

青藏高原北部可可西里不冻泉水质特征、成因模式及开发利用建议

付昌昌^{1,2}, 李向全^{1,2}, 张文静³, 程旭⁴, 白占学^{1,2}, 李金秋^{1,2}

(1.中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2.自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3.吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130012; 4.河北省航空探测与遥感技术重点实验室, 河北 石家庄 050061)

提要:【研究目的】不冻泉位于青藏高原北部可可西里多年冻土区, 是典型的构造融区上升泉, 不冻泉水质状况及形成机理对青藏铁路沿线供水保障及当地小城镇建设至关重要。【研究方法】本文利用单指标评价法筛选出泉水中主要超标组分, 基于地质条件分析、环境同位素和水化学方法研究了不冻泉蓄水构造、循环特征和主要化学组分来源。【研究结果】年内不同时期不冻泉水质综合评价结果均为 V 类水, V 类指标为总硬度、 SO_4^{2-} 、 Cl^- , 毒理学指标和重金属指标均为 I-II 类标准, 冰川融水和河水均为 I-II 类水。不冻泉补给水源主要为昆仑山南坡冰川融水、大气降水和地表河水, 平均循环时间小于 5-10 年。地下水径流通道为 NE 向张性活动断裂形成的构造融区, 补给水源沿此通道径流, 遇 NWW 向压性活动断裂时受阻, 并上涌至地表形成不冻泉。泉水中化学组分主要来源于蒸发盐岩、镁盐和碳酸盐岩的溶滤作用。【结论】从饮水健康角度, 建议可按照泉水和河水 1:2 的配比供水。

关键词: 不冻泉; 构造融区; 水质评价; 冰川融水; 水文地质调查工程; 可可西里; 西藏

创新点: 首次明确了可可西里不冻泉的水质特征及其形成机制; 建立了青藏高原构造融区上升泉成因模式。

Water quality, genetic model, and potential development and use of the Hoh Xil Budongquan spring on the northern Qinghai-Tibet Plateau

FU Changchang^{1,2}, LI Xiangquan^{1,2}, ZHANG Wenjing³, CHENG Xu⁴, BAI Zhanxue^{1,2}, LI Jinqiu^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China; 3. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China; 4. Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology, Hebei, Shijiazhuang 050061, China)

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

[Objective] Budongquan spring is in the region of Hoh Xil on the northern Qinghai-Tibet Plateau. It is a typical sub-surface spring with discharge that ascends to the surface through taliks in the permafrost. It is an important

基金项目: 国家自然科学基金(42002264); 中央科研院所基本科研业务费项目(sk202006); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221812)

作者简介: 付昌昌, 男, 1988 年生, 助理研究员, 主要从事水化学演化与水资源调查评价工作; Email: fu0936@163.com

water supply for the Qinghai–Tibet railway and the construction of small towns along the railway. Therefore, it is very important to understand its formation and water characteristics. **[Methods]** In this paper, we evaluated spring water quality using the single index evaluation method. We analyzed water storage, circulation, and sources of main chemical components by examining the local geology, environmental isotopes, and hydrochemistry. **[Results]** Results show that Budongquan spring water quality is in class V throughout the year. It is in class V in terms of total hardness, SO_4^{2-} , and Cl^- , and in class I–II in terms of toxicological and heavy metal indices. Nearby glacier meltwater and river water are in class I–II. The spring is mainly recharged by glacial meltwater from the southern slope of Kunlun Mountains, atmospheric precipitation, and surface river water. Average cycle length is less than 5–10 years. Groundwater flow follows the talik zone along the northeast-trending active normal faults. Budongquan spring is formed by the surfacing of groundwater that is blocked by the west-northwest-trending active reverse faults. Its chemical composition is mainly determined by evaporation, and presence of and interaction with magnesium salts and carbonate rocks. **[Conclusions]** To meet standards for drinking water, we recommend mixing spring water with river water at a ratio of 1:2.

Keywords: Budong spring, tectonic taliks, water quality evaluation, glacier meltwater, hydrogeologic survey engineering, Hoh Xil, Tibet

Highlights: 1) Water quality and formation mechanisms of the Budongquan spring in Hoh Xil were clarified for the first time. 2) A genetic model of sub-surface springs on the Qinghai–Tibet Plateau was developed.

About the first author: FU Changchang, male, born in 1988, assistant researcher, mainly engaged in hydrochemical evolution and water resources investigation and evaluation, E-mail: fu0936@163.com.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42002264); the China Geological Survey project (No. DD20221812); the Fundamental Research Funds for the Central Public Research Institutes (No. SK202006).

1 引言

青藏高原是我国重要的生态屏障，而水是生态之基，统筹高原经济发展和水资源合理开发利用已成为寒区水文学研究亟待解决的关键科学问题。不冻泉地区位于青藏高原北部可可西里国家级自然保护区，青藏公路和青藏铁路在此并行穿过，周边分布系列居民点，小城镇建设不断加快，对水资源的需求不断增加，但是受高寒、干旱的自然环境条件限制，水资源短缺已成为当地面临的一个严峻问题，而解决此问题的关键在于准确识别水循环和

演化机理，合理开发利用现有水资源。

环境同位素和水化学示踪技术是定量描述流域水循环及演化机理的重要手段（张宗祜等, 1997; 沈照理等, 2002），在研究岩溶大泉补给来源（唐春雷等, 2020）、温泉成因（徐洪飞等, 2020）、地表水-地下水转化关系（陈宗宇等, 2006; 王雨山等, 2021）以及氮、砷典型污染物形成机理（许乃政等, 2021; 任坤等, 2022）等方面得到了广泛的应用并取得了显著进展。而在青藏高原可可西里及周边，利用水化学和 B 同位素查明了勒斜武担湖和布查盐湖的成因和物质来源（马茹莹等, 2015），基于水化学分析了昆仑山玉珠峰冰川融水的离子来源（宋玲玲等, 2019），利用水化学和氢氧同位素解析了长江源区冻结层上水的补给来源及环境效应（Li et al., 2018），水化学和同位素示踪技术已成为高原高寒地区研究地下水的补给来源（Chaillou et al., 2018; Zhao et al., 2021），揭示寒区产汇流过程（Gibson et al., 2015; Windler et al., 2021）和分析水化学演化机理（Mir et al., 2016; 李玉龙等, 2021）等的最有效手段之一。

因此，本次研究通过系统采集不同时期泉水、河水、冰川融水和大气降水，利用单指标综合评价法筛选出泉水中主要超标组分，利用地质条件分析、环境同位素和水化学示踪技术，研究泉水形成的蓄水构造、循环特征和主要化学组分来源。在此基础上，从饮水健康角度给出泉水开发利用的建议。

2 研究区自然地理概况及水文地质条件

2.1 自然地理概况

不冻泉地处青藏高原北部可可西里盆地，多年平均气温为 $-5.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，10月至翌年4月为冰冻期；多年平均降水量为 299.3 mm ，5-9月为汛期，降水量占全年降水量的90%。该区属于长江北源楚玛尔河流域。长江源区昆仑山南坡冰川面积为 61.6 km^2 ，固态水储量约 51.5 亿 m^3 （Yao et al., 2014），冰川融水是研究区地下水重要的补给源。

2.2 水文地质条件

研究区属巴颜喀拉—羌塘地层区，基底为三叠系巴颜喀拉山群沉积岩和燕山期花岗岩体，上覆为新生代地层。研究区属于大片连续多年冻土区（程国栋等, 2019），冻土上限深度为 $2\text{-}3.5\text{ m}$ ，厚度 $2\text{-}37\text{ m}$ ，构成相对较稳定的区域性隔水层。根据含水层与多年冻土层之间的相互关系，研究区地下水可划分为冻结层上水和冻结层下水。

冻结层上水，以多年冻土上限面作为隔水底板，又称季节融化层水。分布范围广，含

水层主要以第四纪松散层为主，及昆仑山南坡山区的基岩风化破碎带。含水层厚度一般 1-2m，最厚可达 3-4m，岩性复杂，透水性相差大，单泉流量变化大，不冻泉以北山区最大单泉流量 44.42 L/s，不冻泉以南丘陵区单泉流量 0.221-6.55 L/s，溶解性总固体 0.27-1.00 g/L，以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}(\text{Na})$ 型水为主。动态特征为冬冻夏融，季节变化较大，一般为潜水，补给区与分布区基本一致。

冻结层下水，多埋藏于多年冻土层以下的基岩裂隙及孔隙中，含水层分布连续、稳定且厚度大，其富水条带往往沿活动断裂分布，岩性主要为三叠系巴颜喀拉山群粉砂岩夹板岩，板岩夹变砂岩和砂岩板岩互层，一般具有承压性，单位涌水量 0.1-1 L/(m²·s)，溶解性总固体 1-4g/L，以 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}\cdot\text{Ca}$ 型水为主，动态较稳定，补给区范围大，往往和分布区不一致。

3 水样采集与分析

3.1 水样采集

采样时间为 2021 年期间，对研究区内不冻泉，冰川融水、大气降水和河水分别取样，采样点位置见图 1。野外采样时，采样前先用 0.45 μm 滤膜进行过滤，其中阳离子和微量元素分析样品采集后滴加 HNO_3 ，使 pH 降到 2 以下；阴离子和环境同位素分析样品不加保护剂。采样后，贴标签并密封保存。采样同时，利用便携式水质分析仪（HANNA，HI9828）检测并记录水样的温度、pH 值和电导率(EC)。

3.2 分析方法

水样检测实验室为国土资源部地下水矿泉水与环境监测中心。阴、阳离子检测仪器分别为 DX-120(Dionex)型离子色谱仪和 ICP-AES(iCAP 6300, Thermo)，执行标准分别为 DZ/T0064-1993 和 GB8538-2016，测试结果阴阳离子平衡相对误差<5%。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的检测仪器为波长扫描-光腔衰荡光谱仪(Picarro L2130i)，测试精度分别为 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。 ^3H 检测时先将样品经过蒸馏和电解富集，再利用低本底液闪仪来测试，每个样品计数时间约 500 min，测试结果以氚单位 (TU) 表示，不确定度是 ± 1 TU。主要测试结果见表 1 所示。

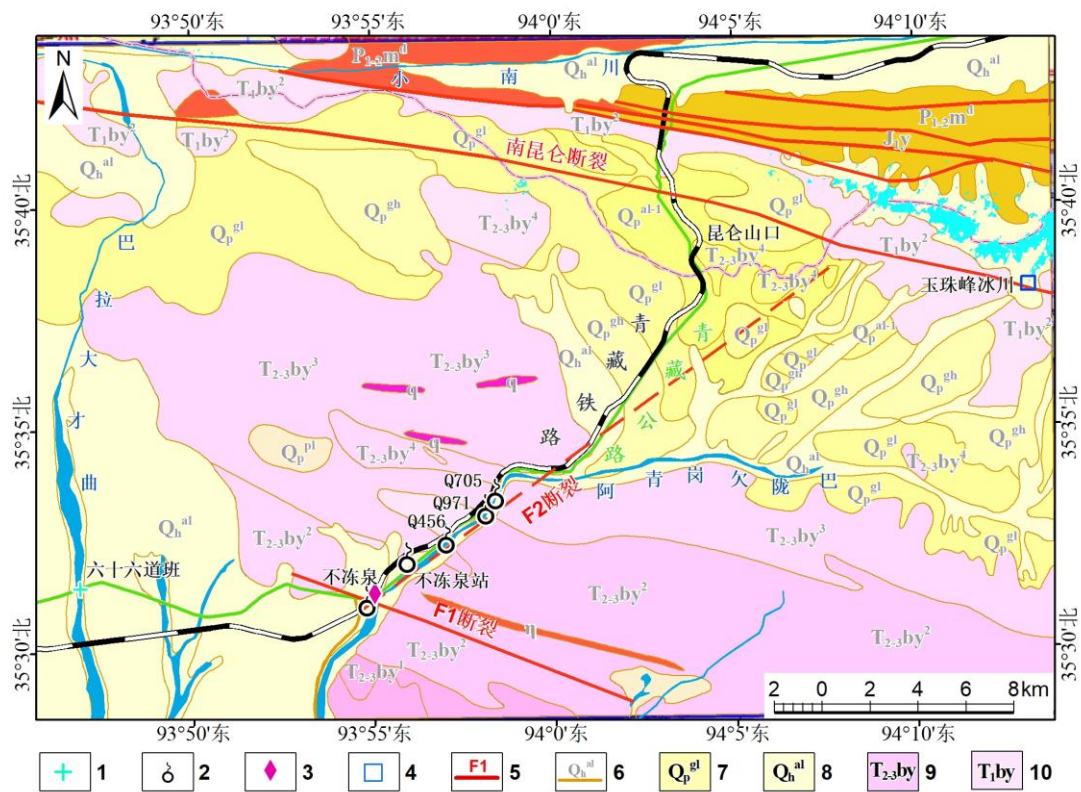


图 1 研究区地质简图和采样点分布图

1—河水采样点；2—上升泉；3—降水采样点；4—冰川融水采样点；5—活动断裂；6—地层界线；7—第四系冰碛层；8—第四系冲洪积层；9—三叠系上巴颜喀拉亚群；10—三叠系下巴颜喀拉亚群

Fig.1 Geological sketch of the study area and the distribution of sampling sites

1—river water sites; 2—ascending spring sites; 3—precipitation sites; 4—glacier meltwater site; 5—active faults; 6—stratigraphic boundary; 7—Quaternary moraine; 8—Quaternary alluvial diluvium; 9—Upper Triassic Bayan Kharaya Group; 10— Lower Triassic Bayan Kharaya Group

表 1 研究区水样的水化学指标和同位素测试结果

Table 1 Chemical and isotopic compositions of water samples in the study area

| bh | 采样日期 | 采样地点 | pH | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | F ⁻ | NO ₃ ⁻ | TDS | 总硬度 | Cr ⁶⁺ | 砷 | 镉 | 铅 | 汞 | δD (‰) | δ ¹⁸ O (‰) | ³ H (TU) |
|-------|------|---------|------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|-------|-------|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|-----------------------|---------------------|
| Y84 | 7月 | 扎西宾馆 | 7.25 | 0.43 | 0.9 | 3.58 | 0.31 | 1.75 | 2.22 | 18.31 | <0.10 | 1.66 | 21.32 | 10.01 | <0.004 | <0.001 | <0.002 | 0.001 | <0.0001 | -26 | -5.5 | 31.8 |
| Y92 | 8月 | 扎西宾馆 | 6.64 | 0.74 | 3.44 | 7.94 | 1.39 | 3.5 | 7.01 | 24.41 | 0.16 | 4.23 | 42.05 | 25.52 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -130 | -18.3 | 12.3 |
| Y100 | 10月 | 扎西宾馆 | 7.57 | 0.49 | 3.68 | 7.69 | 0.64 | 5.6 | 5.39 | 25.63 | 0.19 | 3.67 | 42.03 | 22.02 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -144 | -20.5 | 15.3 |
| Y2201 | 4月 | 五道梁 | 7.44 | 0.69 | 3.38 | 7.66 | 1.04 | 5.25 | 5.04 | 24.16 | <0.10 | 5.62 | 40 | 23.23 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -63 | -10.4 | / |
| Y2206 | 5月 | 五道梁 | | | | | | | | | | | | | | | | | | -200 | -26.4 | / |
| Y2300 | 6月 | 五道梁 | 6.78 | 0.19 | 1.28 | 11.46 | 0.55 | 1.4 | 3.58 | 42.28 | 0.17 | 1.55 | 41 | 30.64 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -92 | -12.9 | / |
| Y2421 | 7月 | 五道梁 | 6.51 | 0.33 | 2.34 | 4.75 | 0.5 | 1.75 | 4.34 | 17.95 | 0.11 | <0.20 | 24 | 13.82 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -162 | -21.6 | 17.4 |
| 008 | 8月 | 五道梁 | 7.34 | 0.01 | 0.57 | 10.05 | 0.45 | 1.43 | 4.08 | 33.56 | 0.13 | 1.81 | 36.36 | 27.02 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -160 | -21.7 | 19.2 |
| Y2419 | 9月 | 五道梁 | | | | | | | | | | | | | | | | | | -67 | -10.2 | 23.2 |
| Y2420 | 10月 | 五道梁 | | | | | | | | | | | | | | | | | | -237 | -31.5 | / |
| Y2101 | 3月 | 不冻泉 | 7.57 | 6.02 | 205 | 132.2 | 150.9 | 427.9 | 607.1 | 194.3 | 0.3 | 5.77 | 1660 | 951.3 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -75 | -10.8 | / |
| Y2203 | 5月 | 不冻泉 | 7.92 | 7.07 | 216.9 | 130.7 | 151.1 | 428.9 | 582.4 | 200 | 0.31 | 6.19 | 1650 | 936.5 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -76 | -10.9 | 15 |
| Y2303 | 6月 | 不冻泉 | 7.67 | 7.14 | 211.2 | 123.3 | 144.8 | 413.2 | 536.1 | 222.3 | 0.28 | 5.93 | 1571 | 892.5 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | / | / | / |
| Y2002 | 7月 | 不冻泉 | 7.53 | 5.95 | 214.6 | 128.7 | 145 | 418.1 | 541.9 | 267.9 | 0.26 | 5.2 | 1604 | 918.2 | <0.004 | 0.001 | <0.0005 | 0.006 | <0.0001 | -77 | -10.9 | 12.6 |
| Y2417 | 9月 | 不冻泉 | | | | | | | | | | | | | | | | | | -76 | -10.9 | 17.2 |
| Y301 | 10月 | 不冻泉 | 7.51 | 5.43 | 200.5 | 119.1 | 139.5 | 411.4 | 500.8 | 207.3 | 0.28 | 8.47 | 1498 | 871.7 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -79 | -11.2 | 11 |
| Y06 | 4月 | 清河水泵 | 7.56 | 5.91 | 138.7 | 124.6 | 67.35 | 261.3 | 120 | 485.1 | 0.82 | 0.72 | 992 | 588.5 | <0.004 | 0.004 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -87 | -11.8 | 1.6 |
| Y05 | 4月 | 北三河 | 8.43 | 2.34 | 21.86 | 27.24 | 14.4 | 29.62 | 25.46 | 116.6 | 0.11 | 3.74 | 194.3 | 127.1 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -75 | -11.5 | 14.9 |
| Y2307 | 6月 | 北三河 | 8.15 | 2.69 | 25.01 | 27.67 | 13.97 | 33.61 | 27.6 | 127.5 | 0.23 | 4.05 | 198 | 125 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | / | / | / |
| Y83 | 7月 | 北三河 | 8.7 | 2.49 | 24.71 | 27.89 | 14.04 | 33.96 | 26.88 | 110.4 | 0.2 | 3.7 | 204.6 | 127.6 | <0.004 | <0.001 | <0.002 | <0.001 | <0.0001 | -74 | -11.3 | 13.6 |
| Y2004 | 8月 | 北三河 | 8.54 | 2.66 | 28.26 | 28.34 | 15.53 | 40.42 | 32.28 | 119.1 | 0.21 | 3.7 | 226.8 | 134.6 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -71 | -10.6 | 12.7 |
| Y2405 | 10月 | 北三河 | 8.3 | 2.58 | 42.58 | 29.01 | 19.29 | 59.52 | 43.31 | 134.6 | 0.25 | 4.15 | 280 | 149.6 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -74 | -10.9 | 12.7 |
| Y2308 | 7月 | 巴拉大才曲 | 8.18 | 3.18 | 32.72 | 28.4 | 15.4 | 54.27 | 31.69 | 114.8 | 0.24 | | 239 | 132.4 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -81 | -11.4 | 27.8 |
| Y2309 | 7月 | 玉珠峰冰川融水 | 8.17 | 0.5 | 2.5 | 11.22 | 5.14 | 4.2 | 4.24 | 60.41 | 0.11 | 2.62 | 65 | 48.43 | <0.004 | <0.001 | <0.0005 | <0.001 | <0.0001 | -89 | -13 | 2.7 |

4 结果

4.1 水化学特征

不冻泉水温 2.6-4.5 °C，pH 为 7.51-7.92，均值为 7.64，TDS 为 1498-1660 mg/L，均值为 1596.60 mg/L，水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型，为弱碱性微咸水，河水 pH 均值为 8.31，TDS 均值为 227.18 mg/L，水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型，为弱碱性淡水，冰川融水 pH 值为 8.17，TDS 值为 65.00 mg/L，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型，大气降水 pH 均值为 7.08，TDS 均值为 35.25 mg/L，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 或 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型。由此可见，由大气降水/冰川融水→河水→泉水，阳离子由 $\text{Ca}^{2+}(\text{Mg}^{2+})$ 演化为 Mg^{2+} 、 Na^+ ，阴离子由 HCO_3^- 演化为 SO_4^{2-} 、 Cl^- ，同时离子含量显著增加。

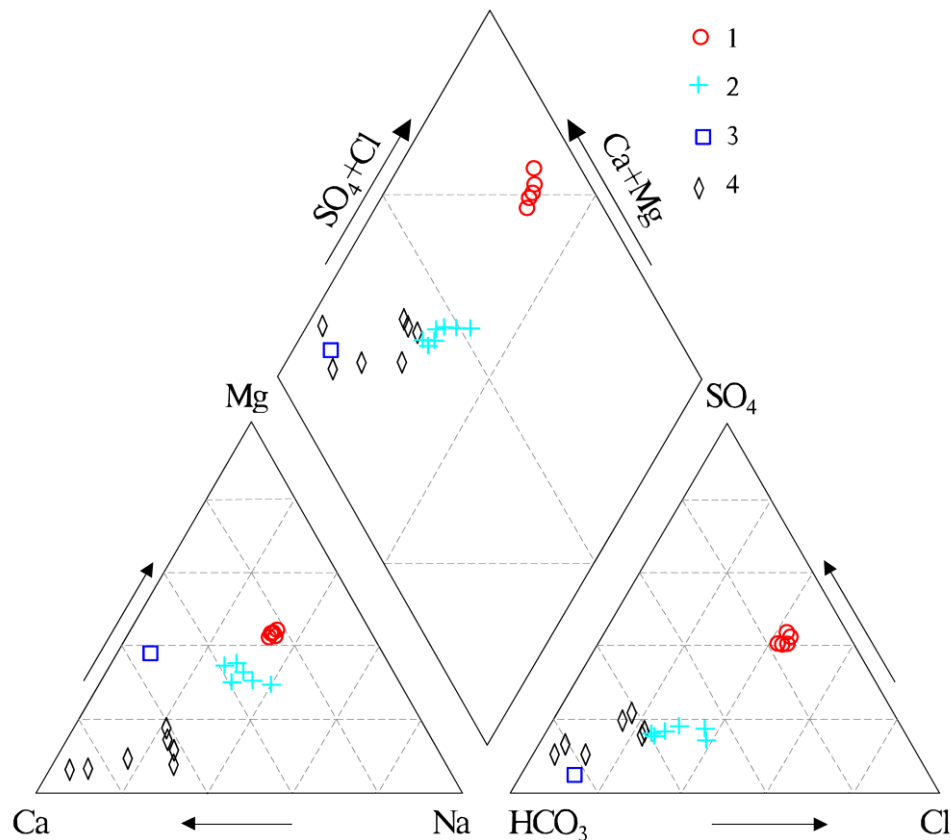


图 2 不冻泉地区不同水体水化学类型 Piper 图

1—不冻泉；2—河水；3—冰川融水；4—大气降水

Fig. 2 Piper diagram of the different water bodies in the Budongquan region

1—Budongquan Spring; 2—river water; 3—glacier meltwater; 4—precipitation

4.2 水质特征

水质指标分为一般化学指标、无机毒理学指标和毒性重金属指标。其中，一般化学指

标包括 pH、总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、铁、锰、铜、锌、铝、耗氧量、 NH_4^+ 和 Na^+ ；无机毒理学指标包括 NO_2^- 、 NO_3^- 、 F^- 和 I^- ；毒性重金属指标包括砷、汞、硒、镉、铬（六价）、铅、钡、和银。本次采用单指标综合评价法开展水质评价，按指标值所在的限值范围确定单项指标水质类别，选取单指标评价结果最差的类别确定为水质综合类别，并筛选出主要超标组分，评价依据为地下水质量标准（DZ/T0290-2017）。

评价结果表明，不冻泉为 V 类水，V 类指标为总硬度、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ，IV 类指标为 TDS 和 Na^+ ，而其他一般化学指标、无机毒理学指标和毒性重金属指标均为 I-II 类水。年内不同时期，主要超标组分含量有所波动，但未改变水质类别。河水和冰川融水为 I-II 类水，无机毒理学指标和毒性重金属指标均为 I 类水。

水环境中对人体有害的组分包括基因毒物质和躯体毒物质两类。基因毒物质具有致癌性，可以导致基因突变或引起遗传性改变，包括铬（六价）、砷和镉，躯体毒物质可以引起躯体中毒性表现，但不具致癌性，主要包括 NH_4^+ 、 F^- 、汞、铅、铁、锰等（USEPA, 1989）。表 2 显示，不冻泉水中致癌性指标和主要非致癌性指标均小于饮水健康风险阈值，而超标组分均为一般化学指标，研究表明硬度超标的水主要影响饮水口感，也可引起胃肠功能暂时性紊乱， SO_4^{2-} 超标的水可能引起轻度腹泻、脱水和胃肠道紊乱症状， Cl^- 超标的水可能引起水质口感的变化（管蓉等, 2013）。因此，尽管不冻泉水单因子指数综合评价结果为 V 类水，但超标组分主要引起水质口感的不适或者可能引起轻度肠胃不适，对于严重缺少稳定供水水源的研究区，不冻泉仍具有非常重要的供水意义。

表 2 不冻泉和河水单指标评价结果
Table 2 Evaluation results for single components in Budongquan Spring and river water

| 分类 | 指标 | 不冻泉 | | 河水 | | 饮用水限值 |
|--------|--------------------|-----------|--------|--------------|--------|---------|
| | | 范围 | 水质标准 | 范围 | 水质标准 | |
| 一般化学指标 | pH | 7.51-7.92 | I | 7.85-8.50 | I | 6.5-8.5 |
| | 总硬度 | 871-952 | V | 125-152 | I - II | 450 |
| | TDS | 1498-1660 | IV | 194-280 | I - II | 1000 |
| | SO_4^{2-} | 500-608 | V | 25-44 | I | 250 |
| | Cl^- | 411-429 | V | 29-41 | I | 250 |
| | 铁 | <0.01 | I | <0.01-0.19 | I - II | 0.3 |
| | 锰 | <0.001 | I | <0.001-0.046 | I - II | 0.1 |
| | 铜 | <0.01 | I | <0.010 | I | 1 |
| | 锌 | <0.002 | I | <0.002 | I | 1 |
| | 铝 | <0.02 | I - II | <0.02 | I | 0.2 |
| | 耗氧量 | 0.62-0.78 | I | 0.37-0.81 | I | 3 |
| | NH_4^+ | <0.04 | I - II | <0.04 | I | 0.5 |
| | Na^+ | 200-217 | IV | 21-43 | I | 200 |

| | | | | | | |
|---------|------------------------------|-----------|--------|-----------|---|-------|
| 无机毒理学指标 | NO ₂ ⁻ | <0.002 | I | <0.002 | I | 1 |
| | NO ₃ ⁻ | 5.2-8.5 | I | 3.70-4.63 | I | 20 |
| | F ⁻ | 0.26-0.31 | I | 0.11-0.25 | I | 1 |
| | I ⁻ | <0.02 | I | <0.02 | I | 0.08 |
| 毒性重金属指标 | 汞 | <0.0001 | I | <0.0001 | I | 0.001 |
| | 砷 | <0.001 | I | <0.001 | I | 0.01 |
| | 硒 | <0.001 | I | <0.001 | I | 0.01 |
| | 镉 | <0.0005 | I - II | <0.0005 | I | 0.005 |
| | 铬(六价) | <0.004 | I | <0.004 | I | 0.05 |
| | 铅 | <0.001 | I | <0.001 | I | 0.01 |

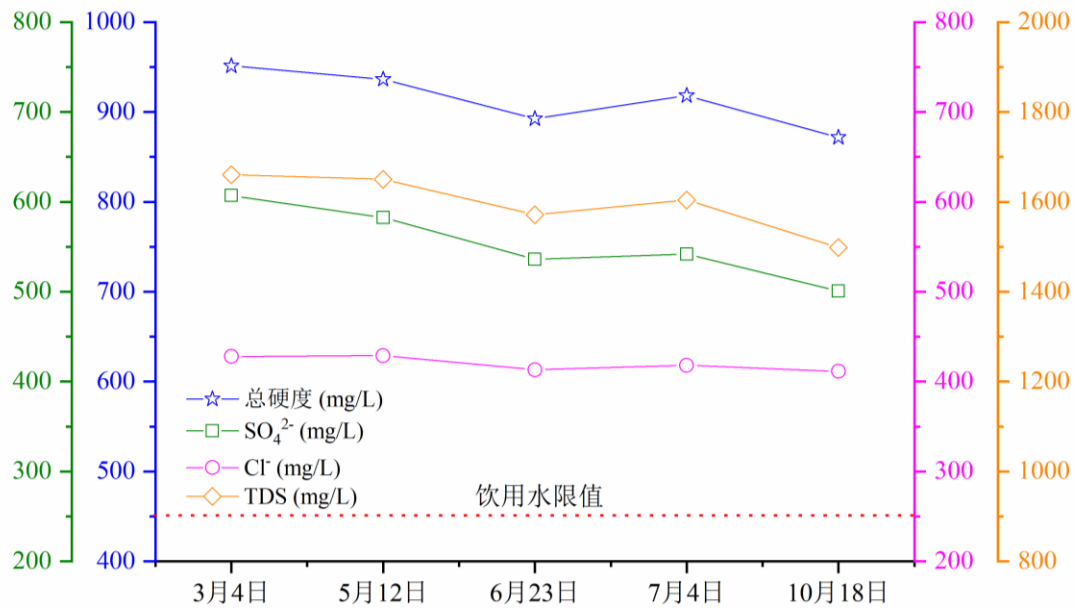


图3 不冻泉水中主要超标组分年内变化特征

Fig.3 Variation characteristics of main components exceeding standard in Budongquan spring water during the year

5 讨论

5.1 蓄水构造

基岩区地下水运动受断裂控制，构成导水通道，压性断裂起到隔水作用，二者交汇处往往形成蓄水构造，出现流量较大的上升泉。在多年冻土区，沿张性断裂形成带状构造融区，构成地下水的富集空间，具有重要的供水意义（周幼吾，2000）。研究区地处巴颜喀拉构造带，区内分布的主要构造有 NWW 向活动断裂(F₁)和 NE 向活动断裂(F₂)（王国灿，2006）。F₁断裂带宽约 200 m，为压性断裂，而 F₂为张性断裂，二者在不冻泉附近交汇。F₂张性断裂构成导水通道，沿 F₂断裂破碎带，夏季形成线状分布的上升泉，冬季形成串珠状排列的冰丘和移动冰丘，冰丘呈椭圆形，长轴走向北东，地下水运动明显受 NE 向 F₂活动

断裂控制。F₁ 压性断裂起到隔水作用，补给区昆仑山冰川融水入渗进入 F₂ 断裂导水通道，向 SW 方向运移至不冻泉地区，受到 F₁ 阻水作用出露地表形成不冻泉（图 4）。

调查表明，沿 F₂ 活动断裂发育线状排列的上升泉，705 号上升泉流量 0.45 L/s，TDS 为 7.6 g/L，水化学类型为 Cl-Na 型，971 号上升泉流量 3.03 L/s，TDS 为 3.0 g/L，456 号上升泉流量 1.40 L/s。本次调查不冻泉流量为 20.80 L/s，TDS 为 1.6 g/L 左右，表明地下水沿 F₂ 断裂蓄水构造循环深度大，径流缓慢，长期水岩作用导致水中化学组分含量高，至不冻泉地区，可能受到河水补给作用导致泉水水质淡化。钻探资料表明，在 F₂ 断裂和 F₁ 断裂的交汇部位构造裂隙极为发育，地下水较丰富，在该处施工的勘探井，井口标高 4588 m，单位涌水量 6.31 L/s m，降深 3.95 m，单井涌水量为 2148 m³/d，而 F₁ 断裂的下盘裂隙不发育，单位涌水量仅 0.004 L/s m（张森琦等, 2011）。

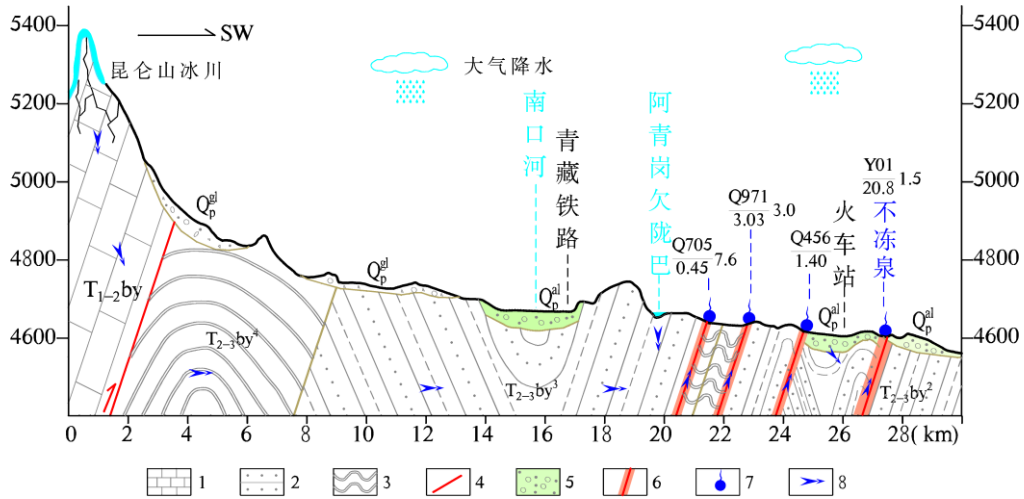


图 4 不冻泉 NE 向蓄水构造模式图

1—灰岩；2—砂岩；3—板岩；4—活动断裂；5—河流融区；6—构造融区；7—上升泉；8—地下水流向

Fig. 4 Planar graph and profile of Budongquan spring storage water structure in NE direction
1—limestone; 2—sandstone; 3—slate; 4—active faults; 5—river taliks; 6—tectonic taliks; 7—ascending springs; 8—groundwater flow direction

5.2 循环特征

在水循环过程中，同位素组成的差异可用于识别水体的来源和补给过程（Wang et al., 2021; 王振等, 2021; Balagizi et al., 2022）。研究区不同水样点均位于当地大气降水线（LMWL: $\delta D=8.11\delta^{18}O+16.57$, $n=14$ ）附近（图 5a），表明当地大气降水是区内不同水体初始补给来源。不冻泉与河水的 $\delta^{18}O$ (δD) 值基本相同，表明二者之间存在密切的水力联系。本次调查中采集测试了清水河源头上升泉，该泉远离河道，基本不受地表水影响，从图 5a 中看出，清水河泉位于不冻泉和河水的左下方，其 $\delta^{18}O$ (δD) 值较不冻泉偏负，进一步表明不冻泉受到了河水的补给影响。

放射性同位素 ³H 的衰变周期为 12.43 年，常用来判断年轻地下水（1952 年以来）的循

环时间。不冻泉和清水河泉均为上升泉，不冻泉的 ^3H 含量为 11.0-17.2 TU，平均值为 14.4 TU，而清水河泉的 ^3H 的含量仅为 1.6 TU。根据 Clark 等（1997）对于氦年龄的解释，不冻泉为现代水（ ^3H 的含量介于 5-15 TU），年龄小于 5-10 年，而清水河泉为 1952 年之前补给和最近补给之间的混合，年龄在 35-70 年，反映出不冻泉得到了现代水的混合补给。研究区内冰川融水的 ^3H 含量为 <1.0-2.7 TU，河水的 ^3H 含量为 12.7-27.8 TU，均值为 16.3 TU，冰川融水的 ^3H 含量极低，从侧面说明不冻泉得到了河水的混合补给，以往水文地质调查也表明，在阿青岗欠陇巴上游至不冻泉火车站段有 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 的河水流量下渗补给地下水（张森琦等, 2011）。

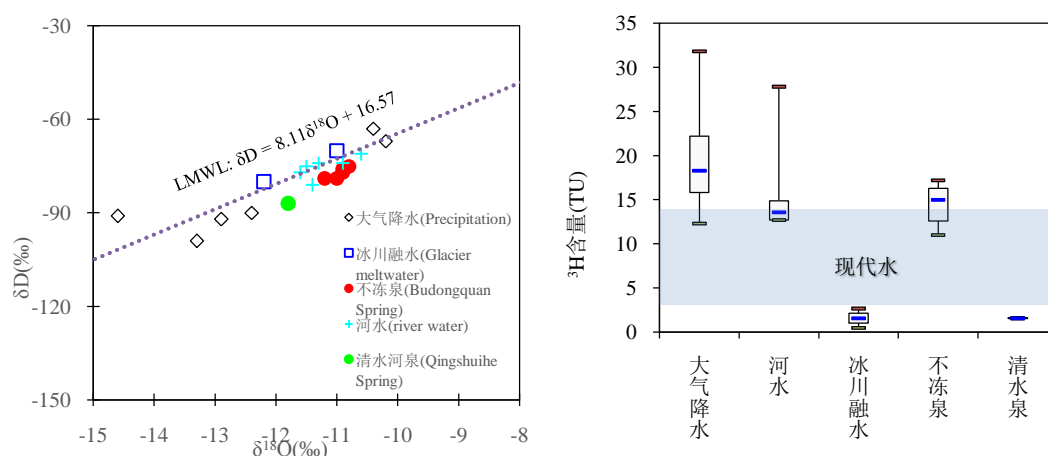


图 5 不冻泉地区不同水体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图 (a) 和 ^3H 含量箱线统计图 (b)
 Fig.5 Diagram of $\delta\text{D}\sim\delta^{18}\text{O}$ (a) and the box plot of ^3H content (b) in different water samples in Budongquan Spring region

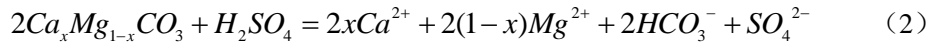
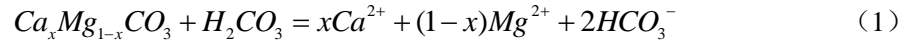
5.3 主要化学组分来源

利用水中离子的比值特征来确定水化学成分的来源是分析水化学演化过程的常用手段之一，通过计算水体阴阳离子间的比值关系可以指示水体溶滤作用，反映水化学形成及演化特征（Fryar et al., 2001; Rissmann et al., 2015; Fu et al., 2018）。

$\delta^{18}\text{O}\text{-Cl}$ 关系可区分盐分的来源，由大气降水/冰川融水→河水→泉水， Cl^- 逐渐增加，但 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本不变（图 6a），表明泉水中 Cl^- 的增加主要是水岩作用，蒸发作用影响较弱（Deng et al., 2009）。表 2 显示，泉水和河水中 NO_3^- 极低，重金属指标也未检出，表明人类活动对水化学组分的影响也可忽略。

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 离子常来源于地层中碳酸盐矿物的溶解，若 H_2CO_3 溶解碳酸盐岩， $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 比值为 1， $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 比值约为 0（反应式 1）；若 H_2SO_4 溶解碳酸盐岩， $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 比值为 2， $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 比值约为 1（反应式 2）（刘丛强等, 2008）。图 6b 显示，大气降水、冰川融水和河水等 TDS 低的水样 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 比值介于 0.09~0.36 之间，表明以 H_2CO_3 溶解碳酸盐岩为主，而不冻泉水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 比值为 3.28，明显大于 1，

则表明这部分水中除了 H_2CO_3 、 H_2SO_4 溶解碳酸盐矿物外，还发生了硫酸盐矿物的溶解。



不冻泉地区古一新近系地层岩性以泥岩、泥灰岩为主，夹镁盐及盐岩等蒸发岩层(李江海等, 2017)，地下水流经该地层时会溶解大量盐分。图 6c 显示，大气降水、冰川融水和河水均分布在 $\gamma(Na/Cl)=1$ 线上，表明水中 Na^+ 和 Cl^- 主要来自盐岩的溶解，而不冻泉 $\gamma(Na/Cl)<1$ ，表明还存在其他含氯元素矿物的溶解。随着水中 SO_4^{2-} 的增加， $\gamma(Mg/SO_4)$ 逐渐趋近于 1，表明深部地层中分布有泻盐，补给水源流经围岩时镁盐溶解，导致不冻泉水中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量进一步增加，水化学类型演变为 $SO_4 \cdot Cl-Mg \cdot Na$ 型（肖捷颖等, 2016）。

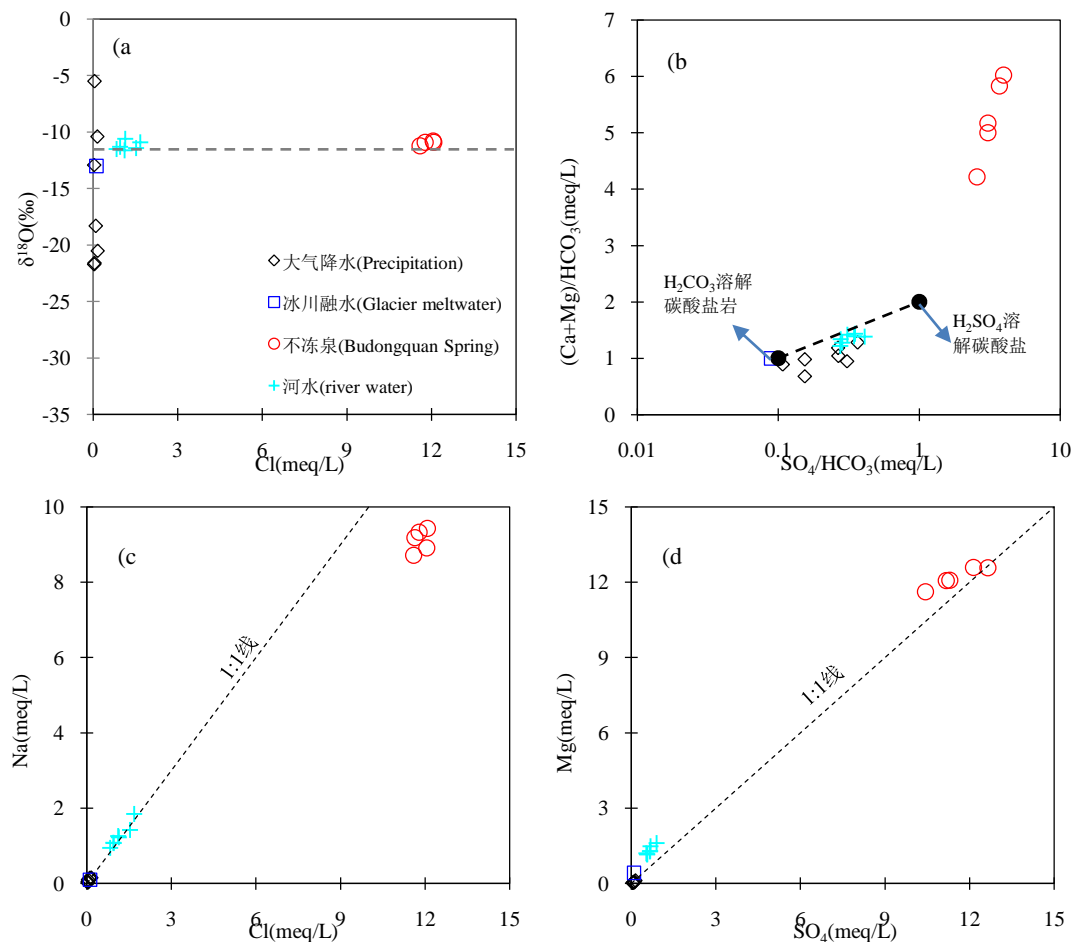


图 6 不同水体主要离子当量浓度比值关系图

Fig.6 Equivalent ratio diagram of the major ions in the different water bodies

5.4 开发利用建议

研究区可利用的水源包括河水和地下水，其中地下水又可分为冻结上水和冻结层下水。河水流经青藏公路，取水便捷，水质优良，均为 I-II 类水，但受当地自然条件制约，每年

10月至翌年5年，河水流量小且处于冻结状态，取水非常困难，而夏季，河水流量大但泥沙含量高，该段时期又处于旅游旺季，往来的人和车产生的生活垃圾进入河道造成人为污染。

研究区处于多年冻土区，多年冻土连续分布，上限深度为2-3.5m，构成了区域稳定隔水层。冻结层上水含水层厚度薄，水位埋藏浅，冰冻期呈冻结状态，水量和相态季节变化大，难以利用。冻结层下水收到上部冻土层的影响，分布极不均匀，补给相对困难，主要通过各类融区获得冰川融水、冻结层上水和地表水的入渗补给，地下水在径流过程中部分以上升泉的形式通过构造融区排泄至地表，径流迟缓，水量小，而且地下水在运移过程中水岩作用时间长，导致水中矿物质含量高，以咸水和微咸水居多，但是构造融区上升泉水质和水量稳定，冬季不冻结，而且不冻泉位于青藏公路边，取水便利，对于当地小城镇建设供水保障具有非常重要的意义。

根据水质评价结果，从供水健康的角度，本文建议按照一定的比例将不冻泉和河水混合后利用，表3列出了3月份不冻泉水中主要超标组分，该时期为统计指标年内最大值，按照质量守恒计算与河水不同比例混合后各指标的含，结果表明，当泉水与河水按照1:2配比混合后，混合水即可达到III类水标准，符合生活饮用水要求。根据青海省用水定额标准（DB36T 1429-2015），农村、城镇居民生活用水定额为40-80 L/人·天，因此，若直接利用泉水，则每天可供2.2-4.5万人生活用水，而按照配比建议供水，则每天可以供6-13万人生活用水，这为当地“以水定城”小城镇开发提供了科学依据。

表3 不冻泉、河水及二者不同比例混合水主要污染指标和水质类别
Table 3 Main pollution indexes and water quality categories of Budongquan spring water, river water and their mixed water in different proportions

| | 总硬度 | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | TDS | Na ⁺ | 水质类别 |
|---------|-------|-------------------------------|-----------------|--------|-----------------|------|
| 不冻泉 | 951.3 | 607.1 | 427.9 | 1660.0 | 205.0 | V |
| 河水 | 132.4 | 31.7 | 54.3 | 239.0 | 32.7 | I |
| 1:1 混合水 | 541.9 | 319.4 | 241.1 | 949.5 | 118.9 | IV |
| 1:2 混合水 | 405.4 | 223.5 | 178.8 | 712.7 | 90.1 | III |
| 饮用水限值 | 450 | 250 | 250 | 1000 | 200 | |

6 结论

(1) 不冻泉为弱碱性微咸水，水化学类型为 SO₄·Cl-Mg·Na 型，TDS 为 1498-1660 mg/L，均值为 1596.60 mg/L。单指标综合评价结果表明，不冻泉为 V 类水，V 类指标为总硬度、SO₄²⁻、Cl⁻，IV 类指标为 TDS 和 Na⁺，而其他一般化学指标、无机毒理学指标和毒

性重金属指标均为 I-II 类水。

(2) 地下水径流通道为 NE 向张性活动断裂形成的构造融区，补给水源沿此通道径流，遇 NWW 向压性活动断裂时受阻上涌形成上升泉。水文地质调查和环境同位素表明，泉水的补给来源主要为昆仑山南坡冰川融水、大气降水和地表河水，平均循环时间小于 5-10 年。水化学分析表明泉水中化学组分主要来源于盐岩、镁盐和碳酸盐岩的溶滤作用，基本不受蒸发作用和人类活动的影响。

(3) 不冻泉流量和水质稳定，取水便捷，根据当地实际情况，从饮水健康角度，建议可按照泉水和河水 1: 2 的配比供水，从因水定城角度，建议小城镇建设的规模控制在 6-13 万人。

References

- Balagizi, Charles M, Kasereka, Marcellin, Kyambikwa, Albert M, Cuoco, Emilio⁴, Arienzo, Ilenia⁴, Liotta, Marcello. 2022. Characterizing groundwater recharge sources using water stable isotopes in the North Basin of Lake Kivu, East Africa [J]. *Chemical Geology*, 594, 120778.
- Clark I D, Fritz P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology* [M]. Boca Raton: Lewis Publishers of United State.
- Chen Zongyu, Wan Li, Nie Zhenlong, Shen Jianmei, Chen Jingsheng. 2006. Identification of groundwater recharge in the Heihe basin using environmental isotopes [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 33(6): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, Wu Xiaodong, Sheng Yu, Hu Guojie, Zou Defu, Jin Huijun, Li Xin, Wu Qingbai. 2019. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(27): 2783-2795(in Chinese with English abstract).
- Chaillou G, Lemay-Borduas F, Larocque M, Couturier M, Biehler A, Tommi-Morin G. 2018. Flow and discharge of groundwater from a snowmelt-affected sandy beach [J]. *Journal of hydrology*, (557): 4-15.
- Deng Yamin, Wang Yanxin, Ma Teng. 2009. Isotope and minor element geochemistry of high arsenic groundwater from Hangjinhouqi, the Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. *Applied Geochemistry*, 24(4): 587-599.
- Fu Changchang, Li Xiangquan, Ma Jianfei, Liu Lingxia, Gao Ming, Bai Zhanxue. 2018. A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin [J]. *Applied Geochemistry*, 98: 82-93.
- Fryar A E, Mullican W F, Macko S A. 2001. Groundwater recharge and chemical evolution in the southern High Plains of Texas, USA[J]. *Hydrogeology Journal*, 9(6): 522-542.
- Gibson J J, Birks S J, Yi Y D H.Vitt. 2015. Runoff to boreal lakes linked to land cover, watershed morphology and permafrost thaw: a 9 - year isotope mass balance assessment[J]. *Hydrological Processes*, 29(18): 3848-3861.
- Guan Rong, Zhao Guipeng, Liu Zhaohui, Li Yongbo. 2014. Investigation and analysis of chlorides, sulfates and nitrates in rural drinking water of central China in 2013. *Chinese Health Laboratory Technology*, 24(22): 3309-3312 (in Chinese with English abstract).
- Li Zongjie, Li Zongxing, Song Lingling, Ma Jinxzhu, Song Yong. 2018. Environment significance and hydrochemical characteristics of supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River [J]. *Science of The Total Environment*, 644 (1): 1141-1151.

- Li Jianghai, Wen Chen, Liu Chiheng. 2017. Geology and geomorphology of Hoh Xil and its evolution [M]. Beijing: science press (in Chinese).
- Li Yulong, Miao Weiliang, Zhang Xiyang, He Maoyong, Tang Qiliang, Yang Kaiyuan, Li Yongshou, Han Jilong, Zhao Xue. 2021. Hydrochemical characteristics and salt-formation elements sources of Li-rich brines in Kushui Lake, west Kunlun [J]. Editorial Committee of Earth Science, 46(11): 4161-4174(in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang, Jiang Yingkui, Tao Faxiang, Lang Yunchao, Li Siliang. 2008. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China [J]. Geochimica, 37(4): 404-414(in Chinese with English abstract).
- Ma Ruying, Han Fengqing, Ma Haizhou, Xiao Yingkai, Ma Yunqi, Zhang Yanxia, Wang Teng, He Lei, Han Jilong, Han Yaozong, Guo Jianfeng. 2015. Hydrochemical Characteristics and Boron Isotope Geochemistry of Brine in Hoh Xil, Qinghai Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(1): 60-66.
- Mir R A, Jeelani G, Dar F A. 2016. Spatio-temporal patterns and factors controlling the hydrogeochemistry of the river Jhelum basin, Kashmir Himalaya [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 188(7):1-24.
- Ren Kun, Pan Xiaodong, Peng Cong, Liang Jiapeng, Zeng Jie, Gan Mingwei, Zhang Hua, Wei Liangshuai. 2022. Identification of nitrate sources of groundwaters in the Zhaotong basin using hydrochemistry, nitrogen and oxygen isotopes and its impact on the environment[J]. Geology in China, 49(2): 409-419(in Chinese with English abstract).
- Rissmann C, Leybourne M, Benn C, Christenson B. 2015. The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer[J]. Chemical Geology, 396: 164-181.
- Shen Zhaoli, Wang Yanxin. 2002. Review and Outlook of Water-Rock Interaction Studies [J]. Earth Science, 27(2): 127-133 (in Chinese with English abstract).
- Song Lingling, Tian Qing, Li Zongjie, He Jing. 2019. Hydrochemical characteristics of melt-water in the Yuzhu Peak Glacier, Kunlun Mountains [J]. Environmental Chemistry, 38(8): 1864-1871.
- Tang Chunlei, Zheng Xiuqing, Liang Yongping, Zhang Fawang, Jing Ze. 2020. The hydraulic connection between Jinci and Pingquan in Taiyuan and its contribution to the reflow of Jinci spring[J]. Geology in China, 47(6):1755-1764(in Chinese with English abstract).
- USEPA. 1989. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response USEPA, EPA/540/189/002.
- Wang Guocan, Li Dewei, Wei Qirong. 2006. Regional geological survey report of 1:250 000 scale Budong spring picture(I46 C 001003) [R]. Wuhan: China University of Geosciences, 272-329 (in Chinese).
- Wang Yushan, Yin Dechao, Wang Xuqing, Qi Xiaofan, Xia Yubo, Ma Zhitong, Zhang Liang, Xu Rongzhen. 2021. Groundwater-surface water interactions in the Baiyangdian wetland, Xiong' an New Area and its impact on reed land[J]. Geology in China, 48(5): 1368-1381(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhen, Guo Huaming, Liu Haiyan, Zhao Weiguang, Liu Shuai, Wang Jiao, Shen Mengmeng. 2021. Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 48(1): 18-26(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhe, Wang Lijuan, Shen Jianmei, Nie Zhenlong, Meng Ling-qun, Cao Le, Wei Shibo, Zeng Xiangfeng. 2021. Groundwater characteristics and climate and ecological evolution in the Badain Jaran Desert in the southwest Mongolian Plateau [J]. China Geology, 4, 421-432.
- Windler G, Brooks J R, Johnson H M, Comeleo R L, Coulombe R, Bowen G J. 2021. Climate impacts on source contributions and evaporation to flow in the Snake River Basin using surface water isoscapes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) [J]. Water Resources Research, 57(7): e2020WR029157.
- Xu Hongfei, Zhou Xun, Wang Mengmeng, Liu Yu, Wu Yanqiu, Zhou Linyang. 2020. Characteristics and formation of the Denggeng hot spring and the Mabu hot spring in Lushui County, Yunnan Province[J]. Geology in China,

47(6):1739-1754(in Chinese with English abstract).

- Xiao Jieying, Zhao Pin, Li Weihong. 2016. Spatial characteristic and controlling factors of surface water hydrochemistry in the Tarim River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 39(1): 33-40(in Chinese with English abstract).
- Xu Naizheng, Gong Jianshi, Tan Mengjiao, Ye Yonghong, Zhou Kaie, Zhu Chunfang, Shu Longcang, Meng Dan. 2021. Hydrogeochemical processes and potential exposure risk of high-arsenic groundwater in Huaihe River Basin, China [J]. *Geology in China*, 48(5): 1418-1428 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zhijun, Liu Zhaofei, Huang Heqing, Liu Gaohuan. 2014. Statistical estimation of the impacts of glaciers and climate change on river runoff in the headwaters of the Yangtze River [J]. *Quaternary International*, (336): 89-97.
- Zhao Wei, Lin Yanzhu, Zhou Pengpeng, Wang Guangcai, Dang Xueya, Gu Xiaofan, 2021. Characteristics of groundwater in Northeast Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate change and human activities: A case study of Delingha, Qaidam Basin [J]. *China Geology*, 4, 377-388.
- Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, Cheng Guodong. *Geocryology in China* [M]. Beijing : Science Press.
- Zhang Zonghu, Shi Dehong, Ren Fuhong, Yin Zhengzhou, Sun Jichao, Zhang Cuiyun. 1997. Evolution of quaternary groundwater system in north China Plain [J]. *Science in China*, 27(2): 74-79 (in Chinese).
- Zhang Senqi, Cao Fuxiang, Li Xufeng, Li Shengtao, Diao Yujie, Li Yingzhi, Li Liang. 2011. Study on Mechanism of Water Controlled by Structures in Budong Spring Region along Qinghai-Tibet Highway [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41: 253-258(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈宗宇, 万力, 聂振龙, 申建梅, 陈京生. 2006. 利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源[J]. *水文地质工程地质*, 33(6): 9-14.
- 程国栋, 赵林, 李韧, 吴晓东, 盛煜, 胡国杰, 邹德富, 金会军, 李新, 吴青柏. 2019. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. *科学通报*, 64(27): 2783-2795.
- 管蓉, 赵桂鹏, 刘朝晖, 李永波. 2014. 2013 年中部某地区农村饮用水中氯化物、硫酸盐、硝酸盐的调查分析 [J]. *中国卫生检验杂志*, 24(22): 3309-3312.
- 李江海, 闻丞, 刘持恒. 2017. 可可西里地质地貌及其形成演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 郎赞超, 李思亮. 2008. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环[J]. *地球化学*, 37(4): 404-414.
- 张宗祜, 施德鸿, 任福弘, 殷正宙, 孙继朝, 张翠云. 1997. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. *中国科学(D 辑:地球科学)*, 27(2): 74-79.
- 李玉龙, 苗卫良, 张西营, 贺茂勇, 唐启亮, 杨凯源, 李永寿, 韩继龙, 赵雪. 2021. 西昆仑地区苦水湖富锂盐湖湖水化学特征及成盐元素来源[J]. *地球科学*, 46(11): 4161-4174.
- 马茹莹, 韩凤清, 马海州, 肖应凯, 马云麒, 张燕霞, 王腾, 何蕾, 韩继龙, 韩耀宗, 郭坚峰. 2015. 青海可可西里盐湖湖水化学及硼同位素地球化学特征[J]. *地球学报*, 36(1): 60-66.
- 任坤, 潘晓东, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁, 甘明伟, 张华, 魏良帅. 2022. 氮氧同位素和水化学解析昭通盆地地下水硝酸盐来源及对环境的影响[J]. *中国地质*, 49(2): 409-419.
- 沈照理, 王焰新. 2002. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. *地球科学*, 2002, 27(2): 127-133.
- 宋玲玲, 田青, 李宗杰, 何靖. 2019. 昆仑山玉珠峰冰川冰雪融水水化学特征分析[J]. *环境化学*, 38(8): 1864-1871.
- 唐春雷, 郑秀清, 梁永平, 张发旺, 景泽. 2020. 山西太原晋祠—平泉水力联系及对晋祠泉复流的贡献[J].

中国地质, 47(6): 1755-1764.

王国灿, 李德威, 魏启荣. 2006. 1: 25 万不冻泉幅(I46 C001003)区域地质调查报告[R]. 武汉:中国地质大学, 272 -329.

王雨山, 尹德超, 王旭清, 祁晓凡, 夏雨波, 马稚桐, 张亮, 徐蓉楨. 2021.雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响[J]. 中国地质, 48(5): 1368-1381.

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌. 2021. 玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征[J]. 水文地质工程地质, 48(1): 18-26.

肖捷颖, 赵品, 李卫红. 2016. 塔里木河流域地表水水化学空间特征及控制因素研究[J]. 干旱区地理, 39(1): 33-40.

许乃政, 龚建师, 檀梦皎, 叶永红, 周锴镔, 朱春芳, 束龙仓, 孟丹. 2021. 淮河流域高砷地下水的形成演化过程及其环境健康风险[J]. 中国地质, 48(5): 1418-1428.

徐洪飞, 周训, 王蒙蒙, 刘宇, 吴艳秋, 桌琳扬. 2020. 云南泸水登埂温泉与玛布温泉形成特征及成因研究[J]. 中国地质, 47(6): 1739-1754.

张森琦, 曹福祥, 李旭峰, 李胜涛, 刁玉杰, 李颖智, 李亮. 2011. 青藏公路沿线不冻泉地区构造控水机理研究[J]. 吉林大学学报, 41: 253-258.

周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 程国栋. 2000. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社.