

新疆喀纳斯湖沉积物粒度组分所揭示的环境特征

周建超^{1,2}, 吴敬禄¹, 曾海鳌¹

(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, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过对新疆喀纳斯湖沉积物进行粒度分析, 结合放射性同位素²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 定年, 研究了喀纳斯湖沉积物粒度敏感组分特征及其环境意义。喀纳斯湖沉积物以细颗粒组分(粒径小于 16 μm)为主, 但 1814~1830 年(32~35 cm 深度处)和 1893~1903 年(18~20 cm 深度处)这两个时期的沉积物粒度特征发生了突变, 粗颗粒组分(粒径大于 16 μm)尤其是粒径大于 63 μm 组分含量迅速升高。对沉积物粒度频率曲线的分析表明, 这两个时期的沉积物来源或沉积动力过程发生了显著变化。基于此, 首先运用粒径-标准偏差法提取了沉积物中的敏感粒度组分 C2(粒径为 15~238 μm), 进而通过敏感粒度组分与器测气象数据的相关性分析和沉积物粗粒径(C)-中值粒径(M)图分析, 研究了喀纳斯湖沉积物沉积时的动力条件。组分 C2 的含量大小与区域春季、夏季温度有关, 反映了山地春季和夏季雪、冰融水入湖的强度, 组分 C2 含量在 1814~1830 年和 1893~1903 年这两个时期的快速增大与水动力异常偏大有关, 据此识别了两次显著的洪水事件。与区域树轮、冰芯记录及文献记载的对比分析表明, 洪水事件的发生与对应时期内暖湿的气候特征有关。

关键词:环境演化; 沉积物; 粒度; 敏感组分; 环境意义; 洪水事件; 喀纳斯湖; 新疆

中图分类号: P512.2

文献标志码: A

Environmental Characteristics Inferred from Sediment Sensitive Grain-size Component Records in Kanas Lake of Xinjiang

ZHOU Jian-chao^{1,2}, WU Jing-lu¹, ZENG Hai-ao¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China; 2. University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the analysis of a sediment core from Kanas Lake of Xinjiang, compared with the dating of radioactive ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs isotopes, the characteristics and environmental significance of sensitive grain-size components of sediments in Kanas Lake were studied. The sediments mainly consist of fine particle components (grain size is less than 16 μm); however, during 1814-1830 AD (the depth of 32-35 cm) and 1893-1903 AD (the depth of 32-35 cm), the grain-size displays a sudden shift, which is the significant increase of the coarse particle components (grain size is more than 16 μm , especially more than 63 μm). The analysis of grain-size frequency curves of sediments indicates that the sediment provenances or dynamic processes have changed significantly during 1814-1830 AD and 1893-1903 AD. And then, the sensitive grain-size component C2 (grain size is 15-238 μm) of sediment is extracted by the method of grain

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271205, U1138301, 41471173)

作者简介: 周建超(1989-), 男, 河南信阳人, 中国科学院大学理学博士研究生, E-mail: xidazhouyangyang@163.com。

通讯作者: 吴敬禄(1965-), 男, 浙江义乌人, 研究员, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: w.jinglu@niglas.ac.cn。

size-standard deviation. Based on the correlation analysis of sensitive grain-size component and meteorological data measured by apparatus, the dynamic conditions of sediments in Kanas Lake were studied with the *C-M* diagram analysis of sediments. The content of sensitive grain-size component C2 is related to the regional spring and summer average temperature, and reflect the intensity of the meltwater from spring, summer snow and ice into the lake in mountainous; the significant increases of content of component C2 during 1814-1830 AD and 1893-1903 AD are related to the unusual increase of hydrodynamic force, thus two significant flood events are identified. Compared with the historical literatures and the records of tree ring and ice core, the flood events are related to warmer and wetter climate conditions during 1814-1830 and 1893-1903.

Key words: environmental evolution; sediment; grain-size; sensitive component; environmental significance; flood event; Kanas Lake; Xinjiang

0 引言

近百年来,全球发生了以增温为主要特征的气候变化,同时气候的不稳定性更为显著。干旱、半干旱地区生态环境脆弱,对气候及环境变化响应敏感。随着西北地区的气候由暖干向暖湿转型^[1]以及降水变化的不确定性增加,尤其是山区融雪性洪水及暴雨洪水频发,为当地社会经济发展带来了不利影响^[2]。通过对历史时期气候环境演化、突变事件及其原因的分析,能够为区域气候变化过程中可能出现的环境突变事件提供历史相似型,为区域生态环境保护提供借鉴。湖泊沉积物是陆地环境变化的天然档案库,保存了丰富的环境演化信息,是研究过去环境变化的良好载体。沉积物中的粒度作为重建古环境的重要指标已广泛应用于古环境研究之中^[3-11]。

湖泊沉积物往往是多种来源或沉积动力过程的混合,不同的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^[12-13]。陈敬安等研究发现,湖水能量是控制沉积物粒度分布的重要因素,粒度的粗细代表了水动力的强弱、湖泊输入水量的相对大小^[3-6];但强明瑞等研究表明,沉积物中粗颗粒含量和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^[12-15]。因此,需要明确粒度变化的环境指示意义,进而探讨各粒度组分所指示的沉积学意义。已有的研究表明,通过 Weibull 分布函数拟合法^[16-17]、端元模型法^[18]、粒径-标准偏差法^[19-20]、因子分析法^[21]等数学方法可以从多峰态的粒度频率曲线中分离出单一粒度组分的特征,提取敏感粒度组分并对沉积物的来源进行分析。本文基于对喀纳斯湖沉积物粒度特征的分析,运用粒径-标准偏差法提取沉积物中的敏感粒度组分,通过其与器测气象数据及区域树轮、冰芯记录的对比分析,明

确粒度敏感组分的环境指示意义,揭示研究时段内的环境突变事件及其控制因素,为新疆山地湖泊的环境保护及流域规划提供借鉴。

1 研究区概况

喀纳斯湖(48°42'N~48°53'N,86°59'E~87°09'E)位于新疆维吾尔自治区布尔津县境内北部的阿尔泰山中段西南坡,系额尔齐斯河主要支流布尔津河上游喀纳斯河的一个开阔段,为中国唯一属于北冰洋—西伯利亚水系的深水湖泊(图1)。湖泊水域面积约 45 km²,湖面海拔约 1 362 m,平均水深 97 m,最大水深 197 m,蓄水量 43.44×10⁸ m³;湖水 pH 值为 8.17,湖水矿化度为 0.04 g·L⁻¹,为淡水湖^[22-24]。湖泊外形呈月牙形,最大湖长约 24 km,宽仅 2.6 km;湖岸陡峭,湖盆呈斗形。喀纳斯湖所在阿尔泰山主要受西风气流的影响和控制,带来大量降水补给冰川,年降水量 700~900 mm,其中冬季和春季降水占 45%~50%,系北冰洋极地气团带来的^[25]。喀纳斯湖东北侧友谊峰(海拔 4 374 m)附近的喀纳斯冰川和湖正北方冰川的冰雪融水分别通过喀纳斯河、阿库里滚河汇入喀纳斯湖,构成喀纳斯湖的主要补给水源;主要排泄水道为喀纳斯湖南侧的喀纳斯河。随着西北地区的气候由暖干向暖湿转型^[1],阿勒泰地区春季融雪洪水和夏季暴雨洪水相应增多,对区域社会经济发展产生了不利影响。

2 采样与分析方法

2012 年,在喀纳斯湖开阔区用重力采样器采集湖泊沉积岩芯,最长岩芯柱长 82 cm,表层沉积岩芯未受扰动。岩芯在野外现场按 1 cm 间隔分样,共获得 82 个样品,按顺序装入密封袋中保存。所有样品及时运回实验室后置于温度为 4℃冰箱中冷藏,以备

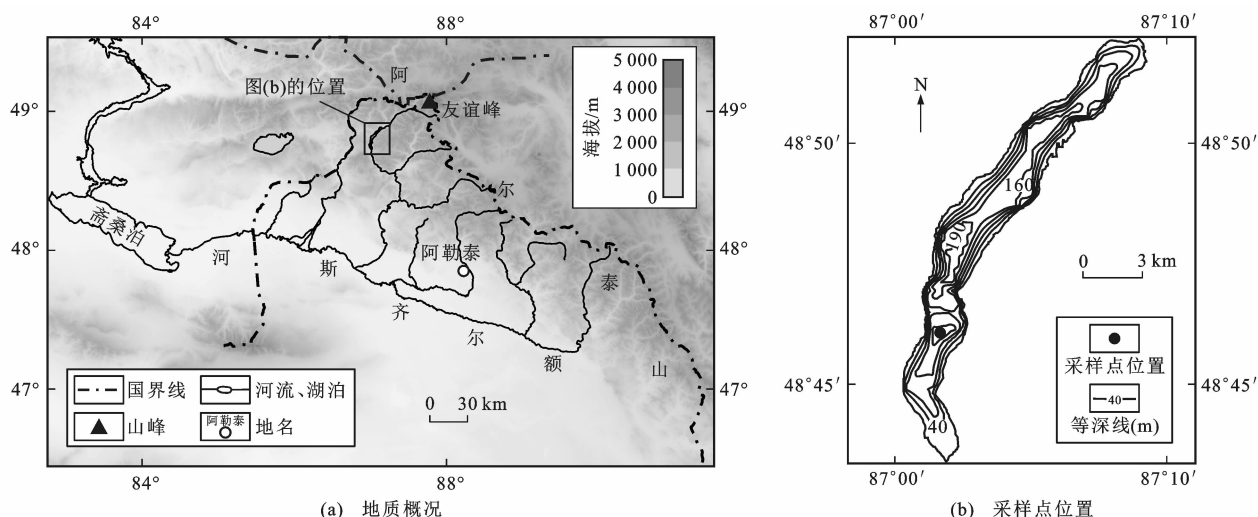


图1 新疆喀纳斯湖地质概况及采样点位置

Fig. 1 Maps Showing Locations of Kanas Lake and the Sampling Site in Xinjiang

分析测试。本文主要对 60 cm 以上层段进行分析。

^{210}Pb 和 ^{137}Cs 放射性比活度是通过 γ 谱分析系统直接分析 465、662 keV 处的 γ 射线能谱得到的,而 ^{210}Pb 的母体同位素 ^{226}Ra 通过分析 352 keV 处的 γ 射线能谱得到的。分析仪器为美国 ORTEC 公司生产的由高纯锗井型探测器 (HPGe GWL)、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。本项分析在中国科学院南京地理与湖泊研究所完成。

沉积物样品经冷冻干燥后,取样品 0.2 g 左右加入 10 mL 质量分数为 10% 的 H_2O_2 和 10 mL 质量分数为 10% 的稀 HCL 溶液分别去除样品有机质及碳酸盐,并加入 10 mL 分散剂质量分数为 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 Mastersize2000 型激光粒度仪测量,各粒级组分平行分析误差小于 5%。粒度试验在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完成。

3 结果分析

3.1 定年结果

喀纳斯湖岩芯主要由黏土质粉砂组成,但 32~35 cm 和 18~20 cm 两个层段主要由砂质粉砂组成。图 2(a) 显示了过剩 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 活度的垂直分布。过剩 ^{210}Pb 活度到 19.5 cm 深度处达到了平衡,而在 19.5 cm 深度以上,过剩 ^{210}Pb 活度随岩芯深度的增加呈指数衰减[图 2(a)]。喀纳斯湖岩芯 ^{137}Cs 活度 5 cm 深度处有一显著的峰[图 2(a)],该层位应是 1963 年大气核试验形成的蓄积峰层位^[26]。喀

纳斯湖为过水性湖泊,其沉积速率会随过湖水流强度的变化而变化,因此,采用 CRS 模式计算年代^[27]。运用 CRS 模式计算得到 8 cm 深度处对应的年代为 1968 年,因而 ^{210}Pb 定年结果与 ^{137}Cs 定年结果总体一致。运用 CRS 模式计算得到 18.5 cm 深度处对应的年代为 1899 年,考虑到岩芯底部的压实作用,18.5 cm 以下层段的年龄通过 16.0~18.5 cm 深度处平均线性沉积速率(每年 0.192 cm)获得,60 cm 深度处对应的年代约为 1683 年,据此建立了岩芯年代与深度的对应关系[图 2(b)]。

3.2 粒度特征

根据 Udden-Wentworth 法将岩芯岩性划分为黏土(粒径小于 4 μm)、细粉砂(粒径为 4~16 μm)、中粉砂(粒径为 16~32 μm)、粗粉砂(粒径为 32~63 μm)和砂(粒径大于 63 μm)等 5 类,划分结果见图 3。喀纳斯湖沉积物主要由黏土和细粉砂组成,分别占总量的 36.2% 和 45.2%,但 32~35 cm 和 18~20 cm 深度处黏土和细粉砂组分的含量(体积分数,下同)显著降低,平均含量分别为 14.6% 和 16.1%,中粉砂组分平均含量为 10%,粗粉砂组分平均含量为 5.7%,砂组分含量整体较低,平均仅 2.9%,但 32~35 cm 和 18~20 cm 深度处含量显著增大,平均含量分别为 24.30% 和 13.86%,最高含量超过 30%,中值粒径、平均粒径和标准偏差也相应增大。从图 3 可以看出,不同粒度组分随深度的变化有所不同。黏土组分与粉砂组分变化趋势较为一致,与粒径大于 16 μm 各组分的变化趋势相反;中值粒径、平均粒径与粒径大于 16 μm 各组分的变化趋势较为一致。

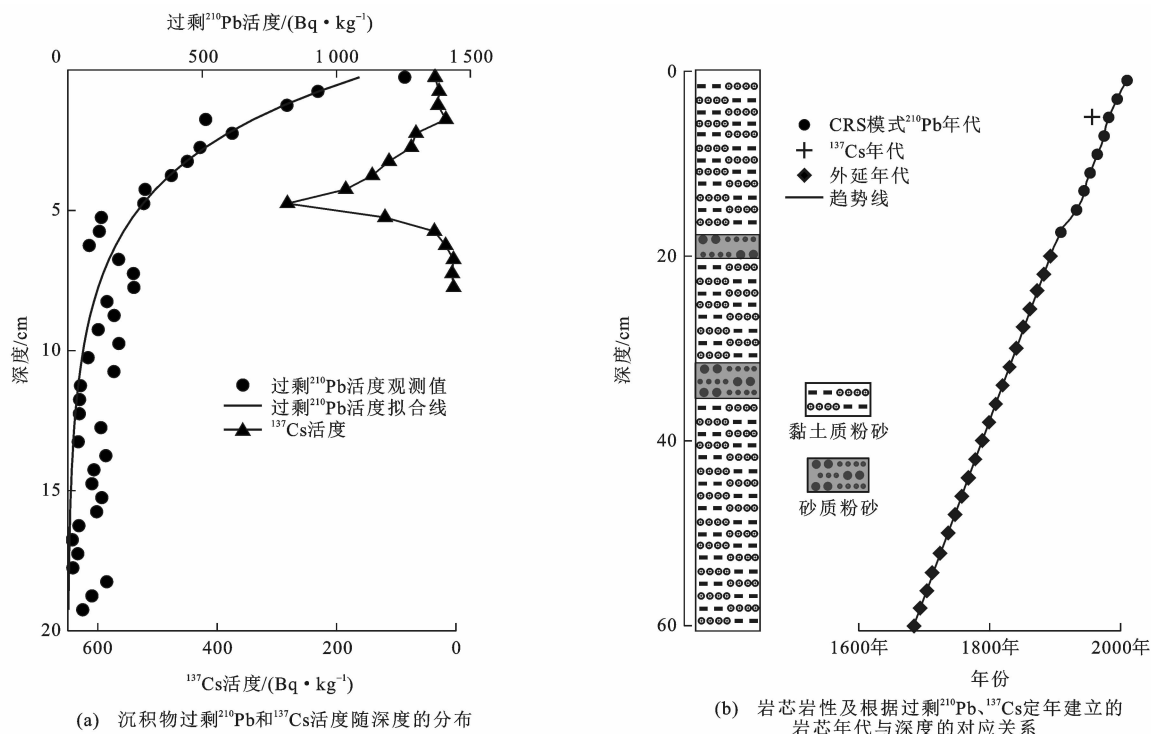


图2 岩芯岩性与年代模式

Fig. 2 Lithology and Age Model of Cores

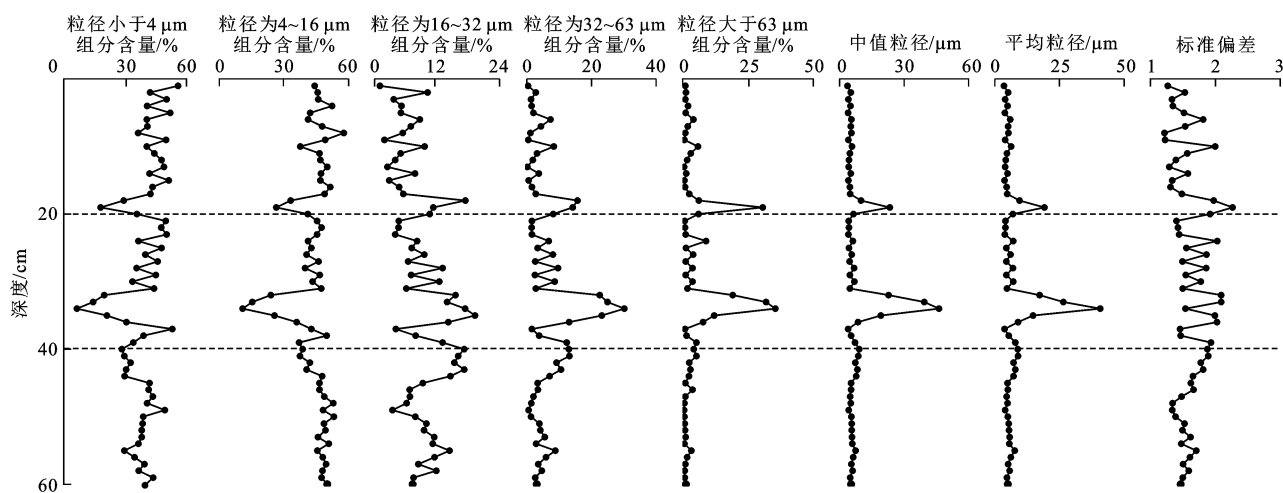
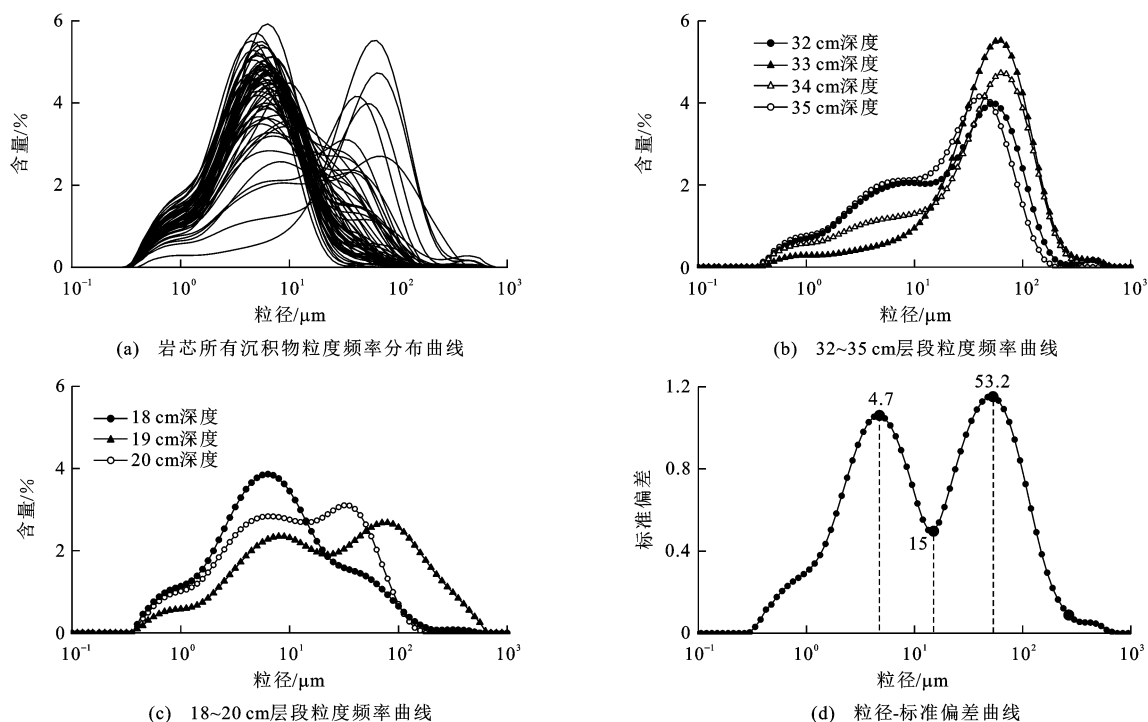


图3 沉积物粒度特征随深度的变化

Fig. 3 Relationships Between Grain-size Characteristics of Sediments and Depth

沉积物粒度频率曲线能够直观反映其所包含的粒度组分(单组分或多组分)信息,并可通过求解不同组分的分布范围和相对含量来追索沉积物的物质来源和搬运方式。当搬运介质和搬运方式一定以及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;多组分总体是单组分的自然累积,在频率曲线上表现为多峰光滑曲线^[28]。喀纳斯湖沉积物粒度频率曲线主要为单峰负偏态曲线,粒度偏向细粒级一侧,反映了较为单一、比较稳定的沉积动力条件[图 4(a)];但 32~35

cm 深度处粒度频率曲线变为单峰正偏态曲线,沉积物粒度明显变粗,表明沉积物的搬运介质或介质动力发生了显著变化[图 4(b)];18~20 cm 深度处粒度频率曲线呈双峰态,表明沉积物可能来源于同一物源,但在不同沉积动力过程中按照不同的比例混合而成,也可能是不同物源和不同沉积动力条件共同作用的结果[图 4(c)]。对于西北干旱、半干旱地区的湖泊而言,其沉积作用主要包括流水作用、风力作用及流水和风力的混合作用。从喀纳斯湖沉积物的粒度频率曲线特征来看,在某些时期,沉积作用的



图(a)曲线对应不同深度岩芯样品

图4 沉积物粒度频率曲线及粒径-标准偏差曲线

Fig. 4 Grain-size Frequency Curves and Grain Size-standard Deviation Curve of Sediments

强度发生了显著变化,也可能有其他沉积作用参与其中。

4 讨论

4.1 粒度敏感组分及其指示意义

本文运用粒径-标准偏差法来提取粒度中的敏感组分。图4(d)展示了利用粒径-标准偏差法所提取出的3个粒度组分,较高的标准偏差所对应的粒径为对沉积环境变化敏感的粒度众数。两个明显的标准偏差峰值对应的粒径为4.7 μm 和53.2 μm ,其界限为15 μm ;此外,在粗粒侧(粒径为238~708 μm)也有一较弱的峰。据此将剖面粒度划分为C1(粒径小于15 μm)、C2(粒径为15~238 μm)和C3(粒径大于238 μm)等3个组分。组分C1含量为17.0%~97.2%,平均为80.5%;组分C2含量为2.8%~81.7%,平均为19.4%;组分C3含量低于1%,本文不讨论其环境意义。

从图5可以看出,组分C1、C2的粒级含量均有显著波动,组分C1、C2的含量在整个剖面呈大致相反的变化趋势。从各组分平均粒径的变化来看,组分C1、C2平均粒径与剖面中值粒径总体上呈一致的变化趋势,但组分C2平均粒径变化更为显著,且与剖面中值粒径的相关性更好,反映了湖泊沉积物

粒度变化主要受组分C2的含量及平均粒径的控制,组分C2应是沉积物粒度组成中的环境敏感粒度组分。

为了明确环境代用指标的环境指示意义,将敏感组分C2的含量及平均粒径与湖区1958~2012年器测气象数据(以阿勒泰市气象站为代表)进行相关性分析(表1)。由表1可知:组分C2含量与夏季(6月至8月)均温、春季(4月至5月)均温在0.05水平上显著相关,与夏季降水量及暴雨频次(降雨量大于24 mm的天数)、冬季降水量及暴雪频次(降雪量大于5 mm的天数)均呈正相关关系,但不显著;组分C2的平均粒径与各项器测气象数据的相关性均不显著。在春季、夏季温度偏高的年份,冰川活动性高,侵蚀力强,且春季、夏季的融雪水量增大,入湖径流强度增大,冰水河流携带现代冰川磨蚀作用形成的粉砂物质和古冰碛中的细颗粒物进入湖泊^[29],较强的入湖径流能够带来更多的粗颗粒物并沉积下来,组分C2的含量相应增大。因此,组分C2的含量变化间接反映了春季、夏季温度的变化。

4.2 C-M图分析

沉积物粗粒径(C)与中值粒径(M)的相关关系包含了丰富的环境变化信息,据此可以判定沉积物的搬运方式,推测特殊沉积环境与成因^[30]。通过

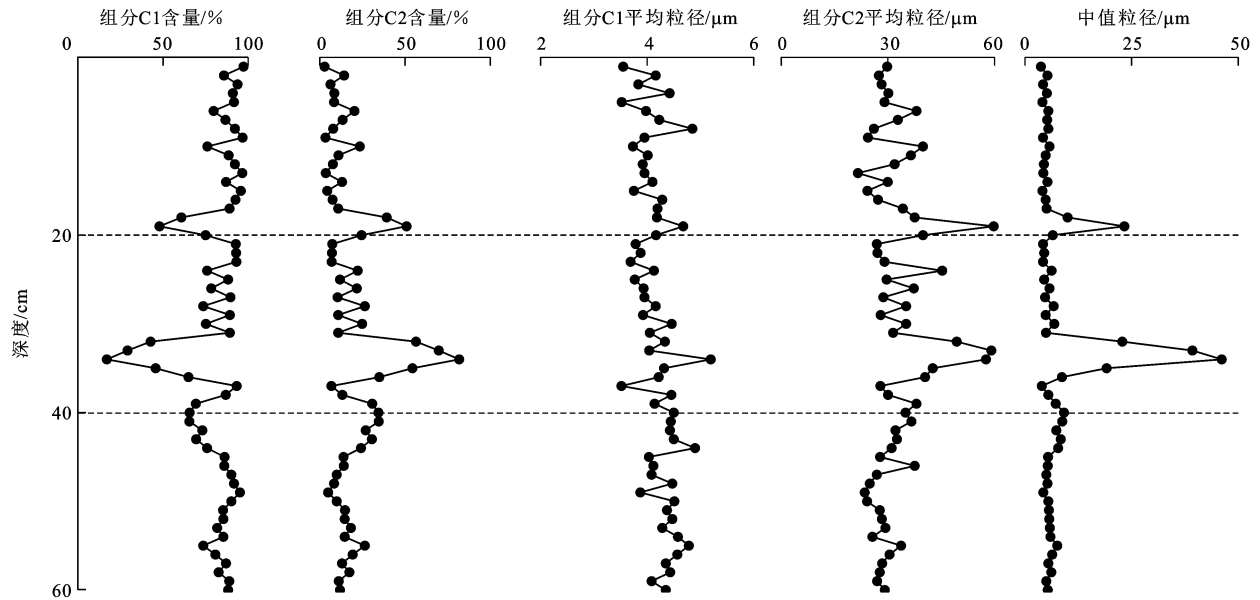


图 5 岩芯粒度敏感组分含量及其粒径对比

Fig. 5 Comparisons of Contents of Sensitive Grain-size Components of Cores and Their Grain Sizes

表 1 岩芯粒度敏感组分 C2 含量及其平均粒径与器测气象数据的相关系数矩阵

Tab. 1 Correlation Coefficient Matrix of Contents and Mean Grain Sizes of Sensitive Grain-size Component C2 of

Core and Meteorological Data Measured by Apparatus

参数名称	组分 C2 含量	组分 C2 平均粒径	夏季平均温度	夏季降水量	夏季暴雨频次	冬季平均温度	冬季降水量	冬季暴雪频次	春季平均温度
组分 C2 含量	1.000								
组分 C2 平均粒径	0.741**	1.000							
夏季平均温度	0.319*	0.133	1.000						
夏季降水量	0.187	0.134	0.286	1.000					
夏季暴雨频次	0.241	0.177	0.206	0.479**	1.000				
冬季平均温度	-0.184	-0.099	0.013	-0.033	-0.133	1.000			
冬季降水量	0.134	0.014	0.116	0.148	0.024	-0.144	1.000		
冬季暴雪频次	0.209	0.104	0.037	0.095	0.014	0.143	0.324**	1.000	
春季平均温度	0.274*	0.112	0.306*	0.122	0.054	0.171	-0.092	0.074	1.000

注：*、** 分别表示相关系数在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

不同沉积物粗粒径、中值粒径可绘出相应的 C-M 图。根据 C-M 图形态、沉积物分布范围以及图形与 C=M 基线的关系等特点,可对沉积物形成时的沉积环境做出判断。根据 C-M 图, Wilhelm 等将阿尔卑斯山 Blanc 湖沉积物划分为不同沉积类型,进而识别了历史时期的环境突变事件^[31]。

对喀纳斯湖沉积物进行 C-M 图分析(图 6),喀纳斯湖沉积物主要存在两种岩性类型。岩性 1 是黏土质粉砂,分布在大多数层位;岩性 2 为砂质粉砂,分布在 32~34 cm 和 19 cm 两个层位。由此可以得到两种沉积类型:沉积 1 型在 C-M 图中分布较为集中,中值粒径与粗粒径的变化范围均较小,与典型的

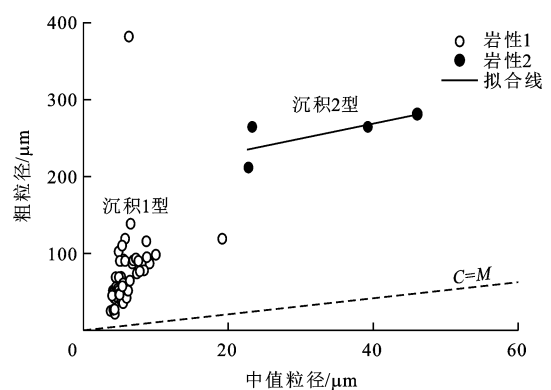


图 6 沉积物 C-M 图

Fig. 6 C-M Diagram of Sediments

深水悬浮组分较为接近^[30],反映了静水沉积环境;沉积2型中值粒径变化较大,而粗粒径变化较小,且各样品拟合所得的曲线在C-M图上平行于 $C=M$ 线,表明沉积物同样受到水流的分选,但反映了水动力异常偏大,即洪水所形成的粒度特征。

粗颗粒组分C2(粒径为15~238 μm)是对环境变化敏感的组分,其含量大小与区域春季、夏季温度有关,反映了山地春季和夏季雪、冰融水入湖的强度。组分C2含量在多数层段变化平稳,然而在32~35 cm(1814~1830年)及18~20 cm(1893~1903年)两个层段快速增大,指示湖泊的沉积环境发生了突变。对沉积物C-M图的分析进一步表明,上述层段沉积环境的突变可能是洪水时期水动力异常偏大产生的。因此,组分C2含量在1814~1830年和1893~1903年两个时期的快速增大记录了两次显著的洪水历史事件。

4.3 沉积物记录的洪水事件及其成因

干旱、半干旱地区湖泊沉积物的粒度组成主要受到流水作用和风力作用的影响^[3-15,32]。喀纳斯湖为山地湖泊,其所在的阿尔泰山阻挡了西来水汽,区域降水较为丰沛,区域森林植被广泛发育,在一定程度上限制了风沙活动的发展,因而风力作用对湖泊沉积物粒度组成的影响有限。另外,喀纳斯湖是开口湖,也是深水湖,湖面波动及湖泊内流对沉积物的影响很微弱,沉积物中的粒度主要反映了入湖水的水动力和流量大小。如果入湖水流强度大,细颗粒物来不及沉积就被带出湖泊,粗颗粒物因重

力作用而沉积下来;当入湖水流强度较弱时,水流携带的粗颗粒物相对减少,沉积物中沉积了更多的细颗粒物。对同为开口湖的博斯腾湖^[6]、镜泊湖^[33]、大鬼湖^[34]的研究也有同样的结论,即湖泊沉积物粒度主要指示了水动力和入湖流量的大小,进而与流域降水多少有关。喀纳斯湖既受大气降水的补给,也受到冰川融水和季节性积雪融水的补给,而区域春季、夏季温度可以通过影响雪、冰的消融量进而影响入湖流量,因此,喀纳斯湖沉积物的粒度组成不单与流域降水多少有关,也包含了区域春季、夏季温度变化的信息。

在1814~1830年和1893~1903年两个时期,组分C2含量(尤其是粒径大于63 μm 的组分含量)显著增大(图7)。对沉积物C-M图的分析表明对应时期内水动力异常,反映了突变的沉积环境,记录了两次显著的洪水事件。在对应两次洪水事件发生的时期,阿勒泰地区树轮记录当时5月至9月月均温偏高(图7)^[35],尤其是1814~1830年,树轮记录其为近400年来高温延续时间最长的时段^[36]。较高的温度有利于冰雪融化,使入湖水量变大并随之带来更多的粗颗粒物。对应于喀纳斯湖沉积记录的洪水时期,古里雅冰芯积累量增加(图7),而高的冰芯积累量指示了山地降水量的增加^[37]。因此,喀纳斯湖1814~1830年和1893~1903年两次较大的洪水事件与当时暖湿的气候背景有关。历史文献也记载清光绪二十年(1894年)(阿勒泰)乌梁海两翼七旗大雪,春季牲畜死亡惨重^[38]。冬季积雪较多,

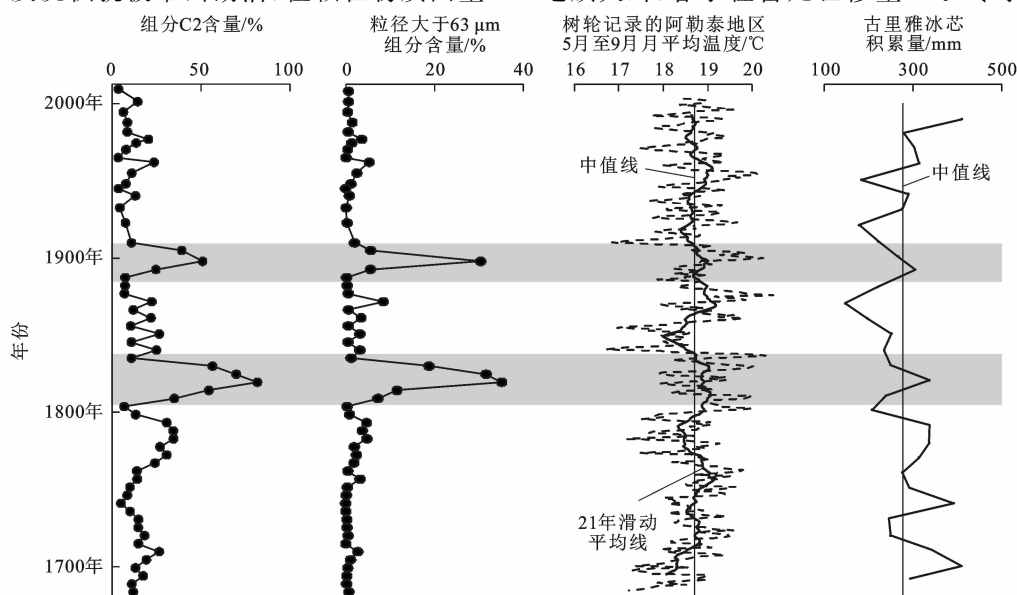


图7 敏感组分与区域树轮、冰芯记录对比

Fig. 7 Comparisons of the Sensitive Components and the Records of Regional Tree Ring and Ice Core

来年随着温度上升,积雪消融量变大,与湖泊记录的 1893~1903 年洪水事件一致。

5 结 语

(1)喀纳斯湖沉积物主要由黏土和细粉砂组成,分别占总量的 36.2%和 45.2%,中粉砂组分的平均含量为 10%,粗粉砂组分的平均含量为 5.7%,砂组分含量整体较低,平均仅 2.9%,但在 32~35 cm 和 18~20 cm 两个层段含量显著增大,平均含量分别为 24.30%和 13.86%。不同粒度组分随深度的变化有所不同,其中黏土组分与粉砂组分变化趋势较为一致,与粒径大于 16 μm 各组分的变化趋势相反。

(2)运用粒径-标准偏差法提取了沉积物中的敏感粒度组分 C2(粒径为 15~238 μm)。与湖区器测气象数据的相关性分析及对沉积物 C-M 图的分析表明,组分 C2 的含量大小与区域春季、夏季温度有关,反映了山地春季和夏季雪、冰融水入湖的强度,组分 C2 含量在 1814~1830 年和 1893~1903 年这两个时期的快速增大与洪水时期水动力异常偏大有关。

(3)敏感粒度组分 C2 含量及粒径大于 63 μm 组分含量与区域冰芯、树轮记录的对比分析表明,1814~1830 年和 1893~1903 年这两个时期发生的洪水事件与对应时期内流域降水量增加、温度偏高的气候特征有关。

野外工作得到喀纳斯景区管理委员会康剑等以及中国科学院新疆生态与地理研究所马龙等的支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

References :

- [1] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping, LI Dong-liang, et al. Discussion on the Present Climate Change from Warm-dry to Warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.
- [2] 努尔兰·哈再孜,沈永平. 新疆阿勒泰地区的洪水特性[J]. 水文, 2014, 34(4): 74-81.
NUERLAN Hazaizi, SHEN Yong-ping. Flood Characteristics of Altay Area, Xinjiang[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(4): 74-81.
- [3] 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 Guo-jiang, ZHANG Feng, et al. Environmental Records of Lacustrine Sediments in Different Time Scales; Sediments Grain Size as an Example[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2003, 33(6): 563-568.
- [4] XIAO J L, CHANG Z G, WEN R L, et al. Holocene Weak Monsoon Intervals Indicated by Low Lake Levels at Hulun Lake in the Monsoonal Margin Region of Northeastern Inner Mongolia, China[J]. Holocene, 2009, 19(6): 899-908.
- [5] CAMPBELL C. Late Holocene Lake Sedimentology and Climate Change in Southern Alberta, Canada[J]. Quaternary Research, 1998, 49(1): 96-101.
- [6] 黄小忠,陈发虎,肖 舜,等. 新疆博斯腾湖沉积物粒度的古环境意义初探[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 291-297.
HUANG Xiao-zhong, CHEN Fa-hu, XIAO Shun, et al. Primary Study on the Environmental Significances of Grain-size Changes of the Lake Bosten Sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3): 291-297.
- [7] 郭利成,吴佳斌,熊尚发,等. 基于静水沉降法的沉积物颗粒分选流程[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(5): 694-699.
GUO Li-cheng, WU Jia-bin, XIONG Shang-fa, et al. New Sedimentary Particle Sorting Process Based on Hydrostatic Sedimentation Method [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(5): 694-699.
- [8] 张小龙,徐柏青,李久乐,等. 青藏高原西南部塔若错湖泊沉积物记录的近 300 年来气候环境变化[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 79-90.
ZHANG Xiao-long, XU Bai-qing, LI Jiu-le, et al. Climatic and Environmental Changes over the Past About 300 Years Recorded by Lake Sediments in Taro Co, South-western Tibetan Plateau[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 79-90.
- [9] 董 进,王 永,张世红,等. 内蒙古黄旗海全新世湖泊沉积物粒度分析及其沉积学意义[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1514-1522.
DONG Jin, WANG Yong, ZHANG Shi-hong, et al. Grain Size Analysis of Holocene Lacustrine Sediments in the Huangqihai Lake of Inner Mongolia and Its Sedimentological Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(10): 1514-1522.
- [10] 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 Jing-zhong, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao. Grain-

- size Characteristics and Its Environmental Significance of Lake Chenpuhaizi Sediments in Hetao Plain, Inner Mongolia[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2014, 34(5): 137-144.
- [11] 郭晓阳,王 维,王国良,等. 季风边缘区湖泊表层沉积物粒度组分分布特征与影响因素[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 677-691.
- GUO Xiao-yang, WANG Wei, WANG Guo-liang, et al. Within-lake Distributions of Grain-size Components and Environmental Implications Based on the Survey of Lake Surface Sediment of Chinese Monsoon Marginal Area[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 677-691.
- [12] 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 Ming-rui, CHEN Fa-hu, ZHOU Ai-feng, 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.
- [13] 金章东. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 34-44.
- JIN Zhang-dong. Composition, Origin and Environmental Interpretation of Minerals in Lake Sediments and Recent Progress[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 34-44.
- [14] 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:以陕西红碱淖湖泊为例[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 87-92.
- SHEN Ji, WANG Yong, YANG Xiang-dong, et al. Paleosandstorm Characteristics and Lake Evolution History Deduced from Investigation on Lacustrine Sediments: The Case of Hongjiannao Lake, Shaanxi Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1): 87-92.
- [15] 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.
- [16] 肖 舜,周爱锋,黄小忠,等. 柴达木盆地表土与大气降尘粒度 Weibull 组成及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1193-1200.
- XIAO Shun, ZHOU Ai-feng, HUANG Xiao-zhong, et al. Grain-size Weibull Composition of Surface Dust Deposits and Atmospheric Dustfall, and Their Environmental Implications in Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5): 1193-1200.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 You-bin, 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.
- [20] 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 Jing-lu, 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.
- [21] 陈国成,郑洪波,李建如,等. 南海西部陆源沉积粒度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 Guo-cheng, ZHENG Hong-bo, LI Jian-ru, 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.
- [22] 吴敬禄,曾海鳌,马 龙,等. 新疆主要湖泊水资源及近期变化分析[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 142-150.
- WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, MA Long, et al. Recent Changes of Selected Lake Water Resources in Arid Xinjiang, Northwestern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 142-150.
- [23] 程培峰,李吉庭,宇德忠,等. 新疆阿尔泰山喀纳斯湖冰层温度变化规律试验研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 692-698.
- CHENG Pei-feng, LI Ji-ting, YU De-zhong, et al. Study of the Ice Cover Temperature Variation of the Kanas Lake[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 692-698.
- [24] 江合理,赵井东,殷秀峰,等. 阿尔泰山喀纳斯河流域末次冰期 OSL 年代学新证[J]. *冰川冻土*, 2012, 34

- (2):304-310.
JIANG He-li, ZHAO Jing-dong, YIN Xiu-feng, et al. New OSL Chronology of the Last Glaciation in Kanas River Valley, Altay Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2):304-310.
- [25] 张 威, 付延菁, 刘蓓蓓, 等. 阿尔泰山喀纳斯河谷晚第四纪冰川地貌演化过程[J]. 地理学报, 2015, 70(5):739-750.
ZHANG Wei, FU Yan-jing, LIU Bei-bei, et al. Geomorphological Process of Late Quaternary Glaciers in Kanas River Valley of the Altay Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5):739-750.
- [26] 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 垂直分布及年代学意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5):981-987.
CHEN Shi-yue, WANG Su-min, CHEN Ying-ying, et al. Vertical Distribution and Chronological Implication of ^{210}Pb and ^{137}Cs in Sediments of Dongping Lake, Shandong Province[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(5):981-987.
- [27] APPLEBY P G, OLDFIELD F. The Calculation of Lead-210 Dates Assuming a Constant Rate of Supply of Unsupported ^{210}Pb to the Sediment[J]. Catena, 1978, 5(1):1-8.
- [28] 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.
SUN Dong-huai, AN Zhi-sheng, SU Rui-xia, et al. Mathematical Approach to Sedimentary Component Partitioning of Polymodal Sediments and Its Applications[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(3):269-276.
- [29] 易朝路, 崔之久. 新疆阿尔泰山哈纳斯河流域冰川湖泊的分类与沉积类型[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(5):477-485.
YI Chao-lu, CUI Zhi-jiu. Classification and Sedimentary Types of Glacial Lakes in the Hanasi River Catchment, the Altay Mountains, Xinjiang[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(5):477-485.
- [30] PASSEGA R. Grain Size Representation by C-M Patterns as a Geological Tool[J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(4):830-847.
- [31] WILHELM B, ARNAUD F, ENTERS D, et al. Does Global Warming Favour the Occurrence of Extreme Floods in European Alps? First Evidences from a NW Alps Proglacial Lake Sediment Record[J]. Climatic Change, 2012, 113(3):563-581.
- [32] 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[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2007, 37(1):77-85.
CHEN Fa-hu, HUANG Xiao-zhong, ZHANG Jia-wu, et al. Humid Little Ice Age in Arid Central Asia Documented by Bosten Lake, Xinjiang[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2007, 37(1):77-85.
- [33] 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[J]. 湖泊科学, 2006, 18(6):605-614.
HOU Xin-hua, WU Yan-hong, YANG Li-yuan. The Paleo-precipitation History Recorded by the Characteristics of Grain-size of Lake Jingpo During Holocene[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(6):605-614.
- [34] ARTHUR CHEN C T, LOU J Y, WANN J K. Preliminary Paleoclimatological Records from High Mountain Lakes in Taiwan[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences Journal, 1993, 4(3):321-329.
- [35] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 用树木年轮重建阿勒泰西部 5~9 月 365 年来的月平均气温序列[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2):288-294.
ZHANG Tong-wen, YUAN Yu-jiang, YU Shu-long, et al. Reconstructed Mean Temperature Series from May to September with Tree-ring in the Western Region of Altay near the Recent 365 a[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2):288-294.
- [36] 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 Yi-cheng, YUAN Yu-jiang, WEI Wen-shou, et al. Tree-ring Reconstruction of Mean June-July Temperature in East Altay, Xinjiang of China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4):1003-1009.
- [37] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2 ka 来温度与降水变化: 古里雅冰芯记录[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 1996, 26(4):348-353.
YAO Tan-dong, QIN Da-he, TIAN Li-de, et al. Variations in Temperature and Precipitation in the Past 2 ka on the Xizang (Tibet) Plateau: Guliya Ice Core Record[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 1996, 26(4):348-353.
- [38] 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.
WEN Ke-gang, SHI Yu-guang, REN Yi-yong. China Meteorological Disasters Books: Xinjiang Volume[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.