設河床沉積物中流體的流動為垂向, 因河床中流體的熱傳導及對流作用, 使得不同深度的溫度振幅及相位會有所不同, 利用其振幅差 (ΔA) 及溫度延遲 ($\Delta \psi$), 便可推算入滲流速。本研究參考 Chen *et al.* (2013) 的研究, 使用 HOBO UTBI-001 防水型溫度記錄器進行不同深度的地溫量測, 評估該河段出入滲速率, 進而推求河床的垂直水力傳導係數。

本研究將溫度讀取器設定於深度 0 公分 (河床表面) 與河床下 30 公分, 量測上下兩個溫度計所記錄的溫度時間序列, 使用 VFLUX 程式來協助處理原始溫度時間序列與計算水的垂直通量。VFLUX 為 Laura *et al.* (2020) 以 MATLAB 程式所開發的程式碼 Gordan *et al.*, (2012), 此程式碼利用上下層的溫度時間序列, 藉由兩者的振幅變化與相位差, 來計算通過飽和孔隙介質的一維垂直滲流。該程式使用 Hatch *et al.* (2006) 振幅的公式進行計算:

$$q = \frac{C}{C_w} \left(\frac{2K_e \ln A_r}{\Delta z} + \sqrt{\frac{\alpha + v_t^2}{2}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

其中 q 是垂向流動通量 (m/s), C 與 C_w 分別為介質骨架與水的比熱容 ($J/M^3/^\circ C$), K_e 為有效熱傳導係數 (m^2/s), Δz 為河床中兩測點的距離差 (m), A_r 為河床內不同深度處兩組溫度訊號的振幅比 (無因次), v_t 是熱峰的流動速度 (m/s), α 定義為 $\sqrt{v_t^4 + (8\pi K_e / P)^2}$, 其中 P 是溫度訊號的周期 (s)。

以振幅來推估滲流速度在低流量與出入滲轉換的環境下有較高的靈敏度, 降低因量測時產生的誤差 (Irvine *et al.*, 2015), 所對應的滲流速度約為 -5 ~ 3 m/d。

因滲流儀不易於河床沉積物粒徑較大的中上游地區施作, 因此本研究於該地區採用地溫梯度試驗; 且為了與滲流儀結果做比較, 因此設計一點位 (T2) 與滲流儀共點, 另一點 (T1) 則於較上游施作, 共施做 2 點, 位置如圖 1 所示。

四、結果與分析

4.1 河川水位量測

為能更準確掌握東港溪水位在空間上的分布, 提供地面水與地下水交互作用之評估, 本研究蒐集的河川水位資料, 除了引用水利署的觀測資料, 亦手動量測河川水位, 來增加河川水位資料密度。為確保量測的河川水位具有代表性, 因此以水利署於興社大橋的自記式水位站資料與本研究於興社大橋量測的點位進行比較, 了解兩者的差異與合適性, 之後再將兩種資料合併, 將觀測河川水位自上游往下游排列, 確認是否有奇異數值。

表 1 為本研究現地量測的水位與水利署自記式水位站的資料列表, 現地觀測為特定日期, 水利署資料亦選擇相同日期進行比較。其中興社大橋點位為現地量測與水利署自記式水位站共點。由表中結果可知, 兩站的數值差距小於 0.2 公尺, 差異屬於可以接受的範圍。造成兩數值不同之原因, 應為量測時間的不同。現地量測的水位為量測時間點當下的河川水位, 水利署的水位則為該天的平均水位值。

4.2 地下水位觀測

本研究欲了解東港溪沿岸的局部區域地下水分布情形, 於 2019 與 2020 年進行東港溪沿岸八口井的地下水位連續觀測。圖 2 為 2019 與 2020 的地下水位與降雨量時間序列資料。其中 BH-8 於 2020 年的 8 月至 9 月中因儀器故障導致資料遺失。由結果可知, 2019 年

表 1 東港溪水水位自記式與手動量測結果表

單位：公尺

	橋名	2019/10/4	2019/12/5	2020/2/5	2020/4/5	2020/7/7	2020/10/15
	手動量測	隴東橋	15.6	15.63	15.57	17.77	17.73
潮州大橋		4.01	3.72	3.63	3.58	3.33	3.33
興社大橋		1.23	1.2	1.16	0.99	1.19	1.19
泗水大橋		12.74	12.46	12.51	12.51	12.68	12.68
崎仔頭橋		3.04	3.21	2.48	3.16	3.1	3.1
新無名橋		0.7	0.69	0.61	0.57	0.68	0.68
自記式	興社大橋	1.33	1.11	1.1	0.98	1.12	1.14
	潮州	4.62	4.42	無資料	4.19	4.34	4.5
	港東二號橋	0.94	0.75	0.68	無資料	0.99	0.92
	萬巒大橋	6.83	6.61	6.51	6.49	6.62	6.74

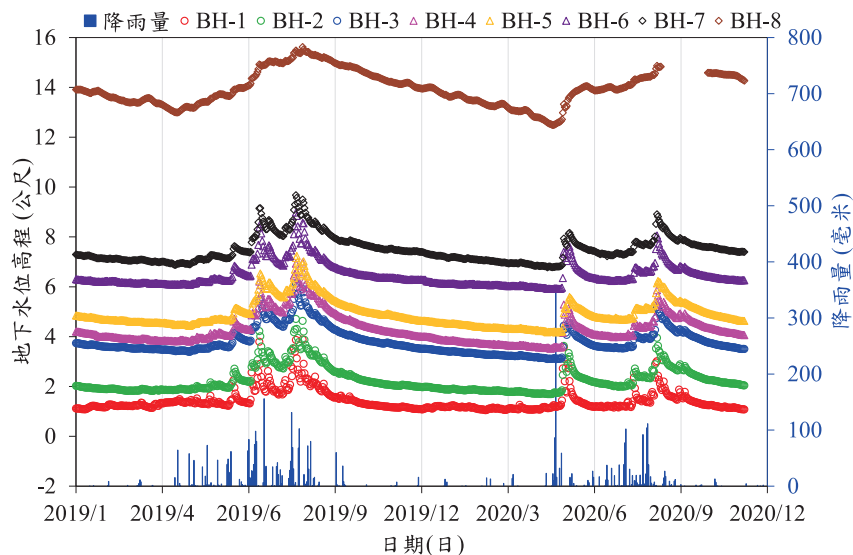


圖 2 2019~2020 年東港溪沿岸八口井地下水觀測結果

7 月與 8 月分別有兩次較大的降雨事件，造成地下水位顯著上升，其中 8 月份降雨後有最高地下水位，各井最低與最高水位約差三公尺，且以 BH-1 ~ BH-7 井位之反應相近，BH-8 井位之地下水位變化與其他井位有顯著不同。2020 年在 5 月與 8 月分別有兩次較大的降雨，皆造成地下水位顯著上升，其中在 5 月份降雨後，BH-1 達到最高地下水位，其餘觀測井在八月份的降雨後達到最高水位。

比較各井於不同年份的水位情況。在 2020 年 5 月，因強降雨的補注，當年度的 5 月份水位高於 2019 年。但由於 2020 年的總降雨量較 2019 年低，因此其他月份的水位皆低於 2019。

4.3 河川水位與地下水位比較

本研究以現地量測之河川水位與鄰近的地下水位

進行比較，討論各河段的河床出入滲情況與季節性的影響，結果如表 2 所示。表中顯示，東港溪於中上游段多呈現地下水出滲的情況，其中比較特別的點位為潮州大橋與 BH-3。BH-3 位於東港溪的右岸，可看到該區段於 12 月至 4 月呈現河水入滲地下水，其他月份轉為地下水出滲，與左岸的 BH-4 相比，右岸的出入滲會隨季節做變化，乾季時河川補注右岸的地下水，左岸的地下水補注河川，濕季時左右兩岸皆為地下水補注河川。從東港溪於此區段中為地下水出滲可推斷，該區域擁有豐沛的地下水資源。

4.4 河床出入滲試驗結果

本研究利用滲流儀搭配微型壓力計，測量河床出入滲量與水力梯度，進而推估河床垂向水力傳導係數，試驗位置的分布如圖 1 所示，由下游至上游分別為 A、

表 2 河川水位與地下水位出入滲分析

單位：公尺

	2019				2020							
	10/4		12/5		2/5		4/5		7/7		10/15	
BH-1	1.64	出滲	1.16	出滲	1.16	出滲	1.09	出滲	1.23	出滲	1.28	出滲
無名橋	0.7		0.69		0.61		0.57		0.68		0.68	
BH-3 (右岸)	4.16	出滲	3.65	入滲	3.38	入滲	3.22	入滲	3.56	出滲	3.84	出滲
潮州 大橋	4.01		3.72		3.63		3.58		3.33		3.33	
BH-4 (左岸)	4.79	出滲	4.13	出滲	3.81	出滲	3.63	出滲	4.04	出滲	4.44	出滲
BH-6	6.69		6.33		6.1		6.03		6.27		6.46	
新潮州 大橋	4.62	出滲	4.42	出滲	**	**	4.19	出滲	4.34	出滲	4.5	出滲
BH-8	14.89		14.13		13.69	13.05	13.99		**			
泗水 大橋	12.74	出滲	12.46	出滲	12.51	出滲	12.51	出滲	12.68	出滲	12.68	**

註:**代表無資料

表 3 滲流儀出入滲試驗與微型壓力計結果表

淨出滲量單位：cm³/min

		A	B	C	D
2 月	淨出滲量	6.0	1.5	3.7	200.7
	水力梯度	0.410	0.004	0.330	0.070
5 月	淨出滲量	57.1	36.9	40.3	28.6
	水力梯度	0.040	0.020	0.003	0.010
7 月	淨出滲量	2.5	33.6	17.8	11.3
	水力梯度	0.024	0.028	0.006	0.051
10 月	淨出滲量	80.0	79.3	90.1	80.0
	水力梯度	0.015	0.030	0.016	0.051
1 月	淨出滲量	42.8	16.9	27.6	8.8
	水力梯度	0.033	0.014	0.032	0.004

B、C、D 試驗點位，試驗時間為每季測量，測量的時間分別是 2020 年的 2 月、4 月、7 月、10 月及 2021 的 1 月。

表 3 為不同季節滲流儀出入滲試驗與微型壓力計量測試驗的結果，其中微型壓力計每個點位施測 15 次，表中所呈現的數值為該次試驗測量的水頭平均值。結果顯示，本研究試驗量測時皆為出滲的情況，因此本區域不論乾濕季皆為地下水出滲。水力傳導係數之推估結果將於後續一起討論。

4.5 地溫量測與分析結果

本研究使用 HOBO 鈕扣型溫度計進行地溫量測，

來推估河床的垂向滲流速度。地溫量測選定兩個點位進行試驗，如圖 1 所示，上游的點位為 T1，中游的點位為 T2。溫度記錄時間為 2020 的 2 月到 2020 的 8 月初，該年 5 月中曾發生強降雨導致洪水事件，遺失埋設的溫度計。因此五月中到 7 月初無觀測資料。

圖 3、圖 5 與圖 7 為各點的溫度時間序列，其中為了比較與氣溫之間的關係，T1 參考氣象局赤山氣象站的氣溫資料，T2 參考氣象局竹田氣象站氣溫資料。圖 4、圖 6 與圖 8 為推估的垂直滲流速度，數值正值為河川向下入滲，負值為出滲。不同季節的量測結果，可以發現一些有趣的現象。2 月中旬 (圖 4)，受到大陸冷氣團的影響，氣溫驟降約 10 度，影響了上下溫度計的記錄，上層尤為顯著，使當時推估的垂直滲流速度，出現極端值的現象；在 3/13 時，也發生相似的情況，兩點皆呈現滲流方向於短時間發生反轉的現象。因此本研究建議，使用地溫量測來推估滲流速度，應避免於冬季冷氣團到來時進行試驗，以減少推估誤差的發生。4 月的氣溫變化較穩定，溫度所造成的影響應可忽略，T1 的結果為圖 6a，溫度時間序列可以看到上下兩層的溫度測量有明顯的日週期，向下的滲流作用能將地表的熱訊號有效傳送至下層。圖 6b，T2 上層的日溫差，逐漸加大。本研究推測，為埋設區域的地表水流動性變差，表面甚至已經呈現無水的現象，下層的溫度無法有效接收來自上層的溫度訊號，代表向下滲流的情況減弱，應為滲流方向反轉向上，使熱源無法有效傳至下方。7 月時，於 T1 埋設溫度計時，表面有充足的地面水流過埋設的位置，從圖 8a，T1 的時

間序列圖可以看到上下兩層的溫度變化不大，溫度皆維持於攝氏 28 度左右。本研究推測，此時地面水的流量充足，溫度無法有效從河面向下傳至河床，導致上下兩層的溫度變化不大。T2 埋設的位置，表面雖有水

但流速較 T1 小很多。從 T2 的資料可以得出，溫度時間序列圖可以看到，上下層的溫度有明顯的日溫度週期，溫度能有效地從水面傳遞至河床下，且向下的滲流現象明顯，其結果如圖 8b 所示。

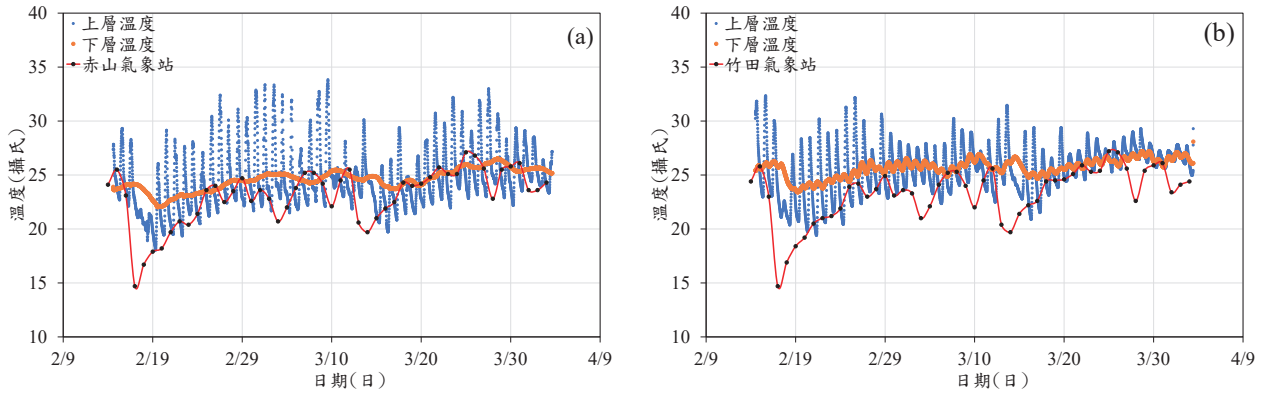


圖 3 (a) T1 地溫量測與赤山氣象站溫度、(b) T2 地溫量測與竹田氣象站溫度，於 2 月至 4 月之溫度時間序列圖

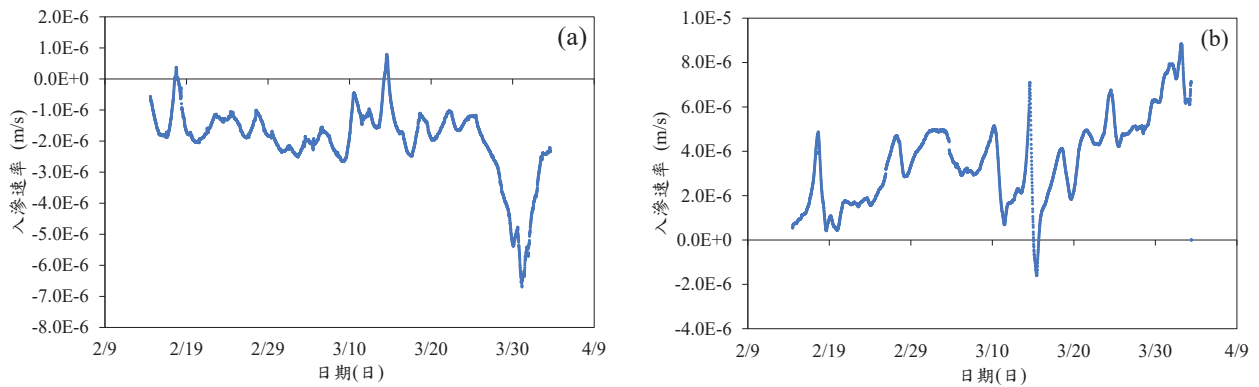


圖 4 (a) T1 與 (b) T2 在 2 月至 4 月垂直滲流速度與時間關係圖

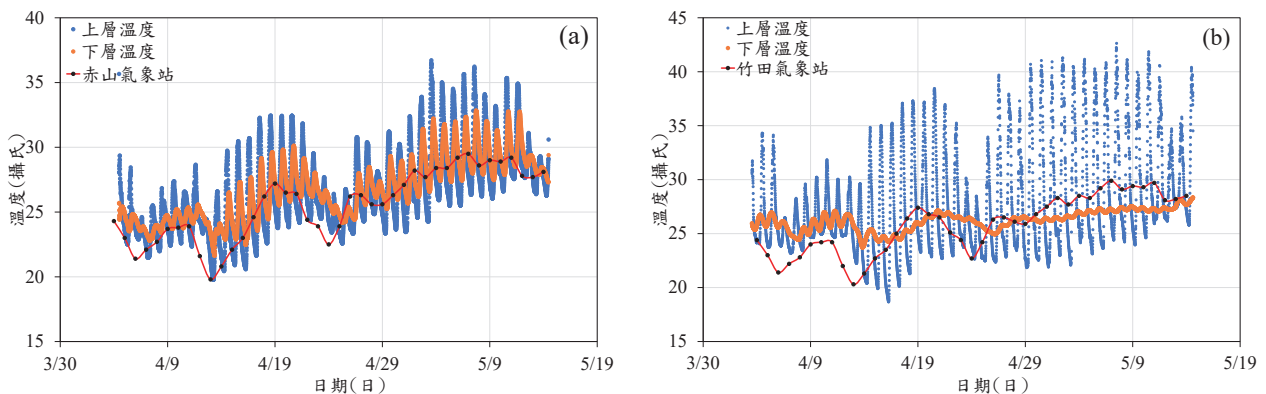


圖 5 (a) T1 地溫量測與赤山氣象站溫度、(b) T2 地溫量測與竹田氣象站溫度，於 4 月至 5 月之溫度時間序列圖

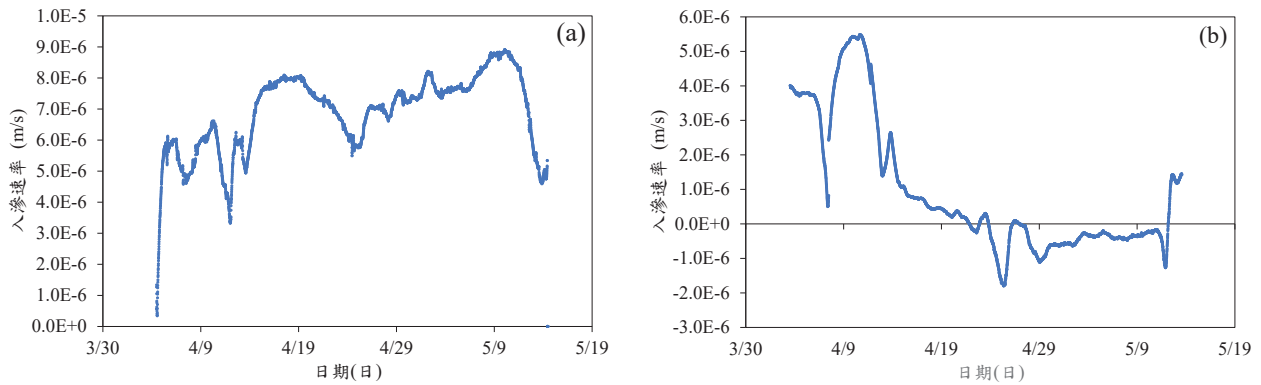


圖 6 (a) T1 與 (b) T2 在 4 月至 5 月垂直滲流速度與時間關係圖

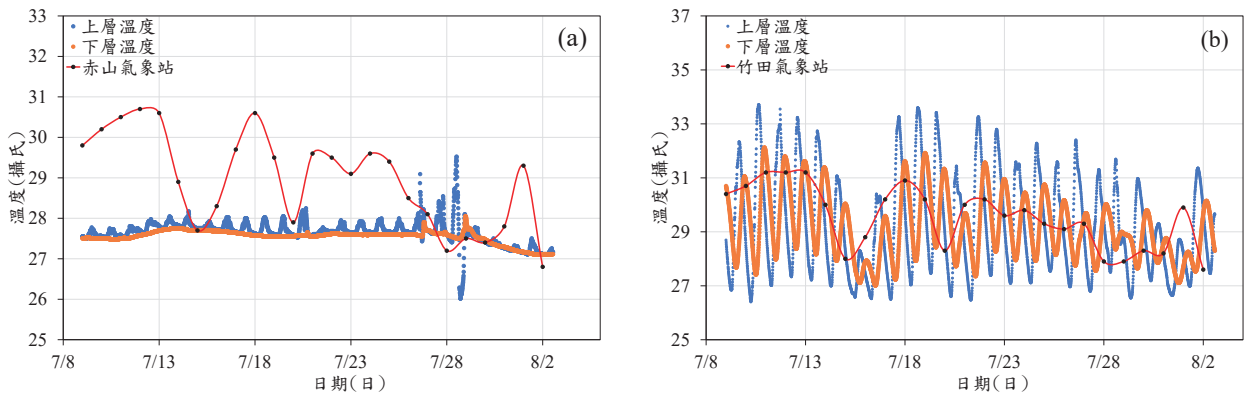


圖 7 (a) T1 地溫量測與赤山氣象站溫度、(b) T2 地溫量測與竹田氣象站溫度，於 7 月至 8 月之溫度時間序列圖

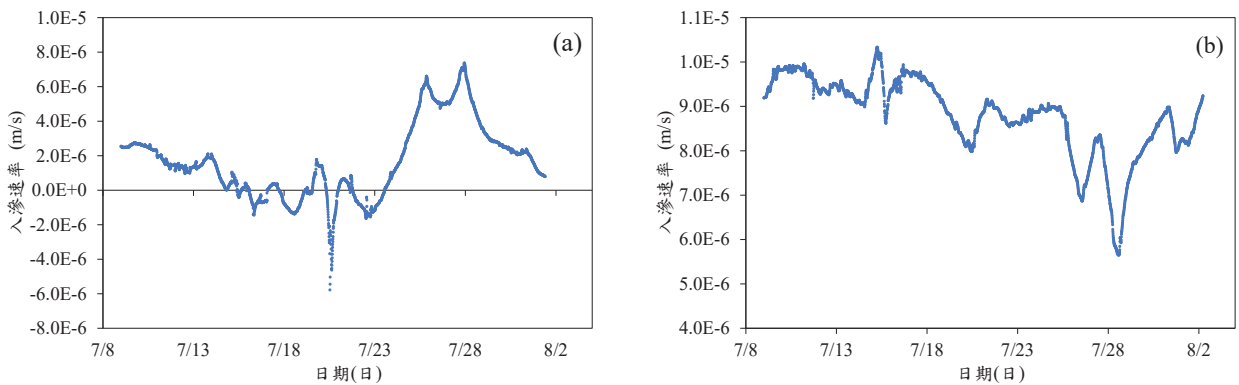


圖 8 (a) T1 與 (b) T2 在 7 月至 8 月垂直滲流速度與時間關係圖

4.6 河床傳導係數推估結果

本研究將滲流儀與地溫量測的結果跟微型壓力計結合，並分為乾濕兩季，探討河床垂直傳導係數在乾濕季的差異，推估結果如表 4 所示。結果顯示，東港溪流河床傳導係數約為 $1.07 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

其中點 D 與 T2 在空間上位置相近 (圖 1)，本研究以不同的試驗方式進行分析，並比較兩試驗結果的差異。點 D 與 T2 在濕季時，兩者的數值有比較大的差異；若比較兩點於乾季時所量測到的結果，可發現兩點的河床傳導係數數值相近。現地試驗時發現，乾旱時兩地的河床材質相近，皆為砂質的材料，但五月的強降

表 4 各現地試驗點位之乾濕季河床傳導係數結果與比較

單位: m/s

季節	滲流儀				地溫梯度	
	點 A	點 B	點 C	點 D	T2	T1
乾季	2.34×10^{-7}	7.35×10^{-7}	1.07×10^{-8}	1.37×10^{-3}	7.27×10^{-4}	8.16×10^{-4}
濕季	2.60×10^{-6}	1.89×10^{-6}	3.86×10^{-6}	8.87×10^{-7}	2.94×10^{-3}	2.12×10^{-4}

雨後，點 D 的河床材質轉為較細顆粒的泥質材質，T2 的河床依舊為砂質材料，可能因此造成濕季有較大差異。該比較結果顯示，兩種方法所量測的河床垂向水力傳導係數相近，因此可將兩方法在不同位置所推估的數值，直接進行整合探討。從表 4 結果可以發現，河床傳導係數於空間中的分布，呈現中下游的數值小於中上游的數值。本研究推測此結果主要受河床材質影響，中上游河床為礫質或粗砂質材料，在中下游河床則為細砂質或泥質等較細顆粒之材質。時間上的分布，可發現乾季的數值小於濕季數值。本研究認為，由於濕季時河川流速較快，水流淘刷河床表面細顆粒沉積物，露出滲透性較高材質，亦使細顆粒材料不易沉積，因此造成濕季入滲能力較大的結果。

結論

本研究於東港溪流域中上游進行乾濕季河床出入滲試驗，並進行河川水位與地下水位觀測，以分析與探討河床出入滲情形與入滲能力，研究結果可歸納出以下幾點結論：

1. 從地下水水位觀測資料顯示，BH-8 的水位變化與其他井顯著不同，該井的水位變化呈現明顯的乾濕季變化，溼季水位抬升後呈現緩慢下降，直到乾季結束。顯示 BH-8 區域的地下水文特性與其他井所在區域有顯著差異。
2. 根據滲流儀試驗的結果與地溫量測的結果顯示，東港溪中下游呈現地下水出滲，上游呈現入滲的情況，再依據地下水位與河川水位的觀測結果分析，潮州大橋附近呈現出入滲轉換的情況，因此推估此區為出入滲交界帶。
3. 現地試驗的結果顯示，河床垂直傳導係數值介於 $2.34 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-3}$ m/s，數值於空間的分布呈現中游數值較小，上游數值較大情況，數值於時間的變化，呈現濕季大於乾季。

此外，進行地溫試驗時，冬季須注意因大陸冷氣團所造成的氣溫劇變，會對反推估的水力傳導係數數

值有影響。夏季則須注意溫度計埋設的位置，會因為地面水的流量較大使溫度訊號不易從上層傳遞至下層。

謝誌

本研究感謝經濟部水利署南區水資源局提供相關水文資料與觀測井供本研究使用，使本研究能順利進行。本文並感謝嘉南藥理科技大學陳文福教授與精靈工匠陳宇文博士提供專業諮詢與建議，感謝國立中央大學應用地質研究所 Minh-Quan Dang 博士生協助部分圖之繪製，以及土水力學研究室夥伴協助現地的試驗相關工作。本文承蒙經濟部水利署計畫經費之支持（計畫編號：MOEAWRA1070135），以及科技部計畫經費支持（計畫編號：MOST 106-2116-M-008-023-MY3）。

參考文獻

1. Chen, W., C. Huang, M. Chang, P. Chang, & H. Lu, The Impact of Floods on Infiltration Rates in a Disconnected Stream. *Water Resources Research*, 49(12): pp. 7887-7899, 2013.
2. Davis, S.N., G.M. Thompson, H.W. Bentley, & G. Stiles, Ground-water Tracers—A Short Review. *Groundwater*, 18(1): pp. 14-23. 1980.
3. Gordon, R.P., L.K. Lautz, M.A. Briggs, & J.M. McKenzie, Automated Calculation of Vertical Pore-water Flux from Field Temperature Time Series Using the VFLUX Method and Computer Program. *Journal of Hydrology*, 2012. 420: p. 142-158.
4. Hatch, C.E., A.T. Fisher, J.S. Revenaugh, J. Constantz, & C. Ruehl, Quantifying Surface Water-groundwater Interactions Using Time Series Analysis of Streambed Thermal Records: Method Development. *Water*

- Resources Research*, 42(10), 2006.
5. Irvine, D.J., L.K. Lautz, M.A. Briggs, R.P. Gordon, & J.M. McKenzie, Experimental Evaluation of the Applicability of Phase, Amplitude, and Combined Methods to Determine Water Flux and Thermal Diffusivity from Temperature Time Series Using VFLUX 2. *Journal of Hydrology*, 531: pp. 728-737, 2015.
 6. Lautz, L., R. P. Gordon, D. J. Irvine, M. A. Briggs, J. M. McKenzie. VFLUX: Vertical Fluid Heat Transfer Solver (VFlu[H]X Solver), HydroShare, 2020, <https://doi.org/10.4211/hs.4df337867d314620bd87b27c6732e6fe>.
 7. Lee, D.R., A Device for Measuring Seepage Flux in Lakes and Estuaries 1. *Limnology and Oceanography*, 22(1): pp. 140-147, 1977.
 8. Martinez, C.J., "Mini-piezometers for Measuring Groundwater to Surface Water Exchange". AE454, a Series of the Department of Agricultural and Biological Engineering, UF/IFAS Extension. 2019.
 9. Murdoch, L.C. and S.E. Kelly, Factors Affecting the Performance of Conventional Seepage Meters. *Water Resources Research*, 39(6), 2003.
 10. Shaw, R. and E. Prepas, Anomalous, Short-term Influx of Water Into Seepage Meters. *Limnology and Oceanography*, 34(7): pp. 1343-1351, 1989.
 11. Wang, S.-J., C.-H. Lee, C.-F. Yeh, Y.F. Choo, H.-W. Tseng, Evaluation of Climate Change Impact on Groundwater Recharge in Groundwater Regions in Taiwan. *Water*, 13(9): pp. 1153, 2021.
 12. 水利署第七河川局。 <https://www.wra07.gov.tw/Default.aspx>。
 13. 王士榮，濁水河流域地下水資源開發與管理。台灣水利，67:頁 43-67，2019。
 14. 宋瑞君，「埔里地下水區水文收支-以參數最佳化與模擬誤差探討」，逢甲大學水利工程與資源保育學系，碩士論文，2018。
 15. 李光敦，水文學。2002: 五南圖書出版股份有限公司。
 16. 國家災害防救科技中心。 <https://den.ncdr.nat.gov.tw/>。
 17. 經濟部水利署南區水資源局，110 年度東港溪水環境保護深耕計畫，2021。
 18. 經濟部水利署南區水資源局，大潮州人工湖補注對於東港流域水文及水質影響探討，2017。
 19. 詹景欽，「東港流域地面水與地下水資源調查研究」，國立屏東科技大學土木工程學系、碩士論文，2014。

收稿日期：民國 112 年 09 月 04 日
修改日期：民國 113 年 01 月 12 日
接受日期：民國 113 年 03 月 01 日