

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.02.010

一种新型的复合生态浮床及其对浮游植物群落结构的影响

李艳枫,刘 凌,陈 宁,夏 倩,邢西刚,燕文明,张 喜,王希希

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:利用现场水池实验法,设可提供生境的复合生态浮床、普通生态浮床、空白对照3组实验处理,对比研究复合浮床与普通浮床在影响浮游植物群落结构及水质净化、生态修复方面的特点和优势。结果表明:复合浮床对N、P的去除率高于普通浮床;复合浮床和普通浮床两者的净化修复作用可抑制水体中浮游植物的大幅度增长,且复合浮床更有助于增加浮游植物的多样性、提高水生态系统的稳定性。

关键词:复合生态浮床;浮游植物;群落结构;水质净化;环境因子

中图分类号:X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)02-0046-06

A new type of compound ecological floating bed system and its effect on phytoplankton community structure

LI Yanfeng, LIU Ling, CHEN Ning, XIA Qian, XING Xigang,
YAN Wenming, ZHANG Xi, WANG Xixi

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Three treatments (the compound ecological floating bed system (EFBS), the general EFBS, and control with no phytoplankton) were compared with field experiments in several ponds to study their effects on phytoplankton community structure and their characteristics during the process of water purification and ecological restoration. The results show that the compound EFBS leads to higher removal rates of N and P; both the compound and the general EFBS have purification and restoration effects, which can inhibit the substantial growth of phytoplankton in the water; and the compound EFBS shows a better performance in increasing the diversity of phytoplankton and improving the stability of the aquatic ecosystem.

Key words: compound EFBS; phytoplankton; community structure; water purification; environmental factors

生态浮床(ecological floating bed system)是按照自然界自身规律,以混凝土、高分子材料等作为载体和基质,种植水生植物而建立的去除水体中污染物的人工生态系统,其通过植物根部的吸收,吸附作用和微生物等作用,消减富集于水体中的N、P及有害物质,从而达到净化水质的效果^[1-2]。目前,生态浮床作为一种水体生态修复手段,越来越多的人不仅关注其水质净化效率,而且更多的结合其对生态系统内浮

游植物群落的影响^[3]来分析其可行性和适用性。浮游植物(phytoplankton)作为水生态系统的主要初级生产者,其生长繁殖除受到自身生物学特性的影响外,还受外界环境因素的影响,如营养盐、温度、酸碱度及其他生物和人为活动的影响。其种类组成、群落结构、数量分布和多样性的生态学特征是水生态系统的重要研究内容,也是评价水生态系统健康和水环境质量的重要标准^[4]。童琰等^[5-7]研究

基金项目:国家自然科学基金(51279060);江苏省水利科技项目(2012023);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006-07)
作者简介:李艳枫(1987—),女,硕士研究生,研究方向为生态水文与水环境保护。E-mail:confident_fandy58@126.com

了不同生态浮床内浮游植物群落的变化,结果表明这些浮床的抑藻和水质改善效果明显。

笔者以浆砌河道、湖库以及景观水体的原位净化处理及水体生态系统的修复为目的,设计了一种“可以提供生境的复合生态浮床”,并参考空白对照试验,通过对复合生态浮床和普通生态浮床内浮游植物群落演替及其与环境因子的关系进行对比,分析各浮床内浮游植物群落结构的健康、稳定性,探究复合浮床在水质净化和生态修复方面的效果,为生态浮床在河道、湖库等水体的原位水质净化及生态修复的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验设施

由水泥砌成3个实验池,规格均为2 m×1 m×1 m(长×宽×高)。其中2个实验池内分别放置复合生态浮床和普通生态浮床,浮床规模均为1 m×0.5 m×0.5 m,浮床面积覆盖率为25%,第3个实验池为空白对照,不放任何种类浮床。

1.2 供试植物

选用美人蕉和水雍菜作为浮床植物,其中美人蕉适合在富营养化水体的浮床上种植,其生物量大^[2],N、P累积量也较大^[8],水雍菜在不同富营养化水平下处理效果相对最好^[9]。

1.3 生态浮床

普通生态浮床由浮床框架、植物、填充基质3部分构成。复合生态浮床由顶部植物吸收利用、鸟类生存区(由带有透光孔的竹排、天然纤维垫、水生植物构成),基质吸附处理、鱼类生存区(包括框架、沸石、生物陶粒等填料基质,中间设有空的通道),微生物挂膜强化处理、小型水生动物生存区(由带有孔洞的悬挂基质包组成)和沉水植物吸收区(包括沉水植物和装有载体基质的网袋)4部分构成。

复合生态浮床融合了高效吸附材料,为微生物的附着提供了巨大的表面积,有利于高效发挥微生物的作用,并且能显著降低水体流速,在促进水体中悬浮物沉淀的同时,也降低了底泥再悬浮的风险,既能自富氧又能自己创造合适的好氧-厌氧环境,既能净化水体又能形成简单的“微生物-浮游生物-植物-鱼类-鸟类”食物链,进而形成良好的生态系统,实现小范围内生态系统的修复。系统具有N、P去除效果好、安装管理方便、抗水流冲击能力强、运行费用低等特点,可极大提高生态浮床装置对富营养化水体中污染物的去除能力,适合于自然河道、湖库以及景观水体的原位净化处理及水体生态系统的修复。

1.4 供试水体

以位于南京市的某校区西湖湖水为原水,实验用水为人工配置的高水平富营养化水体,向抽取的西湖自然水体中加入定量的复合化肥,增加水体中N、P质量浓度($\rho(\text{TN}) > 0.3 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) > 0.02 \text{ mg/L}$,达到了富营养化标准^[10])。

1.5 实验设计

实验设3种处理,分别为复合生态浮床、普通生态浮床和空白对照,每种处理设3个重复。实验时间从2012年6月5日—7月4日,平均气温为27℃。

1.6 水质和浮游植物测试

1.6.1 水质

水样采集固定后,立即带回实验室进行指标测定。理化指标包括TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 、 COD_{Mn} 、pH和温度。各指标的测定参照文献^[11]。

1.6.2 浮游植物采样及鉴定

用于浮游植物计数的水样,取该样点表层至底层的混合水样1 L,加入15 mL的鲁哥试剂固定,带回实验室。摇匀后转入1 L量筒中静置24 h以上,弃去上清液,浓缩液收集定容到30 mL。在显微镜(10×40倍)(Olympus, BX51)下进行镜检计数,对优势种属再进行(10×100倍)高倍镜检精确定种。每个样品计数2次,2次计数误差在15%以上时,重复计数标本。浮游植物的鉴定主要参照文献^[12]进行。

1.7 分析方法

对实验数据用SPSS17.0软件进行方差分析(ANOVA)和Pearson相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 营养盐指标

表1为实验开始和结束时3个不同处理的水质指标及其去除率。实验期间各形态的营养盐水平在各处理组中均呈下降趋势,两种浮床对各种形态的N、P均有比较好的去除作用。复合浮床对TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 、DTP的去除效果高于普通浮床。采用SPSS软件对理化数据进行ANOVA分析,在实验结束时,复合浮床与普通浮床的TP与空白对照组之间的差异均达到了极显著水平,显著性 P 分别为0.004、0.008($P < 0.01$)。

2.2 浮游植物

2.2.1 种类组成和优势种的变化

对3组实验样品进行了8次采样工作,共鉴定出浮游植物8门41属77种。其中绿藻门种类最多,总计53种,占种类总数的68.81%;蓝藻门次

表 1 实验开始和结束时不同处理的水质指标及其去除率

处理方式	TN			NH ₄ ⁺ -N			NO ₃ ⁻ -N		
	ρ ₀ /(mg·L ⁻¹)	ρ _L /(mg·L ⁻¹)	去除率/%	ρ ₀ /(mg·L ⁻¹)	ρ _L /(mg·L ⁻¹)	去除率/%	ρ ₀ /(mg·L ⁻¹)	ρ _L /(mg·L ⁻¹)	去除率/%
空白对照	4.69	3.57	23.81	1.30	0.71	45.44	2.58	0.31	88.07
复合浮床	6.45	1.42	77.92	2.28	0.23	89.84	2.17	0.20	90.72
普通浮床	6.72	1.66	75.31	3.08	0.70	77.19	3.06	0.28	90.76

处理方式	TP			PO ₄ ³⁻ -P			DTP		
	ρ ₀ /(mg·L ⁻¹)	ρ _L /(mg·L ⁻¹)	去除率/%	ρ ₀ /(mg·L ⁻¹)	ρ _L /(mg·L ⁻¹)	去除率/%	ρ ₀ /(mg·L ⁻¹)	ρ _L /(mg·L ⁻¹)	去除率/%
空白对照	0.37	0.12	67.99	0.31	0.02	92.65	0.26	0.05	80.43
复合浮床	0.83	0.18	78.59	0.73	0.03	95.97	0.67	0.09	86.10
普通浮床	0.72	0.22	69.67	0.68	0.03	95.65	0.56	0.09	84.81

注:ρ₀为起始质量浓度;ρ_L为最终质量浓度。

之,为 10 种,占种类总数的 12.99%;硅藻门和隐藻门均为 4 种,均占种类总数的 5.20%;裸藻门 3 种,占种类总数的 3.90%;甲藻门、金藻门和黄藻门较少,均为 1 种,各仅占种类总数的 1.30%。

实验初始,各处理组的优势种群主要为蓝藻门的两棲席藻(*Phormidium. amphibia*)和硅藻门的尖针杆藻(*Synedra. acus*)。实验开始一周后,各处理组的优势种群主要为蓝藻门的中华小尖头藻(*Raphidiopsis. sinensia*)、铜绿微囊藻(*Microcystis. aeruginosa*),绿藻门的小球藻(*Chlorella. vulgaris*)、小空星藻(*Coelastrum. microporum*)、网球藻(*Dictyosphaerium. ehrenbergianum*)、四足十字藻(*Crucigenia. tetrapedia*)、双对栅藻(*Scenedesmus. bijuga*)、四尾栅藻(*Scenedesmus. quadricauda*)、丰富栅藻(*Scenedesmus. abundans*)、斜生栅藻(*Scenedesmus. obliquus*)、二形栅藻(*Scenedesmus. dimorphus*)和角锥胶网球藻(*Pectodictyon. pyramidale*)。其中蓝藻门的铜绿微囊藻主要在空白对照组中出现,复合浮床和普通浮床仅在 6 月 26 日成为优势种;蓝藻门的细小隐球藻(*Aphanocapsa. elachista*)仅在空白对照组中出现;硅藻门的尖针杆藻在 6 月 22 日之后不再是优势种属;隐藻门的嗜蚀隐藻(*Cryptomonas. erosa*)在复合浮床中形成阶段性优势(表 2)。

2.2.2 细胞密度和生物量

实验开始后,湖泊水体进入水泥池,由于底质、流动性、生物等环境的剧变,浮游植物总密度和总生物量在实验开始后的一周内处于较低水平(见图 1 和图 2)。到实验的第 10 天各实验组中浮游植物密度有一个单峰回升,其密度峰值分别为 227.7×10⁶ 个/L、455.5×10⁶ 个/L、910.9×10⁶ 个/L。空白对照组的总生物量有一个单峰回升,峰值为 25.65 mg/L,主要为绿藻门(23.21 mg/L)。整个实验期间,各处理组的浮游植物总密度均在 30 日达到最大值,之后均有所下降。两种浮床处理组中浮游植物总生物量在整个实验期间总体呈上升趋势,这与之前 N、P 等

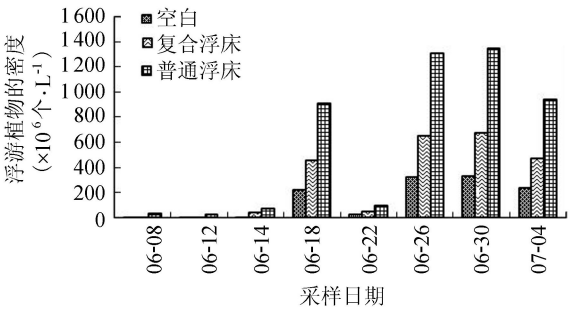


图 1 实验期间浮游植物细胞密度的变化

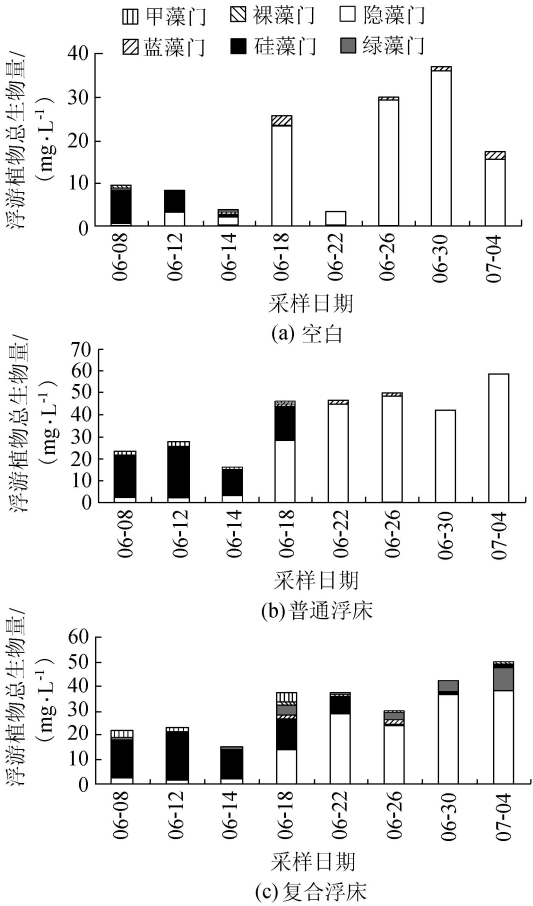


图 2 实验期间浮游植物总生物量

营养盐浓度下降的趋势不一致,原因主要是实验时间持续较短,总生物量的变化存在时间的延迟,滞后于环境因子的变化。由图 2 可知,随着实验的进行,

表 2 实验期间各处理组浮游植物优势种变化																										
优势属种		空白								复合浮床								普通浮床								
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
	两楼席藻				*		*	*		*					*		*	*								
	<i>Phormidium. amphibia</i>																									
	铜绿微囊藻				*			*	*						*								*			
	<i>Microcystis. aeruginosa</i>																									
	坚实微囊藻																									
	<i>Microcystis. firma</i>			*																						
	细小隐球藻																									
	<i>Aphanocapsa. elachista</i>				*	*	*	*	*																	
	中华小尖头藻							*																		
	<i>Raphidiopsis. sinensia</i>				*			*				*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	
	弯形小尖头藻																									
	<i>Raphidiopsis. curvata</i>												*	*	*						*	*	*			
	小球藻																									
	<i>Chlorella. vulgaris</i>			*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*				*	*	*	*	*	
	空星藻																									
	<i>Coelastrum. sphaericum</i>				*			*	*				*	*			*									
	小空星藻																									
	<i>Coelastrum. microporum</i>				*	*	*	*	*				*	*	*	*	*					*		*		
	网球藻																									
	<i>Dictyosphaerium. ehrenbergianu</i>						*	*	*			*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	
	美丽网球藻																*		*		*	*	*	*	*	
	<i>Dictyosphaerium. pulchellum</i>																				*	*	*	*	*	
	四足十字藻										*		*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	
	<i>Crucigenia. tetrapedia</i>													*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	
	顶锥十字藻																						*	*	*	
	<i>Crucigenia. apiculata</i>																						*	*	*	
	双对栅藻																									
	<i>Scenedesmus. bijuga</i>				*			*	*	*			*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	
	四尾栅藻																									
	<i>Scenedesmus. quadricauda</i>				*			*	*	*			*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	
	丰富栅藻																									
	<i>Scenedesmus. abundans</i>				*			*	*	*			*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	
	斜生栅藻																									
	<i>Scenedesmus. obliquus</i>								*			*	*	*	*	*	*			*	*	*				
二形栅藻	<i>Scenedesmus. dimorphus</i>				*			*	*				*	*		*	*				*	*	*	*	*	
	小型卵囊藻																*				*					
	<i>Ocystis. parva</i>					*																*				
	蹄形藻																									
	<i>Kirchneriella. lunaris</i>														*						*	*	*	*	*	
	肾形藻																				*	*	*	*	*	
	<i>Nephrocytium. agardhianum</i>																				*	*	*	*	*	
	角锥胶网球藻							*	*	*					*	*	*				*	*	*	*	*	
	<i>Pectodictyon. pyramidale</i>																									
	单角盘星藻																									
	<i>Pediastrum. simplex</i>							*														*				
	肠突单凸盘星藻							*	*	*																
	<i>Pediastrum. simplex</i>																									
	尖针杆藻		*	*						*	*	*	*	*				*	*	*	*					
	<i>Synedra. acus</i>																	*	*	*	*					
	啃蚀隐藻														*		*	*	*							
	<i>Cryptomonas. erosa</i>														*		*	*	*							

注:1,2,3,4,5,6,7,8 分别指 6 月 8 日,6 月 12 日,6 月 14 日,6 月 18 日,6 月 22 日,6 月 26 日,6 月 30 日,7 月 4 日; * 代表优势种。

复合浮床的浮游植物种类显著多于空白对照组和普通浮床组。

2.2.3 群落演替

随着密度和生物量的变化,浮游植物的群落结构也在不断变化。实验初始时期,浮游植物群落结构主要以蓝藻门、绿藻门和硅藻门为主,占总数量的 95%。随后,硅藻门优势降低,6 月 18 日之后出现很少或者为零;空白对照组蓝藻门优势上升,到实验后期蓝藻门的铜绿微囊藻和细小隐球藻取代绿藻门成为主要优势种;两浮床系统蓝藻门优势总体下降,绿藻门优势总体升高(表 3)。至实验结束时,3 个实验组中浮游植物呈现不同的群落结构特征,空白对照组中浮游植物由蓝藻门、绿藻门、硅藻门和甲藻门构成,复合浮床组由蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、裸藻门和黄藻门构成,普通浮床组仅由蓝藻门、绿藻门和硅藻门构成,复合浮床组的群落结构多样性明显高于空白对照组和普通浮床组。

表 3 浮游植物各门密度百分比									%
采样日期	实验组	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	隐藻门	甲藻门	裸藻门	金藻门	黄藻门
06-08	空白	17.43	42.74	36.65	0.97	1.24	0.97	0	0
	复合浮床	74.20	10.56	14.27	0.25	0.54	0.18	0	0
	普通浮床	46.29	20.63	32.37	0.13	0.39	0.19	0	0
06-12	空白	14.80	53.27	25.79	0.85	3.81	1.27	0.21	0
	复合浮床	17.58	34.12	47.26	0.19	0.76	0.09	0	0
	普通浮床	4.01	41.14	53.58	0.18	1.09	0	0	0
06-14	空白	62.42	32.93	1.79	1.86	0.93	0	0.07	0
	复合浮床	21.75	41.12	34.09	2.71	0.11	0.22	0	0
	普通浮床	24.14	49.56	23.98	1.92	0.32	0.08	0	0
06-18	空白	66.10	33.40	0.12	0	0.38	0	0	0
	复合浮床	50.69	42.22	4.80	1.80	0.23	0.13	0	0.13
	普通浮床	28.10	67.65	4.18	0	0	0	0	0.07
06-22	空白	47.40	52.40	0	0	0.20	0	0	0
	复合浮床	21.67	75.54	2.46	0.33	0	0	0	0
	普通浮床	15.70	84.22	0.06	0.02	0	0	0	0
06-26	空白	17.78	82.16	0	0	0.06	0	0	0
	复合浮床	41.42	57.42	0.20	0.91	0	0	0	0.05
	普通浮床	25.65	74.35	0	0	0	0	0	0
06-30	空白	47.43	52.24	0	0	0.33	0	0	0
	复合浮床	11.91	86.97	0.21	0.91	0	0	0	0
	普通浮床	7.35	92.65	0	0	0	0	0	0
07-04	空白	75.17	24.57	0.06	0	0.20	0	0	0
	复合浮床	7.70	90.57	0.11	1.56	0	0.03	0	0.03
	普通浮床	4.23	95.73	0.04	0	0	0	0	0

2.2.4 生物多样性指数

Shannon-Weiner 指数在浮游植物群落生物多样性和结构健康稳定性的分析上被广泛应用^[13]。由图 3 可以看出,水体进入水泥池后,两浮床系统 Shannon-Weiner 指数均有所下降,表明水体生态系统健康稳定性有所下降。在 6 月 18 日之前,空白对照组的 Shannon-Weiner 指数明显高于复合浮床和普通浮床,但到 6 月 18 日之后却低于其他两种浮床,说明复合浮床和普通生态浮床有助于提高水体浮游植物的生物多样性和水生态系统的健康稳定性;6 月 26 日之后复合生态浮床的 Shannon-Weiner 指数明显高于普通浮床和空白组,因此,在利用生态浮床技术净化河流、湖泊等富营养化水体时,复合生态浮床的净化效果明显、修复作用比较强。

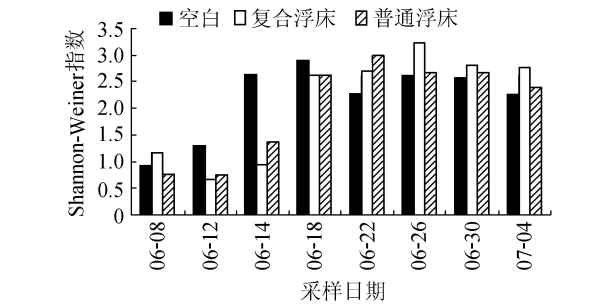


图 3 不同处理组之间浮游植物种类多样性的变化 (Shannon-Weiner 指数)

2.3 浮游植物生物量与环境因子的相关性分析

浮游植物对水环境的化学变化比较敏感^[14]。许多研究结果表明,环境条件的改变可以直接影响藻类植物的生长、繁殖,如温度的变化可以刺激细胞分裂的速度,而 pH 值、营养盐的变化也同样对浮游植物生物量起到重要作用,因此,浮游植物生物量会受到环境因素的综合影响^[14-15]。通过 Pearson 相关性分析得出:实验期间浮游植物生物总量与环境因子 TP、PO₄³⁻-P、DTP、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、COD_{Mn}、pH、温度的相关系数分别为 0.653、0.305、0.483、0.463、0.22、0.35、0.546、0.234、0.07,其中与 DTP、TN 的相关性显著 ($P<0.05$),与 TP、COD_{Mn} 的相关性极显著 ($P<0.01$)。浮游植物总生物量与 TP 含量的相关系数最大,表明 TP 是藻类总生物量的主要限制因子,这与 Dokulil 等^[16-17]的研究成果相一致。

绿藻门的栅藻 (*Scenedesmus*) 属为耐有机污染属,3 个实验组中栅藻属均为优势种属之一(表 2),这与浮游植物总生物量与 COD_{Mn} 极显著正相关相一致;嗜蚀隐藻、细小隐球藻、铜绿微囊藻、两棲席藻为 3 个实验组的部分优势种属(表 2),对 pH 较为敏感,这可能与浮游植物总生物量与 pH 值呈正相关有一定联系。

3 结 论

a. 水质净化效果分析显示对各种形态营养盐

的去除率均由大到小为复合浮床、普通浮床、空白对照,因此,复合浮床在水质净化效果上优于普通浮床。

b. 实验结束时,各实验组的浮游植物密度和总生物量由大到小为:普通浮床、复合浮床、空白对照;复合浮床群落结构复杂性和 Shannon-Weiner 指数高于普通浮床和空白对照。因此,复合浮床在提高浮游植物健康稳定性上优于普通浮床。

c. 浮游植物生物量与各种理化指标相关分析显示,实验期间浮游植物总生物量与 TP 的相关系数最大,因此在浮床系统中磷是浮游植物主要的限制性因素。

d. 本实验中,浮游植物对不同的生态浮床产生积极的响应,且复合生态浮床表现出了比普通生态浮床对浮游植物更强的抑制能力,有更好的水体净化修复效果。这表明在河道、湖库等水体的原位水质净化及生态修复的应用上,复合生态浮床这一设施是可行的。

参考文献:

[1] 郭彪, 张伟. 生态浮床在淀山湖富营养化水体修复中的应用[J]. 中国科技信息,2010,1(23):16-17. (GUO Biao, ZHANG Wei. Application of ecological floating bed in eutrophication of water body restoration in Dianshan Lake[J]. China Science and Technology Information, 2010,1(23):16-17. (in Chinese))

[2] 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, 2003(2):12-15. (LI Huashou, NIE Chengrong, FANG Wenjie, et al. Studies on the growing characteristics of plants grown in floating soilless culture system [J]. Journal of South China Agricultural University, 2003(2):12-15. (in Chinese))

[3] 邹国燕, 叶春. 生态浮床的发展及其生态特性[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2005:103-111.

[4] 沈韫芬, 章宗涉, 龚循矩. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.

[5] 童琰, 徐春燕, 胡雪芹, 等. 滴水湖引水河段组合型生态工程春季对水体净化效果研究[J]. 上海海洋大学学报, 2011(6):930-937. (TONG Yan, XU Chunyan, HU Xueqin, et al. Research of the ecological restoration results of the combined ecological project in Yinshui River, Dripping Lake in spring[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011(6):930-937. (in Chinese))

[6] 吴小慧. 梯级生态浮床修复城市污染河道过程中浮游生物监测及评价研究[D]. 上海:华东师范大学, 2011.

[7] 刘娅琴, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 框式复合型生态浮床对富营养化水体浮游植物群落结构的影响[J]. 水生生物学报, 2010, 34 (1): 196-203. (LIU Yaqin, ZOU Guoyan, SONG Xiangfu, et al. Effect of a new ecological floating bed system (EFBS) on phytoplankton community in eutrophicated water [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010,34(1): 196-203. (in Chinese))

[8] 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. (LUO Guyuan, ZHENG Jianfeng, XU Xiaoyi, et al. Comparison of the growth characteristics and nutrient uptake of four kinds of plants cultivated on a floating-bed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009,29(2): 285-290. (in Chinese))

[9] 胡绵好. 水生经济植物浮床技术改善富营养化水体水质的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.

[10] 刘培桐. 环境学概论[M]. 北京:高等教育出版社, 1995:93-94.

[11] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[12] 胡鸿钧. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1980.

[13] 刘娅琴, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 富营养水体浮游植物群落对新型生态浮床的响应[J]. 环境科学研究, 2011(11): 1233-1241. (LIU Yaqin, ZOU Guoyan, SONG Xiangfu, et al. Response of phytoplankton community to a new ecological floating bed system (EFBS) in enclosures with eutrophicated water [J]. Research of Environmental Sciences, 2011(11):1233-1241. (in Chinese))

[14] 孙春梅, 范亚文. 黑龙江黑河江段藻类植物群落与环境因子的典型对应分析[J]. 湖泊科学, 2009,21(6): 839-844. (SUN Chunmei, FAN Yawen. Canonical correspondence analysis of the relationship between algal community and environment variables of Heilongjiang River in Heihe [J]. Journal of Lake Sciences, 2009,21(6):839-844. (in Chinese))

[15] LEIRA M, SABATER S. Diatom assemblage distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors[J]. Water Research,2005,39:73-82.

[16] DOKULIL M, CHEN W, CAI Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China: the Tai Hu example[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management,2000,3:81-94.

[17] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. 湖泊科学,2001,13(1):63-71. (CHEN Yuwei, QIN Boqiang, GAO Xiyun. Prediction of blue-greenalgae bloom using stepwise multiple regression between algae and related environmental factors in Meiliang bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13 (1): 63-71. (in Chinese))

物学报, 2010, 34 (1): 196-203. (LIU Yaqin, ZOU Guoyan, SONG Xiangfu, et al. Effect of a new ecological floating bed system (EFBS) on phytoplankton community in eutrophicated water [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010,34(1): 196-203. (in Chinese))

[8] 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. (LUO Guyuan, ZHENG Jianfeng, XU Xiaoyi, et al. Comparison of the growth characteristics and nutrient uptake of four kinds of plants cultivated on a floating-bed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009,29(2): 285-290. (in Chinese))

[9] 胡绵好. 水生经济植物浮床技术改善富营养化水体水质的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.

[10] 刘培桐. 环境学概论[M]. 北京:高等教育出版社, 1995:93-94.

[11] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[12] 胡鸿钧. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1980.

[13] 刘娅琴, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 富营养水体浮游植物群落对新型生态浮床的响应[J]. 环境科学研究, 2011(11): 1233-1241. (LIU Yaqin, ZOU Guoyan, SONG Xiangfu, et al. Response of phytoplankton community to a new ecological floating bed system (EFBS) in enclosures with eutrophicated water [J]. Research of Environmental Sciences, 2011(11):1233-1241. (in Chinese))

[14] 孙春梅, 范亚文. 黑龙江黑河江段藻类植物群落与环境因子的典型对应分析[J]. 湖泊科学, 2009,21(6): 839-844. (SUN Chunmei, FAN Yawen. Canonical correspondence analysis of the relationship between algal community and environment variables of Heilongjiang River in Heihe [J]. Journal of Lake Sciences, 2009,21(6):839-844. (in Chinese))

[15] LEIRA M, SABATER S. Diatom assemblage distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors[J]. Water Research,2005,39:73-82.

[16] DOKULIL M, CHEN W, CAI Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China: the Tai Hu example[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management,2000,3:81-94.

[17] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. 湖泊科学,2001,13(1):63-71. (CHEN Yuwei, QIN Boqiang, GAO Xiyun. Prediction of blue-greenalgae bloom using stepwise multiple regression between algae and related environmental factors in Meiliang bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13 (1): 63-71. (in Chinese))

(收稿日期:2013 -09 -04 编辑:徐 娟)