J. Lake Sci.(湖泊科学), 2008, **20**(3): 291-297
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
©2008 by *Journal of Lake Sciences*

新疆博斯腾湖沉积物粒度的古环境意义初探*

黄小忠, 陈发虎, 肖　舜, 吕雁斌, 陈建徽, 周爱锋
(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘　要: 湖泊沉积物的粒度分析是一种研究古环境变化常用的手段, 但是其环境意义具有多解性, 尤其是沙(荒)漠干旱区的湖泊沉积物粒度变化, 代表的是沙尘天气的多寡强弱还是其它环境因素的变化值得细致研究. 在对我国最大的内陆淡水湖——新疆博斯腾湖的沉积物短岩芯进行了 ^{210}Pbex, ^{137}Cs 定年的基础上, 对近 50 多年沉积物的粒度进行分析, 结果表明平均粒径与粗颗粒含量与区域最大河流——开都河大山口站的最大一天洪量、洪峰流量、天山巴音布鲁克站年降水量、湖泊水位变化以及湖泊附近焉耆站 3–6 月风力强度变化记录等环境因素对比发现, 湖泊中部沉积物中粗颗粒含量变化主要反映的是入湖河流径流量、区域洪水强度及频率、山地降水, 而并不反映大风天气或者湖泊水位的变化. 对其近千年沉积岩芯的多指标分析结果表明, 即使在数百年时间尺度上, 博斯腾湖沉积物粒度的环境意义依然与十年时间尺度上一致.
关键词: 博斯腾湖; 粒度; 古环境; 洪水事件; 开都河

Primary study on the environmental significances of grain-size changes of the Lake Bosten sediments

HUANG Xiaozhong, CHEN Fahu, XIAO Shun, LV Yanbin, CHEN Jianhui & ZHOU Aifeng
(*Key Labratory of Western China's Environmental System*, *MOE*; *College of the Resource and Environmental Science*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *P.R.China*)

Abstract: Grain size analysis is a conventional method to explore paleo-environmental changes, but its environment significance has various explanations. Especially for the lake sediments preserved in dry-land area close to Gobi and desert, it is still unclear if the grain size represents the intensity and frequency of the dust weather or the other environmental indicators. Based on the ^{137}Cs and ^{210}Pbex activities from a short-length Glew core drilling from the center of Lake Bosten , the largest inland freshwater lake in China, grain size analysis of the past 50 years of lake sediments suggests that the average grain size and coarse grains content coincide with the maximum one-day runoff and the flood peak runoff at Dashakou station of Kaidu River, and with the annual precipitation of Bayinbuluke Station in the Tianshan Mts. However, the peaks of grain size curves were not consistent with lake level variations or wind speed changes (from March to June) of the Yanqi Station near to Lake Bosten. Therefore, the coarse grains content and average grain size can generally represent intensity and frequency of flood events of the Kaidu River and strong precipitation in the surrounding Tianshan mountainous area, but do not indicate lake level variations nor wind speed changes. A millennial multi-proxy record of Lake Bosten also suggests that the environmental significance from grain size at centennial or multi-centennial timescales is the same as that at annual to decadal timescales.
Keywords: Lake Bosten; grain size analysis; paleo-environment; flood event; Kaidu River

对于风成黄土沉积物中的粒度已经有很多、很好的研究成果, 研究者一般把黄土中石英颗粒大小作为冬季风强度指标[1]或者作为沙漠进退指示[2]. 对于湖泊沉积物中粒度的古环境意义也有很多报道, 不同的研究得出的结果存在较大差异, 一是将湖泊沉积物颗粒大小或者粗颗粒含量作为沙、尘暴的指标, 粗颗粒含量越多, 沙尘天气越强、越频繁[3-4], 或者作为冬季风的指标[5-6], 二是将粒度的大小作为湖泊水

* 国家自然科学基金(40701192)、西部环境创新群体项目(40421101)和国家自然科学基金重点项目(90502008)联合资助. 2007–04–13 收稿; 2007–05–19 收修改稿. 黄小忠, 男, 1977 年生, 博士; E-mail: xzhuang@lzu.edu.cn.

位变化的指标, 粒度越粗, 水位越低[7-11], 而对于水位变化也有相反的解释, 即粒度小指示湖泊水位低或气候干旱[12-13]; 三是将粒度作为降水量或来水量的指标, 来水量越大, 沉积物的颗粒越粗[14-16]; 也有的研究认为在冷干和暖湿条件下湖泊沉积物的粒度都会变粗, 而且近两千年会受到人类活动的影响[17]等等. 但是, 目前的研究在短尺度上对于湖泊岩芯粒度变化与现代环境过程记录的良好对照较少, 而在长尺度上利用多指标的分析结果来探讨粒度的古气候意义也比较欠缺. 尤其是对于沙(荒)漠边缘区的湖泊, 其沉积物粒度变化指示的究竟是风力、水位变化, 还是洪水事件目前不是很清楚. 新疆博斯腾湖是位于我国干旱区的少数大型淡水湖泊, 探讨其粒度的环境意义对于开展区域古环境研究具有重要意义.

1 研究区概况

博斯腾湖(41°56′–42°14′N, 86°40′–87°26′E)位于新疆天山中段南坡焉耆盆地的东南侧. 焉耆盆地北以高大的天山山脉与北疆相隔, 南以霍拉山–库鲁克塔格低矮山地与塔里木盆地相邻. 博斯腾湖湖面海拔约 1048m, 湖水面积约 1000km^2, 湖泊东西长约 55km, 南北宽约 25km, 平均水深 8m, 最大水深 16.2m, 流域面积约为 55600km^2, 是我国最大的内陆淡水湖泊. 博斯腾湖是一个吞吐型的湖泊, 主要由开都河补给, 其他一些补给河流属于季节性河流(图 1); 在自然情况下, 湖水经孔雀河从其西南角流出, 然后经过铁门关折而向东注入罗布泊[18]. 博斯腾湖近年来湖泊面积有扩大的趋势, 为施雅风先生等[19]提出的西北地区气候由暖干向暖湿转型的较好例证之一.

博斯腾湖处于典型内陆干旱气候区, 附近的博湖县气象站多年平均降水量仅 76mm, 但年蒸发量高于 2000mm. 干旱的气候条件造成整个焉耆盆地从上到下植被带类型简单, 包括冰雪带、高山垫状植被带、高山草甸带、草原带、荒漠草原带、荒漠带等, 缺乏森林植被带和亚高山草甸带. 另外, 隐域性植被也广泛分布, 如在山区的阴坡分布有呈片状的雪岭云杉林, 山区河谷两旁分布有白榆疏林, 盐碱地上生长的盐生植物以及湖岸浅水沼泽处为大片的芦苇、香蒲群系[20-21].

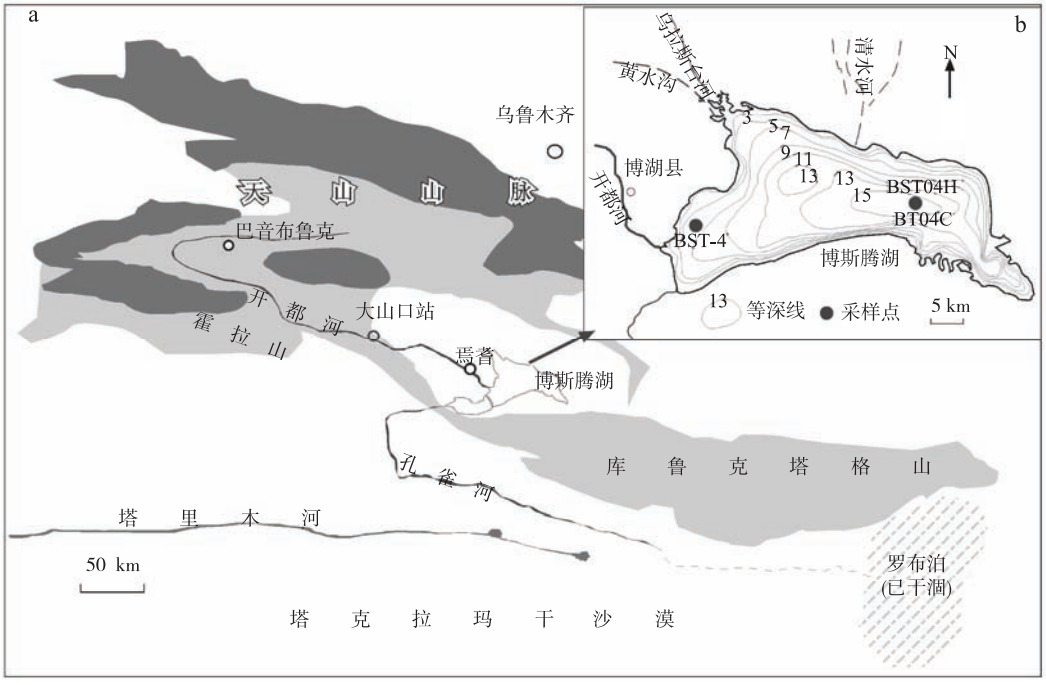


图 1 博斯腾湖流域水系(a); 湖泊等水深线和岩芯钻探点分布(b)

Fig.1 Map of Lake Bosten drainage river system (a); isobath and the drilling sites (b)

2 材料与方法

本研究主要采用位于湖泊中央水深 16.2m 处的 BST04H 孔岩芯和 BT04C 短岩芯为研究对象(图 1), BST04H 岩芯使用 Kullenberg 活塞钻获取, 岩芯顶底重叠以保证岩芯的连续, 最后获得 6.9m 长的完整岩芯, 岩芯就地冷冻后运回实验室后冷储于冷冻箱中, 后按 1cm 间隔分样, 在冷冻干燥机中干燥. BT04C 岩芯用 Glew corer 在靠近 BST04H 孔位置采集, 长 20cm, 无扰动, 该岩芯就地用分样器按 0.5cm 间隔进行分样, 并包装; 将这些样品冷冻干燥后全部送中科院南京湖泊与地理研究所沉积环境开放实验室进行 ^{210}Pbex 和 ^{137}Cs 的比活度的测量以计算沉积物的年代, 使用测量仪器为高纯锗低本底 γ 能谱仪.

样品粒度测量使用兰州大学西部环境教育部重点实验室的 Malvern MS 2000 型激光粒度仪, 前处理方法和 Peng 等[16]所描述一样, 采用加稀盐酸去碳酸盐, 加双氧水去有机质, 然后加分散剂超声波分散等程序进行. 仪器的平均粒径重复测量误差小于 2%. 样品经过前处理后, 去掉了可溶盐、可溶化学沉积和有机质, 基本能代表陆源碎屑物的粒度大小.

3 结果与讨论

3.1 年代结果

博斯腾湖短钻 BT04C 岩芯 0.5cm 间隔 ^{137}Cs 的测量结果(图 2A), 其变化过程和 2000 年在湖泊西部采集岩芯 BST-4 的 ^{137}Cs 变化过程[22]比较一致. 由于 BT04C 孔位于湖泊中心, 距离湖岸有数千米之遥, 因此其沉积速率要远低于浅水的位置. 陈发虎等[23]对博斯腾湖该孔 ^{210}Pbex 以及 ^{137}Cs 的变化过程进行了较为详细的讨论, 并且用该孔 ^{210}Pbex 测量结果计算并建立了岩芯年龄模式, 对百年尺度的小冰期气候进行了讨论. 由于本文要对近几十年的粒度记录与器测资料进行对比, 那么 ^{137}Cs 定年则较 ^{210}Pbex 定年略好. 通过与 BST-4 短岩芯 ^{137}Cs 变化细节的对比发现, 两个岩芯 ^{137}Cs 变化过程非常相似, 一些起伏基本可以对应(图 2). BT04C 岩芯 10.25cm 处与 BST-4 岩芯 15cm 处 ^{137}Cs 的底界基本对应(图 2A、B), BT04C 孔 10.25cm 以下 ^{137}Cs 还有一些波动, 可能为生物扰动、化学扩散及测量本底影响等原因所致. 考虑到 BST-4 孔和 BT04C 孔全新世以来湖相沉积物厚度(8.8m 和 5.56m)的差异[24], 两个岩芯 ^{137}Cs 底界的深度差异也比较合理, 所以, 将 BT04C 孔 10.25cm 处的年代可以大致定为 1950 年. 由于岩芯采自湖中心, 其短时间内深度沉积速率变化不大, 所以 10cm 以上年代按照线性关系计算. BST04H 孔年代用 ^{210}Pbex 比活度变化计算的年代和 2 个经过碳库校正的 C-14 年代建立, 详细讨论见文献[23].

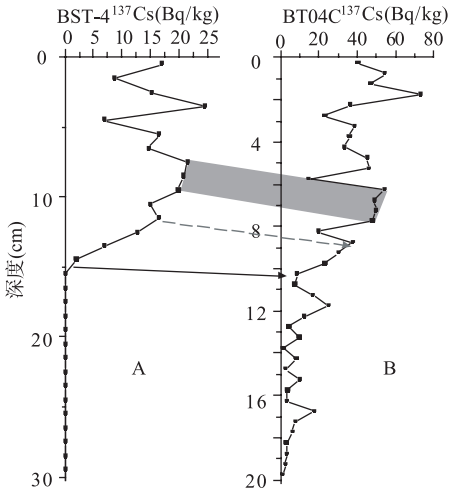


图 2 博斯腾湖 BST-4 孔岩芯[22]和 BT04C 孔岩芯 ^{137}Cs 测量结果对比
Fig.2 Comparison of the ^{137}Cs results of BST-4 core[22] and BT04C core

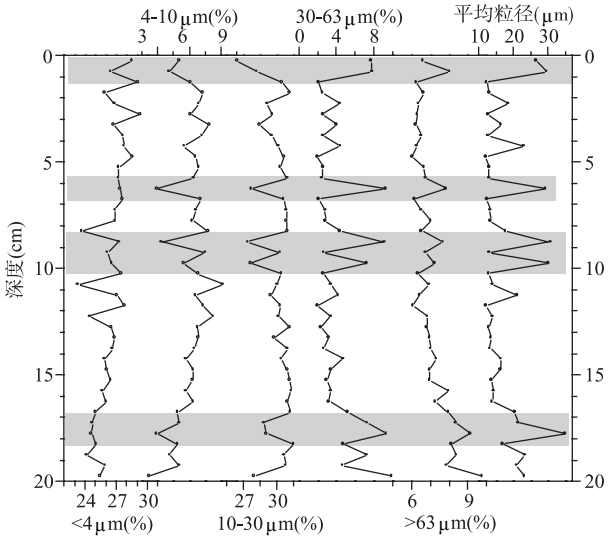


图 3 BT04C 岩芯不同粒径范围内颗粒含量变化以及平均粒径变化
Fig.3 Grain size variations of BT04C core

3.2 粒度及其环境意义分析

BT04C 短岩芯沉积物粒度分析结果表明其主要组成成分是粘土和中细粉砂, 平均粒径在 12.14–34.92μm之间变化, 而平均粒径的变化主要反映的是30–63μm以及大于63μm粗粉沙和砂颗粒含量变化, 而 4–30μm 粉沙的含量则与平均粒径变化有反向变化的关系, 小于 4μm 的颗粒含量变化与平均粒径的变化关系不明显, 平均粒径以及粗颗粒含量在岩芯顶部、6.25cm、8.75cm、9.75cm、17.75cm 等处都有明显的峰值(图 3).

根据前文讨论后建立的年代, 博斯腾湖湖泊中心岩芯粗颗粒含量变化与器测资料的对比(图 4). 样品中粗颗粒的含量峰值(图 4d)和开都河大山口站记录的最大一天径流量、洪峰流量以及开都河上游区巴音布鲁克站的年降水量(图 4a, b, c)有良好对应关系. 开都河大山口站位于中游峡谷出口处(图 1), 其洪峰流量主要反应上游山地降水强度, 这样的对应关系至少说明, 湖泊沉积物中粗颗粒的含量以及平均粒径变化与区域的降水量(主要是天山山地降水, 如巴音布鲁克地区)以及流域内河流(主要是开都河)的洪水强度和频率相关.

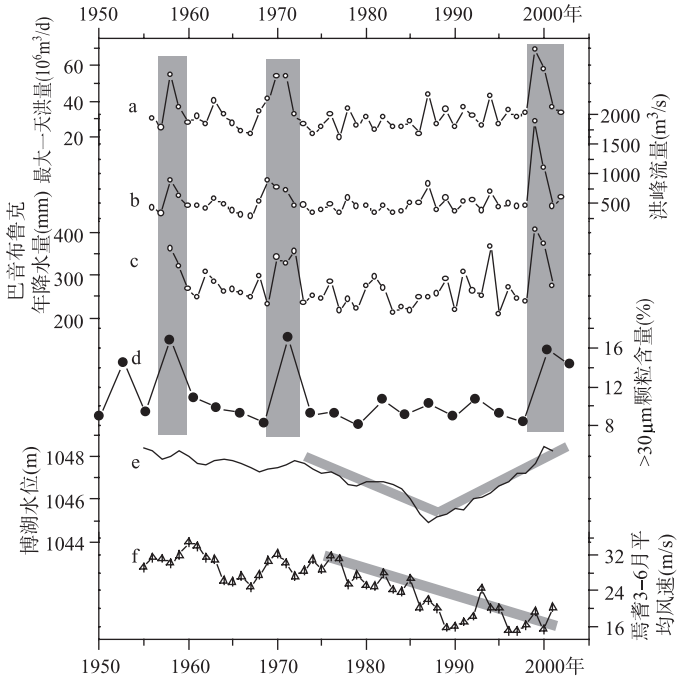


图 4 BT04C 岩芯 1950 年以来的粒度粗颗粒含量变化(曲线 d)与器测水文气象资料的对比
(a、b: 大山口水文站最大一天洪量、洪峰流量[25]; c: 巴音布鲁克站降水量;
e: 博斯腾湖湖泊水位变化; f: 焉耆站 3–6 月平均风速记录)

Fig.4 Comparisons the coarse grains (>30μm) content of the BT04C core (curve d) with the hydrological and climatic records: maximum one-day discharge (curve a) and flood peak runoff record (curve b) of the Dashankou station of Kaidu River[25], the annual precipitation of Bayinbuluke station (curve c), the lake level variation (curve d) and the average wind speed records (March to June) of Yanqi station (curve f)

已有的研究表明, 湖泊附近大风天气强度和频率、湖泊水位的变化会明显影响到粒度变化, 尤其是粗颗粒含量的变化, 风力越大, 水位越低, 则颗粒越粗[3-4,10-11,25], 这些影响因素作用的物理机制是勿庸置疑的. 但是, 具体到博斯腾湖是否适用这一规律呢? 通过岩芯中大于30μm粗颗粒含量的变化(图 4d)与湖泊水位变化记录(图 4e)[26]的对比发现, 湖泊水位在过去近 50 年中发生了大于 3m 幅度的变化, 这样的变

化相对于目前最深只有 16.2m 的湖泊来说可以说是显著的, 但是粒度中粗颗粒的含量却并没有反映出水位的变化, 在湖泊水位最低(1986 年)时并没有出现粗颗粒含量增加, 反而在高湖面的 1969 年、2000 年左右出现粗颗粒相对高含量, 与开都河洪水强度对应. 另外, 博斯腾湖西面焉耆站记录的区域风力变化过程(图 4f)显示, 过去近 50 年风力最强的 3–6 月平均风力与粒度变化也没有明显相关关系, 尤其是在过去 20 多年来, 风力大小明显呈逐渐减小的趋势, 南疆沙尘暴也呈明显减少趋势[27], 而粒度并无明显变化趋势, 而且在 2000 年左右粗颗粒含量峰值时, 当时风力却是近几十年最小. 因此, 博斯腾湖湖泊中心岩芯记录的粒度变化, 不能用近 50 年来水位和风力的变化来解释, 但良好的记录了区域内降水和洪水强度.

对洱海和程海的粒度分析研究表明, 在年到十年的尺度上湖泊沉积物粒度指示湖泊来水量的大小, 来水量越大, 粒度越粗; 但在百年、千年尺度上, 粒度大小仍然指示湖泊水位的变动, 水位低(干旱)时粒度较粗[25]. 博斯腾湖在百年到数百年时间尺度上粒度变化究竟代表什么环境意义呢? 对 BST04H 孔近千年的沉积物粒度分析表明, 沉积物粒度变化经历了明显的三阶段, 1000–1500AD 之间平均粒度较小, 粗颗粒含量较少, 而 1500–1900AD 之间二者同时增大, 1900AD 以来也粒度再度变小(图 5a, b). 与粒度变化耦合的是孢粉 A/C 比(图 5c)以及沉积物碳酸盐含量(图 5d)记录的区域有效湿度变化: 粒度较小时对应区域气候干旱, 而粗颗粒含量增加、粒度变粗对应于高有效湿度、区域气候湿润. 而与粗颗粒含量增加对应区域的其它记录是: 博斯腾湖下游的罗布泊在小冰期时面积广大[28]、古里雅冰芯积累量增加[29]以及塔里木盆地南缘的克里雅河在期间形成阶地、来水量增加[30]等, 这些记录皆表明区域内气候湿润, 湖泊来水量比今增加[23]. 因此, 在百年到数百年时间尺度上粒度变化主要还是记录湖泊的来水量大小.

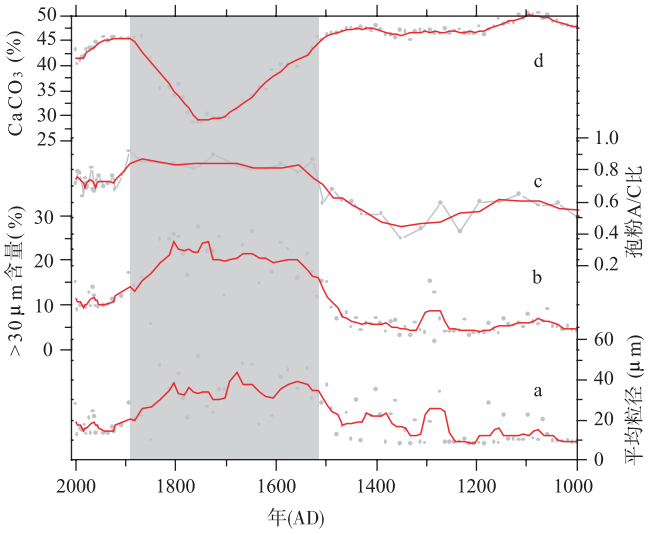


图 5 博斯腾湖近千年来粒度记录(a: 平均粒度; b: 粗颗粒含量, 曲线 5 点平滑)与其它指标(c: 孢粉 A/C 比, 曲线两点平滑; d: 碳酸盐含量, 曲线 5 点平滑)的对比

Fig.5 Comparison 1000 years of grain size records of Lake Bosten (curve a and b, 5 points adjacent averaging) to pollen A/C ratio (curve c, 2 points adjacent averaging) and carbonate content (curve d, 5 points adjacent averaging)

3.3 讨论

位于半干旱—半湿润区的岱海沉积物粒度记录了小冰期发生的尘(沙)暴事件[3]; 但对岱海沉积物粒度新的研究表明, 粒度中粉沙的含量以及中值粒径的大小指示季风降水强度[16]. 位于干旱区柴达木盆地的苏干湖粒度粗颗粒含量可能也记录了区域的粉尘事件[4]. 而在研究青海湖的粒度与孢粉记录时发现孢粉所指示的早、中全新世 1000 多年的湿润气候所对应的粒度仍然比较粗[17], 对该湖自生碳酸盐氧同位素的记录表明在 1650–1950AD 的湿润期内湖泊水位上升, 沉积物的粒度也较粗[15]. 对位于湿润地区的开口

湖—镜泊湖以及台湾的大鬼湖的粒度研究也表明, 沉积物粒度大小能够代表区域的降水和干湿状况, 降水越少、气候越干, 则粒度越小[31,12]; 然而, 同样是湿润区对济州岛西南泥质区近 2300 年的粒度敏感组分却记录了区域的冬季风强度[32], 云南的程海和洱海则记录了水位变化与区域干湿状况, 湿度越大、水位越高则粒度越细[7-8]. 因此, 沉积物的粒度记录有可能指示区域来水量, 但是其环境指示意义需要其它一些指标进行综合分析.

为什么位于干旱区的博斯腾湖在年际到数百年时间尺度上主要反映区域强降水和洪水事件, 而不是通常认为的粉尘事件或水位变化呢? 首先博斯腾湖面积辽阔, 岩芯位于湖盆的中心, 风力难以将较大的颗粒仪悬移方式长距离搬入湖心. 其次, 由于库鲁克塔格山以及霍拉山的阻挡作用, 焉耆盆地的风力远较塔里木盆地小, 并且由于博斯腾湖本身对于区域气候有改善作用, 沙尘天气也较周围区域少很多[33]. 因而, 对于博斯腾湖中心的沉积物而言, 记录风力和沙尘天气的能力较弱. 第三, 由于博斯腾湖是一个开口湖泊, 在野外考察时也没有发现湖泊阶地, 历史上没有高湖面出现, 因此较低的粗颗粒含量和较小的平均粒径很难用高湖面来解释, 因而仅能解释为区域干旱少雨. 此外, 由于区域内天山山地降水比较丰富, 导致博斯腾湖周围地区洪水频发[34], 强的径流反而有利于将岸上以及浅水地带的粗颗粒物质带入湖泊中心沉积. 因此, 历史记载的洪水事件, 如 1958 年、1969 年、1999 年、2000 年等都在沉积岩芯粒度记录中都表现为粗颗粒含量的增加.

4 结论

综合而言, 通过短尺度上与器测资料的对比以及长尺度上多指标的分析, 位于干旱区的博斯腾湖湖泊中心岩芯样品的平均粒度以及粗颗粒(粗粉沙和砂)含量变化, 在年际到数百年时间尺度上更可能代表了区域来水量变化以及洪水发生的强度和频度.

致 谢: 兰州大学靳立亚教授提供了部分资料, 张成君教授等参与了部分野外工作, 作者在此特致谢忱.

5 参考文献

[1] Xiao JL, Porter SC, An ZS *et al*. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130000 yr. *Quaternary Research*, 1995, **43**(1): 22-29.

[2] 丁仲礼, 孙继敏. 联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标. 中国科学(D 辑), 1998, **29**(1): 82-87.

[3] 金章东, 王苏民, 沈 吉等. 岱海地区近 400 年来的"尘暴"事件——来自岱海沉积物粒度的证据. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 193-198.

[4] Qiang MR, Chen FH, Zhang JW *et al*. Grain size in sediments from Lake Sugan: a possible linkage to dust storm events at the northern margin of the Qinghai–Tibetan Plateau. *Environmental Geology*, 2006, **51**(7): 1229-1238.

[5] Xiao JL, Inouchi Y, Kμmai H *et al*. Eolian quartz flux to Lake Biwa, Central Japan, over the past 145000 years. *Quaternary Research*, 1997, **48**: 48-57.

[6] 胡 刚, 王乃昂, 罗建育等. 花海湖泊古风成砂的粒度特征及其环境意义. 沉积学报, 2001, **19**(4): 462-467.

[7] 陈敬安, 万国江. 云南洱海沉积物粒度组成及其环境意义辨识. 矿物学报, 1999, **19**(2): 175-182.

[8] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 云南程海沉积物粒度研究. 环境科学进展, 1999b, **7**(4): 76-82.

[9] 李志明, 吕金福, 冷雪天等. 大布苏湖全新世沉积岩芯的粒度特征与湖面波动. 东北师大学报(自然科学版), 2000, **32**(2): 117-122.

[10] 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. 地理科学进展, 2002, **21**(5): 459-467.

[11] 类延斌, 张成君, 尚华明等. 青藏高原东北部希门错湖岩芯粒度特征及其环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 2006, **26**(3): 31-39.

[12] Chen ATC, Lou JY, Wann JK. Preliminary paleoclimatological records from high mountain lakes in Taiwan. *TAO*, 1993, **4**(3): 321-329.

[13] 蒋庆丰, 刘兴起, 沈 吉. 乌伦古湖沉积物粒度特征及其古气候环境意义. 沉积学报, 2006, **24**(6): 877-882.

[14] Campbell C. Late Holocene lake sedimentology and climate change in southern Alberta, Canada. *Quaternary Research*, 1998,

49: 96-101.

[15] 张家武, 金 明, 陈发虎等. 青海湖沉积岩芯记录的青藏高原东北部过去 800 年以来的降水变化. 科学通报, 2004(1): 10-14.

[16] Peng YJ, Xiao JL, Nakamura T *et al*. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**: 467-479.

[17] 刘兴起, 王苏民, 沈 吉. 青海湖 QH—2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义. 湖泊科学, 2003, **15**(2): 112-117.

[18] 程其畴. 博斯腾湖研究. 南京: 河海大学出版社, 1995: 1-7.

[19] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 219-226.

[20] 许英勤, 阎 顺, 贾宝全等. 天山南坡表土孢粉分析及其与植被的数量关系. 干旱区地理, 1996, **19**(3): 24-30.

[21] 黄小忠, 赵 艳, 程 波等. 新疆博斯腾湖表层沉积物的孢粉分析. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 602-609.

[22] 张成君, 曹 洁, 类延斌等. 中国新疆博斯腾湖全新世沉积环境年代学特征. 沉积学报, 2004, **22**: 494-499.

[23] 陈发虎, 黄小忠, 张家武等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究. 中国科学(D 辑), 2007, **37**(1): 77-85.

[24] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖记录为例. 第四纪研究, 2006, **26**(6): 881-887.

[25] 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. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 563-568.

[26] 夏 军, 左其亭, 邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用——理论·方法·实践. 北京: 科学出版社, 2003: 42-85.

[27] 王 旭, 马 禹, 陈洪武等. 南疆沙尘暴气候特征分析. 中国沙漠, 2003, **23**(2): 147-151.

[28] 加帕尔·买合皮尔, 图尔苏诺夫 AA(主编). 亚洲中部湖泊水生态学概论. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1996: 149.

[29] 姚檀栋, 秦大河, 田立德等. 青藏高原 2ka 来温度与降水变化—古里雅冰芯记录. 中国科学(D 辑), 1996, **26**(4): 348-353.

[30] Yang XP, Zhu ZD, Jaekel D *et al.* Late Quaternary palaeoenvi-ronment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China: the relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in foreland desert regions. *Quaternary International*, 2002, **97/98**: 155-166.

[31] 侯新花, 吴艳宏, 杨丽原. 全新世镜泊湖粒度特征记录的该地区古降水变化历史. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 605-614.

[32] 向 荣, 杨作升, Saito Y 等. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化. 中国科学(D 辑), 2006, **36**(7): 654-662.

[33] 宋其瑞. 博斯腾湖气候效应初探. 干旱区地理, 1989, **12**(3): 28-32.

[34] 田文成主编. 博湖县志. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1993: 73.