

doi: 10.12029/gc20210616

陆石基, 周宏, 刘伟, 陈乾龙, 燕子琪, 陈丽. 2021. 秭归岩溶流域锶的分布特征与富集规律[J]. 中国地质, 48(6): 1865–1874.

Lu Shiji, Zhou Hong, Liu Wei, Chen Qianlong, Yan Ziqi, Chen Li. 2021. Distribution and enrichment of strontium in the Zigui karst watershed [J]. Geology in China, 48(6): 1865–1874(in Chinese with English abstract).

秭归岩溶流域锶的分布特征与富集规律

陆石基^{1,2}, 周宏¹, 刘伟^{1,3}, 陈乾龙¹, 燕子琪¹, 陈丽¹

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海 200433; 3. 自然资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为探究岩溶地区水流系统控制地下水锶的分布现状及富集规律, 本文以秭归茅坪河与九畹溪两个岩溶小流域为研究对象, 于 2016—2018 年期间针对研究区典型泉点、典型断面地表水以及主要含水岩组的岩样进行了采集, 共分析了 415 组水样数据, 93 组岩矿分析数据。研究结果表明: 区域上锶多富集在以潮坪—潟湖沉积相沉积的嘉陵江组、娄山关组、灯影组地层中, 且多以天青石、菱锶矿等矿物等形态存在; 富锶地下水水化学类型主要为 SO₄ 型和 Cl 型; 在水流系统结构上, 包气带以上地层中富锶矿物较少, 主要受淋滤作用影响, 浅循环地下水中的天青石与菱锶矿均未达到饱和, 在少数深循环地下水流中趋于达到饱和状态; 封闭还原且富含石膏、天青石的环境下有利于地下水中锶的富集。

关键词: 锶富集; 水岩作用; 岩溶水系统; 水文地质工程; 秭归地区; 湖北

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1865-10

Distribution and enrichment of strontium in the Zigui karst watershed

LU Shiji^{1,2}, ZHOU Hong¹, LIU Wei^{1,3}, CHEN Qianlong¹, YAN Ziqi¹, CHEN Li¹

(1. Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd, Shanghai 200433, China; 3. Karst Dynamics Laboratory, MNR, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: In order to explore the distribution and enrichment of strontium in groundwater under the control of water flow system in karst area, the Maoping river and Jiawanxi karst watershed in Zigui were taken as the study case, and 415 groups of water samples and 93 groups of rock samples were collected from typical springs, typical surface water and main water-bearing rocks during 2016–2018. The analytical results indicate that strontium is mainly enriched in the strata of the Jialingjiang Formation, Loushanguan Formation and Dengying Formation deposited in tidal flat and lagoon sedimentary facies, and mostly exists in the form of celestite, strontianite and other minerals. The water type of Sr-rich groundwater is mainly SO₄ type, Cl type, and SO₄-HCO₃ type. In the water flow system, the strontium-rich minerals are less in strata above vadose zone, mainly affected by leaching; both celestite and

收稿日期: 2019-07-15; 改回日期: 2020-07-24

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160304、DD20190824)、自然资源部岩溶动力学重点实验室开放基金(KDL201703)及中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUGL180837)联合资助。

作者简介: 陆石基, 男, 1993 年生, 硕士生, 主要从事岩溶水文地质方面的研究; E-mail: lushiji@sgidi.com。

通讯作者: 刘伟, 男, 1985 年生, 助理研究员, 主要从事岩溶水文地质环境地质方面的科研工作; E-mail: wliu@cug.edu.cn。

strontianite are not saturated in shallow groundwater, but they tend to be saturated in a few deep groundwater. The closed reduction environment rich in gypsum and celestite is conducive to the enrichment of strontium in groundwater.

Key words: Strontium enrichment; water-rock interaction; karst water flow system; hydrogeological engineering; Zigui; Hubei Province

About the first author: LU Shiji, male, born in 1993, master candidate, engaged in karst hydrogeological research; E-mail: lushiji@sgidi.com.

About the corresponding author: LIU Wei, male, born in 1985, assistant researcher, engaged in karst hydrogeology and environmental geology; E-mail: wliu@cug.edu.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20160304, No.DD20190824), Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR and GZAR (Institute of Karst Geology, CAGS) Guilin (No.KDL201703), Fundamental Research Funds for the Central Universities, China University of Geosciences (Wuhan) (No.CUGL180837).

1 引 言

锶作为岩石圈上部含量最大的微量元素(胡进武等, 2004; 黄奇波等, 2011), 广泛存在于自然界中但分布非常不均, 锶的分布状态及其存在形态受到自然条件、人类活动等多种因素的影响, 导致锶在分布上富集或贫乏(Comar et al., 1957; 范伟等 2010)。在不同的时期、不同岩性的基岩地层中锶元素的丰度存在明显的差异性, 一般在海相沉积的碳酸盐岩中锶的丰度最高, 在含锶矿物的闪长岩、花岗岩、黏土岩以及碳酸盐岩中, 锶含量相对比较富集, 黏土、砂中锶的丰度最低(刘庆宣等, 2004)。作为微量元素, 锶主要存在于各种造岩矿物和副矿物中, 也能形成一些独立的矿物, 主要为存在于碳酸盐岩中的菱锶矿(SrCO_3)和天青石(SrSO_4), 同时文石、方解石、钙长石及石膏等矿物中亦常见锶置换钙的类质同像现象(Clou et al., 1997; 文冬光等, 1998)。岩石中的锶是地下水中锶的主要物质来源, 锶在赋存母岩中主要经风化、淋滤后在地下水流作用下进行迁移转化(文冬光等, 1998; 康志强等, 2011; 苏春田等, 2017a, b), 进而进入人类及其他动植物的物质循环。前人研究表明, 地下水中锶的分布与富集受渗流地层岩性、溶滤强度、水化学条件(王增银等, 2003; 祁晓凡等, 2009; 范伟等, 2010)等因素的影响。目前, 各国根据锶的含量及其生理医学作用制定了锶矿水的标准, 参照饮用天然矿泉水国家标准(GB8537-2016), 地下水的浓度达到 0.2mg/L , 可命名为富锶矿泉水, 规定的限值为 5mg/L 。岩溶水作为山区居民主要饮用的水源, 关乎百姓的生活与饮食健康, 因而查明地下水中锶的

分布状态, 揭示锶的动态变化, 分析锶的富集规律, 具有较大的研究意义与实际价值。

前人对富锶地下水的研究多集中在赋存条件、水质评价等方面, 多集中在非岩溶地区(孙岐发等, 2019), 针对西南岩溶区富锶地下水的研究还较少(祁晓凡等, 2009; 康志强等, 2011; 苏春田等, 2017a, b), 针对三峡岩溶区的研究则更少。本文选取湖北秭归地区两个岩溶流域为研究区, 以岩溶水系统为单元, 从锶的物质来源条件入手, 分析岩溶水系统中锶的水岩作用过程, 研究不同含水岩组、不同水流条件下地下水中锶的分布与富集特征, 探讨宜昌三峡岩溶去地下水中锶富集的条件与规律。

2 研究区概况

2.1 自然地理概况

本文主要针对秭归地区的茅坪河和九畹溪两个岩溶流域开展研究。研究区地处长江之滨、西陵峡畔、清江以北, 属于中国地形第二、三阶梯的过渡地带, 为川东褶皱与鄂西山地交汇地, 境内山脉为大巴山、巫山余脉, 地形起伏较大。该地区属于亚热带季风气候, 气候温暖、降雨充沛, 年降雨量在 $900\sim 1200\text{mm}$, 其中汛期降雨量占绝大部分, 受季风气候和山峦起伏的影响, 降雨量的季节变化和空间差异明显, 小气候特征比较显著。秭归县位于鄂西褶皱山地, 西南高东北低, 平均海拔高程千米以上, 山峰耸立, 河谷深切, 相对高差一般在 $500\sim 1300\text{m}$ 。其中中低山区多分布于秭归盆地周边, 斜坡倾角介于 $15\sim 25^\circ$, 面积 960km^2 ; 大于 25° 以上的斜坡主要分布在长江峡谷区、中高山向中低山过渡地带, 陡缓变化较大, 多形成陡崖。

2.2 地质概况

研究区地处黄陵穹隆西南缘,自北东向西南从侵入岩体、前震旦纪到三叠纪地层连续出露且较齐全,区内南沱组角度不整合于侵入岩与变质岩基底之上,第四系与下伏地层为角度不整合,其余地层之间均为整合与平行不整合接触关系(南沱组与陡山沱组呈平行不整合,纱帽组与云台观组呈平行不整合)。区域内地层主要是以沉积岩为主,累计沉积岩岩层最大厚度约7567 m,其中碳酸盐岩总厚度达到3443 m,占沉积岩总厚度的45.5%,碳酸盐岩地层主要有震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系及三叠系,岩性以灰岩、白云岩为主,非碳酸盐岩地层有志留系、泥盆系、白垩系,岩性以碎屑岩为主,尤以仙女山一带的白垩系的碎屑砾岩、砂岩为特殊,常常发育有可溶性砾岩裂隙孔洞水。

2.3 岩溶含水系统划分

前人在进行岩溶含水系统划分过程中,主要考虑了含水岩组、空间介质结构、组合特征、岩溶水径流方式、埋藏条件等因素(裴建国等,2008;梁永平等,2015)。秭归地区属于南方岩溶的范畴,多种地层组合特征、构造条件下发育多样的岩溶水系统,既发育有管道裂隙集中排泄型系统、也有裂隙分散排泄型岩溶水系统。根据区域地层的含水性分析,大致可划分为3个岩溶含水系统(图1):上震旦岩溶含水系统(Z_2d 、 $Z_2\epsilon_1d$)、下寒武—奥陶岩溶含水系统(ϵ_1t 、 ϵ_1sl 、 ϵ_2q 、 ϵ_2O_1l 、 O_1n 、 O_1g 、 $O_{2-3}b$)、石炭—三叠岩溶含水系统(P_1q 、 P_1m 、 P_2w 、 T_1d 、 T_2j),进一步可细分为7个岩溶含水子系统(表1)。本文依据空间结构、含水介质、排泄方式、代表水流、标高、流量等特征数据,并结合野外调查资料,对岩溶子含水单元排泄特征进行整理划分(表1)。

3 样品采集与测试

3.1 样品采集与处理

2016—2018年期间,本文依托中国地质调查局二级项目“宜昌长江南岸岩溶流域水文地质环境地质调查”,系统地采集了研究区泉水、典型断面地表水样品,对重点岩溶泉点进行月度监测,并选送测区内主要含水岩组的岩样进行岩石矿物组成分析。针对不同岩溶水系统,选取了31组岩溶泉点作为长期监测点(长观站)(图1),用于分析地下水的

动态变化规律。本文的研究数据来源于区域水文地质调查,及31个岩溶泉长期监测点(长观站)月度样采集,共整理了415组水样数据,93组岩矿分析数据,基于此对锶的分布特征进行分析。

水样采集采用600 mL PVC瓶,现场用水样涮洗3次,同时对水样水温、pH、电导率、流量等指标进行现场测定。此后样品在12 h内送回室内,采用《中华人民共和国地质矿产行业标准 DZ/T 0064.49—93地下水水质检验方法》酸碱滴定法测试并计算碱度。同时将水样用孔径0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤后,分装于2个50 mL PET瓶中分别用于阴阳离子测试,其中阳离子测试样会使用分析纯 HNO_3 酸化至 $\text{pH} < 2$,阴离子样则不加处理。

3.2 样品测试

水化学样品的测试在中国地质大学(武汉)地质调查研究院实验中心完成,阴离子由戴安离子色谱仪 ICS2100 测试,阳离子由赛默飞公司生产的 ICP-OES(ICAP6300)测试;岩石样品矿物组成测试在澳实分析检测(广州)有限公司测试完成,锶等矿物组分均采用封闭酸溶-电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试。

4 分析与讨论

4.1 锶的物源条件分析

通过对93组岩矿分析数据分析可知,不同地质年代的沉积地层中锶的含量大不相同(表2),在震旦系地层中,灯影组地层锶含量比陡山沱组高,灯影组锶含量可达到2900 $\mu\text{g/g}$,均值为1121 $\mu\text{g/g}$,且组内不同段含量差异明显,如灯影组二段的白云质灰岩中锶含量介于800~2600 $\mu\text{g/g}$,其含量较一段和三段的白云岩大,灯影组地层整体变异系数为88.2%($n=10$);寒武系上统娄山关组白云岩中锶含量介于77~2500 $\mu\text{g/g}$,变异系数为62.5%($n=11$),锶含量均值大但分布上存在差异性;奥陶系地层锶含量均不高,介于100~400 $\mu\text{g/g}$,变异系数相对较低;嘉陵江组地层锶的含量较高,均值为2861 $\mu\text{g/g}$,变异系数也较高,为137.3%($n=17$)。

可知,秭归地区富锶地层主要为灯影组、娄山关组、嘉陵江组。从沉积相来看,上述沉积地层均为干旱气候条件下碳酸盐台地浅滩、潮坪-潟湖沉积(徐长昊,2016),为封闭性较好的沉积环境,是蒸

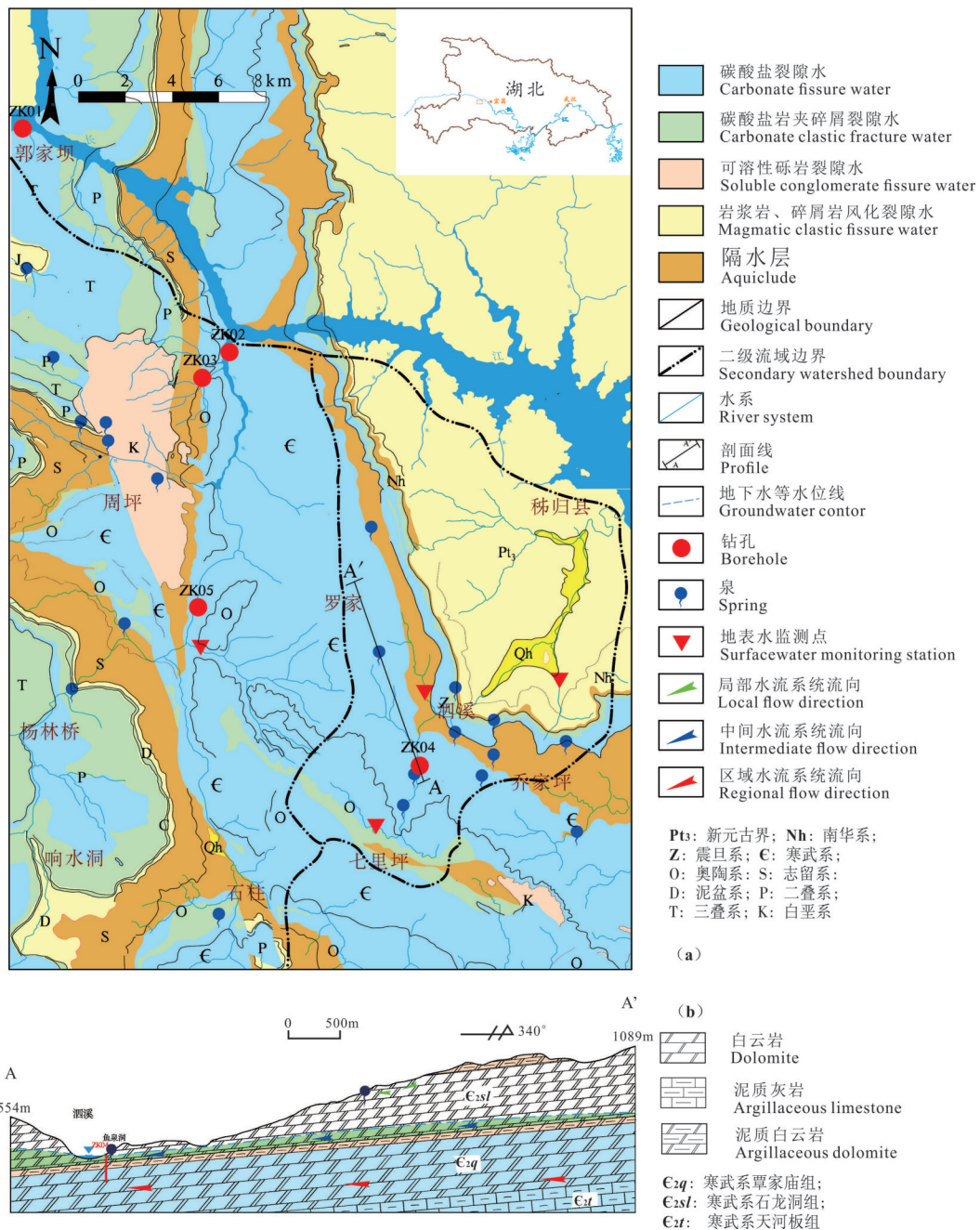


图1 研究区水文地质简图及主要泉点分布图
Fig.1 Hydrogeological map showing distribution of main springs in the study area

发沉积富锶地层发育的良好条件。

同时对区内浅层包气带内岩样分析发现,表层岩石中天青石矿物较少,锶含量偏低且与CaO的相关性较好,而与MgO、SO₃、Al₂O₃的相关性一般。主要是由于表层岩石受到较强的淋滤作用而导致锶的流失,此外浅循环系统中的锶会以类质同像形式存在于方解石矿物中。

对由钻孔揭露深层封闭地层岩样分析发现,锶主要以天青石形式存在,常常与石膏矿物共存。如钻孔ZK05揭露的娄山关组地层中,锶含量普遍较高且与SO₃有较好的相关性($R^2=0.737, n=10$)。另在对钻孔ZK03揭露的奥陶系岩心分析发现,随着MgO含量的增大,岩性逐渐白云岩化,同时锶含量逐渐减小(图2);此外,锶的含量会随着碳酸盐中泥

表1 岩溶含水子系统的介质结构及排泄特征

Table 1 Structure and drainage characteristics of karst water-bearing units

含水系统		空间结构	含水介质	排泄方式	代表水流	标高/m	流量/L	
一级	二级							
石炭系—三叠系 岩溶含水系统(I)	嘉陵江组	单层、断层隔水	管道、溶隙	集中	白龙潭	191	45	
	黄龙组、杨新组	单层	溶隙	/	ZK01	/	/	
		双层	管道、溶隙	集中	周坪龙洞	816	26.5	
		单层	管道、溶隙	集中	杨林龙潭洞	299~614	61.7	
寒武系—奥陶系 岩溶含水系统(II)	奥陶系	单层	溶隙	分散	阴阳家河	931~1135	2.23	
		单层	管道、溶隙	集中	鱼泉洞	284	64.3	
	覃家庙、娄山关组	单斜双层	管道、溶隙	集中	迷宫泉	430	70	
		溶隙、管道	/	ZK05	/	/		
		单斜双层	溶隙	分散	干溪沟	360~1226	0.8	
	天河板—石龙洞 组	单斜双层	溶隙、管道	/	ZK04	/	/	
		单斜单层	管道、溶隙	集中	船沟	750	2.8	
		硝洞	520~1040	19.76				
		单斜单层	管道、溶隙	集中	白岩洞	250~1230	12.14	
	水井沱组	单斜单层	溶隙	分散	芭蕉溪	250~1300	8.51	
震旦系岩溶含水系统(III)		灯影组	单斜单层	管道、溶隙	集中	龙王洞	210~988	104.5
		单斜单层	溶隙	分散	庙沟	490~847	2.26	

质含量的增大(SiO₂含量增大)而减小(图2)。

4.2 锶的水岩作用过程分析

通过对茅坪河与九畹溪两个流域岩溶地下水样分析,从富锶水化学类型、水岩作用程度、物理化学条件等方面,对该区地下水锶分布与富集展开讨论。

针对研究区所采集的415组水样,从Piper三线图(图3)来看,地下水中锶含量大于2 mg/L时,水中阳离子以Ca²⁺、Mg²⁺为优势离子,阴离子以SO₄²⁻为主;地下水中锶含量在0.70~10 mg/L时,水中阳离

子以Na⁺为主,阴离子以Cl⁻为主;地下水中锶含量小于0.70 mg/L时,水中阴离子以HCO₃⁻为主。因此,锶浓度相对较高的地下水化学类型主要包括SO₄型和Cl型,其中尤以SO₄型地下水的锶浓度最高。

岩溶地下水中离子组分主要来源于对母岩的溶滤作用,其决定着地下水中主要水化学过程(康志强等,2011;苏春田等,2017a)。母岩中锶含量影响着水流系统地下水中锶的分布(文冬光等,1998;苏春田等,2017b)。地下水中锶离子主要来源于富锶

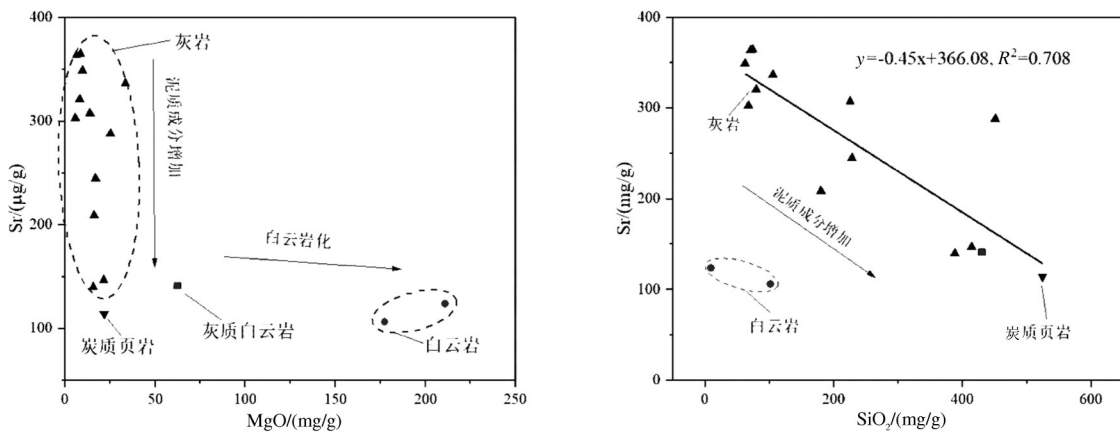


图2 ZK03孔奥陶系岩心中MgO-Sr(a)与SiO₂-Sr(b)浓度关系
Fig.2 Relationship of Sr vs. MgO and SiO₂ of rocks revealed from ZK03

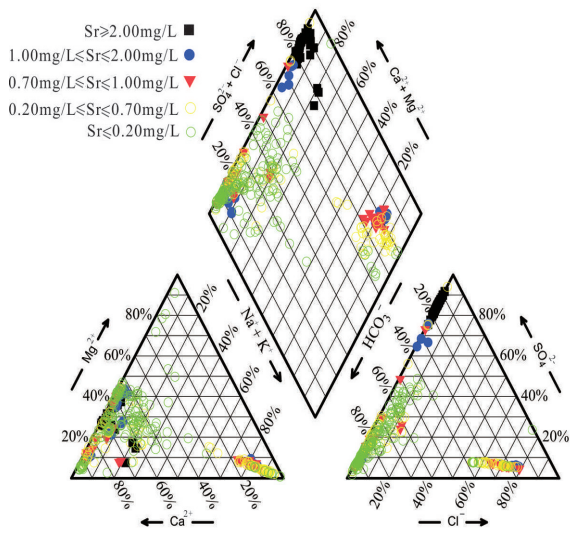
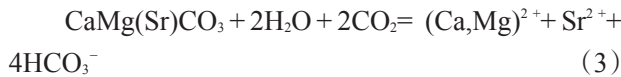


图3 富锶地下水Piper三线图
Fig.3 Piper diagram of Sr-rich groundwater

矿物(天青石、菱锶矿),赋存在方解石、文石及白云石类质同像形态的锶,以及铝硅酸盐中的锶等的溶解(徐兴国,1984),具体的化学反应方程式如下:



表层岩溶泉可反映局部水流系统的水化学特征。基于所采集的334处表层岩溶泉,绘制出研究区锶在表层岩溶水中的分布规律,发现全区存在5

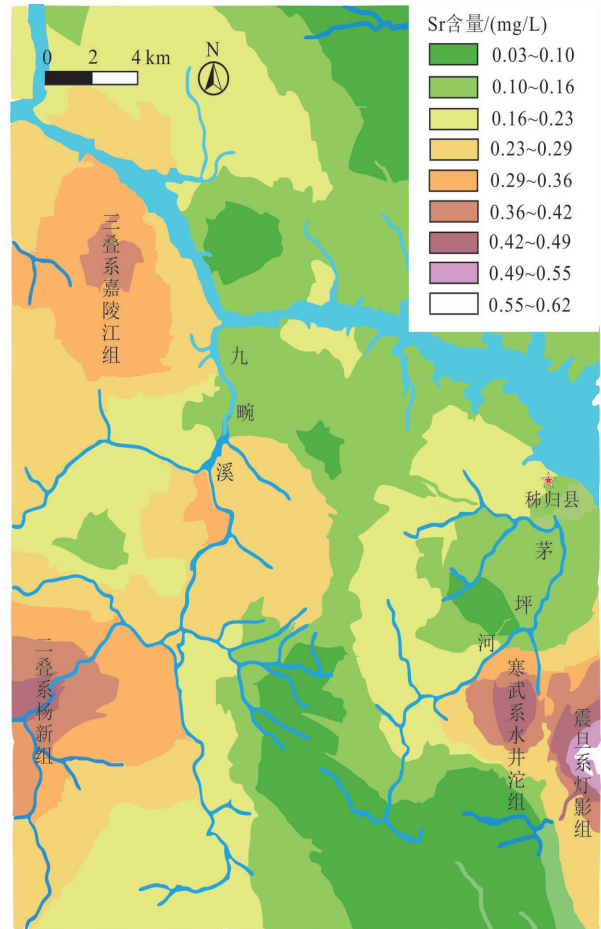


图4 表层岩溶泉中锶的分布特征
Fig.4 Distribution of strontium in karst water

处富锶地下水分布区(图4),且这些富锶地下水分布与富锶地层的分布表现出一致性,二叠系阳新组

表2 秭归岩溶地层中锶含量概况统计
Table 2 Statistics of Sr contents in karst strata in the Zigui area

系	岩石地层	岩性	来源	样本个数	Sr含量最小值/($\mu\text{g/g}$)	Sr含量最大值/($\mu\text{g/g}$)	Sr含量平均值/($\mu\text{g/g}$)	变异系数/%
南华系	南沱组	冰碛砾岩	剖面	1	44	44	44	/
震旦系	陡山沱组	黏土质白云岩、页岩	剖面	20	25	753	181.5	113.1%
	灯影组	微晶白云岩、白云质灰岩	剖面	10	129	2940	1121	88.2%
	水井沱组	泥粉晶灰岩	剖面	4	163	1310	610.3	87.9%
	石龙洞组	细粉晶白云岩	ZK04	8	49	137	81.3	41.6%
寒武系	覃家庙组	泥质白云岩	ZK04	5	72	116	88.4	22.5%
	娄山关组	微晶灰岩、白云岩、石膏	ZK05	11	77	2540	807	62.5%
	南津关组	细晶灰岩	ZK03	3	106	364	198	11.1%
	红花园组	生物碎屑灰岩	ZK03	4	141	349	282	35.2%
奥陶系	大湾组	瘤状灰岩	ZK03	5	114	321	255.2	29.5%
	牯牛潭组	瘤状灰岩	ZK03	4	140	365	215.3	48.5%
志留系	龙马溪组	硅质页岩	ZK03	1	116	116	116	/
三叠系	嘉陵江组	灰岩、粉晶白云岩	ZK01	17	201	10000	2861.2	137.3%

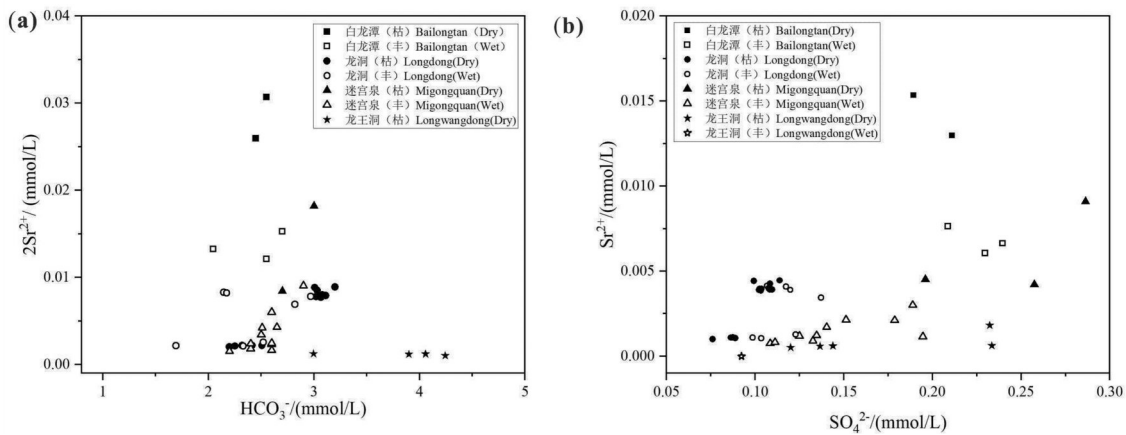


图5 地下水锶与HCO₃⁻、SO₄²⁻的摩尔浓度关系
Fig.5 Relationship between strontium concentration and HCO₃⁻、SO₄²⁻ in groundwater

岩溶水,三叠系嘉陵江组岩溶水,寒武系娄山关组岩溶水,寒武系水井沱组岩溶水及震旦系灯影组岩溶水。其中杨新组表层岩溶水中Sr含量介于0.26~0.76 mg/L;嘉陵江组介于0.23~0.60 mg/L;娄山关组介于0.13~0.43 mg/L;水井沱组与灯影组介于0.22~0.72 mg/L。

对于排泄区,选取研究区内4处锶含量较高的地层中出露的地下水点为例,即白龙潭、龙洞、迷宫泉和龙王洞(表1)。从锶离子与硫酸根离子、重碳酸根离子的浓度关系(图5)发现,嘉陵江组白龙潭岩溶泉水锶含量较高,与硫酸根离子有较好的一致性($R^2=0.707, n=5$),另知嘉陵江组岩矿分析中SO₃含量较高,反映出在该泉域的径流途径上有天青石的存在;娄山关组迷宫泉与重碳酸根离子和硫酸根离子均呈现较好的相关性($R^2=0.668, n=10$; $R^2=0.768, n=13$),反映出径流途径中存在两种富锶矿物溶解。此外,针对地下水中丰、枯两季表现出差异性(图5),主要是由于研究区具有典型南方岩溶管道-裂隙水系统,地下水径流路径和径流时间短、水岩作用不充分(罗明明等,2015),表现出枯季地下水中锶含量普遍比丰水期的要高。由上可知,岩溶水中锶离子含量与各岩溶水系统中富锶矿物含量密切相关,流经的地层岩性差异导致各岩溶水流系统表现出不同的水岩作用过程,或受石膏、天青石矿物溶解的影响,或受菱锶矿溶解的影响,或受多种锶源的混合补给。

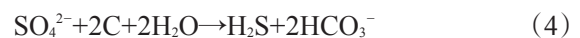
4.3 地下水流系统中锶的分布规律

对于锶在多级水系系统中的分布规律,本文以

泗河流域庙坪—鱼泉洞多级水流系统为例(图1b),不同级次的地下水中锶含量及饱和程度易表现出差异性(表3,图6)。庙坪洼地表层岩溶泉为局部水流系统,锶含量均值为0.08 mg/L, si_Str与 si_Cel均比较低(表3),多为方解石中类质同像锶的溶解释放;鱼泉洞泉水为中间水流系统,地下水锶含量均值为0.22 mg/L, si_Stron与 SI_Cel相比于局部水流系统稍高但未达到饱和(表3),但冬季其锶的饱和指数相对夏季要高,主要由于冬季水流滞缓,水岩作用相对充分(表3);以钻孔ZK04揭露的区域水流系统,其锶均值在2.33 mg/L, si_Str、si_Cel、si_Cal、si_Dol均趋于饱和(图6)。可知地下水与母岩水岩相互作用的时间与水流路径长短决定了地下水中富锶矿物的饱和程度及地下水中锶含量(张群利等,2011;苏春田等,2017a)。

此外,通过对钻孔ZK04及钻孔ZK05中锶含量分析(表3,图6),发现两者锶离子浓度均很大。在两孔钻进施工中,均有H₂S与CH₄等还原性气体溢出,且岩心中有机炭的含量相对较高,尤其是ZK05岩矿组分中发现有单质S存在。推知两孔均混有碳酸盐岩和硫酸盐岩(富含大量的石膏),且均为相对封闭的还原环境。

在这种封闭缺氧还原环境中,地下水中的SO₄²⁻在有机炭和脱硫细菌作用下,容易发生脱硫酸作用(刘硕等,2016),其化学反应式为:



当地层中含有大量铁的时候S²⁻便会与铁结合,

表3 不同级次水流水化学信息统计表

Table 3 Hydrochemistry of different water flow levels

水点		pH	Ca ²⁺ /(mg/L)	Mg ²⁺ /(mg/L)	Sr ²⁺ /(mg/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	si_Cal ⁺	si_Dol	si_Gy	si_Cel	si_Str
庙坪雨水	均值	7.87	0.43	0.20	0.01	6.30	-3.24	-6.93	-4.49	-4.33	-4.69
	n=3 均方差	0.352	0.074	0.157	0.008	5.466	1.382	2.458	0.989	0.410	0.987
庙坪泉	均值	7.41	42.32	22.73	0.08	7.94	-0.22	-0.46	-2.84	-3.86	-2.45
	n=3 均方差	0.127	2.350	0.762	0.025	1.413	0.132	0.269	0.069	0.219	0.207
鱼泉洞	均值	7.52	48.66	21.52	0.22	27.92	-0.11	-0.37	-2.35	-3.16	-2.13
	n=16 均方差	0.059	9.035	4.029	0.207	22.242	0.178	0.359	0.300	0.691	0.369
ZK04	均值	8.07	210.27	75.60	2.33	619.55	0.91	1.66	-0.66	-0.91	-0.56
	n=4 均方差	0.013	46.001	11.044	0.502	133.948	0.110	0.187	0.131	0.137	0.108
ZK05	均值	8.10	469.97	105.90	17.73	1283.82	1.22	1.98	-0.21	0.08	0.30
	n=23 均方差	0.104	138.219	39.556	9.576	253.481	0.209	0.555	0.208	0.113	0.169

注: si_Cal—方解石饱和指数; si_Dol—白云岩饱和指数; si_Gy—石膏饱和指数; si_Cel—天青石饱和指数; si_Str—菱锶矿饱和指数。

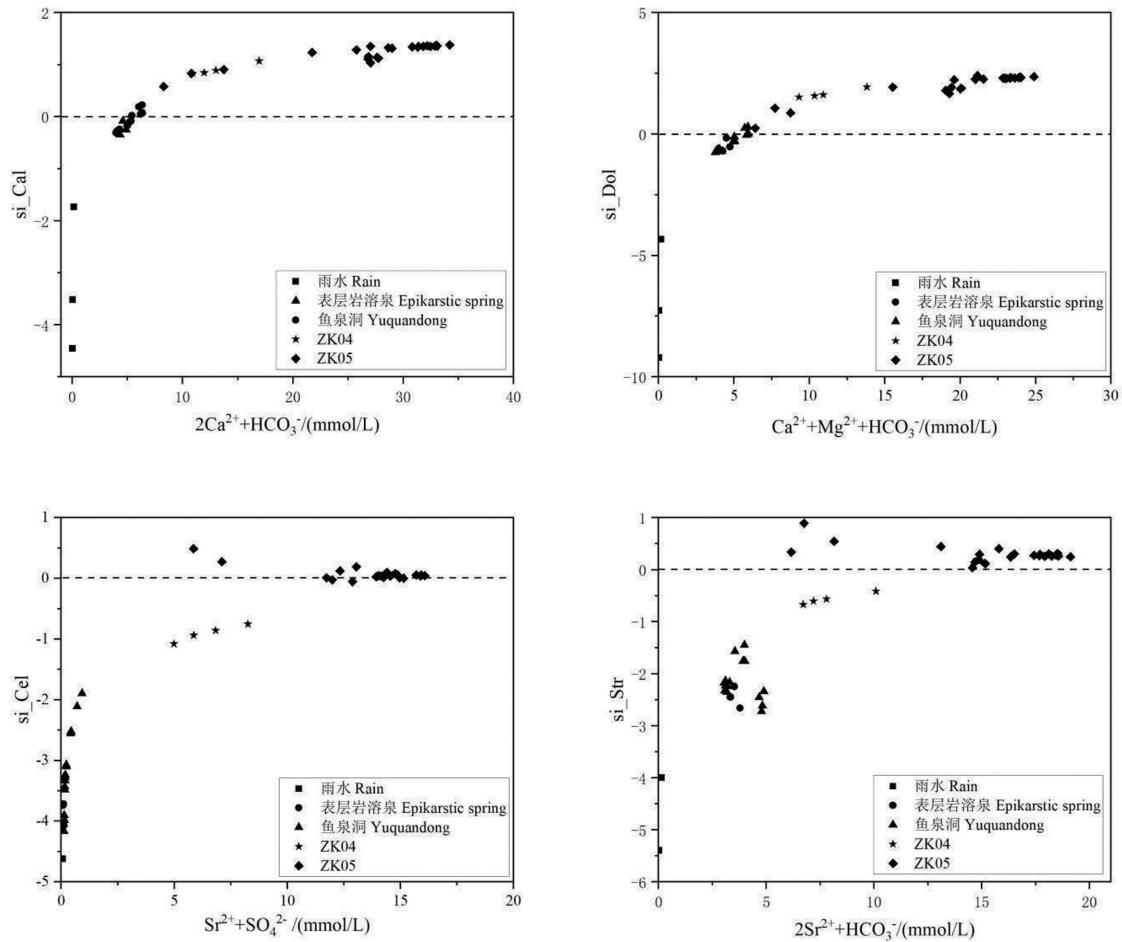


图6 地下水中Sr²⁺与SO₄²⁻的关系

si_Cal—方解石饱和指数; si_Dol—白云岩饱和指数; si_Cel—天青石饱和指数; si_Str—菱锶矿饱和指数

Fig.6 Relationship between Sr²⁺ and SO₄²⁻ in groundwater

si_Cal—Calcite saturation index; si_Dol—Dolomite saturation index; si_Cel: Celestine saturation index; si_Str—Strontianite saturation index

逐渐生成黄铁矿,而硫化氢气体极易溶于水(溶解比例约为1:3),在氧气充足的时候, H_2S 会被氧化成硫酸与碳酸盐结合形成石膏矿物沉淀,但当氧气不足的时候,少部分的 H_2S 会被氧化成单质S,更大一部分仍以气体的形式存在于封闭的还原条件中,这也就是ZK05孔岩心组分中单质S存在的原因。硫酸根离子的转化,促进了石膏、天青石的溶解过程,致使地下水中锶离子富集,甚至使天青石溶解达到饱和,同时菱锶矿的溶解也增大了地下水中锶的含量(罗璐等,2015)。

5 结 论

本文通过对秭归岩溶流域锶的分布与迁移进行分析,得到以下结论:

(1)研究区内嘉陵江组、娄山关组、灯影组地层中的锶含量最高,代表着潮坪-潟湖沉积相;区内浅层岩石中天青石矿物较少,锶含量偏低;深层封闭地层岩样中锶主要以天青石形式存在,常常与石膏矿物共存。

(2)富锶岩溶水的水化学类型主要包括 SO_4 型和Cl型,尤以 SO_4 型地下水的锶浓度最高;母岩中锶的含量决定了地下水中锶的浓度,且锶主要通过溶滤作用进入地下水中。

(3)地下水水流系统中水岩作用程度及地下水的滞留时间均影响地下水中锶的浓度,浅循环岩溶地下水系统中锶均未达到饱和,少数深循环区域地下水系统中锶浓度趋近饱和状态。对于富含石膏、天青石的封闭还原环境有利于地下水中锶的富集。

References

- Clow D W, Mast M A, Bullen T D. 1997. $^{87}Sr/^{86}Sr$ as a tracer of mineral weathering reactions and calcium sources in an alpine/subalpine watershed, Loch Vale, Colorado [J]. *Water Resources Research*, 33(6): 1335-1351.
- Comar C L, Russell R S, Wasserman R H. 1957. Strontium-Calcium movement from soil to man[J]. *Science*, 126(13): 485-492.
- Fan Wei, Yang Yuesuo, Ye Xueyan, Lu Ying. 2010. Hydrogeochemical and environmental characteristics of strontium-enrichment in groundwater and its genesis in Qingken Lake Area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(2): 349-355,367(in Chinese with English abstract).
- Huang Qibo, Kang Zhiqiang, Qin Xiaoqun, Yu Jianguo, Su Chuntian. 2011. Distribution characteristics of Sr^{2+} , Sr/Mg, Sr/Ca and its applications in karst water system of Xishui County[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(4): 98-103(in Chinese with English abstract).
- Hu Jinwu, Wang Zengyin, Zhou Lian, Wang Yusong. 2004. Hydrogeochemical characteristics of the strontium in karst water[J]. *Carsologica Sinica*, 23(1): 38-43(in Chinese with English abstract).
- Kang Zhiqiang, Xiong Zhibin, Li Qingyan, Zhu Qin, Tang Wei, Ma Zhenjie, He Shiyi, Cao Jianhua. 2011. The precipitation effect on the water cycle model of karst subterranean stream catchment[J]. *Earth and Environment*, 39(1): 26-31(in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Zhao Chunhong, Tang Chunlei, Wang Weitai, Shen Haoyong. 2015. Progress of hydrogeology and environmental survey in karst area of northern China: an example from karst area in western hills of Beijing[J]. *Geological Survey of China*, 2(8): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Liu Qingxuan, Wang Guiling, Zhang Fawang. 2004. Geochemical environment of trace element strontium (Sr) enriched in mineral waters[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 31(6): 19-23 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuo, Ge Xiaoguang, Qi Chun, Zhao Guangxiu. 2016. Effect of sulfate-reducing bacteria on groundwater quality in coal measures[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 39(10): 1401-1406(in Chinese with English abstract).
- Luo Mingming, Yin Dechao, Zhang Liang, Chen Zhihua, Zhou Hong, Han Zhaofeng, Shi Tingting. 2015. Identifying methods of karst aquifer system structure in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 34(6): 543-550(in Chinese with English abstract).
- Luo Lu, Pang Zhonghe, Yang Fengtian. 2015. Genesis analysis of sulfate thermal mineral water in carbonate aquifers at Jiahu Uplift, Subei Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 263-270 (in Chinese with English abstract).
- Pei Jianguo, Liang Maozhen, Chen Zhen. 2008. Classification of karst groundwater system and statistics of the main characteristic values in Southwest China karst mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 27(1): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Qi Xiaofan, Jiang Zhongcheng, Deng Yan. 2009. Hydrochemistry of Sr and Ba in epikarstic spring[J]. *Yellow River*, 31(4): 63-64,66(in Chinese).
- Su Chunli, Li Yilian, Wang Yanxin. 2003. Mechanism of form discussion of Donghu mineral water in Shenzhen City[J]. *Geological Science and Technology Information*, 22(4):85-90 (in Chinese with English abstract).
- Su Chuntian, Zhang Fawang, Xia Riyuan, Yao Xin, Zou Shengzhang, Luo Fei, Zhao Guangshuai, Yang Yang, Ba Junjie, Li Xiaopan. 2017a. A study of the water-rock interaction of large rich Sr mineral spring in Xintian, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 44

- (5):1029–1030 (in Chinese with English abstract).
- Su Chuntian, Huang Chenhui, Zou Shengzhang, XieDaixing, Zhao Guangshuai, Tang Jiansheng, Luo Fei, Yang Yang. 2017b. Enrichment environment and sources of strontium of groundwater in Xintian County, Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 36(5): 678–683(in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Tian Hui, GuoXiaodong, YuHuiming. 2019. Strontium-enriched areas discovered in Lianhuashan, Changchun[J]. *Geology in China*, 46(2): 430–431 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zengyin, Liu Juan, Cui Yingxiang, Wang Tao, Guo Tianyuan. 2003. Distribution characteristics of Sr/Mg, Sr/Ca and applications in Yanhe spring karst water system[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 30 (2):15– 19(in Chinese with English abstract).
- Wen Dongguang, Shen Zhaoli, Zhong Zuoshen. 1998. Modeling and Application of Geochemistry Water–Rock Reaction[M]. Wuhan : China University of Geoscience Press(in Chinese).
- Xu Changhao. 2016. Brief Study on the Metallogenic Geological Setting and Genesis to Celestite Deposits in Mts.Huaying, Sichuan– Chongqing[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Xu Xingguo. 1984. Genetic types of celestite deposits and their prospecting direction discussed from strontium geochemistry[J]. *Geological Review*, 30(2):146– 154(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qunli, Guo Huirong, Wu Kongjun, Han Guotong. 2011. Characteristics and indication of hydrogeochemistry for thekarst groundwater system in the Xingong coal field[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 38(2): 1– 7(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 范伟, 杨悦锁, 冶雪艳, 路莹. 2010. 青肯泡地区地下水中锶富集的水文地球化学环境特征及成因分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(2): 349–355, 367.
- 黄奇波, 康志强, 覃小群, 俞健国, 苏春田. 2011. 习水县岩溶水系统 $\rho(\text{Sr}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Sr})/\rho(\text{Ca})$ 、 $\rho(\text{Sr})/\rho(\text{Mg})$ 分布特征及其应用[J]. *地质科技情报*, 30(4):98–103.
- 胡进武, 王增银, 周炼, 汪玉松. 2004. 岩溶水锶元素水文地球化学特征[J]. *中国岩溶*, 23(1): 38–43.
- 康志强, 熊志斌, 李清艳, 朱琴, 唐伟, 马振杰, 何师意, 曹建华. 2011. 岩溶地下河流域水循环方式的降水效应[J]. *地球与环境*, 39(1): 26–31.
- 梁永平, 赵春红, 唐春雷, 王维泰, 申豪勇. 2015. 北方岩溶区水文地质环境地质调查进展[J]. *中国地质调查*, 2(8): 1–8.
- 刘硕, 葛晓光, 漆春, 赵广秀. 2016. 硫酸盐还原菌对煤系地下水水质的影响[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 39(10): 1401–1406.
- 刘庆宣, 王贵玲, 张发旺. 2004. 矿泉水中微量元素锶富集的地球化学环境[J]. *水文地质工程地质*, 31(6):19–23.
- 罗璐, 庞忠和, 杨峰田. 2015. 苏北盆地建湖隆起碳酸盐岩储层中的硫酸盐型热矿水成因[J]. *地学前缘*, 22(2):263–270.
- 罗明明, 尹德超, 张亮, 陈植华, 周宏, 韩兆丰, 史婷婷. 2015. 南方岩溶含水系统结构识别方法初探[J]. *中国岩溶*, 34(6):543–550.
- 裴建国, 梁茂珍, 陈阵. 2008. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. *中国岩溶*, 27(1):6–10.
- 祁晓凡, 蒋忠诚, 邓艳. 2009. 典型表层岩溶泉锶、钡水文地球化学特征[J]. *人民黄河*, 31(4): 63–64, 66.
- 苏春利, 李义连, 王焰新. 2003. 深圳市东湖矿泉水形成机理探讨[J]. *地质科技情报*, 22(4):85–90.
- 苏春田, 张发旺, 夏日元, 姚昕, 邹胜章, 罗飞, 赵光帅, 杨杨, 巴俊杰, 李小盼. 2017a. 湖南新田发现大型富锶矿泉水及机理研究[J]. *中国地质*, 44(5): 1029–1030.
- 苏春田, 黄晨晖, 邹胜章, 谢代兴, 赵光帅, 唐建生, 罗飞, 杨杨. 2017b. 新田县地下水锶富集环境及来源分析[J]. *中国岩溶*, 36(5):678–683.
- 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 于慧明. 2019. 长春莲花山发现锶富集区[J]. *中国地质*, 46(2): 430–431.
- 王增银, 刘娟, 崔银祥, 王涛, 郭天元. 2003. 延河泉岩溶水系统 Sr/Mg、Sr/Ca 分布特征及其应用[J]. *水文地质工程地质*, 30 (2): 15–19.
- 文冬光, 沈照理, 钟佐桑. 1998. 水岩相互作用的地球化学模拟理论及应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 徐长昊. 2016. 四川—重庆华蓥山天青石成矿地质条件及矿床成因研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 徐兴国. 1984. 从锶的地球化学特征探讨天青石矿床的成因类型及找矿方向[J]. *地质论评*, 30(2): 146–154.
- 张群利, 郭会荣, 吴孔军, 韩国童. 2011. 荣巩矿区岩溶地下水系统的水文地球化学特征及其指示意义[J]. *水文地质工程地质*, 38(2): 1–7.