

青藏高原盐湖卤水中溴的分布特征及来源初探*

蔚昊学^{1,2,3}, 李庆宽^{1,2**}, 都永生^{1,2}, 秦占杰^{1,2}, 樊启顺^{1,2}, 唐发满⁴, 杨佺忠⁴, 甘仁香⁴, 山发寿^{1,2}, 袁 秦^{1,2}

(1: 中国科学院青海盐湖研究所, 盐湖资源绿色高值利用重点实验室, 西宁 810008)

(2: 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 五矿盐湖有限公司, 西宁 810008)

摘要: 溴是完备工业体系的关键必备元素。盐湖卤水是溴的重要来源。青藏高原盐湖众多, 富含钾、锂、硼等资源元素, 开发潜力巨大。然而, 目前针对青藏高原盐湖溴浓度、分布特征及其物源的研究仍然薄弱。本次研究采集了 26 个青藏高原盐湖表卤水样品并分析其溴浓度, 进一步总结其他 64 个已报道盐湖数据, 系统分析了青藏高原盐湖溴浓度分布特征, 并进一步探讨了溴的可能物源。结果表明: 青藏高原盐湖表卤水溴分布在 0.5~246.8 mg/L 之间, 平均为 41.1 mg/L, 其中, 碳酸盐型盐湖卤水平均溴浓度最高 (47.0 mg/L), 且集中分布在高原南部, 而氯化物型盐湖平均溴浓度最低 (30.1 mg/L), 盐湖溴浓度呈现自南向北降低的趋势; 青藏高原盐湖中溴有多种来源, 高原南部富溴盐湖溴的来源可能主要与热泉补给有关, 而柴达木盆地盐湖高溴来源可能主要与深部地层水 (如油田水、背斜构造裂隙孔隙水、砂砾孔隙水、气田水等) 补给有关。

关键词: 青藏高原; 盐湖; 溴; 分布特征; 物源

Distribution characteristics and possible sources of bromine in salt lakes on the Qinghai-Xizang Plateau*

Yu Haoxue^{1,2,3}, Li Qingkuan^{1,2**}, Du Yongsheng^{1,2}, Qin Zhanjie^{1,2}, Fan Qishun^{1,2}, Tang Faman⁴, Yang Quanzhong⁴, Gan Renxiang⁴, Shan Fashou^{1,2} & Yuan Qin^{1,2}

(1: Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P.R. China)

(2: Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining 810008, P.R. China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China)

(4: Minmetals Salt Lake Co., Ltd, Xining 810008, P.R. China)

Abstract: Bromine is a key essential element in a complete industrial system. Salt lake is an important source of bromine. There are numerous salt lakes in the Qinghai-Xizang Plateau, which are rich in resource elements such as potassium, lithium, and boron, with enormous development potential. However, researches on the bromine content, distribution characteristics, and sources of salt lakes in the Qinghai-Xizang Plateau are still limit. This study collected 26 surface brine samples from salt lakes on the Qinghai-Xizang Plateau and analyzed their bromine contents. It further summarized data from 64 other reported salt lakes, systematically analyzed the distribution characteristics of bromine content in salt lakes on the Plateau, and further explored potential sources of bromine. The results showed that the distribution of Br in the surface brine of salt lakes on the Qinghai-Xizang Plateau ranged from 0.5 to 246.8 mg/L, with an average of 41.1 mg/L. High bromine salt lakes were concentrated in the southern part of the plateau, show-

* 2023-09-12 收稿; 2023-11-06 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42202096)、青海省科技厅自然科学基金青年基金项目 (2021-ZJ-974Q) 和第二次青藏高原综合考察项目 (2019QZKK0805) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: liqingkuan@isl.ac.cn。

ing a decreasing trend from south to north. At the same time, the average bromine content of carbonate type salt lakes was the highest, while the average bromine content of chloride type salt lakes was the lowest; Evaporation concentration was not the main controlling factor for the enrichment of bromine in salt lake. There are multiple sources of bromine in salt lakes, and the sources of bromine in bromine rich salt lakes in the southern plateau might be mainly related to the supply of hot springs, while the high bromine sources in salt lakes in the Qaidam Basin were mainly related to the supply of deep formation water.

Keywords: Qinghai-Xizang Plateau; salt lake; bromine; distribution characteristics; material source

溴(Br)是卤族元素,是常温常压下唯一的液态非金属元素,于1826年由法国化学家Balard发现。溴及其化合物广泛应用于精细化工、高端制造、医药、环保、储能等领域,是完备工业体系的关键必备资源^[1]。根据ChemAnalyst的分析,2020年全球溴需求量为113万t,预计到2030年将达到181.2万t(<https://www.chemanalyst.com/>)。目前,溴素生产主要集中在美国、以色列、中国、约旦和日本^[2]。我国溴需求量逐年增加,据2023—2027年中国溴素行业市场行情监测及未来发展前景研究报告显示,2022年对外依存度为30.2%(www.newsijie.com),较高的对外依存度严重影响着我国的溴产业安全。

溴作为高度挥发分,易富集于液相或气相中,除少量固体含溴矿物溴银矿(AgBr)和氯溴银矿[Ag(Cl, Br)]外,地壳中大部分溴富集在海洋中,故溴有“海洋元素”之称^[1,3]。全球已开发的溴资源主要包括海水、盐湖卤水及地下卤水等。海洋溴平均浓度为65 mg/L^[4],地表富溴水体的形成一般认为与海水关系密切。位于约旦裂谷的死海,是世界上溴浓度最高的水体,平均浓度达5200 mg/L^[5]。美国阿肯色州和密歇根州地下卤水中溴浓度为2000~5000 mg/L^[6]。中国溴资源主要集中在莱州湾的地下卤水,从1980s初到2016年,莱州湾地下卤水中的溴浓度从400 mg/L降至70 mg/L^[7-8]。以上卤水中溴的来源均与(古)海水密切相关^[8-9]。

青藏高原内流区分布着众多盐湖,是我国乃至全世界盐湖数量最多、资源最丰、类型齐全、海拔最高的盐湖区之一。除赋存大量石盐、芒硝、碳酸盐矿物外,部分盐湖还显著富集钾、锂、硼、铷、铯、溴等资源元素。前人围绕该区域盐湖钾、锂、硼等资源禀赋特征开展了较详细的研究,但对盐湖溴分布特征的研究仍然薄弱^[10]。张西营等^[10]对中国盐湖卤水溴的分布特征研究发现,西藏中部存在一些溴浓度异常高的盐湖,如扎布耶茶卡南湖晶间卤水溴浓度高达512.45 mg/L,与黄海海水蒸发浓缩至原始体积的10%时浓度相近。张彭熹^[11]研究显示,柴达木盆地盐湖的平均溴浓度为34.14 mg/L,以牛郎织女湖为中心的湖区溴浓度相对较高,其次为大小柴旦湖区、察尔汗湖区和尕斯库勒湖区。青藏高原现代盐湖形成于典型的陆相环境中,海水几乎不可能为盐湖提供大量溶质来源^[11-13]。研究显示,溴在非海相盆地水体中的可能来源包括:(1)雨水中溶解的海盐气溶胶;(2)古代海洋沉积物的封存水;(3)古海洋蒸发盐溶解;(4)火山温泉;(5)火成岩和变质岩及矿床中的流体包裹体;(6)热液地下水和泉水^[14-16]。然而,目前针对青藏高原盐湖溴来源的相关研究鲜有报道。

本次研究系统总结了前人已报道的青藏高原盐湖相关数据,并补充分析部分盐湖溴浓度,进一步讨论青藏高原盐湖溴的分布特征,对盐湖溴的可能来源进行初步研究。本研究成果有助于深入认识陆相盐湖富溴的成因机制,并为盐湖资源的综合高效开发利用提供基础数据。

1 青藏高原盐湖概况

青藏高原位于亚洲南部,平均海拔超过4500 m,面积超过250万km²,有“世界屋脊”“地球第三极”之称。高原上分布着近2000个面积大于1 km²的湖泊,其中盐湖有326个,占湖泊总面积的48%,集中在青藏高原腹地及柴达木盆地等内流区(图1),是我国盐湖分布最密集、范围最广、海拔最高、类型齐全、资源最丰的区域之一^[17]。除赋存石盐、芒硝、碳酸盐等一般盐类矿产外,部分盐湖还拥有富有的钾、镁、锂、硼、铷、铯、溴等高值资源元素,资源开发潜力巨大。

青藏高原盐湖成盐时间较晚,多数地区盐湖的盐类沉积发生在第四纪晚期(晚更新世末期—全新世时期)^[18]。盐湖矿化度在空间上呈现由南、东南向北、西北逐渐增加的趋势,大体与年蒸发量和年干燥度变化趋势一致^[19]。内流区盐湖水化学类型在空间上呈现一定的规律性,由南到北可分为碳酸盐型带、硫酸钠亚型带、硫酸镁亚型带、氯化物—硫酸盐型带,不同水化学类型盐湖矿物组合特征不同,详见郑绵平等的

研究^[19]。

青藏高原众多盐湖是高原特殊背景下构造—物源—气候耦合的产物。新生代以来,印度板块向亚欧板块俯冲碰撞导致青藏高原多个盆地—山岭结构的形成,并在平行于主应力方向上,发育一系列南北向裂谷,最终形成大量现代山间内流盆地,为盐湖形成提供了空间位置。高原内部水系纵横交错,冰川水、雨水、地表河流、温泉和各类地下水为盐湖输送了大量的盐类物质来源,尤其是热泉水,是盐湖锂、硼、铷、铯的重要补给源^[12]。据统计,青藏高原已知温泉超过 700 处,且温泉普遍具有较高的矿化度,是盐湖重要的溶质来源。此外,岩石风化淋滤和继承的古代含盐岩系也是高原盐湖的主要物质来源。而青藏高原极高的海拔和众多山系的存在使大洋水气难以到达高原内部,区域气候极端干旱,湖水大量蒸发,盐类物质逐渐浓缩富集,最终湖泊演化为盐湖。

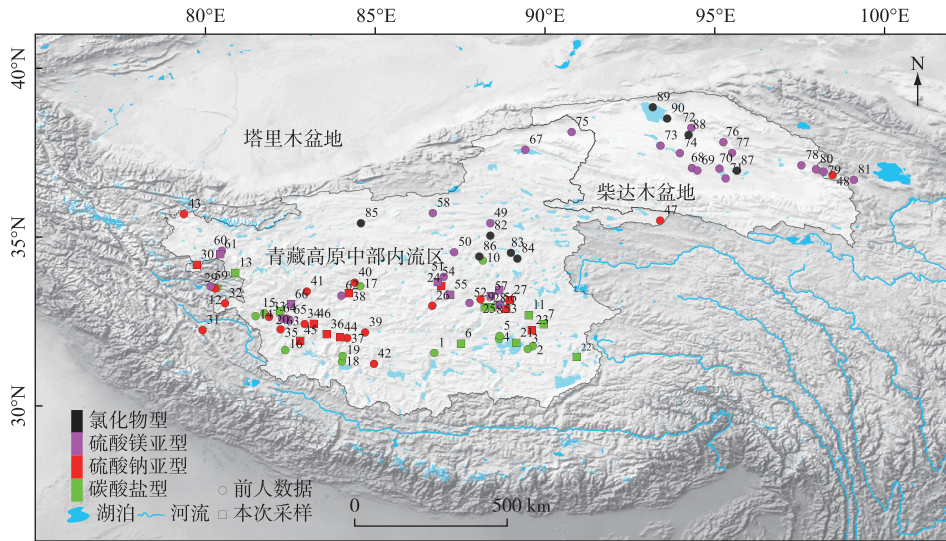


图1 青藏高原区域概况和采样点分布

Fig.1 Overview of the Qinghai-Xizang Plateau and distribution of sampling sites

2 样品采集、分析与数据整理

2.1 样品采集与分析

本研究于 2021 年采集青藏高原内流区 26 个盐湖的湖表卤水样品,盐湖名称见附表 I。每件样品采集至酸洗过的 5 L 低密度聚乙烯塑料桶中,并用所采集水样将塑料桶涮洗 3 遍,密封保存。现场测试水体 pH、氧化还原电位、温度,并做好记录,样品尽快运至实验室,并用 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤后进行分析测试。

卤水样品的溴、氯离子浓度在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成,溴、氯离子浓度采用离子色谱仪(ICS-5000+)测试,精度为 0.2%~0.3%。卤水样品的矿化度由阴、阳离子相加之和计算。测试结果详见附表 I。

2.2 数据整理

除以上 26 个盐湖卤水样品外,本次研究搜集整理青藏高原其他 64 个盐湖湖表卤水溴、氯离子浓度及其矿化度。数据主要来自于《中国盐湖志》^[17],仅有 12 个盐湖卤水相关数据来自于文献资料,样品点位见图 1,具体数据见附表 I。

3 结果与讨论

3.1 青藏高原盐湖卤水溴浓度与分布特征

青藏高原盐湖溴浓度分布在 0.5~246.8 mg/L 之间,平均为 41.1 mg/L,低于现代海水溴浓度(65 mg/L),

但显著高于一般陆相水体的溴浓度 (<20 mg/L), 表明青藏高原部分盐湖可能存在富溴水体的补给^[20]。溴与氯离子地球化学性质相近, 溴氯系数 ($\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$) 广泛用于研究水体形成与演化过程, 可反映补给水体的物源信息。青藏高原盐湖卤水的溴氯系数介于 0.01~18.75 之间, 平均为 1.59, 同样低于海水 (3.61), 与其陆相盐湖低溴特征相吻合。

通过盐湖溴浓度等值线图 (图 2a) 可以看出, 青藏高原盐湖溴浓度整体呈现南高北低的趋势, 这与青藏高原盐湖矿化度变化趋势 (北高南低) 相反^[19], 表明蒸发浓缩可能不是盐湖富溴的原因。高溴盐湖主要分布在高原南部, 形成了 3 个高值中心, 自西向东分别为恰茶卡 (178.4 mg/L)、扎布耶茶卡 (南湖: 242.0 mg/L; 北湖: 246.8 mg/L)、当穹错 (200.0 mg/L), 以上 3 个盐湖的溴浓度远高于海水 (65 mg/L), 且高于盐湖卤水矿产综合评价指标 (50~60 mg/L), 显示了良好的开发前景。而高原北部的柴达木盆地盐湖卤水溴浓度普遍偏低, 平均值为 28.8 mg/L, 仅尕斯库勒、大一小柴旦、牛郎织女盐湖溴浓度较高。对比青藏高原盐湖卤水溴浓度与溴氯系数等值线图 (图 2b) 发现, 虽然溴氯系数高值区同样分布在高原内流区南部, 且同样形成 3 个高值中心, 但与溴高值区并不对应, 自西向东分别为别若则错 (溴: 60.7 mg/L; 溴氯系数: 16.85)、物玛错 (溴: 14.8 mg/L; 溴氯系数: 18.44)、达则错 (溴: 13.4 mg/L; 溴氯系数: 14.89)、蓬错 (溴: 15.0 mg/L; 溴氯系数: 18.75)。以上盐湖除别若则错溴浓度较高外, 其他 3 个盐湖溴浓度平均为 14.4 mg/L, 远低于海水和青藏高原盐湖卤水平均值, 但其溴氯系数远高于海水, 表明以上 3 个盐湖可能有异常富溴的物源补给。此外, 3 个盐湖卤水平均矿化度仅为 14.6 g/L, 显示其蒸发浓缩程度较低, 而溴作为保守元素, 随着湖水蒸发浓缩, 溴浓度势必快速增加, 从而具有经济开发价值。柴达木盆地盐湖卤水溴氯系数明显偏低, 平均为 0.17, 远低于海水和青藏高原内流区南部盐湖。进一步对比青藏高原盐湖溴浓度与溴氯系数 (图 3) 发现, 二者不存在相关性, 说明不同盐湖溴的来源差异较大, 青藏高原盐湖溴可能存在多种物源。

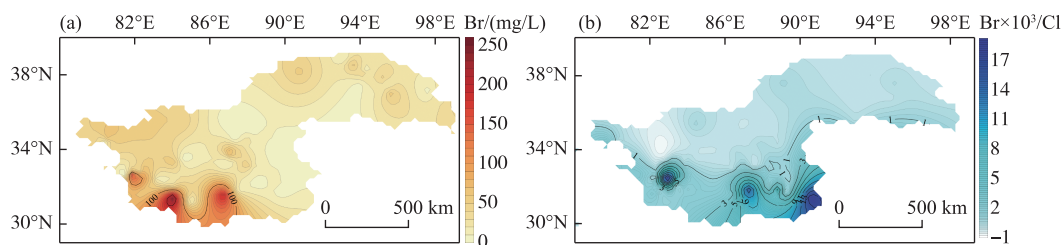


图 2 青藏高原盐湖溴浓度 (a) 和溴氯系数 (b) 等值线图

Fig.2 Isolines of Br concentration (a) and $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ (b) in salt lakes of the Qinghai-Xizang Plateau

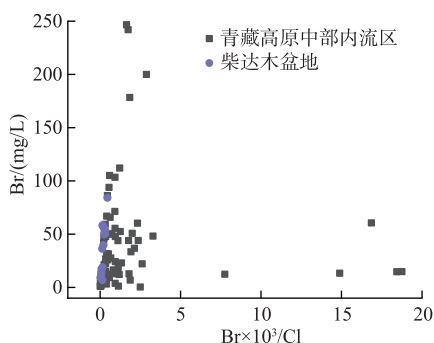


图 3 青藏高原盐湖溴浓度与溴氯系数的相关性

Fig.3 Correlation of Br concentration and $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ in salt lakes of the Qinghai-Xizang Plateau

进一步分析高溴浓度和高溴氯系数的盐湖水质化学类型, 发现恰茶卡、扎布耶茶卡、当穹错、达则错、蓬错等均为碳酸盐型盐湖, 似乎意味着碳酸盐型盐湖溴浓度异常高。而通过总结不同水化学类型盐湖溴浓度和

溴氯系数(图4)发现,碳酸盐型盐湖平均溴浓度和溴氯系数最高(47.0 mg/L,3.1),硫酸钠亚型(39.8 mg/L)和硫酸镁亚型(36.8 mg/L)盐湖平均溴浓度接近,但硫酸钠亚型(2.31)盐湖溴氯系数明显高于硫酸镁亚型(0.37),氯化物型盐湖溴浓度和溴氯系数最低,分别为30.1 mg/L和0.23。前人研究显示,碳酸盐型盐湖卤水的形成可能与蚀源区富长石围岩风化及青藏高原广泛分布的富HCO₃⁻地热水的大量补给有关^[13]。青藏高原地热水显著富集硼锂铷铯溴等资源元素^[21],是盐湖特种资源元素富集的重要补给源。因此,地热水可能是碳酸盐型盐湖富溴的重要原因。而硫酸盐型和氯化物型盐湖中溴的来源可能受多种因素(围岩风化、地热水、溶盐水等)的共同控制,未来仍需开展进一步的研究。

此外,对比不同水化学类型盐湖溴浓度特征及其与蒸发浓缩指标(氯浓度)的相关关系(图5)发现,针对碳酸盐型盐湖,蒸发浓缩有助于溴的富集,且碳酸盐型盐湖卤水平均溴浓度最高;而针对硫酸盐型和氯化物型盐湖,湖水溴浓度与蒸发浓缩程度相关性较差,湖水溴浓度的差异可能主要与物源补给多少有关。总体来看,青藏高原富溴盐湖的形成并不受控于蒸发浓缩程度的增加,而与溴的补给源密切相关。

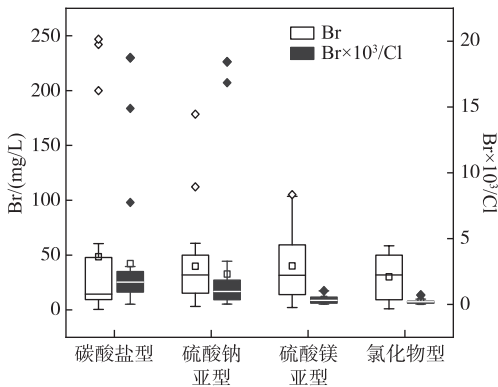


图4 青藏高原不同水化学类型盐湖的溴浓度和溴氯系数

Fig.4 Br concentration and Br×10³/Cl of different hydrochemical types of salt lakes in the Qinghai-Xizang Plateau

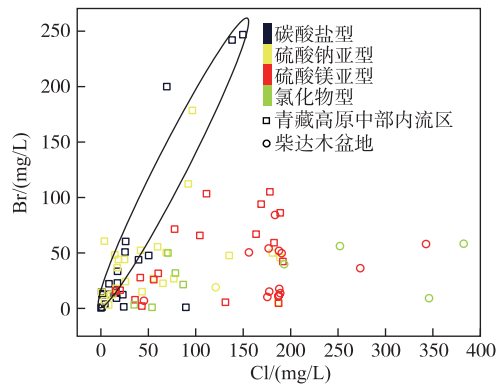


图5 青藏高原不同水化学类型盐湖的溴、氯浓度对比

Fig.5 Br and Cl concentrations of different hydrochemical types of salt lakes on the Qinghai-Xizang Plateau

3.2 青藏高原盐湖卤水溴的可能来源

前文讨论显示,青藏高原盐湖中溴可能存在多种来源,且内流区南部盐湖溴的来源可能与地热水密切相关。本次研究搜集整理了高原南部西藏自治区50个已报道溴浓度的温泉,发现温泉中溴浓度普遍较高,分布在0.05~18.7 mg/L之间,平均为4.58 mg/L,且溴氯系数为0.07~279.13,平均为59.1^[17,21-22]。部分温泉与盐湖具有对应的补给关系,且受补给的盐湖溴浓度明显较高,如当雄错、扎布耶茶卡、大柴旦盐湖等^[21,23-24],而其他活动在西藏南部和东部外流区温泉并未补给至盐湖。但前人研究显示,在藏北高原存在大量古热泉活动的痕迹^[13],并对盐湖有着一定的补给作用。因此,本文认为热泉或古热泉极高的溴浓度和溴氯系数很有可能是导致青藏高原内流区南部富溴和高溴氯系数盐湖卤水形成的关键物源。据统计,青藏高原南部温泉每年溴组分输出量约为409.96 t^[13],较高的溴通量也表明温泉可能是盐湖溴的主要补给源。前人研究指出,热泉是盐湖中锂、硼、铷、铯等特殊组分的重要来源^[12-13,25]。对比盐湖卤水中溴与锂、硼浓度的相关关系(图6,附表II),发现青藏高原内流区南部盐湖溴浓度与硼、锂浓度存在一定的正相关性,而柴达木盆地盐湖溴浓度与硼、锂并不存在显著相关性,说明高原南部盐湖溴很可能来自热泉^[26],而柴达木盆地盐湖溴则有不同来源。温泉中高溴浓度与高原俯冲碰撞背景下地壳局部重熔,溴元素分异演化进入流体富集的过程密切相关^[27]。同时,部分温泉中溴也可能存在蒸发岩溶滤、高温水岩反应等端元的贡献^[4]。因此,应针对区域地质地理情况、水文地质、元素源汇过程开展某一具体盐湖溴的来源与富集过程的具体研究。

青藏高原东北部柴达木盆地多个溴浓度较高的盐湖均为氯化物型或湖区内存在氯化物型晶间卤水,如

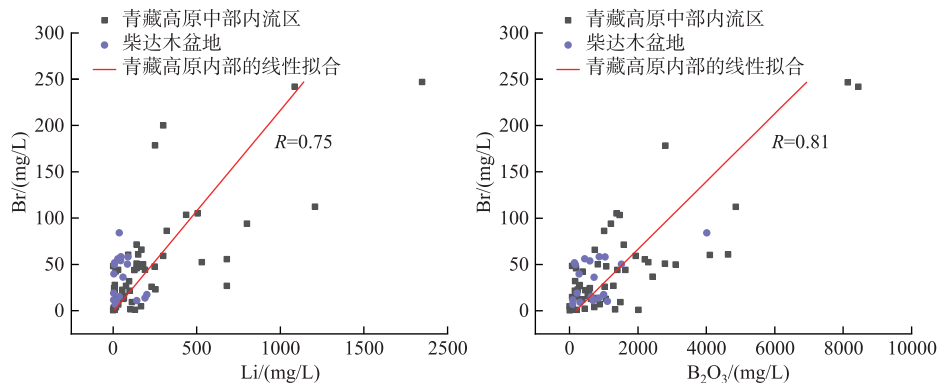


图6 青藏高原盐湖溴与锂、硼的相关性

Fig.6 Correlation between Br and Li, B in salt lakes on the Qinghai-Xizang Plateau

察尔汗盐湖东北部的协作湖、巴伦马海湖、牛郎织女湖、尕斯库勒湖等。前人研究显示,以上氯化物型盐湖的形成与盆地内部沿断裂带上涌的深部水的补给密切相关^[11,28,29-31]。柴达木盆地古近系和新近系地层中蕴藏着丰富的地下卤水,包括油田水、背斜构造裂隙孔隙水、砂砾孔隙水、气田水等。通过搜集典型地下卤水相关数据,发现溴浓度普遍较高,分布在0.1~537.0 mg/L之间,平均为43.2 mg/L(图7)^[32-38]。地下卤水可能通过盆地内部背斜构造或断裂上涌补给至盐湖区,成为盐湖的重要物质来源,如察尔汗盐湖东北部区域、巴伦马海盐湖、尕斯库勒盐湖、钾湖等^[11,28,30,39-41]。据前人研究,柴达木盆地深部地层水明显富钠—钙—氯离子,而贫硫酸根—碳酸根—碳酸氢根离子,且溴锶等微量离子浓度较高,该类水体补给至现代盐湖中,可明显改变现代盐湖卤水组成,使其变为氯化物型卤水,同时也使现代盐湖卤水中溴浓度增加^[39,42-43]。最终在盆地极端干旱的气候下,不断浓缩富集,使盐湖水体中溴浓度升高。深部卤水中高溴的来源可能与沉积地层溶滤、岩浆热液掺杂等作用有关^[35-36]。大一柴旦盐湖高溴的成因可能与其周边的热泉水及塔塔棱河上游泥火山水的补给有关。研究显示,大柴旦温泉是大柴旦盐湖硼锂元素的重要补给源,温泉溴浓度在0.26~0.65 mg/L之间,溴氯系数为1.49~1.86^[44],虽然低于西藏温泉溴浓度和溴氯系数,但仍远高于一般地表水体(柴达木盆地的鱼卡河和格尔木西河上游的溴浓度分别为0.012和0.028 mg/L,世界平均河水的溴浓度为0.02 mg/L)^[45,13],最终导致大柴旦盐湖溴浓度高于柴达木盆地其他盐湖,但低于藏南部分盐湖。补给小柴旦盐湖的塔塔棱河溴浓度明显升高,为0.076 mg/L^[13],在塔塔棱河上游分布着多个泥火山,如乌兰保姆、乌

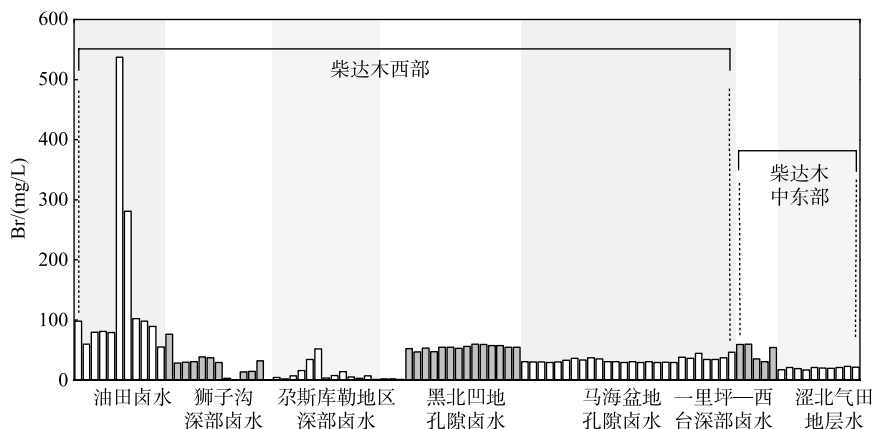


图7 柴达木盆地深部卤水溴浓度

Fig.7 Br concentration of deep formation brines in the Qaidam Basin

保图等,泥火山水中溴浓度较高,为 1.11~1.65 mg/L(未发表数据),大量的泥火山水补给进入塔塔棱河中,并最终进入小柴旦盐湖,经过蒸发浓缩,溴富集至较高的浓度(84.4 mg/L)^[17],近年由于湖泊受淡水影响迅速扩张,溴浓度降至 16.1 mg/L^[23]。

综上所述,青藏高原盐湖中溴具有多种来源,其南部盐湖中高溴的物源可能主要与温泉水的补给有关,而柴达木盆地氯化物型高溴盐湖卤水可能与深部地层水的补给有关。不可否认,大气降水、地表水等同样会为盐湖输入一定量的溴,但并不是盐湖溴富集的关键物源。

4 结论

青藏高原盐湖数量众多,富含钾、锂、硼等资源元素,具有重要的开发价值。目前,针对盐湖溴分布特征及其物源研究仍然薄弱。通过对青藏高原 90 个盐湖表卤水溴浓度的系统总结与分析,本次研究探讨了盐湖中溴的分布特征,初步分析了盐湖中溴的可能来源,得出结论如下:

1) 青藏高原盐湖溴浓度在 0.5~246.8 mg/L 之间,平均为 41.1 mg/L,且碳酸盐型盐湖平均溴浓度(47.0 mg/L)高于硫酸钠亚型(39.8 mg/L)和硫酸镁亚型(36.8 mg/L)盐湖,氯化物型盐湖溴浓度最低(30.1 mg/L);高溴盐湖主要分布在青藏高原内流区南部,呈自南向北降低的趋势。

2) 蒸发浓缩不是青藏高原富溴盐湖形成的主控因素。

3) 青藏高原盐湖溴可能有多重来源,初步认为高原南部盐湖溴的来源主要与区域大规模水热活动有关,而柴达木盆地富溴盐湖的形成与盆地内深部地层水(油田水、背斜构造裂隙孔隙水、砂砾孔隙卤水、气田水等)的补给有关。

致谢:感谢中国科学院青海盐湖研究所王波、薛园、李园、马修臻、马喆、韩丽等完成了常微量元素和矿物组成的测试工作。

5 附录

附表 I 和附表 II 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0329)。

6 参考文献

- [1] Kong WG, Wang DH, Liu XF. Bromine-the key resource of change. *Scientific and Cultural Popularization of Natural Resources*, 2021, (2): 22-25. [孔维刚,王登红,刘喜方.溴——变局之关键资源.自然资源科普与文化,2021,(2):22-25.]
- [2] Zhang YN, Chai SJ, Song D *et al.* Development status and future development trend of bromine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, **300**(3): 032018. DOI: 10.1088/1755-1315/300/3/032018.
- [3] Lin YT. Bromine resources in brine and their development prospects in China. *Geology of China*, 2000, **10**: 42-44. [林耀庭.我国卤水溴资源及其开发前景展望.中国地质,2000,**10**:42-44.]
- [4] 王奕青.青藏高原地热带稀有碱金属资源物源的卤素同位素示踪[学位论文].南京:南京大学,2020.
- [5] Salameh E, Tarawneh A, Al-Raggad M. Origin of high bromide concentration in the water sources in Jordan and in the Dead Sea water. *Ara-bian Journal of Geosciences*, 2016, **9**(5): 414. DOI: 10.1007/s12517-016-2431-9.
- [6] Wisniak J. The history of bromine from discovery to commodity. *NISCAIR-CSIR*, 2002, **9**(3): 263-271. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00088-1.
- [7] Su CY, Yang Y, Song XF. Study on the selective electrooxidation of bromine ions in the extraction of potassium from halite mines. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2022, **73**(7): 3007-3017. DOI: 10.11949/0438-1157.20220412. [苏晨昱,杨颖,宋兴福.岩盐矿提钾老卤中溴离子选择性电氧化过程研究.化工学报,2022,**73**(7):3007-3017.]
- [8] Regional trends in water chemistry, smacker formation, southwest Arkansas: Geochemical and physical controls. *AAPG Bulletin*, 1992, **76**(6): 864-894. DOI: 10.1306/bdff890c-1718-11d7-8645000102e1865d.
- [9] Du Y, Ma T, Chen LZ *et al.* Genesis of salinized groundwater in Quaternary aquifer system of coastal plain, Laizhou Bay, China; Geochemical evidences, especially from bromine stable isotope. *Applied Geochemistry*, 2015, **59**: 155-165. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.04.017.
- [10] Zhang XY, Shan FS, Shi GC *et al.* Comprehensive evaluation of the distribution characteristics and resource endowment of main metallogenetic elements in salt lake brine in China. *Salt Lake Research*, 2016, **24**(2): 1-11. [张西营,山发寿,石国成等.中国盐湖卤水主要成矿元素分布特征及其资源禀赋综合评价.盐湖研究,2016,**24**(2):1-11.]

- [11] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 1987.
- [12] 郑喜玉. 西藏盐湖. 北京: 科学出版社, 1988.
- [13] 郑绵平. 青藏高原盐湖. 北京: 科学出版社, 1989.
- [14] Hardie LA. Evaporites; marine or non-marine? *American Journal of Science*, 1984, **284**(3): 193-240. DOI: 10.2475/ajs.284.3.193.
- [15] Holser WT. Bromide geochemistry of some non-marine salt deposits in the Southern Great Basin. *Mineral Soc*, 1970, **3**: 307-319.
- [16] Goldberg ED. Marine geochemistry I. Chemical scavengers of the sea. *The Journal of Geology*, 1954, **62**(3): 249-265. DOI: 10.2307/30080120.
- [17] 郑喜玉. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] Chen KZ, Yang SX, Zheng XY. Salt lakes on the Qinghai Tibet Plateau. *Journal of Geography*, 1981, **36**(1): 13-21. DOI: 10.11821/xbl198101002. [陈克造, 杨绍修, 郑喜玉. 青藏高原的盐湖. 地理学报, 1981, **36**(1): 13-21.]
- [19] Zheng MP, Liu XF. Hydrochemistry and mineral assemblage characteristics of salt lakes in the Qinghai Tibet Plateau. *Journal of Geology*, 2010, **84**(11): 1585-1600. [郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征. 地质学报, 2010, **84**(11): 1585-1600.]
- [20] Winid B. Bromine and water quality—Selected aspects and future perspectives. *Applied Geochemistry*, 2015, **63**: 413-435. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.10.004.
- [21] 佟伟. 西藏温泉志. 北京: 科学出版社, 2000.
- [22] Niu XS, Liu XF, Lv YY *et al.* The genetic mechanism of hot springs in the Dangxiong Co Basin of Tibet and their supply to salt lake metallogenic materials (Li Rb Cs). *Geology of China*, 2022, 1-19. [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. 中国地质, 2022, 1-19.]
- [23] Stober I, Zhong J, Bucher K. From freshwater inflows to salt lakes and salt deposits in the Qaidam Basin, W China. *Swiss Journal of Geosciences*, 2023, **116**(1): 5. DOI: <https://doi.org/10.1186/s00015-023-00433-4>.
- [24] Luo YB, Zheng MP. Study on the source of boron in the brine of Dangxiong Co Salt Lake in Xizang. *Journal of Geology*, 2016, **90**(8): 1900-1907. [雒洋冰, 郑绵平. 西藏当雄错盐湖卤水中硼的来源研究. 地质学报, 2016, **90**(8): 1900-1907.]
- [25] Luo YB, Zheng MP, Ren YQ. The correlation between special salt lakes in the Qinghai Tibet Plateau and deep volcanic geothermal water. *Technology Herald*, 2017, **35**(12): 44-48. [雒洋冰, 郑绵平, 任雅琼. 青藏高原特种盐湖与深部火山-地热水的相关性. 科技导报, 2017, **35**(12): 44-48.]
- [26] Liu CL, Yu XC, Yuan XY *et al.* Characteristics, distribution patterns, and ore-forming dynamics models of salt lake brine type lithium deposits in the world. *Journal of Geology*, 2021, **95**(7): 2009-2029. [刘成林, 余小灿, 袁学银等. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型. 地质学报, 2021, **95**(7): 2009-2029.]
- [27] Elenka HI, Tan H, Su J *et al.* Origin of the enrichment of B and alkali metal elements in the geothermal water in the Tibetan Plateau: Evidence from B and Sr isotopes. *Geochemistry*, 2021, **81**(3): 125797. DOI: 10.1016/j.chemer.2021.125797.
- [28] Lowenstein TK, Risacher F. Closed basin brine evolution and the influence of Ca-Cl inflow waters; Death valley and Bristol dry Lake California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquatic Geochemistry*, 2009, **15**(1): 71-94. DOI: 10.1007/s10498-008-9046-z.
- [29] Han JB, Xu JX, Liu JB *et al.* Advance in hydrogeological study of subsurface brine. *Journal of Salt Lake Research*, 2018, **26**(4): 79-84, 90. DOI: 10.12119/j.yhj.201804010. [韩积斌, 许建新, 刘久波等. 地下卤水水文地质研究进展. 盐湖研究, 2018, **26**(4): 79-84, 90.]
- [30] 魏新俊. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究. 北京: 地质出版社, 1993.
- [31] 王弭力. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景. 北京: 地质出版社, 1997.
- [32] Yue X, Liu XX, Lu L *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of deep pore brine deposits in Mahai basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, **37**(3): 532-540. [岳鑫, 刘溪溪, 路亮等. 马海盆地深部孔隙卤水矿床水化学特征及成因. 沉积学报, 2019, **37**(3): 532-540.]
- [33] Li HP, Zheng MP, Hou XH *et al.* Chemical characteristics and genesis of brine in the early Pleistocene new type gravel layer in the northern depression of Qaidam. *Earth Science*, 2014, **39**(10): 1433-1442. DOI: 10.3799/dqkx.2014.125. [李洪普, 郑绵平, 侯献华等. 柴达木黑北凹地早更新世新型砂砾层卤水水化学特征与成因. 地球科学, 2014, **39**(10): 1433-1442.]
- [34] Lu Y, Pan T, Li YS *et al.* Preliminary study on the chemical characteristics and genesis of deep brine water in the Yiliping Xitaijinar Area of the Central Qaidam Basin. *Journal of Geology*, 2021, **95**(7): 2129-2137. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2021.07.011. [卢黎, 潘彤, 李永寿等. 柴达木盆地中部一里坪—西台吉乃尔地区深部卤水水化学特征及成因初探. 地质学报, 2021, **95**(7): 2129-2137.]
- [35] Li JS, Ling ZY, Li LM *et al.* The formation water genesis of the Sebei Gas Field indicated by hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope composition. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, **28**(3): 206-211. [李建森, 凌智永, 李雷明等. 水化学及氢氧同位素组成指示的涩北气田地层水成因. 安全与环境工程, 2021, **28**(3): 206-211.]
- [36] Yue X, Liu XX, Qiu XD *et al.* Analysis of the chemical characteristics and genesis of deep pore brine in the Gaskule area of Chaixi. *Salt Lake Research*, 2021, **29**(1): 69-79. DOI: 10.12119/j.yhj.202101008. [岳鑫, 刘溪溪, 仇新迪等. 柴西杂斯库勒地区深部孔隙卤水

- 水化学特征及成因分析. 盐湖研究, 2021, **29**(1): 69-79.]
- [37] Fan QS, Ma HZ, Tan HB *et al.* Discussion on the characteristics and genesis of brine in the Western Qaidam Basin. *Geochemistry*, 2007, **6**: 601-611. [樊启顺, 马海州, 谭红兵等. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨. 地球化学, 2007, **6**: 601-611.]
- [38] Liu XX, Yue X, Yuan WH *et al.* Chemical characteristics and evolution analysis of deep brine in the Shizigou anticline structural area of the western Qaidam Basin. *Salt Lake Research*, 2019, **27**(1): 73-81. [刘溪溪, 岳鑫, 袁文虎等. 柴达木盆地西部狮子沟背斜构造区深部卤水水化学特征及演化分析. 盐湖研究, 2019, **27**(1): 73-81.]
- [39] Fan QS, Lowenstein TK, Wei HC *et al.* Sr isotope and major ion compositional evidence for formation of Qarhan Salt Lake, Western China. *Chemical Geology*, 2018, **497**: 128-145. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.09.001.
- [40] Han JB, Xu JX, Wang GQ *et al.* Source and hydraulic migration of salt forming substances in the Gaskule salt lake area of the Qaidam Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(6): 1551-1560. DOI:10.18307/2017.0627. [韩积斌, 许建新, 王国强等. 柴达木盆地尕斯库勒盐湖区成盐物质的来源与水力迁移作用. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1551-1560.]
- [41] Li JS, Cai JF, Fan QS *et al.* Metallogenic geochemical system of K, B, and Li resources in salt lakes of the Qaidam Basin. *Salt Lake Research*, 2022, **30**(3): 12-20. DOI: 10.12119/j.yhj.202203002. [李建森, 蔡进福, 樊启顺等. 柴达木盆地盐湖 K、B、Li 资源的成矿地球化学系统. 盐湖研究, 2022, **30**(3): 12-20.]
- [42] Tan HB, Rao WB, Ma HZ *et al.* Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, **40**(2): 651-660. DOI: 10.1016/j.jseaes.2010.10.018.
- [43] Li JS, Li TW, Ma YQ *et al.* Distribution and origin of brine-type Li-Rb mineralization in the Qaidam Basin, NW China. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(3): 477-489. DOI: 10.1007/s11430-021-9855-6.
- [44] Stober I, Zhong J, Zhang L *et al.* Deep hydrothermal fluid-rock interaction: The thermal springs of Da Qaidam, China. *Geofluids*, 2016, **16**(4): 711-728. DOI: 10.1111/gfl.12190.
- [45] Yang YL, Liu W, Liu XD *et al.* The distribution and pollution characteristics of bromine in river water and groundwater in western Liaoning Province and Shenyang region. *Environmental Chemistry*, 2009, **28**(6): 924-928. [杨永亮, 刘巍, 刘晓端等. 辽宁省西部和沈阳地区河水及地下水中溴的分布与污染特征. 环境化学, 2009, **28**(6): 924-928.]