

复合水平流人工湿地对氮和有机污染物的 去除效果和动态变化

徐嘉波, 施永海*, 张根玉, 刘建忠, 朱雅珠

(上海市水产研究所, 上海市水产技术推广站, 上海 200433)

摘要: 将半咸水 ($S=7.5 \pm 0.1$) 复合水平流人工湿地同室内水泥池养殖暗纹东方鲀 (*Takifugu obscurus*) 结合, 构建室内集约化养殖—湿地生态系统, 研究了人工湿地处理养殖循环用水过程中, 湿地不同沿程处理系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TSS 和 COD 的去除规律和动态变化。结果表明, 人工湿地对上述水质指标有良好的净化效果, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率 66.37%, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均去除率 97.68%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均去除率 7.63%, TSS 平均去除率 80.39%, COD 平均去除率 16.50%。各水质指标在湿地床内的动态模型可表示为曲线: $C_L=C_0 \cdot \exp(K_1L^2+K_2L+K_3)$ 。

关键词: 半咸水; 人工湿地; 氮; 有机污染物; 动态变化

中图分类号: S959

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2012)06-0875-06

Nitrogen and organic matter removal efficiency and dynamic feature of integrated horizontal constructed wetlands

XU Jia-bo, SHI Yong-hai, ZHANG Gen-yu, LIU Jian-zhong, ZHU Ya-zhu

(Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433)

Abstract: An integrated horizontal constructed wetland was integrated into an indoor recirculating aquaculture system for culturing obscure puffer (*Takifugu obscurus*). The aim of the study was to examine dynamic characteristics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TSS, and COD during the treatment of integrated horizontal constructed wetland under the condition of brackish water (7.4-7.6, salinity). The mean removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TSS, and COD was 66.37%, 97.68%, 7.63%, 80.39%, and 16.50%, respectively, during recirculation process. According to each characteristic dynamic curve, a model was set up as follows: $C_L=C_0 \cdot \exp(K_1L^2+K_2L+K_3)$.

Key words: brackish water; constructed wetland; nitrogen; organic matter; dynamic feature

近年来,随着环境保护意识的加强以及受干旱、污染等自然条件的约束,集约化和生态化养殖技术不断发展。人工湿地作为一种有效的水处理技术在水产养殖业已得到广泛的应用^[1-2],由人工湿地与养殖池构建的循环水养殖系统将集约化和生态化有机结合。与常规循环水处理系统中高能耗的设备运行以及高维护保养费用相比,人工湿地具有造价低、耗能低、维护方便的优势。此外,若选择有经济价值的湿地作物亦可产生附加经济价值。

人工湿地的净化方式包括过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物代谢等,通过物理、

化学和生物的协同作用,有效去除污水中的悬浮固体、有机物、氮、磷等养殖水体产生的污染物^[3-4]。国内外均有利用人工湿地进行淡水循环水养殖的研究报道:如 Tilley 等^[5]通过人工湿地系统对养虾废水进行循环过滤取得一定成效;Lin 等^[6]研究了人工湿地在循环水养殖凡纳滨对虾中的水质净化效果;于涛等^[7]研究了人工湿地在斑点叉尾鲴等养殖中的净化效能。

然而,目前有关半咸水人工湿地净化养殖循环水的研究报道甚少。本文选择耐盐植物,构建基于半咸水人工湿地的养殖系统,初步研究了主要污染

收稿日期: 2011-10-27

基金项目: 上海市科学技术委员会 (09ZR1429000) 项目资助。

作者简介: 徐嘉波, 男, 工程师。E-mail: shxujiabo@gmail.com

* 通讯作者: 施永海, 男, 高级工程师。E-mail: yonghais@163.com

物 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TSS 和 COD) 在人工湿地的去除规律和动态变化, 以期全面掌握污染物在人工湿地沿程的空间分布和动态变化, 并为进一步研究复合水平流人工湿地在集约化养殖系统中合理的面积使用比提供初步研究依据。

1 材料与方 法

1.1 人工湿地构建和工艺流程

本系统由半咸水人工湿地与室内水泥池构成, 其中半咸水人工湿地用于水质的净化, 室内水泥池用于暗纹东方鲀幼鱼的养殖, 组成结构见图 1 和图 2。人工湿地: 利用陆基水泥池构建(19.4 m×12 m), 基底为直径 0~50 mm 的砾石, 砾石层高度为 0.50 m, 砾石上方保持 0.10 m 的表层水位, 此水位在整个试验过程中保持恒定。W0 为初级沉淀池, 主要用于初步沉淀由养殖池产生的固体悬浮物; 人工湿地共均分为面积相等的 5 个单元, 各单元之间砌 0.12 m 水泥砖墙。实际湿地面积为 221.0 m²。为避免植物生长产生绝对优势, W1 和 W3 种植芦苇, W2 和 W4 种植米草, W5 种植茺草。湿地上方覆盖透光尼龙薄膜。室内水泥养殖池共 4 个, 实际养殖水体面积为 193.2 m²。养殖池采用气泵充氧供气, 人工湿地出水处增设气头曝气, 采用 2 寸水泵抽提出水处经净化处理的半咸水泵入室内水泥养殖池, 并经距水泥池口下 0.10 m 的出水口利用水位差回流至人工湿地。复合水平流人工湿地内垂直面水流方式见图 2, 每个单元的进水由砾石底部管道进入之后, 至该单元流程结束时, 经由设在砾石底部的管道流入下一单元。在此过程中, 水体以水平流动为主, 在单元进水端存在向上的流动, 随沿程的增加逐渐减弱; 在单元出水端存在向下的流动, 离出水端越近, 流动越明显。

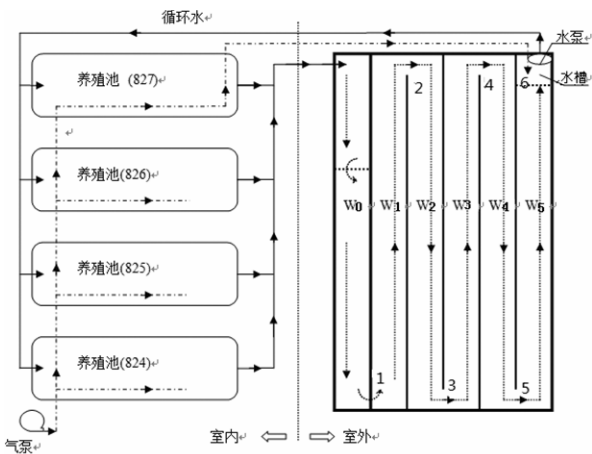


图 1 人工湿地组成及结构示意图
Figure 1 The plane map of the constructed wetland

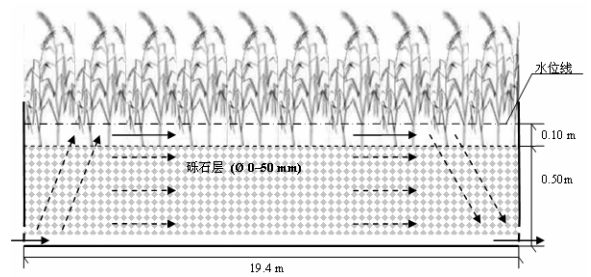


图 2 人工湿地水体流向纵切图
Figure 2 The water flow direction of the constructed wetland

1.2 人工湿地运行与采样

人工湿地自 2009 年 6 月组建, 经过植物培植后, 于 2010 年 6 月至 10 月曾应用于室内凡纳滨对虾的集约化养殖循环水处理。本试验过程中, 湿地植物已生长繁茂, 根系发达。试验自 10 月初至 11 月底进行, 室内水泥养殖池内放养 100 尾·m⁻² 的暗纹东方鲀幼鱼 ($\bar{L} = 5 \text{ cm}$), 每日按鱼体重 2% 投喂鳗鱼粉状饲料揉成的面饼, 试验期间不换水、不吸污, 定期补充因蒸发流失的水分。试验水力负荷为 0.458 m·d⁻¹。实验按图 1 所示标注数字位置采样, 共采样 3 次。

1.3 水质测定与分析方法

测定水样水温、盐度、pH、DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TSS、COD。pH 采用 YSI-100 (Yellow Spring, 美国)测得; DO 和水温采用 YSI-58 (Yellow Spring, 美国)测得; 盐度采用 YSI-30 (Yellow Spring, 美国)测得; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏比色法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用重氮偶氮比色法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用锌镉还原-重氮偶氮法; TSS 采用滤纸恒重法; COD 采用碱性高锰酸钾法。所测数据采用 Spss13.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 人工湿地水质理化参数

本研究中, 人工湿地内进出水物理参数变化见表 1。湿地出水口水温高于进水口水温, 这是因为人工湿地由透明尼龙薄膜覆盖, 天气晴好, 湿地内水温升高, 尼龙薄膜具有保温作用。pH 有轻微升高, 这与湿地内白天藻类光合作用有关, Vymazal^[8]研究表明白天藻类光合作用可导致 pH 的升高。DO 进水口浓度较出水口浓度低, 这是由有机质的氧化和硝化作用的耗氧引起的^[9]。

2.2 人工湿地中三态氮沿程变化

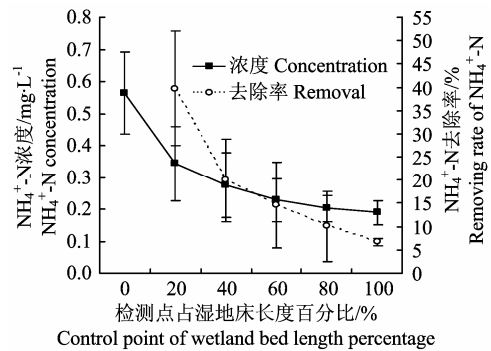
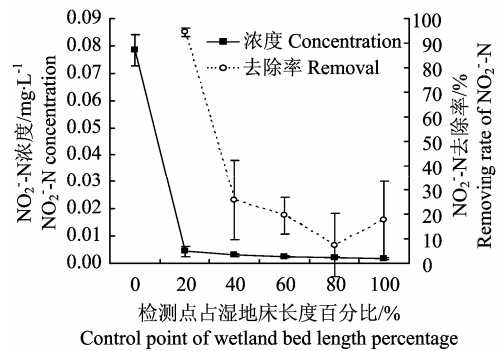
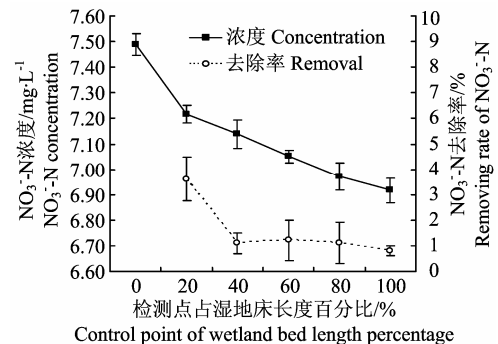
以检测点距离与湿地床长度百分比数 (L) 为横坐标, 分别以污水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为主纵坐标, 各检测点较前一检测点的去除率

为次纵坐标, 得出 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在湿地床内沿程变化趋势 (图 3~图 5)。由图 3 可见, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 从湿地床第 1 至第 2 检测点下降明显, 平均去除率为 39.78%, 随沿程的增加, 去除率逐渐减小, 第 6 监测点平均去除率仅为 6.75%。由图 4 可见, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 从第 1 至第 2 检测点下降显著, 第 2 检测点平均去除率达到 94.52%。这与湿地内微生物的硝化作用有关, 人工湿地经长期的植物培育及高密度对虾养殖用水循环处理后, 已建立完善的有益微生物菌群, 湿地内植物根系茂密, 基质表面附着成熟生物膜, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的高去除率表明湿地硝化作用已成熟。Kyambadde 等^[10]也表明, 植物茂密的根系有利于提高硝化细菌进行硝化作用的能力。此外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除峰值均出现在第 2 检测点, 结合 W1 内植物生长明显优于其他湿地单元分析, 1~2 监测点沿程内为养殖废水首先流经区域, 该区域为微生物菌群的繁殖以及植物生长提供了大量的营养源, 使得该区域微生物的硝化作用更为明显。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 自第 3 检测点起变化趋缓, 随废水在湿地内迁移距离的延长, 去除率呈缓慢下降趋势。湿地出水口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 $0.189 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与进水口浓度相比, 平均去除率达到 66.37%。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 变化趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 一致, 出水口 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均为 $0.002 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与进水口浓度相比, 平均去除率达到 97.68%。由图 5 可见, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除在整个湿地沿程中并不显著, 全程平均去除率仅为 7.63%, 而 Lin 等^[11]研究中测得 68% 以上的去除率。这一区别由水力负荷的不同造成, 低水力负荷延长了硝酸盐与反硝化细菌的接触时间, 导致反硝化作用的形成, 本研究中的水力负荷高于其他研究, 硝酸盐与反硝化细菌接触时间较少, 导致了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的低去除率。尽管如此, 3 次采样 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 全程去除率分别为 7.71%、7.67% 和 7.51%, 去除率标准差为 0.11, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除作用表现稳定, 结合 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度在湿地床 4~6 检测点呈缓慢下降, 且变化幅度小于 25%, 这充分说明了湿地系统的成熟^[12]。

表 1 人工湿地进出水理化参数

Table 1 Physicochemical water parameters of inlet and outlet of the constructed wetland

参数 Parameter	进水 Water inflow	出水 Water outflow
水温/ $^{\circ}\text{C}$ Water temperature	15.9±0.1	16.2±0.1
盐度 Salinity	7.5±0.1	7.5±0.1
pH	7.67±0.08	7.78±0.08
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7.17±0.17	6.83±0.44

图 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在湿地床内浓度及去除变化Figure 3 The amount and removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the wetland bed图 4 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在湿地床内浓度及去除变化Figure 4 The amount and removal rate of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the wetland bed图 5 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在湿地床内浓度及去除变化Figure 5 The amount and removal rate of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the wetland bed

2.3 人工湿地中有机污染物沿程变化

人工湿地对有机污染物的去除主要利用的是基质-微生物-植物的三重协同作用^[13], 此作用主要包括基质对有机污染物的吸附、沉淀和过滤, 微生物的分解以及植物的吸收。图 6、图 7 分别以检测点距离与湿地床长度百分比数 (L) 为横坐标, 分别以污水 COD、TSS 浓度为主纵坐标, 各检测点较前一检测点的去除率为次纵坐标, 得出 COD、TSS 在湿地床内沿程变化趋势。由图 6 可见, COD 的去

除主要发生在2~3检测点间,平均去除率达7.16%,此后在沿程中表现平稳, COD呈缓慢下降趋势,至湿地出水口 COD浓度平均仅为5.11 mg·L⁻¹,这一良好表现主要与经初级沉淀后进入湿地床的水体有机物含量减少以及植物根系茂盛,微生物群对有机物降解能力较强有关, Schulz等^[14]研究表明湿地植物对COD的去除具有重要的作用,植物根茎为去除过程创造了必要的生化环境。由图7可见, TSS在湿地床内由1~6检测点逐渐减少,湿地距离的延长使得养殖废水停留时间增长,有利于TSS的过滤、沉淀和被吸附,去除率在湿地沿程内呈现逐渐增加的趋势(16.96%~47.25%),湿地总沿程内平均去除率为80.39%,这与李谷^[15]研究结果一致。该作者采用复合垂直流人工湿地, TSS的去除率表现为随着污水在人工湿地基质内迁移距离的延长,去除速率逐渐减少。而本研究采用的复合水平流人工湿地,其对TSS的去除除湿地基质对固体颗粒悬浮物的吸附、截留外,也与植物发达的根系有关。

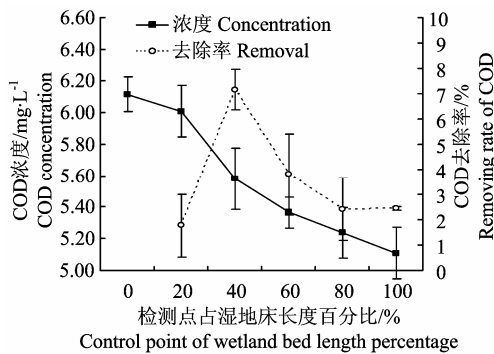


图6 COD在湿地床内浓度及去除变化

Figure 6 The amount and removal rate of COD in the wetland

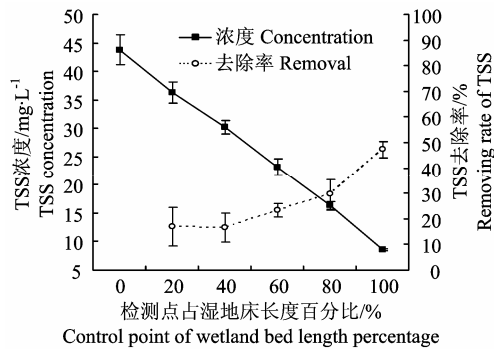


图7 TSS在湿地床内浓度及去除变化

Figure 7 The amount and removal rate of TSS in the wetland

2.3 人工湿地中三态氮及有机污染物沿程动态变化模型

三态氮及有机污染物在湿地床内的动态变化可

以用一级去除动力模型来进行描述^[16],结合经验公式: $y=a\exp(bx^2+cx+d)$,修订一级动力模型转化为湿地床内沿程动态变化计算模型式^[17],如下:

$$C_L=C_0\exp(K_1L^2+K_2L+K_3) \tag{1}$$

对(1)式两边取对数可以得到:

$$\ln(C_L/C_0)=K_1L^2+K_2L+K_3 \tag{2}$$

式中: C_0 为初始浓度, mg·L⁻¹; C_L 为距湿地进水端L处的浓度, mg·L⁻¹; L为监测点距离与湿地床长度百分比数; K_1 、 K_2 、 K_3 为降解系数。

本研究对三态氮及有机污染物实测,拟合模型曲线。图8~图12分别表示NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、COD、TSS的拟合曲线。由图8~图10的拟合曲线方程($P<0.05$)中 K_1 、 K_2 系数分别计算可得,当 $L=93.2\%$ 时, NH₄⁺-N浓度达到最低值;当 $L=72.0\%$ 时, NO₂⁻-N浓度达到最低值;当 $L=99.1\%$ 时, NO₃⁻-N浓度达到最低值。这说明养殖废水经湿地床处理,期间三态氮经过复杂的微生物转化过程、硝化-反硝化过程以及植物的吸收利用过程,于湿地床沿程70%~99%处达到最理想处理效果,三态氮浓度均达到最低值。结合图3~图5可知,实际检测结果与模型式相符。由图11拟合曲线方程($P<0.05$)中 K_1 、 K_2 系数计算得,当 $L=254.5\%$ 时, COD浓度达到最低值,而实际L取值为0~100%,这说明湿地床对COD的去除并未达到理论最优效果,而实际检测结果表明, COD随湿地床沿程的增加呈下降趋势,虽未达到理论最优去除效果,但COD浓度已明显下降,符合地表水环境质量标准(GB3838-2002) I类水质标准中关于COD的限值要求。由图12拟合曲线方程计算可得出:当 $L=100\%$ 时, TSS去除率达到最低值,而实际检测结果表明湿地的出水TSS平均为8.57 mg·L⁻¹,为湿地床沿程测得最低值,且符合渔业水质标准(GB11607-89)外来TSS为10 mg·L⁻¹以下的标准。

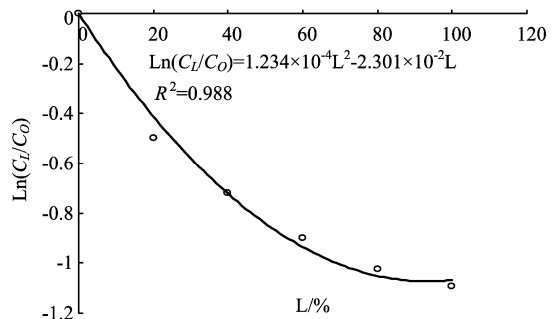
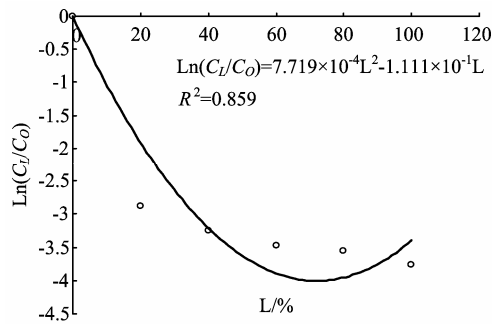
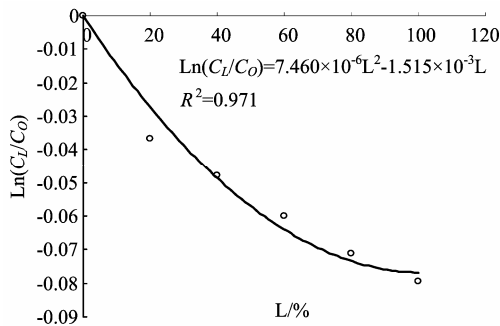
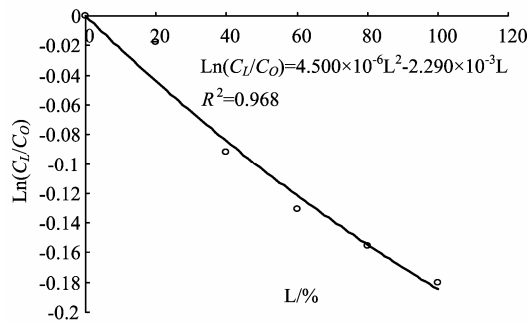
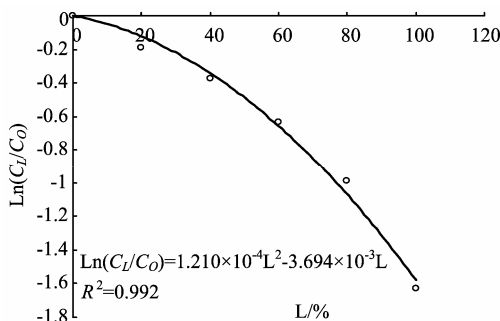


图8 NH₄⁺-N的C_L对L拟合模型曲线

Figure 8 Fitting curve of NH₄⁺-N between C_L and L

图 9 NO_2^- -N 的 C_L 对 L 拟合模型曲线Figure 9 Fitting curve of NO_2^- -N between C_L and L 图 10 NO_3^- -N 的 C_L 对 L 拟合模型曲线Figure 10 Fitting curve of NO_3^- -N between C_L and L 图 11 COD 的 C_L 对 L 拟合模型曲线Figure 11 Fitting curve of COD between C_L and L 图 12 TSS 的 C_L 对 L 拟合模型曲线Figure 12 Fitting curve of TSS between C_L and L

3 结论

利用复合水平流人工湿地, 在半咸水条件下栽植湿地作物, 用于去除养殖循环水中三态氮及有机污染物, 这是一种高效可行的水质处理方式; 养殖用水经复合水平流人工湿地处理后, 主要水质指标均达到国家渔业水质标准(GB11607—89)。

复合水平流人工湿地对三态氮及有机污染物的去除主要集中在湿地床沿程的前中部区域(湿地床沿程总长前 0~40% 区域), 此区域去除的效果为判断人工湿地成熟与否的标准。

有机污染物的去除主要与湿地系统中基质及植物根部区域的吸附、沉淀和过滤作用有关。复合水平流人工湿地的水流方式造成了 TSS 随沿程的延长呈现逐渐下降趋势, 复合水平流人工湿地中 TSS 的去除与湿地床沿程的长度、流速以及基质的空隙率的关系有待进一步研究。

根据三态氮及有机污染物一级去除模型 $C_L = C_0 \exp(K_1 L^2 + K_2 L + K_3)$, 本文实际检验了复合水平流人工湿地系统对各种污染物的降解系数。

参考文献:

- [1] Sindilariu P D, Wolter C, Reiter R. Constructed wetlands as a treatment method for effluents from intensive trout farms[J]. *Aquaculture*, 2008, 277: 179-184.
- [2] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate[J]. *Environ Pollut*, 2005, 134: 411-421.
- [3] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries—A review[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4): 545-560.
- [4] Volodymyr T, Sirajuddin A, Viktor P. Modelling constructed wetland treatment system performance[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 305(3/4): 355-364.
- [5] Tilley D R, Badrinarayanan H, Rosati R, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26: 81-109.
- [6] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y. The potential use of constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for shrimp culture[J]. *Environ Pollut*, 2003, 123 (1): 107-113.
- [7] 于涛, 成水平, 贺锋, 等. 基于复合垂直流人工湿地的循环水养殖系统净化养殖效能与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 188-193.
- [8] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Sci Total Environ*, 2007, 380: 48-65.
- [9] Tunçiper B. Nitrogen removal in a combined vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetland system [J]. *Desalination*, 2009, 247: 466-475.
- [10] Kyambadde J, Kansime F, Gumaelius L, et al. A com-

- parative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate [J]. *Water Res*, 2004, 38: 475-485.
- [11] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Nitrate removal from groundwater using constructed wetlands under various hydraulic loading rates[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 7504-7513.
- [12] 吴振斌, 李谷, 付贵萍, 等. 基于人工湿地的循环水产养殖系统工艺设计及净化效能[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 129-133.
- [13] 宋志文, 王仁卿, 席俊秀, 等. 人工湿地对氮、磷的去除效率与动态特征[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(6): 648-651.
- [14] Schulz C, Gelbrecht J, Rennert B. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow[J]. *Aquaculture*, 2003, 217: 207- 221.
- [15] 李谷. 复合人工湿地- 池塘养殖生态系统的特征与功能研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005.
- [16] Kincanon R, Mcanally A S. Enhancing commonly used model predictions for constructed wetland performance: as- built design considerations [J]. *Ecological Modeling*, 2004, 174: 309- 322.
- [17] 贺俐, 陈贵兴. 计算方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.

本刊顾问 陈宗懋院士

陈宗懋 (1933 -), 茶学专家。出生于上海市, 原籍浙江省海盐县人。1954年毕业于沈阳农学院植保系。曾任中国农业科学院茶叶研究所所长、中国茶叶学会理事长。现任中国农业科学院茶叶研究所研究员、博导、中国茶叶学会名誉理事长和国际茶叶协会副主席。

20世纪60年代陈宗懋院士开创茶叶农残研究, 提出各类农药在茶树上降解规律和预测模型、18项国标和5项部标。首次探明空气漂移是茶叶农残徘徊不降的原因, 研究居国际前沿水平。其实验室被欧盟确认为中国茶出口唯一认可检验机构。近年对降低我国茶叶农残有突出贡献, 3年全国超标率由80%降至20%。90年代开拓昆虫化学生态学新领域, 从茶树-害虫-天敌化学通讯机制着手, 明确害虫和天敌定位的化学生态机制, 具创新性。论文在《*J Chem Ecol*》, 《*J Agricul Food Chem*》等重要刊物上发表。培养多名博士生和管理人才, 对我国茶业起到推动作用。

2003年当选为中国工程院院士。