

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.01

# 左江中游岩溶峰林区河流交互带水化学特征与控制因素

黄奇波<sup>1,2,3</sup>, 覃小群<sup>1,2</sup>, 程瑞瑞<sup>1,2</sup>, 李腾芳<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 自然资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 岩溶交互带是连接岩溶含水层与地表河流的重要通道, 对河流和地下水水质具有重要的保护作用。本研究选取左江中游岩溶峰林区河流交互带为研究对象, 在丰水期(8月下旬)和平水期(10月下旬)对交互带内机井的水化学进行现场测试分析, 并结合地下水流动系统理论探讨左江两侧岩溶交互带空间分布特征和控制因素。研究表明: 左江水的电导率(EC)较小、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  浓度较低, 两岸机井中增高; pH、温度、DO 的变化则相反, 呈现出左江高, 两岸机井中降低; 交互带内形成了具有 DO、pH 值梯度、温度梯度、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  梯度的混合区。左岸岩溶区补给径流面积大, 地下水流动系统范围大, 流线密集, 岩溶十分发育, 形成岩溶管道系统; 右岸为左江包围的河间地块, 地下水流动系统范围小, 补给面积有限, 流线稀疏, 岩溶发育深度和强度受到限制。左江两岸不同规模的地下水流动系统导致两岸岩溶发育强度明显不同, 造成河流交互带范围的巨大差异, 左岸的范围大于 1 000 m, 而右岸的范围在 200 m 以内, 左岸是右岸的 5 倍以上。本研究有助于左江沿岸地下水的开发利用和水质保护。

**关键词:** 河流交互带; 地下水流动系统; 机井; 岩溶峰林区; 左江

中图分类号: P641.134; P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0001-08

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

HUANG Qibo<sup>1,2,3</sup>, QIN Xiaoqun<sup>1,2</sup>, CHENG Ruirui<sup>1,2</sup>, LI Tengfang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China;  
2. Institute of Karst Geology, CAGS, Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China;  
3. Environmental School, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** A karst hyporheic zone is an important channel connecting a karst aquifer and a river, which plays an important role in protecting the ecology and water quality in both of river water and groundwater. In order to study the geochemical characteristics of the karst hyporheic zone in the middle reach of the Zuo River, water temperature, dissolved oxygen, pH and electrical conductivity of 21 water samples from the Zuo River (5 samples), ground water (3 samples) and motor-pumped well (13 samples) were measured. The spatial distribution characteristics and control factors of the karst hyporheic zone on both sides of the Zuo River are discussed by applying the flow system theory of karst groundwater. The results show that the electrical conductivity and concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  of the Zuo River are lower than those observed in the motor-pumped wells in the karst hyporheic zone. On the contrary, the pH values, water temperature and dissolved oxygen in the Zuo River are higher than those observed in the motor-pumped wells, which shows a hydrogeochemical gradient, including a dissolved oxygen gradient, a pH gradient, a temperature gradient, and

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-18

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160301); 国家自然科学基金项目(41571203)

第一作者: 黄奇波(1982-), 男, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质、岩溶环境与全球变化研究。E-mail: qbhuang@karst.ac.cn

通讯作者: 覃小群(1961-), 女, 研究员, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: qxq@karst.ac.cn

$\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  gradients in the Hyporheic zone. The recharge-runoff area in the left bank of the Zuo River is large. Due to the larger karst water flow system, the karst is very developed, and the karst pipeline system is formed. Within the right bank, the interstream block is surrounded by the Zuo River. The basin area is about  $6 \text{ km}^2$ , due to the smaller karst water supply area, the karst development depth and intensity is less than that of the left bank. The boundary of the hyporheic zone is more than 1 000 m far away from the river bank in the left bank, whereas the boundary of the hyporheic zone is less than 200 m away from the river bank in the right bank, and the former is five times more than the latter. This study is helpful in the utilization of groundwater and the protection of water quality along the Zuo River

**Keywords:** karst hyporheic zone; groundwater flow systems; motor-pumped well; karst peak forest; Zuo River

河水与地下水交互带(Hyporheic zone),又称潜流带或交错带,是指位于河床下并延伸至河岸两侧含有河水和地下水并形成交互流(Hyporheic flow)的水分饱和的混合区域<sup>[1-2]</sup>,地表水质量分数为10%~98%是交互带水组成的阈值<sup>[3]</sup>。交互带具有重要的水文调蓄、环境缓冲等功能,对河流和地下水水质具有重要的保护作用<sup>[4]</sup>。岩溶交互带(Karst Hyporheic zone)是由美国著名水文学家 John L Wilson 提出的<sup>[5-6]</sup>,其定义为:岩溶地下水与周边岩溶基质(含沉积物、基岩)水之间物质能量活跃交替的地带。它在岩溶管道形成、发育过程,岩溶生物地球化学作用过程,微尺度岩溶水循环过程,污染质迁移、吸附、转换,微生物作用,地下生态系统演化方面发挥了重要的作用<sup>[7]</sup>。虽然“岩溶交互带”概念的提出及开展研究工作的时间并不长,但其在岩溶生物地球化学研究中的重要作用已经受到了美国岩溶学界的高度重视和广泛认可<sup>[8]</sup>。

由于岩溶交互带以碳酸盐岩含水层为主,广泛发育溶隙、溶孔、溶洞和地下河<sup>[9-10]</sup>,地表水容易通过溶洞和地下河管道等快速倒灌进入岩溶交互带补给地下水,造成岩溶交互带的防污性能减弱,缓冲作用降低<sup>[11]</sup>。若地表水被污染,岩溶地下水很快就会受到影响<sup>[12]</sup>。因此,对岩溶交互带的研究十分重要但非常复杂。但我国对于岩溶交互带的研究迄今鲜有报道,尚处于起步状态<sup>[8]</sup>。2016年中国地质调查局启动了西江中下游岩溶峰林区1:5万水文地质环境地质调查二级项目,项目在左江中游的崇左地区一带开展了大量的调查工作。本研究通过对左江中游岩溶峰林区的河流交互带中取得的水化学资料进行分析,并结合地下水流动系统理论探讨两岸岩溶交互带空间分布特征和控制因素。本研究有助于左江沿岸地下水的开发利用和水质保护;同时,可为我国西南地区进一步开展岩溶交互带发育过程和机理研究提供参考,对于如何有效解决目前在岩溶生态恢复、岩溶水污染治理工作中面

临的重要科学问题具有指导意义。

## 1 研究区概况

研究区位于广西崇左市龙州县内,属于西江中下游的左江流域,位于左江流域中部。左江是珠江流域西江水系郁江的主要支流,干流全长539 km,流域面积 $32\,068 \text{ km}^2$ ,全流域多年平均径流量为 $205.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[13]</sup>。本区处于北回归线以南,属亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛。年日照时数1 600多小时,1月平均气温 $13.8^\circ\text{C}$ ,7月平均气温 $28.1^\circ\text{C}$ ,年平均气温 $21.6^\circ\text{C}$ ,年无霜期长达340多天,年平均降雨量1 350 mm。6—9月为雨季,集中了年降雨量80%左右。枯季一般在12月一次年3月。左江径流量在时间上的分配与降雨一致,即每年12月一次年4月径流量很小,6—9月集中了年径流量的80%左右。

研究区内地势较平缓,西北部、北部和南部相对较高,中部为岩溶平原,地势略有起伏。左江在研究区的西南部自南向北流入,在研究区内形成一个U型河湾后在东部转为由西向东流出该区(图1)。区内出露的地层主要有石炭系马平组( $\text{C}_2\text{p}_1$ )厚层白云岩、灰质白云岩,二叠系栖霞组( $\text{P}_2\text{q}$ )、茅口组( $\text{P}_2\text{m}$ )厚层灰岩,合山组( $\text{P}_3\text{h}$ )砂页岩,及第四系桂平组( $\text{Qhg}$ )砂砾石层(图1)。栖霞组( $\text{P}_2\text{q}$ )、茅口组( $\text{P}_2\text{m}$ )灰岩分布面积大于80%,为研究区的主要含水层;第四系桂平组( $\text{Qhg}$ )砂砾石层分布于中部定从一荷村一带,厚度约2~3 m,面积约 $5 \text{ km}^2$ ,下覆为栖霞组( $\text{P}_2\text{q}$ )灰岩岩溶含水层;马平组( $\text{C}_2\text{p}_1$ )和合山组( $\text{P}_3\text{h}$ )地层零星出露,两者面积约 $0.3 \text{ km}^2$ 。

左江构成当地地下水最低排泄基准面,沿岸地表高程高出左江水面5~8 m。地下水分别由南、北、西三个方向向中部的左江排泄。但在汛期(5—9月),左江水位迅速上升,河水通过地下岩溶管道和地表低洼处倒灌补给地下水,造成两岸洪涝灾害较为频繁<sup>[14]</sup>。位于河床边的地下河出口成为地表污水进入地下水的主要渠

道。研究区左岸流域面积大,但地表水系不发育,大气降水通过地表岩溶洼地、漏斗快速渗入地下,在左江沿岸排泄,造成左岸岩溶地下水点较多,不仅发育岩溶泉(图1中的D3),还有2条地下河管道(图1中的D1和

D2)。右岸为左江包围形成的河间地块,面积约6 km<sup>2</sup>,地表除发育有一条小溪流外,沿岸未见岩溶地下水点(图1)。河流两侧的岩溶交互带发育普遍,其具有丰富的水资源,是沿岸居民打井取水重要地段。

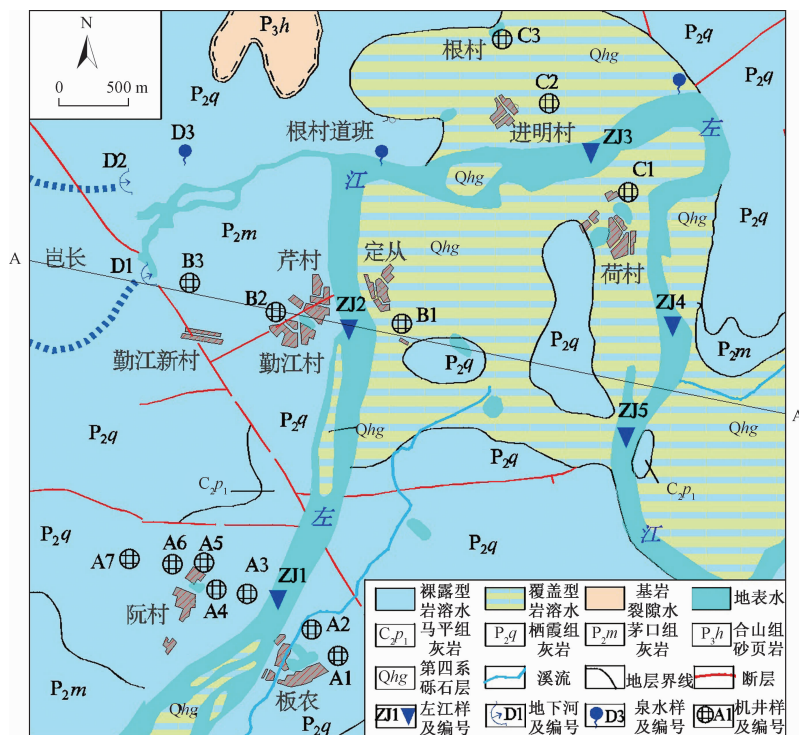


图1 研究区水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

## 2 样品采集与分析测试

本研究于2016年8月下旬和10月下旬对左江水(5个)、机井(13个)及2个地下河出口和1个岩溶泉进行了取样和现场测试分析。左江取样点和机井主要位于人口较集中的村庄,形成3个断面(图1),断面1在上游阮村和板农村一带,取得水样8个,左岸机井5个(A3-A7),右岸机井2个(A1、A2),左江水样1个(ZJ1);断面2在中下游勤江村、定从村一带,取得水样4个,左岸机井2个(B2、B3),右岸机井1个(B1),左江水样1个(ZJ1);断面3位于下游进明村、荷村一带,取得水样4个,左岸机井2个(C2、C3),右岸机井1个(C1),左江水样1个(ZJ3)。另外2个左江水样(ZJ4、ZJ5)取样位置位于3个断面下游;1个岩溶泉和2个地下河出口主要取自左岸。样点分布位置见图1。

机井离左江100~1 000 m范围内,基本位于河流交互带影响范围内;本次水样主要通过村民水泵抽水取得,水泵放置在地表以下10~15 m的深度(水位以下5~10 m),机井均是每天抽一次水,每次抽3~5 h,

本次水样是在机井抽水1~2 h后采集的,水样基本能反映地下水特征。

本次主要采用现场测试、现场滴定和样品室内测试相结合的研究方法。野外现场利用德国WTW公司生产pH/Cond340i测试仪测试各水点的水温、pH值、电导率(EC)和溶解氧(DO)质量浓度,分辨率分别为0.1℃、0.001、1μS/cm和0.01 mg/L。使用德国Aquamerck公司生产的碱度计和硬度计测定河水的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>质量浓度,分辨率分别为6 mg/L和1 mg/L。样品在现场进行过滤(<0.22μm Millipore滤膜)后再装入100 mL聚乙烯瓶中。用于阳离子(Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和Na<sup>+</sup>)测定的样品立即加入超纯盐酸酸化至pH<2,密封于暗箱中保存;用于测定阴离子的样品直接密封于暗箱中保存。

样品带回实验室后,用原子吸收光谱法(atomic absorption spectroscopy,简称AAS)测定阳离子(Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和Na<sup>+</sup>)浓度。阴离子浓度(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)用高效液相色谱(HPLC)仪测定。阴阳离子电荷平衡之差<5%。

由于10月下旬取得的样点水化学指标差异不明

显,在本文中不与讨论,主要讨论 8 月下旬样品的水化学特征。8 月下旬水样主要离子浓度数据见表 1。

表 1 丰水期不同类型水物理化学指标

Table 1 Physical and chemical index in different types of water

| 编号  | 类型  | 取样日期       | 与左江<br>距离/m | 温度/℃ | pH    | DO<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | EC<br>/(μS·cm <sup>-1</sup> ) | Ca <sup>2+</sup><br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|-----|-----|------------|-------------|------|-------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| A1  | 机井  | 2016-08-24 | 300         | 24.4 | 6.978 | 1.70                         | 755                           | 137.10                                     | 331.48                                                  |
| A2  | 机井  | 2016-08-24 | 200         | 24.5 | 7.019 | 2.42                         | 665                           | 127.55                                     | 348.08                                                  |
| A3  | 机井  | 2016-08-24 | 100         | 30.3 | 7.489 | 7.12                         | 548                           | 95.00                                      | 249.83                                                  |
| A4  | 机井  | 2016-08-24 | 200         | 29.7 | 7.232 | 7.00                         | 780                           | 116.40                                     | 310.25                                                  |
| A5  | 机井  | 2016-08-24 | 300         | 28.0 | 7.212 | 5.69                         | 860                           | 130.40                                     | 305.35                                                  |
| A6  | 机井  | 2016-08-24 | 500         | 28.9 | 7.093 | 4.74                         | 795                           | 129.40                                     | 298.82                                                  |
| A7  | 机井  | 2016-08-24 | 800         | 27.1 | 7.014 | 3.22                         | 512                           | 106.30                                     | 303.72                                                  |
| B1  | 机井  | 2016-08-24 | 200         | 26.4 | 7.119 | 4.80                         | 588                           | 120.60                                     | 312.70                                                  |
| B2  | 机井  | 2016-08-24 | 500         | 29.2 | 7.428 | 6.89                         | 551                           | 118.00                                     | 326.58                                                  |
| B3  | 机井  | 2016-08-24 | 1000        | 28.1 | 7.140 | 7.16                         | 558                           | 121.20                                     | 334.02                                                  |
| C1  | 机井  | 2016-08-25 | 100         | 28.2 | 7.370 | 6.91                         | 522                           | 109.00                                     | 298.86                                                  |
| C2  | 机井  | 2016-08-25 | 500         | 28.7 | 7.330 | 6.25                         | 578                           | 122.70                                     | 352.71                                                  |
| C3  | 机井  | 2016-08-25 | 1000        | 28.6 | 7.279 | 5.59                         | 516                           | 106.20                                     | 295.34                                                  |
| 平均值 |     |            |             | 27.9 | 7.208 | 5.35                         | 633                           | 118.45                                     | 312.90                                                  |
| D1  | 地下河 | 2016-08-25 | /           | 24.6 | 7.363 | 5.40                         | 473                           | 94.40                                      | 258.00                                                  |
| D2  | 地下河 | 2016-08-25 | /           | 23.9 | 7.274 | 5.96                         | 511                           | 102.80                                     | 298.86                                                  |
| D3  | 下降泉 | 2016-08-25 | /           | 24.5 | 7.233 | 4.95                         | 558                           | 114.40                                     | 339.64                                                  |
| 平均值 |     |            |             | 24.3 | 7.290 | 5.44                         | 514                           | 103.87                                     | 298.83                                                  |
| ZJ1 | 左江  | 2016-08-24 | /           | 31.7 | 7.702 | 7.88                         | 205                           | 36.50                                      | 111.86                                                  |
| ZJ2 | 左江  | 2016-08-24 | /           | 31.3 | 7.802 | 7.86                         | 203                           | 35.91                                      | 109.40                                                  |
| ZJ3 | 左江  | 2016-08-25 | /           | 30.6 | 7.755 | 7.51                         | 205                           | 36.92                                      | 111.86                                                  |
| ZJ4 | 左江  | 2016-08-25 | /           | 30.6 | 7.510 | 7.72                         | 204                           | 34.14                                      | 109.00                                                  |
| ZJ5 | 左江  | 2016-08-25 | /           | 31.4 | 7.600 | 7.86                         | 220                           | 32.75                                      | 107.24                                                  |
| 平均值 |     |            |             | 31.1 | 7.674 | 7.77                         | 207                           | 35.24                                      | 109.87                                                  |

### 3 结果

8 月下旬为丰水期,左江水位抬升,河水通过地下岩溶管道和地表低洼处倒灌补给地下水,在左江沿岸形成地表水与地下水相混合的交互带。10 月下旬为平水期,左江水位较低,地下水均向左江排泄,河流交互带受左江潜流交互作用影响较小,造成交互带中的机井水化学差异并不明显。

表 1 显示机井的 pH 值变化范围 6.978 ~ 7.489, 平均 7.208,岩溶地下水(泉和地下河)的 pH 值变化范围 7.233 ~ 7.363,平均 7.290,左江水的 pH 值变化范围 7.510 ~ 7.802,平均 7.674,大多数样品的 pH 值高于 7.0,具有岩溶水的特征,这主要受控于碳酸盐岩的溶解。与机井和岩溶地下水(泉和地下河)相比,左江水的 pH 偏高。

机井的溶解氧(DO)和水温变化范围分别为 1.70 ~ 7.16 mg/L 和 24.4 ~ 30.3 ℃,平均值为 5.35 mg/L 和 27.9 ℃,岩溶地下水(泉和地下河)的范围分

别为 4.95 ~ 5.96 mg/L 和 23.9 ~ 24.6 ℃,平均值为 5.44 mg/L 和 24.3 ℃,左江水的范围分别为 7.51 ~ 7.88 mg/L 和 30.6 ~ 31.7 ℃,平均值为 7.77 mg/L 和 31.12 ℃。可见,机井的 DO 变化范围大,但平均值较小,其水温位于岩溶地下水和左江之间。岩溶地下水和左江的水温和 DO 相对稳定。

机井的电导率(EC)为 512 ~ 860 μS/cm,平均值为 633 μS/cm,岩溶地下水 EC 为 473 ~ 558 μS/cm,平均值为 514 μS/cm,左江水 EC 为 203 ~ 220 μS/cm,平均值为 207 μS/cm。机井的 Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度为 95.00 ~ 137.10 mg/L 和 249.83 ~ 352.71 mg/L,平均值为 118.45 mg/L 和 312.90 mg/L,岩溶地下水 Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 分别为 94.40 ~ 114.40 mg/L 和 258.00 ~ 339.64 mg/L,平均值为 103.87 mg/L 和 298.83 mg/L,左江水分别为 32.75 ~ 36.92 mg/L 和 107.24 ~ 111.86 mg/L,平均值为 35.24 mg/L 和 109.87 mg/L。机井、岩溶地下水的 EC、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 平均浓度是左江水的 3 倍左右,但机井高于岩溶地下水。

## 4 讨论

### 4.1 交互带内机井水化学差异原因

左江为一开放的地表水体,其水化学指标易受外部环境的影响,取样期(8月下旬)为崇左地区气温最高的丰水期,气温高达40℃,受气温影响,左江水的平均水温高达31.12℃。机井、岩溶泉和地下河均属于地下水,地下水对外部气温具有一定的调节作用,一般具有相对稳定的水化学指标,其温度接近于所处地区的多年平均温度,且变化幅度较小<sup>[15]</sup>。岩溶地下水(泉和地下河)的水温差异不大,基本与当地平均气温一致。但位于河岸带中的机井,水温表现出较大的变化范围,其平均值(27.9℃)介于岩溶地下水与左江水之间。从表1可发现,有的机井(如A3)水温与左江水基本相同,有的机井(如A1)与岩溶地下水接近,且水温与距左江的距离的大小有很大关系,距左江距离小,机井水温高(如A3),距左江距离大,机井水温低(如A7)。这表明离左江近的机井更易受到具有较高温度左江水潜流交互作用的影响;而离左江远的机井由于左江水倒灌补给的范围有限,受左江水潜流交互作用影响小,水温主要受地下水的控制。

左江为宽约200~400m的流动地表水体,处于不断与外部空气交换的氧化环境条件,因此,DO浓度较高且较稳定。岩溶地下水(泉和地下河)为一开放的流动岩溶地下水系统,也具有较为稳定的DO浓度。相反,机井为一封闭的还原环境,一般DO浓度相对较低<sup>[5]</sup>。本研究中机井的DO浓度具有较大变化范围,这缘于机井受到了地下水和左江水的双重影响。位于左江同一侧距左江不同距离的机井DO浓度具有一定差异,如断面1中左岸距左江100m的机井A3,其DO浓度高达7.12mg/L,800m的机井A7的DO浓度仅为3.22mg/L,前者是后者的2倍;另一方面,位于不同岸但与左江距离相同的机井,其DO也具有较大差异,如断面1中距左江均为200m的机井,左岸A4的DO浓度为7.00mg/L,而右岸A2仅为2.42mg/L,前者是后者的3倍。

如果机井受到左江潜流交换影响,其水温和DO浓度同时升高,这可从机井水温与DO浓度具有较好的正相关关系得到证实(图2);机井中的水温和DO浓度越高,与左江越接近,表明其受左江的影响越大,反之,则受左江的影响小。机井、下降泉和地下河中的DO与Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度具有负相关关系。3个岩溶地下水(泉和地下河)DO、Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度差异不

大,而左江水具有较高的DO和较低的Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度。因此,负相关关系亦是缘于具有较低Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度和较高DO浓度的左江水与沿岸机井发生潜流交互作用的结果。

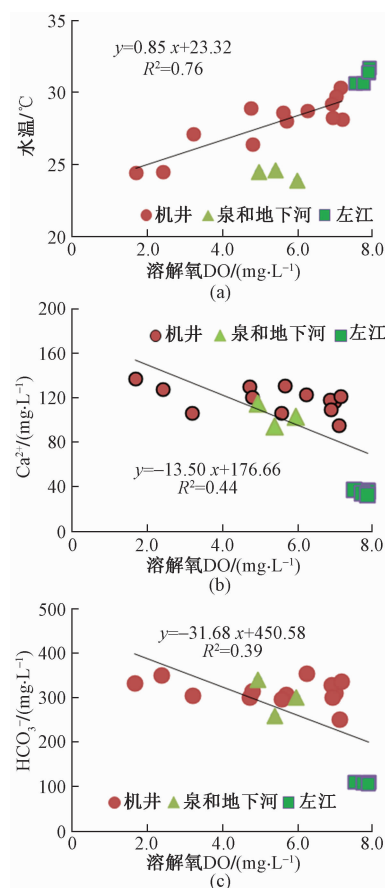


图2 溶解氧(DO)与水温(a)、Ca<sup>2+</sup>(b)和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(c)的变化关系

Fig. 2 Relationships between dissolved oxygen and temperature(a), Ca<sup>2+</sup>(b) and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(c) in different types of water

### 4.2 河流交互带范围

3个断面中均是左江水体的EC值较小、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度较低,两岸机井中增高;pH、温度、DO的变化相反,呈现出左江水高,两岸机井中降低(图3)。河流交互带内形成了具有DO梯度、pH值梯度、温度梯度、Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>梯度的混合区。但三个断面中机井水化学特征有所差异,断面1左岸0~800m范围内机井的EC、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>缓慢升高,pH、温度、DO浓度缓慢下降;而右岸0~300m范围内机井的EC、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度快速升高,pH、温度、DO浓度快速下降,两岸机井水的物理化学指标变化不具对称性(图3),说明断面1左右两岸交互带受左江潜流交互影响差异较

大。单从水温看,左岸受左江潜流交互影响的范围大,800 m 处的机井 A7 水温仍为 27.1 ℃,明显大于岩溶地下水(1 个泉和 2 个地下河)的平均水温(24.3 ℃),表明 0~800 m 范围内均受到左江水潜流交互的影响,河流交互带范围大于 800 m。右岸 200 和 300 m 处的机井 A2 和 A1 的水温分别为 24.5 ℃ 和 24.4 ℃,基本与岩溶地下水(泉和地下河)平均水温一致,DO 浓度分别为 2.42 mg/L 和 1.7 mg/L,仅为左江水的 1/3,说明左江水没有与机井 A1、A2 发生潜流交互作用,右岸河流交互带的范围在 200 m 以内。

断面 2 左岸 1000 m 处机井 B3 的 pH、温度、DO 浓度分别为 7.140、28.1 ℃、7.16 mg/L,与左江水差异不大。左岸 2 个机井与左江水 ZJ2 相比有所下降,但下降的幅度并不大。右岸 200 m 处机井 B1 的 pH、温度、DO 明显小于左江水,其 DO 浓度、水温位于岩溶地下水(泉和地下河)范围内,说明受到左江水潜流交互影响。因此,断面 2 中左岸河流交互带范围大于 1 000 m,右岸范围大约 200 m。

断面 3 左岸 500 m 处机井 C2 和 1 000 m 处的机井 C3 的 pH、温度、DO 与左江水 ZJ3 差异并不明显,其受到左江水潜流交互影响。右岸 100 m 处的机井 DO 和水温小于左江水,但又大于岩溶地下水,说明该机井也受到左江水潜流交互影响。因此,断面 3 左岸河流交互带范围大于 1 000 m,右岸范围大于 100 m。

综合以上分析,河流交互带在左岸的范围大于 1 000 m,右岸的范围在 200 m 以内,左岸是右岸的 5 倍以上。

#### 4.3 岩溶交互带发育控制因素

大气降水通过土壤层后渗入地下,储存和运移于岩层的空隙之中,并对岩石进行不断的溶蚀<sup>[16]</sup>,地下水的径流条件是控制岩溶发育最关键的因素<sup>[17]</sup>。封闭体系岩溶作用非常缓慢甚至停止,只有在开放体系中通过地下水的不断入渗补给及循环交替,岩溶化作用才能得以持续进行<sup>[18-19]</sup>。王增银等<sup>[20]</sup>的研究表明,有均匀大气降水入渗补给的裸露碳酸盐岩河间地块,地下水流动系统是自河间地块向两侧河流径流排泄,由分水岭向河谷流线由疏变密,流量逐渐增大,地下径流逐渐增强,到河谷岸边地带流线最密集,流量也最大,地下径流也最强。

研究区左岸为大面积的裸露岩溶区,岩溶水流动系统补给径流范围大,以左江为最低排泄基准面进行排泄,造成左岸一带地下水流线密集,岩溶发育,不仅延伸范围宽,且发育深度大(图 4),如左岸不仅形成了

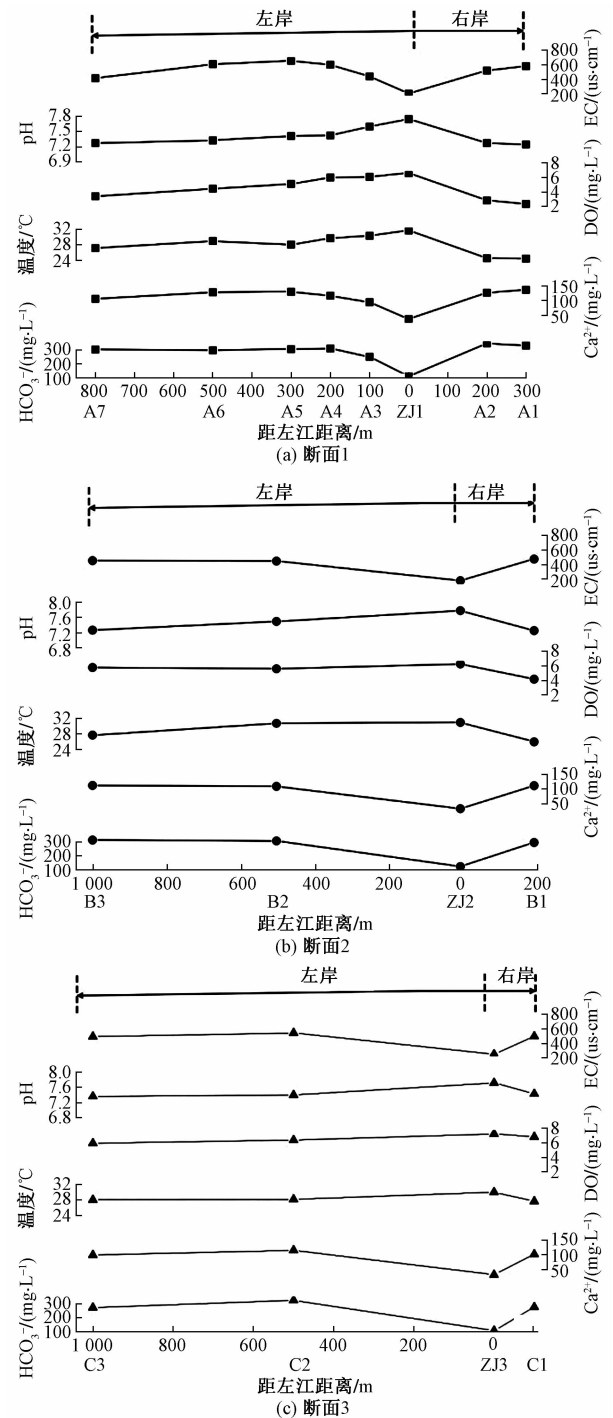


图 3 断面中机井水化指标与距左江距离的变化趋势

Fig. 3 Trends of physical and chemical index of the wells with the distance in the section of the motor-pumped wells

较多的岩溶大泉,还发育有 2 条岩溶地下河管道系统;而右岸为左江包围形成的河间地块,中间岩溶孤峰地带地势稍高,形成了地表分水岭,地下水分水岭与地表水分水岭基本一致,分水岭两侧地下水排向东西两侧的左江,形成两个不同的地下水子系统。由于河间地



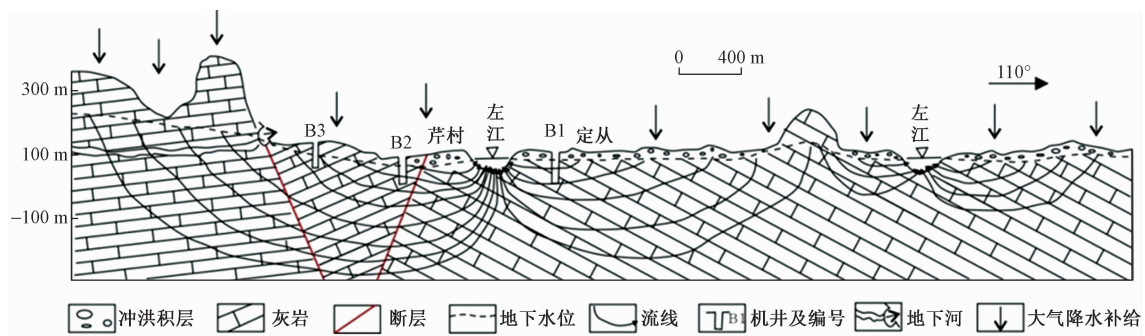


图4 研究区流网图

Fig. 4 Flow-net map of the study area

块东西宽约2 km,南北长约7 km,两个地下水流动子系统范围小,大气降雨补给面积有限,地下水流线稀疏,岩溶发育深度和强度受到限制。因此,左江两岸不同规模的地下水流动系统导致两岸岩溶发育强度明显不同,进而造成河流交互带范围的巨大差异,左岸的范围大于1 000 m,而右岸的范围在200 m以内,左岸是右岸的5倍以上。

## 5 结论

(1)地下水(泉水和地下河)的电导率(EC)值和 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 浓度较高,而pH、温度、DO浓度低;左江水的电导率(EC)和 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 浓度较低,而pH、温度、DO浓度高;受控于地下水和左江水的双重影响,河流交互带中的机井其电导率(EC)、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 浓度、pH、温度、DO浓度位于左江水和地下水(泉水和地下河)之间。由左江向两岸河流交互带机井电导率(EC)值和 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 浓度不断增高的同时,其pH、温度、DO浓度不断降低;河流交互带内形成了具有DO浓度、pH值梯度、温度梯度、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 浓度梯度的混合区。

(2)河流交互带在左岸的范围大于1 000 m,右岸的范围在200 m以内,左岸是右岸的5倍以上。左右两岸不同的地下水流动系统规模是造成其差异的主要原因。左岸岩溶区补给径流面积大,地下水流动系统范围大,流线密集,岩溶十分发育,延伸范围宽,且发育深度大,地表水与地下水交互作用影响范围大;右岸为左江包围的河间地块,中间岩溶山体形成了地表分水岭,形成两个不同的岩溶地下水子系统。地下水流动系统范围小,补给面积有限,地下水流线稀疏,岩溶发育深度和强度受到限制,地表水与地下水交互作用影响范围小。

## 参考文献:

- [1] 张宇,杨平恒,王建力,等. 河水-地下水侧向交互带地球化学特征:以重庆市马鞍溪为例[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2478-2486. [ZHANG Y, YANG P H, WANG J L, et al. Geochemical characteristics of lateral hyporheic zone between the river water and groundwater, a case Study of Maanxi in Chongqing [J]. Environmental Science, 2016, 37(7): 2478-2486. (in Chinese)]
- [2] 杨平恒,张宇,王建力,等. 水位变化影响下的河水-地下水侧向交互带地球化学动态[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 293-301. [YANG P H, ZHANG Y, WANG J L, et al. Influence of water level change on the geochemical dynamics of the lateral hyporheic zone between river water and groundwater[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 293-301. (in Chinese)]
- [3] 金光球,李凌. 河流中潜流交换研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 285-293. [JIN G Q, LI L. Advancement in the hyporheic exchange in rivers [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 285-293. (in Chinese)]
- [4] HERZOG S P, HIGGINS C P, MCCRAY J E. Engineered streambeds for induced hyporheic flow: enhanced removal of nutrients, pathogens, and metals from Urban streams [J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 142(1): 04015053.
- [5] WILSON J L. Karst conduit-matrix exchange and the karst hyporheic zone [C]//Karst waters institute & National cave and karst research institute. Abstract of Symposium on Carbon and Boundaries in karst. Carlsbad, New Mexico, USA: Karst waters institute & National cave and karst research institute, 2013:44.
- [6] WILSON J L. Karst conduit-matrix exchange and the

- karst hyporheic zone[C]//Presentation in Symposium on Carbon and Boundaries in karst. Carlsbad, New Mexico: Karst waters institute & National cave and karst research institute,2013.
- [ 7 ] New Mexico Water Resources Research Institute. 2011 Annual Technical Report[R]. Las Cruces, New Mexico: NM WRRI, 2011.
- [ 8 ] 蒲俊兵,袁道先. Karst Hyporheic zone 及其研究进展[J]. 中国岩溶,2013,32(1):7-13. [PU J B, YUAN D X. Karst Hyporheic Zone and the scientific progress[J]. Carsologica Sinica,2013,32(1):7-13. (in Chinese)]
- [ 9 ] 卢耀如,张凤娥,刘长礼,等. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报,2006, 27(5):393-402. [LU Y R,ZHANG F E, LIU C L, *et al.* Karst water resources in typical areas of china and their ecohydrological characteristics [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(5):393-402. (in Chinese)]
- [10] 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,24(3):250-254. [QIN X Q, JIANG Z C. A review on recent advances and perspective in epikarst water study [J]. Carsologica Sinica,2013,32(1):7-13. (in Chinese)]
- [11] 张军以,王腊春,苏维词,等. 岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J]. 地理科学进展,2014,33(8):1125-1135. [ZHANG J Y, WANG L C, SU W C, *et al.* Status and prospect of the hydrological effects of human activities in the Karst area[J]. Progress in Geography, 2014,33(8):1125-1135. (in Chinese)]
- [12] 张军以,王腊春,马小雪,等. 西南岩溶地区地下水污染及防治途径[J]. 水土保持通报,2014, 34(2):245-249. [ZHANG J Y, WANG L C, MA X X, *et al.* Groundwater pollution and controlling measures in karst mountainous areas of southwestern China[J]. Bulletin of Soil and water conservation, 2014, 34(2):245-249. (in Chinese)]
- [13] 苏友华. 左江水资源管理与保护的思考[J]. 企业科技与发展,2011,26(18):81-84. [SU Y H. Thoughts about the management and protection of Zuojiang water resources[J]. Enterprise Science And Technology & Development,2011,26(18):81-84. (in Chinese)]
- [14] 张健. 左江洪涝特征分析[J]. 广西气象,2005, 26(3):24-26. [ZHANG J. Characteristic analysis for the flooding in Zuo River[J]. Jouturnal of Guangxi Meteorology,2005, 26(3):24-26. (in Chinese)]
- [15] 黄奇波,覃小群,刘朋雨,等. 人为活动对乌江中上游段岩溶地下水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  及碳汇效应的影响[J]. 第四纪研究,2016,36(6):1358-1369. [HUANG Q B, QING X Q, LIU P Y, *et al.* The impact of human activities to  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  of karst groundwater and carbon sink in the upper and middle reaches of of Wu River [J]. Quaternary Science, 2016,36(6):1358-1369. (in Chinese)]
- [16] 刘再华,李强,汪进良,等. 桂林岩溶试验场钻孔水化学暴雨动态和垂向变化解译[J]. 中国岩溶,2004, 23(3):169-176. [LIU Z H, LI Q, WANG J L, *et al.* Interpretation of borehole store-scale and vertical hydrochemical variations at the Guilin Karst experimental site [J]. Carsologica Sinica,2004, 23(3):169-176. (in Chinese)]
- [17] 黄奇波,康志强,覃小群,等. 流澜河间地块岩溶发育特征及形成机制[J]. 桂林理工大学学报,2011,31(1):45-51. [HUANG Q B, KANG Z Q, QIN X Q, *et al.* Karst development features and formation mechanism of interfluvium in Liulan River[J]. Journal of Guilin University of Technology,2011,31(1):45-51. (in Chinese)]
- [18] 黄荷,陈植华,王涛,等. 岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义[J]. 水文地质工程地质,2019, 46(1):19-26. [HUANG H, CHEN Z H, WANG T, *et al.* Groundwater source identification in carbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1):19-26. (in Chinese)]
- [19] 拓明明,周训,郭娟,等. 重庆温泉及地下热水的分布及成因[J]. 水文地质工程地质,2018, 45(1):165-172. [TA M M, ZHOU X, CUO J, *et al.* Occurrence and formation of the hot springs and thermal groundwater in Chongqing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1):165-172. (in Chinese)]
- [20] 王增银,韩庆之,万军伟. 地下水流动系统在河间地块岩溶渗漏评价中的应用[J]. 地质科技情报,1998, 17(2):97-101. [WANG Z Y, HAN Q Z, WAN J W. Application of groundwater flow systems to karst leakage appraise in interstream block [J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(2):97-101. (in Chinese)]

编辑:张若琳