

不同浓度臭氧对循环水养殖系统生物膜活性及其净化效能的影响*

黄 滨^{1①} 马 腾² 刘宝良¹ 刘 滨¹ 洪 磊¹
梁 友¹ 翟介明³ 张丽丽⁴

(1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 2. 中国海洋大学水产学院 青岛 266003; 3. 莱州明波水产有限公司 烟台 264000; 4. 连云港众利水产养殖有限公司 连云港 222000)

摘要 本文通过在循环水养殖系统中添加不同浓度的臭氧,研究其对循环水养殖系统生物膜活性及其净化效能的影响。结果显示,当氧化还原电位(ORP)小于 450 mV 时,氨氮的去除率随着臭氧浓度升高而升高,最高去除率达 39.9%,亚硝酸盐氮的平均去除率为 28.2%,生物膜菌群的平均存活率为 88.1%,生物膜对养殖水体氨氮和亚硝酸盐氮的处理效果良好;当氧化还原电位为 500 mV 时,经过臭氧 24 h 处理,氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别由 36.5%、28.1%降到 12.2%、8.4%,而臭氧 4 h 处理后,生物膜对氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别由 47.5%、32.1%降到 5.0%、3.3%,水处理效果明显下降,生物膜菌群存活率由 88.1% 降到 31.5%。由此可见臭氧添加浓度对生物膜及净化效能有重大影响。综合试验结果和分析评估,建议封闭循环水养殖系统的臭氧添加量以控制生物滤池内的氧化还原电位低于 400 mV 为宜,可保证循环水系统的安全性和经济性。

关键词 臭氧; 循环水养殖系统; 生物膜; 净化效能

中图分类号 S949 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)03-0143-05

臭氧(O₃)作为强氧化剂,具有去除水产养殖系统固体杂质、脱色除臭、氧化氨氮、降解有机物、杀菌消毒和保持养殖水质稳定的作用(Paller *et al*, 1988; Reid *et al*, 1994; Liltved *et al*, 1995; Rueter *et al*, 1995)。随着工厂化水产高效养殖模式在我国的蓬勃发展,臭氧的杀菌、消毒和净化水质等功能在工厂化封闭循环水养殖系统(Recirculating Aquaculture Systems, RAS)中得到了广泛应用。目前,国内外研究已经证明,在 RAS 水处理系统中,臭氧能够快速有效地杀死水体中的有害微生物,有效改善养殖水质,提高系统整体性能,确保鱼类健康成长(Davidson *et al*, 2011);对于养殖水体的处理,臭氧浓度为 0.1–0.2 mg/L,处

理时间 10–30 min 就可以达到很好效果(Bullock *et al*, 1997; Summerfelt, 2003; Ghomi *et al*, 2007);在臭氧对养殖鱼类的影响方面,由于水体中臭氧浓度过高会对养殖鱼类产生毒害作用,其对一般鱼类的安全浓度为 0.008–0.060 mg/L,在半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)封闭循环水养殖系统中,臭氧投加量控制在氧化还原电位(Oxidation-Reduction Potential, ORP)在 350 mV 以内,可达到安全高效的处理效果(周游等, 2012)。

在工厂化循环水养殖系统中,利用生物膜进行水质净化是养殖水处理的核心技术,其净化效能决定了养殖水环境的稳定以及养殖生产的高效和安全。但是,臭氧对生物滤池中生物膜的影响却鲜有报道。当

* 国家鲆鲽类产业技术体系(CARS-50-G10)、江苏省重点研发计划(BE2015328)和江苏省科技计划(BN2015052)共同资助。

① 通讯作者:黄 滨,研究员, E-mail: huangbin@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-03-09, 收修改稿日期: 2015-12-31

臭氧浓度超过一定值时,不仅会对养殖鱼类产生毒害,对生物滤池中的生物膜也将带来影响和损伤。一旦生物膜被破坏,循环水养殖系统将面临崩溃的危险。可见合理控制臭氧添加浓度是必要的(戚翠战等,2014)。因此,深入研究臭氧在养殖水处理技术中的应用,对改善养殖水质、减少病害、提高养殖密度、增加产量、保障安全生产及促进工业化养殖的快速发展具有深远意义。本研究利用珍珠龙胆石斑鱼养殖生产系统中挂有生物膜的滤料和养殖废水,模拟工厂化循环水养殖系统,通过添加不同臭氧量,研究了臭氧对生物膜活性和水处理效率的影响,以期获得 RAS 中安全高效的臭氧添加剂量,为实际生产应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验条件

本试验在山东莱州明波水产有限公司试验车间进行。试验时间为 2013 年 11 月 12 日-12 月 23 日,为期 41 d。试验系统模拟工厂化循环水系统,配置有养殖废水蓄水池、生物试验滤池、生产系统中挂有生物膜的滤料以及臭氧发生器。养殖废水蓄水池采用玻璃钢圆形池,容量为 1000 L;试验用水取自珍珠龙胆石斑鱼循环水养殖废水;物理过滤采用合成纤维过滤棉;生物试验滤池采用圆形玻璃钢养殖池,直径为 30 cm,深为 50 cm,水深为 15 cm,容量约为 10 L,池底呈锥形,在池底使用气石曝气;生物滤料来自于循环水养殖系统中生物滤池内取出的已挂膜的弹性滤料。根据养殖车间内日循环次数 20 次,确定由废水池流向试验池的流量;根据生物滤池内滤料量与生物滤池体积比确定试验池内所放滤料量,流程见图 1。

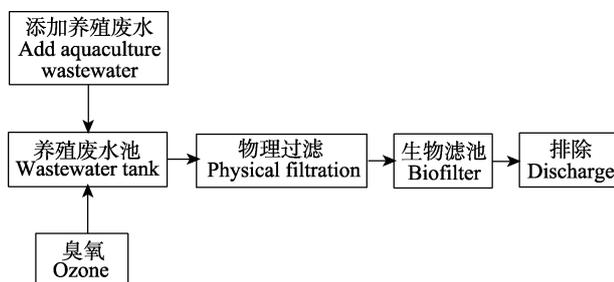


图 1 试验系统工艺流程

Fig.1 Scheme of water treatment in the experimental system

1.2 试验设计

试验中臭氧添加 6 个浓度,ORP 值分别为 300、350、400、450、500 和 550 mV;每个浓度臭氧连续对生物

试验滤池及滤料添加处理 7 d,检测生物试验滤池中挂膜滤料对养殖废水处理效能的变化以及生物膜菌群存活率。试验分为 A 和 B 两个组。A 组为试验组,由臭氧发生器向养殖废水池中通入臭氧,保持水中氧化还原电位稳定,经物理过滤后,流入生物滤池。连续进行 7 d 的臭氧注入试验,设计氧化还原电位初始为 300 mV,臭氧注入试验开始后,在 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h、2 d、3 d、4 d、5 d、6 d、7 d 共 12 个时间点,分别测定进出水口的氨氮和亚硝酸盐氮的含量。取样结束后立即进行测定,若无显著变化,7 d 试验后将氧化还原电位提高 50 mV,更换相同的滤料继续试验,直到水中的氨氮、亚硝酸盐氮含量出现显著变化。B 组为对照组,不通入臭氧,其他条件与 A 组一致。试验过程中,每 6 h 测定一次氧化还原电位,保证氧化还原电位的稳定。试验过程中 B 组的氧化还原电位保持在(221.3±6.8) mV。

1.3 日常管理

试验期间,每 12 h 补充一次新的养殖废水,并保证试验池内氧化还原电位保持在稳定状态。每天监测并记录试验池的 pH、DO、ORP 和水温等水质指标。试验期间保持水温控制在 25-26℃,盐度为 25-26, pH 维持在 7.5-8.0, DO≥8 mg/L。

1.4 参数测定与数据处理

1.4.1 水质测定方法 总氨氮采用次溴酸钠氧化比色法,亚硝酸盐氮采用盐酸萘乙二胺分光光度法,所选用的仪器为 7230G 型分光光度计;化学需氧量采用碱性高锰酸钾法;溶解氧、pH、水温、盐度和氧化还原电位等水质数据的测定,使用专业水质分析仪。

1.4.2 异养菌数量测定 剪下弹性滤料部分毛刷,称重后,将滤料上的附着物取下,放入 500 ml 灭菌海水中,匀浆,制成细菌原液。异养菌数量测定选取 Zobell 2216E 海水培养基,每个水样涂 5 个平板,28℃ 恒温,培养 48 h,观察结果。菌落人工计数,细菌总数在 30-300 之间最合适。

1.4.3 生物滤料细菌存活率 将 1.4.2 中制备细菌原液稀释 100 倍,采用吖啶橙染色直接计数法(许兵等,1992),橙色的为活菌,绿色的为死菌,在荧光显微镜下观察计数。

1.5 数据分析

采用 SPSS17.0 统计软件对所采集的数据进行差异显著性分析。计算测定数据平均值、标准差,以

$P < 0.05$ 作为差异显著, $P < 0.01$ 作为差异极其显著。

2 结果与分析

2.1 同浓度臭氧条件下的水质变化

试验分两组, 对照组经滤料处理后的水质稳定, 氨氮浓度为 (0.32 ± 0.01) mg/L, 亚硝酸盐氮浓度为 0.03 mg/L, 平均去除率分别为 21.4%、16.7%。氧化还原电位值分别设置为 300、350、400、450、500、550 mV 时的氨氮和亚硝酸盐氮的含量变化趋势见图 2 和图 3。

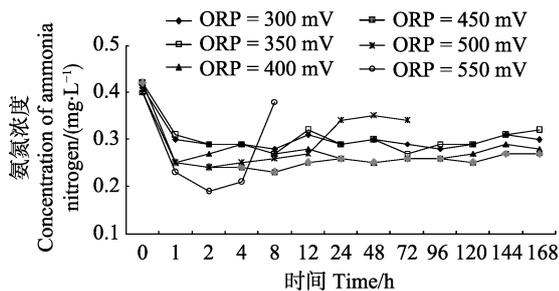


图 2 不同氧化还原电位条件下出水口氨氮浓度

Fig.2 The concentration of ammonia nitrogen in the outlet of filters under different oxidation-reduction potentials

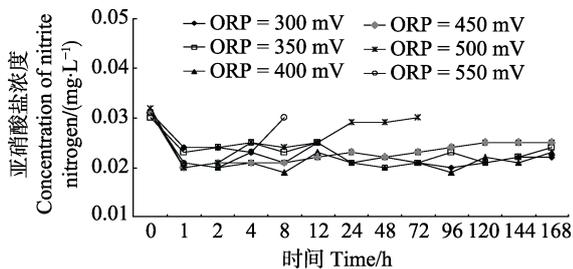


图 3 不同氧化还原电位条件下出水口亚硝酸盐浓度变化

Fig.3 The concentration of nitrite nitrogen in the outlet of filters under different oxidation-reduction potentials

氧化还原电位设定值为 300 mV 时, 实际测量的氧化还原电位为 (301.4 ± 1.7) mV, 进行臭氧处理后, 氨氮含量为 (0.29 ± 0.01) mg/L, 亚硝酸盐氮含量为 0.02 mg/L。未经过生物滤料的养殖废水氨氮、亚硝酸盐氮的含量分别为 0.41、0.03 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 28.3%、29.0%。

氧化还原电位设定值为 350 mV 时, 实际测量的氧化还原电位为 (350.6 ± 1.5) mV, 进行臭氧处理后, 氨氮含量为 (0.30 ± 0.02) mg/L, 亚硝酸盐氮含量为 0.02 mg/L。未经过生物滤料处理的养殖废水氨氮、亚硝酸盐氮的含量分别为 0.42、0.03 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 29.5%、22.3%。氧化还原电位设定值为 400 mV 时, 实际测量氧化还原电位为 (401.6 ± 1.1) mV, 进行臭氧处理后, 氨氮含量为 (0.27 ± 0.01) mg/L, 亚硝酸

盐氮含量为 0.02 mg/L。未经过生物滤料的养殖废水氨氮、亚硝酸盐氮的含量分别为 0.42、0.03 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 35.9%、32.6%。

氧化还原电位设定值为 450 mV 时, 实际测量的氧化还原电位为 (450.6 ± 0.7) mV, 进行臭氧处理后, 氨氮含量为 (0.25 ± 0.01) mg/L, 亚硝酸盐氮含量为 0.02 mg/L。未经过生物滤料处理的养殖废水氨氮、亚硝酸盐氮的含量分别为 0.42、0.03 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 39.9%、26.8%。

氧化还原电位设定值为 500 mV 时, 实际测量的氧化还原电位为 (500.6 ± 0.7) mV, 经过臭氧处理 24 h 时, 氨氮和亚硝酸盐氮含量升高。在处理 1 h–12 h 时, 氨氮含量为 (0.25 ± 0.01) mg/L, 亚硝酸盐氮含量为 0.02 mg/L。未经过生物滤料的养殖废水氨氮、亚硝酸盐氮的含量分别为 0.40、0.03 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 36.5%、28.1%。在处理 24–48 h 时, 氨氮含量为 (0.34 ± 0.01) mg/L, 亚硝酸盐氮含量 (0.03 ± 0.01) mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 12.2%、8.4%。

氧化还原电位设定值为 550 mV 时, 实际测量的氧化还原电位为 (550.0 ± 0.2) mV, 经过臭氧处理 4 h 时, 氨氮和亚硝酸盐氮含量升高。在处理 1–3 h 时, 氨氮含量为 (0.21 ± 0.02) mg/L, 亚硝酸盐氮含量为 0.02 mg/L。未经过滤料的养殖废水氨氮、亚硝酸盐氮的含量分别为 0.40、0.03 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 47.5%、32.1%。在处理 4 h 时, 氨氮含量为 0.38 mg/L, 亚硝酸盐氮含量为 0.30 mg/L。氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 5.0% 和 3.3%。

由试验结果可以看出, 添加臭氧后, 当氧化还原电位由 300 mV 增加至 450 mV 时, 氨氮的去除率表现出随着臭氧浓度升高而升高的趋势, 最高去除率达 39.9%, 亚硝酸盐氮的去除率在 22.3%–32.6% 之间波动, 氨氮和亚硝酸盐氮的平均去除率分别为 33.4%、28.2%; 当氧化还原电位为 500 mV 时, 经过臭氧 24 h 处理, 氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别由 36.5%、28.1% 降到 12.2%、8.4%; 氧化还原电位为 550 mV 时, 经过臭氧 4 h 处理后, 氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别由 47.5%、32.1% 降到 5.0%、3.3%。可见, 当氧化还原电位小于 450 mV 时, 生物膜对养殖水体的处理效果良好, 当超过 500 mV 时, 生物膜的水处理效果明显下降, 在臭氧和硝化细菌共同对养殖水中氨氮和亚硝酸盐氮的去除过程中, 当氧化还原电位超过 500 mV 时, 氨氮和亚硝酸盐氮去除率却显著下降, 说明在臭氧的强氧化性不减的情况下, 硝化细菌的去除效能明显减弱。

2.2 不同浓度臭氧处理对生物滤料细菌存活率的影响

利用吡啶橙染色直接计数法测得,滤料上细菌的总平均数为 $(2.43\pm 0.56)\times 10^{10}$ 个/g。对照组细菌存活率开始为 97.9%,试验系统运行 7 d 后成活率为 95.6%。氧化还原电位为 300 mV 时,试验开始前细菌存活率为 98.1%,系统运行 7 d 后为 90.5%。氧化还原电位为 350 mV 时,试验开始前细菌存活率为 98.7%,系统运行 7 d 后为 91.4%。氧化还原电位为 400 mV 时,试验开始前细菌存活率为 98.4%,系统运行 7 d 后为 82.7%。氧化还原电位为 450 mV 时,试验开始前细菌存活率为 99.2%,系统运行 7 d 后为 85.8%。氧化还原电位为 450 mV 时,试验开始前细菌存活率为 97.6%,系统运行 12 h 后为 82.2%,系统运行 24 h 后为 43.2%。氧化还原电位为 550 mV 时,试验开始前细菌存活率为 98.3%,系统运行 3 h 后为 81.8%,系统运行 4 h 后为 31.5%。

对照组在试验开始和结束时滤料细菌成活率差异不显著。实验组在试验结束时,当氧化还原电位为 300–450 mV 时,滤料细菌成活率比试验开始时减少约 10%,可能是臭氧对滤料外层细菌有一定的杀灭作用;当氧化还原电位为 500 mV 时,臭氧处理前 12 h 与 300–450 mV 时的结果基本一致,臭氧处理 24 h 后细菌成活率开始明显下降;当超过 500 mV 时,细菌存活率明显下降。这表明高浓度臭氧添加对硝化细菌造成了严重伤害,硝化细菌数量显著减少,进一步说明了,臭氧浓度增加去除率反而显著下降的原因。

3 讨论

生物膜法是一种以各种滤料为载体,通过微生物形成的生物膜去除养殖水体中化学物质(包括氨氮和亚硝酸盐氮等)的方法(高喜燕等, 2009)。利用生物膜法去除养殖水体中的有害物质,在此条件下生长的生物膜主要由氨氧化细菌、硝化细菌、反硝化细菌、光合细菌、藻类(光照条件下)和原生动物等组成,其中大部分通过细菌的代谢活动被降解(张正等, 2012)。生物膜法对养殖水体中化学物质的去除效果良好,张正等(2012)研究表明,海水循环水养殖系统中生物滤池经快速挂膜,对氨氮、亚硝酸盐和化学需氧量(COD)的去除率分别为 52.04%、26.82%、62.94%。齐巨龙等(2010)通过研究循环水养殖系统中预培养生物滤膜得出,养殖池排水口的氨氮含量为 0.44 mg/L,进水口的氨氮含量为 0.05 mg/L,一次性平均去除率为 88.64%。李岑鹏等(2009)利用循环水处理系统处理鳗鲡养殖污水,氨氮、

亚硝酸盐氮和 COD 的平均去除率分别为 25.2%、52.2%、52.6%。臭氧也可以去除循环水养殖系统水体中的化学物质,宋奔奔等(2011)通过研究臭氧对大菱鲆半封闭循环水养殖系统水质净化作用得出,向低压喷淋式溶氧器添加 0.26 mg/L 的臭氧后,总氨氮去除率约为 18%,亚硝酸盐氮去除率约为 8%。由此可见,生物膜是利用生物去除水中氨氮、亚硝酸盐氮和 COD,臭氧是通过强氧化剂化学减少水中的有害物质。

在本研究中,对照组对氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别为 21.4%、16.7%,细菌存活率为 95.6%。当氧化还原电位在 300–450 mV 范围内时,经过臭氧处理 168 h,氨氮和亚硝酸盐氮的平均去除率分别为 33.4%、28.2%,细菌存活率平均为 88.1%;当氧化还原电位为 500 mV 时,经过臭氧 24 h 处理,氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别由 36.5%、28.1%减少到 12.2%、8.4%,细菌存活率由 82.2%降到 43.2%;当氧化还原电位为 550 mV 时,经过臭氧 4 h 处理后,氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别由 47.5%、32.1%降到 5.0%、3.3%,细菌存活率由 81.8%降到 31.5%。当氧化还原电位小于 450 mV 时,滤料对养殖水体的处理效果良好,细菌存活率稍有下降;在超过 500 mV 时,高浓度的臭氧可对细菌造成巨大伤害,导致水处理效果明显下降。因此,综合考虑封闭循环水系统工艺流程、设备可控性和安全性等因素,以及不同规格和不同品种养殖鱼类对臭氧的适应力或耐受力的差异,建议将封闭循环水系统中养殖池内和生物滤池内的氧化还原电位控制在 400 mV 之内为宜。本研究结果与周游等(2012)在臭氧前后置工艺变化对循环水半滑舌鳎养殖系统水环境的影响试验中,得到的臭氧投加量要控制在 ORP 指标 350 mV 以内的结果非常接近。

参 考 文 献

- 齐巨龙, 赖铭勇, 谭洪新, 等. 预培养生物膜法在海水循环水养殖系统中的应用效果. 渔业现代化, 2010, 37(2): 14–18
- 许兵, 徐怀恕. 水生细菌几种计数方法的比较. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1992, 22(3): 43–48
- 李岑鹏, 关瑞章, 江兴龙, 等. 循环水处理系统处理鳗鲡养殖污水的应用实验. 集美大学学报(自然科学版), 2009, 14(2): 126–130
- 张正, 王印庚, 曹磊, 等. 海水循环水养殖系统生物膜快速挂膜试验. 农业工程学报, 2012, 28(15): 157–162
- 宋奔奔, 倪琦, 张宇雷, 等. 臭氧对大菱鲆半封闭循环水养殖系统水质净化研究. 渔业现代化, 2011, 38(6): 11–15
- 周游, 黄滨, 宋协法, 等. 臭氧前后置工艺变化对循环水半滑舌鳎养殖系统水环境的影响. 渔业现代化, 2012, 39(6): 5–9

- 高喜燕, 傅松哲, 刘纓, 等. 循环海水养殖中生物滤器生物膜研究现状与分析. 渔业现代化, 2009, 36(3): 16–20
- 戚翠战, 韩世成, 曹广斌, 等. 鱼类循环水养殖水处理中的臭氧浓度 PID 控制. 渔业现代化, 2014, 41(2): 18–22
- Bullock GL, Summerfelt ST, Noble AC, *et al.* Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system II. Effects on microscreen filtration and water quality. *Aquaculture*, 1997, 158(1–2): 57–67
- Davidson J, Good C, Welsh C, *et al.* The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems. *Aquacult Eng*, 2011, 44(3): 80–96
- Ghomi MR, Esmaili A, Vossoughi G, *et al.* Comparison of ozone, hydrogen peroxide and removal of infected eggs for prevention of fungal infection in sturgeon hatchery. *Fish Sci*, 2007, 73(6): 1332–1337
- Liltved H, Landfald B. Use of alternative disinfectants, individually and in combination, in aquacultural wastewater treatment. *Aquacult Res*, 1995, 26(8): 567–576
- Paller MH, Lewis WM. Use of ozone and fluidized-bed biofilters for increased ammonia removal and fish loading rates. *Prog Fish Cult*, 1988, 50(3): 141–147
- Reid B, Arnold CR. Use of ozone for water treatment in recirculating-water raceway system. *Prog Fish Cult*, 1994, 56(1): 47–50
- Rueter J, Johnson R. The use of ozone to improve solids removal during disinfection. *Aquacult Eng*, 1995, 14(2): 123–141
- Summerfelt ST. Ozonation and UV irradiation—an introduction and examples of current applications. *Aquacult Eng*, 2003, 28(1–2): 21–36

(编辑 马璀艳)

Effects of Ozone Concentration on the Activity of Biofilm and Its Effectiveness of Purification in Recirculating Aquaculture Systems

HUANG Bin¹*, MA Teng², LIU Baoliang¹, LIU Bin¹, HONG Lei¹,
LIANG You¹, ZHAI Jieming³, ZHANG Lili⁴

(1. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 2. Fishery College, Ocean University of China, Qingdao 266003; 3. Laizhou Mingbo Aquatic Co. Ltd., Yantai 264000; 4. Lianyungang Zhongli Aquaculture Co. Ltd., Lianyungang 222000)

Abstract Ozone (O₃) is a strong oxidizing agent that has been widely used in factory recirculating aquaculture systems. The proper concentration is a key to the utilization of ozone. Ozone at inappropriately high concentration could impair the growth, behavior, and health of farmed fish. Furthermore, ozone at high concentration also affects the biofilm in the biofilter, which could reduce the efficiency of water treatment in the recirculating aquaculture systems (RAS). In this study, ozone was added in RAS at different concentrations, and the subsequent effects on the activity and purification effectiveness of biofilm were tested. It was shown that when the Oxidation-Reduction Potential (ORP) was lower than 450 mV, the efficiency of ammonia nitrogen treatment was increased along with the elevation in ozone concentration. Under this condition the highest removal rates of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen reached 39.9% and 28.2% respectively, and the survival rate of bacteria in the biofilm was 88.1%. This suggested that ozone did not affect the efficiency of the biofilter as ORP was below 450 mV. When ORP was 500 mV, after 24-hour treatment with ozone the removal efficiency was decreased from 36.5% to 12.2% for ammonia nitrogen, and from 28.1% to 8.4% for nitrite nitrogen. When ORP was 550 mV, 4-hour ozone treatment reduced the efficiency from 47.5% to 5.0% for ammonia nitrogen, and from 32.1% to 3.3% for nitrite nitrogen. This implied that higher ORP significantly reduced the efficiency of water treatment. The survival rate of bacteria in the biofilm dropped from 88.1% to 31.5%. Our study indicated that the effectiveness of water treatment and the survival rate of bacteria could be greatly affected by ozone. To ensure the safety and cost efficiency of RAS, we recommended that the concentration of ozone added in RAS should be controlled to keep ORP in the biofilter under 400 mV.

Key words Ozone; Recirculating aquaculture systems; Biofilm; Purification efficiency

* Corresponding author: HUANG Bin, E-mail: huangbin@ysfri.ac.cn