

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.022

# 长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征

朱林<sup>1</sup>, 汪院生<sup>1</sup>, 邓建才<sup>2</sup>, 张洪梅<sup>2</sup>, 刘鑫<sup>2</sup>

(1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128;  
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

**摘要:**通过对长荡湖不同湖区表层沉积物中营养盐及含水率的测定,结合统计分析手段,探讨其空间分布与污染特征。结果表明:长荡湖表层沉积物中TN、TP的质量比、TOC含量及含水率变化范围分别为3.47~10.80 g/kg、0.57~1.83 g/kg、0.66%~4.21%和41.71%~75.78%,其均值分别为6.86 g/kg、1.19 g/kg、1.73%和60.48%,且均呈湖周高、湖心低的空间分布特征;TN、TP和含水率之间呈显著线性相关,TOC与TN、TP和含水率之间无显著相关性;长荡湖表层沉积物中TN、TP及TOC富集系数分别在0.7~2.0、0.6~2.0和0.4~2.5内变化,其平均值分别为1.3、1.3、1.0;污染指数分别在6.3~19.6、1.0~3.1和0.7~4.2内变化,其平均值分别为12.5、2.0和1.7;长荡湖表层沉积物的氮素水平处于重度污染状态,且磷、有机碳均已受到一定程度的污染。

**关键词:**长荡湖;表层沉积物;TN;TP;TOC;污染特征;空间分布

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0135-06

## Spatial distribution and contamination characteristics of nutrients in surface sediment of Changdang Lake

ZHU Lin<sup>1</sup>, WANG Yuansheng<sup>1</sup>, DENG Jiancai<sup>2</sup>, ZHANG Hongmei<sup>2</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co. Ltd., Suzhou 215128, China;  
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** By determining the nutrient and water contents in surface sediment in different region of Changdang Lake, combined with statistical analysis method, the spatial distribution and pollution characteristics were discussed. The results showed that the concentration of nutrient ranged from 3.47 to 10.80 g/kg for TN, from 0.57 to 1.83 g/kg for TP, from 0.66% to 4.21% for TOC, from 41.71% to 75.78% for water, with an average of 6.86 g/kg, 1.19 g/kg, 1.73% and 60.48%, respectively, which all had spatial distribution of high content in surrounding and low in central in the lake. A significant linear correlation was observed among total nitrogen, total phosphorus and water content, while there was not significant correlation among total organic carbon and total nitrogen, total phosphorus and water content. The enrichment coefficients varied from 0.7 to 2.0 for total nitrogen, from 0.6 to 2.0 for total phosphorus and from 0.4 to 2.5 for total organic carbon, with an average of 1.3, 1.3, 1.0, respectively. And that pollution index varied from 6.3 to 19.6 for total nitrogen, from 1.0 to 3.1 for total phosphorus and from 0.7 to 4.2 for total organic carbon, with the average of 12.5, 2.0 and 1.7, respectively, indicating that nitrogen level was in heavily polluted state and Changdang Lake was under a certain level of pollution of phosphorus, organic carbon in the surface sediment.

**Key words:** Changdang Lake; surface sediment; total nitrogen; total phosphorus; total organic carbon; pollution characteristics; spatial distribution

水体富营养化日益成为世界面临的一个严峻的环境问题<sup>[1]</sup>,其根本原因是水体中氮、磷等营养盐浓度过高,超出水体生物生长需求<sup>[2]</sup>。湖泊作为重要的内陆水资源,也面临着严重的水体富营养化威胁<sup>[3]</sup>。地表径流、工农业污染物进入湖体后,经沉降作用在沉积物中累积,使得底泥成为污染物的主要蓄积库<sup>[4]</sup>,在水动力、渔业活动以及生物扰动等作用下,蓄积于底泥中的污染物会再次向水体释放,造成二次污染<sup>[5-6]</sup>。目前,随着国家与地方水环境保护法律法规出台以及一批截污工程实施,外源入湖污染物得到了有效控制<sup>[7]</sup>,内源营养负荷控制成为湖泊富营养化治理的重点。

近年来,长荡湖受到了大量工农业和生活污水的污染,底泥中积蓄了大量氮、磷等污染物,水质恶化趋势与富营养化趋势明显<sup>[8]</sup>。水动力以及渔业活动频繁,对底泥扰动明显,氮、磷较容易再次向水体中释放,造成内源污染。自2001—2010年长荡湖一直处于富营养化状态,而底泥中氮、磷的变化是湖泊水质的一个缩影,对其营养盐污染进行评价研究,有助于分析未来水质变化趋势;然而目前,国内外对湖泊沉积物营养盐污染评价尚缺乏统一的方法和标准。笔者研究长荡湖营养盐、含水率的空间差异性,探讨氮、磷及有机碳的空间分布特征,阐明底泥污染现状,为湖泊水体富营养化控制与湖泊治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

长荡湖又名洮湖,属草型浅水湖泊,位于金坛市和溧阳市境内,南北长约15.5 km,东西宽约9 km,湖泊面积约85.3 km<sup>2</sup>,多年平均水位3.46 m,平均水深1.10 m。西部通过薛埠河承接茅山丘陵山区降水径流;东部的湟里河、北干河以及中干河将长荡湖与溧湖连通;北部通过丹金溧漕河承接京杭运河来水;南部丹金溧漕河、赵村河、上黄河将长荡湖与南溪诸河串联<sup>[9]</sup>。湖区地处北亚热带湿润气候区,属海洋性湿润气候,具有明显的季风特征,常年主导风向为东南风、东风,多年平均风速为3.5 m/s,实测最大风速为22.0 m/s;四季分明,春季干燥少雨,夏季高温高湿,雨量集中,秋季凉爽,冬季寒冷干燥。长荡湖是江苏省十大淡水湖之一,集防洪调蓄、水资源、生态环境、渔业养殖、气候调节及旅游等功能于一体,地处溧湖和太湖的上游,有向地区和太湖供水的功能,其供水的水量和水质对地区和太湖至关重要。

### 1.2 采样及分析方法

根据长荡湖地形特征、出入湖河流河口分布、不

同区域利用的差异性以及水生植被覆盖程度将其划分为西北区、东北区以及南部湖区,布设48个采样点(图1),其中西北区(16个)、东北区(17个)和南部湖区(15个)。于2014年1月22—26日和2月16—28日进行沉积物样品采集,采用彼德逊采泥器采集各样点的表层沉积物1 kg左右,样品采集完成后,运回实验室低温保存。试验前,用烘干法测量表层沉积物的含水量;剩余样品避光风干,按四分法取约5 g于研钵中研磨,过100目筛。总有机碳(TOC)采用重铬酸钾-硫酸氧化-硫酸亚铁滴定法测定;TN用碱性过硫酸钾消化接紫外比色法测定;TP用酸性过硫酸钾消化接钼锑抗比色法<sup>[10]</sup>测定。

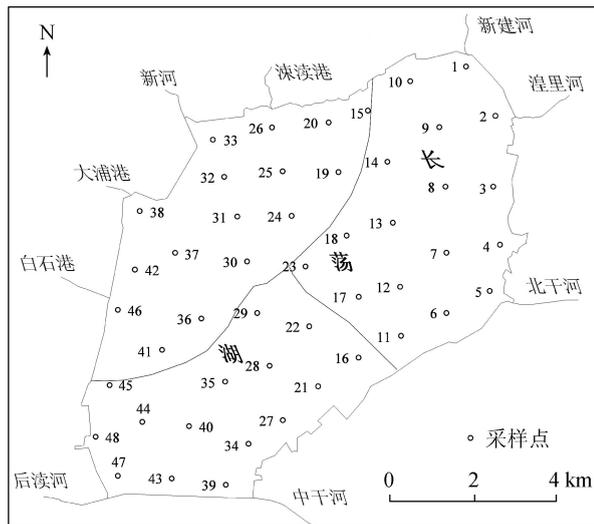


图1 长荡湖采样点分布

### 1.3 沉积物中营养盐污染评价指南

根据1992年加拿大安大略省环境和能源部对生态毒性效应制定的沉积物质量评价指南<sup>[11]</sup>(各指标安全限值:TN 0.55 g/kg, TP 0.60 g/kg, TOC 1.0%),结合长荡湖表层沉积物中营养盐含量(表1),计算不同湖区表层沉积物中营养盐的富集系数 $F_i$ 、污染指数 $P_i$ ,以反映沉积物的污染特征,其计算公式如下:

$$F_i = \frac{C_i}{C_{vi}} \quad (1)$$

$$P_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (2)$$

式中: $F_i$ 为第*i*种营养盐的富集系数; $P_i$ 为第*i*种营养盐的污染指数; $C_i$ 为第*i*种营养盐实测浓度; $C_{0i}$ 为第*i*种营养盐评价标准; $C_{vi}$ 为第*i*种营养盐环境背景参照值(本文使用采集的柱状底泥20~50 cm层中各营养盐平均值的最小值为标准)。

### 1.4 数据处理

数据处理采用Excel 2013;表层沉积物中TN、TP空间分布图的绘制采用Surfer 8.0;统计分析采用SPSS 16.0。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中 TN 空间分布特征

长荡湖表层沉积物中 TN 的质量比在 3.47 ~ 10.80 g/kg 内变化,平均为 6.86 g/kg,极差为 7.33 g/kg,高于全湖平均值(表 1),空间上呈现湖周高、湖心低的分布特征,这与河道输入、围网养殖过程中饵料的添加、动物的排泄等外源性污染有关(图 2)。东北湖区、南部湖区、西北湖区沉积物中 TN 质量比分别为  $(7.30 \pm 2.28)$  g/kg、 $(7.00 \pm 1.97)$  g/kg 和  $(6.35 \pm 2.02)$  g/kg(表 1)。东北部湖区底泥富含氮量,可能是由于围网养殖过程中饵料投放不当、利用率降低,使湖区氮负荷增高,冬季水草衰亡腐败也会导致湖区营养物负荷增高。南部湖区氮污染,可能是由于长荡湖西高东低,南部水浅,且淤积严重,致使泥沙携带的氮素随湖流自西向东迁移,在迁移过程中湖流速度逐渐减小,造成营养物质不断沉积于南部湖区底泥中;这也和南部湖区人口众多、旅游开

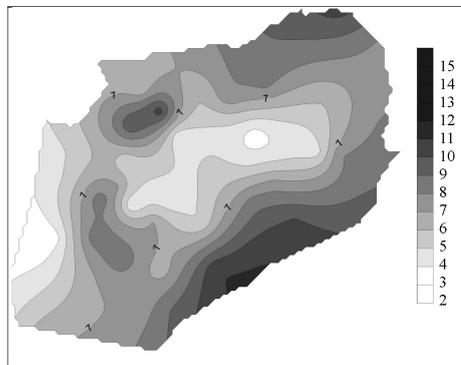


图 2 长荡湖表层底泥中 TN 质量比空间分布(单位:g/kg)

发有关。西北部湖区含氮量可能来自于入湖河道所携带的工农业及生活废水的输入。单因素方差分析(one-way ANOVA)结果表明,3 湖区底泥中 TN 质量比空间差异不显著( $p>0.05$ )。

### 2.2 沉积物中 TP 空间分布特征

磷是湖泊沉积物中另一个主要营养元素,也是反映湖泊污染程度的重要指标。长荡湖表层沉积物中 TP 质量比在 0.57 ~ 1.83 g/kg 内变化,平均为 1.19 g/kg(表 1),其空间分布特征与 TN 相似(图 3),即湖周高、湖心低。西北湖区、南部湖区和东北湖区中 TP 质量比分别为  $(1.18 \pm 0.37)$  g/kg、 $(1.06 \pm 0.25)$  g/kg 和  $(1.01 \pm 0.22)$  g/kg(表 1)。长荡湖底泥中磷的空间分布特征受生活污水排放、农田肥料流失、围网养殖等外源输入影响较大。西北湖区和南部湖区沉积物中相对较高的磷含量,可能与西北湖区白石河、大浦河以及丹金溧漕河携带大量工农业和生活污水进入湖泊并在南部湖区淤积直接有关,这一观点与李勇等<sup>[12]</sup>的研究成果一致。尽

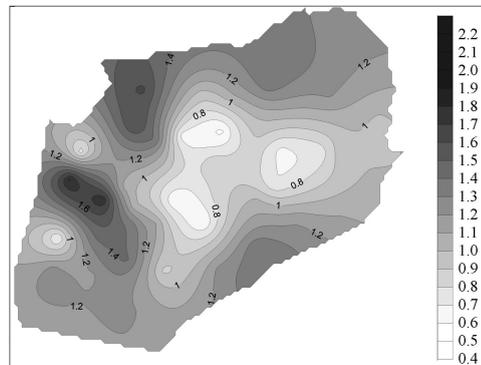


图 3 长荡湖表层底泥中 TP 质量比空间分布(单位:g/kg)

表 1 长荡湖不同湖区表层沉积物中 TN、TP 质量比及 TOC 含量和含水率

指标	西北湖区				东北湖区			
	$w(\text{TN})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{TP})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	TOC 含量/%	含水率/%	$w(\text{TN})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{TP})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	TOC 含量/%	含水率/%
最小值	3.47	0.57	1.02	44.29	3.49	0.67	0.66	46.09
最大值	10.63	1.83	4.21	75.36	10.71	1.38	2.32	75.78
平均值	6.35	1.18	2.00	57.71	7.30	1.01	1.39	62.14
背景值								
方差	2.02	0.37	0.87	8.08	2.28	0.22	0.48	9.15
变异系数	0.32	0.31	0.44	0.14	0.31	0.22	0.34	0.15
样本数(个)	16	16	16	16	17	17	17	17
指标	南部湖区				全湖			
	$w(\text{TN})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{TP})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	TOC 含量/%	含水率/%	$w(\text{TN})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{TP})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	TOC 含量/%	含水率/%
最小值	4.32	0.61	0.99	41.71	3.47	0.57	0.66	41.71
最大值	10.80	1.42	3.64	75.17	10.80	1.83	4.21	75.78
平均值	7.00	1.06	1.81	62.56	6.86	1.19	1.73	60.48
背景值					5.34	0.92	1.66	
方差	1.97	0.25	0.78	8.81	2.19	0.30	0.76	8.77
变异系数	0.28	0.24	0.43	0.14	0.31	0.28	0.44	0.15
样本数(个)	15	15	15	15	48	48	48	48

管3个湖区沉积物中TP含量存在差异,但统计显示差异不显著( $p>0.05$ )。

### 2.3 沉积物中 TOC 空间分布特征

TOC 在湖泊物质循环中发挥着重要的作用,其主要来自于水体中自养生物的合成及外源输入。TOC 指标能在一定程度上反映出湖泊受有机物污染的程度,是指示水体污染源污染程度的重要指标之一<sup>[13]</sup>。底泥中有机碳也是可交换态氮等形态氮的主要来源,微生物活动会增加有机碳的矿化分解,增加湖泊中氮、磷浓度,导致水质恶化或富营养化<sup>[14]</sup>。长荡湖沉积物中 TOC 含量在 0.66% ~ 4.21% 内变化,平均为 1.73% ± 0.76%,极差为 3.55%,高于全湖平均含量(表 1),其有机碳含量分布呈西北部和南部湖区高东北湖区低的特点(图 4)。西北湖区、南部湖区和东北湖区中 TOC 含量分别为 2.00% ± 0.87%、1.81% ± 0.78% 和 1.39% ± 0.48% (表 1)。统计分析表明:西北湖区与东北湖区间差异显著( $p=0.014$ ),西北湖区与南部湖区以及东北湖区和南部湖区间无显著差异( $p>0.05$ )。西北区有机碳可能主要来源于丹金溧漕河河道外源输入,湖泊湖流流速小,有机污染物难于分散,在入湖口辐射区内沉积下来,导致沉积物中 TOC 含量增高;南部区则由于围网养殖饵料投放产生的有机物碎屑,周边生活、生产废水排放及网箱有效缓解了风浪扰动,在底层易形成相对厌氧区,利于有机质的蓄积。东北部湖区污染可能源于湖滨带冬季水生植物衰亡腐败、生活污水排放,但东北湖区湖滨带水生植被及某些微生物(如附着微生物等)的存在增加了表层底泥中的矿化分解作用使其具有相对较高的污染去除能力。

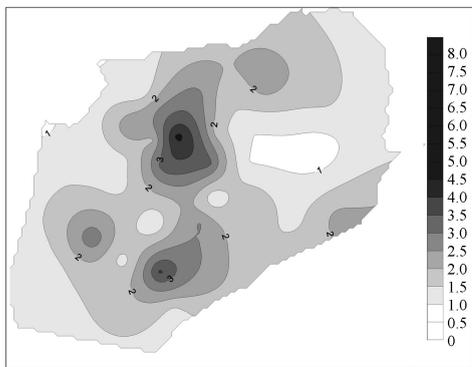


图 4 长荡湖表层底泥中有机碳含量空间分布(单位:%)

### 2.4 沉积物中含水率分布特征

含水率反映了底泥的疏松特征,直接影响底泥的再悬浮程度,而底泥再悬浮过程是营养盐在底泥与上覆水之间重新分配的重要途径<sup>[15-16]</sup>。有研究表明频繁扰动可使底泥中含水率显著增加<sup>[17]</sup>。长荡湖表层沉积物含水率在 41.71% ~ 75.78% 内变化,平均值为 60.48% ± 8.77%,变异系数为 15.0%

(表 1),长荡湖表层沉积物中含水率呈湖周高、湖心低以及由沿岸向湖心逐步降低的特征(图 5)。这可能与沉积物淤积厚度、颗粒粒径、有机质含量等有关。湖周水生植物新陈代谢过程会导致表层沉积物有机质含量增加,再加上频繁水动力扰动,会导致表层沉积物更加的疏松,从而使其含水率相对升高。相比较而言,西北湖区人为干扰少,底泥受扰动最小,含水率也较低。南部湖区、东北湖区和西北湖区沉积物含水率分别 62.56% ± 8.81%、62.14% ± 9.15% 和 57.71% ± 8.08% (表 1)。南部湖区与东北湖区底泥含水率较高,表明其泥质疏松,具有较大的不稳定性,容易发生再悬浮、释放底泥中的营养盐,西北湖区底泥中含水率较低,底泥中的营养元素不易在上覆水体间重新分配,一定程度上会减弱水体的富营养化程度。但单因素方差分析表明,不同湖区表层沉积物含水率差异不显著( $p>0.05$ )。

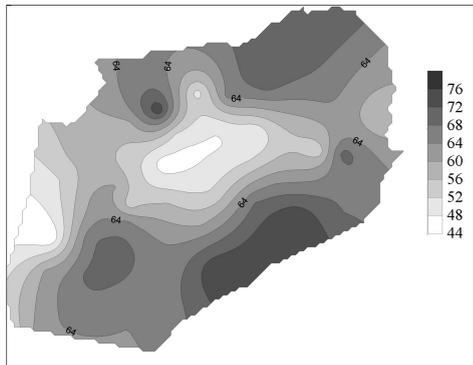


图 5 长荡湖表层底泥中含水率空间分布(单位:%)

由表 2 可见,长荡湖底泥中 TN 和 TP 呈显著线性相关,其相关系数为 0.503( $p<0.01$ ),这表明 TN、TP 可能有相同污染来源,这也验证了 TN、TP 具有一致的空间分布特征,即湖周高、湖心低的空间分布;表层沉积物中 TN、TP 随含水率增加而增高,含水率与 TN、TP 间存在显著线性相关,其相关系数为 0.821( $p<0.01$ ) 和 0.425( $p<0.01$ );TOC 与 TN、TP 以及含水率之间无显著关系。尽管沉积物中碳与氮积累具有高度同步性<sup>[18]</sup>,但由于外源输入的碳、氮打破了两者间平衡,这种关系并未在本研究中发现。

表 2 长荡湖表层沉积物中 TN、TP、含水率及 TOC 相关性分析

水质指标	TN	TP	含水率	TOC
TN	1			
TP	0.503 **	1		
含水率	0.821 **	0.425 **	1	
TOC	0.122	-0.031	0.004	1

\*\* 表示相关性极显著(样本数  $n=48$ ,显著性水平  $p<0.01$ )。

### 2.5 沉积物中营养盐污染特征评价

由表 3 可知,长荡湖表层沉积物中 TN、TP 及 TOD 富集系数  $F_i$  分别在 0.7 ~ 2.0、0.6 ~ 2.0 和 0.4

~2.5 内变化,其平均值分别为 1.3、1.3、1.0; 污染指数分别在 6.3~19.6、1.0~3.1 和 0.7~4.2 内变化,其平均值分别为 12.5、2.0 和 1.7。除 6% 采样点中 TOC 污染指数小于 1 外, TN 和 TP 污染指数均大于 1, 且 TN 为重度污染状态, 其污染指数高于平均值的样本数占 40%, 尤其以东北湖区比例最高, 为 61%, 西北湖区和南部湖区分别为 26% 和 36%, 表明长荡湖表层沉积物营养盐存在富集现象, 并受到一定程度的污染。

表 3 长荡湖表层底泥中 TN、TP 及 TOC 的富集系数和污染指数

项目	TN		TP		TOC	
	$F_i$	$P_i$	$F_i$	$P_i$	$F_i$	$P_i$
最大值	2.0	19.6	2.0	3.1	2.5	4.2
最小值	0.7	6.3	0.6	1.0	0.4	0.7
平均值	1.3	12.5	1.3	2.0	1.0	1.7

长荡湖表层底泥中 TN、TP 平均质量比均显著高于太湖、天目湖、洪泽湖、青海湖及巢湖; TOC 平均含量高于太湖和巢湖, 低于洪泽湖与青海湖(表 4)。根据美国 EPA 沉积物污染评价标准, 沉积物中 TN 质量比大于 2.000 g/kg 时为重度污染<sup>[19]</sup>, TP 质量比大于 0.6 g/kg、TOC 含量大于 1.0% 时表示底泥已经受到污染<sup>[24]</sup>, 因此, 长荡湖表层沉积物内源污染负荷不容忽视。

表 4 长荡湖表层沉积物中 TN、TP 质量比和 TOC 含量与其他湖泊比较

湖名	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	TOC 含量/%	文献
太湖	0.86	0.56	0.74	[20]
天目湖	2.60	0.32		[21]
洪泽湖	1.02	0.58	7.88	[22]
青海湖	1.80	0.47	2.98	[23]
巢湖	1.02	0.61	1.23	[24]
长荡湖	6.86	1.19	1.73	本研究

### 3 结 语

长荡湖表层沉积物营养盐空间分布特征研究发现: 长荡湖 TN、TP、有机碳和含水率空间分布存在异质性, 且空间变异大; 表层沉积物中 TN 与 TP 具有同源性; 表层沉积物 TN、TP 和有机碳均有不同程度的富集, 且 TN 处于重污染水平, TP 和有机碳污染相对较轻。

为有效控制长荡湖的水质及生态环境的恶化, 建议分区对长荡湖施行治理, 加大长荡湖外源污染控制的力度, 开展工业、农业和生活污染源整治工程, 严格控制丹金溧漕河上游输水中携带的污染负荷, 改善上游输入河流的水质; 在西北湖区栽种芦苇、篙草等水生植物, 形成生态拦截带, 减少污染物

向下游的迁移量。在南部湖区适当开展底泥疏浚工程, 降低该区域底泥淤积量, 防治内源释放产生的水体污染; 加强对东北湖区水环境的保护, 防止其自净能力下降而出现水质恶化。

### 参考文献:

- [1] JIN X, XU Q, HUANG C. Current status and future tendency of lake eutrophication in China[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2005, 48: 948-954.
- [2] HECKY R E, KILHAM P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33: 796-822.
- [3] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(3): 235-242. (ZHAO Haichao, WANG Shengrui, JIAO Lixin, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of different forms of phosphorus in the sediments of Erhai Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(3): 227-234. (in Chinese))
- [4] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1268-1276. (WANG Shuhang, WANG Wenwen, JIANG Xia, et al. Spatial-temporal dynamic changes of nitrogen and phosphorus and difference analysis in water body of Lihu Lake[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1268-1276. (in Chinese))
- [5] 李延鹏, 杨婕, 肖文, 等. 洱海及上游主要湖泊底泥营养盐的研究[J]. 大理学院学报, 2013, 12(4): 58-61. (LI Yanpeng, YANG Jie, XIAO Wen, et al. Research about the nutrients of sedimenin in Erhai Lake and three upstream primary lakes [J]. Journal of Dali University, 2013, 12(4): 58-61. (in Chinese))
- [6] 张亚楠, 马启敏, 岳宗恺, 等. 东昌湖表层沉积物中氮的赋存形态[J]. 环境化学, 2013, 32(3): 459-465. (ZHANG Yanan, MA Qimin, YUE Zongkai, et al. Speciation of nitrogen in surface sediments from Dongchang Lake[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(3): 459-465. (in Chinese))
- [7] MORTIMER C H. Chemical exchanges between sediments and water in the Great Lake-Speculations on probable regulatory mechanism[J]. Limnology and Oceanography, 1971, 16: 387-404.
- [8] 隋少峰, 罗启芳. 武汉东湖底泥释磷特点[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 102-105. (SUI Shaofeng, LUO Qifang. Release character of phosphorus from the sediments of East Lake, Wuhan [J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 102-105. (in Chinese))
- [9] 姜以才, 徐小龙, 姚锁洪. 对长荡湖水生态修复的几点思考[J]. 中国水利, 2009(5): 51-53. (JIANG Yicai, XU

- Xiaolong, YAO Suohong. Ecological recovery of Changdang Lake[J]. China Water Resources, 2009(5): 51-53. (in Chinese))
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [11] MUDRO H A, AZCUEJ. Manual of aquatic sediment sampling[M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1995.
- [12] 李勇, 王超, 朱亮, 等. 长荡湖底泥污染特征及水体富营养化状况[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(2): 38-40. (LI Yong, WANG Chao, ZHU Liang, et al. Characteristics of sediment pollution and eutrophication state of Changdang Lake [J]. Environmental Science Technology, 2005, 28(2): 38-40. (in Chinese))
- [13] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [14] 吕晓霞, 宋金明. 海洋沉积物中氮的形态及其生态学意义[J]. 海洋科学集刊, 2003, 45(5): 101-111. (LYU Xiaoxia, SONG Jinming. Nitrogen forms and their ecological importance in marine sediments [J]. Studia Marina Sinica, 2003, 45(5): 101-111. (in Chinese))
- [15] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 714-719. (ZHU Guangwei, GAO Guang, QIN Boqiang, et al. Geochemical characteristics of phosphorus in sediments of a large shallow lake [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 714-719. (in Chinese))
- [16] 徐玉慧, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 869-873. (XU Yuhui, JIANG Xia, JIN Xiangcan, et al. Seasonal variation of bioavailable phosphorus in sediments in northeast part of Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 869-873. (in Chinese))
- [17] KHADGE N H. Effect of benthic disturbance on geotechnical characteristics of sediments from nodule mining area in the Central India Basin [C]//The Proceeding of the Third (1999) ISOPE Ocean Mining Symposium, Goa, India. Cupertino, CA (USA): International Society of Offshore and Polar Engineers, 1999: 138-144.
- [18] 李文朝. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5): 418-421. (LI Wenchao. Nitrogen accumulation in the sediment of East Taihu Lake and biological sedimentation of aquatic plants [J]. China Environmental Science, 1997, 17(5): 418-421. (in Chinese))
- [19] MACDONALD D D, INGERSOLL C G. A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems [M]. US Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, 2002.
- [20] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 954-960. (YUAN Hezhong, SHEN Ji, LIU Enfeng, et al. Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2010, 31(4): 954-960. (in Chinese))
- [21] 贺冉冉, 高永霞, 王芳, 等. 天目湖水体与沉积物中营养盐时空分布及成因[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 353-360. (HE Ranran, GAO Yongxia, WANG Fang, et al. Spatial-temporal distribution of nutrients and its causation in Tianmu Lake, China [J]. Journal of Agro Environment Science, 2009, 28(2): 353-360. (in Chinese))
- [22] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 961-968. (YU Hui, ZHANG Wenbin, LU Shaoyong, et al. Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation [J]. Environmental Science, 2010, 31(4): 961-968. (in Chinese))
- [23] 李青芹, 霍守亮, 管逢宇, 等. 我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2390-2397. (LI Qingqin, HUO Shouliang, ZAN Fengyu, et al. The distribution of nutrients and particle size, their correlations in surface sediments of different lakes, China [J]. Journal of Agro Environment Science, 2010, 29(12): 2390-2397. (in Chinese))
- [24] 王永华, 刘振宇, 刘伟, 等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(4): 501-506. (WANG Yonghua, LIU Zhenyu, LIU Wei, et al. Distribution and correlation characteristics between pollutants in sediment in Chaohu Lake, China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, 39(4): 501-506. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-07-15 编辑: 徐娟)

