

# 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的 去除贡献研究\*

张志勇 郑建初 刘海琴 常志州 陈留根 严少华\*\*

(江苏省农业科学院资源与环境研究所 南京 210014)

**摘要** 采用人工模拟方法,研究了凤眼莲在不同程度富营养化水体中对N、P的吸收和去除作用。结果表明,凤眼莲在总氮(TN)、总磷(TP)初始浓度分别为2.06~20.08 mg·L<sup>-1</sup>和0.14~1.43 mg·L<sup>-1</sup>的4种富营养化水体中均可正常生长,近1年的试验中,凤眼莲总生物量累计增加41.03~47.12 kg·m<sup>-2</sup>,平均生物量增长率为0.096~0.262 kg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。凤眼莲地上部N和P平均含量分别为24.16~34.15 mg·g<sup>-1</sup>和3.46~6.90 mg·g<sup>-1</sup>;地下部N和P平均含量分别为11.76~18.45 mg·g<sup>-1</sup>和6.02~8.50 mg·g<sup>-1</sup>。凤眼莲在4种富营养化水体中的N和P吸收量累计分别为43.06~71.16 g·m<sup>-2</sup>和8.68~16.63 g·m<sup>-2</sup>,且随水体初始N、P浓度的升高而增加,并与自身生物量呈极显著正相关(P<0.01)。在N、P负荷较低的水体(I和II)中,凤眼莲吸收对N、P的去除贡献均超过100%,表明凤眼莲吸收利用了底泥中部分N和P;而在N、P负荷较高的水体(III和IV)中,凤眼莲吸收对N、P的去除贡献也均超过42.32%和83.79%。因此,本试验条件下凤眼莲吸收在水体N、P去除中起主要作用。

**关键词** 凤眼莲 富营养化水体 氮、磷吸收 去除贡献

中图分类号: X171; X703 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)01-0152-06

## Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters

ZHANG Zhi-Yong, ZHENG Jian-Chu, LIU Hai-Qin, CHANG Zhi-Zhou, CHEN Liu-Gen, YAN Shao-Hua  
(Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract** Stimulation experiments were carried out to study nitrogen and phosphorus uptake and removal ability of *Eichhornia crassipes* from varying degrees of eutrophic waters for the period from Nov. 2007 to Oct. 2008. The results show that *E. crassipes* grows normally in different degrees of eutrophic waters with initial concentrations of 2.06~20.08 mg·L<sup>-1</sup> TN and 0.14~1.43 mg·L<sup>-1</sup> TP. Accumulated *E. crassipes* biomass in eutrophic waters increases by 41.03~47.12 kg·m<sup>-2</sup>, at a mean growth rate of 0.096~0.262 kg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> for the period of study. Nitrogen and phosphorus concentrations in *E. crassipes* aboveground part are 24.16~34.15 mg·g<sup>-1</sup> and 3.46~6.90 mg·g<sup>-1</sup> respectively. Those in the belowground part are 11.76~18.45 mg·g<sup>-1</sup> and 6.02~8.50 mg·g<sup>-1</sup> respectively. Total nitrogen and phosphorus uptaken by *E. crassipes* are 43.06~71.16 g·m<sup>-2</sup> and 8.68~16.63 g·m<sup>-2</sup> respectively. Meanwhile, accumulated assimilation of nitrogen and phosphorus increases with increasing initial nitrogen and phosphorus concentration in eutrophic waters. There is a significant positive correlation between accumulated nitrogen and phosphorus assimilation with *E. crassipes* biomass. In eutrophic waters I and II with lower nitrogen and phosphorus load, contribution of *E. crassipes* uptake to nitrogen and phosphorus removal is above 100% indicating some uptake of nitrogen and phosphorus from the sediment by *E. crassipes*. In eutrophic waters III and IV with higher nitrogen and phosphorus load, contribution of *E. crassipes* uptake to nitrogen and phosphorus removal is above 42.32% and 83.79% respectively. *E. crassipes* uptake is therefore a major pathway of nitrogen and phosphorus removal in eutrophic waters.

**Key words** *Eichhornia crassipes*, Eutrophic water, Nitrogen and phosphorus uptake, Removal contribution  
(Received March 26, 2009; accepted May 23, 2009)

\* 国家科技支撑计划项目“水葫芦安全种养和机械化采收技术集成研究与示范”(2009BAC63B01)资助

\*\* 通讯作者: 严少华(1956~), 男, 硕士, 研究员, 主要从事水污染防治研究。E-mail: shyan@jaas.ac.cn

张志勇(1977~), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事污染水体植物修复研究。E-mail: jaaszzyzhang@yahoo.cn

收稿日期: 2009-03-26 接受日期: 2009-05-23

水体富营养化治理是当今世界性难题,而以水生植物为核心的污水处理和富营养化水体修复技术,因具有效果好、投资少、运行成本低、易管理、景观效果好等优点,已成为国内外生态环境科学领域研究热点之一<sup>[1-4]</sup>。凤眼莲(*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,是公认的去 N、P 效果最佳的植物<sup>[5]</sup>,近年来被广泛应用于工业废水<sup>[6-7]</sup>、生活污水<sup>[8]</sup>、富营养化湖泊、河道<sup>[9-10]</sup>、垃圾渗滤液<sup>[11]</sup>等水体处理中。

水生植物通过自身组织吸收能够直接去除水体中的 N 和 P,在污染水体修复中占据着举足轻重的地位。凤眼莲根系发达、生长繁殖快、耐污能力强,有关其对 N、P 等污染物的吸收、累积、分解等作用的研究屡见报道<sup>[12-13]</sup>。但以往研究多局限在某单一污染水体中进行,而对于凤眼莲在不同程度污染水体中 N、P 吸收、累积能力的比较研究则少见报道。已有研究表明,在一定浓度范围内,水生植物对 N、P 的吸收量随水中营养浓度的升高而增加<sup>[14]</sup>。本研究采用模拟培养试验方法,分析和比较不同程度富营养化水体中凤眼莲的 N、P 含量、分布、吸收能力及其对水体 N、P 去除的贡献,旨在为推进凤眼莲在污染水体修复中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2007 年 11 月至 2008 年 10 月在江苏省农业科学院玻璃温室内进行,凤眼莲采自江苏省农业科学院 2<sup>#</sup>污水塘,初始放养量为  $3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。试验装置为 16 个体积为  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$  的混凝土水池。水池底部填充 10 cm 厚的污水塘底泥,水池有效容积为  $1.0 \text{ m}^3$ 。

### 1.2 试验方法

设 4 种不同程度富营养化水体:富营养化水体 I, N、P 浓度接近国家地表水质量标准 V 类水,以自来水加入  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  配制而成;富营养化水体 II,取自江苏省农业科学院污水塘,水质已严重富营养化;富营养化水体 III, N、P 浓度接近城镇污水处理厂一级 A 标准出水,以污水塘水加入

$\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  配制而成;富营养化水体 IV, N、P 浓度接近城镇污水处理厂一级 B 标准出水,配制方法同上。每种富营养化水体处理重复 3 次,各处理另设 1 个无植物的空白对照。试验期间 4 种富营养化水体的平均初始水质指标及 N、P 总负荷见表 1。供试富营养化水体每 21 d 更换 1 次,整个试验共换水 15 次。每次换水前采集各处理出水水样,测定 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度,并计算去除率。每个换水周期结束后(21 d)称量凤眼莲,将净增长量移出后,保留  $3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  继续下周期净化试验。凤眼莲收获的同时选取各处理  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  样方中植株统计分株速率、株高和根长等生长特性,并将植株分地上部和地下部,于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘干,磨碎后备用,测定组织内 N、P 含量。整个试验期间各水体的出水 N、P 浓度、去除率及凤眼莲组织内的 N、P 含量均以 15 个净化周期测定结果的平均值表示;凤眼莲对水体 N、P 的吸收总量和去除总量则以 15 个净化周期测定结果相加求得。

### 1.3 分析方法

水样中 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  分别采用  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  氧化-紫外分光光度法、 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  氧化-钼锑抗比色法、靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定;植物样品经  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮后, TN、TP 分别采用凯氏定氮法和钒钼黄比色法测定。

### 1.4 数据处理与统计分析

试验数据经 EXCEL 处理后,应用 SPSS13.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同程度富营养化水体中凤眼莲的生长特性

在初始放养量为  $3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、净化周期为 21 d 条件下,近 1 年的试验期内凤眼莲在 4 种富营养化水体中的平均总生物量累计增加  $41.03\text{--}47.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均生物干重累计增加  $2.08\text{--}2.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 2),其中地上部生物干重累计增加量高于地下部,分别为  $1.50\text{--}1.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.43\text{--}0.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。凤眼莲的平均株高和分株速率均随水体富营养化程度的加深而增加,而根系长度则表现为减小趋势,其原因主要在于低 N、P 浓度促使凤眼莲根系长度明显增加

表 1 不同程度富营养化水体的初始水质指标及 N、P 负荷  
Tab. 1 Initial water quality and TN and TP load in different degrees of eutrophic waters

水体 Eutrophic water	TN ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN 负荷 TN load ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	TP 负荷 TP load ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
I	2.06±0.24	0.14±0.06	0.27±0.17	1.59±0.33	30.90	2.10
II	6.22±1.46	0.34±0.06	4.10±1.91	1.66±0.91	93.30	5.10
III	15.06±2.34	1.07±0.21	8.49±2.31	6.09±1.16	225.90	16.05
IV	20.08±2.31	1.43±0.22	10.98±2.27	8.50±1.10	301.20	21.45

表 2 不同程度富营养化水体中凤眼莲的生长特征

Tab. 2 Growth characteristics of *E. crassipes* in different degrees of eutrophic waters

水体 Eutrophic water	地上部生物干重 Aboveground dry biomass ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	地下部生物干重 Belowground dry biomass ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	总生物干量 Total dry biomass ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	分株速率 Ramet rate ( $\text{plant} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	株高 Plant length (cm)	根长 Root length (cm)
I	1.50±0.07	0.58±0.03	2.08±0.10	3.45±0.95	32.60±5.26	42.60±7.80
II	1.65±0.14	0.45±0.04	2.10±0.17	4.80±1.17	36.30±2.60	31.00±2.58
III	1.73±0.09	0.43±0.02	2.16±0.12	5.90±0.89	37.40±2.30	24.00±2.15
IV	1.83±0.08	0.47±0.02	2.29±0.10	6.14±1.34	37.40±1.51	21.60±1.11

以实现营养最大程度地吸收<sup>[15]</sup>。

此外, 试验期间凤眼莲生物量增长率因生长季节的不同而存在差异。由凤眼莲生物量增长速率与温度的变化曲线可知(图 1), 凤眼莲生物量增长速率随气温与水温的升降而相应增加或降低。冬、春季节(2007年11月7日~2008年4月26), 气温和水温偏低(特别是南方雪灾期间), 平均分别为 19.3 °C 和 16.8 °C, 此阶段凤眼莲生长缓慢, 其在 4 种富营养化水体中生物量增长速率平均维持在 0.096~0.108  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 入夏后, 温度的大幅度升高促使凤眼莲生长明显加快(气温与水温平均分别为 30.8 °C 和 28.2 °C), 凤眼莲的生物量增长速率达 0.214~0.262  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

## 2.2 凤眼莲对不同程度富营养化水体 N、P 的去除效果

由表 3 可知, 凤眼莲对 4 种富营养化水体中 N、P 均表现出良好的去除效果。在 TN、TP 初始浓度分别为 2.06~20.08  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 0.14~1.43  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  条件下, 经过 21 d 净化, 种有凤眼莲的 4 种水体的 TN、TP 浓度分别降至 0.28~8.87  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 0.03~0.11  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其对 4 种水体的 TN、TP 平均去除率分别为 55.82%~86.55% 和 76.01%~92.53%; 同时凤眼莲对 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负相关关系(图 2,  $r = -0.745$ ,  $P < 0.01$ ); 而随水体 TP 初始浓度的增加, 凤眼莲对 TP 的去除率相应升高, 两者之间呈极显著正相关关

系(图 2,  $r = 0.550$ ,  $P < 0.01$ )。

凤眼莲的存在明显提高了水体 N、P 的去除率, 种有凤眼莲的 4 种水体的 TN、TP 平均去除率分别较空白对照高 12.23%~21.22% 和 5.78%~25.30%。空白对照对水体 TN、TP 具有较好的去除率, 其原因可能与净化期间藻类或水生生物的生长、微生物的硝化、反硝化和底泥的吸附沉积等作用有关。

## 2.3 凤眼莲植株的 N、P 含量及其分配

试验期间, 4 种富营养化水体中凤眼莲不同部位及整株的 N、P 含量见表 4。由表 4 可知, 随着水体富营养化程度的加深, 凤眼莲地上部、地下部及整株的 N、P 平均含量均呈现增加趋势。4 种富营养化水体中凤眼莲整株的 N、P 平均含量分别在 20.74~30.43  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和 4.17~7.32  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  之间, 其 N 含量远高于 P 含量; 凤眼莲不同部位的 N 平均含量表现为地上部 > 地下部, 分别为 24.16~34.15  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和 11.76~18.45  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 而就 P 平均含量而言, 则是地上部 < 地下部, 分别在 3.46~6.90  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和 6.02~8.50  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  之间。

## 2.4 凤眼莲在不同程度富营养化水体中的 N、P 吸收量

依据凤眼莲各净化周期地上部、地下部生物量干重及其组织内的 N、P 养分含量, 计算地上、地下部的 N、P 吸收总量, 并相加求得凤眼莲植株的 N、P 吸收总量(表 5)。整个试验期间, 凤眼莲在 4 种富营养化水体中的 N、P 吸收总量平均分别为 43.06~

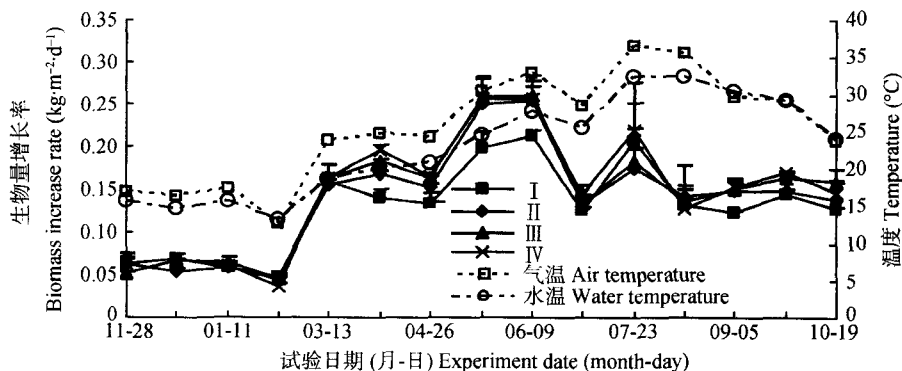


图 1 试验期间凤眼莲生物量增长率变化曲线

Fig. 1 Changes of biomass growth rate of *E. crassipes* during the course of study

I、II、III、IV 分别代表不同程度富营养化水体 I、II、III、IV represent the different degrees of eutrophic waters

表 3 凤眼莲去除不同程度富营养化水体 N、P 的效果  
Tab. 3 Removal effects of TN and TP of different degrees of eutrophic waters by *E. crassipes*

水体 Eutrophic water	处理 Treatment	出水 TN 浓度 Effluent TN concentration (mg · L <sup>-1</sup> )	TN 去除率 TN removal rate (%)	出水 TP 浓度 Effluent TP concentration (mg · L <sup>-1</sup> )	TP 去除率 TP removal rate (%)
I	凤眼莲 <i>E. crassipes</i>	0.28±0.31	86.55±12.1	0.03±0.03	76.01±20.01
	对照 CK	0.71±0.41	65.33±16.7	0.04±0.03	70.23±21.91
II	凤眼莲 <i>E. crassipes</i>	1.57±1.56	74.88±17.4	0.04±0.03	87.39±13.05
	对照 CK	2.62±1.78	58.14±19.5	0.11±0.09	67.39±18.14
III	凤眼莲 <i>E. crassipes</i>	5.88±3.06	61.29±13.5	0.08±0.08	92.43±6.65
	对照 CK	7.73±2.93	49.06±14.2	0.32±0.11	69.56±10.97
IV	凤眼莲 <i>E. crassipes</i>	8.87±3.80	55.82±13.6	0.11±0.13	92.53±8.67
	对照 CK	11.72±3.41	41.62±11.0	0.47±0.13	67.23±6.86

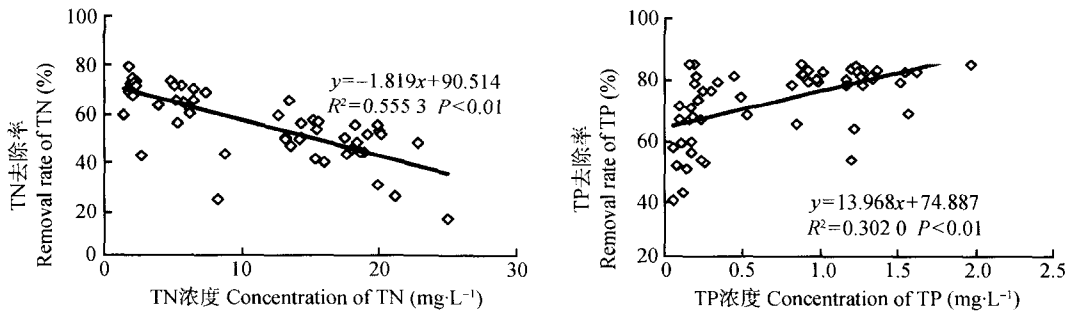


图 2 凤眼莲对富营养化水体 N、P 的去除率与初始浓度的相关关系

Fig. 2 Correlation between removal rate and initial concentration of TN and TP in different degrees of eutrophic waters

表 4 不同程度富营养化水体中凤眼莲的 N、P 含量

Tab. 4 Nitrogen and phosphorus contents of *E. crassipes* in different degrees of eutrophic waters mg · g<sup>-1</sup>

水体 Eutrophic water	N 含量 Nitrogen content		P 含量 Phosphorus content		整株含量 Whole plant	
	地上部	地下部	地上部	地下部	N	P
	Aboveground	Belowground	Aboveground	Belowground		
I	24.16±5.60	11.76±1.63	3.46±1.60	6.02±1.86	20.74±4.45	4.17±1.42
II	30.64±3.97	16.06±2.90	5.45±1.95	7.34±3.12	27.23±3.33	5.96±1.97
III	33.23±3.84	18.05±2.89	6.43±2.12	7.70±2.98	29.90±3.57	6.77±2.07
IV	34.15±4.15	18.45±3.46	6.90±2.57	8.50±2.98	30.43±3.71	7.32±2.50

表 5 凤眼莲在不同程度富营养化水体中的 N、P 吸收总量

Tab. 5 Amounts of nitrogen and phosphorus assimilated by *E. crassipes* in different degrees of eutrophic waters g · m<sup>-2</sup>

水体 Eutrophic water	N 吸收量 Nitrogen assimilation			P 吸收量 Phosphorus assimilation		
	地上部	地下部	总吸收量	地上部	地下部	总吸收量
	Aboveground	Belowground	Total assimilation	Aboveground	Belowground	Total assimilation
I	36.24±1.61	6.82±0.32	43.06±1.94	5.19±0.21	3.49±0.15	8.68±0.36
II	50.56±4.07	7.23±0.65	57.79±4.74	8.99±0.82	3.30±0.27	12.29±1.09
III	56.49±3.03	7.76±0.46	64.25±3.49	10.93±0.70	3.31±0.16	14.24±0.86
IV	62.49±2.73	8.67±0.42	71.16±3.15	12.63±0.65	4.00±0.16	16.63±0.81

71.16 g · m<sup>-2</sup> 和 8.68~16.63 g · m<sup>-2</sup>, 均随水体富营养化程度的加深而升高; 其中地上部 N、P 吸收总量分别为 36.24~62.49 g · m<sup>-2</sup> 和 5.19~12.63 g · m<sup>-2</sup>, 分别占总吸收量的 84.16%~87.82%和 60.35%~75.95%; 凤眼莲地下部的 N、P 吸收总量分别为 6.82~8.67 g · m<sup>-2</sup> 和 3.49~4.00 g · m<sup>-2</sup>。可见, 凤眼莲对富营养化水体 N、P 的吸收主要集中于地上部。

各净化周期内凤眼莲的 N、P 吸收量与生物量干重和植株 N、P 含量呈显著线性关系(图 3), 其中 N、P 吸收量与生物量干重的相关系数分别为 0.884 5

( $P < 0.01$ )和 0.662 0( $P < 0.01$ ); N、P 吸收量与植株 N、P 含量的相关系数分别为 0.293 3( $P < 0.05$ )和 0.401 4 ( $P < 0.01$ ), 说明凤眼莲对富营养化水体 N、P 的吸收量主要受其生物量的影响。

### 2.5 凤眼莲吸收作用对富营养化水体 N、P 去除的贡献

整个试验期间, 4 种富营养化水体的 N、P 去除总量分别为 26.74~168.1 g · m<sup>-2</sup> 和 1.60~19.85 g · m<sup>-2</sup>, 结合凤眼莲对 N、P 的吸收总量, 可计算凤眼莲通过吸收作用对水体 N、P 去除的贡献率。由表 6 可知, 在

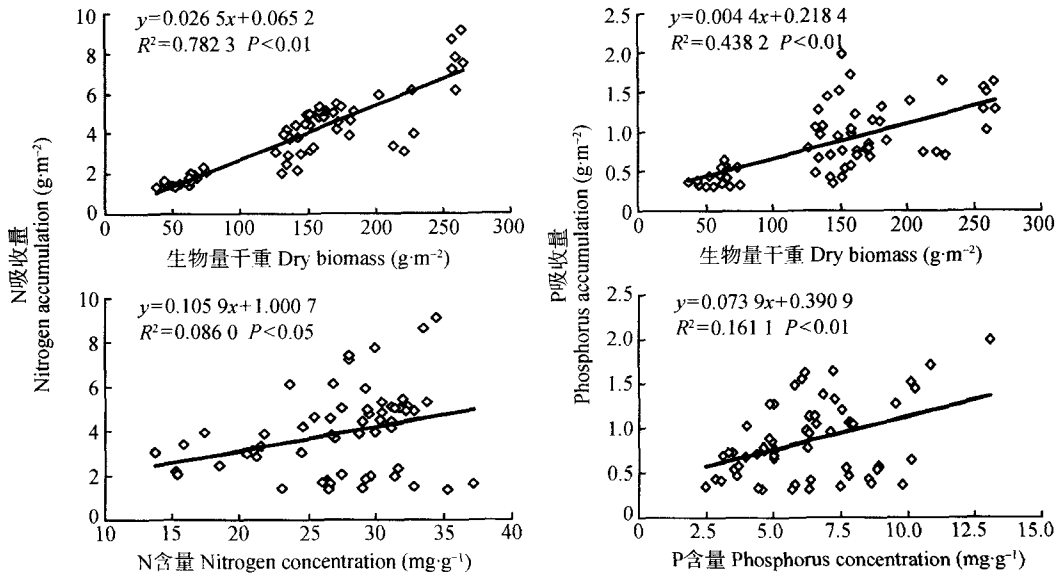


图 3 凤眼莲 N、P 吸收量与其生物量干重和 N、P 含量的关系

Fig. 3 Relationship between nutrients assimilation and concentration and dry biomass of *E. crassipes*

表 6 凤眼莲吸收作用对不同富营养化水体 N、P 去除的贡献

Tab. 6 Contribution of *E. crassipes* uptake to nitrogen and phosphorus removal in different degrees of eutrophic waters

水体 Eutrophic water	总去除量		总吸收量		去除贡献率	
	Total removal ( $g \cdot m^{-2}$ )		Total assimilation ( $g \cdot m^{-2}$ )		Removal contribution (%)	
	N	P	N	P	N	P
I	26.74	1.60	43.06	8.68	161.00	543.80
II	69.86	4.46	57.79	12.29	82.72	275.80
III	138.50	14.84	64.25	14.24	46.41	95.99
IV	168.10	19.85	71.16	16.63	42.32	83.79

地表 V 类水中(TN  $2.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TP  $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 凤眼莲的 N、P 吸收总量对水体 N、P 去除的贡献率均已超出 100%, 即凤眼莲的 N、P 吸收总量高于水体自身输入的 N、P 总量, 表明净化期间底泥向上覆水体中释放了部分 N、P<sup>[16-17]</sup>, 以满足凤眼莲的正常生长。就 TN、TP 初始浓度分别在  $6.22\sim 20.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.34\sim 1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  间的 3 种水体而言, 凤眼莲对 N 的吸收总量分别占各水体 N 去除总量的 82.72%、46.41%和 42.32%; 而由于试验期间凤眼莲承载的 P 负荷远低于 N 负荷, 因此凤眼莲 P 的吸收总量对水体 P 去除的贡献率高于 N, 分别为 275.8%、95.99%和 83.79%, 其中凤眼莲对富营养化池塘水中(TP 浓度为  $0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )P 的吸收量也超出了水体自身 P 的输入量。

### 3 结论与讨论

凤眼莲在 4 种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, 且凤眼莲生物量增长率与水体初始 N、P 浓度也均呈显著相关关系, 相关系数  $r$  分别为 0.719 0( $P<0.01$ )和 0.699 1( $P<0.05$ )。表明凤眼莲的生长很大程度上受温度和水体中 N、P 浓度的影响<sup>[18-19]</sup>。此外, 凤眼莲在 4 种富

营养化水体中夏季的生物量增长率最大, 为  $0.214\sim 0.262 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 同太湖敞水区域和苏州葑门塘河道夏季放养试验中所测得的增长率( $0.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和  $0.50\sim 0.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )相比有较大差距<sup>[9]</sup>, 这可能与本试验是在室内静态培养条件下进行和凤眼莲初始放养量相对较低有关。

大量研究已证明, 凤眼莲对污染水体的净化效果明显优于任何一种水生植物, 是公认的去 N、P 效果最佳的植物<sup>[5]</sup>。本研究中凤眼莲对 TN、TP 初始浓度在  $2.06\sim 20.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.14\sim 1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间的 4 种富营养化水体也表现出良好的净化效果, 经过 21 d 净化, 4 种富营养化水体 TN、TP 浓度分别降至  $0.28\sim 8.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.03\sim 0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TN、TP 平均去除率分别为 55.82%~86.55%和 76.01%~92.53%。一般而言, 凤眼莲对污水中 N、P 等营养物的净化效率与污水中 N、P 营养的浓度负荷有很大相关性。随着 N、P 浓度负荷的增加, 凤眼莲对 N、P 的去除亦增加, 但若 N、P 浓度负荷太高, 超过凤眼莲的吸收速度, 则净化效率反而下降<sup>[18]</sup>。本试验中凤眼莲对 TN 的去除率随 TN 初始浓度的升高而降低, 两者间呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ); 而凤眼莲对 TP 的去除率则随 TP 初始浓度的升高而增加, 两

者间呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。这主要是由试验各水体的 TN、TP 负荷间相差较大引起。

研究表明, 不同种类植物以及同一植物不同器官的 N、P 含量有所不同, 多数研究结果显示, N 和 P 在组织中的分布一般遵循地上部>地下部的规律, 即植物对 N、P 的积累主要集中于地上部, 这种分配有利于通过收获植物地上部去除 N 和 P<sup>[13,20-22]</sup>。本研究中, 凤眼莲在 4 种富营养化水体内的 N 含量均为地上部>地下部, 而 P 含量则呈现地下部>地上部, 地上、地下部的 N 和 P 含量平均分别为 24.16~34.15  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、11.76~18.45  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和 3.46~6.90  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、6.02~8.50  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 地上、地下部的 N 和 P 吸收总量分别为 36.24~62.49  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、6.82~8.67  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  和 5.19~12.63  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、3.49~4.00  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 分别占总吸收量的 84.16%~87.82%和 60.35%~5.95%, 表明凤眼莲对水体 N、P 的吸收主要集中于地上部。研究同时发现, 凤眼莲的 N、P 含量均随水体 N、P 初始浓度的升高而增加<sup>[23]</sup>, 且凤眼莲对 N、P 的吸收总量与生物量间相关性好于其组织内的 N、P 含量, 这与蒋跃平和 DeBusk 等的研究结论一致<sup>[21,23]</sup>。

许多研究显示, 在处理低负荷 N、P 的净化系统中, 湿地植物吸收对 N、P 的去除起主要作用, 对水体 N、P 去除的贡献可超过 40%<sup>[21,24]</sup>, 甚至高达 90%<sup>[25]</sup>; 但在高 N、P 负荷的净化系统中, 虽然植物吸收的绝对量比低负荷系统大, 但其所占比例低, 一般不超过 10%<sup>[26-27]</sup>。本研究中 4 种富营养化水体的 N、P 负荷分别为 30.90~301.2  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  和 2.10~21.45  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 凤眼莲吸收对 N、P 去除的贡献率也因水体 N、P 负荷的不同而存在差异。在 N、P 负荷较低的水体中(水体 I 和 II), 凤眼莲通过吸收带走了淤泥中部分 N、P, 而使吸收作用对水体 N、P 去除的贡献率超过 100%; 而在 N、P 负荷较高的水体 III 和 IV 中, 凤眼莲吸收对水体 N、P 去除的贡献率分别为 46.41%、95.99%和 42.32%、83.79%。因此, 本试验条件下凤眼莲吸收对水体 N、P 的去除起主要作用。

## 参考文献

- [1] Willian J J. The role of water plant in water treatment[J]. Agricultural Eng, 1986, 57(6): 9-10
- [2] 袁东海, 高士祥, 任全进, 等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 77-80, 92
- [3] 周小平, 徐晓峰, 王建国, 等. 3 种植物浮床对冬季富营养化水体氮磷的去除效果研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 102-104
- [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
- [5] 李文朝. 富营养化水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 43-57
- [6] 吴振斌. 凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 I. 动态模拟试验[J]. 水生生物学报, 1986, 10(2): 139-150
- [7] Casabianca M L D, Laugier T, Posada F. Pertoliferous wastewater treatment with water hyacinth: Experimental statement[J]. Waste Management, 1995, 15(8): 651-655
- [8] 朱夕珍, 肖乡, 刘怡, 等. 植物在城市生活污水人工土快滤处理床的作用[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 582-584
- [9] 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
- [10] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养化水体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
- [11] El-Gendy A. Leachate treatment using natural systems[D]. Windsor: University of Windsor, 2003
- [12] 王志刚, 沈颂东, 顾福根, 等. 几种水生维管束植物对水中氮、磷吸收率的比较[J]. 淡水渔业, 2004, 34(5): 6-8
- [13] 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 597-601
- [14] 黄蕾, 翟建平, 王传瑜, 等. 4 种水生植物在冬季脱氮除磷效果的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 366-370
- [15] 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
- [16] 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
- [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 II. 磷的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 792-796
- [18] 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
- [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] 李建娜, 胡日利, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(7): 506-509
- [21] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1718-1723
- [22] 张志勇, 王建国, 杨林章, 等. 植物吸收对模拟污水净化系统去除氮、磷贡献的研究[J]. 土壤, 2008, 40(3): 412-419
- [23] DeBusk T A, Peterson J E, Reddy K R. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters[J]. Ecological Engineering, 1995, 5: 371-390
- [24] 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): 75-80
- [25] Rogers K H, Breen A J, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants[J]. JWPCF, 1991, 63(7): 934-941
- [26] Creler G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries: Summary of long term scientific practical and experiences recommendations[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(5): 157-166
- [27] 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