

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.008>



典型岩溶槽谷区土壤水和地下水氢氧稳定同位素对隧道建设的响应

邱菊, 蒋勇军*, 吕同汝, 茆杨, 吴泽, 马丽娜, 汪啟容, 张彩云

西南大学地理科学学院岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 隧道建设引起地下水流场改变, 对区域水分运移过程造成严重影响. 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例, 于 2017 年 4 月~2019 年 4 月收集降水、土壤水、地下水和隧道排水, 利用氢氧稳定同位素分析隧道影响区和非隧道影响区的土壤水和地下水运移过程, 探索隧道建设对其产生的影响. 结果表明: 隧道影响区土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较非隧道影响区土壤水剧烈, 地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较非隧道影响区地下水更平稳; 与非隧道影响区的土壤水和地下水相比, 隧道影响区浅层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 夏季偏重, 深层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 秋季偏重, 浅层岩溶泉水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 四季均偏重, 地下河水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 冬季偏重, 其余季节各水体的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻; 隧道影响区和非隧道影响区水体平均滞留时间和“新水”比例差异从土壤水到地下水逐渐减小, 隧道影响区土壤水滞留时间较非隧道影响区土壤水少 25.4 d, “新水”比例高 13.5%, 地下水滞留时间少 16.1 d, “新水”比例高 3.4%. 隧道建设一定程度上加快了隧道影响区水分运移速度, 造成土壤层中滞留水分减少, 水分混合作用减弱, 导致地下水混合作用更加显著.

关键词: 氢氧稳定同位素; 水分运移; 隧道建设; 岩溶槽谷区; 水文地质.

中图分类号: P592.641

文章编号: 1000-2383(2022)02-717-12

收稿日期: 2021-11-01

Response of Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen in Soil Water and Groundwater to Tunnel Construction in Typical Karst trough Valley

Qiu Ju, Jiang Yongjun*, Lv Tongru, Mao Yang, Wu Ze, Ma Lina, Wang Qirong, Zhang Caiyun

Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The construction of the tunnel caused changes in the groundwater flow field, which seriously affected the process of regional water migration. Taking the karst trough of Zhongliang Mountain in Chongqing as an example, we collected precipitation, soil water, groundwater and tunnel drainage from April 2017 to April 2019. This study used stable hydrogen and oxygen isotopes to analyze the soil water and groundwater migration processes in the tunnel-affected zone and non-tunnel-affected zone, and explored the impact of tunnel construction on it. The results showed that the change of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of soil water in the tunnel-affected area was greater than that of the tunnel-affected area, and the change of groundwater $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ was more stable than that of the non-tunnel-affected area. Compared with the soil water and groundwater in the non-tunnel-affected area, the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the shallow soil water in the tunnel-affected area were heavier in summer, the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of deep soil were heavier in

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0502306); 重庆市自然科学基金项目 (Nos. cstc2019yszx-jcyjx002, cstc2020yszx-jcyjx006).

作者简介: 邱菊 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩溶学与环境变化研究. ORCID: 0000-0001-8376-4847. E-mail: 1608550505@qq.com

* **通讯作者:** 蒋勇军, E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

引用格式: 邱菊, 蒋勇军, 吕同汝, 茆杨, 吴泽, 马丽娜, 汪啟容, 张彩云, 2022. 典型岩溶槽谷区土壤水和地下水氢氧稳定同位素对隧道建设的响应. 地球科学, 47(2): 717-728.

Citation: Qiu Ju, Jiang Yongjun, Lv Tongru, Mao Yang, Wu Ze, Ma Lina, Wang Qirong, Zhang Caiyun, 2022. Response of Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen in Soil Water and Groundwater to Tunnel Construction in Typical Karst trough Valley. *Earth Science*, 47(02): 717-728.

autumn, the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of shallow karst spring water were basically heavier in all seasons, and the underground river water was $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ tends to be heavier in winter, and the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of water bodies in other seasons were basically lighter. The difference of meantransit time and young water fraction between the tunnel-affected zone and the non-tunnel-affected zone gradually decreased from soil water to groundwater. The meantransit time of soil water in the tunnel-affected area was 25.4 days shorter than that in the non-tunnel-affected area, the young water fraction was 13.5% higher, the meantransit time of groundwater was 16.1 days less, and the young water fraction was 3.4% higher. To sum up, the tunnel construction accelerated the water movement speed in the tunnel-affected zone to a certain extent, resulting in the reduction of retained water in the soil layer and the weakening of water mixing.

Key words: stable hydrogen and oxygen isotopes; water movement; tunnel construction; Karst trough valley; hydrogeology.

0 引言

我国西南地区岩溶强烈发育,土壤浅薄且不连续,大量基岩裸露,降雨通过裂隙、管道、落水洞等迅速汇入地下,构成复杂的地表—地下二元结构(袁道先,2000; Cao *et al.*, 2015). 随着隧道工程技术的进步和发展,西南地区交通建设得到飞速发展,据统计我国大约有 30% 的隧道穿越了岩溶地层,西南地区穿越岩溶地层的运营公路、铁路隧道共 1 396 座(吕玉香等,2020). 隧道建设破坏地下含水层结构,引起地下水流场的改变,导致地表水和地下水均向下伏岩溶管道漏失,带来一系列水文生态问题(秦成,2017; 吕玉香等,2020). 这使得岩溶地区水分运移过程更加复杂,难以解译. 因此,运用简单的方法准确识别隧道建设下的岩溶地区水分运移过程对区域水资源管理十分有意义.

水的稳定同位素广泛应用于水文地质学中,是探究岩溶地区水分运移的理想示踪剂. 水的氢氧稳定同位素广泛存在于自然水体中(Posmentier *et al.*, 2004),其组成在环境温度下基本上是一种保守的性质(Gat, 1996),可以提供水分来源、平均滞留时间和运动规律等相关信息(Jasechko, 2019; 曹乐等, 2021). $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 研究表明,大气降水是岩溶地区其他水体的主要补给来源(罗维均等, 2008; Hu *et al.*, 2015; 宋小庆等, 2019),罗维均和王世杰(2008)发现大气降水、土壤水和洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度在年内依次减小,且三者的季节变化幅度大致协调同步. 与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 相比,岩溶地区土壤水和地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 存在一定的滞后性,通过其他水 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 的季节循环特征可以估算水体的平均滞留时间(McGuire and McDonnell, 2006; 刘伟等, 2011; Hu *et al.*, 2015; Rusjan *et al.*, 2019). Dewalle *et al.* (1997)估算阿巴拉契亚某个森林集水区水体平均滞留时间: 30 cm 深的土壤水为 0.2 a, 泉水

为 1.1~1.3 a 和 1.4~1.6 a. 在岩溶地区,水体的平均滞留时间从几周到几年不等(Hu *et al.*, 2015). 在隧道施工影响区域,研究发现隧道排水和钻孔水相对于大气降水、地表水和泉水,其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 偏轻,季节变化幅度小,混合作用强烈(刘丹, 2001). 部分学者运用 ^3H 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素发现,隧道钻探产生了新的水力梯度,使得地下深处储存的旧水被越来越年轻的水取代,新旧水混合强烈(Maréchal and Etcheverry, 2003; Ranfagni *et al.*, 2014; Tomonaga *et al.*, 2017; Wang and Liu, 2020). 其他研究还运用 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 探索 and 解决隧道突水和地下水环境等问题(Vincenzi *et al.*, 2009; 廖云平, 2018),但是关于岩溶槽谷区各水体水分运移过程对隧道建设的响应的研究较少.

由于岩溶地区独特的地表—地下二元的水文地质结构(Bakalowicz, 2005; Gu *et al.*, 2015),隧道工程建设使其水文过程更加复杂. 本研究以中梁山典型岩溶槽谷区为研究对象,对隧道影响区和非隧道影响区的降水、土壤水、地下水和隧道排水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值进行分析,研究水分运移的时空特征、平均滞留时间和水源比例,探索隧道建设对岩溶槽谷区土壤水和地下水运移过程的影响,以期为岩溶隧道影响区域水资源管理提供一定的理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中梁山典型岩溶槽谷区(106°22'E~106°29'E, 29°39'N~29°50'N)位于重庆市沙坪坝区和北碚区交界地带(图 1),属于亚热带季风气候,年均气温为 16.7 °C,年均降雨量为 1 200 mm 左右,雨量充沛,但季节性分配不均,雨季为 4~10 月,占全年降水量的 76%, 7、8 月份受副热带高压带的控制,炎热干燥,降水较少. 研究区属于川东平行岭谷华蓥山支

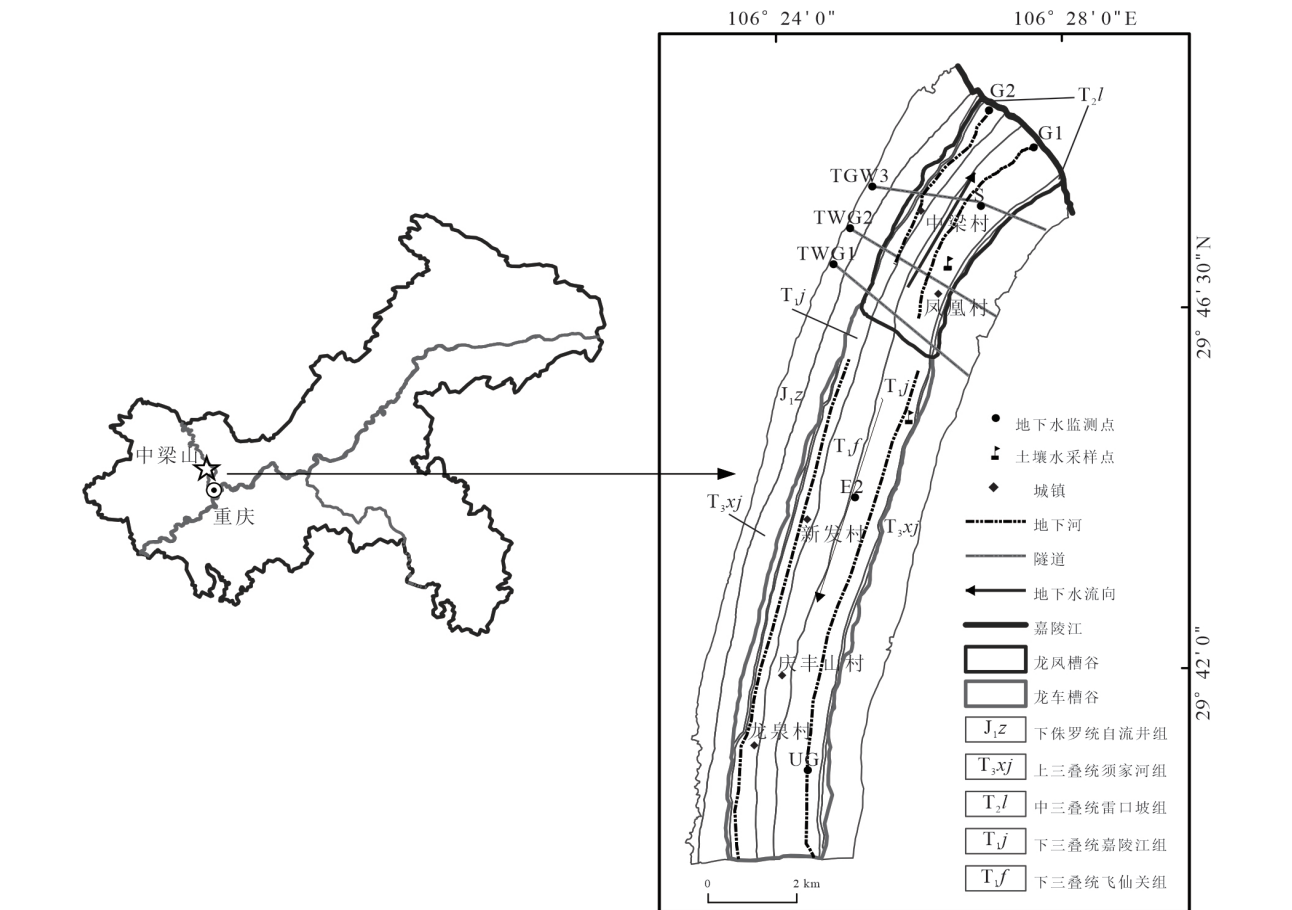


图1 研究区及采样点分布
Fig.1 Study area and sampling points distribution

表 1 龙凤槽谷 3 条隧道基本情况

Table 1 Basic situation of three tunnels in Longfeng karst trough valley

隧道编号	隧道名	隧道开挖期	隧道长度(m)	隧道东/西海拔(m)	隧道东/西排水量(L/S)
1	轻轨 6 号线北碚隧道	2010~2013 年	4 322	245/240	1.5/23.3
2	兰海高速北碚隧道	1999~2001 年	4 035	250/240	2.5/16.8
3	绕城高速施家梁隧道	2006~2008 年	4 285	260/245	2.3/6.5

脉,受隔档式构造影响,为观音峡背斜形成的背斜条状山,背斜轴向为 NNE 走向,核部的碳酸盐岩被两侧的非可溶岩地层包围,核部为下三叠统飞仙关组(T_1f)地层,向两翼地层逐渐过渡为下三叠统嘉陵江组(T_1j)、中统雷口坡组(T_2l)及上三叠统须家河组(T_3xj),背斜核部发育有东西两个 NNE 走向的溶蚀槽谷,形成“一山三岭两槽”的“笔架”式地形.区内主要发育地带性黄壤和非地带性石灰土,土壤浅薄且不连续,坡上土壤约 5~45 cm 厚.

研究区凤凰村附近由于地形高差成为一个分水岭,形成 2 个相对独立的水文地质单元,北部为龙凤槽谷(11.7 km²),南部为龙车槽谷(26.8 km²).区

内没有地表河流,但是内部垂向岩溶裂隙、管道发育,地表水和降水沿裂隙、管道进入岩溶含水层,部分地下水以泉水的形式排出,大部分地下水沿地下河排泄(段世辉等,2019).龙凤槽谷为隧道影响区,自 1999 年以来,共修建 3 条隧道(表 1),地下水流场受隧道建设影响,出现泉眼断流、水井水位降低等现象,水文生态环境受到严重影响;龙车槽谷,为非隧道影响区,区内未修建隧道,与龙凤槽谷形成对照.

1.2 研究方法

1.2.1 野外采样与实验室分析 降雨量和气温数据使用 DAVIS Vantage Pro2 型自动气象监测仪

(天津气象仪器厂有限公司)监测,每 15 min 记录一次,精度分别为 0.1 °C 和 0.1 mm. 大气降水样品通过长沙湘蓝科学仪器有限公司生产的 APS-3A 型降水降尘自动采样器收集. 自动气象站安装于凤凰村村委会楼顶.

在隧道影响区和非隧道影响区分别选择一处坡度、坡向相同的林地,在两处林地安装简易土壤水收集器. 土壤水收集装置由 1 000 cm² 圆形聚乙烯托盘,1 L 聚乙烯瓶,连接托盘和瓶子的导管以及取样管组成,在地表向下间隔 20 cm 埋设土壤水收集盘,最大埋设为 40 cm,共收集 2 层土壤水水样. 具体安装步骤如下:挖出一个约 50 cm 深的土壤剖面,将托盘水平地插入到挖掘的土壤坑侧壁中,以拦截来自上层土壤的水流,被拦截的水通过重力进入瓶子,取样管从瓶底延伸到地表挖掘后的土壤被回填到土坑中,并在安装完成后压实(吴韦等,2018).

2017 年 4 月到 2019 年 4 月,每月收集降水样品、浅层岩溶泉样品(S、E2)、地下河水(G1、G2、UG)和隧道排水样品(TGW1、TGW2-G75、TGW3-G5001);2018 年 1 月到 2018 年 11 月,每月收集 20 cm 和 40 cm 深的土壤水样品(2#0~20cm、2#20~40cm、4#0~20cm、4#20~40cm)(图 1). 所有样品经过 0.45 μm 滤膜过滤后装入样品瓶里,样品瓶用 Parafilm 封口膜密封并冷藏(4 °C)送至实验室分析.

所有的样品都送至重庆国家紫色土壤肥力与肥料效益检测基地进行分析,分析仪器采用高分辨率的离轴整合积分腔光谱输出技术(Off-Axis ICOS)的液态水稳定同位素分析仪(LWIA; GLA431-TLWIA (912-0050)). δ¹⁸O 和 δ²H 测试结果表明为与维也纳平均海水(V_{SNOW})的千分(‰)偏差,δ¹⁸O 的精度为 ±0.2‰;δ²H 的精度为 ±0.5‰.

采用 Excel2010、SPSS26.0、Origin2017 统计分析软件对 2017 年 4 月到 2019 年 4 月的同位素数据进行分析.

1.2.2 数据计算与分析 平均滞留时间是指以降水进入补给,再以径流形式排泄的水流的过程时间. 平均滞留时间越长,意味着示踪剂周期的衰减越大. 因此,在降水和水体中示踪剂循环的幅度通常用于计算集水区平均滞留时间(Kirchner, 2016a, 2016b). δ¹⁸O 的季节循环可以表征小于 5 年的平均滞留时间(McGuire and McDonnell, 2006). 集水区不同水体的 δ¹⁸O 或 δ²H 可以建模为集水区滞留时间分布与降水中的 δ¹⁸O 或 δ²H 时间序列的卷积(Maoszewski and Zuber, 1982):

$$\delta_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^t \delta_{\text{in}}(t') g(t-t') dt', \quad (1)$$

式中:δ_{out}(t)是 t 时刻输出水体的 δ¹⁸O 或 δ²H;δ_{in}(t')是 t' 时刻降水输入的 δ¹⁸O 或 δ²H;t-t' 是滞留时间;g(t-t')是 δ¹⁸O 或 δ²H 的滞留时间分布函数或系统响应函数,∫_{-∞}^t g(t-t') dt' = 1(刘伟等,2011).

基于降水、土壤水、地下水和隧道排水的每月 δ¹⁸O 或 δ²H 数据,采用周期性回归分析对 δ¹⁸O 或 δ²H 的季节趋势进行建模,将余弦曲线拟合到降水和各水体的 δ¹⁸O 或 δ²H 季节变化. 描述 δ¹⁸O 时间序列的季节性余弦拟合定义为(Maoszewski *et al.*, 1983; Dewalle *et al.*, 1997):

$$\delta = \delta_{\text{mean}} + A_{\text{PorS}} \cdot [\cos(c \cdot t - \theta)], \quad (2)$$

式中:δ 和 δ_{mean} 分别为拟合同位素值和拟合年平均同位素值(‰);A_{PorS} 分别为拟合的降水或水体的年振幅(‰);c 为年波动的径向频率(c=2π•365⁻¹);t 为时间变量;θ 是相位(弧度). 同样的方法也适用于 δ²H. 为了拟合降水和水体 δ¹⁸O 和 δ²H 的余弦循环,使用迭代加权最小二乘(IRLS)回归来限制异常值.

Maloszewski and Zuber(1982)假设地下水系统中同位素的传输关系为线性,提出了集中参数模型,包括:活塞流模型(PFM)、指数模型(EM)、指数活塞流模型(EPM)、弥散模型(DM)、线性模型(LM)和线性活塞流模型(LM). 研究区域为典型岩溶槽谷区,其含水层管道裂隙发育,水流路径时间较短,假设其行进时间呈指数分布,平均滞留时间(mean transit time, MTT)定义为(Rusjan *et al.*, 2019):

$$\text{MTT} = c^{-1} \left[\left(A_s / A_p \right)^{-2} - 1 \right]^{0.5}, \quad (3)$$

其中:c 为年波动的径向频率(c=2π•365⁻¹);A_s 和 A_p 分别为水体和降水 δ¹⁸O 或 δ²H 通过余弦拟合得到的年振幅(‰).

在此基础上,Kirchner *et al.*(2016a, 2016b)等人研究认为降水与其他水体的振幅比可以作为替代性的流域存储度量标准表征水源比例,即“新水”比例,其定义为小于 0.15~0.25 a(即 2~3 个月)的水流组分.

2 结果与分析

2.1 降水 δ¹⁸O 和 δ²H 特征

大气降水 δ¹⁸O 和 δ²H 具有明显的季节变化特

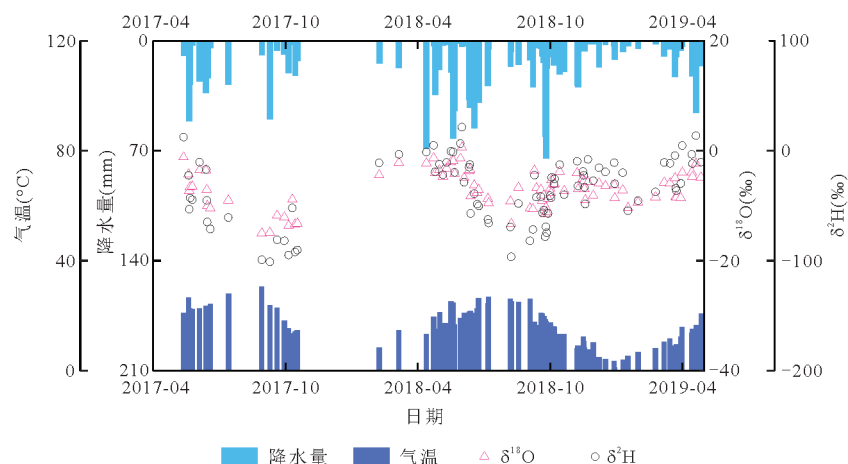
图2 大气降水降水量、气温和 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的季节变化特征

Fig.2 The seasonal variation characteristics of precipitation, temperature and $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of atmospheric precipitation

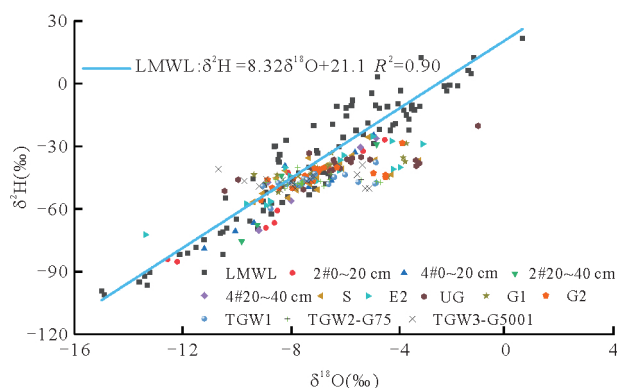
图3 中梁山典型岩溶槽谷区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 的线性特征

Fig.3 Linear characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ - δD of each water body in the valley area of a typical karst trough in Zhongliang Mountain

征. 2017年4月到2019年4月共收集了89个降水样品, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化范围为 $-15.00\text{‰} \sim 0.60\text{‰}$ 和 $-101.20\text{‰} \sim 21.50\text{‰}$, 平均值分别为 -6.90‰ 和 -36.10‰ , 标准差为3.30和28.94, 差异系数为 -0.48 和 -0.80 (图2). 研究区的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 呈现夏季偏轻, 冬季偏重的特征. 主要是由于研究区夏季受西南季风的影响, 来自低纬度的海洋气团经过长距离的运移, 雨滴在下降过程中经历了强烈的蒸发过程, 重同位素逐渐富集, 使得大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值偏轻(孟玉川等, 2010), 而冬季降水主要由本地蒸发的水汽和来自高纬度内陆气团水汽, 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 偏重(胡勇博等, 2019).

根据测定的所有降水样品的氢氧同位素拟合建立当地大气降水线(LMWL):

$$\delta^2\text{H} = 8.32\delta^{18}\text{O} + 21.1, R^2 = 0.90. \quad (4)$$

与前人定义的全局大气降水线 $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} +$

10, 有研究者修重的全球大气降水线 $\delta^2\text{H} = 8.17\delta^{18}\text{O} + 10.56$, 以及前人建立的全局大气降水线 $\delta^2\text{H} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ 相比斜率相似, 截距偏大; 与李廷勇等(2010) ($\delta^2\text{H} = 8.73\delta^{18}\text{O} + 15.73$)、刘梦娇等(2015) ($\delta^2\text{H} = 8.59\delta^{18}\text{O} + 16.64$)拟合的重庆市北碚区的大气降水线相近. 土壤水、地下水和隧道排水的样本点都分布在大气降水线附近, 表明降水是土壤水、地下水和隧道排水的主要补给来源(图3). 图中大部分点都位于大气降水线右下方, 少数点分布在大气降水线左侧, 说明土壤水、地下水和隧道排水都经历了不同程度的蒸发分馏, 但是蒸发分馏程度小.

2.2 土壤水、地下水和隧道排水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 特征

2.2.1 土壤水、地下水和隧道排水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的垂直变化特征

中梁山典型岩溶槽谷区土壤水、地下水和隧道排水的 $\delta^2\text{H}$ 值变化范围为 $-85.32\text{‰} \sim -20.24\text{‰}$, 平均值为 -46.50‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $-13.38\text{‰} \sim -1.04\text{‰}$, 平均值为 -7.21‰ . 各水体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值依据“土壤水—隧道排水—地下水”呈现逐渐偏重的趋势(表2). 隧道影响区土壤水、地下水和隧道排水的 $\delta^2\text{H}$ 值变化范围为 $-85.32\text{‰} \sim -25.68\text{‰}$, 平均值为 -47.46‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $-12.55\text{‰} \sim -2.63\text{‰}$, 平均值为 -7.33‰ ; 非隧道影响区土壤水和地下水的 $\delta^2\text{H}$ 值变化范围为 $-79.10\text{‰} \sim -20.24\text{‰}$, 平均值为 -44.58‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $-13.38\text{‰} \sim -1.04\text{‰}$, 平均值为 -6.97‰ . 隧道影响区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 较非隧道影响区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 偏轻. 对比隧道影响区和非隧道影响区各水体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的标准差和差异系数, 发现隧道影响区浅层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 标准差和差异系数

表 2 中梁山典型岩溶区土壤水、地下水和隧道排水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Table 2 $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of soil waters, groundwater and tunnel drainages in a typical karst area of Zhongliang Mountain

同位素	隧道影响	类型	编号	最大值(‰)	最小值(‰)	平均值(‰)	标准差(‰)	差异系数
$\delta^{18}\text{O}$	是	土壤水	2#0~20 cm	-4.50	-12.55	-8.35	2.58	-0.31
			2#20~40 cm	-4.80	-9.80	-7.87	1.76	-0.22
		浅层岩溶泉	S	-3.24	-9.38	-6.88	1.55	-0.22
		地下河	G1	-3.70	-9.35	-6.79	1.52	-0.22
			G2	-3.85	-9.09	-7.01	1.43	-0.20
		隧道排水	TGW1	-4.82	-9.02	-7.10	1.21	-0.17
	TGW2-G75		-2.63	-8.90	-7.01	1.45	-0.21	
	TGW3-G5001		-5.09	-10.67	-7.65	1.38	-0.18	
	否	土壤水	4#0~20 cm	-4.91	-11.19	-7.65	1.92	-0.25
			4#20~40 cm	-4.82	-9.96	-7.00	1.72	-0.25
		浅层岩溶泉	E2	-3.10	-13.38	-7.12	2.29	-0.32
		地下河	UG	-1.04	-10.43	-6.10	2.09	-0.34
$\delta^2\text{H}$	是	土壤水	2#0~20 cm	-26.90	-85.32	-56.49	20.54	-0.36
			2#20~40 cm	-29.10	-75.50	-52.45	16.20	-0.31
		浅层岩溶泉	S	-25.68	-56.73	-43.61	7.50	-0.17
		地下河	G1	-28.75	-52.04	-42.20	5.14	-0.12
			G2	-28.50	-55.80	-44.68	5.23	-0.12
		隧道排水	TGW1	-37.81	-59.90	-47.18	3.71	-0.08
	TGW2-G75		-38.49	-50.23	-46.48	2.69	-0.06	
	TGW3-G5001		-38.98	-50.59	-46.59	2.95	-0.06	
	否	土壤水	4#0~20 cm	-24.65	-79.10	-49.60	16.51	-0.33
			4#20~40 cm	-26.19	-70.23	-44.49	15.26	-0.34
		浅层岩溶泉	E2	-25.29	-72.35	-44.73	11.15	-0.25
		地下河	UG	-20.24	-51.37	-39.50	6.59	-0.17

更大,非隧道影响区浅层岩溶泉水和地下河水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 标准差和差异系数更大.

2.2.2 土壤水、地下水和隧道排水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的季节变化特征 隧道影响区和非隧道影响区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化趋势基本一致. 土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化差异较大,特别是浅层土壤水,其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化趋于一致;地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 较稳定,季节变化幅度较小(图 4). 比较隧道影响区和非隧道影响区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的季节变化特征,发现隧道影响区浅层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 较非隧道影响区夏季偏重,春、秋和冬季偏轻,深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 秋季偏重,春、夏和冬季偏轻;隧道影响区和非隧道影响区的浅层岩溶泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 全年差异均较小,隧道影响区浅层岩溶泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 夏、秋季节略微偏重;隧道影响区地下河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 较非隧道影响区冬季偏重,春、夏和秋季偏轻. 除此之外,隧道影响区浅层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化幅度最大,并在秋季达到整个区域水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 全年最小值.

2.3 土壤水、地下水和隧道排水的平均滞留时间和水源比例

根据降水和各水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节循环来拟合估算平均滞留时间(图 5). 中梁山各水体平均滞留时间为 0.35 a,随着深度的增加表现为“土壤水(0.17 a)—浅层岩溶泉(0.23 a)—地下河水(0.4 a)—隧道排水(0.62 a)” (表 3). 与非隧道影响区相比,隧道影响区水体的平均滞留时间更短. 隧道影响区 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤水的平均滞留时间为 0.12 a 和 0.15 a,非隧道影响区 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤水的平均滞留时间为 0.18 a 和 0.22 a. 非隧道影响区 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤水的平均滞留时间相比隧道影响区滞后 20.7 d 和 25.4 d. 隧道影响区地下河 G1 和 G2 的平均滞留时间为 0.39 a,非隧道影响区地下河 UG 的平均滞留时间为 0.43 a. 非隧道影响区地下河水的平均滞留时间比隧道影响区滞后 16.1 d. 隧道排水 TGW1、TGW2-G75 和 TGW3-G5001 的平均滞留时间分别为 0.59 a、0.82 a 和 0.44 a,隧道排水 TGW3-G5001 的平均滞留时间

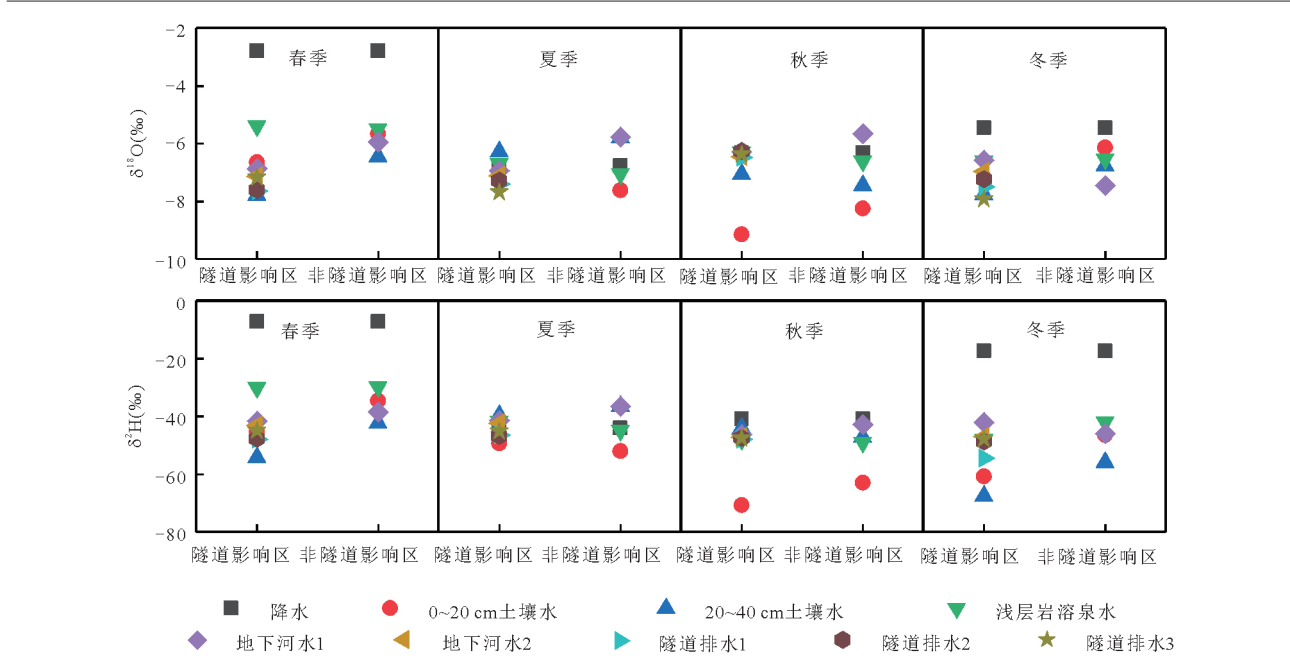


图 4 降水、土壤水、地下水和隧道排水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的季节分布

Fig.4 Seasonal distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of precipitation, soil water, groundwater and tunnel drainage

表 3 中梁山典型岩溶区土壤水、地下水和隧道排水的平均滞留时间和“新水”比例

Table 3 Mean transit time and young water fraction of soil waters, groundwater and tunnel drainages in a typical karst area of Zhongliang Mountain

隧道影响	类型	编号	A_s/A_p	“新水”比例(%)	平均滞留时间 MTT(a)	均方根误差 RMSE(‰)
是	土壤水	2#0~20 cm	0.79	78.96	0.12	1.97
		2#20~40 cm	0.74	73.51	0.15	1.36
	浅层岩溶泉	S	0.50	49.77	0.28	0.99
	地下河	G1	0.38	37.97	0.39	1.29
		G2	0.38	38.01	0.39	1.14
	隧道排水	TGW1	0.26	26.10	0.59	1.08
		TGW2-G75	0.19	19.00	0.82	1.08
TGW3-G5001		0.34	33.73	0.44	1.17	
否	土壤水	4#0~20 cm	0.66	66.18	0.18	0.93
		4#20~40 cm	0.59	59.26	0.22	1.41
	浅层岩溶泉	E2	0.66	66.31	0.18	1.00
	地下河	UG	0.35	34.60	0.43	1.72

最短。

“新水”比例通常受下渗、蒸发和蒸腾等因素的影响,但是研究表明研究区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 受蒸发蒸腾影响较小,“新水”比例的变化主要随着地下深度的变化而变化,表现为“土壤水(69.5%)—地下水(40.0%)—隧道排水(26.3%)”(表 3)。与非隧道影响区相比,隧道影响区各水体的“新水”比例占比更大。隧道影响区 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤水的“新水”比例分别为 79.0% 和 73.5%,非隧道影响区 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤水的“新水”比例分别为

66.2% 和 59.3%,隧道影响区土壤水的平均“新水”比例比非隧道影响区高 13.5%。隧道影响区浅层岩溶泉水 S 的“新水”比例为 49.8%,低于土壤水的“新水”比例。非隧道影响区浅层岩溶泉水 E2“新水”比例为 66.3%,与非隧道影响区 0~20 cm 土壤水的“新水”比例相似。隧道影响区和非隧道影响区地下河水的“新水”比例分别为 38.0% 和 34.6%,隧道影响区地下河“新水”比例比非隧道影响区高 3.4%。

3 讨论

3.1 δ¹⁸O 和 δ²H 时空变化对隧道建设的响应

3.1.1 δ¹⁸O 和 δ²H 垂直变化对隧道建设的响应

研究结果显示,土壤水、地下水和隧道排水均来源于

大气降水,各水体 δ²H 和 δ¹⁸O 值依据“土壤水—隧道排水—地下水”呈现逐渐偏重的趋势,其季节变化幅度趋于稳定. 该过程中土壤水、地下水和隧道排水 δ²H 和 δ¹⁸O 值并不仅仅代表某一场次或某一时期的降水,而是不同年份和月份降水的混合物,各水

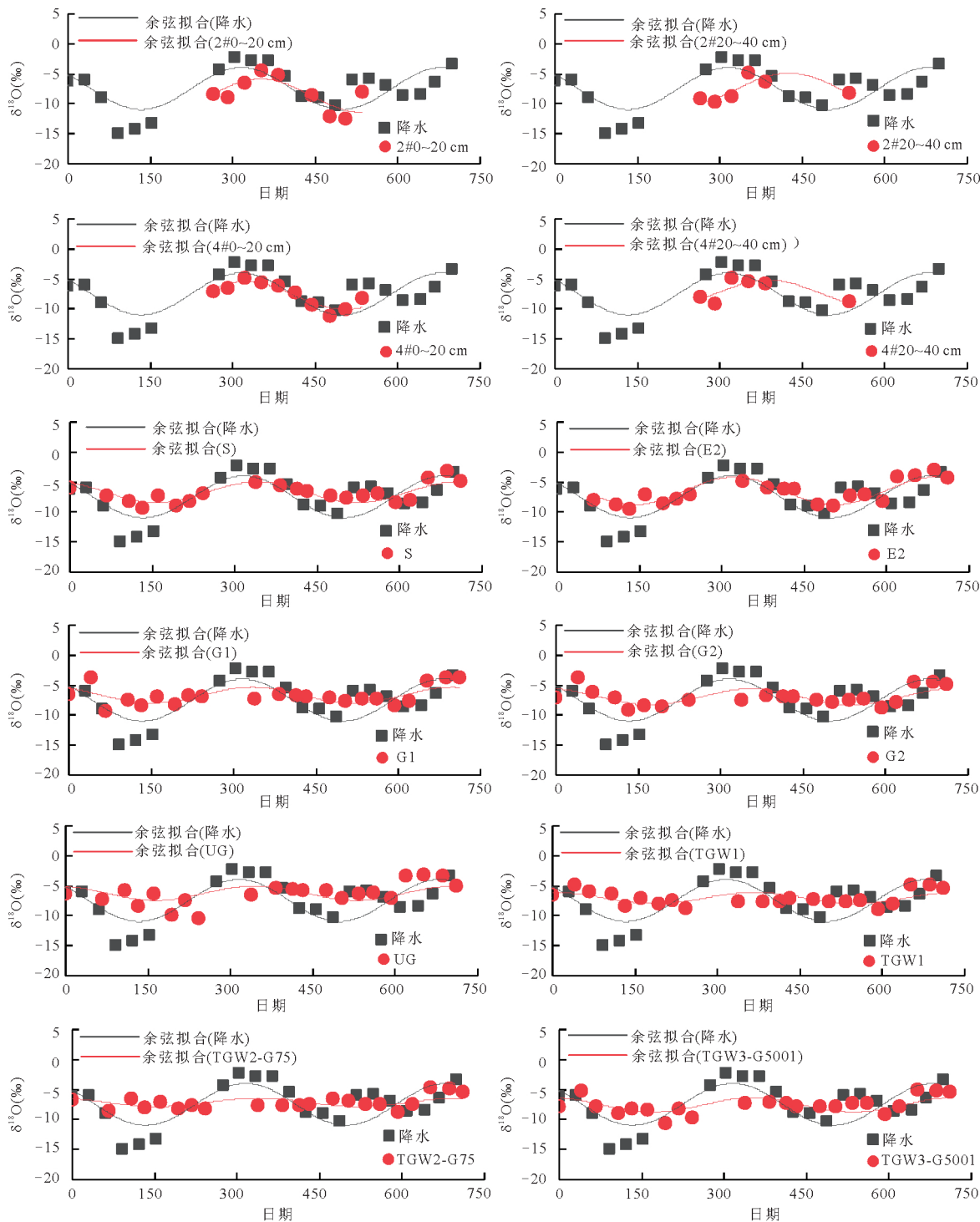


图 5 中梁山典型岩溶槽谷区大气降水、地下水和隧道排水 δ¹⁸O 值的余弦拟合

Fig.5 Cosine fitting of δ¹⁸O values of atmospheric precipitation, groundwater and tunnel drainages in the typical karst trough area of Zhongliang Mountain

体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 受到水分混合作用的影响,表现为多月或多年降水的平均同位素组成(罗维均和王世杰,2008).因此推测中梁山水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 运移过程表现为:大气降水降落地面,入渗补给浅层土壤水;大气降水入渗补给土壤层的过程中,发生了一定的新旧水混合和蒸发作用;通过管道和裂隙补给浅层地下水,发生了一定的新旧水混合和水岩相互作用(该研究以岩溶泉水代表浅层地下水,浅层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 受到蒸发的影响);最终汇入地下河,该过程中新旧水混合更加显著.

相关研究表明,隧道建设会改变地下水流场,导致地表水和地下水均向下伏岩溶管道漏失(秦成,2017;吕玉香等,2020),还会改变土壤物理性质,导致土壤含水率降低和孔隙度增大(Trombulak and Frissell, 2000; 彭学义, 2019),对区域水分运移过程造成严重影响.本研究中,与非隧道影响区相比,隧道影响区水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 总体偏轻,运移过程中隧道影响区土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化幅度较非隧道影响区土壤水更剧烈,而地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化较非隧道影响区地下水平稳.因此推测隧道建设对中梁山岩溶槽谷区水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 运移的影响过程为:降水落入地面,隧道建设导致土壤孔隙度增大,土壤含水率降低,使得降水更快入渗补给土壤层,土壤中滞留水分减少,土壤层水分混合作用减弱;通过管道和裂隙等补给地下水,发生了一定的水分混合作用,但是隧道建设导致地下水位下降,可能使得浅层地下水接受更多“旧水”的补给,因此隧道影响区浅层岩溶泉 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 较非隧道影响区偏重;汇入地下河,新旧水混合更加显著,但是隧道建设过程中隧道排水成为新的集中汇水点,导致附加水力梯度的形成,一定程度上加剧了水分混合作用(刘丹,2001),使得地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化较非隧道影响区地下水平稳.

3.1.2 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化对隧道建设的响应 土壤水和地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 都有明显的季节变化,隧道影响区和非隧道影响区各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化趋势基本一致,不同季节各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 略有差异.相关研究表明隧道建设会造成区域地下水位下降,影响植物生长,从而导致区域植被覆盖率下降,加剧蒸发作用(王芳其等,2018).一般而言,蒸发作用会使表层土壤重同位素富集.本研究区土壤水、地下水和隧道排水都经历了不同程度的蒸发分馏,但是分馏程度小,而夏季7、8月份研究区受副热

带高压控制,炎热干燥,蒸发作用显著,隧道影响区由于植被覆盖率下降,土壤孔隙度增大,浅层土壤水的蒸发作用更加显著,因此隧道影响区的浅层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 相较于非隧道影响区的偏重.秋季,隧道影响区深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 可能受到储存在土壤中的夏季浅层土壤水的影响,使得隧道影响区深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 偏重.隧道影响区与非隧道影响区浅层岩溶泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 全年差异不大,可能是隧道建设使得浅层岩溶泉水接受了深层地下水补给,使得隧道影响区浅层岩溶泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 总体偏重.冬季,研究区降水量最少,地下河主要受储存在管道裂隙中的地下水补给(蒲俊兵,2013),隧道施工过程可能形成了新的管道裂隙,使地下结构更加复杂,水分运移时间较长,隧道影响区地下河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 偏重.

3.2 平均滞留时间和水源比例对隧道建设的响应

岩溶槽谷地区土壤浅薄且不连续,地下裂隙和管道等含水介质发育,导致岩溶水系统转化迅速(袁道先,2000),中梁山各水体平均滞留时间为0.35 a,低于众多非岩溶地区(McGuire and McDonnell, 2006).相关研究表明,隧道施工会进一步增强地表水对地下水的补给,Maréchal and Etcheverry (2003)对阿尔卑斯山进行隧道钻探(约100 m)发现,钻孔内的“旧水”随着时间的延长逐渐被“新水”替代,示踪剂测试表明仅24 d后地表水就到达了隧道.比较隧道影响区和非隧道影响区各水体的平均滞留时间,发现与非隧道影响区相比,隧道影响区土壤水平均滞留时间较非隧道影响区土壤水少25.4 d,地下水的平均滞留时间较非隧道影响区地下水少16.1 d,一定程度上可以表征隧道建设加快了区域土壤水—地下水运移过程.据研究,平均滞留时间实际表征地下水年龄,主要取决于旧水比例,而“新水”比例主要表征新旧水的比例(Kirchner, 2016a, 2016b).并且, Kirchner (2016a, 2016b)研究认为在非均质集水区季节性示踪循环估算的平均滞留时间表现出严重的聚集偏差,但是季节性示踪循环振幅准确地反映了水体中新水的比例,并且表现出较小的聚集偏差,因此本研究对隧道影响区和非隧道影响区各水体“新水”比例进行了分析.对比两个区域水体的水源比例,隧道影响区土壤水“新水”比例比非隧道影响区高出13.5%,地下水“新水”比例高出3.4%,与隧道影响区和非隧道影响区各水体平均滞留时间差异相对应.进一步分析发

现,随着水分的运移,隧道影响区和非隧道影响区水体平均滞留时间和“新水”比例差异从土壤水到地下水逐渐减小,这可能是由于隧道建设改变了土壤物理性质,表现为土壤含水率降低和孔隙度增大(Trombulak and Frissell, 2000; 彭学义, 2019),因而隧道影响区土壤水滞留水分减少,隧道影响区土壤水滞留时间短,“新水”比例高;在地下水运移过程中,隧道排水成为新的集中汇水点,产生了附加的水力梯度,加大对隧道上层地下水和降水补给的袭夺,隧道影响区地下水总体上滞留时间更短,“新水”比例占比更大;但是隧道建设会产生新的管道裂隙,导致部分水储存在其中,其滞留时间更长(Ranfagni *et al.*, 2014; Tomonaga *et al.*, 2017),加之地下水水分混合作用显著(刘丹, 2001),最终表现为隧道影响区和非隧道影响区的地下水平均滞留时间和“新水”比例差异较小。

4 结论

大气降水是中梁山岩溶槽谷区隧道影响区和非隧道影响区土壤水、地下水和隧道排水的主要补给来源,隧道影响区和非隧道影响区各水体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 都经历了不同程度的蒸发分馏,但是分馏程度小。

隧道影响区和非隧道影响区水体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化和季节变化趋势一致,但是隧道影响区土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较非隧道影响区土壤水更大,地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较非隧道影响区地下水更平稳。与非隧道影响区的土壤水和地下水相比,隧道影响区浅层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 夏季偏重,深层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 秋季偏重,浅层岩溶泉水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 四季均偏重,地下河水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 冬季偏重,其余季节各水体的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻。

对比平均滞留时间和“新水”比例,隧道影响区和非隧道影响区水体平均滞留时间和“新水”比例差异从土壤水到地下水逐渐减小,隧道影响区土壤水滞留时间较非隧道影响区土壤水少 25.4 d,“新水”比例高 13.5%,地下水滞留时间少 16.1 d,“新水”比例高 3.4%。

综上,隧道建设一定程度上加快了隧道影响区水分运移速度,造成土壤层中滞留水分减少,水分混合作用减弱,导致地下水混合作用更加显著。

References

- Bakalowicz, M., 2005. Karst Groundwater: a Challenge for New Resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 148–160. <https://doi.org/10.1007/s10040a-004-0402-9>
- Cao, J.H., Yuan, D.X., Tong, L.Q., et al. 2015. An Overview of Karst Ecosystem in Southwest China: Current State and Future Management. *Journal of Resources and Ecology*, 6(4): 247–256. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2015.04.008>
- Cao, L., Shen, J. M., Nie, Z. L., et al., 2020. Stable Isotopic Characteristics of Precipitation and Moisture Recycling in the Badain Jaran Desert. *Earth Science*, 46(8):2973–2983 (in Chinese with English abstract).
- Dewalle, D. R., Edwards, P J., Swistock, B. R., et al., 1997. Seasonal Isotope Hydrology of Three Appala China Forest Catchments. *Hydrological Processes*, 11(15): 1895–1906. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199712\)11:15<1895::AID-HYP538>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199712)11:15<1895::AID-HYP538>3.0.CO;2-#)
- Duan, S. H., Jang, Y. J., Zhang, Y.Z., et al., 2019. Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: a Case Study of an Underground River System in the Longfeng trough Valley, Chongqing. *Environmental Science*, 40(4):1715–1725(in Chinese with English abstract).
- Gat, J. R., 1996. Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Hydrologic Cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(1): 225–262. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225>
- Gu, D., Zhang, Z., Mallik, A., et al., 2015. Seasonal Water Use Strategy of Cyclobalanopsis Glauca in a Karst Area of Southern China. *Environmental Earth Sciences*, 74(2): 1007–1014. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3817-1>
- Hu, K., Chen, H., Nie, Y., et al., 2015. Seasonal Recharge and Mean Residence Times of Soil and Epikarst Water in a Small Karst Catchment of Southwest China. *Scientific Reports*, 5(1): 12–27. <https://doi.org/10.1038/srep10215>
- Hu, Y. B., Xiao, W., Qian, Y. F., et al., 2019. Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation. *Environmental Science*, 40(2):573–581(in Chinese with English abstract).
- Jasechko, S., 2019. Global Isotope Hydrogeology: Review. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 835–965. <https://doi.org/10.1029/2018RG000627>
- Kirchner, J. W., 2016a. Aggregation in Environmental Systems: Part 1: Seasonal Tracer Cycles Quantify Young Water Fractions, But not Mean Transit Times, in Spatially Heterogeneous Catchments. *Hydrology and Earth System*

- Sciences*, 20(1): 279—297. <https://doi.org/10.5194/hess-20-279-2016>
- Kirchner, J. W., 2016b. Aggregation in Environmental Systems: Part 2: Catchment Mean Transit Times and Young Water Fractions under Hydrologic Nonstationarity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1): 299—328. <https://doi.org/10.5194/hess-20-299-2016>
- Liu, D., 2001. Research on Application of Isotope and Hydrochemical Information in Groundwater Environment of Long Tunnel (Dissertation). Southwest Jiaotong University, Sichuan (in Chinese).
- Luo, W. J., Wang, S. J., 2008. The Signal Transmission of $\delta^{18}\text{O}$ in Atmospheric Precipitation-Soil Water-Drop and Its Significance at Guizhou Liangfeng Cave. *Chinese Science Bulletin*, 53(17): 2071—2076 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. Y., Li, C. H., Sheng, C. Z., et al., 2010. Study on the δD and $\delta^{18}\text{O}$ Characteristics of Meteoric Precipitation during 2006–2008 in Chongqing, China. *Advances in Water Science*, 21(6): 757—764 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Wang, S. J., Luo, W. J., 2011. The Response of Epikarst Spring to Precipitation and Its Implications in Karst Peak-Cluster Region of Libo County, Guizhou Province, China. *Geochimica*, 40(5): 487—496 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M. J., Wang, Y., Zhang, Y. H., et al., 2015. Variation Characteristics of Stable Isotopes in Different Water Bodies in Southwestern China Monsoon Area: a Case Study of Beibei District, Chongqing. *Carsologica Sinica*, 34(5): 486—494 (in Chinese with English abstract).
- Liao, Y. P., 2018. Study on Evolution Law of Negative Effects of Groundwater Environment on Tunnel Engineering Around Karst Mountain Area of Chongqing (Dissertation). Chongqing Jiaotong University, Chongqing (in Chinese).
- Lv, Y. X., Jang, Y. J., Wang, Z., et al., 2020. Review on the Hydrology and the Ecological and Environmental Effects of Tunnel Construction in the Karst Valley of Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 40(6): 1851—1864 (in Chinese with English abstract).
- Maoszewski, P., Zuber, A., 1982. Determining the Turnover Time of Groundwater Systems with the Aid of Environmental Tracers. 1. Models and Their Applicability. *Journal of Hydrology*, 57(3–4): 207—231. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90147-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90147-0)
- Maoszewski, P., Rauert, W., Stichler, W., et al., 1983. Application of Flow Models in an Alpine Catchment Area Using Tritium and Deuterium Data. *Journal of Hydrology*, 66(1–4): 319—330. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90193-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90193-2)
- Maréchal, J. C., Etcheverry, D., 2003. The Use of ^3H and ^{18}O Tracers to Characterize Water Inflows in Alpine Tunnels. *Applied Geochemistry*, 18(3): 339—351. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00101-4)
- McGuire, K. J., McDonnell, J. J., 2006. A Review and Evaluation of Catchment Transit Time Modeling. *Journal of Hydrology*, 330(3–4): 543—563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.020>
- Meng, Y. C., Liu, G. D., 2010. Effect of Below-Cloud Secondary Evaporation on the Stable Isotopes in Precipitation over the Yangtze River Basin. *Advances in Water Science*, 21(3): 327—334 (in Chinese with English abstract).
- Posmentier, E. S., Feng, X., Zhao, M., 2004. Seasonal Variations of Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Eastern Asia. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109(D23). <https://doi.org/10.1029/2004JD004510>
- Pu, J. B., 2013. Hydrogen and Oxygen Isotope Geochemistry of Karst Groundwater in Chongqing. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(6): 713—722 (in Chinese with English abstract).
- Peng, X. Y., 2019. Influence of Tunnel Construction on Soil Quality in Karst Valley of Zhongliang Mountain Chongqing (Dissertation). Southwest University, Chongqing (in Chinese).
- Qin, C., 2017. Application of Hydrological Monitoring Technology to Construction of Karst Tunnels. *Tunnel Construction*, 37(7): 878—884 (in Chinese with English abstract).
- Ranfagni, L., Gherardi, F., Rossi, S., 2014. Chemical and Isotope Composition of Waters from Firenzuola Railway Tunnel, Italy. Springer International Publishing, Cham, 971—974. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3-176>
- Rusjan, S., Sapač, K., Petrič, M., et al., 2019. Identifying the Hydrological Behavior of a Complex Karst System Using Stable Isotopes. *Journal of Hydrology*, 577: 123956. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123956>
- Song, X. Q., Peng, Q., Duan, Q. S., et al., 2019. Hydrochemistry Characteristics and Origin of Geothermal Water in Northeastern Guizhou. *Earth Science*, 44(9): 2874—2886 (in Chinese with English abstract).
- Trombulak, S. C., Frissell, C. A., 2000. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14(1). <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>
- Tomonaga, Y., Marzocchi, R., Pera, S., et al., 2017. Using Noble-Gas and Stable-Isotope Data to Determine Groundwater Origin and Flow Regimes: Application to the Ceneri Base Tunnel (Switzerland). *Journal of Hydrology*,

- 545: 395—409. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.043>
- Vincenzi, V., Gargini, A., Goldscheide, r N., 2009. Using Tracer Tests and Hydrological Observations to Evaluate Effects of Tunnel Drainage on Groundwater and Surface Waters in the Northern Apennines (Italy). *Hydrogeology Journal*, 17(1): 135—150. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0371-5>
- Wu, W., Jang, Y. J., Jia, Y. N., et al., 2018. Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: a Case Study of the Zhongliang Mountain, Chongqing City. *Environmental Science*, 39(12): 5418—5427(in Chinese with English abstract).
- Wang, R., Liu, Z. F., 2020. Stable Isotope Evidence for Recent Global Warming Hiatus. *Journal of Earth Science*, 31(2): 419—424. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1239-4>
- Wang, Q. F., Zheng, W., Xu, H., et al., 2018. Influence of Groundwater Loss Induced by Karst Tunnel Construction on Growth of Surrounding Vegetation and Its Countermeasures. *Tunnel Construction*, 38(6): 915—923(in Chinese with English abstract).
- Yuan, D. X., 2000. Aspects on the New Round Land and Resources Survey in Karst Rock Desertification Areas of South China. *Carsologica Sinica*, 19(2): 103—108(in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 曹乐, 申建梅, 聂振龙, 等, 2020. 巴丹吉林沙漠降水稳定同位素特征与水汽再循环. *地球科学*, 46(8): 2973—2983.
- 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 等, 2019. 岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例. *环境科学*, 40(4): 1715—1725.
- 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 等, 2019. 水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响. *环境科学*, 40(2): 573—581.
- 刘丹, 2001. 长大隧道地下水环境中同位素及水化学信息的应用研究(博士学位论文). 四川: 西南交通大学.
- 罗维均, 王世杰, 2008. 贵州凉风洞大气降水—土壤水—滴水的 $\delta^{18}O$ 信号传递及其意义. *科学通报*, (17): 2071—2076.
- 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等, 2010. 2006~2008年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析. *水科学进展*, 21(6): 757—764.
- 刘伟, 王世杰, 罗维均, 2011. 贵州荔波岩溶峰丛区表层岩溶泉对大气降雨的响应及其指示意义. *地球化学*, 40(5): 487—496.
- 刘梦娇, 王勇, 张耀华, 等, 2015. 中国西南季风区不同水体稳定同位素特征分析——以重庆市北碚区为例. *中国岩溶*, 34(5): 486—494.
- 廖云平, 2018. 重庆岩溶山区隧道工程地下水环境负效应演化规律研究(硕士学位论文). 重庆: 重庆交通大学.
- 吕玉香, 蒋勇军, 王正雄, 等, 2020. 西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展. *生态学报*, 40(6): 1851—1864.
- 孟玉川, 刘国东, 2010. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应. *水科学进展*, 21(3): 327—334.
- 蒲俊兵, 2013. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征. *地球学报*, 34(6): 713—722.
- 彭学义, 2019. 重庆市中梁山岩溶槽谷区隧道建设对土壤质量的影响(硕士学位论文). 重庆: 西南大学.
- 秦成, 2017. 水文监测技术在岩溶隧道施工中的应用. *隧道建设*, 37(7): 878—884.
- 宋小庆, 彭钦, 段启杉, 等, 2019. 黔东南地区地热水化学特征及起源. *地球科学*, 44(9): 2874—2886.
- 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 等, 2018. 典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例. *环境科学*, 39(12): 5418—5427.
- 王芳其, 郑炜, 徐华, 等, 2018. 岩溶山区隧道地下水漏失对植物生长的影响分析及对策. *隧道建设*, 038(6): 915—923.
- 袁道先, 2000. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见. *中国岩溶*, (2): 103—108.