

沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响

周小宁, 王圣瑞, 金相灿*

(中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012)

摘要: 在室内模拟条件下研究了沉水植物黑藻对沉积物有机及无机磷形态及潜在可交换性磷的影响。结果表明: ①黑藻可显著降低沉积物的有机质、阳离子代换量及总磷($p < 0.05$), 对沉积物中的磷起到活化的作用。②黑藻对沉积物无机磷形态中的 NaOH-P 有极显著影响($p < 0.01$), 对有机磷形态中的活性有机磷有一定影响($p < 0.1$), 而对其他形态磷的影响没有达到显著水平。③有植物组沉积物的潜在可交换性磷的量增大了 11.5%, 而对照组沉积物的却减少了 61.0%。两者变化的方向截然相反, 而且变化的程度也存在较大差异。这说明黑藻的作用增大了沉积物中潜在可交换性磷的量。

关键词: 沉积物; 沉水植物; 黑藻; 磷形态; 潜在可交换性磷

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2421-05

Influences of Submerged Vegetation *Hydrilla verticillata* on the Forms of Inorganic and Organic Phosphorus and Potentially Exchangeable Phosphate in Sediments

ZHOU Xiao-ning, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can

(Research Center for Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The influences of submerged vegetation *Hydrilla verticillata* on forms of inorganic and organic phosphorous forms and potentially exchangeable phosphate in sediments were investigated under indoors simulating condition. The results show that:

① *Hydrilla verticillata* can decrease the amount of OM, CEC and TP evidently ($p < 0.05$) and activate the phosphate in sediments. ② In the forms of inorganic phosphorus, the NaOH-P was significantly influenced ($p < 0.01$) and the labile organic P in the forms of organic P was influenced to a certainty ($p < 0.1$), while no significant differences were made to the other forms of phosphorous. ③ *Hydrilla verticillata* can affect the amount of potentially exchangeable phosphate of the sediments, which increased 11.5% for the vegetation group and decreased 61.0% for the control group during the period of the experiments. The change orientation was oppositional and the degree of change was quite different. This testified that *Hydrilla verticillata* could increase the amount of potentially exchangeable phosphate of sediments.

Key words: sediments; submerged vegetation; *Hydrilla verticillata*; phosphorus forms; potentially exchangeable phosphate

磷作为水生生物所必需的大量营养元素, 已被认为是影响湖泊富营养化的关键性限制因素之一^[1]。富营养化湖泊沉积物中通常含有丰富的磷, 在外源磷输入得到控制的情况下, 沉积物中的磷可通过吸附-解吸等作用影响上覆水体中磷的浓度。因此, 磷在沉积物-水界面的循环、迁移、转化等行为对于湖泊的营养水平起着不可忽视的作用^[2]。然而, 目前的绝大多数研究是基于沉积物-水界面“二相结构”来开展的^[3], 对沉水植物在这两相间的存在与作用考虑较少。新近的研究表明^[4-6], 沉水植物对于湖泊的磷营养状态具有重要作用, 但是目前尚未清楚其中的作用机理。基于上述原因本实验选择沉水植物黑藻在模拟条件下研究了沉积物的磷形态及潜在可交换性磷等方面的变化以揭示沉水植物黑藻与沉积物之间相互作用的机制, 为富营养化湖泊的

治理及生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计与样品的采集

黑藻 [*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle] 又名轮叶黑藻, 多年生沉水草本植物, 属水鳖科黑藻属, 喜生长在湖泊、池沼、水沟及水流缓慢的河中, 适应性强, 生长迅速, 繁殖快, 是富营养化湖泊生态修复的候选植物之一。本实验所用黑藻取自北京房山一渡拒马河的野生黑藻。初始沉积物取自中国环境科学研究院内湖泊。沉积物取回后先风干, 并过筛去除

收稿日期: 2005-11-17; 修订日期: 2005-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412304)

作者简介: 周小宁(1978~), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为湖泊富营养化方面及其防治。

* 通讯联系人, E-mail: Jinxiang@public.bta.net.cn

杂物,然后在多个小塑料桶(直径 20cm × 高 25cm)中分别装入 4.5kg 的沉积物,最后将它们置于中国环境科学研究院阳光温室里盛满水的水族箱中进行培养(试验过程中始终保持沉积物与水面的距离在 80cm). 试验设置成 2 组:有植物组(编号 Z, 每小桶内均匀种植 10 株黑藻)与对照组(编号 D, 除没有种植植物外,其它情况与有植物组相同),每组设 2 个重复. 在黑藻种植后的第 40d、第 73d、第 93d、第 111d 分别取样,沉积物样品经冷冻干燥后过 100 目筛储备备用.

1.2 分析方法

实验分别测定了沉积物样品的有机质总量(OM)、阳离子代换量(CEC)、总磷(TP)、无机磷形态、有机磷形态以及潜在可交换性磷. 其中,有机质总量采用经典的重铬酸钾法^[7],阳离子代换量采用 EDTA-铵盐快速法^[7],总磷及无机磷形态采用 SMT 法测定^[8],有机磷形态采用 Bowmarr Cole 法^[9],潜在可交换性磷测定采用无限稀释外推法(infinite dilution extrapolation, IDE)^[10]. 实验数据用 SPSS 统计软件进行分析,平行测量误差 < 5%.

2 结果与分析

2.1 沉水植物黑藻对沉积物理化参数的影响

由表 1 可知,随着培养时间的推移,有植物组与对照组沉积物的 OM、CEC、TP 含量均发生了变化. 实验期间,有植物组沉积物的 OM 降低了 4.20 g·kg⁻¹,CEC 降低了 15.94 mmol·kg⁻¹,TP 降低了 58.72 mg·kg⁻¹;而对照组沉积物的 OM、CEC、TP 分别降低了 2.62 g·kg⁻¹、9.46 mmol·kg⁻¹、41.87 mg·kg⁻¹. 经统计分析得知,与对照组的相比,本研究中黑藻显著降低了沉积物的 OM ($p < 0.05$)、CEC ($p < 0.05$) 及 TP ($p < 0.05$).

2.2 沉水植物黑藻对沉积物无机磷形态的影响

目前,沉积物中无机磷的分级提取方法很多^[11,12]. 其中由于 SMT 法主要关注沉积物中生物可利用磷的潜在来源,具有简单、实用、重现性好、适用范围广等优点,因而倍受关注^[8,13]. SMT 法将所提取到的磷分为 5 种形态,即 NaOH-P、HCl-P、IP、OP 及 TP.

表 1 沉积物样品的 OM、CEC、TP 含量

Table 1 Amount of OM, CEC and TP in the sediment samples				
组别	时间	OM	CEC	TP
	/d	/g·kg ⁻¹	/mmol·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹
原土 Y	0	28.73	61.66	623.37
	40	28.56	52.33	594.48
	73	27.86	51.23	588.79
对照组 D	93	27.06	48.34	586.58
	111	26.11	52.20	581.50
	40	26.78	43.27	587.41
	73	24.63	49.24	583.38
有植物组 Z	93	23.80	43.39	567.00
	111	24.53	45.72	564.65

运用 SMT 方法测得样品的无机磷形态结果如图 1 所示. 从图 1 上可以看出,随着培养时间的延长,有植物组与对照组沉积物的各形态磷都逐渐减少,但减少的程度不同. 其中有植物组沉积物的 NaOH-P、HCl-P、IP、OP 及 TP 分别降低了 35.83 mg·kg⁻¹、29.61 mg·kg⁻¹、85.77 mg·kg⁻¹、15.55 mg·kg⁻¹、58.72 mg·kg⁻¹;而对照组沉积物的 NaOH-P、HCl-P、IP、OP 及 TP 分别降低了 32.94 mg·kg⁻¹、27.85 mg·kg⁻¹、69.10 mg·kg⁻¹、13.60 mg·kg⁻¹、41.87 mg·kg⁻¹. 通过对实验数据进行统计分析得知,有植物组与对照组的 TP 间有显著差异($p < 0.05$),NaOH-P 间的差异达极显著水平($p < 0.01$),而其 HCl-P、IP、OP 间无统计差异($p > 0.1$). 即在本实验条件下,黑藻对沉积物的 TP 有显

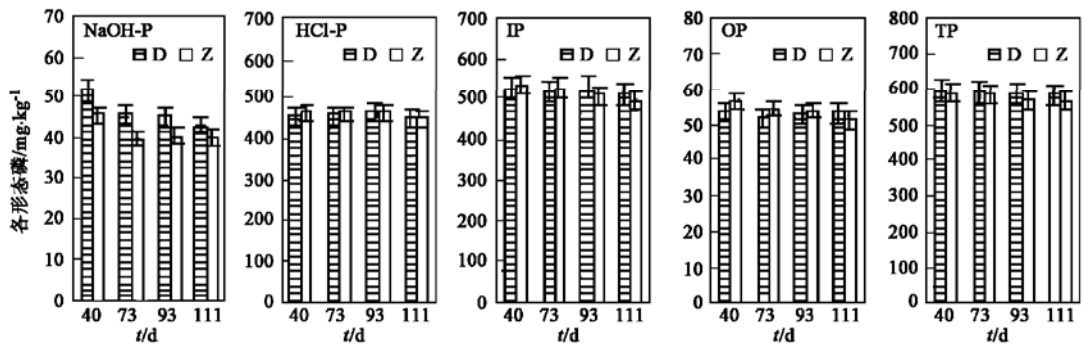


图 1 沉积物样品中各形态磷随时间的变化曲线

Fig. 1 Changes of forms of P with different time in the sediment samples

著的影响,对 NaOH-P 有极显著的影响,而对 HCl-P、JP、OP 的影响不显著.也就是说,种植的沉水植物黑藻显著降低了沉积物总磷的含量,从无机磷的角度来看,主要是通过降低 NaOH-P 的含量来实现的.

2.3 沉水植物黑藻对沉积物有机磷形态的影响

为了探究黑藻对沉积物 OP 的影响,运用 Bowman-Cole 法^[9]对实验样品进行了有机磷的分级提取,其结果如图 2 所示.按照 Bowman-Cole 法,土壤有机磷可分为 4 组:活性有机磷(Labile P₀, L-P₀),包括核酸、磷脂等,易矿化、易为植物吸收;中等活性有机磷(Moderately Labile P₀, ML-P₀),包括植酸钙等,较易矿化、较易为植物吸收;中等稳定性有机磷(Moderately Resistant P₀, MR-P₀),较难矿化且较难为植物吸收;高稳定性有机磷(Highly Resistant P₀, HR-P₀),很难矿化,基本上不被植物吸收.

从图 2 可以看出,随着培养时间的延长,有植物组与对照组沉积物的各形态有机磷含量均有所降低,但变化程度不同.其中有植物组沉积物的 L-P₀、ML-P₀、MR-P₀、HR-P₀ 分别降低了 67.4%、22.7%、21.9%、12.4%;而对照组的分别降低 56.2%、19.3%、23.5%、12.5%.经统计分析得知,与对照组的相比,本实验中黑藻对沉积物的 L-P₀ 有

一定的影响($p < 0.05$),而对 ML-P₀、MR-P₀ 与 HR-P₀ 的影响无统计差异($p > 0.1$).即种植的沉水植物黑藻降低了沉积物有机磷中 L-P₀ 的含量.

沉水植物是决定湖泊营养状态的重要因素^[14].研究表明,沉水植物的分布直接影响水体中营养盐的分布^[15],沉水植物对水体的水质起到极强的净化作用^[4~6, 16~20],同时沉水植物还能抑制某些藻类的生长^[20, 21].因此,沉水植物的恢复重建对于富营养化湖泊的治理具有极其重要的作用.本实验中,有植物组与对照组沉积物中的 OM、CEC、磷形态等参数的含量都随着培养时间的推移而降低.这与黑藻吸收沉积物中的磷和净化水体有关^[17, 22].同时,实验中黑藻对 NaOH-P 有显著影响,而对 HCl-P 的影响没有表现出统计差异.这是因为 NaOH-P 包括 Fe、Mn、Al 氧化物及其氢氧化物所包裹的磷(不稳定态磷也包括在其中).该部分磷是易释放、易为生物所利用的^[23, 24].而 HCl-P 包括与 Ca 结合的各种磷,该部分磷被认为是不易释放、难为生物所利用的.其在通常的弱碱性水环境中,活性很低,仅在 pH 骤降时才会溶解出一部分.因此,黑藻的生长必然导致易释放、易为生物所利用的 NaOH-P 发生显著变化.同样,在有机磷形态中,由于活性有机磷可直接间接为植物所吸收^[25],因此,与对照组的相比,有植物组中黑藻对活性有机磷有一定影响,而对其他形态有

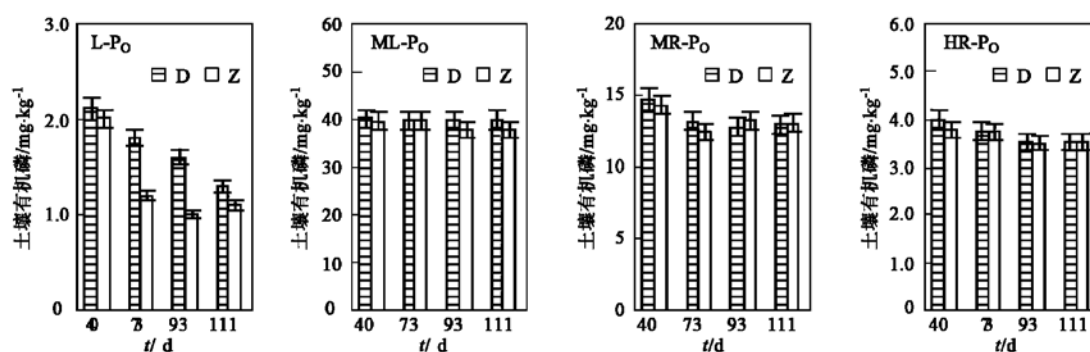


图 2 沉积物样品中各形态有机磷随时间的变化曲线

Fig. 2 Changes of forms of organic P with different time in the sediment samples

机磷的影响没有表现出统计差异.

2.4 沉水植物黑藻对沉积物潜在可交换性磷的影响

潜在可交换性磷是指能够从固体中释放到无限体积的含氧水体中的磷酸盐的总量^[26].在无限稀释实验条件下, Aminot 等^[10]运用 Langmuir 方程推导出式(1)、(2):

$$-1/\Delta q_e = 1/q_i + SK_p/q_i \quad (1)$$

$$\Delta q_e = q_e - q_i = (c_i - c_e)/S \quad (2)$$

式中, q_e 为平衡时单位质量沉积物所吸附的磷酸盐的量; q_i 为单位质量沉积物所吸附的磷酸盐的初始量,即潜在可交换性磷的量; S 为溶液中的沉积物浓度; c_i 为溶液中磷酸盐的初始浓度; c_e 为溶液中磷酸盐的平衡浓度; K_p 是分配系数, $K_p = q_e/c_e$.

若令 $y = -1/\Delta q_e$, $m = 1/q_i$, $n = K_p/q_i$, $x = 1/S$, 则式(1)变为:

$$1/y = m + n/x \tag{3}$$

因此,当沉积物浓度越来越小时 $x \rightarrow \infty$,此时 $y \rightarrow m$,即潜在可交换性磷趋于某个数值.这样,通过用曲线拟合软件将实验数据进行拟合,就可得到 m 及 n 的值,从而可计算出 q_i 及 K_p 的值.

本研究条件下用 IDE 法测量潜在可交换性磷得到的数据如图 3 所示,实验数据的曲线拟合结果见表 2.从表 2 可知,无论有植物组还是对照组,其 IDE 实验数据的曲线拟合结果均达到了极显著水平 ($p < 0.01$).同时还可以看到,在实验期内,虽然有植物组与对照组沉积物的潜在可交换性磷的量都发生了变化,但是其变化的方向截然相反,而且变化的程度也存在较大差异:前者增大了 11.5%,而后者却减少了 61.0%.经统计分析得知,这 2 组沉积物的潜在可交换性磷的量之间可能存在一定差异 ($p < 0.05$).这说明黑藻的作用可增大沉积物的潜在可交换性磷的量.也就是说,黑藻的作用对沉积物中的磷起到了活化的作用.

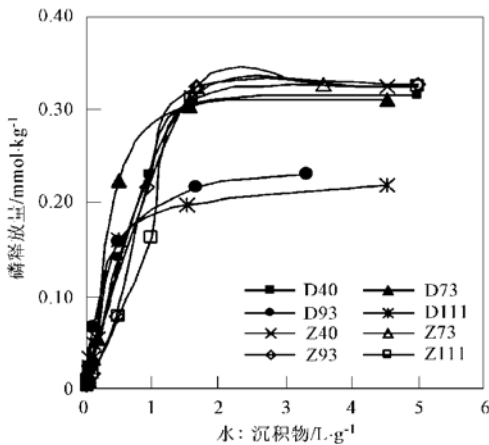


图 3 用 IDE 方法测得的各沉积物样品的潜在可交换性磷
Fig. 3 Application of the IDE method to determination of potentially exchangeable phosphate of the sediment samples

表 2 IDE 实验数据的曲线拟合结果

Table 2 Curve_fit output of IDE experimental data

组别	时间 /d	回归方程		R^2	q_i / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	K_p / $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
		$1/y = m + n/x$				
		m	n			
对照 组 D	40	2.550 8	1.925 6	0.976 3	0.392 04	0.754 89
	73	2.756 4	1.164 6	0.970 6	0.362 79	0.422 50
	93	3.920 0	1.243 6	0.997 3	0.255 10	0.317 25
	111	4.107 2	1.474 3	0.984 4	0.243 47	0.358 95
植物 组 Z	40	2.537 2	1.640 7	0.981 5	0.394 14	0.646 68
	73	2.314 1	1.945 5	0.979 8	0.432 14	0.840 73
	93	2.306 5	2.474 5	0.941 0	0.433 55	1.072 81
	111	2.257 3	3.121 2	0.940 6	0.443 00	1.382 70

黑藻的作用之所以能活化沉积物中的磷,是因为黑藻的根系在从沉积物中吸取所需要的营养盐的同时,其根系还会分泌某些物质(如 H^+ 、有机酸等).这些根系分泌物改变了根系周围沉积物的物理化学特性及生物反应,如 pH、氧化还原电位、表面结构、微生物数量及活性等.樊明寿等^[27]的研究表明,根系分泌物中的质子、有机酸和酸性磷酸酶对磷的有效性起着重要作用.李成保^[28]、梁玉英^[29]等的研究也表明,有机酸对土壤中的磷具有活化作用,并且有机酸的浓度越高,磷活化的效果越显著.而根系分泌物中的 H^+ 或有机酸的增加必然导致根际 pH 值的降低,根际 pH 值的降低有利于提高根际周围难溶性物质的溶解度.造成根际酸化的原因有:①根系在胁迫条件下分泌的有机酸等物质造成,②植物根系对阴阳离子吸收不平衡造成^[30,31].而 pH 值的变化必然影响到沉积物磷的释放^[32,33].同时,根系分泌物中的某些有机酸也可能作为螯合剂.它们与 Fe、Al、Ca 等阳离子螯合,从而抑制过饱和溶液的生成以及磷的化学沉淀^[34].此外,某些根系分泌物(如酸性磷酸酶等)还会影响根际有机磷的矿化分解.因此,本实验中,由于受根际酸化及有机酸螯合等作用叠加的结果,有植物组沉积物的潜在可交换性磷没有像对照组的那样由于磷从沉积物向孔隙水及上覆水的扩散而发生减少,反而有所增大.这证明了黑藻的生长对沉积物中的磷有活化作用.

3 结论

(1) 种植黑藻可显著降低沉积物的有机质、阳离子代换量、总磷,对沉积物中的磷起到活化的作用.其中对沉积物无机磷形态中的 NaOH-P 有极显著影响 ($p < 0.01$),对有机磷形态中的活性有机磷有一定影响 ($p < 0.05$),而对其他形态磷的影响没有表现出统计差异.

(2) 黑藻的作用使得有植物组沉积物潜在可交换性磷变化的方向与对照组的截然相反,而且变化的程度也存在较大差异.在实验期间,有植物组沉积物的潜在可交换性磷的量增大了 11.5%,而对照组沉积物的却减少了 61.0%.这说明黑藻的作用增大了沉积物中的潜在可交换性磷的量.

致谢: 本文得到李丽和同志的很多宝贵意见及建议,特此表示感谢.

参考文献:

[1] David L. C. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving water: a review [J]. Journal of Environmental Qual, 1998, 27: 261~ 266.

- [2] Sundby B, Gobeil C, Silberberg N. The phosphorus cycle in coastal marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(6): 1129~ 1145.
- [3] 金相灿, 王圣瑞, 姜霞. 湖泊水-沉积物界面三相结构模式的初步研究 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(z1): 1~ 5.
- [4] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(6): 673~ 676.
- [5] 刘兵钦, 王万贤, 宋春雷, 等. 菹草对湖泊沉积物磷状态的影响 [J]. *武汉植物学研究*, 2004, **22**(5): 394~ 399.
- [6] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(8): 1351~ 1353.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1978. 123~ 324.
- [8] Ruban J V, Lopez-Sanehez P F, Pardo G, *et al.* Quevauviller harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: a synthesis of recent works [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**: 224~ 228.
- [9] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fraction of organic phosphorous from grassland soil [J]. *Soil Science*, 1978, **125**(2): 95~ 101.
- [10] Aminot A, Andrieux F. Concept and determination of exchangeable phosphate in aquatic sediments [J]. *Water Research*, 1996, **30**(11): 2805~ 2811.
- [11] 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.
- [12] 刘素美, 张经. 沉积物中磷的化学提取分析方法 [J]. *海洋科学*, 2001, **25**(1): 22~ 25.
- [13] Ruban J V, Lopez-Sanehez P F, Pardo G, *et al.* Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**: 51~ 56.
- [14] Phillips G L, Eminson D, Moss B. A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated freshwaters [J]. *Aquat. Bot.*, 1978, **4**: 123~ 126.
- [15] 马凯, 蔡庆华, 谢志才, 等. 沉水植物分布格局对湖泊水环境 N、P 因子影响 [J]. *水生生物学报*, 2003, **27**(3): 232~ 237.
- [16] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 水生植物对富营养化水体水质净化作用研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2001, **19**(4): 299~ 303.
- [17] 苏胜齐, 姚维志. 沉水植物与环境关系评述 [J]. *农业环境保护*, 2002, **21**(6): 570~ 573.
- [18] 成小英, 王国祥, 濮培民, 等. 冬季富营养化湖泊中水生植物的恢复及净化作用 [J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(2): 139~ 144.
- [19] 黄蕾, 翟建平, 王传瑜, 等. 4 种水生植物在冬季脱氮除磷效果的试验研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(2): 366~ 370.
- [20] 朱伟, 陈清锦, 张兰芳. 伊乐藻在冬季低温条件下对污染水体的净化效果 [J]. *生态环境*, 2004, **13**(4): 497~ 499.
- [21] 王立新, 吴国荣, 王建安, 等. 黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 抑制作用 [J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(4): 337~ 342.
- [22] 刘鑫, 王哲, 张一, 等. 两种沉水植物对黄颡鱼夏花培育水体主要水质因子的影响 [J]. *湖泊科学*, 2003, **15**(2): 184~ 188.
- [23] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系 [J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 381~ 388.
- [24] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子——铁和水动力 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(6): 762~ 764.
- [25] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2189~ 2194.
- [26] Froelich P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1988, **33**(4): 649~ 668.
- [27] 樊明寿, 张福锁. 植物磷吸收效率的生理基础 [J]. *生命科学*, 2001, **13**(3): 129~ 131.
- [28] 李成保, 徐仁扣, 肖双成. 几种有机酸对土壤磷活动性的增强效应 [J]. *土壤学报*, 2005, **42**(3): 508~ 512.
- [29] 梁玉英, 黄益宗, 孟凡乔, 等. 有机酸对菜地土壤磷素活化的影响 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(5): 1171~ 1177.
- [30] Hedley M J, Nye P H, White R E. Plant-induced changes in the photosphere of rape (*Brassica napus* var. *emerald*) Seedlings. II. Origin of the pH changes [J]. *New Phytologist*, 1982, **91**: 31~ 44.
- [31] 周文龙, 张福锁, 曹一平. 植物根际 pH 值动态及其效应 [A]. 见: 土壤与植物营养研究新动态 (第一卷) [C]. 北京: 北京农业大学出版社, 1992.
- [32] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(6): 707~ 711.
- [33] Jin X C, Wang S R, Pang Y. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2005, **254**: 241~ 248.
- [34] He Z L, Zhu J. Transformation kinetics and potential availability of specifically-sorbed phosphate in soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **51**: 209~ 215.