

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2010.02111

柴达木盆地尕海湖沉积物粒度特征及其古气候意义

陈碧珊, 潘安定, 张元芳

(广州大学 地理科学学院 广州 510006)

摘要:以尕海湖 DG02 钻孔沉积物为研究对象,利用高分辨率的粒度数据,结合岩性、孢粉特征,分析其粒度特征及近 11 000 aBP 来的气候环境变化。研究发现,尕海湖沉积物记录了该区域湖泊水体逐渐上升又逐渐减少的过程,气候环境变化大致分为 4 个阶段:(1)冰消期晚期(11 324~10 290 aBP)气候干旱,湖泊水位下降,面积收缩,水动力较强,沉积颗粒较粗;(2)早全新世(10 290~8 850 aBP),气候转向湿润,湖泊水位上升,为浅水至深水的过渡阶段,颗粒由粗变细;(3)中全新世(8 850~4 400 aBP),气候更加湿润,湖水水位达到最高,面积扩大,水动力达到最弱,沉积颗粒最细;(4)晚全新世(4 400~200 aBP),气候变干,湖泊强烈收缩,湖面下降,水动力达到最强,沉积颗粒最粗。尕海湖 DG02 钻孔沉积物粒度所记录的区域气候干湿变化及一些重要的干湿事件与国内外研究显示出较好的一致性。

关键词:粒度特征;湖泊沉积物;古气候环境;末次冰期以来;尕海湖

中图分类号:P532

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2010)02-0111-09

位于西部干旱区、东部季风区、青藏高寒区三大区域交汇地带的柴达木盆地,既受亚洲季风的影响,又受西风的影响,对气候和环境变化极为敏感,成为国内外许多科学家的研究热点。20世纪50年代以来,青海省地质局、中科院盐湖研究所等科研机构和高等院校应用湖泊^[1-3]、黄土^[4-5]、孢粉^[6]、冰心^[7-8]、树轮^[8-12]等替代指标对柴达木盆地作了大量的研究工作,基本确立了柴达木盆地古气候环境演化的基本框架。但由于受该地区自然条件和技术方法的局限,绝大部分研究以长时间尺度为主,时间分辨率相对较低,测年精度也不够高,不同替代指标研究结果也存在较大差异。这将需要应用新手段和新方法,开展高分辨率长时间尺度的研究,以期更好地揭示柴达木盆地气候环境演化过程。由于湖泊沉积具有覆盖面广、沉积连续的特点,是进行高分辨率气候环境演化研究的极佳对象;而粒度特征能较好地指示气候的干湿变化以及湖泊沉积的演化过程。因此,本研究选取柴达木盆地尕海湖沉积物高分辨率粒度分析数据作为研究对象,结合沉积物岩性和孢粉等特征,对其反映的古气候环境意义进行探讨。

1 区域概况与研究方法

基金项目:国家自然科学基金项目(40671187)

作者简介:陈碧珊(1982—),女,硕士生,主要从事环境演变与自然灾害研究,E-mail:chenbihshan2008@126.com

收稿日期:2009-07-12;改回日期:2009-09-25 文凤英编辑

1.1 研究区及岩心概况

尕海湖位于柴达木盆地东部边缘,北部为宗务隆山,南部为巴音山和牦牛山,西侧为德令哈盆地汇水的中心——可鲁克湖和托素湖,东部有柴凯湖和柯柯盐湖。湖泊呈椭圆形,总面积 37 km²,平均水深 8 m,最大水深 15 m(图 1)。尕海湖区属于典型的荒漠半荒漠干旱气候,寒冷、干旱、风大是气候的主要特征^[13]。

研究样品取自尕海湖西岸钻孔岩心(DG02)(图 1),采样点位于 37°16'N、97°55'E,孔深 35.01 m(取心率为 97.6%)。根据岩性变化特征岩心可以划分 3 个大的层段:①34.57~30.94 m,发育了洪积相和风积物,沉积物主要为土黄色粉砂、细砂、粉砂黏土及灰色淤泥;②30.94~10.98 m,发育了连续的湖相沉积物,主要为灰色、黑色淤泥及灰色粉砂淤泥,在 30.94~30.00 m 含有石膏;③10.98~0 m,主要为浅湖相沉积,间有沼泽相沉积、冲洪积物以及风积物。

1.2 研究方法

粒度分析大致依据 10 cm 的间距进行采样,共采集样品 338 个(约 35 年分辨率);样品由英国 Mastersizer-2000 粒度仪完成测量,测量范围为 0.2~2 000 μm。由于 DG02 和 DG03 钻孔两岩心同一时间获取,地理位置相近,岩心长度也相差不大,同时结合岩性对比,得出两者沉积环境类似;并

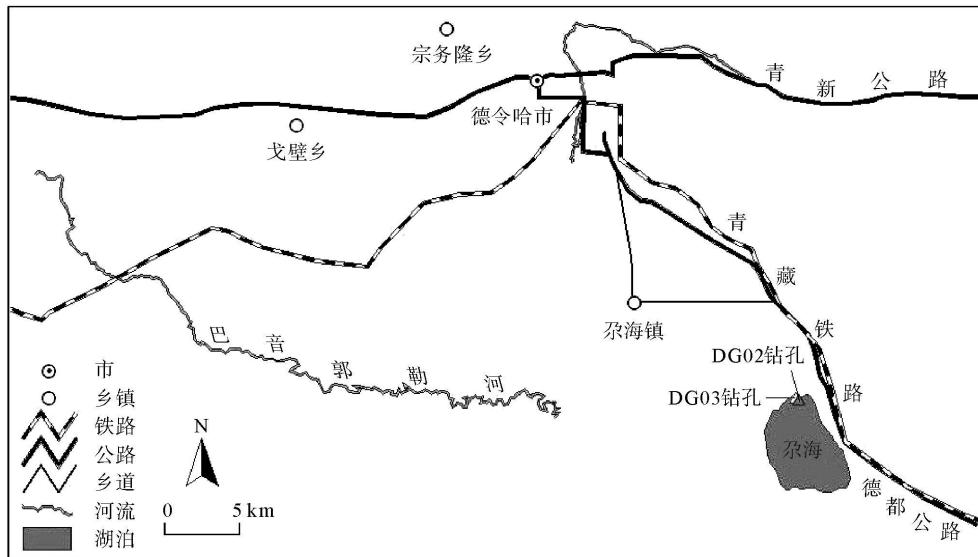


图1 尕海湖及DG02钻孔位置示意图

Fig. 1 Location of Gahai Lake and core DG02

且在 DG02 岩心中也发现植物根系, 其中 2 36 ~ 4 73、9 62 ~ 9. 69、23 56 ~ 23. 91 m 几处与 DG03 岩心中用来测年的有机质材料所在的深度相似。因此, 利用 DG03 岩心的年代数据^[14]作为参考建立 DG02 钻孔的年代序列。

粒级标准采用尤登-温德华氏等比 Φ 值粒级标准, 沉积物分类和命名采用谢帕德粒度三角图分类法; 利用矩阵法计算样品的粒度参数^[15]。粒度分带在有序聚类的数学理论基础上, 根据费舍尔(Fisher)提出来的分类算法^[16-17], 借助 tilia 软件包^[18]完成, 使划带更具客观性和准确性。

2 气候代用指标的环境指示意义

2.1 粒度指标的环境意义

影响干旱区湖泊沉积物粒度组成的原因主要有湖泊面积、水深、水动力、大气沙尘沉积以及径流等。由于尕海湖所在的位置及其周围基本上为山地丘陵所环绕, 加上尕海无常年性地表河流, 湖水主要依靠大气降水和地下潜水补给^[19]。因此, 尕海湖沉积物粒度组分主要取决于湖泊的水动力条件及集水面大小的变化, 即当水位较高时, 同一采样点离湖岸距离变远, 陆源颗粒必须经过长距离的搬运才能到达采样点, 因而沉积物中粗颗粒物质较少, 导致平均粒径减小, 同时, 长距离的搬运对悬浮颗粒起到了很好的分选作用, 沉积物常具较好的分选性。因此, 细粒沉积物指示湖泊扩张、湖水较深的湿润气候期。当湖

泊水位降低时, 同一采样点离湖岸的距离变短, 陆源颗粒未经长距离的搬运就开始在采样点沉降, 沉积物分选性差, 同时沉积物粗颗粒物质增多, 导致平均粒径变大。因此, 粗粒沉积物指示湖泊收缩、湖水较浅的干旱气候期^[20-21]。

2.2 泡粉的气候环境意义

孢粉记录是较好的、最受重视的气候环境指标之一。蒿属/藜科(A/C)花粉含量的比值往往被选择用作反映干旱区空气或土壤湿度的生物气候代用指标, 结合禾本科/蒿属(G/A)花粉比值和莎草科/(禾本科+蒿属)(C/(G+A))花粉比值以及花粉浓度讨论沉积环境的变化。一般认为荒漠区的 A/C 值在 0.5 以下, 荒漠草原约在 0.5 ~ 1.2, 草原区大于 1.0; G/A 值与 C/(G+A)值越大则表示湿度越大, 反之, 气候干旱^[22]。同时, 在干旱半干旱区植物的生长与水分条件有着密切的关系。水分充足时, 植被多为湿生、中生, 花粉产量高, 花粉浓度高; 水分缺乏时, 情况相反。本研究利用孢粉分析结果进行对比论证。

3 结果与分析

3.1 岩心年代序列

根据 DG03 岩心两处有机质材料用 AMS ^{14}C 方法测得的比较准确的年代数据, 结合 DG02 和 DG03 钻孔的岩性, 得出 DG02 岩心表层年龄为零、

9.65 m 处的¹⁴C 年龄为(3 950±40) aBP、23.67 m 处为(8 090±40) aBP、底部 34.57 m 的大致年龄为 11 324 aBP; 从表层到 9.65、9.65~23.67 m 两段的沉积速率分别为 2.44、3.37 mm/a。并根据此年代,用线性插值法进行内插和外推获得各对应深度的年代。

3.2 粒度组成与分布

由尕海湖岩心沉积物粒度分析结果(图 2)可见,岩心剖面粒度组成以粉砂和砂为主,整个剖面的粉砂含量平均为 57%,砂含量为 27%,黏土含量相对较少,为 16%。其中砂组分(>63 μm)占 0~97%,主要集中在上部和下部层位(1 114~50、3 454~3 189 cm),且在 498~378 cm 段变化幅度较大;粉砂(4~63 μm)占 3%~89%,主要集中在中部层位(3 189~1 114 cm),变化幅度较小;黏土占 0~55%,主要集中在中部层位,变化幅度也较小。平均粒径在 2.59~8.52 Φ 之间,平均值为 6.04 Φ,其中大于 6 Φ 的样品占 63%,代表以细粒的粉砂质沉积物为主。粒度的标准差变化在 0.9~2.855 之间,平均值为 1.96,属于分选差和分选较差的类型,分别占 56% 和 43%。粒度的偏态为 -2.148~3.066,变化范围较大,从极负偏到极正偏均有分布,其中以

正偏和极正偏的样品居多,平均值为 1.319。粒度的峰态变化为 1.374~3.988,属中等到很宽范围,其中以宽和很宽的样品居多。众数值在 2~9 Φ 之间变化,平均为 5.378 Φ。

频率分布曲线在描述样品总体粒度特征的同时,也直观显示了样品中各粒级组分的相对含量(体积分数)及其对总样的贡献,是表达沉积物粒度分布的有效方式。沉积物粒度频率变化情况与岩性及沉积环境有很好的对应关系,尕海湖沉积物频率分布曲线(图 3)整体以单峰为主,占 82.5%,双峰次之,占 15.4%,个别出现三峰,仅占 2.1%,而且自下而上具有一定的变化规律。3 454~3 109 cm,频率曲线以单峰态为主,大多数众数为 45~52 μm,少数众数为 275~316 μm。部分样品在砂级主峰的粗端还显示出另一级较为微弱的粉砂次峰,两主峰之间有一微弱低谷。3 109~2 623 cm,自下而上,频率曲线由单峰态逐渐向双峰态和少数三峰态移动的趋势,且双峰和三峰出现的频率较前一阶段增多;单峰态众数多为 11~13 μm,双峰态主峰众数多为 11~13 μm,次峰明显,其众数多为 39~45 μm,少数三峰态还出现微弱的砂级次峰。2 623~1 114 cm,绝大部分以单峰为主,众数主要集中在 13~15 μm 以及 39~45 μm 之间;双峰态主峰众数多为 11~13 μm,

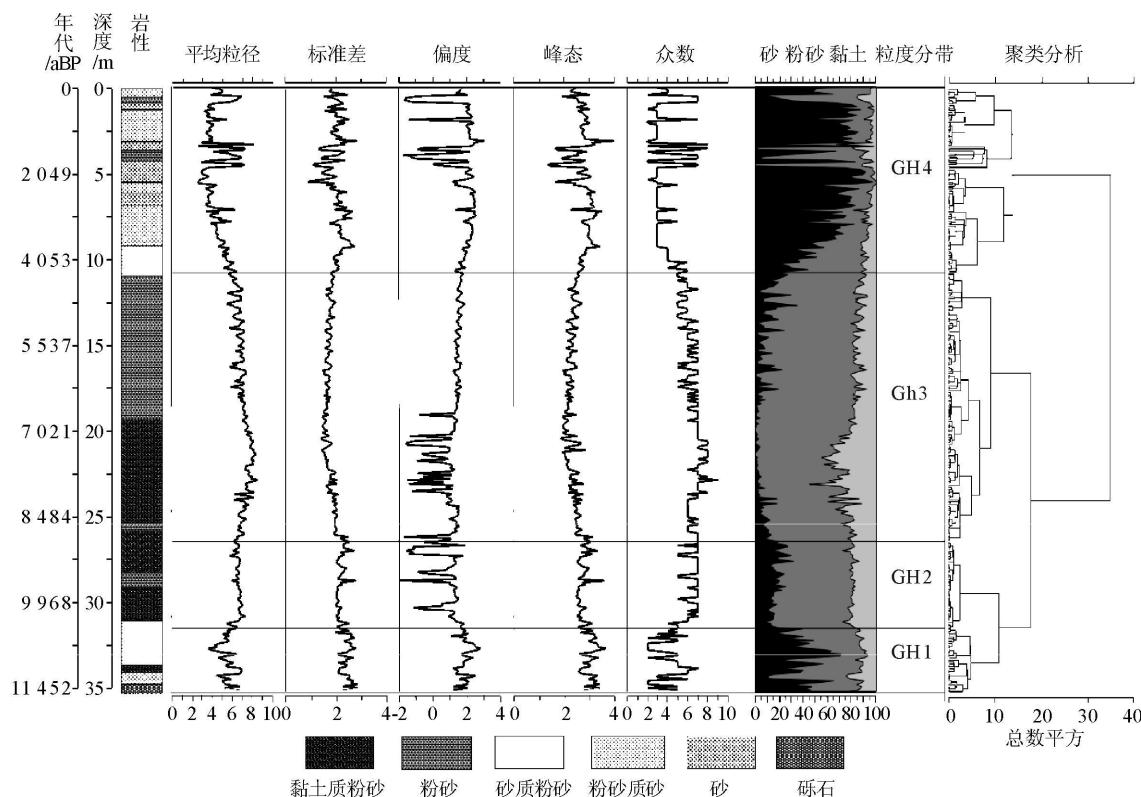


图 2 尕海湖 DG02 钻孔沉积物粒度分布及有序聚类分析结果

Fig. 2 Distribution of sedimentary grain sizes and result of sequential clustering analysis of core DG02 in Gahai Lake

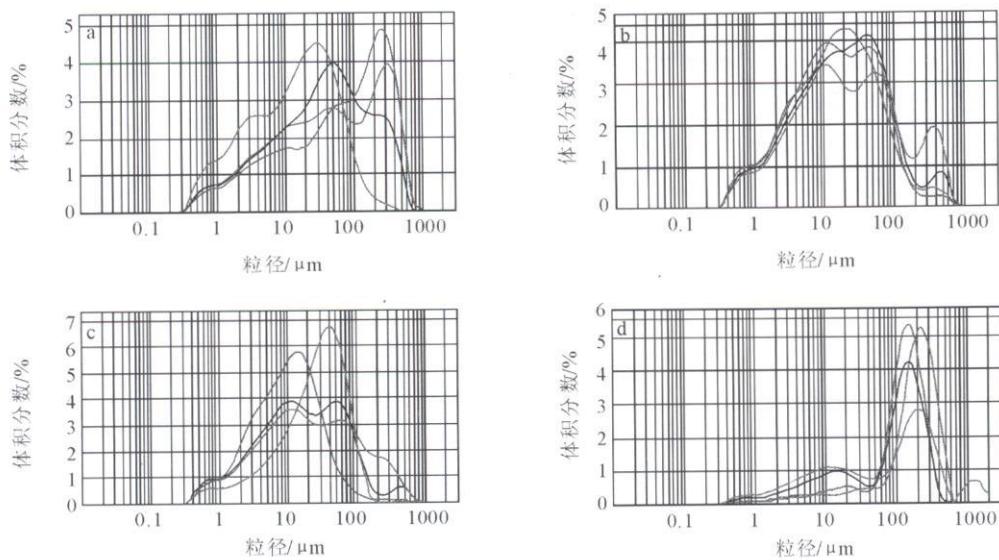


图3 尔海湖 DG02 钻孔沉积物粒度分布频率曲线代表类型

(a: 3 454 ~ 3 109 cm; b: 3 109 ~ 2 623 cm; c: 2 623 ~ 1 114 cm; d: 1 114 ~ 50 cm)

Fig. 3 Typical types of frequency curves of sediment grain size distribution in core DG02 from Gahai Lake

次峰也明显, 其众数为 $52 \sim 60 \mu\text{m}$ 。1 114 ~ 50 cm, 大部分以单峰为主, 在 954 ~ 884 cm 出现连续的双峰, 在 796 ~ 746、468 ~ 378 和 130 ~ 80 cm 等位置还出现单峰间夹交替出现。单峰态众数主要集中在 $138 \sim 158 \mu\text{m}$ 以及 $208 \sim 239 \mu\text{m}$ 之间; 双峰态主峰众数多为 $158 \sim 181 \mu\text{m}$, 次峰微弱, 众数为 $13 \sim 15 \mu\text{m}$, 少数三峰态还出现微弱的黏土级次峰。

沉积动力学研究表明^[21], 介质中由于搬运方式和搬运距离的不同, 会产生多成因组分。单成因组分的频率分布为单峰光滑曲线, 多成因组分的频率曲线是多峰分布的连续光滑曲线。根据频率曲线上分布的众数(峰)可以确定不同成因的组分数, 众数峰值的高低说明此种成因组分对样品整体贡献率的

大小。尔海剖面整体以单峰分布的粒度分布, 表明沉积物多为同种营力作用下沉积物, 但同一营力动力强度存在一些差异, 大致出现强—弱—强的变化过程; 而在 2 903 ~ 2 623 cm 出现明显的多峰分布特征, 表明该时段沉积物为多种不同营力作用下沉积物的混合或者同一营力不同动力强度下沉积物的混合。

3.3 环境演化阶段与讨论

根据湖泊沉积物粒度组成和粒度参数特征有序聚类分析的结果, 结合频率分布曲线、孢粉含量(图4), 可将近 11 324 a 以来尔海湖地区气候干湿变化大致划分为以下 4 个阶段:

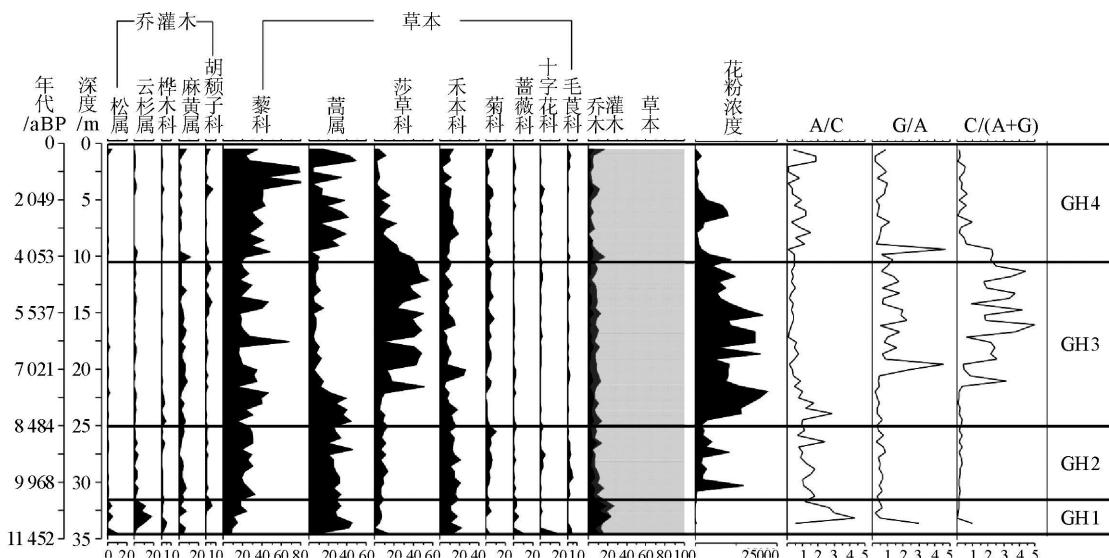


图4 尔海湖 DG02 钻孔主要孢粉类型百分含量及气候代用指标分布

Fig. 4 Percentage pollen diagram and climatic proxies distribution in core DG02 sediment in Gahai Lake

(1) GH1(3 454~3 109 cm, 约 11 324~10 290 aBP)

该阶段相当于冰消期晚期,沉积物粒度组成以粉砂和砂为主,平均粒径为 5.42 Φ ,为全剖面沉积物粒径较粗的一段;频率曲线多为单峰型,众数为 2~7 Φ ,变化范围较大;标准差变化范围为 1.949~2.855,反映搬运营力的性质比较复杂,沉积动力不够稳定,属于水位较低、水面较窄的湖泊沉积环境,气候较为干旱。孢粉资料显示,该时段孢粉浓度很低,最高只有 161 粒。但孢粉组合中,乔灌木比重达 19%,以云杉属、松属和麻黄属为主;草本类植物含量达 76%,主要以藜科、蒿属和禾本科为主。从 A/C、G/A 比值和 C/(A+G) 比值看,三者都比较高,这与粒度数据结果存在一定的偏差,主要由于该段孢粉数目少,鉴定的数目大都少于 200 粒,所以导致误差较大。

该时段虽然气候总体偏干,但不稳定,沉积物粗颗粒含量波动频率高,出现多次气候干湿变化。此段波动较为明显,指示湖泊先扩张—收缩—扩张,气候出现湿润—干旱—湿润的变化过程。在 3 383~3 378 cm(11 104~11 090 aBP) 及 3 239~3 219 cm(10 677~10 618 aBP) 出现明显的干旱事件,在 3 363~3 348 cm(11 045~11 000 aBP) 及 3 114~3 109 cm(10 306~10 291 aBP) 出现微弱的湿润事件。该时间段时间短,但变幅大,可能相当于新仙女木事件。这与前人研究结果^[7, 23~25] 冰消期气候变化较大、干湿波动明显的结论相一致。

(2) GH2(3 109~2 623 cm, 约 10 290~8 850 aBP)

该阶段相当于早全新世,沉积物粒度组成以粉砂为主,黏土和砂的比例相当,平均粒径为 6.538 Φ ;频率曲线多为单峰型,双峰和三峰出现的频率较前一阶段增多,众数为 4~7 Φ ,变化范围较小;标准差变化范围为 1.967~2.784,整体分选较差,反映搬运营力的性质比较复杂,沉积动力不够稳定。孢粉资料显示,该时段孢粉浓度达 4 053 粒。乔灌木比重为 9.7%,以云杉属、桦木属和麻黄属为主;草本类植物含量为 89.7%,主要以藜科、蒿属为主。从 A/C 值看,大多在 0.9~1.2 之间,代表荒漠草原。从本段粒度及孢粉特征看,整体波动较小,气候有朝着湿润变化趋势,且总体上以湿润为主要特征,代表水位较高、水面较宽的湖泊沉积环境。

该时段表明进入全新世后,气候转向湿润,波动变化较上一时段小,但也出现两次比较明显的干旱事件,分别是 2 848~2 823 cm(9 517~9 443 aBP)

和 2 698~2 663 cm(9 072~8 969 aBP),且后一次较前一次更为明显。前一次大致对应于古里雅冰心^[8] 和青海湖^[26] 等记录的 9.4 kaBP 事件;后一次也与敦德冰川^[27] 在 9.0 kaBP 记录的早全新世的极冷事件相对应。

(3) GH3(2 623~1 114 cm, 约 8 850~4 400 aBP)

该阶段相当于中全新世,粗粒组分减少,主要以粉砂为主;平均粒径为 7.044 Φ ,为全剖面最细的一段;在 2 021~2 019 cm 位置有泥炭层堆积。频率曲线多为单峰型,众数为 5~9 Φ ;标准差变化范围为 1.404~2.478,为整个剖面的最低值,分选较好。孢粉资料显示,该时段孢粉浓度达到最高,达 12 238 粒。乔灌木比重有所下降,达 8.6%,以云杉属、麻黄属和胡颓子科为主;草本类植物含量增加,平均达 90.3%,特别是莎草科花粉含量显著增加,平均达 30%以上。从 G/A 比值和 C/(A+G) 比值看,两者都显著上升,显示该时段气候湿润。从本段粒度及孢粉特征看,整体波动较小,水位较高、水面开阔的湖泊沉积环境,气候以湿润为主要特征。

该时段为全新世气候最佳时期,气候进一步湿润化。根据粒度分析结果,中全新世大暖期大致出现在 2 379~2 059 cm(8 496~7 047 aBP),湖面上升,面积扩大,湖水处于较高的位置,气候稳定而湿润;鼎盛期在 2 129~2 134 cm(7 418~7 404 aBP),这与有关学者在青海湖^[28]、新疆柴窝铺湖^[28] 及中国冰心及其他各种记录^[29] 相一致。在 1 828~1 114 cm(6 510~4 400 aBP),气候出现波动变化并开始变干,并出现多次较为明显的干旱事件,其中在 1 278~1 273 cm(4 878~4 863 aBP) 出现最显著的干旱事件。这与金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[30]、河北太师庄泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 及孢粉记录^[31]、松西湖沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[32] 等相对应,也表明这次降温可能具有全国性的特点。

(4) GH4(1 114~50 cm, 约 4 400~200 aBP)

该阶段相当于晚全新世,沉积物粒度组成以砂和粉砂为主,平均粒径为 4.57 Φ ,为全剖面沉积物粒径最粗的一段;频率曲线多为单峰型,众数为 2~8 Φ ,标准差变化范围为 0.9~2.82,变化范围最大,反映搬运营力的性质比较复杂,沉积动力不够稳定。孢粉数据显示,孢粉浓度急剧下降,达 3 062 粒。乔灌木比重下降,为 6.05%,并以麻黄属、胡颓子科和云杉为主;草本类植物含量增加,为 93.2%,特别是代表干旱、半干旱生境的藜科花粉含量显著增加,平均达 40%以上。从 G/A 比值和 C/(A+G) 比值看,

两者都显著下降,显示该时段气候干旱。从粒度及孢粉特征看,该阶段环境状况较差,且整体波动较大,为水体浅、面积较小的湖泊沉积环境,气候以干旱为主要特征。

随着晚全新世气候明显变冷,降水也大为衰减,湖泊强烈收缩,湖面迅速下降。在 959~954 cm (3 930~3 909 aBP 以来),气候逐渐出现明显干旱化,其中存在次一级的干湿波动。在 731~666 cm (2 995~2 729 aBP)、603~468 cm (2 471~1 918 aBP)、403~358 cm (1 651~1 467 aBP)、165~130 cm (676~532 aBP) 都有明显的干旱记录,其中第一次干旱事件在我国甚至全球都有相应的记录,如根据历史文献记录^[33],在 2.9~2.7 kaBP 黄河中下游平原地区出现严重的干旱;竺可桢^[34]对中国 5 000 年来的气候研究也揭示了该事件,敦德冰心 $\delta^{18}\text{O}$ ^[35] 及东北金川泥炭氧同位素^[36]都表明此干冷事件的存在,在世界其他地方如欧洲、非洲、新西兰及日本^[37]、大西洋^[38]等地也有干事件存在,表明此次事件具有全球性;而后面的几次干旱事件也与若果冰和贡嘎山海螺沟的观景台侧碛的冰进 ^{14}C 年代^[39]大致吻合。

4 结论

(1) 尔海湖沉积岩心剖面粒度组成以粉砂和砂为主,频率曲线主要以正态或极正态单峰型为主,说明尔海湖粒度组分主要由于降水变化导致的湖泊水动力及水面大小所决定的。在 3 454~3 109 cm,沉积物颗粒较粗,分选最差,偏度和峰态最大,为浅水浅湖的沉积环境;在 3 109~2 623 cm,沉积物颗粒由粗变细,分选较好,偏度和峰度都有所降低,湖水水位升高,面积扩大,处于浅水沉积向深水沉积过渡的环境;2 623~1 114 cm,沉积物颗粒最细,分选最好,偏度和峰度都最低,达到深水深湖稳定的沉积环境;1 114~50 cm,沉积物颗粒达到最粗,分选较差,偏度和峰态都较大,表示湖泊水位下降,湖面收缩,为浅水浅湖沉积环境。

(2) 根据粒度组成和粒度参数特征进行有序聚类分析的结果,可将尔海湖冰消期晚期以来气候环境演化分为 4 个阶段:冰消期晚期 (11 324~10 290 aBP),湖区气候以干旱为主要特征,降水减少,导致湖泊水位下降,面积收缩,湖泊水动力较强,沉积颗粒较粗;期间 11 104~11 090 和 10 677~10 618 aBP 出现明显的干旱事件,在 11 045~11 000 aBP 及 10 306~10 291 aBP 出现微弱的湿润

事件,气候波动明显,可能是该区域对全球性 YD 事件的响应。早全新世 (10 290~8 850 aBP),降水剧增,气候转向湿润,湖泊水位逐渐上升,为浅水至深水的过渡阶段,颗粒由粗变细;气候波动较小,出现两次比较明显的干旱事件,分别是 9 517~9 443 和 9 072~8 969 aBP,大致对应于 9.4 和 9.0 kaBP 冷事件。中全新世 (8 850~4 400 aBP),为全新世气候最佳时期,气候更加湿润,湖水水位达到最高,面积扩大,湖泊水动力达到最弱,沉积颗粒最细;中全新世大暖期大致出现在 8 496~7 047 aBP,鼎盛期在 7 418~7 404 aBP,此后气候波动变化并开始变干,在 4 878~4 863 aBP 出现最显著的干旱事件。晚全新世 (4 400~200 aBP),气候明显变冷,降水也大为衰减,湖泊强烈收缩,湖面迅速下降,湖泊水动力达到最强,沉积颗粒最粗;气候重新趋向干旱,出现多次明显的干旱事件,其中 2 995~2 729 aBP 的干旱事件在我国甚至全球都有相应的记录。

(3) 在研究方法上,以有序聚类方法对粒度测试数据结果分带,减少主观因素的影响,使评判结果更加符合客观实际。粒度样品处理、测试时间短,效率高,对于缺乏其他有效气候代用指标的样品来说,可作为重要的参考指标。

致谢: 中山大学魏金辉、杨士雄在粒度样品有序聚类分析的计算机实现中提供帮助,罗传秀在论文撰写中给予指导,在此深表谢意。

参考文献(References)

- [1] 刘兴起,王永波,沈吉,等. 16 000a 以来青海茶卡盐湖的演化过程及其对气候的响应 [J]. 地质学报, 2007, 81(6): 843~849.
[LIU Xingqi, WANG Yongbo, SHEN Ji, et al. Evolution of Chaka Salt Lake during the last 16 000 years and its response to climatic change [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 843~849.]
- [2] 陈忠,马海州,曹广超,等. 尔海地区晚冰期以来沉积记录的气候环境演变 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 131~138. [CHEN Zhong, MA Haizhou, CAO Guangchao, et al. Climatic-environmental evolution in Gahai Lake area since the last glacial period from loess-on-ignition [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(1): 131~138.]
- [3] 曹广超,马海州,隆浩,等. 柴达木盆地东部尔海湖 DG03 孔岩心粒度特征及环境意义 [J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1073~1077. [CAO Guangchao, MA Haizhou, LONG Hao, et al. Particle size characteristics of deposits from Core DG03 of Gahai Lake in the east of Qaidam Basin and their environmental significance [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1073~1077.]
- [4] 曾永年,冯兆东,曹广超.末次冰期以来柴达木盆地沙漠形成与

- 演化[J].地理学报,2003,58(3):453-457.[ZENG Yongnian, FENG Zhaodong, CAO Guangchao. Desert formation and evolution in Qaidam Basin since the last glacial epoch [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 453-457.]
- [5] 曾永年,马海州,沙占江,等.柴达木盆地沉积中的新仙女木事件记录[J].干旱区地理,1998,21(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, 21(1): 25-28.]
- [6] 康安,朱筱敏,韩德馨,等.柴达木盆地第四纪孢粉组合及古气候波动[J].地质通报,2003,22(1):12-15.[KANG An, ZHU Xiaomin, HAN Dexin, et al. Quaternary sporopollen assemblages and paleoclimatic fluctuation in the Qaidam basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(1): 12-15.]
- [7] 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风,等.古里雅冰心中末次间冰期以来气候变化记录研究[J].中国科学D辑,1997,27(5):348-353.[YAO Tandong, Thompson L G, SHI Yafeng, et al. Study on the record of climatic change since the last interglacial period in the Guliya ice core of Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(5): 348-353.]
- [8] 王宁练,姚檀栋, Thompson L G,等.全新世早期强降温事件的古里雅冰心记录证据[J].科学通报,2002,47(11):818-823.[WANG Ninglian, YAO Tandong, Thompson L G, et al. Record of cold event in Early Holocene of Guliya ice core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(11): 818-823.]
- [9] 邵雪梅,梁尔源,黄磊,等.柴达木盆地东北部过去1437 a的降水变化重建[J].气候变化研究进展,2006,2(3):122-126.[SHAO Xuemei, LIANG Eryuan, HUANG Lei, et al. A reconstructed precipitation series over the past millennium in the northeastern Qaidam Basin [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(3): 122-126.]
- [10] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨,等.树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J].中国科学D辑,2004,34(2):145-156.[SHAO Xuemei, HUANG Lei, LIU Hongbin, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(2): 145-156.]
- [11] 康兴成,程国栋,陈发虎,等.祁连山中部公元904年以来树木年轮记录的旱涝变化[J].冰川冻土,2003,25(5):518-525.[KANG Xingcheng, CHENG Guodong, CHEN Fahu, et al. A record of drought and flood series by tree-ring data in the middle section of Qilian Mountain since 904 AD [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 518-525.]
- [12] 康兴成,张其花,Lisa J Graumlich,等.祁连山中部公元904年以来树木年轮记录的旱涝变化[J].冰川冻土,2000,22(1):66-72.[KANG Xingcheng, ZHANG Qihua, Lisa J Graumlich, et al. Reconstruction of a 1835 a past climate for Dulan, Qinghai Province, using tree ring [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 66-72.]
- [13] 陈忠,马海州,曹广超.尕海湖DG03孔碳酸盐含量及其环境意义[J].盐湖研究,2007,15(2):6-11.[CHEN Zhong, MA Haizhou, CAO Guangchao. Carbonate content in core DG03 of Lake Gahai and its paleoenvironmental significance [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15(2): 6-11.]
- [14] 陈忠.冰消期以来德令哈尕海湖气候环境演变的碳、氧同位素记录[D].青海:中国科学院青海盐湖所,2007.[CHEN Zhong. Carbon and Oxygen Isotope Record of Climatic-Environmental Evolution in the Gahai Lake, Delingha since last Deglaciation [D]. Qinghai: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences 2007.]
- [15] 窦衍光.长江口邻近海域沉积物粒度和元素地球化学特征及其对沉积环境的指示[D].青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2007.[DOU Yanguang. Characteristics of sediment granularity, element geochemistry and their significance for identifying sedimentary environment in the contiguous sea areas of Changjiang River Estuary [D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China 2007.]
- [16] 王艳.最优分割算法的计算机程序实现与武汉市洪涝灾害预测[D].武汉:华中师范大学,2007.[WANG Yan. The Realization of the Optimal Partition Method Algorithm and Its application [D]. Wuhan: Hua Zhong Normal University, 2007.]
- [17] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2005:252-258.[GAO Huixuan. Applied Multivariate Statistical Analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 2005: 252-258.]
- [18] 刘秀菊.柴达木盆地晚全新世湖泊孢粉记录与气候变化[D].兰州:兰州大学,2007.[LIU Xiuju. Late Holocene Lacustrine Sporopollen Records and Climatic Changes in Qaidam Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.]
- [19] 郑喜玉,张明刚,徐昶,等.中国盐湖志[M].北京:科学出版社,2002:173-174.[ZHENG Xiyu, ZHANG Minggang, XU Chang, et al. *China Salt Lake Log* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 173-174.]
- [20] 畅莉.苏州澄湖全新世环境变化的沉积记录研究[D].上海:华东师范大学,2008.[CHANG Li. Sedimentary Record of Chenghu Lake in Suzhou in Holocene [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.]
- [21] 谢远云,李长安,王秋良,等.江汉平原江陵湖泊沉积物粒度特征及气候环境意义[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(3):570-577.[XIE Yuanyun, LI Chang'an, WANG Qiuliang, et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Jiangling Lake sediments in Jianghan Plain [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(3): 570-577.]
- [22] 唐领余,沈才明,李春海,等.花粉记录的青藏高原中部中全新世以来植被与环境[J].中国科学D辑,2009,39(5):615-625.[TANG Lingyu, SHEN Caiming, LI Chunhai, et al. Pollen record of vegetation and environment in Qinghai-Tibet Plateau since the middle Holocene [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 39(5): 615-625.]
- [23] 周卫建,李小强,董光荣,等.新仙女木沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录——东亚季风颤动的实例[J].中国科学D辑,1996,26(2):118-124.[ZHOU Weijian, LI Xiaoqiang, DONG Guangrong, et al. The high resolution peat records from desert-loess transition zone during the Younger Dryas: the evi-

- dence of eastern Asian monsoon vibration [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(2): 118-124.]
- [24] 周卫建, 安芷生, Porter S C, 等. 末次冰消期东亚和挪威海气候事件的对比 [J]. 中国科学 D 辑, 1997, 27(3): 260-264. [ZHOU Weijian, AN Zhisheng, Porter S C, et al. The last deglaciation climate events in East Asia and the Norwegian Sea [J]. Science in China (Series D), 1997, 27(3): 260-264.]
- [25] 王苏民, 羊向东, 马燕, 等. 江苏固城湖 15 ka 来的环境变迁与古季风关系探讨 [J]. 中国科学 D 辑, 1996, 26(4): 137-141. [WANG Sumin, YANG Xiangdong, MA Yan, et al. Environmental change of Gucheng Lake of Jiangsu in the past 15 ka and its relation to palaeomonsoon [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(4): 137-141.]
- [26] 沈吉, 王苏民, 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, WANG Sumin, Matsumoto R, et al. 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.]
- [27] 李世杰. 末次冰盛期以来青藏高原冰川、冰缘、湖泊演变与气候环境 [C] // 中国第四纪南北对比与全球变化. 中国第四纪研究委员会编. 广州: 广东高等教育出版社, 1993: 121-122. [LI Shijie. Glacier, Ice Barrier and Lacustrine Evolution and Climate of Tibetan Plateau after the Last Glacial Epoch [C] // North-South Contrast in Quaternary and Global Change of China. Edited by Chinese Quaternary Research Council. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1993: 121-122.]
- [28] 李文漪, 阎顺. 柴窝铺盆地第四纪孢粉学研究 [C] // 新疆柴窝盆地第四纪气候环境变迁和水文地质条件. 北京: 海洋出版社, 1990: 46-74. [LI Wenyi, YAN Shun. Quaternary palynology study on Chaiwopu Basin [C] // Quaternary Climate Change and Hydrogeological Conditions of Chaiwopu Basin in Xinjiang Province. Edited by SHI Yafeng, WEN Qizhong, et al. Beijing: China Ocean Press, 1990: 46-74.]
- [29] 何元庆, 姚檀栋, 沈永平, 等. 冰心与其他记录所揭示的中国全新世大暖期变化特征 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 12-18. [HE Yuanqing, YAO Tandong, SHEN Yongping, et al. Climatic differences in China during the Holocene indicated by the various climatic proxy data from different parts of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 12-18.]
- [30] Hong Y T, Jiang H B, Liu T S, et al. Response of climate to solar forcing recorded in a 6 000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose. [J]. The Holocene, 2000, 10(1): 1-7.
- [31] 靳桂云, 刘东生. 华北北部中全新世降温气候事件与古文化变迁 [J]. 科学通报, 2001, 46(20): 1725-1730. [JIN Guiyun, LIU Tungsheng. Mid-Holocene climate change in North China and the effect on cultural development [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(20): 1725-1730.]
- [32] Gasse F, Anodl F, Fontes J C, et al. A 13 000-year climate record from Western Tibet. [J]. Nature, 1991, 353(24): 742-745.
- [33] 侯甬坚, 祝一志. 历史记录提取的近 5~2.7 ka 黄河中下游平原重要气候事件及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 23-29. [HOU Yongjian, ZHU Yizhi. Important climatic events showed by historical records from middle and lower reach plain of the Yellow River during 5~2.7 ka and their environmental significance [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(4): 23-29.]
- [34] 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): 168-189. [ZHU Kezhen. Preliminary study of recent 5 000 years climatic change in China [J]. Science in China, 1973, 16(2): 168-189.]
- [35] 姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰心记录与过去 5 ka 温度变化 [J]. 中国科学 B 辑, 1992, 10: 1089-1093. [YAO Tandong, Thompson L G. Records of Dunde Ice Core and the temperature in the past 5 ka [J]. Science in China (Series B), 1992, 10: 1089-1093.]
- [36] 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5 ka 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 [J]. 中国科学 D 辑, 1997, 27(6): 525-530. [HONG Yetang, JIANG Hongbo, TAO Faxiang, et al. The $\delta^{18}\text{O}$ temperature record of peat from Jinchuan for recent 5 ka [J]. Science in China (Series D), 1997, 27(6): 525-530.]
- [37] Bond G, Showers W. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. [J]. Science, 1997, 278: 1257-1266.
- [38] Van G B, Buurman J, Waterbolk H T. Archaeological and palaeoecological indications of an abrupt climate change in the Netherlands and evidence for climatological teleconnections around 2650 aBP [J]. Journal of Quaternary Science, 1996, 11(6): 451-460.
- [39] Zheng Benxing. Quaternary geology in Kunlun Mountains [C] // In: LIU Tungsheng, ed. Quaternary Geology and Environment in China. Beijing: Science Press, 1991: 392-402.

GRAIN-SIZE CHARACTERISTICS AND THEIR ENVIRONMENTAL SIGNIFICANCE OF GAHAI LAKE SEDIMENTS IN QAIDAM BASIN

CHEN Bishan, PAN Anding, ZHA NG Yuanfang

(School of Geography Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This article analyzes characteristics of grain-sizes and changes of climate and environment since about 11 000 aBP ago using high-resolution grain-size data and information of lithology and pollen assemblage from core DG02 in Gahai Lake. The research result shows that sediment in Gahai Lake has well recorded the processes of the lake water from wetting-up to drying-up. The climatic changes can be divided into four stages as follows: late deglaciation (11 324~10 290 aBP), when the lake level was low, the area was shrinking, the driving force was strong and the sediment particles were coarse with arid climate; early Holocene (10 290~8 850 aBP), when the lake water level was high, the sediment particles were fine with wet climate in the transition phase; mid Holocene (8 850~4 400 aBP), when the lake water level was much lower and expanding, the driving force was the weakest and the sediment particles were the finest with wet climate; late Holocene (4 400~200 aBP), when the lake water level was low and shrinking, the driving force was strong and the sediment particles were coarse with arid climate. The climatic changes and important dry and wet events in Gahai Lake area were coincident with other research results at home and abroad.

Key words: grain-size characteristics; lake sediments; paleoclimate and paleoenvironment; since the last glacial epoch; Gahai Lake