

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

岳晓彩, 饶科, 熊安安, 殷伟, 陈骞, 黄建荣, 黎祖福

(中山大学生命科学学院, 广州 510275)

摘要:选取广东阳江面积为 33.33 hm² 的海水养殖池塘,混合粗养黄鳍鲷(*Sparus latus*)、鲮(*Mugil cephalus*)、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)和锯缘青蟹(*Scylla serrata*),养殖密度为鱼类750 kg/hm²、虾类2 250 kg/hm²、蟹7.5 kg/hm²,投喂罗氏沼虾配合饲料2号和3号,每天2次,每次约280 kg,每周投放1次光滑河蓝蛤(*Potamocorbula laevis*)250 kg作为蟹类活饵料。通过铺设近2 000个由塑料管和普通渔网构成的浮床单体栽种海马齿(*Sesuvium portulacastrum*),研究生态浮床原位修复技术对海水养殖池塘底栖动物群落结构的影响,探讨底栖动物群落结构变化特征与海水养殖池塘水质的关系。结果显示,试验区底栖动物的种类相比对照区的7种增加到10种,出现了一些耐污能力较差的甲壳类(中华螺赢蜚 *Corophium sinensis* 和齿掌细身钩虾 *Maera serratipalma*)以及腹足类(珠带拟蟹守螺 *Cerithidea cingulata*)。各次采样中试验区底栖动物个体丰度均高于对照区,平均由2 725个/m²增加到2 764个/m²。试验区的Shannon-Wiener多样性指数(*H'*)和Margalef丰富度指数(*D*)较对照区均有显著提高($P < 0.05$),分别由初始的0.68和0.67提高到0.81和0.85。试验区表现出比对照区更强的底栖动物多样性恢复能力,表明生态浮床原位修复技术能较好地改善海水养殖环境。

关键词:生态浮床;原位修复;底栖动物;群落结构

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2014)01-0022-06

海水养殖近年来已成为我国沿海省(区)海洋经济的支柱产业,但养殖过程中产生的大量残饵、粪便、排泄物和药物等容易导致水体富营养化,是制约海水养殖业发展的主要因素(王定如, 2003;崔力拓和李志伟, 2006)。当富含营养物质的养殖废水大量排放到近岸海域后,又会污染区域水质。海洋污染和海水养殖业的自身污染是赤潮频发的根本原因(钱宏林等, 2000)。为了海水养殖业的可持续发展,保护海岸带生态环境,必须采取有效、安全、快速又经济的技术措施来治理海水养殖污水。

生态浮床系统处理污水具有简单有效、花费少、能耗低和无二次污染的优势(Lee & Kwon, 2004)。近年来,国内关于利用生态浮床系统对富营养化水体进行修复的报道日益增多,净化效果也普遍得到认可。窦碧霞等(2011)通过室内模拟海水养殖系统构建了海马齿(*Sesuvium portulacastrum*)生物浮床,其对海水养殖系统中N、P和有机污染物具有较

好的去除效果;林永青等(2011)研究表明,浮床栽培海马齿不仅对水中悬浮颗粒具有良好的清除作用,同时能使其浓度提前达到稳定水平;朱玲等(2012)利用人工生态浮床种植生菜(*Lactuca sativa*),对淡水养殖池塘进行原位修复,达到了净化水质、改善池塘水环境的功效;但将海马齿生态浮床实际应用海水养殖池塘进行原位修复的研究尚未见报道。

生态浮床对养殖污染水体的修复不仅体现在水质改善,更重要的是恢复养殖水体生态系统循环。底栖动物是水生态系统食物链的关键环节,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(Susana et al, 2006)。由于分布范围广、生命周期长和迁徙能力弱等特点,底栖动物的群落特征及空间分布与诸多环境因子关系密切,同时不同物种的耐污能力和敏感性差异很大,因而其常常成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)。已有的研究主要集中在污染水体对底栖动物群落结构的影响以及两者之间的响应关系(黄洪辉等, 2005;林秀春和蔡立哲, 2006;纪炜炜和周进, 2012);而利用底栖动物的指示作用来评价养殖水体修复效果的报道还很少。本研究利用浮床栽种海马齿对海水养殖池塘进行原位修复,通过对底栖动物种群数量、分布和生物多样性变化的周期性监测和分析,探讨其群落结构变化与养殖

收稿日期:2013-09-30

基金项目:中央分成海域使用金支出项目(国海办字[2013]543号);广东省教育部产学研结合示范基地项目(2012B090700017);广东省自然科学基金博士启动项目(2010330004203984)。

通讯作者:黎祖福。E-mail: lsslzf@mail.sysu.edu.cn

作者简介:岳晓彩,1988年生,女,硕士研究生,研究方向为水生生物学。E-mail:690719101@qq.com

水质之间的关系,为环境动态监测和评价海马齿浮床对海水围塘的生态恢复提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验系统

试验选在广东阳江市江城区平冈镇柳步村,池塘面积 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。2012 年 6 月初开始投放养殖对象,混合粗养品种包括鱼类(黄鳍鲷 *Sparus latus*、鲮 *Mugil cephalus*)、虾蟹类(凡纳滨对虾 *Litopenaeus vannamei*、锯缘青蟹 *Scylla serrata*)和蟹类活饵料(光滑河蓝蛤 *Potamocorbula laevis*)。养殖密度约为鱼类 750 kg/hm²、虾类 2 250 kg/hm²、蟹 7.5 kg/hm²,投喂罗氏沼虾配合饲料 2 号和 3 号,每天 2 次,每次约 280 kg;另外,每周投放 1 次光滑河蓝蛤 250 kg 作为蟹类活饵料。

从 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 × 1.0 m 矩形框架上构成,在 4 个角和中心位置分别连接 1 个浮球,使浮床稳定停留在水面,所有浮床单体由尼龙绳串联之后固定于木桩(图 1)。选取盐生植物海马齿作为浮床栽培植物。试验时,剪取 30 ~ 40 cm 的海马齿枝条扦插于渔网网孔,每孔 2 ~ 3 株,间距 15 ~ 20 cm。扦插时保证有 1 ~ 2 个茎节浸泡于水中,有利于海马齿生根。

1.2 样品采集与测试

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(图 2),铺设有海马齿生态浮床的试验区包含了 1 号码头左侧、2 号码头右侧和 3 号北角样品采集点,以其他无浮床区作为试验对照即 4 号东角、5 号塘中心和 6 号闸门口。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。

水质和底质分别参照 GB17378.4-2007 和 GB17378.5-2007 进行分析,采用 PHSJ-3F 型 pH 计测定 pH 值,用温度计现场测定水温。底栖动物的采样工具为改进型彼得逊采泥器(1/16 m²)和 D 形网(40 目、0.3 m 宽),采集的样品经孔径为 0.45 mm 筛网筛洗后,用 5% 的福尔马林固定保存。定性定量采集、测定和种类鉴定方法参考相关文献(霍雪雁等,2004;任先秋,2006;黄宗国和林茂,2012)。



图 1 池塘生态浮床

Fig. 1 Ecological floating beds in the test mariculture pond

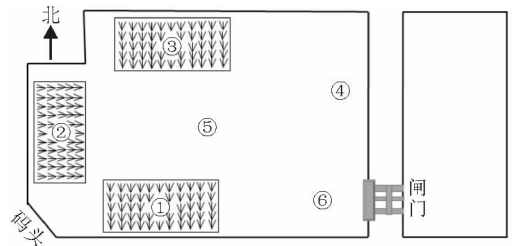


图 2 池塘采样点分布

Fig. 2 Sampling sites in the test mariculture pond

1.3 数据分析

采用 SPSS 19.0 统计软件分析试验区 and 对照区理化指标间、底栖动物种群差异及其丰度与水质因子之间的相关性。用 Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 修复处理效果

与对照区相比,试验区的透明度增加,污染物浓度均明显下降(表 1);其中,生态浮床对氮有显著的去作用($P < 0.05$),COD 和底泥有机碳含量的质量百分比也显著降低($P < 0.05$)。说明浮床系统对养殖池塘的水质和沉积环境均有良好的改善功能。

2.2 底栖动物种类组成

试验区共鉴定出底栖动物 3 类、10 种(表 2)。以对环境变化耐受能力强的多毛类最多(5 种),优势种为双齿围沙蚕(*Perineries aibuhitensis*)和日本刺沙蚕(*Neanthes japonica*);甲壳类次之(4 种),以麦克蝶尾虫(*Discapseddes mackiei*)为主;软体动物最少,只有腹足类 1 种,为珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)。对照区鉴定出底栖动物 2 类、7 种,即 5 种多毛类和 2 种甲壳类。试验区较对照区出现耐污能力较差的腹足类,对环境变化反应较敏感的甲壳动物增加了中华螺赢蜆(*Corophium sinensis*)和齿掌

细身钩虾(*Maera serratipalma*); 试验区的种类数相对丰富。

表1 对照区与试验区水质情况比较

Tab. 1 Comparison of chemical and physical parameters of water quality in the control area and testing area

地点	样本数	透明度/ m	TN/ mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ - N/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹	COD/ mg · L ⁻¹	底泥有机碳/ %
对照区	15	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	15	0.37 ± 0.05	0.29 ± 0.09*	0.10 ± 0.06	0.02 ± 0.01	2.48 ± 0.53*	0.38 ± 0.18*

注: *表示0.05显著水平相关。

Note: The superscript * indicates significant correlation ($P < 0.05$).

表2 对照区与试验区底栖动物种类组成

Tab. 2 Species composition of benthos in the control area and testing area

门类	对照区		试验区	
	种类数	百分比/%	种类数	百分比/%
多毛类	5	71.43	5	50
甲壳类	2	28.57	4	40
腹足类	0	0	1	10
总计	7	100	10	100

2.3 底栖动物密度变化

5月本底调查时,对照区底栖动物密度明显高于试验区(图3)。自浮床置入后,各次采样中,试验区的底栖动物密度均高于对照区。本底调查的底栖动物密度平均高达8764个/m²,其中甲壳类为5840个/m²,7月开始呈现剧烈下降趋势,9月达到密度最低值288个/m²,且主要以多毛类(246个/m²)为主,之后又有所回升;而试验区底栖动物均高于对照区,平均由2725个/L增加到2764个/L。

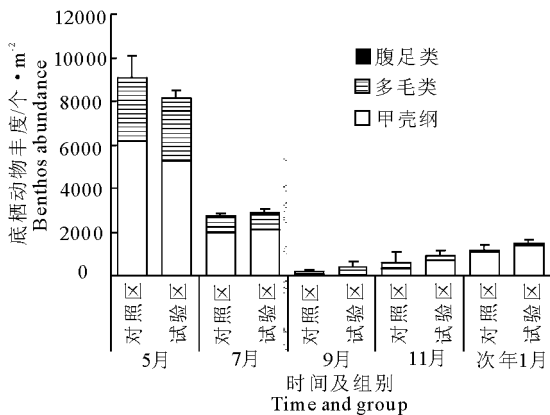


图3 试验区和对照区底栖动物丰度变化

Fig. 3 Dynamics of benthos abundance in the control area and testing area

2.4 底栖动物多样性指数变化

ANOVA 分析结果显示(表3; $n = 15$), 5月(本底调查)和次年1月(收获排水期)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3

次采样中,试验区 H' 和 D 均显著高于对照区($P < 0.05$)。

表3 底栖动物的生物多样性指数变化

Tab. 3 Variation of biodiversity index of benthos

采样 时间	多样性指数(H')		丰富度指数(D)	
	对照区	试验区	对照区	试验区
5月	0.92 ± 0.08	0.94 ± 0.11	0.95 ± 0.05	1.02 ± 0.09
7月	0.76 ± 0.21	0.89 ± 0.03*	0.83 ± 0.02	0.99 ± 0.01*
9月	0.91 ± 0.20	1.07 ± 0.07*	0.89 ± 0.10	1.17 ± 0.24*
11月	0.61 ± 0.11	0.79 ± 0.04*	0.45 ± 0.13	0.75 ± 0.10*
1月	0.47 ± 0.25	0.57 ± 0.03	0.56 ± 0.20	0.64 ± 0.02
均值	0.68 ± 0.24	0.81 ± 0.23*	0.67 ± 0.22	0.85 ± 0.28*

注: *表示0.05显著水平相关。

Note: The superscript * indicates significant correlation ($P < 0.05$).

2.5 底栖动物密度与水质的关系

相关分析显示(表4),底栖动物总数与温度呈正相关,与NH₄⁺-N、总有机碳(TOC)均呈显著负相关($P < 0.05$),而与COD和底泥有机碳含量均呈极显著正相关($P < 0.01$);其中,在与COD和底泥有机碳含量的相关性中各门类的差异较大,甲壳类呈显著正相关($P < 0.05$),多毛类呈极显著正相关($P < 0.01$),而腹足类呈不显著的负相关。

表4 底栖动物群落结构与理化因子的相关性分析

Tab. 4 The correlation analysis of physicochemical parameters and community structure of benthos

底栖 动物	温度	NH ₄ ⁺ - N	COD	TOC	底泥 有机碳
甲壳类	0.217	-0.553*	0.721*	-0.595*	0.719*
多毛类	0.482	-0.704*	0.796**	-0.457	0.907**
腹足类	0.531	-0.302	-0.032	-0.297	-0.174
底栖动物总数	0.321	-0.660*	0.800**	-0.561*	0.901**

注: *表示0.05显著水平相关; **表示0.01显著水平相关。

Note: The superscript * indicates significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 底栖动物种类组成变化

底栖动物在水生态系统中具有相对稳定的生活环境,对外部干扰敏感,水质的变化直接影响其空间

分布和群落结构的变化,因此底栖动物在长期监测有机污染物慢性排放及响应水质污染负荷的累积方面具有优势(王艳杰等,2012)。由于不同种类的底栖动物对水体污染具有不同的耐受力 and 响应方式,当水体受到污染时,导致其群落组成和结构发生变化。在清洁的沉积环境中,生物种类通常极其多样,每种个体数少;当沉积环境受到污染后,敏感种减少或消失,耐污能力强的种类生存下来并且个体数大大增加,造成污染水域中生物种类少、单一种的个体数增多(蔡立哲等,2002)。养殖生物产生的有机污染物累积于沉积物中,引起沉积环境恶化,底栖动物种类数减少,群落结构趋于简单。海洋底栖动物主要类群对环境污染的耐受能力一般为:多毛类 > 软体动物 > 甲壳动物 > 棘皮动物(吴桂汉等,2002)。

本次研究中,在开展修复工程前只在检测到底栖动物7种,包含多毛类和甲壳类,没有采集到对环境变化敏感的棘皮动物和软体动物,反应较敏感的甲壳动物也较少(占28.57%),种类组成以对环境变化耐受能力强的多毛类占绝对优势(占71.43%),说明该养殖池塘水质已受到有机污染。采用生态浮床技术对水质修复后,试验区的底栖动物种类数提高到10种(表2),虽然仍以多毛类(占50%)为主,较对照区增加了耐污能力差的软体动物腹足类(占10%)珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*),甲壳类(占40%)的种类也趋于丰富,表现出底栖动物种类多样性的变化对水质监测良好的指示作用,也显示了生态浮床对养殖水质和沉积环境的改善,有利于底栖动物的生长。

3.2 底栖动物密度的变化

大量的外源性饵料和排泄物使海水养殖水体中的N、P以及有机物迅速增加,导致水体恶化,富营养化的水体中溶解氧含量低下,水生生物的生长和繁殖受到抑制甚至死亡(窦碧霞等,2011)。浮床栽培海马齿的根系输氧缓解了水体溶解氧的不足,同时海马齿根系对N、P的高效移除使水体中氨氮及有机污染物浓度有效降低(张志英等,2009;朱玲等,2012);对颗粒悬浮物强大的吸附能力,可以有效清除水体中的颗粒悬浮物,进而改善水体的沉积环境(林永青等,2011);这是本次研究试验区底栖动物密度高于对照区的主要原因。

温度也是影响底栖动物密度的重要因子。本研究中,温度与底栖动物密度呈正相关(表4)。5月本底调查时密度最高,甲壳类占优势;水温最高的7

月,其密度反而呈现剧烈下降;9月达到最低值,且以多毛类为主。这种现象主要是由于6月开始投放养殖对象后,养殖所产生的有机污染物累积于沉积物,引起沉积环境恶化造成的,底栖动物种群中较敏感的甲壳类数量逐渐减少甚至消失,而耐污能力较强的多毛类密度增加,成为优势类群;此外,底栖动物作为经济鱼类和甲壳类的天然饵料被大量摄食也是影响因素。随着秋季和冬季水温的降低,养殖对象摄食强度减弱,有机污染物沉积量减少,水体和沉积环境质量状况得到改善,使底栖动物丰度逐渐回升,敏感的甲壳类重新变成优势种。尽管受到诸多环境因子的影响,试验区底栖动物丰度始终高于对照区,仍显示出生态浮床有利于底栖动物的生长。

3.3 浮床原位修复对底栖动物多样性的影响

国内外普遍用Shannon-Wiener多样性指数(H')来描述生物群落的特征,也常被用来监测淡水、海水底栖生物群落结构的变化。底栖动物种类数越多, H' 值越大,水质或底质越好;反之,种类数越少, H' 值越小,水体或底质污染越严重。目前国内比较通用的标准为:无底栖动物为严重污染; $0 < H' < 1$ 为重污染; $1 < H' < 2$ 中等污染; $2 < H' < 3$ 轻度污染; $H' > 3$ 为清洁(蔡立哲等,2002)。Margalef种类丰度指数(D)能客观反映水质污染程度和变化趋势,指数值越大,底质越好,越小则表示污染越严重(熊金林等,2003)。本次研究中,试验区经生态浮床修复后,底栖动物趋于丰富, H' 和 D 均较对照区显著提高($P < 0.05$),分别由初始的0.68和0.67提高到0.81和0.85,其中9月最高,分别达到了1.07和1.17;显示了利用生态浮床修复重污染海水养殖水体的良好效果以及利用底栖动物生物多样性指数来评价水质修复措施的有效指示作用。

底栖动物多样性指数的提高得益于水质和沉积环境的改善,尤其后者(表4)。本研究浮床种植的海马齿一直保持着旺盛的生长力,生物量也快速增加,最长根系可达24 cm。水生植物能够吸收和富集污染物,林永青等(2011)用浮床栽培海马齿清除海水中悬浮的颗粒物,认为海马齿根系对颗粒悬浮物具有强大的吸附能力,可以有效清除海水中的颗粒悬浮物进而改善水体的沉积环境。本研究与上述研究结果相似,底泥有机碳含量由对照区的0.53%显著减少到试验区的0.38%($P < 0.05$)(表1)。

综上所述,海马齿生态浮床修复设计改善了水体理化性质和沉积环境,使底栖动物对水体综合环境的变化产生了积极的响应,表现出良好的恢复效

能。试验区的底栖动物种类虽然仍以耐污种多毛类为主,但较对照组种类组成已趋于丰富,出现了耐污能力差的腹足类。Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰度指数评价修复效果显示,养殖水体有从重度污染向中度污染的发展趋势。研究结果表明,利用底栖动物群落结构变化来分析水体修复效果具有可行性和有效性,人工浮床原位修复技术有助于养殖海水的生态恢复。

参考文献

蔡立哲,马丽,高阳,等. 2002. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析[J]. 厦门大学学报:自然科学版,41(5):641-646.

崔力拓,李志伟. 2006. 海水养殖自身污染的现状与对策[J]. 河北渔业,(10):4-5.

窦碧霞,黄建荣,李连春,等. 2011. 海马齿对海水养殖系统中氮、磷的移除效果研究[J]. 水生态学杂志,33(5):95-99.

黄洪辉,林钦,林燕棠,等. 2005. 大亚湾网箱养殖海域底栖动物的时空变化[J]. 中国环境科学,25(4):412-416.

黄宗国,林茂. 2012. 中国海洋生物图集[M]. 北京:海洋出版社.

霍雪雁,赵甘泉,孙瑞平. 2004. 中国动物志·多毛纲(二)·沙蚕目[M]. 北京:科学出版社.

纪炜炜,周进. 2012. 三都澳底栖动物群落结构及其对水产养殖的响应[J]. 中国水产科学,19(3):491-499.

林秀春,蔡立哲. 2006. 湄州湾贝类养殖滩涂底栖动物群落组成[J]. 莆田学院学报,13(5):91-94.

林永青,吴佳鑫,郑新庆,等. 2011. 浮床栽培海马齿对海水

中悬浮颗粒物清除作用的实验研究[J]. 厦门大学学报,50(5):909-914.

钱宏林,梁松,齐雨藻. 2000. 广东沿海赤潮的特点及成因研究[J]. 生态科学,19(3):8-16.

任先秋. 2006. 中国动物志·端足目·钩虾亚目(二)[M]. 北京:科学出版社.

王定如. 2003. 海水养殖对环境的污染及其防治[J]. 浙江海洋学院学报:自然科学版,22(1):60-62.

王艳杰,李法云,范志平,等. 2012. 底栖动物在水生态系统健康评价中的应用[J]. 气象与环境学报,28(5):90-96.

吴桂汉,陈品健,江瑞胜,等. 2002. 贝虾混养池底栖动物调查及有机污染评估[J]. 厦门大学学报:自然科学版,41(1):94-98.

熊金林,梅兴国,胡传林. 2003. 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较[J]. 湖泊科学,15(2):160-168.

张志英,黄凌风,姜丹,等. 2009. 浮床种植海马齿对富营养化海水氮、磷移除能力的初步研究[C]. 北京:中国环境科学学会学术年会论文集:50-55.

朱玲,关梅,申晓东,等. 2012. 人工生态浮床对池塘养殖水环境的影响[J]. 贵州农业科学,40(7):167-169.

Lee E J, Kwon O B. 2004. The effects of floating islands planted with various hydrophytes for water quality improvement [R]. Research Report of the Research and Education Center for Inlandwater Environment, Shinshu University.

Susana Carvalho, Marisa Barata, Fabio Pereira, et al. 2006. Distribution patterns of macrobenthic species in relation to organic enrichment within aquaculture earthen ponds[J]. Marine Pollution Bulletin, 52(12):1573-1584.

(责任编辑 万月华)

Effect of Ecological Floating Bed on Benthos Community Structure in a Mariculture Pond

YUE Xiao-cai, RAO Ke, XIONG An-an, YIN Wei, CHEN Qian, HUANG Jian-rong, LI Zu-fu

(College of Life Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, P. R. China)

Abstract: The population dynamic of benthos was studied during the process of in-situ restoration in a mariculture pond with the treatment of 2 000 ecological floating beds constructed with plastic pipes and nets. The relationship of the benthos community structure and water quality improvement was also researched. This study was carried out in a mariculture pond with an area of 33.33 hm² in Yangjiang of Guangdong province, with a mixed culture of *Sparus latus*, *Mugil cephalus*, *Litopenaeus vannamei* and *Scylla serrata*. A breeding density of 750 kg/hm² for fishes, 2 250 kg/hm² for shrimps, 7.5 kg/hm² for crabs, was utilized respectively. Formulated feed of giant freshwater prawn were used twice a day, with about 280 kg each time. *Potamocorbula laevis* was used, 250 kg once a week, as the crabs' live bait. The results showed that the mariculture water quality was improved after treatment by EFB, and the species of benthos in the testing area increased to 10 species, which were more than 7 species in the control area. Several crustaceans (*Corophium sinensis* and *Maera serratipalma*) and a gastropod (*Cerithidea cingulata*), which have low pollution resistance, were identified in the testing area. The benthos density for each sample in the testing area was higher than that in the control area, increasing from the average of 2 725 ind./m² to 2 764 ind./m². The diversity index, including Shannon-Wiener diversity index (H') and Margalef species richness index (D), represented a notable increase from the original 0.68 and 0.67 to 0.81 and 0.85, respectively. The benthos in the testing area showed higher recovery ability than that in the control area, indicating that the employment of in-situ restoration technology of EPB was effective in improving the mariculture environment.

Key words: ecological floating bed; in-situ restoration; benthos; community structure