

## 苦草 (*Vallisneria natans*) 和黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 对沉积物各形态磷垂直分布的影响\*

俞振飞<sup>1</sup>, 王国祥<sup>1\*\*</sup>, 王立志<sup>1,2</sup>, 李振国<sup>1,3</sup>, 杭子清<sup>1</sup>, 魏宏农<sup>1</sup>

(1: 南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046)

(2: 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂 276000)

(3: 湖南科技大学建筑与城乡规划学院, 湘潭 411201)

**摘要:** 采用沉水植物苦草 (*V. natans*) 和黑藻 (*H. verticillata*) 作为研究对象, 在其旺盛生长期测定群落内外上覆水及沉积物各形态磷的含量, 以探究不同根系特点的沉水植物对沉积物中各形态磷垂直分布的影响. 结果表明: 实验进行 30 d 后苦草和黑藻组沉积物总磷 (TP)、无机磷 (IP) 和氢氧化钠提取磷 (NaOH-P) 含量在垂直方向均呈现不同程度的降低. 苦草和黑藻组沉积物 TP 的含量在 4.5 cm 深度处降低幅度最大, 较对照组分别下降了 58.91 和 36.46 mg/kg; IP 含量分别在沉积物 6.0 和 3.0 cm 深度处降低幅度最大, 较对照组分别降低了 85.41 和 57.41 mg/kg. 总体来看, 沉水植物苦草对沉积物各形态磷含量降低的影响大于黑藻.

**关键词:** 沉水植物; 沉积物; 磷形态; 苦草; 黑藻; 垂直分布

## Effects of macrophytes *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* on the vertical distribution of different phosphorus fractions in sediments

YU Zhenfei<sup>1</sup>, WANG Guoxiang<sup>1</sup>, WANG Lizhi<sup>1,2</sup>, LI Zhenguo<sup>1,3</sup>, HANG Ziqing<sup>1</sup> & WEI Hongnong<sup>1</sup>

(1: College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing 210046, P. R. China)

(2: Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi 276000, P. R. China)

(3: Architecture and Urban Planning School, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the effects of different root systems in different submerged macrophytes on the vertical distribution of phosphorus fractions in sediments, *V. natans* and *H. verticillata* were applied and phosphorus concentrations in overlying water and underneath sediments were investigated during the growth season. Results showed that the contents of total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP) and NaOH-P fractions in sediments decreased vertically in different levels during both submerged macrophytic groups. Both submerged macrophytic groups reached their maximum decreased values at the depth of 4.5 cm, decreased by 58.91 and 36.46 mg/kg, respectively, comparing with the control. The maximum decreased values of IP in groups of *V. natans* and *H. verticillata* appeared at the depth of 6.0 and 3.0 cm, and they decreased by 85.41 and 57.41 mg/kg, respectively, comparing with the control. The results indicated that the submerged macrophyte *V. natans* has higher ability in lowering down phosphorus fractions than *H. verticillata* in sediments.

**Keywords:** Submerged macrophyte; sediment; phosphorus fraction; *Vallisneria natans*; *Hydrilla verticillata*; vertical distribution

磷是湖泊富营养化的重要影响因子<sup>[1]</sup>, 同时也是植物生长发育的必需元素. 沉积物的磷释放是决定湖泊上覆水体磷浓度的重要因素, 特别是在外源污染得到控制的条件下<sup>[2-3]</sup>. 近年来很多学者注意到恢复及重建水生植物成为修复湖泊生态系统的重要途径<sup>[4-6]</sup>, 其重点和难点在于沉水植物的恢复和重建<sup>[7-10]</sup>. 沉水植

\* 国家自然科学基金项目(40873057)和江苏省重大科技支撑项目(BE2008677)联合资助. 2011-06-15 收稿; 2011-09-11 收修稿稿. 俞振飞, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: yuzhenfei0417@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn.

物是浅水湖泊的主要初级生产者,占据了湖泊中水和底质的主要界面,对湖泊生态系统的物质、能量循环和传递起调控作用<sup>[11]</sup>,是湖泊生态系统的重要组成部分,在生长过程中通过对上覆水和沉积物中磷的吸收来调控磷的转化。目前,沉水植物改善水质的研究报道较多,为富营养化湖泊的生态恢复提供了很好的理论依据,王圣瑞等<sup>[12]</sup>采用蓬冠状、根系退化的沉水植物黑藻,从沉积物-水-沉水植物系统的角度研究了沉水植物对上覆水中各形态磷浓度的影响;陈秋敏等<sup>[7]</sup>研究根系发达的深根系沉水植物苦草在生长过程中对上覆水中各形态磷浓度的影响。但是,沉水植物对沉积物磷含量的影响方面多为研究时间序列的变化,而沉水植物在垂直空间上对沉积物各形态磷的影响报道较少<sup>[13-14]</sup>,尤其是不同根系特点的沉水植物对沉积物垂直空间分布的影响更是鲜见报道,沉水植物对在生长过程中由于根系的发育和深入,对沉积物中各形态磷含量影响及各形态磷在这个过程中的垂直空间分布状况需要进一步的探讨。

基于此本文模拟湖泊系统,选择根系发达的沉水植物苦草和根系退化较为严重、顶冠蓬散的沉水植物黑藻为实验植物,建立了“沉水植物-沉积物-水体”系统,研究在沉水植物生长过程中对沉积物各形态磷垂直空间分布的影响。

## 1 实验材料与设计

### 1.1 实验设计

沉积物采自南京富营养化水华暴发水体(32°06'10"N,118°54'14"E),采用彼得森采泥器于2010年6月采集。采集后样品低温风干后过100目筛,去除粗粒及动植物残体,经灭菌后(120℃,30 min)充分混匀,以保证样品均一。将混匀后的沉积物置入聚乙烯小桶(顶直径×底直径×高=7 cm×7 cm×15 cm,预先经过5%的HCl处理后用蒸馏水冲洗干净),沉积物铺设厚度为12 cm。将实验小桶放入高密度聚乙烯桶(顶直径×底直径×高=55 cm×45 cm×75 cm,预先经过5%的HCl处理后用蒸馏水冲洗干净)。沿大桶壁向大桶内缓慢注入100 L暴晒3 d后的自来水(TP,0.02 mg/L),待系统稳定5 d后,移栽沉水植物。供试植物选择沉水植物苦草和黑藻。实验苦草选择南京师范大学仙林校区水生态修复中试平台培养的由种子萌发的亚洲苦草幼苗(长10±1 cm);黑藻采自南京固城湖(31°14'N,118°53'E)并经驯化培养,选取健壮的黑藻顶枝(长10±1 cm)。

### 1.2 实验方法

实验桶装置总计3桶,分别为黑藻、苦草和对照三组,苦草和黑藻为无根幼苗,幼苗事先经驯化培养,以避免附生生物等因子对实验结果产生影响。苦草:株数为1,鲜重1.45 g;黑藻:株数为3,鲜重0.9 g。黑藻组种植3株性状均一的黑藻顶枝于聚乙烯小桶;苦草组种植1株苦草幼苗于聚乙烯小桶;对照组不种植,每处理组设3个平行。实验在江苏省环境演变与生态建设重点实验室的水环境生态修复中试平台玻璃房内进行,实验时间为2010年7-9月。实验玻璃房内部7月晴天和阴天平均光照强度为1092和357 μmol/(m<sup>2</sup>·s),测定时间为下午13:00。水温控制在15~25℃,各桶间水温差异小于2℃。

### 1.3 取样与分析

于实验培养的第30 d进行样品采集。采用虹吸管抽取的方式采集水面以下20 cm处等体积水(50 ml),测定上覆水中的TP、溶解性活性磷(SRP)浓度。上覆水TP浓度测定采用过硫酸钾氧化法;SRP浓度的测定:将水样预先过0.45 μm孔径的醋酸纤维滤膜,而后用钼-锑-钒比色法测定。磷浓度用Skalar(荷兰)流动分析仪测定。直接取出注满沉积物的聚乙烯小桶,小心置于实验室超低温冷冻冰箱中冷冻(-70℃)24 h,冷冻后沉积物每桶高12 cm,按每层1.5 cm分层切割,风干后过100目筛,充分混匀,然后采用SMT(Standards Measurements and Testing)法<sup>[15]</sup>进行沉积物中各形态磷分析。上覆水中磷含量按照相关规范分析<sup>[16]</sup>。pH采用上海雷磁(PHSJ-4A)测定仪测定。溶解氧(DO)采用YSI 550A(美国)测定。

### 1.4 数据处理

实验所得数据采用SPSS 13.0统计软件进行分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著,实验数据采用平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 上覆水各形态磷含量的变化

实验第30 d时,对照组中上覆水TP(图1a)和SRP(图1b)的含量与实验开始时相比差异性均达到极显

著水平 ( $P < 0.01$ ), 而黑藻组和苦草组上覆水中 TP (图 1a) 和 SRP (图 1b) 的含量与实验开始时相比差异性不显著 ( $P > 0.05$ ). 由于对照组实验第 30 d 上覆水中磷含量显著升高, 而植物组中磷含量无显著变化, 所以可认为沉水植物在本实验条件下显著抑制了沉积物中磷的释放, 从而使得植物中上覆水中磷保持在相对较低的水平. 到实验结束时, 苦草组和黑藻组上覆水 TP 含量均由实验初始的 0.06 mg/L 下降至 0.04 mg/L, 苦草组 SRP 含量由实验初始的 4.03  $\mu\text{g/L}$  下降至 2.21  $\mu\text{g/L}$ , 黑藻组 SRP 含量由实验初始的 3.87  $\mu\text{g/L}$  下降至 3.06  $\mu\text{g/L}$ ; 对照组上覆水 TP 含量由实验初始的 0.07 mg/L 上升至 0.11 mg/L, SRP 含量由实验初始的 4.29  $\mu\text{g/L}$  上升至 8.99  $\mu\text{g/L}$ .

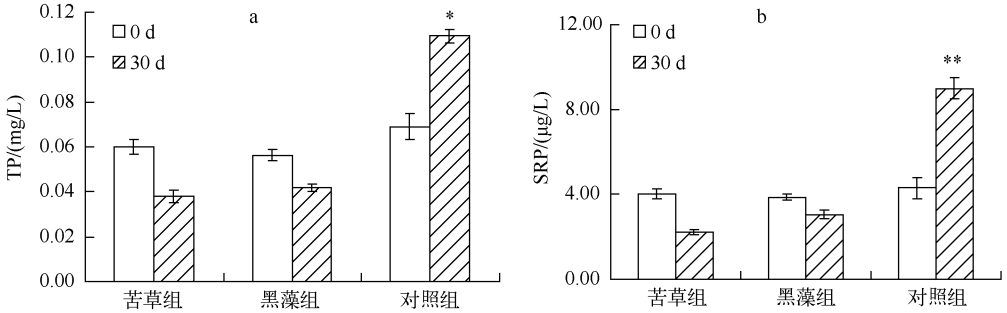


图 1 实验期间上覆水 TP (a) 和 SRP (b) 含量的变化

Fig. 1 Changes of TP (a) and SRP (b) concentrations in overlying water during the experiment course

## 2.2 沉积物总磷含量的变化

与初始值和对照组相比, 实验结束时两种沉水植物处理组沉积物中 TP 含量均有不同程度减少, 且苦草组 < 黑藻组. 苦草及黑藻组均在 4.5 cm 深度处出现最低值 (图 2a), 与实验初始值相比分别下降 48.24 和 25.79 mg/kg; 与对照组相比分别下降 58.91 和 36.46 mg/kg. 方差分析表明, 和对照组相比苦草组沉积物 TP 含量显著降低 ( $P < 0.01$ ), 而黑藻组沉积物 TP 含量与对照组无显著差异 ( $P > 0.05$ ). 因此, 沉水植物的生长能够降低沉积物中的 TP 含量, 且不同沉水植物生长对沉积物 TP 含量的影响存在种间差异, 苦草根系对沉积物 TP 的影响能力要大于黑藻.

## 2.3 沉积物中不同形态磷含量的变化

沉水植物组沉积物不同形态磷含量在沉积物表层 4.5 cm 分布基本表现出一致的趋势, 沉水植物组沉积物各形态磷均不同程度的低于对照组, 但苦草和黑藻对沉积物不同形态磷含量的影响不同. 沉积物各形态磷含量变化以 IP 变化较为突出, 沉水植物组较对照组呈降低趋势, 且苦草组下降幅度小于黑藻组. 方差分析表明, 和对照组相比苦草组沉积物 IP 含量显著降低 ( $P < 0.01$ ), 而黑藻组沉积物 IP 含量与对照组无显著差异 ( $P > 0.05$ ). 苦草组在 6 cm 深度处出现最低值, 较初始值下降 90.48 mg/kg; 黑藻组在 3.0 cm 深度处达到最低值, 较初始值下降 56.62 mg/kg. 其中, 氢氧化钠提取磷 (NaOH-P) 呈缓慢下降趋势, 沉水植物组均在 3.0 cm 深度处达到最低值 (苦草组 168.53  $\pm$  7.81 mg/kg, 黑藻组 171.87  $\pm$  8.46 mg/kg), 继而呈缓慢上升趋势, 但在 4.5 cm 深度处沉水植物组均低于对照组; 而稀盐酸提取磷 (HCl-P) 含量在表层 4.5 cm 变化相对较小, 呈缓和趋势. OP 在表层 4.5 cm 呈现快速下降趋势, 在 4.5 cm 深度处沉水植物组均达到最低值 (苦草组 183.67  $\pm$  5.52 mg/kg, 黑藻组 171.47  $\pm$  6.85 mg/kg) (图 2).

沉积物各形态磷含量从 4.5 cm 至底部开始呈现不同程度缓慢上升的趋势. IP 沉水植物组均低于对照组, 且苦草组 < 黑藻组, NaOH-P 和 HCl-P 沉水植物组与对照组之间变化较为缓和. 然而, OP 沉水植物组在 8.5 ~ 12.0 cm 均高于对照组, 且黑藻组 < 苦草组 (图 2).

## 2.4 沉水植物生物量及根系变化

从沉水植物鲜重来, 沉水植物生长至第 30 d (实验结束时), 苦草和黑藻生物量均极显著大于实验初始值, 单株苦草变化为 1.45 ~ 5.48 g; 单株黑藻变化为 0.90 ~ 3.30 g (图 3). 单株苦草其它生物量指标在实验结束时也显著大于初始值, 平均茎叶长变化为 10.00 ~ 17.92 cm, 叶片数变化为 4 ~ 8 片, 叶宽变化为

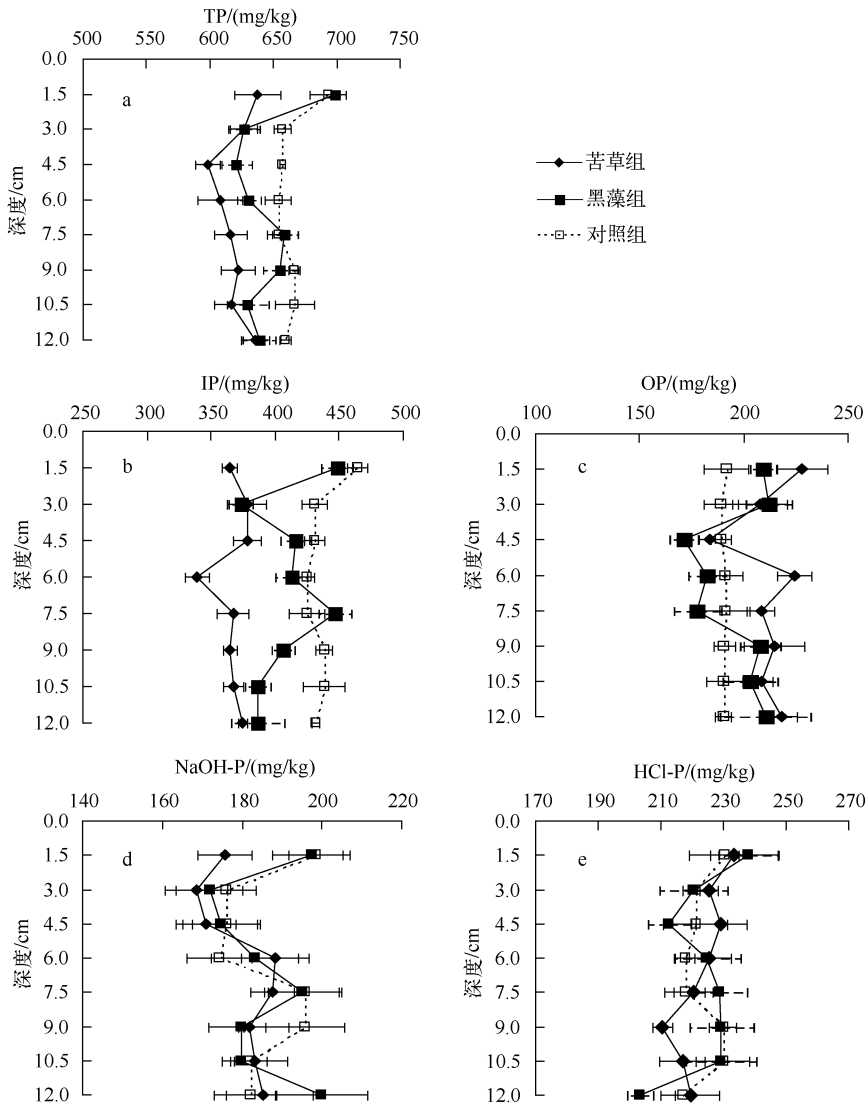


图2 实验结束时黑藻组、苦草组和对照组沉积物TP(a)、IP(b)、OP(c)、NaOH-P(d)、HCl-P(e)含量变化

Fig. 2 Changes of TP (a), IP (b), OP (c), NaOH-P (d), HCl-P (e) concentrations of group *H. verticillata*, *V. natans* and the control in sediment at the end of the experiment

0.30 ~ 0.42 cm; 单株黑藻在实验结束时平均茎叶数极显著大于初始值, 茎叶长变化为 15.00 ~ 78.42 cm, 其中平均分支长为 24.00 cm.

在实验期间, 沉水植物根系也发生了极显著变化. 实验初始时, 对沉水植物进行去根处理, 到实验结束, 通过观察分层切割后的沉积物, 发现苦草根系平均根长为 4.0 cm, 最大根长为 7.5 cm, 黑藻根系平均根长为 4.0 cm, 最大根长为 6.0 cm.

### 3 讨论

沉水植物占据了浅水湖泊中水和沉积物的主要界面, 是水体两大营养库间的有机结合部, 对浅水湖泊生态系统物质循环起着重要的调控作用<sup>[17]</sup>. 沉水植物在生长过程中可以通过茎叶和根系吸收上覆水和沉

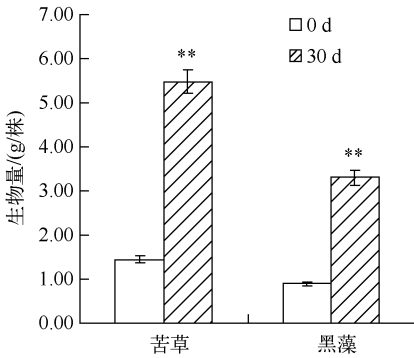


图3 培养期间苦草和黑藻生物量(鲜重)变化

Fig. 3 Variation of the *V. natans* and *H. verticillata* biomass (fresh weight) during the experimental course

4),这应该是上覆水中磷含量较低的一个重要原因,同时由于沉水植物的抑制作用使得沉积物中的IP没有向上覆水中明显释放。

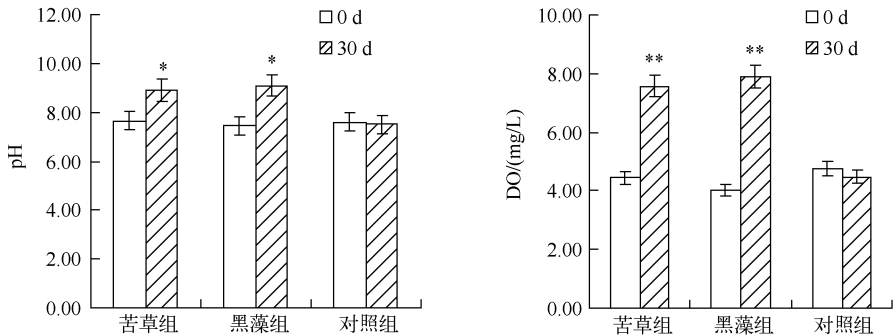


图4 实验期间上覆水物理指标 pH 和 DO 的变化

Fig. 4 Changes of environmental factors of pH and DO during the experimental course

在本实验条件下,沉水植物组 NaOH-P 含量在沉积物上部略呈下降趋势,而 HCl-P 和 OP 的含量均没有显著变化,这和沉积物各形态磷的结合性质有着重要的关系。NaOH-P 是与沉积物中易发生还原作用的铁、铝氧化物或氢氧化物结合的磷,这部分磷较易释放,可被生物所利用<sup>[20,22,26]</sup>。HCl-P 主要指与自生磷灰石、沉积碳酸钙以及生物骨骼等的含磷矿物有关的沉积磷存在形态,主要来自于生物颗粒的沉积和早期成岩作用形成的氟磷灰石<sup>[27]</sup>。它是沉积物中较为稳定的磷形态,较难为植物所利用。OP 包括由陆源性排放物质组成的难降解性有机磷部分和由死亡的水生生物尸体组成的可降解性有机磷部分。其中可降解有机磷部分可以在早期成岩过程中随有机质的降解而释放,甚至向其它结合态磷转化<sup>[26,28-31]</sup>。湖泊沉积物中 OP 具有部分活性,但是 OP 结构相对较稳定,植物利用相对较难。因此在本实验条件下沉积物中相对较易于吸收的 NaOH-P 略呈降低趋势,而难于被植物利用的 OP 和 HCl-P 则无显著变化。

#### 4 参考文献

- [1] Dahl M, Dunning CP, Green T. Convective-transport of chemicals across a sediment-water interface. *Water Science & Technology*, 1993, 28(8/9): 209-213.
- [2] Xie LQ, Xie P, Tang HJ. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—

- an enclosure experiment in a hyperj-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environmental Pollution*, 2003, **122**(3): 391-399.
- [ 3 ] Abrams MM, Jarrell WM. Soil-phosphorus as a potential nonpoint-source for elevated stream phosphorus levels. *Journal of Environmental Quality*, 1995, **24**(1): 132-138.
- [ 4 ] 黎 明, 刘德启. 国内富营养化湖泊生态恢复技术研究进展. 水土保持研究, 2007, **14**(5): 350-355.
- [ 5 ] 贺 锋, 吴振斌. 水生植物在污水处理和水质改善中的应用. 植物学通报, 2003, **20**(6): 641-647.
- [ 6 ] 何池全, 赵魁义, 叶居新. 石莖蒲净化富营养化水体的研究. 南昌大学学报: 理科版, 1999, **23**(1): 73-76.
- [ 7 ] 陈秋敏, 王国祥, 葛绪广等. 沉水植物苦草对上覆水各形态磷浓度的影响. 水资源保护, 2010, **26**(4): 49-56.
- [ 8 ] 胡 莲, 万成炎. 沉水植物在富营养化水体生态恢复中的作用及前景. 水利渔业, 2006, **26**(5): 69-71.
- [ 9 ] 高吉喜, 叶 春, 杜 娟等. 水生植物对面源污水净化效率研究. 中国环境科学, 1997, **17**(3): 247-251.
- [ 10 ] 苏胜齐, 姚维志. 沉水植物与环境关系评述. 农业环境保护, 2002, **21**(6): 570-573.
- [ 11 ] Rossi G, Premazzi G. Delay in lake recovery caused by internal loading. *Water Research*, 1991, **25**(5): 567-575.
- [ 12 ] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超等. 沉水植物黑藻对上覆水中各形态磷浓度的影响. 地球化学, 2006, **35**(2): 179-186.
- [ 13 ] 余源盛. 太湖底质与湖泊富营养化关系. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第九号. 北京: 科学出版社, 1993: 48-62.
- [ 14 ] 高 光. 水-沉积物界面氮、磷迁移转化过程研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 1993.
- [ 15 ] Ruban V. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2/3): 224-228.
- [ 16 ] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [ 17 ] 李 伟, 钟 扬. 水生植被研究的理论与方法. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992: 237-277.
- [ 18 ] Gao JQ, Xiong ZT, Zhang JD *et al.* Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes. *Desalination*, 2009, **242**(1/2/3): 193-204.
- [ 19 ] Jin XC, Wang SR, Pang Y *et al.* Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2006, **139**(2): 288-295.
- [ 20 ] Wang SR, Jin XC, Zhao HC *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, **273**(1/2/3): 109-116.
- [ 21 ] Sun SJ, Huang SL, Sun XM *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 291-295.
- [ 22 ] Wang SG, Jin XC, 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. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, **289**(2): 339-346.
- [ 23 ] Wang SR, Jin XC, Zhao HC *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2/3): 1551-1559.
- [ 24 ] Kleeberg A, Kozerski H. Phosphorus release in Lake Groger Muggelsee and its implications for lake restoration. *Hydrobiologia*, 1997, **342**(1): 9-26.
- [ 25 ] Somiya I, Tsuno H, Matsumoto M. Phosphorus release-storage reaction and organic substrate behavior in biological phosphorus removal. *Water Research*, 1988, **22**(1): 49-58.
- [ 26 ] Zhang RY, Wu FC, Liu CQ *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, China. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(2): 366-372.
- [ 27 ] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments—Lakes Volvi and Koronia, N Greece. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [ 28 ] Benitez-Nelson CR, O'Neill Madden LP, Styles RM *et al.* Inorganic and organic sinking particulate phosphorus fluxes across the oxic/anoxic water column of Cariaco Basin, Venezuela. *Marine Chemistry*, 2007, **105**(1/2): 90-100.
- [ 29 ] Jin XC, Wang SR, Chu JZ *et al.* Organic phosphorus in shallow lake sediments in middle and lower reaches of the Yangtze River area in China. *Pedosphere*, 2008, **18**(3): 394-400.
- [ 30 ] Turner BL. Organic phosphorus in Madagascan rice soils. *Geoderma*, 2006, **136**(1/2): 279-288.
- [ 31 ] Turner BL, Cade-Menun BJ, Condon LM *et al.* Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta*, 2005, **66**(2): 294-306.