

文章编号: 1000-0615(2005)05-0695-05

## 营养液膜技术栽培牧草净化循环流水水产养殖废水的试验

泮进明, 应义斌

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310029)

**摘要:** 为研究植物生态净化技术集成至循环流水水产养殖系统的可行性, 构建了 4 个(4 重复)  $3.0\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.05\text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高) 的植物滤器处理淡水白鲢 (*Colossoma brachypomum*) 高密度养殖废水。每个植物滤器生长  $0.8\text{ m}^2$  NFT (营养液膜技术) 培多年生黑麦草 (*Lolium perenne* L.)。废水每周更换一次, 每次 25.4 L, 连续运行 40 d。7 d 循环灌溉处理后,  $\text{NO}_3^-$ -N、TN、TP、COD 的去除率分别达 96.1%、86.2%、90.5%、88.7%, pH 从 6.4 升高至 8.4, 而水体只消耗 29.7%。除  $\text{NH}_4^+$  由于 pH 升高而超标外, 所有水质指标均符合渔业水质标准。牧草日增长仅 2.3 mm, 显著低于用商品营养液培育的牧草生长速度(日增长 13.2 mm)。鲜草 TAN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分别为  $107.9$  和  $42.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 试验结束时收获鲜草  $582.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 烘干后得到干草  $102.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 干湿比 0.176。结果表明, 植物滤器能解决生物滤器引起的 N、P、COD 累积以及 pH 下降等问题, 是一种环境友好的水处理方法。为使牧草良好生长, 建议定期将牧草返回培育系统用商品营养液培养一段时间。

**关键词:** 循环流水水产养殖废水处理; 营养液膜技术; 黑麦草; 植物滤器

中图分类号: S969

文献标识码: A

## Utilization of nutrient film technology grass to treat wastewater from a recirculating aquaculture system

PAN Jir-ming, YING Yi-bin

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** To investigate the feasibility of applying plant eco filtration method in recirculating aquaculture systems, four  $3.0\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.05\text{ m}$  (L  $\times$  W  $\times$  H) plant filters were used to provide 4 replicates for treatment of wastewater from a *Colossoma brachypomum* intensive system.  $0.8\text{ m}^2$  NFT (nutrient film technology) *Lolium perenne* was planted on each filter. Wastewater was loaded at a rate of 25.4 liter per week for an investigation of 40 day. After a recirculating irrigation of 7 days, the plant filter removed 96.1% of nitrate nitrogen, 86.2% of total nitrogen, 90.5% of total phosphorus, and 88.7% of COD, respectively. pH was raised from 6.4 to 8.4 and only 29.7% of water was used. All parameters conformed to qualifications of China water quality standard for fisheries except unionized ammonia nitrogen as a result of high pH. The grass height increased at a rate of  $2.3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , significantly slower than that irrigated with commercial nutrient solution with a growth of  $13.2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ . Total ammonia nitrogen and nitrate nitrogen concentration of the fresh grass leaves were 107.9 and  $42.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. At the end of this experiment,  $582.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  fresh grass was produced and then was turned over to  $102.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  dry mass with a dry weight to fresh weight ratio of 0.176. It can be concluded that the plant filter is an environment friendly way to solve accumulation of N, P, and COD, and descent of pH in recirculating aquaculture systems. With a view to healthy growth of grass, it's recommended that grass in plant filters should be periodically returned to breeding systems for a certain term irrigation of commercial nutrient solutions.

**Key words:** recirculating aquaculture wastewater treatment; nutrient film technology; *Lolium perenne*; botanical filter

循环流水水产养殖 (recirculating aquaculture) 是指水在养殖系统内再生、循环利用的水产养殖

方式<sup>[1]</sup>, 也有封闭式水产养殖、循环水水产养殖等类似概念。循环流水水产养殖技术在一些发达国家

收稿日期: 2004-05-26

资助项目: 国家自然科学基金 (39570586); 浙江省科技厅重点科研社会发展项目 (2005C23065)

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

家和地区起步较早,经过几十年的发展,日臻成熟,无论是设施设备的开发,还是生产过程的控制与管理都已硕果累累,我国从20世纪70年代中期才开始从事该领域的研究<sup>[2]</sup>。

循环流水水产养殖系统的核心是水处理系统,大量的研究成果虽然为该技术的发展提供了有力的支持,使其日趋高密度化,但不利的因素是利用该技术生产的单位产量的成本事实上在逐渐增加<sup>[3]</sup>。经济分析表明,循环流水水产养殖的关键环节是:(1)最少的能量投入;(2)合适的水再生技术<sup>[4]</sup>。好的系统应尽量简化,减少对复杂机械系统和自动控制系统的依赖,采用技术含量较低的工程技术反而更能提高系统的可靠性<sup>[5]</sup>。在可持续发展思想的指导下,以植物为媒介的生态净化技术成本低、简单易行,受到了广泛关注,在水产养殖系统中,将其称为植物滤器<sup>[6]</sup>。

目前的植物生态净化研究已经涉及了大量的植物种类,但并非都能介入循环流水水产养殖系统。本文利用营养液膜技术(nutrient film technology, NFT)栽培方式,对多年生黑麦草进行间隔循环灌溉,以循环流水水产养殖废水处理后的水质指标和黑麦草的生长参数为评定指标,客观地评价 NFT 培牧草对水质的净化能力,为植物滤器集成至循环流水水产养殖系统提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 植物滤器用草

试验用草选用多年生黑麦草(*Lolium perenne*, 又名宿根黑麦草、牧场黑麦草),因其根茎(叶)比大,生长迅速;而且营养物质丰富,可消化物质产量高,对家畜、家禽和鱼类的适口性好,具有较高的经济价值。试验分两个阶段,第一阶段,2002年10月4日至11月12日,培育期,在 NFT 培牧草培育系统利用商品营养液培育牧草。第二阶段,11月13日至12月20日,以第一阶段育成的 NFT 培牧草为试验材料,用植物滤器处理循环流水水产养殖废水。

### 1.2 NFT 培牧草培育系统设计与管理

NFT 培牧草培育系统位于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)内 18 m × 6 m 玻璃温室内。系统包括 12 个栽培槽、1 个营养液池、2 套由水泵(750 W, 80 L·min<sup>-1</sup>)、继电器(DH48S-S

型时间继电器)、控制阀和 PVC 水管组成的灌溉与回流管线。栽培槽长 7 m, 宽 0.6 m, 深 0.3 m, 槽面坡度 2%, 使灌溉液在重力作用下回流至营养液池, 每个栽培槽进出水管均用球阀控制。营养液池长 1.5 m, 宽 1.3 m, 深 1.5 m, 以水深 1 m 计水量为 1.95 m<sup>3</sup>, 使用时用黑色遮阴幕遮光, 避免绿藻滋长。

草籽于 2002 年 10 月 4 日播种。育苗盘尺寸底面 400 mm × 400 mm, 厚 0.7 mm, 含 576 个 6 mm × 6 mm 小方孔, 孔面积为总面积的 13.0%; 上口 430 mm × 430 mm, 高 60 mm。育苗盘上垫层为 3 层无纺布(规格 10 g·m<sup>-2</sup>), 有防止草籽渗漏、吸水保湿、固定根系等功能。草籽均匀撒播在育苗盘中, 播量 5 g 每盘, 即 31.25 g·m<sup>-2</sup>。一个栽培槽可以容纳 15 只育苗盘, 草面积 2.40 m<sup>2</sup>。系统一次性能育苗 180 盘, 草面积 28.8 m<sup>2</sup>。

草籽发芽前仅使用自来水灌溉, 发芽后用商品营养液灌溉。营养液用商品无土栽培肥料配置, 该肥料以氮、磷、钾为主, 同时含钙、镁、锰、硼、锌、铜、钼、铁等多种元素, 在蔬菜水培以及土培灌溉中使用较多。本系统生产时按照产品使用方法将肥料溶入营养液池的 1.95 m<sup>3</sup> 自来水中, 当水位下降到约 0.4 m 时注入水并同样配置。

系统通过继电器控制水泵以一定的工作周期循环灌溉。多次培育试验表明水泵工作 1 min 的抽水量已经能保证同一个栽培槽上游和下游草能等机会吸收营养液。在草籽发芽前, 以工作 1 min, 停歇 15 min 的工作制度高频率灌溉, 以保证足够的湿度促进草籽发芽。发芽后, 工作 1 min, 停歇 40 min。

### 1.3 NFT 培植物滤器净化循环流水水产养殖废水试验设计

植物滤器位于实验基地三连栋塑料温室内, 共 4 个, 4 个重复。一个植物滤器包括一个栽培槽(长 3 m、宽 0.5 m、深 0.05 m, 槽面坡度 2%)、1 个废水桶(30 L)、1 个水泵(370 W, 40 L·min<sup>-1</sup>)、1 个继电器(DH48S-S 型时间继电器)、控制阀及灌溉与回流管线, 每个滤器可以容纳 5 盘, 即草面积 0.8 m<sup>2</sup>。水泵以一个工作周期开启 10 s, 关闭 30 min 循环灌溉。

2002 年 11 月 13 日, 将 20 盘 NFT 培多年生黑麦草(生长年龄已达 40 d, 试验前 1 d 留茬 60 mm 刈割)移至四个植物滤器中, 净化来自实验基地循

环流水产养殖系统的废水, 12月22日结束, 为期40 d。该系统养殖  $16.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  淡水白鲢(学名短盖巨脂鲤, *Colossoma brachypomum*), 水处理系统包括斜板沉淀器、机械滤网和生物滤器。每7 d用潜水泵(370 W,  $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )将养殖池废水输送到配水桶(250 L)中, 再分别将25.4 L废水分配至4个植物滤器的废水桶中。

**水质检测** 处理前和处理后(7 d)的水量、总氮 TAN(纳氏试剂比色法)、非离子氨  $\text{NH}_3\text{-N}$  (重氮-偶氮比色法)、亚硝氮  $\text{NO}_2\text{-N}$  (重氮-偶氮比色法)、硝氮  $\text{NO}_3\text{-N}$  (酚二磺酸分光光度法)、总氮 TN(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法)、总磷 TP(钼酸铵分光光度法)、化学需氧量 COD(重铬酸钾法)、电导率 EC(HI9033 手持便携式 EC 计, 意大利 Hanna 仪器公司)、pH(HI9024 手持便携式 pH 计, 意大利 Hanna 仪器公司)、水温 T(HI9024 手持便携式 pH 计, 意大利 Hanna 仪器公司)。水量、EC、pH、T 均现场测量, 其余指标在实验室当天测量完成, 重复三次。

**草检测** 植株高度、氨氮 TAN(茚三酮比色法)、硝氮  $\text{NO}_3\text{-N}$  (硝酸试剂比色法) 每7天检测一次, 试验结束时留茬 60 mm 刈割检测鲜重、干重。植株高度采样盘为第2、3、4盘, 每个采样盘随机采样24株牧草, 取平均值。TAN 和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的检测从试验第10天开始, 每周采样一次, 采样盘为第1、5盘, 每盘沿流水方向分五个区采样, 每区  $400 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ , 每次不重复随机选一区刈割采样(留茬 60 mm), 混合后制样。鲜重、干重采样盘为第2、3、4盘。所有化学指标的检测重复三次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 培育期 NFT 培牧草生长特性

培育期多年生黑麦草植株高度成直线增长, 日增长 9.4 mm(图1), 植株高度  $h$  与时间  $t$  ( $t = 5, 6 \dots 20$ ) 的回归曲线方程为:  $h = 9.4319t$  ( $R^2 = 0.9984$ )。第20天留茬 60 mm 刈割后增长速度显著加快, 日增长 13.2 mm。牧草的快速生长表明培育系统能够进行规模生产, 为试验或应用提供充足的材料。

培育过程中, 趋营养性使草根穿过无纺布和育苗盘底面小孔, 与栽培槽面接触, 随着生长年龄的增加, 根系日趋发达, 在盘底形成一定厚度的

“根系网”。灌溉时, 栽培槽上游水(营养液)层厚, 水浮力大, 育苗盘会有一定程度地浮起; 而下游水层薄, 水浮力不足以浮起育苗盘, 始终与栽培槽紧贴, 育苗盘与槽侧壁无空间时, 水流经过根系网的过滤后下流。停歇时, 草的吸收和水分蒸发使草根逐渐变干, 进入曝气阶段。

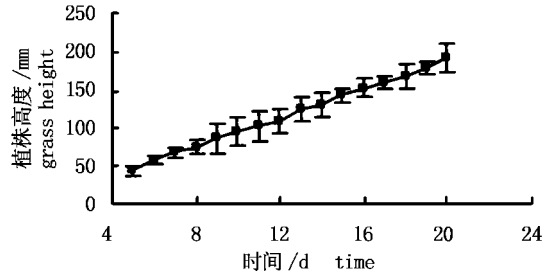


图1 商品营养液灌溉的 NFT 培牧草植株高度

Fig. 1 Height of NFT grass cultured with commercial nutrients solution

停歇时间需要按照环境温度和草根系曝气、水、肥等生理需要设定, 合适的灌溉与停歇间隔既要能保证水分和营养物质的供应, 又要提供足够的氧气。一般而言, 高温季节和生长年龄高时停歇时间取短, 即高频率灌溉; 相反则采用低频率灌溉。育苗盘上垫层无纺布的吸水保湿功能能有效地减少灌溉次数, 降低运行能耗。试验地区(浙江省)本培育系统经验性循环灌溉制度是: 4-6月及9-11月, 工作 1 min, 停歇 30~40 min; 7-8月, 工作 1 min, 停歇 20~30 min; 12-3月, 工作 1 min, 停歇 40~60 min。而在本试验的植物滤器中, 由于规模小, 水泵每次工作只需 10 s。

### 2.2 NFT 培植物滤器对养殖废水的净化效果

未处理前的废水即循环流水水产养殖系统内 TAN、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、UUA 得到了很好的控制, 表明生物滤器运行良好, 但  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN、TP、COD 积累严重, 均超过了地面水环境质量标准(GB 3838-88) III 类水标准值和渔业水质标准(GB 11607-89), pH 也偏低(表1)。经过植物滤器 7d 的处理后, 废水水质发生了显著的改善, 除 UUA 由于 pH 升高而超标外, 所有水质指标均符合标准。TN、TP、COD 的去除率分别达到 86.2%、90.5%、88.7%, 与丁树荣等<sup>[8]</sup>和邵志鹏等<sup>[9]</sup>利用水培多花黑麦草(*Lolium multiflorum* L)净化废水的效果一致。 $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除率达 96.1%, pH 从 6.4 升高至 8.4, 而水

植物对离子的吸收特性会改变其生长环境,吸收  $\text{NH}_4^+$  使溶液的氢离子浓度增大, pH 降低, 而吸收  $\text{NO}_3^-$  使溶液的氢离子浓度变小, pH 升高<sup>[10]</sup>。由于试验废水中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度远远高于 TAN, 牧草对  $\text{NO}_3^-$  的吸收量显著高于对  $\text{NH}_4^+$  的

吸收量, 因此, 处理后 pH 显著升高。这种效果很好地与生物滤器的作用(即  $\text{NO}_3^-$ -N 累积, pH 降低<sup>[6]</sup>)形成互补, 处理后的水回流至养殖系统可以调节 pH 值, 能够解决循环流水水产养殖系统中 N、P、COD 累积以及 pH 下降等问题, 是一种环境友好的水处理方法。

表 1 植物滤器(生长  $0.8 \text{ m}^2$  NFT 培牧草)处理循环流水水产养殖废水效果

Tab. 1 Efficiency of the plant filter with  $0.8 \text{ m}^2$  NFT grass to treat recirculating aquaculture wastewater

指标 parameters	处理前 influent	处理 7d 后 effluent after 7d	标准值* standards
硝酸盐氮( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) nitrate nitrogen	$68.1 \pm 11.7$	$2.7 \pm 4.4$	20
亚硝酸盐氮( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) nitrite nitrogen	$0.065 \pm 0.037$	$0.031 \pm 0.003$	0.15
总氨氮( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) total ammonia nitrogen	$0.51 \pm 0.11$	$0.05 \pm 0.04$	n. a.
非离子氨( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) unionized ammonia nitrogen	$0.001 \pm 0$	$0.024 \pm 0.010$	0.02
总氮( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) total nitrogen	$95.9 \pm 10.3$	$13.2 \pm 6.6$	n. a.
总磷( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) total phosphorus	$7.11 \pm 1.89$	$0.68 \pm 0.13$	0.1
化学需氧量( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) chemical oxygen demand	$41.1 \pm 4.7$	$4.7 \pm 2.8$	15
pH	$6.4 \pm 0.2$	$8.4 \pm 0.2$	6.5~ 8.5
水温( $^{\circ}\text{C}$ ) water temperature	$20.3 \pm 3.3$	$12.7 \pm 3.9$	n. a.
电导率( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) electric conductivity	$787 \pm 57$	$659 \pm 41$	n. a.
水体积(L) water volume	$25.4 \pm 0$	$17.8 \pm 3.6$	n. a.

注: \* 参照中国地面水环境质量标准(GB 3838-88) III 类水标准值和渔业水质标准(GB 11607-89); n. a. 即未规定

Notes: \* Values from level III qualifications of China environmental quality standard for surface water, i. e. China GB 3838-88 and China water quality standard for fisheries, i. e. China GB 11607-89; n. a. means not available

与本试验比较, 单纯利用 NFT 培多花黑麦草过滤罗非鱼(*Oreochromis niloticus*) 养殖废水<sup>[9, 11]</sup>未能成功控制水质的原因可能是: (1) 废水循环灌溉制度不合理, 每天工作 8 次(每次 30 min) 的循环制度未能为牧草创造合适的生长环境; (2) 废水中的营养成分或浓度未能很好满足牧草生长的需要, 牧草实际上生长在贫营养状态, 从而减弱了净化能力; (3) 鱼的排泄物和剩余饲料沉淀在池底, 而且不断积累; (4) 此外, 循环灌溉并未能使回流的废水溶解氧浓度得到大幅度提供, 不提供额外增氧难以满足鱼的需要。因此, 植物滤器只有与机械滤器、生物滤器等有效结合, 才能发挥更大作用。如果条件允许, 植物滤器可以集成至循环流水水产养殖系统, 通过水泵间隔循环抽取养殖系统废水灌溉牧草, 然后返回养殖系统, 相应的工作是: 筛选控制性水质指标, 量化牧草净化能力, 从而根据控制因子的期望水平确定牧草面积, 以合适的灌溉制度运行。

### 2.3 养殖废水灌溉的 NFT 培牧草生长特性

养殖废水灌溉的 NFT 培多年生黑麦草的植株高度增长情况如图 2。前 10 d 生长迅速, 由刈割

后的 60 mm 增长到 186.2 mm, 此后增长十分缓慢, 试验结束时为 249.6 mm。植株高度  $h$  与时间  $t$  ( $t = 2, 3 \dots 37$ ) 的回归曲线方程为:

$$h = 48.769 \ln(t) + 71.562 (R^2 = 0.9923)$$

草等植物对废水的净化作用表现在两方面:

(1) 根系对可沉淀物、悬浮物等固体颗粒的拦截和吸附等物理作用; (2) 植物的生长会吸收可溶性的营养物质和一部分水, 植物收获后完成转移或利用<sup>[12]</sup>。因此, 废水的营养成分高低决定了草的生长效果, 图 1 和图 2 的植株高度增长差异表明, 养殖废水中营养物质对草生长的支持比培育时的商品营养液低。前 10 d 获得的 12.6 mm 日增长应该来自培育时吸收的营养利用, 其后的 28 d 平均 2.3 mm 的直线日增长速度才是废水灌溉的成果。而在培育系统中的草依然保持了 13.2 mm 的日增长速度(15 d 刈割一次)。此外, 整个净化废水试验过程未刈割也可能限制了植株高度的增长, 而培育系统中的高频率刈割对草的直线增长也作出了贡献。虽然没有直接的数据表明, 生长缓慢的草会影响其净化废水的能力, 但我们建议用草净化营养成分不高的废水时, 应定期将草返回培育系统中培养一段时间, 与土培、沙培相比, 带育

苗盘的 NFT 培牧草能十分简便地实现这种运作; 同时, 如果营养成分过高而使草生长受到抑制时, 相同的方法可能也行之有效, 而不必进行稀释。事实上, 养殖废水中也缺乏商品营养液中的钾、钙、镁、锰、硼、锌、铜、钼、铁等元素, 单纯利用废水灌溉可能改变草的营养品质, 这些影响将得到深入研究。

新鲜叶片的 TAN 和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量如图 3 所示, 分别为  $107.9 \pm 19.1$  和  $42.5 \pm 12.7 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  水平介于废水初始浓度和净化后浓度之间。试验结束时留茬 60 mm 刈割收获鲜草  $582.9 \pm 30.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 烘干后得到干草  $102.5 \pm 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 干湿比为 0.176。多年生黑麦草是草食性鱼类及许多蓄、禽喜欢的优质饲草, 利用植物过滤器净化养殖废水同时也是一种有效益的农业生产。

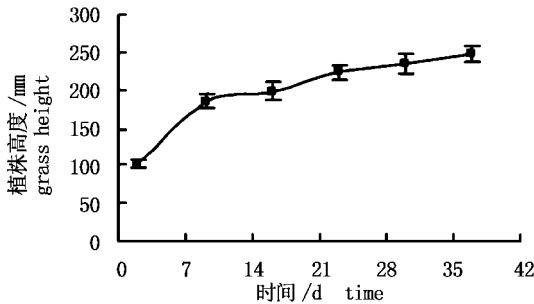


图 2 养殖废水灌溉的 NFT 培牧草植株高度

Fig. 2 Height of NFT grass cultured with recirculating aquaculture wastewater

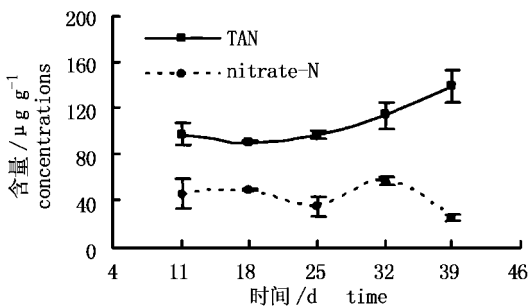


图 3 养殖废水灌溉的 NFT 培牧草

叶片氨氮和硝酸盐氮含量

Fig. 3 Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen concentrations of NFT grass cultured with recirculating aquaculture wastewater

### 3 结论

(1) 培育系统中用商品营养液灌溉的 NFT 培多年生黑麦草生长迅速, 前 20 d 日增长 9.4 mm, 第 20 天留茬 60 mm 刈割后增长速度显著加快, 日

增长 13.2 mm, 能够进行规模生产, 为试验或应用提供材料。

(2) 以  $0.8 \text{ m}^2$  40 d NFT 培多年生黑麦草构建的植物过滤器能有效净化 25.4 L 来自淡水白鲢循环流水养殖系统的废水, 7 d 处理使  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、TP、COD 的去除率分别达到了 96.1%、86.2%、90.5%、88.7%, pH 从 6.4 升高至 8.4, 除 UIA 由于 pH 升高而超标外, 所有水质指标均符合渔业水质标准, 而水体只消耗 29.7%。植物过滤器能够解决循环流水水产养殖系统中 N、P、COD 累积及 pH 下降等, 是一种环境友好的水处理方法。

(3) 植物过滤器中的牧草日增长仅 2.3 mm, 显著低于用商品营养液培育的牧草生长速度(日增长 13.2 mm)。鲜草 TAN 和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量分别为 107.9 和  $42.5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 试验结束时收获鲜草  $582.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 烘干得干草  $102.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 干湿比 0.176。为使牧草正常生长, 建议定期将牧草返回培育系统用商品营养液培养一段时间, 以保持良好生长。

### 参考文献

- [1] Lawson T B. Fundamentals of aquacultural engineering [M]. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 1995. 192.
- [2] 吴万夫, 张荣权. 渔业工程技术 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000. 79.
- [3] Mires D, Anjioni C. A technical and economic comparative evaluation of two intensive closed water cycled culture systems for tilapias in Israel [A]. Proceedings from the fourth international symposium on tilapia in aquaculture [C]. Orlando, Florida, USA: 1997.
- [4] Kugelman I J, Van Gorder S. Water and energy recycling in closed aquaculture systems [A]. Engineering Aspects of Intensive Aquaculture, Proceedings from the Aquaculture Symposium [C]. NY, USA: Cornell University, 1991.
- [5] Rosati R, O'Rourke P D, Foley P, et al. Operation of a prototype commercial scale recirculating grow out system for *Oreochromis niloticus* [A]. Proceedings from the fourth international symposium on tilapia in aquaculture [C]. Orlando, Florida, USA: 1997.
- [6] 中国水产科学研究院东海水产研究所和北京自动化系统工程设计院(译). 水产养殖工程 [M]. 北京: 农业出版社, 1987. 530.
- [7] Körner S, Das S K, Veenstra S, et al. The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba* [J]. Aquatic Botany, 2001, 71: 71-78.
- [8] 丁树荣, 程树培, 胡忠明. 利用人工基质无土栽培多花黑麦草净化缙丝废水的研究 [J]. 中国环境科学, 1992, 12(1): 9-15.
- [9] 邵志鹏, 苗香雯, 崔绍荣. 水产养殖系统中多花黑麦草生物过滤效果研究 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2002, 20(4): 317-321.
- [10] 潘瑞焯, 董愚得. 植物生理学(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 48.
- [11] 泮进明, 邵志鹏, 苗香雯, 等. 循环流水水草共生生态系统的鱼草配比试验研究 [J]. 生态学报, 2004, 24(2): 389-392.
- [12] 泮进明, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 工厂化水产养殖污水处理的植物性过滤器研究及应用 [J]. 水利渔业, 2003, 23(5): 43-45.