

贝藻混养对大西洋鲑养殖废水的生物滤除

马晓娜^{1,2}, 李 蓑³, 孙国祥¹, 王顺奎⁴, 于凯松⁴, 刘 鹰^{1,5}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 4. 山东东方海洋科技股份有限公司, 山东 烟台 264003; 5. 海洋生态养殖技术国家地方联合工程实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 养殖废水的综合利用与无公害化处理排放是实现水产养殖业健康可持续发展的重要保障。作者采用太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)及龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)混养和单养的方式处理大西洋鲑工业化循环水养殖系统排放的废水, 设置贝类组、藻类组、贝藻组 3 组处理, 探讨了贝藻混养方式和贝类、藻类单养对废水中主要水质因子(N、P 营养盐、化学需氧量(COD)和总悬浮颗粒物(TSS))的处理效率, 实验周期为 30 d。结果表明, 牡蛎和龙须菜混养的方式处理养殖废水效果较好, 其对氮、磷营养盐、COD 及 TSS 的去除效率分别为: 总氨态氮 41.67%±8.82%、硝酸盐氮 33.96%±0.34%、总磷 7.18%±0.03%、COD 78.87%±1.82%和 TSS 70.50%±1.65%, 而亚硝酸盐氮出现一定的积累。综合分析, 牡蛎和龙须菜混养的方式处理养殖废水的效率优于牡蛎和龙须菜的单独处理。

关键词: 大西洋鲑(*Salmo salar*); 工业化循环水养殖; 养殖废水; 贝藻混养; 废水处理

中图分类号: Q935 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)01-0032-08

doi: 10.11759/hyxx20150322002

中国是海水养殖大国, 养殖产量约占世界海水养殖总产量的 70%以上^[1], 而水产养殖业对水资源的消耗极大, 据统计, 池塘或流水养殖生产 1 kg 鱼约需消耗水量为 1~20 m³^[2]。近年来, 随着水产养殖产量、面积的扩大, 养殖废水的排放日益增加, 加剧了邻近水域营养物质的负载, 造成局部水体的富营养化^[3], 在生物、水文和气象条件适当时, 还可能产生赤潮^[4]。因此, 对养殖废水进行综合利用和无害化排放处理是水产业实现健康可持续发展的重要保障。

封闭循环水养殖被认为是解决环境污染、提高产品质量的有效途径, 是实现水产业可持续发展的重要保障, 循环养殖废水的资源化和无害化排放处理是环境友好养殖业的基本要求。目前, 养殖废水的处理方法主要包括物理方法、化学方法和生物方法^[5]以及耐盐植物处理法^[6]、人工湿地处理方法^[7-8]等。海水养殖废水中含有大量有机悬浮颗粒和营养盐, 一般通过普通的物理化学或微生物方法去除, 但这些方法仅能将污染物去除, 而不能将其利用, 造成了资源的浪费。滤食性双壳贝类的滤食作用及大型藻类对营养盐的富集作用, 不仅能去除养殖废水中的悬浮物和营养盐, 还能实现生物量的增长, 获得一定的经济效益。因此, 利用沉淀-贝类过滤-藻类吸收的贝藻生物滤器综合处理方法对养殖废水进行再

利用具有重要的理论和实际意义^[9]。目前, 国内关于贝藻混养处理养殖废水已有相关研究, 赖龙玉^[10]等研究了 4 种不同藻类(浒苔(*Enteromorpha prolifera*)、石莼(*Ulva lactuca*)、绳江藻(*Gracilaria chorda*)、真江藻(*Gracilaria asiatica*)与盘鲍(*Haliotis discus*)混养, 郑辉^[11]等开展了贝藻混养生态系统模拟实验, 扇贝和孔石莼(*Ulva pertusavar*)适宜比例混养能取得较好的生态效应但采用贝藻混养处理大西洋鲑养殖废水的研究未见报道。

本研究以大西洋鲑(*Salmo salar*)工业化循环水养殖排放废水为研究对象, 通过贝类、藻类及贝藻混养对其主要污染物处理效率的研究, 探索新型的大西洋鲑养殖废水处理技术, 以促进养殖废水的资源化利用, 为工业化循环水养殖废水处理及再循环利用提供理论参考。

收稿日期: 2015-03-22; 修回日期: 2015-04-30

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD13B04); 国家自然科学基金项目(31472312, 41306152, 31402283); 青岛市创新创业人才计划(13-CX-16)

[Foundation: National Key Technologies R&D Program(2011BAD13B04); National Natural Science Fund of China(31472312, 41306152, 31402283); Qingdao Innovation Talents Program(13-CX-16)]

作者简介: 马晓娜(1991-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事养殖环境工程研究, 电话: 0532-82898031, E-mail: Marianna_IOCAS@163.com; 刘鹰, 通信作者, 研究员, E-mail: yinliu@qdio.ac.cn

1 材料与方 法

1.1 实验材料

本实验于山东东方海洋科技股份有限公司开发区分公司贝藻实验车间进行, 实验周期为 30 d。实验用材料为太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)和龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*), 均采集于青岛胶州湾人工养殖区, 牡蛎平均壳高为 8.5 cm±1.1 cm, 湿质量约为 77 g±13 g, 取回实验室后选取健康、无损伤个体, 清洁壳表污物和附着生物, 实验开始前将其放入大西洋鲑养殖废水经弧形筛过滤处理后的出水处暂养 1 周, 每箱 7 个。龙须菜尽量选取生长较好的同一部位进行实验。实验装置为 55 cm×45 cm×28.5 cm 的蓝色聚乙烯塑料箱, 实验水体为 50 L, 实验贝藻放于 9 个配有气石曝气的蓝色塑料箱实验系统中。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

实验为静态试验, 采用连续曝气的方式, 分为 3 组, 每个组设置 3 个重复, A 组为贝类单养组, 每个养殖箱放牡蛎 7~8 只, 共 545 g±7 g; B 组为贝藻混养组, 每箱放牡蛎 7~8 只, 共 545 g±8 g, 龙须菜大约 75 g±5 g, 密度为 1.5 g/L; C 组为大型藻类组, 每箱放龙须菜大约 75 g±3 g。

实验用水为大西洋鲑工业化循环水养殖车间排水经弧形筛过滤处理后的出水, 水温 15~17℃, 盐度为 28, 溶解氧(DO)为 6.50~7.50 mg/L, pH 为 7.6~7.7, 化学需氧量(COD)为 1.5~2.0 mg/L, 总氨态氮(TAN)为 1.5~2.0 mg/L, 亚硝酸盐(NO₂⁻-N)为 0.10~0.15 mg/L, 硝酸盐(NO₃⁻-N)为 2.3~2.6 mg/L, 总磷(TP)为 0.2~0.3 mg/L, 水深为 20 cm±1 cm。光照采用自然光照(5 月, 烟台)。

1.2.2 水质测定

本实验选取了总悬浮颗粒物(TSS)、化学需氧量、总氨态氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总磷等指标用于水质分析, N、P 营养盐、COD 每天取样 1 次, 测定 7 d; TSS 指标每小时取样 1 次, 连续测定 24 h。水样采集方法: 在各个取样点各采集 1 个水样(500 mL), 将取样瓶浸入水层下取中间部分, 摇晃瓶体洗涤 2 次, 搅动水体, 排除水层泡沫, 快速取水, 取样后将取样瓶放于黑色塑料袋中; 每处取 1 个水样。

水质监测方法参照海洋监测规范^[12], 其中总悬浮颗粒物: 重量法; 化学需氧量: 碱性高锰酸钾法; 总氨态氮: 纳氏试剂分光光度法; 亚硝酸盐氮: 萘乙

二胺分光光度法; 硝酸盐氮: 锌镉还原法; 磷酸盐: 磷钼蓝分光光度法^[12]; 总磷: 总氮总磷联合消化钼-锑-抗分光光度法^[13]。实验过程水体中溶解氧使用溶氧仪(YSI DO200, JC 01540)进行测定, 水温利用海水表层温度计进行测定。

各物质去除率(η)计算公式:

$$\eta=(C_0-C_G)/C_0\times 100,$$

式中, C_0 为进水水质指标平均浓度; C_G 为实验组营养盐平均浓度。

1.2.3 生物量测定

测量牡蛎和龙须菜鲜质量时, 用滤纸将贝体和藻体表面水分吸干, 吸水用的滤纸事先用蒸馏水洗涤以去除亚硝酸盐和硝酸盐等, 并烘干备用。实验前后分别测量牡蛎和龙须菜鲜重。

1.2.4 数据分析方法

实验结果以平均值±标准差表示, 实验数据分析采用软件 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用 LSD 进行统计检验($P<0.05$)。

2 结果

2.1 贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水总悬浮颗粒物的处理效果

图 1 所示为 24 h 内贝类组、贝藻混养组和藻类组 3 组处理对大西洋鲑养殖废水 TSS 的处理效率比较。悬浮物去除是循环水养殖系统的关键水处理环节之一, 由图 1 可知 3 组处理对大西洋鲑养殖废水中

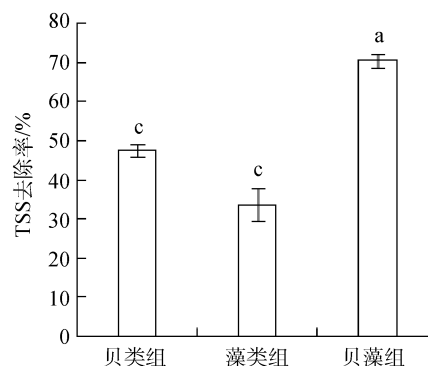


图 1 贝类组、贝藻混养组、藻类组处理大西洋鲑养殖废水 24 h 内悬浮颗粒物的处理效率比较

Fig. 1 Comparison of TSS removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria*, *Gracilaria* 图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示各处理间差异极显著($P<0.01$), 下同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among various treatments; different uppercase letters indicate very significant differences ($P<0.01$) among various treatments. This is the same in all figures.

TSS 均有一定的去除效率, 其中贝藻混养组去除效果最好, 去除效率为 $70.50\% \pm 1.65\%$; 贝类组去除效果次之, 去除效率为 $47.55\% \pm 1.68\%$; 藻类组对悬浮颗粒物的去除效果最差, 去除效率为 $33.62\% \pm 4.21\%$ 。单因素方差分析表明 3 组处理效率之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 贝类组、贝藻混养组、藻类组对大西洋鲑养殖废水营养盐的处理效果

2.2.1 总氨态氮的去除效率

图 2 所示为 7 d 内 3 组处理对大西洋鲑养殖废水氨态氮(TAN)的处理效率。结果表明, 实验开始阶段贝类组、贝藻混养组和藻类组中氨态氮的去除率均为负, 说明水体中氨态氮浓度在实验开始时均略有增加, 随着时间的延长氨态氮的去除率逐渐增加, 其中贝类组和藻类组在第 3 天氨态氮去除率开始呈现正值, 而贝藻混养组在第 2 天氨态氮去除率开始呈现正值, 说明各处理开始去除废水中的氨态氮, 而贝藻组较贝类组和藻类组较早开始去除水体中的氨态氮。由图可看出经 7 d 处理后, 藻类组对氨态氮的去除效率最高达 $42.37\% \pm 2.12\%$; 贝藻混养组略低于藻类组, 氨态氮去除率达 $41.67\% \pm 8.82\%$; 贝类组去除效率最低, 为 $14.83\% \pm 4.21\%$ 。

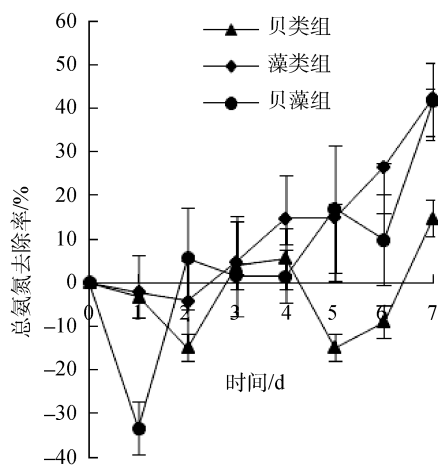


图 2 贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水氨态氮处理效率

Fig. 2 Ammonia nitrogen removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria*, *Gracilaria*

图 3 为处理 7 d 内贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水营养盐的处理效率比较, 经单因素方差分析, 氨态氮去除率贝类组极显著低于藻类组和贝藻混养组($P < 0.01$), 贝藻混养组和藻类组处

理效率差异不显著($P > 0.05$)。

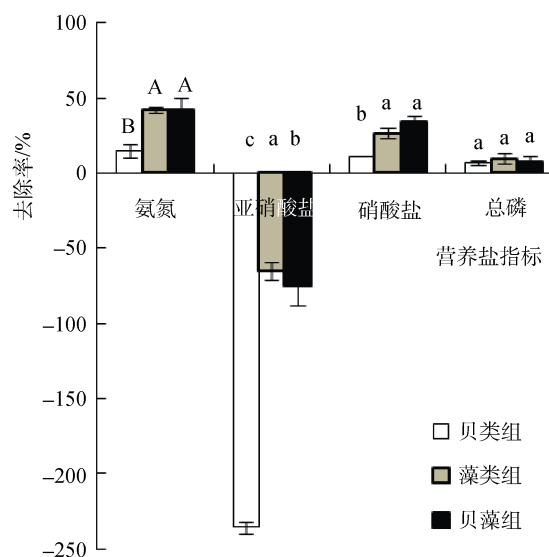


图 3 处理 7 d 后贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水营养盐的处理效率比较

Fig. 3 Comparison of nutrient removal rates by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria*, *Gracilaria* after seven days

2.2.2 亚硝酸盐氮的去除效率

图 4 所示为 7 d 内, 3 组处理对大西洋鲑养殖废水亚硝酸盐氮的处理效率。3 种处理对亚硝酸盐氮的处理效果趋势相似, 去除率均为负, 说明 3 组处理废水中亚硝酸盐氮均有增加, 其中, 贝类组增加最多, 增加 $191.71\% \pm 3.65\%$; 贝藻混养组增加 $94.20\% \pm 12.55\%$, 藻类组增加最少, 为 $67.39\% \pm 5.75\%$ 。单因素方差分析表明 3 组间具有显著性差异($P < 0.05$), 见图 3。

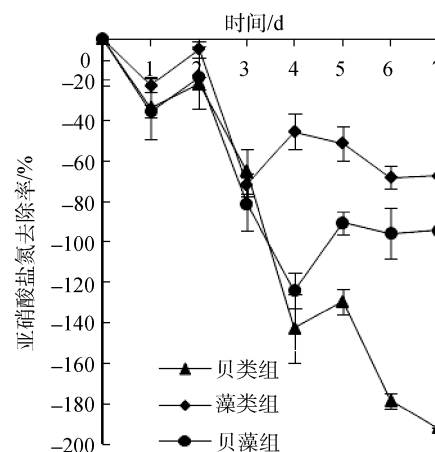


图 4 贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水亚硝酸盐氮的处理效率

Fig. 4 Nitrite removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria*, *Gracilaria*

2.2.3 硝酸盐氮的去除效率

图 5 所示为 7 d 内, 3 组处理对大西洋鲑养殖废水硝酸盐氮的处理效率。由图 5 可以看出, 3 组处理对硝酸盐均有一定的处理效果, 去除率呈现不断增加的趋势。其中, 贝藻混养组对硝酸盐氮的处理效果最好, 处理效率为 $33.96\% \pm 0.34\%$; 藻类组略低于贝藻混养组, 去除效率达 $26.69\% \pm 0.25\%$; 贝类组去除效率最低, 为 $11.35\% \pm 0.03\%$ 。单因素方差分析表明硝酸盐氮去除率贝类组显著低于藻类组和贝藻混养组 ($P < 0.05$), 贝藻混养组和藻类组处理效率差异不显著 ($P > 0.05$), 见图 3。

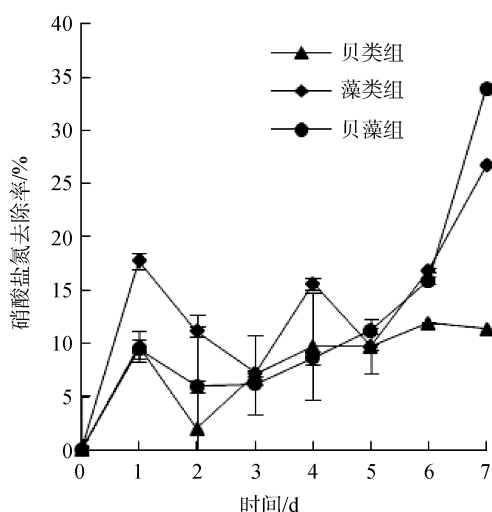


图 5 贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水硝酸盐氮的处理效率
Fig. 5 Nitrite removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria, Gracilaria*

2.2.4 总磷的去除效率

图 6 所示为 7 d 内, 3 组处理对大西洋鲑养殖废水总磷的处理效率。实验结果表明, 经 7 d 的处理后, 3 组处理对废水中的总磷均有一定的去除, 但去除效率均不高。其中, 贝类组去除效率为 $6.46\% \pm 1.52\%$, 藻类组去除效率为 $9.86\% \pm 0.01\%$, 贝藻混养组去除效率为 $7.18\% \pm 0.03\%$ 。单因素方差分析表明 3 组处理之间差异均不显著 ($P > 0.05$), 见图 3。

2.3 贝类组、贝藻混养组、藻类组对大西洋鲑养殖废水 COD 的处理效果

图 7 所示为 7 d 内, 3 组处理对大西洋鲑养殖废水 COD 的处理效率。结果表明, 经 7 d 的处理后, 3 组处理对大西洋鲑养殖废水中 COD 均有去除, 去除率呈现不断增加的趋势。如图 8 所示, 贝藻混养组对

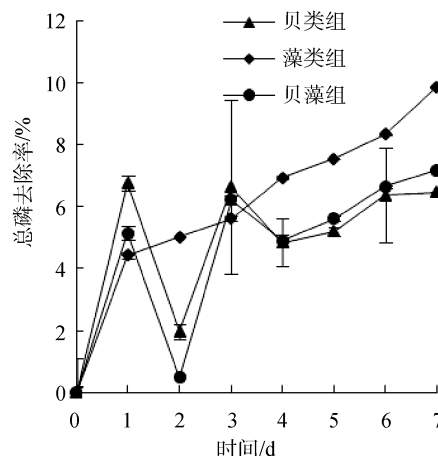


图 6 贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水总磷的处理效率
Fig. 6 TP removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria, Gracilaria*

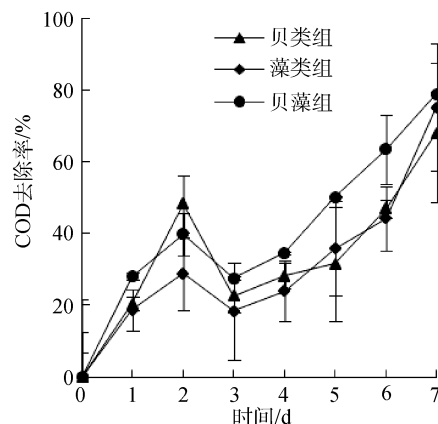


图 7 贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水 COD 处理效率
Fig. 7 COD removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria, Gracilaria*

COD 去除效果最好, 去除效率为 $78.87\% \pm 1.82\%$; 藻类组去除效果次之, 去除效率为 $75.17\% \pm 3.41\%$; 贝类组去除效果最低, 去除效率为 $68.11\% \pm 1.25\%$ 。经单因素方差分析, COD 去除率贝类组显著低于藻类组和贝藻混养组 ($P < 0.05$), 贝藻混养组和藻类组处理效率差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 贝类组、贝藻混养组和藻类组处理大西洋鲑养殖废水中生物量变化情况

表 1 所示为 7 d 3 组处理大西洋鲑养殖废水中生物量变化情况。结果表明, 贝类组和贝藻混养组牡蛎生物量均有所增加, 其中, 贝类组增加 $3.63 \text{ g} \pm 1.20 \text{ g}$, 贝藻混养组增加 $1.5 \text{ g} \pm 0.54 \text{ g}$, 贝类组较贝藻混养组

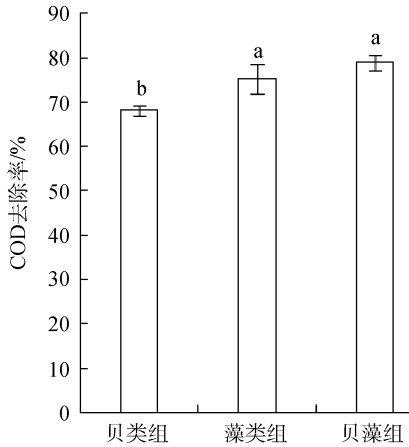


图8 7 d后贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水 COD 处理效率比较

Fig. 8 Comparison of COD removal rate by *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria, Gracilaria* after seven days

牡蛎生物量增长较多，但总体来说，牡蛎质量变化都不大，经单因素方差分析，差异不显著 ($P>0.05$)；贝藻混养组和藻类组龙须菜生物量均增加较多，贝藻混养组增加 $22.87 \text{ g} \pm 2.53 \text{ g}$ ，藻类组增加 $19.67 \text{ g} \pm 1.45 \text{ g}$ ，相较之下，贝藻混养组龙须菜质量增加较多，经单因素方差分析，差异不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论

大西洋鲑养殖废水中主要的污染物为悬浮颗粒物与溶解氮磷，本实验利用滤水能力强的双壳贝类—太平洋牡蛎，通过其滤食作用降低悬浮颗粒物浓度；利用大型藻类龙须菜吸收氮磷营养盐；通过牡蛎与龙须菜混养，有效地净化了水质，同时收获了具有较高经济价值的龙须菜。

表1 贝类组、贝藻混养组、藻类组中生物量变化情况

Tab.1 Biomass variation of *Crassostrea gigas*, *Crassostrea gigas*, and *Gracilaria, Gracilaria*

指标	实验组别		
	贝类组	贝藻混养组	藻类组
牡蛎实验前质量(g)	543.83±7.84	547.00±8.87	
牡蛎实验后质量(g)	547.46±7.06	548.50±6.62	
龙须菜实验前质量(g)		75.00±5.31	75.00±3.84
龙须菜实验后质量(g)		97.87±3.97	94.67±2.89
实验前后牡蛎生物量变化(g)	3.63±1.20*	1.5±0.54*	
实验前后龙须菜生物量变化(g)		22.87±2.53*	19.67±1.45*

注：同一行标注“*”的两组数据间差异不显著 ($P>0.05$)

3.1 养殖废水总悬浮颗粒物的处理效果

悬浮物去除是海水工业化循环水养殖系统的关键水处理环节之一。Chen 等^[14]的研究表明，高密度养殖系统废水中，80%~90%的颗粒物粒径小于 $30 \mu\text{m}$ ，特别是鱼类养殖排出水中，其粪便很容易在水中分解为絮状悬浮物，不易沉淀，采用常规的筛滤工艺很难去除。滤食性贝类具有较强的滤食特性，能够滤食和沉积水体中的悬浮颗粒物。近些年来，利用滤食性双壳贝类去除浅海鱼虾养殖系统水体中悬浮颗粒物已有报道，但关于室内工厂化养殖系统废水处理的研究较少。Hatcher 等^[15]在加拿大 Upper South Coven 贝类养殖区对悬浮颗粒物沉积率进行了测定，并与邻近的非养殖区进行比较，发现前者的沉降量往往是后者的 2 倍以上。Jones^[9]等研究了沉积-贝类过滤-藻类处理系统，这种综合处理方法可以去除 88% 的总悬浮颗粒物。卜雪峰等^[16]研究得出牡蛎、扇贝和文蛤 24 h 对悬浮颗粒物的滤食去除率为 93%、88% 和 85%。本实验比较了贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水总悬浮颗粒物的处理效果，实验中由于曝气会使部分沉积的悬浮颗粒物上浮，对去除效率有一定影响。其中贝藻混养组和贝类组的去除效果均显著高于藻类组 ($P<0.05$)。藻体可以吸附部分悬浮颗粒物，但藻类组由于没有贝类的滤除作用，对悬浮物的去除效果最小；贝藻混养组由于贝类和藻类对悬浮物的共同作用去除效果最好，是藻类组的两倍多。贝类组去除效果次之，大约是藻类组的 1.5 倍。这一结果与 Hatcher 等^[15]和卜雪峰等^[16]的研究相一致。

3.2 养殖废水营养盐的处理效果

废水中的可溶性营养盐主要是 N、P 营养盐，其

中氨态氮是鱼类排泄物的主要成分,非离子氨会对养殖生物产生毒害作用。氨态氮的积累会影响水生生物生理、生化指标进而影响其生长,严重时致使生物死亡,造成经济损失^[17]。亚硝酸盐的积累会引起鱼类中毒甚至窒息死亡^[18];并且有研究发现,亚硝酸盐是诱发鱼病的环境因子之一^[19]。以前认为硝酸盐对生物的毒性较低,但是新的研究认为硝酸盐的积累会影响鱼类的渗透压和血细胞运输氧的能力,特别是引起鱼体色泽和肉质下降,而且富含硝酸盐的养殖水体直接排放,容易造成水体的富营养化^[16]。因此,营养盐的去除在海水养殖废水的净化处理过程中占有很重要的地位。卜雪峰等^[16]研究了石莼、海带和牡蛎对养殖废水的处理,其实验发现海带的密度为 2 g/L 时,24 h 后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 浓度分别降低: 38.2%、31.5%、54.8% 和 40.9%。养殖废水中的氮磷营养盐的浓度经过海带和牡蛎组成的贝藻净化系统处理后,有下降的趋势。24 h 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的去除率分别为 62.6%、55.7%、46.0% 和 56.6%。Jones 等^[9]研究了沉积-贝类过滤-藻类处理系统,这种综合处理方法有较高的去除率,可以分别去除 72 % 的总氮和 86 % 的总磷。

本实验研究比较了贝类组、贝藻混养组、藻类组对大西洋鲑养殖废水氨态氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总磷的处理效果。氨态氮 3 种处理均呈现先增加后降低的趋势,贝藻组较贝类组和藻类组较早开始去除水体中的氨态氮,因为牡蛎在去除 TSS 的同时,自身排氨,开始阶段氨态氮会有一定上升,曝气作用能够促进水体中的硝化细菌将氨态氮转化为硝酸盐,2 d 左右后,氨态氮浓度开始降低。贝藻组和藻类组对氨态氮的去除率差异不大($P>0.05$),均超过 40%,极显著高于贝类组($P<0.01$)。Zhou 等^[20]实验发现: 2.5 g/L 龙须菜在 8 d 内去除养殖废水中 60% 的 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$,去除率高于本实验,可能是因为本实验中龙须菜密度为 1.5 g/L,卜雪峰等^[16]实验证明藻类密度越大,氨态氮去除效率越高,与本实验结果一致。亚硝酸盐氮 3 种处理的处理效果趋势相似,均呈增加趋势。在系统中氮素的转化,一般通过微生物的硝化作用把氨氮转化成亚硝酸氮,并进一步转化成硝酸态氮。本研究中,贝类组增加显著高于贝藻组和藻类组($P<0.05$),贝藻组增加显著低于其他两组。这可能是因为水体中的氨态氮经曝气作用转化为亚硝酸盐氮,藻类可以吸收部分氨态氮,但

是实验过程中吸收速率低于亚硝酸盐氮积累速率,另外牡蛎自身排氨进一步促进了亚硝酸盐氮的积累,所以贝类组亚硝酸盐氮积累显著高于贝藻组;韦玮等^[21]实验证明贝藻混养的互利机制,贝藻组亚硝酸盐氮增加最少可能与这种机制有关。硝酸盐 3 组处理的去除率呈现不断增加的趋势。其中,贝藻混养组对硝酸盐氮的处理效果最好,藻类组略低于贝藻混养组,差异不显著($P>0.05$),贝类组去除率显著低于其他两组($P<0.05$)。3 组处理中,总磷均有一定的去除,但去除效率均不高,差异均不显著($P>0.05$),可能是因为大西洋鲑养殖废水中的磷酸盐浓度自身不高。

本实验中贝藻混养处理大西洋鲑养殖废水处理效果比贝类组和藻类组单独处理好,但是 3 组对营养盐的去除效率均不高于 50%,卜雪峰等^[16]研究了不同密度的石莼、海带和牡蛎混养对养殖废水的处理效果,结果表明藻类密度越大,去除效率越高,本实验龙须菜的密度为 1.5 g/L,这是去除效率不高的主要原因。贝藻的适宜比例还需要在试验和实践过程中不断地摸索和总结。

3.3 养殖废水 COD 的处理效果

化学需氧量(COD)是表征水体有机物相对含量的综合指标之一。郑辉等^[22]开展了海带在贝藻混养生态系统中的生态效应模拟研究,发现贝类单养组和贝藻混养组的 COD 变化趋势均随时间的延长而增加,但混养组上升幅度较小。分析认为这可能是与海带投放密度过大有关,因为海带在生长过程中不断地吸收水体中的有机质,但同时又通过自身的新陈代谢作用向水体释放有机质。卜雪峰等^[16]开展了大型藻类及贝藻混养对养殖废水处理的研究,发现石莼对水中有机物的去除作用不是很明显,水中 COD 的变化不是很大。6 h 和 24 h 后,水体中 COD 分别减小 3.9% 和 5.1%。分析认为石莼在吸收有机物的过程中,可能也通过新陈代谢向水体中释放有机物质。本实验研究比较了贝类组、贝藻混养组和藻类组对大西洋鲑养殖废水 COD 的去除效果,3 组处理对大西洋鲑养殖废水 COD 去除率均呈现不断增加的趋势,贝藻混养组对 COD 去除效果最好。藻类和双壳贝类可以吸收水体中有机物,同时也能通过新陈代谢向水体中释放有机物质,因此 COD 的去除效果与贝类、藻类的密度及比例有关。

4 小结

作者主要研究了贝类、大型藻类以及贝类和大型藻类混养对大西洋鲑养殖废水的净化效果, 包括对 TSS、COD、氮磷营养盐吸收和净化, 以及生物量的增长情况。得到的主要结论如下:

贝藻混养方式对大西洋鲑养殖废水具有较好的净化效果, 其中 TSS、NO₃⁻-N、COD 的去除效率较贝类和藻类单养两组处理高, 去除率分别达 70.50%±1.65%、33.96%±0.34%、78.87%±1.82%, TP、TAN 去除率略低于藻类组, 分别达 7.18%±0.03%、41.67%±8.82%, 但差异不明显($P<0.05$), 亚硝酸盐氮略有增加。

贝藻混养方式处理大西洋鲑养殖废水所用牡蛎和龙须菜的生物量均有所增加, 其中, 牡蛎增加 1.5 g±0.54 g, 龙须菜增加 22.87 g±2.53 g。

因此, 利用牡蛎与龙须菜混养处理大西洋鲑养殖废水较牡蛎和龙须菜单独处理具有更好的处理效率, 并且能收获更多的生物量, 实现了养殖废水的资源化利用。在未来的研究中, 将进一步探讨牡蛎和龙须菜贝藻混养组合的最佳数量配比。

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO global aquaculture production volume and value statistics database updated to 2012[EB/OL]. [http://darc.cms.udel.edu/SGSFR/Aquaculture Statistics2012.pdf](http://darc.cms.udel.edu/SGSFR/Aquaculture%20Statistics2012.pdf), 2014-03/2015-01.
- [2] Martins C I M, Eding E H, Verdegem M C J, et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(3): 83-93.
- [3] 中华人民共和国农业部渔业局. 2011 年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Fisheries Bureau. China fishery statistics yearbook of 2011[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [4] 李红山, 黎松强. 水体富营养化的生化防治机理——污水深度处理与脱氮除磷[J]. *海洋科学*, 2002, 26(6): 31-34.
Li Hongshan, Li Songqiang. Prevention and cure of nutrohication in cultured water body by biochemical prevention mechanism[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(6): 31-34.
- [5] 刘鹰, 王玲玲. 集约化水产养殖污水处理技术及应用[J]. *淡水渔业*, 1999, 29(10): 22-24.
Liu Ying, Wang Lingling. Techniques of sewage treatment in intensive aquaculture and their application[J]. *Freshwater Fisheries*, 1999, 29(10): 22-24.
- [6] Brown J, Glenn E P, Fitzsimmons K M, et al. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent[J]. *Aquaculture*, 1999, 175(3): 255-268.
- [7] Brix H. How 'green' are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(3): 45-50.
- [8] 高素勤. 人工湿地在水产养殖废水处理中的应用前景[J]. *长春渔业*, 2000, 2: 21-22.
Gao Suoqin. The application prospects of constructed wetland in aquaculture wastewater treatment[J]. *Changchun Fisheries*, 2000, 2: 21-22.
- [9] Jones A B, Dennison W C, Preston N P. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study[J]. *Aquaculture*, 2001, 193(1): 155-178.
- [10] 赖龙玉, 严正凇, 钟幼平. 4 种不同藻类与鲍混养的初步试验[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2014, 19(2): 89-94.
Lai Longyu, Yan Zhenglin, Zhong Youping. Preliminary studies on the polyculture of abalone and four kinds of algae[J]. *Journal of Jimei University(Natural Science)*, 2014, 19(2): 89-94.
- [11] 郑辉, 李志伟. 贝藻混养生态系统模拟实验研究[J]. *海洋科学*, 2014, 38(10): 52-55.
Zheng Hui, Li Zhiwei. Simulation of the polyculture ecosystem of scallop (*Argopecten irradians*) and kelp (*Ulva pertusavar*)[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(10): 52-55.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4-2007 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4 -2007 Marine Monitoring Norms Part 4: Seawater Analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] 邢殿楼, 霍堂斌, 吴会民, 等. 总氮、总磷联合消化的测定方法[J]. *大连水产学院学报*, 2006, 21(3): 219-225.
Xing Dianlou, Huo Tangbin, Wu Huimin, et al. Simultaneous digestion for determination of total phosphorus and total nitrogen in sea water[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, 21(3): 219-225.
- [14] Chen S, Timmons M B, Aneshansley D J, et al. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications[J]. *Aquaculture*, 1993, 112(2): 143-155.
- [15] Hatcher A, Grant J, Schofield B. Effects of suspended mussel culture(*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115: 219-235.
- [16] 卜雪峰. 贝藻处理海水养殖废水的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004, 1-70.
Bu Xuefeng. The applied study of wastewater treatment

- in marine culture by filter-feeding bivalves and algae[D]. Qindao: Ocean University of China, 2004, 1-70.
- [17] 张卫强, 朱英. 养殖水体中氨氮的危害及其检测方法研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2012, 2(6): 324-327.
Zhang Weiqiang, Zhu Ying. Advances on the research of the hazard of ammonia nitrogen in aquaculture water and its determination method[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2012, 2(6): 324-327.
- [18] Krous S R, Blazer V S, Meade T L. Effect of acclimation time on nitrite movement across the gill epithelia of rainbow trout: the role of "chloride cells"[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1982, 44(3): 126-130.
- [19] 余瑞兰, 聂湘平, 魏泰莉, 等. 分子氨和亚硝酸盐对鱼类的危害及其对策[J]. 中国水产科学, 1999, 6(3): 73-77.
Yu Ruilan, Nie Xiangping, Wei Taili, et al. Toxicity of molecular ammonia & nitrite to fishes and the control measures[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 6(3): 73-77.
- [20] Zhou Y, Yang H S, Hu H, et al. Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China[J]. Aquaculture, 2006, 252(2): 264-276.
- [21] 韦玮, 方建光. 贝藻混养互利机制的初步研究[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(3): 20-25.
Wei Wei, Fang Jianguang. Preliminary studies on mutually beneficial mechanism in the polyculture of scallop (*Chlamys farreri*) and kelp (*Laminaria japonica*) [J]. Marine Fisheries Research, 2002, 23(3): 20-25.
- [22] 郑辉, 崔力拓, 潘娟. 海带在贝藻混养生态系统中的生态效应模拟研究[J]. 渔业现代化, 2014, 41(3): 26-29.
Zheng Hui, Cui Lituo, Pan Juan. Ecological effect of Kelp in polyculture system with *Argopecten irradians*[J]. Fishery Modernization, 2014, 41(3): 26-29.

Biological purification of Atlantic salmon (*Salmo salar*) wastewater with the polyculture of Bivalves and Macroalgae

MA Xiao-na^{1, 2}, LI Meng³, SUN Guo-xiang¹, WANG Shun-kui⁴, YU Kai-song⁴, LIU Ying^{1, 5}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 4. Shandong Oriental Ocean Sci-Tech Co., Ltd., Yantai 264003, China; 5. National & Local Joint Engineering Laboratory of Ecological Mariculture, Qingdao 266071, China)

Received: Mar., 22, 2015

Key words: Atlantic salmon (*Salmo salar*); recirculating aquaculture systems; aquacultural wastewater

Abstract: The comprehensive utilization and non-harmful treatment of aquacultural wastewater are important to guarantee healthy and sustainable development of the aquaculture industry. In this study, the effects of the polyculture of *Crassostrea gigas* and *Gracilaria lemaneiformis* in processing Atlantic salmon wastewater and recirculating aquaculture systems was observed over 30 days, and the removal rates of nitrogen and phosphorus nutrients, chemical oxygen demand (COD), and total suspended particulate matter (TSS) were observed over 30 days. Results show that nutrients, COD, and TSS removal rates by the polyculture of *Crassostrea gigas* and *Gracilaria* were as follows: 41.67%±8.82% TAN, 33.96%±0.34% NO₃-N, 7.18%±0.03% phosphate, 78.87%±1.82% COD, and 70.50%±1.65% TSS. However, there was a tendency for NO₂⁻-N to accumulate to a certain extent. In conclusion, the polyculture of *Crassostrea gigas* and *Gracilaria* delivered a superior treatment effect than that of *Crassostrea gigas* and *Gracilaria* separately.

(本文编辑: 谭雪静)