

文章编号:1000-0550(2017)06-1158-08

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.06.007

# 新疆乌伦古湖沉积物粒度特征揭示的环境信息

周建超<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** 在放射性同位素<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs定年的基础上,通过对沉积物粒度参数的分析,探讨了近200年来乌伦古湖沉积物粒度敏感组分特征及其环境意义。研究表明,乌伦古湖WL孔沉积物以黏土和细粉砂为主,但在1970 AD前后,粒度参数发生了突变,其中>16 μm组分所占含量迅速升高,在约1830~1842 AD及1910 AD前后这两个时期,沉积物的粒度参数也有较显著的变化。对沉积物粒度频率分布曲线的分析表明,在对应时期内,沉积物的搬运介质或搬运动力发生了变化。基于此,首先通过粒径—标准偏差方法提取了粒度中的敏感组分C2(7~25 μm),进而通过粒度敏感组分与器测气象数据的相关性分析,明确了组分C2含量的环境指示意义。结果表明,组分C2含量的大小与研究区冬、春季温度和冬季降水量大小有关,反映了积雪融水入湖的强度。在约1830~1842 AD、1910 AD前后,组分C2含量偏高,反映入湖水量较大、湖泊水位较高。而20世纪60年代到70年代,沉积物粒度参数的显著变化与流域人类活动的影响有关。

**关键词** 湖泊沉积;粒度;敏感组分;环境意义;乌伦古湖

**第一作者简介** 周建超,男,1989年出生,博士研究生,研究方向为湖泊沉积与环境演化,E-mail:xidazhouyangyang@163.com

**通讯作者** 吴敬禄,男,研究员,E-mail:w.jinglu@niglas.ac.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

湖泊沉积物具有沉积连续、分辨率高、代用指标丰富等优点,是研究古气候古环境变化的良好载体<sup>[1]</sup>。沉积物中的粒度是一个比较成熟的古环境指标,已被广泛应用于古环境研究之中<sup>[2-4]</sup>。近年来,研究者们多通过对样品的粒度资料进行各种数学运算<sup>[5-9]</sup>,提取敏感粒级组分,进而追溯古环境信息。

乌伦古湖地处温带大陆性干旱气候区,生态环境体系脆弱,对气候变化及人类活动的响应敏感。前人已经通过孢粉、粒度、介形类、黏土矿物等多指标分析了该湖晚冰期以来尤其是全新世以来的气候环境演化过程<sup>[10-13]</sup>,但对衔接自然与人类记录的百—千年尺度方面的研究较少,而相关研究对预测未来气候环境变化尤为重要<sup>[14]</sup>。

在乌伦古湖骆驼脖子处获取了高分辨率的沉积岩芯(WL孔),基于对WL孔沉积物粒度特征的分析,采用粒径—标准偏差方法,提取沉积物中的敏感粒度组分,在其与湖区器测气象数据的相关性分析及其与区域树轮记录对比分析的基础上,明确敏感粒度

组分的环境指示意义,探讨近200年来湖泊沉积环境的变化以及人类活动对湖泊演化的影响,以期为湖泊环境保护和流域规划提供基础资料。

## 1 研究区概况

乌伦古湖(46°59'~47°25' N,87°~87°35' E)位于新疆阿勒泰地区福海县境内,流域面积约35 400 km<sup>2</sup>,为干旱区内陆半封闭湖泊,湖泊水位为478.6 m时,湖泊面积约760 km<sup>2</sup>,南北最大宽约27 km,平均宽18.4 km,东西长约41 km,为新疆第二大湖<sup>[15]</sup>。湖区气候寒冷干燥,据福海县气象资料统计,年均温为3.4℃,年降水量为116 mm,年蒸发量为1 844 mm。20世纪70年代以前,乌伦古湖的唯一入湖河流为乌伦古河,乌伦古河发源于阿尔泰山东部,长821 km,流域面积32 000 km<sup>2</sup>,径流来源以季节性积雪补给为主,夏季降雨混合补给为辅<sup>[16]</sup>。1970年,在乌伦古湖北部73公里处开渠,引额尔齐斯河河水补给乌伦古湖,同年在乌伦古湖东南岸直接引乌伦古河河水入湖。1987年冬,又扩大了“引额济乌”工程。气候变化与人类活动的双重影响使得乌伦古湖近百年来水位波动变化较大。

收稿日期:2016-09-22;收修改稿日期:2016-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41671200, 41271205, U1138301);科技基础性工作专项(2014FY110400) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671200, 41271205, U1138301; Special Basic Research Funds, No. 2014FY110400]

## 2 采样与分析方法

2015年8月在乌伦古湖骆驼脖子湖心水深12 m处,用重力采样器采集了长68 cm的完整沉积岩芯,表层沉积岩芯未受扰动。在野外现场按1 cm间隔分割样品,共获得样品68个。样品装入密封袋中保存,以备分析测试。

用于同位素测定的样品经冷冻干燥后,采用ORTEC公司生产的高纯锗井型探测器(HPGe GWL)与Ortec 919型谱控制器构成的多道 $\gamma$ 谱分析系统,分别测定总 $^{210}\text{Pb}$ ( $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ )、 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的放射性比活度。用于定年分析的过剩 $^{210}\text{Pb}$ ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )为 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 与 $^{226}\text{Ra}$ 活度的差值。

用于粒度分析的样品,加10%的双氧水去除有机质,加10%的稀盐酸去除碳酸盐,加5%的六偏磷酸钠溶液,超声振荡。振荡后的样品用Mastersize 2000型激光粒度仪测量粒度组成,各粒度组分平行分析误差小于5%。

## 3 结果与分析

### 3.1 定年结果

乌伦古湖WL孔主要由黏土质粉砂组成,岩性变化较为均一。图1a、b显示出了过剩 $^{210}\text{Pb}$ ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )、 $^{137}\text{Cs}$ 活度的垂直分布。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 到58 cm处达到了平衡,58~0 cm, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度随岩芯深度的增加呈指数衰减(图2a)。WL孔 $^{137}\text{Cs}$ 活度在40 cm处出现了最大峰值,Liu *et al.*<sup>[9]</sup>曾将乌伦古湖湖心区沉积物 $^{137}\text{Cs}$ 活度的最大蓄积层位定为1986年,但根据WL孔 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 数

据计算得到的40 cm处的年龄为1960年,更接近 $^{137}\text{Cs}$ 的1963年时标,且1963年是全球公认的一个 $^{137}\text{Cs}$ 沉降峰值<sup>[17]</sup>,因此本文认为40 cm处对应1963年 $^{137}\text{Cs}$ 的最大富集层位(图2b)。本文采用复合模式计算年代,基于 $^{137}\text{Cs}$ 的1963年时标深度(40 cm处),把沉积岩芯分成上、下两段,根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度变化的数据,采用不同公式计算年代<sup>[18]</sup>。采用复合模式计算得到58~0 cm层位的年代,深58 cm处对应的年代为1872 AD。68~59 cm层位的年代通过外推法获得(由最小二乘法拟合得到58~40 cm层位的平均沉积速率为1.75 mm/a,深68 cm处对应年代约为1810 AD。岩芯年代与深度的对应关系据此建立(图2c)。

与Liu *et al.*<sup>[11]</sup>对湖心区WLG-2004孔的研究相比较,WL孔根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 定年计算的沉积速率显著偏快(WL孔平均沉积速率为3.32 mm/a;WLG-2004孔根据 $^{14}\text{C}$ 测年计算的14 cm以下层段的平均沉积速率为0.37 mm/a,根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 定年计算的14~0 cm的平均沉积速率约为0.085 mm/a), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 及 $^{137}\text{Cs}$ 活度偏低(分别约为WLG-2004孔的一半)。由于WL孔所在的骆驼脖子为一相对封闭的潟湖,风浪作用小,水体沉积环境相对稳定,随水流携带来的物质能较快沉积下来;同时WL孔离岸相对较近,短尺度降水冲刷的流域表土物质也能较快到达WL孔所在湖区并沉积下来,因而相较于WLG-2004孔,WL孔沉积速率显著偏快。两孔沉积部位差异较大,沉积物岩性及沉积特征都有较大的不同,因此 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 蓄积和迁移都会存在差异。另外,沉积物来源和沉积速率的差异也造成蓄积量的不同。

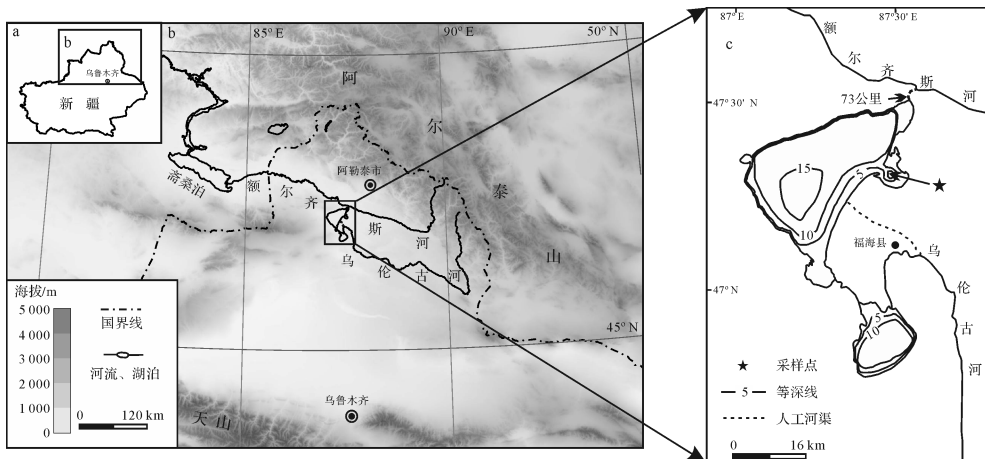


图1 乌伦古湖及采样点所在位置

a, b. 乌伦古湖的地理位置; c. 乌伦古湖等深线分布及采样点所在位置

Fig.1 Location of Wulungu Lake and the core site

a, b. geographic location of Wulungu Lake; c. bathymetry of Wulungu Lake and coring location

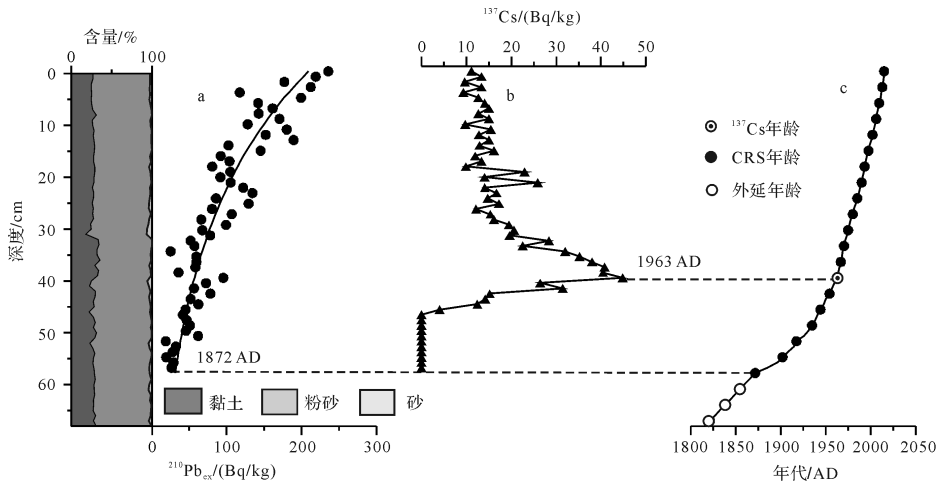


图 2 乌伦古湖 WL 孔沉积物岩性与年代模式

a.  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度的垂直分布; b.  $^{137}\text{Cs}$  活度的垂直分布; c. 根据  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  定年建立的岩芯年代与深度的对应关系

Fig.2 Lithology and age model for WL core in Wulungu Lake

a. the activity of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  versus depth; b. the activity of  $^{137}\text{Cs}$  versus depth; c. age-depth relation based on  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating

### 3.2 粒度特征

乌伦古湖 WL 孔沉积物主要由黏土质粉砂组成。根据伍登—温特瓦斯方法划分的黏土 ( $<4\ \mu\text{m}$ )、细粉砂 ( $4\sim 16\ \mu\text{m}$ )、中粉砂 ( $16\sim 32\ \mu\text{m}$ )、粗粉砂 ( $32\sim 63\ \mu\text{m}$ ) 和砂 ( $>63\ \mu\text{m}$ ) 5 类组分的含量、中值粒径 ( $M_d$ )、平均粒径 ( $M_z$ )、标准偏差随深度的分布见图 3。黏土、细粉砂、中粉砂、粗粉砂和砂的平均含量分别为 27.9%、40%、20%、9.9%、2.4%。与湖心区沉积物的粒度组成 (Liu *et al.*, 2008) 相比较,黏土组分偏多,中值粒径偏小。黏土组分含量在 40~32 cm (约 1963~1970 AD) 略高于平均值,在 32~31 cm (约 1970 AD) 显著下降,而  $>16\ \mu\text{m}$  的各组分在 32~31 cm 则显著升高,与黏土组分含量的变化趋势相反,但与中值粒径及平均粒径的变化趋势较为一致。

沉积物的粒度频率曲线特征是判断沉积作用形式的重要手段之一<sup>[5]</sup>。当搬运方式一定且介质动力大小稳定时,它所搬运的沉积物粒度总体是一个单因子控制的单组分分布,表现为单峰态曲线<sup>[5]</sup>。由图 4a 可知,乌伦古湖 WL 孔沉积物的粒度频率曲线主要表现为单峰负偏态曲线,粒度组成主要集中在细粉砂粒级,砂组分含量较低,与流水沉积作用曲线的变化较为一致。这表明,WL 孔所在湖区沉积物的搬运方式较为单一,主要反映了水流的搬运作用,不同层位粒度频率曲线向粗或向细粒侧偏移反映了介质动力的变化。

### 4 讨论

图 4b 示出了利用粒径—标准偏差方法获得的各

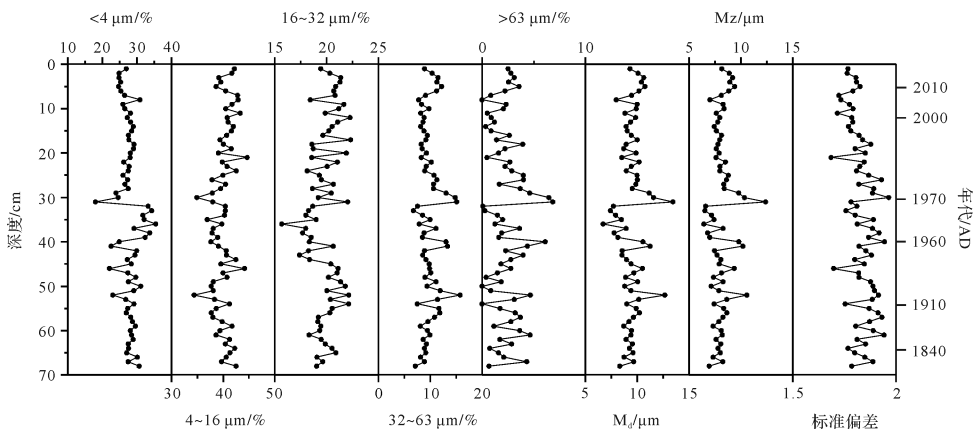


图 3 乌伦古湖 WL 孔沉积物粒度特征值随深度的变化

Fig.3 Grain size distribution and standard deviation of Wulungu Lake sediment from WL Core

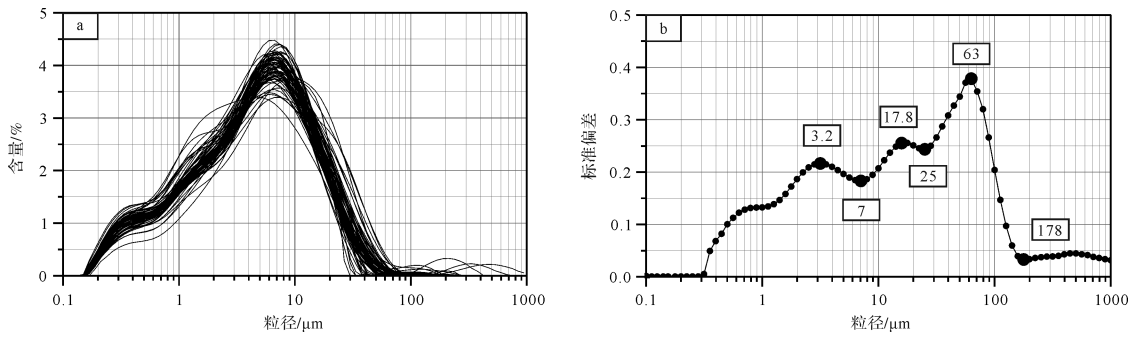


图 4 乌伦古湖 WL 孔沉积物粒度频率分布曲线(a)及粒径—标准偏差曲线(b)

Fig.4 a. the grain-size distribution curves of Wulungu Lake sediment WL Core; b. standard deviation values versus grain size of Wulungu Lake sediment from WL Core

粒径组分标准偏差随粒径的变化曲线,图中较高的标准偏差所对应的粒级即对沉积环境变化敏感的粒度众数。三个较为明显的标准偏差峰值分别出现在 3.2 μm、17.8 μm 和 63 μm,其界限分别为 7 μm 和 25 μm;此外在粗粒侧(>178 μm)也有一较弱的峰。据此将剖面粒度划分为 C1(<7 μm)、C2(7~25 μm)、C3(25~178 μm)和 C4(>178 μm)四个组分。组分 C1 含量为 30.1%~51.6%,平均为 41.5%;组分 C2 含量为 34.5%~45%,平均为 40.3%,组分 C3 含量为 12%~28.9%,平均为 18%。由于组分 C4 的平均含量小于 1%,本文不做讨论。

从图 5 可以看出,组分 C2、C3 含量与组分 C1 含量呈负相关,组分 C1 平均粒径的变化不明显,而组分 C2、C3 平均粒径的变化较为明显,且与各自组分含量的变化趋势较为一致,表明组分 C2、C3 的含量变化控制了组分 C1 的含量变化,组分 C2、C3 是岩芯

对环境变化较为敏感的两个粒度组分。同时,相关性分析结果表明,组分 C2 的平均粒径与岩芯中值粒径的相关性最高(组分 C2、C3 的平均粒径与岩芯中值粒径的相关系数分别为 0.672 和 0.501(P=0.01)),因而组分 C2 控制了岩芯粒度的变化,是岩芯对环境变化最敏感的粒度组分。

为了明确敏感组分的环境指示意义,将组分 C2 含量及其平均粒径与湖区 1954—2014 年的器测气象数据(以阿勒泰市气象站为代表)进行相关性分析,结果如表 1。由表 1 可知,组分 C2 的含量与冬、春季均温及冬季降水量均呈正相关,且达到显著性水平;组分 C2 的平均粒径与冬、春季温度均呈正相关,但未达到显著性水平。阿勒泰地区的冬季降水主要以雪的形式降落并积累下来,并主要在春末夏初(4—6 月)融化,因此,7~25 μm 粒级的物质主要由冬季积雪融化形成的径流所带来,组分 C2 的含量大小在一

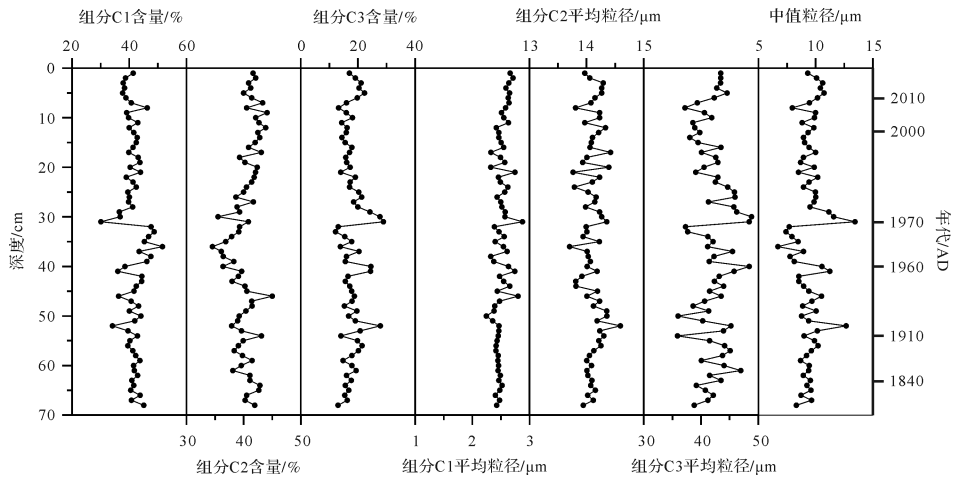


图 5 乌伦古湖 WL 孔沉积物粒度敏感组分含量及其平均粒径与岩芯中值粒径对比

Fig.5 Comparison between the content/mean-size of sensitive grain-size components and the median grain size of Wulungu Lake sediment from WL Core

表1 乌伦古湖 WL 孔粒度敏感组分 C2 含量及其平均粒径与湖区器测气象数据的相关系数矩阵

Table 1 Correlation coefficients matrix of content/mean-size of sensitive grain-size component C2 of Wulungu

## Lake sediment from WL core and meteorological data

|                          | 组分 C2/%   | 组分 C2/ $\mu\text{m}$ | 春季均温/ $^{\circ}\text{C}$ | 夏季均温/ $^{\circ}\text{C}$ | 夏季降水量/mm | 冬季均温/ $^{\circ}\text{C}$ | 冬季降水量/mm |
|--------------------------|-----------|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|
| 组分 C2/%                  | 1         |                      |                          |                          |          |                          |          |
| 组分 C2/ $\mu\text{m}$     | 0.256 * * | 1                    |                          |                          |          |                          |          |
| 春季均温/ $^{\circ}\text{C}$ | 0.223 *   | 0.188                | 1                        |                          |          |                          |          |
| 夏季均温/ $^{\circ}\text{C}$ | -0.073    | 0.025                | 0.272 *                  | 1                        |          |                          |          |
| 夏季降水量/mm                 | 0.192     | -0.002               | -0.223                   | -0.412 * *               | 1        |                          |          |
| 冬季均温/ $^{\circ}\text{C}$ | 0.36 * *  | 0.177                | 0.19                     | 0.065                    | -0.072   | 1                        |          |
| 冬季降水量/mm                 | 0.341 *   | 0.035                | -0.251                   | -0.028                   | -0.041   | -0.204                   | 1        |

注: \*、\* \* 分别表示相关系数在  $P=0.05$  和  $0.01$  水平上显著相关

一定程度上反映了春、夏季积雪融水入湖的强度。上一年冬季积雪较多,来年随着温度快速回升,较多的积雪融水汇入乌伦古河,主要携带了  $7\sim 25\ \mu\text{m}$  粒级的物质进入骆驼脖子湖区并沉积下来,组分 C2 含量相应增大。

沉积物粒度的粗细反映了水流搬运能力的大小及湖泊水位的变化,位于湖泊中心区域沉积物粒度的变化主要与进入湖泊的物源粗细和湖水环境对颗粒的再改造再分布两个因素有关。当湖泊水位下降以致骆驼脖子与大湖相隔成为一封闭潟湖时,湖泊沉积物粒度组成主要受到湖水环境再改造再分布的影响。当冬季积雪较多,随着春季气温回升,融雪水形成的入湖径流为乌伦古湖沉积物提供了物源。由于乌伦古河先注入吉力湖,再由库依尔河流入乌伦古湖,较粗颗粒 ( $25\sim 178\ \mu\text{m}$ ) 多在吉力湖沉积下来,流入乌伦古湖并在骆驼脖子湖心沉积下来的主要是  $7\sim 25\ \mu\text{m}$  粒级的物质。乌伦古河的径流来源以季节性积雪补给为主,夏季降雨混合补给为辅<sup>[15]</sup>,因此冬季积雪越多,随着春夏季气温回升,积雪融水形成的入湖径流所带来的  $7\sim 25\ \mu\text{m}$  粒级的沉积物也就越多,沉积物中组分 C2 的含量也就越大。

在约 1830~1842 AD、1910 AD 前后,组分 C2 的含量显著增大(图 6a),钻孔所在湖区沉积了较多的  $7\sim 25\ \mu\text{m}$  粒级的物质,指示入湖水流偏多,湖泊水位偏高。在对应时期内,阿勒泰东部树轮重建的  $1\sim 2$  月降雪量偏大<sup>[19]</sup>(图 6c),6—7 月月均温偏高<sup>[20]</sup>(图 6d),冬季积雪偏多,春末夏初温度偏高,则由积雪融水形成的入湖径流增大,湖泊水位相应升高,组分 C2 含量相应增大。据历史文献记载<sup>[21]</sup>,“清道光二十二年,上年冬至当年春(1841/1842 年),阿勒泰连降大雪,牲畜倒毙大半,贫苦牧民伤亡甚多”,前人研究也表明<sup>[22]</sup>,1910 年前后是乌伦古湖的高水位期,与本

文粒度沉积记录较为一致。1944 AD 前后,组分 C2 含量及  $>63\ \mu\text{m}$  组分含量均有所升高(图 6a、b),据文献记载,1944 年乌伦古湖水位偏高(约 483 m)<sup>[15]</sup>,而对应时期内阿勒泰东部降雪量偏低(图 6c),6—7 月月均温略高于均值(图 6d),因此春夏季积雪融水对湖泊水位的贡献有所降低,湖泊水位偏高还可能与夏季降水偏多有关。由于 WL 孔所在湖区离岸较近,短尺度降水形成的水流可将不同粒级的物质带入湖中并沉积下来,导致组分 C2 含量及  $>63\ \mu\text{m}$  组分含量同时增大。20 世纪 50 年代中期以来,各粒度指标都出现明显的变化,尤其是 70 年代,沉积物中组分 C2 含量及  $>63\ \mu\text{m}$  组分的含量均显著升高(图 6a、b),而黏土组分含量则显著偏低(图 3),与岩芯上、下段粒度各组分的变化截然不同,与这一时期流域内的人类活动影响明显有关。

乌伦古湖自 1956 年开始受到人类活动的显著影响,1961 年以来乌伦古河沿岸富蕴、福海、青河、农垦 181 团开垦荒地,日益增多的农业用水和生活用水使乌伦古河入湖水量不断减少,乌伦古湖的水位也随之下降。1961 年乌伦古湖水位为 484 m,1969 年下降到 480 m<sup>[15]</sup>。

由于流域农业用水增加,导致入湖水量减少,水位下降,骆驼脖子与大湖面的连接减弱,甚至成为潟湖,改变了水体的动力条件,造成沉积物粒度的显著变化。尤其是 1970s,由于咸化加剧,影响流域居民的生活,1970 年在乌伦古湖东南岸直接引乌伦古河水入湖,并在湖北部 73 公里处开通了“引额济乌”工程,并于 1973 年在引额济乌渠上修建节制闸,额尔齐斯河河水在 73 公里处引入乌伦古湖,导致入湖物质的改变。湖泊沉积物中黏土组分含量显著降低(图 3),而  $>63\ \mu\text{m}$  粒级组分含量则显著升高(图 6b),记录了引水工程对湖泊沉积物粒度组成的显著

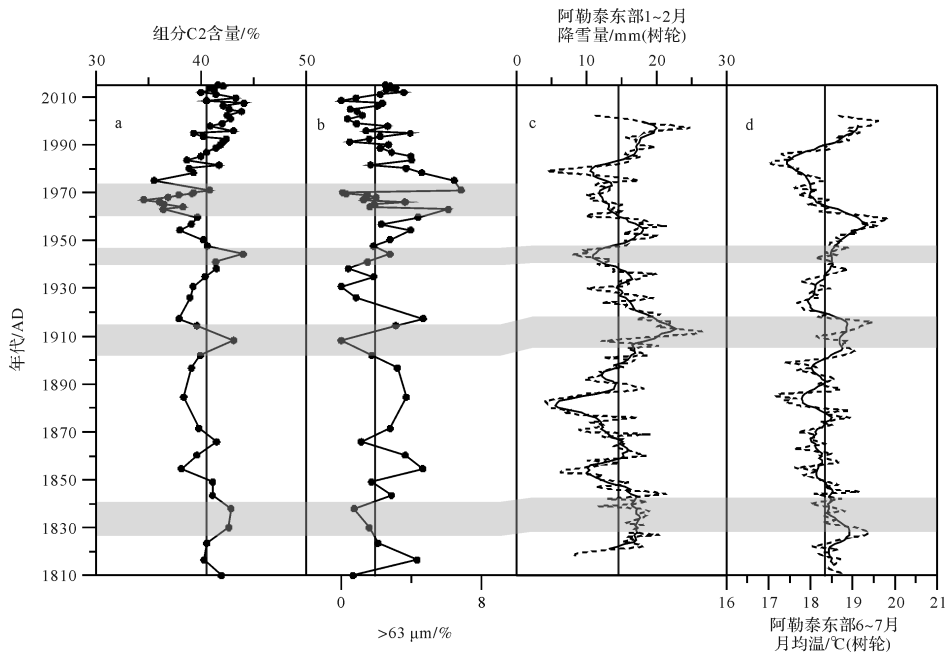


图6 乌伦古湖沉积物粒度敏感粒度组分与区域树轮记录对比

a. 组分 C2 的含量, 图中细实线为中线; b.  $>63 \mu\text{m}$  组分含量, 图中细实线为中线; c. 树轮记录的阿勒泰东部 1—2 月降雪量<sup>[19]</sup>, 图中粗实线为 9 年滑动平均, 细实线为中线; d. 树轮记录的阿勒泰东部 6—7 月月均温<sup>[20]</sup>, 图中粗实线为 9 年滑动平均, 细实线为中线

Fig.6 Correlation of the sensitive grain-size component and the regional tree ring records

a. the content of sensitive grain-size component C2, thin solid line represent average values; b. the content of  $>63 \mu\text{m}$  fraction, thin solid line represent average values; c. the snowfall from January to February recorded by tree-ring in eastern Altay area<sup>[19]</sup>, bold solid line represent 9-year moving average of the snowfall, thin solid line represent average values; d. the mean temperature series from June to July recorded by tree-ring in eastern Altay area<sup>[20]</sup>, bold solid line represent 9-year moving average of the temperature, thin solid line represent average values

影响。20 世纪 80 年代中期以来, 受到区域气候向暖湿转型及人类活动调控入湖水量的影响, 入湖水量相对稳定, 各粒级组分变化也较为平稳。2010 年以来,  $>63 \mu\text{m}$  粒级组分含量又快速上升, 2010 年以来区域降水较多, 短时间内的降水冲刷作用可携带较多的粗颗粒物入湖并沉积下来。据此, 钻孔粒度记录了不同时期气候环境和流域人类活动对湖泊的影响。

## 5 结论

(1) 通过粒径—标准偏差方法, 提取了沉积物中的敏感粒度组分 C2 ( $7\sim 25 \mu\text{m}$ )。与湖区器测气象数据的相关性分析表明, 组分 C2 的含量大小受区域冬、春季温度及冬季降雪量变化的影响, 一定程度上反映了积雪融水入湖的强度。

(2) 乌伦古湖 WL 孔沉积物粒度总体变化平稳, 但在约 1830~1842 AD、1910 AD 前后, 组分 C2 含量偏高, 反映入湖水量偏大, 湖泊水位偏高; 在 1970 AD 前后, 组分 C2 含量及  $>63 \mu\text{m}$  粒级组分含量均显著上升, 与岩芯上、下段粒度各组分的变化截然不同。

(3) 敏感组分含量与区域树轮记录的对比分析表明, 约 1830~1842 AD、1910 AD 前后, 组分 C2 含量偏大, 与阿勒泰东部较多的冬季积雪和较高的初夏温度有关, 反映由积雪融水形成的入湖径流偏大, 湖泊水位偏高。约 1970 AD, 粒度参数的突变表明受人类引水工程的显著影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587. [Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress on depositional environment and environment evolution of lakes in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(6): 579-587.]
- [2] 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(D 辑): 地球科学, 2003, 33(6): 563-568. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang Feng, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: sediment grain size as an example[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 33(6): 563-568.]
- [3] 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[J]. Journal

- of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 149-158.
- [4] Weltje G J. End-member modeling of compositional data; numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem [J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [5] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3/4): 263-277.
- [6] Ma L, Wu J L, Abuduwaili J, et al. Aeolian particle transport inferred using a ~150-year sediment record from Sayram Lake, arid northwest China [J]. *Journal of Limnology*, 2015, 74(3): 584-593.
- [7] Wang J Z, Wu J L, Zeng H A. Sediment record of abrupt environmental changes in Lake Chenpu, upper reaches of Yellow River Basin, north China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10): 6355-6363.
- [8] 马龙, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力. 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*, 2012, 30(5): 945-954. [Ma Long, Wu Jinglu, Jilili Abuduwaili. Environmental changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records in Chaiwopu Lake, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 945-954.]
- [9] 陈国成, 郑洪波, 李建如, 等. 南海西部陆源沉积物组成的控制动力及其反映的东亚季风演化 [J]. *科学通报*, 2007, 52(23): 2768-2776. [Chen Guocheng, Zheng Hongbo, Li Jianru, et al. Dynamic control on grain-size distribution of terrigenous sediments in the western South China Sea: implication for East Asian monsoon evolution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(23): 2768-2776.]
- [10] 肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁 [J]. *微体古生物学报*, 2006, 23(1): 77-86. [Xiao Xiayun, Jiang Qingfeng, Liu Xingqi, et al. High resolution sporopollen record and environmental change since Holocene in the Wulungu Lake, Xinjiang [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2006, 23(1): 77-86.]
- [11] Liu X Q, Herzschuh U, Shen J, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China [J]. *Quaternary Research*, 2008, 70(3): 412-425.
- [12] 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 乌伦古湖介形组合及其壳体同位素记录的全新世气候环境变化 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(3): 382-391. [Jiang Qingfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, et al. Holocene climate reconstruction of Ulungur Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and stable isotopes [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 382-391.]
- [13] 钱鹏, 蒋庆丰, 任雪梅. 新疆乌伦古湖粘土矿物古气候环境意义 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(4): 108-113. [Qian Peng, Jiang Qingfeng, Ren Xuemei. Paleoclimatic significance of the clay minerals from Ulungur Lake sediments, Xinjiang, China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(4): 108-113.]
- [14] 吴敬禄, 马龙. 新疆干旱区柴窝堡湖沉积记录的 150 年来气候环境特征 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30(6): 1137-1144. [Wu Jinglu, Ma Long. Characteristics of the climate and environment in arid regions over the past 150 years recorded by the core sediments of Chaiwopu Lake, Xinjiang, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(6): 1137-1144.]
- [15] 吴敬禄, 马龙, 曾海鳌. 乌伦古湖水量与水质变化特征及其环境效应 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 844-853. [Wu Jinglu, Ma Long, Zeng Haiao. Water quantity and quality change of Ulungur Lake and its environmental effect [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 844-853.]
- [16] 努尔兰·哈再孜. 乌伦古河流域水文特征 [J]. *干旱区研究*, 2014, 31(5): 798-802. [Nurlan Hazazi. Hydrological characteristics in the Ulungur River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(5): 798-802.]
- [17] 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs 垂直分布及年代学意义 [J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 981-987. [Chen Shiyue, Wang Sumin, Chen Yingying, et al. Vertical distribution and chronological implication of <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs in sediments of Dongping Lake, Shandong province [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 981-987.]
- [18] 刘恩峰, 薛滨, 羊向东, 等. 基于<sup>210</sup>Pb 与<sup>137</sup>Cs 分布的近代沉积物定年方法: 以巢湖、太白湖为例 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 89-94. [Liu Enfeng, Xue Bin, Yang Xiangdong, et al. <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb chronology for modern lake sediment: a case study of Chaohu Lake and Taibai Lake [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 89-94.]
- [19] 胡义成, 魏文寿, 袁玉江, 等. 基于树轮的阿勒泰地区 1818—2006 年 1—2 月降雪量重建与分析 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(2): 319-327. [Hu Yicheng, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Reconstruction and analysis of January-February snowfall in the Altay prefecture during 1818-2006 based on tree ring [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 319-327.]
- [20] 胡义成, 袁玉江, 魏文寿, 等. 用树木年轮重建阿勒泰东部 6—7 月平均温度序列 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 1003-1009. [Hu Yicheng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Tree-ring reconstruction of mean June-July temperature during 1613-2006 in East Altay, Xinjiang of China [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4): 1003-1009.]
- [21] 温克刚, 史玉光, 任宜勇. 中国气象灾害大典: 新疆卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 147-168. [Wen Kegang, Shi Yuguang, Ren Yiyong. China meteorological disaster ceremony: Xinjiang volume [M]. Beijing: Meteorological Press, 2006: 147-168.]
- [22] 李疆, 加帕尔, 卡德尔. 乌伦古河径流及布伦托海湖水位多年变化的初步分析 [J]. *干旱区地理*, 1981(1): 10-18. [Li Jiang, Jiapade, Kadeer. Preliminary analysis of runoff of Wulungur River and water level of Wulungu Lake for many years [J]. *Arid Land Geography*, 1981(1): 10-18.]

# Environmental Information Inferred from Environmentally Sensitive Grain-size Component Records in Wulungu Lake, Xinjiang

ZHOU JianChao<sup>1,2</sup>, WU JingLu<sup>1</sup>, ZENG HaiAo<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Analysis of a sediment core from Wulungu Lake of Xinjiang was carried out by using environmental proxy of grain-size. Combining with <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs dating, the characteristics and environmental significance of sensitive grain-size components of Wulungu Lake sediments were studied in Wulungu Lake region. The results showed that the sediment core mainly consisted of clay and fine-silty, however, grain-size displayed a sudden shift before and after 1970 AD; the coarse particle fraction (>16 μm) was significantly increased. The grain size characteristics of the sediments also changed significantly during 1830-1842 AD and in about 1910 AD. The analysis of grain-size frequency distribution curves of the sediment core indicated that the transportation medium or transporting force had changed significantly during corresponding periods. Based on this result, environmentally sensitive grain-size component C2 (7-25 μm) was extracted by the variations of the grain-size standard deviation. Based on correlation analysis between sensitive grain-size component and meteorological data, the environmental significance of sensitive grain-size component C2 was explicated. The results indicated that the content of sensitive grain-size component C2 was related to the regional spring and summer average temperature and winter snowfall, and reflected the intensity of the snow meltwater into the lake. The significant increase of the content of component C2 during 1830~1842 AD and in about 1910 AD thus reflect the increased water inflow and higher lake level. The significant change of grain size characteristics of the sediments during 1960s-70s was related to human activity.

**Key words:** lake sediments; grain size; sensitive component; environmental significance; Wulungu Lake