

日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)土池生物膜原位修复低碳养殖技术的研究^{*}

江兴龙^{1, 2}

(1. 集美大学水产学院 厦门 361021; 2. 鳗鲡现代产业技术教育部工程研究中心 厦门 361021)

摘要 采用水体中设置生物膜净水栅对比实验的方法, 在 12 口土池开展生物膜原位修复技术对土池淡水养殖日本鳗鲡的节水减排、养殖效益及机理的研究。结果表明, 在 172d 的养殖期间, 处理组比对照组节水减排 78% ($P < 0.01$); 处理组的氨氮、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、溶解性正磷酸盐和浊度分别低于对照组 31.7%、49.7%、29.6%、24.2%和 26.2% ($P < 0.01$); 藻类密度的变化幅度及蓝藻相对密度分别低于对照组 58.8%、52.6% ($P < 0.01$); 净产量、起捕尾重和生长速度分别高出对照组 38%、22.7%和 27.1% ($P < 0.01$); 饲料系数低于对照组 14.2% ($P < 0.01$); 处理组每公顷池塘增加养殖利润约 77.25 万元。池塘生物膜原位修复低碳养殖技术具有成本低、节水减排、增产增收、操作简便与易推广等优点, 具有广阔的应用前景。

关键词 鳗鲡, 池塘低碳养殖, 生物膜, 生物修复, 节水减排, 水质净化

中图分类号 S949

随着经济的发展, 面源污染已成为世界范围内地表水和地下水污染的主要来源, 全球 30%—50% 的地球表面已受到面源污染的影响(Dennis *et al.*, 1998)。农业面源污染是导致目前河流、水库、湖泊等水体水质恶化的重要原因, 已成为目前国内外环境污染治理的难点领域(李秀芬等, 2010)。随着世界水产养殖业的迅速发展, 随之产生的大量养殖废水被排放后, 可导致养殖水及邻近水域富营养化或水质恶化(Bergheim *et al.*, 1996; Piedrahita, 2003)。我国是水产养殖大国, 池塘养殖是主要养殖模式, 年产量占水产养殖总产量的 45%以上, 2009 年, 淡水池塘养殖面积 2331900ha、产量 15488542t, 海水池塘养殖面积 416383ha、产量 1852906t (中华人民共和国农业部渔业局, 2010); 大多数养殖用水未经处理直接排放, 对水资源造成了一定的压力(罗国芝等, 2010), 对地表水环境, 尤其是河流、湖泊等地表水体的富营养化影响日趋严重(熊卿, 2010)¹。采用工厂化循环水养殖

可以降低水产养殖废水排放对环境的潜在影响(Barak *et al.*, 2003)。虽然循环水养殖系统的研究有了很大的发展, 但循环水养殖模式会增加一部分的投资和运营成本, 在短期内不会被大面积推广(罗国芝等, 2010)。由作者创建的精养殖水体生物膜原位修复低碳养殖技术, 在室内水槽鳗鲡养殖试验中, 取得了显著节水减排 74%的良好养殖效果, 且具有成本低、环保、安全、操作简便与易推广的优点(江兴龙等, 2010)。本试验研究了生物膜原位修复技术对土池养殖日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)的节水减排、水质改良与增产增收的效果及机理, 以期为养殖业者应用推广池塘生物膜原位修复低碳养殖技术提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料

水产养殖专用生物膜净水栅(专利号 ZL20112003-2516.6)由作者本人发明, 基体材料为聚酰胺弹性填

^{*} 福建省海洋与渔业重点项目, 闽海渔合同[2010]2-10 号; 福建省教育厅 A 类自然科学研究项目, 闽教科[2010]35 号; 厦门市科技局高校创新项目, 3502Z20113026 号。江兴龙, 博士, 教授, E-mail: xinlongjiang@jmu.edu.cn

1) 熊卿, 2010. 水产养殖对水体富营养化的影响及其控制研究. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 1—65

收稿日期: 2011-12-23, 收修改稿日期: 2012-02-14

料, 每组生物膜净水栅的长度约 20m, 高度约 0.7m。试验鳗鱼为日本鳗鲡幼鳗, 试验起始时的鳗鱼规格约尾重 51—90g。

1.2 方法

1.2.1 试验时间、地点及池塘条件 试验养殖时间自 2011 年 5 月 10 日池塘生物膜净水栅设置完毕起, 至 10 月 28 日鳗鱼起捕收获, 试验养殖周期计约 172d。在福建省邵武市拿口镇加源养殖场内, 选择池塘条件相近的鳗鱼养殖池塘 12 口, 每口池塘面积约 1500—2300m², 均配备二台 1.5kW 的增氧机, 池塘水源为溪河水。

1.2.2 实验分组和生物膜净水栅设置 12 口池塘随机分成 2 组, 设为对照组与处理组, 其中 6 口不设置生物膜净水栅为对照组, 6 口设置生物膜净水栅为处理组。生物膜净水栅设置: 每公顷池塘水面安装 45 组生物膜净水栅, 每组间距约 2m, 将生物膜净水栅垂直悬挂于池塘水面下约 10cm 处, 其两端分别用木桩固定系紧。

1.2.3 养殖管理 养殖投饲管理参照日本鳗鲡土池精养殖日常管理进行, 使用正源幼鳗配合粉料, 饲料的粗蛋白(质量分数)≥45.0, 每天投饲 2 次, 日投饲率为鳗鲡体重的 2%左右; 试验期间, 除了添补因蒸发损失的水外, 处理组每周少量换水 1 次, 对照组则每天少量换水。严格记录每口池塘投苗量、规格、换水量、药物使用、投饲料量等。生产结束时起捕并抽样和称重, 严格记录每口池塘的鳗鱼总重量、随机打样测定鳗鱼规格, 统计每口池塘的鳗鱼平均体重、产量、成活率和饲料系数。

1.2.4 样品采集与检测 在生物膜净水栅下池塘安装前(2011 年 5 月 6 日), 用有机玻璃采水器采集各池塘表层水(水面下约 50cm 处)水样一次(本底水样)。生物膜净水栅设置完毕(2011 年 5 月 10 日)后, 各池塘于第 7 天用无菌剪子和镊子随机采集水面下 50cm 处的基体填料约 20g, 放入无菌培养皿中, 10g 用于检测生物膜的细菌总数、异养菌总数、亚硝化细菌数及硝化细菌数, 10g 用于测定填料上生物膜的形成情况, 用游标卡尺测量生物膜的平均形成厚度; 每隔 14d, 现场测定各池塘水的溶氧(DO)、透明度、pH 和水温,

于上午 9 点用溶氧仪和 pH 计测定, 并采集表层水水样测定氨氮(TAN)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、化学需氧量(COD_{Mn})、溶解性正磷酸盐(SRP)、浊度(Tur)、藻类等水质指标。藻类水样用卢戈氏液进行现场固定(终浓度为 2%)。

1.2.5 微生物与水质因子检测方法 生物膜的细菌总数用平板培养法(国家环境保护总局, 2002)、异养菌总数用异养菌平板菌落计数法(戴吉胜等, 2007)、硝化细菌和亚硝化细菌均用液体选择培养基培养法(陈捷音, 2007); 水质溶解氧的测定用膜电极法、pH 的测定用玻璃电极法、透明度的测定用塞氏盘法、氨氮的测定用纳氏试剂光度法、硝酸盐氮测定用紫外分光光度法、亚硝酸盐氮测定用分光光度法、COD_{Mn}测定用高锰酸钾法、溶解性正磷酸盐测定用钼锑抗分光光度法、浊度测定用便携式浊度计法、藻类用镜检细胞计数法(国家环境保护总局, 2002)。

1.2.6 数据处理和分析 应用 SAS 9.1 统计分析软件(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), 对对照组与处理组的试验数据进行显著水平 $\alpha=0.05$ 的 *t*-test 检验, 以 $P<0.05$ 为显著差异, $P<0.01$ 为极显著差异。

2 结果

2.1 生物膜的形成

生物膜净水栅悬挂于池塘后的第 7 天, 目视检查可见基体填料上的生物膜已大量形成, 根据生物膜的平均形成厚度及填料的比表面积等, 可测算出平均每公顷池塘所形成的生物膜面积约 6—11 万 m², 达水面积的 6—11 倍; 经解剖镜及显微镜检查, 生物膜微生物群落主要由细菌、藻类、真菌及原生动物组成。经检测生物膜上的总细菌数平均达 6.1×10⁹CFU/g, 异养菌总数平均达 3.0×10⁸CFU/g, 亚硝化细菌数平均达 2.8×10⁷个/g, 硝化细菌数平均达 2.1×10⁶个/g。

2.2 节水减排与节能

试验期间处理组池塘基本不换水, 每星期少量换水 1 次, 对照组池塘每天少量换水, 处理组的平均日换水率为 1.6%, 对照组的平均日换水率为 7.1%, 处理组比对照组少换水约 78%, 平均节水减排达 78%, 具有极显著差异($P<0.01$)(表 1)。与对照组传统的池塘

表 1 试验期间对照组和处理组池塘的换水量
Tab.1 The quantity of water exchanged in the control and treatment ponds during the trial

组别	换水量(万 m ³ /公顷)	平均日换水率(%)	节水减排幅度(%)	节水减排量(万 m ³ /ha)
对照组	14.58±0.55	7.1±0.3	—	—
处理组	3.27±0.15	1.6±0.07	78	11.3

鳊鱼养殖模式比较,应用该养殖新技术,平均每公顷池塘养殖鳊鱼,可节水约 11.3 万 m³、减排养殖污水 11.3 万 m³。应用水泵抽水,每 100m³ 水耗电约 5—10 度,平均每 1m³ 水耗电约 0.075 度,平均每公顷池塘养殖鳊鱼可节约电约 8475 度。

2.3 水质因子浓度

试验起始时,池塘本底的水质因子浓度,在处理组与对照组之间均无显著差异($P>0.05$) (表 2)。

由表 3 可知,试验期间,除水温和硝酸盐氮在对照组与处理组之间均无显著差异($P>0.05$) 外,其它均有极显著差异($P<0.01$); 处理组平均的 DO 浓度、透明度与 pH 分别高于对照组 7.4%、11.6%和 0.4% ($P<0.01$), 其中,处理组的平均 pH 仅高于对照组 0.03 个单位; 处理组平均的氨氮、NO₂-N、COD_{Mn}、溶解

性正磷酸盐浓度和浊度分别低于对照组 31.7%、49.7%、29.6%、24.2%和 26.2% ($P<0.01$)。表明,尽管处理组池塘的换水量大幅度低于对照组,但水质仍然显著优于对照组池塘。

2.4 藻类优势种、藻类密度及蓝藻相对密度

试验期间,土池中的藻类主要为绿藻、硅藻和黄藻,另外还有少量的蓝藻和裸藻; 大部分的优势种属于绿藻。处理组中的第一优势种属有: 绿藻门十字藻属(*Crucigenia*)、栅藻属(*Scenedesmus*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*), 硅藻门直链藻属(*Melosira*), 黄藻门黄丝藻属(*Tribonema*); 对照组的第一优势种属有: 绿藻门十字藻属、栅藻属、小球藻、绿球藻属(*Chlorococcum*), 单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*), 硅藻门直链藻属, 黄藻门黄丝藻属。总体而言,试验期间处理组各池塘的第一优势种较稳定,演替频次低,而对照组各池塘的第一优势种演替频次较高,较不稳定。由表 4 可知,在藻类密度上,虽然处理组池塘的平均藻类密度略高于对照组,但对照组与处理组间均无显著差异($P>0.05$); 然而,处理组各池塘藻类密度的变化幅度极显著低于对照组池塘($P<0.01$), 平均变异系数(变化幅度)低于对照组池塘 58.8%,表明处理组池塘的水质变化幅度小于对照组,水质较稳定; 处理组各池塘蓝藻相对密度极显著低于对照组池塘($P<0.01$), 平均低于对照组池塘 52.6%。

2.5 养殖结果与效益

由表 5 可知,试验起始时的日本鳊平均尾重、放养密度及养殖池塘面积在对照组与处理组间均无显著差异($P>0.05$)。由表 6 可知,起捕收获时,处理组的平均毛产量、净产量、起捕尾重和生长速度分别高出对照组 33%、38%、22.7%和 27.1%, 均有极显著差异($P<0.01$); 处理组的平均饲料系数低于对照组 14.2%, 有极显著差异($P<0.01$)。生物膜净水栅投资成本每公顷鳊鱼养殖水体约 13500 元,不需日常运行维护,可连续使用约 3 年,每公顷每年的折旧费用约 4500 元,处理组比对照组平均每公顷池塘的净产量增产鳊鱼 6360kg, 每公顷增加收入 89.1 万元,扣除饲料费用约 11.4 万元及生物膜净水栅年折旧费用约 0.45 万元,处理组与对照组相比,平均每公顷池塘养殖鳊鱼可增加利润约 77.25 万元(表 7)。

3 讨论

3.1 节水减排与节能效果

当前鳊鱼养殖模式主要有水泥池精养殖模式和

表 2 对照组与处理组池塘水质因子本底浓度
Tab.2 The background concentrations of water quality parameters in the control and treatment ponds

水质指标	对照组	处理组
$T(^{\circ}\text{C})$	25.7±0.08	25.7±0.13
Sec (cm)	20±1.3	18±2.2
Tur (NTU)	28±17	36±25
pH	6.86±0.02	6.88±0.05
DO (mg/L)	4.56±0.66	4.75±0.37
TAN (mg/L)	0.765±0.34	0.686±0.48
NO ₂ -N (mg/L)	0.061±0.041	0.047±0.044
NO ₃ -N (mg/L)	0.827±0.48	0.843±0.55
COD _{Mn} (mg/L)	9.8±2.0	11.0±2.8
SRP (mg/L)	0.918±0.53	1.173±0.33

注: 对照组与处理组之间均无显著差异($P>0.05$)

表 3 试验期间对照组与处理组水质因子浓度
Tab.3 The concentrations of water quality parameters in the control and treatment during the trial

水质指标	对照组	处理组	增减幅度(%)
$T(^{\circ}\text{C})$	28.3±2.8	28.3±2.8	—
Sec (cm)	18.9±1.4	21.1±1.9	11.6
Tur (NTU)	38.9±15.0	28.7±11.0	-26.2
pH	6.86±0.02	6.89±0.04	0.4
DO (mg/L)	4.58±0.32	4.92±0.22	7.4
TAN (mg/L)	0.928±0.22	0.634±0.20	-31.7
NO ₂ -N (mg/L)	0.0778±0.060	0.0391±0.025	-49.7
NO ₃ -N (mg/L)	2.706±2.1	3.074±2.7	—
COD _{Mn} (mg/L)	11.62±1.9	8.18±1.0	-29.6
SRP (mg/L)	1.515±0.50	1.149±0.35	-24.2

注: 除水温和硝酸盐氮在对照组与处理组之间均无显著差异($P>0.05$)外, 其它均有极显著差异($P<0.01$)

表 4 试验期间对照组与处理组各池塘藻类情况
Tab.4 Algae in the control and treatment ponds during the trial

池塘编号	对照组			处理组		
	藻类密度(10 ⁵ 个/L)	藻类密度变异系数 (%)	蓝藻相对密度(%)	藻类密度(10 ⁵ 个/L)	藻类密度变异系数 (%)	蓝藻相对密度(%)
1	6469±522	8.1	10.5±6.2	6231±287	4.6	4.7±1.7
2	4807±217	4.5	5.5±3.7	5414±195	3.6	5.6±1.8
3	6210±534	8.6	19.2±5.5	6124±184	3.0	6.7±1.7
4	5652±441	7.8	17.3±8.4	6056±164	2.7	10.6±2.5
5	5231±481	9.2	18.6±7.8	5862±205	3.5	8.8±2.1
6	4748±461	9.7	21.3±9.6	5815±145	2.5	7.5±2.0
平均	5520±719	8.0±1.8	15.4±6.1	5917±292	3.3±0.8	7.3±2.2

注: 处理组和对照组在藻类密度变异系数和蓝藻相对密度均存在极显著差异($P<0.01$)

表 5 对照组和处理组池塘鳗鱼投苗放养情况
Tab.5 Eel stock in the control and treatment ponds

组别	池塘面积(m ² /口)	放养规格(g/尾)	放养密度(kg/m ²)
对照组	1923±369	67.7±12	0.52±0.11
处理组	1789±186	73.4±8.3	0.61±0.07

土池养殖模式(樊海平, 2006), 日本鳗鲡土池养殖的日换水率达 5%—10% (福建省海洋与渔业局, 2004)。本试验对照池塘的平均日换水率约 7.1%, 在土池养鳗正常的日换水率范围内, 应用生物膜净水栅的处理组池塘的日换水率仅为 1.6%, 处理组比对照组显著节水减排达 78%。工厂化循环水养殖系统的日换水率低于 2%, 每周反冲生物过滤器消耗的水量折算成日换水率约 0.7% (罗国芝等, 2005)。表明, 通过应用生物膜净水栅开展原位生物修复的节水减排效果显著, 其日换水率基本与循环水养殖的相当。此外, 许多池塘换水必需使用水泵抽水, 应用生物膜净水栅的池塘换水量大幅降低, 耗电量减少, 可以节约大量能源。

3.2 水质改良效果及机理

试验期间, 虽然处理组比对照组少换水约 78%,

一定程度上影响了对处理组水质改良效果的客观评价, 但处理组水质仍然显著优于对照组, 表明生物膜对池塘养殖污染物具有显著降解作用。生物膜微生物群落主要由细菌、藻类、真菌及原生动动物等构成。氮、磷是藻类生长的营养因子, 氨氮是藻类生长最主要的氮源, 藻类倾向于优先利用氨氮(魏群等, 2008), 养殖环境中的细菌具有极大的物种多样性和代谢途径多样性, 细菌的生长需要吸收氮、磷元素。细菌是养殖环境中高效的有机物分解者, 使水体中的 COD 和 BOD 得到降低(肖国华, 2006), 生物膜上大量生长的亚硝化细菌与硝化细菌, 对水体中氨氮和亚硝酸盐的降解有明显作用(姬晓娜等, 2009; 江兴龙等, 2010), 因此处理组的氨氮、NO₂-N、溶解性正磷酸盐、COD 浓度等均显著低于对照组; 由于处理组 COD 浓度降低及藻类密度略高, 使处理组 DO 浓度略高于对照组。藻类的光合作用使 pH 升高, 而呼吸作用则使 pH 下降, 藻类光合作用消耗二氧化碳的速率大于其呼吸作用产生二氧化碳的速率(Nurdogan *et al*, 1995), 因此在光照正常情况下, 藻类密度高的池塘 pH 将上

表 6 对照组和处理组鳗鱼养殖结果
Tab.6 Production results in the control and treatment

组别及增减	毛产量(kg/ha)	净产量(kg/ha)	出池规格(g/尾)	生长速度(g/d)	饲料系数
对照组	21951±4200	16758±3135	286.8±46	1.26±0.20	1.67±0.02
处理组	29188.5±2835	23121±2670	351.9±8.7	1.60±0.08	1.43±0.04
增减幅度(%)	33.0	38.0	22.7	27.1	-14.2

表 7 处理组的鳗鱼增产效益
Tab.7 Profit of yield increased in the treatment

净增产量(kg/ha)	平均售价(万元/t)	增加产值(万元/ha)	幼鳗饲料价格(万元/t)	饲料费用(万元/ha)	生物膜净水栅年折旧费用(万元/ha)	净增加利润(万元/ha)
6360	14	89.1	1.25	11.4	0.45	77.25

升。池塘养殖中,氮可通过氨的散发和反硝化作用散失(Schwartz *et al*, 1994),反硝化作用过程出现于富营养水体的均温层或当氧化的氮化合物扩散到厌氧的泥层中,在底泥大量的无机氮在进行着反硝化作用(Bouldin *et al*, 1974)。反硝化作用属于碱性反应,每消耗 1mol 的硝酸盐就会产生 1mol 的碱度(Boyd *et al*, 1998),反硝化作用的进行使 pH 升高。此外,硝化作用的进行及有机物的降解均使 pH 下降。它们综合作用影响池塘水体的 pH。本试验处理组平均的 pH 仅高于对照组 0.03 个单位,硝酸盐氮浓度无显著差异,认为是处理组池塘比对照组藻类密度较高、有机物降解量较大、硝化作用较强、反硝化作用也较强等综合作用的结果。生物膜净水栅的基体填料可吸附池塘水中有机碎屑、悬浮物质等,生物膜上的一些细菌,如芽孢杆菌、不动杆菌、假单孢菌、微球菌、动胶菌等有生物絮凝作用,可形成菌胶团,将有机物结合成絮状(肖国华, 2006)。因此,处理组的浊度低于对照组,而透明度高于对照组。

池塘中生物膜对污染物的降解机制虽然类似循环水养殖系统中的生物滤器,但有其自身特点。在循环水养殖系统中,通过生物滤器来去除氨氮与亚硝酸盐,其实质是在滤料表面形成适合该系统理化条件的具有水质净化功能的包括细菌、原生动物等在内的微生物群落构成的生物膜,建立硝化作用,使具有充分硝化能力的过程(朱学宝等, 2000),在循环水养殖系统中,常出现硝酸盐浓度高累积的问题,应将循环养殖水中硝态氮浓度控制在 50mg/L 以下的安全浓度范围(罗国芝等, 2009)。在池塘生物膜原位修复中,不仅建立了硝化作用,而且生物膜上的大量藻类、异养细菌等也发挥了重要作用。此外,反硝化作用的发生及藻类对部分硝酸盐的吸收利用,也使硝酸盐浓度维持在不高的水平,本试验中硝态氮浓度平均 3.1mg/L。处理组池塘的 pH、TAN 浓度均符合《国家渔业水质标准》(国家环境保护总局, 1989), DO、COD 浓度符合《无公害食品鳊鱼池塘养殖技术规范》中的养殖水质标准(中华人民共和国农业部, 2002)。

3.3 降低蓝藻相对密度

提高池塘水中的氮磷比值,有利于提高绿藻对蓝藻的比例(Hansell *et al*, 1980),且有可能削弱了蓝藻在种间竞争上的优势,因为蓝藻占优势主要是在营养盐浓度高,尤其是相对于磷的氮被限制时发生,大多数蓝藻大量生长的养殖池塘都是氨氮的浓度高而硝酸盐氮的浓度低(Boyd *et al*, 1998)。试验期间,虽

然处理组比对照组换水量显著减少 78%,处理组仍然显著降低了氨氮浓度和无机磷浓度,硝酸盐氮浓度略高于对照组但无显著差异,总体提高了池塘水中的氮磷比值,从而使蓝藻的相对密度显著下降。

3.4 鳊鱼养殖效果

试验结果表明,生物膜净水栅应用于土池养殖,显著促进了鳊鱼生长、降低饲料系数、提高产量及缩短养殖周期,并产生良好的经济效益。日本鳊鱼对外界环境因子变化的感应较敏感,容易产生应激反应(江兴龙等, 2012),如果日本鳊鱼在养殖过程中发生应激反应,将消耗鱼体能量,减缓其生长,饲料系数增高(江兴龙等, 2010)。处理组的水质较对照组好且稳定,从而减少了养殖过程中的鳊鱼应激。另一方面,由于池塘中有机碎屑、悬浮有机物质、颗粒有机物与生物膜上的细菌、藻类及原生动物等可以共同形成生物絮团被鳊鱼所摄食,从而实现了饲料蛋白的二次利用,提高了饲料转化率,降低了饲料系数。此外,生物膜净水栅为鳊鱼提供了隐匿的栖息场所,有利于减少鳊鱼应激,减少游动,降低体能消耗,促进鱼体增重生长。因此,处理组鳊鱼生长速度提高、饲料系数降低。从生态学原理分析,池塘精养养殖系统是一种封闭的人工养殖生态系统,养殖动物被设定为生物链的顶端,人为地引入了人工饵料,而削弱了其它因子,使系统中物质和能量循环不畅通,生态系统容易失衡,对外来干扰的自我调节能力减弱,破坏了养殖生态系统的稳定性,极易引起养殖动物发病(晏小霞等, 2004)。处理组池塘应用生物膜净水栅,形成大量面积的生物膜,使藻类和有益菌数量显著增加,竞争抑制有害病菌的异常繁殖和生长,使池塘生态系统中的初级生产者和分解者的功能得到了显著增强,促进系统的物质和能量的循环利用,减少污染物在水体中积累,改良水质,减少养殖鳊鱼的应激发生,降低发病率,促进鳊鱼良好生长。

4 结论

生物膜净水栅悬挂于淡水鳊鱼养殖池塘后的第 7 天,可大量形成生物膜,生物膜面积约为水面积的 6—11 倍以上,生物膜微生物群落主要由细菌、藻类、真菌及原生动物组成。

试验期间,生物膜原位修复低碳养殖技术应用处理组的平均日换水率仅 1.6%,比采用传统池塘养殖模式的对照组节水减排 78%,差异极显著($P<0.01$)。平均每公顷池塘养殖鳊鱼节水减排约 11.3

万 m^3 、节电约 8475 度。

试验期间, 处理组的氨氮、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、溶解性正磷酸盐浓度和浊度分别极显著低于对照组 31.7%、49.7%、29.6%、24.2%和 26.2% ($P<0.01$); 处理组的 DO 浓度、透明度与 pH 分别高于对照组 7.4%、11.6%和 0.4% ($P<0.01$); $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在处理组与对照组之间无显著差异($P>0.05$); 处理组水质较稳定, 藻类密度的变化幅度极显著低于对照组池塘 58.8% ($P<0.01$), 蓝藻相对密度极显著低于对照组池塘 52.6% ($P<0.01$)。池塘应用生物膜净水栅, 在大幅度减少换水量的同时, 仍然具有显著的水质改良与稳定效果。

处理组的净产量、起捕尾重和生长速度分别极显著高出对照组 38%、22.7%和 27.1% ($P<0.01$); 处理组的饲料系数极显著低于对照组 14.2% ($P<0.01$); 处理组平均每公顷池塘养殖鳗鱼增加收入约 77.25 万元。生物膜净水栅应用于土池养殖显著促进了鳗鲡生长、降低饲料系数、提高产量与增加效益。

池塘生物膜原位修复低碳养殖技术, 通过生物膜净水栅在池塘养殖中的应用, 突破了目前池塘养殖渔业设施技术, 大幅降低池塘养殖自身污染及对邻近水域的面源污染, 实现饲料蛋白的二次利用, 具有显著的节水、减排、节能、低碳、增产与增收的效果, 对推动我国池塘水产养殖发展方式从高耗费资源型向资源节约与环境友好型转变将产生重大影响, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 中华人民共和国农业部, 2002. 无公害食品——鳗鲡池塘养殖技术规范 NY/T 5069-2002. 北京: 中国标准出版社, 1—4
- 中华人民共和国农业部渔业局, 2010. 2010 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 1—129
- 朱学宝, 谭洪新, 罗国芝, 2000. 封闭循环工厂化水产养殖——水质净化系统的技术构成. 内陆水产, 25(10): 24—25
- 江兴龙, 关瑞章, 2010. 日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)精养水体生物膜原位修复低碳养殖技术的研究. 海洋与湖沼, 41(5): 769—775
- 江兴龙, 耿英慧, Pornlerd Chanratchakool 等, 2012. 复合微生物制剂在日本鳗鲡土池精养中的应用. 水生态学杂志, 33(1): 80—83
- 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君等, 2010. 农业面源污染现状与防治进展. 中国人口资源与环境, 20(4): 81—84
- 肖国华, 2006. 微生物在水产养殖环境生物修复中的作用机制. 河北渔业, (10): 1—3
- 陈捷音, 2007. 水中亚硝化细菌和硝化细菌检测方法的探讨. 环境检测管理与技术, 2(6): 21—23
- 国家环境保护总局, 1989. 国家渔业水质标准 GB11607-89. 北京: 中国标准出版社, 1—5
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 1—836
- 罗国芝, 朱泽闻, 潘云峰等, 2010. 生物絮凝技术在水产养殖中的应用. 中国水产, (2): 62—63
- 罗国芝, 孙大川, 冯是良等, 2005. 闭合循环水产养殖系统生产过程中生物过滤器功能的形成. 水产学报, 29(4): 574—577
- 罗国芝, 谭洪新, 2009. 水产养殖用水的生物脱氮技术. 中国水产, (3): 64—65
- 晏小霞, 唐文浩, 2004. 养殖水环境生物修复研究进展. 热带农业科学, 24(2): 69—72
- 姬晓娜, 王福梅, 张洪美等, 2009. 水质净化过程中生物载体的应用现状与发展. 水处理技术, (8): 9—13
- 福建省海洋与渔业局, 2004. 鳗鲡养殖技术规范 DB35/T579-2004. 福州: 福建科技出版社, 1—13
- 樊海平, 2006. 我国鳗鲡养殖业的现状与发展对策(上). 科学养鱼, (2): 1—2
- 戴吉胜, 陈贻球, 刘文君等, 2007. 异养菌总数检测方法研究. 给水排水(增刊), 33: 22—23
- 魏 群, 胡智泉, 肖 波等, 2008. 利用藻类生物膜技术处理生活污水研究. 中国给水排水, 24(5): 27—30
- Barak Y, Cytryn E, Gelfand I *et al*, 2003. Phosphorus removal in a marine prototype, recirculating aquaculture system. Aquaculture, 220: 313—326
- Bergheim A, Sgrd T, 1996. Waste Production from Aquaculture. In: Baird D J, Beveridgem C M, Kelly L A *et al* ed. Aquaculture and Water Resource Management. Oxford: Blackwell Science Ltd, 50—80
- Bouldin D R, Johnson R L, Burda C *et al*, 1974. Losses of inorganic nitrogen from aquatic systems. Journal of Environmental Quality, 3: 107—114
- Boyd C E, Tucker C S, 1998. Pond Aquaculture Water Quality Management. Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, 1—700
- Dennis L Corwin, Loague Keith, 1998. Non-point Pollution Modeling Based on GIS. Soil & Water Conservation, 53(1): 75—88
- Hansell D A, Boyd C E, 1980. Uses of Hydrated Lime in Fish Ponds. Proc Annual Conf S E Assoc Fish and Wildl. Agencies, 34: 49—58
- Nurdogan Yakup, William J Oswald, 1995. Enhanced nutrient removal in high-rate ponds. Water Sci Technol, 31(12): 33—43
- Piedrahita R H, 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture, 226: 35—45
- Schwartz F M, Boyd C E, 1994. Channel catfish pond effluents. Progressive Fish-Culturist, 56: 273—281

A STUDY ON JAPANESE EEL *ANGUILLA JAPONICA* LOW-CARBON AQUACULTURE TECHNIQUE OF BIOFILM *IN-SITU* BIOREMEDIATION IN EARTHERN POND

JIANG Xing-Long^{1, 2}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen, 361021; 2. Engineering Research Center of the Modern Industry Technology for Eel, Ministry of Education, Xiamen, 361021)

Abstract To study the effect of saving water and reducing pollution, culture benefit and mechanism of the technique of biofilm *in-situ* bioremediation of earthen pond ecosystem for eel intensive culture, the trial was implemented, which included the treatment with biofilm purifying water bar, set in earthen ponds for biofilm developed, and the control without the bar, and used 12 freshwater earthen ponds with Japanese eel (*Anguilla japonica*) intensively cultivating. The results showed, during the 172 days eel cultivation trial, the treatment saved 78% water exchanged than the control significantly ($P<0.01$); the concentrations of TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$, COD_{Mn} , soluble reactive phosphate and turbidity in the treatment were significantly decreased at 31.7%, 49.7%, 29.6%, 24.2% and 26.2% than the control respectively ($P<0.01$); the variety range of algae density and blue algae relative density in the treatment were significantly decreased at 58.8% and 52.6% than the control respectively ($P<0.01$); the treatment increased net yield, eel harvest size and growth rate at 38%, 22.7% and 27.1% respectively ($P<0.01$), and decreased feed conversion rate at 14.2% ($P<0.01$) than the control; the treatment increased profit about 772.5 thousand yuan per hectare than the control. In conclusion, pond low-carbon aquaculture technique of biofilm *in-situ* bioremediation had advantages, such as low cost, saving water and reducing pollution, increasing yield and profit, convenient operation and easy for extension. Therefore, the technique would have a great extension prospect.

Key words Eel, Pond low-carbon aquaculture, Biofilm, Bioremediation, Saving water and reducing pollution, Water quality improvement