

DOI: 10.12401/j.nwg.2023009

新疆博阿断裂附近地表水和地下水的水化学和同位素特征及水质评价

杨明远¹, 赵佳怡^{2,3,*}, 马超¹, 李鑫¹

(1. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二区域地质调查大队, 新疆 昌吉 831100; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 3. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 正定 050800)

摘要: 新疆地区属于西北干旱地区, 水资源紧缺, 为了研究其地下水的水文地球化学特征及水质情况, 在博阿断裂附近采集与收集温泉水、地表水和冷泉水共 15 个样品, 进行了水化学和氢氧同位素特征分析, 并进行了水质评价。结果表明, 研究区地表水的水化学类型主要为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型。温泉水的水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}/\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ 型。冷泉水的水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。研究区冷泉水中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的主要来源是白云石、方解石和石膏溶解。温泉水中的 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 主要来自于长石类矿物的溶解。地表水中的主要离子来源则比较复杂, 并且其含量受到了蒸发作用的强烈影响, 而且地表水处于氧化环境。温泉水和冷泉水主要补给来源为大气降水, 补给高程为 2874~4161 m。温泉水和地表水的水质极差, 不适合饮用。通过研究博阿断裂附近地表水和地下水的水化学和同位素特征, 可为当地水资源的合理开发利用与管理提供理论支撑。

关键词: 水化学; 氢氧同位素; 水质分析; 博阿断裂

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0186-12

Hydrochemical and Isotopic Characteristics and Water Assessment Analysis of Surface Water and Groundwater Near Bolokenu–Aqikekuduke Fault in Xinjiang

YANG Mingyuan¹, ZHAO Jiayi^{2,3,*}, MA Chao¹, LI Xin¹

(1. The Second Regional Geological Survey Group, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Changji 831100, Xinjiang, China; 2. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Zhengding 050800, Hebei, China)

Abstract: Xinjiang is an arid area in Northwest China, which is short of water resources. In order to study the hydrogeochemical characteristics and water quality of its groundwater, 15 samples including hot spring water, surface water and cold spring water were collected near the Boa fault. The hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope characteristics were analyzed, and the water quality was evaluated. The results show that the hy-

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-10-09; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局项目“新疆昌吉州头屯河一带地热资源调查评价”(XGMB202130), 中国地质科学院水文地质环境地质研究所项目“新疆昌吉州头屯河一带地热资源成因模式研究”(IHEGJS2021200)联合资助。

作者简介: 杨明远(1989-), 男, 工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: 297229762@qq.com。

* 通讯作者: 赵佳怡(1992-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事地热地质研究工作。E-mail: zhaojiayi9208@126.com。

drochemical types of surface water in the study area are mainly $\text{SO}_4\text{-Na}$, $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ type. The hydrochemical types of hot spring water are $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}/\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ type. The hydrochemical types of cold spring water are $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ and $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type. The main sources of Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- in the cold spring water in the study area are dolomite, calcite and gypsum dissolution. Na^+ , K^+ , HCO_3^- and Ca^{2+} in hot spring water mainly come from the dissolution of feldspar minerals. The main ion sources in surface water are complex, and their contents are strongly affected by evaporation, and the surface water is in an oxidizing environment. The main supply source of hot spring water and cold spring water is atmospheric precipitation, and the supply elevation varies from 2 874.5 m to 4 287 m. The water quality of hot spring water and surface water is very poor, which is not suitable for drinking. The study of hydrochemical and isotopic characteristics of surface water and groundwater near Boa fault can provide theoretical support for the rational development, utilization and management of local water resources.

Keywords: hydrochemistry; hydrogen and oxygen isotopes; water quality analysis; Bolokenu-Aqikekuduke fault

水资源紧缺一直是制约社会可持续发展的重要因素, 尤其是中国西北干旱地区地下水资源匮乏, 研究地下水的水文地球化学特征及水质可为水资源的开发利用提供支持。

水文地球化学的研究最早起始于地下水勘探开发利用的水文地质研究, 自 20 世纪 60、70 年代起, 水文地球化学在地下水监测及分析中应用越来越广泛(沈照理, 1985)。20 世纪 60 年代, 开始研究地下水在地壳中的作用(任福弘等, 1993), 召开了相应的水文地球与生物地球化学研讨会, 研究水文地球化学相关问题。1992 年《水文地球化学》将此研究分为理论与应用两部分, 从地下水形成、迁移等理论问题和饮用、地热水、矿水和模拟预测的应用两方面进行论述(叶思源等, 2002)。近期水文地球化学围绕油田水、海底矿藏、地热水、环境等方面进行特定的分析, 研究手段也不断增加(马致远等, 2017; 刘瑞平等, 2019)。

新疆地质构造复杂多样, 地壳活动频繁, 地势具有南高北低、西高东低少环山封闭盆地的特点, 地热资源丰富, 各热水区带的水热活动强度自北而南逐渐增强, 自西向东逐渐减弱(中国各省地热资源全解析, 2020)。王书峰(1985)对新疆乌鲁木齐河流域的水文地球化学进行了初步研究, 周金龙(2010)将新疆地下水划分 7 个方面对其进行整体分析研究, 为新疆等西北干旱地区地下水资源与环境问题研究提供了可借鉴的方法和理念。顾新鲁等(2015)对新疆地热资源成因类型及控热模式进行了分析, 将地热成因类型分为断裂构造型、沉积盆地型和煤层自燃型, 主要受区

域断裂构造及次级构造、大地热流背景和热源、水源流体等因素的影响和控制。殷秀兰等(2015)对乌鲁木齐河流域北部的水文地球化学特征进行了研究。蒋万军等(2016)、赵江涛等(2017)、雷米等(2020)分别对新疆吐-哈盆地、焉耆盆地平原区和昌吉州东部平原区的地下水行了水文地球化学分析, 对地下水演化及分布特征进行整体研究。

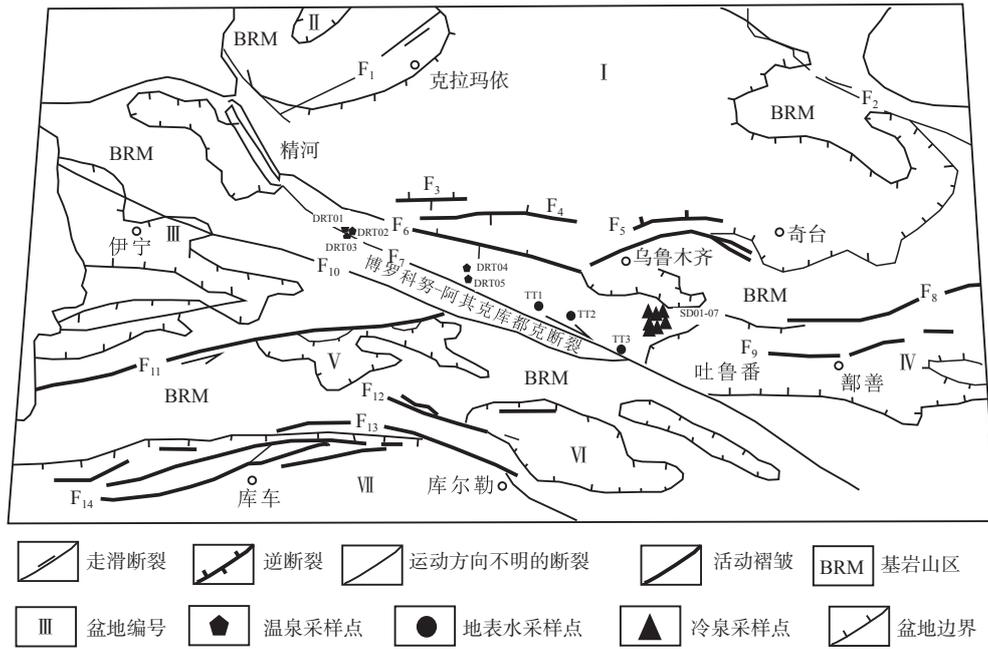
新疆地质演化历史复杂, 博罗科努-阿其克库都克断裂(简称“博阿断裂”)是超岩石圈断裂, 有长期和多期活动的特点, 是良好的导热导水通道及地下水容集通道, 形成条件和岩性等都影响着其蓄水能力和地下水流场。因此, 通过研究博阿断裂附近的地表水及地下水的水化学等特征可判断其对地下水演化、流场等影响。总体来看, 针对新疆单一地区的水文地球化学分析相对较多, 但缺乏针对整体构造的不同分布位置的水的水文地球化学研究。新疆属于西北干旱地区, 水资源匮乏, 通过研究博阿断裂带上泉水的水文地球化学特征可以更好分析断裂构造上对地下水化学演化、径流的影响, 为开发利用地下水及进行水利工程建设等提供理论研究支撑。

1 研究区概况

博阿断裂是一条巨大的 NW 向构造, 断裂起始于哈萨克斯坦境内沿阿拉胡西南侧的阿拉套山山前, 从阿拉山口由 NW 向 SE 进入中国, 在中国境内长约为 800 km(图 1; 杨晓平等, 2000)。博阿断裂属于超岩石

圈断裂(陈哲夫等, 1997), 属准噶尔-哈萨克斯坦古板块与塔里木古板块结合部位, 次级断裂及褶皱构造十分发育, 是褶皱山地断裂型地热资源有利赋存地区, 以密集的 NWW 向大型右行压扭性断裂为主体, 为天山山脉主要控热构造。从该断裂控制的地层和侵入岩体看, 它具有长期和多期活动的特点, 早古生代以

前即已形成。中新生代以来, 由于天山强烈隆起而导致断裂重新活动, 形成由南向北推挤的叠瓦状断裂带, 断面面向西南倾, 倾角为 50°~60°。沿断裂发育破碎带和动力变质带, 其中片理、挤压透镜体长轴及小型褶皱曲轴面与主断裂面成 15°夹角, 显示断裂的压扭性质(冯先岳, 1997)。



I. 准噶尔盆地; II. 塔城盆地; III. 伊宁盆地; IV. 吐鲁番盆地; V. 尤都鲁斯盆地; VI. 焉耆盆地; VII. 塔里木盆地

图 1 天山地区主要活动断裂及采样点位置(杨晓平等, 2000)

Fig. 1 Main active faults in Tianshan area and sampling point location

研究区位于北天山优地槽褶皱带, 西部位于依连哈比尔尕复背斜带, 受区域构造控制, 形成一系列 NWW、SEE 向压性及压扭性断裂, NE-SW 向和 NW-SE 向扭断裂。置属中山区地貌, 山势陡峻, 沟谷纵横交汇, 河谷深切, 呈“U”型谷。侵蚀作用强烈, 温泉出露部位地势相对西高东低, 南高北低, 总体地势是南高北低(陈锋等, 2016)。西部地区主要发育地层为中石炭统前峡亚组, 由沉积作用、火山喷发作用形成的一套以浅海-滨海相正常沉积岩、火山碎屑沉积岩、火山碎屑岩建造, 地层多呈单斜产出(陈首, 2017)。中部位于昌吉市头屯河水库-三屯河努尔加水库, 地处天山北麓准噶尔盆地南缘的头屯河-三屯河冲洪积扇的山前倾斜平原上, 地势总趋势西南高北东低, 地表被两河水系、冲沟侵蚀切割, 切割深度自南向北逐渐变小。头屯河发育有三至四级堆积阶地, 并有河漫滩发育, 切割深度为 25~35 m, 河谷宽为 400~600 m; 三屯河发育有四级

阶地, 切割深度为 30~40 m, 河岸宽为 300~600 m, 并有河漫滩发育。中部地区岩性单一, 岩性为卵石、砾石、砂砾石、砂层等, 结构松散, 透水性好。地形复杂, 总体上呈西高东低, 南高北低, 海拔高程为 1 095~1306 m, 相对高差为 275 m, 山体地形走向以 NW 向的沟谷为主。受控于地质构造运动、三屯河水系及头屯河水系的径流切割, 以低山丘陵地貌为主, 台地地貌为次, 局部地势切割剧烈。东南地区位于乌鲁木齐河流域, 属于天山北坡中段, 准噶尔盆地南缘, 北部为倾斜平原, 东望可见天山主峰博格达峰, 南依天山中段天格尔峰, NW 向准噶尔盆地倾斜, 区广泛分布多层结构的潜水、承压水和深部自流水(周金龙, 2010)。

2 取样与检测方法

在位于博阿断裂带的头屯河水库-三屯河努尔加

水库地区共采集地表水水样3组,在同位于博阿断裂带的沙湾县、呼图壁县及乌鲁木齐市采集温泉水水样6组。另外收集位于博阿断裂带的乌鲁木齐河水水样7组(表1;高朋等,2021)。

采集的泉水样品进行了水质全分析,部分温泉样品进行了氢氧同位素分析,水质全分析根据中华人民共和国国家标准饮用天然矿泉水检验方法(GB/T8538-

2008)检测,其中阳离子使用的ICP方法进行离子浓度检测,阴离子使用离子色谱进行分析,阴阳离子平衡误差控制在3%以内。氢氧同位素利用波长扫描-光腔衰荡光谱法在温度23℃,湿度50%情况下进行检测。本次样品均由国土资源部地下水矿泉水及环境检测中心(中国地质科学院水文地质环境地质研究所)检测完成。

表1 水化学同位素测试分析结果表

Tab. 1 Analysis results of water chemistry and isotope test

编号	水温 (°C)	pH	TDS (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	δD	δ ¹⁸ O
DRT1	49	9.95	387.74	103.26	2.00	0.24	14.32	54.73	23.19	5.54	5.51	-78.94	-10.49
DRT2	38.7	9.84	378.83	100.89	2.00	0.73	14.32	61.45	34.18	3.81	3.95	-83.28	-11.36
DRT3	50	9.92	553.73	163.12	1.60	0.24	15.75	158.44	25.63	5.74	5.70	-78.81	-10.65
DRT4	37.4	9.29	328.84	111.07	4.01	0.24	96.63	16.32	34.18	0.14	0.52	-74.57	-9.19
DRT5	29.5	8.82	304.75	109.08	4.01	0.49	82.32	15.36	48.83	2.26	0.39	-75.17	-9.71
TT1	22	8.24	3 633.91	1 081.49	77.25	50.76	207.74	1 982.86	363.82	31.84	<0.04	—	—
TT2	25	8.58	3 145.98	1 072.95	36.12	12.17	518.99	1 239.95	423.65	17.92	0.16	—	—
TT3	23	8.01	1 338.64	332.22	94.11	25.61	67.36	537.86	451.73	14.29	2.20	—	—
SD01	—	7.87	97.00	1.40	24.36	6.04	5.98	28.79	61.36	—	—	-60.9	-9.1
SD02	—	7.84	79.00	1.24	21.27	4.17	4.27	19.13	57.27	—	—	-59	-9.15
SD03	—	7.70	170.00	3.68	50.18	8.08	9.40	13.78	169.47	—	—	-50	-7.81
SD04	—	7.60	95.00	0.87	25.99	5.57	4.78	18.51	77.72	—	—	-56.7	-9.07
SD05	—	7.62	98.00	0.55	24.45	7.70	3.42	21.18	81.81	—	—	-57.4	-8.98
SD06	—	7.70	77.00	0.78	21.87	3.39	8.20	19.54	46.75	—	—	-58	-9.38
SD07	—	7.97	155.00	1.31	44.43	8.70	6.49	23.03	142.00	—	—	-45.8	-7.8

3 结果分析与讨论

3.1 水化学特征分析

(1) pH 和 TDS

研究区温泉水、地表水和冷泉水的水化学特征有明显的区别。从温泉水、地表水到地下水, pH 值逐渐降低, 分别为 8.82~9.92、8.01~8.58 和 7.6~7.97, 且均大于 7.5, 为碱性水。温泉水、地表水和冷泉水的 TDS 含量为 77~3 633.91 mg/L, 且从地表水、温泉水到冷泉水, TDS 含量逐渐降低。其中, 温泉水和冷泉水的 TDS 分别为 304.75~553.73 mg/L 和 77~170 mg/L, 均小于 1 g/L, 为淡水。然而, 地表水的 TDS 为 1 338.64~3 633.91 mg/L, 大于 1 g/L 或 3 g/L, 为微咸水和咸水。

(2) 水化学特征及主要离子含量

不同类型水的主要离子含量和水化学类型有明显的区别(张帆等, 2023)。地表水中的各种主要离子

含量都明显要高于温泉水和冷泉水, 而且温泉水和冷泉水中各个主要离子的相对含量大小趋势并不存在一致性(图2)。由 piper 三线图(图3)可知地表水的水化学类型主要为 SO₄-Na、Cl-SO₄-Na 和 HCO₃·SO₄-Ca-Na 型, Na⁺ 为主要的阳离子, 其含量为 332.22~1 081.49 mg/L, SO₄²⁻ 为主要的阴离子, 其含量为 537.86~

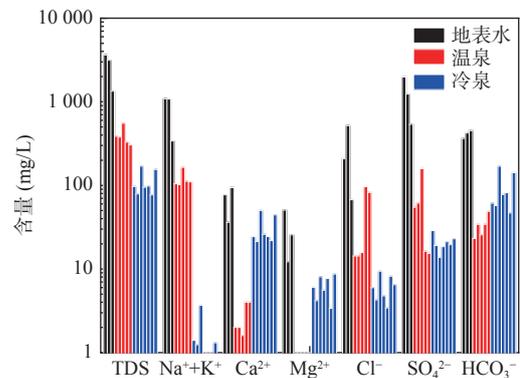


图2 研究区主要离子浓度图

Fig. 2 Major ion concentration in the study area

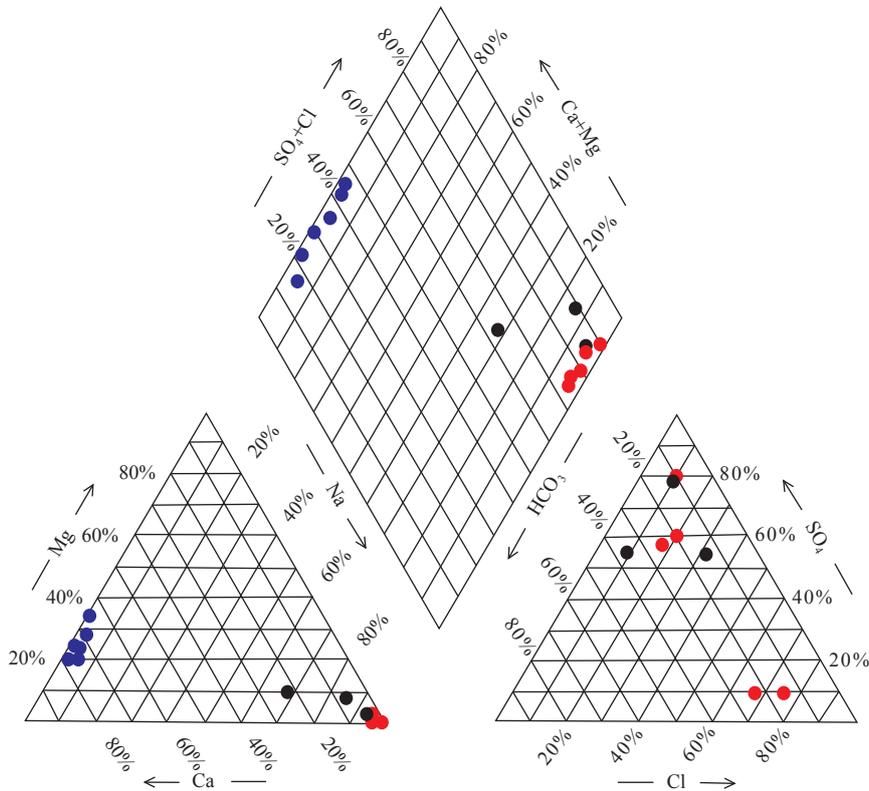


图3 研究区 piper 三线图

Fig. 3 Piper map of the study area

198.26 mg/L。温泉水的水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na/HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ 型, Na^+ 为主要的阳离子, 其含量为 100.89~163.12 mg/L, HCO_3^- 为最主要的阴离子, 其含量为 23.19~48.83 mg/L, 此外, SO_4^{2-} 和 Cl^- 为温泉水的主要阴离子, 含量分别为 15.36~158.44 mg/L 和 14.32~96.63 mg/L。冷泉水的水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ 和 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 型, SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主要的阴离子, 含量分别在 13.78~28.79 mg/L 和 46.75~169.47 mg/L, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主要的阳离子, 含量分别为 21.87~50.18 mg/L 和 3.39-8.7 mg/L。此外, 温泉水的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量要显著小于地表水和冷泉水, 含量仅分别为 1.6~4.01 mg/L 和 0.24~0.73 mg/L。同时, 冷泉水的 Na^+ 和 Cl^- 含量明显偏低, 分别为 0.55~3.68 mg/L 和 3.42~9.4 mg/L。

(3) 特征组分

笔者主要对 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 F^- 和偏硅酸进行讨论。由于并未收集到冷泉水的特征组分的数据, 因此只讨论温泉水和地表水中这些特征组分的含量特征。从图4可以看到, 温泉水中的偏硅酸含量要显著高于地表水, 其在温泉水和地表水中的含量分别为 40.86~

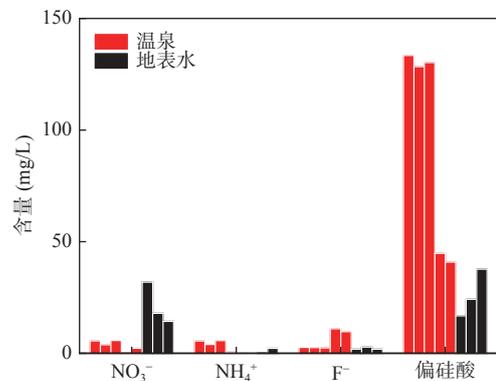


图4 研究区特征组分浓度图

Fig. 4 Characteristic component concentration of study area

133.43 mg/L 和 16.75~37.66 mg/L。温泉水的 F^- 含量也要高于地表水, 分别为 2.43~10.97 mg/L 和 1.82~2.76 mg/L, 并且 DRT4 和 DRT5 水样的 F^- 含量要显著偏高分别为 10.97 mg/L 和 9.67 mg/L。温泉水中的 NO_3^- 含量显著低于地表水, 分别为 0.14~5.74 mg/L 和 14.29~31.84 mg/L。然而, 温泉水的 NH_4^+ 含量则明显高于地表水, 分别为 0.39~5.7 mg/L 和 <0.04~2.2 mg/L。

3.2 水文地球化学过程

地表水和地下水经历的不同的水-岩相互作用、

混合作用、循环时间和路径以及所处的氧化还原环境等因素都控制着水中的离子或元素的含量(张锡根, 1988; 张保健, 2011; 张未, 2016; Wang et al., 2020)。因此, 阐明地下水和地表水在循环过程中所经历的水文地球化学过程对了解地下水和地表水的化学组分的形成机理十分重要。

(1) 蒸发作用

通过对河流、湖泊和雨水等样本分析, Gibbs(1970)提出了地表水的3种离子来源: 蒸发结晶、岩石风化和降水(韩朝辉等, 2023)。通过分析 TDS vs. $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 和 TDS vs. $\text{Cl}^-(\text{Cl}^+\text{+HCO}_3^-)$

(图5), 可以发现地表水水样点大部分位于蒸发结晶区域, 冷泉位于岩石风化区域, 温泉位于岩石风化域和蒸发区域, 说明研究区地表水受到了蒸发作用的强烈影响, 冷泉和温泉主要受到岩石风化或水岩作用的影响。因此, 地表水的主要离子含量与温泉水和冷泉水相比显著偏高。同时, 地表水水样点在 TDS vs. $\text{Cl}^-(\text{Cl}^+\text{+HCO}_3^-)$ 图中位于 Gibbs 图偏左, 而在 TDS vs. $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 图中位于 Gibbs 图右侧, 这可能是由于 Ca^{2+} 发生了沉淀导致了其含量的降低, 或者 Na^+ 与 Ca^{2+} 发生了阳离子交换反应, 导致 Na^+ 含量增加而 Ca^{2+} 含量降低。

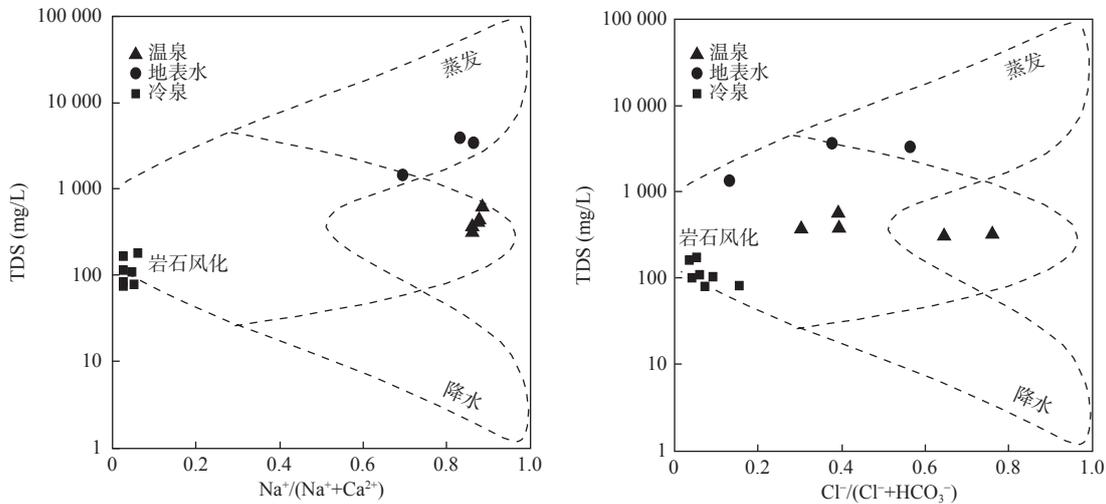


图5 研究区 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs map of the study area

(2) 矿物溶解与沉淀

一般来说, 地下水和地表水中的溶解组分的含量主要来自围岩的溶滤、大气降水以及人类活动等(Lasaga et al., 1994; Xing et al., 2013), 矿物的溶解和沉淀会导致水化学类型发生变化(Gao et al., 2022)。

运用 PHREEQC 对温泉水、地表水和冷泉水的部分矿物饱和度(SI)进行了模拟计算(图6), 发现硬石膏、萤石和石膏的 SI 值都 <0 , 且大部分都 <-1 , 说明研究区这些水中的硬石膏、萤石和石膏都处于溶解状态。然而, 方解石、白云石和文石的矿物饱和度大部分为 $-1\sim 1$, 表明研究区的这些水中的方解石、白云石和文石处于平衡和沉淀状态, 有发生沉淀的趋势。同时, 温泉水中的方解石、白云石和文石基本上都 >0 , 处于沉淀状态, 这也解释了其水样点在 $(\text{Na}+\text{K})\text{vs. HCO}_3^-$ 图中位于 $1:1$ 直线上方的原因。这些矿物对地下水水文地球化学过程起了相当重要的作用。

通过 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的比值分析, 可更好了解方解石与白云石的溶解与沉淀(Gao et al., 2020)。作研究区 $\text{Ca}^{2+}\text{vs. Mg}^{2+}$ 图(图7)显示, 水样基本落在 $1:1$ 直线的下方, 说明研究区中方解石比白云岩更占优势。

(3) 阳离子交替吸附

通过主要离子的毫克当量数据点以及矿物溶解比直线可以揭示主要离子的主要来源。

从 $\text{HCO}_3^- \text{vs. } (\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})$ 、 $(\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})\text{vs. } (\text{SO}_4^{2-}\text{+HCO}_3^-)$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{vs. Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+\text{vs. Cl}^-$ 以及 $(\text{Na}^+\text{+K}^+)\text{vs. HCO}_3^-$ 的主要离子关系图(图8)可以看出, 地表水样点分布都十分分散, 表明地表水中的这些元素来自于多种矿物的溶解。温泉水水样点在 $\text{HCO}_3^- \text{vs. } (\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})$ 、 $(\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})\text{vs. } (\text{SO}_4^{2-}\text{+HCO}_3^-)$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{vs. Ca}^{2+}$ 图中都位于 $1:1$ 直线下, 说明有其他的 HCO_3^- 来源, 而在 $\text{Na}^+\text{vs. Cl}^-$ 以及 $(\text{Na}^+\text{+K}^+)\text{vs. HCO}_3^-$ 图位于 $1:1$ 直线上, 说明 Na^+ 有其他的来源。通常在非碳酸盐岩

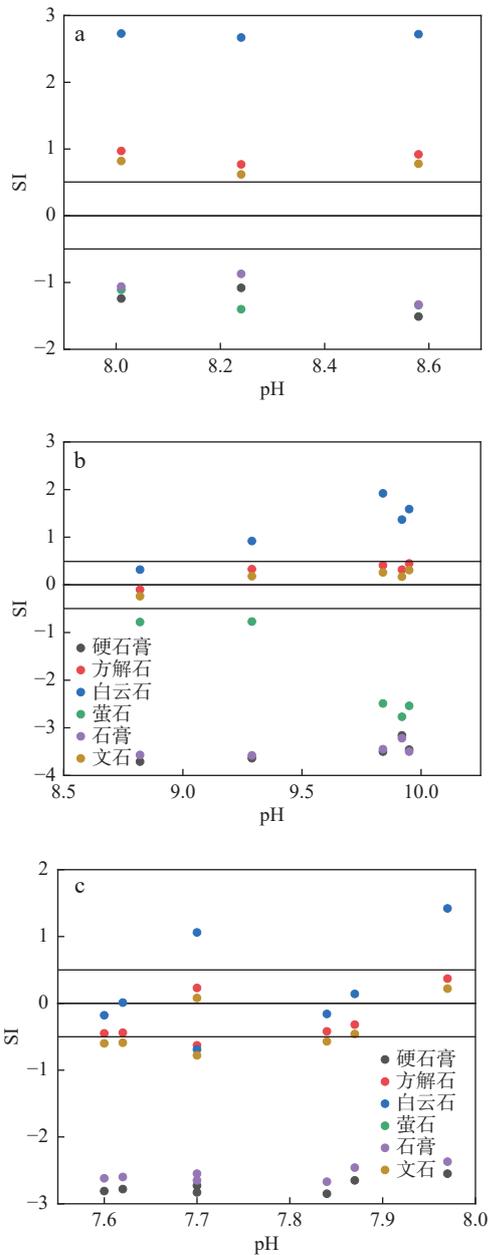


图6 温泉水(a)、地表水(b)和冷泉水(c)SI图

Fig. 6 SI map of (a) hot spring, (b) surface water and (c) cold spring

热储中的地下热水中,由于深部 CO_2 的影响,长石类矿物会发生溶解,导致地下热水中有较高含量的 Na^+ 和 HCO_3^- ,同时由于少量钙长石的溶解,因此地下热水中具有少量的 Ca^{2+} 。同时,含 Mg^{2+} 的矿物很少,因此 Mg^{2+} 的含量很低,低于地下冷水和地表水。可以用如下化学方程式表示:

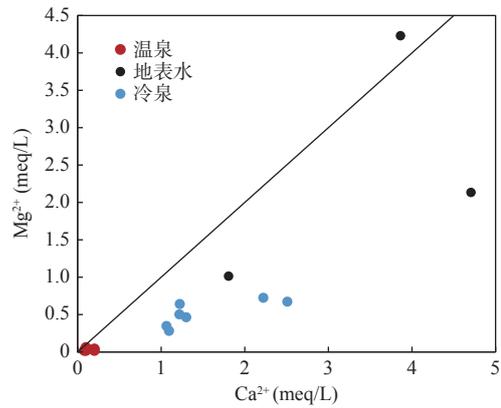
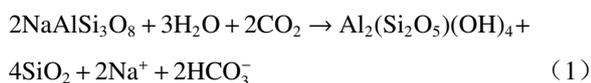
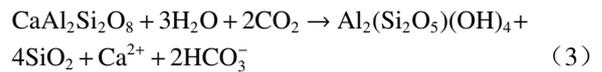
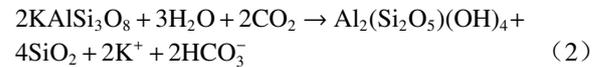
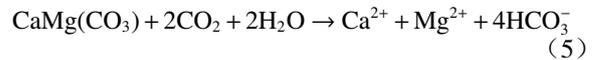
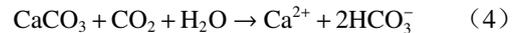


图7 研究区 Ca^{2+} vs Mg^{2+} 离子关系图

Fig. 7 Diagram of Ca^{2+} vs Mg^{2+} relationship in the study area



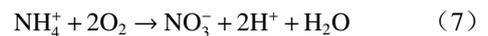
冷泉水样点在 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ vs. $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 图中刚好位于 1:1 溶解比直线,这说明冷泉水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 主要来自于白云石、方解石以及石膏的溶解,可用如下化学方程式来表示:



其数据点在 HCO_3^- vs. $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 、 HCO_3^- vs. Ca^{2+} 以及 SO_4 vs. Ca^{2+} 图中都位于 1:1 直线的上方,也说明了冷泉中这些元素的含量不止一种来源,表明离子交换作用对地下水化学成分影响较为强烈。

(4) 氧化还原环境

NO_3^- 和 NH_4^+ 可以作为氧化还原环境的指示剂。在有氧条件下,亚硝酸细菌和硝酸细菌能够将 NH_4^+ 最终氧化成为 NO_3^- ,可用如下化学方程式来表达:



通过上述特征组分含量的分析可以知道,地表水中的 NO_3^- 含量远大于温泉水,但是其 NH_4^+ 含量却小于温泉水,这说明地表水处于相对氧化的环境,促进了 NH_4^+ 在亚硝酸细菌和硝酸细菌的作用下,被氧化成为 NO_3^- 。地表水与空气直接接触,空气中的 O_2 可以溶解进入地表水中,因而使得地表水处于氧化状态。同时,这也说明了温泉水处于相对的还原状态或者较弱的氧化状态,因此其 NH_4^+ 含量要远高于地表水。温泉水的循环路径较长,在接受大气降水补给之后,往往

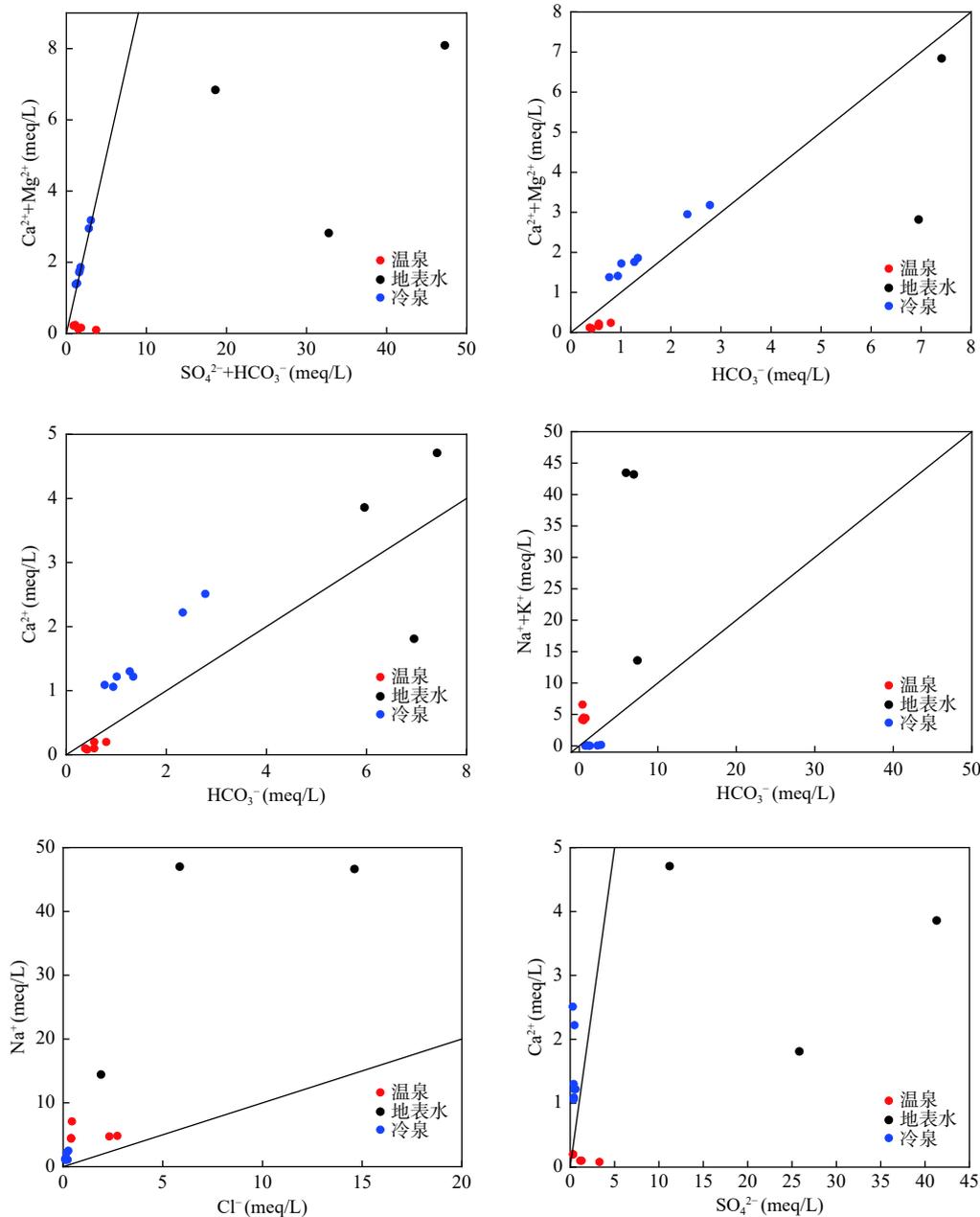


图8 主要离子关系图

Fig. 8 Major ion relationship map

经历较长时间的深循环,在循环过程中水中的大气降水中的 O_2 就会消耗导致含量降低,如果没有其他 O_2 的补给来源,就会导致温泉水处于相对还原或者弱氧化的环境,因而较少的 NH_4^+ 被亚硝酸细菌和硝酸细菌的氧化成为 NO_3^- 。

3.3 氢氧同位素特征

(1) 补给来源

研究地下水氢氧同位素特征可以判断地下水的起源(张帆等, 2023; 王新娟等, 2023), 确定地下水的补给条件、大气降水与地表水和地下水的联系程度,

了解地下水的循环途径(Song et al., 2017)。由于 D 和 ^{18}O 的蒸汽张力比较小, 因此其在液相中富集, 在气相中贫化, 从而导致不同的地下水循环氢氧同位素含量不同(张锡根, 1988)。地下水中的 δD 的变化值除了少部分的混合作用的影响外, 主要取决于补给温度及补给高程, $\delta^{18}O$ 的变化则主要根据水-岩作用的交换程度和水、岩比值(Craig, 1961)。

将水样点的氢氧稳定同位素数据和全球大气降水线以及当地大气降水线绘制在同一张图中(图9), 判断水样点与大气降水线的相对位置, 可以揭示研究

区水的补给来源。其中全球大气降水线： $\delta D=8\delta^{18}O+10$ (倪高倩等, 2016), 新疆乌鲁木齐大气降水线： $\delta D=7.215\delta^{18}O+4.5$ (李晖等, 2009)。由于缺乏研究区地表水的氢氧稳定同位素数据, 因此只判断研究区温泉水和冷泉水的补给来源。

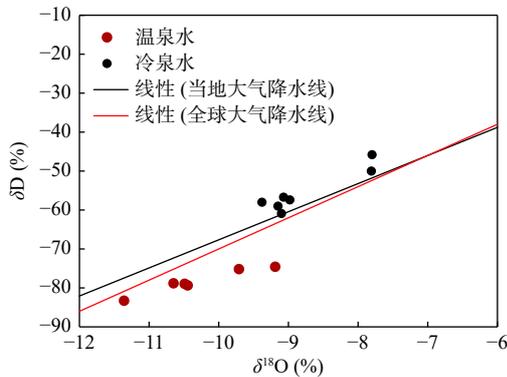


图9 研究区样品 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 9 Study area samples $\delta D-\delta^{18}O$ diagram

研究区温泉水和冷泉水水样点都落在大气降水线附近, 表明它们的主要补给来源为大气降水。然而, 温泉水和冷泉水水样点的分布位置有较大区别。温泉水分布在全球大气降水线和当地大气降水线的下方, 且出现了“ ^{18}O 漂移”的现象, 这主要是因为温泉水与围岩发生的水-岩相互作用导致温泉水和围岩发生了 $\delta^{18}O$ 的交换, 导致水中 $\delta^{18}O$ 富集(Wang et al., 2019)。冷泉水有少数水样点分布在全球大气降水线和当地大气降水线的上方, 这主要是因为发生了水汽再循环, 导致冷泉水中的 δD 富集。

温泉水相对于冷泉水表现出 $\delta^{18}O$ 和 δD 贫化以及更高的温度的特征, 这说明温泉水比冷泉水可能接受了更高的大气降水补给, 以及经历了更深的水循环, 其在含水层中滞留的时间更长, 径流相对较长, 水-岩相互作用程度更加强烈。

(2) 补给高程

通常来说, 大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 与气温呈线性关系, 高程效应指的就是海拔越高, 温度越低, δD 和 $\delta^{18}O$ 值同时也降低(孙占学等, 1992)。主要原因是由于高程的增加导致气温降低, 水汽冷凝同位素分馏, 雨滴蒸发减少, 因此伴有山体迎面风的雨量增加, 形成了山体迎面风的超前降雨区, 从而随着云团上升, 同位素含量减少, 形成高程效应(陈礼明, 2019)。通过研究这种高程效应, 可根据氢氧同位素推测地下水补给高程。根据资料可知地下水补给高程公式:

$$H = \frac{\delta_G - \delta_P}{k} + h \quad (8)$$

式中: δ_G 为样品中 δD 的值; δ_P 为大气降水中 δD 的值; k 为大气降水中 δD 的高程梯度; h 为取样点高程(m)。根据李学礼等(2000)推理得出研究区大气降水的同位素成分, 大气降水 δD 值为 -44.61 , 高程梯度为 $-0.046\text{‰}/100\text{ m}$ 。

根据计算公式得到研究区温泉水补给高程为 $3\ 064\sim 4\ 161\text{ m}$, 冷泉补给高程为 $2\ 874\sim 3\ 943\text{ m}$ (表2), 南部天山山脉海拔 $3\ 800\sim 4\ 200\text{ m}$ 以上为常年积雪和现代冰川作用带, 研究区补给高程与附近山体融雪线高程较为一致, 说明研究区泉水点的主要来源是周围山脉的大气降水与冰川融雪, 通过断裂, 径流、排泄等过程到达研究区, 经过静水压力等作用下上升至地表形成泉水。

表2 研究区补给高程表

Tab. 2 Recharge elevation in the study area

编号	δD_{V-SMOW} (‰)	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ (‰)	补给高程 (m)
DRT1	-78.94	-10.49	4 066.30
DRT2	-83.28	-11.36	4 160.65
DRT3	-78.81	-10.65	4 063.48
DRT4	-74.57	-9.19	3 971.30
DRT5	-75.17	-9.71	3 064.35
DRT6	-79.35	-10.45	3 155.19
SD01	-60.9	-9.1	3 109
SD02	-59	-9.15	3 662.5
SD03	-50	-7.81	2 874.5
SD04	-56.7	-9.07	3 667.5
SD05	-57.4	-8.98	3 570
SD06	-58	-9.38	3 943
SD07	-45.8	-7.8	3 579

3.4 水质评价

F 值评分法是中国水质评价最常用的一种方法, 适用于化学指标分级明显、无超标或多项指标均超标等各类情况(王一凡等, 2014)。利用 F 值评分法对研究区的温泉水和地表水的水质进行评价。具体步骤如下(孟春芳等, 2015):

(1) 首先对各个离子进行单项组分评价, 得到单项组分评价分值(表3)。

表3 地下水质量评分表

Tab. 3 Groundwater quality scoring table

类别	I	II	III	IV	V
F_i	0	1	3	6	10

(2)根据公式计算综合评价分值F:

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (9)$$

$$F = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (10)$$

式中: \bar{F} 为各单项指标评价分值 F_i 的平均值; F_{\max} 为单项指标评价分值 F_i 中的最大值; n 为参加评价的单项指标个数。

(3)根据综合评分值F确定水质分级(表4)。

表4 地下水质量分级表

Tab. 4 Groundwater quality classification table

级别	优秀	良好	较好	较差	极差
F	0.8	0.8~2.5	2.5~4.25	4.25~7.2	>7.2

采用pH、TDS、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、F等8种离子指标进行水质分析,结果见表5。

表5 研究区水质F分值法评价结果表

Tab. 5 Evaluation results of F-score method for water quality in the study area

	DRT1	DRT2	DRT3	DRT4	DRT5	TT1	TT2	TT3
F值	7.72	7.65	7.87	7.62	7.41	8.11	8.43	8.03

根据表5发现,研究区温泉水和地表水的水质都大于7.2,属于V类水,水质均属于极差等级,且地表水的水质要比温泉水更差。通过前面的分析可知,温泉水循环深度较深,循环路径较长,因此其水-岩相互作用时间较长,导致其水质很差。地表水则由于强烈的蒸发浓缩作用,导致其离子和元素的含量很高,因此水质很差。同时,人类活动对地表水产生的污染可能也是导致地表水F值很高、水质较差的原因。

4 结论

(1)研究区不同类型的地表水和地下水的水化学类型有很大的区别。地表水的水化学类型主要为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型。温泉水的水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}/\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ 型。冷泉水的水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。

(2)研究区地表水和地下水主要离子都主要来源于围岩的溶滤或风化,且地表水中主要离子的含量受到了强烈的蒸发作用的影响。研究区冷泉水中 Ca^{2+} 、

Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来源于白云石、方解石和石膏的溶解。温泉水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 HCO_3^- 主要来源于长石类矿物的溶解。地表水中的主要离子则较复杂,具有多种来源。温泉水和地表水中的 NO_3^- 和 NH_4^+ 的相对含量主要受到了氧化还原环境的影响,而且地表水中很高的 NO_3^- 含量又受到了蒸发作用的影响。

(3)研究区的温泉水和冷泉水的补给来源都主要为大气降水。由于水-岩相互作用,温泉水表现出了明显的“ ^{18}O 漂移”现象,而冷泉水的氢氧稳定同位素受到了水汽再循环的影响。温泉水和冷泉水的补给高程分别为3064~4161m和2874~3943m。

(4)研究区的温泉水和地表水的水质极差,都属于V类水,不适合直接饮用。

参考文献(References):

- 陈锋,刘涛,顾新鲁,等.新疆地热水分布与地质构造的关系[J].西部探矿工程,2016,2:144-148.
- CHEN Feng, LIU Tao, GU Xinlu, et al. Relationship between geothermal water distribution and geological structure in Xinjiang[J]. West-china Exploration Engineering, 2016, 2: 144-148.
- 陈礼明.福建地热水氢氧环境同位素特征浅析[J].福建地质,2019,1:61-68.
- CHEN Liming. Isotopic Characteristic Analysis of Hydrogen-oxygen Environment in Geothermal Water in Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 2019, 1: 61-68.
- 陈首.新疆沙湾县南山温泉地热资源地质特征[J].四川地质学报,2017,37(1):91-95.
- CHEN Shou. Geological Features of Geothermal Resources in the Nanshan Hot Spring in Shawan, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sichuan, 2017, 37(1): 91-95.
- 陈哲夫,成守德,梁云海,等.新疆开合构造与成矿[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1997.
- CHEN Zhefu, CHENG Shoude, LIANG Yunhai, et al. Opening-closing tectonics and mineralization in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Health Press, 1997.
- 冯先岳.新疆古地震[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1997.
- FENG Xianyue. Paleoearthquake in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Health Press, 1997.
- 高朋,施成鹏,范明东.基于地下水化学特征对博阿断裂带导水性的探讨[J].甘肃水利水电技术,2021,57(2):53-55.
- GAO Peng, SHI Chengpeng, FAN Mingdong. Discussion on the hy-

- draulic conductivity of Bolokenu-Aqikekuduke fault zone based on the chemical characteristics of groundwater[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2021, 57(2): 53–55.
- 顾新鲁, 刘涛, 陈锋, 等. 新疆地热资源成因类型及控热模式分析[J]. *新疆地质*, 2015, 33(2): 275–278.
- GU Xinlu, LIU Tao, CHEN Feng, et al. Analysis on Genetic Type and Heat Controlling Pattern of Xinjiang Geothermal Resources[J]. *Xinjiang Geology*, 2015, 33(2): 275–278.
- 韩朝辉, 王郅睿, 田辉, 等. 汉中盆地地下水水化学特征及其成因研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 263–273.
- HAN Chaohui, WANG Zhirui, TIAN Hui, et al. Hydrochemical Characteristics and Genesis of Groundwater in the Hanzhong Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 263–273.
- 蒋万军, 赵丹, 王广才, 等. 新疆吐-哈盆地地下水水文地球化学特征及形成作用[J]. *现代地质*, 2016, 30(4): 825–833.
- JIANG Wandan, ZHAO Dan, WANG Guangcai, et al. Hydro-geochemical Characteristics and Formation of Groundwater in Tu-Ha Basin, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 2016, 30(4): 825–833.
- 雷米, 周金龙, 吴彬, 等. 新疆昌吉州东部平原区地下水水文地球化学演化分析[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 105–115.
- LEI Mi, ZHOU Jinlong, WU Bin, et al. Hydrogeochemical Evolution Process of Groundwater in the Eastern Plains in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 105–115.
- 李晖, 蒋忠诚, 王月, 等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征[J]. *水土保持研究*, 2009, 5: 157–161.
- LI Hui, JIANG Zhongcheng, WANG Yue, et al. Variation Characteristics of Stable Isotopes in the Precipitation of Xinjiang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 5: 157–161.
- 李学礼, 刘金辉, 史维竣, 等. 新疆准噶尔盆地北部天然水的同位素研究及其应用[J]. *地球学报*, 2000, 21(4): 401–406.
- LI Xueli, LIU Jinhui, SHI Weijun, et al. The Isotopic Study and Application of Natural Water in Northern Junggar Basin, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, 21(4): 401–406.
- 刘瑞平, 徐友宁, 亢文婷. 基于 phreeqci 和 netpath 联合反演水文地球化学过程——以小秦岭太峪水库为例[J]. *西北地质*, 2019, 52(1): 239–243.
- LIU Ruiping, XU Youning, KANG Wening, et al. Based on Phreeqci and Netpath Joint Inversion Hydrology Geochemistry Process: Example from the Xiaoqinling Tianyu Reservoir[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(1): 239–243.
- 马致远, 党书生, 翟美静, 等. 蓝田汤峪地区地热流体同位素水文地球化学特征及其指示意义[J]. *西北地质*, 2017, 50(2): 214–223.
- MA Zhiyuan, DANG Shusheng, ZHAI Meijing, et al. Characteristics of Isotopes and Hydrogeochemistry for Geothermal Water in the Tangyu Town in Lantian County[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2): 214–223.
- 孟春芳, 孙珂. F 分值法评价新乡市地下水质量[J]. *地下水*, 2015, 37(2): 37–38.
- MENG Chunfang, SUN Ke. Evaluation of groundwater quality in Xinxiang City by F-score method[J]. *Groundwater*, 2015, 37(2): 37–38.
- 倪高倩, 张恒, 韦玉婷, 等. 四川地热流体水文地球化学及同位素特征简析[J]. *新能源进展*, 2016, 4(3): 184–194.
- NI Gaoqian, ZHANG Heng, WEI Yuting, et al. Hydrogeochemical and isotope characteristics of geothermal fluid in Sichuan[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2016, 4(3): 184–194.
- 任福弘, 沈照理. 水文地球化学. 中国大百科全书——地质学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993: 507–508.
- REN Fuhong, SHEN Zhaoli. Hydro-geochemistry, China Encyclopedia: Geology [M], Beijing: China Encyclopedia Press, 1993, 507–508.
- 沈照理. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- SHEN Zhaoli. Hydrogeology[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- 孙占学, 李学礼, 史维竣. 江西中低温地热水的同位素水文地球化学[J]. *华东地质学院学报*, 1992, 15(3): 243–248.
- SUN Zhanxue, LI Xueli, SHI Weijun. Isotopic hydrogeochemistry of mid-low temperature geothermal water in Jiangxi province[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 1992, 15(3): 243–248.
- 王书峰. 乌鲁木齐河流域水文地球化学特征的初步研究[J]. *新疆环境保护*, 1985, 1: 17–23.
- WANG Shufeng. Preliminary study on hydrogeochemical characteristics of Urumqi River Basin[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 1985, 1: 17–23.
- 王新娟, 许苗娟, 韩旭, 等. 基于同位素和水化学的北京平谷盆地地下水循环研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 127–139.
- WANG Xinjuan, XU Miaojuan, HAN Xu, et al. Study on Groundwater Cycle in Beijing Pinggu Basin Based on Isotopes and Hydrochemistry[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 127–139.
- 王一凡, 张永祥, 王昊, 等. 地下水质量综合评价方法的对比分析及应用[J]. *河北工业科技*, 2014, 31(6): 457–462.
- WANG Yifan, ZHANG Yongxiang, WANG Hao, et al. Comparative analysis and application of groundwater quality comprehensive evaluation methods[J]. *Hebei Journal of Industrial Science & Technology*, 2014, 31(6): 457–462.
- 杨晓平, 沈军. 天山内部博罗可努断裂精河—阿拉山口段晚更新世以来的活动特征[J]. *地震地质*, 2000, 22(3): 305–315.
- YANG Xiaoping, SHEN Jun. Late quaternary activity of Jinghe-Alashankou section of the Bolokenu fault, interior Tianshan[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 305–315.

- 叶思源, 孙继朝, 姜春永. 水文地球化学研究现状与进展[J]. 地球学报, 2002, 23(5): 477-482.
- YE Siyuan, SUN Jichao, JIANG Chunyong. Current Situation and Advances in Hydrogeochemical Researches[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2002, 23(5): 477-482.
- 殷秀兰, 凤蔚, 王瑞久, 等. 新疆乌鲁木齐河流域北部平原区水文地球化学[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 77-84.
- YIN Xiulan, FENG Wei, WANG Ruijiu, et al. Research on Hydrogeochemistry in Northern Plain of the Urumqi River Basin, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(1): 77-84.
- 张保健. 鲁西北地区地下热水的水文地球化学特征及形成条件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- ZHANG Baojian. Hydrogeochemical characteristics and formation conditions of the geothermal water in Northwestern Shandong province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- 张帆, 王广才, 张茂省, 等. 产出水识别及受污染地下水水化学和氢氧稳定同位素特征[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 98-108.
- ZHANG Fan, WANG Guangcai, ZHANG Maosheng, et al. Identification of Produced Water and Characteristics of Hydrochemistry and Stable Hydrogen-Oxygen Isotopes of Contaminated Groundwater[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 98-108.
- 张锡根. 同位素地球化学在地质勘探中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1988, 1: 28-31.
- ZHANG Xigen. Application of isotopic geochemistry in geothermal exploration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1988, 1: 28-31.
- 张未. 吉林省长岭县浅层地下水水文地球化学演化规律分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 59-63.
- ZHANG Wei. Analysis of evolution law of hydrology and geochemistry of shallow groundwater in Changling county of Jilin Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(5): 59-63.
- 赵江涛, 周金龙, 梁川, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析[J]. 环境化学, 2017, 36(6): 1397-1406.
- ZHAO Jiangtao, ZHOU Jinlong, LIANG Chuan, et al. Hydrogeochemical process of evolution of groundwater in plain area of Yanqi, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(6): 1397-1406.
- 中国各省地热资源全解析[J]. 地热能, 2020, 5: 30-36.
- Analysis of geothermal resources in every province of China[J]. Geothermal Energy, 2020, 5: 30-36.
- 周金龙. 新疆地下水研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- ZHOU Jinlong. Study on groundwater in Xinjiang[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press. 2010.
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- Gao Yanyan, Chen Jie, Qian Hui, et al. Hydrogeochemical characteristics and processes of groundwater in an over 2260 year irrigation district: A comparison between irrigated and nonirrigated areas[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127437.
- Gao Yanyan, Qian Hui, Ren Wenhao, et al. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121006.
- Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- Lasaga A C, Soler J M, Burch T E, et al. Chemical weathering rate laws and global geochemistry cycles[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994, 58(10): 23610-2386.
- Song Chao, Han Guilin, Wang Pan, et al. Hydrochemical and isotope characteristics of spring water discharging from Qiushe Loess Section in Lingtai, northwestern China and their implication to groundwater recharge[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(4): 364-373.
- Wang Hua, Mao Xumei, Wang Tao, et al. Hydrogeochemical characteristics of hot springs exposed from fault zones in western Guangdong and their ^{14}C age correction[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2019, 7(1): 1-14.
- Wang Mengmeng, Zhouxun, Liu Yu, et al. Major, trace and rare earth elements geochemistry of geothermal waters from the Rehai high-temperature geothermal field in Tengchong of China[J]. Applied Geochemistry, 2020, 119(2).
- Xing L N, Guo H M, Zhang Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 70-71: 250-264.