西藏扎北盐湖夏季卤水自然蒸发实验研究

高 峰^{1,2,3},郑绵平^{1,2,3},也 贞^{1,2,3},刘建华^{1,2,3},宋彭生^{3,4}

(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研究重点开放实验室,北京 100037;

4. 中国科学院青海盐湖研究所,青海 西宁 810008)

摘 要:西藏扎北盐湖位于藏北高原腹地,其卤水类型属硫酸钠亚型,富含 Li、K、B 等元素。为综合利用该 湖的液态矿产资源,于西藏当地对该盐湖富锂卤水进行自然蒸发实验。实验以 Na⁺,Mg²⁺//Cl⁻,SO₄²⁻H₂O 四元体系 15 ℃等温相图及 K⁺,Mg²⁺//SO₄²⁻H₂O 三元体系 15 ℃介稳相图为参考,绘制了扎北盐湖夏季卤水 在秋季自然蒸发结晶路线图,研究了卤水在蒸发过程中液相的化学组成变化以及其蒸发析盐规律。结果表 明,在蒸发过程早期(成卤率 23.9%),锂浓度达 1.2 g/L 时,锂开始以 Na₃LiSO₄ • 3H₂O 等复盐形式大量分 散析出;硼在整个蒸发过程中以硼砂(Na₂B₄O₇ • 10H₂O)等形式分散析出难于富集;钾以钾镁矾(K₂SO₄ • MgSO₄ • 6H₂O)和钾石盐(KCl)形式蒸发浓缩的后期大量析出。实验为扎北盐湖的盐田工程设计及制卤工 艺操作提供了必要的基础数据,也可为我国西藏硫酸钠亚型盐湖卤水的综合利用提供一定参考。

关键词:扎北盐湖;硫酸钠亚型;卤水;自然蒸发;相化学中图分类号::P578.73;0642.4
文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2011)04-0021-07

1 引 言

我国具有丰富的盐湖资源,盐湖卤水中含 有丰富的 K、Na、Mg、Li、B 等矿产资源和生物资 源^[1-2]。盐田工艺在盐湖矿产资源利用中有着 良好的经济效应与环境效应,全球盐湖卤水矿 产资源的开采方式基本都是卤水盐田蒸发析盐 后进行化工处理^[3-4]。因而卤水蒸发实验是盐 田工艺以及盐湖矿产资源综合开发利用的基 础,卤水蒸发实验研究也成为盐湖学的重点研 究领域^[5],国内外已有许多盐湖卤水蒸发结晶 行为的研究报道^[6-8]。

扎北盐湖位于我国藏北高原腹地西部,位 于阿里地区改则县境内,其卤水中富含锂、钾、 锄、铯、硼、溴等矿产资源^[9-10],初步估算其锂 资源量约为4.5×10⁵t(以LiCl计)。湖面面 积约86km²,湖水深度为0.3~0.5m,湖面海 拔4490m。湖区处于藏北高原寒冷干旱气候 区,年平均气温0℃左右,年降水量150mm,日 照时间长,风日多,风速大,一般风速 5~7m/s^[11]。当地气候条件适宜于发展盐田 工艺。为了使该盐湖丰富的液态矿产资源得到 合理的开发利用,本文对扎北盐湖夏季卤水进 行自然蒸发实验,以获得自然条件下蒸发过程 中的扎北盐湖卤水化学组成变化、析盐顺序及 卤水中各元素的富集规律和特异变化,为扎北 盐湖卤水的开发利用提供可靠的参数,进一步 为我国硫酸钠亚型盐湖卤水资源开发利用提供 参考。

收稿日期:2011-07-25

基金项目:中国地质调查局大地调项目(1212010011810)及中国地质科学院重点实验室项目(C0908)联合资助 作者简介:高峰(1978-),男,博士研究生,主要研究方向为矿产资源普查与勘探。

通信作者:郑绵平。E - mail: zmp@ public. bta. net. cn。

22

2 实验部分

2.1 原料卤水

实验所用卤水为2010年7月取自西藏扎

北盐湖东侧的表层湖水。该卤水 pH = 9.19, 密度为 1.05 g/cm³ (15 ℃),盐度为 6.2%, 其主要成分见表 1。根据卤水的化学分类^[12], 扎北盐湖卤水为硫酸钠亚型卤水,将体系简化 为 Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻, SO₄²⁻ 五元体系, 原始卤水组成点 (0 点) 位于芒硝相区。

	表1	原料卤水的主要化学组分
Table 1	Main	chemical composition of original brin

离子/	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ² +	Cl⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ^{2 -}	B ₄ O ₇ ^{2 -}
(g/L)	0. 27	16. 25	3. 00	0. 03	1. 24	14. 62	21. 26	1. 69	2. 92
化合物/	LiCl	Na ₂ SO ₄	NaCl	KCl	CaCO ₃	MgCO ₃	MgSO ₄	Na ₂ B ₄ O ₇	总量
(g/L)	1. 65	28. 67	17. 70	5. 72	0.07	2.31	2. 35	4. 23	77.6

2.2 实验方法及条件

于 2010 年 7 月 12 日,称取 40 kg 原料卤水 置于内衬聚乙烯塑料布(厚 0.2 mm)的圆形蒸 发盘内(φ90 cm × 20 cm),在中国地质科学院 矿产资源所西藏自治区那曲地区尼玛县当雄错 野外观测站进行自然蒸发(观测站距扎北湖区 约 150 km,气候条件与扎北盐湖相似;气压 596 hPa,年均湿度 21%,年均气温 3 ℃,日照充 足,风日多、风速大。

将卤水放入蒸发盘后,每天定时对所蒸发 卤水的 pH 值、盐度、水温、密度、体积及大气气 温、湿度等气象条件进行观测,蒸发期间当有新 固相结晶析出时,进行固液分离,称重计量并分 别采集固、液样品。卤水液样每次所取控制小 于卤水总质量的5%,并对所取液相稀释保存。 对所取固相进行阴干恒重处理。固、液样品集 中进行分析测试,分析项目为 Li⁺、Na⁺、K⁺、 Rb⁺、Cs⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、OH⁻、 CO₃²⁻、SO₄²⁻、B₄O₇²⁻等;并对固相盐样用偏光显 微镜进行盐矿鉴定。

2.3 分析与鉴定方法^[13-14]

 Li^{+} 、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺采用原子吸收分 光光度法测定; Cl⁻采用硝酸银容量法测定; SO₄²⁻采用重量法测定; B₄O₇⁻采用甘露醇容量 法测定; CO₃²⁻采用酸碱滴定法测定。

3 实验结果

扎北盐湖夏季卤水自然蒸发实验共进行了 59 d,卤水蒸发至氯化钾饱和,析出一水硫酸 锂,实验结束。自然蒸发过程中卤水存留液相 组成见表2,析出固相见表3。在表3固相化学 分析结果中有少量在固液分离时由盐样吸附、 夹带卤水阴干后所形成的盐类,本文在配盐计 算中对此部分夹带卤水所造成的影响予以扣 除,配盐计算参照相关文献^[15]。

4 讨 论

4.1 蒸发结晶路线和固相的析出

扎北盐湖夏季卤水在自然条件下蒸发首先 析出硼砂,然后是芒硝,蒸发结晶过程基本按 Na⁺,Mg²⁺//Cl⁻,SO₄²⁻H₂O四元交互体系15 ℃ 稳定相图^[16]和K⁺,Mg²⁺//SO₄²⁻H₂O三元体系 15 ℃介稳相图^[17]所预示结晶线路进行。

由图 1、2 可见,扎北卤水自然蒸发的整个 蒸发过程主要分为芒硝饱和析出阶段和氯化钠 饱和析出阶段。蒸发失水阶段首先析出芒硝, 从 L₂ 到 L₅,卤水在此过程中芒硝一直处于饱 和状态,形成无水芒硝结晶析出过程;当卤水蒸 发到 L₅点时,氯化钠开始饱和析出。直至卤水

第4期

表2 扎北盐湖夏季卤水室外蒸发液相组成变化

	There 2 chemical composition of the inquite prace tormed natural evaporation of Zaber out take 5 summer prince														
编 号	浓缩 倍数	相对密度/ (g/cm ³)			化	学分析约	吉果/(g		Na ⁺ , //0 SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺ cl ⁻ , -H ₂ O	$2Cl^{-} + 2K^{+} + Mg^{2+} = 1M$				
			Li +	Na ⁺	K^+	Mg^{2+}	Cl -	SO_4^2 -	CO_{3}^{2}	$B_4 O_7^2$ -	$J_{\rm Mg^{2}+}$	$J_{so_4^2}$ -	$J_{2K^{+}}$	$J_{\rm Mg^{2}+}$	$J_{\rm 2Cl}$ -
L_0	1.0	1.051	0.27	16.25	3.00	1.24	14.6	21.26	0.50	3.26	13.3	56.85	0. 22	0.15	0.63
L_1	2.7	1.136	0.77	43.63	7.85	2.90	39.0	59.70	0.53	9.77	9.74	55.77	0.21	0.13	0.66
L_2	4.2	1.159	1.22	62.38	12.15	4.36	62.1	72.41	3.77	9.16	10.36	40.28	0.25	0.14	0.61
L_3	4.7	1.181	1.18	85.93	13.63	2.19	73.28	86. 85	5.10	10.09	4.18	35.16	0.26	0.07	0.67
L_4	7.0	1.196	1.64	90.83	21.85	2.73	103.46	84.91	4.65	10.09	10. 58	31.49	0.36	0.07	0.57
L_5	8.2	1.225	2.06	115.47	24.05	3.17	129.32	98.08	4.50	11.06	20.05	26.49	0.35	0.07	0.58
L_6	11.1	1.236	2.07	126. 54	34.69	3.02	159. 50	108.21	2.40	13.58	29.34	29.36	0.41	0.06	0.53
L_7	13.8	1. 294	2.20	129. 72	44.04	3.67	166. 39	115.82	2.40	16. 11	35.85	29.90	0.45	0.06	0.49
L_8	24. 2	1.310	2.23	119. 53	47.49	4.96	161.22	112.90	2.85	19. 79	40.01	31.02	0.47	0.08	0.45
L_9	32.1	1.317	2.77	119. 44	47.80	5.59	168.12	109.61	3.68	21.44	43.84	29.09	0.47	0.09	0.44
L_{10}	45.2	1. 294	2.92	114. 51	53.24	7.07	159. 50	105. 29	3.75	24.84	47.3	30. 19	0.5	0.11	0.4
L_{11}	91.3	1.301	3.87	89.04	64.14	10. 75	185.36	37.09	4.13	40. 27	65.97	17.37	0.66	0.18	0.16

Table 2 chemical composition of the liquid phase formed natural evaporation of Zabei Salt Lake's summer brines

注:浓缩倍数为卤水质量浓缩倍数;本文对 B 的赋存形式以 $B_4 O_7^{2-}$ 计。

表3 扎北盐湖夏季卤水室外蒸发过程中析出盐类固相组成

Table 3	Chemical composition	on of the solid	phases p	recipitated by	⁷ natural eva	poration of	Zabei Salt	Lake'	s summer brines
---------	----------------------	-----------------	----------	----------------	--------------------------	-------------	------------	-------	-----------------

编	a 化学分析结果/%										配盐结果/%								
号	Li +	Na ⁺	K^+	Mg^{2} +	Ca ^{2 +}	Cl -	SO_4^{2-}	CO_3^2 -	$B_4 O_7^2$ -	Db1	Bor	Lan	Mir	На	Gla	Ast	Leo	Sy	总量
S_2	0.04	30. 37	0.49	0.07	0.02	2.09	62.34	0.75	4.43	-	5.71	1.05	91.66	-	-	-	-	-	98.41
S_3	0.14	9.71	1.36	4.16	0.04	7.26	8.05	10.44	8.87	9.49	20. 59	54. 57	13. 81	-	-	-	-	-	98.46
\mathbf{S}_4	0.22	19. 22	1.98	3.57	0.03	11.16	24.49	8.48	11.15	10. 54	17.98	15.44	36.73	15.69	-	-	-	-	96.38
S_5	0. 29	18. 19	2.59	2.97	0.51	15.67	17.54	3.75	12. 52	14. 89	21.87	14.41	23. 18	23.68	-	-	-	-	98.02
S_6	0. 99	25.57	1.75	1.27	0.11	24. 93	29.56	2.70	2.57	42.69	3.72	4.24	-	25.06	16. 61	-	-	-	92.33
S_7	0.70	28.32	1.04	0.19	0.07	32.11	20.20	1.05	0.84	31.99	1. 29	-	-	47.38	14.01	2.45	-	-	97.12
S_8	0.41	26. 89	5.70	0.39	0.05	33.03	22.43	1.12	2.18	17.17	3.06	-	-	40. 93	8.06	7.81	21.56	-	98. 59
S_9	0.18	26.07	7.89	1.71	0.02	33. 87	22.06	1. 39	2.65	7.40	3.58	-	-	40.04	-	17.13	30.65	-	98.80
\mathbf{S}_{10}	0.54	26.4	5.9	0.46	0.01	30.67	24.49	1.05	1.58	22. 89	2.25	-	-	37.36	-	8.50	27.88	-	98.87
\mathbf{S}_{11}	0.61	24. 33	8.34	0.72	0.01	27.12	31.16	1.36	2.09	24. 73	2.83	-	-	24.43	-	5.14	25.89	11. 12	94. 15
S_{12}	0.83	19.03	11.12	1.82	0.01	32. 39	17.87	1.50	6.69	35. 17	9.50	-	-	12.91	-	-	22.62	19.45	99.65

注: Db1 = Li₂SO₄ • 3Na₂SO₄ • 12H₂O; Bor = Na₂B₄O₇ • 10H₂O; Lan = MgCO₃ • 5H₂O; Mir = Na₂SO₄ • 12H₂O; Ha = NaCl; Gla = Na₂SO₄ • 3K₂SO₄ • 3K₂SO₄ • MgSO₄ • 4H₂O; Leo = K₂SO₄ • MgSO₄ • 4H₂O; Sy = KCl; 配盐结果未计钠 硼解石(NaCaB₅O₉ • 8H₂O) 等盐类矿物。

蒸干前,卤水在蒸发过程中氯化钠一直处于饱 和状态,组成点沿着氯化钠固相点与原始卤水 点连线的延线上并远离氯化钠固相点移动,形 成氯化钠结晶析出过程。







图2 K⁺,Mg²⁺//SO₄²-H₂O 三元体系 15 ℃介稳相 图和扎北卤水自然蒸发结晶路线

Fig. 2 Metastable equilibrium phase diagram of K * \backsim Mg $^{2+}$ //SO $_{4}^{2-}$ H2 O ternary system at 15 $^{\circ}C$

在芒硝饱和析出阶段,镁主要以五水碳镁 石($MgCO_3 \cdot 5H_2O$)形式集中于 $L_3 - L_6$ 区间。 而在氯化钠析出阶段,随着 Mg^{2+} 浓度降低与 K⁺浓度升高,从 $L_5 至 L_6$ 间形成钾芒硝结晶。 卤水蒸发至 L_6 点时,白钠镁矾开始大量析出, 并于 L₉点后开始大量析出钾镁矾,最后蒸干于 L_{12} 点形成氯化钠、钾镁矾与氯化钾共同结晶。 盐湖卤水结晶途径与 Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻、 SO²₄-H₂O 五元体系 15 ℃介稳相图相比^[15], 钾 芒硝相区明显变小, 某些零变量点的位置偏低, 致使白钠镁矾相区扩展, 并出现钾镁矾相区。 本文认为这主要是由于扎北盐湖卤水的化学组 成较 Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻, SO²₄-H₂O 五元水盐 体系复杂得多, 其碳酸根浓度较高, 碱性较强, 其中锂、硼含量高, 导致具有弱碳酸盐型卤水的 蒸发析盐特点^[18]。

硼在整个蒸发过程中以硼砂($Na_2B_4O_7$ ・ 10H₂O)形式全程析出,并大量集中于 L₂至 L₅的蒸发区间,此后随溶液中 Ca 的富集,L₅点开 始伴有少量钠硼解石 [$NaCaB_5O_9$ ・8H₂O]析 出。锂盐自卤水蒸发至 L₃点后开始析出,并自 L₆点后集中以锂复盐($Na_3Li(SO_4)_2$ ・6H₂O) 的形式析出,最后经 X 射线粉末衍射检测有少 量一水硫酸锂(Li_2SO_4 ・H₂O)析出。

综上所述,扎北盐湖卤水在秋季当地自然 蒸发过程中的析盐顺序如下:

硼砂; 芒硝 + 硼砂; 芒硝 + 硼砂 + 锂复盐; 五水碳镁石 + 芒硝 + 硼砂 + 锂复盐; 石盐 + 白钠镁矾 + 锂复盐 + 硼砂 + 钠硼解石; 石盐 + 白钠镁矾 + 锂复盐 + 钾芒硝 + 硼砂 + 钠硼解石; 石盐 + 钾镁矾 + 白钠镁矾 + 锂复盐 + 硼砂 + 钠硼解石; 石盐 + 钾镁矾 + 锂复盐 + 硼砂 + 钠硼解石; 石盐 + 钾镁矾 + 锂复盐 + 硼砂 + 小硫酸锂。

4.2 Li、Mg、K、B 在蒸发浓缩过程中的行为

根据表 1 可作出液相 Li^{+} 、 Mg^{2+} 、 K⁺、 $B_4 O_7^{2-}$ 浓度与卤水浓缩倍数的关系图 解(图3、图4)。如图3所示, Li^{+} 在原始 卤水浓缩至8.2倍之前,基本未析出,其 浓度随浓缩倍数成比增长,而当 Li^{+} 浓度 到2.06g/L时, Na_3Li (SO_4)₂·6H₂O开始 大量析出,且 Li^{+} 浓度随浓缩倍数增加缓慢 升高,最终蒸发所得液相 Li^{+} 浓度为3.87g/L。 Mg^{2+} 在初始浓缩阶段,其浓度随浓缩倍数成倍 增长,当液相浓缩至4.2 倍时,由于 Mg^{2+} 与 CO_3^{2-} 的富集,液相集中析出 $MgCO_3 \cdot 5H_2O$ 沉 淀,致使溶液中 Mg^{2+} 迅速降低至2.19 g/L。当 浓缩至8.2 倍后,液相逐步析出白钠镁矾和钾 镁矾。 Mg^{2+} 随液相浓缩其浓度增长减缓,液相 浓缩至91.3 倍时, Mg^{2+} 浓度为10.75 g/L。浓 缩过程中的初始 Mg/Li比为4.59,当浓缩13.8 倍时,Mg/Li比降至最低点仅为1.45,此后 Mg/Li比又缓慢升高,当浓缩至91.3 倍时,Mg/Li



图3 液相 Li⁺、Mg²⁺浓度及 Mg/Li 比与浓缩倍数 关系

Fig. 3 Relation of the concentration of Li $^{+}$, Mg²⁺ and the ratio of Mg/Li in the liquid phase to the ratio of weight concentration

 K^{+} 在原始卤水浓缩至 13.8 倍之前,基本 未析出(图4),浓度随浓缩倍数成比增长,K⁺ 浓度达 44.04 g/L;此后随着 Na₂SO₄ • 3K₂SO₄ 与 K₂SO₄ • MgSO₄ • 4H₂O 的大量析出,K⁺浓度 随浓缩倍数增加缓慢升高,最终蒸发所得液相 K⁺浓度为 64.14 g/L。

B(以 B₄O₇²⁻ 计) 在初始浓缩阶段就开始大量 析出,在液相浓缩至 2.7 倍后,Na₂B₄O₇ • 10H₂O开 始大量析出,液相继续浓缩但 B 浓度基本不变。 液相浓缩至 8.2 倍后,随着溶液中 Ca²⁺的富集, NaCaB₅O₉ • 8H₂O 逐步析出,B 浓度得以缓慢升 高。液相浓缩至 91.3 倍时, B₄O₇²⁻ 浓度为 40.27 g/L。



图 4 液相 K^+ 、 $B_4 O_7^{2-}$ 浓度与浓缩倍数关系 Fig. 4 Relation of the concentration of K^+ and $B_4 O_7^{2-}$ to the ratio of weight concentration

4.3 物料平衡

整个蒸发过程共进行 10 次固液分离,获得 固样 11 个,液样 13 个。整个实验所取卤水样 共 771 g,为原始卤水质量的 1.9%;实验析出 盐类总量共 3 474 g,为原始卤水质量的 8.7%。 蒸发过程中析盐率、成卤率、失水率与卤水浓缩 的关系如图 5 所示。卤水的浓缩倍数最高到 91.3,成卤质量由原始卤水的 40 kg 缩小到 30 g,成卤率缩小到 0.23%,蒸水率增加到 90.75%,析盐率升高到 9.02%。



注: 1. H₂O; 2. Mir; 3. Ha + Gla; 4. Ha + Ast; 5. Ha + Leo; 6. Ha + Leo + Sy

图 5 扎北盐湖夏季卤水自然蒸发失水率、析盐率 及成卤率与卤水浓缩倍数关系

Fig. 5 Relation of water loss rate, salt precipitation rate and brine making rate to the ratio of weight concentration

在蒸发过程中,卤水密度起初随浓缩倍数 升高较快,但当卤水浓缩至30倍后,卤水密度 基本趋于稳定,在1.300g/cm³左右波动 (图6)。造成这种现象的原因可能是卤水在浓 缩30倍之后析盐率与失水率基本达到平衡。 最终卤水在浓缩91.3倍后,盐度升高到 472g/L,卤水密度升高到1.301g/cm³。



图 6 蒸发过程中卤水密度与浓缩倍数的关系 Fig. 6 Relation of density of brine to the ratio of weight concentration during evaporation process

5 结 论

由以上的分析结果与讨论可以得出如下结 论。

1) 西藏扎北盐湖夏季卤水较为独特,在卤 水分类中虽然属于硫酸钠亚型,但其中碳酸根 浓度较高(0.50 g/L),碱性较强(pH = 9.18), 我们认为该卤水处于弱碳酸盐型卤水向硫酸钠 亚型演化的过渡区间。扎北盐湖卤水在自然蒸 发过程中不仅具有硫酸钠型卤水蒸发析盐的一 些特点,还具有一些弱碳酸盐型卤水的蒸发析 盐特点。蒸发过程中首先析出硼砂,有大量五 水碳镁石在蒸发早期集中析出等。

2) 西藏扎北盐湖夏季卤水自然蒸发行为 与 Na⁺,K⁺,Mg²⁺//Cl⁻,SO₄²-H₂O 五元体系 15 ℃介稳相图相比,随着卤水蒸发浓缩,由于硼、 锂含量逐渐增高,卤水组成与"介稳相图"相比 有明显偏离:钾芒硝相区明显变小,某些零变量 点的位置偏低,致使白钠镁矾相区扩展,并出现 钾镁矾相区。其析盐序列为硼砂→芒硝+硼砂 →五水碳镁石+芒硝+硼砂→石盐+白钠镁矾 +锂复盐→石盐+白钠镁矾+锂复盐+钾芒硝 →石盐+钾镁矾+白钠镁矾+锂复盐→石盐+ 钾镁矾+锂复盐+硼砂+钠硼解石→石盐+钾 石盐+钠硼解石+硼砂+一水硫酸锂。

3) 锂在蒸发过程中以锂复盐和一水硫酸 锂等形式分散析出,不宜在当地通过夏季自然 蒸发对卤水中的锂资源进行富集。在夏季蒸发 过程中,应于卤水蒸失率至 83.5%,卤水浓缩 倍数到11倍,Li⁺=2.07g/L,Mg/Li=1.45时, Mg/Li 至最低,Li 大量析出之前,收集夏季蒸发 所得富锂卤水,进一步除硫酸根或冬季低温蒸 发使锂在液相中富集,以便下一步进行提锂。

4) 钾以钾芒硝、钾镁矾和钾石盐等形式在 蒸发后期析出,钾盐含量在析出混盐中含量最 高可达 30.65%,析出混盐可用于提取 KCl、 K₂SO₄等化工产品。

5) 硼以硼砂和钠硼解石等形式在整个析 盐过程中析出,在蒸发早期基本为硼砂,在中后 期随着溶液中 Ca²⁺离子浓度的升高,伴有钠硼 解石析出,在整个析盐过程中硼的析出较为分 散,硼在析出混盐中的最高含量仅有 21.87%。

参考文献:

- 郑绵平. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. 地球学报,2001,22(2):97-102.
- [2] 孔凡晶,郑绵平.盐湖生物学研究进展——第二届"盐湖 生物学及嗜盐生物与油气生成学术研讨会"综述[J].地 球学报,2007,28(6):603-608.
- [3] 宋彭生,李武,孙柏,等. 盐湖资源开发利用进展[J]. 无 机化学,2011,27(5):801-815.
- [4] 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.
- [5] 郑绵平.论盐湖学[J].地球学报,1999,20(4):395-401.
- [6] 高世扬,柳大纲.大柴旦盐湖夏季组成卤水的天然蒸发
 (含硼海水型盐湖卤水的天然蒸发) [J].盐湖研究, 1996,4(3-4):73-86.
- [7] 卜令忠, 乜贞, 宋彭生. 硫酸钠亚型富锂卤水 25 ℃等温 蒸发过程的计算机模拟[J]. 地质学报, 2010, 84(11):
 1708-1713.
- [8] 王云生,郑绵平,乜贞,等.西藏扎北盐湖秋季卤水(硫酸钠亚型)5℃等温蒸发实验研究[J].地球学报,2011,32
 (4):477-482.
- [9] 郑绵平. 青藏高原盐湖 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1989.
- [10] 刘俊英,郑绵平,罗健. 西藏拉果错卤虫 I: 生物学特征 [J]. 湖泊科学,1998,10(2):92-96.

- [11] 郑喜玉,张明刚,徐昶,等.中国盐湖志[M].北京:科学 出版杜,2002.
- [12] Zheng M P, Liu X F. Hydrochemistry of salt lakes of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Aquatic Geochemistry, 2009,15(1-2):293-320.
- [13] 中国科学院青海盐湖研究所.卤水和盐的分析方法 [M].北京:科学出版社,1988.
- [14] 地矿部岩石矿物分析编写组.岩石矿物分析第一分册 [M].北京:地质出版社,1991.
- [15] 高世扬,李国英.盐卤硼酸盐化学(I)-含硼盐卤天然 蒸发过程中硼酸盐的行为[J].高等学校化学学报,

1982, 3(2): 139 - 144.

- [16] Зданоъский А Б, Соловъева Е Ф, Ляховская Е И, итд. Справочник эксперименталы данных по растворимости многокомпонентных водно солевых систем, Ленинград: Издателъство < ХИМИЯ > ,1975, Щ(2): 466 – 476.
- [17] 金作美,周惠南,王励生.Na⁺.K⁺.Mg²⁺//Cl⁻.SO₄²⁻ H₂O 五元水盐体系 15 ℃介稳相图研究 [J].高等学校化学学报, 2002,23(4):690-694.
- [18] 郑绵平,刘喜方.青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征[J].地质学报,2010,84(11):1585-1600.

Study on Natural Evaporation of Summer Brine of Zabei Salt Lake in Tibet, China

GAO Feng^{1,2,3}, ZHENG Mian-ping^{1,2,3}, NIE Zhen^{1,2,3}, LIU Jian-hua^{1,2,3}, SONG Peng-sheng^{3, 4}

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China;

2. R&D Center for Saline Lakes and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences,

Beijing, 100037, China; 3. Key Laboratory of the Research of Saline Lake Resources and

Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100037, China; 4. Qinghai

Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China)

Abstract: Zabei Salt Lake is located in the central region of Northern Tibet, China. The sodium sulfate subtype brine of Zabei Salt Lake is rich in Li, K, B and other elements. For comprehensive utilization of mineral resources of the salt lake, natural evaporation of the lithium-rich brine was carry out in the site of DXC Field Observation Station nearby Zabei Salt Lake. Based on the phase diagram of Na⁺, Mg²⁺//Cl⁻, $SO_4^{2^-} - H_2O$ and K⁺, Mg²⁺//SO₄²⁻ - H₂O 15 °C system, the salts crystallization path of the brine natural evaporation was drawn. And the variation of elements contents in the liquid phase and solid phase through the evaporation was discussed. The results showed that: lithium and boron is precipitated as lithium double salt and borax in the whole evaporation process, and potassium is precipitated as leonite and sylvite until the brine is extremely concentrated. The experiment provide the basic data for future comprehensive utilization of Zabei Salt Lake.

Key words: Zabei Salt Lake; Sodium sulfate subtypes; Brine; Natural evaporation; Phase chemistry