

阿科蔓 (AquaMats)生态基+复合微生物原位修复养殖水体中磷的动态

周艳红^{1,2}, 黎颖治¹, 黄凤莲^{1,3}, 张寒冰^{1,4}, 夏北成¹, 陈桂珠¹

(1.中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省博罗县环境科学研究所, 广东 惠州 516100; 3. 湖南省环境保护局, 湖南 长沙 410007; 4. 广西大学化学化工学院, 广西 南宁 530004)

摘要:应用阿科蔓 (AquaMats)生态基+复合微生物群落的处理方法来原位修复滩涂海水种植-养殖系统水体中的磷。动态监测种植-养殖系统水体总磷 (TP)、可溶性磷酸盐 (DP)、水温、溶解氧 (DO)、透明度等水质因子的变化,分析讨论了各参数的动态变化规律及相互关系。结果表明,水体中的水温与 TP 显著正相关,水温升高有利于底泥磷的释放;水体表层 (<0.20 m)的 DO 与 TP 没有显著相关关系,而底层 (>1.0 m)水中的 DO 与 TP 呈显著负相关;水体透明度与 TP 也呈显著负相关。结果表明,AquaMats 生态基材料+高效降解微生物技术不仅能有效地降低种植-养殖系统水中的 TP 和 DP 浓度,又能维持较稳定的处理效果;而且对底泥中的磷也有一定的修复作用。

关键词:磷;阿科蔓生态基;复合微生物;种植-养殖系统

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1168-05

Phosphorus Dynamics in Water in Intertidal Planting-aquaculture System Being Restored In-site with Aqua-Mats Ecobase and Multimicrobial Community

ZHOU Yan-hong^{1,2}, LI Ying-zhi¹, HUANG Feng-lian^{1,3}, ZHANG Han-bing^{1,4}, XIA Bei-cheng¹, CHEN Gui-zhu¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 2. Boluo County Institute of Environmental Science, Huizhou 516100, China; 3. Hunan Province Environmental Protection Agency, Changsha 410007, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Phosphorus in water in intertidal planting-aquaculture system was restored in-situ with AquaMats ecobase and multimicrobial community. Some parameters such as total phosphorus(TP), dissolved phosphate (DP), water temperature, dissolved oxygen(DO) and transparency were detected dynamically in the intertidal planting-aquaculture system, and the dynamic rules of these parameters and their relationships were discussed. The results showed that water temperature was significantly positive correlated with TP in water, suggesting that the rise of water temperature help to release phosphorus in sediment. TP was significantly negative correlated with DO in bottom water (>1.0 m), but not significantly correlated with DO in surface-layer water (<0.20 m). And transparency was significantly negative correlated with TP. The multimicrobial community and Aqua Mats ecobase applied to restore phosphorus in planting-aquaculture system not only can reduce the total phosphorus and dissolved phosphate concentrations in water effectively and maintain a low phosphorus concentration in water, but also can reduce the phosphorus in sediment to a certain extent.

Keywords: phosphorus; AquaMats ecobase; multimicrobial community;planting-aquaculture system

随着我国水产养殖业的快速发展,养殖水体的自身污染及对周围水体的污染影响日益严重,赤潮灾害

频繁发生,海洋生物环境遭到破坏,对水产养殖的持续发展构成严重威胁^[1-3]。水产养殖污水治理的技术方法主要有物理、化学以及生物等方法^[4]。化学法是目前应用较广的养殖水处理方法,对某些污染物有较好的处理效果^[5];但化学处理使用的化学试剂本身残留以及与其他物质作用而留存在水体中,还会造成二次污染。原位生物修复法是养殖水处理技术的发展方向,

收稿日期:2007-07-14
基金项目:国家海洋 863 项目 滩涂海水种植—养殖系统研究与示范”
Q001AA627030)
作者简介:周艳红 (1979—),女,汉族,硕士,湖北天门人,从事污染生态学研究。E-mail:zyh0348@163.com
通讯作者:夏北成 E-mail:xiabch@mail.sysu.edu.cn

利用微生物去除养殖水中过量的氮、磷营养盐一直是国内外学者研究的热点之一。

黄凤莲^[6]在深圳“海上田园”中的滩涂海水种植-养殖系统中筛选出一些有高效净化能力的微生物菌群,并经过驯化后大量引入到实际养殖系统中,以之原位修复被污染的养殖水体。本文在此基础上,研究养殖系统中水体磷的动态和水温、溶解氧、透明度等环境因子对水体磷的影响,以及阿科蔓生态基与高效菌群组合对水体磷修复的效果作用。通过研究分析磷的动态与其他水质因子的关系及磷的生物修复效果,以期水产养殖的水质改善提供参考,促进水产养殖的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 采样

基地设置不同规格的红树林种植养殖系统,本试验选择的养殖塘面积 4.0 hm²,其中种植桐花树面积占 45%。在该塘内设置 P1、P2、P3、C4 4 个养殖有鱼和虾的试验小区,各小区间无水体交换,各小区面积分别为 10 m×8 m、10 m×6 m、10 m×3.5 m 和 10 m×2.5 m。P1 为阿科蔓(AquaMats)生态基(面积 1.0 m×10.0 m)自然挂膜,P2 为阿科蔓生态基(面积 1.0 m×10.0 m)及投加 4.5 L 混合菌挂膜,P3 仅投加 4.5 L 混合菌挂膜,C4 为小区对照,除 4 个小区外的其他区域设为 C5 对照区。混合菌由培养的光合细菌、硝化细菌和反硝化细菌按 5:3:2 的体积混合而成,细菌含量为 8.25×10⁸ cfu·mL⁻¹^[6]。在试验开始前 2 d 分别按小区面积比例投加饵料以培育水质。

用有机玻璃采水器采集各实验小区表层和水深 1 m 处水样各 500 mL 进行混合,装入 1 L 白色聚乙烯瓶中,立即送回实验室测定。

1.2 分析方法

pH 值用 pH B-3 便携式 pH 计现场测定,透明度用塞氏盘现场测定,用溶解氧仪(型号 YSI 55)分别测定表层(≤0.20 cm)、水深 0.5 m 和水深 1 m 处的溶解氧及水温。水体总磷的含量分析方法采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定^[7]。

2 结果与讨论

2.1 养殖系统中磷的动态变化

在 5 周内对各试验小区水质 TP 和 DP 进行了 10 次测定,其动态变化如图 1。由于第 10 次采样前连续

几天风速较大,对水体有较大扰动,导致底泥磷的释放,水体 TP 和 DP 浓度均有所上升。大风能有效地扰动浅水水体,引起沉积物再悬浮,往往能大量地增加水体中的 DP 和 DP 浓度,风速和扰动是影响水-沉积物界面反应的重要物理因素^[8]。因此在此不考虑 10 月 31 号的测量数据。在前 9 次测定中,P1、P2 和 C4 这 3 个小区的 TP 和 DP 浓度呈下降趋势,其中 TP 浓度分别下降 38%、65%和 8%,P1 和 C4 的 DP 也略有下降,P2 的 DP 起始浓度最高,下降幅度高达 98%,其最终 DP 浓度也是最低的;与其他 3 个小区相反,P3 小区的 TP 和 DP 均略有升高,而 C5 区 TP 浓度有所升高,但 DP 则呈下降趋势。由此可见,阿科蔓生态基能有效地降低养殖水体的 TP 浓度,同时对 DP 浓度也有一定的降低作用,这是由于阿科蔓生态基是多孔介质构成,能有效吸附水体悬浮的饲料碎屑;如果配合投加混合菌群并使其固着在生态基上,从而形成能高效吸附、分解碎屑饲料的微生物群落,达到高效去除养殖水体中 TP 和 DP 的目的;然而只投加混合菌群则只能加快饲料碎屑的分解而没有载体吸附,这样不仅会造成饲料的利用率降低,而且还会提高养殖水体的 TP 和 DP 浓度。

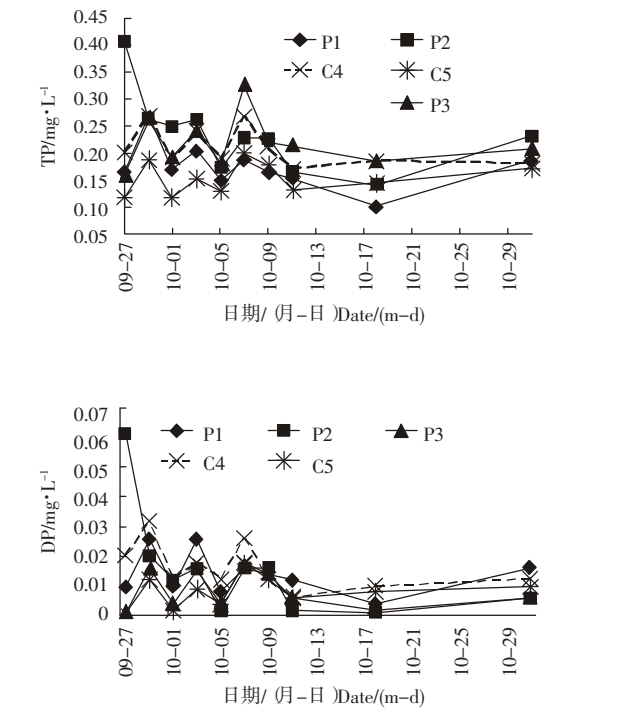


图 1 种植-养殖水体中 TP 和 DP 浓度的动态
Figure 1 Dynamics of TP and DP concentration in planting-aquaculture system

2.2 环境因子与磷变动的关系

2.2.1 水温波动与磷的变化

温度对磷的影响包括化学、生物和物理 3 个方面的作用,通过改变底泥与湖水之间的磷平衡关系来实现。当水温升高时,藻类等生物繁殖加快,增加对磷的吸收,另一方面也使水生生物活动加剧,可促进底泥磷的释放^[9]。对各小区 TP 变化与水温波动进行相关分析,结果如表 1。可能由于 P2 区 TP 起始浓度较高,阿科蔓生态基+混合菌群的处理效果很好,致使 TP 浓度在短时间内有显著降低度,造成了 P2 的 TP 浓度与水温没有显著相关关系,而其余 4 个小区呈显著相关。除去 P2 小区将其他 4 个小区的所有 TP 和水温数据进行了相关分析,结果显示 TP 与水温呈显著相关 ($P<0.01$),TP 和水温数据之间的关系图见图2。

2.2.2 溶解氧与总磷的关系

周启星^[10]等研究某城市湖泊溶解氧的变化与 TP

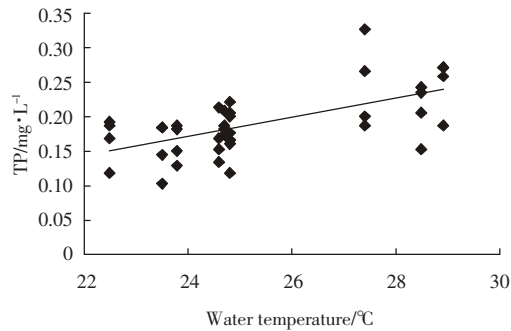


图2 水温与 TP 的相关关系

Figure 2 Relationships between total phosphorus concentrations and water temperatures

的关系的结果表明,湖泊底层溶解氧的消耗与总磷含量的增加呈显著相关。表 2 的结果表明表层溶解氧与 TP 无显著相关,而 P1、P2 和 P3 在次表层 (0.5 m) 的相关性明显增强,虽然仅 P1 呈显著相关 ($P<0.05$)。表 3 列出底层 (>1 m 水深处)各小区溶解氧与 TP 的相关关系式,除 C4 外均呈极显著负相关。将 5 个小区全部 TP 和底层水体 DO 浓度数据进行相关分析,结果显示呈显著负相关 ($P<0.01$),见图 3。

表层因为浮游生物的活动,既有对磷的吸收,又有溶解氧的释放,且表层复氧过程较快,变化相对复杂,使得溶解氧与 TP 间没有显著的相关性。而底层浮游生物的活动减弱,复氧过程也大大的减缓,故溶解氧引起的磷的释放与沉积等规律性较强。

2.2.3 透明度与总磷的变化

各试验小区透明度与 TP 的相关分析结果如表 4。除 P2 外,其余小区的透明度与 TP 呈显著负相关

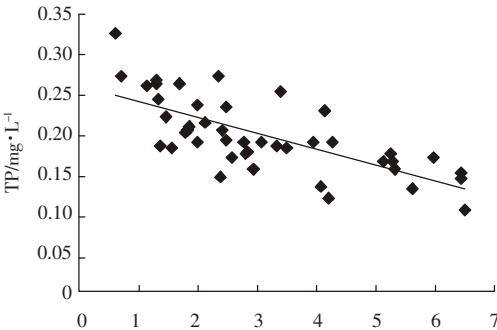


图3 底层 DO 与 TP 的相关关系

Figure 3 Relationship between total phosphorus and dissolved oxygen in bottom water

表 1 TP 与水温的相关关系

Table 1 Correlations between total phosphorus and water temperature

小区	线性回归方程	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
P1	[TP]= 0.016 <i>T</i> −0.227	10	0.788**	< 0.01
P2	[TP]= 0.009 <i>T</i> −0.017	10	0.255	> 0.05
P3	[TP]= 0.016 <i>T</i> −0.190	10	0.731*	< 0.05
C4	[TP]= 0.015 <i>T</i> −0.160	10	0.869**	< 0.01
C5	[TP]= 0.009 <i>T</i> −0.075	10	0.658*	< 0.05
4 个区	[TP]=0.014 <i>T</i> −0.163	40	0.621**	< 0.01

注:①** 表示在 $P=0.01$ 水平上显著相关,* 表示 $P=0.05$ 水平上显著相关。以下各表同。②4 个区是指:P1、P3、C4 和 C5 的 TP 和水温数据。

表 2 各小区表层与次表层溶解氧与 TP 的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between total phosphorus and dissolved oxygen in surface and subsurface water

水深	P1	P2	P3	C4	C5
<0.20 m	-0.512	-0.319	0.054	0.328	-0.122
0.5 m	-0.669*	-0.580	0.103	0.074	0.012

表 3 各小区底层溶解氧与 TP 的相互关系

Table 3 Relationships between total phosphorus and dissolved oxygen in bottom water				
小区	线性回归方程	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
P1	[TP]= -0.023 DO + 0.284	9	-0.851**	< 0.01
P2	[TP]= -0.024 DO + 0.307	9	-0.926**	< 0.01
P3	[TP]= -0.041 DO + 0.306	9	-0.871**	< 0.01
C4	[TP]= -0.020 DO + 0.251	9	-0.556	> 0.05
C5	[TP]= -0.019 DO + 0.217	9	-0.815**	< 0.01
全部	[TP]= -0.020 DO + 0.259	45	-0.701**	< 0.01

注:没有监测到 9 月 27 号的 DO 数据。

($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。除去对 TP 浓度有显著去除效果的 P2 小区外,将其他四个小区全部透明度和 TP 的数据进行相关性分析表明两者呈显著的线性关系,具体见表 4,散点图见图 4。在以磷为限制因子的水体中,磷的增加会刺激浮游生物的繁殖,浮游生物的增加导致水体透明度下降,另外沉积物的再悬浮既可增加水体的 TP 浓度也可降低透明度,所以磷与透明度存在负相关关系。

2.3 底泥中磷的变化与修复

种植-养殖系统底泥中 TP 含量为 690.1~900.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。经过微生物修复作用,不同处理之间底泥的

TP 变化差异较大。P1 和 P2 两个处理的底泥 TP 有明显的降低。P1 底泥 TP 起始含量为 $845.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,经过一个月修复试验后,TP 降为 $665.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;P2 则由 $899.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降为 $732.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。仅直接投加混合菌的 P3 处理底泥中的 TP 含量则没有出现降低的迹象。P1 和 P2 与对照小区 C4 比较有显著差异。

该修复试验底泥中磷的变化有以下几方面的原因:其一,水体中磷减少而沉积到底泥,使底泥中 TP 增加,P3 属于这种情况;其二,生物膜微生物的聚磷作用,使底泥中的磷释放到水体后被微生物吸附,随着生态基上生物膜的成熟,水体和底泥中的 TP 均有所降低,P1 和 P2 属于这种情况。另外导致这种情况出现也可能是因为生态基的投放,为微生物生长繁殖提供适宜的环境形成了一个完善的生物系统并有产 PH_3 微生物大量增殖,从而通过把底泥中的磷转化为 PH_3 而移除了底泥部分磷^[11-13]。其三,因为水生植物和微生物等生长吸收磷和其死亡残体沉降分解,养殖动物的排泄物沉降分解,分解出来的磷被底泥吸附,通过沉积物—水界面的交换,使得沉积物与上覆水达到磷的动态平衡,这些过程作用导致底泥中的磷稍微升高,C4、C5 属于这种情况。

3 结论与讨论

(1) 水温升高有利于底泥磷的释放,水体中的总

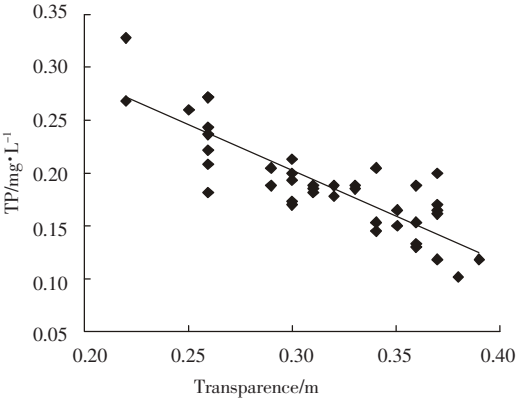


图 4 透明度与 TP 的相关关系

Figure 4 Relationship between total phosphorus and transparency of water

表 4 各小区透明度与 TP 的相关关系

Table 4 Relationships between total phosphorus and transparency of water				
小区	线性回归方程	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
P1	[TP]= -1.092Sec + 0.549	10	-0.890**	< 0.01
P2	[TP]= 0.698Sec + 0.016	10	0.337	> 0.05
P3	[TP]= -0.984Sec + 0.498	10	-0.874**	< 0.01
C4	[TP]= -0.479Sec + 0.351	10	-0.637*	< 0.05
C5	[TP]= -0.840Sec + 0.437	10	-0.955**	< 0.01
4 个区	[TP]= -0.850Sec + 0.457	40	-0.846**	< 0.01

注:4 个区是指:P1、P3、C4 和 C5 的 TP 和水温数据。

表 5 原位生物修复试验期间种植-养殖系统底泥中 TP 的变化 (mg·kg⁻¹)

Table 5 Variations of TP of sediment in plant-aquaculture system during in situ bioremediation period

时间/d	P1	P2	P3	C4	C5
1	845.9	899.8	738.8	780.8	789.5
3	815.7	795.6	866.3	617.1	690.1
5	783.7	847.6	937.8	809.4	709.3
9	684.6	868.0	900.1	798.5	898.8
11	768.5	689.1	906.3	955.0	760.4
18	812.5	779.8	945.1	839.9	724.1
31	665.5	732.9	851.6	811.7	900.5
TP 去除率/%	21.3	18.6	-15.3	-4.0	-2.5

磷与水温显著正相关:[TP]=0.014T-0.163($r=0.621, n=50, P<0.01$);表层水中的溶解氧与总磷没有显著相关关系,而深层水中的溶解氧与总磷呈显著的负相关关系[TP]=-0.020DO +0.259 ($r=-0.701, n=45, P<0.01$);水体透明度与总磷也存在显著的负相关关系[TP]=-0.850Sec+0.457 ($r=-0.846, n=50, P<0.01$)。

②)采用微生物组合技术修复滩涂养殖系统水环境具有显著效果。AquaMats 生态基材料+高效降解微生物技术 (处理 P2)能很好的去除种植养殖系统中的氮、磷、有机物,且能维持较稳定的处理效果。

③)AquaMats 生态基作为一种新型的生物膜载体,通过人工投加有益微生物,能有效、持久地去除养殖废水中的营养盐,改善养殖环境,从而建立起 “生态修复”的微生物群落。AquaMats 生态基具有巨大的比表面积,吸附能力强,人工投加有益微生物后,能快速吸附到生物膜载体上,并通过吸附水体中的悬浮物、鱼虾排泄物,给微生物生长提供充分的营养物,并不断消耗水体中的有机物和营养盐,形成一个可自我维持的微生物生态系统。

④)水产养殖关系到水资源的合理利用和保护,能否实现水资源的可持续利用,与养殖水环境的自我修复密切相关。使有效降解微生物在养殖环境中建立优势群落,是维持养殖系统自我修复能力的一个最重要的途径,本项研究推荐的生态基与高效降解菌的复合处理技术初步表现出对养殖水体水质的维护作用。对来自自然养殖环境中的微生物进行富集和强化,并使其回到自然环境中提高其对环境的修复能力,充分

利用自然的力量和潜能,是治理养殖废水以及类似环境水体的一条可望成功的路线。

参考文献:

[1] Funge Smith, Briggs M R P. Nutrient buintnsive shrimp ponds: implications for sustainability [J]. *Aquaculture*,1998,164(18):117-133.

[2] 孙 耀,李 健,崔 毅,等.虾塘新生残饵的 N、P 营养物溶出速率及其变化规律研究[J].*应用生态学报*,1997, 8(5):541-544.

[3] 董汉林,潘克厚.海水养殖对沿岸生态环境影响的研究进展[J].*青岛海洋大学学报*,2000, 30(4):575-582.

[4] 周 华,孙建歧.水产养殖业的水处理技术综述[J].*渔业现代化*,2000, (4):27-29.

[5] 臧维玲,戴习林,江 敏,等.臭氧对罗氏沼虾育苗池水净化作用的研究[J].*水产科技情报*,2000,27(5): 195-199.

[6] 黄凤莲. 滩涂海水种植-养殖系统微生物修复研究[D]. 广州:中山大学博士学位论文, 2005.

[7] 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].第四版,北京:中国环境科学出版社,2002.

[8] 韩沙沙,温琰茂.富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素[J].*生态学杂志*,2004, 23(2):98-101.

[9] 高 丽,杨 浩,周健民.湖泊沉积物中磷释放的研究进展[J]. *土壤*, 2004,36 (1): 115.

[10] 周启星,俞 洁,陈 剑,等.某城市湖泊中磷的循环特征及富营养化发生潜势[J].*环境科学*, 2004,25(5):139-140.

[11] 王晓蓉,丁丽丽,牛晓君,等.磷化氢在湖泊磷生物地球化学循环中的作用[J].*环境化学*, 2003, 22(5):483-487.

[12] 牛晓君,耿金菊,马宏瑞,等.富营养浅水湖泊中新发现的磷化氢[J].*中国环境科学*, 2004, 24(1):85-88.

[13] 丁丽丽,梁瀚文,朱益新,等.结合态磷化氢在污水深度处理系统中的源[J].*科学通报*,2005 20(10):1050-1051.