

青海察尔汗盐湖别勒滩区段固体钾盐液化前后物质组成对比及意义*

李波涛¹, 赵元艺^{2**}, 钱作华², 焦鹏程², 刘成林², 王石军³

(1 中国地质大学, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 青海盐湖集团技术中心, 青海 格尔木 816000)

摘要 察尔汗盐湖钾矿是中国最大的钾盐矿床, 别勒滩位于察尔汗盐湖的最西端, 目前正通过液化技术在别勒滩区段的固体钾盐层中提取钾资源。文章通过野外钻孔采集样品和室内系统的岩矿鉴定、X射线衍射、扫描电镜和化学成分分析, 研究了含钾地层液化前、后的石盐和主要钾盐矿物的特征, 对常量、微量元素进行了测定。得出的结论是: 液化前和液化后主要钾盐矿物都是钾石盐、光卤石和杂卤石, 其中杂卤石为最主要的钾盐矿物, 液化前和液化后, 富集程度高的微量元素为 I、B 和 Li, 可见别勒滩区段伴生元素 I、B 和 Li 具有开采潜力。通过计算得知此区段埋深 22.42 m 以上液化前 $w(\text{KCl})$ 平均为 2.15%, 液化后 $w(\text{KCl})$ 平均为 1.68%, 计算预测溶出的 KCl 资源量约为 5 374 万吨, 埋深 4.1 m 以上液化前 $w(\text{KCl})$ 平均为 2.23%, 液化后 $w(\text{KCl})$ 平均为 1.71%, 计算预测溶出的 KCl 资源量约为 1 087 万吨, 证明了液化法开采别勒滩地区固体钾盐经济可行。

关键词 地球化学 固体钾盐 液化前 液化后 别勒滩 青海

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

A comparative study of material composition of solid sylvite before and after liquefaction and its significance in Bieletan area of Qarhan salt lake, Qinghai, China

LI BoTao¹, ZHAO YuanYi², QIAN ZuoHua², JIAO PengCheng², LIU ChengLin² and WANG ShiJun³

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Qinghai Salt Lake Group Technology Center, Golmud 816000, Qinghai, China)

Abstract

The Qarhan salt lake has the largest potassium reserves in China, and its westernmost end is Bieletan. At present, solid potassium resources are being extracted by liquefaction technology in Bieletan. This paper studied the characteristics of halite and sylvite minerals before and after liquefaction by such means as field sampling, indoor mineral identification, X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and chemical composition analysis. As a result, the main and trace elements were determined. Some conclusions have been reached: The main sylvite minerals are potassium salt, carnallite and polyhalite, and the most important sylvite mineral is polyhalite; as for trace elements before and after liquefaction, the most enriched elements are I, B and Li, which

* 本研究得到国家高技术研究发展计划(863计划)课题“青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发的关键技术”(编号:2006AA06Z133)与国土资源部“我国钾盐资源潜力数据库建设”(编号:JTXM-DW-KZ4-04)的联合资助

第一作者简介: 李波涛, 女, 1987年出生, 硕士研究生。Email: libotaozai@163.com

**通信作者: 赵元艺, 男, 1966年生, 研究员, 从事矿床学与地球化学研究。Email: yuanyizhao2@sina.com

收稿日期: 2009-07-27; 改回日期: 2010-03-09。李岩编辑。

suggests that these elements have potential exploitation value; calculations show that the average concentration is 2.15% before liquefaction and 1.68% after liquefaction, indicating that the dissolved potassium chloride resources amount to about 53.74 million tons above the depth of 22.42 m; the average concentration is 2.23% before liquefaction and 1.71% after liquefaction, implying that the dissolved potassium chloride resources reach 10.87 million tons or so above the depth 4.1 m, which also proves that the liquefaction technology is economical and workable in the exploitation of solid potassium in Bieletan area.

Key words: geochemistry, solid sylvite, before liquefaction, after liquefaction, Bieletan, Qinghai

察尔汗盐湖钾矿是中国最大的水溶性钾盐矿床,自西向东分为别勒滩、达布逊、察尔汗、霍布逊等4个区段(图1),已探明钾盐固体矿资源量 2.96×10^8 t,液体矿资源量 2.44×10^8 t,成为中国钾肥的主要基地(周训等,2006)。钾肥的生产主要是以晶间卤水为原料生产成光卤石后再经过反浮选-冷结晶生产KCl(保英莲,2006;谭欣等,2007)。在察尔汗盐湖东部的察尔汗区段,晶间卤水已被大量开采;在西部的别勒滩区段也已于2002年开始开采晶间卤水,并通过输卤渠输送到生产盐田。近年来随着晶间卤水水位的下降,通过液化开发低品位固体钾盐已引起有关方面的重视(赵元艺等,2008),目前正在考虑通过液化技术(焦鹏程等,2008)在别勒滩区段

的固体钾盐层中开采钾盐资源。

盐类矿物为易溶性矿物,当它处于浓度较低的介质中时,便发生溶解,发生固-液转化(袁见齐等,1995)。将卤水从供卤渠注入含钾盐层而溶出 K^+ ,进而从采卤渠中提取 K^+ 的过程称为“液化”。察尔汗盐湖固体钾盐矿物包括钾石盐(KCl)、光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)、钾盐镁矾($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 11/4H_2O$)、杂卤石($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$)和钾石膏($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$)等(郑绵平等,1989;杨谦等,1993;蔡克勤等,1994;袁见齐等,1995;王石军,2005)。

本文通过系统的野外和室内工作,确定了别勒滩区段最主要的钾盐矿物类型,基本查明了液化前后矿物和化学组成的特点,为钾盐的开发提供基础资料。

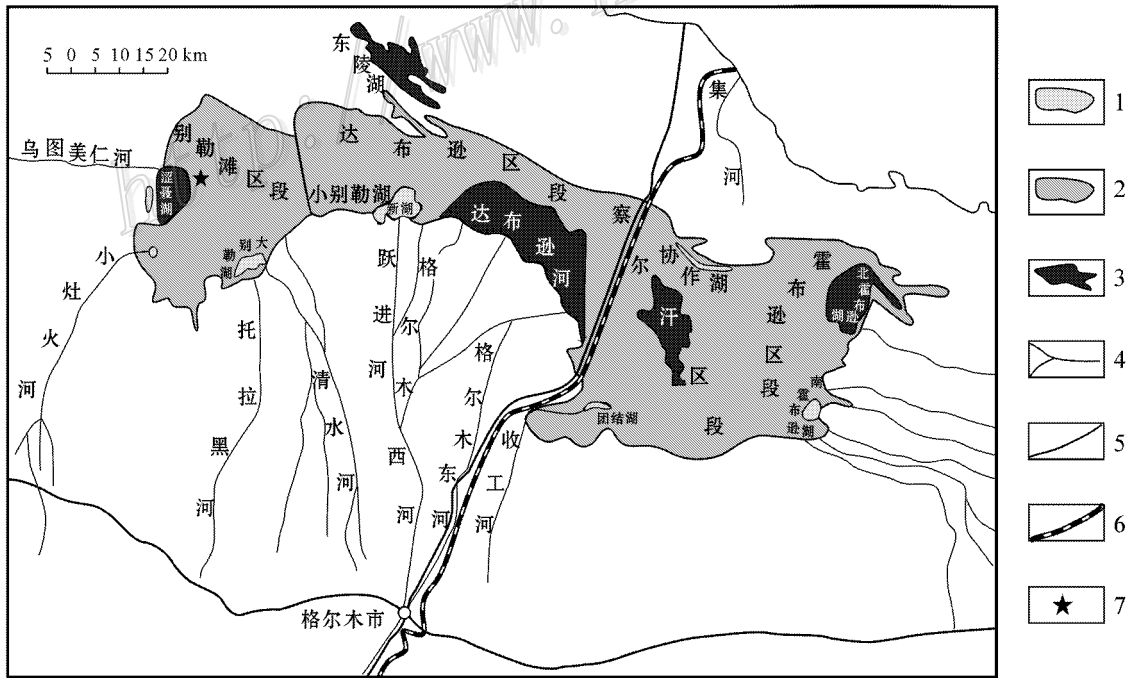


图1 察尔汗盐湖区段划分示意图

1—水湖;2—干盐湖;3—固液共存盐湖;4—河流;5—公路;6—铁路;7—野外工作地点

Fig. 1 The section division of the Qarhan salt lake

1—Water Lake; 2—Dry salt lake; 3—Salt lake with solid and liquid; 4—River; 5—Road; 6—Railway; 7—Fieldwork site

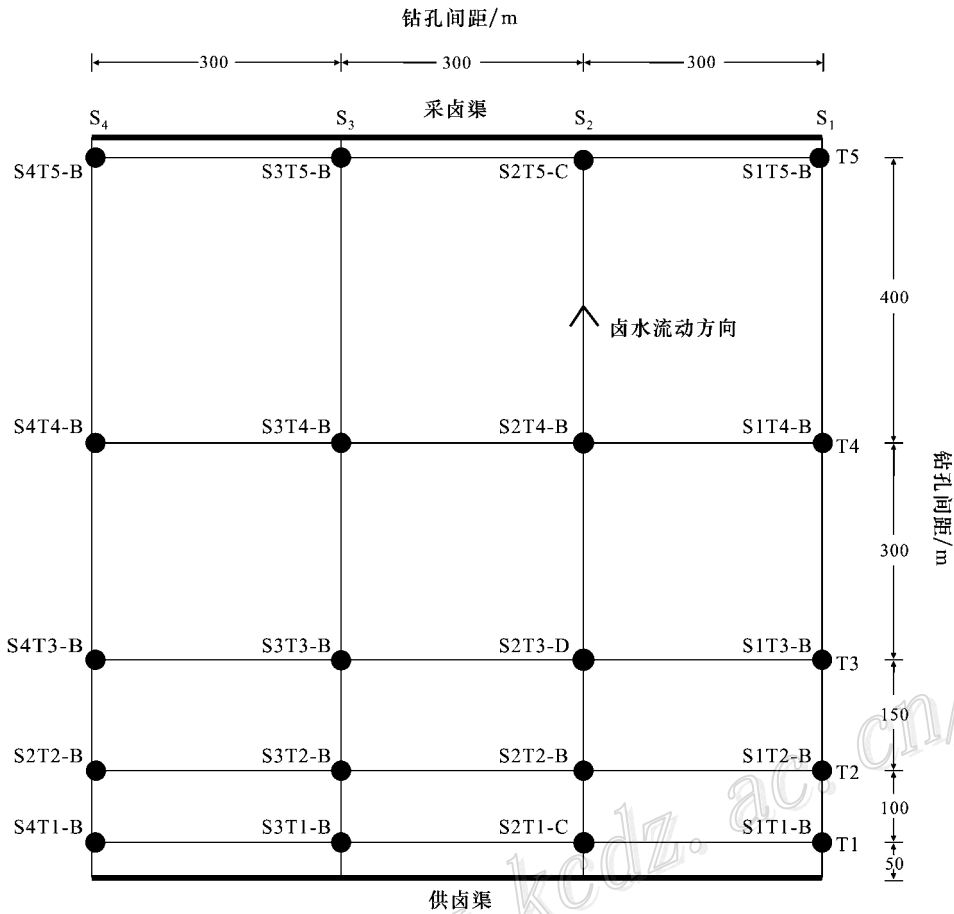


图 2 钻孔位置平面示意图

Fig. 2 Sketch map of drilling locations

1 样品采集和测定方法

1.1 样品采集与处理

本文样品均采自青海盐湖集团正在采卤的察尔汗盐湖别勒滩区段涩聂湖东北岸的 S_4 盐层,在此试验区布置了 20 个钻孔(图 2),对 S_2 线 S_2T_1-C 、 S_2T_3-D 、 S_2T_4-B 、 S_2T_5-C 钻孔进行了全孔岩芯采样,所采样品立即装进透明塑料袋内密封保存。钻孔孔深: S_2T_1-C 为 14.62 m、 S_2T_3-D 为 22.41 m、 S_2T_4-B 为 8.0 m、 S_2T_5-C 为 14.02 m,采样位置见表 1,取样间隔 0.1~0.6 m。

1.2 测试方法

样品的测定包括矿物组成和化学组成的测定。矿物组成的测定工作包括盐矿物鉴定、X 射线粉晶衍射及扫描电子显微镜分析 3 种方法相互补充。化学组成测定包括主量元素和微量元素测定。

扫描电子显微镜分析:将原状岩芯样品置于上海市实验仪器总厂生产的 101A-2B 型干燥箱内,在 80°C 的温度条件下处理 3 天,使样品达到干燥状态。对干燥后的样品,用日本产 Shimadzu Lc50 型镀膜机进行抽真空,然后镀金膜,膜厚度为 100\AA 。最后用 LEO-435VP 型扫描电子显微镜对样品进行观察并对有代表性的图像拍照。测试条件 20 kV , 100 pA 。执行标准为:SY/T5162-1997 岩石样品扫描电子显微镜分析方法。测试单位为中国石油勘探开发研究院石油地质试验研究中心。

X 射线衍射分析:样品经粉碎后过 300 目筛,用缩分仪缩分,取分析样品约 10 g 备用。分析时将硅华粉末置于小玻璃片上 2 mm 深的凹槽内压实。将装有粉末样品的小玻璃片放入 X 射线衍射仪中扫描。衍射仪为 Bruker D8 Advance Diffractometer;X 光源:铜靶/40 kV/40 mA;探测器:锂漂移硅固体探测器;狭缝 $DS=SS=1\text{ mm}$, $RS=0.1\text{ mm}$;扫描方式:

表1 采样位置一览表

Table 1 Sampling locations

孔号及层号	样号	采样位置/m	孔号及层号	样号	采样位置/m	孔号及层号	样号	采样位置/m
S2T1-C			S2T3-D			S2T3-D		
1	Hj01	0.00~0.30	5	Hj20	4.00~4.20	10	Hj80	16.63~17.13
4	Hj10	2.70~2.90	6	Hj25	5.00~5.20		Hj85	18.98~19.48
7	Hj20	5.70~6.00	7	Hj30	6.00~6.20		Hj90	21.48~21.98
10	Hj30	9.57~10.07		Hj35	7.10~7.30	S2T5-C		
13	Hj35	11.49~11.99		Hj40	8.10~8.30	1	Hj01	0.00~0.30
15	Hj40	13.99~14.62		Hj45	9.10~9.30	4	Hj10	3.00~3.20
	Hj45	12.99~13.50		Hj50	10.20~10.40	8	Hj20	6.40~6.80
S2T3-D				Hj55	11.20~11.40	10	Hj30	11.17~11.67
1	Hj01	0.00~0.20	8	Hj60	12.49~12.69	12	Hj35	13.32~13.82
	Hj05	0.80~1.00	9	Hj65	13.59~13.79		Hj40	10.6~11.1
3	Hj10	2.00~2.20		Hj70	14.59~14.79		Hj45	12.95~13.45
5	Hj15	3.00~3.20		Hj75	15.59~15.79			
	Hj17	3.40~3.60						

连续扫描,扫描速度 $3^\circ/\text{min}$,采样间隔 0.02° 。测试单位为地质科学院矿产资源研究所。

化学组成分析项目包括主量元素 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 和水不溶物,以及微量元素 Li、Sr、Br、B 和 I,以“DZG 93-08 岩石和矿石分析规程盐类矿石分析规程”为检测依据,根据不同的离子特性采取不同的分析方法: K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用原子吸收光谱测定法; Cl^- 用硝酸汞容量法; SO_4^{2-} 用硫酸钡重量法; CO_3^{2-} 用酸碱滴定容量法;水不溶物用重量法;Li、Sr、Br、B 用 ICP-MS 法;I 用催化动力光度法。测试单位为中化地质矿山总局中心实验室。

2 液化前后固体钾盐物质组成及对比

2.1 液化前固体钾盐物质组成

从研究样品的标本与显微镜下岩矿鉴定及 X 射线衍射实验结果(表 2)可知,绝大多数样品中石盐是主要矿物。钾盐矿物在 S2T1 钻孔 0~5.70 m 区段主要为光卤石,5.70~11.99 m 区段主要为杂卤石和光卤石,S2T5 钻孔 14.04 m 以上为杂卤石和光卤石,S2T3 钻孔仅在 3.00~3.20 m 和 21.48~21.98 m 出现钾石盐,在 0~22.41 m 的其他部位普遍为杂卤石和光卤石。矿物粉晶 X 射线分析结果显示,试验区沉积物由石盐、钾石盐、石膏、石英、光卤石、长石、伊利石、绿泥石、水氯镁石、半水石膏、杂卤石、硬石膏和方解石等共 13 种矿物组成。其中钾盐矿物主要为杂卤石,同时有一部分光卤石和极少量的钾

石盐。

由岩矿鉴定和扫描电镜分析可知,大多数钾盐矿物晶形完好,溶蚀现象较少。石盐:中细粒结构,多为立方体(图 3a),表面光洁,但部分石盐晶体中存在晶洞和裂缝,并有石盐晶体残骸。光卤石:主要为粒状(图 3a、图 3b),一般为立方体,部分光卤石存在龟裂和被溶蚀现象,出现在粒间、粒表和晶洞中。杂卤石:多呈片状(图 3c),针状出现在粒间和粒表,可见粒表片状杂卤石集合体呈放射状(图 3d)。钾石盐:白色,多为立方体(图 3e),集合体常为致密粒状块体(图 3f)。

因子分析结果(表 3)显示,当取 3 个因子时,方差贡献总计已达 92.62%,因此,3 个因子基本上可代表样品所包括的全部信息(表 4)。这 3 个因子分别是 F_1 : Na^+ - Cl^- -|水不溶物|-总盐量, F_2 : Ca^{2+} - SO_4^{2-} , F_3 : K^+ - Mg^{2+} 。可以看出 K^+ 与 Mg^{2+} 在 F_3 中密切相关。另外,从根据化学分析数据进行聚类分析得到的谱系图(图 4)中可以看出,所分析的 8 项变量可分为 2 类,其中 II 类包括 Mg^{2+} 、 K^+ 、水不溶物、 SO_4 和 Ca^{2+} ;I 类包括总盐量、 Cl^- 和 Na^+ 。因此, Mg^{2+} 与 K^+ 有着密切的含量变化关系,而 Cl^- 与 Na^+ 的相关是石盐的体现,总盐量、 Cl^- 、 Na^+ 在 I 类中体现出石盐是造成总盐量变化的主要因素。

总之,因子分析与聚类分析结果是基本一致的。 Mg^{2+} 、 K^+ 的相关性表明,别勒滩区段钾盐主要的存在形式为杂卤石或光卤石,这与岩矿鉴定和 X 射线分析结果是一致的。

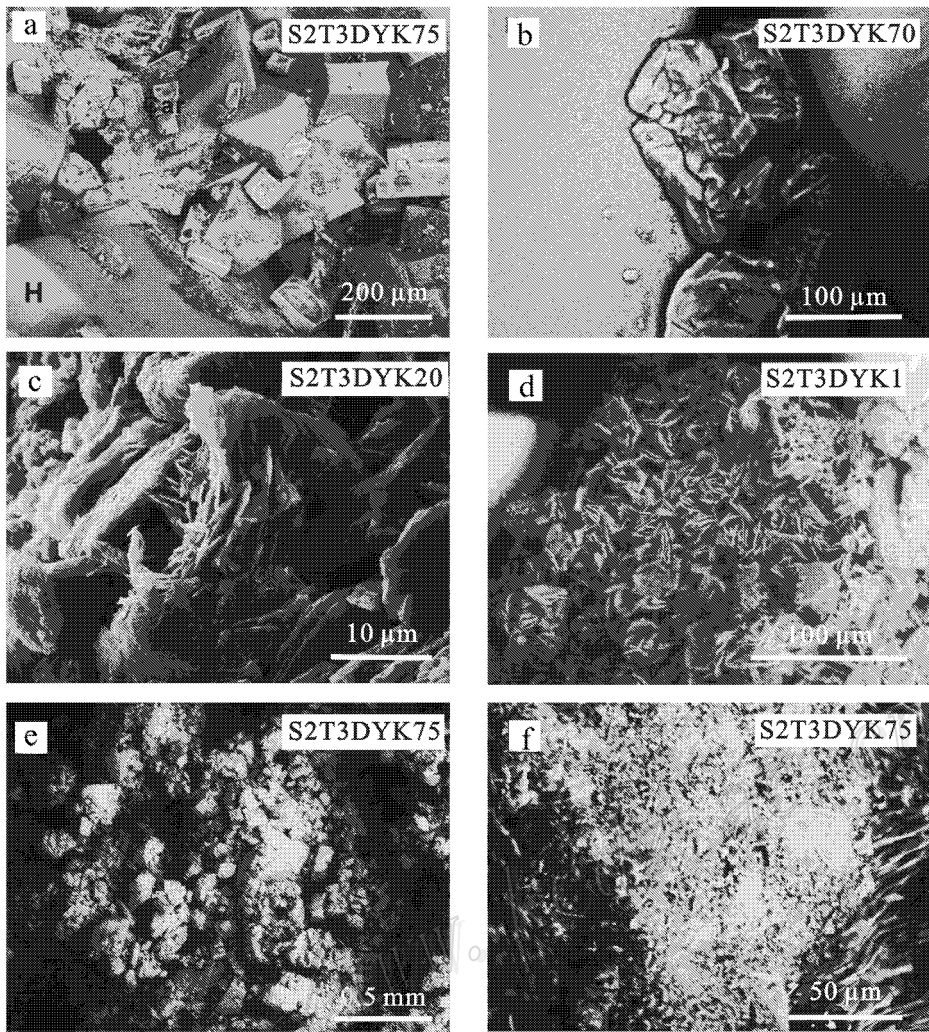


图 3 别勒滩液化前钾盐矿物的形貌特征

a. 石盐(H)与光卤石(Car); b. 粒间粒状光卤石; c. 片状杂卤石; d. 放射状杂卤石集合体; e. 钾石盐; f. 钾石盐集合体

Fig. 3 Morphology of potassium minerals before liquefaction in Bieletan

a. Halite(H) and carnallite(Car); b. Granular carnallite; c. Flaky polyhalite; d. Radial polyhalite aggregate; e. Sylvite; f. Sylvine aggregate

2.2 液化后固体钾盐物质组成

从液化后标本与显微镜下岩矿鉴定及 X 射线衍射实验结果可知,绝大多数样品中石盐是主要矿物(表 5)。钾盐矿物在 S2T1 钻孔 0~11.99 m 区段主要为杂卤石(图 5a)和光卤石(图 5b); S2T5 钻孔 0~0.30 m 区段主要为光卤石, 0.30~3.20 m 区段主要为杂卤石和光卤石, 3.20~14.02 m 区段主要为杂卤石。在钻孔 S2T3 中光卤石仅在 0.80~1.00 m、5.00~5.20 m 和 16.63~17.13 m 范围内出现,而杂卤石普遍存在,仅在 0.80~2.20 m 范围内未出现。矿物粉晶 X 射线衍射分析结果显示,试验区沉积物内含有石盐、钾石盐、石膏、石英、光卤石、长石、

云母类矿物、绿泥石、水氯镁石、杂卤石、硬石膏、方解石、角闪石等共 13 种矿物。其中钾盐矿物主要为杂卤石,同时有一部分光卤石和极少量的钾石盐。

岩矿鉴定和扫描电镜显示,石盐、光卤石和杂卤石完好晶形者较少,几乎都出现溶蚀现象,发育孔隙、溶孔、溶洞和溶蚀裂隙及光卤石膜(图 5c)和氯化钠晶体间 $MgCl_2$ 薄膜(图 5d)。

2.3 液化前后固体钾盐物质成分对比

岩矿鉴定和 X 射线衍射分析结果对比(表 6)表明,石盐是液化前后的贯通性矿物,且都是最主要的组成矿物,液化前后最主要的钾盐矿物都为杂卤石,其次为光卤石。钾石盐液化前后的含量都很少,液

表2 液化前别勒滩固体钾盐矿物X射线衍射半定量分析结果(w(B) %)

Table 2 X-ray diffraction semi-quantitative analyses of solid potassium minerals(w(B) %) before liquefaction in Bieletan

样品号	石盐	钾石盐	石膏	石英	光卤石	长石	伊利石	绿泥石	水氯镁石	半水石膏	杂卤石	硬石膏	方解石
S2T1cx1	83.9		1.6	3.7	2.9	1.4	4.5			2.0			
S2T1cx10	25.6		37.5	13.8	2.7	4.7	11.2	2.0		2.5			
S2T1cx20	89.7			3.7	1.5	1.0						4.1	
S2T1cx30	89.6			1.5	1.8	0.6			1.8			4.7	
S2T1cx35	82.3		5.0	2.5	2.1	0.7	5.5		1.4			0.7	
S2T1cx40	71.5		16.9	6.9		0.9		1.5		2.4			
S2T1cx45	98.5			0.4		0.3						0.8	
S2T5cx1	86.0		1.2	2.5	2.2	0.5	4.0			0.7	2.2		0.8
S2T5cx10	79.9		9.2	2.3		1.9	5.0			1.0			0.9
S2T5cx20	89.8		1.2	0.9		1.0	3.4			0.8	3.0		
S2T5cx30	94.3			0.5	0.8	0.8					3.6		
S2T5cx35	90.7			1.3	0.8	0.5	5.6				1.1		
S2T5cx40	70.8		8.7	4.3	2.6	1.9	7.7	1.1			1.8		1.2
S2T5cx45	44.5		11.7	7.6	5.7	4.9	16.1	1.9		2.9	4.8		
S2T3cx1	82.7			1.6	3.3	0.7	6.6	0.9					4.3
S2T3cx5	91.7		0.8	1.5	1.6	0.4				1.3	2.6		
S2T3cx10	10.0		43.4	11.5	3.4	3.0	11.6	1.8		4.7	7.7		2.9
S2T3cx15	45.7	16.3	11.1	2.2	1.4	2.9	3.5	1.2		4.0	10.9		0.9
S2T3cx17	3.1			1.6	5.5		5.6	1.6			82.6		
S2T3cx20	80.6			1.7	1.8	1.4	3.8	0.4			10.3		
S2T3cx25	63.0		3.3	5.9	3.3	1.5	13.2		1.8		8.0		
S2T3cx30	71.8			1.6	3.2	2.0	11.8	2.0			7.7		
S2T3cx35	89.9			1.0	1.3		3.8				4.0		
S2T3cx40	70.2		9.5	2.7	2.6	0.9	9.2	1.1		2.1	1.6		
S2T3cx45	60.5		4.2	3.9	3.4	1.9	13.7	1.6		0.8	10.0		
S2T3cx50	69		0.8	5.6	3.4	2.0	11.5	1.4		1.0	4.9		
S2T3cx55	51.8			8.3	2.5	2.9	22.4	2.4				8.8	0.8
S2T3cx60	35.6			6.3	4.3	3.1	23.0	2.1			14.6	11.1	
S2T3cx65	96.8			0.8	0.9						1.5		
S2T3cx70	95.4		1.7	0.6	1.3						1.0		
S2T3cx75	81.6			2.9	1.7		6.8				2.9	4.2	
S2T3cx80	42.9			9.2	2.5	1.5	28.7	2.7			5.6	4.3	2.6
S2T3cx85	52.9		3.4	6.1	4.9	4.1	17.3	2.2		2.1	4.4		2.4
S2T3cx90	1.6	0.4		16.1	5.0	13.5	32.9	3.0		5.8	16.5		5.1

注:空白为低于检测限。

表3 别勒滩旋转正交因子特征值

Table 3 Eigenvalues of orthogonal rotation factors in Bieletan

因子	方差贡献百分比/%	方差贡献累计百分比/%
1	55.208	55.208
2	19.291	74.498
3	18.120	92.618
4	6.021	98.639
5	1.007	99.646
6	0.240	99.886
7	0.101	99.987
8	0.01266	100.000

表4 别勒滩正交旋转因子解

Table 4 Orthogonal rotation factor solution in Bieletan

化学成分	因子		
	F ₁	F ₂	F ₃
K ⁺			0.862
Na ⁺	0.963		
Ca ²⁺		0.974	
Mg ²⁺			0.840
Cl ⁻	0.970		
SO ₄ ²⁻		0.977	
水不溶物	-0.972		
总盐量	0.990		

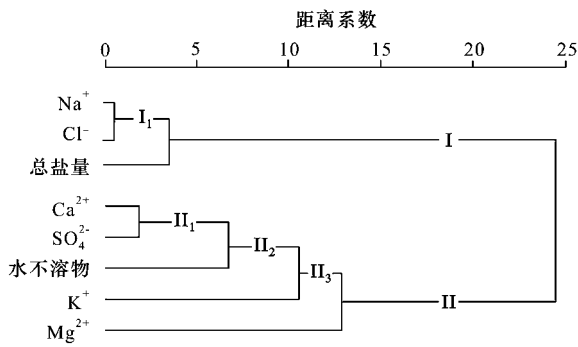


图 4 聚类分析谱系图

Fig. 4 Lineage diagram of cluster analysis

化前仅发现于 S2T3 钻孔的顶部,而液化后该钻孔中则不存在钾石盐,仅在 S2T5 钻孔的顶部发现,反映液化前后钾石盐仅存在于试验区的地表部位。液化前光卤石普遍存在,液化后则断续存在,含量比液化前少很多,仅在 S2T5 钻孔的 0.00~0.30 m 和 3.00~3.20 m 含量较多。杂卤石在液化后的含量与液化前相比明显减少。虽然整体上杂卤石和光卤石的含

量液化后都比液化前有所减少,但在 S2T5 钻孔的 0~3.20 m 区段,液化后光卤石的含量高于液化前,6.40~13.82 m 区段液化后杂卤石的含量高于液化前。

3 液化前后固体钾盐层钾含量及微量元素含量对比

3.1 液化前固体钾盐层钾含量及微量元素含量

样品分析项目为 K^+ ,对 4 个钻孔所有样品的钾含量(表 7)进行加权平均计算,得出 $w(KCl)$ 为 2.15%,略小于固体钾盐的边界品位 3%。4 m 以上 $w(KCl)$ 平均为 2.23%,略高于全孔的 $w(KCl)$ 平均值。反映 4 m 以上盐层浓缩程度要比 4 m 以下高,含钾量略高。钾盐的主要赋存层位在 1.80~8.10 m 之间,在这一段 $w(K^+)$ 在 4 个钻孔中的平均值为 1.85%,折算 $w(KCl)$ 为 3.53%,高于工业品位 3%,说明此段是富钾层位,具有工业利用价值。其中 S2T1 钻孔 $w(KCl)$ 平均为 1.93%。S2T3 钻孔

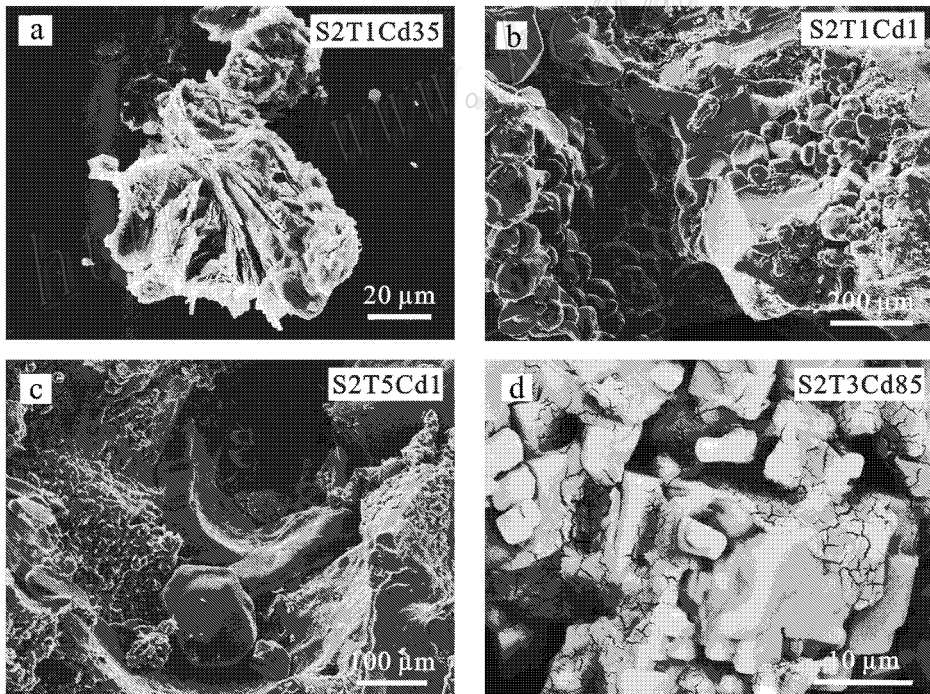


图 5 别勒滩液化后固体钾盐矿物的形貌特征

a. 杂卤石; b. 粒间光卤石; c. 孔壁上光卤石膜; d. 氯化钠晶体间 $MgCl_2$ 薄膜

Fig. 5 Morphology of solid potassium minerals after liquefaction in Bieletan

a. Polyhalite; b. Carnallite among grains; c. Carnallite film on the wall of hole; d. $MgCl_2$ film between halites

表5 液化后固体钾盐矿物的X射线衍射测试半定量分析结果($w(B)/\%$)Table 5 X-ray diffraction semi-quantitative analyses of solid potassium minerals ($w(B)/\%$) after liquefaction in Bieletan

样品号	石盐	钾石盐	石膏	石英	光卤石	长石	云母类	绿泥石	水氯镁石	杂卤石	硬石膏	方解石	角闪石
S2T1cx1	94.3		1.5	0.5	0.7		1.1		0.8	0.4	0.2	0.4	
S2T1cx10	74.7		21.4	1.4			2.5						
S2T1cx20	90.6		4.2	0.7		1.4			3.2				
S2T1cx30	59.0			14.4	1.4	7.9	11.4	2.0		3.8			
S2T1cx35	77.6		4.9	3.9		3.4	6.9	1.2		2.0			
S2T1cx40	72.8		4.4	11.5		5.6	2.6	2.3				0.8	
S2T1cx45	96.6		0.3	0.4		0.7			0.8		1.3		
S2T5dx1	70.7	13.3		1.8	10.4	1.5			1.2		1.0		
S2T5dx10	72.2	13.6		1.8	11.0						1.4		
S2T5dx20	72.7		4.9	9.7		4.1	3.3	1.6			3.7		
S2T5dx30	26.6		16.1	19.7		14.3	7.7	4.5	2.8	4.9			3.5
S2T5dx35	83.1		3.8	2.6		2.6	3.3	1.8		2.9			
S2T5dx40	85.0		0.7	3.6			2.9	1.4	1.8	2.2	1.9	0.6	
S2T5dx45	82.5		2.9	3.7		1.6	3.7	1.8	0.9	2.2		0.7	
S2T3cx1	92.4		0.7	1.5				1.5		2.3	1.0	0.5	
S2T3cx5	93.4		0.6	2.9	1.1	0.3	1.4					0.3	
S2T3cx10	21.0		36.6	15.5		8.5	10.2	3.5					4.7
S2T3cx15	98.6		0.6	0.2					0.5	0.2			
S2T3cx17	76.7		9.3	3.5			2.2	1.0		6.8		0.4	
S2T3cx17-1	28.2			6.6			8.2	3.2	5.8	48.0			
S2T3cx20	97.3		0.8	0.9					0.3	0.7			
S2T3cx25	87.8		7.4	0.9	1.2		0.9		1.2	0.6			
S2T3cx30	92.7		1.7	2.0			2.2			1.3			
S2T3cx35	57.8		2.1	16.0		5.9	8.6	2.8		7.0			
S2T3cx40	82.4		6.1	3.2		1.9	3.2	1.6		1.4		0.1	
S2T3cx45	81.5		2.0	3.4			3.1	0.4	1.5	8.2			
S2T3cx50	96.3		2.3	0.4					0.7	0.4			
S2T3cx55	93.1		3.5	0.8					0.7	1.8			
S2T3cx60	76.3		0.7	6.1		2.0	3.3	1.3	1.7	3.3	4.8	0.4	
S2T3cx65	94.9		3.0	0.6					0.7	0.5	0.4		
S2T3cx70	83.8		4.8	3.3			2.1	1.3	2.1	2.0		0.5	
S2T3cx75	66.6			9.7		2.2	4.8	2.5	2.7		10.6	0.9	
S2T3cx80	94.9		0.6	0.9	2.7				0.9				
S2T3cx85	68.6		5.7	8.1		5.0	4.1	2.2	2.8		0.7	2.8	
S2T3cx90	77.6		3.6	3.2			5.9	2.2	3.9				3.7

注 空白为低于检测限。

$w(KCl)$ 平均 1.82%。S2T4 钻孔 $w(KCl)$ 平均 2.39%。S2T5 钻孔 $w(KCl)$ 平均 2.47%。由此可知 KCl 的含量亦即 K^+ 含量从钻孔 S2T3 到钻孔 S2T5 有逐渐升高的趋势。总的看来 4 个钻孔中固体钾含量较低,但分布比较均匀,因此利用低品位含钾盐段进行钾盐的开采是有实际意义的。

分别对 S2T1、S2T3 与 S2T5 三个钻孔的 Li、Sr、Br、B、I 进行了分析测试。Li 平均含量 (w_B ,下同)为 58.48×10^{-6} ; Sr 平均为 204.88×10^{-6} ; Br 平均为 6.62×10^{-6} ; B 平均为 158.46×10^{-6} ; I 平均为 2.34×10^{-6} (表 8)。

3.2 液化后固体钾盐层钾含量及微量元素含量

共对 S2T1、S2T3、S2T5 三个钻孔进行了 KCl 分析。在 S2T1 钻孔中, $w(KCl)$ 大于固体钾盐边界品位 (3%) 的区段为 5.60~6.25 m 和 6.75~7.25 m (图 6); 在 S2T3 钻孔中, $w(KCl)$ 大于固体钾盐边界品位的区段为 9.60~10.60 m (图 7); 在 S2T5 钻孔中, $w(KCl)$ 大于固体钾盐边界品位的区段为 0~0.40 m、0.90~1.90 m、3.60~3.80 m 和 7.50~8.00 m (图 8)。

液化后对 S2T1、S2T3、和 S2T5 三个钻孔的样品进行了常量元素化学分析。从分析结果可以看出液化后全孔的 $w(KCl)$ 平均为 1.68%, 4m 以上

表 6 液化前后盐类矿物 X 射线衍射分析结果对比 [w(B) %]

Table 6 A comparison of X-ray diffraction analyses of mineral salts before and after liquefaction [w(B) %]

样品号	石盐		钾石盐		光卤石		杂卤石	
	液化前	液化后	液化前	液化后	液化前	液化后	液化前	液化后
S2T1cx1	83.9	94.3			2.9	0.7		0.4
S2T1cx10	25.6	74.7			2.7			
S2T1cx20	89.7	90.6			1.5		4.1	3.2
S2T1cx30	89.6	59.0			1.8	1.4	4.7	3.8
S2T1cx35	82.3	77.6			2.1		0.7	2.0
S2T1cx40	71.5	72.8						
S2T1cx45	98.5	96.6						
S2T5cx1	86.0	70.7		13.3	2.2	10.4	2.2	
S2T5cx10	79.9	72.2		13.6		11.0		1.4
S2T5cx20	89.8	72.7					3.0	3.7
S2T5cx30	94.3	26.6			0.8		3.6	4.9
S2T5cx35	90.7	83.1			0.8		1.1	2.9
S2T5cx40	70.8	85.0			2.6		1.8	2.2
S2T5cx45	44.5	82.5			5.7		4.8	2.2
S2T3cx1	82.7	92.4			3.3			2.3
S2T3cx5	91.7	93.4			1.6	1.1	2.6	
S2T3cx10	10.0	21.0			3.4		7.7	
S2T3cx15	45.7	98.6	16.3		1.4		10.9	0.2
S2T3cx17	3.1	28.2			5.5		82.6	48.0
S2T3cx20	80.6	97.3			1.8		10.3	0.7
S2T3cx25	63.0	87.8			3.3	1.2	8.0	0.6
S2T3cx30	71.8	92.7			3.2		7.7	1.3
S2T3cx35	89.9	57.8			1.3		4.0	7.0
S2T3cx40	70.2	82.4			2.6		1.6	1.4
S2T3cx45	60.5	81.5			3.4		10.0	8.2
S2T3cx50	69.	96.3			3.4		4.9	0.4
S2T3cx55	51.8	93.1			2.5			1.8
S2T3cx60	35.6	76.3			4.3		14.6	3.3
S2T3cx65	96.8	94.9			0.9			0.5
S2T3cx70	95.4	83.8			1.3			2.0
S2T3cx75	81.6	66.6			1.7		2.9	
S2T3cx80	42.9	94.9			2.5	2.7	5.6	
S2T3cx85	52.9	68.6			4.9		4.4	
S2T3cx90	81.6	77.6	0.4		5.0		16.5	

注 空白为低于检测限。

表 7 液化前试验区 S₂ 线钻孔全孔和 4.3 m 以上 KCl 含量

Table 7 KCl concentrations before liquefaction in whole holes and above 4.3 m along S₂ line in Bieletan

钻孔号	孔深/m	w(KCl) %			钻孔号	孔深/m	w(KCl) %		
		最高	最低	平均			最高	最低	平均
S2T1	14.62	6.11	0.42	1.93	S2T1	3.90	6.11	0.42	2.06
S2T3	22.41	9.55	0.36	1.82	S2T3	4.00	4.20	0.53	1.83
S2T4	8.00	4.97	0.80	2.39	S2T4	4.10	4.96	0.80	2.19
S2T5	14.02	10.12	0.69	2.47	S2T5	4.00	10.12	0.76	2.87
	平均			2.15		平均			2.23

表 8 试验区 S₂ 线钻孔全孔 Li、Sr、Br、B、I 含量Table 8 The whole hole concentrations of Li, Sr, Br, B and I before liquefaction along S₂ line in Bieletan

钻孔号	孔深/m	$w_B/10^{-6}$														
		Li			Sr			Br			B			I		
		最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
S2T1	13.50	109	9.41	52.94	397	45.60	162.24	12.60	1.43	6.41	609	18.60	158.05	0.48	0.26	0.36
S2T3	21.98	173	4.09	76.20	2489	8.21	293.19	10.20	4.11	7.30	467	5.13	182.58	0.87	0.21	0.34
S2T5	13.45	83.7	1.64	46.30	542	36.80	159.22	8.96	2.54	6.14	289	10.04	134.74	85.40	0.31	6.33
平均				58.48			204.88			6.62			158.46			2.34

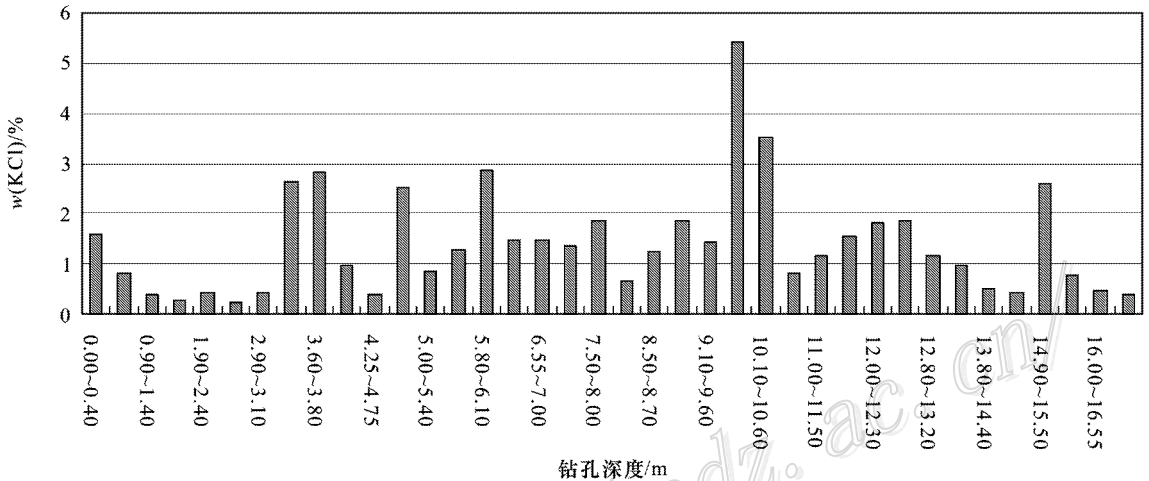


图 6 液化后钻孔 S2T1 中 KCl 含量随深度的变化

Fig. 6 KCl content changes with the depth in S2T1 drill hole after liquefaction

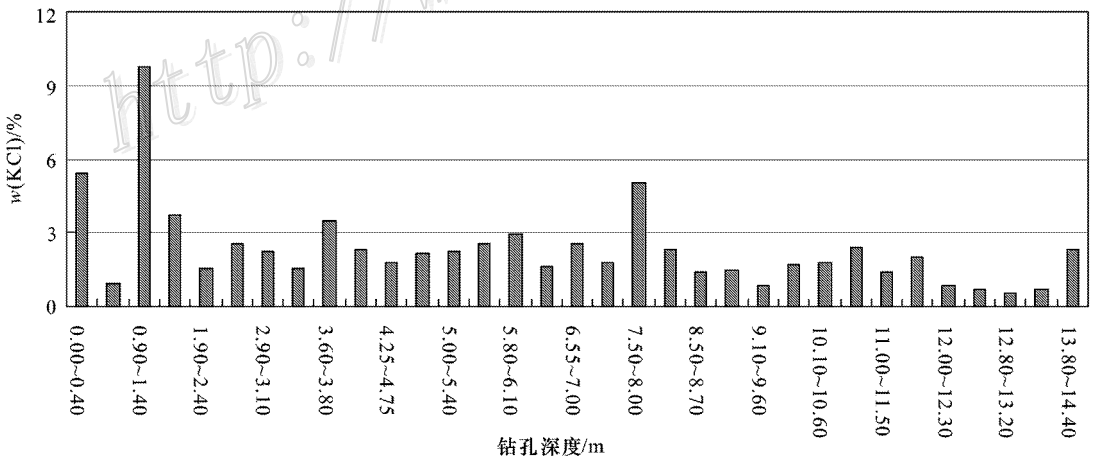


图 7 液化后钻孔 S2T3 中 KCl 含量随深度的变化

Fig. 7 KCl content changes with the depth in S2T3 drill hole after liquefaction

$w(KCl)$ 平均为 1.71% (表 9), 略高于全孔的 $w(KCl)$ 平均值。反映 4 m 以上盐层浓缩程度要比 4 m 以下大, 含钾量略高。从水平方向上分析, 可以看出 S2T1、S2T3、S2T5 的 KCl 含量逐渐升高, S2T5

的 $w(KCl)$ 为 3.38%, 远远高于 S2T1、S2T3 中的该值, 反映从钻孔 S2T1 到钻孔 S2T5 方向 KCl 浓缩度逐渐增大。

液化后分别对 S2T1、S2T3 与 S2T5 三个钻孔的

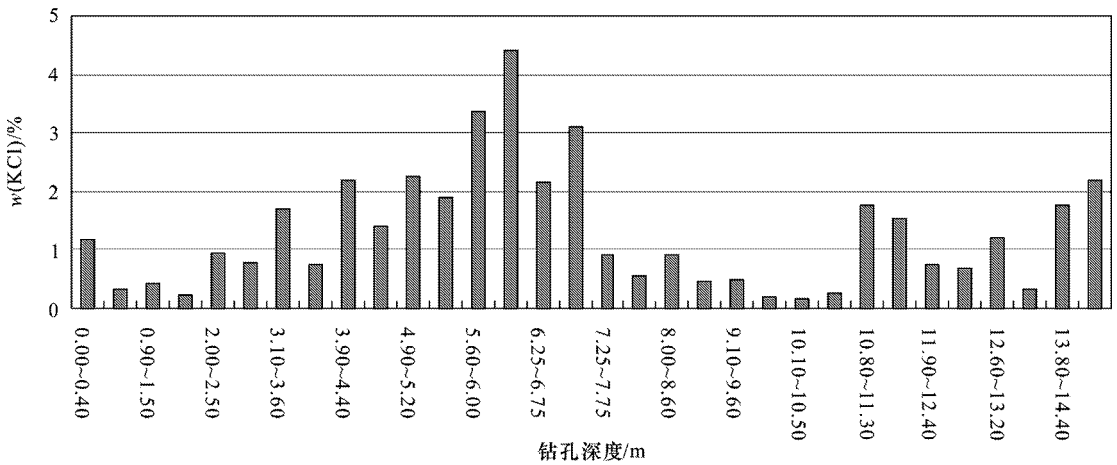


图 8 液化后钻孔 S2T5 中 KCl 含量随深度的变化

Fig. 8 KCl content changes with the depth in S2T5 drill hole after liquefaction

表 9 液化后试验区 S₂ 线钻孔全孔和 4.3 m 以上 KCl 含量

Table 9 KCl concentrations after liquefaction in whole drill holes and above 4.3 m along S₂ line in Bieletan

钻孔号	孔深/m	w(KCl)/%			钻孔号	孔深/m	w(KCl)/%		
		最高	最低	平均			最高	最低	平均
S2T1	14.70	4.41	0.17	1.24	S2T1	3.90	1.70	0.23	0.78
S2T3	22.42	5.42	0.25	1.47	S2T3	3.80	2.82	0.25	0.97
S2T5	14.40	9.73	0.53	2.32	S2T5	3.80	9.73	0.90	3.38
平均				1.68	平均				1.71

表 10 液化后试验区 S₂ 线钻孔全孔 Li、Sr、Br、B、I 含量

Table 10 Concentrations of Li, Sr, Br, B, I after liquefaction in whole drill holes along S₂ line in Bieletan

钻孔号	孔深/m	w _B /%														
		Li			Sr			Br			B			I		
		最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
S2T1	13.50	54.5	10.9	29.40	445	49.9	187.33	4.08	2.44	3.28	329	53.9	149.54	0.43	0.30	0.36
S2T3	21.98	74	13.3	44.01	720	63.1	228.49	5.53	2.27	3.90	270	43.5	127.11	0.50	0.25	0.39
S2T5	13.45	101	14.6	50.10	367	84.2	211.50	4.73	2.42	3.53	481	123.0	211.00	0.45	0.40	0.41
平均				41.17			209.11			3.57			162.55			0.39

Li、Sr、Br、B、I 这 5 种微量元素进行了分析测试。Li 的平均含量 (w_B , 下同) 为 41.17×10^{-6} ; Sr 的平均含量为 209.11×10^{-6} ; Br 的平均含量为 3.57×10^{-6} ; B 的平均含量为 162.55×10^{-6} ; I 的平均含量为 0.39×10^{-6} (表 10)。

3.3 液化前后固体钾盐钾及微量元素含量对比

3.3.1 液化前后固体钾盐钾含量对比

由于钾盐的利用主要是 KCl, 无论是光卤石还是杂卤石最终的生产产品都是 KCl, 所以本文对液化前后的 KCl 进行了对比分析。

液化前测得 S₂ 线 S2T1、S2T3、S2T4 和 S2T5 四

个钻孔的 KCl 含量 ($w(B)$, 下同), 液化后测得 S2T1、S2T3 和 S2T5 三个钻孔的 KCl 含量。对比结果见表 11。

S₂ 线 22.41 m 以上 KCl 的平均含量在液化前为 2.15%, 液化后为 1.68%, 液化后比液化前降低了 0.47%。4.1 m 以上的 KCl 平均含量液化前为 2.23%, 液化后为 1.71%, 液化后比液化前降低了 0.52% (表 12)。反映 4.1 m 以下溶解在水中的 K⁺ 低于 4.1 m 以上溶解在水中的 K⁺。

各个钻孔液化后 KCl 的平均含量 (S2T4 未测) 较液化前都有明显降低, 钻孔 S2T1 下降 0.69%,

S2T3 下降 0.35% ,S2T5 下降 0.15%。从 S2T3 到 S2T5 方向溶出的 K^+ 逐渐减少,这是由于 S2T3 靠近供卤渠,S2T5 靠近采卤渠,注入到钾盐层的卤水从供卤渠到采卤渠流动的过程中,水动力逐渐减小,并且越靠近采卤渠 K^+ 结晶越多。各个钻孔中 KCl 的最高含量(S2T3 除外)与最低含量在液化前均分别高于液化后(表 11、表 12),反映各层的 K^+ 都有被液化的现象。

3.3.2 液化前后固体钾盐微量元素组成对比

液化后与液化前相比,21.98 m 以上 Li、Br、I 这 3 种元素的含量降低,但 Sr 和 B 的含量升高(表 8、10)。液化前、后试验区 21.98 m 以上含量最高的为 Sr(液化前 204.88×10^{-6} ,液化后 209.11×10^{-6})和 I(液化前 158.46×10^{-6} ,液化后 162.55×10^{-6})其

次为 Li(液化前 58.48×10^{-6} ,液化后 41.17×10^{-6})和 Br(液化前 6.62×10^{-6} ,液化后 3.57×10^{-6}),含量最少的为 I(液化前 2.34×10^{-6} ,液化后 0.39×10^{-6})。

4 讨论

4.1 钾盐矿物的水溶性

目前全球范围内所发现的钾盐矿床中,主要的钾盐矿物均为钾石盐(KCl)、光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)和杂卤石($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$)。这与本文所获得的结果是一致的,但各个矿床中最主要的钾盐矿物组合却不尽相同。俄罗斯上卡姆钾盐矿床和涅帕钾盐矿床主要的钾盐矿物组合为钾石盐和光卤

表 11 试验区 S₂ 线钻孔全孔液化前后 KCl 含量对比表

Table 11 A comparison of KCl concentrations before and after liquefaction in whole drill holes along S₂ line in Bieletan

钻孔号	孔深/m	$\alpha(KCl)\%$					
		最高		最低		平均	
		液化前	液化后	液化前	液化后	液化前	液化后
S2T1	14.70	6.11	4.41	0.42	0.17	1.93	1.24
S2T3	22.41	9.55	5.42	0.36	0.25	1.82	1.47
S2T4	8.00	4.97		0.80		2.39	
S2T5	14.40	10.12	9.73	0.69	0.53	2.47	2.32
平均						2.15	1.68

表 12 试验区 S₂ 线钻孔 4.1 m 以上液化前后 KCl 含量对比表

Table 12 A comparison of KCl concentrations before and after liquefaction in drill holes above 4.1 m along S₂ line in Bieletan

钻孔号	孔深/m	$\alpha(KCl)\%$					
		最高		最低		平均	
		液化前	液化后	液化前	液化后	液化前	液化后
S2T1	3.90	6.11	1.70	0.42	0.23	2.06	0.78
S2T3	4.00	4.20	2.82	0.53	0.25	1.83	0.97
S2T4	4.10	4.96		0.80		2.19	
S2T5	4.00	10.12	9.73	0.76	0.90	2.87	3.38
平均						2.23	1.71

石(林耀庭,1996);加拿大萨斯喀彻温钾盐矿床有用的钾盐矿物为钾石盐(Worley et al.,1979);中国云南思茅盆地呵叻上盐组预测主要的钾盐矿物为钾石盐和光卤石(王春宁等,2007);新疆罗布泊盆地主要的钾盐矿物为杂卤石(刘成林等,2008);内蒙鄂尔多斯盆地奥陶系中发现有钾石盐和石膏(魏东岩等,2000)。由于杂卤石和光卤石的水溶性和溶解产物

的不同,所以查明钾盐矿层中最主要的钾盐矿物是十分必要的,据其来确定具体的开采方案,以提高钾盐的开采利用率。前人认为察尔汗盐湖最主要的钾盐矿物普遍为光卤石,但本文通过对别勒滩区段系统的样品分析和测试,认为别勒滩区段最主要的钾盐矿物为杂卤石,其次为光卤石。杂卤石与光卤石均属于复盐,液化提钾的过程实际上是溶解这种复

盐的过程。因此,研究其溶解机理对认识自然界盐矿、盐层的形成、浸蚀过程,从而更好地对它们进行开采和利用有一定的意义(洪显兰等,1994;韩冰等,2008)。

以往认为杂卤石溶解质较小,不利于开采,近年来对杂卤石的溶解试验研究表明(唐明林等,1997;郝丽芳等,2003;安莲英等,2004,2007,2008;陈永志等,2008),溶解度较小的杂卤石可以通过水溶法开采,因此杂卤石在别勒滩地区的液化过程中是能够溶解的。光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)易溶于水,其在水中分解时进行着包括溶解和 KCl 结晶 2 种复杂过程。水溶液中 $NaCl$ 的浓度几乎不影响光卤石的溶解(保积庆等,1995)。总之,别勒滩区段的固体钾盐是可以通过液化的方式进行开采的。

4.2 微量元素的富集程度

盐湖伴生矿产的综合利用是长期以来讨论的热点(孙青武等,2003;郑绵平等,2004;胡仙峰,2007;赵吉祥等,2009)。察尔汗盐湖目前正在进行 Li 等资源的综合回收利用工作。本文对于察尔汗盐湖微量元素的研究,可以为其 Li 、 Sr 、 Br 、 B 、 I 等伴生资源的综合开发利用提供基础资料。

从表 13 中可以看出,与中国沉积岩中元素的丰度(黎彤,1994;倪守斌等,1999;杨磊等,2008)相比,液化前 Li 、 B 、 I 的富集系数均大于 2,为强富集元素; Br 的富集系数为 1~2,是中等富集元素, Sr 的富集系数 < 1 ,则为贫化元素。液化后 B 的富集系数大于 2,为强富集元素; Li 、 I 的富集系数为 1~2,是中等富集元素; Sr 、 Br 的富集系数 < 1 ,则为贫化元素。可见盐湖中的伴生元素 I 、 B 和 Li 具有开采潜力。

4.3 液化溶出资源量及其经济意义

S_2 线 22.41 m 以上的 KCl 平均含量液化前为 2.15%,液化后为 1.68%,液化后比液化前降低了

0.47%。4.1 m 以上的 KCl 平均含量液化前为 2.23%,液化后则为 1.71%,液化后比液化前降低了 0.52%(表 11 表 12)。

根据体积法公式: $Q = s \times h \times \rho \times c$ (Q 为溶出的 KCl 总量; s 为别勒滩区段的面积; h 为盐层的厚度; c 为溶出的 KCl 质量分数; ρ 为含钾盐层的密度;本文 $\rho = 1.7 t/m^2$),可以计算出 KCl 的资源量。

别勒滩盐湖的面积约 1 500 km^2 (杨谦等,1993),但由于盐湖演化的晚期才有钾盐形成,综合勘查及调查资料计算出固体钾盐分布面积约为 300 km^2 。由此计算出别勒滩地区 22.41 m 以上溶出 KCl 的资源量为 5 374 万吨,根据 2009 年 3 月 14 日青海格尔木市钾肥报价 3 500 元/吨计算,其钾肥潜在价值约 1 881 亿元。4.1 m 以上溶出的 KCl 资源量约为 1 087 万吨,潜在价值约 381 亿元。

5 结 论

(1) 别勒滩地区液化前、后主要的钾盐矿物均为杂卤石,其次为光卤石,这与前人所述察尔汗地区最主要的钾盐矿物为光卤石不同。杂卤石的水溶性小于光卤石,但实验研究显示,固液转化法开采别勒滩地区杂卤石可行。

(2) 液化前别勒滩地区的微量元素中,强富集元素为 I 、 B 和 Li ,中等富集元素为 Br ,贫化元素为 Sr 。液化后别勒滩地区的微量元素中,强富集元素为 B ,中等富集元素 Li 和 I ,贫化的元素为 Sr 和 Br 。可见盐湖中的伴生元素 I 、 B 和 Li 具有开采潜力。

(3) 试验区 S_2 线液化前埋藏 22.41 m 以上的 KCl 平均含量为 2.15%,液化后的平均含量为 1.68%,液化后比液化前的平均含量降低了 0.47%。溶出 KCl 的资源量约为 5 374 万吨,计算预测钾盐潜在价值约 1 881 亿元。液化前 4.1 m 以上 KCl 平均含量为 2.23%,液化后的平均含量为 1.71%,液化后比液化前的平均含量低 0.52%。溶出的 KCl 资源量约为 1 087 万吨,计算预测潜在价值约为 381 亿元。

志 谢 本文样品鉴定工作得到曲懿华高工、刘丹阳高工的帮助,扫描电镜为魏宝和高工测试, X 射线衍射分析为韩景仪副研究员完成,化学分析为何汉江高工完成,成文过程中得到中国地质大学(北京)肖荣阁教授、叶荣教授的指导,论文承蒙《矿床地

表 13 别勒滩区段液化前、后微量元素富集系数统计表
Table 13 Statistics of enrichment factors before and after
liquefaction in Bieletan

元素	液化前富集系数	液化后富集系数	中国沉积岩中的丰度/ $10^{-6} \%$
Li	2.25	1.58	26
Sr	0.62	0.63	330
Br	1.84	0.99	3.6
B	2.30	2.36	69
I	10.17	1.70	0.23

* 据黎彤等,1994;倪守斌等,1999;杨磊等,2008。

质)所邀审稿专家认真审核并提宝贵意见,在此表示衷心感谢。

References

- An L Y, Yin H A, Tang M L and Yao L P. 2004. Study on the dissolving behavior of polyhalite in water[J]. *J. Mineral. & Petrol.*, 24(4): 108-110 (in Chinese with English abstract).
- An L Y, Liu N, Yin H A, Tang M L and Hao L F. 2007. Laboratorial study on the leaching process of polyhalite[J]. *J. Mineral. & Petrol.*, 27(2): 112-115 (in Chinese with English abstract).
- An L Y, Yang Z J, Liu N, Yin H A and Tang M L. 2008. Modeling of leaching process of polyhalite in laboratory[J]. *Industrial Minerals & Processing*, (10): 24-27 (in Chinese with English abstract).
- Bao J Q and Xia S P. 1995. Study on the dissolution and transformation of carnallite in Na_2SO_4 solution[J]. *J. Salt Lake Research*, 3(2): 51-58 (in Chinese with English abstract).
- Bao Y L. 2006. Phase diagram analysis of the process for production of KCl by reverse flotation and cold crystallization[J]. *J. Salt Lake Research*, 14(3): 39-42 (in Chinese with English abstract).
- Cai K Q and Gao J H. 1994. The conditions for the forming of potassium deposits in salt lake of Chaerhar[J]. *Earth Science Frontiers*, 1(3-4): 231-233 (in Chinese).
- Chen Y Z, Liu C L and Jiao P C. 2008. Characteristics and preliminary dissolution experiment of polyhalite in Lop Nur[A]. In: Chen Y C, Xue C J and Zhang C Q, ed. Main attacking deep, Pushing forward westward and keeping in view the world-The memoir of the Ninth Session National Deposit Conference[C]. The Ninth Session National Deposit Conference, 2008. Beijing: Geol. Pub. House. 813-815 (in Chinese).
- Han B, Tang N, Shang Z L, Li C B, Lu J C and Zhao B. 2008. Study on crystallization mechanism of producing potassium chloride by dissolving carnallite[J]. *J. Salt & Chemical Industry*, 37(2): 13-16 (in Chinese with English abstract).
- Hao L F, An L Y, Tang M L, Yin H A and Long Z P. 2003. Study of the extraction method of potassium in polyhalite[J]. *J. Chengdu Univ. Technol.(Sci. & Technol. Edition)*, 30(2): 202-204 (in Chinese with English abstract).
- Hong X L, Xia S and Gao S Y. 1994. Study on the process of dissolution of carnallite[J]. *J. Salt Lake Research*, 2(2): 44-48 (in Chinese with English abstract).
- Hu X F. 2007. Thinking of mineral resources in development direction: The comprehensive development of potassium, boron, lithium, magnesium and the development of high value-added product of salt lake deep processing[J]. *China Foreign Medical Treatment*, (13): 29-30 (in Chinese).
- Jiao P C, Liu C L, Zhao Y Y, Li W P, Hao A B, Wang S J and Chen Y Z. 2008. The research of development technology about the low-grade solid potash resources in Bieletan, Qinghai[A]. In: Chen Y C, Xue C J and Zhang C Q, ed. Main attack partes profunda, Push forward westward and Keeping in view the world: The memoir of the Ninth Session National Deposit Conference[C]. The Ninth Session National Deposit Conference, 2008. Beijing: Geol. Pub. House. 820-822 (in Chinese).
- Li T. 1994. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust[J]. *Geochimica*, 23(2): 140-145 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T. 1996. How to resolve the shortage of sylvite in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 4(2): 14-17 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Fan W D, Chen Y Z, Yang Z S and Wang J G. 2008. Sedimentary characteristics and origin of polyhalite in Lop Nur salt lake, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 27(6): 705-713 (in Chinese with English abstract).
- Ni S B, Man F S, Li Tong and Wang Z R. 1999. On the tectonogeochemical background in northern Xinjiang[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 177-185 (in Chinese with English abstract).
- Sun Q W, Qiu C F and Zhang S R. 2003. Thinking about resource development and utilization of Chaerhan salt lake[J]. *Qinghai Sci. & Technol.*, (6): 16-18 (in Chinese).
- Tan X, Wang F L, Zeng K, Ren A J and Liu S H. 2007. Novel purification technology of potassium chloride product from Qinghai Salt Lake Industry Group Co. Ltd. by preprocessing-reverse flotation[J]. *Nonferrous Metals*, 59(2): 50-54 (in Chinese with English abstract).
- Tang M L and Wang R. 1997. Study on the utilizing method of potassium of polyhalite deeply occurred in China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (3): 31-34 (in Chinese with English abstract).
- Wang C N, Yu J Q, Chen L and Zhang L S. 2007. A review on the exploration of global potash resources with an emphasis on the past and present status of China with a methodological perspective[J]. *J. Salt Lake Research*, 15(3): 56-72 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J. 2005. Discussion on characteristics of workable reserves of potassium and magnesium salt deposit in Chaerhan salt lake and its mining[J]. *Industrial Minerals & Processing*, (1): 30 (in Chinese with English abstract).
- Wei D Y, Cui T X, Liu Z M, Deng X L and Yang G S. 2000. On conditions for potassium-forming of Eerduosi basin during Ordovician period and direction of potassium-hunting in it[J]. *Geol. Chem. Minerals*, 22(4): 193-204 (in Chinese with English abstract).
- Worley N and Fuacsy A. 1979. The potash-bearing members of the Devonian Prance evaporate of southeastern Saskatchewan, south of the mining area[J]. *Econ. Geol.*, (74): 377-388.
- Yang L, Liu C Y and Li H Y. 2008. Geochemistry of trace elements and rare earth elements of coal in Chenjiashan coal mine[J]. *Coal Geol. & Explor.*, 36(2): 10-14 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q, Wu B H, Wang S Z, Cai K Q and Qian Z H. 1993. Geology of the potash deposit of the Qarhan salt lake[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 99-111 (in Chinese).
- Yuan J Q, Yang Q, Sun D P, Huo C Y, Cai K Q, Wang W D and Liu

- Xun. 1995. Formation conditions of the potash deposit of the Qarhan salt lake[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 107, 120-123, 147-152 (in Chinese).
- Zhao J X, Liu W P and Wang C. 2009. Comprehensive utilization of magnesium chloride resources in the Qarhan salt lake[J]. China New Technologies and Products, (12): 173 (in Chinese).
- Zhao Y Y, Han J Y, Wang S J, Jiao P C, Liu C L and Qian Z H. 2008. New cognition and its significance of mineral composition of solid potassium salts in Bieletan, Qinghai[A]. In: Chen Y C, Xue C J and Zhan C Q, ed. Main attacking deep, Pushing forward westward and keeping in view the world—The memoir of the Ninth Session National Deposit Conference[C]. The Ninth Session National Deposit Conference, 2008. Beijing: Geol. Pub. House. 395-397 (in Chinese).
- Zheng M P, Xiang J, Wei X J and Zheng Y. 1989. Salt lakes on the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau[M]. Beijing: Beijing Sci. & Technol. Press. 330 (in Chinese).
- Zheng M P, Xiang J and Ge Z H. 2004. Sustainable development of K, Mg, Li, B mineral resources in China[J]. Land & Resources Information, (3): 27-32 (in Chinese).
- Zhou X, Fang B, Chen M Y, Zhang H, Zhao L and Shen Y. 2006. Numerical simulation of brine in crystalline halite in the Bieletan area of the Charham salt lake region, Qinghai Province[J]. Arid Zone Research, 23(2): 258-263 (in Chinese with English abstract).
- 胡仙峰. 2007. 青海察尔汗盐湖矿产资源的开发方向思考——钾、硼、锂、镁综合开发、高附加值的盐湖深加工产品开发[J]. 化工之友, (13): 29-30.
- 焦鹏程, 刘成林, 赵元艺, 李文鹏, 郝爱兵, 王石军, 陈永志. 2008. 青海别勒滩低品位固体钾盐资源开发技术探讨[A]. 见: 陈毓川, 薛春纪, 张长青, 主编. 《主攻深部 挺进西部 放眼世界——第九届全国矿床会议论文集》[C]. 第九届全国矿床会议, 2008. 北京: 地质出版社. 820-822.
- 黎彤. 1994. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 23(2): 140-145.
- 林耀庭. 1996. 对解决我国钾盐资源途径的思考[J]. 矿产保护与利用, 4(2): 14-17.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 樊卫东, 陈永志, 杨智琛, 王敬国. 2008. 罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨[J]. 矿床地质, 27(6): 705-713.
- 倪守斌, 满发胜, 黎彤, 王兆荣. 1999. 新疆北部地区的大地化学背景[J]. 地质科学, 34(2): 177-185.
- 孙青武, 邱春风, 张述瑞. 2003. 对察尔汗盐湖资源开发利用的思考[J]. 青海科技, (6): 16-18.
- 谭欣, 王福良, 曾克, 任爱军, 刘水红. 2007. 青海盐湖集团公司氯化钾产品预处理、反浮选纯化新工艺[J]. 有色金属, 59(2): 50-54.
- 唐明林, 汪蓉. 1997. 我国深部杂卤石中钾的利用途径研究[J]. 矿产综合利用, (3): 31-34.
- 王春宁, 余俊清, 陈良, 张丽莎. 2007. 钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究[J]. 盐湖研究, 15(3): 56-72.
- 王石军. 2005. 察尔汗盐湖钾镁盐矿床可采储量特征及其开采探讨[J]. 化工矿物与加工, (1): 30.
- 魏东岩, 崔天秀, 刘振敏, 邓小林, 杨更生. 2000. 试论鄂尔多斯盆地奥陶系成钾条件及找钾方向[J]. 化工矿产地质, 22(4): 193-204.
- 杨磊, 刘池洋, 李洪英. 2008. 陈家山矿煤中微量元素和稀土元素地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 36(2): 10-14.
- 杨谦, 吴必豪, 王绳祖, 蔡克勤, 钱作华. 1993. 察尔汗盐湖钾盐矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 99-111.
- 袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 霍承禹, 蔡克勤, 王文达, 刘训. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[M]. 北京: 地质出版社. 120-123, 147, 150-152.
- 赵吉祥, 刘万平, 王超. 2009. 察尔汗盐湖氯化镁资源的综合利用[J]. 中国新技术新产品, (12): 173.
- 赵元艺, 韩景仪, 王石军, 焦鹏程, 刘成林, 钱作华. 2008. 青海别勒滩固体钾盐矿物组成的新认识及其意义[A]. 见: 陈毓川, 薛春纪, 张长青, 主编. 《主攻深部 挺进西部 放眼世界——第九届全国矿床会议论文集》[C]. 第九届全国矿床会议, 2008. 北京: 地质出版社. 395-397.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 330.
- 郑绵平, 项杰, 葛振华. 2004. 我国钾、镁、锂、硼矿产资源的可持续发展[J]. 国土资源情报, (3): 27-32.
- 周训, 方斌, 陈明佑, 张华, 赵亮, 沈晔. 2006. 青海省察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水数值模拟[J]. 干旱区研究, 23(2): 258-263.

附中文参考文献

- 安莲英, 殷辉安, 唐明林, 尧丽萍. 2004. 杂卤石溶解性能的测定[J]. 矿物岩石, 24(4): 108-110.
- 安莲英, 刘宁, 殷辉安, 唐明林, 郝丽芳. 2007. 杂卤石矿地浸模拟实验研究[J]. 矿物岩石, 27(2): 112-115.
- 安莲英, 杨站君, 刘宁, 殷辉安, 唐明林. 2008. 杂卤石地浸开采实验室模拟[J]. 化工矿物与加工, (10): 24-27.
- 保积庆, 夏树屏. 1995. 氯化钠对钾光卤石溶解过程的影响[J]. 盐湖研究, 3(2): 51-58.
- 保英莲. 2006. 反浮选-冷结晶法生产氯化钾相图分析[J]. 盐湖研究, 14(3): 39-42.
- 蔡克勤, 高建华. 1994. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[J]. 地学前缘, 1(3-4): 231-233.
- 陈永志, 刘成林, 焦鹏程. 2008. 罗布泊杂卤石特征及其溶矿实验初步研究[A]. 见: 陈毓川, 薛春纪, 张长青, 主编. 《主攻深部 挺进西部 放眼世界——第九届全国矿床会议论文集》[C]. 第九届全国矿床会议, 2008. 北京: 地质出版社. 813-815.
- 韩冰, 唐娜, 沙作良, 李承宝, 鲁娟昌, 赵彪. 2008. 光卤石分解制氯化钾结晶机理研究[J]. 盐业与化工, 37(2): 13-16.
- 郝丽芳, 安莲英, 唐明林, 殷辉安, 龙卓平. 2003. 杂卤石矿中钾的提取工艺研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(2): 202-204.
- 洪显兰, 夏树屏, 高世扬. 1994. 钾光卤石溶解过程研究[J]. 盐湖研究, 2(2): 44-48.