

西南喀斯特流域岩溶水氢氧同位素时空分布特征及水文意义——以后寨河流域为例

张艳青¹, 张志才^{1,5,*}, 陈喜², 王刚³, 程勤波¹, 刘皓¹, 彭韬^{4,5}

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072; 3. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 4. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 5. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 中国生态系统研究网络, 贵州 普定 562100)

摘要: 受多重导水介质影响, 喀斯特流域水循环过程复杂, 只以水分作为研究对象的水文学方法难以刻画其时空变化特征及其受喀斯特水文地质条件的控制作用。稳定氢氧同位素赋予岩溶水指纹信息, 为解译喀斯特流域水循环时空演变与水文功能提供了重要研究手段。论文选取贵州普定后寨河流域为研究对象, 基于月尺度的高空间分辨率的水样采集, 结合聚类分析和克里金插值方法, 分析流域岩溶地下水氢氧同位素和反映蒸发分馏程度的 Lc 指数时空分布特征及其影响因素。以此为基础, 研究喀斯特流域降雨混合、水文连通性及水流路径等水文作用。结果表明, 研究区雨季岩溶地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Lc 偏负, 枯季岩溶水整体 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Lc 相对偏正, 表明雨季湿热条件下, 岩溶地下水受“新”、“老”水混合作用与流域蒸发过程的共同影响, 枯季地下水混合作用较弱, 蒸发作用弱; 相较于中下游覆盖型岩溶区, 流域上游峰丛区岩溶水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负, Lc 偏正, 表明流域上游土壤/表层岩溶带浅薄山区, 降雨入渗迅速, 岩溶水中土壤水成分较低, 下游土壤较厚, 入渗较慢且蒸发强烈, 地下水蓄存时间长, 岩溶水中土壤水成分较高。干湿交替期, 岩溶水 Lc 快速变负, 表明随水文连通性增强, 土壤水补充岩溶含水层地下水能力增强。

关键词: 氢氧同位素; Lc 指数; 水文作用; 喀斯特流域

中图分类号: P641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2022)01-0025-09 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.071

西南喀斯特流域水文地质空间结构复杂, 受孔隙、裂隙、管道等多重导水介质, 以及落水洞等岩溶地貌共同控制, 流域水文过程表现出剧烈的时空变化特征^[1]。然而, 现有只针对水分进行观测、分析/计算的水文学研究方法难以准确刻画喀斯特流域水分来源、水流路径及混合过程等复杂的水文过程及其对气候变化的响应规律。

水文地球化学特征是反映水分(流)赋存、运动及其与环境相互作用的重要信息, 为流域尺度上的水文过程提供了重要的研究手段。稳定同位素动态分析是水文地球化学研究中的重要方法, 其已被广泛的应用于水流的追踪^[2]、水循环时空演变规律^[3-5]以及水分来源^[6]等方面。稳定氢氧同位素组成动态及其分馏特征受降雨混合、蒸散发、水动力过程以及水-岩作用等多种因素影响^[7-10]。因此, 基于

稳定氢氧同位素组成及其分馏时空变化特征的分析, 在揭示喀斯特流域水文过程和水循环演变规律表现出显著的优势。例如, 陈雪莲等^[11]针对喀斯特流域下垫面分布复杂性及其不均匀性, 采用稳定同位素分析等方法划分了流域出口径流的水源成分。Chen等^[12]根据氢氧同位素的时空变化, 解析了喀斯特关键带结构及其受流域水文连通性的影响。

然而, 目前针对我国西南喀斯特流域, 采用稳定氢氧同位素进行相关水文过程解析的研究, 水样采集多集中于流域出口^[13-14], 或较少次数的流域不同空间位置的采集^[15]。空间高度异质性是影响喀斯特关键带水文过程的核心因素^[12], ‘集总式’的采样和分析方式难以刻画喀斯特水循环空间变异特征, 及其受相应土壤-植被-岩石裂隙/管道连续体空间结构的控制作用, 进而对研究结论带来较高

收稿日期: 2020-12-17; 改回日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971028、42030506); 国家重点研发项目(2016YFC0502602)。

第一作者简介: 张艳青(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特流域水文。E-mail: 18805488795@163.com.

* 通讯作者: 张志才(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为岩溶水文学。E-mail: zhangzhicai_0@hhu.edu.cn.

的不确定性。因此,进行连续高空间分辨率水样采集,并在此基础上进行相应分析,对全面明晰喀斯特地区水文规律及其影响因素具有重要意义。论文以贵州后寨河流域为研究对象,进行连续高空间分辨率水样采集,采用聚类分析和克里金插值方法分析岩溶水氢氧同位素及分馏时空变化特征,结合地形、岩性、土壤和土地利用等流域特征与水文气象条件,揭示其水文作用,为该地区水文过程研究提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

后寨河流域位于贵州省普定县,流域面积为 75 km²。流域地势东南高,西北低,海拔 1 212~1 552 m。流域地理气候状况属于典型的东南亚热带季风气候,年平均气温在 15 ℃左右,流域的汛期为 5 月到 10 月,枯期为 11 月到次年 4 月。该地区降雨的时空、季节分布不均,年平均降雨量 1 178 mm,汛期的降雨量主要分别集中在 5、6、7、8 四个丰水月,枯

期降雨主要还是集中在 4 月的中下旬。根据地形将流域划分为上游地形梯度较大的喀斯特峰丛区、中下游地势相对平坦的覆盖型岩溶区,其分界线如图 1a 所示。流域上游区域主要为三叠系中统关岭地层组,占比最大的三种岩性为白云岩、溶塌角砾岩和白云质灰岩,其分布如图 1b 所示。后寨河流域土壤按地带性规律属黄壤^[16],但石灰岩分布面积较广,因而石灰土分布也较广。石灰土厚薄悬殊,在溶沟中可达数米,但大面积的土壤厚度很小,石山裸露率占碳酸盐岩区的 20.3%^[17]。流域内部岩溶地貌发育强烈,发育一套完整的主干地下河生态系统,发源于上游的打油寨,经中游马堡、六谷,至下游的冒水坑流出,汇入后寨河。流域土地利用类型主要有耕地、林地、水域和住宅用地,其中耕地主要分布在中下游地势相对平坦地区,林地主要分布在东部山区。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

在后寨河流域上游陈旗与流域出口处进行降

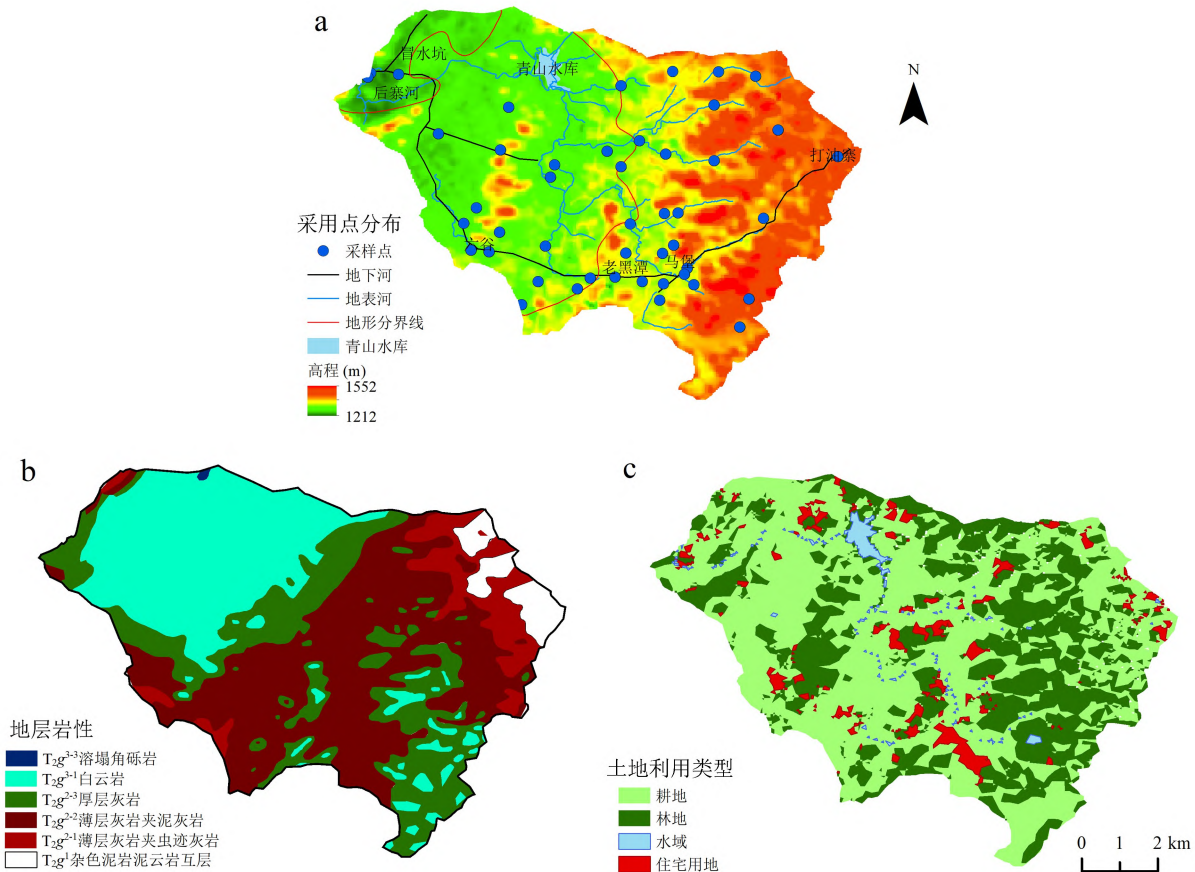


图 1 后寨河流域图

Fig. 1 Map of Houzhai river basin

雨水样采集, 降雨水样采用人工采集方式, 降雨时利用水盆接雨, 雨停后灌于 25 mL 聚乙烯瓶。降雨以天为单位进行采集, 当一天内有多场降雨时, 取最大场次降雨作为该日降雨水样。根据流域地貌、岩性及土地利用类型分布特征, 在后寨河流域内设置了地下河出口、天窗、岩溶泉等共计 49 个岩溶水采样点, 人工采集样品, 采样期为 2016 年 1 月到 2016 年 12 月, 逐月采集(受仪器故障影响, 2、3 月数据缺失), 每个样品在现场密封于 50 mL 聚乙烯瓶中并标好序号。所有采集的样品带回实验室经过滤(0.22 μm 滤膜过滤)后密封于 2 mL 玻璃瓶中, 并用密封胶带缠好, 置于冷藏箱中保存, 保持温度 4~6 $^{\circ}\text{C}$ 。实验水样委托海河大学水文水资源国家重点实验室采用 MAT-253 气体质谱仪进行 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 测试分析, 测试精度分别为 0.5‰ 和 0.1‰。测定结果以 SMOW (标准平均海洋水) 为标准的千分差 $\delta^{[18]}$ 。

1.2.2 Line-conditioned excess (Lc) 指数

在稳定氢氧同位素中, 由于氧比氢具有更高的原子质量, 所以在从液态到气态的过程中发生非平衡分馏相变时, 氢原子优先蒸发^[19]。根据这一现象, 研究者常用根据全球大气降水氢氧同位素组成计算得到的‘氘盈余’度量氢氧同位素的蒸发分馏特征^[20]。相较于氘盈余, Lc 指数根据当地降雨氢

氧同位素组成计算获得, 描述了水样品双同位素偏离当地大气降水线(LMWL) 的程度。近年来已被广泛用于评价氢氧同位素蒸发分馏特征^[21-23]。Lc 指数的表达式为:

$$Lc = \delta D - \alpha \delta^{18}\text{O} - \beta \quad (1)$$

其中, α 、 β 分别表示 LMWL 的斜率和截距值。Lc 值小于 0 表示氢氧同位素同位素存在蒸发分馏, 其水样受蒸发作用影响, 且 Lc 越负, 蒸发作用越强烈。

1.2.3 层次聚类分析法

本文选取 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Lc 两种变量进行层次聚类分析, 选择最常用的欧氏距离(公式 2)为度量值, 选择 ward 法, 即使离差平方和最小进行合并, 从而得到更精确的聚类结果, 本次分析中, 当选择类间距离为 12 时, 聚类结果最好^[24]。

$$dist(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

式中, $dist(X, Y)$ 表示 x_i 、 y_i 两点之间的距离公式, n 代表的是维度。

2 结果分析

2.1 岩溶水氢氧同位素组成及 Lc 指数时空分布特征

图 2 为根据流域上 49 个采样点逐月水样氢氧同位素组成数据绘制的 $\delta^{18}\text{O} \sim \delta\text{D}$ 关系图。流域

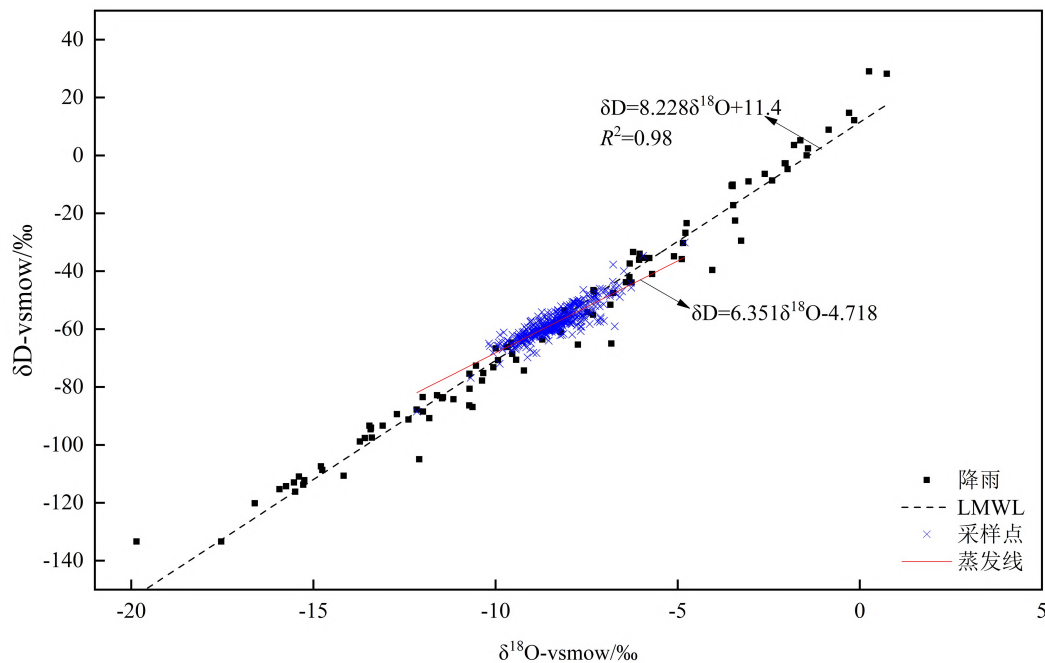


图 2 后寨河流域 $\delta^{18}\text{O} \sim \delta\text{D}$ 关系图

Fig. 2 The relation between $\delta^{18}\text{O} \sim \delta\text{D}$ in Houzhai River Basin

LMWL 根据 2016 年 1 月到 2016 年 12 月的降雨氢氧同位素组成确定: $\delta D = 8.228\delta^{18}O + 11.4$ 。结果显示,各采样点的氢氧同位素组成接近当地大气降水线,流域地下水主要由大气降水补给。采样点氢氧同位素蒸发线斜率小于 LMWL 斜率,部分样点向下偏离 LMWL 较远,表明岩溶水受蒸发作用影响。

2.1.1 岩溶水氢氧同位素时间分布特征

后寨河流域月降雨量,降雨和岩溶水逐月 $\delta^{18}O$ 值如图 3 所示,其季节统计结果如表 1 所示。夏秋季降雨 $\delta^{18}O$ 值偏负,且变化幅度大,均值分别为 -9.81‰ 与 -11.01‰ ,冬春季相对偏正,变化幅度较

小,均值分别为 -4.32‰ 与 -2.54‰ 。与之对应,岩溶水夏秋季(均值 -8.39‰ 与 -8.46‰)较冬春季(-8.27‰ 与 -8.37‰)偏负(表 1)。雨季岩溶水 $\delta^{18}O$ 值介于 -9.08‰ ~ -7.41‰ ,平均值为 -8.42‰ ;枯季的变化范围为 -8.43‰ ~ -8.20‰ ,平均值为 -8.33‰ ,枯季相对偏正(图 3)。岩溶水 Lc 值雨季变化范围为 -2.57‰ ~ 3.47‰ ,平均值为 -0.73‰ ,枯季 -1.42‰ ~ 3.47‰ ,平均值为 0.05‰ 。雨季大部分月份的岩溶水 $Lc < 0$,且其变化相对剧烈,表明岩溶水受蒸发与混合作用控制,枯季大部分的 $Lc > 0$,其受蒸发作用相对较弱。

表 1 降雨及岩溶水实测 $\delta^{18}O$ 季节分布

Table 1 The measured seasonal distribution of $\delta^{18}O$ in rainfall and karst water

| 季节 | 春(3~5月) | | | 夏(6~8月) | | | 秋(9~11月) | | | 冬(12,1~2月) | | |
|-----|---------|-------|-------|---------|-------|--------|----------|-------|--------|------------|-------|-------|
| | 最小 | 最大 | 平均 | 最小 | 最大 | 平均 | 最小 | 最大 | 平均 | 最小 | 最大 | 平均 |
| 降雨 | -6.77 | -0.29 | -2.97 | -20.16 | -2.04 | -10.46 | -15.98 | -5.08 | -11.01 | -5.36 | -3.22 | -4.32 |
| 岩溶水 | -10.15 | -4.81 | -8.37 | -12.16 | -6.28 | -8.39 | -9.88 | -7.11 | -8.46 | -9.64 | -6.43 | -8.27 |

为分析不同区域 $\delta^{18}O$ 和 Lc 随时间变化规律,分别分析东部山区、中部平原及西部出口区地下水 $\delta^{18}O$ 和 Lc 动态特征(图 3b、c)。三个区域的 $\delta^{18}O$ 雨季最低值都出现在 7、8 月份,最正值出现在 6 月。其中,西部出口区 $\delta^{18}O$ 动态变化剧烈,其它两个区域都表现为先增加后减少趋势。三个地区地下水氢氧同位素 Lc 值整体上均表现为雨季偏负,枯季偏正的规律,其中,西部出口区的 Lc 全年平均值(-1.63‰)明显低于东部山区(0.06‰)和中部平原区(-0.78‰)。三个区域的 Lc 平均值在降雨量较大的 6 月份和 10 月份都表现为偏负,地下水表现出较强的受蒸发信号。

2.1.2 岩溶水氢氧同位素空间分布特征

雨季流域中部平原区及西部出口区地下水 $\delta^{18}O$ 值相对偏正(图 4a)。与之对应,雨季东部山区地下水氢氧同位素 Lc 偏正,中部平原及西部出口区域 Lc 值相对较负,表明相较于流域中下游区域,上游山区地下水蒸发信号较弱。枯季 $\delta^{18}O$ 分布特征与雨季相似,较负值出现在东部山区。该时期,地下水氢氧同位素 Lc 值在西部出口区域相对较负,出现大面积 $Lc < 0$ 分布区,与之对应,东部山区 Lc 较正。此外,受水文与水文地质条件影响,雨、枯季的 $\delta^{18}O$ 与 Lc 值空间分布均表现局部信号的变异性,如青山水库(图 1a)区域,雨季和枯季均表现出和周围不同的偏正 Lc 值,表明该地区地下水蒸发信号较周围区域弱。

2.2 基于 $\delta^{18}O$ 和 Lc 指数的岩溶水聚类分析

用 SPSS 的聚类分析模块,选取 2016 年 1 月 ~ 2016 年 12 月的 $\delta^{18}O$ 、Lc 逐月数据为变量对流域上 49 个采样点进行分层聚类分析。根据判别标准(类间距离为 12),岩溶水 $\delta^{18}O$ 与 Lc 值可划分为 3 类,其归类结果的空间分布如图 5 所示。结果显示第三类点(绿色)主要位于流域上游峰丛区,第二类别点(蓝色)主要集中在中下游覆盖型岩溶区,第一类别点(红色)在上游与中下游均有分布。

各类别点 $\delta^{18}O$ 与 Lc 值逐月变化趋势如图 6 所示。岩溶水 $\delta^{18}O$ 变化结果显示,较一类与二类点($\delta^{18}O$ 均值分别为 -8.30‰ 和 -8.10‰),主要位于上游区的第三类点整体 $\delta^{18}O$ 偏负,其均值为 -8.70‰ 。三类别点的 $\delta^{18}O$ 整体变化相似,主要位于中下游区的第二类点 $\delta^{18}O$ 在 4 月变化具有小幅的不同,出现滞后。三类点岩溶水 $\delta^{18}O$ 均在 6 月和 8 月出现显著变化,表明岩溶水氢氧同位素在 6 月出现显著的富集,8 月出现显著的贫化。与各类别岩溶水 $\delta^{18}O$ 月变化相似,各类岩溶水月 Lc 值整体呈相同的变化趋势。其中,一类点(上游区)岩溶水 Lc 值总体最高,其平均值为 0.39‰ ,一类和二类点岩溶水 Lc 平均值分别为 -0.59‰ 和 -1.30‰ 。表明与二、三类点相比,一类点岩溶水整体受蒸发作用较弱。研究期内,各类点岩溶水 Lc 最大值均出现在 4 月,6 与 10 月 Lc 值相对较低(图 6),表明流域岩溶水 4 月表现为蒸发作用较弱,6 和 10 月岩溶水受

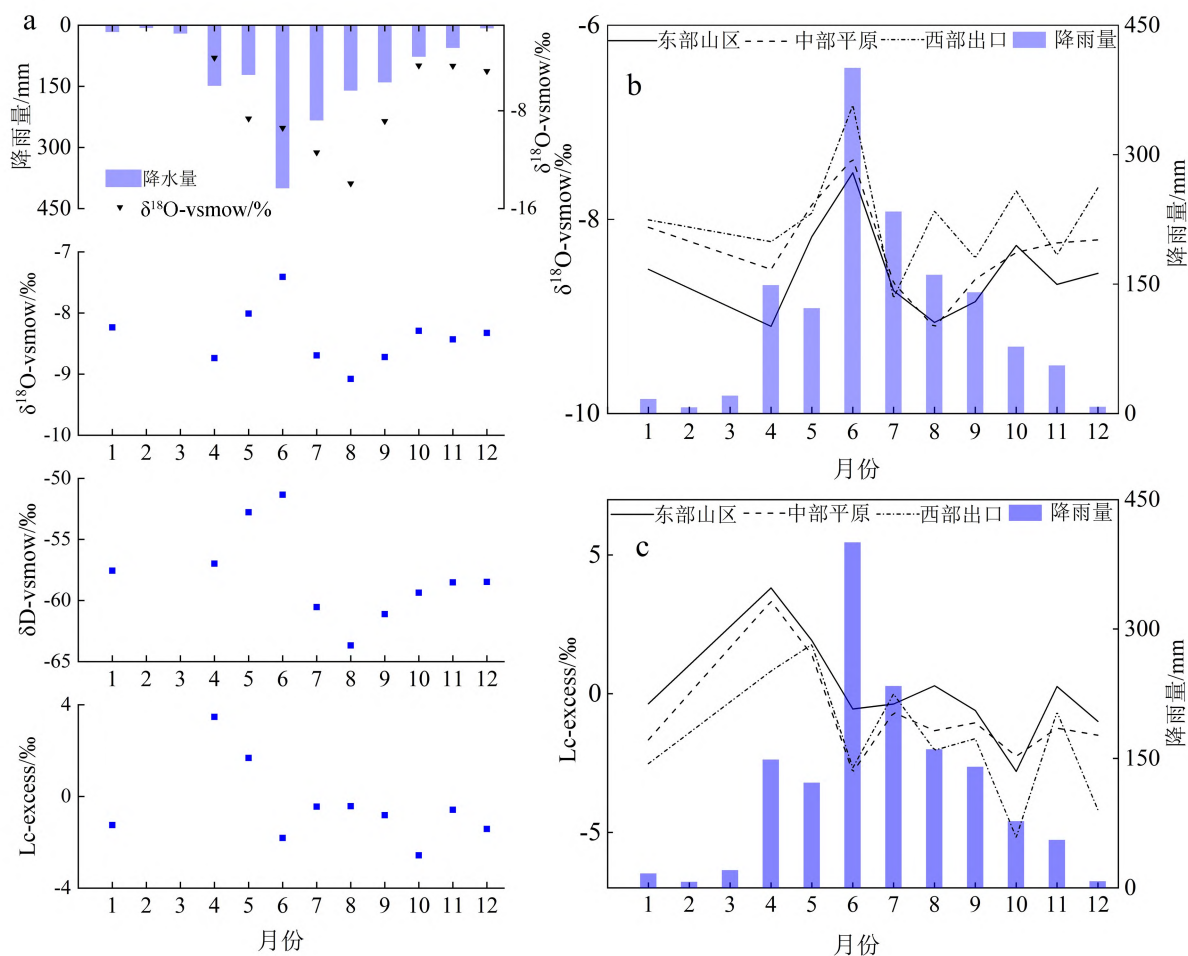


图 3 2016 年降雨及采样点平均 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Lc (a), 东部山区、中部平原及西部出口 $\delta^{18}\text{O}$ (b)、 Lc (c) 动态过程

Fig. 3 Average rainfall and sampling point $\delta^{18}\text{O}$, δD , Lc (a), dynamic process of $\delta^{18}\text{O}$ (b), Lc (c) at the eastern mountain area, central plain and western exit in 2016

蒸发作用较强。

3 讨论

3.1 水文气象作用分析

西南岩溶区地下水动态受降雨条件控制,其同位素组成的季节变化与降雨来源具有密切关系。研究区降雨与岩溶水同位素变化特征(图 3a)表明二者整体上存在明显的相关性。根据降雨氢氧同位素分析结果(旱季偏正,雨季偏负),旱季及雨季初期研究区主要受大陆性气团的影响,降雨水汽主要来源于内陆地区再蒸发水;雨季中后期降雨水汽主要来自海洋,该推论与已有研究相一致^[25]。

研究区岩溶水氢氧同位素动态除受水汽来源影响外,也受流域内蒸发与混合过程控制。如研究期内,流域岩溶水氢氧同位素在 2016 年 6 月出现显著偏正值,同时其 Lc 值显著偏负(图 3a),表明此时

岩溶水受强烈的蒸发作用。聚类分析结果也显示各类岩溶水氢氧同位素 6 月出现富集,同时 Lc 值较低的特征(图 6)。根据气象监测,2016 年 6 月,流域平均气温 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度 88.4% ,气象条件表明流域土壤水受潜在的强蒸发影响。虽然此月降雨量较高(400.50 mm),且根据 6 月份的降雨同位素检测结果,该月 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正(图 3a),氢氧同位素 Lc 指数为 $0.68 > 0$ (表明降雨落到地面前受蒸发作用较弱),但岩溶水氢氧同位素整体表现出较强的蒸发分馏。由此推断,储存于流域内“老”水(如土壤水与细小裂隙水)被激活,在地下河/管道以及岩溶泉流量中比重增加,出现不完全混合过程,即“老”水被“新”水(降雨)排出。根据分析结果,此不完全混合现象主要发生于由干转湿阶段,即雨季初期,此水文现象对评估喀斯特流域物质通量过程,如氮、磷等营养元素的赋存与流失,具有重

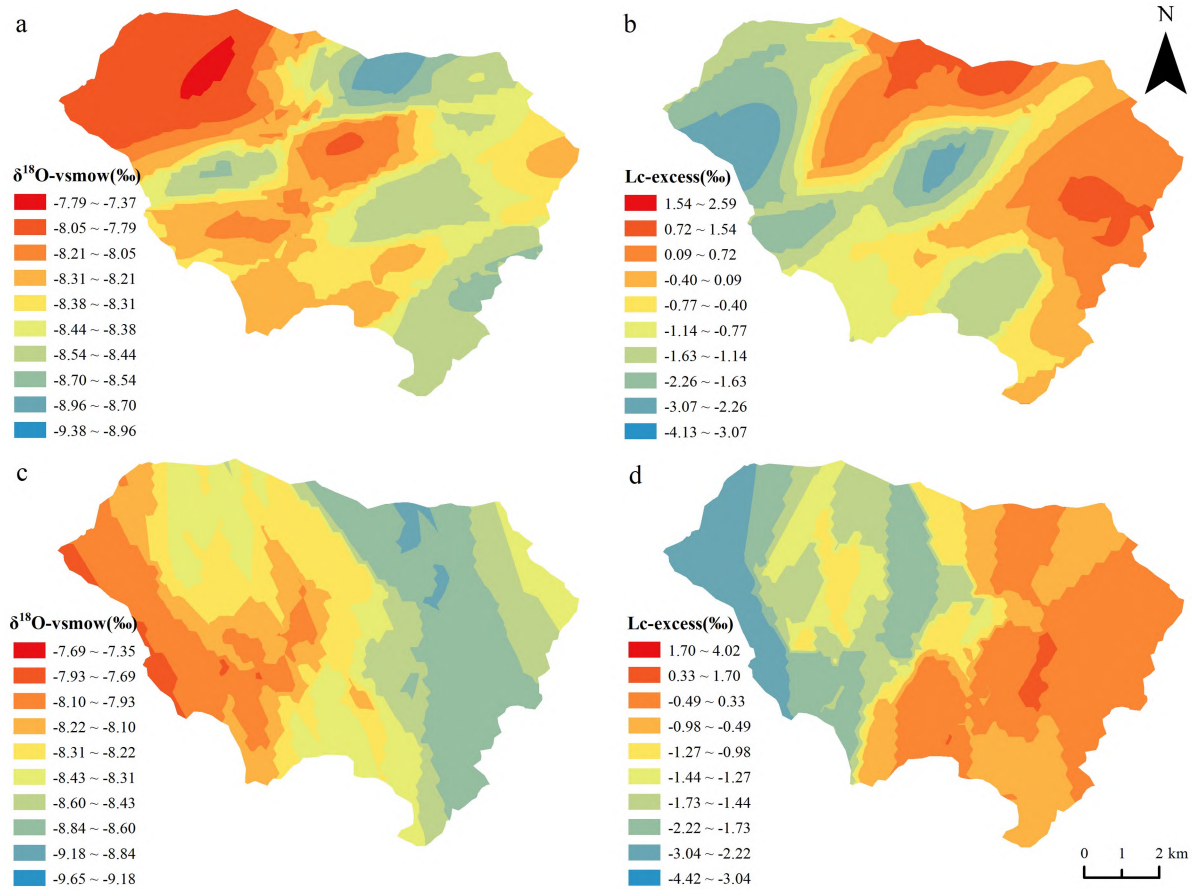


图4 $\delta^{18}\text{O}$ 雨季(a)及枯季(c)、Lc 雨季(b)及枯季(d)的空间插值

Fig. 4 Interpolation of $\delta^{18}\text{O}$ in rainy season (a) and dry season (c), Lc in rainy season (b) and dry season Lc(d)

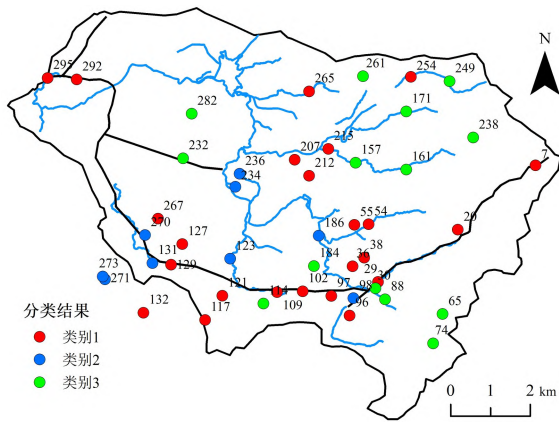


图5 后寨河流域聚类分析各类别点空间分布

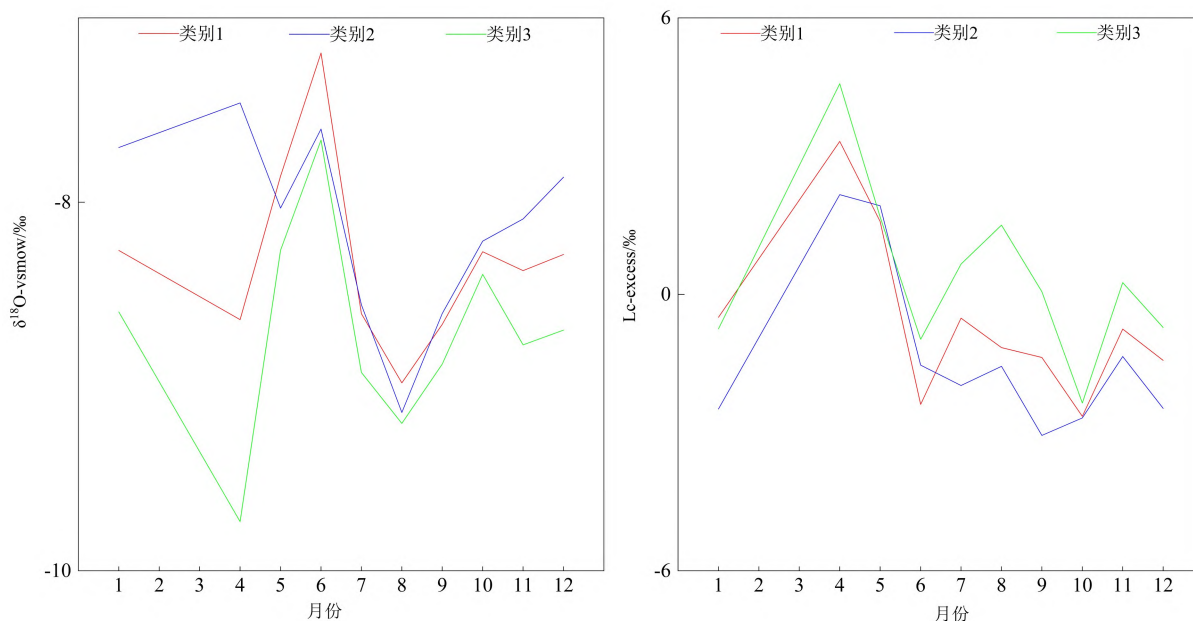
Fig. 5 Spatial distribution of each cluster in Houzhai catchment

要意义。

3.2 土壤-岩溶含水层水文连通性作用分析

喀斯特流域水文连通性的时空变化特征对流域内不同区域的水分来源与水流路径具有重要控制作用^[14],从而显著影响岩溶水氢氧同位素动态变化特征。根据已有研究,氢氧同位素蒸发分馏主要

发生在储存于土壤层中的水分^[26]。因此推断,流域岩溶水所表现出的受蒸发作用影响主要来自于土壤水补给。本文中,氢氧同位素 Lc 时间分布结果显示,研究流域岩溶水在 6 月与 10 月出现明显的蒸发分馏信号,即 Lc 显著偏负(图 3c 与图 6)。根据年内降雨量分布(图 3)及土壤含水率观测结果(中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站在陈旗流域(后寨河子流域)喀斯特坡地的土壤体积含水率观测结果),6 月处于流域干湿交替期(上半月平均土壤含水率 0.24,下半月 0.258),前期(如 4,5 月平均土壤含水率为 0.22)土壤较干,土壤与岩溶含水层水文连通性相对较弱。其受限水难以补给岩溶水,因此流域岩溶水表现为受蒸发作用较弱(Lc > 0)。当暴雨来临时,土壤含水率快速增加,土壤与含水层水文连通性显著增加,与雨水混合的土壤水向下补给含水层,因此,岩溶水出现明显受蒸发作用影响的特征。7~9 月经过雨季与降雨的不断混合释放,受强蒸发分馏的土壤水已相对较少。同时,虽然此时期温度高,流域蒸散发强烈,但受降雨

图 6 2016 年各类别点 $\delta^{18}\text{O}$ 、Lc 的月变化过程Fig. 6 The monthly variation in $\delta^{18}\text{O}$ and Lc for each category in 2016

强烈混合影响,岩溶水受蒸发作用的强度仍相对较弱。流域 10 月降雨已明显减少,但该时期气温相对较高(月均值 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$),流域仍具有较强的蒸发过程,加之有限雨水混合,岩溶水受蒸发作用增强。11 月随着降雨量进一步减少,土壤变干,土壤与含水层水文连通性减弱,岩溶水补给主要来自于前期储存于含水层中的细小裂隙^[13],因此岩溶水受蒸发作用较弱。根据统计结果,2016 年 11 月总降雨量为 55 mm ,而该月月末出现了集中降雨,11 月 29 与 30 日合计降雨量 30 mm 。因此,虽然统计的 12 月降雨总量低(7.8 mm),但受 11 月末的较大降雨影响,土壤与地下水连通性增强,前期储存在土壤中的“老”水进入地下,使地下水表现出较强的蒸发信号($Lc < 0$)。由此可见,在水文过程变化剧烈的西南喀斯特地区,高时空分辨率的观测与采样是准确分析其水文过程的发展方向。

3.3 岩溶水补给来源与水流路径作用分析

岩溶水氢氧同位素动态特征受水分来源与水流路径影响显著^[27]。本文中,岩溶水氢氧同位素 Lc 值空间分布雨季枯季均表现为东部(上游峰丛区)偏正,中西部相对偏负(图 4),表明中西部地区岩溶水受蒸发作用较东部地区强。东部上游区域主要为峰丛洼地,地形梯度大,土壤层薄,岩石裸露率高,区内岩石裂隙发育,该类型关键带结构利于形成快速水流成分。因此,岩溶水氢氧同位素动态

(图 4)及聚类分析结果(图 6)揭示了喀斯特流域上游峰丛区水分主要来源于降雨直接补给,水流速度快,混合迅速,主要受裂隙/管道控制的水文特性;流域中、西部区域(中下游区)地势整体平坦,土壤覆盖厚,且地下河与地下管道水力梯度较小^[28-29],表层岩溶带发育较深,储存空间大^[30]。该区内的岩溶水氢氧同位素动态(图 4)与聚类分析结果(图 6)均揭示了喀斯特流域地势平坦的覆盖型岩溶区地下水接受土壤水的补给显著,其滞留时间较长,具有降雨、土壤水、上游侧向来水等多重水流补给的水文特性。

4 结论

本文以西南典型喀斯特流域——贵州后寨河流域为研究对象,基于岩溶水稳定氢氧同位素实测数据,利用数理统计和空间插值方法,分析后寨河流域岩溶水氢氧同位素与 Lc 指数的时空分布特征,并在此基础上,结合气象条件与地形、岩性等流域特征,揭示喀斯特流域水文作用。得到以下主要结论:

1) 流域岩溶水 $\delta^{18}\text{O}$ 值整体由上游山区向出口逐渐变正,Lc 值逐渐变负。表明地下水受蒸发作用由上游山区向出口增强。结合聚类分析结果,氢氧同位素动态揭示了喀斯特流域上游峰丛区岩溶水主要受土壤水补给较少,混合作用强烈;中下游覆

盖型岩溶区地下水接受土壤水的补给显著,其滞留时间较长。

2) 氢氧同位素随时间变化规律揭示:同位素储存于喀斯特关键带土壤与细小裂隙中的“老水”,在流域由干转湿的雨季初期易受降雨激活,被降雨“排挤”出,在地下河/管道以及岩溶泉流量中比重增加,导致岩溶水表现出受蒸发作用增强

的特征。

3) 干湿季节氢氧同位素动态表明,当流域较干时,土壤与岩溶水水文连通性弱,岩溶水中土壤水成分较低;雨季流域湿润,土壤与岩溶水水文连通性增强,土壤水对岩溶水补给作用增强。同时,雨季氢氧同位素动态的剧烈变化,也揭示出喀斯特流域岩溶水与降雨强烈混合的特征。

参 考 文 献

- [1] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 218-242.
- [2] Gat J R, Confiantini R. Stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle[J]. Vienna: IAEA, 1981.
- [3] 刘峰, 李忠勤, 郝嘉楠, 等. 额尔齐斯河源春季水化学及稳定同位素特征研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 234-242.
- [4] 高旭波, 向绚丽, 侯保俊, 等. 水化学——稳定同位素技术在岩溶水文地质研究中的应用[J]. *中国岩溶*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.p.20200526.1511.004.html>
- [5] 李宗省, 冯起, 李宗杰, 等. 祁连山北坡稳定同位素生态水文学研究的初步进展与成果应用田[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1044-1052.
- [6] Song X, Kayane I, Tanaka T, et al. A study of the groundwater cycle in Sri Lanka using stable isotopes[J]. *Hydrol Process*, 1999, 13(10): 1479-1496.
- [7] 章新平, 姚檀栋, 田立德. 水体蒸发过程中稳定同位素分馏的模拟[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 65-71.
- [8] 郝玥, 余新晓, 邓文平等. 北京西山大气降水中 D 和 ^{18}O 组成变化及水汽来源[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1211-1221.
- [9] 刘澄静, 角媛梅, 张贵玲, 等. 哈尼梯田麻栗寨河流域泉水氢氧同位素的海拔效应[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1404-1410.
- [10] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(3): 403-408.
- [11] 陈雪莲, 陈喜, 张志才, 等. 基于稳定同位素和水化学成分的西南喀斯特流域径流划分[J]. *地球与环境*, 2013, 41(2): 104-110.
- [12] Chen X, Zhang Z, Soulsby C, et al. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: An integrated approach [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(19): 2932-2946.
- [13] Zhang Z, Chen X, Cheng Q, et al. Storage dynamics, hydrological connectivity and flux ages in a karst catchment: Conceptual modelling using stable isotopes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(1): 51-71.
- [14] Zhao M, Hu Y, Zeng C, et al. Effects of land cover on variations in stable hydrogen and oxygen isotopes in karst groundwater: A comparative study of three karst catchments in Guizhou Province, Southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 374-385.
- [15] 申春华, 韩志伟, 郭永丽, 等. 典型岩溶地下河系统不同水体中硝酸盐时空分布规律及其影响因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(8): 1255-1264.
- [16] 章程. 贵州普定后寨地下河流域地下水脆弱性评价与土地利用空间变化的关系[D]. 北京: 中国地质科学院, 2003.
- [17] 龙健, 郭琴, 廖洪凯, 等. 喀斯特山区浅层地下水的季节变化特征及影响因素: 以普定后寨河为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(4): 518-525.
- [18] 李小飞, 张明军, 马潜, 等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 2924-2931.
- [19] 章新平, 刘晶淼, 谢自楚. 我国西南地区降水中过量氧指示水汽来源[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 613-619.
- [20] Dansgaard, W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [21] Landwehr J M, Coplen T B. Line-conditioned excess: A new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems[M]. *Isotopes in Environmental Studies*, 2004: 132-134.
- [22] Mccutcheon R J, Mcnamara J P, Kohn M J, et al. An evaluation of the ecohydrological separation hypothesis in a semiarid catchment[J]. *Hydrologic Processes*, 2017, 31(4): 783-799.
- [23] Sprenger M, Leister H, Gimbel K, et al. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes [J]. *Reviews Geophysics*, 2016, 54(3): 674-704.
- [24] 王波雷, 马孝义, 郝晶晶. 系统聚类分析法在喷头射程公式验证的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2008, 10: 72-74+78.
- [25] 朱磊, 范毅, 郭欢. 西南地区大气降水中氢氧稳定同位素特征与水汽来源[J]. *云南地理环境研究*, 2014, 26(5): 61-66.
- [26] Sprenger M, Tetzlaff D, Tunaley C, et al. Evaporation fractionation in a peatland drainage network affects stream water isotope composition[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1): 851-866.
- [27] 胡可, 陈洪, 聂云鹏, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征[J]. *农业工程学报*, 2013(5): 53-62.
- [28] 杨立铮. 贵州普定后寨地下河岩溶水运动特征[J]. *中国岩溶*, 1982, 1: 20-28.

- [29] Wang L, Zhang Y. Karst conduit flow and its hydrodynamic characteristics——Houzhai River drainage basin in Fueling, Guizhou, China as an example[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(S1): 5-50.
- [30] Zhang Z, Chen X, Cheng Q, et al. Coupled hydrological and biogeochemical modelling of nitrogen transport in the karst critical zone[J]. Science of the Total Environment, 2020, 732: 38902.

Spatiotemporal Features of Deuterium and Oxygen-18 in Karst Water and Its Relation to Hydrological Regime in the Karst Catchment of Southwest China——A Case Study of Houzhai Catchment

ZHANG Yanqing¹, ZHANG Zhicai^{1,5}, CHEN Xi², WANG Gang³, CHENG Qinbo¹,
LIU Hao¹, PENG Tao^{4,5}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China;

4. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang, 550002, China; 5. China Ecosystem Research Network, Puding Karst Ecosystem Observation and

Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding Guizhou 562100, China)

Abstract: Affected by multiple media, the hydrological processes in karst catchment are complicated. Hydrological methods using only water as the research object are difficult to characterize the spatiotemporal features in water cycle and its controlling factor of karstic hydrogeological conditions. As a kind of fingerprint of water flow, the deuterium and oxygen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) provide a potentially useful information for exploring the hydrological processes and hydrological functions in karst catchment. In this study, the hydrological functions, such as flow mixing, hydrological connection and flow paths, were explored using stable isotopes analysis in a karst catchment of Houzhai in Puding, Guizhou Province. High spatial resolution sampling was carried out at monthly steps in this catchment. The dynamics of $\delta^{18}\text{O}$ and Line-conditioned index (Lc) reflecting the degree of evaporative fractionation, as well as its controlling factors in karst water were analyzed using cluster and Kriging interpolation methods. The results show that $\delta^{18}\text{O}$ in karst water in the dry season are more enriched than that in the wet season, meanwhile, the Lc in karst water for dry season is higher than that in wet season. The strong evaporative effect on the karst water in wet season reveals the mixing of “new” water (rainfall) with the “old” water stored in soil, while the karst water has weak evaporative effect due to the less mixing with soil water. Compared to the mid-downstream area, the depleted $\delta^{18}\text{O}$ and higher Lc in karst water in upstream area with thin soil cover indicate the strong rapid infiltration of rainfall results in the low proportion of soil water in karst water. In contrast, the karst water in mid-downstream area with long residence time has a high proportion of soil water. During the midpoint of dry and wet season, enhanced hydrological connection leads the increase in soil water recharge to karst water.

Key words: deuterium and oxygen-18; line-conditioned excess; hydrological effect; karst catchment