

文章编号: 1000-0550(2007) 05-0767-07

德令哈盆地尕斯库勒湖 DG03 孔岩芯矿物组合与古环境变化

张西营 马海州 韩风清 陈 忠 曹广超 王建国

(中国科学院青海盐湖研究所 西宁 810008)

摘要 对气候敏感区德令哈盆地尕斯库勒湖 DG03 孔岩芯的矿物学分析表明, DG03 孔岩芯的矿物主要包括石英、斜长石、微斜长石、绿泥石、伊利石、方解石、文石、白云石、石膏及石盐等。岩芯记录了尕斯库勒湖约 11 ka 以来 (AMS-¹⁴C 年龄) 的古环境变化。根据矿物、碳酸盐含量及岩性的变化, 整个岩芯可划分为三个部分: 约 11 ka~ 10 ka BP, 晚冰期末期; 10 ka~ 4 ka BP, 全新世早中期; 4 ka 至今, 全新世晚期。矿物组合表明, 自晚冰期以来, 尕斯库勒湖先后经历了湖泊演化的逆向和正向演化阶段, 即尕斯库勒湖先后经历了晚冰期的干冷气候, 早全新世的暖干气候, 中全新世的暖湿气候以及晚全新世以来的逐渐干冷的气候。岩性分析还表明, 尕斯库勒湖沉积环境复杂, 存在多种微相沉积。

关键词 德令哈盆地 尕斯库勒湖 矿物组合 古环境 文石 石膏

第一作者简介 张西营 男 1977 年出生 硕士 助理研究员 第四纪环境变化和矿物学 E-mail: xyzhchina@isl.ac.cn

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

1 引言

青藏高原东北部处于东亚季风区、西南季风区、西风带等多个大尺度气候系统的交汇区, 也是气候环境变化的敏感区, 对于研究各气候系统之间的相互作用关系具有重要作用^[1]。西风带作为极地和北大西洋气候区与亚洲季风区的联系纽带, 对东亚季风和西风带气候具有重要影响^[2], 因此, 加强青藏高原东北部的研究对全球气候变化都具有十分重要的意义。

湖泊沉积是记录古环境变化的有利载体^[3], 2003 年 5 月, 我们在青藏高原东北部气候敏感区德令哈盆地尕斯库勒湖钻取了多孔岩芯, 这里以其中之一的 DG03 孔长序岩芯为研究对象, 希望通过对该岩芯的分析和研究能够对该气候敏感区的古环境变化有较为深入的了解。

2 研究区概况

德令哈盆地是柴达木盆地的次一级盆地, 其南部剧烈下沉, 是第四系的主要堆积场所, 厚达上千米, 形成由上更新统的近代洪积、冲积及湖积层组成的山前倾斜平原。尕斯库勒湖、托素湖位于德令哈盆地的汇水中心, 主要接受巴音河、巴勒更河以及四周山区的雨洪补给^[4]。巴音河是德令哈盆地最大的河流, 出宗务隆山后, 在戈壁滩上大量渗漏, 地下水在砂

砾石层、含泥砂砾石层中向南流动的过程中, 一部分地下水向尕斯库勒湖方向径流, 并于尕斯库勒湖滨溢出补给湖水; 另一部分地下水受德令哈构造的阻挡, 于郭里木绕过构造向西流去。在一棵树附近, 由于河床坡度减缓, 水流排泄不畅, 地下水开始溢出地表, 在可鲁可湖东约 20 km 长的范围内形成沼泽湿地, 最终排泄、汇集于可鲁可湖^[5]。

尕斯库勒湖, 位于海西蒙古族藏族自治州德令哈市郭里木乡境内, 地理坐标: 97°33'E, 37°08'N。尕斯库勒湖盆地为新生代沉降盆地, 盆内冲积、湖积粉砂粘土和含盐淤泥覆盖, 湖表有薄层石盐沉积, 边缘为冲积、洪积平原, 形成砂砾石、平坦戈壁沉积, 接近湖滨为盐碱沼泽沉积。湖泊面积 37 km², 水深平均 8 m, 最大 15 m。湖盆无常年地表河流, 依靠大气降水和地下潜水补给。湖水矿化度 90.6 g/l 相对密度 1.061, pH 值 8.28 盐湖水化学类型为硫酸盐型硫酸镁亚型^[6]。尕斯库勒湖区属典型的荒漠半荒漠干旱气候, 年均降水量不足 124.6 mm, 年均蒸发量为 2242.8 mm, 年均温度 2~4℃。由于干旱, 流入湖泊的两条主要河流哈尔吉河和布伦河现已干涸^[7]。

3 材料与方法

2003 年 5 月, 我们在尕斯库勒湖西北边缘钻取了长约 35 m 的长序岩芯 (编号为 DG03 孔), 钻孔地理位

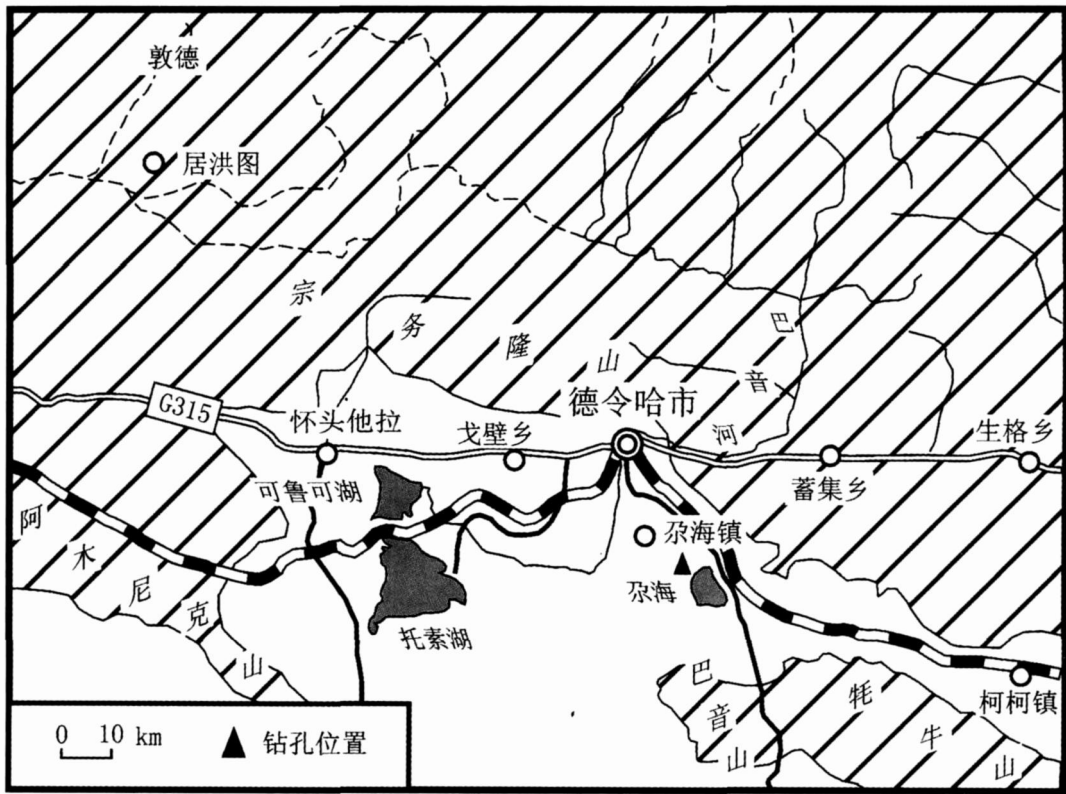


图 1 尕斯海位置图

Fig 1 Location map of Gahai Lake

置: 37.16413°N , 97.55438°E 。根据岩性的变化共取样 100 个, 其中岩芯顶部约 5 m 取样间距较密, 其余则相对较疏。

根据岩性变化岩芯基本可以划分为 3 个大的层段: 34.83~30.70 m, 冲洪积相和风积物(风成砂和黄土); 30.70~9.81 m, 发育了连续的湖相沉积, 沉积物主要为灰色、灰黑色、灰黄色粘土粉砂、粉砂粘土和淤泥, 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; 9.81~0 m, 本段主要为滨浅湖相沉积, 间有沼泽相沉积、冲洪积物以及风积物, 沉积环境比较复杂。

样品的分析测试工作主要分为三部分:

1) 全样矿物成分测试: 测试工作由本所的日本理学 D/max-B 型粉晶 X 射线衍射仪完成。实验条件: 石墨单色滤波器, Cu 靶 K_{α} 辐射, 管电压 40 kV, 管电流 30 mA, 步进扫描。样品测试前, 用 10% 的 H_2O_2 去除有机质。

各矿物的相对百分含量由该矿物最强衍射峰的绝对强度与所有矿物最强衍射峰总绝对强度的比值

来确定, 而碳酸盐矿物的绝对百分含量是由各自的相对百分含量乘以实测碳酸盐含量获得^[8]。

2) 碳酸盐含量的测定: 大部分样品(不含或含少量石膏)采用洗失量法^[9]; 含有较多石膏的个别样品, 则采用差热分析法, 用此方法我们还得到了石膏的绝对百分含量。

为了验证洗失量法得到的碳酸盐含量的可靠性, 我们同时用差热法对一些样品进行了碳酸盐矿物含量的测试工作, 结果表明二者的误差均小于 5% (用洗失量法得到的结果均比差热法要大), 且二者的相关系数 $R^2 = 0.9977$, 具有很好的相关性。

4 岩芯年代序列

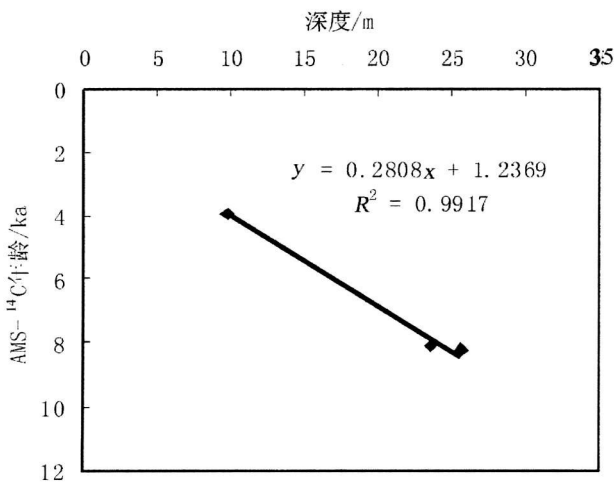
测年物质送往两处进行测定: 一处是在美国 Beta Analytic 实验室进行加速器质谱 (AMS) ^{14}C 测年, 测试材料和数据结果见表 1; 另一处是在中国科技大学利用岩芯下部的石膏进行热电离质谱—铀系定年, 但由于石膏中混入了较多的碎屑成分, 极难对样品进行分离和纯化, 未获得年龄数据。

表 1 年龄测试结果

Table 1 Results of dating

| 样品编号 | 取样深度 /m | AMS- ¹⁴ C 年龄 /aBP | 日历年龄 /calyBP | 测试方法 | 测试材料 |
|-------------|---------|------------------------------|--------------|----------------------|------|
| DG03-05-21 | 3.36 | 6630+/-40 | 7500 | AMS- ¹⁴ C | 有机质 |
| DG03-13-103 | 9.77 | 3950+/-40 | 4420 | AMS- ¹⁴ C | 有机质 |
| DG03-18-43 | 23.67 | 8090+/-50 | 9020 | AMS- ¹⁴ C | 有机质 |
| DG03-19-50 | 25.60 | 8220+/-40 | 9180 | AMS- ¹⁴ C | 贝壳 |

幸运的是, 美国 Leigh University 的 Zicheng Yu 博士 2005 年在德令哈盆地的 Hurleg Lake (可鲁可湖) 钻取岩芯并做了年代测试工作 (AMS-¹⁴C)。尕斯湖与可鲁可湖处于同一地貌单元中, 相距不过几十千米, 且受同一河流 (巴音河) 补给, 对它们进行对比应该可以得到比较可靠的年龄。可鲁可湖 (HL05-2) 的多指标记录 1) 表明, 约在 4.4 ka cal yr BP, 可鲁可湖在碳酸盐含量、磁化率、粒径和孢粉浓度等多个指标均有明显的变化, 正好对应于尕斯湖在 9.77 m 处 (4.420 Cal yr BP) 时岩性的明显变化, 这说明此处的年龄数据是比较可靠的。综合岩性分析, 由于岩芯上部沉积环境复杂, 其沉积物年龄可能由于混入了较多的老碳而导致偏大, 并且出现倒置现象, 而在湖相沉积发育较好的中部, 测年物质受外界干扰较小, 年龄数据比较可靠。基于上述分析, 9.77 m、23.57 m 和 25.60 m 三处的年龄数据应该是可信的, 用最小二乘法拟合后三者具有很好的线性关系 (见图 2)。

图 2 AMS-¹⁴C 年龄数据拟合曲线Fig 2 Fitting curve of AMS-¹⁴C age data

根据上述依据可确定三个沉积层段的界限年龄为: 层 / 层约为 10 ka BP (11 ka cal BP); 层 / 层约 4 ka BP (4.4 ka Cal BP)。岩芯底部主要为粒度较粗的沉积物 (黄土或风成砂及冲洪积物), 其沉积速率应该

比较大, 所以底部年龄应该在 11 ka BP (12 ka cal BP) 左右。因此岩芯反映了约 11 ka BP 以来 (晚冰期末期及整个全新世) 尕斯湖的古环境变化过程。

5 矿物学研究

矿物及其组合是探讨古气候与古环境变化的一个重要手段, 同时也可以为沉积序列的划分提供重要的参考依据^[10]。X 射线衍射分析表明, 样品中的矿物主要包括石英、斜长石、微斜长石、伊利石、绿泥石、方解石、文石、白云石、石膏和石盐等 (见表 2), 我们把这些矿物分为三大类:

碎屑矿物: 石英、斜长石、微斜长石、伊利石、绿泥石

碳酸盐矿物: 方解石、文石、白云石

蒸发岩矿物: 石膏和石盐

5.1 碎屑矿物

非粘土碎屑矿物主要包括石英、斜长石、微斜长石, 其中石英在所有矿物中平均含量最高 (42.8%)。粘土碎屑矿物又包括伊利石和绿泥石, 绿泥石一般只存在于冰川或干旱的地表等化学风化作用受抑制的地区, 而干冷的气候和较弱的淋滤作用则对伊利石的形成和保存十分有利, 它们都是母岩物质风化的产物^[11, 12], 粘土矿物只是说明了物源区的气候特征, 而非反映了湖泊沉积时的气候特征。碎屑矿物在样品中占有绝对优势 (见表 2)。

湖泊中的碎屑矿物基本是由河流、洪流和风力等外力作用携带入湖的外源物质, 它们只是反映了沉积物的物源岩性特征搬运状况^[13]。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。

表 2 各矿物的相对百分含量

Table 2 Relative contents of different minerals

| | 石英 | 斜长石 | 微斜长石 | 伊利石 | 绿泥石 | 方解石 | 白云石 | 文石 | 石膏 | 石盐 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 平均值 /% | 42.66 | 11.70 | 6.08 | 7.03 | 6.07 | 18.02 | 2.73 | 1.71 | 2.90 | 1.09 |
| 最大值 /% | 74.41 | 32.53 | 18.38 | 23.22 | 23.62 | 52.31 | 9.49 | 30.23 | 83.44 | 4.62 |
| 最小值 /% | 0.50 | 1.92 | 0.00 | 0.98 | 0.02 | 3.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 标准差 | 13.10 | 5.07 | 3.66 | 5.02 | 4.28 | 7.03 | 1.62 | 4.71 | 12.80 | 1.28 |
| 变异系数 /% | 30.70 | 43.38 | 60.14 | 71.45 | 70.53 | 39.01 | 59.13 | 275.25 | 441.31 | 118.21 |

5.2 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,它们可以大量地产自三类沉积物源(外源的,内生的和自生的),其中方解石和白云石的来源较复杂,而文石基本属于湖泊中化学沉积作用产生的自生矿物^[13]。

碳酸盐在水体中以何种矿物形式结晶析出主要受水体 Mg/Ca 比值的控制和影响。一般来说,根据碳酸盐化学反应动力学研究,当水体中只有少量 Mg^{2+} 时,有利于方解石的结晶沉淀;当 Mg^{2+} 数量较多时,文石析出;而水体中 Mg/Ca 比值较高时,则可以析出镁方解石;只有在 Mg/Ca 比值很高、温度较高以及结晶速度较慢的条件下,才有可能生成具有标准化组成和高有序度的白云石^[9,14]。

方解石是碳酸钙的稳定相,适宜于在低镁、低温、低 pH 值的介质环境中和在较缓慢的结晶速度条件下生长;文石则是以无机方式沉淀下来的不稳定相,有利于在高镁、温暖、高 pH 值的介质环境中产生,碎屑层样品中文石比例很高时,无疑能高反映当时较高的气温条件、相对干燥的古环境特征^[15]。具有标准化组成的白云石,其 X 射线的最强衍射峰的 $d_{(104)}$ 值为 2.8837^[16],而样品中白云石的 $d_{(104)}$ 值均与其非常相近,因此白云石很可能主要为碎屑成因。

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^[17]。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,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^[18-20]。这种分析对湖泊的正向演化过程(即由低盐度湖泊或淡水湖泊向高盐度湖泊或干盐湖的变化过程)是适用的,但对于逆向演化过程(由高盐度湖泊或干盐湖变为低盐度湖泊或淡水湖泊的过程)来说,其环境指示意义则恰恰相反,要具体情况具体分析。

5.3 蒸发岩矿物

在自然界中,石膏可以呈单个的、分散的晶体或晶体团出现在碳酸盐岩或碎屑岩中,多数地表条件下,石膏属于原生矿物。绝大部分的现代石膏主要形成于潮汐坪和干盐湖的渗滤带和上潜水带,那里的渗滤带中的卤水已被蒸发作用浓化到石膏的沉积点^[16]。

石膏在岩芯中的分布相当离散,除在表层发现有微量存在外,其主要分布在岩芯下部的三个层位:32.47~31.83 m(厚 0.64 m), 30.70~30.08 m(厚 0.62 m), 29.04~26.13 m(厚 2.91 m)。

石膏晶体在 30.70~30.08 m 和 29.04~26.13 m 两个层位呈自形晶体产出,其主要以针状、板状等微晶形式星散分布于粉砂或粘土粉砂中,生长方向各异,偶见有石膏团块,自形石膏生成于沉积期,可反映沉积环境和湖水的盐度变化^[21]。个别晶形较好的粗大晶体,内含较多灰黑色泥质而呈现明显的环带状结构,这是沉积晚期至成岩期孔隙卤水浓缩并以沉积期沉淀的石膏晶体为“晶芽”生长加大的结果,这与柴达木马海盆地的情况非常相似^[21]。据以上分析,这两个层段的石膏很可能主要原生于湖岸的渗滤带,然后由外力作用搬运至湖中,在强烈的蒸发作用下,湖水浓缩,从而使石膏从孔隙水中析出,这也反映当时湖水的盐度还是比较高的。

32.47~31.83 m 层位的石膏主要为针状、柱状和菱形的晶体,大小不一,有明显的机械破坏痕迹,分布于灰黄色松散含细砾的粗砂中,该层段底部还发现有动物骨骼碎片。该层位的石膏很可能来源于物源区的母岩或湖盆内早期形成的石膏,它们形成后又经历了强烈的风化作用和外力搬运作用,然后与粗碎屑共同沉积。

石盐的平均相对含量只有 1.09%,是所有矿物中含量最低的,并且绝大多数层段均含有石盐。综合考虑岩性和矿物成分,尕斯库勒湖尚未达到蒸发盐析出的阶段,因此岩芯中的石盐应该是由于钻取岩芯过程中湖水少量渗入所致。

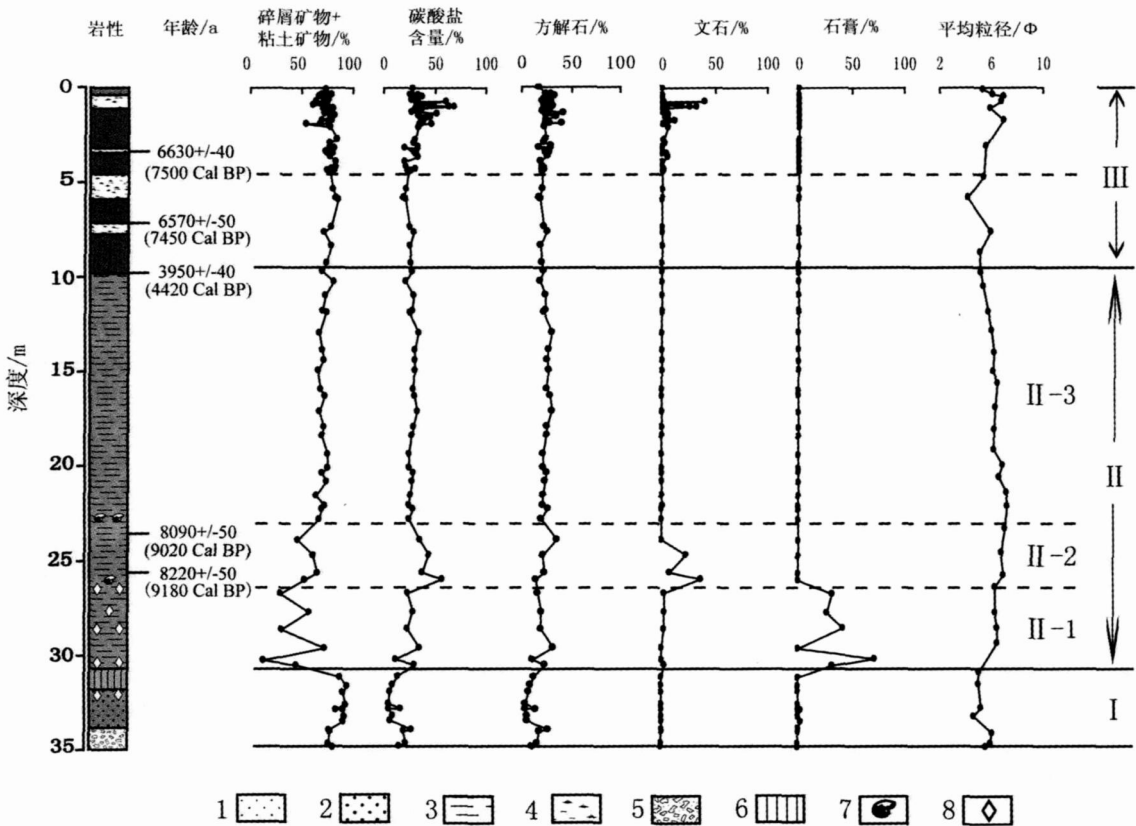


图 3 DG 03 孔岩芯的岩性、平均粒径、碳酸盐含量及矿物随深度的变化

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 3 Lithology, grain size, carbonate content and minerals with depth in Core DG03

6 矿物组合的环境意义

依据矿物组合、碳酸盐含量以及岩性的变化, 宏观上可以把岩芯分为三个层段, 如图 3 所示。

35.00 m ~ 30.70 m (约 11ka BP ~ 10ka BP)

本段岩芯涵盖了晚冰期晚期的古环境变化信息。矿物组合为碎屑矿物 + 碳酸盐矿物 + 石膏 (部分层位), 其中碎屑矿物占绝对优势, 碳酸盐含量较低。岩芯底部为一套冲洪积物, 随后沉积了粒度较粗的风成砂 (内含石膏), 然后又向黄土过渡。这说明在晚冰期晚期干冷的气候条件下, 湖泊水位比较低, 尕斯库勒湖湖岸线已经退离了现在岩芯的位置。此时尕斯库勒湖是一个水位较低的具有较高盐度的湖泊, 很可能已经达到了湖泊演化的晚期阶段 (盐湖)。

30.70 m ~ 9.81 m (10 ka BP ~ 4 ka BP)

该段岩芯沉积时间历时约 6 ka 对应于全新世的早期和中期。本段的矿物组合变化比较丰富, 依据特征矿物石膏与文石的变化, 可以划分为三个亚层 (见图 2), 每个亚层都有独特的矿物组合特征。

-1 该亚层的矿物组合主要为石膏 + 文石 (极少量) + 方解石 + 碎屑矿物。石膏占明显优势, 碳酸盐及其矿物含量明显上升, 碎屑矿物含量则大幅下降, 各代用指标的变化波动较大, 岩性表明此时为湖相沉积。此时由于全新世早期气候转暖导致祁连山冰川融化, 尕斯库勒湖得到冰雪融水的补给, 其水位上升, 盐度则相对降低。

-2 该亚层矿物组合又有了新的变化, 石膏消失, 文石大量析出, 矿物组合主要为文石 + 方解石 + 碎屑矿物。碳酸盐含量达到了本段的最大值, 碎屑矿物的含量也在逐步升高。石膏的消失与文石的出现表明尕斯库勒湖盐度进一步降低, 尕斯库勒湖正经历盐湖的逆向演化过程, 湖水的水化学类型也由硫酸盐型转变为碳酸盐型。

-3 该亚层文石消失, 矿物组合主要为方解石 + 碎屑矿物, 各矿物含量的变化比较稳定。本亚层的岩性主要为具有较好层理的粘土粉砂、粉砂粘土或淤泥, 表明此时尕斯库勒湖水位较高, 而水动力条件较弱, 此时的尕斯库勒湖可能为淡水或咸水湖泊。入湖水量增加

的主导因素可能已经由冰雪融水转变为暖湿气候形成的大气降水。

9. 981 m~0 m (约 4 ka至今)

本段岩芯属于晚全新世,从岩性可以看出其沉积环境相当复杂,存在多种微相沉积,根据矿物组合可以分为两个亚层(见图2)。

晚全新世早期(-2)的矿物组合与全新世中期基本相同,主要为方解石+碎屑矿物,各矿物含量的变化比较稳定,这一时期可能是全新世中期暖湿气候的延续。晚全新世晚期(-1)的矿物组合为文石+方解石+碎屑矿物,碳酸盐与文石的含量自下而上变高,碎屑矿物变化与其相反。晚全新世以来气候趋向干冷,水位降低,盐度升高,因此晚期又析出了文石。在干冷气候的影响下,尕斯库勒湖正沿着湖泊的正向演化方向发展。

7 结论与讨论

DG03孔岩芯记录了晚冰期以来尕斯库勒湖地区的古环境变化信息。晚冰期晚期尕斯库勒湖水位较低,湖泊萎缩,湖岸线退离了钻孔位置,此时尕斯库勒湖气候干冷,水体盐度较高;从早全新世开始,暖干气候使得尕斯库勒湖入湖水量逐渐增加,水位升高,盐度逐渐降低并先后出现石膏与文石,而全新世中期则表现了较暖湿的气候特征;晚全新世沉积环境复杂,其后期的矿物组合中又出现了文石,这表明湖水盐度开始升高,气候又变得干冷,这种变化一直持续到现在。总而言之,全新世以来尕斯库勒湖经历了湖泊的逆向演化和正向演化两个阶段。

值得注意的是,尕斯库勒湖的沉积环境较为复杂,即使在以湖相沉积为主的岩芯中部,也存在多层较粗的碎屑沉积物,而全新世晚期以来,尕斯库勒湖更是成为各种陆相沉积物的堆积场所。尕斯库勒湖这种沉积特征与其地理位置密切相关,尕斯库勒湖受巴音河补给,从巴音河出山口到尕斯库勒湖,距离短,坡降大,且不象可鲁可湖那样有大片沼泽湿地作为天然的泥沙“过滤器”,因此洪流带来的物质在几乎没有什么阻障的情况下频繁对尕斯库勒湖直接进行充填,从而严重干扰了正常的湖相沉积过程,致使沉积环境非常复杂。但这种复杂性可能蕴含了更为丰富的区域环境变化信息,值得我们关注和进一步研究。

致谢 南京大学鹿化煜教授审阅全文并提出了宝贵的意见和建议;中国科学院青海盐湖研究所高章洪研究员在矿物鉴定和分析方面给予了极大帮助,高

东林副研究员、董亚萍副研究员和杨波副研究员分别在绘图、差热分析以及X射线衍射分析过程中予以精心指导,对几位老师在此谨表谢意。

参考文献 (References)

- 1 陈隆勋,朱乾根,罗会邦,等. 东亚季风. 北京:气象出版社,1991. 1-262 [Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang *et al.* East Asian Monsoon. Beijing: Meteorology Press, 1991. 1-262]
- 2 屈文军,张小曳,王丹,等. 西风带研究的重要意义. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 125-132 [Qu Wenjun, Zhang Xiaoye, Wang Dan, *et al.* The important significance of westerly wind study. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(1): 125-132]
- 3 王苏民,李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段——以青海湖、岱海为例. 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 Daihai lake. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(1): 54-56]
- 4 段水强,吴秀琴. 德令哈盆地水资源潜力开发分析. 青海科技, 2005, 12(2): 13-15 [Duan Shuiqiang, Wu Xiujin. Exploitation analysis of water resource potential in Delingha Basin. Qinghai Science and Technology, 2005, 12(2): 13-15]
- 5 郑喜玉,张明刚,徐昶,等. 中国盐湖志. 北京:科学出版社,2002. 173-174 [Zheng Xiuyu, Zhang Minggang, Xu Chang *et al.* Records of Salt Lake in China. Beijing: Science Press, 2002. 173-174]
- 6 杜进新. 尕斯库勒湖卤虫减少原因及保护对策. 柴达木开发研究, 2001, (2): 25-27 [Du Jinxin. Decrease causations and protection countermeasures of the Artemia in Gashai lake. Exploitation Research of Qaidam Basin, 2001, (2): 25-27]
- 7 段水强. 德令哈盆地湖泊湿地变化与生态需水初步研究. 中国农村水利水电, 2005, (9): 22-23 [Duan Shuiqiang. Primary studies on changes of wetland and ecological water requirement in Delingha Basin. China Rural Water and Hydropower, 2005, (9): 22-23]
- 8 米利曼 JD. 现代沉积碳酸盐(第一卷)—海洋碳酸盐. 北京:地质出版社,1978. 16-22 [J. D. Millin. Recent Sedimentary Carbonates (part 1)—Marine Carbonates. Beijing: Geological Publishing House, 1978. 16-22]
- 9 中国科学院兰州分院,中国科学院西部资源环境研究中心. 青海湖近代环境的演化和预测. 北京:科学出版社,1994. 119-130 [Lanzhou Branch Chinese Academy of Sciences Research Center of Western Resources and Environment Chinese Academy of Sciences. Evolution of Recent Environment in Qinghai Lake and Its Prediction. Beijing: Science Press, 1994. 119-130]
- 10 颜文,陈忠,王有强,等. 南海 NS93-5 柱样的矿物学特征及矿物沉积序列. 矿物学报, 2000, 20(2): 143-149 [Yan Wen, Chen Zhong, Wang Youqiang *et al.* Mineralogical characteristics and mineral sedimentary sequences of core NS93-5 from south China sea. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(2): 143-149]
- 11 汤艳杰,贾建业,谢先德. 粘土矿物的环境意义. 地质学前缘(中国地质大学,北京), 2002, 9(2): 337-344 [Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals. Earth Science

- Frontiers 2002, 9(2): 337-344]
- 12 赵东升, 贺鹏, 孔红喜, 等. 柴达木盆地粘土矿物特征及其演化. 沉积学报, 2001, 19(1): 66-70 [Zhao Dongsheng He Peng Kong Hongxi *et al* Characteristics and evolution of the clay minerals in Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001, 19(1): 66-70]
 - 13 莱尔曼 A. 湖泊的化学、地质学和物理学. 北京: 地质出版社, 1989. 213-242 [Lem an A. ed. *Lakes Chemistry Geology Physics* Beijing Geological Publishing House 1989 213-242]
 - 14 罗宾·巴瑟斯特. 碳酸盐沉积物及其成岩作用. 北京: 科学出版社, 1977. 175-220 [Robin G C Bathurst *Carbonate Sediments and Their Diagenesis* Beijing Science Press 1977. 175-220]
 - 15 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. 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 Tontsu, Tibet. *Earth Science Frontiers* 2002 9(1): 129-135]
 - 16 布拉特 H, 米德顿 G V, 穆雷 R C. 沉积岩成因. 北京: 科学出版社, 1978. 341-368 [Blatt H, Middleton G V, Murray R C. *Origin of Sedimentary Rocks* Beijing Science Press 1978 341-368]
 - 17 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. 湖泊科学, 1998 10(2): 58-64 [Li Shijie Ou Rongkang Zhu Zhaoyu, *et al* A carbonate content record of late Quaternary climate and environment changes from lacustrine core TS95 in Tianshuhai Lake basin, northwestern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Journal of Lake Sciences* 1998 10(2): 58-64]
 - 18 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. 海洋与湖沼, 1993 24(1): 31-36 [Wang Yunfei. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climate-environmental evolution—a case study of Qinghai lake and Dahai lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 1993 24(1): 31-36]
 - 19 沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 2001, 21(6): 508-513 [Shen Ji Zhang Enlou Xia Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai lake to minor climatic and environmental changes of the past about 1000 years. *Quaternary Sciences* 2001, 21(6): 508-513]
 - 20 李世杰, 王小天, 夏威夷, 等. 青藏高原苟鲁湖沉积记录的小冰期气候变化. 第四纪研究, 2004 24(5): 578-584 [Li Shijie Wang Xiaotian, Xia Weilan, *et al* The little ice age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulu Lake, Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences* 2004, 24(5): 578-584]
 - 21 刘淑琴, 张发胜. 柴达木海盆地沉积环境和成盐作用. 北京: 地质出版社, 1992. 23-24 [Liu Shuqin, Zhang Fasheng. *The Sedimentary Environment and Salinization of Mahai Basin in Qaidam*. Beijing Geological Publishing house 1992. 23-24]

Mineral Assemblages and Palaeoenvironmental Changes of Core DG03 of Gahai Lake in Delingha Basin

ZHANG Xi-ying MA Haizhou HAN Feng-qing CHEN Zhong

CAO Guang-chao WANG Jian-guo

(Qinghai Institute of Salt Lakes Chinese Academy of Sciences Xining 810008)

Abstract Gahai Lake lies in the conjunction area of some large-scale climatic systems such as East Asian monsoon area, southwest monsoon area and westerly wind and so on. Through studies on some palaeoenvironmental proxies such as minerals, grain size and carbonate content in Core DG03, we have analyzed and discussed the characteristics of palaeoenvironment changes in Gahai Lake, where is a sensitive area for climatic change. The research results show that the main minerals in core DG03 include quartz, plagioclase, microcline, chlorite, illite, calcite, aragonite, dolomite, gypsum and halite. The core records the palaeoenvironmental change information of Gahai Lake since about 11 ka BP (AMS-¹⁴C age). According to change characteristics of minerals and lithology, the core is divided into three parts: about 11 ka~ 10 ka BP, the last period of late-glacial (Younger Dryas event); 10 ka~ 4 ka BP, the early and middle Holocene; 4 ka ~ 0 BP, the late Holocene. The mineral assemblages in different period indicate that the water level of Gahai Lake experiences a process of low-high-low and accordingly salinity high-low-high. Gahai Lake orderly experiences the reverse and forward process of lake evolution. Combining the lithology and grain size, we speculate that Gahai Lake area orderly experienced the cold and dry climate of late-glacial, the warm and dry climate of early Holocene, the warm and wet climate of middle Holocene and the gradually cold and dry climate of late Holocene. The analysis of lithology also shows that there is a complex sedimentary environment and there are some different types of terrestrial deposits in Gahai Lake and the influence of a fluvial-proluvial deposition is through the whole Holocene. But we believe that the complex sedimentary environments can better reveal the change characteristics of regional environment.

Key words Delingha Basin, Gahai Lake, mineral assemblages, palaeoenvironment, aragonite, gypsum