

青藏高原腹地湖泊沉积粒度特征及其古环境意义

田庆春¹, 石小静¹, 石培宏²

(1. 山西师范大学地理科学学院, 山西 临汾 041000;

2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要:选择青藏高原腹地可可西里为研究区,通过对该区湖泊沉积物粒度参数的分析,并且与其他环境代用指标进行比较,探讨了中更新世以来可可西里地区的环境演变。结果表明:粒度参数的变化特征可以很好地指示湖泊水位的变化,能反映湖区气候的变化情况,粒度参数所指示的湖泊水位波动及环境变化得到了其他环境代用指标很好的支持,说明对沉积物粒度研究是恢复区域气候环境变化的一种有效途径。同时该区湖泊沉积物粒度参数的变化规律和深海氧同位素曲线在冰期—间冰期旋回尺度上有较好的一致性,但也出现不同的变化特征,表明这一区域既有与全球一致的气候特征,也受区域气候变化影响,其原因可能与青藏高原的抬升有一定关系。

关键词:青藏高原;湖泊沉积;粒度特征;环境意义

中图分类号: P512.2

文献标识码:

文章编号: 1008-858X(2021)01-0025-08

粒度作为气候代用指标在恢复古气候、古环境中得到了广泛的应用。因粒度的组分与搬运介质、方式及后期沉积环境有关,因此在一定的区域条件下,粒度特征能反映沉积物的成因,对指示区域气候演化有重要意义。黄土沉积物粒度研究表明,其沉积物粒度大小能很好地指示东亚冬季风强弱的变化^[1]。在深海沉积研究中,可用沉积物粒度值来反映洋流流速以及搬运能力的大小。湖泊沉积研究发现,湖泊沉积物粒度受到湖泊水体能量的控制,粒度的粗细代表水动力的大小及入湖水量的多少,可在一定程度上指示湖区降水量的变化,进而反映气候的干湿变化^[2]。

青藏高原不管是在环境变化驱动还是响应方面都在全球气候变化中起到了重要的作用^[3-4]。位于高原腹地的可可西里地区,受人类生产生活干扰很小,本研究选择可可西里地区为研究区,通过对可可西里地区古湖泊沉积物粒度各组分特征进行分析,从而对该区湖泊及其湖区气候环境演化进行探讨。

1 研究区概况

可可西里位于昆仑山脉以南的青藏高原腹地,东至青藏公路,西至青海省界,南到唐古拉山脉。研究区内沉积物主要为晚第四纪的松散沉积物,主要包括冲积、洪积以及一些冰水堆积的砂砾石层。可可西里海拔4 200~6 860 m,面积约为450×10⁴ hm²,年均气温变化波动在-10.0~4.1℃之间,年平均降水量变化在173.0~494.9 mm,雨热同期,降水量集中在夏季^[5]。该区植被以高寒草原为主。

岩芯取自可可西里东部边缘,位置35°13'05"N, 93°55'52.2"E,距青藏公路约30 km(图1),编号为BDQ06,长106 m,取芯率在90%以上,取芯时间为2006年8月。野外将岩芯密封后运回实验室,按2 cm分样,岩芯颜色主要为浅绿色,同时夹杂一些其它颜色(黄色、褐色、铁锈色等)。

收稿日期:2020-03-31;修回日期:2020-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41701223);陕西省自然科学基金(No2018JM4008)

作者简介:田庆春(1982-),男,博士,副教授,研究方向为全球变化与第四纪环境演化。Email: tianqch2006@126.com。

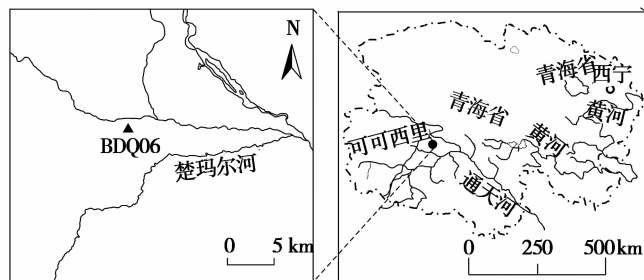


图 1 采样位置图

Fig. 1 The sample site

2 研究方法

以 10 cm 间距对沉积物岩芯进行粒度样品的取样,并且以 10 ~ 20 cm 不等间隔取得古地磁样品。粒度测试首先除去样品中的有机质(用 $\text{H}_2\text{O}_2/10\%$)和碳酸盐(用 $\text{HCl}/10\%$),加入蒸馏

水静置 12 h 后,将上层清水抽至约剩 20 mL 时加入 10 mL 分散剂,放入超声波震荡仪,震荡 5 min 后加入 Mastersizer2000 激光粒度仪(英国 Malvern Instruments 公司)进行测试。为了更好地分析湖泊沉积物粒度的气候意义,同时测定了总有机碳、磁化率和色度等气候代用指标进行对比分析,具体测试方法见参考文献^[6]。

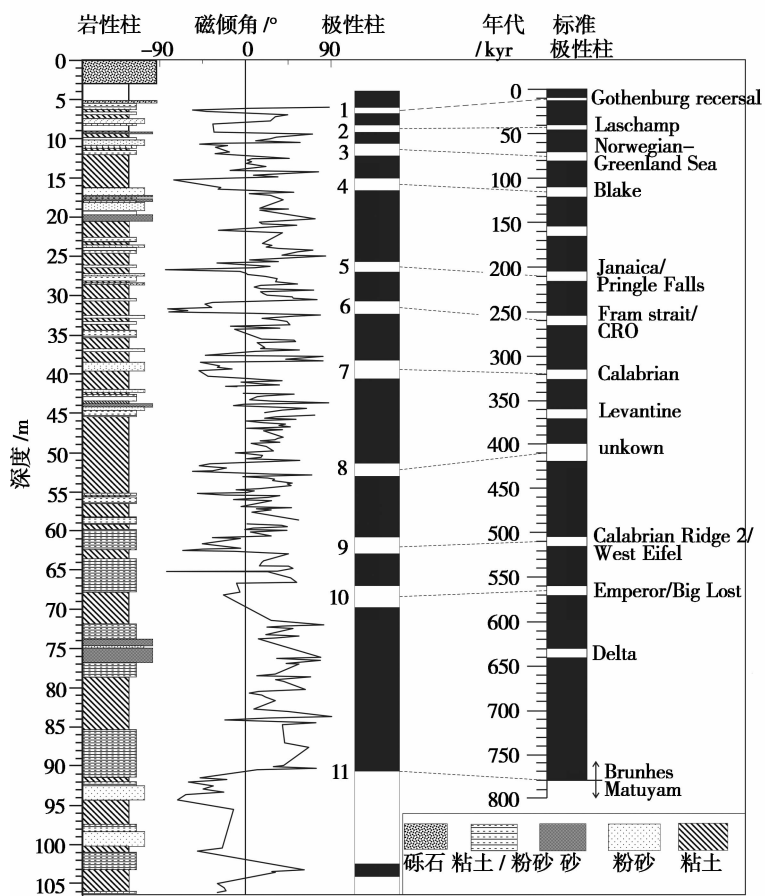


图 2 BDQ06 孔古地磁测试结果

Fig. 2 Paleogeomagnetic test results of BDQ06 core

古地磁 从钻孔岩芯取得 2 cm 的立方体,通过 2G 超导磁力仪(2G-755R Magnetometer)和热退磁仪(MMTD60)进行测试。共测试样品 353 个,有效数据占 80%。古地磁和粒度的测试均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

3 年代确定

BDQ06 孔年代框架建立在磁性地层学的基础上,磁性测量结果如图 2。高原东部若尔盖盆地 RH 孔磁性地层研究结果显示,B/M 界限位于 108 m 处,同时在布容世内出现了 9 次极性漂移事件^[7],大部分极性漂移事件可与本钻孔相对应,将本钻孔极性漂移事件与标准极性柱对比^[8-10],同时结合轨道调谐的方法,建立了 BDQ06 孔的年代框架,轨道调谐具体方法、步骤见参考文献^[6]。

4 分析与结果

沉积物颗粒的粗细程度常常能反映出沉积时

期水动力的大小。根据湖泊水动力学原理,湖水动力大小和湖泊水体深度呈反比,因此沉积物粒度从湖岸至湖心呈现出由粗到细的逐渐过渡,呈环带状与湖岸线平行,也即湖泊沉积物粒度分布大致表现出由湖岸至湖心从砾—砂—粉砂—粘土的沉积特征。当沉积物粗颗粒含量较大时说明采样点离湖岸近,湖水面积缩小,反映气候较为干旱;如果沉积物中细颗粒占优,则说明采样点距离湖岸较远,湖水面积扩张,反映气候相对较为湿润^[11-13]。陈敬安等^[14]通过对不同时间尺度、不同分辨率沉积物的综合研究认为,此结论只适用于百年、千年的较低分辨率的研究,不同时间尺度、不同分辨率的研究沉积物粒度所指示的环境信息可能会出现不同的结果。湖泊沉积除受到水动力大小的影响外,还受到其它素的影响,如构造运动等,湖泊沉积物平均粒径、粘土含量等在反映沉积环境时存在一定的局限性^[15]。因此,除平均粒径(Mz)、粘土含量(<4 μm)等,还计算了标准偏差、偏度系数及峰态,这有助于更好地恢复沉积环境。

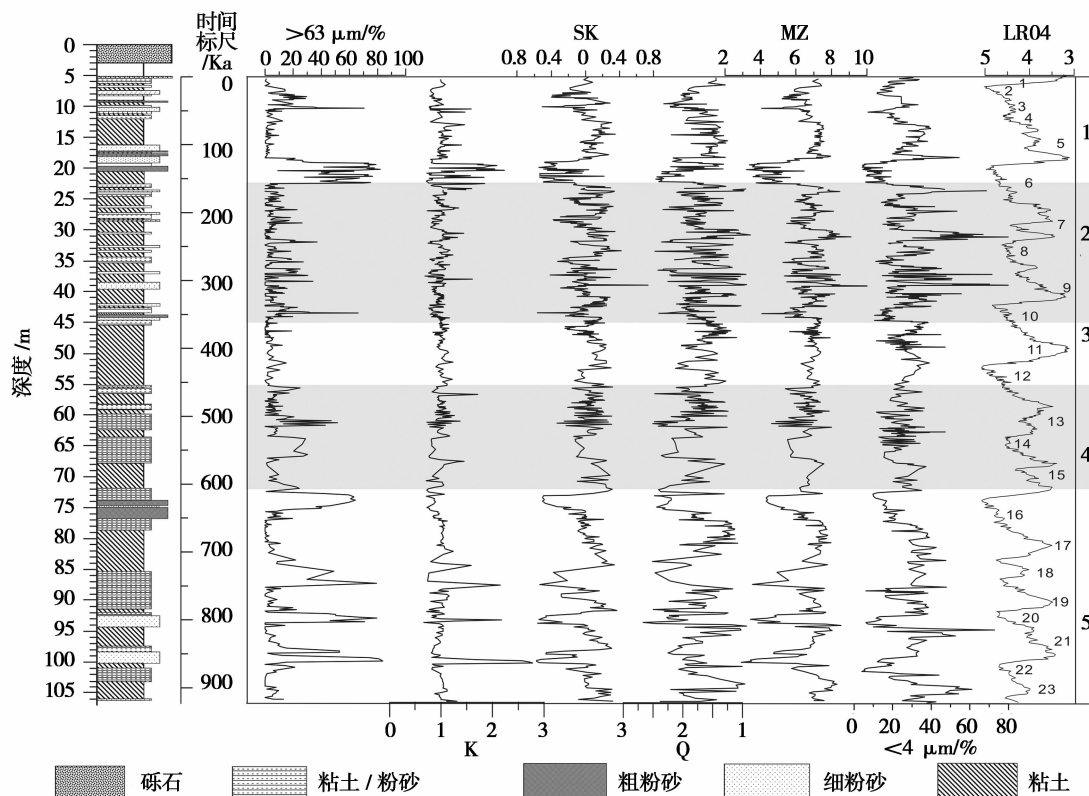


图3 BDQ06 孔岩性特征与粒度参数变化曲线

Fig. 3 Lithological features and grain size parameters in core BDQ06

粒度参数的计算利用 Folk 与 Ward 的图解法公式^[16]。标准偏差(σ_1)可以反映出沉积物的分选性,即沉积物粒径粗细的均匀程度,其值愈小,表明沉积物分选程度愈好,沉积时期水动力条件愈弱;反之则显示沉积时水的动能较强。偏度(SK)可指示沉积物粒度频率曲线的对称性^[17],也就是将沉积物粒度频率曲线与正态分布曲线对比时,其主峰相对的偏离程度。负偏时,沉积物粒度组成为粗偏;正偏则为沉积物细偏^[18]。峰态(KG)可以表征与正态分布曲线对比时,该曲线是尖峰还是相对的宽峰。假设正态曲线峰态为0的时候,沉积物粒度峰态偏正则是窄峰,偏负则为宽峰,峰态在一定程度上能反映沉积物的沉积动

力来源及其性质^[19]。

对各沉积物样品进行粒度频率曲线分析,发现粒度频率曲线主要表现为三种形态(图4),图4-a类型一般出现在粘土含量较高的层位,指示湖泊水体较大、水动力较小,沉积物环境较为稳定。图4-b主要是出现在粘土含量高值向低值转变,或者是由低值向高值转变的一些层位,但峰值仍小于100 μm ,说明此时湖泊沉积物来源仍以流水搬运为主,湖盆面积较小,水动力变化较为频繁。图4-c主要出现在粗颗粒含量较大的层位,而且粗颗粒组分峰值大于100 μm ,指示湖水不稳定,湖水面积减小,水动力较大,湖泊沉积物既有流水搬运,也存在风力输送^[20-22];由图3可以看

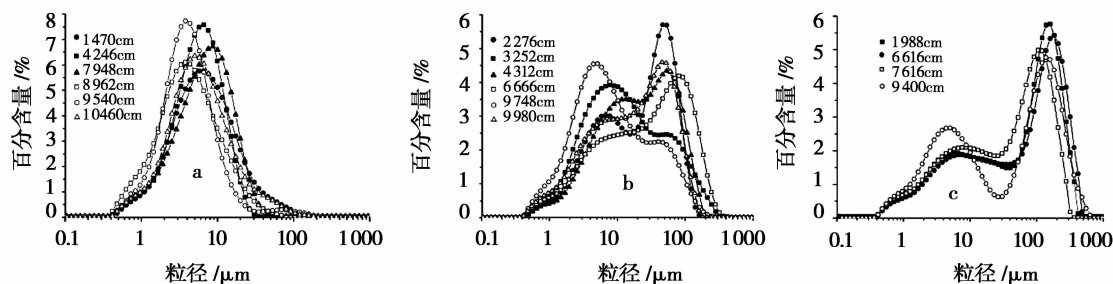


图4 沉积物粒度的频率曲线特征

Fig. 4 Frequency curve of sediment grain size

出,粒度参数的变化特征与岩性有较好的相关性,沉积岩芯为粗粒物质时,对应的粒径值大,分选程度较差;相反粒度较细,对应粒径值小,分选性较好。并且,和深海氧同位素曲线相比,整体趋势上有很好的 consistency,可根据岩性沉积特征、粒度参数及各气候代用指标曲线波动特征对该区气候变化过程进行划分。前人研究发现青藏高原在中更新世以来经历了三次快速隆升时期,分别为~0.6、0.36和0.16Ma^[23-24],而BDQ06孔在这三个阶段沉积物粒度明显变粗,其余指标也发生明显变化,可能也与高原的构造隆升有关,因此将这三个时间点作为划分气候阶段的时间节点。MIS12阶段(460kaBP前后)后全球气候发生明显变化,称为中布容事件^[25],本区气候在这个时间段也有明显的转变,因此也将460ka作为气候阶段划分的时间节点。根据上述4个时间节点将可可西里中更新世以来的环境演化分5个阶段进行讨论(图3,图5),并且将其与LR04及察尔汗CK6孔^[26]、若尔盖盆地的RM^[23]和RH孔记录^[27]进行对比分析(图6)。

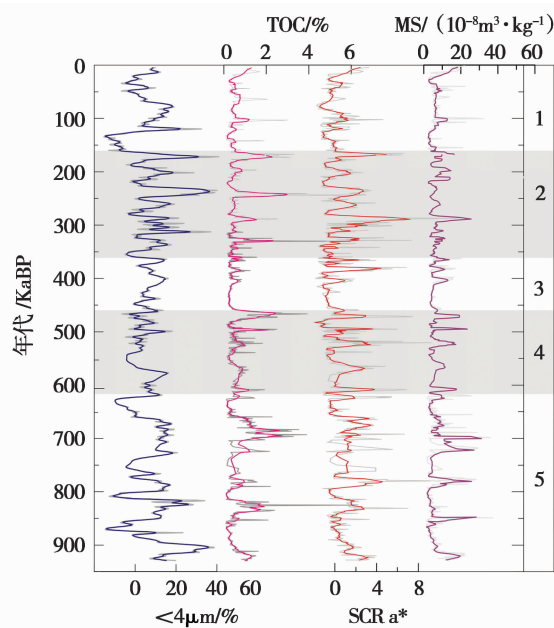


图5 BDQ06孔粒度指标与其它指标对比

Fig. 5 Comparison of mean grain size and other indices of BDQ06 core

5 阶段(929 ~ 600 ka):本阶段与 MIS23 - 16 时间上相当, <4 μm 粒径组分出现几个较大的峰值, 时间上对应于 MIS23、21、19 和 17 阶段, 标准偏差为负偏, 说明分选较好; 偏度(SK)为正偏态, 平均粒径(MZ)在 9 ϕ 左右, 接近整个钻孔的最大值, 说明沉积物粒度偏向细颗粒。相应的 >63 μm 粒径组分为低值, 粒度频率曲线为图 4-a 类型, 表明沉积环境相对稳定; 标准偏差(σ_1)接近整个钻孔最小值, 说明湖泊动能较弱, 分选较好, 湖泊水体深度相对较大; 相同层位的 TOC、磁化率和色度 a^* 都为高值, 说明气候相对温暖。与 <4 μm 粒径组分峰值相间隔的层位, 各粒度参数都显示出相反的特征, 时间上对应于 MIS22、20、18 和 16 阶段, 平均粒径值为高值段, 说明湖水动能较大, 当时的水深相对较小; 其他指标也显示环境较冷。总的来说, 本阶段环境相对湿润, 中间出现几次短暂干旱期。LR04、CK6 及若尔盖盆地的 RH 和 RM 孔都显示明显的峰谷变化, 尤其是 RH 孔有机碳同位素波动明显峰值最大, 说明在间冰期环境较好(图 6)。在玉龙山(云南)三千米的高度发现古土壤, 代表湿热环境, 年代在 700 ~ 500 ka 左右^[28], 与本阶段湿润期环境类似。而玉龙山现代土壤为寒冷条件下的弱生草灰化土, 反映青藏

高原东南部在 700 ~ 500 ka 以来呈大幅度隆升^[28], 时间上与昆一黄运动一致^[23-24]。而高原东部边缘地区黄土也显示该时段早期气候比较暖湿, 约 0.88 ~ 0.65 Ma 气候较为暖湿, 之后变为冷湿, 后期气候变冷、变干^[29]。

4 阶段(600 ~ 460 ka):本阶段粒度各参数的变化与上一阶段基本一致, 但粘土含量稍有降低, 平均粒径(MZ)值为 8 ϕ 左右, 说明沉积物颗粒比上一阶段稍粗, 标准偏差(σ_1)比上一阶段要大, 说明水动力条件要强一些。对应于 MIS15 ~ 13, 偏度(SK)显示正偏态, 表明此阶段水动力条件虽有增强趋势, 但仍有不少的细颗粒沉积, 指示湖水仍相对较深。后期平均粒径及其他参数波动较为频繁, 说明水动力条件变得相对不太稳定, 反映出湖区气候条件变化较快; TOC、磁化率及色度 a^* 都比上一阶段有一定的降低, 说明气候向趋冷、趋干转变。粒度频率曲线以图 4-b 为主, 这也说明了沉积环境变得比之前要相对复杂。LR04 显示环境条件较好, 而青藏高原几个记录也显示从这一时段开始环境条件较差, 但后期有转好趋势。崔之久等^[24]认为昆一黄运动使高原达到临界高度, 使高原进入冰冻圈。使气候变冷、变干, 沙漠扩展, 湖盆面积缩小, 这与本区气候变化一致。从本阶段开始沉积物明显较之前粗。同时高原达到临界高度, 冷高压加强, 使冬季风携带粉尘能力加强, 黄土沉积的颗粒增粗, 范围扩大, 并首次越过秦岭。刘东生^[30]等曾提出青藏高原一戈壁沙漠—黄土形成是一个彼此相关的耦合系统, 因此本阶段气候变干与西北地区气候变干成因上可能有一定的联系, 也与青藏高原的隆升相关。

3 阶段(460 ~ 360 ka):本阶段 <4 μm 粒径组分波动幅度不大, 但其百分含量比上一阶段要小, 维持在一个中等水平, 相当于 MIS12 ~ 11。偏度(SK)、峰度(KG)、平均粒径(MZ)都表现出波动比较平稳、数值偏大, 显示湖泊水动力条件相对比较稳定, 沉积物以细砂、粉砂等稍粗颗粒为主, 分选较差。频率曲线以图 4-b 与 4-c 两种为主, 说明水动力条件变大, 由上一阶段的湖水深度较深变得较浅。总的来说, 本阶段气候要稍干一些, 部分时段有风成沉积物进入; 其他环境代用指标也都处在较低的水平, 后期波动增大。LR04 在 MIS11 阶段显示峰值较高, CK6 孔和若尔盖与本

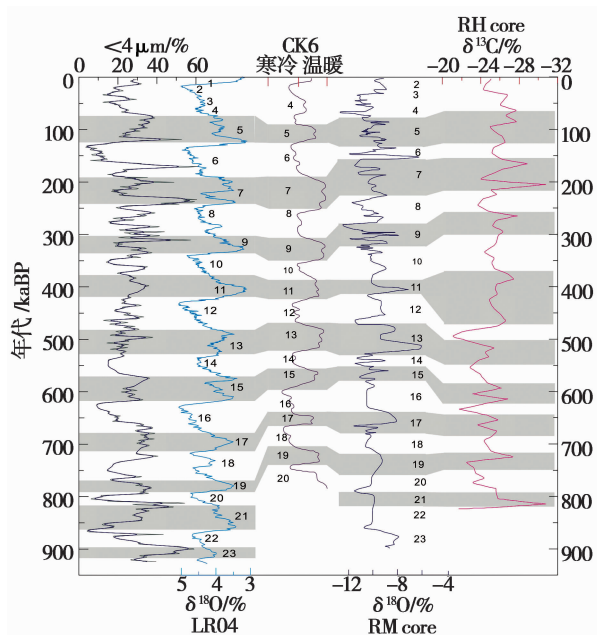


图 6 BDQ06 孔 <4 μm 粒径组分与其他地质记录对比

Fig. 6 <4 μm particle size composition in core BDQ06 with other geological records

钻孔记录相似,峰值相对较小(图 6)。对照前人的研究结论,构造累计效应使高原气候明显变干^[31],从而使本阶段沉积物中不仅有流水携带,还加入了风尘沉积物。

2 阶段(360 ~ 160 ka):本段 <4 μm 粒径组分百分含量出现几个较大的峰值,但都持续较为短暂的时间,与 MIS10 ~ 6 阶段相当。偏度(SK)、峰度(KG)、平均粒径(MZ)也都表现出同样的特征,标准偏差(σ_1)波动较为频繁,粘土含量峰值时期频率曲线以图 4-a 为主,谷值时期以图 4-c 为主,说明湖泊水体波动较为频繁;TOC、磁化率和色度 a^* 表现出对应的峰值,说明湿润期温度也较高,但峰谷交替频率较快,说明本区气候不稳定的特性,冷干暖湿交替变得较快。LR04 波动比之前稍有增大,CK6 孔由于分辨率较低只能显示这一阶段气候波动的峰值较高,而若尔盖盆地的沉积记录显示在 MIS10 ~ 9 阶段,环境指标在整体平稳的背景下波动较为强烈,且峰值较高,与本区记录相一致;同期的黄土沉积显示黄土—古土壤旋回更加醒目^[32]。施雅风等^[33]认为气候的波动可能是在构造隆升下高原气候系统剧烈调整的表现。构造隆升可能使高原充当了放大器的作用^[23,33-34],距今 360 ka 可能存在一次快速隆升^[23]。可能正是由于高原的隆升,使高原上升到了新的高度,激发了亚洲季风的深入,增加了高原的热源以及冷源的效应,使暖期更暖,冷期更冷,气候变得不太稳定。

1 阶段(160 ~ 5 ka):本段时间对应于 MIS6 晚期 ~ MIS1。在 160 ~ 120 ka,平均粒径(MZ)呈现出一个很大的谷值,偏度(SK)呈明显的负偏,峰度(KG)和标准偏差(σ_1)值都比较大,说明沉积物分选较差,以粗颗粒沉积为主,>63 μm 粒径组分百分含量达到 60% 以上;TOC、磁化率和色度 a^* 都为低值,说明该时段湖水较浅,湖区气候较为干旱,这可能与高原的进一步快速隆升有关^[23,35],使得印度季风难以北进,高原内部变得寒冷干燥;同时西伯利亚—蒙古高压加强,同期黄土沉积 L2 黄土颗粒较粗,磁化率值为低值,时间上对应于 MIS6 阶段。而在 120 ~ 80 ka,平均粒径(MZ)为一峰值,偏度(SK)为正偏,峰度(KG)和标准偏差(σ_1)都为较低的值,频率曲线以图 4-a 为主,说明此段湖水动力较弱,分选较好,沉积物

偏向细颗粒;TOC、磁化率和色度 a^* 都为相对的高值,但没有达到钻孔最大值,说明温度偏低,指示湖泊水体较深,湖区气候相对湿润,时间上对应于 MIS5 阶段。此后 <4 μm 粒径组分百分含量开始降低,偏度(SK)开始负偏,峰度(KG)和标准偏差(σ_1)逐渐增大,说明水动力增大,湖泊水体开始缩小,湖区气候变得干旱。在 40 ka 左右,<4 μm 粒径组分百分含量为一峰值,偏度(SK)为正偏,沉积物粒度偏细,说明湖泊水体出现短暂增大;TOC、磁化率和色度 a^* 都出现一个小的峰值,与 MIS3 阶段的暖湿气候期相对应^[36]。直到一万年以来,<4 μm 粒径组分百分含量呈现出上升趋势,相应的偏度(SK)也为正偏,标准偏差(σ_1)逐渐减小,说明湖水动能逐渐减小,分选性逐渐变好,指示湖泊水体逐渐增大,气候开始变得湿润;其他指标也呈现出升高的趋势,可能与全新世气候升温相一致。大约在距今 5 ka 左右湖泊被河流切穿,湖相沉积结束,转为河流相沉积。其他几个地质记录的变化特征整体上与本区域记录基本上保持一致,但每个阶段内部有不同变化,这也说明全球变化整体趋势是一致的,但不同地区都表现出明显的区域特征。

5 结 论

通过对可可西里边缘区古湖泊(BDQ06 孔)沉积物粒度的分析,初步得到以下结论。

1) 粒度与岩性有较好的对应关系,同时得到其他代用指标较好的支持,说明沉积物粒度可作为指示古环境变化的替代性指标。

2) BDQ06 孔沉积物粒度显示可可西里地区早更新世晚期至中更新世早期气候湿润,此后气候偏干,直至中更新世晚期出现快速干湿交替的变化特征,晚更新世经历了末次间冰期的湿润期,其它时段气候偏干。

3) BDQ06 孔湖泊沉积物粒度指标和深海氧同位素在整体趋势上较为一致,但也受区域气候变化影响,这可能与高原的抬升有一定关系,因此本区域气候与全球气候之间的关系研究有重要意义。

沉积物粒度是恢复古环境演化的一条有效途径,同时由于粒度沉积后受到其他影响因素较小,

测量简单、经济,受到不少学者的青睐。通过以上分析,可以看出粒度和岩性之间有很好的对应关系,能在一定程度上反映出湖泊水体的变化特征,但由于粒度在沉积过程中除受到湖泊本身因素影响外,还受到湖区其他一些因素的影响,如构造运动、短暂暴雨等,因此粒度指示的环境信息相对较为复杂。对于古环境的准确恢复,单一指标难免得出片面的结论,因此在分析过程中需要结合其他的气候指标进行相互印证。

参考文献:

- [1] Porter S C, An Z. Correlation between climate events in the north Atlantic and China during the lastglaciation[J]. *Nature*, 1995, 375: 305 – 308.
- [2] Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deepocean flow south of Iceland [J]. *Nature*, 1999, 39(7): 515 – 517.
- [3] Stocer T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis[C]// Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013
- [4] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 青藏高原隆升对中国构造地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 698 – 714.
- [5] 何蕾, 韩凤清, 韩文霞, 等. 青海可可西里地区勒斜武担湖水化学特征研究[J]. *盐湖研究*, 2015, 23(2): 28 – 33
- [6] 田庆春. 青藏高原腹地湖泊沉积记录的中更新世以来的气候变化[D]. 兰州: 兰州大学 2012.
- [7] 陈发虎, 王苏民, 李吉均, 等. 青藏高原若尔盖湖芯磁性地层研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1995, 25(7): 772 – 777
- [8] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 6093 – 6095
- [9] Langereis C G, Dekkers M J, de Lange G J, *et al.* Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes [J]. *Geophys. J. Int.* 1997, 129: 75 – 94.
- [10] Morner N A and Lanser J P. Gothenburg Magnetic Flip [J]. *Nature*, 1974, 251: 408 – 409.
- [11] 郝世祺, 张生, 李文保, 等. 内蒙古中部达里湖沉积物粒度及营养盐垂直变化特征[J]. *盐湖研究*, 2017, 25(2): 89 – 95.
- [12] Wang H, Liu H, Cui H. *et al.* Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironmental changes revealed by mineral – magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southeastern Inner Mongolia Plateau, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 170: 115 – 132
- [13] 陈荣彦, 宋学良, 张世涛, 等. 滇池 700 年来气候变化与人类活动的湖泊环境响应研究[J]. *盐湖研究*, 2008, 16(2): 7 – 12.
- [14] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录: 以沉积物粒度为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2003, 33(6): 563 – 568.
- [15] 王君波, 朱立平. 藏南沉错沉积物的粒度特征及其古环境意义[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(5): 459 – 467
- [16] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Jour. Sediment Petrol.*, 1957, 27(1): 3 – 26.
- [17] 曾方明, 张萍. 图解法和矩阵法计算西台吉乃尔盐湖沉积物粒度参数的差异[J]. *盐湖研究*, 2015, 23(3): 1 – 4, 22
- [18] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 31 – 143.
- [19] 孙永传, 李惠生. 碎屑岩沉积相和沉积环境[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [20] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 269 – 276.
- [21] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 晚冰期以来大柴旦盐湖沉积记录的古气候演变及其尘暴事件[J]. *盐湖研究*, 2019, 27(1): 39 – 53
- [22] 王中, 刘向军, 从禄. 青海湖东岸末次冰期冰盛期和早全新世沙漠范围重建[J]. *盐湖研究*, 2017, 25(2): 67 – 75
- [23] 薛滨, 王苏民, 夏威夷, 等. 若尔盖 RM 孔揭示的青藏高原 900kaBP 以来的隆升与环境变化[J]. *中国科学(D辑)*. 1997, 27(6): 543 – 547.
- [24] 崔之久, 吴永秋, 刘耕年. 关于“昆仑—黄河运动”[J]. *中国科学 D 辑*. 1998, 16(1): 53 – 60
- [25] Jansen J H F, Kuijpers A, Troelstra S R. A mid – Brunhes climatic event: long – term changes in global atmosphere and ocean circulation. *Science*, 1986, 232: 619 – 622.
- [26] 沈振枢, 程果, 乐昌硕, 等. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境[M]. 北京: 地质出版社. 1993.
- [27] 王苏民, 薛滨. 中更新世以来若尔盖盆地环境演化与黄土高原比较研究[J]. *中国科学(D辑)*. 1998, 26(4): 323 – 328.
- [28] 姚小峰, 郭正堂, 赵希涛, 等. 玉龙山东麓古红壤的发现及其对青藏高原隆升的指示[J]. *科学通报*, 2000, 45(15): 1671 – 1676
- [29] 陈诗越, 方小敏, 王苏民. 川西高原甘孜黄土与印度季风演化关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(8): 41 – 46
- [30] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985
- [31] 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. *地理学报*, 1999, 54(1): 10 – 20
- [32] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, *et al.* Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits [J]. *Quaternary Science Reviews*. 1994, 13: 39 – 70.
- [33] 施雅风, 汤慰苍, 马玉贞. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕

- 育关系探讨[J]. 中国科学(D 辑). 1998, 28(3): 263 – 271
- [34] Liu X D, Dong B W. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon – arid environment evolution [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 4277 – 4291, doi: 10. 1007/s11434-013-5987-8
- [35] 王书兵, 蒋复初, 傅建利, 等. 关于黄河形成时代的一些认识[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 705 – 714
- [36] Fan Q S, Lai Z P, Long H, *et al.* OSL chronology for lacustrine sediments recording high stands of Gahai Lake in Qaidam Basin, northeastern Qinghai – Tibetan Plateau [J]. Quat. Geochronol., 2010, 5: 223 – 227

Grain Size Characteristics and Their Environmental Significance of the Lacustrine Deposits in the Hinterland of Qinghai-Tibetan Plateau

TIAN Qing-chun¹, SHI Xiao-jing¹, SHI Pei-hong²

(1. College of Geographical Science, Shanxi Normal University, Linfen, 041000, China;

2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710119, China)

Abstract: In Hoh Xil area, the hinterland of Qinghai-Tibetan Plateau, by the analyses of the grain-size parameters and the comparison with other proxies of the BDQ06 core sediments, the authors researched the environmental evolution of this area since the Middle Pleistocene. The variation in grain-size parameters, as a good indicator for the variation in lake level, could further reflect the climate change of lake region. These environmental changes reflected by the grain-size of BDQ06 core sediments were well supported by other proxies and proved by other research results. The sediment grain size provides a new effective way to recover the climate changes. Furthermore, the climate change in this area was compared with the LR04 marine $\delta^{18}\text{O}$ record; the results indicated that there were very strong similarity on the scale of glacial-interglacial cycle, and there were also obvious regional differences. That means this area responded to global climate change with regional characteristics which might be related with the tectonic uplifting of Qinghai-Tibetan Plateau.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; Lake sediments; Grain-size characteristics; Climatic significance