

雷钧镒,李 猛,马旭洲,等. 青萍对富营养化水体氮、磷的去除效果[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):325-328.

# 青萍对富营养化水体氮、磷的去除效果

雷钧镒<sup>1</sup>, 李 猛<sup>2</sup>, 马旭洲<sup>3</sup>, 王 武<sup>4</sup>

(1. 上海海洋大学省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 宜昌英武长江生态渔业有限公司, 湖北宜昌 443000; 3. 上海市水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心, 上海 201306)

**摘要:**以网箱内优势植物青萍为研究对象,研究其在不同浓度富营养化水体中对 N、P 的去除效果。结果表明,在总氮(TN)、总磷(TP)初始浓度分别为 6.13 ~ 18.72 mg/L 和 0.40 ~ 1.57 mg/L 的 3 种富营养化水体中,经 12 d 净化,TN、TP 浓度分别降至 2.94 ~ 7.00 mg/L 和 0.17 ~ 0.47 mg/L;青萍对 N、P 的吸收量分别为 62.24 ~ 171.13 mg 和 16.35 ~ 51.62 mg;青萍对水体 N 去除的贡献率分别为 65.74%、54.17%、51.27%,青萍对水体 P 去除的贡献率分别为 88.32%、83.06%、78.79%。青萍对水体氮、磷具有较好的去除效果,在富营养化水体中种植青萍可起到改善水质的作用。

**关键词:**青萍;富营养化水体;氮;磷;去除贡献

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)01-0325-04

随着人类对环境资源开发利用活动的日益增加,富营养化已成为世界范围内水环境保护中的重大环境问题<sup>[1]</sup>。为了高效、低耗地控制水体富营养化,以利用水生植物为主的污水处理和水体修复生态工程技术一直是水处理领域的研究热

点<sup>[2-5]</sup>。漂浮生长的浮萍科植物因具有生长快、周期短、生活周期长<sup>[6]</sup>、适应性强、易收获、易加工处理<sup>[7]</sup>、蛋白质含量高、处理系统设计简单等优点,近年来得到广泛研究和应用<sup>[8-12]</sup>,利用浮萍去除污水中的氮、磷成为国内外水处理领域的研究热点<sup>[13-20]</sup>。但关于青萍(*Lemna minor*)同时去除氮、磷的基础研究还未见报道。网箱养鱼是一种高密度、集约化的养殖方式,将大水体优越的环境条件与高产网箱养殖技术相结合,可促进水产品养殖的优质、高效,提高其市场竞争力。但网箱养殖是一种人工营养型高密度、集约化的养殖系统,越来越多的网箱养殖使水体污染日益严重<sup>[21]</sup>。降低网箱养鱼对水体的污染,实现水产养殖业的可持续发展,探求环保型生态网箱,成为当前必须面对的课题。

收稿日期:2013-05-18

基金项目:上海市重点学科建设项目(编号:Y1101);欧盟 FP7 亚欧水产平台项目(编号:245020);上海高校知识服务平台项目(编号:ZF1206);上海海洋大学校企横向课题。

作者简介:雷钧镒(1986—),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事环保型生态网箱研究。E-mail:718559687@qq.com。

通信作者:马旭洲(1965—),男,博士,副教授。E-mail:xzma@shou.edu.cn。

比值由原来的 0.83 提高到 1.1,增加了近 30%,同时三级子系统内独特的兼氧环境促进了系统内反硝化作用的提升,但是由于 C/N 比值较理想的完全反硝化数值相差仍然较大,导致系统总氮的去除效率不是很理想。因此,采取分段进水后系统的有机负荷和水力负荷均不同程度的提高,而出水的水质较单段进水时并没有大的变化,充分说明人工快速渗滤系统采用分段式结构后,即可发挥原有的优势,同时还可以增加复氧,增大有机负荷,在保证出水水质的条件下相应地减少了人工快速渗滤系统的占地面积,具有较好的实际工程应用价值。

## 3 结论

一级子系统表层和二级子系统表层分别以 1 m/d 和 0.3 m/d 水力负荷进水时,COD 负荷提高到 0.23 kg/(m<sup>2</sup>·d),去除率为 84.6%。氨态氮负荷提高到 123.2 g/(m<sup>2</sup>·d),去除率为 96.7%。出水中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度都能满足 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物综合排放标准》一级 A 标准。同时,总氮的去除率为 63.8%。

## 参考文献:

[1] 何江涛,钟佐桑,汤鸣皋,等. 人工构建快速渗滤系统污水处理系统的实验[J]. 中国环境科学,2002,22(3):239-243.

[2] 何江涛,钟佐桑,汤鸣皋,等. 解决污水快速渗滤土地处理系统占地突出新方法[J]. 现代地质,2001,15(3):339-345.

[3] Belinda E H, Fletcher T D, Deletic A. Treatment performance of gravel filter media: Implications for design and application of storm water infiltration systems[J]. Water Research, 2007, 41: 2513-2524.

[4] Leverenz H L, Tchobanoglous G, Darby J L. Clogging in intermittently dosed sand filters used for wastewater treatment[J]. Water Research, 2009, 43(3): 695-705.

[5] 张金炳,黄培鸿,杨小毛,等. 东莞华兴电器厂生活污水人工快速渗滤处理系统[J]. 环境工程,2003,21(6):32-35.

[6] 李 丽,陆兆华,王 昊,等. 新型混合填料人工快速渗滤系统处理污染河水的试验研究[J]. 中国给水排水,2007,23(11):86-89.

[7] 牟新民,黄培鸿,张金炳,等. 人工快速渗滤处理深圳茅洲河水的实验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(4):370-377.

[8] 康爱彬,杨雅雯,王守伟,等. 三级串联人工快速渗滤系统处理养殖废水[J]. 环境工程学报,2009,3(3):475-478.

[9] 康爱彬,祝 明,王守伟,等. 人工快速渗滤系统处理模拟养殖废水的研究[J]. 中国给水排水,2009,25(19):65-67.

[10] 谢宇轩,康爱彬,李 明,等. 三级人工快速渗滤系统脱氮效果及菌种分布分析[J]. 环境工程学报,2010,4(6):1271-1275.

青萍为浮萍科,别名水瓢、绿米、卵萍,长椭圆形,左右不对称,上表面具稀疏排列的小突起,腹面有不明显的三脉纹,两面均为绿色,根鞘有2片明显的翅状附属物,根细丝状,先端尖形。本研究以网箱内优势植物青萍为供试材料,测定不同程度富营养化水体中青萍自身氮、磷含量及其对水体氮、磷的去除量,旨在为提高网箱养殖的净化能力提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

选用宜昌英武长江生态渔业有限公司养殖基地的网箱采集青萍。先用自来水将青萍洗净,再用蒸馏水清洗2次,然后放置在曝气的自来水中驯养7d,选择健康、生长良好的青萍植株,用蒸馏水冲洗干净后使用。试验容器为60 cm × 45 cm × 50 cm,容量为70 L的半透明塑料箱,试验水体积为30 L,青萍初始投放量为30.03 ± 0.03 g/箱。

### 1.2 试验设计

2012年8月1日开始在宜昌英武长江生态渔业有限公司基地实验室内进行室内静态试验,试验用水是在长江水中加入硝酸铵(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)和磷酸二氢钾(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)配制成3种不同程度的富营养化水体(表1)。处理I的水质已严重富营养化,处理II、III的水质分别达到城镇污水处理厂一级A、B出水的氮、磷浓度。江水取自湖北省宜昌市三峡大坝夷陵区江段(30°46'N,111°19'E)。试验期间室内气温为21.5 ~ 37.5 °C,日平均光照强度为5 130 lx。

表1 3种不同程度的富营养化水体

处理	TN (mg/L)	TP (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N (mg/L)
I	6.13 ± 0.24	0.40 ± 0.05	1.17 ± 0.03	3.75 ± 0.22
II	13.07 ± 0.31	0.84 ± 0.10	2.08 ± 0.10	9.03 ± 0.31
III	18.72 ± 0.56	1.53 ± 0.12	3.18 ± 0.12	14.85 ± 0.44

3种处理均设空白对照组,每个处理3个对照。试验期间每隔4d取1次水样,取样时间为08:00,采集水样前充分搅拌水体,试验期间通过添加蒸馏水使箱内水位稳定,试验开始和结束时捞出全部青萍,测定其鲜重和干重,然后将植株剪

表2 不同程度富营养化水体中青萍的生长特性

处理	鲜重			干重		
	初始(g/箱)	结束(g/箱)	特定生长率(%/d)	初始(g/箱)	结束(g/箱)	特定生长率(%/d)
I	30.08 ± 0.03a	50.78 ± 2.12a	4.36 ± 0.36a	2.26 ± 0.05 a	3.92 ± 0.27a	4.59 ± 0.39a
II	30.01 ± 0.03a	66.45 ± 6.13b	6.60 ± 0.76b	2.29 ± 0.07 a	5.27 ± 0.32b	6.93 ± 0.74b
III	29.99 ± 0.05a	77.67 ± 5.52c	7.92 ± 0.59c	2.28 ± 0.08 a	6.47 ± 0.35c	8.68 ± 0.58c

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 青萍对不同程度富营养化水体的氮、磷去除效果

青萍对3种富营养化水体中的N、P均表现出较好的去除效果。在TN、TP初始浓度分别为6.13 ~ 18.72 mg/L和0.40 ~ 1.57 mg/L的3种富营养化水体中,经12d净化,TN、TP浓度分别降至2.94 ~ 7.00 mg/L和0.17 ~ 0.47 mg/L;青萍对3种富营养化水体的TN、TP去除率分别为52.01% ~ 61.31%和57.56% ~ 70.14%(表3、表4)。

处理I、II、III在试验后4、8d的TN去除率上无显著差异( $P > 0.05$ );处理I和II、处理II和III在试验第12天的TN

碎后置于105 °C烘箱烘干,磨碎后备用,用以测定组织内氮、磷含量。

### 1.3 测定项目及方法

青萍鲜重测定:用捞网将青萍捞起,待无水滴出现用滤纸吸干水分后称其鲜重;干重测定:先对样品进行杀青,然后烘干后测其干重。用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮青萍样品后,采用凯氏定氮法测定TN,采用钒钼黄比色法测定TP。定时采集水样,充分搅拌水体后,采用紫外分光光度法(过硫酸钾氧化)测定TN,采用钼酸铵分光光度法测定TP。

### 1.4 计算方法

$$\text{特定生长率}(SGR) = (\ln m_t - \ln m_0) / t \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{氮磷去除率} = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{青萍对氮、磷的吸收量} = P_t \times m_t - P_0 \times m_0 \quad (3)$$

式中: $m_t$ 为试验第 $t$ 天时青萍重量; $m_0$ 为初始青萍重量; $t$ 为试验持续时间; $C_0$ 为水样氮、磷初始值; $C_t$ 为水样氮、磷终值; $P_t$ 为最终青萍全株氮、磷含量; $P_0$ 为初始青萍全株氮、磷含量。

### 1.5 数据处理与分析

采用SPASS 19.0软件中One - Way ANOVA方差分析、Duncan多重比较法及Excel软件对试验数据进行处理,所有试验数据采用“平均值 ± 标准误”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同程度富营养化水体中青萍的生长特性

青萍在3种不同程度富营养化水体中均能正常生长。青萍初始投放量为29.99 ~ 30.08 g/箱时,经12d生长,青萍鲜重为50.78 ~ 77.67 g/箱,干重为3.92 ~ 6.47 g/箱(表2)。处理I、II、III的鲜重、干重均有显著差异( $P < 0.05$ ),处理III的青萍鲜重分别较处理I、II增加了52.95%、16.88%,处理III的青萍干重分别较处理I、II增加了65.05%、22.77%。处理I、II、III的青萍鲜重、干重的特定生长率均有显著差异( $P < 0.05$ ),处理III青萍鲜重的特定生长率分别较处理I、II提高了65.05%、22.77%,处理III青萍干重的特定生长率分别较处理I、II提高了89.11%、25.25%。

去除率上无显著差异( $P > 0.05$ ),处理I和III在试验第12天的TN去除率上有显著差异( $P < 0.05$ )。处理II、III在试验第12天的TN去除率分别较处理I提高了25.64%、16.00%。各空白对照在试验后4、8、12d的TN去除率均无显著差异( $P > 0.05$ )(表3)。

由表4可见,关于试验4、8、12d的TP去除率,处理III显著高于处理I( $P < 0.05$ ),处理I与II间均无显著差异( $P > 0.05$ );试验后8、12d处理III空白对照的TP去除率显著高于处理I、II( $P < 0.05$ )。

表3 青萍对不同程度富营养化水体氮素的去除效果

水体	处理	总氮含量(mg/L)				去除率(%)		
		0 d	4 d	8 d	12d	4 d	8 d	12 d
水体 I	青萍	6.13 ± 0.24	5.06 ± 0.03	3.57 ± 0.15	2.94 ± 0.15	17.41 ± 2.69a	41.74 ± 3.68a	52.01 ± 3.55a
	对照	6.11 ± 0.07	5.76 ± 0.03	5.50 ± 0.21	5.16 ± 0.15	5.78 ± 0.92c	10.04 ± 4.19c	15.60 ± 3.45d
水体 II	青萍	13.07 ± 0.31	10.48 ± 0.28	7.22 ± 0.18	5.70 ± 0.41	19.72 ± 3.60a	44.70 ± 2.69a	56.34 ± 4.02ab
	对照	13.08 ± 0.28	12.70 ± 0.21	11.95 ± 0.16	11.47 ± 0.11	2.96 ± 0.45c	8.67 ± 0.92c	12.37 ± 1.14d
水体 III	青萍	18.72 ± 0.56	14.42 ± 0.46	9.23 ± 0.69	7.00 ± 0.45	20.34 ± 4.22a	48.94 ± 5.16a	61.31 ± 3.48b
	对照	18.13 ± 0.44	17.63 ± 0.40	16.71 ± 0.28	16.27 ± 0.03	2.76 ± 0.34c	7.86 ± 1.11c	10.23 ± 2.32d

表4 青萍对不同程度富营养化水体磷素的去除效果

水体	处理	总磷含量(mg/L)				去除率(%)		
		0 d	4 d	8 d	12d	4 d	8 d	12 d
水体 I	青萍	0.40 ± 0.05	0.25 ± 0.21	0.19 ± 0.12	0.17 ± 0.01	35.89 ± 1.59a	50.80 ± 3.95a	57.56 ± 4.39a
	对照	0.40 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.37 ± 0.01	0.36 ± 0.01	4.21 ± 1.40c	7.68 ± 2.07c	9.72 ± 3.26c
水体 II	青萍	1.08 ± 0.10	0.72 ± 0.13	0.49 ± 0.09	0.38 ± 0.08	33.16 ± 5.66a	54.05 ± 3.60ab	64.31 ± 3.68ab
	对照	1.08 ± 0.07	1.05 ± 0.08	1.03 ± 0.09	1.02 ± 0.08	2.58 ± 0.37c	5.08 ± 1.82c	6.12 ± 1.45c
水体 III	青萍	1.57 ± 0.12	0.98 ± 0.07	0.63 ± 0.04	0.47 ± 0.05	37.16 ± 7.46b	60.01 ± 5.10b	70.14 ± 3.97b
	对照	1.57 ± 0.06	1.53 ± 0.08	1.49 ± 0.05	1.47 ± 0.03	2.36 ± 1.04c	5.08 ± 1.59c	6.54 ± 1.76c

青萍的存在显著提高了水体 N、P 去除率,青萍处理的 TN、TP 去除率显著高于空白对照( $P < 0.05$ )。漂浮植物对水体全磷的去除率大于全氮,这与姜敏等对 3 种水生漂浮植物的研究结果<sup>[10]</sup>一致。

### 2.3 青萍在不同程度富营养化水体中的氮、磷吸收量

根据青萍全株干重及其体内 N、P 含量,计算出青萍在不同程度富营养化水体中的 N、P 吸收量。青萍体内 N、P 含量随水体 N、P 浓度的增大而增加,这与李猛等在大藻对水体

氮、磷去除效果的研究结果<sup>[22]</sup>一致。处理 I、II、III 的青萍 N 含量无显著差异( $P > 0.05$ );关于青萍 P 含量,处理 I 与 II 间无显著差异( $P > 0.05$ ),处理 I 与 III 间差异显著( $P < 0.05$ )。青萍在 3 种富营养化水体中的 N、P 吸收量分别为 62.64 ~ 171.13 mg 和 16.35 ~ 51.62 mg,各处理间均差异显著( $P < 0.05$ )。青萍对 N、P 的吸收量均随水体富营养化程度的增加而升高(表 5),这与黄蕾等<sup>[23]</sup>、张志勇等<sup>[24]</sup>、李猛等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。

表5 青萍在不同程度富营养化水体中的氮、磷吸收量

处理	N 含量(mg/g)		P 含量(mg/g)		N 吸收量(mg)	P 吸收量(mg)
	初始	结束	初始	结束		
I	35.76 ± 1.43a	36.61 ± 2.23a	6.30 ± 0.28a	7.82 ± 0.56a	62.64 ± 6.85a	16.35 ± 1.04a
II	35.51 ± 1.54a	38.23 ± 1.92a	6.34 ± 0.23a	9.31 ± 0.56ab	119.56 ± 9.12b	34.48 ± 3.86b
III	36.12 ± 1.64a	39.15 ± 1.71a	6.21 ± 0.36a	10.18 ± 1.13b	171.13 ± 19.28c	51.62 ± 6.54c

### 2.4 青萍对不同程度富营养化水体 N、P 去除的贡献

由表 6 可见,青萍在 3 种富营养化水体中的 N、P 去除量分别为 95.80 ~ 333.40 mg 和 28.70 ~ 55.80 mg,各处理间均差异显著( $P < 0.05$ )。根据水体的 N、P 去除量和青萍对 N、P 的吸收量,可计算出青萍通过吸收作用对水体 N、P 去除的贡献率。在 TN、TP 初始浓度分别为 6.13 ~ 18.72 mg/L 和 0.40 ~ 1.57 mg/L 的 3 种富营养化水体中,青萍对水体 N 去

除的贡献率分别为 65.74%、54.17%、51.27%,青萍对水体 P 去除的贡献率分别为 88.32%、83.06%、78.79%,各处理间青萍对水体 N、P 去除的贡献率均无显著差异( $P > 0.05$ )。由此可知,青萍对水体中的氮、磷营养均有较高的吸收富集效率。氮、磷浓度的降低速率随水体中氮、磷浓度的增大而升高,而对氮、磷的去除率随水体中氮、磷浓度的增大而降低。

表6 青萍对不同程度富营养化水体 N、P 去除的贡献

处理	总去除量(mg)		总吸收量(mg)		贡献率(%)	
	N	P	N	P	N	P
I	95.80 ± 9.56a	28.70 ± 6.61a	62.64 ± 6.85a	16.35 ± 1.04a	65.74 ± 8.89a	88.32 ± 5.83a
II	221.00 ± 20.85b	48.40 ± 5.44b	119.56 ± 9.12b	34.48 ± 3.86b	54.17 ± 1.28a	83.06 ± 6.17a
III	333.40 ± 28.50c	55.80 ± 14.06c	171.13 ± 19.28c	51.62 ± 6.54c	51.27 ± 2.54a	78.79 ± 13.55a

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

青萍耐污能力较好,在氮、磷浓度较大的情况下也能正常生长,生长速度随着氮、磷浓度的增大而增加,在 TN、TP 初始浓度分别为 6.13 ~ 18.72 mg/L 和 0.40 ~ 1.57 mg/L 的 3 种

富营养化水体中,青萍初始投放量为 29.99 ~ 30.08 g/箱,经 12 d 生长,青萍鲜重的特定生长率可达到 7.92%/d,干重的特定生长率可达到 8.68%/d。

青萍的存在显著提高了水体 N、P 的去除率,青萍处理的 TN、TP 去除率显著高于空白对照( $P < 0.05$ )。在 TN、TP 初始浓度分别为 6.13 ~ 18.72 mg/L 和 0.40 ~ 1.57 mg/L 的 3

种富营养化水体中,经 12 d 净化,TN、TP 浓度分别降至 2.94 ~ 7.00 mg/L 和 0.17 ~ 0.47 mg/L。

青萍体内 N、P 含量随水体 N、P 浓度的增大而增加,青萍对 N、P 的吸收量均随水体富营养化程度的增加而升高,青萍在 3 种富营养化水体中的 N、P 去除量分别为 95.80 ~ 333.40 mg 和 28.70 ~ 55.80 mg,青萍对水体 N 去除的贡献率分别为 65.74%、54.17%、51.27%,青萍对水体 P 去除的贡献率分别为 88.32%、83.06%、78.79%。

### 3.2 讨论

金树权等指出,水生植物的净增生物量是决定水生植物水质净化能力的一个重要因素<sup>[25]</sup>;孙宜敏比较了紫萍、少根浮萍和青萍的种群生长,认为青萍在 3 种浮萍中生长速度最快,种群结构合理,具备较好的增长能力<sup>[26]</sup>。本研究中,青萍在 3 种富营养化程度的水体均表现出良好的净化效果,经 12 d 净化,3 种富营养化水体青萍的 N、P 吸收量分别为 62.24 ~ 171.13 mg 和 16.35 ~ 51.62 mg。试验条件下,青萍能适应较高氮、磷浓度的富营养化水体,青萍属对 N、P 耐污能力高,增长速度快于浮萍属<sup>[26]</sup>。在自然条件下,容易形成大片群落,具有竞争性。

大藻和凤眼莲等其他漂浮植物容易造成生态入侵<sup>[25]</sup>,浮萍是一种小型漂浮植物,属于我国本土品种,生长速度快,易于收获,不会对水体造成太大影响,生活周期较其他维管束植物更长,在水温 5 ~ 7 °C、气温 1 ~ 3 °C 的低温情况下,浮萍科植物仍能正常生长<sup>[26]</sup>。浮萍科植物的蛋白质含量可以与大豆相媲美<sup>[10]</sup>,产量却远远超过大豆,必需氨基酸的平衡性也好,而且类胡萝卜素含量极高,粗纤维素含量低,细胞壁不含木质素,易被消化<sup>[27]</sup>,蛋白质成本明显优于大豆饼和鱼粉等传统饲料蛋白质源,可作为高蛋白饲料,也可与草鱼养殖结合起来直接产生经济效益,采用浮萍科植物饲喂草鱼<sup>[28]</sup>、团头鲂<sup>[29]</sup>等都取得过高产,有较好的经济效益和环境效益。在网箱内栽培青萍净化水质时,必须加强管理,对网箱内的青萍进行定期打捞、清除,并在网箱外面加层围隔防止外逃。本研究中的富营养化水体均为人工配制的水体,与天然水体的氮、磷形态存在差异,青萍对其他氮、磷形态的去除效果还有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(6):575-578.

[2] Reddy K R, Debusk T A. State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control[J]. Wat Sci Tech,1987,19(10):61-79.

[3] 吴振斌,詹发萃,邓家齐,等. 综合生物塘处理城镇污水研究[J]. 环境科学学报,1994,14(2):223-228.

[4] 孙刚,盛连喜. 湖泊富营养化治理的生态工程[J]. 应用生态学报,2001,12(4):590-592.

[5] Sherwood C R, Ronald W, Crites E, et al. Natural systems for waste management and treatment[M]. New York: McGraws-Hill,1995:134.

[6] 宋关玲,侯文华,汪群慧,等. 适用于青萍修复的水体富营养化状况研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(10):1793-1796.

[7] Jayash R M, Mut H B, Arockiasamy D I. Efficiency of *Spirodela pileo-*

*rhiza* (L.) shleiden in absorbing and utilizing different forms of Nitrogen[J]. Journal of Environmental Biology,1996,17(3):227-233.

[8] 钟云霄,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[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(2):36-40.

[9] Allinson G, Stagnitti F, Colville S, et al. Growth of floating aquatic macrophytes in alkaline industrial wastewaters[J]. Journal of Environmental Engineering,2000,126(12):1103-1107.

[10] 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.

[11] 沈根祥,徐介乐,胡双庆,等. 浅水体浮萍污水净化系统的除氮途径[J]. 生态与农村环境学报,2006,22(1):42-47.

[12] 蔡树美,诸海焘,钱晓晴,等. 不同磷初始浓度对紫萍生长及磷吸收效率的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):88-92.

[13] 钟云霄,胡洪营,钱易. 无机氮化合物及 pH 值对紫背浮萍生长的影响[J]. 中国环境科学,2003,23(4):417-421.

[14] 钟云霄,胡洪营,钱易. pH 及无机氮化合物对小浮萍生长的影响[J]. 环境科学,2003,24(4):35-40.

[15] 钟云霄,胡洪营,钱易. pH 及无机氮化合物对细脉浮萍生长的影响[J]. 生态学报,2003,23(11):2293-2298.

[16] 钟云霄,胡洪营,钱易. 硝酸盐氮对紫背浮萍氨耐受能力的影响[J]. 华南农业大学学报,2005,26(3):14-17.

[17] Gideon O. Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production[J]. Agricultural Water Management,1994,26(1/2):27-40.

[18] Bonomo L, Pastoreli G, Zambon N. Advantages and limitations of duckweed-based wastewater treatment systems[J]. Wat Sci Tech,1997,35(5):239-246.

[19] Bergmann B A, Cheng J, Classen J, et al. Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed[J]. Trans Action of the ASAE,2000,43(2):263-269.

[20] Bergmann B A, Cheng J, Classen J, et al. In vitro election of duckweed geographical isolates for potential use in swine lagoon effluent renovation[J]. Bioresource Technology,2000,73(1):13-20.

[21] 蒋增杰,方建光,毛玉泽,等. 宁波南沙港网箱养殖水域营养状况评价及生物修复策略[J]. 环境科学与管理,2010,35(11):162-167.

[22] 李猛,马旭洲,王武. 大藻对水体氨磷去除效果的初步研究[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(9):1137-1142.

[23] 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.

[24] 张志勇,郑建初,刘海琴,等. 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(1):152-157.

[25] 金树权,周金波,朱晓丽,等. 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1571-1575.

[26] 孙宜敏. 浮萍对污染水体中氮磷吸收富集作用研究[D]. 上海:华东师范大学,2004:1-12.

[27] 陈晓. 利用浮萍进行富营养化修复及控藻研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006:12-14.

[28] 梁长辉. 浮萍培育大规模草鱼种高产高效试验[J]. 内陆水产,2002,32(6):6.

[29] 胡世然. 浮萍培育武昌鱼种获高产[J]. 科学养鱼,2002(9):15.