

达里湖沉积粒度组分-湖面状况定量模型*

范佳伟^{①②} 肖举乐^① 温锐林^① 翟大有^① 张生瑞^{①②} 秦小光^①

(①中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029; ②中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 湖泊碎屑沉积物的粒度分布可以提供与区域气候变化相关的湖泊水文变化信息。然而, 由于湖泊沉积物多峰分布固有的复杂性, 其粒度组分成因的解释仍存在很大的不确定性。本文利用对数正态分布函数对内蒙古达里湖 36 个表层沉积物样品的粒度组分进行了分离, 并探讨了各组分特性与特定沉积环境(包括每个采样点位的离岸距离和水深)之间的关系。结果表明, 达里湖现代碎屑沉积物包含 5 个截然不同的单峰粒度分布, 分别代表 5 个不同的粒度组分。虽然其相对百分含量随湖泊水动力条件而变化, 但每个组分均保留着各自的众数粒径、搬运方式、沉积环境等特性。这些组分自细而粗可分为: 长期悬移粘土组分、离岸带悬移细粉砂组分、离岸带悬移中粗粉砂组分、近岸带悬移细砂组分、近岸带跃移中砂组分。近岸带环境两个组分的百分含量与现今湖泊水深呈负相关, 揭示出沉积岩芯近岸带组分与地质历史时期湖面状况相关联的数值模型。该模型在达里湖沉积岩芯中的应用显示, 近岸带组分百分含量增加与同岩芯孢粉序列重建的区域降水减少相对应。两种独立的代用指标在时间上的一致性, 不仅展示了对数正态分布函数分离多峰沉积物的有效性, 而且揭示出利用粒度组分-湖面状况模型重建湖泊古水文的潜力。

关键词 达里湖 多峰态沉积物 对数正态分布 粒度组分 湖面状况 数值模型

中图分类号 P941.78, P534.63⁺2 **文献标识码** A

碎屑沉积物粒度分布提供了物质来源、搬运机制和沉积环境变化的直接信息^[1-3]。河流、风成、海洋沉积物的粒度分布, 数十年前已得到详细的解释。河流沉积物由两个粒度组分构成, 即: 众数粒径为 200~400 μm 的跃移中砂组分和众数粒径为 10~15 μm 的悬移细粉砂组分^[4-8]。典型的黄土沉积由主导众数粒径为 16~32 μm 的短距离悬移中粗粉砂组分和主导众数粒径为 2~6 μm 的长距离悬移粘土-细粉砂组分构成^[9-12]; 而沙漠沙主要由众数粒径为 100~200 μm 的跃移细中砂组分和众数粒径为 2~6 μm 的悬移粘土-细粉砂组分构成^[9-11, 13]。深海沉积物以众数粒径为 2 μm 的单一风成组分为主^[14-16]; 而近海沉积物由众数粒径分别为 13 μm 和 7 μm 的两个风成组分和众数粒径为 4 μm 的近海组分构成^[17-19]。

长期以来, 湖泊沉积物的粒度分布一直被用作与区域气候和环境变化过程密切相关的湖泊水文状况的代用指标^[20-27]。然而, 对特定湖泊而言, 通过沉积岩芯分析获得的传统粒度参数(例如: 众数粒

径、平均粒径和中值粒径, 偏度, 峰度)在湖区古水文、古气候历史重建中并未起到应有的作用, 其原因在于湖泊沉积物多峰态粒度分布固有的复杂性。简而言之, 不同沉积物的粒度分布不仅峰态数不同, 而且主峰态的属性也不相同。这种固有的复杂性意味着, 湖泊沉积物单一多峰粒度分布中不同的峰态可能是通过特定沉积过程在不同沉积环境中形成的^[4, 5, 28]。

学界认为, 具有单一峰态(即: 单一组分)的碎屑沉积物的粒度分布在对数坐标上呈单峰、对称分布, 而多峰态粒度分布可视为两个或多个单峰分布(即: 两个或多个组分)的组合^[5, 28-31]。此外, 单一峰态沉积物的粒度分布服从对数正态分布^[32], 而包含两个或多个单峰组分的沉积物, 其中每个组分均可用对数正态分布函数进行足够精确的描述^[5]。基于上述认识, 本文利用对数正态分布函数, 对现代碎屑型湖泊内蒙古中东部达里湖沿 3 条断面采集的 36 个表层沉积物样品单一粒度分布中的粒度组分进行了定量拟合和分离, 目的在于解释湖泊沉积

第一作者简介: 范佳伟 男 28 岁 博士研究生 第四纪地质学专业 E-mail: jwfan@mail.iggcas.ac.cn

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:41130101)和国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)(批准号:2010CB833400)共同资助
2015-11-13 收稿, 2016-01-25 收修稿稿

物多峰粒度分布的成因, 并将单一粒度分布中所有的粒度组分与特定的湖泊沉积过程和沉积环境相关联。本文试图建立湖泊沉积物粒度组分与湖面状况数值模型, 该模型可基于湖泊沉积岩芯数据用以重建过去湖面变化历史。

1 区域背景

达里湖($43^{\circ}13' \sim 43^{\circ}23'N$, $116^{\circ}29' \sim 116^{\circ}45'E$)是一个水文封闭型湖泊, 位于内蒙古克什克腾旗西70km处(图1), 湖泊所在湖盆为一形成于上新世至更新世的内陆断陷盆地^[33]。湖泊面积为 238km^2 , 最大水深达11m, 海拔为1226m(图1)。湖泊坐落于东-西走向的浑善达克沙地的北部边缘。湖泊北部和西部展布着玄武岩质的丘陵, 湖的东岸分布着广阔的湖积平原。湖泊东北部的两条永久性河流(公格尔河和萨林河)和湖泊西南部的两条间歇性溪流(耗来河和亮子河)注入湖泊, 但没有一条河流排泄湖水(图1)。

达里湖位于我国中温带半湿润-半干旱区的过渡带。湖区气候主要由东亚季风控制^[34,35]。夏季, 来自湖区东南方向的暖湿气团与来自西北方向的冷气流相互作用, 为湖区带来绝大多数的年降水量; 冬季, 来自西北方向的冷干气流主导湖区气候, 湖区盛行西北风并且尘暴天气多发。湖区年均温是 3.2°C , 7月均温是 20.4°C , 1月均温达 -16.6°C 。

年均降水量为 383mm , 其中约70%的年降水量集中在6月到8月。年均潜在蒸发量 1632mm , 是年均降水量的4倍多。每年11月至次年4月, 达里湖湖面封冻。

2 材料与方法

2.1 表层沉积物样品采集

达里湖表层沉积物样品沿a、b和c三个断面采集, 其中a断面共采集11个样品, b断面共采集13个样品, c断面共采集12个样品(图1、图2和表1)。a、b和c断面分别从近岸带的a1($43^{\circ}18.460'N$, $116^{\circ}34.747'E$)、b1($43^{\circ}13.999'N$, $116^{\circ}39.394'E$)和c1($43^{\circ}19.758'N$, $116^{\circ}42.864'E$)样品开始采集, 并分别采集至湖心位置附近的a11($43^{\circ}17.060'N$, $116^{\circ}38.068'E$)、b13($43^{\circ}16.796'N$, $116^{\circ}39.014'E$)和c12($43^{\circ}18.004'N$, $116^{\circ}39.849'E$)样品为止(图1、图2和表1)。在每一个取样点, 用配备聚乙烯套管的重力钻提取湖床底部40cm或60cm长的沉积岩芯。岩芯管内沉积物顶部的水岩界面以及毫米级厚度的白灰色沉积清晰可辨。用塑料管抽吸并移除岩芯管中的湖水, 然后切取每段岩芯的顶部1cm作为表层沉积物样品。在重力钻取芯的同时, 我们测量了每个取样点的水深和离岸距离(图2和表1)。

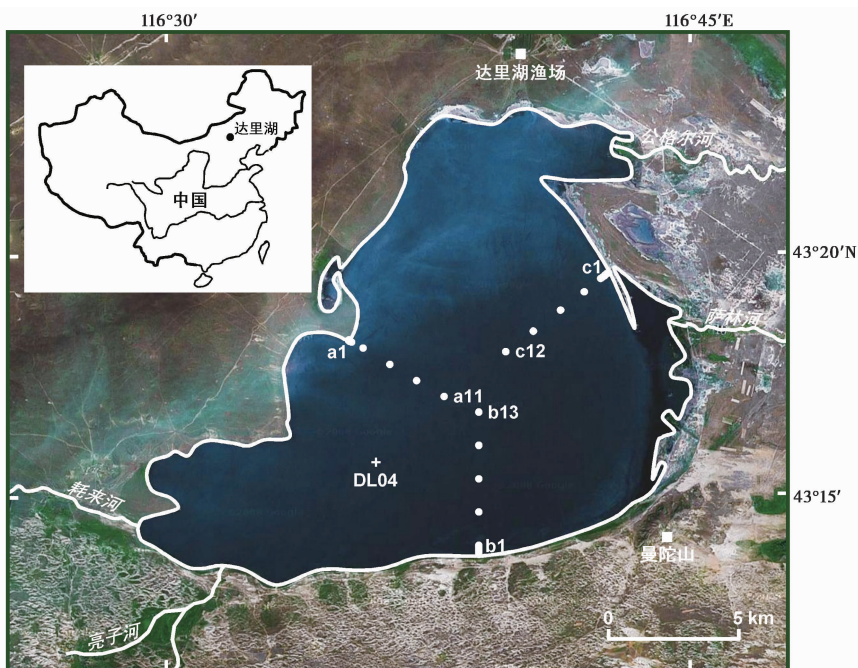


图1 达里湖卫星地图以及a、b、c三个断面和DL04沉积岩芯

Fig. 1 Map of Dali Lake showing the location of the transects a, b and c, and the DL04 sediment core

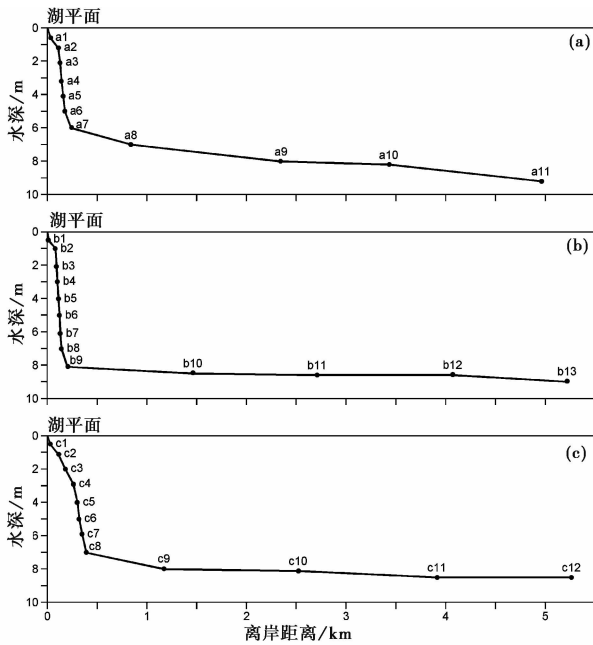


图2 达里湖 a、b、c 三个断面的湖底地形图以及采样点位的分布

Fig. 2 Profile of the lake floor along the transects a, b and c showing the sampling sites

表1 达里湖 a、b、c 三个断面表层沉积物样品点位的水深和离岸距离(2010年6月测量)

Table 1 Water depths and offshore distances of 36 surface-sediment sampling sites along the transects a, b and c in Dali Lake (measurements taken in June 2010)

样品号	水深 /m	离岸距离 /km	样品号	水深 /m	离岸距离 /km	样品号	水深 /m	离岸距离 /km
a1	0.6	0.03	b1	0.5	0.01	c1	0.5	0.03
a2	1.2	0.11	b2	1.0	0.08	c2	1.1	0.11
a3	2.1	0.13	b3	2.1	0.09	c3	2.0	0.18
a4	3.2	0.14	b4	3.0	0.10	c4	2.9	0.26
a5	4.1	0.16	b5	4.0	0.11	c5	4.0	0.30
a6	5.0	0.18	b6	5.0	0.12	c6	5.0	0.32
a7	6.0	0.24	b7	6.1	0.13	c7	5.9	0.35
a8	7.0	0.84	b8	7.0	0.14	c8	7.0	0.39
a9	8.0	2.33	b9	8.1	0.20	c9	8.0	1.17
a10	8.2	3.43	b10	8.5	1.46	c10	8.1	2.52
a11	9.2	4.96	b11	8.6	2.71	c11	8.5	3.91
			b12	8.6	4.07	c12	8.5	5.26
			b13	9.0	5.22			

2.2 粒度分析

所有样品的粒度分布均采用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行分析。从每个自然风干的样品中取出约 200mg 离散沉积物, 加入 10~20ml 浓度为 30% 的 H_2O_2 溶液, 将样品溶液加热至 140℃, 去除有机质。然后往样品溶液中加入 10ml 浓度为

10% 的 HCl 溶液, 去除碳酸盐。往去除有机质和碳酸盐后的样品溶液中加入去离子水至样品溶液体积为 500ml, 静置 24 小时, 稀释酸溶液。用 2000ml 烧杯轻轻移除静置后的样品溶液的上清液, 往残余样品溶液中加入约 10ml 浓度为 0.05 M 的六偏磷酸钠 ($(NaPO_3)_6$) 溶液。然后将样品溶液置于超声波分散器中, 超声震荡 10 分钟, 充分分散样品溶液, 等待分析。

Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪的测量范围为 0.02 ~ 2000 μm , 样品粒度的分辨率以 0.166 ϕ 为间隔 ($\phi = -\log_2(D)$, D 为颗粒直径, 单位为 mm), 因此每个样品会产生 100 个粒度组分。Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪自动给出每个粒度组分的体积百分含量。重复测量的相对误差 < 1%。

2.3 粒度组分的拟合和分离

具有单一组分的碎屑沉积物的粒度分布在对数坐标上呈单峰、对称分布, 而不对称的或具有偏态的粒度分布可视为多个单峰分布的组合^[5, 28-31]; 此外, 单一峰态沉积物的粒度分布服从对数正态分布^[32], 而包含多个单峰组分的沉积物, 其中每个组分均可用对数正态分布函数进行精确描述^[5, 8, 12]。本文我们利用对数正态分布函数^[12]来拟合并分离达里湖表层沉积物的各个粒度组分。对数正态分布函数的方程式如下:

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

n 为粒度组分的数量, $x = \ln(d)$, d 为以 μm 为单位的颗粒粒径; c_i 为第 i 个组分的百分含量, $c_i \geq 0$, n 个 c_i 的总和为 100%; σ_i 为第 i 个组分的标准偏差; a_i 为第 i 个组分对数粒径的平均值, 单位为 μm , 即 $a_i = \ln(d_i)$, $a_i > 0$ 。

拟合残差计算公式如下:

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

m 为粒度区间的数量。 $F(x_j)$ 为第 j 个粒度区间的拟合百分含量。 $G(x_j)$ 为第 j 个粒度区间的实测百分含量。 dF 值越小代表拟合结果越好。

在开始拟合之前, 需要假设实测多峰态粒度分布的组分数量 n 。 n 通过鉴别实测分布曲线的峰数以及每个峰的偏态来确定。 在这里, 用两个组分描述一个具有偏态的峰是非常必要的。 单个实测多峰分布的每个组分用 3 个参数 (c 、 a 和 σ) 来描述, 结

合 n 个组分的这 3 个参数可以描述该实测多峰分布。为了便于操作和计算, 我们应用 Visual Basic 语言编写了拟合程序。拟合步骤如下: 1) 将所有样品的实测粒度数据置于 MS Excel 工作表中; 2) 运行程序, 选择目标样品, 程序随机生成估算的样品中每个组分的 3 个参数 (c 、 a 和 σ) 的初始值, 然后利用上述估算的参数 (n 、 c 、 a 和 σ) 值以及实测粒度数据进行拟合运算, 并产生初始拟合残差; 3) 程序开始对这 4 个参数 (n 、 c 、 a 和 σ) 进行迭代运算, 并在每次运算完成后产生一组新的参数值, 以获得最小的拟合残差值。在运算过程中, $0 < c_i < 100$, $a_{i-1} < a_i < a_{i+1}$, $0 < \sigma_i < \sigma$ (σ 为样品实测粒度数据的标准偏差)。程序将迭代运算过程中 3 个参数的增量 (Δc 、 Δa 和 $\Delta \sigma$) 设置得足够小 ($\Delta c = 0.01$, $\Delta a = (a_i - a_{i-1})/100$, $\Delta \sigma = \sigma/100$), 以确保获得一个足够好的拟合结果。在每次运算结束后, 程序自动输出一个拟合残差值, 并将此与之前最小的残差值进行比较, 选取相对更小的值作为样品的最小拟合残差值。当迭代运算完成后, 程序将给出拟合残差值最小条件下的 n 个组分的 3 个参数的组合来代表实测的多峰态分布。

当拟合残差达到最小值时, 单个样品的拟合过程结束。当对数正态分布函数拟合过程结束后, 程序会同时给出实测多峰分布中单一组分的数值分离结果, 因为在拟合过程中已经确定了每个组分的 3 个参数和分布函数。拟合过程完成, 程序会自动输出单个样品所有组分的拟合曲线以及每个组分的众数粒径和百分含量。每个组分的众数粒径在数值上等同于该组分的平均粒径和中值粒径, 因为在拟合过程中所有组分都被认为是对数正态分布的。第 i 个组分的众数粒径计算公式如下:

$$\bar{d}_i = \exp(a_i)$$

我们选取达里湖断面 a 上的 3 个典型样品 (a3、a7、a11) 来阐明利用对数正态分布函数对单个多峰分布中各个粒度组分的拟合和分离效果 (图 3)。这 3 个样品分别代表了在 3 种不同环境条件下沉积的现代沉积物, a3 代表近岸带沉积, a7 代表过渡带沉积, a11 代表离岸带沉积 (图 1 和图 2)。图 3 清楚地展示了每个样品的拟合和分离结果以及最小拟合残差值。

3 结果

3.1 粒度组分的鉴定

对数正态分布函数的拟合和分离结果表明达里

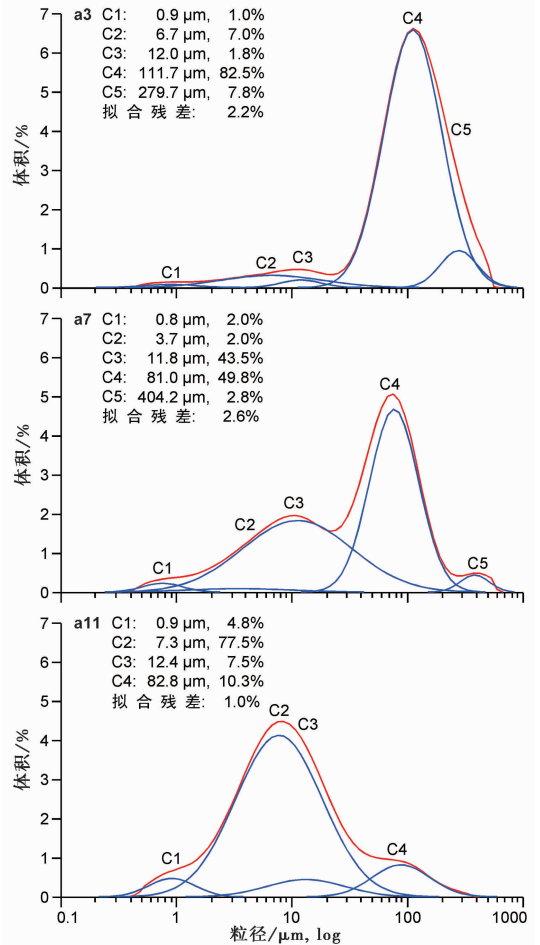


图 3 达里湖表层沉积物中 3 个代表样品的频率分布曲线 (红线), 以及利用对数正态分布函数拟合的方法分离出的不同粒度组分 (蓝线) 和各组分的众数粒径、百分含量及拟合残差

按众数粒径从细到粗的顺序, 将多峰态分布曲线上鉴定出的 5 个粒度组分命名为 C1 到 C5

Fig. 3 Frequency distribution curves (red lines) of three representative surface sediment samples of Dali Lake, illustrating fitting and partitioning of grain-size components (blue lines) using the lognormal distribution function. The modal size and percentage of each component and the fitting residual of each sample are shown. Altogether, five grain-size components can be recognized on the polymodal distributions, and are designated C1 through C5 from fine to coarse modes

湖表层沉积物中每一个多峰粒度分布的样品均由 3~5 个单峰分布构成。根据每个单峰分布众数粒径的主要变化范围, 可将这些单峰分布定义为 5 个不同的粒度组分。本文将这 5 个组分按众数粒径由细到粗分别命名为 C1 到 C5 (图 3)。

如图 3 所示, 拟合和分离过程中确定两个相对独立的组分 (比如 a3 和 a7 样品的 C1 和 C5 组分相

互独立)比较容易。然而,当相邻组分之间有叠加(比如 a3 样品的 C4 和 C5 组分, a7 样品的 C3 和 C2 组分, a11 样品的 C2 和 C3 组分相互叠加)时,为了得到最小的拟合残差值,只能通过反复试验。幸运的是,只有当百分含量比较低的组分(如 a3 样品中的 C5 组分, a7 样品中的 C2 组分, a11 样品中的 C3 组分)均被考虑进去后,样品的拟合残差才能达到最小值(图 3)。这也证明了对数正态分布函数在拟合和分离多峰态碎屑沉积物粒度组分中的精确性。

3.2 粒度组分的特征

36 个样品的拟合和分离结果显示,达里湖现代碎屑沉积物中的 C1、C2、C3、C4 和 C5 组分均具有它们各自不同的特征(图 4、图 5 和表 2)。C1、C2、C3、C4 和 C5 组分的众数粒径分布范围分别为 $0.7\sim 1.6\mu\text{m}$ 、 $1.9\sim 8.8\mu\text{m}$ 、 $10.5\sim 53.0\mu\text{m}$ 、 $68.2\sim 157.7\mu\text{m}$ 以及 $203.0\sim 514.7\mu\text{m}$ 。如图 4 和表 2 所示,两个相邻组分的众数粒径均被完全分离。C1、C2、C3、C4 和 C5 组分的百分含量变化范围分别为 $0.3\%\sim 10.3\%$ 、 $1.0\%\sim 77.5\%$ 、 $1.0\%\sim 68.5\%$ 、 $5.5\%\sim 100\%$ 以及 $0.8\%\sim 100\%$ 。C2、C3、C4 和 C5 组分呈现出两种不同的主要百分含量的分布模式,即 C2 和 C3 组分在绝大多数样品中均呈现较低的百分含量,而 C4 和 C5 组分在近似相当数量的样品中分别呈现较低和较高的百分含量(图 5)。断面 a 上的 11 个样品拟合残差值均小于 5.3% ,平均值为 3.1% ;断面 b 上的 13 个样品拟合残差值均小于 8.2% ,平均值为 4.6% ;断面 c 上的 12 个样品拟合残差值均小于 8.2% ,平均值为 4.9% 。

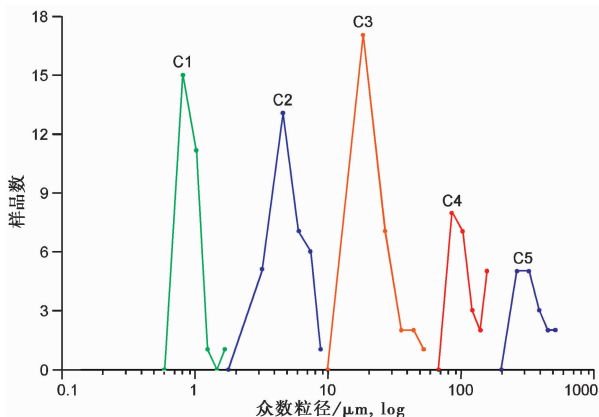


图 4 达里湖 36 个表层沉积物样品 5 个粒度组分众数粒径的频率分布

Fig. 4 Frequency of the modal sizes of the five grain-size components in 36 surface-sediment samples of Dali Lake

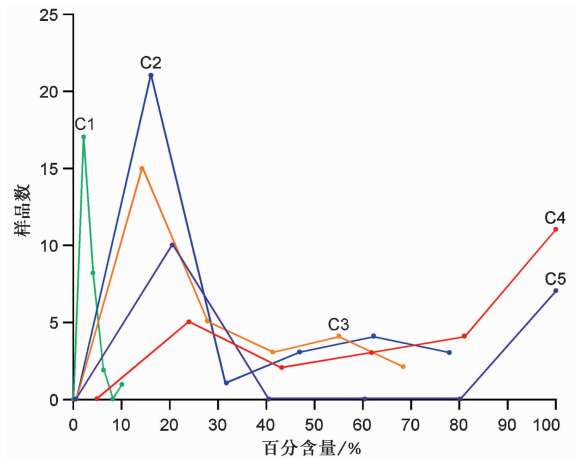


图 5 达里湖 36 个表层沉积物样品 5 个粒度组分百分含量的频率分布

Fig. 5 Frequency of the percentages of the five grain-size components in 36 surface-sediment samples of Dali Lake

表 2 达里湖 36 个表层沉积物样品多峰态粒度分布中分离的 5 个粒度组分的特征

Table 2 Characteristics of the five grain-size components recognized on the polymodal distributions of 36 surface-sediment samples of Dali Lake

粒度组分	样品数	众数粒径/ μm		百分含量/%		组分描述
		最小值	最大值	最小值	最大值	
C1	28	0.7	1.6	0.3	10.3	长期悬移粘土组分
C2	32	1.9	8.8	1.0	77.5	离岸带悬移细粉砂组分
C3	29	10.5	53.0	1.0	68.5	离岸带悬移中粗粉砂组分
C4	25	68.2	157.7	5.5	100.0	近岸带悬移细砂组分
C5	17	203.0	514.7	0.8	100.0	近岸带跃移中砂组分

3.3 粒度组分的分布

达里湖 36 个表层沉积物样品中的 C1、C2、C3、C4 和 C5 粒度组分的统计结果显示, C1、C2 和 C3 组分分别存在于 28、32 和 29 个样品中, 而 C4 和 C5 组分分别存在于 25 和 17 个样品中(表 2)。

在所有的取样点中, 水深变化范围为 $0.5\sim 9.2\text{m}$, 离岸距离变化范围为 $0.01\sim 5.26\text{km}$ (图 1、图 2 和表 1)。36 个样品沿湖床的空间分布指示 C1、C2、C3、C4 和 C5 组分在湖内分布的总体特征如下:

(1) C1 组分存在于分布在整个湖泊内部的 28 个样品中。C1 组分的众数粒径没有随湖床底部取样点位置的变化而发生显著变化, 而百分含量沿近岸带向湖心方向总体呈增加趋势。

(2) C2 组分在主要分布于水深不到 1.0m 并且离岸距离不到 0.08km 的近岸带样品中缺失。在有

C2 组分出现的样品中, 离岸带样品的 C2 组分百分含量显著高于近岸带和过渡带样品, 而 C2 组分的众数粒径未呈现任何变化趋势。

(3) C3 组分在主要分布于水深不到 2.9m 并且离岸距离不到 0.26km 的近岸带样品中缺失。在有 C3 组分出现的样品中, 离岸带样品的 C3 组分百分含量显著高于近岸带和过渡带样品, 且 C3 组分的众数粒径沿近岸带向湖心方向总体呈增大趋势。

(4) C4 组分存在于分布在整个湖泊内部的 25 个样品中。从近岸带到离岸带, C4 组分的百分含量逐渐减少, 众数粒径轻微减小。

(5) C5 组分只存在于主要分布在水深不到 7.0m 并且离岸距离不到 0.84km 的近岸带和过渡带的 17 个样品中。从近岸带到过渡带, C5 组分百分含量显著减少, 而众数粒径未显示任何变化趋势。

3.4 粒度组分与水深和离岸距离的相关性

表 3 展示了达里湖 36 个表层沉积物样品中的 C2、C3、C4 和 C5 粒度组分的众数粒径(以 ϕ 为单位)和百分含量与水深的相关性结果。所有组分的众数粒径似乎与水深均无关(其中, C1 组分的众数粒径与水深之间的决定系数仅为 0.17), 而不同组分的百分含量与水深呈现不同程度的相关性(表 3)。C2 组分(离岸带悬移细粉砂组分)和 C3 组分(离岸带悬移中粗粉砂组分)的百分含量分别与水深呈正相关性(决定系数分别为 0.55 和 0.31)。C4 组分(近岸带悬移细砂组分)和 C5 组分

表 3 达里湖 36 个表层沉积物样品粒度组分众数粒径、百分含量与水深的关系*

Table 3 Relationship between the modal size as well as percentage of the grain-size components in 36 surface-sediment samples of Dali Lake and the water depth. In the linear regression equations, x represents modal size or percentage of the grain-size components, and y represents water depth of the sampling sites

粒度组分	样品数	线性回归方程	决定系数	标准误差 /m
C2 组分众数粒径	32	$y = -0.96x + 13.28$	0.04	2.6
C3 组分众数粒径	29	$y = -2.07x + 18.01$	0.25	2.4
C4 组分众数粒径	25	$y = 2.76x - 3.83$	0.13	2.7
C5 组分众数粒径	17	$y = -0.88x + 6.28$	0.01	2.7
C2 组分百分含量	32	$y = 0.08x + 4.06$	0.55	1.8
C3 组分百分含量	29	$y = 0.08x + 4.42$	0.31	2.3
C4 组分百分含量	25	$y = -0.07x + 9.77$	0.70	1.6
C5 组分百分含量	17	$y = -0.03x + 6.16$	0.31	2.3
C4+C5 组分百分含量	34	$y = -0.07x + 9.55$	0.71	1.5

* 线性回归方程中, x 为粒度组分众数粒径或百分含量, y 为取样点水深(m)

(近岸带跃移中砂组分)的百分含量分别与水深呈负相关性(决定系数分别为 0.70 和 0.31)。C4+C5 组分百分含量与水深呈显著的负相关性(决定系数为 0.71)。此外, C1 组分的百分含量与水深呈正相关, 决定系数为 0.44。

在这 36 个样品中, C1、C2、C3、C4 和 C5 组分的众数粒径(以 ϕ 为单位)与离岸距离均不存在显著的相关性, 其中, 相关性相对最好的为 C2 组分, 决定系数仅为 0.17。这 5 个组分的百分含量与离岸距离之间的相关性相对较好的为 C1、C2 和 C4 组分, 其中, C1 和 C2 组分与离岸距离呈正相关性, 决定系数分别为 0.70 和 0.71, 而 C4 组分与离岸距离呈负相关性, 决定系数为 0.74。C3 和 C5 组分百分含量与离岸距离之间无显著相关性, 它们的决定系数分别为 0.20 和 0.23。

4 讨论

4.1 粒度组分的环境指示意义

达里湖地处我国中温带半湿润-半干旱区的过渡带。气象观测数据显示湖区气候主要由东亚季风控制^[34,35]。夏季, 来自低纬太平洋的暖湿气团为湖区带来绝大多数的年降水量; 冬季, 来自西北方向的冷干气流会给湖区带来尘暴天气。就达里湖的地理位置和盆地形态而言, 我们认为达里湖碎屑沉积物主要来自夏季和秋季的河流搬运物质以及冬季和春季的风力搬运的沙尘; 此外, 由暴风引起的湖浪对湖岸的侵蚀作用带来的碎屑物质也可能沉积在达里湖中。这 3 种碎屑物质来源在沉积至湖床前将经历湖泊水动力的改造和分选^[22,23]。

前人研究表明, 3 种典型碎屑沉积物在不同的搬运机制下可以构成特定粒度组分的不同组合^[4,5,10,28]。为了更好地理解达里湖沉积物碎屑物质的来源, 我们分析了达里湖湖面封冻期间在湖心位置采集的冰上沙尘样品, 公格尔河、萨林河和亮子河河口沉积的河流沙样品以及湖泊西南部沙丘沙样品的粒度分布(图 6)。

如图 6 所示, 冰上沙尘、河流沙(除亮子河外)和沙丘沙样品总体上都由多个粒度组分构成。冰上沙尘的主要众数粒径为 17.4 μm , 与典型黄土沉积的短距离悬移中粗粉砂组分众数粒径(16~32 μm)相当^[9-12]。冰上沙尘的细颗粒组分众数粒径约为 1~2 μm (图 6), 与典型黄土沉积中主导众数粒径为 2~6 μm 的长距离悬移粘土-细粉砂组分^[9-12] 相近。

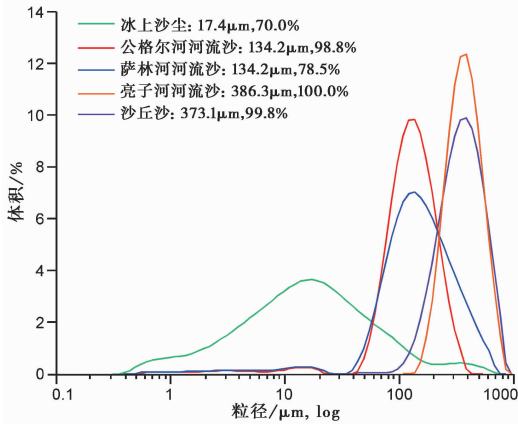


图6 达里湖湖心现代冰上沙尘样品以及公格尔河、萨林河、亮子河河口沉积的现代河流沙样品和湖泊西南部的沙丘沙样品的频率分布曲线

图中展示了各样品主要粒度组分的众数粒径和百分含量

Fig.6 Frequency distribution curves of modern eolian dust trapped on the ice in the central part of Dali Lake, modern riverbed sands deposited at the mouths of the Gongger, Salin and Liangzi rivers and dune sands to the southwest of the lake. The modal size and percentage of the dominant component of each sample are shown

达里湖冰上沙尘主要是碎屑颗粒在冬季和春季盛行的西北风的搬运下沉积至封冻的湖面,这与典型黄土的搬运机制或沉积过程相似。此外,冰上沙尘还包括一个众数粒径约为 $400\mu\text{m}$ 的粗颗粒组分(图6)。正如上文所述,冬季,来自西北方向的冷干气流主导湖区气候,湖区盛行西北风并且沙尘天气多发^[34,35]。我们认为当湖区发生沙尘暴事件时,强劲的近地面风足可以将湖岸的粗颗粒物以滚动搬运的方式带到湖心,而与这些粗颗粒物被同时搬运的细颗粒物可能在强劲的风力作用下被搬运至更远的下风向区。这些粗颗粒组分在湖面的冻融过程中被捕获,最终与那些先前或之后沉积的细颗粒组分混合在一起形成具有多峰态粒度分布的冰上沙尘(图6)。公格尔河和萨林河河流沙的主要组分众数粒径均为 $134.2\mu\text{m}$,比典型河流沉积物的跃移中砂组分众数粒径($200\sim 400\mu\text{m}$)^[4-8]更细。湖区在春季多发沙尘暴事件^[34],因此我们推测春季强劲的西北风^[34]很可能将粒径相对较细的沙尘搬运至河道,从而使河流沉积物中混入了这些细颗粒的风成物质,最终这些粒径相对较细的河流沉积物在水动力搬运作用下经过河口并最终沉积至达里湖中。位于达里湖西南部的亮子河河流沙主要组分众数粒径为 $386.3\mu\text{m}$,与典型河流沉积物的跃移中砂组分众数粒径($200\sim 400\mu\text{m}$)^[4-8]相当(图6)。达里湖位于

浑善达克沙地的北部边缘^[33](图1),湖泊西南部沙丘沙的主要组分众数粒径为 $373.1\mu\text{m}$,非常接近于亮子河河流沙的主要组分众数粒径(图6),因此我们推测亮子河搬运的碎屑物质主要来源于沙丘沙。如图6所示,沙丘沙中包含了微量的细颗粒组分(众数粒径 $<20\mu\text{m}$,百分含量仅为0.2%),这些细颗粒组分主要的众数粒径与典型黄土沉积的短距离悬移中粗粉砂组分众数粒径($16\sim 32\mu\text{m}$)相近^[9-12](图6),但它们并没有在亮子河河流沙中保存下来(图6)。我们推测在比较均匀的亮子河水动力的再搬运用下,这些细颗粒组分最终被分选出去,最后只保留了典型的河流沉积物的跃移中砂组分^[4-8]。

湖泊碎屑沉积物的属性和分布主要受控于湖泊的水动力条件^[22,36]。从本质上讲,颗粒之间的相互作用与湖泊水动力条件之间存在相关性,因此,湖泊可被分为高能状态和低能状态^[37,38]。总体而言,近岸带浅水区域比离岸带深水区域拥有更高的湖水动能,并且湖水动能越高,沉积的碎屑颗粒越粗。基于湖泊内部每一个粒度组分的空间分布规律,我们将达里湖表层沉积物的C1、C2、C3、C4和C5组分解释为代表与不同沉积过程相关的不同沉积模式(表2)。C1组分(众数粒径为 $0.7\sim 1.6\mu\text{m}$),存在于分布在整个湖泊内部的28个样品中。基于碎屑颗粒粒径与流体动力特征之间的相互关系^[20,28],我们认为C1组分可能代表在搬运和沉积取决于湍流强度的流体介质中的长期悬移粘土组分。C2组分(众数粒径为 $1.9\sim 8.8\mu\text{m}$),在主要分布于近岸带的样品中缺失,并且在存在C2组分的样品中,离岸带样品的C2组分百分含量显著高于近岸带和过渡带样品,暗示C2组分可代表离岸带悬移细粉砂组分。C3组分(众数粒径为 $10.5\sim 53.0\mu\text{m}$),同样在主要分布于近岸带的样品中缺失,在存在C3组分的样品中,离岸带样品的C3组分百分含量显著高于近岸带和过渡带样品,且C3组分的众数粒径沿近岸带向湖心方向总体呈增大趋势,表明C3组分可代表离岸带悬移中粗粉砂组分。C4组分(众数粒径为 $68.2\sim 157.7\mu\text{m}$),存在于分布在整个湖泊内部的25个样品中,从近岸带到离岸带,C4组分的百分含量逐渐减少,众数粒径轻微减小,表明C4组分可代表近岸带悬移细砂组分。C5组分(众数粒径为 $203.0\sim 514.7\mu\text{m}$),主要分布在近岸带和过渡带的17个样品中,并且C5组分百分含量从近岸带到过渡带显著减少,表明C5组分可代表近岸带跃移中砂组分。

4.2 粒度组分-湖面状况模型

达里湖表层沉积物粒度组分呈现出沿湖床向湖

心方向的空间分布模式, 这种模式清楚地描述了湖泊的现代水动力条件。对于某一特定湖泊而言, 其水动力条件与该湖泊的水深和大小密切相关^[21~23]。达里湖现代碎屑沉积物的粒度分布数据为建立粒度组分与湖面状况的数值模型提供了可能。

表3展示了C2、C3、C4和C5组分的众数粒径(以 ϕ 为单位)和百分含量与水深的相关性特征。所有组分的众数粒径似乎与水深均无关, 而各个组分的百分含量与水深之间呈不同程度的相关性。C2组分(离岸带悬移细粉砂组分)和C3组分(离岸带悬移中粗粉砂组分)的百分含量与水深呈正相关性(决定系数分别为0.55和0.31), 而C4组分(近岸带悬移细砂组分)和C5组分(近岸带跃移中砂组分)的百分含量与水深呈负相关性(决定系数分别为0.70和0.31)。综合考虑决定系数以及每一组分在湖内的空间分布, C4组分百分含量与水深的负相关性最为显著。鉴于C4和C5组分均被解释为近岸带组分, 这两组分可被作为反映近岸带沉积环境的整体。如表3和图7所示, C4+C5组分百分含量与水深呈现负相关性, 决定系数高达0.71, 高于单个组分C4的百分含量与水深之间的决定系数。这些数据表明C4+C5组分可以作为近岸带沉积环境的代用指标, 这两个组分主导了从较浅水区域采集的34个样品粒度分布的所有组分。基于沉积岩芯数据, C4+C5组分或许可为达里湖过去水深的重建提供数值模型。

4.3 粒度组分-湖面状况模型的应用

达里湖现代碎屑沉积物近岸带粒度组分(C4+C5组分)百分含量与水深之间显著的相关性为地质历史时期湖面变化历史的重建提供了模型。图8展示了从达里湖沉积中心提取的涵盖过去12000年的DL04岩芯沉积物^[39]近岸带粒度组分的百分含量(C4+C5,%)数据。距今11800~11500年、10050~9250年、5900~5350年、4850~4150年、3250~2850年、2150~1600年、1150~900年和700~250年, 近岸带组分百分含量显著增加, 指示这些时段湖面显著降低(图8)。

全新世达里湖区的降水变化历史已根据同一岩芯的孢粉数据^[40]以及温带东亚孢粉-气候转换函数^[41]定量重建(图8)。如图8所示, 湖区年均降水量在上述时段显著减少, 表明湖泊沉积物近岸带组分百分含量的增加与湖区降水量的减少密切相关。

现代观测以及历史记录表明, 在降水量较少的

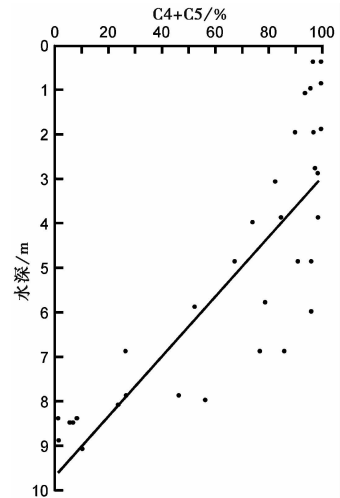


图7 达里湖36个表层沉积物样品近岸带粒度组分百分含量(C4+C5,%)与水深的相关性特征
黑色直线为线性回归曲线

Fig. 7 Percentage of the nearshore grain-size components (C4+C5, %) in 36 surface sediment samples of Dali Lake plotted against water depth. The black line is the linear regression line

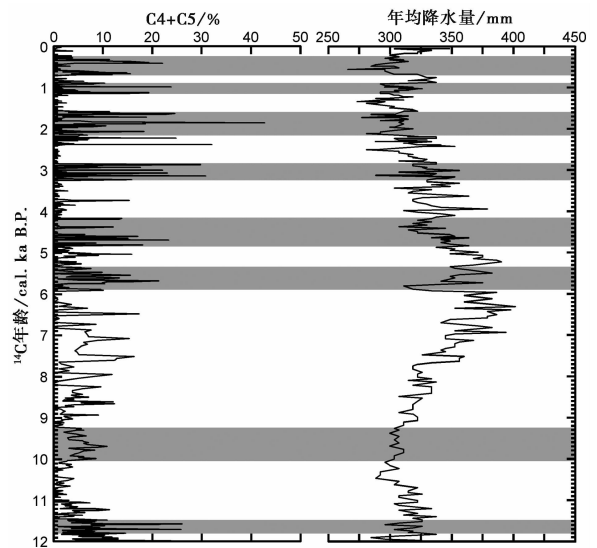


图8 达里湖中心提取的DL04沉积岩芯近岸带粒度组分百分含量(C4+C5,%)与同一岩芯孢粉数据重建的湖区年均降水量之间的对比

年龄为去碳库效应(472年)后的¹⁴C日历年龄^[40]; 灰色条带表示最近12000年湖面降低以及湖区降水量减少的时段

Fig. 8 Percentage of the nearshore grain-size components (C4+C5, %) in the DL04 sediment core recovered in the central part of Dali Lake compared with the mean annual precipitation in the lake region reconstructed on the pollen profile of the same core. The chronology was derived from calibrated ages of the reservoir-effect-free radiocarbon dates with the reservoir correction factor being 472a^[40]; Shaded bars mark the intervals of lowered lake levels and declined regional precipitations during the last 12000 years

年份达里湖收缩、湖面降低^[33]。现有数据暗示达里湖沉积物近岸带组分百分含量在湖区年降水量减少时增加。达里湖沉积岩芯的这两个独立指标良好的一致性佐证了对数正态分布函数拟合方法在分离多峰态粒度分布的湖泊沉积物中以及粒度组分-湖面状况模型在描述湖泊古水文过程中的普遍应用性。

5 结论

本文应用对数正态分布函数对达里湖 36 个表层沉积物样品的多峰态粒度分布进行了拟合和分离。达里湖现代碎屑沉积物包含了代表湖内特定沉积过程和沉积环境的 5 个截然不同的粒度组分。每个组分都保留了各自的特征,包括众数粒径、搬运方式和沉积环境,尽管各个组分的百分含量因湖内水动力条件的不同而发生变化。这些组分众数粒径由细到粗分别为长期悬移粘土组分、离岸带悬移细粉砂组分、离岸带悬移中粗粉砂组分、近岸带悬移细砂组分和近岸带跃移中砂组分。

代表近岸带水动力环境的粒度组分主导了从浅水区域采集的样品的粒度分布。这一良好的相关性为湖泊古水文的重建提供了粒度组分-湖面状况模型。达里湖岩芯沉积物近岸带组分百分含量的增加与同一沉积岩芯孢粉数据重建的湖区降水量的减少非常一致,证实了该模型的潜在价值。

对数正态分布函数拟合方法在分离多峰态湖泊沉积物粒度组分中的成功应用表明该方法非常有助于我们理解湖内碎屑物质的搬运和沉积过程以及粒度组分与湖内特定沉积环境之间的联系。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师建设性的修改意见。

参考文献 (References)

- 郑旭峰, 李安春, 万世明等. 冲绳海槽中全新世的浊流沉积及其控制因素. 第四纪研究, 2014, **34**(3): 579~589
Zheng Xufeng, Li Anchun, Wan Shiming *et al.* The turbidity events in Okinawa Trough during Middle Holocene and its potential dominating mechanisms. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(3): 579~589
- 刘世昊, 丰爱平, 李培英等. 现代黄河三角洲地区晚更新世以来高分辨率沉积物粒度特征及动力沉积环境演化. 第四纪研究, 2015, **35**(2): 291~306
Liu Shihao, Feng Aiping, Li Peiyong *et al.* High-resolution grain size distribution and evolution of the sediment-dynamic environment in the modern Yellow River delta since the Latest Pleistocene.

- Quaternary Sciences*, 2015, **35**(2): 291~306
- 姜 韬, 曾志刚, 南青云等. 全新世以来冲绳海槽北部 S9 孔粒度变化特征及其古气候响应. 第四纪研究, 2015, **35**(2): 307~318
Jiang Tao, Zeng Zhigang, Nan Qingyun *et al.* The grain size characteristics of the core S9 sediments in the northern Okinawa Trough and their paleoclimate response since Holocene. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(2): 307~318
- Middleton G V. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology*, 1976, **84**(4): 405~426
- Ashley G M. Interpretation of polymodal sediments. *Journal of Geology*, 1978, **86**(4): 411~421
- Bennett S J, Best J L. Mean flow and turbulence structure over fixed, two dimensional dunes: Implications for sediment transport and bedform stability. *Sedimentology*, 1995, **42**(3): 491~513
- Kranck K, Smith P C, Milligan T G. Grain-size characteristics of fine-grained unflocculated sediments II: 'Multi-round' distributions. *Sedimentology*, 1996, **43**(3): 597~606
- Pässe T. Grain size distribution expressed as tanh-functions. *Sedimentology*, 1997, **44**(6): 1011~1014
- Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 1987, **34**(1): 139~153
- Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits. London: Academic Press, 1987. 29~62
- 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. *Sedimentary Geology*, 2002, **152**(3~4): 263~277, doi: 10.1016/S0037-0738(02)00082-9
- Qin Xiaoguang, Cai Binggui, Liu Tungsheng. Loess record of the aerodynamic environment in the East Asia monsoon area since 60,000 years before present. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(1): B01204, doi: 10.1029/2004JB003131
- Gillette D A, Blifford D A, Fryrear D W. The influence of wind velocity on size distributions of soil wind aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 1974, **79**(27): 4068~4075, doi: 10.1029/JC079i027p04068
- Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geological history of wind. *Review of Geophysics*, 1994, **32**(2): 159~195
- Rea D K, Hovan S A. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific. *Paleoceanography*, 1995, **10**(2): 251~258, doi: 10.1029/94PA03355
- Boven K L, Rea D K. Partitioning of eolian and hemipelagic sediment in eastern equatorial Pacific core TR 163-31B and the Late Quaternary paleoclimate of the northern Andes. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, **68**: 850~855, doi: 10.2110/jsr.68.850
- Prins M A, Postma G, Weltje G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the Late Quaternary: The Makran continental slope. *Marine Geology*, 2000, **169**(3): 351~371,

- doi: 10.1016/S0025-3227(00)00087-6
- 18 Stuut J B W, Prins M A, Schneider R R *et al.* A 300-kyr record of aridity and wind strength in Southwestern Africa; Inferences from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Marine Geology*, 2002, **180**(1~4): 221~233, doi: 10.1016/S0025-3227(01)00215-8
- 19 Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics. *Sedimentary Geology*, 2003, **162**(1): 39~62, doi: 10.1016/S0037-0738(03)00235-5
- 20 Friedman G M, Sanders J E. Principles of Sedimentology. New York: Wiley, 1978. 1~792
- 21 Lerman A. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. New York: Springer, 1978. 1~363
- 22 Håkanson L, Jansson M. Principles of Lake Sedimentology. Berlin: Springer, 1983. 1~316
- 23 Talbot M R, Allen P A. Lakes. In: Reading H G ed. Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy. Oxford: Wiley-Blackwell, 1996. 83~124
- 24 姜雅娟, 王维, 马玉贞等. 内蒙古鄂尔多斯高原泊江海子全新世气候变化初步研究. 第四纪研究, 2014, **34**(3): 654~665
Jiang Yajuan, Wang Wei, Ma Yuzhen *et al.* A preliminary study on Holocene climate change of Ordos Plateau, as inferred by sedimentary record from Bojiangaizi Lake of Inner Mongolia, China. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(3): 654~665
- 25 李渊, 强明瑞, 王刚刚等. 晚冰期以来共和盆地更尕海碎屑物质输入过程与气候变化. 第四纪研究, 2015, **35**(1): 160~171
Li Yuan, Qiang Mingrui, Wang Ganggang *et al.* Processes of exogenous detrital input to Genggahai Lake and climatic changes in the Gonghe basin since the Late Glacial. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(1): 160~171
- 26 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. 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. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(4): 922~933
- 27 涂路遥, 周鑫, 刘毅等. 近海泥质沉积物敏感粒径作为冬季风强度指标的再研究: 与器测数据的对比. 第四纪研究, 2015, **35**(6): 1393~1401
Tu Luyao, Zhou Xin, Liu Yi *et al.* Re-analysis of sensitive grain size of coastal muddy sediments as proxy of winter monsoon strength; Comparison with instrumental data. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(6): 1393~1401
- 28 Visher G S. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, **39**(3): 1074~1106, doi: 10.1306/74D71D9D-2B21-11D7-8648000102C1865D
- 29 Inman D L. Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1949, **19**(2): 51~70, doi:10.1306/D426934B-2B26-11D7-8648000102C1865D
- 30 Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, **27**(1): 3~26, doi: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D
- 31 Tanner W F. Modification of sediment size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, **34**(1): 156~164
- 32 Krumbein W C. Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1938, **8**(3): 84~90
- 33 李振刚. 克什克腾旗志. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1993. 1~1144
Li Zhengang. Annals of Hexigten Banner. Hohhot: People's Press of Inner Mongolia, 1993. 1~1144
- 34 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理——气候. 北京: 科学出版社, 1984. 1~161
Compilatory Commission of Physical Geography of China, Chinese Academy of Sciences. Physical Geography of China: Climate. Beijing: Science Press, 1984. 1~161
- 35 张家诚, 林之光. 中国气候. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 1~603
Zhang Jiacheng, Lin Zhiguang. Climate of China. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985. 1~603
- 36 Sly P G. Sedimentary processes in lakes. In: Lerman A ed. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. New York: Springer, 1978. 65~89
- 37 Sly P G. Sediment dispersion: Part 1, fine sediments and significance of the silt/clay ratio. *Hydrobiologia*, 1989, **176**(1): 99~110
- 38 Sly P G. Sediment dispersion: Part 2, characterisation by size of sand fraction and per cent mud. *Hydrobiologia*, 1989, **176**(1): 111~124
- 39 Xiao Jule, Chang Zhigang, Si Bin *et al.* Partitioning of the grain-size components of Dali Lake core sediments: Evidence for lake-level changes during the Holocene. *Journal of Paleolimnology*, 2009, **42**(2): 249~260, doi: 10.1007/s10933-008-9274-7
- 40 Wen Ruilin, Xiao Jule, Zhai Dayou *et al.* Holocene precipitation and temperature variations in the mid-latitude monsoonal margin deduced from pollen data from Dali Lake in northeastern Inner Mongolia, China. 2016, in preparation
- 41 Wen Ruilin, Xiao Jule, Ma Yuzhen *et al.* Pollen-climate transfer functions intended for temperate Eastern Asia. *Quaternary International*, 2013, **311**: 3~11, doi: 10.1016/j.quaint.2013.04.025

A MODEL FOR THE LINKAGE BETWEEN GRAIN-SIZE COMPONENT IN THE DALI LAKE SEDIMENTS AND LAKE LEVEL STATUS

Fan Jiawei^{①②} Xiao Jule^① Wen Ruilin^① Zhai Dayou^① Zhang Shengrui^{①②} Qin Xiaoguang^①

(^①Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

^②University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

The grain-size distribution of elastic sediments in lakes may provide an important source of information on changes in the hydrology of lakes associated with regional climatic variations. For lake sediments, however, there is still great uncertainty in explaining the genesis of grain-size components due to the inherent complexity of polymodal grain-size distributions. In this study, the grain-size components of 36 surface sediments of Dali Lake (43°13' ~ 43°23'N, 116°29' ~ 116°45'E), Inner Mongolia, were partitioned using a lognormal distribution function and the relationship between the identity of each component and the specific sedimentary environment (including the offshore distance and water depth of each sampling site) was investigated. The data indicate that the modern elastic sediments of Dali Lake contain five distinct unimodal grain-size distributions representing five grain-size components. Each of the components retains its identity including modal size, manner of transportation and environment of deposition although the relative percentage varies with the hydraulic condition throughout the lake. These components are specified from fine to coarse modes as long-term suspension clay, offshore-suspension fine silt and medium-to-coarse silt, and nearshore-suspension fine sand and saltation medium sand. The percentage of the nearshore components displays a negative correlation with water depth across the modern lakebed, suggesting a model for linking the nearshore components in sediment cores to the lake level status in the geological past. The model was applied to a sediment core from Dali Lake where high percentages of the nearshore components in the core sediments were correlated with low regional precipitations reconstructed on the pollen profile of the same core. The coincidences between two independent proxies do not only demonstrate the validity of lognormal distribution function in partitioning polymodal sediments but also reveals the potential of the grain-size component-lake level status model for lake's paleohydrological reconstruction.

Key words Dali Lake, polymodal sediment, lognormal distribution, grain-size component, lake-level status, numerical model