

doi: 10.12029/gc20200624001

孙岐发, 孙茁桉, 贾林刚, 田辉, 郭晓东, 都基众, 李旭光, 李霄, 贾立国. 2023. 吉林省长春莲花山地区地下水中锶及偏硅酸的形成机理研究[J]. 中国地质, 50(1): 181-190.

Sun Qifa, Sun Zhuoan, Jia Lingang, Tian Hui, Guo Xiaodong, Du Jizhong, Li Xuguang, Li Xiao, Jia Ligu. 2023. Formation mechanism of strontium and metasilicic acid groundwater in the Lianhuashan area, Changchun, Jilin Province[J]. Geology in China, 50(1): 181-191(in Chinese with English abstract).

吉林省长春莲花山地区地下水中锶及偏硅酸的形成机理研究

孙岐发^{1,2,3}, 孙茁桉⁴, 贾林刚⁵, 田辉³, 郭晓东³, 都基众³, 李旭光³, 李霄³, 贾立国³

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 4. 国家珠宝玉石质量监督检验中心沈阳实验室, 辽宁 沈阳 110034; 5. 中煤科工生态环境科技有限公司, 北京 100031)

摘要:【研究目的】长春莲花山地区地下水中富含 Sr 和偏硅酸, 查明地下水中锶及偏硅酸的形成机理具有重要意义。【研究方法】通过 Piper 三线图法及对研究区矿泉水形成的物质基础、水动力条件、水化学条件的深入研究。【研究结果】研究发现长春莲花山地区发育的松散岩、碎屑岩、火成岩是该地区地下水中锶及偏硅酸的富集的物质基础; 大气降水与地表水入渗补给等为地下水长期与周围岩石(矿物)发生水解和溶滤作用、为地下水最终富锶及偏硅酸创造了条件。【结论】区域地层中存在 16.3~80 m 巨厚的基岩风化带, 使富锶及富含偏硅酸的地下水呈面状分布, 部分区域两种地下水同时存在, 这一点不同与以往在基岩构造带上发现的线状分布的矿泉水源; 前人在此区域上没有发现富含锶及偏硅酸的矿泉水, 这一发现为地方经济发展提供了新的空间。

关键词:地下水; 富锶矿泉水; 水岩相互作用; 锶和偏硅酸; 地质调查工程; 长春; 吉林

创 新 点:在地下水动力学和地下水化学理论的指导下, 综合矿泉水形成的物质基础和形成条件, 发现面状分布富含锶及富含偏硅酸的矿泉水资源。

中图分类号: P641.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0181-11

Formation mechanism of strontium and metasilicic acid groundwater in the Lianhuashan area, Changchun, Jilin Province

SUN Qifa^{1,2,3}, SUN Zhuoan⁴, JIA Lingang⁵, TIAN Hui³, GUO Xiaodong³, DU Jizhong³,
LI Xuguang³, LI Xiao³, JIA Ligu³

(1. Harbin Natural Resources Comprehensive Investigation Center, CGS, Harbin 150081, Heilongjiang, China; 2. Northeast Geological S & T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 3. Shenyang Center of Geological Survey, CGS,

收稿日期: 2020-06-24; 改回日期: 2020-10-20

基金项目: 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2022-43)及中国地质调查局项目(DD20160265, 10222822102000009037)资助。

作者简介: 孙岐发, 男, 1966年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质和环境地质调查研究工作;
E-mail: 152468435@qq.com。

Shenyang 110034, Liaoning, China; 4. Shenyang Laboratory of national gemstone testing center, Shenyang 110034, Liaoning, China;
5. Ecological Environment Technology Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Beijing 100013, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The groundwater in Lianhuashan area of Changchun is rich in strontium and metasilicic acid. It is important to understand the formation mechanism of strontium and metasilicic acid in groundwater. **[Methods]** The material basis, hydrodynamic conditions and hydrochemical conditions of the formation of mineral water in the study area were studied in depth by using the Piper three-line diagram method. **[Results]** It is found that the loose rock, clastic rock and igneous rock developed in Lianhuashan area of Changchun are the material basis for the enrichment of strontium and metasilicic acid in groundwater in this area; Atmospheric precipitation and infiltration recharge of surface water create conditions for the long-term hydrolysis and leaching of groundwater with surrounding rocks (minerals), and for the final enrichment of strontium and metasilicic acid in groundwater. **[Conclusions]** There is a 16.3–80 m thick bedrock weathering zone in the regional strata, which makes the groundwater rich in strontium and metasilicic acid distributed in a plane shape. In some areas, two kinds of groundwater exist at the same time, which is different from the linear distribution of mineral water resources found in the bedrock structural belt; No one in history has found mineral water rich in strontium and metasilicic acid in this area. This discovery provides imagination space for local economic development.

Key words: groundwater; strontium-rich mineral water; water rock interaction; strontium and metasilicic acid; geological survey engineering; Changchun; Jilin

Highlights: Under the guidance of groundwater dynamics and groundwater chemistry theory, the mineral water resources rich in strontium and metasilicic acid are found in areal distribution by integrating the material basis and formation conditions of mineral water.

About the first author: SUN Qifa, male, born in 1966, doctor, professor level senior engineer, mainly engaged in hydrogeology, engineering geology and environmental geology investigation and research; E-mail: 152468435@qq.com.

Fund Support: Supported by the funding project of Northeast Geological S & T Innovatian Center of China Geological Survey(No. QCJJ2022-03); the projects of China Geological Survey (No.DD20160265, No.102228221020000009037).

1 引 言

长春莲花山生态旅游度假区坐落在长春市东部的长白山余脉大黑山中段,2007年4月由吉林省政府批准成立,拟规划建成国内一流、国际著名的休闲度假胜地和东北亚国际交流基地,绿色发展是首要任务。研究区地层中含丰富的砂岩、凝灰岩、花岗岩,存在16.3~80 m的巨厚风化带(孙岐发等,2019a)。锶是碱土金属元素,在富含锶的花岗岩及碳酸岩中,其含量相对集中(Parisita et al.,2011;金阳等,2022;孙岐发等,2022),随着钙长石、钾长石及角闪石等矿物的水解作用,部分锶以离子态溶于水中。本区发育的花岗岩、砂岩是形成偏硅酸的基础(Kenoyer and Bowser,1992a),二氧化硅(SiO_2)是一种酸性氧化物,对应水化物为偏硅酸(H_2SiO_3),区内地下水主要由大气降水补给,由于降水中的 CO_2 渗入地下(闫志为和韦复才,2003;Audigane et al.,2007),在一定温度和压力环境中与锶矿物(以 SrCO_3 为主)(李占敏,1993)、硅酸盐矿物长石

($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)(严金叙,1993)相互作用,形成含锶、偏硅酸的矿泉水(Indraratna et al.,2014;余国松,2017)。研究区处于新华夏系第二隆起带和第二沉降带的交接部位,经多次构造活动,形成了多种类型的构造体系(王宏伟等,2004;孙厚云等,2018)。这些构造体系在区域上不同程度的控制着地层的沉积、岩浆活动。同时,也控制着地形、水系走向和地下水分布,为地下水的补径排和富存创造了条件(Plummer et al.,1991;Xu and Pruess,2001;Xu et al.,2001,2004;Matthew and Sharp,2001;Borgia et al.,2011)。研究本地区锶和偏硅酸富存的物质条件、形成机理(刘庆宣等,2004),发现其规律性,可以为其他地区矿泉水资源的寻找、开发提供依据。

2 研究区概况

据区域地质资料,研究区内的地层有二叠系,侏罗系、白垩系,新近系以及第四系更新统、全新统松散堆积物。侵入岩在区内广泛分布,主要分布在低山丘陵区,尖顶或者圆顶状低山丘陵,属于燕山

期侵入岩。岩性主要以二长花岗岩、碱长花岗岩、碱长正长岩和石英闪长岩为主,含石英、长石、角闪石和云母等。块状构造,表层风化裂隙发育,风化壳深度可达30~40 m。

根据含水层或含水层岩群的岩性和结构,研究区地下水可分为富水区、相对富水区和一般富水区3种类型。块状岩石裂隙水主要由花岗闪长岩、二长岩、碱长正长岩和碱长花岗岩组成,含水层组多为中粗粒结构,风化层厚度大,钻孔揭露厚度16.3~80 m,风化裂隙发育,多呈线状、脉状,局部呈网状,水位1.91~5.63 m,富水强度不同,单井涌水量50~840 m³/d,水质很好。发育的砂岩、花岗岩、闪长岩等岩石是地下水中富含锶和偏硅酸的基础。

3 样品采集与测试分析

3.1 样品采集

样品采集时间为2017年6月和2018年6月,综合考虑研究区水文地质条件,采用均匀布点的方式,水样均取自饮用水井和农用井,井深在120 m以内。共采集地下水样品102组,其中2017年采集52组,2018年采集50组(图1)。微量的锶元素,用聚

乙烯塑料瓶取水样1 L,立即加入1:1硝酸5 mL,以石蜡密封瓶口,其他元素应用聚乙烯塑料瓶采取水样2 L,以石蜡密封瓶口,5天内送实验室。

3.2 测试方法

本研究通过现场调查、水样采集、实验测试的方法,从地下水化学类型、岩性等形成条件,到地下水中的锶和偏硅酸的含量及其分布区域进行研究。利用三线图法和舒卡列夫分类法对地下水化学类型进行了研究,利用全谱直读等离子体光谱法(ICP-OES)测定Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺,离子色谱法(IC)测定Cl⁻、SO₄²⁻,紫外分光光度法(UV)测定H₂SiO₃,重量法(GR)测定溶解性总固体(Total Dissolved Solid,简写TDS),等离子体质谱法(ICP-MS)测定Sr,容量法(VOL)测定HCO₃⁻(表1)。

为了确保分析方法的准确性和可靠性,采用加标回收的方法测定,每份样品分析12次,计算分析平均值和加标回收率。加标回收率(12次平均值)控制在90%~110%,并计算单个标样(或加标回收样)12份分析的相对标准偏差(RSD%),要求RSD%≤15%。

每批样品插入4件标准控制样品,GBW08606

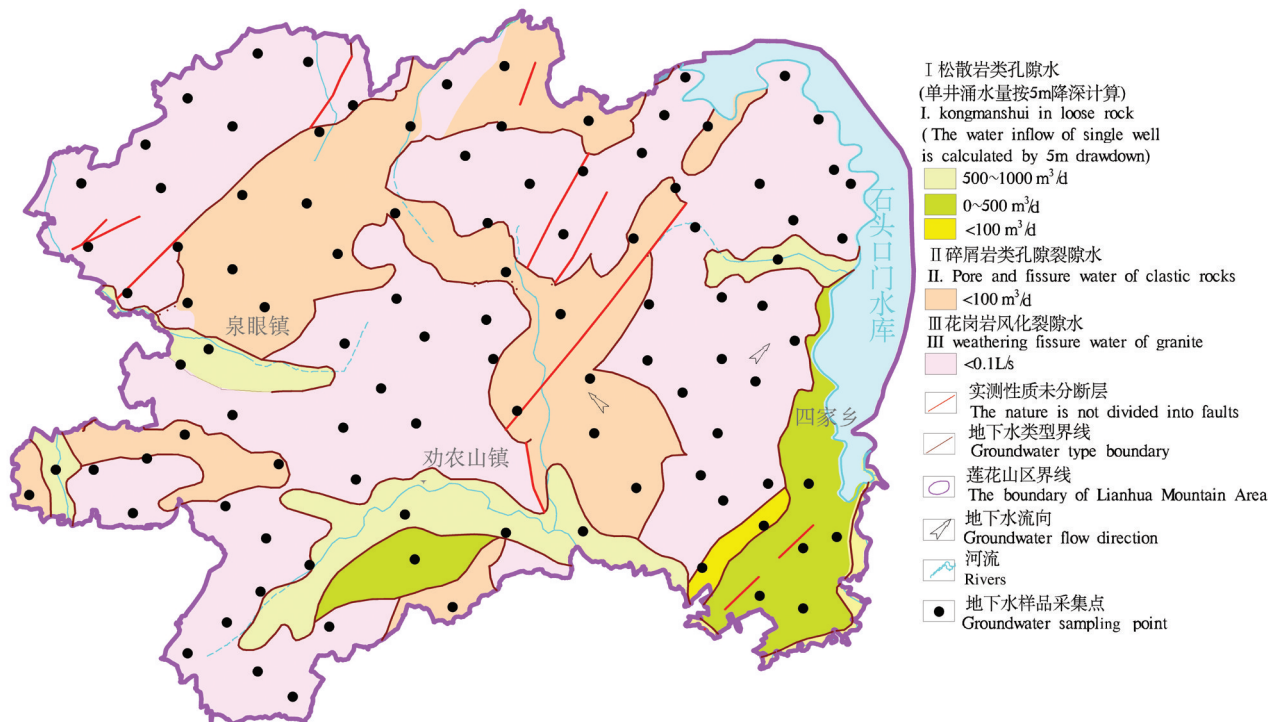


图1 长春莲花山地区水文地质及地下水样品采集点位简图

Fig.1 Sketch map of hydrogeological and groundwater sampling points in Lianhua Mountain area, Changchun

表1 检测方法
Table 1 Test methods

分析方法	检测项目	数量
全谱直读等离子体光谱法(ICP-OES)	Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺	4
离子色谱法(IC)	Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻	2
紫外分光光度法(UV)	H ₂ SiO ₃	1
重量法(GR)	Total Dissolved Solid(TDS)	1
等离子体质谱法(ICP-MS)	Sr	1
容量法(VOL)	HCO ₃ ⁻	1

等标准样品(分别控制不同的项目),同时采用加标回收样5件与样品同时分析控制准确度。严格按照规范的要求根据加标量的不同控制加标回收率。分别控制在80%~120%、90%~110%、95%~105%。

对HCO₃⁻、溶解性总固体等项目采用标样监控和阴阳离子平衡监控。取阴阳离子平衡相对误差E的绝对值小于5%为可靠数据,经检验,所有数据均为可靠数据。

4 结 果

4.1 地下水各研究指标化验结果

根据中华人民共和国国家标准《生活饮用水标准检验方法》(GB 5750-2006)、《饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538-2016);中华人民共和国地质矿产行业标准《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130-2006)、《地下水水质检验方法》(DZ/T 0064-1993);中国地质调查局地质调查技术标准《地下水污染调查评价样品分析质量控制技术要求》(DD 2014-15),通过测试得出长春莲花山地区地下水各主要指标的分析结果(表2)。

从表2中看出,长春莲花山地区地下水TDS为129.16~1169.62 mg/L,平均396.71 mg/L;Na⁺含量8.46~65.68 mg/L,平均27.61 mg/L;Ca²⁺含量25.21~202.41 mg/L,平均69.83 mg/L;Mg²⁺含量4.28~58.69 mg/L,平均17.21 mg/L;HCO₃⁻含量57.20~294.58 mg/L,平均141.43 mg/L;SO₄²⁻含量0.32~255.84 mg/L,平均38.48 mg/L;Cl⁻含量4.34~202.50 mg/L,平均56.78 mg/L;H₂SiO₃含量7.01~58.73 mg/L,平均34.85 mg/L;Sr含量0.08~0.89 mg/L,平均0.36 mg/L,研究区H₂SiO₃和Sr含量丰富。

4.2 地下水化学类型研究

根据表2结果,绘制长春莲花山地区地下水Piper

三线图(图2)并利用舒卡列夫分类法对地下水化学类型进行分类(Kenoyer and Bowser, 1992b; Hidalgo et al., 2001; 郭晓东和赵海卿, 2014),结果见表3。

从表3的舒卡列夫分类(Wicks et al., 1994; 赵力, 2005)可以看出,22-A型水,即Cl·HCO₃-Ca型水最多,有25个样品点,占总样品的24.51%;1-A型水,即为HCO₃-Ca型水,17个水样点,占总样品的16.67%,具有浅层溶滤水的特点;23-A型水,即为Cl·HCO₃-Ca·Mg型水,15个样品点,占总样品的14.71%;2-A型水,即为HCO₃-Ca·Mg型水,12个样品点,占总样品的11.76%;4-A型水,即为HCO₃-Ca·Na型水,6个样品点,占总样品的5.88%;15-A型水,即为HCO₃·Cl·SO₄-Ca型水,5个样品点,占总样品的4.90%。个别地区地下水化学类型存在11-A、12-A、16-A、18-A、25-A、36-A、37-A、43-A、44-A、5-A、8-A、9-A等类型水,相对占比比较少,都低于5%。由此可见,这一地区地下水离子以HCO₃⁻和Ca²⁺为主。

结果显示,研究区地下水中阳离子以Ca²⁺为主,Mg²⁺次之;阴离子以HCO₃⁻为主,Cl⁻和SO₄²⁻次之,HCO₃⁻水为H₂SiO₃和Sr的水解和浸出创造了条件。

4.3 地下水中锶和偏硅酸分布特征

根据《食品安全国家标准饮用天然矿泉水》(GB 8537-2018)地下水H₂SiO₃和Sr的界线指标为H₂SiO₃含量大于等于30 mg/L,Sr含量大于等于0.4 mg/L。从表2可以看出,102组样品中,67组样品的H₂SiO₃含量达到30 mg/L以上,占样品数量的65.79%,最大值达到58.73 mg/L;有40组样品的Sr含量达到0.4 mg/L以上,占样品数量的39.2%,最大值达到0.89 mg/L(孙岐发等, 2017)。根据表2对Sr和H₂SiO₃两项指标作图3。

长春莲花山生态旅游度假区面积364 km²(包括石头口门水库面积),地下水富Sr面积196 km²,占整个区域的53.96%,主要发育在火成岩风化带及构造破碎带;地下水富含H₂SiO₃面积319 km²,占整个区域的87.53%。富含锶的区域同富含偏硅酸的区域存在重叠,形成即富含H₂SiO₃又富含Sr的复合型矿泉水,富Sr及富含H₂SiO₃的地下水呈面状分布(孙岐发等, 2019b)。

结合研究区水文地质条件(图1)及H₂SiO₃型水及富Sr水的形成范围(图3)可知,H₂SiO₃水主要形

表2 长春莲花山地区地下水化学分析结果(mg/L)

Table 2 Chemical analysis results(mg/L) of groundwater in Lianhuashan area, Changchun									
样品号	TDS	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	H ₂ SiO ₃	Sr
s01	198.85	15.63	44.11	12.8	88.78	16.34	18.27	28.88	0.21
s02	360.67	31.86	72.25	17.15	76.95	65.11	54.21	38.89	0.85
s03	191.65	13.82	49.87	13.75	103.29	23.05	28.48	31.85	0.4
s04	423.73	29.45	101.22	25.44	165.73	80.23	43.73	22.65	0.41
s05	184.43	10.32	40.87	11.9	65.11	20.62	26.73	13.56	0.3
s06	198.71	12.97	45.95	10.13	65.11	5.28	27.84	19.77	0.23
s07	302.14	21.41	70.96	23.36	151.64	24.8	99.18	31.55	0.27
s08	139.04	10.21	49.44	11.67	145.01	9.61	30.54	34.58	0.26
s09	197.45	14.33	59.47	9.62	118.38	4.61	31.32	37.04	0.31
s10	508.42	24.83	98.23	26.39	73.99	23.13	119.68	39.82	0.54
s11	105.71	17.43	43.09	10.2	195.21	14.08	11.34	38.05	0.27
s12	205.13	15.72	51.83	12.85	96.3	26.14	33.57	39.99	0.74
s13	123.92	17.65	31.19	5.81	115.21	13.56	23.51	25.92	0.4
s14	82.49	14.54	40.74	6.03	153.66	7.79	10.2	29.23	0.48
s15	207.49	21.36	51.82	12.6	105.06	29.05	38.54	28.09	0.89
s16	185.55	28.36	86.45	20.16	346.26	19.97	20.16	27.67	0.37
s17	209.3	9.33	44.28	11.69	63.21	3.34	33.42	26.68	0.41
s18	365.29	18.36	65.19	16.27	37.7	8.95	62.99	30.38	0.8
s19	138.01	16.37	59.32	12.62	201.24	26.25	22.3	26.95	0.32
s20	221.82	20.04	74.57	14.33	210.12	29.12	70.28	30.63	0.27
s21	107.93	13.87	48.78	9.27	192.66	8.7	16.07	29.1	0.3
s22	327.17	41.19	77.77	17.92	171.65	67.84	55.23	26.8	0.24
s23	238.76	18.46	60.93	15.11	121.34	27.87	36.44	31.93	0.39
s24	103.44	15.67	20.02	4.52	47.35	23.22	23.25	22.98	0.59
s25	500.28	25.5	132.29	18.99	124.3	38.42	117.1	37.76	0.51
s26	474.22	31.62	96.28	23.67	68.07	32.17	108.59	34.64	0.72
s27	107.29	13.3	34.68	5.79	91.74	37.36	14	31.23	0.4
s28	121.04	13.63	35.91	5.95	79.02	45.44	17.5	33.99	0.57
s29	390.49	37.81	83.22	19.11	88.07	89.02	92.17	35.7	0.47
s30	275.88	32.64	72.66	13.81	136.14	87.76	58.49	16.32	0.5
s31	85.47	17.93	52.16	14.82	118.38	26.28	28.8	31.17	0.43
s32	91.14	12.35	61.78	16.41	165.73	8.96	39.39	27.17	0.22
s33	133.52	28.06	83.11	21.59	94.7	9.15	106.99	23.26	0.31
s34	54.3	10.37	34.26	8.65	130.22	8.19	10.1	51.89	0.52
s35	67.14	11.43	35.54	10.32	118.38	32.96	27.07	58.73	0.37
s36	40.82	11.54	21.81	6.4	82.87	3.76	3.6	22.64	0.13
s37	60.66	13.16	37.7	9.08	53.27	6.18	20.31	42.19	0.13
s38	108.66	23.57	65.89	18.33	73.99	20.46	75.07	29.99	0.18
s39	119.68	18.68	77.09	22.18	79.91	44.55	64.57	55.36	0.27
s40	70.24	18.24	43.11	7.25	88.78	22.4	17.49	50	0.29
s41	182.6	23.92	126.88	30.51	59.19	2.39	112.08	46.13	0.33
s42	117.77	31.91	58.43	25.39	53.27	96.66	92.81	41.05	0.21
s43	58.49	9.77	37.89	10.48	109.5	16.14	5.07	30.11	0.6
s44	142.62	37.64	80.86	22.94	168.69	54.5	42.72	45.04	0.31
s45	119.68	20.12	75.43	23.6	118.38	44.7	57.95	33.53	0.46
s46	143.67	53.51	63.56	25.72	319.62	34.15	17.04	46.36	0.21
s47	79.96	18.27	43.33	17.53	189.41	25.35	15.76	36.32	0.4
s48	64.44	19.56	33.02	10.85	106.54	49.55	8.73	7.01	0.8
s49	80.94	10.79	47.38	11.62	204.2	14.94	9.9	55.76	0.73
s50	78.93	10.69	46.47	11.4	201.24	10.3	10.86	53.37	0.76
s51	288.97	15.92	62.23	16.28	228.8	18.37	14.8	33.01	0.59

续表2

样品号	TDS	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	H ₂ SiO ₃	Sr
s52	347.32	54.62	40.63	10.11	200.2	36.28	43.97	33.64	0.4
s53	484.51	43.08	85.04	26.32	251.68	87.21	83.21	42.49	0.33
s54	492.23	21.71	94.46	20.08	131.56	35.48	81.81	29.06	0.33
s55	229.06	18.42	42.39	7.84	128.7	25.99	22.58	55.21	0.51
s56	237.7	10.08	42.62	9.25	82.94	6.92	21.8	35.42	0.18
s57	487.64	25.99	83.6	17.87	131.56	3.41	79.14	22.94	0.44
s58	517.85	34.49	86.74	17.87	108.68	22.52	99.09	29.28	0.14
s59	344.61	15.15	50.06	10.78	45.76	12.49	50.47	38.72	0.28
s60	416.42	28.98	76.06	14.91	120.12	36.62	87.51	40.47	0.55
s61	143.39	13.53	25.55	4.64	85.8	9.01	11.79	18.57	0.38
s62	168.36	12.04	25.21	6.07	62.92	15.88	22.65	40.55	0.25
s63	216.79	17.53	35.74	10.97	65.78	34.74	57.74	39.56	0.82
s64	248.36	20.28	40.56	8.91	94.38	39.93	22.63	35.83	0.47
s65	289.23	17.83	52.76	11.12	94.38	39.74	28.16	35.29	0.08
s66	400.74	57.36	65.57	18.91	308.88	8.28	51.67	38.37	0.09
s67	253.34	16.03	42.44	6.28	65.78	37.02	23.39	29.36	0.25
s68	292.72	31.05	40.09	9.32	165.88	43.62	14.87	40.54	0.19
s69	402.19	83.9	42.48	19.94	180.18	35.28	97.76	24.63	0.08
s70	502.88	23	92.87	18.33	82.94	20.85	86.13	29.76	0.09
s71	293.67	27.57	49.19	24.18	308.88	0.32	18.29	54.57	0.08
s72	366.28	15.54	66.39	13.78	57.2	29.74	65.57	55.71	0.4
s73	674.43	23.58	125.5	23.68	62.92	12.27	133.67	48.81	0.15
s74	845.86	58.84	145.5	32.33	286	72.65	156.19	43.56	0.31
s75	855.53	34.75	183.73	26.34	80.08	63.57	177.98	13.57	0.09
s76	569	26.25	103.83	28.45	117.26	60.33	78.47	44.07	0.24
s77	285.74	20.47	61.41	9.01	154.44	28.54	32.53	28.91	0.28
s78	170.75	8.46	33.08	7.86	120.12	6.46	6.33	33.13	0.29
s79	222.09	21.65	33.8	10.83	91.52	50.09	19.18	25.2	0.12
s80	408.38	38.07	74.13	22.98	245.96	28.87	44.85	30.39	0.14
s81	1169.62	65.68	202.41	58.69	231.66	155.84	202.5	55.88	0.13
s82	327.49	28.05	55.11	12.92	111.54	49.08	41.56	49.04	0.12
s83	251.87	22.6	42.02	14.67	160.16	50.09	16.5	27.94	0.19
s84	175.06	8.53	30.24	7.99	117.26	6.2	6.21	36.26	0.2
s85	696.87	35.9	125.2	36.61	177.32	91.26	115.59	24.29	0.22
s86	337.7	35.53	50.6	15.71	134.42	64.54	20.15	39.68	0.14
s87	161.59	9.46	31.11	6.01	108.68	2.95	12.05	49.49	0.13
s88	369.84	25.18	80.44	16.71	260.26	25.16	53.13	51.09	0.08
s89	626.19	35.39	102.49	35.9	137.28	75.85	94.87	40.65	0.42
s90	163.7	10.78	25.08	5.62	111.54	7.81	4.34	49.83	0.28
s91	129.16	10.23	15.68	4.28	74.36	13.02	3.45	33.07	0.58
s92	351.41	15.57	68.05	17.39	131.56	20.3	45.56	39.91	0.52
s93	195.02	17.31	34.59	9	114.4	34.82	13.76	32.73	0.42
s94	314.56	28.52	38.49	12.91	74.36	53.47	20.29	35.41	0.17
s95	290.17	34.06	46.03	14.64	160.16	37.67	26.38	44.47	0.2
s96	731.13	33.84	130.6	33.55	102.96	55.56	105.8	33.07	0.57
s97	1017.64	59.34	192.76	45.66	183.04	89.36	169.37	26.84	0.72
s98	235.58	25.25	42.83	11.68	163.02	33.08	28.69	30.55	0.63
s99	233.53	17.6	32.6	8.85	60.06	18.61	18.43	27.84	0.2
s100	398.18	27.7	70.64	15.95	143	47.79	38.43	25.41	0.2
s101	599.83	25.59	140.79	27.57	294.58	107.7	124.58	23.43	0.51
s102	376.44	26.63	74.35	14.45	117.26	32.23	76.69	17.96	0.39

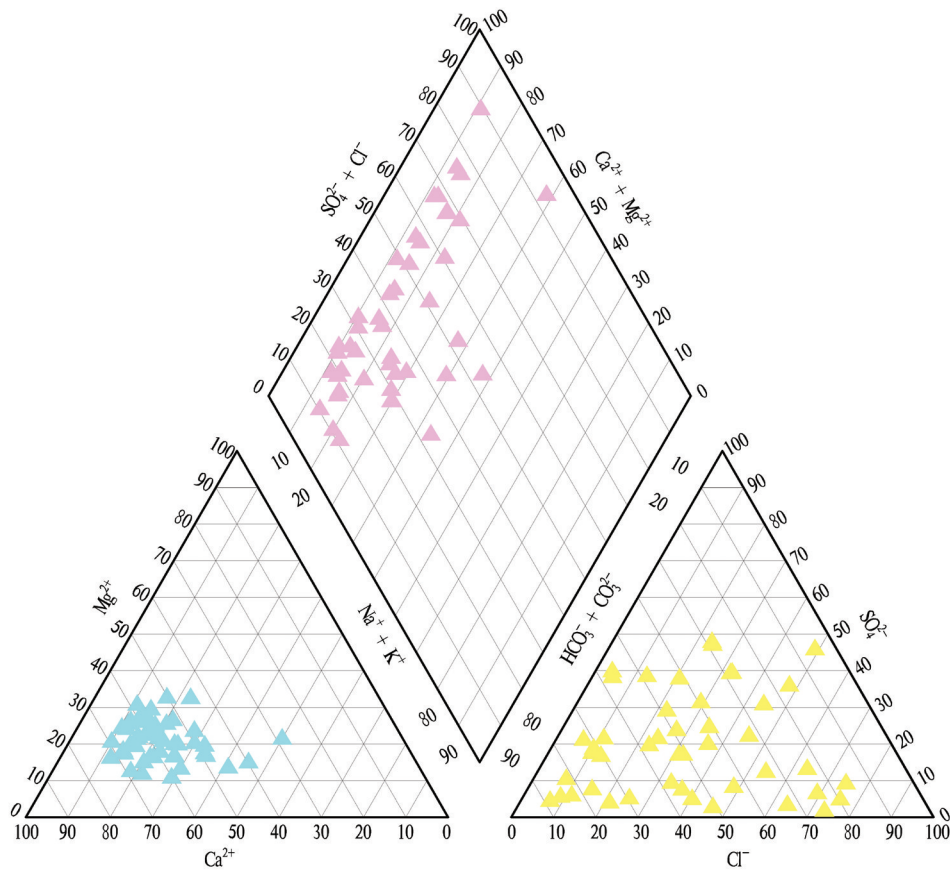


图2 地下水Piper三线图

Fig.2 Piper three-line diagram of groundwater

成在碎屑岩孔隙裂缝及花岗岩风化裂缝地层中,在这里通过水岩相互作用,最终形成富含 H_2SiO_3 的地下水;富Sr水主要分布在松散岩、碎屑岩和风化基岩中,同时在碎屑岩孔隙裂缝及花岗岩风化裂缝地层中存在,但分布范围没有 H_2SiO_3 地下水广泛。

4.4 含水岩组鉴定结果

为研究地下水中水岩相互作用的关系,在区域地下水含水层中取具有代表性岩石样品做鉴定,结果见表4。

5 讨论

5.1 地下水中Sr和偏硅酸形成的物源条件

研究发现矿泉水富集区同地下广泛分布的侵入岩相关,Sr是碱土金属元素,在闪长岩、花岗岩及碳酸岩中,其含量相对集中。研究区主要岩性为似斑状细粒闪长岩、二长花岗岩、碱长正长岩、碱长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等为地下水中富含Sr提供了物质基础。二氧化硅矿物在地球上主要

存于花岗岩、砂岩和黑硅岩中,本区花岗岩、砂岩发育,二氧化硅(SiO_2)是一种酸性氧化物,对应水化物为硅酸(H_2SiO_3)。含Sr、Si矿物的存在是形成Sr型、偏硅酸型矿泉水的物质基础。

5.2 地下水中Sr和偏硅酸形成的水动力条件

地下水的补给、径流、排泄,严格受气象水文、地质构造及人为因素的控制。区内大气降水渗入补给较为普遍,是区内各类地下水的主要补给来源。区内地势东南高、西北低,东南为高差较大,切割强烈的低山丘陵,西北部为松花江支流为主的河谷平原。这种地形特征使地下水由山地丘陵经台地向河谷平原径流运移,又以径流的形式排泄于区外。在运移的过程中不断接受大气降水的渗入补给和蒸发排泄。

丘陵低山区,地下水埋深后缘较大,前缘地下水埋深较小,总体地下水径流条件较好,地下水动态为降水渗入径流型,水位年变幅多为1~3 m;在台地区,地下水埋深较大,地下水径流条件较好,地下

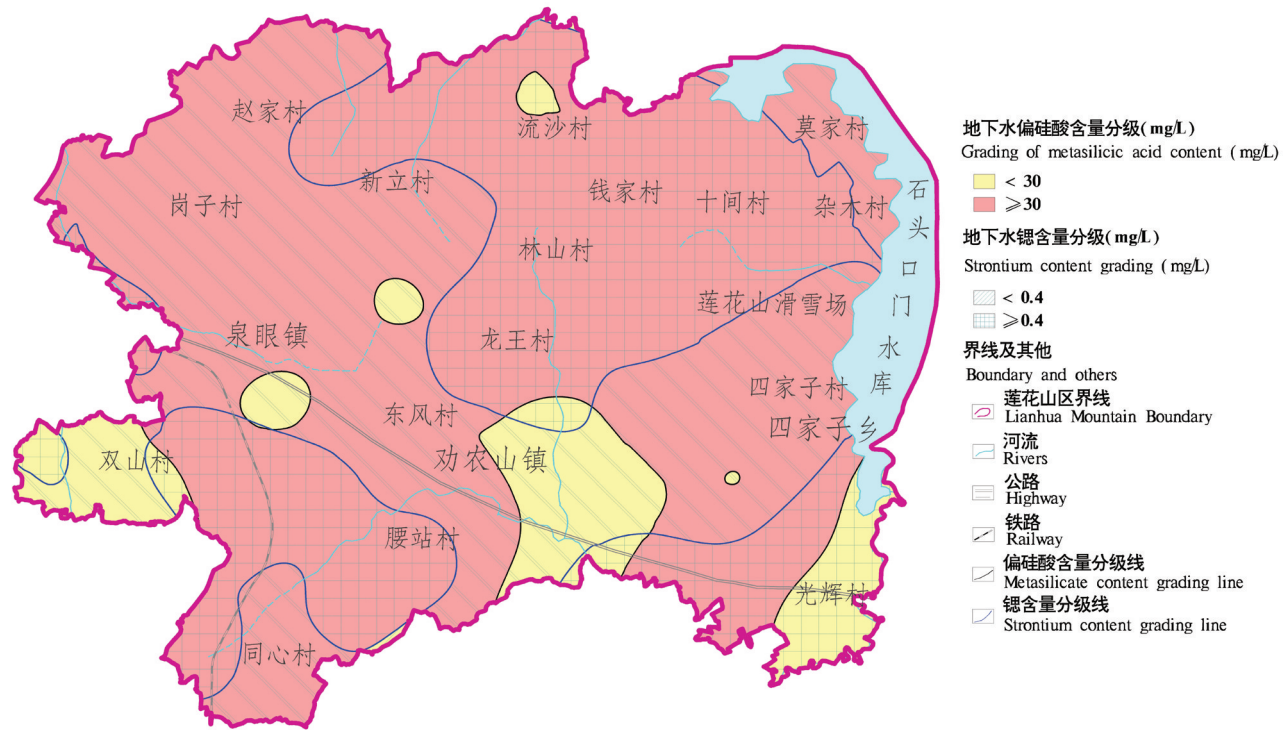


图3 莲花山地区富锶和富含偏硅酸区域分布图
Fig.3 Distribution map of strontium-rich and metasilicic acid-rich regions in Lianhuashan area

水动态为降水渗入径流型,水位年变幅多为1~3 m;在河谷平原近河床处地下水动态降水渗入水文型主要受河水水位影响,由于河流上游大多有水利工程,人为地控制了河流的径流量,导致河水水位变幅较小,使沿河地下水位变化较小;河谷平原后缘多为降水渗入径流型。这一切为地下水中Sr和偏硅酸的富集提供了水动力条件。

5.3 地下水中Sr和偏硅酸形成的水化学条件

在花岗岩中Sr主要以分散形式以类质同象存在于钙长石矿物中,Sr在岩浆分异作用中,含量以超基性-基性-中性-酸性岩呈增加趋势,长石中Sr的含量能够大于铁硅酸盐的10倍,随着钙长石、钾长石以及角闪石等矿物的水解作用,部分Sr以离子态溶于水中。

地下水与周围含Sr、硅矿物(岩石)长期接触是矿泉水形成的基础条件(杨艳林等,2019;李状等,

2022),在其他条件不变的情况下,地下水与含Sr、硅矿物(岩石)接触时间越长,则水中Sr、偏硅酸含量就越高(阎如璠等,1996)。研究区岩石(主要由花岗闪长岩、二长岩、碱长正长岩和碱长花岗岩组成)风化厚度大(钻孔揭露厚度16.3~80 m),风化裂隙发育,多呈线状、脉状,局部呈网状,水位1.91~5.63 m,富水强度不同,单井涌水量50~840 m³/d,水质很好。发育的砂岩、花岗岩、闪长岩等岩石为地下水中富含Sr和偏硅酸的基础;区内发育的构造破碎带及厚层风化岩,赋存了丰富的地下水,为地下水物质交换提供了空间。

研究区内,大气降水通过孔隙、裂隙渗透补给地下水后,在沿孔隙、裂隙向深部运移循环的过程中,由于大气降水中CO₂随降水渗入地下(Dobson et al.,2004;苏春田等,2017),在一定的温度和压力环境中,得以长期与周围岩石进行水解和溶滤作

表3 舒卡列夫地下水类型分类统计
Table 3 Shukalev groundwater classification summary table

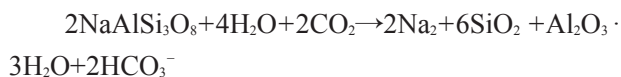
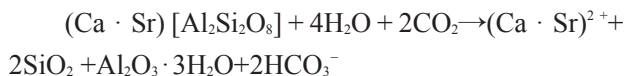
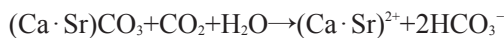
类型	1-A	11-A	12-A	15-A	16-A	18-A	2-A	22-A	23-A	25-A	36-A	37-A	4-A	43-A	44-A	5-A	8-A	9-A
数量	17	1	1	5	1	1	12	25	15	1	1	1	6	4	2	2	4	3
比例/%	16.67	0.98	0.98	4.9	0.98	0.98	11.76	24.51	14.71	0.98	0.98	0.98	5.88	3.92	1.96	1.96	3.92	2.94

表4 莲花山地区含水层代表性岩石鉴定结果

Table 4 Identification results of representative rocks of aquifer in Lianhuashan area

序号	岩石名称	镜下鉴定
1	花岗质碎裂岩	由黑云母4%、斜长石30%、碱性长石35%及石英32%组成。 该岩石原岩为花岗岩,现强碎裂,分成碎斑及碎基两部分,碎斑约占70%,成分为斜长石、黑云母、碱性长石及石英。特征如下: 黑云母:不规则片状,黄绿色,见绿泥石沿解理缝交代。 斜长石:半自形板柱状、粒状,部分棱角状,聚片双晶纹较清晰,表面弱泥化,部分发育裂纹,粒径:0.4~2.7 mm。 碱性长石:次棱角状、次圆状,成分为条纹长石,粒径:0.6~2.7 mm。 石英:次棱角状、次圆状,局部可见粒状集合体,裂纹发育,裂而不离,粒径:0.3~3.5 mm。 碎基成分:为碎粒或碎粉状长石、石英,粒径在0.2 mm以下。
2	强碳酸盐化玄武岩	斑晶成分:橄榄石:柱状、楔形柱状、锥面粒状,裂纹发育,表面强碳酸盐化呈假象,粒径:0.3~0.9 mm,占6%~8%。 斜长石:不规则柱状,双晶不发育,粒径:0.8 mm,约占2%。 基质:斜长石微晶杂乱分布,其间充填隐晶质及金属晶粒。 斜长石:半自形长柱状,聚片双晶带较宽,部分弱环带,表面强碳酸盐化,粒径均在0.1 mm以下。 蚀变特征:岩石发生强碳酸盐化,隐晶碳酸盐广泛交代,见较粗方解石脉。
3	碳酸盐化玄武岩	斑晶成分:橄榄石:三角形粒状、楔形柱状、锥面粒状,裂纹发育,全部暗化呈假象,粒径:0.4~0.6 mm,占7%~8%。 基质:斜长石微晶杂乱分布,其间充填隐晶质及金属晶粒。 斜长石:半自形长柱状,聚片双晶带较宽,部分弱环带,粒径:0.05~0.12 mm。 岩石中见石英捕虏晶,裂纹发育,边缘被熔蚀呈港湾状。 蚀变特征:岩石发生强碳酸盐化,方解石集合体呈脉状、树枝状充填交代。
4	硅化碳酸盐化玄武岩	斑晶成分:橄榄石:三角形粒状、楔形柱状、双锥粒状,裂纹发育,全部暗化呈假象,粒径:0.4~1.0 mm,占6%~7%。 斜长石:自形柱状,双晶不发育,粒径:0.4~0.6 mm,占1%~2%。 基质:斜长石微晶杂乱分布,其间充填隐晶质及金属晶粒。 斜长石:半自形长柱状,聚片双晶带较宽,部分弱环带,粒径:0.05~0.12mm。 蚀变特征:岩石发生碳酸盐化及硅化作用,方解石及隐晶硅质集合体呈脉状或团块状充填交代。
5	流纹质岩屑晶屑凝灰岩	岩屑:次棱角状,成分为微晶片岩、石英岩、长英质成分、变酸性熔岩及安山岩,直径:0.13~1.4 mm,约占5%。 晶屑:呈棱角状、次棱角状,成分以石英为主,少量斜长石及条纹长石,粒径:0.2~0.7 mm,约占21%。 填隙物:隐晶褐铁质成分为主,少量细小棱角状长石、石英。

用,而使得闪长岩、花岗岩及碳酸岩中的Sr矿物、硅酸盐矿物长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)等发生水解(研究区地下水的化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型),Sr、钙、二氧化硅等一系列组分溶于水中,从而使得地下水形成重碳酸钙型($\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型)含Sr及偏硅酸矿泉水。其主要过程如下:



莲花山地区地处长白山余脉、大黑山中段,发育有丰富的火成岩,受历史上多期构造运动,岩浆活动、气候、温度的影响,在长期的水岩相互作用下,形成巨厚层火成岩风化层,为区域内地下水中Sr及偏硅酸

的富集提供了物质基础,多种因素影响下的水动力作用、水文地球化学作用为地下水中Sr及偏硅酸的富集创造了条件,岩石的风化空隙为矿泉水成藏提供了空间。莲花山地区同以往其他地区在构造破碎带中发现的脉状、带状矿泉水不同,区内87.53%的区域地下水中偏硅酸含量达到矿泉水标准,53.96%的区域Sr的含量达到矿泉水标准,富含Sr的区域同富含偏硅酸的区域存在重叠区域,形成即富含Sr又富含偏硅酸的复合型矿泉水。这一切为矿泉水的形成提供了物质基础、创造了形成条件和成藏机制,最终使这一区域富Sr及富含偏硅酸的矿泉水呈面状分布,这也是莲花地区矿泉水的独特之处。

6 结论

(1)长春莲花山生态旅游度假区发育的松散岩、碎屑岩、火成岩是该地区地下水中Sr及偏硅酸

富集的物质基础。

(2) 大气降水与地表水入渗补给等为地下水长期与周围岩石(矿物)发生水解和溶滤作用、为地下水最终富 Sr 及偏硅酸创造了条件。

(3) 区域地层中存在 16.3~80 m 巨厚的基岩风化带,使富 Sr 及富含偏硅酸的地下水呈面状分布,部分区域两种地下水同时存在,这一点不同与以往在基岩构造带上发现的线状分布的矿泉水源。

(4) 前人在此区域上没有发现富含 Sr 及偏硅酸的矿泉水,这一发现为地方经济发展提供了新的空间。

致谢:感谢长春市各级政府在调查研究中的大力支持。感谢编辑和匿名审稿专家提出的建设性意见和建议。感谢国土资源部东北矿产资源监督检测中心郝原芳等的化验成果。

References

- Audigane P, Gaus I, Czernichowski-Lauriol I, Karsten P, Tianfu X. 2007. Two-dimensional reactive transport modeling of CO₂ injection in a saline aquifer at the Sleipner site, North Sea[J]. *American Journal of Science*, 307(7): 974-1008.
- Borgia A, Cattaneo L, Marconi D, Delcroix C, Rossi E, Clemente G, Amoroso C, Lo Re F, Tozzato E. 2011. Using a MODFLOW grid, generated with GMS, to solve a transport problem with TOUGH2 in complex geological environments: The intertidal deposits of the Venetian Lagoon[J]. *Computers & Geosciences*, 37(6):783-790.
- Dobson P, Salah S, Spycher N, Sonnenthal, E. 2004. Simulation of water-rock interaction in the Yellowstone geothermal system using TOUGHREACT[J]. *Geothermics*, 33(4):493-502.
- Guo Xiaodong, Zhao Haiqing. 2014. Hydrochemical characteristics and correlation analysis of groundwater in Hunchun Basin[J]. *Geology in China*, 41(3): 1010-1017(in Chinese with English abstract).
- Hidalgo M C, Cruz-Sanjulián J. 2001. Groundwater composition, hydrochemical evolution and mass transfer in a regional detrital aquifer (Baza basin, southern Spain) [J]. *Applied Geochemistry*, 16(7): 745-758.
- Indraratna B, Pathirage P U, Rowe R K, Banasiak L. 2014. Coupled hydro-geochemical modelling of a permeable reactive barrier for treating acidic groundwater[J]. *Computers and Geotechnics*, 55: 429-439.
- Jin Yang, Jiang Yuehua, Dong Xianzhe, Yang Guoqiang, Liu Hongying, Lei Changzheng, Zhou Quanping, Zhang Hong, Mei Shijia, Yang Hui, Lü Jinsong, Li Yun. 2022. Chemical characteristics and eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain, Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1527-1542(in Chinese with English abstract).
- Kenoyer G J, Bowser C J. 1992a. Groundwater chemical evolution in a sandy silicate aquifer in northern Wisconsin: 1. Patterns and rates of change[J]. *Water Resources Research*, 28(2): 579-589.
- Kenoyer G J, Bowser C J. 1992b. Groundwater chemical evolution in a sandy silicate aquifer in northern Wisconsin: 2. Reaction modeling[J]. *Water Resources Research*, 28(2): 591-600.
- Li Zhanmin. 1993. Formation of metasilicic acid components in drinking mineral water in China[J]. *Survey Science and Technology*, 11(1): 41-43(in Chinese).
- Li Zhuang, Su Jingwen, Dong Changchun, Ye Yonghong, Yang Yang. 2022. Hydrochemistry characteristics and evolution mechanisms of the groundwater in Dangtu area, Ma'anshan City, Anhui Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1509-1526(in Chinese with English abstract).
- Liu Qingxuan, Wang Guiling, Zhang Fawang. 2004. Geochemical environment of strontium enrichment in mineral water[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 31(6): 19-23(in Chinese with English abstract).
- Matthew M U, Sharp Jr J M. 2001. Tracing regional flow paths to major springs in Trans-Pecos Texas using geochemical data and geochemical models[J]. *Chemical Geology*, 179(1):53-72.
- Parisia S, Paternosterb M, Perric F, Mongelli G. 2011. Source and mobility of minor and trace elements in a volcanic aquifer system: Mt. Vulture (southern Italy) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 110(3): 233-244.
- Plummer L N, Prestenrnon E C, Parkhurst D L. 1991. An Interactive Code (NETPATH) for Modeling NET Geochemical Reactions along a Flow Path[R]. U.S.G.S. Water Resources Investigations.
- Su Chuntian, Zhang Fawang, Xia Riyuan, Yao Xin, Zou Shengzhang, Luo Fei, Zhao Guangshuai, Yang Yang, Ba Junjie, Li Xiaopan. 2017. 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).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1128-1141(in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Guo Xiaodong, Tian Hui, Yu Huiming. 2019a. Comprehensive geological environment survey of Changji economic circle[R]. Shenyang: Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey(in Chinese).
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming, Ma Shimin, Li Lijun. 2017. The discovery of silicic acid and strontium enrichment areas in groundwater of Changchun area, Jilin Province[J]. *Geology in China*, 44(5): 1031-1032(in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming. 2019b. Strontium-enriched areas discovered in Lianhuashan, Changchun[J]. *Geology in China*, 46(2): 430-431(in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Yang Ke, Sun Zhuo'an, Jia Lin'gang, Tian Hui, Guo

- Xiaodong, Li Xuguang, Zhu Wei. 2022. Characteristics of groundwater quality in Changchun New Area and its evaluation on ecological health[J]. *Geology in China*, 49(3): 834–848(in Chinese with English abstract).
- Wang Hongwei, Gong Qinghong, Zhao Xiangdong. 2004. Main groundwater storage structure in plain area of Jilin Province [J]. *Jilin Geology*, 23 (4): 64–68(in Chinese with English abstract).
- Wicks C M, Herman J S. 1994. The effect of a confining unit on the geochemical evolution of ground water in the Upper Floridan aquifer system[J]. *Journal of Hydrology*, 153(1): 139–155.
- Xu T, Pruess K. 2001. Modeling multiphase non–isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 1. Methodology[J]. *American Journal of Science*, 301(1): 16–33.
- Xu T, Sonnenthal E, Spycher N, Pruess G, Brimhall John A. 2001. Modeling multiphase non– isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 2. Applications to supergene copper enrichment and hydrothermal flows[J]. *American Journal of Science*, 301(1): 34–59.
- Xu T, Sonnenthal E, Spycher N, Pruess K. 2004. TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Non– isothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geological Media[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Yan Jinxu. 1993. Analysis on the distribution and genesis of metasilicic acid type mineral water in Northern Zhejiang[J]. *China Coalfield Geology*, 5 (4): 47–57(in Chinese).
- Yan Ruhui, Sun Tingfang, He Ping. 1996. Basic characteristics and formation rules of drinking natural mineral water resources in Anhui Province[J]. *Anhui Geology*, 6(3): 63–76(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhiwei, Wei Fucui. 2003. Summary on the genesis of CO₂ in groundwater[J]. *Carsologica Sinica*, 22(2): 118–123(in Chinese with English abstract).
- Yang Yanlin, Shao Changsheng, Jing Jing, Chen Lide, Wang Shichang, Lu Tao, Zhang Ao, Wang Cen, Liu Guangning. 2019. Exploration of mineral water resources in city clusters along the middle reaches of the Yangtze and discoveries—A case study of the dataset of the hydrogeological survey in the 1: 50000 Tingsiqiao Map– sheet, Xianning City[J]. *Geology in China*, 46(S2): 74–82(in Chinese with English abstract).
- Yu Guosong. 2017. Occurrence characteristics and formation mechanism of drinking natural mineral water in Linqian mining area, Fujian Province[J]. *Low Carbon World*, 7(24): 78–79(in Chinese).
- Zhao Li. 2005. Chemical characteristics and genetic analysis of natural mineral water in Eastern Yanshan[J]. *Water Science and Engineering Technology*, (1): 24–26(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 郭晓东,赵海卿. 2014. 珲春盆地地下水水化学特征分析[J]. *中国地质*, 41(3): 1010–1017.
- 金阳,姜月华,董贤哲,杨国强,刘红樱,雷长征,周权平,张鸿,梅世嘉,杨辉,吕劲松,李云. 2022. 浙江宁波平原地下水水化学特征及其生态环境效应[J]. *中国地质*, 49(5): 1527–1542.
- 李占敏. 1993. 我国饮用矿泉水中偏硅酸组分的形成[J]. *勘察科学技术*, 11(1): 41–43.
- 李状,苏晶文,董长春,叶永红,杨洋. 2022. 安徽马鞍山市当涂地区地下水水化学特征及演化机制[J]. *中国地质*, 49(5): 1509–1526.
- 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.
- 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. 2017. 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.
- 孙厚云,毛启贵,卫晓锋,张会琼,蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. *中国地质*, 45(6): 1128–1141.
- 孙岐发,郭晓东,田辉,于慧明. 2019a. 长吉经济圈地质环境综合调查[R]. 中国地质调查局沈阳地质调查中心.
- 孙岐发,田辉,郭晓东,于慧明. 2019b. 长春莲花山发现锶富集区[J]. *中国地质*, 46(2): 430–431.
- 孙岐发,田辉,郭晓东,于慧明,马诗敏,李丽君. 2017. 吉林长春地区地下水中发现偏硅酸和锶富集区[J]. *中国地质*, 44(5): 1031–1032.
- 孙岐发,杨柯,孙苗桢,贾林刚,田辉,郭晓东,李旭光,朱巍. 2022. 长春新区地下水水质特征及其对生态健康的评价[J]. *中国地质*, 49(3): 834–848.
- 王宏伟,龚庆红,赵向东. 2004. 吉林省平原区地下水主要蓄水构造[J]. *吉林地质*, 23(4): 64–68.
- 严金叙. 1993. 浙北地区偏硅酸型矿泉水分布与成因分析[J]. *中国煤田地质*, 5(4): 47–57.
- 阎如璠,孙庭芳,贺平. 1996. 安徽省饮用天然矿泉水资源的基本特征与形成规律[J]. *安徽地质*, 6(3): 63–76.
- 闫志为,韦复才. 2003. 地下水中CO₂的成因综述[J]. *中国岩溶*, 22(2): 118–123.
- 杨艳林,邵长生,靖晶,陈立德,王世昌,路韬,张傲,王岑,刘广宁. 2019. 长江中游城市群矿泉水资源勘查与发现——以咸宁市汀泗桥幅1:50 000水文地质调查数据集为例[J]. *中国地质*, 46(S2): 74–82.
- 余国松. 2017. 福建林前矿区饮用天然矿泉水赋存特征与形成机理[J]. *低碳世界*, 7(24): 78–79.
- 赵力. 2005. 燕山东部天然矿泉水化学特征及成因分析[J]. *水科学与工程*, (1): 24–26.