

植物-生物绳组合生态浮床对富营养化水体的净化效果*

张亚娟¹, 刘存歧¹, 王军霞¹, 孙磊¹, 李洪波², 吴亦红²

(1. 河北大学 生命科学学院, 河北 保定 071002; 2. 河北省环境科学研究院, 石家庄 050001)

摘要:在白洋淀富营养化水体构筑薹菜(*Ipomoea aquatica*)浮床-生物绳组合系统一段时间后,带回实验室做静态分析,研究生物绳对微生物富集后对富营养化水体的改善效果。结果表明,薹菜浮床、薹菜-聚苯乙烯纤维绳组合浮床、薹菜-麻绳组合浮床对水中 TN、NH₄⁺-N、TP 和 DIP 均有较好的去除效果,薹菜浮床对水中 TN、NH₄⁺-N、TP 和 DIP 的去除率为 39.09%、44.55%、63.68% 和 53.70%,而薹菜-聚苯乙烯纤维绳组合浮床、薹菜-麻绳组合浮床的去除率分别为 49.46%、67.79%、54.72%、50.62% 和 60.43%、70.05%、71.70%、64.20%,可见组合式浮床比薹菜浮床的氮磷去除能力更强,而且以薹菜-麻绳组合浮床的净化效果最好。其中,薹菜浮床、薹菜-聚苯乙烯纤维绳组合浮床和薹菜-麻绳组合浮床的植物去氮贡献率分别为 36.13%、32.15% 和 27.11%,去磷贡献率分别为 71.85%、87.07% 和 74.34%,表明浮床中植物吸收只去除了系统中一部分 N,微生物的脱氮途径占主导作用;而对 P 的去除,本试验结果显示植物吸收起主要作用。可见,该组合生态浮床是改善富营养化水体的有效方法。

关键词:生态浮床;薹菜;富营养化;聚苯乙烯纤维绳;麻绳;氮;磷

中图分类号:X171;Q948.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2012)03-0031-06

随着全球湖泊富营养化程度的加剧,受污水体中氮、磷的去除成为备受关注的问题。诸多学者针对其治理开展了大量的研究工作,治理措施大概可以分为工程措施、化学措施和生物措施^[1],其中生物修复技术被认为是最科学有效和经济的水体修复技术^[2-4]。20世纪70年代以来,国内外对利用高等水生植物净化富营养水体进行了广泛的研究,应用了人工湿地、缓冲带、植物浮床系统等工程技术^[5],目前生态浮床技术以其能耗小、投资少、操作简便和处理效果好等优点正逐步成为水富营养化治理的关键技术^[6-8],所应用的浮床植物也包含了蔬菜^[9-12]、花卉^[13]、作物^[14]等。以往的研究多侧重于浮床系统对水体的净化效果。已有研究表明,水生植物组织中累积的氮仅占系统去除的一小部分,多数氮是微生物的硝化-反硝化途径去除的^[15-16],所以本试验利用“生物共生机制”原理,在浮床底部悬挂生物绳,试图通过该方法优化植物-微生物之间的协同作用,达到净化水体最佳效果。本文以传统浮床底部悬挂麻绳和聚苯乙烯纤维绳两种生物绳构成的组合浮床系统为对象,研究二种薹菜浮床对富营养水体氮磷

的去除效果,评价它们的生态优化效果,为优化生态浮床系统提供必要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 植物材料

薹菜采用陆地育苗后,移栽到置于湖面上的浮床上培育至生长盛期备用,时间为60 d。

1.2 浮床框体和床体

浮床边框采用竹竿为材料,浮床大小为3 m×3 m,框体中间为纤维结成的网格作为床体以固定浮床植物。安装采用木桩固定法,使浮床固定成排。在网格下系有由麻绳和聚苯乙烯纤维绳,作为附着生物和细菌的附着基质,增强薹菜对营养盐的吸收速率。放置薹菜后浮床安装在白洋淀大田庄村附近一较封闭水域,水质指标为:TN 2.84 mg/L, NH₄⁺-N 2.61 mg/L, TP 0.217 mg/L, DIP 0.172 mg/L 和 CODMn 34 mg/L,参照 GB 3838—200,属于V类水。

将生长旺盛、大小一致的薹菜和浮床底部的生物绳分别带回实验室,在水族箱中做静态试验分析。试验用水为浮床周边水。水族箱为40 cm×40 cm×

* 收稿日期:2012-02-01 网络出版时间:2012-5-26 12:13

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大水专项(No. 2008ZX07209-007-06)

作者简介:张亚娟,女,硕士,讲师,研究方向为湿地生态学;通讯作者:刘存歧,E-mail:liucunqi@sina.com

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.31_007.html

30 cm,每个水族箱中放置蔬菜 7 株,水 18 L。蔬菜鲜重 64.16 ± 6.89 g,各水族箱中植物生物量相近,生物绳长度相等,均为 25 cm,试验设置一个对照组和 5 个试验组,每组设 2 个平行(表 1)。试验室为自然光照,室温为 20~25℃,水温为 18~21℃。

表 1 不同试验组设置

Tab. 1 Setting of different experiment groups

组别	处理
对照组	试验用水
试验 1 组	试验用水+聚苯乙烯纤维绳
试验 2 组	试验用水+麻绳
试验 3 组	试验用水+植物
试验 4 组	试验用水+植物+聚苯乙烯纤维绳
试验 5 组	试验用水+植物+麻绳

1.3 试验方法

1.3.1 试验水样 试验于 2010 年 10 月 28 日开始,至 11 月 14 日结束。期间每隔 2 d 测定一次水质情况,测定水体总氮、氨氮、总磷和无机磷的含量,分别于水族箱中心和贴靠池壁两端距水面 10 cm 处取样,最终将水样混匀成一个水样。为了使试验与自然状态更符合,本试验不添加水量,通过称水质量来换算所观测指标的总量,方法参照葛滢等^[17]来计算去除率。即去除率 = $(C_0 \cdot V_0 - C_i \cdot V_i) \div (C_0 \cdot V_0) \times 100\%$, 式中 C_0 为初始水样的浓度, V_0 为初始时的体积, C_i 为第 i 天的水样浓度, V_i 为第 i 天的水体积。

1.3.2 微生物 试验结束后分别记录麻绳和聚苯乙

烯纤维绳中微生物的数量和形态。分别取 10 cm 麻绳和聚苯乙烯纤维绳放于 100 mL 无菌生理盐水中,震荡培养 2 h。采用稀释平板法测定细菌总数,采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,单位 CFU/mL,微生物测序后应用 BLAST 比对。

1.3.3 水样测定 氨氮浓度测定采用纳氏试剂分光光度法^[18],总氮浓度测定采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定^[19],磷浓度测定采用钼锑抗比色法测定^[19]。植物体氮测定采用过硫酸钾氧化吸收光度法^[20],磷测定采用经典钼蓝比色的改进方法^[21]。

1.3.4 数据统计及分析 结果处理采用 SPSS13.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同试验条件下蔬菜的生长状况

从表 2 数据分析,3 个试验组中蔬菜长势较好,至采样时成活率为 100%。在试验初期植物增长较快,但在后期部分叶片出现枯黄、萎蔫,可能是由于水中营养供应不足而减缓了植物的生长。试验过程中生物量增加显著($p < 0.05$),至试验结束时试验 3、4、5 组蔬菜干重各增加约 4.38、4.94 和 5.09 g,可知蔬菜在各试验系统中均生长良好,表明其在受污水体中能很好地生长,可以有效地吸收水中的营养物质,与其它蔬菜浮床的相关研究结果类似^[11-12,22-23]。从试验结束后蔬菜的株高、根长和干重分析,各试验组之间差异不显著($p < 0.05$),可见两种生物绳的存在并没有明显促进蔬菜的生长。

表 2 试验开始和结束时植物生育性状比较

Tab. 2 The plant biological characteristics of Ipomoea at the beginning and end of trial

	试验初始			试验结束		
	株高/cm	根长/cm	干重/g	株高/cm	根长/cm	干重/g
试验 3 组	38.6±4.1	7.3±1.8	63.59±2.09	66.0±4.5	8.6±2.0	67.97±4.83
试验 4 组	36.3±3.2	7.8±1.3	63.18±3.28	63.1±5.2	9.4±1.2	68.12±4.16
试验 5 组	36.4±3.8	6.7±1.6	62.25±5.21	68.3±3.9	8.4±1.0	67.34±5.89

2.2 各试验组水中氮的去除效果

试验开始和结束时各试验组水中总氮和氨氮的指标见表 3,对水中总氮和氨氮的去除率见图 1。

试验结束时,各试验组的总氮、氨氮值与试验开始时相比均显著降低,说明蔬菜、生物绳以及蔬菜—生物绳组合系统均能净化水质。而蔬菜—麻绳处理组对总氮和氨氮的去除率达到 60.43% 和 70.05%,高于其他处理组。

由结果分析,试验结束后试验 1 组和 2 组的总氮、氨氮值与对照组相比显著降低($p < 0.05$),说明两种生物绳的存在增加了水中氮的去除效果,可能是由于生物绳的富集作用使水体中的微生物数量增多,从而增加了氮的去除量。试验 3、4、5 组的总氮和氨氮去除率分别为 39.09%、49.46%、60.43% 和 44.55%、67.79%、70.05%,显著高于其他组($p < 0.05$),说明蔬菜浮床能明显增加氮的去除,而生物

绳的存在更加优化了植物—微生物的共生关系,增强了氮的去除效率。

表3 试验初期和结束时不同处理水体中氮素含量的变化

Tab.3 Change of nitrogen contents among different treatments at the beginning and end of trial

处理		总氮含量/(mg · L ⁻¹)	氨氮含量/(mg · L ⁻¹)
试验初始	所有组别	2.741±0.018a	2.164±0.021a
	对照组	2.459±0.027b	2.111±0.009b
试验结束	1.516±0.027c	试验1组	1.787±0.015d
	1.486±0.013c	试验2组	1.922±0.022c
	1.200±0.011d	试验3组	1.670±0.018e
	0.697±0.031e	试验4组	1.385±0.036f
	0.648±0.029e	试验5组	1.085±0.041g

注:图中同一列数据上不同字母代表有显著差异(p < 0.05)。

蔬菜有很强的耐高温和耐污性能,也有很高的经济价值。它可以一次栽种而多次采收,这对净化污水,将营养盐不断地从污水中输出而不致造成水体二次污染卓有成效。很多学者将其作为浮床植物进行了研究,由其结果可知,蔬菜浮床对水体中的氮有很强的去除效果,去除率与本研究结果较为接近^[11-12,23];李欲如^[24]研究水蔬菜对苏州重污染水体中的 TN、NH₄⁺-N、TP 等的去除率分别为 92.9%、93.9%、94.3%,明显高于本试验结果,可能是由于试验条件的差异造成的。蔬菜浮床去除氮的能力要受蔬菜净生长量和植物组织中氮浓度的限制,同时试验水体中氮的初始浓度也是重要的影响因素。还有,对照组的 N 含量也相应降低,可能是由于实验用水直接取自白洋淀,水中已有微生物的存在造成

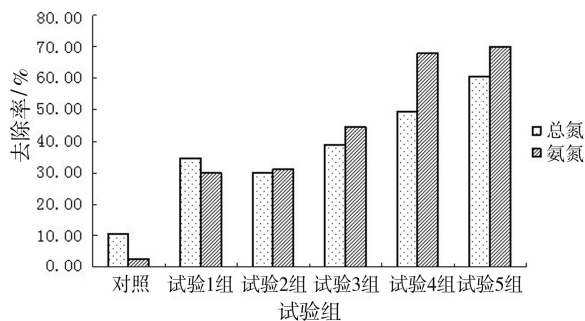


图1 各试验组对水体总氮和氨氮的去除效果
Fig.1 Removal effect on TN and NH₄⁺-N by differmt experiment groups

表4 不同类型生态浮床氮去除途径及贡献率

Tab.4 Nitrogen removal and contribution of floating-bed systems between different floating-bed

处理	去氮量/(mg · L ⁻¹)		贡献率/%	
	浮床系统	植物	植物	微生物
试验3组	1.071	0.387	36.13	66.37
试验4组	1.356	0.436	32.15	67.85
试验5组	1.656	0.449	27.11	72.89

表5 麻绳和聚苯乙烯纤维绳的细菌数量

Tab.5 The total numbers of bacteria on PST rope and hemp rope

	麻绳	聚苯乙烯纤维绳
细菌总数/(CFU · mL ⁻¹)	2.37×10 ⁷	1.67×10 ⁷

了此实验结果。

由不同浮床类型的氮去除贡献率分析,试验3、4、5组的总氮去除率在27%~37%(表4),说明浮床系统中氮的去除机制主要是微生物的硝化-反硝化作用,与范杰群^[25]、李海英^[26]等研究结果类似。

2.3 各试验组水中磷的去除效果

试验开始和结束时各试验组水中总磷和无机磷

有研究表明,人工湿地40%~92%的氮去除是通过硝化和反硝化作用的生物脱氮进行^[27]。由两种生物绳富集的细菌数量分析(表5),麻绳明显高于聚苯乙烯纤维绳,可知细菌生物量的影响是试验5组氮去除率高于试验4组的原因。

的指标见表6,对水中总磷和无机磷的去除率见图2。

试验结束时,各试验组的总磷、无机磷值与试验开始时相比均显著降低($p < 0.05$),说明蔬菜、生物绳以及蔬菜-生物绳组合系统均能去除水中的磷。

而蔬菜-麻绳处理组对总磷和无机磷的去除率达到 71.70% 和 64.20%,高于其他处理组。

由结果分析,试验结束后试验 1 组和 2 组的总

表 6 实验初期和结束时不同处理磷素含量

Tab. 6 Change of phosphorus contents of differences among treatments at the beginning and end of trial

	处理	总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	无机磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
试验初始	所有试验组	0.212±0.009a	0.162±0.007a
	对照组	0.107±0.011b	0.096±0.006b
试验结束	0.095±0.006b	试验 1 组	0.103±0.007bc
	0.090±0.006bc	试验 2 组	0.095±0.013 bc
	0.075±0.002cd	试验 3 组	0.077±0.011cd
	0.080bc±0.004	试验 4 组	0.096±0.008bc
	0.058±0.007d	试验 5 组	0.060±0.012d

注:图中同一列数据上不同字母代表有显著差异($p < 0.05$)。

磷、无机磷值与对照组相比显著降低($p < 0.05$),说明两种生物绳的存在也增加了水中磷的去除效果,可能是由于生物绳的富集作用增加了微生物的生物量,但两种生物绳组之间差异不显著。试验 3、4、5 组的总磷和无机磷的去除率分别为 63.68%、54.72%、71.70% 和 53.70%、50.62%、64.20%,显著高于对照组($p < 0.05$),说明蔬菜浮床能明显增加磷的去除,而生物绳的存在更加增强了磷的去除效率。

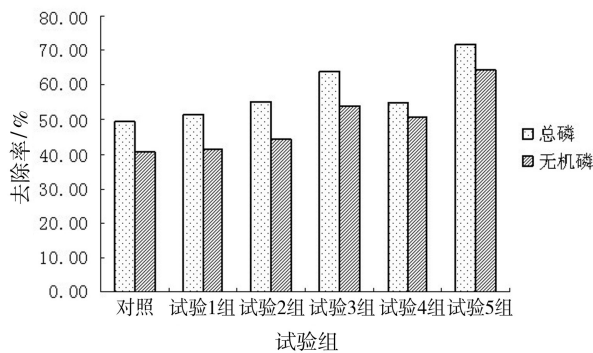


图 2 各试验组对水体总磷和无机磷的去除效果

Fig. 2 Removal effect on TP and DIP by different experiment groups

与蔬菜浮床对氮的净化作用相比,其对磷的去除研究相对较少。浮床系统对磷的去除途径包括植物吸收、沉淀作用和微生物固定等。本试验中蔬菜对水中磷的去除效率与周小平^[5]的研究结果相似,但明显低于李欲如^[24]的研究结果,可能是由于其试验温度为 30℃,是水蔬菜的最适生长条件,另一方面与试验用水的初始 N、P 浓度相关。

由不同浮床类型的磷去除率分析(表 7),试验 3、4、5 组的总磷去除率在 70%~90% 左右,说明植物的吸收在磷的去除中起着重要作用,这与氮的去除明显不同,而且由本试验结果可知,浮床系统对氮的去除总量明显高于磷,说明水生植物-微生物系统对氮的需求远高于磷,与唐静杰等^[28,29]研究结果相一致。

2.4 两种生物绳的附着微生物

由以上试验结果可知,生物绳试验组对氮磷的去除效率明显高于其他处理组,可能是由于其改变了试验水体中微生物的数量和组成,而麻绳试验组又高于聚苯乙烯纤维绳试验组,所以本试验初步分析了麻绳以及聚苯乙烯纤维绳上附着的细菌的数量

表 7 不同类型生态浮床磷去除途径及贡献率

Tab. 7 Phosphorus removal and contribution of floating-bed systems between different floating-bed

处理	去氮量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		贡献率/%	
	浮床系统	植物	植物	微生物
处理 3 组	0.135	0.097	71.85	28.15
处理 4 组	0.116	0.101	87.07	12.93
处理 5 组	0.152	0.113	74.34	25.66

和种类。细菌总数见表 5。选取出现概率大于 5%

的菌落进行初步鉴定,结果见表 8。

表8 麻绳和聚苯乙烯纤维绳的细菌种类

Tab. 8 The varieties of bacteria on PST rope and hemp rope

麻绳		聚苯乙烯纤维绳	
最相近菌株(登录号)	类群	最相近菌株(登录号)	类群
<i>Microbacterium laevaniformans</i> (AB004726)(98.9%)	放线菌门	<i>Ancylobacter dichloromethanicus</i> (EU589386)(99.6%)	α -变形菌纲
<i>Hydrogenophaga flava</i> (AF078771)(99.6%)(3)	β -变形菌纲	<i>Hydrogenophaga pseudoflava</i> (AF078770)(99.1%)	β -变形菌纲
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> (CP000143)(99.2%)	α -变形菌纲	<i>Microbacterium profundii</i> (EF623999)(99.1%)	放线菌门
<i>Cloacibacterium rupense</i> (EU581834)(99.7%)	黄杆菌门	<i>Lysobacter brunescens</i> (AB161360)(100%)	γ -变形菌纲
<i>Porphyrobacter donghaensis</i> (AY559428)(99.7%)	α -变形菌纲	<i>Catellibacterium aquatile</i> (EU313813)(100%)	α -变形菌纲
<i>Sandaracinobacter sibiricus</i> (Y10678)(99.6%)	α -变形菌纲	<i>Malikia granosa</i> (AJ627188)(98.8%)	β -变形菌纲
<i>Novosphingobium lentum</i> (AJ303009)(99.7%)	α -变形菌纲	<i>Providencia vermicola</i> (AM040495)(99.8%)	γ -变形菌纲

由以上结果可见,麻绳的细菌数量和多样性明显高于聚苯乙烯纤维绳,而且两种生物绳上的细菌优势菌群也明显不同,可能是造成麻绳处理组的氮磷去除效率高于聚苯乙烯纤维绳的原因之一。

3 结论

1)植物浮床系统对水中的氮磷有良好的净化效果,生物绳—薹菜浮床组合系统的去除效率优于单纯的植物浮床,而麻绳-薹菜浮床组合系统的效果更好,对氮磷的去除效率达到70.50%和64.20%,说明该方法优化植物-微生物之间的协同作用,更有利于水的净化。

2)在浮床系统中植物对氮的去除贡献率在27%~37%,对磷的去除贡献率在71%~88%,说明水中氮的去除主要是通过微生物的硝化与反硝化作用,而对磷的去除主要是通过植物的吸收作用。

3)麻绳和聚乙烯纤维绳所富集的微生物的数量、种类以及优势种群的不同可能是造成麻绳-薹菜组合浮床水处理效果最好的原因之一。

参考文献:

[1] 刘春光,王雯,庄源益.湖泊富营养化控制理论与技术[J].干旱环境监测,2004,18(1):17-20.
[2] Suresh B, Ravishankar G A. Phytoremediation: A novel and promising approach for environmental clean-up[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2004,24(2-3):97-124.

[3] Fiona j, Jody W W, Edward P G, et al. Natural bioremediation of a nitrate-contaminated soil-and-aquifer system in a desert environment[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(5):748-763.
[4] Bedienp B, Rifaih S. Ground water contaminant modeling for bioremediation; a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 1992,32(2-3):225-243.
[5] 周小平,王建国,薛利红,等.浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究[J].应用生态学报,2005,16(11):2199-2103.
[6] Akira M, Fumitake K, Waichi A, et al. Plant production and water purification efficiency by rice and umbrella plant grow in a floating culture system under various water environment conditions[J]. Fac Agr Kyushu Univ, 2000, 45(1):28-38.
[7] Li W, Friedrich R. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: Preliminary results from growth chamber trail[J]. Agric Ecosyst Environ, 2002, 90:9-15.
[8] Victor N, De J, Elliott M E. Orive, causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem; eutrophication[J]. Hydrobiologia, 2002, 475/476:1-19.
[9] 由文辉,刘淑媛,钱晓燕.水生经济植物净化受污染水体研究[J].华东师范大学学报,2000,3(1):99-102.
[10] 张村侠,朱世东.浮床栽培绿叶蔬菜对富营养化水体的净化效果[J].安徽农业科学,2007,35(14):4193-4194,4196.

- [11] 葛滢, 王晓月, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 1999, 11(6): 690-692.
- [12] 关保华, 葛滢, 常杰, 等. 富营养化水体中植物的元素吸收与净化能力的关系[J]. 浙江大学学报, 2002, 29(2): 190-197.
- [13] 吴伟明, 宋祥甫, 金千瑜, 等. 鱼塘水面无土栽培美人蕉研究[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(3): 206-210.
- [14] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 489-494.
- [15] 靖元孝, 杨丹青. 风车草(*Cyperus alternifolius*)人工湿地系统氮去除及氮转化细菌研究[J]. 生态科学, 2004, 23(1): 89-91.
- [16] Peterson S B, Teal J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems [J]. *Ecological Engineering*, 1996, 6(1-3): 137-148.
- [17] 葛滢, 常杰, 王晓月, 等. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1050-1055.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] 国家环保局编. 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: 246-248, 254-257.
- [20] 吴建之, 葛滢, 王晓月. 过硫酸钾氧化吸光光度法测定植物总氮[J]. 理化检测-化学分册, 2000, 36(4): 166-168.
- [21] 陈正行. 植物和食物中磷测定方法的改进[J]. 化学世界, 1996(1): 41-43.
- [22] 黄婧, 林惠凤, 朱联东, 等. 浮床水培蔬菜的生物学特征及水质净化效果[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(12): 92-94.
- [23] 吴伟, 胡庚东, 金兰仙, 等. 浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9): 791-795.
- [24] 李欲如, 操家顺, 徐峰, 等. 水蔬菜对苏州重污染水体净化功能的研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(1): 69-71.
- [25] 范洁群, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 不同类型生态浮床对富营养河水脱氮效果及微生物菌群的影响[J]. 环境科学研究, 2011(8): 850-856.
- [26] 李海英, 李文朝, 冯慕华, 等. 微曝气生态浮床水芹吸收 NP 的特征及其对系统去除 NP 贡献的研究[J]. 农业环境科学学报 2009, 28(9): 1908-1913.
- [27] Sherwood C, Reed Ronald W, Crites E. Joe Middlebrooks. *Natural systems for waste anagement and treatment* [M]. NewYork :Mcgraw Hill. Inc, 1995.
- [28] 唐静杰, 成小英, 张光生. 不同水生植物—微生物系统去除水体氮磷能力研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 270-273.
- [29] 蒋鑫焱, 翟建平, 黄蕾. 不同水生植物富集氮磷能力的试验研究[J]. 环境保护科学, 2006, 32(6): 13-16.

(责任编辑 欧红叶)