

河道伏流水特性及其對地表逕流水質之影響

The Characteristics of Hyporheic Water and Its Influence on Surface Water Quality

國立成功大學水利及海洋工程學系
碩士

游志弘

Chih-Hung Yu

國立成功大學水利及海洋工程學系
副教授

孫建平*

Jian-Ping Suen

摘要

河道伏流水不僅影響溪流中的化學及物理性質，亦可提供水生生物所需的養分，對溪流生態系統的影響深具重要性。本研究地點位於屏東五溝水湧泉濕地，透過微測壓管量測垂直水力梯度，判斷伏流水的上湧及下滲現象；使用微水試驗量測水力傳導度，計算伏流水與地表逕流間交換的單位面積通量；並利用水質儀器測量地表逕流水與伏流水水質。在大尺度下發現興盛橋上游河段大致呈現上湧現象；在小尺度下則由於局部區域河床底質顆粒較粗，因重力效應及滲透性佳使得下滲現象明顯。藉由獨立 T 檢定顯示上湧及下滲處之水質無明顯的差異性，因地表逕流流動快，故於上湧及下滲處水質特性較接近，以及伏流水於上湧及下滲處水質特性因滲透層特性相似而無差異性。透過多元尺度方法及主成分分析方法分析地表逕流水質特性，區分出上湧及下滲處，研究成果可供管理人員藉由水質特性判斷上湧或下滲的出現位置，在河道伏流水的使用上有更多的考量依據。

關鍵詞：五溝水湧泉濕地，伏流水，水質特性，微測壓管，通量。

ABSTRACT

The effect of hyporheic water on wetland ecological habitat is important. The hyporheic processes not only impact physical and chemical characteristics of water but also provide needs to organisms in stream ecosystems. The exchange between surface water and hyporheic water was quantified by measuring the vertical hydraulic gradient (VHG) and streambed hydraulic conductivity (K) in minipiezometers by using the slug test in Wu Gou Shui spring-fed wetland area. Physical and chemical characteristics of the surface water and hyporheic water were measured and analyzed. Most upwelling sites were

*通訊作者，成功大學水利及海洋工程學系副教授，70101 台南市大學路 1 號，jpsuen@mail.ncku.edu.tw

observed in the upper reach at Xing Sheng Bridge. On a small scale, few downwelling sites contained large sediment in the streambed. The magnitude of downwelling sites was significantly higher than the magnitude of upwelling sites because of gravity and good permeability. Some neutral sites were observed with frequent interactions between surface water and hyporheic water in small areas. There were no differences in water quality characteristics of surface water and hyporheic water between upwelling sites and downwelling sites. By using multidimensional scaling analysis (MDS) and principal component analysis (PCA), we could distinguish upwelling and downwelling sites and find the main factors of water quality characteristics by analyzing water quality characteristics of surface water.

Keywords: Wu Gou Shui spring-fed wetland area, Hyporheic water, Water quality characteristics, Minipiezometer, Flux.

一、前言

近年來臺灣對使用伏流水之相關議題討論熱烈，但伏流水對河川逕流之物理及化學性質造成的影響卻研究甚少，故本研究將對臺灣河道伏流水特性做討論。河道伏流水為在伏流水層流動的水，本研究所指的伏流水層(Hyporheic Zone)為「河川河床下方飽和孔隙區域，並延伸至包含部分地表逕流之河岸區域」(White, 1993)。伏流水層為地下水與地表逕流之間交換的區域，且地表逕流和地下水是連續不可分離而呈現下滲(Downwelling)和上湧(Upwelling)的水流動循環(Alley *et al.*, 2002)。Valett *et al.* (1993)更廣泛的定義伏流水層為了解伏流水與地表逕流進行水交換的溪流地下水流動區域，包含了河道中的水及進入伏流水層後水質發生變化的水，強調含有地表水是伏流水層的一個關鍵，地表逕流經過下滲進入伏流水層，在其中流動而和地下水連接並混合，而後在上湧處重新回到地表逕流(Bencala, 2000)。伏流水層連接著陸地、河岸與溪流河道，是集水區內物質和能量的連絡通道，由於能夠反映周圍環境生態系的變化，因此伏流水層是評估溪流生態系統健康與否的因素之一，也可做為保持生物多樣性與溪流生態平衡的重要環節。

伏流水與地表逕流之間的交換分成上湧及下滲兩種方式，在不同空間尺度伏流水的上湧與下滲機制也會不同，不同的地文(例如：地底岩盤、地形坡度)、水文條件(例如：高流量造成表面壓力比較大)和河川底質性質(例如：土壤孔隙大小、水力傳導度)都會影響伏流水的上湧與下滲。Frissell *et al.* (1986)指出在洪水平原區域之大尺度下，底床顆粒大小為主要影響因素，上游礫石堆積而孔隙較大，造成地表逕流容易下滲至伏流水層；下游細顆粒沉積而孔隙較小使得伏流水上湧到河道中(Boulton, 1993; Stanford & Ward, 1993)。Valett *et al.* (1994)指出在潭-瀨(Pool-riffle)之小尺度下，地貌特性則為主要影響因素，在潭接瀨的尾端會有下滲現象，緊接在瀨接潭的尾端則會出現上湧現象(Gariglio *et al.*, 2013)。Malard *et al.* (2001)則指出在河段(Reach)尺度下，大部分上湧現象主要發生在瀨區(Riffle)的尾段、礫石沙洲(Gravel bar)尾端、階梯狀渠道(Channel step)尾端、彎曲河道尾處、滲透性銳減處及潭區(Pool)起始處等位置。

伏流水層的物理滲透機制最為明顯，當水進入或流過伏流水層時，沉積物阻止泥等細顆粒物質的流動(Vervier *et al.*, 1992)，其邊界亦會因地表逕流和地下水交換的體積與深度的變化而處

於波動狀態，在豐水期，以地表逕流進入伏流水層為主；在枯水期，以地下水進入伏流水層為主。其次是伏流水層的生物滲透機制，其類似於污水處理廠的過濾器(Ward *et al.*, 1998)，為溶解在地表逕流或地下水中的營養物質被附著在沉積物上的生物膜吸收或轉化(Boulton *et al.*, 1999; Triska *et al.*, 1993)。生物滲透的效率與微生物活性有關，近地表的無脊椎動物主要依賴於生物膜營養物質才能進入食物鏈(Marmonier *et al.*, 1995)。伏流水層中以生物膜為介質的生物吸收能夠去除水中的污染物質，並影響著營養元素及污染物的生物地球化學循環。最後為伏流水層的化學滲透機制，主要受伏流水層中化學條件的控制，而且化學條件的變化會導致溶解的金屬元素和礦物質發生沉澱(Harvey and Fuller, 1998)。因為上湧及下滲的水溫、pH 值、導電度、溶氧量和硝酸鹽存在著差異，因此不同的水流混合後會產生一些化學作用(Franken *et al.*, 2001)，可藉由混合模式分析溶質遷移的動力學過程(Battin *et al.*, 2003)。此外，由於伏流水層內生物和物理化學梯度的存在，使得伏流水層的生物地球化學過程影響著地表逕流的水質。

本研究目的在了解河道伏流水於河川之上湧及下滲現象對溪流水質造成的影響，利用 Baxter *et al.* (2003)設計之微測壓管(Minipiezometer)判斷採樣點之上湧及下滲情形，採集地表逕流與伏流水，以分析上湧及下滲處之水質差異，並透過多變量統計方法經由水質參數區分上湧與下滲的群聚。研究成果可供管理人員藉由水質特性判斷上湧或下滲現象的出現位置，並可於考慮利用伏流水作為備用水資源時，取水及水質處理之參考依據。

二、研究方法

2.1 研究地點

本研究區域位於屏東縣萬巒鄉東港溪的上游支流，現稱為五溝水湧泉濕地河段，其河水流經傳統客家農村聚落之五溝村。源頭來自大武山雨水，經過地下伏流，在五溝社區附近河段湧出而形成泉水窟溪，居民開鑿水圳引入溪水利用，

因而發展出結合客家文化的獨特地景。氣候乾濕季分明，年雨量平均約為 2,216 mm，五月至十月為濕季，降雨量集中，十一月到翌年四月為乾季。

採樣站主要分佈在興盛橋上游河段及五福橋下游河段。其中興盛橋上游至彭城堂屋後的河段，緊鄰家屋但水質清澈；而五溝社區公園旁的五福橋河段，水域環境於 2014 年 1 月整治工程完工後逐漸復原，兩河段之調查採樣範圍均約 150 至 200 公尺。此外，因湧泉窟位於五溝水溪流之上游，為大武山雨水經地下伏流於五溝社區附近湧出所形成的水池，由於地貌環境幾乎不受其他水源干擾而水質非常清澈，故在此區域作水質調查，與前述兩河段做比較。

2.2 垂直水力梯度與單位面積通量

Darcy (1856)根據定水頭實驗結果，得到砂中水的流動速率與水力坡降成正比。換言之，飽和土壤中水流動的速度與水力坡降呈線性關係，其公式如下：

$$v = -Ki \quad \dots\dots\dots (1)$$

其中 K 為水力傳導度；i 為水力坡降，定義為水流經單位土體長度(L)所產生的總水頭損失(H)，公式如下：

$$i = \frac{H}{L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

本研究所使用之微測壓管採樣工具依 Baxter *et al.* (2003)提出之微測壓管原理製作，主要分為金屬外管、金屬內管、敲擊金屬頭及鐵槌四部份。實驗時將金屬內管與外管組合，使用鐵鎚敲入溪流底床下約 40 公分，抽出金屬內管，放入微測壓管，抽出金屬外管，再量測微測壓管內之水位，微測壓管詳細規格及操作步驟請參閱林馳源(2013)。

圖 1 為利用微測壓管判斷上湧及下滲現象的示意圖，其中 Δh 為地表逕流水位與微測壓管內水位間的水頭差， Δl 為從底床表面至微測壓管底部的第一個孔之長度。

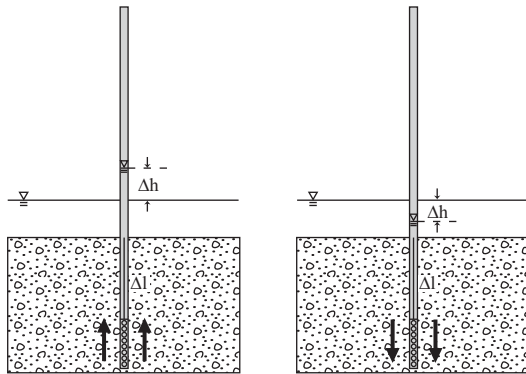


圖 1 利用微測壓管量測水頭差(左為上湧, 右為下滲)

微測壓管量測得水頭差後, 可計算底床顆粒間的垂直水力梯度 (Vertical Hydraulic Gradient, VHG)、水力傳導度及單位面積垂直通量, 其中 VHG 使用 Dahm *et al.* (2006) 提出的公式:

$$VHG = \frac{\Delta h}{\Delta l} \dots\dots\dots(3)$$

VHG 為計算伏流水與地表逕流間的壓力差且無單位, 分成上湧及下滲兩種情況, 上湧時微測壓管中水位會高於地表逕流水位; 下滲時則相反之, 管中水位低於地表逕流水位, 微測壓管的量測原理及達西公式原理相同, 而垂直水力梯度之物理意義與水力坡降相同(林馳源, 2013)。

河床底質中的水力傳導度 ($K, m \cdot s^{-1}$) 可由微水試驗 (Slug test, Fetter, 1994) 量測, 如圖 2 所示, 水位於內管直徑為 D (m) 之微測壓管 h_0 降至 h 所花的時間 Δt , 由 Baxter *et al.* (2003) 提出修改 Hvorslev (1951) 的公式計算可得:

$$K = \left(\frac{0.7854 * D}{\pi * \Delta t} \right) * \left(\ln \frac{h_0}{h} \right) \dots\dots\dots(4)$$

單位面積垂直通量 ($q, m \cdot s^{-1}$) 則由 Darcy 公式可得:

$$q = -K \cdot VHG \dots\dots\dots(5)$$

2.3 採樣方法

為了解地表逕流與伏流水之間交換對水質

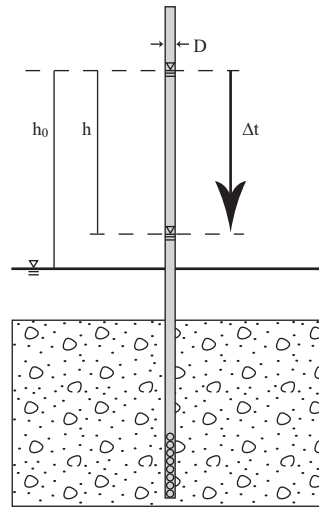


圖 2 微測壓管量測水力傳導度示意圖

特性的影響, 並比較地表逕流與伏流水於上湧及下滲處的水質差異, 本研究主要針對地表逕流之水質特性與水文特性做量測。在地表逕流部分, 水質特性透過手持式 YSI Model 63 量測導電度、鹽度和 pH 值, 以及手持式 YSI Model 550 量測水溫及溶氧; 水文特性使用 FP111 攜帶式流速儀量測流速與水深等微棲地尺度資料。伏流水水質調查部分則使用抽水幫浦密封連接微測壓管, 以手動抽取伏流水後裝於量筒, 使用上述水質計在每一站點測量其水溫、導電度、鹽度、溶氧和 pH 值。

為量測地表逕流與伏流水之硝酸鹽及總磷濃度, 將各站點之地表逕流及伏流水分別瓶裝 250 毫升水體樣本, 帶回實驗室以 HACH Model DR800 直讀式分光光度計分析, 以記錄水體中硝酸鹽和總磷濃度。

2.4 統計分析

本研究使用 SPSS 套裝軟體進行統計分析, 以獨立樣本 T 檢定分別比較地表逕流和伏流水水質在上湧及下滲處是否有明顯差異性, 以成對樣本 T 檢定對水質資料檢驗上湧與下滲處及地表逕流與伏流水的平均數差異, 藉此了解上湧與下滲現象對地表逕流及伏流水水質之影響; 並以多元尺度方法 (Multidimensional Scaling, MDS) 分別輸

入湧泉窟、地表逕流與伏流水水質特性進行計量 MDS 的分析，藉此分出湧泉窟、上湧處、下滲處的集群，來達到透過水質特性去判斷上湧及下滲出現區域的目的。此外，使用 PRIMER 6 套裝軟體以主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)將水質特性分類，探討水質特性在主成分分析結果中的分佈情形，藉由將多個因子簡化來找出水質特性在上湧及下滲處中，有較高影響力的水質因子，進而作為可判斷上湧及下滲出現的區域的指標範圍。上述統計分析方法之原理請參閱陳順宇(2005)。

三、研究結果

3.1 上湧及下滲分佈情形

本研究採樣時間為 2013 年 8 月至隔年 4 月，在五溝水湧泉濕地兩河段調查共計有 84 個站點，其中上湧處 41 個、下滲處 14 個及平衡處 29 個，另外在湧泉窟亦有 10 個站點，皆為上湧現象。其中平衡狀態的定義，原應為微測壓管內水面與地表逕流水面一致，這時垂直水力梯度為 0，但因逕流水面上下波動會造成觀測上的誤差，根據現地量測到的地表逕流水位與微測壓管內水位間的水頭差(Δh)及土體長(Δl)估算，假設水頭差在觀測上的誤差約為 ± 1 公分，平均土體長約為 20 公分，依式(3)估算出垂直水力梯度約為 ± 0.05 ，則令此範圍內垂直水力梯度作為平衡狀態，由圖 3 可得知本研究採樣 84 個站點的垂直水力梯度範圍。為呈現垂直水力梯度值大小的差別，將垂直水力梯度高於 0.1 和低於-0.1 視為強度界限，垂直水力梯度於 0.05 至 0.1 為上湧，大於 0.1 則為強上湧；垂直水力梯度於-0.05 至 -0.1 為下滲，小於-0.1 則為強下滲，圖 4 則為 84 個站點呈現上湧及下滲之垂直水力梯度強弱分佈圖。

根據圖 4，由大尺度來看，發現興盛橋上游河段呈現大區域上湧現象，極少部分出現下滲現象，上湧及下滲與潭瀨的分佈沒有特定的相關；五福橋下游河段則在潭瀨尾端呈現上湧及下滲交錯現象，主要是因河道蜿蜒造成地勢上的高低

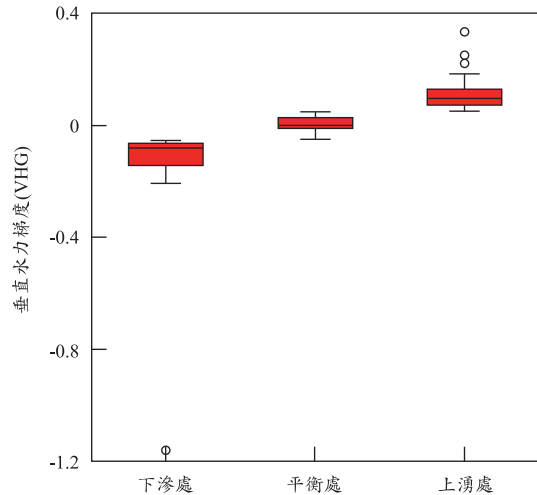


圖 3 垂直水力梯度測值盒形圖(下滲處 14 個、平衡處 29 個、上湧處 41 個站點)

起伏及土壓不均勻所產生(Malard *et al.*, 2001)。然而由小尺度來看，興盛橋上游 10 公尺至 20 公尺處為瀨段，但是河床底質卻由粗顆粒及泥沙組成，粗顆粒底質堆積使得水流方向改變，因重力效應及滲透性較佳造成了此區段的下滲現象明顯，並有幾處在平衡狀態，表示伏流水與地表逕流交互作用在小區域作用頻繁。

3.2 垂直水力梯度在乾濕季之差異性

臺灣南部乾濕季分明，地表逕流量因季節而有差異，地下水位也隨之有變化，導致伏流水的上湧及下滲亦會有所變化。本研究採樣於 2013 年 8 月至 2014 年 4 月期間，由濕季轉乾季時，垂直水力梯度於上湧處以及下滲處由強轉弱，如圖 5 所示。其中圈選的範圍指出，於興盛橋上游河段發現區域內的垂直水力梯度明顯地隨季節轉變而改變強度，表示濕季時伏流水與地表逕流間的交互作用非常旺盛。

3.3 單位面積通量

本研究除利用微測壓管測得垂直水力梯度，以了解伏流水的上湧及下滲外，也透過現地量測方法估算水力傳導度，並計算伏流水與地表逕流間交換的單位面積通量。由圖 6 可看出湧泉

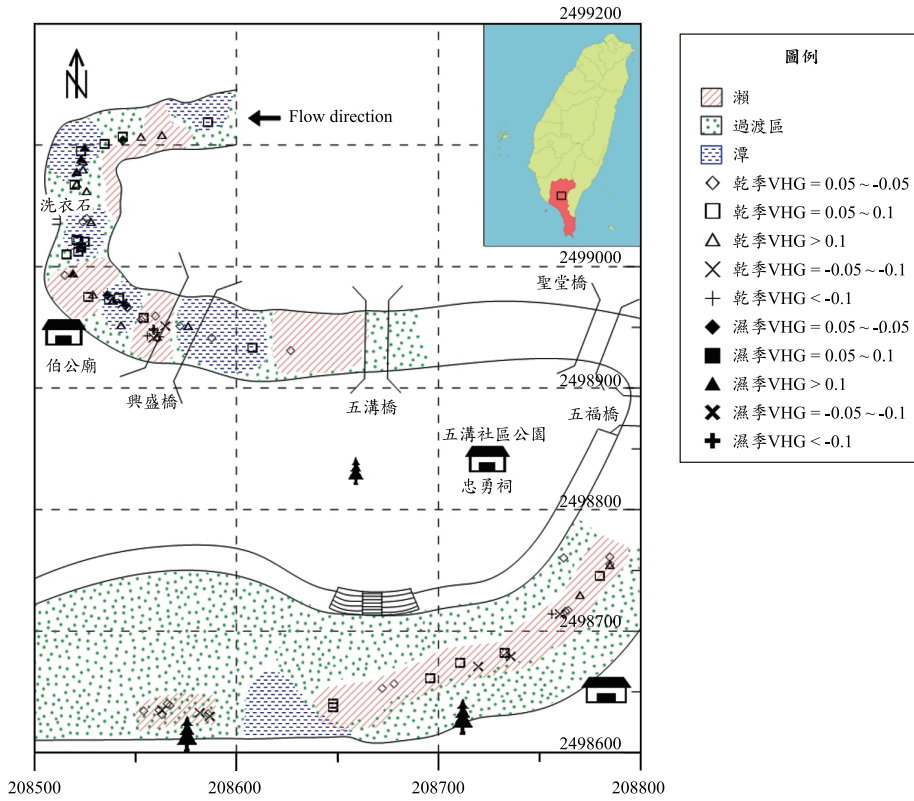


圖 4 站點垂直水力梯度上湧及下滲強度分佈圖(X 軸及 Y 軸為二度分帶座標)

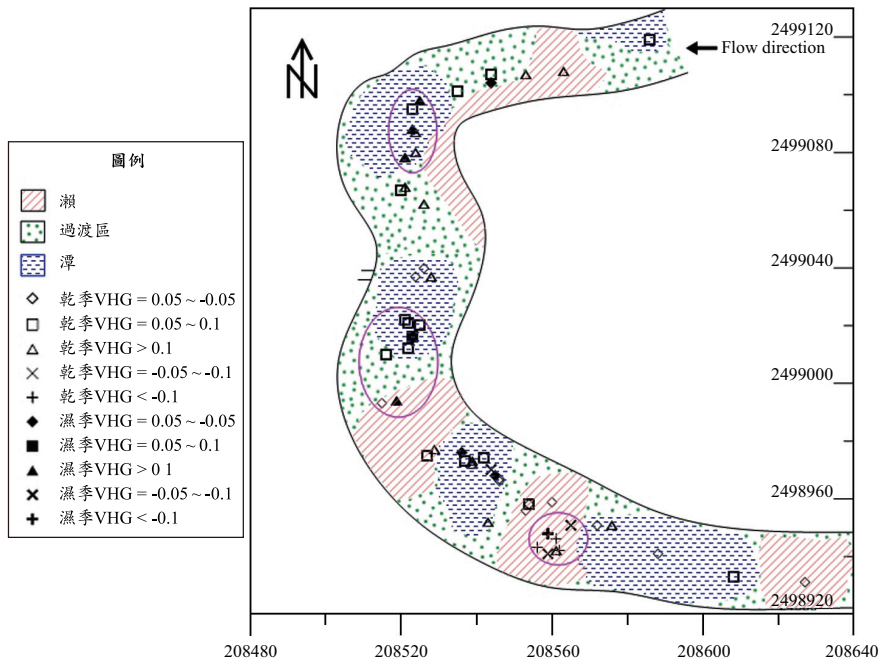


圖 5 興盛橋上游河段垂直水力梯度於乾濕季變化情形(X 軸及 Y 軸為二度分帶座標)

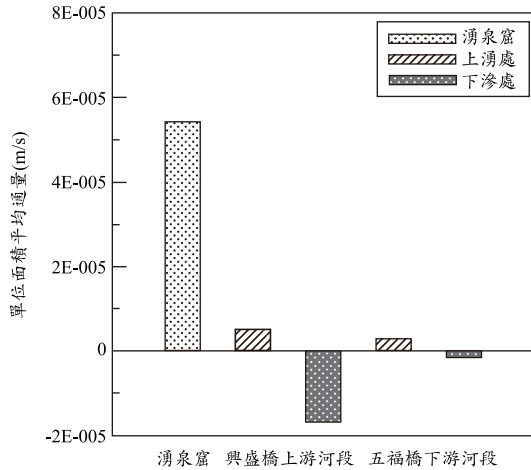


圖 6 湧泉窟、興盛橋上游河段及五福橋下游河段的平均通量比較圖

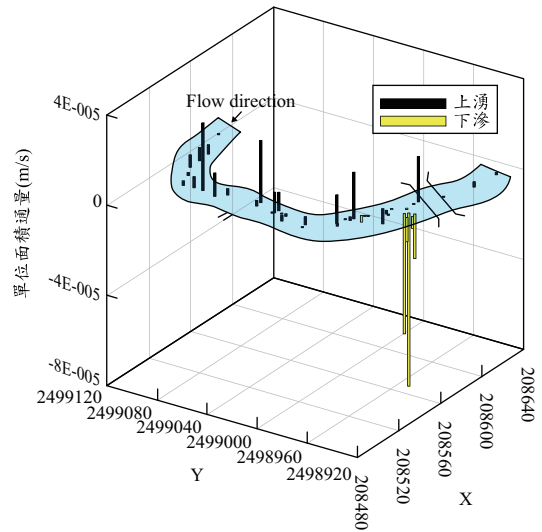


圖 8 伏流水於興盛橋上游河段的站點通量分佈圖 (X 及 Y 為二度分帶座標)

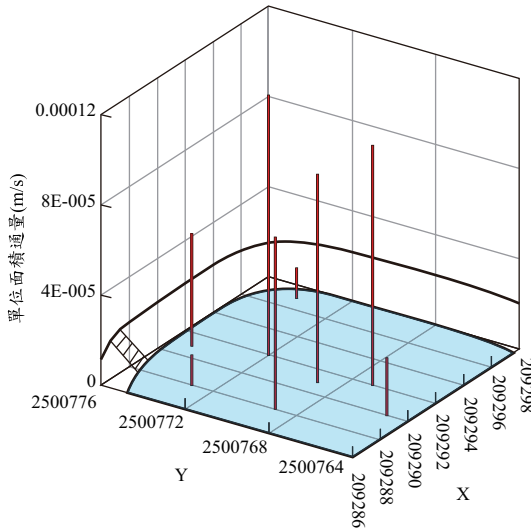


圖 7 伏流水於湧泉窟的站點通量分佈圖(X及Y為二度分帶座標)

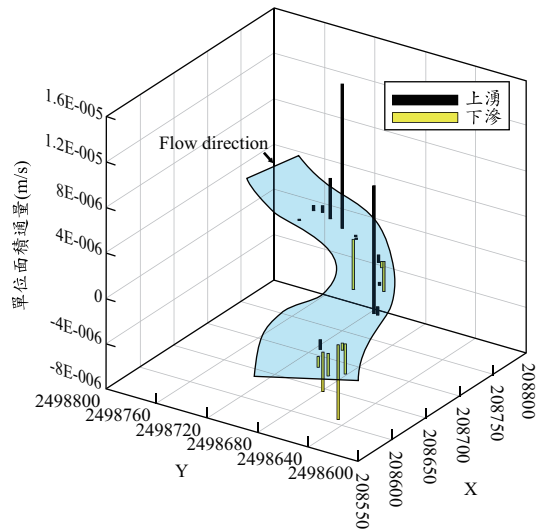


圖 9 伏流水於五福橋下游河段的站點通量分佈圖 (X 及 Y 為二度分帶座標)

窟上湧的單位面積平均通量量值，較五福橋上游及興盛橋下游河段明顯高出許多。一般而言，地層中決定含水層導水性質的是沉積物質的顆粒大小，顆粒愈大，導水性質愈好。從現地地質觀察湧泉窟以礫質分佈比例較高，水力傳導度由式(4)計算介於 3.87×10^{-4} 至 4.23×10^{-5} m/s 之間，故湧泉窟之單位平均通量呈現較高。反之，興盛橋上游及五福橋下游河段多以細砂及粗砂等底質

居多，水力傳導度由式(4)計算介於 1.07×10^{-5} 至 1.90×10^{-8} m/s 之間，因此單位面積平均通量偏低。此外，圖 6 中亦顯示興盛橋上游的下滲處單位面積通量比上湧處高，結合現地觀測到的底床地形，發現粗顆粒造成滲透性較佳，再加上重力效應，不僅讓水流方向改變，也造成明顯的下滲現象。

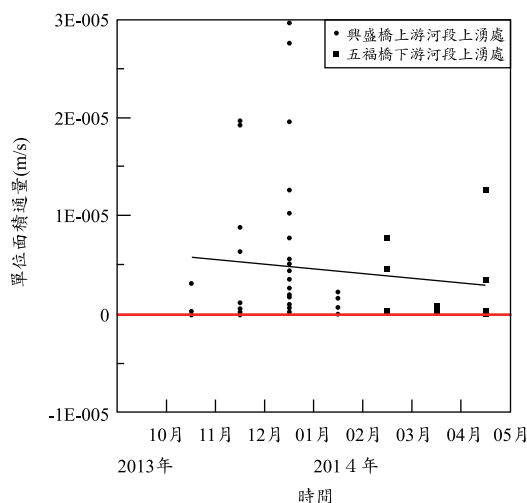


圖 10 上湧處平均通量—時間關係圖

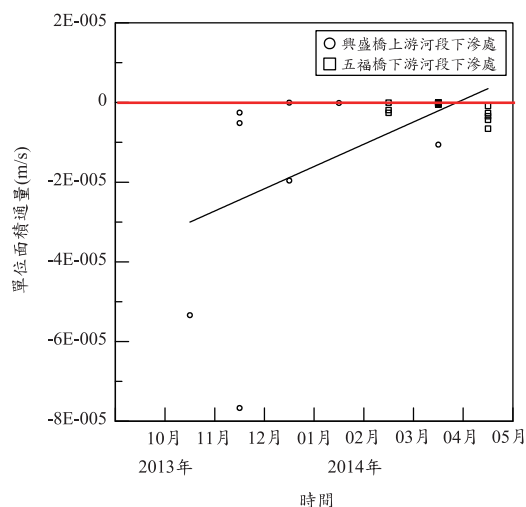


圖 11 下滲處平均通量—時間關係圖

圖 7、圖 8 及圖 9 分別為伏流水於湧泉窟、興盛橋上游河段及五福橋下游河段的站點通量分佈圖，圖中的 X 及 Y 為二度分帶座標。五福橋下游河段單位面積通量相較於湧泉窟、興盛橋上游河段為最低，其主要原因應是在五福橋與堤岸整治工程施作過後，使得土壤顆粒分佈改變，河床底質歷經被挖掘、填補等擾動，透過現地觀測底質多屬泥、砂等底質分佈，水力傳導度較低。圖 9 指出少部分區域單位面積通量相較於其他區域較高，可能因為施工後土壤顆粒分佈不均，而形成少部分區域導水性質較佳，導致單位面積通量在少部分區域偏高。

地表逕流量因季節而有差異，地下水位也因山上所注入的地下水多寡而有變化。伏流水的上湧及下滲之流量亦會隨著季節時間改變，本研究發現伏流水平均通量從濕季末轉成乾季時，強度也隨之減弱，如圖 10 及圖 11 所示。從採樣結果得知在 2014 年 3 月至 4 月間平均通量為最低，接著即將進入濕季的開始，使得平均通量略增強。而高流量、水流穩定性低會使上湧及下滲之垂直水力梯度變強，低流量、水流穩定性高則會使上湧及下滲之垂直水力梯度變弱。經由達西公式可得知通量正比於水力傳導度與垂直水力梯度，所以當垂直水力梯度較大時，上湧的伏流水通量也會較多。

3.4 上湧與下滲水質差異性

表 1 及表 2 分別為地表逕流及伏流水在上湧及下滲處水質之獨立 T 檢定比較。結果顯示五福橋下游河段之地表逕流 pH 值於上湧及下滲處有顯著差異性($p < 0.05$)，導電度、溶氧量、硝酸鹽濃度及總磷濃度則無顯著差異性。此外，在興盛橋上游及五福橋下游河段比較中，地表逕流上湧處水質結果顯示導電度及硝酸鹽濃度有非常顯著差異性；地表逕流下滲處水質，也顯示導電度及硝酸鹽濃度有顯著差異性；但伏流水下滲處水質僅顯示硝酸鹽濃度有顯著差異性。

地表逕流 pH 值的部份，在五福橋下游河段，下滲處 pH 值比上湧處較低，其原因可能為下滲處有較多有機物聚集，在分解的過程中增加水中二氧化碳濃度，造成下滲處 pH 值比上湧處較低。伏流水導電度、溶氧量和總磷濃度在本研究中雖然沒有明顯的差異性，但從平均值的比較中，呈現了導電度於上湧處高於下滲處，因雨水導電度較低會稀釋地表逕流中的導電度，下滲處把地表逕流水帶入伏流水層中，而伏流水因經過地下底質，底質富含礦物質便有較高的帶電離子，導致伏流水在上湧處會有較高的導電度。溶氧量於下滲處高於上湧處(Franken *et al.*, 2001; Valett *et al.*, 1990)，因為地表逕流較容易接觸空氣，所以氧氣較容易溶於水中，藉由下滲現象把

表 1 地表逕流上湧及下滲處水質之獨立 T 檢定比較

| 水質因子 | 興盛橋上游河段 | | | 五福橋下游河段 | | |
|----------------------------|---------|--------|-------|---------|--------|--------|
| | 上湧處平均值 | 下滲處平均值 | P 值 | 上湧處平均值 | 下滲處平均值 | P 值 |
| 導電度($\mu\text{mhos/cm}$) | 196.06 | 207.53 | 0.065 | 224.75 | 231.23 | 0.239 |
| 溶氧量(mg/L) | 7.07 | 7.29 | 0.813 | 7.36 | 7.59 | 0.565 |
| pH 值 | 6.86 | 6.82 | 0.840 | 6.85 | 6.71 | 0.044* |
| 硝酸鹽濃度(mg/L) | 2.27 | 2.07 | 0.429 | 2.80 | 2.81 | 0.944 |
| 總磷濃度(mg/L) | 0.25 | 0.34 | 0.313 | 0.23 | 0.15 | 0.055 |

*表示為顯著

**表示為非常顯著

表 2 伏流水上湧及下滲處水質之獨立 T 檢定比較

| 水質因子 | 興盛橋上游河段 | | | 五福橋下游河段 | | |
|----------------------------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 上湧處平均值 | 下滲處平均值 | P 值 | 上湧處平均值 | 下滲處平均值 | P 值 |
| 導電度($\mu\text{mhos/cm}$) | 231.31 | 223.76 | 0.615 | 287.29 | 265.57 | 0.553 |
| 溶氧量(mg/L) | 4.55 | 5.23 | 0.161 | 5.31 | 6.48 | 0.217 |
| pH 值 | 6.94 | 7.36 | 0.211 | 7.12 | 7.01 | 0.355 |
| 硝酸鹽濃度(mg/L) | 0.56 | 0.31 | 0.366 | 0.64 | 1.17 | 0.186 |
| 總磷濃度(mg/L) | 0.62 | 0.52 | 0.885 | 0.88 | 0.46 | 0.398 |

*表示為顯著

**表示為非常顯著

溶氧量高的地表逕流水帶入伏流水中，又因地下不易接觸空氣缺乏氧氣，且呼吸作用或硝化作用時亦會消耗氧氣，故造成上湧的伏流水溶氧量不高。總磷濃度於上湧處比下滲處較高(Valet *et al.* 1990)，伏流水於上湧處透過沖刷將底質的營養物質帶到地表，故上湧處的總磷濃度會偏高。

上湧處水質的部份，呈現地表逕流導電度及硝酸鹽濃度在五福橋下游段明顯較高，而伏流水水質則無明顯差異，由於伏流水因位於底質下流動，不易受到其他因素所干擾；地表逕流之上湧處水質則因湧出時的滲透層特性所影響，再加上聚落的家庭排水對地表逕流水質的影響，導致有較高之導電度及硝酸鹽濃度。在下滲處水質的部份，也發現地表逕流導電度及硝酸鹽濃度在五福橋下游段明顯較高，推估可能主要因聚落的家庭排水對地表逕流的影響，使得五福橋下游段導電度及硝酸鹽濃度較高。

研究顯示五福橋下游河段的導電度高過於興盛橋下游河段，透過 T 檢定驗證了地表逕流與伏流水之導電度於興盛橋上游與五福橋下游河

段均有非常顯著差異性($p < 0.01$)，如圖 12 及圖 13 指出地表逕流與伏流水導電度在五福橋下游河段比興盛橋上游河段較高。由於不排除聚落對地表逕流水質的影響，在地理位置上，興盛橋上游河段主要受到五溝村所影響；五福橋下游河段則主要受到五溝村、萬金村及赤山村所影響，因此在五福橋下游河段其地表逕流水導電度，可能受到較多之家庭排水及地理環境影響而呈現較高。因伏流水流經河床底質，不易受人為因素影響，底質礦物中所含帶電離子較高，故伏流水導電度高於地表逕流水導電度，除此之外，因為五福橋下游河段之伏流水導電度高於興盛橋下游河段，顯示五福橋下游段河床底質礦物所含的帶電離子高於興盛橋下游河段。

伏流水與地表逕流之水質亦存在著差異性，在興盛橋上游河段的部份，結果顯示地表逕流和伏流水在導電度、溶氧量、pH 值及硝酸鹽濃度有非常顯著差異性($p < 0.01$)；在五福橋下游河段的部份，顯示地表逕流和伏流水在導電度、溶氧量、pH 值、硝酸鹽濃度及總磷濃度有非常

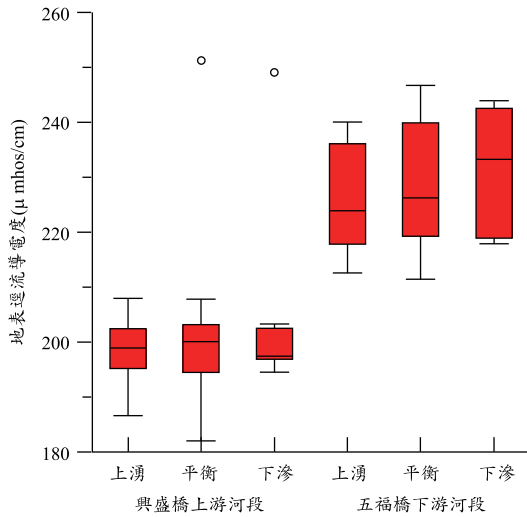


圖 12 地表逕流於上湧、平衡、下滲處之導電度盒形圖

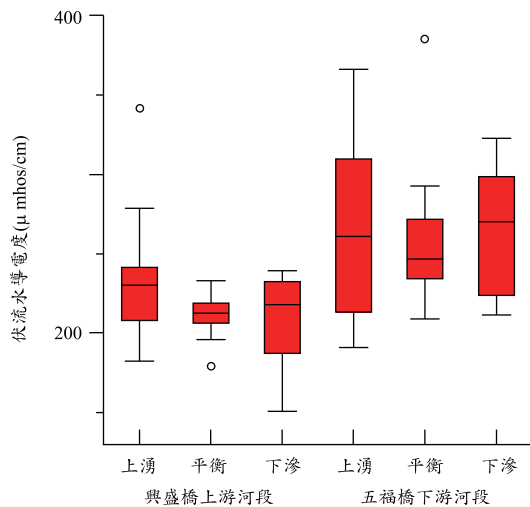


圖 13 伏流水於上湧、平衡、下滲處之導電度盒形圖

顯著差異性($p < 0.01$)；在湧泉窟的部份，顯示地表逕流和伏流水在導電度、溶氧量及 pH 值有非常顯著差異性($p < 0.01$)。

3.5 多元尺度方法分析水質特性

以地表逕流之水溫、導電度、溶氧量、pH 值、硝酸鹽濃度及總磷濃度為六變數作 MDS 分析，依垂直水力梯度結果將採樣站點分為湧泉、

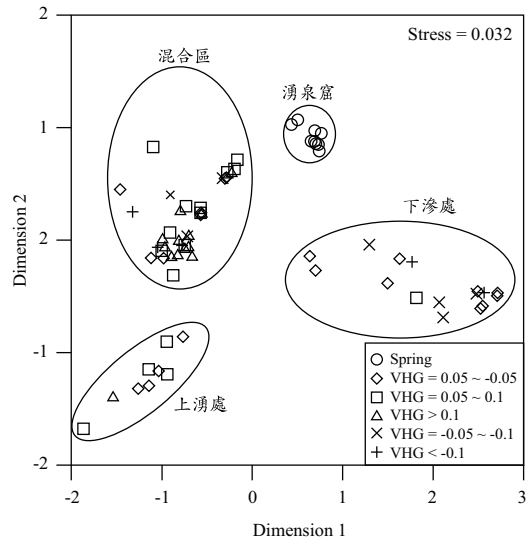


圖 14 多元尺度方法分析地表逕流水質特性

強上湧、上湧、平衡、下滲及強下滲等六類，呈現於圖 14 做比較，結果顯示可將站點分為湧泉窟、下滲處、上湧處及上湧下滲混合區等四個區域。湧泉窟水源為大武山上雨水經地下伏流湧出，可能與地下水相連接，其水質特性較不相似於興盛橋上游段及五福橋下游段的地表逕流水質特性。將興盛橋上游段及五福橋下游段的地表逕流水質特性以明顯相似的部份區分成上湧處、下滲處及混合區，未來可藉由五溝水之地表逕流水質特性判斷上湧及下滲現象的出現位置，再搭配微測壓管做實際驗證。

圖 15 為以伏流水水溫、導電度、溶氧量、pH 值、硝酸鹽濃度、總磷濃度作 MDS 分析，結果顯示可明顯分出湧泉窟、上湧處及下滲處三區。因伏流水水質不易受人為活動影響，故分別位於上湧及下滲處之水質特性相似性較高，而能清楚區分兩者。

3.6 主成分分析水質特性

為了解上湧及下滲處之水質特性相似的主要因子，本研究分別對地表逕流與伏流水以水溫、導電度、溶氧量、pH 值、硝酸鹽濃度、總磷濃度為六變數作主成分分析，其中總磷濃度因資料遺漏值過多而被排除，無法列入分析。

地表逕流水質特性之主成分分析中，第一主成分解釋變異程度達 47.3%，主要因子為導電度、溶氧量及硝酸鹽濃度；第二主成分解釋變

異程度達 28.8%，主要因子為水溫及 pH 值，如圖 16 所示。依垂直水力梯度之湧泉、強上湧、上湧、平衡、下滲及強下滲六類觀察，並對照 MDS 分析結果，發現下滲處的水質特性中導電度及硝酸鹽濃度呈現較上湧處高，溶氧量則較上湧處低。

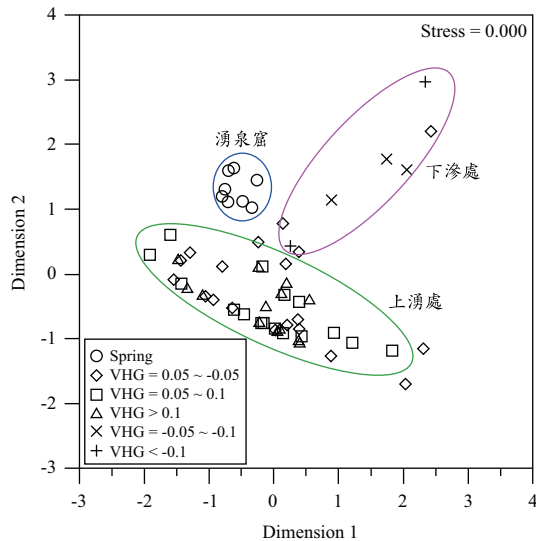


圖 15 多元尺度方法分析伏流水水質特性

伏流水水質特性之主成分分析中，第一主成分解釋變異程度達 32.9%，主要因子為水溫及導電度；第二主成分解釋變異程度達 28.1%，主要因子為溶氧量及 pH 值，如圖 17 所示。對照 MDS 分析結果，發現下滲處的水質特性中水溫、導電度及硝酸鹽濃度呈現較上湧處高。

藉由 PCA 找出地表逕流於上湧及下滲處之水質特性的主要因子，分析其下滲處水質特性資料，水溫約為 24.37 至 26.06°C，導電度約為 227.07 至 243.13 $\mu\text{mhos/cm}$ ，溶氧量約為 5.12 至 5.90 mg/L，pH 值約為 6.75 至 7.14，硝酸鹽濃度約為 7.28 至 10.69 mg/L；上湧處水溫約為 23.57 至 25.13°C，導電度約為 188.93 至 196.20 $\mu\text{mhos/cm}$ ，

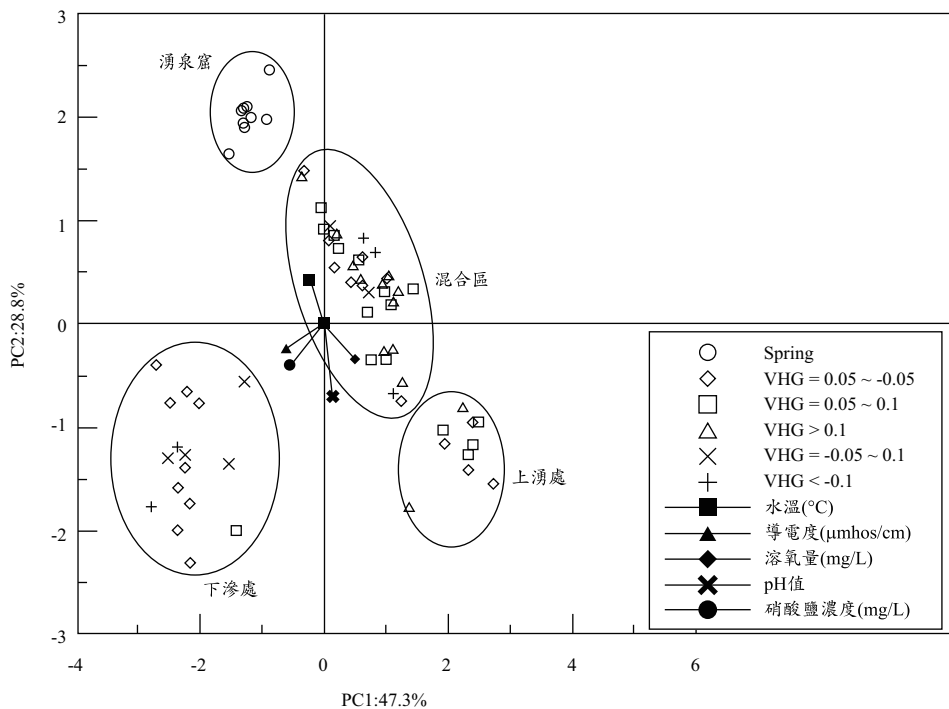


圖 16 地表逕流水質主成分分析

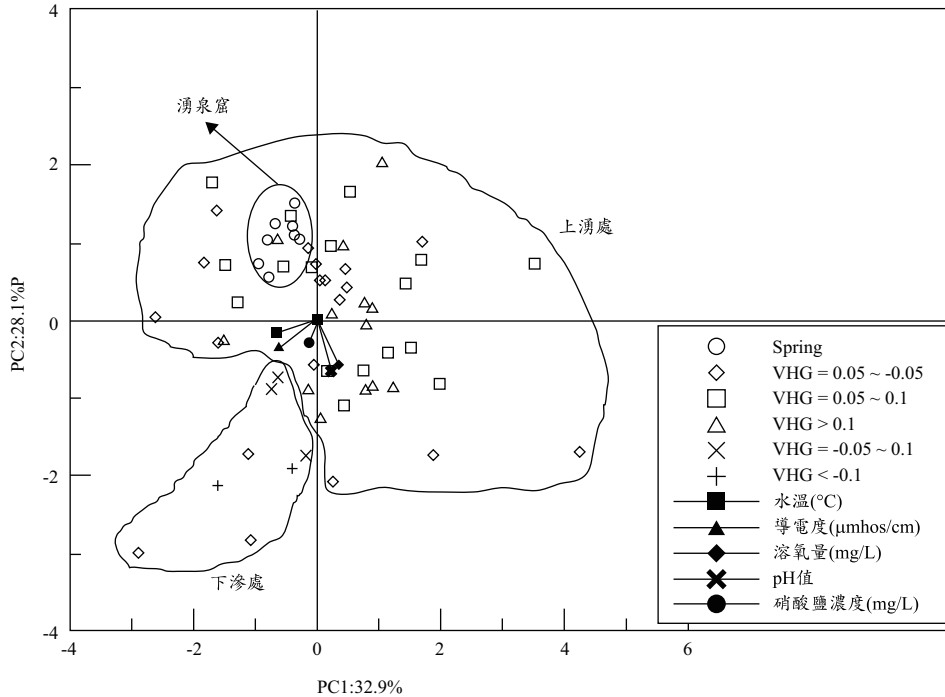


圖 17 伏流水水質主成分分析

溶氧量約為 7.19 至 9.77 mg/L，pH 值約為 6.78 至 7.45，硝酸鹽濃度約為 2.11 至 2.29 mg/L，指標範圍可搭配微測壓管作現場實際驗證，提供往後研究伏流水的參考。

四、討 論

從現地觀測到的資料發現興盛橋上游段大部份區域呈現上湧現象，指出粗顆粒底質密集堆積使得水流方向改變，因重力效應及滲透性較佳造成了少部份區域出現下滲現象，另外其他區域為平衡狀態，表示伏流水與地表逕流交互作用在小區域作用頻繁。

臺灣南部乾濕季分明，地表逕流量因季節而有差異，地下水位也因山上所注入的地下水多寡而有變化，因此伏流水的上湧及下滲之水流量亦會隨著季節時間改變，表示伏流水與地表逕流之間的交換在濕季時較旺盛、頻繁，地表逕流的流量較高且上湧的水量也會比較多，若要將伏流水作為備援水資源的觀點來看，濕季伏流水流量較多，缺水問題不大，在乾季缺水時伏流水量相對

較少，是管理者需要多加注意的情況。

河道伏流水為地表逕流經過河床底質之水流，具有與地表逕流不同的水質，Fernald *et al.* (2006)指出地下水和伏流水相較於地表逕流之水質，存在著極大的差異性，同樣於本研究中也呈現出伏流水與地表逕流的水質差異性，並且在興盛橋上游、五福橋下游河段及湧泉窟都發現了一致的不同，溶氧量、硝酸鹽濃度於地表逕流較高；導電度、pH 值及總磷濃度於伏流水較高。

伏流水與地表逕流之間的交換，透過上湧及下滲現象影響形成水質差異，然而藉由獨立 T 檢定檢驗上湧及下滲處的水質差異性中，沒有顯示較佳的結果，因地表逕流流動快，故於上湧及下滲處所採集之水樣水質特性較接近，以及伏流水於上湧及下滲處水質特性因滲透層特性相似而無差異性。不過總結在興盛橋上游及五福橋下游河段的水質差異性比較一致，地表逕流溶氧量於下滲處較高，pH 值於上湧處較高；伏流水導電度及總磷濃度於上湧處較高，溶氧量於下滲處較高。

屏東縣政府因進行改善排水工程，針對五福

橋上、下游河段施作工程拓寬河道，不僅改變河川地貌、土壤底質分佈情況，影響水質特性及土壤孔隙的水力傳導度，形成伏流水位置在小區域單位面積通量偏高，且溪流生態棲地也一併受到影響。

五、結 論

本研究於東港溪上游五溝水湧泉濕地，透過微測壓管判斷採樣地點為伏流水之上湧或下滲處，使用微水試驗量測水力傳導度，估計地表逕流與伏流水間交換的通量，並比較在不同河段的差異，除此之外，伏流水之上湧及下滲隨季節轉換而變化，上湧及下滲之單位面積平均通量也會隨著濕季轉乾季而有改變。地表逕流水質於上湧和下滲處以五福橋下游河段 pH 值有明顯差異性，導電度、溶氧量、硝酸鹽濃度及總磷濃度則沒有明顯的差異，而地表逕流與伏流水分別於興盛橋上游與五福橋下游河段以導電度有明顯差異性。抽取伏流水與地表逕流水質作比較，興盛橋上游河段以導電度、溶氧量及硝酸鹽濃度有非常明顯差異性；五福橋下游河段以導電度、溶氧量、pH 值、硝酸鹽濃度及總磷濃度有非常明顯差異性。最後，透過多元尺度方法及主成分分析水質特性，區分出上湧處、下滲處及湧泉窟三群，並找出地表逕流於上湧及下滲處的水質特性資料作為可依據的指標範圍，可作往後研究伏流水的參考，研究成果可供管理人員可藉由地表逕流水質特性判斷出五溝水濕地的上湧及下滲現象會發生在何處。本研究認為上湧及下滲處存在著差異性，而伏流水與地表逕流水質存在著差異性，然而地表逕流於上湧及下滲處水質特性差異不夠明顯，主因素為地表逕流會受自然、生物或人類活動所影響，所以在水質特性方面若能加入其他因子再藉由統計分析方法可做出更好的分群結果。

謝 誌

感謝國立成功大學水利及海洋工程學系水資源生態環境系統研究室所有成員的鼎力相助。研究經費承蒙科技部計畫 NSC102-2116-M-006-009 補助。

參考文獻

1. 林馳源，伏流水對地表逕流水質與魚類影響之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士學位論文。(2013)
2. 陳順宇，多變量分析，華泰文化。(2005)
3. Alley, W. M., Healy, R. W., LaBaugh, J. W., & Reilly, T. E. Flow and storage in groundwater systems. *Science*, 296(5575), 1985-1990. (2002)
4. Battin, T. J., Kaplan, L. A., Newbold, J. D., & Hendricks, S. P. A mixing model analysis of stream solute dynamics and the contribution of a hyporheic zone to ecosystem function. *Freshwater Biology*, 48(6), 995-1014. (2003)
5. Baxter, C., Hauer, F. R., & Woessner, W. W. Measuring groundwater-stream water exchange: new techniques for installing minipiezometers and estimating hydraulic conductivity. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132(3), 493-502. (2003)
6. Bencala, K. E. Hyporheic zone hydrological processes. *Hydrological Processes*, 14(15), 2797-2798. (2000)
7. Boulton, A. Stream ecology and surface-hyporheic hydrologic exchange: implications, techniques and limitations. *Marine and Freshwater Research*, 44(4), 553-564. (1993)
8. Boulton, A., Marmonier, P., & Davis, J. Hydrological exchange and subsurface water chemistry in streams varying in salinity in south-western Australia. *International Journal of Salt Lake Research*, 8(4), 361-382. (1999)
9. Dahm, C. N., Valett, H. M., Baxter, C. V., & Woessner, W. W. Hyporheic zones. In: Hauer, F. R., & Lamberti, G. A. (eds) *Methods in stream ecology*. Elsevier, Boston, pp 119-142. (2006)
10. Darcy, H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris: Paris, Librairie des Corps Imperiaux des Ponts et Chaussées et des Mines. (1856)
11. Fernald, A. G., Landers, D. H., & Wigington, P.

- J. Water quality changes in hyporheic flow paths between a large gravel bed river and off- channel alcoves in Oregon, USA. *River Research and Applications*, 22(10), 1111-1124. (2006)
12. Fetter, C. W. *Applied hydrogeology*. Merrill, New Jersey. (1994)
 13. Franken, R. J. M., Storey, R. G., & Williams, D. D. Biological, chemical and physical characteristics of downwelling and upwelling zones in the hyporheic zone of a north-temperate stream. *Hydrobiologia*, 444(1-3), 183-195. (2001)
 14. Frissell, C. A., Liss, W. J., Warren, C. E., & Hurley, M. D. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 10(2), 199-214. (1986)
 15. Gariglio, F. P., Tonina, D., & Luce, C. H. Spatiotemporal variability of hyporheic exchange through a pool-riffle-pool sequence. *Water Resources Research*, 49(11), 7185-7204. (2013)
 16. Harvey, J. W., & Fuller, C. C. Effect of enhanced manganese oxidation in the hyporheic zone on basin- scale geochemical mass balance. *Water Resources Research*, 34(4), 623-636. (1998)
 17. Hvorslev, M. J. Time lag and soil permeability in ground-water observations. U.S. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Bulletin 36, Vicksburg, Mississippi. (1951)
 18. Malard F., K. T., M. Dole-olivier, J. Mathieu and F. Stoch Sampling manual for the assessment of regional groundwater biodiversity fifth framework programme key action. *Global Change, Climate and Biodiversity Assessing and Conserving Biodiversity Contract*, 2, 1-21. (2001)
 19. Marmonier, P., Fontvieille, D., Gibert, J., & Vanek, V. Distribution of dissolved organic carbon and bacteria at the interface between the Rhône River and its alluvial aquifer. *Journal of the North American Benthological Society*, 382-392. (1995)
 20. Stanford, J. and J. V. Ward. An ecosystem perspective of alluvial rivers: Connectivity and the hyporheic corridor. *Journal of the North American Benthological Society*, 12, 48-60. (1993)
 21. Triska, F. J., Duff, J. H., & Avanzino, R. J. The role of water exchange between a stream channel and its hyporheic zone in nitrogen cycling at the terrestrial - aquatic interface. *Hydrobiologia*, 251(1-3), 167-184. (1993)
 22. Valett, H. M., Fisher, S. G., Grimm, N. B., & Camill, P. Vertical hydrologic exchange and ecological stability of a desert stream ecosystem. *Ecology*, 75(2), 548-560. (1994)
 23. Valett, H. M., Fisher, S. G., Stanley, E. H. Physical and chemical characteristics of the hyporheic zone of a Sonoran Desert stream. *The North American Benthological Society*, 201-215. (1990)
 24. Valett, H. M., Hakenkamp, C. C., & Boulton, A. J. Perspectives on the hyporheic zone: integrating hydrology and biology. Introduction. *Journal of the North American Benthological Society*, 40-43. (1993)
 25. Vervier, P., Gibert, J., Marmonier, P., & Dole-Olivier, M.-J. A perspective on the permeability of the surface freshwater-groundwater ecotone. *Journal of the North American Benthological Society*, 93-102. (1992)
 26. Ward, J., Bretschko, G., Brunke, M., Danielopol, D., Gibert, J., Gonsler, T., & Hildrew, A. The boundaries of river systems: the metazoan perspective. *Freshwater Biology*, 40(3), 531-569. (1998)
 27. White, D. S. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *Journal of the North American Benthological Society*, 61-69. (1993)

收稿日期：民國 103 年 8 月 27 日
 修正日期：民國 104 年 1 月 19 日
 接受日期：民國 104 年 2 月 24 日