

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009007

承德地区天然含锶矿泉水空间分布及特征分析

朱雪芹¹, 刘文波¹, 李志明¹, 陈 坦², 任玉祥³, 邵 海¹, 王龙凤¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081;
3. 承德市自然资源和规划局, 河北 承德 067000)

摘要: 承德地区是京津冀水源涵养功能区和生态环境支撑区, 为可持续开发与保护承德地区矿泉水资源, 探求区域内含锶矿泉水成因并圈定矿泉水潜力区, 依托承德地区项目组所开展的含锶矿泉水调查与勘探, 在生态水文地质调查, 地下水、泉、地表水样品采集及含锶矿泉水检测分析基础上, 通过分析整理大量的含锶样品测试分析数据, 针对主要岩性含锶值量化对比, 以及含锶点图层叠加耦合, 利用统计学中的相关分析、对比分析、因子分析, 对研究区内三大岩类中主要岩性含锶值量化对比分析, 明确指出了本区富含锶的岩性地层潜力层; 利用 GIS 数据空间叠加分析等方法将区内含锶矿泉水分布与岩性、构造在空间上叠加并进行关联分析, 圈定出富含锶矿泉水潜力构造区域带, 分析研究区域内含锶矿泉水的分布规律特征及成因, 为进一步指导研究区探寻构造带及地层中的富锶矿泉水潜力区, 提供精准靶向目标; 为进一步研究含锶矿泉水成因, 尤其是富锶水与构造密切性、开采条件等因素深入研究提供重要基础支撑。

关键词: 含锶矿泉水; 相关分析; 分布特征; 含锶均值; 图层叠加耦合

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0065-09

Distribution and characterization analyses of strontium-bearing mineral spring water in the Chengde region

ZHU Xueqin¹, LIU Wenbo¹, LI Zhiming¹, CHEN Tan², REN Yuxiang³, SHAO Hai¹, WANG Longfeng¹
(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 3. Chengde Natural Resources and Planning Bureau, Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: Chengde area is the water conservation function area and ecological environment supporting area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region. In order to develop and protect the mineral spring water resources in the Chengde area, explore the origin of strontium-bearing mineral spring water and locate the potential areas of mineral spring water, we analyzed and collated a large number of strontium-bearing sample testing and analysis data based on the investigation and exploration of strontium-bearing mineral spring water, ecological hydrogeological survey, groundwater, spring and surface water sample collection, and strontium-bearing mineral spring water detection and analyses were carried out. The methods of correlation analysis, comparative analysis and factor analysis are used to quantify the strontium content in the main lithology of the study area. By means of the spatial analysis of GIS data, the distribution of strontium-bearing mineral spring water in this area is mapped by overlapping and analyzing the data in space, and the potential tectonic zones of strontium-rich mineral spring water are located. The distribution characteristics and causes of strontium-bearing mineral spring water in the region are analyzed and examined, which may provide accurate targets for guiding further investigation in the study area to explore the potential areas of strontium-rich mineral spring water in the tectonic belts and strata.

Keywords: strontium bearing mineral water; correlation analysis; distribution characteristics; average concentration of strontium; map overlaying

收稿日期: 2020-09-05; 修订日期: 2020-10-22

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190311)

第一作者: 朱雪芹(1963-), 女, 博士, 教授级高工, 主要从事水文地质环境地质研究。E-mail: zhuxq@cigem.cn

通讯作者: 刘文波(1977-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事水文地质环境地质研究。E-mail: liuw@igem.cn

在国标《饮用天然矿泉水》(GB 8537—2018)中,饮用天然含锶矿泉水被定义为:当水质达到饮用天然矿泉水标准情况下,其中锶(Sr)浓度超过0.2 mg/L时,此水称为含锶矿泉水。锶是人体骨骼和牙齿的正常组成部分,是一种人体必需的微量元素。锶对骨骼和牙齿强度起到强化作用,尤其是对治疗老年骨质疏松症有非常好的疗效。

随着对含锶水有益于健康认识的加深,20世纪末全国范围内加大开发利用含锶矿泉水,也更加推进学者对含锶矿泉水特征及成因分析研究。前人在含锶水分布特征及成因方面的研究取得了一定的进展。有学者从基础地质角度分析湖南省矿泉水资源地质特征,研究矿泉水成因规律^[1]。方建华^[2]对郑州市饮用天然矿泉水中锶成因进行了探讨;牛俊强等^[3]对湖北省75个含锶矿泉水成因类型划分为:断裂深循环型、裂隙浅循环型、层间缓慢径流型,并分析了矿泉水的形成机理。王松等^[4]对黑龙江五大连池含锶矿泉水分布及成因进行研究,分析了含锶地下水分布特征及成因,指出黑龙江省、湖南省、安徽省、河北省等水源地的锶型矿泉水锶含量较高。刘庆宣等^[5]对全国566处含锶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,重点阐述了微量元素锶的富集与含水介质岩性的关系,并概括了矿泉水中锶富集的地球化学特征,得出矿泉水中Sr的含量与岩石中Sr丰度存在正相关关系,但由于影响水中Sr富集的其他因素较多,并得出碳酸盐岩地层含锶最高,其次是碎屑岩地层。地下水中锶主要来源于水岩相互作用^[6-7],锶在地下水动力作用下迁移和转化,通过岩石矿物的风化作用、水解溶滤作用进入地下水中^[8]。苏宏建等^[9-10]对承德市饮用天然矿泉水研究认为承德地区矿泉水与构造关系密切,矿泉水水源地大多分布于断裂带附近。唐山开平区天然矿泉水地球化学特征与成因也被进行了详细的研究探讨^[11]。廖先远等^[12]得出Sr在地壳丰度为0.375‰,在纯碳酸盐岩中含量为0.610‰,在石英砂岩中含量较小。通过总结前人研究结果:含锶丰度较高的围岩可以出现含锶较高的含锶水,但不是绝对控制因素。普遍认为矿泉水中微量元素Sr富集的最有利的环境是碳酸盐岩地层,其次是碎屑岩地层。

总结前人在承德地区对含锶矿泉水研究结果,多为定性分析富含锶岩石成分与水化学成分变化,研究含锶水成因,缺少对研究区内主要岩性含锶值量化对比分析;在分析深大断裂操控含锶矿泉水成因分析中,缺少空间上富锶水点与构造岩石关联分析并提出含锶

潜力分布区。

依据承德地区开展的生态水文地质调查,大量采集的地下水、泉、地表水样品,以及含锶矿泉水检测分析。利用统计学中的相关分析、对比分析、因子分析,GIS数据空间叠加分析等方法,对研究区内三大岩类中主要岩性进行含锶值的量化对比分析,明确指出了本区富含锶的岩性地层;将含锶矿泉水分布与岩性、构造在空间上叠加并进行关联分析,指出富含锶矿泉水潜力构造区域带,以解析研究区含锶矿泉水的分布规律特征及成因分析,为进一步指导研究区探寻构造带及地层中的富锶矿泉水潜力区,提供精准靶向目标,提供重要依据。

1 研究区概况

研究区位于燕山山脉东段长城北侧的承德地区,地势北高南低,地形复杂,山脉纵横,滦河基本流经全区,局部流入外省,地貌由北向南从坝上高原、燕山山脉中低山、燕山南麓低山丘陵逐步过渡。承德市下辖双桥区、双滦区、鹰手营子矿区3个区,承德县、兴隆县、滦平县、隆化县4个县,1个县级市平泉市,丰宁满族自治县、宽城满族自治县、围场满族蒙古族自治县3个自治县,总面积为39 506.3 km²。

本区富含锶的岩性分布较广,岩性是含锶水的主要来源,是主控因素,区域中部内含有大量富含锶的岩石矿物,如岩浆岩中侵入岩中的安山岩、花岗岩、凝灰岩等,沉积岩中的灰岩。

地质构造是本区地下水的重要控制因素,不论是浅层水还是深层水,其富水地段无不受构造控制,尤其是断层带、断层影响带以及向、背斜的轴部,常常形成较大的蓄水构造,构成具有供水意义的水源地。

控制着研究区构造框架是7条深大断裂,其展布方向为NE向或近EW向,它们直接控制本区的水文地质条件,使得研究区基岩地下水呈现出自北向南的孔洞裂隙水、构造裂隙水、风化带网状裂隙水、碳酸盐岩裂隙、溶隙、岩溶水的分布规律。深、大断裂性质以压性、压扭性为主,间断出现有张性,但它的疏张地带的次一级构造裂隙多呈张性,充填物少,连通性好,为地下水的运移及储存创造了良好的空间场所,泉水出露较多,流量大。

全区多年平均降水量为542.77 mm(1956—2015年),但因降水年内分配极不均匀,集中降水的6—8月占全年的70%,集中在汛期(6—9月)。区内降水量、降水强度及降水补给特征对地下水形成起着主要

控制作用。降雨多为暴雨,加之地形坡度较大,植被发育一般,降水入渗系数仅为 4% ~ 8%,所以大部分降水以地表径流流失。承德市水资源受降雨和地形影响,时空分布极不均匀,总体呈南多北少的态势。

承德地区地下水补给来源主要为大气降水,同时接受河流及渠道渗漏补给。浅层地下水流向与地表水流向总体一致,由西北向东南流,山前侧向径流补给是浅层地下水的重要补给来源。本区地下水主要赋存于松散岩类孔隙、碳酸盐岩类裂隙溶隙、基岩类的构造节理裂隙、风化带网状裂隙以及玄武岩、碎屑岩裂隙、孔隙之中,多为潜水,局部具承压性,其分布受地层岩性、地质构造和地貌等赋存条件的综合影响,具有较大的不均匀性。垂向上,山间沟谷上部多分布砂性土,主干流宽缓河谷多为砂、砾石、卵石的连续沉积,且其间所夹的弱透土层分布不连续,地下水垂直运动明显。地下水除蒸发排泄、基流排泄和人工开采,大部分以泉水

排泄,并有局部呈地下暗流补给沟谷第四系孔隙水,或者通过断裂带下渗成为深部承压水或层间水。深部基岩具有微量层状孔隙-裂隙及岩溶水,主要赋存于陆相沉积岩及构造盆地中,埋藏较深,岩层透水性弱,径流排泄条件较差。区内大气降水—地表水—地下水相互转化作用强烈,山前地下水补给条件好,径流速度快,更新速率高,盐分溶滤水岩相互作用强烈,地下水动态季节性变化明显。

研究区内地下水赋存类型主要为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水。北部坝上一带发育孔隙水、孔洞裂隙水,主要赋存于玄武岩建造、碎屑岩裂隙孔隙之中、第四系亚砂土-亚黏土的松散孔隙含水层中。中部发育基岩裂隙水、构造裂隙水,赋存于侵入岩-变质岩构造节理、裂隙、风化带网状裂隙、砂岩裂隙孔隙含水层中。南部发育岩溶裂隙水,赋存于碳酸盐溶洞、溶孔、溶隙含水层中,本区水文地质图见图 1。

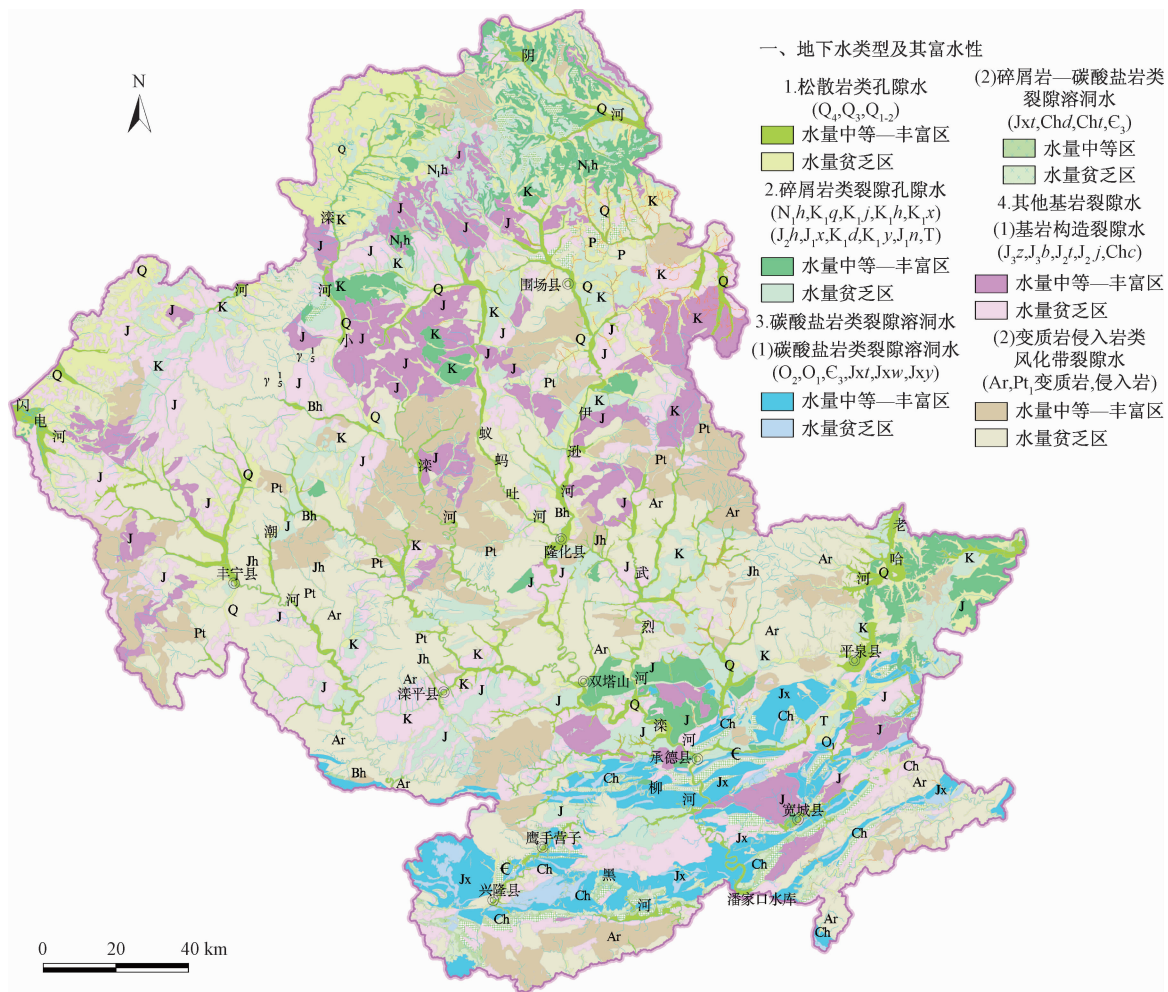


图 1 工作区水文地质简图

Fig. 1 Simplified hydrogeological map of the study area

2 研究方法

2.1 样品采集与检测

2019年项目组在研究区内共采集含锶水样167组,包括有地下水、地表水、泉水样品。本次统计分析中以含锶水($0.05\text{ mg/L} \leq \text{Sr} < 5.00\text{ mg/L}$)为研究对象,同时收集已有的相关资料,收集已有富含锶点26组(2019年^[9]),在含锶水点分布示意图以及含锶均值占比图增加收集26组水点,共计189个含锶水点,含锶水点分布示意图见图2。

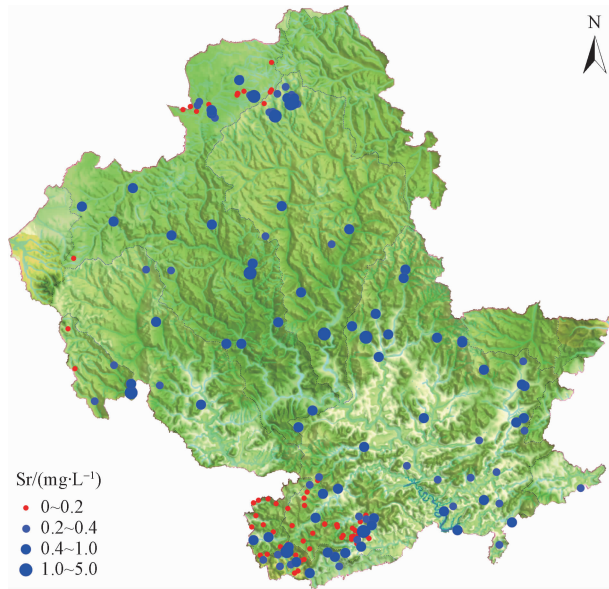


图2 工作区内含锶水点分布

Fig.2 Distribution of Sr-bearing mineral spring water in the study area

样品采集包括现场测试指标以及实验室检测指标,样品采集过程中严格按照《区域水文地质调查技术规范》(HL/T164—2004)进行采集、保存与运输,现场测试了水样温度、pH、溶解氧(DO)、总溶解性固体(TDS)等指标,室内测试指标分别由中国地质大学、河北省地质环境监测总站进行分析测试,样品检测单位具有国家认证检测资质,严格按照国家检测项目的要求开展检测。

2.2 分析方法

(1)相关性分析

现场测试 TDS、pH、TH ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)、阴离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^-)、阳离子 (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+}),其代表着岩性中主要成分因子,通过因子之间 Pearson 相关系数找出两个因子之间最大相关程度,从 Sr 与其它因子最大相关系数,可追踪确定富

含锶的岩性或具体岩石。

(2)分层分类

将岩性、构造、出露条件分为三个类别。在每个类别中再进一步分层,逐层分类。如水点所在地质岩性再分为岩浆岩、变质岩、沉积岩三大类;对于含锶水点出露条件又分为水井出露、自然泉出露两类,在不同层次及不同类别中逐层开展含锶均值对比分析。

(3)图层叠加

本次研究主要是将含锶水点与研究区构造线性图层,地层面性图层叠加,形成耦合图,可空间上直观反映富含锶矿泉水与深大构造及岩性带的密切相关性,便于进一步深入研究含锶水在构造和岩性中点分布特点。

3 结果与分析

3.1 空间分布特征

研究区2019年采集水点以及收集含锶水点共计189个,含锶量小于0.20 mg/L的占比为35.98%,即使是这些水点达到矿泉水标准,也不能称为含锶矿泉水;锶含量大于0.20 mg/L的水点占比64.40%,该水点称为含锶水;含锶0.20~1.0 mg/L的水点占区内绝大多数,达到58.73%;大于1.0 mg/L以上水点占比5.29%(图3)。

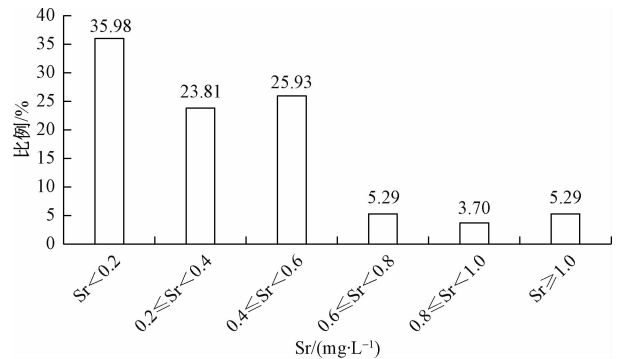


图3 不同含锶量所占比例

Fig.3 Percentage distribution of Sr concentrations in the water samples

将2019年现场采集组分主要因子及实验室检测主要化学组分(有效样品数为137组)运用SPSS数理统计分析描述,含锶量介于0.04~6.20 mg/L,区域含锶均值为0.40 mg/L,总体区域地下水含锶量偏高。地下水pH值为7.27~8.97, Cl^- 、 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 组分均值含量均低于地下水饮用水质标准值,说明本区地下水是属于补给及径流区,地下水以优质富含锶水质为主,详见表1。

表1 承德地区地下水含锶水主要成分数理统计表

Table 1 Chemical constituents of Sr-bearing mineral spring water in the Chengde region

	最小值	最大值	平均值	平均值标准误差	标准差	方差	峰度	地下水水质标准
TDS	52.20	1 321.90	272.27	13.75	160.95	25 905.45	13.22	1 000.00
TH	14.37	492.30	78.65	4.40	51.55	2 657.40	29.74	
pH	7.27	8.97	8.05	0.03	0.33	0.11	0.03	6.5~8.5
Sr ²⁺	0.04	6.20	0.40	0.05	0.63	0.40	57.00	
K ⁺	0.31	8.31	1.70	0.11	1.32	1.74	6.94	
Na ⁺	1.74	282.00	15.09	2.66	31.08	965.84	50.73	200.00
Ca ²⁺	12.60	450.00	60.04	3.82	44.67	1 995.74	42.44	
Mg ²⁺	1.31	48.43	18.61	1.04	12.18	148.39	-0.77	
HCO ₃ ⁻	0.00	363.07	180.39	6.93	81.09	6 574.84	-0.91	
SO ₄ ²⁻	3.64	237.81	34.20	2.80	32.72	1 070.42	16.79	250.00
Cl ⁻	2.10	179.59	14.18	1.92	22.45	504.05	27.50	250.00
NO ₃ ⁻	0.28	413.40	32.86	4.45	52.09	2 713.79	26.64	20.00

注:pH、平均值标准误差、标准差、方差、峰度均无量纲;其余单位为 mg/L。

含锶水分布与构造关系:研究区内分布深断裂5条,大断裂2条,发育方向近EW向和NE向,在深大断裂附近发育数百条小型断裂,以NE为主,零星分布EW、NW向。断裂由北向南依次分布为:康保-围场深断裂,丰宁-隆化深断裂、大庙-娘娘庙深断裂、尚义-平泉深断裂、上黄旗-乌龙沟深断裂、平坊-桑园大断裂及密云-喜峰山大断裂。将研究区含锶量分为4段: Sr < 0.20 mg/L, 0.20 mg/L ≤ Sr < 0.40 mg/L, 0.40 mg/L ≤ Sr < 1.0 mg/L, Sr ≥ 1.00 mg/L。四类含锶水点与区域构造图叠加,其耦合结果在空间上分布为:低于0.20 mg/L含锶水点主要分布在研究区的东南兴隆县西南区岩溶水分布区,该区分布在构造带上的水点比例为23.5%,丰宁县西部以及围场北部分布在构造带上水点比例为61.0%,岩溶水含锶量低时与构造关系不大。中部区域构造带未见有分布,对于Sr介于0.2~0.4 mg/L及0.4~1.0 mg/L时,分布在构造带上的水点比例分别为25.6%及21.2%,Sr > 1.0 mg/L时分布在大构造带上的水点比例为44.4%,详见图4。可见含锶越高的点,与大型构造断裂带相关性越高。主要是位于北部康保-围场深断裂、中部沿丰宁—隆化深断裂构造带,南部分布在平坊—桑园大断裂、密云—喜峰口大断裂构造带上以及围场北部向斜构造带。含锶量高与深大断裂有着密切关系,说明地下水经过活动断裂构造循环后,水温不断升高,溶解能力增强,促进了水岩作用的溶解、离子交换作用,强化了水对围岩的溶解和淋滤作用,从而使地下水中溶入多种矿物质而形成矿泉水。

含锶水分布与岩性关系:岩石富含锶矿物成分是含锶矿泉水点主要来源。与矿泉水成因有关的地层有:元古界长城系,蓟县系、古生界寒武系,中生界侏罗

系、白垩系,及新生界古近系、第四系。承德地区岩性分布由北向南含锶特点如下:

围场北部以古近系、第四系为主,第四系主要分布在河谷区,是该区域含锶点岩石来源,但锶含量不高,只在大构造带或褶皱带中出现含锶高的水点。围场西到丰宁,南到双塔山深平、东到平泉,是中部地区,岩性主要以侏罗系、白垩系地层为主,有变质岩和侵入岩带分布,尤其侵入岩与深大断裂构造带相伴,在大构造分布的侵入岩带上分布有含锶较高水点。南部位于承德县以南,西到兴隆县,东到平泉,主要分布有奥陶系、寒武系岩溶地层,侏罗系地层是酸性火山岩系,主要以凝灰岩及流纹岩为主;白垩系地层底部为碎屑沉积岩,元古界长城系、蓟县系变质碎屑岩。

将研究区含锶水点与区域地层叠加,其耦合结果在空间上分布为:低于0.20 mg/L含锶水点主要分布在研究区围场北部及南部兴隆县西南长城系变质岩、碳酸盐岩以及混合碎屑岩区。0.20~0.40 mg/L含锶水点围场北部主要分布在古近系、第四系碎屑岩和松散第四系沉积物中。中部地区大部分含锶水点是位于岩浆岩侵入到侏罗系和白垩系地层交界处。含锶量一般在0.4 mg/L以上,位于中部丰宁—兴隆深大断裂带上点侵入岩分布较高含锶水点,该断裂带上侵入岩具有富锶矿泉水,侵入岩带具有富含锶矿泉水潜力。南部地区,较高点富锶矿泉水点主要是沿着近于NEE方向,元古界长城系Ch及蓟县系Jx与太古界变质岩交界带,以及奥陶系寒武系碳酸盐岩与构造带交界带,均是富锶水点潜力区,详见图5。

3.2 含锶均值在不同出露(开采)条件下的特征

根据含锶水点揭露方式不同,将含锶水点分为井水、泉水及地表水,对三类含锶水算数平均值(以下简

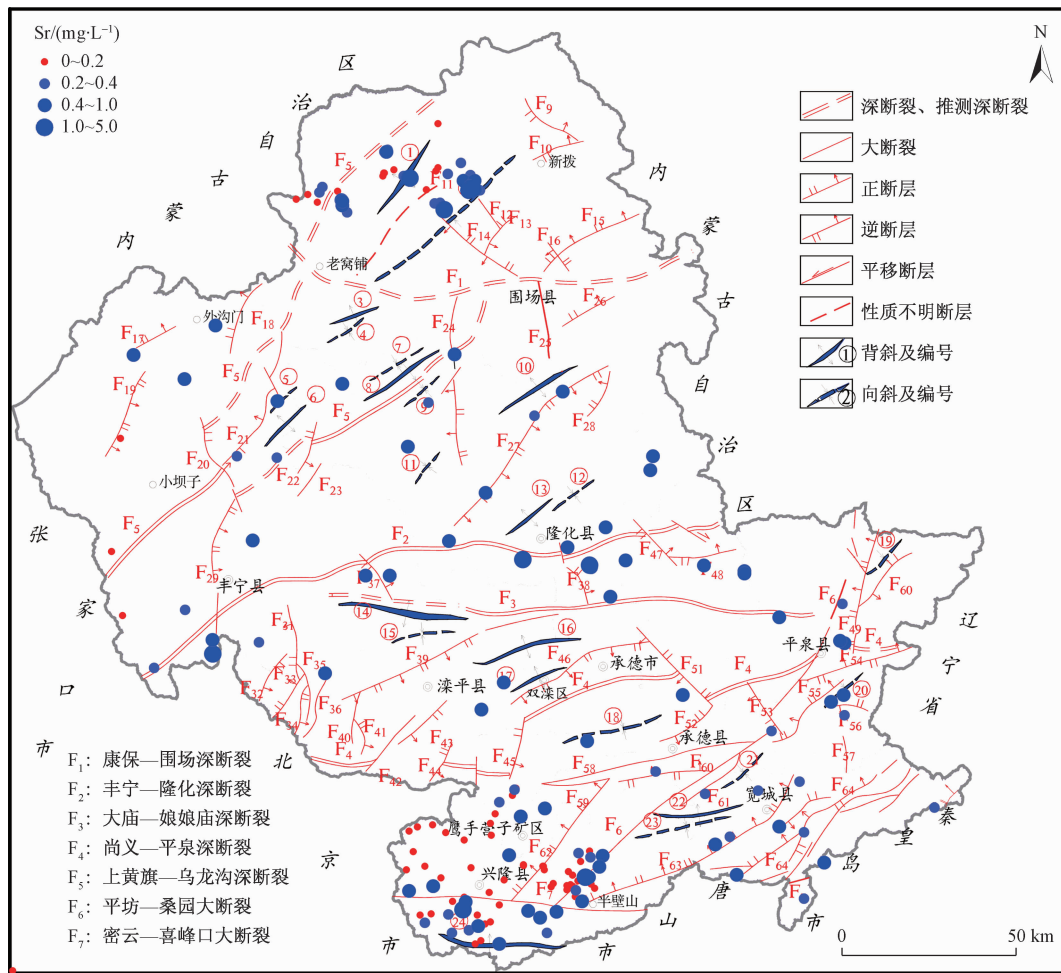


图4 含锶水不同含量段与构造耦合分布图

Fig.4 Average concentration distribution of strontium overlapping the construction map

称含锶均值)进行对比分析:其锶含量分别为0.54 mg/L、0.26 mg/L和0.29 mg/L,可见不同出露(开采)条件对含锶量有一定影响,见图6。

三大岩性含锶均值对比:在相同的水点出露条件下,围岩岩性不同,含锶均值不同,如同为水井点中,岩浆岩含锶均值为0.57 mg/L,变质岩为0.52 mg/L,沉积岩0.53 mg/L。在泉水点中,岩浆岩含锶均值0.37 mg/L高于变质岩0.28 mg/L,变质岩高于沉积岩0.19 mg/L,地表水含锶均值0.29 mg/L,仅略高于泉水点中的变质岩,泉水出露条件下,围岩为沉积岩含锶均值最低,仅为0.19 mg/L。在水井开采条件下,富含锶由高到低围岩分别为岩浆岩、沉积岩、变质岩;在泉水开采条件下,富含锶由高到低围岩分别为岩浆岩、变质岩,沉积岩,见图7。

水井开采条件下,不同岩性含锶值不同:岩浆岩类中,安山岩及花岗岩含锶均值较高,分别为0.71 mg/L、0.74 mg/L,凝灰岩0.58 mg/L,玄武岩为0.32 mg/L,

本区最低为石英砂岩0.17 mg/L,低于含锶矿泉水的标准。沉积岩类中,灰岩0.55 mg/L,砂岩0.39 mg/L,白云岩0.37 mg/L,石英砂岩仅为0.17 mg/L,低于含锶矿泉水的标准。变质岩中的片麻岩含锶均值0.52 mg/L,低于岩浆岩中的安山岩及花岗岩。未固结第四系沉积物中含锶均值0.67 mg/L。井水出露条件下,含锶均值由高到低排序依次为花岗岩、安山岩、第四系沉积物、凝灰岩、灰岩、片麻岩、砂岩、白云岩、玄武岩、石英砂岩。

泉水出露条件下,同为岩浆岩类中的安山岩含锶均值为0.48 mg/L,凝灰岩0.41 mg/L,花岗岩0.39 mg/L,均高于玄武岩0.30 mg/L;岩浆岩中的安山岩、凝灰岩、花岗岩、玄武岩均高于变质岩中的片麻岩0.28 mg/L;沉积岩中,最低为白云岩及砂岩0.14 mg/L,石英砂岩为0.17 mg/L。沉积岩中超过含锶矿泉水标准的只有灰岩0.20 mg/L。本区在泉水出露方式条件下围岩岩石含锶均值由高到低排序依次

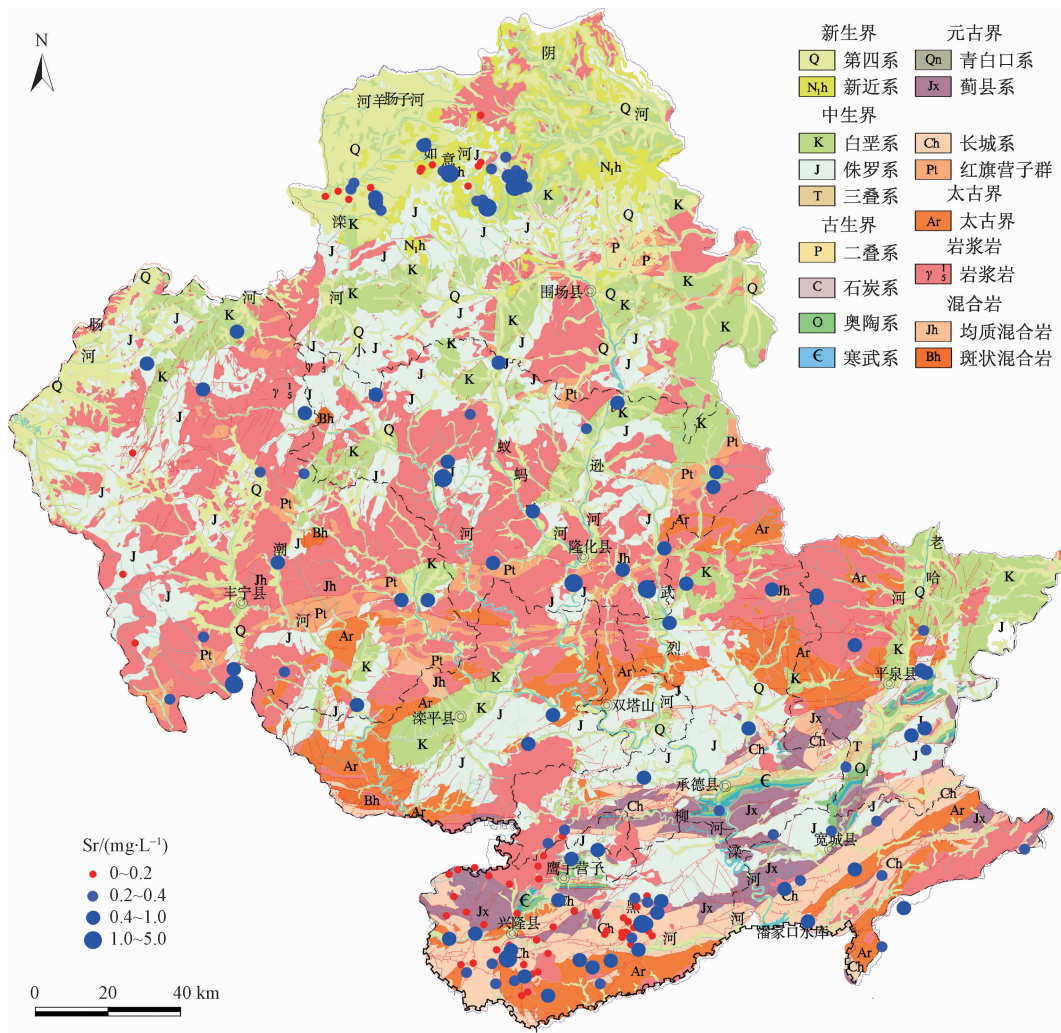


图 5 含锶水与地层耦合分布图

Fig. 5 Average concentration distribution of strontium overlapping the lithological map

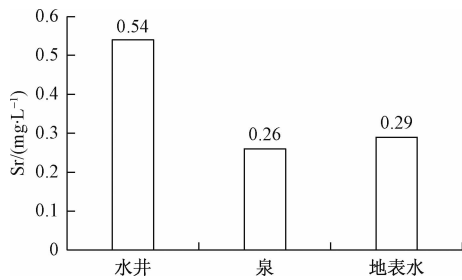


图 6 不同出露条件下的 Sr 均值

Fig. 6 Percentage distribution of Sr concentrations under the different occurrence conditions

为:安山岩、凝灰岩、花岗岩、玄武岩、第四系沉积物、片麻岩、灰岩、砂岩、白云岩。

相同岩性对比:在不同的开采方式下含锶均值也有着明显变化,普遍存在着水井开采方式中含锶均值高于泉水,但玄武岩、石英砂岩中两种方式变化较小,

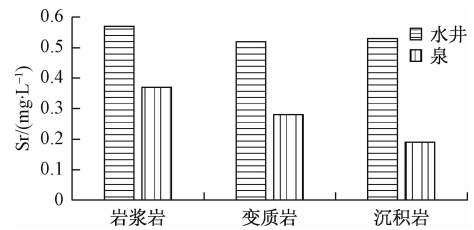


图 7 不同出露条件下三大岩中含锶均值对比

Fig. 7 Distribution of Sr concentrations in the three lithological systems under different occurrence conditions

石英砂岩相对其它岩含锶是最低的,见图 8。

根据上述数据分析可见,围岩岩性条件相同,井水中含锶量普遍高于泉水,推测原因:是否存在着水井开采条件下水体搅动力增大,使含锶盐围岩溶解性增强,含锶盐岩溶解变化是否受水体动力搅动强度以及环境温度、气压等环境条件影响,需要进一步探索研究。

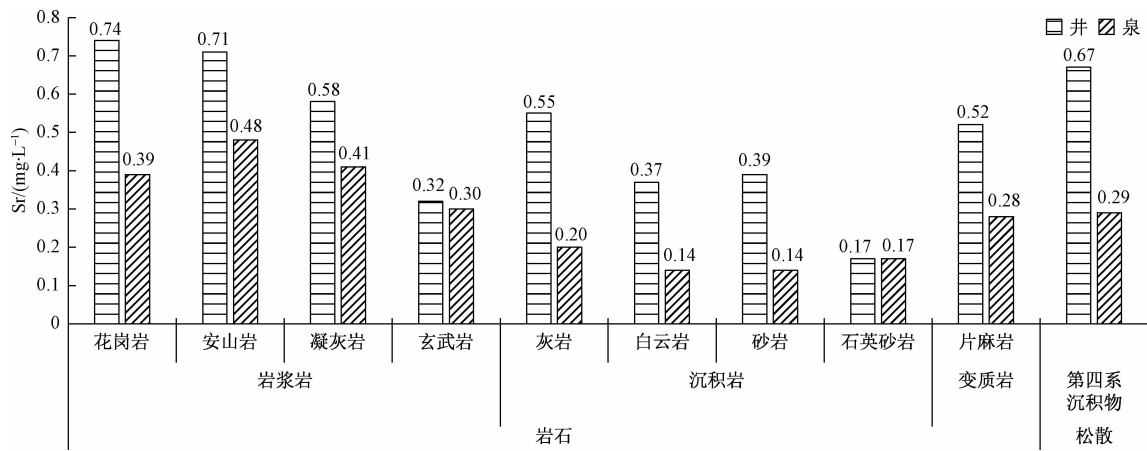


图8 研究区主要岩性在不同开采条件下含锶均值对比

Fig. 8 Distribution of Sr concentrations of the key rocks in the study area under the different occurrence conditions

3.3 因子相关性分析

2019年,现场检测组分主要因子及实验室检测主要化学组分(有效样品数为137组),运用SPSS中的Pearson相关分析对承德地区含锶井水点各主要因子进行矩阵相关分析。相关性分析因子主要包括部分现场检测项目、主要阳离子、主要阴离子,水点含锶量与各因子呈现不同程度的相关性,12个指标的Pearson相关系数矩阵见表2。表中表示双尾时Sr与TDS、TH(Ca+Mg)、Na⁺、K⁺、Ca²⁺及SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻呈较大相关性,进一步说明水中的锶与岩性有关。单尾时Sr与HCO₃⁻相关性较大。水样中Sr含量与TDS、TH(Ca+Mg)、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻显著正相关,说明水体中Sr的来源可能不是简单的某个单因子引起含锶岩的溶解、离子交换作用,还应与复杂的地质构造条件等相关。

4 结论

(1)含锶量越高与大型构造越密切,尤其是中部沿丰宁—隆化深断裂构造带,南部平坊—桑园大断裂、密云—喜峰口大断裂构造带南部,以及奥陶系、寒武系碳酸盐岩与构造带交界带,是富含锶水的重要潜力区。

(2)在相同出露条件下,本区不同的岩性含锶均值不同,如井水出露条件下含锶均值由高到低排序依次为花岗岩、安山岩、第四系沉积物、凝灰岩、灰岩、片麻岩、砂岩、白云岩、玄武岩、石英砂岩。进一步指出研究区内富含锶的地层岩性潜力层为:岩浆岩的深成花岗岩、其次是岩浆岩中喷出安山岩、凝灰岩,以及未成岩的第四系沉积物。玄武岩、石英砂岩在两种方式变化较小,石英砂岩相对其它岩含锶是最低的。

表2 承德地区地下水含锶水主要化学成分相关矩阵表

Table 2 Correlation matrix of chemical constituents of groundwater samples in the Chengde region

	TDS	TH	pH	Sr ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
TDS	1											
TH	0.828 **	1										
pH	-0.211 *	-0.296 **	1									
Sr ²⁺	0.491 **	0.445 **	-0.168	1								
K ⁺	0.477 **	0.301 **	-0.175 *	0.501 **	1							
Na ⁺	0.465 **	0.087	0.049	0.300 **	0.454 **	1						
Ca ²⁺	0.822 **	0.978 **	-0.272 **	0.484 **	0.333 **	0.152	1					
Mg ²⁺	0.492 **	0.645 **	-0.253 **	0.109	0.055	-0.189 *	0.472 **	1				
HCO ₃ ⁻	0.465 **	0.553 **	-0.277 **	0.182 *	0.139	0.014	0.461 **	0.648 **	1			
SO ₄ ²⁻	0.521 **	0.289 **	-0.159	0.372 **	0.466 **	0.754 **	0.319 **	0.055	0.004	1		
Cl ⁻	0.861 **	0.745 **	-0.167	0.463 **	0.399 **	0.372 **	0.795 **	0.237 **	0.195 *	0.372 **	1	
NO ₃ ⁻	0.807 **	0.726 **	-0.137	0.382 **	0.322 **	0.157	0.747 **	0.331 **	0.143	0.206 *	0.919 **	1

注: * 和 ** 分别表示在 P=0.05 和 0.01 时(双尾)相关性显著。

(3)含锶水出露方式不同,含锶量存在一定的差别,如水井出露方式对于部分岩性含锶量影响较大,如水井中含锶值高于泉水和地表水,除溶滤作用之外,是否存在着氧化环境、水动力强度等因素影响含锶量变化,尚需要进一步对比分析研究。

参考文献 (References):

- [1] 赵帅军,黄树春,夏友,等.从基础地质角度研究湖南省矿泉水资源特征及成因规律[J].矿产地质,2017,31(1):187-193. [ZHAO S J, HUANG S C, XIA Y, et al. Discussion of resources characteristics and genesis regularity of mineral water in respect to basic geology in Hunan Province [J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(1):187-193. (in Chinese)]
- [2] 方建华.郑州市饮用天然矿泉水成因探讨[J].河南地质,1993,11(2):128-132. [FANG J H. Discussion on the cause of drinking natural mineral water in Zhengzhou [J]. Henan Geology, 1993, 11(2):128-132. (in Chinese)]
- [3] 牛俊强,文美霞,郭昆,等.湖北省饮用天然矿泉水成因类型及成矿模式分析[J].资源环境与工程,2019,33(1):61-65. [NIU J Q, WEN M X, GUO K, et al. Analysis of genetic types and metallogenic model of potable natural mineral water in Hubei Province [J]. Resources Environment & Engineering, 2019, 33(1):61-65. (in Chinese)]
- [4] 王松,王菁华,潘虹,等.高锶矿泉水研究[J].黑龙江科学,2019,10(8):32-33. [WANG S, WANG J H, PAN H, et al. Study on high strontium mineral water [J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(8):32-33. (in Chinese)]
- [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,2004,31(6):19-23. [LIU Q X, WANG G L, ZHANG F W. Geochemical environment of trace element strontium (Sr) enriched in mineral waters [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(6):19-23. (in Chinese)]
- [6] 苏春田,聂发运,邹胜章,等.湖南新田富锶地下水水化学特征与成因分析[J].现代地质,2018,32(3):554-564. [SU C T, NIE F Y, ZOU S Z, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of strontium-rich groundwater in Xintian County, Hunan Province [J]. Geoscience, 2018, 32(3):554-564. (in Chinese)]
- [7] 孙厚云,毛启贵,卫晓锋,等.哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J].中国地质,2018,45(6):1128-1141. [SUN H Y, MAO Q G, WEI X F, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin [J]. Geology in China, 2018, 45(6):1128-1141. (in Chinese)]
- [8] 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. [FAN W, YANG Y S, YE X Y, et al. Hydrogeochemical and environmental characteristics of strontium-enrichment in groundwater and its genesis in Qingken Lake area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2):349-355. (in Chinese)]
- [9] 苏宏建,杨瑞,多晓松,等.承德市矿泉水资源分布规律及其形成的地球化学条件[J].化工矿产地质,2019,41(1):27-34. [SU H J, YANG R, DUO X S, et al. Distribution rules and geochemical conditions of mineral water resources in Chengde City [J]. Geology of Chemical Minerals, 2019, 41(1):27-34. (in Chinese)]
- [10] 孙厚云,卫晓锋,甘凤伟,等.滦河流域中上游富锶地下水成因类型与形成机制[J].地球学报,2020,41(1):65-79. [SUN H Y, WEI X F, GAN F W, et al. Genetic type and formation mechanism of strontium-rich groundwater in the upper and middle reaches of Luanhe river basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2020, 41(1):65-79. (in Chinese)]
- [11] 梁爽,田西昭,张瑞强,等.唐山市饮用天然矿泉水地球化学特征与成因探讨[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):102-107. [LIANG S, TIAN X Z, ZHANG R Q, et al. Primary discussion of geochemistry characteristic and formation of potable natural mineral water in Tangshan City [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(6):102-107. (in Chinese)]
- [12] 廖先远,胡雨柔.青海曲海天然饮用富锶型矿泉水形成机制分析[J].四川地质学报,2017,37(4):592-595. [LIAO X Y, HU Y R. Genetic mechanism for the Sr-rich mineral water in Quhai, Qinghai [J]. Acta Geologica Sichuan, 2017, 37(4):592-595. (in Chinese)]