

# 水葫芦去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较

张志勇, 刘海琴, 严少华, 郑建初, 常志州, 陈留根

(江苏省农业科学院资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 采用人工模拟试验方法, 在2007年11月至2008年10月期间比较研究了水葫芦(*Eichhornia crassipes*)对4种不同程度富营养化水体氮、磷的净化效果和去除能力。结果显示, 水葫芦在4种富营养化水体中均可正常生长, 全年的平均生物量增长率为0.096~0.262 kg/(m<sup>2</sup>·d), 且明显受温度的影响。经过21 d的净化, 水葫芦对4种富营养化水体氮、磷均表现出良好的净化效果。4种富营养化水体的TN(总氮)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(铵态氮)、TP(总磷)平均浓度分别由初始的2.06~20.08 mg/L、0.27~10.98 mg/L和0.14~1.43 mg/L降至0.27~8.87 mg/L、0.06~0.71 mg/L和0.03~0.47 mg/L。水葫芦对TN的平均去除率随初始TN浓度的增加而降低, 对TP的去除率则相反; 水葫芦对4种不同程度富营养化水体的TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP的平均去除率分别为55.82%~86.55%、78.15%~93.54%和76.01%~92.53%。水葫芦对TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP的单位面积负荷去除速率则均随水体初始氮、磷浓度的增加而升高, 平均分别为84.69~533.70 mg/(m<sup>2</sup>·d)、12.94~478.70 mg/(m<sup>2</sup>·d)和5.01~63.06 mg/(m<sup>2</sup>·d)。

**关键词:** 水葫芦; 富营养化水体; 氮; 磷; 去除率

**中图分类号:** X52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2009)05-1039-08

## Comparison of the Removal Ability of Nitrogen and Phosphorous by Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Differently Eutrophic Water

ZHANG Zhi-yong, LIU Hai-qin, YAN Shao-hua, ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen

(Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** From November in 2007 to October in 2008, the purification effect and removal ability of nitrogen and phosphorous from differently eutrophic water by water hyacinth were comparatively studied by simulation experiments. The results showed that water hyacinth were able to grow normally in four eutrophic water, in which biomass growth rate during experimental period was between 0.096 kg/(m<sup>2</sup>·d) and 0.262 kg/(m<sup>2</sup>·d). The water hyacinth displayed great ability to remove nitrogen and phosphorous from eutrophic water. After purification for 21 d, the average concentrations of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP in eutrophic water decreased from 2.06 - 20.08 mg/L, 0.27 - 10.98 mg/L and 0.14 - 1.43 mg/L to 0.27 - 8.87 mg/L, 0.06 - 0.71 mg/L and 0.03 - 0.47 mg/L, respectively. The average removal rate of TN by water hyacinth dropped with the increase of initial concentration of TN, while the average removal rate of TP increased with the increase of initial concentration of TP. The removal rates of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP by water hyacinth from four eutrophic water were 55.82% - 86.55%, 78.15% - 93.54%, and 76.01% - 92.53%, respectively. And the average load removal rates of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP by water hyacinth from four eutrophic water were 84.69 - 533.70 mg/(m<sup>2</sup>·d), 12.94 - 478.70 mg/(m<sup>2</sup>·d) and 5.01 - 63.06 mg/(m<sup>2</sup>·d), respectively, which increased with the increase of initial concentrations of

nitrogen and phosphorous.

**Key words:** water hyacinth; eutrophic water; nitrogen; phosphorous; removal rate

水体富营养化治理是当今世界性难题。利用水生高等植物治理和修复受污水体具有明显的效

收稿日期: 2009-03-17

基金项目: 国家支撑计划(2007BAD89B12)

作者简介: 张志勇(1977-), 男, 河北唐山人, 博士, 助理研究员, 主要从事水生植物污染水体修复研究。(Tel) 025-84391231; (E-mail) jaaszzyzhang@yahoo.cn

通讯作者: 严少华, (Tel) 025-84390002; (E-mail) shyan@jaas.ac.cn

果<sup>[14]</sup>,已成为水体富营养化控制发展最快的一种手段。水葫芦(*Eichhornia crassipes*)是研究最早、最深入,也是实际生态修复工程中应用较广的水生植物。大量研究表明,水葫芦对受污水体的净化效果明显优于任何一种水生生物,可有效地去除水中的氮、磷等营养元素,降低生化需氧量(BOD),吸收和富集各种重金属、有毒化合物,而且还能抑制藻类生长<sup>[5-6]</sup>。水葫芦已被用于富营养化湖泊<sup>[7-8]</sup>、河道<sup>[9]</sup>、养殖废水<sup>[10]</sup>、工业废水<sup>[11-12]</sup>及垃圾渗滤液<sup>[13]</sup>等方面的处理。

虽然有关水葫芦修复受污水体能力方面的研究已有大量的报道,但以往的研究多是针对某单一污染水体进行的,缺乏水葫芦对不同程度污染水体(不同污染负荷)氮、磷去除能力的比较研究。而有研究表明,水葫芦对水体氮、磷等物质的净化效果与氮、磷的浓度或负荷有很大的相关性,随着氮、磷浓度或负荷的增加,其对氮、磷的去除能力也增加<sup>[6]</sup>。本研究采用室内模拟试验方法,分析和比较了水葫芦对不同程度富营养化水体氮、磷的净化效果和去除能力,旨在为推进水葫芦在受污水体修复中的应用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于江苏省农业科学院玻璃温室内进行,试验期为2007年11月至2008年10月,水葫芦采自江苏省农业科学院2号灌溉塘,初始放养量为3.0 kg/m<sup>2</sup>。试验装置为16个长、宽、深分别为1.0 m、1.0 m、1.2 m的混凝土水池。水池底部填充10 cm

厚的灌溉塘底泥,水池有效容积为1.0 m<sup>3</sup>。

### 1.2 试验方法

试验共设4种不同富营养化水体处理:富营养化水体I,氮、磷浓度接近国家地表水质量标准V类水,以自来水加入NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>和KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>配制而成;富营养化水体II,取自江苏省农业科学院1号灌溉塘,水质已严重富营养化;富营养化水体III,氮、磷浓度接近城镇污水处理厂一级A标准出水,以灌溉塘水加入NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>和KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>配制而成;富营养化水体IV,氮、磷浓度接近城镇污水处理厂一级B标准出水,配制方法同上。4种富营养化水体的平均初始水质指标见表1。每种富营养化水体处理设3次重复,每处理另设一个无植物的空白对照。供试富营养化水体21 d更换一次,试验期间共换水15次。换水周期内每3 d取各处理水样,测定TN(总氮),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(铵态氮),NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(硝态氮)和TP(总磷)浓度;定期测定不同深度水层DO(溶解氧)的含量;每个换水周期结束后(21 d)称量水葫芦,将净增长量移出后,保留3.0 kg/m<sup>2</sup>继续下周期净化试验。水葫芦收获的同时选取各处理0.5 m×0.5 m样方中植株统计分株速率、株高和根长等生长特性。试验期间各水体中DO含量、氮磷的浓度和去除率等数据均为15个换水周期测定结果的平均值。

水样测定项目为:TN含量,采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP含量,采用过硫酸钾消解-钼锑抗比色法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量,采用靛酚蓝比色法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量,采用紫外分光光度法;DO含量,采用JPB-607型便携式溶氧仪测定。

表1 不同富营养化水体的初始水质指标

Table 1 Initial water quality in four differently eutrophic water

富营养化水体	TN	TP	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	溶解氧
	-(mg/L)-				
I	2.06 ± 0.24	0.14 ± 0.06	0.27 ± 0.17	1.59 ± 0.33	4.67 ± 1.07
II	6.22 ± 1.46	0.34 ± 0.06	4.10 ± 1.91	1.66 ± 0.91	3.50 ± 1.09
III	15.06 ± 2.34	1.07 ± 0.21	8.49 ± 2.31	6.09 ± 1.16	3.43 ± 1.21
IV	20.08 ± 2.31	1.43 ± 0.22	10.98 ± 2.27	8.50 ± 1.10	3.37 ± 1.58

## 2 结果

### 2.1 不同程度富营养化水体中水葫芦的生长特性

试验期间,水葫芦在4种富营养化水体中均可

正常生长(表2),水葫芦的株高和生物量增长速率等指标均随水体氮、磷浓度的升高呈递增的趋势,而根系长度则呈递减的趋势,其原因在于较低的氮、磷浓度刺激了水葫芦根系生长,从而通过增加根表面

积来获取更多的营养物质<sup>[14]</sup>;4种富营养化水体中水葫芦的干物质含量在5.0%左右。

此外,水葫芦全年的生物量增长速率与温度表现出了相似的变化趋势(图1)。随着气温与水温的升降,水葫芦的生物量增长速率也相应地增加或降低;自试验开始至2008年4月26日的冬、春季节,气温和水温较低(特别是南方雪灾期间),4种水体中水葫芦生长缓慢,生物量增长速率平均维持在0.096~0.108 kg/(m<sup>2</sup>·d);进入5月,温度的大幅度升高使得水葫芦生长速率明显增加,4种水体中水葫芦生物量增长速率平均达到0.214~0.262 kg/(m<sup>2</sup>·d)。

表2 不同富营养化水体中水葫芦的生长特征

Table 2 Growth characteristics of water hyacinth in differently eutrophic water

水体	干物质含量(%)	株高(cm)	根长(cm)	生物量增长速率 kg/(m <sup>2</sup> ·d)
I	5.08	32.6	42.6	0.130
II	4.84	36.3	31.0	0.140
III	4.70	37.4	24.0	0.146
IV	4.89	37.4	21.6	0.149

I、II、III、IV见表1。

## 2.2 水葫芦对不同富营养化水体溶解氧(DO)的影响

由图2可知,试验期间4种富营养化水体初始DO浓度均以地表V类水体最高,平均为4.67 mg/L,其它3种水体的DO浓度较接近,平均为3.37~3.50 mg/L;水葫芦的存在明显降低了各类水体DO的浓度,种有水葫芦的4种水体DO浓度较初始浓度平均降低了1.36~1.71 mg/L,较空白对照降低了0.42~0.76 mg/L。试验期间还发现,随着水深度的增加,4种水体DO浓度均呈递减的趋势,证明水体DO浓度在垂直方向存在分层现象<sup>[15-16]</sup>。

## 2.3 不同富营养化水体中氮、磷浓度的动态变化

2.3.1 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度动态变化 4种富营养化水体的TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度动态变化趋势较一致(图3),即随着净化时间的延长,TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度呈递减趋势,且净化前期TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度的下降幅度大于净化后期;与此同时,随着水体TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N初始浓度的升高,其出水TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度也相应地

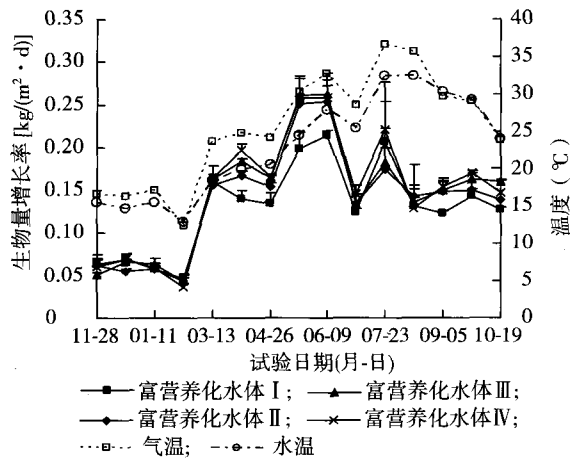


图1 试验期间水葫芦生物量增长速率与温度的关系

Fig. 1 Relationship between biomass growth rate of water hyacinth and temperature during experiment

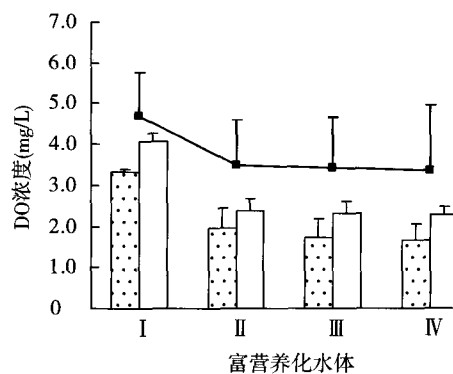


图2 水葫芦对不同富营养化水体溶解氧的影响

I、II、III、IV见表1。

图2 水葫芦对不同富营养化水体溶解氧的影响

Fig. 2 The effects of water hyacinth on dissolved oxygen for differently eutrophic water

增加,经过21d的净化,种有水葫芦的4种水体出水TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的浓度分别降至了0.27 mg/L、0.06 mg/L (I), 1.56 mg/L、0.16 mg/L (II), 5.88 mg/L、0.51 mg/L (III)和8.87 mg/L、0.71 mg/L (IV),分别较空白对照低0.42 mg/L、0.04 mg/L (I), 1.06 mg/L、0.83 mg/L (II), 1.85 mg/L、1.14 mg/L (III)和2.85 mg/L、2.44 mg/L (IV),说明水葫芦的存在明显促进了水体TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除。

4种水体的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度变化趋势存在差异,地表V类水的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度随着净化时间的延长逐渐降低,而其他3种水体则表现为先升高后降低的趋势。这种

差异的产生很可能取决于水体自身硝化、反硝化作用的相对强弱。因为水体中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  除被水葫芦及浮游植物吸收利用外,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  可经硝化作用转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 而  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  经反硝化作用可还原为  $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{N}_2$  而得以去除, 若系统的硝化作用强度大于反硝化作用,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  将累积, 反之则降低。

2.3.2 TP 浓度动态变化 4 种水体 TP 浓度的动态变化趋势与 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  相似(图 3), 随着净化时

间的延长, 各类水体 TP 浓度均明显降低; 水葫芦的存在促进了 TP 的去除, 种有水葫芦的水体出水 TP 浓度均明显低于空白对照, 且 4 种水体间出水 TP 浓度无明显差异, 均维持在较低水平, 处于 0.03 mg/L 至 0.11 mg/L 之间。这说明在本试验 TP 浓度为 0.14 ~ 1.43 mg/L, 水葫芦可有效去除富营养化水体 TP。

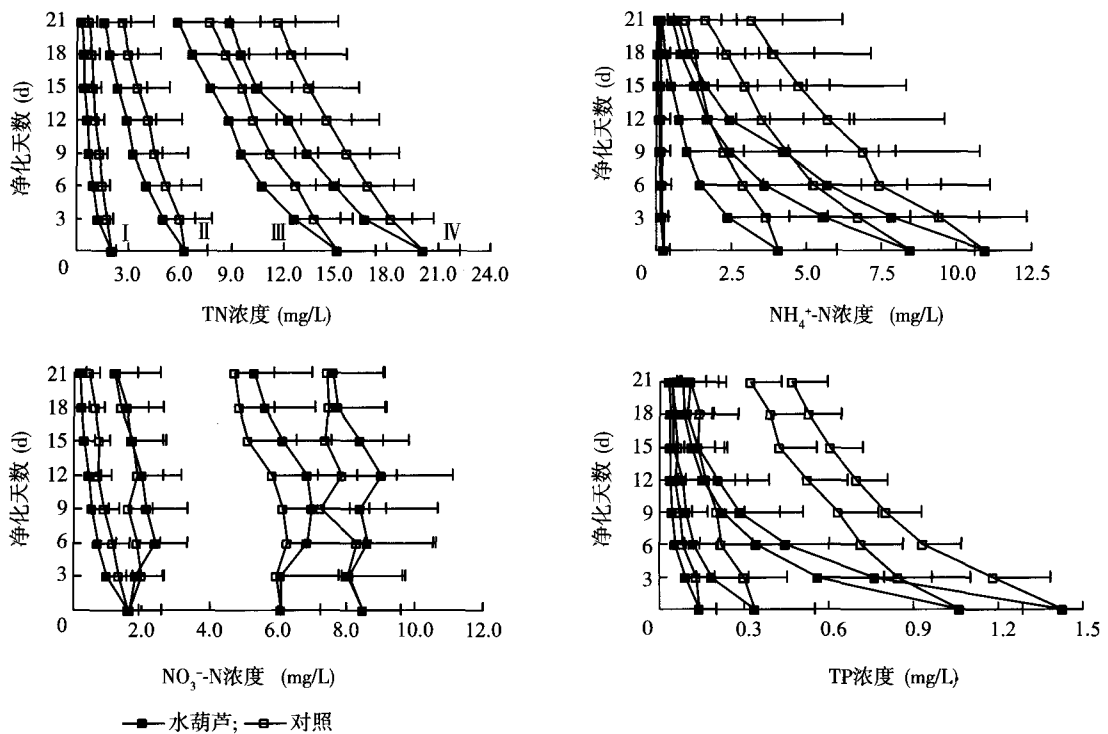


图3 不同富营养化水体氮、磷浓度动态变化

Fig.3 Dynamic changes of nitrogen and phosphorous concentrations in differently eutrophic water

## 2.4 水葫芦对不同富营养化水体氮、磷的净化效果

### 2.4.1 对 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化效果

近 1 年的试验监测结果表明, 水葫芦对 4 种程度富营养化水体的 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均表现出良好的净化效果(表 3), 在 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度分别为 2.06 ~ 20.08 mg/L 和 0.27 ~ 10.98 mg/L 的条件下, 4 种水体 TN 的平均去除率分别为 86.55% (I)、74.88% (II)、61.29% (III) 和 55.82% (IV),  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率分别为 78.15% (I)、96.04% (II)、93.97% (III) 和 93.54% (IV)。水葫芦对 TN 的去除率随着

TN 初始浓度的升高而降低, 两者之间具有极显著的负相关关系(图 4,  $r = -0.7450$ ,  $P < 0.01$ ); 而  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率与水体  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  初始浓度无显著的相关性( $P > 0.05$ )。水葫芦对水体  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率以地表 V 类水最低, 很可能是因其  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  初始浓度较低, 底泥中可交换态  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  通过扩散作用释放到上覆水中, 从而维持泥水两相中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平衡浓度所致<sup>[17]</sup>。种有水葫芦的 4 种水体 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率分别高出空白对照 12.23% ~ 21.22% 和 13.41% ~ 20.15%, 表明水葫芦的存在

明显提高了水体 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率。

水葫芦对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的净化效果除地表 V 类水较高外,对其他 3 种水体的净化效果较差,仅为 8.44% ~ 21.95%。其原因可能在于水体初始 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度的升

高一定程度上促进了硝化作用的进行,从而减缓了反硝化作用对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除速度。水葫芦对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除率与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 初始浓度的相关分析表明,两者之间无显著的相关性 ( $P > 0.05$ )。

表 3 水葫芦对不同富营养化水体 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的净化效果

Table 3 Purification effect of water hyacinth on TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in differently eutrophic water

富营养化水体	处理	TN		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	
		出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)	出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)	出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)
I	水葫芦	0.28 ± 0.31	86.55 ± 12.10	0.06 ± 0.13	78.15 ± 24.91	0.19 ± 0.18	88.91 ± 12.40
	对照	0.71 ± 0.41	65.33 ± 16.70	0.10 ± 0.25	61.82 ± 36.35	0.43 ± 0.31	74.54 ± 16.60
II	水葫芦	1.57 ± 1.56	74.88 ± 17.40	0.16 ± 0.41	96.04 ± 6.00	1.23 ± 1.29	21.95 ± 32.23
	对照	2.62 ± 1.78	58.14 ± 19.50	0.99 ± 1.66	75.87 ± 24.35	1.20 ± 0.65	23.54 ± 29.57
III	水葫芦	5.88 ± 3.06	61.29 ± 13.50	0.51 ± 1.62	93.97 ± 11.76	5.29 ± 1.68	10.57 ± 32.38
	对照	7.73 ± 2.93	49.06 ± 14.20	1.65 ± 2.54	80.57 ± 18.37	4.23 ± 1.68	28.46 ± 27.13
IV	水葫芦	8.87 ± 3.80	55.82 ± 13.60	0.71 ± 1.94	93.54 ± 11.74	7.61 ± 1.50	8.44 ± 15.20
	对照	11.72 ± 3.41	41.62 ± 11.00	3.15 ± 3.03	71.33 ± 20.88	7.43 ± 1.65	10.64 ± 22.35

I、II、III、IV 见表 1。

2.4.2 对 TP 的净化效果 由表 4 可知,水葫芦对 4 种水体的 TP 表现出了良好的净化效果,TP 的去除率为 76.01% ~ 92.53%。随着水体 TP 初始浓度的增加,水葫芦对 TP 的去除率也相应升高,两者之间具有极显著的正相关关系 (图 4,  $r = 0.5500$ ,  $P < 0.01$ )。地表 V 类水 TP 的去除率相对较低主要因

为初始 TP 浓度较低,底泥中的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 释放至上覆水中以维持 TP 的平衡浓度所致<sup>[18]</sup>。各类水体空白对照均具有较高的 TP 去除率,其原因可能与净化期间藻类和微生物生长对磷的吸收、固定以及磷的化学沉淀有关。

表 4 水葫芦对不同富营养化水体 TP 的净化效果

Table 4 Purification effect of water hyacinth on TP in differently eutrophic water

富营养化水体	出水浓度 (mg/L)		去除率 (%)	
	水葫芦	对照	水葫芦	对照
I	0.03 ± 0.03	0.04 ± 0.03	76.01 ± 20.01	70.23 ± 21.91
II	0.04 ± 0.03	0.11 ± 0.09	87.39 ± 13.05	67.39 ± 18.14
III	0.08 ± 0.08	0.32 ± 0.11	92.43 ± 6.65	69.56 ± 10.97
IV	0.11 ± 0.13	0.47 ± 0.13	92.53 ± 8.67	67.23 ± 6.86

I、II、III、IV 见表 1。

### 2.5 水葫芦对不同富营养化水体氮、磷负荷的去除速率

水葫芦对 4 种富营养化水体氮、磷的单位面积负荷去除速率区别于对氮、磷的净化效果 (图 5)。随着水体 TN 浓度的增加,水葫芦对 TN 的净化效果降低 (表 3),但其对 TN 的负荷去除速率则明显提

高;除地表 V 类水外,尽管水葫芦对其他 3 种水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的净化效果间无明显的差异,但就 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的负荷去除速率而言,则均随水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 初始浓度的增加而明显提高。试验期间,水葫芦对 4 种富营养化水体 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的平均负荷去除速率:TN 分别为 84.69 mg/(m<sup>2</sup>·d) (I)、

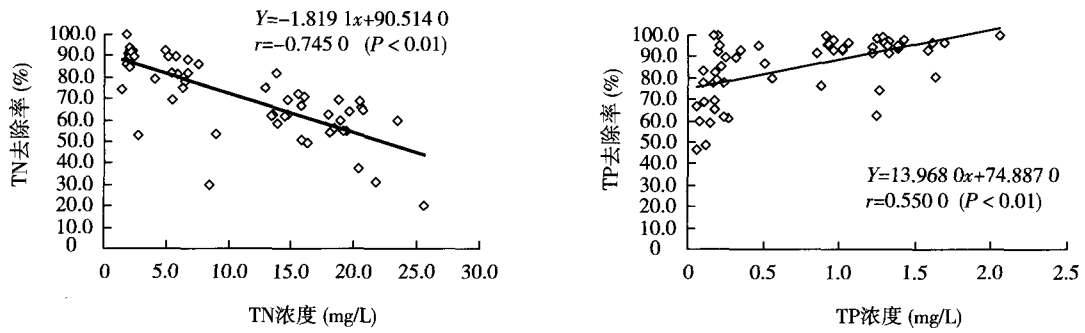
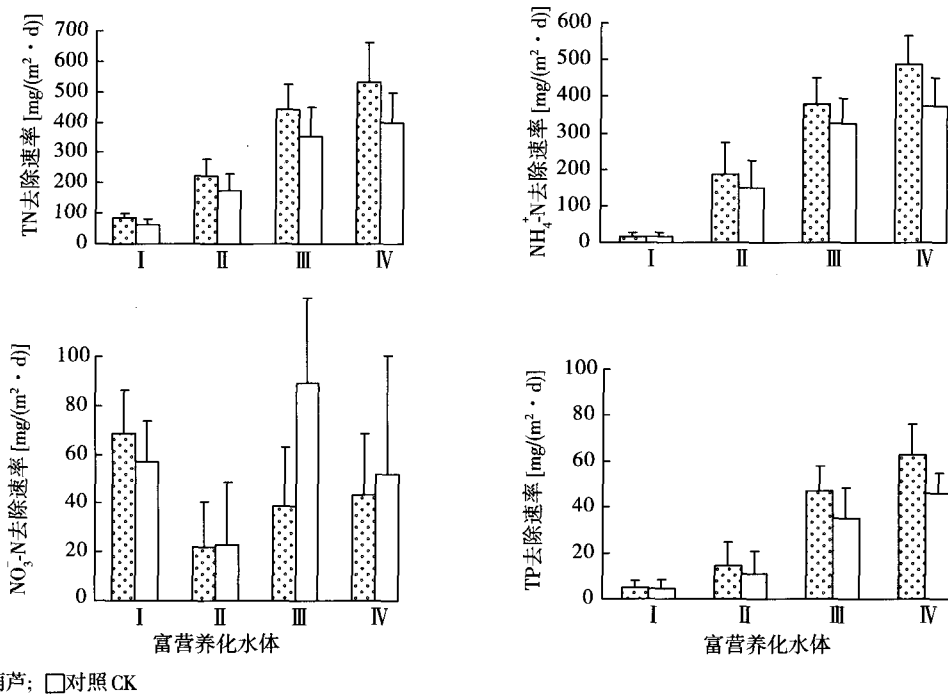


图 4 水葫芦对富营养化水体氮、磷的去除率与初始浓度的相关关系

Fig. 4 Correlation between removal rate and initial concentrations of TN and TP in differently eutrophic water



▨水葫芦; □对照 CK

I、II、III、IV 见表 1。

图 5 水葫芦对不同富营养化水体氮、磷的负荷去除速率

Fig. 5 Load removal rates of nitrogen and phosphorous by water hyacinth in differently eutrophic water

223.30 mg/(m<sup>2</sup>·d) (II)、442.90 mg/(m<sup>2</sup>·d) (III)、533.70 mg/(m<sup>2</sup>·d) (IV); NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 分别为 12.94 mg/(m<sup>2</sup>·d) (I)、175.40 mg/(m<sup>2</sup>·d) (II)、369.20 mg/(m<sup>2</sup>·d) (III)、478.70 mg/(m<sup>2</sup>·d) (IV); TP 分别为 5.01 mg/(m<sup>2</sup>·d) (I)、14.16 mg/(m<sup>2</sup>·d) (II)、46.93 mg/(m<sup>2</sup>·d) (III)、63.06 mg/(m<sup>2</sup>·d) (IV)。水葫芦对 4 种富营养化水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的平均负荷去除速率分别为 68.59 mg/(m<sup>2</sup>·d) (I)、21.78 mg/(m<sup>2</sup>·d) (II)、

38.92 mg/(m<sup>2</sup>·d) (III)、43.25 mg/(m<sup>2</sup>·d) (IV), 以地表 V 类水最高, 其他 3 种水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的负荷去除率随 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度的增加略有提高。

### 3 讨论

水葫芦净化富营养化水体的效果首先取决于生物量, 而生长率是决定生物量的重要因素。本试验水葫芦在 4 种程度富营养化水体中全年的生物量增长率与温度表现出相似的变化趋势, 并且水葫芦的

生物量增长率与富营养化水体初始氮、磷浓度均具有显著的相关关系,相关系数  $r$  分别为 0.719 0 ( $P < 0.01$ ) 和 0.699 1 ( $P < 0.05$ ),表明水葫芦的生长率很大程度上受温度和水体中氮、磷浓度的影响<sup>[6,19]</sup>。此外,水葫芦生物量增长率的监测结果显示,水葫芦在 4 种富营养化水体中夏季生物量增长率最大为 0.214 ~ 0.262 kg/(m<sup>2</sup>·d),与在太湖敞水区域和苏州葑门塘河道夏季放养试验所测得的增长率 [0.50 kg/(m<sup>2</sup>·d) 和 0.50 ~ 0.70 kg/(m<sup>2</sup>·d)] 相比有较大差距<sup>[8]</sup>,这很可能与本试验是在室内静态培养条件下进行和水葫芦初始放养量相对较低有关。

水体中 DO 水平取决于其收入和支出的平衡,其中 DO 的收入途径主要包括水生植物的光合作用和表层的复氧,支出途径则通常有水生生物的呼吸耗氧(包括藻类、细菌、底栖生物、浮游生物、水生生物)以及底质有机物的分解耗氧<sup>[15]</sup>。现有关于水葫芦对富营养化水体 DO 浓度影响的报道多数认为,水葫芦的存在对增加水体 DO 有明显的效果<sup>[20-21]</sup>。本研究试验结果显示,水葫芦的存在明显降低了水体溶解氧的浓度,与初始 DO 浓度相比,净化期间 4 种富营养化水体的 DO 浓度降低了 1.36 ~ 1.71 mg/L。其原因可能在于净化期间水葫芦覆盖了整个表层水面,阻碍大气中的氧气溶解进入水体,使水体复氧能力减弱;同时水生生物的呼吸和底泥中有机物质氧化分解等耗氧速度超过了水体补充氧的速度,致使水体 DO 减少。

大量研究已证明,水葫芦对污染水体的净化效果明显优于任何一种水生植物。本研究中水葫芦对 4 种程度富营养化水体均表现出良好的净化效果,经 21 d 的净化,水葫芦对 TN、TP 的负荷去除速率平均分别为 84.69 ~ 533.70 mg/(m<sup>2</sup>·d) 和 5.01 ~ 63.06 mg/(m<sup>2</sup>·d)。在国内报道的同类研究中,也有学者采用平均生物量法计算水葫芦对水体氮、磷的去除速率。李修岭等<sup>[22]</sup>对漂浮水生植物和陆生植物去除超富营养化湖水(TN 浓度为 10.00 mg/L,TP 浓度为 0.99 mg/L)氮、磷能力进行了研究,其中水葫芦对 TN、TP 的平均生物量去除速率分别为 21.65 mg/(kg·d) 和 4.01 mg/(kg·d)。本试验条件下,水葫芦对 4 种富营养化水体 TN、TP 的平均生物量去除速率分别为 19.38 mg/(kg·d)、51.08 mg/(kg·d)、98.90 mg/(kg·d)、119.75 mg/(kg·d) 和 1.18 mg/(kg·d)、3.23 mg/(kg·d)、10.32 mg/(kg·d)、13.78 mg/(kg·d)。

水葫芦庞大的根须和惊人的繁殖速度造就了其超强的净化水质的本领。但由于其在污染水体中生长迅速,管理上稍有疏忽就会引发生态灾害,故也被称为世界十大害草之一。因此在利用水葫芦治理污水时,不仅要对其进行定期的打捞和收集,还应对其进行科学合理的后处理。水葫芦营养成分丰富,开发利用前景极其广阔,目前已被用于制作饲料<sup>[23]</sup>、堆制肥料<sup>[24]</sup>、发酵产沼气<sup>[25-26]</sup>以及食品、药用资源的开发等。因此,如何充分利用水葫芦自身的优点,寻求综合利用水葫芦资源的最佳途径,在达到生物治污目的的同时,又将其资源化利用、变废为宝,是当前和今后水葫芦研究的重点。

### 参考文献:

- [1] 李芳柏,吴启堂. 漂浮栽培美人蕉蕹菜等植物处理化粪池废水[J]. 农村生态环境,1997,13(1):25-28,41.
- [2] 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.
- [3] 司友斌,包军杰,曹德菊,等. 香根草对富营养化水体净化效果研究[J]. 应用生态学报,2003,14(2):277-279.
- [4] 严以新,操家顺,李欲如. 冬-春季节浮床技术净化重污染河水的动态试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):119-122.
- [5] 袁桂良,刘 鹰. 凤眼莲对集约化甲鱼养殖污水的静态净化研究[J]. 农业环境保护,2001,20(5):322-325.
- [6] 严国安,任 南,李益健. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响[J]. 环境科学与技术,1994(1):2-5,27.
- [7] 濮培民. 改善太湖马山水厂水源区水质的物理-生态工程实验研究[J]. 湖泊科学,1993,5(2):171-180.
- [8] 窦鸿身,濮培民,张圣照,等. 太湖开阔水域凤眼莲的放养实验[J]. 植物资源与环境,1995,4(1):54-60.
- [9] 孙文浩,俞子文,余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理[J]. 环境科学学报,1989,9(2):187-195.
- [10] 蒋艾青. 凤眼莲对城郊污水鱼塘的净化试验[J]. 淡水渔业,2003,33(5):43-44.
- [11] 袁 蓉,刘建武,成旦红. 凤眼莲对多环芳烃(萘)有机废水的净化[J]. 上海大学学报:自然科学版,2004,10(3):272-276.
- [12] CASABIANCA M L D, LAUGIER T, POSADA F. Pertoliferous wastewater treatment with water hyacinth: experimental statement [J]. Waste Management,1995,15(8):651-655.
- [13] EL-GENDY A. Leachate treatment using natural systems [D]. Windsor: University of Windsor,2003.
- [14] 方云英,杨肖娥,濮培民,等. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报,2008,19(2):407-412.
- [15] 刘海英,曲克明,马绍赛. 养殖水体中溶解氧的变化及收支平

- 衡研究概况[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(2): 79-84.
- [16] 彭青林, 敖洁, 曾经. 水生植物塘中的溶解氧变化及对污水处理研究[J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 2004, 19(1): 79-81.
- [17] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: I 氮的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 786-791.
- [18] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: II 磷的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 792-796.
- [19] 张雁秋. 凤眼莲的容量对净化、利用的影响[J]. 农村生态环境, 1989(1): 40-43.
- [20] 娄敏, 廖柏寒, 刘红玉, 等. 3种水生漂浮植物处理富营养化水体的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 194-195.
- [21] 吴振斌, 夏宜铮. 凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究: II 静态净化试验[J]. 水生生物学报, 1987, 11(4): 299-309.
- [22] 李修岭, 李伟, 李夜光, 等. 几种植物去除高度富营养化湖水中氮磷及抑藻效果的初步研究[J]. 武汉植物学研究, 2005, 23(1): 53-57.
- [23] MUKHERJEE R, NANDI B. Improvement of *in vitro* digestibility through biological treatment of water hyacinth biomass by two Pleurotus species [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2004(53): 7-12.
- [24] ADEOYE G O, SRIDHAR M K C, IPINMOROTI R R, et al. Potassium recovery from farm wastes for crop growth [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2001, 32(15-16): 2347-2358.
- [25] PARVEEN S, FERROZA B, HOSSAIN M, et al. Production of biogas from cow dung by adding water hyacinth and mud [J]. Bangladesh J Sci Ind Res, 1998, 33(3): 369-372.
- [26] MATSUMURA Y. Evaluation of supercritical water gasification and biomethanation for wet biomass utilization in Japan [J]. Energy Conversion and Management, 2002(43): 1301-1310.