

大柴旦温泉沟泉的地球化学成因

李建森^{1,2}, 董华庆³, 姜有旭³, 聂玉峰³, 朱广琴^{1,2}, 李雷明^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008; 2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海大学盐湖系, 青海 西宁 810016)

摘要:大柴旦温泉沟泉水作为柴达木盆地出露的典型富矿水体, 对于揭示柴达木盆地成盐、成矿至关重要。为了研究泉水的地球化学成因, 开展了热泉水、冷泉水和八里沟河水体的元素和氢氧同位素地球化学研究及其对比分析, 并结合区域地质构造特征对其水体的来源、水文过程形成了较为细化的新认识: 温泉沟的泉水来源于冰雪融水, 而与雨水关系不大; 八里沟水体相对富集 B、Li, 且具有类似于泉水的地球化学特征, 推断其成因与断裂带密切相关。对于岩浆水与泉水的关系, 需要进一步开展研究。

关键词:元素; 氢氧同位素; 泉水; 温泉沟

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2017)02-0055-05

引言

温泉沟位于大柴旦镇北部 10 km 处, 在不到 1 km² 的范围内, 分布有近百个泉眼, 其中绝大部分为热泉, 还有几处冷泉。这些泉涌水量较大, 源源不断以地下潜流的形式汇入到大柴旦盐湖中, 并为其提供了丰富的钾、硼、锂等资源。对于温泉沟泉水, 前人开展了较多的研究, 包括元素和同位素地球化学。早在 1957 年中国盐湖科学调查队就对热泉水进行了采集分析研究, 后来普遍将其作为柴达木盆地典型“深部水”。张彭熹对热泉水测定氟含量, 低氟的特征指示了深部成因, 进而研究了氢氧同位素特征, 认为起源于大气降水^[1]。郑绵平则根据区域构造和泉水元素地球化学推测热泉水中的硼、锂等组分与深部重熔岩浆有关^[2]。随着同位素新技术的推进, 肖应凯等对温泉沟热泉水先后进行了硼、氯和锂非传统稳定同位素的测

定^[3-5], 为大柴旦盐湖的地球化学成因研究提供了佐证。温泉沟泉水的成因研究, 对于深入探讨柴达木盆地盐湖成盐成矿具有重要指示意义。温泉沟内出露的冷泉, 前人较少关注, 除肖应凯报道了水体锂同位素比值之外^[5], 相关的元素和同位素地球化学工作极少。为更好地探讨温泉沟泉的成因, 开展不同季节泉水的地球化学研究, 并进行不同水体之间的地球化学对比是十分有必要的。与温泉沟相邻的八里沟河流可以作为水体对比研究的良好载体, 本次研究基于此系统开展大柴旦温泉沟热泉和冷泉以及八里沟河流的水体元素和同位素地球化学及其对比研究, 可增进我们对于泉成因的科学认识。

1 区域地质

大柴旦温泉沟位于达肯大坂山, 该山体大面积出露中元古代变质岩, 古生代至中生代岩

收稿日期: 2016-06-07; 修回日期: 2016-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402229, U1407128); 中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金(Y560301146); 中国科学院大学生创新实践训练计划(Y510151132)联合资助

作者简介: 李建森(1987-), 男, 研究实习员, 主要从事水文地质及地球化学研究工作。Email: songtaowuya@163.com。

层亦有小面积分布,早中元古代至晚中生代岩浆活动频繁,尤其以中生代花岗岩分布最广,主要为含电气石的斑状花岗岩。山体同时出露第三系陆相山麓碎屑岩建造和第四系沉积物覆盖,温泉沟的泉水均出露于元古代变质岩系中。八里沟亦处于达肯大坂山脉,沟谷两边山体坡度较陡,岩性主要由中生代花岗岩、片岩和砂岩以及第四系混杂堆积组成。达肯大坂山脉断裂发育,以大柴旦逆冲走滑断裂和宗务隆山逆冲断裂为主,温泉沟和八里沟受控发育于断裂带内。

2 样品采集与测试

2011 年 12 月进行首次样品采集,采集热

泉水 3 件、冷泉水 1 件,作为枯水期样品;2013 年 8 月进行二次样品采集,采集热泉水 2 件、冷泉水 1 件,作为丰水期样品,同时采集八里沟上游河水 1 件。在中国科学院青海盐湖研究所分析测试部进行了水样的全化学元素分析;在中国科学院兰州油气资源研究中心进行了水样的氢氧同位素测试,仪器型号为 ISO prime 100 型质谱仪,测试精度 $\delta^{18}\text{O} < 0.1\text{‰}$, $\delta\text{D} < 1\text{‰}$,所有样品均在采集后 3 个月内完成测试分析。

3 结果与讨论

3.1 泉水的水化学特征

各水体的元素组成见表 1。

表 1 热泉水、冷泉水和河水的水化学组成

Table 1 Chemical compositions of hot spring water, cold spring water and river water mg/L

样 品	采集时间	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	B_2O_3	Li	Br
热泉 1	2011.12	411.6	5.6	31.2	343.6	175.2	21.4	132.2	3.4	0.24
热泉 2	2011.12	372.2	3.4	29.4	336.8	171.1	21.8	128.0	3.4	0.27
热泉 3	2011.12	431.8	3.3	30.0	353.2	174.0	19.3	142.6	3.4	0.26
热泉 4	2013.08	326.5	5.8	27.0	341.6	286.6	15.8	128.5	3.6	0.25
热泉 5	2013.08	320.9	2.8	27.7	340.9	189.6	16.1	125.0	3.5	0.24
冷泉 1	2011.12	36.4	13.2	48.9	70.5	40.8	6.9	7.2	0.03	0.008
冷泉 2	2013.08	35.1	13.0	43.0	69.2	41.6	6.6	7.0	0.03	0.007
河水 1	2013.08	78.1	13.6	65.2	72.3	25.6	3.2	26.8	0.48	0.004

水体所携带的盐分浓度和元素组成以及物性特点的信息,均反映了其所经历的水文地球化学过程。热泉水水体充沛,喷涌量大,多个泉眼出露,水体温度常年保持相对恒定,温度在 $68 \sim 82\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,为高温热泉。水体为氯化钠型,主量元素以 Na 、 Cl 和 SO_4^{2-} 为主,相对富 Ca 而低 Mg ,这与许多深部热水类似,如较为典型的柴达木盆地西部油田水和西藏地热水,在成因上具有一定深部特征,深部热源和物质为其提供充足的能量。在微量元素上,热泉水具有较高的 K 、 B 、 Li 、 Br 等有益元素,尤其是 B 的含量远高于 K 和 Li ,也高于 Ca 和 Mg ,其富集程度之高指示必然有特殊的物质供给渠道。对于

热泉水中 B 、 Li 的物质来源,郑绵平指出这种类似于“岩浆型”地热水中的 B 、 Li 主要来自于深部重熔岩浆^[2]。除此之外,众多学者认为地热水中的 B 、 Li 与壳内残余岩浆囊体有关^[6-9]。同时,热泉水中 Br 也有较高的富集,这和西藏地热水等深部水体也极为类似,然而目前针对 Br 物质来源的研究较少,溴的克拉克值并不高,在地壳火山岩中有一定分布,推测 Br 与深部过程有密切关系。

随季节的变化,丰水期和枯水期的热泉水化学组成具有差异性。枯水期的盐分含量高于丰水期,主要体现在 Na 、 Cl 和 K 、 B 含量上,而 Mg 和 SO_4^{2-} 则在丰水期略有升高。这一方面

说明热泉水并非封闭水体,而与外界有很大程度的联系;另一方面说明不同季节参与形成热泉水的水体在质或量上有所差异。

冷泉水在温泉沟沿岩体破碎带出露,温度常年在 15 ℃ 左右,水量极小,整个温泉沟仅有两个泉眼,其中大部分元素含量远低于热泉水,然而 Ca 和 Mg 含量高于热泉水,这充分显示了水体迁移路径和汇聚模式的差异性。同样,八里沟河水与冷泉水的水化学组成具有较大相似性,而八里沟河水的含盐度略高,较之冷泉水具有较高的 Ca 和较低的 SO_4^{2-} ,以及远高于冷泉水的 B、Li 含量,说明八里沟水体也具有异于一般河流水体的特性,与其所处的地质环境和水文过程有关。

钠氯系数($r\text{Na}/r\text{Cl}$)常被用来作为判断水体来源、变质程度及水动力条件的指标。水体中 Na 的化学稳定性相对 Cl 差,在水体演变过程中可能由于吸附、沉淀等化学反应而减少,而 Cl 一般变化不大,系数变大反映其与渗入水有关。一般情况下,多数天然水体的钠氯系数在 1 左右,如地层封存水体往往小于 0.87,海水或沉积变质海水在 0.85 ~ 0.87 左右,岩盐淋滤水体等于或略大于 1。热泉水的钠氯系数在 1.47 ~ 1.90 之间,平均 1.68,远大于 1。首先排除了封存水或沉积变质水体的可能性,其次用盐岩淋滤成因也不能完全解释,而降雪过程可以捕获一定盐分,但不具有一般规律性。张彭熹曾研究了昆仑山降雪的元素组成,其钠氯系数可以达到 5.5,而冰雹的钠氯系数仅为 0.01^[1]。由此可见,降雪对盐分的捕获可以导致所融化的水体具有高的钠氯系数,但降雪中的 B、Li 含量为 0,因此也不能简单地将热泉水的成因完全归因于冰雪融水,所以热泉水中 Na、Cl 的来源可能有一定特殊性。冷泉水的钠氯系数为 0.80,微显封存特征,呈现出与热泉水完全不同的地球化学过程。八里沟水的钠氯系数为 1.67,与热泉水极为相似,在成因上则可能与热泉水有某些相似性。

在大地构造方面,达肯达坂山发育的主要断裂带尤其是大柴旦断裂是晚第四纪以挤压逆冲为主兼具右旋走滑分量的活动断裂,活动强烈,促发了大柴旦地区多次中型地震,并控制着

温泉沟和八里沟的发育^[10]。这些断裂可能成为地球深部与地表流体的通道,加强了断裂带附近的水体与深部水体的联系,从而使出露水体在化学组成上具有异于一般水体的特性。泉水的出露与水体的地下循环有关,热泉水则可以山体发育的深大断裂为通道循环至地下,再沿断裂带上升,其最大的可能是循环至熔融岩浆处,高温岩浆区加热水体并提供压力促使其上涌喷出地表,具有深循环特征。冷泉水温度低、水头极小、流速缓慢,具有浅循环特征。

3.2 泉水的氢氧同位素特征

将所有水体的氢氧同位素值投到 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 标准关系图上,如图 1。

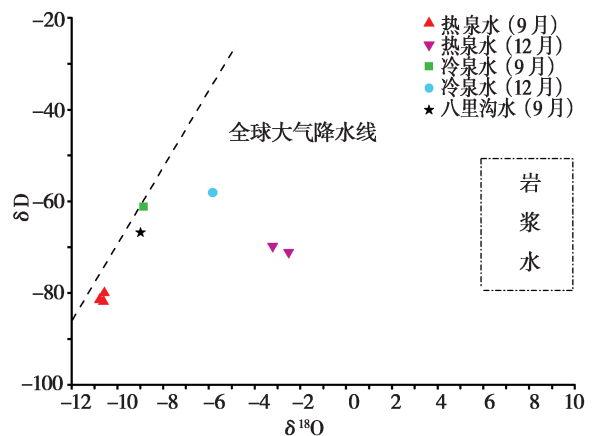


图1 热泉水、冷泉水和河水的氢氧同位素组成

Fig. 1 Hydrogen-oxygen isotopic composition of hot spring water, cold spring water and river water

依据水体的氢氧同位素特征可将水体分为两类,一类为靠近大气降水线附近,另一类在一定程度上偏离大气降水线。9月份丰水期采集的水体全部靠近大气降水线,而12月采集的泉水样品偏离大气降水线。由这样的氢氧同位素分布特征可以看出,泉水可在不同季节周期内受到影响而使其氢氧同位素发生较大变化,验证了由水化学分析得出的泉水循环系统并非是封闭系统而与外界有较大联系的结论,呈现了季节变化规律性。在不同季节,地表水体的变化主要体现在两方面:一是水量,枯水期水量小,而丰水期水量大;二是水的来源,枯水期以冰雪降水为主,丰水期以大量的冰雪融水和少

量降雨为主。从热泉水的氢氧同位素来看,起源于大气降水,但作为地下深循环过程的水体虽经历了较为充分的水—岩反应,却具有极低的氢氧同位素特征,低于冷泉水和河水。积雪和冰雹等冰雪降水往往具有较低的氢氧同位素,而雨水的氢氧同位素则较高,柴达木盆地的积雪的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -11.05‰ ,大柴旦地区冰雹的 $\delta^{18}\text{O}$ 可达 -14.36‰ ,大柴旦地区夏季雨水的 δD 为 -40.6‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.83‰ ^[1]。由此可以推断,热泉水的水体的来源以冰雪融水为主。冷泉水的氢氧同位素明显高于热泉水,并落在全球大气降水线上,指示其起源于大气降水且经历的水—岩反应极少。氢同位素介于冰雪融水和雨水之间,氧同位素高于雨水,这说明冷泉水与雨水关系不大,而应为冰雪融水补给,但经历了一定的蒸发,从而使其氢氧同位素发生沿大气降水线的漂移,最大的可能性是与一定时间的储存有关,这与以钠氯系数研究得出的结论一致。八里沟河水水流量很大,蒸发作用和水—岩反应极其微弱,其氢氧同位素依然可以极好地与补给水体对应;氧同位素与雨水相当,与雨水相比氢同位素却偏低,与冰雪融水相比氢同位素偏高,推断其受雨水和冰雪融水的影响;但与冰雪融水相比,由于降雨量极小,可参与到河流的水体还是十分有限的,因此八里沟水体可能还有其它补给来源。考虑八里沟所处的地质构造特征,受断裂控制,而断裂带往往可以伴随溢出水^[11],类似于热泉水的断裂带溢出水补给八里沟水体是可能的,这与八里沟水与热泉水的钠氯系数一致且富硼、锂的水化学特征相对应。

在枯水期,热泉和冷泉的同位素均发生一定漂移。枯水期水量补给减少,循环周期加大,使水体在循环过程中经受的地下蒸发作用和水—岩反应增强,从而可以更充分地萃取和溶解有关组分,Na、Cl、B、Li、Br等有用元素可以更好地富集,这与枯水期比丰水期泉水中的盐分更高的特点一致。

对于热泉水与岩浆水的关系,从不同季节热泉水的水化学和氢氧同位素以及不同类别水体间的对比来看,似乎没有明显体现岩浆水的加入,还需要加强相关研究工作。不过,限于目

前对岩浆水体系的研究依然处在概念和推断阶段,这项工作开展起来难度仍然较大。

4 结 论

1)从泉水的氢氧同位素分布上看出,温泉沟热泉水和冷泉水均来自冰雪融水,而与雨水关系不大。

2)热泉水中的元素富集为水体循环的结果,但热泉水的钠氯比例、硼和溴含量等地球化学特征明显异于地表水体,水体深循环过程的元素富集值得研究;仅从氢氧同位素特征,依然难以判断岩浆水与热泉水的关系,需要进一步开展研究。

3)大柴旦地区为地质构造活动强烈区,以八里沟水体为代表的河流水极有可能受到断裂带溢出水的掺杂,从而具有与热泉水类似的地球化学特征。

参考文献:

- [1] 张彭熹,等. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社,1987:27,175.
- [2] 郑绵平. 青藏高原盐湖[M]. 北京:北京科学技术出版社,1989:325.
- [3] Xiao Y, Sun D, Wang Y. Boron isotopic compositions of brine, sediments and source water in Da Qaidam Lake, Qinghai, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(4):1561–1568.
- [4] 肖应凯,金琳,刘卫国,等. 大柴达木湖的氯同位素组成[J]. *科学通报*, 1994, 39(14):1319–1322.
- [5] 肖应凯,祁海平,王蕴慧. 青海大柴达木湖卤水、沉积物和水源水中的锂同位素组成[J]. *地球化学*, 1994, 23(4):329–338.
- [6] 佟伟,章铭陶. 西藏地热[M]. 北京:科学出版社,1981.
- [7] 张知非,朱梅湘,刘时彬,等. 西藏水热地球化学的初步研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1982, 3:88–96.
- [8] 佟伟,穆治国,刘时彬. 中国晚新生代火山和现代高温水热系统[J]. *地球物理学报*, 1990, 33(3):329–335.
- [9] 李振清. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D]. 北京:中国地质科学院,2002:64.
- [10] 庞炜,何文贵,袁道阳,等. 青海大柴旦断裂带地震特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(3):87–103.
- [11] 汪万红,张慧,苏鹤军. 秦岭北缘断裂带温泉水循环深度与地震活动性的关系研究[J]. *西北地震学报*, 2008, 30(1):36–41.

Geochemical Genesis of the Springs in Wenquan Ditch of Da Qaidam Area

LI Jian-sen^{1,2}, DONG Hua-qing³, JIANG You-xu³, NIE Yu-feng³, ZHU Guang-qin^{1,2}, LI Lei-ming^{1,2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Xining, 810008, China;

3. University of Qinghai, Xining, 810008, China)

Abstract: As typical water in Qaidam Basin which is rich in ore, the spring water in Da Qaidam is very beneficial to reveal the formation of salt. In order to study the geochemical genesis of spring, the elementary composition, and hydrogen and oxygen isotopes ratio of hot spring, cold spring water and river water were tested. Base on the data and its comparative analysis, further more combine the regional tectonics, a more detailed new understanding was inferred aiming to the source of the water and its hydrological processes. The spring water origin is from ice and snow melting water instead of the rainwater. The water of Bali ditch is similar to the hot spring, which formation may be related to fault. Further researches are needed to elaborate the relationship between magmatic water and spring water.

Key words: Elements; Hydrogen and oxygen isotope; Spring water; Hot spring ditch

(上接第12页)

Assessment of Heavy Metal Pollution in Xining Section of the Huangshui River

ZENG Fang-ming

(Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,
Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China)

Abstract: Huangshui River is an important river in Xining City. Study on heavy metals in Xining section of the Huangshui River has great significance for environmental protection and ecological construction in Xining. In the present work heavy metals in surface muddy sediments and water as well as modern topsoil for cultivating vegetable and pine seedling in Xining section of the Huangshui river were surveyed. Meanwhile, pre-Holocene loess and sandy sediment from river terrace (T1) of the Huangshui River were applied to give the natural background state of heavy metals in Xining. Concentrations of heavy metals in various samples showed that: 1) Under the natural state, Pb is 29.5 mg/kg, As is 15.6 mg/kg, Hg is 0.01 mg/kg, Cd is 0.18 mg/kg, and Cr is 31.1 mg/kg in Xining. 2) The average content of heavy metals in surface muddy sediments of the Huangshui River showed that Pb is 45.2 mg/kg, As is 7.8 mg/kg, Hg is 0.02 mg/kg, Cd is 0.48 mg/kg, and Cr is 48.8 mg/kg. 3) Generally, Cd, Pb, Hg, Cr in river surface muddy sediments, modern vegetable topsoil and pine seedling surface soil are higher than the natural background values. 4) The Xining section of the Huangshui river evidently shows heavy metal pollution. The emissions of Cd and other heavy metals into Huangshui River should be controlled.

Key words: Xining; Huangshui river; Heavy metals; Environmental pollution