

莫生鹏,李庆宽,李雯霞,等. 大柴旦热泉成因及其富硼锂机制研究进展[J]. 盐湖研究, 2024, 32(1): 120-127.

Mo S P, Li Q K, Li W X, et al. Research progress on the genesis of Da Chaidam hot springs and the enrichment mechanism of B and Li elements[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(1): 120-127.

DOI: 10.12119/j.yhyj.202401013

大柴旦热泉成因及其富硼锂机制研究进展

莫生鹏^{1,2,3}, 李庆宽^{1,2}, 李雯霞^{1,2,3*}, 袁 秦^{1,2}, 秦占杰^{1,2*}, 都永生^{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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:大柴旦热泉成因及其硼锂富集机制研究是系统揭示该区域富硼锂盐湖卤水矿床成矿规律的关键环节,同时对青藏高原同类型富硼锂热泉深部水文过程的精细研究具有重要的参考价值。本文从地热学的视角梳理并评述了大柴旦热泉成因的研究现状,重点探讨了大柴旦热泉的水源补给端元、热源及其储热机制、热泉的硼锂物源及其富集过程。研究结果初步显示,大柴旦热泉水源以大气降水为主,在高山区为冰雪融水,补给高程约为 5 980 m,热储温度约为 194.5 °C,循环深度约为 7 630 m,上升过程中混入了约 66% 的冷水;岩浆流体的补给或岩浆脱气过程可能为热泉提供了热量;热泉中硼锂的物源可能来自花岗岩源岩的高温水岩淋滤、岩浆流体补给或岩浆脱气输入以及风成沉积物中易溶盐类矿物溶解的共同贡献。大柴旦热泉地热系统及其战略资源元素富集过程的整体研究仍比较薄弱,尤其是不同补给端元贡献的定量研究,硼锂岩石地球化学行为的厘定,深部水岩作用的模拟等仍需要进一步开展详细的研究工作。

关键词:热泉成因;岩浆流体;硼锂物源;地热系统;大柴旦

中图分类号: P619.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2024)01-0120-08

热泉是一种地热资源,是深部地热流体沿断裂上涌在表层出露的一种地表流体,由于其带有深部物质信息,是获取深部水-岩反应、流体活动、矿产信息的重要窗口^[1-3]。高温地热流体(热泉)一般富 B、Li、Rb、Cs 等元素,这些典型特征元素通常被用来研究高温地热流体起源及地球化学过程^[4,5]。目前,富 B、Li 热泉已成为一种新型的卤水资源^[6-8],同时,其也是富 B、Li 盐湖的重要补给端元,如柴达木盆地大柴旦盐湖、东-西台吉乃尔盐湖、察尔汗盐湖别勒滩区段、西藏当雄错盐湖和玻利维亚的乌尤尼盐沼等,均与热泉的持续补给密切相关^[5,8-10]。热泉成因的深度解析及其在富 B、Li 盐湖“源汇”成矿系统中的端元贡献量化研究,已成为当今盐湖学领域的核心科学问题。

青藏高原是我国地热资源最为发育的地区,得到了广泛的关注和研究。目前热泉研究主要集中在藏南高原,如羊八井、羊易、搭格架等地热区^[3-4,6-8]。

藏南地热多属于岩浆热源型地热系统^[4],如羊八井、羊易地热区^[11-13]。岩浆热源地热水相对非岩浆热源地热水往往有较高的 B、Li 组分^[6-8],其主控机制可能与地壳重熔型残余岩浆流体和脱气过程有关。在岩浆热源型地热系统中,地热水中 B、Li 主要来源于岩浆流体的补给和围岩淋滤,而非岩浆热源型地热系统中,地热水 B、Li 主要源于围岩溶滤^[4-8]。热泉不同的成因类型,包括热泉形成过程中水源、热源和热储层的性质均会影响其 B、Li 的富集作用,进而对流域和尾间湖泊中 B、Li 的含量,乃至成矿等产生重要影响。

青藏高原东北部柴达木盆地北缘大柴旦地区也出露众多串珠状富 B、Li 热泉,热泉水通过地下渗流的形式补给大柴旦盐湖,是大柴旦盐湖 B、Li 的重要来源之一^[14-15]。最近学者^[9-10,16-18]对大柴旦热泉的主、微量元素特征、同位素组成特征、水岩作用等做了大量研究,并在热泉的水化学特征、物源示踪及其与盐

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-09-13

基金项目: 青海省科技厅自然科学基金青年基金(2020-ZJ-946Q); 中国科学院青年创新促进会人才项目(2021431); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSBR-039); 特别研究助理项目(李庆宽)

作者简介: 莫生鹏(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向为热泉成因及资源元素富集规律。E-mail: msp0410@163.com。

通讯作者: 李雯霞(1987-),女,工程师,主要从事盐湖锂资源成矿规律研究。E-mail: liwx@isl.ac.cn; 秦占杰(1987-),男,副研究员,主要研究方向为蒸发岩矿床成因与演化。E-mail: qinzhajie@isl.ac.cn。

湖资源成矿方面取得了诸多有益认识。然而,对于热泉的形成过程、水源、储热和冷却机制仍缺乏系统研究,热泉 B、Li 的来源和富集机制等仍认识不清,尤其缺少岩石学和室内模拟实验的相关证据,这直接限制了该区域 B、Li 源汇过程的整体深入认识。

因此,本文从地热学的视角出发,通过梳理热泉成因及其 B、Li 元素富集研究现状,提出热泉成因及其 B、Li 富集机制的一些新见解,评述并展望了大柴旦热泉研究未来的拓展方向,该工作对深入研究青藏高原富 B、Li 热泉成因机制同样具有重要理论指导意义。

1 大柴旦热泉地质概况

大柴旦热泉集中发育于祁连山脉达肯大坂山,距大柴旦镇约 10 km (图 1),区域内其他水热活动分布于柴达木盆地中北缘居红土硼矿(古热泉)和多处泥火山中^[10]。构造上,大柴旦热泉处于柴北缘造山带,位于祁连地块和南祁连地块之间,该区域经历了洋—陆俯冲、陆—陆碰撞及后期陆内俯冲的构造演化过程^[19-20]。

区域内花岗岩广泛分布,包括俯冲花岗岩、碰撞花岗岩及碰撞后花岗岩^[21-24]。热泉出露处基岩均为花岗岩,是区内出露塔塔楞花岗岩体边缘相,边缘相花岗岩以细粒二长花岗岩为主,在边缘相内带部分区域出现少量电气石,含量 1%~5%^[25-26]。花岗岩露头正下方热泉处出露古生代沉积岩,在露头南部,大型冲积扇向大柴旦盐湖延伸。温泉出露于花岗岩与古生界沉积物之间呈 WNW-ESE 向的断裂系统^[16],该断裂可能是热泉水的向上运移通道。

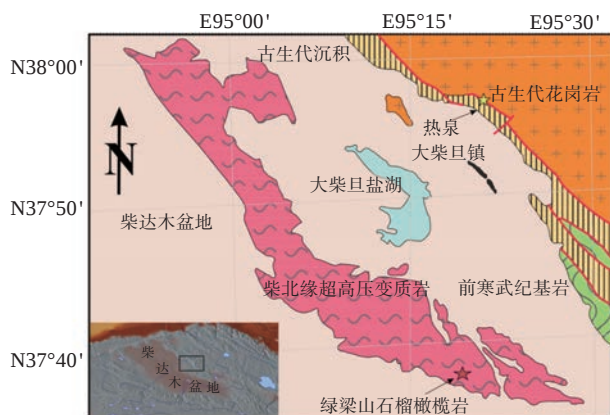


图1 柴达木盆地北缘大柴旦热泉地质略图(改自[16])

Fig. 1 Geological sketch map of Da Chaidam hot spring in the northern margin of Qaidam Basin (changed from [16])

2 大柴旦热泉成因

热泉属于水热型地热系统,水源、热源、热储层及盖层是研究水热型地热系统成因的 4 个基本要素,是构建地热水系统成因模式的核心内容^[27-28]。大柴旦热泉作为柴达木盆地中典型的地热水系统,从地热学视角研究该系统的成因,对深入认识该区域热泉的形成过程及其资源元素富集具有重要意义。

2.1 水源及补给高程

热泉的水源主要来自于大气降水、冰雪融水、岩浆热液流体、地表水和浅层地下水等^[4,6],出露地表的热泉水一般会经历不同来源流体的混合过程。大柴旦热泉水氢氧同位素特征显示其起源于大气降水,在高山区为冰雪融水^[9,17]。然而,其硼和溴含量明显不同于地表水,显示可能存在岩浆水的贡献,但仍需进一步研究^[9,17],同时,热泉出露后的水文混合过程亦不清楚。基于热泉以大气降水为主要补给,本文尝试运用水体氢氧同位素对热泉出露后的水文混合比例进行初步讨论。通常情况下,运用氢氧同位素计算热泉水补给高程需要消除水汽分离、冷水混入和水岩反应对其的影响,这在贵德盆地热泉水氢氧同位素控制因素识别和定量计算中已得到验证^[29]。因大柴旦热泉没有发现明显的水汽分离现象^[9-10],为研究冷水混入的影响,本文通过公式(1)~(3)计算,发现大柴旦热泉中冷水的混入比例约为 66%(详见 2.3),且冷水混合前热水的 δD 值为 -122.18‰, $\delta^{18}O$ 值为 -14.78‰。

$$\delta_m = \delta_{m0}(1-X) + \delta_c X \quad (1)$$

公式中 δ_m 为热水和冷水混合后的同位素值; δ_{m0} 为混合前热水的同位素值; δ_c 为冷水的同位素值; X 为冷水混入比例。本文计算中 δ_m 和 δ_c 引自文献[9]中热泉水和冷泉水的氢氧同位素组成数据,热泉水 δD 值为 -82.00‰, $\delta^{18}O$ 值为 -10.80‰;冷泉水 δD 值为 -61.30‰, $\delta^{18}O$ 值为 -8.75‰。

此外,由于水岩反应不改变热泉水 δD 值^[30],热泉水发生水岩反应之前的氧同位素值在当地大气降水线上的水平投影点,即代表了地热水初始的同位素值^[29]。因此,本文得出初始热泉水的 δD 值为 -122.18‰, $\delta^{18}O$ 值为 -17.40‰,其中水岩反应导致的氧漂移量为 2.62‰,冷水混入导致的氧漂移量为 3.98‰,冷水混入对热泉水同位素组成影响较大(图 2)。

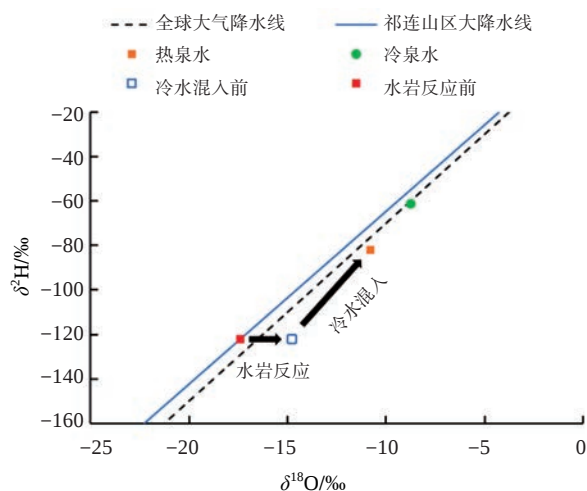


图2 大柴旦热泉氢氧同位素偏移过程示意图,祁连山区大气降水线引自[31]

Fig. 2 Da Chaidam hot spring hydrogen and oxygen isotope migration process diagram, the atmospheric precipitation line in Qilian Mountains is derived from [31]

补给高程的定量计算是构建泉水水文循环的关键环节,且利用水体的氢氧同位素高程效应计算泉水的补给高程已得到广泛应用^[30,32]。学者前期借助大柴旦热泉实测氢同位素计算得出其水体的补给高程为4 866~4 940 m^[9]。为进一步研究当地热泉的水文循环过程,本文基于祁连地区水体氢氧同位素拟合的高程公式 $H=-24.995 \cdot \delta D+2\ 926$ ^[33]和校正后的热泉氢同位素组成进行估算,得到大柴旦热泉的补给高程约为5 980 m,这接近于祁连山脉最高峰的海拔。因大柴旦热泉的物源及其不同水体的补给比例并不完全清楚,因此,初始热泉水的氢氧同位素及其补给高程的定量计算仍存在一定误差,后续加强热泉水的物源定量研究是首要任务。

2.2 热源

地表能观测到的热流由地幔热流和地壳热流组成,地热系统的附加热源来源于熔融岩浆、花岗岩放射性产热以及区域断裂系统的摩擦热^[4,34-35]。如,西藏羊八井、羊易地热区已被证实存在岩浆热源^[11-13],青海共和盆地热泉显示不存在岩浆热源,其热源来自深部地幔热传导^[36-37]。

柴北缘达肯达坂山出露有中国西部最大的花岗岩体(即塔塔楞岩体)^[22],由于它巨大的出露面积,很有可能隐伏向下延伸而成为大柴旦热泉的热储源岩^[9,16]。学者报道大柴旦热泉区花岗岩中检测到斜绿泥石,并且能观测到大柴旦热泉附近出露的花岗

岩发生了强烈的水热蚀变,认为热泉水可能和花岗岩围岩发生了强烈的水岩反应^[9]。进一步对比大柴旦热泉、贵德-共和盆地热泉以及西藏热泉水的B-Cl含量、 $(Na/K-Na/Cl)-\delta^{11}B$ 值、 $B-\delta^{11}B$ 值,发现大柴旦热泉水中B明显受到幔源岩浆脱气作用和水-岩作用的共同影响^[9]。此外,热泉水明显富集碳酸氢根和碳酸根的特性,可能与深部水岩作用过程中二氧化碳的参与有关^[10],同时,塔塔楞岩体东部分布的与大柴旦热泉有相似构造背景的泥火山喷出的气体也为二氧化碳^[10],这暗示二氧化碳参与了深部水岩反应。大柴旦热泉水较低的B、Li同位素组成和高的B、Li含量指示其存在岩浆流体的补给或岩浆脱气输入^[6,38-39],本文推测该区域热泉的热源与岩浆流体补给或岩浆脱气过程关系密切。

区域内广泛分布的含裂隙花岗岩可能是其热储围岩,但仍需要进行地球物理研究进一步查明大柴旦热泉区域地下是否存在延伸较大的花岗岩体。热泉水在沿断裂下渗及上涌过程中与花岗岩储层发生了不同程度的水岩反应。热泉水水文地球化学特征指示其受到岩浆脱气作用(二氧化碳的加入)、水岩反应和冷水混入的共同影响,而岩浆热液端元的实际贡献与否及其量化仍需要更多地球化学指标的详细约束。

2.3 热储温度与循环深度

大柴旦热泉的热储温度和循环深度已有初步研究,学者基于Na-K-Mg阳离子温标,计算得出大柴旦热泉的热储温度为160℃左右,循环深度为6.2 km,且热泉水位于Na-K-Mg图解的局部平衡区^[9,40]。由于位于局部平衡区的热泉水,水岩作用还在继续,离子浓度尚未饱和,溶解作用仍在进行,此情况下,利用阳离子温标计算热储温度可能会存在一定偏差。此外现实情况中,热泉水(原始热泉水)在沿断裂上升至地表过程中通常会与地下水和地表水混合。冷水的加入将导致地热水冷却后呈现不同的地球化学特征^[41-42],因此用传统的地热温标计算的热储温度会有较大的误差。地热水向上运移过程中,地热水中溶解的二氧化硅遵循石英溶解度曲线,在与浅层冷水混合使得热水温度下降时,这部分热水暂时不会将过饱和的二氧化硅析出^[33],地热水温度在相当长的一段时间代表其深部热储温度,因此可以利用硅-焓混合模型来分析热泉水冷水混入比例和热泉的热

储温度。硅焓模型法计算地热水热储温度和冷水混入比例的模型方程为^[43]

$$H_{(冷)}X + H_{(热)}(1-X) = H_{(温)} \quad (2)$$

$$SiO_{2(冷)}X + SiO_{2(热)}(1-X) = SiO_{2(温)} \quad (3)$$

式中 $H_{(冷)}$ 为冷水的焓, J/g; $H_{(热)}$ 为热水的焓, J/g; $H_{(温)}$ 为温泉水的焓, J/g; $SiO_{2(冷)}$ 为冷水的 SiO_2 含量, mg/L; $SiO_{2(热)}$ 为热水的 SiO_2 含量, mg/L; $SiO_{2(温)}$ 为温泉水的 SiO_2 含量, mg/L; X 为冷水混合比例。

基于 Fournier 和 Truesdell 提出的热水温度、焓与 SiO_2 含量的关系(表 1)^[43], 本文运用温泉水(QD26)温度为 71.8 °C, SiO_2 含量为 83.76 mg/L^[16], 与溪流混合的热水(QD27)温度为 67.0 °C, SiO_2 含量为 85.01 mg/L^[16], 祁连山地区江仓大气降水温度为 8.7 °C, SiO_2 含量为 4.16 mg/L^[33], 建立了焓与 SiO_2 含量相对于温度的函数关系, 两条曲线交点的坐标即为热泉水冷水混入比例和热储温度(图 3)。

由图可知, 大柴旦 QB26 热泉水, 冷水混入比例大约为 66%, 热储温度大约为 194.5 °C; QB27 热泉

表 1 热水温度、焓和 SiO_2 含量表

Table 1 Table of hot water temperature, enthalpy and SiO_2 content

温度/°C	焓/($\times 4.186$ J/g)	SiO_2 /(mg/L)
50	50	13.5
75	75	26.6
100	100.1	48
125	125.1	80
150	151	125
175	177	185
200	203.6	265
225	230.9	365
250	259.2	486
275	289	614
300	321	692

水, 冷水混入比例大约为 71%, 热储温度约为 205.5 °C。因 QB27 水样混入的溪水 SiO_2 含量高(39.76 mg/L), 导致该水样基于 SiO_2 含量计算的混入比例和热储温度与真实的热泉水冷水混入比例和热储温度存在一定误差, 因此, 本文采用 QB26 热泉水计算的冷水混入比例和热储温度, 即分别约为 66% 和 194.5 °C。

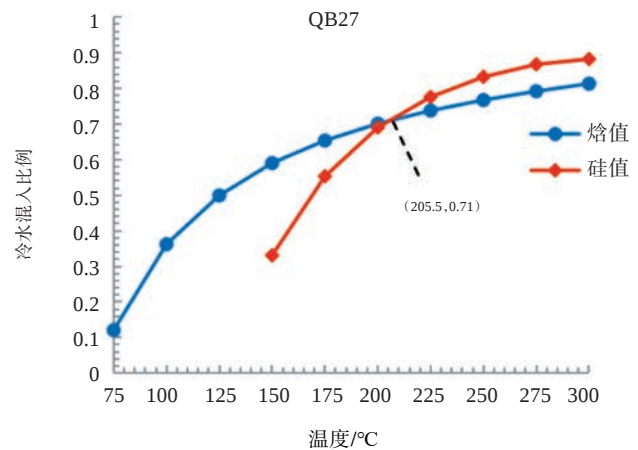
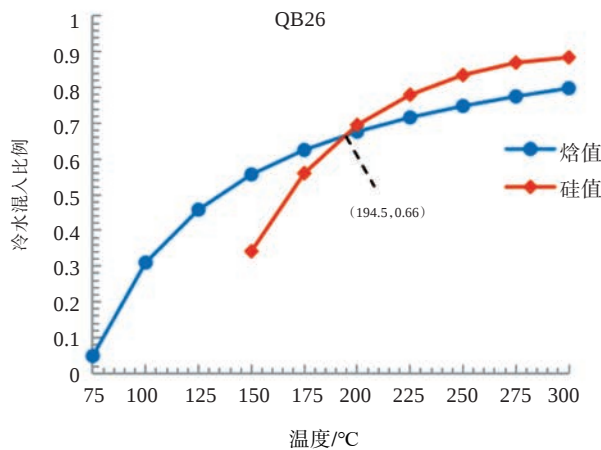


图 3 大柴旦热泉硅焓方程混合曲线模型

Fig. 3 Da Chaidam hot spring silicon enthalpy equation mixing curve model

基于上述热储温度, 本文进一步运用公式(4)初步计算了热泉的循环深度, 公式为

$$H = (T - t) / (K + H_0) \quad (4)$$

式中 H 为热泉水的循环深度, km; T 为热泉水的储层温度, °C; t 为取样点平均气温, °C; K 为取样点地热梯度, °C/km; H_0 为常温带深度, 50 m。

本文中地热梯度选用典型造山带地温梯度, 25 °C/km^[44], 大柴旦地区平均温度为 5 °C, 常温带深度约为 50 m^[9,30]。经计算, 我们初步得出大柴旦热泉水循环深度约为 7 630 m。

基于以上初步分析, 我们认为大柴旦热泉水经历了一定的深循环过程, 其热储温度约为 194.5 °C, 循环深度约为 7 630 m。由于区内海拔高, 存在冻土层, 在上升过程中热泉水经历了冷水混合冷却和传导冷却过程, 在上升至地表过程中混入了大约 66% 的冷水。该认识对梳理大柴旦热泉的演化过程发挥了重要启示作用, 但较为详细的热泉形成与冷却机制仍需要基于大量的实地调查、充足的样品数量和精确的测试分析来进一步厘定。

3 大柴旦热泉硼、锂的物源及富集过程

如前所述,大柴旦热泉的水源和热源特征显示可能存在深部岩浆流体补给或岩浆脱气输入,这势必会影响热泉 B、Li 的含量,冷水混入和热储围岩的性质也会影响热泉 B、Li 的含量。已有研究表明,大柴旦热泉是大柴旦盐湖硼锂成矿的关键补给端元^[9-10],因此查明该端元的地质条件、水文循环过程、元素富集机理是揭示大柴旦富 B、Li 盐湖卤水矿床源汇系统中“源”的关键部分。

大柴旦热泉 B、Li 含量分别约为 46.29 mg/L 和 3.65 mg/L^[18],明显高于祁连山系河流的平均 B 含量 0.56 mg/L 和 Li 含量 0.04 mg/L^[9,17]。但相对于藏南存在岩浆流体补给的高温地热水 B、Li 含量低^[6-7],这可能与大柴旦热泉水上升过程中混入了约 66% 的冷水有关。其次,冷水的混入使得母地热流体温度降低,一定程度减少了从浅部热储围岩中 B、Li 的淋滤。

热泉富 B 离不开基岩背景,电气石被认为是典型的富硼矿物,和大柴旦热泉水有关的塔塔楞岩体东北的居红土硼矿和众多泥火山,附近多出露含电气石花岗岩或含电气石岩脉^[10],而热泉区花岗岩则没有发现电气石^[9]。尽管大柴旦热泉区分布的花岗岩中没有发现电气石等富硼矿物,但是此处花岗岩是塔塔楞岩体边缘相,越靠近岩体边缘相内部电气石含量增加^[25-26],可能存在含电气石花岗岩脉体侵入热泉区花岗岩热储围岩中,热泉水与这些岩脉发生了水岩反应。

B 同位素是地热流体物源的优良示踪剂^[45]。大柴旦热泉水的 $\delta^{11}\text{B}$ 范围为 $-12.33\text{‰} \sim -11.16\text{‰}$ ^[46],明显区别于海水或浅层冷水混合的地热水和与围岩淋滤为主的深部热水的 B 同位素组成^[6],但与存在岩浆热源的西藏南部地热水 $\delta^{11}\text{B}$ 值的范围相似,如羊八井地热水 $\delta^{11}\text{B}$ 为 $-13.83\text{‰} \sim -8.37\text{‰}$ ^[38-39],羊易地热水 $\delta^{11}\text{B}$ 为 $-9.7\text{‰} \sim -5.0\text{‰}$ ^[39]。这些地热水中 B 被认为存在岩浆流体的贡献^[6,39,47],相似的 $\delta^{11}\text{B}$ 范围表明大柴旦热泉水 B 的来源可能存在岩浆流体的补给或者岩浆脱气输入。

Li 同位素在示踪地热流体及流体来源有良好的应用前景^[7]。大柴旦热泉 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $+2.29\text{‰} \sim +4.33\text{‰}$ ^[48-49],与上地幔岩浆 $\delta^7\text{Li}$ 值 $+3\text{‰} \sim +5\text{‰}$ 、岛弧

岩浆 $\delta^7\text{Li}$ 值 $+2\text{‰} \sim +6\text{‰}$ ^[50]、冰岛 Krafla 地热田 $\delta^7\text{Li}$ 值 $+3.5\text{‰} \sim +8.1\text{‰}$ ^[51] 以及存在岩浆热源的地热水(如西藏羊八井、色米、搭格架地热水) $\delta^7\text{Li}$ 范围 $-1.7\text{‰} \sim +3.8\text{‰}$ ^[47] 相似,进一步表明大柴旦热泉水 Li 的来源可能与岩浆流体补给有关。结合大柴旦热泉水源和热源的研究进展,岩浆流体补给或岩浆脱气输入过程不仅对热泉形成过程存在影响,还对热泉 B、Li 的富集有显著的影响。

大柴旦热泉水高的 Cl/Br 比和地表径流的化学组成,显示有蒸发岩组分的影响^[16],这可能和来自柴达木盆地盐坪和沙漠的石盐、石膏和硼酸盐矿物的风成沉积物有关^[10]。柴达木盆地盐湖众多,盐渍化和盐漠化极为发育,频繁发生的盐尘暴携带的盐类物质,降落到地表直接或间接补给盐湖^[52-54],显然这种盐类矿物会在柴北缘热泉区山系中持续加积,形成风成沉积物,该沉积物经水溶解,导致初始流体(下渗水)携带 B、Li^[18]。在大的时空尺度下大气降水和冰雪融水在山系表面溶解风成沉积物中的含 B、Li 蒸发岩矿物为初始流体(下渗水)贡献的 B、Li 也不容忽视。

因此,大柴旦热泉 B、Li 的物源主要包括:(1) 花岗岩源岩的高温水岩淋滤作用;(2) 岩浆流体补给或岩浆脱气输入;(3) 风成沉积物中易溶盐类矿物的溶解。但各端元 B、Li 的贡献率仍需定量化研究,尤其是岩浆流体补给或岩浆脱气输入与否则仍存在较大争议,需要更多地球化学指标的精细约束,高温水岩作用过程中不同矿物的溶解速率与硼、锂的释放效率仍不清楚,风成沉积物的矿物组成及其分相淋滤过程中硼、锂的解析能力尚不明确。

大柴旦热泉硼、锂的富集成因可初步解释为,大气降水(在高山区为冰雪融水)在山系表面溶解风成沉积物中含 B、Li 盐类矿物,这些流体沿裂隙到达深部花岗岩热储时,获得岩浆流体或岩浆脱气输入 B、Li,由于温度、压力的提高及幔源岩浆脱气作用,加快了流体与富 B、Li 围岩的水岩反应,淋滤了更多的 B、Li,母地热流体上升过程中混入了约 66% 的冷水,造成热泉水 B、Li 含量的降低,但仍相对富集 B、Li,最后富 B、Li 热泉水在地表涌出,补给大柴旦盐湖,形成富 B、Li 盐湖卤水矿床(图 4)。

上述工作对大柴旦热泉中 B、Li 的物源与富集机制已进行了诸多有益的探讨,然而从“源汇”成矿系统角度审视,仍需要对热泉区域围岩、风成沉积物

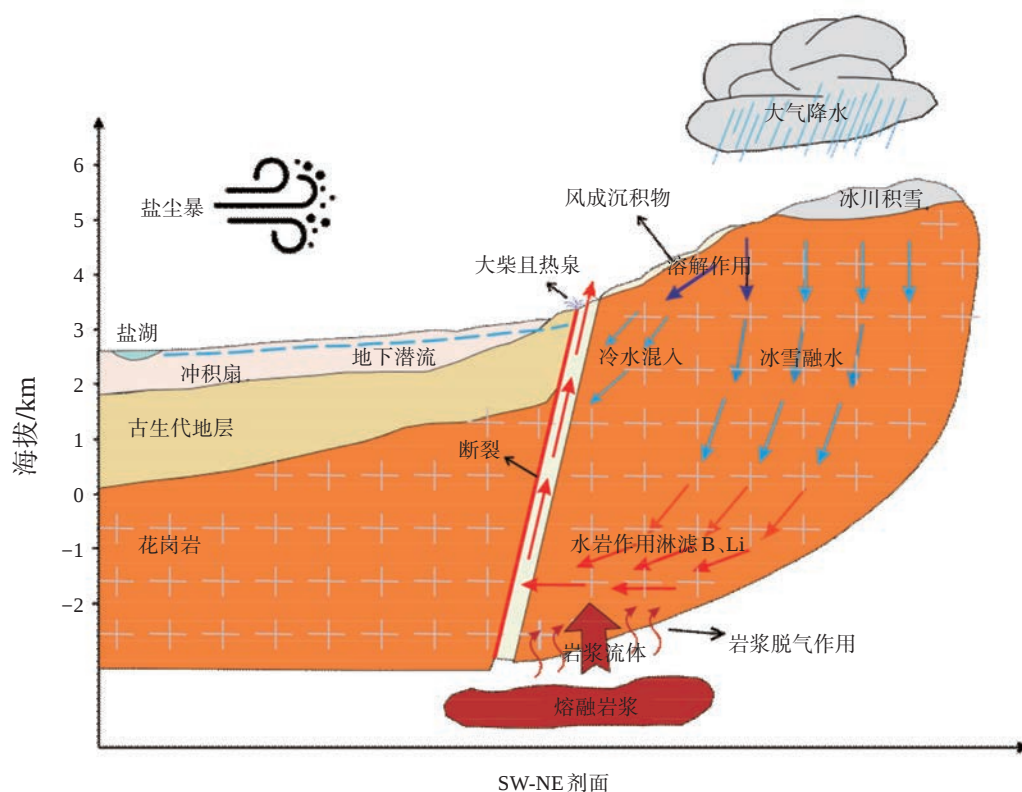


图4 大柴旦热泉富硼、锂模式图,据参考文献[16][18]修改

Fig. 4 B, Li-rich pattern diagram of the Da Chaidam hot spring, modified according to [16][18]

的矿物组成、常微量元素及同位素地球化学开展详细研究,同时,考虑地球物理方法和高温高压模拟实验的综合应用,区域热泉富B、Li的综合对比分析也是亟待深入研究的关键环节。

4 结论与展望

1) 综合前人的研究成果及本文的初步计算,得出大柴旦热泉水主要来源于大气降水,在高山区为冰雪融水,补给高程约为5 980 m;区内分布的花岗岩是大柴旦热泉热储围岩,热储温度约为194.5 °C,循环深度约为7 630 m,上升过程中混入了约66%的冷水。岩浆流体的补给或岩浆脱气过程可能为热泉提供了热量。然而,由于热泉存在岩浆热液等流体的掺杂痕迹,尤其是不同水体混合比例的定量研究仍未系统开展,因此,基于水体氢氧同位素高程效应计算的水文循环补给模式仍存在较大不确定性。后期应从地热学专业角度对该区域热泉进行系统的标准化采样与分析,运用多维非传统稳定同位素(B-Li-Sr)并结合岩石学及岩石淋滤实验、地球物理勘查等,才能更精细的刻画该区域热泉的成因及其循环

模式。

2) 研究进展表明大柴旦热泉的B、Li物源主要包括花岗岩源岩的高温水岩淋滤作用,岩浆流体补给或岩浆脱气输入和风成沉积物中易溶盐类矿物的溶解。然而,最为突出的科学问题是不同端元的B、Li贡献仍不清楚,地层中高温水岩作用的岩石淋滤过程及其岩石学证据缺乏,岩浆流体或岩浆脱气作用中B、Li的地球化学行为并不清楚,风成沉积物的分布范围及其淋滤程度尚未开展系统研究。因此,加强研究区岩石学与矿物学系统研究,查明富硼锂矿物组合及其寄主岩石赋存特征,尤其是借助高温高压室内模拟实验,揭示流体中B、Li在深部环境中的被萃取过程与富集机理,是对该区域热泉及青藏高原同类型热泉中资源元素富集规律深化认识的关键步骤。

致谢:评审专家提出的建设性意见和建议使笔者受益匪浅,在此衷心感谢。

参考文献:

[1] 张景荣,陆建军,王蔚. 论湖南石门神-(金)矿床的古热泉成因

- [J]. 地质论评, 1994, (5): 429-435.
- [2] 王登红, 付小方, 应汉龙. 四川西部现代热泉沉积物地球化学特征及意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, (5): 878-883.
- [3] 郭清海, 杨晨. 西藏搭格架高温热泉中钨的水文地球化学异常[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2544-2554.
- [4] 郭清海. 岩浆热源型地热系统及其水文地球化学判据[J]. 地质学报, 2020, 94(12): 3544-3554.
- [5] 牛新生, 刘喜方, 吕苑苑, 等. 西藏当雄错流域热泉成因机制及其对盐湖成矿物质(Li-Rb-Cs)的供给[J/OL]. 中国地质: 1-19[2023-04-13].
- [6] 刘明亮, 正安婷, 尚建波, 等. 高温地热流体中硼的地球化学研究进展[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 878-893.
- [7] 魏帅超, 张薇, 付勇, 等. 我国地热水中锂元素分布特征及资源开发利用[J/OL]. 中国地质: 1-32[2023-05-29].
- [8] 王晨光, 郑绵平, 张雪飞, 等. 青藏高原南部地热型锂资源[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 24-36.
- [9] 姜盼武. 柴达木盆地中北缘水-岩硼含量分布特征及富硼流体的物源分析[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2020.
- [10] 李斌凯. 青藏高原富硼盐湖的物质来源与迁移富集过程及形成模式[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2022.
- [11] Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, *et al.* Bright Spots, Structure, and Magmatism in Southern Tibet from Indepth Seismic Reflection Profiling[J]. Science, 1996, 274(5293): 1688-1690.
- [12] Chen L S, Booker J R, Jones A G, *et al.* Electrically Conductive Crust in Southern Tibet from Indepth Magnetotelluric Surveying[J]. Science, 1996, 274(5293): 1694-1696.
- [13] Kind R, Ni J, Zhao W, *et al.* Evidence from Earthquake Data for a Partially Molten Crustal Layer in Southern Tibet[J]. Science, 1996, 274(5293): 1692-1694.
- [14] 张彭熹, 等. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 27, 175.
- [15] 郑绵平. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989: 325.
- [16] Stober I, Zhong J, Zhang L, *et al.* Deep hydrothermal fluid-rock interaction: the thermal springs of Da Qaidam, China[J]. Geofluids, 2016, 16(4): 711-728.
- [17] 李建森, 董华庆, 姜有旭, 等. 大柴旦温泉沟泉的地球化学成因[J]. 盐湖研究, 2017, 25(2): 55-59.
- [18] 姜盼武, 樊启顺, 秦占杰, 等. 柴达木盆地水-岩硼含量分布特征及其富集区域物源讨论[J]. 盐湖研究, 2021, 29(1): 44-55.
- [19] 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3531-3554.
- [20] 蔡鹏捷. 柴北缘开屏沟超基性杂岩体地质、地球化学特征及对找矿的指示[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [21] 陈能松, 王新宇, 张宏飞, 等. 柴-欧微地块花岗岩地球化学和Nd-Sr-Pb同位素组成: 基底性质和构造属性启示[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, (1): 7-21.
- [22] 吴才来, 郝源红, 吴锁平, 等. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, (8): 930-949.
- [23] 彭渊, 马寅生, 刘成林, 等. 柴达木盆地北缘晚海西—印支期古构造应力分析[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 51-59.
- [24] 彭渊, 马寅生, 刘成林, 等. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 206-221.
- [25] 吴向农. 大柴旦幅 J-46-24 达布逊湖幅 J-46-30 1/20 万区域地质调查报告[R]. 青海省区综大队(原第一区测队), 1980.
- [26] 青海省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质专报一[R]. 区域地质第24号, 青海省区域地质志, 1991.
- [27] White D E. Hydrology, activity, and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada[M]. City: US Government Printing Office, 1968.
- [28] 闫佰忠. 长白山玄武岩区地热水资源成因机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [29] 戴蔓, 蒋小伟, 罗银飞, 等. 地热水氢氧同位素控制因素识别与定量计算: 以青海贵德盆地为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 420-427.
- [30] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [31] 孙从建, 张子宇, 陈伟, 等. 亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 19-28.
- [32] Clark I D & Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [33] 刘玲霞, 杜煜, 祁士华. 青藏高原东北缘江仓盆地温泉水文地球化学特征及意义[J/OL]. 现代地质: 1-16[2023-06-13]. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.017.
- [34] 汪集肠, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- [35] 赵铎渊, 王帅, 陈峰, 等. 帕米尔高原东北缘中高温地热流体水文地球化学特征及成因机制[J/OL]. 地球科学: 1-18[2023-06-13].
- [36] 王瑞娟. 青海省共和盆地恰卜恰地热水地球化学特征与资源评价[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [37] 李永革. 青海省共和盆地恰卜恰地区地下水水文地球化学特征及成因分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- [38] Zhang W J, Tan H B, Zhang Y F, *et al.* Boron Geochemistry from Some Typical Tibetan Hydrothermal Systems: Origin and Isotopic Fractionation[J]. Applied Geochemistry, 2015, 63: 436-445.
- [39] Yuan J F, Guo Q H, Wang Y X. Geochemical Behaviors of Boron and Its Isotopes in Aqueous Environment of the Yangbajing and Yangyi Geothermal Fields, Tibet, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 140: 11-22.
- [40] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1988, 52(12): 2749-2765.
- [41] Guo Q H, Wang Y X, Liu W. Hydrogeochemistry and environmental impact of geothermal waters from Yangyi of Tibet, China [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2009, 180(1): 9-20.
- [42] Guo Q H, Wang Y X. Geochemistry of the hot springs in the Tengchong hydrothermal areas, Southwestern China [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2012, 215: 61-73.
- [43] Fournier R O & Truesdell A H. Geochemical indicators of subsurface temperature. Part II. Estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold water [J]. Journal of Research

- of the U.S. Geological Survey, 1974, 2(3): 263-270.
- [44] Nathenson M, Guffanti M. Compilation of geothermal-gradient data in the conterminous United States [C]//IEEE International Geoscience&Remote Sensing Symposium. 1987.
- [45] Wu S F, You C F, Lin Y P, *et al.* New Boron Isotopic Evidence for Sedimentary and Magmatic Fluid Influence in the Shallow Hydrothermal Vent System of Milos Island (Aegean Sea, Greece) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2016, 310: 58-71.
- [46] 李俊周, 孙大鹏. 大柴达木盐湖硼同位素地球化学研究[J]. *地球化学*, 1996(3): 277-285.
- [47] 张煜道, 谭红兵, 丛培鑫, 等. 西藏羊八井—当雄断裂带地热系统B、Li、Rb、Cs富集机制[J/OL]. *沉积学报*; 1-18[2023-06-13]. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.129.
- [48] 肖应凯, 祁海平, 王蕴慧, 等. 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(4): 329-338.
- [49] He M Y, Luo C G, Yang H J, *et al.* Sources and a proposal for comprehensive exploitation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin on the northern Tibetan Plateau, China: Evidence from Li isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 117: 103277.
- [50] Tomascak P B, Tera F, Helz R T, *et al.* The absence of lithium isotope fractionation during basalt differentiation: New measurements by multicollector sector ICP-MS[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(6): 907-910.
- [51] Sanjuan B, Millot R, Innocent C, *et al.* Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation[J]. *Chemical Geology*, 2014, 428: 27-47.
- [52] 张西营, 李雯霞, 耿鋈, 等. 柴达木盆地盐尘暴及其资源生态环境影响[J]. *盐湖研究*, 2020, 28(1): 11-17.
- [53] 耿鋈, 张西营, 李雯霞, 等. 柴达木盆地中东部表土盐类矿物分布特征及其与盐尘暴物源联系[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(1): 121-130.
- [54] 耿鋈. 柴达木盆地南部大气降尘中可溶盐时空分布特征及物源探讨[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2021.

Research Progress on the Genesis of Da Chaidam Hot Springs and the Enrichment Mechanism of B and Li elements

MO Shengpeng^{1,2,3}, LI Qingkuan^{1,2}, LI Wenxia^{1,2,3*}, YUAN Qin^{1,2},
QIN Zhanjie^{1,2*}, DU Yongsheng^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: Studies on the genesis of Da Chaidam hot springs, and its boron and lithium enrichment mechanism is of great significance to reveal the metallogenic regularity of boron-lithium-rich salt lake brine deposits in this area. At the same time, it is benefit to understand the deep hydrological process of similar boron-lithium-rich hot springs in the Qinghai-Xizhang Plateau. This paper reviews the research status of the genesis of Da Chaidam hot springs from the perspective of geothermals, and focuses on the water and heat sources, and heat storage mechanism of Da Chaidam hot springs, as well as the boron-lithium sources and enrichment process. The results show that the water source of Da Chaidam hot springs is mainly meteoric waters. The recharge elevation is about 5 980 m, the temperature of geothermal reservoir is about 194.5 °C, and the circulation depth is about 7 630 m, and about 66% of the cold water is mixed during the upwelling process. Supply of magmatic fluids may provide heat for hot springs. Boron and lithium in hot springs may come from high temperature water-rock leaching of granite rocks, magmatic fluids, and dissolution of soluble salt minerals in aeolian sediments. Researches on the geothermal system and the enrichment process of strategic resource elements in the Da Chaidam hot springs are insufficient. Future research works should focus on quantitative evaluation of elemental contributions from different fluids, determination of the geochemical behavior of boron and lithium, and the simulation of water-rock interaction.

Key words: Genesis; Magmatic fluid; Boron and Lithium elements; Da Chaidam hot springs