

文章编号:1000-5641(2011)06-0057-08

# 水生植物浮床对城市污染水体的 净化效果研究

赵丰<sup>1</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 黄民生<sup>1</sup>, 吴小慧<sup>1</sup>, 张一藩<sup>1</sup>, 何岩<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062; 2. 安徽建筑工业学院, 合肥 230022)

**摘要:** 以香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)、睡莲(*Nymphaea tetragona*)和西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*)3种水生植物为试材,制成植物浮床,研究3种植物以及无植物浮床对城市污染水体中污染物的净化效果,试验共持续35 d.结果表明:3种植物在污染水体中能保持较强生命力,试验结束时,其株高、根长及生物量均有显著增加,增长率表现为睡莲>香菇草>西伯利亚鸢尾;3种植物对水体中 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN和TP均有明显去除效果,香菇草、睡莲、西伯利亚鸢尾对水体中的TN去除率分别为90.0%、85.7%和81.2%,对TP的去除率分别为68.6%、57.0%和62.8%;3种植物浮床去除率显著大于对照浮床( $P<0.05$ ).试验表明,3种植物对污染水体均有很好的净化效果和一定的景观价值,可作为城市景观污染水体治理的优良物种而推广使用.

**关键词:** 水生植物; 污染水体; 浮床; 净化效果

**中图分类号:** X172      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.06.007

## Study on the purification effects of aquatic plant floating-beds for urban polluted water

ZHAO Feng<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, HUANG Min-sheng<sup>1</sup>, WU Xiao-hui<sup>1</sup>,  
ZHANG Yi-fan<sup>1</sup>, HE Yan<sup>1</sup>

(1. Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;  
2. Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei 230022, China)

**Abstract:** Three kinds of ecological floating-beds were made of *Hydrocotyle vulgaris*, *Nymphaea tetragona* and *Iris sibirica*, respectively, to study their purification effects on removing pollutants of urban polluted water. The experiment lasted for 35 days. The results indicated that the three aquatic plants were adaptable to grow in the urban polluted water, and their biomass, height and root increased significantly at the end of the experiment. The growth rates were *Nymphaea tetragona*>*Hydrocotyle vulgaris*>*Iris sibirica*. Three plants had strong ability to remove  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and TP, which were higher than that in the control treatments ( $P<0.05$ ). The removal rates of TN by *Hydrocotyle vulgaris*, *Nymphaea tetragona* and *Myr-*

收稿日期:2010-12

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX07317-006,2009ZX07317-009)

第一作者:赵丰,男,博士研究生.

通讯作者:黄民生,男,教授,博士生导师. E-mail:mshuang@des.ecnu.edu.cn.

*iophyllum verticillatum* were 90.0%, 85.7% and 81.2%, respectively. In addition, the removal rates of TP by *Hydrocotyle vulgaris*, *Nymphaea tetragona* and *Myriophyllum verticillatum* were 68.6%, 57.0% and 62.8%, respectively. Based on their significant effects on nitrogen and phosphorus removal, the three plants are recommended as species of aquatic plants in ecological restoration engineering of urban polluted water.

**Key words:** aquatic plants; polluted water; floating-bed; purification effect

## 0 引 言

生态浮床技术具有效率高、投资少、运行费用低、可实现原位修复和控制污染物等特点,近年来得到广泛关注<sup>[1-3]</sup>.其净化机理是,通过在人工浮床上种植水生植物,利用植物对氮、磷等营养物的吸收作用、根系附着微生物对污染物的降解作用,达到净化水体的目的<sup>[4]</sup>.

目前,针对生态浮床的研究主要集中在浮床物种的选择、浮床植物的生长特性和浮床系统对污水的净化效果研究等方面<sup>[5-10]</sup>.关于浮床物种,应用到实际治理工程的已达几十种,如芦苇、空心菜、黄花水龙、水芹、灯芯草、香蒲和凤眼莲等.针对严重污染的城市河道景观功能特点,本文选择了3种耐污性能强、去污效果好、景观效果显著的水生植物,研究其对污染水体的净化效率,以期在城市严重污染的景观水体生态修复提供良好的物种选择和应用示范.

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

本试验研究所选取的景观水生植物:香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)、睡莲(*Nymphaea tetragona*)和西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*)均购于上海市车墩花卉市场.将植物带回试验基地后用蒸馏水洗根,置于塑料盆中,用试验河水预培养7d,选取生长大小一致的植株进行试验.

### 1.2 试验方法

试验地点位于国家“十一五”重大科技专项上海市试验基地.试验水体采自上海市普陀区工业河,该河主要污染源为生活污水.采集到的河水主要水质指标如表1所示,参照GB3838—2002<sup>[11]</sup>,该河水为劣V类.

表1 试验水体水质

Tab.1 Quality of experimental water

COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	pH
56.74 ± 4.83	10.36 ± 1.08	12.84 ± 2.06	0.83 ± 0.27	8.3 ± 0.4

试验采用有机玻璃水箱(长70cm×宽50cm×高60cm)水培浮床植物方式,共设计4组试验水箱,每组设3个平行.水箱盛放试验河水,水样体积为200L,每组水箱水面上放置一块65cm×45cm、厚5cm的聚乙烯泡沫板作为浮床,在浮床上按间距10cm×10cm开10个直径5cm的定植孔,每孔定植2株植物,每组浮床植物湿重500g,并用海绵辅助固定.第1组为只有浮床无植物的水箱作为空白对照,第2组为香菇草浮床系统,第3组为睡莲浮床系统,第4组为西伯利亚鸢尾浮床系统.试验于2009年4月15日~5月20日进行,试验周期为35d,整个试验处于自然光照和温度下.试验中每7d取样一次,测定水质指标,定期对植物生长指标进行测定,并且定时补充蒸馏水以消除由于蒸发和植物蒸腾作用水箱

所散失的水分.

### 1.3 指标测定

每次采样均在水箱的上部、中部和下部固定位置取水样并混合均匀,以消除抽样误差. 化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>):重铬酸钾法;氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N):纳氏试剂分光光度法;总氮(TN):过硫酸钾氧化—紫外分光光度法;总磷(TP):钼锑抗分光光度法<sup>[12]</sup>;pH测定采用 HI98127 笔式 pH 计测定(HANNA 中国公司);DO测定采用 YSI5100 型便携式溶解氧测定仪(美国 HACH 公司);植物生物量采用 JT601N 型电子天平称量.

## 2 结果与分析

### 2.1 植物生长情况

试验过程中3种植物均生长良好,叶片颜色鲜艳,均未出现死亡现象.但试验初期整株长度增加缓慢,栽种的1周后长出新根,4月中旬以后生长速度加快,分蘖旺盛.经过35 d生长,植株株高、根长等有显著增长.其中,香菇草单株分蘖数量最多;睡莲具有宽大的叶片,生物量大;西伯利亚鸢尾株高增长最快,整株长度达到32 cm,如表2所示.

表2 各浮床植物株高、根长及生物量的变化

Tab.2 Changes of height, root and biomass of three floating-bed plants

		平均株高/cm	平均根长/cm	平均分蘖/株	净增生物量(湿重)/g
香菇草	移植前	6	2	7	
	15 d	10	5	15	756
	35 d	14	7	22	
睡莲	移植前	8	4	3	
	15 d	14	10	7	824
	35 d	17	19	15	
西伯利亚鸢尾	移植前	10	3	5	
	15 d	18	5	12	738
	35 d	32	8	19	

由试验过程中植物的生长态势来看,香菇草、睡莲和西伯利亚鸢尾在污染水体中均保持较强的生命力,能够正常生长,同时3种植物均有很好的景观效应,因此在治理污染水体,特别是城市河道污染水体时可作为优势种而广泛使用.

### 2.2 各浮床系统对 COD<sub>Cr</sub> 的去除效果

由图1可知,3种植物浮床系统对 COD<sub>Cr</sub> 的去除均有明显的效果,而对照浮床系统中 COD<sub>Cr</sub> 降解缓慢.试验结束时,香菇草、睡莲和西伯利亚鸢尾浮床系统中 COD<sub>Cr</sub> 的浓度由初始的 55.6 mg/L 分别降低为 12.1, 15.3, 20.1 mg/L, 去除率达 78.2%、72.5%、63.8%,而对照浮床系统 COD<sub>Cr</sub> 浓度为 32.7 mg/L, 去除率与3种植物浮床系统存在显著差异( $P < 0.05$ ),仅为 41.2%.研究表明,植物对 COD<sub>Cr</sub> 的降解主要是依靠植物根系微生物的活动完成的,降解过程受水体温度、DO、水体微生物种类及数量等因素影响;通常,以水体中 DO 浓度  $< 0.20$  mg/L、 $(0.20 \sim 1.0)$  mg/L 和  $> 1.0$  mg/L 为控制条件,发生厌氧降解、缺氧降解和好氧降解反应<sup>[13]</sup>.因此,本研究对 COD<sub>Cr</sub> 的降解主要为好氧降解过程,同时植物浮床系统 COD<sub>Cr</sub> 去除率显著大于对照,其原因可能是植物根系的存在有利于微生物大量附着,导致微生物数量和种群量均大于对照组.

### 2.3 各浮床系统对氮的去除效果

由图 2 可知,试验结束时,香菇草、睡莲和西伯利亚鸢尾浮床系统中 TN 的浓度由初始的 15.42 mg/L 分别降低为 1.54、2.21、2.92 mg/L,去除率分别是 90.0%、85.7%、81.2%。3 种植物浮床系统对 TN 去除率均在 80% 以上,而对照浮床系统去除率显著低于植物系统 ( $P < 0.05$ ),仅为 54.9%,说明植物存在显著提高了系统对 TN 的去除效果。

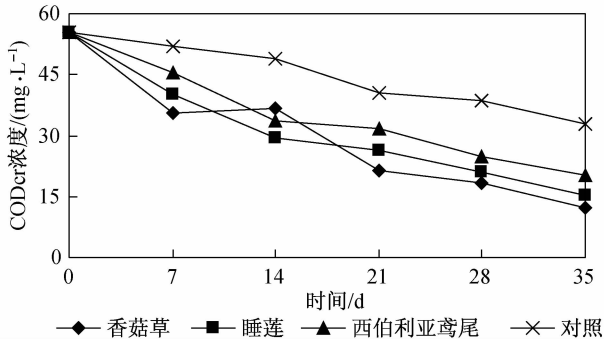


图 1 3 种植物浮床系统对 COD<sub>Cr</sub> 的去除效果

Fig. 1 Removal effects on COD<sub>Cr</sub> by floating-bed system of three plants

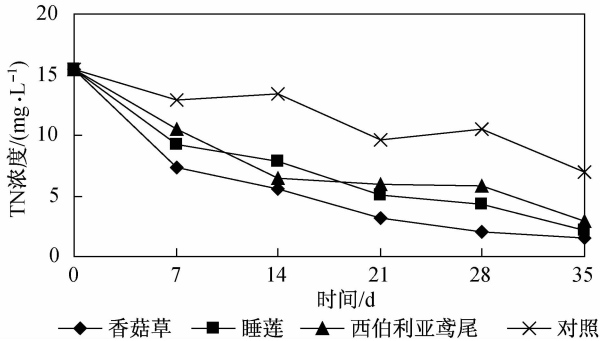


图 2 3 种植物浮床系统对 TN 的去除效果

Fig. 2 Removal effects on TN by floating-bed system of three plants

由图 3 可知,试验结束时,香菇草、睡莲和西伯利亚鸢尾浮床系统与对照浮床系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率分别是 92.83%、89.97%、91.18% 和 65.86%。3 种植物对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率与对照组相比分别提高 26.97%、24.11% 和 25.32%,这与王超等<sup>[13]</sup>对黄花水龙的研究结果类似。方差分析结果表明,3 种植物浮床系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除效果与对照系统差异显著 ( $P < 0.05$ )。研究表明,水体中的氨态氮去除的主要途径有以下三种<sup>[14]</sup>。

(1) 氨挥发 氨挥发与水体 pH 关系密切,当 pH 为 8.0~9.5 时,氨挥发显著,当 pH 为 7.5~8.0 时,氨挥发可以忽略不计<sup>[15,16]</sup>。试验过程各试验系统的 pH 变化情况见表 3,可知:对照浮床系统 pH 均值变化为 8.1~8.8,氨挥发显著;香菇草浮床系统 pH 均值变化为 7.2~8.0,氨挥发不显著,氨挥发不是该系统  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除的主要途径;睡莲浮床系统 pH 均值变化为 7.1~7.4,不利于氨挥发,故该系统通过氨挥发去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  很少,可以忽略不计;亚鸢尾浮床系统 pH 均值变化为 7.6~8.4,可能氨挥发对该系统  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除贡献较大。

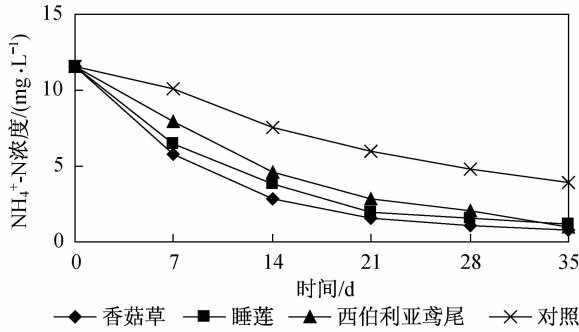


图 3 3 种植物浮床系统对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果

Fig. 3 Removal effects on NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N by floating-bed system of three plants

表 3 3 种植物浮床系统的 DO, pH 和温度变化情况

Tab. 3 Changes of DO, pH and temperature in the experimental floating-bed systems

	时间/d	DO 浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	pH	温度/℃
对照	0~7	2.09 ± 0.38	8.4 ± 0.2	16.6 ± 1.3
	8~14	2.16 ± 0.31	8.3 ± 0.6	18.7 ± 1.1
	15~21	2.12 ± 0.36	8.6 ± 0.3	19.7 ± 1.5
	22~28	2.07 ± 0.37	8.5 ± 0.5	20.5 ± 1.8
	29~35	2.03 ± 0.42	8.8 ± 0.3	22.4 ± 1.2
香菇草	0~7	2.21 ± 0.52	7.6 ± 0.4	15.8 ± 1.7
	8~14	2.27 ± 0.26	7.8 ± 0.3	17.8 ± 1.4
	15~21	2.24 ± 0.33	8.0 ± 0.5	19.4 ± 1.7
	22~28	2.37 ± 0.25	7.2 ± 0.3	20.3 ± 1.2
	29~35	2.33 ± 0.42	7.5 ± 0.2	21.6 ± 1.3
睡莲	0~7	2.16 ± 0.37	7.4 ± 0.3	16.2 ± 1.6
	8~14	2.24 ± 0.41	7.3 ± 0.5	18.3 ± 1.2
	15~21	2.18 ± 0.62	7.2 ± 0.3	19.7 ± 1.2
	22~28	2.32 ± 0.18	7.1 ± 0.2	20.7 ± 1.5
	29~35	2.28 ± 0.57	7.3 ± 0.1	22.1 ± 1.9
西伯利亚鸢尾	0~7	2.12 ± 0.64	8.2 ± 0.4	16.4 ± 1.3
	8~14	2.14 ± 0.57	8.4 ± 0.3	18.5 ± 1.5
	15~21	2.09 ± 0.35	8.3 ± 0.6	19.2 ± 1.4
	22~28	1.56 ± 0.41	7.8 ± 0.4	19.8 ± 1.7
	29~35	1.35 ± 0.75	7.6 ± 0.5	20.4 ± 1.6

(2) 硝化反应 硝化是将铵离子氧化为硝酸根的过程,有自养型好氧微生物来完成,硝化反应受 DO 浓度、pH、温度、碳氮比以及微生物数量等因素影响. 其中,硝化菌的最佳 pH 为 7.0~8.5, 同时硝化反应的 DO 浓度一般需高于 2 m/L, 温度对硝化反应也有重要影响, 当温度低于 15 ℃ 是硝化反应将受到明显抑制. 由表 3 可知, 香菇草浮床系统和睡莲浮床系统整个试验期间, 水体温度分别为 15.8~21.6 ℃ 和 16.2~22.1 ℃, pH 分别为 7.2~8.0 和 7.1~7.4, DO 浓度分别为 2.21~2.33 m/L 和 2.16~2.28 m/L, 适宜硝化菌的生长, 因此硝化反应是这两个浮床系统的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除的主要原因; 西伯利亚鸢尾浮床系统, 试验期间水体温度分别为 16.4~20.4 ℃, 在试验 0~21 d, DO 浓度为 2.09~2.14 m/L, 而 22~35 d, DO 浓度降低为 1.35~1.65 m/L, 因此该试验组在前 21 d 内 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 降低硝化反应有重要关系, 而 22~35 d 时, 硝化反应将受到抑制; 而对照浮床系统, 由于试验期间 pH 变化范围为 8.3~8.8, 大于硝化细菌存在的最佳 pH 条件, 因此对照浮床系统通过硝化反应去除 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 有限.

(3) 植物吸收 植物吸收的氮素主要是氨态氮和硝态氮, 也包含一些小分子含氮有机物

如尿素和氨基酸等. 一般来说, 植物同化吸收水体的氮素, 植物体内氮积累量与植物生物量有很好的相关性, 因此植物生物量的变化直接反应了从外界水体吸收养分的多少, 所以可以通过生物量来评价植物对氮的吸收. 试验过程中, 3种浮床植物株高、根长和分蘖数均有显著增加, 说明3种植物浮床系统通过自身同化吸收氮素作用显著.

由图4可知, 香菇草和睡莲浮床系统中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度呈先增加后减少的趋势, 试验第21天左右,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度达到最大值(4.37 mg/L 和 3.68 mg/L), 比初始增加了 12.14 倍和 10.22 倍, 与  $\text{NH}_4^+$ -N 形成此消彼长的变化趋势, 随后  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度降至 0.62 mg/L 和 0.53 mg/L; 西伯利亚鸢尾和对照浮床系统  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度在试验前 14 d 左右有所增加, 但增加幅度没有香菇草和睡莲浮床系统大, 14 d 后  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度呈平缓下降趋势.

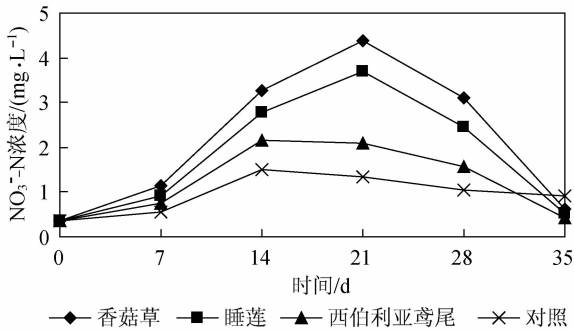


图4 3种植物浮床系统对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除效果

Fig. 4 Removal effects on  $\text{NO}_3^-$ -N by floating-bed system of three plants

试验浮床系统  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度变化与水体硝化、反硝化反应以及植物吸收有密切关系. 一般来说, 硝化菌将水体  $\text{NH}_4^+$ -N 转化为  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NO}_3^-$  后, 通过厌氧微生物将硝酸根还原为分子氮, 从系统中去除, 因此反硝化反应需在厌氧或缺氧条件下发生. 研究表明, 当 DO 浓度  $\leq 0.50$  mg/L 时, 仅发生反硝化反应; 当 DO 浓度  $\geq 2.0$  mg/L 时, 仅发生硝化反应. 本试验中, 植物浮床系统由于植物光合作用以及呼吸作用将氧气从上部送至根系, 经释放和扩散, 根系周围呈现好氧环境, 致使水体中 DO 浓度较高. 同时, 由于试验容器较浅, 植物浮床系统, 对照系统水体复氧能力均较强, 香菇草和睡莲浮床系统的 DO 浓度始终高于硝化反应的最低要求, 同时由于水体 DO 浓度较为均一, 厌氧-好氧交替的环境较难形成, 从而使得系统中硝化反应充分, 而不利于厌氧型反硝化细菌的生长和繁殖, 抑制了反硝化酶, 使反硝化反应缓慢, 因此导致这 2 组浮床系统  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在试验前 21 d 左右大量积累. 试验 21 d 以后由于水体中的绝大部分氨态氮已转化为硝态氮, 因此试验后期  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度出现显著降低趋势, 原因可能是在于香菇草和睡莲浮床系统对硝化作用的产物——硝态氮吸收同化所致. 对照浮床系统  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度变化不大的主要原因是该系统硝化反应不明显, 故  $\text{NO}_3^-$ -N 的积累很少, 其氮素主要是通过氨挥发而去除的.

#### 2.4 各浮床系统对磷的去除效果

由图5可知, 3种植物浮床系统对水体 TP 均有明显的去除效果. 试验结束时, 香菇草、睡莲和西伯利亚鸢尾 TP 浓度降低为 0.27, 0.37 和 0.32 mg/L, 去除率达 68.6%, 57.0% 和 62.8%, 而对照浮床系统去除率远远低于植物系统, 仅为 19.8%, 与植物浮床系统存在显著差异 ( $P < 0.05$ ). 一般来说, 浮床系统对磷的去除途径包括植物吸收、接触沉淀、过滤吸附作

用和微生物固定等<sup>[17]</sup>. 本试验中,由于浮床载体是泡沫板、水箱底部是塑料材质,故吸附作用去除磷可不予考虑,而对于对照系统而言,由于缺少植物的吸收,水体 TP 浓度的降低可能是沉淀、微生物降解起到重要作用,植物浮床系统去除率显著高于对照系统的主要原因可能植物对可溶性磷的同化吸收作用. 3 种植物中,睡莲浮床系统对 TP 的去除率最高,可能是由于睡莲对磷的吸附以及根系周围微生物对磷的固定作用更强.

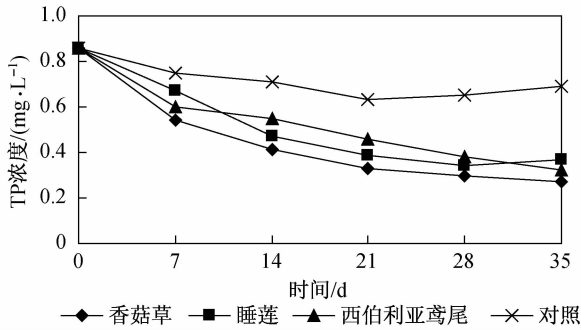


图5 3种植物浮床系统对 TP 的去除效果

Fig. 5 Removal effect on TP by floating-bed system of three plants

### 3 结 论

(1) 3 种景观水生植物香菇草、睡莲、西伯利亚鸢尾在城市污染水体中均保持较强的生命力,其株高、根长和生物量均有显著增加,增长率表现为睡莲>香菇草>西伯利亚鸢尾.

(2) 3 种水生植物浮床系统对污染水体的水质净化效果显著. 香菇草、睡莲和西伯利亚鸢尾浮床系统对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除率分别为 78.2%、72.5%、63.9%;对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率分别为 92.8%、90.0%、91.2%;对 TN 去除率分别为 90.0%、85.7%、81.2%;对 TP 去除率分别为 68.6%、57.0%和 62.8%. 3 种植物浮床系统对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 去除率与对照浮床系统都有明显差异( $P<0.05$ ).

(3) 3 种水生植物可有效去除污染水体中的氮、磷等污染物质,生命力强,同时又具有很高的景观价值,因此在治理城市景观污染水体时可作为优势种广泛使用.

### [参 考 文 献]

- [1] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure waste water[J]. *Ecol Eng*, 2004, 22: 27-42.
- [2] 吴湘,杨肖娥,李廷强,等. 漂浮植物对富营养化景观水体的净化效果研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 128-133.  
WU X, YANG X E, LI Y Q, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from eutrophicated sight water by several floating macrophytes[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2007, 21(5): 128-133.
- [3] 罗固源,郑剑锋,许晓毅,等. 4 种浮床栽培植物生长特性及吸收氮磷能力的比较[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 285-220.  
LUO G Y, ZHENG J F, XU X Y, et al. Comparison of the growth characteristics and nutrient uptake of four kinds of plants cultivated on a floating-bed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 285-220.
- [4] 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): 1447-1450.  
TONG C H, YANG X E, PU P M. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. *Chinese Journal of*

- Applied Ecology: 2004, 15(8): 1447-1450.
- [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): 2199-2203.  
ZHOU X P, WANG J G, XUE L H, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2199-2203.
- [6] 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.  
SONG X F, ZOU G Y, WU W M, et al. Study on the removal effect and regulation of rice plants on floating-beds to main nutrients N and P in eutrophicated water bodys[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(5): 489-494.
- [7] 李先宁, 宋海亮, 朱光灿, 等. 组合型浮床生态系统的构建及其改善湖泊水源地水质的效果[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 367-372.  
LI X N, SONG H L, ZHU G C, et al. Effect of combined floating bed ecosystem on water quality improvement in lake water source area[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(4): 367-372.
- [8] 金卫红, 付融冰, 顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 75-81.  
JIN W H, FU R B, GU G W. Plant growth characteristics and nutrient uptake from eutrophic water in constructed wetlands[J]. Reserch of Environmental Science, 2007, 20(3): 75-81.
- [9] GERKE S, BAKER L A, XU Y. Nitrogen transformations in a wetland receiving lagoon effluent; sequential model and implications for water reuse[J]. Water Res, 2001, 35(16): 3857-3866.
- [10] 周明真, 叶青, 沈春花, 等. 3 种浮床植物对富营养化水体净化效果研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 91-95.  
ZHOU M Z, YE Q, SHEN C H, et al. Study on purification effects by there floating-bed plant systems in eutrophic water bodies[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 91-95.
- [11] 国家环境保护总局. GB3838—2002: 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration. GB3838—2002: Surface water environmental quality standards [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [12] 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.  
State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Monitoring Analysis Method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 王超, 张文明, 王沛芳. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 975-981.  
WANG C, ZHANG W M, WANG P F. Removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water by *Jussiaea stipulacea Ohwi*[J]. Environment Science, 2007, 28(5): 975-981.
- [14] 周晓红, 王国祥, 冯冰冰, 等. 3 种景观植物对城市河道污染水体的净化效果[J]. 环境科学研究, 2009, 22(12): 108-113.  
ZHOU X H, WANG G X, FENG B B, et al. Purification effect of nitrogen and phosphorus in polluted water of urban rivers by three landscape plants[J]. Reserch of Environmental Science, 2009, 22(12): 108-113.
- [15] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2677.  
LU S Y, JIN X C, YU G. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2670-2677.
- [16] FENNESSY M S, CRONK J K, MITSCHA W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. Ecol Eng, 1994, 3(4): 469-484.
- [17] 许桂芳. 4 种观赏植物对富营养化景观水体的净化效果[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 299-302.  
XU G F. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from eutrophicated landscape water by four floating ornamental plants[J]. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2010, 26(7): 299-302.