

几种植物浮床的水质净化及水华防治效率*

朱术超¹, 刘毅², 李善¹, 关易云¹, 徐建区¹, 蒋海龙³, 刘蔚秋¹

(1. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省水利水电技术中心, 广东 广州 510635;

3. 封开江口中学, 广东 肇庆 526500)

摘要: 分别构建香根草 *Vetiveria zizanioides*、黄菖蒲 *Iris pseudacorus*、西芹 *Apium graveolens* 浮床及其不同组合的植物浮床, 并在水体中加入 6 种不同种类的浮游植物及一种水生动物—斑马鱼 *Danio rerio*, 研究不同浮床系统对水质的净化效应及其对水生生物的影响。结果显示三种植物在浮床上能健康生长, 其生物量、株高和根长均明显增加, 且香根草和黄菖蒲的长势优于西芹。植物浮床均能有效防止水体的中化学需氧量 (COD_{Mn}) 的上升, 但各生态浮床植物之间无显著性差异; 植物浮床能显著去除水体中的氮 (N)、磷 (P) 营养盐, 其中, 香根草的去除效果最好, 而西芹的效果相对较差。总体而言, 在系统中添加斑马鱼能在一定程度上提高浮床系统对水体的净化功能。香根草浮床能显著抑制水体中浮游植物的生长, 相对而言其他类型的植物浮床对浮游植物的抑制能力较弱或无显著影响, 且不同种类浮游藻类对植物浮床的敏感度不同。香根草和黄菖蒲对生态浮床系统中斑马鱼的生物量具有促进作用, 香根草的促进作用大于黄菖蒲。综上所述, 香根草是一种优良的浮床植物, 可广泛用于水体净化及水华防治, 而黄菖蒲可用于城市景观水体的净化。

关键词: 植物浮床; 水体净化; 浮游植物; 香根草 *Vetiveria zizanioides*; 黄菖蒲 *Iris pseudacorus*; 西芹 *Apium graveolens*

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2016) 06-0140-08

Effects of plant floating beds on water purification and bloom control

ZHU Shuchao¹, LIU Yi², LI Shan¹, GUAN Yiyun¹, XU Jianqu¹, JIANG Hailong³, LIU Weiqiu¹

(1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Water Resources and Hydropower Technology Center, Guangzhou 510635, China;

3. Jiangkou Middle School, Zhaoqing 526500, China)

Abstract: To investigate the water purification effects of different floating-bed systems and their influences on aquatic organisms, floating-bed systems vegetated with *Vetiveria zizanioides*, *Iris pseudacorus*, *Apium graveolens* or their combinations respectively were constructed, 6 species of phytoplankton as well as zebrafish (*Danio rerio*) were also added to the systems. The results showed that the three plant species could all grow well in the floating-bed. The growth of *Vetiveria zizanioides* and *Iris pseudacorus* were better than *Apium graveolens*. All floating-bed systems could prevent the increase of chemical oxygen demand (COD_{Mn}) in water. However, no significant difference was observed among different floating-bed systems. Floating-bed systems could also remove the nitrogen and phosphorus nutrients in the water effectively, with *V. zizanioides* having the best effect. In general, putting *Danio rerio* into the systems improved the water purification efficiency to some extent. Floating-beds cultivated with *V. zizanioides* signif-

* 收稿日期: 2016-04-01

基金项目: 广东省科技计划资助项目 (2012B030800013); 广东省海洋渔业科技推广专项资助项目 (A201201102)

作者简介: 朱术超 (1988年生), 男; 研究方向: 污染水体的生物修复; 通讯作者: 刘蔚秋; E-mail: lsslwq@mail.sysu.edu.cn

icantly inhibited the growth of phytoplankton, while the inhibition effects of floating-beds vegetated with other plants were relatively lower or not significant. On the other side, the sensitivity of different phytoplankton species to floating-bed systems was different. The growth of *D. rerio* was significantly stimulated by floating-beds cultivated with *V. zizanioides* or *I. pseudacorus*, with *V. zizanioides* being more effective. Overall, *V. zizanioides* might be an excellent candidate for floating-bed cultivation in water purification and bloom prevention, while *I. pseudacorus* might be used in water purification of urban landscapes.

Key words: plant floating-bed; water purification; phytoplankton; *Vetiveria zizanioides*; *Iris pseudacorus*; *Apium graveolens*

随着我国经济的快速发展, 湖泊、河流、水库等水体的水质严重恶化, 水体富营养化情况日益加剧。水体富营养化易导致浮游植物过度繁殖, 进而引发水华, 对水体生态系统及饮用水安全造成极大的威胁。如何对水体富营养化进行有效治理, 已成为广泛关注的热点。目前降低水体中富营养化的方法主要有物理方法、化学方法、生物方法, 其中生物方法以其简便易行, 防治效果好, 持久防治等特点而逐渐受到人们的青睐^[1-2]。

大型植物常用于水库湖泊等大型水体的环境修复, 通过植草对营养元素强势占有, 达到降低水体的富营养水平、抑制浮游藻类的生长, 从而达到净化水质的目的^[3-5], 另一方面大型植物还可通过改变水环境, 调节水生生态系统的结构, 从而达到抑制浮游藻类生长, 控制水华的作用^[6]。植物浮床技术是利用植物修复水体常用的一种技术手段。上世纪八十年代以来欧美很多国家开始采用浮床技术治理水体污染, 取得较好的效果^[7-8], 至上世纪九十年代中国开始引进此项技术, 目前已经成为一项广泛应用于多种水体生态系统的修复技术^[9-10]。

在植物浮床技术中, 浮床植物的选择是一个重要的环节, 生长迅速、根系发达, 适应性强等特征常成为选择浮床植物的重要标准, 而选用同时具经济价值的植物以达到环境效益和经济效益的双重功效成为近年来植物浮床应用的发展方向。香根草是一种生物量大, 适应能力强的多年生禾本科植物, 广泛用于水土保持和污水净化^[11-12], 黄菖蒲 *Iris pseudacorus*、西芹 *Apium graveolens* 亦常应用于植物浮床, 但目前有关这些植物对水华藻类的影响尚未

见报导。另外香根草的根和叶可用于提取芳香油, 黄菖蒲具有较高的观赏价值, 西芹为蔬菜植物, 均具有一定的经济价值。因此, 本研究选用香根草等3种植物作为研究对象, 并在实验水体中人工加入浮游藻类及斑马鱼以延长水体生态系统的食物链长度, 对比研究这三种植物及其不同组合构成的植物浮床系统在降低水体富营养化水平及调节水体生态系统结构方面的效果, 为在实际应用中浮床植物的筛选和优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

浮床植物选用香根草、黄菖蒲和西芹, 其中香根草购自华南农业大学野外基地, 黄菖蒲和西芹来源于市售。

实验中在水体种接种的浮游藻类包括铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* (FACHB-315)、水华鱼腥藻 *Anabaena flosaquae* (FACHB-245)、斜生栅藻 *Scenedesmus obliquus* (FACHB-13)、羊角月牙藻 *Selenastrum capricornutum* (FACHB-271)、蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidesa* (FACHB-11) 及莱茵衣藻 *Chlamydomonas reinhardtii* (FACHB-359), 均购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库 (FACHB)。实验动物斑马鱼 *Danio rerio* 来源于市售。

实验用水为自来水配置的 Hoagland (0.05 ×) 营养液, 水质初始营养状况见表1, 氮、磷等营养盐质量浓度直接由所配置营养液中各营养盐质量浓度计算而来。

表1 试验用水初始水质状况¹⁾

Table 1 Initial nutritional status of the water for experiment

$\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$							pH
DTN	DTP	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	COD_{Mn}	DO	
8.86	0.95	8.68	0.18	0.95	2.21 ± 0.08	6.77 ± 0.06	7.64 ± 0.05

1) 氮、磷营养盐质量浓度直接由所配溶液中 N、P 质量浓度计算而来

1.2 试验设置

向 24 个直径 60 cm, 高 90 cm 的塑料水桶中分别加入自来水 200 L, 水体高约 70 cm, 自然放置 3 d 除氯后, 加入相关营养元素, 使水体中各营养元素的含量为 $0.05 \times$ Hoagland 营养液水平 (表 1), 然后在水中加入 6 种藻类, 使水中各种藻类的密度分别为 1×10^5 cell/L。将 6 cm 厚的泡沫板切割成 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 大小 (约为水面面积的 25%), 在泡沫板上均匀钻 6 个孔, 选取长势良好且均匀一致的植物冲洗干净后固定于孔内, 每孔 2 株植物。共设置 7 种浮床处理, 即香根草、黄菖蒲、西芹、香根草 + 黄菖蒲、香根草 + 西芹、黄菖蒲 + 西芹、香根草 + 黄菖蒲 + 西芹处理, 混合植物浮床中不同种植物等量种植。每种处理设 3 个重复。初始时期香根草、黄菖蒲和西芹的初始株高分别约为 35、55 和 20 cm, 根长分别约为 20、25 和 12 cm, 鲜质量分别约为 12、6.5 和 10 g。另构建包含斑马鱼的复合生态系统: 同上设置 3 种单种植物浮床处理组和 1 个无植物生态浮床的空白对照组, 但在试验 3 周后, 每个水桶中投放斑马鱼 8 尾 (大小约为 0.35 g/尾 , 密度为 20 g/m^3)。

实验开始时及结束后分别测定各植物的鲜质量、株高和根长。实验期间, 每 3 d 补充一次水, 使液面到达初始高度, 实验共进行 6 周, 时间为 2015 年 10 月 21 日至 12 月 3 日, 实验期间日平均气温为 $18 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 。分别于实验开始 1、3 和 6 周后进行水质和浮游植物监测。

1.3 指标测定

水质测定方法见表 2^[13]。

浮游植物的定量检测采用常规镜检方法。

1.4 数据分析及处理

植物与斑马鱼各指标增长率计算公式如下:

$$\text{增长率} = \frac{(A_1 - A_0)}{A_0} \times 100\%$$

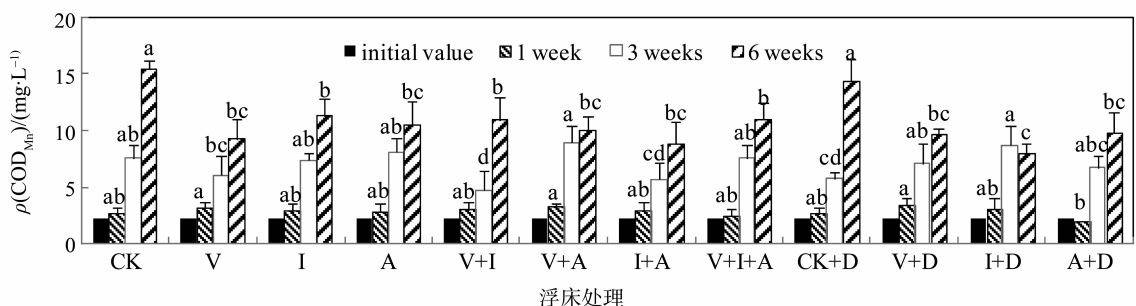


图 1 不同植物浮床系统对水体化学需氧量 (COD_{Mn}) 的影响

Fig. 1 Effects of plant floating-bed systems on COD_{Mn}

式中 A_0 表示试验初始数值, A_1 表示 6 周后实验结束时数值。

采用单因素方差分析法 (one way ANOVA, LSD) 分析同一时期不同处理间各指标差异性, $P < 0.05$ 时设为差异显著。分析软件为 SPSS 17.0。

表 2 水质指标测定方法

指标	方法
COD_{Mn}	酸性滴定法
DTN	过硫酸钾消解、紫外分光光度法
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	纳氏试剂法
DTP	过硫酸钾消解、钼锑抗分光光度法
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	钼锑抗分光光度法

2 结果与分析

2.1 浮床植物的生长特征

如表 3 所示, 3 种植物在浮床上均可健康生长, 经过 6 周后, 香根草的株高和根长增长率最大 (最高分别达 112% 和 240%), 黄菖蒲的株高增长最小, 西芹的根长增长率最小, 但生物量的增长率则表现为黄菖蒲 > 香根草 > 西芹。

2.2 对水质的影响

如图 1 所示, 在实验期间各组水体 COD_{Mn} 均呈现明显的上升趋势, 但浮床处理对水体 COD_{Mn} 的上升具有显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 而在系统中加入斑马鱼仅提高了 6 周后黄菖蒲浮床对 COD_{Mn} 的抑制作用 ($P < 0.05$)。

CK 为空白对照, V, I 和 A 分别代表浮床植物为香根草、黄菖蒲和西芹, CK + D, V + D, I + D 和 A + D 分别代表对应的添加斑马鱼的复合植物浮床系统, 数据以平均值 + SD 表示 ($n = 3$), 不同小写字母表示同一时期不同浮床处理间差异显著 ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD)。全文同。

表 3 实验 6 周后各浮床植物株高、根长及生物量变化 (平均值 ± 标准差)

Table 3 Changes of height, root length and biomass of floating-bed plants after 6 weeks of experiment (means ± SD)

组别	V		I		A		V + D		I + D		A + D	
	香根草	黄菖蒲	香根草	黄菖蒲	香根草	黄菖蒲	香根草	黄菖蒲	香根草	黄菖蒲	香根草	黄菖蒲
实验前株高/cm	34.5 ± 0.5	54.5 ± 1.1	18.8 ± 0.9	34.9 ± 0.4	54.9 ± 1.0	19.0 ± 0.8	34.9 ± 0.4	54.9 ± 1.0	19.0 ± 0.8	34.9 ± 0.4	54.9 ± 1.0	19.0 ± 0.8
实验后株高/cm	69.2 ± 1.6	62.6 ± 3.3	26.0 ± 1.0	74.2 ± 1.6	67.2 ± 5.5	31.3 ± 2.8	74.2 ± 1.6	67.2 ± 5.5	31.3 ± 2.8	74.2 ± 1.6	67.2 ± 5.5	31.3 ± 2.8
增长率/%	100.29	14.80	38.30	112.40	22.33	64.85	112.40	22.33	64.85	112.40	22.33	64.85
实验前株高/cm	20.1 ± 0.8	24.8 ± 0.5	14.3 ± 0.3	20.8 ± 0.3	24.9 ± 0.5	14.0 ± 0.3	20.8 ± 0.3	24.9 ± 0.5	14.0 ± 0.3	20.8 ± 0.3	24.9 ± 0.5	14.0 ± 0.3
实验后株高/cm	58.7 ± 4.3	46.3 ± 2.8	16.4 ± 0.8	70.7 ± 3.8	48.4 ± 3.4	17.2 ± 0.8	70.7 ± 3.8	48.4 ± 3.4	17.2 ± 0.8	70.7 ± 3.8	48.4 ± 3.4	17.2 ± 0.8
增长率/%	192.52	86.69	14.92	239.74	93.98	22.80	239.74	93.98	22.80	239.74	93.98	22.80
实验前株高/cm	145.7 ± 4.0	74.6 ± 2.5	123.3 ± 4.2	148.5 ± 3.2	75.4 ± 3.7	122.1 ± 6.3	148.5 ± 3.2	75.4 ± 3.7	122.1 ± 6.3	148.5 ± 3.2	75.4 ± 3.7	122.1 ± 6.3
实验后株高/cm	212.9 ± 7.4	165.7 ± 10.3	172.4 ± 5.1	225.1 ± 9.1	184.9 ± 7.8	179.8 ± 10.7	225.1 ± 9.1	184.9 ± 7.8	179.8 ± 10.7	225.1 ± 9.1	184.9 ± 7.8	179.8 ± 10.7
增长率/%	46.13	122.03	39.78	51.60	145.18	47.26	51.60	145.18	47.26	51.60	145.18	47.26

组别	V + I		V + A		I + A		V + I + A		
	香根草	黄菖蒲	香根草	西芹	黄菖蒲	西芹	香根草	黄菖蒲	西芹
实验前株高/cm	34.7 ± 0.4	52.1 ± 1.7	35.6 ± 1.6	19.1 ± 0.9	52.4 ± 1.9	18.4 ± 0.7	35.2 ± 1.3	53.6 ± 1.5	19.8 ± 1.7
实验后株高/cm	63.7 ± 2.8	64.7 ± 3.6	63.2 ± 2.4	26.5 ± 2.1	71.2 ± 4.3	24.8 ± 2.2	61.3 ± 4.8	70.8 ± 5.6	27.8 ± 1.1
生物量增长率/%	83.85	24.33	77.43	38.74	35.79	34.54	74.31	32.23	40.64
实验前株高/cm	17.5 ± 0.5	24.5 ± 0.7	23.6 ± 1.4	10.1 ± 0.8	23.6 ± 1.1	11.2 ± 1.6	19.0 ± 0.6	27.8 ± 1.2	10.7 ± 0.8
实验后株高/cm	58.6 ± 3.1	44.1 ± 3.8	57.8 ± 5.7	11.9 ± 1.4	38.5 ± 3.4	11.9 ± 2.6	62.7 ± 3.8	48.1 ± 2.9	10.9 ± 1.6
生物量增长率/%	235.05	80.14	144.77	17.49	63.28	6.27	229.25	73.23	1.55
实验前株高/cm	69.0 ± 1.4	39.5 ± 2.1	68.3 ± 2.6	60.3 ± 1.6	39.4 ± 2.9	60.5 ± 2.0	51.1 ± 1.7	27.7 ± 2.2	39.4 ± 2.2
实验后株高/cm	99.5 ± 4.2	112.0 ± 7.1	127.8 ± 6.1	69.6 ± 2.7	104.2 ± 8.6	75.1 ± 6.7	81.2 ± 2.6	87.2 ± 7.1	46.4 ± 3.4
生物量增长率/%	44.20	183.82	87.17	15.46	164.83	24.19	58.86	215.16	17.79

实验期间各组水体可溶性总氮 (total soluble nitrogen, DTN) 质量浓度均呈降低的趋势 ($P < 0.05$) (图 2), 但所有处理组在实验开始 1 周后即可显著降低水体 DTN 质量浓度 ($P < 0.05$), 并以“香根草”组、“香根草 + 斑马鱼”组以及“黄菖蒲 + 斑马鱼”组的去除效果比其余组好 ($P < 0.05$)。各组水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度在第 1 周呈上

升趋势, 但此后即逐渐下降, 在实验开始 3 周后所有浮床处理组均能显著降低水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度 ($P < 0.05$); 并以“香根草”组和“香根草 + 斑马鱼”组的去除效果最好。水体中的 DTN 以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占绝对优势, 水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的变化规律与 DTN 相似 (具体数据未列出)。

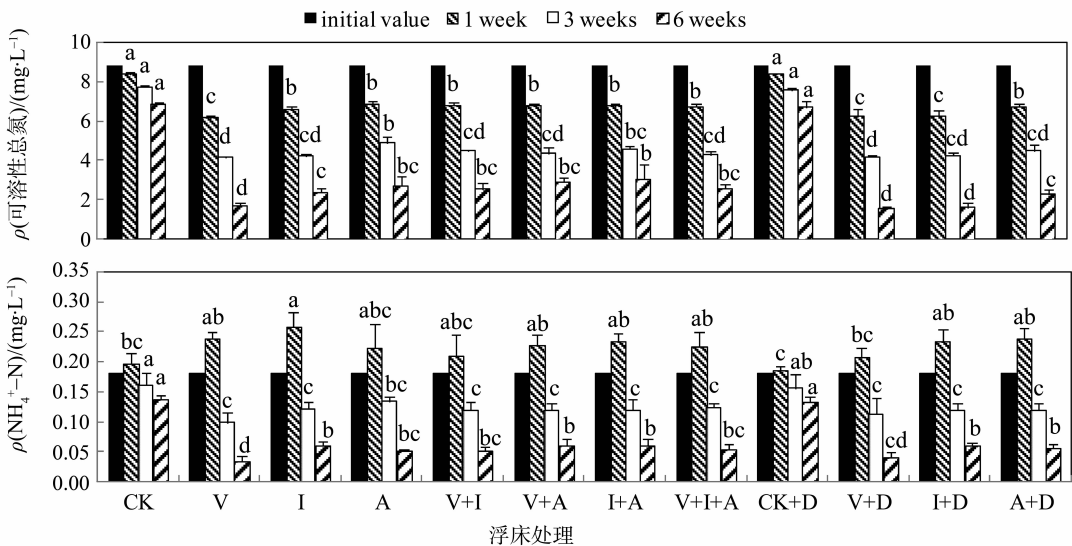


图 2 不同生态浮床对水体可溶性总氮和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的影响

Fig. 2 Effects of different ecological floating beds on concentration of DTN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

对照组水体中可溶性总磷 (total soluble phosphorus, DTP) 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 质量浓度在实验期间基本稳定, 但植物浮床能大幅降低水体中 DTP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的质量浓度 ($P < 0.05$, 图 3), 并以香根草浮床和加入斑马鱼的香根草复合系统的去除效果最好, 添加斑马鱼对于系统去除 DTP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 无显著性影响 ($P > 0.05$)。

2.3 对浮游植物的影响

实验开始 1 周后, 各水体中藻类总密度大幅上升, 但随后逐渐降低 (图 4)。植物浮床可在一定程度上抑制浮游植物密度的上升, 并以香根草浮

床系统和加斑马鱼的香根草复合浮床系统对藻类密度的抑制效果最好 ($P < 0.05$)。

对水体中不同种类浮游植物的定量分析显示, 经过 6 周实验, 各水体中浮游植物均以斜生栅藻的比例最高 (表 4)。所有植物浮床均能显著抑制水华鱼腥藻的生长, 而香根草浮床对斜生栅藻、莱茵衣藻和铜绿微囊藻均具明显的抑制作用。添加斑马鱼的复合系统与对应的单纯植物浮床系统相比, 对斜生栅藻的生长无显著影响, 但在系统中添加斑马鱼可在一定条件下促进莱茵衣藻、铜绿微囊藻或水华鱼腥藻的生长 (表 4)。

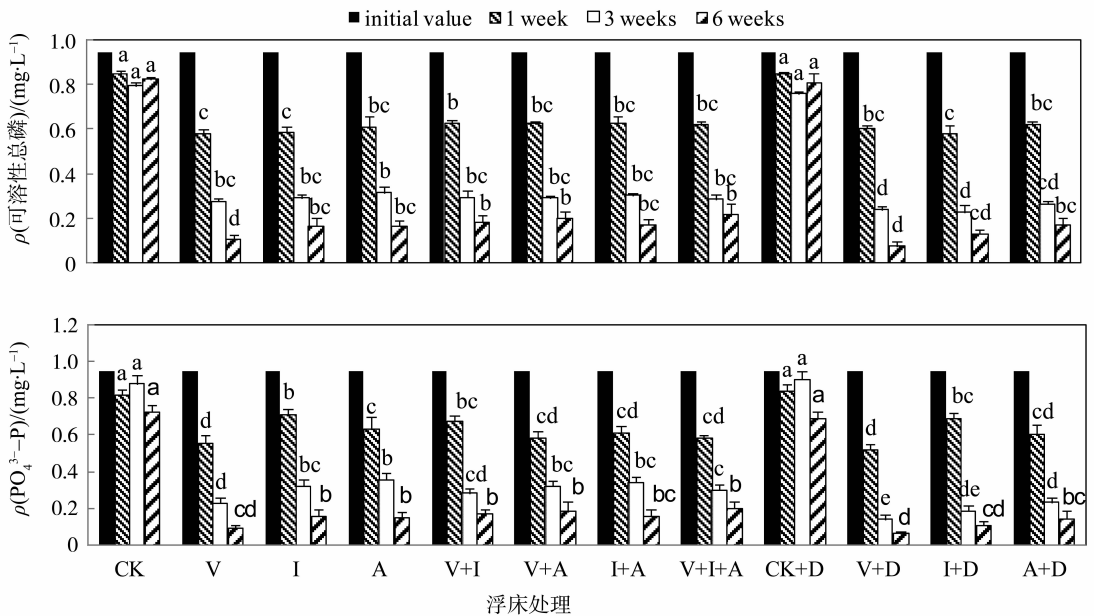


图 3 不同生态浮床对水体 ρ (DTP) 和 ρ ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 的影响

Fig. 3 Effects of different ecological floating beds on concentration of DTP and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

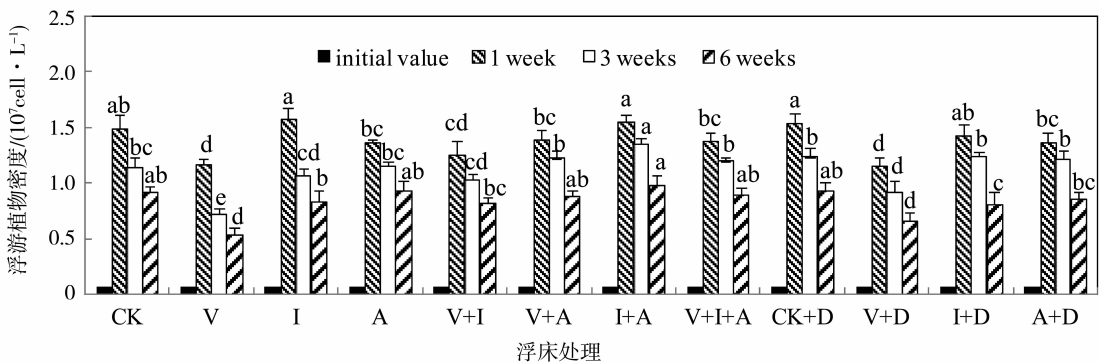


图 4 生态浮床对浮游植物总密度的影响

Fig. 4 Effects of floating-bed systems on total density of phytoplankton

表 4 实验 6 周后不同浮床系统中各种浮游植物的密度 (mean ± SD)¹⁾

Table 4 Density of various phytoplankton in different floating-bed systems

10⁶ cells · L⁻¹

浮床处理	斜生栅藻	蛋白核小球藻	莱茵衣藻	羊角月牙藻	铜绿微囊藻	水华鱼腥藻
CK	6.33 ± 1.18ab	0.72 ± 0.18	0.68 ± 0.10b	0.07 ± 0.03	0.93 ± 0.20abc	0.43 ± 0.10b
V	3.68 ± 0.35c	0.77 ± 0.20	0.48 ± 0.24dc	0.08 ± 0.08	0.38 ± 0.19d	0.00 ± 0.00c
I	7.17 ± 0.99a	0.30 ± 0.05	0.33 ± 0.10d	0.02 ± 0.03	0.55 ± 0.44cd	0.00 ± 0.00c
A	7.10 ± 0.90a	0.40 ± 0.25	0.57 ± 0.13 bcd	0.02 ± 0.03	1.30 ± 0.13a	0.00 ± 0.00c
V + I	6.25 ± 0.40ab	0.52 ± 0.15	0.70 ± 0.13bc	0.03 ± 0.03	0.75 ± 0.18bcd	0.00 ± 0.00c
V + A	6.50 ± 0.58ab	0.58 ± 0.21	0.75 ± 0.10abc	0.03 ± 0.06	0.98 ± 0.35ab	0.00 ± 0.00c
I + A	7.65 ± 0.75a	0.70 ± 0.18	0.82 ± 0.20 ab	0.05 ± 0.05	0.63 ± 0.18bcd	0.00 ± 0.00c
V + I + A	6.78 ± 1.08 a	0.58 ± 0.15	0.52 ± 0.15cd	0.05 ± 0.05	1.02 ± 0.31ab	0.00 ± 0.00c
CK + D	6.57 ± 0.88ab	0.60 ± 0.15	0.60 ± 0.05bed	0.07 ± 0.03	0.97 ± 0.18ab	0.53 ± 0.13a
V + D	4.80 ± 0.68c	0.52 ± 0.32	0.65 ± 0.10bc	0.18 ± 0.10	0.40 ± 0.09d	0.00 ± 0.00c
I + D	5.30 ± 1.03bc	0.78 ± 0.13	0.98 ± 0.33a	0.08 ± 0.08	0.92 ± 0.15abc	0.00 ± 0.00c
A + D	6.57 ± 0.67ab	0.53 ± 0.19	0.63 ± 0.16bc	0.05 ± 0.05	0.82 ± 0.25b	0.00 ± 0.00c

1) 数字后不同字母表示同一种藻类密度存显著性差异 (P < 0.05, One way ANOVA, LSD)

2.4 对斑马鱼的影响

种植香根草和黄菖蒲的复合浮床系统中斑马鱼生长显著快于空白对照组 (P < 0.05), 并且香根草浮床对斑马鱼生长的促进效应大于黄菖蒲 (P < 0.05), 而西芹对其生物量影响不显著。

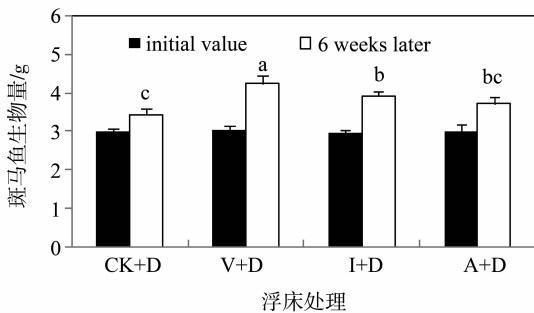


图 5 实验 6 周后不同复合浮床系统中斑马鱼生物量的变化

Fig. 5 Biomass changes of *Danio rerio* in different floating-bed systems after 6 weeks of experiment

3 讨论

3.1 浮床植物的生长特征

本研究中, 香根草和黄菖蒲根系发达、生长迅速且生物量大, 适合作为生态浮床植物应用于富营养化水体的治理, 这与前人研究结果相符^[14-16]。根据本研究的结果, 西芹在浮床上的生长状态较弱, 其对水质的净化效率也较低。

3.2 植物浮床对水质的影响

化学需氧量 (COD_{Mn}) 是反映水体中有机和无

机可氧化物污染程度的指标, 也是水体有机物相对含量的综合指标之一, 水体中 COD_{Mn} 高说明水体有机污染程度重。水体中 COD_{Mn} 的去除主要通过微生物的代谢分解作用以及颗粒物的沉降净化, 植物根系的吸附吸收对其去除作用较小^[17-18], 而植物在生长过程中产生的枯枝落叶等残留物及其降解产生的有机物、植物根系分泌物以及水体中浮游植物等都会使系统中的有机物增加。本研究中, 随实验进程, 各水体中的 COD_{Mn} 均上升, 可能与藻类大量繁殖使得水体中还原物质大幅增加有关, 但与空白对照相比, 在实验进行 6 周后所有生态浮床均能有效地抑制水体中 COD_{Mn} 的增长, 说明植物经过适应生长后均能在一定程度上降低水体有机污染的程度。

氮磷营养盐是造成水体富营养化的主要营养物质, 是浮游植物生长的重要限制因子, 水体中氮磷营养盐含量也是衡量水质状况的重要指标^[19]。本研究中, 各植物浮床均能显著降低水体中氮磷营养盐的含量且以香根草的效果最佳, 其次为黄菖蒲, 由于香根草和黄菖蒲生长迅速并且根系发达, 使得对水体中氮磷营养盐吸收效率相对较高^[14,16,20]。但不同植物组合生态浮床之间对水体氮磷营养盐的去除效果无显著性差异, 未出现预期中的种间联合效应。

斑马鱼作为模式生物广泛用于水环境相关的研究中, 本研究在浮床系统中添加斑马鱼构建复合浮床系统, 结果显示添加斑马鱼的黄菖蒲复合浮床系统比无斑马鱼的黄菖蒲植物浮床能更有效地抑制水体中 COD_{Mn} 的增长, 而投放斑马鱼的香根草复合浮

床系统和黄菖蒲复合浮床系统比相应的单一植物浮床系统能更有效地去除水体中氮磷营养盐,表明一定条件下植物-动物复合浮床系统比单一的植物浮床能更好地改善水质状况,与前人研究结果一致^[18,21]。

3.3 植物浮床对浮游植物的影响

浮游植物是水生态系统的初级生产者,能敏感地反映水体质量,并对水体生态系统的其他生物产生重大影响^[22-23]。

本研究中,实验开始1周后,由于所接种藻类的迅速生长导致水体中浮游植物总密度急剧增加,但此后由于水体中营养物质含量降低导致藻类密度减小。香根草浮床以及添加斑马鱼的香根草复合浮床系统可有效抑制水体中浮游植物的生长,这一方面源于香根草对氮磷的强力吸收作用^[24],另一方面亦与香根草对藻类具较强的化感抑制作用有关(数据另文发表)。总体来看,在系统中添加斑马鱼对浮游植物总密度的影响不大,而Lin等^[25]研究发现植物-鲢鳙复合生态浮床比单一的植物浮床控制藻类效果好,可能与本研究中添加的斑马鱼是杂食性而非滤食性鱼类有关,也可能是由于投放的斑马鱼密度较小,对浮游藻类摄食量不大有关,在今后的研究中可进一步增加不同类型消费者构建复合浮床系统,以期更全面地了解不同浮床系统的生态功能。

本研究中,植物浮床对不同藻类的影响不同,显示高等植物通过对不同藻类的差别化影响改变水体中浮游植物的群落结构,此前亦有类似的研究报道^[26-28],这在今后利用植物浮床进行水质净化时应加以考虑。

3.4 生态浮床系统对斑马鱼生长的变化

研究显示,香根草和黄菖蒲浮床均能显著促进斑马鱼的生长,其中香根草的促进效果比黄菖蒲好。可能是香根草的根系比黄菖蒲的更发达,有利于维持水环境的稳定,更适合水体中斑马鱼的摄食与生长。

4 结 论

香根草、黄菖蒲和西芹均可在植物浮床上健康生长,其中香根草和黄菖蒲根系发达、生长迅速,对富营养化水体的氮磷营养盐具有很好的去除作用,并能促进水体中鱼类的生长,同时香根草对水体中浮游植物的生长具有一定的抑制作用。因此香根草植物浮床在富营养水体的净化及水华防治方面具有极高的潜在推广价值,而黄菖蒲可应用于城市

景观水体的环境治理。

参考文献:

- [1] 钱大富,马静颖,洪小平. 水体富营养化及其防治技术研究进展[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2002, 20(1): 28-30.
- [2] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. Ecological Engineering, 2004, 22: 27-42.
- [3] SRIVASTAVA J, GUPTA A, CHANDRA H. Managing water quality with aquatic macrophytes [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, 7: 255-266.
- [4] VERMEER C P, MARIEKE E, PORTIELJE R, et al. Nitrogen uptake and translocation by *Chara* [J]. Aquatic Botany, 2003, 76: 245-258.
- [5] XIONG J B, GUO G L. Nitrogen removal from secondary effluent by using integrated constructed wetland system [J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 659-662.
- [6] BAKKER E S, van DONK E, DECLERCK S A J, et al. Effect of macrophyte community composition and nutrient enrichment on plant biomass and algal blooms [J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11: 432-439.
- [7] CALHEIROS C S C, RANGEL A O S S, CASTRO P M L. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater [J]. Water Research, 2007, 41(8): 1790-1798.
- [8] CIRIA M P, SOLANO M L, SORIANO P. Role of macrophyte *Typha latifolia* in a constructed wetland for wastewater treatment and assessment of its potential as a biomass fuel [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 535-544.
- [9] 孙连鹏,冯晨,刘阳. 强化生态浮床对珠江水中氮污染物去除研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(1): 93-97.
- [10] 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.
- [11] 夏汉平,敖惠修,刘世忠,等. 应用香根草对垃圾场进行植被恢复及净化垃圾污水的研究[J]. 广州环境科学, 2002, 17(1): 34-37.
- [12] DONJADEE S, CLEMENTE R S, TINGSANCHALI T, et al. Effects of vertical hedge interval of vetiver grass on erosion on steep agricultural lands [J]. Land Degradation & Development, 2010, 21(3): 219-227.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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: 243-285.

- [14] 丛海兵, 吴黎明. 2种耐寒生态浮床植物的水质改善性能研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 51-56.
- [15] 李艳蕾, 李兆华, 姜应和, 等. 不同芹菜浮床对富营养化水体净化效果研究 [J]. 水处理技术, 2011, 37(10): 66-70.
- [16] 徐礼煜. 香根草系统在我国的应用与发展 20 年历程回顾 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1406-1414.
- [17] HU G J, ZHOU M, HOU H B, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1448-1458.
- [18] LI X N, SONG H L, LI W, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 382-390.
- [19] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1351-1353.
- [20] 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.
- [21] GUO Y M, LIU Y G, ZENG G M, et al. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26: 1090-1098.
- [22] ALTMAN J C, PAEPL H W. Composition of inorganic and organic nutrient sources influences phytoplankton community structure in the New River Estuary, North Carolina [J]. Aquatic Ecology, 2012, 46: 269-282.
- [23] LITCHMAN E, PINTO P T, KLAUSMEIER C A, et al. Linking traits to species diversity and community structure in phytoplankton [J]. Hydrobiologia, 2010, 653: 15-28.
- [24] 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): 285-290.
- [25] LIN T, CUI F Y, LIU D M. Full-scale study of removal effect on *Cyclops* of zooplankton with chlorine dioxide [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 11(5): 234-239.
- [26] CHANG X X, FALK E, SABINE H. Do macrophytes support harmful cyanobacteria? Interactions with a green alga reverse the inhibiting effects of macrophyte allelochemicals on *Microcystis aeruginosa* [J]. Harmful Algae, 2012, 19: 76-84.
- [27] MULDERIJ G, van DONK E, ROELOFS J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from *Chara* [J]. Hydrobiologia, 2003, 491: 261-271.
- [28] PAKDEL F M, SIM L, BEARDA J, et al. Allelopathic inhibition of microalgae by the freshwater stonewort, *Chara australis*, and a submerged angiosperm, *Potamogeton crispus* [J]. Aquatic Botany, 2013, 110: 24-30.
- [29] MULLER N, HEMPEL M, PHILIPP B, et al. Degradation of gallic acid and hydrolysable polyphenols is constitutively activated in the freshwater plant-associated bacterium *Matsuebacter* sp FB25 [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2007, 47: 83-90.
- [30] CAO W P, ZHANG Y Q. Removal of nitrogen (N) from hypereutrophic waters by ecological floating beds (EFBs) with various substrates [J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 148-152.
- [31] ZHANG T T, ZHENG C Y, HU W. The allelopathy and allelopathic mechanism of phenolic acids on toxic *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Applied Phycology, 2010, 22: 71-77.