

doi: 10.12029/gc20190202

曹建文, 夏日元, 方尚武, 赵良杰, 王喆, 王若凡, 易瑞. 2019. 云贵高原斜坡地带典型地下水富硫酸盐地区“越层找水”模式及其机理研究[J]. 中国地质, 46(2): 235–243.

Cao Jianwen, Xia Riyuan, Fang Shangwu, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Wang Ruofan, Yi Rui. 2019. Model and mechanism of "water exploration by cross layer" for high sulfate area in slope region of Yunnan–Guizhou Plateau[J]. *Geology in China*, 46(2): 235–243(in Chinese with English abstract).

## 云贵高原斜坡地带典型地下水富硫酸盐地区 “越层找水”模式及其机理研究

曹建文<sup>1</sup>, 夏日元<sup>1</sup>, 方尚武<sup>2</sup>, 赵良杰<sup>1</sup>, 王喆<sup>1</sup>, 王若凡<sup>2</sup>, 易瑞<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所 / 自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队, 贵州 遵义 563000)

**摘要:** 地下水是中国西南云贵高原斜坡地带重要的饮用水源, 其中黔中镇宁县北部存在大面积地下水中硫酸盐超标地区, 导致了当地出现水质性缺水问题。本次研究通过岩相古地理分析、水化学分析、D、<sup>18</sup>O、<sup>34</sup>S 同位素测试、岩样测试、岩心观察等技术手段, 查明了研究区内地下水的补给源主要为大气降水, 地下水中硫酸盐(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)浓度在 30~1100 mg/L, 平均值为 221.78 mg/L, 呈现高度富集 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的特点; 在区域相对隔水层以上, 不同类型地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度大体具有有机井 > 上升泉 > 下降泉 > 溶潭 > 地下河出口 > 基岩裂隙泉 > 表层岩溶泉的规律; 探讨了地表水、地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的来源, 表层岩溶泉中硫酸根的来源主要为大气降水, 高硫酸盐样品中硫酸根的来源主要为石膏溶解。在此基础上, 结合钻井资料, 掌握了研究区膏岩层分布及含水层结构特征, 通过建立“越层找水”模式, 采取下层低硫酸盐含水层, 获取合格饮用水源, 可有效解决当地水质性缺水问题。

**关键词:** 地下水; 高硫酸盐; 来源识别; 越层找水; 镇宁北部

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)02-0235-09

### Model and mechanism of "water exploration by cross layer" for high sulfate area in slope region of Yunnan–Guizhou Plateau

CAO Jianwen<sup>1</sup>, XIA Riyuan<sup>1</sup>, FANG Shangwu<sup>2</sup>, ZHAO Liangjie<sup>1</sup>,  
WANG Zhe<sup>1</sup>, WANG Ruofan<sup>2</sup>, YI Rui<sup>2</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/ Karst Dynamics Laboratory, MNR & GZAR, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. No.114 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Zunyi 563000, Guizhou, China)

**Abstract:** Groundwater is an important drinking water source in Southwest China. However, there exists a large area of sulfate exceeding standard in groundwater in the northern part of Zhenning County in Central Guizhou Province, which leads to the problem of water shortage in local area. The following conclusions were obtained by methods of lithofacies palaeogeographic

收稿日期: 2018-09-15; 改回日期: 2019-03-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“红水河上游岩溶流域 1:5 万水文地质环境地质调查”(DD20160300)及“南北盘江流域水文地质调查”(DD20190342)资助。

作者简介: 曹建文, 男, 1983 年生, 高级工程师, 从事岩溶地质、水文地质调查研究工作; E-mail: caojianwen@karst.ac.cn。

analysis, hydrochemical analysis, D,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{34}\text{S}$  isotope test, rock sample test, core observation and other technical methods: The main source of water supply in the study area is meteoric water; the concentration of sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) in groundwater is in the range of 30–1100 mg/L, with an average value of 221.78 mg/L, showing the characteristics of highly enriched  $\text{SO}_4^{2-}$ ; the concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  in different types of groundwater exhibits the law of well > rising spring > falling spring > karst pool > underground river > bedrock fissure spring > epikarst spring; the source of sulfate root in epikarst spring is mainly meteoric water, and the source of sulfate root in high sulfate samples such as J469, J585, ZK3–2 and C010 is mainly dissolved in gypsum. On such a basis and in combination with drilling data, the authors detected the distribution of gypsum rock layer and the characteristics of aquifer structure, and adopted the lower sulfate aquifers to obtain qualified drinking water source by establishing the "cross layer water finding" model, which can effectively solve the problem of water shortage in the study area.

**Key words:** groundwater; high sulfate; source identification; water exploration by cross layer; northern Zhenning

**About the first author:** CAO Jianwen, male, born in 1983, senior engineer, engages in karst geology and hydrogeology survey research; E-mail: caojianwen@karst.ac.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160300; DD20190342).

## 1 引 言

镇宁县位于贵州省中部,地处云贵高原斜坡面的北东向褶皱带,属平缓山原丘陵地貌,多峰丛洼地和河间谷地;该地区岩溶发育,是世界上岩溶地貌最发育的典型地区之一,溶洞、暗河、消水洞、天窗、竖井遍布,岩溶面积占74.0%~85.5%,水土流失面积37%,石漠化面积32%,属于桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区的一部分(曹建华等,2017)。由于强烈发育的岩溶环境、不合理的人为工程活动,以及极端气候条件造成了严重的工程性缺水和饮水不安全问题,对经济社会发展以及正常的生活和生产秩序造成了严重的影响(贵州省地下水勘查规划,2009;张永双等,2017)。近年来,地方政府深入贯彻落实中央关于脱贫攻坚的决策部署,在地下水勘查和应急找水打井方面都取得了较大的进展,地方工程性缺水问题已得到很大缓解(王明章,2012)。但是部分岩溶山区农村饮水安全问题存在,在研究区内,地下水中硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )含量超标已成为影响当地经济社会发展及生命健康的重要环境地质问题,由此带来的水质性缺水问题亟需解决。

前人研究发现,高浓度硫酸盐对环境的危害严重,进入到环境水体中的硫酸盐会扩散到水体的底部沉积层,加速甲基汞生成,造成水生植物必要的微量金属元素缺失,并改变水体原有的生态功能,导致鱼虾等水生动物灭绝(胡明成,2012);硫酸盐对人体的健康影响主要是腹泻、脱水和胃肠道紊乱,并使水味变坏,研究还发现水中硫酸盐与肝病

死因的关系呈正相关(董建忠,2001)。

目前国内外对地下水中硫酸盐的研究多集中在水文地球化学特征及来源分析,大量研究表明,地下水中硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )主要来源包括硫酸盐岩的溶解、硫化矿物的氧化、大气沉降和人类活动的输入(CLARKI et al.,1997; Liu Congqiang et al.,2008; 杨郦城等,2008; 李云等,2014),多使用 $\text{SO}_4^{2-}$ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 来示踪硫酸盐的来源(Hosono et al.,2007; 李云等,2014; Niu Xinsheng et al.,2014),并计算出不同来源地对地下水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 的贡献比例(任坤等,2016),为水资源的合理开发利用与保护修复提供了很好的科学依据。本文尝试通过开展岩石沉积相分析、地下水环境同位素测试、钻孔岩心化学组分分析、水文地质背景分析等方法手段,系统研究工作区内地下水中硫酸盐的分布特征及形成机理,并建立“越层找水”模式,揭示其成因机理,探索该地区找水新途径,为西南地区类似环境地质条件下地下水资源的合理有效开发提供科学依据。

## 2 研究区概况

### 2.1 自然地理概况

研究区隶属贵州省安顺市,位于珠江水系与长江水系分水岭地带,东与安顺市西秀区、紫云苗族布依族自治县相邻;南濒北盘江与黔西南自治州望谟、贞丰两县隔江相望,西同关岭布依族苗族自治县接壤;北与普定县、六枝特区毗邻。境内地势北高南低,坡度变化较大,东北部的茅草坡山主峰为全县最高点,海拔1678 m,南端良田乡北盘江出县

界处为最低点,海拔 356 m,相对高差 1322 m,地貌类型以峰丛洼地,峰丛谷地为主。区内地表水系及地下水系发育,主要隶属于北盘江水系。地属以亚热带湿润季风气候区,全年平均气温 18℃左右,年均降雨量 1200 mm 左右,降雨主要集中在 6—9 月份,占全年降雨总量的 60%左右。

### 2.2 岩性特征与含水层组

区内出露的主要地层为二叠系中统栖霞—茅口组(P<sub>2</sub>q+m)、上统龙潭组(P<sub>3</sub>l),三叠系下统夜郎组(T<sub>1</sub>y)/大冶组(T<sub>1</sub>d)、嘉陵江组(T<sub>1-2</sub>j)/安顺组(T<sub>1-2</sub>a)/罗楼组(T<sub>1-2</sub>l)、中统关岭组(T<sub>2</sub>g)/花溪组(T<sub>2</sub>h)/新苑组(T<sub>2</sub>x)、杨柳井组(T<sub>2</sub>y)/边阳组(T<sub>2</sub>b)、上统黑苗湾组(T<sub>3</sub>hm)。由于古构造作用及沉积环境等条件的不同,造成地层沉积缺失及相变变化较为复杂。区内二叠系上统龙潭组(P<sub>3</sub>l)沉积相主要为陆棚浅海潮坪—沼泽相,主要岩性为粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,夹少量燧石灰岩及煤层;三叠系下统夜郎组(T<sub>1</sub>y)、嘉陵江组(T<sub>1-2</sub>j)中下部为半局限台地相(以潮坪相为主)沉积,岩性为一套碳酸盐岩(灰岩)与碎屑岩(粉砂岩、黏土岩)的组合;三叠系下统嘉陵江组(T<sub>1-2</sub>j)上部、中统关岭组(T<sub>2</sub>g)、杨柳井组(T<sub>2</sub>y)处于半封闭—封闭的局限极浅水环境,形成以潮汐作用

和蒸发作用为主的碳酸盐潮坪—泻湖沉积,白云岩常有石膏、盐类伴生(贵州岩相古地理图集)。

区内地下水类型可划分为碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水和第四系松散岩类孔隙水。其中,碳酸盐岩岩溶水为主要含水类型,在区内广泛分布;基岩裂隙水含水岩组主要为白垩系茅台组(K<sub>2</sub>m)、二叠系中统梁山组(P<sub>2</sub>l)、二叠系上统龙潭组段(P<sub>3</sub>l),在区内呈条带状出露;第四系松散岩类孔隙水零星分布于镇宁县城一带的谷地中以及王二河及其支流沿岸河谷阶地中。

## 3 样品采集与测试

### 3.1 样品采集

2016年8月,在镇宁北部地区选取代表性地下河、岩溶泉、钻孔及地表河流进行了水样采集,共采集水样 22 组(图 1),其中地表水 2 组,地下河出口 1 组,溶潭 2 组,上升泉 1 组,下降泉 9 组,表层岩溶泉 2 组,基岩裂隙泉 1 组,机井水样 4 组。水化学常规离子和 δD、δ<sup>18</sup>O 样用 50 mL 聚乙烯塑料瓶采集,阳离子样品加 1:1 优级纯 HNO<sub>3</sub> 至 pH < 2。硫酸盐中 δ<sup>34</sup>S<sub>SO4</sub> 样用 2 L 棕色塑料瓶采集,加优级纯 HCl 至 pH < 2,用 BaCl<sub>2</sub> 沉淀法将 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 完全转化为 BaSO<sub>4</sub>

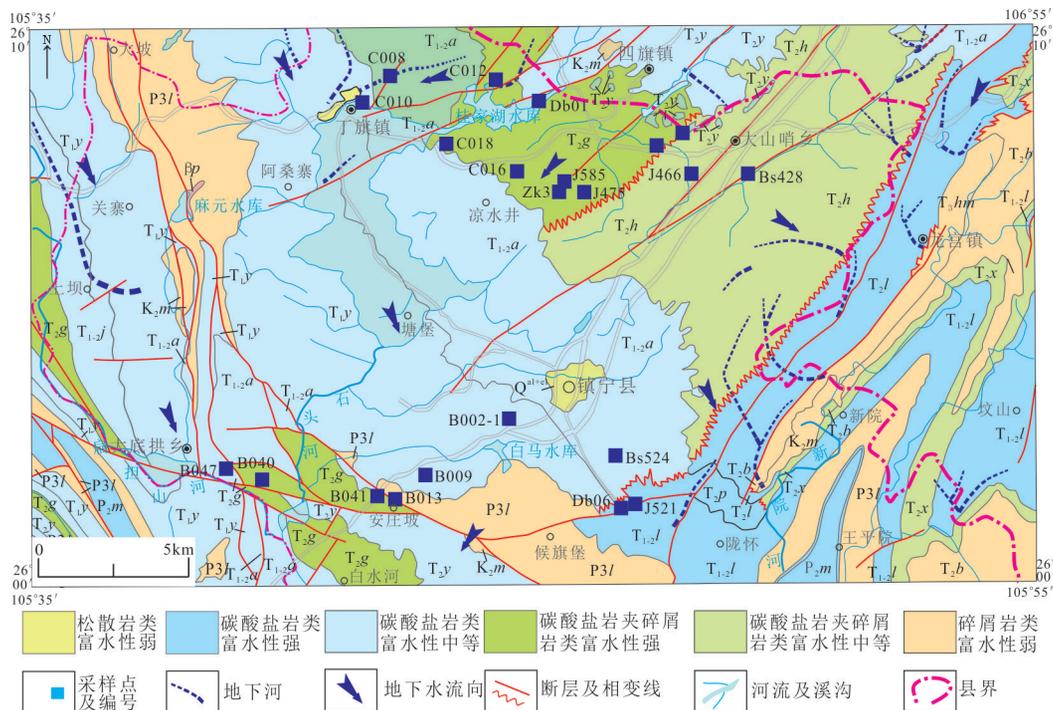


图 1 工作区水文地质简图及采样点位置

Fig.1 Hydrogeological map and location of sampling points in the study area

沉淀,并采用DPTA试剂再沉淀法进行纯化,制备纯净的BaSO<sub>4</sub>样品,冷冻至粉末状送至实验室测试。采样过程中,用预采样瓶对采样瓶进行3次以上的冲洗,再进行取样,水样采集前用0.45 μm 滤膜过滤,所有水样4℃条件下冷藏待测。

2017年9月,在镇宁县大山镇清河村石官堡村,对ZK3号钻孔岩心进行了取样,自上而下共采集10组岩石常量元素分析样品。

样品采样时均利用GPS记录采样点的位置坐标。

### 3.2 样品测试

Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>用硬度计和碱度计现场滴定,精度分别为2 mg/L和0.1 mmol/L。用法国PONSEL便携式水质测量仪现场测定水体pH,检测精度0.01。阳离子Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>用原子吸收光谱法(AAS)测试,阴离子SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>用高效液相色谱(HPLC)测定。 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 样用稳定同位素质谱仪(MAT253)测定,精度分别优于0.1%和0.05%。 $\delta^{34}S_{SO_4}$ 样采用气体同位素质谱仪(Delta v plus)测定,精度分别优于0.2‰。岩石样品的常量元素分析用电感耦合等离子体-原子发射光谱法(ICP-AES)测定。

阳离子(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>)、阴离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)和 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 样品的测定工作在自然资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成; $\delta^{34}S_{SO_4}$ 样品的测定工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成;岩石样品的岩矿鉴定及常量元素分析在自然资源部长沙矿产资源监督检测中心完成。

## 4 结果分析

### 4.1 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度特征

由表1可以看出,研究区内地表水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度在33~140 mg/L之间,平均值为86.5 mg/L,其中,DB01中阴离子HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>占绝对优势,DB04中阴离子HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>占绝对优势,DB01与DB04的水化学类型分别为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup>型和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup>型;地下水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度为30~1100 mg/L,平均值为221.78 mg/L C010、B002-1、B013、S159、J469、J585、ZK3(89 m)和ZK3(150 m)等8个高SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>样品中,阴离子以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>占绝对优势,水化学类型为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup>(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>)型。

西部临近的水城地区地表水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度63.1~110 mg/L,平均值为84.24 mg/L;地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度

30~61.1 mg/L,平均值为45.5 mg/L(Li et al.,2010),与研究区相比,地表水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度大体相当,而研究区地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度远高于水城地区,呈现富集SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的特点。

在研究区内不同类型地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度大体具有机井>上升泉>下降泉>溶潭>地下河出口>基岩裂隙泉>表层岩溶泉的规律(图2),其中机井、上升泉和下降泉中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度较高,均大于100 mg/L,溶潭、地下河出口、基岩裂隙泉及表层岩溶泉中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度差别不大,在40~50 mg/L,表明了SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的来源应该主要为所处的地层,浓度的高低与水岩交互作用的途径及时间长短有密切关系。

此外,利用SPSS软件分析得出,水体中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度与电导率相关系数达到0.983,二者具有高度的线性正相关关系(图3)。例如,样品中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度最高的J585中电导率达到了1787.17 μS/cm,样品中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度最低的BS524中电导率仅为297.11 μS/cm,在该地区的野外实地调查中,初步测得的超高电导率异常值可以作为初步判断水体SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>高度富集的依据。

### 4.2 同位素特征

水体中的 $\delta D_{V-SMOW}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 可以被运用于识别地下水或混合水体的补给来源(李小倩等,2014;杨平恒等,2014;任坤等,2016)。本文利用赵金凤等(2004)给出的中国西南地区大气降水线 $\delta D_{V-SMOW}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 关系方程: $\delta D_{V-SMOW}=7.96\delta^{18}O_{V-SMOW}+9.52$ ,对照图4可以看出,研究区内各类水体中 $\delta D_{V-SMOW}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 主要集中在西南地区大气降水线附近,表明了地表水、地下水的主要补给来源为大气降水。

前人研究发现,地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主要有以下几种来源:大气降水、蒸发岩的溶解、硫化物的氧化及土壤带中有机硫的矿化,此外,随着经济社会的发展,人类活动(如矿产开采、化肥施用)等也成为硫酸盐的主要来源之一(Hanshaw et al., 1979; Macpherson, 1996; Montoroi et al., 2002; Han et al., 2004; 赵金凤等,2004)。稳定同位素的组成( $\delta^{34}S$ )代表各污染源的化学指纹,不同来源的 $\delta^{34}S$ 存在较大差异,这使利用硫稳定同位素示踪污染来源成为可能(郭照冰等,2010),而被广泛运用于自然生态系统中各种硫源的示踪和地球化学循环的研究(任坤等,2016)。根据前人研究成果,邻近的贵阳地区夏季雨水中 $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$ 值主要在-8.1‰~-4.9‰

表1 研究区样品水化学测试结果

Table 1 Hydrochemical test results of samples in the study area

样品编号	地层	采样点类型	水化学类型	/ (mg·L <sup>-1</sup> )									电导率 / (μS·cm <sup>-1</sup> )	pH
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
C008	T <sub>1-2</sub> a <sup>1</sup>	溶潭	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	54.85	27.40	2.22	2.40	6.79	50.21	224.40	9.83	249.77	7.59	
C010	T <sub>1-2</sub> a <sup>1</sup>	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	60.66	36.79	1.61	2.04	6.80	79.96	265.74	8.99	302.97	7.47	
C012	T <sub>2</sub> g <sup>1b</sup>	地下河出口	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	46.46	33.66	3.03	2.91	12.32	46.62	242.96	17.66	254.58	7.80	
C016	T <sub>2</sub> g <sup>1a</sup>	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	42.59	34.83	3.03	3.72	2.92	47.54	253.08	15.33	281.61	7.75	
C018	T <sub>2</sub> g <sup>1a</sup>	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	61.30	46.58	3.24	3.01	5.19	63.71	317.19	11.88	344.86	7.37	
B002-1	T <sub>1</sub> y	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	300.70	27.40	3.46	8.82	8.04	657.75	172.09	63.28	863.73	7.31	
B009	T <sub>1</sub> y	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	106.47	9.78	2.83	9.81	22.64	63.34	151.85	125.92	306.18	7.27	
B011	T <sub>2</sub> g <sup>1a</sup>	溶潭	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	86.47	25.83	2.02	3.14	7.27	47.10	293.57	36.45	322.29	7.44	
B013	T <sub>2</sub> g <sup>1a</sup>	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	123.90	19.77	2.73	18.14	19.41	161.38	234.52	56.04	390.80	6.95	
B040	T <sub>2</sub> g <sup>1b</sup>	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	95.15	46.58	3.90	3.18	6.77	66.77	416.74	14.58	431.89	7.37	
B047	T <sub>2</sub> g <sup>1a</sup>	上升泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	100.02	38.75	25.65	13.90	15.93	155.79	361.06	42.69	409.32	7.33	
DB01	—	地表水	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	39.13	20.76	2.10	2.20	9.37	33.00	159.88	12.88	183.21	7.30	
DB04	—	地表水	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	82.19	25.96	7.50	20.70	16.87	140.00	228.59	10.76	423.07	8.10	
S142	T <sub>1</sub> l <sup>1</sup>	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	84.75	4.15	1.80	1.70	4.69	30.00	222.06	17.52	278.45	7.40	
BS524	T <sub>1-2</sub> a <sup>1b</sup>	表层岩溶泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	58.70	31.64	5.10	2.90	7.03	30.00	288.35	15.43	297.11	7.30	
BS248	T <sub>2</sub> h <sup>3</sup>	表层岩溶泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	61.64	33.23	5.20	3.10	7.03	53.00	277.58	17.58	319.11	7.50	
GS146	T <sub>2</sub> q <sup>1</sup>	基岩裂隙泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	37.67	7.27	12.20	5.70	5.16	43.00	117.56	6.04	278.45	7.50	
S159	C <sub>3</sub> mp	下降泉	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	91.64	23.23	3.20	4.10	6.03	71.25	255.52	11.58	345.23	7.30	
J469	T <sub>2</sub> g <sup>1</sup>	机井	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	365.42	79.23	14.20	8.20	17.08	898.13	268.43	10.76	1645.33	7.40	
J585	T <sub>2</sub> g <sup>1</sup>	机井	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	405.98	88.00	13.40	7.60	14.06	1100.00	276.93	11.96	1787.17	7.30	
ZK3-1(89m)	T <sub>2</sub> g <sup>1</sup>	机井	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	288.51	73.72	15.60	9.60	23.44	720.00	342.89	9.00	1324.31	7.60	
ZK3-2(150m)	T <sub>2</sub> g <sup>1</sup>	机井	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> ·Mg <sup>2+</sup>	89.04	39.97	1.70	1.20	4.22	100.00	339.63	2.69	414.63	7.40	
平均值				121.97	35.21	6.17	6.28	10.41	209.48	259.57	24.04	520.64	7.44	

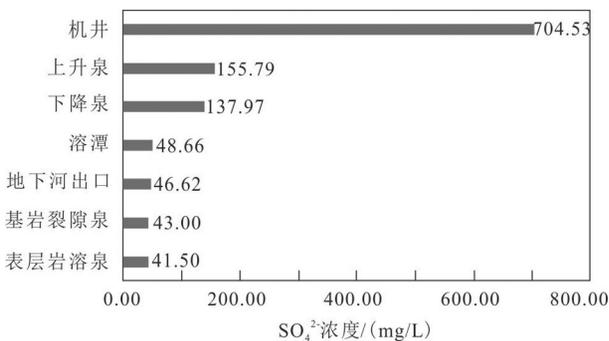


图2 研究区不同类型地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度特征  
Fig. 2 Concentration characteristics of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in different types of groundwater

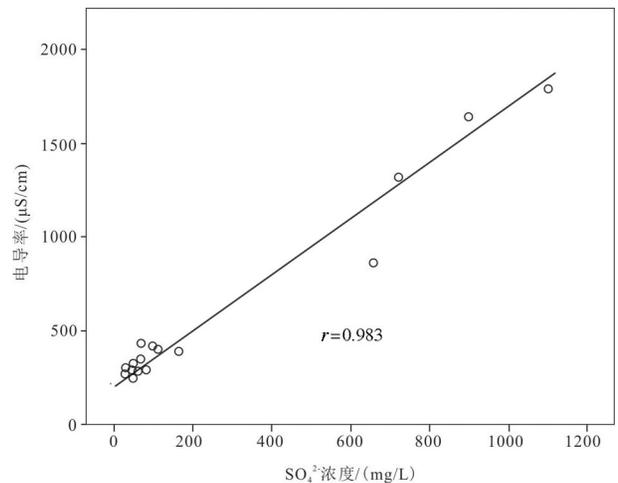
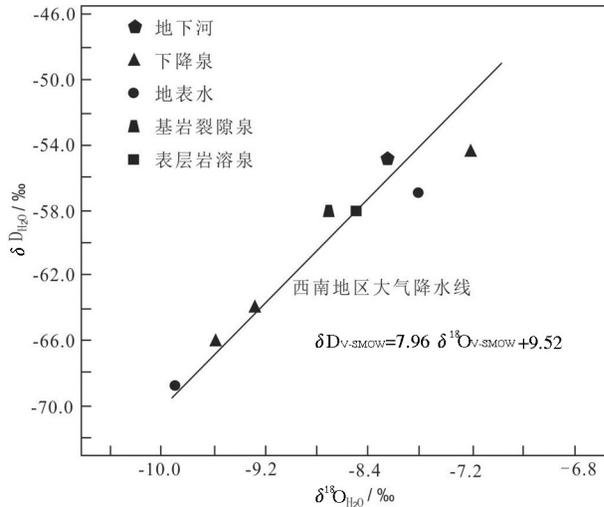


图3 样品中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度与电导率的关系  
Fig. 3 Relationship between the concentration of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and the electrical conductivity

(Xiao Huanyun et al., 2002; 郭照冰等, 2010); 研究区附近的含煤地层主要为二叠系上统, 具有硫含量高和低 δ<sup>34</sup>S 的特点, 其 δ<sup>34</sup>S (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 值变化于 -15‰ ~ -2.51‰ (蒋颖魁等, 2007); 寒武系膏岩层中石膏的 δ<sup>34</sup>S (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 值最高, 达 +32‰, 二叠—三叠系膏岩层

中石膏的 δ<sup>34</sup>S (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 值相对较小, 变化范围为 +10‰ ~ +28‰ (Krouse et al., 1991)。本次研究分别以 -

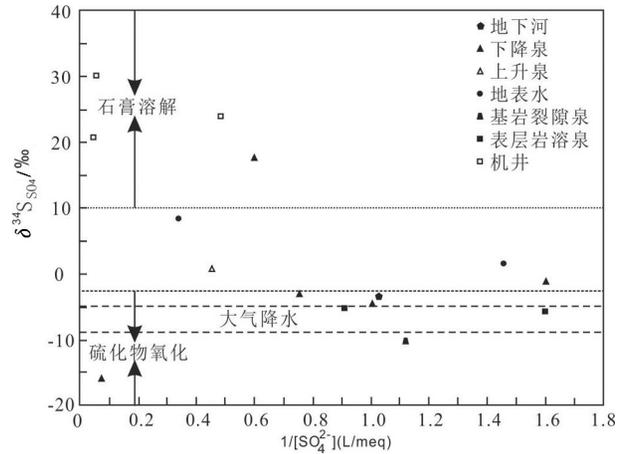
图4 各类水体中 $\delta D_{V-SMOW}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 的关系Fig.4 Relationship between  $\delta D_{V-SMOW}$  and  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  in different types of groundwater

8.1‰~-4.9‰, -15‰~-2.51‰及+10‰~+32‰作为识别水体中 $SO_4^{2-}$ 大气降水来源、硫化物氧化来源及石膏溶解来源的 $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$ 特征值。

研究区内各类水体中 $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$ 值(表2)在-15.30‰~30.40‰,平均值为1.08‰,其相对较宽的分布范围反映了研究区内硫酸根的来源比较多样。由图5可以看出,有J469、J585、ZK3-2及C010等4个样品的 $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$ 值位于石膏溶解来源的范围内,这4个点均位于膏岩发育地层;有BS524、BS248等2个样品的 $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$ 值位于大气降水来源的范围内,这2个点均为表层岩溶泉;有B002-1、GS146等5个样品位于硫化物氧化来源范围内,样品中包含了岩溶下降泉、基岩裂隙泉及地下河3种类型,推测与来自煤系地层补给区的地下水输入有关。

## 5 “越层找水”模式

为查明研究区内地下水中高硫酸盐在垂向上的分布规律及形成机理,在镇宁县大山镇清河村实施了钻井ZK3号,终孔深度为150.26 m,钻遇地层自上而下分别为第四系黏土层、三叠系中统关岭组一段上亚段( $T_2g^{1b}$ )、关岭组一段下亚段( $T_2g^{1a}$ )及三叠系下统安顺组四段( $T_{1-a}^4$ ),为获取不同深度地下水水质水量的变化特征,钻孔采取分层抽水(第一试段0~89.32 m,混合试段0~150.26 m),并采取4件岩石样品和2件水样(图6),综合钻探及测试结果

图5 不同类型水体中 $\delta^{34}S_{SO_4}$ 与 $1/[SO_4^{2-}]$ 关系图Fig.5 Relationship between  $\delta^{34}S_{SO_4}$  and  $1/[SO_4^{2-}]$  in different types of groundwater表2 研究区样品 $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$ 测试结果Table 2  $\delta^{34}S(SO_4^{2-})$  test results of samples in the study area

样品编号	地层	采样点类型	$[SO_4^{2-}]$ (meq/L)	$\delta^{34}S_{SO_4}/\%$
C010	$T_{1a}^1$	下降泉	1.67	17.30
C012	$T_2g^{1b}$	地下河出口	0.97	-3.50
C016	$T_2g^{1a}$	下降泉	0.99	-4.40
C018	$T_2g^{1a}$	下降泉	1.33	-3.20
B002-1	$T_{1y}$	下降泉	13.70	-15.30
B047	$T_2g^{1a}$	上升泉	2.20	0.70
DB01	—	地表水	0.69	1.40
DB04	—	地表水	2.92	8.70
S142	$T_{1f}^1$	下降泉	0.63	-1.10
BS524	$T_{1a}^{1b}$	表层岩溶泉	0.63	-5.60
BS248	$T_2h^3$	表层岩溶泉	1.10	-5.20
GS146	$T_2g^1$	基岩裂隙泉	0.90	-10.10
J469	$T_2g^1$	机井	18.71	30.40
J585	$T_2g^1$	机井	22.92	20.90
ZK3-2(150 m)	$T_2g^1$	机井	2.08	24.00

(表3),该地区地层垂向上具有如下特征:

(1)地层岩性以泥晶白云岩、泥质白云岩为主,夹部分角砾白云岩及白云质泥岩、泥岩,基岩中S含量为0.30~1.40 g/kg。

(2)距 $T_2g^{1a}$ 地层顶面20 m深度发育一层厚约1 m的膏岩层,在水-岩交互作用下,导致水体中硫酸盐( $SO_4^{2-}$ )含量超标,ZK-1(89 m)采样分析结果显示(表1),样品中 $SO_4^{2-}$ 含量720 mg/L,电导率为1324.31  $\mu S/cm$ ,按照《地下水水质标准》(DZ/T 0290-2015)对水质进行评价,该试段水质属V类

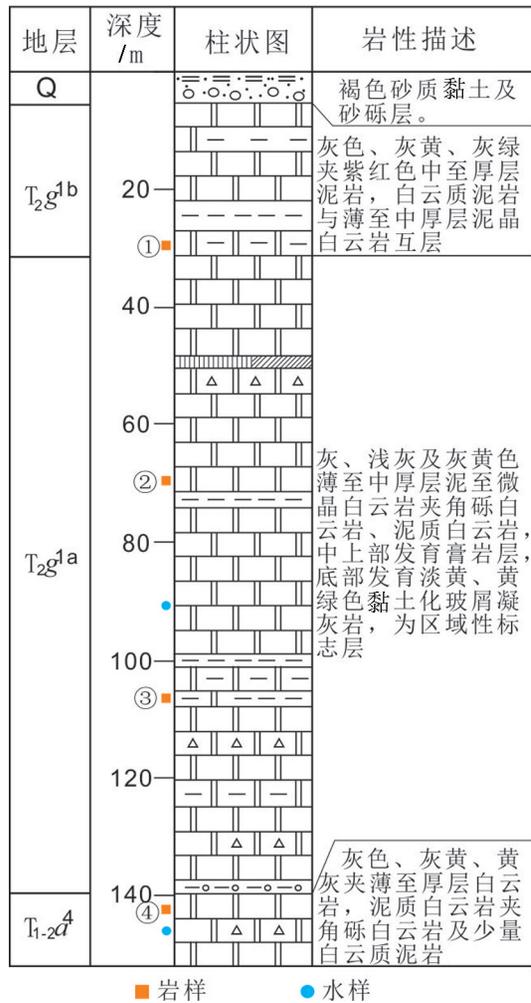


图6 ZK3号钻井柱状图及样品采集部位  
Fig.6 ZK3 borehole histogram and location of sample collection

水,不适宜生活饮用。

(3)T<sub>2</sub>g<sup>1a</sup>地层中下部发育的泥质白云岩、泥岩为一相对隔水层,钻透该层后发育第二个含水层,具承压性,ZK-1(150 m)水样采集及测试结果发现,水体中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量124 mg/L,电导率降为414.63 μS/cm,评价结果水质属Ⅲ类水,可以适用于集中式生活饮用水水源。

根据以上特征,在镇宁T<sub>2</sub>g<sup>1a</sup>地层高硫酸盐地下水发育区,可以通过开展“越层找水”来解决当地水质性缺水难题,如图7所示,“越层找水”模式的机理如下:

研究区T<sub>2</sub>g<sup>1</sup>地层是以潮汐作用和蒸发作用为主的碳酸盐潮坪-潟湖沉积,白云岩中常有石膏伴生,

表3 ZK3号钻井岩心样品测试结果  
Table 3 Core sample of ZK3 borehole test results

样品编号	S/(g/kg)	薄片鉴定结果
①	0.30	泥质白云岩
②	0.36	泥晶白云岩
③	0.35	白云质泥岩
④	1.40	泥晶白云岩

在长期的水岩交互作用下,石膏中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>不断溶解进入地下水中,形成了SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>高度富集的现象,造成了发育在该地层中的岩溶泉及碳酸盐岩裂隙孔洞水均呈现不同程度的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>超标,导致了所在地区的水质性缺水问题;T<sub>2</sub>g<sup>1</sup>地层中发育有泥质白云岩、白云质泥岩、泥岩,这些层位透水性差,阻隔了其上下之间的水力联系,可作为区域上的相对隔水层,位于下部的白云岩地层硫含量较低,赋存其中的地下水不会产生SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的高度富集;垂向上,自上而下可划分出高硫酸盐含水层、相对隔水层和低硫酸盐含水层三个层位,在开发利用过程中可通过钻越高硫酸盐含水层和相对隔水层,并采取分层止水,开采低硫酸盐含水层,获取水质达标的生活饮用水源。

“越层找水”模式的关键在于其相对隔水层的存在,因此,该模式适于在泥岩等相对隔水层连续性较好且厚度较大地区实施推广;在断层发育地区,应综合考虑断层性质,谨慎实施钻探工程;拉张性断层发育区易造成上下含水层联通,导致水体中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度普遍超标,压扭性断层发育区则要注意地层错动情况。

## 6 结论

(1)研究区地下水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度在30~1100 mg/L之间,平均值为221.78 mg/L,地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度远高于西侧的水城地区,呈现富集SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的特点,原因在于研究区内发育的三叠系中下统地层主要是以潮汐作用和蒸发作用为主的碳酸盐潮坪-潟湖沉积,常有石膏盐类伴生,水岩交互作用下,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>大量进入地下水体中。

(2)统计分析得出,在区域相对隔水层以上,不同类型地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度大体具有有机井>上升泉>下降泉>溶潭>地下河出口>基岩裂隙泉>表层岩溶泉的规律,表明地下水和围岩的作用途径及时间长短,对水体中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度具有明显影响。

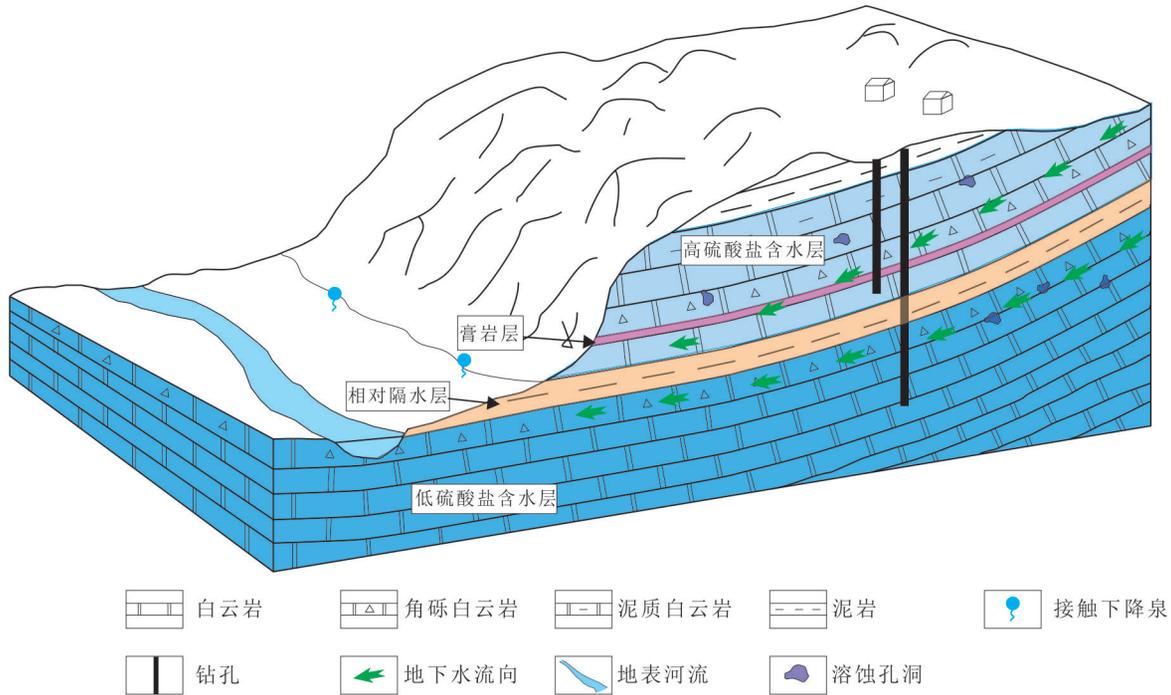


图7 “越层找水”模式示意图

Fig.7 Schematic diagram of water exploration by cross layer

(3)研究区内各类水体中硫酸根的来源多种多样,表层岩溶泉中硫酸根的来源主要为大气降水, J469、J585、ZK3-2及C010等高硫酸盐样品中硫酸根的来源主要为石膏溶解,地表水及部分泉点由于外来补给源较复杂,其硫酸根的来源不易确定。

(4)综合水体中 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度发育规律、 $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ 值特征及钻井岩心观测,可以得出造成当地地下水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 超标的主要原因是三叠系中统关岭组一段下亚段 $\text{T}_2\text{g}^{1a}$ 地层中石膏层的溶解。

(5)通过建立“越层找水”模式,钻越高硫酸盐含水层,采取分层止水,开采下部的低硫酸盐含水层,可有效解决研究区内存在的水质性缺水问题。

## References

- Cao Jianhua, Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Xia Riyuan, Zhang Cheng. 2017. The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years [J]. *Geology in China*, 44(5): 874-900 (in Chinese with English abstract).
- CLARKI, FRITZP. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology* [M]. New York: Lewis Publishers.
- Dong Jianzhong, Liu Xingjuan. 2001. Study on the correlation between drinking water quality and causes of death in Shaxian County [J]. *Journal of Environment and Health*, 18(6): 375-376 (in Chinese).
- Regional Geological Survey Brigade of Guizhou Geological and Mineral Bureau. 1992. *Guizhou Atlas of the palaeogeography of Guiyang*: Guizhou Science and Technology Publishing House [M] (in Chinese).
- Guo Zhaobing, Dong Qiongyuan, Chen Tian, Chen Tianlei, Bao Chunxiao, Zhou Fei. 2010. Identification of environmental pollutants using sulfur stable isotope [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2(5): 426-430 (in Chinese with English abstract).
- Han G L, Liu C Q. 2004. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. *Chemical Geology*, 204(1/2): 1-21.
- Hanshaw B B, Back W. 1979. Major geochemical processes in the evolution of carbonate-quifer systems [J]. *Journal of Hydrology*, 43(1/4): 287-312.
- Hosono T, Nakano T, Igeta A, Tayasu I, Tanaka T, Yachi S. 2007. Impact of fertilizer on a small watershed of Lake Biwa: Use of sulfur and strontium isotopes in environmental diagnosis [J]. *Science of the Total Environment*, 384(1/3): 342-354.
- Hu Mingcheng. 2012. Environmental hazards by sulfate and treatment method of waste water containing sulfate [J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 31(2): 181-184 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yingkui, Liu Congqiang, Tao Faxiang. 2007. Sulfur isotope

- composition characters of Wujiang river water in Guizhou province [J]. *Advances in Water Science*, 18(4): 558–565 (in Chinese with English abstract).
- Krouse H R, Crinenko V A. 1991. *Stable Isotopic: Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment* [M]. Chichester: John Wiley, 1–440.
- Li Xiaodong, Liu Congqiang, Harue M, Li Siliang, Liu Xiaodong. 2010. The use of environmental isotopic (C, Sr, S) and hydrochemical tracers to characterize anthropogenic effects on karst groundwater quality: A case study of the Shuicheng Basin, SW China [J]. *Applied Geochemistry*, 25(12): 1924–1936.
- Li Xiaoqian, Liu Yunde, Zhou Aiguo, Zhang Bin. 2014. Sulfur and oxygen isotope compositions of dissolved sulfate in the Yangtze river during high water period and its sulfate source tracing [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(11): 1547–1554 (in Chinese with English abstract).
- Li Yun, Jiang Yuehua, Zhou Xun, Jian Junyuan, Zhou Quanping, Li Yunfeng. 2014. Characteristics of Hydraulic Connection and Sulfate Contamination within the Groundwater System of Yangzhou–Taizhou–Jingjiang Area [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(2):183–190 (in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang, Lang Yunchao, Satake H, Wu Jiahong, Li Siliang. 2008. Identification of anthropogenic and natural inputs of sulfate and chloride into the karstic ground eater of Guiyang, SW China: Combined  $\delta^{37}\text{Cl}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 42(15):5421–5427.
- Macpherson G L. 1996. Hydrogeology of thin limestones: the Konza Prairie long– term ecological research site, Northeastern Kansas [J]. *Journal of Hydrology*, 186(1–4): 191–228.
- Montoroi J P, Grünberger O, Nasri S. 2002. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia [J]. *Applied Geochemistry*, 17(8): 1047–1060.
- Niu Xinsheng, Liu Xifang, Chen Xiwen. 2014. Hydrochemical characteristics and origin for salt springs water in Dogai Coring area of north Qiangtang basin, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(6):1003–1010.
- Ren Kun, Pan Xiaodong, Lan Ganjiang, Jiao Youjun, Zeng Jie, Meng Xiaojun, Pang Yuan. 2016. Sulfate concentrations and source identification in different water bodies of the Chadianqiao underground river basin in Central Guizhou [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8):1922–1932 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mingzhang. 2012. Considerations about the hydrogeology exploration works in Guizhou Province [J]. *Guizhou Geology*, 29(2):81–85 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Huanyun, Liu Congqiang. 2002. Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, southwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 36(33): 5121–5130.
- Yang Pingheng, Lu Bingqing, He Qiufang, Chen Xuebin. 2014. Hydrogeochemical characteristics of typical karst groundwater system in Chongqing [J]. *Environmental Science*, 35(4): 1290–1296 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuncheng, Shen Zhaoli, Wen Dongguang, Hou Guangcai, Zhao Zhenhong, Wang Dong. 2008. Hydrochemical characteristics and sources of sulfate groundwater of the Ordos Cretaceous Groundwater Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(5):553–562 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Sun Lu, Yin Xiulan, Meng Hui. 2017. Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review [J]. *Geology in China*, 44(5): 901–912 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jinfeng, Xia Keqin, Shi Yuchuan, Sun Jinyu. 2004. Isotope component characteristics of Geleshan Tunnel’ Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 15(2): 94–97 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 夏日元, 章程. 2017. 岩溶动力系统与全球变化研究进展[J]. *中国地质*, 44(5): 874–900.
- 贵州省地矿局. 贵州省地下水勘查规划[R]. 2009.
- 胡明成. 2012. 硫酸盐的环境危害及含硫酸盐废水处理技术[J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 31(2): 181–184.
- 李小倩, 刘运德, 周爱国, 张彬. 2014. 长江干流丰水期河水硫酸盐同位素组成特征及其来源解析[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 39(11):1547–1554.
- 李云, 姜月华, 周迅, 贾军元, 周权平, 李云峰. 2014. 扬–泰–靖地区地下水系统水力联系与硫酸盐污染特征[J]. *地球学报*, 35(2): 183–190.
- 董建忠, 刘杏娟. 2001. 饮用水水质与居民死因的相关性研究[J]. *环境与健康杂志*, 18(6):375–376.
- 贵州省地质矿产局区域地质调查大队. 1992. 贵州岩相古地理图集[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 郭照冰, 董琼元, 陈天, 陈天蕾, 包春晓, 周飞. 2010. 硫稳定同位素对环境污染物的示踪[J]. *南京工程信息大学学报(自然科学版)*, 2(5): 426–430.
- 蒋颖魁, 刘从强, 陶发祥. 2007. 贵州乌江水系河水硫同位素组成研究[J]. *水科学进展*, 18(4): 558–565.
- 任坤, 潘晓东, 兰干江, 焦友军, 曾洁, 孟小军, 庞园. 2016. 黔中茶店桥地下河流域不同水体硫酸盐浓度特征及来源识别[J]. *地质学报*, 90(8):1922–1932.
- 王明章. 2012. 贵州省水文地质工作思考[J]. *贵州地质*, 29(2):81–85.
- 杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬. 2014. 重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究[J]. *环境科学*, 35(4): 1290–1296.
- 杨郧城, 沈照理, 文冬光, 侯光才, 赵振宏, 王冬. 2008. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地硫酸盐的水文地球化学特征及来源[J]. *地球学报*, 29(5):553–562.
- 张永双, 孙璐, 殷秀兰, 孟晖. 2017. 中国环境地质研究主要进展与展望[J]. *中国地质*, 44(5): 901–912.
- 赵金凤, 夏克勤, 石豫川, 孙晋玉. 2004. 重庆歌乐山隧址区地下水同位素组成特征及意义[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 15(2):94–97.