

新世纪南美盐湖资源的开发利用

宋彭生 李 武 孙 柏

(中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘 要: 作为特殊类型资源的盐湖, 有重要的科学意义、经济价值和环境效应, 是重要矿产的宝库, 其中蕴藏的锂、钾都是对国家经济社会发展具有战略意义的宝贵资源。进入 21 世纪以来, 盐湖资源开发的特点就是发达国家和新兴经济体国家都对这些重要资源的极其注重, 众多国家参与到开发者的行列中来, 特别是参与到南美盐湖资源的开发热潮中来。从资源勘探、评价、开发试验, 到产品投放到市场和下游产品开发, 以及资金注入、产销体系的建设都非常迅速。可以预料盐湖资源开发的新局面, 甚至是新的垄断局面在不久的将来即将形成。

关键词: 盐湖资源利用; 锂盐开发; 钾盐开发

中图分类号: TD871.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2011)02-0043-16

前 言

盐湖是一种特殊类型的自然资源, 它的经济价值、科学意义、开发利用、环境效应等都为各方面所关注。我们在 2000 年曾将 20 世纪盐湖及相关资源开发利用的状况和发展做过系统的总结^[1]。时间过去了 10 年, 这期间世界的经济、政治形势都发生了很大的变化。盐湖资源开发又有了怎样的变化和发展? 本文拟对此再次加以探讨。毫无疑问, 我们将面对这些变化, 努力改革、不断创新, 既顺应大的发展趋势, 又走我们自己的路, 开创我国盐湖资源开发的新局面。

中东的死海、美国的大盐湖、南美安第斯山盐湖带和我国青藏高原盐湖是目前世界 4 大盐湖开发区, 其资源特色不同, 发展历程各异, 目前开发状况有别, 呈现出多样化的特点。2000 年我们首先指出的是南美安第斯山盐湖群的开发, 10 年来最引入瞩目的还是那里。

1 南美盐湖的位置及卤水化学组成的特点

南美玻利维亚、智利、阿根廷交界的中安第斯山高原地区, 发育有许多盐湖, 其中大多为干盐湖, 当地西班牙语称“Salar”, 意为盐湖、盐沼、盐滩或干盐湖等, 也有一些是季节性交替的干盐湖—卤水湖。这些盐湖的晶间卤水或湖表卤水含有大量宝贵的矿物资源, 如锂、钾、硼、钠、镁等。这一地区面积超过 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$, 盐湖众多, 卤水资源储量巨大。尤其是卤水中锂浓度极高, 且大多数盐湖卤水 Mg/Li 比较低, 对于加工提取十分有利。从前认为, 地壳上锂主要蕴藏在伟晶岩中, 但后来随着富锂液体矿产资源的发现, 这种认识已发生变化。现在有资料表明^[2], 全球锂资源 35% 赋存于伟晶岩中, 而 65% 则存在于卤水资源中。储量大、品位高且易于开发利用的南美中安第斯山地区盐湖卤水, 自然成为争相开发的目标。

这一地区盐湖资源极其丰富, 自然条件得天独厚。因周边国家经济发展对矿产品的大量

收稿日期: 2010-08-25; 修回日期: 2011-03-07

作者简介: 宋彭生(1937-) 男, 研究员。



图 1 南美洲中安第斯山地区主要盐湖位置图
Fig.1 Location of main salars on the central Andes in South America

需求和矿产资源中锂、钾、硼等极端重要的战略意义。现在有许多公司蜂拥而至，开发该地区的盐湖资源。其中智利阿塔卡玛盐湖、阿根廷霍

姆布雷托盐湖已成功开发多年，最近阿根廷的林肯盐湖和玻利维亚的乌尤尼盐湖等的开发已启动并正在大力推进中。该地区已经成为当前世界无机化工开发的一大热点地区。

在 21 世纪头 10 年，世界盐湖资源开发的最重要进展，首推南美安第斯高原盐湖群的大力开发。在南纬 15° ~ 45° 间的南美安第斯高原上，1 × 10⁶ km² 以上的区域内发育有 100 多个盐湖。图 1 为南美洲中安第斯山地区主要盐湖的地理位置。

Ericksen 等^[3] 给出过 66 个较大面积盐湖的名称和位置，最著名的有 Salar de Uyuni(乌尤尼盐湖，玻利维亚)、Salar de Atacama(阿塔卡玛盐湖，智利) 和 Salar de Hombre Muerto(霍姆布雷托盐湖，阿根廷) 等。

表 1 中列出了南美某些盐湖卤水的化学组成，表中也给出了其它盐湖的组成，以兹对比。表 2 为这些盐湖的基础地理数据。

表 1 南美某些盐湖卤水的化学组成和性质^[4-5]

Table 1 Chemical composition of brines of salars in South America										%
盐湖名称	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	B	Mg/Li	相对密度
阿塔卡玛	7.60	1.85	0.96	0.031	16.04	1.65	0.150	0.064	6.40	1.226
乌尤尼	8.75	0.72	0.65	0.046	15.69	0.85	0.035	0.02	18.6	1.211
霍姆布雷托	9.79	0.617	0.085	0.053	15.80	0.853	0.062	0.035	1.37*	1.205
林肯	9.46	0.656	0.303	0.059	16.06	1.015	0.033	0.040	9.29	1.220
柯查瑞	9.33	0.42	0.145	0.033	14.86	1.57	0.051	0.112	2.84	1.215
银峰	6.20	0.53	0.03	0.02	10.06	0.71	0.023	0.008	1.43	-
扎布耶	10.81	2.64	0.001	0.007	12.16	5.24	0.097	0.286	0.01	1.297
大盐湖	8.000	0.650	1.000	0.016	14.000	2.000	0.004	0.006	250	1.218
死海	3.0	0.60	3.33	0.30	16.0	0.05	0.002		2000	-

注：扎布耶卤水还含有 5.679% 的 HCO₃⁻。

表 2 南美一些盐湖的基础数据^[4,6-7]

Table 2 The basic data for salars in South America									
盐湖名称	所在国家	湖面积 / km ²	海拔 / m	卤水锂质量浓度 / (mg/L)	锂储量 / Mt	开发状态	蒸发量 / mm	大气降水 / mm	所属公司
阿塔卡玛	智利	3 200	2 300	1 500	6.3	已生产	3 833	20 ~ 50	SQM*
霍姆布雷托	阿根廷	565	4 300	620	0.8	已生产	2 300	20 ~ 25	FMC
乌尤尼	玻利维亚	10 582	3 650	350	10.2	试验中	1 300 ~ 1 700	100 ~ 200	
林肯	阿根廷	256	3 700	330	1.118	试验中	3 000		
Olaroz	阿根廷	508		800	0.156	筹划中		< 100	
死海	中东	725	-410		-	未筹划	1 700	50	
大盐湖	美国	3 885	1 281		-	未筹划	~ 1 800	330	
银峰	美国			230	0.3	已生产	1 800	230	
扎布耶	中国	247		970	1.53	已生产	2 200	180	

注：* SQM 和 Chemetall 两家公司

由表 1、2 的数据可以看出 ,南美盐湖资源具有如下特点^[5]:

1) 卤水含盐量高 ,因为阿塔卡玛、柯查瑞 (Cauchari) 等都是干盐湖 ,蕴藏的是 NaCl 饱和的晶间卤水。重要组分 Li、K、B 等的浓度高 ,像阿塔卡玛盐湖卤水 Li 浓度是目前已知卤水中最高的 ,特别有利于加工提取。同时卤水中 K 的浓度 1.80% ,也远大于已开发利用的死海卤水的 0.6% 的 K 含量;

2) 卤水资源储藏量大 ,根据美国地质调查局 Mineral Commodity Summaries 2010 年报告介绍^[2] ,全球已查明锂储量 2.550×10^7 t (按金属锂计) ,玻利维亚乌尤尼和智利阿塔卡玛两大盐湖分别蕴藏 9.00×10^6 t 和 7.50×10^6 t ,占 35.3% 和 29.4% ,如果将这一地区其它盐

湖锂储量也算在内 ,其总量将超过 70% 。所以西方媒体也将南美阿根廷、玻利维亚和智利 3 国交界处的安第斯高原盐湖群称为 “锂三角” 或 “锂 ABC” (3 国英文名字的开头字母) ;

3) 这一地区盐湖卤水化学类型属于硫酸盐型 ,以硫酸镁亚型居多 ,也有硫酸钠亚型 ,卤水的 Mg/Li 比变化很大。例如霍姆布雷托盐湖最小 ,只有 1.37; 而乌尤尼盐湖最高 ,Mg/Li 比达 18.6。截止目前还没有发现氯化物型和碳酸盐型盐湖 ,几个南美盐湖卤水的化学类型和卤水组成点在 25 ℃ Na⁺ ,K⁺ ,Mg²⁺ /Cl⁻ ,SO₄²⁻ -H₂O 五元体系介稳相图中的位置如表 3、图 2 所示。

表 3 几种卤水的化学类型和相图指数
Table 3 Chemical types of salar brines and Janecke index on the phase diagram

盐湖名称	Na ⁺ K ⁺ Mg ²⁺ /Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ -H ₂ O 五元体系相图中卤水组成点的 Janecke 指数			卤水类型
	K ₂ ⁺	Mg ₂ ²⁺	SO ₄ ²⁻	
阿塔卡玛	29.736 8	49.646 1	20.617 1	硫酸镁亚型
乌尤尼	21.093 3	61.265 6	17.641 1	硫酸镁亚型
霍姆布雷托	41.649 3	18.460 1	39.890 7	硫酸钠亚型
林肯	27.330 9	40.020 2	32.648 9	硫酸镁亚型
柯查瑞	18.20	18.74	63.06 [°]	硫酸钠亚型
银峰	45.102 5	9.035 1	45.862 4	硫酸钠亚型
大柴旦盐湖	6.313 1	66.011 7	27.675 1	硫酸镁亚型
西台吉乃尔	9.657 4	57.902 8	32.439 8	硫酸镁亚型
一里坪 J	11.039 5	78.405 2	10.555 3	硫酸镁亚型
扎仓茶 III	18.428 3	53.014 8	28.556 9	硫酸镁亚型
大盐湖	11.895 8	58.880 6	29.223 7	硫酸镁亚型

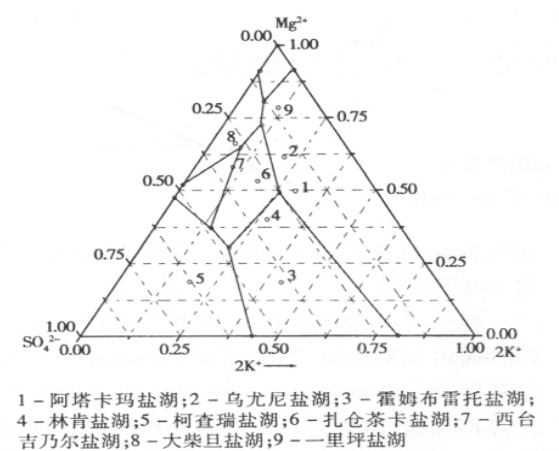


图 2 南美盐湖卤水组成点在 Na⁺ ,K⁺ ,Mg²⁺ /Cl⁻ ,SO₄²⁻ -H₂O 体系 25 ℃ 介稳相图上的位置

Fig.2 Location of Salar brines on the metastable phase diagram Na⁺ ,K⁺ ,Mg²⁺ /Cl⁻ ,SO₄²⁻ -H₂O system at 25 ℃

表中和图上还给出了我国一些硫酸盐型盐湖卤水的组成点 ,以便对比。由图上可以看出 ,1 到 5 这 5 个南美盐湖 ,其组成点在相图上较为分散 ,这是因为它们既有硫酸镁亚型又有硫酸钠亚型。而我国青藏高原的 4 个盐湖 ,都是硫酸镁亚型的 ,且镁浓度较高 ,图形点都分布在距镁角顶较近的区域;

4) 这一地区盐湖大多为干盐湖 ,部分为季节性半干盐湖 ,随取样季节和地点不同卤水成分变化很大 ,因此选取的样品有代表性就十分重要。同时不同出处的卤水化学组成 ,时常差别很大 ,也多源于此。针对南美盐湖卤水的化学研究目前还不充分 ,有的甚至一点研究工作都没有开展过。

2 南美盐湖的开发利用

南美的众多盐湖开发状况可大致分成 3 种: 1) 已经开发利用的,最成功的典型当然是阿塔卡玛盐湖、霍姆布雷托盐湖; 2) 正在积极推进开发利用进程的,包括正在进行中试的和已规划出时间表正在进行中的; 3) 公司正式宣布有计划将要开发某一确定的盐湖的。下面将分别加以介绍。

2.1 已经开发利用的盐湖

属于已经成功开发利用的南美盐湖有智利阿塔卡玛盐湖和阿根廷的霍姆布雷托盐湖。

1) 阿塔卡玛盐湖的开发利用 阿塔卡玛盐湖位于智利东北部安第斯高原,海拔 2 300 m,是最干燥的地方,旅游者的 T 恤上写着“沙漠中的沙漠”。气候学家称其为“绝对沙漠”、“地球的旱极”。1870 年西班牙人建气象站以来,至今没有降雨的记录^[8]。曾有地理学家说它是“世界上唯一没有发现生命

的地方”。距智利第 2 大城市安托法加斯塔 (Antofagasto) 港 280 km,南回归线穿过其中。年淡水蒸发量 3 833 mm; 卤水蒸发量 2 032 mm。在阿塔卡玛沙漠发现的木乃伊已被确定有 9 000 年的历史^[9]。

目前有两家公司在开发阿塔卡玛盐湖资源—SQM 和 Chemetall SCL。SQM 是一家在纽约上市的公司,其隶属关系几经转变,原 Minsal 已不存在,全部转入 SQM 公司。

SQM 公司的生产可分成两条路线^[10],如图 3 所示。一条是硝石为原料,生产碘、硝酸盐专用肥; 另一条以盐湖卤水为原料,生产碳酸锂、氯化钾、硫酸钾。两条线结合生产硝酸钾。公司产品销往 100 多个国家。公司拥有 1 586 km²湖区采矿权,包括 820 km²面积 40 m 深的矿产资源和 240 L/s 的采卤权。这等于 2.600 × 10⁷ t K (5.000 × 10⁷ t KCl)、1.80 × 10⁶ t Li (1.100 × 10⁷ t Li₂CO₃)、2.200 × 10⁷ t SO₄²⁻ (3.900 × 10⁷ t K₂SO₄)、7.0 × 10⁵ t B (4.00 × 10⁶ t H₃BO₃)。勘探权和开采权至 2030 年到期。

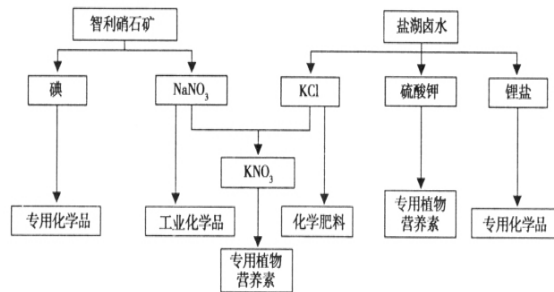


图 3 SQM 公司生产路线
Fig. 3 Process route of SQM Corp.

由抽卤井抽取的卤水进入太阳池,随着水分蒸发先后析出石盐、含钾石盐混盐和含硫酸盐的钾混盐。钾混盐用于生产氯化钾和硫酸钾,示意流程图见图 4。富集后的含锂卤水,运往 240 km 以外的安托法加斯塔附近 Salar de Carmen 的加工厂生产碳酸锂。生产过程的最终老卤于厂区 12 km 以外注回到盐湖盐壳以下^[11]。2006 销售 30 400 t Li₂CO₃; 2007 销售 28 600 t Li₂CO₃, 价值 1.798 亿美元。预计

2008 年达 42 000 t 生产能力。占世界 Li₂CO₃ 市场 31%。

另一个开发阿塔卡玛盐湖的公司是 Chemetall SCL 公司,它是德国 Chemetall GmbH 的子公司。Chemetall GmbH 以生产各种锂盐产品而闻名,特别是锂电池中使用的锂化合物他们都参与开发(见表 4),包括锂原电池、可充电电池和锂离子电池的金属氧化物阳极、锂金属阴极、电解质盐类和添加物。它在智利的子

公司“Sociedad Chilena de Litio Ltda. (智利锂公司, 简称 SCL)”利用阿塔卡玛盐湖卤水生产碳酸锂。除湖边盐田外, 生产 Li_2CO_3 车间等设在安托法加斯塔港。生产能力约 23 000 t Li_2CO_3 。全部运往 Chemetall GmbH 在美国的加工厂, 用于生产下游产品。公司网站提供有粉末 Li_2CO_3 的粒度分布数据。Chemetall

GmbH在美国的子公司 Chemetall Foote 利用美国内华达州克莱顿谷的 Silver Peak 地下卤水, 也在生产 Li_2CO_3 [12-14]。近期产量未见报道。

此外, Chemetall GmbH 也是世界生产铯化合物的大厂家。其网站上公布有 54 种铯化合物产品名称 [15] (含不同纯度级别)。

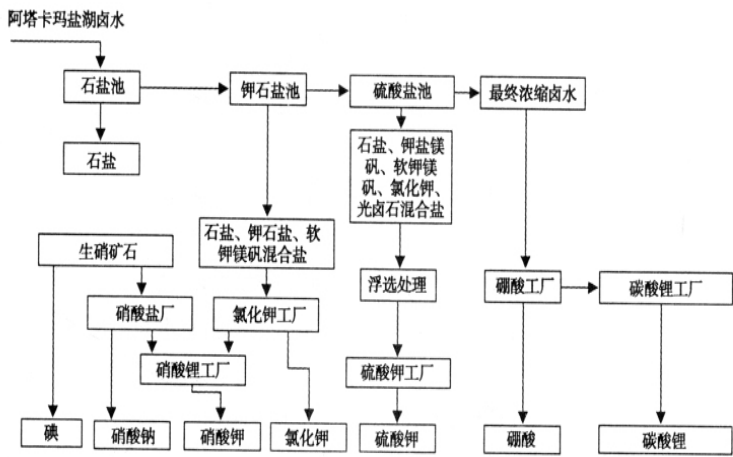


图 4 阿塔卡玛盐湖卤水综合利用产品流程

Fig. 4 Flow sheet of comprehensive utilization of Atacama brine

表 4 Chemetall GmbH 参与的锂电池产品开发情况 [16]

Table 4 Lithium products of Chemetall for Li-batteries

电池材料	电池类型	Chemetall 参与否	供应的锂产品
金属氧化物阳极	锂离子电池	参与	碳酸锂、氢氧化锂
钛酸锂阴极	锂离子电池	参与	碳酸锂
电解质盐和添加剂	锂离子电池	参与	碳酸锂、氢氧化锂、偏硼酸锂
锂金属阴极	原电池、可充电电池	参与	锂金属和锂箔
电解质盐	原电池	参与	各种锂化合物

2) 霍姆布雷托盐湖的开发利用 [1-2, 12-14, 17]

位于阿根廷 Puna 高原的霍姆布雷托盐湖海拔 4 300 m, 距首都布宜诺斯艾利斯 1 370 km。湖面积达 565 km², 卤水锂的浓度 0.22 ~ 1.08 g/L, 湖区年平均降雨量仅 20 ~ 25 mm。湖边淡水量充沛, 可供生产工艺使用。美国 FMC 公司于 1997 年第 3 季度投产其 Li_2CO_3 厂, 设计生产能力是 12 000 t/a 产品。1998 年 1 月又在 Salta 省 Guemes 投产 LiCl 厂, 设计生产能力 5 500 t/a 产品。2003 年又扩大至 7 250 t/a。目前二者产量都在 8 500 t/a 左右 [12]。产品通过铁路运往智利的安托法加斯塔港, 再由那里运往美国。FMC 公司认为, 其

盐湖的锂储量足够开采 75 年以上。

近年, 总部位于加拿大多伦多的第一锂业公司 (Lithium One Inc.) 也加入到霍姆布雷托盐湖锂的开发行列中来 [18-19]。该公司于 2009 年由原 Conigas 资源有限公司改名而来, 在多伦多证券交易所上市的股票代码为 TSX-V: Li。在股票代码中有元素锂的化学符号“Li”, 表明公司致力于发展锂产业的宗旨 (表 5)。该公司在霍姆布雷托盐湖区启动了一个称之为“生命之盐” (Sal de Vida) 的卤水开发项目。项目位于距首都约 1 400 km, 海拔 4 025 m 之处。由于 Salta 市有全天候公路 6 h 可到该处。距阿根廷国家主电网有 111 km。

表 5 第一锂业提供的全球锂卤水矿藏情况比较

Table 5 Global Li resources of brines on the data of Lithium One Corp.

矿 藏	公 司	锂储量(以金属 Li 计 /t)	锂浓度($w/(\times 10^{-6})$)
阿塔卡玛盐湖	SQM	6.0×10^6	1.570
阿塔卡玛盐湖	Chemetall	5.0×10^5	1.570
霍姆布雷托盐湖	FMC	8.0×10^5	650
霍姆布雷托盐湖	第一锂业		600 ~ 1 000(初步样品)
林肯盐湖	Sentient 资源公司	$1.0 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6$	340
乌尤尼盐湖	玻利维亚政府	$5.5 \times 10^6 \sim 8.9 \times 10^6$	450

第一锂业公司占据有霍姆布雷托盐湖东部 565 km² 总面积的一部分,约320 km²。该湖西部从 1997 年起已获准开发,FMC 公司的子公司 Minera del Altiplano 阿根廷唯一商业规模开发锂的加工厂就在该地区的 Fenix。2008 年 Fenix 厂生产了 10 000 t 碳酸锂和7 600 t 氯化锂,按金属锂计占全球总产量的 14%。FMC 公司宣称霍姆布雷托盐湖可开采 75 年以上。

2009 年公司已经开始大面积采集卤水样品。2010 年上半年则进一步在霍姆布雷托盐湖湖表系统取样。根据 2010 年公司的计划安排,还要进行地球物理勘探和钻探,并开展中间试验,至年底完成可行性报告。2010 年 6 月 22 日公司宣布,在阿根廷霍姆布雷托盐湖的“生命之盐”项目的钻井首次获得了有关数据,项目的锂、钾资源至少蕴藏在 60 m 的晶间卤水

中。来自两个试验井的卤水提供给蒸发试验。卤水锂浓度平均为 706 mg/L(590×10^{-6}),钾浓度平均为 6 900 mg/L(0.58%),Mg/Li 比 2.1。这些结果与 Roskill 公司 2009 年估计的相邻的 FMC 公司 Fenix 锂矿的结果 600 ~ 650 $\times 10^{-6}$ 的 Li,Mg/Li 比 1.5 的数据相当。事后公司总裁兼首席执行官 Patrick Highsmith 指出,这些结果促使其加速项目计划的执行。

原来钻探的计划是打 10 个钻孔,目标深度为 50 ~ 100 m。第 1 个钻孔位于公司所拥有地段的西南部分,该地被称为“南盆地”。两个钻孔已经钻到了目标深度,并变成实验井使用。这两口井都钻到了饱和盐水层,其中的一口还在约 35 m 处遇到了石盐层,这是在霍姆布雷托盐湖东部首次钻到石盐层。从 0 ~ 30 m 和 30 ~ 60 m 处取得的样品卤水的分析结果列在表 6 中。

表 6 霍姆布雷托盐湖钻井采得的样品分析结果

Table 6 Analysis results of samples of drilling

取样地点	取样层位	ρ_{Li+} 浓度/(mg/L)	ρ_{K+} 浓度/(mg/L)	卤水密度	Mg/Li
SV10-03	0 ~ 30 m	647	6 172	1.20	2.00
SV10-03	30 ~ 60 m	850	8 109	1.21	2.01
SV10-04	0 ~ 30 m	633	6 045	1.16	2.04
SV10-04	30 ~ 60 m	692	7 605	1.21	2.37

按原计划 2010 年下半年开始蒸发试验,并且进行打钻取芯和概念可行性研究(scoping study)。在取得了钻探的可喜结果后,整个项目的计划可能会加速推进。此前 6 月初,公司宣布了与韩国高丽资源公司(Korea Resources Corporation)的合作计划,预计它也会加速进行。

2.2 正在推进开发进程的盐湖

属于这种情况的盐湖有阿根廷的柯查瑞—

奥拉鲁兹(Cauchari-Olaroz)盐湖和玻利维亚的乌尤尼(Uyuni)盐湖。前者已经完成现场的 30 ℃ 等温蒸发实验和 15 ℃ 溶解平衡实验,正在进行加工过程研究。后者正在进行现场中间试验,结果尚未报道,但其详细的中试方案已有介绍。在此将有关信息各有侧重地做一介绍。

1) Uyuni 盐湖的开发^[20-21] 乌尤尼盐湖位于玻利维亚西南部的波托西省(Potosi)安第斯高原上,海拔为3 650 m。乌尤尼盐湖长180 km,宽

80 km ,面积达10 582 km² ,是世界最大的盐湖。约40 000年以前这里是晚第四纪的巨大湖泊 Minchin ,干化以后形成了现今的两个盐沼 ,Uyuni 和 Coipasa。在每年 11 月份雨季时 ,表面卤水可升至盐壳以上几十厘米 ,形成巨大的盐沼湖

面 ,并有 3 条河流注入湖中。旱季到来后 ,由于气候干燥 ,湖面蒸发速度很快 ,盐沼可以在几个星期内就完全干掉 ,留下非常平滑的盐壳表面。估计 Uyuni 盐湖蕴藏有 1.00 × 10¹⁰ t 的盐 ,目前每年只开采食盐不足25 000 t。

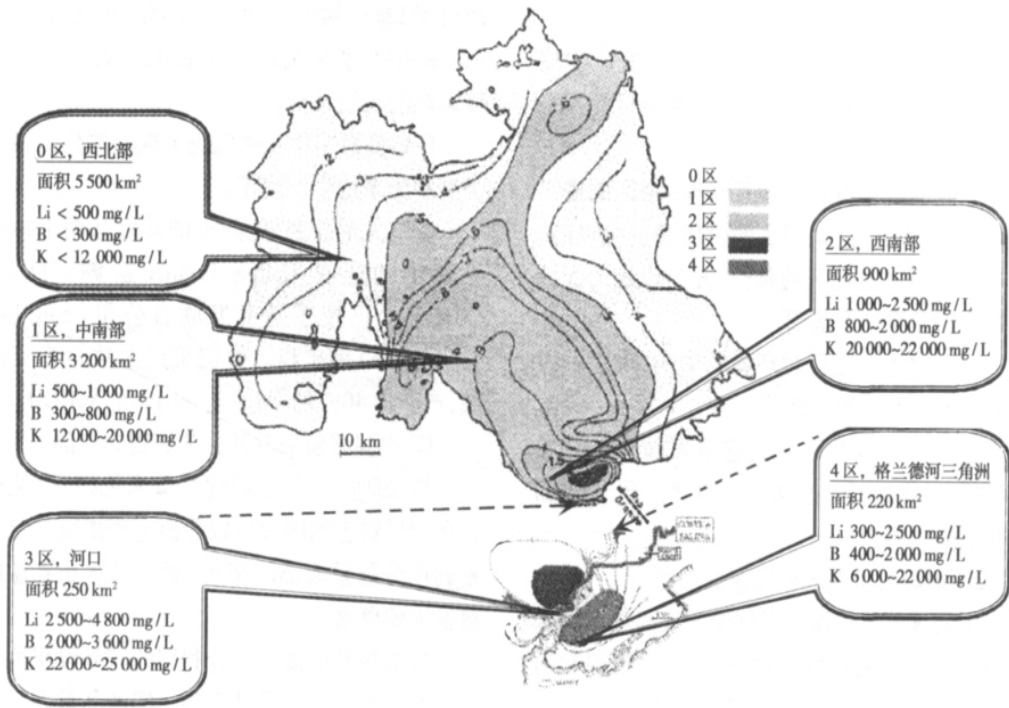


图 5 乌尤尼盐湖卤水成分分布图

Fig. 5 Distribution of contents of Salar de Uyuni brine

乌尤尼盐湖卤水中锂、钾、硼等成分浓度在盐湖不同位置的分布情况已有过研究。图 5 表示了卤水中上述 3 种成分的分布状况。湖区

分成 5 个部分 ,用不同色调绘出。各区的面积、卤水中上述 3 种成分的浓度范围见表 7。

表 7 乌尤尼盐湖不同位置卤水中锂、钾、硼质量浓度分布情况
Table 7 Distribution of elements Li , B , K of Salar de Uyuni brine

区号	区域名称	质量浓度 / (mg/L)			面积 /km ²
		Li	B	K	
0	西北区	<500	<300	<12 000	5 500
1	中南区	500 ~ 1 000	300 ~ 800	12 000 ~ 20 000	3 200
2	西南区	1 000 ~ 2 500	800 ~ 2 000	2 000 ~ 22 000	900
3	河口区	1 500 ~ 4 800	2 000 ~ 3 600	22 000 ~ 25 000	250
4	格兰德河三角洲区	300 ~ 2 500	400 ~ 2 000	60 000 ~ 22 000	220

关于乌尤尼盐湖开发的最新进展 ,玻利维亚矿业公司(COMIBOL—Corporacion Minera de Bolivia) 决定就乌尤尼盐湖资源生产锂盐开展中间试验研究。报道称 ,中间试验研究已于

2008 年 5 月启动。在 COMIBOL 公司中 ,玻利维亚政府占 51% 股份。下设有蒸发盐分公司 ,组织实施中间试验研究。由于这项中间试验意义重大 ,所以 ,玻利维亚国家总统埃沃·莫拉莱

斯也参加了开工典礼。

A) 中间试验的目的

a) 通过中间试验寻找最佳工艺流程,加工处理乌尤尼盐湖卤水,以便获得锂、钾、硼、镁等化工产品。拟开发和销售的产品有碳酸锂、氯化钾、硫酸钾、氯化镁和硼酸;

b) 对玻利维亚其它盐沼的蒸发盐矿物储量做出评价,以便明确未来大规模项目的开采区域;

c) 改善格兰德河(Río Grande)地区的进出道路、运输和电力、饮用水的供应和卫生设施,以改善中间试验场区的条件,并为长远的锂综合企业的发展打下基础;

d) 研究大型工厂对环境的影响,确定减缓对环境不利影响的措施;

e) 支持当地社区对其它蒸发盐资源开发的积极性,例如开发洗涤过的钠硼解石、十水硼砂和碳酸钠等。

B) 中间试验中的环境保护问题

中间试验项目说明书称中间实验场要符合一切目前生效的环境法律法规,对可能引起的环境影响风险,拟采取必要的缓解措施。

a) 卤水从盐层中由泵抽取上来,并输至盐沼的边缘地区;

b) 太阳蒸发池用塑料膜衬里,以防止卤水渗漏;

c) 蒸发池沉淀出的氯化物盐类,如氯化钠、水氯镁石通过卤水管线返回盐湖去;

d) 加工过程中使用的淡水应尽量多地利用位于 Lipez 的含盐的格兰德河河水代替;

e) 中间实验场的一个目的是大型工厂环境影响的现场评价;

f) 环境影响将主要取决于选择的化工过程类型和未来的生产规模。

除乌尤尼盐湖外,附近的其它盐湖中拟开发利用的还有 Collpa Laguna 盐湖。目前,COMIBOL 已授予圣荷塞联合公司(San José Cooperative)采矿权。他们采用土法生产天然碱,产品含 40% 的 Na_2CO_3 和 4% 的 NaHCO_3 。

C) 中间试验采取的工艺流程和产品

拟采取的工艺流程的细节未见报道,从中试介绍材料中的图片可以看出一些情况。首先是利用分层采取晶间卤水,然后仍然是靠盐田蒸发浓缩卤水^[22]。

未来乌尤尼盐湖综合利用的产品设想可分为钾产品系列、硼产品系列、锂产品系列,有氯化钾、硫酸钾、硼酸、碳酸锂等,如图 6 所示。

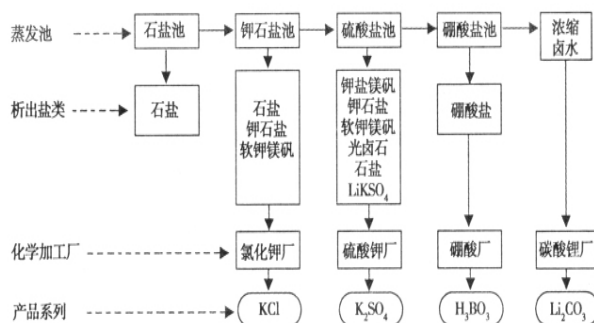


图 6 乌尤尼盐湖综合开发各种产品示意图

Fig. 6 Products of utilization of Uyuni brine

2) Cauchari-Olaroz 盐湖的开发^[23-24]

Cauchari 盐湖和 Olaroz 盐湖位于阿根廷胡胡伊省(Jujuy)。该省是阿根廷的矿业大省之一,世界级的 Aguilar 锌矿就在该省,已经开采了近百年。二湖紧相邻,Cauchari 盐湖在南,Olaroz 盐湖在北。Cauchari 盐湖和 Olaroz 盐湖项目距离

该省省会圣萨尔瓦多 240 km。位于海拔 4 000 m 的资源区域基础设施条件良好,包括有公路、铁路、天然气管线和手机信号覆盖。Cauchari 盐湖和 Olaroz 盐湖都是陆相来源的,为砾石、砂、粘土、石盐、钠硼解石所填充。目前参与此二湖开发的公司有美洲锂业公司(Lithium

Americas Corp.) 和 Orocobre 公司两家。

美洲锂业公司是一家私人公司,分别由拉丁美洲矿物有限公司(Latin American Minerals Inc., 多伦多证券交易所股票代码 TSX - V) 和 Grupo Minero Los Boros S. A. (一个阿根廷硼砂矿业公司) 合并而成。公司在阿根廷、智利、玻利维亚 3 国交界的 Puna 高原的世界级锂卤水资源地区控制有1 122.41 km²的盐湖锂钾卤水资源。这个地区蕴藏着世界 66% 以上的锂资源储量,2008 年大约供应了世界锂产量的 59% ,图 7 为其试验盐田。

美洲锂业公司的资源包含有 Cauchari 盐湖和 Olaroz 盐湖的重要部分,覆盖约 300 km² 面积,卤水锂的品位很高。在 Cauchari 和 Olaroz



图 7 美洲锂业的 Cauchari 盐湖中试现场的盐田照片

Fig. 7 Photo of solar pond of pilot plant for Salar de Cauchari

盐湖预期远景最好地区的湖面上挖出卤坑,采集了 20 个卤水样品,在 1 ~ 3 m 处卤水锂的质量分数为 0.08% (表 8)。

表 8 Cauchari 和 Olaroz 盐湖卤水组成(质量分数/%) 与其它富锂盐湖的比较
Table 8 Composition of Cauchari and Olaroz brines with others

卤水矿床	K ⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	SO ₄ ²⁻	K/Mg	SO ₄ /Mg	SO ₄ /K	SO ₄ /Li	Mg/Li
阿塔卡玛,平均值	1.85	0.96	0.150	1.65	1.93	1.72	0.89	11.00	6.40
Cauchari(Li0.03% 以上)	0.63	0.27	0.08	1.83	2.4	6.8	2.9	22.9	3.3
Olaroz(Li0.03% 以上)	0.80	0.24	0.075	0.93	3.3	3.9	1.2	12.5	3.2
霍姆布雷托	0.62	0.09	0.062	0.85	7.26	10.04	1.38	13.76	1.37
林肯	0.62	0.28	0.033	1.01	2.20	3.57	1.63	30.73	8.61
乌尤尼,平均值	0.72	0.65	0.035	0.85	1.11	1.31	1.19	24.40	18.57
银峰(美国克莱顿谷)	0.53	0.03	0.023	0.71	16.08	21.52	1.34	30.87	1.43

勘探计划包含沿 Cauchari 盐湖和 Olaroz 盐湖的北 - 南轴向 2 000 m 的逆循环钻探,以检验含超浓卤水层的厚度、组成和体积。如果在预计的一个或几个含水层发现高品位含锂卤水,公司就将开钻生产井,并将完成生产性抽卤试验。这些工作的结果再加上另一项详尽地质水文研究,就使得公司可以确定储量。典型的卤水勘探项目经常可以迅速推进可行性研究和公司的发展。

为开发利用 Olaroz 盐湖卤水资源,由安托法加斯塔大学进行了 Olaroz 卤水 30 ℃ 等温蒸发实验。实验于 2009 年 10 月下旬开始在大学实验室进行。卤水取自 PE - 4 钻孔 89 ~ 186 m 间,留有备份后,取 51 kg(42 L) 卤水用于实验。从原始卤水至蒸发结束,液固分离 5 次。我们由卤水组成(表 9) 计算出其相图指数,将其描绘在五元体系 25 ℃ Na⁺, K⁺, Mg²⁺/Cl⁻, SO₄²⁻ -

H₂O 介稳相图上,如图 8 所示。Olaroz 卤水属于硫酸钠亚型,加之卤水富含硼、锂,卤水蒸发过程析出盐类较为复杂。

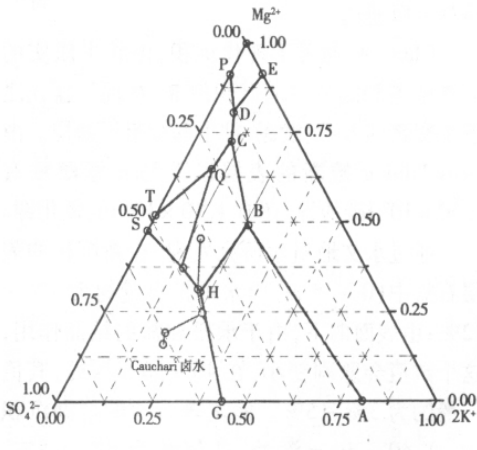


图 8 Olaroz 盐湖卤水 30 ℃ 等温蒸发时卤水的结晶路线

Fig. 8 Evaporation path of Olaroz brine at 30 ℃

表 9 公司项目中卤水成分平均含量与正在开发利用的卤水矿床成分的对比

Table 9 Comparison of brine contents with others in production

	正在开发利用的矿床						37 个样品的平均值	波动范围
	钾盐矿		K - Li 矿		锂矿			
	死海	大盐湖	阿塔卡玛	银峰	林肯湖	Phoenix	Cau-Olaroz	Cau-Olaroz
K / %	0. 60	0. 650	1. 85	0. 53	0. 62	0. 62	0. 50	0. 1 ~ 2
Li / 10 ⁻⁶	20	40	1 500	230	330	620	800	300 ~ 2 200
B / 10 ⁻⁶	30	60	64	80	270	360	989	100 ~ 5 000
Mg / Li	1. 665	250	6	1. 43	8. 61	1. 37	3. 70	0. 5 ~ 8

除美洲锂业公司外 ,奥勒柯布勒矿产资源公司(Orocobre Limited) 也于最近参与了 Olaroz 盐湖卤水资源的开发。Orocobre Limited 是一家总部设在澳大利亚布里斯班的矿产资源公司 ,该公司 2007 年在澳大利亚证券交易所 (ASX) 上市 ,代号 ORE。

奥勒柯布勒公司占有 Olaroz 盐湖上 1. 18 km²面积 ,2009 年 4 月公司宣布 ,经初步估计 ,公司在 Olaroz 盐湖的开发项目中包含有至少 1. 50 × 10⁶ t 碳酸锂 4. 40 × 10⁶ t 氯化钾。在 2009 年 5 月发表的概略可行性研究中 ,曾指出公司的目标是年产碳酸锂 15 000 t/a ,氯化钾 36 000 t/a。

Olaroz 项目位于从阿根廷北部通往智利安托法加斯塔港的公路边 ,向西 550 km 可达该港口 ,这将为产品提供出口路线。由 Olaroz 盐湖向北 40 km 可达阿根廷国家天然气管线。湖区距胡胡伊省省会圣萨尔瓦多 170 km ,距萨尔塔省省会萨尔塔 400 km ,公路都可以通达。

Olaroz 盐湖属于现代沉积 ,由并未压实的河流碎屑和湖泊碎屑沉积组成 ,在现代盐壳之下是交替的砂石、淤泥、粘土和少量石盐层。由 Geos Mining 推断的表层以下 55 m 厚蕴藏有 1. 50 × 10⁶ t 碳酸锂 ,还有 4. 10 × 10⁶ t 的氯化钾。

通过水文地质学研究发现 ,在新沉积的表层石盐中 (0 ~ 15 m) 卤水可排出量约为 8% ~ 12% ;由表面向下 ,由于承压和盐的结晶作用 ,这个数值会急剧变小 ,在 40 ~ 50 m 深处 ,其值一般约为 3% ~ 5% 。而富含石盐的盐湖沉积中 ,在 40 ~ 50 m 深处 ,其值约为 6% ~ 8% 。Olaroz 沉积不是以石盐为主体的 ,是以砂石为主体 ,其卤水可排出量几乎随埋深没有变化 ,可

以将底部的粘土层区域作为勘探的最终目标。这一区域已经为 3 个探孔所打穿 ,已经判别出许多潜在的砂石蓄卤带。钻孔表明 Olaroz 盐湖至少有 200 m 深 ,接下来的重力测试指出盆地达到 600 m 深。

就目前资源的情况和与类似规模及品位的其它资源比较来看 ,Olaroz 项目在第一期可以作为年产 15 000 t 碳酸锂 36 000 t 氯化钾的长期生产企业进行开发 ;进一步深入勘探的潜力足以保证未来可以有更重要的扩展。

Olaroz 盐湖卤水锂的平均品位是 800 mg / L ,与霍姆布雷托盐湖类似 ,大约为美国银峰或里肯卤水的 2 倍。其 Mg / Li 比很低 ,只有 2. 8 ,有利于卤水加工 ,可与阿塔卡玛、林肯、乌尤尼加以比较 ,它们分别为 6. 4、8. 6 和 18. 6 ,只有银峰和霍姆布雷托的卤水 Mg / Li 比低于 1. 4。现场试验证实 ,Olaroz 盐湖卤水可以利用类似银峰的操作步骤经济地加工处理。首先采用太阳池蒸发水分 ,然后加入当地可得的石灰 ,把无用的东西沉淀出 ,接着采用浮选法回收钾盐 ,最后用纯碱沉淀碳酸锂。其结果是降低了风险 ,降低了成本 ,终端产品可以满足工业需求。对于一个年产 15 000 t 碳酸锂和 36 000 t 氯化钾工厂的运营成本 ,估计在 8 000 万至 1 亿美元 ,包括不可预见费用。公司的概念可行性研究和后续研究表明 ,Olaroz 项目的生产运行的操作成本将很低 ,而运行获利良好。奥勒柯布勒公司将会成为现存低成本卤水加工企业的有力竞争者。

Olaroz 项目所在地海拔约 3 900 m ,平均温度大约 8 ℃ ,年降雨量少于 100 mm ,平均风速约为 25 km / h ,云覆盖少。这些气象条件十分有利于采用盐田技术 ,天然蒸发浓缩卤水 ,富集

有用成分(图9)。

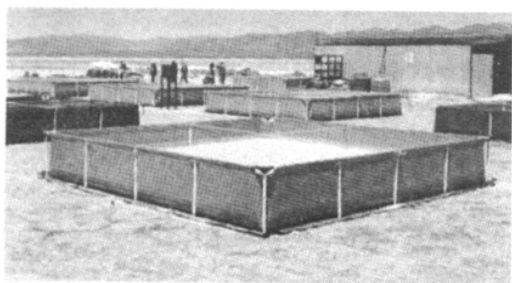


图9 公司在 Olaroz 盐湖边设置的试验用蒸发池
Fig.9 Evaporation tank on the field of Olaroz salar

2010 年初 Orocobre 公司宣布将和丰田集团旗下丰田通商(Toyota Tsusho Corp.)合作,成立一家合资公司,共同开发阿根廷北部 Olaroz 盐湖的锂和钾。丰田通商将投资 45 亿美元,用于合资公司的发展;另外,日本政府将给该合资公司提供一笔低息贷款,占合资公司总投资额的 60%。

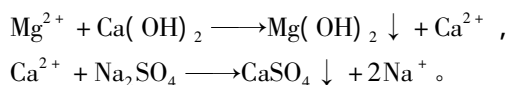
Orocobre 总监 Richard Seville 称“根据这个合资公司的融资方案,Orocobre 不需要投入任何资金。和丰田通商形成战略合作伙伴,意味着 Orocobre 将获得更多与丰田、松下和三洋合作的机会。另外,丰田通商在车用锂电池领域拥有丰富的经验,相信 Orocobre 将受益无穷。”

丰田通商在官方声明中表示“为了满足全球车企日益高涨的锂电池需求,丰田通商将想方设法寻求更可靠的、成本更低的锂原材料供应商。本次丰田通商与 Orocobre 成立的这个合资公司属世界顶级规模,将为业界提供高纯度、质量一流的锂金属。因此,南美锂产业也多了一个强势竞争对手。”

3) Rincon 盐湖的开发^[25-27] Rincon 盐湖位于阿根廷西北部安第斯高原 Salta 省,海拔 3 700 m,面积超过 250 km²。卤水的年蒸发量约 3 000 mm。卤水 Li⁺ 浓度为 0.33%,Mg/Li 为 8.4。资源储量为 Li 7.40 × 10⁶ t(Li₂CO₃),K 5.100 × 10⁷ t(KCl)。

目前澳大利亚 Admiralty Resources NL 公司的子公司 Rincon Lithium 正对其进行开发。公司在 2007 年成功进行了一项水文研究,更深入了解了盐层的孔隙度和渗透性能。在提取碳酸锂工艺过程上也取得了重大进展,缩短了盐

田蒸发生产周期。2007 年底中间试验场建成投入运行。盐田面积 0.05 km²,衬有两层塑料膜(总厚度 100 μm)的盐田。中试结果非常成功,2008 年中试生产出 97% 碳酸锂 12 t,后续设备安装完成后可得 99% 以上的碳酸锂和 99.75% 的 KCl 产品。设计的最终生产能力为 Li₂CO₃ 10 000 t、LiCl 3 000 t、LiOH 4 000 t,公司计划在锂盐投产前,先生产钾盐,约每年 40 000 t。公司采用的除 Mg²⁺、Ca²⁺ 方法是先以石灰乳除 Mg²⁺,多余的 Ca²⁺ 再用 Na₂SO₄ 除去。过程反应如下:



若达到年产 15 000 t LiCl,则需 84 000 t Na₂SO₄。为此公司购买了 250 km 以外的 Salar del Rio Grand 储量 1.850 × 10⁷ t 的 Na₂SO₄ 矿藏。

但是 Admiralty Resources 公司在 2008 年经历了严重的财政危机,于 2008 年末以 2.7 × 10⁷ 美元,将 Rincon 盐湖资产出售给了 Sentient Group。

最近又有报道,秘鲁的 Li3 Energy Inc. 也参与了 Rincon 盐湖的开发。公司在 Rincon 盐湖的北部的资源为 202.50 km² 以上,南部也有资源。公司的卤水资源中 Li⁺ 浓度为 0.033 18%,K⁺ 0.63%,Mg²⁺ 0.27%,Mg/Li 为 8.1。而在 Centenario 盐湖卤水中有用成分的浓度还要高得多,Li⁺ 浓度可达 0.15%,K⁺ 更高达 1.0%。

公司认为,露天开采伟晶岩生产锂盐,投资大,建设周期长,生产成本低,相比较而言开采富锂卤水生产锂盐则有投资省、建设周期短、生产成本低的特点。卤水生产碳酸锂的工艺流程也简单易行,他们拟采用的原则工艺流程见图 10。

这一拟采用的原则流程框图列了一些较为具体的数据内容,如三段盐田的浓缩倍数、析出的盐类化合物等。另外的资料中报道,在以碳酸钠沉淀碳酸锂以前,还需要进一步净化卤水,以离子交换树脂除去卤水中残存的硼,后面沉淀析出的碳酸锂经洗涤、干燥后,产品碳酸锂可达电池级质量要求。

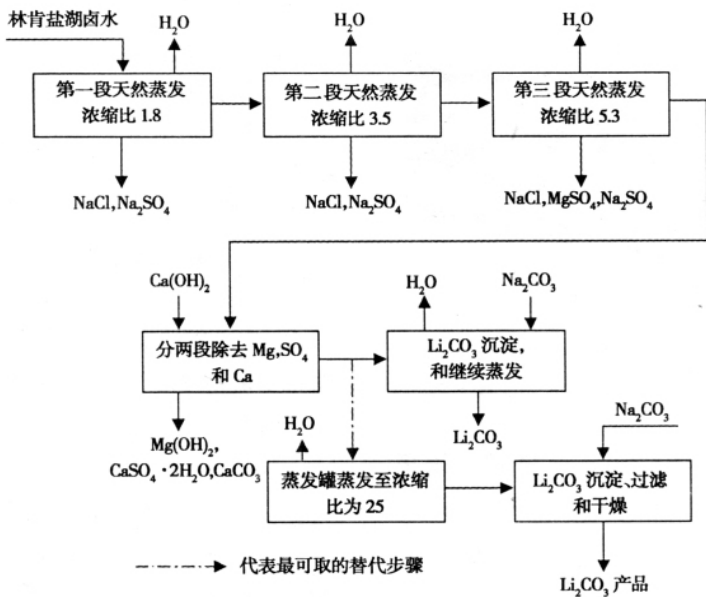


图 10 Li3 Energy 公司 Rincon 湖卤水原则工艺流程框图
Fig. 10 Flow sheet of Rincon brine process of Li3 Energy Corp.

2.3 有计划将要开发利用的盐湖^[28-30]

在“锂三角”开发热潮中,又有许多公司参与了进来,又有许多新盐湖的名字出现在各种材料中。

两年以前,安第斯山地区开发利用的盐湖只有两个,参与开发的公司也只有 3 个,而如今,参与的公司有 15 家,涉及到的盐湖则有 20 多个。还有众多公司开发锂辉石等硬岩矿。我们把与锂资源开发有关的公司情况汇总在表 10 中,供参考。

表 10 与盐湖卤水锂开发有关的公司及资源状况
Table 10 List of brine Li resources and companies

从锂资源中开发生产锂产品的大集团			
公司名称	所属国家	资源类型	矿山名称
SQM	智利	卤水	Salar de Atacama
Chemetall	智利	卤水	Salar de Atacama
FMC Lithium	阿根廷	卤水	Salar de Hombre Muerte
Talison Minerals	澳大利亚	矿石	Greenbushes
产量较少的小公司及正在开展中试或建设中的开发项目和公司			
公司名称	所属国家	资源类型	矿山名称
Lithium Americas Corporation	阿根廷	卤水	Salar de Cauchari, Olaroz, Incahuasi and others
Orocobre	阿根廷	卤水	Salar de Olaroz, Salar de Salinas Grandes, Cauchari, Guyatayoc and others
The Sentient Group	阿根廷	卤水	Salar de Rincon
Marifil Mines Ltd.	阿根廷	卤水	Salar de Antofalla and Salar de Ratones
Li3 Energy Inc. Corp.	秘鲁	卤水	Salar de Rincon
Comibol	玻利维亚	卤水	Salar de Uyuni
New World Resources	玻利维亚	卤水	Salar de Pastos Grandes
Salares Lithium Inc.	智利	卤水	Salar de Piedra Parada, Grande, Aguilar, Agua Amarga, La Isla, Las Parinas and Maricunga

续表 10:

Pan American Lithium	智利	卤水	Laguna Verde ,Laguna Brava , Rio Salado y Rio Pedenales and others
Lomiko	智利 , 美国	卤水	Salar de Aguas Calientes ,Clayton Valley
Simbol Mining	美国	卤水	brines and effluent
American Lithium	美国	卤水	Montezuma Valley
Amerpro Resources	美国	卤水	Smokey Valley in Esmeralda County
Rodinia Minerals	美国 , 阿根廷	卤水	Clayton Valley , Salinas Grandes
Electric Metals	美国 , 阿根廷	卤水	Big Smokey Valley , Salar Arizaro , Salar Rio Grande
America Lithium	美国 , 加拿大 , 澳大利亚	卤水	Paymaster Canyon , Leduc Formation
CITIC 中信国安台吉乃尔	中国	卤水	West Taijinair Salt Lake (Xitai)
扎布耶锂业	中国	卤水	Zhabuye Salt Lake
Sterling Group Ventures 当雄措	中国	卤水	Dangxiongcuo (DXC)
西部矿业集团东台吉乃尔	中国	卤水	East Taijinair Salt Lake(Dongtai)
North Arrow Minerals Inc.	加拿大	矿石	Big Bird pegmatite
Nemaska Exploration	加拿大	矿石	Lac des Montagnes
Sirios Resources	加拿大	矿石	Pontax Project
Petro Horizon Energy Corp.	加拿大	矿石	Brzail Lake Property
Channel resources	加拿大	矿石	Fox Creek Lithium Project
Western Lithium Corporation	美国	矿石	Kings Valley Project
四川镍钴	中国	矿石	Maerkang Mines
四川金川	中国	矿石	Jinchuan Mine
中国锂业	中国	矿石	Several Mines in Sichuan
江西宁都	中国	矿石	Ningdu , Jiangxi
四川德鑫矿业资源有限公司	中国	矿石	Lijiagou Lithium Mine
China Lithium Products Technology Co. , Ltd.	中国 矿石	矿石	
Keliber Resources	芬兰	矿石	Länttä Spodumene Pegmatite
Pacific Wildcat Resources Corp.	莫桑比克	矿石	Muiane Project
Rio Tinto	塞尔维亚	矿石	Jadar Lithium Project
Ultra Lithium	加拿大	矿石 卤水	Berland river , Zigzag lake , South Smoke Valley
Lithium One	加拿大 , 阿根廷	矿石 卤水	Cyr Property , Sal de vida in Salar de Hombre Muerte
International Lithium	加拿大 , 美国 , 阿根廷 , 爱尔兰	矿石 卤水	Forgan and Niemi Lake , Fish lake Valley , Mariana
First Lithium Resources	加拿大	Basinal 卤水 矿石	Valley View (Alberta) and Godslith (Manitoba)
Mesa Uranium	美国	Basinal 卤水	Green Energy Lithium Project
生产其它锂产品的主要企业			
企业名称	所属国家	原料	产品
中信国安	中国	锂辉石	carbonate hydroxide
青海锂盐厂	中国	锂辉石	carbonate hydroxide
天齐锂业 四川射洪	中国	锂辉石	碳酸锂 , 氢氧化锂
新余赣丰	中国	碳酸锂 , 氯化锂	金属锂 , 丁基锂 , 锂无机化学品
四川阿坝广盛	中国	锂辉石	碳酸锂 , 氢氧化锂
TVEL	俄罗斯	碳酸锂 , 氯化锂	金属锂 , 丁基锂 , 锂无机化学品
Lichem	美国	碳酸锂	锂无机化学品

3 碳酸锂产品质量标准

随着近年科学技术的发展 ,锂的用途日益重要而广泛。虽然南美盐湖资源开发利用都坚持综合利用的方针 ,但锂化学品的开发都是当然首选。而近年来碳酸锂的主要消费中有 37% 和锂电池生产有关。目前 ,在全球锂盐产品市场上 ,来自南美盐湖的锂产品占据绝对份

额 ,SQM、Chemetall 和 FMC 分别以 30%、28% 和 19% 占据第 1、第 2 和第 4 的位置。我国从盐湖卤水和锂矿石生产出的锂盐之和 ,以 22% 占据第 3 位。

现以 SQM 为例 ,将其电池级和工业级碳酸锂的产品质量标准与我国的国家标准及某些企业产品的加以比较 ,列在表 11 中。我们应特别注意卤水中富含的各种离子的含量。

表 11 电池级碳酸锂质量标准比较
Table 11 Specifications of battery grade Li₂CO₃

各项指标	SQM 公司电池级和工业级碳酸锂标准与我国国家及公司标准指标比较						
	SQM		天齐锂业	四川国锂	国家标准 YS/T582 - 2006		
	工业级	电池级	电池级	电池级	电池 0 级	电池 01 级	电池 02 级
Li ₂ CO ₃	≥99%	≥99.2%	≥99.5%	≥99.5%	≥99.9%	≥99.9%	≥99.5%
Cl	≤0.02%	≤0.01%	≤0.005%	≤0.005%	≤0.002%		
Na	≤0.1%	≤0.06%	≤0.025%	≤0.025%	≤0.002%	≤0.002%	≤0.02%
K	≤0.05%	≤0.005%	≤0.001%	≤0.004%	≤0.001%	≤0.002%	≤0.01%
Ca	≤0.04%	≤0.01%	≤0.005%	≤0.01%			
Mg	≤0.01%	≤0.01%	≤0.01%	≤0.004%	≤0.001%	≤0.0025%	≤0.01%
SO ₄	≤0.05%	≤0.03%	≤0.08%	≤0.05%	≤0.003%		≤0.08%
B	≤0.001%			≤0.0003%			
Fe ₂ O ₃	≤0.003%	Fe≤0.001%	Fe≤0.002%	≤0.001%			
Ni		≤0.001%	≤0.003%		≤0.0002%	≤0.002%	≤0.002%
Cu		≤0.001%	≤0.001%		≤0.00025%	≤0.0005%	≤0.001%
Pb		≤0.001%	≤0.001%		≤0.0005%	≤0.005%	≤0.005%
Al		≤0.001%	≤0.005%		≤0.0002%	≤0.001%	≤0.001%
Cr		≤0.001%					
Zn		≤0.001%	≤0.001%				≤0.001%
Mn			≤0.001%		≤0.0005%	≤0.001%	≤0.001%
Si	≤0.005%						
H ₂ O	≤0.2%	≤0.2%	≤0.40%	≤0.30%			
烧失重	≤0.7%	≤0.5%		≤0.45%			
酸不溶物	≤0.02%	≤0.01%		≤0.005%			

4 南美盐湖开发利用的其它工程问题

1) 生产过程的最终老卤排回盐湖中 盐湖卤水加工过程并非都能够“吃干榨净” ,像矿山开采加工产生尾矿一样 ,最终也会有“老卤”或“尾卤”产生。加工利用盐湖卤水的企业 ,如何处理这些老卤和过程中产生的其它暂时不用

的液固相中间物 ,是一个必须解决好的问题。
我国察尔汗是氯化物型盐湖 ,盐田生产光卤石后的老卤基本上是氯化镁饱和溶液 ,还含有被浓缩富集了的原卤水中的其它微量成分。目前这种老卤除少量用来生产水氯镁石外 ,基本未加利用 ,被暂时排放到 30 km 以外的南霍布逊盐湖中。中东的死海也是氯化物型盐湖 ,生产钾肥后的老卤与我国察尔汗盐湖的类似 ,以色列死海加工厂是将其排回到死海中。由于

老卤密度较死海湖水大,会自动沉到盐湖底部。大盐湖 GSL 生产后的老卤也是排回到大盐湖中。

南美盐湖开发利用最后产生的老卤,都是回注到盐湖盐壳之下,不留在地表上。例如,阿塔卡玛盐湖生产过程的最终老卤,于盐田厂区之外注回到盐湖干盐壳之下^[13]。Uyuni 盐湖的中试方案也是采取老卤返回到湖中,而不暴露于空气中的方式。尽管 Uyuni 盐湖的面积超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,而且目前尚未开发,整个盐湖是一片荒漠,几乎没有人烟,但中试方案却把这一做法当成是中间试验的一个环保措施,单独列出了。Cauchari 盐湖的开发计划中,老卤也是排回到盐湖中。

2) 不在湖区建设化工加工车间 南美盐湖开发的各公司只在湖区修建盐田,灌入卤水进行天然日晒蒸发,而不在湖区建设化工加工车间。例如,阿塔卡玛盐湖经盐田日晒浓缩后的富锂卤水,用槽车运往 240 km 以外的 Antofagasto 港附近 Salar de Carmen 的加工厂,进一步处理以获得最终产品 Li_2CO_3 。Chemetall SCL 公司除湖边修建盐田外,生产 Li_2CO_3 的车间等就建在 Antofagasto 港。美洲锂业公司开发 Olaroz 盐湖也计划如此运作。

3) 综合利用盐湖资源,开发多种产品 卤水是一种多成分综合性资源,虽然开发锂产品十分走俏,但开发南美盐湖的各公司,都坚持多成分综合利用的路线。毫无疑问 SQM 开发 Atacama 盐湖是最成功的例子之一。它目前开发的有锂、钾、硼、碘及硝酸盐等系列产品,并且将卤水资源开发与周边其它矿产资源开发加以整合,形成综合型化工企业,并延伸产业链,参与下游产品开发。

5 结 语

在新世纪过去的 10 年里,南美安第斯高原盐湖群的开发利用取得了显著进展,我们对此做了一个简略地介绍。这里使用的信息除来自纸质期刊外,大多为网络信息,包括 SQM、FMC、Chemetall 等大锂盐生产公司,TRU、Roskill、Admiralty 等大的咨询公司和高级独立

咨询专家,还有其他专家甚至旅游者的博客。

对于南美盐湖资源综合利用产业的迅速崛起,除很多工艺技术问题值得我们认真、深入研究外,这些公司的发展思路和策略也有许多值得我们借鉴的东西,应密切注意发展趋势和动向。

由于锂的极端重要的战略意义,南美富锂盐湖资源开发已经完全被赋予了新的含义,它已经从一种普通的矿产资源,变成了未来的能源。盐湖锂资源储藏最丰富的玻利维亚,被众多媒体说成是“锂的沙特”,南美洲“锂三角”地区被称为“下一个中东”,很多发达国家都加入到这场被国外媒体称为“锂矿争夺战”中来。作为同样蕴藏丰富富锂盐湖资源的中国,应该针对这种具有战略意义的资源的开发,制定长远的科学规划,这是需要我国有关部门迅速做出决策的。

此外,我们还可以从南美盐湖资源开发的新进展中,注意到他们将卤水资源开发与周边其它矿产资源开发加以整合,并延伸产业链,参与下游产品开发;特别注重销售网络的建设,抢占国际市场;并注重生态环境保护和可持续发展问题,以及将盐湖资源开发利用与当地社区发展结合等等,其中大有值得我们认真学习和借鉴的内容。

参考文献:

- [1] 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): 50-68.
- [2] Jaskula B W. Lithium[M]//Salazar K, McNutt M K, eds. Mineral commodity summaries 2010. Washington: U. S. Interior Department, Geological Survey 2010.
- [3] Ericksen G E, Chong D G, Vila G T. Lithium resources of salars in the central Andes[M]//Vine D, Ed. Lithium Resources and Requirements by the year 2000, U. S. Geological Survey Professional Paper 1005, Reston: U. S. Geological Survey, 1976: 66-74.
- [4] King M. Amended inferred resource estimation of Lithium and Potassium at Cauchari and Olaroz salars, Jujuy province, Argentina[R]. Nova Scotia: Groundwater Insight Inc., 2010.
- [5] 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.
- [6] Gruber P, Medina P. Global Lithium availability: a con-

- straint for electric vehicles? A practicum submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science [D]. Ann Arbor: University of Michigan 2010.
- [7] Ferro R, Pipoli R. The Future of Lithium ,Mining Intelligence Series [M]. Santiago: Business News Americas 2010.
- [8] 金陵晚报. 智利沙漠小城几十年不下雨 [N]. 金陵晚报 2006-09-05.
- [9] Place D. Atacama desert ,Chile [EB/OL]. 2009-06-09. <http://www.extremescience.com/DriestPlace.htm>.
- [10] SQM S A. Corporate Presentation Chilean ,Bond Issuance Roadshow [EB/OL]. 2009. <http://www.sqm.com/aspx/Investor>.
- [11] British Sulphur Corporation Ltd. GSL - a tale of 15 ,000 years [J]. Fertilizer International 2008(426): 51-52.
- [12] Jaskula B W. Lithium [Advanced release] ,USGS 2007 Minerals Yearbook [M]. Washington: U. S. Interior Department ,Geological Survey 2008: 44. 1-44. 8.
- [13] Ober J A. Lithium ,USGS 2006 Minerals Yearbook [M]. Washington: U. S. Interior Department ,Geological Survey , 2007 44. 1-44. 7.
- [14] Ober J A. Lithium ,USGS 2005 Minerals Yearbook [M]. Washington: U. S. Interior Department ,Geological Survey , 2006 45. 1-45. 7.
- [15] Chemetall GmbH. Cesium Carbonate 99.9 [EB/OL]. 2009. <http://www.specialmetals.com/DownloadPDFfile>.
- [16] Chemetall GmbH. Lithium Batteries for the Automatic Industry [EB/OL]. 2009. <http://www.Chemetalllithium.com/index.php?id=56>.
- [17] FMC Corporation. FMC 2009 Annual Report [EB/OL]. 2010. <http://www.specialmetals.com/DownloadPDFfile>.
- [18] Lithium One Inc. Lithium One corporate presentation [EB/OL]. 2010 <http://www.Lithiuml.com>.
- [19] Lithium One Inc. Lithium one corporate overview [EB/OL]. 2010. <http://www.lithiuml.com>.
- [20] Corporación Minera de Bolivia. Gerencia nacional de recursos evaporíticos [EB/OL]. 2009. <http://www.evaporiticocbolivia.org/indexi.php?Modulo=Temas01&Opcion=Direccion>.
- [21] Corporación Minera de Bolivia. Desarrollo Integral de las Salmueras del salar de Uyuni Planta Piloto ,Proyecto a diseno final [EB/OL]. 2009. <http://www.evaporiticocbolivia.org/indexi.php?Modulo=Temas01&Opcion=PlantaFuture>.
- [22] Romero S. In Bolivia ,untapped bounty meets nationalism [N]. The NY Times ,February 3 2009.
- [23] Lithium Americas Corp. LAC presentation [EB/OL]. 2010. <http://www.lithiumamericas.com>.
- [24] Orocobre Limited. Olaroz Lithium project [EB/OL]. 2010. <http://www.orocobre.com.au/Proiects/Olaroz.htm>.
- [25] Hallgarten & Company. Rincon Lithium [EB/OL]. 2009. <http://www.hallgartenco.com/file.phd=Samples.....Rincon>.
- [26] Hallgarten & Company. Lithium Sector Review [EB/OL]. 2010. <http://www.hallgartenco.com>.
- [27] Li3 Energy Inc. Corporate Presentation [EB/OL]. 2010. <http://www.li3energy.com>.
- [28] Orocobre Limited. ASX announcement ,significant expansion of land holdings around Olaroz Lithium-Potassium project [M]. Brisbane: Orocobre Limited 2009.
- [29] Orocobre Limited. The Lithium market [EB/OL]. 2010. <http://www.orocobre.com.au/LithiumMarket.htm>.
- [30] Process and Environmental Consultancy. Lithium mining [EB/OL]. 2010. <http://www.lithiumsite.com/LithiumMining1jX3.html>.
- [31] British Sulphur Corporation Ltd. Three production technologies [J]. Fertilizer International 2008(423): 45-47.

Comprehensive Utilization of Salt Lakes in South America in the New Century

SONG Peng-sheng¹, LI Wu¹, SUN Bai¹

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China)

Abstract: As a special type of resources, salt lakes have important scientific, economic values, and environmental effect. Salt lakes are store houses of mineral salts. Especially, their contents lithium, potassium, boron etc., are precious resources for the development of economics and society of China with strategic interest. The new characteristics of exploitation of salt lakes in the 21 century are that many countries, including developing and developed ones, take part in the activities of exploiting “salars” in South America. It can be expected that new situations about development of salt lake resources will be formed in the near future.

Key words: Utilization of salt lake resources; Exploitation of lithium salt; Exploitation of potassium salt