

文章编号:1000-0615(2004)04-0419-06

循环流水水产养殖系统接种商品硝化菌的试验研究

泮进明

(浙江大学农业生物环境工程研究所,浙江 杭州 310029)

摘要:与接种成熟滤料等方法相比,利用商品硝化菌接种生物滤器来源广泛,操作简便。本文使用一种商业上已取得一定成功的商品硝化菌液接种循环流水水产养殖系统试验模型的生物滤器。试验开始时定期接入 20mL 菌液(细菌含量 1.5×10^{10} CFU·mL⁻¹)以处理 400g 饲料产生的 $4.27\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮(TAN),12d 后 TAN 浓度低于 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,20d 后 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度降至同样水平。在为期 30d 的检验期中,系统内养殖 $2.15\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 淡水白鲟,日喂饲率 2%。期间养殖池 TAN 最大值 $0.465\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最小值 $0.393\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值 $0.427 \pm 0.019\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大值 $0.062\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最小值 $0.038\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值 $0.052 \pm 0.007\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;EC 呈线性上升状态,每周增加 $32.8\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$;而 pH 呈线性下降,每周降低 0.24。系统结束时生物滤器含细菌 8.65×10^6 CFU·mL⁻¹,水质除 TP 超标外,其余指标均符合我国淡水水产养殖水质标准,在 2.1%~1.4% 的日喂饲率下淡水白鲟日增重为 1.91g,饲料系数 1.164。

关键词:硝化细菌;接种;生物滤器;循环流水水产养殖;淡水白鲟

中图分类号:S961.6

文献标识码:A

Utilization of commercial nitrobacteria additive in the inoculation of a new recirculating aquaculture system

PAN Jin-ming

(Institute of Agricultural Bio-environment Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: In recirculating aquaculture production systems, certain high quality commercial bacterial amendments are easier to be used than getting media from an established biofilter. In this paper, a known commercial bacterial amendment was used to inoculate for a new biofilter of a pilot recirculating aquaculture system. At the beginning, 20 mL amendment in all (300 billion CFU bacteria) was injected into the biofilter basin in four applications during a period of three days. On the first day and the third day of the experiment, 200g of feed containing 32% protein were dissolved into fish tanks. The peak of total ammonia nitrogen (TAN) concentration was found on the seventh day and that of nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^- - \text{N}$) was found four days later. It took 12 and 20 days for TAN and $\text{NO}_2^- - \text{N}$, respectively, to achieve a level of $0.05\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. In the subsequent 30 day investigation, 54 *Colossoma brachyomum* (mean initial weight $105.7 \pm 23.2\ \text{g}$) were stocked in the system at the density of $2.15\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and fed a sinking 32% protein diet twice daily. TAN level in two fish tanks was kept between 0.393 and 0.465 with a mean of $0.427 \pm 0.019\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ was between 0.038 and 0.062 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with a mean of $0.052 \pm 0.007\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Diurnal changes of TAN concentration showed two peaks and two

收稿日期:2003-10-13

资助项目:国家自然科学基金(39570586)和中国—比利时国际合作项目(教外司欧(1996)663号)

作者简介:泮进明(1977-),男,浙江东阳人,讲师,博士,主要从事生态农业环境工程研究。E-mail: panhouse@zju.edu.cn

troughs, while $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration only showed one peak and one trough. Electric conductivity (EC) measurements taken in the fish tanks showed a linear accumulation of $32.8 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ weekly while pH descended 0.24 every week. At the end of this experiment, 8.65 million $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ of bacteria was found in the biofilter. Except total phosphorus (TP) of $4.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, water quality parameters all conformed to the requirements of Chinese Freshwater Aquaculture Water Quality Standards with TAN of $0.471 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ of $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) of $7.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, total nitrogen (TN) of $13.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, chemical oxygen demand (COD) of $7.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and dissolved oxygen (DO) of $8.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. As a result of comfortable environments, the fish grew well under daily feed rates of 2.1% - 1.4% and got a survival rate of 100%, with a daily growth rate of 1.91 g, and a feed conversion ratio (FCR) of 1.164.

Key words: nitrobacteria; inoculation; biofilter; recirculating aquaculture; *Colossoma brachypomum*

生物过滤在工业、农业和生活污水的处理方面得到了最广泛的应用,在水产养殖废水处理中也是最经济可行的方法^[1],Lawson^[2]将生物滤器称为循环流水水产养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)的心脏。在一个生物滤器中,由各种细菌(统称为硝化菌)将氨转化成亚硝酸盐(亚硝化)和将亚硝酸盐转化成硝酸盐(硝化),但在新建的水产养殖系统中,硝化细菌数量十分缺乏,通过接种可以使系统尽快投产。

生物滤器的接种方法有:(1)接种成熟生物滤器的滤料;(2)接种配方菌液或菌粉;(3)接种细菌丰富的表层土壤;(4)接种活性淤泥等^[3]。目前许多研究都建议采用第一种方法,但事实上,该方法来源有限、操作不便;与其相比,方法二的来源易形成商品,来源广泛,具有很大的发展潜力和应用价值。由于未能有效鉴别各种细菌是否具有亚硝化或硝化等相关功能,较早的相关研究没有得到积极的效果^[4-5]。近几年来,各种配方菌液或菌粉已得到大量开发,出现在市场上的商品日渐增多,但相关的应用研究尤其是在水产养殖上的应用信息十分有限。

本文在新建的循环流水水产养殖系统试验模型中使用一种商业上已取得一定成功的商品硝化菌液进行生物滤器接种,并在半高密度养殖条件下检验生物滤器过滤效果,为寻找低成本、高效率、操作简便的接种方法提供依据。

1 材料与方 法

1.1 实验设计

本试验在浙江大学农业生物环境工程研究所

校内实验基地(农业部生态农业环境工程重点开放实验室)进行,循环流水水产养殖系统试验模型包括:2个养殖池,1个固体处理池(包括斜板沉淀器和机械过滤器),1个生物滤器(图1)。

各池顶部处于同一高度,总容积为 5.090 m^3 ;额定静水状态下池顶部与水位高差 150mm,此时系统水容量为 4.236 m^3 ,两个养殖池水容量为 2.651 m^3 ,固体处理池为 0.918 m^3 ,生物滤器为 1.080 m^3 。系统的水循环通过由继电器控制的自吸式水泵(550 W , $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)完成,水泵1个工作周期为 15min,开启 5min,关闭 10min,整点开启。利用雷磁式空气压缩机(130 W)增氧,1个工作周期为 15min,开启 10min,关闭 5min,工作周期与水泵工作周期同步。生物滤器滤料采用浙江省杭州市农村能源办公室研制的塑料线状滤料(图1),每根滤料长为 150mm,每米含 800根,池中每串长 0.75m,共悬挂 30串,间距 $180 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

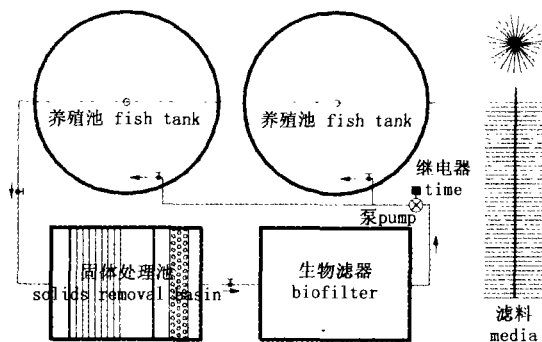


图1 循环流水水产养殖系统试验模型平面图(左)及生物滤器滤料详图(右)

Fig.1 Overall layout of the model recirculating aquaculture system (left) and details of biofilter media (right)

试验于 2003 年 5 月 19 日开始,6 月 30 日结束,为期 43d,分两个阶段。

第一阶段:5 月 19 日至 5 月 31 日,接种期,生物滤器接种及观察初步效果。分别于 5 月 19 日和 5 月 21 日(8:00)向系统的两个养殖池各投入饲料 200g(为加快饲料的溶解和分解,饲料先装入 PVC 丝网袋中,充分湿润后揉碎溶解,残渣也倒入系统中;预备试验结果表明 100g 饲料溶解后产生总氨氮 TAN 约 2.83g)。硝化菌液为一种在商业上已取得一定成功的市售净水剂,内含光合菌群、乳酸菌群、酵母菌群、革兰氏阳性放线菌群、发酵丝状放线菌群等多种细菌,活菌数为 1.5×10^{10} CFU·mL⁻¹,该产品对外塘养殖的推荐接种剂量为 $0.5 \sim 0.8$ mg·L⁻¹,15d 使用一次。共进行 4 次接种(5 月 19 日、5 月 21 日、5 月 23 日、5 月 25 日),接种时间为 8:00,每次接种 5mL。

第二阶段:6 月 1 日至 6 月 30 日,检验期,在半高密度养殖下检验生物滤器的过滤能力;6 月 1 日(17:00)系统开始养殖淡水白鲳(学名短盖巨脂鲤, *Colossoma brachypomum*),检验接种效果。

淡水白鲳于 5 月 29 日从浙江省水产科学研究所获得,不喂饲直至 6 月 1 日下午逐条称重后养入系统中(5 月 31 日下午 4:00 向系统中加入一定量的氯化钠,以降低亚硝氮对鱼的毒性,用量按照 1 mg·L⁻¹ 亚硝氮 : 6 mg·L⁻¹ 氯化钠计算确定^[6])。两个养殖池各养殖 27 尾,体重分别为 108.4 ± 19.6 和 102.9 ± 24.2 g,载鱼量分别为 2.93 和 2.78kg,养殖密度分别为 2.21 和 2.10kg·m⁻³。6 月 3 日喂饲开始,饲料为柱状颗粒,蛋白质含量 32%。日喂饲率 2%,两个养殖池的实际日喂饲量均采用 60g。每天投喂两次(9:00 和 17:00),每次投喂量相同。整个生产过程中系统不向外界排放废水,由于蒸发等造成的水量损失由专门的补水桶和水泵补充,一般 9d 测量并补水一次。

1.2 采样制度及检测方法

第一阶段:每天检测水质总氨氮 TAN、亚硝氮 NO₂⁻-N。采样对象为养殖池(2 个),采样时间 16:58~17:00,每个养殖池采双样,每样重复 3 次,取平均值计算。5 月 24 日至 5 月 31 日对养殖池 TAN 和 NO₂⁻-N 进行日变化监测,采样时间每天 8:00~22:00,每小时采样 1 次。

第二阶段:正常喂饲 7d 后每天检测养殖池(2 个)、固体处理池和生物滤器的 TAN 和 NO₂⁻-N;

每周周日检测电导率 EC(HI9033 手持便携式 EC 计)、溶氧 DO(HI9143 手持便携式 DO 计)、pH(HI9024 手持便携式 pH 计)和水温 T(HI9024 手持便携式 pH 计)(采样时间 17:00,现场测量);每周周一进行 TAN 和 NO₂⁻-N 日变化监测(8:00~次日 6:00),每 2 h 采样 1 次,整点采样;6 月 30 日检测 TAN、NO₂⁻-N、硝氮 NO₃⁻-N、总氮 TN、总磷 TP、化学需氧量 COD,采样时间 9:00。7 月 1 日 8:00 检测生物滤器细菌数(平板稀释法^[7]),滤料采样:取 1 根滤料置于 200mL 锥形瓶的 200mL NaCl 无菌水 (30 g·L⁻¹) + 无菌 Tween 溶液 (1%)^[8] 中振荡 30min 后迅速取样;水体采样:同 TAN 等采样。7 月 1 日停止喂饲,7 月 3 日 8:00 鱼全体称重。

2 结果

2.1 接种期 TAN、NO₂⁻-N 浓度

接种期(5 月 19 日至 5 月 31 日)每天 8:00 对养殖池 TAN 和 NO₂⁻-N 监测结果见图 2。

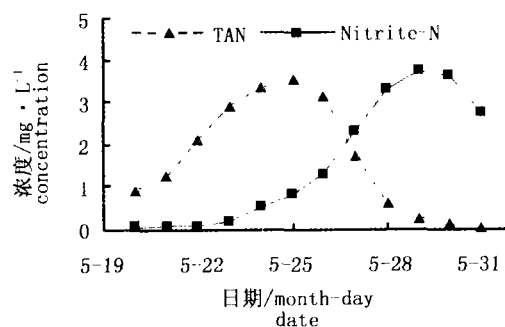


图 2 接种期养殖池总氨氮 TAN 和亚硝氮 NO₂⁻-N 浓度

Fig.2 Total ammonia-nitrogen (TAN) and nitrite-nitrogen (NO₂⁻-N) concentrations in two fish tanks during the inoculation period

养殖池 TAN 浓度在 5 月 25 日以前一直处于上升状态,其后一直下降,5 月 31 日 8:00 已低于 0.05 mg·L⁻¹ (0.040 mg·L⁻¹)。NO₂⁻-N 浓度变化趋势与 TAN 相似,但其变化比 TAN 变化滞后约 4d,峰值出现在 5 月 29 日 (3.755 mg·L⁻¹),随后逐渐下降。

2.2 检验期 TAN、NO₂⁻-N 浓度日变化

以 6 月 9 日测量结果为例,检验期系统 TAN 和 NO₂⁻-N 日变化分别见图 3 和图 4。养殖池

TAN浓度一天出现两个高峰和两个低谷,高峰值分别为 $0.487\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (14:00)和 $0.476\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (22:00),低谷值为 $0.421\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (18:00)和 $0.410\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (6:00); NO_2^- -N浓度日变化一天只出现一个高峰和一个低谷,高峰 $0.069\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (12:00),低谷 $0.049\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (24:00)。固体处理池净水区

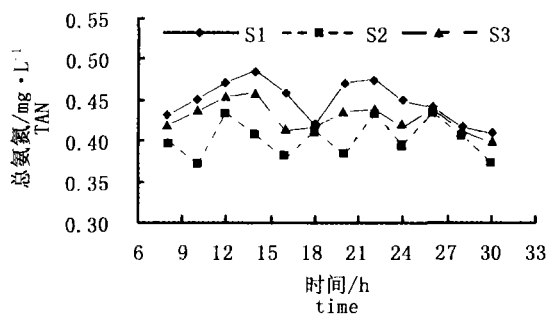


图3 检验期 TAN 浓度日变化

Fig.3 TAN diurnal changes during the test period

S1 - 养殖池, S2 - 生物滤器, S3 - 固体处理池

S1 - fish tanks, S2 - biofilter basin, S3 - solids removal basin

2.3 检验期生物滤器过滤效果

检验期养殖池、固体处理池、生物滤器 TAN 和 NO_2^- -N 日变化分别见图 5 和 6。与日变化监测结果相同, TAN 浓度从高到低依次为: 养殖池、固体处理池和生物滤器; NO_2^- -N 浓度从高到低依次为: 固体处理池、生物滤器和养殖池。TAN 和 NO_2^- -N 的变换均观测到一定的周期性, 后者更为明显, 相连低谷和峰值间隔 9d 出现。

EC 呈线性上升趋势, 如养殖池 EC 由 $196\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ (6月8日) 上升至 $295\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ (6月29日), 每周增加 $32.8\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。相反, pH 呈线性下降趋势, 每周降低 0.24。此外, 养殖池 DO 浓度平均值为 $8.9 \pm 0.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (最小值 $8.4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最大值 $9.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

2.4 试验结束时系统养殖成果、水质及细菌数

经 28d 养殖, 淡水白鲮存活率为 100%, 平均体重达到 $161.9 \pm 26.0\text{g}$, 日增重 1.91g , 此时系统养殖密度为 $3.24\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。试验期间共投喂饲料 3.36kg , 饲料系数为 1.164。试验结束时, 养殖池 TAN、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TN、TP、COD、DO 分别为 0.471 、 0.050 、 7.10 、 13.16 、 4.81 、 7.2 、 $8.7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。养殖池水质除 TP 外均符合我国淡水养殖

TAN、 NO_2^- -N 日变化与养殖池几乎同步。生物滤器的 TAN 浓度在一天中呈锯齿形的强烈变化, 共观察到 5 次上升状态和 5 次下降状态; NO_2^- -N 浓度虽然变化强烈, 但其最大值 ($0.082\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 与最小值 ($0.056\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 出现时间与养殖池和固体处理池一致。

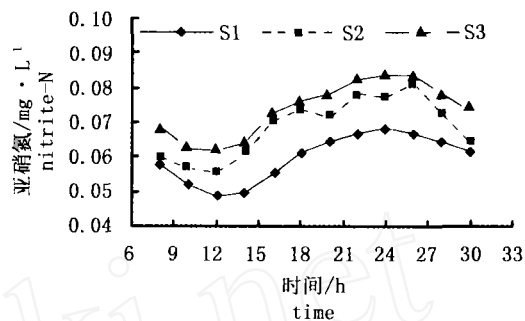


图4 检验期 NO_2^- -N 浓度日变化

Fig.4 NO_2^- -N diurnal changes during the test period

S1 - 养殖池, S2 - 生物滤器, S3 - 固体处理池

S1 - fish tanks, S2 - biofilter basin, S3 - solids removal basin

水质标准的要求, 由于未检测含 P 化合物, 不能确定 P 在系统中的存在形式。生物滤器每根滤料的细菌数为 $3.07 \times 10^8\text{CFU}$, 水体细菌浓度为 $1.35 \times 10^6\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$, 因此生物滤器中约有细菌 $7.01 \times 10^{12}\text{CFU}$, 浓度 $8.65 \times 10^6\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

3 讨论

一个养殖系统成功生产的基础是保证养殖池水质符合养殖生物的生长要求, 尤其是 TAN、 NO_2^- -N 等污染物的水平。

在接种期, TAN 浓度受到两个因素的影响, 首先是溶解的饲料 (400g 饲料在系统养殖池产生 $4.270\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TAN) 不断分解使其浓度不断上升, 其次是接种的硝化菌不断将 NH_4^+ 亚硝化成 NO_2^- 。以 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为目标, 罗国芝等^[3] 在海水养殖系统生物滤器接种试验中, 各种接种方法下达到目标花费时间和出现的 TAN 浓度最大值为: 成熟滤料 10d、 $1.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 土壤系统 32d、 $3.32\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 活性淤泥 44d、 $4.14\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO.I 号超级硝化菌 65d、 $4.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO.II 号超级硝化菌 69d、 $4.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO.III 号超级硝化菌 54d、 $4.26\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 对照 (无接种) 53d、 $2.99\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本试验生

物过滤器花费 12d 达到同样目标,试验过程 TAN 浓度最大值为 $3.540\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,所使用的商品硝化菌

液表现了较强的亚硝化能力。

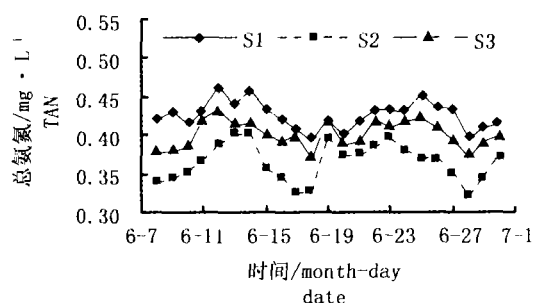


图5 检验期 TAN 浓度

Fig.5 Change of concentration of TAN from June 8 to June 30, 2003

S1 - 养殖池, S2 - 生物滤器, S3 - 固体处理池
S1 - fish tanks, S2 - biofilter basin, S3 - solids removal basin

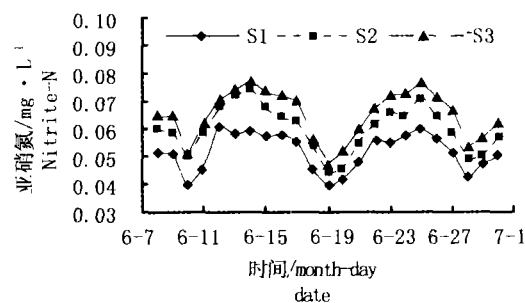


图6 检验期 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度

Fig.6 Change of concentration of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ from June 8 to June 30, 2003

S1 - 养殖池, S2 - 生物滤器, S3 - 固体处理池
S1 - fish tanks, S2 - biofilter basin, S3 - solids removal basin

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度也受到两个因素的影响,首先是亚硝化作用使其浓度增加,其次是硝化作用使其浓度降低;两种作用综合决定其浓度的上升或下降以及升降速度。养殖池的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度在 6 月 28 日后就维持在 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,距试验开始 20d,期间浓度最大值为 $4.028\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而罗国芝等^[3]的研究中最佳结果为接种成熟滤料得到的 24d 和 $3.63\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这说明本试验使用的硝化菌液对硝化作用起到了与接种成熟滤料相当的促进作用。

在试验第二阶段,养殖池 TAN 浓度在一天中的两次高峰均出现在喂饲后 5h 左右,与 Cole 等^[9]的结果相同。一般氨系数为喂饲量的 2.5% ~ 3.5%^[10,11],本系统每天承受 120g 的饲料,约产生氨 3.0 ~ 4.2g;根据养殖池 TAN 浓度监测结果(图 3),一天中产生的氨基本上在 24h 内就得到降解,生物滤器每天转化氨 3.0 ~ 4.2g,考虑滤器中滤料的体积(0.918m^3),处理能力为 $3.3 \sim 4.6\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。图 4 和图 6 显示系统 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度一直处于 $0.09\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,说明氨转化为亚硝氮以后能迅速转化为硝氮,硝化作用彻底。郭文艳等^[12]利用实验室培养的硝化菌液也取得很高的效率。

EC 的上升应该这是由于系统中 NO_3^- 增加的结果,该指标在评价生物滤器工作能力上的应用潜

力很大。氮的硝化反应和合成反应都产生氢离子,因此在氮的硝化过程中 pH 值往往降低,养殖系统中需要加入碳酸盐或碳酸氢盐以保持 pH。由于不能确定 P 的存在形式,因此不能判断该硝化菌液对 P 是否发生影响。

在 6 月 8 日、6 月 17 日和 6 月 26 日 17:00 进行的损失水补充可能是 TAN(图 5)、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ (图 6)以 9d 为周期波动的原因,但尚无其他研究支持该结果。

4 结论

利用商品硝化菌液接种水产养殖系统生物滤器来源广泛,操作简便。本试验在循环流水水产养殖系统的生物滤器中定期接入 20mL 某商品菌液处理 400g 饲料产生的 $4.270\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮(TAN),12d 时 TAN 浓度低于 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,20d 后 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度降至同样水平。

在 30d 检验期中,系统内养殖 5.71kg 淡水白鲮,日投喂量 120g。养殖池 TAN 最大值为 $0.465\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最小值为 $0.393\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值 $0.427 \pm 0.019\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大值为 $0.062\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最小值 $0.038\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值 $0.052 \pm 0.007\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;日监测结果表明养殖池 TAN 浓度一天出现两个高峰和两个低谷, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度日变化一天只出现 1 个高峰和 1 个低

谷。整个试验期间 EC 呈线性上升状态,每周增加 $32.8 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$; 而 pH 呈线性下降,每周降低 0.24。系统结束时除 TP 超标外,其余指标均符合我国淡水水产养殖水质标准;生物滤器含细菌 $8.65 \times 10^6 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

试验结果表明商品硝化菌液是一种低成本、高效率的生物滤器接种来源,具有很大的发展潜力和应用前景。值得一提的是,硝化菌生产、销售厂家众多,质量良莠不齐,行业权威机构的试验、检验及评价应为用户提供有效建议。

参考文献:

- [1] Jaap van Rijn. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture - a review [J]. *Aquac*, 1996, 139: 181 - 201.
- [2] Lawson T B. Fundamentals of aquacultural engineering [M]. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 1995: 214.
- [3] Luo G Z, Liu Y H, Tan H X, *et al.* Inoculation and cultivation in newly established seawater biofilter [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(6): 442 - 445, 451. [罗国芝, 刘艳红, 谭洪新, 等. 新建海水生物滤器接种培养的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6): 442 - 445, 451.]
- [4] Bower C E, Tuner D T. Accelerated nitrification in new seawater culture systems; effectiveness of commercial additives and seed media from established systems [J]. *Aquac*, 1981, 24: 1 - 6.
- [5] Turker C S, Lloyd S W. Evaluation of a commercial bacterial amendment for improving water quality in channel catfish ponds [J]. *Miss Agric Forestry Exp Sta, Miss State Univ, Res Rep*, 1985, 10: 1 - 4.
- [6] Ebeling J, Jensen G, Losordo T, *et al.* MARS engineering and operations manual [M]. Virginia, USA: the U. S. Department of Agriculture, 1995: 12.
- [7] Zu R F, Hu B L, Zhou D Q. Micro biology experiments [M]. Shanghai: Fudan University Publisher, 1993: 126 - 131. [祖若夫, 胡宝龙, 周德庆. 微生物学实验教程[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 126 - 131.]
- [8] National Marine Bureau of China. Marine monitoring standards [M]. Beijing: Marine Publisher, 1991. 270 - 273. [国家海洋局. 海洋监测规范[M]. 北京: 海洋出版社, 1991. 270 - 273.]
- [9] Cole W M, Rakocy J E, Shultz K A, *et al.* Effects of solids removal on tilapia production and water quality in continuously aerated, outdoor tanks [A]. *Tilapia aquaculture, proceedings from the fourth international symposium on tilapia in aquaculture [C]*. Orlando, Florida, USA, 1997.
- [10] Liao P B, Mayo R D. Intensified fish culture combining water reconditioning with pollution abatement [J]. *Aquac*, 1974, 3: 61 - 85.
- [11] Speece R E. Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1973, 102(2): 223 - 334.
- [12] Guo W Y, Ren A, Xu Y T. Study on application of nitrifying bacteria to further treatment of NH_4^+-N [J]. *Shanghai Environmental Science*, 1999, 18(9): 414 - 416. [郭文艳, 任翱, 徐亚同. 硝化细菌在氨氮深度处理中的应用研究[J]. 上海环境科学, 1999, 18(9): 414 - 416.]