

我国盐湖锂资源开发现状、存在问题及对策

伍倩,刘喜方,郑绵平*, 卮贞,余疆江

(中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京 100037)

摘要:随着笔记本电脑、手机和电动汽车对锂电池需求的不断增加,直接带动未来对锂资源需求量的飞速增长。我国盐湖锂资源十分丰富,是今后开发的重要来源。青藏高原是我国盐湖锂资源主产地,自然条件差,开采难度大。盐湖卤水锂品位参差不齐,伴生元素众多,综合利用价值高。在介绍我国盐湖锂资源禀赋、国内外开发利用现状的基础上,指出我国盐湖锂资源在开发利用中存在工艺技术水平较低、综合利用程度不高、缺乏长远科学规划等问题,提出要加强盐湖锂资源开发及综合利用科技攻关,制定盐湖锂产业发展整体规划,保证盐湖锂资源开发过程高效、绿色、环保等切实合理的科学建议。

关键词:盐湖锂资源;开发工艺;盐湖资源综合利用

中图分类号:TQ131.1+1

文献标志码:C

文章编号:0253-4320(2017)05-0001-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.05.001

Present situation, existing problems and countermeasures of development of salt lake lithium resources in China

WU Qian, LIU Xi-fang, ZHENG Mian-ping*, ZHANG Zhen, YU Jiang-jiang

(MLR Salt Lake Resources and Environment Key Laboratory, The Research Institute of Mineral Resources of CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: The notebook computers, mobile phones and electric vehicles have been increasing demand for lithium batteries, directly resulting in the great growth of the demand for lithium resource in future. China is rich in the lithium resource of salt lake, which is an important source of lithium resource development in future. Qinghai-Tibet plateau is China's main salt lake lithium resource reserve place with poor natural conditions and big difficult in mining, and the concentration of lithium in the salt lake brine are uneven, with more associated elements and high comprehensive utilization value. Based on the introduction of China's lithium resources reserves and global status quo of the development and utilization of lithium resources, it is pointed out in this paper that China has existing problems in the development and utilization of salt lake lithium resources, such as lower technical level, poor comprehensive utilization rate, lack of long-term scientific planning etc. Some practical and reasonable scientific advices such as strengthening technical research on development and comprehensive utilization of lithium resources, formulating overall planning for the salt lake lithium industry and ensuring the development process to be high effective, "green" and environmental friendly are suggested.

Key words: lithium resources in salt lakes; development process; comprehensive utilization of salt lake resources

锂是最轻的碱金属元素,于1817年由瑞典化学家贝齐里乌斯的学生阿尔费特森在分析透锂长石时发现。自然界中主要的锂矿物有锂辉石、锂云母、透锂长石和磷铝石等。锂产品最初被应用于军事上,而后随着锂在锂铝合金、锂离子电池等诸多领域中的广泛应用以及核聚变的研究,推动了世界锂工业的发展。近年来,金属锂及其化合物广泛应用于各个行业,如锂电池和蓄电池、原子能热核聚变(反应)、玻璃、陶瓷工业、冶金、润滑剂、空气调节器、有机化学等^[1],享有“工业味精”、“宇航合金”、“能源金属”等美誉。现今,锂不仅是发展国民经济与推动现代高科技产业前进的关键元素,而且已经成为

用于核能、军工的国家战略元素,锂资源储备和提锂技术直接影响到国家的战略安全。

全球锂资源主要赋存在硬岩(锂辉石、锂云母、透锂长石等)和盐湖卤水中,其中盐湖卤水占比达70%以上。据美国地质调查局(USGS)统计,全球已查明的金属锂资源量约3 950万t(USGS,2014)。其中,玻利维亚以910万t的查明资源量高居榜首,其次是智利(750万t)、阿根廷(670万t)、美国(550万t),我国以540万t位居第五。其他重要的锂资源国有澳大利亚、加拿大、刚果(金)、塞尔维亚、俄罗斯、巴西等。

锂资源的分布很大程度上决定了锂的供应格

收稿日期:2017-01-13

基金项目:中国工程院咨询研究项目(2015-XY-44);国家自然科学基金(青年)项目(41203046);中国地质调查局地质调查项目(121201233000160020);中国地质科学院基本科研业务费项目(YWYF201605)

作者简介:伍倩(1983-),女,博士研究生,副研究员,研究方向为盐湖资源综合利用,wuqian0516@163.com;郑绵平(1934-),男,中国工程院院士,研究方向为盐湖学与盐类地质矿床研究,通讯联系人,010-68999076, zhengmp2010@126.com。

局。目前,全球盐湖锂资源开发高度集中在智利、阿根廷和我国。我国是锂资源大国,但同时也是锂消费大国,产量远不能满足需求,对外依存度达 58% 以上。近年来,随着国家新能源汽车补贴细则相继落地、充电设施扶持政策出台等因素推动,我国锂电产业快速发展。自 2015 年以来,在大宗商品行情持续走低的情形下,碳酸锂的价格却整体大幅上涨,锂产业链中的锂精矿和碳酸锂仍处于供不应求的状态。到 2020 年,我国新能源汽车将达到 500 万辆,可以预料这种锂资源短缺的局面仍将持续,这也势必会激发锂产业链上下游企业的生产热情,积极寻求资源供给和突破技术瓶颈,以应对未来锂盐需求强劲、供应短缺、锂价持续飙升的市场形势。基于此,本文对我国盐湖锂资源禀赋、国内外盐湖锂资源开发利用现状进行了综述,并通过借鉴国外盐湖锂资源的成功开发经验,对我国盐湖锂产业的发展提出切实合理的科学建议。

1 我国盐湖锂资源禀赋

我国锂资源主要分布在青海、西藏、四川、江西、新疆、湖南等地,其中盐湖锂资源的查明储量占比高达 80.54%。由于我国绝大多数盐湖锂资源分布在青藏高原生态脆弱地区,锂资源的开发受到环境影响和技术壁垒制约。

青海盐湖卤水中的氯化锂(LiCl)资源储量共计约 1 982 万 t,占到我国锂资源储量的一半以上,具有很高的开采价值和巨大的经济效益。柴达木盆地现已查明有 11 个硫酸盐型盐湖中的锂含量达到工业品位^[1-2],包括东台吉乃尔、西台吉乃尔、察尔汗和一里坪等。主要盐湖锂资源品位及储量见表 1。青海可可西里的勒斜武担湖(氯化物型)和西金乌兰湖(硫酸盐型) LiCl 含量分别达 104.43 mg/L 和 614.44 mg/L, LiCl 资源量分别为 35.56 万 t 和 99.92 万 t^[3]。此外,柴达木盆地的尕斯库勒和马海

表 1 青海柴达木盆地主要盐湖锂资源品位及储量^[4-7]

湖名	质量分数/%							LiCl	
	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	储量/万 t	Mg/Li
察尔汗	0.003	5.90	1.00	0.084	2.37	16.67	0.53	995.0	1825.0
东台吉乃尔	0.085	5.13	1.47	0.020	2.99	14.95	4.78	55.3	35.2
西台吉乃尔	0.022	8.25	0.69	0.016	1.28	14.97	2.88	178.4	61.0
大柴旦	0.016	10.60	0.40	0.040	1.30	18.70	2.25	24.3	65.0
一里坪	0.021	6.69	0.91	0.031	2.00	16.17	1.14	267.7	91.0

地区的盐湖晶间卤水和孔隙卤水中还有一些锂资源,预测 LiCl 资源量为 30 万 t。

西藏盐湖锂资源十分丰富,主要分布在藏西北地区,卤水以锂、硼含量高为基本特征,同时还含有较高的铷、铯、溴等伴生微量元素。除拉果错、麻米错、龙木错、鄂雅错等硫酸盐型锂盐湖外,还拥有独特的碳酸盐型锂盐湖,如扎布耶、当雄错、班戈错、结则茶卡等,其显著特点是卤水的 Mg/Li 值较低或几乎不含 Mg²⁺,卤水经自然蒸发便可得到碳酸锂,具有其他类型盐湖不可比拟的资源优势,是我国重要的盐湖锂资源产地。西藏卤水锂含量达到边界工业品位的盐湖有 80 个,其中大型以上有 8 个, LiCl 资源储量共计 1 738.34 万 t,主要盐湖锂资源品位及储量见表 2。中国地质科学院盐湖中心郑绵平院士

表 2 西藏主要盐湖锂资源品位及储量^[8]

湖名	LiCl 品位/(mg·L ⁻¹)	LiCl 资源量/万 t
拉果错	1938.0	247.68
仓木(麻米)错	6078.7	240.00
龙木错	1038.6	215.35
多格错仁	1024.8	199.62
结则茶卡	1312.8	139.62
扎布耶固体	—	117.29
扎布耶液体	11290.3	93.95
鄂雅错	1032.2	101.92
当雄错	2470.6	85.88
错尼东湖	417.2	83.85
捌千错	3352.0	20.35
阿克萨依湖	574.1	18.83
阿翁错	470.3	13.17
杜佳里湖	2386.6	12.39
玛尔果茶卡	1899.5	11.55
洞错	1353.5	11.52
泽错	445.9	10.26
班戈 II 湖	1633.0	5.55
班戈 III 湖	739.0	13.20
扎仓茶卡 I 湖	2033.6	2.24
扎仓茶卡 II 湖	4477.8	11.16
扎仓茶卡 III 湖	3897.5	3.45
永波错	1016.3	8.13
阿果错	617.0	7.90
阿木错	824.7	7.18
恰尔嘎木错	486.8	5.84
比洛错	1252.1	5.51
查波错	1486.6	4.20

团队经多年调查研究,认为青藏高原盐湖至少还有LiCl资源储量500多万t,LiCl远景资源达1 000万t以上。

总体上,我国盐湖锂资源具有如下特点:

(1)分布较为集中,青海、西藏是盐湖卤水型锂矿床的主产地,大部分锂盐湖位于高海拔(3 600 ~ 4 000 m以上)地区,自然条件差,开采难度大。

(2)盐湖卤水锂品位参差不齐,大多数大型/超大型盐湖锂品位高于世界平均品位,如青海一里坪、东台、西台等,西藏扎布耶盐湖锂品位居世界前三位。但近年来受气候变化等因素影响,西藏部分盐湖湖水表现出不同程度的淡化趋势,卤水锂品位有所下降。

(3)盐湖卤水中与锂伴生的硼、钾、镁、钠、铷、铯、溴等元素众多,特别是青海富锂盐湖卤水大多属于硫酸镁亚型和氯化物型,Mg/Li值较高,镁元素的大量存在使得锂镁分离困难,卤水提锂技术瓶颈难以突破。

(4)西藏盐湖锂资源以大型/超大型矿床为主,中小型矿床较少,原因在于西藏盐湖锂矿勘查程度较低^[9]、探矿权申请难、交通条件差、能源匮乏,中小型盐湖锂矿开采的经济可行性和环保可行性尚需进一步评价。

2 我国盐湖锂资源开发利用现状

传统的提锂原料为硬岩型锂辉石,尽管工艺技术成熟,但受固体锂矿床减少和环境要求提高的影响,开发成本不断增加,逐渐缺乏市场竞争力。相比之下,从盐湖卤水等液体矿床中分离提取锂盐,因其工艺技术相对简单、成本较低、环境友好,具有较强的市场竞争力,已成为世界各国生产锂盐的主要途径^[6,10],也是今后锂资源开发的重要来源。

据了解,目前全球生产的碳酸锂原料有70%来自盐湖卤水,仅30%来自矿石。而我国卤水提锂比例较低,矿石提锂占比高达80%。究其原因,一方面西藏碳酸盐型盐湖卤水提锂技术虽已成熟并产业化,但由于企业生产管理、技术应用等方面的问题,导致生产效益较低,难以达产、扩产;另一方面青海柴达木盆地尽管盐湖锂资源极其可观,但因锂镁分离技术难题尚未解决,大大限制了盐湖提锂企业的产能扩张,再加上碳酸锂常处于副产地位,难以单独扩展提锂产能,故要实现锂产业化还需做好基础研发和技术攻关工作。

(1)察尔汗

地处青海柴达木盆地中部,海拔2 670 m,是我国最大的可溶性钾镁盐矿床,也是世界上大型盐湖矿床之一。盐湖卤水属氯化物型,Mg/Li值接近2 000,LiCl资源储量达824.6万t。青海盐湖佛照蓝科锂业股份有限公司采用俄罗斯专利吸附法、纳滤膜法、电渗析法和沉淀法相结合的卤水提锂成套工艺技术生产碳酸锂,具有技术创新、节能环保、锂回收率高等特点。目前年产约3 000 t工业级碳酸锂,现正在建设10 000 t碳酸锂生产线。

(2)东台吉乃尔

位于青海柴达木盆地中部,海拔2 681 m,气候干燥,蒸降比近90,具有优越的自然蒸发条件。盐湖卤水属硫酸镁亚型,锂资源量达超大型规模(以LiCl计约54.6万t),Mg/Li值约为40。青海锂业有限公司自主研发了从高镁锂比盐湖卤水提取锂盐的离子选择迁移合成法新技术,结合均相膜法、电渗析法和沉淀法^[11],可获得产品纯度在99.5%以上的电池级碳酸锂,具有可操作性强、产品质量高、清洁无污染等特点^[12]。碳酸锂设计产能10 000 t/a,目前除生产工业级和电池级碳酸锂产品外,还主要生产工业级硫酸钾镁肥、硫酸钾、氯化钾、工业级硼酸和氢氧化镁,在一定程度上做到了盐湖资源综合利用。

(3)西台吉乃尔

地处青海柴达木盆地中部,海拔2 681 m,属硫酸镁亚型盐湖,固液共存,主要以液体矿为主,具有埋藏浅、品位高的特点,是锂、硼大型矿床,锂资源量以LiCl计为308万t,可采储量约130万t。卤水Mg/Li值较高(约为65),提锂技术相对复杂。青海中信国安科技发展有限公司采用煅烧法分离镁锂^[13],建设了碳酸锂化工产品生产基地。目前,2 000 t工业级碳酸锂规模化中试已成功,即将建成2万t工业级碳酸锂生产线。由于生产过程中产生的大量稀盐酸因无法处理而形成酸雾污染,煅烧过程中产生的大量氧化镁渣难以利用,高温煅烧的酸性环境对回转炉设备腐蚀严重等问题的存在^[12],该工艺亟需改进和完善^[14]。

(4)扎布耶

位于西藏日喀则地区仲巴县,海拔4 422 m,面积243 km²,LiCl资源储量为209万t。扎布耶是著名的低镁锂比碳酸盐型盐湖,Mg/Li值仅0.003 ~ 0.01,锂以碳酸锂的形态天然存在,较易于提取。1982年,郑绵平院士团队在此建立了世界海拔最高

的科学观测站,利用湖区高寒、日照强等环境条件的优势,首创了适合我国国情的“冷冻除碱硝-梯度太阳池升温析锂”的低成本提锂新工艺。2004年,具有自主知识产权的太阳池结晶提锂技术正式应用于工业化生产,其提锂成本接近世界提锂成本最低的阿塔卡玛盐湖。目前,该湖由西藏扎布耶锂业高科技有限公司负责开发,其产品主要是碳酸锂和氢氧化锂,产量约 6 000 t/a。近年来,由于受到交通、电力、能源等条件所限,再加上企业管理不到位、工艺技术缺乏改进创新,扎布耶锂业一直难以达产、扩产,生产效益较低。

(5) 结则茶卡、龙木错

位于西藏阿里地区日土县,两湖锂资源按 LiCl 计约 443 万 t,属于大型锂矿资源。结则茶卡为碳酸盐型盐湖,龙木错为硫酸盐型盐湖, Mg/Li 值约 85。西藏城市发展投资股份有限公司充分利用当地太阳能、风能、冷能资源,采用两湖混合多次兑卤工艺制备碳酸锂,在克服碳酸盐型盐湖卤水锂富集难题的同时,获得了高品位锂产品(碳酸锂含量 $\geq 65\%$)和高锂收率(综合收率 $\geq 55\%$)。一期 5 000 t 碳酸锂项目建设已于 2012 年开始,2014 年试生产,2015 年完成规模化量产和工艺优化研究,预计 2020 年前碳酸锂生产能力可达 10 000 t。

可以看到,在当前碳酸锂价格飙升、锂电行业发展一路向好的态势下,我国盐湖锂生产企业的积极性高涨,都在充分发挥自身优势,从技术、规模上千方百计提高产品质量和产量。针对不同组成、不同品质的卤水采取多种方法组合提锂工艺,是目前被业界广泛认同的适用于高镁锂比卤水提锂的优选技术方案,倘若这一世界性难题被完全攻破,那么我国盐湖锂资源将真正实现规模化生产和综合利用,并完全可自给自足。

3 国外盐湖锂资源开发现状

当前,国外盐湖锂资源开发高度集中在智利、阿根廷和美国,已知的正在开发和生产的主要锂盐湖有智利阿塔卡玛、阿根廷霍姆布勒姆尔托和林肯盐湖、玻利维亚乌尤尼、美国银峰、西尔斯湖和大盐湖等^[15-16]。国外盐湖卤水的镁锂比值较小,通常采用分步沉淀法和磷酸盐沉淀法在富锂的高矿化卤水中提取锂盐产品。

(1) 阿塔卡玛

位于智利北部,海拔 2 300 m,是全球第二大盐

湖卤水型锂矿床, LiCl 资源量约 1 484 万 t。盐湖卤水属硫酸镁亚型,锂浓度为 0.15%, Mg/Li 比为 6.4。湖区气候极度干燥,蒸发量极大,特别适合通过日晒自然蒸发廉价浓缩盐湖卤水,富集有用成分。阿塔卡玛盐湖由全球最大的锂业公司智利 SQM 和 Chemetall SCL 两家公司进行开发,针对冬、夏季采用完全不同的锂、钾等盐类分离提取及加工工艺路线^[17],产品涵盖碳酸锂、硼酸、氯化钾、硫酸钾、硝酸钾、硝酸钠和碘,已整合形成大型综合无机化工企业。阿塔卡玛盐湖的资源开发为世界盐湖资源的开发树立了典范。

(2) 霍姆布勒姆尔托

位于阿根廷西北部,海拔 4 300 m,面积约 565 km²,湖区年均降雨量仅 20 ~ 25 mm,卤水中锂浓度为 0.22 ~ 1.08 g/L。基于当地气温、湿度、风速等自然条件,美国 FMC 公司通过建造盐田蒸发浓缩卤水,并采用专有的吸附工艺技术提取碳酸锂。2012 年公司实际生产了 10 600 t Li₂CO₃ 和 4 300 t LiCl,占当年全球市场份额的 11%。另外,加拿大第一锂业公司也占据了霍姆布雷托盐湖 320 km² 的锂资源,并于 2011 年初首次获得了 Li₂CO₃ 产品^[18]。

(3) 乌尤尼盐湖

位于玻利维亚西南部,海拔 3 656 m,面积达 9 065 km²,是世界上最大的盐湖。近些年的深钻表明其锂资源储量超过 1 800 万 t,至少是美国地质调查局先前估计值的 2 倍以上。近年来,玻利维亚政府在积极推进乌尤尼盐湖矿产资源的开发利用,专门成立了玻利维亚矿业公司,政府占股 51%,坚持锂资源的开发指导方针为“初期阶段的开发将由本国自有资金全面控制,外资只能参加最后生产高附加值产品的投资项目”。盐湖卤水开发利用的中间试验于 2010 年启动,后期逐步形成了详尽的中试方案和生态环境保护措施,开发产品有碳酸锂、硼酸、氯化钾、硫酸钾和镁盐。

(4) 林肯盐湖

位于阿根廷西北部,海拔 3 700 m,面积超过 250 km², LiCl 资源储量为 840 万 t。卤水锂含量为 0.33%, Mg/Li 比为 8.4,年蒸发量约 3 000 mm。澳大利亚 Rincon Lithium 公司最先开展盐湖前期开发工作,包括水文研究、盐田蒸发和碳酸锂提取工艺研究等,采用先以石灰乳除 Mg²⁺,再以 Na₂SO₄ 除 Ca²⁺ 的杂质去除工艺。设计的最终产能为 1 万 t Li₂CO₃、3 000 t LiCl、4 000 t LiOH 和 4 万 t 钾盐。为

满足工艺过程中大量 Na_2SO_4 的需求,公司还购买了一个储量达 1 850 万 t 的 Na_2SO_4 矿床,即里奥格兰德干盐湖^[18]。

4 国外盐湖锂资源开发对我国的借鉴意义

国外特别是南美盐湖锂资源开发及综合利用,对我国盐湖锂资源开发有着很好的启发和借鉴意义,值得深思^[19]。

(1) 锂资源具有重大的战略和经济价值,南美洲“锂三角”地区被称为“下一个中东”,盐湖锂资源储量最为丰富的玻利维亚被称为是“锂的沙特”。南美富锂盐湖锂资源的开发被完全赋予了新的含义,锂已经从一种普通的矿产资源,变成了未来的能源。我国蕴藏着丰富的盐湖锂资源,应当对其开发利用和产业发展实施国家管理,制定出长远的科学规划。

(2) 技术研发具有极端重要性,针对制约我国盐湖锂资源开发及综合利用的重大关键技术问题,如镁锂分离、高附加值锂产品的研发等要加强科技攻关,将科学技术作为盐湖锂资源开发的第一生产力,加大投入,使科研成果尽快转化为现实生产力,并推广到产业化^[20]。

(3) 地处边远高寒地区、气候恶劣、交通不便、能源缺乏等现实条件,不能成为阻碍我国盐湖锂产业发展的绊脚石。南美大多开发成功的锂盐湖就位于高海拔干旱、自然环境恶劣地区。我国在盐湖锂资源开发时应本着“因地制宜、就地取材”的原则,充分利用当地的太阳能、风能、冷能和地热等天然资源优势,发展盐田工艺技术^[15],并尽量利用本地及周边矿产资源,减少外来化学试剂添加^[21],力求开发过程高效、绿色、环保。

(4) 在开发锂资源的同时,要做到盐湖资源综合利用^[12]。我国富锂盐湖卤水中还含有其他诸多高价值元素,如钾、硼、镁、铷、铯、溴等。单一的开发方式不仅增加生产成本,而且造成资源的极大浪费。在提锂同时对其他有用组分回收利用,则会带来巨大的绿色效益。另外,对于提锂后老卤及其他废水的处理,也是盐湖锂资源开发必须解决的关键问题。南美盐湖在开发时将最终产生的老卤都回注到盐湖干盐壳之下,不留在地表^[18]。我国锂盐湖大多位于青藏高原生态环境脆弱区,对提锂及综合利用后的

老卤要妥善存放和处理,以防破坏环境。

参考文献

- [1] 张兴儒. 关于柴达木盆地盐湖锂盐资源开发的探讨[J]. 盐湖盐与化工, 1996, 25(3): 44-46.
- [2] 赵元艺. 中国盐湖锂资源及其开发进程[J]. 矿床地质, 2003, (1): 99-106.
- [3] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 乜贞, 卜令忠, 郑绵平. 中国盐湖锂资源的产业化现状——以西台吉乃尔盐湖和扎布耶盐湖为例[J]. 地球学报, 2010, (1): 95-101.
- [5] 王宝才. 我国卤水锂资源及开发技术进展[J]. 化工矿物与加工, 2000, (10): 4-6.
- [6] 钟辉, 周燕芳, 殷辉安. 卤水锂资源开发技术进展[J]. 矿产综合利用, 2003, (1): 3-28.
- [7] 曹文虎, 吴蝉. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [8] 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.
- [9] 张利珍, 谭秀民, 张秀峰. 我国盐湖资源开发利用的现状与对策分析[J]. 盐业与化工, 2012, (11): 7-18.
- [10] 杨兆娟, 向兰. 从盐湖卤水中提锂的研究进展[J]. 盐湖盐与化工, 2005, (6): 27-29.
- [11] 刘元会, 邓天龙. 国内外从盐湖卤水中提锂工艺技术研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2006, (5): 69-75.
- [12] 马培华. 科学开发我国的盐湖资源[J]. 化学进展, 2009, (11): 2349-2357.
- [13] 后立胜, 李效广, 金若时, 等. 中国盐湖卤水锂资源禀赋分析与策略建议[J]. 资源与产业, 2016, (5): 56-62.
- [14] 杨能红. 我国盐湖锂资源工业化生产现状及进展[J]. 盐业与化工, 2015, (12): 5-7.
- [15] 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.
- [16] 宋彭生. 盐湖及相关资源开发利用进展[J]. 盐湖研究, 2000, (1): 1-16.
- [17] 常启明. 世界卤水提锂发展概况[J]. 新疆有色金属, 1994, (4): 40-44.
- [18] 宋彭生, 项仁杰. 盐湖锂资源开发利用及对中国锂产业发展的建议[J]. 矿床地质, 2014, (33): 977-992.
- [19] 郑绵平. 我国重要稀有、稀散金属综合利用战略咨询研究发展战略研究报告[R]. 中国工程院咨询研究项目, 2015.
- [20] 郑绵平, 齐文. 我国盐湖资源及其开发利用[J]. 矿产保护与利用, 2006, (5): 45-50.
- [21] 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. ■