

3种湿地植物构建的浮床系统修复富营养化水体的效果研究

贺鸿志^{1,2}, 余景², 李拥军³, 黎华寿¹

(1 农业部生态农业重点开放实验室, 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642; 2 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300; 3 中山市农产品质量监督检验所, 广东 中山 528403)

摘要:采用人工浮床法研究了3种湿地植物野生稻 *Oryza rufipogon*、香根草 *Vetiveria zizanioides* 和风车草 *Cyperus alternifolius* 构建的浮床系统对富营养化水体的净化效果。结果表明:3种植物在试验水体中均能较好地生长,并能有效降低水体总悬浮物和叶绿素 a 含量,其中,香根草和风车草的效果较好。水体溶解氧则先降低后迅速回升,并显著高于对照,其中以风车草的增氧效果最好。3种植物对水体中总氮和总磷均有良好的去除效果,野生稻、香根草和风车草对富营养化水体的最大 N 去除率分别为 71.3%、82.3% 和 83.7%,最大 P 去除率分别为 74.9%、89.3% 和 85.6%。综合来看,3种湿地植物中风车草修复能力最强,香根草次之,野生稻最弱。

关键词:湿地植物; 富营养化; 修复; 浮床; 去除率

中图分类号:S682

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2011)02-0016-05

Studies on Mediation of Eutrophic Water Using Artificial Floating-Beds System Established with Three Wetland Plants

HE Hong-zhi^{1,2}, YU Jing², LI Yong-jun³, LI Hua-shou¹

(1 Key Laboratory of Ecological Agriculture, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Agricultural Ecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province, Guangzhou 510300, China; 3 Zhongshan Quality Supervision & Test Institute of Agricultural Products, Zhongshan 528403, China)

Abstract: Using artificial floating-beds system, three wetland plant species (*Oryza rufipogon*, *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus alternifolius*) were chosen to study their effects in the mediation of eutrophic water. The results showed that all the plants grew well in eutrophic water. After treated with three plant species, total suspended solids (TSS) and Chl a concentration of eutrophic water reduced significantly. *V. zizanioides* and *C. alternifolius* had better effects than *O. rufipogon*. Dissolved oxygen (DO) concentration decreased at the beginning and then increased rapidly during the experiment. The oxygen enhancement ability of *C. alternifolius* was the best among three plant species. In addition, three plant species could significantly reduce the content of total N (TN) and total P (TP) of eutrophicated water. Maximal TN removing efficiency of *O. rufipogon*, *V. zizanioides* and *C. alternifolius* were 71.3%, 82.3% and 83.7% respectively, maximal TP removing efficiency were 74.9%, 89.3% and 85.6%. In summary, the purification ability of *C. alternifolius* was the best, *V. zizanioides* was the second.

Key words: wetland plants; eutrophication; purification; floating bed; removing efficiency

收稿日期:2010-06-10

作者简介:贺鸿志(1977—),男,讲师,博士;通信作者:黎华寿(1964—),男,教授,博士,E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

基金项目:广东省渔业生态环境重点实验室开放基金(LFE-2009-07);华南农业大学校长基金(2008K002)

当前,水体富营养化问题已成为我国最主要的水污染问题之一.据统计,我国90%以上的湖泊水体已处于中度营养和富营养状态,部分处于严重富营养化状态.水体富营养化往往使浮游植物特别是藻类大量爆发,导致水体溶解氧降低,悬浮物含量增加,威胁鱼类等其他水生生物的生存,破坏生态平衡,也给人们正常的生产生活带来了严重的干扰,如太湖水体富营养化导致的藻类爆发引起饮用水危机^[1].水体富营养化具有发展快、危害大和难治理等特点,必须发展新方法和新技术来加以控制和修复.人工植物浮床技术是把水生植物或湿地植物,甚至改良过的陆地植物,以浮床作为载体,在富营养化水体表面种植,利用水生植物的营养吸收作用、遮光效应、化感作用、供氧作用以及为有益细菌提供生存环境等作用来净化水质^[1-5].利用水生高等植物组装人工植物浮床净化污水具有成本低、易实施、效果好等优点,具有广阔的应用前景,国内外关于这方面的研究已有不少报道^[1-13].本文采用3种耐污力强、生物量较大、生长较快的湿地植物为供试植物,比较研究其对富营养化水体的净化效果.

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物为野生稻 *Oryza rufipogon*、香根草 *Vetiverial zizanioids* 和风车草 *Cyperus alternifolius*,取自华南农业大学农场.水体材料取自华南农业大学六一区池塘,该池塘位于教工生活区中心区域,有部分生活污水直接排入.其总氮(TN)和总磷(TP)质量浓度分别为 8.837 和 2.235 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,属于富营养化水体.

1.2 试验设计

在长 $\times$ 宽 $\times$ 高=0.5 m $\times$ 0.3 m $\times$ 0.4 m的透明玻璃缸内盛装混合均匀的试验用水,同时取池塘底泥混合均匀后,用小铁铲小心放入缸底,底泥厚度约3 cm.静置1周以后,在每缸内水面上放置1块大小一致的聚苯乙烯泡沫板作为漂浮栽培的定植板.在此定植板上以25 cm $\times$ 15 cm的间距开3个直径7 cm的定植孔,在定植孔中放入与定植孔孔径相匹配的塑料定植杯,每个杯中植入2株去土洗净的长势一致的植物,每种植物设3个重复.同时,以放置了无植物的泡沫板缸为对照(CK),设3个重复.每隔1 d以蒸馏水补充蒸发的水分.试验过程中,每隔14 d取样测定有关指标.取样时间为上午8:30—9:00.试

验于2007年9月14日开始,至11月23日结束,共计70 d.据气象资料,2007年9、11月广州月平均气温分别为27.9、25.4和19.7 $^{\circ}\text{C}$.

1.3 测定项目

试验水质测定项目包括溶解氧(DO)、总N(TN)、总P(TP)、总悬浮物(TSS)、水体叶绿素a(Chl a)和藻类. DO用溶解氧仪测定(YSI-85,美国YSI公司)、TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定(GB11894—89)、TP采用钼锑抗分光光度法测定(GB11893—89)、TSS用重量法测定(GB11901—89)、Chl a采用丙酮萃取-分光光度法测定.每次试验均先取样测定DO后再测定其他指标.

藻类的定性和定量分析:在各培养缸水面下10 cm处采集水样10 mL.采集到的水样置于10 mL塑料离心管中,并立即加入哥鲁氏液0.1 mL固定,静置24 h.之后用滴管缓慢吸去上清液,留下0.5 mL.点少量于载玻片上,加上盖玻片后用Olympus倒置显微镜在400倍显微镜下观察,参考藻类分类资料进行定性分析^[14].定量时,将浓缩水样摇匀后取0.10 mL到浮游植物计数框内,在100倍显微镜下观察10个视野.每个水样观察3次,取平均值.

Shannon-Weiner多样性指数(H)公式为: $H = -\sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right)$,式中, S 为物种数目, N 为所有种的个体总数, n_i 为属于种 i 的个体数.

去除率计算公式:去除率 = $\frac{C_0 V_0 - C_i V_i}{C_0 V_0} \times 100\%$,其中 C_0 为溶液初始浓度, V_0 为初始水体积, C_i 为第 i d溶液浓度, V_i 为第 i d的水体积.

1.4 数据分析

所有数据采用SPSS13.0进行分析,Microcal Origin 6.0作图.

2 结果与讨论

2.1 浮床栽培植物对水体TSS的影响

水体TSS的变化情况见图1,从图1中可知,栽培3种植物的水体中TSS在试验期间逐渐降低,且均低于CK.最终CK的TSS(268.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别为种植野生稻、香根草和风车草水体的2.48、3.23和3.64倍.这表明3种植物对于水体TSS具有一定的净化作用,其中,香根草净化TSS的效果最好,风车草次之,野生稻最差.

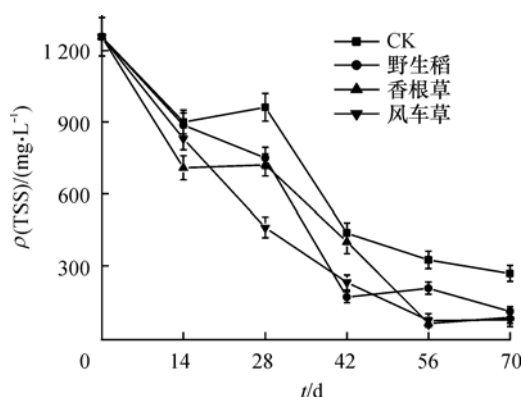


图1 野生稻、香根草和风车草对富营养化水体 TSS 的影响
Fig.1 Effects of *O. rufipogon*, *V. zizanioids* and *C. alternifolius* on TSS concentration in eutrophic water

2.2 浮床栽培植物对水体浮游植物 Chl a 含量的影响

水体浮游植物 Chl a 含量的变化情况见图 2, 从图 2 中可知, 种植植物后的水体 Chl a 浓度逐渐降低, 至第 42 d 时均达到最小值. 但随后种植植物水体 Chl a 浓度出现不同程度的增加. 而 CK 的 Chl a 浓度在第 14 d 达到最低值以后, 迅速增加, 最终在第 70 d 达到 $1.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时, 种植野生稻、香根草和风车草的水体 Chl a 质量浓度为 0.325 、 0.995 和 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这表明 3 种植物对于水体中的浮游植物具有较强的抑制作用, 但野生稻和风车草的抑制效果比香根草的好. 一般认为高等植物对浮游植物的抑制作用与遮光作用、养分竞争和分泌化感作用物质有关^[4, 15-16]. 本研究的浮床试验设置使得 3 种水生植物与藻类在光能竞争方面具有优势, 尤其是对茎叶部分较发达的风车草. 3 种水生植物中香根草和风车草的根系都比较发达, 有利于其与藻类竞争 N、P 等植物性营养盐. 而对于这 3 种植物是否对藻类具有化感作用则尚无法判断, 需要在今后作进一步的研究.

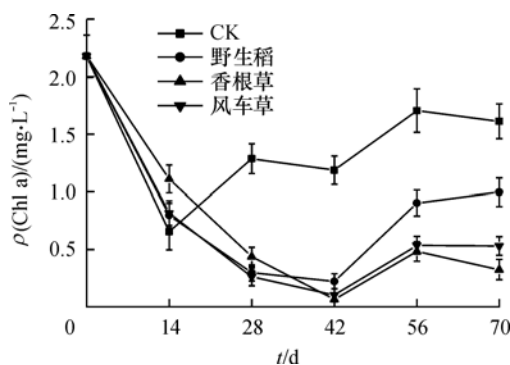


图2 野生稻、香根草和风车草对富营养化水体 Chl a 含量的影响
Fig.2 Effects of *O. rufipogon*, *V. zizanioids* and *C. alternifolius* on Chl a concentration of plankton in eutrophic water

2.3 浮床栽培植物对水体 DO 的影响

浮床栽培植物对水体 DO 含量的影响情况见图

3, 从图 3 中可知, 种植植物后的水体 DO 含量与 CK 中的含量相近, 都呈现先降低后回升的变化趋势. 但 CK 组在前段降低得很快, 后段升高较少. 最终, CK 组在第 70 d 时 $\rho(\text{DO})$ 为 $4.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时, 种植野生稻、香根草和风车草的水体 $\rho(\text{DO})$ 分别为 6.10 、 6.67 和 $8.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明种植植物后水体 DO 含量迅速增加, 特别是在栽培风车草时, 水体 DO 增加最为迅速. 与此结果相似, 胡绵好等^[8]也发现黑麦草处理的富营养化水体中 $\rho(\text{DO})$ 为 $7.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而无植物处理的对照 $\rho(\text{OD})$ 仅为 $3.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明高等植物的增氧效果非常明显, DO 的大幅度增加将为好氧微生物的繁殖创造良好的条件, 通过微生物对有机污染物等的分解, 水体会得到进一步的净化.

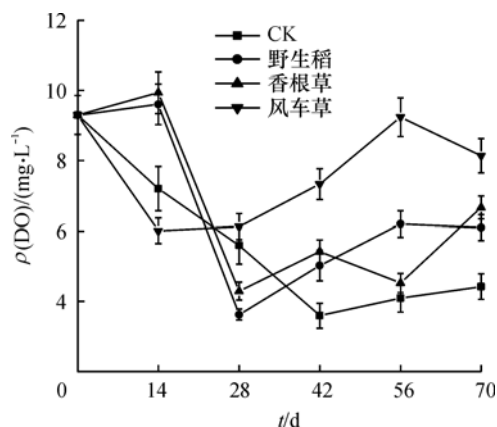


图3 野生稻、香根草和风车草对富营养化水体 DO 的影响
Fig.3 Effects of *O. rufipogon*, *V. zizanioids* and *C. alternifolius* on DO concentration in eutrophic water

2.4 浮床栽培植物对水体 TN 和 TP 的去除作用

浮床栽培植物对水体 TN 含量的影响情况见图 4, 从图 4 中可知, 与 CK 比较, 种植植物后的水体 TN 含量都呈现前段急速降低, 而第 28 d 后趋于平

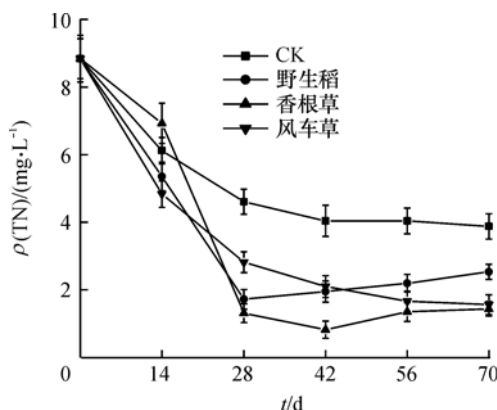


图4 浮床栽培植物野生稻、香根草和风车草对富营养化水体 TN 的影响
Fig.4 Effects of *O. rufipogon*, *V. zizanioids* and *C. alternifolius* on TN concentration in eutrophic water

稳的趋势(风车草稍有升高)。最终,CK在第70 d时 $\rho(TN)$ 为 $3.878 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而此时,种植野生稻、香根草和风车草的水体 $\rho(TN)$ 分别为 2.535 、 1.443 和 $1.568 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。栽培香根草和风车草时TN去除率相近(70 d去除率分别为82.3%和83.7%),而野生稻的去除效果稍差(70 d去除率为71.3%)。说明种植野生稻、香根草和风车草3种植物均能迅速有效地去除富营养化水体的TN。TN去除率与胡绵好等^[8]报道的黑麦草去除率73.68%的结果相近。

浮床栽培植物对水体TP含量的影响情况见图5,从图5中可知,与CK比较,种植植物后的水体TP含量呈逐渐降低的趋势,并在第56 d达到最低值,但随后有明显的升高趋势。最终,CK在第70 d时 $\rho(TP)$ 为 $1.524 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而此时,种植野生稻、香根草和风车草的水体 $\rho(TP)$ 分别为 0.533 、 0.651 和 $0.466 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。栽培野生稻、香根草和风车草的TP去除率在第56 d时达到最大值(分别为74.9%、89.3%和85.6%)。这与胡绵好等^[8]报道的黑麦草去

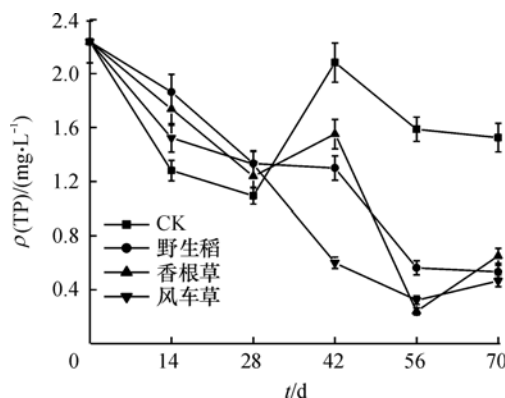


图5 浮床栽培植物野生稻、香根草和风车草对富营养化水体TP的影响

Fig.5 Effects of *O. rufipogon*, *V. zizanioids* and *C. alternifolius* on TP concentration in eutrophic water

除率84.69%的结果相近。试验结果表明富营养化水体种植3种湿地植物能有效降低水体TP,其中以香根草的去除效果最好,野生稻的去除效果最差。当然值得注意的是TP在56 d后出现明显的上升趋势,这可能与底泥中的P释出有关^[12]。

植物在其生长过程中需要大量吸收氮、磷等营养元素,而这些营养元素正是水体富营养化的物质基础。因此,植物通过吸收同化作用从污染水体中将营养物质带走,从而使水体中的氮、磷含量降低,可以达到减轻水体的富营养化程度,从而净化水质的目的。本文的试验结果表明3种植物的TN和TP去除率均达到了很高的水平,说明这3种植物的营养吸收作用效果显著。与此同时,经过人工植物浮床的处理,富营养化水体的其他理化性质也发生了良性转变,如总悬浮物的减少增加了水体透明度,有利于水生植物的生长,溶解氧的增加不但有利于水生动物的生长,也为能降解有机污染物的好氧细菌提供了生存条件。而水华藻类(主要是蓝藻或裸藻)密度的减少以及其他藻类的增多有利于水生生态系统的修复和重建。因此,如果利用恰当,人工植物浮床法可能达到净化水质和重建健康水生生态系统的双重目的。

2.5 浮床栽培植物对浮游藻类的影响

经显微镜镜检观察发现,水样中存在高密度的裸藻(密度约为 $3 \times 10^5 \text{ mL}^{-1}$),其特点为无坚固外壁,易变形,游动迅速,并具有一个红色眼点(图6),初步判断主要为绿色裸藻 *Euglena viridis*。裸藻一般喜欢生长于有机质含量较高的水体,在富营养化水体中经常出现,是淡水水体严重污染的指示生物。栽培浮床植物后,裸藻细胞密度明显降低,而其他绿藻和硅藻的数量逐渐增加。

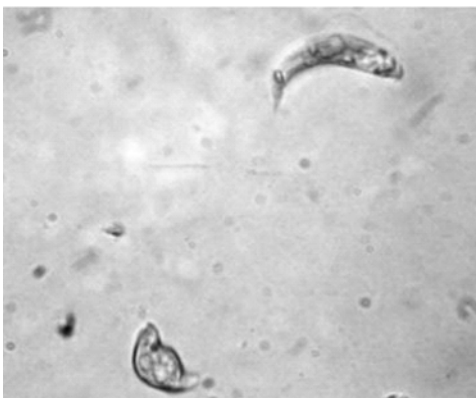


图6 华南农业大学池塘污水中的优势藻——裸藻

Fig.6 The dominant alga (*Euglena viridis*) in an eutrophic pond in south china agricultural university

从表1可知,与对照相比,栽种不同浮床植物的污水中藻类密度均显著降低.而栽种不同浮床植物的污水中藻类 Shannon-Weiner 指数也出现明显差异,其中栽种香根草的水体 Shannon-Weiner 指数最高,而栽种风车草的最低.这可能与风车草的长势较好、吸收 N 和 P 等营养元素的能力强以及遮光作用有关.

表1 栽种不同浮床植物的污水中藻细胞密度和 Shannon-Weiner 指数

Tab.1 The density and Shannon-Weiner index of algae in eutrophic water with different plants

浮床植物	细胞密度/ mL ⁻¹	Shannon-Weiner 指数
CK	1 440 ± 102	1.73
野生稻	1 320 ± 136	1.79
香根草	480 ± 56	2.05
风车草	960 ± 98	1.68

3 结论

野生稻、香根草和风车草在试验水体中均能较好地生长,并对水体 TSS、TN 和 TP 具有良好的净化效果,同时,使水体 DO 浓度显著增加,抑制藻类等浮游植物的生长.3种植物中风车草对富营养化水体的综合修复能力最强,香根草次之,野生稻最弱.本文试验结果对于选择浮床植物用于净化富营养化水体和重建健康水生生态系统具有参考价值.

参考文献:

- [1] LI Lin-feng, LI Ying-hao, BISWAS D K. Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 1656-1663.
- [2] LI Xian-ning, SONG Hai-liang, LI Wei, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water [J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 382-390.
- [3] FISHERA J, STRATFORDA C J, BUCKTONB S. Variation in nutrient removal in three wetland blocks in relation to vegetation composition, inflow nutrient concentration and hydraulic loading [J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 1387-1394.
- [4] 汤仲恩, 种云霄, 吴启堂, 等. 3种沉水植物对5种富营养化藻类生长的化感效应 [J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 42-46.
- [5] 黎华寿, 聂呈荣, 方文杰, 等. 浮床栽培植物生长特性的研究 [J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 24(2): 12-15.
- [6] IAMCHATURAPATRA J, YIA S W, RHEEA J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland [J]. Ecological Engineering, 2007, 29: 287-293.
- [7] 武林慈, 吴林林, 黄民生, 等. 人工浮床及其在污染水体治理中应用进展净水技术 [J]. 净水技术, 2006, 25(4): 8-9.
- [8] 胡绵好, 袁菊红, 张玲, 等. 不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1740-1749.
- [9] 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, 9(5): 489-494.
- [10] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(3): 493-497.
- [11] 牛昶, 韩烈保, 侯国华, 等. 浮床种植草坪草对富营养化水体的净化作用研究 [J]. 草业科学, 2007, 24(10): 90-93.
- [12] 李科德, 胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理 [J]. 中国环境科学, 1995, 15(2): 140-144.
- [13] 廖新伟, 骆世明. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 719-722.
- [14] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 李锋民, 胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用 [J]. 中国给水排水, 2004, 20(11): 18-21.
- [16] 章宗涉. 水生高等植物: 浮游植物关系和湖泊营养状态 [J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 83-86.

【责任编辑 周志红】