

气水比对移动床生物滤器净化海水养殖废水的影响

马晓娜^{1,2}, 李 贤¹, 张延青³, 王 博³, 李 薨⁴, 刘 鹰⁵

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033; 4. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 5. 大连海洋大学, 辽宁 大连 116023)

摘要: 生物滤器是海水养殖废水净化的核心处理单元, 而气水比是影响移动床生物滤器处理效率的关键因素。本实验采用挂膜成熟的移动床生物滤器和人工模拟海水养殖废水, 研究了不同气水比(6:1、10:1、15:1、20:1、30:1)对移动床生物滤器处理海水养殖废水效能的影响。结果表明: 随着气水比的增大, 氨态氮(TAN)去除率呈现出先降低后增加的趋势, 亚硝酸盐(NO₂⁻-N)的积累率呈现出先增加后降低的趋势, 化学需氧量(COD)去除率呈现降低的趋势。气水比为 6:1 时 TAN 和 COD 平均去除率最大(TAN 12.55%±0.80%, COD 16.63%±1.28%), NO₂⁻-N 平均积累率相对较小(109.71%±23.94%), 且出水水质稳定, 波动最小, 对水质的净化效果明显好于其他的气水比条件, 因此气水比 6:1 是实验条件下的最佳气水比, 可为实际生产应用提供理论参考。

关键词: 移动床生物滤器; 海水养殖废水; 气水比; 净化效能

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)08-0046-07

DOI: 10.11759/hyqx20161229002

中国是世界水产养殖第一大国, 产量可达世界海水养殖产量的 70%^[1], 与传统养殖模式相比, 工厂化循环水养殖模式具有节水、节能、生态效益高、人工可控等优点^[2-3], 是未来水产养殖业发展方向之一。海水封闭循环水养殖通过对养殖废水的净化处理实现循环回用, 其中水质处理是关键。与生活污水和工业废水相比, 海水养殖废水盐度较高、温度较低、污染浓度较低、水质处理指标要求高^[4], 这些特点增加了水处理的难度。生物滤器是循环水养殖水处理系统的核心单元, 也是其中能耗最大的单元, 可以有效转化和脱除养殖废水中的氨氮、亚硝酸盐氮和有机物, 是目前国内外广泛推广使用的废水处理技术^[3, 5]。

生物滤器按照填料是否相对固定, 分为固定床(Fixed Bed Reactor)和移动床(Moving Bed Reactor)。与固定床相比, 移动床生物滤器单位体积养殖生物承载量大、不易堵塞、抗冲击负荷强、处理效率高, 被认为是一种新型高效的废水处理方法^[6-7]。国内外对移动床生物滤器的研究主要集中在污染浓度较高的工业废水和生活污水处理领域^[8], 而对于处理低污染浓度的海水养殖废水的研究报道较少^[9]。因此, 利用移动床生物滤器处理海水循环水养殖废水亟待进一步的研究。气水比即气流量和水流量的比值, 是影响移动床生物滤器处理效率的关键因素, 其可通过

直接影响滤器内溶氧浓度、污染物传质速率, 影响相关降解微生物如碳化细菌、硝化细菌等的生长, 进而影响生物膜的生长代谢和附着脱落过程^[10-11]。气水比过小则溶解氧不足, 填料循环移动不畅, 不利于硝化反应; 而气水比过大不仅能耗增加, 而且填料表面不断冲刷可能造成生物膜脱落, 使得生物滤器处理效果下降^[12]。因此探寻合适的气水比非常重要。

本研究初步探讨了不同气水比对移动床生物滤器海水养殖废水处理效能的影响, 旨在探寻能获得较好净化效率的最佳气水比, 为移动床生物滤器在实际工厂化循环水养殖生产中的推广应用提供参考。

收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(31472312, 41306152, 31402283); 国家科技支撑计划(2014BAD08B09); 江苏省重点研发计划(BE2015325); 青岛市海洋经济创新发展示范城市重点项目-工业化循环水高效智能养殖装备产业链协同创新与构建项目

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31472312, No. 41306152, No. 31402283; the National Key Technologies R&D Program (2014BAD08B09); the JIANGSU Province key R&D Project (BE2015325); the key Program of Qingdao Innovation and Demonstration in Marine Economy Development (Construction of the Innovative Industry Chain for Efficient and Intelligent Equipment in Recirculating Aquaculture System)]

作者简介: 马晓娜(1991-), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事养殖环境工程研究, E-mail: Marianna_IOCAS@163.com, 电话: 15610480956; 刘鹰, 通信作者, 男, 研究员, 主要从事水产工程学研究与应用, E-mail: yinliu@qdio.ac.cn

1 材料与方 法

1.1 实验材料

1.1.1 实验装置概述

本实验设计并构建了一套实验室规模的上流式生物滤器系统,图 1 为实验移动床生物滤器结构示意图。实验用生物滤器构造整体是圆柱形,上半部分采用不透明的 PVC 材料,下半部分采用透明的有机玻璃,以便查看其内部填料的移动情况;底部为 45° 倾角,直径为 11 cm,有效高度为 70 cm,有效体积为 6.3 L。滤器上部设置带有旋塞的斜三通作为填料口,方便填料的放入和取出。滤器出水口高 60 cm 处设置高位水箱,蓄水池中的实验用水由潜水泵提升至高位水箱,然后由重力作用经连通管由反应器底部进水,上部出水口出水。下部距出水口约 10 cm 处布设圆形有孔挡板,防止填料在运动过程中流失或堵住出水口。曝气采用微孔曝气的方式,气泡密集,有利于填料的移动。曝气头布设于底部气箱中,底部倾角处曝气,气泡上升,带走部分水体,形成空区,底板上的填料不断移动循环至倾角底部,有利于填料在滤器内循环,使得污水与填料能够充分接触。生物滤器的进水由液体流量计控制,进气由气体流量计控制,以设置不同的气水比。

实验装置设计依据如下:

(1) 滤器高度和直径

不同的高径比(H/D)对生物滤器影响不同: H/D 大的反应器,液体循环流量大,速度快,抗冲击负荷能力高,处理效率高; H/D 小的反应器,结构稳定,运行管理方便,基建投资少。一般移动床 H/D 范围为 4~15。由 $D^2=4V/\pi H$ [13]可知, D 的较小变化会引起 H 的较大变化,反之由 H 改变引起的 D 变化较小。所以在设计反应器时,优先确定高度 H 。综合考虑, H 选择 70 cm, D 选择 11 cm 的标准径。

(2) 填料投加量

填料投加量计算如下 [13-14]:

$$C_s = X p_s / p_d \times 1 / (r_p - r_m)^3 - 1 \quad (1)$$

其中, C_s 为填料浓度(g/L); X 为生物浓度(g/L); p_s 为惰性填料真密度(g/cm³), $p_s=0.634$ g/cm³; p_d 为生物膜干密度(g/cm³), $p_d=1.4$ g/cm³; r_p 为生物填料半径(mm),即填料挂膜后半径, $r_p=10.8$ mm; r_m 为惰性填料半径(mm),即填料挂膜前半径, $r_m=10$ mm。

$$X = N_v / N_s \quad (2)$$

其中, N_v 为容积负荷,取 $N_v=9$ kg/(m³·d); N_s 为污泥负

荷,取 $N_s=1.2$ kg/(kg·d)。 N_v 、 N_s 选择依据:易降解废水 N_v 可取 7~10 kg/(m³·d),处理低浓度废水的反应器 N_s 可取 1.0~1.5 kg/(kg·d)。

由(1)(2)可得填料浓度 $C_s=66.335$ g/L。

$$W = C_s V \quad (3)$$

其中, V 为生物滤器有效体积, $V=6.3$ L; W 为反应区填料投加量,计算得 $W=417.91$ g。

$$\text{载体投加体积 } V^1 = W / p_s = 417.91 / 0.634 = 659.165 \text{ cm}^3 \quad (4)$$

所用填料单个有效体积约为 1.75 cm³(表 1),计算得填料投加量约为 376 个。

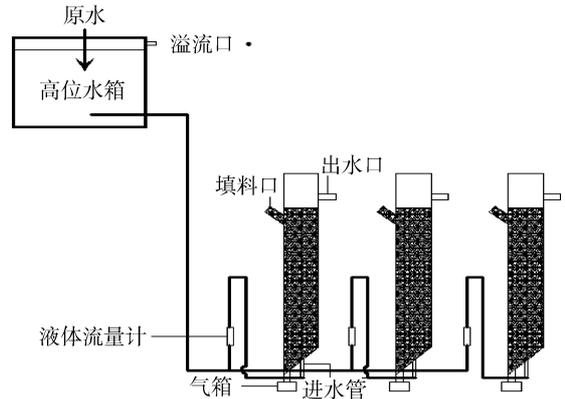


图 1 移动床生物滤器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of moving bed biofilter system

1.1.2 实验填料

本实验选用 K3 型填料,其为多孔悬浮的圆环状填料。其质量轻,价格低廉,孔隙率大,机械强度高,不仅适合微生物附着生长,且便于移动循环,在国内外废水处理中得到广泛应用。填料的各项常用物理参数见表 1。

表 1 填料的物理参数

Tab. 1 Physical substrate parameters

粒径 (mm)	真密度 (g/cm ³)	表观密度 (g/cm ³)	实际体积 (cm ³)	堆积体积 (cm ³)
25	0.634±0.001	0.226±0.001	1.75	4.91

1.1.3 实验用水

本实验采用化学试剂配制人工模拟海水养殖废水。通过向新鲜海水中投加氯化铵和葡萄糖控制水体中的 TAN 和 COD,投加量分别为:氯化铵 15.29 g/m³,葡萄糖 25.71 g/m³,新鲜海水来自中国科学院海洋研究所。进水 TAN 5~6 mg/L, COD 23~30 mg/L, NO₂⁻-N 0.001~0.003 mg/L, pH 7.4~7.8,实验期间水温 22~26℃,水力停留时间 1 h。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

本实验在水力停留时间 40 min、气水比为 10 : 1、溶解氧充足、进水水温为 15~20℃的条件下进行挂膜,各反应器在 71 d 后 TAN 去除率均达到稳定状态且出水亚氮浓度变化较小,视为挂膜基本成熟。此后采用此挂膜成熟的移动床生物滤器进行实验,通过气体流量计和液体流量计改变气水比,于改变气水比后第 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10 d 取样进行水质监测。共设置 6 : 1、10 : 1、15 : 1、20 : 1、30 : 1 等 5 个气水比处理,每组处理设置三个重复。

1.2.2 水质测定

本实验选取 COD、TAN、NO₂⁻-N 为主要水质指标,实验期间监测 pH 值、温度等常规指标,具体方法参照海洋监测规范^[15]及优化方法^[16],其中,COD:碱性高锰酸钾法;TAN:纳氏试剂分光光度法;NO₂⁻-N:萘乙二胺分光光度法;pH 值和温度分别使用 YSI 便携式 pH 计和温度计进行测定。

1.2.3 数据分析方法

污染物去除率计算公式:去除率 $\eta = (C_0 - C_G) / C_0 \times 100$,其中,C₀为进水水质指标平均浓度;C_G为出水水质指标平均浓度。实验结果以平均值±标准差表示,数据分析采用软件 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA),统计检验采用 Duncan 方法($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 气水比对 TAN 去除效果的影响

图 2 为不同气水比条件下生物滤器 TAN 去除率。图 3 为不同气水比条件下生物滤器 TAN 平均出水浓度及平均去除率。结果表明,随着气水比的增大,TAN 去除率先降低后增加,气水比由 6 : 1 增大至 20 : 1 时,TAN 去除率持续降低,当气水比继续增加至 30 : 1 时,TAN 去除率出现增加的趋势。在气水比为 6 : 1 时对氨氮的去除效果最好,去除率最高且保持稳定,平均可达 12.55%±0.80%,出水 TAN 浓度最低,低于 4.5 mg/L,波动最小。随着气水比的增大,出水 TAN 浓度波动变大,浓度增大,气水比在 20 : 1 时,TAN 去除率最低,出水 TAN 浓度最大,峰值达到 6 mg/L,波动也最为剧烈。TAN 去除率由大到小排列为 6 : 1、10 : 1、30 : 1、15 : 1、20 : 1。对 TAN 去除率的单因素方差分析结果表明,气水比 6 : 1 时,TAN 去除率显著高于气水比 15 : 1 和 20 : 1 ($P < 0.05$),与 10 : 1

和 30 : 1 条件下去除率无显著性差异 ($P > 0.05$),气水比 10 : 1 与 20 : 1 条件下去除率差异显著 ($P < 0.05$),其他气水比条件下 TAN 去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。

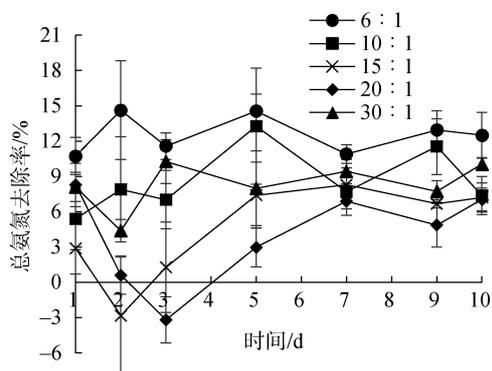


图 2 不同气水比条件下生物滤器 TAN 去除率
Fig. 2 TAN removal rates under different gas-water ratios

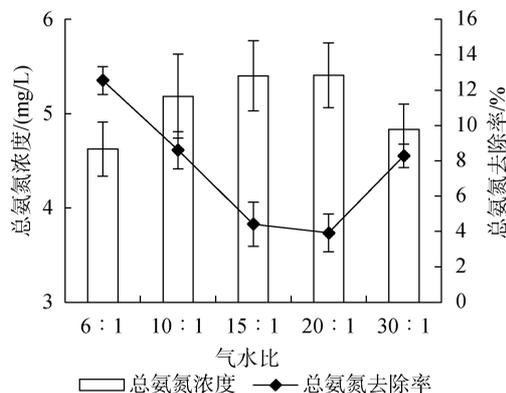


图 3 不同气水比条件下生物滤器 TAN 平均出水浓度及平均去除率

Fig. 3 Average TAN concentrations and removal rates under different gas-water ratios

2.2 气水比对 NO₂⁻-N 积累的影响

图 4 为不同气水比条件下生物滤器 NO₂⁻-N 的积累率。图 5 为不同气水比条件下生物滤器 NO₂⁻-N 平均出水浓度及平均积累率。结果表明,随着气水比的增大,NO₂⁻-N 的积累率先增加后降低,气水比由 6 : 1 增加至 10 : 1,NO₂⁻-N 的积累率出现骤增,随着气水比的继续增加由 10 : 1 至 30 : 1,NO₂⁻-N 的积累率出现逐渐下降的趋势。在气水比为 30 : 1 时对 NO₂⁻-N 的处理效果最好,平均积累率最低且保持稳定,平均可达 95.24%±20.44%,出水 NO₂⁻-N 波动小,受进水条件影响较小。在气水比为 6 : 1 时 NO₂⁻-N 的平均积累率较高于气水比 30 : 1 但无明显差异,平均积累率可达 109.71%±23.94%,出水 NO₂⁻-N 波

动小。气水比在 10 : 1 时, NO_2^- -N 积累率最大, 平均积累率高达 $339.70\% \pm 49.77\%$, 出水 NO_2^- -N 波动剧烈, 不稳定。 NO_2^- -N 积累率由小到大排列为 30 : 1、6 : 1、20 : 1、15 : 1、10 : 1。对出水 NO_2^- -N 积累率的单因素方差分析表明: 气水比 6 : 1 条件下显著低于气水比 15 : 1 ($P < 0.05$), 极显著低于气水比 10 : 1 ($P < 0.01$), 气水比 10 : 1 和 20 : 1 显著差异 ($P < 0.05$), 其他气水比条件下 NO_2^- -N 去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。

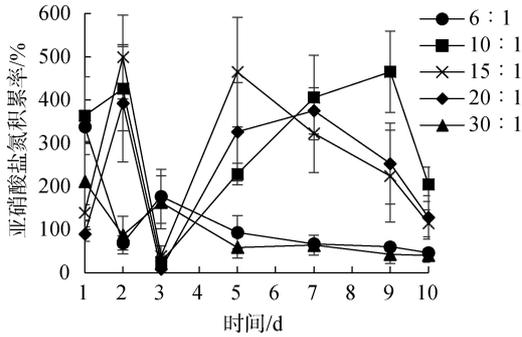


图 4 不同气水比条件下生物滤器 NO_2^- -N 积累率

Fig. 4 NO_2^- -N accumulation rates under different gas-water ratios

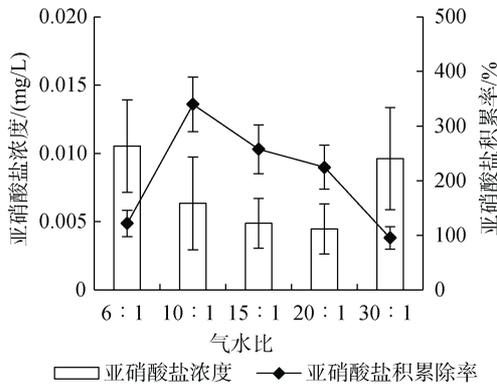


图 5 不同气水比条件下生物滤器 NO_2^- -N 平均出水浓度及平均积累率

Fig. 5 Average NO_2^- -N concentrations and accumulation rates under different gas-water ratios

2.3 气水比对 COD 去除效果的影响分析

图 6 为不同气水比条件下生物滤器对 COD 的去除率。图 7 为不同气水比条件下生物滤器 COD 平均出水浓度及平均去除率。由图可以看出, 当气水比为 6 : 1 时, 生物滤器对 COD 的处理效果最好, 出水 COD 浓度最低, 去除率显著高于其他气水比条件 ($P > 0.05$), 最高去除率达 $22.58\% \pm 6.72\%$, 平均去除率达 $16.63\% \pm 1.28\%$, 出水较为稳定, 波动小。随着气水比的增大, COD 去除率出现降低的趋势。COD

平均去除率由大到小排列为 6 : 1、15 : 1、10 : 1、20 : 1、30 : 1。对生物滤器 COD 去除率进行单因素方差分析结果表明, 气水比 6 : 1 条件下显著高于其他气水比 10 : 1、15 : 1、20 : 1、30 : 1 ($P < 0.05$), 10 : 1、15 : 1、20 : 1、30 : 1 气水比条件下, 两两之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

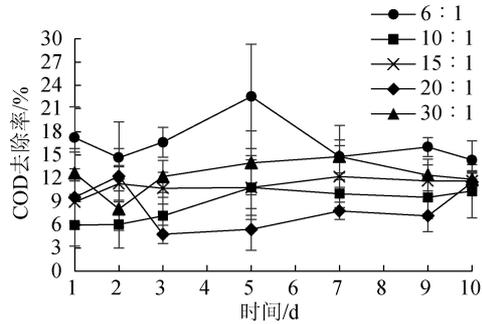


图 6 不同气水比条件下生物滤器 COD 去除率

Fig. 6 COD removal rates under different gas-water ratios

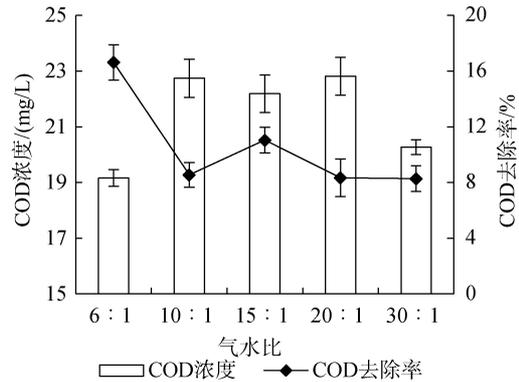


图 7 不同气水比条件下生物滤器 COD 平均出水浓度及平均去除率

Fig. 7 Average COD concentrations and removal rates under different gas-water ratios

3 讨论

气水比不仅为生物滤器微生物的呼吸提供必须的“临界氧浓度”, 还是生物反应器内反应动力学参数的重要指标^[17]。气水比越大, 与溶氧浓度相关的功能微生物如碳化细菌、硝化细菌、亚硝化细菌等的活性相对越强, 但当气水比过大时, 反而会降低处理效能^[18-19]。合适的气水比是影响移动床生物滤器处理效能和工程投资经济性的重要控制因素^[20], 可以有效提高生物滤器的生物硝化速率和有机物分解速率。因此, 本研究在实验室条件下设计构建移动床生物滤器, 并利用挂膜成熟后的生物滤器探寻不同

气水比对移动床生物滤器去除效果的影响。

循环水系统中主要的代谢废物为残饵、粪便产生的 TAN、 NO_2^- -N 和有机物^[21]。TAN 是鱼类排泄物的主要成分,非离子氨会毒害养殖生物。TAN 的积累会影响养殖生物的生理生化指标进而影响其生长繁殖,甚至严重时致使生物死亡,导致严重的经济损失^[22]。有研究发现, NO_2^- -N 是诱发鱼病的环境因子之一^[23]。 NO_2^- -N 积累会引起鱼类中毒甚至窒息死亡^[24]。COD 是表征水体中有机物相对含量的指标之一,反映的是能被氧化的有机物污染状况,包括溶解态 COD 及颗粒态 COD 两部分。生物滤器的主要作用是创造培养微生物菌群的条件,利用微生物降解废水中的 TAN、 NO_2^- -N 及部分有机物,减小对养殖对象的毒害作用,脱除水体中的氮元素,从而实现对水质的净化^[5]。生物滤器对水体污染物的净化主要依靠附着在其内部填料上的生物膜特别是相应功能微生物来实现。TAN 的去除主要依靠硝化反应来完成,硝化反应是硝化细菌在好氧条件下将 TAN 转化为 NO_2^- -N、硝酸盐氮的过程,这个过程中会造成 NO_2^- -N 的积累,但是部分微生物可以将产生的 NO_2^- -N 进一步转化为对养殖生物毒害性较弱的硝酸盐氮^[25]。COD 的净化主要依靠生物膜上降解有机物的微生物的活性及气体的气浮作用。

本研究通过气水比的联合作用使填料在移动床内循环移动,加强生物膜与养殖废水的接触与传质作用。在气水比 6:1 的条件下填料能够循环移动,而低于 6:1 时填料则不能正常循环移动。气水比 30:1 时水体呈现翻滚状态,由于海水养殖废水是微污染水,其生物滤器填料挂膜本来就比较困难^[26],若继续增大气水比,会造成生物膜的脱落,处理效率反而会下降,并且能耗过大,提高了生物滤器运行成本,因此本实验设置 6:1 为最低气水比,30:1 为最高气水比。结果表明随着气水比的增大,TAN 去除率呈现先降低后增加的趋势, NO_2^- -N 的积累率呈现先增加后降低的趋势,COD 去除率呈现降低的趋势。气水比在 6:1 时,TAN 和 COD 去除率最高, NO_2^- -N 积累率最小,且出水水质最为稳定,波动最小。这可能是由于海水养殖废水营养少,且水体盐度高,不利于微生物的生长^[27]。如果是传统的生物滤器,随着时间的推移,其上的生物膜会越来越厚,污染物的去除率会随着气水比的增大而增大;但在移动床生物滤器中,当气水比达到一定程度时,反应器中的溶氧已足够满足硝化细菌的需要,不再是硝化细菌的

代谢活性的限制因素,此时,当气水比继续增加,生物滤器中的气泡增多,气泡对水体的扰动增强,又会导致填料之间碰撞加剧,过量冲刷填料表面,加速了生物膜的脱落,这样有效功能微生物数量及活性降低,影响去除效果^[26]。因此在气水比较小为 6:1 时,污染物去除率最大, NO_2^- -N 积累率最小,随着气水比的增大,其对污染物的去除效率反而下降,但是在气水比为 30:1 的时候 TAN 去除率上升, NO_2^- -N 积累率减小,这是因为 30:1 的气水比已经相当大,根据双膜理论,气液膜之间的阻力决定了氧气传递速率的大小,气水比越大,气液膜间的传质阻力越小,其他条件相近时,生物膜内溶氧浓度越高^[28],虽然填料上的生物膜微生物数量减少,但是好氧异养菌及硝化细菌的活性增强,并且水体中的气泡数量增加很多,通过气浮作用对水体中的污染物也有一定的净化作用。侯沙沙^[27]等研究发现使用竹环填料的生物滤器,随着气水比增大,出水 TAN 浓度逐渐降低,出水 COD 波动减小,且趋于平缓,在气水比为 30:1 时其去除率最大,这是因为竹环填料质量较重需要较大的气水比而本实验 K3 填料质轻便于移动,6:1 的气水比即可达到较好的去除率。黄滨等^[26]通过封闭式循环水半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis* Gunthe)养殖试验,随着气水比由 0.75:1~1.25:1 的增加,生物滤池氨氮的去除率由 35.0% 增加至 52.0%,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%,气水比高于 1.25:1 时,TAN 和 NO_2^- -N 去除率增速明显减缓,如果气水比再继续增大,对 TAN 去除作用不明显,还会浪费能耗。宋奔奔^[11]等的实验研究发现当气水比为 6:1 时,移动床滤料达到流化状态,TAN 去除率显著高于其他处理。这些研究结果与本研究的研究结果相似。

4 结论

本文主要研究了不同气水比条件下移动床生物滤器处理海水养殖废水污染物的去除效果,包括对 COD、TAN、 NO_2^- -N 的处理效率。结果显示:不同气水比条件下移动床生物滤器净化污染物的效果不同,且去除率波动较大。气水比为 6:1 时,生物滤器对 TAN 和 COD 的去除率均为最佳,对 NO_2^- -N 的积累率相对较低,能够满足鱼类养殖对亚硝酸盐氮浓度的安全要求,且此时移动床生物滤器能耗最低。如果增大气水比,不但能耗增加,滤器的去除率也会下降;如果减小气水比,则滤器中的填料不能正

常循环移动, 失去了移动床生物滤器的意义。因此选择气水比为 6 : 1 可获得较好的净化效率。

参考文献:

- [1] FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations). The State of World Fisheries and Aquaculture[R]. Rome: FAO, 2012, 209.
- [2] Timmons M B, Ebeling J M. The role for recirculating aquaculture systems [J]. AES News, 2007, 10(1): 2-9.
- [3] 刘鹰. 海水工业化循环水养殖技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 50-53.
Liu Ying. Research progress on marine industrial recirculating aquaculture technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5): 50-53.
- [4] 沈加正. 膜生物反应器应用于海水养殖废水处理的基础研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
Shen Jiazheng. Fundamental research on application of membrane bioreactor in marine aquaculture wastewater treatment[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [5] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(10): 16-23.
Wang Feng, Lei Jilin, Gao Chunren, et al. Research progress of water conditioning in industry recirculating aquaculture mode at home and abroad[J]. Engineering Science, 2013, 15(10): 16-23.
- [6] 李景贤, 罗麟, 杨慧霞, 等. MBBR 法工艺的应用现状及其研究进展[J]. 四川环境, 2007, 26(5): 97-101.
Li Jingxian, Luo Lin, Yang Huixia, et al. Status quo of application and research progress of MBBR process [J]. Sichuan Environment, 2007, 26(5): 97-101.
- [7] 陈淑吟, 孙国铭, 吉红九. 臭氧水处理在水产养殖中的应用研究[J]. 水产养殖, 2001, 2: 28-30.
Chen Shuying, Sun Guoming, Ji Hongjiu. The study on application of O₃ treatment in aquaculture[J]. Journal of Aquaculture, 2001, 2: 28-30.
- [8] 王学江, 夏四清, 陈玲, 等. DO 对 MBBR 同步硝化反硝化生物脱氮影响研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 514-517, 538.
Wang Xuejiang, Xia Siqing, Chen Ling, et al. Effect of DO on simultaneous nitrification and denitrification in MBBR[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2006, 34(4): 514-517, 538.
- [9] Zhu S, Chen S. Impacts of Reynolds number on nitrification biofilm kinetics[J]. Aquacult Eng, 2001, 24: 213-229.
- [10] 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[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 16-20.
Gao Xiyen, Fu Songzhe, Liu Ying, et al. Advances and analysis on the research of biofilm in biofilter in recirculating marine aquaculture system[J]. Fishery Modernization, 2009, 36(3): 16-20.
- [11] 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.
Qiu Fuguo, Hao Xiaodi, Chen Xinhua. Experimental study on influencing factor of biological aerated filter[J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(12): 81-84.
- [12] 宋奔奔, 宿墨, 单建军, 等. 水力负荷对移动床生物滤器硝化功能的影响[J]. 渔业现代化, 2012, 39(5): 1-6.
Song Benben, SU Mo, Shan Jianjun, et al. Effect of hydraulic loading on nitrification efficiency in moving bed biofilm reactor[J]. Fishery Modernization, 2012, 39(5): 1-6.
- [13] 施汉昌, 温泌雪, 白雪. 污水处理好氧生物流化床的原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012, 270-272.
Shi Hanchang, Wen Mixue, Bai Xue. The principle and application of aerobic biological fluidized bed in wastewater treatment[M]. Beijing: Science Press, 2012, 270-272.
- [14] Hirata A, Nakamura Y, Tsuneda S. Nitrogen removal from industrial wastewater discharged from metal recovery process[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(2-3): 171-179.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB17378.4-2007 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4 -2007 Marine monitoring norms part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [16] 闫修花, 王桂珍, 陈迪军. 纳氏试剂比色法测定海水中的氨氮[J]. 环境监测管理与技术, 2003, 15(3): 21-23.
Yan Xiuhua, Wang Guizhen, Chen Dijun. To determine NH₄⁺-N directly in sea-water using nessler's reagent-colorimetry[J]. Environmental Monitoring in China, 2003, 15(3): 21-23.
- [17] 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.
Kong Xiaosong, Gan Aihua, Liu Ruixuan, et al. The effect of gas-water ratio on the biofilm wastewater treatment technology in different stages[J]. Industrial Water Treatment, 2005, 25(7): 50-52.
- [18] 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.
Zhao Jingye, Zheng Xiaomeng, Gao Jun. Research on transfer coefficient of oxygenic aeration[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2006(1): 32-37.
- [19] 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.
Zhang Chuang, Tao Tao, Li Er, et al. Evaluation of two aerators based on results of clean water oxygenation experiment[J]. Environmental Pollution & Control, 2006(1): 42-45.
- [20] 徐斌, 夏四清, 胡晨燕, 等. MBBR 工艺预处理黄浦

- 江微污染原水[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 5-9.
- Xu Bing, Xia Siqing, Hu Chenyan, et al. MBBR technology for pretreatment of micro-polluted raw water[J]. *Chinawater&Wastewater*, 2004, 20(8): 5-9.
- [21] Martins C I M, Eding E H, Verdegem M C J, et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(3): 83-93.
- [22] 张卫强, 朱英. 养殖水体中氨氮的危害及其检测方法研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2012, 2(6): 324-327.
- Zhang Weiqiang, Zhu Ying. Advances on the research of the hazard of ammonia nitrogen in aquaculture water and its determination method[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2012, 2(6): 324-327.
- [23] 余瑞兰, 聂湘平, 魏泰莉, 等. 分子氨和亚硝酸盐对鱼类的危害及其对策[J]. 中国水产科学, 1999, 6(3): 73-77.
- Yu Ruilan, Nie Xiangping, Wei Taili, et al. Toxicity of molecular ammonia & nitrite to fishes and the control measures[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1999, 6(3): 73-77.
- [24] Krous S R, Blazer V S, Meade T L. Effect of Acclimation time on nitrite movement across the gill epithelia of rainbow trout: The role of "chloride cells"[J]. *The Progressive Fish-Culturist*, 1982, 44(3): 126-130.
- [25] Díaz V, Ibáñez R, Gómez P, et al. Kinetics of nitrogen compounds in a commercial marine Recirculating Aquaculture System[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 50: 20-27.
- [26] 黄滨, 雷霖霖, 翟介明, 等. 封闭循环水系统生物滤池气水比对水质净化效能的影响[J]. 中国水产科学, 2013, 20(6): 1266-1273.
- Huang Bin, Lei Jilin, Zhai Jieming, et al., Effect of the air-to-liquid ratio on treatment efficiency of wastewater in multistage BAF in a recirculating aquaculture system[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(6): 1266-1273.
- [27] 侯沙沙. 海水循环水养殖系统中气水比对生物滤器去除效率的影响[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- Hou Shasha. Dissertation for the Master Degree in Engineering[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011.
- [28] 刘春, 张安龙. 气水比对曝气生物滤池处理碱法草浆中段废水的影响[J]. 上海造纸. 2009, 40(3), 52-56.
- Liu Chun, Zhang Anlong. The Effect of Ratio of Gas and Water on Treating Soda Straw Pulping Effluent using Biological Aerated Filter[J]. *Shanghai Paper Making*, 2009, 40(3), 52-56.

Effect of gas–water ratio on removal efficiency of marine aquaculture wastewater in moving bed biofilm reactor

MA Xiao-na^{1, 2}, LI Xian¹, ZHANG Yan-qing³, WANG Bo³, LI Meng⁴, LIU Ying⁵

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 4. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 5. Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Received: Dec. 29, 2016

Key words: aquaculture wastewater; moving bed biofilm reactor; gas–water ratio; treatment effect

Abstract: The biological filter is the central unit in recirculating aquaculture systems (RAS) and the gas–water ratio is the key factor that influences the treatment efficiency of moving bed biofilm reactors. To determine the best gas–water ratio, in this paper, we evaluated the effect of the gas–water ratio on the purification efficiency in a mature moving bed biofilm reactor. We investigated the removal rates of total nitrogen (TAN), accumulation rates of nitrite (NO₂⁻-N), and chemical oxygen demand (COD) at different gas–water ratios (6 : 1, 10 : 1, 15 : 1, 20 : 1, 30 : 1). The results showed that as the gas–water ratio increased from 6 : 1 to 30 : 1, the TAN removal rate first increased and then decreased, whereas the accumulation rate of NO₂⁻-N first decreased and then increased. The gas–water ratio of 6 : 1 was associated with a better treatment efficiency than other gas–water ratios, with the best removal rates for TAN (12.55% ± 0.80%), COD (16.63% ± 1.28%), and the relatively lowest NO₂⁻-N (109.71% ± 23.94%) accumulation rate. Our results provide a reference for the optimization of moving bed biofilm reactors in industrialized production.

(本文编辑: 康亦兼)