

文章编号: 1000-0550(2009) 02-0360-07

# 11. 5kaBP 以来尕海沉积物氧化物地球化学特征及其环境意义<sup>①</sup>

曹广超<sup>1, 2, 3</sup> 马海州<sup>2</sup> 张璞<sup>4</sup> 陈忠<sup>5</sup> 张西营<sup>2</sup> 高东林<sup>2</sup> 韩凤清<sup>2</sup>

(1 青海师范大学生命与地理科学学院 西宁 810008; 2 中国科学院青海盐湖研究所 西宁 810008;

3 中国科学院研究生院 北京 100049; 4 河北石家庄经济学院 石家庄 050031; 5 昆明理工大学国土资源工程学院 昆明 650093)

**摘要** 通过对柴达木盆地尕海 DG03 孔沉积序列的年代学测定和沉积物分析, 选取对气候环境较为敏感的  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  等作为环境代用指标, 分析了尕海地区 11. 5 kaBP 以来的气候环境变化。研究表明尕海地区在 11. 5 kaBP 以来存在 4 个明显的气候变化期: 晚冰期晚期 (11. 5~10. 16 kaBP) 的气候波动较大, 其中 11. 5~11. 16 kaBP 是暖干气候; 11. 16~10. 16 kaBP, 气候冷干, 可能是新仙女木事件的反映; 全新世早期 (10. 16~7. 83 kaBP) 气候转暖, 有短期极干冷事件的发生; 中全新世适宜期 (7. 83~4. 73 kaBP), 气候温暖湿润; 4. 73 kaBP 以来的全新世晚期, 气候环境明显恶化, 期间出现气候暖湿与干冷的多次波动变化。

**关键词** 尕海 氧化物 古环境 全新世

**第一作者简介** 曹广超 男 1971 年出生 副教授 博士 环境变化 E-mail caoguangchao@qhnu.edu.cn

**中图分类号** P534. 63 P512. 2 **文献标识码** A

## 0 引言

近年来, 湖泊沉积记录在重建不同时间尺度气候环境研究方面发挥了重要的作用。在湖泊沉积记录中寻找敏感的气候环境代用指标, 利用有效方法提取气候环境信息是利用湖泊沉积进行高分辨率恢复历史时期气候环境序列的关键<sup>[1]</sup>。沉积物中, 氧化物的构成以及含量的变化受风化作用、搬运作用、沉积作用以及原岩成分的影响, 而影响风化作用、搬运作用、沉积作用的最主要因素是气候。如果一个地区物源变化不是很大的话, 那么沉积物中的氧化物组成和含量与气候条件是具有相关性的, 可以作为指示气候变化的标志。具有古气候指示意义的是对地表环境具有一定灵敏度的氧化物, 主要是 Si Fe Al Mn 等的氧化物<sup>[2]</sup>。尕海湖流域属于温带大陆性干旱气候区, 生态环境脆弱, 对气候变化具有较强的敏感性。在本项研究中, 通过对尕海湖沉积物氧化物地球化学特征的研究, 侧重探讨尕海湖流域 11. 5 kaBP 以来气候环境演化特征。

## 1 研究区概况

尕海位于柴达木盆地东北部。地理坐标: 37°08' N, 97°33'E。行政区划上隶属于青海省海西蒙古族

藏族自治州德令哈市尕海镇境内 (图 1)。湖盆为新生代沉降盆地, 湖盆边缘为冲积、洪积平原, 表面被冲积、湖积粉沙粘土和含盐淤泥覆盖, 近湖滨为盐碱沼泽沉积。湖水位 2 894 m, 湖面长 7. 9 km, 最宽处 5. 4 km, 均宽 4. 05 km, 面积 32. 0 km<sup>2</sup>, 水深 8. 0~13 m, 最大水深 15 m。湖区属于亚洲内陆大陆性荒漠干旱气候, 近 40 年 (1961~2000 年) 年均温 3. 54℃, 年降水 173 mm。湖水主要依靠大气降水和地下潜水补给。主要补给来源是湖东的沼泽 (尚有泉水溢出, 自东向西注入湖中), 另有一条巴音河的分支河流, 从西北与该湖相通, 洪水季节有暂时性流水流入。湖水矿化度 90. 6 g/l 相对密度 1. 061, pH 8. 28 盐湖化学类型为硫酸盐型硫酸镁亚型<sup>[3]</sup>。

## 2 研究材料与方法

### 2. 1 采样

2003 年 7 月, 我们在尕海湖西北岸利用汽车钻成功的取得一段 34. 83m 的湖芯, 钻孔编号 DG03 采样点坐标: 37°9'24. 8"N, 97°31'57. 8"E。在室内按照近密远疏的原则进行了分样, 分样间距 1 cm 或 2 cm, 共分样 1 785 个。根据 DG03 孔沉积物岩芯岩性的分布特征, 以 2 cm、5 cm 或 10 cm 的不等间距采集样品 412 个进行元素氧化物含量分析。

①国家重点基础研究发展计划“973 计划” (编号: 2004CB720202); 中国科学院知识创新重要方向性项目 (KZCX2-SW-118) 资助。  
收稿日期: 2008-02-14 收修改稿日期: 2008-05-12

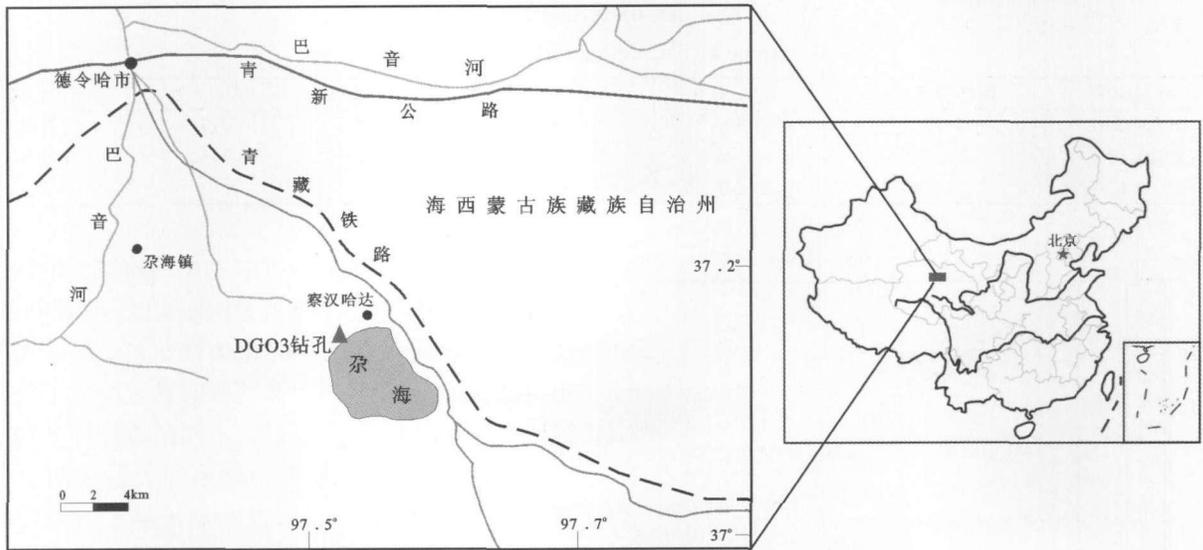


图 1 尕海湖泊及 DG03 钻孔位置示意图

Fig 1 Location of Gahai Lake and Core DG03

## 2.2 分析方法

氧化物含量分析是在国土资源部西宁地矿测试研究中心采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定。样品自然风干后, 用玛瑙研钵磨细至 200 目, 在恒温箱中 60℃ 下干燥 24 h, 取 3g 沉积物用熔融片法制片, 在瑞士 ARL-9800 型 X 射线荧光光谱仪上测定  $SO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  的质量分数。分析过程采用国家标准沉积物样 GSD-1 全程监控, 相对分析误差 < 1%。

## 3 分析结果

### 3.1 DG03 孔岩性描述

DG03 岩芯从岩性上基本可以划分为 3 个大的层段:

(1) 0~9.81 m: 本段主要为滨浅湖相沉积, 间有沼泽相沉积和冲洪积物, 可能还有风积物, 沉积环境比较复杂。

(2) 9.8~30.71 m: 发育了较好的湖相沉积, 沉积物主要为灰色、灰黑色、灰黄色粘土粉砂和粉砂粘土, 一般具较好(水平)层理。值得注意的是, 在下部若干层段含石膏和贝壳, 在 25.48~25.97 m 之间贝壳非常丰富, 23.77 m 和 30.00~30.19 m 是浅灰色的石膏沉积。

(3) 30.71~34.83 m: 冲洪积物和风积物(风成砂和黄土), 其中 33.82~34.83 m 是灰褐色的冲洪积物; 30.70~33.82 m: 分选很好的风积物。

### 3.2 年代序列确定

尕海钻孔岩芯样品共选取 9 个植物残体和贝壳化石作为年代样品做 AMS  $C^{14}$  测年, 由美国迈阿密 Bate 实验室完成。由于所选测年材料类型多样以及 DG03 孔沉积环境较为复杂, 测年结果出现多处倒转现象。通过对 DG03 孔沉积环境和测年材料的综合分析, 采集于岩芯上部的 3 个测年样品和中部的 2 个样品, 属于水生植物残体, 由于与湖泊水文体系密切相关, 其碳组分受到湖水中无机溶解碳的影响较大, 底部的 1 个测年样品在样品采集或测年过程中受到了污染, 在本项研究中决定不采用。我们认为位于沉积环境较为稳定岩芯中部的三个测年数据的测年材料主要是陆生高等植物残体和贝壳, 测年物质受外界干扰较小, 年龄数据是比较可靠的, 如表 1 所示。尕海湖在 20 世纪 80 年代以前水位比现在高, 最近几年来水位下降较快, 但是在雨水充沛的季节, 湖水位还是经常高过钻孔位置, 因此可以较为肯定钻孔位置现代时期仍持续接受了湖相的沉积。因此, DG03 孔 0 m 深度处近似地以零年计算。

由于测年数据较少, 所以在 0~25.60 m 之间的岩芯年龄采用分段线性内插的方法获得, 25.60~34.83 m 之间的岩芯年龄则利用最小二乘法对现有年代数据进行拟合并计算不同深度对应的年代。拟合的结果是  $X = 321.79Y + 315.35$ ,  $R^2 = 0.9895$  (见图 2)。利用上述拟合公式, 可以推断 DG03 孔底部年龄大约是 11.50 kaBP。也就是说, 岩芯反映了约 11.50 kaBP 以来(晚冰期末期及整个全新世)尕海湖的古环境变化过程。

表 1 DG 03 岩芯测年结果  
Table 1 <sup>14</sup>C dating of Core DG 03

样品编号	取样深度 /m	<sup>14</sup> C 年龄 /aBP	日历年龄 /cal yrBP	测年方法	δ <sup>13</sup> C / ‰	测年材料
DG03-13-103	9.77	3950 ± 40	4420	AMS	- 27.9	有机质
DG03-18-43	23.67	8090 ± 50	9020	AMS	- 15.2	有机质
DG03-19-50	25.60	8220 ± 40	9180	AMS	- 4	贝壳

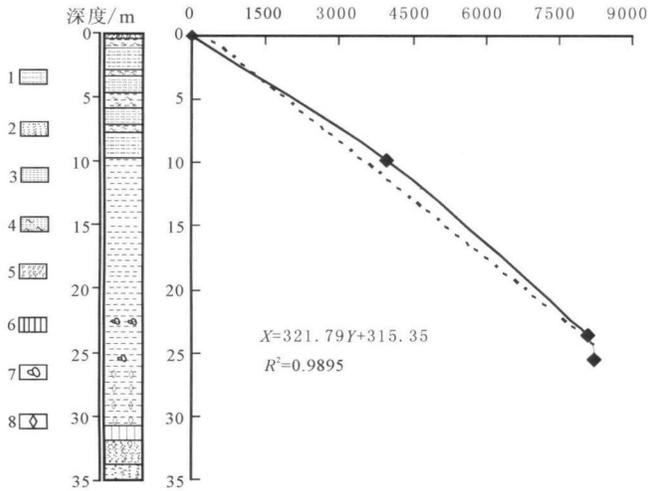


图 2 杂海 DG 03 钻孔沉积序列和年代模型  
1. 中细砂 2. 中粗砂 3. 粉砂、粘土或淤泥 4. 沼泽  
5. 冲洪积物 6. 黄土 7. 贝壳 8. 石膏

Fig 2 The classification of sedimentary unit of Core DG03 and fitting curve of AMS <sup>14</sup>C age data

3.3 DG03 孔氧化物地球化学分布特征

DG03 孔部分氧化物相对百分含量分布如图 3 所示, SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO 在整个岩芯中的平均含量分别是 48.77%、2.20%、3.72%、14.77%、

9.62%、2.42%。所有指标在岩芯中均有较大的波动范围,表明所选指标在 DG03 孔中的环境指示现象明显。

各个指标在岩芯中的相关性极好,为了便于说明,我们将指标在岩芯中波动较明显区段作了分段并统计了分段内的指标平均值,不同区段指标平均值差异十分明显(表 2)。由于指标值在分段区间上存在一些差异,为了便于对比,没有划入某些区段的指标值用\* 代替。

土壤的硅铝铁率是随着气候变得湿热而降低的, DG03 孔硅铝铁率均值是 3.87,全段波动变化与上述的氧化物含量波动变化相关性极好,在 0.36 m、0.93 m、12.4 m、30.60 m、33.71 m 是其比值变化的拐点,分别构成了不同均值的比值变化区间。预示着地表风化程度发生了较大的差异性变化。

DG03 孔的 CIA 和 ICV 值变化在岩芯中的相关性极好(图 4),以 0.93 m、4.4 m、22.8 m、30.6 m 为区间端点, DG03 明显经历了 3 次风化强度大的时间段和 2 次较弱的时期。岩芯的 ICV 值在 1.2~5.0 之间,平均值 2.0 明显高于长石类和粘土矿物的 ICV 值,表明 DG03 孔揭示的本区的风化作用在研究时段内都是比较弱的。

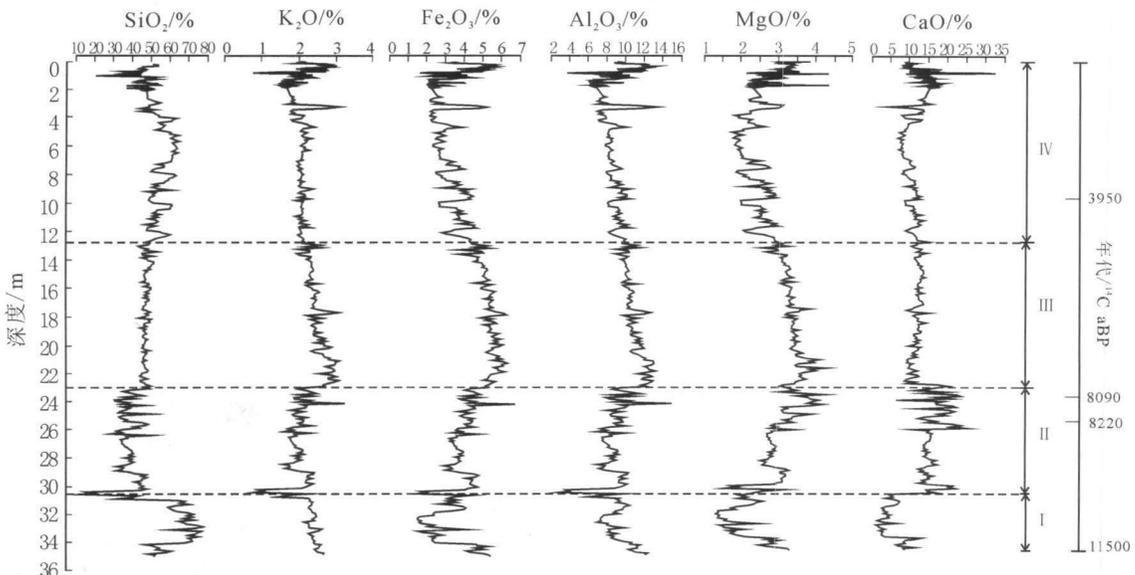


图 3 DG 03 孔沉积物氧化物地球化学特征分布图

Fig 3 Distribution of the geochemical characteristics of depositional oxide from Core DG03

表 2 DG03 孔沉积物氧化物含量不同深度区段平均值

Table 2 A verage of typical section of depositional oxide content of Core DG03

指标名称	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO
深度区间 /m	0~ 0.36	0~ 0.36	0~ 0.36	*	0~ 0.36	0~ 0.93
均值 /%	52.23	3.24	9.35	*	2.06	13.3
深度区间 /m	*	0.36~ 0.93	0.36~ 0.93	0~ 0.93	0.36~ 0.93	0.93~ 1.05
均值 /%	*	4.63	11.97	2.94	*	30.73
深度区间 /m	0.36~ 3.4	0.93~ 3.11	0.93~ 3.11	0.93~ 3.11	0.93~ 3.11	1.02~ 3.80
均值 /%	44.9	2.52	7.59	2.18	1.76	17
深度区间 /m	*	3.11~ 3.40	3.11~ 3.40	3.11~ 3.40	3.11~ 3.40	*
均值 /%	*	4.60	12.38	2.72	2.81	*
深度区间 /m	3.4~ 12.4	3.40~ 12.40	3.40~ 12.40	3.40~ 12.30	3.40~ 13.19	3.80~ 22.80
均值 /%	56.02	3.04	8.89	1.75	2.08	13.66
深度区间 /m	12.4~ 22.8	12.40~ 22.80	12.40~ 22.80	12.30~ 25.60	13.19~ 22.80	22.80~ 26
均值 /%	47.11	5.03	11.26	3.13	2.54	20.87
深度区间 /m	22.8~ 30.6	22.80~ 30	22.80~ 30	25.60~ 30	22.80~ 30	26~ 30
均值 /%	37.96	3.83	9.20	2.5	2.04	17.28
深度区间 /m	*	30~ 30.30	30.00~ 30.30	30.00~ 30.30	30.00~ 30.30	30~ 30.3
均值 /%	*	1.62	3.40	1.01	0.9	24.25
深度区间 /m	*	*	*	*	*	30.3~ 30.7
均值 /%	*	*	*	*	*	18.2
深度区间 /m	30.6~ 33.71	30.30~ 33.71	30.30~ 33.71	30.30~ 33.71	30.30~ 34.83	30.71~ 33.71
均值 /%	69.06	2.58	8.89	1.25	2.27	6.41
深度区间 /m	33.7~ 34.83	33.71~ 34.83	33.71~ 34.83	33.71~ 34.83	*	33.71~ 34.83
均值 /%	53.59	4.54	11.44	2.47	*	11.7

表 3 DG03 孔沉积物氧化物比值不同深度区段平均值

Table 3 A verage of typical section of depositional oxide ratio from Core DG03

名称	SiO <sub>2</sub> / (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	CHA <sup>①</sup>	ICV <sup>②</sup>
深度区间 /m	0~ 0.36	*	*
均值 /%	4.1	*	*
深度区间 /m	0.36~ 0.93	0~ 0.93	0~ 0.93
均值 /%	2.59	38	2.31
深度区间 /m	0.93~ 12.4	0.93~ 3.8	0.93~ 4.3
均值 /%	4.73	28	3.41
深度区间 /m	12.4~ 30.60	3.8~ 22.8	4.3~ 22.8
均值 /%	2.96	36	2.40
深度区间 /m	30.60~ 33.71	22.8~ 30.60	22.8~ 30.6
均值 /%	6.19	29	3.18
深度区间 /m	33.71~ 34.83	30.6~ 34.83	30.6~ 34.83
均值 /%	3.38	45	1.68

①  $CHA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O) \times 100\%$

②  $ICV = (Fe_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$

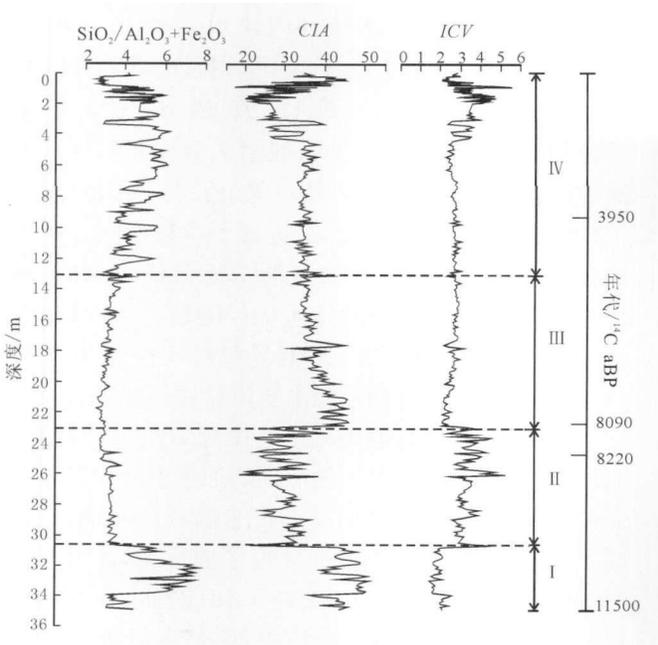


图 4 DG03 孔沉积物氧化物比值曲线

Fig 4 Curve of depositional oxide ratio of Core DG03

同样,我们将各氧化物比值指标在 DG03 孔中波动较明显区段作了分段并统计了分段内的指标平均值(表 3)。为了便于对比,没有划入某些区段的指标值用\* 代替。

## 4 讨论和结论

### 4.1 环境代用指标的选取以及环境指示意义

#### 4.1.1 元素氧化物指标的环境指示意义

SiO<sub>2</sub>是一种难迁移的物质,沉积物中的 SiO<sub>2</sub>主要包括两个方面的来源:一是以碎屑颗粒搬运沉积下来的石英碎屑和其他硅酸盐矿物碎屑;二是以胶体和粘

土矿物搬运并沉积下来的物质。石英颗粒在地表环境中是非常稳定的,而硅酸盐矿物相对容易分解,如橄榄石、辉石、角闪石等。相对暖湿的环境可以增强化学反应,并加强了化学风化作用,使部分硅酸盐矿物被分解,形成了一些粘土矿物和  $SiO_2$  胶体<sup>[2]</sup>。如果降水较充沛,被淋滤出来的胶体以及被搬运的粘土矿物就比较多,但是同时也有大量的易淋溶物质被搬运,如  $MgO$ 、 $K_2O$  等氧化物,对于尕斯库勒湖地区而言,易淋溶组分在湖泊中的沉积比例变化大于  $SiO_2$  等稳定组分,从而降低了沉积物中  $SiO_2$  的相对含量。因此,如果不考虑原岩的影响,沉积物中  $SiO_2$  含量的相对低值,指示了气候的湿化,而  $MgO$ 、 $K_2O$  的变化与此相反。

$Al_2O_3$  和  $Fe_2O_3$  的含量说明氧化作用特征。铁是受氧化还原作用影响比较大的元素,还原条件下,铁呈二价,溶解并迁移,在氧化环境中,二价铁极易被氧化为三价铁发生淀积,相应地湖泊沉积物中铁氧化物含量就会降低。 $Al_2O_3$  的变化与此类似, $Fe_2O_3$  和  $Al_2O_3$  在整个剖面中的变化具有一致性,低值可能代表了地表较强的氧化环境,导致湖泊沉积物中  $Fe_2O_3$  和  $Al_2O_3$  含量相应变低,意味着水体变浅的可能;但是沉积物中有机质的含量对其有一定的影响。

$CaO$  的分布特征说明表生碳酸盐化作用特征,化学风化程度较弱, $CaO$  含量变化较少, $CaO$  含量随着风化过程的进行趋于富集; $CaO$  含量的变化与  $CaCO_3$  含量的变化具有较好一致性,其高值可能指示着较干的气候环境。

#### 4.1.2 元素氧化物组合比值的环境指示意义

沉积物中一种氧化物含量的升高会影响到其他元素含量的变化,如果紧紧以某个元素氧化物的含量来判断气候特征变化可能会出现一些不协调的地方,因此,利用它们百分含量的比值就更能显示元素的相对富集情况,对气候的解释更符合实际情况。

现代土壤研究表明,土壤的硅铝率、硅铁率、硅氧化物率是随着气候变得湿热而降低的。 $Si$  是不易迁移的元素,硅铝率 ( $SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ ) 常用来反映风化壳的发育状况,地表风化壳发育的结果是  $Fe$ 、 $Al$  元素被淋溶,而难迁移的  $SiO_2$  留在原地,在湖泊沉积中其比值与风化壳的发育状况呈负相关,可以反映流域的湿润程度。

*Nesbitt*<sup>[4]</sup> 等提出以化学蚀变指数  $CA$  判别源区化学风化的强度,其值表示为:  $CA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O) \times 100$   $CA$  值能很好地反映物

源区化学风化的情况。 $CA$  值与长石风化成粘土矿物的程度成正比,与风化强度成正比, $CA$  值越大,风化强度越大<sup>[2,4]</sup>。沉积序列中矿物风化程度还可以用成分变异指数  $ICV$  来粗略估计<sup>[5]</sup>:  $ICV = (Fe_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$ 。不同的矿物具有不同的  $ICV$  值区间,非粘土矿物的  $ICV$  值高于粘土矿物,辉石在 10~100 间,角闪石约为 8 钾长石为 0.8~1,斜长石为 0.6 白云母和伊利石约为 0.3 蒙脱石为 0.15~0.3 高岭石仅为 0.03~0.05。由于  $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $MgO$  等组分均较  $Al_2O_3$  活跃,所以  $ICV$  比值也反映了沉积物中活动组分与惰性组分之间的关系,与气候条件密切相关。湖泊沉积物中,这一比值越高,表明入湖的惰性组分越少,源区的风化越弱,水热条件差;反之,风化作用增强,水热条件优越<sup>[2]</sup>。

#### 4.2 气候重建

综合 DG03 孔沉积环境的变化和各个指标值的组合特征,我们将 DG03 孔揭示的尕斯库勒湖地区 11.50Ka BP 以来的环境变化分为 4 个阶段(图 3 图 4)。

I 阶段: 34.83~30.6 m (11.50~10.16 kaBP): 晚冰期与全新世过渡阶段。沉积相从底部的冲洪积物向上过渡到风成沙和黄土。在 34.83~33.71 m (11.50~11.16 kaBP) 之间,硅铝铁率比相邻区段明显降低,地表风化较强,可能主要是温度升高的结果。 $CA$  和  $ICV$  值均有明显变化,佐证了本段应该是一个比较明显的暖干气候演化阶段。 $SiO_2$  平均含量 53.59%,但是  $K_2O$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$  等活性成分含量较高,尤其是  $Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$  含量处于全段的较高值,沉积物中这些组分可能主要依靠冲洪积带入而不是地表淋溶的结果,地表处于一个较好的氧化环境。水位较低,进一步说明风化活动的加强主要是温度升高的结果,是晚冰期晚期一个较为温暖的时期,气候暖干,刘兴起在青海湖亦发现了这一事件<sup>[9]</sup>。在 33.71~30.6 m (11.16~10.16 kaBP) 之间,沉积相的风成沉积特征说明湖泊水位极低,甚至可能已经干涸。 $SiO_2$  含量与硅铝铁率均处于全段的最高值,风化弱。由于出露地表, $CA$  和  $ICV$  值不具有表征湖泊沉积序列风化强弱的能力,但是相同的变化趋势可以说明演化阶段的确定性。 $CaO$  含量仅有 6.41%,说明本时期水分条件极差,气候干冷,与曾永年在柴达木的研究结果极为类似<sup>[17]</sup>。

II 阶段: 30.6~22.8 m (10.16~7.83 kaBP): 全

新世早期, 沉积相中砂质粘土、淤泥质粘土以及粉砂交替出现, 有石膏出现。各个指标值虽然有相同的变化趋势, 但是波动均较大, 说明在全新世早期气候波动频繁。CIA 值全段最低, ICV 相应的出现全段的最高值, 说明地表风化弱,  $SO_2$  和易淋溶氧化物均处于低值, 而  $CaO$  含量达到全段的最高值, 说明较 I 阶段入湖水量虽然增加, 可能主要是由于气候的变暖, 祁连山冰川融水增加, 地表径流的直接补给效果。但是总体上还处于较干的气候期。需要指出的是, 在 30 ~ 30.3 m 处, 各个指标值出现突然变化, 易淋溶氧化物达到全段最低值, 沉积相中发现明显的石膏晶体。可能是一次极端气候的出现。

II 阶段: 22.8 ~ 12.4 m (7.83 ~ 4.73 kaBP): 全新世适宜期。沉积相以淤泥质粘土和粉砂质粘土为主, 全段均可见植物残体化石, 质地变化较为均一, 硅铝铁率、CIA 和 ICV 均显示本段风化作用较强并且变化稳定, 易淋溶氧化物组分含量均值都到达全段的最高值并且变化幅度较小, 是本区全新世的适宜期, 气候相对暖湿。大量水生植物化石的出现, 可能预示着本时段内尕斯库勒湖矿化度较低, 水位较高, 甚至可能与德令哈盆地的沉积中心可鲁可湖和托素湖之间通过地表河流产生水力联系, 是吞吐的淡水湖。这一时期的变化与青海湖、苏干湖的变化基本同步<sup>[7, 9, 11]</sup>

IV 阶段: 12.4 ~ 0 m (4.73 ~ 0(?) kaBP): 全新世晚期。沉积相从沙质粘土逐渐过渡到以中、粗沙为主的沉积, 但是出现多处粘土夹层。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的迅速降低表明沉积物处于较好的氧化环境, 水位降低, 入湖水量减少。硅铝铁率、CIA 和 ICV 的组合特征表明地表风化减弱。全新世适宜期结束, 气候变差, 变动频繁。但是在 3.11 ~ 3.40 m (1.25 ~ 1.37 kaBP) 处各个指标值出现十分明显的变化, 沉积物中地表易淋溶组分氧化物含量突然增加, 沉积物中含有大量的植物化石, 硅铝铁率、CIA 和 ICV 的组合特征表明处于风化较强的时期, 各个指标均值与全新世适宜期十分接近, 可能是一次短期的暖湿事件。表层 0 ~ 0.36 m 沉积以滨湖相的粗沙沉积为主, 基本表征了现代气候过程。

致谢 张彭熹院士、许黎明高级工程师、李海军高级工程师、杨海镇博士等人参加了本研究项目的野外采样工作, 南京大学鹿化煜教授审阅全文并提出了宝贵的意见, 深表感谢。

### 参考文献 (References)

1 王苏民, 李建仁. 湖泊沉积—研究历史气候的有效手段——以青

- 湖、岱海为例 [J]. 科学通报, 1991, (36) 1: 54-56 [Wang Sumin, Li Jianren. Lake sediment—an effective way to research the palaeoclimate as example of Qinghai lake and Da Hai lake [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(1): 54-56]
- 2 吴艳宏, 李世杰, 夏威岚. 可可西里苟仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义 [J]. 地球科学与环境学报, 26(3): 64-68 [Wu Yanhong, Li Shijie, Xia Weilan. Element geochemistry of lake sediment from Gourenco Lake Kekexili Qinghai-Xizang Plateau and its significance for climate variation [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 26(3): 64-68]
- 3 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社 [M], 2002: 173-174 [Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Chang, et al. Records of Salt Lake in China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 173-174]
- 4 Nesbitt H W, Yong G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299: 715-717
- 5 Cox R. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 2919-2940
- 6 张西营, 马海州, 韩凤清, 等. 德令哈盆地尕斯库勒湖 DG03 孔岩心矿物组合与古环境变化 [J]. 沉积学报, 2007, 25(5): 767-773 [Zhang Xiyong, Ma Haizhou, et al. Mineral assemblages and palaeoenvironmental changes of Core DG03 of Gahai Lake in Delingha Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 767-773]
- 7 沈吉, 刘兴起, Matsumoto R, 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化 [J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(6): 582-589 [Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake [J]. Science in China Series D, 2004, 34(6): 582-589]
- 8 施雅风, 孔昭宸, 王苏民. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. 中国科学: D 辑, 1992, (12): 1300-1308 [Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Suming. Climate fluctuation and vital events of Holocene in China. Science in China Series D, 1992, (12): 1300-1308]
- 9 刘兴起, 沈吉, 王苏民. 16 ka 以来青海湖湖相自生碳酸盐沉积记录的古气候 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(1): 38-46 [Liu Xingqi, Shen Ji, Wang Suming. A 16000 ka palaeoclimatic record derived from authigenic carbonate of lacustrine sediment in Qinghai Lake [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(1): 38-46]
- 10 姚檀栋. 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化记录 [J]. 第四纪研究, 1997, (1): 52-61 [Yao Tandong. Climatic and environmental record in the past about 2000 years from the Guliya Ice Core [J]. Quaternary Sciences, 1997, (1): 52-61]
- 11 强明瑞, 陈发虎, 张家武, 等. 2 ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化 [J]. 科学通报, 2005, 50(13): 1385-1393 [Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhang Jiawu, et al. Climate variations recorded by carbonate stable isotope in Sugan Lake since 2 ka [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(13): 1385-1393]
- 12 魏乐军, 郑绵平, 蔡克勤, 等. 西藏洞错全新世早中期盐湖沉积的古气候记录 [J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 129-135 [Wei Lejun,

- Zheng Mianping, Cai Keqin, *et al.* Early-middle Holocene paleoclimate record from saline lake sediments in Tontsa Tibet [J]. *Earth Science Frontiers* 2002, 9(1): 129-135]
- 13 李炳元. 青藏高原大湖期 [J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 174-182 [Li Bingyuan. The last greatest lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica* 2000, 55(2): 174-182]
- 14 李炳元, 李元芳, 孔昭宸. 青海可可西里苟弄错近二万年来的环境变化 [J]. *科学通报*, 1994, 39(18): 1727-1728 [Li Bingyuan, Li Yuanfang, Kong Zhaochen. 20000 Years environmental changes of the Gongong Co. in HohXil of Qinghai [J]. *Chinese Science Bulletin* 1994, 39(18): 1727-1728]
- 15 曹洁, 张家武, 张成君, 等. 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来湖泊沉积及其环境意义 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 100-107 [Cao Jie, Zhang Jiawu, Zhang Chengjun, *et al.* Environmental changes during the past 800 years records in lake sediments from Kala Lake in the Northern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences* 2007, 27(1): 100-107]
- 16 李红春, 朱照宇. 美国西部 Owens 湖地球化学记录及其古气候意义 [J]. *第四纪研究*, 2002, 22(6): 576-588 [Li Hongchun, Zhu Zhaoyu. Geochemical records and their paleoclimate significance in Owens Lake, Western USA [J]. *Quaternary Sciences* 2002, 22(6): 576-588]
- 17 曾永年, 马海洲, 沙占江, 等. 柴达木盆地沙漠沉积中的新仙女木事件记录 [J]. *干旱区地理*, 1998, 24(1): 25-28 [Zeng Yongnian, Ma Haizhou, Sha Zhanjiang, *et al.* The record of Younger Dryas event in eolian sand deposit in Qaidam Basin [J]. *Arid Land Geography*, 1998, 24(1): 25-28]

## Geochemical Composition of Sediment in Gahai Lake Since 11.5 ka BP and Its Environmental Implication

CAO Guang-chao<sup>1, 2, 3</sup> MA Hai-zhou<sup>2</sup> ZHANG Pu<sup>5</sup> CHEN Zhong<sup>4</sup>  
ZHANG Xiyi<sup>2</sup> GAO Dong-lin<sup>2</sup> HAN Feng-qing<sup>2</sup>

(1 College of Life and Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810008;

2 Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031; 5 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

**Abstract** On the basis of the new time scale and the analysis of oxide of Core DG03 samples from Gahai Lake in Qaidam Basin, this paper employs  $SO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  and their ratios, which are sensitive to environmental changes, to reconstruct the palaeoenvironmental changes since 11.5 kaBP in Gahai Lake. The results show that there are four distinct climate changing periods in Gahai Lake Area since 11.5 kaBP. At the early stage of the Late Deglaciation, the climate was warm and a little bit dry in 11.5-11.16 kaBP, it soon turned to be extremely cold and dry in 11.16~10.16 kaBP, this dramatic changes should be correlated to the Younger Dryas events. When entering into the Holocene period, it was turned warm with some occurrence of short period of cold and dry events in 10.16-7.83 kaBP. During the Mid-Holocene period (7.83~4.73 kaBP) its climate was warm and wet, which was the best climatic stage since the Late Deglaciation period. The Late Holocene period (4.73~0 kaBP) was in the deterioration of climate which was cold and very arid.

**Key words** Gahai sediments; palaeoenvironment; Holocene