

蕹菜对富营养化水体的氮磷去除及吸收动力学研究

张亚娟¹ 刘存歧¹ 李洪波² 吴亦红² 王亚斌³

(1. 河北大学生命科学学院, 保定 071002; 2. 河北省环境科学研究院, 石家庄 050051; 3. 保定市环境监测站, 保定 071002)

摘要 以蕹菜(*Ipomoea aquatica*)为材料,采用改进的常规耗竭法,对氨氮、硝酸盐氮和无机磷的吸收动力学特性进行了研究。通过室内静态实验测定了蕹菜对富营养化水体的氮磷去除效率。用 Michaelis-Menten 方程来描述蕹菜对氨氮、硝酸盐氮和无机磷的吸收速率与溶液浓度的相互关系。结果表明:蕹菜对氨氮、硝酸盐氮和无机磷的最大吸收常数 $V_{\max}$ 为 23.59、2.88 和 1.52 $\mu\text{mol}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$, 亲和力常数 K_m 为 1.90、10.94 和 0.97 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 可见蕹菜对氨氮的吸收速率和亲和力均高于硝酸盐氮,对无机磷的吸收速率较小;蕹菜对富营养化水体总氮、氨氮、总磷和有机磷的去除率分别为 38.13%、44.85%、63.77% 和 53.95%;蕹菜对受试水体表现了良好的适应性和净化能力。

关键词 蕹菜 氨氮 硝酸盐氮 磷 吸收动力学

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)05-1057-05

Nitrogen and phosphorus removal performance and kinetics absorption by *Ipomoea aquatica*

Zhang Yajuan¹ Liu Cunqi¹ Li Hongbo² Wu Yihong² Wang Yabin³

(1. College of Life Sciences, Hebei University 071002, China;

2 Hebei Provincial Academy of Environmental Sciences, Shijiazhuang 050051, China;

3 Environment Monitoring Institute of Baoding, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract The absorption kinetics of ammonium, nitrate and phosphorus by *Ipomoea aquatica* were studied, after that ammonium, nitrate and inorganic phosphorus removal from eutrophic water was examined under indoor static simulation experimental condition. The relationship between the uptake rate and the concentration was depicted using the Michaelis-Menten equation. The purposes of this study were to provide a scientific foundation for the removal mechanism of ammonium, nitrate and inorganic phosphorus from water. The results showed that the maximum velocities ($V_{\max}$) of absorption on ammonium, nitrate and inorganic phosphorus were 23.59, 2.88 and 1.52 $\mu\text{mol}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$, the Michaelis constant (K_m) were 1.90, 10.94 and 0.97 $\mu\text{mol}/\text{L}$. The results of static state removals of TN, NH_4^+-N , TP, DOP by *I. aquatica* were 38.13%, 44.85%, 63.77% and 53.95%, respectively. It is proved that *I. aquatica* could be used to purify the eutrophicated water body.

Key words *Ipomoea aquatica*; ammonium; nitrate; nitrite; phosphorus; kinetics

水体中氮磷浓度升高导致的富营养化已成为全球性的环境问题,降低水体和底泥中的氮、磷含量成为水体修复的关键问题。国内外关于富营养化水体的治理主要采用物理、化学及生物修复技术^[1-2],其中利用水生植物富集氮、磷是治理、调节和抑制水体富营养化的有效途径。水生植物不仅可以直接吸收利用水中的营养物质和重金属等有害物质,还可通过其根际微生物的分解作用净化水体。凤眼莲、水花生和大藻等植物虽对水体有很好的净化效果,但利用途径较少,还会带来二次污染。因此,选取一些人类可以直接利用的、能高效净化水质的经济作物

已成为水体污染植物修复中亟待解决的问题。蕹菜又称空心菜,为一年生活多年生草本植物,有很强的耐高温和耐污性能,同时也有很高的经济价值。它可以一次栽种多次采收,这对净化污水、将营养盐不断的从污水中输出而不致造成水体二次污染卓有成

基金项目:保定市科技局指导计划项目(09ZF086);国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2008ZX07209-007-06)

收稿日期:2010-12-29; **修订日期:**2011-01-28

作者简介:张亚娟(1978~),女,硕士,讲师,主要从事湿地生态学方面的研究工作。E-mail:zyj0212@sina.com

效。操家顺等^[3]利用人工浮床技术,在苏州苗家河重污染河道中种植水薹菜,可以有效净化污染水体和抑制藻类暴发。

吸收动力学是将 Michaelis-Menten 方程应用到植物对介质中离子吸收动态过程的一种理论,在阐述植物尤其是栽培植物营养物质吸收特性方面的应用已十分普遍^[4-6]。有关水生植物在环境污染修复中的相关动力学研究鲜有报道。本文以酶促反应动力学理论为基础,开展薹菜对不同形态氮的吸收动力学研究,对进一步明确薹菜对废水中氮的净化作用的机理和确定污染修复工程中铵态氮与硝态氮的负荷均具有理论和实际意义。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验用薹菜采自农田。选择生长健壮大小一致的薹菜移于清水中培养5 d,以恢复受损根系。之后先用自来水、后用蒸馏水洗净于 Hogland 营养液中培养3周。每4 d更换营养液,调节营养液的pH为7.0,并且在培养期间向营养液中加入微生物抑制剂 $C_{16}H_{18}NaN_3O_4S$ (MERCK) 100 mg/L 以排除微生物的影响。

1.2 实验方法

1.2.1 薹菜对氨氮、硝酸盐氮和无机磷的吸收动力学实验

实验前将生长健壮大小一致的薹菜用超纯水冲洗干净,转入用超纯水配置的0.1 mmol/L的硫酸钙溶液中,在其中饥饿培养2 d,以排除自由空间中残留的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 对实验的影响。实验期间室温为20~25℃,水温18~21℃。

薹菜对氨氮和硝酸盐氮的吸收动力学实验采用改进常规耗竭法^[7],用硫酸钙作为支持溶液(0.10 mmol/L),用超纯水和分析纯 NH_4Cl 、 KNO_3 配置 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的吸收溶液,分8个处理,每个处理中放置薹菜10株,浓度分别为(0、0.1、0.25、0.5、0.75、1、1.5和2 mmol/L)。吸干薹菜根表面的水分后直接放于含不同浓度氨氮溶液300 mL的烧杯(用黑色纸包裹)中,加入 $C_{16}H_{18}NaN_3O_4S$ (MERCK) 100 mg/L 抑制微生物的生长,调节pH值为6.0。每个处理重复3次。最后把各处理转移到培养箱中进行实验,培养箱温度设为25℃,光照强度为4 000 lx。4 h后,将薹菜取出,吸干根部表面的水分后称量薹菜鲜重并记录。根据吸收前后氨氮浓度

的变化量,计算单位质量在单位时间内的氨氮净吸收速率。采用 Michaelis-Menten 动力学方程求出吸收动力学参数 V_{max} (最大吸收速率)和 K_m (表观米氏常数)。

薹菜对无机磷的吸收动力学实验同样采用改进常规耗竭法,无机磷吸收溶液的浓度同为0、0.1、0.25、0.5、0.75、1、1.5和2 mmol/L,实验设计同上。

1.2.2 富营养水中氮磷的去除

所用的实验用水直接取自河北省白洋淀,实验在20 cm×30 cm的水族箱中进行。每个实验箱中放置18 L水。实验时间2010年10月28日至11月15日,共18 d。设置对照组和实验组,每组2个重复,实验组放置预培养好的大小均匀的薹菜7株(每升水生物量 3.66 ± 0.36 g)。温度为 18 ± 2 ℃,在自然光照下进行。每2 d采水样测定水中总氮、总磷、氨氮和有机磷的含量。为了使实验与自然状态更符合,本实验不添加水量,通过称水质量来换算所观测指标的总量,参照文献[8]来计算去除率: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。实验用水水质指标为:TN 1.74 mg/L, NH_4^+-N 1.61 mg/L, TP 0.21 mg/L, DOP 0.15 mg/L 和 COD_{Mn} 34 mg/L,水质指标参照 GB 3838-200,属于V类水。

1.2.3 氨氮、硝酸盐氮和磷的测定方法

水样中氨氮浓度测定采用纳氏试剂显色分光光度法测定^[9],硝酸盐浓度测定采用紫外分光光度法测定^[10],磷浓度测定采用钼锑抗比色法测定^[10]。

1.2.4 数据统计及分析

结果处理采用 SPSS 和 SigmaPlot 9.0 软件。

2 实验结果与分析

2.1 薹菜对氨氮、硝态氮和无机磷的吸收动力学特征

薹菜对氨氮吸收速率与溶液浓度相互关系曲线,采用 Michaelis-Menten 方程描述(图1)。薹菜对氨氮的吸收速率随溶液浓度的增加而增大,氨氮浓度为0~1 mmol/L范围内,吸收速率随着浓度的升高而显著增加,超过这一浓度范围,吸收速率增加缓慢,并逐渐的趋于饱和。

图2是薹菜硝酸盐氮吸收速率随溶液浓度的变化曲线,其拟合 Michaelis-Menten 酶动力学模型。薹菜对硝酸盐氮的吸收速率随溶液浓度的增加而增

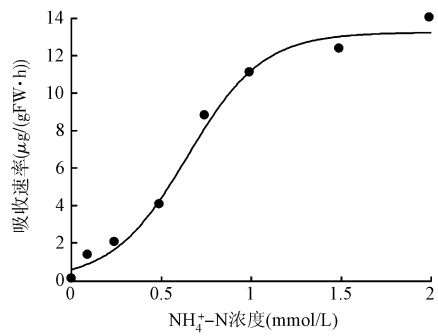


图 1 薹菜吸收氨氮的动力学曲线

速率增加缓慢,并逐渐的趋于饱和。薹菜对氨氮、硝酸盐氮和无机磷的吸收动力学参数见表 1。

表 1 薹菜吸收氨氮、硝酸盐氮和无机磷的动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of ammonium ,nitrate and inorganic phosphorus absorption by <i>I. aquatica</i>		$V_{\max}$	K_m
营养盐类型	动力学方程	($\mu\text{mol}/(\text{gFW} \cdot \text{h})$)	($\mu\text{mol}/\text{L}$)
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$V = 23.59C / (1.90 + C)$	23.59	1.90
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$V = 2.88C / (10.94 + C)$	2.88	10.94
DIP	$V = 1.52C / (0.97 + C)$	1.52	0.97

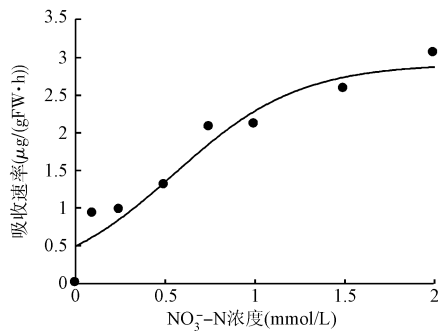


图 2 薹菜吸收硝酸盐氮的动力学曲线

2.2 薹菜对富营养水中氮磷的去除

2.2.1 植物的生长状况

薹菜在供试白洋淀水中生长良好,能很好的适应污水环境,成活率 100%。实验开始 2 周内植株生长迅速,枝叶挺拔,叶片翠绿;2 周后,叶片开始出萎蔫,枯黄;到实验结束时每株植物上都开始有枯黄的叶子。实验期间植物的生长状况见表 2。

表 2 实验期间植物生长状况

Table 2 Growth of <i>I. aquatica</i> in experimental water			
生长期	株高 (cm)	根长 (cm)	生物量 (g)
实验初始	41.60 ± 4.04	9.60 ± 2.22	65.83 ± 6.66
实验结束	73.80 ± 9.26	10.90 ± 1.02	79.88 ± 8.93
增长	32.20 ± 6.06	2.10 ± 0.82	14.05 ± 4.28

2.2.2 薹菜对水中氮磷的去除

图 4 显示薹菜对供试白洋淀水体中的 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 和 DOP 的去除率。可见,薹菜对水中的 N、P 均有一定的去除效果,对水中的 TN 去除率可达到 38.13%,对总磷的去除率可达到 63.77%,去除率实验组均高于对照组。表明薹菜对水中的 N、P 有明显的去除。

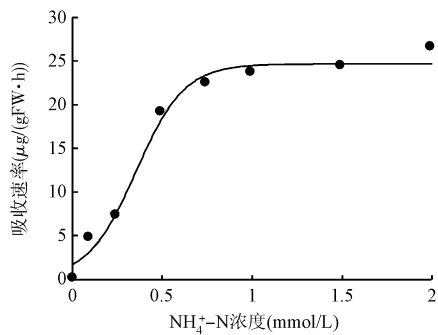


图 3 薹菜吸收无机磷的动力学曲线

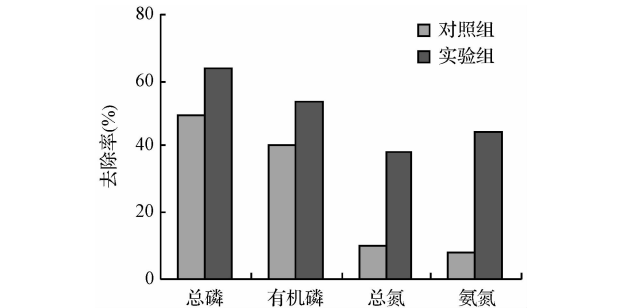


图 4 薹菜对水体总磷、有机磷、总氮和氨氮的去除效果
Fig 4 Removal effect of TP,DOP,TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ by *I. aquatica*

Fig. 1 Kinetics curve of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ uptake by *I. aquatica*

Fig. 2 Kinetics curve of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ uptake by *I. Aquatica*

Fig. 3 Kinetics curve of inorganic phosphorus uptake by *I. aquatica*

Fig 4 Removal effect of TP,DOP,TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ by *I. aquatica*

大,氨氮浓度大于 1.5 mmol/L,吸收速率增加缓慢,并逐渐的趋于饱和。

图 3 是薹菜无机磷的吸收速率随溶液浓度的变化曲线,其拟合 Michaelis-Menten 酶动力学模型。薹菜对无机磷的吸收速率随溶液浓度的增加而增大,无机磷的浓度为 0 ~ 1 mmol/L 范围内,吸收速率随着浓度的升高而显著增加,超过这一浓度范围,吸收

3 讨论

3.1 莼菜对氨氮、硝态氮和无机磷的吸收动力学特征

吸收动力学是将 Michaelis-Menten 学说及其方程应用到解释植物对介质中离子吸收动态过程的一种理论。植物根系吸收营养离子的动力学特性主要是通过吸收动力学参数 (K_m 和 V_{max}) 来描述, K_m 表示载体对离子的亲和力, K_m 越小, 载体对离子的亲和力越高, V_{max} 表示的最大吸收速率, 与载体数目及其在运转过程中的效率有关^[8]。它是研究植物元素吸收的重要方法, 为描述养分吸收特性、阐明吸收速率的机理、鉴定和筛选吸收高效的植物品种提供了有利的手段^[11]。

莼菜可去除污染水体中的氮, 有效净化污染水体和抑制藻类暴发, 而且应用于生产, 可以取得良好的经济、社会和环境效益的目的^[12], 其对氨氮和硝酸盐氮的吸收动力学尚未见报道。莼菜对氨氮和硝酸盐氮的吸收速率和亲和力存在很大差异, 其对氨氮和硝酸盐氮的最大吸收速率分别为 23.59 和 2.88 $\mu\text{mol}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$, 米氏常数分别为 1.889 和 10.941 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 表明莼菜对氨氮的最大吸收速率和亲和力均大于硝酸盐氮, 说明在水体中氮的浓度较低时, 莼菜优先吸收氨氮。目前有关水生蔬菜吸收动力学的报道较少, 胡绵好等^[13]研究了水芹 (*Oenanthe javanica*) 和豆瓣菜 (*Nasturtium officinale*) 对氨氮和硝酸盐氮的吸收动力学, 水芹的 V_{max} 和 K_m 分别为 31.35、16.45 $\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{kg FW})$ 和 0.0069、0.0025 mmol/L , 豆瓣菜的 V_{max} 和 K_m 分别为 13.60、10.21 $\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{kg FW})$ 和 0.028、0.085 mmol/L 。在动力学研究中, 底物浓度较高时, 对物质的吸收决定于最大吸收速率, 而底物浓度较低时, 先吸收何种物质, 将取决于底物与植物的亲和力, K_m 值越高亲和力越小。由此可见不同的水生蔬菜对氨氮和硝酸盐氮的吸收能力存在显著差异, 在较高浓度下水芹对氨氮和硝酸盐氮的吸收能力要略高于莼菜, 但氨氮浓度较低时, 莼菜的亲和力要高于水芹和豆瓣菜。此外, 常会庆等^[14]研究了3种水生植物黄花水龙 (*Jussiaea stipulacea* Ohwi)、伊乐藻 (*Elodea nuttallii*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 对于铵氮和硝态氮吸收动力学特征, 结果表明漂浮植物黄花水龙和凤眼莲具有较大的吸收速率 V_{max} , 更适合作为先锋植物对污染严重的富营养化水体进行前期的修复治

理, 而伊乐藻在低浓度下对氨氮和硝酸盐氮具有更强的亲和能力, 适合对轻度污染的水进行治理。沈根祥等^[15]应用浮萍也做了相关研究, 表明浮萍在氮浓度较低时优先吸收氨氮, 与本研究结果类似。

莼菜对无机磷的吸收动力学常数 V_{max} 为 1.52 $\mu\text{mol}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$, 远小于其对氨氮的最大吸收速率, 莼菜对无机磷的 K_m 为 0.97 mg/L , 说明其在低浓度下对无机磷的亲和力较高。莼菜对磷的吸收动力学与其它植物也存在差异, 刘强等^[16]研究了空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides* Griseb)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes* Solms)、碎米莎草 (*Cyperus iria* L) 和空心菜 (*Ipomoea aquatica*) 4 种水生植物根系磷吸收动力学特性, 其 V_{max} 分别为 75.30 $\mu\text{g}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$ 、68.80 $\mu\text{g}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$ 、38.70 $\mu\text{g}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$ 和 36.40 $\mu\text{g}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$, K_m 分别为 1.06 mg/L 、0.95 mg/L 、0.25 mg/L 和 1.67 mg/L 。结果表明, 不同植物对磷的吸收也存在种属差异性, 其中空心菜与莼菜为同种植物, V_{max} 结果差异是由于使用单位不同, 本试验经转换后 V_{max} 为 47.12 $\mu\text{g}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$, 高于刘强的研究结果, 可能是由于实验用莼菜处于不同的生长时期。

3.2 莼菜对水中氮磷的影响

莼菜在供试白洋淀水中保持较强的生命力, 生长良好, 新生叶叶色鲜绿较大, 株高和生物量增加明显。实验结束后, 莼菜的株高、根长和生物量分别增加了 77.40%、21.86% 和 21.36%。在实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。

实验结果表明, 莼菜对水中的 N、P 具有良好的去除效率。其对 TN 、 NH_4^+-N 、TP 和 DOP 的去除率分别可达到 38.13%、44.85%、63.77% 和 53.95%。但对照组的 N、P 含量也相应降低, 可能是由于实验用水直接取自白洋淀, 水中浮游生物的存在影响了实验结果。氮磷是植物生长所需的营养物质, 莼菜通过自身生长吸收水中的 N、P 物质, 其发达的根系及其根系微生物分泌大量的酶, 也会加速水体中大分子污染物的降解过程, 使水质得到净化^[17]。李欲如等^[18]研究水莼菜对苏州重污染水体中的 TN 、 NH_4^+-N 和 TP 的去除率分别为 92.9%、93.9% 和 94.3%, 明显高于本实验结果, 可能是由于其实验温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 是水莼菜的最适生长条件, 另一方面与实验用水的初始 N、P 浓度相关。

4 结 论

(1) 薹菜对 NH_4^+ -N 吸收的最大速率 ($V_{\max}$) 明显大于对 NO_3^- -N 和 P 吸收的 $V_{\max}$ 值, 而对 P 的亲合力明显大于 NO_3^- -N, 略大于 NH_4^+ -N。

(2) 在供试的白洋淀水体中, 薹菜成活率可达 100%, 生长能力很强。对 TN、 NH_4^+ -N、TP 均有明显的去除效果。

由此可见, 开展多种水生植物对不同形态氮磷吸收动力学研究, 对进一步明确它们对水体中氮磷的去除机理, 并针对不同营养特征的富营养化水体在进行生态修复工程中水生植物的选取等方面均具有理论和实践意义。薹菜在富营养水体中生长旺盛, 生命力强, 对水中 N 和 P 有明显的去除效率, 因此可作为白洋淀净化处理的优良生物材料之一。

参 考 文 献

- [1] Beltman B., Van den Broek T., Barendregt A. Rehabilitation of acidified and eutrophied fens in the Netherlands: Effects of hydrologic manipulation and liming. *Ecological Engineering*, **2001**, 17(1): 21-31
- [2] Healy M. G., Rodgers M., Mulqueen J. Treatment of dairywastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters. *Bioresource Technol.*, **2007**, 98(12): 2268-2281
- [3] 操家顺, 李欲如, 陈娟. 水薹菜对重污染河道净化及克藻功能. *水资源保护*, **2006**, 22(3): 36-39
- [4] Anti A. B., Mortatti J., Trivelin P., *et al.* Radicular uptake kinetics of NO_3^- , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, and NH_4^+ in whole rice plants. *Journal of Plant Nutrition*, **2001**, 24(11): 1695-1710
- [5] Mengel K., Kirkby E. A. *Principles of Plant Nutrition* (4th Edition). Bern: International Potash Institute, **1987**
- [6] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 六种作物不同生育期吸收铵、硝态氮的特性. *作物学报*, **1999**, 25(2): 221-226
- [7] 杨肖娥, 孙羲. 不同水稻品种 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收的动力学. *土壤通报*, **1991**, 22(5): 222-224
- [8] 葛滢, 常杰, 王晓月, 等. 两种程度富营养化水中不同植物生态特性与净化能力的关系. *生态学报*, **2000**, 20(6): 1050-1055
- [9] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, **1999**
- [10] 魏复盛. *水和废水监测分析方法* (第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [11] Cacco G., Ferrari C., Saccomani M., *et al.* Pattern of sulfate during root elongation in maize: Its correlation. *Physiology Plant*, **1980**, 48(3): 375-378
- [12] 余勤, 邝炎华. 根系养分吸收动力学研究及应用. *华南农业大学学报*, **1997**, 18(2): 105-110
- [13] 胡绵好, 袁菊红, 向律成, 等. 富营养化水体中水生植物氮代谢酶特性与不同形态氮去除的关系. *农业环境科学学报*, **2008**, 27(4): 1489-1494
- [14] 常会庆, 李娜, 徐晓峰. 三种水生植物对不同形态氮素吸收动力学研究. *生态环境*, **2008**, 17(2): 511-51
- [15] 沈根祥, 姚芳, 胡宏, 等. 浮萍吸收不同形态氮的动力学特性研究. *土壤通报*, **2006**, 37(3): 505-508
- [16] 刘强, 尹丽, 方玉生. 四种水生植物对富营养化水体中磷去除效果的研究. *井冈山学院学报(自然科学)*, **2008**, 29(12): 5-6
- [17] 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. *环境污染治理技术与设备*, **2003**, 4(2): 36-40
- [18] 李欲如, 操家顺, 徐峰, 等. 水薹菜对苏州重污染水体净化功能的研究. *环境污染与防治*, **2006**, 28(1): 69-71