

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.05137

# 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

汪敬忠<sup>1,2</sup>, 吴敬禄<sup>1</sup>, 曾海鳌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**对河套地区陈普海子湖泊及其流域不同类型表层沉积物的粒度特征进行了分析,并结合放射性同位素<sup>210</sup>Pb测年,探讨了湖泊的沉积演变过程。通过主成分分析,对沉积物剖面粒度不同粒级组分含量进行了研究,分析了湖泊沉积物的物质来源,得到两个主控因子F1和F2,它们控制了湖泊沉积物近98.68%的粒度变化特征。研究表明,F1代表了以6.18 μm为众数粒径的次总体,主要受流水作用控制;而F2为以42.75 μm为众数粒径的次总体,主要来源于地表风沙作用。通过粒径-标准偏差方法,提取了湖泊沉积物中不同时期的环境敏感粒度组分,结果表明:在1996AD之前,流水作用所携带的细颗粒(<14.1 μm)决定了沉积物的粒度特征,在1960—1985AD期间表现出风沙活动强烈;1996AD以来,由于人类开展了大规模的沙荒土地开垦,流沙活动强烈,流域风沙活动所携带的粗颗粒(14.1~224.35 μm)控制了沉积物的粒度组成。

**关键词:**沉积物;粒度特征;环境变化;陈普海子

中图分类号:P512.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2014)05-0137-08

湖泊沉积物记录了湖泊及其流域内环境变化的信息。湖泊对气候的波动变化敏感,同时又是流域陆源物质的储存库,具有较高的沉积速率,能真实地记录湖区在较长的地质历史时期各种气候和其他环境变化的信息。湖泊沉积的连续性及其剖面保存的完整性,使其成为揭示湖区古气候和环境变化的指示器<sup>[1-2]</sup>,而沉积物粒度作为重建古环境的重要指标,广泛应用于古环境研究之中<sup>[3-5]</sup>。

研究表明,干旱-半干旱地区的湖泊沉积物能够良好地记录过去风沙活动发生的频率、强度以及流域的自然环境<sup>[6]</sup>,其粒度组成是地质历史时期干旱事件和风沙活动的良好指标<sup>[7-8]</sup>。在干旱-半干旱地区,湖泊除了接受地表径流搬运来的流域物质,还接纳风力输送来的物质,其进入湖中直接参与沉降,这两种不同动力机制所带来的沉积物必然会对沉积物的粒度组成产生影响<sup>[6,9]</sup>,而通过对湖泊沉积物粒度组成的分析则可以将两者分离开来<sup>[8]</sup>。因此,内陆干旱-半干旱地区的湖泊沉积可成为研究过去区域风沙活动的重要信息档案。本文主要通过陈普

海子沉积物的粒度变化特征,并结合流域不同类型的表层沉积物粒度特征,揭示该湖泊的沉积环境,为河套地区湖泊的沉积演化与合理利用湖泊资源提供参考资料。

## 1 湖区概况与分析方法

### 1.1 湖区概况

陈普海子位于内蒙古自治区巴彦淖尔盟市磴口县,是河套平原地区的一个封闭湖泊,西部为乌兰布和沙漠,南邻黄河,北部为阴山山脉,其海拔高度为1 033 m,面积约为2.65 km<sup>2</sup>,最大水深3.2 m(图1)。湖泊是由黄河改道而形成的河迹洼地湖,湖盆形状表现为“倒三角形”,湖底地势总体上比较平坦,深水区位于中北部,目前其补给来源主要为河套灌区的农业灌溉退水,东部为湖泊的入水口,西部为出水口,湖泊水位相对稳定。全新世以来,周边沉积地层是由湖沼河流相向黄河泛滥相过渡的沉积物,主要岩性为黄色黏土与粉细砂互层<sup>[10]</sup>。湖水矿化度达4.3 g/L,属微咸水湖,其阳离子K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量分别为27.6、1 072.2、27.4、320.0 mg/L;阴离子HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>含量分别为20.1、8.7、812.4、1 045.9 mg/L,水化学类型为Cl<sup>-</sup>-Na<sup>+</sup>。湖区属

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2012CB956102);西部之光人才培养计划项目(XBBS201106);王宽城博士后基金(20110491752)

作者简介:汪敬忠(1986—),男,博士生,主要从事湖泊沉积与环境演化方面的研究,E-mail:myjingzhong@163.com

收稿日期:2013-09-21;改回日期:2013-12-04. 文凤英编辑

温带大陆性干旱半干旱气候,气候干燥,降水较少,是中国北方东部季风气候区的边缘区域。其年均气温约  $6.8 \sim 7.6^{\circ}\text{C}$ , 温度年(日)变幅差异很大;年降水量为  $105.0 \sim 144.6 \text{ mm}$ , 夏季降水量约占全年降水量的  $65\%$ ;平均相对湿度  $47\%$ , 年蒸发量大;风势强烈,平均风速  $3 \text{ m/s}$ , 大风频繁,  $\geq 8$  级大风日数  $7.9 \sim 28.3 \text{ d}$ , 年沙暴日  $20 \text{ d}$ , 沙尘天气主要出现在 2—6 月份, 占全年的  $58.5\%$ , 冬季次之, 秋季最少<sup>[11-12]</sup>。

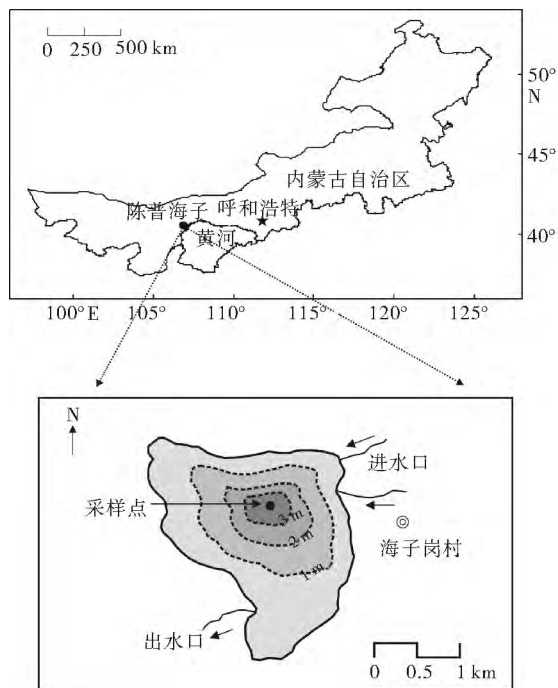


图 1 陈普海子以及沉积岩心点位的地理位置

Fig. 1 Location of Lake Chenpuhaizi and coring site

## 1.2 样品采集

2012 年 8 月在陈普海子湖心 ( $40.65471^{\circ}\text{N}$ ,  $106.82136^{\circ}\text{E}$ , 图 1) 水深  $3.2 \text{ m}$  处, 用重力采样器平行采集湖泊沉积物岩心 2 个 (CP1, 柱长  $58 \text{ cm}$ ; CP2, 柱长  $84 \text{ cm}$ ), 表层沉积岩心未受扰动。CP1 孔在野外现场按  $1 \text{ cm}$  间隔分样, 共分 84 个子样品, 均按顺序编号装入塑料袋中密封保存; CP2 孔在野外现场按  $1 \text{ cm}$  间隔分样, 共分 58 个子样品, 并按顺序编号保存于聚乙烯自封口塑料袋中, 以备室内进行  $^{210}\text{Pb}$  同位素测年。

此外, 还采集了陈普海子流域不同类型的表层沉积物 5 个, 采样点位置及沉积物属性见表 1, 所有样品及时运回实验室后置于温度为  $4^{\circ}\text{C}$  冰箱中冷藏以备分析测试。

表 1 湖区流域不同类型的表层沉积物样品

Table 1 Surficial samples from lake watershed

样品编号	纬度 N	经度 E	沉积物属性
H1	$40.41926^{\circ}$	$107.16234^{\circ}$	黄河河漫滩表层沉积物
H2	$40.62332^{\circ}$	$106.85433^{\circ}$	渠道岸边表层沉积物
H3	$40.63881^{\circ}$	$106.99794^{\circ}$	裸露的农田表层沉积物
H4	$40.67781^{\circ}$	$106.9006^{\circ}$	草地表层沉积物
H5	$40.66688^{\circ}$	$106.64996^{\circ}$	沙丘地表层沉积物

## 1.3 年代测定

$^{210}\text{Pb}$  法是最常用的测定  $100 \sim 150$  年来湖泊沉积年代和速率的放射性同位素方法<sup>[13]</sup>, 其方法为:  $^{210}\text{Pb}$  的放射性比活度是通过 C 谱分析系统直接分析  $465 \text{ keV}$  处的 C 射线能谱得到, 而  $^{210}\text{Pb}$  的母体同位素  $^{226}\text{Ra}$  通过分析  $352 \text{ keV}$  处的 C 射线能谱得到; 分析仪器为美国 EG & G Ortec 公司生产的低本底高纯锗  $\gamma$  能谱仪井型探测器 (HPGe GWL 120-15) 测定;  $^{226}\text{Ra}$  标准样品由中国原子能研究院提供,  $^{210}\text{Pb}$  标准样品由英国利物浦大学做对比标准, 测试误差小于  $10\%$ 。

## 1.4 粒度测定

沉积物样品经冷冻干燥后, 取样品  $0.13 \text{ g}$  左右, 加入  $10 \text{ mL}$  浓度为  $10\%$  的  $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $10 \text{ mL}$  浓度为  $10\%$  的稀  $\text{HCl}$  分别去除样品有机质及碳酸盐, 并加入  $10 \text{ mL}$  分散剂 (浓度为  $5\%$  的六偏磷酸钠溶液) 超声波振荡, 将振荡后的样品采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测量<sup>[14]</sup>, 各粒级组分平行分析误差小于  $5\%$ , 实验操作于中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室进行。

## 2 结果分析

### 2.1 沉积物年代序列

大气中的  $^{210}\text{Pb}$  通过干、湿沉降进入水体, 蓄积在沉积物中, 沉积物中蓄积的这部分  $^{210}\text{Pb}$  因不与其母体  $^{226}\text{Ra}$  共存和平衡, 通称为过剩  $^{210}\text{Pb}$  (标记为  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ), 通过沉积物岩心中不同层节样品的  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度分析, 便可计算沉积速率或某一层节的沉积年龄。利用  $^{210}\text{Pb}$  计年有两种方法: (1) 常量初始浓度 (CIC) 模式; (2) 恒定补给速率 (CRS) 模式<sup>[15-16]</sup>。前者适用于当沉积物沉积时单位质量沉积物携带和

捕获的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 数量恒定、沉积速率恒定时,一定质量深度的沉积物中, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度也将随该层节的质量深度成指数衰减关系的情况。后者通常用于当 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 输入通量保持恒定,而沉积物堆积速率可能随时间变化的情况<sup>[13]</sup>。由于河套地区陈普海子沉积物主要来源于风沙作用和黄河的泥沙,沉积速率有较为明显的变化,CIC模式较难反映出沉积速率随时间的变化,因此,使用CRS恒定补给模式计算从而得到陈普海子岩心0~55 cm处不同深度的沉积速率,55 cm后采用外推法(平均沉积速率为0.2 cm/a),进而推算出整个岩心深度与年代的对应关系(图2)。

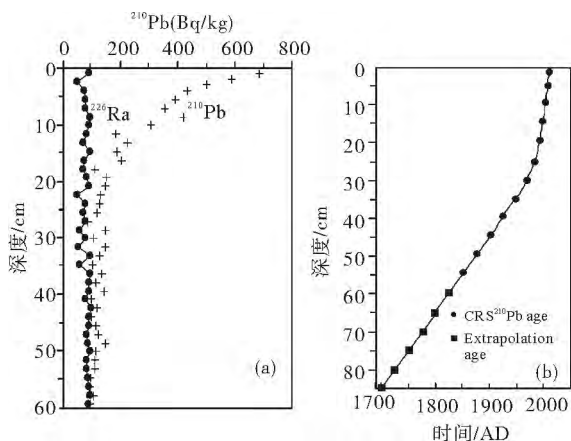


图2 陈普海子湖泊沉积物剖面总 $^{210}\text{Pb}$ 、

$^{226}\text{Ra}$ 垂直分布(a)以及岩心的年代与深度关系(b)

Fig. 2 Vertical distribution of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  in sediment core (a) and the depth-age relationship of the core (b)

## 2.2 湖泊沉积物粒度特征分析

沉积物的粒度特征是判别沉积环境的一个重要

物理标志,可以为沉积物搬运介质的性质、能量和搬运方式的确定提供重要的环境分析依据<sup>[4]</sup>。本文根据传统沉积学岩性分类方法将粒度分为黏土( $<4\ \mu\text{m}$ )、细粉砂( $4\sim16\ \mu\text{m}$ )、中粉砂( $16\sim32\ \mu\text{m}$ )、粗粉砂( $32\sim63\ \mu\text{m}$ )和砂( $>63\ \mu\text{m}$ )5类<sup>[17]</sup>。

陈普海子沉积物粒度变化特征见图3。整个剖面粒度组成以粉砂和黏土为主,粉砂( $4\sim63\ \mu\text{m}$ )含量占58.6%,其中又以粒径为 $4\sim16\ \mu\text{m}$ 的细粉砂含量为主,约占46.9%,黏土( $<4\ \mu\text{m}$ )含量占38.5%,而砂( $>63\ \mu\text{m}$ )含量相对较少,平均为2.9%。不同粒级组分的变化存在差异,其中黏土质和中粉砂质组分含量变化趋势相反,粗粉砂以及砂质含量变化趋势较为一致。平均粒径( $M_z$ )和中值粒径( $M_d$ )的变化趋势和粗颗粒( $>32\ \mu\text{m}$ )组分含量的变化趋势一致。尽管整个剖面中砂含量相对较少,但在0~15 cm(约1996—2012AD)期间粒径波动明显,沉积物平均值( $M_z$ )和中值粒径( $M_d$ )明显变大,沉积物明显变粗,粉砂粒级变为砂粒级,且粒径大于 $63\ \mu\text{m}$ 的占15%左右,分选系数( $\sigma$ )变大,偏度(SK)为负偏,沉积物向粗颗粒方向移动,峰度(KG)表现为尖峰态。

## 3 讨论

本文采用主成分分析方法探讨沉积物粒度组成的控制因素,并通过粒级标准偏差算法提取沉积物中的环境敏感粒度组分<sup>[18-19]</sup>,其原理是通过研究激光粒度仪给出的每一粒级所对应含量的标准差变化而获得粒度组分的个数和分布范围。粒径-标准偏差曲线主要反映了不同样品的粒度含量在各粒径范

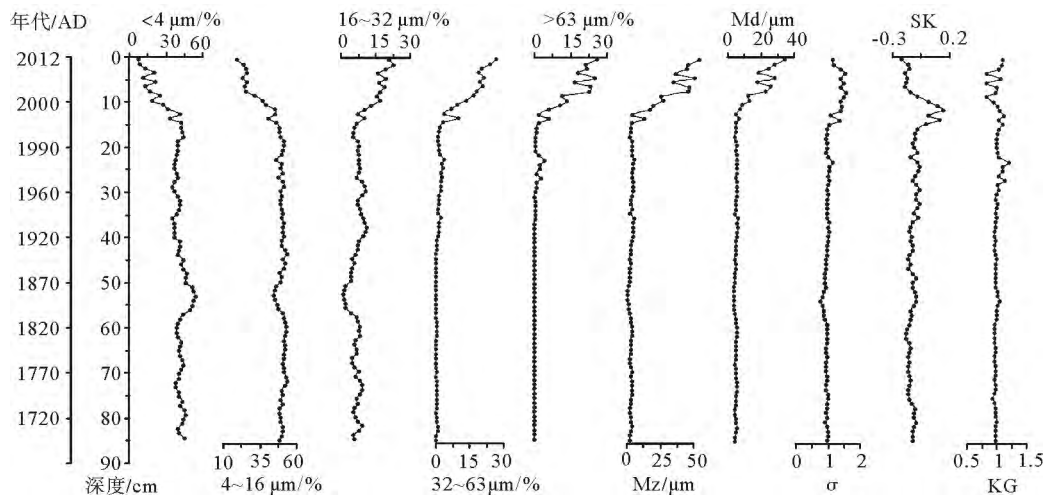


图3 陈普海子沉积物粒度特征值随深度的变化

Fig. 3 Changes in grain-size parameters versus depth of Lake Chenpuhaizi

围内的差异性,高的标准偏差值反映了不同样品的粒度含量在某一粒径范围内差异较大,低的标准偏差则反映了粒度含量在某一粒径范围内差异较小。图中较高标准偏差值所对应的粒级即对沉积环境敏感的粒度众数,据此可以反映出一系列样品中粒度变化存在显著差异的粒度组分的个数和分布范围<sup>[20]</sup>。

沉积物的频率曲线特征是判断沉积作用形式的重要手段之一,从陈普海子沉积物不同层位的频率分布曲线来看,存在单峰和双峰两种不同的形式(图 4A),且沉积物粒度频率曲线主要以单峰态曲线类型(CP2-35)为主,反映了湖泊水动力较小,沉积环境较为稳定。但由于不同外营力的作用,致使湖泊的沉积物频率曲线变为不对称,分选系数、偏度以及峰度等粒度参数也呈现不同的变化。以各层沉积物粒度频率分布为变量,通过 SPSS16.0 软件进行主成分分析,得到两个主控因子 F1 和 F2, F1 可以解释频率变化特征的 87.46%, F2 可以解释粒度变化特征的 11.22%, 因此, F1 与 F2 两个因子基本上可以解释沉积物的总体粒度变化特征。

表 2 中的系数称为主成分载荷,表示不同深度的粒径频率分布曲线和两个因子之间的相关系数,正(负)数代表正(负)相关,相关系数的绝对值越大,则变量对该因子的代表性就越大,就更能反

映该因子对湖泊沉积物粒度的特征。在岩心 15 cm 之上,粒径频率分布与 F2 的相关系数平均值为 85.45%; 15 cm 之后,频率分布与 F1 的相关系数平均为 98.82%。通过因子 F1、F2 控制的粒径频率分布曲线(图 4B 和 4C)可知,因子 F1 主要反映众数粒径为  $6.18 \mu\text{m}$  的粒度次总体,而因子 F2 主要反映众数粒径为  $42.75 \mu\text{m}$  的粒度次总体。图 4B 中 H1 为黄河河漫滩沉积物, H2 为渠道岸边表层沉积物,两者的众数粒径与 F1 因子控制的粒度次总体的众数粒径基本相同,说明主控因子 F1 主要反映了流水作用对湖泊粒径的影响。对流域其他不同表层沉积物样品的粒度分析表明,受因子 F2 以  $42.75 \mu\text{m}$  为众数粒径的影响, H3 裸露的农田表层沉积物的粒度频率曲线呈现双峰分布,裸露农田地粒径较粗的次峰、H4 草地表层沉积物与 H5 沙丘地具有相似的粒级范围,因此,主控因子 F2 反映了风营力的作用。

根据粒径-标准偏差分布曲线中较高标准偏差峰值分别出现在  $4.09$  和  $49.05 \mu\text{m}$ , 可以确定 3 个粒度组分的分界线约在  $14.1$  和  $224.35 \mu\text{m}$  (图 4D)。据此,可将粒度组分划分为组分 C1 ( $<14.1 \mu\text{m}$ )、组分 C2 ( $14.1 \sim 224.35 \mu\text{m}$ ) 和组分 C3 ( $>224.35 \mu\text{m}$ ), 由于组分 C3 的含量不足 1%, 本文不予讨论。

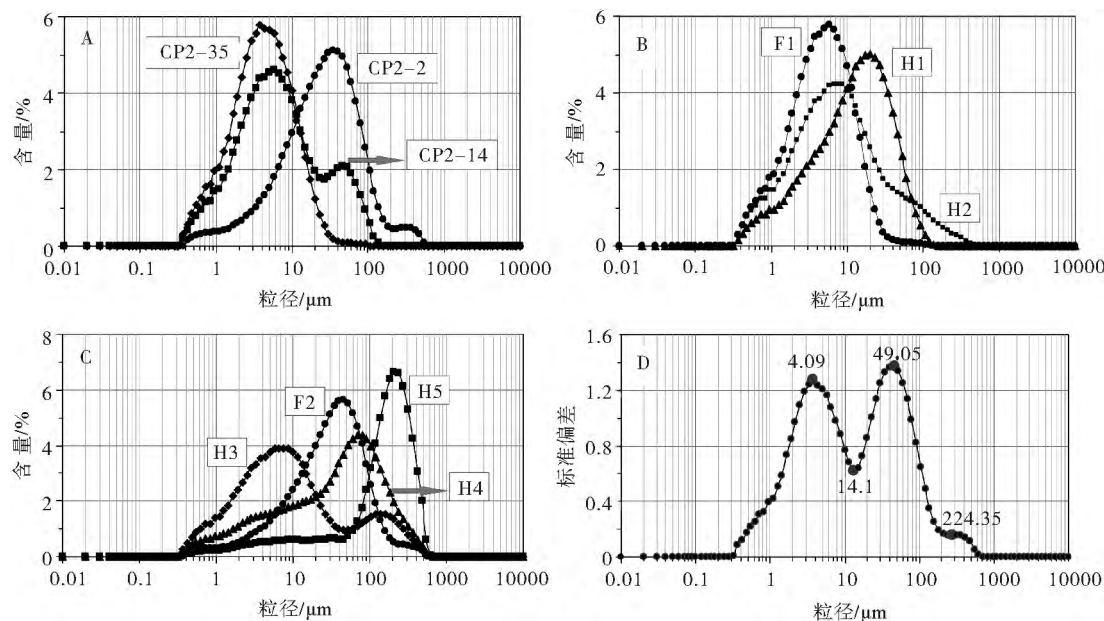


图 4 岩心 CP2 的粒度频率分布曲线(A)、因子 F1 控制的粒径与表层沉积物粒度频率分布曲线对比(B)、因子 F2 控制的粒径与表层沉积物粒度频率分布曲线对比(C)和岩心 CP2 的粒径-标准偏差分布曲线(D)

Fig. 4 The grain-size distribution curves of lake sediment (A), dominating particle size compared with surface sediment in grain-size distribution curves (B for factor 1 and C for factor 2) and standard deviation distribution curve of lake sediments (D)

表 2 主成分分析因子载荷矩阵  
Table 2 Matrix of principal component load

深度 /cm	因子		深度 /cm	因子		深度 /cm	因子		深度 /cm	因子	
	F1	F2		F1	F2		F1	F2		F1	F2
1	-0.068	0.993	22	0.999	0.015	43	0.997	-0.036	64	0.997	-0.069
2	0.060	0.995	23	0.998	0.051	44	0.996	-0.047	65	0.996	-0.051
3	0.189	0.980	24	0.996	0.053	45	0.992	-0.112	66	0.997	-0.055
4	0.366	0.908	25	0.997	0.057	46	0.996	-0.078	67	0.994	-0.100
5	0.089	0.993	26	0.999	0.014	47	0.993	-0.102	68	0.992	-0.113
6	0.390	0.902	27	0.998	0.003	48	0.983	-0.139	69	0.996	-0.079
7	0.154	0.986	28	0.994	0.047	49	0.988	-0.127	70	0.996	-0.029
8	0.269	0.958	29	0.992	0.076	50	0.988	-0.131	71	0.997	-0.052
9	0.309	0.858	30	0.989	0.080	51	0.949	-0.200	72	0.992	-0.005
10	0.371	0.863	31	0.997	0.008	52	0.936	-0.210	73	0.988	0.020
11	0.458	0.769	32	0.998	-0.040	53	0.917	-0.218	74	0.989	-0.004
12	0.543	0.781	33	0.999	-0.035	54	0.937	-0.214	75	0.997	-0.025
13	0.589	0.763	34	0.998	-0.013	55	0.954	-0.204	76	0.998	-0.062
14	0.671	0.726	35	0.988	-0.106	56	0.959	-0.191	77	0.999	-0.043
15	0.897	0.343	36	0.979	0.101	57	0.990	-0.119	78	0.994	-0.095
16	0.897	0.343	37	0.988	0.051	58	0.997	-0.050	79	0.989	-0.113
17	0.994	-0.079	38	0.979	0.074	59	0.995	-0.032	80	0.996	-0.084
18	0.994	-0.090	39	0.986	0.056	60	0.991	-0.008	81	0.997	-0.061
19	0.999	-0.025	40	0.989	0.040	61	0.992	-0.019	82	0.996	0.004
20	0.999	-0.010	41	0.998	-0.030	62	0.995	-0.016	83	0.998	-0.032
21	0.999	-0.011	42	0.998	-0.039	63	0.997	-0.072	84	0.992	-0.110

组分 C1 和组分 C2 的含量及其平均粒径变化如图 5 所示,组分 C1 和组分 C2 的含量呈反向变化。在岩心 15 cm 以上,组分 C1 的平均粒径变化不显著,而陈普海子岩心的中值粒径和组分 C2 的平均粒径的变化趋势较为一致,反映了湖泊沉积物

粒度的变化应主要受组分 C2 的控制,因此,组分 C2 为沉积物粒度组成中的环境敏感粒度组分。通过对沉积物粒度频率分布变量的主成分分析,湖泊沉积物中粗颗粒主要受风沙作用的影响,组分 C2 的含量与平均粒径反映了区域的风沙活动。

从 1996 年开始,磴口地区提出了“一县变两县”的土地开发规划,开展了大规模的沙荒土地开垦,农田面积扩大的同时,使得磴口县西南部和中北部地区的流动沙丘面积有明显扩展,流沙面积由 1996 年的 55 486.1  $\text{hm}^2$  增加到 2003 年的 67 499.9  $\text{hm}^2$ ,7 年内扩展了 12 013.8  $\text{hm}^2$ ,增长了 21.7%,年均扩展 1 716.3  $\text{hm}^2$ <sup>[21]</sup>,这直接导致沙丘活化,流沙活动强烈,开垦区在同风速条件下风沙活动加剧。陈普海子位于磴口县中北部地区,在 20 世纪 90 年代中期,地表风沙侵蚀作用加强是湖泊沉积物粒径变粗的主要原因。由于近期受人类活动作用的方式以及湖区自身特点的不同,使得河套地区乌梁素海与陈普海子的粒度变化趋势明显不同,马龙等得出 1965 年来灌溉退水携带的大量流域物质是引起乌梁素海粒度特征变化的主要原因<sup>[22]</sup>。在岩心 15 cm 以下,组分 C1 的平均粒径与剖面的中值粒径基本一致,

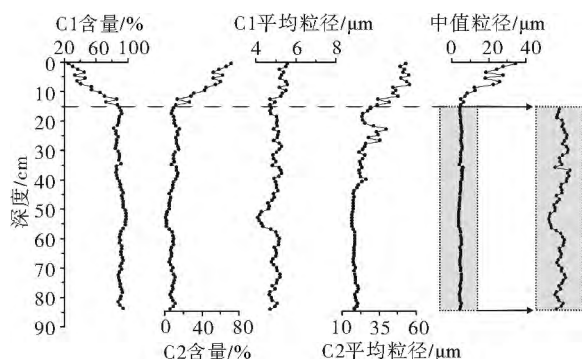


图 5 岩心 CP2 粒度组分 C1、C2 含量与平均粒径  
及其与剖面中值粒径对比

(右侧方框内图形为岩心 15~84 cm 之间中值粒径的放大图)

Fig. 5 Comparison of content and mean-size of grain-size components (C1 and C2) and the median grain size of the sediment (the figure in right box shows the median grain size of the sediment between 15 and 84 centimeters)

说明组分 C1 为环境敏感组分,而组分 C1 的含量与平均粒径主要反映了区域流水作用对湖泊粒度的影响,这与湖泊水源的补给密切相关。虽然在岩心 15 cm 以下,湖泊粒度特征变化总体以流水作用为主,但通过组分 C2 平均粒径曲线可知(图 5),约 22~30 cm 段(约 1960—1985AD)平均粒径明显增大,通过文献对磴口地区沙尘天气的分析可知<sup>[11-12]</sup>,20 世纪 60 年代到 80 年代中期,风沙天气发生日数较多,在 80 年代中期之后呈现逐渐减小的趋势,而 21 世纪初,沙尘天气的发生又有所回升,这表明岩心在约 22~30 cm 段(约 1960—1985AD)平均粒径增大是由于较强的风沙活动所致。

#### 4 结论

(1) 陈普海子沉积物整个岩心粒度组成以粉砂和黏土为主,粉砂(4~63  $\mu\text{m}$ )含量占 58.6%,其中又以粒径为 4~16  $\mu\text{m}$  的细粉砂含量为主,约占 46.9%,黏土(<4  $\mu\text{m}$ )含量占 38.5%,而砂(>63  $\mu\text{m}$ )含量相对较少,平均含量为 2.9%;不同粒度组分的变化存在差异,其中黏土质和中粉砂质组分含量变化趋势相反,粗粉砂以及砂质含量变化趋势较为一致。

(2) 通过对以各层沉积物粒度频率分布为变量进行的主成分分析,表明在 1996AD 左右陈普海子沉积物组分特征发生了明显变化,主要由两个主控因子控制。结合流域不同类型表层沉积物的粒径频率分布曲线,确定两个主控因子分别为地表风沙侵蚀和地表流水侵蚀。进而运用粒径-标准偏差方法,与整个岩心的中值粒径进行对比,得出不同时期的环境敏感组分,在约 1996AD 之前,流水作用所携带的细颗粒(<14.1  $\mu\text{m}$ )控制了沉积物的粒度组成,但在 1960—1985AD 期间湖泊沉积物粒度特征对较强的风沙活动也有较好的响应;而约 1996AD 以来,由于人类活动的影响,流域风沙活动所携带的粗颗粒(14.1~224.35  $\mu\text{m}$ )决定了沉积物的粒级特征。

#### 参考文献(References)

- [1] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社,1998: 374-377. [WANG Sumin, DOU Hongshen. Memoirs of Lakes in China [M]. Beijing: Science Press, 1998: 374-377.]
- [2] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 307-313. [SHEN Ji. Progress and prospect of palaeolimnology research in China [J]. Journal of Lake Science, 2009, 21(3): 307-313.]
- [3] 马龙,吴敬禄,吉力力. 新疆柴窝堡湖沉积物中环境敏感粒度组分揭示的环境信息[J]. 沉积学报, 2013, 30(5): 945-954. [MA Long, WU Jinglu, JI Lili. Environmental changes inferred from environmentally sensitive Grain-size component records in Chaiwopu Lake, Xinjiang [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 30(5): 945-954.]
- [4] Chen Guangquan, Yi Liang, Chen Shenliang, et al. Partitioning of grain-size components of estuarine sediments and implications for sediment transport in southwestern Laizhou Bay, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(4): 895-906.
- [5] 王君兰,李晖,邓伟,等. 内蒙古嘎顺诺尔湖泊沉积物磁化率与粒度的古环境意义[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 661-668. [WANG Junlan, LI Hui, DENG Wei, et al. Paleoenvironmental significance of magnetic susceptibility and grain size of lake sediments from Gaxun Nur, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 661-668.]
- [6] 沈吉,汪勇,羊向东,等. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史:以陕西红碱淖湖为例[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 87-92. [SHEN Ji, WANG Yong, YANG Xiangdong, et al. Palaeosandstorm characteristics and lake evolution history deduced from investigation on lacustrine sediments: the case of Hongjiannao Lake, Shaanxi Province [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20): 2355-2361.]
- [7] 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 Sugan Lake sediments, North Qaidam Basin [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 915-922.]
- [8] 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 area, Inner Mongolia during the past 400 years: evidence from grain-size analysis of lake sediments [J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(3): 193-198.]
- [9] 孙千里,周杰,肖举乐. 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, XIAO Jule. Grain-size characteristics of Lake Daihai sediments and its paleoenvironment significance [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001, 21(1): 93-95.]
- [10] 高存荣,刘文波,刘滨,等. 河套平原第四纪沉积物中砷的赋存形态分析[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 760-770. [GAO Cunrong, LIU Wenbo, LIU Bin, et al. Modes of occurrence of arsenic in Quaternary sediments of the Hetao Plain [J]. Geology in China, 2010, 37(3): 760-770.]
- [11] 王玉魁,阎艳霞,王保平,等. 乌兰布和沙漠沙尘天气的气象条件分析[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 22-27. [WANG Yukui, YAN Yanxia, WANG Baoping, et al. Weather condition analysis on dust events of Ulanbuh Desert [J]. Scientia Silvae Sinica, 2007, 43(1): 22-27.]
- [12] 董智,李红丽,孙保平,等. 乌兰布和沙漠东北缘磴口县沙尘

- 天气变化规律及其对防护林体系建设的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 269-275. [DONG Zhi, LI Hongli, SUN Baoping, et al. The change of sand-wind climate and response to the shelter belt system construction in the North-eastern Ulanbuh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 269-275.]
- [13] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of  $^{210}\text{Pb}$  assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment [J]. Catena, 1978, 5(1): 18.
- [14] 马龙, 吴敬禄. 内蒙古乌梁素海湖泊沉积物元素地球化学特征及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 119-125. [MA Long, WU Jinglu. Element geochemical characteristic of lake sediments and its influence factors in wuliangsu lake, Inner Mongolia[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(3): 119-125.]
- [15] 张敬, 牟德海, 杜金洲, 等. 过剩 $^{210}\text{Pb}$ 年代学的多种计算模式的比较研究[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(4): 370-374, 382. [ZHANG Jing, MU Dehai, DU Jinzhou, et al. Study on comparison of excess  $^{210}\text{Pb}$  chronology of several models[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(4): 370-374, 382.]
- [16] 万国江. 现代沉积的 $^{210}\text{Pb}$ 计年[J]. 第四纪研究, 1997, 17(3): 230-239. [WAN Guojiang.  $^{210}\text{Pb}$  dating for recent sedimentation[J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(3): 230-239.]
- [17] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 74-75. [JIANG Zaixing. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 74-75.]
- [18] Liu Z, Colin C, Trentesaux A, et al. Late quaternary climatic control on erosion and weathering in the eastern Tibetan Plateau and the Mekong Basin [J]. Quaternary Research, 2005, 63(3): 316-328.
- [19] Guan Q, Pan B, Li N, et al. An indicator of sand storms in the south of the Tengger Desert [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 102(1): 197-203.
- [20] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. 科学通报, 2003, 48(1): 83-86. [SUN Youbin, GAO Shu, LI Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 83-86.]
- [21] 张国庆. 乌兰布和沙漠东北部磴口县生态环境受水资源的影响及对策[J]. 内蒙古水利, 2007, 4: 80-81. [ZHANG Guoqing. The measure of ecological environment influenced by water resources in Dengkou county of the northeast of Ulan Buh Desert[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2007, 4: 80-81.]
- [22] 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 environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 646-652.]

## GRAIN-SIZE CHARACTERISTICS AND ITS ENVIRONMENTAL SIGNIFICANCE OF LAKE CHENPUHAI SEDIMENTS IN HETAO PLAIN, INNER MONGOLIA

WANG Jingzhong<sup>1,2</sup>, WU Jinglu<sup>1</sup>, ZENG Haiao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake and Environmental Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** This paper is devoted to the grain-size characteristics of the surficial sediments of the Lake Chenpuhai. Combined with the radiocarbon dating data of  $^{210}\text{Pb}$ , environmental evolution of the lake is revealed. Primary components of the sediment are used for study of the source of the lake sediment. Two main controlling factors, which account for 98.68% of the sediment, are picked out by statistic analysis. It shows that coarse fraction of the lake sediment is of fluvial origin in addition to fine fraction of eolian origin. Environmentally sensitive grain-size components were extracted by the variation in grain-size standard deviation. The results indicate that before 1996 AD, the fine particle ( $<14.1\mu\text{m}$ ) carried by fluvial water dominated the sediments. Severe sand-dust storm occurred during 1960-1985 AD and had brought great impact to the characteristic of the sediment; since 1996 AD, as a result of the human made large-scale land reclamation and strong sand activities, coarse particle ( $14.1\sim 224.35\mu\text{m}$ ) carried by sand storms dominated the lake sediments.

**Key words:** lacustrine sediment; grain-size; environmental change; Lake Chenpuhai