

我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究

李青芹^{1,2}, 霍守亮², 咎逢宇^{2,3}, 刘清学², 席北斗²

(1.中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083; 2.中国环境科学研究院, 北京 100012; 3.安徽师范大学环境科学学院, 安徽芜湖 241000)

摘要:通过现场采样及室内理化性质分析,研究了我国不同区域 6 个不同特征湖泊表层沉积物营养盐和粒度的分布及其相互关系。结果发现,浅水富营养化湖泊杞麓湖、巢湖的沉积物营养盐含量和水体富营养化程度一致,而深水湖泊泸沽湖、程海和青海湖的沉积物营养盐含量和水体的营养状态没有关系,尤其是贫营养湖泊泸沽湖,沉积物中 TN、TP 含量远远高于东部富营养化严重的浅水湖泊。研究湖泊的表层沉积物中 TOC 与 TN 和 Po 表现出显著相关关系,表明沉积物中氮主要以有机氮的形式存在,有机质是有机磷的重要载体。表层沉积物粒径主要集中在 64 μm 以下,不同的湖泊表层沉积物表现不同的粒度分布特征,沉积物营养盐含量较高的杞麓湖、程海、泸沽湖和巢湖的沉积物粒径更细,细颗粒所占比例高低与其污染程度相一致。沉积物中 TOC、TN、TP、Pi、Po 与小于 4 μm 的细颗粒都呈现显著的正相关关系,而与 16~64 μm 的粒径范围呈现负相关关系。

关键词:沉积物;营养盐分布;粒度;湖泊营养状态

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2390-08

The Distribution of Nutrients and Particle Size, Their Correlations in Surface Sediments of Different Lakes, China

LI Qing-qin^{1,2}, HUO Shou-liang², ZAN Feng-yu^{2,3}, LIU Qing-xue², XI Bei-dou²

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 3. College of Environmental Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: In this study, the characteristics of nutrients and particle size in surface sediments of six lakes with different feature from different region were investigated, and the relationships between nutrients and particle size were also discussed. The results indicated that the nutrient content was consistent with lake trophic in shallow eutrophic lake, Lake Qilu and Lake Chaohu; However, there were no relationships in the deep lakes, Lake Luguhu, Lake Chenhai and Lake Qinhaihu. The concentrations of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) were far higher in surface sediments of Lake Luguhu than those in shallow eutrophic lake of the middle and lower reaches of Yangtze River region. Total organic matter(TOC) was significantly correlated with TN, organic phosphorus(Po), which suggested that organic nitrogen was the main fraction of TN and organic matter was important carrier of Po in studied surface sediments. The particle size of surface sediments were below 64 μm and have different distribution characteristics in different lake. The grain size was smaller in higher nutrient content of sediments. The percent content of small particle was consistent with pollution level of surface sediments. The particle of below 4 μm was significantly positive correlated with TOC, TN, TP, Pi and Po however, the particle in range of 16~64 μm was negative correlated with TOC, TN, TP, Pi and Po.

Keywords: sediments; nutrient distribution; particle size; lake trophic

湖泊沉积物是湖泊内源负荷的重要的源和库,在外源负荷得到有效控制后,由于沉积物中营养物的释放,导致不能有效降低湖泊水体营养物浓度,是影响上覆水体营养水平的重要因素^[1-5]。因为储存在沉积

物中的营养盐仍将释放出来而抵消外源负荷的削减,沉积物内源负荷对湖泊恢复的影响可能会持续几十年^[6-7]。不同污染状况、深度和生态系统类型的湖泊沉积物中,营养盐的形态、含量及其释放机制存在较大差异^[8-10]。沉积物中营养盐含量除了受到人为污染发生改变之外,粒度这一沉积物重要物理特性的差异,使不同水体沉积物、甚至同一水体沉积物不同样品中的营养盐含量也不同。不同粒度的沉积物具有不同的比表面积、质量、有机质含量等,对于沉积物吸附和释

收稿日期:2010-07-06

基金项目:国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2009ZX07106-001);国家自然科学基金(40901248)

作者简介:李青芹(1985—),女,研究生,主要研究方向为沉积物营养盐生物地球化学研究。

通讯作者:席北斗 E-mail: xibeidou@263.net

放营养盐的能力有重要的影响^[1]。

因此,研究不同特征湖泊沉积物营养盐的分布特征及其与粒度的相关关系对于揭示湖泊沉积物的生物地球化学循环过程具有重要作用。本文选择了我国不同地区 6 个典型湖泊,研究不同流域特征、生态结构、污染程度的湖泊沉积物中营养盐和粒度分布特征,分析营养盐与粒度的关系,探讨沉积物营养盐含量和湖泊富营养化的关系。

1 材料与方法

1.1 研究湖泊背景及样品采集

在我国不同地区选择 6 个不同流域特征、生态结构、污染程度的湖泊。其中,东部平原湖区选择富营养化湖泊巢湖,在东、西湖区不同污染区域设置 12 个采样点;云贵高原湖区选择富营养化浅水湖泊杞麓湖,设置 6 个采样点;中营养深水湖泊程海,设置 6 个采样点;贫营养深水湖泊泸沽湖,设置 10 个采样点;青藏高原湖区选择贫营养深水湖泊青海湖,在典型区域设置 11 个采样点;蒙新高原湖区选择草型富营养化湖泊乌梁素海,在典型区域设置 3 个采样点。用彼得森采泥器采集湖泊表层沉积物样品,装入密封袋中,用干冰覆盖低温密闭保存,运回实验室后经超低温冷冻干燥后研磨过 100 目筛,密封后冷藏保存待分析用。

1.2 样品分析

1.2.1 理化性质分析

称取两份 0.5 g 沉积物样品,对其中一份进行灰化(500 °C 下灰化 2 h),经酸提取后(1 mol·L⁻¹ HCl 提取 16 h),采用钼锑抗比色法测定 TP 含量;另一份直接经酸提取(1 mol·L⁻¹ HCl 提取 16 h)后测定无机磷(Pi)含量,最后由 TP 和 Pi 相减获得总有机磷(Po)的含量^[12]。称取 0.3~0.5 g 沉积物样品,加入 1 mol·L⁻¹ 盐酸去除样品中无机碳,在 105~110 °C 干燥 30 min 后采用 TOC/TN 分析仪(MultiN/C2100TOC/TN 仪,德国耶拿公司)测定 TOC 含量。TN 采用元素分析仪(Vario El 型,德国 Elementar 公司)进行测定。实验中对所有样品均取 3 份平行测定并取其平均值,实验误差小于 5%。

1.2.2 粒度分析

将新鲜样品混合均匀,用药匙从样品袋中取 0.2 g 左右样品加入 100 mL 烧杯,注入 5 mL 10% 双氧水溶液,放到电热板上加热,不断地用水冲洗烧杯壁,避免烧干,烧至变清没有细小泡沫时,加入 5 mL 10% 盐酸溶液,再注满水,浸泡 12 h。待样品浸泡好后,用皮

管将上面的清水抽出,抽至约 10 mL 即可。再在样品中加入 10 mL 六偏磷酸钠,入超声波振荡仪中,振荡 15 min。振荡后的样品采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,测量范围 0.02~2 000 μm,3 次重复测量误差小于 2%。采用 SPSS13.0 软件进行数据处理和统计分析,确定沉积物粒径和氮、磷和有机碳含量之间的 Pearson 相关系数,分析各指标间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 湖泊沉积物营养盐分布特征

湖泊表层沉积物的 TOC、TN、TP、Pi 和 Po 含量见图 1~图 5,从图中可以看出,云贵湖区浅水湖泊杞麓湖有机污染最为严重,TOC 平均含量为 92.32 mg·g⁻¹,其次是泸沽湖和乌梁素海,分别为 66.14 mg·g⁻¹ 和 58.67 mg·g⁻¹,均高于 40 mg·g⁻¹,已达国家一级土壤肥力水平。深水中营养湖泊程海和贫营养湖泊青海湖沉积物 TOC 含量分别为 27.60 mg·g⁻¹ 和 29.78 mg·g⁻¹,巢湖的 TOC 含量最低,为 17.69 mg·g⁻¹。

杞麓湖、泸沽湖、程海、青海湖、巢湖和乌梁素海的 TN 平均含量分别为 7.60、5.43、2.06、1.80、1.67 mg·g⁻¹ 和 1.44 mg·g⁻¹,而太湖沉积物 TN 的变化范围是 0.43~0.93 g·kg⁻¹,平均含量为 0.64 g·kg⁻¹,所研究的 6 个湖泊中沉积物 TN 含量明显高于太湖^[13],尤其是水质较好的程海和泸沽湖,TN 含量高于东部平原湖区富营养化较为严重湖泊沉积物 5~10 倍。

泸沽湖沉积物中 TP 含量最高,超过 1 300 mg·kg⁻¹,属重污染,其他 5 个湖泊沉积物 TP 含量处于 500~1 300 mg·kg⁻¹,属中污染^[14],平均含量顺序依次为杞麓湖>巢湖>程海>乌梁素海>青海湖。沉积物中磷的形态以 Pi 为主,Pi 含量范围为 130~1 770 mg·kg⁻¹,占 TP 的 50.0%~88.9%;Po 含量范围为 70~540 mg·kg⁻¹,其中泸沽湖 Po 最高,平均 433 mg·kg⁻¹,乌梁素海最低,平均为 130 mg·kg⁻¹。

2.2 湖泊沉积物营养盐累积分析

沉积物中营养盐的富集可以采用 C、N、P 的元素比例来评价^[15]。沉积物有机质的 C/N 值可有效地指示有机质的来源:低等水生植物含有较多的蛋白质,其 C/N 值一般小于 7,而维管束陆生植物的 C/N 值通常大于 20。6 个研究湖泊表层沉积物的 C/N、N/P 和 C/P 比见图 6~图 8,乌梁素海沉积物的 C/N 最高,平均为 49,其次青海湖为 20。乌梁素海生长的大量芦苇死亡腐烂是乌梁素海沉积物有机质的主要来源;青海湖流

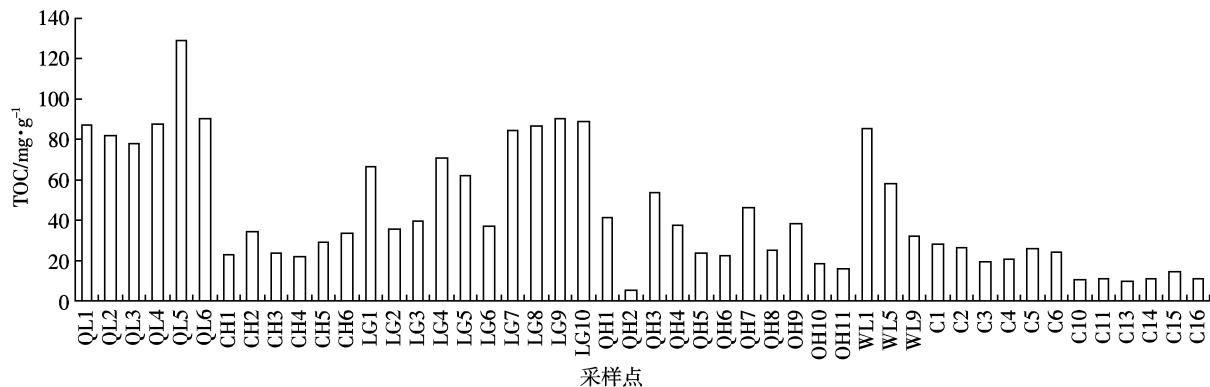


图 1 表层沉积物中 TOC 含量

Figure 1 Total organic carbon (TOC) concentration in the surface sediment

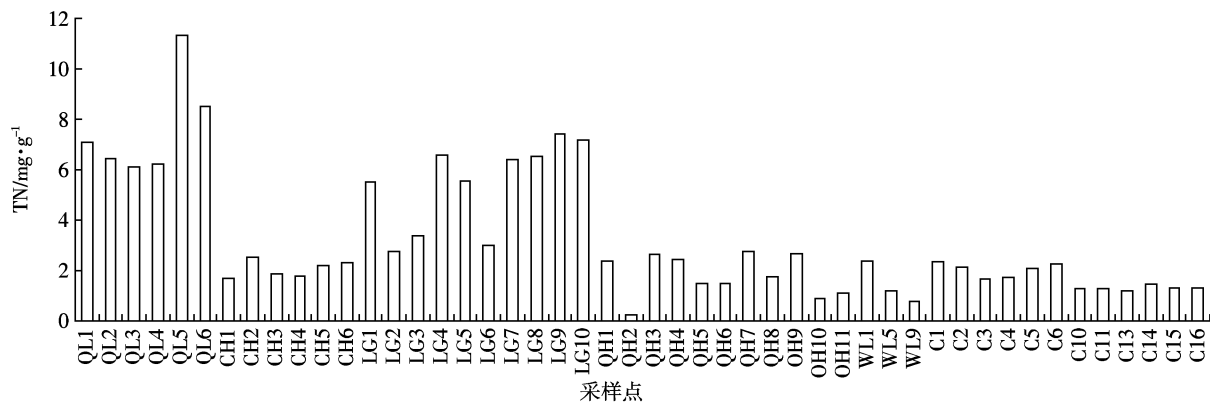


图 2 表层沉积物中 TN 含量

Figure 2 Total nitrogen (TN) concentration in the surface sediment

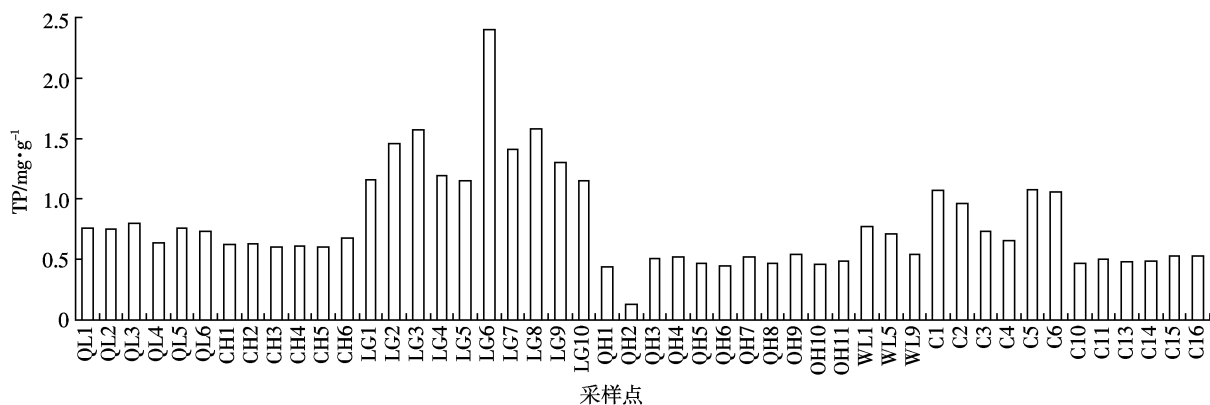


图 3 表层沉积物中 TP 含量

Figure 3 Total phosphorus (TP) concentration in the surface sediment

域人类活动较少,有机质为自然陆源输入。而流域主要为森林覆盖的泸沽湖沉积物的 C/N 值为 14, 可能原因是泸沽湖为深水湖泊,有机质在沉积过程中部分参与了水体的生物化学循环,C/N 值发生了变化^[4]。杞麓湖、程海和巢湖 C/N 值分别为 14、15 和 11,3 个湖泊的外源污染为生活污染源、工业污染源和流域面源以及藻生源,有机质来源比较复杂,其中巢湖的藻生源贡献较大^[16]。

杞麓湖沉积物的 N/P 和 C/P 值最高,平均分别达 23 和 324,远高于 Redfield 常数(106:16:1 C:N:P),主要指示流域点源和面源污染物的大量输入^[17]。杞麓湖流域内污染源类型较多,工业污染、城镇和农村生活污染、面源污染和养殖污染并存,水质持续恶化,沉积物污染严重。巢湖沉积物 N/P 和 C/P 值最低,平均分别为 5 和 63,远低于 Redfield 常数,主要原因是浅水湖泊巢湖沉积物-水界面生物化学作用剧烈,通过降

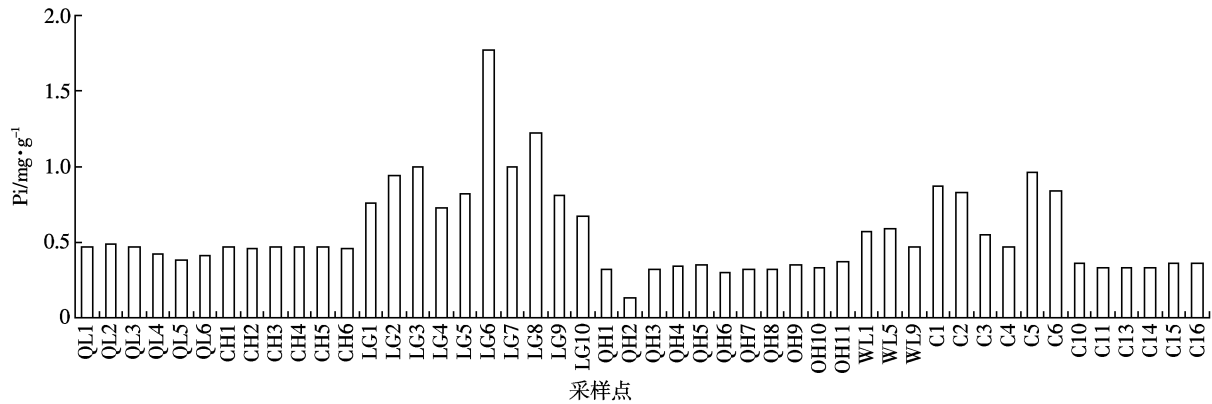


图 4 表层沉积物中 Pi 含量

Figure 4 Inorganic phosphorus(Pi) concentration in the surface sediment

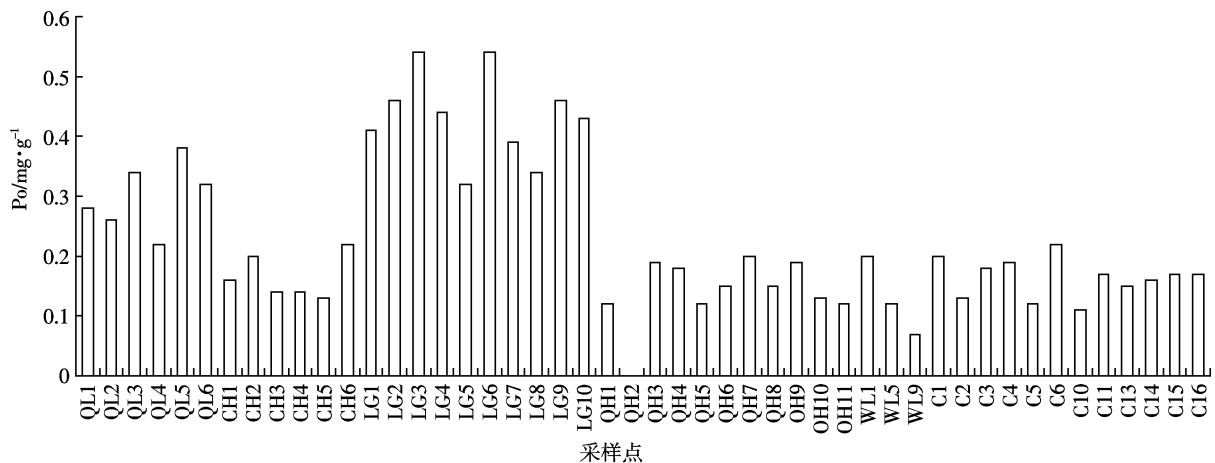


图 5 表层沉积物中 Po 含量

Figure 5 Organic phosphorus(Po) concentration in the surface sediment

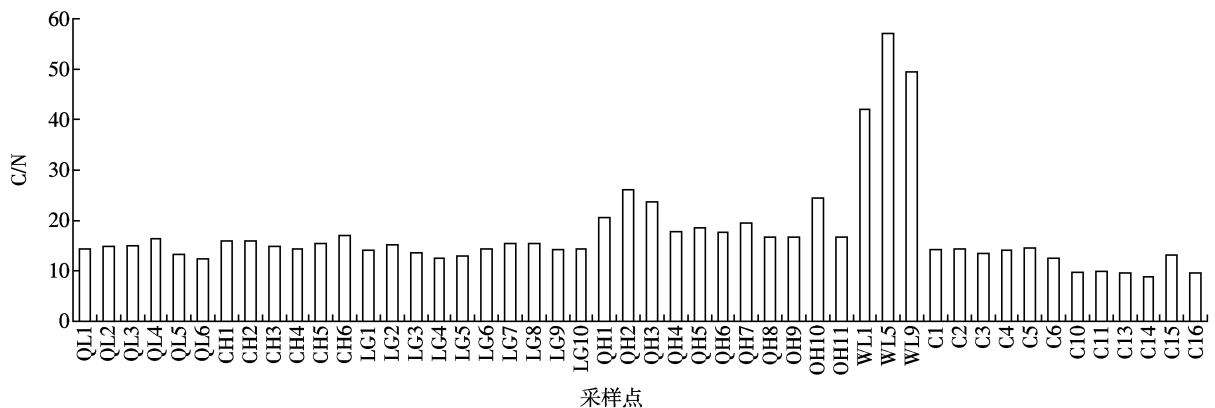


图 6 表层沉积物的 C/N 值

Figure 6 C/N ratios in surface sediments of studied lakes

解和成岩作用,C 和 N 以气体的形式转化,P 富集在沉积物中^[18]。程海、泸沽湖、乌梁素海和青海湖的 N/P 和 C/P 值分别为 7、9、5、8 和 114、128、218、164。

2.3 沉积物粒度分布特征

各湖泊各粒级的百分含量、中值粒径和平均粒径分别见图 9~图 11。这 6 个湖泊中,粒径小于 4 μm 的

百分含量为 10.36%~44.50%, 平均为 29.10%。杞麓湖、程海、青海湖、巢湖、乌梁素海和泸沽湖的平均百分含量分别为 33.28%、36.41%、19.21%、26.85%、17.35%和 38.15%。粒径 4~8 μm 的百分含量为 10.37%~28.15%,平均为 20.72%,上述湖泊的平均百分含量分别为 16.57%、25.55%、18.48%、23.11%、

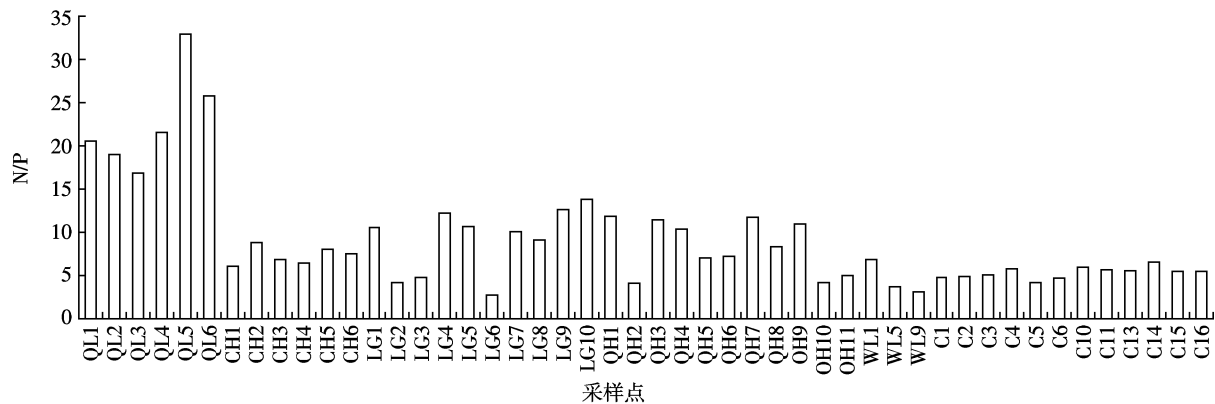


图7 表层沉积物的 N/P 值

Figure 7 N/P ratios in surface sediments of studied lakes

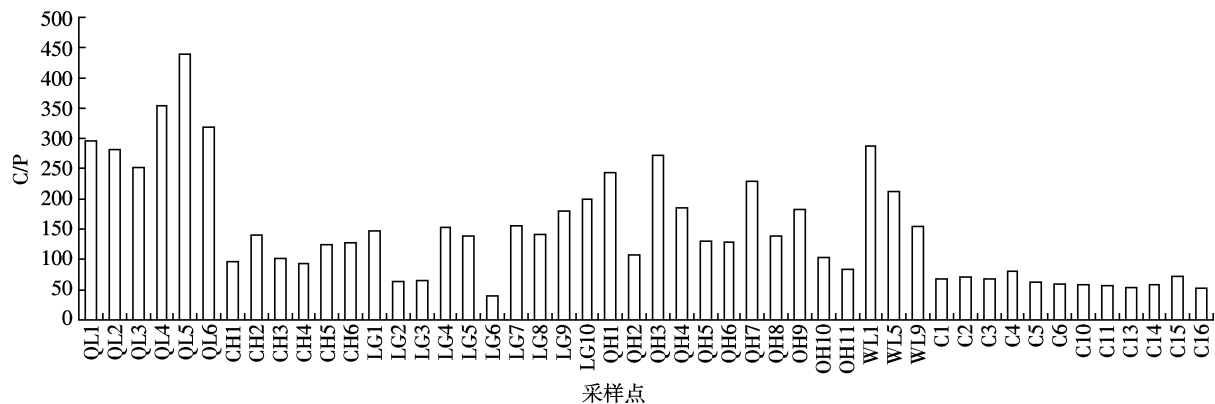


图8 表层沉积物的 C/P 值

Figure 8 C/P ratios in surface sediments of studied lakes

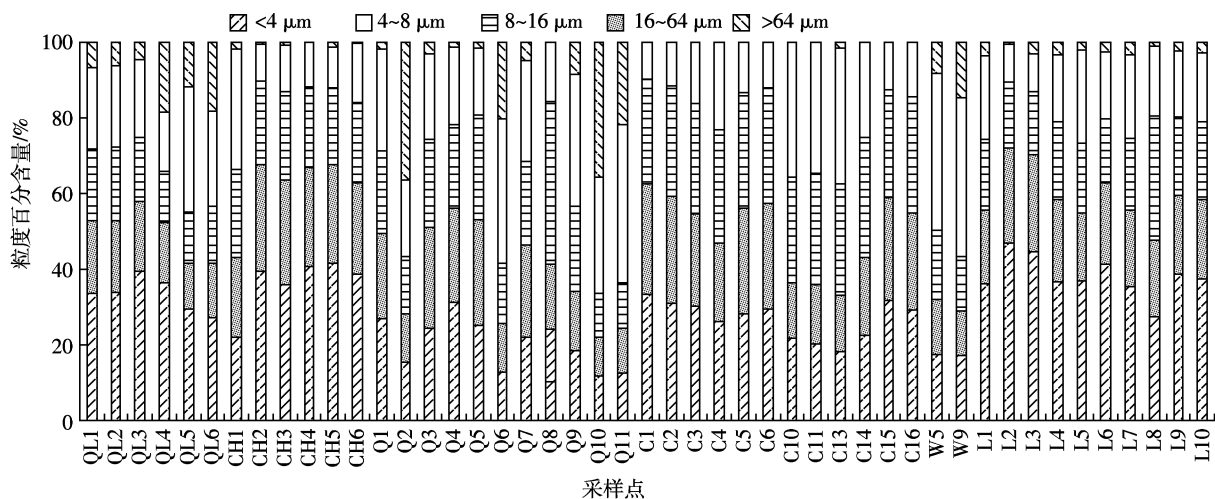


图9 表层沉积物粒度分布

Figure 9 The distribution of particle size in surface sediments

13.28%和21.38%。粒径 8~16 μm 的百分含量为 11.40%~30.66%,平均为 21.90%,其平均百分含量分别为 16.28%、21.91%、19.22%、29.55%、16.09%和 20.18%。粒径 16~64 μm 的百分含量为 9.62%~42.10%,平均为 22.53%,其平均百分含量分别为

22.81%、15.36%、29.39%、20.36%、41.88%和 17.84%。粒径大于 64 μm 的百分含量为 0~36.47%,平均为 5.76%,其平均百分含量分别为 11.06%、0.77%、13.70%、0.13%、11.40%和 2.45%。研究湖泊的表层沉积物的粒径主要集中在 64 μm 以下,不同的湖泊表

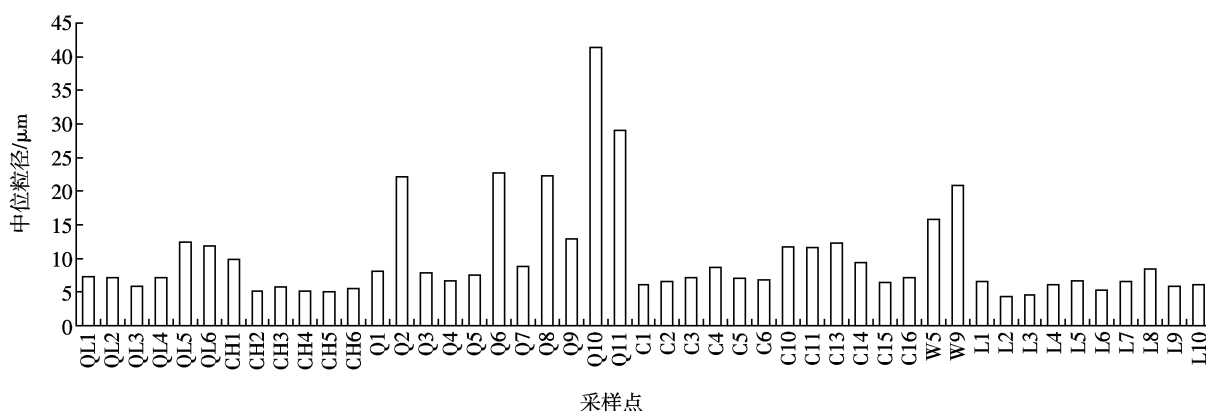


图 10 表层沉积物中位粒径

Figure 10 The distribution of median particle size in surface sediments

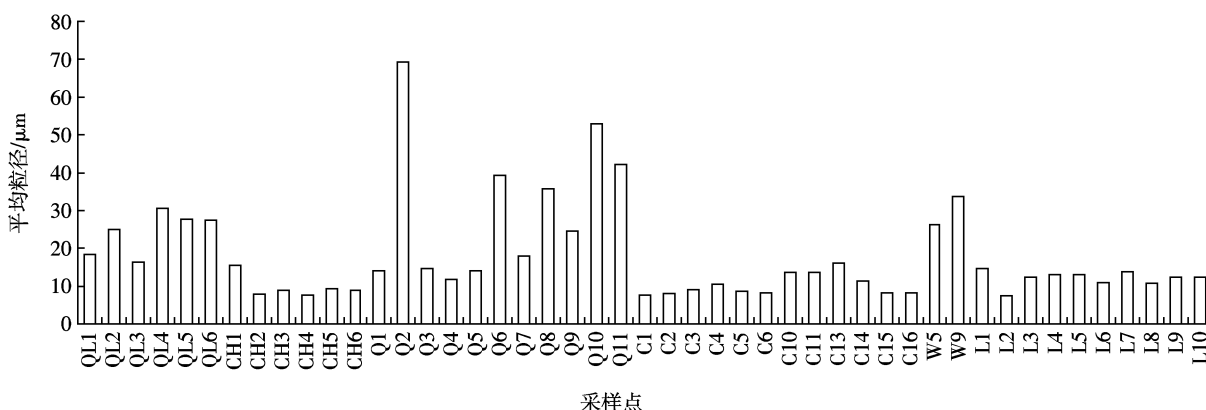


图 11 表层沉积物平均粒径

Figure 11 The distribution of mean particle size in surface sediments

层沉积物表现不同的粒度分布特征,沉积物营养盐含量较高的杞麓湖、程海、泸沽湖和巢湖的沉积物粒径更细。

2.4 沉积物营养盐之间及其与粒度的相关关系

沉积物营养盐之间及其与粒度的相关关系见表 1。可以看出,研究湖泊的表层沉积物中 TOC 和 TN 表现出显著相关关系($R^2=0.921, P<0.01$),表明沉积物中氮主要以有机氮的形式存在,和有机氮相比,沉积物中含无机氮的量相对恒定^[19]。沉积物中 TOC 与 P_o 表现出显著相关关系($R^2=0.80, P<0.01$),说明有机质是有机磷的重要载体。在沉积物中有机质和 P 尤其是 P_o 的生物地球化学循环有密切联系^[20-23]。TN 与 TP、 P_o 也表现出显著的相关关系,表明沉积物中氮、磷来源的同源性。沉积物中 TOC、TN、TP、Pi、 P_o 与粒径小于 $4\ \mu\text{m}$ 的细颗粒都呈显著正相关关系,而与粒径范围 $16\sim 64\ \mu\text{m}$ 的颗粒呈负相关关系。

3 讨论

不同区域湖泊沉积物中营养盐和粒度分布特征

具有明显的差异性,与湖泊的流域特征、生态结构、污染程度等密切相关。杞麓湖历史上沉水植物种群丰富、密度大,近年来水面几乎全被凤眼莲覆盖,水生植物死亡腐烂沉积下来,造成沉积物有机质含量高。乌梁素海是典型的草型浅水湖泊,大量的挺水和沉水植物死亡后腐烂沉积,引起沉积物有机质含量较高,而深水贫营养湖泊泸沽湖沉积物严重的有机污染可能是多年来流域内森林地表径流快速沉积造成的。东部平原湖区污染较重的巢湖沉积物中有机质含量明显低于水质较好的深水湖泊,对于深水湖泊沉积物-水界面温度低、扰动小,生物化学作用较弱,与上覆水的交换作用明显低于浅水湖泊,浅水湖泊沉积物-水界面生物化学作用非常剧烈,部分有机质沉积过程中或沉积后被快速降解。

沉积物中 P_o 主要来源于陆源输入和食物链等生物过程,其含量大小会直接影响初级生产力的溶解性磷的可利用水平。 P_o 可以用来粗略估计有机质的生成和降解,是一种优于 TP 的可指示富营养化程度的指标^[24]。沉积物中各种形态磷的分布特征不但受地

表 1 研究湖泊沉积物营养盐各指标间及与粒度的 Pearson 相关系数表($n=48$)
Table 1 Pearson correlation coefficients of nutrients and particle size in surface sediment($n=48$)

	TOC	TN	TP	Pi	Po	<4 μm	4~8 μm	8~16 μm	16~64 μm	>64 μm	中位粒径	平均粒径
TOC	1											
TN	0.921**	1										
TP	0.371**	0.414**	1									
Pi	0.238	0.258	0.969**	1								
Po	0.605**	0.691**	0.829**	0.668**	1							
<4 μm	0.369*	0.433**	0.602**	0.526**	0.646**	1						
4~8 μm	-0.183	-0.147	0.247	0.298*	0.089	0.602**	1					
8~16 μm	-0.386**	-0.304*	-0.027	0.073	-0.235	0.003	0.549**	1				
16~64 μm	-0.043	-0.129	-0.395**	-0.399**	-0.306*	-0.799**	-0.820**	-0.292*	1			
>64 μm	0.028	-0.021	-0.335*	-0.348*	-0.243	-0.547**	-0.714**	-0.687**	0.436**	1		
中位粒径	-0.252	-0.307*	-0.422**	-0.387**	-0.422**	-0.794**	-0.729**	-0.441**	0.679**	0.835**	1	
平均粒径	0.210	0.155	-0.264	-0.287	-0.156	-0.269	-0.542**	-0.530**	0.228	0.725**	0.414**	1

质-地球化学背景的控制,而且与湖泊流域的工业活动、人为因素密切相关^[25]。Po 含量不仅与有机质含量关系密切,其含量的差异也反映湖泊不同流域特征、污染来源^[26]和磷的生物地球化学循环的差异。泸沽湖和青海湖 TP 主要来源于流域自然径流,杞麓湖、巢湖和程海 TP 主要来源于流域的工业、生活和面源污染,不同湖泊沉积物中 Po 相对含量表明其来源和生物地球化学循环的差异。Zhang 等^[14]研究也表明湖泊中 TP 以工业和生活污染来源为主的沉积物中 Po 相对含量低于以农业面源污染为主的沉积物。而对于草型富营养化湖泊乌梁素海 Po 相对含量明显偏低,可能是草-藻性湖泊初级生产力生长过程中大量利用了 Po 的结果。目前湖泊沉积物氮释放方面的研究主要针对浅水湖泊,对于深水湖泊则较为缺乏,对于水质较好的深水湖泊沉积物氮的释放值得关注。

沉积物中低的 N/P 值与沉积物-水界面低的溶解氧浓度有关,低的溶解氧浓度使得表层沉积物中 N 因矿化而损失^[20,27],流域人类扰动较小的泸沽湖和青海湖沉积物中低的 N/P 值也暗示沉积物中 P 大部分来自于自然条件下的碎屑源^[28]。同时,不同 C、N、P 的元素比值的差异也暗示不同特征湖泊的沉积物-水界面的生物地球化学作用的差异,目前针对浅水湖泊开展了大量研究,而深水湖泊泸沽湖、程海和青海湖沉积物-水界面营养盐的生物地球化学作用值得关注。表层沉积物中较细的粘粒部分对污染物有较强的吸附能力和再悬浮能力,细颗粒所占比例较高的沉积物,污染程度一般较高,这一结果与其污染程度相一致,不同湖泊沉积物粒度分布的差异导致其沉积物营养盐的生物地球化学循环存在明显的差异。

4 结论

本文研究了我国不同区域的 6 个不同流域特征、污染程度和生态类型的湖泊表层沉积物营养盐和粒度的分布特征,分析了营养盐间及其与粒度的相互关系。不同湖泊表层沉积物的营养盐和粒度分布差异性明显,浅水富营养化湖泊杞麓湖和巢湖的沉积物营养盐含量和水体富营养化程度一致,草型富营养化湖泊乌梁素海沉积物营养盐分布表现明显不同特征。而深水湖泊泸沽湖、程海和青海湖的沉积物营养盐含量和水体的营养状态没有关系,尤其是贫营养湖泊泸沽湖,沉积物中 TN、TP 含量远远高于东部富营养化严重的浅水湖泊。因此,深水湖泊的沉积物-上覆水界面营养盐的生物地球化学循环值得进一步深入研究。研究湖泊的表层沉积物中 TOC 与 TN 和 Po 表现出显著相关关系,表明沉积物中氮主要以有机氮的形式存在,有机质是有机磷的重要载体。所研究湖泊的表层沉积物的粒径主要集中在 64 μm 以下,不同的湖泊表层沉积物表现不同的粒度分布特征,沉积物营养盐含量较高的杞麓湖、程海、泸沽湖和巢湖的沉积物粒径更细。细颗粒所占比例高低与其污染程度相一致,沉积物中 TOC、TN、TP、Pi、Po 与小于 4 μm 的细颗粒都呈现显著的正相关关系,而与 16~64 μm 的粒径范围呈现负相关关系。

参考文献:

[1] 张 路,范成新,王建军,等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1537-1543.
ZHANG Lu, FANG Cheng-xin, WANG Jian-jun, et al. Space-time de-

- pendent variances of ammonia and phosphorus flux on sediment-water interface in Lake Taihu[J]. *Chinese Environmental Science*, 2006, 27(8): 1537-1543
- [2] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms: An enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 391-399.
- [3] Norton S A, Coolidge K, Amirbahman A, et al. Speciation of Al, Fe, and P in recent sediment from three lakes in Maine, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 404: 276-283.
- [4] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield D E. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apopka, Florida[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 418: 217-227.
- [5] Lauridsen T L, Jensen J P, Jeppesen E, et al. Response of submerged-macrophytes in Danish lakes to nutrient loading reductions and biomanipulation[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509: 641-649.
- [6] James R T, James M, Wool T, et al. A sediment resuspension and water quality model of Lake Okeechobee[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(3): 661-680.
- [7] Jeppesen E, Søndergaard M, Kronvang B, et al. Lake and catchment management in Denmark[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 395/396: 419-432.
- [8] Wang S R, Jin X C, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 289: 339-346.
- [9] 金相灿, 孟凡德, 姜霞, 等. 太湖东北部沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 388-394.
- JIN Xiang-can, MENG Fan-de, JIANG Xia, et al. Physical-chemical characteristics and form of phosphorus speciations in the sediments of northeast Lake Taihu[J]. *Chinese Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 388-394.
- [10] Havens K E, Fukushima T, Xie P, et al. Nutrient dynamics and eutrophication of shallow lakes Kasumigaura (Japan), Donghu (PR China) and Okeechobee (USA)[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 111: 263-272.
- [11] 梁海清, 王圣瑞, 金相灿, 等. 不同污染程度沉积物不同粒级有机磷形态及其分布[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 380-385.
- LIANG Hai-qin, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Study on the organic phosphorus form & distribution of different particle size fractions in the different polluted sediments[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3): 380-385.
- [12] Aspila K I, Agemian H, Chau A S Y. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments[J]. *Analyst*, 1976, 101: 187-197.
- [13] 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[J]. 湖泊科学, 2003, 15(3): 213-220.
- LU Min, ZHANG Wei-guo, SHI Yu-xin, et al. Vertical variations of metals and nutrients in sediments from northern Taihu Lake and the influencing factors[J]. *Chinese Journal of Lake Science*, 2003, 15(3): 213-220.
- [14] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau[J]. *China Environmental Pollution*, 2008, 152: 366-372.
- [15] Ruiz-Fernandez A C, Hillaire-Marcel C, Ghaleb B, et al. Recent sedimentary history of anthropogenic impacts on the Culiacan River Estuary, northwestern Mexico: Geochemical evidence from organic matter and nutrients[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118: 365-377.
- [16] 周志华, 刘丛强, 李军, 等. 巢湖沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 记录的生态环境演化过程[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1338-1343.
- ZHOU Zhi-hua, LIU Cong-qiang, LI Jun, et al. Record of ecosystem evolution processes provided by $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in Chaohu Lake sediments[J]. *Chinese Environmental Science*, 2007, 28(6): 1338-1343.
- [17] Emmeis K C, Struck U, Leippe T, et al. Changes in the C, N, P burial rates in some Baltic Sea sediments over the last 150 years—relevance to P regeneration rates and the phosphorus cycle[J]. *Marine Geology*, 2000, 167: 43-59.
- [18] Hecky R E, Campbell P, Hendael L L. The stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans[J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, 38(4): 709-724.
- [19] Calvert S E. Beware intercepts: interpreting compositional ratios in multi-component sediments and sedimentary rocks. *Org. Geochem.* 2004, 35: 981-987.
- [20] Ribeiro D C, Martins G, Nogueira R, et al. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal)[J]. *Chemosphere*, 2008, 70: 1256-1263
- [21] Ingall E D, Cappellen V P. Relation between sedimentation rate and burial of organic phosphorus and organic carbon in marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 373-386.
- [22] Whitton B A., Grainger S L J, Hawley G R W, et al. Cellbound and extracellular phosphatase activities of cyanobacterial isolates[J]. *Microbial Ecology*, 1991, 21: 85-98.
- [23] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43-46.
- JIANG Jing-long, WU Yun-hai. The factors on release of phosphorus from the sediment[J]. *Chinese Environmental Science and Management*, 2008, 33(6): 43-46.
- [24] Vaalgamaa S. The effect of urbanisation on Laajalahti Bay, Helsinki City, as reflected by sediment geochemistry[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48: 650-662.
- [25] 刘浏, 刘晓端, 徐清, 等. 密云水库沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 岩矿测试, 2003, 22(2): 81-85.
- LIU Liu, LIU Xiao-duan, XU Qing, et al. Phosphorous species and their distribution characters in sediments of Miyun Reservoir[J]. *Chinese Rock and Mineral Analysis*, 2003, 22(2): 81-85.
- [26] Ruban V, Lo'pez-Sa'nchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments e a synthesis of recent works[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 370: 224-228.
- [27] Giblin A E, Hopkinson C S, Tucker J. Benthic metabolism and nutrient cycling in Boston Harbor[J]. *Massachusetts Estuaries*, 1997, 20(2): 346-364.
- [28] Teodoru C R, Friedl G, Friedrich J, et al. Spatial distribution and recent changes in carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in sediments of the Black Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 105: 52-69.