

孙华杰, 臧淑英, 孙德尧, 等. 呼伦湖沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 地理科学, 2018, 38(9): 1570-1578. [Sun Huajie, Zang Shuying, Sun Deyao et al. Grain-size Characteristics and Their Environmental Significance of Hulun Lake Sediments. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(9): 1570-1578.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.09.021

呼伦湖沉积物粒度特征及其环境指示意义

孙华杰, 臧淑英, 孙德尧, 张科, 孙丽

(哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要:通过对呼伦湖湖心沉积岩芯粒度机械组成和频率分布曲线的分析, 辅以²¹⁰Pb年代测定, 重建了1865~2016年粒度演变特征并揭示其环境指示意义。研究表明: 湖心沉积物主要为粉砂和黏土, 中值粒径同粗粉砂和砂组分显著正相关, 在垂直剖面上表现为减小、波动变化和增大的变化趋势。应用对数正态分布函数对粒度频率曲线进行拟合, 提取出大气粉尘源、湖心相标志组分和风沙尘暴组分3个环境敏感组分。粒度机械组成与环境敏感组分的垂向特征变化同历史时期的湖泊水位变化、降水量强度变化, 及沙尘暴事件较为一致, 能够较好的重建150 a来湖区气候干湿变化和风沙活动特征, 可用于恢复区域环境变化历史。

关键词: 粒度; 频率分布曲线; 环境意义; 沉积物; 呼伦湖

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2018)09-1570-09

湖泊是流域陆源物质的主要汇集地, 湖相沉积物具有剖面保存完整、连续性好、分辨率高、沉积速率快等特点, 是记录湖区人类活动、自然环境与气候变化的重要历史档案^[1-3]。沉积物中的粒度是不同沉积动力机制下湖泊接纳多种物源的综合反映, 是揭示沉积环境和区域气候变化的重要指示器, 因其受生物扰动较小、物理意义明确、对环境变化响应敏感等优势被广泛应用于古环境重建研究中^[4-7]。近年来, 众多学者通过分析湖泊柱状沉积岩芯中的粒度机械组成及参数指标, 反演湖区历史气候干湿变化特征、水动力搬运强度以及湖面水位高低变化等信息^[8-11]。亦有学者依据粒度频率曲线的多组分、多模态的分布特征提取环境变化的敏感粒度组分, 判别沉积过程中的搬运介质和搬运方式的变化, 进而揭示历史时期的风沙运移状况与尘暴事件^[12, 13]。近年来, 众多学者尝试利用不同湖泊沉积粒度记录对第四纪不同时段的环境和气候变化开展了大量工作^[3-6]。然而, 由于缺乏湖泊不同粒度组分沉积过程及其与环境关系的认识, 很多结果仍存在不确定性。百年尺度由

于有详实的气象数据和文献资料参考, 成为理解湖泊沉积物粒度沉积过程及其环境意义的关键时段。尤其是对处于中高纬度地区和东亚季风边缘区的呼伦湖, 开展相关古环境研究的重要意义更为凸显。

呼伦湖地处内蒙古呼伦贝尔草原的西部地区, 是中国北方第一大淡水湖, 对中国北方地区的生态安全意义重大^[14]。目前针对呼伦湖沉积物的研究多集中在营养元素分布、重金属含量特征等近现代环境污染指标的评价研究等方面^[15-18], 以及孢粉、介形虫等古环境重建研究^[19-21]。王静洁、李畅游等^[22]利用粒径-标准偏差法与主成分分析法相结合, 对呼伦湖沉积物中环境敏感粒度组分进行了提取, 但对沉积物粒度特征进行分析并对其指示的沉积环境意义的研究还比较少见。本文以采自呼伦湖湖心的沉积柱为研究对象, 通过分析沉积物粒度机械组成、粒度参数、频率曲线及利用对数正态分布函数拟合对其敏感组分进行提取等方法, 较为全面系统地分析总结沉积物的粒度特征, 深入探讨呼伦湖沉积物粒度的环境学意义。

收稿日期: 2018-04-12; **修订日期:** 2018-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(41571199, 41401589)、黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(2017-KYYWF-0139)资助。
[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41571199, 41401589), Basic Scientific Research Business Expenses Foundation of Heilongjiang Provincial Institution of Higher Education (2017-KYYWF-0139).]

作者简介: 孙华杰(1983-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 主要从事湖泊沉积学方面的研究。E-mail: 41454532@qq.com

通讯作者: 孙丽, 讲师。E-mail: sunli_wabb@163.com

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

呼伦湖位于内蒙古自治区呼伦贝尔市西端, 117°00'10"~117°41'40"E, 48°30'40"~49°20'40"N。呼伦湖湖盆东边是大兴安岭山脉, 西边及南边是蒙古高原。湖面呈不规则斜长方形, 长轴为东北至西南方向, 长度为93 km, 最大宽度为41 km, 湖周长447 km, 湖水面积2 339 km²。平均水深5.7 m, 最大水深10 m。湖区气候为温带半干旱大陆性季风气候, 春季干旱, 多大风, 夏季温和雨水集中, 秋季气温急降, 无霜期短。平均气温为-0.24℃, 年平均相对湿度68%, 年降水量为268 mm, 76%的降水集中在6~9月。湖水补给除直接受大气降水外, 主要依靠地表径流和地下水的补给。主要入湖河流为西南部的克鲁伦河、东南部的乌尔逊河及北部的新开河^[23]。此外, 湖北边的达兰鄂木罗河在洪水季节或丰水年份, 海拉尔河通过该河道补给呼伦湖。直至1958年末, 在达兰鄂木罗河上筑坝建闸后, 切断了湖泊与海拉尔河的水力联系^[24]。

1.2 样品采集与实验分析

2016年8月应用活塞式柱状采样器在呼伦湖近湖心处(117°25'42.67"E, 48°58'32.48"N), 采得平

行柱状沉积岩芯3根(图1)。近湖心处较少受人类活动干扰和入湖河流的影响, 采样过程控制采样器最大限度垂直于水面, 所采沉积岩芯能够较真实地反映该湖区自然环境的变化。3根岩芯长度介于75~78 cm之间, 表层呈现灰黑色, 有机质含量较高, 表层以下为深灰色软泥和黏土, 纹理较为清晰。在野外现场按1 cm间隔连续切割分样, 随即放入聚乙烯自封袋中, 密封保存, 带回实验室储存在4℃的冰箱中冷藏以备分析测试。选取其中长82 cm岩芯(HLA)主要用于现代沉积物中²¹⁰Pb测年分析, 长78 cm岩芯(HL)用于粒度等参数的测定。利用 Advantage EL-85 真空冻干机进行冻干, 去除里面的砾石、植物残体等杂质, 混合均匀、研磨、过120目筛, 放在聚乙烯塑封袋中保存备用。

沉积岩芯年代测定分析仪器为美国 EG & GORTEC 公司生产的由高纯锗井型探测器与 ORTEC 919 型谱控制器和计算机构成的 16K 多道分析器所组成的γ谱分析系统。采用中国原子能研究院和英国利物浦大学提供的²¹⁰Pb定年标样进行结果比对与校正。粒度分析使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行分析测定, 测量范围为0.02~2 000 μm, 重复测量的相对误差小于5%。所有样品测试分析均在哈尔滨

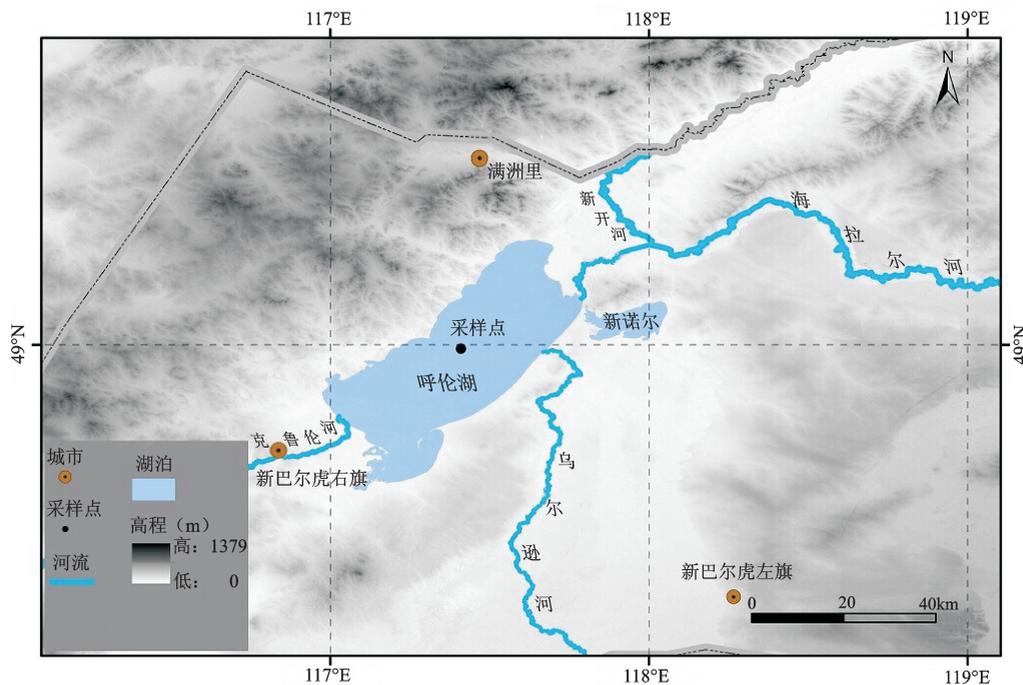


图1 研究区位置及采样点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of the sampling sites

师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室完成。按照 Udden-Wentworth 标准将呼伦湖沉积物岩芯粒度机械组成的粒级划分为黏土 (<4 μm)、粉砂 (4~64 μm) 和砂 (>64 μm)，其中粉砂进一步分为细粉砂 (4~16 μm) 和粗粉砂 (16~64 μm)^[25,26]。

2 结果与讨论

2.1 沉积岩芯年代序列建立

为建立呼伦湖沉积岩芯的过去环境信息年谱,选取沉积物中的²¹⁰Pb进行年代测定,具体测定及分析方法详见参考文献[15]。依据采样时间将呼伦湖表层沉积物年代定为2016年,通过²¹⁰Pb CRS模式计算得出HL沉积岩芯78 cm处的初始年代为1865年,即HL沉积岩芯记录了150 a来的湖泊演化历史。该测年结果与前人通过¹⁴C对呼伦湖沉积岩芯78 cm处定年约为距今3 300 a B.P.的结果存在较大偏差^[9],测年结果的较大差异主要是受到不同测年方法量程尺度差异的影响。

2.2 粒度机械组成与参数特征

呼伦湖沉积物粒径分布在0.02~200 μm 之间,岩性粒度总体较细。其中黏土、细粉砂和粗粉砂为主导粒径组分,分别占10.7%~44.4%、18.2%~57.9%和9.5%~57.5%,砂含量相对较少,仅占到0~15.8%,平均值分别为28.1%、38.2%、30.6%和3.1%。根据谢帕德三角图解法命名,属于粉质-亚黏土。从粒度组成上看呼伦湖沉积物粒度与同在内蒙古地区的陈普海子湖^[27]粒度机械组成相近,略粗于中国南方的安固里淖^[28]、巢湖^[3],细于干旱地区的乌梁素海^[29]。

HL沉积岩芯平均粒径(M_z)在10.5~34.5 μm 之间,与粗粉砂和砂显著正相关(0.69、0.57, $P < 0.01$),与黏土和细粉砂显著负相关(-0.66、-0.60, $P < 0.01$);中值粒径(M_d)范围是4.6~30.5 μm ,其与粒度机械组成的相关系数明显高于平均粒径,分别为0.92、0.93、-0.89、-0.86, $P < 0.01$, M_z 和 M_d 的结果均表明沉积物的总体粒径分布特征在一定程度上是由较粗颗粒组分决定的。标准差(Sd)的大小表示沉积物颗粒粗细的均匀程度,沉积岩芯样品Sd的变化范围为1.41~1.87,属差到极差的分选,反映了复杂的沉积环境。沉积物样品偏态(Sk)变化范围为-1.68~0.67,平均值-0.36,超过75%的样品Sk均为负值,说明样品多为负偏态,沉积样品中相

对富集粗粒组分。样品峰度(Kg)值变化范围为-0.82~1.57,平均值-0.27,总体而言峰态多中等和尖窄峰,反映颗粒相对集中。

2.3 粒度含量垂向分布特征

中值粒径是沉积物粒度分布中最主要的参数之一,被广泛应用于沉积环境重建研究^[6,7]。本研究中 M_d 同 M_z 相比,与粒度机械组成各组分具有更为显著的相关关系,最为能够代表HL沉积岩芯粒度的垂向分布特征。为深入探究呼伦湖岩芯粒度的历史变化,从而揭示其环境意义,依据 M_d 的变化特征将呼伦湖150 a来的沉积序列划分为3个环境变化阶段(图2),即自岩芯底部至52 cm, M_d 粒级以细颗粒为主且变化相对稳定;51~28 cm, M_d 变化剧烈且频繁;27 cm至表层, M_d 粒级呈波动性增大趋势。为进一步验证3个沉积阶段划分的合理性,采用方差分析对呼伦湖3个沉积阶段各粒度机械组成进行含量差异性判别,结果表明黏土、细粉砂、粗粉砂和砂含量在28 cm以下的2个沉积阶段均不存在显著性差异($P=0.087$ 、0.169、0.883、0.090),而在27 cm以上,4个粒度组分的含量分别同其下2个沉积阶段呈现显著的差异性($P < 0.05$)。

沉积阶段 I (78~52 cm, 沉积时间为1865~1968年):该阶段处于呼伦湖沉积的早期阶段,中值粒径为7.93 μm ,粒径小于岩芯整体中值粒径10.68 μm 。颗粒物机械组成以细颗粒为主,黏土、细粉砂、粗粉砂含量分别为(33.11 \pm 1.43)%、(39.26 \pm 0.91)%、(26.83 \pm 2.11)%,砂含量所占比重较少,仅为(0.8 \pm 0.16)%。黏土、细粉砂含量呈波动性增加趋势,粗粉砂呈波动性减小趋势,而砂含量变化较为稳定,中值粒径与粗粉砂含量变化一致。

沉积阶段 II (51~28 cm, 沉积时间为1969~1992年):该阶段中值粒径为8.66 μm ,较上阶段呈不显著增加趋势($P > 0.05$),但仍小于整体中值粒径。粒度组成仍以细颗粒为主,黏土、细粉砂、粗粉砂和砂含量分别为占(29.46 \pm 1.49)%、(41.98 \pm 1.39)%、(26.38 \pm 1.90)%、(2.18 \pm 0.36)%。粒度机械组成变化剧烈且频繁,黏土和细粉砂、粗粉砂和砂均表现出相似的变化趋势,且这两大粗细组分呈反向变化。中值粒径与砂和粗粉砂含量变化一致,在34 cm和46 cm处出现2个峰值,并在其峰值两边呈波动性变化,呈增大-减小-增大-减小变化特征。

沉积阶段 III (27 cm~表层, 沉积时间为1993~

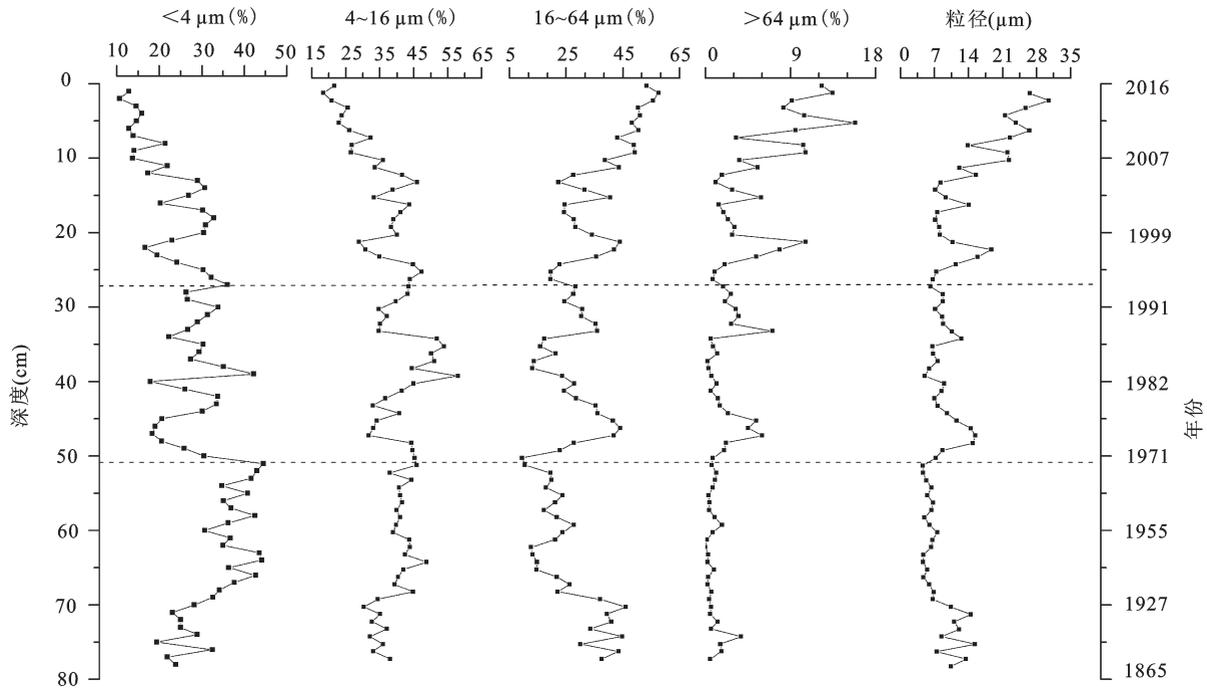


图2 呼伦湖HL沉积岩芯沉积物粒度机械组成垂向分布
 Fig.2 Vertical profile of grain size compositions of HL sediment core in Hulun Lake

2016年):中值粒径为15.17 μm,均显著性大于沉积阶段 I 和 II ($P<0.05$),粒度组成以粗粉砂为主,黏土、细粉砂、粗粉砂和砂含量分别为占(22.11±1.49)%、(33.57±1.66)%、(38.28±2.32)%、(6.04±0.85)%。该阶段沉积物粒径粗化特征明显,粗粉砂和砂呈显著增大趋势,黏土和粉砂含量趋于减小。

2.4 粒度频率曲线提取

沉积物粒度频率曲线是判断沉积作用形式的重要手段之一,频率曲线峰态变化常反映了沉积作用形式的变化^[30]。沉积动力学研究发现由于搬运方式和搬运距离不同,产生多成因组分的存在,单成因组分的频率分布为单峰曲线,多成因组分的频率曲线是多峰分布的连续曲线。湖盆作为一个开放的沉积区,主要接纳来自湖泊流域内入湖河流和地表径流输入的风化碎屑物以及更大范围内风力搬运的粉尘颗粒。由于物源的多源性和搬运动力的复杂性、多变性,湖泊沉积物粒度频率曲线往往呈双峰甚至多峰分布^[31-33]。

利用对数正态分布函数^[34]对呼伦湖沉积岩芯所有样本的粒度频率曲线进行拟合,提取环境敏感组分(图3),从多组分混合沉积物中分离出单一组分的含量和中值粒径,探讨不同组分的沉积机理和指示意义。呼伦湖沉积剖面粒径由细到粗

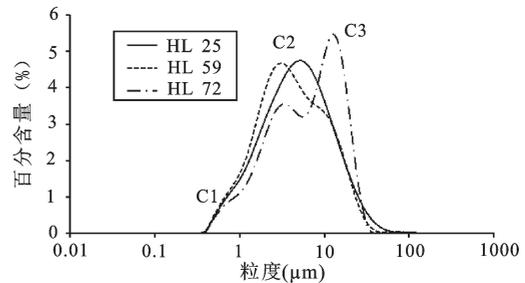


图3 呼伦湖HL沉积岩芯沉积物粒度频率曲线代表类型
 Fig.3 Typical types of frequency curves of HL sediment core in Hulun Lake

依次提取出C1、C2、C3这3个环境敏感组分,各组分贡献率百分含量变化范围分别为0.75%~12%、23.3%~98.7%、2.7%~71.7%。

C1组分普遍存在于所有沉积物样品中,其众数粒径变化为0.6~1.2 μm,平均贡献率为4%。作为一种超细粒组分,可以在湖水中长时间悬浮,并且在湖心区域按照一定速率沉降到湖盆中^[32],该组分出现在多数湖泊沉积物中^[35,36],为大气中长期悬浮的超细粉尘和气溶胶,通过大气干湿沉降和地表径流进入湖泊水体^[33]。C2组分众数粒径变化范围为5~12 μm,平均贡献率为64%,是细粒物质含量的控制因素。根据已有研究^[3,8],C2组分可作为

搬运距离的替代性指标,湖泊水位越高,搬运距离越远,是湖心相沉积物优势组分,是识别湖心相的标志之一,可间接指示湖泊水位的变化。C3组分众数粒径在21~53 μm ,平均贡献率为32%,变化趋势与中值粒径一致。湖泊作为相对稳定的静水水体,对风沙物质具有良好的保存性^[37],干旱-半干旱地区湖泊沉积物粒度在揭示沙尘天气事件方面具有很大的潜力,其粗颗粒含量及中值粒径大小可以指示历史时期沙尘天气发生的频率和强度^[38]。呼伦湖位于中国北方半干旱地区,受季风作用显著,除流水作用沉积外,湖区所在地呼伦贝尔草原面临严重的沙化问题,沉积物中势必存在局地风沙物质的输入,因此C3组分指示了风力作用的强弱,可揭示区域性风沙活动,特别是尘暴降尘历史。

2.5 粒度频率曲线垂向分布特征

呼伦湖沉积物粒度频率分布曲线中均在0.5~0.7 μm 存在一个细尾,说明含有少量黏土,除在部分剖面呈现单峰正态分布,表明沉积环境较为稳定外,其余处都呈现出明显双峰特征,由此反映出呼伦湖沉积作用表现为2种不同营力的综合或同一营力不同强度沉积的混合作用^[6]。呼伦湖水体补给除大气降水和少量地下水外,主要来自于乌尔逊河、克鲁伦河,河流在补给过程中携带大量泥

沙入湖,造成湖泊沉积物的多物源供应;加之呼伦湖位于中国半干旱地区,受冬季风影响显著,湖水受风的作用较强,湖滨侵蚀强烈;湖水冰冻期年平均达5个月之久,春季多风沙,部分较粗颗粒随湖面的融化自然沉降,导致了沉积物频率曲线分布的复杂性。沉积剖面中各敏感组分的贡献率变化如图4所示。

沉积阶段 I :呼伦湖沉积物频率曲线双峰特征显著,主要表现为2种峰型交替出现。第一种峰型:主峰出现在37~50 μm 之间,偏向于粗粉砂端,次峰出在5~8 μm 之间,与主峰差异悬殊,分布表现为陡窄峰。第二种双峰态,主峰偏于位于8~11 μm 附近,粒度组成以细粉沙为主,次峰位于30 μm 附近,含有部分粗粉砂,分布形态属宽中峰。C3在此阶段贡献率为32.74%,呈波动性减小的趋势,C1、C2贡献率较为稳定分别为3.8%和63.46%。

沉积阶段 II :在25~30 cm、35~40 cm、49 cm、50 cm频率曲线表现为单峰正态分布,粒度组成高度集中于峰形中间的细粉沙粒级,峰值在9 μm 附近。峰形两端的黏土和砂含量较低,分布形态接近于正态。其他剖面双峰特征显著。C2在此阶段贡献率处于较高阶段70.44%,C1稳定在3.73%,C3贡献率较低为25.83%波动性变化趋势明显。

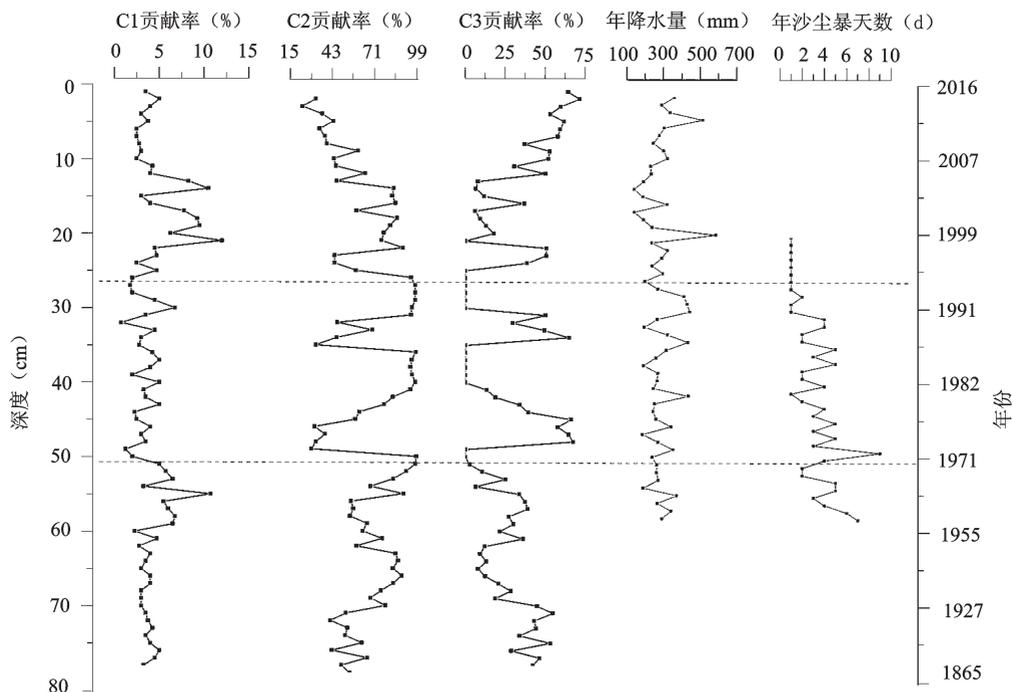


图4 呼伦湖HL沉积物环境敏感粒度组分贡献率和影响因素垂向分布

Fig.4 Vertical profile of the contributions of environmentally sensitive grain-size component and their impact factors of HL sediment in Hulun Lake

沉积阶段Ⅲ:频率曲线双峰特征明显,主峰与次峰交替变化,波动频繁。C3贡献率最高33.22%呈逐渐增大趋势,C1贡献率稳定在4%左右,C2贡献率在42.39%,呈波动性减少。

2.6 呼伦湖粒度指示环境变化历史

湖泊沉积物的粒度组成及其变化情况是记录过去区域环境和气候变化的良好代用指标。已有研究^[3,26]指出,湖泊沉积物颗粒的粗细变化可以反映湖面的收缩和扩张,进而可指示湖区气候的干湿变迁。粗粒沉积物指示湖泊收缩、湖水较浅的干旱气候期;细粒沉积物指示湖泊扩张、湖水较深的湿润气候期。在湖泊沉积过程中,降雨量的变化也可通过影响地表径流强度而在相当程度上决定着进入湖泊的陆源颗粒物的粗细和多少。降水量大的年份,地表径流发育,其剥蚀和搬运能力增强,沉积物粒径增大;降水量小的干旱年份,地表径流贫乏,粗颗粒物质难以搬运至湖泊,沉积物粒径减小。同时湖泊沉积物粒度在揭示沙尘天气事件方面具有很大的潜力,并且粗颗粒含量及其中值粒径大小可以指示历史时期风力作用下的大气尘埃物质入湖状况,即可以指示沙尘天气发生的频率与强度。综合呼伦湖沉积物粒度特征及文献记载的有观测以来1961~2005年呼伦湖湖区年降水量^[23]、1959~2016年满洲里水文观测站的水位、流量资料,及呼伦贝尔市14个站点尘暴降尘资料^[24],呼伦湖区域气候干湿变化、风沙活动特征如下:

沉积阶段Ⅰ,1865~1968年(78~52 cm):黏土含量为一高值段,粒度组成以细颗粒为主,砂含量较低。此阶段频率曲线双峰特征明显,说明入湖物质来源复杂多样。粒度频率曲线提取的敏感组分C1贡献率最为稳定,C2组分呈波动性增大趋势,存在2个峰值,说明该阶段湖泊水位趋于增大,反映该阶段气候湿润,整体水位较高,处于扩张阶段。但是该阶段的沉积初期1865~1902年(78~73 cm),沉积岩芯砂含量较高,占整个阶段砂含量的49.4%,说明在此阶段湖泊水位下降,湖水物理动能增加,沉积物颗粒变粗,该结果与同期C2组分贡献率的相对低值相一致。据资料记载呼伦湖在清末时期,湖水干涸,湖面大面积萎缩,只剩下几个小水泡和大量的湿地。1908~1968年(74~52 cm),粗粉砂总体含量总体减少,黏土细粉砂含量增加,该阶段呼伦湖水位处于上升期,到1962年湖面面积为20世纪90年代以来最大,C2组分贡献率达到研究

时段内首个高值。敏感组分C3贡献率存在2个峰值,与内蒙古地区尘暴事件几个主要发生阶段1820~1880年及20世纪60年代的记载相一致。

沉积阶段Ⅱ,1969~1993年(51~28 cm):此阶段粒度机械组成呈波动变化,黏土含量变低,细粉砂和砂含量增加,岩芯沉积物仍以细颗粒为主,中值粒径与粗粉砂、砂质含量变化趋势一致。频率曲线也相应呈现单峰和双峰交替出现特征,其中正态单峰频率曲线粒度集中于粉砂组分,峰形两侧的黏土和砂含量较低。C1组分贡献率仍相对稳定,C2组分贡献率总体较高,平均值达72.57%,存在2个持续高值区。呼伦湖水位达到1962年有记载以来最高水位后虽有所降低,但仍保持在19世纪50年代的水位,且高于20世纪初,故此阶段虽然气候不稳定,有数次波动,但湖泊水位仍处于较高阶段,C2组分贡献率变化主要受季风气候及年降水强度的影响,与同期年降水量变化相一致(图4)。其中1971年(47 cm)和1983年(34 cm)砂含量突然增加,气象资料显示这2 a呼伦湖地区降水量较大,强降水及上游来水使得流水的搬运能力增强,导致更多的粗颗粒进入湖中。1995~1991年(30~25 cm)、1983~1987年(40~35 cm)2个阶段粒度频率曲线呈单峰形态、C3贡献率较低,反映了此段沉积物搬运力的单一性,沉积粒度变化主要受河水补给影响。C3在此阶段贡献率最低为23.84%,呈波动性变化。该阶段尘暴降尘的频率与沉积物中C3的贡献率变化大体一致,通过对该时期C3组分贡献率和年沙尘暴日数做相关分析,结果呈显著正相关($P < 0.05$),据县志记载呼伦贝尔在20世纪90年代全市沙尘暴发生日数最少,70年代和80年代的绝大多数年份发生的沙尘暴日数大于多年平均值。

沉积阶段Ⅲ,1994~2016年(27 cm~表层):黏土和粉砂含量处于相对低值,沉积物中值粒径明显变大,砂含量约占6.1%左右,标准差增大。频率曲线为主次双峰,沉积物向粗颗粒方向移动,多数偏度为负偏窄峰。C2和C3组分贡献率呈反向变化特征,C2组分的减小趋势为主导作用,反映出该时期气候暖干化趋势严重,水位大幅度下降,湖泊水域面积萎缩,风沙活动加剧。进入20世纪90年代以来,呼伦湖水位逐年下降,特别是21世纪初至今减少幅度最大,到2009年水位已经下降了约4.6 m,水域面积缩减了477 km²,比历史最大面积2 339 km²

缩减了20%。C3组分贡献率在此阶段呈逐渐演化的趋势,平均含量处于高值;2015年(2 cm)存在明显突出的贡献,与内蒙地区2015年经历较大沙尘暴的记载相一致。同时由于过度放牧,呼伦贝尔沙化土地面积已经达到130 000 km²,上升为中国第四大沙地,湖水水位的下降,地表风沙侵蚀作用加强是20世纪90年代以来呼伦湖沉积物粒径变粗的主要原因。但在1993年(25 cm)和2001年(17 cm)黏土含量突然增加,与此时的年均降水量较低,水动力变弱,流水的搬运能减小有关。而在1998年(22 cm)为岩芯砂含量最大值,1998年呼伦贝尔的降水量较大,其流域出现了大洪水,河水流速增大,各水系注入湖区的同时携带大量泥沙入湖,被雨水带入呼伦湖的泥土和砂砾急剧增加,从而使沉积物的粒径变粗。

3 结论

对呼伦湖湖心柱状岩芯沉积物150 a来粒度机械组成及频率曲线进行分析,得到如下结论:

1) 呼伦湖沉积物中粉砂和黏土为优势组分,砂含量较低,属粉质亚黏土。自1865年以来黏土和细粉砂含量呈显著性减小趋势,粗粉砂和砂含量呈显著性增大趋势,黏土含量变化最为稳定,而砂含量变化的波动性逐渐增大。

2) 通过对数正态分布函数对粒度频率曲线进行拟合,共提取3个环境敏感粒度组分,C1组分粒径变化为0.6~1.2 μm,平均贡献率为4%,普遍存在于所有沉积物中,为大气中长期悬浮的超细粉尘和气溶胶入湖源;C2组分粒径变化为5~12 μm,平均贡献率为64%,是湖心相标志组分;C3组分粒径为21~53 μm,平均贡献率为32%,可揭示区域性的风沙活动。

3) 呼伦湖岩芯沉积物粒度特征变化趋势同历史同期的湖泊水位变化、降水量强度变化,及沙尘暴事件较为一致,能够较好的重建湖区气候干湿变化和风沙活动特征,可用于恢复区域环境变化历史。

致谢:感谢解瑞峰在样品采集、张因因和张家伟在沉积物定年过程中的帮助。

参考文献(References):

[1] 孙丽,臧淑英,肖海丰,等. 连环湖他拉红泡重金属和营养元素的沉积记录[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 99-103.

- [Sun Li, Zang Shuying, Xiao Haifeng et al. Sedimentary record of heavy metals and nutrient elements in core sediments from Talahong sub-lake in the Lianhuan Lake. *Geography and Geo-Information Science*, 2010,26(4): 99-103.]
- [2] 王小雷,杨浩,赵其国,等. 云南滇池近现代沉积速率及气候干湿变化的粒度记录[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 161-171. [Wang Xiaolei, Yang Hao, Zhao Qiguo et al. Modern sedimentation rates and dry-humid change inferred from grain size records in Dianchi Lake, Yunnan Province. *Geographical Research*, 2011,30(1): 161-171.]
- [3] 徐利强,徐芳,周涛发. 巢湖沉积物粒度特征及其沉积学意义[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1318-1324. [Xu Liqiang, Xu Fang, Zhou Taofa. Grain-size features of lacustrine sediments from Chahu Lake and its sedimentary implications. *Scientia Geographica Sinica*, 2015,35(10): 1318-1324.]
- [4] Chen J A, Wan G J. Sediment particle size distribution and its environmental significance in Lake Erhai, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1999,18(4): 314-320.
- [5] Liu X X, Vandenberghe J, An Z S et al. Grain size of Lake Qinghai sediments: Implications for riverine input and Holocene monsoon variability[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016,449: 41-51.
- [6] 何华春,丁海燕,张振克,等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学, 2005,25(5): 590-596. [He Huachun, Ding Haiyan, Zhang Zhenke et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 590-596.]
- [7] 周建超,吴敬禄,曾海鳌. 新疆喀纳斯湖沉积物粒度组分所揭示的环境特征[J]. 地球科学与环境学报, 2016,38(6): 859-868. [Zhou Jianchao, Wu Jinglu, Zeng Haiao. Environmental characteristics inferred from sediment sensitive grain-size component records in Kanas Lake of Xinjiang. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016,38(6): 859-868.]
- [8] 殷志强,秦小光,吴金水,等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J]. 第四纪研究, 2008,28(2): 345-353. [Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jinshui et al. Multimodal grain-size distribution characteristics and formation mechanism of lake sediments. *Quaternary Sciences*, 2008,28(2): 345-353.]
- [9] 侯战方,陈诗越,孟静静,等. 近1200 a来黄河下游梁山泊沉积记录的环境变迁[J]. 湖泊科学, 2018,30(1): 245-255. [Hou Zhanfang, Chen Shiyue, Meng Jingjing et al. Environmental changes in the lower reaches of Yellow River area during the last 1200 years revealed by multiple proxies from the Lake Liangshanpo. *Journal of Lake Sciences*, 2018,30(1): 245-255.]
- [10] Xiao J L, Chang Z G, Si B et al. Partitioning of the grain-size components of Dali Lake core sediments: Evidence for lake-level changes during the Holocene[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009,42(2): 249-260.
- [11] Xiao J L, Fan J W, Zhou L et al. A model for linking grain-size component to lake level status of a modern clastic lake. *Journal*

- of Asian Earth Sciences, 2013,69: 149-158.
- [12] Street-Perrott F A, Holmes J A, Waller M P et al. Drought and dust deposition in the west African Sabel: A 5500-year record from Kajamarum Oasis, Northeastern Nigeria. *The Holocene*, 2000,10(2): 293-302.
- [13] 强明瑞, 陈发虎, 周爱锋, 等. 苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究[J]. 第四纪研究, 2006,26(6): 915-922. [Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhou Aifeng et al. Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Suga Lake sediments, north Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2006,26(6): 915-922.]
- [14] 张娜, 乌力吉, 刘松涛, 等. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015,29(7): 192-197. [Zhang Na, Wu Liji, Liu Songtao et al. The characteristics of climate change and its influence on water area of Hulun lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015,29(7): 192-197.]
- [15] 孙德尧, 臧淑英, 孙华杰, 等. 近150年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2018,37(1): 137-147. [Sun Deyao, Zang Shuying, Sun Huajie et al. Pollution history and potential ecological risk assessment of heavy metals in core sediments in Hulun Lake during the past 150 years. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018,37(1): 137-147.]
- [16] 李卫平, 李畅游, 贾克力, 等. 内蒙古呼伦湖沉积物营养元素分布及环境污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2010,29(2): 339-343. [Li Weiping, Li Changyou, Jia Keli et al. Distribution of nutrient elements and environmental pollution assessment in sediment of Hulun Lake, Inner Mongolia. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 339-343.]
- [17] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 呼伦湖沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010,29(1): 157-162. [Zhang Xiaojing, Li Changyou, Zhang Sheng et al. Distribution features and ecological risk assessment of heavy metals in superficial sediments of Hulun Lake. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010,29(1): 157-162.]
- [18] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014,35(3): 951-957. [Chuai Xiaoming, Yang Liuyan, Cheng Shubo et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun. *Environmental Science*, 2014,35(3): 951-957.]
- [19] Wen R L, Xiao J L, Chang Z G et al. Holocene precipitation and temperature variations in the East Asian monsoonal margin from pollen data from Hulun Lake in northeastern Inner Mongolia, China[J]. *Boreas*, 2010,39(2): 262-272.
- [20] Wen R L, Xiao J L, Chang Z G et al. Holocene climate changes in the mid-high latitude monsoon margin reflected by the pollen record from Hulun Lake, northeastern Inner Mongolia[J]. *Quaternary Research*, 2010,73, 293-303.
- [21] Zhai D Y, Xiao J L, Zhou L et al. Holocene East Asian monsoon variation inferred from species assemblage and shell chemistry of the ostracodes from Hulun Lake, Inner Mongolia[J]. *Quaternary Research*, 2011,75, 512-522.
- [22] 王静洁, 李畅游, 赵胜男, 等. 呼伦湖沉积物中环境敏感粒度组分提取[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(2): 105-114. [Wang Jingjie, Li Changyou, Zhao Shengnan et al. The extraction of the environmentally sensitive grain size composition in the sediment of Hulun Lake. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017,28(2): 105-114.]
- [23] 赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报, 2008,28(3): 1064-1071. [Zhao Huiying, Wu Liji, Hao Wenjun. Influences of climate change to ecological and environmental evolution in the Hulun Lake wetland and its surrounding areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(3): 1064-1071.]
- [24] 秦伯强, 王苏民. 呼伦湖的近期演变及其与气候的关系[J]. 干旱区资源与环境, 1993,6(2): 2-9. [Qin Boqiang, Wang Sumin. Hulun Lake's recent changes and their responses to the climate. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1993,6(2): 2-9.]
- [25] Prins M A, Postma G, Weitjue G. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the Late Quaternary: the Makran continental slope[J]. *Marine Geology*, 2000,169: 351-371.
- [26] 于瑞雪, 李畅游, 李文宝, 等. 内蒙古达拉诺尔湖湖泊沉积物中敏感粒度组分沉积环境及地层分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2016,36(3): 77-82. [Yu Ruixue, Li Changyou, Li Wenbao et al. Sedimentary environmental and stratigraphic analysis of the sensitive grain size components from the Dalai Nur Lake deposits, Inner Mongolia. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2016,36(3): 77-82.]
- [27] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌. 内蒙古河套地区陈普海子湖泊沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(5): 137-144. [Wang Jingzhong, Wu Jinglu, Zeng Haiao. Grain-size characteristics and its environmental significance of Lake Chenpuhai sediments in Hetao Plain, Inner Mongolia. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2014,34(5): 137-144.]
- [28] 姜加明, 吴敬禄, 沈吉. 安固里淖沉积物记录的气候环境变迁[J]. 地理科学, 2004,24(3): 346-351. [Jiang Jiaming, Wu Jinglu, Shen Ji. Lake sediment records of climatic and environmental change in Anguliniao Lake. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(3): 346-351.]
- [29] 马龙, 吴敬禄, 温军会, 等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 2013,31(4): 646-652. [Ma Long, Wu Jinglu, Wen Junhui et al. Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013,31(4): 646-652.]
- [30] 孙千里, 周杰. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001,21(1): 93-95. [Sun Qianli, Zhou Jie. Grain-size characteristics of Lake Daihai sediments and its paleoenvironment significance. *Marine Geology and Quaternary*

- Geology, 2001,21(1): 93-95.]
- [31] Bagnold R A, Barndorff-Nielsen O. The pattern of natural size distributions[J]. *Sedimentology*, 1980,27(2): 199-207.
- [32] 肖舜, 陈发虎, 强明瑞, 等. 青海苏干湖表层沉积物粒度分布模式与大气粉尘记录[J]. *地理学报*, 2007,62(11): 1153-1164. [Xiao Shun, Chen Fahu, Qiang Mingrui et al. Distribution pattern of grain size in surface sediments from Sugan Lake and its potential in recording Aeolian dust in arid China. *Acta Geographica Sinica*, 2007,62(11): 1153-1164.]
- [33] 李华勇, 张虎才, 陈光杰, 等. 云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2017,35(3): 499-506. [Li Huayong, Zhang Hucai, Chen Guangjie et al. The grain size distribution characteristics of surface sediments from plateau lakes in Yunnan Province and their environmental significances. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017,35(3): 499-506.]
- [34] Qin X G, Cai B G, Liu T S. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60,000 years before present[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005,110(B1): B01204.
- [35] Chen F H, Qiang M R, Zhou A F et al. A 2000-year dust storm record from Lake Sugan in the dust source area of arid China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118 (5): 2149-2160.
- [36] Qiang M R, Liu Y Y, Jin Y X et al. Holocene record of eolian activity from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 589-595.
- [37] 薛积彬, 钟巍. 干旱区湖泊沉积物粒度组分记录的区域沙尘活动历史:以新疆巴里坤湖为例[J]. *沉积学报*, 2008,26(4): 648-654. [Xue Jibin, Zhong Wei. Variations in dust event reflected by grain-size component of lacustrine records in droughty area case study on Barkol Lake, Xinjiang, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008,26(4): 648-654.]
- [38] 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[J]. *湖泊科学*, 2000,12(3): 193-198. [Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji et al. Dust-storm events in Daihai Lake ares, Inner Mongolia during the past 400 years: evidence from grain-size analysis of lake sediments. *Journal of Lake Sciences*, 2000,12(3): 193-198.]

Grain-size Characteristics and Their Environmental Significance of Hulun Lake Sediments

Sun Huajie, Zang Shuying, Sun Deyao, Zhang Ke, Sun Li

(Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, Heilongjiang, China)

Abstract: Grain-size evolution characteristics and their environmental significance of Hulun Lake sediments were investigated since 1865 to 2016. The sediment core with a length of 78 cm was collected in the center of the lake in August 2016. Mechanical compositions of grain-size and frequency distribution curves were measured by the grain-size analyzer “Mastersizer 2000”. Based on accurate dating by ^{210}Pb , the regional environment and climate changes of the Hulun Lake according to the vertical profile of sediment grain sizes, which provides a new effective way for recovering the century-scale climatic changes. The results indicate that: sediments were mainly composed of silt and clay, and significant positive correlation were found between the contents of median grain-size and coarse silt and sand. Contents of median grain-size showed the changes of decrease, fluctuation and increase from the bottom to top of the sediment core. Three environmental sensitive components of atmospheric dust, eulimnetic facies, dust storm were identified by the method of log-normal distribution. Good agreements were found among the changes of grain-size, sensitive components, lake water levels, precipitations, and dust events. The results indicated that the current study well reconstructed the history of dry and wet climatic changes and wind-sand activities characteristics.

Key words: grain-size; frequency distribution curve; environmental significance; sediments; Hulun Lake