

典型岩溶槽谷区地下水循环特征

李 莲, 唐越尔, 杨 琰, 叶许春, 孔志岗

Characteristics of groundwater circulation in typical karst trough areas—A case study of Longtan trough valley in Youyang, Chongqing

LI Lian, TANG Yueer, YANG Yan, YE Xuchun, and KONG Zhigang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

贵州深切峡谷区典型岩溶地下河水文水化学特征

Hydrological and hydrochemical regime of a typical subterranean river in a deep canyon karst area: A case study in the Santang underground river, Guizhou

陈旺光, 曾成, 龚效宇, 邵治钦, 邓俊祖, 杨明星 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 19–29

川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究

Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan–Xizang Railway

李向全, 马剑飞, 张春潮, 王振兴, 付昌昌, 白占学 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 34–45

桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应

Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin

卢丽, 邹胜章, 赵一, 樊连杰, 林永生, 王 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 63–72

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62–71

南方小型岩溶流域与非岩溶流域的释水过程及径流组分差异

Variations in discharge processes and runoff components between small karst watersheds and non-karst watersheds in Southern China

王泽君, 周宏, 罗明明, 郭绪磊, 蔡志强 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 27–27

分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究

Improvement and application of a distributed hydrological model in karst regions

梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 陈爽, 黄奇波 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 60–67



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403044

李莲, 唐越尔, 杨琰, 等. 典型岩溶槽谷区地下水循环特征——以重庆酉阳龙潭槽谷为例 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 53-62.

LI Lian, TANG Yueer, YANG Yan, et al. Characteristics of groundwater circulation in typical karst trough areas: A case study of Longtan trough valley in Youyang, Chongqing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 53-62.

典型岩溶槽谷区地下水循环特征 ——以重庆酉阳龙潭槽谷为例

李 莲^{1,2}, 唐越尔², 杨 琰², 叶许春², 孔志岗¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 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: 西南岩溶槽谷区地下水资源丰富, 但有关槽谷区不同部位和类型岩溶地下水的循环特征及其差异的认识还不深入。以重庆酉阳龙潭槽谷为例, 采用流量衰减法以及水均衡原理等方法, 系统分析了槽谷顺、逆层坡不同性质岩溶泉水的流量衰减过程、水源组成、补给特征及调蓄作用。结果表明: 研究区地下水单次流量衰减过程可分为 2 个阶段, 第一阶段的衰减系数比下一阶段的衰减系数高至少 1 个量级, 不同含水介质特征明显, 岩溶水的水源组分主要为含水层内部存储的裂隙水; 顺坡地下河补给面积为 66.15 km², 逆坡表层岩溶泉补给面积仅为 0.90 km², 两泉次降雨补给系数在季节变化上呈现出冬春季大、夏季小的特点; 顺、逆层岩溶泉水系统在 5—9 月以地下水储存作用为主, 在其他月份, 主要表现为地下水的释放; 顺坡常流泉全年流量波动幅度相对较小, 泉域调蓄能力较强, 逆坡季节泉在夏季伏旱期会出现断流现象。本研究揭示了槽谷区顺、逆层坡不同性质岩溶水系统补给、调蓄以及排泄等水循环过程的特征差异, 为区域地下水资源开发利用提供科学依据。

关键词: 岩溶泉; 地下河; 衰减; 补给; 调蓄; 岩溶槽谷

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0053-10

Characteristics of groundwater circulation in typical karst trough areas: A case study of Longtan trough valley in Youyang, Chongqing

LI Lian^{1,2}, TANG Yueer², YANG Yan², YE Xuchun², KONG Zhigang¹

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Although the southwest karst valley region of China has an abundance of groundwater resources, little is known about the variations in the karst trough valley's groundwater types and their cycle features. Using the Chongqing Youyang Longtan trough valley as a case study, this research systematically analyzed the flow attenuation process, water source composition, recharge characteristics, and storage role of karst springs on the

收稿日期: 2024-03-10; 修订日期: 2024-06-27

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277048; 42071028); 国家重点研发计划项目(2016YFC050230205)

第一作者: 李莲(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩溶地下水循环的研究。E-mail: 2240497469@qq.com

通讯作者: 孔志岗(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境地质、构造地质学方面研究。E-mail: zhigangkong@kust.edu.cn

downstream and reverse slopes of the valley by the methods of hydrological impulse function simulation, water balance principle, and flow attenuation. The results show that the attenuation process of single spring flow in the study area can be divided into two stages, with the attenuation coefficient of the first stage being at least one order of magnitude higher than that of the second stage. The characteristics of different water-bearing media are clearly distinct, with the primary source of karst water being the fissure water stored within the aquifer. The theoretical recharge area of the downslope karst spring is 66.15 km², while that of the inverse-slope seasonal karst spring is only 0.99 km². The recharge coefficients of the two springs in the seasonal changes are large in winter and spring and small in summer. There are significant fluctuations in the flow rate of downslope normal-flow springs throughout the year, but these springs have a strong capacity to store water, and the inverse-slope seasonal spring can also store water. From May to September, the system of downslope and inverse karst springs is mainly dominated by groundwater storage, while groundwater release occurs predominantly in the other months. During the summer drought, the downslope seasonal springs may experience broken flow. This study offers a scientific foundation for the development and utilization of groundwater resources in the area by highlighting the variations in the features of the water cycle processes of recharge, storage, and discharge of karst springs with various properties on the downslope and reverse slope of the trough area.

Keywords: karst spring; underground river; attenuation; recharge; regulation and storage; karst trough valley

我国西南地区岩溶分布广泛, 占区内幅员面积的三分之一以上。岩溶地区地形地貌复杂, 生态环境脆弱, 干旱与内涝频发, 石漠化形势严峻^[1]。特别是, 川黔褶皱带中因流水作用参与而形成的长条状岩溶槽谷区, 地形坡度大、产汇流速度快, 土层浅薄且蓄水能力低, 并受人类活动影响, 土地质量退化与生产力降低的风险尤其突出^[2-4]。西南岩溶区地下水资源丰富, 其开发利用和保护一直是关注的热点和重点。研究岩溶槽谷区地下水赋存规律和水循环过程变化特征, 有助于促进区域地下水资源因地制宜开发利用, 科学推进岩溶流域石漠化治理和提升水源涵养能力。

目前, 国内外学者对岩溶水文过程开展了诸多研究, 包括岩溶泉水流量与水化学变化过程^[5]、降雨-径流过程的响应与模拟^[6]、流域蓄-泄关系^[7]以及气候变化对地下水补给的影响^[8]等。但以往的研究主要集中于水循环动态过程的某一部分或水文地球化学过程的研究, 没有从岩溶水的组成及其运动规律系统的研究到补给-调蓄-排泄的完整过程。鉴于岩溶槽谷区地下水系统的复杂性和表层岩溶水对于解决西南岩溶山区居民的干旱缺水问题意义重大^[9], 对槽谷区不同部位和类型的岩溶地下水循环过程进行系统研究十分必要。

岩溶水循环的动态过程包括岩溶水的补给、径流、调蓄和排泄等过程, 涉及到岩溶水资源形成、运移和分布的各个环节, 受到岩溶含水层水结构特征的严格控制^[10]。由于岩溶槽谷区高位蓄水构造频繁出

露, 地下岩体遭受流水侵蚀、溶蚀严重, 岩溶介质具有高度非均质性, 不同类型岩溶地下水动态特征差异显著^[11]。岩溶地下水流量动态变化为岩溶含水层对降雨响应的表现形式之一, 当降雨经过岩溶含水系统时, 降雨入渗及其汇流过程必然受到含水系统内部结构和性质的影响, 因此流量过程曲线中也应含有岩溶含水层的一些内部信息, 这也是通过分析地下水流量曲线认识含水层内部特征的物理基础^[12]。传统研究大多监测地下水排泄出口或地表水断面的水文过程, 通过水文分析推断岩溶水系统的结构特征, 以及进行水资源量评价^[13]。岩溶地下水的一些物理化学指标(水位、温度等)动态变化过程易于获取, 也常被用来解译岩溶含水层的内部结构和调控机理^[14]。然而, 槽谷区部分岩溶含水层厚度大于 500 m, 具有多源补给特征和复杂的地下空间结构, 传统水文地质调查方法如示踪试验、水文地质钻探物探等, 在确定岩溶含水层厚度较大区域的水文地质参数和补给范围上具有一定难度, 并且成本较高。

我国西南岩溶槽谷区地下水空间结构复杂、类型多样、动态变化极大, 目前对于岩溶水系统补给-调蓄-排泄机制的认识还有待深入。对岩溶地下水循环特征的探索应着眼于系统与外界环境的关系, 用输入、响应和输出阐述两者的因果关系, 从而对整个流域的水动态过程进行模拟和分析。本研究以重庆酉阳岩溶槽谷区顺、逆层坡水文地质结构差异显著的地下河出口和表层岩溶泉为例, 基于区内气象和地下水流量

过程的自动连续监测, 研究识别不同类型岩溶系统的水源组分及补给-排泄过程, 在此基础上揭示岩溶水的调蓄作用, 为客观认识岩溶槽谷区地下水循环过程及其动态变化提供科学依据。

1 研究区概况

龙潭槽谷位于重庆市酉阳县境内, 深处武陵山腹地。地质构造上, 龙潭槽谷地处渝东南桐麻岭背斜的南东翼, 为背斜型岩溶低位槽谷(图1)。槽谷范围从酉阳县泔溪镇至龙潭镇, 全长约 35 km, 呈东北至西南走向, 与背斜构造线方向一致。桐麻岭背斜的轴部以寒武系(ϵ)的白云岩与奥陶系(O)的白云质灰岩为主, 背斜两翼分别为志留系(S)的砂页岩、二叠系(P)与三叠系(T)的灰岩。槽谷东侧为逆层坡, 岩层倾向与坡向相反, 土壤层较厚, 地层为毛田组($\epsilon_3 m$)、南津关组

($O_1 n$)、分乡组与红花园组($O_2 f+h$)及大湾组($O_3 d$), 岩性以白云质灰岩与白云岩为主, 岩组富水性中等偏弱。西侧为顺层坡, 岩层倾向与坡向一致, 基岩裸露, 土壤层较薄, 地层为高台组($\epsilon_2 g$)、平井组($\epsilon_2 p$), 岩性以白云质灰岩为主, 岩组富水性中等。

龙潭槽谷区年均气温 16 °C, 年均降水量 1 470 mm, 降水集中在 5—7 月和 9—10 月, 属亚热带季风气候。研究区龙潭槽谷两侧坡脚处分别发育地下河出口及表层岩溶泉: 顺层坡的龙洞塘和逆层坡的老泉。其中, 龙洞塘为龙潭河支流地下河段出口, 出露于槽谷顺层坡寒武系高台组($\epsilon_2 g$)地层, 海拔约 387 m, 年均流量 589.29 L/s; 老泉为季节性岩溶泉, 夏季伏旱期会出现断流, 出露于槽谷逆层坡寒武系毛田组($\epsilon_3 m$)地层, 海拔约 369 m, 年均流量 5.26 L/s。区内地表、地下水均流入龙潭河, 最后汇入沅江水系。

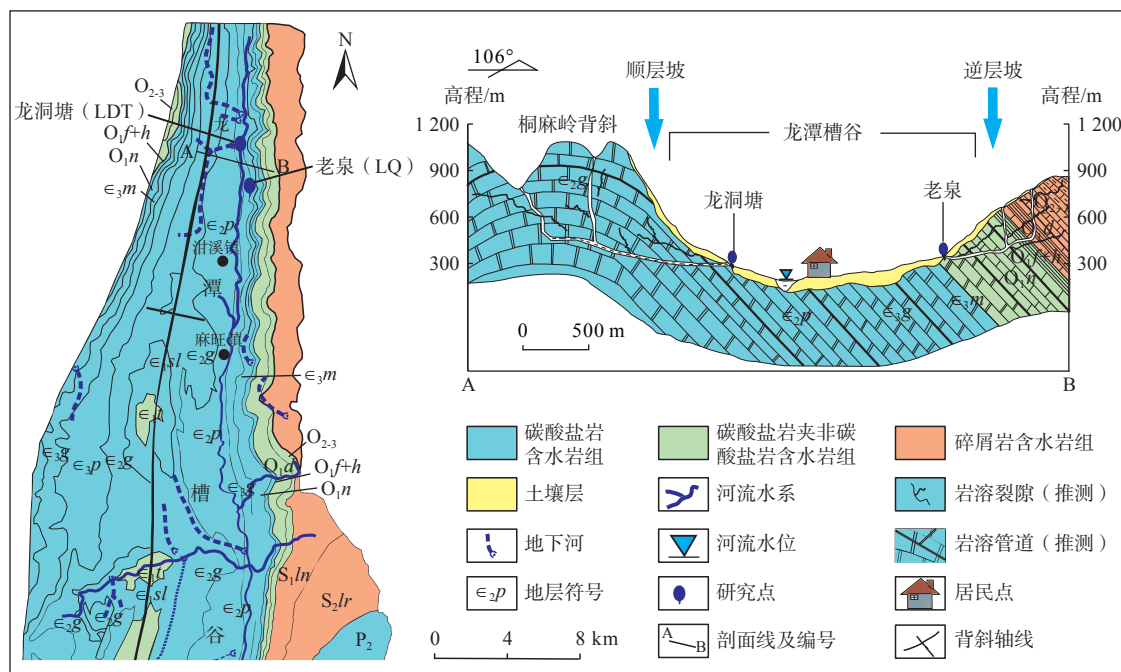


图1 龙潭槽谷水文地质概况图(修改自参考文献[14])

Fig. 1 Hydrogeological condition of Longtan Trough Valley (modified from reference [14])

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2018 年, 研究区内设置高分辨率自动监测仪器获取岩溶地下水出流特征和当地气象的实时动态数据。其中, 在老泉(LQ)和龙洞塘(LDT)分别安装 U20-001-04 HOBO Water Level 水位计, 按 15 min/次的频率自动记录地下水水位, 分辨率为 0.001 m。逆坡老泉出口处修建有蓄水池, 并设置直角三角堰与薄壁矩形复

合堰, 通过强降水期间实测堰上水头高度与蓄水池内 HOBO 水位计自动记录的相对水位高度进行矫正, 利用堰流公式计算泉水流量。当泉水水位低于三角堰最大高度时, 采用直角三角堰流量公式计算^[15]。当泉水水位高于三角堰最大高度时, 采用薄壁矩形堰流量公式计算, 流量系数采用巴赞流量系数^[16-17]。龙洞塘出口连接筑坝溶潭, 溶潭内地下水主要以主渠和泄洪河道为排泄通道。主渠为修建有矩形断面状砼

衬砌渠排水渠道,底部有块石及砾石分布,泄洪河道底坡平坦,断面均匀稳定,研究中均采用曼宁流量公式^[18-21]计算地下水流量。主渠水位由水位计自动监测记录,泄洪河道水位结合 2022 年龙洞塘主渠与泄洪河道水位自动监测数据的相关性进行计算,其相关关系为:

$$H_1 = 0.73H_2 + 0.23, R^2 = 0.88$$

式中: H_1 ——泄洪河道水位;

H_2 ——主渠水位。

气象监测方面,监测点附近设置有 DAVIS Vantage Pro2 型自动气象监测站及重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站武陵山龙潭观测点气象站,按 15 min/次的频率自动记录研究区降水量、气温和蒸发量,分辨率分别为 0.2 mm、0.01 °C 和 0.2 mm。

考虑到监测过程中数据的完整性和连续性,本研究选择 2021 年一个完整年的气象和水文监测数据进行相关分析。图 2 显示了 2021 年 15 min/次的降水量以及老泉和龙洞塘的流量实时变化过程。

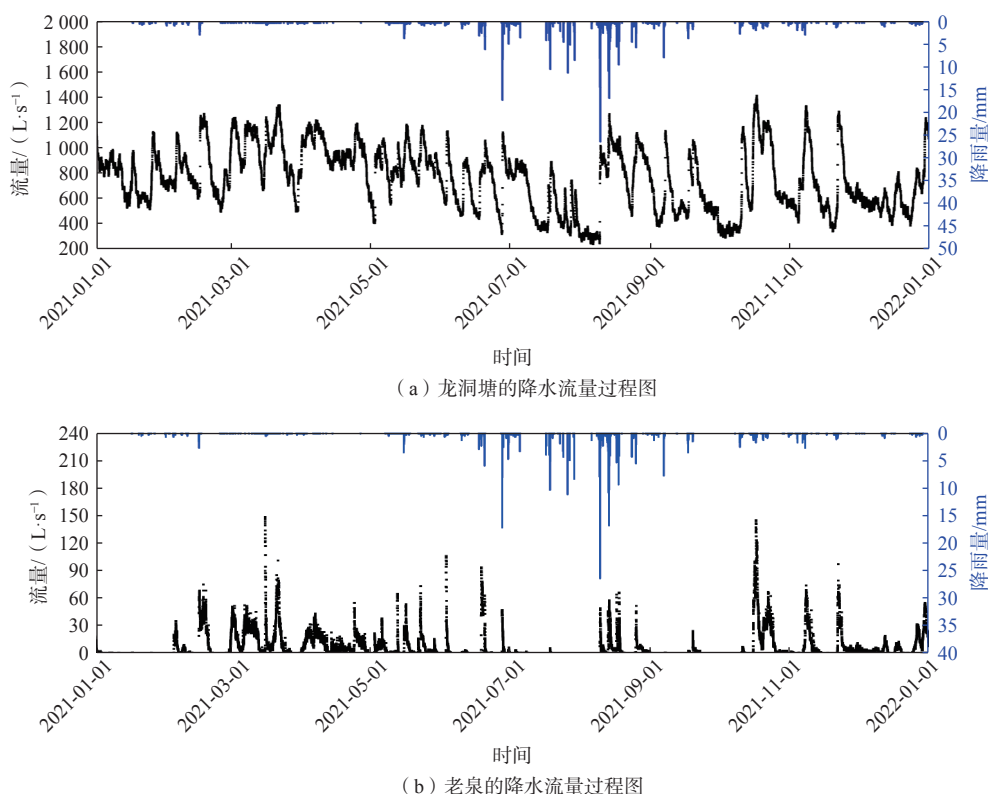


图 2 2021 年 (a) 龙洞塘和 (b) 老泉的降水流量过程图

Fig. 2 Precipitation flow processes for (a) Longdongtang and (b) Laoquan in 2021

2.2 研究方法

2.2.1 流量衰减计算

岩溶含水系统由多重含水介质组成,在流量衰减初期,不同级次的释水管道均进行释水,但每一级次管道的排泄时间和衰减速率不同。岩溶水的衰减过程看作不同级次含水介质释水过程的叠加,符合分段指数衰减规律^[22]:

$$Q_t = \begin{cases} Q_0 e^{-a_1 t} & t \in (0, t_1] \\ Q_1 e^{-a_2 (t-t_1)} & t \in (t_1, t_2] \\ \dots & \dots \\ Q_n e^{-a_{n+1} (t-t_n)} & t \in (t_n, t_{n+1}] \end{cases} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{\lg Q_{i-1} - \lg Q_i}{0.434 3(t_i - t_{i-1})} \quad (2)$$

式中: Q_t ——衰减开始后 t 时刻流量/(L·s⁻¹);
 Q_0 ——第一衰减期的初始流量/(L·s⁻¹);
 Q_1 ——第二衰减期的初始流量/(L·s⁻¹);
 a_1 ——第一衰减期流量衰减系数;
 a_2 ——第二衰减期流量衰减系数;
 t_1 ——第一衰减期结束时间/h;
 t_2 ——第二衰减期结束时间/h;
 Q_i ——第 $i+1$ 衰减期初始时刻流量/(L·s⁻¹);
 a_i ——第 i 衰减期流量衰减系数;

t_i ——第 i 衰减期结束时间/h。

岩溶水的衰减过程看作不同级次含水介质释水过程的叠加,依据衰减速率的差异,可将整个流量衰减过程划分为若干个衰减期。各衰减期内含水介质的储水量可表示为:

$$\begin{aligned} V_1 &= \int_0^{t_1} (Q_1 e^{-\alpha_1 t} - Q_2 e^{-\alpha_2 t}) dt \\ V_2 &= \int_0^{t_2} (Q_2 e^{-\alpha_2 t} - Q_3 e^{-\alpha_3 t}) dt \\ &\dots \\ V_n &= \int_0^{t_n} (Q_n e^{-\alpha_n t} - Q_{(n+1)} e^{-\alpha_{(n+1)} t}) dt \end{aligned} \quad (3)$$

式中: V_n ——第 n 衰减内含水介质的储水量/L。

不同级次含水介质的储水量占总水量的百分比 (K_i) 表示为:

$$K_i = V_i / (V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad (4)$$

2.2.2 单次降水补给系数计算

单次降雨的补给系数可通过综合单次有效降水量和补给面积求取^[15]:

$$\alpha = \frac{V_0}{A \cdot P_{\text{eff}}} \quad (5)$$

式中: α ——单次降雨补给系数;

V_0 ——含水介质总储水量/L,详细计算过程见式(3);

A ——岩溶水系统的补给面积/ km^2 ;

P_{eff} ——单次降雨产生的有效补给降雨量/mm。

2.2.3 调蓄量与调蓄系数的计算

对于独立完整的岩溶水系统,其某一均衡期内地下水的补给量与流出量的差等于岩溶水系统的调蓄量:

$$\alpha \cdot P = R_2 + \Delta S \quad (6)$$

式中: P ——降水量/mm;

R_2 ——地下径流量,以径流深度计/mm;

ΔS ——调蓄量/mm。

ΔS 为正值时说明在此均衡期内水量有盈余,表现为岩溶水的储存作用, ΔS 为负值时说明径流量中有来自地下水的补充,表现为地下水的释放作用。

地下径流系数为年地下径流深度与年降水量的比值,反映降水转化为地下径流的比例。

岩溶含水系统年调蓄系数为各月地下水调蓄量绝对值的总和与年地下水径流深度的比值。

3 结果

3.1 岩溶水的衰减过程

根据 2021 年降雨流量过程(图 2),分别在老泉和龙洞塘选取了 4 次衰减过程完整、具有较好代表性的

洪峰流量过程,进行岩溶水的衰减分析。其中,龙洞塘的 4 次洪峰流量衰减过程的洪峰出现时间分别为 7 月 8 日、7 月 29 日、10 月 23 日和 11 月 22 日;老泉的 4 次洪峰流量衰减过程的洪峰出现时间分别为 5 月 16 日、6 月 3 日、8 月 25 日和 11 月 21 日。岩溶水的衰减过程受其水系统内部复杂结构的影响,衰减过程中影响因子也比较多。分析表明,龙潭槽谷逆层坡的老泉和顺层坡的龙洞塘流量衰减过程大都呈现出 2 个衰减期:第一衰减期主要为落水洞和大型岩溶管道中的管道流,第二衰减期主要为含水介质里的裂隙水。从第一个衰减期到第二个衰减期,衰减系数依次减小(图 3),量级上也有显著差异。

对两处地下水 4 次洪峰流量衰减过程中每一衰减期的衰减系数取平均值,可知龙洞塘第一衰减期的平均衰减系数为 0.01,平均衰减时间为 74.38 h;第二衰减期的平均衰减系数为 0.000 4,时间持续到排泄过程结束。老泉第一衰减期的平均衰减系数为 0.14,平均衰减时间为 5.73 h;第二衰减期的平均衰减系数为 0.03,时间持续到排泄过程结束。

3.2 岩溶水的水源组分

单个衰减期的衰减流量与当次衰减过程的总流量相比,得出岩溶水的水源组分,推求出补给区两类不同管径含水介质的理论占比(表 1)。第一衰减期内,龙洞塘管道流占比为 9.02%~24.86%,平均值为 13.87%;老泉管道流占比为 17.15%~69.27%,平均值为 44.62%。与此同时,第一衰减期内裂隙流在两处地下水流量组成中也占据一定比例,其中,龙洞塘裂隙流占比为 17.86%~46.18%,老泉裂隙流占比为 11.88%~41.48%。第二衰减期内,龙洞塘和老泉的裂隙流占比分别为 28.96%~73.13%和 8.96%~70.95%。综合来看,龙洞塘裂隙流占比约为 87.31%,老泉裂隙流约为 56.10%。

3.3 岩溶水的补给特征

龙洞塘和老泉处于同一研究区,直线距离约为 3.4 km,所以两个研究点的蒸散发量近似相同。根据地形分水岭所获得的老泉汇水面积为 0.9 km^2 ^[23]。龙洞塘为地下河出口,流域包括含水层大于 500 m 的桐麻岭背斜,若单纯采用水文地质勘察的方法成本较大且难以在短时间内精确掌握其流域范围,故采用 ArcSWAT 模型对龙洞塘进行流域面积的提取。ArcSWAT 模型可以模拟不同的水文过程,将复杂流域划分为多个子流域,同时具备模拟精度高、运用广泛、易于获取数据源等优点^[24-27]。以龙洞塘为流域出水口采用 ArcSWAT

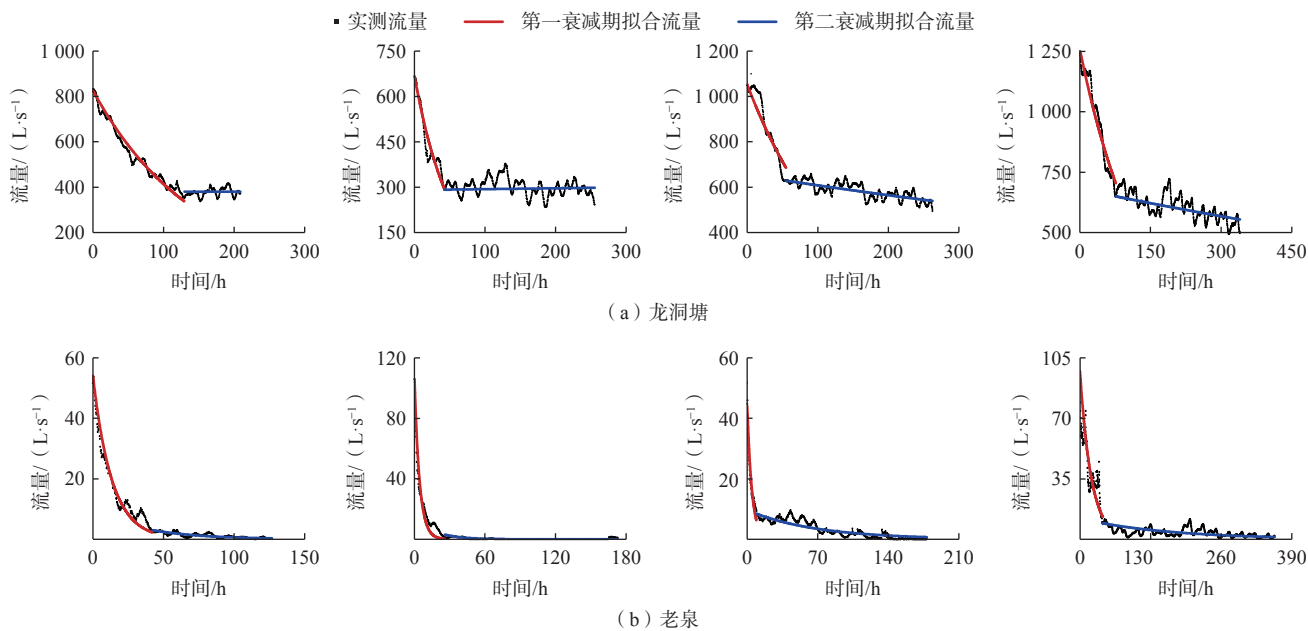


图 3 龙洞塘和老泉流量衰减过程曲线
Fig. 3 Flow decay process curves of Longdongtang and Laoquan

表 1 龙洞塘和老泉的水源构成

研究点		水源组分(第一衰减期)				水源组分(第二衰减期)	
		管道流/L	占比/%	裂隙流/L	占比/%	裂隙流/L	占比/%
龙洞塘	7月8日	24 489.75	24.86	45 489.04	46.18	28 532.17	28.96
	7月29日	7 064.49	11.58	12 507.05	20.49	41 460.41	67.93
	10月23日	12 556.83	9.02	24 873.65	17.86	101 850.80	73.13
	11月22日	23 353.60	10.04	50 033.51	21.51	159 253.94	68.45
老泉	5月16日	563.89	69.27	166.76	20.49	83.37	10.24
	6月3日	249.77	49.56	209.04	41.48	45.16	8.96
	8月25日	123.26	17.15	85.45	11.88	509.98	70.95
	11月21日	1 308.59	42.51	441.54	14.35	1 327.87	43.14

模型提取流域范围,获得龙洞塘出口以上流域面积为 66.15 km²。

单次降雨的补给系数可以反映出研究区地形地貌、气候特征、降雨时长、降雨时间等因素对岩溶水补给的影响。基于 2021 年龙洞塘和老泉的流量过程曲线,选取降雨时间相对集中、单次降水量级不同、洪峰过程相对完整的水文响应过程进行单次降雨的补给系数计算。计算表明,降雨强度及其时间分布对单次降水补给系数的影响最为显著(表 2)。龙洞塘和老泉的补给系数呈现出相似的季节规律,但龙洞塘的单次降雨补给系数包含了 10⁻¹ 和 10⁻² 两个量级,而老泉的补给系数包含 10⁻¹、10⁻² 和 10⁻³ 三个量级,龙洞塘的单次降雨补给系数整体而言比老泉更大也更集中。老泉在 8 月 24 日的单次降雨补给过程中,补给系数仅为 0.004,说明夏季伏旱天气和暴雨情况对老泉的

地下水补给影响很大。

龙洞塘和老泉的单次降雨补给系数都呈现出随降雨量的增大而减小的负相关关系,其最佳拟合函数

表 2 龙洞塘和老泉降雨量与单次降雨补给系数

龙洞塘			老泉		
时间	单次降雨量/mm	补给系数	时间	单次降雨量/mm	补给系数
2月16日	2.4	0.632	2月16日	2.4	0.394
3月22日	3.0	0.703	3月2日	1.4	0.746
6月2日	37.6	0.022	3月16日	8.0	0.172
6月28日	102.0	0.024	5月16日	57.0	0.017
8月25日	34.2	0.045	6月3日	8.4	0.120
9月19日	20.0	0.127	6月27日	73.4	0.006
11月7日	6.8	0.335	8月9日	114.2	0.021
11月21日	18.4	0.151	8月24日	40.8	0.004

为反比例函数(图 4a)。在暴雨情况下, 大部分降水所形成的是地面径流, 随着降雨等级的减小, 降水有更多的时间暂留地表和下渗, 地下径流产生的占比增

大, 单次降雨补给系数便会相应的增大。补给系数在季节变化上呈现出冬春季节大、夏季小的特点, 与两个研究点流量的整体变化情况一致(图 4b)。

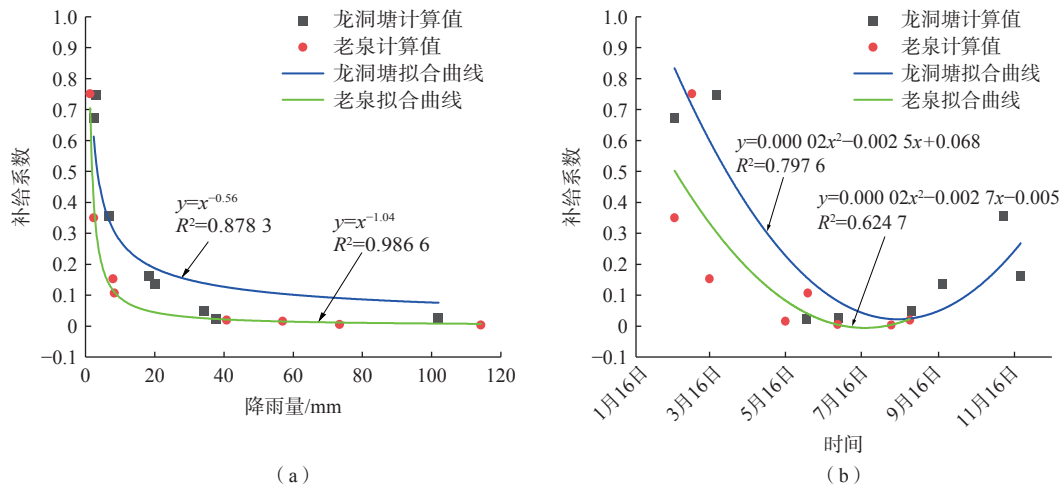


图 4 单次降雨补给系数与降雨量和降水时间的关系图
Fig. 4 Sub-rainfall recharge coefficient vs. rainfall amount and precipitation duration

3.4 岩溶水的调蓄作用

年调蓄量表征岩溶水系统在丰、枯水期能参与或释放的总水量(研究中以流域面平均水流深度表示), 年调蓄系数表示总径流量中参与调蓄的比例, 两者综合反映了岩溶水系统的调蓄能力[28]。计算表明, 2021 年龙洞塘岩溶水系统地下水径流系数为 0.26, 老泉为 0.16, 龙洞塘的地下水转化率更高。龙洞塘岩溶水系统的年调蓄量约 79 mm, 年调蓄系数为 0.22; 老泉岩溶水系统的年调蓄量约为 38 mm, 年调蓄系数为 0.17 (表 3)。总体上, 龙洞塘在 2021 年储存的水量和总径流量中参与调蓄的占比均高于老泉, 龙洞塘的调蓄能力相较老泉更强。

在季节分布上, 龙洞塘和老泉岩溶系统地下水的储存也主要集中在 5—9 月, 尤其以夏季 6—8 月最为突出, 两者在 8 月的储存水量分别达到 107, 68 mm(图 5)。其他月份, 地下水补给量小于排泄量, 主要表现为地下水的排泄。研究区伏早期与雨季基本重合, 期间降雨量很大, 岩溶地下水系统以水量储存作用为主; 与此同时, 区内高温蒸发突出, 以老泉为代表的表层岩溶泉水通常出现断流现象。

4 讨论

研究区龙洞塘和老泉同属龙潭槽谷岩溶区, 其流量衰减过程、水源组分、补给特征和调蓄作用等方面具有一定的相似性。然而, 受岩溶地下水系统发育

顺、逆层坡的地质构造以及流域特点等影响, 岩溶水排泄规律方面存在较大差异。又由于其系统结构的复杂性和地下结构难以准确探求, 在岩溶槽谷区的地

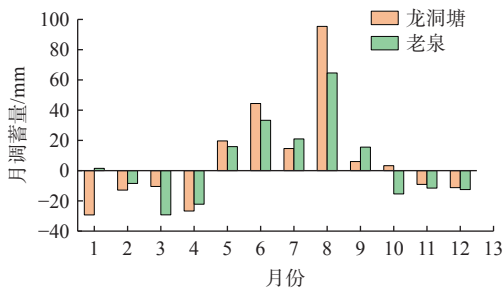


图 5 龙洞塘、老泉月调蓄量变化图
Fig. 5 Changes in monthly storage volume of Longdong Pond and Laoquan

表 3 龙洞塘、老泉 2021 年气象水文要素
Table 3 Meteorological and Hydrological Elements for Long Dong Tang and Laoquan in 2021

气象水文要素	龙洞塘	老泉
补给面积/km ²	66.15	0.90
平均气温/°C	17.11	17.11
年降水量/mm	1 417	1 417
年地下水径流量/mm	365	224
年蒸散发量/mm	869	869
年调蓄量/mm	79	38
年地下水径流系数	0.26	0.16
年调蓄系数	0.22	0.17

注: 年地下水径流量、年蒸散发量与年调蓄量均以流域面平均水流深度表示, 故为/mm。

下水补给量探求方面也存在着较大差异^[29-30]。龙洞塘发育于槽谷的顺层坡,为地下河出水口,其补给区为顺层坡桐麻岭背斜至龙潭河支流地下河出口。背斜翼部地层受到挤压作用裂隙发育,汇水区内含水层厚度很大,大于 500 m,降雨入渗后雨水可以较好地暂存在岩溶裂隙中,导致岩溶水的衰减系数较小,持续时间较长。

此外,龙洞塘的单次流量衰减曲线出现直线骤降,可以推断该汇水区出现了落水洞等大型岩溶管道,暴雨时汇水区补给能力有所提高。老泉位于龙潭槽谷逆层坡坡脚,属于浅表层季节性岩溶泉,汇水区为其所在坡脚上部分坡面,坡度较陡,降水易形成大量坡面流流走。同时,补给区含水层厚度不足 100 m,泉水流量主要来源于降雨入渗沿着溶蚀管道和裂隙释水。老泉管道流所占总流量的比重远高于龙洞塘,雨后释水过程快,对地下水的暂时储存能力低。龙洞塘实测流量随季节波动,受重庆市伏旱天气影响夏季流量与全年平均流量相比明显偏小,但总体波动幅度相对较小,未出现断流。老泉实测流量波动幅度极大,其在夏季伏旱期间大多接近于断流状态,冬春季受降雨影响流量变化也较大,降雨初期流量减小很快,总体趋势不稳定。

岩溶区植被覆盖度低,土层单薄,集中暴雨不易入渗到深部含水层,反而容易形成坡面流流走,难以形成有效的地下水补给。此外,伏旱天气是研究区每年都会出现的特殊天气^[31-32],虽然每年的伏旱期时长不同,但都对研究区岩溶水循环的动态变化造成了很大的影响。2021 年研究区在伏旱期内干旱天数为 36 d,降雨天数为 26 d,高温天气($\geq 35^{\circ}\text{C}$)天数为 39 d。伏旱期对研究区地下水补给情况影响显著,即使研究区处于亚热带季风性湿润气候区,两个研究点地下水流量也表现出夏季最少,春季最多的特点。单次降雨强度最大的时段和伏旱天气的时间大部分是重合的,二者的叠加影响,造成了虽降水很多,但有效入渗的表层土壤水快速蒸发,单次降雨入渗系数小。所以龙洞塘和老泉伏旱期(7、8 月)内补给系数很小,甚至比年内最大值小了 1~2 个量级。春季研究区温暖湿润,三月多连绵小雨,单次降雨后表层土壤水不易蒸发,能较好入渗,所以龙洞塘和老泉两个水系统均在三月取得单次降雨补给系数的较大值。

5 结论

(1)龙洞塘和老泉的单次地下水流量衰减过程均

可分为 2 个阶段:龙洞塘第一阶段的衰减系数比下一阶段的衰减系数高 2 个量级,层次分明,不同含水介质特征明显;老泉第一阶段的衰减系数比第二阶段高 1 个量级,衰减趋势明显。龙洞塘的水源组分主要为含水层内部存储的裂隙水,占总流量的 87.31%。老泉含水层内管道流产生的快速流占总流量的 43.90%,裂隙水占 56.10%。

(2)龙洞塘的单次降雨补给系数包含了 10^{-1} 和 10^{-2} 两个量级,而老泉的补给系数包含 10^{-1} 、 10^{-2} 和 10^{-3} 三个量级,老泉所在逆层坡的岩层富水性更弱和流域汇水面积更小造成了其对降水和其他环境因素的响应更为灵敏。

(3)老泉的调蓄能力很差,泉水动态与环境动态一致,夏季伏旱期出现断流,冬春季节完全随降水动态而变化。龙洞塘全年流量波动幅度相对较小,在伏旱期之后恢复能力较好,地下水系统的调蓄能力较强。

参考文献 (References):

- [1] 余梦,李阳兵,罗光杰.中国西南岩溶山地石漠化演变趋势[J].生态学报,2022,42(10):4267-4283. [YU Meng, LI Yangbing, LUO Guangjie. Evolution trend of rocky desertification in Karst mountainous areas of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4267-4283. (in Chinese)]
- [2] 王世杰,张信宝,白晓永.南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J].山地学报,2013,31(1):18-24. [WANG Shijie, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong. Discussion on nomenclature of the Karst desertification regions and illustration for their environment characteristics in Southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(1): 18-24. (in Chinese with English abstract)]
- [3] GAN Fengling, HE Binghui, QIN Ziyang, et al. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a Karst trough valley[J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125093.
- [4] 王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J].中国岩溶,2002,21(2):101-105. [WANG Shijie. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 常勇,吴吉春,姜光辉,等.峰丛洼地岩溶泉流量和水化学变化过程中地面径流的作用[J].水利学报,2012,43(9):1050-1057. [CHANG Yong, WU Jichun, JIANG Guanghui, et al. The impact of overland

- flow on the variation of discharge and hydrochemistry of Karst spring in peak cluster[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(9): 1050 – 1057. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘丽红. 岩溶槽谷流域地表降水径流过程模拟研究——以重庆青木关岩溶槽谷为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2011. [LIU Lihong. Simulation of surface precipitation runoff process in Karst valley watershed: A case study of qingmuguan Karst valley in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 党学亚, 张茂省. 晋西南峨嵋台塬的岩溶水系统及岩溶水资源潜力 [J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(4): 70 – 73. [DANG Xueya, ZHANG Maosheng. Karst water system and water resources potential in the Emei loess platform in southwestern Shanxi[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(4): 70 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [8] HARTMANN A, MUDARRA M, ANDREO B, et al. Modeling spatiotemporal impacts of hydroclimatic extremes on groundwater recharge at a Mediterranean Karst aquifer[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6507 – 6521.
- [9] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向 [J]. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 250 – 254. [QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng. A review on recent advances and perspective in epikarst water study[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(3): 250 – 254. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 罗明明. 南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研究——以香溪河岩溶流域为例 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2017. [LUO Mingming. Study on physical mechanism and mathematical model of Karst water circulation in South China: A case study of Xiangxi River Karst Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 尹德超, 罗明明, 周宏, 等. 鄂西岩溶槽谷区地下河系统水资源构成及其结构特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 13 – 18. [YIN Dechao, LUO Mingming, ZHOU Hong, et al. Water resources composition and structure characteristics of the underground river system in the Karst ridge-trough in the western Hubei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 13 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 常勇. 裂隙—管道二元结构的岩溶泉水文过程分析与模拟 [D]. 南京: 南京大学, 2015. [CHANG Yong. Analysis and simulation of Karst spring water process of fracture-pipeline binary structure[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [13] CHARLIER J B, BERTRAND C, MUDRY J. Conceptual hydrogeological model of flow and transport of dissolved organic carbon in a small Jura Karst system[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 460: 52 – 64.
- [14] 罗振宇. 武陵山龙潭岩溶槽谷坡面至小流域尺度的流量过程及碳通量研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2023. [LUO Zhenyu. Flow processes and carbon fluxes from the slope to the sub-watershed scale in Longtan karst trough valley, Wuling Mountains[D]. Chongqing: Southwest University, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 中华人民共和国水利部. 土石坝安全监测技术规范: SL 551—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical specification for earth-rockfill dam safety monitoring: SL 551—2012[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese)]
- [16] 他金城, 谭立新, 张宗孝. 黄池沟配水枢纽分水池侧槽退水道水力特性试验研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 141 – 145. [TA Jincheng, TAN Lixin, ZHANG Zongxiao. Experiments on the hydraulic characteristics of the side channel spillway of the water allocation pool in Huangchigou Water Distribution Hub[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(2): 141 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 徐玲君, 陈刚, 李国栋, 等. 薄壁堰泄流能力的数值模型计算及模拟自由水面的评价 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 225 – 230. [XU Lingjun, CHEN Gang, LI Guodong, et al. Numerical simulation about rectangle sharp-crested weir and evaluation of free-surface[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(1): 225 – 230. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李一鸣, 管光华, 陈琛, 等. 渠道糙率影响因素分析及预测模型研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(增刊 2): 155 – 161. [LI Yiming, GUAN Guanghua, CHEN Chen, et al. Analysis of influencing factors of channel roughness and research on prediction model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(Sup 2): 155 – 161. (in Chinese)]
- [19] 玛哈沙提·哈孜哈力, 努尔夏西·曼斯尔. 天然河道的糙率确定方法分析 [J]. *能源与节能*, 2017(4): 94 – 95. [Mahashati Hazihali, Nuerxiashi Mansier. Analysis of

- the methods for determining the roughness of natural river course[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2017(4): 94 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 罗振宇, 杨琰, 李计, 等. 石漠化治理区表层岩溶泉流量衰减分析及无机碳通量估算——以重庆酉阳龙潭槽谷老泉为例 [J]. *中国岩溶*, 2023, 42(2): 337 – 350. [LUO Zhenyu, YANG Yan, LI Ji, et al. Flow attenuation analysis and inorganic carbon flux estimation of surface Karst spring in rocky desertification control area: A case study at Laoquan spring in the Longtan trough valley, Youyang County, Chongqing City, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 337 – 350. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 黄宇航, 周晓泉, 周文桐, 等. 曼宁公式在粗糙壁面明渠流的适用性研究 [J]. *泥沙研究*, 2023, 48(3): 22 – 29. [HUANG Yuhang, ZHOU Xiaquan, ZHOU Wentong, et al. Study on the applicability of Manning formula to flow in rough wall open channel[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(3): 22 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 尹德超, 罗明明, 张亮, 等. 基于流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(3): 11 – 16. [YIN Dechao, LUO Mingming, ZHANG Liang, et al. Methods of calculating recharge coefficient of precipitation event based on spring recession analyses[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(3): 11 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 邹晓岗, 杨琰, 徐刚, 等. 岩溶槽谷石漠化治理区表层泉水化学特征研究: 以重庆酉阳泔溪花椒基地老泉为例 [J]. *地球与环境*, 2018, 46(6): 524 – 533. [ZOU Xiaogang, YANG Yan, XU Gang, et al. Chemical characteristics of surface spring in the rehabilitation area of Karst rock desertification: A case study at Laoquan in the pepper planting base of Ganxi Town, Youyang County, Chongqing City, China[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(6): 524 – 533. (in Chinese with English abstract)]
- [24] RUMPH FREDERIKSEN R, MOLINA-NAVARRO E. The importance of subsurface drainage on model performance and water balance in an agricultural catchment using SWAT and SWAT-MODFLOW[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107058.
- [25] NERANTZAKI S D, HRISTOPULOS D T, NIKOLAIDIS N P. Estimation of the uncertainty of hydrologic predictions in a karstic Mediterranean watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137131.
- [26] JAKADA H, CHEN Z H. An approach to runoff modelling in small Karst watersheds using the SWAT model[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(8): 318.
- [27] YAMINI PRIYA R, MANJULA R. A review for comparing SWAT and SWAT coupled models and its applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 7190 – 7194.
- [28] 罗明明, 陈植华, 周宏, 等. 岩溶流域地下水调蓄资源量评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 14 – 20. [LUO Mingming, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, et al. Assessment of regulating groundwater resources in Karst watersheds[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 14 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 张亮, 陈植华, 周宏, 等. 典型岩溶泉水文地质条件的调查与分析——以香溪河流域白龙泉为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(2): 31 – 37. [ZHANG Liang, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, et al. Investigation and analysis of the hydrogeological characteristics of the typical Karst spring in the Xiangxi River Basin: Exemplified by the Bailong spring in Xingshan County of Hubei[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(2): 31 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 罗明明, 尹德超, 张亮, 等. 南方岩溶含水系统结构识别方法初探 [J]. *中国岩溶*, 2015, 34(6): 543 – 550. [LUO Mingming, YIN Dechao, ZHANG Liang, et al. Identifying methods of Karst aquifer system structure in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6): 543 – 550. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 刘波, 刘玉冰, 黎春蕾, 等. 重庆市伏秋旱时空演变特征及其影响因素分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(5): 1077 – 1085. [LIU Bo, LIU Yubing, LI Chunlei, et al. Characteristics of spatial and temporal evolution of drought in Chongqing and its influencing factors[J]. *Yangtze River Basin Resources and Environment*, 2022, 31(5): 1077 – 1085. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 韩世刚. 重庆市高温伏旱气候特征及其预报方案研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [HAN Shigang. Research on the climatic characteristics of high temperature drought and its forecasting program in Chongqing [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳