

# 碳酸盐型盐湖卤水的模拟太阳池结晶试验

唐力君<sup>1,2,3)</sup>, 郑绵平<sup>1,3)</sup>, 刘建华<sup>1,3)</sup>

1)国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2)中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;

3)中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037

**摘 要:** 在碳酸盐型盐湖提锂工艺中, 太阳池是一个重要组成部分, 目的是储存太阳能能量以结晶析出碳酸锂。文章利用加热方法首次在实验室条件下进行模拟太阳池结晶试验, 试验的蒸发量随着温度的升高而加大, 但蒸发量的不同对析盐结晶影响不大。在不同时间段模拟试验中, 24 h 时间段的  $Mg^{2+}$  析盐浓度较  $Li^+$  大, 且随着时间的延长逐渐降低, 而  $Li^+$  则相反;  $Mg^{2+}$  析出速率随着时间的增加而逐渐降低, 而  $Li^+$  析出速率基本保持一致。在不同温度模拟试验中, 卤水主要组分总析出率与温度的升高呈正相关, 卤水中  $CO_3^{2-}$  和  $Li^+$  的浓度降低速度大于其他组分,  $CO_3^{2-}$  和  $Li^+$  的析出率远大于其他组分, 析出主要矿物鉴定结果均为扎布耶石。

**关键词:** 盐湖卤水; 模拟太阳池结晶; 锂、镁; 析出率

中图分类号: P967; O611.65 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)02-249-07

## Simulation Experiments on Solar Pond Crystallization of Carbonate-type Saline Lake Brine

TANG Li-jun<sup>1,3)</sup>, ZHENG Mian-ping<sup>1,3)</sup>, LIU Jian-hua<sup>1,3)</sup>

1) Key Open Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037;

2) National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

**Abstract:** The solar pond plays an important role in the process of lithium extraction from the carbonate saline lake in that it can store solar energy to extract lithium carbonate. The authors used the heating method for the first time to perform simulation experiments on solar pond crystallization in laboratory. In the experiments, the evaporation quantity of brine increased with increasing temperatures, but the difference in evaporation quantity had little effect on salt precipitation. In different time intervals, the concentration of  $Mg^{2+}$  in precipitated salt was higher than that of  $Li^+$  in 24 hours and gradually decreased with time, whereas the concentration of  $Li^+$  increased. Moreover, the precipitation rate of  $Mg^{2+}$  gradually decreased with time while the precipitation rate of  $Li^+$  on the whole remained constant. In simulation experiments at different temperatures, the total precipitation rates of the main components of the brine had a positive correlation with temperatures. The concentration lowering rates of  $CO_3^{2-}$  and  $Li^+$  were higher than those of other components, and the precipitation rates of  $CO_3^{2-}$  and  $Li^+$  were by far higher than those of other components. The main mineral identified by microscopic observation at different temperatures was zabuyelite.

**Key words:** saline lake brine; simulation on solar pond crystallization; Li and Mg; precipitation rate

本文由国家自然科学基金重点项目(编号: 40531002)和国家大地调项目(编号: 1212010633809)联合资助。

收稿日期: 2008-05-16; 改回日期: 2009-02-20。

第一作者简介: 唐力君, 男, 1976 年生。助理研究员, 从事盐湖化学和分析化学研究。通讯地址: 100037, 北京市百万庄大街 26 号。

电话: 010-68999559。E-mail: tanglijun@cags.net.cn。

在碳酸盐型盐湖提锂工艺过程中,通常要经过盐田多次晒卤阶段和太阳池结晶阶段(罗莎莎等, 2003; 郑绵平, 2006; 郑绵平等, 2006), 太阳池(Solar pond)是其重要组成部分。进入太阳池的卤水浓度以及太阳池所能达到的积热程度是决定碳酸锂结晶析出效果的关键, 卤水浓度是由盐田多级晒卤过程决定, 积热程度是由太阳池本身结构和当时天气情况决定(七贞, 2001; 郑绵平, 2002)。西藏有些碳酸盐型盐湖湖区周围分布的温泉是其进行太阳池结晶析锂所具有的一个明显优势, 是一个可以利用的能源(郑绵平等, 1989; 郑绵平, 2001a, 2001b; Zheng, 2001)。而且, 这些盐湖周围地势具有一定的相对高差, 有的河流流量也比较大, 且河流的河谷宽度、流域范围适合建造中小型水利水电工程, 因此在合适季节可进行水力发电, 这也可以为湖区提供新的能源。上述有利条件使得该类盐湖进行盐田提锂工艺开发具有比藏北其他盐湖较为有利的条件, 可以把仅仅依赖太阳能进行太阳池结晶析锂转为多种能源共用的局面。但这些盐湖周围地势起伏较大, 附近湖只有面积较小的平整土地, 限制了盐田面积的建设规模。模拟太阳池结晶试验主要目的是为了降低盐田工艺过程中进入太阳池的卤水浓度, 克服制取高浓度卤水的困难, 使在卤水锂浓度较低时也可能利用进行太阳池效应结晶析盐, 这是为将来利用湖区多种可利用能源而上级的前期试验, 具有广阔的运用前景。文章根据前人所做的蒸发试验(七贞等, 2001; 张永生等, 2005; 郑绵平等, 2007), 探讨了热水在太阳池效应过程中应用试验, 在 50℃ 条件下, 模拟太阳池的盐梯度结构层, 做卤水的模拟太阳池结晶加热试验, 对高浓度晒池卤水进行模拟太阳池结晶析盐试验, 然后按照不同时间段收集析盐样品, 做析盐样品的分析研究。同时, 进行不同温度系列的模拟太阳池结晶试验, 对比不同温度条件下模拟太阳池结晶试验效果。研究人工条件下模拟太阳池结晶的效果和盐类析出规律, 为以后利用温泉水等其他能源提取盐类提供基础性研究依据(Garrett, 1992; 钟辉等, 2003; 罗莎莎等, 2004)。

## 1 试验部分

### 1.1 试验温度选择依据

笔者对 2005 年和 2007 年盐田提锂工艺过程中盐梯度太阳池温度的观测记录进行比较, 可以得出湖区太阳池积热可达到的温度在 50℃ 上下。2005 年太阳池积热的最高温度为 6 月 7 日的 47.8℃, 达到这个温度的时间大约 1 个月, 也就是蓄热期时间。

2007 年太阳池积热的最高温度为 52.9℃, 较 2005 年略高, 但其达到最高温度的蓄热期为 1 个半月, 较 2005 年略长。据以上这两年太阳池积热所能达到的最高温度数据, 模拟太阳池结晶试验选择 50℃ 作为试验加热温度, 并考虑湖区所具有的温泉、水利发电、煤炭能源等有利条件, 增添进行 60℃、70℃ 的模拟太阳池结晶试验研究。

### 1.2 试验方法

(1) 试验器材: HHS-2S 型电子恒温不锈钢水浴锅, ZOZ-0 式台式电热干燥箱, 和基牌电子台秤(1 g), pH 计, WYY-1 型盐度计, 比重计, 1000 ml 烧杯。

(2) 试验过程: 首先把高浓度晒池卤水倒入 1000 ml 烧杯里, 稳定一段时间待卤水静止, 其次沿烧杯壁缓缓倒入淡水, 形成模拟太阳池淡水层, 组成卤水盐梯度太阳池结构, 然后把该烧杯放置于水浴锅, 调整水浴温度至试验温度(50℃、60℃、70℃), 进行模拟太阳池结晶试验, 最后用移液管准确吸取卤水层卤水, 析盐用定量滤纸过滤得到, 所采集的析盐和卤水都做组分分析、盐类鉴定。

(3) 测量参数: 试验卤水的参数(盐度、pH、比重), 卤水量, 淡水量, 加热时间, 析盐量。文中卤水的物理参数由笔者测量, 组分参数由中国地质科学院盐湖中心盐类分析实验室刘建华和崔锦完成, 盐类鉴定由中国地质科学院盐湖中心盐类鉴定实验室刘丹阳完成。

### 1.3 卤水和析盐组分的分析方法

析盐样品先烘干, 然后进行组分分析。 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 和  $\text{Na}^+$ 均采用原子吸收分光光度计法,  $\text{SO}_4^{2-}$ 采用盐酸联苯胺容量法,  $\text{Cl}^-$ 采用硝酸银沉淀法,  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 和  $\text{B}_2\text{O}_3$ 采用甘露醇法(中科院青海盐湖研究所, 1973)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟太阳池结晶试验的蒸发量与蒸发速度

试验卤水盐度为 38.4%, pH 值为 9.79, 密度为 1.3000 g/cm<sup>3</sup>, 卤水量为 860 g。同时用烧杯 A 和烧杯 B 进行试验, 首先在 50℃ 的水浴锅里加热, 根据析盐情况和蒸发量变化, 然后把水浴锅温度改为 60℃。根据蒸发量大小不断补充上层淡水以保持淡水层厚度, 测量蒸发量并记录试验时间。

在模拟太阳池结晶试验的整个过程中, 无论在 50℃ 还是在 60℃ 试验温度下, 烧杯液面通常不会形成表面浮晶, 始终是液体表面, 这主要是因为高浓度卤水表面覆盖着淡水, 其盐度极低, 不容易结晶。

表 1 和表 2 中蒸发速度为蒸发量与时间的比值。

表 1 50℃模拟试验  
Table 1 Simulation experiment at 50

阶段	时间/h	蒸发量/g		蒸发速度/g·h <sup>-1</sup>	
		烧杯 A	烧杯 B	烧杯 A	烧杯 B
1	12.2	130	84	10.7	6.9
2	11.8	134	102	11.4	8.6
3	14.0	148	112	10.6	8.0
4	10.0	95	55	9.5	5.5
5	12.2	134	103	11.0	8.4
6	12.4	138	97	11.1	7.8
合计	72.6	779	553	10.7	7.6

表 2 60℃模拟试验  
Table 2 Simulation experiment at 60

阶段	时间/h	蒸发量/g		蒸发速度/g·h <sup>-1</sup>	
		烧杯 A	烧杯 B	烧杯 A	烧杯 B
1	9.8	167	132	17.0	13.5
2	12.2	232	160	19.0	13.1
合计	22.0	399	292	18.1	13.3

据表 1 和表 2, 在温度一定情况下, 液体蒸发速度基本稳定, 波动小, 与淡水层存在有关。另外, 白天和夜晚的蒸发效率差不多, 没有明显的区别, 表明液体蒸发受外界影响小。因此将来只需根据蒸发面积和温度来决定上层淡水的补充时间和补充量, 以保障淡水层的厚度。试验温度从 50 上升到 60 后, 液体蒸发速度明显提高, 烧杯 A 与烧杯 B 的蒸发速度提高比例分别为 69.2%和 75.0%, 提高幅度相近。两个烧杯的蒸发量和蒸发速度的不同主要与烧杯的直径大小与烧杯壁的厚薄有关, 烧杯 A 直径大于烧杯 B, 其液面也略大, 所以在不同温度、不同时间段上它的液体蒸发量、蒸发速度都大于后者。

### 2.2 不同时间段的模拟太阳池结晶试验

试验卤水盐度为 34.4%, pH 值为 9.18, 密度为 1.2560 g/ml<sup>3</sup>, 卤水量为 711 g, 其中 Li<sup>+</sup>浓度为 1.14 g/l, Mg<sup>2+</sup>浓度为 256 mg/l。分别按照 24 h、48 h、72 h、126 h 的试验时间进行析盐采集, 盐样号对应为 7、9、10、13, 然后对烘干析盐进行组分分析。

根据表 4, 24 h 时间段试验的 Mg<sup>2+</sup>百分含量在 4 个时间段中为最大, 同时, 在 7 号析盐的所有阳离子组分中, Mg<sup>2+</sup>百分含量仅次于钠、钾组分。在 4 个时间段模拟试验中, 析盐中 Li<sup>+</sup>的百分含量随着试验时间的延长逐步提高, 而 Mg<sup>2+</sup>的百分含量却快速降低, 然后呈现稳定的变化趋势。在 126 h 模拟试验后, Li<sup>+</sup>的百分含量最高可达 1.1%, 折合碳酸锂含量约为 5.8%, 这仅仅是利用 Li<sup>+</sup>浓度只有 1.14 g/l 的

表 3 试验析盐量  
Table 3 Experimental precipitated salts

时间/h	盐样号	盐量/g	
		析盐量	干盐量
24	7	9	4
48	9	11	6
72	10	12	6
126	13	-	-

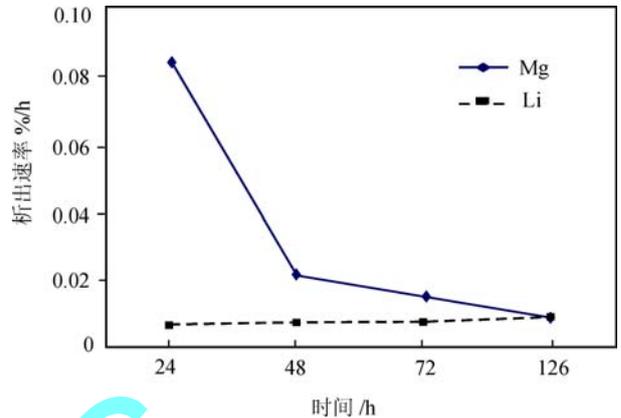


图 1 析盐 Li<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>析出速率变化  
Fig. 1 Precipitation rate change of Li<sup>+</sup> and Mg<sup>2+</sup>

卤水结晶获得的析盐结果, 是一个很值得关注的结果。

图 1 为析盐组分析出速率图, 析盐组分析出速率是组分浓度与试验时间的比值。从该图可知, 前 24 h 的 Mg<sup>2+</sup>析出速率远远大于 Li<sup>+</sup>的析出速率, 两者析出速率不在同一个数量级。随着模拟太阳池结晶试验时间的延长, Mg<sup>2+</sup>析出速率逐渐降低, 而 Li<sup>+</sup>析出速率一直保持基本平稳状态, 表明在太阳池结晶试验过程中, Li<sup>+</sup>是稳定析出。

### 2.3 不同温度系列模拟太阳池结晶试验

#### 2.3.1 50 模拟试验

试验描述: 试验卤水盐度为 37.2%, pH 值为 9.47, 密度为 1.2800 g/ml<sup>3</sup>, 卤温为 -0.8 , 卤水量为 1110 g, 试验温度为 50 , 试验时间为 6.67 h, 析盐量为 25.5 g。

根据表 5, 卤水盐度从原始试验卤水的 37.2%降为试验后的 36.0%, 试验后卤水的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>浓度在各组分中下降幅度最大, 其他组分浓度变化不明显。

在所有组分析出率中, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>析出率远远超出其他组分, 其中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的析出率达到 84.09%, Li<sup>+</sup>析出率为 59.20%。除 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>之外, 其他组分析出率基本处于同一水平, 在 5%至 6%之间。因此, 温度对 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>的析出影响很大, 但析盐中阴离子

表 4 析盐组分浓度/%  
Table 4 Composition of precipitated salts /%

盐样号	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Li <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
7	0.02	2.01	0.149	5.76	38.06	0.72	2.35	1.25	41.71	1.92
9	0.04	1.01	0.341	4.31	40.04	0.84	1.26	1.25	48.12	0.97
10	0.15	1.08	0.499	4.20	37.78	0.00	2.02	1.18	46.98	0.98
13	0.64	1.11	1.102	3.50	38.84	0.30	2.14	1.11	45.40	0.65

表 5 卤水析盐试验数据  
Table 5 Experimental data of brine and precipitated salts

组分	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
原始卤水/g·l <sup>-1</sup>	178.08	17.93	9.27	10.91	2.51	109.12	44.25
卤水/g·l <sup>-1</sup>	176.93	17.72	7.07	10.77	1.26	114.81	42.85
析盐/%	31.50	3.07	26.52	1.90	5.05	22.11	7.62
原始组分量/g	154.43	15.55	8.04	9.46	2.18	94.62	38.38
析盐组分量/g	8.03	0.78	6.76	0.48	1.29	5.64	1.94
析出率/%	5.20	5.03	84.09	5.11	59.20	5.96	5.07

表 6 卤水析盐试验数据  
Table 6 Experimental data of brine and precipitated salts

组分	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
原始卤水/g·l <sup>-1</sup>	170.01	29.40	13.69	11.12	2.26	112.03	47.05
卤水/g·l <sup>-1</sup>	164.62	28.94	10.77	11.05	1.07	121.29	46.79
析盐/%	25.51	4.78	31.70	1.74	5.45	19.65	7.01
原始组分量/g	141.43	24.46	11.39	9.25	1.88	93.20	39.14
析盐组分量/g	6.63	1.24	8.24	0.45	1.42	5.11	1.82
析出率/%	4.69	5.08	72.34	4.89	75.25	5.48	4.65

组分百分含量最高的是 Cl<sup>-</sup>，阳离子组分百分含量最高的是 Na<sup>+</sup>。

### 2.3.2 60 模拟试验

试验描述：试验卤水盐度为 37.6%，pH 值为 9.67，密度为 1.2970 g/ml<sup>3</sup>，卤温为 3.0 ，卤水量为 1079 g，试验温度为 60 ，试验时间为 6 h，析盐量为 26.0 g。

卤水盐度从原始试验卤水的 37.6%降为试验后的 37.4%，试验后卤水的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>浓度在各组分中下降幅度最大，Li<sup>+</sup>浓度甚至低于原始卤水的 50%。

在所有组分析出率中，CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>析出率高出其他组分，其他组分析出率分布在 4%至 6%之间，相差不大。与 50 试验比较，60 试验的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>析出率没有随着温度增加而增大，反而降到 72.34%，其他大部分组分析出率略微降低。60 试验析盐中阴离子组分百分含量最高的为 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>，这与 50 试验不同，阳离子组分百分含量最高仍为 Na<sup>+</sup>(表 6)。

### 2.3.3 70 模拟试验

试验描述：试验卤水盐度为 38.0%，pH 值为

9.58，密度为 1.2900 g/ml<sup>3</sup>，卤温为 0 ，卤水量为 1072 g，试验温度为 70 ，试验时间为 6 h，析盐量为 28.5 g。

卤水盐度从原始试验卤水的 38.0%降为试验后的 36.0%，试验后卤水的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>浓度在各组分中下降幅度依旧最大。

在所有组分析出率中，CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>在 3 个试验温度条件下均远大于其他组分，其他组分析出率均只在 5%至 7%之间变化。但 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>析出率与温度变化相反，70 的析出率最低，只析出 61.84%(表 7)。

### 2.3.4 不同温度试验比较

表 8 的主要组分指的是 Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、B<sub>4</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>。在不同温度模拟太阳池结晶试验中，主要组分的总析出率与温度的升高呈正相关，温度越高，析出的主要组分总量越大。在表 8 中，卤水量与主要组分析出总量关系随温度升高呈反相关，在试验温度为 70 时，虽然卤水量略少，但主要组分析出总量却最大，总析出率最高；试验温度为 50 时，卤水量最大，但析出总量最小。温度在模拟太阳池结晶试验的析碳酸锂中起主要作用。

表 7 卤水析盐试验数据  
Table 7 Experimental data of brine and precipitated salts

组分	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
原始卤水/g·l <sup>-1</sup>	174.24	22.21	12.19	11.19	2.53	110.01	47.65
卤水/g·l <sup>-1</sup>	167.32	22.00	9.17	11.12	1.04	114.80	44.17
析盐/%	30.80	3.79	22.20	2.05	5.31	21.63	7.92
原始组分量/g	146.28	18.65	10.23	9.40	2.13	92.36	40.01
析盐组分量/g	8.78	1.08	6.33	0.59	1.51	6.17	2.26
析出率/%	6.00	5.79	61.84	6.23	71.16	6.68	5.64

表 8 不同温度模拟试验的析出量和析出率  
Table 8 Precipitation quantity and rate at different temperatures of simulation experiments

温度/°C	卤水量/g	主要组分量/g	主要组分析出总量/g	总析出率/%
50	1110	322.66	24.93	7.73
60	1079	320.76	24.92	7.77
70	1072	319.05	26.70	8.37

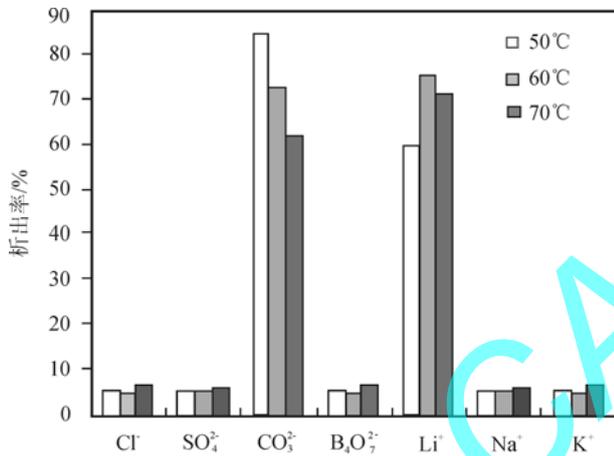


图 2 不同温度析盐组分析出率比较

Fig. 2 Comparison of precipitation rates of components in precipitated salts at different temperatures

在不同温度模拟太阳池结晶试验中, 固液分离后卤水与原始试验卤水组分浓度比值可见表 9。CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>的比值明显减低, 特别是 Li<sup>+</sup>比值约为原始试验卤水浓度的一半, 50 时为 60 和 70 时其比值已小于 50%, 其他主要组分变化不大, 表明卤水其他组分经过模拟太阳池结晶试验后组分浓度变化较小, 其中只有 Na<sup>+</sup>的比值大于 1, 即其在试验后浓度略微增加, 因此模拟太阳池结晶试验主要使 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>的浓度发生变化, 对其他组分影响较小。

从不同温度模拟太阳池结晶试验的析盐组分析出率(图 2)可知, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>析出率均为最大, 远远超过其他组分析出率。其他析盐组分析出率均低于 10%, 且数值相差不大, 因此它们析出水平相当。这些特征与卤水结果相一致。

### 2.3.5 盐类鉴定结果

表 10 中未烘干表示析盐未进烘箱烘干, 烘干表示析盐已进烘箱烘干。在不同温度的模拟太阳池结晶试验中, 湿盐主要为扎布耶石和氯碳钠镁石, 析出阳离子组分主要为 Li<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>的百分含量均达到 5% 以上, 其中 60 试验时 Li<sup>+</sup>的百分含量为 5.45%, 可见表 10, 阴离子组分主要为 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Cl<sup>-</sup>; 干盐主要为扎布耶石和石盐。析盐和干盐的主要组分鉴定均为扎布耶石。湿盐烘干后氯碳钠镁石含量减少, 而石盐含量增大, 而且不同温度析出湿盐均未见钾芒硝, 而干盐均出现少量钾芒硝。总的析盐鉴定结果均为含石盐的扎布耶石。

根据化学分析结果和显微镜下盐类鉴定结果进行矿物组分人工配平, 具体结果见表 11。在不同温度模拟太阳池结晶试验中析出盐类矿物主要为扎布耶石、石盐, 其次为钾芒硝、硼砂、钾石盐、氯碳钠镁石等。扎布耶石的最大值出现在试验温度为 60 的情况, 其百分含量高达 29.05%。

### 3 结论

(1) 首次在实验室条件下进行模拟太阳池结晶试验, 探索室内蒸发规律, 可为将来工艺开发利用提供基础参数。在模拟太阳池结晶试验的整个过程中, 卤水表面始终保持液体表面, 这有利于蒸发, 但要根据蒸发量变化及时添加淡水。在温度一定情况下, 液体蒸发速度基本稳定, 波动小, 试验温度变化对液体蒸发速度产生主要影响。上层淡水层的厚度变化对模拟太阳池试验的析盐结果影响较小。

(2) 在不同时间段的模拟太阳池结晶试验中, 24 h 时间段试验的 Mg<sup>2+</sup>析出浓度较 Li<sup>+</sup>大, 且它在析盐的浓度随着时间的延长逐渐降低, 而 Li<sup>+</sup>析出浓度随着时间的延长而逐步提高, 因此 Mg<sup>2+</sup>先于 Li<sup>+</sup>达到饱和状态。随着模拟试验时间的增加, Mg<sup>2+</sup>析出速率逐渐降低, 而 Li<sup>+</sup>析出速率基本保持一致, 因此 Li<sup>+</sup>能稳定析出。其中在 126 h 模拟试验后, 析盐 Li<sup>+</sup>浓度达 1.1%, 其仅仅是利用 Li<sup>+</sup>浓度只有 1.14 g/l 的

表 9 剩余卤水与试验卤水浓度比值  
Table 9 Concentration ratio between original brine and residual brine

温度/	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
50	0.994	0.989	0.763	0.987	0.501	1.052	0.968
60	0.968	0.984	0.786	0.994	0.471	1.083	0.995
70	0.960	0.991	0.752	0.993	0.411	1.043	0.927

表 10 盐样显微镜下盐类鉴定结果  
Table 10 Composition of solid-phase minerals by microscopic identification

温度/	状态	扎布耶石	钾石盐	石盐	天然碱	钾芒硝	氯碳钠镁石
50	未烘干	极大量		微量			一般
	烘干	极大量		一般	微量	微量	微量
60	未烘干	极大量		一般	微量		一般
	烘干	极大量	少量	一般		微量	少量
70	未烘干	极大量		tr			一般
	烘干	极大量	少量	一般		微量	微量

注: (极大量)>50%; (大量)20%~50%; (一般)5%~25%; (少量)1%~5%; (微量)<1%。

表 11 析盐中矿物百分含量/%  
Table 11 Weight percentage of minerals in solid-phase /%

温度/	扎布耶石	天然碱	水碱	石盐	钾芒硝	硼砂	钾石盐	氯碳钠镁石	水菱镁矿	总和
50	27.01	-	6.29	42.84	5.32	4.66	10.97	1.96	1.02	100.1
60	29.05	2.08	9.34	32.5	8.27	4.23	7.82	6.00	-	99.82
70	28.40	-	2.83	41.87	6.92	5.11	10.46	1.05	1.27	97.91

卤水结晶而获得,是值得关注的结果。

(3) 在不同温度的模拟太阳池结晶试验中,主要组分总析出率与温度的升高呈正相关,温度在模拟太阳池结晶试验的析盐效率中起主要作用。在不同温度模拟试验中,主要使液体卤水中的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>浓度发生变化,对卤水其他组分影响较小;另外,析盐组分中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 Li<sup>+</sup>析出率最大,其余主要组分析出水平相当,析盐与卤水结果互为对应;在三个试验温度下,析盐 Li<sup>+</sup>浓度均超过 5%,其中在试验温度为 60 时,扎布耶石百分含量可达 29.05%。不同温度试验下的析盐矿物鉴定结果均为含石盐扎布耶石。

致谢: 特别感谢盐湖中心费振壁和化学分析室崔锦同志对论文工作的帮助!

### 参考文献:

- 罗莎莎, 郑绵平. 2003. 新型太阳池的研究[J]. 盐湖研究, 11(3): 65-70.
- 罗莎莎, 郑绵平. 2004. 西藏地区盐湖锂资源的开发现状[J]. 地质与勘探, 40(3): 11-14.
- 乜贞. 2001. 碳酸盐盐湖卤水提锂工艺研究[D]. 中国地质科学院.
- 乜贞, 郑绵平. 2001. 西藏扎布耶盐湖夏季卤水盐田晒制研究[J].

地球学报, 22(3): 271-275.

- 张永生, 郑绵平, 乜贞, 卜令忠. 2005. 西藏扎布耶盐湖碳酸盐型卤水 15 等温蒸发实验[J]. 海湖盐与化工, 34(4): 1-6.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京, 科学技术出版社.
- 郑绵平. 2001a. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. 地球学报, 22(2): 97-102.
- 郑绵平. 2001b. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 20(2): 181-189.
- 郑绵平. 2002. 西藏扎布耶盐湖锂、硼、钾综合开发扩大试验研究报告[R]. 中国地质科学院.
- 郑绵平. 2006. 盐湖学的研究与展望[J]. 地质论评, 52(6): 737-746.
- 郑绵平, 齐文. 2006. 我国盐湖资源及其开发利用[J]. 矿产保护与利用, 5: 45-50.
- 郑绵平, 邓月金, 乜贞, 卜令忠, 史世云. 2007. 西藏扎布耶盐湖秋季卤水 25 等温蒸发研究[J]. 地质学报, 81(12): 1742-1749.
- 中国科学院青海盐湖研究所. 1973. 卤水和盐的分析方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 钟辉, 周燕芳, 殷辉安. 2003. 卤水锂资源的开发技术进展[J]. 矿产综合利用, 1: 23-28.

### References:

- GARRETT E D. 1992. Natural Soda Ash Occurrences, processing, and use[M]: 432-497
- LUO Sha-sha, ZHENG Mian-ping. 2003. The study of new-style solar ponds[J]. Journal of Salt Lake Research, 11(3): 65-70 (in

- Chinese with English abstract).
- LUO Sha-sha, ZHENG Mian-ping. 2005. Exploitation actuality of saline lake lithium resources in Tibet[J]. *Geology and Prospecting*, 40(3): 11-14 (in Chinese with English abstract).
- NIE Zhen. 2001. Technological research on depositing lithium salt from brine of carbonate saline lakes[D]. Chinese academy of geological sciences (in Chinese with English abstract).
- NIE Zhen, ZHENG Mian-ping. 2001. A Study of the brine solarizing behavior in solar ponds of Zhabuye salt lake[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 271-275 (in Chinese with English abstract).
- Qinghai institute of salt lakes, chinese academy of sciences. 1973. *Analysis Methods of Brines and Salt*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- ZHANG Yong-sheng, ZHENG Mian-ping, NIE Zhen. 2005. 15 -isothermal evaporation experiment on carbonate-type brine from Zhabuye salt lake, Tibet, southwestern China[J]. *Sea-lake Salt and Chemical Industry*, 34(4): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, XIANG Jun, WEI Xin-jun, ZHENG Yuan. 1989. *Salt lakes on the Qinhai-Xizang(Tibet) plateau*[M]. Beijing: Beijing Scientific and Technological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping. 2001a. Study advances in saline lake resources on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 22(2): 97-102 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping. 2001. On salinology[J]. *Hydrobiologia*, 466: 339-347.
- ZHENG Mian-ping. 2001b. On Chinese salt lakes[J]. *Mineral deposits*, 20 (2): 181-189 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping. 2002. The enlargement experiment on comprehensive utilization of Li, B, K from Zhabuye salt lake in Tibet[R]. Chinese academy of geological sciences(in Chinese).
- ZHENG Mian-ping. 2006. Salinology: research and prospects[J]. *Geological Review*, 52(6): 737-746 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, QI Wen. 2006. Saline resources and its development in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 5: 45-50 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, DENG Yue-jin, NIE Zhen, BU Ling-zhong, SHI Shiyun. 2007. 25 -isothermal evaporation of autumn brines from the Zabuye salt lake, Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(12): 1742-1749 (in Chinese with English abstract).
- ZHONG Hui, ZHOU Yan-fang, YIN Hui-an. 2003. Progress in technology for extracting lithium from Li-bearing brine resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1: 23-28 (in Chinese with English abstract).