

2种海水鱼工厂化循环水养殖中微细颗粒物的赋存特征

卢洋, 朱弦一, 郭悦, 谷晶, 杨国军, 任同军, 王华

引用本文:

卢洋, 朱弦一, 郭悦, 谷晶, 杨国军, 任同军, 王华. 2种海水鱼工厂化循环水养殖中微细颗粒物的赋存特征[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1143–1150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0571>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同养殖阶段猪舍氨气和颗粒物污染特征及其动态

许稳, 刘学军, 孟令敏, 郑鲲

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1248–1254 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1440>

冬季不同类型猪舍内颗粒物与微生物气溶胶浓度分布规律研究

黄凯, 唐倩, 沈丹, 戴鹏远, 刘俊泽, 李延森, 李春梅

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1616–1623 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1471>

堆肥过程逸散抗生素耐药菌气溶胶的浓度及粒径分布特征

陈默, 高敏, 宋渊, 程首涛, 高浩泽, 王旭明

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1633–1640 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0009>

冻融循环对猪粪粒径及有机质变化的影响

胡柏杨, 蒋林树, 李艳霞, 陈兴财, 安思羽

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 219–226 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0874>

三类抗生素在两种典型猪场废水处理工艺中的去除效果

周婧, 支苏丽, 宫祥静, 杨凤霞, 谷艳茹, 丁飞飞, 张克强

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 430–438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1092>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

卢洋, 朱弦一, 郭悦, 等. 2种海水鱼工厂化循环水养殖中微细颗粒物的赋存特征[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1143–1150.

LU Y, ZHU X Y, GUO Y, et al. Occurrence of fine particles in an industrial recirculating mariculture system for marine fish farming of two species[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 1143–1150.



开放科学 OSID

2种海水鱼工厂化循环水养殖中微细颗粒物的赋存特征

卢洋, 朱弦一, 郭悦, 谷晶, 杨国军, 任同军*, 王华*

(大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:为了明晰工厂化循环水处理系统对水中微细颗粒物的去除效果,对红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)和半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)工厂化循环水养殖过程中微细颗粒物的质量、组成和粒径分布的动态变化进行研究。结果表明,基于弧形筛、泡沫分离器和生物滤池的工厂化循环水处理工艺,红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池水中微细颗粒物浓度均稳定在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,且投喂后水中微细颗粒物含量明显增高,微细颗粒物中有机物所占比例均达到90%以上,表明水中微细颗粒物增多是投喂所致。红鳍东方鲀养殖池水中微细颗粒物的粒径主要分布在60~170 nm,半滑舌鲷养殖池水中微细颗粒物的粒径为95~420 nm。养殖池出水经水处理系统处理后,水中留存的微细颗粒物的粒径主要介于95~110 nm之间,表明该循环水养殖系统中粒径在60~95 nm之间和粒径大于110 nm的微细颗粒物可以被有效去除。

关键词:循环水养殖系统;微细颗粒物;红鳍东方鲀;半滑舌鲷

中图分类号:X714 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)05-1143-08 doi:10.11654/jaes.2023-0571

Occurrence of fine particles in an industrial recirculating mariculture system for marine fish farming of two species

LU Yang, ZHU Xianyi, GUO Yue, GU Jing, YANG Guojun, REN Tongjun*, WANG Hua*

(College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: To clarify the removal effects of an industrial circulating water treatment system on fine particulate matter in water, dynamic changes in the mass, composition, and particle size distribution of fine particulate matter during the industrial circulating water culture of *Takifugu rubripes* and *Cynoglossus semilaevis* were studied. The results showed that the concentration of fine particles in the aquaculture ponds of *T. rubripes* and *C. semilaevis* was stable at about $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ based on an industrial circulating water treatment process using an arc sieve, foam separator, and biological filter. The content of fine particles in the water increased significantly after feeding; the proportion of organic matter in the fine particles reached more than 90%, indicating that the increase in fine particles in the water was caused by feeding. The particle size of fine particles was mainly distributed within 60–170 nm in the *T. rubripes* culture pond water and 95–420 nm in the *C. semilaevis* culture pond water. After the effluent of the aquaculture pond was treated using the water treatment system, the particle size of the fine particles retained in the water was mainly between 95 nm and 110 nm, indicating that the fine particles with a particle size of 60–95 nm and greater than 110 nm in the recirculating aquaculture system can be effectively removed.

Keywords: recirculating aquaculture system; fine particulate matter; *Takifugu rubripes*; *Cynoglossus semilaevis*

收稿日期:2023-07-18 录用日期:2023-09-25

作者简介:卢洋(2000—),女,辽宁丹东人,硕士研究生,从事水环境化学研究。E-mail:3170214872@qq.com

*通信作者:任同军 E-mail:sea_bream@hotmail.com; 王华 E-mail:wanghua@dlou.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0117900);辽宁省教育厅项目(LJKFZ20220240);设施渔业教育部重点实验室(大连海洋大学)开放课题(202223)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2022YFE0117900); Liaoning Provincial Education Department Project (LJKFZ20220240); Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture (Dalian Ocean University) Ministry of Education (202223)

随着我国人民生活水平的不断提高和食物结构的不断优化,作为优质动物蛋白重要来源的水产品消费需求呈持续增长趋势。2022年,我国海水工厂化水产养殖产量为389 583 t,淡水工厂化水产养殖产量为403 494 t,分别比2021年增加9.51%和24.47%,工厂化水产养殖业的发展对于保障我国水产品稳定供给发挥了越来越重要的作用^[1]。高密度的工厂化水产养殖过程中,残饵和粪便构成了水中悬浮颗粒物的主体。水中悬浮颗粒物还包括悬浮在水中的无机颗粒物、有机颗粒物、无机-有机复合物及微生物絮团等固态颗粒。这些固态颗粒根据粒径大小可划分为微细颗粒(<30 μm)、小颗粒(30~100 μm)和易沉降颗粒(>100 μm)^[2-3]。养殖水中易沉降颗粒通常采用沉淀或筛滤的方法去除,小颗粒可采用介质过滤的方法去除,而采用常规的水处理工艺较难以实现对粒径极小的微细颗粒物的有效控制和去除。微细颗粒物在水体中停留时间长,不仅消耗水中溶解氧,而且更容易增加水中可溶性氮磷的污染负荷。此外,工厂化水产养殖尾水外排时,水中大量的微细颗粒物可能会造成受纳水体的水环境污染^[4]。为了实现工厂化循环水养殖系统水质稳定,节约水资源,保护水域生态环境,有必要明晰高密度工厂化循环水养殖过程中产生的微细颗粒物的赋存特征,以确定水处理工艺对水中微细颗粒物的去除效果。

红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)和半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)均是我国北方沿海地区经济价值较高的海水养殖品种,近年来的工厂化养殖已初具规模,但不同养殖品种对工厂化循环水系统中微细颗粒物的赋存特征的影响尚不明晰。工厂化循环水养殖系统中微细颗粒物含量受到养殖系统构成、运行方式、养殖品种、个体大小、饲料投喂等因素的影响^[5]。因此,本研究以红鳍东方鲀和半滑舌鲷工厂化循环水养殖系统中的微细颗粒物为研究对象,考察了工厂化循环水系统中微细颗粒物的粒径大小、存在浓度和组成成分,研究结果可为红鳍东方鲀和半滑舌鲷工厂化循环水养殖过程的水质调控提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验系统

本实验采用的工厂化循环水养殖系统如图1所示。红鳍东方鲀和半滑舌鲷的养殖池均为圆柱形,每个养殖池中海水的体积为22 m^3 ,养殖池深度1 m,每套循环水养殖系统均包含9个养殖池,全部养殖池中水的总体积近200 m^3 ,水处理装置及管道中海水的总量约为200

m^3 。在工厂化循环水养殖系统运行过程中,养殖池中的水从池底部流出,进入排水管,经弧形筛(孔径0.50 mm)过滤后进入储水池,再通过水泵输送至泡沫分离器,然后自流入以弹性填料为载体的生物滤池中,生物滤池出水经曝气和紫外消毒后,流回养殖池中。工厂化循环水养殖系统中水的流速控制为200 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,每日向循环水养殖系统中补充的新鲜海水量约占水体总量的5%。本实验所有循环水养殖系统均处于同一生产车间内,实验过程中控制水温 and 光照均相同。

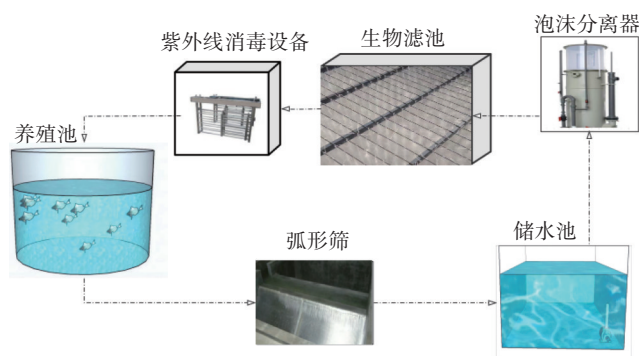


图1 循环水养殖系统

Figure 1 Recirculating aquaculture system

1.2 实验方法

实验用红鳍东方鲀和半滑舌鲷的平均体质量分别为(883±28) g和(952±36) g,实验系统中两种实验用鱼的养殖密度均设定为15.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。投喂红鳍东方鲀和半滑舌鲷的颗粒饲料成分相同,含50%粗蛋白、9%粗脂肪、16%粗灰分、2%粗纤维、2.5%赖氨酸和10%水分。养殖过程中每日15时至16时投喂颗粒饲料1次,日投喂量为鱼体质量的0.7%。采用YSI溶氧仪(Professional Plus Model 550A, Yellow Springs, 美国)测定养殖池水的盐度、水温和溶解氧,pH测定使用pH计(Model PB-10, Sartorius, 德国),化学需氧量、氨态氮、亚硝酸盐氮和活性磷酸盐的测定方法参照《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007),实验过程中养殖池内相关水质指标见表1。

水中微细颗粒物的采样设在养殖池的出水和进水处,采用浊度仪(SGZ-200AS)测定水样浊度,使用激光衍射粒度分析仪(Mastersizer 3000)测定水样中微细颗粒物的粒径以及各粒径所占百分比,水中微细颗粒物的粒径是特定采样时间点多次采集测定结果的平均值,每种鱼类的实验结果以9组平行的平均值表示。同时,待测水样经GF/C玻璃纤维滤膜(0.45 μm)过滤后,置于60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥箱中干燥48 h后称

表1 养殖池的水质指标

Table 1 Water quality of culture tank

指标 Index	红鳍东方鲀养殖池 <i>Takifugu rubripes</i> culture tank	半滑舌鲷养殖池 <i>Cynoglossus semilaevis</i> culture tank
溶氧 Dissolved oxygen/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	8.62~9.90	8.94~9.88
水温 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20.70~20.80	17.80~18.30
pH	6.93~7.19	7.45~7.61
化学需氧量 Chemical oxygen demand/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.578~3.658	2.074~3.658
总氨态氮 Total ammonia nitrogen/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.249~0.470	0.123~0.251
亚硝酸盐氮 Nitrite nitrogen/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.061~0.094	0.063~0.094
活性磷酸盐 Orthophosphate/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.269~0.451	0.069~0.132

质量,确定水样中微细颗粒物的质量。将干燥后的滤膜放入450℃马弗炉中灼烧5 h,确定微细颗粒物中有机物和无机物的含量。

2 结果与分析

2.1 水中微细颗粒物的粒径分布

图2为红鳍东方鲀和半滑舌鲷的循环水养殖系

统中微细颗粒物的粒径分布。红鳍东方鲀养殖池出水中(图2a)的微细颗粒物的粒径主要集中在53、61、71、82、95、110、128、148、171 nm和198 nm,它们所占的百分比分别为1.3%、25.2%、13.2%、15.0%、9.5%、7.1%、4.1%、12.0%、9.6%和3.0%,可以看出红鳍东方鲀养殖池水中粒径60 nm的微细颗粒物最多,其次是粒径在70~110 nm和150~170 nm的微细颗粒物。红鳍东方鲀养殖池进水中(图2b)微细颗粒物的粒径主要是61、71、82、95 nm和110 nm,它们所占的比例分别为1.7%、4.0%、7.7%、31.0%和55.6%,可见经过工厂化循环水处理设施处理后,粒径低于70 nm和粒径大于110 nm的微细颗粒物均被去除,但该工厂化循环水处理设施对水中粒径介于80~95 nm之间的微细颗粒物的去除效果不佳。

半滑舌鲷养殖池出水中微细颗粒物的粒径分布如图2c所示,水中微细颗粒物的粒径分别为95、128、148、171、198、308、356 nm和413 nm,它们所占的百分比分别为25.5%、6.3%、26.3%、15.5%、3.0%、4.0%、10.2%和6.2%。由图2c可以看出,粒径为95 nm和148 nm的微细颗粒物在半滑舌鲷养殖池水中占比均超过25%,其次是粒径为171 nm的微细颗粒物占比

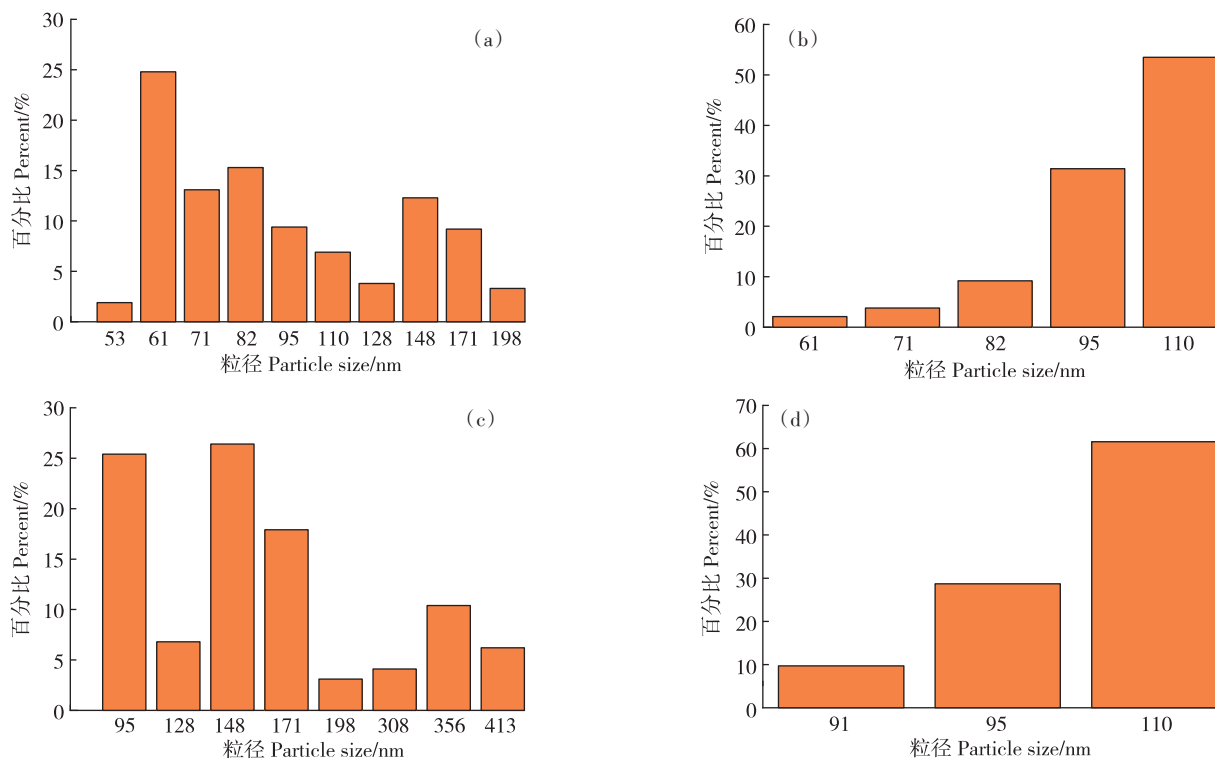


图2 红鳍东方鲀养殖池出水(a)和进水(b)及半滑舌鲷养殖池出水(c)和进水(d)中微细颗粒物粒径分布

Figure 2 Distribution of fine particle size in outlet(a) and inlet(b) water of *Takifugu rubripes* culture and in outlet(c) and inlet(d) water of *Cynoglossus semilaevis* culture

超过了15%,而且粒径在300 nm以上的微细颗粒物的占比超过20%。图2d为半滑舌鲷养殖池进水的微细颗粒物粒径分布,水中微细颗粒物的粒径为91、95 nm和110 nm,它们所占的比例分别为9.1%、28.9%和62.0%,可见经循环水处理系统处理后,水中微细颗粒物的粒径主要分布在90~110 nm之间,粒径大于110 nm的微细颗粒物均被水处理系统去除。

2.2 浊度

图3为红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池出水浊度的变化。由图3可知,在0时至15时,红鳍东方鲀养殖池出水的浊度相对稳定,浊度维持在1~2 NTU;但在16时浊度突然急剧上升至5.2 NTU,然后在17时降至2.2 NTU,此后随着时间延长而缓慢降低,在24时降至1.4 NTU。半滑舌鲷养殖池出水的浊度在0时至24时的变化趋势与红鳍东方鲀养殖池相同,在15时半滑舌鲷养殖池出水的浊度达到4.1 NTU后,出水的浊度也随着时间延长而逐渐降低,在24时后半滑舌鲷养殖池出水的浊度维持在1~1.5 NTU。

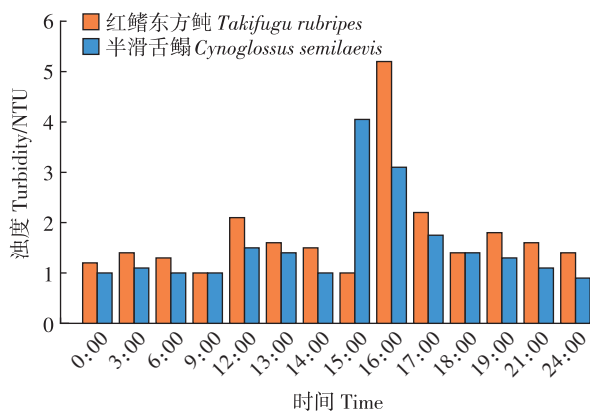


图3 红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池出水浊度变化

Figure 3 Turbidity in the effluent of *Takifugu rubripes* and *Cynoglossus semilaevis* culture tanks

图4为红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池进水浊度的变化。在0时至24时红鳍东方鲀养殖池进水的浊度相对稳定,整体维持在1 NTU左右,仅在16时达到1.6 NTU,在24时降至0.5 NTU。半滑舌鲷养殖池进水的浊度在0时至24时的变化趋势与红鳍东方鲀养殖池相同,在15时半滑舌鲷养殖池进水的浊度达到1.8 NTU后,进水的浊度随着时间延长而逐渐降低,24时后进水的浊度维持在0.5~1.0 NTU,可见经循环水处理系统处理后,养殖池进水的浊度明显低于出水的浊度。

2.3 微细颗粒物浓度

图5为红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池出水中微

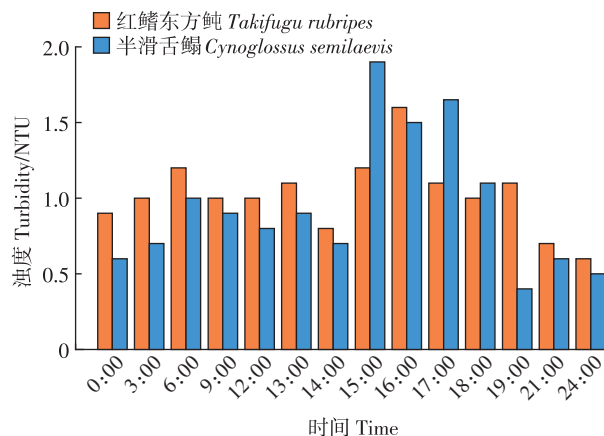


图4 红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池进水浊度变化

Figure 4 Turbidity in the entrance of *Takifugu rubripes* and *Cynoglossus semilaevis* culture tanks

细颗粒物浓度变化。红鳍东方鲀养殖池出水的微细颗粒物浓度在0时至15时维持在20 mg·L⁻¹左右,在16时增长至32 mg·L⁻¹,随后逐渐降低,在24时降至20 mg·L⁻¹左右。半滑舌鲷养殖池出水的微细颗粒物浓度在0时至15时保持在18 mg·L⁻¹左右,在16时增长至26 mg·L⁻¹,然后逐渐降低至24时的18 mg·L⁻¹左右。

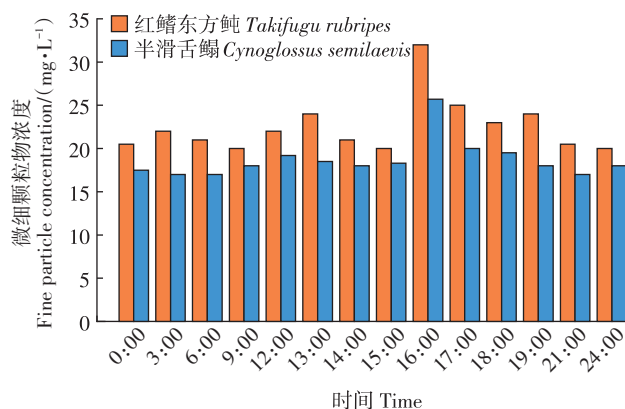


图5 红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池出水中微细颗粒物浓度变化

Figure 5 Varieties of the fine particle concentration in the effluent of *Takifugu rubripes* and *Cynoglossus semilaevis* culture tanks

图6为红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池进水中微细颗粒物浓度变化。红鳍东方鲀养殖池进水中微细颗粒物浓度在0时至15时稳定在17~20 mg·L⁻¹,在16时达到22 mg·L⁻¹,随后降至20 mg·L⁻¹以下,在24时红鳍东方鲀养殖池进水中微细颗粒物的浓度为18 mg·L⁻¹。半滑舌鲷养殖池进水的微细颗粒物浓度在0时至12时维持在15~18 mg·L⁻¹,在13时增长至21 mg·L⁻¹,然后逐渐降低,在24时半滑舌鲷养殖池进水的微细颗粒

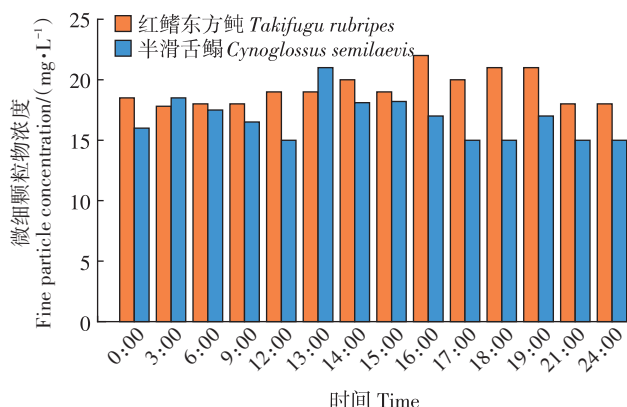


图6 红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池进水中微细颗粒物浓度变化
Figure 6 Varieties of the fine particle concentration in the entrance of *Takifugu rubripes* and *Cynoglossus semilaevis* culture tanks

物浓度稳定在 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 水中微细颗粒物中有机物和无机物的比例

图7为红鳍东方鲀养殖池出水微细颗粒物中有机物和无机物的比例,由图可知红鳍东方鲀养殖池水中的微细颗粒物以有机物为主,在0时至24时有机物所占比例维持在80%以上,在17时至18时出水微细颗粒物中有机物的比例达到95%。图8为半滑舌鲷养殖池出水微细颗粒物中有机物和无机物的比例,可见其动态变化趋势与红鳍东方鲀养殖池出水的变化趋势相同,微细颗粒物中近80%以上为有机物,在17时半滑舌鲷养殖池出水微细颗粒物中有机物的比例接近95%。

图9为红鳍东方鲀养殖池进水中微细颗粒物的有机物和无机物的比例。由图9可知,红鳍东方鲀养

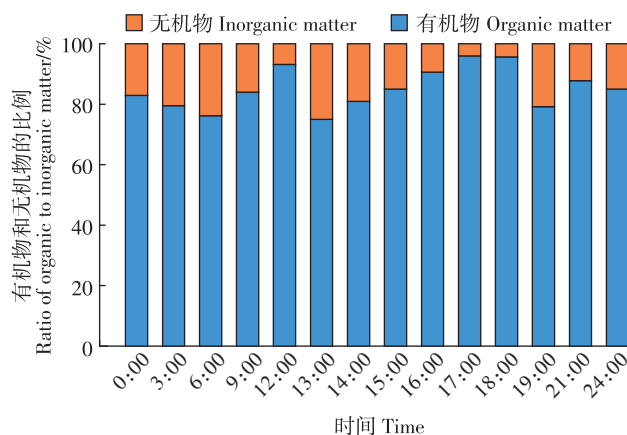


图7 红鳍东方鲀养殖池出水微细颗粒物中有机物和无机物的比例

Figure 7 Ratio of organic to inorganic matter of the fine particle in the effluent of *Takifugu rubripes* culture tanks

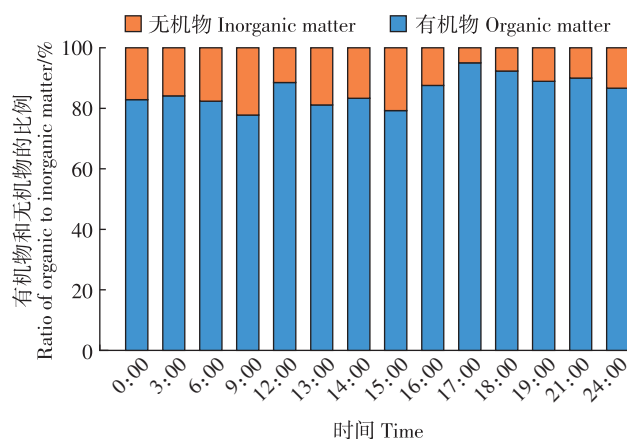


图8 半滑舌鲷养殖池出水微细颗粒物中有机物和无机物的比例

Figure 8 Ratio of organic to inorganic matter of the fine particle in the effluent of *Cynoglossus semilaevis* culture tanks

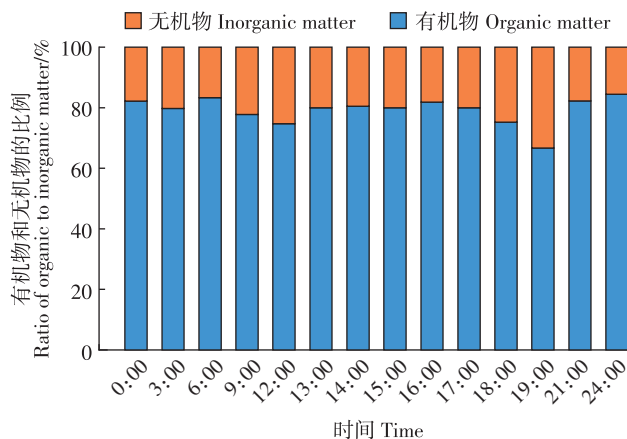


图9 红鳍东方鲀养殖池进水微细颗粒物中有机物和无机物的比例

Figure 9 Ratio of organic to inorganic matter of the fine particle in the entrance of *Takifugu rubripes* culture tanks

殖池进水中的微细颗粒物以有机物为主,在0时至24时间有机物所占比例相对稳定在80%左右,无机物的占比在20%左右。图10为半滑舌鲷养殖池进水微细颗粒物中有机物和无机物的比例,可见其动态变化趋势与红鳍东方鲀养殖池进水的变化趋势相同,微细颗粒物中近80%以上为有机物,在12、16时和18时半滑舌鲷养殖池进水微细颗粒物中有机物的比例接近95%,在3、13时和15时进水微细颗粒物中无机物的比例略高于25%。

3 讨论

3.1 工厂化循环水养鱼系统中悬浮颗粒物浓度变化

目前,鱼类的工厂化循环水养殖已经成为一种新

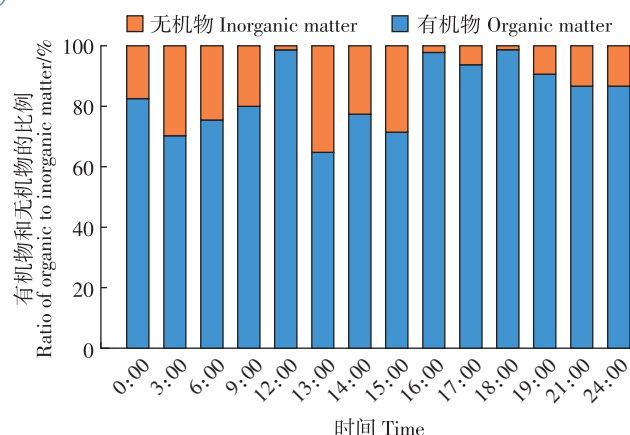


图10 半滑舌鲷养殖池进水微细颗粒物中有机物和无机物的比例

Figure 10 Ratio of organic to inorganic matter of the fine particle in the entrance of *Cynoglossus semilaevis* culture tanks

型的高经济附加值鱼类的养殖模式。鱼类养殖在人工可控的条件下,其生长不受外界环境影响,可实现全年高密度养殖生产。工厂化循环水养殖系统正常运转的关键是养殖水中污染物的快速高效去除,特别是养殖过程中产生的微细颗粒物的及时去除,可以有效减轻后续水处理的污染负荷。本研究中红鳍东方鲀和半滑舌鲷工厂化养殖系统的循环水中的微细颗粒物的流动性较好,饲料投喂时间和水处理工艺影响其在水中的赋存特征。本研究发现,红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池水的浊度的日变化趋势相同,即每日15时至16时投喂后,养殖池水的浊度明显增高,然后浊度随着水处理时间延长而逐渐降低,3~4 h后达到稳定。两种养殖鱼类循环水系统中微细颗粒物浓度的变化趋势与浊度相同,即投喂刚刚结束时水中微细颗粒物浓度增大,且红鳍东方鲀养殖池中微细颗粒物浓度略高于半滑舌鲷养殖池中微细颗粒物浓度。方志山^[5]的研究认为养殖生物的摄食与排泄行为会影响养殖池表层水体的悬浮颗粒物浓度和有机悬浮颗粒物的浓度。工厂化循环水养殖系统中微细颗粒物的浓度一般在 $5\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间^[6],倪琦等^[7]报道了大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)养殖系统中总悬浮颗粒物的浓度 $\leq 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而养殖罗非鱼时总悬浮颗粒物的浓度可达 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。张运林等^[8]的研究表明水中悬浮颗粒物的动态变化与环境因子密切相关,水流等动力作用可使沉降到底层的悬浮颗粒物发生再悬浮。此外,通过对比红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖水中悬浮颗粒物的有机物和无机物的比例,可知有机物在悬浮颗粒物中的比例超过80%,且投喂后有机物的比例增

加至95%,表明投喂后水中悬浮颗粒物的增多应是残饵和粪便造成的。有研究报道鱼池颗粒腐质及细菌量占颗粒有机物的比例为59.55%,表明水体中颗粒腐质及细菌量对颗粒有机物的动态变化有较大影响^[9]。Chen等^[10]的研究表明,高密度鱼类养殖过程中,特别是养殖外排水中,鱼类粪便易在水中分解为絮状微生物,从而增加水中悬浮颗粒物的数量。

3.2 水中微细颗粒物的粒径分布

在红鳍东方鲀工厂化循环水养殖过程中,养殖池中悬浮颗粒物的粒径在60~200 nm之间。在半滑舌鲷养殖池中,悬浮颗粒物粒径在95~400 nm之间,且悬浮颗粒物粒径在300 nm以上的达到20%,可见半滑舌鲷养殖水中部分悬浮颗粒物粒径远大于红鳍东方鲀水中的悬浮颗粒物,这可能与养殖种类的摄食方式和栖息习性有关。红鳍东方鲀属于鲀形目,体形为纺锤型,游动迅速,多集群于养殖池内游动;半滑舌鲷属于鲷形目,体形为平扁型,喜栖息于养殖池底,游动较少。在本研究中,虽然两种养殖鱼类的养殖系统、养殖密度、投喂量和投喂方式相同,但不同养殖品种鱼的摄食过程和消化过程不同,且红鳍东方鲀养殖池内水的湍流作用强于半滑舌鲷养殖池,使得红鳍东方鲀养殖池中悬浮颗粒物粒径小于半滑舌鲷养殖池。同时,对比红鳍东方鲀和半滑舌鲷养殖池出水口和进水口的悬浮颗粒物的粒径分布,可以发现水中悬浮颗粒物经过弧形筛、泡沫分离器和生物滤池处理后,粒径在60~90 nm之间和大于110 nm的悬浮颗粒物基本被去除,循环回到养殖池的水中悬浮颗粒物的粒径主要分布在90~110 nm之间,表明工厂化循环水处理系统构成对不同粒径的悬浮颗粒物的去除效果不同。这与段姗杉等^[11]的研究结果一致,微细颗粒物的去除随着粒径的增大呈先下降后上升的趋势。

在本研究实施的工厂化循环水养殖系统的水处理工艺中,能够实现水中颗粒物去除的设备包括弧形筛、泡沫分离器和生物滤池。弧形筛主要滤除水中的大颗粒物,泡沫分离器主要去除可以黏附在气泡表面的微小颗粒物,生物滤池中的滤料可以截留和吸附一部分粒径较小的颗粒物。通过本研究可知,经过工厂化循环水处理后,水中大部分的悬浮颗粒物可以被截留去除,但仍有部分粒径的颗粒物会留存于水中,表明水处理工艺对悬浮颗粒物的去除效果与颗粒物的粒径大小密切相关。李汝琪等^[12]认为循环水养殖系统中粒径较大的悬浮物易于被截留,陈石等^[13]的研究结果表明,随着筛缝间隙的增大,弧形筛装置的固体

颗粒物去除率呈逐渐下降趋势,但筛缝间隙与颗粒物粒径具有明显的“匹配性”特征,即装置对粒径大于或等于其筛缝间隙的固体颗粒物的平均去除率在60%以上,而对于粒径小于其筛缝间隙的固体颗粒物的平均去除率在40%左右,因此作为粗过滤环节的弧形筛装置,建议其筛缝间隙应以选择等于或略小于水体中平均固体颗粒物粒径为宜。Liu等^[14]研究了牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)养殖系统中悬浮颗粒物粒径分布与沉降特性,认为悬浮颗粒物的去除效率随粒径变小而有较为明显的下降。王勇等^[15]研究了水力旋流器对悬浮颗粒物的去除效果,发现其对大粒径颗粒物的去除效果好,且小粒径颗粒可能会比大粒径颗粒对旋流器壁面最大冲蚀磨损率要大。针对水产养殖过程中产生的悬浮颗粒物,需要根据颗粒物的粒径大小选择恰当的去除工艺。张正等^[16]把弧形筛用作养殖废水的初级过滤以去除水中残饵、排泄物等大颗粒物质。季明东等^[17]的研究表明养殖水中颗粒物泡沫分离的去除率与颗粒粒径密切相关。泡沫分离器产生的气泡表面易于粘附粒径<60 μm的微小颗粒物,对水中微小悬浮颗粒物和溶解有机物的去除效果良好^[16,18]。

工厂化循环水养殖系统中的悬浮颗粒物的粒径在水处理过程中可能会发生变化,如悬浮颗粒物在生物滤器内可能由于低湍流而使较小颗粒物形成更大的颗粒聚集体,有利于水中小颗粒物去除^[18]。Brambilla等^[19]报道了泡沫分离器在欧洲鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)循环水养殖系统中对不同粒径的悬浮颗粒物的去除效果,探讨了气流速度、水力停留时间、温度、pH、盐度等对悬浮颗粒物去除效率的影响。McMillan等^[20]研究了水泵对循环水养殖系统中悬浮颗粒物赋存状态的影响,发现关闭和开启水泵前后系统中悬浮颗粒物粒径发生显著变化,水泵的运行增加了水中小颗粒物的量。孙大川^[21]研究了尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)循环水养殖系统中悬浮颗粒物粒径变化,结果表明随着悬浮颗粒物在养殖池中停留时间的增加,悬浮颗粒物粒径倾向于变小。上述研究结果表明,工厂化循环水养殖系统中微细颗粒物的状态与水处理工艺密切相关,在后续的研究中,可采用扫描电镜进一步观察微细颗粒物的微观结构,也可采用颗粒物智能识别技术评价水中微细颗粒的大小和质量,以期更加深入解析微细颗粒物在水中的赋存状态。

4 结论

(1)在红鳍东方鲀和半滑舌鳎工厂化循环水养殖

系统中,饲料投喂直接导致水中微细颗粒物浓度快速增加,循环水处理系统能够有效去除水中的微细颗粒物,使水中悬浮颗粒物浓度维持稳定。

(2)红鳍东方鲀和半滑舌鳎养殖池水微细颗粒物中的有机物所占比例近乎80%以上,表明微细颗粒物的可生化降解性能好。

(3)红鳍东方鲀和半滑舌鳎养殖池进水和出水中的微细颗粒物粒径分布不同,表明工厂化养殖种类的摄食方式和栖息习性会影响水中微细颗粒物的赋存状态。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2023中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023. Fishery Administration Bureau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. 2023 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.
- [2] FERNANDES P, PEDERSEN L F, PEDERSEN P B. Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 65: 17–26.
- [3] PFEIFFER T J, OSBORN A, DAVIS M. Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2008, 39(1): 24–29.
- [4] 潘雁艳. 循环水养殖系统及固体悬浮物处理技术浅析[J]. 福建农机, 2020(1): 46–49. PAN Y Y. Analysis of recirculating aquaculture system and solid suspended substance treatment technology[J]. *Fujian Agricultural Machinery*, 2020(1): 46–49.
- [5] 方志山. 综合水产养殖池悬浮颗粒物的动态变化研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(1): 131–134. FANG Z S. Dynamic variation of total particular matter in poly-culture pond[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2007, 46(1): 131–134.
- [6] CRIPPS S J, KELLY L A. Reductions in wastes from aquaculture[M]. England: Oxford, 1996: 166–201.
- [7] 倪琦, 张宇雷. 循环水养殖系统中的固体悬浮物去除技术[J]. 渔业现代化, 2008, 34(6): 7–10. NI Q, ZHANG Y L. Suspended solids removal technology in recirculating aquaculture systems[J]. *Fishery Modernization*, 2008, 34(6): 7–10.
- [8] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 266–271. ZHANG Y L, QIN B Q, CHEN W M, et al. A study on total suspended matter in Lake Taihu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(3): 266–271.
- [9] 郭赣林, 赵文. 淡水鱼池生态系统的悬浮物结构及有机碳库储量[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(2): 127–130. GUO G L, ZHAO W. The seston structure and storage of organic carbon pools in freshwater fish ponds[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, 21(2): 127–130.
- [10] CHEN S L, TIMMONS M B, ANESHANSLEY D J, et al. Suspended solids characteristics from recirculating aquaculture systems and design implications[J]. *Aquaculture*, 1993, 112(2/3): 143–155.

- [11] 段姍杉, 杨晨, 宋协法, 等. 循环水养殖系统微细悬浮颗粒的分布规律研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 22-28. DUAN S S, YANG C, SONG X F, et al. Distribution of suspended fine particles in recirculating aquaculture system[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(2): 22-28.
- [12] 李汝琪, 钱易, 孔波, 等. 曝气生物滤池去除污染物的机理研究[J]. 环境科学, 1999, 20(6): 49-52. LI R Q, QIAN Y, KONG B, et al. Research on the removal mechanism of pollutants using biological aerated filter[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(6): 49-52.
- [13] 陈石, 张成林, 张宇雷, 等. 弧形筛对水体中固体颗粒物的去除效果研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 43-48. CHEN S, ZHANG C L, ZHANG Y L, et al. Solid particle removal effect of parabolic screen filter for aquaculture water[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(35): 43-48.
- [14] LIU C F, XU Y, YAN Z S, et al. Particle size distribution and settling characteristics of solids waste settled in the recirculating aquaculture system for Japanese flounder culture[J]. *Fisheries Modernization*, 2009, 36(6): 1-5.
- [15] 王勇, 曾涛, 徐银香, 等. 固体颗粒对水力旋流器冲蚀磨损特性的影响[J]. 流体机械, 2019, 47(5): 50-55. WANG Y, ZENG T, XU Y X, et al. Effect of solid particles on the erosion wear characteristics of hydrocyclone[J]. *Fluid Machinery*, 2019, 47(5): 50-55.
- [16] 张正, 王清印, 王印庚, 等. 弧形筛及生物净化池净化陆基工厂化海水养殖废水的效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 176-181. ZHANG Z, WANG Q Y, WANG Y G, et al. Effluent purification effect of system in sieve bend combined with four grade biological cleansing ponds in industrialized mariculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 176-181.
- [17] 季明东, 李建平, 叶章颖, 等. 泡沫分离器去除养殖循环水中不同粒径细微颗粒物的效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 202-207. JI M D, LI J P, YE Z Y, et al. Removing effect of fine particles with different sizes by foam fractionator in recirculating aquaculture system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(19): 202-207.
- [18] RUSTEN B, EIKEBROKK B, ULGENES Y, et al. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(3): 322-331.
- [19] BRAMBILLA F, ANTONINI M, CECCUZZI P, et al. Foam fractionation efficiency in particulate matter and heterotrophic bacteria removal from a recirculating seabass (*Dicentrarchus labrax*) system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2008, 39(1): 37-42.
- [20] MCMILLAN J D, WHEATON F W, HOCHHEIMER J N, et al. Pumping effect on particle size in a recirculating aquaculture system[J]. *Aquaculture Engineering*, 2003, 27(1): 53-59.
- [21] 孙大川. 循环水养殖系统中悬浮颗粒物的分布、迁移以及核心水处理单元的水处理效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2006. SUN D C. Study on the distribution and transference of suspended solids and the core water treatment[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2006.

(责任编辑:李丹)