

庄思蝶,周晓成,李鹏飞,等.新疆塔什库尔干断裂带温泉环境地球化学特征[J].地球科学与环境学报,2022,44(4):699-712.
ZHUANG Si-die,ZHOU Xiao-cheng,LI Peng-fei,et al.Environmental Hydrogeochemical Characteristics of Hot Springs in Tashkurgan Fault Zone of Xinjiang,China[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2022,44(4):699-712.

DOI:10.19814/j.jese.2021.11028

新疆塔什库尔干断裂带温泉环境地球化学特征

庄思蝶^{1,2},周晓成^{2*},李鹏飞³,史浙明¹,赛买尔那吉·喀依木⁴,
朱成英⁴,颜玉聪²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083; 2. 中国地震局地震预测研究所
高压物理与地震科学联合实验室(中国地震局地震预测重点实验室),北京 100036; 3. 中国地质大学(北京)
地球科学与资源学院,北京 100083; 4. 新疆维吾尔自治区地震局,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:水文地球化学方法是研究温泉水成因和评价温泉水资源的有效手段。选用 2018 年 9 月在新疆塔什库尔干断裂带内采集的 6 个温泉水样,根据主量和微量元素浓度以及氢氧、铍同位素进行水化学特征分析,并利用 WQI 指数进行水质评估。结果表明:①温泉水整体呈碱性,矿化度平均值为 $1\ 036.13\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 等 3 种,富集因子说明区域变质角闪岩、碱性片麻岩和侵入花岗岩对微量元素含量特征起控制作用;②温泉水的氢氧同位素组成均分布在大气降水线附近,指示补给来源主要为大气降水,补给高程为 4.3~5.6 km,符合高原干旱—半干旱气候下的蒸发作用特征;循环深度为 1.4~2.1 km,属于断裂带控热控水的循环型温泉;③主量元素水质评价结果表明本次采集的温泉水样均不适合直接作为生活饮用水和农业用水, F^- 浓度超标;微量元素水质评价结果表明 WQI 指数介于 1 类和 3 类之间,整体水质较为原始,但公格尔和马尔洋温泉水样出现局部 B 和 As 浓度空间分布高值,部分温泉水 Li、Fe、F 浓度及温度达到了医疗热泉标准,具有理疗和保健功效。

关键词:水化学;氢氧同位素;铍同位素;热储温度;WQI 指数;温泉;水岩平衡;新疆

中图分类号:X142;P641.3

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)04-0699-14

Environmental Hydrogeochemical Characteristics of Hot Springs in Tashkurgan Fault Zone of Xinjiang, China

ZHUANG Si-die^{1,2}, ZHOU Xiao-cheng^{2*}, LI Peng-fei³, SHI Zhe-ming¹,
Saimai'ernaiji KAYIMU⁴, ZHU Cheng-ying⁴, YAN Yu-cong²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. United Laboratory of High-pressure Physics and Earthquake Science (Key Laboratory of Earthquake
Prediction), Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
4. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Hydrogeochemical method is effective for studying the genesis of hot spring water and

收稿日期:2021-11-13;修回日期:2022-01-14 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(CEAIEF2022030205,CEAIEF20220507,CEAIEF20220213,2021IEF0101,2021IEF1201);国家重点研发计划项目(2017YFC1500501-05,2019YFC1509203);
国家自然科学基金项目(41673106,42073063,4193000170)

作者简介:庄思蝶(1999-),女,河南漯河人,中国地质大学(北京)工学硕士研究生,E-mail:zhuangsidie@163.com。

* 通讯作者:周晓成(1978-),男,新疆玛纳斯人,研究员,理学博士,E-mail:zhouxiaocheng188@163.com。

evaluating hot spring water resources. Six hot spring water samples collected from the Tashkurgan fault zone in Xinjiang in September, 2018 were selected. According to the concentration of major and trace elements, as well as H-O and Sr isotopes, the characteristics of hydrogeochemistry were analyzed, and the comprehensive water quality index (WQI) was used for water quality assessment. The results show that ① the spring water is generally alkaline with an average TDS of $1\ 036.13\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; the chemical types of hot spring water are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, and $\text{SO}_4\text{-Na}$; the enrichment factor explains the control effect of regional metamorphic amphibolite, alkaline gneiss and intrusive granite on the characteristics of trace element content; ② the H-O isotopic compositions of spring water all distribute near the precipitation line, indicating that the recharge source is mainly meteoric water, and the recharge altitude is 4.3–5.6 km, which is consistent with the characteristics of evaporation in the arid and semi-arid climate of the plateau; the circulation depth is 1.4–2.1 km, which belongs to the circulating hot spring controlling heat and water in fault zone; ③ the water quality evaluation of major element shows that the collected hot spring water samples are not suitable for drinking water and agricultural water, and the F^- concentration in the hot spring exceeds the standard; the water quality evaluation of trace element shows that the water quality identification index between 1 and 3 classes, the overall water quality is relatively primitive, but the local spatial distributions of B and As concentrations of Gongge'er and Ma'eryang hot springs are high, Li, Fe and F concentrations and water temperature of part hot springs reach the standard for medical hot springs, have effect of physical therapy and health care. The research results provide data support for geothermal research in Tashkurgan fault zone, and are of great significance for sustainable development and protection of local hot spring resources.

Key words: hydrogeochemistry; H-O isotopes; Sr isotope; thermal storage temperature; water quality index; hot spring; water-rock equilibrium; Xinjiang

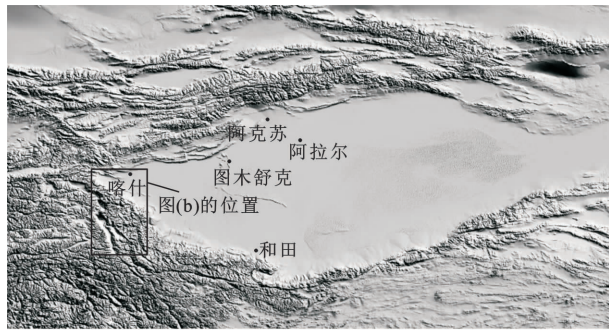
0 引言

人类活动的主要水源包括地下水、河流、水坝、池塘、人工挖掘的井和泉水^[1],然而人口的持续增长导致地下水大量枯竭、地表水污染和气候变化,淡水供应的可持续性受到严重威胁^[2]。温泉作为一种宝贵的地下热水资源,是一种可再生的清洁绿色能源,具有开发利用安全、稳定、清洁、高效的特点^[3]。温泉水中含有的特殊矿物组分具有防病治病等人体特殊功效,对人体健康具有很高的理(医)疗价值^[4]。尤其在干旱和半干旱地区,泉水被作为饮用、农业和家庭用水的主要来源^[5],但水资源有限和长期平均降水量的减少使得优质水资源紧缺现象更加突出^[6-7]。因此,非常有必要研究温泉水化学特征,进行温泉环境评价。

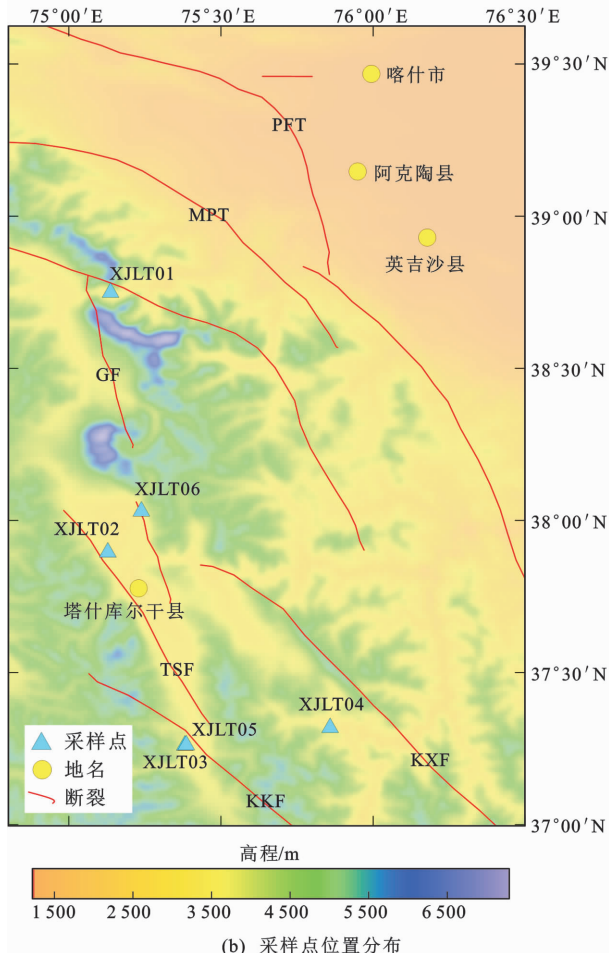
自1965年Horton首次提出综合水质指数(Water Quality Index, WQI)^[8]后,不同计算方式的WQI指数在世界不同地区得以应用^[9-11]。WQI指数是以特定用途和标准相关的各种水质参数为基

础,反映某一区域水质的总体效果评级^[12-13]。WQI指数如今被广泛应用于地下水体的水质评价。例如,印度很多地区利用WQI指数对温泉水质和人体健康的影响进行评估,确定部分温泉水饮用的适宜性,为当地泉水用于工业或农业灌溉提供可行性建议^[14-16];又如克什米尔河谷巴拉穆拉县和尼泊尔Jhimruk河流域针对泉水的污染威胁和气候变化对喜马拉雅生态系统的影响,利用WQI指数判定绝大多数泉水的水质属于优质至良好类别,对于人体健康和生态不构成危害,为该区域泉水资源保护提供了依据^[17-18]。此外,在伊拉克库尔德斯坦地区部分村庄、尼日利亚东部Ojoto省、土耳其安卡拉瓦盆地和斯里兰卡东部等水资源紧缺的干旱地区,WQI指数都为当地水资源的紧缺和污染情况以及生态和健康风险提供了科学用水依据^[1,19-20]。

新疆塔什库尔干断裂带处于帕米尔高原西昆仑构造结的重要转折部位,同时也是“一带一路”倡议重点发展区域(图1)。国内学者应用水文地球化学方法对新疆塔什库尔干断裂带地热地质构造条件及



(a) 新疆地形图



(b) 采样点位置分布

GF为公格尔拉张系;KKF为喀喇昆仑走滑断裂;KXF为喀拉喀什断裂;MPT为主帕米尔逆冲断裂;PFT为帕米尔前缘褶皱-逆冲断层带;TSF为塔什库尔干正断层

图1 新疆塔什库尔干断裂带温泉采样点位置

Fig. 1 Location of Sampling Points of Hot Springs in Tashkurgan Fault Zone of Xinjiang

特点、地热资源成因机理和热储存量方面已经做出较为详细的研究^[21-25],但由于地理条件艰苦(平均海拔大于3.5 km),当地温泉开发利用程度较低,居民大多将天然出露的温泉直接作为生活和农业用水,缺乏符合国家标准的水质评价。因此,本文根据国家标准《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)^[26]

和《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[27]规定的Ⅲ类标准。对新疆塔什库尔干断裂带温泉进行水质评价,并应用WQI指数等水文地球化学指标分析水化学特征,阐明形成机理,为当地温泉资源的合理利用提供科学依据,以期对当地经济建设和居民生活水平改善起到促进作用。

1 研究区概况

塔什库尔干断裂带位于青藏高原西北部,属于帕米尔构造区中东部喀喇昆仑构造带内,是青藏高原西部特角构造活动最为强烈的地区之一^[28-29]。塔什库尔干断裂带总体走向为NNW向,全长约190 km,由多条次级断层右阶斜列组合而成,以右行走滑为主要运动特征,为一条全新世活动断裂,控制着木吉至塔什库尔干5个断陷谷地的形成和演化^[30],呈向青藏高原逐渐增高的SN向带状变化趋势^[23]。研究区及其外围地层发育元古界(Pt)片麻岩、片岩、大理岩和石英岩,分布较广,是热储围岩的组成岩性,地层热蚀变现象普遍。侏罗系(J₁)和新近系(N)灰色碳酸盐岩及碎屑岩沉积主要岩性为泥岩、砂岩和砾岩,透水条件差,覆盖在热储上部,具备良好的盖层条件。第四系(Q)岩性为砂砾石,透水性和富水条件较好,喜山期侵入岩(γ₆、ξ₆)为花岗岩和正长岩,为高产热岩体^[23,31];该套侵入岩富含U、Th、K等长寿命放射性同位素,是研究区热水主要的热量来源,发育在塔什库尔干谷地西侧的广大山区^[23]。

研究区纬度范围为37.26°N~38.03°N,经度范围为75.13°E~75.86°E,位于新疆维吾尔自治区塔什库尔干塔吉克自治县和阿克陶县(图1)。该区域人口稀少,无工厂、农田和生活污染物排放。根据塔什库尔干气象站资料,该区属于帕米尔高原高寒气候区,日照时间长,多年平均气温3.3℃,平均地温7.9℃,温度变化剧烈导致蒸发强烈,多年平均降雨68.9 mm,最大蒸发量达2 629.0 mm,当地河流主要为冰川融水和大气降水补给^[32]。

2 样品采集、检测和评价方法

2.1 样品采集和检测方法

本次实验数据来自2018年9月在新疆维吾尔自治区塔什库尔干塔吉克自治县和阿克陶县沿塔什库尔干断裂带的天然温泉露头采集的6个温泉(公格尔、塔合曼、达布达尔、马尔洋、瓦恰、拜什库尔干)水样,共检测了12种离子和30种元素成分。样品

收集后在 30 d 内完成检测,水化学检测的详细数据列于表 1 和表 2。

温泉水样采用容量为 250 mL 的聚乙烯塑料瓶进行收集。在天然温泉露头处,用待采集的温泉水润洗取样瓶 3、4 次;润洗后的水不要倒回泉水中,防止造成人为误差;野外采集水样时,尽量紧临温泉在地表的出露源头。为保证温泉水样不受空气的影响,从水样收集开始至封闭瓶口结束,需要始终保持采样瓶的瓶口完全浸没于水面以下。向用于检测阳离子的采样瓶中加入分析纯级的 HNO_3 溶液,直至水样的 pH 值小于 2;向用于检测 SiO_2 的采样瓶中加入超纯水稀释 10 倍,目的在于防止水中微生物的分解作用和产生沉淀;漂浮物及泉水中的固体物质不属于悬浮物,采样时应当避免。将采集的水样放置于实验室 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 环境中保存直至分析。温泉水化学参数中的温度、电导率、pH 值采用 Wagtech CP1000 便携式水质测试套件设备在野外检测,温度和电导率传感器探头的测量精度分别为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.0\text{ }\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$,pH 值精确度为 0.01。

所采集的温泉水样中的微量元素浓度采用 Element 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定^[33],检测工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。温泉水样中的主量元素浓度使用 Dionex ICS-900 离子色谱仪及 AS40 自动进样器进行测定,检测限为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[34],检测工作在中国地震局地震预测重点实验室完成。温泉水样中检测的阳离子指标为 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度,阴离子指标为 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 和 Br^- 浓度, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 浓度使用 ZDJ-3D 型电位滴定仪通过标准滴定程序测量,滴定所用的 HCl 浓度为 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为了校准色谱,在测量每批水样之前测量标准样品,测量偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内。离子平衡(i_b)计算公式为

$$i_b = \frac{\sum m(A) - \sum m(B)}{\sum m(A) \sum m(B) \times 0.5} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m(A)$ 表示阳离子 A 的浓度; $m(B)$ 表示阴离子 B 的浓度;阴、阳离子的测量误差均小于 5%。

氢氧同位素分析采用气体同位素质谱仪

表 1 温泉水样主量元素水化学参数统计结果

Table 1 Statistical Results of Water Chemical Parameters of Major Elements of Hot Spring Samples

样品编号	XJLT01	XJLT02	XJLT03	XJLT04	XJLT05	XJLT06
温泉名称	公格尔	塔合曼	达布达尔	马尔洋	瓦恰	拜什库尔干
时间	2018-09	2018-09	2018-09	2018-09	2018-09	2018-09
溶解性总固体/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	662.28	445.91	1 796.30	2 242.23	686.20	383.83
温度/ $^\circ\text{C}$	34.0	63.0	58.6	50.0	33.5	36.5
pH 值	8.40	7.98	9.08	7.54	7.37	7.30
电导率/($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	708	685	2 572	2 672	1 144	712
$m(\text{Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	99.19	128.86	465.41	360.55	187.10	107.43
$m(\text{K}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	10.55	4.01	49.53	37.44	3.06	2.56
$m(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	15.15	0.61	9.10	12.83	0.59	0.19
$m(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95.43	34.49	58.12	217.37	19.47	18.04
$m(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	25.17	27.58	171.94	93.80	75.10	46.02
$m(\text{NO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2.66	0.84	—	1.98	—	1.36
$m(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	113.98	148.17	334.07	1 358.54	342.13	165.67
$m(\text{CO}_3^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	—	20.00	38.00	—	37.00	—
$m(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	592.00	136.00	1 321.00	311.00	40.00	70.00
$m(\text{F}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	3.57	13.15	7.12	3.77	1.76	7.50
$m(\text{Br}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	—	—	0.20	—	—	—
$\delta^{18}\text{O}$ 值/ ‰	-10.2	-12.1	-9.7	-10.6	-9.1	-9.6
δD 值/ ‰	-75.4	-86.5	-72.6	-69.4	-63.3	-70.0
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值	0.715 252	0.709 436	0.717 837	0.709 118	0.713 585	0.708 779
水化学类型	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	$\text{SO}_4\text{-Na}$	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	$\text{SO}_4\text{-Na}$	$\text{SO}_4\text{-Na}$	$\text{SO}_4\text{-Na}$
补给高程/km	4.5	5.6	4.8	4.3	4.6	4.5
海拔/m	3 018	3 314	3 516	2 570	3 543	3 221

注: $m(\cdot)$ 为离子或元素浓度;“—”表示超出检出限。

表2 温泉水样微量元素浓度分析结果

Table 2 Analysis Results of Trace Element Concentrations of Hot Spring Samples

样品编号	XJLT01	XJLT02	XJLT03	XJLT04	XJLT05	XJLT06
温泉名称	公格尔	塔合曼	达布达尔	马尔洋	瓦恰	拜什库尔干
<i>m</i> (Li)	504.00	196.00	2 249.00	418.00	3.75	71.90
<i>m</i> (Be)	0.62	0.53	3.22	0.58	0.03	0.03
<i>m</i> (Ti)	8.90	10.90	13.00	13.40	7.31	6.63
<i>m</i> (V)	0.81	0.70	2.34	4.10	1.24	1.82
<i>m</i> (Mn)	0.26	7.71	108.00	1.45	0.67	1.85
<i>m</i> (Cr)	0.36	0.25	0.57	0.53	0.54	0.64
<i>m</i> (Co)	0.17	0.04	0.18	0.40	0.05	0.06
<i>m</i> (Ni)	5.37	0.59	2.84	10.40	0.90	1.07
<i>m</i> (Cu)	1.89	1.93	5.27	4.15	2.34	2.52
<i>m</i> (Zn)	2.40	2.74	10.40	4.65	3.22	5.15
<i>m</i> (Mo)	13.50	5.39	0.26	5.98	9.11	56.10
<i>m</i> (Cd)	0.04	0.02	0.01	0.05	0.02	0.09
<i>m</i> (Sb)	16.90	0.92	1.11	0.70	0.81	0.58
<i>m</i> (Ba)	32.50	6.66	85.20	14.00	4.29	3.41
<i>m</i> (Tl)	0.01	0.01	0.44	0.11	0.01	0.01
<i>m</i> (Pb)	0.23	0.08	0.47	0.09	5.78	0.19
<i>m</i> (Th)	0.03	0.07	0.06	0.07	0.02	0.06
<i>m</i> (U)	19.00	0.23	0.16	3.54	0.05	0.05
<i>m</i> (Sr)	917.00	957.00	2 061.00	4 308.00	91.00	249.00
<i>m</i> (Ag)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
<i>m</i> (B)	5 049.00	205.00	5 133.00	768.00	399.00	1 020.00
<i>m</i> (Sn)	0.06	0.11	0.07	0.08	0.06	0.11
<i>m</i> (Fe)	1.62	4.24	10.90	4.23	3.29	11.70
<i>m</i> (Al)	5.37	17.20	58.00	26.40	20.50	35.50
<i>m</i> (As)	235.00	—	—	—	16.60	51.40
<i>m</i> (Hg)	—	—	—	—	—	—
<i>m</i> (Se)	—	—	—	—	—	—

注:元素浓度单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;“—”表示超出检出限。

(MAT253), δD 分析精度优于 $\pm 1\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 分析精度优于 $\pm 0.2\%$ ^[35]。As、Hg、Se 等 3 种微量元素采用 ASF2202 原子荧光光度计测量, 锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值采用 Phoenix 热表面电离质谱仪测定, 误差范围为 $(1.5 \sim 1.9) \times 10^{-5}$, SiO_2 浓度检测仪器为电感耦合等离子体发射光谱仪 (Optima-5300DV)^[36]。

2.2 样品评价方法

地下水质量的综合评价是地下水资源保护和管理中不可缺少的部分, 也是采取相应防御措施及制定科学有效治理方案的必要前提^[37]。综合水质指数 (WQI) 提供了一个有效的地下水质量评价综合模型, 将大量水质数据指标表示为一个单一的数字^[38-41], 最早由 Horton 于 1965 年开发^[8]。WQI 指

数可以用于评估多种有害元素对生态系统的总体影响, 被广泛应用于地表水和地下水的水质评价^[42-43]。

WQI 指数 (I_{WQI}) 权重公式为

$$I_{\text{WQI}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i / Q_i \quad (2)$$

式中: C_i 是水中检测到的第 i 种参评元素浓度; Q_i 是第 i 种参评元素的水质标准极限值; n 为参评元素数量。

WQI 指数包括 4 类: 1 类 (几乎未受污染), $I_{\text{WQI}} \leq 1$; 2 类 (轻度污染), $1 < I_{\text{WQI}} \leq 2$; 3 类 (中度污染), $2 < I_{\text{WQI}} \leq 3$; 4 类 (重度污染), $I_{\text{WQI}} > 3$ ^[21]。此外, 为了消除个别元素因空间分布异常影响总体评价结果, 将参评元素在采样点的浓度应用单因子水质指数分别做出评价, 以便于突出单一元素对总体结果的贡献。单因子水质指数根据水环境功能区将其分为 I ~ V 类污染等级, 污染程度随等级指示递增, 具体评价方法参考文献^[44]和^[45]。本次主量和微量元素水质评价均参照国家标准《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)^[26]和《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[27]规定的 III 类标准。III 类标准的含义为地下水化学组分含量中等, 主要适用于集中式饮用水水源及工农业用水。本文按照“从优不从劣”的评价原则, 选择标准水质下限值。

3 结果分析

3.1 水化学离子特征

新疆塔什库尔干断裂带温泉水样的出露温度为 $33.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 63.0 \text{ }^\circ\text{C}$; pH 值为 $7.3 \sim 9.0$, 整体为碱性; 电导率为 $685 \sim 2\ 672 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$; 溶解性总固体 (TDS) 为 $383.83 \sim 2\ 242.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $1\ 036.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其中, 达布达尔温泉水样 (样品 XJLT03) 和马尔洋温泉水样 (样品 XJLT04) 属于微咸水, 其余水样为淡水。阳离子以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主。 F^- 浓度普遍偏高, 平均值为 $6.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Br^- 和硝酸盐浓度较低, 全部或大部分在检测限以下。水样 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别 $-86.5\% \sim -63.3\%$ 、 $-12.1\% \sim -9.1\%$, 平均值分别为 -72.9% 和 -10.2% , 各个采样点之间差值不明显。 SiO_2 浓度为 $20.0 \sim 53.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $34.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.708\ 779 \sim 0.717\ 837$, 平均值为 $0.712\ 335$ (表 1)。

水样微量元素浓度较低, 但个别温泉水样 Li、Sr、B 浓度出现高值: 达布达尔温泉水样 Li 浓度为 $2\ 249.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Sr 浓度为 $2\ 061.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, B

浓度为 $5\ 133.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 马尔洋温泉水样 Sr 浓度为 $4\ 308.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 公格尔温泉水样 B 浓度为 $5\ 049.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Hg、Se 浓度很低,均在检测限以下(表 2)。

3.2 水质评价结果

3.2.1 主量元素

主量元素水质评价结果表明,本次采集的温泉水样均不适合作为生活饮用水和农业用水。溶解性总固体普遍偏高,达布达尔温泉和马尔洋温泉水样为微咸水,且达布达尔温泉水样 pH 值为 9.08,超出《生活饮用水卫生标准》规定的Ⅲ类标准(pH 值为 6.5~8.5)。值得注意的是,温泉水样氟化物均超标,长期饮用会对人体造成潜在危害(表 3)。

3.2.2 微量元素

选取温泉水样中的 20 种与人体健康密切相关的微量元素,采用 WQI 指数进行环境水质评价,评价结果见图 2。大多数温泉水样 WQI 指数均在 3 类以下,但部分元素存在空间异常,WQI 指数在 1 类到 3 类之间。

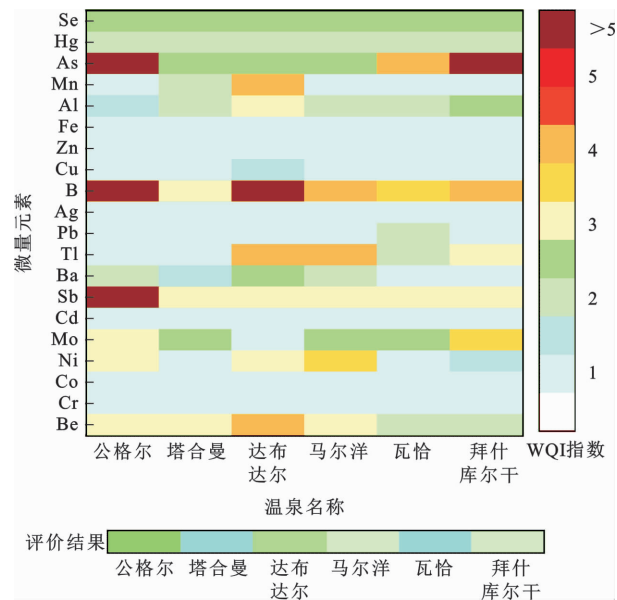


图 2 WQI 指数风险评价图

Fig. 2 Risk Assessment Chart of WQI Index

公格尔、瓦恰和拜什库尔干温泉水样 As 浓度均超出《生活饮用水卫生标准》规定的Ⅲ类标准(As 浓度为 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),其中公格尔和拜什库尔干温泉水样分别达到 $235.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $51.40\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,分别超标 23 倍和 5 倍。所有水样 Hg 和 Pb 浓度均在Ⅲ类标准(Hg 和 Pb 浓度分别为 $1\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)以内,说明这两种元素对研究区居民饮水不构成危害。公格尔和达布达尔温泉水样 B

浓度超出Ⅲ类标准(B 浓度为 $500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)10 倍以上,分别为 $5\ 049.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\ 133.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。仅有达布达尔温泉水样 Ti 浓度超过Ⅲ类标准(Ti 浓度为 $0.1\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),为 $0.44\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其余各水样均在Ⅲ类标准以内。公格尔温泉水样 Sb 浓度超出Ⅲ类标准(Sb 浓度为 $5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),为 $16.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。除以上元素外,其余微量元素浓度均在Ⅲ类标准以内。

4 讨论

4.1 温泉水的主要来源

研究温泉水氢氧同位素特征可以判断补给来源和计算补给高程,确定补给条件与大气降水、地下水之间的联系程度,进而了解温泉水的循环途径和演化历史^[46]。根据新疆塔什库尔干断裂地理位置,采用新疆大气降水线 $\delta(D) = 7.3\delta(^{18}\text{O}) + 3.5$ ^[47] 近似代表当地大气降水线,并与全球大气降水线 $\delta(D) = 8\delta(^{18}\text{O}) + 10$ ^[48] 进行比较(图 3)。其中, $\delta(D)$ 为 δD 值; $\delta(^{18}\text{O})$ 为 $\delta^{18}\text{O}$ 值。从图 3 可以看出,采样点基本都分布在新疆大气降水线附近,表明温泉水补给来源为当地大气降水。

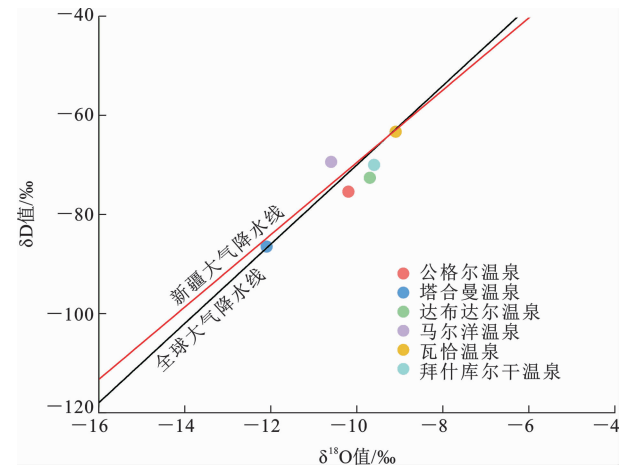


图 3 温泉水样 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解

Fig. 3 Diagram of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ of Hot Spring Samples

温泉水样 $\delta^{18}\text{O}$ 漂移现象不明显,推断为蒸发作用所致。因为研究区处于高原干旱一半干旱气候,蒸发量较大,远离海洋,离岸效应对大气降水线的偏离影响微弱。马尔洋温泉分布在大气降水线左侧,热水中可能存在断裂带深部 CO_2 的加入或冰川融雪补给^[31]。大气降水的同位素效应与温度、纬度、离岸远近、区域和高程等因素有着密切关系^[49],因此,根据 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值与高程的关系可以计算地下热水的补给区高程(H)。其表达式为

$$H = (\delta(G) - \delta(P)) / k + h_1 \quad (3)$$

表3 温泉水样主量元素水质评价结果

Table 3 Results of Water Quality Evaluation for Major Elements of Hot Spring Samples

评价指标	Ⅲ级标准/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同温泉水样水质评价结果					
		公格尔	塔合曼	达布达尔	马尔洋	瓦恰	拜什库尔干
溶解性总固体	$\leq 1\,000.0$	Ⅲ类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅴ类	Ⅲ类	Ⅱ类
总硬度(以 CaCO_3 计)	≤ 450.0	Ⅲ类	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅴ类	Ⅰ类	Ⅰ类
硫酸盐浓度	≤ 250.0	Ⅱ类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅴ类	Ⅳ类	Ⅲ类
氯化物浓度	≤ 250.0	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅲ类	Ⅱ类	Ⅱ类	Ⅰ类
Na^+ 浓度	≤ 200.0	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅳ类	Ⅳ类	Ⅲ类	Ⅱ类
硝酸盐(以 N 计)浓度	≤ 20.0	Ⅱ类	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅰ类
氟化物浓度	≤ 1.0	Ⅴ类	Ⅴ类	Ⅴ类	Ⅴ类	Ⅳ类	Ⅴ类

式中: $\delta(\text{G})$ 为水样的 δD 值或 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta(\text{P})$ 为大气降水的 δD 值或 $\delta^{18}\text{O}$ 值; h_1 为取样点标高; k 为大气降水氢或氧同位素梯度,采用全球平均值(每百米 -0.25‰);大气降水氢氧同位素组成采用新疆和田地区大气降水同位素加权平均值, δD 值为 -41‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -6.4‰ [50-51]。

根据式(3)计算塔什库尔干地区地下热水的补给高程见表1。平均补给高程相对较高,大于 4.7 km 。除马尔洋温泉外,大部分温泉水样位于全球大气降水线下方,这与塔什库尔干地区高原干旱一半干旱气候导致蒸发作用强烈的特点相吻合,且研究区温泉水样 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 值大于 1, $\gamma\text{Cl}/\gamma\text{Br}$ 值大于 300,属于循环型地下热水,再次说明补给来源为大气降水 [52]。

4.2 温泉水中主量和微量元素的来源

4.2.1 主量元素来源

研究区水岩反应主要由碳酸盐岩和硅酸盐岩地层的溶滤作用主导。温泉水沿着裂隙上升过程中,受围岩溶滤作用或不同程度未饱和冷水混合影响,会导致主要离子水化学类型的改变 [53]。利用舒卡列夫分类法进行分类,温泉水化学类型主要有 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 等 3 种,总体水化学特征简单,大多数离子与温度、溶解性总固体成正相关关系。

根据温泉水样化学组分数据,绘制 Piper 图(图4)。从图4可以看出:在阳离子中, Na^+ 和 K^+ 占主导地位;在阴离子中,公格尔和达布达尔温泉主要以碳酸盐和重碳酸盐为主,马尔洋、塔合曼、瓦恰和拜什库尔干温泉则倾向于 SO_4 端元;除达布达尔温泉水样外,其余温泉水样中的 Cl^- 很少, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 占主导地位,表明该地区受碳酸盐岩和硅酸盐岩控制,溶滤作用尚未进行到末期阶段,或者在温泉上升过程中出现了未饱和水的混合作用。

公格尔温泉水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。所在地层出露

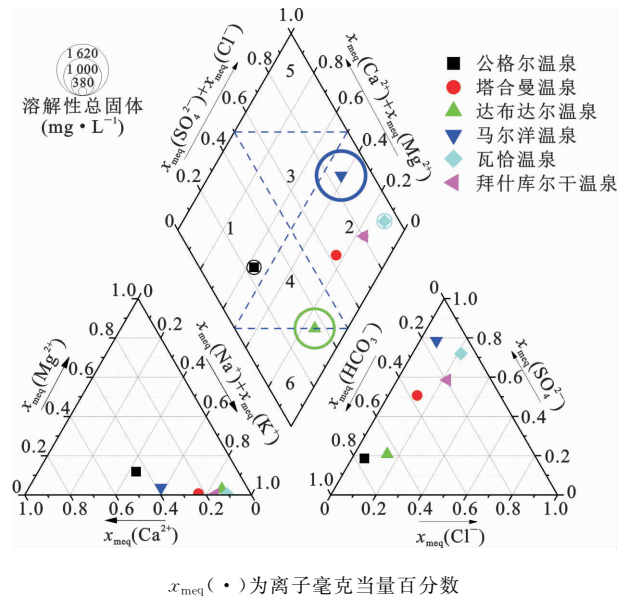


图4 温泉水样水化学 Piper 图

Fig. 4 Piper Diagram of Hydrogeochemistry of Hot Spring Samples

元古界片岩和片麻岩,在 CO_2 和 H_2O 的参与下,经过溶滤作用使岩石中钙碱性矿物发生水解,在公格尔形成以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主的地下热水。

达布达尔温泉水为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。所在地层出露侏罗系一新近系灰色碳酸盐岩-碎屑岩沉积,岩性以泥岩、砂岩为主,矿化度、溶解性总固体较高,以 Na^+ 和 HCO_3^- 为主,反映径流时间较长、水文循环程度高的特征。

塔合曼、马尔洋、瓦恰、拜什库尔干温泉水为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型。所在地层出露角闪岩或斜长片麻岩以及喜山期侵入花岗岩和正长岩,发育在塔什库尔干谷地西侧的广大山区;变质片麻岩中的黄铁矿矿物经过溶滤作用进入水体中,向上至浅部含水层后被氧化形成大量 SO_4^{2-} 。

总体上看,不同温泉中的离子种类相同,但浓度相差较大。其总体特征是碱性离子(Na^+ 和 K^+)的优势度高于碱土离子(Ca^{2+} 和 Mg^{2+}),强酸离子

(SO_4^{2-})优势度大于弱酸离子(HCO_3^-)。其中, Cl^- 和 NO_3^- 浓度较低,没有以 Cl^- 为主的水化学类型,同时也表现出低 Mg^{2+} 的特点,而 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 浓度表现出高值。塔什库尔干断裂带温泉由于地下水循回路径较长,溶滤作用充分,所以水岩反应进行到后期呈现出硫酸盐浓度高而氯化物浓度偏低的特点。区域内变质片麻岩和角闪石中的云母矿物提供了 F^- 来源,导致研究区温泉 F^- 浓度普遍偏高。依据中国医疗矿泉分类修订方案(2017年)和《地热资源地质勘查规范》(GB 11615—2010)^[54-55],F、Fe、Li等3种一般性微量元素浓度达到了医疗泉水标准。除瓦恰温泉微量元素浓度略低外,其他温泉均属于氟水(F^- 浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),达布达尔温泉属于矿化铁水(Fe浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。因此,所有温泉均为含F的医疗热泉,达布达尔温泉为含Li、Fe和F的医疗热泉。

4.2.2 微量元素来源

微量元素在天然水中的浓度很低,自然水域(如河流和湖泊)中为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但是重金属和有毒元素(如As和Hg)对于人类健康起着重要影响^[56]。研究区温泉大多数微量元素浓度较低,仅少量元素呈现高值。为了判断研究区温泉水微量元素的来源,常用富集因子(EF)定性比较^[57]。其计算方法为

$$I_i = (C_i/C_R)_w / (C_i/C_R)_r \quad (4)$$

式中: I_i 为元素*i*的富集因子; C_R 为选定的参比元素R的浓度; C_i 为样品中元素*i*的浓度;下标w表示水样;下标r表示岩石。

采用塔什库尔干地区微量元素浓度平均值作为参考背景^[58-59],使用Ti浓度对微量元素浓度进行归一化处理,计算得到研究区微量元素富集因子(图5)。从图5可以看出,塔什库尔干地区温泉水中Sr、Al明显富集,Ba、Fe、B相对富集,元素亏损现象不明显。

区域深大断裂带循环型温泉中的微量元素浓度特征与该地区岩石地球化学背景值、元素物化特性、地下水水层物理化学条件以及水岩相互作用等密切相关^[60]。Sr和Ba属于大离子亲石元素,往往与生热元素Th、U共同富集^[61],采样点区域分布元古界角闪岩、斜长石片麻岩,且伴有喜山期花岗岩和正长岩侵入^[24],大量角闪石在富水条件下分离结晶后导致 SiO_2 浓度升高,使角闪石变质杂岩基底呈现出富集Ba的特点^[58,62]。Cu、Zn以及其他重金属硫化物矿物通常与Hg、Pb一起沉积^[22],由于温泉水在上

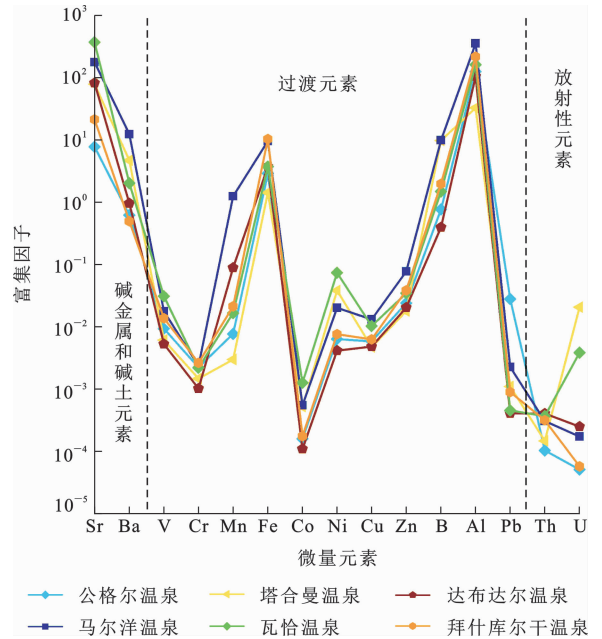


图5 温泉水样富集因子分布

Fig. 5 Distribution of Enrichment Coefficient of Hot Spring Samples

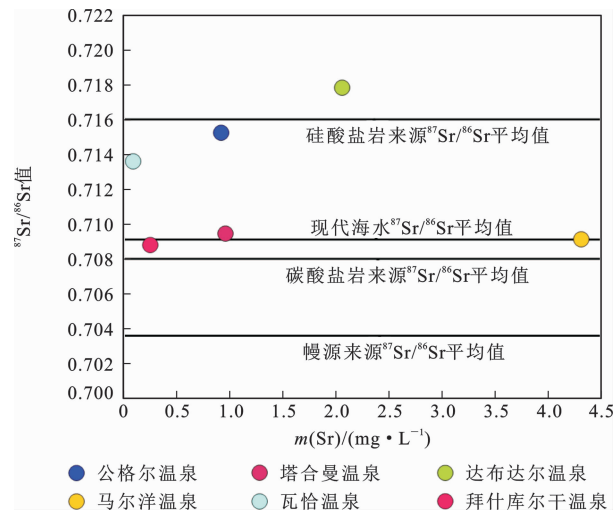
升过程中和浅部含水层的冷水发生混合作用,此类重金属元素析出沉淀,所以富集因子分布图(图5)中没有出现此类离子的明显富集。过渡元素Fe浓度偏高,平均值为 $6.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,研究区碱性正长岩源区存在的富铁岩石圈地幔岩浆和富镁铝软流圈地幔岩浆混合,发生地幔交代作用,从而引起部分熔融。富霓辉石和金云母矿物也是该类碱性源区固有特征,成为Fe富集的主要物质来源。

B平均浓度高达 $2\ 095.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由于亲石的活泼化学性质,B在岩浆喷气和温泉水溶滤作用以及其他各成岩阶段均可参与,变质岩体中的角闪石斜长片麻岩赋存大量硼铁矿物质和硼镁矿物。B由于化学性质活泼且与放射性元素Th、U等紧密共生,在水岩反应过程中,当温度、pH值、氧化-还原电位等水文地球化学条件改变时,易以硼酸盐的形式经溶滤作用通过水岩交换进入热水系统中,导致研究区B浓度普遍偏高。

As是无色无味的非金属元素,已被证实非常低的浓度($10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)下有毒^[63]。公格尔温泉水样As超出饮用水标准23倍,浓度达到 $235.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,拜什库尔干温泉为 $51.40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,超标5倍。天然热泉中的As主要来源于含砷硫化物的氧化^[64],当温泉沿断裂带上升至浅部含水层直至出露到地表后,在 O_2 的参与下由还原环境转变为氧化环境,区内变质片麻岩中富砷黄铁矿的As进入到

水体中并产生大量 Fe^{3+} , 导致该区域部分温泉的 As 浓度高于标准值。

此外, Sr 浓度在研究区温泉采样点之间相差较大, 最高差值达 47.3 倍。作为水岩相互作用过程中的有力天然示踪剂^[65-66], 将温泉水样中的锶同位素比值与不同来源锶同位素标准值作比较, 所有温泉点锶同位素比值均在碳酸盐岩与壳源硅铝质来源之间(图 6)。塔合曼、马尔洋和拜什库尔干温泉水样 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值接近现代海水平均值, 围岩主要为侏罗系和新近系碳酸盐岩沉积物, 说明地热流体在大气降水深循环过程中与壳源深部富集 Sr 的岩石相互作用形成。公格尔温泉水样 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值接近于碳酸盐岩来源 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值, 在热水循环过程中主要受到元古界变质围岩的溶滤作用的影响。



$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值参照线引自文献^[3]

图 6 温泉水样 $m(\text{Sr})$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解

Fig. 6 Relationship Between Strontium Concentration and Strontium Isotope of Hot Spring Samples

前人研究认为, 过滤后水样的元素浓度尽管与真实值相似, 但仍然会被低估, 当温泉的 pH 值和氧化-还原电位变为碱性时, 有害微量元素会重新回到水体中, 进一步威胁人类健康^[67]。因此, 研究区富集的微量元素 B、As、Sr 浓度可能会比水样测得浓度更高, 从而对人体危害可能更大。

4.3 温泉水的循环深度

循环深度是控制主量元素和微量元素的重要因素。塔什库尔干断裂带属于区域控热控水断裂带, 为温泉提供了良好的热储通道^[23]。大气降水经过入渗补给后, 在地下深部循环加热上升至地表形成热水, 计算热储温度和循环深度可以更好地了解温泉水岩反应程度和循环途径。根据 Na-K-Mg 三角图解判断所有温泉水样均分布在水岩反应的完全平

衡线以下(图 7), 说明所有水样经历了浅层冷水的混合作用^[23], 导致热储系统内部矿物未达到平衡^[68]。采用石英-无蒸汽损失 SiO_2 地热温标($<300^\circ\text{C}$, 符合精度需求)计算热储温度和热水循环深度^[69-70]。热储温度(T)计算式为

$$T = \frac{1309}{5.19 - \lg m(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad (5)$$

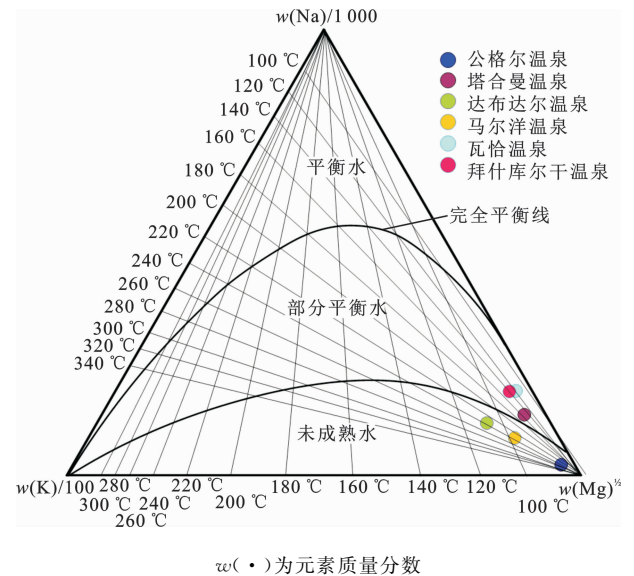


图 7 温泉水样 Na-K-Mg 三角图解

Fig. 7 Na-K-Mg Triangle Plot of Hot Spring Samples

SiO_2 平均浓度为 $34.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均温度为 41.6°C , 计算得出温泉热储温度为 $63.4^\circ\text{C} \sim 105.4^\circ\text{C}$ 。主要热量来源于侵入高热花岗岩、正长岩与其内部的放射性同位素^[22]。循环深度(H)计算式为

$$H = (T - T_0) / g + h_2 \quad (6)$$

式中: T_0 为研究区平均气温, 取多年平均气温 3.3°C ; g 为地温梯度, 取每百米 5.59°C ; h_2 为常温带深度, 取 20 m ^[71]。

根据式(6)计算得出研究区热水循环深度为 $1.4 \sim 2.1 \text{ km}$, 平均循环深度为 1.7 km , 计算结果见表 5。

表 5 温泉水样热储温度和循环深度计算结果

Table 5 Calculated Results of the Thermal Storage Temperature and Cycle Depth of Hot Spring Samples

样品编号	温泉名称	SiO_2 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	热储温度/ $^\circ\text{C}$	循环深度/ km
XJLT01	公格尔	22.4	67.9	1.4
XJLT02	塔合曼	36.6	87.7	1.8
XJLT03	达布达尔	53.1	105.4	2.1
XJLT04	马尔洋	51.7	103.2	2.1
XJLT05	瓦恰	20.5	64.4	1.6
XJLT06	拜什库尔干	20.0	63.5	1.4

总体上看,塔什库尔干断裂带温泉来源于当地大气降水,入渗地表后沿断裂带进入含水层,通过溶滤作用与围岩进行离子交换,深部加热后在压力差和密度差的作用下上涌至地表形成天然泉水露头。由于泉水在上升过程中被浅部冷水混合,导致流体内部系统并未达到平衡。

4.4 温泉利用建议

根据研究区水样基本化学组分和微量元素浓度分析结果,除瓦恰温泉外,其他温泉根据《地热资源地质勘查规范》规定的 F^- 浓度标准($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)可以命名为氟水,属氟理疗热矿水;WQI 指数表明,研究区温泉总体水质介于 1 类至 3 类之间,整体水质较为原始,受人类活动影响小,温泉溶解性总固体普遍偏高,其中达布达尔和马尔洋温泉为微咸水。各温泉中的 Li、B、As、Sb、Ti、Mn、Be 浓度出现不同程度的超标情况, F^- 浓度则均超出《地下水质量标准》规定的 III 类标准,浓度为标准值上限的几倍,不宜直接作为生活用水以及农业用水。

根据温泉温度、酸碱度和人体所需的微量元素进行分析,塔合曼、达布达尔、马尔洋温泉的天然露头温度超过 $42 \text{ }^\circ\text{C}$,能刺激交感神经使人精神放松,同时增加能量消耗,可以用来辅助治疗没有并发症的糖尿病患者及肥胖人群,且对代偿不全的心脏病患者具有良好的理疗作用^[52]。按照热泉资源的温度分级,公格尔、塔合曼、瓦恰和拜什库尔干温泉的热储温度符合《地热资源地质勘查规范》规定的低温热泉标准($60 \text{ }^\circ\text{C} \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$),达布达尔和马尔洋温泉符合中温热泉标准($90 \text{ }^\circ\text{C} \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$),所有温泉均可以用作洗浴、采暖;达布达尔、马尔洋温泉还可用作发电。

天然泉水含有的多种微量元素对于人体具有特定的医疗价值和健康意义。在研究区温泉微量组分中, F^- 、B、Li 浓度达到对人体健康有益标准。达布达尔温泉水样 Li 浓度为 $2.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超过《地热资源地质勘查规范》规定的有医疗价值浓度($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);所有温泉 F^- 浓度均达到有医疗价值浓度($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);公格尔、达布达尔和拜什库尔干温泉水样 B 浓度超过有医疗价值浓度($1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且公格尔和达布达尔温泉达到《地热资源地质勘查规范》规定的 B 浓度标准($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

温泉水中携带 Li、Fe、F 等特征离子组分对人体具有保健理疗等特殊功效,但部分温泉中 B、As 等有害元素浓度超标,在温泉水的开发利用中应当引起注意。研究区整体水质较为原始,周围目前没

有工厂和人为排泄污染源,建议在开发利用温泉时采取管理措施来保持和提高水质。

5 结 语

(1)新疆塔什库尔干断裂带 6 个温泉水样整体呈碱性,其中达布达尔和马尔洋温泉属于微咸水,其余 4 个温泉为淡水。水样的水化学类型简单,主要由 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 组成,大多数离子浓度与温度、溶解性总固体成正相关关系,可分为 HCO_3^- -Ca、 HCO_3^- -Na、 SO_4 -Na 等 3 种类型,Cl、Br 和硝酸盐浓度较低, F^- 浓度均呈现出高值。富集因子显示温泉水中 Sr、Al 明显富集,Ba、Fe、B 相对富集,元素亏损现象不明显,说明区域变质角闪岩、碱性片麻岩和侵入花岗岩对微量元素浓度特征起控制作用。

(2)塔什库尔干断裂带温泉热储温度为 $63.4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 105.4 \text{ }^\circ\text{C}$,循环深度为 $1.1 \sim 1.8 \text{ km}$,属于区域热控断裂中的循环型温泉。温泉水样的锶同位素比值为 $0.708\ 779 \sim 0.717\ 837$,平均值为 $0.712\ 335$,均在碳酸盐岩与壳源硅铝质来源之间,说明研究区温泉水主要来自于壳源物质,地热流体在大气降水深循环过程中与壳源富锶岩石相互作用形成。温泉的补给来源主要为大气降水,补给高程为 $4.3 \sim 5.6 \text{ km}$ 。氢氧同位素分析结果表明,研究区温泉水具有高原干旱一半干旱气候下的蒸发作用特征。

(3)主量元素水质评价结果表明,本次采集的温泉水样均不适合直接作为生活饮用水和农业用水,所有温泉水样的 F^- 浓度均超出《地下水质量标准》规定的 III 类标准,浓度为标准值上限的几倍。微量元素水质 WQI 指数显示温泉水样共有 6 种元素超出标准值,分别为 Be、Sb、Ti、B、Mn、As;其余微量元素浓度在 I 类至 III 类水质之间,浓度未超出《生活饮用水卫生标准》,WQI 指数表明温泉总体水质介于 1 类至 3 类之间,整体水质较为原始,受人类活动影响小,但公格尔和马尔洋温泉中的 B 和 As 浓度出现高值。部分温泉水 Li、Fe、F 浓度及温度达到了《地热资源地质勘查规范》规定的医疗热泉标准,具有理疗和保健功效。

参 考 文 献 :

References :

- [1] AMEEN H A. Spring Water Quality Assessment Using Water Quality Index in Villages of Barwari Bala, Duhok, Kurdistan Region, Iraq[J]. Applied Water Science, 2019, 9: 176.

- [2] POUDEL D D, DUEX T W. Vanishing Springs in Nepalese Mountains: Assessment of Water Sources, Farmers' Perceptions, and Climate Change Adaptation [J]. *Mountain Research and Development*, 2017, 37: 35-46.
- [3] 李鹭. 江西省宜春地区温泉水文地球化学特征研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
LI Lu. Hydrogeochemistry of Hot Springs in Yichun Area of Jiangxi Province [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2018.
- [4] 李明礼. 西藏典型理疗地热矿泉的成因及功效研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
LI Ming-li. Genesis and Efficacy of the Typical Therapy Geothermal Mineral Spring, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [5] TRIPATHI D K, PANDEY D G, JAIN C K. Physico-chemical Analysis of Selected Springs Water Samples of Dehradun City, Uttarakhand, India [J]. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, 2015, 2(5): 99-103.
- [6] BARAKAT A, MEDDAH R, AFDALI M, et al. Physicochemical and Microbial Assessment of Spring Water Quality for Drinking Supply in Piedmont of Béni-Mellal Atlas (Morocco) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 104: 39-46.
- [7] MISHRA A K, SINGH V P. A Review of Drought Concepts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [8] HORTON R K. An Index Number System for Rating Water Quality [J]. *Journal of Water Pollution*, 1965, 37(3): 300-306.
- [9] BROWN R M, MC CLELLAND N I, DEININGER R A, et al. A Water Quality Index: Do We Dare? [J]. *Water and Sewage Works*, 1970, 117(10): 339-343.
- [10] REZA R, SINGH G. Heavy Metal Contamination and Its Indexing Approach for River Water [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2010, 7(4): 785-792.
- [11] SHIGUT D A, LIKNEW G, IRGE D D, et al. Assessment of Physico-chemical Quality of Borehole and Spring Water Sources Supplied to Robe Town, Oromia Region, Ethiopia [J]. *Applied Water Science*, 2017, 7: 155-164.
- [12] KAVIARASAN M, GEETHA P, SOMAN K P. GIS-based Ground Water Quality Monitoring in Thiruvananthapuram District, Tamil Nadu, India [C] // SURESH L P, PANIGRAHI B K. Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems. Dordrecht: Springer, 2016: 685-700.
- [13] ETIM E E, ODOH R, ITODO A U, et al. Water Quality Index for the Assessment of Water Quality from Different Sources in the Niger Delta Region of Nigeria [J]. *Frontiers in Science*, 2013, 3(3): 89-95.
- [14] CHAUHAN S J, BADWAL T, BADOLA N. Assessment of Potability of Spring Water and Its Health Implication in a Hilly Village of Uttarakhand, India [J]. *Applied Water Science*, 2020, 10: 73.
- [15] SHAH M, SIRCAR A, VARSADA R, et al. Assessment of Geothermal Water Quality for Industrial and Irrigation Purposes in the Unai Geothermal Field, Gujarat, India [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019, 8: 59-68.
- [16] VISHWAKARMA C A, SEN R, SINGH N, et al. Geochemical Characterization and Controlling Factors of Chemical Composition of Spring Water in a Part of Eastern Himalaya [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2018, 92: 753-763.
- [17] BHAT S U, MUSHTAQ S, QAYOOM U, et al. Water Quality Scenario of Kashmir Himalayan Springs: A Case Study of Baramulla District, Kashmir Valley [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2020, 231: 454.
- [18] THAPA B, PANT R R, THAKURI S, et al. Assessment of Spring Water Quality in Jhimruk River Watershed, Lesser Himalaya, Nepal [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79: 504.
- [19] EGBUERI J C, MGBENU C N. Chemometric Analysis for Pollution Source Identification and Human Health Risk Assessment of Water Resources in Ojoto Province, Southeast Nigeria [J]. *Applied Water Science*, 2020, 10: 98.
- [20] DEDE O T, TELCI I T, ARAL M M. The Use of Water Quality Index Models for the Evaluation of Surface Water Quality: A Case Study for Kirmir Basin, Ankara, Turkey [J]. *Water Quality Exposure and Health*, 2013, 5(1): 41-56.
- [21] QU B, ZHANG Y, KANG S, et al. Water Quality in the Tibetan Plateau: Major Ions and Trace Elements in Rivers of the "Water Tower of Asia" [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 571-581.
- [22] LI Y M, PANG Z H, YANG F T, et al. Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of the High-temperature Geothermal System in the Tashkorgan Basin of the Pamir Syntax, Western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 149: 134-144.
- [23] 史杰, 陆成新, 李清海, 等. 新疆塔什库尔干谷地地热资源研究进展 [J]. *中国地质调查*, 2018, 5(2): 8-17.

- SHI Jie, LU Cheng-xin, LI Qing-hai, et al. Progress in Research on the Geothermal Resources in Taxkorgan Valley, Xinjiang [J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 8-17.
- [24] 常志勇, 李清海, 史杰, 等. 新疆塔什库尔干谷地北段地热地质条件分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 42(3): 164-170.
CHANG Zhi-yong, LI Qing-hai, SHI Jie, et al. An Analysis of Geothermal and Geological Conditions in the Northern Taxkorgan Valley of Xinjiang [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 42(3): 164-170.
- [25] 庞忠和, 杨峰田, 袁丽娟, 等. 新疆塔县盆地地热显示与热储温度预测[J]. 地质论评, 2011, 57(1): 86-88.
PANG Zhong-he, YANG Feng-tian, YUAN Li-juan, et al. Geothermal Display and Temperature Prediction of Heat Storage in Taxian Basin, Xinjiang [J]. Geological Review, 2011, 57(1): 86-88.
- [26] GB 5749—2006, 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749—2006, Standards for Drinking Water Quality[S].
- [27] GB/T 14848—2017, 地下水质量标准[S].
GB/T 14848—2017, Standard for Groundwater Quality[S].
- [28] 陈杰, 李涛, 李文巧, 等. 帕米尔构造结及邻区的晚新生代构造与现今变形[J]. 地震地质, 2011, 33(2): 241-259.
LI Jie, LI Tao, LI Wen-qiao, et al. Late Cenozoic and Present Tectonic Deformation in the Pamir Salient, Northwestern China [J]. Seismology and Geology, 2011, 33(2): 241-259.
- [29] 沈军, 汪一鹏, 赵瑞斌, 等. 帕米尔东北缘及塔里木盆地西北部弧形构造的扩展特征[J]. 地震地质, 2001, 23(3): 381-389.
SHEN Jun, WANG Yi-peng, ZHAO Rui-bin, et al. Propagation of Cenozoic Arcuate Structures in Northeast Pamir and Northwest Tarim Basin [J]. Seismology and Geology, 2001, 23(3): 381-389.
- [30] 李海兵, VALLI F, 许志琴, 等. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 239-255.
LI Hai-bing, VALLI F, XU Zhi-qin, et al. Deformation and Tectonic Evolution of the Karakorum Fault, Western Tibet [J]. Geology in China, 2006, 33(2): 239-255.
- [31] 全晓霞, 马武明, 孙兴乐. 新疆帕米尔高原塔什库尔干地区冰川融水锶同位素特征及其环境意义[J]. 环境化学, 2017, 36(4): 830-838.
- TONG Xiao-xia, MA Wu-ming, SUN Xing-le. Characteristic and Environmental Significance of Strontium Isotope in Glacial Meltwater of the Tashkorgan Area in Pamirs, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(4): 830-838.
- [32] 巴合提瓦尔·马苏尔, 熊凤英, 哈德尔·阿布都哈力, 等. 新疆塔什库尔干河冰雪水文特征与水能开发潜力[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 1073-1077.
Bahtiwar · MANSIRIK, XIONG Feng-ying, Hader · ABDUHALIK, et al. Glacier-snow Hydrological Processes and Potential Hydropower Resources in Taxkorgan River Basin, Eastern Pamir Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 1073-1077.
- [33] FRENGSTAD B, SKREDE A K M, BANKS D, et al. The Chemistry of Norwegian Groundwaters; III. The Distribution of Trace Elements in 476 Crystalline Bedrock Groundwaters, as Analysed by ICP-MS Techniques [J]. Science of the Total Environment, 2000, 246(1): 21-40.
- [34] CHEN Z, ZHOU X C, DU J G, et al. Hydrochemical Characteristics of Hot Spring Waters in the Kangding District Related to the Lushan $M_s = 7.0$ Earthquake in Sichuan, China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015, 15(6): 1149-1156.
- [35] 刘汉彬, 金贵善, 李军杰, 等. 铀矿地质样品的稳定同位素组成测试方法[J]. 世界核地质科学, 2013, 30(3): 174-179.
LIU Han-bin, JIN Gui-shan, LI Jun-jie, et al. Determination of Stable Isotope Composition in Uranium Geological Samples [J]. World Nuclear Geoscience, 2013, 30(3): 174-179.
- [36] 王衍鹏. Optima 5300DV 光谱定性和定量分析的化学计量学方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
WANG Yan-peng. Research on Chemometrics Methods of Qualitative and Quantitative Spectral Analysis with Optima 5300DV [D]. Nanning: Guangxi University, 2011.
- [37] 谢川, 李子君, 王滨, 等. 改进综合标识指数法在地下水方面的应用——以赵川盆地为例[J]. 节水灌溉, 2018(9): 56-61.
XIE Chuan, LI Zi-jun, WANG Bin, et al. Application of Improved Comprehensive Water Quality Identification Index Method to Evaluation of Groundwater Quality—A Case Study of Zhaochuan Basin [J]. Water Saving Irrigation, 2018(9): 56-61.
- [38] ADIMALLA N, TALOOR A K. Hydrogeochemical Investigation of Groundwater Quality in the Hard Rock

- Terrain of South India Using Geographic Information System (GIS) and Groundwater Quality Index (GWQI) Techniques[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 10:100288.
- [39] TALOOR A K, PIR R A, ADIMALLA N, et al. Spring Water Quality and Discharge Assessment in the Bantantar Watershed of Jammu Himalaya Using Geographic Information System(GIS) and Water Quality Index(WQI)[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 10:100364.
- [40] VAROL S, DAVRAZ A. Evaluation of the Groundwater Quality with WQI(Water Quality Index) and Multivariate Analysis: A Case Study of the Tefenni Plain (Burdur/Turkey)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(4):1725-1744.
- [41] RAMAKRISHNAIAH C R, SADASHIVAIAH C, RANGANNA G. Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India[J]. *Journal of Chemistry*, 2009, 6(2):523-530.
- [42] WATOR K, ZDECHLIK R. Application of Water Quality Indices to the Assessment of the Effect of Geothermal Water Discharge on River Water Quality: Case Study from the Podhale Region (Southern Poland) [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121:107098.
- [43] TIAN Y, JIANG Y, LIU Q, et al. Using a Water Quality Index to Assess the Water Quality of the Upper and Middle Streams of the Luanhe River, Northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667(1):142-151.
- [44] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(3):321-325.
XU Zu-xin. Single Factor Water Quality Identification Index for Environmental Quality Assessment of Surface Water[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(3):321-325.
- [45] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4):482-488.
XU Zu-xin. Comprehensive Water Quality Identification Index for Environmental Quality Assessment of Surface Water[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(4):482-488.
- [46] TREBLE P C, BUDD W F, HOPE P K, et al. Synoptic-scale Climate Patterns Associated with Rainfall $\delta^{18}\text{O}$ in Southern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 302(1/2/3/4):270-282.
- [47] 李捷, 庞忠和, 古丽波斯丹·吐逊江, 等. 北疆大气降水水汽源识别及其对地下水补给的指示意义[J]. *科技导报*, 2016, 34(18):118-124.
- LI Jie, PANG Zhong-he, Tursung · GULBOSTAN, et al. Identification of Moisture Sources in Junggar Basin and Its Implication for Groundwater Recharge [J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(18):118-124.
- [48] CRAIG H. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. *Science*, 1961, 133:1702-1703.
- [49] YU W, TIAN L, RISI C, et al. $\delta^{18}\text{O}$ Records in Water Vapor and an Ice Core from the Eastern Pamir Plateau: Implications for Paleoclimate Reconstructions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 456:146-156.
- [50] 陈宗宇, 齐继祥, 张兆吉. 北方典型盆地同位素水文地质学方法应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
CHEN Zong-yu, QI Ji-xiang, ZHANG Zhao-ji. Application of Isotope Hydrogeological Methods in Typical Basins, the Northern China [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [51] 乃尉华, 史杰, 王文科, 等. 喀什平原区地下水氢氧稳定同位素分布特征及意义[J]. *新疆地质*, 2018, 36(2):266-270.
NAI Wei-hua, SHI Jie, WANG Wen-ke, et al. Distribution Characteristics and Its Significance of Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Groundwater in Kashgar Plain [J]. *Xinjiang Geology*, 2018, 36(2):266-270.
- [52] 王东升, 王经兰. 中国地下热水的基本类型和成因特征[J]. *第四纪研究*, 1996(2):140-145.
WANG Dong-sheng, WANG Jing-lan. Genetic Characteristics and Basic Types of Geothermal Water in China[J]. *Quaternary Sciences*, 1996(2):140-145.
- [53] 王焰新, 孙连发, 罗朝晖, 等. 指示娘子关泉群水动力环境的水化学-同位素信息分析[J]. *水文地质工程地质*, 1997(3):1-5, 9.
WANG Yan-xin, SUN Lian-fa, LUO Zhao-hui, et al. Analysis of Hydrochemical-isotope Information Indicating the Hydrodynamic Conditions of the Niangziguan Karst Springs [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1997(3):1-5, 9.
- [54] 肖振, 张恩达, 林敏. 中国医疗矿泉定义与分类方案专家共识(2017年)[J]. *中国疗养医学*, 2017, 26(6):668-672.
XIAO Zhen, ZHANG En-da, LIN Min. Expert Consensus on Definition and Classification Scheme of Medical Mineral Springs in China (2017) [J]. *Chinese Journal of Convalescent Medicine*, 2017, 26(6):668-

- 672.
- [55] GB/T 11615—2010, 地热资源地质勘查规范[S].
GB/T 11615—2010, Geologic Exploration Standard of Geothermal Resources[S].
- [56] ZHANG H, FENG X B, LARSSSEN T, et al. In Inland China, Rice, Rather Than Fish, Is the Major Pathway for Methylmercury Exposure[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(9): 1183-1188.
- [57] SOTO-JIMENEZ M F, PAEZ-OSUNA F. Distribution and Normalization of Heavy Metal Concentrations in Mangrove and Lagoonal Sediments from Mazatlán Harbor(SE Gulf of California)[J]. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 2001, 53(3): 259-274.
- [58] 刘文平, 王核, 全喜来, 等. 西昆仑塔什库尔干布伦阔勒群的岩石地球化学特征及变质 $P-T$ 轨迹[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 923-937.
LIU Wen-ping, WANG He, TONG Xi-lai, et al. Geochemical Characteristics and Metamorphic $P-T$ Paths of the Bulunkuole Group in Taxkorgan, Western Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 923-937.
- [59] 柯珊, 莫宣学, 罗照华, 等. 塔什库尔干新生代碱性杂岩的地球化学特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 905-915.
KE Shan, MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, et al. Petrogenesis and Geochemistry of Cenozoic Taxkorgan Alkaline Complex and Its Geological Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 905-915.
- [60] ZHANG Y F, TAN H B, ZHANG W J, et al. Geochemical Constraint on Origin and Evolution of Solutes in Geothermal Springs in Western Yunnan, China[J]. *Chemie der Erde: Geochemistry*, 2016, 76(1): 63-75.
- [61] GÖB S, LOGES A, NOLDE N, et al. Major and Trace Element Compositions (Including REE) of Mineral, Thermal, Mine and Surface Waters in SW Germany and Implications for Water-rock Interaction[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 33: 127-152.
- [62] 孙丽莎. 西昆仑塔什库尔干大河口一带斜长角闪岩岩石地球化学特征及成因探讨[J]. *山东国土资源*, 2019, 35(11): 21-27.
SUN Li-sha. Study on Geochemical Characteristics and the Origin of Amphibolite in Dahekou Area in Tashkurgan in Western Kunlun[J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, 35(11): 21-27.
- [63] FENG X B, QIU G L. Mercury Pollution in Guizhou, Southwestern China: An Overview[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3): 227-237.
- [64] 邓娅敏. 河套盆地西部高砷地下水系统中的地球化学过程研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
- DENG Ya-min. Geochemical Processes of High Arsenic Groundwater System at Western Hetao Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [65] BARBIERI M, BOSCHETTI T, PETITTA M, et al. Stable Isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and Hydrochemistry Monitoring for Groundwater Hydrodynamics Analysis in a Karst Aquifer(Gran Sasso, Central Italy)[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(11): 2063-2081.
- [66] IHIENFELD C, NORMAN M D, GAGAN M K, et al. Climatic Significance of Seasonal Trace Element and Stable Isotope Variations in a Modern Freshwater Tufa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(13): 2341-2357.
- [67] ZHANG Y, SILLANP M, LI C, et al. River Water Quality Across the Himalayan Regions: Elemental Concentrations in Headwaters of Yarlung Tsangpo, Indus and Ganges River[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8): 4151-4163.
- [68] 赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 等. 四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 81-89.
ZHAO Jia-yi, ZHANG Wei, ZHANG Han-xiong, et al. Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of the Geothermal Fields in Batang of Sichuan[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(4): 81-89.
- [69] 郎旭娟, 蔺文静, 刘志明, 等. 贵德盆地地下热水水文地球化学特征[J]. *地球科学*, 2016, 41(10): 1723-1734.
LANG Xu-juan, LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, et al. Hydrochemical Characteristics of Geothermal Water in Guide Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(10): 1723-1734.
- [70] 李永革, 蔺文静, 邢林啸, 等. 青海省恰卜恰地区深部热储温度估算[J]. *地质与资源*, 2021, 30(4): 479-484, 511.
LI Yong-ge, LIN Wen-jing, XING Lin-xiao, et al. Estimation of Deep Geothermal Reservoir Temperature in Qabqa Area, Qinghai Province[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(4): 479-484, 511.
- [71] 姜光政, 高珊, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892-2910.
JIANG Guang-zheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of Heat Flow Data in the Continental Area of China(4th Edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892-2910.