

青海大浪滩凹地梁中矿区软钾镁矾 沉积元素和相化学分析

万全博^{1,2}, 山发寿¹, 樊启顺¹, 秦占杰¹, 王明祥¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:青海大浪滩凹地梁中矿区是典型的固、液矿共存的钾镁盐矿床。地质勘查显示, 梁中矿区埋深8~10m以下沉积有层状的含钾硫酸盐固体钾矿(主要是软钾镁矾, 并伴生有钾石盐和光卤石)。在兴元钾肥厂已开挖的矿层断面, 选择7.3m的沉积剖面, 采集并分析了73件盐样和7件晶间卤水样离子含量, 结合2件样品的软钾镁矾稳定锶同位素比值、矿物组合分布和25℃时 Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系介稳相图, 探讨了研究区软钾镁矾沉积的化学元素组成特征和化学演化过程。结果表明, 1) 5.3~2.6m沉积了钾盐矿物, K^+ 含量主要在10%~18%之间变化; 2) 全新世温度的升高和外来水体的混入, 使软钾镁矾沉积时矿物析盐序列呈现逆向析盐过程; 3) 对比软钾镁矾和研究区盐湖卤水、油田卤水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 推断大浪滩凹地软钾镁矾的沉积可能与其南侧断裂—小梁山构造气田水渗入有关。

关键词:大浪滩凹地; 软钾镁矾; 元素和相化学

中图分类号: P534.63; P619.21

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2015)04-0024-07

引言

我国已形成了化肥高量投入的耕作系统, 而钾盐是生产钾肥的重要原料^[1]。我国已探明的钾盐储量和基础储量, 仅分别占世界1.024%和1.015%。目前主要开采第四纪盐湖卤水生产钾肥, 产量只能满足国内需求的40%~50%。从20世纪50年代中期开始, 国家就已部署钾盐找矿工作; 至2002年底, 已探明的可溶性钾盐矿床40余处, 主要以液体钾矿为主, 占总量的98%以上, 固体钾矿仅占2%左右。我国液体钾矿主要分布在西部盐湖区, 如青海柴达木盆地和新疆罗布泊地区, 约占总储量的96%以上。其中, 柴达木盆地是重要的钾盐矿区, 主要分布在察尔汗、大浪滩、马海、昆特

依、大柴旦湖、西台吉乃尔湖等盐湖区^[2]; 氯化钾总地质储量为 7.06×10^8 t, 占全国氯化钾地质储量的65%^[3]。我国已探明的固体钾盐矿主要为云南勐野井古新世钾盐矿, 该矿床位于兰坪—思茅盆地, 是碎屑岩沉积型钾盐矿(钾石盐和少量光卤石), KCl品位为8%~12%^[4]。

在柴达木盆地西部, 从渐新统至上新统均见不同厚度的石膏、钙芒硝、石盐沉积^[5], 古岩盐巨厚^[6], 古卤水发育, 且已出露的油田卤水普遍富钾^[7-10]。近年来, 通过石油及地质部门的勘查, 在盆地西部大浪滩凹地梁中矿区发现, 埋深8~10m以下(图1), 沉积有层状的含钾硫酸盐固体钾盐(主要是软钾镁矾, 并伴生有钾石盐和石盐)。硫酸钾镁肥作为多元素硫酸钾产品之一, 是很理想的农用肥料, 软钾镁矾

收稿日期: 2015-03-23; 修回日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41272274)资助

作者简介: 万全博(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为盐湖地球化学。

通信作者: 山发寿, Email: shanfsh@isl.ac.cn.

($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)更是硫酸钾镁肥的主要品种^[11]。课题组选择7.3 m厚的含盐地层为研究对象,分析了软钾镁矾及伴生的盐类矿物组合分布特征^[12]。通过分析该剖面含盐地层的常量元素,结合地层中赋存的晶间卤水水化学组成以及25℃时 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图^[13],探讨大浪滩软钾镁矾钾沉积元素特征和化学演化过程。

1 区域地质背景及矿区地质概况

1.1 区域地质背景

柴达木盆地面积约 $12.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[9],地势南北高,中部及东南部低。柴达木盆地四周被北西—北西西向的祁连山断裂、北西西向的东昆仑断裂、北东向的阿尔金断裂和北北西向的鄂拉山断裂及褶皱带所限,这4条大断裂不仅控制了柴达木盆地的菱形平面几何形态,对盆地的发育演化也起着至关重要的控制作用^[10]。

柴达木盆地是在前侏罗纪柴达木地块基础上发育起来的中、新生代内陆沉积盆地,盆地性质和构造格局是随时间不同而变化的,具有多旋回盆地演化的历史。三叠纪后的晚印支运动结束了柴达木盆地海相沉积历史,此后盆地全面进入陆相沉积发育阶段。早侏罗纪盆地北缘的祁连山前和阿尔金山南缘古构造带开始发生断块活动,形成了一些规模较小、分割性较强的差异断陷盆地群。在中侏罗纪末期,燕山运动使祁连褶皱带复活隆升形成张裂构造作用,北部局部地区处于剥蚀状态,盆地沉积中心向南迁移。经燕山晚期构造运动的剥蚀夷平作用后,古、始新世大面积超覆于中生界或更老的地层之上,盆地南部及东部开始接受沉积。晚第三纪末至第四纪早期,阿尔金山、昆仑山和祁连山等盆缘山系受挤压作用剧烈抬升。随着四周山体不断抬升,中央拗陷盆地主体形成,盆地西部逐渐演变成“高山深盆”的沉积环境^[14]。上新世时期,柴达木盆地西北地区广泛发育较深湖、浅湖和滨湖相,沉积了厚度达10 000 m的第三系沉积物,地层含盐度高,岩性主要为碳酸盐岩、泥岩及岩盐类互层。湖水呈半咸水—咸

水,湖盆为浅湖—较深湖—盐湖,湖水咸化浓缩结晶出盐类矿物,并形成独立的小盐湖^[15]。

1.2 大浪滩梁中矿区地质概况

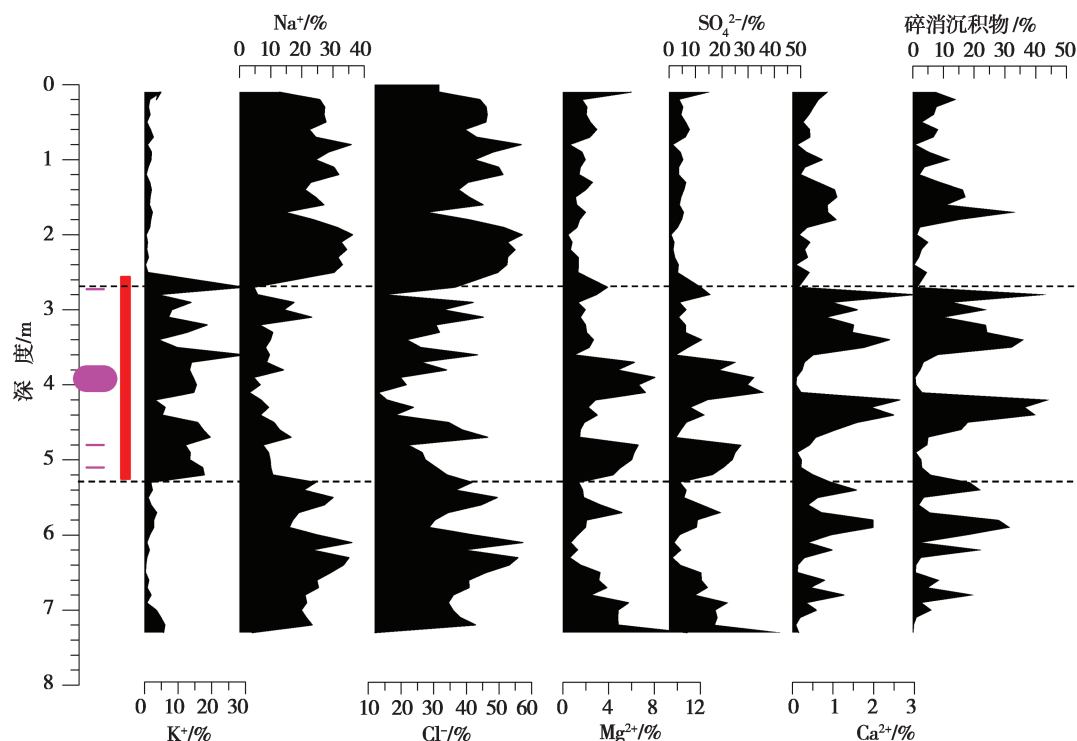
大浪滩钾镁盐矿田位于柴达木盆地西部,隶属于青海省海西蒙古族、藏族自治州茫崖镇,是一个次级盆地。该矿田介于北纬 $38^\circ 00' \sim 38^\circ 40'$,东经 $91^\circ 10' \sim 92^\circ 10'$,呈北西向延伸,长约100 km,宽约50 km^[16]。该区域从上新世以来独立成盆,是柴达木新生代早、中期较大的连续沉积中心(厚约4 600~7 000 m),也是盆地中、上新世主要盐类沉积中心。大浪滩钾镁盐矿田可分为梁中矿床、双泉矿床、风南矿床、黄瓜梁矿床及黑北矿点、风北矿点。梁中矿区是最具典型的固、液体矿共存的钾镁盐矿床,面积约790 km^2 ,固体矿产主要为石盐,其次为可溶性钾镁盐(软钾镁矾、钾石盐和光卤石)。卤水钾镁盐矿丰富,主要有 KCl 、 MgCl_2 、 MgSO_4 、 NaCl 等组分。该区含盐系主要由石盐、白钠镁矾、泻利盐、芒硝以及含盐粘土层组成^[17]。大浪滩凹地梁中矿床的可溶性钾矿沉积厚,分布广,兴元和康泰钾肥厂已开采钾矿。按矿层产出层位,自下而上可以分为7层,1~2层产自中更新统地层中,埋深大,分布面积小,品位较低,不具有工业意义;3~5层产于全新统中、下部,分布面积较小,品位低,多为表外矿,经济意义小;6~7层产于全新统上部,埋藏浅、厚度大,具工业意义^[18]。本文讨论的软钾镁矾就是沉积于全新统上部的钾盐矿物。

2 样品采集与分析

柴达木盆地西部的大浪滩凹地梁中矿床,发现埋深8~10 m以下有层状的含钾硫酸盐固体钾盐(主要是软钾镁矾,并伴生有钾石盐和石盐晶体)沉积,结晶良好,含钾品位高^[12]。在野外考察中见到兴元钾肥厂在大浪滩凹地已经开挖软钾镁矾钾盐,并进行加工制取钾肥。从已开挖的矿层选择两个断面,以中间沉积的层状软钾镁矾层为标准,把两个断面合成一个剖面(XY-1)($38^\circ 31.294' \text{N}$, $91^\circ 25.028' \text{E}$),深度为7.3 m。从上到下以10 cm间距采集73件

固体盐样,分析了盐类矿物的化学组成。同时,在大浪滩梁中矿区及周边的小梁山、咸水泉背斜区采集了 7 件卤水样品(大浪滩地区卤水样品 4 个、咸水泉地区卤水样品 2 个、小梁山地区卤水样品 1 个),分析了其常量组成。卤水样品采样量 500 mL,现场测其比重后封口用于实验室分析。卤水和盐类矿物分析测试常量离子

成分, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 采用常规重量法(误差 0.5%)和滴定法(误差 0.2%~0.3%)测定。采集了 2 件软钾镁矾矿物,在中国地质调查局武汉地质调查中心的同位素地球化学开放研究实验室采用 VG354 同位素质谱仪测定稳定锶同位素比值,单个测试结果重复精度高于 0.02%。



红色条柱为地层中沉积的钾盐矿物,粉色条柱为地层中沉积的软钾镁矾矿物

图 1 XY-1 剖面常量离子含量变化

Fig. 1 The changes of major ions content in the XY-1 profile

3 剖面盐类矿物的化学组成分析

XY-1 剖面^[12]73 个样品常量离子含量分析表明,该剖面主要沉积了 Na^+ 和 Cl^- ,中间地层(5.3~2.6 m)沉积了钾盐矿物(图 2 中红色条柱), K^+ 含量在 10%~18% 之间变化,最大值达到 30%。按照课题组完成的 XY-1 剖面矿物组合^[12],含钾硫酸盐固体钾盐主要为软钾镁矾、钾石盐和光卤石。通过该剖面离子含量和矿物组合,发现软钾镁矾由上至下沉积有 4 层,分别出现在 2.6~2.8 m、3.7~4.1 m、4.8 m 和 5.1 m 处(图 2 中粉色条柱)。从钾盐出露

地层看, Na^+ 和 Cl^- 含量明显比下伏、上覆地层减少; Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量呈同步的变化,并与 K^+ 含量也呈相同的变化趋势,说明与软钾镁矾钾盐析出有关。同时, Ca^{2+} 和碎屑沉积物含量也呈同步变化规律,说明盐类矿物中 Ca^{2+} 含量增加与碎屑沉积物有关。结合矿物组合分布发现,高 Ca^{2+} 含量的地层与杂卤石钾盐矿物的析出有关。如果把 $\text{K}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+} -$ 碎屑沉积物含量进行对比,则可见到两组离子组分呈相反的变化规律。高 $\text{K}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 的软钾镁矾矿物的析出,明显与下伏沉积有大量的碎屑沉积物有关,说明在软钾镁矾矿物析出之前,有外来水体的混入,这些水体可能为软钾

镁矾、钾石盐和光卤石的析出奠定了基础。

4 大浪滩凹地卤水的化学组成

从样品的离子含量来看(表1),所有样品阴离子含量以 Cl^- 为绝对优势,含量大于55%,阳离子中 Ca^{2+} 含量都很低。大浪滩凹地卤水样品中阳离子以 Mg^{2+} 为主, K^+ 、 Na^+ 含量也较低,可以推测水样中溶解物以 MgCl 为主,应该是卤水蒸发浓缩形成。如果将它们放在 25°C Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图中^[13](图2),发现大浪滩卤水样品投影点全部分布在钾石盐相区的上部, K^+ 、 Mg^{2+} 含

量高, SO_4^{2-} 含量低,表明大浪滩卤水的蒸发结晶演化到了后期钾盐析盐阶段。小梁山卤水投影点位于钾石盐相区的中下部,并接近钾芒硝相区, K^+ 、 Mg^{2+} 含量较高, SO_4^{2-} 含量较低,说明小梁山卤水蒸发结晶演化到中期阶段。咸水泉卤水投影点之一位于无水芒硝相区, K^+ 、 Mg^{2+} 含量较低, SO_4^{2-} 含量较高,说明咸水泉卤水处于蒸发结晶的初始阶段。从卤水点的相图分析看出,大浪滩梁中矿区目前的晶间卤水随着蒸发的进行不可能析出软钾镁矾矿物;如果卤水点从钾石盐相区移向软钾镁矾相区,需要更多 SO_4^{2-} 组分。

表1 柴达木盆地西部大浪滩及周边盐湖卤水离子含量

Table 1 The brine ion content of Dalangtan in western Qaidam Basin and surrounding salt lakes								g/L
样品编号	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	矿化度
DLT-03	15.7	14.0	0.04	77.8	244.6	24.3	1.2	377.6
DLT-07	21.0	18.0	0.03	75.5	237.2	40.2	0.8	392.8
DLT-11	18.7	19.6	0.03	73.2	228.3	43.9	0.6	384.4
DLT2-B	16.1	33.4	0.05	60.9	199.0	60.4	0.6	370.5
XLS-01	10.2	104.0	0.30	10.6	190.7	13.7	0.2	329.8
XSQ-02	15.0	109.6	0.30	8.6	187.8	27.4	0.3	349.1
XSQ-01	2.7	125.8	0.30	1.5	183.6	23.6	0.2	337.7

5 剖面盐类矿物的相图分析

XY-1 剖面矿物分析结果表明,剖面盐类矿物主要是由石盐组成;根据不同层位盐类矿物组成变化特征,剖面自下而上可以划分为3个阶段^[12]。

I 阶段(7.3~5.3 m) 主要由石盐组成,并含有少量的泻利盐、钾石盐、光卤石和水氯镁石矿物,同时沉积有杂卤石和碎屑沉积物。

II 阶段(5.3~2.6 m) 主要由石盐、泻利盐、钾石盐和光卤石组成,并包含有4层软钾镁矾矿物。以析出的钾盐含量的高低为依据,II 阶段可以划分为两个亚层(II a 和 II b)。

III 阶段(2.6~0 m) 主要是由石盐组成,并包含有少量的光卤石。与 I 和 II 阶段相比,最明显的特征是该阶段析出大量水氯镁石,水氯镁石是盐湖演化到晚期时析出的盐类矿物。

从2.6 m 至剖面顶部,水氯镁石呈现波动中增加的趋势,说明大浪滩凹地盐湖卤水干涸,在缺少外来水体补给的情况下,盐湖析盐终结。

为了阐述软钾镁矾沉积条件,将 XY-1 剖面盐类矿物组合投影于 25°C Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图中^[13]。从投影到相图结果发现,矿物析盐序列总体上有两个过程(图2)。1)在5.3~4.1 m 阶段,其中包含有两层软钾镁矾矿层。矿物的析盐序列从 G 到 M 的沉积过程,即 $\text{G} \rightarrow \text{Q} \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{M}$,总体符合盐湖钾盐沉积的过程。2)在4.1~2.0 m 阶段,其中包含有两层软钾镁矾矿层。该阶段沉积的软钾镁矾矿层达到最厚,是大浪滩凹地兴元和康泰钾肥厂重点开采的矿层。矿物的析盐序列从 $\text{Q} \rightarrow \text{F}$ 的沉积过程,即 $\text{Q} \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{N} \rightarrow \text{F}$ 。通过分析上述两个盐层的沉积序列发现,1)阶段之后突然转向2)阶段,呈现了逆向析盐过程。从相图 K^+ - Mg^{2+} - SO_4^{2-} 3 离子对

比来看,从 1) 阶段到 2) 阶段的逆向析盐过程,主要体现在 SO_4^{2-} 含量增加,导致溶液向高 SO_4^{2-} 相图移动,有利于软钾镁矾的沉积析出。

结合矿物组合分析结果,高 SO_4^{2-} 的溶液可

能与软钾镁矾下覆沉积的大量碎屑物有关,指示外来水体的混入,改变了溶液的组分。目前还不了解外来水体具体的地球化学信息。

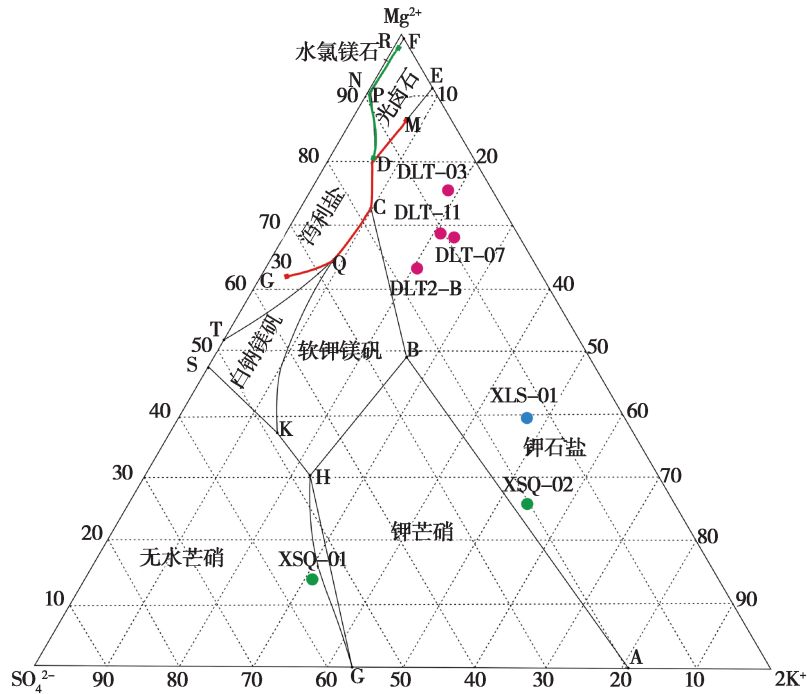


图 2 25 °C Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图

Fig. 2 The Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, SO_4^{2-} - H_2O five system interface steady phase at 25 °C

6 柴达木盆地盐湖软钾镁矾沉积的形成条件

软钾镁矾($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)是一种含钾、硫、镁的复盐,是硫酸钾镁肥的主要品种。自 20 世纪 70 年代开始,科技工作者就对柴达木盆地盐湖沉积的软钾镁矾进行过研究,并获得有益的研究成果^[12,18-21]。

按大浪滩钻孔岩芯矿物学、元素地球化学和沉积学特征,大浪滩盐湖属硫酸盐型钾镁盐沉积矿床。矿床下部以硫酸盐为主,向上逐渐过渡为氯化物沉积(尤其到全新统明显增加)。盐类矿物主要沉积了软钾镁矾、钾石盐和光卤石,其成因为盐湖卤水浓缩—淡化—分割浓缩形成的化学沉积矿床^[16,18-19]。

高世扬等^[20]结合 25 °C Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图^[13]和地质

钻探资料,对大柴旦盐湖软钾镁矾形成条件提出以下 4 点认识。第一,地层分布上,从晚更新统到全新统软钾镁矾含量增高,厚度增大;对应的矿物组合由晚更新统软钾镁矾与石盐、芒硝、石膏和卤泥共生,到全新统与石盐、白钠镁矾和泻利盐共生。第二,基于美国大盐湖软钾镁矾沉积环境和全新世大暖期气候条件,推断软钾镁矾析出时其年平均气温比目前高 5 ~ 6 °C。第三,从 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系热力学溶解度相图^[13]分析,软钾镁矾相区存在的温度范围是 -6 ~ 25 °C。第四,增高的温度会使硫酸盐(芒硝等)回溶,导致湖表卤水中硫酸盐含量明显增加,卤水组成点易落在 25 °C 五元体系介稳相图的白钠镁矾相区内,有利于软钾镁矾结晶析出。

孙大鹏和 Lock^[21]基于盐湖沉积学、地球化

学和物理化学特征,总结了柴达木盆地钾盐沉积条件。第一,丰富的物质来源(主要为外围山系的花岗岩类,其次为深部水、盆地西部上新世和中下更新世的含盐沉积和第三纪油田水)。第二,具有钾迁移和富集的良好过程,与盆地形成和演化紧密相关。第三,具有良好的物理化学环境(干燥的气候条件、富钾的硫酸盐型和氯化物型卤水、低温条件)。

通过大浪滩凹地 XY-1 剖面和大柴旦盐湖软钾镁矾沉积地层对比发现,软钾镁矾沉积于全新统盐层中,且有更高的钾含量。同时,在全新统地层中软钾镁矾和芒硝、石膏等矿物没有共生沉积。野外考察发现,从小梁山到大浪滩凹地软钾镁矾矿区,沉积有层状的芒硝和片状、龟背状的石膏矿物,说明在软钾镁矾矿区的外围沉积有更多石膏和芒硝矿物。从相图分析来看,芒硝和石膏等矿物是盐湖卤水早期析出的盐类矿物,随着卤水的蒸发浓缩,后期析出软钾镁矾、钾石盐或光卤石矿物,这符合正常的钾盐析盐序列。由于大浪滩凹地野外采集 7.3 m 的地层剖面,尚难说明软钾镁矾下覆地层的矿物组合信息。但是,通过大浪滩外围的盐类矿物沉积和大柴旦盐湖从晚更新统到全新统的矿物组合分布,可以推断大浪滩凹地 XY-1 剖面符合盐湖蒸发析盐序列,从早期芒硝、石膏矿物析出,到白钠镁矾、软钾镁矾矿物析出,最后发展为钾石盐、光卤石以及水氯镁石矿物的析出。竺可桢^[22]对我国近 5 000 年来气候变化的研究指出,公元前 2 000 ~ 3 000 年间,我国曾出现过持续高温气候,以此推测在同一时期青藏高原地区的年平均气温有可能同步上升 5 ~ 6℃。结合高世扬等的研究成果,可以说大浪滩和大柴旦盐湖整体的析盐序列与全新世更高的气温条件,加强了卤水的蒸发浓缩和软钾镁矾的结晶析出。

本文通过 XY-1 剖面矿物组合,结合 25℃ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} - H_2O 五元体系介稳相图分析,发现软钾镁矾沉积时两个亚层呈现了逆向的析盐过程。同时,矿物组合分布证实软钾镁矾矿层下覆沉积有大量的碎屑沉积物。综合对比推断,除了全新世高温条件外,还有更多的外来水体混入,带来了一些碎屑沉积

物和盐类组分。

重建盐湖水体的地球化学信息,仅凭矿物组合分布和离子含量,目前很难解决全部问题。为了简要揭示软钾镁矾沉积时古卤水的物源联系,测试了 XY-1 剖面 3.7 ~ 4.1 m 两个软钾镁矾矿物的稳定锶同位素比值,其值在 0.712 12 ~ 0.712 56 之间,均高于深部来源温泉水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.708 53)^[23]。壳源锶主要由大陆古老岩石风化提供, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的全球平均值为 0.711 9^[24];幔源锶主要由洋中脊热液系统提供, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为 0.703 5^[25]。软钾镁矾的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值更接近于壳源的值,说明与壳源硅铝质岩石风化物源有关。此外,软钾镁矾锶同位素比值偏重于柴达木盆地盐湖湖水和晶间卤水,更接近于盆地西部油田卤水的值^[26],可以推测大浪滩凹地软钾镁矾的沉积可能与其南侧断裂—小梁山构造气田水渗入有关。

参考文献:

- [1] 郑绵平,袁鹤然,张永生,等. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1523 - 1553.
- [2] 张彭熹等. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] 袁见齐. 钾盐矿床成矿理论研究若干问题[J]. 地质论评, 1980, 26(1): 56 - 59.
- [4] 曲懿华,袁品泉,帅开业,等. 兰坪—思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [5] 沈振枢,程果,乐昌硕,等. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [6] 郑绵平,袁鹤然,张永生,等. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1523 - 1553.
- [7] 付建龙,于升松,李世金,等. 柴达木盆地西部第三系油田卤水资源可利用性分析[J]. 盐湖研究, 2005, 13(3): 17 - 21.
- [8] 樊启顺,马海州,谭红兵,等. 柴达木盆地西部卤水特征与找钾研究[J]. 地球学报, 2007, 28(5): 446 - 455.
- [9] 樊启顺,马海州,谭红兵,等. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 601 - 611.
- [10] 樊启顺,马海州,谭红兵,等. 柴达木盆地西部典型地区油田卤水水化学异常及资源评价[J]. 盐湖研究, 2007, 15(4): 6 - 12.
- [11] 侯建华,盖晓宏. 罗布泊盐湖矿物制取软件镁矾的试验研究[J]. 新疆化工, 2012, 2: 5 - 7.
- [12] 樊启顺,程怀德,冉广芬. 柴达木盆地西部大浪滩梁中矿区软钾镁矾沉积的矿物组合特征[J]. 盐湖研究, 2014, 22(3): 9 - 14.

- [13] 金作美,肖县志,梁式梅. $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ 五元系统介稳平衡的研究[J]. 化学学报, 1980, 38:313-321.
- [14] 袁见齐,霍承禹,蔡克勤. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析[J]. 地质论评, 1983, 29(3):159-165.
- [15] 李廷伟,谭红兵,樊启顺. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析[J]. 盐湖研究, 2006, 14(4):26-32.
- [16] 王弭力,王仪杰,刘成林,等. 柴达木盆地大浪滩盐矿床基本特征及形成机理[J]. 中国地质科学院院报, 1993, 26:97-114.
- [17] 杨谦. 大浪滩地区全新统以前的盐层中寻找固体钾矿的可能性[R]. 平安:青海省第一地质水文地质大队, 1985:13-24.
- [18] 覃功平,马林,尚小刚. 大浪滩梁中浅部钾镁盐矿的矿床特征与成因分析[J]. 中国工程科学. 2005, 7:306-310.
- [19] 中国科学院青海盐湖研究. 大浪滩钾镁盐矿床矿物成分的研究[J]. 盐湖研究, 1975:32-43.
- [20] 高世扬,宋彭生,夏树屏,等. 盐湖化学—新类型锂硼盐湖[M]. 北京:科学出版社, 2007:373-376.
- [21] 孙大鹏,Lock D E. 柴达木盆地钾盐沉积的形成问题[J]. 中国科学(B辑), 1988, 1323-1333.
- [22] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 1973, 16(2):226-256.
- [23] 刘昊年,黄思静,胡作维,等. 锶同位素在沉积学中的研究与进展[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3):59-65.
- [24] 刘成林,王弭力,焦鹏程. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶同位素地球化学及钾矿成矿物质来源[J]. 矿床地质, 1990, 18(3):268-275.
- [25] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotopic budget of the modern ocean [J]. Earth Planet Sci. Lett., 1989, 92:11-26.
- [26] 李廷伟,谭红兵,樊启顺. 柴达木盆地西部卤水水化学特征及成因分析[C]//陈毓川,毛景文,薛春纪. 第八届全国矿床会议论文集. 北京:地质出版社, 2006:488-491.

Element and Phase Chemistry of Picromerite Deposits from Dalangtan Liangzhong Depression in the Western Qaidam Basin

WAN Quan-bo^{1,2}, SHAN Fa-shou¹, FAN Qi-shun¹, QIN Zhan-jie¹, WANG Ming-xiang¹

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The Dalangtan Liangzhong depression in the western Qaidam Basin consists of liquid brines enriching K^+ and potassium salt minerals. Based on the field investigation for these salt deposits of Liangzhong depression, the authors collected 73 salt samples from a profile (XY-1) contained potassium salt in the Xingyuan Salt Works, and analyzed chemical composition of 73 salt samples and 7 brine samples, stable strontium isotopic composition of two picromerite samples in this study. Combining with mineral assemblages of XY-1 and $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ five system interface steady phase diagram at 25°C , the authors discussed elemental compositions characteristics and chemical evolution of picromerite deposits from Dalangtan Liangzhong depression in the western Qaidam Basin. The results indicate that: (1) the potassium minerals at 5.3-2.6 m from XY-1 were deposited, which reached 10%-18% of K^+ ; (2) the temperature rose during Holocene and mixing of extraneous water resulted in reverse salting process at 5.3-2.0 m; (3) by comparing $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of picromerite with those of oil-field and salt lake brines, the authors deduced that the picromerite deposits might be associated with the supply of oilfield water from southern fault of Xiaoliangshan.

Key words: Dalangtan salt lake; Picromerite; Element and phase chemistry