

不同沉水植物对沉积物磷迁移转化的影响

张福林^{1,2}, 王圣瑞^{2*}, 杨苏文², 金相灿², 姚云峰¹, 张丽媛^{1,2}

1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 中国环境科学研究院湖泊创新基地/国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012

摘要: 选择了微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus* A. Benn.)、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.)和金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum* L.)3种沉水植物, 在温室模拟研究了不同沉水植物对湖泊沉积物磷迁移转化的影响。研究表明, 随着培养时间的延续微齿眼子菜和穗花狐尾藻对沉积物NaOH-P有明显的吸收和转化作用, 分别吸收和转化了36.9%和33.2%, 而金鱼藻对沉积物NaOH-P的影响不显著; 各处理随着植物的生长, 由于根系的吸收作用, 沉积物中Olsen-P发生了从非根际→根际→沉水植物的迁移过程, 其中微齿眼子菜和穗花狐尾藻更为明显。因此, 微齿眼子菜和穗花狐尾藻对沉积物磷释放的控制作用更为明显。

关键词: 沉水植物; 沉积物; 磷形态; 扩散通量; Olsen-p

中图分类号: X17

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2081-05

湖泊富营养化是一个全球性的环境问题^[1], 也是当前我国湖泊面临的最为突出的环境问题之一。在外源负荷得到有效控制的同时, 内源负荷的控制也越来越引起人们的重视。目前在内源负荷控制方面主要有底泥疏浚、引水清污、深层水的排放、物理化学方法, 以及生态恢复等^[2]。利用水生植物进行生态恢复的方法, 以其良好的净化效果, 独特的经济效益、能耗低、简单易行以及有利于重建和恢复良好的水生生态系统等特点, 正日益受到人们的关注^[3-4]。有关这方面的研究也很多, 王圣瑞等^[5]研究了黑藻对水-沉积物界面各形态氮含量的影响, 包先明等^[6]研究了种植沉水植物对富营养化水体沉积物中磷形态的影响, 刘兵钦等^[7]研究了菹草对湖泊沉积物磷状态的影响等, 且越来越多的研究集中于沉水植物对富营养化调控和控制机理的探索性研究中^[8-10]。磷被认为是造成湖泊富营养化的限制性元素^[11], 而微齿眼子菜、穗花狐尾藻和金鱼藻作为浅水湖泊三种常见沉水植物, 其各自对湖泊沉积物磷的迁移、转化影响的研究目前还较少。本文在实验室人工模拟种植三种沉水植物, 定期进行沉积物、上覆水和间隙水中磷的测定, 研究不同沉水植物对沉积物中磷的迁移、转化的影响, 以期对沉水植物控制湖泊富营养化、净化水体提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

本研究选用的沉积物取自北京大观园景观湖泊, 沉积物取回后经自然风干, 用重物捣碎, 过3 mm

细筛1~2次, 力求均匀一致。沉水植物微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus* A. Benn.)、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.)和金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum* L.) 采自北京房山区拒马河。植物采回后, 剪取健壮的顶枝部分 (约10 cm) 扦插种植到装有3 kg沉积物的PVC小桶内, 其中根际区与非根际区用30 μm孔径的尼龙网隔开, 然后将桶分别放入4个100 cm×100 cm×80 cm的玻璃缸中, 每个玻璃缸共21桶。试验采用随机区组设计, 共设4个处理: 1[#]不种植物对照, 2[#]种植微齿眼子菜, 3[#]种植穗花狐尾藻, 4[#]种植金鱼藻, 每个处理重复3次。模拟试验采用自来水进行静态培养。试验于2008年5月14日开始, 历时180 d。模拟试验在中国环境科学研究院温室内进行。

1.2 样品的采集与分析

分别于培养的第7、30、60、90、120、150和180天采集不同处理的上覆水和沉积物样品, 一部分沉积物经真空冷冻干燥, 研磨过100目筛后, 测定其总磷和各形态磷, 所用方法为Ruban等SMT法^[12-13], 同时测定根际与非根际的Olsen-p含量, 测定方法简要概括为: 称取2.5 g沉积物样品 (100目) 于100 mL离心管中, 加入0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (pH=8.5) 溶液50 mL, 25℃下往复振荡24 h, 5 000 r·min⁻¹离心10 min, 上清液过0.45 μm孔径滤膜, 测定滤液磷酸盐浓度, 即Olsen-P含量^[14]; 另一部分沉积物采样后立即离心获取间隙水, 测定间隙水中总磷浓度, 上覆水和间隙水总磷浓度测定采用过

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40703017; 40873079; U0833603); 国家水专项洱海项目 (2008ZX07105-005)

作者简介: 张福林 (1981年生), 男 (蒙古族), 硕士研究生, 研究方向为环境科学与工程。E-mail: Fulin_zhangchina@163.com

*责任作者: 王圣瑞, E-mail: wangsr@craes.org.cn

收稿日期: 2009-10-01

硫酸钾氧化法^[15]。

2 结果与讨论

2.1 不同沉水植物对沉积物各形态磷含量的影响

各试验组沉积物总磷含量在植物枯死之前(金鱼藻8月份出现衰退现象;穗花狐尾藻在9月份开始出现枯萎,衰退现象;微齿眼子菜于10月份,才有枯黄茎叶出现)随着培养时间的延续呈下降趋势(图1(a)),这与包先明、吴振斌等^[6,16-17]的研究成果相一致,主要是由于水生植物生长吸收了沉积物中的磷所致。其中微齿眼子菜试验组,其沉积物相对于对照组总磷含量下降了7%,而穗花狐尾藻和金鱼藻试验组随着培养时间的变化其沉积物总磷含量的变化不是很明显。对于有机磷微齿眼子菜和金鱼藻试验组的沉积物在8月份含量达到最大,而穗花狐尾藻试验组沉积物有机磷含量最高值出现在9月份(图1(b))。有机磷的增高主要是由于沉水植物将无机磷转化为自身的有机体后,残体又回落到沉积物所致。沉积物中无机磷是植物利用的主要磷形态^[18],本试验中沉积物无机磷中的HCl-P在培养过程中没有明显变化(图1(c)),这与HCl-P本身的性质有关,稳定^[18]不易被植物所利用;而NaOH-P随着培养的延续则呈明显的下降趋势(图1(d)),其大部分被植物根系直接吸收^[6]。因为随着植物的生长其根际区的微环境发生了变化^[19],使更多的NaOH-P释放出来被植物的根系所吸收。

在本试验中,沉积物各形态磷中NaOH-P含量变化最为明显(图1),各试验组NaOH-P含量相对

于对照组下降的幅度微齿眼子菜>穗花狐尾藻>金鱼藻,微齿眼子菜试验组下降了36.9%,穗花狐尾藻试验组下降了33.2%,而金鱼藻试验组没有太明显的变化。金鱼藻是R-选择种^[20],世代短,竞争力弱,容易被其他物种排挤掉,在8月份金鱼藻试验组缸内出现大量水棉与其竞争养分,使金鱼藻过早地出现衰退现象,致使其变化不是很明显。NaOH-P是指被Al、Fe、Mn的氧化物及其水合物所包裹的磷,被认为是可为生物所利用的磷^[21],所以在本试验中,相对于金鱼藻,微齿眼子菜和穗花狐尾藻更加有效地降低了沉积物中生物可利用磷的含量。

2.2 不同沉水植物对沉积物向上覆水扩散通量的影响

沉积物和上覆水之间的营养盐交换是水体中营养盐来源和归趋的重要过程^[22],而沉水植物在这一过程中起着重要的调控作用^[23]。本研究分析测定了不同沉水植物在培养不同时期的扩散通量,扩散通量的测定采用Fick第一定律的模型公式^[24]:

$$F = \phi D_s \frac{\partial c}{\partial x}$$

式中, F 为通过上覆水的扩散通量, ϕ 为表层沉积物的孔隙度, $\frac{\partial c}{\partial x}$ 为上覆水-沉积物界面的营养盐梯度, D_s 为考虑了沉积物效应的实际分子扩散系数。真实扩散系数 D_s 与孔隙度 ϕ 之间的经验关系式为^[25]:

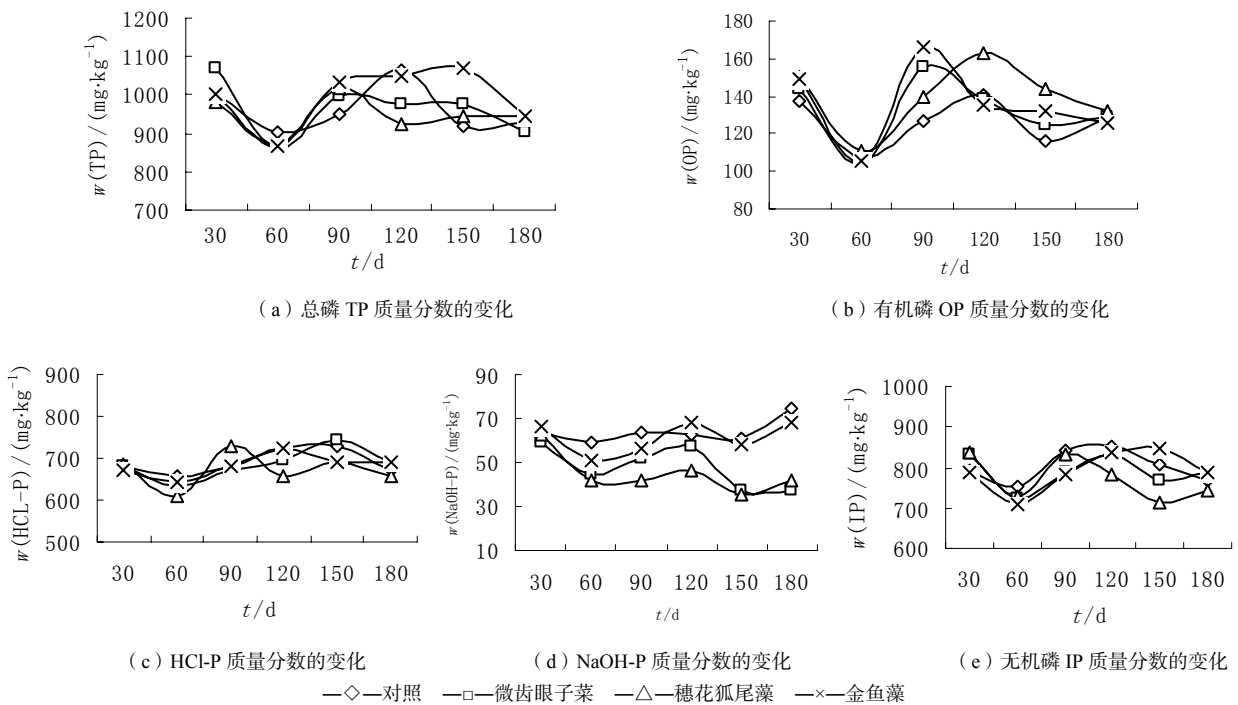


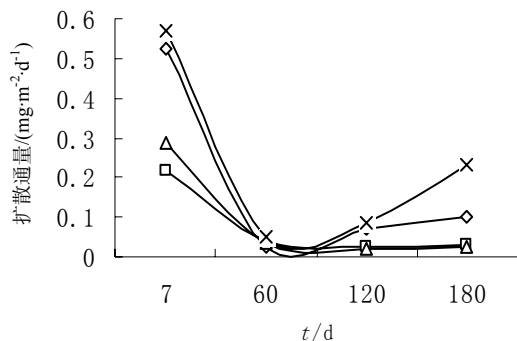
图1 不同处理随培养时间各形态磷含量的变化

Fig.1 changes of various forms phosphorus content of Different treatment along with culture time

$$D_s = \Phi D_0 (\Phi \leq 0.7); D_s = \Phi^2 D_0 (\Phi > 0.7)$$

式中, D_0 为营养盐在无限稀释溶液中理想扩散系数, 对 HPO_4^{2-} , $D_0 = 7.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

研究结果如下图所示(图2), 沉水植物经过一周的培养后进入了旺盛的生长期, 一周后随着培养时间的延续, 沉积物向上覆水体的扩散通量急剧下降并趋于稳定。因为沉水植物直接与底泥接触, 不仅能吸收底泥中释放的营养盐, 而且还能直接吸收底泥中的营养; 植物的根系可以固定底泥, 减缓底



—◇—对照 —□—微齿眼子菜 —△—穗花狐尾藻 —×—金鱼藻

图2 扩散通量随培养时间的变化

Fig.2 changes of Pervasion flux along with culture time

泥的营养物质向上覆水体释放; 沉水植物光合作用产生的氧气提高了水体中的溶解氧, 抑制了底泥磷的释放^[26]。

在培养后期微齿眼子菜和穗花狐尾藻的沉积物向上覆水体的扩散通量相对于对照分别下降了69%和74%, 说明此时微齿眼子菜和穗花狐尾藻试验组沉积物磷浓度相对于初始值有比较明显的下降, 而金鱼藻由于过早衰退, 在后期其沉积物向上覆水体的扩散通量反而有所上升。王圣瑞等^[27]研究发现间隙水对上覆水各形态磷浓度影响主要与沉水植物吸收和环境温度等影响因素有关。在本研究中, 环境温度是恒定的, 因此可以认为微齿眼子菜

和穗花狐尾藻有效地吸收和降低了沉积物中的磷, 控制了沉积物向上覆水体的磷扩散。

2.3 不同沉水植物对沉积物 Olsen-p 含量的影响

徐玉慧等认为^[28]沉积物中的 Olsen-p 含量与沉水植物生长周期有密切关系, 从下图可见(图3), 根际区与非根际区 Olsen-p 含量随着培养的延续相对于对照组都有所下降, 其中穗花狐尾藻和微齿眼子菜试验组下降最为明显, 非根际区与根际区相对于初始分别下降了45.6%、28.9%和49%、54.6%, 而金鱼藻由于过早衰退, 其试验组沉积物 Olsen-p 含量没有太明显变化。

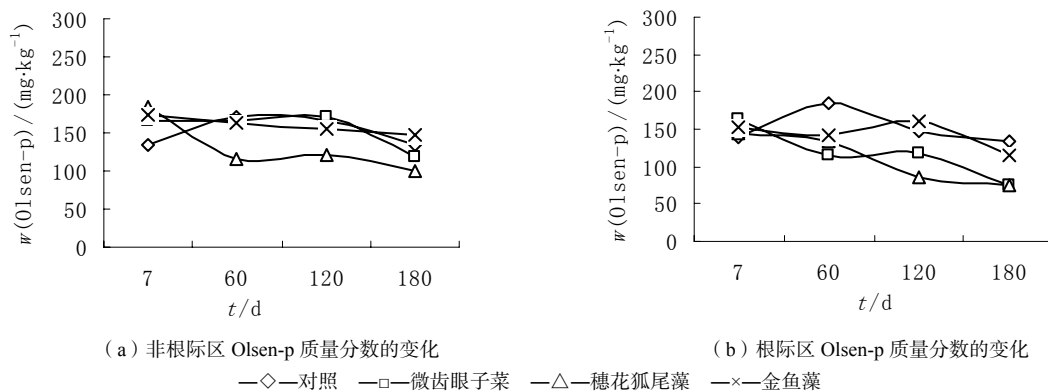
非根际区的 Olsen-p 含量降低可能有两种去向: 向上覆水体扩散或向根际区转移。根据扩散通量可以看出, 向上覆水体扩散很少, 所以向根际区迁移的可能性要大一些。黎颖治研究认为^[29]沉水植物的根系吸收底质中的 Olsen-p, 所以我们认为根际区 Olsen-p 含量减少基本上是被植物根系所吸收, 即沉积物 Olsen-p 在植物生长过程中发生了从非根际→根际→沉水植物的迁移。

在富营养化湖泊中, 水生植物的生长可以起到控制水体和沉积物营养元素的作用^[30]。综合以上三个方面可得: 在本试验条件下, 由于沉水植物金鱼藻的过早衰退, 相对而言, 微齿眼子菜和穗花狐尾藻更加有效地降低了沉积物中生物有效磷和 Olsen-p 的含量, 减少了沉积物向上覆水的磷扩散, 起到了减缓沉积物磷负荷、净化水体的作用。

3 结论

(1) 本研究条件下, 三种沉水植物对沉积物 NaOH-P 有明显的转化和吸收作用, 由于金鱼藻过早的衰退, 微齿眼子菜和穗花狐尾藻对沉积物 NaOH-P 转化和吸收的效果表现得较为明显, 相对于对照分别下降了36.9%和33.2%。

(2) 由于金鱼藻的过早衰退, 所以相对于金鱼藻试验组, 微齿眼子菜和穗花狐尾藻试验组沉积物



(a) 非根际区 Olsen-p 质量分数的变化

(b) 根际区 Olsen-p 质量分数的变化

—◇—对照 —□—微齿眼子菜 —△—穗花狐尾藻 —×—金鱼藻

图3 Olsen-p 质量分数随培养时间的变化

Fig.3 changes of Olsen-p content along with culture time

向上覆水体磷的扩散通量随着培养时间的延续有较明显的下降,并逐渐趋于稳定,即在本试验中,微齿眼子菜和穗花狐尾藻有效地控制了沉积物磷向上覆水的扩散。

(3) 沉积物 Olsen-p 在植物生长过程中有比较明显的迁移,即从非根际→根际→沉水植物,其中微齿眼子菜和穗花狐尾藻试验组表现最为明显。

参考文献:

- [1] 王明华,沈全华,唐晟凯,等.伊乐藻对黄颡鱼池塘养殖水体净化的试验[J].水生生态学杂志,2009,2(4):49-51.
Wang Minghua, Sheng Quanhua, Tang Shengkai, et al. Purification effect of elodea nuttallii on water in pond stocked pelteobagrus fulvidraco[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(4): 49-51.
- [2] 金相灿.湖泊富营养化研究中的主要科学问题[J].环境科学学报, 2008, 28(1): 21-23.
Jin Xiangcan. The key scientific problems in lake eutrophication studies[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(1): 21-23.
- [3] ArnlgMelzer. Aquatic macrophytes as tools for lake management[J]. Eydriologia, 1999, 395/396: 181-190.
- [4] 吴玉树.根生沉水植物菹草对滇池水体的净化作用[J].环境科学学报, 1991, 11(4): 411-416.
Wu Yushu. Purification of dianchi lake by radical submerged hydrophyte(Potamogeton crispus) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1991, 11(4): 411-416.
- [5] 王圣瑞,金相灿,崔哲,等.沉水植物对水-沉积物界面各形态氮含量的影响[J].环境化学, 2006, 25(5): 534-538.
Wang Shengrui, Jin Xiangcan, Cui Zhe, et al. Effects of submerged plant on the concentrations of different nitrogen species in water-sediment interface[J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(5): 534-538.
- [6] 包先明,陈开宁,范成新.种植沉水植物对富营养化水体沉积物中磷形态的影响[J].土壤通报, 2006, 37(4): 710-715.
Bao Xianming, Chen Kaining, Fan Chengxin. Effects of restoration of submerged macrophytes on phosphorus forms in sediments under eutrophic water[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 710-715.
- [7] 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.
Liu Bingqin, Wang Wanxian, Song Chunlei, et al. Influences of potamogeton crispus L. on phosphorus status in lake sediments[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2004, 22(5): 394-399.
- [8] Moss B. Engineering and biological to the restroration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communiton are important components[J]. Hydrobiologia, 1990, 200/201: 367-377.
- [9] 范成新,刘元波,陈荷生.太湖底泥蓄积量估算及分布特征探讨[J].上海环境科学, 2000, 19(2): 72-75.
Fan Chengxin, Liu Yuanbo, Chen Hesheng. Approach on estimating storage sludge in lake Taihu and its distributig characteristics[J]. Shanghai Environmental Science, 2000, 19(2): 72-75.
- [10] 贺锋,吴掘斌.水生植物在污水处理和水质改善中的应用[J].植物学通报, 2003, 20(6): 641-647.
He Feng, Wu Zhenbin. Application of aquatic plants in sewage treatment and water quality improvement[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2003, 20(6): 641-647.
- [11] 高海鹰,刘韬,丁士明,等.滇池沉积物有机磷形态分级特征[J].生态环境, 2008, 17(6): 2137-2140.
Gao Haiying, Liu Tao, Ding Shiming, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of Lake Dianchi[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2137-2140.
- [12] Ruban V, et al. H armonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works [J]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370: 224-228.
- [13] 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]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(4): 403-407.
- [14] McDowell R W, Sharpley A N. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration [J]. Geoderma, 2003, 112: 143-154.
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社.2002,234-256.
State Environmental Protection Agency. Water and waste water monitoring methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 234-256.
- [16] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等.沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J].应用生态学报, 2003, 14(8): 1351-1353.
Wu Zhenbin, Qiu Dongru, He Feng, et al. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1351-1353.
- [17] 胡俊,丰民义,吴永红,等.沉水植物对沉积物中磷赋存形态影响的初步研究[J].环境化学, 2006, 25(1): 28-31.
Hu Jun, Feng Minyi, Wu Yonghong, et al. Study on submerged macrophyte effect on phosphorus pools in the sediment[J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(1): 28-31.
- [18] 赵海超,王圣瑞,罗永华,等.沉水植物对不同层次沉积物及土壤中磷迁移的影响[J].水土保持学报, 2007, 21(5): 10-14.
Zhao Haichao, Wang Shengrui, Luo Yonghua, et al. Effect on transferred of phosphorus in different layer sediment and soil by submerged plant[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5): 10-14.
- [19] 赵海超,赵海香,王圣瑞,等.沉水植物对沉积物及土壤垂向各形态无机磷的影响[J].生态环境, 2008, 17(1): 74-80.
Zhao Haichao, Zhao Haixiang, Wang Shengrui, et al. Effect of inorganic phosphorus forms in the sediment and soil by submerged plant[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 74-80.
- [20] 陈书琴,路杨,储昭升,等.破罡湖通江前后湖滨带夏季水生植物对比研究[J].生物学杂志, 2009, 26(3): 10-12.
Chen Shuqin, Lu Yang, Chu Zhaosheng, et al. Comparative study on summer hydrophyte of lakeside in Pogang lake before and after its river-communiting (RC) [J]. Journal of Biology, 2009, 26(3): 10-12.
- [21] 金相灿,庞燕,王圣瑞,等.长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J].农业环境科学学报, 2008, 27(1): 0279-0285.
Jin Xiangcan, Pang Yan, Wang Shengrui, et al. Phosphorus forms and its distribution character in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the yangtze river[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1): 0279-0285.
- [22] Barko JW, Gunnison D, Carpenter S R. Sediment Interactions with Submersed Macrophyte Growth and Community Dynamics[J]. Aquatic Botany, 1991, 4(1): 41-65.
- [23] 李伟,钟扬.水生植被研究的理论与方法[M].武汉:华中师范大学出版社, 1992: 237-277.
Li Wei, Zhong Yang. Theories and methods of the study of aquatic vegetation[M]. Wuhan: Central China Normal University Press, 1992: 237-277 (in Chinese).
- [24] Bolalek J, Grace B. Ammonia nitrogen at the water-sediment interface in Puck Bay (Baltic) [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1996, 4(3):

- 767-779.
- [25] Ullman W J, Sandstron M W. Dissolved nutrient flux from the near-shore sediments of Bowling Green Bay, Central Great Barrier Reef Lagoon(Australia)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1987, 24(3): 289-303.
- [26] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云, 等. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21 (2): 152-154.
Cai Jingbo, Ding Xuefeng, Peng Hongyun, et al. Impact of environmental factors and submerged plant on phosphate release from sediment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2):152-154.
- [27] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 沉水植物黑藻对上覆水体中各形态磷浓度的影响[J]. 地球化学, 2006, 35 (2): 179-186.
Wang Shengrui, Jin Xiangcan, Zhao Haichao, et al. Effect of submerged plant *Hydrilla verticillata* on the concentrations of different phosphorus species in overlying water[J]. Geochimica, 2006, 35 (2): 179-186.
- [28] 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): 870-873.
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): 870-873.
- [29] 黎颖治, 夏北成. 影响湖泊沉积物-水界面磷交换的重要环境因子分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 162-166.
Li Yingzhi, Xia Beicheng. Some important exterior factors to affect phosphorus exchange across the sediment-water interface in lakes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(1):162-166.
- [30] 雷泽湘, 徐德兰, 顾继光, 等. 太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (2): 698-704.
Lei Zexiang, Xu Delan, Gu Jiguang, et al. Distribution characteristics of aquatic macrophytes and their effects on the nutrients of water and sediment in taihu lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27 (2): 698-704.

Effects of different submerged macrophytes on migration and transformation of phosphorus in sediments

ZHANG Fulin^{1,2}, WANG Shengrui^{2*}, YANG Suwen², JIN Xiangcan², YAO Yunfeng¹, ZHANG Liyuan^{1,2}

1. College of Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Huhhot 010018, China;

2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control//Research Center of Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

Abstract: Effects of three submerged macrophytes, *Potamogeton maackianus* A. Benn., *Myriophyllum spicatum* L. and *Ceratophyllum demersum* L. on migration and transformation of phosphorus in Sediments were investigated in the greenhouse. The results indicated that NaOH-P have been absorbed and transformed obviously by *Myriophyllum spicatum* and *Potamogeton maackianus* along with the continuation of culture time, the contents is 36.9% and 33.2%, while the impact of *Ceratophyllum demersum* is not too obvious; With the growth of submerged macrophytes, the Olsen-p of each treatment occurs migration process, which is from non-rhizosphere to rhizosphere to submerged macrophytest, this is because of absorption of the root, of which *Potamogeton maackianus* and *Myriophyllum spicatum* are more obvious. So, the effects of control phosphorus releasing by *Potamogeton maackianus* and *Myriophyllum spicatum* in sediments are more obvious.

Key words: submerged macrophytes; sediment; forms of phosphorus; pervasion flux; Olsen-p