

利用地下水流音評估邊坡及河灘地淺層地下水流動特性

吳為成 梁偉立*

摘 要 淺層地下水流動特性對於邊坡穩定性評估及河灘地水文交互作用至關重要，然而淺層地下水流動路徑具高度空間異質性，傳統監測方法受限於點位代表性或探測精度，難以有效掌握其分布特性。本研究以地下水流音探測法針對一處邊坡與河灘地進行淺層地下水調查。研究首先透過人工灑水試驗檢測儀器性能與限制，確認水流音強度隨距離呈冪函數衰減，有效探測範圍約 1.5-2.0 m。此外，本研究改良分析流程，透過聲音特徵辨識濾除環境雜訊，並利用水流音之加速度強度與曝氣事件發生頻率，解析地下水流動型態。現地調查結果顯示，在邊坡樣區，地下水除因重力匯集於坡腳外，坡面中段亦存在經由優勢路徑流動之地下水脈；在河灘地樣區，濱水區測得高強度連續水流音，顯示河水流動量大，而靠邊坡處則呈現低強度高頻率訊號，反映邊坡地下水之補注。本研究證實此方法具非破壞性且操作便捷的優勢，能有效快速偵測淺層地下水的潛在流動位置、型態，進而判釋可能的來源。

關鍵詞：地下水流音、淺層地下水、優勢路徑、邊坡、河灘地

Examining the Characteristics of Shallow Groundwater Flow in a Slope and a Floodplain Through Groundwater Aeration Sound

Weicheng Wu Wei-Li Liang*

ABSTRACT Shallow groundwater flow characteristics are crucial for slope stability assessments and hydrological interactions in floodplains. However, shallow groundwater flow paths exhibit high spatial heterogeneity, and conventional monitoring methods are limited by their point-scale representativeness or detection accuracy, which hinders the characterization of path distribution. This study used the groundwater aeration sound method to investigate shallow groundwater flow in a slope and a floodplain. Artificial sprinkling tests were conducted to examine instrument performance and limitations. The results confirmed that flow sound intensity decayed as a power function with distance, with an effective detection range of approximately 1.5–2.0 m. In the improved analytical workflow, environmental noise was filtered out through sound characteristic identification, and groundwater flow patterns were interpreted through sound acceleration intensity and aeration event frequency. Field surveys revealed that in the slope site, groundwater not only converged at the toe because of gravity but also flowed through preferential paths in the middle slope. In the floodplain site, high-intensity continuous flow sounds were detected in the riparian zone, indicating substantial river water flow, while the area near the slope exhibited low-intensity, high-frequency signals, reflecting groundwater recharge from the slope. Overall, this study demonstrates that the groundwater aeration sound method is nondestructive and easy to apply. This method enables the effective and rapid identification of potential shallow groundwater locations and flow patterns and the determination of possible groundwater sources.

Key Words: Groundwater aeration sound, shallow groundwater, preferential flow, slope, floodplain.

一、前 言

淺層地下水在邊坡及河岸地形系統的水文反應中扮演關鍵角色。地下水的流動路徑與通量直接影響邊坡的穩定性，改變土壤或岩層的孔隙水壓與有效應力，降低土體的抗剪強度，進而影響邊坡的穩定條件；特別是在強降雨時，地下水位上升或是地中飽和帶的形成，常是觸發淺層崩塌的關鍵因素 (Liang 2020)。在河岸、河灘區域，淺層地下水與地表水具有交互作用，豐水時期河溪水位高於地下水位可補

注地下水，使地下飽和帶往邊坡方向擴大；枯水時期地下水則成為維持河溪基流的重要來源，當河溪水位低於河床時，以伏流型態潛伏於地中 (陳信雄，1996)。因此若能掌握淺層地下水流動路徑、水脈位置，對於邊坡穩定評估、水資源管理及河岸生態保育具有重要意義。

現地判釋地下水流動位置的方法，可二分為直接探測法及間接探測法。前者主要是透過水井、張力計等方式，直接獲取水位或孔隙水壓等資訊 (Liang and Chan 2017; 蕭維震、

梁偉立, 2021); 後者為透過水或地層的物理或化學性質間接推估, 例如地電阻、電磁、震波、透地雷達、聲響等地球物理探測法 (Yamakawa et al. 2012; 呂宗烜、梁偉立, 2014)。直接法雖可實際量測地下水, 然而依照儀器設置的數量, 空間代表性受限; 相對地, 間接法可在不破壞地層條件下進行快速且大範圍的調查, 然而透過理化性質進行間接推估時, 容易受地層異質性與環境干擾影響, 探測精確度受限。實務上最佳策略是整合兩種方法, 先以間接法進行初步調查、圈定潛在地下水流位置, 再於關鍵位置設置直接監測設備, 可兼顧調查效率又可確保探測結果的品質。

聲學探測技術屬於間接探測法之一, 近年來廣泛應用在許多領域中, 一般可分為主動發射聲波並接收其反射訊號的主動式聲學探測, 如海洋領域應用的聲納系統 (Yang et al. 2020; Yin et al. 2020), 以及單純接收環境中聲波訊號的被動式聲學探測, 如應用聲景評估動物出沒的時間與位置 (Lin et al. 2017; Sethi et al. 2023)。其中被動式聲學探測也常應用在機械或工程領域中, 例如簡易機械式聽音棒或是電子式聽漏儀, 利用機械式探針或所附加的電子裝置 (麥克風、擴大器、加速度感測器...等), 探測漏水或漏氣位置所發出的聲響及震動, 可用於快速偵測自來水管線漏水位置 (Almeida et al. 2017; Cheng and Shen 2022), 同樣的方法也可用於測量天然氣管 (Liang et al. 2013) 或油管 (Ni et al. 2014) 等液體輸送管線滲漏位置。關於自然環境、通氣帶地下水流特性, 由於固、液、氣態三相的存在, 地下水與空氣混合流動的過程會產生曝氣音 (aeration sound), 同時也產生輕微的震動與瞬時加速度。Tada et al. (2005) 利用此特性, 改良市售的電子式聽漏儀, 並應用於日本崩塌地的地下水位置探測, 發現淺層崩塌區域的地下水流音明顯高於未崩塌區域。多田泰之 (2008) 進而指出, 原本未崩塌但水流音較強的位置, 在颱風過後亦發生淺層崩塌, 顯示此地下水流音探測法可有效評估淺層崩塌潛勢位置。同樣的調查方式也應用於其他地域, Jotisankasa et al. (2016) 於泰國的現地調查顯示, 崩塌區域的水流音強度高於未崩塌區, 且水流音與土壤孔隙水壓有正相關性; Kawai et al. (2014) 於蒙古分析水流音大小與地下水位的关系, 指出此方法甚至可偵測到 9.4 m 深的地下水流音。

上述研究證實該地下水流音探測法可有效掌握潛在地下水位置, 若應用在邊坡與河灘地環境中, 有助於崩塌潛勢評估、地表水與地下水交互作用的理解。然而上述研究僅憑藉儀器的輸出值或聲音強度大小來判斷水流位置甚至深度, 可能包含環境背景值或雜訊 (動物、風、人為操作音), 且調查方式以單一或複數測線進行, 不僅影響判釋地下水存在的準確性, 也難以掌握其流動路徑或空間分布。本研究改良上述地下水流音探測法分析流程, 透過聲音特徵來辨識水聲與背景雜訊; 試驗前期先於草生地進行灑水測試, 以評估水流音儀器可能的探測範圍, 再於邊坡與河灘地樣區, 進行多點、面狀探測, 透過淺層地下水流音的空間分布, 評估邊坡與河灘地環境中淺層地下水流動特性。

二、材料與方法

1. 試驗儀器

本研究所使用的地下水流音探測儀 (GAS-03, TAKUWA), 其基本構造為一加速度感測儀 (圖 1a), 其拾音感測器 (pickup sensor) 配備 10 cm 長高靈敏度加速度感測探針及收音麥克風。淺層地下水在通氣帶中流動時, 水流推擠土壤粒子間隙內的空氣, 使氣泡持續生成與破裂, 進而產生曝氣音及微小的機械震動; 儀器藉由量測此震動所產生的加速度, 即可定量表示地下水流音的強度。現場操作時 (圖 1b), 將探針插入地表下進行探測, 除了儀器自動記錄該位置之加速度數據外, 同時利用外接錄音裝置 (ICD-PX470, SONY; 取樣率: 44.1 kHz) 錄下所測得的聲音, 以便於內業作業時區分聲音種類 (圖 2a)。

本儀器設計及應用策略以現場聽音辨識為主, 物理量測量為輔, 以快速判定地下水可能的位置。儀器採類比訊號與數位訊號分流架構, 探針接收之類比訊號經帶通濾波與放大後分流兩路, 一路以純類比形式直通外接耳機及錄音裝置; 另一路則進入儀器內部類比數位 A/D 轉換器, 以 2000 Hz 取樣率 (即每 0.1 s 內取樣 200 次) 擷取最大振幅 (加速度峰值), 作為評估聲音能量之輔助指標 (TAKUWA Corporation n.d.)。儀器輸出數據為電壓比值 (mV/mV), 測量範圍為 0 至 999。一次完整測量歷時 6 s, 共輸出並記錄 60 筆峰值數據 (圖 2b)。

儀器內部訊號放大係數預設為 5, 如遇水流音強度過大之位置則適當降低放大係數, 最低選用 1。一般水流音出現的頻段落於 200-1500 Hz (TAKUWA Corporation n.d.), 如何選擇適當的帶通濾波頻段有賴於現場判斷; 儀器內建帶通濾波器可選擇無截斷、低頻截斷 (200、300、400 Hz)、高頻截斷 (600、800、1200 Hz), 選擇適當的帶通頻段可濾除頻段外之環境雜訊, 有助於現場聽音辨識。本研究於探測樣區測試不同頻段組合的結果, 發現帶通範圍設定為 400-1200 Hz 可聽到最多且清楚的地下水流音, 因此本研究皆採取此帶通範圍設定。

2. 資料分析

現場調查數據帶回實驗室進行後續分析, 數據可由資料軟體 Underground Sound Data Collection Software (ver.1.20, TAKUWA) 導入電腦, 並利用原廠技術文件所提供的電壓比值-加速度換算公式 (TAKUWA Corporation n.d.), 以加速度 (m/s^2) 來表示地下水流音的強度。錄音筆所錄得的聲音檔導入電腦後, 以頻譜圖顯示軟體 Sonic Visualiser (ver.5.0.1, Queen Mary University of London) 輔助呈現聲音頻譜 (圖 2a), 以利後續聽辨判讀。之後透過人工聽辨錄音檔案, 針對單次測量的 60 筆數值進行聲音類別判定, 並區分為水音、環境背景音、雜音、過渡音 (圖 2b)。通氣帶地下水流動時會產生「咕嚕咕嚕」的曝氣音 (範例: https://www.youtube.com/watch?v=e980_J7uMNg), 當這種聲音出現時即歸類為「水音」; 未出現時即歸類為「背景音」; 因為風或人為操作所產生的聲音容易辨認, 歸類為「雜音」, 通常加速度值較大; 由於每筆加速度數據間隔為 0.1 s, 當聲音快速變化、聽覺上

難以辨識時，即歸類為「過渡音」。聲音分類完成後，僅擷取水音作為後續分析的來源，分別計算水音的平均值、最大值、最小值，以及曝氣事件發生的頻率 (次/6 s)，並利用繪圖軟體 Surfer (ver. 13, Golden Software)，以 Kriging 法計算出各個測點間的空間內插值，繪製樣區內水音的空間分布。若考慮水流音訊號之特性，且不考慮流動位置之深淺，可利用水流音的強弱及頻率進行簡單的質性分類 (表 1)：高強度且高頻率者代表水分持續性的強烈流動，為一地下水流動活躍區域；高強度但低頻率者雖有水分流動，但為不穩定的間歇流動型態；低強度且高頻率者屬於持續性的微弱流動區，水流穩定但流速緩慢；低強度且低頻率者則是不活躍的微弱流動區域。

3. 前期灑水測試

為了瞭解水流音隨距離的衰減趨勢及地下水流音儀可偵測的範圍，以地貌相對單純的草生地作為測試地點，進行簡易的灑水試驗，模擬單一位置的降雨入滲，其水流音隨距離的變化。測試地點於國立臺灣大學校總區、新店溪沿岸綠帶、林業試驗所福山研究中心三處 (圖 3a)，各劃設一 5 m 的測線 (圖 3b)，內含 18 個測點，除了灑水位置 0 m 以外，測線位置 0-1 m 區間測點間隔 0.1 m，1-5 m 區間測點間隔 0.5

m。灑水前先行測量於各測點之聲音背景值，測量時段選在環境音響相對平穩之條件下進行 (如風小或無風時)，每一測點測量 3 次 (共 18 s；180 筆加速度值)，取其平均值作為背景值；灑水使用市售電動灑水器 (IR-N5000, IRIS OHYAMA)，並將灑水器本體置於距灑水點 1.5-2.0 m 處，以避免其電機運作對測量造成干擾。灑水強度分別以 460 及 300 mL/min 進行；持續灑水期間依序測量每個測點的地下水流音，同樣每一測點測量 3 次。現地測量結束後進行數據分析，評估音灑水所造成的加速度變化量，每個測點擷取有水音之數據，計算其加速度平均值，再減去未灑水時該測點的背景值，作為代表該測點因灑水造成的加速度變化。

表 1 基於水流音強度與曝氣事件發生頻率之地下水流動型態質性分類

Table 1 Qualitative classification of groundwater flow patterns based on aeration sound intensity and frequency of aeration events

頻率 \ 強度	低發生頻率	高發生頻率
	高強度 低強度	間歇性強烈流動 間歇性微弱流動 持續性強烈流動 持續性微弱流動

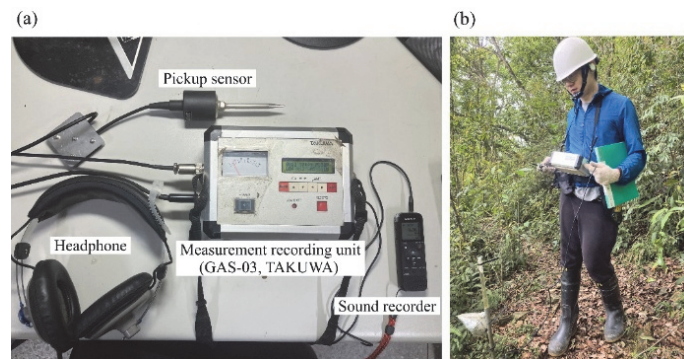


圖 1 (a) 攜帶型地下水流音探測儀器、(b) 現場探測樣貌

Fig.1 (a) Portable instrument for groundwater aeration sound detection. (b) On-site detection scenario

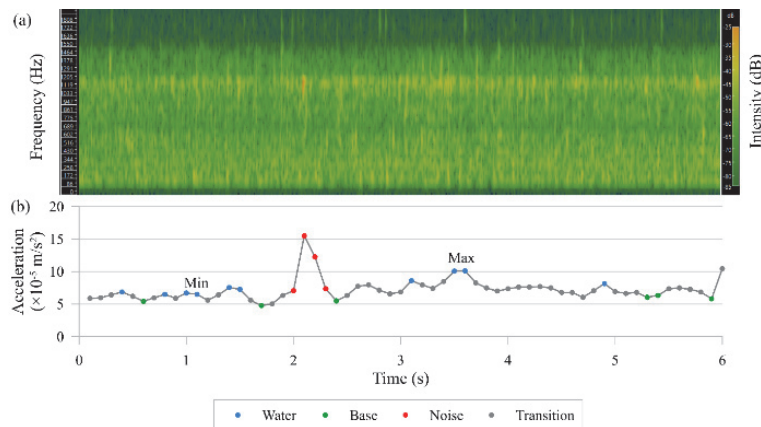


圖 2 (a) 地下水流音頻譜圖、(b) 地下水流音分類示意圖。Water 為水音，Base 為環境背景值，Noise 為雜音，Transition 為聽覺上難以辨識之過渡音。本資料為圖 4b 中藍色圓圈測點的實際測量結果。

Fig.2 (a) Spectrogram of the groundwater aeration sound and (b) Schematic diagram of groundwater aeration sound classification. "Water" indicates water sounds; "Base" indicates environmental background levels; "Noise" indicates interference; and "Transition" indicates transitional sounds that are difficult to distinguish aurally. The data are derived from the measurement point indicated by the blue circle in Figure 4b

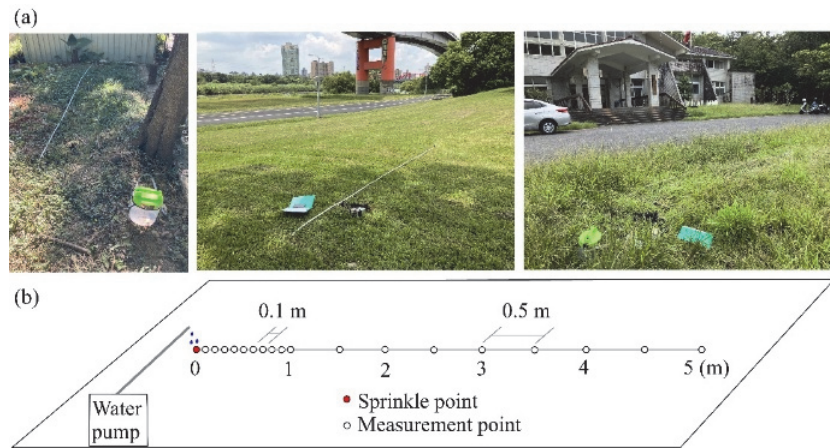


圖 3 進行灑水試驗之 (a) 草地樣貌，以及 (b) 測線、測點示意圖。三處試驗草地由左至右分別位於臺大校區、新店溪沿岸綠帶、福山研究中心

Fig.3 Sprinkling experiments showing (a) the appearance of the grassland sites and (b) a schematic of measurement lines and points. From left to right, the three experimental grassland sites are located at the National Taiwan University campus, the riverside greenbelt along the Xindian River, and the Fushan Research Center

4. 地下水流音探測樣區：邊坡、河灘地

本研究分別於 2025/06/12 及 2025/06/14，於國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處溪頭營林區內的兩處地點探測地下水流音（圖 4a），並同時並使用雷射測距儀（Tru-Pluse 360B, Laser Technology）測量地形。邊坡樣區面積約 30 m²，平均坡度約 43°，位於道路旁下端有水滲出的邊坡（圖 4b），坡面有蕨類植物覆蓋，坡面頂端有數棵柳杉；地下水流音調查共 41 測點。河灘地樣區面積約 190 m²，平均坡度約 12°，位於神木坑溪與邊坡之間，地表幾乎被茂密的草本植被覆蓋，地表部分位置有積水（圖 4c）；地下水流音調查共 39 測點。如前述現地調查及資料分析方式，於每個測點各測量 3 次，累計 18 s、180 筆加速度值，之後區分水音並計算其平均值、最大值、最小值、曝氣事件發生頻率。

兩樣區調查期間無降雨，根據中央氣象署公開的觀測資料（中央氣象署，2025），邊坡樣區調查前一日（2025/06/11）無降雨，但河灘地樣區調查前一日（2025/06/13）有強降雨發生，日降雨量為 68 mm。

三、結 果

1. 水流音強度隨距離之變化

圖 5 為三地點的灑水試驗結果，以測量值減去背景值的加速度變化來表示因灑水所造成的水流音強度。關於 460 mL/min 灑水強度的試驗，三地點均呈現一致的趨勢，水音強度由最靠近灑水位置的 0.1 m 時的約 $300 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，在 0.5 m 內快速下降至 $50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 以下；300 mL/min 的灑水強度試驗也呈現一致的趨勢，水音強度在最靠近灑水位置的 0.1 m 約 200×10^{-5} 或 $300 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右，在約 0.3 m 就下降至 $50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 以下。因此水流音強度隨距離而減少，且灑水強度越大，在可偵測範圍內的水流音強度也越大。

加速度變化與距離的關係若以冪函數迴歸方程來表示的話，各迴歸線的決定係數 (R^2) 介於 0.42~0.94 之間，其中

臺大校區試驗的 R^2 較低，甚至可發現 1.5-2.0 m 的水流音較 0.5-1.0 m 強，導致數據較為分散；其餘兩測試地點試驗結果，其 R^2 均在 0.69 以上，顯示冪函數模型能良好地描述水流音強度隨距離的衰減關係。當迴歸線斜率絕對值小於 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ 時，幾乎無法聽到水流音，若以此作為可偵測範圍的基準，460 mL/min 的趨勢線斜率在約 2.0 m 處絕對值皆小於 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ ，300 mL/min 的趨勢線斜率在約 1.5 m 處絕對值皆小於 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ ，顯示以 460 mL/min 的強度灑水約可偵測到 2.0 m 範圍內的水音，且當強度減弱時可偵測到的範圍會減少。因此灑水強度越大，可偵測範圍也越大。

2. 邊坡地下水流音空間分布

圖 6 顯示邊坡樣區地下水流音的空間分布，若將樣區分為上中下三區段，無論是水流音平均值、最大值或最小值，其相對數值大的位置集中在坡面下段的滲水處，而水流音最小則位於樣區上段。值得注意的是，樣區中段一處沒有水流滲出的位置，其水流音最大值及平均值也相較周圍大，但與上下坡段之間卻沒有明顯的連結。水流音曝氣事件發生頻率最大的位置在下端滲水處，並隨著高程遞減；而樣區中段均顯示水流音較大的測點附近，也有較高的水流音曝氣事件發生頻率；樣區上段水流音曝氣事件發生頻率最低。

以表 1 的簡易分類來檢視圖 6 的結果，樣區下段為地表可見滲水區域，其強度與曝氣事件發生頻率皆很高，一直延伸到樣區中段，都有明顯地下水流動；特別是樣區中段局部位置具有較高的水流音曝氣事件發生頻率，代表該位置持續性的水分流動，但在地表卻無明顯滲水；在樣區上段則屬於流動不活躍區。

3. 河灘地地下水流音空間分布

圖 7 顯示河灘地樣區的地下水流音空間分布，無論是水流音平均值、最大值或最小值，其相對數值大的位置集中在河灘地靠近神木坑溪的濱水區，其他區域水流音則偏小甚至難偵測。從地下水流音最大值的空間分布可以發現，樣區中

上游區域的部分位置有相對大的水流音, 相互連接且與直交於神木坑溪, 該區域並無地表積水。水流音曝氣事件發生頻率最大的位置除了在最靠近神木坑溪的濱水區外, 樣區其他

位置也可發現零星或帶狀連接的高水流音曝氣事件發生頻率位置, 但有地表積水的位置, 其水流音強度及曝氣事件發生頻率反而很低。

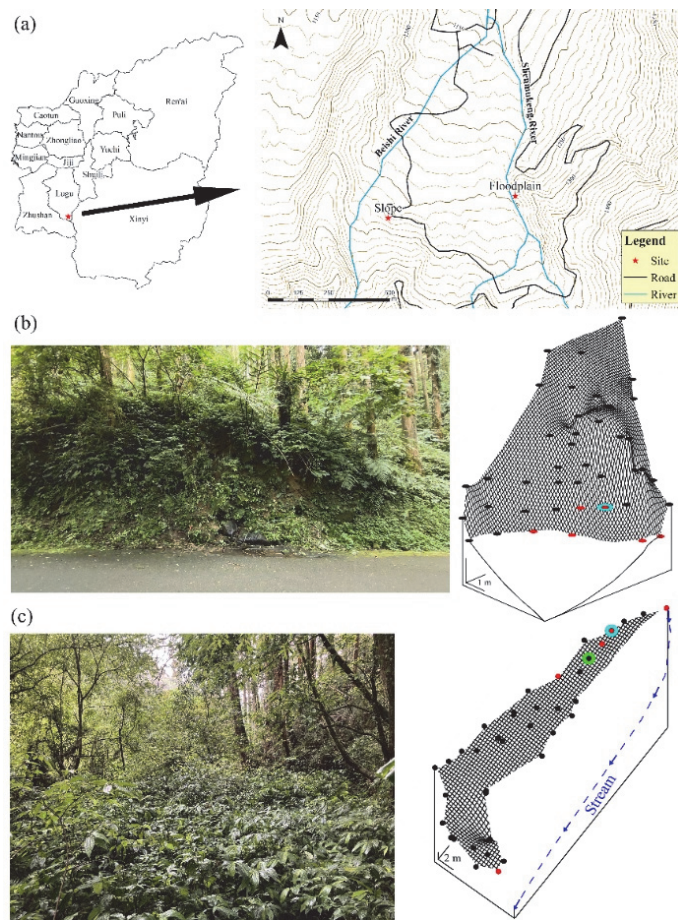


圖 4 (a) 試驗樣區位置, (b) 邊坡樣區之地貌及地形網格圖, (c) 河灘地樣區地貌及地形網格圖。圖 4a 資料改繪自 OpenStreetMap。圖 4b、4c 中的黑色、紅色點位分別為無地表水、有地表水測點。圖 4b 中的藍色圓圈為圖 2b 的資料調查位置。圖 4c 中的藍色圓圈為圖 9 積水處位置, 綠色圓圈為貫入試驗點, 藍色虛線為神木坑溪位置。

Fig.4 (a) Locations of the study sites; (b) landscape and topographic grid map of the slope site; (c) landscape and topographic grid map of the floodplain site. Fig. 4a is adapted from OpenStreetMap. In Figs. 4b and 4c, black and red dots represent measurement points without and with surface water, respectively. The blue mark in Fig. 4b indicates the measurement point of the data shown in Fig. 2. In Fig. 4c, the blue mark indicates the ponding area shown in Figure 9, the green mark indicates the penetration test point, and the blue dashed line represents the location of the Shenmukeng stream

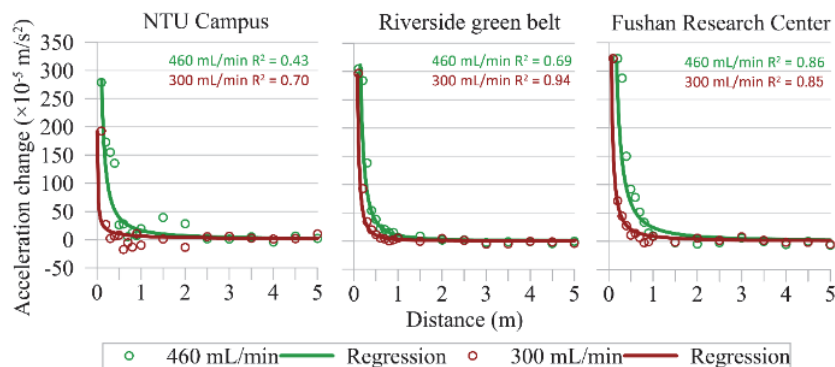


圖 5 距灑水點不同距離之水流音強度變化。迴歸方程為冪函數模型。

Fig.5 Variations in groundwater flow sound intensity at different distances from the sprinkling point. The regression equations follow a power function model

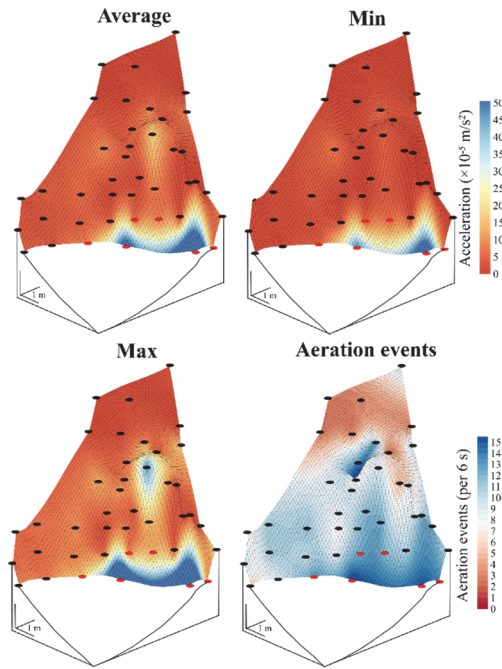


圖 6 邊坡樣區地下水流音平均值、最小值、最大值、曝氣事件發生頻率之空間分布。黑色、紅色點位分別為無地表湧水、有地表湧水之測點。

Fig.6 Spatial distribution of the average, minimum, maximum, and frequency of aeration events at the slope site. Black and red dots represent measurement points without and with surface water seepage, respectively

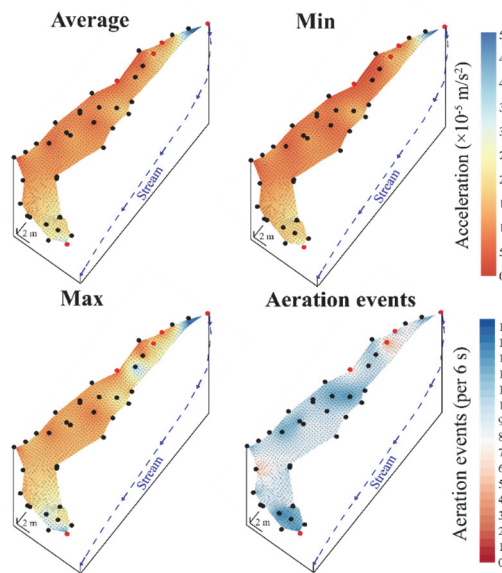


圖 7 河灘地樣區地下水流音平均值、最小值、最大值、曝氣事件發生頻率之空間分布。黑色、紅色點位分別為無地表水、有地表水之測點。

Fig.7 Spatial distribution of the average, minimum, maximum, and frequency of aeration events at the floodplain site. Black and red dots represent measurement points without and with surface water, respectively

以表 1 的簡易分類來檢視圖 7 的結果，樣區靠近神木坑溪的濱水區，其強度與曝氣事件發生頻率皆很高，是明顯持續性的水分流動區域；其餘強度較弱但曝氣事件發生頻率較高的區域，是持續性的微弱流動區域；而樣區內地表積水的位置，反而是流動不活躍的間歇微弱流動區。

四、討 論

1. 地下水流音探測範圍與限制

關於使用同樣的地下水流音探測儀的前人研究，Tada et al. (2005) 於實驗室進行儀器性能的基礎測試，於一 $5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 填滿標準砂的砂槽表面量測地下水flow音，砂槽內 0.35 m 及 0.62 m 深埋入水管，並分別以 $50\text{--}300\text{ mL/s}$ 的強度將水注入於水管，模擬不同地下管流深度、管流量條件下，可探測的範圍；結果顯示，無論是垂直深度或水平距離，離管流位置越近，探測到的地下水流音越大。Kawai et al. (2014) 也使用同樣儀器進行現地試驗，於蒙古半乾旱草原環境探測地下水流音，探測地點周圍有許多遊牧民族使用的淺井，地下水位深度約介於 $1\text{--}10\text{ m}$ ；結果顯示地下水位離地表越近，所探測到的地下水流音越大，兩者具有自然對數關係。

地下淺層水流產生的曝氣音可視為單一點音源，理論上在均勻的介質中以球面波形式等量地向外擴散；本研究所進行的灑水測試，為模擬單一點位的降雨入滲，隨著距離可偵測到水流音強度的變化。在本研究的設計條件下，在 1.5 m 或 2.0 m 的範圍內，均可探測到水流音（圖 5），更強的水流能產生更大的水音，也能傳遞更遠，因此水流音儀器可偵測到的範圍也越大，符合前人研究的認知。根據三處樣區的試驗結果，加速度變化與距離的關係可以冪函數迴歸方程描述，惟臺大校區試驗結果的 R^2 較低，甚至出現 $1.5\text{--}2.0\text{ m}$ 處之水流音強於 $0.5\text{--}1.0\text{ m}$ 處的情形。此一不符合衰減趨勢的異常訊號增強，推測與該試驗地點下方可能存在之地下管線或化糞池等人工構造物有關，導致數據較為分散。此試驗結果亦提供了一項重要的現地實務資訊：若灑水試驗中部分測點之水流音強度空間分布不符合冪函數衰減趨勢、變異偏大，或出現局部訊號異常增強，即可研判該處存在非灑水所造成的干擾，進而從中獲取額外的地下環境資訊。

由於本研究所使用的地下水流音探測儀基本上為一加速度感測儀，藉由探測地下水與空氣混合流動所產生的微小震動，來評估地下水流的強度，因此地表上所探測的水流音大小與地下水流強度、位置、深度相關，特別是試驗環境的土壤地質條件有關鍵性的影響，例如將探針置於河溪表面、不接觸水面，就偵測不到水流所產生的音響、震動。因此根據儀器特性與試驗結果，可歸納出本方法可能之偵測限制的三種情況：(1) 地下水位位置較深且流量不足，微震動傳至地表已低於偵測門檻；(2) 地表至水流位置之間存在富含大孔隙的礫石層，微震動受空氣阻隔而大幅衰減；(3) 緻密地層中水流量極小，曝氣音本身即微弱而難以偵測。上述的限制也是造成前人研究與本研究量化差異的原因，光靠水流音探測值難以準確評估地下水流的位置，但可推估水平距離或垂

直深度數公尺內是否有地下水流動。地下水流音探測法的優勢在於操作簡便、快速，無需鑽孔即可完成大範圍普查，特別適用於資源有限或地形困難的環境；正如同醫生使用的聽診器，可用來快速進行初步診斷，判斷可能症狀，但無法取代精密檢驗。以圖 2b 的水流音分類為例，短短 6 s 間可以透過聽覺簡單區分噪音、水音、背景音，也包括不易辨識、快速變化的過渡音，若將此分類對照圖 2a 的頻譜圖，除了噪音的強度較大以外，就視覺上難以區分水音或背景音，需要進一步的頻譜分析來判定水音可能的頻域特徵。因此本研究法之應用策略可作為初步探測之工具，進行快速探找出重點區域，再針對熱點投入精密監測，提高現場地下水調查的效率。

儀器內部取樣率的限制、數位輸出值的解讀，亦為本探測法須注意之處。本研究通帶範圍設定為 400–1200 Hz，為預測試時可聽到最多且清楚的地下水流音的頻段；類比輸出的結果也現顯示樣區高強度水流音集中在超過 1000 Hz 的高頻（圖 2a），就現場聽音辨識而言，是一個適當的頻段選擇。然而根據奈奎斯特取樣定理（Nyquist-Shannon sampling theorem），取樣頻率必須大於測得訊號最高頻率的兩倍；儀器內部類比數位 A/D 轉換器的採樣率為 2000 Hz，若每 0.1 s 取樣 200 次所擷取最大加速度峰值落在高於 1000 Hz 的頻段，就發生訊號混疊（Aliasing）並折疊至低頻區段，與原有訊號產生相位疊加或抵銷效應，導致 800–1200 Hz 區間的加速度峰值可能包含疊加/抵銷干擾帶來的不確定性。相較於使用本儀器的前人研究（e.g., Tada et al. 2005），這也是本研究對於資料分析的改良之處，不能僅靠數位輸出值、閾值切分來判斷地下水流動之有無，需先透過類比訊號判斷水流音（圖 2b），再進行簡易質性分類（表 1），可有效降低依賴數位輸出值可能產生之誤判風險。

2. 邊坡淺層地下水流動特性

一般而言，受重力作用影響，淺層地下水會向下坡或坡腳處匯集。Feng et al. (2022) 結合災後調查與人工降雨試驗，利用含水率與張力感測器及染料追蹤技術，分析強降雨引發崩塌過程中的地下水時空分布特徵；該研究指出，邊坡淺層雖因土體結構差異形成空間異質性的飽和滲流區，基岩面上的飽和帶在重力驅動下向下坡匯集，使得中下段飽和區的範圍與深度均大於上段，此不均勻分布成為中下部優先崩塌的關鍵機制。Masaoka et al. (2016) 於日本一河溪旁坡地建置高密度三維孔隙水壓監測系統，觀測結果同樣證實坡腳為淺層地下水集中區域，但主要機制是地下水從基岩表面持續湧出至土壤層，在滲出區下坡處持續形成飽和側向流，且不受降雨條件影響，與土壤入滲水混合後向坡腳匯集。呂宗烜等 (2015) 使用與本研究相同的地下水流音探測法，調查 7 個疏伐後坡地，僅有坡度最大的樣區水流音分布與地形相關，且強度較大的水流音集中於下坡處；其餘 6 個樣區的地下水流音空間分布與地形無明顯關聯，甚至部分坡地在中上段出現較強的地下水流音訊號。前述幾個研究案例說明了基岩面飽和帶的形成，或是淺層地下水的流動機制、樣式，受地質構造、土層特性、坡度等環境條件的影響，存在相當大的變異

性，凸顯現地實測對於理解各樣區個別水文特性的重要性。

本研究的調查結果顯示（圖 6），水流音最強的位置位於邊坡下端水流滲出的坡腳，與 Feng et al. (2022) 及 Masaoka et al. (2016) 所觀測到重力驅動地下水向坡腳匯集之現象相符；然而，本研究亦發現了類似呂宗烜等 (2015) 提及的空間分布異質性，在邊坡中段有一局部位置也可偵測到較大的地下水流音，該位置並無觀察到地表湧水且坡度變化大（遷急點、遷緩點）。為了瞭解各樣點的地下水特性，以平均水流音強度、水流音曝氣事件發生頻率的空間平均值作為區分基準，依照表 1 將測點屬性分為 4 類（圖 8a），可發現持續性偵測到地下水的位置集中在下坡處，且坡腳位置水流強度最大，也是湧水發生之處，為地下水流主要流動區；邊坡中段遷急點、遷緩點附近，則為持續性或間歇性強度較大的地下水流，研判受地形起伏影響，導致地下水流往地表滲出途中又經優勢路徑往深處滲漏。因此邊坡樣區的淺層地下水由上坡往下坡流動時，經由中段土壤層或岩層的優勢路徑、裂隙，最後於下坡段、坡腳處滲出。

除了應用於天然坡地調查外，本調查法亦具有應用於坡地工程構造物檢測的潛力。例如應用於擋土牆背填土層積水問題診斷，檢測排水管或排水暗溝是否正常運作，快速定位排水孔阻塞或排水層失效位置，或是辨識可能危及構造物穩定性的集中地下水帶。傳統的構造物排水檢測多仰賴目視檢查、鑽孔取樣或地電阻影像法等方法，然而目視檢查僅能觀察表面狀況而無法掌握內部水流路徑，鑽孔取樣屬破壞性檢測且成本較高，地電阻影像法則需要較複雜的設備與資料判釋技術。相較之下，地下水流音探測法具有非破壞性、操作簡便、成本低廉、可快速調查等優勢，現場人員僅需透過聽音設備配合湧水點觀察，即可迅速評估結構體內的水流位置與潛在排水路徑，進而判斷構造物排水系統是否受阻或失效。

3. 河灘地淺層地下水流動特性

河灘地為潛在河溪地表水與坡地地下水的交會處，其水流特性具有多樣性。Hester and Fox (2020) 以文獻回顧方式探討河灘地的優勢流現象，指出水平優勢流會快速將營養鹽或污染物帶入河溪中，而垂直優勢流則可能經由土壤層的吸附作用，增加污染物在地下水中被去除的機會。根據 Kotowski et al. (2023) 山區河谷的抽水試驗結果，河灘地之地表水與地下水在自然狀態下呈雙向流動，受抽水擾動後轉為地表往地下的單向流動，但流入取水井的水僅含 12% 河水，顯示河灘地地下水含量的重要性。Sun et al. (2023) 於實驗室內進行沙箱灑水試驗，填滿土壤以模擬河灘地地形，並於上方灑水以模擬降雨，發現當地下水位高於河水水位面時，在降雨初期地下水流會先往河道方向及遠離河道兩個相反方向移動，而到降雨後期會全部往河道方向流動。前述幾個研究案例說明河灘地的水分流動型態，除了河溪的水分供給外，也不能忽視河溪兩旁邊坡的地下水貢獻。

本研究河灘地的淺層地下水分布也發現類似的現象，受河溪地表水及邊坡地下水交會的影響（圖 7）。為了更清楚瞭解其差異，以平均水流音強度、水流音曝氣事件發生頻率的

空間平均值作為區分基準，依照表 1 將測點屬性分為 4 類 (圖 8b)，持續性偵測到地下水且強度大的區域主要靠近河溪的濱水區域，研判為河溪水流的供給所致；而樣區靠近邊坡的位置，也偵測到持續性但強度較小的水流音，顯示由邊坡地下水供給的可能性；兩股水流來源的交會處 (樣區中間) 則呈現間歇性地下水流特徵。因此河灘地靠近河溪的位置，淺層地下水主要來自於河溪流動方向的貢獻，而河溪靠近邊坡的位置，則是邊坡地下水沿礫石層等優勢路徑往河溪方向匯集與流動。本研究以各樣區水流音強度與曝氣事件發生頻率的空間平均值作為表 1 性質分類臨界值 (圖 8)，屬於因地制宜的相對分類方式。由於不同樣區的地質條件與淺層地下水深度各異，訊號傳導至地表時的衰減程度不同，各樣區水流音之絕對加速度值差異甚大，難以訂定跨樣區適用的通用閾值。因此，採用個別樣區之空間平均值進行相對區分，能更有效反映各樣區自身的環境條件，並有助於辨識樣區內地下水流動的相對活躍程度與空間分布特徵。

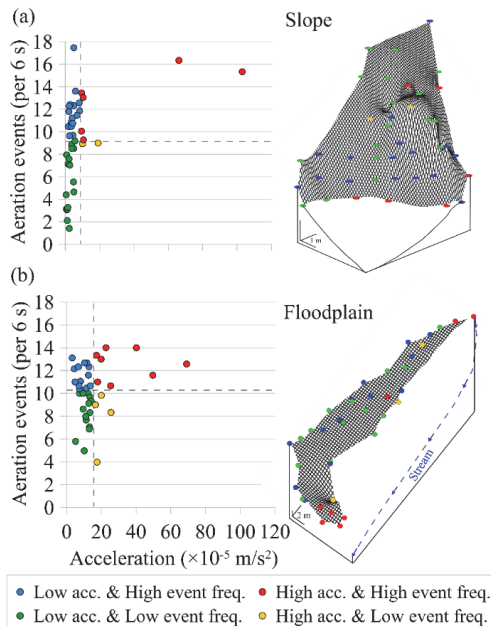


圖 8 (a) 邊坡樣區及 (b) 河灘地樣區地下水流音平均強度與曝氣事件發生頻率之關係、空間分布。根據表 1 的分類，以強度與頻率的空間平均值，將樣點屬性區分為 4 類。

Fig.8 Relationships and spatial distributions of the average acceleration and frequency of aeration events in the (a) slope and (b) floodplain sites. According to the classification in Table 1, the attributes of the measurement points are categorized into four types based on the spatial mean values of acceleration and frequency

此外，本研究的觀測結果凸顯了地下水流音探測法的一項重要優勢：能有效突破視覺觀察的侷限，釐清地表積水現象與地下水流動之間的關聯性；亦即地表可見積水不代表地下有活躍流動，地表無水亦不代表地下無水流。在樣區中有部分的測點在測量當下有地表積水 (圖 9a)，但測點的水流音強度及曝氣事件發生頻率卻很低 (圖 7)，代表是非明顯流

動的水，研判並非河溪供給，也非地下水的上升，而是調查前一天降雨所導致無流動的積水。為了驗證該位置的地層特性，本研究於積水處的下游約 2 m 位置 (圖 4c)，進行簡易貫入試驗 (鄭名宏、梁偉立，2019)；結果顯示至深度 40 cm 前貫入組抗都很小 (圖 9b)，屬於土壤層，但在深度 45 cm 時貫入阻抗急遽大於 100 drop/10 cm，並難以繼續貫入，研判到達礫石層；進一步以水位檢測計探測該位置，發現深度 45 cm 處並無飽和水分，因此地表的積水並非由地下水面高於地表所致，該點位所偵測到的水流音位於 45 cm 以下更深層的礫石層。簡易貫入的結果也說明了河灘地樣區的環境特性，該河灘地富有植被覆蓋，但泥砂堆積或土壤層僅有約 45 cm，其下為礫石層，具大孔隙、優勢路徑，雖然有助於邊坡地下水往下滲漏，但如前述，在地表面就會大幅減少接收到水流所產生的微震動，因此更佐證了河溪與邊坡之間的區域，地下水流音強度及曝氣事件發生頻率皆偏低，河溪地表水及邊坡地下水的交會位於礫石層更深處。

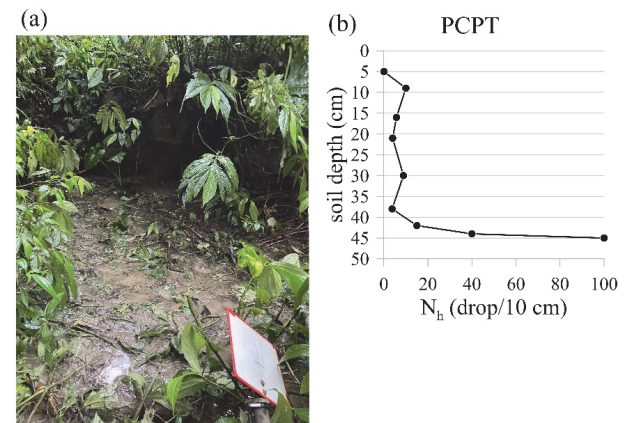


圖 9 (a) 河灘地樣區地表積水，以及 (b) 簡易貫入試驗 (portable cone penetration test, PCPT) 結果。圖 9a、9b 位置顯示於圖 4c。圖 9a 為移除地表植被後的樣貌。圖 9b 顯示簡易貫入阻抗 (N_b) 隨著深度的變化。

Fig.9 (a) Surface ponding at the floodplain site, and (b) results of the portable cone penetration test (PCPT). The locations of Figs.9a and 9b are shown in Fig. 4c. Figure 9a shows the site appearance after the removal of surface vegetation. Figure 9b shows the variation of the penetration resistance (N_b) with depth

五、結 論

本研究改良傳統地下水流音探測法的分析流程，透過聲音特徵辨識區分水音與背景雜訊，並以面狀多點探測取代傳統單一測線調查，藉此評估邊坡與河灘地環境中淺層地下水的流動特性。主要結論如下：

1. 灑水試驗結果顯示，水流音強度隨距離增加呈冪函數衰減，且水流強度越大，可偵測範圍越廣。在本研究的試驗條件下，460 mL/min 的灑水強度約可偵測到約 2.0 m 範

圍內的水流音，300 mL/min 則約為 1.5 m。此結果可作為現地調查時規劃測點密度的參考依據。

2. 邊坡樣區的調查結果顯示，淺層地下水除受重力驅使匯集於邊坡下段外，中段微地形變化處亦呈現持續性的水流訊號。透過水流音強度與曝氣事件發生頻率的空間分布特徵，本研究成功辨識出活躍流動區與微弱流動區的範圍，驗證了淺層地下水由坡頂經優勢路徑傳輸至坡腳滲出的流動模式。
3. 河灘地樣區的調查結果顯示，高強度、高曝氣事件發生頻率地下水水流音主要集中於濱水區域，反映出河溪水流之供給；而樣區靠近邊坡的位置，則呈現低強度但高曝氣事件發生頻率的的水流音特徵，顯示有持續性但較微弱的地下水流動，研判為邊坡地下水沿優勢路徑向河道方向匯集。值得注意的是，地表積水處反而未偵測到顯著水流音，經簡易貫入試驗驗證，該處約 45 cm 深以下為礫石層，活躍的地下水流動發生於較深處的礫石層而非表層土壤中。河灘地的地下水流動呈現空間異質性，而透過水流音強度與曝氣事件發生頻率的空間分布特徵，可有效辨識不同水源的供給區位與流動型態。

本研究所提出的地下水水流音分析法，透過聲音特徵辨識區分水音與背景雜訊，並以水流音強度與曝氣事件發生頻率進行地下水流動型態的分類，可有效辨識淺層地下水的流動位置與不同水源的供給特徵。此探測法具有非破壞性、操作簡便、可快速進行大範圍普查等優勢，適合作為初步篩查工具，輔助傳統地下水監測方法，應用於崩塌潛勢評估、邊坡工程構造物排水檢測及河岸帶水文調查等領域。儘管本研究於資料處理階段由單一研究人員依循固定流程進行人工聽辨，以盡可能確保分類標準之一致性，然人工聽辨本質上仍難以完全排除主觀判定的侷限。未來研究建議進一步導入頻譜分析等數位音訊處理技術，藉由演算法自動辨識水流音之時頻特徵，以降低人工判釋的主觀偏差，提升分析流程的標準化程度與結果再現性。

誌 謝

本研究由國科會計畫 112-2313-B-002-015-MY3 支持。調查期間承蒙國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處溪頭營林區、林業試驗所福山研究中心的行政協助、背景資料提供。國立臺灣大學森林環境暨資源學系水土資源保育研究室成員協助野外調查。匿名審查者提供具體且寶貴的建議，使本文內容更臻完整，特此致謝。

參考文獻

- [1] 中央氣象署 (2025), 「氣候觀測資料查詢服務」, <<https://codis.cwa.gov.tw/>> (Jan. 19, 2026). (Central Weather Administration (2025). "Climate observation data inquire service", <<https://codis.cwa.gov.tw/>> (Jan. 19, 2026))
- [2] 多田泰之 (2008), 「地下流水音を用いた崩壊発生場所の予測について」, 水利科学, 52(5), 83-115. (Tada, Y. (2008). "Prediction of collapse locations using groundwater aeration sounds." *Water science*, 52(5), 83-115. (In Japanese))
- [3] 呂宗烜、梁偉立 (2014), 「應用簡易貫入試驗及大地比電阻法推估崩積地土壤岩層界面」, 中華水土保持學報, 45(4), 234-242. (Lu, T.H., Liang, W.L. (2014). "Applying cone penetration testing and electrical resistivity tomography to estimate the soil-bedrock interface in colluvium." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 45(4), 234-242. (in Chinese))
- [4] 呂宗烜、梁偉立、周坤宇、李勝倫、詹孟浚 (2015), 「人工林行列疏伐對地表及地下水文環境之影響」, 台灣林業科學, 30, 185-199. (Lu, T.H., Liang, W.L., Chou, K.Y., Li, S.L., and Chan, M.C. (2015). "Effects of row thinning on the surface and underground hydrological environments." *Taiwan Journal of Forest Science*, 30, 185-199. (in Chinese))
- [5] 陳信雄 (1996), 「哈盆溪集水區伏流水動態之研究(一)」, 台大實驗林研究報告, 10(3), 1-18. (Chen, H.H. (1996). "The potential of subsurface flow at Ha - Pen watershed (I)." *Journal of the Experimental Forest of National Taiwan University*, 10(3), 1-18. (In Chinese))
- [6] 鄭名宏、梁偉立 (2019), 「應用簡易動力貫入法判釋地層結構」, 中華水土保持學報, 50(1), 22-31. (Chen, M.H., and Liang, W.L. (2019). "Applying a portable dynamic cone penetration test to detect shallow geological structures." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 50(1), 22-31. (in Chinese))
- [7] 蕭維震、梁偉立 (2021), 「應用攜帶式鑽探設備觀測天然林沖蝕溝的地表逕流及淺層地下水特性」, 中華水土保持學報, 52(3), 121-134. (Hsiao, W.C., and Liang, W.L. (2021). "Applying portable drilling equipment to explore the characteristics of surface runoff and shallow groundwater along a gully in a natural forest." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 52(3), 121-134. (in Chinese))
- [8] Almeida, F.C.L., Brennan, M.J., Paschoalini, A.T., Joseph, P.F., and Gao, Y. (2017). "On the signum function and its effect on acoustic correlation for leak location in buried plastic water pipes." *Procedia Engineering*, 199, 1344-1349.
- [9] Cheng, W., and Shen, Y. (2022). "Frequency characteristic analysis of acoustic emission signals of pipeline leakage." *Water (Basel)*, 14(24), 3992.
- [10] Feng, W., Bai, H., Lan, B., Wu, Y., Wu, Z., Yan, L., and Ma, X. (2022). "Spatial-temporal distribution and failure mechanism of group-occurring landslides in Mibei village, Longchuan County, Guangdong, China." *Landslides*, 19(8), 1957-1970.
- [11] Hester, E.T., and Fox, G.A. (2020). "Preferential flow in riparian groundwater: Gateways for watershed solute transport and implications for water quality management." *Water Resources Research*, 56(12), e2020WR028186.

- [12] Jotisankasa, A., Mahannopkul, K., Teerachaikulpanich, N., Miyashita, T., and Tada, Y. (2016). "Investigation of high-seepage zones in slopes using the Groundwater Aeration Sound (GAS) survey technique in Thailand." *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(74), 2539-2543.
- [13] Kawai, T., Tada, Y., Shinoda, M., Tsuchiya, R., Motii, T., Suzuki, T., and Tseedulam, K. (2014). "Simple method of shallow groundwater exploration by groundwater aeration sound in semi-arid grassland." *Journal of Arid Land Studies*, 24, 245-248.
- [14] Kotowski, T., Najman, J., Nowobilska-Luberda, A., Bergel, T., and Kaczor, G. (2023). "Analysis of the interaction between surface water and groundwater using gaseous tracers in a dynamic test at a riverbank filtration intake." *Hydrological Processes*, 37(4), e14862.
- [15] Liang, W., Zhang, L., Xu, Q., and Yan, C. (2013). "Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology." *Engineering Failure Analysis*, 31, 1-7.
- [16] Liang, W.L. (2020). "Dynamics of pore water pressure at the soil-bedrock interface recorded during a rainfall-induced shallow landslide in a steep natural forested headwater catchment, Taiwan." *Journal of Hydrology*, 587, 125003.
- [17] Liang, W.L., and Chan, M.C. (2017). "Spatial and temporal variations in the effects of soil depth and topographic wetness index of bedrock topography on subsurface saturation generation in a steep natural forested headwater catchment." *Journal of Hydrology*, 546, 405-418.
- [18] Lin, T.H., Fang, S.H., and Tsao, Y. (2017). "Improving biodiversity assessment via unsupervised separation of biological sounds from long-duration recordings." *Scientific Reports*, 7(1), 4547.
- [19] Masaoka, N., Kosugi, K. i., Yamakawa, Y., and Tsutsumi, D. (2016). "Processes of bedrock groundwater seepage and their effects on soil water fluxes in a foot slope area." *Journal of Hydrology*, 535, 160-172.
- [20] Ni, L., Jiang, J., Pan, Y., and Wang, Z. (2014). "Leak location of pipelines based on characteristic entropy." *Journal of loss prevention in the process industries*, 30, 24-36.
- [21] Sethi, S.S., Bick, A., Ewers, R.M., Klinck, H., Ramesh, V., Tuanmu, M.N., and Coomes, D.A. (2023). "Limits to the accurate and generalizable use of soundscapes to monitor biodiversity." *Nature Ecology & Evolution*, 7(9), 1373-1378.
- [22] Sun, R., Xiao, W., Jiang, L., Chen, Y., and Ma, Q. (2023). "Laboratory studies of the temporal evolution process of the riparian groundwater flow system related to rainfall." *Journal of Hydrology*, 625, 130086.
- [23] Tada, Y., Fujita, M., Tsutsumi, D., Okumura, T., Koyama, K., and Kawai, T. (2005). "Detection of collapse position in mountainous slope by underground sound method." *Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University*, 48(C), 219-229.
- [24] TAKUWA Corporation. (n.d.). "Technical material." *Groundwater aeration sound measuring device*, <<http://www.mi-zumichi.jp/en/method04.php>><<http://www.mi-zumichi.jp/en/method09.php>> (Jan. 19, 2026).
- [25] Yamakawa, Y., Kosugi, K., Masaoka, N., Sumida, J., Tani, M., and Mizuyama, T. (2012). "Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered granitic hillslope." *Geomorphology*, 145-146, 56-69.
- [26] Yang, H., Byun, S.H., Lee, K., Choo, Y., and Kim, K. (2020). "Underwater acoustic research trends with machine learning: Active SONAR applications." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 34(4), 277-284.
- [27] Yin, J., Men, W., Han, X., and Guo, L. (2020). "Integrated waveform for continuous active sonar detection and communication." *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(9), 1382-390.

2026 年 01 月 19 日 收稿

2026 年 02 月 25 日 修正

2026 年 04 月 19 日 接受