

青海察尔汗盐湖固体钾盐物质组成及意义

李波涛¹, 赵元艺², 叶荣¹, 郝爱兵³, 王石军⁴, 焦鹏程²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 青海盐湖工业集团有限公司 技术中心, 青海 格尔木 816000)

摘要: 察尔汗盐湖为我国目前最大的钾肥产地。根据钾盐层的矿物组成可以确定钾盐开发的难易程度以及化学组成可以确定钾盐富集层位并可对资源量进行估计的原则, 通过在察尔汗盐湖别勒滩区段和察尔汗区段野外系统取样和室内的分析测试, 研究了固体钾盐层的矿物组成、化学组成和物理参数。结果表明, 别勒滩区段钾盐层最主要的钾盐矿物是杂卤石, 其矿物晶形完好, 排列紧密, 表明液化开发至“中期阶段”即可利用, 此段22.42 m以上钾盐的资源量约为2.5亿吨, 主要赋存层位为断续的5段; 察尔汗区段钾盐层最主要的钾盐矿物为光卤石, 其矿物晶体排列疏松, 表明液化开发到“晚期阶段”才可利用, 察尔汗盐湖3区段3.55 m以上资源量共约为0.89亿吨, 钾盐的主要赋存层位为浅表的60 cm以浅的盐层。对该区段钾盐的物理参数进行探讨, 为察尔汗盐湖的进一步研究和固体钾盐的开发提供了新资料。

关键词: 察尔汗盐湖; 别勒滩区段; 察尔汗区段; 固体钾盐; 青海省

中图分类号: P619.21+1

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2012)01-0071-14

Composition in Solid Potash Deposits of Qarhan Salt Lake, Qinghai Province and Its Significance

LI Bo-tao¹, ZHAO Yuan-yi², YE Rong¹, HAO Ai-bing³, WANG Shi-jun⁴,
JIAO Peng-cheng²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China;
4. Technology Center, Qinghai Salt Lake Group Industry Group Co., Ltd, Geermu, Qinghai 816000, China)

Abstract: At present, Qarhan salt lake is the largest potash producing area in China. Based on the principle that mineral composition in potash deposits could determine potassium mining process, and that chemical composition could determine potassium-rich layers and estimate the amount of K resources, mineral composition, chemical composition and physical parameters of solid potash strata were studied by analyzing the samples from the field of Bielestan section and Qarhan section in Qarhan salt lake. Results show that the characteristics are as following: the main potassium mineral from Bielestan is polyhalite, and crystals of salt minerals are shaped perfectly and arranged closely, which indicates that the middle phase of liquefaction is available, and the resource quantity is about 250 million tons above the 22.42 m in Bielestan section, and there are five main occurrence layers for 0-0.4 m, 2.9-8.1 m, 8.90-9.70 m, 11.4-12.4 m and 15.99-16.33 m, respectively; the main potassium minerals are carnallite, and crystals of salt minerals are loosely arranged, which indicates that the last phase of liquefaction is available, and the average concentration of KCl is 1.68% above the 3.55 m,

收稿日期: 2011-05-11; 改回日期: 2011-10-15; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 科技部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”(2006AA06Z133); 国土资源部“金土工程”课题“我国钾盐资源潜力数据库建设”(JTXM-DW-KZ4-04)。

作者简介: 李波涛, 女, 硕士研究生, 1987年出生, 矿床地球化学专业, 主要从事表生地球化学研究。

Email: libotaozai@163.com。

通信作者: 赵元艺, 男, 研究员, 1966年出生, 矿床学专业, 主要从事矿床地球化学研究。Email: yuanyizhao2@sina.com。

and the main layer of potash is located above 60 cm, the resource quantity is about 89 million tons above the 3.55 m in Qarhan salt lake except Bieletan section. The research provides new data for the further research and the exploitation of solid potash.

Key words: Qarhan salt lake; Bieletan section; Qarhan section; solid potash deposit; Qinghai Province

0 引言

钾盐是农用钾肥的生产原料,在我国属大宗紧缺矿种。察尔汗盐湖位于柴达木盆地的东南部,面积达五千多平方公里,从整体上看,基本上是一个“干湖”,仅在东、西、南缘残存一些水湖。察尔汗盐湖自西向东分为别勒滩区段、达不逊区段、察尔汗区段和霍布逊区段(图1)^[1-3]。本文研究的区段为别勒滩区段和察尔汗区段。以往的学者在察尔汗盐湖的研究主要包括以下3个方面:晶间卤水动态和卤水水化学特征^[2,4-12]、盐湖钾镁资源开发利用前景探讨^[13-20]和钾盐镁盐矿床成矿机理和形成的地质条件^[21-25],这些均未涉及对钾盐物质的详细探讨。赵元艺等也已对别勒滩区段的物质组成进行了详细研究,指出别勒滩区段钾盐矿物的矿物组成和化学特点^[26-27],但是缺乏从整个盐湖角度的详细论述。本文对察尔汗盐湖别勒滩区段和察尔汗区段的固体钾盐层,从矿

物组成、化学组成和物理参数3方面进行详细论述,指出这两个区段最主要的钾盐矿物与化学组成的差异,并从物质组成探讨液化开发的阶段,从化学组成探讨综合利用前景,为察尔汗盐湖的进一步研究与固体钾盐的开发提供基础资料。

1 样品的采集和测定方法

1.1 样品采集和处理

本次研究的样品主要采自别勒滩区段和察尔汗区段。

1.1.1 别勒滩区段

别勒滩区段的样品采自青海盐湖集团目前正在采卤的察尔汗西部色聂湖东北岸采卤区的S₄盐层(图2A)。样品采集地点和深度分别如图1和表1所示。本次研究在此试验区施工22个钻孔(图3,图4),对其中涩北公路南侧的S2T1、S2T3、S2T4、S2T5一组钻孔和涩北公路北侧钻孔CK2600、CK2188进行了全孔岩心采样(图2B、C),

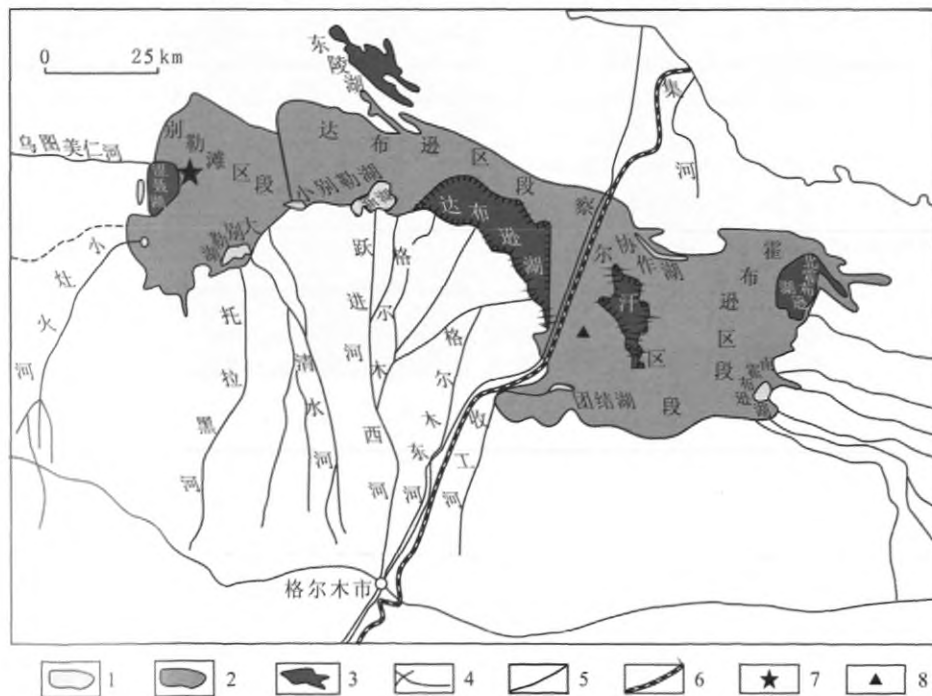


图1 察尔汗盐湖的区段划分示意图(据于升松^[2], 2000, 改绘)

Fig. 1 The divided section of Qarhan salt lake (modified after Yu^[2], 2000)

1. 水湖; 2. 干盐湖; 3. 固液共存盐湖; 4. 河流; 5. 公路; 6. 铁路; 7. 别勒滩区段工作地点; 8. 察尔汗区段工作地点

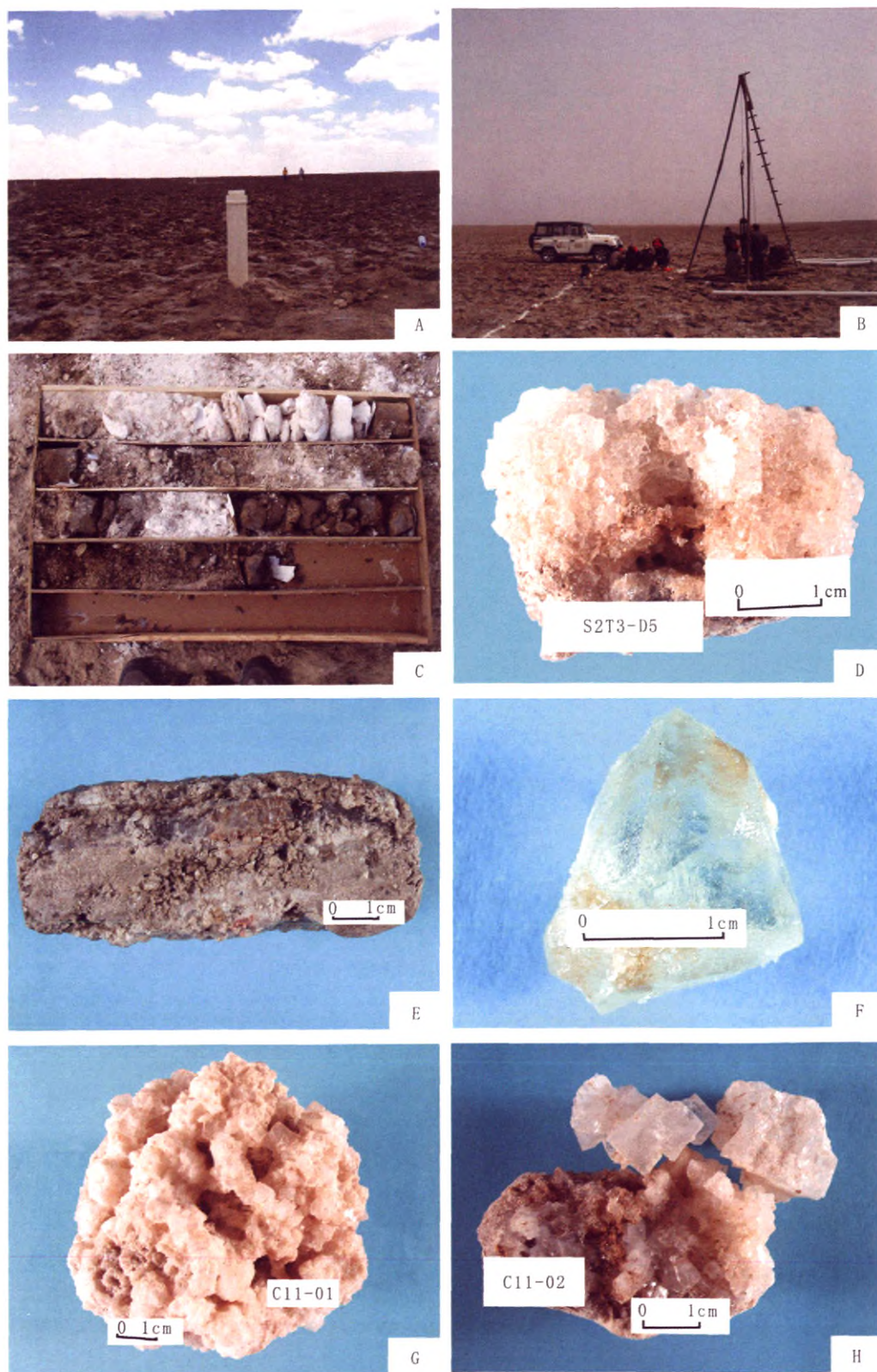


图2 察尔汗盐湖盐层和盐类矿物晶体

Fig. 2 Salt bed and crystals of salt minerals in Qarhan salt lake

A. 别勒滩区段盐层; B. 察尔汗区段钻孔取样; C. 岩心; D. 别勒滩区段石盐晶体(样号 S2T3-D5); E. 别勒滩区段含杂卤石粉砂石盐条带结构(样号 CK2600-X17); F. 别勒滩区段光卤石晶体(样号 CK2600-X0); G. 察尔汗区段石盐孔隙(样号 C11-01); H. 察尔汗区段石盐晶体(样号 C11-02)

表 1 别勒滩区段样品采集深度
Table 1 Sampling depth in Bieletan section

孔号	样号	采样深度/m	孔号	样号	采样深度/m	孔号	样号	采样深度/m
	Hj01	0~0.30		Hj55	11.20~11.40		Hj01	0~0.30
	Hj10	2.70~2.90		Hj60	12.49~12.69		Hj10	3.00~3.20
	Hj20	5.70~6.00		Hj65	13.59~13.79		Hj20	6.40~6.80
	Hj30	9.57~10.07		Hj70	14.59~14.79		Hj30	11.17~11.67
	Hj35	11.49~11.99		Hj75	15.59~15.79		Hj35	13.32~13.82
	Hj40	13.99~14.62		Hj80	16.63~17.13		Hj40	10.6~11.1
S2T1	Hj45	12.99~13.50		Hj85	18.98~19.48		Hj45	12.95~13.45
	KG01	2.00~2.10		Hj90	21.48~21.98	S2T5	KG01	1.60~1.70
	KG02	2.90~3.00	S2T3	KG01	1.00~1.10		KG02	2.10~2.20
	KG03	3.50~3.60		KG02	1.70~1.80		KG03	2.90~3.00
	KG04	3.90~4.00		KG03	2.20~2.30		KG04	3.60~3.70
	KG05	6.30~6.40		KG04	5.30~5.40		KG05	5.50~5.60
	KG06	8.47~8.57		KG05	6.80~6.90		KG06	6.30~6.40
	Hj01	0.00~0.20		KG06	10.10~10.20		KG07	8.07~8.17
	Hj05	0.80~1.00		KG07	11.60~11.70		KG08	9.57~9.67
	Hj10	2.00~2.20		KG08	13.09~13.17		W0	6.9~7.45
	Hj15	3.00~3.20		KG09	18.38~18.48		W4	1.5~1.8
S2T3	Hj17	3.40~3.60	S2T4	KG01	0.40~0.50	CK2188	W8	2.9~3.4
	Hj20	4.00~4.20		KG02	2.60~2.70		W10	4.3~4.5
	Hj25	5.00~5.20		KG03	3.50~3.60		W13	5.75~6.5
	Hj30	6.00~6.20		KG04	4.60~4.70		W0	8.4~8.5
	Hj35	7.10~7.30		KG05	5.80~5.90		W8	2.8~3.1
	Hj40	8.10~8.30		KG06	6.20~6.30	CK2600	W17	5.75~6.05
	Hj45	9.10~9.30		KG07	6.62~6.72		W17-1	5.6~5.8
	Hj50	10.20~10.40		KG08	7.20~7.30		W32	12.8~12.9

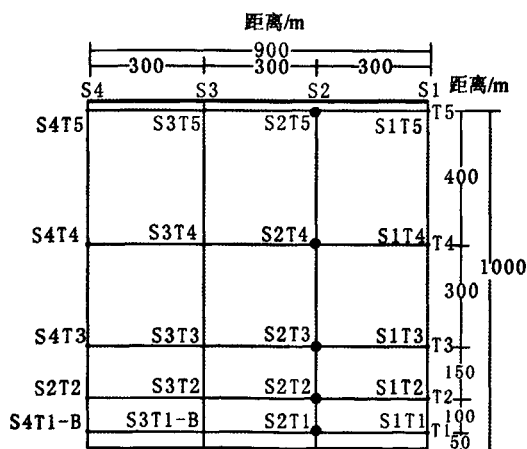


图 3 别勒滩区段 S 线钻孔位置示意图

Fig. 3 Location of drillholes in S line in Bieletan section

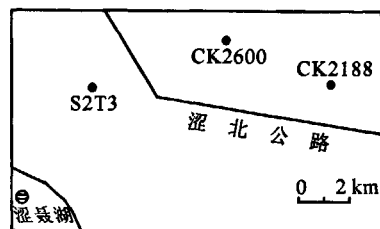


图 4 别勒滩区段 CK 两钻孔及 S2T3 钻孔位置示意图

Fig. 4 Location of CK and S2T3 drillholes in Bieletan section

1.1.2 察尔汗区段

察尔汗区段样品采自该区青藏铁路东侧 S4 盐层, 采集地点和深度分别如图 1 和表 2 所示。在此试验区范围内的 10 000 m² 区域施工 12 个钻孔 (图 5), 本研究对其中的 3 个钻孔 C2、C5 和 C11 进行了全孔岩心采样, 样品采集后立即装进透明塑料袋内密封保存。钻孔 C2 深 3.55 m, 钻孔 C5 深 3.30 m, 钻孔 C11 深 3.50 m。

1.2 样品的分析测试方法

本次研究测定了样品的矿物组成、化学组成

样品采集后立即装进透明塑料袋内密封保存。钻孔 S2T1 深 14.62 m, 钻孔 S2T3 深 22.41 m, 钻孔 S2T4 深 8 m, 钻孔 S2T5 深 14.02 m, 钻孔 CK2600 深 12.90 m, 钻孔 CK2188 深 7.45 m。

表2 察尔汗区段钻孔 C11 样品采样深度

Table 2 Sampling depth in drillhole of C11 in Qarhan section

样号	采样深度/m	样号	采样深度/m	样号	采样深度/m
01	0.00~0.10	08	0.70~0.85	21	2.05~2.15
02	0.10~0.20	09	0.85~0.95	22	2.15~2.25
03	0.20~0.30	10	0.95~1.05	24	2.50~2.75
04	0.30~0.40	12	1.15~1.25	25	2.75~2.85
05	0.40~0.50	14	1.35~1.45	26	2.85~2.95
06	0.50~0.60	16	1.55~1.65	28	3.05~3.15
07	0.60~0.70	18	1.75~1.85	30	3.25~3.35

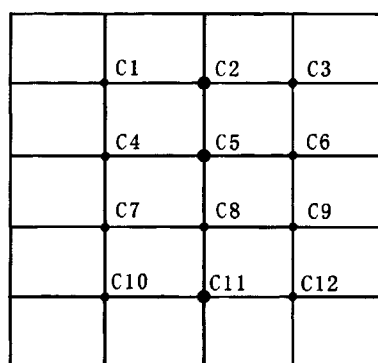


图5 察尔汗区段钻孔位置示意图

Fig. 5 Location of drillholes in Qarhan section

和盐层的物理参数。矿物组成的测定采用显微镜鉴定、X射线粉晶衍射分析以及扫描电镜分析方法，化学组成包括主量元素和微量元素，物理参数包括密度和孔给度。

采用扫描电子显微镜分析矿物组成的过程为：取原状岩心样品，使用上海市实验仪器总厂生产的101A-2B型干燥箱，在80℃温度下对样品进行干燥处理，处理时间为3天。对干燥后的样品，用日本产Shimadzu Lc50型镀膜机进行抽空，然后镀金膜，膜的厚度为100 Å。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。测试条件为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。

采用X射线衍射分析矿物组成的过程为：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深为2 mm的凹槽内压实。将装有粉末样品的小玻璃片放入X射线衍射分析仪中扫描。测试条件采用衍射仪Bruker D8 Advance和Diffractionmeter，X

光源为铜靶/40 kV/40 mA，探测器为锂漂移硅固体探测器，狭缝DS=SS=1 mm，RS=0.1 mm，扫描方式为连续扫描，扫描速度为3°/min，采样间隔为0.02°。测试单位为中国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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻和水不溶物，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，K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺用原子吸收光谱法测定，Cl⁻采用硝酸汞容量法，SO₄²⁻采用硫酸钡质量法，CO₃²⁻采用酸碱滴定容量法，水不溶物采用质量法测定。测试单位为中化地质矿山总局中心实验室。物理参数的分析项目包括密度和孔给度，测试单位为青海省柴达木综合地质大队实验室。

2 别勒滩区段固体钾盐物质组成

2.1 矿物组成

本次研究对别勒滩区段涩北公路北侧CK2188和CK2600两个钻孔的样品进行了分析。从研究样品标本(图6)与扫描电镜鉴定及X射线衍射实验结果(表3)可知，试验区沉积物由石盐、钾石盐、光卤石、杂卤石、石膏、硬石膏、石英、绿泥石、水氯镁石、方解石和云母类矿物共11种矿物组成。其中石盐是最主要的矿物，石膏类矿物含量不高，但普遍存在。

别勒滩区段不同层位的主要钾盐矿物不同，2.8~3.1 m主要钾盐矿物为钾石盐(11.3%)，5.6~6.05 m主要的钾盐矿物是杂卤石(27.3%)，8.4~8.5 m主要的钾盐矿物是光卤石(10.1%)。由于钾石盐层和光卤石层的厚度及钾盐矿物的含量都低于杂卤石层的，所以涩北公路北侧最主要的钾盐矿物是杂卤石，其次是钾石盐，并含有少量的光卤石。

别勒滩区段盐类矿物大多数晶形完好，溶蚀现象较少。石盐具中细粒结构，多为立方体(图2D，图6A)，表面光洁，少量出现含杂卤石粉砂石盐条带结构(图2E)。光卤石(图2F)分布于粒表和粒间，呈粒状(图6B)、球粒状(图6C)、条状(图6D)和片状(图6E)，部分光卤石被溶蚀(图6F)。杂卤石形态各异，呈绒球状(图6G)、放射球状、针叶状(图6H)和片状。石膏呈片状、针状和条状。水氯镁石呈条状。钾石盐为白色，多呈立方体，集合体常为致密粒状块体。

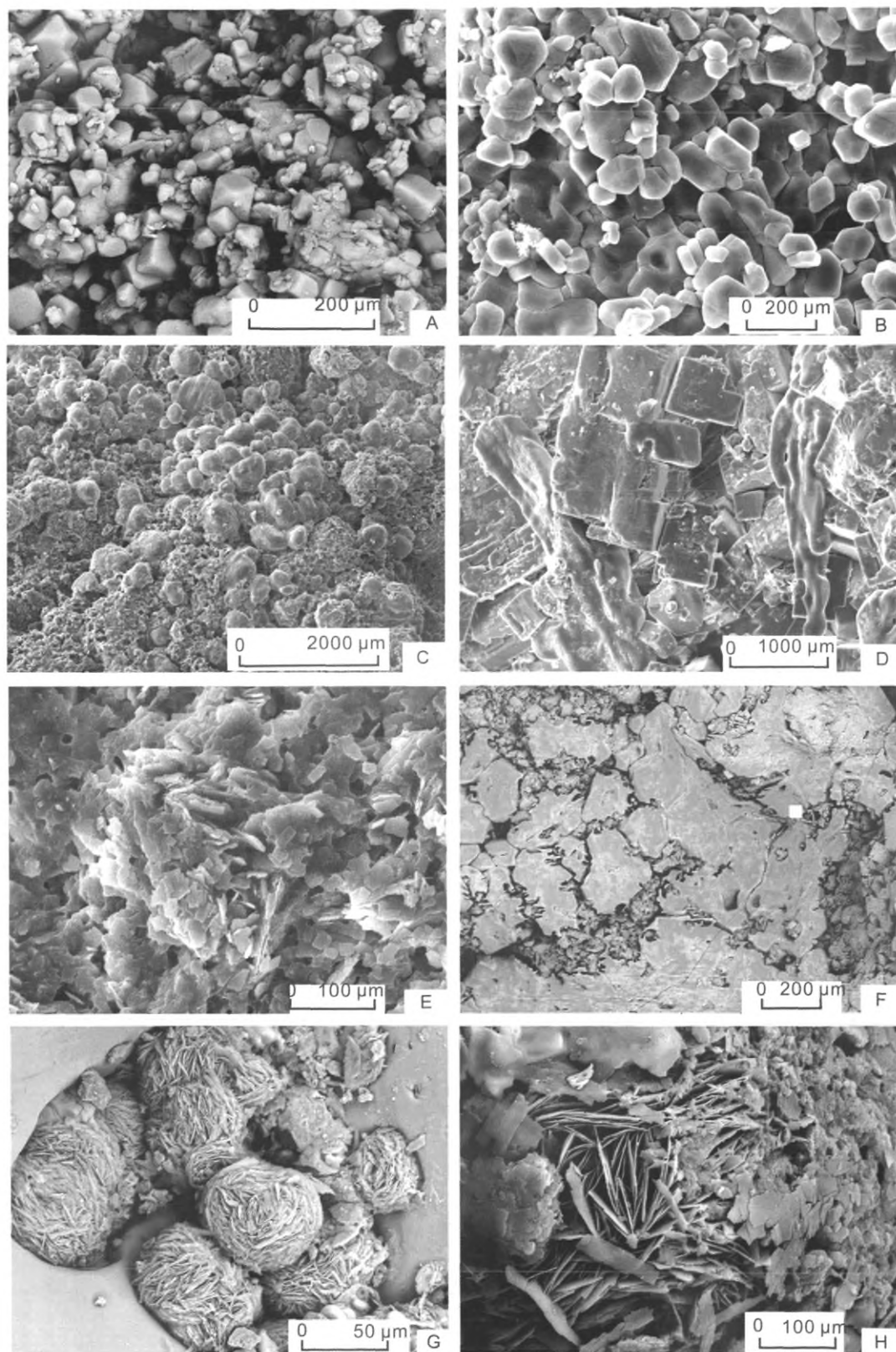


图6 别勒滩区段盐类矿物晶体

Fig. 6 Crystals of salt minerals in Bielestan section

A. 石盐(样号 CK2188 - W4); B. 粒状光卤石(样号 CK2600 - W8); C. 球粒状光卤石(样号 CK2600 - W17); D. 条状光卤石(样号 CK2600 - W0); E. 片状光卤石(CK2600 - W17); F. 光卤石被溶蚀(样号 CK2600 - W32); G. 绒球状杂卤石(样号 CK2188 - W8); H. 针叶状杂卤石(样号 CK2188 - W8)

表 3 别勒滩区段固体钾盐矿物 X 射线衍射组成分析结果 ($w_B/\%$)

Table 3 X-ray diffraction analysis of the solid potassium mineral composition in Bieletan section (%)

样品号	取样深度/m	石盐	钾石盐	石膏	石英	光卤石	云母类矿物	绿泥石	水氯镁石	杂卤石	硬石膏	方解石
CK2188 - W4	1.5 ~ 1.8	95.1	-	4.7	0.3	-	-	-	-	-	-	-
CK2188 - W8	2.9 ~ 3.4	94.9	-	-	0.2	-	-	-	-	4.8	-	-
CK2188 - W10	4.3 ~ 4.5	91.9	1.0	1.8	1.7	-	2.5	0.7	-	0.5	-	-
CK2188 - W13	5.75 ~ 6.5	99.0	-	-	0.3	-	-	-	-	-	0.7	-
CK2188 - W0	6.9 ~ 7.45	92.3	-	-	1.8	-	-	-	2.2	0.5	3.2	-
CK2600 - W8	2.8 ~ 3.1	79.4	11.3	3.1	-	6.2	-	-	-	-	-	-
CK2600 - W17	5.75 ~ 6.05	59.7	-	-	-	-	3.8	-	9.2	27.3	-	-
CK2600 - W17 - 1	5.6 ~ 5.8	94.3	-	0.3	-	2.2	-	-	1.2	2.1	-	-
CK2600 - W0	8.4 ~ 8.5	80.2	1.9	2.8	1.7	10.1	-	-	-	-	1.6	1.6
CK2600 - W32	12.8 ~ 12.9	94.4	-	1.3	0.2	-	-	-	4.1	-	-	-

2.2 别勒滩区段的钾含量

由别勒滩区段化学组成(表 4)可知, S2T3 孔样品中 K^+ 含量变化范围为 0.28% ~ 5.00%, 平均含量为 0.95%, 含量较大的有 4 段: 2.90 ~ 5.80 m 段 K^+ 含量为 1.00% ~ 2.12%, 平均含量为 1.78%; 6.00 ~ 8.10 m 段 K^+ 含量为 1.45% ~ 2.93%, 平均含量为 2.22%; 8.90 ~ 9.70 m 段 K^+ 含量为 1.40% ~ 2.50%, 平均为 1.84%; 15.99 ~ 16.33 m 段 K^+ 含量为 1.97% ~ 5.00%, 平均含量为 3.32%。

CK2188 孔样品中 K^+ 含量变化范围是 0.24% ~ 2.76%, 平均为 0.74% (图 7(a)); K^+ 含量较大的深度为 0 ~ 0.4 m, 平均含量为 2.76%。

CK2600 孔样品中 K^+ 含量变化范围是 0.32% ~ 5.7%, 平均为 1.70% (图 7(b))。含量较大的有两段: 4.8 ~ 6.6 m 段 K^+ 含量为 2.71% ~ 3.3%, 平均为 3.09%; 11.4 ~ 12.4 m 段 K^+ 含量为 5.7%, 平均为 5.7%。

3 个钻孔 22.41 m 以浅层位钾平均含量为 1.13%, 折算成 KCl 含量为 2.16%。由这 3 个钻孔钾含量值可知别勒滩区段钾盐的主要赋存层位分别为 0 ~ 0.4 m、2.9 ~ 8.1 m、8.90 ~ 9.70 m、11.4 ~ 12.4 m 和 15.99 ~ 16.33 m, 其钾含量均高于工业品位, 具有工业利用价值。

表 4 别勒滩区段 S2T3 钻孔剖面及组分含量变化

Table 4 Profile and composition changes of drillhole S2T3 in Bieletan section

孔号 层号	柱状图	岩性描述	样号 Hj	终点 /m	厚度 /m	$w(K^+)/\%$ 2 4	$w(Na^+)/\%$ 10 40	$w(Mg^{2+})/\%$ 1 3	$w(\text{水不溶物})/\%$ 25 75
S2T3- D1	PoSy	灰白色含 粘土粉砂 的细粒石 盐	01	0.20	0.20				
			02	0.40	0.20				
			03	0.60	0.20				
			04	0.80	0.20				
			05	1.00	0.20				
			06	1.30	0.20				
S2T3- D2	Gy	白色中- 细粒石盐	07	1.50	0.20				
			08	1.70	0.20				
			09	2.00	0.20				
S2T3- D3	Gy	灰白色含 粘土粉砂 的细粒石 盐	10	2.40	0.20				
			11	2.50	0.20				
			12	2.70	0.20				
S2T3- D4	Gy	白色中- 细粒石盐	13	2.90	0.20				
			14	3.00	0.10				
			15	3.20	0.20				
S2T3- D5	Po	灰白色含 粘土粉砂 的细粒石 盐钾矿	16	3.40	0.20				
			17	3.60	0.20				
			18	3.80	0.20				
			19	4.00	0.20				
			20	4.20	0.20				
			21	4.40	0.20				
			22	4.60	0.20				
			23	4.80	0.20				
			24	5.00	0.20				
			25	5.20	0.20				
S2T3- D6	Po	上部含粉 状石膏 KCl: 3.14%	26	5.30	0.10				
			27	5.40	0.10				

(续)表4 别勒滩区段 S2T3 钻孔剖面及组分含量变化

孔号 层号	柱状图	岩性描述	样号 Hj	终点 /m	厚度 /m	w(K ⁺)/%		w(Na ⁺)/%		w(Mg ²⁺)/%		w(水不溶物)/%		
						2	4	10	40	1	3	25	75	
S2T3- D6		黄白色含中粉砂粗粒石盐上部5.40~8.10 m为钾矿层 KCl:3.87% 9.7~9.9m为93%的微粒石膏	27	5.60	0.20									
			28	5.80	0.20									
			29	6.00	0.20									
			30	6.20	0.20									
			31	6.40	0.20									
			32	6.60	0.20									
			33	6.80	0.20									
			34	7.10	0.20									
			35	7.30	0.20									
			36	7.50	0.20									
			37	7.70	0.20									
			38	7.90	0.20									
			39	8.10	0.20									
			40	8.40	0.20									
			41	8.50	0.20									
			42	8.70	0.20									
			43	8.90	0.20									
			44	9.10	0.20									
			45	9.30	0.20									
			S2T3- D7		黄褐色粘上粉砂中细粒石盐	58	12.19	0.30						
59	12.49	0.30												
S2T3- D8		黄白色含砂粘上的中细粒石盐 Hj79样品光卤石晶体量少, 15.99~16.63 m KCl:6.09%	60	12.65	0.20									
			61	12.85	0.20									
			62	13.07	0.20									
			63	13.25	0.20									
			64	13.55	0.20									
			65	13.75	0.20									
			66	13.97	0.20									
			67	14.15	0.20									
			68	14.35	0.20									
			69	14.55	0.20									
			70	14.75	0.20									
			71	14.95	0.20									
			72	15.15	0.20									
S2T3- D9		黄褐色含碳上石盐酸质粉砂	73	15.35	0.20									
			74	15.55	0.20									
			75	15.75	0.20									
			76	15.95	0.20									
			77	16.15	0.20									
			78	16.35	0.20									
			79	16.63	0.24									
S2T3- D10		黄褐色含碳上石盐酸质粉砂	80	17.13	0.50									
			81	17.63	0.50									
			82	17.85	0.25									
			83	18.35	0.50									
			84	18.95	0.50									
S2T3- D11		黄褐色含碳上石盐酸质粉砂	85	19.45	0.50									
			86	19.95	0.50									
			87	20.15	0.50									
			88	20.95	0.50									
S2T3- D11		黄褐色含碳上石盐酸质粉砂	89	21.45	0.50									
			90	21.95	0.50									
			91	22.41	0.43									

石盐 石盐粉砂 光卤石 粉砂石盐 粘上粉砂 钾矿层 杂卤石 石膏 钾石盐

0 1 m

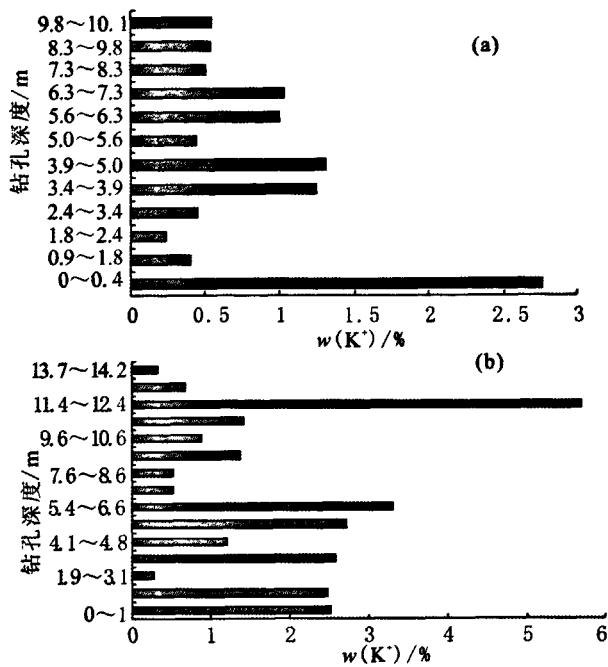


图7 别勒滩区段钻孔 CK2188 和 CK2600 中 K⁺ 含量

Fig. 7 Diagrams of K⁺ content in the drillholes of CK2188 and CK2600

另外，根据 S2T3 钻孔的成分组成(表4)，钻孔中 Na⁺ 含量普遍较高，说明石盐是贯通性矿物；K⁺ 含量与 Mg²⁺ 含量呈正相关，说明含有杂卤石和光卤石。水不溶物在钻孔的中下部含量较高，光卤石、杂卤石和石盐的含量较低，由于水不溶物是在盐度较低条件下形成，而光卤石和石盐是水中盐度较高条件下形成；因此，光卤石和杂卤石是在盐湖演化到晚期所形成，这与对察尔汗盐湖形成的一般认识^[1,21]是一致的。

2.3 固体钾盐层的物理参数

本次研究对别勒滩试验区 4 个钻孔的 31 件样品进行了密度和孔给度的测定，孔给度包括湿度、孔隙度和给水度 3 个物理参数(表 5)。

3 察尔汗区段固体钾盐物质组成

3.1 矿物组成

察尔汗区段 21 件样品标本与扫描电镜鉴定及 X 射线衍射分析结果(表 6)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、半水石膏共 10 种矿物组成。大多数样品主要由石盐组成，但 C11X09 样品中石膏的含量(56%)大于石盐的含量(8.8%)；C11X25 与 C11X26 样品中水氯镁石的含量分别为

表 5 别勒滩区段物理参数

Table 5 Physical parameters of Bieletan section

孔号	样号	密度/ (g/cm ³)	湿度/ %	孔隙度/ %	给水度/ %
S2T1	KG01	1.79	10.28	21.27	12.78
	KG02	1.72	5.52	19.15	9.66
	KG03	1.80	12.49	22.78	0.30
	KG04	1.72	10.25	23.96	6.33
	KG05	1.69	4.65	19.83	11.97
	KG06	1.79	13.77	24.71	0.06
S2T3	KG01	1.65	1.54	19.17	16.63
	KG02	1.66	1.52	18.67	16.15
	KG03	1.68	2.14	18.61	15.01
	KG04	1.77	7.63	20.25	6.74
	KG05	1.74	7.22	21.25	8.69
	KG06	1.70	6.49	22.08	11.05
	KG07	1.71	5.41	20.32	11.07
	KG08	1.73	6.28	20.13	9.27
	KG09	1.81	6.39	17.35	5.28
S2T4	KG01	1.64	10.46	27.30	10.15
	KG02	1.67	1.57	18.22	15.60
	KG03	1.79	8.24	20.65	5.90
	KG04	1.72	7.32	21.86	9.27
	KG05	1.74	8.30	22.17	7.73
	KG06	1.68	3.35	19.22	13.59
	KG07	1.65	5.38	22.71	13.83
	KG08	1.76	8.89	22.16	6.51
S2T5	KG01	1.64	1.64	19.75	17.06
	KG02	1.72	2.52	17.00	12.66
	KG03	1.66	1.09	18.31	16.50
	KG04	1.83	13.18	24.70	0.58
	KG05	1.76	9.16	21.63	5.51
	KG06	1.67	4.55	21.48	13.88
	KG07	1.79	10.55	22.65	3.77
	KG08	1.80	9.77	20.38	2.79
S2T1	平均值	1.75	9.49	21.95	6.85
S2T3	平均值	1.72	4.93	19.75	11.14
S2T4	平均值	1.71	6.69	21.79	10.32
S2T5	平均值	1.73	6.56	20.74	9.09
4 个钻孔	平均值	1.73	6.70	20.96	9.56

注：采样位置见表 1。

91.1% 和 64.9%，均远远大于石盐的含量，而 C11X30 样品中水氯镁石的含量(27.4%)与石盐的含量(29.2%)接近。因此，试验区中石盐为贯通性矿物，在盐湖沉积物中普遍存在。不同阶段沉积物的主要矿物组成不同，0 ~ 80 cm、90 ~ 245 cm、300 ~ 350 cm 段主要矿物为石盐，80 ~ 90 cm 段主要矿物为石膏，245 ~ 285 cm 主要矿物为水氯镁石。

表6 察尔汗区段样品盐类矿物粉晶X射线分析结果($w_B/\%$)

Table 6 X-ray diffraction analysis of the solid potassium mineral composition before liquefaction in Qarhan section (%)

样号	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
C11X01	73.4	14.5	5.2	0.5	6.4	-	-	-	-	-
C11X02	81.7	8.2	6.4	0.6	3.1	-	-	-	-	-
C11X03	77.8	-	10.3	-	11.9	-	-	-	-	-
C11X04	84.0	-	12.1	-	3.9	-	-	-	-	-
C11X05	82.8	-	10.6	-	6.6	-	-	-	-	-
C11X06	82.4	-	9.3	-	8.2	-	-	-	-	-
C11X07	76.2	-	22.3	-	1.5	-	-	-	-	-
C11X08	70.7	-	19.8	3.8	3.4	2.3	-	-	-	-
C11X09	8.8	-	56.0	12.9	4.1	2.3	14.3	1.6	-	-
C11X10	72.6	-	20.3	4.2	1.8	1.1	-	-	-	-
C11X12	87.5	-	10.7	0.5	1.3	-	-	-	-	-
C11X14	80.0	-	11.9	2.1	-	-	-	-	6.1	-
C11X16	83.2	-	10.8	0.7	2.9	-	-	-	2.4	-
C11X18	74.9	-	-	8.8	2.4	2.4	-	-	3.2	8.3
C11X21	76.4	-	-	9.0	2.4	1.1	-	-	2.6	8.5
C11X22	87.6	-	-	1.7	7.2	-	-	-	-	3.5
C11X24	82.2	-	-	1.8	15.9	-	-	-	-	-
C11X25	1.2	-	-	5.1	2.6	-	-	-	91.1	-
C11X26	7.5	-	-	14.4	-	4.3	5.9	0.8	64.9	2.1
C11X28	66.2	-	19.7	0.9	1.4	-	3.6	-	6.9	1.3
C11X30	29.2	-	16.9	4.3	3.3	1.2	9.6	1.2	27.4	6.9

注: 采样位置见表2。

试验区的钾盐矿物种类有钾石盐和光卤石, 其中石盐仅出现于岩心顶部的0~20 cm范围, 光卤石仅在130~140 cm与265~285 cm两段未发现, 在其余各段均有发现, 其高含量的区段为0~90 cm和150~265 cm; 因此, 试验区主要的钾盐矿物是光卤石。

由矿物鉴定结果可以看出, 察尔汗区段大多数样品属于疏松样品, 粒间孔隙较大, 多为100~500 μm 与50~300 μm , 也有200~600 μm 。石盐(图2G、H, 图8A)多为立方体状, 表面光洁, 部分光卤石存在被溶蚀(图8B)与龟裂状(图8C)现象。水氯镁石多呈丝状(图8D)、絮状(图8E)和绳状(图8F)等。石膏多呈片状(图8G), 部分为铁饼状(图8H)。

3.2 常量元素的组成

根据察尔汗区段化学组成可知, C2 钻孔 K^+ 含量变化范围为0.06%~3.44%, 平均为1.04%; 岩心顶部60 cm以浅部位样品(C2H02, C2H04,

C2H06) K^+ 含量较大, 为2.68%~3.44%(图9a)。C5 钻孔 K^+ 含量变化范围为0.06%~6.12%, 平均为0.96%; 岩心顶部20 cm以浅部位样品(C5H02)含量也较大, 为6.12%(图9b)。C11 钻孔 K^+ 含量变化范围为0.12%~2.95%, 平均为0.78%; 岩心顶部0~40 cm范围内 K^+ 含量较大, 为1.73%~2.95%(表7)。

通过对3个钻孔所有样品的钾含量进行加权平均计算, 钾含量为0.88%, 折算成KCl的含量为1.68%。钾盐主要赋存于盐湖沉积浅表60 cm以浅的盐层, 其钾含量在C2、C5、C11的3个钻孔中的平均值为2.33%, 折算成KCl的含量为4.45%。

根据成分组成(表7), 钻孔样品的 Na^+ 含量与 Cl^- 含量呈正相关, 说明石盐含量高; Ca^{2+} 含量与 SO_4^{2-} 含量呈正相关, 说明含有石膏。 Na^+ 含量与 Ca^{2+} 含量呈镜像相反, Cl^- 含量与 SO_4^{2-} 含量呈镜像相反, 说明两者形成条件不同。在3个钻孔的中下部水不溶物含量较高, 光卤石和石盐的含量较低, 由于水不溶物在盐度较低条件下形成, 光卤石和石盐是水中盐度较高条件下形成; 因此, 光卤石是在盐湖演化到晚期所形成, 这与对察尔汗盐湖形成的一般认识^[1,21]是一致的。

4 讨论

4.1 察尔汗盐湖钾盐液化阶段

目前, 察尔汗盐湖S4盐层中的固体钾盐正在通过液化技术开发, 由于各类钾盐液化开发的难易程度不同, 因此, 查明钾盐矿层中最主要的钾盐矿物十分必要, 依此可以确定具体的开采方案, 提高钾盐的开采利用率。以前的研究普遍认为察尔汗盐湖主要的钾盐矿物是光卤石^[3, 28~30], 并没有对各个区段的钾盐矿物种类进一步研究。本文通过对别勒滩区段和察尔汗区段样品进行系统的分析和测试, 进一步确定该区段主要钾盐矿物种类。别勒滩区段涩北公路北侧最主要的钾盐矿物是杂卤石, 其次是钾石盐, 并含有少量的光卤石。此认识与别勒滩地区涩北公路以南采样分析的别勒滩区段最主要的钾盐矿物为杂卤石相符^[27]。察尔汗区段最主要的钾盐矿物为光卤石, 其次为钾石盐。根据盐湖液化阶段呈现碳酸盐型→硫酸盐型→氯化物型的特点, 认为别勒滩区段主要为液化中间阶段(杂卤石是硫酸盐), 察尔汗区段主要为液化晚期阶段(光卤石

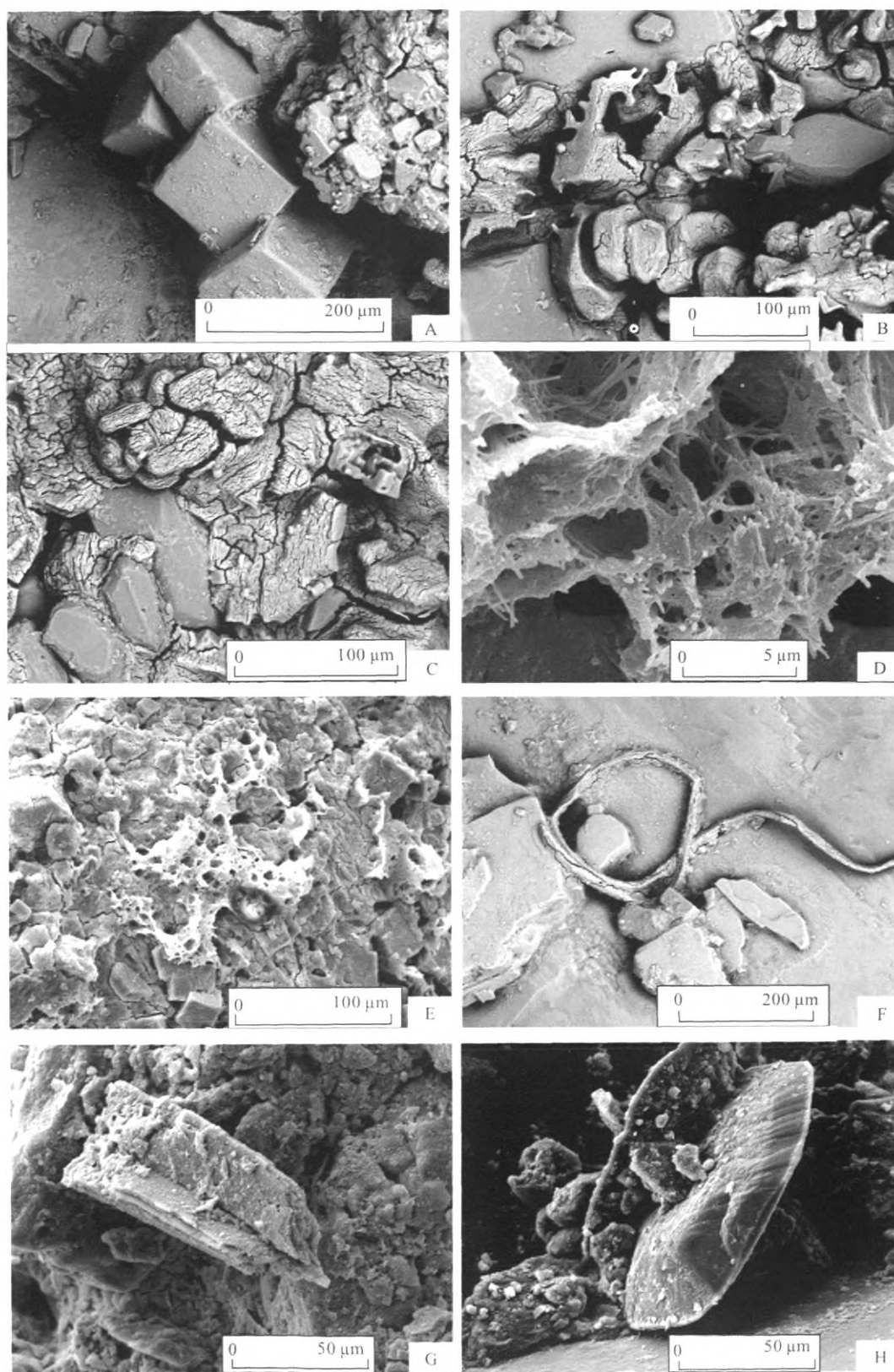


图8 察尔汗区段盐类矿物晶体

Fig. 8 Crystals of salt minerals in Qarhan section

- A. 石盐晶体(样号 C5S010); B. 光卤石被溶蚀(样号 C5S08); C. 龟裂状光卤石(样号 C5S08); D. 丝状水氯镁石(样号 C2S02); E. 絮状水氯镁石(样号 C2S02); F. 绳状水氯镁石(样号 C5S12); G. 片状石膏(样号 C2S20); H. 铁饼状石膏(样号 C2S12)

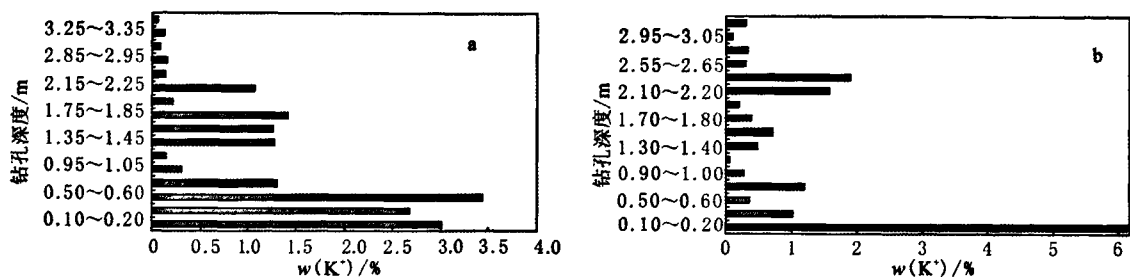


图9 察尔汗区段钻孔 C2 和钻孔 C5 中 K⁺ 含量
Fig.9 K⁺ contents in drillholes of C2 and C5 in Qarhan section

表7 察尔汗区段 C11 钻孔剖面及组分含量变化

Table 7 Profile and composition changes of drillhole C11 in Qarhan section

孔号	柱状图	岩性描述	样品号	取样位置/m			w _B /%									
				起点	终点	层厚	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	水不溶物		
1		灰白色光卤石细粒，上部0.4 m为光卤石钾矿，KCl:4.11%	C11H1	0	0.10	0.10										
			C11H2	0.10	0.20	0.10										
			C11H3	0.20	0.30	0.10										
			C11H4	0.30	0.40	0.10										
			C11H5	0.40	0.50	0.10										
			C11H6	0.50	0.60	0.10										
			C11H7	0.60	0.70	0.10										
			C11H8	0.70	0.80	0.10										
3		浅灰色含碳酸盐粘土粉砂，偶见光卤石钾盐	C11H9	0.80	0.90	0.10										
			C11H10	0.90	1.00	0.10										
			C11H11	1.00	1.10	0.10										
			C11H12	1.10	1.20	0.10										
			C11H13	1.20	1.30	0.10										
			C11H14	1.30	1.40	0.10										
			C11H15	1.40	1.50	0.10										
			C11H16	1.50	1.60	0.10										
			C11H17	1.60	1.70	0.10										
			C11H18	1.70	1.80	0.10										
			C11H19	1.80	1.90	0.10										
			C11H20	1.90	2.00	0.10										
			C11H21	2.00	2.10	0.10										
			C11H22	2.10	2.20	0.10										
			C11H23	2.20	2.30	0.10										
			C11H24	2.30	2.45	0.25										
4		褐黄色含碳酸盐粘土粉砂	C11H25	2.45	2.65	0.10										
			C11H26	2.65	2.85	0.20										
			C11H27	2.85	3.00	0.15										
5		褐黄色含碳酸盐粘土粉砂	C11H28	3.00	3.10	0.10										
			C11H29	3.10	3.20	0.10										
			C11H30	3.20	3.30	0.10										
			C11H31	3.30	3.40	0.10										
			C11H32	3.40	3.50	0.10										

注:★粉砂指灰色含碳酸盐粘土粉砂。 石盐 钾矿层 光卤石 石膏 泻利盐 粉砂石盐 石盐粉砂 粘土粉砂

是氯化物)。从这两个区段钾盐矿物形态看，别勒滩区段盐类矿物晶形完好，排列紧密；察尔汗区段样品疏松，出现龟裂状纹，粒间孔隙较大；察尔汗区段已完全干涸，表明别勒滩区段液化至“中期阶段”即可开发利用，而察尔汗区段要液化到“晚期阶段”才可开发利用。

4.2 察尔汗盐湖钾盐的综合利用前景

别勒滩区段 3 个钻孔 22.41 m 以浅层位钾含

量的平均值为 1.13%，折算成的 KCl 含量为 2.16%。根据这 3 个钻孔钾含量值，将别勒滩区段钾盐的主要赋存层位划分为 0~0.4 m、2.9~8.1 m、8.90~9.70 m、11.4~12.4 m 和 15.99~16.33 m 共 5 段，其钾含量均高于工业品位，具有工业利用价值。

通过对察尔汗区段钻孔所有样品的钾含量进行加权平均计算，得到 3.55 m 以上 KCl 平均含量

为1.68%。钾盐的主要赋存层位为盐湖沉积浅表60 cm以浅的盐层,其钾含量的平均值为2.33%,折算成的KCl含量为4.45%,说明此段是富钾层位,具有工业利用价值。

与前人的遥感定量等方法不同^[31],本文采用体积法,其公式为 $Q = S \times H \times C \times p$ 。式中: Q 为钾盐层的KCl的总含量; S 为面积; H 为深度; C 为KCl的平均含量; p 含钾盐层的密度,取 1.73 t/m^3 。依此公式分别计算出别勒滩区段22.42 m以浅和察尔汗盐湖除别勒滩区段以外的区段3.55 m以浅KCl的资源量。别勒滩区段的面积约为 1500 km^2 ,察尔汗盐湖除别勒滩以外的面积约为 4300 km^2 ^[28],在盐湖演化的晚期有钾盐形成。按照野外实地考察,1/5盐湖面积有固体钾盐存在,别勒滩区段固体钾盐存在的面积约为 300 km^2 ,其他区段固体钾盐存在的面积约为 860 km^2 。

依据体积法公式计算出别勒滩区段22.42 m以浅KCl的资源量约为2.5亿吨。由于察尔汗区段位于达不逊区段和霍布逊区段之间,这3个区段KCl的平均含量以察尔汗区段钻孔所测数据(1.68%)为准计算,得到察尔汗区段、达不逊区段和霍布逊区段3.55 m以浅KCl的资源量共约为0.89亿吨。

4.3 别勒滩区段固体钾盐层物理参数特征

别勒滩区段样品密度的变化范围较小,为 $1.64 \sim 1.83 \text{ g/cm}^3$,各个钻孔从浅部到深部其密度值较均一。4个钻孔S2T1、S2T3、S2T4和钻孔S2T5的密度分别为 1.75 g/cm^3 、 1.72 g/cm^3 、 1.71 g/cm^3 和 1.73 g/cm^3 ,这说明试验区矿石密度较均一。试验区矿石的平均密度为 1.73 g/cm^3 。

别勒滩区段样品湿度的变化范围较大,为 $1.09\% \sim 13.18\%$,各个钻孔从浅部到深部高湿度和低湿度相间分布。4个钻孔S2T1、S2T3、S2T4和S2T5的湿度值分别为 9.49% 、 4.93% 、 6.69% 和 6.56% ,在水平方向上高湿度和低湿度相间分布。试验区矿石的平均湿度为 6.70% 。

样品孔隙度的变化范围较大,为 $17\% \sim 27.3\%$,总体上各个钻孔从浅部到深部孔隙度变化不大。4个钻孔S2T1、S2T3、S2T4和S2T5的孔隙度分别为 21.95% 、 19.75% 、 21.79% 和 20.74% ,这说明试验区孔隙度一致。试验区矿石的平均孔隙度为 20.96% 。

样品给水度的变化范围大,为 $0.06\% \sim 17.06\%$,各个钻孔从浅部到深部高给水度和低给

水度相间分布。4个钻孔S2T1、S2T3、S2T4和S2T5的给水度分别为 6.85% 、 11.14% 、 10.32% 和 9.56% 。试验区矿石的平均给水度为 9.56% 。

总之,别勒滩试验区钾盐层的密度和孔隙度均一,变化范围不大;湿度和给水度变化范围较大,高湿度和低湿度相间分布,高给水度和低给水度相间分布。

5 结 论

通过对察尔汗盐湖别勒滩和察尔汗区段固体钾盐矿物组成和化学组成的研究,得到以下认识:

(1)别勒滩区段最主要的钾盐矿物是杂卤石,其次是钾石盐,并含有少量的光卤石,盐类矿物晶形完好,排列紧密,表明液化开发至“中期阶段”即可利用。察尔汗区段最主要的钾盐矿物为光卤石,其次是钾石盐,样品疏松,出现龟裂状纹,粒间孔隙较大,表明液化开发到“晚期阶段”才可利用。

(2)别勒滩区段22.42 m以浅KCl平均含量为 2.16% ,资源量约为2.5亿吨。主要赋存层位为 $0 \sim 0.4 \text{ m}$ 、 $2.9 \sim 8.1 \text{ m}$ 、 $8.90 \sim 9.70 \text{ m}$ 、 $11.4 \sim 12.4 \text{ m}$ 和 $15.99 \sim 16.33 \text{ m}$ 共5段,其钾含量均高于工业品位,具有工业利用价值。察尔汗区段3.55 m以浅KCl平均含量为 1.68% ,察尔汗区段、达不逊区段和霍布逊区段3.55 m以浅资源量共约为0.89亿吨。钾盐的主要赋存层位为盐湖沉积的浅表60 cm以浅的盐层,该段KCl平均含量为 4.45% ,高于工业品位(KCl 2%)。

(3)别勒滩区段固体钾盐层矿石的平均密度为 1.73 g/cm^3 ,平均湿度为 6.70% ,平均孔隙度为 20.96% ,平均给水度为 9.56% 。

致谢:样品鉴定工作得到曲懿华和刘丹阳高级工程师的帮助,X射线衍射分析由韩景仪副研究员完成,扫描电镜的分析测试由魏宝和高级工程师完成,化学分析由何汉江高级工程师完成;工作过程中得到青海盐湖工业集团有限公司王兴富总裁、李小松副总经理以及中国地质环境监测院李文鹏总工程师的大力支持;成文过程中得到肖荣阁教授的指导;在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 217-222.
- [2] 于升松. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及其预测 [M]. 北

- 京: 科学出版社, 2000: 104-110.
- [3] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 141-144.
- [4] 曾章仁. 察尔汗盐湖晶间卤水水化学垂直分带及其形成机理 [J]. 西安地质学院学报, 1983 (2): 59-64.
- [5] 李润民. 察尔汗盐湖石盐晶间卤水钾矿在开采中水动力条件研究 [J]. 化工矿产地质, 1992, 14(2): 33-40.
- [6] 胡东生. 柴达木盆地沙下盐湖的卤水化学及矿物沉积特征: 以察尔汗盐湖区北部外围地带为例 [J]. 湖泊科学, 1995, 7(4): 327-333.
- [7] 郑秀清, 施婉, 董悦安. 察尔汗盐湖首采区含钾卤水水量水质模拟 [J]. 西北地质科学, 1997, 18(1): 63-69.
- [8] 刘兴起, 于升松, 邵明显. 察尔汗盐湖晶间卤水痕量元素分布特征研究 [J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(4): 416-422.
- [9] 李海龙, 马国祥. 察尔汗盐湖地下卤水动态规律研究 [J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 212-217.
- [10] 刘兴起, 谭红兵, 葛文胜. 察尔汗盐湖采卤过程中晶间卤水水位时空变化规律的趋势面分析 [J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 381-386.
- [11] 周训, 方斌, 陈明佑, 等. 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, 2006, 23(2): 258-263.
- [12] 田润, 韩凤清, 马海州, 等. 察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水的主要离子分布特征 [J]. 盐湖研究, 2007, 15(3): 7-13.
- [13] 王宇菲, 陈艺锋, 潘金龙. 察尔汗盐湖镁资源利用问题 [J]. 世界有色金属, 1999(11): 36-38.
- [14] 王石军. 察尔汗盐湖资源开发前景展望 [J]. 化工矿产地质, 1999, 21(3): 175-180.
- [15] 王宇菲, 陈艺锋, 潘金龙. 察尔汗盐湖镁资源利用途径分析 [J]. 世界有色金属, 2000(12): 13-16.
- [16] 杨永征, 李长辉. 察尔汗盐湖钾矿资源开采中的环境问题分析与对策 [J]. 青海地质, 2001(1): 1-3.
- [17] 尹衍升, 师瑞霞, 李嘉, 等. 察尔汗盐湖镁资源的开发及展望 [J]. 材料导报, 2002, 16(10): 6-8.
- [18] 郭新华, 王春男, 马明珠. 青海柴达木盆地察尔汗盐湖首采区钾镁盐矿床开发及老卤排放对液体钾矿的影响现状 [J]. 西北地质, 2006, 39(1): 98-104.
- [19] 刘丽峰, 安勇, 阮菊华. 察尔汗盐湖开发及环境地质问题综述 [J]. 青海国土经略, 2008(6): 44-45.
- [20] 张继文. 浅谈察尔汗盐湖资源综合开发利用 [J]. 青海科技, 2009(4): 123-124.
- [21] 杨谦. 察尔汗内陆盐湖钾矿层的沉积机理 [J]. 地质学报, 1982(3): 281-291.
- [22] 李润民. 柴达木盆地察尔汗钾镁盐成矿地质条件 [J]. 地质论评, 1983, 29(3): 262-267.
- [23] 蔡克勤, 高建华. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件 [J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4): 231-233.
- [24] 王春男, 郭新华, 马明珠, 等. 察尔汗盐湖钾镁盐矿成矿地质背景 [J]. 西北地质, 2008, 41(1): 97-106.
- [25] 段振豪, 袁见齐. 察尔汗盐湖物质来源的研究 [J]. 现代地质, 1988, 2(4): 420-427.
- [26] 赵元艺, 韩景仪, 王石军, 等. 青海别勒滩固体钾盐矿物组成的新认识及其意义 [M] // 陈毓川, 薛春纪, 张长青. 主攻深部 挺进西部 放眼世界——第九届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2008: 395-397.
- [27] 李波涛, 赵元艺, 钱作华, 等. 青海察尔汗盐湖别勒滩段固体钾盐液化前后物质组成对比及意义 [J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 669-682.
- [28] 杨谦, 吴必豪, 王绳祖, 等. 察尔汗盐湖钾盐矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 98-112.
- [29] 袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 等. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 104-110.
- [30] 曹文虎, 吴蟬, 等. 卤水资源及其综合利用技术 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-90.
- [31] 田淑芳, 秦绪文, 郑绵平, 等. 西藏扎布耶盐湖总盐含量遥感定量分析 [J]. 现代地质, 2005, 19(4): 596-602.