

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.02.007

盐城大纵湖疏浚前后沉积物-水界面环境化学变化

王流通, 刘 凌, 钱 宝, 夏 倩, 陈立尧

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 运用微电极技术, 模拟盐城大纵湖疏浚前后沉积物柱状样, 分析疏浚前后沉积物-水界面约 2 cm 深度的 pH、Eh 和 DO 的剖面数值及变化规律, 探讨底泥疏浚对控制浅水湖泊富营养化的作用。结果表明: 采用传统方法和微电极技术测得的 Eh 和 pH 值结果相差很大, 微电极技术在微尺度下更具有研究意义; 疏浚前后沉积物的含氧层厚度分别为 8 mm 和 13 mm; 微尺度下疏浚前后 pH、Eh 和 DO 值的变化趋势显示疏浚有助于富营养化的控制。

关键词: 微电极; 富营养化; 底泥疏浚; 环境因子; 沉积物-水界面

中图分类号: X143 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2013)02-0033-05

Changes in environmental chemistry at water-sediment interface before and after dredging of Dazong Lake in Yancheng City

WANG Liutong, LIU Ling, QIAN Bao, XIA Qian, CHEN Liyao

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Sediment cores from Dazong Lake in Yancheng City before and after dredging of the lake were simulated using microelectrode technology. The changes in pH, Eh, and DO in the profile of the upper 2-cm surface layer were studied before and after dredging, in order to investigate the effect of sediment dredging on the control of eutrophication in shallow lakes. The results show that there are significant differences in the values of Eh and pH measured by traditional methods and the microelectrode technology, which plays an important role in micro-scale research. The thickness of the oxygenated layer of sediment before and after dredging were 8 mm and 13 mm, respectively, and the changes in pH, Eh, and DO before and after dredging can help control the eutrophication in shallow lakes.

Key words: microelectrode; eutrophication; sediment dredging; environmental factors; sediment-water interface

目前我国大部分湖泊富营养化污染问题严重, 富营养化控制已是目前的研究热点。而底泥疏浚较多的应用在湖泊富营养化治理中, 由于湖泊表层沉积物是一个各种微生物参与、物质交换发生频繁、具有高度生物活性的特殊环境, 因此底泥疏浚肯定会对表层的这些特殊环境产生极大的影响, 而了解疏浚前后表层沉积物 pH、Eh 和 DO 值的变化, 就显现出其特别重要的地球生物化学意义。

20 世纪 70 年代产生的微电极技术, 80 年代在国外被广泛应用, Archer 等^[1]把有机膜玻璃微电极

技术应用于测量深海沉积物剖面的 pH, Revsbech 等^[2]在近海沉积物中开展光合作用研究。随着微电极技术的不断发展改进, 该技术目前在国外被广泛应用^[3-6], 但国内外在浅水湖泊沉积物研究中的应用还不多见^[7-8]。由于微电极技术具有可以原位测量沉积物-水界面、多次进行试验并不会对样品产生很大的扰动等优点, 因此可以运用该技术原位测量底泥环境因子的变化, 从而为底泥疏浚对富营养化治理产生的效果提供参考, 并可以在此基础上深入研究浅水湖泊沉积物-水界面地球生物化学作用。

基金项目: 国家自然科学基金(51279060); 江苏省研究生创新计划项目(CXZZ11-0436)

作者简介: 王流通(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境水文与水资源保护。E-mail: wangliutong@yeah.net

1 研究区概况

大纵湖位于江苏省盐城市西南,是苏北里下河地区最大的湖泊,面积约 30 km²,当地存在大量的围网养殖现象,剩余的饲料、鱼蟹所排废物等加快了湖泊富营养化,湖底淤泥深度较厚,最深处大于 1 m。根据 2011 年 10 月采样资料,水质状况为: $\rho(\text{Chl-a})=23.4 \mu\text{g/L}$, $\rho(\text{TP})=0.18 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TN})=1.02 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})=5.67 \text{ mg/L}$,透明度(SD)为 0.35 m。运用综合营养指数评价方法^[9],对大纵湖富营养化现状进行评价,得出综合营养状态指数 $I_{\text{TL}}=60.17$,对照湖泊营养状态分级标准(表 1),水体处于轻度和中度富营养化边缘状态,如果不注重水体环境的保护,湖泊富营养化污染程度将加剧。研究区及采样点位置见图 1。

表 1 湖泊营养状态分级标准

营养级别	I_{TL} 值范围
贫营养	$0 < I_{\text{TL}} < 30$
中营养	$30 \leq I_{\text{TL}} \leq 50$
轻度富营养	$50 < I_{\text{TL}} \leq 60$
中度富营养	$60 < I_{\text{TL}} \leq 70$
重度富营养	$I_{\text{TL}} > 70$

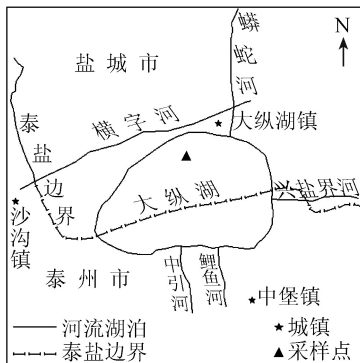


图 1 研究区及采样点位置

2 样品采集及试验

2.1 样品采集及处理

在大纵湖选取采样点(119°49'11"E,33°10'19"N),于 2011 年 10 月在采样点水平面 3 m 范围内无扰动采集 3 个平行柱状样,编号为 A、B、C。取样器采用配有内径 90 mm 有机玻璃管的原位底泥采样与分离分析系统(0423sa, Water & land),柱状样采集后对有机玻璃管底部用不透光锡纸包裹,并对柱状样底部塞子用胶带封牢以防止原位柱状样中途被破坏,在便携式冰箱中 4℃ 条件下保存,4 h 内带回试验室。

对采集的原位沉积柱用虹吸法抽去上层水体,

保存待测。采用上顶法把表层 10 cm 沉积物移入到另一洗净的内径为 90 mm 的有机玻璃管内,制成模拟未疏浚的柱状样,编号为 A₁、B₁ 和 C₁,再切去 20 cm 厚的沉积物,把剩余沉积物(10 cm 长)上顶至另一洗净的有机玻璃管中,制成模拟疏浚 30 cm 的柱状样^[10],编号为 A₂、B₂ 和 C₂。最后用虹吸法沿筒壁注入少量上覆水(经 0.45 μm 滤膜过滤),静置 24 h 稳定后待测。

2.2 试验仪器及步骤

本试验采用微电极系统(MM-METER, Unisense),选用尖端外径为 25 μm 的 pH、Eh 和 DO 电极对沉积物-水界面进行无扰动测定,以 100 μm 深度为步长,测定柱子垂向的 pH、Eh 及 DO 值。

a. pH 电极校正。将参比电极和 pH 微电极头浸入 pH 值分别为 4、7 和 10 的缓冲液中进行三点校正,校正后再回测标准液,观测到测量数据回到标准 pH 值,证明电极完好,校正结束,可以直接测量。

b. Eh 校正值。将 Eh 微电极探头浸入盛有醌氢醌氧化还原缓冲液(pH 分别为 4、7)的烧杯中进行校正。醌氢醌氧化还原缓冲液是在每 1 L 缓冲液中加入 10 g 醌氢醌配置而成的。

c. DO 电极校正。①零校正:将氧电极放入充满零校正溶液中,信号稳定后设浓度为 0 μmol/L,氧电极零校正溶液有多种配制方法,通常用试验室超纯水以 5 L/min 的速率通氮气 5 min 以上,驱除 99.99% 的氧气;②饱和校正:取一定量溶液用泵通空气 5 min 以上,软件自动生成相应的饱和浓度值,则 DO 电极校正结束。对于试验的 3 个平行柱状样分别测量 pH、Eh 及 DO 值,为了提高试验精度,对同一柱子的每个指标测量 3 次后求平均值。

微电极试验结束后,对未疏浚 A₁、B₁ 和疏浚 A₂、B₂ 表层 5 cm 的沉积物用传统方法测量 pH 和 Eh 值,即以 1 cm 厚度分层,称量分层所得沉积物 70 g 放入 100 mL 离心管中离心,A₁ 和 A₂ 离心所得间隙水立即采用便携式多参数测定仪(HACH-sension156, HACH)测量 Eh 及 pH 值,B₁ 和 B₂ 离心所得间隙水用流动注射仪(San++, skalar)测量 N、P 浓度。把未疏浚柱子 C₁ 和疏浚柱子 C₂ 表层 2 cm 沉积物以 1 cm 分层,冻干后用 SMT 分离方法,求出沉积物中各种磷形态含量。试验数据采用 Sigmaplot10.0 处理。

3 试验数据及分析

3.1 疏浚前后表层沉积物 pH、Eh 及 DO 值比较

图 2 中深度为 0 mm 表示沉积物-水分离界面,深度为负数表示在水土分离界面以下。由图 2(a)

可见,疏浚前后表层沉积物中 pH 值变化不大,范围均在 7.3 ~ 8.3 之间,疏浚柱子中深度在 -13 mm 以下 pH 值趋于稳定,为 7.4,未疏浚柱子中 pH 值在深度 -8 mm 以下稳定至 7.3。疏浚柱子的 pH 值略小于未疏浚柱子的 pH 值,均呈弱碱性。未疏浚柱子 pH 值相对较小的原因可能是其中沉积物中含有较多的有机质沉积物,其生物化学作用产生的二氧化碳或有机酸等使 pH 值降低。对比王旭东等^[11]运用微电极研究阶段的变化趋势,再结合本文图 2(c)中 DO 数据,也可得出与本试验一致结果。

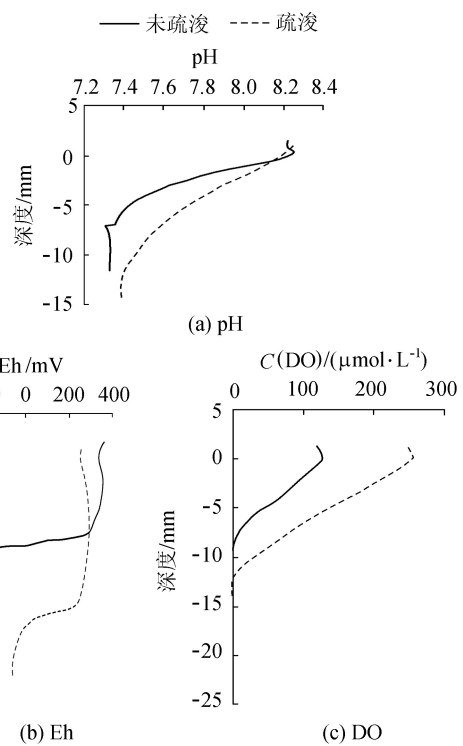


图 2 疏浚前后表层沉积物 pH、Eh 和 DO 值比较

Eh 反映氧化还原反应强度。沉积物中有许多氧化还原体系,如氧体系、铁体系、锰体系、氮体系、硫体系及有机体系等。Eh 值越高,氧化的强度越大;反之,则还原性越强。Eh 值的大小影响沉积物中物质的转化和养分的有效性。由图 2(b)可见,本试验疏浚的 Eh 在 0 ~ -8 mm 深度处一直缓慢增大,最大处可达 291 mV,深度 -8 ~ -16 mm 段缓慢变小,但都处在氧化环境,深度在 -16 mm 处突然减小,深度 -17 mm 处 Eh 值变为零,进入还原环境,之后缓慢变小,深度至 -22 mm 处 Eh 稳定在 -65 mV;未疏浚柱子的 Eh 在深度 0 ~ -5 mm 段缓慢变大,在 -5 ~ -9 mm 段急剧变小至 -300 mV,之后的基本处于稳定。对比疏浚和未疏浚数据,突变的原因可以从图 2(c)中看出, O_2 浓度在这一沉积物层面变为 $0 \mu\text{mol}/\text{L}$,也就是为含氧层和厌氧层的分界面。疏浚和未疏浚柱子 Eh 值变为稳定的深度相差较大,由于 Eh 是多个氧化物与还原物质发生氧化还原的综合结果,

对于水体或沉积物柱子来说,往往存在多个氧化还原电对,是一个相当复杂的体系。沉积物剖面的低氧化还原状态分布的不同,也反映了不同沉积深度存在着有机质的多少以及微生物活动的强弱^[12]。

由图 2(c)可见,疏浚后的 DO 值约为未疏浚 DO 的 2 倍,可能是由于未疏浚沉积物表层中相对于疏浚新生沉积物表层含有较多的有机质和微生物,其分解有机质会消耗大量的 O_2 ,产生一些 CO_2 、 CH_3COOH 等酸性物质使 pH 降低,这在图 2(a)中可以得到证实,此时 pH 值处在变小的过程。另外,从图 2(b)中的 Eh 值疏浚后大于未疏浚,这一点也可看出 DO 最大值的不同,是由于表层有机质分解作用强弱不同。DO 最大值均出现在沉积物-水界面处,原因可能为水土分离界面藻类等微生物在光照条件下可生产出 O_2 。图 2(c)和许昆明等^[13]运用微电极技术所测 DO 变化趋势相似,这也与微电极技术运用在海域^[1-2]的 DO 研究结果是一致的。未疏浚的含氧层和无氧层的分界面深度约为 -8 mm,由于在其上部还有较多的微生物和含氮硫化合物,所以其耗氧会较快、较多,疏浚柱子 DO 浓度值变为零的深度为 -13 mm,未疏浚柱子 DO 浓度值变为零的深度与 Eh 值变为负值的深度大致在同一水平面,而疏浚过后的柱子 Eh 值变为负值的深度大致在 -17 mm,这与 DO 浓度值变为零的深度为 -13 mm 相差较大,导致这种现象的原因可能是由于疏浚后微生物群落的不同和生源物质的减少使得耗氧过程推迟^[14]。

3.2 疏浚前后间隙水的 pH、Eh 值比较

对微电极试验中用过的柱子进行分层,离心分层得到表层沉积物中间隙水,运用传统方法测量间隙水的 pH 和 Eh 值,结果见图 3,分析剖面数值和变化规律,可以看出疏浚后的 pH 和 Eh 值总体大于未疏浚数值,这与运用微电极技术测量疏浚前后得到的变化规律基本一致,并且 pH 和 Eh 两者数值在不同层的变化幅度较大,连续性差。钟继承等^[15]用传统方法对柱子分层所得到的 Eh 值与笔者运用微电

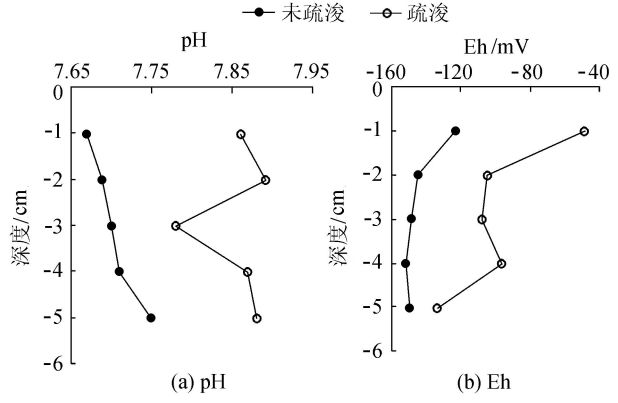


图 3 疏浚前后表层沉积物间隙水的 pH、Eh 值比较

极测量结果趋势一致,但传统测量方法相对于微电极技术存在两点不足之处:①离心间隙水的方法其分层尺度仅为厘米尺度,而微电极技术可以达到微米尺度;②分层测量的方法使样品的 pH 和 Eh 值发生一些不可逆的变化,造成测量结果的不准确。

3.3 疏浚前后氮磷指标值比较

由表 2 可见,疏浚对富营养化控制具有很好的效果,TP、SRP(溶解性正磷酸盐)、DTP(可溶性总磷酸盐)和 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度在上覆水和间隙水中都有不同程度的降低,主要可能是由于上层含有丰富有机物、约 30 cm 厚的沉积物被疏浚。分析 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 等 3 者浓度值可以发现:NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 分别在疏浚前后所占 TN 比例较大,结合微电极测得剖面 pH、DO 及 Eh 值与李志霞等^[16] 研究结果分析,原因可能是由于此时 pH 是 NH₄⁺-N 转化的主要影响因素。

表 2 疏浚前后上覆水和间隙水中氮磷质量浓度

		mg/L					
水体	状态	ρ (TP)	ρ (SRP)	ρ (DTP)	ρ (TN)	ρ (NH ₄ ⁺ -N)	ρ (NO ₃ ⁻ -N)
上覆水	未疏浚	0.6254	0.1802	0.0930	1.7225	0.5924	0.1031
	疏浚	0.2098	0.0600	0.0250	1.0530	0.1677	0.1442
间隙水	未疏浚	2.6598	0.9942	1.4205	5.9450	4.2920	0.2320
	疏浚	1.0342	0.6258	1.0237	3.0674	0.5875	0.1644

由表 3 可见,表层沉积物中 LP(可交换态磷)很活泼,尽管它只占 TP 很小的比例,但常被看作为沉积物柱相互作用重要过程的较为实用的指示物。NAIP(非磷灰结合态磷)与 OP(有机磷)为潜在可释放态磷,在厌氧状况下可以释放供浮游植物生长利用,它经常被用来估计沉积物短期与长期的有效态磷,而有机磷则是代表与有机质结合的磷,它也是潜在可释放的磷形态,本试验中 NAIP 与 OP 在垂直剖面上含量降低较为明显,模拟疏浚能够有效减少沉积物中 NAIP 与 OP 的含量,从而减少沉积物中这两种形态磷的释放风险。因此从表 2、表 3 数据分析可以看出,底泥疏浚对富营养化控制有一定积极作用。

表 3 表层沉积物中氮磷质量比

		mg/kg					
状态	w(TP)	w(IP)	w(OP)	w(NAIP)	w(AP)	w(LP)	
未疏浚	667.4312	427.2614	179.1298	212.6647	235.3630	2.2414	
疏浚	486.9795	396.6148	153.2251	169.7096	182.5440	1.7290	

4 结论

a. 相关研究^[17-19]表明,沉积物-水界面 pH 为弱碱性、Eh 和 DO 为较大值,均可在一定程度上抑制沉积物氮磷的内源释放。运用微电极技术分析可知:盐城大纵湖疏浚前后 pH 值变化范围都在 7.3 ~ 8.3,且疏浚比未疏浚的 pH 值较大,疏浚后的 Eh 和 DO 值都

较未疏浚的大。由 pH、Eh 和 DO 值的变化趋势,可以得出底泥疏浚有助于控制富营养化的结论。

b. 未疏浚柱子的 pH 值变为稳定的沉积物深度、Eh 值为零的沉积物深度和 DO 浓度值变为零的深度一致;疏浚柱子的 pH 变为稳定的沉积物深度与 DO 浓度值变为零的深度一致,但 Eh 值变为零的深度比 DO 浓度值为零的深度和 pH 趋于稳定的深度约深 4 mm,这可能是由于疏浚后新生表层沉积物中生源物质含量较少,并且这时的微生物群落发生变化,沉积物进入还原环境及微生物作用较弱的原因。

c. 在研究沉积物的相关试验中,DO 较少列出,由于技术的限制,很难测出沉积物的含氧厚度。本次试验疏浚和未疏浚的含氧层厚度分别为 13 mm 和 8 mm,疏浚后沉积柱好氧层厚度比疏浚前的要大。

d. 从微电极技术和传统方法的比较中可以看出,不同尺度下两者测得的 pH 和 Eh 值差别很大,由于微电极技术可以进行多次无扰动的测量,同时也可观察微小范围内的变化梯度,更能测得原位的、接近真实的数据,因此采用微电极技术测得的数据在微尺度研究层面上更具有真实意义。

参考文献:

- [1] ARCHER D, EMERSON S, REIMERS C. Dissolution of calcite in deep-sea sediments: pH and O₂ microelectrode results [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53 (11): 2831-2845.
- [2] REVSBECH N P, JORGENSEN B B, BLACKBURN T H. Microelectrode studies of the photosynthesis and O₂, H₂S, and pH profiles of a microbial mat [J]. *Limnol Oceanogr*, 1983, 28(6): 1062-1074.
- [3] BREUER E R, LAW G T W, WOULD S C, et al. Sedimentary oxygen consumption and microdistribution at sites across the Arabian Sea oxygen minimum zone (Pakistan margin) [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(6/7): 296-304.
- [4] SCHREIBER F, POLERECKY L, BEER D D. Nitric oxide microsensor for high spatial resolution measurements in biofilms and sediments [J]. *Analytical Chemistry*, 2008, 80(4): 1152-1158.
- [5] SCHRAMM A, LARSEN L H, REVSBECH N P, et al. Structure and function of a nitrifying biofilm as determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, 62(12): 4641-4647.
- [6] SCHRAMM A. In situ analysis of structure and activity of the nitrifying community in biofilms, aggregates, and

- sediments[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2003, 20(4): 313-333.
- [7] 王建军, 沈吉, 张路, 等. 湖泊沉积物-水界面氧气交换速率的测定及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(4): 474-482. (WANG Jianjun, SHEN Ji, ZHANG Lu, et al. Spatial heterogeneity of oxygen exchange between sediment-water interface in lakes [J]. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(4): 474-482. (in Chinese))
- [8] 商景阁, 张路, 王建军, 等. 中国长足摇蚊幼虫和霍普水丝蚓扰动下沉积物氧气特征分析[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(4): 610-615. (SHANG Jingge, ZHANG Lu, WANG Jianjun, et al. Bioturbation effects of tanytus chinensis and limnodrilus hoffmeisteri on penetration and distribution of sediment oxygen [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(4): 610-615. (in Chinese))
- [9] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47-49. (WANG Mingcui, LIU Xueqin, ZHANG Jianhui, et al. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47-49. (in Chinese))
- [10] 高慧琴, 刘凌, 闫峰, 等. 底泥疏浚对湖泊内源磷释放的短期效应研究[J]. *水资源保护*, 2011, 27(3): 33-37. (GAO Huiqin, LIU Ling, YAN Feng, et al. Short-term effect of sediment dredging on endogenous phosphorus release [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(3): 33-37. (in Chinese))
- [11] 王旭东, 许维, 王磊, 等. 用微电极测定曝气量对 SBR 系统中硝化作用的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(12): 2705-2708. (WANG Xudong, XU Wei, WANG Lei, et al. Effects of aeration quantity on nitrification determined with microelectrode in SBR system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(12): 2705-2708. (in Chinese))
- [12] 赵兴青, 杨柳燕, 尹大强, 等. 不同空间位点沉积物理化性质与微生物多样性垂向分布规律[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3537-3545. (ZHAO Xingqing, YANG Liuyan, YIN Daqiang, et al. Vertical distribution of physicochemical characteristics and the microbial diversity in different spatial sediments samples in Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3537-3545. (in Chinese))
- [13] 许昆明, 张丽平. 适用于测量沉积物 pH 的金属氧化物微电极[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2009, 48(4): 570-575. (XU Kunming, ZHANG Liping. Development of metal oxide microelectrodes for measuring sediment pH [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2009, 48(4): 570-575. (in Chinese))
- [14] 钟继承, 刘国峰, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: IV. 对沉积物微生物活性与群落功能多样性的影响及其意义[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 21-28. (ZHONG Jicheng, LIU Guofeng, FAN Chengxin, et al. Environmental effect of sediment dredging in lake: IV. influences of dredging on microbial activity and functional diversity of microbial community in sediments and its significance [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 21-28. (in Chinese))
- [15] 钟继承, 刘国峰, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: I. 内源磷释放控制作用[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(1): 84-93. (ZHONG Jicheng, LIU Guofeng, FAN Chengxin, et al. Environmental effect of sediment dredging in lake (I): the role of sediment dredging in reducing internal phosphorous release [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1): 84-93. (in Chinese))
- [16] 李志霞, 王磊, 王韬, 等. 自制微电极分析 pH 对硝化反应的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(4): 56-59. (LI Zhixia, WANG Lei, WANG Tao, et al. Effects of pH on nitrification using home made probes [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(4): 56-59. (in Chinese))
- [17] 肖文胜, 杨开, 郭建林. 环境因子对湖泊底泥释磷的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(3): 50-53. (XIAO Wensheng, YANG Kai, GUO Jianlin. Study on effect of environmental factors on phosphorus release from sediments in lake [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(3): 50-53. (in Chinese))
- [18] 于军亭, 张帅, 张志斌, 等. 环境因子对浅水湖泊沉积物中氮释放的影响[J]. *山东建筑大学学报*, 2010, 25(1): 58-61. (YU Junting, ZHANG Shuai, ZHANG Zhibin, et al. Effects of environmental factors on release of sediment nitrogen in shallow lake [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2010, 25(1): 58-61. (in Chinese))
- [19] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响[J]. *湖泊科学*, 1997, 9(4): 337-342. (FAN Chengxi, MORIHIRO Aizaki. Effects of aerobic and anaerobic conditions on exchange of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in lake Kasumigaura [J]. *Journal of Lake Science*, 1997, 9(4): 337-342. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-10-16 编辑: 徐娟)

