

6种沉水植物系统对淀山湖水质净化效果的研究

王丽卿, 李 燕, 张瑞雷

(上海海洋大学生命科学与技术学院, 农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室, 上海 200090)

摘 要:富营养化状态的淀山湖,是上海市主要水源地之一,兼有航运、排灌、旅游等多种功能。采用室内透明玻璃桶装置,研究了淀山湖常见 6 种沉水植物与底泥组成的系统对水体氮磷等营养物质的去除效果及动态规律。结果表明: ① 6 种沉水植物的除磷效果都很好,主要表现为沉降吸附;金鱼藻系统和马来眼子菜系统的除氮效果较好;马来眼子菜和穗状狐尾藻对氮磷的去除效率最高;这 3 种沉水植物可作为淀山湖沉水植被恢复的先锋植物; ② 沉水植物系统对淀山湖水体中磷的去除效果比氮好,速度也比氮快,对有机物(COD_{Mn})的去除效果不显著; ③ 沉水植物系统使水体中的叶绿素 a 大幅下降,对 DO 和 pH 的影响未表现出明显的规律性; ④ 供试沉水植物系统对水体中氮磷的去除方式可分为 3 类:植物体吸收为主、吸附沉降为主和二者结合。

关键词:沉水植物;淀山湖;总氮;总磷;去除率;去除效率

中图分类号:X173 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1134-06

The Purification of Lake Dianshan Water Quality with Six Species of Submerged Macrophyte Systems

WANG Li-qing, LI Yan, ZHANG Rui-lei

(College of Aqua-life Science and Technology, Shanghai Ocean University, Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquacultural Ecology, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China)

Abstract: Eutrophicated Lake Dianshan, main fresh water resource of Shanghai district, plays an important role in shipping, irrigation and drainage, tourism, and so on. An experimental study was carried out to investigate the effects of nutrient removal by six species of submerged macrophytes and the effects of macrophyte-sediment systems on nutrient dynamics in the lake water. The results showed that: ① All of the six species showed a significant effect for phosphorus removal, resulted from nutrient deposition along with sedimentation of suspended particles; *Ceratophyllum demersum* and *Potamogeton malainus* showed a better effect for nitrogen removal; *Potamogeton malainus* and *Myriophyllum spicatum* had highest efficiency for nutrient removal; these three species can be used as pioneer plants for restoration of submerged macrophytes in Lake Dianshan. ② Nitrogen in water was removed faster than phosphorus, but the removal of organic matter (COD_{Mn}) by macrophytes was not significant. ③ Chl a in the water declined significantly in the submerged macrophyte systems, but DO and pH did not change greatly. ④ Based on the pathways of nutrient removal, the six species were classified into three groups: tissue uptake, nutrient depositing, and combination of the both.

Keywords: submerged macrophytes; Lake Dianshan; total nitrogen; total phosphorus; removal rate; removal efficiency

长江中下游湖泊是我国淡水污染较为严重的水域之一,位于苏浙沪交界处的淀山湖自 1985 年开始每年均有不同程度的水华出现^[1],目前已处于富营养化水平^[2]。沉水植被不仅直接吸收氮磷营养物质,抑制藻类生长,还可改善水体和底质的生态环境,所以沉

水植被的生态恢复是生物防治水体富营养化的重要环节^[3]。结合淀山湖的理化水文条件,恢复沉水植被对淀山湖富营养化防治具有重要意义。

目前,关于水生植物各生态类群对水体营养盐水平的影响,国内外已有大量研究^[4-7],水生植物净化水体的效果和机理也有部分研究^[8-11]。但是结合淀山湖特定的水体环境,关于以沉水植物为主体的生态系统对水体氮磷营养盐的去除率和去除方式的比较研究相对较少。另外,淀山湖水环境生态的研究,主要集中在浮游动植物等生物群落结构分析和环境质量评价

收稿日期:2007-11-12

基金项目:上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金项目;上海市农委四新项目

作者简介:王丽卿(1970—),女,浙江东阳人,副教授,专业方向为水域环境生态修复。E-mail:lqwang@shou.edu.cn

等方面^[1,2,12,13],关于大型沉水植物及其生态功能开发利用方面的研究尚且不多。本文研究了淀山湖常见 6 种沉水植物与底泥组成的系统对水体氮磷等营养物质的去除率及动态规律,以期为淀山湖沉水植被生态恢复提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、梅花藻 (*Batrachium trichophyllum*)、苦草 (*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、马来眼子菜 (*Potamogeton malainus*)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 6 种沉水植物于 2007 年 7 月 5 日采自淀山湖,均为生长状态良好的成熟植株,且性状统一。实验条件下驯养适应 25 d。

1.2 试验条件和方法

试验于 2007 年 8 月 1 日—31 日在实验室内进行,采用 12 L 透明玻璃桶 ($\Phi=180\text{ mm}, h=550\text{ mm}$),桶底置厚度约 10 cm 的底泥 5 kg,试验设沉水植物处理组和不种植任何水草的空白对照组。每个处理组种养一种沉水植物 (鲜重约 10 g),设 3 个重复。试验水深为 450 mm,水温为 32~35 ℃,日间光照强度为 3 637~3 705 lx。试验期间添加纯水来补充因蒸发等原因损耗的水分,以保持水位。试验用水和底泥均取自淀山湖。

试验开始时测定水质的初始值,开始后每隔 5 d 取样进行水质化学分析,测定指标包括总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、活性磷 (SOP)、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、亚硝态氮 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)和叶绿素 a (Chla),测定方法参照《水和废水监测分析方法 (第四版)》^[14]。DO 和 pH 用仪器现场测定。测定沉水植物始末的生物量以及 TN、TP 含量,植物 TN 采用 FOSS Kjeltac 2300 凯氏定氮仪测定^[23],植物 TP 采用浓硫酸-高氯酸消解、钼锑抗分光光度法测定^[14]。

2 结果和讨论

试验用水水质初始值为 TN 1.68、TP 0.43、 COD_{Mn} 6.82 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838—2002),该湖水属Ⅳ—Ⅴ类。

2.1 沉水植物系统对淀山湖水体中不同营养物质的去除效果

沉水植物系统对氮磷营养物质的去除是生物相的生物作用和底泥相的生物与吸附作用相辅相成的

结果,其中生物相包括沉水植物、浮游生物、原生动物和微生物,底泥相主要包括微生物和底栖生物。

关于底泥在水域生态系统中的作用,无沉水植物生长的情况下,底泥中的营养物质会释放到水体中造成二次污染^[10]。种植沉水植物的情况下,营养物质在水体、沉水植物和底泥组成的系统中迁移,沉水植物一方面抑制底泥中营养物质的释放,另一方面底泥作为沉水植物根系的固着点和生长所需营养的主要来源,有利于水生植物更好地吸收利用水体和底泥中的营养物质^[15]。

2.1.1 沉水植物系统对水体中氮的去除效果

沉水植物系统能有效去除富营养化水体中的 TN (见图 1),相对原水的去除率高达 52.63%~93.99%,作用时间可持续约 30 d。其中金鱼藻的去除效果最好,30 d 后实验水体 TN 只有对照组的 6.03%,达到地表水Ⅰ类总氮的标准。研究指出,沉水植物对水体中 N 的去除过程中,细菌的降解作用占主导地位^[16]。

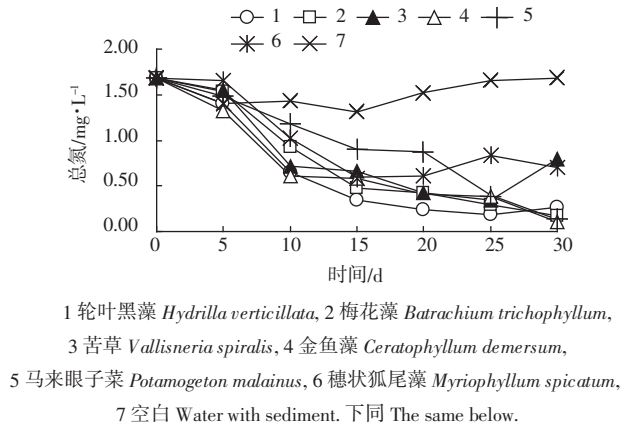


图 1 沉水植物系统对水体总氮的去除效果
Figure 1 Effect of submerged macrophyte systems on the removal of total nitrogen in water

沉水植物系统对水中氨氮的去除效果也十分明显 (见图 2),去除率高达 73.33%~81.25%,均达到地表水Ⅱ类氨氮的标准,其中以马来眼子菜的效果最好。氨氮去除速度比较快,仅 5 d 各沉水植物处理组水中氨氮含量下降 70%多。而童昌华等^[10]的冬季试验中,氨氮的去除率只有 14%~70%。这表明,尽管氨氮可以通过直接挥发、吸附到底泥等途径从水体中去除^[17-19],但硝化和反硝化作用才是去除的主要途径^[11]。本试验于夏季高温季节 (水温 30~32 ℃)进行,从而有利于加速氨氮的直接挥发和增强硝化、反硝化细菌的降解活力。

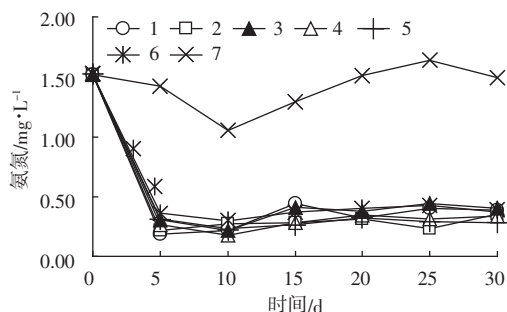


图2 沉水植物系统对水体氨氮的去除效果

Figure 2 Effect of submerged macrophyte systems on $\text{NH}_3\text{-N}$ removal from water

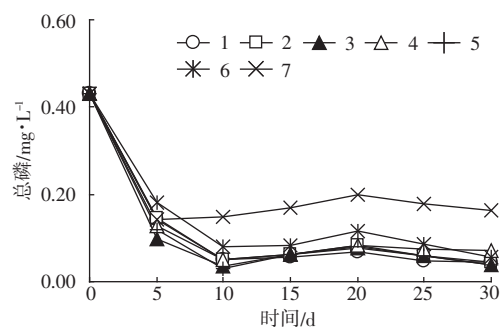


图4 沉水植物系统对水体总磷的去除效果

Figure 4 Effect of submerged macrophyte systems on total phosphorus removal from water

沉水植物系统对硝态氮的去除率在上述3种形态氮中最高(见图3),均在95%以上,而且作用时间较长,30 d内水中硝态氮的浓度持续下降,至结束时只有对照的1.14%~4.86%。这可能是因为硝态氮是最活跃的氮的形态,既可以被沉水植物直接吸收利用,也可以通过反硝化的过程被去除^[17],而且它是氮循环中微生物作用的直接底物^[10]。

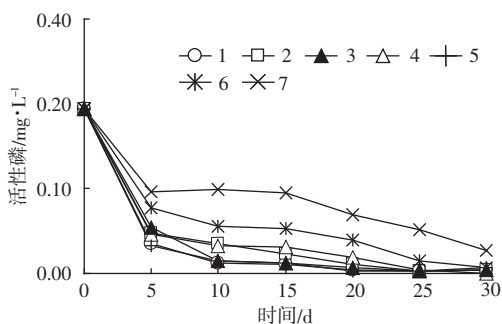


图5 沉水植物系统对水体活性磷的去除效果

Figure 5 Effect of submerged macrophyte systems on soluble orthophosphate (SOP) removal from water

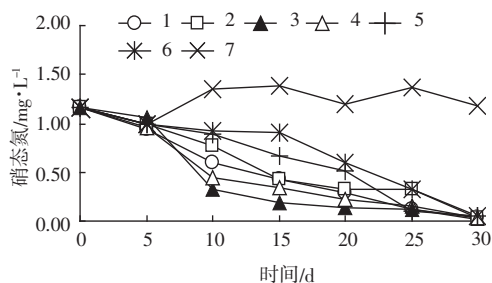


图3 沉水植物系统对水体硝态氮的去除效果

Figure 3 Effect of submerged macrophyte systems on $\text{NO}_3\text{-N}$ removal from water of Lake Dianshan

2.1.2 沉水植物系统对水体中磷的去除效果

沉水植物系统对总磷(见图4)和活性磷(见图5)的去除效果十分明显,去除率分别在80%和96%以上,达到地表水Ⅱ类总磷的标准。对总磷的去除率,苦草和马来眼子菜最高(均为91.05%),金鱼藻最低(83.38%)。对活性磷的去除率,金鱼藻几乎达100%,而且净化速率大于总磷,这主要与沉水植物生长时直接吸收正磷酸盐有关^[8]。总体上沉水植物系统对磷的去除效果比氮好,去除速率也比氮快。同时试验中空白组的磷在前5 d也下降了约30%~50%,这表明,沉降吸附作用对磷酸盐在水体中的归趋有重要影响^[3,20]。伏彩中等指出,在稳定的环境下,底泥是磷的重要归趋,因此减少风浪及其他活动的扰动,对控制磷的释

放有重要意义^[3]。

2.1.3 沉水植物系统对水体中有机物(以 COD_{Mn} 表示)的去除效果

沉水植物系统对有机物的去除效果不显著(图6),去除率最高只有51.66%(轮叶黑藻)。植物生长前期,水体的 COD_{Mn} 有所降低,但后期又反弹,变化规律不明显。这与童昌华等的研究结果一致^[10]。

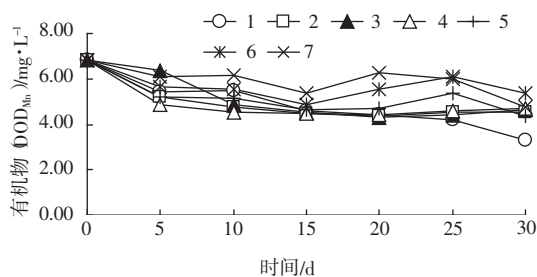
图6 沉水植物系统对水体有机物(COD_{Mn})的去除效果

Figure 6 Effect of submerged macrophyte systems on organic matter (COD_{Mn}) removal from water

2.1.4 沉水植物系统对淀山湖水体叶绿素 a (Chla)、DO 和 pH 的影响

如图 7 所示,沉水植物系统明显抑制浮游藻类的生长,使水中 Chla 含量降低了 78.96%~94.75%,其中穗状狐尾藻的抑制效果最好。虽然对照组的 Chla 在实验前 10 d 也明显下降,但接下来又逐步回升,实验后期始终高于其他处理。这说明,一方面是沉水植物对藻类具有一定的克制作用^[21];另一方面,浮游植物在静水中的沉降也是 Chla 降低的重要原因之一。

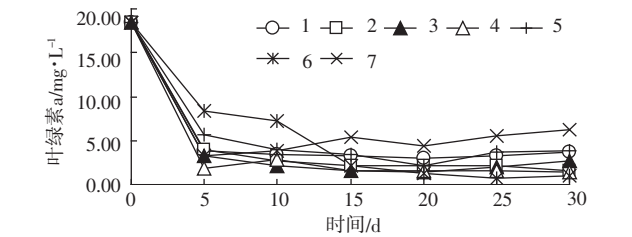


图 7 沉水植物系统对叶绿素 a 的影响

Figure 7 Effect of submerged macrophyte systems on Chla

沉水植物系统使水体中溶解氧的含量有所上升,但规律性不显著(表 1),其中梅花藻和苦草的增氧效果最好,30 d 后,DO 上升了 1 倍,是对照组的 1.6 倍。除对照组外,试验前后相比水体中的 pH 值均有小幅上升(表 1),其中轮叶黑藻上升幅度最大。

2.2 各种沉水植物对淀山湖水体营养盐去除方式的比较

试验前后植物体营养成分增加量和水体中营养盐去除量的结果见表 2。根据表 2 的结果,可将供试沉水植物系统对水体中氮磷的去除方式分为 3 类:Ⅰ类,以植物体吸收为主要去除方式,通过叶片、根系等器官大量吸收水体和底泥中的营养物质^[22],植物体内 TN、TP 含量的增加量大于水体中 TN、TP 的去除量,包括金鱼藻。Ⅱ类,以沉降吸附为主要去除方式,包括梅花藻、马来眼子菜和穗状狐尾藻,以此方式去除的 TN 占水体总氮去除量的 44%~61%,TP 占水体总磷去除量的 75%~87%,虽然它们直接吸收营养盐的

量相比水中减少的量小,但是其密集的枝叶以及部分种类分泌的助凝物质,能够吸附沉降水中的悬浮颗粒^[15],而且这些沉水植物的根茎向底泥输送氧气,在根区和远离根区的底泥中形成有氧和厌氧环境,促进磷酸盐向底质的吸附转移,促使三态氮在底泥微生物的硝化与反硝化作用下相互转化而除去^[3,4]。Ⅲ类,植物体直接吸收和沉降吸附两者相结合的方式进行营养物质的去除,包括轮叶黑藻和苦草,TN 的去除以吸收为主;总磷的去除以沉降吸附为主。

2.3 沉水植物对水体氮磷去除效率的比较

如表 3 所示,各种沉水植物对水体氮磷的去除效率(增加 1 g 鲜量对氮磷的去除量),马来眼子菜和穗状狐尾藻最高,梅花藻其次,苦草去除效率相对较低。

表 2 处理 30 d 后植物体和 水体营养盐含量变化的比较

Table 2 Comparison on the variation of nutrient content in submerged macrophytes and lake water after 30 days

分类	植物	生长量/g	植物体营养成分增加量/mg		水体中营养盐去除量/mg	
			TN	TP	TN	TP
Ⅰ	金鱼藻	7.75	13.89	3.39	12.66	2.87
	梅花藻	4.18	4.71	0.58	12.12	3.09
Ⅱ	马来眼子菜	2.47	6.90	0.79	12.38	3.14
	穗状狐尾藻	1.49	3.47	0.35	6.91	2.62
Ⅲ	轮叶黑藻	12.14	35.17	2.75	11.37	3.09
	苦草	12.09	19.19	2.16	7.09	3.14

表 3 各沉水植物处理组对淀山湖水体氮磷去除效率的比较

Table 3 Comparison on removal efficiencies of TN&TP form water between different species of submerged macrophytes

植物	植物去除率(%)=系统去除率-空白组去除率		增加 1 g 鲜量对氮磷的去除量/mg·g ⁻¹	
	TN	TP	TN	TP
轮叶黑藻	84.15	28.01	0.94	0.25
梅花藻	89.74	28.01	2.90	0.74
苦草	52.39	29.29	0.59	0.26
金鱼藻	93.75	21.62	1.63	0.37
马来眼子菜	91.69	29.29	5.01	1.27
穗状狐尾藻	58.36	25.25	4.63	1.76

表 1 沉水植物系统对 DO、pH 的影响

Table 1 Effect of submerged macrophyte systems on DO and pH in water

指标	时间/d	轮叶黑藻	梅花藻	苦草	金鱼藻	马来眼子菜	穗状狐尾藻	空白
DO/mg·L ⁻¹	0				4.8			
	10	6.8	8.3	6.6	6.8	6.6	5.8	5.3
	20	10.8	8.9	7.5	9.1	8.9	6.2	6.7
	30	9.4	10	10	7.1	8.9	9.9	6.1
	初始值				8.11			
pH	最终值	9.33	8.55	9.19	8.58	8.33	8.19	7.97

种云霄等研究指出,植物的生理代谢活动直接关系到污染物的降解^[23]。即便同一种沉水植物在不同的研究背景和试验条件下,表现出的净化能力也不同。可见,评价一种沉水植物的净化效果,应以去除率为主,因为去除率代表以沉水植物为主的整个生物系统的综合作用效果,是最终能产生的净化效果;而去除效率(增加1g鲜量对氮磷的去除量)只代表该种沉水植物的净化能力,会受到环境条件、植物生理生长等因素的制约,所以去除效率高的植物去除率未必高,净化效果也未必好。

3 结论

(1) 6种沉水植物的除磷效果都很好,主要表现为沉降吸附;金鱼藻和马来眼子菜植物系统的除氮效果较好;马来眼子菜和穗状狐尾藻对氮磷的去除效率最高;这3种沉水植物可作为淀山湖沉水植被恢复的先鋒植物。

(2) 沉水植物系统对淀山湖水体中磷的去除效果比氮好,速度也比氮快,对有机物(COD_{Mn})的去除效果不显著。

(3) 沉水植物系统使水体中的叶绿素a大幅下降,对DO和pH的影响未表现出明显的规律性。

(4) 供试沉水植物系统对水体中氮磷的去除方式,可分为3类:植物体吸收为主、吸附沉降为主和二者结合。

参考文献:

- [1] 阮仁良,屠鹤鸣,王云. 淀山湖水质监测及富营养化对策研究[J]. 上海水利, 1997, 3: 35-38.
- [2] 王旭晨,王丽卿,彭自然,等. 灰色聚类法评价淀山湖水水质状况[J]. 上海水产大学学报, 2006, 15 (4): 497-502.
- [3] 伏彩中,肖瑜,高士祥. 模拟水生生态系统中沉水植物对水体营养物质消减的影响[J]. 环境污染与防治, 2006, 28 (10): 753-756.
- [4] Wigand C, Stevenson J C, Cornwell J C. Effects of different submersed macrophytes on sediment biogeochemistry[J]. *Aquatic Botany*, 1997, 56 (3): 234.
- [5] Cedergreen N. Nitrate reductase activity in roots and shoots of aquatic macrophytes[J]. *Aquatic Botany*, 2003, 76 (3): 203-212.
- [6] 宋福,陈艳卿,乔建荣,等. 常见沉水植物对草海水体(含底泥)总氮去除速率的研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10 (4): 47-50.
- [7] 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.
- [8] 雷泽湘,谢贻发,徐德兰,等. 大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34 (3): 553-554.
- [9] 邓辅唐,孙佩石,邓辅商,等. 几种水生植物对滇池入湖河道水的净化性能研究[J]. 贵州环科技, 2005, 11 (3): 7-12.
- [10] 童昌华,杨肖娥,濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15 (8): 1448-1450.
- [11] 李科德,胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. 中国环境科学, 1995, 15 (2): 140-144.
- [12] 由文辉. 淀山湖周丛动物群落初步研究[J]. 水生生物学报, 1997, 21 (2): 114-122.
- [13] 由文辉. 淀山湖着生藻类群落结构与数量特征[J]. 环境科学, 1999, 20 (5): 59-62.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 123-207.
- [15] 种云霄. 利用沉水植物治理水体富营养化[J]. 广州环境科学, 2005, 20 (3): 41-43.
- [16] JAMES F R. Nitrate removal from a drinking water supply with large

free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14: 33–47.

- [17] 庄源益, 戴树桂, 张明顺. 水中氨氮挥发影响因素探讨[J]. *环境化学*, 1995, 14 (4): 343–346.

ZHUANG Yuan-yi, DAI Shu-gui, ZHANG Ming-shun. Study on factors influencing volatilization of ammonia nitrogen in water[J]. *Environmental Chemistry*, 1995, 14 (4): 343–346.

- [18] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001. 147.

WANG Xiao-rong. *Environmental Chemistry*[M]. Nanjing: Nanjing University Press. 2001. 147.

- [19] Reddy K R, Kebusk T A. State of the art utilization of aquatic plants in water pollution control[J]. *Wat Sci Tech*, 1987, 19 (10): 61–79.

- [20] 陈淑珠, 钱 红, 张 经. 沉积物对磷酸盐的吸附与释放[J]. *青岛海洋大学学报*, 1997, 27 (3): 413–418.

CHEN Shu-zhu, QIAN Hong, ZHANG Jing. Effect on adsorption and release of phosphate by sediments[J]. *Journal of Ocean University of*

Qingdao, 1997, 27 (3): 413–418.

- [21] 由文辉. 我国利用水生植物监测和净化污水的研究进展[J]. *环境科学动态*, 1993, 2: 8–11.

YOU Wen-hui. The current state of studies of the monitoring and purifying progress on wastewater by aquatic plants in China[J]. *Environmental Science Trends*, 1993, 2: 8–11.

- [22] 朱 斌, 陈飞星, 陈增奇. 利用水生植物净化富营养化水体的研究进展[J]. *上海环境科学*, 2002, 21 (9): 564–567

ZHU Bin, CHEN Fei-xing, CHEN Zeng-qi. Study progress on purification of eutrophic water by aquatic macrophytes[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2002, 21 (9): 564–567.

- [23] 种云霄, 胡洪营, 钱 易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4 (2): 36.

ZHONG Yun-xiao, HU Hong-ying, QIAN Yi. Study on application of macrophytes for water pollution control[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4 (2): 36.