

大型溠引导的沉水植被生态修复对滴水湖水质的净化效果*

霍元子^{1,2} 何文辉^{1,2} 罗 坤^{1,2} 王阳阳^{1,2} 张饮江^{1,2} 田千桃^{1,2} 何培民^{1,2**}

(¹ 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306 ;² 上海海洋大学水域环境生态上海高楼工程研究中心, 上海 201306)

摘 要 2007年4月—2008年1月,在滴水湖D港中段长950 m(水量为10000 m³)的修复区内投放大型溠(*Daphnia magna*),以滤除水华藻类等颗粒有机物,然后移栽伊乐藻、苦草、轮叶黑藻、光叶眼子菜和菹草等沉水植物,逐月监测水体中总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)和COD等水质指标,分析沉水植被栽培对滴水湖水体水质的净化效果。结果表明:试验期间,修复区水体TN、TP、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和COD显著低于对照区($P < 0.01$),溶解氧(DO)增加了50.4%,水体透明度(SD)平均在3.4~3.7 m,水质达到国家Ⅱ~Ⅲ类地表水水质标准。2008年3月应用已构建的沉水植被群落对富营养化流水水体水质进行净化试验,7 d后修复区流水水体除BOD外,TN、TP、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和COD均显著降低($P < 0.01$),DO增加了17.98%,SD提高了30 cm。利用大型溠控藻后移栽沉水植物对滴水湖水体水质的净化效果十分显著。

关键词 大型溠 沉水植物 滴水湖 生态修复

文章编号 1001-9332(2010)02-0495-05 **中图分类号** Q17 ;X173 **文献标识码** A

Bioremediation efficiency of applying *Daphnia magna* and submerged plants : A case study in Dishui Lake of Shanghai , China. HUO Yuan-zi^{1,2} , HE Wen-hui^{1,2} , LUO Kun^{1,2} , WANG Yang-yang^{1,2} , ZHANG Yin-jiang^{1,2} , TIAN Qian-tao^{1,2} , HE Pei-min^{1,2} (¹Fisheries and Life Sciences , Shanghai Ocean University , Shanghai 201306 , China ;²Water Environment & Ecology Engineering Research Center of Shanghai Institution of Higher Education , Shanghai Ocean University , Shanghai 201306 , China) . -Chin. J. Appl. Ecol. 2010 21(2) : 495-499.

Abstract : From April 2007 to January 2008 , a bioremediation experiment was conducted in a diversion channel of D-port pilot area of Dishui Lake (the channel length is 950 m , and its water volume is 10000 m³). *Daphnia magna* was first introduced to filter the high biomass of phytoplankton and other particulate organic matter , and then , five submerged plant species *Elodea canadensis* , *Vallisneria spiralis* , *Hydrilla verticillata* , *Potamogeton lucens* , and *Potamogeton crispus* were transplanted. Water samples were collected monthly to monitor the water quality and to investigate the bioremediation efficiency. Ten months monitoring data showed that in the remediation area , the water body 's total nitrogen (TN) , ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) , nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) , nitrite nitrogen (NO₂⁻-N) , total phosphorus (TP) , and reactive phosphate (PO₄³⁻-P) concentrations and chemical oxygen demand (COD) were significantly lower ($P < 0.01$) , dissolved oxygen (DO) was increased by 50.4% , and the Secchi depth (SD) reached to an average of 3.4-3.7 m. Overall , the water quality was up to grades Ⅱ or Ⅲ of state water quality standards for surface water. In March 2008 , the established submerged plant community was used to test its effectiveness in improving the eutrophicated water body from Dishui Lake , and the results showed that after 7-day treatment , except biological oxygen demand (BOD) , the TN , TP , NO₃⁻-N , NO₂⁻-N , NH₄⁺-N ,

* 国家水体污染控制与治理科技重大项目(2008ZX07101-012)、上海市科委重点科技攻关项目(09391912000)、上海市科委应用基础研究项目(09DZ1200903)、上海市水生生物学重点学科项目(S30701)和上海海洋大学博士启动基金项目资助。

** 通讯作者。E-mail : pmhe@shou.edu.cn

2009-07-29 收稿 2009-12-01 接受。

and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations and COD of the eutrophicated water were all decreased significantly, the DO was increased by 17.98%, and the SD was increased by 30 cm. The present study demonstrated the effectiveness of introducing *D. magna* and transplanting submerged plants in improving the water quality of Dishui Lake.

Key words : *Daphnia magna* ; submerged plant ; Dishui Lake ; bioremediation.

近 10 年来,我国江河、湖库的富营养化严重,“水华”现象时有发生,且呈逐渐恶化的趋势.据《2008 中国环境状况公报》显示,在 28 个国控重点湖(库)中,满足Ⅱ类水质的湖(库)有 4 个,占 14.3%;Ⅲ类 2 个,占 7.1%;Ⅳ类 6 个,占 21.4%;Ⅴ类至劣Ⅴ类 16 个,占 57.2%^[1].可见我国水域富营养化现象相当严重.

过多的氮、磷营养盐输入水体可以引起水体富营养化,而利用水生植物吸收营养物质,并通过收获植物带走水中的营养物质是一种低耗、高效和环境安全的生态修复方法. Ciurli 等^[2]研究表明,沉水植物狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)和伊乐藻(*Elo-dea canadensis*)可以有效地降低浅水湖泊中营养物质的含量;童昌华等^[3]研究表明,狐尾藻和微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)在水中栽培 1 个月后可使水体中的总氮去除 83.84% 和 77.54%,磷均去除 91.7%;方云英等^[4]认为,耐寒性沉水植物伊乐藻在净化水质、维持水质理化性质稳定和提高透明度方面作用显著.但是,沉水植物在重度富营养化的藻型湖泊中无法生存^[5],提高水体的透明度就成为沉水植被恢复的关键.我们在试验室内研究发现,经人工驯化的大型溞(*Daphnia magna*)可以快速滤食掉水华藻类和其他有机颗粒物,在短时间内将水体透明度提高 1.0~1.5 m,使沉水植物能够移栽和存活.而沉水植物通过营养竞争、克生效应等快速降低水体中氮、磷等营养盐的含量,抑制水华藻类的生长与繁殖.因此,在短时间内提高富营养化水体的透明度,继而应用沉水植物进行水质净化具有重要意义.

滴水湖位于上海临港新城内,面积为 5.56 km²,是目前国内在海滩上开挖的最大人工湖.自 2004 年 12 月引水入湖以来,水体综合营养状态指数在 54.3~60.4,有向中度富营养化发展的趋势^[6].本文通过采用大型溞控藻引导沉水植物栽培,对滴水湖引水通道 D 港进行生态修复,分析其对滴水湖水质的影响,以期为中、重度富营养化湖泊的生态修复提供借鉴.

1 研究区域与研究方法

1.1 试验区域

滴水湖 D 港中段长 950 m、宽 25 m,平均水深 3.5 m.生态修复试验前,没有大型水生植物生长,水体透明度仅为 40~50 cm.2007 年 4 月至 2008 年 1 月,在试验区内放养驯化的大型溞,以滤食掉浮游植物及有机碎屑,然后移栽沉水植物伊乐藻、苦草(*Vallisneria spiralis*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、光叶眼子菜(*Potamogeton lucens*)和菹草(*Potamogeton crispus*),形成了以沉水植物为主体的水生植物群落.

1.2 试验方法

在滴水湖湖区设立水样采样点 A,滴水湖 D 港内设立水样采样点 B、C、D、E、F.其中,样点 A、B、F 为对照区采样点(样点 B 和 F 位于 D 港修复区下游段和上游段的围堰外),C、D、E 为修复区采样点(位于 D 港中段修复区内).采样点设置见图 1.

2007 年 4 月—2008 年 1 月,在修复区和对照区连续进行了 10 个月的水质定点跟踪监测.2008 年 3 月向修复区内引入外源劣Ⅴ类污染源,每日水流量超过 D 港修复区水体的 10%,试验持续 7 d,每天

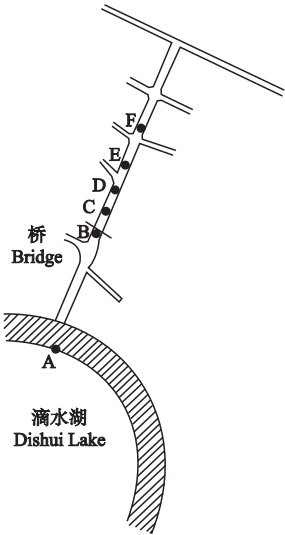


图 1 采样点分布示意图
Fig. 1 Sketch of sampling sites distribution.

定时对修复区和对照区的水质进行定点监测. 监测的水质指标包括总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝酸态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、总磷(TP)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)、高锰酸钾指数(COD)、5 日生物耗氧量(BOD_5)、溶解氧(DO)和透明度(SD), 分析沉水植物对高营养负荷流水水体水质的净化效果.

TN 采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(GB 11894—89), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂比色法测定(GB 7479—87), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用酚二磺酸分光光度法测定(GB 7480—87), $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用对氨基苯环酰胺-萘乙二胺分光光度法测定(GB 7493—87), $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 采用磷钼蓝分光光度法^[7], TP 采用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893—89), COD 采用 GB 11892—89 的方法测定, BOD_5 采用稀释与接种法测定(GB 7488—87), DO 采用碘量法测定(GB 7489—87), SD 采用塞氏盘法测定.

1.3 数据处理

用 SPSS 13.0 软件中单因子方差(ANOVA)及 Duncan 多重比较对试验结果进行统计分析和差异显著性检验. 参照《国家地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》对修复区和对照区水质进行评价.

2 结果与分析

2.1 滴水湖 D 港生态修复期间水体水质的月变化

2.1.1 含氮水质指标 由图 2 可以看出, 2007 年 6 月以后, 生态修复区的 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度迅速下降, 极显著低于对照组($P < 0.01$); 至 2008 年 1 月, TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别比对照降低 48.2%、90.3% 和 77.3%. 修复区 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在前 2 个月内与对照差异不显著($P > 0.05$); 至 2007 年 7 月, 修复区 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度显著低于对照($P < 0.01$), 2007 年 8 月后迅速下降. 这可能与随着水温的上升, 沉水植物快速生长, 大量消耗 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有关. 至 2008 年 1 月, 修复区内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比对照区降低了 72.2%.

2.1.2 含磷水质指标 由图 2 可以看出, 沉水植被群落对 TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除效果明显. 4—5 月份以后, 生态修复区水体中 TP 含量极显著低于对照($P < 0.01$), 至 2008 年 1 月, 修复区内 TP 含量比对照降低了 80.7%; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度从 2007 年 5 月开始极显著低于对照($P < 0.01$), 但在 2007 年 8—10 月, 修复区内 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度迅速上升, 这可能与周围面源

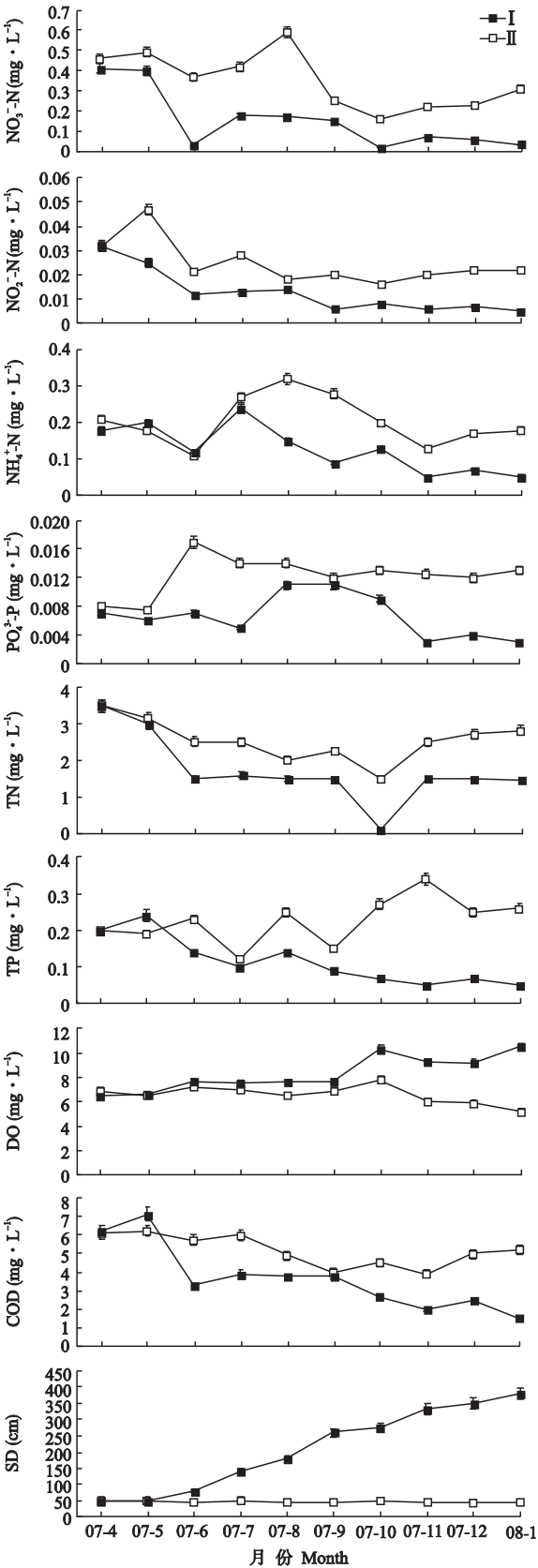


图2 生态修复区(I)与对照区(II)水体水质各项指标的月变化
Fig. 2 Comparison of water quality between eco-restoration area (I) and control area(II) (mean ± SD).

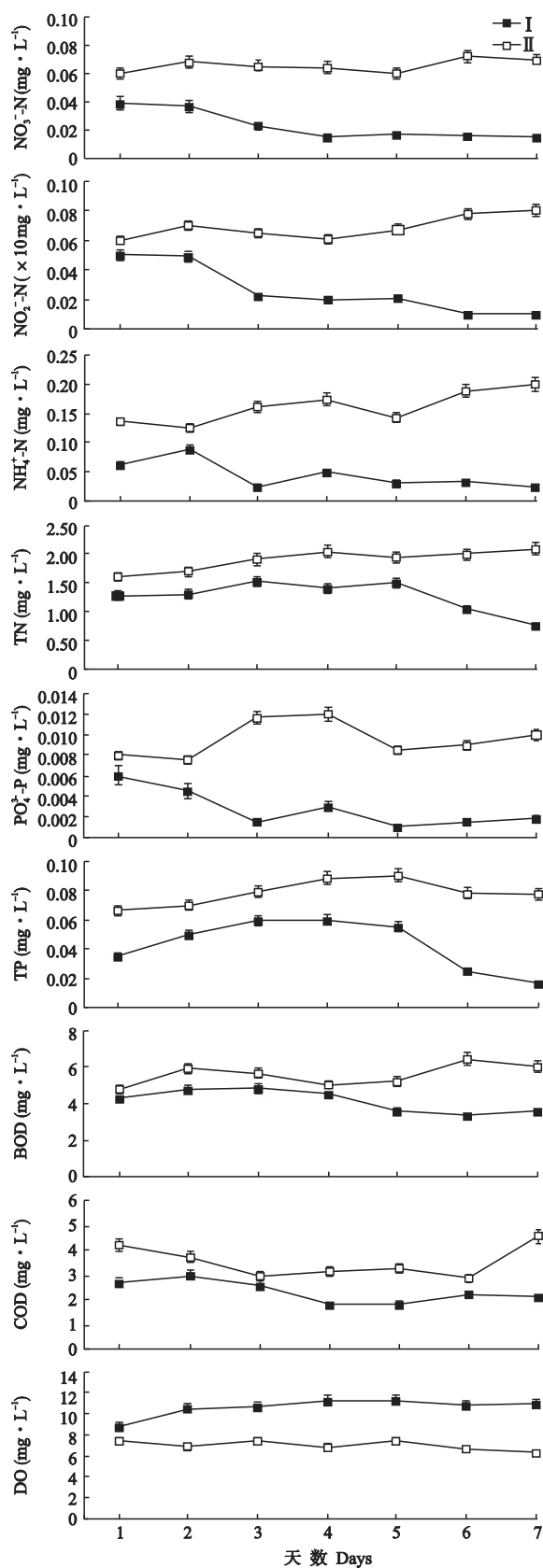


图3 沉水植被对富营养化流水水体水质指标的影响

Fig.3 Effects of submerged vegetations to the water quality of flowing eutrophic waters (mean ± SD).

I 修复区 Eco-restoration area ; II 对照区 Control area.

输入的大量磷营养盐有关. 2007 年 10 月以后, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度显著下降,至 2008 年 1 月已比对照下降了 76.9%.

2.1.3 其他水质指标 沉水植物群落可以显著提高水体的 SD. 由图 2 可以看出,4—5 月份以后,生态修复区水体的 SD 和 DO 含量显著高于对照 ($P < 0.01$),而 COD 显著低于对照 ($P < 0.01$). 至 2008 年 1 月,水体 SD 达 3.8 m,而对照区只有 0.5 m;水体中 DO 含量比对照提高了 50.4%,而 COD 比对照降低了 71.1%.

2.2 沉水植被对流水水体营养盐的去除效果

沉水植物群落构建以后,生态系统逐渐达到稳定状态. 2008 年 1 月,沉水植物群落中以耐寒品系的苦草和伊乐藻为优势种类,至 2008 年 3 月,虽然水温有所上升,但沉水植物群落仍以苦草和伊乐藻为主. 由图 3 可以看出,以苦草和伊乐藻为主的沉水植物群落对高营养负荷的流水水体净化效果极其显著. 从试验的第 2 天开始,生态修复区水体的 TN、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD 浓度迅速下降,极显著低于对照 ($P < 0.01$);至试验结束 (7 d),TN、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD 浓度分别比起始浓度降低了 41.4%、61.3%、80.0%、56.1%、51.4%、68.3% 和 51.4%. 而修复区水体 BOD 含量下降比较缓慢,7 d 后,仅比对照降低了 14.3%. 修复区水体 DO 含量比起始浓度升高了 19.8%,达到 $10.9\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于对照 ($P < 0.01$). 沉水植物群落对高营养负荷水体透明度的提高效果显著,7 d 后,修复水体 SD 达到 2.0 m,极显著高于对照 (0.3 m, $P < 0.01$).

3 讨 论

3.1 大型溞在生态修复中的作用

藻类的大量繁殖引起水体透明度降低是富营养化水域生态修复面临的 最大瓶颈之一. 因此,改善水底光照条件是沉水植被恢复的关键^[8]. 目前,改善水底光照条件的方法主要有:适当降低水位,使更多的光照可以达到底部;强制换水,改善水质;通过生物控制、药物控制或机械控制收集去除;投撒生态混凝剂或安全的微生态制剂;控制风浪,避免机械损伤或水质混浊^[8]. 上述方法中,有些实施起来相对困难,有些易产生二次污染或技术上难度较大. 本研究 中,投放大型溞并非是 利用其较高的摄食压力对水华藻类进行长期的下行控制作用,而是想利用大型溞快速滤食掉富营养化水体中的水华藻类和颗粒有

机物,达到短期内(2~4周)快速提高水体透明度(1.0~1.5 m)的目的(图2),从而使沉水植物的移栽和存活成为可能,为进一步应用沉水植被进行水质净化奠定基础。

3.2 沉水植被在生态修复中的作用

沉水植物在生物操纵中的重要性越来越得到人们的认可。大型沉水植物能够通过养分竞争、克生物质释放以及提供植食性浮游动物庇护所等多种机制影响湖泊生态系统。因此,沉水植被的恢复和重建是滴水湖水水质得以长期稳定与改善的关键。

本研究中,通过投放大型溇快速滤食水华藻类和有机碎屑,提高了水体的透明度以后,构建了以伊乐藻、苦草、轮叶黑藻、光叶眼子菜和菹草为主的沉水植物群落,并且经过10个月已经形成了能够进行自行演替的、稳定的生态系统。通过不同种沉水植物对不同种营养盐去除效率的差异,达到净化水体的目的。研究表明,苦草、菹草、伊乐藻和轮叶黑藻对总磷和总氮的去除速率均在80%以上^[9],眼子菜属的微齿眼子菜和马来眼子菜在去除总氮、硝态氮方面的效果比较好^[3]。菹草可以在水层中 NH_4^+-N 含量较低($<0.35 \text{ mg L}^{-1}$)时,优先吸收 NO_3^--N 而与浮游植物选择吸收 NH_4^+-N 互补^[10],这可能是本试验中 NO_3^--N 浓度下降明显的原因之一。此外,伊乐藻、轮叶黑藻和光叶眼子菜可以在短时间内(2 d)大量去除水体中的TN、TP等营养元素(未发表资料)。在冬季温度较低的情况下,沉水植物群落主要以伊乐藻和耐寒性品系的苦草为主,二者均能在较低温度下显著去除水体中的营养盐,并且光叶眼子菜不易遭受冻害,在寒冷季节也能发挥去除水体中营养盐、净化水质的作用^[4]。本试验结果还表明,构建的沉水植物群落对高营养负荷流水水体中的营养盐有着较高的去除效率,但在短期内对BOD的去除效率较低。这可能是由于沉水植物对单细胞藻类的克生效应和营养竞争作用产生的效果要在较长时间后才能显现的缘故。

除了营养吸收和克生效应以外,沉水植被的水质净化功能还表现在对水中污染物的吸附净化和促进沉降等方面^[11]。沉水植物密集的枝叶与水体有着庞大的接触面积,能够吸附水体中的悬浮颗粒。一些种类还可以分泌助絮物质,促进中小颗粒的沉降^[14],从而提高水体的透明度。本研究中,沉水植物的吸附净化和促进沉降作用对提高和维持水体的透明度也有一定的作用,其效率还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (中华人民共和国环境保护部). Water Environmental Status of China in 2008 [EB/OL]. (2009-06-17) [2009-07-28]. http://www.sepa.gov.cn/cont/swrkz/zhgl/200906/t20090617_152894.htm
- [2] Ciurli A, Zuccarini P, Alpi A. Growth and nutrient absorption of two submerged aquatic macrophytes in mesocosms, for reinsertion in a eutrophicated shallow lake. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, **17**: 107–115
- [3] Tong C-H (童昌华), Yang X-E (杨肖娥), Pu P-M (濮培民). Purification of eutrophicated water by aquatic plant. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(8): 125–140 (in Chinese)
- [4] Fang Y-Y (方云英), Yang X-E (杨肖娥), Chang H-Q (常会庆), et al. In-situ remediation of polluted water body by plant hydrophytes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(2): 407–412 (in Chinese)
- [5] Schefer M. *Ecology of Shallow Lakes*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1998
- [6] Wang H-Y (汪海英), Zhou M-J (周敏杰). Eutrophic status and control strategy for Dishui Lake in Shanghai. *Shanghai Water* (上海水务), 2006, **22**(4): 24–33 (in Chinese)
- [7] Lei Y-Z (雷衍之). *Experiments of Water Environmental Chemistry in Aquaculture*. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [8] Xu Z-X (徐祖信). *Planning Theory and Practice of River Pollution Control*. Beijing: China Water Power Press, 2003 (in Chinese)
- [9] Qiao J-R (乔建荣), Ren J-C (任久长), Chen Y-Q (陈艳卿), et al. Study on the removal rate to TP in Lake Caohai by common submerged macrophytes. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis* (北京大学学报·自然科学版), 1996, **32**(6): 785–789 (in Chinese)
- [10] Jin S-D (金送笛), Li Y-H (李永函), Ni C-H (倪彩虹), et al. Uptake by *Potamogeton crispus* of nitrogen and phosphorus from water and some affecting factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1994, **14**(2): 169–173 (in Chinese)
- [11] Li W-C (李文朝). Construction and purification efficiency test of an evergreen aquatic vegetation in an eutrophic lake. *China Environmental Science* (中国环境科学), 1997, **17**(1): 53–57 (in Chinese)

作者简介 霍元子,男,1979年生,博士,讲师。主要从事水域生态学研究 and 教学工作,发表论文10余篇。E-mail: yzhuo@shou.edu.cn

责任编辑 李凤琴