

太湖西北部表层沉积物粒度特征与沉积环境*

章婷曦^{1,2,3}, 文莹亭¹, 董丹萍¹, 王国祥^{1**}

(1: 南京师范大学环境学院, 南京 210023)

(2: 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

(3: 江苏省物质循环与污染控制实验室, 南京 210023)

摘要: 对太湖西北部主要入湖河流、河口及近岸湖区 64 个表层沉积物样品进行粒度分析, 结合粒度参数计算和聚类分析, 探讨了表层沉积物的粒度分布特征及其沉积类型。研究表明: 研究区沉积物平均粒径介于 4.0~58.7 μm 之间, 粒级组分为黏土、粉砂和砂, 其含量的均值分别为 7.19%、81.81% 和 11.00%。太湖西北部表层沉积物以粉砂和砂质粉砂为主; 研究区粒度总体呈南粗北细的分布特征, 太湖西部沿岸区距离物源区较近且水动力条件复杂, 沉积物粒度较粗。太湖北部入湖河流沉积物的频率曲线峰形较宽, 峰值位于细粒级; 西岸入湖河道多呈单峰态, 粒径偏粗; 河口区沉积物粒径较河道偏粗, 粗颗粒含量高。Q 型聚类分析结果表明, 研究区可分为 4 类沉积区, 其中 3 类沉积区有典型特征: 第 1 类沉积区主要分布在太湖西部沿岸, 其沉积物粒度相对较粗; 第 2 类沉积区主要位于入湖河流河口, 沉积物粒度最粗; 第 3 类沉积区位于蓝藻频发的梁溪河, 其沉积物黏土含量极高, 表明沉积物粒度特征可能与污染状况有一定的联系。

关键词: 太湖西北部; 表层沉积物; 粒度; 空间分布; 沉积环境

Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the northwest Lake Taihu

ZHANG Tingxi^{1,2,3}, WEN Yingting¹, DONG Danping¹ & WANG Guoxiang^{1**}

(1: School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

(2: Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, P.R.China)

(3: Jiangsu Key Laboratory of Material Cycle & Pollution Control, Nanjing 210023, P.R.China)

Abstract: Sixty-four surficial sediment samples taken along the northwest of Lake Taihu were analyzed by particle size analysis. Combined with particle size parameter calculation and cluster analysis, the characteristic of particle size distribution and the sedimentary types of surficial sediments were discussed. The results show that the sediments had average particle sizes of 4.0~58.7 μm , and average grain mass fractions of 7.19% for clay, 81.81% for silt, and 11.00% for sand, respectively. Silt and sand are the dominant components in the sediments. There are more coarse particles in the western coastal area and more fine particles in the northern lake. The west bank of the study area was characterized by the enrichment of coarser deposition, indicating strong hydrodynamic conditions and nearby source. The frequency curves of sediments in the northern part of Lake Taihu are wide with the peak in the fine grain level, while that of the sediments in the western area are single-peaked and the grain size was coarse; the grain size of sediments in the estuary was coarser than that of river channel. The results of Q-type cluster analysis show that the study area can be divided into four types of sedimentary areas, among which three types of areas are typical. The first type of sedimentary area is located in the west bank of Lake Taihu with relatively coarse grain size. The second type sedimentary area is in the estuary with the coarsest particles. The third type of sedimentary area is located in the Liangxi River where cyanobacteria bloom occurs frequently, and its clay content was extremely high, indicating that the grain size of the sediments may be related to the lake pollution condi-

* 国家自然科学基金项目(41303058)、江苏省太湖水污染治理专项(TH2014402)和江苏高校优势学科建设项目联合资助。2017-05-22 收稿; 2017-09-18 收修改稿。章婷曦(1975~), 女, 博士, 副教授; E-mail: zhangtingxi@njnu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn.

tion.

Keywords: Northwest Lake Taihu; surface sediments; particle size; spatial distribution; sedimentary environment

湖泊沉积物保存了丰富的环境演化以及人类活动等信息,具有环境信息“放大”作用,是研究环境变化的良好载体^[1-2]. 表层沉积物是物理、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,被广泛应用于各种湖泊沉积研究中^[3-4].

粒度是沉积物最基本的表征,包含了大量有关物源、搬运方式和沉积环境的信息^[5-8]. 利用沉积物粒度特征可以有效地追踪物质来源^[2]、判别水动力条件^[9]、识别沉积环境类型^[10]和指示沉积物中污染物分布特征^[11-12]. 近年来,对沉积物粒度开展了很多工作,Le 等^[13]对沉积物运输路径进行分析,以确定污染物可能的扩散模式;Yi 等^[14]提出水深不同导致沉积环境的能量存在差异,而沉积物颗粒的分布特征能够反映水深变化,从而表征不同沉积环境;Luo 等^[15]通过对比长三角过去三十年的河床沉积物粒度,对长江的泥沙排放量减小、三角洲的衰退的问题进行了分析研究;Howari 等^[16]和 Singh 等^[17]的研究发现,河床沉积物中的重金属含量与黏土含量有一定关系.

太湖是我国第三大浅水湖泊,面积 2338 km²,平均水深约为 2 m,位于长江三角洲的经济发达地区. 太湖水浅底平,入湖河道主要分布在太湖西北部,北部拥有较多湖湾,沉积作用受湖泊形态特征和湖泊动力条件影响显著^[18]. 同时,风浪和湖流对沉积物的扰动比较大^[19],会造成悬浮物漂移,对底泥内源营养盐释放和污染物迁移具有重要的影响. 太湖西北部湖区夏季水体富营养化严重,蓝藻湖泛暴发频繁,是研究人员重点关注的区域之一^[20].

沉积物的粒度特征受人湖河流、湖湾和水下地形的影响,开展太湖西北部入湖河流、河口及近岸湖区表层沉积物的粒度特征研究,将有助于认识太湖入湖河流、湖湾和 underwater 地形的分布状况. 对深入认识太湖西北部沉积作用、沉积环境及沉积物与营养盐、污染物的赋存关系具有重要的环境学意义. 以往对太湖沉积物粒度的研究均围绕太湖全湖,且只着眼于样品粒度各组分含量的变化^[18,21-22],或以粒度作为参数指标,研究粒度与营养盐、重金属等指标的相关性^[11,23],少有文献系统地研究太湖沉积物粒度组成特征及其沉积环境,对入湖河流及河口区也鲜有关注. 因此,本文以蓝藻湖泛易发区——太湖西北部为研究区域,通过对主要入湖河流、河口及近岸湖区表层沉积物粒度参数和粒度组成的分析研究,探讨了太湖西北部沉积物粒度组成特征、空间分布特征及与入湖河流、湖湾的相互关系;同时对该区域的沉积环境进行了分区研究. 研究结果是已有研究成果的重要补充,可为太湖西北部入湖河流、河口及近岸湖区表层沉积物中污染物的蓄积、迁移提供粒度数据,为太湖环境综合治理提供科学依据.

1 研究区概况

以太湖西北部为研究区域,使用彼得森采样器,于 2015 年 8 月在主要入湖河流——大港河(DG)、乌溪港(WX)、大浦港(DP)、陈东港(CD)、庙渚港(MD)、社渚港(SD)、官渚港(GD)、沙塘港(ST)、洪巷港(HX)、毛渚港(MD)、太漏运河(TG)、曹桥河(CQ)、直湖港(ZH)、武进港(WJ)和梁溪河(LX)及其近岸湖区采集 64 个表层沉积物样品(图 1). 所有样品在现场进行描述,分别装入聚乙烯样品袋,运回实验室低温保存.

2 材料与方法

2.1 分析测定方法

采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对沉积物样品进行粒度分析. 该仪器测量范围为 0.02~2000 μm.

称取沉积物原样约 0.2~0.3 g,放入 50 ml 烧杯中,加入 10 ml 浓度为 10% 的 HCl 溶液,电热板上加热,充分反应,除去样品中的碳酸盐类;当气泡完全排完后,放置冷却,然后加入 10 ml 浓度为 10% 的 H₂O₂ 溶液,置于电热板加热,使其充分反应,除去有机质^[4]. 待样品冷却后,往烧杯中加满水,静置 12 h 后,连续一周排水,调节 pH 至中性后,进行粒度测定. 实际分析中每个样品重复 3 次,测定结果取平均值.

2.2 数据处理方法

沉积物的分类和命名采用 Folk 的沉积物粒度三角图解法. 将粒度分析仪测出的数据换算成无量纲的 φ

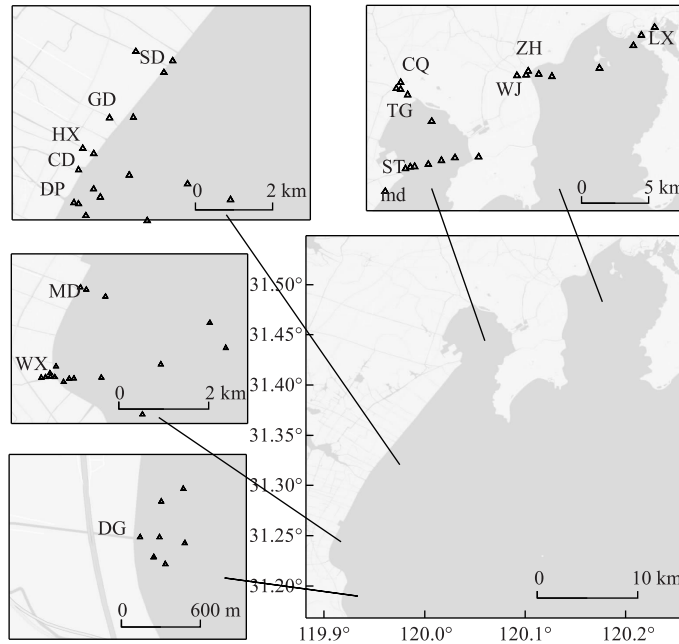


图1 太湖流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Taihu

值: $\varphi = -\log_2\left(\frac{x}{x_0}\right)$, 式中, x 是以 μm 为单位的粒径值, x_0 为参考粒径, 等于 1 mm. 采用矩值法对样品的粒度参数进行计算, 平均粒径 (Mz)、分选系数 (S_0)、偏态 (Sk_g) 和峰度 (K_g) 的计算公式为^[24]:

$$Mz = \frac{\sum f m_\varphi}{100} \quad (1)$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum f (m_\varphi - Mz)^2}{100}} \quad (2)$$

$$Sk_g = \frac{\sum f (m_\varphi - Mz)^3}{100 S_0^3} \quad (3)$$

$$K_g = \frac{\sum f (m_\varphi - Mz)^4}{100 S_0^4} \quad (4)$$

最后将粒度数据结果用 Golden Surfer 进行克里金插值, 得到各粒度参数的空间分布图, 利用 SPSS 软件进行系统聚类分析, 得到沉积环境的分区.

3 结果与讨论

3.1 表层沉积物粒度组成及空间分布

按照 Udden-Went-worth 标准划分为黏土 ($<4 \mu\text{m}$)、粉砂 ($4\sim64 \mu\text{m}$) 和砂 ($>64 \mu\text{m}$) 3 种组分, 来反映表层沉积物粒度组成的变化^[25]. 粒度各组分含量的空间分布如图 2 所示. 研究区黏土组分的含量较低, 介于 3.30%~37.06% 之间, 平均值为 7.19%; 大部分区域内黏土含量低于 15%, 黏土高值区主要分布在五里湖附近, 高达 30% 以上; 粉砂组分为本研究区的优势粒级, 含量介于 46.64%~92.97% 之间, 平均值为 81.81%, 高值区主要位于太湖北部的竺山、梅梁湾以及大浦港以南湖区, 低值区主要分布在五里湖附近; 砂组分的百分含量介于 0.22%~49.34% 之间, 平均值为 11.00%, 砂组分的高、低值区与粉砂分布情况相反. 总体上, 太湖西

部沉积物呈现自湖岸向近岸湖区逐渐变细的分布趋势。

在研究区的北部湖湾,除竺山湾东部和五里湖之外,绝大部分区域黏土含量偏低,介于3%~12%之间。梅梁湾由北至南方向粉砂含量逐渐增加,砂含量逐渐减少,沉积物粒径由粗变细;竺山湾粉砂和砂含量呈似同心圆的分布特点,湖区中心往北粉砂含量最高,向外延伸粉砂含量递减,砂含量递增。此外,直湖港的入湖河流河口处砂含量较高,此现象可能是由于入湖水流的动力作用将部分粗碎屑物沉积于河口。

在研究区的西部,沿着西湖岸从乌溪港向北延伸,砂含量高的面积逐渐增加。秦伯强等对太湖水动力的研究表明,在夏季偏南风作用下,西太湖有一个逆时针的环流,沿着西湖岸,有一股向南稳定的湖流^[26],西湖岸沉积物在向南湖流的作用下,粒径缓慢变细,表明沉积物粒径的梯度变化方向与湖流流向有关,这也符合沿水流方向的沉积物粒度一般逐渐变小的规律^[27]

在太湖西部近岸湖区,粉砂和砂含量具有明显的空间分布特征。粉砂含量沿近岸湖区方向缓慢增加,而砂含量沿上述方向逐渐减少,表明太湖近岸区易形成颗粒较粗的沉积区,从湖岸至近岸湖区,沉积物粒径缓慢变细,与范成新等的研究结果相同^[21],反映了向湖心方向,搬运距离增加,湖泊水动力有减弱的趋势。

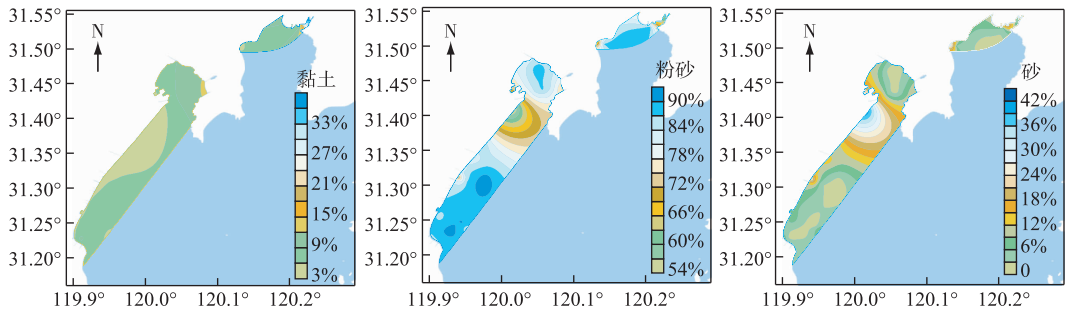


图2 太湖表层沉积物中黏土、粉砂和砂的百分含量分布

Fig.2 Percentage contents of clay, silt and sand in the surface sediments of Lake Taihu

以上分析表明,研究区的64个表层沉积物以粉砂为主,黏土含量较低,砂含量高值区主要分布在太湖西岸湖岸带。根据Folk沉积物命名规则^[28],该研究区表层沉积物样品主要类型为粉砂和砂质粉砂(图3)。

3.2 表层沉积物粒度参数变化特征

沉积物粒度是反映沉积物组分和结构的基本参数,主要受沉积动力、沉积环境以及物质来源等因素的影响^[29]。在湖泊沉积物粒度研究中,常用的粒度参数有 Mz 、 S_0 、 Sk_g 和 K_g 。其中 Mz 是衡量沉积物颗粒平均大小的指标,可以敏感地反映出沉积物沉积时水动力的大小, Mz 主要受两个因素影响,源区物质的粒度分布和搬运介质的平均动能; S_0 反映了沉积物颗粒大小的均匀程度,分选作用与运动介质的性质和碎屑物被搬运的距离密切相关; Sk_g 反映了频率分布曲线的不对称程度,与分选性有密切关系; K_g 是频率分布曲线两尾端与曲线中央部分分选的比值,反映了粒度分布的集中程度^[4,7,30]。常用粒度参数及分类标准见表1。

研究区表层沉积物的 Mz 在4.0~58.7 μm 之间波动,平均值为18.6 μm ,整体偏小。 Mz 呈环带状分布,粗粒级主要集中在西岸偏北的近岸区(图4a)。从整体上看,细粒级在北部湖湾分布较广,研究区表层沉积物粒度主要呈南粗北细、近岸粗远岸细的分布特征,其分布

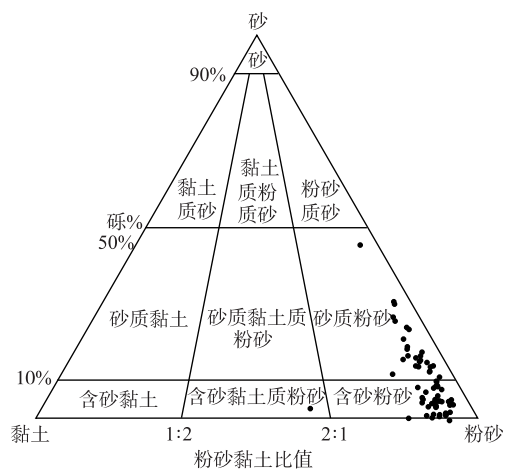


图3 太湖表层沉积物在Folk三角图中的分类

Fig.3 Classification of surface sediments by Folk Triangle classification method in Lake Taihu

特征明显受到物源供给和水动力条件的影响.

表 1 常用粒度参数分类标准^[24]

Tab.1 Classification standards of grain size parameters

平均粒径/ μm	分类	分选系数	分类	偏态	分类	峰度	分类
<4	黏土	<0.35	分选非常好	>1.30	强烈偏向细粒	<1.70	非常宽峰
4~64	粉砂	0.35~0.50	分选好	0.43~1.30	偏向细粒	1.70~2.55	宽峰
>64	砂	0.50~0.70	分选较好	-0.43~0.43	近对称	2.55~3.70	中等尖峰
		0.70~1.00	分选中等	-1.30~-0.43	偏向粗粒	3.70~7.40	尖峰
		1.00~2.00	分选差	<-1.30	强烈偏向粗粒	>7.40	非常尖峰
		2.00~4.00	分选非常差				
		>4.00	分选极差				

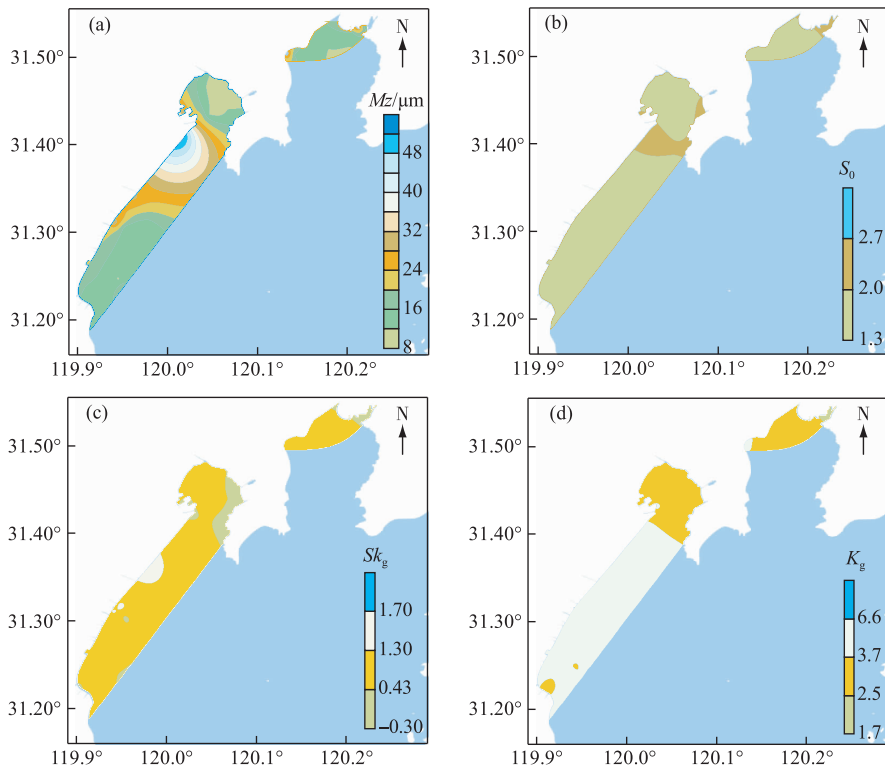


图 4 太湖表层沉积物平均粒径(a)、分选系数(b)、偏态(c)和峰度(d)的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of mean sizes(a), sorting coefficient(b), skewness(c) and kurtosis(d) in the surface sediments of Lake Taihu

进入太湖的泥沙主要有两种来源:入湖河流的输沙和入湖的崩岸物质^[31]. 注入西太湖的水系众多,湖相沉积物粒度与主要水系入湖口(如陈东港、社渚港)在空间上的一致性,说明了入湖河流对太湖沉积物粒度的影响. 太湖西部沿岸以泥质湖岸为主,崩岸物质是太湖泥沙的重要来源^[31],在风浪与湖流作用下,太湖沿岸碎屑不断崩退,崩岸物质在向南的波浪、湖流影响下,经波浪反复颠洗,沉积物相对较粗;而太湖北部沉积物的风化指标高,导致北部黏土矿物的成分高于南部^[18],这也是造成太湖西北部表层沉积物南粗北细的原因之一. 从水动力条件来看,太湖是典型的浅水平底湖泊,沉积作用主要受湖泊形态特征和湖泊动力条件影响,沉积作用存在区域性差异,西太湖的大部分地区为侵蚀性湖底,底泥不断被风浪侵蚀、搬运和沉积,而

在太湖北部湖湾风生流速度减小,水环境相对稳定^[18],在这些因素的影响下,太湖北部湖湾的沉积物粒径较西部偏细。

沉积物的 S_0 介于 1.27~2.66 之间,平均值为 1.72。 S_0 越大,其分选程度越差,颗粒越不均匀,表现为水动力变化比较复杂的沉积环境^[32]。根据 S_0 分类,研究区的分选性普遍较差(图 4b),在一定程度上反映了太湖西北部湖区沉积环境水动力条件复杂,水动力扰动较大,太湖西北部沉积物的物质来源具有多样性,影响沉积物粒度的均一性。

Sk_g 反映了曲线的对称程度,正态分布的偏度为零,正偏差表明在频率曲线上细颗粒较多,而负偏差表示粗颗粒偏多。本研究区沉积物的 Sk_g 介于 -0.35~1.93 之间,平均值为 0.71。研究湖区沉积物 Sk_g 普遍介于 0.43~1.30 之间(图 4c),按照 Sk_g 的分级划分标准属偏向细粒,表明分布在频率曲线峰细粒方向上的尾部比在粗粒方向的尾部有拉长的趋势,这是由于太湖西北部表层沉积物粉砂和黏土含量高,使得研究区沉积物的粒度总体偏向细粒部分,这与研究区沉积物粒度总体较细的结果吻合。

沉积物的 K_g 介于 1.74~7.61 之间,平均值为 4.14。研究区北部的两个湖湾为中等尖峰,其余区域为尖峰分布(图 4d),说明北部湖湾的粒度分布范围较宽,而西太湖粗粒成分优势占比大于北部湖湾^[33]。

3.3 入湖河流沉积物的粒度特征

太湖是一个大型浅水湖泊,拥有较多的湖湾,入湖河流影响了湖湾的水力学特征,湖流及波浪的影响也对沉积特征造成影响,使得各湖区的沉积物粒度存在不同的空间分布特征。因此,本文对各条入湖河流分别进行研究,并考虑了主要入湖河流对沉积物粒度的影响;将河道沉积物粒度与河口进行对比分析,以揭示两者沉积环境的差异。

不同入湖河道沉积物的粒度频率分布曲线见图 5。太湖西部和北部入湖河道沉积物的频率曲线表现出不同的特征。西部入湖河道粒度主峰大多位于粗粒级,呈较为对称的单峰态,峰形稍窄(图 5a);北部入湖河道则峰形较宽,频率曲线上的峰值出现在细粒级处(图 5b、5c)。

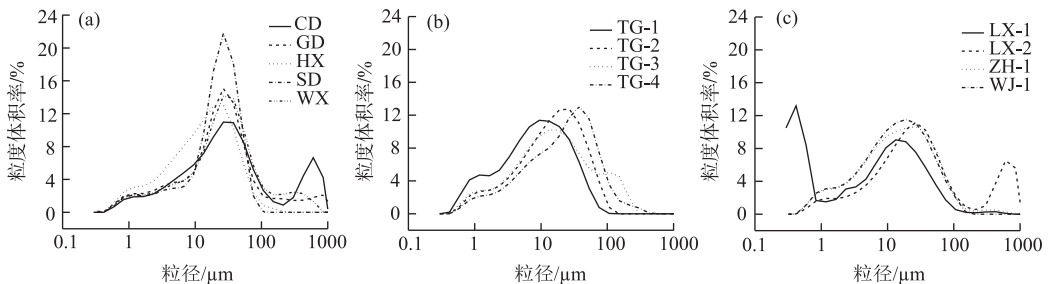


图 5 太湖西部入湖河道(a)、太滬运河(b)及其余北部河道(c)的粒度频率分布曲线

Fig.5 Grain size distribution curves of western inflow rivers (a), Taige Rivers (b) and other northern inflow rivers (c) of Lake Taihu

太滬运河是竺山湾氮、磷营养负荷的主要外部来源^[34]。太滬运河及曹桥河 4 个河道样点表层沉积物的 Mz 介于 7.4~18.1 μm 之间,沉积物粒度偏细。其频率曲线的峰值位于 9.3~37.7 μm 处,分布较散乱;主峰不明显,呈主峰和多峰结合特征(图 5b)。多峰的频率分布特征反映了该湖区具有不同的碎屑物质来源,沉积物组成复杂^[8]。直湖港为梅梁湾西北部的一条入湖河道,该处样品在细粒级处有拖尾现象(图 5c),偏向细粒级意味着因搬运动力弱,粗粒物质不足^[35]。梁溪河沉积物的粒度频率分布曲线呈双峰态,细颗粒成分极高,峰值分别出现在 0.4 和 13.3 μm 处(图 5c),秦伯强等在梅梁湾的研究表明^[26],梁溪河河口附近由于局地环流易于形成飘浮物质的富集地。

北部入湖河道沉积物的粒度频率曲线呈现多峰的特征,反映了北部入湖河道物源复杂,受人类活动影响较为严重。宓莹等和陆敏等的研究结果表明^[11,36],太湖北部湖区沉积物中 TN 等污染物含量较高,除了人为污染输入差异之外,还可能是因为这些湖区较细沉积物的吸附作用导致污染物更易发生富集。

太湖西部入湖河道官渎港、社渎港和乌溪港的峰值均出现在 26.7 μm 处(图 5a),表明其沉积物粒度特

征有明显的相似性. 陈东港的沉积物粒度频率曲线为双峰态, 主峰峰值分布在 26.7~37.7 μm 处, 频率曲线在 213.4 μm 处突然跃迁, 在 603.6 μm 粒径处又出现一个峰值 (图 5a). 陈东港在 200 多条入湖河道中入湖流量最大, 2001—2002 年流入太湖的水量约为 $10^8 \text{ m}^3/\text{d}$, 远高于研究区其他入湖河流的日流量^[26,37], 而流量大、河流水动力作用强, 则河流入湖所携带的粗颗粒成分所占比重较大, 这也解释了该点沉积物在粗粒级处的组分突然增大的现象. 以上结果表明, 太湖西部入湖河道沉积物粒径相对偏粗, 粒度频率曲线多呈单峰态, 沉积物来源单一.

本文对梁溪河、直湖港、武进港、洪巷港和乌溪港的河口与河道沉积物粒度进行对比分析, 其粒度组分比较见表 2. 如图 6a 所示, 梁溪入湖河道 (LX-1) 沉积物细颗粒成分极高; 靠近陆源的梁溪河道 (LX-2) 频率曲线在 603.6 μm 处有一峰值, 这可能是由于陆地上的粗屑屑通过风力、湖流搬运至其临近湖区, 使得 LX-2 样点的沉积物粗颗粒增加. 直湖港和武进港的河道沉积物频率曲线较为相似, 峰值粒径分别为 26.7 和 18.9 μm ; 而在两条河道汇合的河口区, 沉积物频率曲线的峰形相对尖锐, 主峰向粗粒级迁移, 峰值粒径介于 26.7~37.7 μm 之间 (图 6b), 显示河口沉积物粗颗粒物较多. 从表 2 可以看出, 乌溪港与洪巷港的河口沉积物均粗于河道沉积物, 且两者频率曲线上的峰值粒径均向粗端偏移 (图 6c、6d).

结果表明, 除去 LX-2 的特殊情况, 其余样点的河口区沉积物均粗于河道, 这可能由于河口受河流及湖流的影响, 水动力较强且不稳定, 易于起动的细颗粒沉积物被水流带走, 留下较难起动的粗颗粒沉积物, 大量粗颗粒于河口优先沉积, 使得河口区沉积物粒度整体上比河道粗^[38]. 河道与河口沉积物粒度组成存在明显差异, 直接反映了其水动力条件的强弱.

粒度的大小、不同级配反映了水动力强度, 间接影响沉积物所携带污染物的分布情况, 黏粒级沉积物比表面积大, 其更易吸附入湖污染物, 因此, 沉积物细颗粒成分高的河道或河口区在一定程度上揭示其入湖污染物通量高.

表 2 河道与河口沉积物粒度比较

Tab.2 Comparison of grain size between riverine and estuarine sediments

采样区域	距河口的 距离/km	采样点 编号	纬度	经度	黏土 含量/%	砂含量/ %	峰值 粒径/ μm
梁溪河	-2.24	LX-1	31.540794°N	120.222135°E	37.06	3.38	0.4, 13.3
	-1.20	LX-2	31.534623°N	120.211846°E	6.09	26.52	26.7, 603.6
	0	LX-3	31.526457°N	120.205575°E	8.01	3.93	26.7
直湖港	-0.42	ZH-1	31.506852°N	120.124095°E	9.69	8.96	26.7
武进港	-0.79	WJ-1	31.503158°N	120.115447°E	10.03	6.27	18.9
	0	WJ-2	31.503705°N	120.122552°E	8.46	7.73	26.7~37.7
洪巷港	-0.34	HXG-1	31.325629°N	119.935744°E	9.84	3.85	26.7
	0	HXG-2	31.324157°N	119.938855°E	6.69	19.73	26.7
乌溪港	-0.29	WX-1	31.228286°N	119.890430°E	7.06	19.10	26.7
	-0.15	WX-2	31.228442°N	119.891856°E	4.50	8.42	26.7
	0	WX-3	31.228624°N	119.893466°E	3.83	31.65	53.4
曹桥河	-2.31	CQ-1	31.497907°N	120.025362°E	15.85	0.81	9.4
太滆运河	-2.06	TG-1	31.493145°N	120.021912°E	8.61	4.70	26.7
	-0.96	TG-2	31.492550°N	120.025325°E	9.35	16.37	13.3
	-1.69	TG-3	31.488357°N	120.030810°E	6.77	14.45	37.7

3.4 沉积环境的划分

3.4.1 聚类分析 R 型聚类分析是对变量进行分类处理, 可以了解个别变量之间关系的亲疏程度; Q 型聚类分析是对样本进行分类处理, 可以综合利用多个变量的信息对样本进行分类^[39-40].

由于各项粒度参数之间也可能存在不同程度的联系, 对所有粒度参数进行 Q 型聚类分析不能有效地揭示研究区沉积环境的差异, 本文先对 7 个常用的粒度参数 (M_z 、 S_0 、 S_k 和 K_g ; 黏土、粉砂和砂的百分含量) 进

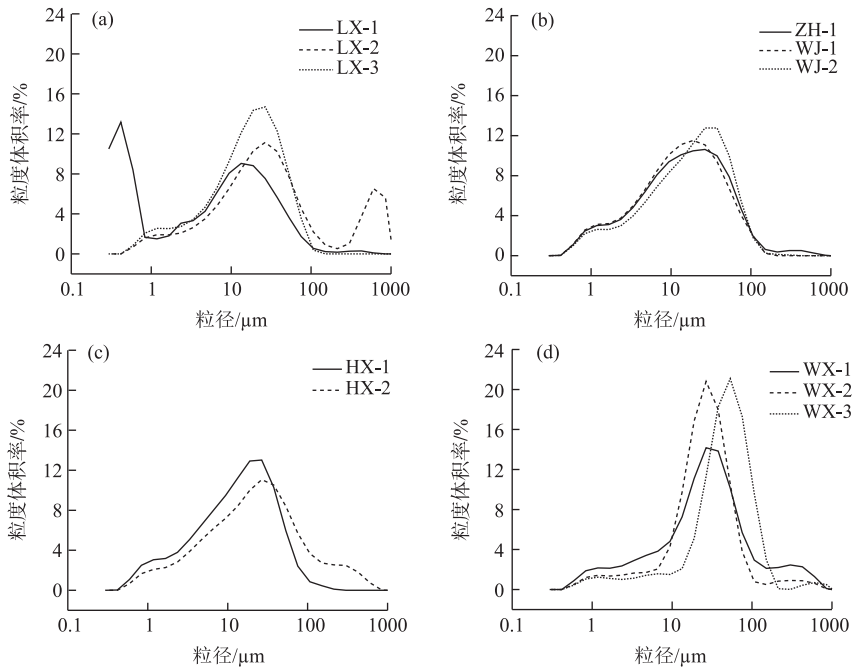


图6 河口与河道的粒度频率分布曲线:梁溪河(a)、直湖港、武近港(b)、洪巷港(c)和乌溪港(d)

Fig.6 Grain size distribution curves of different estuaries and rivers

行R型系统聚类分析,将具有相同聚集趋势的参数降维,最大限度地保持指标中所包含的特征信息.

R型聚类分析可以获得3个集群结果,其中 Mz 和黏土含量为第1群, S_0 和砂含量为第2群, Sk_g 、 K_g 和粉砂含量分别为第3群(图7).经过分析,本文最后采用 Mz 、 S_0 和 K_g 为划分沉积环境的粒度特征指标.

3.4.2 沉积环境分区 根据Q型聚类分析结果,以 Mz 、 S_0 和 K_g 为变量,本文将太湖西北部沉积物的沉积环境大致划分为4类,其中第1、2和3类沉积区有明显的粒度特征(图8).

第1类沉积区粒度相对较粗,主要分布在太湖西部沿岸地区.该区域沉积物 Mz 为26.1 μm ,黏土、粉砂和砂含量分别为4.33%、81.80%和13.87%; S_0 均值为1.53,分选差; K_g 均值为

5.64,主要呈尖峰型.该区域沉积物频率曲线多为单峰,表明其物源单一;而沉积物粒度相对较粗,主要受水动力和物源条件影响,反映了太湖西部沿岸地区受湖浪扰动作用大,物源碎屑相对较粗.

第2类沉积区主要分布在太湖入湖河口区域,该区的显著特征是粒度最粗、砂含量高、分选非常差.该区沉积物的 Mz 为37.4 μm ,黏土、粉砂和砂含量分别为5.67%、63.71%和30.62%, S_0 均值为2.46, K_g 均值为3.25,主要呈中等尖峰型.水动力作用是形成该区沉积物特征的主要原因,河口受到河流及湖流的双重冲刷作用,水动力频繁,细颗粒发生再悬浮被带走,粗颗粒在河口沉积下来,所以该区沉积物砂含量较高,整体粒径偏粗.

第3类沉积区比较特殊,该研究区位于梅梁湾东岸梁溪河内,为太湖蓝藻暴发最为严重的区域,总磷和

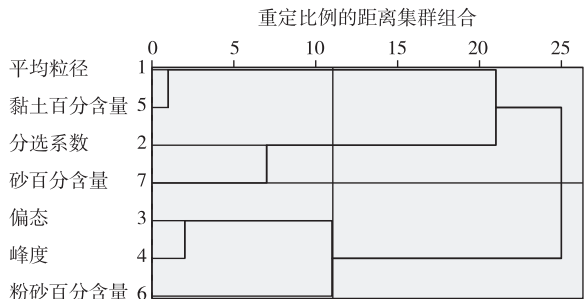


图7 沉积物7个常用粒度参数的R型聚类分析谱系图

Fig.7 R-type clustering analysis of seven common particle size parameters of sediment

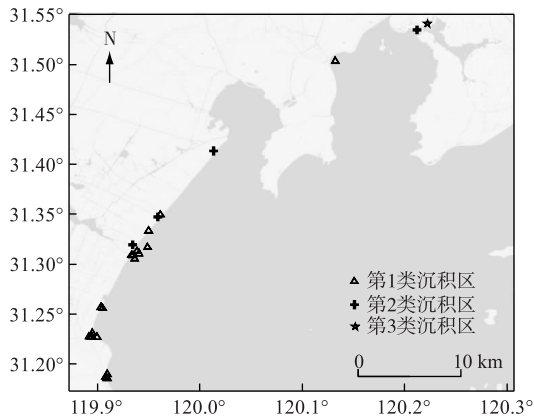


图 8 Q 型聚类分区和沉积动力分区

Fig.8 Q-type cluster partition and sedimentary dynamic partition

太湖西北部多发育于石灰岩地区,物质来源较细^[18],因此粒度较细的沉积物在研究区有最大的分布面积;由于北部湖湾水流滞缓、西湖岸远岸区随搬运距离增加,水动力作用减弱,导致该类沉积区沉积物粒径偏细。

4 结论

本文通过对太湖西北部 64 个表层沉积物样品的粒度组分特征、粒度参数变化和沉积环境的分析,得出以下结论:

1) 太湖西北部表层沉积物主要由粉砂和砂组成。黏土、粉砂和砂含量的平均值分别为 7.19%、81.81% 和 11.00%。研究区表层沉积物粒度主要呈南粗北细、近岸粗远岸细的分布特征,粒度分布特征与地形条件存在较高的一致性。物源、地形和水动力条件是影响太湖西北部表层沉积物粒度特征的主要因素。粒度特征参数表明,研究区表层沉积物粒径较细,分选性普遍较差,偏向细粒级;研究区北部的两个湖湾为中等尖峰,其余区域为尖峰分布,反映了研究区沉积物总体上粒度较细,物质来源复杂,水动力条件较强,太湖西部粗粒成分优势占比大于北部湖湾。

2) 从频率分布曲线来看,太湖西部和北部的入湖河流沉积物具有不同的特征,北部入湖河流峰形较宽,峰值多出现在细粒级;西部入湖河流则呈现对称的单峰态,偏向粗粒,反映了注入西太湖的各水系物源单一。由于水动力的频繁作用,太湖河口区沉积物粒径一般相对河道更粗,粗粒含量高。

3) 根据聚类分析结果,以 M_z 、 S_0 和 K_g 为变量,可以将研究区沉积物的沉积环境分为 4 类。第 1、2 和 3 类沉积区沉积物有明显的粒度特征,其沉积环境有一定的特殊性:1 区分主要分布在太湖西部沿岸地区;2 区分主要分布在太湖入湖河流河口区域,为河口强动力沉积区;3 区位于梁溪河口附近,为蓝藻水华暴发频繁区,值得注意的是,其沉积物细粒成分极高,这可能揭示了沉积物粒度与沉积物污染的关联性。

致谢:感谢南京师范大学地理科学学院张茂恒教授、陈晔教授和刘国飞老师在仪器使用方面提供的帮助。

5 参考文献

- [1] Zhang WX, Ming QZ, Shi ZT *et al.* Lake sediment records on climate change and human activities in the Xingyun Lake catchment, SW China. *PloS One*, 2014, **9**(7): 1-11.
- [2] Ma L, Wu JL, Wen JH *et al.* Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, **31**(4): 646-652. [马龙, 吴敬禄, 温军会等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义. 沉积学报, 2013, **31**(4): 646-652.]
- [3] Liu X, Vandenberghe J, An Z *et al.* Grain size of Lake Qinghai sediments: implications for riverine input and Holocene monsoon variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, **449**: 41-51.

总氮浓度也远高于其他地区^[41]。该点位的底泥表层有恶臭,没有水生植被生长。粒度结果表明,该研究区沉积物粒度极细, M_z 为 $4.1 \mu\text{m}$,黏土含量高达 37.06%,高黏土含量指示该沉积区的弱水动力条件。细颗粒具有较大的比表面积,由于吸附、络合和共沉淀作用,细粒径的底泥易将污染物粘附在其上,造成局部污染严重。宓莹等^[11]在太湖梅梁湾的研究结果表明:TN、TOC 含量与黏土含量呈现显著的正相关关系,即 TOC、TN 主要吸附在细颗粒沉积物中。由此可见,沉积物粒度有可能作为初步判断环境污染程度的一个指标^[39]。

第 4 类沉积区粒径较细,在研究区分布范围最广,太湖北部湖湾、西湖岸远岸区以为此类沉积区为主。该湖区沉积物 M_z 为 $15.0 \mu\text{m}$,黏土、粉砂和砂含量分别为 8.15%、84.31% 和 7.55%; S_0 均值为 1.73,分选差; K_g 均值为 3.48,主要呈中等尖峰型。太

- [4] Wu H, Chang FQ, Zhang HC *et al.* Grain-size distribution patterns of the surface sediments and their influential factors in Lake Lugu. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, **34**(4): 679-687. [吴汉, 常凤琴, 张虎才等. 泸沽湖表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素. 沉积学报, 2016, **34**(4): 679-687.]
- [5] Zhang J, Li AC, Wan SM *et al.* Grain size distribution of surface sediments in the southern south China sea and influencing factors. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, **36**(2): 1-10. [张晋, 李安春, 万世明等. 南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素. 海洋地质与第四纪地质, 2016, **36**(2): 1-10.]
- [6] Wang W, Li AC, Xu FJ *et al.* Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, **40**(5): 525-531. [王伟, 李安春, 徐方建等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析. 海洋与湖沼, 2009, **40**(5): 525-531.]
- [7] Peng XT, Zhou HY, Ye Y *et al.* Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl River Estuary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, **22**(3): 487-493. [彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示. 沉积学报, 2004, **22**(3): 487-493.]
- [8] Liu XB, Li MS, Liang MY *et al.* Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the Caofeidian offshore area. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, **35**(3): 507-514. [刘宪斌, 李孟沙, 梁梦宇等. 曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境. 矿物岩石地球化学通报, 2016, **35**(3): 507-514.]
- [9] Ju JT, Zhu LP, Feng JL *et al.* Hydrodynamic process of Tibetan Plateau lake revealed by grain size: Case study of Pumayum Co. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(19): 1775-1784. [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. 科学通报, 2012, **57**(19): 1775-1784.]
- [10] Li Y, Liu Y, Li AC *et al.* Grain size distribution characteristics in surface sediments near the Dalian Bay and their hydrodynamic environmental implications. *Marine Science Bulletin*, 2015, **17**(2): 25-38.
- [11] Mi Y, Huang CC, Yang H *et al.* Effects of human activities on sedimentary records in the Meiliang Bay of Taihu. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, **9**(4): 26-35. [宓莹, 黄昌春, 杨浩等. 太湖梅梁湾地区人类活动对湖泊沉积环境的影响. 亚热带资源与环境学报, 2014, **9**(4): 26-35.]
- [12] Qin YW, Zhang L, Zheng BH *et al.* Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4291-4299. [秦延文, 张雷, 郑丙辉等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征. 环境科学, 2012, **33**(12): 4291-4299.]
- [13] Le Roux JP, O'Brien RD, Rios F *et al.* Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. *Computers & Geosciences*, 2002, **28**(5): 717-721.
- [14] Yi L, Yu H, Ortiz J D *et al.* A reconstruction of late Pleistocene relative sea level in the south Bohai Sea, China, based on sediment grain-size analysis. *Sedimentary Geology*, 2012, **281**: 88-100.
- [15] Luo XX, Yang SL, Wang RS *et al.* New evidence of Yangtze delta recession after closing of the Three Gorges Dam. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 1-10.
- [16] Howari FM, Banat KM. Assessment of Fe, Zn, Cd, Hg, and Pb in the Jordan and Yarmouk river sediments in relation to their physicochemical properties and sequential extraction characterization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2001, **132**(1): 43-59.
- [17] Singh AK, Hasnain SI, Banerjee DK. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River-a tributary of the lower Ganga, India. *Environmental Geology*, 1999, **39**(1): 90-98.
- [18] Yuan XY, Chen J, Ji JF *et al.* Compositions and the formative conditions of sediments in Taihu Lake, Eastern China. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2002, **38**(6): 756-765. [袁旭音, 陈骏, 季峻峰等. 太湖现代沉积物的物质组成和形成条件分析. 南京大学学报: 自然科学版, 2002, **38**(6): 756-765.]
- [19] Liu JJ, Wu JL. Environmental information of recent 100 years recorded sediments of Dapu area in Taihu Lake. *Journal of Palaeogeography*, 2006, **8**(4): 559-564. [刘建军, 吴敬禄. 太湖大浦湖区近百年来湖泊记录的环境信息. 古地理学报, 2006, **8**(4): 559-564.]
- [20] Zhang L, Fan CX, Chi QQ *et al.* Phosphorus species distribution of sediments in Lake Taihu and its main inflow rivers. *Geochimica*, 2004, **33**(4): 423-432. [张路, 范成新, 池俏俏等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究. 地球化学, 2004, **33**(4): 423-432.]
- [21] Fan CX, Zhang L eds. Principles of sediment pollution and remediation. Beijing: Science Press, 2009: 65-68. [范成新, 张路. 太湖沉积物污染与修复原理. 北京: 科学出版社, 2009: 65-68.]
- [22] Hou J, Wang C, Wang PF *et al.* Temporal variability and spatial distribution of granulometric composition of surface sediments and classification in Taihu Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2013, **41**(2): 114-119. [侯俊, 王超, 王沛芳等. 太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, **41**(2):

- 114-119.]
- [23] Shen J, Yuan HZ, Liu EF *et al.* Spatial distribution and stratigraphic characteristics of surface sediments in Taihu Lake, China. *Chinese Science Bull*, 2011, **55**(36): 3516-3524. [沈吉, 袁和忠, 刘恩峰等. 太湖表层沉积物的空间分布与层序特征分析. 科学通报, 2010, **55**(36): 3516-3524.]
- [24] Blott SJ, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2001, **26**(11): 1237-1248.
- [25] Wentworth CK. A scale of grade and class terms for elastic sediments. *The Journal of Geology*, 1922, **30**(5): 377-392.
- [26] Qin BQ, Xu PZ, Wu QD *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14.
- [27] Li Y, Li RW, Shang YM *et al.* The environment sedimentological study on Erhai Lake, Yunnan Province—sediments particle size distribution, flow direction and energy distribution. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, **17**(Suppl): 769-774. [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. 沉积学报, 1999, **17**(Suppl): 769-774.]
- [28] Folk RL, Andrews PB, Lewis DW. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, **13**(4): 937-968.
- [29] Guo XY, Wang W, Wang GL *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. *Geographical Research*, 2016, **35**(4): 677-691. [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. 地理研究, 2016, **35**(4): 677-691.]
- [30] Folk RL. A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 1966, **6**(2): 73-93.
- [31] Wu XG. The sediments and evolution of Taihu Lake. *J Lake Sci*, 1992, **4**(3): 54-60. DOI:10.18307/1992.0308. [吴小根. 太湖的泥沙与演变. 湖泊科学, 1992, **4**(3): 54-60.]
- [32] Wang XL, Yang H, Zhao QG *et al.* Recent environmental change inferred from grain-size records in Fuxian Lake, Yunnan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, **28**(4): 776-782. [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. 沉积学报, 2010, **28**(4): 776-782.]
- [33] Jin BF. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis. *Marine Sciences*, 2012, **36**(2): 129-135. [金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义. 海洋科学, 2012, **36**(2): 129-135.]
- [34] Ma JY, Wang GX, Li ZG *et al.* Distribution of nitrogen in the sediment of Taige South River Estuary. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 577-584. [马久远, 王国祥, 李振国等. 太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征. 环境科学, 2014, **35**(2): 577-584.]
- [35] Lu LZ, Shi ZT. Analysis for sediment grain size parameters of connotation sand calculation method. *Environmental Science and Management*, 2010, **35**(6): 54-60. [卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析. 环境科学与管理, 2010, **35**(6): 54-60.]
- [36] Lu M, Zhang WG, Shi YX *et al.* Vertical variations of metals and nutrients in sediments from northern Taihu Lake and the influencing factors. *J Lake Sci*, 2003, **15**(3): 213-220. DOI:10.18307/2003.0304. [陆敏, 张卫国, 师育新等. 太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 213-220.]
- [37] Chen XF, Chuai XM, Zeng J *et al.* Nitrogenous fluxes and its self-purification capacity in Lake Taihu. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2309-2314. [陈小锋, 揣小明, 曾巾等. 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究. 环境科学, 2012, **33**(7): 2309-2314.]
- [38] Yang Y, Gao S, Zhou L *et al.* Grain size distribution of surface sediments and sedimentary environment in the lagoon of Xincun, Hainan Island. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **38**(1): 94-105. [杨阳, 高抒, 周亮等. 海南新村港潟湖表层沉积物粒度特征及其沉积环境. 海洋学报, 2016, **38**(1): 94-105.]
- [39] Li DY, Xu YH, Wang AJ *et al.* Analysis of surface sediment grain size characteristics and modern sedimentary process in Fujian Anhai Gulf. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, **33**(4): 724-734. [李东义, 徐勇航, 王爱军等. 福建安海湾表层沉积物粒度特征及其现代沉积过程分析. 沉积学报, 2015, **33**(4): 724-734.]
- [40] Song HY, Liu JQ, Yin P *et al.* Grain size characteristics of the surface sediment and sedimentary environment in Rizhao Offshore. *Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences*, 2016, (3): 96-104. [宋红瑛, 刘金庆, 印萍等. 日照近海表层沉积物粒度特征与沉积环境. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2016, (3): 96-104.]
- [41] Qin BQ, Hu WP, Chen WM *et al.* Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang Bay, Northern Taihu Lake, China. *J Lake Sci*, 2000, **12**(4): 327-334. DOI:10.18307/2000.0406. [秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 327-334.]