

文章编号: 1004-7271(2005)04-0390-07

## 循环水工厂化养殖系统中浮球式生物滤器 在不同工况下的水处理效果

孙大川, 罗国芝, 谭洪新, 朱学宝, 吴嘉敏, 冯是良

(上海水产大学设施渔业研究所, 上海 200090)

**摘要:**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, 结果表明: (1) 无曝气条件下, 随着水流量的降低, 滤器的硝化效率呈增加趋势;  $\text{NH}_4\text{-N}$  转化率和  $\text{NO}_2\text{-N}$  转化率分别由水流量  $8\text{ m}^3/\text{h}$  时的 15.87% 和 23.84% 增加到水流量  $2\text{ m}^3/\text{h}$  时的 38.85% 和 71.37%; COD 去除率在  $4\text{ m}^3/\text{h}$  的水流量下最高, 达到 10.33%; 另外, 不曝气各工况下出水溶氧和 pH 有所下降。 (2) 有曝气条件下, 滤器水处理效率随水流量降低而增加;  $\text{NH}_4\text{-N}$  转化率和  $\text{NO}_2\text{-N}$  转化率分别由水流量  $8\text{ m}^3/\text{h}$  时的 6.45% 和 51.45% 增加到水流量  $2\text{ m}^3/\text{h}$  时的 32.67% 和 93.36%; COD 去除率在水流量  $4\text{ m}^3/\text{h}$  下最高, 为 12.20%; 有曝气各工况下出水溶氧和 pH 都有所增加。 (3) 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。 (4) 对试验中各工况的日水处理效果进行比较, 认为有曝气条件下水流量维持在  $6\text{ m}^3/\text{h}$  为适合生产的最佳工况。

**关键词:** 循环水工厂化水产养殖系统; 不同工况; 水处理效果; 浮球式生物滤器

中图分类号: S 969.32 文献标识码: A

### Study on the water treatment efficiency of floating bead biological filter under different working conditions based on the recirculating aquaculture system

SUN Da-chuan, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, ZHU Xue-bao, WU Jia-min, FENG Shi-liang  
(Research Institute of Engineering-Aquaculture, 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 well 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 floating bead biological filter under different conditions are compared. The results indicated that: (1) Without aeration, the nitrification efficiency of the floating bead biological filter is increased along with the reducing of the water influent; The removal rates of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_2\text{-N}$  are increased from 15.87% and 23.84% at  $8\text{ m}^3/\text{h}$  influent to 38.85% and 71.37% at  $2\text{ m}^3/\text{h}$  influent respectively; The best removal rate of COD is 10.33% when the influent reaches  $4\text{ m}^3/\text{h}$ ; Additionally, without aeration, the DO and pH of the outlet water from floating bead biological filter all have a little decrease. (2) Under the conditions with aeration, the water treatment efficiency also increased along with the reducing of the water influent; The removal rate of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_2\text{-N}$  are increased respectively from 6.45% and 51.45% at  $8\text{ m}^3/\text{h}$

收稿日期: 2005-04-20

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]

作者简介: 孙大川(1981-), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 专业方向为设施渔业水处理工艺。E-mail: dachuans@sohu.com

influent to 32.67% and 93.36% at 2 m<sup>3</sup>/h influent; The best removal rate of COD reaches 12.20% when the influent is 4 m<sup>3</sup>/h; The DO and pH of outlet water from the filter have some increase under these conditions with aeration. (3) The comparison of the conditions without aeration to the conditions with aeration indicates that the water treatment efficiency under conditions with aeration is superior to that without aeration. (4) The comparison of the water treatment efficiency under all conditions shows that the 6 m<sup>3</sup>/h influent with aeration is the optimum working condition for fish cultivation.

**Key words:** recirculating aquaculture system; different working conditions; water treatment efficiency; floating bead biological filter

闭合循环水产养殖系统是水产养殖学、微生物学、环境科学、信息与计算机科学等多学科交叉的产物,具有高产、高效、节水、不污染环境等生产优越性,是现代化水产养殖业发展的主要方向之一<sup>[1]</sup>。养殖废水的处理与循环利用是循环水超高密度工厂化水产养殖系统的最主要特点。通过高效的水处理单元保持养殖用水的循环利用,是维持生产正常进行的核心技术,其中生物过滤对控制整个系统中的 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度起着关键作用<sup>[2]</sup>。浮球式生物滤器(Floating bead biological filter reactor)多以经过特殊处理的 PVC 球作为填料,供微生物附着和提供生化反应场所,氧化去除或吸附水体中的 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、COD、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、小颗粒 SS 等养殖废水中有害或多余物质。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。目前国内外关于各种生物滤器水处理效果已多有报道,但大多是在实验室内模拟循环水养殖系统,缺乏直接以生产系统为对象的研究,与实际生产中水处理效果有很大差距<sup>[3-5]</sup>。国内闭合循环水产养殖系统生产规模上相关生物滤器在不同工况下水处理效果尚未见报道。

## 1 材料与方方法

### 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工厂化养殖系统。该系统占地 1500 m<sup>2</sup>,其中单个生产系统中养殖面积 250 m<sup>2</sup>,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。每个生产系统配置 2 个并联运行的浮球式生物滤器,其结构示意图 2,规格:滤料为 PVC 小球,容积为:4 m<sup>3</sup>,水流量、曝气量均可控。

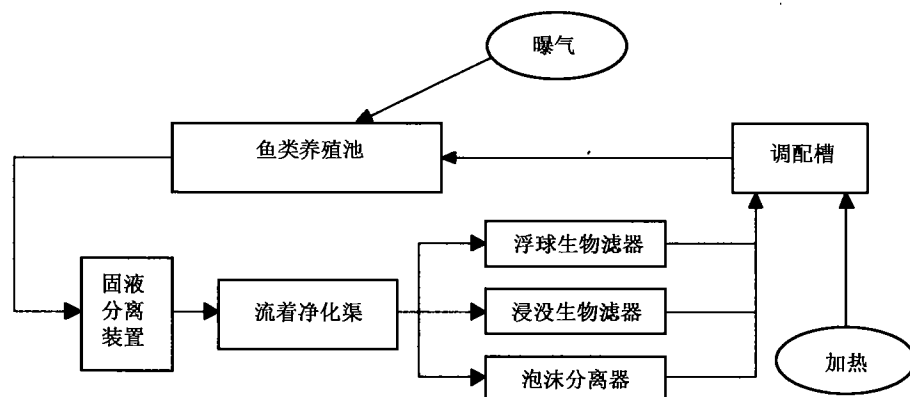


图 1 系统结构配置

Fig.1 Structure of system

## 1.2 养殖品种及日常管理

系统养殖品种为澳洲宝石鱼 (Jade perch), 放养密度为 50 尾/米<sup>3</sup> (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。养殖水温维持在 (25 ± 0.5) °C。

## 1.3 实验设计

在系统稳定的生产阶段, 选取同一生产系统并联运行的 2 个浮球式生物滤器, 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。工况设计如表 1 所示:

两个浮球式生物滤器, 其中一个曝气阀关闭, 设为无曝气水平; 另外一个调节曝气阀, 使曝气量水平控制在 2 m<sup>3</sup>/h; 水流量设有 2 m<sup>3</sup>/h、4 m<sup>3</sup>/h、6 m<sup>3</sup>/h 和 8 m<sup>3</sup>/h 四个水平, 在试验中各浮球式生物滤器的水流量分别按由大到小的顺序进行调节; 两参数进行交叉组合, 得到表 1 所列的 2 组 8 个工况。

由于系统生物滤器数量有限, 要保证系统的正常生产不受实验影响, 一个浮球式滤器会承担多个工况的测定。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。

测定指标: NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、COD、pH、DO 和温度。

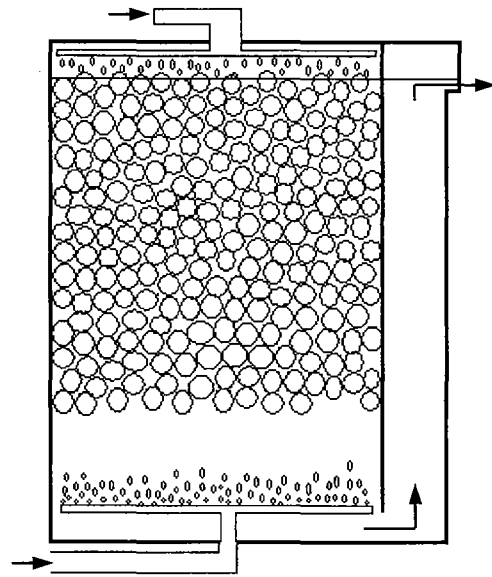


图 2 浮球式生物滤器示意图

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

注: 细箭头代表水流, 粗箭头代表气流

表 1 试验中不同工况的设计

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

水流情况 \ 曝气情况	水流情况			
	水流量 2 m <sup>3</sup> /h (W2)	水流量 4 m <sup>3</sup> /h (W4)	水流量 6 m <sup>3</sup> /h (W6)	水流量 8 m <sup>3</sup> /h (W8)
无曝气 aeration 0 m <sup>3</sup> /h (A0)	A0-W2	A0-W4	A0-W6	A0-W8
有曝气 aeration 2 m <sup>3</sup> /h (A)	A-W2	A-W4	A-W6	A-W8

## 1.4 检测方法

NH<sub>4</sub>-N: 奈氏法, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N: 重氮-偶氮比色法, COD: 酸性高锰酸钾法, pH: Phep HI 98127 型酸度计, DO 和温度: YSI550A 多功能溶氧仪。

## 2 结果

### 2.1 在无曝气、不同水流量条件下, 浮球式生物滤器的水处理效果

在无曝气条件下, 各工况水处理效率及比较、各指标变化情况见表 2、表 3:

表 2 无曝气各工况下浮球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 floating bead biological filter under different conditions without aeration

工况	NH <sub>4</sub> -N 去除率	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N 去除率	COD 去除率	出水 pH 变量	出水 DO 变量(mg/L)
A0-W8	15.87%	23.84%	3.54%	-0.1	-0.8
A0-W6	12.86%	25.45%	8.05%	-0.1	-0.9
A0-W4	14.39%	47.87%	10.33%	0	-0.57
A0-W2	38.85%	71.37%	4.14%	0	-1.04

注:1. 检测指标去除率 = (进水口浓度 - 出水口浓度)/进水口浓度, 出口指标变量 = 出水口浓度 - 进水口浓度。

2. 以上去除效率及指标变化均为平均值。

表 3 无曝气组各工况下流化床进出水口各水质指标的变化情况

Tab.3 The water quality changes of fluidized bed reactor under different conditions without aeration

工况	NH <sub>4</sub> -N(mg/L)		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N(mg/L)		COD(mg/L)	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水
A0-W8	0.381 (0.352~0.425)	0.320 (0.293~0.357)	0.096 (0.074~0.113)	0.074 (0.055~0.090)	6.93 (7.05~6.30)	6.69 (5.94~7.18)
A0-W6	0.520 (0.508~0.530)	0.453 (0.448~0.457)	0.209 (0.205~0.216)	0.156 (0.150~0.167)	7.89 (7.72~8.00)	7.25 (7.24~7.26)
A0-W4	0.378 (0.375~0.380)	0.323 (0.316~0.329)	0.175 (0.166~0.187)	0.091 (0.087~0.096)	7.26 (7.18~7.29)	6.51 (6.50~6.53)
A0-W2	0.836 (0.777~0.896)	0.508 (0.466~0.549)	0.241 (0.238~0.244)	0.069 (0.067~0.072)	8.93 (8.87~8.95)	8.56 (8.51~8.69)

工况	pH		DO(mg/L)	
	进水	出水	进水	出水
A0-W8	7.3 (7.3~7.4)	7.2 (7.2~7.2)	6.03 (5.23~6.83)	5.23 (4.98~5.39)
A0-W6	7.1 (7.1~7.1)	7.0 (7.0~7.0)	5.51 (5.48~5.53)	4.61 (4.59~4.64)
A0-W4	7.1 (7.1~7.1)	7.1 (7.1~7.1)	4.93 (4.84~5.02)	4.36 (4.35~4.38)
A0-W2	6.8 (6.8~6.8)	6.8 (6.8~6.8)	4.23 (4.22~4.23)	3.19 (3.16~3.22)

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, 表格上层为平均值, 下层为数值变化范围。

2. 实验温度(25±0.5)℃。

由以上检测指标变化情况及去除效率比较分析得出, 在不曝气的各工况下, 随着水流量的下降, 浮球式生物滤器的亚硝化、硝化效率有明显增加的趋势。

NH<sub>4</sub>-N 转化率由 A0-W8 工况下的平均 15.87% 增加到 A0-W2 工况下的平均 38.85%; NO<sub>2</sub>-N 转化率由 A0-W8 工况下的平均 23.84% 增加到 A0-W2 工况下的平均 71.37%。COD 去除率在 A0-W4 工况下最高, 达到平均 10.33%。

另外, 由于微生物硝化耗氧, 不曝气各工况下, 出水溶氧也有所下降, 其中 A0-W2 工况下平均下降最大, 达到 1.04 mg/L(进水平均溶氧 4.23 mg/L, 出水 3.19 mg/L)。进出水口 pH 也有所变化, 当水流量最大(A0-W8 工况)时, 出水水样 pH 比进水最多时下降 0.2; 随着水流量的下降, pH 的变化也随之缓和, 当水流量最小时(A0-W2 工况), 进出水口 pH 变化为 0。

## 2.2 在相同曝气、不同水流量条件下, 浮球式生物滤器的水处理效果

有曝气各工况下检测指标处理效率比较及指示变化情况见表 4、表 5。

表4 有曝气各工况下浮球式生物滤器水处理效率及指标变化

Tab.4 The water treatment efficiency and index change of floating bead biological filter under different conditions with aeration

工况	NH <sub>4</sub> -N 去除率	NO <sub>2</sub> -N 去除率	COD 去除率	出水 pH 变量	出水 DO 变量(mg/L)
A-W8	6.45%	51.45%	4.06%	0.1	0.94
A-W6	22.30%	64.67%	6.36%	0.2	2.17
A-W4	11.65%	85.31%	12.20%	0.4	2.69
A-W2	32.67%	93.36%	5.15%	0.5	3.28

注:1. 检测指标去除率 = (进水口浓度 - 出水口浓度)/进水口浓度, 出口指标变量 = 出水口浓度 - 进水口浓度。

2. 以上去除效率及指标变化均为平均值。

表5 有曝气组各工况下流化床进出水口各水质指标的变化情况

Tab.5 The water quality changes of fluidized bed reactor under different conditions with aeration

工况	NH <sub>4</sub> -N(mg/L)		NO <sub>2</sub> -N(mg/L)		COD(mg/L)	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水
A-W8	0.396 (0.370~0.425)	0.371 (0.348~0.407)	0.095 (0.076~0.107)	0.046 (0.038~0.052)	6.87 (6.03~7.54)	6.84 (6.39~7.36)
A-W6	0.523 (0.512~0.535)	0.406 (0.384~0.421)	0.212 (0.209~0.214)	0.075 (0.074~0.076)	8.05 (7.82~8.19)	7.54 (7.44~7.63)
A-W4	0.378 (0.375~0.380)	0.334 (0.329~0.338)	0.175 (0.166~0.187)	0.026 (0.025~0.026)	7.28 (7.24~7.36)	6.39 (6.24~6.70)
A-W2	0.836 (0.777~0.896)	0.565 (0.485~0.645)	0.241 (0.238~0.244)	0.016 (0.015~0.018)	8.93 (8.91~8.96)	8.47 (8.46~8.49)

工况	pH		DO(mg/L)	
	进水	出水	进水	出水
A-W8	7.3 (7.3~7.4)	7.4 (7.3~7.5)	6.24 (5.70~7.01)	7.18 (6.49~7.58)
A-W6	7.1 (7.1~7.1)	7.3 (7.3~7.3)	5.48 (5.38~5.57)	7.65 (7.63~7.67)
A-W4	7.1 (7.1~7.1)	7.5 (7.5~7.5)	5.05 (5.03~5.07)	7.74 (7.71~7.78)
A-W2	6.8 (6.8~6.8)	7.3 (7.3~7.3)	4.22 (4.22~4.23)	7.51 (7.50~7.51)

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, 表格上层为平均值, 下层为数值变化范围。

2. 实验温度(25±0.5)℃。

由以上检测指标变化及去除效率比较可以看出,在曝气工况条件下,浮球式生物滤器的亚硝化、硝化效率也有随水流量降低而增加的趋势。NH<sub>4</sub>-N 转化率由 A-W8 工况下的平均 6.45% 增加到 A-W2 工况下的平均 32.67%; NO<sub>2</sub>-N 转化率由 A-W8 工况下的平均 51.45% 增加到 A-W2 工况下的平均 93.36%,可以看出,在曝气条件下,浮球式生物滤器对 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 有很好的转化效果。COD 去除率在 A0-W4 工况下最高,达到平均 12.20%。

在曝气条件下,补充的溶氧不但满足了硝化微生物生化活动的需要,还使出水溶氧得以增加。在一定曝气量下,随着进水流量的下降,出水溶氧增加量呈上升趋势。水流量最小时(A-W2 工况),平均出水溶氧增加量达到 3.29 mg/L(进水溶氧平均为 4.22 mg/L,出水为 7.51 mg/L)。同时,出水 pH 得以增加,增加量也随水流量的减小而呈上升趋势,最小工况(A-W2)时平均增加量最大。

### 2.3 在不同工况下浮球式生物滤器的水处理效果比较

不同工况下浮球式生物滤器的水处理效果比较见图 3。各种工况下, NH<sub>4</sub>-N 去除率随着水流量的减小呈上升趋势。NH<sub>4</sub>-N 去除率最小的是 A-W8 工况,只有 6.45%;去除率最大的是 A0-W2 工况,达到

38.85%。相同水流量下进行比较,发现无曝气工况的  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除效率总体上略大于曝气工况,这点与以往学者研究硝化效率和 DO 关系所得结果相悖<sup>[6]</sup>。

$\text{NO}_2\text{-N}$  去除率随水流量的减小呈明显上升趋势。在 A0-W8 工况下,  $\text{NO}_2\text{-N}$  去除率最小,只有 23.84%; 而 A-W2 工况下,  $\text{NO}_2\text{-N}$  去除率达到最大的 93.36%。另外,在相同水流量下进行比较,每组曝气工况的  $\text{NO}_2\text{-N}$  去除效率都要比相应无曝气工况提高近 20 个百分点。

浮球式生物滤器对 COD 去除率在各工况下也各不相同,试验在 W4 工况下得到的 COD 去除率均为相应组最高,分别是 A0 组的 10.33% 和 A 组的 12.20%。

#### 2.4 浮球式生物滤器在生产上的最佳水处理工况

由以上试验结果比较得出;在有曝气条件下,各工况不但整体硝化效率要优于无曝气条件下的各工况,而且可以提高水体 pH,增加水中溶氧,这些对养殖环境都是有益的。试验中最佳水处理效率都是在水流量较小工况下得到的,这在生产上并不是适合运作的工况,水流量的限制也限制了单位时间内的去除总量,运行效率未必最高,因为设施渔业要考虑到运行成本,要求在能耗最少的基础上使系统运行效率最高。下面假设浮球式生物滤器进水  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、COD 的浓度在一天内变化不大,都能维持在分别为  $x \text{ mg/L}$ 、 $y \text{ mg/L}$ 、 $z \text{ mg/L}$  的水平,且各工况下滤器一天内对检测指标的处理效率不变,得滤器一天内对检测指标的去除量估算见表 6:

表 6 有曝气各工况下浮球式生物滤器一天内对检测指标的去除量

Tab.6 The one day's wastes removal of floating bead biological filter under different conditions with aeration

工况	$\text{NH}_4\text{-N}$ 去除量 (mg/d)	$\text{NO}_2\text{-N}$ 去除量 (mg/d)	COD 去除量 (mg/d)
A-W8	12384x	98784y	7795z
A-W6	32112x	93125y	9158z
A-W4	11184x	81898y	11712z
A-W2	15682x	44813y	2472z

注: 检测指标去除量 = 处理效率 × 水中指标检测浓度 × 每小时水流量 × 24 h

上表是对有曝气各工况下浮球式生物滤器在一天内检测指标去除量的比较。比较发现, A-W6 工况一天内各项指标去除量均位于前列,综合处理效率最优于其它各工况,是应用于生产中的最佳水处理工况。

### 3 讨论

试验结果表明,浮球式生物滤器在循环水养殖生产上有良好的水质净化效果。试验中最高硝化达到 93.36%,接近实验室模拟循环水养殖系统得到的结果<sup>[7]</sup>,但总体处理水平比实验室模拟结果偏低,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,这也极大地影响了浮球式生物滤器等生物滤器水处理效果的稳定性<sup>[8]</sup>。生产上,养殖废水中含有少量的悬浮颗粒,这些颗粒可以被滤器滤料小球吸附,在表面堆积,这也会使生物滤器的水处理效率降低,所以,在生产上,要对滤器定期反冲,以维持滤器良好的水处理效果。另外,浮球式生物滤器所使用的滤料多为 PVC 小球,作为硝化微生物的生长载体有质轻、冲洗方便等优点,但缺乏缓冲性能,遇到水质 pH 剧烈变化的情况,往往受到的影响也大;而一些以矿质材料为微生物载体的滤器虽然轻便不足,但滤料优良的理化质地使这些滤器可以经受水质 pH 的变化而保持相对稳定的硝化

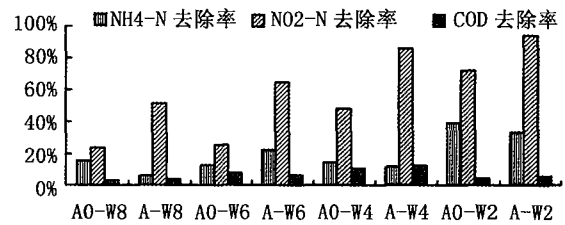


图 3 各工况下浮球式生物滤器水处理效率比较  
Fig.3 The comparison of water treatment efficiency of floating bead biological filter under different conditions

性能,所以在生产上将两种或两种以上的生物滤器配合使用往往会收到更好的水处理效果。

研究表明:在一定范围内,硝化效率会随 DO 升高而增加,但两者之间并不存在线性关系,DO 超过一定范围也会成为硝化作用的限制因素。本实验中将相同水流量的工况进行比较,发现无曝气工况  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除效率总体上大于曝气工况,与以往一些学者实验室研究结果相悖,这也可能是由生产上造成滤器工作效率不稳定的因素形成,如:进水 DO 含量变化、进水指标物质浓度变化、生物膜新老交替等。

生物滤器的生物膜是一个复杂的微生物体系,硝化细菌与反硝化细菌同时存在,一定的环境条件下,会发生相应的生物化学反应。尽管生产上滤器进水 DO 一般能在 4 mg/L 以上,但由于硝化作用耗氧,布水、曝气的不均匀性,滤器内部总会形成一定程度的缺氧区域,当  $\text{DO} < 2 \text{ mg/L}$  时,DO 可以成为硝化反应的限制因素<sup>[9]</sup>,这就给同步反硝化脱氮创造了良好的条件。同时,生物膜内部微生态环境中的厌氧区域也在不停地进行着反硝化作用<sup>[6]</sup>。厌氧区域中,硝化作用生成的硝酸盐在反硝化微生物的作用下,以有机物为碳源,发生脱氮作用,其释放的碱度可以在一定程度上弥补亚硝化、硝化作用所消耗的碱度,从而起到维持水中  $\text{H}^+$  与  $\text{OH}^-$  浓度相对平衡的作用。这种现象也是养殖系统在生物滤器正常运作的情况下,不需要额外添加碱性物质,却能维持系统养殖水体 pH 相对稳定的原因之一。在生产上,滤器出水 pH 值的变化还会因工况、水质情况、滤器运行状态等因素的不同而发生变化,但只要滤器维护得当,运作正常,一般均能保持在相对稳定的范围之内。

#### 参考文献:

- [1] 北京市水产研究所. 工厂化——中国农村创新的探索与实践[M]. 北京:科技出版社,1999. 120-131.
- [2] Nijhof M, Bovendeur. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculation fish culture systems[J]. *Aquaculture*, 1990, 87(2): 133-143.
- [3] 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.
- [4] Huguenin J E. Design and Operating Guide for Aquaculture Seawater Systems[M]. Amsterdam Elsevier, 1989. 168-170.
- [5] Heinsbroek L T N, Kamstra A. Design and performance of Water Recirculation Systems for Eel Culture[J]. *Aquacultural Engineering*, 1990, 9: 171-207.
- [6] 邹联沛,张立秋,王宝贞,等. MBR 中 DO 对同步硝化反硝化的影响[J]. 2001, 17(6): 10-14.
- [7] Jae Koan Seo, Il Hyong Jung, Mi Ryung Kim, et al. Nitrification performance of nitrifiers immobilized in PVA (polyvinyl alcohol) for a marine recirculating aquarium system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24: 181-194.
- [8] 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(002): 203-208.
- [9] 王淑莹,曾薇,董文艺,等. SBR 法短程硝化及过程控制研究[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(10): 1-5.