

集成生物净化系统用于鱼池水质控制的初步试验研究

李秀辰¹, 张国琛¹, 崔引安², 雷衍之¹

(1. 大连水产学院机械工程系, 大连 116023; 2 中国农业大学, 北京 100083)

摘 要: 该文提出了生物膜和水生植物的集成生物净化系统用于鱼池水质控制, 通过人工配置营养盐和养鱼循环水体的净化试验研究, 探讨了该集成生物净化系统对主要污染指标的净化能力和对养鱼循环水体的净化效果及规律。研究结果显示, 由生物膜和水生植物组成的集成生物净化系统对氨氮的承载能力明显增强, 当 NH_4^+ 的初始浓度在 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时, 净化效果显著, 水质良好。该集成系统对养鱼循环水体中氨氮和有机物的去除率分别保持在 80% 和 40% 以上, 对养鱼水体 pH 和 DO 也有良好的调节和改善作用。

关键词: 水产养殖; 水质; 集成生物净化

中图分类号: S955.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0216-04

1 引言

由于农业产业结构的调整和海洋渔业资源的不断萎缩和环境污染的日益加剧, 近年来陆地工厂化水产养殖得到了长足发展。目前, 仅我国北方地区工厂化养殖面积已超过了 3.33 万 hm^2 。然而, 养殖水体不能有效净化, 一直是制约养殖企业生存与发展的瓶颈问题。因鱼类所食饵料的 70% ~ 80% 以废弃物(主要是有机物和氨氮)的形式排入水中^[4, 6], 如果这些废弃物不能被有效去除, 只能靠大量换水改善水质, 养殖水质很难保证, 养殖产量低、质量差, 水、能资源浪费大, 而且环境污染严重。利用生物膜法能将水中有机物和氨氮分别降解、氧化为毒性相对较低的硝酸盐, 使养殖水体得到一定程度的净化, 但会导致硝酸盐的大量积累^[7]。已有报道, 硝酸盐的积累会影响鱼体的渗透压和血细胞的运氧能力, 特别是引起鱼体色泽和肉质下降, 而且富含硝酸盐的养殖废水直接排放, 还会造成水体富营养化^[1, 3]。诸多研究表明, 水生植物能有效吸收养殖水体中的无机 N、P 营养盐, 并可回收天然植物饵料^[2, 5], 但单纯利用水生植物净化养殖水体, 有机物的去除效率却比较低^[2]。本研究提出生物膜和水生植物的集成生物净化系统用于鱼池水质控制, 以期通过优势互补, 达到水质净化和废弃物利用的综合效果。通过人工配置营养盐和对养鱼循环水体的净化试验, 探讨这种集成生物净化系统对主要污染指标的净化能力和对养鱼循环水体的净化规律, 生物量匹配关系和所能承受的最大污染负荷等, 为鱼池水质控制提供新型、有效的方法。

2 材料与方法

2.1 试验材料及装置

鲍鱼: 皱纹盘鲍(*Haliosis discus hannai* Ino), 体长 2.5~4.0 cm, 若干。

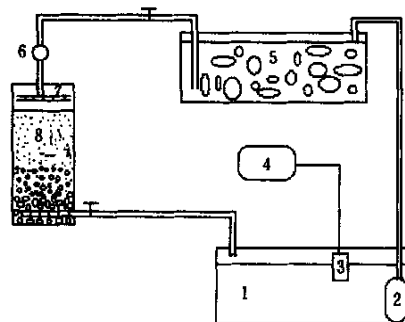
孔石莼(Ulva Pertusa): 由日本引种, 室内培养的大型绿藻, 其适温范围 4~35℃。鱼池: 玻璃钢水槽(1.0 m × 0.5 m × 0.6 m), 2 个(一个用于循环水系统, 一个用于鲍鱼的自污染试验)。

植物滤池(Ulva Biofilter, 简称 UB): 玻璃钢水槽(1.0 m × 0.5 m × 0.6 m), 1 个, 内装海水 250 L, 投放孔石莼生物量为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

生物膜滤池(Sand Biofilter, 简称 SB): 玻璃钢无压、滴流式生物膜滤池(0.35 × 1.0), 一个, 砂子粒径为 0.4 mm 左右, 砂层厚度为 0.90 m, SB 在被接入系统之前, 用养鲍污水挂膜 18 d。

2.2 试验方法

循环水系统构成: 将 UB 和挂膜后的 SB 与鱼池串联, 组成循环水养鱼系统(见图 1), 系统中的流量由液位传感器控制。各水质指标测定方法同^[2]。



1. 鲍鱼池 2. 潜水泵 3. 液位传感器 4. 传感器
二次表 5. UB 6. 转子流量计 7. 布水装置 8. SB

图 1 集成生物净化系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combined biofilter system

2.2.1 集成系统净化能力试验

在图 1 所示的系统中, 鱼池 1 不放鲍鱼, 只加入 250 L 海水, 在该循环水系统中加入不同浓度的氨氮(由 NH_4Cl 配置)。每次试验均从早晨 8:30 开始, 系统连续运转 24 h, 至第二天早晨 8:30 结束, 液力负荷为 $80 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。每隔 3 h 由 UB、SB 和池 1 出水取样, 测定 NH_4^+ 、 NO_2^- 和 NO_3^- 的浓度。

收稿日期: 2002-10-20 修订日期: 2003-03-20

基金项目: 大连市科技计划项目

作者简介: 李秀辰, 博士, 副教授, 大连市沙河区 大连水产学院机械工程系, 116023。Email: zhlt@maildlptt.ln.cn

2.2.2 养鱼循环水体净化试验

在图1所示的系统中, 鱼池1中加入海水250 L, 放养鲍鱼30 kg(养殖密度约为 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。系统运转期间不换水, 每天下午4:30~5:00用虹吸管吸残饵, 并投新饵(投饵量为鲍鱼重的5%), 每天早晨8:30取样, 测定各池出水中 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、COD、pH、DO。取另一鱼池, 加水量、鲍鱼密度、投饵量、投饵时间及吸残饵方法均同循环水系统, 试验期间不换水, 进行鲍鱼自污染试验, 每天早晨8:30取样测定池中各水质指标。试验水温为18~22。

3 试验结果及分析

3.1 集成系统净化能力试验

系统中实际加入的 NH_4^+ 浓度分别为1.16、1.99和3.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统运行过程中测得池1中 NH_4^+ 浓度随时间的变化见表1。

表1 NH_4^+ 浓度随时间的变化

Table 1 Changes of ammonia concentration with time			
试验时间/h	池1中 NH_4^+ 的浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
初始	1.16	1.99	3.57
3	0.88 (24.2)*	1.39 (30.1)	2.70 (24.4)
6	0.18 (84.6)	0.89 (55.2)	1.98 (44.5)
9	0.00 (100)	0.43 (78.4)	1.31 (63.3)
24	0.00 (100)	0.17 (91.3)	0.72 (79.9)

* 括号中为去除率%。

由试验结果看出, 在UB和SB的联合作用下, 当系统中 NH_4^+ 的初始浓度为1.16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统运行6 h后, NH_4^+ 浓度已降至0.18 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 9 h后已检不出 NH_4^+ 的存在。当 NH_4^+ 的初始浓度增至1.99 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统运转9 h后, NH_4^+ 浓度已降至0.43 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。当 NH_4^+ 初始浓度增加到3.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统运转24 h后 NH_4^+ 浓度降为0.72 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见, 系统中 NH_4^+ 的初始浓度越低, 集成系统的净化效率越高。在本试验条件下, 当 NH_4^+ 的初始浓度在2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时, 集成系统对 NH_4^+ 保持很高的去除率, 如24 h去除率在90%以上, 保证了水质优良。当 NH_4^+ 的初始浓度超过3.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 虽然24 h后 NH_4^+ 的去除率接近80%, 但水中 NH_4^+ 的仍有较多积累(0.72 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。由试验结果还可看出, 虽然在夜间UB的光合作用受到抑制, 减少的其对 NH_4^+ 的吸收, 但SB仍保持对 NH_4^+ 的硝化作用, 即该集成系统在夜间对 NH_4^+ 也有净化作用(试验开始9 h后至第2 d早晨, 水中 NH_4^+ 浓度继续下降), UB和SB的这种互补作用, 对防止养殖系统中夜间 NH_4^+ 的过度积累很有利。

3.1.1 NH_4^+ 净化模型

由试验结果可知, 在UB和SB联合作用下, 水中 NH_4^+ 的去除仍符合一级反应动力学, NH_4^+ 浓度随时间的变化可用如下模型描述:

$$d(S)/dt = -K_N(S)$$

由试验结果求得集成生物净化系统对 NH_4^+ 的净化

模型如下

$$Se = So \cdot \exp(-0.21t \cdot So^{-0.99})$$

式中 K_N ——去除率常数; Se ——净化后水中 NH_4^+ 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; So ——水中 NH_4^+ 的初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t ——试验时间, h。

3.1.2 集成系统对 NH_4^+ 的吸收和硝化作用评价

该集成系统对 NH_4^+ 的净化是由UB中植物的吸收和SB中细菌的硝化作用综合所致。水体中积累的 NO_3^- 和 NO_2^- 量(总称 ToxN)为SB硝化产物。假定系统中没有 ToxN 损失(因 NH_4^+ 的抑制作用^[12], 可忽略短期内孔石莼对 NO_3^- 和 NO_2^- 的吸收), 根据系统运行一昼夜 NH_4^+ 的去除总量和 ToxN 的积累总量, 求得UB和SB对 NH_4^+ 的吸收和硝化速率分别见表2。

表2 UB和SB对 NH_4^+ 的吸收和硝化速率

Table 2 Ammonia uptaking and nitrification rate by UB and SB

系统加入 NH_4^+ 的总量/ mg	24 h后系统中 NH_4^+ 和 ToxN 含量/ mg		吸收率和硝化率/%	
	NH_4^+	ToxN	UB吸收率	SB硝化率
579.0 (1.16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.0	205.5	64.5	35.5
993.0 (1.99 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	85.0	447.8	46.3	45.1
1787.0 (3.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	360.0	1100.8	18.3	61.6

表2结果表明, UB和SB对 NH_4^+ 的吸收和硝化作用与 NH_4^+ 浓度有关, NH_4^+ 浓度越低, 越有利于UB的吸收, NH_4^+ 浓度增加, UB对 NH_4^+ 的吸收能力下降, SB硝化作用逐渐占优势, 例如当系统中 NH_4^+ 浓度分别为1.16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、1.99 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和3.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 24 h后, UB对 NH_4^+ 的吸收率分别为64.5%、46.3%和18.3%, SB的硝化率则分别为35.5%、45.1%和61.6%。试验发现, 当水中 NH_4^+ 浓度高于2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (NH_4^+ 含量超过993 mg)时, NH_4^+ 对孔石莼的吸收具有抑制作用, UB的吸收效率明显下降, 可见, 为了保持UB对 NH_4^+ 吸收利用的优势, 该集成系统适宜的 NH_4^+ 浓度最好控制在2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

3.2 养鱼循环水体净化试验

系统连续运行9 d, 测得各池中 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、COD、pH和DO每天的变化情况见图2。

由图2a看出, 除第2 d鱼池中 NH_4^+ 浓度变化不大外, 在试验期间, 鱼池中 NH_4^+ 浓度保持递增趋势。在试验前3 d中, NH_4^+ 浓度增加较明显, 第3 d以后, 仅有少量积累, 9 d试验期间, 鱼池中 NH_4^+ 浓度一直保持在0.30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。从自污染试验(由于水质恶化, 出现个别鲍鱼死亡, 故只进行了8 d)结果(未示出)可知, 到第8 d时, 鱼池中 NH_4^+ 浓度已超过3.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水质恶化比较严重。由图2a还可看出, UB对水中 NH_4^+ 具有很好的吸收作用, 特别是在试验初期, UB吸收占明显优势(前3 d中, UB和SB对 NH_4^+ 的去除率分别为82%和6%)。随着系统运转时间的延长, 孔石莼由开始的“饥饿”吸收逐渐转为饱和和吸收状态, UB的除氮能力随之达到饱和, SB对水中 NH_4^+ 的硝化作用逐渐加

强,例如,第8 d时,SB和UB对 NH_4^+ 的去除率分别为56%和31%。由此看来,该集成系统对养鱼水体中 NH_4^+ 的具有很强的去除能力,本系统连续运行9 d不

换水,仍能保证鱼池中 NH_4^+ 浓度在优质水质范围内。

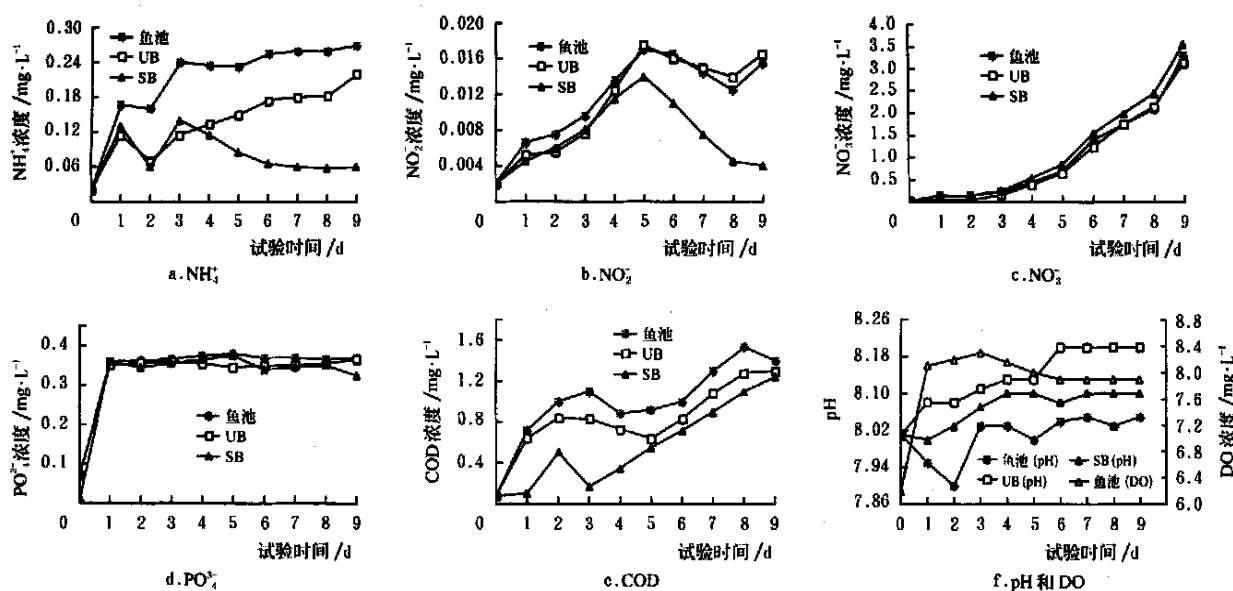


图2 系统中水质随时间的变化

Fig. 2 Changes vs time of water quality with combined biofilter system

图2b结果表明,因SB的硝化作用,鱼池中含有少量的 NO_2^- 。试验初期,由于水中 NH_4^+ 浓度较低,UB对 NO_2^- 能保持微量吸收,试验后期,孔石莼对 NO_2^- 的吸收受到 NH_4^+ 的抑制,故UB对 NO_2^- 几乎无吸收作用。但在整个试验期间,SB对 NO_2^- 的氧化比较彻底,水体中 NO_2^- 一直保持微量,对水质影响不大。

系统中 ToxN 的积累主要是以 NO_3^- 的形式存在的(见图2c)。试验开始前3 d中,因系统中代谢产物相对较少,而且 NH_4^+ 和 NO_2^- 主要被UB吸收,系统中 NO_3^- 的含量很少(在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右),而在试验后期,因代谢产物不断积累,且UB对 NH_4^+ 的吸收接近饱和,SB的硝化作用逐渐增强,因此系统中 NO_3^- 浓度增加较快。到第9 d时,鱼池中 NO_3^- 浓度为 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由试验结果求得鱼池中 NO_3^- 的积累模型为

$$S_t = 0.072 \exp(0.438 t) \quad R^2 = 0.910$$

式中 S_t ——鱼池 NO_3^- 中浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t ——试验时间, d。

根据上述模型可推算出,第11 d后,水体中 NO_3^- 的含量会超过 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,养殖水质将会变差。

因孔石莼对无机N吸收的同时,需要利用一定比例的 PO_4^{3-} ,由图2d看出,UB能吸收部分 PO_4^{3-} (UB出水中 PO_4^{3-} 含量一直低于鱼池出水),SB的除磷作用不明显。对比自污染试验结果,该集成系统对 PO_4^{3-} 的去除率在10%左右,试验9 d中,水体中 PO_4^{3-} 含量一直保持在 $0.3 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。

由图2e看出,SB对水中有机物具有较强的去除作用,特别是在试验初期,SB降解作用占明显优势(SB出

水中COD浓度明显低于UB出水),随着试验的进行,因 NH_4^+ 浓度增加,SB的氧化负荷增加,对有机物的降解速度有所降低。另外发现,在试验后期UB池壁有少量生物膜附着,UB出水中COD浓度略低于鱼池出水,可见UB对有机物也有一定的去除作用。在本试验条件下,该集成系统对有机物的去除率在40%以上,试验期间鱼池中COD浓度一直保持在 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。相比之下,第8 d时自污染鱼池中COD的浓度已超过 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

试验前3 d中,鱼池中pH值波动较大(见图2f),以后pH值趋于稳定,一直保持在 $8.0 \sim 8.1$ 之间。由于SB硝化反应不断产生氢离子和 CO_2 等物质,造成SB出水pH值明显下降。相反,因孔石莼的光合作用,不断消耗水中的 CO_2 ,从而提高了水体pH值。因此,该集成系统对养殖水体pH值具有很好的调节和改善作用,即有利于鲍鱼的生长,又有利于UB和SB对水中有害物质的去除。尽管SB硝化和降解过程要消耗水中溶氧(Dissolved oxygen, DO),但由于UB光合作用不断产生氧气,对水中DO有较好的补偿作用。另外,由于鱼池有气石充气,DO一直稳定在 $7.9 \sim 8.3 \text{ mg}$ 之间(见图2f),因此系统中DO含量没有影响鲍鱼的正常生长和SB的硝化效率。

4 结论

1) 由生物膜和水生植物组成的该集成生物净化系统,在对养鱼水体净化方面,有明显的优势互补和净化作用。系统连续运行9 d不换水,水体中 NH_4^+ 和有机物指标一直保持在理想水质要求的范围内,鱼池中水体

pH 值和DO 稳定, 鲍鱼个体活力强, 生长良好, 而且孔石莼色泽浓绿, 生长旺盛。这些表明, 该集成生物净化系统可有效地用于鱼池水质的控制。

2) 在本试验条件下, 尽管UB 对水中 NH_4^+ 的吸收效果较好, 对水体pH 值和DO 也有良好的补偿和调节作用, 但因孔石莼生物量偏少, 鱼池水体pH 值偏低, 对水中 NO_3^- 的吸收效果不显著, UB 的优势还未得到充分发挥。因此, 对系统中UB 和SB 的最佳生物量匹配问题还需进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 赵 煜, 安艳方. 发展工厂化养鱼的战略[J]. 渔业现代化, 1997, 4: 4~ 7.
- [2] 李秀辰, 张国琛, 崔引安等. 孔石莼对鲍鱼养殖水体的静态净化研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 173~ 176.
- [3] 国际渔业 D I A T 反硝化系统节约再循环用水[Z]. 科技部西南信息中心, 1999, 6: 36.
- [4] Hall P O J, Holby O, Kollberg S, et al. Chemical fluxes and mass balance in a marine fish cage fam. IV. Nitrogen [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1992, 89: 81~ 91.
- [5] Krom M D, Ellner S P, Rijn J V, et al. Nitrogen and phosphorous cycling and transformations in a prototype "non-polluting" integrated mariculture system [J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 118: 25~ 36.
- [6] Porter C P, Krom M D, Robbins M G, et al. Ammonia excretion and total N budget for gilthead seabream (*Sparus aurata*) and its effect on water quality conditions [J]. Aquaculture, 1987, 66: 287~ 298.
- [7] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, et al. Recirculating Aquaculture System [M]. NRAC publication, 2001, 191~ 225.

Combined biofilter system for water quality control of fish tank

Li Xiuchen¹, Zhang Guochen¹, Cui Yin'an², Lei Yianzhi¹

(1. Faculty of Mechanism Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A combined biofilter system including a trickling sand biofilter and an ulva biofilter (*Ulva pertusa*) was set up for water quality control of fish tank. The water purification characteristics and the efficiency of the combined biofilter system were tested by nutrient supplying experiment in a recirculating abalone-culture system. The results showed that the combined biofilter system was effective in ammonia removal when ammonia concentration is less than $2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the removal rates of ammonia and dissolved organic in fish tank were more than 80% and 40%, respectively, and the pH and DO were also maintained at required levels. The developed combined biofilter system could provide one alternative for water quality control of fish tank.

Key words: aquaculture; water quality; combined biofilter system