

文章编号: 1004-7271(2007)06-0542-07

循环水养殖系统中浸没式 生物滤器的水处理效果

吴嘉敏, 孙大川

(上海水产大学生命科学与技术学院, 上海 200090)

摘要:生物过滤技术是循环水超高密度工厂化养殖系统维持生产正常进行的核心技术。运转良好的生物过滤装置都有很好的硝化效果,但不同工况参数会影响生物滤器的硝化效率。已有的相关生物滤器报道均是实验室试验结果,缺乏直接以生产系统为对象的研究。本试验对浮球式生物滤器在不同工况下的水处理效率进行比较,结果发现:(1)无曝气条件下, $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化率在 HRT 为 18 min 时最大为 28.77%; $\text{NO}_2\text{-N}$ 转化率随着水力停留时间增加而增加,在 HRT 为 36 min 工况时达到最大,为 67.20%; COD 去除率在 HRT 为 36 min 时最高,达到 6.56%;另外,不曝气各工况下出水溶氧和 pH 都有较明显下降。(2)曝气量为 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,滤器水处理效率随 HRT 延长而增加; $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化率和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 转化率分别由 HRT 为 9 min 时的 7.54% 和 49.30% 增加到 HRT 为 36 min 时的 39.03% 和 71.78%; COD 去除率在 HRT 为 36 min 时最高,为 6.16%;曝气量为 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 各工况下出水溶氧和 pH 略有增加。(3)曝气量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,滤器水处理效率也随 HRT 延长而增加; $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化率和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 转化率在 HRT 为 36 min 时达到最高,分别为 27.27% 和 74.92%; COD 去除率在 HRT 为 9 min 时最高,为 5.30%;曝气量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 各工况下出水溶氧和 pH 也都略有增加。(4)对无曝气和有曝气各工况进行比较,结果显示有曝气组各工况水处理效率优于无曝气组,曝气水平为 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 时处理效率最好。

关键词:循环水工厂化水产养殖系统;不同工况;水处理效果;浸没式生物滤器

中图分类号: S 912 文献标识码: A

Study on the water treatment efficiency of submerged biological filter in the recirculating aquaculture system

WU Jia-min, SUN Da-chuan

(College of Aqua-life Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Biological filtering is the core technology in maintaining the regular running of the high density of factory aquaculture. The proper running filter will be effective in nitrification, which will be affected by different working parameters. Although there are some reports on biological filtering, all lack the research on the practical system directly. In this paper, the water treatment rates of submerged biological filter under different conditions are compared. The results indicated that: (1) Without aeration, the best removal rate of $\text{NH}_4\text{-N}$ is 28.77% when the HRT is 18min. The removal rates of $\text{NO}_2\text{-N}$ is increased with the decreased water

收稿日期: 2006-09-04

基金项目: 上海市农委“四新”推广项目[沪农科推字(2004)第1-6-5号]; 国家科技支撑计划(2006BAD03B06); 上海市重点学科建设项目(Y1101)

作者简介: 吴嘉敏(1961-), 男, 上海市人, 副教授, 主要从事水产健康养殖工艺及养殖环境生态方面的研究。Tel: 021-65710018

flow rates, which reach the top efficiency, 67.20%, at the condition with 36 min HRT; The COD removal rate reaches the top at the condition with 36 min HRT, which is 6.65%. Additionally, the DO and pH of outlet water from the submerged biological filter at the conditions without aeration are lower obviously. (2) Under the conditions with aeration of $1 \text{ m}^3/\text{h}$, the water treatment efficiency also increased with the reducing of the water influent. The removal rates of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ are increased respectively from 7.54% and 49.30% at 9min HRT to 39.03% and 71.78% at 36 min HRT. The best removal rate of COD reaches 6.16% when the HRT is 36 min. And under these conditions, the DO and pH of outlet water have somewhat increased. (3) Under the conditions with aeration of $2 \text{ m}^3/\text{h}$, the water treatment efficiency also increased with the decreased water flow rates. The best removal rate of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ are 27.27% and 74.92% respectively which achieved at 36 min HRT. The removal rate of COD reaches the top when the HRT is 9min, which is 5.30%, and the DO and pH of outlet water also have some increase at these conditions with $2 \text{ m}^3/\text{h}$ aeration. (4) The results of comparison of the conditions without aeration to the conditions with aeration indicate that the water treatment efficiency under conditions with aeration is superior to that without aeration, and the treatment efficiency which achieved with $1 \text{ m}^3/\text{h}$ is relatively better than others.

Key words: recirculating aquaculture system; different working conditions; water treatment efficiency; submerged biological filter

水处理技术是循环水养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)的核心技术之一,其中,生物过滤技术在控制养殖水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 等有毒物质方面起着十分关键的作用^[1]。目前关于各类生物滤器水处理效果的报道较多^[2-4],但多以人工模拟养殖水为处理对象,进行生物滤器的小试研究,相关研究结果在指导生产性养殖系统生物处理单元的运行及管理方面缺乏弹性。为保证商业化养殖系统高效、稳定运行,需在生产规模上综合研究生物过滤技术,获取关键参数,为循环水养殖系统水处理的设计及运行管理提供直接依据。本实验以湖北宜昌三峡现代渔业有限公司的循环水养殖系统为研究对象,对浸没式生物滤器在不同工况下的水处理效果进行了比较研究,为生物过滤器的设计和运行管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 系统介绍

本实验采用上海水产大学设施渔业研究所设计的湖北宜昌三峡现代渔业有限公司循环水养殖系统。循环水养殖系统占地 $1\,500 \text{ m}^2$,共分 4 个子养殖系统,每个子养殖系统的养殖面积为 250 m^2 ,系统水处理单元构成为:生物滤器(浮球式和浸没式)、流着净化渠、泡沫分离器、固液分离装置以及紫外消毒装置,工艺流程见图 1。每个子养殖系统配置 8 个并联运行的浸没式生物滤器,其结构示意图 2,每个滤器容积为 3 m^3 ,滤料为麦饭石、白云石、碎珊瑚、贝壳,水流量、曝气量均可控,滤器滤料间孔隙率为 40%。

1.2 养殖品种及日常管理

系统养殖品种为澳洲宝石鱼(*Scortum barcoo*),放养密度为 $50 \text{ ind}/\text{m}^3$ (宝石鱼平均规格约 300 g 左右)。日投饵率为鱼体重的 3%~4%,所用饵料为统一配合饲料。养殖水体溶氧维持在 $6 \sim 8 \text{ mg/L}$,水

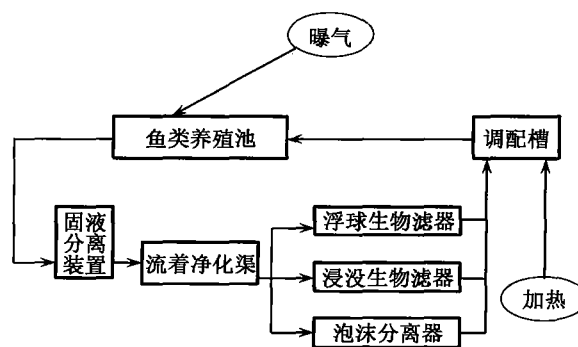


图 1 系统结构配置

Fig. 1 Layout of system

温 $25 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

1.3 实验设计

在系统稳定的生产阶段,选取一条生产系统的4个浸没式生物滤器,按照曝气水平先无后有、曝气量和水流量由小到大的顺序分别调整其工况,待工况稳定后,检测进出水口各指标的变化情况。曝气设为无曝气、曝气1和曝气2三个水平,其中曝气1水平曝气量控制为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、曝气2水平曝气量控制在 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,分别标记为 A0 (aeration $0 \text{ m}^3/\text{h}$)、A1 (aeration $1 \text{ m}^3/\text{h}$)和 A2 (aeration $2 \text{ m}^3/\text{h}$);水流量设为四个水平,分别为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $8 \text{ m}^3/\text{h}$,由生物滤器有效容积、孔隙率计算出对应水力停留时间(HRT)分别为:36 min、18 min、12 min以及9 min;将曝气水平和水力停留时间进行正交设计,得到3组12个工况,如表1所示。

当一个滤器的一个工况测定结束后将其转换成另一个工况,中间留24 h作为缓冲适应时间,以使滤器中微生物膜工作稳定。其中无曝气工况过渡到有曝气工况中间缓冲时间为48 h。

测定指标有: $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、COD、pH、DO和温度。

表1 试验中不同工况的设计

Tab.1 The design of different working conditions in this experiment

曝气情况	水流量 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ (HRT = 36 min)	水流量 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ (HRT = 18 min)	水流量 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ (HRT = 12 min)	水流量 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ (HRT = 9 min)
无曝气 aeration $0 \text{ m}^3/\text{h}$ (A0)	A0-H36	A0-H18	A0-H12	A0-H9
有曝气 aeration $1 \text{ m}^3/\text{h}$ (A1)	A1-H36	A1-H18	A1-H12	A1-H9
有曝气 aeration $2 \text{ m}^3/\text{h}$ (A2)	A2-H36	A2-H18	A2-H12	A2-H9

1.4 检测方法

$\text{NH}_4\text{-N}$:奈氏试剂法, $\text{NO}_2\text{-N}$:重氮-偶氮比色法,COD:酸性高锰酸钾法,pH:Phep HI98127型酸度计,DO和温度:YSI550A多功能溶氧仪。

2 结果

2.1 无曝气、不同水力停留时间下,浸没式生物滤器的水处理效果

无曝气、不同水力停留时间下,浸没式生物滤器的水处理效率、各指标变化及比较见表2。

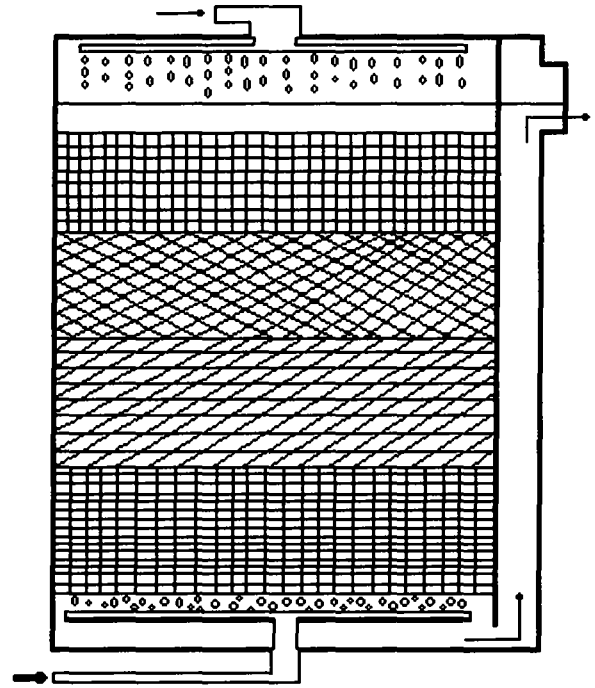


图2 浸没式生物滤器示意图

Fig.2 The main structure of the submerged bead bio-filter reactor

注:细箭头表示水流方向,粗箭头表示气流方向,不同网格表示不同滤料(从上而下分别是麦饭石、牡蛎壳、白云石和碎珊瑚)

表 2 无曝气、不同水流量浸没式生物滤器水处理效率及指标变化
Tab. 2 The water treatment efficiency and index change of submerged biological filter under different conditions without aeration

工况	NH ₄ -N 去除率(%)	NO ₂ -N 去除率(%)	COD 去除率(%)	出水 pH 变量	出水 DO 变量(mg/L)
A0-H9	21.96 ± 2.06	36.53 ± 2.41	2.75 ± 1.26	-0.1	-1.61
A0-H12	16.47 ± 2.31	48.22 ± 0.35	4.85 ± 0.09	-0.1	-2.27
A0-H18	28.77 ± 4.60	49.73 ± 3.35	2.59 ± 1.28	-0.1	-2.35
A0-H36	12.83 ± 3.63	67.20 ± 0.09	6.56 ± 0.09	-0.2	-3.53

注:去除率 = (进水口浓度 - 出水口浓度) / 进水口浓度, 出口变量 = 出水口浓度 - 进水口浓度, 水样数为 9

由以上检测指标去除效率比较分析得出,在不曝气的各工况下,浮球式生物滤器的 NH₄-N 去除率变化较大,在 A0-H18 工况下有最大平均去除率,为 28.77%, A0-H36 工况下的平均去除率最小,为 12.83%。NO₂-N 转化率随着水力停留时间的增加,有明显增加的趋势;由 A0-H9 工况下的平均 36.53% 增加到 A0-H36 工况下的平均 67.20%。COD 的平均去除率在 A0-H36 和 A0-H12 工况下较高,分别为 6.56% 和 4.85%。

由于微生物硝化耗氧,不曝气各工况下,没有空气的补充,出水溶氧有所下降,其中 A0-H36 工况下平均下降最大,达到 3.53 mg/L(进水平均溶氧 6.34 mg/L,出水 2.81 mg/L)。同时,出水口 pH 也有都所下降,当水流量最小(A0-H36 工况)时,出水 pH 比进水最多下降 0.2;其它各工况出水 pH 下降范围在 0.1 左右。

2.2 相同曝气、不同水力停留时间下,浸没式生物滤器的水处理效果

2.2.1 曝气量为 1 m³/h 各工况下浸没式滤器的水处理效果

曝气量为 1 m³/h 各工况下检测指标处理效率和比较及部分指示变化情况见表 3。

表 3 曝气 1 m³/h 各工况下浸没式生物滤器水处理效率及指标变化
Tab. 3 The water treatment efficiency and index change of submerged biological filter under different conditions with 1 m³/h aeration

工况	NH ₄ -N 去除率(%)	NO ₂ -N 去除率(%)	COD 去除率(%)	出水 pH 变量	出水 DO 变量(mg/L)
A1-H9	7.54 ± 2.16	49.30 ± 2.66	3.91 ± 0.30	0	-0.1
A1-H12	32.43 ± 3.76	56.48 ± 3.35	3.27 ± 0.38	-0.1	-0.4
A1-H18	35.33 ± 2.22	65.65 ± 4.61	4.14 ± 0.95	0.1	1.37
A1-H36	39.03 ± 4.38	71.78 ± 2.93	6.16 ± 0.98	0.1	1.63

注:去除率 = (进水口浓度 - 出水口浓度) / 进水口浓度, 出口变量 = 出水口浓度 - 进水口浓度, 水样数为 9

由以上检测指标去除效率比较可以看出,在曝气量为 1 m³/h 条件下,浸没式生物滤器在不同工况下的亚硝化、硝化效率有随水力停留时间延长而增加的趋势。NH₄-N 转化率由 A1-H9 工况下的平均 7.54% 增加到 A1-H36 工况下的平均 39.03%; NO₂-N 转化率由 A1-H9 工况下的平均 49.30% 增加到 A1-H36 工况下的平均 71.78%,可以看出,在曝气条件下,浮球式生物滤器对 NH₄-N、NO₂-N 有很好的转化效果。COD 去除率在 A1-H36 工况下最高,为平均 6.16%。

在曝气条件下,补充的溶氧部分满足了硝化微生物生化活动的需要,使出水溶氧的下降趋于缓和,随着进水流量的下降,在小水流量工况下,出水溶氧略有增加。水流量最小时(A1-H36 工况),平均出水溶氧增加 1.63 mg/L(进水溶氧平均为 4.22 mg/L,出水为 5.85 mg/L)。同时,随着水流量的减小和水中溶氧的增加,出水 pH 也略有增加,增加量范围在 0 ~ 0.1。

2.2.2 曝气量为 2 m³/h 各工况下浸没式滤器的水处理效果

曝气量为 2 m³/h 各工况下检测指标处理效率和比较及部分指示变化情况见表 4。

表4 无曝气组各工况下生化反应器进出水口各水质指标的变化情况

Tab.4 The water quality changes of biological filter reactor under different conditions without aeration

工况	NH ₄ -N		NO ₂ -N		COD		pH		DO	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
A0-H9	0.645 (0.407-0.846)	0.514 (0.306-0.668)	0.179 (0.108-0.216)	0.115 (0.065-0.141)	7.34 (6.12-8.56)	7.13 (6.03-8.19)	7.2 (7.1-7.4)	7.1 (7.0-7.3)	6.69 (6.50-6.92)	5.08 (4.73-5.76)
A0-H12	0.370 (0.366-0.375)	0.309 (0.297-0.320)	0.178 (0.168-0.189)	0.092 (0.087-0.103)	7.63 (7.54-7.72)	7.26 (7.19-7.31)	7.2 (7.2-7.2)	7.1 (7.1-7.2)	6.03 (6.02-6.04)	3.77 (3.75-3.79)
A0-H18	0.532 (0.407-0.777)	0.317 (0.304-0.503)	0.173 (0.104-0.241)	0.089 (0.048-0.131)	7.34 (6.03-8.93)	7.16 (5.76-8.75)	7.2 (6.8-7.4)	7.1 (6.8-7.2)	5.35 (4.22-6.57)	3.00 (1.51-4.40)
A0-H36	0.455 (0.453-0.457)	0.400 (0.380-0.421)	0.168 (0.157-0.178)	0.055 (0.047-0.062)	7.17 (7.07-7.21)	6.70 (6.66-6.79)	7.1 (7.1-7.1)	6.9 (6.9-6.9)	6.34 (6.32-6.35)	2.81 (2.76-2.87)

表5 曝气组各工况下生化反应器进出水口各水质指标的变化情况(1)

Tab.5 The water quality changes of biological filter reactor under different conditions with aeration(1)

工况	NH ₄ -N		NO ₂ -N		COD		pH		DO	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
A1-H9	0.455 (0.453-0.457)	0.421 (0.407-0.448)	0.168 (0.167-0.168)	0.085 (0.076-0.095)	7.17 (7.15-7.18)	6.89 (6.79-6.93)	7.1 (7.1-7.1)	7.1 (7.1-7.1)	6.34 (6.32-6.35)	6.23 (6.21-6.26)
A1-H12	0.778 (0.709-0.846)	0.526 (0.444-0.626)	0.216 (0.208-0.219)	0.094 (0.087-0.099)	8.56 (8.54-8.57)	8.28 (8.22-8.31)	7.1 (7.1-7.1)	7.0 (7.0-7.0)	6.57 (6.50-6.65)	6.17 (6.15-6.20)
A1-H18	0.836 (0.777-0.896)	0.542 (0.480-0.604)	0.241 (0.240-0.241)	0.083 (0.081-0.085)	8.93 (8.89-8.97)	8.56 (8.51-8.59)	6.8 (6.8-6.8)	6.9 (6.9-6.9)	4.22 (4.21-4.27)	5.60 (5.58-5.61)
A1-H36	0.836 (0.777-0.896)	0.506 (0.453-0.558)	0.241 (0.240-0.241)	0.068 (0.066-0.074)	8.93 (8.93-8.93)	8.38 (8.32-8.38)	6.8 (6.8-6.8)	6.9 (6.9-6.9)	4.22 (4.20-4.27)	5.85 (5.83-5.88)

表6 曝气组各工况下生化反应器进出水口各水质指标的变化情况(2)

Tab.6 The water quality changes of biological filter reactor under different conditions with aeration(2)

工况	NH ₄ -N		NO ₂ -N		COD		pH		DO	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
A1-H9	0.458 (0.453-0.467)	0.404 (0.402-0.407)	0.168 (0.167-0.168)	0.094 (0.093-0.095)	7.17 (7.11-7.20)	6.79 (6.77-6.83)	7.1 (7.1-7.1)	7.1 (7.1-7.1)	6.34 (6.32-6.35)	6.72 (6.69-6.77)
A1-H12	0.370 (0.366-0.375)	0.320 (0.316-0.325)	0.179 (0.178-0.179)	0.090 (0.0890.091)	7.58 (7.48-7.63)	7.35 (7.17-7.44)	7.2 (7.2-7.2)	7.3 (7.3-7.3)	6.03 (6.026.04)	6.67 (6.65-6.69)
A1-H18	0.424 (0.407-0.444)	0.382 (0.370-0.393)	0.173 (0.167-0.177)	0.072 (0.075-0.069)	7.12 (7.07-7.17)	6.86 (6.63-6.98)	7.3 (7.3-7.3)	7.3 (7.3-7.3)	7.08 (7.07-7.09)	7.06 (7.05-7.06)
A1-H36	0.778 (0.709-0.846)	0.565 (0.521-0.613)	0.215 (0.214-0.216)	0.054 (0.053-0.054)	8.56 (8.48-8.66)	8.14 (8.11-8.17)	7.1 (7.1-7.1)	7.2 (7.2-7.2)	6.57 (6.50-6.65)	6.79 (6.76-6.82)

注:1.各工况下的每个测试指标在各进出水口采集水样数为9,其中每3水样设为1个重复

2.实验温度 25±0.5℃

表7 曝气 2 m³/h 各工况下浸没式生物滤器水处理效率及指标变化Tab.7 The water treatment efficiency and index change of submerged biological filter under different conditions with 2 m³/h aeration

工况	NH ₄ -N	NO ₂ -N	COD	出水 pH	出水 DO
	去除率(%)	去除率(%)	去除率(%)	变量	变量(mg/L)
A2-H9	11.91±1.55	43.94±0.36	5.30±0	0	0.37
A2-H12	13.50±0.84	49.44±0.61	3.04±0.78	0.1	0.64
A2-H18	9.79±1.21	58.41±1.34	3.60±0.39	0	0.03
A2-H36	27.27±0.54	74.92±0.11	4.91±0	0.1	0.21

注:去除率=(进水口浓度-出水口浓度)/进水口浓度,出口变量=出水口浓度-进水口浓度,水样数为9

由表3看到在曝气量为 2 m³/h 各工况下,随着水力停留时间的增加,NH₄-N 去除率大体呈增加趋势,在 A2-H36 工况下有最大去除率,为 27.27%。NO₂-N 去除率随水力停留时间的增加,由 HRT 最小

的 A2-H9 工况下 43.94% 增加到 HRT 最大工况 A2-H36 下的 74.92%。COD 去除率在 A2-H9 和 A2-H36 工况下较高,分别是 5.30% 和 4.91%。

由于曝气对水中溶氧的补充,此组各工况下滤器出水溶氧都有所增加,最大增加量为 0.64 mg/L, pH 升高范围平均为 0~0.1。

2.3 在不同工况下浸没式生物滤器的水处理效果比较

不同工况下浸没式生物滤器的水处理效果比较见图 3。由以上对各工况下浸没式生物滤器水处理效果的综合比较,发现在相同曝气(或不曝气)条件下,滤器在水力停留时间最大(H36)时有最好水处理效率,NH₄-N 去除率在 A1-H36 工况下有最大值 39.04%;NO₂-N 去除率在 A2-H36 工况下最高,为 74.92%;COD 去除率的最大值也出现在最大水力停留时间下的 A0-H36 工况。

在相同水力停留时间时进行比较,发现整体硝化水平最高的是曝气量 1 m³/h(A1)各工况,在 H9、H12、H18 和 H36 各组下,A1 曝气量工况的 NH₄-N 去除率和 NO₂-N 去除率均在组内最高或处于相对较高的水平。

浸没式生物滤器对 COD 去除率在各工况下也各不相同,试验在 H36 工况下得到的 COD 去除率相应较高,在 A0-H36 工况下有最大值 6.56%。

3 讨论

本试验中最高水处理效率比实验室模拟循环水养殖系统测得结果偏低^[5],这主要是因为生产中水质变化易受到鱼类养殖生产管理情况(投饵、反冲、施用药物等)的影响,不如实验室人为控制水质容易,这也极大地影响了浸没式生物滤器等生物滤器水处理效果的稳定性^[6]。另外,生产上,养殖鱼类的残饵、粪便及生物膜脱落物质会在水中形成悬浮颗粒,它们经过滤器时会被滤料吸附,时久量多时,会堵塞滤料表面,降低生物膜传质效果和硝化效率,这也是造成生产上水处理效率低于实验室结果的原因之一,所以生产上要加强水处理单元的维护管理,滤器要定期反冲去污,以维持生物滤器高效运转。因此,在大规模商业化生产系统的设计和运行上,采用实验室取得的数据指导生产是有风险的。为保证商业化生产系统高效、稳定运行,必须对实际生产系统在正常运转情况下取得的数据进行反复论证,在参考实验室数据的基础上,用实际生产中取得的数据和经验指导大规模商业化生产系统的设计和运行参数调节。

水流与生物膜的接触机率也是影响生物滤器水处理效果的因素之一,浸没式滤器滤料体积较大,如果放置时不注意滤料的均匀性,会在滤料包间留下较大空隙,水大量从此流过时就得不到很好的净化。滤器进水的分布也要加以考虑,一般要求布水均匀、流速缓和^[7]。

滤料表面的生物膜是个复杂的微生物群落,它主要是由菌胶团、浮游藻类、鞭毛虫、变形虫、纤毛虫、线虫、蚊类幼虫等微小生物组成,所有这些微生物的数量及活动都会影响到生物滤器水质净化效果,同时它们的数量及活动也在很大程度上反过来受到系统水质变化的影响。生物滤器中生物膜稳定的微生物相很大程度上决定了滤器水处理效果的稳定性。在系统运行的每个阶段,由于生产管理活动对系统水质的影响,都会间接地影响到生物滤器的水处理效果;当水质相对稳定的阶段,生物膜上微生物种群的数目及优势种群变化就可能表现为系统三态氮及微生物总数的变化^[8-9]。

试验中最大曝气控制在 2 m³/h,这是本套系统目前在生产条件下能达到的曝气量,有人认为在一定曝气范围内提高曝气量有助于滤器的硝化,提高出水质量,也有人认为高的曝气量会抑制微生物硝化

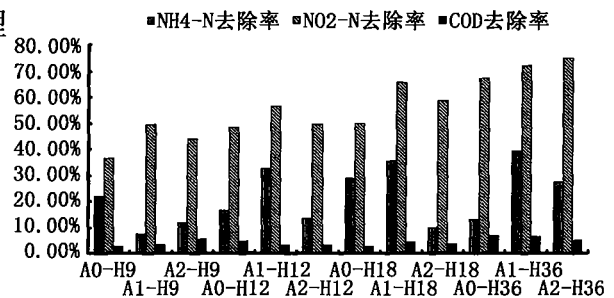


图3 各工况下浸没式生物滤器水处理效率比较
Fig.3 The comparison of water treatment efficiency of submerged biological filter under different conditions

作用的进行,降低水处理效率;是否更大曝气量下处理效率还能进一步提高,有待验证。另外系统运行成本在设施渔业生产上是需要考虑的重要因素,以后还要对各单元运行成本细化估算,寻找最经济最有效的控制点。

参考文献:

- [1] Bovendeur N M. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculation fish culture systems[J]. *Aquaculture*, 1990, 87(2): 133 - 143.
- [2] 刘艳红,罗国芝,朱学宝. 海水闭合循环系统生物滤器微生物特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(3): 443 - 445.
- [3] Huguenin J E, Colt J. Design and Operating Guide for Aquaculture Seawater Systems[M]. Elsevier, Amsterdam, 1989: 168 - 170.
- [4] Heinsbroek L T N, Kamstra A. Design and Performance of Water Recirculation Systems for Eel Culture[J]. *Aquacultural Engineering*, 1990, 9: 171 - 207.
- [5] Seo J K, Jung I H, Kim M R, *et al.* Nitrification performance of nitrifiers immobilized in PVA (polyvinyl alcohol) for a marine recirculating aquarium system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24: 181 - 194.
- [6] 罗国芝,谭洪新,朱学宝. 闭合循环水产养殖系统中生物过滤器的水处理效果研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(2): 203 - 208.
- [7] 山形阳一. 循环过滤装置的维护和管理[J]. *水产科技情报*, 1991, 18(2): 58 - 60.
- [8] 郑天凌,郑微云,王桂忠,等. 水产养殖水体细菌数量、生物量、生长速率研究方法评论及现场结果[G]//*中国鱼池生态学*, 上海:上海科学出版社, 1995: 127 - 133.
- [9] 周群英,高廷耀. *环境工程微生物学*[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.