

文章编号: 1000-0550(2017)03-0499-09

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.008

云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义

李华勇¹, 张虎才¹, 陈光杰¹, 常凤琴¹, 段立曾¹, 王教元¹, 卢慧斌^{1,2}, 吴汉¹, 胡葵¹

1. 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

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

摘要 选取云南15个高原湖泊, 利用瑞典产HTH重力采样器提取沉积物短钻, 取顶部0~0.5 cm作为湖泊现代沉积物进行粒度分析并利用分析软件对粒度频率曲线进行拟合, 探讨各组分的沉积特征和环境指示意义。结果显示, 滇池等15个云南湖泊表层沉积物频率曲线呈多峰态, 含有2至5个组分, 从细到粗分别为黏土组分(C1)、细粉砂组分(C2)、粉砂组分(C3)、细一中砂组分(C4)、粗砂组分(C5), 拟合众数粒径范围为0.6~423.0 μm。C1组分来自大气中长期悬浮的超细粉尘和气溶胶, 通过自然沉降和降水进入湖泊水体, 反映西南地区大气粉尘背景值; C2和C3是湖泊沉积物中的主要组分, 反映流域内降水和水动力大小; C4和C5组分只出现在洱海、滇池、差黑海等部分湖泊湖心沉积物中, 且含量非常低, 该组分与湖泊水动力密切相关。对于滇池、抚仙湖等大型湖泊而言, 粗颗粒进入湖心需两个过程: 从流域地表进入湖泊水体的输入过程和从湖滨到达湖心的传输过程。湖心沉积物中粗粒含量主要受第二个过程影响, 而该过程的强弱与湖流、水深、湖盆坡度等因素有关。西南地区干旱背景下湖泊快速收缩直至消失时, 降水量的大幅减少使得地表径流动力减弱, 加之大气环流偏弱以及水生植物覆盖面积比例增大, 湖水动力减弱, 由湖滨向湖心传输的物质以细粒碎屑为主。位于山地地区的小型湖泊, 由于汇水面积有限、地形坡度较大, 坡面径流可将地表风化碎屑物带入湖盆甚至湖心位置, 这类湖泊沉积物中粗粒物质的增加反映流域内降水量或降水强度增大。

关键词 云南; 高原湖泊; 表层沉积物; 粒度分布特征; 物源分析; 沉积动力

第一作者简介 李华勇, 男, 1986年出生, 博士研究生, 湖泊沉积与气候变化, E-mail: lihuayong2010@hotmail.com

通讯作者 张虎才, 男, 教授, E-mail: hucaizhang@yahoo.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

云南高原和横断山脉地区湖泊众多, 其中部分湖泊已经被证明是研究季风演化和人地关系历史的理想载体^[1-5]。在湖泊研究中, 无机碎屑颗粒是湖泊沉积物中主要成分, 其颗粒大小(即粒度)反映了湖泊流域水动力状况^[6], 在古气候和古环境的研究中应用广泛^[7]。前人利用粒度指标在滇池^[8]、洱海^[9]、抚仙湖^[10]、程海^[11]、星云湖^[3]、属都湖^[12]、点苍山冰川湖^[13]、腾冲青海火山口湖^[14]等开展研究, 重建了几百至上万年以来的区域环境演化。然而, 越来越多的研究证明, 粒度参数的气候环境意义一直以来存在多解性, 不同类型的湖泊中粒度指标可能存在完全相反的解释^[11, 13], 这就要求我们进行对比研究, 以期能够对粒度参数进行分别解译, 从而准确、可靠的揭示粒度的气候环境指示意义。

云南地区地形复杂, 湖泊类型多样, 根据地质学“将今论古”的原理, 选取云南15个代表性湖泊, 通过研究表层沉积物粒度特征来讨论现代沉积搬运过

程及动力机制, 提高粒度数据解译的可靠性和可信度, 达到将粒度记录有效应用于古气候、古环境变化研究的目的。

1 研究区自然地理概况

本文所研究的15个云南高原湖泊包括位于滇西北的泸沽湖、程海、洱海、海西海、大理西湖等5个构造湖, 位于滇东地区的滇池、阳宗海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖等5个构造断陷湖以及位于滇东南的异龙湖、大屯海、长桥海、差黑海、浴仙湖等5个岩溶湖^[15](图1)。各湖位置坐标及其他相关信息见表1。15个湖泊跨南亚热带季雨林、亚热带常绿林和落叶与针阔混交林三个植被带, 海拔分布最低不足1300 m, 最高接近2700 m。既有中国第六大淡水湖滇池, 也有接近干涸的浴仙湖(2013年采样时湖泊面积30 m²左右, 2014年3月再次考察时已完全干涸), 有中国第二深水湖抚仙湖, 同时也有平均水深不足1 m的差黑海和

收稿日期: 2016-01-14; 收修改稿日期: 2016-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(41361008), 云南省领军人才计划(2015HA024), 云南省高端人才引进项目(2010CI111)[**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41361008; Leading Talents Program of Yunnan Province, No.2015HA024; Senior Talent Program of Yunnan Province, No.2010CI111]

浴仙湖,有人类活动强烈干扰的湖泊,如异龙湖^[16]、杞麓湖^[17],也有目前人类活动影响比较微弱的泸沽湖。云南高原湖泊主要受西南季风影响,全年分为明

显的干湿两季,无结冰期。输入湖盆的无机碎屑主要来自流域内的风化产物,通过河流和地表径流带入。除此而外,尚有部分经过风力搬运的远源颗粒物。

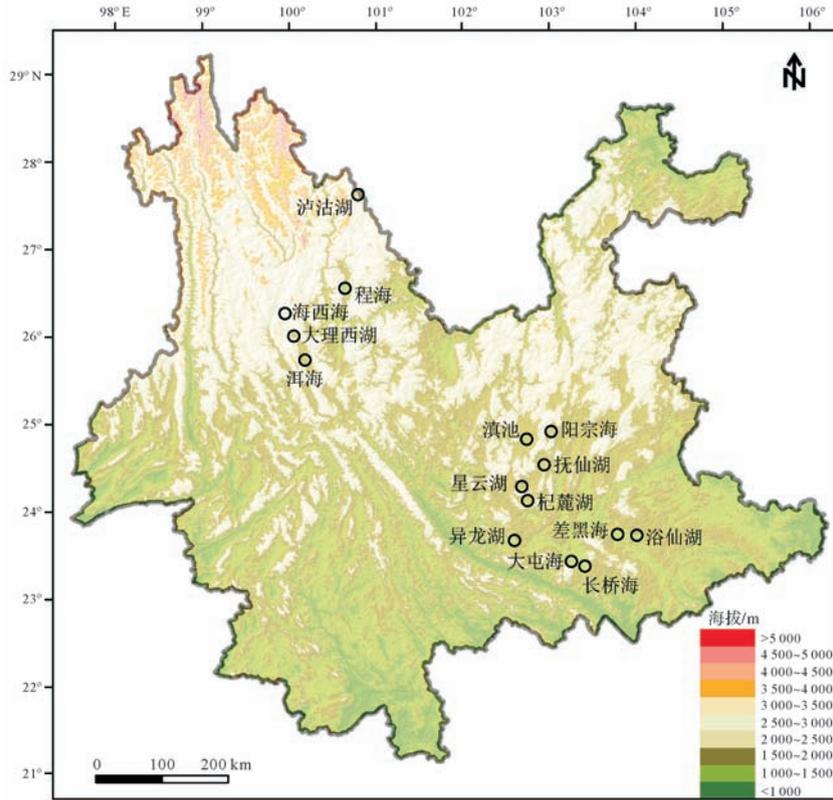


图1 云南地形及15个湖泊位置图

Fig.1 DEM map of Yunnan Province and location of the 15 lakes

表1 15个湖泊的位置坐标及其他相关信息

Table 1 The coordinate of the 15 lakes and other related information

湖泊	坐标位置	流域/湖泊面积	最大/平均水深	湖面高程	年降水量	流域植被	补给(m ³)	地表径流/
		/km ²	/m	/m	/mm		湖面降水	
泸沽湖	27°41'~27°45'N, 100°45'~100°50'E	171.4/57.7	105.3/38.4	2 692.2	920	落叶阔叶与针阔混交林	0.62×10 ⁸ /0.48×10 ⁸	
程海	26°27'~26°38'N, 100°38'~100°41'E	228.9/75.97	35.87/24.98	1 502.0	738.6	亚热带针阔混交林, 云南松林	0.9×10 ⁸ /0.57×10 ⁸	
海西海	26°15'~26°17'N, 99°57'~99°58'E	2.4/*	16/10	2 052	1 048	亚热带针阔混交林	*	
大理西湖	26°00'~26°01'N, 100°01'~100°03'E	4.7/*	8.3/2~3	1 970	1 048	亚热带针阔混交林	*	
洱海	25°36'~25°58'N, 100°06'~100°17'E	2 785.0/251.32	19.50/8.8	1 965.8	1 000~1 200	亚热带针阔混交林	10.65×10 ⁸ /3.13×10 ⁸	
滇池	24°40'~25°02'N, 102°36'~102°47'E	2 866.0/298.1	11.35/5.01	1 887.4	946.4	亚热带季雨林常绿阔叶林	9.02×10 ⁸ /2.98×10 ⁸	
阳宗海	24°51'~24°58'N, 102°58'~103°01'E	192.0/31.17	28.59/21.50	1 769.2	963.5	亚热带常绿针阔混交林	0.36×10 ⁸ /0.3×10 ⁸	
抚仙湖	24°21'~24°38'N, 102°49'~102°58'E	1 084.0/216.6	158.9/95.2	1 722.5	879.1	南亚热带常绿针阔叶混交林	2.58×10 ⁸ /2.17×10 ⁸	
星云湖	24°17'~24°23'N, 102°45'~102°48'E	378.0/34.33	10.81/6.01	1 722.5	947	亚热带常绿针阔混交林	2.2×10 ⁸ /0.32×10 ⁸	
杞麓湖	24°08'~24°13'N, 102°43'~102°49'E	341.0/36.95	6.84/4.20	1 795.7	869.2	南亚热带常绿阔叶林	1.1×10 ⁸ /0.33×10 ⁸	
异龙湖	23°38'~23°42'N, 102°30'~102°38'E	303.6/29.59	5.7/3.9	1 414.0	928	南亚热带常绿阔叶林	0.483×10 ⁸ /0.208×10 ⁸	
大屯海	23°23'~23°27'N, 103°17'~103°20'E	284.5/12.3	5.0/3.7	1 280.7	717.6	亚热带雨林、灌丛	0.157×10 ⁸ /0.089×10 ⁸	
长桥海	23°24'~23°27'N, 103°20'~103°24'E	167.0/10.7	5.50/3.74	1 284	834.2	亚热带雨林、灌丛	0.385×10 ⁸ /0.089×10 ⁸	
浴仙湖	23°41'N, 103°53'E	29.2/1.5×10 ⁻⁴ (2013)	0/0	1 523	983	亚热带雨林、灌丛	*	
差黑海	23°41'N, 103°53'E	34.8/2.4 (2013)	*/0.2	1 475	983	亚热带雨林、灌丛	*	

注: * 无数据。泸沽湖、程海、洱海、滇池、阳宗海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖云南高原九大湖泊面积及对应湖面海拔高度数据来自《云南省九大高原湖泊水底地形测量成果图册》, 云南省环保厅, 2010。

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

2012—2013 年间利用瑞典产 HTH 重力采样器,在滇池、洱海、抚仙湖等 15 个云南高原湖泊上提取 30~50 cm 长度不等的沉积物短钻,钻孔地点皆位于各湖湖心区,取短钻顶部 0~0.5 cm 作为湖泊现代沉积物进行粒度分析。野外对所采样品进行现场观察发现,泸沽湖等少数几个贫营养型湖泊表层沉积物呈黄棕色,以无机矿物为主,有机质含量极少;洱海、程海等中营养型湖泊表层沉积物呈棕褐色,有机质层厚度较小且含量不大;大多数湖泊,诸如滇池、星云湖等均为富营养型湖泊,表层沉积物富含有机质,呈褐色甚至黑色絮状。

2.2 粒度测试

取冻干后的样品 0.5 g 置于烧杯中,加足量 10% H_2O_2 并加热,使其完全反应以除去样品中的有机质;加足量 10% 稀 HCl,加热使其充分反应,除去碳酸盐;注满蒸馏水,静置 24 h;倒去上层清液,加 10 mL 0.05 mol/L ($NaPO_3$)₆,用超声波震荡 10 min 后,用 Master-size2000 型激光粒度仪进行粒度测量。每个样品重复测量两次,系统自动取平均值。

2.3 粒度组分拟合分析

已有研究结果显示,经过单一动力长距离搬运的碎屑堆积物,其频率曲线往往呈近似正态分布的单峰态^[18],搬运动力越强,拟合中值粒径越大。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^[19]。输入湖盆的碎屑物在湖泊水动力作用下重新分选,大致呈现由湖滨到湖心逐渐变细的同心圆状^[20]。但实际上由于受控于湖泊面积大小和水动力强弱,粒度分布模式在各个湖泊中不尽相同^[8-14]。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^[19]。

利用秦小光等^[21]开发的沉积物粒度分析软件,对 15 个湖泊表层沉积物粒度频率曲线进行拟合,分解为若干正态分布曲线(图 2),探讨不同组分的沉积机理和指示意义。该粒度分析软件公式如下:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{c_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x - \alpha_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) dx \right] \quad (1)$$

式中, n 是拟合的粒度组分个数, $x = \ln(d)$, d 是粒径

值,单位为 μm 。 c_i 是第 i 组分的百分含量, $c_i \geq 0, c_1 + \dots + c_n = 100\%$ 。 σ_i 是第 i 组分的标准差。 α_i 是第 i 组分对数粒径值的中值,单位为 μm 。 $\alpha_i = \ln(d_i), \alpha_i > 0$ 。

拟合误差用下面公式计算得出:

$$dF = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (F(x_j) - G(x_j))^2 \quad (2)$$

式中, m 是粒度间隔的数目, $F(x_j)$ 是拟合出的第 j 个粒度间隔的百分含量, $G(x_j)$ 是测量得出的第 j 个粒度间隔的百分含量。 dF 值越低,表示误差越小,拟合度越高。

3 实验分析结果

分析结果显示,滇池等 15 个云南高原湖泊表层沉积物粒径分布范围为 0.24(泸沽湖、滇池、星云湖)~724.44 μm (洱海),频率曲线多呈双峰或三峰分布(图 2),主峰出现的位置在 2.0(泸沽湖)~65.5 μm (杞麓湖)之间,具有 2 至 5 个不等的组分,按照由细到粗的顺序,分别命名为 C1(黏土)、C2(细粉砂)、C3(粉砂)、C4(细—中砂)和 C5(粗砂)。其中 C1 和 C2 出现在所有 15 个湖泊沉积中,中值粒径和含量范围分别为 0.57~1.1 μm , 2.6%~12.2%; 1.5~6.4 μm , 7.5%~89.8%。C3 组分出现在泸沽湖等 10 个湖泊的表层沉积物中,中值粒径和百分含量范围分别为 4.7~22.8 μm , 28.4%~79.6%。C4 组分出现在星云湖、程海、滇池、大屯海、大理海西海和杞麓湖等 6 个湖泊中,除在杞麓湖表层沉积物中的含量高达 62.1% 以外,在其余几个湖泊中的含量均低于 7%。C5 组分出现在星云湖等 6 个湖泊中,其中值粒径均 240 μm 以上,最高达到 423 μm (洱海),但含量一般较低,平均值为 1.2%。从拟合数据可看出,除杞麓湖外,C2 和 C3 是构成湖泊沉积物的主要组分,平均含量分别达到 48.4% 和 56.3%。

就各个湖泊而言,长桥海和浴仙湖只含有两个组分(C1 和 C2);泸沽湖、异龙湖、阳宗海和大理西湖等 4 个湖泊只含有 C1、C2 和 C3 三个组分;海西海和大屯海含有除 C5 以外的其余四个组分;洱海、抚仙湖和差黑海含有除 C4 以外的其余四个组分;滇池和程海含有除 C3 以外的其余四个组分;杞麓湖只含有 C1、C2、C4 三个组分;而星云湖则含有全部五个组分。

4 讨论

湖泊沉积物中粒度指标具有多解性的根本原因在于湖心粒度既反映湖泊流域内搬运动力的变化^[22],也体现湖泊本身水动力的强弱波动^[14,23]。对于所研究

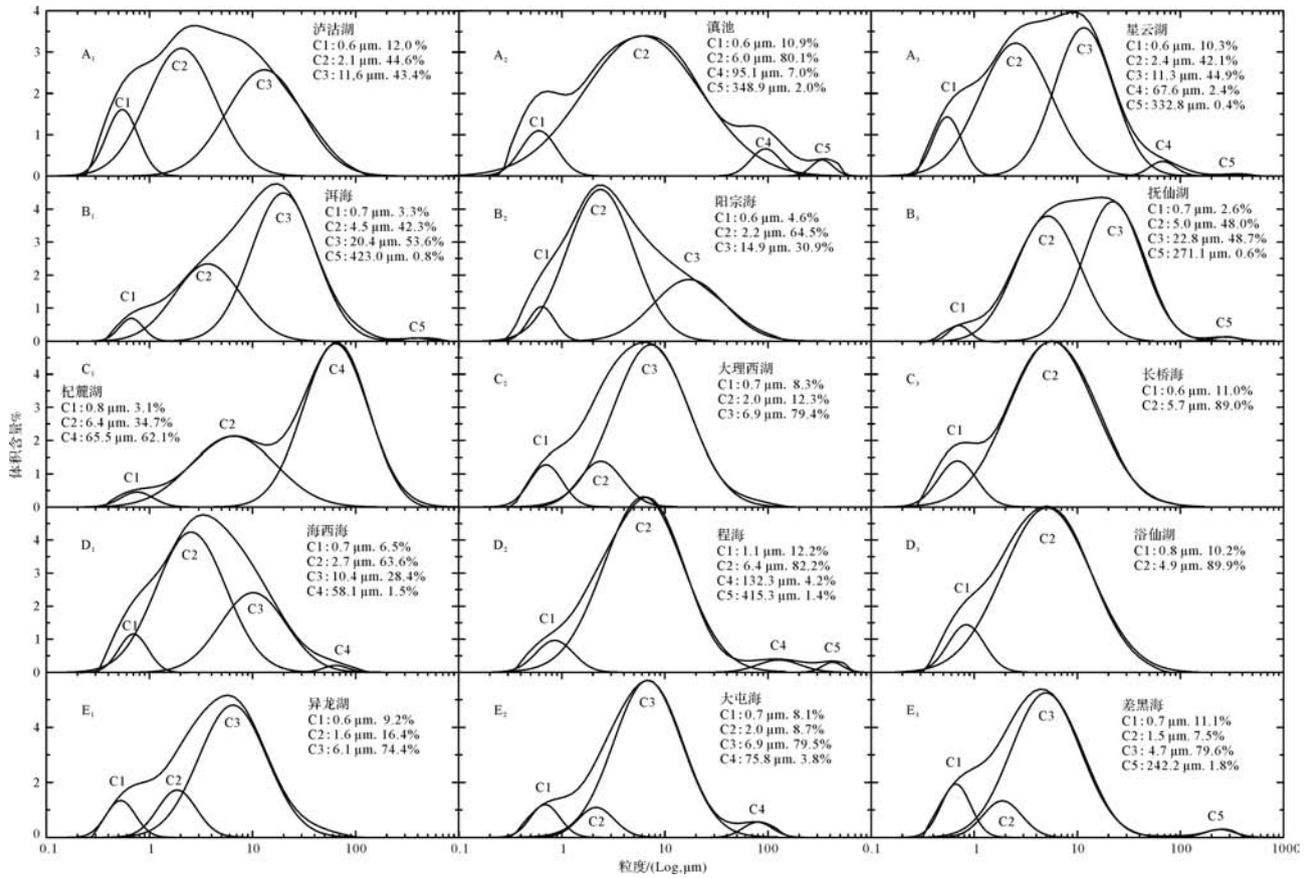


图2 云南15个湖泊表层沉积物粒度频率曲线和拟合结果

A₁~A₃: 泸沽湖、滇池、星云湖; B₁~B₃: 洱海、阳宗海、抚仙湖; C₁~C₃: 杞麓湖、大理西湖、长桥海; D₁~D₃: 海西海、程海、浴仙湖; E₁~E₃: 异龙湖、大屯海、差黑海

Fig.2 Frequency distribution curves of the 15 lakes and their fitting results

的15个云南湖泊而言,由于受西南季风的影响,降水丰富,植被覆盖度相对较高,全年无结冰期。湖盆中无机沉积物主要来自湖泊流域内地表径流和河流携带的风化碎屑颗粒,其次则是来自大气中长期悬浮的超细粉尘和气溶胶。进入湖泊中的颗粒在湖水动力作用下,通过跃移和悬移的方式到达湖心位置沉淀下来。通常而言,越接近湖心深水区,水动力越弱,粗粒组分的含量和峰值都会随之减小。

另一方面,所研究的15个湖泊地处云南高原山地,尤其是位于滇西北和滇东的构造断陷湖,流域内地形起伏很大和湖盆边坡较陡,加之降水丰富,搬运力很强而且距离相对较短,致使大量粗粒物质被搬运进入湖盆甚至湖心区域。同时,由于滇中地区大型、较大型湖泊,如杞麓湖、异龙湖、星云湖等受人类活动影响强烈,通过在出水口处修筑堤坝,炸开落水洞,引水出/入湖等方式^[15]人为控制湖面高程和水量平衡模式,在短时间内改变了湖水动力,沉积物粒度特征也会随之发

生变化。另外,云南中西部地区几乎全年盛行偏南风,冬半年尤其强烈,南北狭长型湖泊,如洱海、滇池、抚仙湖、程海、阳宗海等,使得南风的吹程较长,因而可以形成较强的湖浪和湖流,形成特殊的搬运模式和路径,导致湖流可以将粗颗粒组分通过悬移和跃移的方式带至湖心深水区,这也是该区域湖泊沉积物粒度分布的特点之一。

4.1 C1组分的来源及其意义

分析结果显示15个云南湖泊表层沉积物中都含有C1组分,其拟合中值粒径和含量范围分别为0.6~1.1 μm和2.6%~12.2%(图2、表2)。事实上,C1作为一种超细粒组分(拟合中值粒径小于2 μm),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^[19,24-25],因此绝大多数湖泊沉积物中都有该组分出现^[22-26]。沉积物中<2 μm颗粒可以通过盆地径流和大气沉降两种方式进入湖盆^[19,24-25],而组分拟合的目的之一就是将在同一粒级却由不同营力搬运的

表 2 15 个湖泊表层沉积物的拟合组分中值粒径及百分含量

Table 2 The modal size and percentage of components from the 15 lakes surface sediments

湖泊	C1 中值粒径(μm)	C2 中值粒径(μm)	C3 中值粒径(μm)	C4 中值粒径(μm)	C5 中值粒径(μm)
	/含量(%)	/含量(%)	/含量(%)	/含量(%)	/含量(%)
浴仙湖	0.8/10.2	4.9/89.8			
长桥海	0.6/11.0	5.7/89.0			
泸沽湖	0.6/12.0	2.1/44.6	11.6/43.4		
异龙湖	0.6/9.2	1.6/16.4	6.1/74.4		
阳宗海	0.6/4.6	2.2/64.5	14.9/30.9		
西湖	0.7/8.3	2.0/12.3	6.9/79.4		
杞麓湖	0.8/3.1	6.4/34.7		65.5/62.1	
海西海	0.7/6.5	2.7/63.6	10.4/28.4	58.1/1.5	
大屯海	0.7/8.1	2.0/8.7	6.9/79.5	75.8/3.75	
洱海	0.7/3.3	4.5/42.2	20.4/53.6		423.0/0.8
抚仙湖	0.7/2.6	5.0/48.0	22.8/48.7		271.1/0.6
差黑海	0.7/11.1	1.5/7.5	4.7/79.6		242.4/1.8
滇池	0.6/10.9	6.0/80.1		95.1/7.0	348.9/2.0
程海	1.1/12.2	6.4/82.2		132.3/4.2	415.3/1.4
星云湖	0.6/10.3	2.4/42.1	11.3/44.9	67.6/2.4	332.8/0.4

组分区别开^[22,26]。本文中,拟合出的 C1 组分中值粒径除程海为 1.1 μm 外,其余皆为 0.6~0.8 μm ,最大粒径仅有 2~3 μm (图 2),表明搬运该组分的动力均很弱,而且在这 15 个湖泊流域内大致相同,推断该组分为大气中长期悬浮的超细粉尘和气溶胶,通过重力和降水作用进入湖泊水体,构成表层沉积物粒度频率曲线细端(<2 μm)部分。因此这 15 个湖泊中 C1 组分极有可能代表西南地区大气粉尘(气溶胶)的本底值^[27]。同时,拟合中值粒径为 0.7 μm 左右,与中国北方干旱区相比偏细^[19]。需要指出的是,受湖泊水动力影响,沉积物中 C1 组分的粒度大小和百分含量与大气背景值并不完全成正比。例如,湖滨区域和水动力较强的过水湖,超细组分缺乏稳定的沉积环境,沉积物中的 C1 组分相对较少甚至缺失^[23]。沉积速率较慢的湖泊,沉积过程较长,C1 组分的含量相对较高^[3,9](图 2 表 2)。从以上讨论可以得出,同一个湖泊沉积岩芯中,C1 百分含量与沉积速率成反比,藉此可以建立较可靠的沉积年代序列,但前提是超细组分的沉降背景值恒定且沉积环境稳定。

4.2 主要组分

除杞麓湖外,其余 14 个湖泊表层沉积物的主要组分为 C2 或 C3,拟合中值粒径为 2.1~22.8 μm ,属细砂组分,C2+C3 含量达 80.1%~96.7%,占湖泊沉积物无机颗粒的绝大部分。有研究表明该组分主要反映湖盆流域内水动力强弱^[19]。当降水充沛、强度较大时,地表径流和河流搬运能力增强,所携带的物质颗粒整体偏粗,从而导致湖泊沉积物中主要组分(C2 或 C3)峰

值右移。另一方面,进入湖泊水体的颗粒物随着越向湖心水动力越弱,粗粒物质最先沉淀,致使湖中心沉积物粒径主要组分峰值逐渐左移,因此主成分的粒径大小同时受流域降水和湖泊水动力两者的影响。

从图 2、表 2 可看出,洱海、抚仙湖主成分最粗,拟合中值粒径分别达到 20.4 μm 、22.8 μm ,其次为星云湖、大屯海、大理西湖,而浴仙湖、泸沽湖、阳宗海、海西海、差黑海等 5 个湖泊的主成分拟合中值粒径较细,均小于 5 μm 。由此可以得出,湖泊面积大小并不是控制沉积物主要组分粗细的决定性因素。这 15 个湖泊中,洱海、抚仙湖的面积仅次于滇池(表 1),而主成分粒径却最粗,表明由水力作用带入这两个湖盆的风化颗粒总体较粗,这可能与洱海和抚仙湖流域的径流和地形有关:洱海、抚仙湖均属于构造断陷湖^[15],流域内高差巨大,降水形成的坡面汇流具有较强的能量,可以携带粗粒物质进入湖盆,另外,发源于点苍山的十余条常年性河流,水量(表 1)与水能都足以携带大量粗粒物质进入洱海,在年际尺度上具有湖心粗粒物质含量与流域降水量成正比的关系^[28]。差黑海和浴仙湖面积和水深在这 15 个湖泊中最小(表 1),拟合主成分中值粒径也较小,分别只有 4.7 μm 和 4.9 μm (图 2、表 2)。2013 年对这两个湖泊进行考察采样时,西南地区正经历一次严重干旱事件^[29],湖泊面积急剧收缩,浴仙湖更是接近干涸。有研究认为干旱时期湖泊收缩,粒度分布同心圆模式影响到湖心,使湖心沉积物变粗^[30]。浴仙湖和差黑海表层沉积物粒度拟合结果可能给出另外一种解释:西南地区干旱时期,小型湖泊剧烈收缩甚

至干涸,入湖水流大量减少,携带进入湖泊的颗粒少而且偏细,同时,大气环流偏弱^[29],湖泊收缩导致水生植物覆盖比例增大,湖水动力减弱,向湖心输送的颗粒物同样偏细。因此,不同外部条件下导致的湖泊收缩,沉积物中粒度的响应是不同的。在借助湖泊岩芯重建古气候和古环境的研究中,一般认为湖泊收缩导致粒度变粗,而粒度变细对应深水相沉积^[31],现在看来并不适用于所有湖泊,特别是云南高原湖泊,在这里湖心沉积物粒度是对流域水动力/风力的直接响应,与水深大小关系较弱。

杞麓湖表层沉积物粒度拟合结果显示 C4 为其主要组分,中值粒径为 65.5 μm ,含量达到 62.1%,并显示出与其他 14 个湖泊不同的频率曲线特征(图 2-C-1),表明有大量粗颗粒组分进入湖盆且输送到湖心位置。结合湖泊流域降水,入湖径流及湖盆特征综合分析认为由地表径流和河流输入的可能性较小。遥感影像资料表明杞麓湖自 1988 年以来面积缩小了 40%以上,除气候因素外,人为采用河流泥沙冲淤造田和挖湖泥造田也是一个重要方面^[17,32]。大量粗粒泥沙通过这种方式进入杞麓湖,影响了湖心沉积物粒度频率曲线形态。除杞麓湖外,填湖造陆在滇池、异龙湖也较为普遍^[16],势必会对湖泊某一区域,甚至是全湖的沉积物粒度组成产生影响。

4.3 砂组分的输入途径

分析结果显示,C5(粗砂)组分出现在差黑海、洱海、滇池、抚仙湖、程海、星云湖 6 个湖泊中,拟合中值粒径和含量分别为 242.4~423.0 μm 、0.4%~2.0%,除差黑海外,其余 5 个湖泊均属于云南 9 大高原湖泊(表 1)。大型湖泊湖心表层沉积物粒度中出现砂组分,说明湖水本身具有较强的搬运动力,将地表径流输入到湖盆的粗粒物质运至湖心并沉淀。受南北走向构造断裂影响^[33],诸如滇池、抚仙湖等云南几大构造断陷湖也多东西窄,南北长^[15],加之云南地区多数时间盛行偏南风,在南北狭长型湖面形成较长的吹程,使得这一类湖泊普遍具有显著的湖流:表层湖水向北运动,下层湖水向南进行补偿。据野外观测,抚仙湖湖流循环深度可达 20 m 以上,滇池、星云湖、洱海^[34]可影响到湖底,强烈的湖流运动为 C4 和 C5 组分的悬移或者跃移搬运提供了可能。

相比之下,小型湖泊,如海西海、大屯海、差黑海中砂组分的来源可能有多种解释。海西海(表 1)是位于洱海之北的一个小型湖泊,周围地形陡峭,流域面积仅有 2.4 km^2 。由于湖泊面积较小,流速较快的地表径流

可将大量泥沙带入湖盆,并引起整个湖水浑浊,这也是山地地区小型湖泊湖心沉积物中粗粒组分输入的主要途径^[13]。因此这类湖泊中 C4 和 C5 组分含量的增加指示流域内降水量和降水强度增大。大屯海(表 1)南北长 5.0 km,东西宽 2.46 km ^[15],其湖心表层沉积物中的砂组分成因可能与洱海和抚仙湖类似:强烈的湖流将部分湖滨粗颗粒物携带至湖心,证明粗颗粒组分的拟合中值粒径和含量与湖流强度相关。

4.4 两个过程

研究表明,湖泊流域内的风化碎屑物进入湖盆并到达湖心位置沉淀下来需要如下两个过程,即从湖泊流域地表到湖盆的输入过程和从湖滨至湖心的传输过程。第一个过程主要受流域内降水和地表径流控制^[23],同时地形,植被覆盖情况以及人类活动也会对碎屑物的输入产生影响^[13,35];第二个过程主要由湖泊大小,水深以及水动力强弱决定^[36]。研究认为在年际和十年尺度上,降水增多会导致沉积物中粒度整体偏粗,而在百年甚至更长时间尺度上降水增多则会导致粒径偏细^[28]。其原因在于百年以上时间尺度上的降水增加,势必会导致湖泊面积和水深的增大(同时受出水口高程控制),湖心到湖岸距离增大,从而弱化第二个过程,导致传输到湖心的颗粒偏细。从这个意义上讲,在地质历史时期,两个过程是相互影响的。但就本文研究的湖泊表层沉积物粒度特征而言,两个过程是相对独立的。第一个过程影响湖泊沉积物主成分(主要为 C2 或 C3)粒径大小,第二个过程影响湖心粗粒组分(C4 和 C5)含量。对于面积较小的湖泊,这两个过程有时会合并为一个过程:当降水强度较大时,水流将地表风化碎屑直接输入到湖心,如海西海。但对于洱海、滇池、程海等面积较大湖泊而言,第一个过程一般只能将粗颗粒输入到湖滨,其后在湖水动力作用下输送到湖心。从以上分析可以得出,对于湖泊沉积物粒度环境指示意义的解译需持谨慎态度,同时,需要其它指标的支持与佐证,这样才能建立一个合理而可靠的环境指标。

5 结论

通过对云南高原 15 个湖泊表层沉积物粒度组成的分析研究可以得出,其 C1 组分来自大气中长期悬浮的超细粉尘和气溶胶,通过自然沉降和降水进入湖泊水体,反映西南地区大气粉尘背景值,通常而言,该组分含量与沉积速率成反比;C2 和 C3 组分则是湖泊沉积物中的主要组分,该组分拟合粒径反映流域内降水

和水动力大小;C4和C5组分只出现在部分湖泊湖心沉积物中,且含量非常低,该组分与湖泊水动力密切相关。

对于多数湖泊而言,沉积物颗粒,尤其是粗颗粒进入湖心需两个过程:从流域地表进入湖滨的输入过程和从湖滨到达湖心的传输过程。对于滇池、洱海等大型湖泊而言,第二个过程决定其湖心沉积物中粗颗粒物含量,而该过程的强弱与湖流、水深、湖盆坡度等因素有关。

西南地区干旱背景下湖泊快速收缩直至消失时,降水量的大幅减少使得地表径流携带进入湖泊的颗粒物具有偏细的特征,大气环流偏弱加上水生植物覆盖面积比例增大,湖水动力减弱,由湖滨向湖心传输的物质以细粒碎屑为主,例如浴仙湖。因此在利用湖相沉积物重建区域古环境时须仔细甄别粒度的指示意义。位于山地地区的小型湖泊,由于汇水面积有限,湖面高程受地貌限制,流域地形坡度较大,在这种情况下坡面径流可将地表风化碎屑物带入湖盆甚至湖心位置,这类湖泊沉积物中粗粒物质的增加反映流域内降水量和降水强度增大。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所的秦小光研究员提供粒度分析软件,华中师范大学博士研究生郑茜,云南师范大学高原湖泊生态与全球变化实验室的王熊飞、陈小林、陈思思、刘东升、施海彬、刘圆圆、陶建霜等共同参与了野外采样和实验室工作,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Wu Duo, Zhou Aifeng, Liu Jianbo, et al. Changing intensity of human activity over the last 2,000 years recorded by the magnetic characteristics of sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2015, 53(1): 47-60.
- [2] Liu Guimin, Liu Zhengwen, Gu Binhe, et al. How important are trophic state, macrophyte and fish population effects on cladoceran community? A study in Lake Erhai [J]. *Hydrobiologia*, 2014, 736(1): 189-204.
- [3] 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.
- [4] 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.]
- [5] 张振克,吴瑞金,沈吉,等. 近 1800 年来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录 [J]. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 297-303. [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Shen Ji, et al. Lacustrine records of climatic change and human activities in the catchment of Erhai Lake, Yunnan province since the past 1800 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(4): 297-303.]
- [6] Ashley G M. Interpretation of polymodal sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1978, 86(4): 411-421.
- [7] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the geologic history of wind [J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(2): 159-195.
- [8] 陈荣彦,宋学良,张世涛,等. 滇池 700 年来气候变化与人类活动的湖泊环境响应研究 [J]. *盐湖研究*, 2008, 16(2): 7-12. [Chen Rongyan, Song Xueliang, Zhang Shitao, et al. Dianchi Lake sediment records of climate changes and humane activities in the past 700 years [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2008, 16(2): 7-12.]
- [9] 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, Lü 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.]
- [10] 王小雷,杨浩,赵其国,等. 云南抚仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 776-782. [Wang Xiaolei, Yang Hao, Zhao Qiguo, et al. Recent environmental change inferred from grain-size records in Fuxian Lake, Yunnan province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 776-782.]
- [11] 陈敬安,万国江,黄荣贵. 云南程海沉积物粒度研究 [J]. *环境科学进展*, 1999, 7(4): 76-82. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Huang Ronggui. Study of sediment particle sizes in Lake Chenghai, Yunnan province [J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(4): 76-82.]
- [12] 姚远,张恩楼,沈吉,等. 云南属都湖沉积物金属元素地球化学 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20(4): 486-491. [Yao Yuan, Zhang Enlou, Shen Ji, et al. Metals geochemistry of the sediments of Lake Shudu, Yunnan province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(4): 486-491.]
- [13] 杨建强,崔之久,易朝露,等. 云南点苍山全新世以来的冰川湖泊沉积 [J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 525-533. [Yang Jianqiang, Cui Zhijiu, Yi Chaolu, et al. Glacial lacustrine sediment's response to climate change since Holocene in Diancang Mountain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 525-533.]
- [14] 刘亚生,常凤琴,张虎才,等. 云南腾冲青海湖沉积物物化参数的特点、环境意义及末次冰消期以来气候环境变化 [J]. *第四纪研究*, 2015, 35(4): 922-933. [Liu Yasheng, Chang Fengqin, Zhang Hucai, et al. Environmental significance of physicochemical parameters of sediment and climate changes since the Late Glacial at Qinghai Lake of Tengchong county, Yunnan province [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(4): 922-933.]
- [15] 王苏民,窦鸿身. *中国湖泊志* [M]. 北京:科学出版社,1998:368-389. [Wang Sumin, Dou Hongshen. *Chinese lakes* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 368-389.]
- [16] 陈思思,张虎才,常凤琴,等. 异龙湖湖泊沉积对流域人类活动的

- 响应[J]. 山地学报, 2016, 34(3): 274-281. [Chen Sisi, Zhang Hucai, Chang Fengqin, et al. Human activities indicated by the sediments at the Yilong Lake[J]. Mountain Research, 2016, 34(3): 274-281.]
- [17] 吴小君, 吴鹏海, 刘紫涵, 等. 利用时序 Landat 数据的杞麓湖面积年变化时空分析[J]. 遥感信息, 2016, 31(4): 89-94. [Wu Xiaojun, Wu Penghai, Liu Zihan, et al. A spatio-temporal analysis of water body area annual changes in Qilu Lake based on time series Landset data[J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(4): 89-94.]
- [18] Bagnold R A, Barndorff-Nielsen O. The pattern of natural size distributions[J]. Sedimentology, 1980, 27(2): 199-207.
- [19] 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[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11): 1153-1164.]
- [20] 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[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(2): 345-353.]
- [21] Qin Xiaoguang, Cai Binggui, Liu Tungsheng. 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.
- [22] Xiao Jule, Chang Zhigang, Fan Jiawei, et al. The link between grain-size components and depositional processes in a modern clastic lake[J]. Sedimentology, 2012, 59(3): 1050-1062.
- [23] 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 Xinhua, Wu Yanhong, Yang Liyuan. 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.]
- [24] Chen Fahu, Qiang Mingrui, Zhou Aifeng, 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.
- [25] Qiang Mingrui, Liu Yingying, Jin Yanxiang, et al. Holocene record of eolian activity from Genggahai Lake, northeastern Qinghai - Tibetan Plateau, China [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(2): 589-595.
- [26] Xiao Jule, Fan Jiawei, Zhou Lang, 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.
- [27] 梁涛, 史正涛, 刘志国. 昆明市街道灰尘粒度特征及其环境意义[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 122-128. [Liang Tao, Shi Zhengtao, Liu Zhiguo. Grain size characteristics of street dust in Kunming and its environmental significance[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(1): 122-128.]
- [28] 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 China (Seri.D): Earth Sciences, 2003, 33(6): 563-568.]
- [29] 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 443-457. [Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(3): 443-457.]
- [30] 类延斌, 张成君, 尚华明, 等. 青藏高原东北部希门错湖岩心粒度特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 31-38. [Lei Yanbin, Zhang Chengjun, Shang Huaming, et al. The grain size characteristics of Ximencuo Lake core in the Northeast Tibet Plateau and its environmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 31-38.]
- [31] 明庆忠, 苏怀, 史正涛, 等. 云南小中甸盆地湖相沉积记录的最近 5 次 Heinrich 事件[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 123-130. [Ming Qingzhong, Su Huai, Shi Zhengtao, et al. Last five Heinrich events revealed by lacustrine sediments from Xiaozhongdian Basin in Yunnan province[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 123-130.]
- [32] 刘阳, 吴钢, 高正文. 云南省抚仙湖和杞麓湖流域土地利用变化对水质的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3): 447-753. [Liu Yang, Wu Gang, Gao Zhengwen. Impacts of land-use change in Fuxian and Qilu basins of Yunnan province on lake water quality [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(3): 447-753.]
- [33] 张宗祜. 川滇南北构造带中段晚新生代地质研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 3-8. [Zhang Zonghu. Late Cenozoic geology in middle segment of Sichuan-Yunnan South-North tectonic belt [M]. Beijing: China Petroleum Press, 1994: 3-8.]
- [34] 李原, 李任伟, 尚榆民, 等. 云南洱海的环境沉积学研究——表层沉积物的粒度分布、水流方向和能量[J]. 沉积学报, 1999, 17(增刊1): 769-774. [Li Yuan, Li Renwei, Shang Yumin, et al. The environment sedimentological study on Erhai Lake, Yunnan Province——Sediments particle size distribution, flow direction and energy distribution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(Suppl.1): 769-774.]
- [35] 魏强, 汉景泰, 李东. 32ka B.P.以来东北二龙湾玛珥湖沉积序列的粒度特征及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 957-958. [Wei Qiang, Han Jingtai, Li Dong. Grain size distribution patterns and paleoenvironmental implications of the sedimentary sequence in the Erlongwan maar lake, North East China for the last 32 ka[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 957-958.]
- [36] 陈碧珊, 潘安定, 张元芳. 柴达木盆地尕斯库勒湖沉积物粒度特征及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(2): 111-119. [Chen Bishan, Pan Anding, Zhang Yuanfang. Grain-size characteristics and their environmental significance of Gahai Lake sediments in Qaidam Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(2): 111-119.]

The Grain Size Distribution Characteristics of Surface Sediments from Plateau Lakes in Yunnan Province and Their Environmental Significances

LI HuaYong¹, ZHANG HuCai¹, CHEN GuangJie¹, CHANG FengQin¹, DUAN LiZeng¹, WANG JiaoYuan¹, LU HuiBin^{1,2}, WU Han¹, HU Kui¹

1. 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

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: To investigate the distribution pattern and significance of grain size and provide accurate analogues for grain size records from lake cores, we analyzed surface sediments from 15 lakes of Yunnan Province, China for grain size. Meanwhile, the grain size components of the surface sediments of the 15 lakes were partitioned using the log-normal distribution function method. The results showed that frequency curves of samples indicated polymodal and consisted of two to five grain-size components with the modal size varying within ranges of 0.6~423.0 μm . These components are specified from fine to coarse modes as clay (C1), fine silt (C2), silt (C3), fine to medium sand (C4) and coarse sand (C5). The grain size analysis reveals that the C1 components were the long-term superfine dust and aerosol in the atmosphere which entered the lake water body through the process of gravity and precipitation, and may have represented the background level of atmospheric dust and aerosols in southwest China; C2 and C3 were the main components of surface sediments, the modal size of which reflected the precipitation intensity of the watershed; C4 and C5 components only appeared in minority surface sediments of lakes with the contents were extremely low, and were significantly related to the lake hydrodynamic force. For the large lakes, such as Dianchi and Fuxian Lakes, it requires two processes for the sand components to reach the central part of lakes; process of from drain basin to lakes and from lakeshore to the middle of lakes, and the second one plays a main role, affected by lake current, water depth, gradient of lake basin and so on. Under the background of the drought in southwest China, some small lakes in Yunnan shrunk and even disappeared. However, because of the decrease of precipitation and weakening of general circulation, surface runoff and hydrodynamics of lakes recede, thus the material which transmit to the center of the lakes were primarily fine grain. Small lakes located in the mountainous region, with the limited catchment area and conspicuous terrain slope, can be affected by the surface runoff directly and strongly. Therefore, the increase of coarse grain in the sediments of this kind of lakes reflected the enhancement of precipitation or the precipitation intensity.

Key words: Yunnan Province; plateau lakes; surface sediments; grain size distribution characteristics; source analysis; sedimentary dynamics