

苏春田,黄晨晖,邹胜章,等.新田县地下水镉富集环境及来源分析[J].中国岩溶,2017,36(5):678-683.
DOI:10.11932/karst2017y42

新田县地下水镉富集环境及来源分析

苏春田^{1,2},黄晨晖²,邹胜章²,谢代兴²,赵光帅²,唐建生²,罗飞²,杨杨²

(1.中国地质大学(武汉)环境学院,武汉 430074;

2.中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:为掌握新田县地下水镉富集环境及来源,对新田县富镉地下水及对相应地质剖面岩样进行采样分析。结果表明,富镉地下水赋存于泥盆系余田桥组地层中,地下水镉元素含量具有泥盆系余田桥组(D_{3s})>石炭系岩关阶(C_{1y})>泥盆系锡矿山组下段(D_{3x¹})>泥盆系棋子桥组(D_{2q})的规律;下降泉、机井中镉元素含量平均值分别为 376.57 μg·L⁻¹、2 756.87 μg·L⁻¹,分别是饮用天然矿泉水镉含量最低限值的 1.88 倍、13.78 倍,机井镉元素平均含量远高于下降泉,是其 7.32 倍;余田桥组地层岩性为中薄层浅灰色泥灰岩夹灰岩、页岩,岩石中镉含量普遍大于 300 mg·kg⁻¹,最高含量为 838 mg·kg⁻¹,是地下水中镉元素主要来源。地层平缓的产状、低的降水入渗系数、面状补给、分散渗流为富镉地下水的形成提供了水文地质基础。

关键词:富集环境;岩溶;镉;来源分析;湖南新田

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)05-0678-06

0 引言

镉是岩石圈上部含量最大的微量元素,同时镉也是人体必须的微量元素之一,对人及其它动物生理机能具有重要的生物学意义及毒理学意义^[1-4]。镉广泛分布于自然界,但分布不均,在粘土、砂中含量最低,在海相沉积的碳酸盐岩中含量最高^[3]。围岩中的镉是地下水镉元素的物质来源,不同地层、不同岩性的富镉地下水中,镉元素浓度也有明显差异,赋存于不同岩性水中镉平均含量具有碳酸盐岩>碎屑岩>变质岩>喷出岩>新生代松散层>中酸性侵入岩的规律^[5],同是碳酸盐岩,地下水中镉又具有生物碎屑灰岩>纯灰岩>白云岩的规律^[6]。能否形成富镉地下水,水的侵蚀性、温度、pH 值、造岩矿物的风化破碎程度、水交替强度、溶滤时间、岩石镉元素含量等是重要的影响因素^[7]。

富镉矿泉水在中国分布相对比较广泛,新疆地

区^[8]主要分布于石炭系、二叠系、三叠系碳酸盐岩、火山碎屑岩及硅酸盐中,成因类型可分为构造断裂深循环淋溶型、裂隙浅循环淋溶型、补给富集埋藏型;陕西省^[9];东北松嫩平原中部麦肯泡地区^[4]主要含水层为第四纪砂、砂砾石层中;河北邯郸和村-孙庄盆地^[10]含水层为奥陶系中统峰峰组二、三段的岩溶裂隙,镉元素来源碳酸盐岩和岩浆岩;河北曲阳嘉山地区^[11]赋存于太古界阜平组黑云斜长片麻岩中;五大连池药泉山^[12]地下水中镉来源于华力西期花岗岩闪长岩;深圳市东湖区^[13]地下水微量元素镉主要来源于钾长石、钙长石;青岛西北地区^[14]主要赋存于橄榄安粗岩系,岩性为安山玄武岩、粗安岩基各种凝灰质火山碎屑岩等;2016年湖南新田县发现大型富镉地下水田,面积约 176.7 km²^[15],在西南岩溶区,乃至全国实属罕见,开采潜力巨大。由于潜在的、巨大的市场需求以及经济效益,饮用天然矿泉水作为一种安全、卫生、可恢复性的特殊资源而备受各级政府的高度重

资助项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160303、DD20160301、DD20160285)

第一作者简介:苏春田(1981-),男,博士研究生,高级工程师,水文地质专业,长期从事岩溶水文地质环境地质方面的研究。E-mail:suchuntian@karst.ac.cn.

通信作者:邹胜章(1969-),研究员,主要从事水资源与环境工程方面的研究工作。E-mail:zshzh@karst.ac.cn.

收稿日期:2017-04-18

视^[16],矿泉水开发已成为贫困山区脱贫致富的主要手段之一。

目前对于富锶地下水的研究主要集中在赋存条件、水质评价、地球化学特征等方面研究^[8-14],主要为非岩溶区,针对西南岩溶区富锶地下水的研究则较少,胡进武等^[1]、祁晓凡等^[17]分别以桂林地区和广西弄拉、平果龙何屯地区地下水为例,研究了岩溶水锶元素的水文地球化学特征;康志强等^[18]以贵州荔波板寨地下河为例,通过分析锶的水文地球化学特征,研究水循环的降水效应。但上述研究地区地下水锶元素含量均较低,未达到国家饮用天然矿泉水锶元素的限值。本文以湖南新田县为例,通过对地下水锶富集环境以及锶元素来源的分析,以期揭示其形成机理,为当地发展富锶矿泉水产业提供技术支撑。

1 研究区概况

新田县位于湖南省南部,岩溶区面积占全区总面积超70%,地势具有北西部高、南东低的特点,最高山峰主峰海拔1080 m,最低点新田河出口处,海拔147 m,地貌以峰林谷地、峰林平原为主,次为峰丛洼地和岩溶丘陵—垄岗,北部为非岩溶区。

地层除缺失泥盆系下统、二叠系、三叠系、第三系外,从上古生界寒武系到新生界第四系均有分布。下古生界中上寒武统一志留系主要为一套浅变质的海相碎屑及泥质沉积,厚度3564~5600 m;上古生界泥盆系、石炭系,以浅海相碳酸盐类沉积为主,次为陆相及滨海相碎屑沉积,其中泥盆系相变较大;中生界侏罗系—白垩系均为陆相红色碎屑沉积,与下伏地层呈不整合接触;而新生界第四系以残坡积物为主,冲积物次之,残坡积物分布广且薄,冲积物主要分布于河谷两岸。新田县位于南岭巨型纬向构造带的北部,祁阳弧形构造带的南缘,经历了多次构造运动,形成了以加里东—印支期的东西向构造、南北向构造与印支—燕山期的新华夏系构造、NE向、NNW向构造等多期构造的复合,对水文地质条件和岩溶发育与分布起着严格的控制作用。

新田县属亚热带湿润季风气候,年平均气温18.1℃,多年年平均降水量分别为1444.5 mm,其中4—6月最集中,占全年总降水量43%,多年平均蒸发量1442.3 mm。

2 研究方法

2.1 水样采集与测试

2016年5—8月,对研究区出露的下降泉、岩溶大泉、地下河出口、机井进行采样(图1),采样前需用地下水洗三遍纯净水瓶,共采集样品数量为103组,涉及地层包括泥盆系中统棋子桥组(D₂q)、泥盆系上统余田桥组(D₃s)和锡矿山组(D₃x)以及石炭系下统岩关阶(C₁y),样品带回实验室由中国地质科学院岩溶地质研究所实验室完成测试分析,Sr采用火焰发射光谱法。

2.2 岩样采集与测试

2016年5—6月,对研究区出露的泥盆系余田桥组(D₃s)地层进行地质剖面测量,并采集不同部位的岩石样品,采集岩石样品数量为13组,样品带回实验室由国土资源部长沙矿产资源监督检测中心完成测试,锶采用封闭酸溶—电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测量。

3 结果与分析

3.1 地下水中锶(Sr)富集的地质环境

根据饮用天然矿泉水(GB8537—2008)Sr元素标准,对研究区不同地层地下水样品取样分析可知(表1),Sr元素含量大于200 μg·L⁻¹的地下水赋存于泥盆系余田桥组(D₃s)地层中,其它地层地下水Sr元素含量均小于200 μg·L⁻¹,地下水Sr元素含量具有泥盆系余田桥组(D₃s)>石炭系岩关阶(C₁y)>泥盆系锡矿山组下段(D₃x¹)>泥盆系棋子桥组(D₂q)的规律,余田桥组(D₃s)地下水Sr元素平均含量是其它地层地下水Sr元素平均含量的19.57~43.03倍。泥盆系余田桥组(D₃s)岩性以泥灰岩为主,其它地层以灰岩、白云质灰岩为主,说明地层岩性是影响地下水Sr元素含量高低的重要因素。

地下水Sr元素含量在石炭系岩关阶(C₁y)、泥盆系锡矿山组下段(D₃x¹)、泥盆系棋子桥组(D₂q)中的变异系数分别为26.51%、54.88%、44.70%,属于中等变异,说明地下水Sr元素含量在这些地层分布中的相对稳定性,而在余田桥组(D₃s)中变异系数为131.48%,属于强变异,说明地下水Sr元素含量在空间分布上的差异性明显。

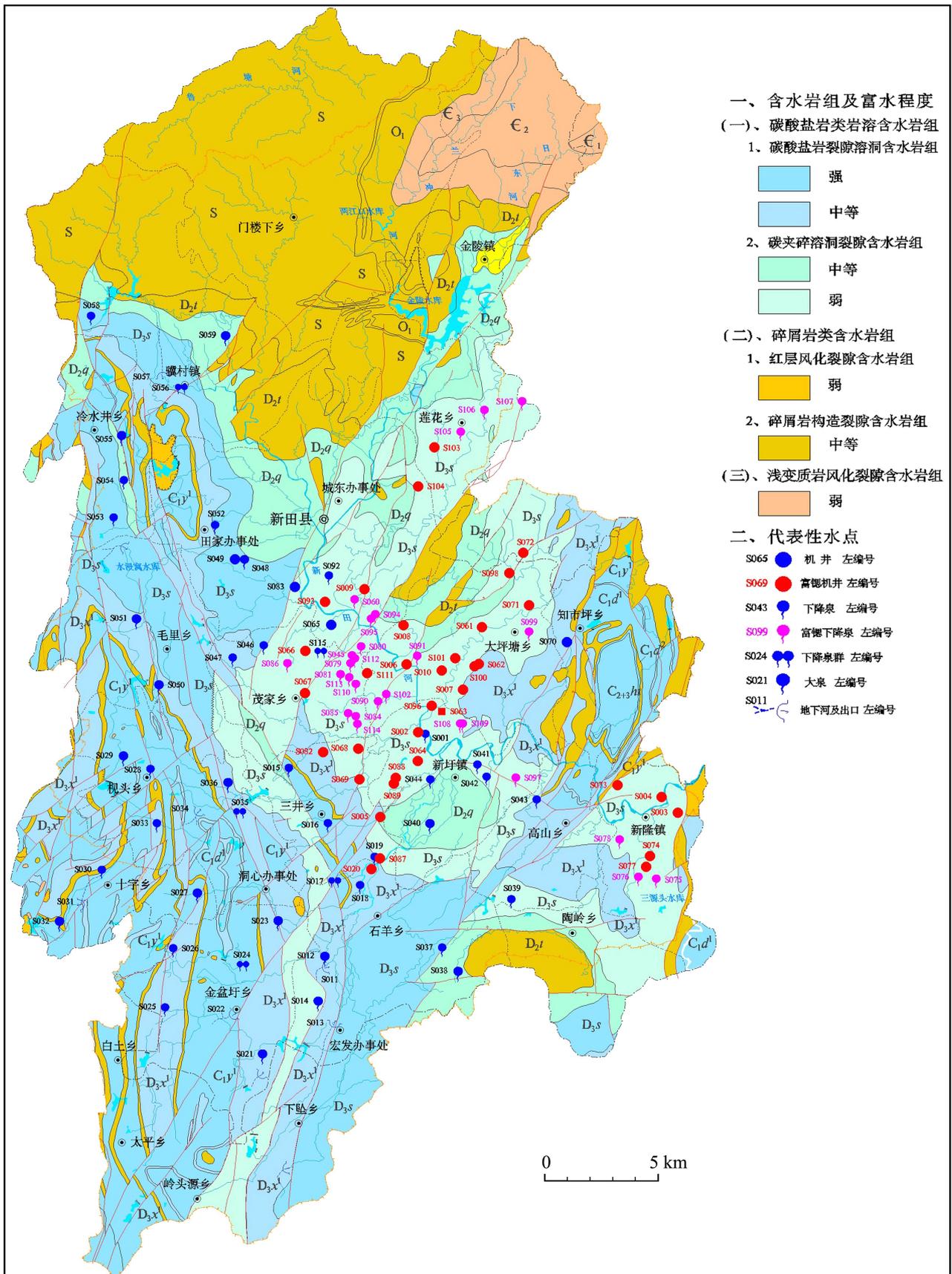


图1 新田县地下水取样分布图(据文献[15]修改)

Fig.1 Groundwater sampling site distribution map of Xintian county(modified from literature [15])

表 1 不同地层地下水铯元素含量统计及富铯地下水点数

Table 1 Statistics of strontium element contents and rich-strontium groundwater in different strata

地层	岩性	最小值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	最大值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	标准差	变异系数/ %	水点数/ 个	富铯水点数/ 个
D ₂ q	中厚层灰色灰岩、泥灰岩	20.80	67.30	36.05	16.11	44.70	10	0
D ₃ s	中薄层浅灰色泥灰岩夹灰岩、页岩	32.40	8 465.00	1 551.17	2 039.47	131.48	60	51
D ₃ x ¹	厚层至块状灰、深灰色灰岩、白云质灰岩	28.10	196.00	73.20	40.18	54.88	22	0
C ₁ y	中厚层灰黑色灰岩、白云质灰岩	57.90	132.00	79.28	21.02	26.51	11	0

3.2 泥盆系余田桥 (D₃s) 组水文地质特征及岩石铯 (Sr) 含量

3.2.1 泥盆系余田桥 (D₃s) 组地层岩性及岩石铯 (Sr) 含量

测量研究区泥盆系余田桥 (D₃s) 组地质剖面可知

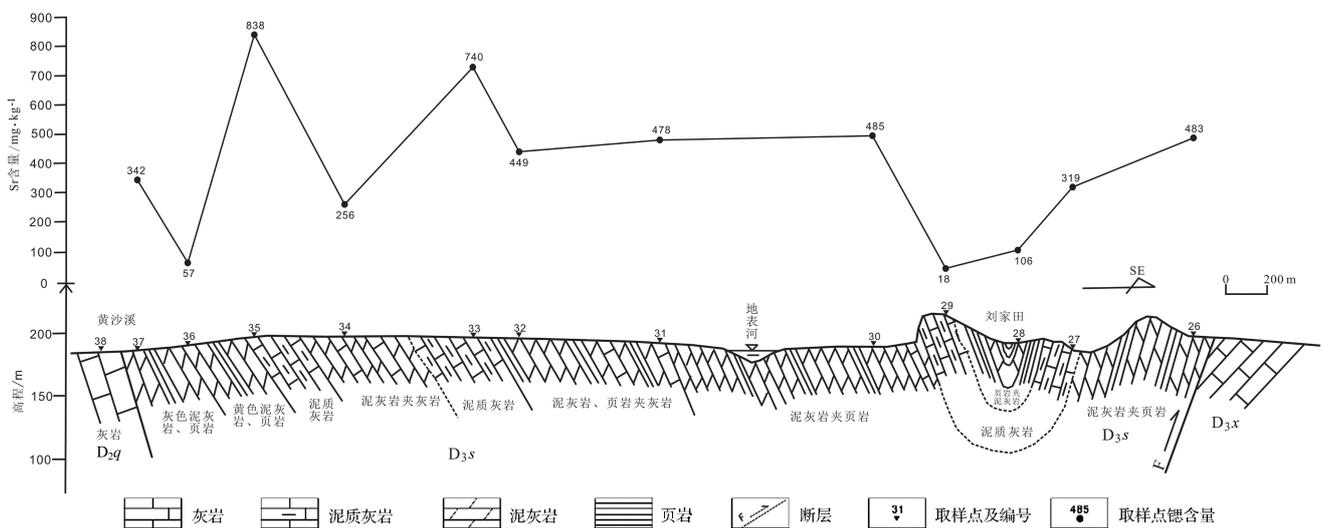


图 2 研究区 D₃s 地质剖面及取样点岩石铯含量

Fig. 2 Geological section of D₃s in the study area and strontium contents in rock samples

赋存于岩石圈中的地下水在运移过程中不断与围岩发生各种化学反应,从而导致化学元素的迁移、聚集和分散^[19]。不同岩层铯元素含量不同,大气降水落至地面后渗流经不同岩层,致使地下水中 Sr 元素浓度存在差异^[20]。研究区余田桥 (D₃s) 组地层属浅海相碳酸盐岩类沉积,对地质剖面不同部位的岩石取样分析(图 2),35 号取样点岩石 Sr 元素含量最高,其值为 838 mg · kg⁻¹,其次为 33 号取样点岩石 Sr 元素含量,其值为 740 mg · kg⁻¹,分别是地壳 Sr 元素平均丰度 2.23 倍和 1.97 倍;26 号、30~32 号取样点岩石 Sn 元素含量为 449~485 mg · kg⁻¹,均大于地壳 Sr 元素平均丰度(375 mg · kg⁻¹)。初步分析

(图 2),余田桥组 (D₃s) 地层岩性为中薄层浅灰色泥灰岩夹灰岩、页岩,灰岩夹层有 3 层,不同地区层厚变化较大,总厚度约 701~1 171 m,其中灰岩夹层是余田桥 (D₃s) 组主要的富水部位。

认为余田桥 (D₃s) 组岩石中高 Sr 含量是地下水中 Sr 元素的主要来源。富 Sr 地下水 Sr 元素含量变异系数的强变异性,也与余田桥 (D₃s) 组岩石中不同部位 Sr 含量的高低相关。

3.2.2 泥盆系余田桥 (D₃s) 组水文地质特征

泥盆系余田桥组属碳酸盐岩夹碎屑岩溶洞裂隙水,岩溶发育弱,主要有溶孔、溶缝、溶隙、溶沟等,地面未见洼地、落水洞、竖井、天窗、溶潭等。地下水的补给形式以降雨面状分散补给为主,局部地段有地表水库、山塘蓄水渗漏对地下水的补给,无点状集中注入式补给。地下水径流严格受含水介质及地形条件的制约,以分散渗流为主,含水介质为裂隙、裂缝,径

流方向沿地势由高往低运动,潜水面变化大,无固定地下水水面,并以潜流向河谷排泄带运移排泄或以小泉出露于地表,泉水流量多在 $0.3 \sim 4.0 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。流速的快慢取决于补给水量的大小、含水介质的发育程度以及水力坡度等,余田桥组地下水径流模数、降水入渗系数分别为 $2.17 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 和 0.17 , 均小于泥盆系棋子桥组(平均值 $5.99 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 0.348)、锡矿山组(平均值 $5.99 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 0.348)以及石炭系岩关阶(平均值 $8.42 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 0.443)的地下水径流模数、降水入渗系数^[21],沉积岩层产状平缓,倾角多在 25° 以内。低的降水入渗系数、平缓的产状、面状补给、分散渗流使地下水在运移过程中与含有 Sr 元素的围岩长时间接触,水-岩相互作用,通过溶滤、水解等物理化学作用,使地下水中锶元素含量不断增高,为富 Sr 地下水的形成提供了水文地质基础。

3.3 锶(Sr)富集的地下水排泄类型

对研究区含水岩组为泥盆系余田桥组的 51 处不同排泄类型的富锶地下水 Sr 元素含量分析可知(表 2),30 处机井中锶元素含量范围为 $304 \sim 8465 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $2756.87 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;21 处下降泉中 Sr 元素含量范围 $238 \sim 670 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $376.57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。机井、下降泉中 Sr 元素平均含量分别是饮用天然矿泉水 Sr 元素限制的 1.88 倍、13.78 倍,机井 Sr 元素平均含量远高于下降泉,是下降泉 Sr 元素平均含量的 7.32 倍,地下水 Sr 元素含量具有深部饱水层大于表层岩溶带下降泉的规律,研究结果与胡进武等研究结果相反^[1]。主要因为 Sr 是活泼元素,无论是氧化还原还是酸碱环境中对其溶解迁移均无较大影响,决定地下水中 Sr 元素含量的因素与地下水在岩石中的径流途径、溶滤时间以及温度条件有关^[22]。

表 2 不同排泄类型富锶地下水锶元素含量统计及水点数

Table 2 Statistics of strontium element contents and rich-strontium groundwater in different discharge types

排泄类型	最小值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	最大值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	标准差	变异系数/%	水点数/个
机井	304.00	8465.00	2756.87	2288.40	83.01	30
下降泉	238.00	670.00	376.57	114.26	30.34	21

4 结 论

新田县富 Sr 地下水属 Sr 含量达到国家饮用天然矿泉水标准的地下水,赋存于泥盆系余田桥组,Sr 含量具有机井大于下降泉的规律,地下水 Sr 含量均高于广西巴马长寿区^[23]($300 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)、机井 Sr 含量又高于湖北钟祥市长寿区^[24]($625 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)、青海玉树热水沟^[25]($620 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)、河北和村一孙庄盆地^[10]($265 \sim 524 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)饮用水和 Sr 含量,属于高 Sr 地下水。岩石中高 Sr 含量给富 Sr 地下水的形成提供了物质来源,平缓的产状、低的降水入渗系数、面状补给、分散渗流为富 Sr 地下水的形成提供了水文地质基础。

参考文献

- [1] 胡进武,王增银,周炼,等.岩溶水锶元素水文地球化学特征[J].中国岩溶,2004,23(1):37-42.
- [2] Nielsen S P. The biological role of strontium[J]. Bone,2004,35:583-588.
- [3] 张俊德.河北饮用天然矿泉水基本特征与形成机理初步探讨[J].华北地质矿产杂志,1995,10(4):430-436.

- [4] 范伟,杨悦锁,冶雪艳,等.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(自然科学版),2010,40(2):349-367.
- [5] 刘庆宣,王贵玲,张发旺.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,2006,33(6):19-23.
- [6] 荆慧,左丽琼,王彩会.江苏碳酸盐岩地热水中锶元素水化学特征[J].安徽地质,2015,25(4):313-317.
- [7] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984.
- [8] 顾新鲁,王占和,曾永刚,等.新疆天然矿泉水成因类型及资源远景区预测[J].新疆地质,2012,30(1):95-98.
- [9] 苏文智.论陕西省饮用天然矿泉水形成机理[J].西安矿业学院学报,1993,(4):316-320.
- [10] 常明华.和村一孙庄盆地富锶矿泉水赋存地质条件[J].中国煤炭地质,2008,20(2):24-26.
- [11] 烟献军.曲阳嘉山锶-偏硅酸饮用天然矿泉水[J].华北地质矿产杂志,1995,10(4):545-547.
- [12] 钱丽萍.五大连池药泉山矿泉水锶元素水文地球化学特征[J].资源开发与市场,2007,23(10):865-867.
- [13] 苏春利,李义连,王焰新.深圳市东湖矿泉水形成机理探讨[J].地质科技情报,2003,22(4):85-90.
- [14] 赵广涛,李玉瑛,曹钦臣,等.青岛西北地区矿泉水的水化学特征与形成机理[J].青岛海洋大学学报,1998,28(1):135-141.
- [15] 夏日元,蒋忠诚,邹胜章,等.岩溶地区水文地质环境地质综合

- 调查工程进展[J]. 中国地质调查, 2017, 4(1): 1-10.
- [16] 危润初. 靖宇国家级自然保护区天然矿泉水形成机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [17] 祁晓凡, 蒋忠诚, 邓艳. 典型表层岩溶泉锶、钡水文地球化学特征[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 63-66.
- [18] 康志强, 熊志斌, 李清艳, 等. 岩溶地下河流域水循环方式的降水效应[J]. 地球与环境, 2011, 39(1): 26-31.
- [19] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [20] 王增银, 刘娟, 王涛, 等. 锶元素地球化学在水文地质研究中的应用进展[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 91-95.
- [21] 唐建生, 李兆林, 徐远光, 等. 西南岩溶地区地下水与环境地质调查综合研究: 湖南新田河岩溶流域水文地质调查[R]. 桂林: 中国地质科学院岩溶地质研究所, 2005.
- [22] 许佩瑶, 丁志农. 含锶饮用天然矿泉水的形成[J]. 勘察科学技术, 1997(5): 36-38.
- [23] 秦俊发. 中国的百岁老人研究 V. 微量元素: 长寿的重要物质基础[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(2): 15-32.
- [24] 高明勇. 湖北省长寿乡钟祥环境微量元素与长寿间关系研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2011.
- [25] 赵振, 陈惠娟, 罗银飞, 等. 青海玉树热水沟天然矿泉水形成条件及水质分析[J]. 地下水, 2013, 35(6): 4-6.

Enrichment environment and sources of strontium of groundwater in Xintian county, Hunan Province

SU Chuntian^{1,2}, HUANG Chenhui², ZOU Shengzhang², XIE Daixing², ZHAO Guangshuai²,
TANG Jiansheng², LUO Fei², YANG Yang²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract This work attempts to better understanding the enrichment environment and sources of strontium in groundwater in Xintian county, Hunan Province. Groundwater and rocks on geological profiles were sampled and analyzed. The results showed that, (1) Rich-strontium groundwater is present in the strata of D_3s , with contents in order for strata, $D_3s > C_1y > D_3x^1 > D_2q$; (2) The average contents of strontium element of springs and shafts are $376.57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $2,756.87 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, 1.88 times and 13.78 times the natural mineral water, respectively. Strontium element contents of shafts are much higher than that of descending springs, 7.32 times the descending spring; (3) The lithology of D_3s is medium-thick or thin layers of light grey marls, intercalated with limestone and shale, in which strontium contents are generally more than $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with the highest was $838 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which is the primary source of strontium in groundwater; (4) Many conditions have contributed to the formation of rich strontium in groundwater, such as gentle strata, the low coefficient of precipitation infiltration, planar supplies, and scattered seepage.

Key words enrichment environment, karst, strontium, source analysis, Xintian county, Hunan Province

(编辑 张玲)