

生态浮床原位修复对海水养殖池塘 浮游动物群落结构的影响*

曾碧健¹ 岳晓彩² 黎祖福² 黄建荣²

(1. 广东第二师范学院生物与食品工程学院 应用生态学实验室 广州 510303; 2. 中山大学生命科学学院 广州 510275)

摘要 利用海马齿生态浮床技术原位修复海水养殖池塘, 通过周期性监测试验池塘浮游动物群落结构种类组成、密度和生物多样性变化趋势, 分析了浮游动物群落结构变化和养殖池塘水质改善之间的响应关系。结果表明: (1) 生态浮床对养殖池塘水质和沉积环境都表现出良好的改善功能, 表现为试验区较对照区, 水体透明度明显增加, 而 TN、NH₄⁺-N、TP、COD 和底泥有机碳等污染物浓度均降低, 其中 TN、COD 和底泥有机碳呈现出显著性降低($P < 0.05$); (2) 试验区浮游动物的种类相比对照区的 34 种增加到 40 种, 趋于丰富; 各次采样中试验区浮游动物的密度均高于对照区, 平均由 13559 ind./L 增加到 15933 ind./L; 试验区的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Margalef 种类丰富度指数(D)均高于对照区, 分别由初始的 0.94 和 1.05 提高到 1.01 和 1.57。

关键词 生态浮床; 原位修复; 浮游动物; 群落结构

中图分类号 Q178 doi: 10.11693/hyh20141100319

生态浮床对养殖污染水体的修复不仅体现在水质改善, 更重要的是养殖水体生态系统得到恢复 (Carvalho *et al.*, 2006; 岳晓彩等, 2014)。浮游动物是水生态系统食物链的重要环节, 在物质循环、能量流动和初级生产力等方面均具有重要的作用, 不同物种的浮游动物对水体污染具有不同的耐污能力和响应, 常常作为环境监测指标生物, 能对水生态系统状态进行快速评价(王艳杰等, 2012)。本研究利用海马齿生态浮床技术原位修复海水养殖池塘, 调查试验池塘浮游动物群落结构和生物多样性变化趋势, 分析浮游动物群落结构变化和养殖池塘水质改善之间的响应关系, 评价了生态浮床水体修复措施的可行性以及有效性, 以期发展为适合海水养殖池塘污水处理新技术提供新思路, 为我国海岸带生态系统的修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验系统

试验池塘位于广东阳江市江城区平冈镇柳步村 (21.42°N, 111.49°E), 面积 33.33 hm², 平均水深 1.5 m, 泥沙底质, 属于海水围塘, 东南方向有闸门与外海相通。自 2012 年 6 月初开始在池塘码头两侧和北角放置浮床, 浮床覆盖面积占池塘面积的 10%左右。每个生态浮床单体由网孔直径为 1 cm 的普通渔网缝绑在塑料管拼接成的 0.6 m × 1 m 矩形框架上构成, 在四个角和中心位置分别连接一个浮球, 使浮床稳定地停留在水面, 所有浮床单体由尼龙绳串联之后固定于木桩。选取盐生植物海马齿 (*Sesuvium portulacastrum*) 作为浮床栽培植物构建生态立体修复浮床。根据试验池塘的地理形状及分布特点, 共设置 6 个样品采集点,

* 广东省科技计划项目, 2015B020235006 号; 海洋公益性行业科研专项, 201305021 号; 澳门科技基金项目, 045/2010/A 号。
曾碧健, 讲师, E-mail: zengbijian@gdei.edu.cn

通讯作者: 黄建荣, 硕士, 副教授, E-mail: lsshjr@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2014-11-16, 收修改稿日期: 2015-12-27

铺设海马齿生态浮床的试验区包含了 4 号北角、5 号码头左侧和 6 号码头右侧样品采集点, 以其他无浮床区作为试验对照区即 1 号东角、2 号塘中心和 3 号闸门口。另外, 在池塘外靠近闸门口选取邻近池塘一个点作为空白对照, 设为 0 号(图 1)。自 2012 年 5 月至 2013 年 1 月, 每 2 个月采样 1 次; 其中 5 月为本底调查数据, 最后一次采样为池塘收获排水时。

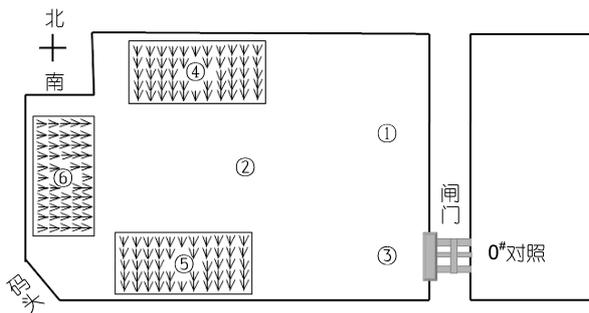


图 1 池塘采样点分布

Fig.1 The sample site of the experiment pond

1.2 样本采集与水质分析

浮游原生动物的采集: 在各采样点水面下 0.5 m 用有机玻璃采水器取水样 5 L, 甲醛固定 24 h 以上, 浓缩至 50 mL。轮虫、枝角类、桡足类和浮游幼虫等后生浮游动物在各采样点总共采水 50 L, 用 25 号浮游生物网现场过滤。所有样品均用甲醛溶液固定至最终浓度为 5%。并用浮游生物网尽量收集样品, 用于种类的定性研究。水质参照 GB17378.4-2007 进行分析。pH、温度和盐度用 pH 计、温度计和盐度计现场测定。

1.3 数据分析

采用 SPSS 19.0 统计软件分析试验区 and 对照区理化指标、浮游动物群落结构及其与水质因子之间的差异和相关性。

2 结果与分析

2.1 水质修复处理效果

表 1 所示, 试验期间, 空白对照组的透明度在最初即 2012 年 5 月为 40cm, 2012 年 7 月下降至最小值 20cm 之后, 呈现出逐渐增加的趋势, 至 2013 年 1 月份有了大幅度增加, 达到最大值 108cm, 此时对照组正值涨潮期, 因此对照组的透明度主要与自然降雨量和潮汛相关。对比之下, 实验池塘内 6 个采样点的透明度在本底调查时达到最大值(45cm), 之后一直都处于降低趋势, 最小值出现在 2012 年 9 月。因此, 实验组的透明度除了与自然降雨量和闸门口蓄水量有关之外, 主要受到养殖污染的影响。并且, 6 个采样点中对照组 1 号至 3 号三个采样点的透明度基本处于一致水平, 试验组 4 号、5 号和 6 号三个采样点的透明度总是高于对照组采样点, 说明海马齿浮床系统对养殖水体具有良好的絮凝净化作用。

表 2 所示, 试验区与对照区相比, 透明度增加, 污染物浓度也均明显下降; 生态浮床对氮有显著性的去除作用($P < 0.05$), COD 和底泥有机碳的质量百分比也显著性降低($P < 0.05$)。说明生态浮床对养殖池塘水质和沉积环境都表现出良好的改善功能。

2.2 浮游动物种类组成

实验中共鉴定出浮游动物 50 种, 种类数最多的是纤毛虫, 有 32 种; 其次是轮虫, 有 10 种; 桡足类和肉足虫都是 4 种。另外还检测到桡足类无节幼体、桡足幼体和贝类面盘幼虫等浮游幼虫。

如表 3 所示, 试验区浮游动物的种类数较对照区的高。试验区共鉴定出浮游动物 40 种, 以原生动物最多, 共有 30 种, 占种类总数的 75%; 其次为轮虫, 有 7 种, 占 17.5%; 桡足类最少, 有 3 种, 占 7.5%。

表 1 各采样点的水温和透明度
Tab.1 The water temperature and transparency of each sampling site

采样时间	2012.05.06		2012.07.15		2012.09.23		2012.11.24		2013.01.03	
采样点	水温(°C)	透明度(cm)								
0#对照	30.5	40	35	20	31	25	22	35	15	108
1#东角	30.5	45	33	30	30	25	22	30	15	33
2#中心	30.5	45	33	30	30	25	22	35	15	35
3#闸门口	30.5	45	33	30	31	25	22	30	15	33
4#北角	30.5	45	33.5	30	31	25	22	38	15	34
5#左侧	30.5	45	34.5	38	31	30	22	38	15	34
6#右侧	30.5	45	34.5	40	31	30	22	38	15	35

表 2 对照区与试验区水质情况比较
Tab.2 The water quality in the control area and surveyed area

地点	透明度(m)	TN(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	TP(mg/L)	COD(mg/L)	底泥有机碳(%)
对照区	0.32±0.07	0.43±0.12	0.14±0.08	0.04±0.01	2.92±0.23	0.53±0.14
试验区	0.37±0.05	0.29±0.09*	0.10±0.06	0.02±0.01	2.48±0.53*	0.38±0.18*

* 表示 0.05 显著水平相关

表 3 对照区和试验区浮游动物种类组成
Tab.3 The species composition of zooplankton in the control area and surveyed area

门类	0#对照		对照区		试验区	
	种类数	百分比(%)	种类数	百分比(%)	种类数	百分比(%)
原生动物	30	83.33	28	82.35	30	75.00
轮虫类	3	8.33	3	8.82	7	17.50
桡足类	3	8.33	3	8.82	3	7.50
总计	36	100	34	100	40	100

2.3 浮游动物密度变化

表 4 所示, 各个采样点原生动物数量主要由纤毛虫组成, 后生动物则主要由桡足类和各类浮游幼虫组成, 肉足虫和轮虫在各个采样点数量较少或没有采集到。在 2012 年 5 月和 7 月, 各采样点的轮虫密度较高。对照池塘 0 号采样点的浮游原生动物的密度在 2012 年 7 月和 2012 年 11 月较高, 2012 年 5 月和 2013 年 1 月最低; 试验池塘组各采样点在 2012 年 7 月和 2012 年 11 月出现两个峰值, 2012 年 9 月为最低。而后生浮游动物密度都是在 2012 年 7 月达到最高值后呈逐渐下降趋势。

统计分析显示, 试验区浮游动物密度较对照区高, 但差异不显著($P < 0.05$), 且由数量占绝对优势的原生动物纤毛虫主导。由于置入浮床后, 光照、水流、溶解氧等环境条件的改变, 为浮游动物的生长提供了更加优越的环境条件, 使本底调查时其丰度由对照区的 $1.048 \times 10^4 \text{ ind./L}$ 上升到 $2.117 \times 10^4 \text{ ind./L}$ 。7 月试验区浮游动物的丰度保持上升趋势, 达到最高峰 $2.366 \times 10^4 \text{ ind./L}$ 。9 月浮游动物丰度急剧减少, 但试验区仍高于对照区。这可能与养殖群体的快速生长增加水体耗氧量及水体扰动, 同时养殖污染加重有关。另外, 由于水温开始逐渐下降, 之后浮游动物的丰度都有所下降。

2.4 浮游动物群落结构多样性指数变化

ANOVA 单因素方差分析结果显示, 本底调查时试验区和对照区的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Margalef 种类丰富度指数(D)无显著性差异($P > 0.05$); 其余 4 次采样中, 试验区的 H' 和 D 均高于对照区, H' 在 1 月表现出显著性差异($P < 0.05$), D 也出现了显著性差异(9 月、11 月和均值)和极显著性差异

(7 月), 见表 5。

2.5 浮游动物密度与水质的关系

相关分析显示, 本次实验中, 浮游动物密度与温度、底泥有机碳都呈非显著正相关, 与 NH₄⁺-N、COD、TOC 分别呈非显著负相关。桡足类密度与温度、NH₄⁺-N、COD 相关性都为极显著($P < 0.01$), 与底泥有机碳相关性为显著($P < 0.05$), 见表 6。

3 讨论

3.1 生态浮床原位修复对浮游动物种类组成的影响

浮游动物是水生生态系统的重要组成部分, 因此其种类组成和种类数的消长与水质状况有着密切的关系(许木启, 1996)。一般情况下, 清洁的水体里浮游动物表现为种类多而数量少, 中度污染的水体里常常是耐污种类成为优势种群; 除少数种类的细菌, 几乎所有的水生生物都难以在重度污染的水体里生存(章宗涉等, 1991)。本次实验中, 试验区的浮游动物种类数由对照区的 34 种增加到了 40 种, 其中表现最为明显的是轮虫由单一的壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceus*)、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)和镰状臂尾轮虫(*Brachionus falcatus*)3 种喜好有机污染水体且极耐低氧的种类, 增加到 7 种, 包括眼镜柱头轮虫(*Eosphora najas*)、钩状狭甲轮虫(*Colurella uncinata*)、曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*)和裂足轮虫(*Brachionus diversicornis*), 说明池塘水体是以有机污染为主要特征的污染生态系统, 经过海马齿生态浮床修复后, 水体污染状况得到改善, 浮游动物种类趋于丰富, 群落结构得到一定程度的恢复, 表明浮床的置入有利于浮游动物的生长。

表 4 各采样点浮游动物密度(ind./L)
Tab.4 The zooplankton density of each sample site (ind./L)

采样点	2012.05	2012.07	2012.09	2012.11	2013.01	
0#对照	肉足虫	200	1400	900	250	0
	纤毛虫	2550	15750	13450	12450	2300
	原生动物合计	2750	17150	14350	12700	2300
	轮虫	15	219	6	0	1
	桡足类	19	4	8	2	0
	各类浮游幼虫	101	120	82	6	3
	后生动物合计	135	343	96	8	4
	肉足虫	450	650	1000	0	0
1#东角	纤毛虫	8650	20500	3900	23900	12300
	原生动物合计	9100	21150	4900	23900	12300
	轮虫	32	12	0	1	1
	桡足类	14	15	18	1	0
	各类浮游幼虫	112	316	24	12	1
2#中心	后生动物合计	158	343	42	14	2
	肉足虫	550	500	500	0	0
	纤毛虫	9550	19250	4650	18200	9600
	原生动物合计	10100	19750	5150	18200	9600
	轮虫	37	8	0	0	0
3#闸门口	桡足类	13	17	13	4	1
	各类浮游幼虫	109	352	52	13	2
	后生动物合计	159	377	65	17	3
	肉足虫	450	850	700	0	0
	纤毛虫	15050	25400	4250	21100	8300
	原生动物合计	15500	26250	4950	21100	8300
	轮虫	29	3	0	0	0
	桡足类	16	23	12	2	1
4#北角	各类浮游幼虫	147	200	94	14	1
	后生动物合计	192	226	106	16	2
	肉足虫	350	450	750	0	0
	纤毛虫	6700	12450	4350	20600	10300
	原生动物合计	7050	12900	5100	20600	10300
5#左侧	轮虫	16	1	0	1	1
	桡足类	10	2	6	2	0
	各类浮游幼虫	52	144	37	6	2
	后生动物合计	78	147	43	9	3
	肉足虫	500	750	400	0	0
6#右侧	纤毛虫	20400	25500	4900	22700	12800
	原生动物合计	20900	26250	5300	22700	12800
	轮虫	32	198	2	0	1
	桡足类	17	12	4	1	1
	各类浮游幼虫	164	286	43	9	1
	后生动物合计	213	496	49	10	3
	肉足虫	150	750	0	0	0
	纤毛虫	21200	20050	4900	21650	14100
6#右侧	原生动物合计	21350	20800	4900	21650	14100
	轮虫	20	44	1	0	1
	桡足类	12	15	10	2	1
	各类浮游幼虫	154	329	65	8	1
	后生动物合计	186	388	76	10	3

表 5 浮游动物群落的生物多样性指数变化
Tab.5 Variation in biodiversity index of zooplankton community

采样时间与项目	Shannon-Wiener 多样性指数(H')		Margalef 种类丰富度指数(D)	
	对照区	试验区	对照区	试验区
5 月	1.12±0.04	1.03±0.11	0.62±0.09	0.73±0.04
7 月	0.95±0.05	1.07±0.11	0.80±0.18	1.68±0.21**
9 月	0.87±0.14	0.88±0.01	0.63±0.06	0.95±0.21*
11 月	0.93±0.12	0.95±0.02	1.06±0.07	1.29±0.07*
1 月	0.78±0.15	1.16±0.19*	2.34±0.44	2.98±0.49
均值	0.94±0.15	1.01±0.14	1.05±0.67	1.57±0.89*

* 表示 0.05 显著水平相关; ** 表示 0.01 显著水平相关

表 6 浮游动物群落结构与理化因子的相关性分析
Tab.6 The correlative analysis of physicochemical parameters and abundance of zooplankton community

浮游动物	温度	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	COD	TOC	底泥有机碳
轮虫	0.484	-0.189	-0.234	-0.342	0.241
桡足类	0.822**	-0.824**	-0.785**	-0.498	0.622*
原生动物	0.091	-0.029	-0.136	-0.176	0.287
浮游动物总数	0.094	-0.030	-0.137	-0.179	0.289

*表示 0.05 显著水平相关; **表示 0.01 显著水平相关

3.2 生态浮床原位修复对浮游动物密度影响

浮游动物的生长被低浓度的溶氧抑制(Sedlacek *et al.*, 2005), 大部分水生生物的生存状况都取决于水中溶氧的浓度(王晓明等, 2007)。相比于空气扩散所得氧量和从空气向水面扩散氧气的速率, 生态浮床水培植物根系的输氧量和输氧速率都大有改观(Whitman *et al.*, 2004)。通过浮床植物根系的输氧, 因溶解不足的污染水体得到了改善, 有利于浮游动物生长, 从而使试验区的浮游动物密度相对对照区有了增长。国内外很多研究都表明浮床植物的根系通过吸附、吸收和生物代谢降解等作用, 可以有效去除或降低水体中的氨氮和有机污染物的浓度(魏树和等, 2006)。浮游动物会受到水体中非离子形式氨的毒害作用(Sarma *et al.*, 2003; Arauzo, 2003), 而浮床植物根系对其移除消减作用, 可以有效改善浮游动物的生存环境, 因而使其密度发生明显变化, 表现了浮游动物群落结构变化与水体状况之间的响应关系。本次研究中, 相关性分析显示, 各类浮游动物密度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、TOC 分别呈负相关, 其中桡足类与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD 呈现极显著负相关, 其密度随着污染物浓度的增加而降低, 当污染物浓度下降时, 浮游动物密度反而上升, 这与相关研究一致。温度也是影响浮游动物密度的重要因素。本次研究中, 浮游动物密度与温度呈正相关, 其中桡足类呈现极显著正相关, 密

度会随着温度的升高而增加, 反之下降。试验池塘所处的阳江地区位于亚热带, 平均采样温度大于 20°C , 适合浮游动物的生长(金琼贝等, 1991; 陈光荣等, 2008)。排除养殖污染、台风天气、浮床置入时的扰动等因素, 本试验各次采样的浮游动物密度与水温基本符合此相关规律。

3.3 浮床原位修复对浮游动物群落结构多样性的影响

Shannon-Wiener 多样性指数(H')是衡量物种种类和数量分布的一个重要指标, 其越高反映物种越丰富、数量分布越均匀(方宏达等, 2009)。Margalef 种类丰富度指数(D)可以比较客观地反映水体的污染状况和变化情况, 值越大说明污染越轻, 反之越低则污染越严重(许木启, 1993)。本试验区的浮床置入后, 水质有所好转, 浮游动物的种类和数量都得到了增加, 使试验区的 H' 和 D 均高于对照区。胡春英(1999)研究表明, 除了水质得到了改善, 浮游动物的多样性指数也会受到高的水生植物生物量的影响而增加。本试验中浮床种植的海马齿一直生长良好, 生物量增加, 浮游动物多样性的增高也有可能是受此影响。经浮床修复后, 试验区的 H' 和 D 平均值分别为 1.01 和 1.57, 按照 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 的等级评判标准, H' 值在 1.0—2.0 之间表明水质为中度污染; 按照 Margalef 种类丰富度指数(D)的等级评判标准, D 值为

2—3 表明水质为中度污染, 说明养殖池塘的水质仍属于中度污染, 结果基本具有一致性(章宗涉等, 1991)。本研究结果显示, 海马齿浮床原位修复海水养殖池塘污染水体具有一定的成效, 并且能够证实利用浮游动物的生物多样性指数对水体修复效果进行鉴定评价具有良好的可行性和有效性。

参 考 文 献

- 王艳杰, 李法云, 范志平等, 2012. 大型底栖动物在水生态系统健康评价中的应用. 气象与环境学报, 28(5): 90—96
- 王晓明, 宋晓梅, 2007. 淮南市高塘湖浮游动物与水环境因子的相关性研究. 北京教育学院学报(自然科学版), 2(5): 19—23
- 方宏达, 朱艾嘉, 董燕红等, 2009. 2005—2006 年珠江口浮游动物群落变化研究. 台湾海峡, 28(1): 30—37
- 许木启, 1993. 京密运河—北京排污河浮游动物群落变化与水质关系的研究. 环境科学学报, 13(3): 347—354
- 许木启, 1996. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河—白洋淀水体的自净效果. 水生生物学报, 20(3): 212—220
- 陈光荣, 钟 萍, 张修峰等, 2008. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. 湖泊科学, 20(3): 351—356
- 岳晓彩, 饶 科, 熊安安等, 2014. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘底栖动物群落结构的影响. 水生态学杂志, 35(1): 22—27
- 金琼贝, 盛连喜, 张 然, 1991. 温度对浮游动物群落的影响. 东北师大学报: 自然科学版, (4): 103—111
- 胡春英, 1999. 不同湖泊演替过程中浮游动物数量及多样性的研究. 水生生物学报, 23(3): 217—226
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社
- 魏树和, 周启星, Koval P V 等, 2006. 有机污染环境植物修复技术. 生态学杂志, 25(6): 716—721
- Arauzo M, 2003. Harmful effects of un-ionised ammonia on the zooplankton community in a deep waste treatment pond. Water Research, 37(5): 1048—1054
- Carvalho S, Barata M, Pereira F *et al*, 2006. Distribution patterns of macrobenthic species in relation to organic enrichment within aquaculture earthen ponds. Marine Pollution Bulletin, 52(12): 1573—1584
- Sarma S S S, Mangas-Ramírez E, Nandini S, 2003. Effect of ammonia toxicity on the competition among three species of cladocerans (Crustacea: Cladocera). Ecotoxicology and Environmental Safety, 55(2): 227—235
- Sedlacek C, Marcus N H, 2005. Egg production of the copepod *Acartia tonsa*: The influence of hypoxia and food concentration. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 318(2): 183—190
- Whitman R L, Nevers M B, Goodrich M L *et al*, 2004. Characterization of Lake Michigan coastal lakes using zooplankton assemblages. Ecological Indicators, 4(4): 277—286

EFFECT OF ECOLOGICAL FLOATING BED ON ZOOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE IN A MARICULTURE POND

ZENG Bi-Jian¹, YUE Xiao-Cai², LI Zu-Fu², HUANG Jian-Rong²

(1. College of Biology and Food Engineering, Applied Ecology Laboratory, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China; 2. College of Life Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract The community structure of zooplankton was studied during the process of *in-situ* restoration in a mariculture pond, the respond relationship between the biodiversity of zooplankton and the water quality was analyzed. The results showed: (1) Ecological floating bed showed a good function in improving mariculture pond water and depositional environments. Compared to the control area, transparency increased significantly, and the water chemical factors, such as TN, NH₄⁺-N, TP, COD and sediment organic carbon, were all lower in the test area, especially TN, COD and sediment organic carbon showed decreased significantly ($P < 0.05$). (2) The species of zooplankton in the test area increased to 40, more than that 34 species in the control area. Each zooplankton density in test area was higher than that in the control area, and increased from 13559 ind./L to 15933 ind./L in average. The biodiversity index also increased, of which Shannon-Wiener diversity index (H') and Margalef species richness index (D) increased from the original 0.94 and 1.05 to 1.01 and 1.57, respectively. The zooplankton diversity in test area showed higher recovery ability than that in control area, indicated that employment of *in-situ* restoration technology of ecological floating bed was effective in improving mariculture environment.

Key words ecological floating bed; *in-situ* restoration; zooplankton; community structure