

沉水植物与生态浮床组合对水产养殖污染控制的研究

罗思亭, 张饮江^①, 李娟英, 黄子贤, 霍姮翠, 董悦 (上海海洋大学水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

摘要: 通过 2009 年 9 月—2010 年 2 月测定陆基围隔中水生植物种植密度、浮床水面覆盖率、水质状况、浮游藻类群落特征及水生生物生长状况,研究了沉水植物与植物浮床相结合的新型养殖水体净化模式对养虾塘污染原位净化及水质调控效果。结果表明,养虾塘第 V 组围隔(单个围隔面积为 3 m × 3 m)内栽种苦草(*Vallisneria natans*) 4.0 kg 和轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*) 3.0 kg,与种植 312 株常绿鸢尾(*Iris hexagonus*)的植物浮床组合,对养殖污染的控制效果较好,TN、TP、COD_{Mn} 分别从 3.41、0.32、14.34 mg · L⁻¹降至 0.79、0.02 和 11.96 mg · L⁻¹;第 V 组围隔内浮游藻类 Margalef 指数为 4.00,Shannon-Wiener 多样性指数为 3.32,Pielou 均匀度指数为 0.76,显示养殖水体环境较稳定,水质相对较好。

关键词: 沉水植物; 植物浮床; 陆基围隔; 养殖污染; 水质净化

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2011)02-0087-08

Effect of Combination of Submerged Macrophyte With Ecological Floating Bed on Aquacultural Pollution Controlling. LUO Si-ting, ZHANG Yin-jiang, LI Juan-ying, HUANG Zi-xian, HUO Heng-cui, DONG Yue (Water Environment Ecology Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Through monitoring the density of aquatic plants, surface coverage rate of the floating bed, water quality, characteristics of phytoplankton communities and growth of hydrobionts in a shrimp-rearing pond during September 2009 to February 2010, effects of combinations of submerged macrophytes with ecological floating beds on in-situ purification and regulation of water quality were studied. It was found that the combination of planting 4.0 kg *Vallisneria natans* and 3.0 kg *Hydrilla verticillata* with the floating bed of 312 hills of *Iris hexagonus* in Enclosure V was the most effective in controlling aquacultural pollution, with TN, TP and COD_{Mn} decreased in concentration from 3.41, 0.32 and 14.34 to 0.79, 0.02 and 11.96 mg · L⁻¹, respectively. In this enclosure, the Margalef index of phytoplankton was 4.00, the Shannon-Wiener diversity index 3.32, and the evenness index 0.76, which demonstrate that its water environment is quite stable and its water quality quite good. A new aquacultural water purification model of combining submerged macrophyte with ecological floating beds has been developed in this study.

Key words: submerged macrophyte; ecological floating bed; land-based enclosure; aquacultural pollution; water purification

利用水生植物净化污水是一种成本低廉、节约能源、简便易行的方法,其作为污染水体净化修复的有效手段而被广泛运用于研究和实践。沉水植物植被恢复技术和生态浮床技术是治理、调控和抑制水体富营养化的有效途径,运用于水体修复的报道较多。由于生态浮床的放置会降低水体光照强度,而沉水植物的生存依赖于水环境中的光因子^[1],所以沉水植物与植物浮床结合净化水体的研究甚少。但最近的研究表明,沉水植物生长与光照强度并非呈完全线性关系^[2],每种植物具有各自不同的光补偿点,在光照条件不良的水体中种植沉水植物可考虑光补偿点低的物种。随着科学技术的不断发展,浮床也趋于多样化,采用框架结构浮床^[3],兼顾浮床

内水下生物对光照的需求,适当降低植株种植密度,将沉水植物植被恢复技术与生态浮床技术结合应用,在理论上完全可行,同时还具有优化净化效果、修复水体、美化水域景观等诸多优点。

水产养殖池塘内源性污染明显,养殖过程中污染物的排放危害了水域生态环境和周边居民的生活、卫生条件。有效改善池塘养殖水环境质量和水

收稿日期: 2010-09-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX-07101); 上海市科学技术委员会重大项目(08dz1900408); 上海市重点学科建设项目(Y1110,S30701)

① 通信作者 E-mail: yjzhang@shou.edu.cn

生态系统,降低养殖污水量,减少污染物排放量,构建养殖池塘生态景观,对于促进生态农业健康发展,推进社会主义新农村建设具有重要意义。笔者通过在养殖池塘中放置生态浮床,种植能周年生长的景观植物——鸢尾,并在池底栽种净水效果较好且光补偿点低的2种沉水植物——苦草与轮叶黑藻^[4],通过现场围隔试验,探寻有效修复富营养化水体、营造优美水域环境的最适水生植物配置,为解决日益严峻的农业水环境问题提供新的技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验区位

试验于2009年9月—2010年2月在上海市松江五库农业示范园养虾塘进行。2009年3—8月试

验塘水质基本状况见表1。由表1可知,试验塘水体有机污染严重,高锰酸盐指数(COD_{Mn})最高达18.82 mg·L⁻¹;总氮(TN)质量浓度为1.99~6.91 mg·L⁻¹,大大超出GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中V类水标准值。

1.2 试验材料

采用陆基围隔^[5]进行现场试验(图1)。在680 m²养殖塘设置10个围隔(图2),5个为1排,排间距为1 m,同一排内围隔间距0.5 m。围隔以木桩为骨架,以竹竿为支架,以聚乙烯薄膜为围隔幔。围隔形状为正方形(3 m×3 m),高1.5 m,水深1.0~1.2 m,围隔露出水面高度为0.3~0.5 m,容积为13.5 m³,围隔底部安装有PVC水管以调节进、排水量。

表1 试验塘主要水质指标

Table 1 Main water quality indexes in the experimental pond

日期	pH 值	硬度/ (mg·L ⁻¹)	碱度/ (mg·L ⁻¹)	ρ/(mg·L ⁻¹)			
				COD _{Mn}	TP	TN	NO ₃ ⁻ -N
2009-03-10	7.53 ± 0.03	210.85 ± 1.19	115.92 ± 6.79	16.92 ± 0.16	0.05 ± 0.014	1.99 ± 0.064	1.10 ± 0.177
2009-04-10	7.32 ± 0.22	183.58 ± 5.09	119.46 ± 1.47	15.62 ± 0.94	0.04 ± 0.007	2.31 ± 0.622	1.19 ± 0.558
2009-05-10	7.87 ± 0.06	194.90 ± 3.95	117.32 ± 4.81	17.20 ± 0.06	0.05 ± 0.014	2.43 ± 0.339	1.35 ± 0.184
2009-06-10	8.28 ± 0.19	178.30 ± 5.03	128.96 ± 9.65	18.22 ± 0.13	0.04 ± 0.010	3.58 ± 1.627	1.48 ± 0.333
2009-07-10	8.36 ± 0.16	178.33 ± 5.06	147.16 ± 4.96	18.82 ± 0.18	0.04 ± 0.006	6.91 ± 1.595	2.22 ± 0.903
2009-08-10	8.17 ± 0.16	181.24 ± 2.38	151.37 ± 6.36	18.43 ± 0.39	0.08 ± 0.064	2.06 ± 0.597	1.07 ± 0.242

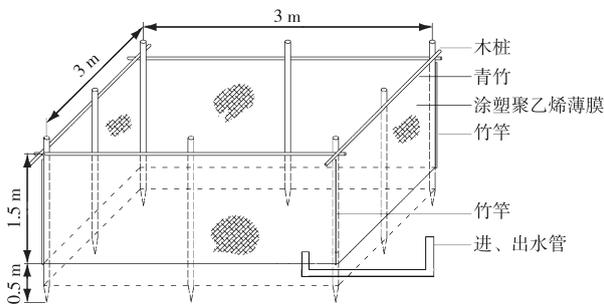


图1 试验围隔的结构

Fig. 1 The structure of enclosure

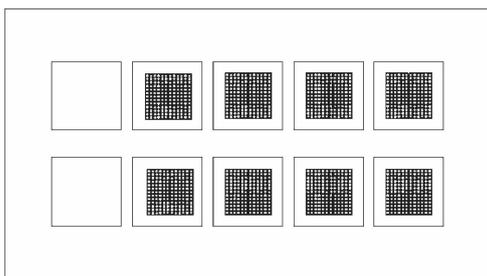


图2 试验塘中围隔的分布

Fig. 2 Distribution of enclosures in the experimental pond

为减小浮床对水下光照强度的影响,试验采用框架式浮床^[6](图3)。单个浮床面积1 m×2 m,含种植篮66个,每个种植篮直径10 cm,种植篮间距10 cm,浮床的植物覆盖率50%。浮床购自上海海圣水族设备厂。

苦草株高26.5~34.3 cm,轮叶黑藻株高52.5~58.1 cm,鸢尾株高45.6~56.2 cm,均购自安徽省阜阳市大京九菊圃上海种植基地,沉水植物种植与生态浮床放置状况如图4所示。日本沼虾苗体长1.0~1.3 cm,体质量1.61~1.79 g,购自上海松江五库农贸市场。

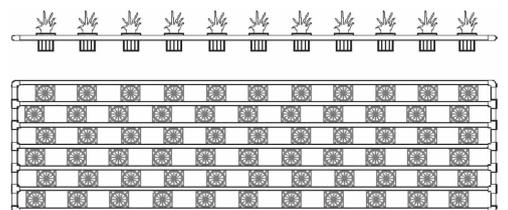


图3 框架式浮床示意

Fig. 3 Framed floating beds

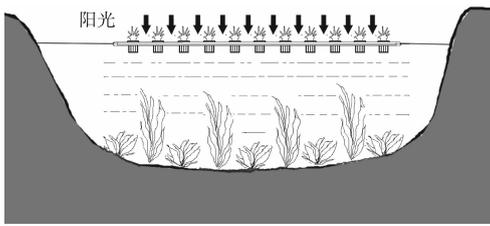


图4 沉水植物与生态浮床组合示意

Fig.4 Sketch of the combination of floating beds and submerged macrophyte

1.3 试验设计

1.3.1 试验组设置

为模拟养殖环境,每围隔投放虾苗400尾,设置5个试验组,每组设2个重复。除对照组以外,每个围隔放置2个浮床,水面覆盖率为44%,试验围隔中水生植物品种及种植量见表2。

表2 试验围隔中水生植物品种及种植量

Table 2 Species and specifications of the aquatic plants in the experimental enclosures

试验组	浮床植物种植量/株		沉水植物种植量/kg	
	常绿鸢尾		苦草	轮叶黑藻
对照组 I	0		0	0
组合系统 II	312		2.5	1.5
组合系统 III	312		3.0	2.0
组合系统 IV	312		3.5	2.5
组合系统 V	312		4.0	3.0

1.3.2 日常管理

试验用水来自五库农业示范园周边河道,进水口用0.425~0.250 mm孔径筛绢布进行双层过滤,以防野杂鱼及其受精卵进入。围隔内沉水植物种植于2009年9月,为促进水生植物健康生长,采用控制水位逐级添加方式向围隔内注水,至10月水深增高至1 m时,将日本沼虾、浮床放入围隔中,以插种方式将鸢尾种植于浮床篮筐内。围隔内投喂配合饵料,每天投喂量约为100 g·围隔⁻¹,并随着气温变化视虾摄食情况而增减,2010年1月每周投喂量约为200 g·围隔⁻¹;试验期间不换水,仅添加少量水以补充水的蒸发量,水深控制在1.0~1.2 m。

1.4 试验检测方法

1.4.1 水质检测

试验期间,每月定期使用5 L采水器在围隔内侧水深约0.5 m处采取水样,现场检测水温、pH值、透明度。于实验室内检测COD_{Mn}、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)、TN、总碱度(Alk)、总硬度(HT)、氯离子(Cl⁻)、叶绿素a含量。

测定方法及评价标准均采用GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,水样经过混合纤维素膜过滤,过滤后的水样测定NO₃⁻-N、NO₂⁻-N含量,未过滤水样测定TN、TP、COD_{Mn}、Alk、HT、Cl⁻含量。温度、pH值采用国产雷磁pHB-4探头现场测定;透明度采用萨氏黑白盘测定;叶绿素a含量采用体积分数φ为90%的丙酮抽提,分光光度计法测定,用Lorenzen方程进行计算。

1.4.2 浮游藻类群落结构调查

试验中期对各围隔内浮游藻类群落结构进行调查。样品采集和室内处理按《淡水浮游生物研究方法》^[7]进行。用25号浮游生物网(网孔直径0.064 mm)采集浮游藻类定性样,于10×40倍光学显微镜下观察并鉴定其种类;用5 L采水器在表层、底层采集定量水样,取1 L混合水样,用鲁哥氏液固定后在室内沉淀器中沉淀48 h,浓缩至50 mL,取0.1 mL在0.1 mL计数框内计数,每个标本重复计数2次,每次计数视野数为100个。2次计数结果允许相对偏差小于±15%。

以优势度(Y)判断群落的优势种,用Margalef指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数分析群落的多样性^[8-10]。

1.4.3 围隔生物生长状况检测

试验期间,每天观察记录围隔内水生植物与日本沼虾的生长状况,每月定期对沉水植物、浮床植物及日本沼虾生长指标进行调查,检测项目包括植物株高、鲜质量以及虾的体长、体质量。

2 结果与分析

2.1 试验围隔水质状况

2.1.1 pH值和硬、碱度

水质指标检测结果见表3。由表3可知,围隔水温为8.25~28.50℃,9月水温最高,至11月明显下降,试验期间由高到低变化,变幅在养殖生物适宜生长温度范围内。围隔间各离子指标变化趋势相似,数值略有波动,pH值为7.53~8.17,总硬度为165.66~370.28 mg·L⁻¹,总碱度为146.91~402.28 mg·L⁻¹,ρ(Cl⁻)为300.91~431.33 mg·L⁻¹。

2.1.2 TN和TP

试验期间,第I组围隔水TN含量均高于其他4组围隔(表3),9月围隔水TN含量达最高值,其中第I组围隔水TN含量最高,为4.50 mg·L⁻¹。试验初始阶段围隔生态系统刚建立,环境还不稳定,随着气温降低以及水生植物对营养盐的吸收,围隔水TN含量呈逐步下降趋势,2010年1月栽种有水生

植物的第Ⅳ、Ⅴ组围隔水 TN 含量均已降至 $0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表3 试验围隔主要水质指标

Table 3 Main water quality indexes in the experimental enclosures

日期	组别	水温/ ℃	硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碱度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$						
					COD _{Mn}	Cl ⁻	TP	TN	硝态氮	亚硝态氮	叶绿素 a
2009-09-01	I	28.50	171.72	253.60	15.33	300.91	0.16	4.50	1.41	0.24	4.008
	II	28.35	297.06	161.93	11.67	301.21	0.32	3.39	1.13	0.21	3.413
	III	28.25	295.82	163.42	11.36	301.67	0.32	3.39	1.13	0.21	3.497
	IV	28.15	296.52	164.49	11.54	303.08	0.33	3.38	1.07	0.18	3.522
	V	28.15	296.61	163.95	11.50	302.77	0.32	3.41	1.03	0.14	3.319
2009-10-03	I	24.60	175.94	261.44	15.43	311.02	0.45	3.54	1.34	0.16	2.194
	II	21.95	204.73	230.51	13.27	389.26	0.18	1.25	1.02	0.15	1.431
	III	21.80	370.28	402.28	13.08	395.46	0.79	1.72	0.98	0.12	1.312
	IV	20.40	346.67	270.99	14.44	361.58	0.35	1.33	0.93	0.09	1.316
	V	19.30	264.01	262.34	14.34	319.99	0.11	1.11	0.85	0.10	1.347
2009-11-01	I	16.60	206.10	259.71	16.22	371.38	0.08	3.44	1.16	0.15	0.016
	II	15.15	179.58	219.54	13.70	386.60	0.05	2.18	0.71	0.07	0.007
	III	14.25	173.50	201.55	14.91	395.46	0.03	2.04	0.66	0.06	0.008
	IV	14.00	168.28	205.28	13.74	364.35	0.03	1.94	0.62	0.06	0.004
	V	13.45	183.93	242.58	13.19	319.60	0.03	1.82	0.54	0.05	0.004
2009-12-01	I	9.05	205.23	256.10	13.07	431.33	0.06	3.05	1.04	0.12	0.005
	II	8.85	196.53	223.98	14.56	430.82	0.02	1.02	0.56	0.06	0.002
	III	8.75	240.46	203.88	13.58	413.56	0.03	0.88	0.53	0.05	—
	IV	8.55	176.10	204.59	13.06	415.17	0.03	0.85	0.48	0.04	—
	V	8.25	165.66	247.27	13.59	380.82	0.02	0.77	0.44	0.04	—
2010-01-03	I	10.15	263.33	260.49	14.72	370.19	0.04	2.09	1.00	0.16	—
	II	8.45	230.80	228.69	16.58	422.40	0.02	0.88	0.57	0.07	—
	III	8.45	262.31	278.62	12.91	347.80	0.02	0.86	0.48	0.06	—
	IV	8.65	246.73	182.65	11.96	331.42	0.02	0.79	0.48	0.05	—
	V	8.60	244.68	146.91	11.96	366.74	0.02	0.79	0.47	0.05	—

—指未检出。

由表3可知,试验初期围隔水 TP 含量呈上升趋势,10月最高,均值达 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。磷属于沉积型元素,沉水植物自9月初栽种后1个月内围隔都处在加水状态,进水口位于围隔底部,进水时对底泥有一定的冲刷作用,造成围隔水体浑浊,TP 含量较高。至11月围隔水 TP 含量呈缓慢下降趋势。2010年1月数据显示,第Ⅳ、Ⅴ组围隔水 TP 含量均已降至 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见,各组合系统对水体中 N、P 的去除效果较好,各处理组去除率(去除率 = 组合系统去除率 - 空白组去除率)见图5。图5表明,第Ⅴ组围隔水 TN、TP 去除率最高,分别为 23.32% 和 21.11%。水生植物通过与藻类竞争营养元素和光能,抑制浮游藻类的生长,从而改善水质。

2.1.3 高锰酸盐指数

试验期间各组围隔水 COD_{Mn} 值为 $11.36 \sim 16.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着饵料的投入,有机负荷逐渐升高,COD_{Mn} 值也相应升高。自11月起天气渐冷,投饵量随沼虾摄食量变小而减少,试验围隔水 COD_{Mn}

值也从11月起呈下降趋势。已有研究表明饲料溶失或分解是养殖池塘有机负荷的重要来源^[11]。随着气温继续降低,沼虾几乎停止游动,投入的饵料未及时被摄食,导致水体有机污染迅速回升,但此时第Ⅴ组围隔水 COD_{Mn} 值继续降低,明显低于对照组,表明该组植物净化系统对有机污染的去效果良好。

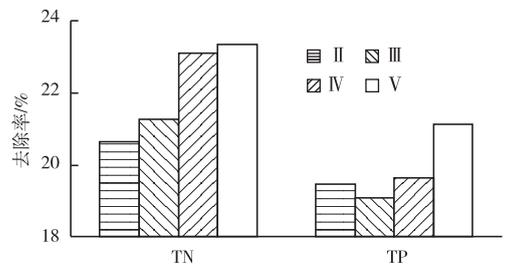


图5 各组合系统 TN、TP 去除率比较

Fig.5 Comparison between combinations in TN and TP removal rate

2.1.4 主要水质指标净化效果排序

根据2010年9月—2010年1月各试验组水质指标测定数据,采用直观分析法^[12],用同一因素平均值的极差(极差=处理组指标值-对照组指标值)来反映各处理组的不同设置对该项因素影响的大小,即显示各处理组针对某一项水质指标的净化效果,极差大表示该处理组对此项水质指标的净化效果好,极差小则表示水质净化效果较差。依据 COD_{Mn} 、TP、TN、 $NO_3^- - N$ 、 $NO_2^- - N$ 5个水质指标值,对各组合系统水质净化效果进行排序(表4)。

表4 各组合系统水质净化效果比较

Table 4 Comparison between combinations in water purification effect

试验组	COD_{Mn}	TP	TN	$NO_3^- - N$	$NO_2^- - N$
II	+	+++	++	+	+
III	++	+	+	++	++
IV	+++	++	+++	+++	+++
V	++++	++++	++++	++++	++++
极差 ¹⁾	2.038	0.059	1.744	0.524	0.091

++++、+++、++和+分别指净化效果最好、其次、较差和最差。

1)单位为 $mg \cdot L^{-1}$ 。

由表4可知,第V组围隔水质净化效果好于其他处理组,尤其是对 COD_{Mn} 、TN和 $NO_3^- - N$ 的净化效果。综合分析可知,水质状况与水生植物生物量密切相关,试验中水质净化效果随水生植物生物量的增加而渐好,适宜的种植比例有利于植物生长,第V

表5 试验围隔中浮游藻类种类组成

Table 5 Species of phytoplankton in the experimental enclosures

门	属	种	
蓝藻门(Cyanophyta)	鱼腥藻属(<i>Anabaena</i>)	鱼腥藻(<i>A. azollae</i>)	
		卷曲鱼腥藻(<i>A. circinalis</i>)	
	平裂藻属(<i>Merismopedia</i>)	类颤藻鱼腥藻(<i>A. oscellarioides</i>)	
		点状平裂藻(<i>M. punctata</i>)	
	微囊藻属(<i>Microcystis</i>)	微小平裂藻(<i>M. tenuissima</i>)	
		水华微囊藻(<i>M. flos-aquae</i>)	
	绿藻门(Chlorophyta)	铜绿微囊藻(<i>M. aeruginosa</i> var. <i>aeruginosa</i>)	
		颤藻属(<i>Oscillatoria</i>)	小颤藻(<i>O. tenuis</i>)
		席藻属(<i>Phormidium</i>)	小席藻(<i>P. tenue</i>)
		色球藻属(<i>Chroococcus</i>)	小形色球藻(<i>C. minor</i>)
		蓝纤维藻属(<i>Dactylococcopsis</i>)	针状蓝纤维藻(<i>D. acicularis</i>)
		盘星藻属(<i>Pediastrum</i>)	二角盘星藻(<i>P. duplex</i>)
	鼓藻属(<i>Cosmarium</i>)	颤鼓藻(<i>C. vexatum</i>)	
		颗粒鼓藻(<i>C. granatum</i>)	
小空星藻(<i>C. microporum</i>)			
集星藻(<i>A. hantzschii</i>)			
刚毛藻属(<i>Cladophora</i>)		绿球藻(<i>C. aegagrophila</i>)	
小球藻属(<i>Chlorella</i>)		普通小球藻(<i>C. vulgaris</i>)	
十字藻属(<i>Crucigenia</i>)		四足十字藻(<i>C. tetrapedia</i>)	

组围隔水草茂盛,水质较好,表明第V组围隔所设植物配比优于其他处理组。

2.2 试验围隔中浮游藻类群落特征

叶绿素a含量为浮游藻类现存量指标。围隔水叶绿素a含量9月最高,为 $3.319 \sim 4.008 mg \cdot L^{-1}$,10月—次年1月呈下降趋势,尤其是12月和次年1月水样中叶绿素a含量均低于检出限(表3)。水温可控制藻类光合作用与呼吸代谢速率,进而影响叶绿素a含量。9月由于水温高,藻类处于大量繁衍期,叶绿素a含量也维持高值。秋季,随着水温下降,叶绿素a含量也呈现下降趋势。由于没有水生植物对藻类的竞争抑制作用,第I组围隔水叶绿素a含量远高于其他种植水生植物的围隔。

观察到围隔内浮游藻类共6门36属51种(表5):蓝藻门7属11种,占总种类数的21.57%;绿藻门13属21种,占总种类数的41.18%;硅藻门10属13种,占总种类数的25.49%;黄藻门3属3种,金藻门1属1种,甲藻门2属2种,共占总种类数的11.76%。蓝藻门的席藻属(*Phormidium*)、绿藻门的纤维藻属(*Ankistrodesmus*)和硅藻门的菱形藻属(*Nitzschia*)是围隔水体的优势属,其在各组围隔中的分布达100%,围隔水体藻型为绿藻+蓝藻+硅藻型,其中优势种类席藻、颤藻等均被视为富营养河流代表种,显示水体呈富营养化。

各试验组围隔中浮游藻类多样性指数见表6。

续表 5 Table 5 (Continued)

门	属	种
	卵囊藻属 (<i>Oocystis</i>)	四角十字藻 (<i>C. quadrata</i>) 椭圆卵囊藻 (<i>O. elliptica</i>) 单球卵囊藻 (<i>O. eremosphaeria</i>)
	韦氏藻属 (<i>Westella</i>)	韦氏藻 (<i>W. botryoides</i>)
	栅藻属 (<i>Scenedesmus</i>)	斜生栅藻 (<i>S. obliquus</i>) 四尾栅藻 (<i>S. armatus</i>) 尖细栅藻 (<i>S. acumi-natus</i>)
	新月藻属 (<i>Closterium</i>)	小新月藻 (<i>C. venus</i>)
	月牙藻属 (<i>Selenastrum</i>)	月牙藻 (<i>S. bibrainum</i>) 羊角月牙藻 (<i>S. capricornutum</i>)
	纤维藻属 (<i>Ankistrodesmus</i>)	针形纤维藻 (<i>A. acicularis</i>) 狭形纤维藻 (<i>A. angustas</i>) 镰形纤维藻 (<i>A. falcatus</i>)
硅藻门 (Bacillariophyta)	舟形藻属 (<i>Navicula</i>)	扁圆舟形藻 (<i>N. ptacentuta</i>) 绿舟形藻 (<i>N. gracilis</i>)
	根管藻属 (<i>Rhizosolenia</i>)	长刺根管藻 (<i>R. longiseta</i>)
	等片藻属 (<i>Diatoma</i>)	长等片藻 (<i>D. elongatum</i>)
	菱形藻属 (<i>Nitzschia</i>)	帽形菱形藻 (<i>N. palea</i>) 尖菱形藻 (<i>N. apiculata</i>)
	小环藻属 (<i>Cyclotella</i>)	梅尼小环藻 (<i>C. meneghiniana</i>) 微小环藻 (<i>C. caspia</i>)
	三角藻属 (<i>Triceratium</i>)	美洲三角藻 (<i>T. americanum</i>)
	褐指藻属 (<i>Phaeodactylum</i>)	三角褐指藻 (<i>P. tricornutum</i>)
	针杆藻属 (<i>Synedra</i>)	双头针杆藻 (<i>S. amphicephala</i>)
	双尾藻属 (<i>Ditylum</i>)	布氏双尾藻 (<i>D. brightwellii</i>)
	桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	舟形桥弯藻 (<i>C. naviculiformis</i>)
黄藻门 (Xanthophyta)	黄丝藻属 (<i>Tribonema</i>)	黄丝藻 (<i>T. minus</i>)
	拟气球藻属 (<i>Botrydiopsis</i>)	拟气球藻 (<i>B. arhiza</i>)
	黄管藻属 (<i>Ophiocytium</i>)	小型黄管藻 (<i>O. parvulum</i>)
金藻门 (<i>Chrysophyta</i>)	硅鞭金藻属 (<i>Distephanus</i>)	四角网硅鞭藻 (<i>D. fibula</i>)
甲藻门 (<i>Pyrrophyta</i>)	角藻属 (<i>Ceratium</i>)	三角甲藻 (<i>C. tripos</i>)
	薄甲藻属 (<i>Glenodinium</i>)	薄甲藻 (<i>G. pulvisculus</i>)

表 6 试验围隔中浮游藻类多样性指数

Table 6 Species diversity and evenness of phytoplankton in the experimental enclosures

试验组	Margalef 指数 <i>D</i>	Shannon-Wiener 指数 <i>H</i>	H_{max}^{-1}	Pielou 指数 <i>J</i>
I	2.29	3.59	4.46	0.80
II	3.31	3.85	4.31	0.89
III	2.93	3.45	4.39	0.78
IV	2.07	3.11	3.46	0.90
V	4.00	3.32	4.39	0.76

1) 指最大 Shannon-Wiener 多样性指数。

由表 6 可知,第 V 组围隔中浮游藻类 Margalef 指数为 4.00, Shannon-Wiener 多样性指数为 3.32, Pielou 均匀度指数为 0.76。理论上而言,浮游生物种类越多,个体数量分布越均匀,所得 Margalef 多样性指数就越大,指示环境越稳定,而 Shannon-Wiener 指数越高,水质污染程度就越轻^[13]。结果表明,第

V 组围隔中水体环境最稳定,水质状况最好,与水质检测结果相吻合。

2.3 围隔生物生长状况

由于试验期间围隔水没有交换,在试验开始不到 1 个月时第 I 组围隔水体浑浊,发绿发臭,日本沼虾全部死亡;第 II、III、IV 和 V 组围隔由于采用植物浮床和沉水植物相组合的方式,虾和草生长状况良好,苦草和轮叶黑藻平均株高最高时分别达 53.5、85.7 cm,2010 年 1 月日本沼虾平均体质量最大,达 1.90 g (图 6~7),但是进入冬季之后沉水植物停止生长,并逐渐萎缩。

3 讨论

3.1 沉水植物的配置

在富营养化水体治理研究中,水生植物对改善水质具有良好效果^[14],尤其是苦草、轮叶黑藻和马

来眼子菜等沉水植物在水质净化方面具有良好功效,在水环境修复工程中被大量利用^[15]。黑藻具有在水中形成上位冠层、根系发达的特性,与苦草、马来眼子菜相比在占领上层空间、获取光照和吸收营养方面优势明显,表现出强大的竞争力;马来眼子菜与苦草的竞争不明显,其占据水面面积大,获取光照多;而苦草则主要占据水体下层空间,地下部分发达,混种时两者生物量相当^[16]。

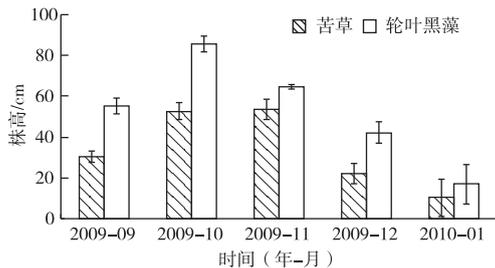


图6 试验围隔中水生植物平均株高变化

Fig. 6 Variation of plant height of hydrophytes in the experimental enclosures

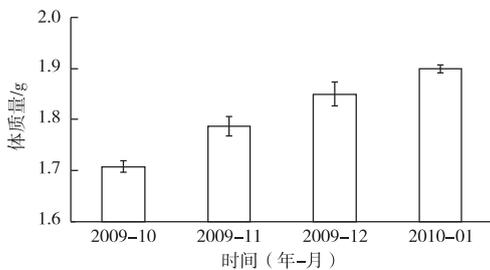


图7 试验围隔中日本沼虾平均体质量变化

Fig. 7 Variation of mean weight of individual shrimps in the experimental enclosures

在这3种沉水植物的各种组合中,苦草+轮叶黑藻组合系统对TN、TP的去除效果最好,同时对藻类叶绿素a的去除也相当有效^[15]。轮叶黑藻和苦草分别占据上、下层空间,相互影响不大;而轮叶黑藻与马来眼子菜之间的竞争明显,这势必会影响各自的生长。因此,苦草+轮叶黑藻的组合系统不仅可以在水体中形成生态位互补,而且对水质的净化效果明显。无论是从对水色和水体透明度的观察结果来看,还是从TN、TP和叶绿素a等水质参数变化以及对浮游藻类的调查结果来看,都显示出这2种植物对水体中有机污染物及N、P等营养盐有较好的去除效果,并对藻类具有良好的抑制作用^[17]。

3.2 沉水植物与生态浮床协同作用的新型植物净水模式

利用植物生长过程对大量N、P的吸收和植物

的光合作用,生态浮床可直接去除水中N、P,降低悬浮物,有效提高透明度,改善水体环境,有利于沉水植物生长。同时框架式浮床大大降低了浮床基垫对水面的覆盖率,增加了浮床透光性,改善了浮床内水下光照环境。但是浮床的放置势必会减少沉水植物的光照,所以浮床覆盖率对沉水植物的生长是一个关键因素。宋祥甫等^[18]研究表明沉水植物与20%覆盖率浮床处理的关联较好,笔者研究中所设浮床水面覆盖率为44%,但是采用框架式浮床的植物覆盖率为50%,即实际水面覆盖率为22%,与之相近。

笔者试验中采用的浮床植物为水生常绿鸢尾,常绿鸢尾适合周年生长,即使在寒冬依然生长健壮,叶色浓绿,抗寒优势明显,弥补了沉水植物季节性强的不足。试验中常绿鸢尾与沉水植物苦草、轮叶黑藻搭配种植,生长状况良好,证实了这种新型植物净水模式的可行性,试验数据显示沉水植物与生态浮床协同作用在去除富营养化水体中有机污染物及N、P等营养盐时效果较佳。当然,植物配置比例也非常关键,第V组围隔中沉水植物(苦草4.0 kg、轮叶黑藻3.0 kg)与浮床植物(常绿鸢尾312株)的组合效果最好,景观效果突出,水草茂盛,水体清澈。

3.3 沉水植物与生态浮床组合系统在水产养殖业中的应用

在传统的水产养殖业中,因为追求高产,过分强化人工饲料与养殖对象这个单一物质能量通道,导致养殖生态系统物种组成失衡,物质能量转化率低。研究表明投入水体的饵料通常有1/2或更多未被摄食,产生的残饵、残骸与鱼虾排泄物一起沉到水底,通过耗氧并分解为氨氮,使其转变为氨化物、亚硝态氮、硫化氢等有毒物质而污染水体^[19]。试验中,第I组为日本沼虾单养组,由于试验期间不换水,养殖动物在试验进行不到1个月就全部死亡,且氮含量严重超标。

日本沼虾适宜生活在水质清新、溶解氧含量高、水草茂盛的水体中,并摄食水生植物碎片、腐败的茎叶和有机碎屑。据此,在日本沼虾养殖池中种植水生植物,不但能吸收水体中过多的营养元素,改善水质,同时也能给养殖对象提供良好的栖息环境,并促其生长。笔者的试验也证实了水生植物在日本沼虾养殖中的重要作用,围隔中水草茂盛,水体清澈,植物浮床-沉水植物组合系统在改善水质的同时,不但增大了水产养殖对象的栖息范围,而且增强了养殖环境的观赏性,为现代水产养殖业提供了新的发展思路。

致谢:感谢上海市松江五库农业示范园区养虾场对研究工作的大力支持与帮助,同时感谢王聪、马海峰同学在采样工作中的热情相助。

参考文献:

- [1] 袁龙义,李守淳,李伟,等.光照对沉水植物刺苦草生活史对策的影响[J].江西师范大学学报:自然科学版,2008,32(4):482-487.
- [2] 王素梅,潘伟斌,黄华.富营养化水体中光照对黑藻生长的影响[J].水资源保护,2010,26(2):53-55.
- [3] 复合立体生物浮床技术对微污染水体氮磷的去除效果[J].生态与农村环境学报,2010,26(增刊1):24-29.
- [4] 周红,任久长,蔡晓明.沉水植物昼夜光补偿点及其测定[J].环境科学学报,1997,17(2):256-258.
- [5] 李德尚,杨红生,王吉桥,等.一种池塘路基实验围隔[J].青岛海洋大学学报,1998,28(2):199-203.
- [6] 杜佳沫,张饮江,张磊,等.框架式模块化植物浮床构建及其生态效应[J].水产科技情报,2010,37(1):4-8.
- [7] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991:358-388.
- [8] SHANNON C E, WEAVER W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963:25-32.
- [9] MARGALEF D R. Information Theory in Ecology [J]. General Systems, 1958(3):36-71.
- [10] PIELOU E C. Species-Diversity and Pattern-Diversity in the Study

- of Ecological Succession [J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10(2):370-383.
- [11] 王岩,张鸿雁,齐振雄.不同单养与混养海水实验围隔水化学研究[J].水产学报,1999,24(4):350-356.
- [12] 赵连友.正交试验直观分析法介绍[J].养殖技术顾问,1984(2):59-62.
- [13] WU B, CHEN D H. Study on the Structure of Phytoplankton Community and Water Quality Monitoring in Huangpu River[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2007, 25(5):467-472.
- [14] 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,2005,15(8):1447-1450.
- [15] 杜峰,梁宗锁,胡莉娟.植物竞争研究综述[J].生态学杂志,2004,23(4):157-163.
- [16] 雷泽湘,陈光荣,谭镇,等.富营养化水体中3种沉水植物的生长竞争及其净化效果[J].湖北大学学报:自然科学版,2009,319(2):192-196.
- [17] 王艳丽,肖瑜,潘慧云,等.沉水植物苦草的营养成分分析与综合利用[J].生态与农村环境学报,2006,22(4):45-47.
- [18] 宋祥甫,邹国燕,付子轼,等.沉水植物生长对浮床旱伞草净化水质效果的响应[C]//第十三届世界湖泊大会论文集.北京:中国农业出版社,2010:1656-1665.
- [19] 符贵红,肖调义,许宝红.养殖水体污染的危害及预防调控措施[J].内陆水产,2005(12):22-24.

作者简介:罗思亨(1986—),女,湖南株洲人,硕士生,主要研究方向为水域环境生态。E-mail: satingluo1986@gmail.com

敬告读者·作者

根据2010年版《中国科技期刊引证报告》(核心版),2009年本刊被引用计量指标:总被引频次917次,影响因子1.080,引用期刊数233,扩散因子25.41,学科扩散指标6.66,学科影响指标0.77,即年指标0.135,他引率0.94,被引半衰期6.0,权威因子508.50。

《中国科技期刊引证报告》(核心版)选用的是中国科技论文统计源期刊,即中国科技核心期刊,这些期刊是在经过严格的定量和定性分析的基础上选取的各个学科的重要科技期刊。2010年版《中国科技期刊引证报告》(核心版)收录中国科技论文统计源期刊共1946种。中国科技论文统计源期刊的论文构成了中国科技论文与引文数据库(CSTPCD),该数据库的统计结果编入国家统计局和科学技术部编制的《中国科技统计年鉴》,统计结果被科技管理部门和学术界广泛应用。

本刊编辑部
2011年3月18日