

南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究

古小治^{1,2}, 张雷^{1,2}, 柏祥³, 范成新^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 利用平衡式孔隙水采样技术 Pore Water Equilibrators (Peeper) 来获得沉积物的孔隙水剖面, 研究了南四湖湿地芦苇、香蒲沉积物的理化性质对孔隙水营养盐的垂向分布特征及其扩散通量的影响。结果表明, 通过种植芦苇和香蒲, 沉积含水量、孔隙度及交换态的氨氮、硝态氮含量均较无植物的对照区有明显提高。在 2~5 cm 亚表层, 芦苇区和香蒲区孔隙度分别提高了 57.5% 和 34.6%。在沉积物-水界面附近, 孔隙水中氨氮和可溶性磷酸盐浓度随剖面深度的增加呈指数关系增长, 在沉积物 6~8 cm 左右达到最大值。运用 Fick 第一定律对孔隙水营养盐的扩散通量进行估算, 发现芦苇较香蒲更能有效地抑制孔隙水中氨氮的再次释放, 从对照区的最高值 3.57~4.48 mg/(m²·d) 降低 0.90~1.24 mg/(m²·d); 磷酸根扩散通量 3 个区域的数值相差不大, 在 0.02~0.04 mg/(m²·d) 间波动; 硝态氮 3 个区域均表现为上覆水向间隙水中扩散。相关分析结果表明, 沉积物中交换态营养盐含量与孔隙水中含量呈显著正相关关系, 因此控制营养盐的可交换态含量可能是防止湿地沉积物营养盐二次污染的有效途径之一。

关键词 南四湖; 沉积物; 磷形态; 孔隙水; 扩散通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)04-0939-07

Characteristics of Sediments and Pore Water in Lake Nansi Wetland

GU Xiao-zhi^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, BO Xiang³, FAN Cheng-xin¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract In order to investigate the influence of sediment physical and chemical characteristics on the vertical distribution of NH₄⁺, PO₄³⁻ and NO₃⁻ and their diffusive fluxes at sediment-water surface, pore water equilibrators (Peeper) were employed to obtain multiple pore water profiles from reed and bulrush sediments in Lake Nansihu wetland. The results showed that sediment properties in the planted reed and bulrush fields, i. e. water content, porosity, KCl-extractable NH₄⁺ and NO₃⁻ were generally greater than those in seldom vegetation, and the porosity in 2-5 cm depth subsurface sediments increased by 57.5%, 34.6%, respectively. Nutrient profiles of NH₄⁺ and PO₄³⁻ at sediment-water interface exhibited a nearly exponential increase with increasing depth including a concentration maximum at a 8 cm depth, where there was a spike in the NH₄⁺ and PO₄³⁻ concentration. The diffusive flux (J_x) across the sediment-water interface could be calculated from Fick's first law. The flux calculations showed reed could effectively decreased NH₄⁺ diffusive flux, and the NH₄⁺ diffusive flux, the maximum flux 3.57-4.48 mg/(m²·d) in reed field, was nearly three times greater than the minimum flux 0.90-1.24 mg/(m²·d) in seldom vegetation. However, there was a narrow PO₄³⁻ flux range from 0.02 to 0.04 mg/(m²·d) in three fields while NO₃⁻ concentration gradient showed an opposite pattern and diffusive flux occurred in one direction from the overlying bottom water to the sediment pore water. The correlative results suggested that extractable nutrient contents in sediments correlated with pore water content, therefore, controlling extractable nutrient contents appeared to a viable measure to avoid nutrient recontamination to overlying water in wetlands.

Key words Lake Nansi; sediment; phosphorus specie; pore water; diffusive flux

南四湖是我国重要的淡水湖泊之一, 是山东省重要水源地, 南四湖为我国南水北调工程东线必经通道, 并担负着关键的调蓄功能, 其水质对湖区工农业生产、生态及南水北调的水质具有重大的影响。沉积物是湖泊水体的营养主要储存库, 在一定条件下, 底泥中营养盐(如 N、P 等)通过扩散、对流、沉积物再悬浮等过程向上覆水体释放。当外源磷输入得到有效控制后, 湖泊沉积物内源氮磷释放将成为影响湖泊富营养化进程的关键因素^[1,2]。有关湖泊水文条

件及沉积物性质对沉积物氮磷的释放规律研究较多^[3~6]。而湖泊湿地植物对沉积物营养盐释放的贡献鲜见报道。本研究通过在湿地现场条件下采用专用平衡式孔隙水采样器 Pore Water Equilibrators

收稿日期 2009-06-22; 修订日期 2009-08-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC10B03); 国家自然科学基金重点项目(40730528); 国家高技术研究发展计划(863)项目(200560101005)

作者简介: 古小治(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊污染与湿地修复, E-mail: guxiaozhi@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cxf@niglas.ac.cn

(Peeper)^[5,6],获得较高分辨率的原位孔隙水剖面,阐述湿地植物对沉积物的影响以及沉积物-上覆水界面的营养盐的扩散通量,以期达到湖泊湿地在净化水质的同时更加有效地控制营养盐的二次污染。

1 材料与方法

1.1 Peeper 结构简介

Peeper 主体是由一系列小室组成,小室两侧覆盖一层渗析膜,室内预先封装去离子水,利用渗析膜过滤的特性,使膜两侧水体(如去离子水和孔隙水)中一些可溶离子和分子交换达到平衡。Peeper 制作材料为有机玻璃,36 个小室并行排列,间隔 1 cm,每一小室体积约为 6.4 mL,孔径为 0.45 μm 的渗析膜,具生物惰性,使用时用双面夹板固定于采样器主体板上。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 采样点的选择

本研究选择南四湖人工湿地植物优势种芦苇和香蒲为对象,采样点位于新薛河下游入湖口附近,具体如表 1 所示。

表 1 采样点位置

Table 1 Geographic coordinates of the sampling sites

样点代号	位置描述	经纬度
芦苇区	常年大片芦苇	117.14832°E, 34.76782°N
香蒲区	常年大片香蒲	117.14828°E, 32.76770°N
对照区	常年无水草区	117.14918°E, 34.76770°N

1.2.2 沉积物的采集

利用装有有机玻璃管(φ=85 mm, h=600 mm)的柱状采泥器采集泥样,每点采集 3 根平行样,返回实验室进行分层。分层泥样放置在阴凉处,于室温下自然阴干,除去植物和贝类等残体,研磨混匀,过 100 目筛,备用。

1.2.3 孔隙水的采集与分析

用自制 Peeper 投放器^[7]向水下垂直投放 Peeper 并插入底泥至预定深度。自 Peeper 投放时间计起,平衡 30 d,从泥中拔出 Peeper,即刻用低压水枪冲洗其单面所附泥块,并用吸水纸吸干膜外部湖水,立即用移液枪穿孔抽取适量体积孔隙水装入具塞小瓶中,2 h 内带回实验室,水样过 GF/F 滤膜后用 Skalar 流动分析仪(荷兰)进行 PO₄³⁻、NH₄⁺、NO₃⁻的分析。

1.2.4 沉积物性质分析

(1) 水分含量、容重、空隙率的测定
水分测得采用烘干法在 105℃ 在 105℃ 下烘 6

h,含水率为沉积物烘干前后质量差值与原有湿沉积物质量的比值。湿容重采用环刀法测定。利用柱状采样器,采集表层沉积物柱样,保持原始结构不被破坏,将湿底泥填满金属小环(φ=1.75 cm, h=0.9 cm),容重为湿沉积物的质量与小环体积的比值。孔隙度按下式计算^[8]:

$$\text{孔隙度}(\%) = \frac{[W_w(g) - W_d(g)] \times 100\%}{[W_w(g) - W_d(g)] + W_d(g)/2.5}$$

式中, W_w 为沉积物鲜重; W_d 为沉积物干重; 2.5 为表层沉积物的平均密度与水密度的比值。

(2) 总碳(TC)和总有机碳(TOC)的测定
测定采样 TOC 分析仪(LiquiTOC II, 德国 Elementar 公司生产)。

(3) 沉积物氨氮、硝态氮、总氮、总磷及磷形态的测定

沉积物硝态氮、氨氮含量测定:称取相当于 10 g 烘干土的新鲜沉积物,2 mol/L KCl 溶液浸提(液:土=5:1),振荡 30 min,过滤后紫外分光光度法(210 nm 比色)测定浸提液中硝态氮含量,纳氏比色法测定浸提液中氨氮含量^[9]。总氮的测定为碱性过硫酸钾消解后在 210 nm 比色分光光度法测定。磷形态测定采用 Emil 等方法测定^[10],将沉积物磷分为可交换态磷(LP)、铁磷(BD-P)、铝磷(NaOH-P)、钙磷(HCl-P)具体见文献[3]。总磷的测定采用 SMT 法,具体见文献[11]。

1.2.5 孔隙水扩散通量模型

如果只考虑沉积物-上覆水界面处的营养盐交换通量,通过表层沉积物的氮、磷扩散通量就可运用 Fick 第一定律来获得沉积物-上覆水界面处的交换通量^[12,13]:

$$F = \varphi_0 D_s \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0}$$

式中, F 为沉积物-上覆水界面扩散通量, φ_0 为表层沉积物的孔隙度, $\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0}$ 为沉积物-上覆水界面的浓度梯度。 D_s 为考虑了沉积物弯曲效应的实际分子扩散系数。Ullman 等^[14]曾经给出了真实扩散系数 D_s 与孔隙度 φ 之间的经验关系式:

$$D_s = \varphi D_0 \quad (\varphi < 0.7)$$

$$D_s = \varphi^2 D_0 \quad (\varphi > 0.7)$$

式中, D_0 为无限稀释溶液的理想扩散系数,在 25℃, PO₄³⁻, $D_0 = 6.12 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$; NO₃⁻, $D_0 = 19.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$; NH₄⁺-N, $D_0 = 17.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ^[15]。通过测定表层沉积物(0~7 cm)的平均孔隙度 φ 得到 D_s 。

的数值.

2 结果与讨论

2.1 剖面沉积物的特性

南四湖湿地芦苇、香蒲及对照区沉积物的基本性质见表 2,在芦苇和香蒲区沉积物水分含量明显高于相应的对照区,孔隙度和湿容重的数值表现出类似的规律.0~10 cm 表层沉积物的含水量均在 40% 以上,相应孔隙度高于 50%,尤其是 2~5 cm 亚表层,芦苇区和香蒲区孔隙度分别比对照高出 57.5% 和 34.6%,这对孔隙水营养盐的扩散(D_s)起着至关重要的作用.究其原因这可能与芦苇和香蒲

根系及根系附近生物活动有关^[16].芦苇和香蒲区总碳(TC)和总有机碳(TOC)在均高于无植物的对照区,尤其是 TOC 的数值表现最为明显.在 10~20 cm TOC 的值达到最大,该层是芦苇和香蒲根系最为发达的区域,根系的分泌物及多年来腐烂的根系对有机碳的贡献不可忽视.另外从整个剖面的分布特征来看,在 3 个研究区中该层次氮氮的浓度也最大,无植物生长的对照区可交换态氮氮明显低于芦苇区和香蒲区.而硝态氮在整个剖面的分布表现规律性最强,表层最高,沿剖面向下逐步降低,而总氮含量与可交换态硝态氮分布特征具有类似的规律.

2.2 孔隙水营养盐的分布特征

表 2 南四湖湿地沉积物的基本性质

Table 2 Primary properties of the Lake Nansihu sediments									
名称	剖面/cm	水分含量 /%	湿容重 /g·cm ⁻³	空隙度 φ /%	TOC /%	TC /%	NH ₄ ⁺ /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·kg ⁻¹	TN /mg·kg ⁻¹
芦苇	0~2	59.24	1.463	78.42	1.992	2.201	1.892	21.06	1.403
	2~5	53.21	1.522	73.96	2.061	1.972	1.962	18.43	1.350
	5~10	43.09	1.671	65.43	2.382	2.233	2.821	16.05	1.434
	10~15	39.17	1.754	61.68	2.623	2.934	2.090	15.43	1.655
	15~20	35.90	1.743	58.34	2.472	2.274	1.912	12.09	1.328
	20~30	34.87	1.821	56.45	2.120	3.013	3.221	12.89	1.067
香蒲	0~2	54.67	1.524	75.09	1.662	2.353	6.861	18.09	1.474
	2~5	40.73	1.683	63.21	2.302	2.283	9.751	15.97	1.550
	5~10	32.69	1.732	54.84	1.503	2.002	7.900	14.76	1.644
	10~15	30.77	1.783	52.63	2.243	2.273	6.562	12.78	1.540
	15~20	30.94	1.782	52.83	1.902	2.743	1.313	12.45	1.230
	20~30	29.06	1.831	46.78	1.361	3.052	0.432	10.54	1.100
对照	0~2	42.39	1.650	64.78	1.612	2.592	0.472	14.09	1.402
	2~5	26.14	1.781	46.95	1.743	2.753	0.622	13.57	1.221
	5~10	24.02	1.813	44.15	1.472	2.684	1.892	12.78	1.030
	10~15	24.85	1.872	45.25	1.413	1.812	1.961	11.64	1.063
	15~20	22.98	1.894	43.56	1.033	2.480	2.802	11.80	942
	20~30	22.08	1.901	42.37	1.121	1.872	2.091	10.76	1.119

芦苇区、香蒲区及对照区沉积物孔隙水的分布如图 1 所示,总体来看,氮氮和磷酸根孔隙水高于上覆水,而硝态氮上覆水中含量高于孔隙水.在 3 个研究区域,在沉积物-上覆水界面附近,随着剖面深度的增加,氮氮和可溶性磷酸盐浓度成指数增长,在沉积物 6~8 cm 左右达到最大值,而后基本趋于稳定.硝态氮则刚好相反,随深度增加硝态氮那的浓度呈指数递减,在剖面沉积物的 10 cm 左右基本趋于稳定.把孔隙水营养盐的浓度和剖面深度进行曲线拟合(见图 2),发现两者符合 $c_x = c_0 \times \exp(\alpha x)$ 的关系,其中 c_x 为沉积物 x cm 深度处营养盐的浓度 c_0 和 α 为常数, $-1 < \alpha < 1$, x 为剖面深度.从图 2 的结果来看,芦苇区、香蒲区及对照沉积物孔隙水中营养盐浓度(纵坐标)与沉积物深度 x (横坐标)呈明

显的指数关系分布,拟合方程相关系数 R^2 均大于 0.9,拟合效果较为理想.这与 Cermelj 等^[17]的研究结果相似.利用 dc/dx 求导,可得出沉积物-水界面附近磷酸根、氮氮及硝态氮的浓度梯度的数值.具体见表 3.

2.3 湿地沉积物-上覆水界面营养盐的扩散通量

湿地沉积物-上覆水界面是指湿地固体沉积物与孔隙水和上覆水的界面,在自然湿地界面上,由于湿地水流速度极低,界面上下浓度梯度引起的扩散转移过程是营养盐主要的迁移过程.离子在沉积物-水界面的扩散服从 Fick 第一定律,计算结果如表 3 所示.从表 3 中的数值可看出,氮氮和磷酸根表现为沉积物向上覆水释放营养盐,而上覆水中的硝态氮则被沉积物吸附固定.香蒲区沉积物对硝态氮吸附

通量为 $-0.64 \sim -0.83 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 约占对照区的 50%. 磷酸根扩散通量 3 个区域的数值相差不大, 在 $0.02 \sim 0.04 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 间波动. 氨氮的扩散通量芦苇区最低, 从对照区的最高值 $3.57 \sim 4.48 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降低 $0.90 \sim 1.24 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 从表 3 的数据来看, 芦苇区、香蒲区及对照区他们的孔隙度 φ 和实际扩散系数 D_s 相差不大, 而三者的浓度梯度尤其是氨氮变化较大, 从对照区的 $0.23 \sim 1.8$ 倍波

动, 这对离子的扩散通量的大小起了决定性的作用^[18, 19]. 从表 3 扩散通量 F 的数值来看, dc/dx 和 F 的变化趋势一致. 另外从图 1 孔隙水营养盐含量的具体数值来看, 芦苇区孔隙水中氨氮和磷酸根的浓度远低于对照区, 另外界面附近氨氮和磷酸根的浓度梯度 dc/dx 也低于对照区, 而香蒲区则刚好相反. 故在两者离子实际扩散系数(D_s)相差不大的情况下, 浓度梯度成为最主要的决定因素.

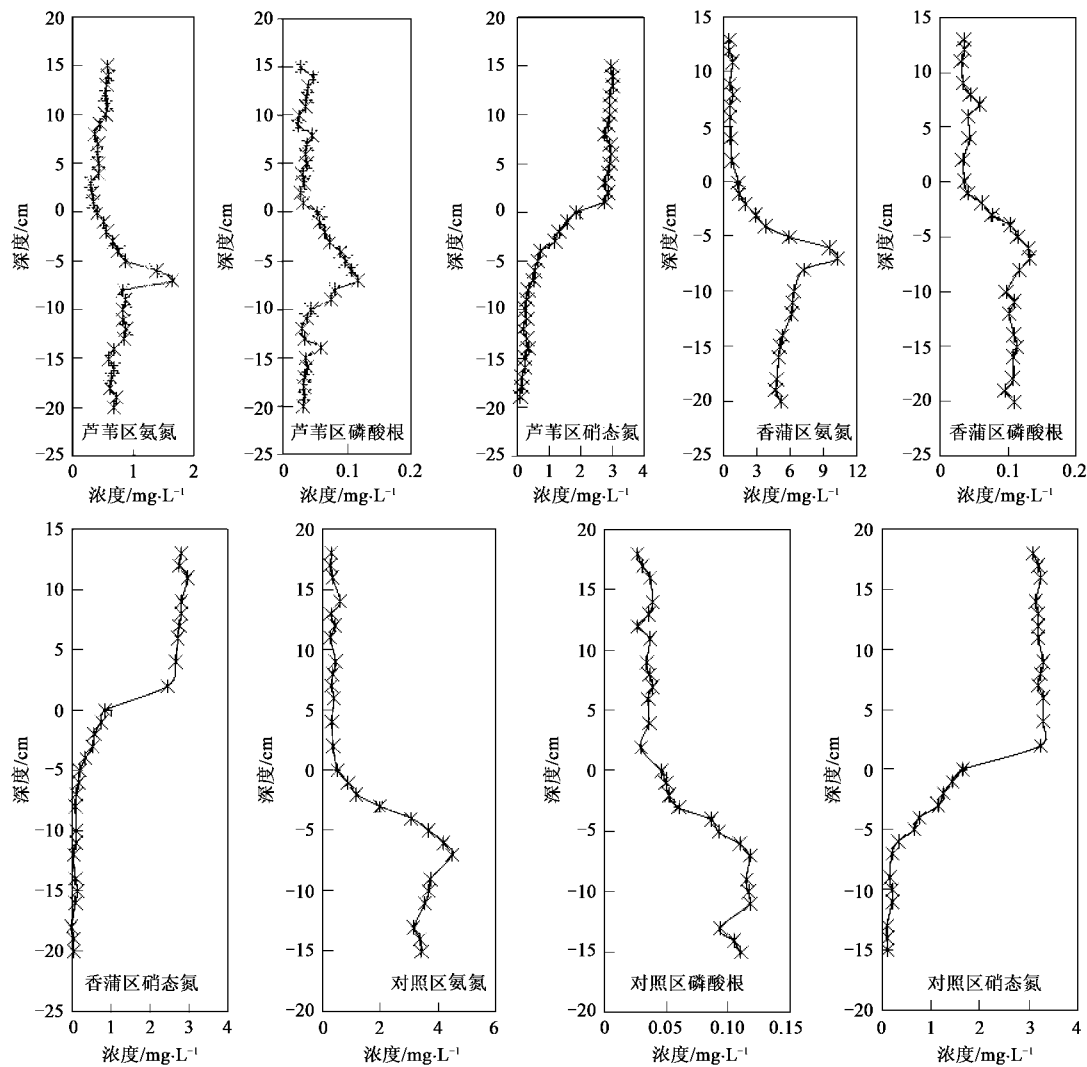


图 1 南四湖湿地沉积物孔隙水 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 P 、 NO_3^- 的垂向分布

Fig. 1 Vertical distribution of NH_4^+ , PO_4^{3-} , P , NO_3^- in the pore water of Lake Nansihu wetland

2.4 孔隙水营养盐和沉积物的关系

磷的地球化学形态是判别沉积物中磷的迁移能力、生态效应的重要参数^[20]. 为了进一步了解剖面孔隙水中可溶性磷与沉积物磷的关系, 将沉积物盐剖面分为 6 层, 分别测定了 3 个实验区沉积物各形态的磷组分, 具体见表 4. 从表 4 数据可看出,

NH_4Cl 可提取态磷占总磷的 $0.4\% \sim 1.5\%$, 基本特征表现为沉积物中层含量高, 表层和底层含量相对低的规律. 另外剖面 NH_4Cl 可提取态磷的最高值随剖面湿地植物根系主要分布层次不同而不同. 芦苇可提取态磷最大值在亚表层的 $2 \sim 5 \text{ cm}$, 香蒲由于根系分布略深, 提取态磷的最大值在 $5 \sim 10 \text{ cm}$. 将

NH_4Cl 提取态磷与孔隙水中的磷进行相关性分析, 相关系数 $R^2 = 0.984$, $p < 0.01$, 呈极显著相关. 朱广伟等^[21] 研究发现长江中下游湖泊沉积物交换态磷与上覆水中含量也呈显著的正相关关系. 将沉积物其它的磷组分进行连续提取, 分别得到了 BD 提取态磷(铁磷)、NaOH 提取态磷(铝磷)、HCl 提取态磷(钙磷和一部分有机磷)及总磷. 从表 4 所示数据看, BD 和 NaOH 提取的铝磷和铁磷在南四湖湿地沉积物中分别占总磷 10% 左右, 而 HCl 提取态磷则占到总磷的 29% ~ 73% 不等. 将剖面孔隙水中的可溶

性磷与沉积物中的磷组分进行相关分析, 从表 5 可看出 NH_4Cl 提取态磷与 HCl 提取态磷也成显著性相关, 这说明 HCl 提取态磷是交换态磷的主要的潜在性来源^[22-24]. NaOH 提取态磷与 HCl 提取态磷也呈显著的正相关关系, 这暗示 NaOH 提取态磷(铝磷)在一定条件下也可成为 NH_4Cl 提取态磷的一个重要来源. 这与 Spear 等^[25] 研究结果一致. 另外表 5 数据显示, 孔隙水中可溶性磷与 HCl 提取态磷呈显著性相关, 这可能是交换态磷与 HCl 提取态磷的相关性的间接结果.

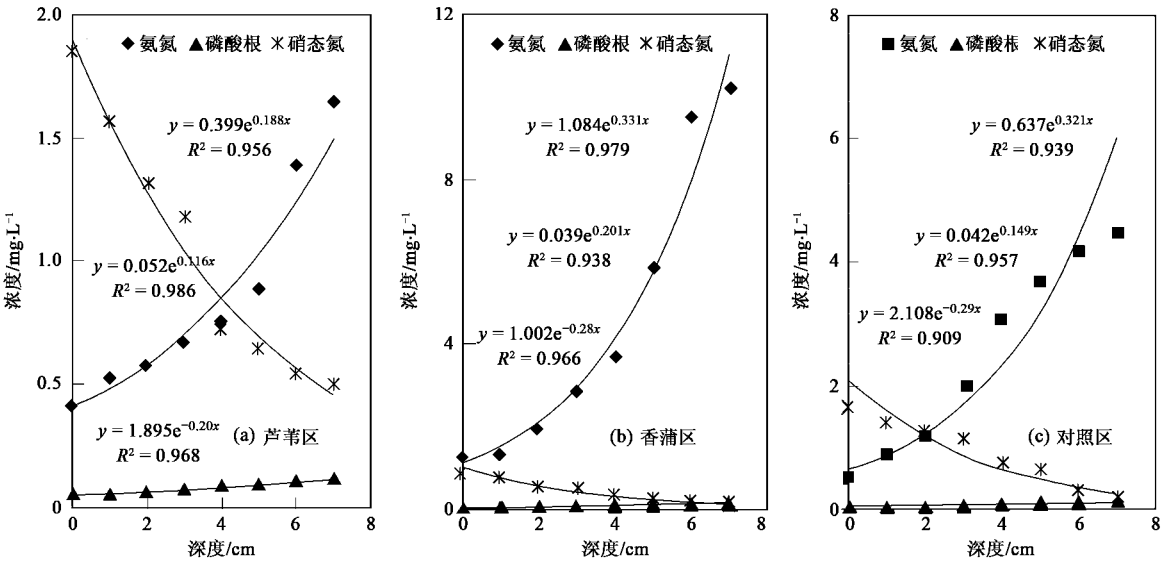


图 2 沉积物-水界面附近孔隙水中 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 的浓度分布特征

Fig. 2 Characteristics of NH_4^+ , PO_4^{3-} , NO_3^- levels at sediment-water interface

表 3 湿地沉积物-水界面 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 的扩散通量

Table 3 Diffusive fluxes at the sediment-water interface of PO_4^{3-} , NH_4^+ and NO_3^-

名称	营养盐	拟合曲线	R^2	dc/dx / $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$	φ_0 /%	$D_0 \times 10^{-6}$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$D_s \times 10^{-6}$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	t / $^{\circ}\text{C}$	F / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
芦苇	氨氮	$y = 0.399e^{0.188x}$	0.956	0.145	78.42 ± 4.14	17.60	$9.71 \sim 12.00$	22.35	$0.90 \sim 1.24$
	磷酸根	$y = 0.052e^{0.116x}$	0.986	0.009	78.42 ± 4.14	6.12	$3.38 \sim 4.17$	22.35	$0.02 \sim 0.03$
	硝态氮	$y = 1.895e^{-0.20x}$	0.968	-0.178	78.42 ± 4.14	19.00	$10.48 \sim 12.95$	22.35	$-1.20 \sim -1.65$
香蒲	氨氮	$y = 1.084e^{0.331x}$	0.979	1.143	75.09 ± 3.25	17.60	$9.08 \sim 10.80$	25.09	$6.44 \sim 8.36$
	磷酸根	$y = 0.039e^{0.201x}$	0.938	0.016	75.09 ± 3.25	6.12	$3.16 \sim 3.76$	25.09	$0.03 \sim 0.04$
	硝态氮	$y = 1.002e^{-0.28x}$	0.966	-0.105	75.09 ± 3.25	19.00	$9.81 \sim 11.66$	25.09	$-0.64 \sim -0.83$
对照	氨氮	$y = 0.637e^{0.321x}$	0.939	0.629	64.78 ± 3.67	17.60	$10.76 \sim 12.05$	23.07	$3.57 \sim 4.48$
	磷酸根	$y = 0.042e^{0.149x}$	0.957	0.011	64.78 ± 3.67	6.12	$3.74 \sim 4.19$	23.0	$0.02 \sim 0.03$
	硝态氮	$y = 2.108e^{-0.29x}$	0.909	-0.222	64.78 ± 3.67	19.00	$11.61 \sim 13.01$	23.07	$-1.36 \sim -1.70$

1) 实验中采集孔隙水的平均温度均在 25℃ 左右, 所以取 25℃ 时无限稀释溶液中的分子扩散系数 D_0 ; 2) 表中 dc/dx 和 F 的数值为负表示离子由上覆水向间孔隙水扩散; 3) φ_0 为平均值 $\pm$ 标准偏差, 样本数 $n = 3$, 依据 φ 的值得出相应的 D_s 和 F 的取值范围

将孔隙水中的氨氮和硝态氮与沉积物中 KCl 提取态含量进行相关性分析, 结果发现孔隙水中氨氮含量与提取态氨氮呈极显著相关, $R^2 = 0.744$, $p =$

0.001 ; 硝态氮也呈显著相关, $R^2 = 0.594$, $p = 0.02$. 这说明了沉积物中交换态营养盐是孔隙水中可溶性氮一个重要来源.

表 4 南四湖湿地不同植被区沉积物磷形态的垂向分布¹⁾

Table 4 Vertical distribution of sediment phosphorus species of Lake Nansihu wetland

名称	剖面 /cm	LP /mg·kg ⁻¹	占 TP 比 率/%	BD-P /mg·kg ⁻¹	占 TP 比 率/%	NaOH-P /mg·kg ⁻¹	占 TP 比 率/%	HCl-P /mg·kg ⁻¹	占 TP 比 率/%	TP /mg·kg ⁻¹
芦苇	0~2	2.49	0.36	64.52	9.42	25.96	3.79	228.03	33.29	685.00
	2~5	5.70	1.15	70.40	14.15	27.00	5.43	155.25	31.19	497.68
	5~10	2.49	0.47	68.75	12.84	24.46	4.57	181.47	33.89	535.43
	10~15	2.28	0.43	62.15	11.79	14.50	2.75	154.80	29.36	527.18
	15~20	2.11	0.44	59.95	12.64	9.50	2.00	118.35	24.96	474.25
	20~30	2.92	0.85	60.16	17.45	40.63	11.78	203.91	59.14	344.78
香蒲	0~2	2.27	0.42	57.12	10.64	28.85	5.37	177.84	33.13	536.71
	2~5	4.59	0.85	66.36	12.32	42.93	7.97	221.09	41.04	538.66
	5~10	6.03	1.11	46.63	8.59	33.15	6.11	278.32	51.27	542.84
	10~15	5.92	1.26	46.98	10.00	33.33	7.09	249.84	53.17	469.89
	15~20	1.70	0.41	50.09	12.12	26.34	6.37	89.20	21.58	413.39
	20~30	2.50	0.64	28.70	7.34	53.26	13.63	284.67	72.83	390.85
对照	0~2	2.39	0.62	24.66	6.37	41.81	10.81	114.83	29.68	386.91
	2~5	2.60	0.67	28.65	7.39	59.90	15.46	232.03	59.90	387.37
	5~10	6.02	1.59	35.14	9.26	41.67	10.98	280.42	73.89	379.53
	10~15	6.08	1.44	29.62	7.01	50.96	12.06	243.61	57.67	422.42
	15~20	1.70	0.48	23.20	6.51	43.36	12.16	267.54	75.06	356.44
	20~30	2.50	0.50	37.02	7.33	45.19	8.95	240.14	47.57	504.77

1) LP 表示用 pH 为 7 的 1 mol/L NH₄Cl 的磷组分, BD-P 表示用 0.11 mol/L Na₂O₄/NaHCO₃ 的磷组分, NaOH-P 表示用 0.1 mol/L NaOH 提取的磷组分, HCl-P 表示用 0.5 mol/L 提取的磷组分, 具体见文献[10]

表 5 孔隙水中 PO₄³⁻-P 浓度同沉积物各磷形态含量的对应关系¹⁾

Table 5 Relationships of PO₄³⁻-P concentrations in interstitial waters with different phosphorus species contents in sediments

因子	PO ₄ ³⁻ -P	NH ₄ Cl-P	HCl-P	NaOH-P	BD-P	TP-P
PO ₄ ³⁻ -P	1.000					
NH ₄ Cl-P	0.981**	1.000				
HCl-P	0.637*	0.576*	1.000			
NaOH-P	0.388	0.279	0.563*	1.000		
BD-P	-0.150	-0.032	-0.209	-0.459	1.000	
TP-P	0.083	0.031	0.406	0.040	0.272	1.000

1) * 表示显著性水平 α=0.05, ** 表示显著性水平 α=0.01, n=13

3 结论

通过种植芦苇和香蒲,湿地沉积物的物理化学特性(孔隙度、含水量、总碳、总有机碳及交换态氮、硝态氮含量)均明显改善.沉积物中 NH₄Cl 提取态磷是孔隙水中磷酸盐的最主要的来源,而 NaOH 提取态磷和 HCl 提取态磷在一定条件下可转化为 NH₄Cl 提取态磷,进而间接成为孔隙水中磷酸盐的另一个来源.通过对原位孔隙水进行分析,发现芦苇能有效控制沉积物中氮和磷酸根的再次释放,而香蒲效果不明显,甚至出现氮和磷酸根释放通量远高于对照和芦苇的现象.沉积物关于此现象及原因还需进一步研究.

参考文献:

[1] 范成新,张路,王建军,等.湖泊底泥疏浚对内源释放影响的

过程与机理[J].科学通报,2004,49(15):1523-1528.
[2] 秦伯强,朱广伟,张路,等.大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J].中国科学(D辑):地球科学,2005,35(S2):33-37.
[3] 李宝,丁士明,范成新,等.滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J].环境科学,2008,29(1):114-120.
[4] 周来,冯启言,王华,等.南四湖表层底泥磷的化学形态及其释放规律[J].环境科学与技术,2007,30(6):37-39.
[5] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release[J]. Hydrobiologia, 2007, 584: 37-48.
[6] Babu K N, Ouseph P P, Padmalal D. Interstitial water-sediment geochemistry of N, P and Fe and its response to overlying waters of tropical estuaries: a case from the southwest coast of India[J]. Environ Geol, 2000, 39(6): 633-640.
[7] 范成新.孔隙水采样器水下投放装置[P].中国专利: ZL02263161.5, 2003.05.28.
[8] Noel R U, Christian D, Bernhard W. Solute transfer across the

sediment surface of a eutrophic lake :I. Pore water profiles from dialysis samplers [J]. Aquat Sci , 1997 , **59** : 1-25.

[9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京 : 中国农业科技出版社 , 1999.

[10] Emil R , Eugene B W. Aluminum dose required to inactivate phosphate in lake sediments [J]. Water Research , 1998 , **32** : 2969-2976.

[11] Ruban V ,Brigault S ,Demare D , *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir ,France [J]. J Environ Monitor , 1999 , **1**(4) : 403-407.

[12] Peter R T , Graeme E B , Simon C A. Pore water sampling with sediment peepers [J]. Trends in Analytical Chemistry , 1995 , **14**(6) : 250-256.

[13] Alakendra N R. Spatial and seasonal variations in depth profile of trace metals in saltmarsh sediments from Sapelo Island , Georgia , USA [J]. Estuarine , Coastal and Shelf Science , 2007 , **72** : 675-689.

[14] Ullman W J ,Sandstron M W. Dissolved nutrient flux from the nearshore sediments of Bowling Green Bay ,Central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. Esturine , Coastal and Shelf Science , 1987 , **24**(3) : 289-303.

[15] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学 [M]. 北京 : 海洋出版社 , 1997. 6-8.

[16] 王蓓 ,张旭 ,李广贺 ,等. 芦苇根系对土壤中石油污染物纵向迁移转化的影响 [J]. 环境科学学报 , 2007 , **27**(8) : 1282-1287.

[17] Cermelj B , Bertuzzi A , Faganeli J. Modeling of pore water nutrient distribution and fluxes in shallow coastal waters(gulf of Trieste ,northern Adriatic) [J]. Water ,Air and Soil Pollution , 1997 , **99** : 435-444.

[18] Krom M D , Berner R A. The diffusion coefficients of sulfate , ammonium and phosphate ions in anoxic marine sediments [J]. Limnol Oceanogr , 1980 , **25**(2) : 327-337.

[19] 范成新 ,张路 ,杨龙元 ,等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟 [J]. 海洋与湖沼 , 2002 , **33**(4) : 370-378.

[20] 付永清 ,周易勇. 沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义 [J]. 湖泊科学 , 1999 , **11**(4) : 376-381.

[21] 朱广伟 ,秦伯强 ,高光 ,等. 长江中下游浅水湖泊水相磷的关系 [J]. 环境科学学报 , 2004 , **24**(3) : 382-387.

[22] 王圣瑞 ,金相灿 ,赵海超 ,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征 [J]. 环境科学 , 2005 , **26**(3) : 38-43.

[23] 王超 ,邹丽敏 ,王沛芳 ,等. 典型城市浅水湖泊沉积物中磷与铁的形态分布及相关关系 [J]. 环境科学 , 2008 , **29**(12) : 3400-3404.

[24] 张志斌 ,张学杨 ,张波 ,等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征 [J]. 环境科学 , 2009 , **30**(5) : 1345-1350.

[25] Spears B M , Carvalho L , Paterson D M. Phosphorus partitioning in a shallow lake : implications for water quality management [J]. Water and Environment Journal , 2007 , **21** : 47-53.