

文章编号:1000-0615(2005)04-0578-05

研究简报·

双层浮球生物滤器设计及其水产养殖水处理性能试验

曹广斌, 蒋树义, 刘永, 韩世成, 陈中祥

(中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150070)

关键词: 浮球; 生物滤器; 水产养殖; 处理性能

中图分类号: S969 文献标识码: A

Study on design and performance of two-layer floating bead biofilter for recirculating aquaculture system

CAO Guang-bin, JIANG Shu-yi, LIU Yong, HAN Shi-cheng, CHEN Zhong-xiang

(Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Harbin 150070, China)

Abstract: Based on the filtration of sand filter bed, a solid and nitrification biofilter of floating plastic bead was designed and tested. In the biofilter, the bead was layered automatically in water according to the size and gravity of plastic bead. With two types of diameter 5 mm gravity 0.94 and diameter 2 mm gravity 0.5 beads, the biofilter performed well in solid separation and ammonia nitrification. The bead filter performances were tested in a recirculating aquaculture system. When pump power was 0.75 kW and flow quantity was $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, the recirculating culture system could support 10 m^3 water in culture density of $16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ *Amur sturgeon*. Suspended solid filtering rate was 90% and ammonia nitrification capacity was $149 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Within water exchanged period of two weeks, the water quality was as following, SS $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ammonia $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Nitrite $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and Nitrate $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. After 15 days' culture, fish survival rate was 99% and growth rate was 50%. The experiment result showed that the bead biofilter could meet the need of recirculating aquaculture system in solid separation and ammonia nitrification.

Key words: bead; biofilter; aquaculture; treatment performance

工厂化水产养殖水体的处理主要包括增氧、分离(分离固体物和悬浮物)、生物过滤(降低 BOD、氨氮和亚硝酸盐)、曝气(去除二氧化碳等)和杀菌消毒等处理过程。其中,悬浮物和氨氮去除是主要技术难点^[1]。自 20 世纪 80 年代,各国学者深入研究了固定滤床和流化滤床、喷淋滤床和浮球生物滤器(bead filter)等悬浮物和氨氮综合处理装置的性能^[2-6]。由于浮球生物滤器(bead filter)的球形塑料滤料具有比面积大、流体阻力小、易反冲等特点,受到研究者的极大关注。研究表明,浮球生物滤器有很好的悬浮物和氨氮处理效果,可过滤 79% 的 $30 \mu\text{m}$ 以下的悬浮物,氨氮的转化率为 $330 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 饵料负荷能力为 $32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[6-8]。但是,由于养殖水体中的悬浮物具有结块的特性,为了防止反冲时的堵塞和有较好的过流量,浮球生物滤器需要频繁的反冲清洗^[6,9,10]。应用中不仅浪费

水源,而且限制罐底滤网网目的大小和浮球尺寸的设计。为了解决上述问题,我们设计、研制了双层浮球生物滤器,并对其处理性能进行了测试。

1 材料与方法

1.1 双层浮球生物滤器的结构原理

结构 双层浮球生物滤器采用 5 mm 比重为 0.94 和 2 mm 比重 0.5 的两种塑料球作为过滤介质,其结构见图 1。主要由罐体、球形滤料、控制阀门、滤网、反冲喷头和进排水管路等组成。

工作原理 生物滤器工作时,排污控制阀 1 和反冲控制阀 13 关闭,进水控制阀 12 打开,污水泵 14 通过与养殖池连接的管路 15 抽吸养殖排水,经进水管 11 进入罐体,柱形罐内比重小于水、不同直径和比重的塑料过滤球

收稿日期:2004-10-11

资助项目:科技部科研院所社会公益研究专项基金项目“我国内陆冷水性鱼类资源调查与设施渔业养殖技术研究”(2003-2005)

作者简介:曹广斌(1957-),男,山东金乡人,研究员,主要从事渔业工程方面的研究。Tel:0451-84861943, E-mail:laocao@hotmail.com

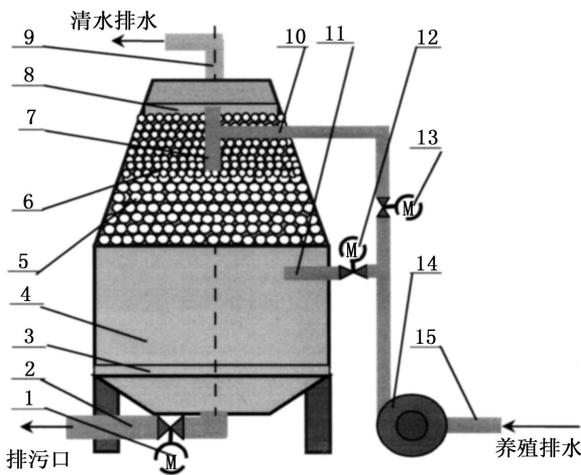


图1 双层浮球生物滤器的结构

Fig. 1 Structure chart of two-layer bead biofilter

- 1. 排污控制阀; 2. 排污管; 3. 粗筛网; 4. 罐体; 5. 滤球; 6. 细滤球; 7. 反冲喷水管; 8. 细滤网; 9. 排水管; 10. 反冲水管; 11. 进水管; 12. 进水控制阀; 13. 反冲控制阀; 14. 污水泵; 15. 连接管
- 1. discharge valve; 2. waste discharge pipe; 3. crude screen; 4. tank; 5. large plastic bead; 6. small plastic bead; 7. backwashing spray pipe; 8. microscreen; 9. water discharge pipe; 10. backwashing pipe; 11. inlet pipe; 12. inlet water valve; 13. backwashing valve; 14. water pump; 15. joint pipe

逐渐上浮,在浮力和流体阻力的作用下,体积大、比重大的过滤球分布于下部,体积小、比重小的过滤球分布于上部,从而在锥形罐内形成两层过滤层。过滤过程中,大比重的固体颗粒在罐内圆柱体部分沉淀,经粗筛网3进入罐体底部,比重小的悬浮物由过滤层过滤。清水经细筛网8和水管9排入养殖罐。滤层在过滤悬浮物的同时,塑料球表面

生长硝化菌对水中的氨氮进行硝化处理。当各层过滤球之间形成的空间逐渐被污物堵塞时,水流阻力增大、压力增大、流量减少,控制系统控制各个电磁阀进行反冲。反冲时,阀1、13打开,阀12关闭,反冲水经反冲水管10,由喷水管7冲洗细筛网和过滤层浮球,喷水管7、电磁阀1和排水管2控制反冲流量为排出流量的1/2以上。由此,水位逐渐下降,过滤层浮球也逐渐下降,浮球在锥形罐体和反冲水流的作用下,不断改变垂向和径向位置,在罐内得到充分冲洗。反冲污物通过粗筛网3进入罐体底部,经污水管从排污口排出、聚集。当过滤球到达罐体底部粗筛网时,控制系统关闭1、13电磁阀,打开12电磁阀,重新开始养殖水体的过滤。

1.2 处理性能试验

养殖水处理试验的内容包括过滤悬浮物处理能力、氨氮转化的能力、过滤悬浮颗粒的大小、反冲时间和用水量。

试验设备与材料 试验在一个由8个饲养罐组成的室内循环养殖系统中进行,试验流程见图2。功率为0.75 kW、流量为20 t h⁻¹的水泵从回水槽内抽水,经过阀6把水泵入生物滤器,过滤后的水经过阀3分配到8个养鱼罐中。罐内的养殖水体在水压差的作用下,从底部排出,通过管路进入回水槽,形成循环使用的回路。反冲时,泵出的水经过阀2进入生物滤器的喷水管,反冲污水经过阀5由排水口入污水池沉淀。阀1是补水阀;阀4是养殖水体排放阀。

试验中根据pH值变化,在回水槽加入NaOH和NaHCO₃使pH值保持在7~8之间;在回水槽和养鱼罐设置充气棒增氧,使溶解氧保持5 mg L⁻¹以上;在回水槽设置加热和控温器,使水温保持15 ± 1。过滤器在试验前,低温挂膜运行了20 d。

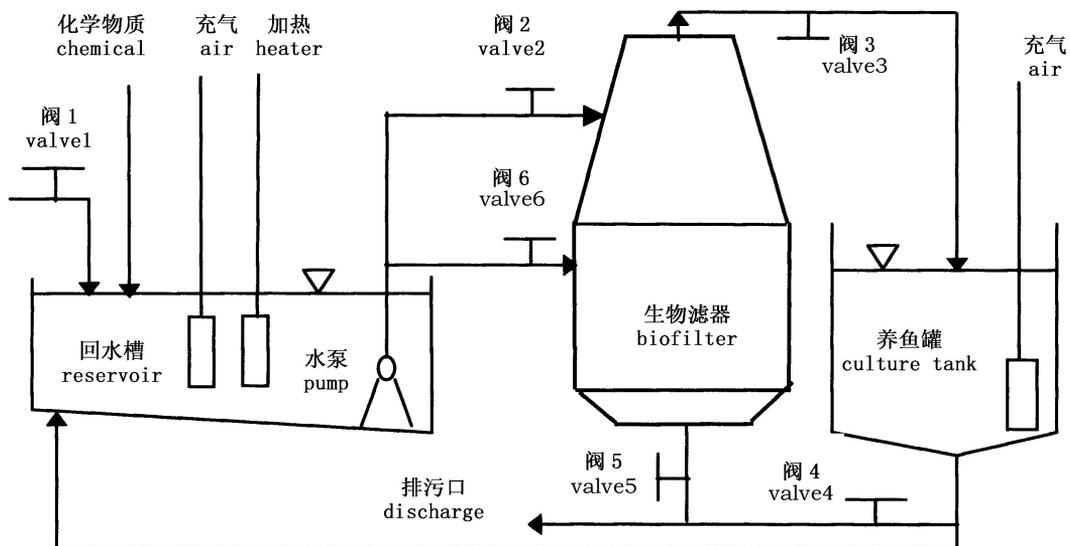


图2 浮球生物滤器循环养殖性能试验流程

Fig. 2 The chart of treatment performance for bead filter recycle system

图中单个养鱼罐直径为 1.6 m, 水深 0.5 m, 水体 1.0 m³; 过滤罐容积为 1.3 m³, 过滤球为 0.6 m³, 水体 0.7 m³; 回水槽水体 1.2 m³; 加入循环管路中的水体, 循环水总量约为 10 m³。

试验用鱼为施氏鲟 1 龄鱼种, 平均体重为 100 g。每个罐内放入 100 尾施氏鲟, 总计 800 尾、总重 80 kg。试验时间为 4 月 8 日 - 22 日。在试验过程中日食量按 3% 体重的量, 投喂含蛋白 45% 的饲料, 每天的投喂量根据饵料系数(按饵料系数 1.0 计算)计算鱼体的总重量而确定。每天分 9:00、14:00 和 19:00 3 次投喂。

为了确定试验鱼类的排泄情况, 根据 Cho 等^[11]、Simon 和 Cripps^[12]的试验方法, 设置 2 个对照养殖罐, 每个罐内放入与试验鱼同等规格施氏鲟 30 尾。养殖水体 1.0 m³, 原池循环和增氧; 投喂量和时间与试验组相同。

试验方法 每天 8:00 投喂饵料前, 在 8 个试验罐的入水口任意采取两个水样, 一个平行样; 在 2 个对照罐各取一个水样, 一个平行样。pH 值采用玻璃电极法, 符合 GB 6920 - 86 标准; 溶解氧采用碘量法, 符合 GB 7489 - 87 标准; 氨氮采用纳氏试剂比色法, 符合 GB 7481 - 87 标准; 硝酸盐采用酚二磺酸分光光度法, 符合 GB 7480 - 87 标准; 亚硝酸盐采用分光光度法, 符合 GB 7493 - 87 标准; 悬浮物采用重量法, 符合 11901 - 89 标准。悬浮物最大颗粒度采用把水样用滤纸过滤浓缩悬浮颗粒, 水洗至烧杯内, 再取少量用显微镜目微尺测定的办法。反冲用水量的多少, 采用计时秒表计量反冲时间, 反冲水集中在沉淀池测量体积的方法确定。

2 结果与讨论

2.1 养殖效果

试验罐养殖 15 d, 投饵 44.5 kg, 鱼增重 45.0 kg, 养殖密度 16 kg·m⁻³, 成活率 99%, 饵料系数约为 1.0, 与试验设计基本一致。悬浮物和氨氮处理效果符合封闭循环式水产养殖试验设计要求。

对照组养殖 3 d, 投饵 0.2 kg, 成活率 100%, 在非离子氨达到 0.049 mg·L⁻¹, 接近极限标准 (0.05 mg·L⁻¹)^[13]时终止。

2.2 悬浮物处理效果

悬浮物处理试验结果见表 1。对照组 3 d 后, 悬浮物由 8 mg·L⁻¹ 增加到 44 mg·L⁻¹, 悬浮物的排泄率为 18% (1 kg 饲料排泄 0.18 kg 悬浮物)。

表 1 中悬浮物处理效率可用下述公式计算:

$$ss = \frac{W_{ss} - \frac{1}{1000}V(s_s - s_0)}{W_{ss}} \quad (1)$$

其中, ss 表示悬浮物处理效率(%); W_{ss} 表示悬浮物累积排泄量(kg); V 表示循环水体积(m³); s_s 表示悬浮物的最终浓度(mg·L⁻¹); s_0 表示悬浮物开始浓度(mg·L⁻¹)。

由表 1 的数据可见, 悬浮物处理效率随着时间的不同在 72% ~ 90% 之间呈现不规则变动。第 7 天反冲后, 悬浮物浓度大幅下降。之后, 随着负荷、残留浓度和时间的增加, 处理效率有提高的趋势, 并稳定在 90%。试验中处理悬浮物的最大效率为 90%; 悬浮物最大残留颗粒为 19 ~ 30 μm。

表 1 试验期间投饵量、悬浮物负荷、残留量、最大颗粒和处理效率数据

Tab. 1 Data of feed load, suspension load, left concentration, size and treatment efficiency in experiment

项目 items	试验时间(d) time														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
投饵量(kg) Feed load	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
悬浮物排泄量(kg) SS load	0.43	0.45	0.45	0.47	0.48	0.50	0.52	0.52	0.54	0.56	0.58	0.59	0.60	0.63	0.65
悬浮物残留(mg·L ⁻¹) SS left	18	28	37	49	58	72	86	30	44	59	70	76	82	90	96
残留最大颗粒(μm) SS size	30	30	29	27	27	24	20	19	30	29	26	27	24	22	21
处理效率(%) AN	79	78	80	75	79	72	73	-	74	73	81	90	90	88	90

注: 悬浮物排泄量按投饵量的 18% 计算

Notes: the SS load was calculated as 18% of feed load

2.3 氨氮处理效果

氨氮处理的试验结果见表 2。对照组 3 d 后, 氨氮由 0.23 mg·L⁻¹ 增加到 9 mg·L⁻¹, 氨氮的排泄率为 4.2% (1 kg 饲料排泄 0.042 kg 氨氮), 氮的排泄率约为 3.3%。

表 2 中的氨氮处理的效率可以计算为:

$$AN = \frac{W_{AN} - V(A_A - A_0)}{NV_q} \quad (2)$$

其中, AN 为处理氨氮的效率(g·m⁻³·d⁻¹); W_{AN} 为氨氮累积排泄量(g); V 为循环水体体积(m³); A_A 为氨氮最终浓度(mg·L⁻¹); A_0 为氨氮开始浓度(mg·L⁻¹); N 为天数(d); V_q 为塑料球总体积(m³)。

由表 2 数据可见,试验期间氨氮处理效率随着负荷的增加逐渐提高,在 15 d 的换水周期内的最大处理能力为 $149 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$;溶解氧和 pH 值偏低时,可降低氨氮的处

理效率,因为偏低的溶解氧和 pH 值降低了硝化细菌和亚硝化细菌的生物活性,影响了转化效率。

表 2 试验中投饵量、氨氮排泄量、水中氨氮浓度、溶解氧浓度、pH 值和处理效率数据

Tab. 2 Data of feed load, ammonia load, left ammonia, DO, pH and treatment efficiency in experiment

项目 items	试验时间(d) time															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
投饵量(kg) feed load	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	
氨氮排泄量(g) AN load	101	105	105	109	113	117	121	126	126	130	134	139	142	147	151	
水中氨氮浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) dissolved AN	0.37	0.69	0.88	0.39	0.48	0.58	0.45	0.49	0.60	0.45	0.76	0.91	0.36	0.45	0.61	
溶解氧 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) DO	7.45	7.75	7.76	7.68	7.14	7.45	6.53	6.22	5.60	6.07	5.70	7.45	7.30	5.92	6.06	
pH 值	7.21	7.12	7.06	7.54	7.20	7.17	7.59	7.37	7.20	7.42	7.10	6.91	7.47	7.13	6.90	
氨氮处理效率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) AN	100	102	103	114	112	116	122	-	-	125	132	131	138	147	146	149

注:氨氮排泄量按投饵量的 4.2% 计算

Notes: the ammonia load was calculated as 4.2% of feed load

2.4 反冲时间和用水量

在生物滤器进水口装有压力表,以监测悬浮物堵塞情况。试验中压力没有明显上升,第 7 天养殖水体的悬浮物残留浓度达到 $86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进行了反冲。反冲时间 14 min,用水量 3.2 m^3 。反冲过程中没有出现堵塞和浮球乱层现象。

2.5 处理过程的副产物

硝酸盐和亚硝酸盐是处理过程的主要副产物,生物滤器中的亚硝化细菌将氨氮转化为亚硝酸盐、硝化细菌再把亚硝酸盐转化为硝酸盐。在局部缺氧的条件下,也有反硝化细菌把硝酸盐转化为氮气的处理过程。试验过程中氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐的变化见图 3 和图 4。

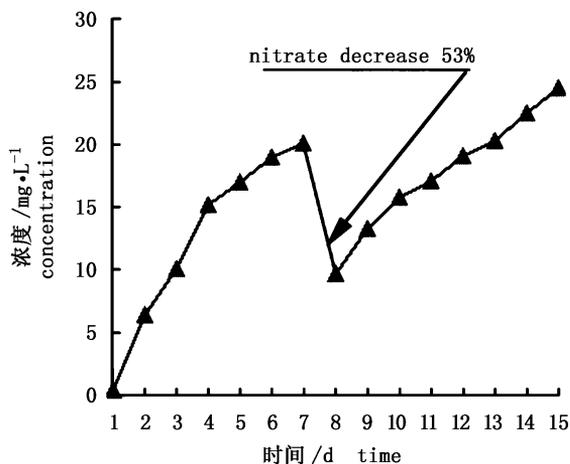


图 3 试验期间硝酸盐变化

Fig. 3 Nitrate variation in experiment

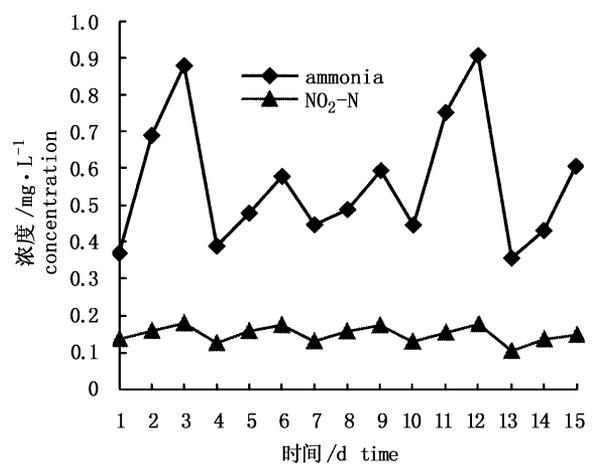


图 4 试验中氨氮与亚硝酸盐变化

Fig. 4 Variation of ammonia and nitrite

由图 3 可知,在处理过程中,硝酸盐随着氨氮负荷的增加而直线上升,在第 7 天反冲后下降了 53%,之后又直线上升,说明过滤器转化氨氮过程是硝酸盐直线积累过

程。7 d 反冲一次的最大积累浓度为 $24.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。对反冲前后硝酸盐积累的直线方程可表示为:

$$n = kt + n_0 \quad (3)$$

其中, n 为硝酸盐浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), k 为增长率 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), t 为时间 (d), n_0 为初始硝酸盐浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

由图 4 可知, 氨氮和亚硝酸盐在水体中没有积累的现象, 氨氮在 $0.36 \sim 0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化; 亚硝酸盐在 $0.11 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 变化。图 3 和图 4 的结果充分说明硝化和亚硝化细菌表现了较好的硝化性能, 把养殖鱼类排泄的氨氮转化成了对鱼类生理影响较小的硝酸盐, 从而延长了反冲和换水周期。氨氮和亚硝酸盐浓度呈现波浪变化的状态, 起伏变化的周期均为 3 d。这可能是因为在试验中根据检测 pH 值的情况, 每 3 天加一次 NaOH 和 NaHCO_3 进行 pH 调整的结果, pH 值的变化影响了硝化细菌和亚硝化细菌的生物活性, 影响了转化氨氮和亚硝酸盐的能力。

3 结论

悬浮物处理性能得到了改善 悬浮物过滤能力达到了 90%, 最大颗粒直径减小到 $19 \mu\text{m}$ 。与现有浮球滤器的 79%^[5,6,10] 的处理效率比较有了较大的改善。

反冲次数减少, 节约了水源 由于增大了底筛网尺寸, 延长了反冲的时间间隔。在 7 d 时反冲, 没有发现堵塞和过水压力增加的现象。与现有浮球滤器频繁反冲^[6-8] 相比节约了水源。

在低温下有较好的氨氮处理效果 15 温度条件下, 氨氮处理能力达到了 $149 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 与 30 温度下 $330 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[11] 的现有浮球滤器的结果比较, 仍为较好处理效果。因为微生物的最佳处理温度应为 $30 \sim 35$, 15 时其活性将降低, 硝化速度仅相当于 30 的 40% 左右^[14]。

氨氮和亚硝酸向盐硝酸盐的转化可确保养殖水质条件 运转过程中氨氮低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7.5 时非离子氨低于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝酸盐低于 $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均低于现有工厂化养殖所要求的非离子氨 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝酸盐 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平^[13]。

需采取进一步措施降低悬浮物的浓度 虽然过滤器可去除 72%~90% 的悬浮物, 但是仍有 28%~10% 积累在水中, 使悬浮物的浓度不断增加, 最后达到 $96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可采取增加细颗粒过滤层厚度、减小颗粒直径和降低流速的办法解决。

参考文献:

[1] Sahdev S, James E, Fredrick W. Water quality trials in four

recirculating aquacultural system configurations [J]. Aquacultural Engineering, 1999, 20: 75 - 84

- [2] 战培荣, 刘伟, 曹广斌, 等. 流化床生物滤器净化循环水养鱼系统的工艺与特性研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 226 - 230.
- [3] Miller G E, Libey G S. Evaluation of three filters suitable for aquaculture application[J]. World Maricult Soc, 1985, 16:158 - 168.
- [4] Rogers G I, Klemetson S I. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilter [J]. Aquacultural Engineering, 1985, 4:135 - 154.
- [5] Aurelio A, Delos Reyes Jr, Thomas B L. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system[J]. Aquacultural Engineering, 1996, 15: 27 - 39.
- [6] Balaji N S, Aurelio A, Delos R Jr, et al. Nitrification performance of a bubble-washed bead filter for combined solids removal and biological filtration in a recirculating aquaculture system [J]. Aquacultural Engineering, 1999, 19:105 - 117.
- [7] Drennan D, Golz W, Ahmed H, et al. Clarification abilities of floating bead filters used in recirculating aquaculture systems [A]. Proceedings from the Aquaculture Exposition VIII and Aquaculture Mid-Atlantic Conference [C], Washington D C, 1995. 256 - 257.
- [8] DeLos R A A Jr, Rusch K A, Malone R F. Performance of a commercial scale recirculating alligator production system employing a paddle-washed floating bead filter [J]. Aquacultural Engineering, 1997, 16 (4): 239 - 251.
- [9] MaLone R F, Chitta B S, Drennan D G. Techniques for modern aquaculture [M]. Michigan American Society of Agricultural Engineers, 1993. 315 - 325.
- [10] GoLz W, Rusch K A, MaLone R F. Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture [M]. New York, NRAES, 1996. 196 - 205.
- [11] Cho C Y, Hynes J D, Wood, K R, et al. Quantification of fish culture waste by biological and chemical method[A]. Proceedings of the First International Symposium on Nutritional Strategies in Management of Aquaculture Waste [C]. Univ Guelph, Ont, Canada 1990: 37 - 50.
- [12] Simon J, Cripps A B. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems [J]. Aquacultural Engineering, 1999, 22: 33 - 56.
- [13] Thomas M L, Michael P M, James R. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems (An Overview of Critical Considerations) [J]. SRAC Publication, 1998, 451, 1 - 6.
- [14] 李军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 374 - 383.