

贵州深切峡谷区典型岩溶地下河水文水化学特征

陈旺光, 曾 成, 龚效宇, 邵治钦, 邓俊祖, 杨明星

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

CHEN Wangguang, ZENG Cheng, GONG Xiaoyu, TAI Zhiqin, DENG Junzu, and YANG Mingxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江干流水化学成因与风化过程CO₂消耗通量解析

Hydrochemical origins and weathering-controlled CO₂ consumption rates in the mainstream of the Yangtze River

张鸿, 周权平, 姜月华, 金阳, 杨国强, 顾轩, 梅世嘉, 王晓龙 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 30–40

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

湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算

Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe River Basin of western Hunan

霍俊伊, 于, 张清华, 李亮 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 64–72

左江中游岩溶峰林区河流交互带水化学特征与控制因素

Hydrochemical characteristics and control factors of karst hyporheic zones in the karst peak forest region of the middle reaches of the Zuo River

黄奇波, 覃小群, 程瑞瑞, 李腾芳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 1–8

京津冀水源涵养区水化学环境分析——以承德市兴隆县为例

Hydrochemical environment in a typical conservation area in the Beijing–Tianjin–Hebei region: A case study in Xinglong County of Chengde

鲁重生, 刘文波, 李志明, 武雄, 康伟, 任玉祥 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 132–141

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18–26



DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109047

陈旺光, 曾成, 龚效宇, 等. 贵州深切峡谷区典型岩溶地下河水文水化学特征——以贵州三塘地下河为例[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 19-29.

CHEN Wangguang, ZENG Cheng, GONG Xiaoyu, *et al.* Hydrological and hydrochemical regime of a typical subterranean river in a deep canyon karst area: A case study in the Santang underground river, Guizhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 19-29.

贵州深切峡谷区典型岩溶地下河水文水化学特征 ——以贵州三塘地下河为例

陈旺光^{1,2}, 曾 成¹, 龚效宇¹, 邵治钦³, 邓俊祖⁴, 杨明星⁵

(1. 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, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001; 4. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 江西南昌 330013; 5. 贵州理工学院资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 黔中水利枢纽水源工程——平寨水库位于贵州高原三岔河深切峡谷型岩溶区, 是保障黔中地区水资源安全的重要水利基础设施。文章采用水文水化学自动监测技术, 对前期水文地质基础研究较为薄弱的平寨水库区间流域内的重要支流——三塘地下河系统的水文水化学变化规律进行了研究, 在此基础上探讨了深切峡谷型岩溶地下河系统的岩溶发育规律及管道模式。研究表明, 该地下河系统水化学动态主要受覆被 CO₂ 效应、有效降雨稀释效应和径流-排泄通道开放效应三者的控制。在不同时间尺度和大气降水条件下, 水化学动态的总体变化特征不同, 起主导作用的效应也有所不同。水温在年尺度上呈夏季高冬季低的变化规律, 日尺度上呈昼高夜低的变化规律。电导率和水中的 CO₂ 分压的动态变化, 年尺度下, 在覆被 CO₂ 效应与稀释效应的共同作用下总体呈现平水期较高丰水期较低; 月尺度下, 降雨初期可见明显的覆被 CO₂ 效应, 降雨后则为有效降雨的稀释效应主控; 在旱季无雨条件下的日尺度上, 可见由径流-排泄通道的开放效应造成的水化学日动态。径流-排泄通道开放效应的识别, 可为今后在岩溶水系统模型化研究中判断岩溶管道的承压状态提供水化学方面的依据。本研究对今后该区开展地表与地下水库联合调度、水资源合理利用研究提供了一定的水文地质基础。

关键词: 峡谷型岩溶; 地下河系统; 水文水化学动态; 稀释效应; CO₂ 效应; 开放性效应

中图分类号: P641.134

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0019-11

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

CHEN Wangguang^{1,2}, ZENG Cheng¹, GONG Xiaoyu¹, TAI Zhiqin³, DENG Junzu⁴, YANG Mingxing⁵

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Karst Science, Guizhou Normal University/State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China; 4. School of Water Resources & Environmental Engineering, East China

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2021-11-05

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1612441)

第一作者: 陈旺光(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: 17785942613@163.com

通讯作者: 曾成(1979-), 男, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: zcchampion@qq.com

University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 5. School of Resources & Environmental Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract: The Pingzhai Reservoir, a water source project of the Central Guizhou Province hydro-junction project, is located in the deep canyon karst area of the Sancha river in the Guizhou Plateau. It is an important water conservancy infrastructure to ensure the safety of water resources in central Guizhou. In this paper, the hydrological and hydrochemical automatic monitoring technology is used to study the hydrological and hydrochemical regime of the Santang underground river system, an important tributary in the interval basin of the Pingzhai Reservoir, which lacks the early basic research of hydrogeology. On this basis, the karst development and conduit model of the deep canyon karst subterranean river system are preliminarily discussed. The results show that the hydrochemical regimes are mainly controlled by the cover CO_2 effect, effective rainfall dilution effect and opening effect of runoff-discharge channels. In different time scales and atmospheric precipitation conditions, the variation characteristics of hydrochemical regime are different, and the corresponding dominant effect is also different. The annual variation of water temperature is high in summer and low in winter, and the daily variation is high in day and low at night. The annual variations of electrical conductivity and partial pressure of CO_2 of the groundwater is high in normal-water level period and low in high-water level period because of the combined effects of land cover CO_2 and rainfall dilution. On the monthly scale, the cover CO_2 effect can be observed during the initial stage of rainfall, but after rainfall the dilution effect control the variation of electrical conductivity and P_{CO_2} . On the daily scale in the dry season, the daily hydrochemical regime controlled by the opening effect of the runoff-discharge channels can be observed. The identified opening effect of the runoff-discharge channels can provide a hydrochemical basis for judging the pressure state of karst conduit in the modeling study of the karst water system. This study provides a hydrogeological basis for the joint scheduling of surface and underground reservoirs and the reasonable utilization of water resources in this area in the future.

Keywords: canyon karst; subterranean river; hydrological and hydrochemical regime; dilution effect; CO_2 effect; opening effect

黔中水利枢纽是贵州省首个大型跨流域调水工程,是保障以贵阳和安顺为中心的黔中地区水资源安全的重要水利基础设施。其水源工程——平寨水库的区间流域面积占坝址以上总集雨面积的 1/4,区内深切峡谷型岩溶极为发育^[1]。然而,由于本区水文地质调查及研究程度总体上较低,基础性岩溶水文地质资料缺乏,因此造成水库运营后的调洪演算模型误差较大,进而影响地表与地下水资源的联合调度、科学管理及合理利用。为此,有针对性地开展了平寨水库区间流域深切峡谷型岩溶发育规律的研究工作。

化学场、温度场、同位素场和渗流场“四场”分析是岩溶水文地质研究方法的重要组成部分。其中,水文水化学自动监测技术的出现大大推动了岩溶水系统化学、温度场论研究的进一步发展,并使岩溶含水介质结构及岩溶水赋存特征的水化学解释工作更具合理性^[2-3]。2000 年以后,利用水文水化学自动监测

技术对岩溶槽谷^[4-5]、断陷盆地^[6]、峰丛洼地^[7-9]和岩溶高原^[10]等主要岩溶类型区典型地下水系统的化学动态研究取得了一系列有价值的新认识。然而,这些研究虽然在一定程度上丰富了对中国南方岩溶水系统水文水化学动态特征的认识,但是在岩溶含水介质结构的水化学解释方面仍略显不足。

贵州省是中国西南岩溶区的核心,其岩溶地貌的突出特点是晚近期峡谷切割贵州岩溶高原面,形成特殊的深切峡谷型岩溶,该岩溶类型区内的含水介质结构与水循环特征有其特殊性。然而,深切峡谷型岩溶区地下水系统的水化学动态与含水介质结构关系研究却罕见相关报道。这对于乌江梯级水电开发,多座大中型水库的科学管理与运营是不利的。鉴于此,对典型峡谷型岩溶水系统开展相关的水文地质研究具有重要意义。

本文选择贵州织金三塘地下河系统作为深切峡

谷型岩溶水系统的典型进行研究。该地下河系统具有一定的研究基础,因其汇水范围内分布有煤系地层,在煤炭资源的勘探开发过程中,有关含煤岩系的分布及煤层赋存规律^[11]、三塘向斜北西翼的矿床水文地质条件^[12]、向斜单翼地下水顺层径流模式^[13]等的地质认识较为清晰;岩溶水文地质研究表明三塘地下河系统内不同地貌单元的相对起伏度与岩溶含水介质结构之间存在一定的数量关系^[14-16]。然而,三塘地下河系统的水文水化学动态与含水介质结构特征的相关研究依然不足。为此,本文在该地下河系统开展了相关研究,以期对峡谷型岩溶地下河系统的水文水化学动态规律研究积累数据,并深化其水文地质条件与岩溶模式的认识。

1 研究区概况

黔中水利枢纽的水源工程——平寨水库位于乌江南源三岔河中上游,地表库容达 $10.89 \times 10^8 \text{ m}^3$,属大型水库。水库区间流域(即地表水库达到正常蓄水位后从坝址到干流回水末端之间的流域)受乌江干支流的溯源下切,区内峡谷地貌发育,为典型的深切峡谷型岩溶区(图1)。三塘地下河是该水库区间流域内的一条重要支流,集水面积 160.39 km^2 ,位于毕节市织金县三塘镇境内,属湿润亚热带季风气候,雨热同期,年平均气温 14.46°C ,多年平均降雨量 1277 mm ,丰水期为6—10月,枯水期为11月至次年2月。2018—2020年实测资料显示三塘地下河最大流量为 $14.65 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

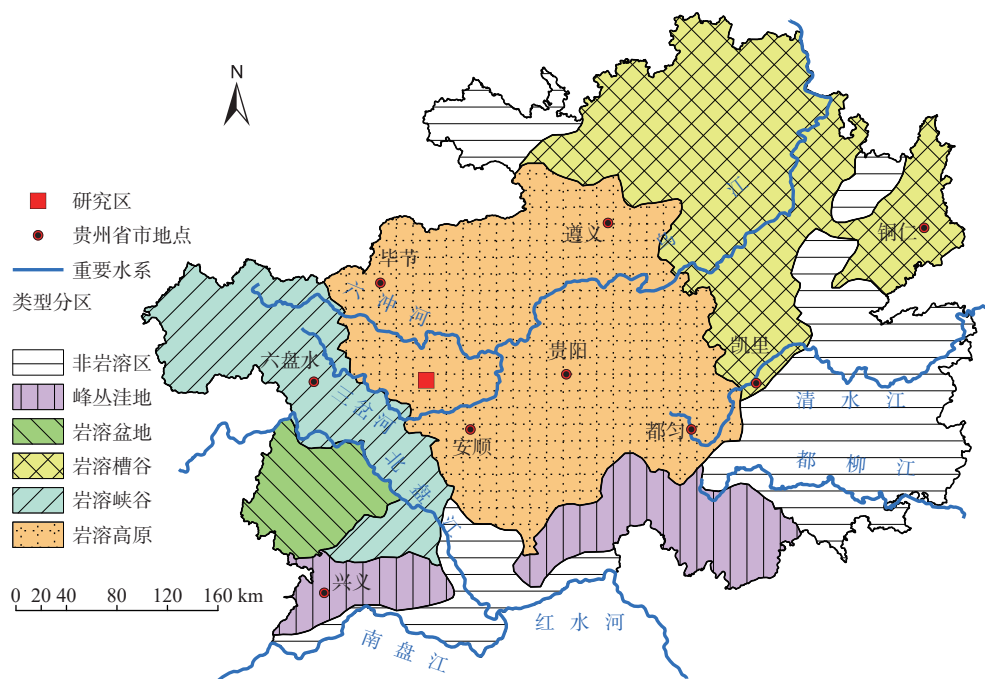


图1 研究区地理位置(据文献[16]综合改编)

Fig.1 Location map of the study area (modified from Ref. [16])

三塘地下河系统处于黔中—黔西南岩溶峰林主体地貌类型区^[15],因受三岔河支流溯源侵蚀影响,多期岩溶地貌发育,岩溶地貌组合形态有峰丛—洼地、残丘波地—岩溶盆地及岩溶峡谷等。该地下河系统由沿北东 60° 发育的三塘向斜蓄水构造主控,自核部至两翼地层依次出露三叠系下统永宁镇组石灰岩、夜郎组泥岩与砂岩;二叠系乐平统长兴大隆组砂岩、泥岩、粉质泥岩;龙潭组泥质砂岩和煤系地层;仅在地下河出口处出露少量三叠系中统关岭组薄层灰岩(图2)。流域内地层中发育少量石膏夹层。

三塘地下河主要受大气降水、向斜盆地周边地表

径流补给。地下河干流大致沿NEE向延伸的向斜轴部发育,向斜北东翼三叠系下统夜郎组泥灰岩与泥岩互层出露区多发育树枝状地表水系。地下水由北、东、南三面向位于向斜轴部的岩溶盆地侧向汇流后,沿地下河干流大体自东向西径流,最终在落处村以分散泄流的形式排泄(图2)。

2 研究方法

2.1 水文水化学自动监测

水文水化学自动监测仪由Campbell公司的数据采集器组装而成,集成有压力计、雨量筒、温度计、pH值

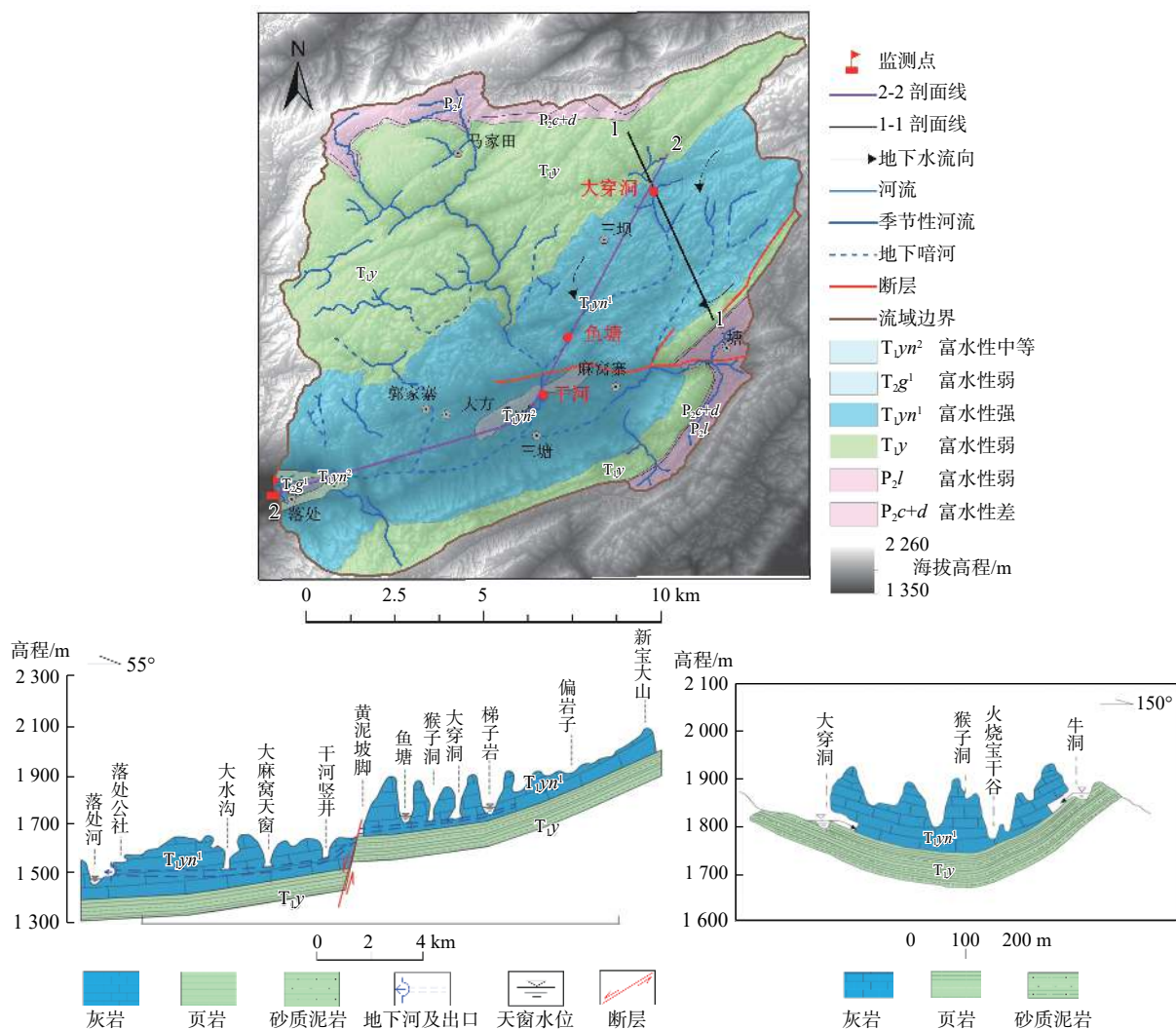


图 2 三塘地下河水文地质简图 (据文献 [17] 修改)

Fig. 2 Hydrogeological sketch map of the Santang subterranean river (modified from Ref. [17])

和电导率探头,可分别自动记录相对水位(H)、降雨量(P)、水温(T)、pH值和电导率(EC)参数。测量精度值分别为0.2 cm、0.2 mm、0.01 °C、0.01和0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$,其中电导率自动补偿至25 °C水温时的值。自动监测仪放置于三塘地下河分散式排泄出口下游能测量总流量的断面处,监测时段为2018年4月—2020年9月,岩溶水文水化学动态数据的采集时间间隔为30 min。

2.2 流量测算

地下河流量由LS45A型流速仪测算,并建立水位流量关系,用以将相对水位的自动记录值换算为高时间分辨率的流量数据。

2.3 水样采集与测试分析

水样按月采集,其中雨水样品以捕捉到的单场降雨为单位,每场降雨结束后采集。采用聚四氟乙烯采样瓶(60 mL)在野外现场采集雨水与地下河水化学样

品,装样前先用水样将采样瓶润洗3次,然后将采样瓶装满水样,盖上瓶盖的时候瓶内尽量不留气体。用于测试阳离子的水样将在现场滴入浓硝酸并调节水样的pH值小于2,再密封保存。测试水样和雨水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的样品在现场用封口膜对瓶盖及瓶身做缠绕密封处理。所有样品分类放置于4 °C冷藏室保存。室内测试指标主要有 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 及 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$,由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测试分析。

为防止岩溶水中钙离子(Ca^{2+})和碳酸氢根离子(HCO_3^-)发生变化,2018年4月—2019年4月在每月底进行一次野外巡测,使用Merck公司的便携式钙离子和碱度滴定盒分别对 Ca^{2+} 的质量浓度和 HCO_3^- 的物质的量浓度进行现场滴定,精度分别为4 mg/L、0.1 mmol/L。

2.4 水化学连续监测数据的计算

利用以时间序列采集水样的物理化学分析数据建立 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的物质的量浓度与 EC 的线性相关关系: $m_{\text{Ca}^{2+}} = (0.067\ 1EC + 32.236)/40$, $R^2=0.62$; $m_{\text{HCO}_3^-} = 0.004\ EC + 0.745$, $R^2=0.81$ 以及巡测样品的阴阳离子测试结果平均值(表 1), 利用 PHREEQC 软件^[7] 批量计算出自动监测过程中各时刻对应的水中二氧化碳分压(P_{CO_2})和

方解石饱和指数(SI_C):

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{K_1 K_{\text{CO}_2}}$$

式中: K_1 —— HCO_3^- 的平衡常数;
 K_{CO_2} —— CO_2 的平衡常数;
 $[\text{HCO}_3^-]$ —— HCO_3^- 离子的摩尔活度;
 $[\text{H}^+]$ —— H^+ 离子的摩尔活度。

表 1 样品主要离子浓度平均值

Table 1 Average concentrations of the main ions in the water samples

样品	pH	$EC/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\text{K}^+/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Na}^+/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Cl}^-/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{HCO}_3^-/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
地下水	7.94	322.92	1.68	43.21	7.84	3.58	39.72	2.47	126.27
雨水		12.16	0.12	2.58	0.11	0.03	0.93	0.15	<1.20

$$SI_C = \lg \left(\frac{[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]}{K_C} \right)$$

式中: K_C ——方解石平衡常数
 $[\text{Ca}^{2+}]$ 、 $[\text{CO}_3^{2-}]$ —— Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 离子的摩尔活度。
当 $SI_C=0$ 时, 溶液中方解石达到平衡状态; $SI_C>0$ 时, 溶液中方解石达到饱和状态; $SI_C<0$ 时, 溶液中方解石未饱和, 还可以继续溶解更多的方解石。

3 结果分析及讨论

3.1 水化学特征分析

3.1.1 氢氧稳定同位素特征

图 3 为三塘地下河系统出口处岩溶水与当地大气降水的氢氧稳定同位素曲线图。当地大气降水线(LMWL)的方程为 $\delta D=8.18\delta^{18}\text{O}+9.21$; 地下水样品的 δD 分布范围为 $-70\text{‰} \sim -60\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为 $-10\text{‰} \sim -8\text{‰}$ 。地下水样品的氢氧稳定同位素值基本上分布

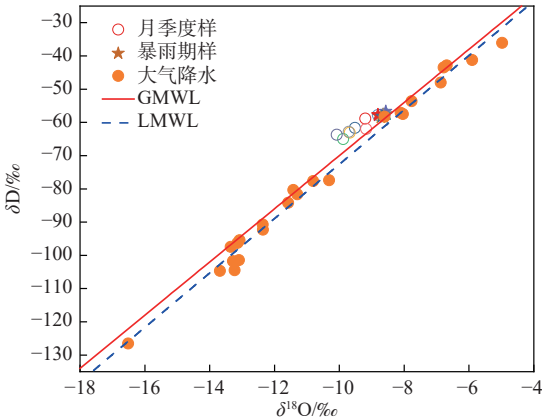


图 3 三塘地下河水与当地大气降水的氢氧稳定同位素关系
Fig. 3 Relationship between stable hydrogen and oxygen isotopes in the Santang groundwater and local atmospheric precipitation

于全球大气降水线^[18]: GMWL, $\delta D=8\delta^{18}\text{O}+10$ 和当地大气降水线附近, 这也表明三塘地下河系统的地下水主要受大气降水补给, 为山区雨源型的地下河系统。

3.1.2 主要化学组分特征

三塘地下河出口处地下水中的主要离子为 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} , 其质量浓度范围分别为 $32.68 \sim 59.62\text{ mg/L}$ 、 $97.6 \sim 158.6\text{ mg/L}$ 、 $24.16 \sim 62.06\text{ mg/L}$ (图 4)。

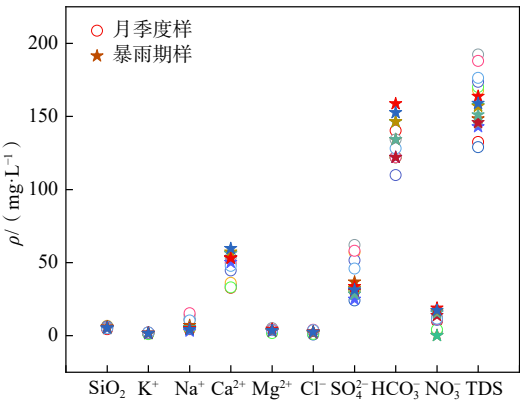


图 4 研究区地下水主要离子质量浓度分布
Fig. 4 Mass concentration distribution of the major ions in groundwater in the study area

Piper 三线图可以直观反映地下水化学特征、类型和主导的岩石风化端元。为此, 将三塘地下河水的主要化学组分数据绘制于 Piper 三线图中。由图 5 可见, 在不同时间采集的地下河水主要化学组分的数据点相对集中地分布于菱形左侧的钝角顶点偏右上附近, 提示碳酸盐硬度超过了 50%, 河水中阳离子以 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 其次是 SO_4^{2-} , 水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Ca}$ 型水。

暴雨(BY)期间高频率采集的水样与按月巡测

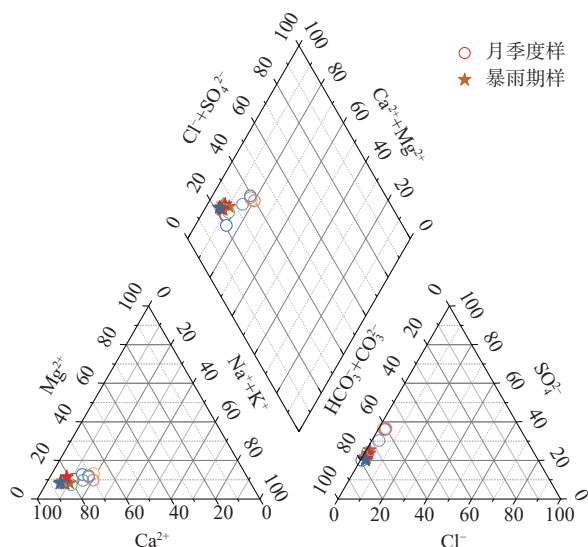


图5 研究区 piper 图

Fig. 5 Piper diagram of the water samples in the study area

(ST)采水样相比,水中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子有所增加, Ca^{2+} 由占阳离子毫克当量总数的70%增至80%, HCO_3^- 由占阴离子毫克当量总数的60%增加至80%, SO_4^{2-} 由

占阴离子毫克当量总数的40%减少至20%。这一变化受控于气相、液相和固相碳酸盐反应体系,即三塘地下河系统发育于碳酸盐岩地层中,雨热同期的气候使得在夏季暴雨期间的大气降水在下渗补给过程中吸收了浓度较高的土壤和枯落物中的 CO_2 ,通过 $\text{CaCO}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 反应体系使地下水中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子相比冬季枯水期有所提高。 SO_4^{2-} 离子浓度在暴雨期间有所降低主要是由暴雨的稀释效应造成。

三塘地下河中的 SO_4^{2-} 离子来源可根据 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 的毫克当量比值进行判断。当 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-=1$ 时,水化学组分主要为碳酸盐岩溶解控制;当 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})=1$ 时,水化学组分主要由碳酸盐岩与石膏溶解共同控制^[19]。由图6可以看出,三塘地下河水的各数据点落在 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 和 HCO_3^- 毫克当量浓度比 $y=x$ 直线的上方,表明地下水化学组分不单由碳酸盐岩溶解作用主导,水点几乎落在 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 和 $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 毫克当量浓度比1:1线上。表明研究区地下水主控离子主要来源为碳酸盐岩与石膏溶解。

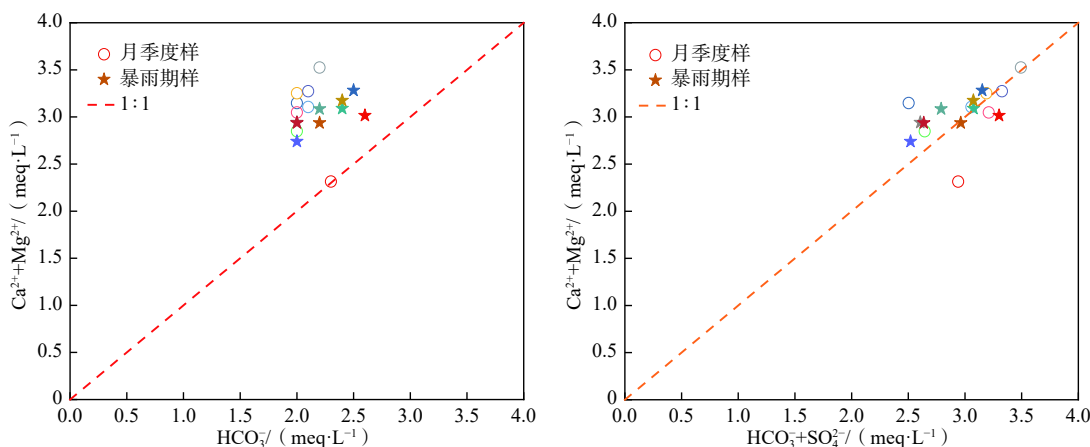


图6 研究区主要离子毫克当量浓度关系

Fig. 6 Equivalent concentration relationship of the major ions in the study area

3.2 水文水化学动态特征分析

以流量、温度、电导率、pH值、二氧化碳分压和方解石饱和指数作为监测指标,从年、月、日3种时间尺度对三塘地下河出口岩溶水的动态进行分析。

3.2.1 年尺度

受湿润亚热带季风气候年变化的影响,三塘地下河的水文水化学动态呈现较为明显的年周期变化特点(图7)。雨热同期的气候使得流量和水温显示夏秋雨季高、冬春旱季低的特征。流量对降水响应迅速,

陡涨陡落的峰值明显。水温呈现长周期变化模式,变幅仅为 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。电导率不但受流域内地表覆被 CO_2 效应和稀释效应的控制,而且受到地层岩性的控制。由于三塘地下河流域内广泛分布的三叠系碳酸盐岩地层中多夹有膏盐层。在枯水期时,当地层中分布的膏盐遇水发生两相溶解时,随水-岩相互作用时间的延长,水中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度不断升高;丰水期电导率的降低主要是因为稀释效应,即降雨对膏盐溶滤产物 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子的稀释部分抵消了由地表覆被 CO_2 效应

导致的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度的增加效应, 最终综合表现为地下水中特征性离子浓度降低。

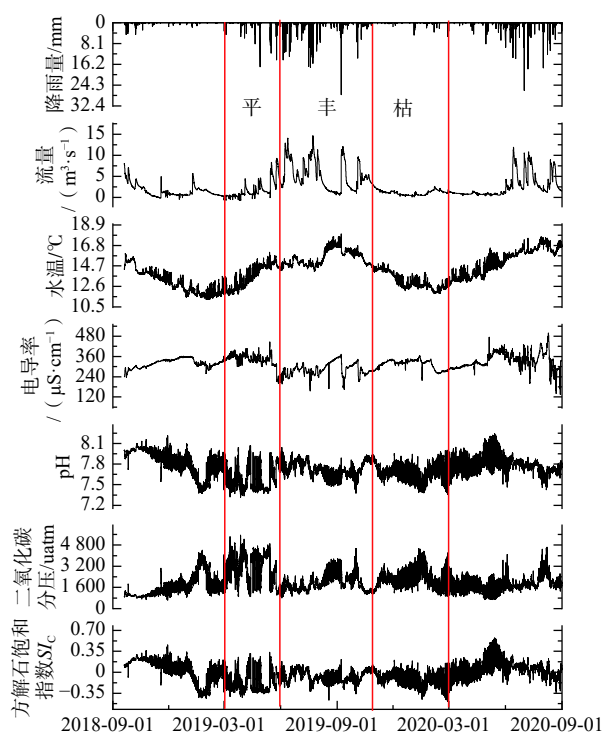


图7 年尺度三塘地下河出口的水文水化学动态

Fig. 7 Hydrological and hydrochemical regime at the outlet of the Santang subterranean river on the annual time scale

P_{CO_2} 呈现 3—5 月平水期较高、6—10 月丰水期较低、11 月至次年 2 月枯水期居中的整体趋势(图 7)。pH 值和 SI_c 的变化趋势正好与之相反。在平水期, P_{CO_2} 的波动显著, 变化幅度较大, 显示次降雨事件虽然能在一定程度上造成稀释现象, 但是不足以压制地表覆被的 CO_2 效应。然而在丰水期, P_{CO_2} 的波动幅度变小, 且整体降低, 表明当降雨的强度与频度都增加时, 尽管气温上升导致覆被 CO_2 效应增加, 但效果被雨水的稀释效应显著削弱。总的来说, 在年尺度上覆被 CO_2 效应和降雨稀释效应控制着丰、平、枯三期的 P_{CO_2} 变化规律。

3.2.2 月尺度

本文选取 2020 年 5 月和 6 月作为三塘地下河系统水文水化学月动态的分析时段(图 8), 并且这一时段正好为平水期与丰水期的过渡阶段, 具有较为显著的水文地质意义。

2020 年 5 月期间由于以无效降雨为主, 因此流量无明显变化。水温、pH 值、 P_{CO_2} 和 SI_c 呈显著的日周期变化。电导率的均值为 $377 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。总体呈现缓慢上升的趋势, 并且基本上没有明显的峰值变化。其主

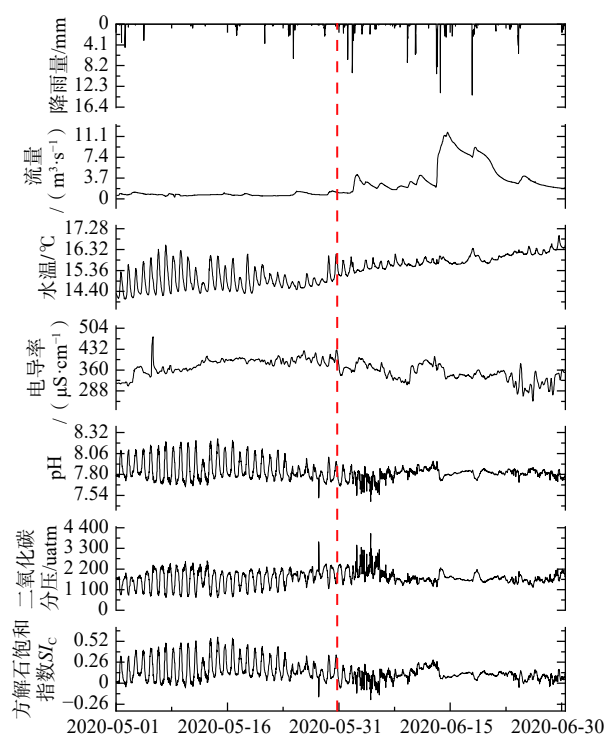


图8 月尺度三塘地下河出口的水文水化学动态

Fig. 8 Hydrological and hydrochemical regime at the outlet of the Santang subterranean river on the monthly time scale

要原因是天气逐渐转暖, 地表覆被的 CO_2 浓度逐渐升高, 并且缺乏有效降雨所致的稀释效应, 因此岩溶系统中的覆被 CO_2 效应强于稀释效应, 最终三塘地下河水的电导率出现上升趋势。

2020 年 6 月正式进入汛期, 暴雨事件频发, 流量波动显著。受降雨的影响, 水温、pH 值、 P_{CO_2} 和 SI_c 指标的昼夜变化规律消失。相对于 5 月, 电导率有所降低, 其均值为 $346 \mu\text{S}/\text{cm}$, 并且电导率总体上逐渐降低, 这主要是因为丰水期更强的稀释作用。在电导率曲线变化的细节上, 常出现降雨后电导率先升高后降低, 其原因是在降雨事件发生的初期, 大气降水快速转入岩溶管道系统, 然后将下游岩溶管道、溶蚀裂隙中的老水推出岩溶地下河系统, 导致电导率先暂时升高, 之后, 大气降水的稀释效应占主导作用, 地下河出口的电导率降低。丰水期强烈的稀释效应和覆被 CO_2 效应交替影响着电导率的变化。

3.2.3 日尺度

以没有降雨事件发生的 2018 年 12 月 26—30 日作为三塘地下河系统的水文水化学日动态分析期(图 9)。由于在此期间之前的一段时间没有发生降雨事件, 地下河出口流量处于自然衰减状态, 因此以这一时段作为三塘地下河系统的日动态分析期较为理想。

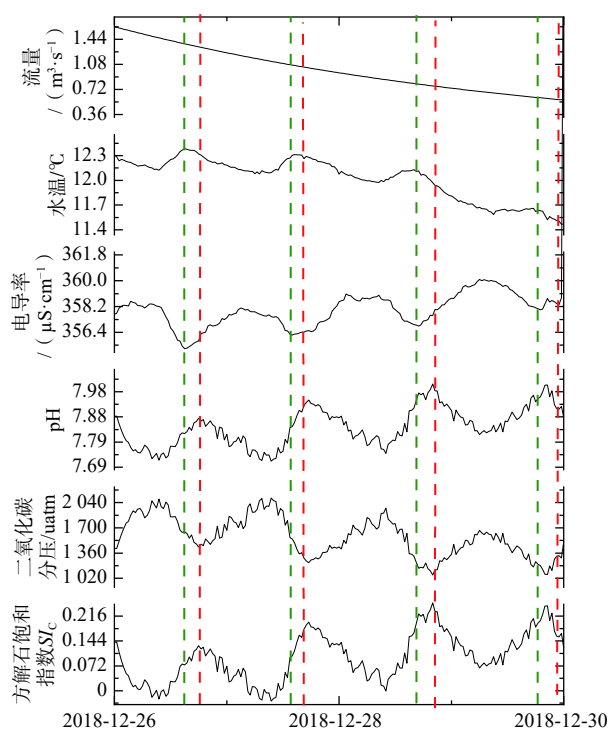


图9 无雨条件日尺度上的三塘地下河出口水文水化学动态
Fig. 9 Hydrological and hydrochemical regime at the outlet of the Santang subterranean river on the daily time scale without rainfall

注: 图中红色虚线标识方解石饱和指数在一天中达到极大值的时刻刚好与二氧化碳分压极小值和 pH 极大值相对应; 绿色虚线标识水温在一天中的极大值出现的时刻。

由图9可见在短时间尺度下, 地下河水的电导率和 P_{CO_2} 表现出昼低夜高的日周期性变化特点, 并且电导率和 P_{CO_2} 的峰值滞后于水温峰值约 12 h。在冬季, 由于气温总体偏低, 由环境气象要素的日周期变化导致的覆被 CO_2 效应较弱。考虑到水温的极大值点和电导率与 P_{CO_2} 的极小值点的相位差较小, 可知在旱季时三塘地下河出口的水化学动态主要由径流—排泄通道的开放效应控制。

3.3 讨论

水化学特征分析结果表明该岩溶地下河系统为雨源型地下河系统。流量具有显著的季节性变化特点, 对有效降雨事件的响应敏感, 并且变幅极大, 显示出具有中国南方岩溶区域水流系统补给区的共性特征。

从年、月、日 3 种时间尺度上分析三塘地下河出口的水文水化学动态, 结果表明该岩溶地下河系统的水化学动态不但受覆被 CO_2 效应和有效降雨稀释效应的控制, 而且还受到径流—排泄通道开放效应的制约。 P_{CO_2} 呈现平水期较高、丰水期较低的相对变化, 该特征表明土壤 CO_2 效应控制着地下河系统年尺度

的水化学变化规律。在月时间尺度上, 土壤 CO_2 效应使水中 P_{CO_2} 与电导率 2 个指标在平水期要高于以雨水稀释效应为主的丰水期。在枯水期, 日尺度上, 水温、电导率、pH 值、 P_{CO_2} 和 SI_c 指标都表现出显著的正弦式日动态变化, 各曲线极值点间的相位差强烈提示该地下河系统的水化学动态受到径流—排泄通道开放效应的影响。

由水文地质测绘发现三塘地下河不为集中排泄, 并没有明显的暗河出口, 地下水以泄流的方式在山前崩积物中分散排泄, 逐渐汇流成下游地表河。该地下河系统内的排泄区不但发育有深切峡谷状的地表明河, 而且在排泄主通道上多发育有直接与外界环境相连的岩溶井等岩溶形态, 并且在流域的中上游也发育有地表河(图2)。因此, 三塘地下河属于地表与地下水系相互转化密切型的岩溶地下河系统, 其径流与排泄通道的环境开放性较强。

与岩溶溪流和钙华池因水生生物活动和环境温度所致的水化学日动态^[20-21]不同, 传统意义上的岩溶水化学日动态指的是由覆被 CO_2 浓度的日周期变化驱动的, 多发生于表层岩溶泉^[22], 其显著特点是在平水期泉水的 P_{CO_2} 、电导率的曲线变化形态和气温(或水温)的曲线相似, 并且仅有极小的相位差。枯水期的三塘地下河, P_{CO_2} 和电导率日动态变化曲线与水温曲线的相位差可达 12 h。结合该地下河系统较好的径流与排泄通道的环境开放性, 可以推知其在旱季的水化学动态变化受覆被 CO_2 效应的控制较弱, 受径流—排泄通道开放效应的控制较强。

在以往研究中, 有关岩溶地下河出口水化学昼夜动态变化的报道较为零星, 仅见章程等^[23]在广西融水县大良镇官村地下河出口及其下游河段于丰水期 8 月开展的岩溶水生物地球化学过程研究, 高分辨率的水文地球化学监测显示地下河出口岩溶水的温度、pH 值和溶解氧指标几乎不变, 然而该研究侧重于地下河出口下游的地表河中的生物地球化学过程, 并未对岩溶地下河本身的水文地质条件及不同季节的水化学动态展开研究与讨论。此外, 大部分有关岩溶地下河系统的高分辨率水文水化学自动监测研究多集中于暴雨期的水化学动态分析^[4,24-25], 并未对平水期和枯水期水化学日动态的岩溶水文地质意义进行剖析。

此外, 前人曾通过微分方程数学推导^[26-28]、室内物理模型模拟及数值计算等方法^[29]发现岩溶多介质内部的结构差异会影响岩溶泉流量的衰减速率, 进一步深化了最早由前南斯拉夫提出的有关岩溶含水

介质结构与流量衰减系数之间存在一定数量关系的认识^[30]。已有研究表明,三塘地下河系统受三岔河深切峡谷溯源侵蚀的影响,不同岩溶地貌单元内的地面起伏度差异明显,由流量衰减分析可将地下河系统的含水介质结构分为3个级次,其中管道型和溶蚀裂缝型的蓄水空间约占40%,与流域内高起伏度的峰丛-洼地组合地貌的分布面积比例相近,提示岩溶地貌与含水介质结构之间具有一定的数量关系,并且该地下河系统第一亚动态溶洞水的占比达9.4%^[14],明显高于相对起伏度较低的黔中溶丘高原的普定后寨河(3.0%)^[31-32]、湘南-桂北岩溶丘陵区的石期河(4.5%)与鄂西香溪河雾龙洞(4.8%)^[33-34]等地下河系统的值。其原因是受深切峡谷支流溯源侵蚀的影响,三塘地下河系统发生岩溶地貌回春,排泄区内的水力坡度反常增大,原有的溶洞规模被扩大,并产生大量的洞穴顶板垮塌,径流一排泄区的开放性提高,最终造成流量衰减系数和水化学日动态与其它类型岩溶水系统的差异。由此可见,径流一排泄通道开放效应的识别,可为日后在岩溶水系统模型化研究中判断岩溶管道的承压状态提供水化学方面的依据。

4 结论

(1) 氢氧稳定同位素指标显示三塘地下河系统以大气降水补给为主,属于典型的中国南方雨源型地下河系统。

(2) 三塘地下河水中的溶解性总固体变化范围为130~200 mg/L,属低矿化度岩溶水。受地下河流域内三叠系夹膏盐碳酸盐岩地层岩性的控制,水中的主要离子为 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} ,分别占阳离子和阴离子毫克当量总数的70%~80%、60%~80%和20%~40%,属 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Ca}$ 型水。

(3) 三塘地下河的水化学动态主要受流域覆被 CO_2 效应、有效降雨稀释效应和径流一排泄通道开放性效应三者的控制。在不同的时间尺度上和大气降水条件下,水化学动态的总体变化特征有明显差异,并且起主控作用的效应也有所不同。水温在年尺度上呈夏季高和冬季低的变化规律,日尺度上呈昼高夜低的变化规律。电导率和水中 CO_2 分压的动态变化规律为在覆被 CO_2 效应与稀释效应的共同作用下,总体上呈现平水期较高丰水期较低的年变化规律;月尺度下,降雨初期可见明显的覆被 CO_2 效应,降雨后则为有效降雨的稀释效应主控;在旱季无雨条件下的日尺度上,由径流一排泄通道的开放效应主控。

(4) 结合已有流量衰减分析的结果,枯水期的水化学日动态特征可以在一定程度上反映岩溶含水介质的结构特征。径流一排泄通道开放效应的识别,可为今后在岩溶水系统模型化研究中判断岩溶管道的承压状态提供水化学方面的依据。

参考文献 (References) :

- [1] 何春,曾永军,曾成,等. 乌江上游深切峡谷区平寨水库伴生的岩溶地下水库库容计算[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(4): 478 - 483. [HE Chun, ZENG Yongjun, ZENG Cheng, et al. Reservoir capacity calculation of Karst underground reservoir associated with pingzhai reservoir in deep canyon area of upper reaches of Wujiang River[J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(4): 478 - 483. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 段水云,吴慧芳. 用地下水化学动力学方法计算出的水文地质参数来定量评价水文地质条件:以太原三给地垒及周围地区为例[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(5): 62 - 65. [DUAN Shuiyun, WU Huifang. Hydrogeological conditions evaluation using parameters from chemical kinetic of groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(5): 62 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [3] SHUSTER E T, WHITE W B. Seasonal fluctuations in the chemistry of lime-stone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers[J]. Journal of Hydrology, 1971, 14(2): 93 - 128.
- [4] 苟鹏飞,蒋勇军,扈志勇,等. 典型岩溶地下河系统暴雨条件下水文水化学动态变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 20 - 25. [GOU Pengfei, JIANG Yongjun, HU Zhiyong, et al. A study of the variations in hydrology and hydrochemistry under the condition of a storm in a typical karst subterranean stream[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 20 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 蒲俊兵,袁道先,蒋勇军,等. 重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 628 - 636. [PU Junbing, YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, et al. Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean Karst streams in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 628 - 636. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 赵一,李衍青,李军,等. 滇东断陷盆地南洞岩溶地下水系统地下河水文动态特征与资源量评价[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 324 - 332. [ZHAO Yi, LI Yanqing,

- LI Jun, et al. Underground river hydrological dynamic characteristics and resource evaluation of the Nandong Karst water system in east Yunnan Faulted Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 324 – 332. (in Chinese with English abstract)]
- [7] LIU Z, LI Q, SUN H, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO₂ and dilution effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(1/2): 207 – 223.
- [8] 曾成. 湿亚热带岩溶系统水文水化学对不同土地利用的响应研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009. [ZENG Cheng. Study on the response of hydrology and hydrochemistry of karst systems to different land uses under humid subtropical climate[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [9] WANG F, CHEN H S, LIAN J J, et al. Seasonal recharge of spring and stream waters in a karst catchment revealed by isotopic and hydrochemical analyses[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 1 – 12.
- [10] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(1): 12 – 21. [YUAN Jianfei, DENG Guoshi, XU Fen, et al. Hydrogeochemical characteristics of Karst groundwater in the northern part of the city of Bijie[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 12 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 许亚青, 江勇, 常红亮, 等. 贵州织金县三塘镇矿山地层对比与划分研究[J]. *世界有色金属*, 2017(8): 153 – 154. [XU Yaqing, JIANG Yong, CHANG Hongliang, et al. Guizhou Zhijin County town three coal-bearing strata contrast and research[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(8): 153 – 154. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 何止. 贵州省织金县三塘向斜北西翼煤炭整装勘查区地层富水性及充水因素分析[J]. *资源信息与工程*, 2017, 32(4): 58 – 60. [HE Zhi. Analysis of water-rich strata and water-filling factors in the coal integrated exploration area of the northwest wing of Santang syncline, Zhijin County, Guizhou Province[J]. *Resource Information and Engineering*, 2017, 32(4): 58 – 60. (in Chinese)]
- [13] 刘子金, 袁代江, 武兴亮, 等. 贵州三岔河中游左岸鸡场一带岩溶地下水运移特征分析[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(5): 685 – 691. [LIU Zijin, YUAN Daijiang, WU Xingliang, et al. Analysis of karst groundwater migration characteristics near the Jichang area on the left bank of mid stream within Shanchanhe, Guizhou[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(5): 685 – 691. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 龚效宇, 曾成, 何春, 等. 贵州乌江南源上游流域不同岩溶地貌单元的流量衰减分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(2): 154 – 163. [GONG Xiaoyu, ZENG Cheng, HE Chun, et al. Flow recession analysis of karst underground river basins in different karst geomorphic units in the upper reaches of the south source of the Wujiang river, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(2): 154 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李宗发. 贵州喀斯特地貌分区[J]. *贵州地质*, 2011, 28(3): 177 – 181. [LI Zongfa. Division of Karst landform in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 2011, 28(3): 177 – 181. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李兴中. 晚新生代贵州高原喀斯特地貌演进及其影响因素[J]. *贵州地质*, 2001, 18(1): 29 – 36. [LI Xingzhong. Evolution of karst geomorphology of upper cenozoic and its influential factors in Guizhou plateau[J]. *Guizhou Geology*, 2001, 18(1): 29 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 金占省, 任建国, 袁德修, 等. 中华人民共和国区域水文地质普查报告(安顺幅)[R]. 1979: 20 – 73. [JIN Zhansheng, REN Jianguo, YUAN Dexiu, et al. Report of regional hydrogeological survey of the People's Republic of China (Anshun)[R]. 1979: 20 – 73. (in Chinese)]
- [18] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702 – 1703.
- [19] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 等. 西昌市尔乌泉域泉水水文地球化学特征及成因[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 15 – 22. [YUAN Jianfei, DENG Guoshi, XU Fen, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis of springs in the catchment area of the Erwu spring of Xichang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 15 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘再华, 张美良, 游省易, 等. 碳酸钙沉积溪流中地球化学指标的空间分布和日变化特征——以云南白水台为例[J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 269 – 278. [LIU Zaihua, ZHANG Meiliang, YOU Shengyi, et al. Spatial and diurnal variations of geochemical indicators in a calcite precipitating stream: Case study of Baishuitai, Yunnan[J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 269 – 278. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 吕保樱, 刘再华, 廖长君, 等. 水生植物对岩溶水化学

- 日变化的影响:以桂林岩溶水文地质试验场为例[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(4): 335 – 340. [LV Baoying, LIU Zaihua, LIAO Changjun, et al. The influence of aquatic plants on diurnal variations of hydrochemistry in karst system: A case in the Guilin karst experimental site[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(4): 335 – 340. (in Chinese with English abstract)]
- [22] YANG R, LIU Z H, ZENG C, et al. Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO₂ and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 468/469: 151 – 158.
- [23] 章程,汪进良,蒲俊兵. 地下河出口河流水化学昼夜动态变化:生物地球化学过程的控制[J]. *地球学报*, 2015, 36(2): 197 – 203. [ZHANG Cheng, WANG Jinliang, PU Junbing. Diel aqueous chemical cycling in a typical karst spring-fed stream: Controls of biogeochemical processes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(2): 197 – 203. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王凤康,王晓晓,任坤,等. 基于高分辨率数据的地下河水化学变化研究:以重庆市雪玉洞地下河为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(2): 96 – 102. [WANG Fengkang, WANG Xiaoxiao, REN Kun, et al. A survey of hydrochemical variations of an underground river based on high resolution data: A case study of the underground river in Xueyu cave, Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, 37(2): 96 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 苟鹏飞,蒋勇军,林涛,等. 典型岩溶地下河入、出口处强降雨过程中水动态变化[J]. *水资源保护*, 2011, 27(1): 6 – 10. [GOU Pengfei, JIANG Yongjun, LIN Tao, et al. Study on dynamic variation of hydrological regime at inlet and outlet of typical underground river of karst valley during a large storm[J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(1): 6 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 缪钟灵,缪执中. 指数衰减方程在地下水研究中的运用[J]. *勘察科学技术*, 1984(5): 1 – 6. [MIAO Zhongling, MIAO Zhizhong. Application of exponential decay equation in groundwater research[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1984(5): 1 – 6. (in Chinese)]
- [27] 林敏,陈崇希. 岩溶含水层中地下水向泉口流动的解析模型[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(3): 247 – 258. [LIN Min, CHEN Chongxi. Analytic models of groundwater flows to karst springs[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(3): 247 – 258. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 常勇,吴吉春,刘玲,等. 岩溶泉流量衰减曲线分析[J]. *水文*, 2016, 36(1): 15 – 21. [CHANG Yong, WU Jichun, LIU Ling, et al. On recession curve of Karst spring[J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(1): 15 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 孙晨,束龙仓,鲁程鹏,等. 裂隙-管道介质泉流量衰减过程试验研究及数值模拟[J]. *水利学报*, 2014, 45(1): 50 – 57. [SUN Chen, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Physical experiment and numerical simulation of spring flow attenuation process in fissure-conduit media[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(1): 50 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 黄敬熙. 流量衰减方程及其应用——以洛塔岩溶盆地为例[J]. *中国岩溶*, 1982, 1(2): 118 – 126. [HUANG Jingxi. Recession equation and its application: Case history of Luota Karst Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 1982, 1(2): 118 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 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(1): 18 – 26. [YANG Lizheng. Karst water movement in Houzhai Subterranean River, Puding, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 1982, 1(1): 18 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王腊春,许有鹏,张立峰,等. 贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究[J]. *地理科学*, 2000, 20(6): 557 – 562. [WANG Lachun, XU Youpeng, ZHANG Lifeng, et al. The characteristic study of karst water at houzhai underground basin in Puding County, Guizhou Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(6): 557 – 562. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 劳文科,蓝芙宁,蒋忠诚,等. 石期河流域岩溶水系统及其水资源构成分析[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(3): 255 – 262. [LAO Wenke, LAN Funing, JIANG Zhongcheng, et al. Analysis on karst groundwater system and its water resources composition in Shiqihe Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(3): 255 – 262. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 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)]