http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

西藏扎布耶碳酸盐型盐湖卤水相化学研究

乜贞[1,2,3)],卜令忠[1,2,3)],郑绵平[1,2,3)],张永生[1,2,3)]

1) 中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037;

2) 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心,北京,100037;

3) 国土资源部盐湖资源与环境重点开放实验室,北京,100037

内容提要:中国盐湖资源丰富,且水化学类型齐全。西藏扎布耶盐湖位于西藏高原腹地,该湖卤水水化学类型为碳酸盐型,已处于盐湖演化晚期,是一个固液共存的盐湖矿床,具有很好的工业开发价值。笔者分别在15℃、25℃下对该卤水进行了等温蒸发实验,研究了在此两个温度下卤水中各元素富集行为和盐类矿物析出规律。并通过讨论其与国内外碳酸盐型和硫酸盐型锂盐湖的卤水蒸发路径和矿物析出异同,指出扎布耶盐湖具有其独特的卤水蒸发析盐路径。在本实验中低温有利于卤水中锂的富集,而高温有利于硼的富集,碳酸锂和钾盐交叉析出,低温时钾的矿物主要为钾石盐,高温时主要为钾芒硝,高温有利于获得高品位的碳酸锂混盐。

关键词:扎布耶盐湖;碳酸盐型;等温蒸发;盐类矿物;析出规律

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我国西北的青海、西藏、新疆和内蒙四省区,大小盐湖有一千多个(郑喜玉等,2002)。中国也是个盐湖水化学类型丰富的国家,氯化物型、硫酸盐型、碳酸盐型盐湖齐全。

扎布耶盐湖卤水水化学类型属碳酸盐型,位于西藏高原腹地,距离西藏自治区区府拉萨约1100 km,行政区划属西藏日喀则地区仲巴县,属干旱高原型气候。湖面海拔4422 m,湖盆面积247 km^2(郑绵平等,1989;郑喜玉等,2002)。扎布耶盐湖已处于盐湖演化的晚期,其南湖已成为半干盐湖,使该湖成为一个固液共存的盐湖矿床。扎布耶盐湖矿床中锂盐、硼砂达到超大型,钾盐达到大型,品位都很高,卤水中还含有多种特种元素,具有很好的工业开发价值(郑绵平等,1989;郑绵平,1999;赵元艺,2003)。

扎布耶盐湖卤水具有与氯化物型或硫酸盐型不同的水化学特性,其卤水中各元素的富集规律和盐类矿物组合也不同,该湖最大的特点是现阶段正在沉积天然碳酸锂——扎布耶石(郑绵平等,1987)。1990年,中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心在扎布耶盐湖湖畔建立了气象水文科学长期观测站,观测内容包括气温、地温、蒸发量、降水量、相对湿度、风向、风速、日照强度、湖水水位、水化学组成、淡水补给量等。以该长观站为依托,盐湖中心在扎布耶盐湖地区进行了多项科研工作,积累了丰富的地质矿产科研资料(刘喜方等,2007;齐文等,2007a;郑绵平等,2007a)。现在,该长观站还在运行当中,为多项科研工作提供了基础数据和科研平台,也提供了多项盐湖卤水蒸发结晶的数据(乜贞等,2001;张永生等,2001;齐文等,2007b)。

从20世纪80年代起,为了开发利用扎布耶盐湖矿产资源,进行了包括基础研究和开发工艺技术方面的多项科学研究。针对扎布耶碳酸盐型盐湖卤水,前人做了一些室内等温蒸发实验,但都是在同一温度下进行的研究,没有进行不同温度的对比研究(杨建元等,1996;张永生等,2005;郑绵平等,2007b)。本文通过15℃和25℃等温蒸发实验,来对比研究卤水中元素的富集规律和矿物的析出路线。从而为合理开发利用扎布耶盐湖钾盐、硼砂和碳酸锂资源提供实验数据与技术基础。在不同温度下,考查卤水中各有用元素的析出规律,设法分离提取,是制定资源开发工艺路线的基础,这将对扎布耶盐湖资源的综合利用具有积极的意义。

注:本文为中国地质科学院矿产资源研究所基金项目(编号K0722和K0918)及中国地质科学院基金项目(编号C0903)资助成果。

收稿日期:2009-04-27;改回日期:2009-12-30;责任编辑:周健。

作者简介:乜贞,男,1972年生。高级工程师,研究方向:盐湖资源综合利用,现就职于中国地质科学院矿产资源研究所。电话:010-68992231;Email: nieezhen518@163.com。

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

1 实验过程

本实验用卤水分别于5月和10月取自扎布耶盐湖。卤水主要化学组成见表1。扎布耶盐湖湖水温度在1月可低至－15℃，而在夏季可达到25℃(齐文等，2007a)。因此，本实验分别用春季和秋季卤水进行15℃和25℃等温蒸发实验，实验温度取值在扎布耶现场卤水温度范围内，可以体现出卤水在蒸发过程中的元素的富集规律和矿物的析出特征。

表1 扎布耶盐湖卤水主要化学组成

Table 1 The main chemical composition of Zabuye salt lake brines

样号	化学组成(g/L)							说明
	Na^+	K^+	Li^+	Cl^-	SO_4^{2-}	B_2O_3	CO_3^{2-}	
$L0_{15}$	122.5	48.1	1.17	181.3	13.1	10.3	33.6	春季卤水
$L0_{25}$	129.6	40.9	1.05	156.2	38.6	11.0	44.2	秋季卤水

本卤水等温蒸发实验在恒温箱中进行，白炽灯作热源，水银接触式温度计控制蒸发温度(15±1℃和25±1℃)，排风扇间断排风。将卤水置于玻璃蒸发皿中，然后分别于15±1℃和25±1℃恒温控制箱中进行蒸发实验。每日3次定时取出新析出的固样进行镜下鉴定，至有新固相生成时即分离固液相，并分别测定其化学组成(张永生等，2005；郑绵平等，2007b)。液、固相样品由国家地质测试中心进行分析测试，盐矿由中国地质科学院盐湖中心鉴定(偏光显微镜，BX51-P，OLYMPUS)。

本实验采用的分析方法是(中国科学院青海盐湖研究所分析室，1988)：K^+、Li^+、Na^+：原子吸收分光光度法(原子吸收分光光度计，WFX-120，北京瑞利分析仪器公司)；Cl^-：硝酸银容量法；SO_4^{2-}：硫酸钡重量法；B_2O_3、CO_3^{2-}：甘露醇容量法。

2 矿物析出规律

通过在15℃和25℃两个温度进行等温蒸发实验，分别得到了两个过程的卤水中盐类矿物结晶析出过程，文中所涉及的盐类矿物见表2。

图1是扎布耶盐湖秋季卤水25℃等温蒸发路线图，用Na^+、K^+//Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}－H_2O五元水盐体系25℃介稳相图来描述卤水蒸发路线(房春晖等，1991)，图2是春季卤水15℃等温蒸发路线图。扎布耶盐湖春季卤水原始组成与秋季卤水不同，其体系组成点位于相图的钾石盐区，因此，在15℃等温蒸发过程中钾石盐析出较早。因为没有合适的水盐体系相图，在本文中采用了Na^+、K^+//Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}－H_2O五元体系25℃介稳相图，这相当于是对扎布耶复杂的Li^+、Na^+、K^+//Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、$B_4O_7^{2-}$、HCO_3^-－H_2O八元体系的简化，因此，在五元相图上无法判断碳酸锂和硼砂的析出次序，对15℃等温蒸发过程中的析盐次序的判断也存在偏差。本文实验过程中的盐类矿物析出次序及组合较为复杂，详细见表3。在25℃等温蒸发过程中，盐类矿物的首次析出顺序为石盐、钾芒硝、碳酸锂、天然碱、水碱、钾石盐、硼砂；而在15℃时为石盐、钾石盐、天然碱、硼砂、碳酸锂、水碱、泡碱、钾芒硝。

表2 本文盐湖卤水蒸发过程中有关盐类矿物一览表

Table 2 Salt minerals during brine evaporation in this paper

英文缩写	英文名称	矿物名称	化学分子式
H	Halite	石盐	NaCl
Zb	Zabuyelite	扎布耶石	Li_2CO_3
Sy	Sylvite	钾石盐	KCl
Ap	Aphthitalite	钾芒硝	$K_3Na(SO_4)_2$
Then	Thenardite	无水芒硝	Na_2SO_4
Bu	Burkeite	碳钠矾	$Na_6CO_3(SO_4)_2$
Ha	Hanksite	碳钾钠矾	$Na_{22}K(SO_4)_9(CO_3)_2Cl$
Sch	Sodium Carbonate Heptahydrate		$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$
No	Northupite	氯碳钠镁石	$Na_3Mg(CO_3)_2Cl$
Th	Thermonatrite	水碱	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$
Tr	Trona	天然碱	$Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$
Nt	Natron	泡碱	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$
Bo	Borax	硼砂	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
M	Mirabilite	芒硝	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
Bis	Bischofite	水氯镁石	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Bl	Bloedite	白钠镁矾	$Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$
Car	Carnallite	光卤石	$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Eps	Epsomite	泻利盐	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$
Hex	Hexahydrite	六水泻盐	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$
Pic	Picromerite	软钾镁矾	$K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$
Ka	Kainite	钾盐镁矾	$KCl \cdot MgSO_4 \cdot 2.75H_2O$
Ls	Lithium Sulfate Monohydrate	一水硫酸锂	$Li_2SO_4 \cdot H_2O$

在本实验中，锂的矿物主要是碳酸锂，即扎布耶石。图3表示了15℃和25℃等温蒸发过程中扎布耶石随卤水成卤率的变化关系。在两个温度蒸发实验中，从中期开始就有扎布耶石析出，然后锂矿物的析出贯穿随后的蒸发过程。期间，混盐中扎布耶石的品位比较低，25℃时只达到4%，而15℃时更低，只有2%。在25℃实验中，很明显出现两次碳酸锂析出高峰，而在15℃时没有明显析出高峰。因此，在较高的温度可以得到高品位的碳酸锂混盐，而且其析出也更集中。

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

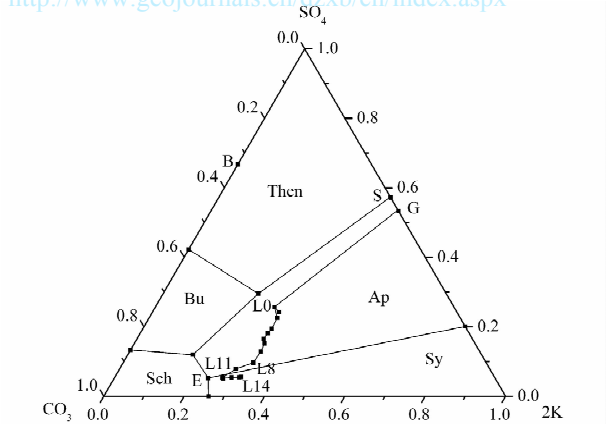

图 1　扎布耶盐湖秋季卤水 25℃等温蒸发结晶路线

Fig. 1　Crystallization path of the autumn brine in Zabuye salt lake at 25℃

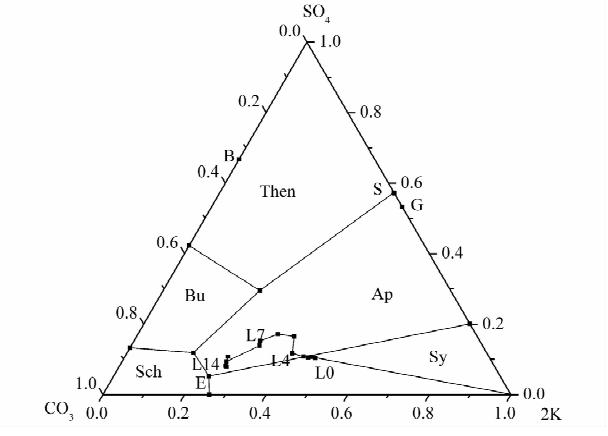

图 2　扎布耶盐湖春季卤水 15℃等温蒸发结晶路线

Fig. 2　Crystallization path of the spring brine in Zabuye salt lake at 15℃

在两个实验的蒸发过程中,卤水中钾离子于实验前期就达到饱和状态,然后钾盐持续析出,直到实验结束,只是在不同温度下钾芒硝和钾石盐的析出顺序不一样。25℃时,在蒸发的前期至中期,主要析出钾芒硝,到了后期主要析出钾石盐并伴有少量的

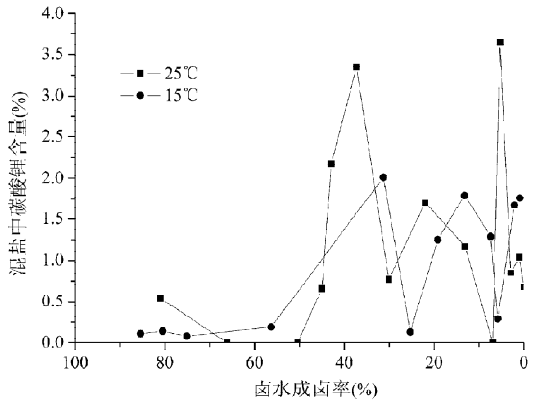

图 3　等温蒸发过程中锂矿物析出规律

Fig. 3　Content of lithium carbonate in solid phases during isothermal evaporation

钾芒硝。而 15℃时,在蒸发的前期至中后期,主要以钾石盐的形式析出,到了后期钾芒硝开始析出,此时,钾石盐和钾芒硝共同析出。在钾盐析出的过程中,钾混盐的品位都较高,达到 20%～35%,通过适当控制,可获得很好的钾混盐产品(图 4)。

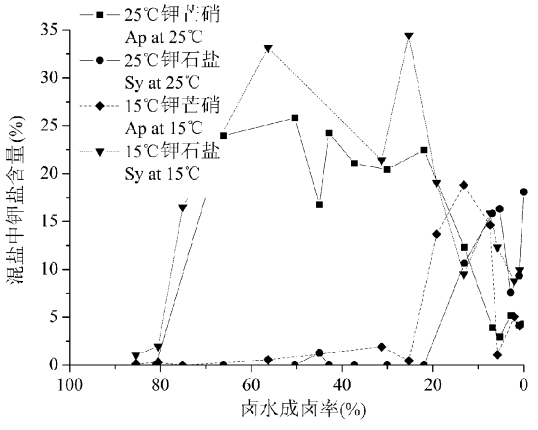

图 4　等温蒸发过程中钾盐析出规律

Fig. 4　Content of potash in solid phases during isothermal evaporation

从图 5 可以看出,在两个温度实验中硼都得到

表 3　等温蒸发过程中盐类矿物析出组合

Table 3　Salt minerals during isothermal evaporation of Zabuye salt lake brine

实验温度(℃)	15	25
盐类矿物次序及组合	H	H
	H+ Sy	H+ Ap
	H+ Sy+ Tr	H+ Ap+ Zb
	H+ Sy+ Tr+ Bo	H+ Ap+ Zb+ Tr
	H+ Sy+ Tr+ Bo+ Zb	H+ Ap+ Zb+ Tr+ Th
	H+ Sy+ Tr+ Bo+ Zb+ Th+ Nt	H+ Ap+ Zb+ Tr+ Th+ Sy
	H+ Sy+ Bo+ Zb+ Th+ Nt+ Ap	H+ Ap+ Zb+ Tr+ Th+ Sy+ Bo
	H+ Sy+ Bo+ Zb+ Nt+ Ap	H+ Ap+ Zb+ Th+ Sy+ Bo

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

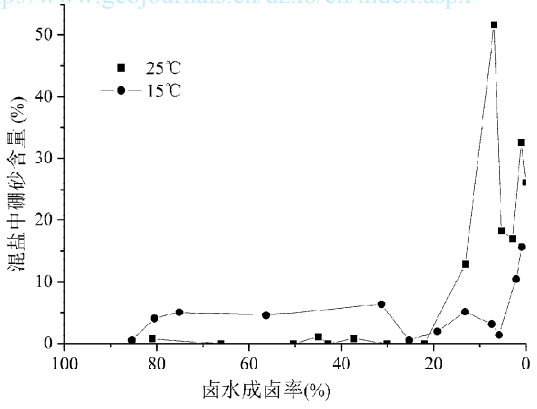

图 5 等温蒸发过程中硼砂析出规律

Fig. 5 Content of borax in solid phases during isothermal evaporation

了很好的富集。15℃等温蒸发时,在实验中前期只有少量硼砂析出,到了蒸发尾期才有大量的硼砂析出。在25℃蒸发过程中,硼砂于实验中前期几乎不析出,而在蒸发后期集中析出,品位达到50%。因此,扎布耶盐湖卤水于15~25℃蒸发中后期的尾卤可用于提取硼砂产品,而且对照两个实验温度,高温更适合硼砂的提取,可得到高品位硼砂产品。

3 与其他碳酸盐型锂盐湖卤水析盐比较

国外从碳酸盐型盐湖卤水中提取锂盐产品的只有美国的西尔斯盐湖。西尔斯湖卤水组成见表4,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(Teeple,1929)。与西尔斯盐湖卤水的蒸发析盐过程相比,扎布耶湖卤水的总体析盐过程相似,只是没有出现复盐碳钠矾和碳钾钠矾,而以单盐为主。虽然是碳酸盐型锂盐湖,西尔斯盐湖卤水中的锂含量较低,因此没有析出碳酸锂矿物的报道,这是与扎布耶盐湖卤水的最大不同。针对西尔斯盐湖卤水,Teeple博士在20~100℃ 5个选定温度下,系统进行了 Na^+、K^+ // Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、$B_4O_7^{2-}$、HCO_3^- - H_2O 子体系的25个四元、6个五元、一个六元体系相关系研究,获得了相图数据,在此基础上确立了西尔斯湖的卤水资源综合利用工艺流程。这些体系的溶解度数据和研究方法对于开发国内碳酸盐型锂盐湖具有很好的借鉴意义。

在我国,碳酸盐型盐湖主要分布在内蒙古,其次是西藏高原,新疆也有少量分布。但是碳酸盐型锂盐湖主要分布在西藏班公错-怒江构造带以南地区,除了扎布耶盐湖,其他著名的有班戈湖、杜佳里湖、当雄错等。赵元艺等(2005)对比了扎布耶盐湖和班戈湖卤水异同,认为两湖同属碳酸盐型锂盐湖,但扎布耶湖为高锂低镁型,班戈湖为高镁低锂型,班戈湖卤水蒸发的第一阶段析出镁盐,而后卤水中锂浓度高于镁,镁浓度逐渐趋于零。因此,与扎布耶湖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。

4 与国内外其他锂盐湖卤水蒸发析盐比较

我国青藏高原还发育有许多硫酸盐型锂盐湖,其中已经进行了较多研究的是东、西台吉乃尔盐湖和一里坪盐湖,都位于柴达木盆地中部,水化学类型属于硫酸镁亚型,其卤水化学组成见表5。张宝全等(1994a,1994b)和李俊德等(2008)分别进行了东台吉乃尔盐湖卤水蒸发实验和一里坪卤水自然蒸发实验研究,得到蒸发过程中的矿物析出规律(表6)。与扎布耶盐湖卤水有点相似的是,这两个盐湖卤水在低温蒸发过程中都析出钾石盐,但是在较高温度下得到多种钾盐矿物,过程中没有得到硼矿物。扎布耶盐湖卤水中锂的富集空间很小,容易析出,而在硫酸盐盐湖卤水中可以得到很高浓度的富锂卤水。张宝全等(1994a,1994b)在进行东台吉乃尔盐湖卤水25℃蒸发时,实验前期一直没有锂盐析出,于卤水蒸失率达到86.7%时得到品位30%的一水硫酸锂混盐。李俊德等(2008)在一里坪卤水蒸发析盐过程中没有得到锂盐,所获尾卤中的锂离子含量为0.48%。

在国外,智利的阿塔卡玛盐湖也属于硫酸镁亚型锂盐湖,但是其卤水的Mg/Li只有6.4,比我国的东台吉乃尔盐湖(Mg/Li=33.8)和一里坪盐湖(Mg/Li=89.5)要低。其卤水在夏季蒸发时会析出 $LiKSO_4$,冬季蒸发时锂在最后阶段才以一水硫酸锂形式析出(Luis et al.,1983)。与我国硫酸镁亚型盐湖卤水的蒸发富集行为有差别,但低温时有利于锂

表 4 美国西尔斯盐湖卤水化学组成

Table 4 Composition of Searles Lake brine in America

卤水密度	含量(%)							
($\times10^{-3}$ kg/m^3)	NaCl	Na_2SO_4	KCl	Na_2CO_3	$Na_2B_4O_7$	Na_3PO4	NaBr	LiCl
1.300	16.50	6.82	4.82	4.80	1.51	0.155	0.109	0.021

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

表 5　国内一些锂盐湖卤水主要化学组成

Table 5　Main chemical composition of some lithium bearing salt lake brines in China

盐湖	卤水密度	化学组成(%)									数据来源
	($\times10^{-3}$ kg/m^3)	Na^+	K^+	Li^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	B_2O_3	CO_3^{2-}	
扎布耶	1.295	10.01	3.16	0.08			12.06	2.98	0.84	3.41	郑绵平等,2007b
一里坪	1.221	7.04	0.91	0.02	0.01	1.79	15.84	1.65	0.08		李俊德等,2008
东台	1.266	7.24	1.16	0.06		2.03	13.62	6.55	0.08		张宝全等,1994a,1994b
西台	1.226	8.42	0.56	0.02	0.02	1.11	15.34	1.96	0.16		郑喜玉等,2002

表 6　卤水蒸发过程中盐类矿物析出组合

Table 6　Salt minerals during brine evaporation

盐湖	东台吉乃尔		一里坪
卤水蒸发方式	25℃等温蒸发	冻硝后 25℃等温蒸发	自然蒸发
盐类矿物次序及组合	H H+ Pic H+ Pic+ Eps H+ Eps+ Sy H+ Hex+ Ka H+ Hex+ Ka+ Car H+ Car+ Ls+ Bis	M H H+ Sy H+ Sy+ Eps H+ Hex+ Car	H H+ Sy H+ Sy+ Eps+ Car H+ Eps+ Car H+ Bis

的富集这一趋势是一致的。通过盐田晒制,可以在阿塔卡玛盐湖湖区得到锂离子含量为 4.3%～6%的富锂卤水,作为工厂原料来提取锂盐产品(黄维农等,2008)。

扎布耶盐湖卤水水化学类型为碳酸盐型,卤水中大量存在的 CO_3^{2-} 限定了 Ca^{2+}、Mg^{2+} 在卤水中存在的浓度范围,从而造就了扎布耶卤水很小的镁锂比,但是又制约着 Li^+ 在卤水中的富集(乜贞等,2005)。在本文实验过程,卤水中锂离子富集空间很小,在蒸发实验的大部分阶段都有碳酸锂析出,卤水中 Li^+ 的富集规律见图 6 所示。相比较而言,液相中的 Li^+ 于 15℃比 25℃能富集到更高的浓度,但是最高也只能达到0.16%,远低于硫酸盐型锂盐湖所能富集到的 Li^+ 浓度。

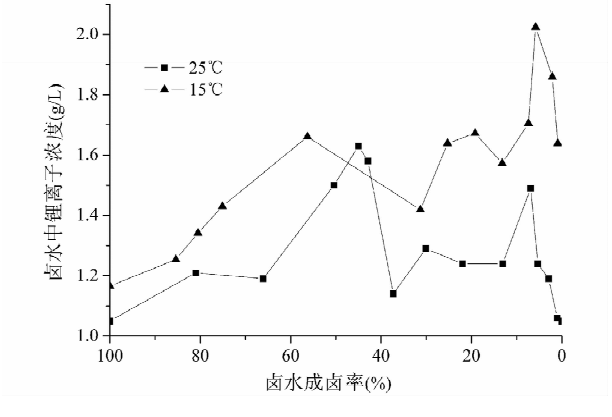

图 6　等温蒸发过程中卤水中锂富集规律

Fig. 6　Content of lithium in brine during isothermal evaporation

5　讨论与结论

(1)本文实验过程中的盐类矿物析出次序及组合较为复杂,与 Na^+、K^+//Cl^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}－H_2O 五元水盐体系 25℃介稳相图有所偏离。在 25℃等温蒸发过程中,盐类矿物的首次析出顺序为石盐、钾芒硝、碳酸锂、天然碱、水碱、钾石盐、硼砂;而在 15℃时为石盐、钾石盐、天然碱、硼砂、碳酸锂、水碱、泡碱、钾芒硝。

(2)在本文实验中,碳酸锂与钾盐基本同时析出,存在这两种盐的分离问题。但是在较低温度时,钾盐先于碳酸锂析出。因此,可以通过在低温蒸发扎布耶盐湖卤水来分离钾盐和锂盐。低温时钾的矿物主要为钾石盐,高温时主要为钾芒硝,高温有利于获得高品位的碳酸锂混盐。硼砂在蒸发后期集中析出,且于较高温度时可得品位达 50%的硼砂产品。

(3)扎布耶盐湖卤水水化学类型为碳酸盐型,低温有利于卤水中锂的富集,但是卤水中锂离子富集空间很小,所能富集的浓度远低于硫酸盐型锂盐湖卤水。

(4)在等温蒸发过程中,钾以钾芒硝和钾石盐两种矿物析出。在两个温度蒸发过程中,钾矿物的品位都比较高,其含量可高达 20%～35%。因此,可从扎布耶盐湖卤水中制取高品位钾混盐,进一步开发

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

形成钾盐产品。

致谢:中国科学院青海盐湖研究所宋彭生研究员和未具名审稿人对文稿提出了宝贵建议,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

房春晖,牛自得,刘子琴,陈敬清. 1991. Na^+,K^+// Cl^-,SO_4^{2-},CO_3^{2-}—H_2O 五元体系 25℃介稳相图的研究. 化学学报,49:1062~1070.

黄维农,孙之南,王学魁,乜贞,卜令忠. 2008. 盐湖提锂研究和工业化进展. 现代化工,28(2):14~19.

李俊德,石天成,王英孝,吴蝉,付建龙. 2008. 一里坪矿区卤水自然蒸发试验研究. 盐湖研究,16(4):32~36.

刘喜方,郑绵平,齐文. 2007. 西藏扎布耶盐湖超大型 B、Li 矿床成矿物质来源研究. 地质学报,81(12):1709~1715.

乜贞,郑绵平. 2001. 西藏扎布耶盐湖夏季卤水盐田晒制研究. 地球学报,22(3):271~275.

乜贞,张永生,卜令忠,黄维农,郑绵平. 2005. 西藏扎布耶盐湖卤水冬季制卤试验研究. 地质通报,24(4):386~390.

齐文,郑绵平. 2007a. 西藏盐湖卤水蒸发速率的实验与计算. 地质学报,81(12):1727~1733.

齐文,郑绵平. 2007b. 西藏扎布耶盐湖卤水演化的 Pitzer 模型模拟. 地质学报,81(12):1734~1741.

杨建元,张勇,程温莹,蒋秀川. 1996. 西藏扎布耶盐湖冬季卤水 25℃等温蒸发研究. 海湖盐与化工,25(5):21~24.

张宝全,刘铸唐,符廷进,王萍. 1994a. 东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究(I)——25℃等温蒸发实验. 盐湖研究,2(2):57~60.

张宝全,刘铸唐,符廷进,王萍,张军,李永华. 1994b. 东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究(Ⅱ)——冬夏季卤水蒸发实验. 盐湖研究,2(3):27~34.

张永生,乜贞,卜令忠,郑绵平. 2001. 富锂碳酸盐型卤水在系列冷冻温度下的组成演变. 海湖盐与化工,30(1):3~6.

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. 海湖盐与化工,34(4):1~5.

赵元艺. 2003. 中国盐湖锂资源及其开发进程. 矿床地质,22(1):99~105.

赵元艺,郑绵平,卜令忠,乜贞,刘喜方. 2005. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究. 海湖盐与化工,34(2):1~6.

郑绵平,刘文采. 1987. 新的锂矿物——扎布耶石. 矿物学报,7(3):221~227.

郑绵平,向军,魏新俊,郑元. 1989. 青藏高原盐湖. 北京:北京科学技术出版社.

郑绵平. 1999. 论盐湖学. 地球学报,20(4):395~401.

郑绵平,袁鹤然,刘俊英,李延河,马志邦,孙青. 2007a. 西藏高原扎布耶盐湖 128 ka 以来沉积特征与古环境记录. 地质学报,81(12):1608~1617.

郑绵平,邓月金,乜贞,卜令忠,史世云. 2007b. 西藏扎布耶盐湖冬季卤水 25℃等温蒸发研究. 地质学报,81(12):1742~1749.

郑喜玉,张明刚,徐昶,李秉孝. 2002. 中国盐湖志. 北京:科学出版社.

中国科学院青海盐湖研究所分析室. 1988. 卤水和盐的分析方法. 第二版,北京:科学出版社.

Luis V E, Nancy P F. 1983. Study of the phase chemistry of the Salar de Atacama brine. Sixth International Symposium on Salt, Vol Ⅱ: 345~366.

Teeple J E. 1929. The Industrial Development of Searles Lake Brines. New York: The Chemical Catalog Company, Inc.

Phase Chemistry Study on Brine from the Zabuye Carbonate-Type Salt Lake in Tibet

NIE Zhen[1,2,3], BU Lingzhong[1,2,3], ZHENG Mianping[1,2,3], ZHANG Yongsheng[1,2,3]

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *R & D Center for Saline Lakes and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

3) *Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing*, 100037

Abstract

Salt lakes are well developed in China with all hydro-chemical types. Zabuye carbonate-type Salt lake, located in the interior of the Tibetan Plateau, is just at the late period of evolution and is a coexistence deposit of solid and liquid. Therefore, it is of great economic value. Isothermal evaporation experiment was conducted on the brines from the Zabuye Salt Lake at 15℃ and 25℃ in order to understand the enrichment behavior of each element and crystallization paths of salt minerals. Based on the comparison study on concentration rule and crystallization paths of the worldwide carbonate-type and sulfate-type lithium salt lakes, it is concluded that the brine of Zabuye Salt Lake has a unique crystallization path during evaporation. The experiments also suggests that low evaporation temperature is appropriate for lithium concentration while high temperature for boron enrichment. Zabuyelite (Li_2CO_3) and potash can precipitate together during evaporation. The potassium mineral is sylvite in low temperature and glaserite in high temperature. Meanwhile high temperature is in favor of the formation of high-grade lithium carbonate.

Key words: Zabuye salt lake; carbonate-type; isothermal evaporation; salt minerals; crystallization law