

全球盐湖卤水锂矿床的分布特征及其控制因素

高春亮^{1,2}, 余俊清^{1,2}, 闵秀云¹, 成艾颖^{1,2}, 张丽莎^{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)

摘要:盐湖卤水锂资源占全球锂矿总储量的78%, 是全球最重要的一种锂矿床类型。研究并总结了全球盐湖卤水型锂矿床的分布特征、物质来源以及成矿规律, 并提出了盐湖卤水型锂矿床成矿模型。研究发现, 卤水型锂矿床的形成均受控于新构造运动、封闭-半封闭的低洼汇水盆地以及极端干旱的气候条件等因素, 所有卤水型锂矿床均与新生代地质水热活动有密切关联, 成矿物质特别是锂元素主要来源于火山喷发岩, 经热泉水、温泉水以及大气降水等的水-岩作用后迁移富集。

关键词:卤水锂矿床; 水热活动; 分布特征; 锂矿床模型; 青藏高原

中图分类号: P612; P618.71

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2020)04-0048-08

全球锂资源主要赋存在硬岩(锂辉石、锂云母和透锂长石等)以及盐湖卤水中, 其中盐湖卤水型锂矿约占全球锂矿总储量的78%^[1], 是全球最重要的一种锂矿床类型。盐湖卤水型锂矿床中的锂主要赋存于湖表卤水、晶间卤水以及孔隙卤水中^[1], 资源储量丰富, 但分布极其不均(图1), 其形成主要受气候条件、地质构造以及成矿物质来源等控制。我国盐湖卤水锂资源占全国锂资源总量的80%以上, 约占世界盐湖卤水锂资源的1/3, 主要分布在青藏高原, 特别是柴达木盆地盐湖卤水型锂资源约占我国卤水锂资源总量的80%, 集中分布在别勒滩、东台、西台以及一里坪等四盐湖区^[2-4]。尽管如此, 并非“无锂不盐湖”。鉴于此, 本文开展了全球盐湖卤水型锂资源的分布特征与成矿规律研究, 并从地貌学和水文地球化学等角度深化对卤水型锂矿床成因的认识, 找寻盐湖锂来源的确凿证据, 摸索控制全球不同区域盐湖卤水型锂矿床形成和分布的地貌和水文气候因素, 完善盐湖锂矿床成因理论, 为盐湖锂资源的可持续开发提供基础依据。

1 盐湖卤水型锂矿床的分布特征

全球盐湖卤水型锂资源分布极不均衡, 主要分布于南美洲的安第斯高原、中国的青藏高原和北美的内华达州^[7]。主要包括智利的阿塔卡玛干盐湖(Salar de Atacama), 玻利维亚的乌尤尼干盐湖(Salar de Uyuni), 阿根廷的翁布雷穆尔托盐湖(Salar de Hombre Muerto)、奥拉罗斯盐湖(Salar de Olaroz)和里肯盐湖(Salar de Rincon), 美国的银峰干盐湖(Silver Peak Playa)、希尔斯盐湖(Searles Salt Lake)和大盐湖(Great Salt Lake), 中东(以色列和约旦)的死海(Dead Sea), 中国西藏的扎布耶盐湖、扎仓茶卡盐湖、班戈错盐湖、当雄错盐湖和麻米错盐湖, 青海柴达木盆地内的四盐湖区(别勒滩、东台、西台和一里坪)、大柴旦盐湖以及可可西里地区的勒斜武担盐湖、西金乌兰盐湖等。这种分布特征与地区地质构造和自然气候带类型有着密切的关联。从图1可以看出, 全球盐湖卤水型锂矿床主要分布在北纬30°~40°的

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501052, U1407206, 41471013)以及青海省自然科学基金项目(2017-ZJ-928Q)共同资助

作者简介: 高春亮(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为盐湖沉积学。Email: chunlianggao@isl.ac.cn; gaochunliang2007@163.com。

通信作者: 余俊清(1954-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事地球化学、第四纪地质等研究。Email: junquyu@isl.ac.cn。

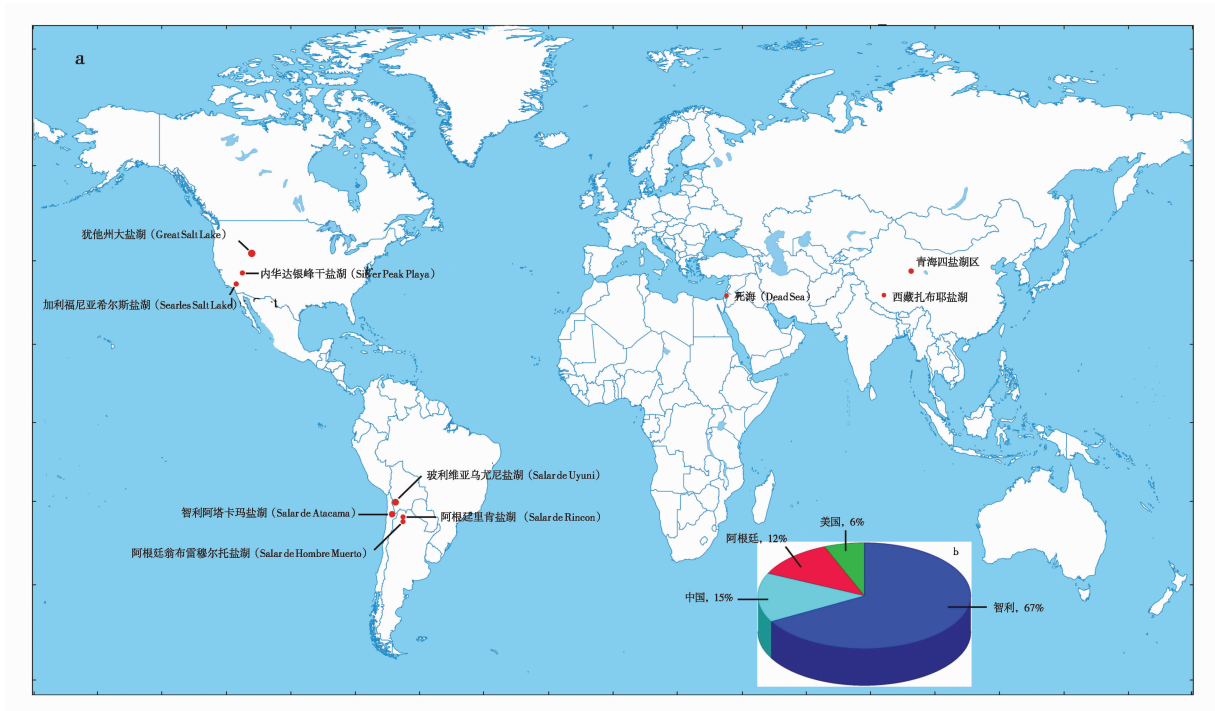


图 1 全球主要盐湖卤水型锂矿床及其资源储量分布示意图(根据这些文献^[5-6]改绘)

Fig. 1 The distribution of main lithium brine deposits and resource reserves in the world

温带干旱气候区,以及南纬 20°~30°的热带干旱气候区,且其中的有利成矿地带多位于大陆西岸或内陆西侧雨影区内^[8]。气候干旱、降雨量少、蒸发量大、日照以及风力强度大等得天独厚的自然条件致使这些区域成为全球盐湖卤水锂资源开发的一大热点^[9]。

1.1 南美洲安第斯高原

南美洲安第斯高原赋锂盐湖群主要分布在智利、阿根廷和玻利维亚交界的沙漠中,位于南纬

18°~28°之间。该区域气候极为干燥,日照充足,降雨量少,蒸发量大,在 100 × 10⁴ km² 的范围内发育有 100 多个盐湖,赋存了全球近 70% 的锂资源^[1]。特别值得一提的是,南美盐湖卤水中锂离子含量普遍较高(表 1),原始卤水中锂离子含量最高可达到 4 000 mg/L^[10],同时也富集有钾、硼、镁、铷和铯等伴生元素。与我国青藏高原许多硫酸盐型盐湖相比,其卤水中伴生元素镁离子浓度较低,属于典型的低镁锂比硫酸盐型盐湖卤水(表 1)。

表 1 全球重要盐湖卤水型锂矿床的基础数据

Table 1 The basic data of important lithium brine deposits in the world

盐湖名称	地理位置	海拔/m	面积/km ²	降雨量/(mm·a ⁻¹)	蒸发量/(mm·a ⁻¹)	锂含量/(mg·L ⁻¹)	镁锂比值	水化学类型	锂储量/10 ⁴ t
乌尤尼	玻利维亚	3 650	10 582	100	1 700	321	9.28	MS	550
阿塔卡玛	智利	2 300	3 000	30	3 833	1 500	6.23	MS	450
翁布雷穆尔托	阿根廷	4 300	565	20	2 300	521	1.37	NS	220
奥拉罗斯	阿根廷	3 900	508	<100	2 500	796	2.88	MS	60.5
里肯	阿根廷	3 700	250	20	3 000	397	8.60	NS	48
银峰	美国	543	32	230	1 800	163	1.43	NS	0.3

续表 1:

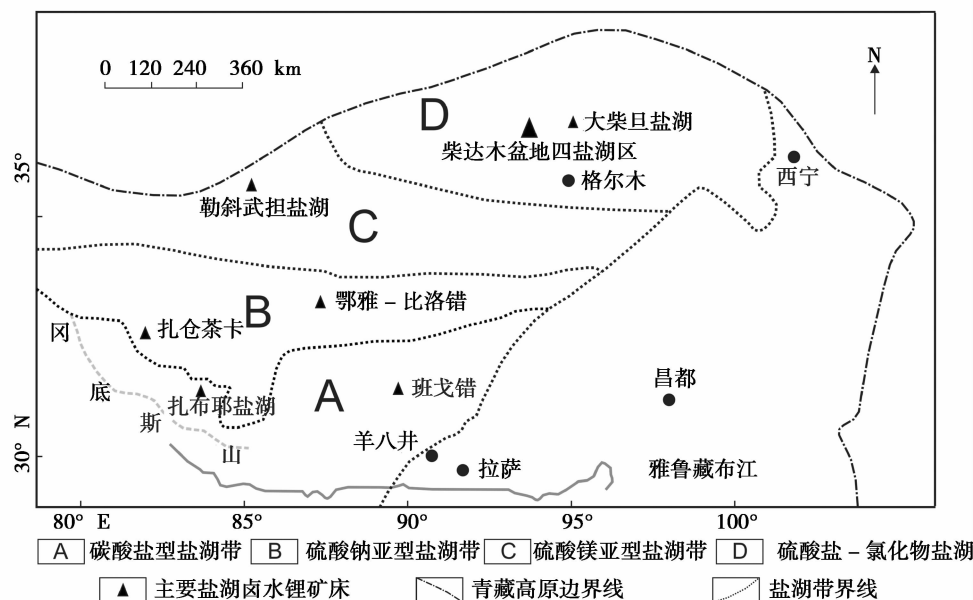
盐 湖 名 称	地 理 位 置	海 拔 /m	面 积 /km ²	降雨量 /(mm·a ⁻¹)	蒸发量 /(mm·a ⁻¹)	锂含量 /(mg·L ⁻¹)	镁 锂 比 值	水化学 类型	锂储量 /10 ⁴ t
希尔斯	美 国	512	100	101	2 000	50	4.10	NS	0.1
大盐湖	美 国	1 281	3 800	330	1 800	40	250	MS	0.5
死 海	中东地区	-430	1 020	50	1 700	20	2 000	U	280
扎布耶	中国西藏	4 422	247	196	2 269	632	0.01	SC	153
扎仓茶卡	中国西藏	4 328	114	120	2 200	807	10.30	MS	2.8
班戈错	中国西藏	4 523	54	308	2 239	247	0.04	MC	3.1
当雄错	中国西藏	4 475	55	151	2 302	211	0.22	MC	17
麻米错	中国西藏	4 342	98	128	2 342	91	4.11	NS	39.5
别勒滩	中国青海	2 681	1 500	30	3 000	191	0.06	MS	126.7
东台吉乃尔	中国青海	2 683	210	18	3 102	300	40.32	MS	46.6
西台吉乃尔	中国青海	2 680	570	18	2 506	220	65.57	MS	50.4
一里坪	中国青海	2 600	250	25	3 500	210	92.30	MS	29.2
大柴旦	中国青海	3 142	240	80	1 800	127	65.00	MS	6.3
勒斜武担	中国青海	4 867	227	202	1 500	171	12 800	U	5.9
西金乌兰	中国青海	4 769	346	425	1 500	101	24 600	MS	16.5

数据来源:中国有色金属工业协会锂业分会,以及参考文献^[1,8-19];MS 为硫酸镁亚型,NS 为硫酸钠亚型,SC 为强度碳酸盐型,MC 为中度碳酸盐型,U 为氯化物型

1.2 中国青藏高原

中国赋锂盐湖群主要集中于青藏高原(图 2)。由南向北,盐湖水化学类型由碳酸盐型向硫酸盐型和氯化物型过渡,干燥气候逐渐加强。盐湖卤水锂平均含量,柴达木盆地盐湖为 67.8 mg/L,可可西里盐湖为 73.7 mg/L,西藏盐湖为 264 mg/L。从北到南逐渐增大。需要指出的是,由图 2 可以看出,在青藏高原范围内的西藏、可可西里以及柴达木盆地盐湖共有 6 个含锂卤水富集区。西藏西部和北部有 2 处,分别位于狮泉河到措勤县之间以及尼玛县分布区,卤水锂含量分别超过 500 mg/L 和 300 mg/L;可可西里地区有勒斜武担盐湖和西金乌兰盐湖^[15] 2 个含锂卤水富集区,卤水锂含量都超过 100 mg/L,并确定勒斜武担盐湖为氯化物型卤水锂矿床^[15]。柴达木盆地中部一里坪盐湖、东台吉乃尔盐湖、西台吉乃尔盐湖和别勒滩盐湖等四盐湖区,以及盆地北部的大

柴旦盐湖为 2 个含锂卤水富集区,卤水锂含量分别超过 125 mg/L 和 100 mg/L(表 1)。其中,柴达木盆地四盐湖区和西藏扎布耶盐湖最具有商业开发价值,卤水锂资源储量都超过百万吨(表 1)。扎布耶盐湖卤水型锂矿床由于其 Mg/Li 比值极低,仅为 0.01,提取工艺更为简单,是全球为数不多的优质盐湖卤水型锂矿床。青藏高原盐湖卤水型锂矿床品位参差不齐,大多数大型/超大型盐湖卤水型锂矿床品位高于世界平均品位,扎布耶盐湖、东台吉乃尔盐湖、西台吉乃尔盐湖以及一里坪盐湖等均是如此。近年来由于受到气候变化等因素影响,西藏部分盐湖表现出不同程度的湖水淡化趋势,卤水锂品位有所下降。此外,由于盐湖卤水中与锂伴生的钾、硼、镁、钠、钙、铷、铯和溴等元素众多,尤其是青海富锂盐湖卤水水化学类型多属于硫酸镁亚型和氯化物型,Mg/Li 比值较高(表 1),镁元素的大量存在致使镁锂分离困难,卤水提锂技术瓶颈难以突破。

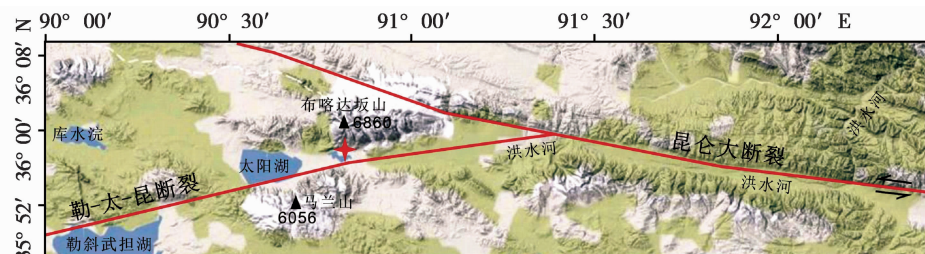


异常区域^[12,25-26]。目前已知的温泉点/群高达 600 多处,局部还有泥火山水^[12]。青藏高原特种盐湖卤水中的锂、硼、铷和铯等元素来自高原重熔岩浆,热泉是其输入盐湖中的主要载体^[27-30]。这些热水汇聚到高原地区,特别是羌南—喜马拉雅地区,迄今在雅鲁藏布江南北两侧有强烈的水热活动及其相应的水热沉积^[12]。羌南—喜马拉雅地区的热泉每年向地表和湖泊输出 Li^+ 595 t 和 B_2O_3 5 370 t, 足够形成超过目前已知的西藏高原现代盐湖中的锂和硼等矿床资源量^[31]。扎布耶盐湖在晚更新世经历了“泛湖期”, 汇水范围广阔, 聚集了大量硼、锂成矿物质; 同时在盆地内发现中新世富硼、锂火山沉积, 是扎布耶盐湖硼、锂矿床的一个重要物质来源^[32]。此外, 扎布耶湖区地层中的硼、锂等成矿元素相对其他矿区含量较低, 但经历了长期风化淋滤以及浸泡等水—岩交互作用, 成矿元素较容易被浸出, 并随河流不断向湖中迁移, 也是扎布耶盐湖成矿物质的来源之一^[32], 但贡献量较低。由此可见, 地热水很可能是西藏盐湖矿床的主要物质来源。

关于柴达木盆地中部地带盐湖卤水锂资源的物质来源和成因研究主要存有三种不同认识。1) 盆地西部早期盐湖的含锂残余卤水经一里坪、东台、西台盐湖东迁至察尔汗盐湖, 构成锂的重要

来源; 深部含锂卤水沿深大断裂上涌, 与残余卤水相互掺杂, 促进了锂的富集成矿^[11]。2) 火山热泉水补给两大古咸水湖 (30 ka 之前), 切口注入察尔汗湖区, 经蒸发浓集形成钾、锂矿床^[33]。3) 昆仑山高温热泉群含锂泉水 (图 3) 长期经由洪水河—那棱格勒河水系输入别勒滩、东台、西台和一里坪等四盐湖, 蒸发富集形成盐湖卤水锂矿床^[2-4]; 而区内火山岩风化侵蚀等地表作用对洪—那河水锂的贡献不大, 可以忽略不计。对于柴达木盆地北部的大柴旦盐湖来说, 盆地东北部山麓地带分布有含锂、硼热泉/温泉水, 泉水中含有较高的锂 (3 mg/L ^[34]) 和硼 ($> 100 \text{ mg/L}$), 正是这种高含锂、硼热泉水的长期汇入和强烈的蒸发浓集作用, 造成了大柴旦盐湖卤水的高锂、硼含量。据青海省地质局第一地质队资料, 温泉每年汇入大柴旦湖盆 B_2O_3 74.5 t 和 LiCl 1.77 t。此外, 大柴旦区域地层中的锂总平均含量为 74 mg/L ^[34], 经过长期风化淋滤作用, 一定数量的锂也被迁移汇入到盐湖中。

综上所述, 关于全球盐湖卤水型锂矿床的物质来源主要有以下几种解释。1) 周边火山含锂热泉/温泉水是盐湖卤水锂资源形成的主要物质来源; 2) 含锂围岩风化淋滤作用为盐湖卤水锂矿床的形成提供主要物质来源; 3) 深部含锂卤水沿深大断裂上涌, 与盐湖卤水相互掺杂, 促进了锂的富集成矿。



十字星指示水热场位于布喀达坂山麓昆仑大断裂活动断层交汇地带, 含锂热水经由 150 个热泉口喷涌地表形成湖泊并注入洪水河

图 3 昆仑山高温热泉群区域卫星影像^[4]

Fig. 3 Satellite image of the high temperature thermal springs in Kunlun mountain area

3 盐湖卤水型锂矿床的成矿规律和成矿模型

3.1 成矿规律与富集成矿过程

根据全球盐湖卤水型锂矿床的分布特征可以

看出, 其形成于干旱少雨的自然气候环境下的封闭汇水盆地内, 周围新生代火山活动频繁, 断层发育, 岩浆热液活动、赋锂围岩以及火山喷出物等提供了丰富的物质来源, 在长期的地质作用和气候条件的控制下, 汇集蒸发浓缩成矿。

以柴达木盆地中部四盐湖区卤水锂矿床为例, 新近研究工作发现, 在昆仑大断裂新构造运动

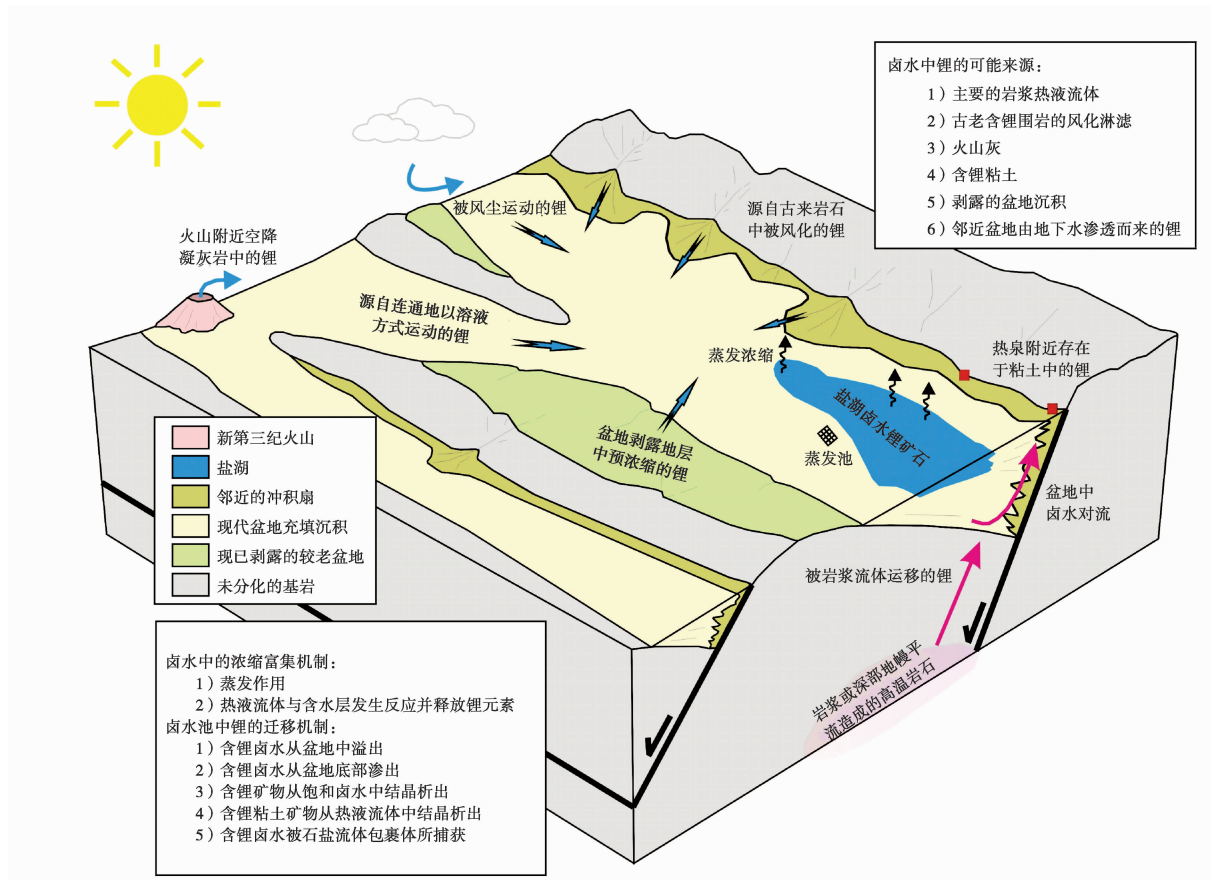


图4 封闭盆地盐湖卤水型锂矿床成矿模型图(据文献^[38]修改)

Fig. 4 Schematic deposit model for lithium brine showing part of a closed-basin system consisting of interconnected sub-basins, and the sub-basin containing the salt lake being the lowest

以及地震频发的影响下,洪水河谷地带的水热场特别发育,含锂热泉水(Li^+ 96 mg/L^[35])大量涌出,是洪水河水中锂的主要来源。区内几条活动断裂交汇地带的断层错动和地震活动频繁,有利于水热场活动的持续。热泉群位于布喀达坂山麓,流域内年平均降水量大于260 mm,加之夏季冰雪融水,有利于地表水的下渗补给。洪水河上游区海拔4 880 m,与东台等四盐湖区形成高达2 200 m的高程落差。构造作用形成的南北走向的洪水河谷切穿昆仑山,将含锂河水源源不断地输入到柴达木盆地低洼地带的盐湖,在极端干旱的气候条件下蒸发浓缩富集,形成盐湖卤水型锂矿床。也就是说,汇水流域特征地形引发盛行西风的差动效应是形成含盐地层以及锂、钾卤水矿床的关键因素,而决定能否形成共生的卤水锂矿床则完全取决于是否有高锂含量河水的补给。洪—那河系中 Li^+ 含量比格尔木河高20多倍^[2],

径流量也高很多,其高锂河水通过乌图美仁河汇入涩聂湖以及别勒滩盐湖,由此决定了卤水锂矿床只在察尔汗盐湖最西端的别勒滩盐湖区段形成。同时,地下隆起阻隔含锂河水东流,造成了达布逊及其以东盐湖区段不能形成卤水锂矿床^[3]。

需要强调的是,在暖期时上述差动效应会进一步增强,因此察尔汗等盐湖大量蒸发盐沉积并非如前人判定形成于干冷的末次冰期(24~25 ka BP)^[36-37],而是早—中全新世暖期更有利于蒸发盐沉积。这是因为,相对暖期时地面温度增高,促发山地地形冷凝作用的垂向对流增强,导致昆仑山区降水量增加,从而进入柴达木盆地盐湖区的汇流量增多,并能季节性覆盖察尔汗干盐滩;此时柴达木盆地的蒸发作用增强,从而更有利于盐类沉积。

3.2 锂矿床成矿模型

封闭盆地的盐湖卤水型锂矿床成矿模型见

图4。首先,在地质时代早期,汇水盆地是物质沉降聚集的中心,沉积有盐类矿物,且卤水中锂含量已趋于富集;到了后期,该区域开始隆起,致使盆地内古湖水定向迁移,而在迁移方向上又存有构造隆升,使得湖水受到阻隔形成封闭盆地/湖盆;同时,盆地内断层活动引起的沉降提供了足够高的卤水渗透率,从而具备了盐湖卤水型锂矿床形成的地理条件。其次,山区与盆地之间数千米的高程落差以及雨影效应致使盆地内的气候条件极端干旱,来自山区的季节性河流汇流入湖后受到强烈的蒸发浓缩作用,成为形成盐湖卤水型锂矿床的重要气候条件。最后,汇水盆地周边新生代火山活动形成的岩浆热液、赋锂围岩以及火山喷出物等提供了多种形式的成矿物质来源,加之锂元素具有较高的溶解度,除少量被粘土矿物等吸附外,大部分残留在卤水中,在极端干旱的气候条件下,锂离子不断浓缩富集,最终形成盐湖卤水型锂矿床。

4 结 语

盐湖卤水锂资源是我国重要的战略资源,赋锂盐湖群主要集中于青藏高原,战略资源地位不言而喻。近年来提锂技术及其工程化研究备受重视,对盐湖卤水型锂矿床成因和分布规律的了解凸显不足,锂矿资源的严重流失与之不无关联^[4]。卤水锂矿床的形成受控于新构造运动、封闭一半封闭的低洼汇水盆地以及极端干旱的气候条件等因素,所有卤水型锂矿床均与新生代地质水热活动有密切关联,成矿物质特别是锂元素主要来源于火山喷发岩,经热泉水、温泉水以及大气降水等的水-岩作用后迁移富集。在长期的地质作用和极端干旱气候条件的控制下,锂离子不断浓缩富集,最终形成盐湖卤水型锂矿床。

致 谢:审稿专家以及编辑部老师对论文提出建设性意见,在此一并致以诚挚谢意。

参考文献:

- [1] 王秋舒,邱景智,邵鹤楠,等. 全球盐湖卤水型锂矿床成矿特征与资源潜力分析[J]. 中国矿业,2015,24(11):82-88.
- [2] 展大鹏,余俊清,高春亮,等. 柴达木盆地四盐湖卤水锂资源形成的水文地球化学条件[J]. 湖泊科学,2010,22(5):783-792.
- [3] Yu J, Gao C, Cheng A, *et al.* Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 50:171-183.
- [4] 余俊清,洪荣昌,高春亮,等. 柴达木盆地盐湖锂矿床成矿过程及分布规律[J]. 盐湖研究,2018,26(1):7-14.
- [5] Naumov A V, Naumova M A. Modern state of the world lithium market [J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2010, 51(4):324-330.
- [6] 王飞飞,刘池洋,邱欣卫,等. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. 地质学报,2017,91(9):2021-2046.
- [7] Ebensperger A, Maxwell P, Moscoso C. The lithium industry: its recent evolution and future prospects [J]. *Resources Policy*, 2005, 30(3):218-231.
- [8] 高峰,郑绵平,乜贞,等. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. 地球学报,2011,32(4):483-492.
- [9] 宋彭生,李武,孙柏,等. 盐湖资源开发利用进展[J]. 无机化学学报,2011,27(5):801-815.
- [10] 余疆江,郑绵平,伍倩. 富锂盐湖提锂工艺研究进展[J]. 化工进展,2013,32(1):13-21.
- [11] 张彭熹,陈克造,于升松. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社,1987:1-235.
- [12] 郑绵平,向军,魏新俊,等. 青藏高原盐湖[M]. 北京:北京科学技术出版社,1989:1-431.
- [13] 张彭熹,张保珍,唐渊,等. 中国盐湖自然资源及其开发利用[M]. 北京:科学出版社,1999:256-259.
- [14] 郑喜玉,张明刚,许昶,等. 中国盐湖志[M]. 北京:科学出版社,1999:1-415.
- [15] 韩凤清. 青藏高原盐湖 Li 地球化学[J]. 盐湖研究,2001,9(1):55-61.
- [16] Garrett D E. Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride-Their Deposits, Processing, Uses and Properties [M]. London: Academic Press, Great Britain, 2004:1-223.
- [17] 唐尧. 阿根廷锂开发利用及我国未来锂资源发展策略建议[J]. 国土资源情报,2014,159(3):44-48.
- [18] 李增荣,刘国旺,唐发满. 青海盐湖锂资源及提锂技术概述[J]. 资源信息与工程,2017,32(5):94-97.
- [19] 伍倩,刘喜方,郑绵平,等. 我国盐湖锂资源开发现状、存在问题及对策[J]. 现代化工,2017,37(5):1-5.
- [20] 赵元艺. 中国盐湖锂资源及其开发进程[J]. 矿床地质,2003,22(1):99-106.
- [21] Jordan T E, Muñoz N, Hein M, *et al.* Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114(11):1406-1421.
- [22] Ide Y F, Kunasz I A. Origin of lithium in Salar de Atacama, northern Chile [C]//Erickson G E, Cãnas Pinochet M T, Reinemund J A, Eds. *Geology of the Andes and Its Relation to*

- Hydrocarbon and Mineral Resources, vol. 11. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Houston Earth Science Series, 1989; 165 – 172.
- [23] Tibaldi A, Corazzato C, Roviola A. Miocene-Quaternary structural evolution of the Uyuni-Atacama region, Andes of Chile and Bolivia [J]. Tectonophysics, 2009, 471(1): 114 – 135.
- [24] Davis J R, Vine J D. Stratigraphic and tectonic setting of the lithium brine field, Clayton Valley, Nevada [C]//Newman G W, Goode H D. Eds. Basin and range symposium. Denver: Rocky Mountain Association of Geologists, 1979; 421 – 430.
- [25] 郑绵平, 刘文高, 向军, 等. 论西藏的盐湖[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 184 – 194.
- [26] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1585 – 1600.
- [27] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution [J]. Nature, 1997, 387(6628): 37 – 43.
- [28] Alsdorf D, Brown L, Nelson K D, *et al.* Crustal deformation of the Lhasa terrane, Tibet plateau from Project INDEPTH deep seismic reflection profiles [J]. Tectonics, 1998, 17(4): 501 – 519.
- [29] Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, *et al.* Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet [J]. Science, 1999, 283(5406): 1306 – 1309.
- [30] Tilmann F, Ni J, InDEPTH III S T. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet [J]. Science, 2003, 300(5624): 1424 – 1427.
- [31] 郑绵平, 刘喜方, 赵文. 西藏高原盐湖的构造地球化学和生物学研究[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1698 – 1708.
- [32] 刘喜方, 郑绵平, 齐文. 西藏扎布耶盐湖超大型B、Li矿床成矿物质来源研究[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1709 – 1715.
- [33] 朱允铸, 李争艳, 吴必豪, 等. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成[J]. 地质学报, 1990, 14(1): 13 – 21.
- [34] 李家桢. 大柴旦盐湖硼、锂分布规律[J]. 盐湖研究, 1994, 2(1): 18 – 24.
- [35] 李炳元. 青海可可西里地区自然环境[M]. 北京: 科学出版社, 1996; 260.
- [36] 黄麒, 韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动[M]. 北京: 科学出版社, 2007; 1 – 207.
- [37] 梁青生, 黄麒. 青海察尔汗盐湖达布逊区段和别勒滩区段的成盐年代[J]. 沉积学报, 1995, 13(3): 126 – 131.
- [38] Bradley D, Munk L A, Jochens H, *et al.* A preliminary deposit model for lithium brines [M]. US Department of the Interior, US Geological Survey Open File Report, 2013 – 1006, 2013: 1 – 6.

Distribution Characteristics and Controlling Factors of Lithium Brine Deposits in the World

GAO Chun-liang^{1,2}, YU Jun-qing^{1,2}, MIN Xiu-yun¹, CHENG Ai-ying^{1,2}, ZHANG Li-sha^{1,2}

(1. 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)

Abstract: As the most important type of lithium deposits in the world, 78% of lithium brine resources are in the salt lakes. The paper focused on the distribution characteristics, material source and ore-forming mechanism of lithium brine deposit in the world, and gave the deposit model of lithium brine. The results showed that all lithium brine deposits are controlled by neotectonics, enclosed/semi-enclosed low catchment basin and hyper-arid climate conditions, and related to the Cenozoic geological hydrothermal activities. The ore-forming materials, especially lithium element, are derived from volcanic, which were migrated and enriched after water-rock interaction by hydrothermal spring water and atmospheric precipitation.

Key words: Lithium brine deposits; Hydrothermal activity; Distribution characteristics; Lithium deposit model; Qinghai-Tibetan Plateau