

大柴旦盐湖化学沉积特征及其控制因素

高春亮¹, 余俊清¹, 闵秀云¹, 何先虎², 成艾颖¹, 辛首臻^{1,3},
洪荣昌^{1,3}, 刘永⁴, 张丽莎¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 青海省能源局, 青海 西宁 810008;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 浙江 杭州 310002)

摘要:大柴旦盐湖岩性地层层序依据湖底沉积剖面 DCD-2 和 DCD03 自上而下可划分为蒸发盐类盐层与灰黑色淤泥层混合层(Ⅰ层)、灰白色柱硼镁石矿层(Ⅱ层)和土黄色泥质沉积层(Ⅲ层)。湖底化学沉积以石膏为主, 并见有石盐和碳酸盐等盐类矿物, 这些蒸发盐类矿物几乎贯穿整个化学沉积过程, 碎屑矿物夹杂其中, 化学沉积分异很不充分。在柱硼镁石矿层形成前的较长时期内, 大柴旦盐湖是以碎屑沉积为主的非盐湖相沉积环境, 此后快速进入硫酸盐型盐湖阶段和湖底柱硼镁石矿层形成阶段。个别层位见有大柴旦盐湖这种独特化学沉积序列, 与其它陆相和海相蒸发沉积序列有明显的差异, 这可能主要受该地区的构造环境、物源背景以及气候变化等因素的控制。新构造运动、气候的持续干旱化、湖底柱硼镁石矿层形成前后截然不同的湖区气温、水量平衡和水化学条件(包括化学动力学因素)以及盐湖硼酸盐矿物形成的内外耦合条件, 促使全球分布有限的柱硼镁石矿层在大柴旦湖底形成。构造运动、气候干湿变化以及不同水体(包括入湖淡水、盐湖卤水和周边出露泉水)的掺杂兑卤作用的耦合机制控制了大柴旦盐湖如此特殊的化学沉积序列。

关键词:大柴旦盐湖; 湖底沉积剖面; 沉积序列; 柱硼镁石矿层; 柴达木盆地

中图分类号: P57; P59

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2015)01-0022-08

引言

柴达木盆地盐湖广泛分布, 盐湖沉积具有其独特性, 蕴藏着丰富的钾锂硼镁等盐类矿产资源。其中, 大柴旦盐湖以蕴藏硼矿资源而闻名, 主要表现为在盐湖成盐演化过程中出现了大量固体硼酸盐矿物沉积, 特别是湖底沉积有全球少有分布的胶结致密块状柱硼镁石矿层^[1-2], 还包括湖滨钠硼解石和水方硼石等多种硼酸盐矿物^[3-7]。然而, 该盐湖化学沉积与青藏高原地区其他富硼、锂盐湖的化学沉积存

有一定的差异。比如, 东、西台吉乃尔盐湖与大柴旦盐湖相比, 虽然盐湖卤水中皆富含硼和锂, 但台吉乃尔盐湖没有沉积固体硼矿^[7-8]; 西藏自治区扎仓茶卡等盐湖虽沉积有固体硼矿, 但包括硼矿层在内的上覆含盐地层和下伏地层与大柴旦盐湖化学沉积相比, 皆存有一定的差异性^[6, 9-10]。另外, 大柴旦盐湖硼矿床与土耳其西安纳托利亚(Western Anatolia)地区硼矿床、美国加利福尼亚硼矿床以及南美地区硼矿床等第三纪湖相沉积矿床也存有很大的差异, 这种差异性主要体现在硼酸盐矿物种类以及共生矿物组合等方面^[11-18]。上述差异性可能受多种

收稿日期: 2014-09-02; **修回日期:** 2014-09-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171171); 中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金项目以及中国科学院“西部之光”西部博士资助项目; 国家自然科学基金—青海联合基金项目(U1407206)共同资助

作者简介: 高春亮(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为地球化学和矿床学。Email: gaochunliang2007@163.com。

通信作者: 余俊清。Email: junquyu@isl.ac.cn。

因素控制,包括构造运动、气候干湿变化、不同水体(入湖淡水、盐湖卤水和周边出露泉水)的掺杂兑卤作用、补给变化以及后期成岩作用等。本文拟通过对大柴旦盐湖湖底沉积剖面DCD-2和DCD03化学沉积特征开展分析和对比研究,以期深入探讨其盐湖成盐演化和湖底特色柱硼镁石矿层形成的控制因素。

1 湖区概况

大柴旦盐湖位于柴达木盆地东北边缘的次级山间盆地内,地理坐标 $37^{\circ}46' \sim 37^{\circ}55'N$, $95^{\circ}02' \sim 95^{\circ}22'E$,是一个独立的闭流汇水盆地。所在区域在大地构造位置上属于“祁连山边缘凹陷带”,区内构造以断裂为主,褶皱不甚

发育,岩浆活动频繁^[4]。大柴旦盐湖是一个常年性水体,外观呈不规则新月形(图1)。湖水最大水深通常不足1 m,水面随季节升降,盐湖卤水面积相应地在 $35 \sim 45 \text{ km}^2$ 的范围内变化。湖面海拔高度为3 148 m,封闭型汇水盆地的面积约为 $2 130 \text{ km}^2$ 。盐湖区干旱少雨,年降水量为 $60 \sim 80 \text{ mm}$,年蒸发量高达1 800 mm左右。无常年性河流入湖,湖水水位和水化学的变化受控于周围众多山前冲洪积扇地表径流和地下潜流补给,尤其受山区汇水盆地春季融水量和夏季降水量的大小以及湖区蒸发量的控制。因此,在不同时间尺度上该盐湖水体的水量平衡决定了它在不同时期的水化学特征和湖底沉积物的矿物组合特征。

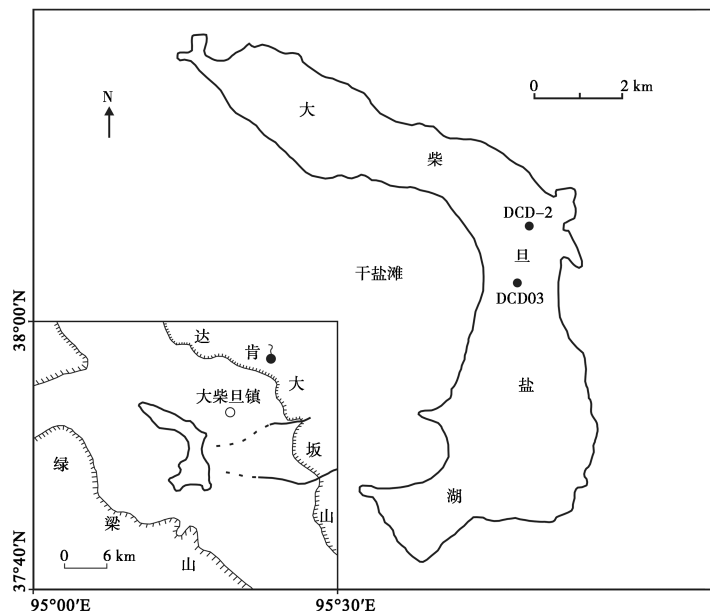


图1 大柴旦盐湖湖底沉积剖面DCD-2和DCD03采样点示意图

Fig.1 Sampling site of subbottom sediment profile DCD-2 and DCD03 from Da Qaidam salt lake

大柴旦盐湖卤水及各种地下卤水中的硼含量居柴达木盆地各类盐湖之首,达 $500 \sim 800 \text{ mg/L}$,是海水硼含量的110~180倍。值得注意的是,源自达肯大坂山一带高含硼热泉水($B_2O_3 > 40 \text{ mg/L}$)的长期汇入和湖水强烈的蒸发浓集作用,造成了大柴旦盐湖卤水的高硼含量以及固体硼酸盐矿物的沉积。

2 研究材料和方法

大柴旦湖底沉积剖面DCD-2和DCD03位于现代水体的中部(图1),经人工抽卤和开挖后马上将采集的样品保存在 $4^{\circ}C$ 的冷藏室中备用。采样间距一般为1 cm,此外,根据沉积物特征有时将采样间距选定为 $0.5 \sim 3 \text{ cm}$ 不

等。对湖底沉积剖面 DCD-2 和 DCD03 进行了详细的岩性描述、烧失量分析(LOI)、X 射线衍射分析(XRD)及扫描电镜形貌分析(SEM)等矿物学研究,并鉴定出样品中的盐类矿物种类和特征。从样品中选择有机碳含量较高的黑色淤泥样品用于(AMS)¹⁴C 断代研究,以确定沉积地层的年代。在上述研究工作的基础上,对比国内外海相蒸发沉积序列和湖泊陆相蒸发沉积序列,以期深入探讨大柴旦盐湖化学沉积序列的特殊性和控制因素。

3 海相与陆相蒸发岩沉积序列

3.1 海相沉积序列

世界上的盐类矿床特别是钾盐矿床,多属于海相成因。因此,作为盐类物质来源的海水,最早引起前辈科学家们的注意,并开展了海水的相关实验研究,目的是探讨盐类矿物的沉积机理及其矿床成因。Usiglio^[21]于 1849 年首次提出了地中海海水蒸发析盐序列,分为以下 7 个阶段。

- 1) 氧化铁 + 碳酸钙
- 2) 石膏
- 3) 石膏 + 石盐
- 4) 石膏 + 石盐 + 泻利盐
- 5) 石膏 + 石盐 + 泻利盐 + 软钾镁矾
- 6) 石膏 + 石盐 + 泻利盐 + 软钾镁矾 + 光卤石
- 7) 石膏 + 石盐 + 泻利盐 + 软钾镁矾 + 光卤石 + 水氯镁石

上述可见,在海水蒸发浓缩过程中,石膏和石盐在大多数阶段均有结晶析出,并依次析出泻利盐、软钾镁矾、光卤石和水氯镁石。Valyashko^[22]提出的海水结晶顺序如下。

- 1) 石盐
- 2) 石盐 + 白钠镁矾
- 3) 石盐 + 泻利盐 + 钾盐镁矾
- 4) 石盐 + 硫镁矾 + 光卤石
- 5) 石盐 + 硫镁矾 + 光卤石 + 水氯镁石

Valyashko 提出的海水析盐序列与前者存在一定的差异性,这可能与海水的水化学组成

的变化有关。由此可见,水化学组分或水化学特性是形成不同盐类矿床的主要内在控制因素之一。值得注意的是,海水中虽然含有微量的硼元素,但在整个海水蒸发析盐过程中,硼只是被浓缩富集在海水中,并不以固体硼酸盐的形式结晶析出。

3.2 陆相沉积序列

为了考察成盐元素硼在盐湖卤水蒸发浓缩过程中的行为,特别是能否直接结晶析出固体硼酸盐,国内前辈科学家们对青藏高原盐湖卤水(湖表卤水或晶间卤水)的蒸发结晶路线和析盐序列开展了研究。陈敬清等^[23]提出柴达木盆地小柴旦盐湖湖表卤水蒸发析盐序列。

- 1) 石膏
- 2) 石膏 + 石盐
- 3) 石盐 + 无水芒硝
- 4) 石盐 + 无水芒硝 + 白钠镁矾
- 5) 石盐 + 白钠镁矾
- 6) 石盐 + 白钠镁矾 + 软钾镁矾
- 7) 石盐 + 白钠镁矾 + 软钾镁矾 + 泻利盐
- 8) 石盐 + 软钾镁矾 + 泻利盐
- 9) 石盐 + 软钾镁矾 + 泻利盐 + 六水泻盐
- 10) 石盐 + 软钾镁矾 + 六水泻盐
- 11) 石盐 + 钾石盐 + 六水泻盐
- 12) 石盐 + 钾石盐 + 六水泻盐 + 钾盐镁矾 + 镁硼酸盐

小柴旦盐湖卤水水化学类型起初为硫酸钠亚型,后演变为硫酸镁亚型。盐湖卤水结晶路线基本上按照 $\text{Na}^+, \text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ 四元水盐交互体系以及 $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ 五元水盐交互体系中的介稳相图进行。需要特别强调的是,在小柴旦盐湖卤水蒸发浓缩过程中,析出了镁硼酸盐。张宝全等^[24]提出柴达木盆地东台吉乃尔盐湖晶间卤水蒸发析盐序列。

- 1) 石盐
- 2) 石盐 + 软钾镁矾
- 3) 石盐 + 软钾镁矾 + 泻利盐
- 4) 石盐 + 泻利盐 + 钾石盐
- 5) 石盐 + 六水泻盐 + 钾盐镁矾
- 6) 石盐 + 六水泻盐 + 钾盐镁矾 + 光卤石

7)石盐+光卤石+一水硫酸锂+水氯镁石
东台吉乃尔盐湖卤水水化学类型为硫酸镁亚型。研究结果显示,硼在蒸发过程中被浓缩富集在卤水中,并不以固体硼酸盐的形式结晶析出。李刚和高世扬^[25]提出西藏扎仓茶卡盐湖湖表卤水蒸发析盐序列。

- 1)水钙芒硝
- 2)水钙芒硝+无水芒硝
- 3)石盐+无水芒硝
- 4)石盐+无水芒硝+白钠镁矾+软钾镁矾
- 5)石盐+白钠镁矾+软钾镁矾
- 6)石盐+软钾镁矾+泻利盐+一水硫酸锂
- 7)石盐+泻利盐+钾石盐+光卤石+一水硫酸锂

由以上 3 个蒸发模拟实验可以看出,在富硼盐湖卤水水化学类型同属硫酸镁亚型的情况下,其卤水蒸发析盐序列仍存有一定的差异性。研究结果同样显示,在相同的外在控制条件下,虽然实验中盐湖卤水原料不同(湖表卤水或晶间卤水),但除小柴旦盐湖卤水在蒸发浓缩过程中析出镁硼酸盐外,其它两个盐湖卤水在蒸发过程中并没有固体硼酸盐结晶析出。由此可见,蒸发成盐机制^[26]除适用于一般蒸发盐类矿物外,盐湖硼酸盐矿物的形成是否真正受控于此成盐机制,值得进一步深入探讨和研究。

4 大柴旦盐湖

4.1 湖表卤水蒸发析盐序列

高世扬等^[7]对大柴旦盐湖夏季和冬季组成卤水进行了天然蒸发实验,并提出如下蒸发析盐序列。

- 1)石盐
 - 2)石盐+泻利盐
 - 3)石盐+六水泻盐+钾石盐
 - 4)石盐+六水泻盐+光卤石
 - 5)石盐+六水泻盐+光卤石+水氯镁石
- 在上述天然蒸发实验中,并没有首先析出石膏矿物,而是石盐首先析出,并且在整个蒸发过程中并未析出石膏。我们分析认为,既然大柴旦湖底沉积物中主要盐类矿物是石膏,这就

说明湖底早期沉积形成了大量的石膏矿物,因而致使蒸发实验所用的卤水中钙离子含量很低和硫酸钙一直未达到饱和状态。蒸发实验研究结果显示,在盐湖卤水蒸发浓缩过程中,硼并不以固体硼酸盐的形式析出,而是被富集在浓缩卤水中。

4.2 湖底沉积剖面盐类沉积序列

湖底沉积剖面 DCD-2 和 DCD03 位于大柴旦盐湖的中部(图 1),对两个剖面 90 个样品进行了 XRD 分析测试,从沉积物中检出含量超过 1% 的矿物达 16 种以上,其中主要盐类矿物有石膏、碳酸盐矿物(包括方解石、文石、白云石和水菱镁矿)以及石盐(表 1 和表 2)。两个剖面除了在个别层位检出柱硼镁石外,再未出现此前形成块状厚层柱硼镁石矿层的水化学条件和沉积地球化学环境。

表 1 大柴旦盐湖 DCD-2 沉积剖面中盐类矿物的相对质量分数

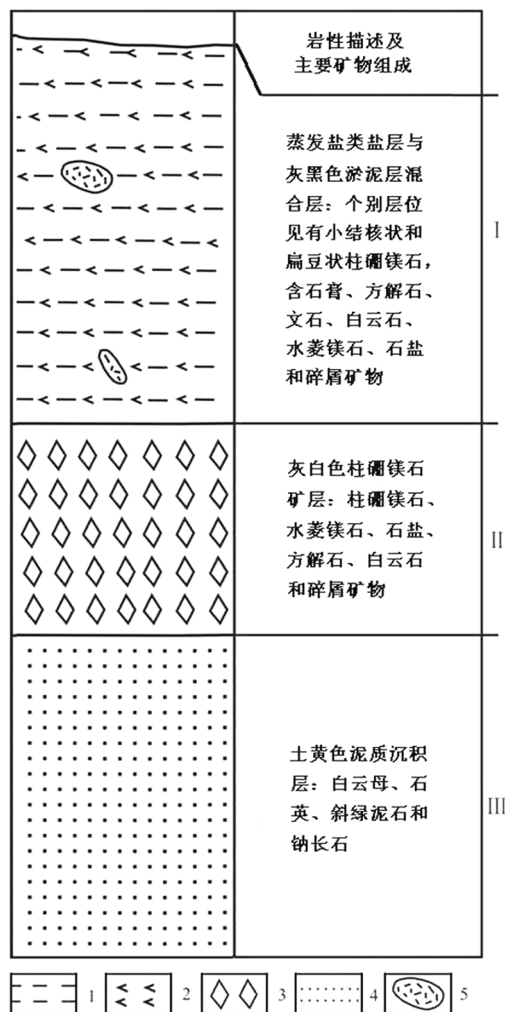
Table 1 Relative contents of salt minerals of sediment profile DCD-2 from Da Qaidam salt lake %			
矿物组分	平均值	最大值	最小值
石 盐	8.6	31.0	0.0
石 膏	41.3	82.0	0.0
方解石	2.4	8.0	0.0
文 石	9.2	27.0	0.0
白云石	0.9	7.0	0.0
水菱镁矿	11.7	33.0	0.0
柱硼镁石	1.1	33.0	0.0

表 2 大柴旦盐湖 DCD03 沉积剖面中盐类矿物的相对质量分数

Table 2 Relative contents of salt minerals of sediment profile DCD03 from Da Qaidam salt lake %			
矿物组分	平均值	最大值	最小值
石 盐	4.6	13.0	0.0
石 膏	5.3	34.0	0.0
方解石	9.6	18.0	1.0
白云石	1.1	3.0	0.0
水菱镁矿	5.4	27.0	0.0
柱硼镁石	9.6	18.0	0.0

大柴旦盐湖岩性地层层序依据湖底沉积剖

面 DCD-2 以及 DCD03 大体可以划分成 I、II 和 III (从上往下) 3 个不同的沉积单元 (图 2), 按沉积先后顺序由下而上描述如下。



1 - 淤泥; 2 - 蒸发盐类矿物; 3 - 柱硼镁石; 4 - 土黄色泥质沉积物; 5 - 结核

图 2 大柴旦盐湖湖底岩性地层特征和主要矿物组成

Fig. 2 The lithostratigraphic characteristics and mineral compositions of subbottom profile from Da Qaidam salt lake

III: 下伏土黄色泥质沉积层, 厚度 2 m 以上, 未见底。碎屑矿物主要包括白云母、石英、斜绿泥石以及钠长石。

II: 灰白色柱硼镁石矿层, 平均厚度在 70 cm 左右, 埋深 2 ~ 2.5 m, 胶结紧密的大块矿层中水平层理十分发育 (图 3)。柱硼镁石矿层与上覆含盐地层和下伏土黄色泥质沉积层为整

合接触关系。

I: 蒸发盐类盐层与灰黑色淤泥层混合层, 沉积分异不充分, 个别层位见有小结核状和扁豆状柱硼镁石。盐类矿物以石膏、碳酸盐和石盐为主; 碎屑矿物以粘土矿物为主, 主要包括斜绿泥石、白云母、石英和钠长石。

由此可见, 大柴旦湖底化学沉积序列相对比较复杂, 不仅沉积有各种蒸发盐类, 还沉积有柱硼镁石等固体硼酸盐, 化学沉积分异很不充分。一般而言, 自生碳酸盐矿物是淡水渗入盐湖卤水后的生成物, 而沉积物中石膏和石盐等盐类矿物含量高时反映卤水浓度较高。湖底沉积剖面中蒸发盐类矿物与灰黑色淤泥层交互成层, 反映了湖区数十至百年级水体淡咸波动以及水位高低的更替, 这进一步说明大柴旦湖底蒸发盐沉积序列与该地区的气候干湿变化和入湖补给水量变化有着密切的联系。

4.3 湖底特色柱硼镁石矿层

大柴旦盐湖常年水体底部硼矿层以胶结块状柱硼镁石为主 (图 3), 平均厚度在 70 cm 左右, 埋深为 2 ~ 2.5 m, 是 7 m 厚的盐湖沉积地层中唯一的硼矿层, B_2O_3 含量约为 3% ~ 16%, 属于中低品位硼矿层, 主要分布在现代盐湖水体东部近岸一带约 10 km² 的范围内。显然, 湖底柱硼镁石矿层是在特定的盐湖环境下形成的。

汇水盆地山区地层中硼的克拉克值较高, 尤其是大量高硼含量热泉水汇入大柴旦盐湖后, 在强烈的蒸发作用下不断富集是形成该湖高硼含量卤水资源的主要原因^[5-6]。此种高硼含量卤水资源的形成与柴达木盆地盐湖卤水锂资源的富集成矿和形成过程非常相似^[27-28]。湖底硼矿层样品 XRD 分析表明, 该矿层盐类共生矿物组合为柱硼镁石 + 石膏 + 水菱镁矿。其中, 石膏的含量比较高, 水菱镁矿也有一定的含量。石膏的大量沉积, 说明当时气候比较干旱。据青藏高原现代湖泊研究, 湖泊中 Mg^{2+} 浓度和盐度有着较为稳定的正相关关系^[29]。随着湖水不断地蒸发浓缩, 致使 Mg^{2+} 浓度不断增高, 由于 Ca^{2+} 参与了硫酸盐沉积, 致使 Mg/Ca 比值相对较高, 因而一部分 Mg^{2+} 参与碳酸盐沉积形成水菱镁矿, 大



图3 大柴旦湖底胶结块状柱硼镁石

Fig.3 Subbottom cemented massive pinnoite ore of Da Qaidam salt lake

部分 Mg^{2+} 由于地下含硼淡水或咸化水的掺杂稀释作用形成胶体状柱硼镁石,后经压实作用逐渐形成胶结致密块状柱硼镁石。

依据如下:1)柱硼镁石矿层与上覆含盐地层以及下伏土黄色泥质沉积层为整合接触关系—连续沉积;2)柱硼镁石矿层呈胶结致密块状,具有层理—湖底沉积;3)常年水体下部湖底沉积柱硼镁石矿层分布面积相对较小,分布面积约为 10 km^2 —湖水变浅;4)柱硼镁石矿层以下至 7 m 内无其它硼矿层—卤水中 B_2O_3 历经持续浓缩;5)气候持续干旱才能导致大柴旦盐湖变小变浅。

最后,通过对比柱硼镁石矿层形成前后大柴旦盐湖湖泊环境特征(图2),我们认为在柱硼镁石矿层形成前的较长时期内,大柴旦盐湖是以碎屑沉积为主的非盐湖相沉积环境,此后快速进入硫酸盐型盐湖阶段和湖底柱硼镁石矿层形成阶段。此外,区域气温稳步上升,并可能由此引发山区降水量增加和湖区蒸发量增强^[30],致使湖泊水量平衡、水化学和沉积环境急剧改变。而柱硼镁石矿层形成之后,从沉积物岩性来看,大柴旦盐湖则一直保持在盐湖沉积阶段,且卤水浓度较高,据推测现在的大柴旦盐湖常年卤水的硼含量应为 $3\ 600 \text{ a BP}$ 以来的

最高值, B_2O_3 含量高达 800 mg/L 。由此可见,在柱硼镁石矿层形成前以及形成时的湖泊环境与现今存在很大的不同。另外我们推测硼酸盐矿物形成受控于硼自身内在地球化学特性及其外在控制条件,是内外条件耦合的结果。因此,正是大柴旦盐湖柱硼镁石矿层形成前后截然不同的湖区气温、水量平衡和水化学条件(包括化学动力学因素)以及硼酸盐矿物形成的内外耦合条件,才促使全球分布有限的柱硼镁石矿层在大柴旦湖底形成。

5 结 论

源自周边山地的降水通过地表和地下径流将硼锂钾等成盐元素汇入湖中,伴随着新构造运动的强烈发生和第四纪以来干旱气候的持续发展,致使湖水不断地蒸发浓缩,卤水中 B_2O_3 不断富集而形成富硼硫酸镁亚型地表卤水,在特定的水文地球化学条件和湖泊环境中,在湖底和湖滨地带沉积形成各种蒸发盐类矿物和硼酸盐矿物,特别是形成湖底特色柱硼镁石矿床。

1)在柱硼镁石矿层形成前的较长时期内,大柴旦盐湖是以碎屑沉积为主的非盐湖相沉积环境,此后快速进入硫酸盐型盐湖阶段和湖底

柱硼镁石矿层形成阶段。湖底柱硼镁石矿层形成前后截然不同的湖区气温、水量平衡和水化学条件(包括化学动力学因素)以及盐湖硼酸盐矿物形成的内外耦合条件,促使全球分布有限的柱硼镁石矿层在大柴旦湖底形成。

2)构造运动、气候干湿变化以及不同水体(包括入湖淡水、盐湖卤水和周边出露泉水)的掺杂兑卤作用的耦合机制控制了大柴旦盐湖如此特殊的化学沉积序列。

参考文献:

- [1] 柳大纲,高世扬. 大柴旦盐湖地表卤水底部沉积中硼酸盐的发现[J]. 盐湖研究,1995,3(1):1-9.
- [2] 高春亮,张丽莎,余俊清,等. 大柴旦盐湖卤水演变及环境变化的矿物学记录[J]. 地球化学,2011,40(2):156-162.
- [3] 曲懿华,韩蔚田. 大柴旦盐湖硼酸盐矿物形成环境的探讨[J]. 矿物岩石,1981(Z1):86-93.
- [4] 杨谦. 青海省柴达木盆地大、小柴旦盐湖矿床地质概况[J]. 青海国土经略,1983(3):38-63.
- [5] 张彭熹,陈克造,于升松. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社,1987:1-235.
- [6] 郑绵平,向军,魏新俊,等. 青藏高原盐湖[M]. 北京:北京科学技术出版社,1989:1-431.
- [7] 高世扬,宋彭生,夏树屏,等. 盐湖化学—新类型硼锂盐湖[M]. 北京:科学出版社,2007:1-522.
- [8] 高春亮. 大柴旦和台吉乃尔盐湖成盐演化及硼锂矿床成因研究[D]. 北京:中国科学院大学,2012:1-120.
- [9] 郑绵平,刘文高. 西藏发现富锂镁硼酸盐矿床[J]. 地质评论,1982,28(3):263-266.
- [10] 郑喜玉. 扎仓茶卡盐湖形成条件的初步探讨[J]. 地质评论,1984,30(2):155-160.
- [11] Alonso R N, Helvacı C, Sureda R J, et al. A new Tertiary borax deposit in the Andes[J]. Mineralium Deposita, 1988, 23:299-305.
- [12] Bowser C J, Dickson F W, Rau J L. Chemical zonation of the borates of Kramer, California[C]//Second Symposium on Salt-V. 1, Geology, geochemistry, mining. Cleveland: Northern Ohio Geol. Soc., 1966:122-132.
- [13] Garrett D E. Borates-Handbook of Deposits, Processing, Properties, and Use[M]. San Diego: Academic Press, 1998: 1-483.
- [14] Helvacı C. A review of the mineralogy of the Turkish borate deposits[J]. Mercian Geol., 1978, 6(4):257-270.
- [15] Helvacı C, Yagmurlu F. Geological setting and economic potential of the lignite and evaporite-bearing Neogene basins of western Anatolia, Turkey[J]. Israel Journal of Earth Science, 1995, 44(2):91-105.
- [16] Helvacı C, Orti F. Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits(western Anatolia, Turkey)[J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(5):1021-1033.
- [17] Palmer M R, Helvacı C. The boron isotope geochemistry of the Kirka borate deposit, western Turkey[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17):3599-3605.
- [18] Tanner L H. Borate formation in a perennial lacustrine setting: Miocene-Pliocene Furnace Creek Formation, Death Valley, California, USA[J]. Sedimentary Geology, 2002(148):259-273.
- [19] 张丽莎,余俊清,刘子亭,等. 黄旗海沉积岩芯烧失量变化曲线:冰后期环境演变的有效代用指标[J]. 盐湖研究,2007,15(1):12-15.
- [20] van Klinken G J, Hedges G E M. Chemistry strategies for organic ^{14}C samples[J]. Radiocarbon, 1998, 40(1):51-56.
- [21] Usiglio J. Analyse de L'eau de la Mediterranee sur le Cotes de France[J]. Ann. de Chem, 1849, 27(3):92-107.
- [22] Valyashko M G. Translated by Fan L, et al. Geochemical regularity for the formation of potash deposits[M]. Beijing: China Industrial Press, 1965:144.
- [23] 陈敬清,刘子琴,房春晖,等. 小柴旦盐湖卤水 25℃等温蒸发[J]. 地质评论,1986,32(5):470-480.
- [24] 张宝全,刘铸唐,符廷进,等. 东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究(I)25℃等温蒸发实验[J]. 盐湖研究,1994,2(2):57-61.
- [25] 李刚,高世扬. 扎仓茶卡盐湖卤水 25℃等温蒸发实验[J]. 海湖盐与化工,1996,25(4):16-19.
- [26] 李秉孝. 新疆现代盐湖盐类矿物及有关成盐机制[J]. 湖泊科学,1992,4(1):48-55.
- [27] 展大鹏,余俊清,高春亮,等. 柴达木盆地四盐湖卤水锂资源形成的水文地球化学条件[J]. 湖泊科学,2010,22(5):783-792.
- [28] Yu J Q, Gao C L, Cheng A Y, et al. Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 50:171-183.
- [29] 王海雷,王云生. 青藏高原湖泊 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mg/Ca 盐度指示意义的初步分析[J]. 湖泊科学,2010,22(6):894-900.
- [30] Yu J Q, Zhang L S. LAKE QINGHAI:Paleoenvironment and Paleoclimate[M]. Beijing: Science Press, 2008:1-161.

Chemical Sedimentary Sequence from Subbottom Sediment Profiles of Da Qaidam Salt Lake in Qaidam Basin and Its Controlling Factors

GAO Chun-liang¹, YU Jun-qing¹, MIN Xiu-yun¹, HE Xian-hu², CHENG Ai-ying¹,

XIN Shou-zhen^{1,3}, HONG Rong-chang^{1,3}, LIU Yong⁴, ZHANG Li-sha¹

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

2. Qinghai Energy Bureau, Xining, 810008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

4. Zhejiang Geological Prospecting Institute of CHEN, Hangzhou, 310002, China)

Abstract: Based on subbottom sediment profiles DCD-2 and DCD03 from Da Qaidam salt lake, the lithostratigraphic sequence can be divided into evaporite and silt mixed layer (unit I), pinnoite deposit (unit II) and argillaceous sediment layer (unit III). Gypsum-halite-carbonate evaporite minerals dominated in chemical sedimentary sequence in subbottom sediment of Da Qaidam salt lake, which almost throughout the whole chemical sedimentation process. Detrital minerals are mixed up with evaporite minerals that result in chemical sedimentary differentiation is insufficient. The results show that Da Qaidam salt lake had been a non-salt lake facies sedimentary environment that dominated by detrital deposit for a long period of time before subbottom pinnoite deposited. Then it rapidly changed into sulfate-type salt lake sedimentary stage and subbottom pinnoite sedimentary stage. Consequent changes in temperature, water balance and water chemistry of the lake, and as well as other control conditions may in a way associate with the sedimentary conditions favorable for the deposition of pinnoite deposit. The coupling mechanism of quaternary neotectonics, continuous arid climate and dilution and mixing from the different water bodies might have been responsible for the formation of this peculiar chemical sedimentary sequence in Da Qaidam salt lake.

Key words: Da Qaidam salt lake; Subbottom sediment profile; Sedimentary sequence; Pinnoite deposit; Qaidam Basin

封面图片:察尔汗盐湖

察尔汗盐湖位于柴达木盆地中南部,由东向西分为霍布逊、察尔汗、达布逊和别勒滩4个区段,总面积5 856 km²,格尔木河、柴达木河等多条内流河注入该湖。由于水分不断蒸发,盐湖上形成坚硬的盐盖;青藏铁路和青藏公路即修建于盐盖之上,后者称作“万丈盐桥”。察尔汗盐湖除蕴藏有丰富的氯化钠、氯化钾、氯化镁等无机盐类外,盐湖卤水中还伴生有锂、硼、碘等多种矿物质。察尔汗盐湖是我国最大的钾盐生产基地;氯化钾储量达1.45 × 10⁸ t,氯化镁1.6 × 10⁹ t,氯化锂8.25 × 10⁶ t,储量均居国内首位。

(中国科学院青海盐湖研究所 杨波)