

以天然示蹤劑之端點混合分析法驗證農業用水之循環性— 以彰化扇頂區為例

劉滄琴¹ 林毓雯² 詹婉君³ 彭宗仁^{4,*}

摘要

劉滄琴、林毓雯、詹婉君、彭宗仁。2021。以天然示蹤劑之端點混合分析法驗證農業用水之循環性—以彰化扇頂區為例。台灣農業研究 70(4):271–284。

本研究利用以氫氧同位素及氯離子建構而成的端點水源混合分析技術，進行彰化扇頂區地下水及八卦山地下水之補注來源分析。進一步，本研究探究濁水溪溪水、八卦山地下水與彰化扇頂區地下水三者間之關聯。結果顯示，八卦山地下水約有 47% 來自雨水入滲，53% 來自引來的濁水溪溪水。濁水溪溪水是彰化平原地下水之主要補注源，約占總補注量的 68%；其中，約有 38% 來自河床溪水直接補注，另外 30% 來自八卦山上來自濁水溪的灌溉水。也就是說，濁水溪溪水可被引至八卦山進行農業灌溉，之後灌溉水入滲形成地下水進而形成彰化平原地下水的補注水源。本水源分析研究不僅半定量證明濁水溪溪水對彰化平原地下水的重要性，也驗證了農業灌溉水的循環性。

關鍵詞：灌溉用水、穩定氫氧同位素、天然示蹤技術、扇頂地下水、彰化。

前言

依據經濟部統計資料 (Water Resources Planning Commission 1995)，1993 年台灣地區各標的用水總量約 $171.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中以農業灌溉用水 $97.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占約 56.6%) 最多，其次依序為農業養殖用水 $28.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占約 16.4%)，生活用水 $27.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占約 16.2%)，工業用水 $16.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占約 9.8%)，農業畜牧用水 $1.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占約 < 1%)。由此數據顯示，農業灌溉用水是水資源利用的最大支出項目。

表面上上述統計資料容易讓人誤解農業灌溉是一種高耗水產業。然而，農業灌溉用水並非全然是一種淨支出 (Tabbal *et al.* 2002)。部分灌溉水或地面水可藉由蒸發散回歸大氣，若佐以適當降雨條件，亦能再提供作為水資源；

再者，灌溉亦可經由地表灌溉渠道與田間水入滲補注地下水。例如 Peng *et al.* (2012) 利用氫氧同位素技術推估桃園台地的地下水有 54% 來自台地降雨，而台地降雨中有 6% 是來自地面水 (池塘水) 的蒸發補充。此外，根據農委會資料 (Chen & Yang 2004)，在台灣農業灌溉用水中的 64% 是可經由水循環再利用的活水，其中的 66% 可補注地下水，另外的 34% 大部分回歸地面水源如河川、湖泊及海洋。因此，雖然表面上水資源收支帳中農業灌溉用水為最大耗水產業，但大多數農業灌溉用水仍可進入水圈循環而再被利用。

濁水溪沖積扇所屬之彰化、雲林兩縣為本省之主要農業生產區，灌溉用水需求殷切，但因地表水源時空分布不均，故需以地下水為輔助水源。自 1975 年起為發展農業，開始進行地

投稿日期：2020 年 9 月 16 日；接受日期：2021 年 7 月 23 日。

* 通訊作者：trpeng@nchu.edu.tw

¹ 農委會農業試驗所農業化學組研究員兼組長。台灣 台中市。

² 農委會農業試驗所農業化學組副研究員。台灣 台中市。

³ 國立中興大學土壤環境科學系研究助理。台灣 台中市。

⁴ 國立中興大學土壤環境科學系教授。台灣 台中市。

下水之大量開發，1981年起又因沿海地區養殖業興起，對地下水之抽用更有變本加厲之趨勢。根據水利單位之統計 (Water Conservancy Bureau 1997)，地下水源目前已占彰、雲二縣用水總需求的 27–39%，其中灌溉用水約 10–50% 係使用地下水，禽畜、養殖及生活用水則幾乎全以地下水供應，估計工業用水之 90% 亦係來自地下水。顯見瞭解區域地下水之補注來源至為重要。

在彰化地區，八卦山脈涵養大量的山泉水，全長近 5 km 的台 76 線「八卦山隧道」，沿線設有導水測溝，汲引山泉水往東、西兩側出口每天不斷流出，據估計每天至少有 10 座游泳池的水量。而令人好奇的是，八卦山內擁有大量之地下水究竟是單純來自雨水入滲補注，還是另有其他補注來源，尚未被研究。另外，近年來政府在八卦山實行高地旱灌水源設施營運 (Ministry of Economic Affairs 2007)，此計畫規劃自集集攔河堰引濁水溪溪水引水至八卦山公池再經灌溉渠道分送至各農戶進行農業灌溉。此濁水溪溪水被引至八卦山灌溉後，是否有下滲形成八卦山地下水，或進而再補注至彰化平原地下水，迄今也尚未有任何相關研究。

理想的示蹤劑在物理性質上必須與水相同，在化學性質上又能不與水及含水層介質發生反應。近 30 年，穩定氫、氧同位素技術已是被用來追溯標的水體來源有力工具之一。以穩定氫、氧同位素技術追溯標的水體來源之原理，是建立在不同環境的水體因遭受不同程度或不同類別的同位素分化作用 (isotope fractionation)，而會有不同的氫、氧同位素組成特徵 ($\delta^2\text{H}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 值) (Gat 1981b)。此外，在一般自然環境下除了像地熱水那樣的高溫環境 (溫度高於 80°C) 外，水體中的氫、氧同位素不易與周圍的岩礦發生化學反應而改變其原來的同位素組成特徵 (Gat 1981a)。因此，氫、氧穩定同位素應用在水文方面之研究是利用其具守恆的地球化學特性。所以，當天水 (雨水或地表水) 入滲形成地下水後，來源水體的氫、氧同位素組成特徵會記錄在地下水中。因此，此同位素組成特徵差異就可做為偵測地下水來源之依據，或者探討相關水體間的水體關聯性 (Clark & Fritz 1997)。另外，氯化物具

活性小的特性，不易產生化學反應，因此氯離子濃度常被許多文獻用來作為示蹤劑，用以測定水的來源、移動及混合 (Clark & Friz 1997; Barth *et al.* 2006; Peng *et al.* 2014; Peng *et al.* 2016)。

因此，本研究乃利用以氫氧同位素及氯離子建構而成的端點水源混合分析技術 (Peng *et al.* 2016)，進行彰化扇頂區地下水及八卦山地下水之補注來源分析。進一步，本研究探究濁水溪溪水、八卦山地下水與彰化扇頂區地下水三者間之關聯，以驗證農業灌溉水的循環性。

材料與方法

標本採樣

本研究之區域包括八卦山台地及濁水溪沖積扇彰化扇頂區 (圖 1)。濁水溪沖積扇為台灣最大之沖積扇，北起烏溪南岸，南約止於北港溪，東以八卦山及斗六丘陵為界，西接台灣海峽，流域面積約 2,000 km²。本研究雨水、溪水及地下水各類水體之採樣點如圖 1 所示，扼述如下：

1. 雨水：本研究長期雨水之同位素及化學數據取自 Peng *et al.* (2015) 中的資料，計有 2011–2013 三年共 161 個雨水數據。
2. 溪水：溪水在濁水溪名竹大橋 (SW1)、彰雲大橋 (SW2)、取水站 (SW3) 及溪州大橋 (SW4) 等 4 處溪水採樣。各點於 2017 年 2 月至 2018 年 2 月間每月採樣 1 次。
3. 八卦山地下水：計有 5 處地下水滲流點，分別標記為 MG1、MG2、MG3、MG4 及 MG5，各點於 2017 年 3 月至 2018 年 2 月間每月採樣 1 次。
4. 平原地下水：地下水分別採自水利署觀測井及農用灌溉井。水利署觀測井共有 5 口井分別位於二水 (PG3)、田中 (PG4) 及柑園 (PG5) 三地下水觀測站，其中二水站有 1 井 PG3，田中站有淺、深 2 井分別為 PG4-1 及 PG4-2，柑園站亦有淺、深 2 井分別為 PG5-1 及 PG5-2。農用灌溉井有 PG1 及 PG2 二站井。水利署觀測井分別於 2017 年 4 月及 9 月各採樣 1 次；農用灌溉井於 2017–2019 年間分別採樣 7 次。

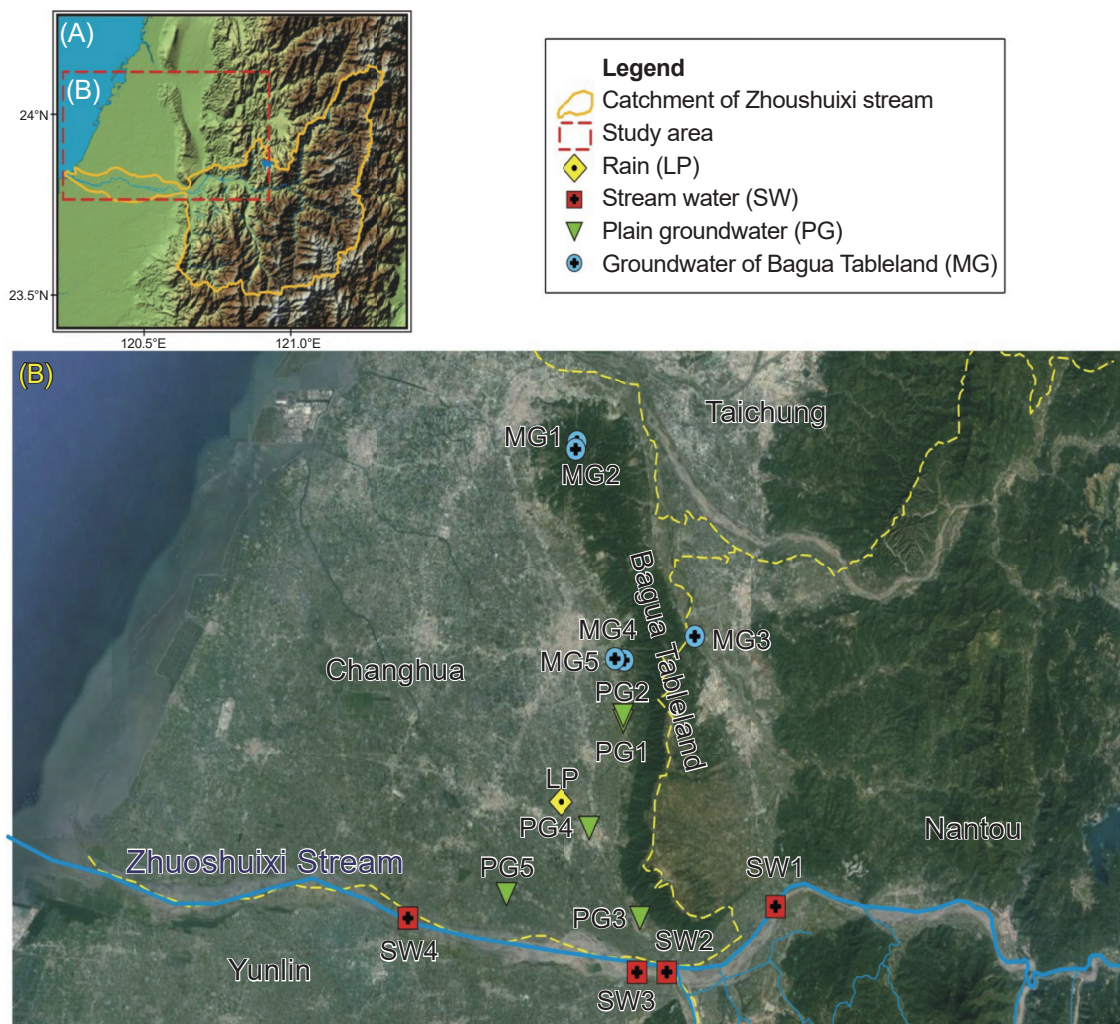


圖 1. (A) 研究區域地理位置圖；(B) 雨水 (LP)、溪水 (SW)、八卦山地下水 (MG) 及平原地下水 (PG) 採樣站位置。

Fig. 1. (A) Study area; (B) map indicating sample collection sites of rain water (LP), stream water (SW), and groundwaters including Bagua Tableland groundwater (MG) and proximal-fan groundwater (PG) in the Changhua plain.

氫氧同位素分析

水樣品的穩定氫、氧同位素使用液態水同位素分析儀 (Triple Liquid Water Isotope Analyzer; T-LWIA-45-EP, Los Gatos Research, San Jose, CA, USA) 進行分析。此分析儀是利用光譜法中的離軸積分腔輸出光譜技術 (off-axis integrated cavity output spectroscopy; OA-ICOS)，可同時測定水樣之氫、氧同位素比值 ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) (Lis *et al.* 2008; Peng *et al.* 2014)。

在操作上，水樣標本分析前以 $0.45\ \mu\text{m}$ 的濾膜濾除非水溶性雜質，接著取 $1.5\ \text{mL}$ 已過濾之水樣移入 $1.8\ \text{mL}$ 的旋蓋自動進樣瓶，經自動取樣器吸取適量樣品注入已加熱至 70°C 之進樣口，水樣經汽化後，水氣進入分析腔測定其氫、氧同位素比值。最後得到的氫、氧同位素的分析結果分別以 $\delta^2\text{H}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 表示，其定義如下：

$$\delta = 1,000 [(R_{\text{Sample}} / R_{\text{SMOW}}) - 1] \quad (1)$$

其中 R_{Sample} 為樣本之 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值, R_{SMOW} 為國際標準海水 (Vienna Standard Mean Ocean Water; SMOW) 的 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值。 δ 的單位以千分比 (%) 表示。

本研究之氫、氧同位素分析是以國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency; IAEA) 所分發的標準水樣 V-SMOW2 (Vienna Standard Mean Ocean Water 2; $\delta^2\text{H} = 0\%$, $\delta^{18}\text{O} = 0\%$) , 及 Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP; $\delta^2\text{H} = -428\%$, $\delta^{18}\text{O} = -55.5\%$; Yurtsever & Gat 1981) 作為樣品校正基準。實驗室所用參考標本重複分析分析精確度 (1σ) 對氧而言優於 0.2%, 對氫而言優於 0.8%。

氯離子濃度分析

氯離子濃度之測定是使用離子色層分析儀 (ion chromatography; 850 Professional IC, Metrohm, Herisau, Switzerland) 測定。在測定標本前, 根據標本之大概濃度, 使用 Merck 標準溶液調製適當濃度之檢量線。同標本二次分析之測值差不得超過 5%。

端點水源混合分析

一般而言, 鄰接山區的沖積平原地下水 (PG) 有 3 個來源: 當地雨水 (LP)、鄰近溪水 (SW) 以及來自鄰接山區的地下水 (MG), 四者之水量 (Q) 關聯可以下式表之:

$$Q_{\text{PG}} = Q_{\text{LP}} + Q_{\text{SW}} + Q_{\text{MG}} \quad (2)$$

以本研究而言, PG 為彰化平原地下水, LP 為彰化平原雨水, SW 為區內濁水溪溪水, MG 為八卦山地下水。

依據三端點混合分析 (end member mixing analysis; EMMA) (Liu & Yamanaka 2012; Peng *et al.* 2014), 式 (2) 可改寫成含示蹤劑之關係式:

$$T_{\text{PG}} = T_{\text{LP}}R_{\text{LP}} + T_{\text{SW}}R_{\text{SW}} + T_{\text{MG}}R_{\text{MG}} \quad (3)$$

T 為示蹤劑濃度值。 R_{LP} 、 R_{SW} 、 R_{MG} 為 PG 中分別來自 LP、SW、MG 的貢獻分量; $R_{\text{LP}} = Q_{\text{LP}} / Q_{\text{PG}}$, $R_{\text{SW}} = Q_{\text{SW}} / Q_{\text{PG}}$, $R_{\text{MG}} = Q_{\text{MG}} / Q_{\text{PG}}$ 。

因為式 (3) 中有 3 個端點來源, 因此需要 2 個互相獨立的示蹤劑 (T)。

在本研究, 示蹤劑選擇氫或氧同位素, 以及氯離子 (Cl^-) 濃度。因此, 式 (3) 改寫成:

$$\delta_{\text{PG}} = \delta_{\text{LP}}R_{\text{LP}} + \delta_{\text{SW}}R_{\text{SW}} + \delta_{\text{MG}}R_{\text{MG}} \quad (4)$$

$$C_{\text{PG}} = C_{\text{LP}}R_{\text{LP}} + C_{\text{SW}}R_{\text{SW}} + C_{\text{MG}}R_{\text{MG}} \quad (5)$$

$$1 = R_{\text{LP}} + R_{\text{SW}} + R_{\text{MG}} \quad (6)$$

上式中, δ 可為 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 值, C 為 Cl^- 濃度值。

但如一水體 M 有二個來源 A 及 B, 此二水源對標的水體 M 的貢獻度可由下式求得 (Clark & Fritz 1997):

$$T_{\text{M}} = T_{\text{A}}R_{\text{A}} + T_{\text{B}}R_{\text{B}} \quad (7)$$

$$1 = R_{\text{A}} + R_{\text{B}} \quad (8)$$

上式中, T 可為 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 或 Cl^- 測值。

然而要注意的是, 由式 (4)–(6) 或式 (7)–(8) 所求得之貢獻百分比為半定量之估算結果。因為式 (4)–(6) 或式 (7)–(8) 之計算不僅涉及各參數之實驗分析誤差, 同時在算式的計算過程中, 各參數之實驗分析誤差亦會產生傳遞誤差, 因此難以推估各貢獻百分比的不確定性 (Peng *et al.* 2016)。

結果

本研究各類水體之同位素組成及 Cl^- 濃度分析結果列於表 1。下文中描述各類水體同位素組成及 Cl^- 濃度測值之平均值除雨水為雨量加權平均值外, 其餘溪水及地下水測值之平均值皆為算術平均值。

雨水

根據 Peng *et al.* (2015), 2011–2013 年彰化市雨水 $\delta^2\text{H}$ 之平均值為 $-36.0\% \pm 24.3\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 之平均值為 $-5.8\% \pm 2.8\%$ 。所有雨水之 δ 值均沿台灣中部地區氫氧同位素天水線 ($\delta^2\text{H} = 8.1\delta^{18}\text{O} + 11.2$) 分布 (圖 2), 顯示雨水樣本之 δ 值並未經歷蒸發作用而改變。天水 (meteoric

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl⁻ 濃度。

Table 1. Stable isotopic compositions and Cl⁻ concentration of stream water and groundwater of this study.

Sample	Sampled date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)
Stream water of Zhuoshuixi (SW)				
SW1	2017/2/10	-10.85	-75.3	3.0
	2017/3/10	-10.37	-71.3	4.1
	2017/4/7	-10.18	-70.2	4.7
	2017/5/5	-9.85	-66.5	3.2
	2017/6/9	-10.13	-68.6	2.6
	2017/7/14	-9.72	-66.5	3.2
	2017/8/4	-10.54	-73.1	3.0
	2017/9/11	-10.18	-68.1	3.7
	2017/10/6	-10.76	-71.5	2.6
	2017/11/10	-11.66	-77.7	4.4
	2017/12/7	-11.05	-76.4	2.6
	2018/1/11	-10.99	-77.0	2.4
	2018/2/8	-10.47	-69.5	2.9
	SW2	2017/2/10	-8.89	-63.4
2017/3/10		-8.32	-55.4	5.4
2017/4/7		-8.31	-55.9	7.9
2017/5/5		-9.60	-64.3	2.3
2017/6/9		-9.14	-61.7	2.7
2017/7/14		-9.05	-60.8	1.8
2017/8/4		-9.46	-64.1	4.1
2017/9/11		-8.73	-56.3	2.7
2017/10/6		-9.38	-63.2	2.6
2017/11/10		-10.46	-69.4	4.1
2017/12/7		-10.62	-74.5	2.5
2018/1/11		-10.73	-72.8	3.0
2018/2/8		-9.51	-64.5	3.9
SW3		2017/2/10	-9.42	-65.8
	2017/3/10	-9.21	-60.4	7.1
	2017/4/7	-9.00	-62.6	8.1
	2017/5/5	-9.54	-64.9	3.5
	2017/7/14	-9.96	-67.1	1.5
	2017/8/4	-10.48	-71.2	4.5
	2017/9/11	-10.78	-73.1	2.8
	2017/10/6	-9.31	-62.1	3.4
	2017/11/10	-10.32	-69.1	4.3
	2017/12/7	-11.20	-74.8	2.4
	2018/1/11	-10.51	-70.1	1.4
	2018/2/8	-9.51	-62.9	4.5

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl⁻ 濃度。(續)Table 1. Stable isotopic compositions and Cl⁻ concentration of stream water and groundwater of this study. (continued)

Sample	Sampled date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	
SW4	2017/2/10	-8.18	-57.0	13.1	
	2017/3/10	-9.38	-63.4	4.9	
	2017/4/7	-8.84	-61.0	9.8	
	2017/5/5	-9.67	-66.5	3.2	
	2017/6/9	-10.09	-66.7	2.7	
	2017/7/14	-9.14	-62.6	3.3	
	2017/8/4	-9.90	-66.6	4.4	
	2017/9/11	-8.87	-60.2	3.2	
	2017/10/6	-9.37	-63.2	6.1	
	2017/11/10	-9.48	-64.3	6.6	
	2017/12/7	-10.90	-73.2	3.2	
	2018/1/11	-10.62	-71.4	0.4	
	2018/2/8	-9.98	-66.6	2.8	
Groundwater of Bagua Tableland (MG)					
MG1	2017/3/23	-7.62	-52.0	11.0	
	2017/4/7	-7.57	-50.6	10.8	
	2017/5/5	-7.66	-51.8	9.8	
	2017/6/9	-7.87	-51.9	9.5	
	2017/7/14	-7.88	-51.1	12.5	
	2017/8/4	-7.85	-52.6	11.3	
	2017/9/11	-7.99	-50.3	11.1	
	2017/10/6	-7.91	-50.9	10.9	
	2017/11/10	-8.03	-52.1	10.2	
	2017/12/7	-7.74	-52.8	10.5	
	2018/1/11	-7.75	-51.7	9.1	
		2018/2/8	-7.62	-52.0	8.9
MG2	2017/6/9	-7.95	-51.8	10.0	
	2017/7/14	-7.82	-50.9	12.9	
	2017/8/4	-7.90	-52.5	10.8	
	2017/9/11	-7.91	-51.0	12.2	
	2017/10/6	-7.86	-51.7	10.9	
	2017/11/10	-7.78	-51.1	12.1	
	2017/12/7	-7.76	-50.9	9.6	
	2018/1/11	-7.76	-51.1	8.0	
		2018/2/8	-7.67	-51.5	9.1
	MG3	2017/3/27	-8.00	-52.3	10.9
2017/4/7		-7.70	-51.9	10.5	
2017/5/5		-7.88	-51.7	9.6	
2017/6/9		-8.03	-51.4	9.8	
2017/7/14		-8.12	-53.2	9.8	
2017/8/4		-7.96	-52.3	10.8	

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl⁻ 濃度。(續)Table 1. Stable isotopic compositions and Cl⁻ concentration of stream water and groundwater of this study. (continued)

Sample	Sampled date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	
MG4	2017/9/11	-7.83	-52.2	9.3	
	2017/10/6	-8.02	-53.1	6.9	
	2017/11/10	-7.88	-51.0	9.0	
	2017/12/7	-7.69	-51.8	8.5	
	2018/1/11	-8.01	-52.1	6.8	
	2018/2/8	-7.99	-53.5	3.4	
	2017/3/27	-7.83	-50.8	9.0	
	2017/4/7	-7.67	-51.8	9.5	
	2017/5/5	-7.73	-50.5	7.0	
	2017/6/9	-7.88	-50.6	6.5	
	2017/7/14	-7.82	-52.1	9.9	
	2017/8/4	-7.70	-49.4	8.9	
	2017/9/11	-7.74	-51.1	6.8	
	2017/10/6	-7.87	-52.2	6.8	
	2017/11/10	-8.24	-50.6	6.0	
MG5	2017/12/7	-7.76	-51.5	7.3	
	2018/1/11	-7.79	-51.9	4.9	
	2018/2/8	-8.10	-51.6	5.7	
	2017/3/27	-7.81	-51.2	9.8	
	2017/4/7	-7.93	-52.3	9.8	
	2017/5/5	-7.79	-50.3	8.5	
	2017/6/9	-7.97	-52.6	8.5	
	2017/7/14	-7.82	-53.4	10.6	
	2017/8/4	-7.73	-51.2	8.6	
	2017/9/11	-7.99	-52.4	8.3	
	2017/10/6	-7.98	-52.9	9.2	
	2017/11/10	-8.05	-51.2	6.6	
Proximal-fan groundwater of Changhua plain (PG)	2017/12/7	-7.77	-50.8	9.1	
	2018/1/11	-7.83	-51.3	5.5	
	2018/2/8	-8.09	-53.1	5.7	
	PG3	2017/4/19	-8.27	-55.0	6.8
		2017/9/6	-8.15	-54.4	7.7
	PG4-1	2017/4/18	-8.74	-60.0	10.6
		2017/9/6	-8.66	-60.5	9.8
	PG4-2	2017/4/18	-8.44	-57.3	9.8
		2017/9/6	-8.33	-57.8	9.1
	PG5-1	2017/4/18	-8.67	-60.4	11.2
	2017/9/6	-8.89	-60.7	10.6	

表 1. 本研究溪水及地下水之氫、氧同位素組成及 Cl⁻ 濃度。(續)Table 1. Stable isotopic compositions and Cl⁻ concentration of stream water and groundwater of this study. (continued)

Sample	Sampled date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)
PG5-2	2017/4/18	-9.79	-67.3	4.2
	2017/9/6	-9.88	-68.5	4.7
PG1	2017/4/12	-7.75	-51.3	10.4
	2017/6/23	-7.52	-50.6	9.4
	2017/8/25	-7.40	-48.7	11.2
	2017/10/26	-7.53	-49.9	7.6
	2017/12/8	-7.79	-49.9	6.6
	2019/9/27	-7.27	-48.2	10.3
PG2	2019/12/7	-6.85	-46.9	9.6
	2017/4/12	-7.77	-50.5	11.7
	2017/6/23	-7.46	-49.3	10.9
	2017/8/25	-7.37	-48.6	14.1
	2017/10/26	-7.00	-49.2	10.3
	2017/12/8	-8.03	-50.5	9.3
	2019/9/27	-7.32	-48.3	12.0
	2019/12/7	-7.13	-47.1	10.4

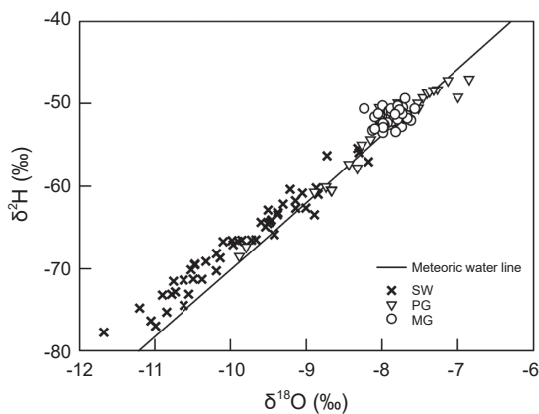


圖 2. 本研究各類水體之 $\delta^{18}\text{O}$ 與 $\delta^2\text{H}$ 的關係圖。圖中所示的雨水數據和台灣中部氫氧同位素天水線取自 Peng *et al.* (2015)。

Fig. 2. Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ of water samples of this study. The isotopic meteoric water line of central Taiwan shown in the plot are derived from Peng *et al.* (2015).

water) 乃指近期大氣循環之水體，包括雨水或不受地層化石水影響之溪水。以季節性差異而言，夏季之 δ 值較冬季之值為低；夏季 (6–9 月) 之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-48.8 \pm 19.1\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值

為 $-6.9 \pm 2.5\text{‰}$ ；冬季 (11–3 月) 之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-24.2 \pm 24.8\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 $-4.9 \pm 2.8\text{‰}$ 。

另外，全部雨水之 Cl⁻ 濃度平均值為 $1.95 \pm 1.04 \text{ mg L}^{-1}$ 。冬季之值為 $1.59 \pm 1.21 \text{ mg L}^{-1}$ ，夏季之值為 $2.46 \pm 1.11 \text{ mg L}^{-1}$ 。夏季之值略高於冬季之值。

溪水

位於本研究最上游溪水點 (SW1) 之 $\delta^2\text{H}$ 與 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分別為 $-71.7 \pm 3.9\text{‰}$ 與 $-10.5 \pm 0.5\text{‰}$ ，位於下游溪水點 (SW4) 之 $\delta^2\text{H}$ 與 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分別為 $-64.8 \pm 4.4\text{‰}$ 與 $-9.6 \pm 0.7\text{‰}$ (表 1)。下游溪水點之 δ 平均值略高於上游溪水點之值。另一方面，溪水 δ 值之季節性差異不明顯。所有溪水冬季之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-68.6 \pm 6.3\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 $-10.1 \pm 0.9\text{‰}$ ；夏季之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-65.8 \pm 4.8\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 $-9.7 \pm 0.6\text{‰}$ 。

與雨水之 δ 值比較，溪水之 δ 年平均值明顯較平原雨水之 δ 值為低，此為所謂之集水區效應 (catchment effect) (Dutton *et al.* 2005)，因同位素高程效應所造成 (Peng *et al.* 2010)。

簡言之，本研究雨水在平原區（高程約 40 m）收取，而所採樣之溪水來自山區集水區降雨（高程大於 2,000 m）。根據氫氧同位素之高程效應，山區降雨之 δ 值會較平原區降雨之值為低。再者，以本研究而言，在近平原區所採之濁水溪溪水之 δ 值遠低於平原區雨水之 δ 值，且上、下游溪水之 δ 值差異小，這表示研究區內溪水之流量大且受區內雨水影響小，乃為集水區效應現象。

在 Cl^- 濃度方面，所有溪水之 Cl^- 濃度平均值為 $4.0 \pm 2.2 \text{ mg L}^{-1}$ （表 1）。以季節性差異而言，冬季之平均值為 $4.2 \pm 2.5 \text{ mg L}^{-1}$ ；夏季之平均值為 $3.1 \pm 0.9 \text{ mg L}^{-1}$ ；夏季之值略低於冬季。與雨水比較，溪水之值略高於雨水大約之 2 mg L^{-1} 。

八卦山地下水

八卦山地下水 (MG) 之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-51.7 \pm 0.9\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 $-7.9 \pm 0.1\text{‰}$ （表 1）。以季節性差異而言，冬季之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-51.7 \pm 0.7\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 $-7.9 \pm 0.2\text{‰}$ ；夏季之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 $-51.7 \pm 1.0\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 $-7.9 \pm 0.1\text{‰}$ 。夏、冬二季之 δ 平均值相近，顯示地下水之 δ 值已混合均勻化。

在 Cl^- 濃度方面，八卦山地下水 Cl^- 濃度平均值為 $9.0 \pm 2.0 \text{ mg L}^{-1}$ （表 1）。以季節性差異而言，冬季之 Cl^- 濃度平均值為 $8.2 \pm 2.2 \text{ mg L}^{-1}$ ；夏季之值為 $9.9 \pm 1.7 \text{ mg L}^{-1}$ 。夏、冬二季之 Cl^- 濃度平均值相近。與研究區內雨水及溪水比較，八卦山地下水 Cl^- 濃度平均值高了約 5 mg L^{-1} 。

彰化平原地下水

在水利署觀測井方面，PG3、PG4-1、PG4-2、PG5-1 及 PG5-2 地下水之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 -60.2‰ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 -8.8‰ ， Cl^- 濃度平均值為 8.5 mg L^{-1} （表 1）；其中，PG5-2 之 δ 值與 Cl^- 濃度明顯較其它地下水為低。在農用灌溉井部份，地下水 PG1 及 PG2 之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 -49.2‰ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 -7.4‰ ， Cl^- 濃度平均值為 10.3 mg L^{-1} （表 1），其 δ 值及 Cl^- 濃度均明顯較觀測井地下水之值為高。以農用

灌溉井地下水之 δ 值而言，冬季之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 -48.6‰ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 -7.4‰ ；夏季之 $\delta^2\text{H}$ 平均值為 -48.9‰ ， $\delta^{18}\text{O}$ 平均值為 -7.4‰ 。夏、冬二季之 δ 平均值相近。在 Cl^- 濃度方面，冬季之平均值約 9 mg L^{-1} ，夏季之值約 11 mg L^{-1} ，夏季之值略較冬季為高。綜合比較顯示，平原地下水之 Cl^- 濃度與八卦山地下水之平均值相當。

平原地下水以及研究區內之溪水及八卦山地下水之 δ 值均沿台灣中部地區氫氧同位素天水線分布（圖 2），顯示這些溪水或地下水之 δ 值並未經歷蒸發作用或水岩之氧同位素交換反應而改變，而能反映出個水體原本之 $\delta^2\text{H}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

討論

平原地下水來源評估

依據式 (2)，扇頂平原地下水 (PG) 有當地雨水補注源 (LP)、鄰近溪水補注源 (SW) 及山區地下水側向補注源 (MG)。在本研究，PG 為彰化平原地下水，LP 為彰化雨水，SW 為濁水溪溪水，MG 為八卦山地下水。

以 EMMA 原理而言，如果 PG 為 LP、SW、MG 三端源水體之混合，PG 之 δ 值及 Cl^- 濃度會介於 LP、SW、MG 三端源水體的對應值之間。由圖 3 初步顯示，平原地下水 (PG) 除 PG3 與 PG5-2 外，其餘均靠近 MG（八卦山地下水）端點水源，表示其來源主要與八卦山地下水有關。此外，由圖 3 亦顯示 PG5-2 之水源與 SW（濁水溪溪水）有關，而 PG3 較與 SW 及 MG 有關。

依據圖 3，PG3 落於以 LP、SW、MG 為端點之三角形內，表示 LP、SW、MG 三端源水體均對 PG3 有貢獻。因此，本研究分別利用 $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}^-$ 與 $\delta^2\text{H}-\text{Cl}^-$ 示蹤劑組合，以三端點 EMMA [式 (4)-(6)] 評估 LP、SW、MG 三端源水體分別對 PG3 的貢獻度，結果列於表 2。由表 2 顯示，LP、SW、MG 三端源水體對 PG3 的貢獻度分別約 7、27 與 66%。此結果表示 PG3 地下水主要源自八卦山地下水。

在圖 3 中，PG5-2 位於 SW、MG 二端源

水體的混合線上，表示 LP 對 PG5-2 地下水幾無貢獻。因此，本研究分別利用 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 或 Cl^- 作為示蹤劑，以二端點 EMMA [式 (7)–

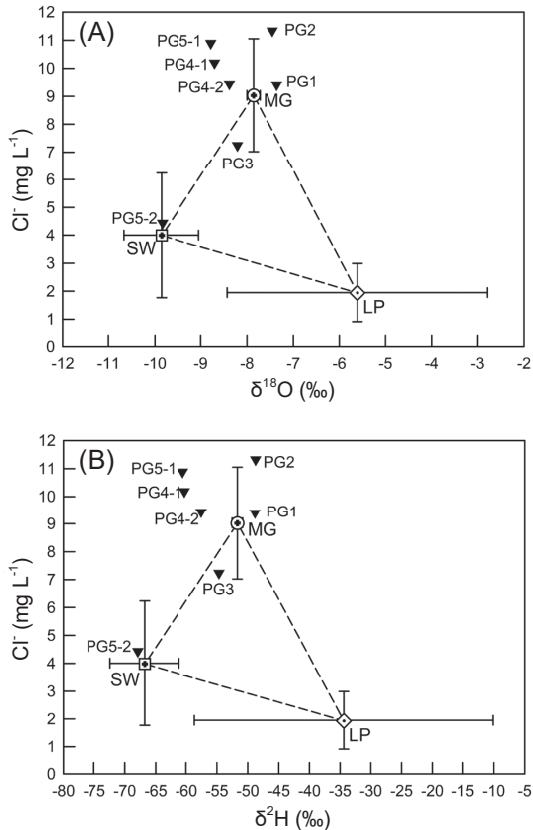


圖 3. 本研究平原地下水之 Cl^- 濃度分別與 (A) $\delta^{18}\text{O}$ 及 (B) $\delta^2\text{H}$ 的關係圖。

Fig. 3. Plots of (A) Cl^- vs. $\delta^{18}\text{O}$ and (B) Cl^- vs. $\delta^2\text{H}$ of groundwater of this study.

表 2. 由 EMMA 估算 LP、SW、MG 三端點水源對 PG3 地下水的相對貢獻度。

Table 2. Fractions of relative contributions among rain (LP), stream water (SW), and groundwater of Bagua Tableland (MG) to the groundwater PG3 derived by ternary end member mixing analysis (EMMA).

PG ^z sample	Contribution fraction				
	R_{LP} (%)		R_{SW} (%)		R_{MG} (%)
PG3	6 ^y	8 ^x	27 ^y	27 ^x	67 ^y 65 ^x

^z PG: plain groundwater.

^y Tracer pair of $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- used in ternary EMMA [Eqs (4)–(6)].

^x Tracer pair of $\delta^2\text{H}$ and Cl^- used in ternary EMMA [Eqs (4)–(6)].

(8)] 評估 SW、MG 三端源水體分別對 PG5-2 的貢獻度，結果列於表 3。由表 3 顯示，SW 及 MG 二端源水體對 PG5-2 的貢獻度分別約 99% 與 1%。此結果表示 PG5-2 地下水幾乎都是源自濁水溪溪水。

再者，依據圖 3，除 PG3 與 PG5-2 外，其餘 PG4-1、PG4-2、PG5-1、PG1、PG2 地下水均靠近 MG (八卦山地下水) 端點水源；然而這些地下水之 Cl^- 濃度卻比 LP、SW、MG 三端源水體之平均濃度為高，但接近 MG (八卦山地下水) 之最高濃度 11 mg L^{-1} (圖 3)，因此尚屬容許範圍。由於 Cl^- 濃度變異性大，且由圖 3 顯示，PG4-1、PG4-2、PG5-1 落點介於 SW 與 MG 二端源水體間，而 PG1、PG2 落點介於 LP 與 MG 二端源水體間。因此，本研究分別利用 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 作為示蹤劑，以二端點 EMMA [式 (7)–(8)] 評估 SW、MG 二端源水體分別對觀測井地下水 PG4-1、PG4-2、PG5-1、PG5-2 的貢獻度，以及評估 LP、MG 二端源水體分別對農用灌溉井地下水 PG1、PG2 的貢獻度，結果均列於表 3。由表 3 顯示，在觀測井地下水方面，除 PG5-2 外，SW 的貢獻度約 26–59%，平均約 40%，MG 的貢獻度約 41–74%，平均約 60%。相較而言，由前段分析顯示 SW 對 PG5-2 貢獻度幾達 100%。在農用灌溉井地下水方面，LP 與 MG 對 PG1、PG2 的平均貢獻度分別約 17% 與 83%。

表 3. 以二端點 EMMA 估算端點水源對彰化平原地下水的相對貢獻度。

Table 3. Fractions of relative contributions of rain (LP), stream water (SW), or groundwater of Bagua Tableland (MG) to the groundwater of Changhua plain (PG) by binary end member mixing analysis (EMMA).

PG sample	Contribution fraction				
	R_{LP} (%)		R_{SW} (%)		R_{MG} (%)
PG4-1			42 ^z	57 ^y	58 ^z 43 ^y
PG4-2			26 ^z	39 ^y	74 ^z 61 ^y
PG5-1			46 ^z	59 ^y	54 ^z 41 ^y
PG5-2			99 ^z	107 ^y	1 ^z -7 ^y
PG1	18 ^z	13 ^y			82 ^z 87 ^y
PG2	19 ^z	15 ^y			81 ^z 85 ^y

^z Single tracer of $\delta^{18}\text{O}$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].

^y Single tracer of $\delta^2\text{H}$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].

表 2 及表 3 之貢獻度估算結果似有其地理位置意義 (圖 1)。例如水利署觀測井 (PG4-1, PG4-2, PG5-1, PG5-2) 之站井位置相較農用灌溉井 (PG1, PG2) 更靠近濁水溪主河道, 因此其地下水有相對較多的 SW 貢獻度。相較而言, PG1、PG2 較 PG4-1、PG4-2、PG5-1、PG5-2 更靠近八卦山, 因此其地下水有相對較多的 MG 貢獻度。

另外一個有趣的現象是, LP (研究區雨水) 的貢獻度整體而言約 0–19%, 平均小於 10%, 遠低於 SW、MG 二端源水體的貢獻。究其原因可能是研究區 LP 的入滲面積 (水量) 遠小於 SW、MG 二者在山區的集水面積 (水量) (圖 1); 或者是都市化的不透水建築鋪設以及農田犁底層的阻礙, 限制了研究區雨水下滲的補注。

八卦山地下水來源評估

雨水基本上是八卦山地下水來源之一, 然而近年來政府在八卦山實行高地旱灌水源設施營運 (Ministry of Economic Affairs 2007), 此計畫引集攔壩堰引濁水溪溪水至八卦山公池再經灌溉渠道分送至各農戶進行農業灌溉。因此, 此來自濁水溪溪水的灌溉水亦能下滲補注八卦山之地下水。

根據式 (7)–(8), 以雨水及濁水溪溪水做為二端點, 分別試以 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 或 Cl^- 測值估算雨水及濁水溪溪水二者對八卦山地下水之貢獻度, 結果列於表 4。由表 4 顯示, 以 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 作為示蹤劑, 計算所得之雨水對八卦山

表 4. 由 EMMA 估算 LP 及 SW 二端點水源對八卦山地下水的相對貢獻度。

Table 4. Fractions of relative contributions among rain (LP) and stream water (SW) to the groundwater of Bagua Tableland (MG) derived by binary end member mixing analysis (EMMA).

MG sample	Contribution fraction			
	R_{LP} (%)		R_{SW} (%)	
MG1	49 ^z	47 ^y	51 ^z	53 ^y
MG2	48 ^z	47 ^y	52 ^z	53 ^y
MG3	45 ^z	45 ^y	55 ^z	55 ^y
MG4	47 ^z	48 ^y	53 ^z	52 ^y
MG5	46 ^z	46 ^y	54 ^z	54 ^y

^z Single tracer of $\delta^{18}\text{O}$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].

^y Single tracer of $\delta^2\text{H}$ used in binary EMMA [Eqs (7)–(8)].

地下水的貢獻度為 45–49%, 濁水溪溪水 51–55%。

然而, 若以 Cl^- 測值估算, 則雨水及濁水溪溪水之貢獻度出現負值或大於 100%, 顯示 Cl^- 測值不適用於此二端點 EMMA 估算。可能原因是八卦山地下水受農作影響, 有額外非雨水及濁水溪水源之氯化物下滲溶入八卦山地下水, 以致八卦山地下水之 Cl^- 測值高於雨水及濁水溪溪水。此外, 雨水或溪水入滲形成地下水之過程中發生蒸發作用導致地下水 Cl^- 濃度富集亦為可能之原因。

濁水溪溪水的重要性

表 2 及表 3 中所列之濁水溪溪水對彰化平原地下水的貢獻度為濁水溪溪水的直接貢獻。然而, 濁水溪溪水被引至八卦山灌溉後下滲形成八卦山地下水後會再補注至彰化平原地下水, 此為濁水溪溪水對彰化平原地下水的間接貢獻。也就是說, 八卦山地下水對彰化平原地下水之貢獻度中含有濁水溪溪水的成分。表 5 中之間接貢獻度為八卦山地下水對彰化平原地下水的貢獻度 (表 2 及表 3 中的 R_{MG}) 與濁水溪溪水對八卦山地下水貢獻度 (表 4 中的 R_{SW}) 之乘積; 直接貢獻度與間接貢獻度之和即為濁水溪溪水對彰化平原地下水之總貢獻度 (表 5)。由表 5 顯示, 此總貢獻度在水利署觀測井地下水方面 (PG3, PG4-1, PG4-2, PG5-1, PG5-2), 為 62–100%, PG5-2 幾為來自溪水之直接貢獻。在農用灌溉井地下水方面 (PG1, PG2), 溪水總貢獻度約為 42–45%, 且全部來自間接貢獻。

表 5 之整理有 2 個意涵: (1) 濁水溪溪水是彰化平原地下水之主要補注源。(2) 農業灌溉用水並非全然是一個單一環節的淨支出。例如濁水溪溪水可被引至八卦山進行農業灌溉, 之後灌溉水入滲形成地下水進而形成彰化平原地下水的補注水源, 這也驗證農業灌溉水的循環性, 說明農業灌溉用水並非全然被視為淨支出, 在部分環節它亦扮演水資源補注的角色。

誌謝

本試驗由國立中興大學及行政院農業委

表 5. 濁水溪溪水對彰化平原地下水之貢獻度。

Table 5. Contributions of stream water of Zhuoshuixi to the groundwater of Changhua plain (PG).

PG sample	Direct contribution ^z (%)	Indirect contribution ^y (%)	Total contribution ^x (%)
PG3	27	35 [= (53%) (66%)]	62
PG4-1	50	27 [= (53%) (51%)]	77
PG4-2	33	36 [= (53%) (68%)]	69
PG5-1	53	25 [= (53%) (48%)]	78
PG5-2	100	0 [= (53%) (0%)]	100
PG1	0	45 [= (53%) (85%)]	45
PG2	0	42 [= (53%) (83%)]	42

^z The mean R_{sw} value of each groundwater in Tables 2 or 3.

^y The indirect contribution is the product of the mean R_{MG} of each groundwater in Tables 2 and 3 and the mean R_{sw} (ca. 53%) in Table 4.

^x Total contribution = direct contribution + indirect contribution.

員會農業試驗所提供經費，計畫編號 NCHU-TARI 10806。

引用文獻

- Barth, J. A. C., W. Stichler, M. Bergemann, and H. Reincke. 2006. Can conductivity and stable isotope tracers determine water sources during flooding? An example from the Elbe River in 2002. *Int. J. River Basin Manag.* 4:77–83. doi:10.1080/15715124.2006.9635278
- Chen, R. K. and C. H. Yang. 2004. Discussion on the feasibility of rice water-saving cultivation (1) Water consumption and saving. *Tech. Service Quart. Bull.* 60:1–4. (in Chinese)
- Clark, I. D. and P. Fritz. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press. Boca Raton, FL. 342 pp. doi:10.1201/9781482242911
- Dutton, A., B. H. Wilkinson, J. M. Welker, G. J. Bowen, and K. C. Lohmann. 2005. Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrol. Process.* 19:4121–4146. doi:10.1002/hyp.5876
- Gat, J. R. 1981a. Groundwater. p.223–240. *in: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. (Gat, J. R. and R. Gonfiantini, eds.) I.A.E.A. Tech. Rep. Ser. No. 210. Vienna, Austria. 339 pp.
- Gat, J. R. 1981b. Isotopic fractionation. p.21–34. *in: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. (Gat, J. R. and R. Gonfiantini, eds.) I.A.E.A. Tech. Rep. Ser. No. 210. Vienna, Austria. 339 pp.
- Lis, G., L. I. Wassenaar, and M. J. Hendry. 2008. High-precision laser spectroscopy D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements of microliter natural water samples. *Anal. Chem.* 80:287–293. doi:10.1021/ac701716q
- Liu, Y. and T. Yamanaka. 2012. Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry. *J. Hydrol.* 464–465:116–126. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.053
- Ministry of Economic Affairs. 2007. *Essentials of reservoir operation of Jiji Weir. Laws and Regulations Retrieving System*. Ministry of Economic Affairs, R.O.C. <https://law.moea.gov.tw/LawContentSource.aspx?id=FL011614> (visit on 03/10/2021) (in Chinese)
- Peng, T. R., C. C. Huang, J. E. Chen, W. J. Zhan, L. W. Chiang, and L. C. Chang. 2016. Evaluating the relative importance of groundwater recharge sources in a subtropical alluvial plain using tracer-based ternary end member mixing analysis (EMMA). *Water Resour. Manag.* 30:3861–3878. doi:10.1007/s11269-016-1393-8
- Peng T. R., C. H. Wang, C. C. Huang, L. Y. Fei, C. T. A. Chen, and J. L. Hwong. 2010. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region. *Earth Planet. Sc. Lett.* 289:357–366. doi:10.1016/j.epsl.2009.11.024
- Peng, T. R., C. H. Wang, S. M. Hsu, N. C. Chen, T. W. Su, and J. F. Lee. 2012. Use of stable water isotopes to assess sources and influences of slope groundwater on slope failure. *Hydrol. Process.* 26:345–355. doi:10.1002/hyp.8130
- Peng, T. R., K. Y. Chen, W. J. Zhan, W. C. Lu, and L. T. J. Tong. 2015. Use of stable water isotopes to identify hydrological processes of meteoric water in montane catchments. *Hydrol. Process.* 29:4957–4967. doi:10.1002/hyp.10557
- Peng, T. R., W. C. Lu, K. Y. Chen, W. J. Zhan, and T. K. Liu. 2014. Groundwater-recharge connectivity

- between a hills-and plains' area of western Taiwan using water isotopes and electrical conductivity. *J. Hydrol.* 517:226–235. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.010
- Tabbal, D. F., B. A. M. Bouman, S. I. Bhuiyan, E. B. Sibayan, and M. A. Sattar. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. *Agric. Water Manag.* 56:93–112. doi:10.1016/S0378-3774(02)00007-0
- Water Conservancy Bureau. 1997. Research Report on Preliminary Analysis of Groundwater Hydrology of Choshuixi Alluvial Fan. Taiwan Prov. Gov. Taichung, Taiwan. 178 pp. (in Chinese)
- Water Resources Planning Commission. 1995. Water Resources of Taiwan. Ministry of Economic Affairs, R.O.C. Taipei, Taiwan. 334 pp. (in Chinese)
- Yurtsever, Y. and J. R. Gat. 1981. Atmospheric waters. p.103–142. *in*: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. (Gat, J. R. and R. Gonfiantini, eds.) I.A.E.A. Tech. Rep. Ser. No. 210. Vienna, Austria. 339 pp.

Verifying the Circularity of Agricultural Water Using Natural Tracer-Based End Member Mixing Analysis: A Case Study of the Proximal-Fan Region of Changhua

Tsang-Sen Liu¹, Yu-Wen Lin², Wen-Jun Zhan³, and Tsung-Ren Peng^{4,*}

Abstract

Liu, T. S., Y. W. Lin, W. J. Zhan, and T. R. Peng. 2021. Verifying the circularity of agricultural water using natural tracer-based end member mixing analysis: A case study of the proximal-fan region of Changhua. *J. Taiwan Agric. Res.* 70(4):271–284.

This study employed the end member mixing analysis (EMMA) approach constructed with hydrogen/oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$) and chloride-ion (Cl⁻) concentration to study the sources of groundwater in proximal-fan region and Bagua Tableland in Changhua County, Taiwan. This study also depicted the relationship among Zhuoshuixi stream water, Bagua Tableland groundwater, and plain groundwater in the proximal-fan region. The results indicate that approximately 47% of Bagua-Tableland groundwater comes from rainwater infiltration, and the remaining 53% from Zhuoshuixi stream water. The Zhuoshuixi stream water is the main source recharging groundwater in Changhua Plain, accounting for 68% of the total recharge of the proximal-fan groundwater. Of 68%, approximately 38% comes from direct recharge via the riverbed, and other 30% comes from the Bagua Tableland groundwater containing the stream water derived from the Zhuoshuixi. In other words, Zhuoshuixi stream water can be streamed to Bagua Tableland for irrigation. Thereafter, part of the irrigation water may percolate to form groundwater of the Bagua Tableland, which then recharges groundwater in the Changhua Plain. This study not only semi-quantitatively confirms the importance of stream water of Zhuoshuixi to groundwater of Changhua Plain, but also verifies the circularity of agricultural irrigation water.

Key words: Agricultural irrigation water, Stable hydrogen and oxygen isotopes, Natural tracer approach, Proximal-fan groundwater, Changhua.

Received: September 16, 2020; Accepted: July 23, 2021.

* Corresponding author, e-mail: trpeng@nchu.edu.tw

¹ Researcher and Division Director, Division of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

² Associate Researcher, Division of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

³ Research Assistant, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.

⁴ Professor, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung City, Taiwan, ROC.