

赵光帅, 苏春田, 潘晓东, 等. 湖南新田铈矿泉水文地球化学分带特征分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 858-866.
DOI: 10.11932/karst20190603

湖南新田铈矿泉水文地球化学分带特征分析

赵光帅, 苏春田, 潘晓东, 谢代兴, 罗飞, 杨杨, 巴俊杰, 李小盼, 毕奔腾

(中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,
广西桂林 541004)

摘要:以湖南新田县大型富铈矿泉为研究对象,通过采样、水化学组分分析,运用 ArcGIS、AquaChem 软件揭示富铈地下水水化学组分、水化学类型及水平和垂向分带特征。结果表明:下降泉中铈元素含量具有很好的分带特征,但机井中铈的分带性较差, TDS 与铈元素含量变化基本一致。下降泉、机井中离子的变异系数具有较好的一致性, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量较为稳定, 而 Sr^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度变化较大, 下降泉和机井的水动力环境均有较大变化, 或含水岩组的差异性较明显。下降泉、机井中主要离子毫克当量数所占百分比排次相同, 但其垂向变化范围较大, 机井水化学组分受含水岩组和人类活动等因素影响较大, 水化学类型也由下降泉单一的 HCO_3-Ca 型水演变为 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}$ 型等复杂水化学类型, 表现出垂向上正向的地球化学分带特征。铈元素在垂向上的分带呈现出异常, 在 50~80 m 深度达到最大值。

关键词:湖南新田县; 富铈地下水; 水文地球化学分带; 指示意义

中图分类号: P641.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2019)06-0858-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

铈是自然界广泛分布的微量元素,在岩石、土壤、水体及生物体中均有分布且其浓度和同位素组成变化范围较大。铈在地下水中以 Sr^{2+} 的形式存在和迁移,岩石中的铈是地下水中铈的主要物源^[1]。铈及其同位素稳定的地球化学性质使其在水文地质调查与研究中具有 2 个显著优势:①不同岩石中 Sr 含量有明显差异,因此,地下水中 Sr 的浓度可以反映不同的成岩环境特征;②Sr 元素化学性质稳定,铈同位素不受质量分馏的影响。因此,水中的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 特征能反映地下水流经不同含水层

的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 特征。Shawan 等^[2]研究了澳大利亚东南部半干旱灰岩地区地下水组分的演化,用 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值估算得到了下伏含水层对上部含水层的越流补给量。王焰新等^[3]根据娘子关泉域 Sr^{2+} 浓度的变化推断了该地区的水动力环境并划分了泉群的不同流动系统。王增银等^[4]根据对延河泉岩溶水系统 Sr/Mg、Sr/Ca 分布规律和形成条件的研究得出,随着地下水径流途径的增长,水-岩相互作用时间的增加, Sr^{2+} 浓度逐渐增高。胡进武等^[5]通过对桂林地区地下河系统不同类型岩溶水中 Sr^{2+} 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分析得出,岩溶水中 Sr^{2+} 含量随 Ca^{2+} 含量的增大而增大,随 Mg^{2+} 含量增大而减小,流经砂

资助项目:中国地质调查局地质调查项目:湘江上游岩溶流域 1:5 万水文地质环境地质调查(DD20160303);南北盘江流域水文地质调查(DD20190342)

第一作者简介:赵光帅(1989—),男,研究实习员,硕士,主要从事岩溶水文地球化学研究。E-mail:gszhaoyr@karst.ac.cn。

收稿日期:2018-06-20

岩层的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较高,其次为流经白云岩层和灰岩层的地下水。刘庆宣等^[6]通过对中国566处富含Sr矿泉水的化学测试数据、所处的地球化学环境、地质背景的分析,发现各种重碳酸型的矿泉水中Sr的平均含量小于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相反,由于 Sr^{2+} 和 SO_4^{2-} 呈正相关关系,各种硫酸型的矿泉水中Sr的平均含量大于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且地下水的pH值能影响Sr的迁移能力。范伟等^[7]通过研究青肯泡地区不同空间位置、浅深层含水层系统中Sr的分布,及与处理塘、滞洪区水样中Sr分布之间的关系,发现Sr的富集成因由水岩作用和非点源污染共同控制。包国良^[8]通过对福建大田琴山矿区水文地质调查,发现从地表到地下,随着深度的增加,水中主要阴阳离子及TDS含量都呈明显增加趋势。郭齐军等^[9]通过对南堡凹陷地区水文地球化学垂向分带的研究,发现由于硫酸盐化合物的化学氧化作用,使得愈靠近含油层组或油藏,重碳酸根离子含量愈多,从而导致油田水水文地球化学垂向分带出现矿化度倒转现象。楼章华等^[10]通过对松辽盆地油田地下水水化学场的分析,发现大气降水下渗,泥岩压实排水和黏土矿物脱水等淡化作用与蒸发、渗滤等浓缩作用造成地下水化学性质在垂向上的分带性;同时区域水动力场特征决定了地下水化学场在平面上的分区性。商书波等^[11]通过研究松花江江水倒灌过程中的水文地球化学分带,得出与电子转移和与质子转移有关的两种不同类型的水文地球化学分带呈有机联系、相互作用,并控制钙镁和氮元素等污染组分的迁移。综合前人研究,地下水水文地球化学垂向分带可划分为3种类型:(1)正常类型:地下水矿化度随埋深增加而升高;(2)异常类型:水文地质剖面上,矿化度随深度的增加整体呈增加趋势,在局部条件(温度、pH、外来水浸入)改变时矿化度会降低。(3)倒转类型:由于含矿层或其它地质体的影响,导致地下水矿化度随埋深增加而降低。

地质调查在湖南新田县发现大型富铈矿泉水田,本文以新田县为研究对象,探究县域内富铈地下水分布及水文地球化学分带特征。

1 研究区概况

新田县位于湖南省南部,东经 $112^{\circ}04'30''\sim 112^{\circ}23'00''$,北纬 $25^{\circ}36'40''\sim 26^{\circ}06'30''$,总面积 $1\,022.4\text{ km}^2$ 。属亚热带湿润季风季候,气候温和,热量富足,雨量充沛,降雨集中,年平均气温 18.1°C 。岩溶区面积占

全县总面积超70%,地势具有北西高、南东低的特点,最高峰海拔 $1\,080\text{ m}$,最低点新田河河谷处,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。新田县城以北土地覆盖类型基本为茂密的林地,县城以南丘陵和岩溶溶丘土地覆盖类型主要为灌木丛、荒草地,风化堆积的残丘上大多为林地及果园,丘谷等地势较低及坡度平缓的地区为耕地。

研究区地层除缺失泥盆系下统、二叠系、三叠系、第三系外,从下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海相碎屑及泥质沉积,厚度 $3\,564\sim 5\,600\text{ m}$;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。研究区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、北东向、北北西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。北北东向为主的构造组成了本区的构造骨架,纵张断裂和横张断裂、节理的相互切割常常成为地下水活动通道,促进了岩溶发育,为地下水运动创造了条件。岩溶洼地、落水洞、漏斗、干谷等多种岩溶形态均很发育,且北北东向挤压强破碎带是研究区主要的控洞断裂构造,洞体多沿糜棱岩化碎裂的一侧发育。

2 采样与分析方法

2.1 富铈地下水采样

由于研究区地势平缓,地下水循环交替缓慢,地下水多以泉水的形式出露。2016年8月对研究区内发现的102处地下水点(图1)采样,包括下降泉点65处,村民自打机井37处,其中37处机井点位及终孔层位均为泥盆系上统余田桥组地层(表1)。取样采用 600 mL 聚乙烯瓶,取样前用所取水样润洗取样瓶3次,取样时加入1:1浓度的硝酸 3 mL ,取样后即送至自然资源部岩溶地质资源环境监督检测中心对样品进行检测分析。

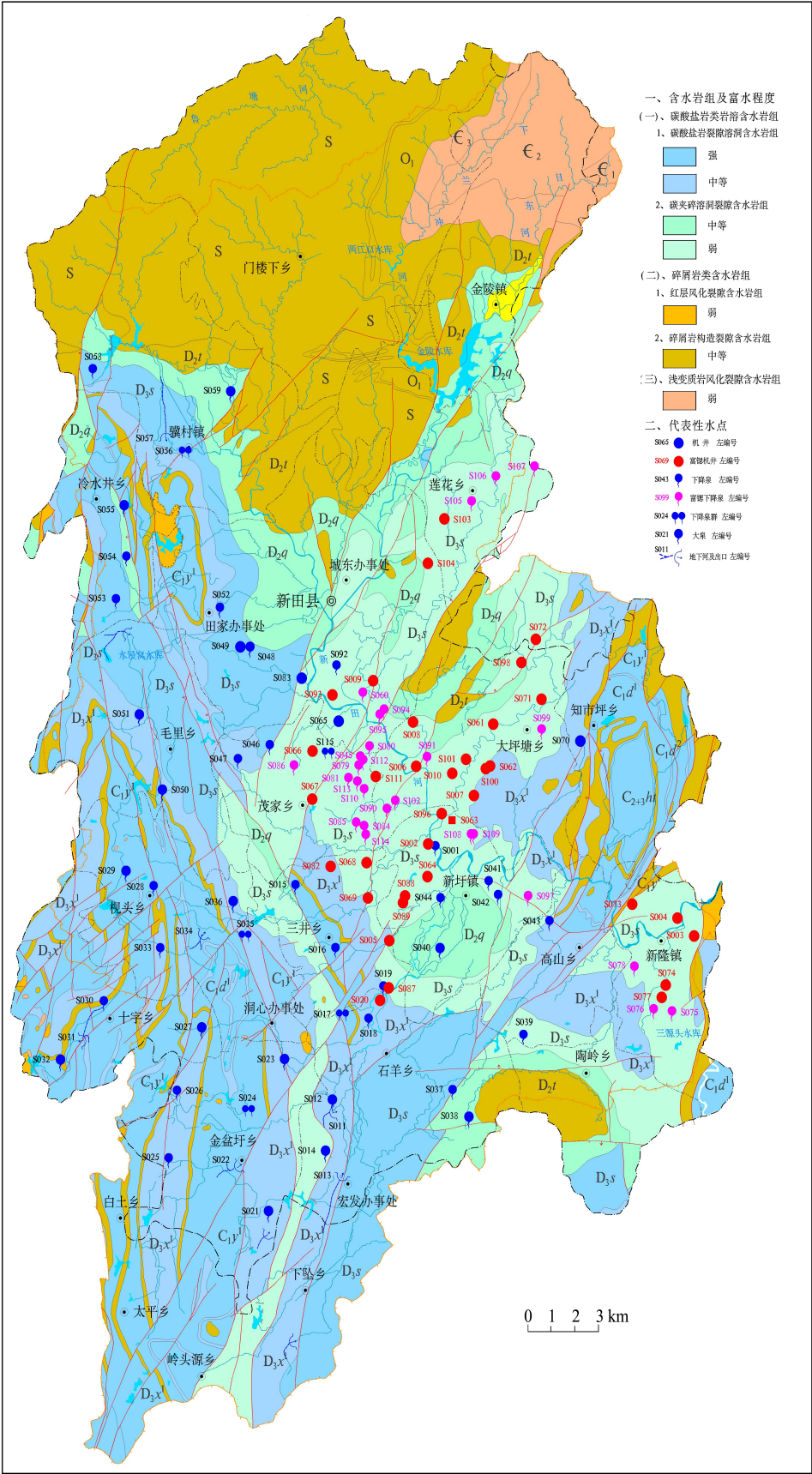


图1 富锶地下水采样点分布图(据文献12)

Fig. 1 Map showing distribution of sampling sites of rich strontium groundwater (from literature 12)

表 1 机井深度分级及终孔地层岩性

Table 1 Depth ranking of motor-pumped wells and lithology of strata in finished boreholes

机井深度 H/m	数量/处	占比/%	主要地层岩性	地下水类型
10≤H<20	4	10.8	D _{3s} 薄层泥灰岩夹灰岩	潜水
20≤H<50	17	46.0	D _{3s} 薄层泥灰岩、泥质灰岩	承压水
50≤H<80	12	32.4	D _{3s} 薄层泥灰岩、泥质灰岩	承压水
80≤H<138	4	10.8	D _{3s} 薄层泥灰岩夹灰岩	承压水

2.2 富铈地下水水文地球化学分带

根据各水点水化学组分含量,结合区域地下水流场,运用克里金插值在 ArcGIS10.0 中生成水化学组分水平分带示意图;根据区域地下水流场,结合机井深度、揭露的地层岩性及含水岩组的分层特征,分析富铈地下水水化学组分垂向分带特征。

3 测试结果分析

3.1 水文地球化学水平分带及指示意义

3.1.1 水文地球化学水平分带

研究区下降泉中铈元素含量具有很好的分带特

征(图 2),总体表现为南部、北部较低,向中东部逐渐升高并达到国家饮用天然矿泉水铈含量标准(0.2 mg·L⁻¹),铈含量平均值为 0.16 mg·L⁻¹,含量最高处可达 0.67 mg·L⁻¹(表 2),是国家饮用天然矿泉水铈含量标准的 3.35 倍。下降泉中总溶解固体(TDS)含量的变化趋势与铈元素含量变化基本一致,其含量最高值位于铈含量峰值的西北侧,含量变化范围为 136.91~466.55 mg·L⁻¹,平均值 273.53 mg·L⁻¹,不同的是,研究区南部出现两处 TDS 高值区。

与下降泉中水化学组分含量相比,机井中铈、TDS 含量的分带性较差,表现出多处高值小片区。铈元素含量同样由南部、北部向中东部逐渐增高,其含

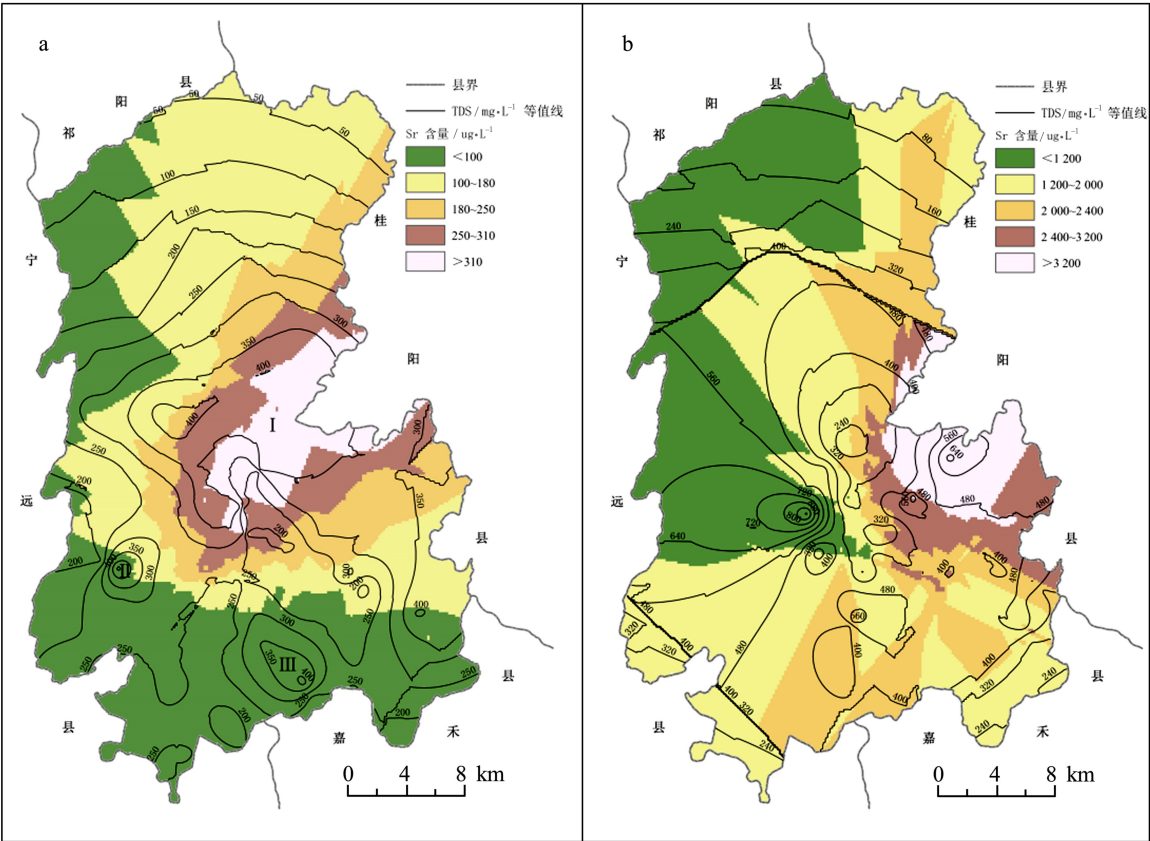


图 2 下降泉、机井铈含量分布图

Fig.2 Strontium content distribution of gravity springs and motor-pumped wells

a. 下降泉铈含量分布图 b. 机井铈含量分布图

量变化范围为 $0.109 \sim 8.465 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.212 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 3), 是国家饮用天然矿泉水锶含量标准的 11.06 倍。锶含量高值小片区主要分布于研究区南部, 但其含量均不大于 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TDS 峰值区主要

分布于研究区中东部、中部及中南部三片区域, 且与锶含量峰值区分布相同或紧邻。TDS 含量由南部、北部向中部逐渐升高, 但北部变化梯度较大, 南部较缓。

表 2 下降泉水化学指标含量统计结果

Table 2 Statistics of hydrochemical indicator content in gravity springs

	样品数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
Sr ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	20.80	670.00	160.29	154.14	0.96
K ⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	0.06	16.44	1.49	2.46	1.65
Na ⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	0.28	21.16	3.01	4.14	1.38
Ca ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	39.38	131.14	88.98	20.38	0.23
Mg ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	0.94	19.78	4.37	3.40	0.78
HCO ₃ ⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	132.50	398.43	262.00	53.00	0.20
SO ₄ ²⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	4.29	57.71	17.01	12.06	0.71
Cl ⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	1.40	48.07	7.01	7.92	1.13
TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	65	136.91	466.55	273.53	70.16	0.26

表 3 机井水化学指标含量统计结果

Table 3 Statistics of hydrochemical indicator content in motor-pumped wells

	样品数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
Sr ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	109.00	8 465.00	2 212.32	2 330.45	1.05
K ⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	0.28	24.00	3.15	4.63	1.47
Na ⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	0.70	105.52	28.30	34.46	1.22
Ca ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	18.17	188.74	95.92	41.11	0.43
Mg ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	1.86	77.94	21.55	18.12	0.84
HCO ₃ ⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	182.98	581.31	381.01	82.55	0.22
SO ₄ ²⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	5.18	414.97	50.15	66.88	1.33
Cl ⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	1.68	88.78	22.53	23.12	1.03
TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	37	186.56	975.79	439.71	142.61	0.32

下降泉水化学类型较单一, 为钙重碳酸型、钙镁重碳酸型、钙重碳酸硫酸型三种水化学类型 (图 3)。其中钙重碳酸硫酸型 1 处, 该处位于县城西南侧的县工业产业园, 工业废水未经处理排放, 经孔隙、裂隙渗流, 通过 S048 下降泉排泄。机井水化学类型较复杂, 除钙重碳酸型、钙镁重碳酸型外另有 7 种其它离子匹配型水, 其水平分带特征见图 4, 北部、西部地下水补给区水化学类型为钙重碳酸型、钙镁重碳酸型、钙镁钠重碳酸型、钙钠镁重碳酸硫酸氯型, 主要分布在新田河河谷两侧及乡镇中心或其附近。

3.1.2 水文地球化学水平分带的指示意义

下降泉中锶含量良好的分带性, 表明泉水中锶的成因有一定规律可循。锶含量大于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的

水点均分布于泥盆系下统余田桥组泥灰岩地层中, 说明泥灰岩中锶元素是泉水中锶的主要来源, 这与刘文均^[13]对湘南泥盆系碳酸盐岩中锶含量的实验测试结果一致: 台棚和台盆相的泥质灰岩锶含量分别为 300.78×10^{-6} 和 769.72×10^{-6} , 为湘南泥盆系碳酸盐岩中锶含量的最高值。

下降泉、机井中离子的变异系数大小具有较好的一致性: Ca²⁺、HCO₃⁻ 变异系数相对较小, 表明其含量较为稳定, 反映了区域含水层以灰岩、泥质灰岩、泥灰岩为主的地质背景; Sr²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、SO₄²⁻、Cl⁻ 变异系数均较大, 说明其质量浓度变化较大。机井中离子变异系数与下降泉离子变异系数的一致性一方面是由于下降泉、机井在地下水渗流缓慢和循环较快的构造带均有分布, 不同的水动力环境, 水岩作

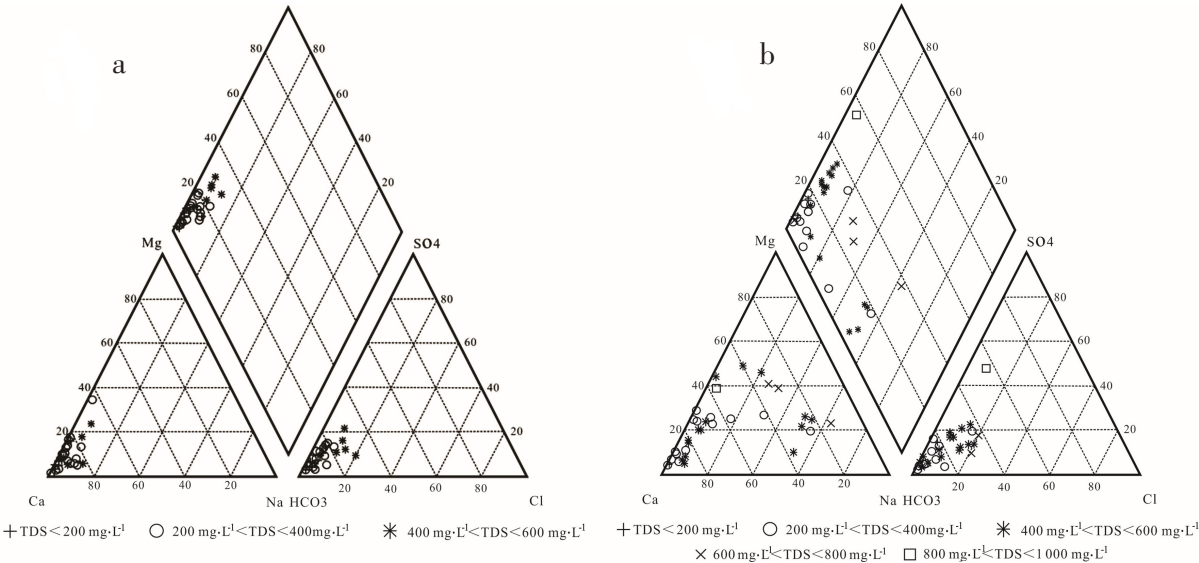


图3 下降泉、机井piper图
Fig.3 Piper chart of gravity springs and motor-pumped wells
a. 下降泉piper图 b. 机井piper图

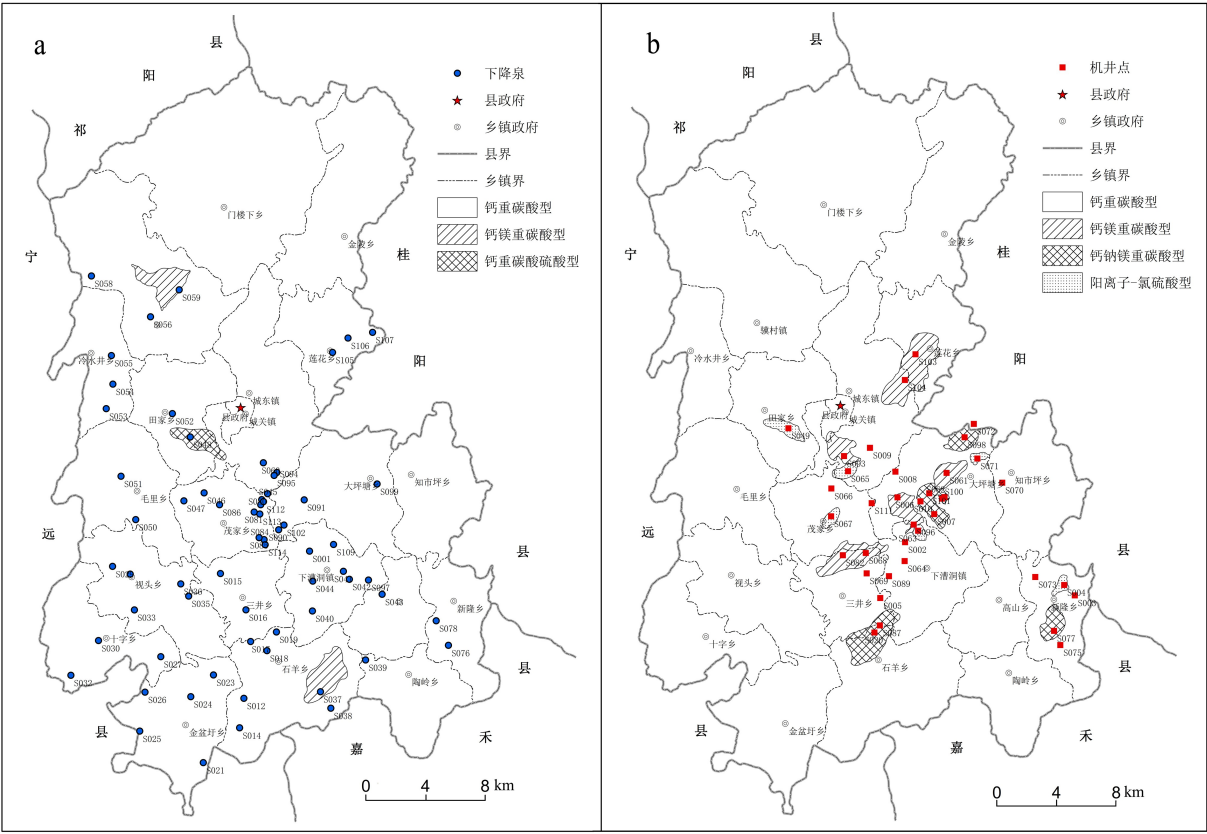


图4 富铈地下水水文地球化学水平分带图
Fig.4 Hydrogeochemical horizontal zoning of strontium-rich groundwater
a. 下降泉水化学水平分带图 b. 机井水化学水平分带图

用时间不同,水中溶滤出的元素有较大的差异,另一方面可能由于薄层泥灰岩、泥质灰岩防污性能较差,外部污染源透过表层含水层进入机井水中,再或者

机井与下降泉有一定程度的水力联系。
研究区下降泉的水化学分带较单一,主要为钙重碳酸型水,局部见有小片条带状钙镁重碳酸型水

(点S037、S059),一方面与下降泉所处含水层岩性薄层泥质灰岩夹灰岩有关,另一方面,下降泉位于区域侵蚀基准面(新田河)以上,地下水具有高的势能,但薄层泥灰岩中岩溶管道不发育,一定程度限制了地下水的流动,使下降泉中水化学类型单一,但锶含量较高。机井水化学分带较复杂,北部、西部补给区接受大气降水、地表水补给强烈,水化学类型以钙(镁)重碳酸型为主,如点S103、S104;新田河为区域侵蚀基准面,地下水经过长时间的径流,水岩作用较为充分,地下水从泥灰岩中溶滤出 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Cl^- 等多种化学成分,使水中总溶解固体含量增加,水化学类型复杂化,如点S065、S096;乡镇中心及附近,未经处理的生活生产用水随意排放也是出现硫酸氯型水的原因,如点S067、S073。

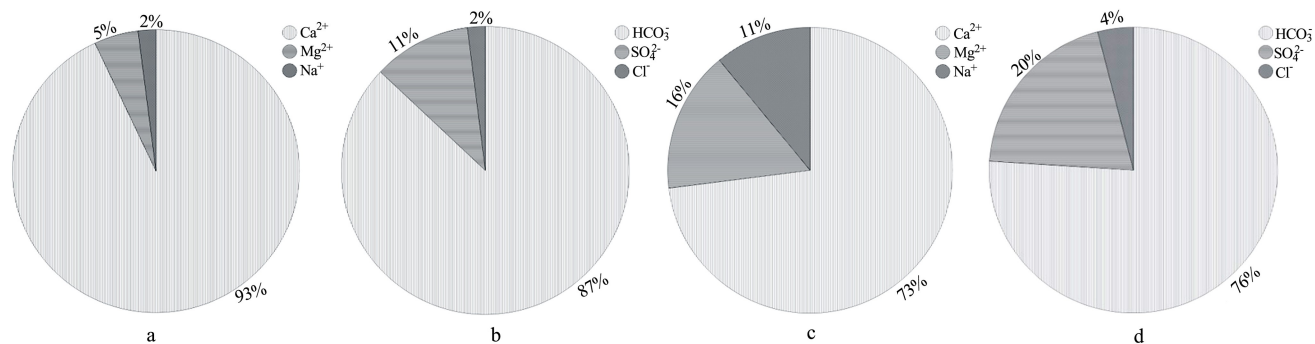


图5 下降泉、机井离子毫克当量饼图

Fig.5 Statistics of mg equivalent of ions in gravity springs and motor-pumped wells

a. 下降泉阳离子毫克当量饼图 b. 下降泉阴离子毫克当量饼图 c. 机井阳离子毫克当量饼图 d. 机井阴离子毫克当量饼图

下降泉水化学类型较为单一(表4),主要为 HCO_3-Ca 型,另有两处水点为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,一处水点为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型;且其TDS含量整体较低,基本分布于 $200\sim 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,占总样点数87.7%,小于 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水点7个,占10.8%,大于 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水点仅1个,占1.5%,该处为受工业生产污染的 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水。机井水化学类型较下降泉复杂,其水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型(13处)和 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型(8处),但两者之和也仅

占总水点的56.7%,其次为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型等;机井TDS含量较高,其均值为下降泉TDS含量均值的1.6倍,最高达 $975.79\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水TDS含量均小于 $450\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TDS含量大于 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水点有4处,占总样点10.8%,水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{Na}$ 型。

表4 富锶地下水水文地球化学垂向分带统计结果

Table 4 Statistics of hydrogeochemical vertical zoning of strontium-rich groundwater

	下降泉			机井		
水化学类型	钙重碳酸型	钙镁重碳酸型	钙重碳酸硫酸型	钙(镁)重碳酸型	钙(镁)钠重碳酸型	阳离子一氯、硫酸、重碳酸型
含水层深度/m	<30	<30	<30	<50	50~80	80~138
总溶解固体/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	<400	<400	400~500	<450	450~600	600~980
个数(占比/%)	62(95.4)	2(3.1)	1(1.5)	21(56.7)	12(32.5)	4(10.8)

由图6可知,在0~50 m的深度内,富锶地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,该深度由于大气降水、地表水入渗,矿化度较低,水化学类型单一;50~80 m深度,地层岩性由薄层泥灰岩夹灰岩变为薄层泥灰岩、泥质灰岩,长时间的水岩作用,从泥质、有机质中溶滤出大量的 SO_4^{2-} 和 Na^+ ;大于80 m的深度范围,该区地下水流动缓慢,局部位于区

域侵蚀基准面以下,地下水排泄不畅,高温、高压、水岩长期作用,造成高矿化度的 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型水。分析统计垂向锶含量分布发现,在50~80 m深度,锶含量最高,大于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其次为90~138 m,锶含量 $0.6\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,20~50 m,锶含量 $0.3\sim 0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,锶含量最低处为小于20 m的潜水带,小于 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

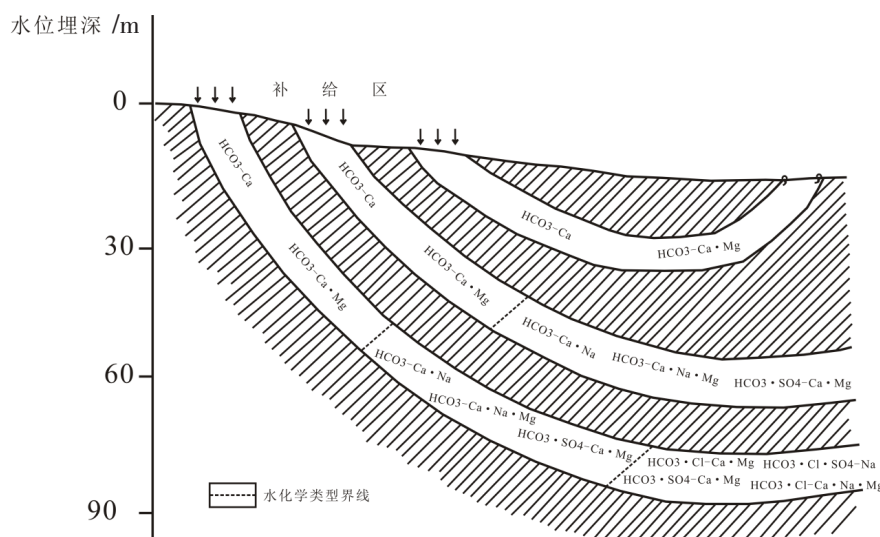


图6 富锶地下水水文地球化学垂向分带图

Fig. 6 Hydrogeochemical vertical zoning of strontium-rich groundwater

3.2.2 水文地球化学垂向分带的指示意义

下降泉、机井中主要离子毫克当量数所占百分比排次相同,即阳离子 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$,阴离子 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$,但其垂向变化范围较大,机井中 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 离子毫克当量百分数较下降泉依次增加了2.2倍、4.5倍、0.82倍、1倍,表明机井水化学组分受含水岩组、水动力条件和人类活动等因素影响较大。 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、TDS垂向上随深度显著增加,水化学类型也由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水演变为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型等复杂水化学类型,进一步说明了在表层地下水补给强烈,渗透、径流通畅的环境中,水化学成分较为单一,随深度的增加,地下水补给减弱,水循环交替缓慢,原生水滞留较多,长期的水岩作用,溶滤出含水岩组中多种矿质成分,呈现出一种垂向上正向的地球化学分带特征。而锶元素在垂向上的分带呈现出异常,在50~80 m深度达到最大值,主要是由于该带含水岩组为锶含量最高的薄层泥灰岩、泥质灰岩,同时该处地下水循环缓慢,水动力条件差,长时间的水岩作用从岩石中溶滤出锶元素并富集。其下

部80~138 m地层岩性演变为泥灰岩夹灰岩,灰岩中锶含量较泥灰岩中少,锶元素来源不足。上部20~50 m地层岩性虽同为薄层泥灰岩、泥质灰岩,但受表层潜水入渗补给较大,且水动力较强,水循环相对较好,水岩作用时间较短,不足以溶滤出较多的锶元素。

4 结 论

(1)下降泉中锶元素含量具有很好的分带特征,总体表现为南部、北部较低,向中东部逐渐升高,并达到国家饮用天然矿泉水锶含量标准($0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),机井中锶、TDS含量的分带性较差。锶含量大于 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水点均分布于泥盆系下统余田桥组泥灰岩地层中,泥灰岩中锶元素是地下水中锶的主要来源。

(2)下降泉、机井中优势阴阳离子依次为 HCO_3^- 、 Ca^{2+} ,但由下降泉至机井,优势阴阳离子含量均显著下降,而锶含量大幅上升,增幅达1281%。下降泉、机井中主要离子毫克当量数所占百分比排次相同,机井中主要阴阳离子含量明显高于下降泉中离子含量,表明机井水化学组分受含水岩组、水动力条件和人类活动等因素影响较大。

(3)下降泉至机井水化学类型由单一趋向复杂化,表现出垂向上正向的地球化学分带特征,但锶元素在垂向上的分带呈现出异常,在50~80 m深度达到最大值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Shawan S D, Andrew L H. Strontium and carbon isotope constraints on carbonate-solution interactions and inter-aquifer mixing in groundwater of the semi-arid Murray Basin Australia [J]. Journal of Hydrology, 2002, 262: 50-67.
- [3] 王焰新,孙连发,罗朝辉,等. 指示娘子关泉群水动力环境的水化学—同位素信息分析[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(3): 1-5.
- [4] 王增银,刘娟,崔银祥,等. 延河泉岩溶水系统 Sr/Ca、Sr/Mg 分布特征及应用[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(2): 15-19.
- [5] 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.
- [6] 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, 2004, 31(6): 19-23.
- [7] 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(地球科学版), 2010, 40(2): 349-355.
- [8] 包国良. 地下水水文地球化学空间分带性:以福建大田琴山矿区为例[J]. 勘查科学技术, 2013(1): 13-18.
- [9] 郭齐军,焦守谏,万智民. 深部水文地球化学垂直分带的倒转[J]. 石油实验地质, 1995, 17(3): 277-280.
- [10] 楼章华,金爱民,朱蓉,等. 松辽盆地油田地下水化学场的垂直分带性与平面分区性[J]. 地质科学, 2006, 41(3): 392-403.
- [11] 商书波,李绪谦,李红艳,等. 江水倒灌污染的水文地球化学分带研究[J]. 水文地质工程地质, 2007(1): 102-106.
- [12] 苏春田,黄晨晖,邹胜章,等. 新田县地下水锶富集环境及来源分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 678-683.
- [13] 刘文均. 湘南泥盆系碳酸盐岩中锶的分布特点及其环境意义[J]. 沉积学报, 1989, 7(2): 15-20.

Hydrogeochemical zoning characteristics of the strontium mineral spring in Xintian county, Hunan Province

ZHAO Guangshuai, SU Chuntian, PAN Xiaodong, XIE Daixing, LUO Fei,
YANG Yang, BA Junjie, LI Xiaopan, BI Benteng

(Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Migration and transformation of the strontium element in groundwater in karst hilly regions are affected by the groundwater agent, and its enrichment and zoning characteristics have important hydrogeochemical significance. This paper addresses these issues using an example of a large strontium-rich mineral spring in Hunan Xintian county. Sampling, water chemical composition analysis, and data processing by ArcGIS and AquaChem software permit to reveal the horizontal and vertical zoning characteristics as well as chemical composition and types of this spring. Results show that the strontium element content in the gravity springs has good zoning characteristics, while such characteristics in the motor-pumped wells are not obvious. TDS is basically consistent with the strontium content. The variation coefficients of ions have good consistence in the gravity spring and well. Ca^{2+} and HCO_3^- content are relatively stable, while Sr^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , and Cl^- concentrations change greatly. The hydrodynamic environments of the springs and motor-pumped wells vary intensively, or the water-bearing rocks are obviously different. The main ion microgram equivalent number in the gravity springs and motor-pumped wells has the same percentage rank, but the vertical variation range is larger. The hydrochemistry components in the wells are primarily influenced by water-bearing rocks and human activities. The hydrochemical type also changes from the single type in the surface karst springs to the well's complex hydrochemical type, showing the upward geochemical zoning in the vertical direction. The vertical zoning of strontium is abnormal and reaches the maximum at 50—80 m depth.

Key words Xintian county of Hunan Province, strontium-rich groundwater, hydrogeochemical zoning, denotative meaning

(编辑 张玲)