

青藏高原碳酸盐型锂盐湖开发技术

乜贞, 伍倩, 卜令忠, 王云生, 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 中国的盐湖锂资源十分丰富, 并且盐湖类型齐全; 锂是对国民经济和国家安全有重要意义的能源金属, 近年来随着国际社会对新能源的高度重视, 国内外锂盐行业发展十分迅猛, 锂盐湖的开发也迎来了新的机遇。综述了中国青藏高原碳酸盐型锂盐湖的分布、卤水特点和重要碳酸盐型锂盐湖产业化状况, 详细阐述了盐梯度太阳池技术和兑卤法技术, 及其在中国青藏高原碳酸盐型锂盐湖中的应用情况。中国碳酸盐型锂盐湖具有镁锂比低、工艺技术相对简单的特点, 通过这两种技术的有机结合, 该类型盐湖有望在开发过程中率先实现重大突破。

关键词 锂盐湖; 碳酸盐型; 盐梯度太阳池技术; 兑卤法技术; 碳酸锂; 青藏高原

锂是最轻的金属元素, 银白色, 质软, 密度仅 0.534 g/cm^3 。天然锂有两种同位素: ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 。锂在自然界中丰度较大, 居第 27 位, 在地壳中约含 0.0065%。锂是对国民经济及国防具有重要意义, 在日常生活各个方面都得到了广泛的应用^[1]。近年来, 信息技术迅猛发展, 锂离子电池成为发展最为迅速的领域之一。而且, 由于世界各国对矿物能源短缺的顾虑和环保的要求, 国内外都提出了详尽的清洁能源发展战略, 世界主要汽车生产国都出台了新能源汽车规划目标。根据《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》, 2020 年中国新能源汽车年产量将达到 200 万辆, 按照保守估算, 至 2020 年, 中国仅电动汽车产业就需碳酸锂约 8 万 t。

目前, 国际上盐湖卤水提锂产品已占到整个锂盐产品的 80% 以上, 因此盐湖卤水提锂已经成为锂盐生产的主攻方向。中国盐湖资源丰富, 水化学类型齐全, 其中有许多适于开发的锂盐湖^[2-3]。但是中国硫酸盐型和氯化物型锂盐湖因镁锂比太高, 在镁锂分离技术上还没有真正突破, 盐湖锂资源的大规模开发受到严重制约。本文通过分析中国青藏高原碳酸盐型锂盐湖的资源特点和开发工艺技术进展, 探讨碳酸盐型锂盐湖开发取得突破的可行性。

1 碳酸盐型锂盐湖

中国是一个多盐湖的国家, 全国多数省区均有古代或现代盐湖分布。现代第四纪盐湖主要分布在青海、西藏、新疆和内蒙古四省区, 大小盐湖有 1500 多个。现代盐湖中储藏着大量国民经济所必需的天然无机盐资源和生物资源, 其中最

重要的化学元素是钾、硼和锂^[2-3]。

盐湖有多种分类方法, 在库尔纳可夫-瓦良什科对盐湖的分类基础上, 郑绵平将青藏高原的盐湖划分为碳酸盐型、硫酸盐型(硫酸钠亚型、硫酸镁亚型)及氯化物型 3 种类型(表 1), 按照碱度(K_c)等相应盐沉积差异再将碳酸盐型盐湖分为强、中、弱 3 个亚类^[4]。

表 1 中

$$K_c = \frac{\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3}{\text{总盐量}} \times 100\%$$

$$K_{n1} = \frac{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \quad K_{n2} = \frac{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$$

$$K_{n3} = \frac{\text{SO}_4^{2-}}{\text{Ca}^{2+}} \quad K_{n4} = \frac{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-}{\text{Ca}^{2+}}$$

$$K_1 = \frac{\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3}{\text{Na}_2\text{SO}_4} \quad K_{11} = \frac{\text{Na}_2\text{SO}_4}{\text{MgSO}_4}$$

$$K_{11}^2 = \frac{\text{MgSO}_4}{\text{MgCl}_2} \quad K_{111} = \frac{\text{MgCl}_2}{\text{CaCl}_2}$$

式中, K_c 为碱度, 以盐的质量分数(%)或质量浓度(mg/L)为单位计算; K_{n1-4} 为判别系数 1, 以离子当量浓度计算; K_{1-111} 为判别系数 2, 以质量分数(%)或质量浓度(mg/L)为单位计算。

中国盐湖资源丰富, 水化学类型齐全, 不仅分布有常见的氯化物型、硫酸盐型和碳酸盐型盐湖, 而且分布有富含锂、硼等元素的特种盐湖。碳酸盐型盐湖主要分布在中国内蒙古及青藏高原地区, 新疆也有少量分布。而中国碳酸盐型锂盐湖主要分布在青藏高原南部地区以冈底斯山-念青唐古拉山为界的南北两个亚带中, 其代表性盐湖是西藏扎布耶盐

收稿日期: 2017-02-10; 修回日期: 2017-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41473061); 中国地质调查局地质大调查项目(121201103000150012)

作者简介: 乜贞, 研究员, 研究方向为盐湖资源综合利用和盐湖化工, 电子信箱: niezhen518@163.com

引用格式: 乜贞, 伍倩, 卜令忠, 等. 青藏高原碳酸盐型锂盐湖开发技术[J]. 科技导报, 2017, 35(12): 49-54; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.12.007

湖,除此之外还有当雄错、结则茶卡、班戈湖等盐湖^[2,4]。表2列出了国内外主要锂盐湖及碳酸盐型锂盐湖的卤水化学组

成,从中可以看到,碳酸盐型锂盐湖卤水的镁锂比很低,基本在0.02~4范围,远低于硫酸盐型,更不用说氯化物型。

表1 盐湖化学类型分类
Table 1 Classification of hydrochemical type of salt lakes

化学类型	特征系数									
	$K_c / \%$	K_{n1}	K_{n2}	K_{n3}	K_{n4}	K_I	K_{II}^1	K_{II}^2	K_{III}	
碳酸盐型	强	> 29	≥1	≥1	≥1	≥1	≥1	∞	—	—
	中	8~29	≥1	≥1	≥1	≥1	≥1	∞	—	—
	弱	0.1~8	> 1	≥1	≥1	≥1	≤1	∞	—	—
硫酸盐型	硫酸镁亚型	0~0.1	≥1	≥1	≥1	> 1 / < 1	0	n	∞	—
	硫酸钠亚型	—	≤1	≤1	≥1	> 1 / < 1	—	0	n	0
氯化物型	—	≤1	≤1	≤1	< 1	—	—	0	n	n

表2 国内外主要锂盐湖卤水的化学组成^[5-9]
Table 2 Chemical compositions of major lithium salt lake brines

盐湖名称	卤水化学组成 / %									比重	Mg/Li	水化学类型
	Na	K	Mg	Ca	Li	Cl	SO ₄	B ₂ O ₃	CO ₃			
阿塔卡玛	7.600	1.850	0.96	0.031	0.150	16.04	1.650	0.21	—	1.223	6.40	硫酸镁
乌尤尼	8.750	0.720	0.65	0.046	0.035	15.69	0.850	0.06	—	1.211	18.60	硫酸镁
霍姆布雷托	9.790	0.617	0.085	0.053	0.062	15.80	0.853	0.11	—	1.205	1.37	硫酸钠
西尔斯	15.200	2.300	0.34	—	0.0083	12.39	4.560	1.13	2.72	1.300	4.10	碳酸盐
察尔汗	5.903	1.000	2.372	0.084	0.0013	16.67	0.530	0.006	—	1.209	1825	氯化物
东台	7.240	1.160	2.03	—	0.060	13.62	6.550	0.08	—	1.266	33.80	硫酸镁
西台	8.420	0.560	1.11	0.020	0.020	15.34	1.960	0.16	—	1.226	55.50	硫酸镁
一里坪	7.040	0.910	1.79	—	0.020	15.84	1.650	0.08	—	1.221	89.50	硫酸镁
扎布耶	10.010	3.160	0.002	—	0.081	12.06	2.980	0.84	3.41	1.295	0.025	碳酸盐
当雄错	3.720	0.800	0.007	0.001	0.033	6.30	0.640	0.253	0.99	1.110	0.200	碳酸盐
结则茶卡	3.930	0.220	0.030	0.020	0.020	5.87	0.260	0.070	0.31	1.083	1.500	碳酸盐
班戈湖	1.720	0.220	0.013	0.001	0.004	1.06	1.930	0.102	0.28	1.046	3.500	碳酸盐
龙木错	2.930	0.300	0.90	0.230	0.010	7.41	0.570	0.06	—	—	90.00	—

2 碳酸盐型锂盐湖卤水的特点

将碳酸盐型锂盐湖卤水的化学组成换算成Janecke指数(见表3),将卤水组成点描绘在25℃Na⁺, K⁺//Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻-H₂O五元体系系稳相图上^[10],如图1所示。从表2可见,碳酸盐型锂盐湖卤水的镁锂比变化也较大,其中扎布耶盐湖最小,只有0.025,而西尔斯盐湖最高,镁锂比达4.1,说明虽然它们同属碳酸盐型盐湖,但是在具体化学组成上有很大不同。在相图上,它们的原始卤水组成点分布也较分散,其中扎布耶、当雄错、结则茶卡3个盐湖的卤水组成点位于钾芒硝相区,而班戈湖和西尔斯的卤水组成点则位于无水芒硝相区。

虽然同属碳酸盐型锂盐湖,由于化学组成的不同,且在相图中原卤相点分布各异,造成了这几个碳酸盐型锂盐湖卤水在蒸发过程中具有不同的元素富集规律和盐类矿物组合。西尔斯盐湖卤水组成见表2,在蒸发过程中会析出石盐、

钾芒硝、天然碱、碳钠矾、碳钾钠矾和硼砂等矿物^[11]。而扎布耶盐湖在25℃等温蒸发过程中,盐类矿物的析出顺序为石盐、钾芒硝、碳酸锂、天然碱、水碱、钾石盐、硼砂,扎布耶盐湖卤水最大的特点是现阶段正在沉积天然碳酸锂——扎布耶石^[9,12-13]。虽然是碳酸盐型锂盐湖,但西尔斯盐湖不仅由于卤水中锂含量较低,而且由于卤水中含有磷酸根,因此在尾卤中析出磷酸锂,而没有析出碳酸锂矿物。班戈湖卤水的镁锂比较高(3.5),接近于硫酸盐型锂盐湖卤水,其卤水蒸发的第一阶段析出镁盐,而后卤水中锂浓度逐渐高于镁,镁浓度逐渐趋于零。因此,与扎布耶卤水析盐过程不同的是,班戈湖卤水中会析出较多氯碳钠镁石^[14]。当雄错盐湖卤水的析盐规律与扎布耶盐湖基本相同^[15]。

碳酸盐型锂盐湖由于其卤水中大量存在的CO₃²⁻限制了Ca²⁺、Mg²⁺在卤水中存在的浓度范围,从而造就了卤水很小的

表3 几个碳酸盐型锂盐湖卤水的相图指数

Table 3 Janecke index on the phase diagram of carbonate lithium salt lake brines

盐湖名称	Na ⁺ ,K ⁺ //Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,CO ₃ ²⁻ -H ₂ O 五元体系相图中 卤水组成点的 Janecke 指数/%			Mg/Li	相图点
	2K ⁺	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻		
扎布耶	31.51	24.19	44.31	0.025	1
当雄错	30.64	19.95	49.41	0.200	2
结则茶卡	26.33	25.33	48.34	1.500	3
班戈湖	10.20	72.87	16.92	3.500	4
西尔斯	24.07	38.84	37.09	4.100	5

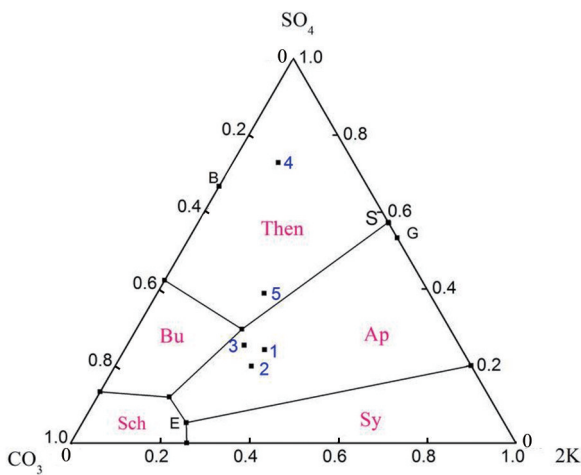


图1 碳酸盐型锂盐湖卤水在25°C Na⁺,K⁺//Cl⁻,SO₄²⁻,CO₃²⁻-H₂O 五元体系介稳相图中的分布

Fig. 1 Distribution of carbonate lithium salt lake brine in the metastable phase diagram of quinary system Na⁺,K⁺//Cl⁻,SO₄²⁻,CO₃²⁻-H₂O (298 K)

表4 有关盐类矿物一览表

Table 4 Salt minerals discussed in this paper

矿物名称缩写	矿物名称	化学分子式
Zb	扎布耶石(Zabuyelite)	Li ₂ CO ₃
Sy	钾石盐(Sylvite)	KCl
Ap	钾芒硝(Aphthitalite)	K ₃ Na(SO ₄) ₂
Then	无水芒硝(Thenardite)	Na ₂ SO ₄
Bu	碳钠矾(Burkeite)	Na ₆ CO ₃ (SO ₄) ₂
Sch	七水碳酸钠(Sodium Carbonate Heptahydrate)	Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O
No	氯碳钠镁石(Northupite)	Na ₃ Mg(CO ₃) ₂ Cl
Th	水碱(Thermonatrite)	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O
Tr	天然碱(Trona)	Na ₂ CO ₃ ·NaHCO ₃ ·2H ₂ O
Bo	硼砂(Borax)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O

镁锂比,这是碳酸盐型锂盐湖的优点。但是因为碳酸锂溶解度较小,很高的CO₃²⁻又制约着Li⁺在卤水中的富集,致使卤水中锂离子富集空间很小,容易在蒸发浓缩的过程中以碳酸锂形式结晶析出^[16]。因此碳酸盐型锂盐湖卤水不能富集到较高的锂浓度,成卤浓度远低于硫酸盐型或氯化物型锂盐湖卤水,且其成卤的结晶析出率也很低,这成为制约碳酸盐型锂盐湖资源开发技术突破的主要难题。

3 碳酸盐型锂盐湖的开发

目前,中国已经进入产业化开发,可以提供产品的碳酸盐型锂盐湖有两个,分别是扎布耶盐湖和结则茶卡盐湖,而这两个盐湖各自形成了独特的开发工艺。

3.1 西藏扎布耶盐湖

扎布耶盐湖位于西藏阿里地区仲巴县境内,湖泊面积247 km²,湖面海拔高度4422 m。扎布耶盐湖富含锂、钾、硼、铷、铯、溴等多种矿物元素,含量较高,属国内外罕见,是一个锂、硼、钾、铷等储量达到超大型的碳酸盐型锂盐湖,其中碳酸锂储量达到184万t^[17]。

扎布耶盐湖的开发工艺在郑绵平的指导下研究形成,其锂资源提取工艺简单实用,分为制卤和结晶两步,得到高品位碳酸锂混盐。制卤阶段利用当地冬季丰富的冷资源,使卤水中的锂快速富集,制取高锂卤水;在结晶阶段,主要采用了盐梯度太阳池技术,利用青藏高原丰富的太阳能资源来加热高锂卤水,直接得到品位75%左右的碳酸锂矿产品,然后再运输到锂厂去精加工,形成工业级或电池级碳酸锂产品^[18-20]。扎布耶盐湖的生产工艺路线见图2。太阳池又叫盐梯度太阳池,一般由3个区域构成,最上层区域称为上对流层是一层淡水,中间区域称为浓度梯度层,下层是储能区。在浓度梯度层中,盐溶液的比重随池深逐渐增大,使该层没有对流运动。所以浓度梯度层就具有防止下层热量向上散发的作用,使太阳能量储存于池底储能区,是太阳池的关键所在^[18,21]。卤水在太阳池内可升温40~60°C,满足碳酸锂高温结晶的条件,使碳酸锂能够集中沉淀,图3所示为扎布耶正在生产中的结晶池。

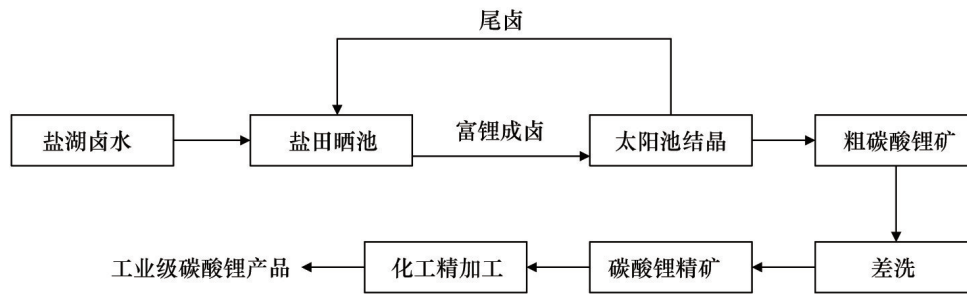


图2 扎布耶盐湖卤水沉锂工艺路线

Fig. 2 Flow chart for producing lithium carbonate with Zabuye salt lake brine



图3 正在运行中的扎布耶盐湖结晶池

Fig. 3 Crystallization pond in operation at Zabuye salt lake

扎布耶盐湖由西藏矿业发展股份有限公司开发,锂资源项目于2003年动工,利用盐梯度太阳池技术生产碳酸锂精矿,日晒干燥后再运往甘肃白银锂工厂进一步加工提纯,制成工业级碳酸锂和氢氧化锂产品,产能为年产5000 t工业级

碳酸锂^[22],目前年产量为3000~4000 t碳酸锂。

3.2 西藏结则茶卡盐湖

结则茶卡盐湖位于西藏阿里地区日土县东汝乡,湖水面积113 km²,探明储量为200万 t碳酸锂。结则茶卡盐湖属于碳酸盐型盐湖,从表2可见,该湖卤水CO₃²⁻含量较高,镁锂比低,只有1.5,但是作为碳酸盐型盐湖,该湖也存在卤水蒸发过程中锂难以有效富集的问题。而距离结则茶卡约80 km的龙木错属于硫酸盐型锂盐湖,镁锂比高达90,该湖在提取锂产品的过程中存在镁锂分离难题。因此,李武团队在结则茶卡盐湖的开发工艺研究过程中采用了兑卤法,将晒制好的结则茶卡卤水和龙木错卤水按CO₃²⁻和Mg²⁺等摩尔比进行兑卤,利用龙木错卤水中的高Mg²⁺沉淀结则茶卡卤水中的CO₃²⁻,互兑后的卤水中CO₃²⁻和Mg²⁺浓度很低,此卤水再通过晒制后可以得到Li⁺浓度很高的成卤,然后利用结则茶卡的高CO₃²⁻卤水进行第二次兑卤,将Li⁺沉淀出来即可得到纯度较高的碳酸锂矿产品^[23-26]。整个工艺过程见图4所示,关键是两段兑卤,在第一次兑卤时,发生的化学反应如式(1)和(2)所示,第二次兑

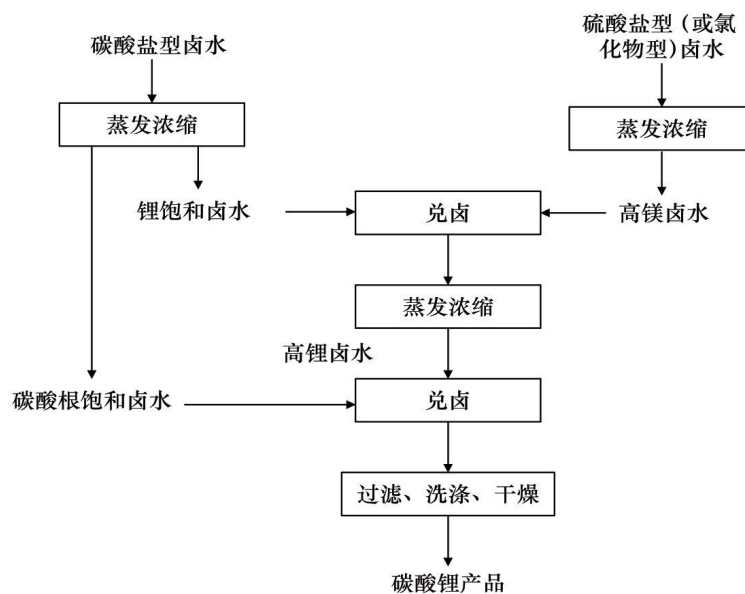
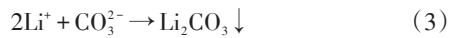


图4 结则茶卡盐湖卤水兑卤工艺路线

Fig. 4 Flow chart of producing lithium carbonate with Jeze char salt lake brine

卤时发生了式(3)所示的化学反应。该工艺的特点是没有引入化学原料,完全利用当地锂盐湖的资源化学组成特点,实现了镁锂分离和锂资源的高效提取。



西藏城市发展投资股份有限公司利用兑卤法开发结则茶卡和龙木错两湖的锂资源,目前已经形成了从高镁锂比盐湖中提取碳酸锂的方法,正在建设年产5000 t碳酸锂的生产线,在湖区已经修建了10 km²的盐田和部分结晶池,形成了百吨级的碳酸锂矿产品。

4 结语

受国家新能源政策的鼓舞,目前中国锂行业一片火热景象,已有很多企业投入到从锂电材料到动力电池、储能电池、新能源汽车的生产,而由于中国盐湖锂资源开发的滞后,使目前中国的碳酸锂原材料处于供不应求的局面,倒逼盐湖锂产业加速发展。目前的锂行情为中国盐湖锂产业的快速崛起,提供了良好的机遇。中国西部的西藏、青海有很好的盐湖锂资源优势,有望与内地资本和技术有机结合,加快盐湖锂产业布局进程。

作为青藏高原特种类型的碳酸盐型锂盐湖,在代表其目前最高开发水平的盐梯度太阳池技术和兑卤法技术已基本获得突破的今天,其开发进程将有机会快速推进,因为制约碳酸盐型锂盐湖开发的瓶颈问题已经解决。兑卤法将成功解决碳酸盐型锂盐湖的制卤问题,使其可以像其他类型盐湖一样自由制取高锂卤水;而太阳池技术将解决碳酸盐型锂盐湖卤水的结晶和青藏高原能源缺乏问题。此两项技术的有机组合,将有望率先实现中国碳酸盐型锂盐湖的大规模成功开发。

参考文献(References)

- [1] 黄师强. 锂和锂化合物[M]//化工百科全书(10卷). 北京: 化工出版社, 1996: 303-320.
Huang Shiqiang. Lithium and lithium compound[M]//Chemical engineering encyclopedia (vol 10). Beijing: Chemical Industry Press, 1996: 303-320.
- [2] 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.
Zheng Mianping, Xiang Jiong, Wei Xinjun, et al. Saline lakes of Tibet and Qinghai[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1989: 1-431.
- [3] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Tao, et al. Salt Lakes of China[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [4] 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.
Zheng Mianping, Liu Xifang. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1585-1600.
- [5] 宋彭生. 盐湖及相关资源开发利用进展[J]. 盐湖研究, 2000, 8(1): 1-16; 8(2): 33-58; 8(3): 44-61; 8(4): 50-69.
Song Pengsheng. Comprehensive utilization of salt lake and related resources[J]. Journal of Salt Lake Science, 2000, 8(1):1-16; 8(2): 33-58; 8(3):44-61; 8(4):50-69.
- [6] 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(5): 977-992.
Song Pengsheng, Xiang Renjie. Utilization of salt lake lithium resources and suggestions for the development of lithium industry in China[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(5): 977-992.
- [7] 张宝全, 刘铸唐, 符廷进, 等. 东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究(I): 25℃等温蒸发实验[J]. 盐湖研究, 1994, 2(2): 57-60.
Zhang Baoquan, Liu Zhutang, Fu Tingjin, et al. Study of the phase chemistry of Dongtaijinarer salt lake brine (I): Isothermal evaporation at 25℃[J]. Journal of Salt Lake Science, 1994, 2(2): 57-60.
- [8] 郭爱武, 李吉生, 王菊香, 等. 西台吉乃尔盐湖卤水自然蒸发试验研究[J]. 盐湖研究, 2009, 17(3): 29-31.
Guo Aiwu, Li Jisheng, Wang Juxiang, et al. Experimental study on natural evaporation of Xitaijinarer salt lake brine[J]. Journal of Salt Lake Science, 2009, 17(3): 29-31.
- [9] 郑绵平, 邓月金, 卞贞, 等. 西藏扎布耶盐湖冬季卤水25℃等温蒸发研究[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1742-1749.
Zheng Mianping, Deng Yuejin, Nie Zhen, et al. 25℃ isothermal evaporation of winter brines from the Zabuye Salt Lake, Tibet, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(12): 1742-1749.
- [10] 房春晖, 牛自得, 刘子琴, 等. Na⁺, K⁺/Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻-H₂O五元体系25℃介稳相图的研究[J]. 化学学报, 1991, 49(11): 1062-1070.
Fang Chunhui, Niu Zide, Liu Ziqin, et al. Studies on the metastable phase diagram in the quinary system Na⁺, K⁺/Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻-H₂O at 25℃[J]. Acta Chimica Sinica, 1991, 49(11): 1062-1070.
- [11] Teeple J E. The industrial development of searles lake brines[M]. New York: The Chemical Catalog Company, Inc, 1929.
- [12] 杨建元, 张勇, 程温莹, 等. 西藏扎布耶盐湖冬季卤水25℃等温蒸发研究[J]. 海湖盐与化工, 1996, 25(5): 21-24.
Yang Jianyuan, Zhang Yong, Cheng Wunying, et al. 25o isothermal evaporating research in winter brine of Zabuye salt lake in Tibet[J]. Sea & Lake Salt and Chemical Industry, 1996, 25 (5): 21-24.
- [13] 郑绵平, 刘文高. 新的锂矿物——扎布耶石[J]. 矿物学报, 1987, 7(3): 221-227.
Zheng Mianping, Liu Wengao. A new Li mineral: Zabuylite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1987, 7(3): 221-227.
- [14] 赵元艺, 郑绵平, 卜令忠, 等. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究[J]. 海湖盐与化工, 2005, 34(2):1-6.
Zhao Yuanyi, Zheng Mianping, Bu Lingzhong, et al. Study on salt pond technology of lithium salt extracting from carbonate-type saline lakes, Tibet [J]. Journal of Sea & Lake Salt and Chemical Industry, 2005, 34 (2):1-6.
- [15] 伍倩, 郑绵平, 卞贞, 等. 西藏当雄错碳酸盐型盐湖卤水自然蒸发析盐规律研究[J]. 无机化学学报, 2012, 28(9): 1895-1903.
Wu Qian, Zheng Mianping, Nie Zhen, et al. Natural evaporation and crystallization regularity of Dangxiongcuo carbonate-type salt lake brine in Tibet[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2012, 28(9): 1895-1903.
- [16] 卞贞, 卜令忠, 郑绵平, 等. 西藏扎布耶碳酸盐型盐湖卤水相化学研

- 究[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 587-592.
- Nie Zhen, Bu Lingzhong, Zheng Mianping, et al. Phase chemistry study of the Zabuysalt lake carbonate-type brine, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(4): 587-592.
- [17] 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: 82-189.
- Cao Wenhui, Wu Chan. Brine resources and the technology of their comprehensive utilization[M]. Beijing: Geology Publisher, 2004: 82-189.
- [18] 郑绵平, 卜令忠, 邓月金, 等. 利用太阳池从碳酸盐型卤水中结晶析出碳酸锂的方法: CN1398786[P]. 2003-02-26.
- Zheng Mianping, Bu Lingzhong, Deng Yuejing, et al. Method to crystallize lithium carbonate from carbonate type brine using solar ponds: CN1398786[P]. 2003-02-26.
- [19] 郑绵平, 郭珍旭, 张永生, 等. 从碳酸盐型卤水中提取锂盐方法: CN1270927[P]. 2000-10-25.
- Zheng Mianping, Guo Zhenxu, Zhang Yunsheng, et al. Method of extracting lithium from carbonate type brine: CN1270927A[P]. 2000-10-25.
- [20] 乜贞, 卜令忠, 郑绵平. 中国盐湖锂资源的产业化现状——以西台吉乃儿盐湖和扎布耶盐湖为例[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 95-101.
- Nie Zhen, Bu Lingzhong, Zheng Mianping. Lithium resources industrialization of salt lakes in China: A case study of the Xitaijinaiersalt lake and the Zabuysalt lake[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(1): 95-101.
- [21] 乜贞, 卜令忠, 王云生, 等. 盐湖卤水资源锂镁分离的工艺技术[J]. 无机盐工业, 2013, 45(5): 1-4.
- Nie Zhen, Bu Lingzhong, Wang Yunsheng, et al. Industrial technology for the separation of lithium from magnesium rich salt lake brines[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2013, 45(5): 1-4.
- [22] Nie Z, Bu L Z, Zheng M P, et al. Experimental study of natural brine solar ponds in Tibet[J]. Solar Energy, 2011, 85(7): 1537-1542.
- [23] 黄维农, 孙之南, 王学魁, 等. 盐湖提锂研究和工业化进展[J]. 现代化工, 2008, 28(2): 14-19.
- Huang Weinong, Sun Zhinan, Wang Xuekui, et al. Progress in industrialization for lithium extraction from salt lake[J]. Modern Chemical Industry, 2008, 28(2): 14-19.
- [24] 陈兆华, 陈默. 以碳酸盐型卤水和硫酸盐型卤水为原料用重叠兑卤法制取碳酸锂的生产方法: CN 102491378A[P]. 2012-06-13.
- Chen Zhaohua, Chen Mo. Method to produce lithium carbonate from carbonate and sulfate type brines using mixing brine technology: CN 102491378A[P]. 2012-06-13.
- [25] Zhu C C, Dong Y P, Yun Z, et al. Study of lithium exploitation from carbonate subtype and sulfate type salt-lakes of Tibet[J]. Hydrometallurgy, 2014, 149: 143-147.
- [26] 崔玉虎, 袁建军, 杨美洁, 等. 龙木错与结则茶卡盐湖卤水兑卤及蒸发析盐规律研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 239-243.
- Cui Yuhu, Yuan Jianjun, Yang Meijie, et al. Salt precipitation and evaporation of mixed brine from two salt lakes in Tibet[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(2): 239-243.

Exploitation of carbonate lithium salt lake in Qinghai-Tibet Plateau, China

NIE Zhen, WU Qian, BU Lingzhong, WANG Yunsheng, YU Jiangjiang

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract Lithium salt lakes are well developed in China with abundant chemical types. The quaternary salt lakes, with good exploitation prospects, are mainly distributed in Chinese northwestern regions, especially, in the Qinghai-Tibet Plateau. The lithium, as an energy metal, is of great significance for the domestic economy and the national security. Recently, the lithium industry sees a rapid development in the world due to the new energy policies of the main economical countries. The exploitation of the lithium resources from salt lakes is a new focus. The distribution, the brine chemical characteristics, as well as the industrialization of the carbonate type lithium salt lakes are reviewed in this paper. The two main technologies to exploit the carbonate type lithium salt lake brines, the salinity gradient solar pond technology and the mixing brine technology, are discussed, as well as their utilization in salt lakes. With a discussion of combining the two technologies, the possibility of exploitation in large scale of the carbonate type lithium salt lakes is indicated.

Keywords lithium salt lake; carbonate type; salinity gradient solar pond technology; mixing brine technology; lithium carbonate; Qinghai-Tibet Plateau

(责任编辑 韩星明)