

doi: 10.12029/gc20220808001

王卓, 黄冉笑, 吴大天, 许逢明, 孙巍, 张德会, 赵院冬. 2023. 盐湖卤水型锂矿基本特征及其开发利用潜力评价[J]. 中国地质, 50(1): 102–117.
Wang Zhuo, Huang Ranxiao, Wu Datian, Xu Fengming, Sun Wei, Zhang Dehui, Zhao Yuandong. 2023. The basic characteristics and development potential evaluation of salt lake brine-type lithium deposits[J]. Geology in China, 50(1): 102–117(in Chinese with English abstract).

盐湖卤水型锂矿基本特征及其开发利用潜力评价

王卓¹, 黄冉笑², 吴大天^{1,3}, 许逢明¹, 孙巍¹, 张德会³, 赵院冬⁴

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中核地矿科技集团有限公司, 北京 100013; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157000)

摘要:【研究目的】近年来, 新能源发展势头强劲, 锂电池需求旺盛, 锂矿资源争夺激烈。相比于目前主要开发的硬岩型锂矿, 盐湖卤水型锂矿有着“量大、绿色、经济”的优势, 随着卤水提锂工艺的不断进步, 盐湖型锂矿的产能将进一步得到释放; 中国是盐湖卤水型锂矿的主要分布国家之一, 占世界总资源量的比例排在第五位。在世界锂资源争夺战愈演愈烈的情况下, 总结盐湖卤水型锂矿的分布特征、水化学类型分类和矿物组合, 估算潜在资源量以及提出评价盐湖卤水型锂矿的方法, 对合理安排勘查和开发投入, 以及规划国家新能源资源具有重要意义。【研究方法】搜集已公开发表或出版的盐湖卤水型锂矿资料, 从分布、成矿地质条件方面分析基本特征, 并对潜在资源量估算以及开发利用潜力评价进行评述。【研究结果】全球盐湖卤水型锂矿资源丰富, 但分布不均, 主要集中在南美安第斯高原、美国西部高原和中国青藏高原 3 个盐湖聚集区, 其形成主要受大地构造背景、断层活动断裂以及气候海拔等条件控制。中国青藏高原盐湖卤水型锂矿资源不同于另两大盐湖聚集区的是, 其构造背景属于陆陆碰撞, 而非洋壳俯冲。由南到北还可进一步分为西藏和青海两个盐湖地区, 青海地区镁锂比较高, 不适用于传统的蒸发沉淀法, 新兴的提锂方法成本又较高, 因而在开发和技术条件方面需要谨慎评价。【结论】通过已公开的相关资料, 对南美安第斯高原、美国西部高原和中国青藏高原 3 个盐湖聚集区的含矿系数 N 和收获系数 HI 进行了计算, 提出了估算潜在资源量的一般公式。并依据盐湖卤水型锂矿开发评价的关键要点, 运用 $\lg(\text{Li}^+)/\lg(\text{Mg}/\text{Li})$ 碳酸锂价格象限判别图解对世界各大盐湖聚集区锂矿的品质进行评价, 结果表明: 当锂价格处于低位(碳酸锂价格 ≤ 10 万元/t)时, 盐湖品质排序为: 中国西藏地区 > 南美安第斯高原 > 美国西部高原 > 中国青海地区; 当锂价格处于中高位(碳酸锂价格 > 10 万元/t)时, 排序为: 南美安第斯高原 > 中国西藏地区 > 中国青海地区 > 美国西部高原。

关键词: 锂; 盐湖卤水型; 基本特征; 潜力评价; 矿产勘查工程

创 新 点: 首次提出全球各大盐湖聚集区无统计资源量的卤水型锂矿潜在资源量的一般估算公式, 以及结合碳酸锂价格绘制 $\lg(\text{Li}^+)/\lg(\text{Mg}/\text{Li})$ 碳酸锂价格象限判别图解。

中图分类号: P662 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0102-16

The basic characteristics and development potential evaluation of salt lake brine-type lithium deposits

收稿日期: 2022-08-08; 改回日期: 2022-09-22

基金项目: 中国地质调查局项目“塞尔维亚铜金资源调查”(DD20201162)、国家重点研发计划项目“全球战略性矿产成矿规律和预警决策支持技术”(2021YFC2901802)资助。

作者简介: 王卓, 男, 1995 年生, 工程师, 从事境外地质调查研究工作; E-mail: wangzhuo@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 吴大天, 男, 1989 年生, 高级工程师, 从事境外地质调查研究工作; E-mail: wudatian@mail.cgs.gov.cn。

WANG Zhuo¹, HUANG Ranxiao², WU Datian^{1,3}, XU Fengming¹,
SUN Wei¹, ZHANG Dehui³, ZHAO Yuandong⁴

(1. *Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China*; 2. *China National Nuclear Geology and Mining Technology Group Co., Ltd., Beijing 100013, China*; 3. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 4. *Mudanjiang Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Mudanjiang 157000, Heilongjiang, China*)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] In recent years, the new energy industry sees a robust growth with strong demand for lithium batteries and fierce competition for lithium resources. Compared with hard rock-type lithium deposits, which are currently the main type for lithium exploitation, salt lake brine-type lithium deposits have the advantages in reserves, environment-friendly and financial benefit. With the continuous improvement of lithium extraction technology from brine, the production capacity of salt lake brine-type lithium deposits will be further released. China is one of the countries where salt lake brine-type lithium deposits are mainly distributed, and the resources reserves is ranked 5th around the world. In the world-wide fierce competition for lithium resources, it is of great significance to summarize distribution regularity, hydrochemical classification and mineral combination of salt lake brine-type lithium deposits, while estimating potential resources and proposing an evaluation methods for salt lake brine-type lithium deposits also contribute to the arrangement of protesting and exploitation investment and the scheduling of new energy resources in our country. **[Methods]** We collect the published data of salt lake brine-type lithium deposits, analyze the basic characteristics from the aspects of distribution and geological conditions of metallogenesis, and systematically summarize the estimation of potential resources and evaluation the potential in exploitation. **[Results]** Lithium resources from salt lake brine-type deposits are abundant in the world, but the distribution is uneven. Salt lake brine-type lithium deposits are mainly located in the three major plateaus, namely the Andes Plateau in South America, the western Plateau of the United States and the Qinghai-Tibet Plateau of China. The genesis is mainly controlled by tectonic background, fault activities, climate and altitude. The difference between salt lake brine-type lithium deposits in the Qinghai-Tibet Plateau and those in other two salt lake accumulation areas is that the tectonic background of the Qinghai-Tibet Plateau is continental collision rather than oceanic crust subduction. The salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau can be further divided into two parts: the Tibet salt lake area and the Qinghai salt lake area from south to north. On the one hand, the salt lakes in Qinghai area has high Mg/Li ratio, so the exploitation is not suitable for the traditional evaporation precipitation method. On the other hand, new emerging lithium extraction methods cost high, as a result, the exploitation and technical conditions need to be evaluated carefully. **[Conclusion]** Based on the published data, the ore-bearing coefficient “N” and harvest coefficient “HI” of three salt lake accumulation areas are calculated and the general formula for estimating the potential resources is also established. By considering the key points of exploitation evaluation of salt lake brine-type lithium deposits, the quality of lithium deposits in world-famous salt lake areas is evaluated by using the “lg(Li⁺)-lg(Mg/Li) combining the price of lithium carbonate discriminant diagram”. The results show that if the price of lithium carbonate is below 100,000 yuan/ton, the quality of salt lakes is ranked as follows: Tibet, China > Andean Plateau of South America > Western Plateau of the United States > Qinghai, China; if the price of lithium carbonate goes above 100,000 yuan/ton, the order changes to: Andean Plateau of South America > Tibet China > Qinghai China > Western Plateau of the United States.

Key words: lithium; salt lake brine-type; basic characteristics; potential evaluation; mineral exploration engineering

Highlights: Targeted at the salt lake brine-type lithium deposits in world-famous salt lake areas, the general formula for estimating potential resources is established without statistical resource data. The discriminant diagram is drawn by the combination of the lg(Li⁺)-lg(Mg/Li) diagram and the price of lithium carbonate.

About the first author: WANG Zhuo, male, born in 1995, engineer, engaged in the survey and research of foreign geology; E-mail: wangzhuo@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WU Datian, male, born in 1989, senior engineer, engaged in the survey and research of foreign geology; E-mail: wudatian@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20201162) and the National Key Research and Development Program (No.2021YFC2901802).

1 引 言

锂作为当前时代新能源电池的关键配方,被誉为第四次工业革命时代的“白色石油”,中国于2016年(《全国矿产资源规划(2016—2020年)》)、美国于2022年(《2022 List of Critical Minerals》)、日本于2009年(《稀有金属保障战略》)、澳大利亚于2019年(《Australia's Critical Minerals Strategy 2019》)、欧盟于2020年(《EU 2020 Critical Resources List》),分别将其纳入关键矿产资源的范畴。全球锂矿资源较为丰富,探明锂储量为1.28亿t(折合碳酸锂,下同),其中,两种最主要的锂矿资源类型——盐湖卤水型锂矿和伟晶岩型锂矿,储量占比分别为64%和26%^①。在锂矿资源开发方面,硬岩型锂矿开发技术条件简单,开发周期较短,投资见效快,但生产成本低,环境污染大,每开采1t硬岩锂矿平均需要15t CO₂、469 m³水^②;相比而言,盐湖卤水型锂矿的生产成本低,环境污染小,但投资周期较长,提锂技术仍需进一步攻关(张亮等,2020;徐正震等,2021)。目前,中国锂矿资源供应主要以硬岩型为主,虽然近年来中资企业(赣锋锂业、天齐锂业、盛新锂能等)开始开展对盐湖锂资源的投资布局,尤其是南美盐湖锂,但是同美国等发达国家相比,无论从布局时长、矿山品质等,中国矿业企业锂矿资源的投资结构仍有较大差距(李建康等,2014)。

随着新能源电池的迅猛发展,在产业链下游强烈需求的支撑下,锂矿资源争夺战逐渐“拉开帷幕”(李志丹等,2021),碳酸锂价格呈现指数型增长,2021年11月底电池级碳酸锂报价突破20万元/t,2022年2月,更是突破45万元/t,4月,逼近50万元/t(价格参考上海有色网)。在锂矿市场价格持续向好的背景下,中国以高成本、高能耗的硬岩型锂矿作为资源供应主体的现状不具备长期发展潜力,而开发绿色经济的盐湖卤水型锂矿是未来产业发展的必然方向(丁涛等,2020)。

中国的青藏高原是盐湖卤水型锂矿三大资源基地之一,与南美安第斯高原和美国西部高原相比,中国的盐湖卤水型锂矿虽然有着可观的远景资源量,但也存在着不利因素:第一,大部分盐湖地处4000 m左右高海拔区、能源电力匮乏、交通运输不便以及缺乏熟练调试工人;第二,镁锂比较高,传统蒸发沉淀提锂

方法不可行,需要投入成本较高的新兴提锂方法;第三,脆弱的生态环境要求化学试剂使用更加谨慎。因此相较于中国的伟晶岩型锂矿,受到的关注程度不高(刘成林等,2021)。但近年来随着国内外卤水提锂技术的进步,尤其是高镁锂比卤水提锂技术的突破(丁涛等,2020;吴西顺等,2020),逐步投入工业生产,碳酸锂价格的上涨,以及国内地质勘查投入的向好(《2021年全国地质勘查通报》),中国青藏高原盐湖型锂矿开发潜力到底如何?在现今的市场条件下与其他地区的盐湖型锂矿的有何差别?如何进行开发选择?需要总结归纳出一套系统的评价方法。

2 锂矿资源基本情况

2.1 全球锂矿资源的主要类型及分布

锂元素存在于盐湖卤水、岩石(花岗岩及云英岩等)、沉积盆地或黏土岩类中、火山、植物和地下海水中。前三者构成了锂矿的主要类型,即盐湖卤水型锂矿、伟晶岩型锂矿和沉积型锂矿(图1;杨卉芄等,2019)。锂矿资源的全球范围内分布很不均匀,主要集中在南美安第斯高原地区(阿根廷、玻利维亚和智利三国毗邻区域)、澳大利亚、中国、美国、刚果(金)和加拿大等国(图2;刘丽君等,2017)。不同锂矿类型的分布也相对集中,南美安第斯高原地区是全球最重要的盐湖卤水型锂矿资源基地,其次是中国的青藏高原和美国西部高原(刘成林等,2021);硬岩型锂矿主要分布在澳大利亚西部、加拿大、中国青藏高原周边、刚果(金)、津巴布韦等国家和地区,与造山带关系密切(王学评等,2014);沉积型锂矿主要分布在美国内华达州 Clayton Valley 和塞尔维亚 Jadar 等地(于飒等,2019)。

2.2 全球锂矿资源的勘查及开发情况

目前全球锂矿开发主要集中在安第斯高原地区的智利和阿根廷,澳大利亚、加拿大、中国、美国,以及少数其他国家。总的来说,开发比较集中。其中澳大利亚和加拿大则以开发硬岩型锂矿为主,而智利、阿根廷和中国都是以盐湖卤水型锂矿开发为主。

截至2020年底,评估全球锂矿资源量34943万t,主要分布在玻利维亚(31.98%)、阿根廷(22.71%)、美国(15.72%)和澳大利亚(5.90%),加拿大、捷克、智利等国也有分布。中国锂矿资源量1914万t,占全球5.48%^③(表1,图3);全球查明锂矿储量12828

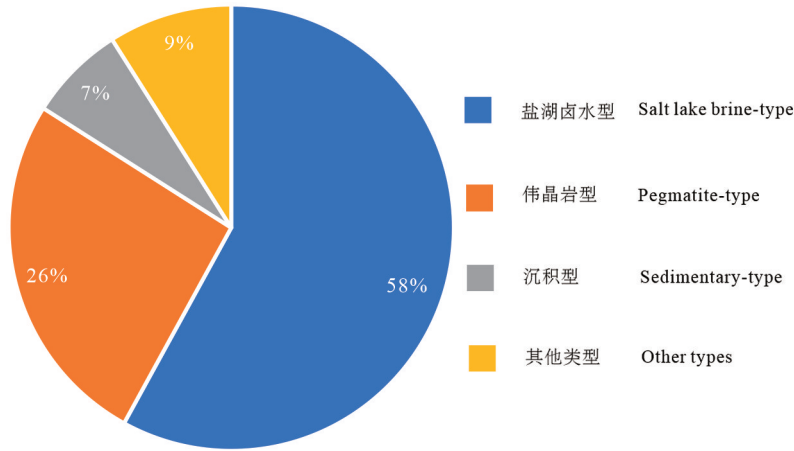


图1 全球各锂矿类型占比图

Fig.1 Proportion chart of various types of lithium deposits in the world

万t(碳酸锂当量,下同),主要分布在智利(41.06%)、澳大利亚(14.34%)、阿根廷(13.20%)等国。中国锂矿储量810万t,占全球6.31%^[9](表2,图4)。

相比于基本金属的市场规模,锂的价格对供需关系极为敏感,导致了在2015年以后的短期供应格局发生变化,硬岩锂因其投产快并能迅速调整产量的特点,成为市场供应主体,有的专家认为就目前市场对于锂的需求,二者并存的局面将长期存在(张亮等, 2020);但是也有部分专家认为,从长远看,随

着锂市场规模不断扩大,硬岩锂成为市场主要供应的情况将一去不复还,卤水锂会有着越来越举足轻重的地位(丁涛等, 2020)。

3 盐湖卤水型锂矿基本特征

3.1 分布特征

3.1.1 全球盐湖卤水型锂矿分布概况

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(王秋舒等, 2015),资

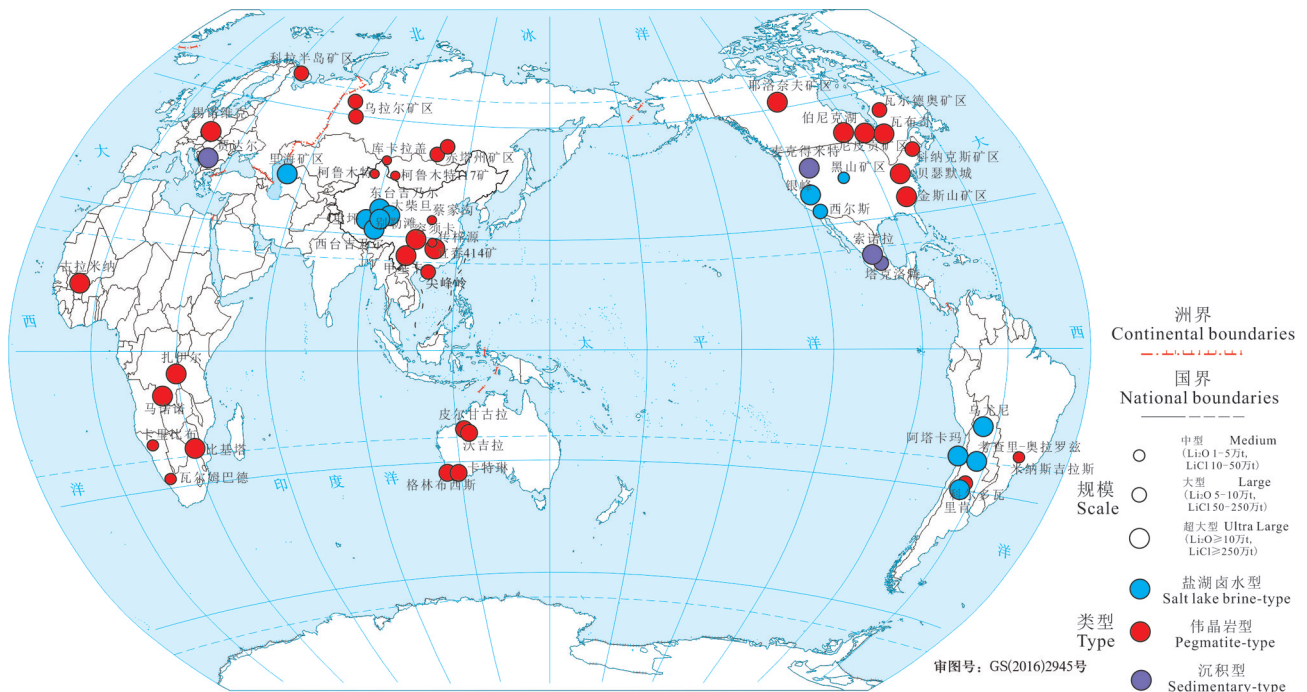


图2 全球锂矿分布与主要类型

Fig.2 Distribution and major types of lithium deposits in the world

表1 世界各国评估锂资源量(碳酸锂当量)统计表
Table 1 Statistical table of assessment of lithium resources (LCE) in countries of the world

排名	国别	资源量/万t	占比
1	玻利维亚	11176	32.0%
2	阿根廷	7934	22.7%
3	美国	5492	15.7%
4	澳大利亚	2062	5.9%
5	中国	1914	5.5%
6	刚果(金)	1628	4.7%
7	加拿大	1462	4.2%
8	捷克	656	1.9%
9	塞尔维亚	617	1.8%
10	智利	580	1.7%
11	其他	1422	4.1%
	合计	34943	100%

源储量丰富,在世界探明的锂矿总资源量中占比达65%(刘成林等, 2021),但分布不均,其形成主要受气候条件、地质构造以及物质来源等控制(高春亮等, 2020)。全球盐湖卤水型锂矿分布相对集中,主要集中在南美洲安第斯高原、中国青藏高原和美国西部高原三大盐湖聚集区(图2),已探明锂资源量(碳酸锂)分别为9085万t、5755万t和2173万t,占比分别为53%、34%和13%(刘成林等, 2021)。对于盐湖矿床的成矿地质条件已得到共识,要具备3个必要条件,即有断层活动的封闭盆地、干旱的气候以及新生代地质活动(王秋舒等, 2015; Munk et al., 2016; 刘成林等, 2021)。

3.1.2 南美盐湖卤水型锂矿分布特征

南美盐湖卤水锂矿主要分布在玻利维亚、智

利、阿根廷三国境交界处(图5),俗称“锂三角”,位于南科迪勒拉造山带南美板块中安第斯构造带,按照构造类型上分类属于后弧挤压盆地大陆型(郑绵平等, 1989)。高原地势较高且内部渗透率高,富锂盐湖沿安第斯聚合边缘造山带分布,属于收缩的内弧盆地。中新世以来,区域火山活动十分发育,在区内形成了广泛的英安岩和凝灰岩,且含盐岩系中的含锂地热水,成为盐湖特有成分的双重补给。而上新世以来的构造沉降在区内形成大量封闭盆地,由于水岩反应、气候干旱等因素,卤水不断浓缩,各类盐矿物在盐湖内沉淀,锂离子因其较大的溶解度在卤水内不断富集,并在盐田及其周边的沙粒及食盐混层沉积物中赋存,使该湖群中的富锂盐湖都存在浅层含锂卤水,且拥有巨厚的石盐沉积,如Uyuni盐湖^⑥。

金属锂资源量超过250万t的盐湖卤水型锂矿基本上都分布在南美洲安第斯高原,包括阿根廷西北部的Hombre Muerto盐湖和Rincon盐湖,玻利维亚西部的Uyuni盐湖和智利北部的Atacama盐湖等。该区盐湖卤水锂矿不仅储量大,且卤水锂离子含量很高,达到321~1500 mg/L。区内具备锂资源开发潜力的盐湖50多个,总面积2.5万km²。区域因勘探程度不同锂矿资源量呈现出较大的差别。阿根廷开展了15个盐湖19个项目的勘探,储量1693万t,探明+控制资源量6756.9万t,推断资源量7934万t。玻利维亚开展了1个盐湖1个项目的勘探,探明+控制资源量1064万t,推断资源量11176万t。智

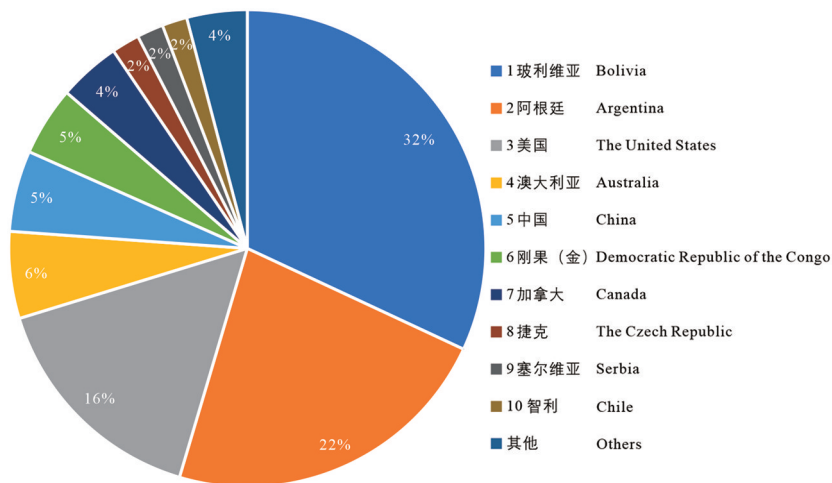


图3 世界各国评估锂资源量(碳酸锂当量)比例图

Fig.3 Proportion chart of assessment of lithium resources (LCE) in countries of the world

表2 世界各国锂储量(碳酸锂)
Table 2 The lithium reserves (lithium carbonate) in countries of the world

排名	国别	储量/万t	占比
1	智利	5267	41.1%
2	澳大利亚	1839	14.3%
3	阿根廷	1693	13.2%
4	中国	810	6.3%
5	美国	570	4.4%
6	加拿大	369	2.9%
7	刚果(金)	363	2.8%
8	津巴布韦	243	1.9%
9	墨西哥	173	1.4%
10	西班牙	79	0.6%
11	其他	1422	11.1%
	合计	12828	100%

利开展了3个盐湖5个项目的勘探,储量5267万t,探明+控制资源量5446.6万t,推断资源量580万t^[9]。

3.1.3 美国盐湖卤水型锂矿分布特征

美国盐湖卤水型锂矿主要分布在西部高原北科迪勒拉造山带,即北美板块西部的落基山脉等山间及裂谷盆地中,代表性盐湖有:Great Salt Lake、Silver Peak、Searles Lake、Salton Sea等(Munk et al., 2016)(图6)。位于美国西部盆地和山脉的新生代沉积盐湖属于后弧扩张克拉通盆地型,包括内华达州的Silver Peak和犹他州的Great Salt Lake,该类盐湖盆地的特点是处在一个外延的半地堑系统中(Oldow and Cashman, 2009)。盆地中被第四纪沉积物所覆盖,其中有黏土矿物,如锂蒙脱石。附近的新生代火山活动亦较普遍,并见含硼、锂地热水补

给。最重要的含锂源区是延伸并贯穿了整个盆地的火山灰,这是该地区富锂盐湖与其他地区最大的不同点。该区的卤水是化学沉积形成的,最大的可能是酸性火山岩风化或附近火山系统、地下岩浆体的地热活动。同时,水岩反应先消耗掉卤水中的镁,也作为该区卤水中锂富集一个可能原因。因此,成矿物质来源主要是周围流纹岩和凝灰岩的风化淋滤(Price et al., 2000),与盆地内热泉活动(Araoka et al., 2014)以及岩浆活动(Lowenstein et al., 2016)的关系也十分紧密。

3.1.4 中国盐湖卤水型锂矿分布特征

中国的盐湖卤水型锂矿资源主要分布在青藏高原柴达木盆地和西藏北部(图7;闫立娟和齐文, 2012;马哲和李建武, 2018;Li et al., 2018)。由于印度板块与欧亚板块碰撞而使青藏高原物质向东位移(Tapponnier and Molnar, 1977),并使大批较老的断层复活,而形成4种类型湖盆:山间断块深盆和带内拗断、微裂谷和走滑湖盆,其中尤以成南北向的新生代微裂谷,且其下部存在与晚新生代断裂有关的岩浆活动的环状构造(郑绵平和刘喜方, 2010)。在该盐湖区,晚新生代岩浆活动最大特点之一是以深部侵位为主,只在少数地段以火山岩流溢出地表。其成因可能与该区碰撞特点和壳层较厚(5~8 km)有关,使在碰撞阶段形成的酸性再熔岩浆多处于深部,再熔岩浆的锂、硼等特殊组分多以地热形式携出地表,而与上述南美安第斯高原和美国西部高原两类构造带以火山活动强烈的特点不同。

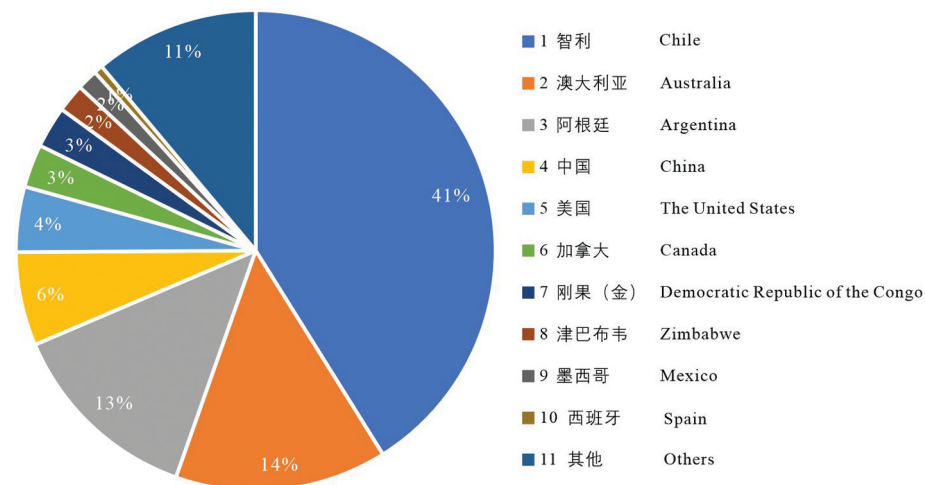


图4 世界各国锂储量(碳酸锂)比例图

Fig.4 Proportion chart of proven lithium reserves in countries of the world

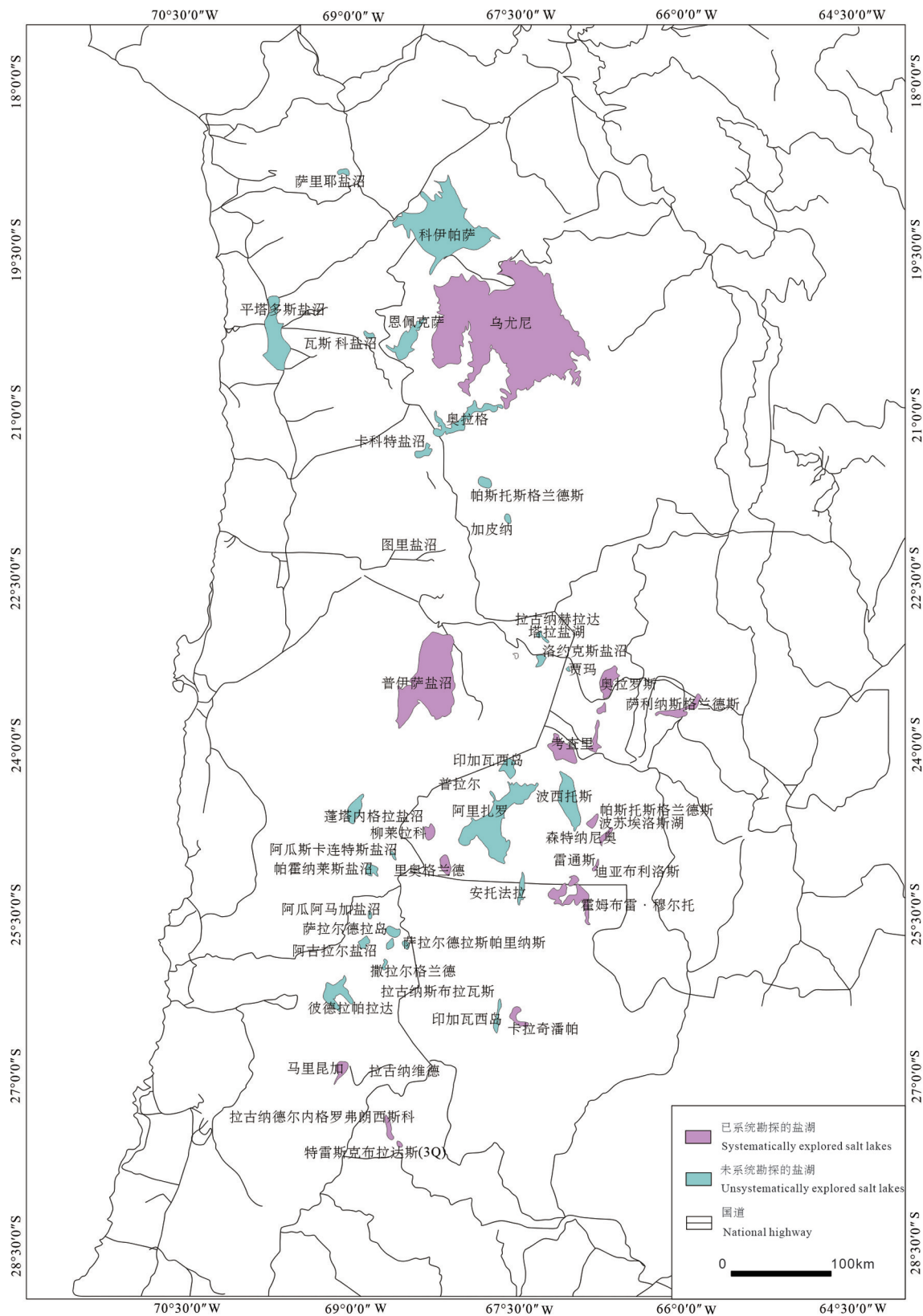
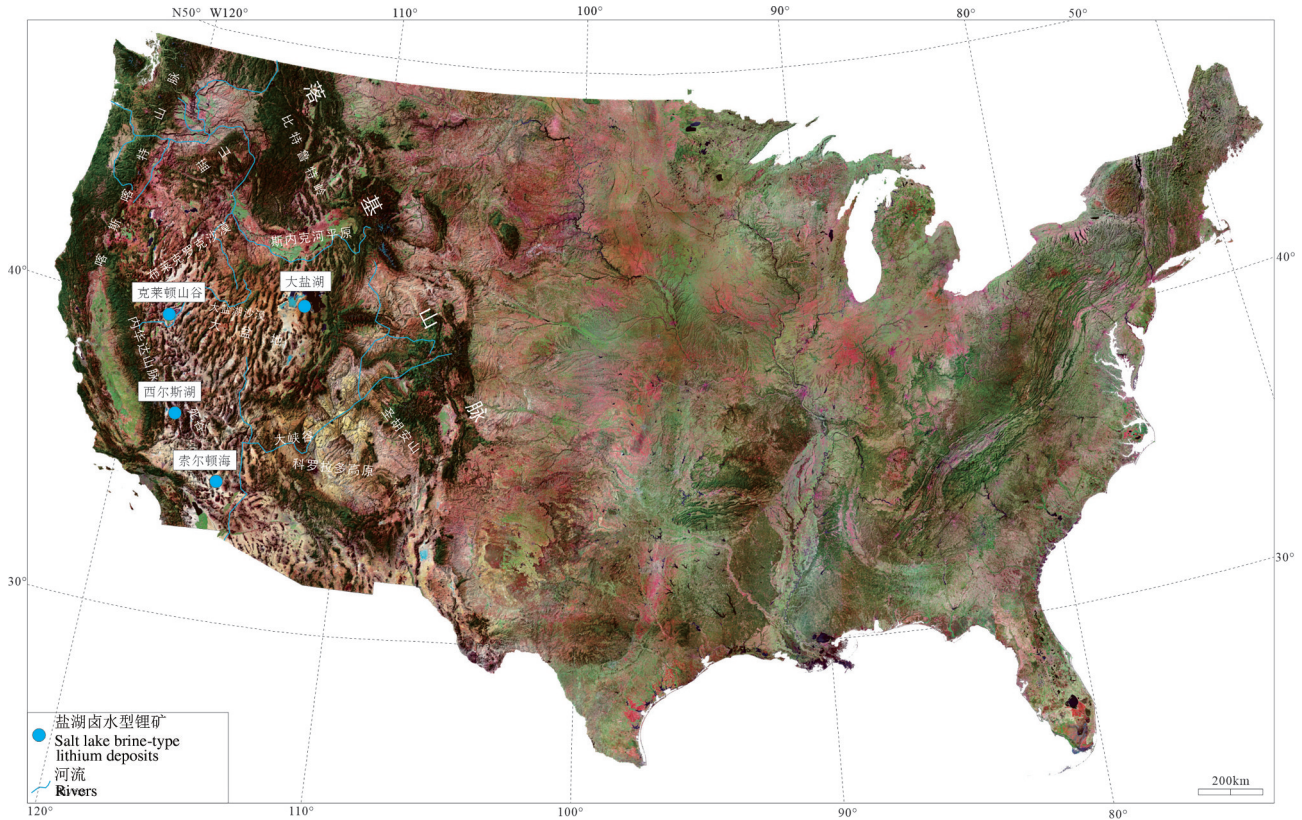


图5 “锂三角”地区盐湖卤水型锂矿分布图[®]

Fig.5 Distribution map of salt lake brine-type lithium deposits in "Lithium Triangle" area[®]

图6 美国西部高原盐湖卤水型锂矿分布图^⑥Fig.6 Distribution map of salt lake brine-type lithium deposits in the western United States Plateau^⑥

同时,青藏高原的隆升阻挡了来自印度洋的暖湿气流,促使高原气候向干(旱)寒(冷)方向发展,在高原的中、西和北部形成了众多的盐湖,其中富锂盐湖80多个($\text{LiCl} \geq 0.3 \text{ g/L}$; $\text{Li}^+ \geq 0.05 \text{ g/L}$)。在青藏高原上升的地质历史时期,干旱气候由南向北逐渐加强,导致盐湖发育北早南晚,因此,柴达木盆地盐湖的规模和形成时间上都远大于西藏盐湖,而卤水中的锂含量由北向南则是逐渐增大,例如察尔汗盐湖面积达到 5856 km^2 , 卤水中锂离子的浓度为 0.31 g/L , 而扎布耶盐湖只有 247 km^2 , 卤水中锂离子的浓度高达 0.632 g/L 。最具代表性的富锂盐湖为西藏扎布耶盐湖、当雄错盐湖以及青海柴达木盆地的察尔汗盐湖、西台吉乃尔盐湖和一里坪盐湖等,这些盐湖中的锂含量均达到或超过边界品位以上($\text{LiCl} \geq 0.15 \text{ g/L}$; $\text{Li}^+ \geq 0.025 \text{ g/L}$)。青藏高原盐湖卤水中查明锂储量可达1580万t(碳酸锂当量),其锂资源的提取利用,是中国锂盐产业开发的重要方向之一^⑥(郑绵平和刘喜方,2007;刘成林等,2021)。

中国盐湖卤水型锂矿的潜在资源量远大于伟

晶岩型,不过尽管如此,实际开发挑战重重,主要原因是开发的内外在条件限制,如盐湖聚集区的海拔较高,能源电力匮乏、交通运输不便以及缺乏熟练调试工人所带来的困扰;近年来气候变化卤水出现淡化;高原生态环境脆弱,矿山开采政策受限;针对高镁锂比的卤水提锂技术,如电渗析法、膜分离法和吸附法,投产成本较高,而溶剂萃取法则不环保等(李建康等,2014;赵冬等,2017;高春亮等,2020)。

3.2 富锂盐湖水化学及其矿物组合特征

富锂盐湖卤水中的 Li^+ 常与大量的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等碱金属阳离子及 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 BO_3^{3-} 等阴离子共存。对于阳离子来说,锂和镁的离子半径十分接近,化学性质相似并且经常在盐湖卤水中共生,且浓缩到卤水阶段后镁的氯化物溶解度很大,只有到最后阶段才会析出,使得卤水往往具有很高的浓度的 Mg^{2+} , 因此盐湖卤水提锂过程中的镁锂分离一直是工艺技术难点和降低成本的关键(余疆江等,2013)。一般而言,盐湖卤水中镁锂比的高低决定了利用卤水资源生产锂盐的可行性以及锂盐产

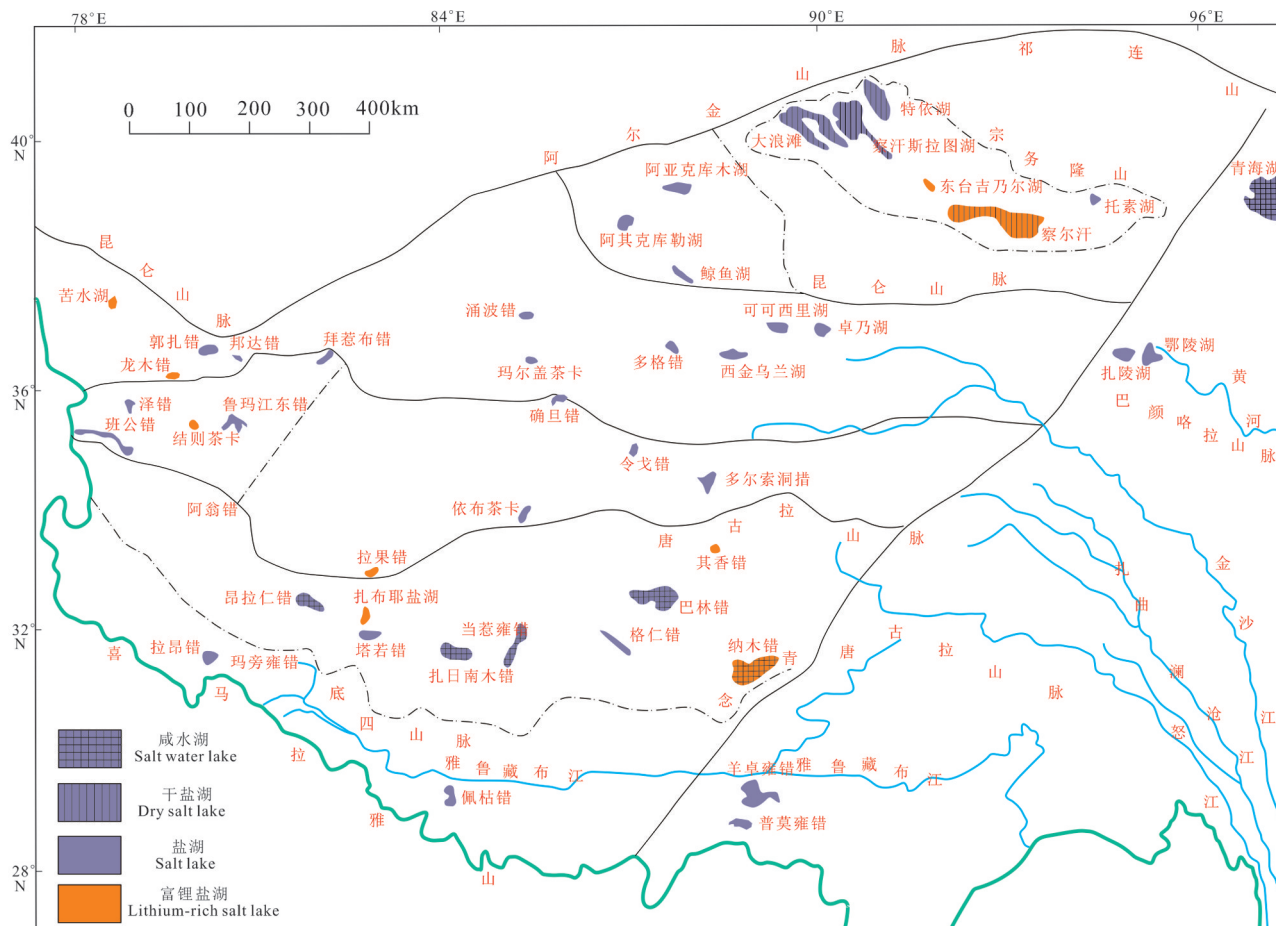


图7 中国青藏高原盐湖卤水型锂矿床分布图(修改自郑绵平和刘喜方, 2010)

Fig.7 Distribution map of salt lake brine-type lithium deposits in Qinghai-Tibet Plateau (modified from Zheng Mianping and Liu Xifang, 2010)

品的生产成本和经济效益,因此镁锂比成为评价盐湖锂资源品质的重要指标(李燕茹等, 2013)。董涛等(2015)将盐湖卤水锂矿进行较为细致的划分,将镁锂比 ≤ 1 , $\rho(\text{Li}^+) \geq 50 \text{ mg/L}$ 的卤水称为高品质低镁锂比; $1 < \text{镁锂比} \leq 10$ 的卤水称为低镁锂比; $10 < \text{镁锂比} \leq 50$ 的卤水称为中镁锂比; $50 < \text{镁锂比} \leq 100$ 的卤水称为高镁锂比; 镁锂比 > 100 的卤水称为超高镁锂比。而根据卤水中阴离子类型,盐湖则通常可分为3种类型,即碳酸盐型、硫酸盐型(硫酸钠亚型、硫酸镁亚型)及氯化物型,而盐湖的矿化度则与其所处的构造环境和气候条件密切相关(郑绵平和刘喜方, 2010),不同的盐湖化学类型,具有不同的专属性,如镁锂比、矿物组合等。

3.2.1 碳酸盐型

碳酸盐型盐湖主要分布在中国西藏地区,美国西部高原也零星分布。卤水的平均镁锂比是3种水

化学类型中最低的,大部分高品质低镁锂比盐湖,如扎布耶、当雄错、茶拉卡错、班戈错,以及低镁锂比盐湖,如 Searles Lake,属于此类型(董涛等, 2015)。

碳酸盐型盐湖代表性矿物组合为硼砂(三方硼砂)或硼砂-扎布耶石,以及碱金属碳酸盐-芒硝组合(表3;郑绵平和刘喜方, 2010)。其中扎布耶石(天然碳酸锂,化学式为 Li_2CO_3)是在西藏扎布耶湖中发现的新矿物,是现代盐湖中重要的锂矿资源(郑绵平和刘文高, 1987)。扎布耶盐湖锂矿位于青藏高原腹地,分为半干盐湖的南湖,和卤水湖的北湖(郑绵平等, 1989),固体锂矿主要以扎布耶石矿物的形式赋存于石盐中,或以细小晶体与单斜钠钙石、氯碳酸钠镁石等矿物共生与黏土碳酸盐层中, Li_2CO_3 含量多为0.35%~0.7%,局部最高可达6.71%(曹文虎和吴蝉, 2004)。扎布耶盐湖的锂总资源量

表3 碳酸盐型盐湖矿物组合

Table 3 Mineral assemblages of carbonate-type salt lake

矿物成分	碳酸盐型	碳酸盐型		
		强度	中度	弱度
石盐 NaCl		○	▲	●
钾石盐 KCl			▲	
石膏 CaSO ₄ ·2H ₂ O				○
芒硝 Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O		●	●	●
无水芒硝 Na ₂ SO ₄		▲	▲	▲
钾芒硝 K ₂ Na(SO ₄) ₂		▲	▲	
硫碳镁钠石 2MgCO ₃ ·2Na ₂ CO ₃ ·Na ₂ SO ₄		○	○	
扎布耶石 Li ₂ CO ₃			▲	
针碳钠钙石 CaCO ₃ ·Na ₂ CO ₃ ·5H ₂ O			●	●
五水碳铁石 MgCO ₃ ·3H ₂ O			▲	
氯碳钠镁石 MgCO ₃ ·Na ₂ CO ₃ ·NaCl		●	●	▲
菱镁矿 MgCO ₃		▲	●	▲
白云石 NaCO ₃ ·CaCO ₃		●	●	▲
水碳镁石 4MgCO ₃ ·Mg(OH) ₂ ·4H ₂ O		●	●	○
天然碱 Na ₂ CO ₃ ·NaHCO ₃ ·2H ₂ O		▲	●	
泡碱 Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O		▲	●	
水碱 Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O		▲	▲	
苏打石 NaHCO ₃		●	▲	
钠硼解石 NaCaB ₃ O ₉ ·8H ₂ O			○	▲
硼砂 Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O		●	●	●
三方硼砂 Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O		▲	▲	▲

注:●—主要矿物,▲—次要矿物,○—边缘相痕量矿物。

(Li₂CO₃)约为241万t,达到超大型锂矿规模(赵元芝等, 2005)。放眼中国,乃至全球,碳酸盐型所具有的含量高、提取易的天然优势十分明显,可谓是盐湖卤水锂矿中的“大熊猫”,在进行科学研究的同时,应给予足够的关注和保护。

3.2.2 硫酸盐型

硫酸盐型盐湖分布较为广泛,南美安第斯高原大部分盐湖、中国青海柴达木盆地大部分盐湖以及美国西部高原部分盐湖均属于此类型。该类型的盐湖对于镁锂比的类型实现了全覆盖,包括高品质低镁锂比、低镁锂比、中镁锂比、高镁锂比以及超高镁锂比,其中,硫酸镁亚型的确且错、硫酸钠亚型的朋彦错、才玛尔错属于高品质低镁锂比盐湖;硫酸钠亚型的冈塘错、肖茶卡和结则茶卡等属于低镁锂比盐湖;硫酸钠亚型的洞错、达瓦错、别若则错等属于中镁锂比盐湖;硫酸钠亚型的查那错、龙木措、扎西茶卡等属于高镁锂比盐湖;硫酸镁亚型的玉盘错、长颈错、太苦错等属于超高镁锂比盐湖(董涛等, 2015)。

硫酸盐型盐湖代表性矿物组合为硫酸镁盐(泻利盐、白钠镁矾)—石盐、镁硼酸盐—芒硝、芒硝—软钾镁

表4 硫酸盐型盐湖矿物组合

Table 4 Mineral assemblages of sulfate-type salt lake

矿物成分	硫酸盐型	硫酸盐型	
		硫酸钠亚型	硫酸镁亚型
光卤石 KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O			●
水氯镁石 MgCl ₂ ·6H ₂ O			●
钾石盐 KCl		▲	●
石盐 NaCl		●	●
钾盐镁矾 KCl·MgSO ₄ ·3H ₂ O			▲
软钾镁矾 K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·6H ₂ O			▲
杂卤石 K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·2CaSO ₄ ·2H ₂ O		▲	▲
钾石膏 K ₂ SO ₄ ·CaSO ₄ ·H ₂ O			▲
白钠镁矾 Na ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·4H ₂ O		●	▲
钙芒硝 Na ₂ SO ₄ ·CaSO ₄		●	▲
水钙芒硝 5Na ₂ SO ₄ ·3CaSO ₄ ·6H ₂ O		▲	○
泻利盐 MgSO ₄ ·7H ₂ O		○	▲
六水泻盐 MgSO ₄ ·6H ₂ O		○	▲
四水泻盐 MgSO ₄ ·4H ₂ O		○	○
石膏 CaSO ₄ ·2H ₂ O		▲	●
芒硝 Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O		●	●
无水芒硝 Na ₂ SO ₄		▲	▲
菱镁矿 MgCO ₃		▲	●
白云石 MgCO ₃ ·CaCO ₃		●	●
三方水硼镁石 MgB ₃ O ₁₀ ·7.5H ₂ O			○
库水硼镁石 Mg ₂ B ₄ O ₁₁ ·15H ₂ O		●	▲
多水硼镁石 Mg ₂ B ₄ O ₁₁ ·15H ₂ O		▲	▲
柱硼镁石 MgB ₂ O ₄ ·3H ₂ O		●	●
水方硼石 CaMgB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O			●
板棚钙石 Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·13H ₂ O		▲	
钠硼解石 NaCaB ₃ O ₉ ·8H ₂ O		●	▲

注:●—主要矿物,▲—次要矿物,○—边缘相痕量矿物。

矾—石盐以及大量石膏;硫酸钠亚型盐湖代表性成矿组合为芒硝(无水芒硝)—石盐以及镁硼酸盐(库水硼镁石、柱硼镁石等)—钠硼解石—芒硝为主,有大量钠硼解石产出(表4;郑绵平和刘喜方, 2010)。

3.2.3 氯化物型

氯化物型盐湖分布相对较少,主要代表矿床为青藏高原的察尔汗、南美安第斯高原 Cauchari—Olaroz 以及美国西部高原 Salton Sea 盐湖。其中,察尔汗盐湖镁锂比为 1825,属于超高镁锂比;Cauchari—Olaroz 镁锂比为 1.37,属于低镁锂比;Salton Sea 镁锂比为 0.16,ρ(Li⁺)为 260 mg/L,属于高品质低镁锂比,因此该类型镁锂比没有专属性。

氯化物型盐湖代表性矿物组合为光卤石—水氯镁石—石盐、光卤石—石盐,个别盐湖共生南极石(表5;郑绵平和刘喜方, 2010)。

3.3 潜在资源量估算方法

3.3.1 估算潜在资源量的意义

盐湖卤水型锂矿资源量由地下储卤层的空间

表5 氯化物型盐湖矿物组合

Table 5 Mineral assemblages of chloride-type salt lake

矿物	成分	氯化物型
南极石	CaCl ₂ ·6H ₂ O	○
光卤石	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	●
水氯镁石	MgCl ₂ ·6H ₂ O	▲
水石盐	NaCl·2H ₂ O	○
钾石盐	KCl	●
石盐	NaCl	●
石膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	●
菱铁矿	MgCO ₃	●
菱锶矿	SrCO ₃	○
白云石	MgCO ₃ ·CaCO ₃	●

注:●—主要矿物,▲—次要矿物,○—边缘相痕量矿物。

分布、储集性能,还有区域构造等地质条件综合决定,对盐湖卤水型锂矿资源量评价和预测需要考虑地下卤水在含盐盆地特殊含水介质中的储集和运移特点,因此,相比于其他金属矿山,盐湖卤水型锂矿估算资源量的方法要复杂很多。首先,盐湖卤水不像矿山那样较为稳定的存在,估算资源量需要按照丰水期和枯水期,两次查明湖水深度、面积、湖底沉积物的组成及分布,还应了解历年盐湖面积变化情况。其次盐湖普遍位于高原地区,且盐湖面积较大,工程操作难度高,打钻孔等直接取样方法难以实现。最后,一些现代估算资源量方法,如航磁电测法,会受地表硬壳的影响,同样不方便估算资源量。因此需要充分利用已有典型盐湖资源量数据,反推出估算潜在资源量的公式,为前期快速评价盐湖开发利用潜力提供依据。

3.3.2 潜在锂资源量的一般估算公式

盐湖卤水型锂矿的潜在资源量可以根据已有盐湖资源数据推算。根据拟合盐湖相关指标参数,潜在资源量估算公式可总结为:金属锂资源量(万t)=Li⁺平均含量ω(g/L)×盐湖面积S(km²)×含矿系数N×收获指数(Harvest Index, HI)^①,此公式估算方法可简称为“ωSN-HI估算法”。

盐湖卤水型锂矿的经济性评价极其复杂,受盐湖类型、光照强度、蒸发温度、降水量和蒸发量等多因素影响,本文引进收获指数(Harvest Index, HI)的概念参与潜在资源量的科学计算。

收获指数(Harvest Index, HI)原指是作物收获时经济产量(籽粒、果实等)与生物产量之比,又名经济系数(Coefficient of Economic)(潘晓华和邓强辉,2007)。HI反映了盐湖卤水型锂矿转化为经济产品

的能力,是评价卤水型锂矿的重要指标。盐湖卤水型锂矿开发的影响因素较多,卤水类型、气候、光照、蒸发量、基础设施完善情况等均会对锂矿开发产生影响。本文结合当前工艺技术和全球锂资源开发现状,选择了盐湖类型和海拔高度两个重要指标来判断盐湖卤水型锂矿的收获指数(HI)。就现有采矿工艺而言,对不同类型盐湖友好程度排序为C型>S型(NS型>MS型)>U型。中国青藏和南美安第斯高原盐湖区均位于高海拔地区,而高海拔地区往往是气候变化的敏感区域,同样也是各国基础设施建设最薄弱区域,均为工业化开采带来极大挑战。为方便下文讨论,确定HI值为盐湖类型系数×海拔区间系数。盐湖类型系数,设定盐湖C型为0.9,S型为0.6(NS型为0.65,MS型为0.55),U型为0.3;海拔区间系数,设定海拔<2000 m为0.9,2000 m<海拔<4000 m为0.6,海拔>4000 m为0.3。

由于三大盐湖聚集区各指标参数存在差异,因此含矿系数N应分开单独计算。同时考虑到中国青海盐湖多集中2000~3000 m,而西藏则均在4000 m以上,二者类型也存在较大不同,中国青海和西藏地区也将单独计算。根据已有各盐湖聚集区典型矿床的金属锂资源量(万t)、盐湖Li⁺平均含量(g/L)和面积(km²),通过计算含矿系数N,结果表明,中国青海地区的含矿系数N₁约为0.371,中国西藏地区的含矿系数N₂约为2.341,美国西部盐湖区的含矿系数N₃约为2.06,南美安第斯高原地区的含矿系数N₄约为2.085(表6)。从含矿系数值来看,中国西藏、美国西部和南美安第斯高原的N值较高,主要是因为三者镁锂比较中国青海盐湖具有明显优势,尽管全球盐湖提锂技术(萃取法、膜渗透法及吸附法等)进步显著,但不可否认从含矿系数指标而言稍逊前三者。

三大盐湖聚集区收获指数表明,美国西部以其低海拔、基础设施较完善排在4个盐湖区之首,而海拔均在4000 m以上的中国西藏盐湖区则排在最后一位。为综合考虑三大盐湖聚集区锂矿转化为经济产品的能力和盐湖品质,首次给出了N·HI的概念。通过计算可以得出(N·HI)₁<(N·HI)₂<(N·HI)₄<(N·HI)₃,即代表着美国西部优于南美安第斯高原,而南美安第斯高原优于中国西藏和中国青海,可能与目前大多数学者对于三大聚集区盐湖卤水型锂矿品质综合排序有一定偏差,偏差主要集中于美国

表6 全球主要盐湖聚集区典型盐湖卤水型锂矿床信息

Table 6 Information on typical salt lake brine-type lithium deposits in major salt lake aggregation areas worldwide

名称	盐湖聚集区	资源量 (金属)/万t	Li ⁺ 含量 (g/L)	Li ⁺ 平均 值(g/L)	面积 /km ²	含矿 系数N	N平 均值	Mg/Li	Mg/Li 平均值	类型	海拔/m	HI	HI平 均值	N-HI	资料来源
察尔汗	中国青海	163	0.31		5856	0.090		1437		U	2670	0.18		0.02	
西台吉乃尔	中国青海	44	0.22		570	0.351		65.57		MS	2680	0.33		0.12	
东台吉乃尔	中国青海	46	0.3	0.233	210	0.730	0.371	40.23	340.02	MS	2683	0.33	0.3	0.24	余疆江等, 2013
一里坪	中国青海	29	0.21		250	0.552		92.3		MS	2600	0.33		0.18	
大柴旦	中国青海	3.98	0.127		240	0.131		65		MS	3142	0.33		0.04	
扎布耶	中国西藏	150	0.632		247	0.961		0.01		C	4422	0.27		0.26	余疆江等, 2013
当雄措	中国西藏	17	0.211	0.311	55	1.465	2.341	0.22	1.45	C	4475	0.27	0.245	0.40	
麻米错	中国西藏	41	0.091		98	4.597		4.11		NS	4342	0.195		0.90	刘成林等, 2021
Searles Lake	美国	32	0.26		888	0.139		0.18		U	65	0.27		0.04	
Salton Sea	美国	30	0.163	0.128	32	5.752		1.43		NS	543	0.585	0.484	3.36	Mohr et al., 2012
Silver Peak	美国	10	0.05		100	2.000	2.060	4.1	2.05	NS	512	0.585		1.17	
Great Salt Lake	美国	53	0.04		3800	0.349		250		MS	1281	0.495		0.17	
Uyuni	玻利维亚	1020	0.321		10582	0.300		9.28		MS	3650	0.33		0.10	Kesler et al., 2012
Atacama	智利	630	1.5		3000	0.140		6.23		MS	2300	0.33		0.05	
Hombre Muerto	阿根廷	446.9	0.521	0.707	565	1.518	2.085	1.37	5.67	NS	4300	0.195	0.315	0.30	注释①
Rincon	阿根廷	353.2	0.397		250	3.559		8.6		NS	3700	0.39		1.39	高春亮等, 2020
Cauchari-Olaroz	阿根廷	1984.4	0.796		508	4.907		2.88		MS	3900	0.33		1.62	

注:U—氯化物型,C—碳酸盐型,MS—硫酸镁亚型,NS—硫酸钠亚型,S—硫酸型。

西部与南美安第斯高原孰先孰后。分析原因如下:美国西部高原盐湖卤水尽管存在Li⁺含量低和锂总资源量小的问题,但其镁锂比平均值和海拔均低,加上基础设施相对完备,在当前新能源需求快速增长的数年内,其可获得性最高;而南美洲锂三角区域尽管资源量巨大、高Li⁺含量、适中镁锂比,但也存在基础设施差、印第安原住民、锂三角各国的工会势力等等诸多重大挑战;中国青海相较于西藏,镁锂比太高,经济性较差,而西藏地区盐湖卤水海拔多大于4000 m也同样困难重重。

通过以上论述,确认了三大盐湖聚集区内的潜在金属资源量的估算公式。南美安第斯高原:资源量(万t)=Li⁺平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×2.085×0.315;美国西部高原:资源量(万t)=Li⁺平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×2.06×0.484;中国青藏高原:其中中国西藏地区资源量(万t)=Li⁺平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×2.341×0.245,青海地区资源量(万t)=Li⁺平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×0.371×0.3。

4 盐湖卤水型锂矿开发利用潜力评价

尽管卤水锂矿资源总量占据优势,卤水生产锂盐的成本也比较低,但是全球卤水资源不同于其他稀有金属矿床,其多在高海拔的偏远干旱地区,生产周期长,易受天气影响,取得开采许可的要求

高。传统的蒸发沉淀法,盐田建设面积大,副产品多,原料品位低,物料处理量大,锂的回收率低;而新兴的渗透、吸附等方法在投产前则需要大量投资等,仍是开发利用盐湖卤水锂矿的不利因素。因此在勘查前期阶段,有必要结合矿产品市场情况,针对盐湖型矿床的具体特点,对开发利用潜力做出前置预判,以减少未来勘查及开发设计等资金投入的风险。

鉴于以上思考,本文以前人对于盐湖型矿床的评价方法(李冬梅等, 2014; 何茜等, 2017)为基础,选出易于在勘查阶段获取的盐湖卤水型锂矿指标,对全球主要盐湖聚集区的卤水锂矿进行定性评价,并论证不同矿床在碳酸锂价格变化趋势下的开发潜力特征,为是否加大勘查投入提供建设性意见。

并非全部盐湖都拥有值得经济开采的锂资源,富锂盐湖属于一种特殊类型的盐湖,通常指Li⁺浓度超过0.05 g/L的盐湖资源,而随着提锂工艺不断完善,碳酸锂价格上涨,经济性可采边界应调整为Li⁺浓度超过0.025 g/L^{①②}。依据统计的全球典型盐湖卤水型锂矿床各类指标数据,及近年来碳酸锂价格曲线,制作出盐湖卤水型锂矿床的lg(Li⁺)-lg(Mg/Li)价格象限判别图解,根据前人数据及经验,将Mg/Li=8(张亮等, 2020)、Li⁺含量为0.05 g/L,和Mg/Li=500^③、Li⁺含量为0.025 g/L,分别作为碳酸锂价格处于低、高段来划分盐湖品质区域的边界线,而对于

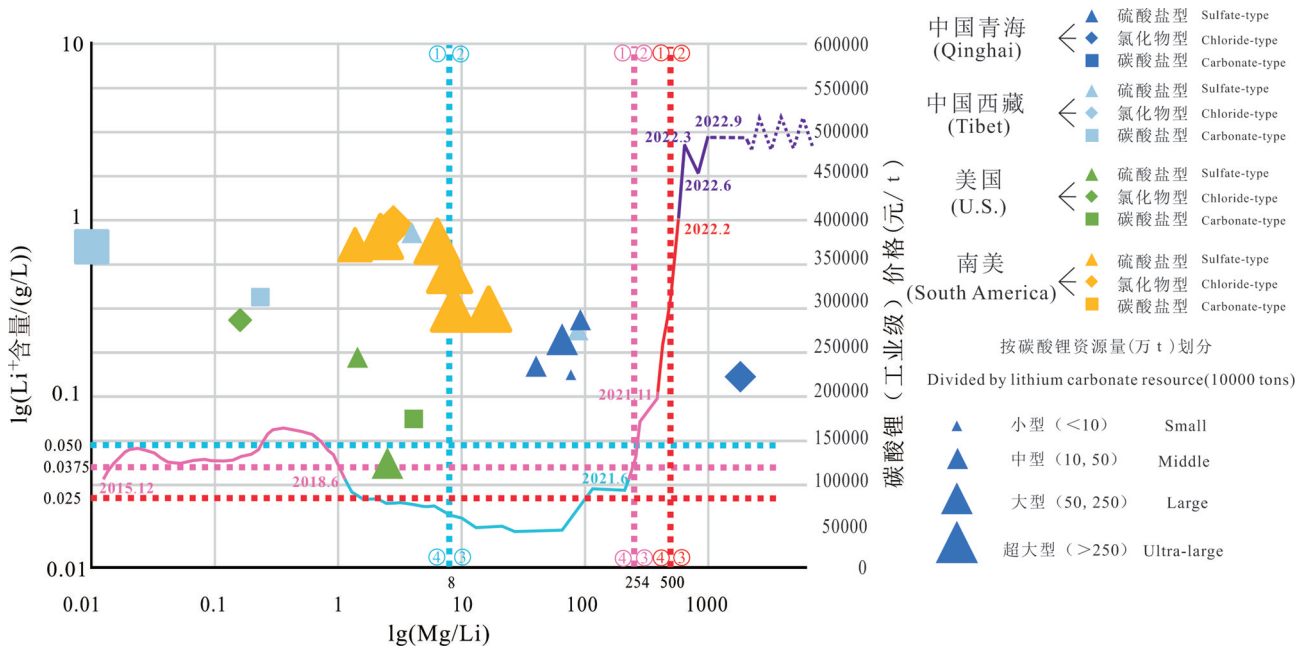


图8 盐湖卤水型锂矿床lg(Li⁺)-lg(Mg/Li)价格象限判别图解

Fig.8 Diagram of lg(Li⁺)-lg(Mg/Li) price quadrant discrimination for salt lake brine-type lithium deposits

价格中段,边界线则取前二者平均值,即 Mg/Li=254、Li⁺含量为0.0375 g/L(图8)。

根据现有提锂技术和各类评价指标衡量,得出结论:位于判别图中①区域为优质盐湖锂矿资源,反之,③则是相对劣质盐湖锂矿资源(由于本文统计的盐湖数据均为已开采卤水锂矿床,不宜开采的③区域无盐湖数据)。对于②区域的盐湖资源,在碳酸锂价格低位时,较高的Mg/Li伴随着较高的提锂成本,无法实现量产,因此暂时无法得以高效利用;但是在碳酸锂价格处于中、高位时,提锂高成本则不是考虑的首要因素。而对于④区域来说,需具体矿床具体分析,结合不同类型的盐湖锂矿床的提锂方式以及成本,来确定可开采Li的含量。不过①~④区域是随着碳酸锂的价格波动而逐渐变化的。

当碳酸锂处于价格低位,即0~10万元时,对于图中已搜集到数据的盐湖锂矿资源禀赋的优劣排序为:①>④>②>③,①区域集中了全部中国西藏地区、大部分南美安第斯高原和部分美国西部高原的盐湖卤水型锂矿;②区域集中了全部中国青海以及少部分南美安第斯高原的盐湖卤水型锂矿;③区域无覆盖;④区域均集中了部分美国西部高原盐湖卤水型锂矿。

当碳酸锂处于价格中位,即10~20万元时,优劣排序为:①>④>②>③,①区域已覆盖了全部中国西

藏地区、南美安第斯高原和美国西部高原的盐湖卤水型锂矿,以及绝大部分中国青海地区的盐湖卤水型锂矿;②区域集中了少数氯化物型中国盐湖卤水型锂矿;③、④区域无覆盖。

当碳酸锂处于价格高位,即>20万元时,优劣排序为:①>④>②>③,①~④区域盐湖覆盖情况同价格中位一样。

南美安第斯高原盐湖聚集区盐湖锂矿资源无论价格高低,大多集中在①区域,相比其他两大盐湖区优质许多,资源量最大,Li⁺平均含量最高,为0.707 g/L,镁锂比平均值为5.67,含矿系数N为2.085,HI值为0.315,具有无与伦比的低成本开发优势。美国西部高原盐湖聚集区集中在①和④区域,三大盐湖区里资源量最少,Li⁺平均含量最低,为0.128 g/L,镁锂比平均值为2.05,含矿系数N为2.06。而对于中国盐湖聚集区,资源量大于美国西部高原,西藏地区盐湖几乎均处在①区域,Li⁺平均含量为0.311 g/L,镁锂比比最低,平均值1.45,N为2.341;青海地区集中在①和②区域,Li⁺平均含量为0.233 g/L,镁锂比最高,平均值为340.02,N为0.371。随着价格从低位变为中高,提锂工艺持续优化,分界线是向着向右下的变化趋势,从而会出现盐湖跨区的情况。例如原本价格低位时位于②区域,即较不适合开采的部分南美和大部分中国盐湖卤

水型锂矿,价格升高逐渐转变为适合开采的①区域;低位时位于④区域的部分美国西部盐湖卤水型锂矿,随着价格升高也变为适合开采的①区域。

综上,评价盐湖聚集区锂开发潜力不仅需要结合盐湖自身地质条件,也要考虑到碳酸锂市场价格。在低价阶段,南美安第斯高原盐湖虽然资源量最大,锂含量高,镁锂比较低,但是仍有部分盐湖处在②区域,而超低镁锂比的中国西藏地区凭借着天然低成本提锂优势,在开发潜力上稍占上风。美国西部地区盐湖则凭借较低镁锂比,集中在①、④区域,开发潜力优于中国青海地区。整体排序为中国西藏地区>南美安第斯高原地区>美国西部高原地区>中国青海地区;在中价阶段,原本处在②区域的部分南美盐湖划分到了①区域,此时其资源量大、含量高的特点凸显,而中国西藏地区盐湖的低成本提锂优势减弱,南美安第斯高原盐湖占据优势。中国青海地区盐湖,随着锂的价格上涨,大部分也都划分为①区域,其凭借着资源量较大,锂含量较高的优势,开发潜力要优于美国西部高原盐湖。整体排序为南美安第斯高原地区>中国西藏地区>中国青海地区>美国西部高原地区;高价阶段排序同中位阶段。随着直接提锂技术(萃取法、膜渗透法及吸附法等)的不断突破,高镁锂比盐湖已经具备工业化开采的条件,在这些新技术的框架下,这种随价格上涨而跨区的现象说明,已不能仅用镁锂比来判定盐湖卤水型锂矿品质,锂价格如果再继续持续上涨,镁锂比可能将不再重要。

5 结 论

(1)锂市场火热,资源战略地位十分重要;主要类型有盐湖卤水型、硬岩型和沉积型;盐湖卤水型近年来由于资源多,周期长,成本低的特点,优势愈发明显。

(2)提出运用 ω SN-HI估算法确定了三大盐湖聚集区无统计资源量的公式,即南美安第斯高原:资源量(万t)= Li^+ 平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×2.085×0.315;美国西部高原:资源量(万t)= Li^+ 平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×2.06×0.484;中国青藏高原:其中中国西藏地区资源量(万t)= Li^+ 平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×2.341×0.245,青海地区资源量(万t)= Li^+ 平均含量(g/L)×盐湖面积(km²)×0.371×0.3。

(3)结合N·HI值,综合三大盐湖聚集区锂矿转化为经济产品的能力和盐湖品质,判断美国西部优于南美安第斯高原,而南美安第斯高原优于中国西藏和中国青海。

(4)运用碳酸锂价格的lg(LiCl)-lg(Mg/Li)价格象限判别图解,得出各盐湖聚集区的锂资源开发潜力排序。当碳酸锂价格≤10万元/t时,中国西藏地区>南美安第斯高原>美国西部高原>中国青海地区,当碳酸锂价格>10万元/t时,南美安第斯高原>中国西藏地区>中国青海地区>美国西部高原。

在当前中国资源保障实行“两种资源,两种市场”的战略方针下,本文对国内国外盐湖型锂矿资源的开发潜力提出了定性评价,为合理利用国外资源、规划国内资源提出重要参考。

注释

① 隰弯弯,赵宇浩,姚春彦. 2020. 南美锂三角地区(阿根廷、智利和玻利维亚)锂资源开发现状的调查报告和布局建议[R]. 中国地质调查局南京地质调查中心.

② 洪涛研究小组. 2022-01-01. 战略性关键金属科普平台. “锂”清过去,“锂”解未来. https://mp.weixin.qq.com/s/vizKsgbH_fVJ0xikDD1vQ.

③ 江思宏,代涛,赵汀. 2021. 全球锂、钴、镍、锡、钾盐矿产资源储量评估报告(2021)[R]. 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心.

④ 葛军,孙景文,吴霜. 2021. 盐湖提锂产业深度报告:中国盐湖提锂,走向成熟[R]. 五矿证券.

⑤ 王秋舒,元春华,许虹. 2015. 应对全球化:全球主要矿产资源研究系列报告 锂矿卷[R]. 中国地质调查局发展研究中心.

⑥ GISGeography. 2015. <https://gisgeography.com/open-source-remote-sensing-software-packages>.

⑦ 证券之星智库. 2021-08-16. <http://stock.stockstar.com/RB2021081600005000.shtml>.

Reference

- Araoka D, Kawahata H, Takagi T, Watanabe Y, Nishimura K, Nishio Y. 2014. Lithium and strontium isotopic systematics in playas in Nevada, USA: Constraints on the origin of lithium[J]. *Mineralium Deposita*, 49(3): 371-379.
- Cao Wenhui, Wu Chan. 2004. Brine Resources and Their Comprehensive Utilization Technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-316 (in Chinese with English abstract).
- Ding Tao, Zheng Mianping, Peng Suping, Wu Qian, Han Hongye. 2020. Extracting lithium from salt lake with a high magnesium-to-lithium ratio: Research progress and prospect of lithium salt

- adsorbents[J]. *Science and Technology Review*, 38(14): 94–101 (in Chinese with English abstract).
- Dong Tao, Tan Hongbing, Zhang Wenjie, Zhang Yanfei. 2015. Geochemical distribution of lithium in saline lakes in Tibet[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 43(3): 220–235 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Min Xiyun, Cheng Aiyong, Zhang Lisha. 2020. Distribution characteristics and controlling factors of lithium brine deposits in the world[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 28(4): 48–55 (in Chinese with English abstract).
- He Xi. 2017. Discussion about overall evaluation on sustainable exploitation and utilization of resources in salt lake[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 46(7): 59–62 (in Chinese with English abstract).
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Wallington T J. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 48(5): 55–69.
- Li Dongmei, Wang Jianping, Zhang Kang, Yang Jiaojiao. 2014. A case study on Qarhan salt lake: Comprehensive evaluation index system of sustainable development of salt lake resources[J]. *Resources and Industries*, 16(5): 70–77 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269–2283 (in Chinese with English abstract).
- Li R Q, Liu C L, Jiao P C, Wang J Y. 2018. The tempo–spatial characteristics and forming mechanism of Lithium–rich brines in China[J]. *China Geology*, 1(1): 72–83.
- Li Yanru, Yuan Jianjun, Zhu Liang, Sha Zuoliang, Yang Meijie, Zuo Yuehua. 2013. Research on extraction process of lithium carbonate from salt lake brine[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 45(7): 12–14 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhidan, Xie Yu, Li Junjian, Li Xiaoguang, Zeng Wei, Li Shanpo, Peng Yi, Liu Bo. 2021. Characteristics and metallogenic regularity of lithium resources in North China[J]. *North China Geology*, 44(3): 41–49 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaochan, Yuan Xueyin, Li Ruiqin, Yao Fujun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi. 2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine–type Li deposits in salt lakes in the world [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2009–2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. *China Geology*, 44(2): 263–278 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Dolginko L A C, Garcia Veigas J. 2016. Influence of magmatic–hydrothermal activity on brine evolution in closed basins: Searles Lake, California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128(9/10): 1555–1568.
- Ma Zhe, Li Jianwu. 2018. Analysis of China's lithium resources supply system: Status, issues and suggestions[J]. *China Mining Magazine*, 27(10): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Mohr S H, Mudd G, Giurco D. 2012. Lithium resources and production: critical assessment and global projections[J]. *Minerals*, 2(4): 65–84.
- Munk L A, Hynek S, Bradley D C, Boutt D, Labay K A, Jochens H. 2016. Lithium brines: A global perspective[J]. *Reviews Economic Geology*, 18: 339–365.
- Oldow J S, Cashman P H. 2009. Late Cenozoic structure and evolution of the Great Basin–Sierra Nevada transition[J]. *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 45(8): 543–8.
- Pan Xiaohua, Deng Qianghui. 2007. Review on crop harvest index[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, (1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Price J G, Lechler P J, Lear M B, Giles T F. 2000. Possible volcanic sources of lithium in brines in Clayton Valley, Nevada[C]//Cluer J K(ed.). *Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond: Geological Society of Nevada, Proceedings*. Reno, Nev: Geological Society of Nevada, 241–248.
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 82(20): 2905–2930.
- Wang Qishu, Qiu Jingzhi, Shao Hernan, Xu Hong. 2015. Analysis on metallogenic characteristic and resource potential of salt lake brine lithium deposits in the global[J]. *China Mining Magazine*, 24(11): 82–88 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueping, Chai Xinxia, Cui Wenjuan. 2014. Exploitation and utilization of global lithium resources: Trends and our responses[J]. *China Mining Magazine*, 23(6): 10–13 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xishun, Sun Yan, Wang Denghong, Huang Wenbin, Huang Fan, Gao Xi, Zhang Wei, Yao Xiang. 2020. International lithium mine utilization technology: Current status, innovation and prospects[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (6): 110–120 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengzhen, Liang Jinglong, Li Hui, Guo Jiaming. 2021. Research status and prospects of lithium extraction from lithium containing resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (5): 32–37 (in Chinese with English abstract).
- Yan Lijuan, Qi Wen. 2012. Lakes in Tibetan Plateau extraction from remote sensing and their dynamic changes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 65–74 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huipeng, Liu Lin, Ding Guofeng. 2019. Present situation and development trend of lithium resources in the world[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 26–40 (in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Wang Denghong, Yu Yang, Liu Zhu, Gao Juanqin, Zhong Jia'ai, Qin Yan. 2019. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary–type lithium deposits[J]. *Rock*

- and Mineral Testing, 38(3): 354–364 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jiangjiang, Zheng Mianping, Wu Qian. 2013. Research progress of lithium extraction process in lithium-containing salt lake[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 32(1): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B, Qi F Y, Gao X Z, Li X L, Shang Y T, Kong Z Y, Jia L Q, Meng J, Guo H, Fang F K, Liu Y B, Jiang X, Chai H, Liu Z, Ye X T, Wang G D. 2022. Geological characteristics, metallogenic regularity, and research progress of lithium deposits in China[J]. China Geology, 5(4): 734–767.
- Zhang Liang, Yang Huipeng, Liu Lin, Ding Guofeng. 2020. Global technology trends of lithium extraction[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 40(5): 24–31 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dong, Du Xuemin, Wang Shiqiang, Guo Yafei, Deng Tianlong. 2017. Research on extraction from salt lake brine with high Mg/Li ratio[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 46(6): 40–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Zheng Mianping, Bu Lingzhong, Niezhen, Liu Xifang. 2005. Study on salt Pan technology of lithium salt extracting from carbonate-type saline lakes, Tibet[J]. Sea-lake Salt and Chemical Industry, 34(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Liu Wengao. 1987. A new Li-mineral—Zabuyelite[J]. Geological Review, 33(4): 365–368 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping. 1989. Salt Lakes on Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1–470 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Liu Xifang. 2010. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 84(11): 1585–1600 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Liu Xifang. 2007. Lithium resources in China[J]. Advanced Materials Industry, (8): 13–17(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 曹文虎, 吴蝉. 2004. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1–316.
- 丁涛, 郑绵平, 彭苏萍, 伍倩, 韩鸿业. 2020. 盐湖提锂工艺——高锂比盐湖锂盐吸附剂研发进展[J]. 科技导报, 38(14): 94–101.
- 董涛, 谭红兵, 张文杰, 张燕飞. 2015. 西藏地区盐湖锂的地球化学分布规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 43(3): 220–235.
- 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 成艾颖, 张丽莎. 2020. 全球盐湖卤水型锂矿床的分布特征及其控制因素[J]. 盐湖研究, 28(4): 48–55.
- 何茜. 2017. 盐湖资源可持续开发利用综合评价探讨[J]. 化工矿物与加工, 46(7): 59–62.
- 李冬梅, 王建萍, 张康, 杨姣姣. 2014. 盐湖资源可持续开发利用综合评价指标体系研究: 以青海察尔汗盐湖为例[J]. 资源与产业, 16(5): 70–77.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2269–2283.
- 李燕茹, 袁建军, 朱亮, 沙作良, 杨美洁, 左玥华. 2013. 盐湖卤水碳酸锂提取工艺过程研究[J]. 无机盐工业, 45(7): 12–14.
- 李志丹, 谢瑜, 李俊建, 李效广, 曾威, 李山坡, 彭翼, 刘波. 2021. 华北地区锂资源特征及成矿规律概要[J]. 华北地质, 44(3): 41–49.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009–2029.
- 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 李建康, 代鸿章, 闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263–278.
- 马哲, 李建武. 2018. 中国锂资源供应体系研究: 现状、问题与建议[J]. 中国矿业, 27(10): 1–7.
- 潘晓华, 邓强辉. 2007. 作物收获指数的研究进展[J]. 江西农业大学学报, (1): 1–5.
- 王秋舒, 邱景智, 邵鹤楠, 许虹. 2015. 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, 24(11): 82–88.
- 王学评, 柴新夏, 崔文娟. 2014. 全球锂资源开发利用的现状与思考[J]. 中国矿业, 23(6): 10–13.
- 吴西顺, 孙艳, 王登红, 黄文斌, 黄凡, 高曦, 张炜, 姚翔. 2020. 国际锂矿开发技术现状、革新及展望[J]. 矿产综合利用, (6): 110–120.
- 徐正震, 梁青龙, 李慧, 郭佳明. 2021. 含锂资源中锂的提取研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, (5): 32–37.
- 闫立娟, 齐文. 2012. 青藏高原湖泊遥感信息提取及湖面动态变化趋势研究[J]. 地球学报, 33(1): 65–74.
- 杨卉芃, 柳林, 丁国峰. 2019. 全球锂矿资源现状及发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 26–40.
- 于枫, 王登红, 于扬, 刘铸, 高娟琴, 仲佳爱, 秦燕. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. 岩矿测试, 38(3): 354–364.
- 余疆江, 郑绵平, 伍倩. 2013. 盐湖提锂工艺研究进展[J]. 化工进展, 32(1): 13–21.
- 张亮, 杨卉芃, 柳林, 丁国峰. 2020. 全球提锂技术进展[J]. 矿产保护与利用, 40(5): 24–31.
- 赵冬, 杜雪敏, 王士强, 郭亚飞, 邓天龙. 2017. 高镁、锂比盐湖卤水提锂研究[J]. 盐科学与化工, 46(6): 40–44.
- 赵元艺, 郑绵平, 卜令忠, 卞贞, 刘喜方. 2005. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究[J]. 盐湖盐与化工, 34(2): 1–9.
- 郑绵平, 刘文高. 1987. 新的锂矿物——扎布耶石(Zabuyelite)[J]. 地质评论, 33(4): 365–368.
- 郑绵平. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1–470.
- 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖卤水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 84(11): 1585–1600.
- 郑绵平, 刘喜方. 2007. 中国的锂资源[J]. 新材料产业, (8): 13–17.