

泸沽湖表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素

吴 汉 常凤琴 张虎才 李华勇 蒙红卫 段立曾
刘东升 李 楠 朱梦姝

(云南师范大学旅游与地理科学学院/高原湖泊生态与全球变化重点实验室/高原地理过程与环境云南省重点实验室 昆明 650500)

摘 要 选择位于青藏高原和云贵高原过渡区的泸沽湖作为研究对象,对南部主湖区 70 个表层沉积物样品进行了粒度分析,结合湖泊周围自然地理要素,探讨了粒度各组分在空间上的分布特征及其影响因素。结果表明:泸沽湖南部主湖区表层沉积物沉积类型以黏土质粉砂为主,少数样品为砂质粉砂、砂,砾石主要分布在研究区南部和北部湖滨带,其中粉砂是该研究区的优势粒级。另外,南部主湖区表层沉积物粒度各组分分布具有明显的空间差异性,其中研究区东南侧及西南侧由于受入湖河流(山跨河、三家村河)的影响,导致黏土组分呈舌状分别向北、向东北方向延伸,但东南侧由于受湖水外流形成的定向湖流顶托作用,对研究区物源的贡献较弱;研究区西北部砂组分由于受到悬移作用和定向湖流影响,由西北向东南方向凸出;由于受反时针环流作用的影响,大量细粒物质由研究区北部和西南侧悬移至研究区南部并沉积下来,使得此处有大量细物质沉积。同时指出,泸沽湖南湖表层沉积物粒度空间分布的差异性特征受控于湖泊沉积动力过程及沉积物对环境变化响应敏感程度的差异,研究湖泊表层沉积物粒度组成不仅对于认识湖泊水动力及物质输入状况有很大的促进作用,对合理选择钻孔岩芯位置、开展湖泊沉积古气候环境变化研究具有一定的参考意义。

关键词 泸沽湖 表层沉积物 粒度 空间分布

第一作者简介 吴 汉 男 1987 年出生 硕士 湖泊沉积与环境演化 E-mail: hanwuynsf@163.com

通讯作者 常凤琴 女 副教授 E-mail: fqchang@niglas.ac.cn

中图分类号 P736.21 **文献标识码** A

0 引言

湖泊作为陆地上相对独立的自然综合体,是岩石圈、水圈、生物圈和大气圈相互作用的连接点,记录了区域内环境变化的综合信息^[1-2]。和其他各种自然载体(冰芯、石笋、黄土、深海沉积物、树轮)相比,湖泊沉积物具有沉积物信息量大、沉积连续、沉积速率大、分辨率高、地理覆盖面广等特点,使其成为古气候、古环境研究的理想材料,吸引了众多学者的目光^[1]。其中,湖泊表层沉积物作为研究现代湖泊的载体,是物理、化学、生物、水文及地质构造等诸多要素在沉积物形成过程中的综合体现,广泛应用于各种湖泊生态环境评价、污染事件调查等领域,是研究现代沉积学的重要手段^[2]。粒度作为利用沉积物重建古环境的代用指标之一,因其测试简单、费用少、干扰因素少等特点,被广泛应用于各种沉积环境研究中^[3-6]。其中沉积物粒度分布特征被广泛应用于搬运介质、搬运方

式以及沉积环境等方面的研究,并取得了很大进展^[7],受到湖泊研究者的广泛而持续的关注^[4-5]。

云贵高原地处东亚季风与印度季风的交汇地带,是对全球变化响应和反馈最敏感的地区之一^[8],也是众多研究者重点关注的地区之一。自 20 世纪 90 年代以来,针对该地区湖泊的古气候研究开展了很多工作,如早期的陈敬安^[9-10]、周静^[11]、张振克^[8,12]、沈吉等^[13]陆续开展了洱海全新世以来的古气候研究;吴艳宏等^[14]开展了滇池 13 ka B.P.以来气候演化的研究;陈敬安等^[15]通过化学指标对程海进行了研究,重建近代以来气候演化序列;刘占红等^[16]开展了纳帕海古环境演化的研究;张虎才等^[17-18]对云南主要湖泊进行了大范围的考察和钻孔岩芯提取。近年来,研究者们对滇中和滇西北地区,如星云湖^[19-21]、杞麓湖^[22]、天才湖等^[23-24]湖泊进行了古生态和古湖泊学意义研究,泸沽湖的研究也主要集中在古气候方面^[25-26],并在此基础上对不同时间尺度的环境演变

收稿日期:2015-07-27; 收修改稿日期:2015-12-23

基金项目:国家自然科学基金(41361008);云南省高端人才引进项目(2010CI111);湖泊沉积与环境变化云南省创新团队项目(2010CI) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41361008; Yunnan Provincial Government Senior Talent Program, No.2010CI111; Innovation Team Project on the Lake Ecology and Environmental Change of Yunnan, No. 2011CI]

进行了恢复和重建。然而到目前为止,针对该区域的研究主要集中在古气候和古环境等方面的重建,对其表层沉积物的研究相对较少。在以往的研究中,以沉积物粒度为古环境代用指标,均着眼于全样品粒度各组分含量的变化,而对于整个湖泊现代沉积物中粒度组分与沉积环境的探讨不多。此外,由于粒度指标在环境解释方面具有多解性,往往需要结合其他代用指标或者气象资料进行分析才能确定粒度指标与环境指向之间的差异^[27],因此对湖泊表层沉积物的粒度组分研究有助于了解粒度相关指标空间分布的控制因素,从而进一步认识粒度相关指标所揭示的气候环境意义。

本文选择泸沽湖南湖作为研究对象,通过对其表层沉积物粒度进行测试,分析沉积物粒度的空间分布特征及变化趋势,结合自然地理环境,探讨影响其空间分布特征的控制因素,并在此基础上,可以较为准确地选择与确定钻孔岩芯提取位置,进而运用沉积物粒度指标重建该地区古气候与古环境的演化历史。

1 研究区概况

泸沽湖位于四川和云南交界处($27^{\circ}41' \sim 27^{\circ}45' N$, $100^{\circ}45' \sim 100^{\circ}50' E$),是云贵高原第二深淡水湖(图1),呈北西—东南走向,为构造作用形成的断陷湖盆。泸沽湖从形态上可分为北部和南部两部分湖区,湖中分布有6个大小不一的石质小岛。湖面海拔约2 692.2 m(2005年实测数据),相应湖水面积57.7 km²、流域面积216 km²。湖泊平均水深38.4 m、最大

水深105.3 m。湖水主要由湖面降水和地表径流补给,入湖主要河流有南岸的三家村河、落水村河、山跨河等,其中山跨河为泸沽湖流域较长的河流,出湖河流主要为海门河。泸沽湖是一个永不冻结的湖泊,其湖水温度为 $10.0^{\circ}C \sim 21.4^{\circ}C$ 。湖区属于亚热带高原季风气候,年平均温度 $12.9^{\circ}C$,1月份均温为 $5.4^{\circ}C$,7月份均温为 $18.9^{\circ}C$;年降水量介于730~850 mm,89%的降水主要集中在6—10月,每年11月份至翌年4月份,由于受西风带南移的影响,该区干暖少雨;5—10月,受来自印度洋的西南季风影响,降水充沛,形成明显的干湿两季^[28-29]。湖区周围森林覆盖率较高,以落叶阔叶次生林和落叶阔叶、落叶针叶次生混交林为主,水生植物广泛分布^[30]。草海位于泸沽湖南部水域的东部地区,面积约为8.7 km²,是泸沽湖外出水流必经之地^[30]。此外,泸沽湖是一个典型的半封闭式深水贫营养湖泊,人类干扰作用较小,水质为国家地面水I类标准,由于其沉积连续,沉积速率稳定且有机质丰富,是开展现代环境变化研究的天然实验场地^[26,31]。

2 材料与方法

2013年11月采用奥地利产水上平台活塞取芯设备在泸沽湖南部(以下简称泸沽湖南湖)中心位置采集长钻岩芯 LGH-1 工作过程中,利用重力钻在南湖不同部位采集表层(现代)沉积物样品70个,采样点水深介于2.7~49.8 m,基本覆盖南湖各个区域,样品采集厚度约为1~2 cm,并在现场描述,分别装入聚乙烯样品袋,运回实验室低温($4^{\circ}C$ 左右)保存,以备

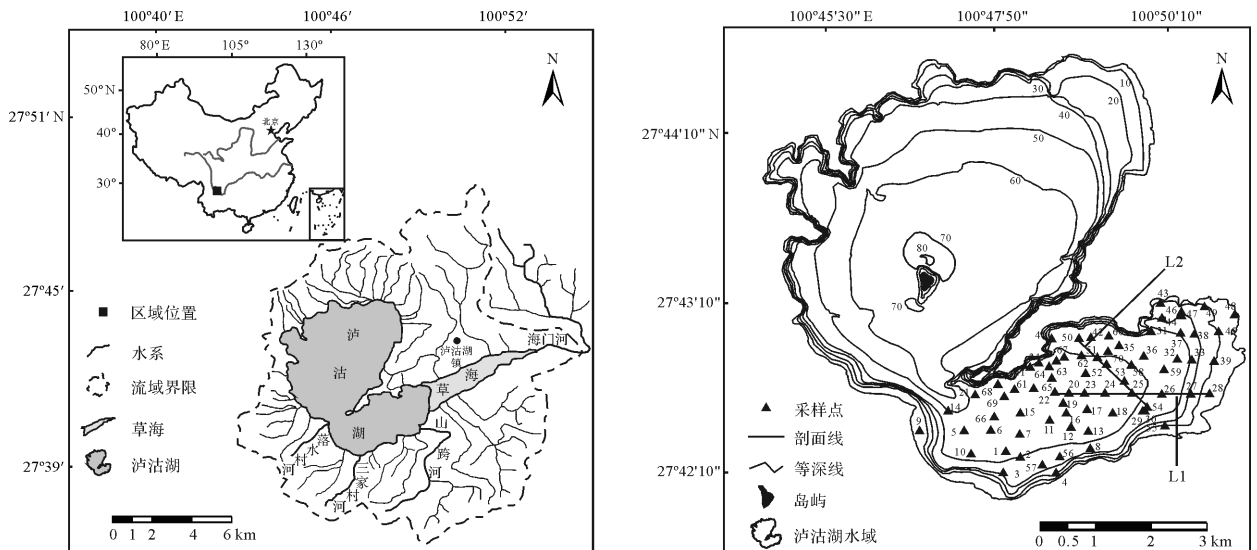


图1 泸沽湖流域、水深及采样点分布

Fig.1 The catchment, water depth and the distribution of sampling points in Lugu Lake

分析所用。此外,本课题组于2014年9月对泸沽湖进行了大规模考察,调查了泸沽湖湖区及其周围自然环境状况。本文对所采沉积物样品进行粒度分析,实验步骤如下:

在实验室称取烘干的样品约0.25 g放入50 mL的烧杯中(对于含有粗粒的样品首先过筛,选取粒径小于2mm的样品进行分析),加入10 mL浓度为10%的HCl溶液,然后在加热板上进行加热,使其充分反应,除去样品中碳酸盐类;当气泡完全排完后,放置冷却,然后加入10 mL浓度为10%的H₂O₂,在加热板适当加热,使其充分反应,除去有机质;当气泡排完后,静置24小时,然后小心抽去上部清液,加入5 mL浓度为10%的(NaPO₃)₆进行分散,摇匀后置于微波震荡仪上进行震荡供测定。本分析采用英国Malvern公司生产的Mastersizer2000型激光粒度仪进行测定,该仪器测量范围为2~1 000 μm。在实际分析中每个样品重复3次,取其平均值,保证重复测量相对误差小于(1%),对于误差较大或测量过程中出现异常的样品进行重测。以上实验均在云南师范大学高原湖泊生态与全球变化重点实验室完成。

本文采用谢帕德三角图分类法对沉积物进行命名,并采用矩法对样品的粒度参数(平均粒径(*Mz*)、分选系数(*S₀*)、偏态(*Sk_φ*)和峰态(*Kg*))进行计算。将计算的结果用ARCGIS MAP10.1软件进行克里格插值,得到各种粒度参数空间分布图。

3 结果

3.1 表层沉积物粒度组成及类型

泸沽湖南湖表层沉积物粒级按照Udden-Wentworth标准划分为黏土(<4 μm)、粉砂(4~64 μm)和砂(>64 μm)3种组分来反映表层沉积物粒度组成的变化。粒度各组分百分含量在研究区的空间分布等值线图如图2所示。其中黏土组分的百分含量介于7.47%~41.32%,平均值为27.28%。黏土组分含量的空间分布总的趋势具有明显的似同心圆状空间分布特点(图2a),即黏土高值区主要分布在靠近中心湖盆的深水区,低值区分布在靠近湖岸的浅水区。前人研究表明^[25-26,32],泸沽湖湖泊沉积速率的空间分布具有深水区高、浅水区低等特点,即使从年沉积通量的角度分析,黏土含量的仍然具有上述的空间分布特点。然而在本研究区域的低值区范围内,如研究区南部靠近湖岸的地方,也存在高值区(其高值区呈舌状向东南方向延伸)。通过对泸沽湖南湖表层沉积物黏土含量与对应的深度进行了相关分析,发现黏土含量与水深呈显著正相关($r=0.65, p<0.01$),这表明湖泊沉积物粒度是随着深度增加而变细,符合湖泊沉积的一般规律。

粉砂组分的百分含量分布如图2b所示,其变化范围为50.07%~77.39%,平均值为66.50%,为本研究区域的优势粒级。除湖区东部外,绝大部分区域的

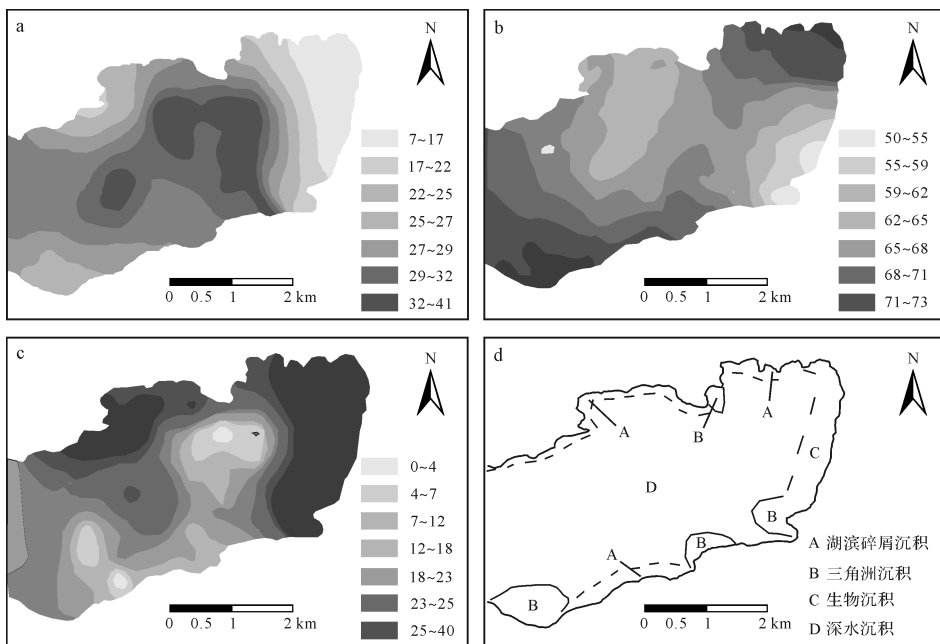


图2 泸沽湖南湖表层沉积物中黏土(a)、粉砂(b)、砂百分含量(c)分布及碎屑沉积类型(d)分布

Fig.2 The percentage content of clay (a), silt (b), sand (c) in the surface sediments and detrital sediment (d) in Lugu Lake

粉砂组分含量都大于62%,且湖区东北部粉砂组分呈现出由东北向西南方快速变化的趋势。相对而言,研究区的西南部粉砂组分变化较为缓和。

砂组分的百分含量波动于0.11%~41.71%,平均值为6.21%(图2c)。砂含量在研究区的空间分布总趋势与黏土的含量分布趋势相反,即靠近深水区,砂含量较低,浅水区砂含量较高,尤其靠近草海的区域;研究区域低值区主要靠近东部湖心的深水区,但在南部的浅水区域也存在低值区。通过相关性分析发现,在靠近草海的湖区,沉积物砂组分含量与黏土、深度分别呈现显著的负相关性,相关系数 r 分别为-0.772($p<0.01$)和-0.636($p<0.01$),这表明在该区域随着湖泊深度增加,湖泊表层沉积物粗颗粒在减少,细颗粒物质在增加。

以上分析表明,泸沽湖南湖表层沉积物70个样品(除湖滨粗样)主要以粉砂和黏土为主,其中粉砂为研究湖区的优势粒级,砂含量较低,含大量砾石的沉积物主要分布在研究区北部和南部湖滨带(图2d)。根据沉积物的命名规则^[33],该研究区域表层沉积物样品主要类型为黏土质粉砂,少数几个样品为砂质粉砂、砂(图3)。

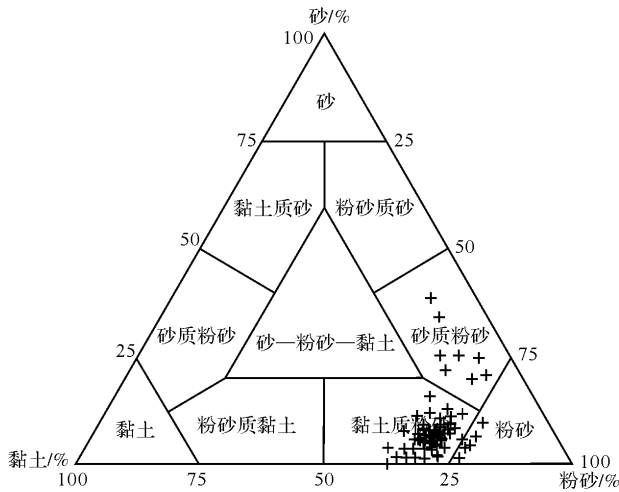


图3 泸沽湖南湖表层沉积物谢帕德三角分类示意图

Fig.3 Classification of surface sediments by Shepard Triangle classification method in Lugu Lake

3.2 沉积物粒度参数变化特征

沉积物粒度参数主要反映沉积物形成时物质来源、输送介质和沉积环境等信息。在湖泊沉积物研究中,常用的粒度参数有平均粒径(Mz)、分选系数(S_0)、偏态(Sk_p)和峰态(Kg)^[34]。其中平均粒径是衡量沉积物颗粒平均大小的一种指标,可以敏感地反

映出沉积物沉积时水动力的大小;分选系数是用来表示沉积物分选性好坏的参数,同时也反映了沉积颗粒的差异性;偏态常用来测量频率曲线的不对称程度,与分选性有密切关系。分选很好的单峰沉积物,频率曲线是对称的,而当有另一组或粗或细的颗粒少量加入时,分选较差,频率曲线变为不对称,或为正偏或为负偏;峰态是用来测量频率曲线两尾端与曲线中央部分分选的比率,反映了颗粒粒径分布的集中程度^[34]。

从图4a中可以看出,研究区沉积物平均粒径介于2.66~47.80 μm 之间,平均值为4.42 μm ,变幅较大。分析发现,平均粒径变化具有明显的规律性,其空间分布总趋势和黏土变化具有一致性,即粗粒沉积物主要分布于靠近湖岸水动力比较强的区域,而细颗粒物质分布在深水区。其中,湖区东部颗粒呈现出由东向西迅速变细的趋势,通过调查分析发现与湖区底部的地形和水草的分布有关,而湖盆中心以西颗粒变化不大。

沉积物分选系数介于0.43~5.63,平均值为3.34。根据分选系数等级表,该区域的分选性包括分选良好、分选中等良好、分选中等、分选差、分选很差几种,根据分选系数绘制的等值线图如4b所示。依据数据分析可以得出,该研究区湖泊现代沉积粒度分选性呈现两种分布模式,即研究区的西部分选性较差,而东部分选性则较好。然而,在分选性较好的区域中也包括分选性较差的部位,如靠近东南部河流入湖处。

沉积物偏态介于-1.91~2.1,平均值为-0.40。从表层沉积物偏态等值线分布图(图4c)可以看出,该湖区表层沉积物偏态具有明显的空间分布特点,形成在靠近湖盆中心偏态偏负,与越靠近湖盆中心颗粒越细相关,指示处于静水低能量环境下,水动力条件最弱;而靠近湖岸区域,偏态偏正,颗粒较粗,揭示靠近湖岸的高能环境下,水动力较强。

沉积物峰度值介于0.12~39.9之间,平均为8.34。从峰态等值线分布特征(图4d)可以看出,该研究区域表层沉积物峰态和分选系数分布具有较强的相关性。通过对表层沉积物分选系数与对应的峰度进行了相关分析,发现分选系数与峰度具有显著正相关关系($r=0.889, p<0.01$)。

为了进一步分析研究区随着湖水深度的增加水动力变化的趋势,本文选择了受岛屿分布、河流注入影响较小的部分样点(其位置见图1),绘制L1、L2剖面线,分别探讨各粒度参数的变化特征(图5)。从图可以看出,沿L1剖面线由东向西(样品编号28→27

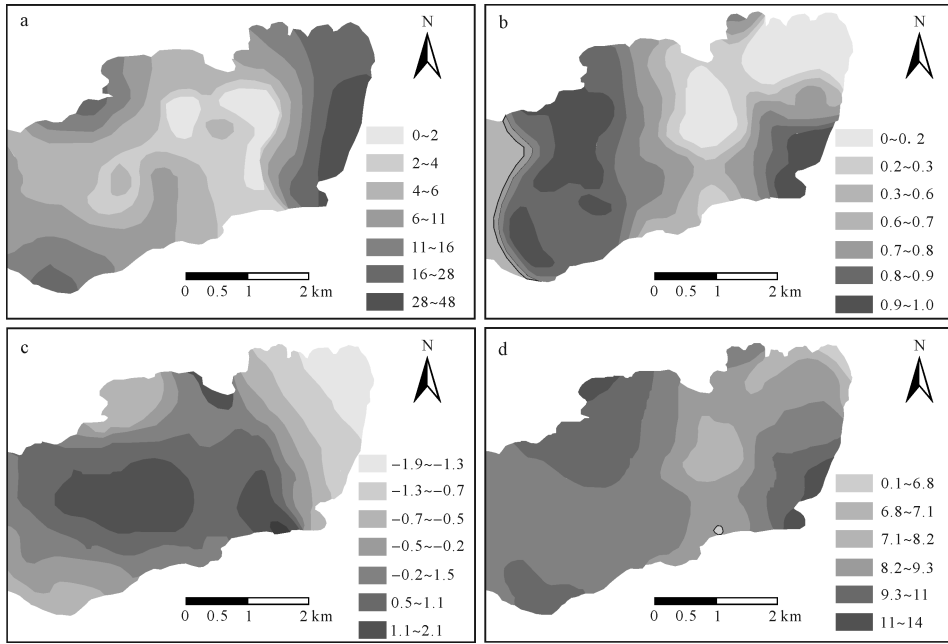


图4 泸沽湖表层沉积物平均粒径(a)、分选系数(b)、偏态(c)和峰态(d)空间分布图
 Fig.4 The spatial distribution of mean sizes (a), sorting coefficient (b), skewness (c) and kurtosis (d) in the surface sediments of Lugu Lake

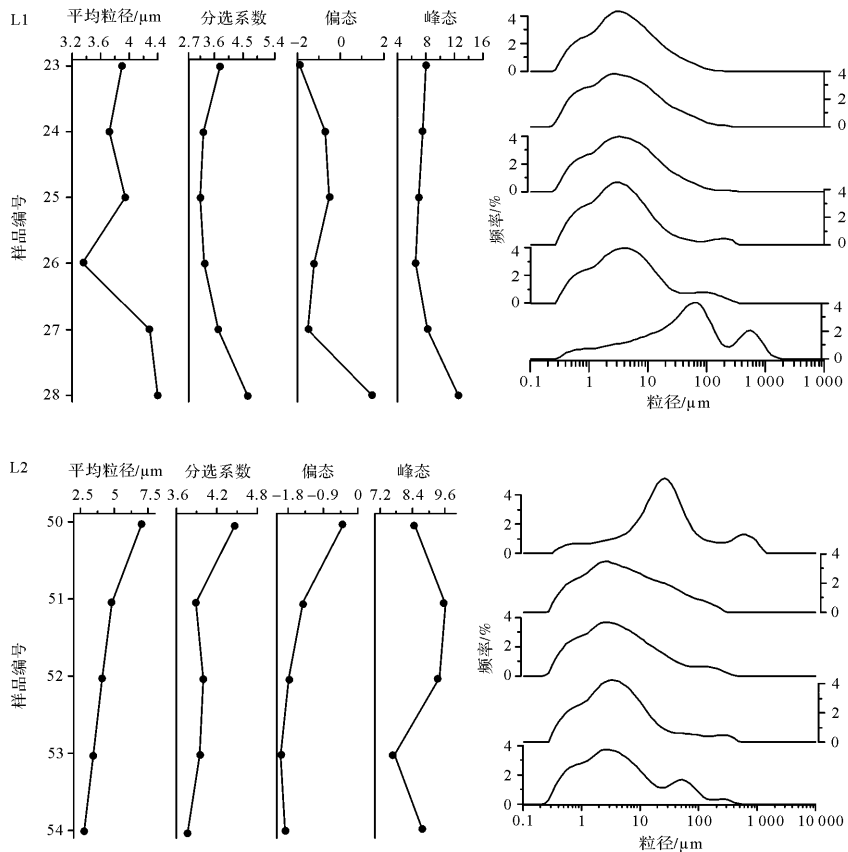


图5 泸沽湖南湖表层沉积物粒度参数的空间变化(剖面L1和剖面L2)

Fig.5 The spatial variation of grain size parameters in the surface sediments of Lugu Lake (profile L1 and L2)

→26→25→24→23)至湖盆中心,沉积物粒度频率分布曲线由双峰、颗粒较粗,变为细粒物质逐渐增加,频率曲线过渡为单峰,指示东部位于湖滨地带的沉积物分选性较差,物源复杂;随着水深的增加,水动力减弱,物质搬运能力降低,沉积物以细粒为主,趋向沉积终极成分,分选性增加。沿 L2 剖面(样品编号 50→51→52→53→54),沉积物频率分布曲线变化剧烈,由多峰过渡到单峰,然后再由单峰过渡到多峰,沉积物细粒组分先逐渐增加,再逐渐减小;平均粒径由大逐渐变小;分选性先好后差,最后再变差,偏态先由正逐渐向负值转变。这说明北部靠近基岩山体,大量碎屑崩塌滚落至湖滨带,再加上波浪的冲刷,物源复杂,水动力较强,而靠近湖心低能环境下,由于湖泊水动力较弱,粗颗粒很难搬运至此,而东南区域,随着湖水深度逐渐变小,水动力变强,受自然和人类活动影响,物质来源较为广泛,频率曲线呈现出多峰的变化趋势。

4 讨论

湖泊表层沉积物粒度各组分的空间分布特征、迁移和富集规律主要受沉积物源和沉积环境两方面因素制约^[35],并且在不同的自然地理背景下,其主要控制因素的表现形式、强度等也存在很大差异。沉积物的物源往往是造成湖泊表层沉积物中粗颗粒含量在空间分布总体上存在近岸高、远岸低的主要控制因素,而沉积环境的水动力特征也是影响物质颗粒在该研究区分布的重要因素,它与其他环境要素,如水草分布、岛屿位置等因素的综合作用最终决定了不同区域的沉积物类型。泸沽湖作为一个半封闭湖泊,其物源主要来源于湖盆四周风化产物,由于物源面积较小,季节性的沟谷汇水和区间坡面漫流是物质携带的一种主要形式。当然,大气中搬运的尘粒也是湖泊沉积物的主要来源之一。云南地处低纬高原气候,干湿季分布明显,风力很容易搬运细颗粒作长距离运移,但考虑到粉尘堆积速率较低,本研究不考虑风尘作用。另外,通过对泸沽湖水深资料 and 变化趋势的分析,多次在泸沽湖流域考察及与当地住民交流,我们认为,泸沽湖北湖区虽然面积较大,但是在湖中心土司岛附近有限范围内水深从 70 m 左右急速变为 105 m 以上(2005 年实测数据),这不符合正常的湖泊沉积过程和 水下地形变化特征(可能存在构造活动作用);不仅如此,在北湖分布多个小岛,湖岸变化大导致水深变化剧烈,水下通道发育形成暗河补水入湖,也发现存在水下古湖岸,这些均有可能影响湖泊正常

的沉积过程和沉积物的分布,造成分析数据解译的困难和多解性。我们认为在北湖区开展研究工作必须考虑这些情况,谨慎解译分析所得数据。对于南湖区而言,虽然在其东北部存在高水位期出水口,但由于整体水深较北湖区浅,湖底平缓,受北湖区深水沉积作用的影响较小,沉积过程稳定,是开展湖泊沉积过程及环境演变记录研究的理想区。

前已述及,泸沽湖南湖粒度总体变化趋势具有以下特点:靠近中心湖盆的深水区细颗粒含量较高,而靠近湖岸浅水区,粗颗粒较多。而在水深超过 40 m 的湖区,由于受入湖河流动力作用影响较弱,系静水低能环境,悬移作用加强,广泛分布黏土质粉砂。在研究区的东部,黏土和砂含量具有明显的东西向分布,其中黏土含量由东向西缓慢增加,而砂的含量却沿上述方向逐渐降低。上述粒度分布特征基本符合沉积学规律,与前人研究结果相吻合^[36-37]。一般而言,在湖泊表层沉积物理想的沉积模式中,从湖岸到湖心,随着水深逐步增大,水动力条件由强变弱,湖泊沉积物呈环状分布,即从湖岸至湖心依次出现砾、砂、粉砂及黏土带,沉积物粒径由粗变细^[36]。但由于自然界中搬运方式多且复杂,需要综合研究影响沉积过程的不同因素^[37],如河流注入、湖浪运移方式、岛屿分布以及湖水外流产生定向水流等因素。

从图 2a、图 2c 以及图 4a 可以看出,在研究区的东南部和西南部,各有一个分支向湖盆中心延伸,其中东南部分支的黏土组分和平均粒径由东南向北方向延伸,西南部的黏土组分和平均粒径由西南向东北方向延伸,而砂含量却沿上述方向递减。从分布趋势来看,这两支细粒沉积主要来自东南和西南方向,这种分布与南部湖区的河流注入是密切相关的。由于注入研究区东南部的山跨河相对于其他河流汇流面积较大,而西南部则为三家村河,河流较短,但纵比降大,因此这两条河流相对于其他较小河流而言对湖泊的物质输入影响较大。沿着入湖水流方向及主流两侧,随着河流作用的减弱,沉积物粒度依次变细,黏土和粉砂含量增加,砂含量降低。值得注意的是,虽然山跨河流域面积较大,流量也较大,但河流纵比降小,势能较弱,在入湖之前大量粗颗粒优先沉积,致使入湖粗颗粒较少,因此对粒度分布影响程度并没有三家村河大。此外,定向湖流的顶托作用也不可忽视。泸沽湖湖水依赖地表径流和湖面降水补给主要发生在夏季,夏季湖面大幅度抬升,大量湖水流向出水口,形成了明显的由西向东的定向水流。而此时山跨河大

量的河水受到出湖定向水流的顶托作用,河水向东流动,将大量的泥沙输入到草海,而对河口区以西、以北物源补给较弱。从图4b也可以看出,在河流入湖处,由于受沿岸侵蚀和河流作用双重影响,沉积物分选性较差。

研究区西北部,黏土和粉砂含量变化不大,而砂含量却由西北向东南方向呈舌状延伸,可以看出砂组分主要来源于北部湖滨带风化侵蚀产物。由图1等深线可以看出,该区域水深都大于40m,深度较大,基本处于静水低能量的环境下,不能用湖浪来揭示粗粒物质的来源,因此需要考虑到悬移作用以及南北湖水运移产生定向水流的影响。北岸分布着比较明显的砾石带,再加上北坡较陡,大量的碎屑崩塌散落至湖滨带,由于受波浪冲刷的作用,形成大量的砂组分,在坡面汇流的作用下,以悬移方式向东南方向输送。此外,受到由西向东定向水流的作用,也将部分悬移携带的泥沙沉积于此,形成砂组分的舌状沉积。

在研究区的南部分布有大面积的细粒物质沉积区,此处黏土含量较高,砂组分含量较少,平均粒径偏细,很难用沉积动力学解释。出现上述现象的原因应该与该研究区湖流带动泥沙运移的轨迹有关。泸沽湖以风生流为主,其中南部主湖区以反时针环流为主^[30]。湖流在运移的过程中,将水深在30m以上的湖泊底泥扰动,沿着湖流运行的轨迹运动,在湖流作用较弱的区域沉积下来。研究区南部水深大多超过30m,流速基本接近零,同时处在高山的背影区,风力较小,湖流很难扰动底部泥沙。湖滨带生长着大量水草也进一步阻挡了沿岸物质向此处输送。因此该区域细粒沉积物不可能是由于近源作用形成的,而是来源于研究区的北侧及西南侧,北侧的细颗粒在湖流的作用下悬移至研究区南部并沉积下来,而西南侧由于是河流冲积物堆积区,水深小于30m,湖流流速较大,湖流可以直接将底部细颗粒携带至研究区南部并沉积下来。

5 结论

通过对泸沽湖南湖70个表层沉积物样品的粒度组分特征、沉积物类型和粒度参数变化的分析,探讨了沉积物粒度的空间分布特征,及其与沉积环境之间的关系,得出如下结论:

(1) 研究区表层沉积物样品沉积类型主要是黏土质粉砂,少数样品为砂质粉砂、砂,砾石主要分布在研究区南部和北部湖滨带,其中粉砂是该研究区的优

势粒级。

(2) 物质来源和水动力条件是控制研究区表层沉积物各粒度组分分布的主要因素。研究区东南侧及西南侧由于受入湖河流(山跨河、三家村河)的影响,黏土组分分别呈舌状向不同方向延伸,但东南侧河流的搬运作用由于受到定向湖流顶托影响,对研究区物源贡献不大;研究区西北部砂组分由于受到悬移作用以及由西向东定向水流影响,由西北向东南延伸;研究区南部大面积细粒沉积与该湖区常年盛行的反时针湖流有关。

(3) 湖泊沉积动力过程及沉积物对环境变化响应敏感程度的差异决定了泸沽湖南部主湖区表层沉积物粒度空间分布特征。研究湖泊表层沉积物粒度组成对认识湖泊水动力及物质输入状况具有重要的意义,同时也对合理选择采样点及开展古气候研究具有一定参考意义。

参考文献 (References)

- 曹建廷,王苏民,沈吉. 湖泊沉积多学科研究的古气候环境意义[J]. 河海大学学报,2000,28(增刊I):90-94. [Cao Jianting, Wang Suming, Shen Ji. Significance of multidisciplinary research on lake sediments for recovery of paleoenvironment[J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(Suppl. I): 90-94.]
- 万国江. 环境质量的地球化学原理[M]. 北京:中国环境科学出版社,1988. [Wan Guojiang. The Geochemical Principle for Environmental Quality[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988.]
- 鹿化煜,安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学(D辑):地球科学,1998,28(3):278-283. [Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 1998, 28(3): 278-283.]
- 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.]
- Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen Press, 1941: 265.
- 雷国良,张虎才,张文翔,等. Mastersize2000型激光粒度仪分析数据可靠性检验及意义—以洛川剖面S4层古土壤为例[J]. 沉积学报,2006,24(4):531-539. [Lei Guoliang, Zhang Hucai, Zhang Wenxiang, et al. The reliability and significance of the grain-size obtained by Mastersize 2000 Laser analyzer: A case study on the typical S4 from Luochuan section[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 531-539.]
- 柏春广,王建. 一种新的粒度指标:沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. 沉积学报,2003,21(2):234-240. [Bai Chunguang, Wang

- Jian. A new grain-size index: grain-size fractal dimension of sediment and its environmental significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 234-240.]
- 8 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 近 8 ka B.P. 来云南洱海地区气候演化的有机碳稳定同位素记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(3): 23-28. [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin, et al. Climate evolution recorded by organic carbon stable isotope ratios in Erhai Lake in the past 8 ka years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(3): 23-28.]
 - 9 陈敬安, 万国江, 康德贵, 等. 洱海近代气候变化的沉积物粒度与同位素记录 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(3): 253-259. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Kang Degui, et al. Recent climate changes recorded by sediment grain sizes and isotopes in Erhai Lake [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 253-259.]
 - 10 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化 [J]. *地球化学*, 1999, 28(6): 562-570. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Chen Zhenlou, et al. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution [J]. *Geochimica*, 1999, 28(6): 562-570.]
 - 11 周静, 王苏民, 吕静. 洱海地区一万多年以来气候环境演化的湖泊沉积记录 [J]. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 104-111. [Zhou Jing, Wang Sumin, Lv Jing. Climatic and environmental changes from the sediment record of Erhai Lake over the past 10000 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(2): 104-111.]
 - 12 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 全新世大暖期云南洱海环境演化的湖泊沉积记录 [J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(2): 210-214. [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin, et al. Environmental evolution recorded by lake sediments from Erhai Lake, Yunnan province in Holocene megathermal [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(2): 210-214.]
 - 13 沈吉, 杨丽原, 羊向东, 等. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录 [J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2004, 34(2): 130-138. [Shen Ji, Yang Liyuan, Yang Xiangdong, et al. Lake sediment records on climate change and human activities since the Holocene in Erhai catchment, Yunnan province, China [J]. *Science China(Seri.D): Earth Sciences*, 2004, 34(2): 130-138.]
 - 14 吴艳宏, 吴瑞金, 薛滨, 等. 13 ka B.P. 以来滇池地区古环境演化 [J]. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 5-9. [Wu Yanhong, Wu Ruijin, Xue Bin, et al. Paleoenvironmental evolution in Dianchi Lake area since 13 ka B.P. [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 5-9.]
 - 15 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 程海近代气候变化的化学记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 39-42. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Huang Ronggui. Recent climatic changes and the chemical records in Chenghai Lake [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(1): 39-42.]
 - 16 刘占红, 谢曼平, 方念乔, 等. 云南中甸纳帕海 16000 年以来硅藻植物群的演化及其古环境意义 [J]. *地质科技情报*, 2004, 23(3): 35-39, 46. [Liu Zhanhong, Xie Manping, Fang Nianqiao, et al. Assemblage of diatoms in Napa Lake, Zhongdian, Yunnan province and their environmental significance up to 16000a B.P. [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(3): 35-39, 46.]
 - 17 史正涛, 明庆忠, 张虎才. 云南高原典型湖泊演化及环境变化初步考察 [J]. *地质力学学报*, 2004, 10(4): 344-350, 365. [Shi Zhengtao, Ming Qingzhong, Zhang Hucai. Investigation of the evolution and environment change of typical lakes in Yunnan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2004, 10(4): 344-350, 365.]
 - 18 史正涛, 明庆忠, 张虎才. 云南高原典型湖泊现代过程及环境演变研究进展 [J]. *云南地理环境研究*, 2005, 17(1): 24-26, 63. [Shi Zhengtao, Ming Qingzhong, Zhang Hucai. A study review on the modern processes and environmental evolution of the typical lakes in Yunnan [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2005, 17(1): 24-26, 63.]
 - 19 Whitmore T J, Brenner M, Song X L. Environmental Implications of the Late Quaternary Diatom History from Xingyun Hu, Yunnan province, China [J]. *Memoirs of the California Academy of Science*, 1994, 17: 525-538.
 - 20 Zhang Wenxiang, Ming Qingzhong, Shi Zhengtao, et al. Lake sediment records on climate change and human activities in the Xingyun lake catchment, SW China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(7): e102167.
 - 21 Chen Xuemei, Chen Fahu, Zhou Aifeng, et al. Vegetation history, climatic changes and Indian summer monsoon evolution during the Last Glaciation (36,400-13,400 cal yr BP) documented by sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 410: 179-189.
 - 22 Hodell D A, Brenner M, Kanfoush S L, et al. Paleoclimate of Southwestern China for the Past 50,000 yr inferred from lake sediment records [J]. *Quaternary Research*, 1999, 52(3): 369-380.
 - 23 韩艳, 肖霞云, 羊向东, 等. 全新世以来滇西北地区天才湖粒度特征及古降水 [J]. *第四纪研究*, 2011, 31(6): 999-1010. [Han Yan, Xiao Xiayun, Yang Xiangdong, et al. The grain-size characteristics of Tiancai Lake in northwestern of Yunnan province and paleo-precipitation history during the Holocene [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(6): 999-1010.]
 - 24 Xiao Xiayun, Haberle S G, Yang Xiangdong, et al. New evidence on deglacial climatic variability from an alpine lacustrine record in northwestern Yunnan province, southwestern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 406: 9-21.
 - 25 郑茜, 张虎才, 明庆忠, 等. 泸沽湖记录的西南季风区 15000a B.P. 以来植被与气候变化 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1314-1326. [Zheng Qian, Zhang Hucai, Ming Qingzhong, et al. Vegetational and environmental changes since 15ka B.P. recorded by Lake Lugu in the southwest monsoon domain region [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1314-1326.]
 - 26 陈传红, 汪敬忠, 朱迟, 等. 近 200 a 来泸沽湖沉积物色素记录与区域气候变化的关系 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 780-788. [Chen Chuanhong, Wang Jingzhong, Zhu Chi, et al. Relationship between the sediment pigment records of Lake Lugu and the regional climate change over the last 200 a [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(5): 780-788.]
 - 27 鞠建廷, 朱立平, 冯金良, 等. 粒度揭示的青藏高原湖泊水动力现代过程: 以藏南普莫雍错为例 [J]. *科学通报*, 2012, 57(19): 1775-1784. [Ju Jianting, Zhu Liping, Feng Jinliang, et al. Hydrodynamic

- process of Tibetan Plateau lake revealed by grain size: A case study of Pumayum Co[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(19): 1775-1784.]
- 28 周聪, 金华, 蒋晔, 等. 四川省泸沽湖植被类型多样性及其保护对策[J]. 四川林业科技, 2010, 31(1): 81-84. [Zhou Cong, Jin Hua, Jiang Ye, et al. The diversity of vegetation forms about the Lugu Lake and their protection strategy[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2010, 31(1): 81-84.]
- 29 曾熙雯, 王宝荣, 杨树华. 泸沽湖流域的陆生植被特征[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(4): 476-485. [Zeng Xiwen, Wang Baorong, Yang Shuhua. The terrestrial vegetation characteristics in Lugu Lake watershed[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2012, 34(4): 476-485.]
- 30 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. [Wang Sumin, Dou Hongshen. Memoirs of Lakes in China[M]. Beijing: Science Press, 1998.]
- 31 陈毅风, 万国江. 泸沽湖沉积物 α 纤维素的提取及其稳定碳同位素研究初探[J]. 地质地球化学, 1999, 27(4): 72-76. [Chen Yifeng, Wan Guojiang. Extraction of α -cellulose from Lugu Lake sediment and its stable carbon isotope[J]. Geology-Geochemistry, 1999, 27(4): 72-76.]
- 32 徐经意, 万国江, 王长生, 等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的垂直分布及其计年[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 110-116. [Xu Jingyi, Wan Guojiang, Wang Changsheng, et al. Vertical distribution of ^{210}Pb and ^{137}Cs and their dating in recent sediments of Lugu Lake and Erhai Lake, Yunnan province[J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(2): 110-116.]
- 33 Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- 34 Folk R L. A review of grain-size parameters[J]. Sedimentology, 1966, 6(2): 73-97.
- 35 古立峰, 刘永, 占玄, 等. 湖泊沉积物粒度分析方法在古气候环境研究中的应用[J]. 化工矿产地质, 2012, 34(3): 169-174. [Gu Lifeng, Liu Yong, Zhan Xuan, et al. The application of grain size of lake sediments in reconstructing the paleoclimate and paleoenvironment[J]. Geology of Chemical Minerals, 2012, 34(3): 169-174.]
- 36 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 & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 93-95.]
- 37 Sun Donghuai, 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.

Grain-size Distribution Patterns of the Surface Sediments and Their Influential Factors in Lake Lugu

WU Han CHANG FengQin ZHANG HuCai LI HuaYong MENG HongWei
DUAN LiZeng LIU DongSheng LI Nan ZHU MengShu

(Key Laboratory of Plateau Lake Ecology & Global Change, Yunnan Provincial Key Laboratory of Geographical Process and Environmental Change on the Plateau, College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Lugu Lake is one of the typical plateau-type lakes in the transitional zone between Tibet Plateau and Yunnan-Guizhou Plateau. With relatively weak human impacts, lake Lugu is one of the most suitable lakes for palaeoenvironmental study. Based on the grain-size analysis results on 70 surface (modern) sediment samples in south main lake, combined with the investigation/observation results on the surrounding natural conditions, we have analyzed the spatial distribution features of the different particle compositions and their influential factors controlling the spatial distribution of grain sizes in the Lake. The results show that the grain-size of the samples can be classified into three types, including clayey silt, sand silt and sand. Meanwhile, the grain size components in the studied area have some obvious spatial distribution patterns, for example, the grain size in the east side of the study area controlled by the rivers (Shankua River and Sanjiacun River) show a obvious tongue-shape mainly composed of clay, and with eastward and northwestward distributions, respectively. Whole in the south part of the study area, the particle distribution pattern is influenced by lake current. In the northwest, the grain-size is dominated by sand because of suspension effect. The lake current carries a lot of sediments from the north and southwest of the study area to the south of the lake and deposit there. Generally speaking, the differences between the grain size distribution patterns are mainly attributed to the lake dynamic processes and the different respond of the sediments to the climate changes. The study on lake surface sediments not only promotes the understanding of the lake dynamics and the status of material input, but also important to select suitable sites to take cores for the paleoclimate-paleoenvironmental reconstruction.

Key words: Lugu Lake; surface sediments; particle sizes; distribution in space