

方尚武,李强,王若帆,等. 贵州高硫酸盐地区寻找安全饮用水方法的探讨[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 388-393.
DOI: 10. 11932/karst20190308

贵州高硫酸盐地区寻找安全饮用水方法的探讨

方尚武^{1,2}, 李强^{1,2}, 王若帆^{1,2}, 焦恒^{1,2}, 易瑞^{1,2}

(1. 贵州省地矿局第二工程勘察院, 贵州 遵义 563000;

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: 贵州镇宁地区地下水中硫酸盐超标是典型的环境地质问题之一, 而该区地下水中硫酸盐超标主要来自于三叠系中统关岭组(T_2g)含水岩组。采集水样分析发现该含水岩组中地下水的硫酸盐含量达到了 $275.42 \sim 1\,100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为 IV—V 类水。运用地下水中硫同位素追踪, 其硫酸盐主要来源于石膏溶解, 并通过实施“探采结合井”(ZK3), 初步查明“膏岩层”分布于三叠系中统关岭组一段下亚段(T_2g^{1a})的中下部, 厚度在 $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 。而分层抽水试验显示: T_2g 含水岩组试段水质为 V 类, 降深在 11.50 m 时涌水量为 $256.61 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 当揭穿 T_2g 膏岩层含水层并进行封隔止水后, 钻孔自流量为 $330.05 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 降深在 10.80 m 时钻孔涌水量达 $628.84 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 水质属 III 类水。因此, 在类似因水质超标而引起的功能性缺水地区, 可越过膏岩层而获取深层安全的可饮用的地下水。

关键词: 硫酸盐; 地下水; 膏岩层

中图分类号: P641.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2019)03-0388-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地下水是重要的饮用水资源, 全世界有 $20\% \sim 25\%$ 的人口把岩溶地下水作为饮用水源^[1]。在贵州镇宁地区, 地下水中硫酸盐(SO_4^{2-})含量超标已成为区内与地下水有关的重要环境地质问题之一, 使得区内当地村民有水不能用于饮用——功能性缺水问题相当突出。地下水中硫酸盐(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^[2], 不同来源的 SO_4^{2-} 具有不同的 $\delta^{34}\text{S}$ “指纹”特征, 因而 $\delta^{34}\text{S}$ 被广泛运用于示踪 SO_4^{2-} 的来源^[3-6]。目前国内外对地下水中硫酸盐来源研究较多, 大多数都仅仅停留在硫酸盐来源识别的领

域, 然而针对如何解决地下水中硫酸盐超标的环境地质问题的研究却为数寥寥, 本文在识别地下水中硫酸盐来源的基础上, 探讨如何解决农村饮水安全问题。通过开展水文地质调查、水样采集及测试, 并实施“探采结合”水文地质钻孔, 查明导致硫酸盐超标的含水岩组中特有的“膏岩层”的分布特征, 同时开展分层抽水试验, 探索在该地区寻找可供人类安全饮用的岩溶地下水, 以期为岩溶区地下水资源的合理开发与保护提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于贵州省西南部镇宁县, 毗邻贵州社会

资助项目: 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); 贵州省科技计划项目“贵州省地下热水资源赋存条件及勘查关键技术研究”(黔科合[2016]支撑 2842)

第一作者简介: 方尚武(1986—), 男, 工程师, 主要从事西南岩溶水文地质、环境地质、地热地质等方面工作。E-mail: 504685875@qq.com。

通信作者: 李强(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、地热地质等方面工作。E-mail: 109616117@qq.com。

收稿日期: 2018-06-06

经济产业布局中的黔中经济核心,为贵州省主体功能区划中的国家重点开发区域,处于贵阳—安顺都市圈内。区内属亚热带湿润季风气候,全年平均气温为 16.2℃,最冷月(元月)平均气温为 6.5℃,最热月(7 月)平均气温为 23.7℃。区内年无霜期长达 297~345 d,年平均相对湿度为 78%,年平均蒸发量为 1 125 mm,年日照时数为 1 142 h。区内属典型的岩溶山区,岩溶特别发育,形成的岩溶地貌与常态地貌交错分布,地貌形态千姿百态,石芽、竖井、漏斗、洼地、谷地、盲谷、丘峰、峰林等到处可见,溶洞、暗河、地下廊道比比皆是。由于碳酸盐岩大面积分布,跌宕起伏的山区地形和强烈发育的岩溶使得区内生态环境极为脆弱,并由此引发了较多的环境地质问题,成为制约地域经济社会发展的瓶颈^[7-10]。区内出露的主

要地层为二叠系中统栖霞—茅口组(P_2q+m)、上统龙潭组(P_3l)、三叠系下统大冶组(T_1d)、安顺组(T_1a)、罗楼组(T_1l)、中统关岭组(T_2g)/花溪组(T_2h)/青岩组(T_2q)、杨柳井组(T_2y)/边阳组(T_2b)/垄头组(T_2l)、上统黑庙湾组(T_3hm)(表 1)。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(图 1)。区内二叠系上统龙潭组(P_3l)沉积相主要为半局限台地相(HP),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。三叠系中统关岭组(T_2g)、杨柳井组(T_2y)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^[11]。

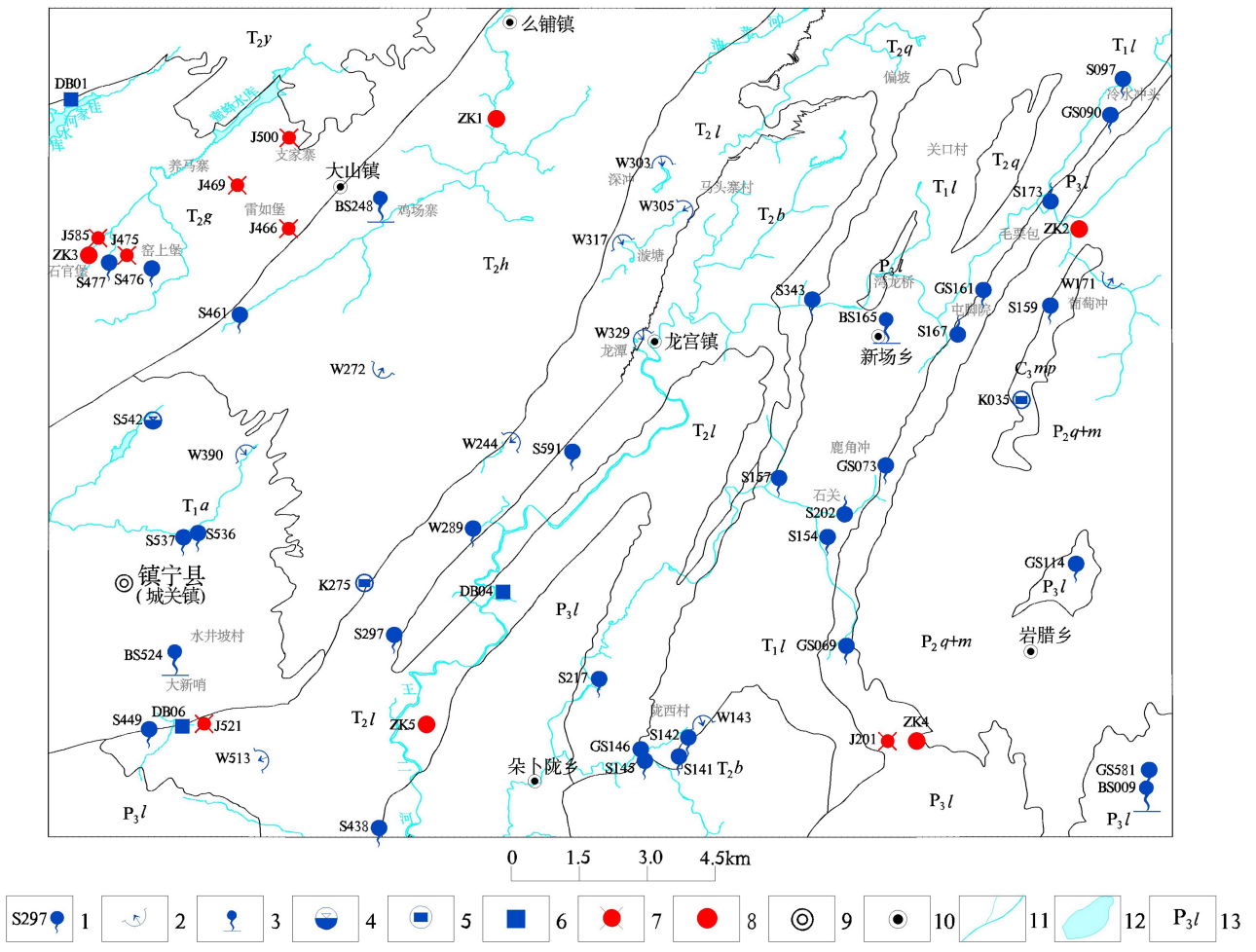


图 1 研究区地质构造及水样采集点分布图

Fig. 1 Map showing geological structure and distribution of sampling sites in the study area
1—岩溶下降泉(左:野外编号) 2—地下河出口 3—表层岩溶泉 4—溶潭 5—竖井 6—地表水 7—地下水开采井
8—本次实施的探采结合井 9—县驻地 10—乡镇驻地 11—河流 12—水库 13—含水岩组

表 1 研究区地层岩性特征表

Table 1 Lithology characteristic of strata in the study area

系	统	阶(组)				符 号		地层岩性特征									
		第四系				Q		残坡积、亚黏土、黏土									
白垩系	上统	扎佐组				$K_2 z^1$		灰岩、砂岩及硅质岩与泥岩胶结									
三叠系	上统	黑庙湾组				$T_3 h m$		灰岩、生物屑灰岩夹泥岩、粉砂岩									
	中统	杨柳井组			边阳组	$T_2 y$		$T_2 b$	灰色薄至中厚层白云岩夹角砾白云		灰-灰白色厚层块状砂屑生物屑灰岩	砂岩与泥岩及粉砂质泥岩不等厚互层					
		关岭组	第二段上亚段	花溪组		垄头组	青岩组		$T_2 g^{2b}$	$T_2 h$		$T_2 l$	$T_2 q$	灰色白云岩、泥质白云岩及泥云岩夹灰岩	灰-深灰色灰岩夹白云岩及灰质白云岩、泥岩	下部为褐黄色薄至中厚层钙质泥岩及泥岩夹薄层泥晶灰岩;上部为深灰、蓝灰色薄至中厚层泥岩夹薄层泥灰岩	
			第二段下亚段											$T_2 g^{2a}$			灰色灰岩夹泥质灰岩及泥质白云岩
			第一段上亚段											$T_2 g^{1b}$			浅灰白云岩及泥质白云岩与紫红、褐黄、灰绿色泥岩不等厚互层
			第一段下亚段											$T_2 g^{1a}$			灰色白云岩夹角砾白云岩,底部有 1~1.5 m 厚石膏

注:杨柳井组与边阳组为相变关系,关岭组、花溪组、垄头组、青岩组为同一个沉积时期的相变地层。

2 研究方法

2.1 方法

研究工作手段主要采用水文地质环境地质调查、地球物理勘探、水文地质钻探,水样采集及测试等。主要目的是查明研究区内岩溶地下水的含水岩组特征,地下水补给、径流、排泄特征和地下水化学特征等。对硫酸盐超标的地下水机井进行专项水样采集及测试,运用 ^{34}S 同位素追踪硫酸盐的来源,实施“探采结合”水文地质钻孔,并开展分层抽水试验。通过实验,分析含膏岩层与不含膏岩层含水层的水质、水量结果,为寻找安全饮用水提供技术依据。

2.2 数据采集

2016 年 7 月,对区内地下水机井进行了全分析取样调查。水样采集按照《水质采样、样品的保存和

管理技术规定(GB12999-91)》、《水质、采样技术指导(GB12998-91)》要求进行采集及测试。同年 8 月,对硫酸盐超标的地下水机井进行硫同位素($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$)测试,该测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心(核工业地质分析测试研究中心)完成。

3 结果与讨论

3.1 地下水机井中硫酸盐含量

由表 2 可看出,地下水机井中水质超标的主要为三叠系中统关岭组($T_2 g$)含水岩组,按《地下水水质标准》(DZ/T 0290-2015)评价,为Ⅳ—Ⅴ类水质,硫酸盐(SO_4^{2-})超标。地下水中硫酸盐(SO_4^{2-})含量与硫同位素($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$)值大致呈正相关关系,其变化范围为 19.9‰~30.4‰。

表 2 地下水机井硫酸盐含量及硫同位素水质分析结果统计表

Table 2 Statistics of sulphate content and water quality analyses by sulphur isotope in motor wells of groundwater

编 号	类 型	位 置	含水岩组	硫酸盐含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	地下水质量评价
J466	机井	大山镇雷召村	$T_2 h$	275.42	28.6	Ⅳ类
J469	机井	大山镇豆角村	$T_2 g$	898.13	30.4	Ⅴ类
J475	机井	大山镇西窑村	$T_2 g$	341.31	19.9	Ⅳ类
J500	机井	大山镇支家村	$T_2 g$	460.43	20.9	Ⅴ类
J585	机井	大山镇清河村	$T_2 g$	1 100	24.0	Ⅴ类

注: $\text{SO}_4^{2-} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Ⅰ类; $\text{SO}_4^{2-} \leq 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Ⅱ类; $\text{SO}_4^{2-} \leq 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Ⅲ类; $\text{SO}_4^{2-} \leq 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Ⅳ类; $\text{SO}_4^{2-} > 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Ⅴ类。

3.2 硫酸盐来源的识别

3.2.1 从沉积环境条件分析

T₂g 沉积环境中,由于处于半封闭—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。根据化学反应式^[6,12-13]:CaSO₄≈Ca²⁺+SO₄²⁻,石膏(CaSO₄)在地下水运动过程中充分溶解,是区内地下水中硫酸盐(SO₄²⁻)形成的主要方式。

3.2.2 采用 δ³⁴S 同位素追踪 SO₄²⁻ 来源

地下水中不同来源 SO₄²⁻ 具有不同的 δ³⁴S“指纹”特征,因此 δ³⁴S 被广泛运用于示踪 SO₄²⁻ 的来源。大气降水中 δ³⁴S 值与 SO₄²⁻ 浓度及降水量没有相关性,δ³⁴S 值只与污染源有关^[14]。夏季贵阳地区雨水中 δ³⁴S 值主要在-8.1‰~-4.9‰之间^[15-16],本次评价以 δ³⁴S 值在此区间作为水体中大气降水来源的 δ³⁴S 值。贵州煤具有高硫含量和低 δ³⁴S 值的特点,硫含量在 3.12‰~9.08‰之间,平均值在 5.5‰,属于典型的高硫煤;其 δ³⁴S 值变化范围在-15‰~-2.51‰之间,平均值在-7.52‰^[17-20]。本次评价以 δ³⁴S 值在-15‰~-2.51‰作为水体中 SO₄²⁻ 煤系地层硫化物氧化来源的 δ³⁴S 特征值。寒武系膏岩层中石膏的 δ³⁴S 值最高,达 32‰,二叠系至三叠系膏岩层中石膏的 δ³⁴S 值相对较小,在 10‰~28‰^[21]。本次评价以 δ³⁴S 值在 10‰~32‰作为水体中石膏溶解来源的 δ³⁴S 值。图 2 显示地下水机井中硫酸盐来源于石膏溶解。

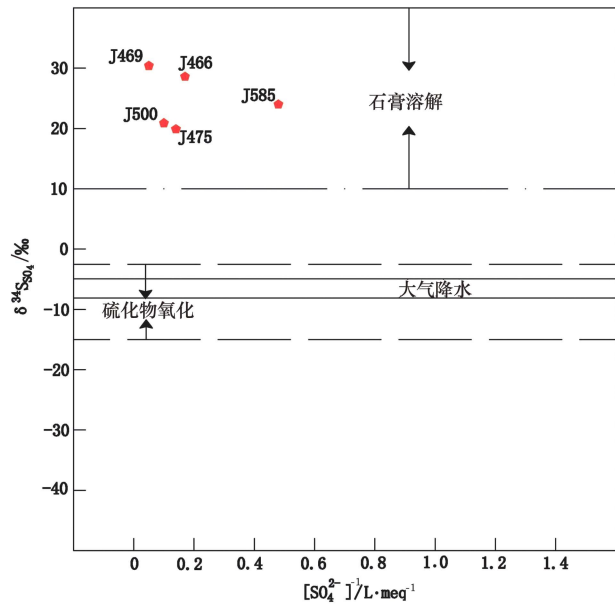


图 2 区内地下水中 δ³⁴S 与 1/[SO₄²⁻]关系图
Fig. 2 Relationship between δ³⁴S and 1/[SO₄²⁻] in groundwater of the study area

3.3 ZK3 水文地质“探采结合”井实施

3.3.1 钻孔地质结构

由图 3 可知,ZK3 钻孔地质结构如下:0~1.80 m 为第四系,岩性为灰黑色耕植土;1.80~30.98 m 为三叠系中统关岭组一段上亚段(T₂g^{1b}),岩性为浅灰色白云岩、泥质白云岩;30.98~138.1 m 为三叠系中统关岭组一段下亚段(T₂g^{1a}),岩性为浅灰色白云岩、角砾状白云岩、泥质白云岩,中下部沉积有 1.3 m 厚的膏岩层;138.1~150.26 m 为三叠系下统安顺组四段(T₁a⁴)浅灰色白云岩、角状白云岩。

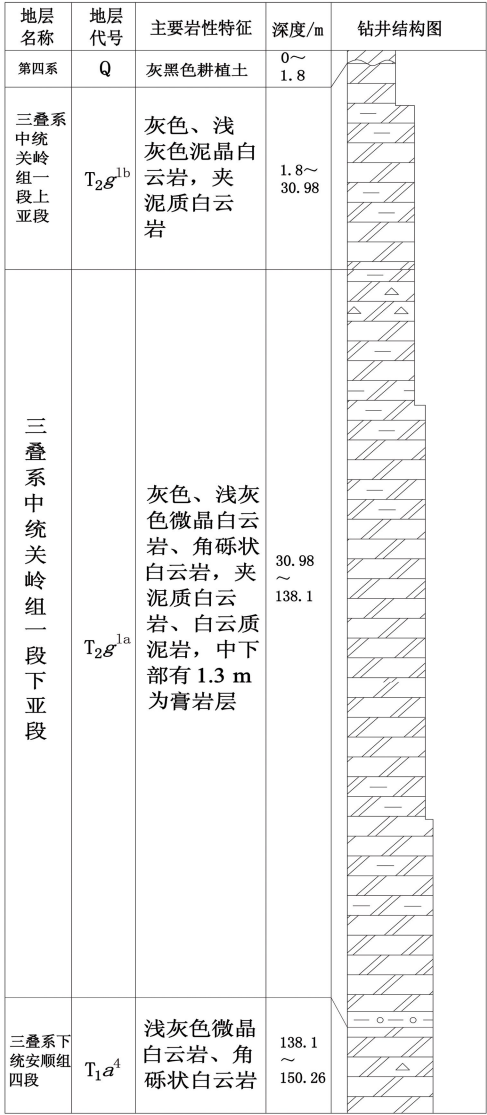


图 3 ZK3 号“探采”结合井地质结构图

Fig. 3 Geological structure of "combined exploration and pumping" well ZK3

3.3.2 分层抽水

在 89.32 m 时钻遇石膏层,继续钻进至 108.7 m,

开展了第一次抽水试验并采集水样,通过抽水实验,降深在 11.50 m 时涌水量为 $256.61 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;通过水样采集测试结果显示:水质中 SO_4^{2-} 含量为 $720 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总硬度(以 CaCO_3 计)为 $1\,023.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,溶解性总固体为 $1\,324.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。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 类水(硫酸盐、总硬度 V 类,溶解性总固体 IV 类),已超标,不适宜生活饮用。

钻进至 150.26 m 终孔,同时下置实管封隔 T_2g 含水层段,开展了第二次抽水试验并采集水样。通过水样采集及测试结果发现,地下水中 SO_4^{2-} 含量为 $124 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总硬度(以 CaCO_3 计)为 $413 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,溶解性总固体为 $455.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。评价结果水质属 III 类水,可适用于集中式生活饮用水水源;通过抽水实验,钻孔自流量为 $330.05 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,降深在 10.80 m 时钻孔涌水量达 $628.84 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

4 结 论

(1)地下水中硫酸盐超标主要来自 T_2g 含水岩组,且硫酸盐含量达 $275.42 \sim 1\,100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,属 IV—V 类水质,不适宜生活饮用。

(2) T_2g 含水岩组中地下水的硫同位素($\delta^{34}\text{S}_{\text{v-cdt}}$)值范围在 $19.9\text{‰} \sim 30.4\text{‰}$,其硫酸盐(SO_4^{2-})主要来源于石膏溶解。

(3)通过实施“探采结合”水文地质钻探,该膏岩层主要沉积在 T_2g^{1a} 的中下部,厚度在 $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 。

(4)在膏盐层段开展的第一次抽水试验显示降深在 11.50 m 时涌水量为 $256.61 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水质属 V 类水,不适宜生活饮用;终孔时开展第二次抽水试验,并下置实管封隔 T_2g 含水层段后,钻孔自流量为 $330.05 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,降深在 10.80 m 时钻孔涌水量达 $628.84 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水质属 III 类水,可适用于集中式生活饮用水水源。

(5)在类似功能性缺水地区,可越过膏岩层而获取深层安全的可饮用的地下水。

致 谢:感谢贵州省地矿局王明章研究员、中国地质科学院岩溶地质研究所夏日元研究员等在论文写作中给予的指导,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007: 1-45.
- [2] Liu Congqiang, Lang Yunchao, Satake H, et al. 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, 2008, 42(15): 5421-5427.

- [3] Crowley S F, Mccarthy M D B, Bottrell S H, et al. $\delta^{34}\text{S}$ of Lower Carboniferous Anhydrite, Cumbria and Its Implications for Mineralization in the northern Pennines[J]. Journal of the Geological Society, 2008, 154(4): 597-600.
- [4] Hosono T, Nakano T, Igeta A, et al. Impact of fertilizer on a small watershed of Lake Biwa: Use of sulfur and strontium isotopes in environmental diagnosis. Science of the Total Environment, 2007, 384(1-3): 342-354.
- [5] Niu Xinsheng, Liu Xifang, Chen Xiwen. Hydrochemical characteristics and origin for salt springs water in Dogai Coring area of north Qiangtang basin, Tibet[J]. Acta Geological Sinica, 2014, 88(6): 1003-1010(in Chinese with English abstract).
- [6] 任坤,潘晓东,兰干江,等.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,2016,90(8):1922-1932.
- [7] 王明章,张林,王伟,等.贵州省岩溶区地下水与地质环境[M].北京:地质出版社,2015.
- [8] 袁道先.我国岩溶资源环境领域的创新问题[J].中国岩溶,2015,34(2):98-100.
- [9] 袁道先.对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J].中国岩溶,2000,19(2):103-108.
- [10] 苏印,官冬杰,苏维词.基于 SPA 的喀斯特地区水安全评价[J].中国岩溶,2015,34(6):560-569.
- [11] 贵州省地质矿产局区域地质调查大队.贵州岩相古地理图集[M].贵阳:贵州科技出版社,1992.
- [12] 刘再华, W Dreybrodt, 韩军,等. $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 岩溶系统的平衡化学及其分析[J].中国岩溶,2005,24(1):1-14.
- [13] 闫志为.硫酸根离子对方解石和白云石溶解度的影响[J].中国岩溶,2008,27(1):24-31.
- [14] 武瑶,徐志方.大气降水中稳定同位素研究进展[J].地球与环境,2013,41(6):688-695.
- [15] 洪业汤,张鸿斌,朱詠煊,等.中国大气降水的硫同位素组成特征[J].自然科学进展:国家重点实验室通讯,1994,4(6):741-745.
- [16] Xiao Huayun, Liu Congqiang. Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, Southwest China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(33): 5121-5130.
- [17] 洪业汤,张鸿斌,朱詠煊,等.中国煤的硫同位素组成特征及燃烧过程硫同位素分馏[J].中国科学: B 辑,1992,5(8):868-873.
- [18] 蒋颖魁,刘丛强,陶发祥.贵州乌江水系河水硫同位素组成研究[J].水科学进展,2007,18(4):558-565.
- [19] 蒋颖魁.喀斯特流域硫同位素地球化学与碳酸盐岩侵蚀[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2007.
- [20] 李小倩,刘运德,周爱国,等.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,2014,39(11):1547-1554.
- [21] Krous H R, Crinenko V A. Stable Isotopic: Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment [M]. Chichester: John Wiley, 1991: 1-440.

Discussion on the method of searching for safe drinking water in high-sulfate areas of Guizhou Province

FANG Shangwu^{1,2}, LI Qiang^{1,2}, WANG Ruofan^{1,2}, JIAO Heng^{1,2}, YI Rui^{1,2}

(1. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Engineering Investigation Institute 2nd, Zunyi, Guizhou 563000, China;

2. No. 114 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Zunyi, Guizhou 563000, China)

Abstract Zhenning area is located in the southwest of Guizhou Province, which is a national key development area in the main functional zone of Guizhou Province. It is a typical karst mountainous areas, where carbonate rocks are widely distributed. The excessive sulfate content in groundwater is one of the main environmental geological problems, which makes the problem of functional water shortage quite prominent, especially drink water for local villagers. This paper discusses how to find safe drinking water in the study area. Our analysis is based on data from hydrogeological and environmental geology survey, geophysical exploration, hydrogeological drilling, water sample collection and testing. It is found that the sulfate in groundwater in this area is mainly from the T_2g aquifer formation, and the sulfate content in groundwater reaches $275.42-1,100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, implying the water of IV—V class. Tracing by ^{34}S isotope in groundwater shows that the sulfate is mainly from gypsum dissolution. The implementation of a "combined exploration and pumping" well ZK3 reveals that the gypsum formation is distributed in the middle and lower part of T_2g^{1a} with a thickness of about 1—1.5 m. The stratified pumping test shows that the content of SO_4^{2-} in groundwater in the test section of the T_2g aquifer formation is $720 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, evaluated as V class water. The water inflow is $256.61 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ when the depth is reduced to 11.50 m. When the groundwater aquifer of the T_2g gypsum formation is penetrated and sealed, the content of SO_4^{2-} in groundwater is $124 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the borehole self-discharge rate is $330.05 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, and the depth is reduced to 10.80 m. In this condition the borehole water inflow reaches $628.84 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, and the water quality is III class. This investigation demonstrates that safe and drinkable groundwater can be found below the gypsum layer by drilling to some depth. Such a method can also be applied to other regions with similar problems of water quality.

Key words sulfates, groundwater, gypsum layer

(编辑 黄晨晖)