

文章编号: 1674 - 7054(2015) 03 - 0235 - 07

5种滤料在循环养殖系统中去除氨氮效果的比较

崔云亮^{1 2}, 顾志峰^{1 2}, 郑兴^{1 2}, 王爱民^{1 2}

(1. 海南大学 热带生物资源教育部重点实验室, 海南海口 570228;

2. 海南大学 海洋学院/海南省热带水生生物技术重点实验室, 海南海口 570228)

摘要: 采用自然挂膜法, 研究了封闭循环水养殖系统中5种生物滤料挂膜成熟后氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮含量的变化趋势和相互关系。结果表明: 在生物膜挂膜期间, 5种不同生物滤料的氨氮质量浓度均随着系统运行时间的延长而逐渐下降, 亚硝酸盐氮质量浓度先升后降, 硝酸盐氮质量浓度则是逐渐上升。5种生物滤料中, 珊瑚砂和红色呼吸环的效果最优, 约23 d完成挂膜, 氨氮去除率为98.5%。各生物滤料挂膜成熟后, 可利用指数方程 $y = ae^{-bx}$ 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果进行拟合, 利用公 $y = 1/(a + b/x \ln x + c/x)$ 对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果进行拟合。生物滤料挂膜成熟后, 海水中的氨氮质量浓度与亚硝酸盐氮质量浓度或硝酸盐氮质量浓度之间也可用指数方程 $y = ae^{-bx}$ 拟合。

关键词: 生物滤料; 循环养殖系统; 挂膜; 氨氮; 水处理; 拟合模型

中图分类号: S 955. 7 文献标志码: A DOI: 10. 15886/j. cnki. rds wxb. 2015. 03. 002

近年来, 随着渔业资源的衰退和海洋环境污染的不断加剧, 循环水养殖模式已经逐渐成为我国海洋渔业可持续发展的重要养殖方式和研究热点。水质处理是循环水养殖的关键, 主要采用物理性过滤、化学性过滤和生物过滤等去除水体中的废物^[1], 其中, 生物过滤是核心环节^[2-3]。目前, 循环水养殖系统基本是在滤池中填充生物滤料处理养殖污水, 利用生物滤料附着的各种微生物的代谢活动分解养殖过程中所产生的废物, 其处理效果的好坏取决于滤料上生物膜的附着量和活性, 故滤料的选择与生物过滤处理效果关系十分密切^[4]。生物滤料种类繁多, 主要有天然生物滤料(如珊瑚石、贝壳、沸石、石英砂、竹环), 有机高分子滤料(如PE, HDPE, PP, PVF), 无机滤料(如活性炭、硅铝酸盐、陶粒)等。理想的生物滤料应具比表面积大、价格低廉、微生物易于附着、密度较小、易反冲洗等特性^[5]。生物滤料的处理效果一般综合其生物膜的挂膜时间长短、水处理效果以及滤料上生物膜生长的好坏等指标进行评价。这些指标受许多因素的影响, 如滤料的表面物理化学特性、微生物的性质、环境特性(水力剪切、溶解氧、温度、有机物负荷、pH值等)^[6-8]。目前, 已经有许多学者开展了不同生物滤料水处理效果的研究, 主要是针对水体中氨氮转化为亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的分析, 如 Hirai 等^[9]对阶梯环和空心球进行了研究, 发现阶梯环的氨氮去除效果优于空心球; 何洁等^[10]对沙子、活性炭、沸石进行了研究, 发现沸石的氨氧化作用和硝化作用性能均好于活性炭、沙子; 张延青等^[11]研究了竹环、麦饭石、陶粒、塑料生物球的除氮性能, 发现竹环的效果优于其他3种滤料; 王际英等^[12]比较了活化炉渣与其他生物滤料对氨氮处理效率的差异, 发现活化炉渣可以替代常规生物滤料, 而且更廉价。笔者以养殖废水为处理对象, 在室内循环养殖系统中比较分析珊瑚砂、红色呼吸环、白色玻璃环、火山岩和细菌球5种生物滤料的生物挂膜效果及挂膜成熟后氨氮处理效果, 旨在为循环水养殖中水质处理的生物媒介提供更多的选择。

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国际科技合作专项(2012DFG32200, 2013DFA31780); 国家科技支撑计划(2012BAC18B04); 海南省科技兴海项目(XH201314)

作者简介: 崔云亮(1989-), 男, 海南大学海洋学院2012级硕士研究生, E-mail: 48606738@qq.com

通信作者: 王爱民(1961-), 男, 教授, 研究方向: 贝类遗传育种, E-mail: aimwang@163.com

1 材料与方法

1.1 实验装置 实验装置为上、中、下 3 层互通的封闭式循环水养殖缸,其中下层用于生物滤料的填充。整个实验装置的总有效水体为 600 L,采用潮汐式循环封闭系统,室内温度为 25 ℃。潮汐式循环封闭系统的构建原理具体见文献 [13]。

1.2 实验材料 生物滤料中的珊瑚砂于 2014-07-03 采自海南省儋州市桥头港,红色呼吸环、白色玻璃环、天然火山岩和细菌球等 4 种滤料均购自台湾 no.1 滤料公司(图 1)。

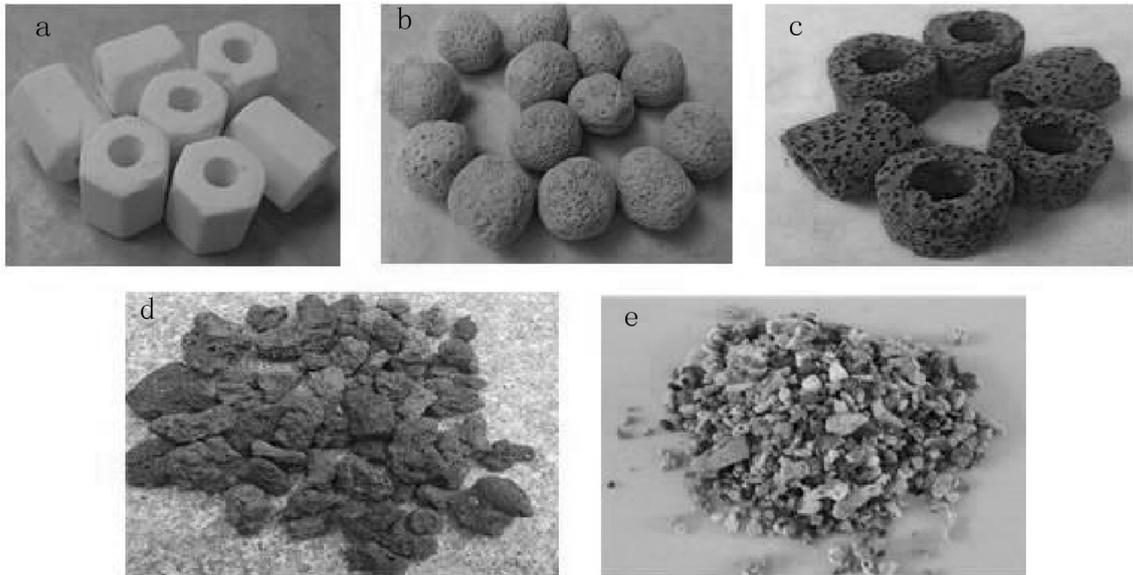


图 1 各生物滤料外观图

a. 白色玻璃环; b. 细菌球; c. 红色呼吸环; d. 火山岩; e. 珊瑚砂

Fig. 1 The appearance of biofilter media

a: White glass ring; b: Bacterial ball; c: Red breathing loop; d: Volcanic rock; e: Coral sandstone

1.3 实验方法

1.3.1 滤料氨氮去除能力的检测方法 用氨氮初始质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的养殖废水对生物滤料进行自然挂膜处理,即利用海水中天然存在的硝化细菌等微生物在养殖系统的水体循环过程中自然吸附接种于生物滤料表面,逐渐繁殖发育形成生物膜。调试循环水养殖系统,维持水体中溶解氧(DO)质量浓度为 $5.0 \sim 5.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、盐度为 29~31、pH 为 7.9~8.1。待水体 TAN 和 NO_2^- 质量浓度均降至最低时,通过添加 NH_4Cl 溶液使水体的 NH_4^+-N 质量浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,连续 25 d 检测水质各无机氮盐的变化情况,对各生物滤料氨氮去除能力进行比较。

依照《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007)进行氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的检测,即 NH_4^+-N 采用次溴酸盐氧化法、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 采用重氮-偶氮比色法、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 采用锌镉还原法,每天上午 8:00 分别进行测量;同时,采用 YSI-6600 多功能水质分析仪(美国 YSI 公司)测定水体的盐度、pH 值、DO 和水温。

1.3.2 数据处理 采用 DPS14.5 统计软件处理实验数据,分析氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮含量变化以及彼此间的变化关系,并建立氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮变化规律的预测模型方程(y 代表质量浓度, x 代表时间)。

2 结果与分析

2.1 滤料挂膜阶段 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 质量浓度变化情况 从图 2A 可知,在系统运行至 21~23 d 后,5 种生物滤料水体的 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 质量浓度皆达到最小值。珊瑚砂、红色呼吸环、细菌球、白色玻璃环和火山岩处理水体中 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 质量浓度的最小值分别为 0.055、0.059、0.096、0.096、0.071 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中珊瑚砂及红色呼

吸环在第19天时 NO_2^- -N 质量浓度接近最低值。

2.2 滤料挂膜成熟后处理高浓度氨氮海水时,含氮无机盐质量浓度的变化情况

2.2.1 NH_4^+ -N 质量浓度变化 从图2B可知,经5种生物滤料处理后, NH_4^+ -N 质量浓度在第3天开始迅速降低,其中珊瑚砂和红色呼吸环下降较快,第15天时接近最小值($0.215 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),氨氮去除率为98.5%;其余3种生物滤料在第17天时 NH_4^+ -N 质量浓度趋于最小值($0.405 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),氨氮去除率为95.5%。

2.2.2 NO_2^- -N 质量浓度变化 从图2C可知,珊瑚砂处理的水体的 NO_2^- -N 质量浓度从第3天开始迅速上升,第7天达最大值($4.281 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),第9天快速下降,直至第17天趋缓,第19天的质量浓度为 $0.660 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其余4种生物滤料基本是在第4天开始快速增高,其中,红色呼吸环处理的水体的 NO_2^- -N 质量浓度第9天达到最大值($5.943 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),然后迅速下降,在第17天趋缓,第19天的质量浓度为 $0.824 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;火山岩、白色玻璃环和细菌球等生物滤料处理的水体的 NO_2^- -N 质量浓度均在第11天达到最大值,分别为 6.928 、 7.205 、 $7.927 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;火山岩处理的 NO_2^- -N 质量浓度达最大值后随即迅速下降,而白色玻璃环和细菌球处理的则在第15天后才快速下降。

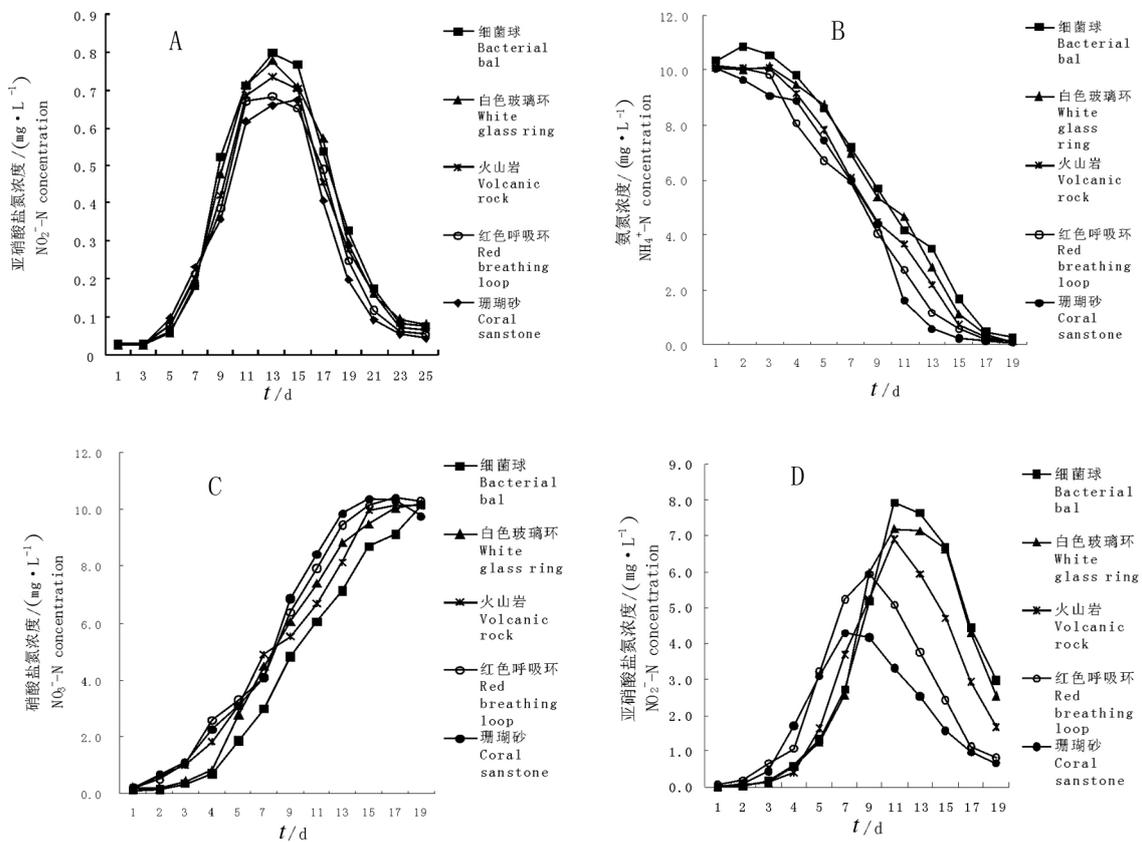


图2 5种生物滤料挂膜及处理高氨氮含量海水时的含氮无机盐质量浓度变化

A: 挂膜期间海水 NO_2^- -N 质量浓度; B: 挂膜成熟后海水 NH_4^+ -N 质量浓度;
C: 挂膜成熟后海水 NO_2^- -N 质量浓度; D: 挂膜成熟后海水 NO_3^- -N 质量浓度

Fig. 2 The concentration change of inorganic salt containing nitrogen in the seawater containing high ammonia during biofilm cultivation and maturation

A: The NO_2^- -N concentration during biofilm cultivation; B: The NH_4^+ -N concentration after biofilm maturation;

C: The NO_2^- -N concentration after biofilm maturation; D: The NO_3^- -N concentration after biofilm maturation

2.2.3 NO_3^- -N 质量浓度变化 从图2D可知,珊瑚砂、红色呼吸环和火山岩处理的水体的 NO_3^- -N 的质量浓度自挂膜成熟后第3天开始迅速上升,第15天趋缓;白色玻璃环和细菌球处理的从挂膜成熟后第4

天开始 NO_3^- -N 的质量浓度迅速上升,第 17 天趋缓;第 19 天时,5 种生物滤料处理的 NO_3^- -N 质量浓度基本相似,约为 $10.325 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3 滤料挂膜成熟后处理高浓度氨氮海水时,氨氮与亚硝酸盐氮、硝酸盐氮质量浓度间的关系 生物滤料挂膜处理循环养殖系统水体时,是将 NH_4^+ -N 先转化为 NO_2^- -N,再转化为 NO_3^- -N,故 NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 之间存在一定相关关系。DPS 14.5 拟合分析结果显示,当生物滤料挂膜成熟后处理高浓度氨氮海水时,从图 3A 可知,当 NH_4^+ -N 质量浓度高于 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 质量浓度 (x) 与 NO_2^- -N 质量浓度 (y) 之间的关系符合方程 $y = 768.8e^{-0.008930x}$ ($R^2 = 0.9019$),二者质量浓度间的相关性较强,拟合程度较高;从图 3B 可知,当生物滤料挂膜成熟后处理高浓度氨氮海水时, NH_4^+ -N 质量浓度 (x) 与 NO_2^- -N 质量浓度 (y) 之间符合指数方程 $y = 531.556674e^{-0.01324x}$ ($R^2 = 0.8259$),其拟合程度也较高。

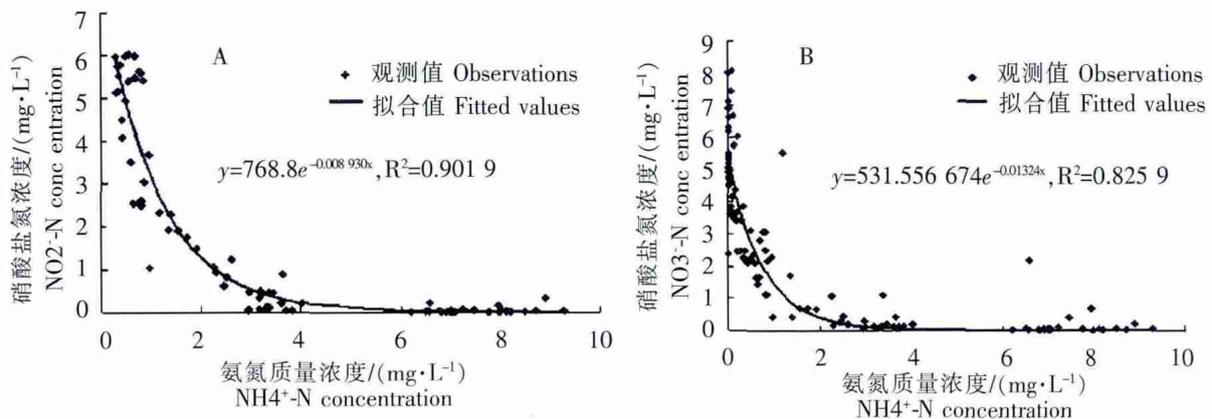


图 3 生物滤料挂膜成熟后处理高氨氮含量海水时氨氮与亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的质量浓度拟合图

A: 氨氮与亚硝酸盐氮; B: 氨氮与硝酸盐氮

Fig. 3 The fit curve between the NH_4^+ -N and NO_2^- -N or NO_3^- -N concentration of the seawater containing high ammonia when treated with the biofilter media after biofilm maturation

A: fit curve between NH_4^+ -N and NO_2^- -N concentration; B: fit curve between NH_4^+ -N and NO_3^- -N concentration

2.4 滤料挂膜成熟后处理高质量浓度氨氮海水时,无机氮质量浓度变化的预测模型方程

2.4.1 NH_4^+ -N 质量浓度变化预测模型 从表 1 可知,5 种生物滤料处理高质量浓度氨氮海水时, NH_4^+ -N 质量浓度的变化均符合指数函数 $y = ae^{-bx}$,所有拟合方程的拟合度很好, R^2 至少为 0.9218。细菌球处理效果的拟合方程 a 值最大(961.599206)且 b 值最小(0.087175),白色玻璃环处理效果的拟合方程 a 值最小(850.714680),珊瑚砂处理效果拟合方程的 b 值最大。

2.4.2 NO_2^- -N 质量浓度变化预测模型 从表 1 可知,5 种生物滤料处理高质量浓度氨氮海水时, NO_2^- -N 的质量浓度变化都符合方程 $y = 1/(a + b/x \ln x + c/x)$ 。细菌球、白色玻璃环和火山岩处理拟合方程的拟合度很好, $R^2 \geq 0.9715$;红色呼吸环处理预测模型的拟合度良好,其 R^2 为 0.8991;珊瑚砂处理预测模型的拟合度较差,其 R^2 仅有 0.7666。在 5 种生物滤料中,珊瑚砂拟合方程的 3 个常量绝对值最大,其 a b c 值分别为 0.09699, -0.88207, 1.09459;红色呼吸环拟合方程的 3 个常量的绝对值最小,其 a b c 值分别为 0.01086, -0.13332, 0.22511。

2.3.3 NO_3^- -N 质量浓度变化模型 从表 1 可知,5 种生物滤料处理高质量浓度氨氮海水时, NO_3^- -N 的质量浓度变化拟合方程一致,且与 NO_2^- -N 的质量浓度变化预测模型方程相同。细菌球、白色玻璃环和珊瑚砂处理拟合方程的拟合度良好, $R^2 \geq 0.9417$;红色呼吸环和火山岩处理预测模型的拟合度略低,其 R^2 分别为 0.8572 及 0.8922。红色呼吸环拟合方程的 3 个常量绝对值最小,其 a b c 值分别为 0.00654, -0.08558, 0.17999;白色玻璃环拟合方程 a 常量绝对值最大(0.02529);细菌球 b c 常量绝对值最大,分别为 -0.80454, 2.20384。

表1 生物滤料挂膜成熟后处理高氨氮含量海水时无机氮质量浓度预测模型方程参数值

Tab. 1 The parameter values of the model equations for inorganic nitrogen concentration of the seawater containing high ammonia when treated after biofilm maturation

无机氮类型 Types of inorganic nitrogen	生物滤材类型 Types of biological biofilter media	参数值 Values			R^2
		a	b	c	
$\text{NH}_4^+ -\text{N}$	细菌球 Bacterial ball	961.599 206	0.087 175		0.921 8
	白色玻璃环 White glass ring	850.714 680	0.091 767		0.923 8
	火山岩 Volcanic rock	887.113 529	0.099 054		0.962 4
	红色呼吸环 Red breathing loop	934.520 778	0.124 005		0.947 8
	珊瑚砂 Coral sandstone	942.149 386	0.128 155		0.939 4
$\text{NO}_2^- -\text{N}$	细菌球 Bacterial ball	0.033 82	-0.533 61	0.964 12	0.972 7
	白色玻璃环 White glass ring	0.023 51	-0.361 73	0.652 64	0.987 4
	火山岩 Volcanic rock	0.031 71	-0.422 69	0.694 04	0.971 5
	红色呼吸环 Red breathing loop	0.010 86	-0.133 32	0.225 11	0.899 1
	珊瑚砂 Coral sandstone	0.096 99	-0.882 07	1.094 59	0.766 6
$\text{NO}_3^- -\text{N}$	细菌球 Bacterial ball	0.020 93	-0.804 54	2.203 84	0.987 2
	白色玻璃环 White glass ring	0.025 29	-0.47662	0.966 86	0.983 4
	火山岩 Volcanic rock	0.006 44	-0.120 49	0.269 03	0.892 2
	红色呼吸环 Red breathing loop	0.006 54	-0.085 58	0.179 99	0.857 2
	珊瑚砂 Coral sandstone	0.008 35	-0.112 87	0.200 90	0.941 7

3 讨论

19世纪20~30年代,英国人最早以碎石、炉渣作为生物滤料处理废水,随后国内外大量学者对生物滤料的高生物浓度、高氧气传质效率、高降解能力等方面进行研究。Hiraz^[9]对比研究了阶梯环和空心球生物滤料的特性,发现阶梯环氨氮去除效果优于空心球;Moore. R^[14]认为,粒径在1.5~3.5 mm的滤料对氨氮的处理效果较优。本研究结果显示,5种生物滤料生物膜培养过程中亚硝酸盐氮质量浓度基本是先呈略微下降的趋势,后急剧上升趋于最大峰值,在峰值附近维持数天后快速下降,并最终稳定在某一低质量浓度,该结果与山形阳一等^[15]的报道一致。亚硝酸盐氮质量浓度降至最低值所需时间与硝酸盐氮质量浓度达到最大值所需时间基本吻合,与张延青等^[11]实验结果相似。当 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 质量浓度降至最低值时表明生物膜已培养成熟^[16],即氨氮降解的硝化作用系统完全建立。Bwver^[17]认为,用生物球及软性生物填料构建的海水滤池硝化功能的建立一般需40~80 d;李冬梅等^[18]在生物氧化铁改性砂的氨氮强化过滤性

能的研究中发现, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度在第 27 天降至最低。本实验中, 珊瑚砂及红色呼吸环 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度降至最低值只需 19 d。滤料生物挂膜成熟时间的差异既可能是不同生物滤料本身理化特性等差异所致, 也可能是实验海水的盐度、微生物类群与丰度等不同引起。此外, 本研究采用潮汐式自动循环养殖系统, 滤材交替处于露空-浸没中, 这可能影响微生物的繁殖; 同时, 本研究将水温控制在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 也有利细菌繁殖。

挂膜成熟后, 笔者通过添加 NH_4Cl 溶液, 使水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度达到 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 研究挂膜成熟后滤料的功能性。结果发现, 5 种滤料的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度在第 3 天时开始迅速降低, 珊瑚砂和红色呼吸环在第 15 天时就达到最低质量浓度 ($0.215\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其总氨氮去除率可达 98.5%, 即稳定运行阶段的滤料具有较高的氨氮负荷及氨氮去除率, 该现象与吴凡等^[19]在关于聚苯乙烯泡沫粒子新型悬浮滤料的研究中得到的结果一致, 而略高于周晴^[8]在 UBAF 不同挂膜方式的研究中得到的自然挂膜法的氨氮去除率为 87.8% 的结果。挂膜成熟后的滤料 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度均有不同程度的积累现象, 且亚硝酸盐氮质量浓度最大值不尽一致, 其原因可能是在 DO 和 TOC 充足时氨氧化细菌的生存竞争占优势, 一定程度上阻碍了自养的硝化细菌的生长繁殖^[20], 挂膜稳定后亚硝酸盐氮的积累时间最多为 4 d, 而宋协法等^[21]的结果表明, 亚硝酸盐氮的积累时间为 10 d, 两者的结果差异较大, 其原因可能在于本实验采用了能充分保证水体溶氧量的潮汐式过滤方式, 保证了硝化细菌新陈代谢及繁殖所需要的溶氧量。在所供试的 5 种生物滤料中, 珊瑚砂和红色呼吸环相对其余 3 种生物滤料的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度下降较快, 去除率较高。综合考虑, 珊瑚砂和红色呼吸环对于水体氨氮去除功能性优于细菌球、白色玻璃环和火山岩; 珊瑚砂稍优于红色呼吸环。

生物滤料挂膜成熟后处理海水中的氨氮, 主要是利用形成的生物膜中的微生物将对经济养殖生物可能产生毒性的 NH_3 最终转化为毒性较低硝酸盐, 因而, 在封闭的循环养殖系统中, 总氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮质量浓度存在一定的此消彼长的关系, 氨氮模型表达式为指数函数 $y = ae^{-bx}$ 。本研究拟合方程结果显示, 铵盐质量浓度与亚硝酸盐和硝酸盐质量浓度均存在负相关关系。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度的变化趋势皆满足表达式 $y = 1/(a + b/x \ln x + c/x)$, 可理解为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度之间的变化是具有同步性的, 而在同一时间段 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度的变化各自的参数值不同。因此, 可借生物滤料无机氮盐浓度变化趋势模型来推测在某一时间范围内无机氮盐对应的浓度变化, 从而为循环水养殖系统的定期维护提供指示作用。

参考文献:

- [1] 韩家波, 木云雷, 王丽梅. 海水养殖与近海水域污染研究进展 [J]. 水产科学, 1999, 18(4): 40-43.
- [2] 刘鹰. 欧洲循环水养殖技术综述 [J]. 渔业现代化, 2006(6): 47-49.
- [3] 朱建新, 刘慧, 徐勇, 等. 循环水养殖系统生物滤器负荷挂膜技术 [J]. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 118-124.
- [4] 宋协法, 曹涵, 彭磊. 一种新型滤料在循环养殖水处理中的应用 [J]. 环境工程学报, 2007, 1(12): 27-31.
- [5] HE S, XUE G, KONG H. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature ammonium shock load [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1/2): 291-295.
- [6] PUJOL R, LEMMEL H, GOUSAILLES M. A keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reactor [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(3): 43-49.
- [7] BLANCHETON J P. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species [J]. Aquacultural Engineering, 2000, 22(1/2): 17-31.
- [8] 周晴, 傅金祥, 赵玉华, 等. UBAF 两种挂膜方式的试验研究 [J]. 工业安全与环保, 2005, 31(5): 28-30.
- [9] HIRAI M, KAMAMOTO M, YANI M, et al. Comparison of the biological NH_3 removal characteristics among four inorganic packing materials [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2001, 91(4): 428-430.
- [10] 何洁, 刘长发, 张红霞. 3 种载体上生物膜的硝化性能 [J]. 中国水产科学, 2003, 10(1): 65-68.
- [11] 张延青, 刘鹰, 石芳永, 等. 海水生物滤器除氮性能及硝化动力学研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1697-1703.
- [12] 王际英, 乔洪金, 李宝山, 等. 活化炉渣作为生物滤料在循环式海水工厂化养殖中的应用 [J]. 渔业现代化, 2014, 41(3): 1-4.
- [13] 田景波, 王印庚, 孙修涛, 等. 海水池塘养殖污水减排系统的设计和工程化技术 [J]. 渔业现代化, 2008, 35(2): 1-5.
- [14] MOORE R, QUARMBY J, STEPHENSON T. The effects of media size on the performance of biological aerated filters [J].

- Water Research 2001, 35(10): 2514–2522.
- [15] 山形阳一, 梅志平. 循环过滤设备的维护和管理[J]. 水产科技情报, 1991, 18(2): 58–60.
- [16] 王威, 曲克明, 王海增, 等. 水力负荷对3种滤料生物挂膜和溶解无机氮去除效果的初步研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 66–71.
- [17] BOWER C E, TURNER D T. Effects of seven chemotherapeutic agents on nitrification in closed seawater culture systems [J]. Aquaculture, 1982, 29(3/4): 331–345.
- [18] 李冬梅, 龙倩雯, 周志宁, 等. 生物-氧化铁改性砂对氨氮的强化过滤性能[J]. 中国给水排水, 2014, 30(3): 5–9.
- [19] 吴凡, 鲍越鼎, 刘晃, 等. 一种新型悬浮滤料在循环水养殖系统中的生物过滤效果[J]. 水产科技情报, 2008, 35(6): 293–296.
- [20] 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 521–525.
- [21] 宋协法, 柳瑶, 黄志涛. 不同滤料及挂膜方式对养殖污水处理效果的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1687–1691.

Comparison of Five Biofilter Media in Ammonia-removing Efficiency in the Recirculation Aquaculture System

CUI Yunliang^{1,2}, GU Zhifeng^{1,2}, ZHENG Xing^{1,2}, WANG Aimin^{1,2}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Tropical Bio-resources, Hainan University, Haikou 570228;

2. Ocean College/Hainan Key Laboratory of Tropical Hydrobiological Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Five biofilter media, bacterial ball, white glass ring, volcanic rock, red breathing loop and coral sandstone, were used to remove dissolved $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in the seawater in a closed recirculation aquaculture system by using the natural biofilm cultivation method, and to examine the change of and the relation among $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in the seawater after the biofilm maturation. During biofilm cultivation, these biofilter media were found to reduce the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentrations over time, increase initially and then decrease the $\text{NO}_2\text{-N}$ concentrations, and increase gradually the $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations. The coral sandstone and the red breathing loop were better than other media in removing inorganic nitrogen. They formed biofilms in about 23 days and reduced the ammonia concentrations to $0.215 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at day 15 after biofilm formation, with a $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ removal rate of upto 98.5%. After biofilm maturation, the exponential equation $y = ae^{-bx}$ was fitted to the data of the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ removal efficiencies of each biofilter medium, and the equation $y = 1/(a + b/x \ln x + c/x)$ fitted to the data of the $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ removal efficiencies. Moreover, the relationship between the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration and the $\text{NO}_2\text{-N}$ concentration or the $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration in the sea water was also fitted by using the exponential equation $y = ae^{-bx}$.

Key words: biofilter media; recirculation aquaculture system; biofilm cultivation; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$; ammonia nitrogen; water treatment; fitting equation model