

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.01266

封闭循环水系统生物滤池气水比对水质净化效能的影响

黄滨¹, 雷霖霖¹, 翟介明², 周游³, 王峰⁴, 高淳仁¹, 梁友¹

1. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071

2. 山东莱州明波水产有限公司, 山东 烟台 264000

3. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003

4. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109

摘要: 通过在全封闭循环水系统中养殖半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis* Gunthe), 研究了不同气水比对曝气生物滤池净化效能, 以及对 DO、pH 值的影响。结果表明: 本试验系统在温度为(19±1)℃, 系统循环次数为 15 次, 养殖池 DO 保持在 12 mg/L 以上的运行条件下, 随着气水比由 0.75 : 1~1.50 : 1 的增加, 生物滤池氨氮的去除率由 35.0% 增加至 52.0%, NO₂-N 的去除率由 8.2% 增加至 44.6%, 气水比对硝化反应影响显著, 但对化学需氧量 COD 的去除率影响并不显著, 其平均去除率为 10.14%; pH 值有增加的趋势, 生物滤池进水口到出水口的 pH 值由 7.97 增加至 8.08; 气水比最佳运行参数为 1.25:1。同时还发现 1 级生物滤池进水口 DO 接近饱和, 1 级到末级滤池间 DO 仅降低了 10% 左右, 系统 pH 值在 7.9~8.1。本研究获参数, 可供生物膜法处理养殖循环水的条件优化作参考。

关键词: 气水比; 循环水; 多级曝气生物滤池; 净化效能

中图分类号: S965

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)06-1266-08

在海水封闭循环水养殖系统中, 多级曝气生物滤池以建设和运行费用低、处理水量大、抗冲击能力强、维护管理简单等特点而被广泛应用。曝气生物滤池 BAF(Biological aerated filter)的气水比是影响生物硝化速率和有机化合物分解速率的重要工艺参数之一。它不仅与系统能耗、运行成本有很高的关联度, 还与循环水处理系统的水质净化效能有密切的关系; 在工业与城市污水处理行业中, 气水比对工程投资和运行费用大小有很大影响。本研究通过封闭循环水系统养殖半滑舌鳎的试验, 力求找到最经济的气水比运行参数。

目前国内外对曝气生物滤池气水比的研究, 在工业污水处理和城市污水处理领域中的研究比较全面和系统。如气水比不仅为微生物的呼吸提供必须的“临界氧浓度”, 还是各种生物反应器内反应动

力学参数的重要指标^[1]。气水比大小会直接影响曝气生物滤池内 DO 浓度, DO 浓度是影响同步硝化反硝化的一个主要限制因素^[2-4]。气水比与体积容氧系数 K_{La} 成正比关系, 气水比越大, 与溶解氧浓度相关的微生物如碳化细菌、氮化细菌、硝化细菌等, 活性就会相对增强, 但当气水比过大时, 反而会影响到下一步处理效果^[5-6]。气水比的大小, 生活污水气水比一般取 3 : 1~20 : 1, 而对于一些难以降解的工业废水, 气水比可以高达 20 : 1~60 : 1。但相比之下, 在养殖循环水处理系统中, 气水比的定量研究相对缺乏, 封闭循环水养殖系统的水处理工艺与一般污水处理不仅在系统工艺与运行机制上有所不同, 水处理指标要求也有很大差别, 近年来实际生产应用中气水比多凭经验值运行。因此, 量化与优化气水比的合理配置, 不仅为养殖系统生物滤池

收稿日期: 2013-02-28; 修订日期: 2013-05-17.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003024); 鲆鲽类产业技术体系项目(CARS-50-G10).

作者简介: 黄滨(1962-), 男, 副研究员, 主要从事设施渔业研究. E-mail: huangbin@ysfri.ac.cn

通信作者: 雷霖霖, 研究员, 中国工程院院士, 博士生导师. E-mail: leijl@ysfri.ac.cn

运行工艺参数优化提供科学依据, 对我国循环水养殖节能增效也意义重大。

1 材料与方法

1.1 试验系统与试验用鱼

试验在山东莱州明波水产有限公司试验车间(图1), 采用封闭式循环水养殖系统, 养殖半滑舌鲷试验。系统水体交换率为18次/d。

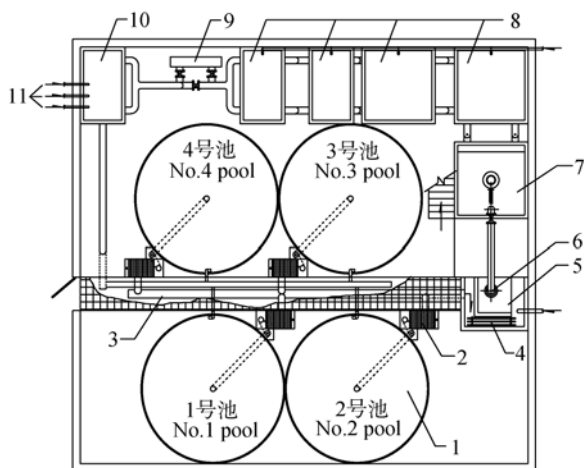


图1 封闭循环系统生物滤池试验车间平面布置图

1. 养殖池, 2. 弧形筛, 3. 回水主管道, 4. 前置紫外线装置, 5. 缓冲调节泵池, 6. 循环水泵, 7. 气浮净化池, 8. 多级曝气生物滤池, 9. 后置紫外线装置, 10. 终端水质优化池, 11. 纯氧、臭氧、汽加热添加管路

Fig. 1 Fish greenhouse plan of the recirculating aquaculture system

1. fish tanks, 2. arc screen, 3. backwater main, 4. lead UV disinfection, 5. pump pool, 6. circulating water pump, 7. degassing unit, 8. biofilters, 9. rear UV disinfection, 10. dissolved oxygen pool, 11. pure oxygen, ozone, steam heating add line

试验系统: 养殖池为4个圆形中心排水的玻璃钢水池, 单池面积 15 m^2 , 养殖水深100 cm, 养殖水体 60 m^3 ; 生物滤池为4级曝气生物滤池, 总容积 60 m^3 , 第一级填装比表面积 $200\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的BIO-BLOK生物包, 第二级填装比表面积 $380\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的多孔网状生物填料(俗称方便面填料), 第三、四级填装比表面积 $100\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的立体弹性滤料。

生物滤池采用多孔管曝气方式, 曝气孔径为0.8 mm, 间距100 mm, 总供气管路上并联有2个进气空气流量计, 型号LZB-40, 一路计量新增曝气量,

另一路计量曝气量。

试验用鱼: 总共投放体质量 $(640.10 \pm 63.30)\text{ g}$, 体长 $(43.10 \pm 1.48)\text{ cm}$ 的半滑舌鲷鱼种 780 尾, 分别按1号池240尾、2号池210尾、3号池180尾、4号池150尾不同密度布放于4个养殖池中。

1.2 封闭式循环水养殖系统工艺流程

封闭式循环水养殖系统工艺流程如图2所示。

1.3 养殖试验日常管理

试验期间每天上午8点常规监测并记录养殖池的水温、盐度 pH、DO、ORP、电导率等水质指标, 检查水泵、风机等设施设备运转情况, 根据水质变化情况进行相应调控。定时观察半滑舌鲷的摄食、活动、状态等情况, 饵料全部是进口人工配合饲料, 日投饵量是根据鱼总体质量的千分之六计量饵料量, 分2次(8:00, 20:00)投喂, 每次以饱食为准(即见到鱼群基本不再摄食时停止投喂)。每次投饵完成后30 min, 拔起养殖池插拔控制管以便及时将残饵粪便排出系统外, 实时添加因排污和蒸发所损失水量; 系统循环次数设定在15次/d, 温度 $(19 \pm 1)^\circ\text{C}$, 发现试验鱼状态不稳定时, 及时采取减少投饵次数和人为惊扰, 测定分析循环系统水质指标和细菌指数等, 尽力消除不利因素对半滑舌鲷生理与生长的影响。

1.4 试验设计

以原有的生物滤池充气量为基准, 通过调节供气管路的阀门, 从 30 m^3 开始每个梯度增加 $5\text{ m}^3/\text{h}$, 气水比设定 $0.75:1$ 、 $0.88:1$ 、 $1.00:1$ 、 $1.25:1$ 、 $1.50:1$ 等5个梯度, 每个梯度试验运行4 d, 相应测定系统水质指标(特别注意氨氮指标和 pH)和鱼的生理指标。

试验水质条件为: 水温 $(19.19 \pm 0.59)^\circ\text{C}$, 盐度 (25.46 ± 0.83) , pH (7.89 ± 0.03) 生物滤池水力停留时间为1.33 h。池中臭氧浓度最高添加量时的ORP达到389.0 mV。

试验期间, 为掌握循环水养殖系统总氨氮、亚硝酸氮和COD的变化情况, 每隔1天分别对养殖池出水口气浮净化池出水口、各级生物滤池出水口、前(后)置紫外线装置进水口、前(后)紫外线装置出水口、养殖池进水位置的水质进行采样分析, 采样时间为13:30, 每个点取样2个, 取其平均值。

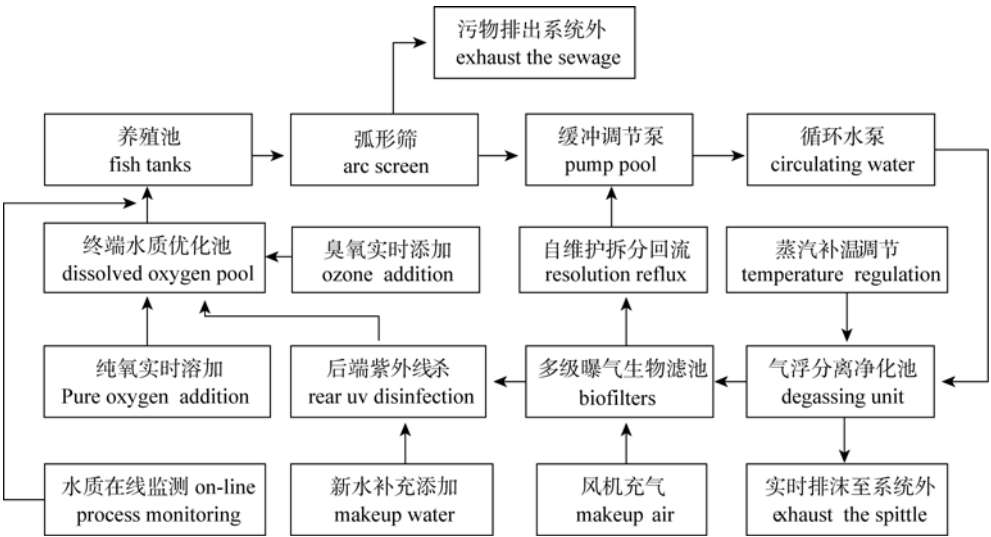


图 2 封闭式循环水养殖系统水处理工艺流程图

Fig. 2 Water treatment process of closed recirculation aquaculture system

1.5 水质测定与数据处理方法

总氮氮采用次溴酸钠氧化比色法测定, 亚硝氮用盐酸萘乙二胺分光光度法测定^[7]。化学需氧量采用碱性高锰酸钾法测定^[8]。溶解氧、pH、水温、盐度、氧化还原电位等水质数据测定使用 Ysi professional plus 多参数水质分析仪。对所采集的数据采用 SPSS 17 .0 统计软件进行差异显著性分析。计算测定数据平均值、标准误差,以 $P<0.05$ 作为差异显著水平, $P<0.01$ 作为差异极其显著水平, $P>0.05$ 作为差异不显著水平。

2 结果与分析

2.1 不同气水比状况下生物滤池进、出水口的水质指标

为比较不同气水比对封闭式循环水养殖系统多级曝气生物滤池进、出水口净化效能和 pH 值、DO、

鱼的生长、生理情况等水质指标的影响, 对 5 个梯度气水比试验的数据进行统计, 结果见表 1-表 3。

由表 1、表 2 可见, 随着气水比的增加, 循环系统各单元中 DO 处于接近饱和或超饱和状态, pH 有上升趋势, 生物滤池内水生物净化效能有所提高。一般情况下, pH 的变化与海水中各种形式的二氧化碳的含量有密切关系, pH 的变化是因为高密度养殖系统, CO₂ 积累的途径主要是鱼类的呼吸, 残饵、粪便、分泌体液等还原性有机物质的降解; CO₂ 的累积造成池水中 HCO₃⁻ 浓度增大, 且控制了养殖水体较低的 pH^[9]。试验发现, 通过气水比的增加, 可在一定程度上利用生物滤池的曝气脱除一部分水中的二氧化碳, 使系统 pH 在相对低位上有回升的趋势。而对于循环系统生物净化效能的提高, 则得益于气水比增加提高了

表 1 不同气水比状况下生物滤池进、出水口 TAN、NO₂-N、COD 水质指标变化情况表

Tab. 1 Changes of TAN, NO₂-N, and COD in inlet and outlet of bio-filter with different air-to-liquid ratios

气水比 air-to-liquid ratio	TAN/(mg·L ⁻¹)			NO ₂ -N/(mg·L ⁻¹)			COD/(mg·L ⁻¹)		
	进口 inlet	出口 outlet	R _t /%	进口 inlet	出口 outlet	R _n /%	进口 inlet	出口 outlet	R _c /%
0.75:1	0.126	0.082	35.0	0.022	0.020	8.2	1.08	0.99	8.3
0.88:1	0.153	0.104	32.0	0.013	0.011	8.5	1.11	0.96	13.6
1.00:1	0.135	0.069	49.1	0.042	0.038	9.7	1.03	0.91	11.4
1.25:1	0.164	0.091	44.4	0.043	0.023	46.6	1.02	0.90	11.3
1.50:1	0.148	0.071	52.0	0.031	0.024	22.1	0.90	0.85	6.1

注: R_t、R_n、R_c 分别为 TAN、NO₂-N、COD 的去除率。
Note: R_t, R_n and R_c refer to the eliminating ratios of TAN, NO₂-N and COD, respectively.

表 2 封闭式循环水养殖系统不同气水比状况下生物滤池进、出水口 pH、DO 水质指标变化情况表
Tab. 2 Changes of pH and DO in inlet and outlet of bio-filter with different air-to-liquid ratios

气水比 air-to-liquid ratio	pH		溶氧饱和度/% DO of air saturation	
	进口 inlet	出口 outlet	进口 inlet	出口 outlet
0.75 : 1	7.97	8.03	94.3	82.1
0.88 : 1	7.99	8.04	94.5	88.5
1.00 : 1	8.00	8.04	94.8	88.6
1.25 : 1	8.02	8.07	96.3	89.1
1.50 : 1	8.02	8.08	100.8	89.2

表 3 封闭式循环水养殖系统各鱼池生长的变化及成活率
Tab. 3 Growth rate and survival rate of the fish in the tank

组别 group	一号池 Pool No.1	二号池 Pool No.2	三号池 Pool No.3	四号池 Pool No.4
初始体质量/kg initial body weight	0.663	0.663	0.663	0.663
最终体重/kg final body weight	1.534	1.644	1.786	1.863
增重率/%weight gain rate	131.37	147.96	169.38	181
初始体长/cm initial length	42.64	42.64	42.64	42.64
最终体长/cm final length	57.023	55.65	57.74	57.6
增长率/% growth rate	33.73	30.51	35.41	35.08
成活率/% survival rate	93.75	92.3	91.12	90.68

生物滤池溶氧和搅动作用,使水生物膜充分接触,对生物硝化过程速率和有机化合物分解速率有提升作用。因此,在本封闭式循环水系统试验条件下,由试验数据综合分析可以初步得出结论:气水比在一定范围内对提高封闭式循环水养殖系统水净化效能有积极作用。

2.2 不同气水比状况下水处理单元氨氮、NO₂-N 指标的变化分析

由图 3 和图 4 所示,气水比从 0.75 : 1 增至 1.50 : 1 时,生物滤池的进口氨氮浓度在 0.13~0.16 mg/L,出口浓度在 0.069~0.100 mg/L,去除率由 35.0%增加至 52.0%,去除效果明显;生物滤池进口的 NO₂-N 浓度在 0.013~0.043 mg/L,出口浓度在 0.012~0.038 mg/L,其中气水比为 1.25 : 1 时,NO₂-N 去除率最大为 46.6%;特别是气水比大于 1.0 以后,去除率显著增加;但当气水比大于 1.25 : 1 时,NO₂-N 的去除率由 46.6%下降到 22.1%,有较明显减缓趋势;试验证明曝气生物滤池系统,在充足氧气的条件下,对去除水中氨氮和 NO₂-N 等有害物质方面效果显著($P<0.01$);但水中有机污染物含量越低,生物净化的难度越大。

2.3 不同气水比状况下水处理单元 COD 指标的变化分析

图 5 显示,气水比从 0.75 : 1 增至 1.50 : 1 时,

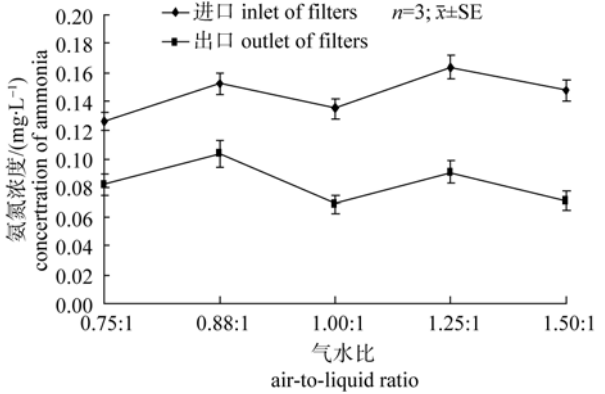


图 3 封闭式循环水养殖系统中不同气水比状况生物滤池进水口与出水口氨氮的变化

Fig. 3 Changes of ammonia nitrogen in inlet and outlet of bio-filter with different air-to-liquid ratios

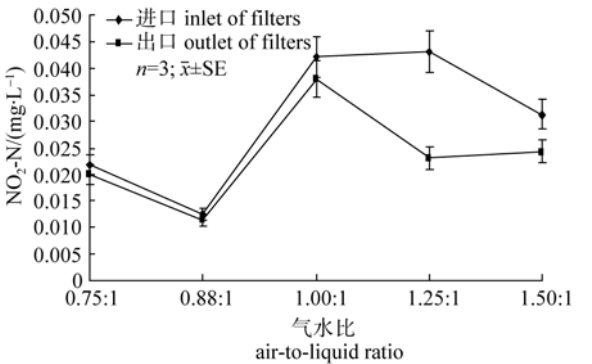


图 4 封闭式循环水养殖系统中不同气水比状况生物滤池进水口与出水口亚硝酸盐氮的变化

Fig. 4 Changes of nitrogen in inlet and outlet of bio-filter with different air-to-liquid ratios

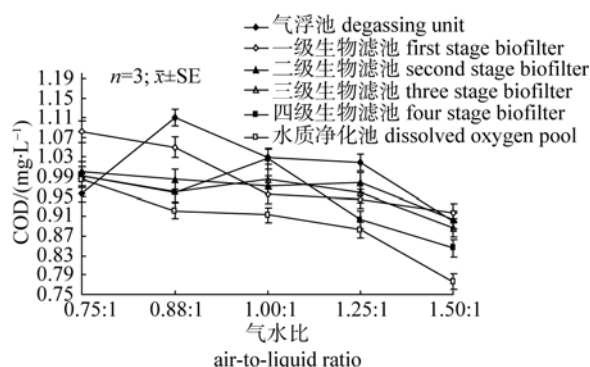


图 5 封闭式循环水养殖系统中不同气水比状况下各水处理单元 COD 的变化

Fig. 5 Changes of COD in water treatment units with different air-to-liquid ratios

各级生物滤池的 COD 浓度有下降趋势, 平均下降幅度为 0.10 mg/L; 但由表 1 可见, 随着气水比的增加, COD 去除率在 6.1%~13.6%波动时, 去除率变化幅度仅为 7.5%, 且不规律, 这说明不同气水比对 COD 的去除率影响并不显著($P > 0.05$)。

2.4 不同气水比状况下水处理单元 pH、DO 的变化分析

由图 6 可以看出, 随着气水比从 0.75 : 1 增至 1.50 : 1, 各级生物滤池的 pH 有增加的趋势, 生物滤池进、出水口的 pH 由 7.97 增加至 8.08, 维持了整个养殖系统的 pH 始终处于 7.5~8.5 的适宜区间。生物滤池出水口的 DO 随着气水比的增加, 与进水口相比溶氧量变化不大, 溶氧饱和度仅有 82.10%增至 89.23%。经过 6 个月的养殖试验, 本试验系统 4 个池子的成活率分别为 93.75%、92.3%、

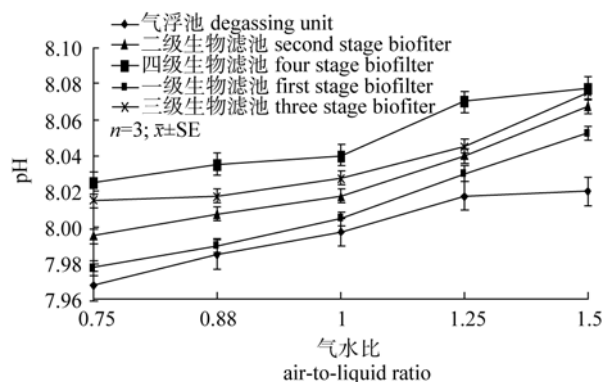


图 6 封闭式循环水养殖系统中不同气水比状况下各水处理单元 pH 的变化

Fig. 6 Changes of pH in water treatment units with different air-to-liquid ratios

91.12%、90.68%, 成鱼平均体质量为 1 707 g, 体长 57.00 cm, 增重率 157.43%, 增长率 33.68%, 取得了良好的养殖效果。

综合分析各项指标所得结果为, 当气水比为 1.25 : 1 时, 该系统的生物滤池处理水质效果最佳。在此条件下, 生物滤池出水口水质指标为: TAN 0.091 mg/L, NO₂-N 0.023 mg/L, COD 0.90 mg/L, 溶氧饱和度为 89.1%, pH 8.07。

3 讨论

3.1 气水比对优化全封闭循环水养殖工艺的影响

过去简单认为海水养殖水处理技术是在城市污水处理技术的基础上演化发展而来的, 但实际上循环水养殖水处理与一般的污水处理, 在理念和技术上都有着较大的差别。养殖水处理有以下特点: 1) 污染浓度低; 2) 盐度高、溶氧高; 3) 生物处理处于低温、寡营养状态; 4) 水质处理指标要求高, 属深度处理。由此可见, 循环水养殖系统的深度处理, 循环利用, 其本身就比较一般的重度污染水的处理要困难许多, 它不仅对 COD、氨氮、亚氮指标要有较高的去除率, 同时还对温度、pH、氧化还原电位等指标有一定的调控要求, 所以两者相比差异较大。生物滤池气水比的曝气作用也因自身水环境条件和终极指标不同而不尽相同, 因此现行污水处理行业气水比对曝气生物滤池净化效能影响的研究成果, 并不能完全适用于与海水养殖行业, 气水比研究的缺失对全封闭循环水养殖的工艺会产生一定的影响。因此针对优化养殖循环水处理条件进行基础研究, 将对生物膜法处理养殖水技术产生极其重要的指导作用。

3.2 气水比对生物滤池溶解氧浓度的影响

在封闭式工厂化循环水养殖系统中, 为了达到高密度养殖和快速增长高效养殖的目的, 目前国内大多数循环水养殖系统都采用了纯氧增氧的方式。在循环水模式下养殖池中溶氧的不断补充, 使养殖池水的 DO 水平基本处于 ≥ 10 mg/L 的超饱和状态。由表 2 可以看出, 不同气水比状况下 DO 的变化情况, 本试验系统中一级生物滤池进水口溶氧饱和度由 94.3%增加至 100.8%, 其均值达 96.14%接近饱和,

一级到末级滤池间 DO 均值仅降低了 10%左右, 生物滤池出口水的溶氧饱和度均值一直保持在 82% 以上, 而在硝化反应过程中, 将 1 g 氨氮氧化为硝酸盐氮需耗氧量 $4.57 \text{ g}^{[10]}$, 本试验系统生物滤池的最小溶氧质量浓度的测试数据 94.3%, 约等于 8.5 mg/L (20°C) 远超过“临界氧浓度”。通常认为, 只需要保持在 5.0 mg/L 以上, 便足以保证生物膜上微生物的正常生命活动^[11]。由此可见, 在使用纯氧的循环水养殖系统中, 各单元水的 DO 水平基本处于超饱和或接近饱和的状态, 气水比的增加对生物滤池 DO 浓度的增氧作用不明显, 这与普通污水处理中曝气生物滤池需要大气水比来提高 DO 浓度有明显不同, 循环水养殖系统生物滤池的气水比大小不是生物滤池 DO 浓度的主要影响因素, 即便较小的气水比也能远远满足生物滤池的“临界氧浓度”。

3.3 气水比对生物滤池水净化效能的影响

养殖水中残饵、粪便和溶解态代谢废物的积累, 经常会导致水体中氨氮、亚硝酸盐等指数超标, 对养殖鱼类毒害后果极为严重, 因此养殖系统生物滤池承载着水质净化的主要任务。气水比具有提高生物滤池溶氧、生物硝化过程速率和有机化合物分解速率的作用。对于普通的污水处理, 气水比对硝化细菌的活性影响很大, 当气水比较低时, 硝化细菌很难得到溶解氧的补给, 而在数量和活性上均表现较低。随着气水比的提高, 氧传质系数 K_{La} 也随之提高, 溶解氧含量迅速提升, 硝化细菌的活性被释放。表现为反应器的硝化效果明显提高, 氨氮去除率增大^[12]。在本循环水试验系统中, 虽然气水比大小不是生物滤池 DO 浓度的主要影响因素, 但气水比仍与净水微生物如氮化细菌、硝化细菌等活性相关, 特别是气水比大于 1.0 以后, 氨氮和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除率显著增加, 其中生物滤池出水氨氮浓度 0.091 mg/L , 去除率 44.4%, $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度 0.023 mg/L , 去除率 46.6%, 尤其是 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度指标比傅雪军等^[13]通过封闭式循环水半滑舌鲷养殖试验, 得到的生物滤池出水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 平均浓度低于 0.090 mg/L , 平均去除率 19.47% 结果明显提高。本试验当气水比大于 1.25 : 1 时, 氨氮和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除率增速有较明显减缓趋势; 同时也证明了当反应器中的溶解

氧已能满足硝化细菌的需要时, 溶解氧不再是限制硝化细菌代谢活性的因素^[14]。此时如果继续加大气水比, 对氨氮去除率的提高作用不明显, 还会造成浪费。试验中气水比变化对于 COD 去除率的影响, 从结果的数据和变化趋势分析看, 仅靠增加气水比手段, 要大幅度降低 COD 浓度, 对低污染浓度的养殖用水作深度处理是相对困难的; 另外也证实, 当气水比增加到一定程度后, 溶解氧不再是好氧异养菌活性的主要限制因素, 生物滤池对 COD 的去除率也逐渐趋于稳定^[15]。

3.4 气水比对系统 pH 和鱼类生理的影响

pH 是海水养殖体系的重要参数, pH 的变化与海水中各种形式的二氧化碳的含量有密切关系, 二氧化碳越高, 则结合水分子形成碳酸, 释放出氢离子, 使水中的 pH 下降, 反之则升高。伴随着循环水系统中高密度养殖鱼类的呼吸作用和其他微生物的生理生化影响, 以及硝化过程中产生的 H^+ , 会导致水中二氧化碳浓度逐渐积累, 有的甚至达到周围环境饱和浓度的 20~100 倍, 使得 pH 值快速下降, 对循环水养殖系统的控制造成了非常大的困难^[16]。臧维玲等^[17]的试验证实, 随养殖天数增加, pH 逐步下降, COD、氨氮和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度呈上升趋势。曲克明等^[18]研究认为, 在生物滤池池底大面积曝气, 对循环水养鱼系统中各种生物产生的二氧化碳具有较好的去除作用, 不需另设二氧化碳去除设备。本试验随着气水比从 0.75 : 1 增至 1.50 : 1, 各级生物滤池的 pH 值虽然提高并不明显, 但对整个养殖系统的 pH 值维持在 7.9~8.1 的适宜区间起到了重要作用。由此可见, 合适的气水比运行参数对循环系统的适宜水环境构建有积极影响。

从鱼类生理学分析看, 养殖水环境的 pH 值过高 ($\text{pH} > 9.5$) 或过低 ($\text{pH} < 6.5$) 都对鱼类生长不利。鱼长期处于偏酸性水体中, 受环境胁迫影响, 可使鱼虾血液的 pH 降低, 削弱其载氧能力, 造成缺氧症; pH 过高的水则会腐蚀鳃组织^[19]。另外, pH 过高, 池水中的 NH_3 浓度增大, 过高的 NH_3 对鱼类有毒害作用, 限制鱼的生长^[20]。因为池水中存在着铵氮平衡体系 $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$, 可见 pH 值对氨氮的存在形式十分重要, 对氨氮毒性的显现也非常关

键。pH 的降低还使海水中硝化过程的速率减慢, 有机化合物的分解速率降低, 导致水体中物质的循环再生减慢, 水质更加恶化。由此看 pH 的变化对养殖鱼类生理和硝化细菌生化都有较大的影响, 因此绝不能忽视循环水养殖系统中 pH 值的变化。在我国《海洋监测质量保证手册》的渔业水质标准中规定, 海水养殖的 pH 范围为 7.0~8.5^[21]。本试验经过 6 个月的养殖试验, 半滑舌鲷养殖成活率为 91.96%, 成鱼平均体重为 1 723 g, 体长 57.14 cm, 增重率 169.2%, 增长率 32.58%, 取得了良好的养殖效果。试验数据可以说明, 对于高密度循环水养殖系统: (1) 选择最佳的气水比运行参数, 是保证鱼类在适宜水环境中(pH 7.5~8.5)生长的重要手段之一。(2) 气水比的增加对生物滤池净化性能有积极的促进作用。

3.5 气水比对生物膜代谢能力和活性的影响

生物滤池中生物膜的代谢和活性, 比较理想的情况是减缓生物膜老化的进程, 不使厌氧层过分增长, 加快好氧膜的更新^[11]。活性生物膜的厚度一般在 70~100 μm 范围内, 生物膜为薄层时, 膜内传质阻力小, 膜的活性较高^[21]。试验分析发现, 当气水比从 0.75 : 1 增至 1.50 : 1 时, 生物滤池的氨氮浓度去除率由 35.0% 增加至 52.0%, $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度去除率由 8.2% 增加至 46.6%; 去除效果明显增加; 特别是气水比大于 1.0 以后, 去除率增速显著; 可以说明合理的气水比曝气量, 除了有为生物滤池充气增氧和脱除水中的有害气体的作用外, 还与生物膜的更新有关系; 它能带来足够量的上升气泡, 使生物滤池内部的水力搅拌作用增大, 同时加大了气水上升流对滤料的剪切力, 不断冲刷滤料上老化的生物膜, 促使生物膜的新陈代谢能力增强, 以保证好氧膜的不断更新, 提高生物膜活性, 表现为对氨氮、亚硝酸氮去除效能的不断增长; 当气水比增加到一定程度后, 生物滤池对氨氮、亚硝酸氮的去除率也逐渐趋于稳定; 但是当气水比增加过高时, 又会导致其对滤料的过量冲刷, 不利于增强生物膜活性, 还会降低其处理效果, 并造成能源浪费。因此气水比的大小需要控制在一个适宜的范围内更为科学。

4 结语

(1) 生物滤池的气水比与普通污水处理气水比有所不同, 不是为生物硝化过程提供氧气为主要目的。(2) 当气水比从 0.75 : 1 增至 1.50 : 1 时, 生物滤池氨氮的去除率由 35.0% 增加至 52.0%, 去除效果明显; 在气水比为 1.25 : 1 时, $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除率最大达 46.6%, 当气水比大于 1.25 : 1 时, 氨氮和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除率增速有较明显减缓趋势。(3) 生物滤池曝气有脱除水中二氧化碳等有害气体的作用, 最佳的气水比可以维持养殖水 pH 值在 7.5~8.5 的适宜区间, 对促进鱼类生长, 提高抗病能力有益。

因此, 对于不同的封闭式循环水养殖系统, 要根据生物滤池大小、滤料比表面积和数量、养殖密度、温度等条件, 经过测试寻求最佳的生物滤池气水比运行参数, 只有这样才能达到高效节能的生产状态。本试验系统生物滤池气水比的最佳运行参数为 1.25 : 1, 可供封闭式循环水养殖系统生产运行参考。

参考文献:

- [1] 孔小松, 干爱华, 刘瑞轩, 等. 气水比对生物膜法处理废水各阶段的影响[J]. 工业水处理, 2005, 25(7): 50-52.
- [2] 仇付国, 郝晓地, 陈新华. 曝气生物滤池处理效果影响因素试验研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(12): 81-84.
- [3] Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification(SND) [J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(6): 61-68.
- [4] 徐亚同. 废水中氮磷的处理[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1996: 23-59.
- [5] 赵静野, 郑晓萌, 高军. 曝气充氧中氧总传质系数的探讨[J]. 北京建筑工程学院学报, 2006 (1): 32-37.
- [6] 张闯, 陶涛, 李尔, 等. 两种曝气设备的清水曝气充氧实验研究[J]. 环境污染与防治, 2006 (1): 42-45.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 工业循环冷却水中化学需氧量(COD)的测定高锰酸钾法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 王丽, 苏柯, 张龙军, 等. 高密度循环海水养殖系统 CO_2 的积累和去除效果分析[J]. 海洋水产研究, 2003,

- 24(2): 25–29.
- [10] 高俊发. 水环境工程学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 182–278 .
- [11] 张冰莹. 利用漂液废渣处理印染废水[J]. 环境保护, 1995(9): 110–113.
- [12] 陶涛. 气水比对多级曝气生物滤池深度强化污水处理效能的影响研究[J]. 重庆建筑, 2011, 10(96): 48–51 .
- [13] 傅雪军, 马绍赛, 朱建新, 等. 封闭式循环水养殖系统水处理效率及半滑舌鲷养殖效果分析[J]. 环境工程学报, 2011, 5(4): 745–751 .
- [14] Zhu S, Chen S. Impacts of ReynoLds number on nitrification biofiLm kinetics[J]. Aqu Engin, 2001, 24: 213–229.
- [15] Fdz-PoLanco F, Mendez E, Uruena M A, et al . SpaiLaL distribution of heterotrophsand nitriers in a submerged biofiLter for nitrification [J]. Wat Res, 2003, 34(10): 4081–4089 .
- [16] Colta J, Watten B, Pfeiffer T. Carbon dioxide stripping in aquaculture-Part II: Development of gas transfer models[J] . Aqu Engin, 2012, 47: 38–46.
- [17] 臧维玲, 戴习林, 徐嘉波, 等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报, 2008, 32(5): 749–756 .
- [18] 曲克明, 杜守恩. 海水工厂化高效养殖体系构建工程技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 138–220 .
- [19] 李丹萍. pH 值对海水鱼虾养殖的影响[J]. 科学养鱼, 1998(9): 4 .
- [20] 王安利, 王维娜. 虾池赤潮与环境因子关系的研究[J]. 海洋学报, 1995, 17(2):128–133 .
- [21] 《海洋监测质量保证手册》编委会. 海洋监测质量保证手册[M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 23.

Effect of the air-to-liquid ratio on treatment efficiency of wastewater in multistage BAF in a recirculating aquaculture system

HUANG Bin¹, LEI Jilin¹, ZHAI Jieming², ZHOU You³, WANG Feng⁴, GAO Chunren¹, LIANG You¹

1. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. LaiZhou MingBo Aquatic CO., LTD, Yantai 264000, China;
3. Fishery College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
4. Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

Abstract: The half-smooth tongue-sole (*Cynoglossus semilaevis* Gunthe) is commonly reared in a recirculating aquaculture system. We evaluated the effect of the air-to-liquid ratio on the purification efficiency, DO, and pH in the biological aerated filters of a recirculating system. The test system was maintained at $(19 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ and 15 cycles. The DO in the tank remained above 12 mg/L. As the air-to-liquid ratio increased from 0.75:1 to 1.50:1, the removal rate of TAN increased from 35.0% to 52.0%, and the removal rate of $\text{NO}_2\text{-N}$ increased from 8.2% to 44.6%. Thus, the air-to-liquid ratio had a significant impact on nitrification, whereas the influence of chemical oxygen demand (COD) removal rate was not significant. The average removal rate was 10.14%. The pH values increased from 7.97 to 8.08 but decreased between the biofilter inlet and the outlet. The optimal air-to-liquid ratio was 1.25:1. This resulted in DO levels at the inlet of the first bio-filter tank that were close to saturation. Between the first bio-filter tank and the final bio-filter tank, DO only decreased by 10%. The recirculation aquaculture system maintained the water pH value between 7.9 and 8.1. Our results provide a reference for optimization of bio-film process culture conditions.

Key words: air-to-liquid ratio; recirculation aquaculture system; multistage BAF; purification efficiency

Corresponding author: LEI Jilin. E-mail: leijl@ysfri.ac.cn