大柴旦盐湖 DCD03 剖面的矿物学记录 及其环境指示意义

何先虎¹² 余俊清¹ 张丽莎¹ 高春亮¹ 成艾颖¹²

(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: 报道了大柴旦盐湖 DCD03 沉积剖面硼矿层及其下伏沉积地层的矿物学、有机质烧失量(LOI)等环境指标的研究结果,首次探讨硼矿层下伏灰黄色粉砂质粘土层沉积以来大柴旦湖水水化学演变及其与区域气候变化的关联。根据剖面的岩性、矿物组合和有机质烧失量(LOI)将研究剖面划分为 3 个沉积单元: I. 灰黄色粉砂质粘土层(623~423 cm)、II. 灰黑色淤泥夹结核层(423~407 cm)、III. 柱硼镁石矿层(407~395 cm)。研究结果表明,在湖底硼矿层形成之前的较长时期内,大柴旦湖是碎屑沉积为主的非盐湖相沉积环境,直到单元 I 顶层 20 cm 沉积物中才开始出现少量石膏。此后快速进入硫酸盐型盐湖沉积阶段(II)和湖底柱硼镁石矿层形成阶段(III)。有机烧失量在 I₁、I₂和 I₃单元中呈阶段性增加预示区域气温稳步上升,由此导致山区降水量增加和湖区蒸发量增强。湖泊环境变化是区域水文气候条件改变的结果。 关键词: 盐湖沉积; 矿物组合; 有机质烧失量; 盐湖水化学演变; 气候变化

1 引 言

湖泊沉积是研究过去全球变化(PAGES) 的重要环境档案之一,由于湖泊沉积可用于重 建不同时间尺度的古气候与古环境演变,因此 受到广泛重视^[1]。大柴旦盐湖受西风带气候 主控,其湖底沉积剖面是探讨西风带气候演变 的理想环境档案^[2]。大柴旦盐湖由于蕴藏固 体硼矿资源而闻名,前人的研究工作主要是针 对各类硼矿体的分布和沉积特征、物质来源、形 成条件等^[3-5]。高春亮等^[6]报道了硼矿层顶层 及其上覆沉积剖面的岩性和矿物地层学研究结 果,重建了硼矿层形成以来的水化学演变与其 水文气候变化的历史,但针对硼矿层以下沉积 物的古环境变化研究几乎没有开展。为了对大 柴旦盐湖硼矿层和下部沉积物的沉积序列及其 指示的古环境演变开展较为详尽的研究,我们 于2012年赴大柴旦盐湖考察取样并开展了相 关的研究工作。本文报道该盐湖中央湖体底部 沉积物 DCD03 剖面的初步研究结果,旨在探讨 沉积岩性突变,即从下伏灰黄色湖相粉砂质粘 土沉积转变为上覆硼矿层沉积反映的古气候与 古环境变化。

2 湖区概况

大柴旦盐湖位于柴达木盆地北部次级盆地 及祁连山褶皱带南缘的山间盆地内,大柴旦湖盆 属于典型的内陆山间闭流盆地,其北部为达肯大 坂山,南依绿梁山,西部有一第四纪隆起而与鱼 卡洼地相隔,东部为洪积裙。湖区东北距大柴旦

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171171;40871008;40571173) 资助

作者简介: 何先虎(1987 -), 男,硕士研究生,主要研究方向为地球化学。Email: hxh6800@163.com。

通信作者:余俊清。Email: junqyu@isl.ac.cn。

镇约4 km 敦格公路从境内穿过(图1)。

大柴旦湖盆呈北西一南东向椭圆形分布, 封闭型汇水盆地面积约2130km²。大柴旦盐 湖是一个常年性水体,外观呈不规则新月形,干 盐滩与湖表卤水共存。湖水最大水深通常不足 1m,且随着年份和季节不同而升降,盐湖卤水 面积相应也在23~44km²的范围内变化。湖 盆内水系呈向心型,无常年性河流入湖,在湖区 东部自上而下依次有温泉沟、八里沟以及大头 羊沟。湖水水位和水化学变化受控于周围众多 山前冲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,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。 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500~800 mg/L, 是海水硼含量的110~180倍。源自达肯大坂 山一带高含硼热泉水(>40 mg/L)的长期汇入 和强烈的蒸发浓集作用,造成了大柴旦盐湖卤 水的高硼含量。正是这种高硼卤水的存在为该 盐湖区固体硼矿的形成提供了基础。



图 1 大柴旦盐湖地理位置及 DCD03 取样点示意图 Fig. 1 Location and sampling site DCD03 of Da Qaidan Salt Lake

3 研究材料与方法

DCD03 剖面位于大柴旦盐湖现代水体中 部 地理位置 37°50′26″N,95°15′48″E,是研究 湖底硼矿层形成前后的代表性剖面(图2)。经 过人工抽卤和开挖后马上系统采集沉积物样 品,采样间距视岩性变化而定,一般按每 1~2 cm的间距采样。在沉积均匀、岩性变化不 大的层段中采样间距可扩大至 5 cm。采集的 样品封装运回实验室后保存在 4 ℃的冷藏设备 中备用。对选定的样品分别进行有机质烧失量 (LOI)测定和矿物的 X 射线衍射(XRD)分析。 样品有机质百分含量的有机质烧失量的具体分 析方法是 将 7 g 左右沉积物湿样置于 10 mL 坩埚中 在 110 ℃下烘干 再在 500 ℃马弗炉中



图 2 大柴旦盐湖 DCD03 沉积剖面的沉积特征和主要矿物组成

Fig. 2 Sediment characteristics and mineral composition of the subbottom sediment section DCD03 from Da Qaidam Salt Lake

加热 5 h,取出后立即置于干燥器内,待冷却至 室温后称重,并按下式得出与有机质含量相关 的烧失量的百分含量。 $LOI_{500} = 100(1 - W_{500}/W_{110})$,式中 W_{110} 为干样重量; W_{500} 为500 °C 加热后的样品重量。选作 X 射线衍射(XRD) 分析的样品干燥后在石英研钵中研磨至小于 63 μ m,采用 Phillips X-pert Pro 型 X 射线衍射 仪对其进行粉晶分析,鉴定样品中的矿物种类, 同时估算各矿物的含量(误差约 ±5%)。

4 结果与讨论

4.1 岩芯有机质烧失量

利用烧失量分析方法测定湖泊沉积物有机 碳与碳酸盐含量既准确也方便快捷^[7]。由于 沉积物中有机碳与碳酸盐含量通常受区域气 温、有效降水等气候环境条件的控制 它们因此 成为指示区域气候环境变化的重要指标^[8]。 研究结果表明^[9-13] 烧失量与沉积物中的有机 质含量两者之间有很好的相关性。湖泊沉积物 中有机质的含量主要取决于湖泊的有机质生产 力和湖泊的有机质保存条件这两个因素^[14] 大 柴旦盐湖也不例外。在我国西北寒旱区,不少 湖泊具有以下特点,当有机物质保存条件和沉 积速率变化不大或者皆非主导因素的情况下, 沉积地层中的有机碳、氮含量主要反映湖泊的 自生有机生产率^[15]。而这些湖泊的自生有机 生产率的重要改变又与冰期/间冰期气候的重 大转变紧密关联^[16]。DCD03 剖面灰黄色粉砂 质粘土中的有机质含量从剖面底部向顶部呈现 明显的阶段性上升(表1,图3),很可能反映湖 区逐步升温的气候特征。将有机烧失量与方解 石和石膏等矿物含量变化综合考量,我们注意 到 1) 当 LOI₅₀₀ 平均值在灰黄色粉砂质粘土顶 层(I₃) 中达到 10.3% 最高值,方解石含量逐步 升高 石膏开始出现;2) 矿物学证据说明大柴 旦湖水此间的盐度上升,水化学类型开始由碳 酸盐型向硫酸盐型过渡。这两点发现说明 Д 沉积期间湖区气温开始上升,夏季蒸发作用开 始增强。

表 1 DCD03 剖面有机质烧失量测定结果

Table 1	The	results	of	organic	matter	loss-on-ignition
from subbo	ottom	sedimen	t se	ection D	CD03	

层段	岩性	LOI ₅₀₀ 平均/%
П	灰黑色淤泥夹结核	9.0
Ι,	灰黄色粉砂质粘土	10.3
I ₂	灰黄色粉砂质粘土	5.8
I ₁	灰黄色粉砂质粘土	3.8

4.2 沉积物岩性特征与矿物组合

DCD03 剖面 395~623 cm 段沉积物中,I. 下部单元 423~623 cm 为湖相灰黄色粉砂质粘 土层,未见底;II.中部单元407~423 cm 为灰 黑色淤泥夹结核层,其下层为灰黑色淤泥,上层 为灰黑色淤泥夹结核;III.上部单元 395~ 407 cm为柱硼镁石矿层,厚度 12 cm 左右,胶结 矿层中的水平层理十分发育。从沉积剖面中选 择 20 个样品进行了 XRD 分析测试,含量超过 1% 的矿物达 12 种。沉积单元 I、II、III的岩性 特征和矿物组合变化的研究结果清楚指示大柴 旦古湖经历了重要的演变过程,即从以碎屑 (为主)沉积环境过渡到以形成柱硼镁石为主 (相对含量 40.25%)、含少量石膏和石盐等蒸 发盐矿物的盐湖沉积环境,可就不同矿物的环 境指示意义分析如下。

1) 碎屑矿物 在沉积单元 I 中碎屑矿物 占有绝对优势(59%)。非粘土碎屑矿物主要 包括石英、钠长石,其中石英含量较高,平均含 量达到了20%。粘土碎屑矿物又包括绿泥石 和白云母,绿泥石一般只存在于冰川或干旱地 区 化学风化作用受抑制 是母岩物质风化的产 物[17-18]。鉴于柴达木盆地沉积岩中的粘土矿 物主要为陆源成因^[19] 其形成及演化主要受母 岩分布与性质、气候条件与沉积环境的影响 因 此粘土矿物只是说明了物源区的气候特征 而 并非反映湖泊沉积时的气候特征。大柴旦湖区 北部的达肯大坂山和南部绿梁山岩性主要为变 质花岗岩、白云母片麻岩和中基性火山岩 其中 还有岩浆活动侵入的花岗岩大量出露^[4]。这 些母岩为大柴旦盐湖中白云母、石英、绿泥石等 碎屑矿物提供了丰富的物源基础。

湖泊中的碎屑矿物基本是由河流、洪流和



图 3 DCD03 剖面矿物组合及烧失量随深度变化图

Fig. 3 Mineralogical assemblages and organic matter loss-on-ignition with depth from subbottom sediment section DCD03

风力等外力作用携带入湖的外源物质,它们也 反映了沉积物的物源岩类经搬运的状况^[20]。 湖相沉积中的碎屑矿物含量的变化指示了入湖 水量的变化和湖泊水动力条件的变化,碎屑矿 物含量多说明了湖泊化学沉积作用的减弱,反 之则表明化学沉积作用的增强,二者互为消长。

2) 碳酸盐矿物 碳酸盐矿物是构成许多 湖泊沉积物的重要组成部分,有外源沉积、自生 沉积和内生沉积3种来源。其中,方解石的来 源较为复杂,水菱镁矿则基本属于湖泊化学沉 积作用产生的自生矿物^[20]。

碳酸盐在水体中以何种矿物的形式结晶析 出主要是受水体 Mg/Ca 比值的控制。当水体 中含有少量 Mg²⁺时,有利于方解石的结晶沉 淀;随着湖水的不断演化发展,Mg/Ca 比值达 到 20~30 ,pH 值增至 9.1 时,水菱镁矿就会结 晶析出^[21-23]。一般情况下,淡水一微咸水时沉 积方解石;若湖水中浓度很高时,常常会抑制稳 定相方解石的结晶^[24]。大柴旦盐湖沉积中的 水菱镁矿很可能在富镁缺钙的水化学条件下生 成^[25]。

内陆半干旱封闭湖泊中的碳酸盐含量变化 通常可被视为气候变化的敏感性指标^[26]。一 般说来,沉积物中以方解石和文石为代表的碳 酸盐沉积是盐类沉积的早期阶段,水菱镁石通 常在盐度较高水温较低的环境中生成^[27]。沉 积物中碳酸盐含量的高低分别指示了湖水的咸 化和淡化,亦即湖泊水体的萎缩和扩张,或湖泊 水位的下降和上升,从而间接地反映湖区气候 的干湿变化^[28]。XRD分析结果显示(图3),碳 酸盐含量在灰黄色粉砂质粘土层(Ⅰ)中整体 偏低,在上覆灰黑色淤泥夹结核层(Ⅱ)中含量 升高到整个剖面的最高值,表明湖水逐渐转咸。 硼矿层(Ⅲ)中方解石含量几乎为零,但析出水 菱镁石,清楚指示湖水已经进入盐湖阶段。

4.3 沉积记录与古环境变化

根据岩性、矿物组合、有机质烧失量在Ⅰ、 Ⅱ和Ⅲ3 个沉积单元中的特征和变化,我们对 大柴旦湖的古环境变化作如下推演。

沉积单元 I (623~423 cm) 湖相灰黄色粉 砂质粘土沉积是大柴旦盐湖湖底硼矿层沉积之 前的非盐湖相沉积阶段,为了更清楚地揭示这 个重要沉积阶段的环境变化过程,我们将单元 I 划分为 I₁、I₂和 I₃3 个亚单元展开讨论。

I,碎屑矿物为主的均质灰黄色粉砂质粘 土沉积,石英和白云母平均含量较高,分别为 33%和35%,绿泥石含量不足10%。方解石占 矿物总量的12.5%。根据有机质烧失量为整 个岩芯剖面的最低值(3.8%)和碎屑矿物含量 占绝对优势(84%)推断,I,单元沉积时的大 柴旦湖水尚未进入盐湖沉积阶段,以外来碎屑 沉积为主,碎屑物质可能随达肯大坂山区冰川 融水入湖,湖区气温较低,夏季蒸发作用较弱。 I₂岩性和矿物组合与I₁亚段基本相同, 石英含量的变化指示入湖碎屑物质有减少趋势,而有机质烧失量明显升高指示湖泊自生有 机生产率有所提高,可能是湖区气温升高的结 果。

I₃灰黄色粉砂质粘土沉积清楚指示,大柴 旦湖I₃沉积时的湖泊环境与此前(I₁和I₂) 相比基本相同,但有机烧失量较前两个亚沉积 单元进一步升高(10.32%)反映了湖区气温的 明显提高导致湖泊自生有机生产率的继续增 加,而碳酸盐及方解石含量的稳步增长 (14.3%),顶部20 cm石膏沉积(20%左右)开 始出现,这些都预示着湖区气候即将出现使湖 泊沉积环境从量变到质变的重要变化。

沉积单元 II (423 ~ 407 cm)的岩性、矿物 组成等与单元 I 相比有质的改变。下部灰黑色 淤泥夹带砂砾反映汇水盆地水文气候条件发生 了重要变化;上部灰黑色淤泥夹结核层中水菱 镁石和柱硼镁石开始形成,说明大柴旦湖开始 进入盐湖沉积阶段。尤其重要的是,水文气候 的变化,即汇水盆地降水量和径流量的增加导 致高硼含量温泉水大量汇入大柴旦湖,而有机 烧失量的继续增加预示湖区气温的继续升高, 湖水蒸发量增加,这些都为湖底硼矿层的形成 奠定了基础。

沉积单元Ⅲ(407~395 cm)为低品位柱硼 镁石矿层。胶结紧密的块状矿层中水平层理十 分发育,由水菱镁石(16.33%)、柱硼镁石 (33%)、碎屑矿物(剖面中含量最低值13%) 和少量石盐等组成。湖底柱硼镁石贫矿层的形 成需要前期含硼温泉水的汇入和入湖后的蒸发 浓集,区域气温的增高有助于夏季山区降水量 和湖区蒸发量的增加。需要指出的是,现今大 柴旦盐湖卤水的 B₂O₃含量高达 800 mg/L 但湖 底并不具备形成硼矿层的条件。可见大柴旦湖 底硼矿成矿时的湖区气温、湖泊水量平衡、水化 学条件(包括化学动力学因素)与今相比皆有 很大的不同。正是这种不同,全球有限分布的 柱硼镁石硼矿床才能在当时的大柴旦盐湖湖底 形成。而且 其成矿过程与大柴旦盐湖湖滨地 带的钠硼解石和水方硼石富矿床相比也有着很 大的不同。虽然全方位揭示造成两方面不同的

具体要素仍有待更加深入的研究工作,本文提 供的岩性、矿物组合、有机烧失量等详实的沉积 学研究结果,揭示了大柴旦湖底硼矿床形成前 的湖泊沉积物组成和变化特征,反映的沉积环 境和演变过程,以及成矿时与今相比完全不同 的湖泊地质背景和水文气候条件,这将为深入 探讨和揭示湖底特色柱硼镁石矿层的成因机理 提供重要基础信息。

致谢: 沉积物 XRD 分析由中国科学院青海盐湖 研究所杨波协助完成 在此谨表谢意。

参考文献:

- [1] 张振克, 王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究 进展与展望[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 417-422.
- [2] Yu J Q. Sedimentary evolution of DaQaidam Salt Lake associated with climate change in the mid-latitude westerly belt [R]. Beijing: NSFC Proposal 2012.
- [3] 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.
- [4] 杨谦.青海省柴达木盆地大、小柴旦盐湖硼矿床地质概况[J].青海地质,1983(3):38-63.
- [5] 吴俐俐,马文展,唐渊. 青藏高原高硼卤水的水化学特 征及其成因[J]. 地理研究,1984,3(4):1-11.
- [6] 高春亮 涨丽莎 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 -161.
- [7] 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.
- [8] 刘子亭,余俊清,涨保华,等. 烧失量分析在湖泊沉积与 环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究,2006,14(2): 67-72.
- [9] Cato I. Recent sedimentological and geochemical conditions and pollution problems in two marine areas in south westerm Sweden [J]. Striae Uppsalien-sis pro Geologia Quaternaria, 1977 6: 1 – 158.
- [10] 袁旭音 陈骏 季峻峰 ,等. 太湖现代沉积物的物质组成 和形成条件分析 [J]. 南京大学学报. 2002,38(6): 756-765.
- [11] Dean W E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods [J]. J. Sed. Petrol. , 1974 A4(1): 242 – 248.
- [12] Santisteban J I ,Mediavilla R ,Lopez-pamo E et al. Loss on ignition: aqualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments [J]. J. Pal-

eolim. , 2004 32(3): 287 - 299.

- [13] Boyle J. A comparison of two methods for estimating the organic matter content of sediments [J]. J. Paleolim 2004 31 (1): 125 - 127.
- [14] 王苏民 吴瑞金. 岱海[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社,1990:145.
- [15] YU J Q Zhang L S. Lake Qinghai: Paleoenvironment and Paleoclimate [M]. Beijing: Science Press 2008: 38 – 45.
- [16] Yu J Q ,Kelts K. Abrupt changes in climatic conditions across the late-glacial/Holocene transition on the N. E. Tibet-Qinghai Plateau: evidence from Qinghai Lake, China [J]. Journal of Paleolimnology 2002 28: 195 – 206.
- [17] 汤艳杰,贾建业,谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. 地 学前缘 2002 9(2):337-344.
- [18] 赵东升, 贺鹏, 孔红喜, 等. 柴达木盆地粘土矿物特征及 其演化[J]. 沉积学报 2001, 19(1):66-70.
- [19] 徐昶. 我国盐湖粘土矿物及其意义的初步研究[J]. 中 国科学(B辑),1990(3):303-312.
- [20] 莱尔曼 A. 湖泊的化学、地质学和物理学[M]. 北京:地 质出版社,1989: 213-242.
- [21] 罗宾·巴瑟斯特. 碳酸盐沉积物及其成岩作用[M]. 北

京:科学出版社,1977:175-220.

- [22] Alderman A R. Dolomitic sediments and their environment in the South-East of South Australia [J]. Geochemical et Cosmochimica Acta ,1965 29(12):1355 – 1365.
- [23] Müller G Jrion G ,Förstner U. Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment [J]. Naturwissenschaften ,1972 59(4):158 – 164.
- [24] Matter A ,et al. Modern and ancient lake sediment [M]. Oxford: Blackwell ,1978.
- [25] Von Der Borch C C. The distribution and preliminary geochemistry of modern carbonate sediments of the Coorong area South Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 1965 29(7):781-799.
- [26] 李世杰 区荣康 朱照宇 等. 24 万年来西昆仑山甜水海 湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化 [J]. 湖泊科 学,1998,10(2):58-64.
- [27] 郑绵平,赵元艺,刘俊英.第四纪盐湖沉积与古气候[J].第四纪研究,1998,(4):297-307.
- [28] 王云飞.青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环 境变化[J].海洋与湖沼,1993 24(1):31-35.

A Mineralogical Record from the Sediment Section DCD03 of Da Qaidam Salt Lake: Implications for Environmental Change

HE Xian-hu¹², YU Jun-qing¹ ZHANG Li-sha¹, GAO Chun-liang¹, CHENG Ai-ying¹²

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes Academy of Sciences Xining \$10008 China;

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

Abstract: This paper reports the result of mineralogical investigation and loss-on-ignition (LOI_{500}) for the subbottom sediment section DCD03 of Da Qaidam Salt Lake. We discuss the evolution of lake water chemistry in association with regional climate change since the deposition of grayish yellow silty clay layer prior to the pinnoite deposition. Based on sediment character , mineral composition , and LOI_{500} , the sediment section is divided into three units (I, II, III): I. grayish-yellow silty clay layer ($623 \sim 423$ cm), II. Dark gray silt mixed with nodules ($423 \sim 407$ cm), III. Pinnoite layer ($407 \sim 395$ cm). Results indicate that during the deposition of Unit I , Da Qaidam was not a salt lake , as suggested by detrital dominated sediments , and that the salinity of the lake began to increase near the end of the Unit I deposition as shown by the increase of calcite and occurrence of gypsum in the top 20 cm sediment interval. Unit II represents a rapid transition into a sulfate type saline lake. The pinnoite layer (Unit III) was formed in a saline lake environment. Organic matter increases in three distinct stages in the sediments of subunit I₁, I₂ and I₃, implying a stepwise temperature increase in the study area. As a result , precipitation increase in paleo-lake conditions , therefore , resulted from hydro-climate change.

Key words: Salt lake sediment; Mineral assemblage; Loss-on-ignition; Evolution of lake water chemistry; Climate change