

叶捷,彭剑峰,高红杰,等. 2011. 潮汐流人工湿地低温下  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  去除模型比较和优化[J]. 环境科学学报, 31(7): 1456-1463

Ye J, Peng J F, Gao H J, et al. 2011. Comparison and optimization of a  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  removal model of a tidal-flow constructed wetland in low temperature seasons[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(7): 1456-1463

# 潮汐流人工湿地低温下 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 去除模型比较和优化

叶捷<sup>1,2</sup>, 彭剑峰<sup>2</sup>, 高红杰<sup>2</sup>, 宋永会<sup>2,\*</sup>, 邱光磊<sup>2</sup>, 张盼月<sup>1,3</sup>, 曾光明<sup>1</sup>

1. 湖南大学环境科学与工程学院, 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082

2. 中国环境科学研究院, 城市水环境研究室, 北京 100012

3. 北京林业大学, 环境科学与工程学院, 北京 100083

收稿日期: 2010-09-07

修回日期: 2010-10-21

录用日期: 2010-11-08

**摘要:** 针对目前人工湿地在低温条件下脱氮效能降低的问题, 本研究对每天 3 个运行周期的潮汐流人工湿地在低温条件下对  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  的处理效能进行研究, 同时利用表观动力学模型、多元参数回归模型及 Monod 机制模型对  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  的去除过程进行拟合. 结果显示, 在平均水温为 9 ~ 13 °C 条件下, 每天 3 个运行周期的潮汐流人工湿地对  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  有良好的去除效果, 同时 Monod 机制模型对  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  的去除过程具有最优的拟合结果, 可决系数  $R^2 = 0.9035$ . 在此基础上, 利用修正的摩尔斯分类筛选法对 Monod 机制模型参数进行局部灵敏度分析, 结果表明, 在 Monod 机制模型中, 进水  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  浓度为高灵敏参数, 其对反应器内  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  的去除影响最大, 平均水温 ( $T$ ) 为灵敏参数, DO 为中等灵敏参数.

**关键词:** 潮汐流人工湿地;  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ ; 低温; 动力学模型; 摩尔斯分类筛选法; 局部灵敏度分析

文章编号: 0253-2468(2011)07-1456-08

中图分类号: X703

文献标识码: A

## Comparison and optimization of a $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ removal model of a tidal-flow constructed wetland in low temperature seasons

YE Jie<sup>1,2</sup>, PENG Jianfeng<sup>2</sup>, GAO Hongjie<sup>2</sup>, SONG Yonghui<sup>2,\*</sup>, QIU Guanglei<sup>2</sup>, ZHANG Panyue<sup>1,3</sup>, ZENG Guangming<sup>1</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082

2. Department of Urban Water Environmental Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083

Received 7 September 2010;

received in revised form 21 October 2010;

accepted 8 November 2010

**Abstract:** To solve the problem of the low efficiency of nitrogen removal under low temperatures in constructed wetlands, we studied the treatment performance of a tidal-flow constructed wetland with three running cycles per day under low temperature conditions. We simulated the  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  removal using the apparent kinetic model, multiple regression model and Monod-mechanism model. The experimental results showed that the tidal-flow constructed wetland with three running cycles per day had a high efficiency for  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  removal at 9 ~ 13 °C and it fit the Monod-mechanism model reasonably well, with a coefficient of determination  $R^2$  of 0.9035. Based on this conclusion, the local sensitivity of the Monod-mechanism model was analyzed by modified Morris screening which showed that in the Monod-mechanism model,  $C_{in}$  was a highly sensitive parameter, the average water temperature ( $T$ ) was a sensitive parameter and DO was a medium sensitive parameter.

**Keywords:** tidal-flow constructed wetland;  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ ; low temperature; dynamic model; Morris screening method; local sensitivity analysis

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项课题( No. 2008ZX07208-003); 国家自然科学基金项目( No. 50708101/E080402)

Supported by the National Key Scientific and Technological Project for Water Pollution Control and Management ( No. 2008ZX07208-003) and the National Natural Science Foundation of China ( No. 50708101/E080402)

作者简介: 叶捷(1985—) 男, E-mail: eyejie@126.com; \* 通讯作者( 责任作者) E-mail: songyh@caes.org.cn

Biography: YE Jie(1985—), male, E-mail: eyejie@126.com; \* Corresponding author E-mail: songyh@caes.org.cn

## 1 引言 (Introduction)

人工湿地是利用土壤-植物-微生物之间的相互作用实现污染物质去除的一种污水生态处理方式 (Chan *et al.*, 2008). 相对于其他污水处理工艺而言, 人工湿地具有建设和运行费用低廉, 对氮、磷等污染物质去除能力强、维护管理简便、耐冲击负荷强等优点 (Lai *et al.*, 2009; Chung *et al.*, 2008; Tee *et al.*, 2009), 因而被广泛应用于农村地区生活污水、受污染地表水等的处理中 (吴晓磊, 1995; Gross *et al.*, 2007). 潮汐流人工湿地是由英国伯明翰大学提出的一种新型人工湿地, 它通过将湿地按时间序列周期性地充水和排干, 使得湿地内部不断形成好氧-厌氧过程, 从而实现并强化对污染物质的去除. 潮汐流人工湿地的运行方式分为进水-反应-排空-闲置 4 个阶段, 该运行模式下周期性的复氧, 能有效促进污染物质的去除, 并可防止蚊蝇滋生和臭味产生.

人工湿地系统中的污染物降解行为涉及多种物理、化学和生物过程, 深入研究人工湿地污染物的去除动力学行为, 并建立可靠的数学模型, 对人工湿地的设计与运行效果评估具有重要的理论和实践意义. 之前人工湿地的设计一般建立在统计数据和经验公式基础上, 由于设计中存在不确定因素或适用范围有限, 经常导致出水不能达标排放. 随着研究的深入, 湿地模型不断得到发展, 对湿地运行效果的预测有了一定提高 (谢龙等, 2009). 为明确人工湿地中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除行为, 分析并确定影响  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除的关键因素, 进而进一步优化反应器内  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除过程, 本研究以每天运行 3 个周期的潮汐流人工湿地中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除为研究对象, 分别采用表观动力学、多元参数回归及 Monod 机制模型对反应器内  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除过程进行动力学分析, 并建立数学模型, 确定  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除的主要影响因素, 模拟和预测潮汐流人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 实验装置

本试验于沈阳某污水处理模拟实验室中开展, 试验装置 (图 1) 为直径 30 cm、高 80 cm 的有机玻璃

圆柱体, 有效体积为  $0.042 \text{ m}^3$ . 反应器内填充砾石填料, 填充高度为 65 cm (底部填充直径为 25 ~ 50 mm 的大砾石 15 cm, 中部填充直径为 8 ~ 12 mm 的砾石 20 cm, 上部填充直径为 3 ~ 5 mm 的砾石 30 cm). 反应器采用潮汐式运行方式, 反应器进水和出水由 PLC 时控器控制.

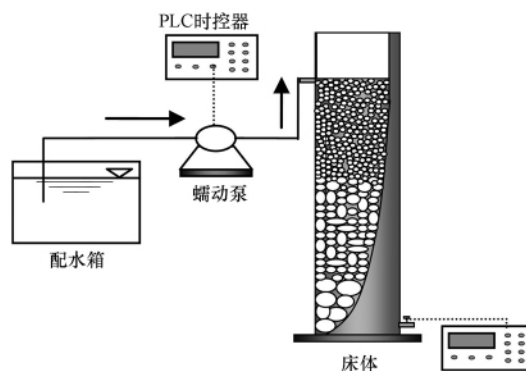


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental equipment

### 2.2 实验水质

实验水质为人工模拟重污染河水, 主要水质指标为:  $\text{COD}_{\text{Cr}}$   $110.00 \sim 175.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度  $29.04 \sim 44.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度  $3.36 \sim 5.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 值为  $6.0 \sim 7.0$ .

### 2.3 监测方法

常规水质指标:  $\text{COD}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、生物量采用 SEPA (2002) 标准方法测定. 水温 ( $T$ )、DO 采用 YSI 便携式 DO 测定仪测定 (YSI 美国).

### 2.4 运行条件

为模拟低温下植物枯萎的环境条件, 本研究采用未栽种植物的潮汐流人工湿地, 水力负荷为  $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . 系统采用瞬时进水、瞬时排空的运行方式, 每周期 8.0 h, 其中, 反应和排空各 4.0 h. 系统于 2009 年 10 月开始运行, 经过 1 个月的驯化后正式启动. 2009 年 11 月 ~ 2010 年 4 月为系统正式运行期. 其中 2009 年 11 月 ~ 2010 年 2 月平均温度为  $9 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2010 年 3 月 ~ 2010 年 4 月平均温度为  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 2.5 数学模型的建立

2.5.1 模型参数定义及取值 本研究涉及的主要参数的物理意义及其取值如表 2 所示, 各参数取值的确定分别采取自测定和参考文献值的方法.

表 1 模型主要参数及其取值范围和取值方法  
Table 1 Parameters with respect to  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal models

参数符号	参数含义	单位	数值	数据来源
$T$	平均水温	$^{\circ}\text{C}$	8 ~ 17	自测定
DO	溶解氧	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.43 ~ 0.72	自测定
$k_1$	一级反应速率常数	$\text{h}^{-1}$	0.12	由式(9)计算得到
$k_0$	零级反应速率常数	$\text{h}^{-1}$	3.40	由式(6)计算得到
$C_{\text{out}}$	出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	16.43 ~ 33.45	自测定
$C_{\text{in}}$	进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	29.04 ~ 44.75	自测定
CT	接触反应时间	h	4	自测定
$V$	反应器容积	L	42	自测定
$\mu_{\text{max}}$	微生物最大比生长速率	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00164	自测定
$K_s$	饱和常数	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.199	自测定
$x$	生物量	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	771.5	自测定
$\theta$	温度修正系数		1.04	Kadlec, 1995
$Y$	产率系数		0.2	Metcalf and Eddy Inc., 2003
$k_o$	溶解氧半饱和常数	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.2	Metcalf and Eddy Inc., 2003

注: 产率系数以每 mg 基质产生的生物膜 mg 数计。

2.5.2 表观动力学模型 表观动力学模型较广泛地用于人工湿地的设计(Kadlec *et al.*, 2000; 丁畔等, 2006), 其主要考虑处理负荷与处理效率之间的关系。模型的构建以基质的去除过程服从简单反应动力学为基础。在反应器运行相对稳定条件下, 首先假设模型中基质的去除速率常数为定值, 即稳定运行期内, 水力负荷或进水浓度微小波动对其取值影响不大, 其次假设反应器内不同空间位置污染物的衰减均遵循相同规律并具有相同的反应速率。基于以上假设, 根据物料平衡方程, 人工湿地系统内某特定污染物的质量平衡可以表示为(Chan *et al.*, 2008; 谢龙等, 2009):

$$V \frac{dc}{dt} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} + Vr \quad (1)$$

式中  $c$  为污染物浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $r$  为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的表观衰减速率( $\text{h}^{-1}$ ), 是对反应器内吸附、沉积、挥发和微生物降解等一系列过程综合作用的表观描述。

本研究中选取  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为研究对象, 则其物料平衡方程可以表示为(Chan *et al.*, 2008):

$$V \frac{d[\text{NH}_4^+ - \text{N}]}{dt} = Vr + Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \quad (2)$$

式中,  $Q_{\text{in}}$ 、 $Q_{\text{out}}$  分别为污染物的输入量和输出量( $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ )。对于潮汐流运行模式的人工湿地, 一个独立的反应周期内, 反应器内不存在  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的输入输出, 即  $Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} = 0$ 。对于本研究, 式(2)则可以表示为:

$$V \frac{d[\text{NH}_4^+ - \text{N}]}{dt} = Vr \quad (3)$$

假设  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的衰减服从简单反应动力学, 则  $r$  可以表示为:

$$r = -k_n c^n \quad (4)$$

式中  $n$  为反应级数。

在基质的去除遵循零级反应条件下,  $n = 0$ , 由式(4)可得:

$$r = -k_0 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得:

$$k_0 = -\frac{C_{\text{out}} - C_{\text{in}}}{CT} \quad (6)$$

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} - k_0 CT \quad (7)$$

当基质去除遵循一级反应时,  $n = 1$ , 由式(4)可得:

$$r = -k_1 c \quad (8)$$

将式(8)代入式(3)可得:

$$k_1 = \frac{\ln C_{\text{in}} - \ln C_{\text{out}}}{CT} \quad (9)$$

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} e^{-k_1 CT} \quad (10)$$

2.5.3 多元回归模型 多元回归分析预测法是指通过对两上或两个以上的自变量与一个因变量的相关分析, 建立预测模型进行预测的方法, 通常表示为:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots) \quad (11)$$

在人工湿地中, 选取进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度  $C_{\text{in}}$ 、COD、DO、 $T$  为出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度  $C_{\text{out}}$  的主要影响因素, 进而考察出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度  $C_{\text{out}}$  与各影响因素之

间的关系( Chan *et al.* , 2008) , 对应函数可表示为:

$$C_{\text{out}} = f( C_{\text{in}}, \text{COD}, \text{DO}, T) \quad (12)$$

2.5.4 Monod 机制模型 以上两个模型均为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除过程的经验模型 , 与经验模型相对的是污染物去除机制模型 , 机制模型是在对反应器内进出水污染物进行物料衡算的基础上 , 确定反应器内污染物归趋 , 并对反应器内污染物各归趋途径 ( 如: 吸附、降解、沉积等) 的微反应过程进行定量描述 , 从而构建污染物去除与反应器内各反应过程的机理模式. 机制模型由物料平衡方程可以表示为:

$$V \frac{d[\text{NH}_4^+ - \text{N}]}{dt} = V \sum_{j=1}^m r_j + Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \quad (13)$$

式中  $r_j$  为反应器内物质的某种反应速率( 吸附、沉积、挥发、微生物降解等) .

同样 , 对于潮汐流运行模式的人工湿地 , 一个独立的反应周期内 , 反应器内不存在  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的输入输出 , 即  $Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} = 0$ . 由此可得:

$$V \frac{d[\text{NH}_4^+ - \text{N}]}{dt} = V \sum_{j=1}^m r_j \quad (14)$$

本研究中模拟人工湿地采用砾石作为填料 , 其对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附作用微弱 , 同时反应器内 pH 值在 6.0 ~ 7.0 之间 , 去除过程中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的挥发和沉积作用可以忽略 , 因此 , 假设  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除主要来源于微生物的降解作用 , 则式( 14) 可以表示为:

$$V \frac{d[\text{NH}_4^+ - \text{N}]}{dt} = V r_d \quad (15)$$

式中  $r_d$  为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的微生物降解速率(  $\text{h}^{-1}$ ) .

将  $C_{\text{in}}$ 、DO、 $T$  作为主要影响因素 , 同时 , 根据 Monod 模型和阿伦尼乌兹公式 , 则  $r_d$  可以表示为 ( Chan *et al.* , 2008) :

$$r_d = - \frac{1}{Y} \frac{u_{\text{max}} C_{\text{in}}}{K_s + C_{\text{in}}} x \left( \frac{[\text{DO}]}{k_o + [\text{DO}]} \right) \theta^{(T-20)} \quad (16)$$

由式( 15) 、( 16) , 反应器内  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除可以表示为:

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} - \quad (\text{CT}) \quad \frac{1}{Y} \frac{u_{\text{max}} C_{\text{in}}}{K_s + C_{\text{in}}} x \left( \frac{[\text{DO}]}{k_o + [\text{DO}]} \right) \theta^{(T-20)} \quad (17)$$

## 2.6 局部灵敏度分析法

局部灵敏度分析是在某个参数最佳估计值附近进行“微扰动” , 而其他参数保持不变的条件下 , 计算该参数在这一很小范围内的变化所导致模型输出结果的变化率. 摩尔分类筛选法 ( Morris) 是

目前应用较广的一种局部灵敏度分析方法 ( Francos , 2003; Zador *et al.* , 2006) . 修正的摩尔分类筛选法则是将某一参数以固定步长变化 , 每次变化计算摩尔系数 , 最后将多次扰动计算出的摩尔系数加和求平均值 , 得到该参数的灵敏度指数 ( 郝芳华等 , 2004) :

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i) / Y_0}{(P_{i+1} - P_i)} / n \quad (18)$$

式中  $S$  为灵敏度指数;  $Y_i$  为模型第  $i$  次运行输出值;  $Y_{i+1}$  为模型第  $(i+1)$  次运行输出值;  $Y_0$  为参数率定后计算结果初始值;  $P_i$  为第  $i$  次模型运算参数值相对于率定后参数值的变化百分率;  $P_{i+1}$  为第  $(i+1)$  次模型运算参数值相对于率定后初始参数值的变化百分率;  $n$  为模型运行次数.

## 3 结果( Results)

### 3.1 实验结果

潮汐流人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的反应过程可假设为前期微生物吸附截留和后期微生物好氧降解 2 个阶段( 吴树彪 , 等 , 2010; Sun *et al.* , 1998) . 淹水状态下 , 首先将  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  吸附于带负电荷的生物膜表面 , 然后在瞬间排空的同时将气态氧吸入基质孔隙 , 被吸入基质孔隙的气态氧在短时间内即可传输到微生物膜内部 , 提供给硝化细菌 , 使氨氮硝化过程顺利进行 , 进而提高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除效率. 同时 , “潮汐流”的运行方式也促进了稳定、高密度的微生物生物膜的逐渐形成 ( Behrends *et al.* , 2001) , 从而实现潮汐流反应器对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  处理效果不断提高. 实验结果显示 , 在 2009 年 11 月份 , 当  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均污染负荷为  $37.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时 , 每天运行 3 个周期的潮汐流人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为 11.71%; 随着系统的运行 , 潮汐流人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果不断提高; 在 2010 年 3 月份 , 当  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均污染负荷为  $35.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时 , 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率达到 41.23%. 该运行方式对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的净化效果优于每天运行 1 个周期的潮汐流人工湿地 ( 35.25% ) .

### 3.2 模型求解及预测准确度分析

3.2.1 表观动力学模型 表观动力学模型广泛应用于人工湿地污染物去除过程的模型拟合. 分别根据式( 6) 和式( 9) 对反应器内反应动力学常数进行求解 , 并通过拟合化简 , 得到反应器内  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除过程的一级动力学模型( 式( 19) ) 和零级动力学模型( 式( 20) ) .

$$C_{out} = C_{in} e^{-0.47816} \quad (19)$$

$$C_{out} = C_{in} - 13.6072 \quad (20)$$

图 2 为采用一级动力学模型及零级动力学模型对反应器出水  $NH_4^+ -N$  的预测曲线. 从图中可以看出, 一级动力学模型和零级动力学模型均可以较好地模拟反应器对  $NH_4^+ -N$  的去除效果. 对模型预测结果与实测结果进行回归分析(图 3) 结果显示, 模拟结果与实际结果具有较好的拟合度(一级动力学模型:  $R^2 = 0.7371$   $\delta = 2.074$ ; 零级动力学模型:  $R^2 = 0.8036$   $\delta = 1.780$ ). 从两个模拟的对比结果来看, 零级动力学模型比一级动力学模型具有更高的拟合度和更小的标准偏差. 此外, 从图 3 可以看出, 对于一级反应模型, 存在低进水  $NH_4^+ -N$  浓度及出水  $NH_4^+ -N$  浓度范围内预测结果较实测结果偏低, 而高进水  $NH_4^+ -N$  浓度及出水  $NH_4^+ -N$  浓度范围内预测结果普遍较实测结果偏高的现象, 说明一级动力学模型高估了反应器内  $NH_4^+ -N$  降解速率对进水  $NH_4^+ -N$  浓度的依赖性, 因此, 零级动力学模型比一级动力学模型能更恰当地描述污染物的降解过程.

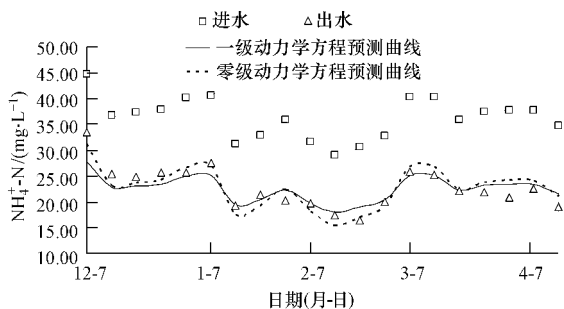


图 2 出水预测值与实测值的对比(一级、零级动力学方程)  
Fig. 2 Comparison of the simulated  $NH_4^+ -N$  with observed  $NH_4^+ -N$

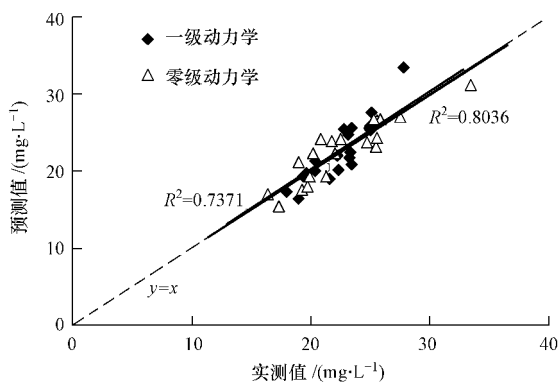


图 3 表观动力学模型预测精度  
Fig. 3 Fits of predictions from the apparent dynamic model

3.2.2 多元参数回归模型 多元回归模型是基于系统处理效果和能够影响及控制系统处理效果的关键因素之间相关性关系而建立的模型. 通过 SPSS 软件对出水  $NH_4^+ -N$  浓度及影响出水  $NH_4^+ -N$  浓度的各因素 ( $C_{in}$ 、COD、DO、 $T$ ) 进行拟合, 结果如下:

$$Y = -3.591 - 0.278X_1 + 0.896 X_2 - 10.496 X_3 + 0.014 X_4 \quad (21)$$

式中  $Y$  为出水  $NH_4^+ -N$  浓度  $C_{out}$  ( $mg \cdot L^{-1}$ );  $X_1$  为温度  $T$  ( $^{\circ}C$ );  $X_2$  为进水  $NH_4^+ -N$  浓度  $C_{in}$  ( $mg \cdot L^{-1}$ );  $X_3$  为溶解氧 DO 浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ );  $X_4$  为 COD 值 ( $mg \cdot L^{-1}$ ).

图 4 为采用多元参数回归方程对反应器内出水  $NH_4^+ -N$  浓度的预测结果. 从图中可以看出, 多元回归模型可以较好地反映反应器内进出水  $NH_4^+ -N$  的对应关系. 预测结果和实测结果间的回归分析结果(图 5) 显示, 模拟结果与实测结果之间具有较高的拟合度 ( $R^2 = 0.8863$ ) 及较小的标准偏差 ( $\delta = 1.369$ ), 模拟结果可以较好地反映反应器实际出水  $NH_4^+ -N$  浓度.

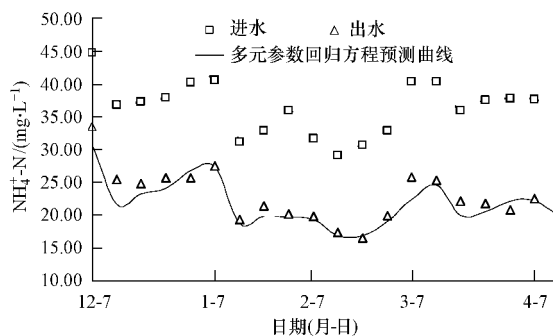


图 4 出水预测值与实测值的对比(多元参数回归方程)  
Fig. 4 Comparison of the simulated  $NH_4^+ -N$  with observed  $NH_4^+ -N$

从各影响因素对  $NH_4^+ -N$  去除的影响来看,  $C_{out}$  与  $C_{in}$ 、COD 呈正线性关系, 回归系数分别为 0.896 和 0.014, 说明随着污染负荷特别是  $NH_4^+ -N$  负荷的增加,  $C_{out}$  升高明显. 因此, 潮汐流人工湿地较适合应用于污水经过预处理的二、三级深度处理(Austin, 2006).  $C_{out}$  与 DO、 $T$  呈负线性关系, DO 的回归系数为  $-10.496$ , 说明 DO 的变化会对处理效果产生显著影响, 充足的 DO 能够促进硝化反应的进行(肖海文等, 2006); 而温度  $T$  的回归系数为  $-0.278$ , 说明温度的提高有助于增加微生物活性, 促进污染物质的去除(尹连庆等, 2008).

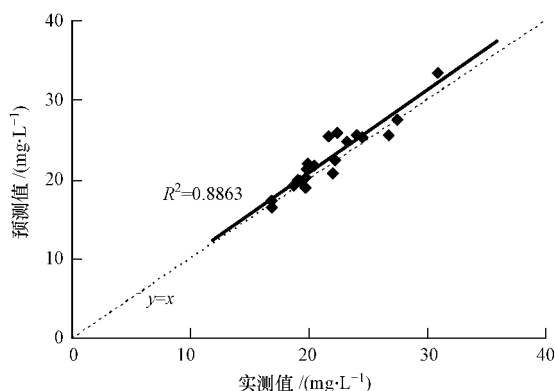


图5 多元参数回归模型预测准确度

Fig. 5 Fits of predictions from the multivariate regression model

3.2.3 Monod 机制模型 该模型主要考虑反应器内污染物去除行为与系统内部微生物作用之间的关系,其中  $\mu_{\max}$  和  $K_s$  可以通过 Monod 方程测定求解. 根据  $\mu_{\max}$  和  $K_s$  的测定结果,同时参考  $\theta$ 、 $Y$ 、 $k_0$  的文献值 (Halling *et al.*, 1996; Kadlec, 1995; Metcalf and Eddy Inc., 2003), 则反应器内的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除的 Monod 机制模型可以表示为:

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} - \frac{26.22 \times C_{\text{in}}}{6.199 + C_{\text{in}}} \left( \frac{\text{DO}}{0.2 + \text{DO}} \right) \theta^{(T-20)} \quad (22)$$

图6为采用 Monod 机制模型对反应器出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的预测曲线. 从图中可以看出,预测曲线可以与实际结果较好地吻合. 同时对预测结果和实际测定结果进行回归分析(图7),预测结果与实际测定结果之间呈现出较高的线性关系 ( $R^2 = 0.9035$ ) 及较小的标准偏差 ( $\delta = 1.232$ ). 但从图7可以看出,数值点多位于  $y=x$  直线下方,说明预测结果较实际测定结果普遍较低,这可能与  $\theta$ 、 $Y$ 、 $k_0$  取文献值有关.  $C_{\text{out}}$  与  $\theta$ 、 $k_0$  呈正线性关系,与  $Y$  呈负线性关系.  $\theta$  和  $k_0$  分别反映了反应器内微生物活性与

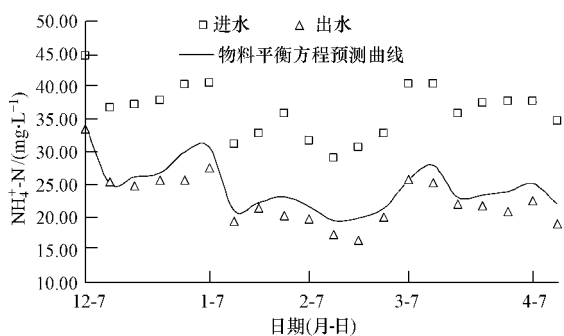


图6 出水预测值与实测值的对比 (Monod 机制模型)

Fig. 6 Comparison of the simulated  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  with observed  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 

$T$  和  $\text{DO}$  的依赖关系,因此可以推断,本研究中潮汐流人工湿地微生物对  $T$  和  $\text{DO}$  具有比文献 (Halling *et al.*, 1996; Kadlec, 1995; Metcalf and Eddy Inc., 2003) 更低的依赖性.

各影响因素对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除的影响见式 (22), 本研究范围内,  $C_{\text{out}}$  与  $C_{\text{in}}$  呈正线性关系,与  $T$  和  $\text{DO}$  呈负线性关系,为进一步量化各影响因素对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除的影响,对物料衡算模型中各影响因子进行局部灵敏度分析.

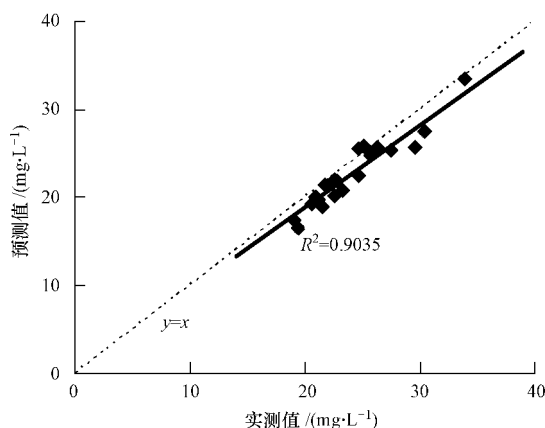


图7 Monod 机制模型预测准确度

Fig. 7 Fits of predictions from the Monod-mechanism model

### 3.3 局部灵敏度分析结果

灵敏度分析具有很重要的生态学意义,通过灵敏度分析,可知模型对哪些参数的变化敏感,从而可以确定各影响因子对模型所模拟的生态过程的影响程度 (徐崇刚等, 2004). 采用修正的摩尔斯分类筛选法对 Monod 机制模型中出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的局部灵敏度分析结果进行定量表述,以 5% 为固定步长对某一参数值进行扰动,分别取其值的 -20%、-15%、-10%、-5%、5%、10%、15% 和 20%,而其他参数值固定不变. 由图 8a 可知,影响出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度最灵敏参数为进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度,其  $|S| = 1.419$ ; 而  $T$  及  $\text{DO}$  的  $|S|$  值分别为 0.234 及 0.147. 由表 3 可知,进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的灵敏度等级为 IV 级,为高灵敏参数; 平均水温  $T$  的灵敏度等级为 III 级,为灵敏参数;  $\text{DO}$  的灵敏度等级为 II 级,为中等灵敏参数,这与 Chan (2008) 的研究结果一致. 值得注意的是  $T$  的  $S$  值为 -0.234,表明  $T$  对出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的影响具有很高的复杂性. 这可能是因为一方面温度越高,微生物硝化反应强度也就越大; 另一方面,温度的升高会导致水中  $\text{O}_2$  浓度的降低,因此,硝化作用仅能在  $T$  升高与  $\text{DO}$  降低之间取

得一个平衡关系,以获得最佳的效果(尹连庆等, 2008)。

图8b为所有扰动下计算出的灵敏度偏差,其中,DO的灵敏度偏差较大。

表2 参数灵敏度分级(徐崇刚等, 2004)

Table 2 Sensitivity classification of parameters

等级	灵敏度范围	灵敏度
I	$0 \leq  S_i  < 0.05$	不灵敏
II	$0.05 \leq  S_i  < 0.2$	中等灵敏
III	$0.2 \leq  S_i  < 1$	灵敏
IV	$ S_i  \geq 1$	高灵敏

注:  $S_i$ 为模型输出的第*i*个变量的摩尔系数。

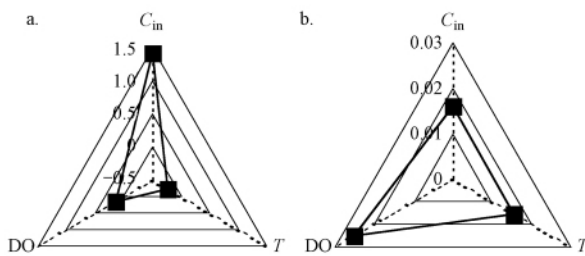


图8 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度对参数的灵敏度分析结果(a. 敏感度指数; b. 标准偏差)

Fig 8 Sensitivity analysis results of the parameters with respect to  $C_{\text{out}}$  (a. Sensitivity index; b. Standard deviation)

#### 4 讨论(Discussion)

表观动力学模型和多元参数回归模型是根据大量运行数据建立的一种“输入-输出”统计学响应关系,它将湿地系统视为黑箱,通过对进、出水浓度或负荷的统计,依据人为定义的线性或幂次方程对数据进行拟合,获得进、出水指标间的关系(郝芳华等, 2004)均属于经验模型。动力学模型仅考虑进出水之间的定量关系,假设各个条件下反应器对污染物的去除速率为定值,而没有考虑反应器操作条件和环境因子对污染物去除的影响,因此其仅适用于反应器运行条件变化不大且环境条件相对稳定的情况。多元回归模型是对系统去除效果和可能影响因素之间的经验性的直观表述,其对于去除效果影响因素的确定是极为有力的工具,但其却不能对湿地系统中多种复杂的污染物去除过程进行定量描述,因此很多情况下不能真正反映反应器内的污染物去除过程以及各影响因素对去除效果的影响。而 Monod 机制模型则是从系统内部微生物的生长代谢过程以及微生物对污染物的去除机制考虑,

属于机制模型范畴,因此其能更好地描述污染物在反应器内的去除行为,本研究中 Monod 机制模型的拟合度为  $R^2 = 0.9035$ , 优于多元回归模型 ( $R^2 = 0.886$ )、零级动力学模型 ( $R^2 = 0.804$ ) 及一级动力学模型 ( $R^2 = 0.7371$ ); 均方差  $\delta = 1.232$ , 小于多元回归模型 ( $\delta = 1.369$ )、零级动力学模型 ( $\delta = 1.780$ ) 及一级动力学模型 ( $\delta = 2.074$ )。可见 Monod 机制模型能更有效地对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除进行拟合。

#### 5 结论(Conclusions)

1) 利用表观动力学模型、多元参数回归模型及 Monod 机制模型对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除进行拟合,结果证明, Monod 机制模型能更有效地对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除进行拟合 ( $R^2 = 0.9035$ )。

2) 利用修正的摩尔系数分类筛选法对 Monod 机制模型进行局部灵敏度分析,结果证明,在 Monod 机制模型中进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除影响最大,其次为平均水温  $T$ ,再次为 DO,因此,进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为高灵敏参数,  $T$  为灵敏参数, DO 为中等灵敏参数。

责任作者简介:宋永会(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事水污染控制技术研究。E-mail: songyh@cares.org.cn.

#### 参考文献(References):

- Austin D. 2006. Influence of cation exchange capacity (CEC) in a tidal flow, flood and drain wastewater treatment wetland [J]. *Ecol Eng*, 28(1): 35-43
- Behrends L, Houke L, Balley E *et al.* 2001. Reciprocating constructed wetlands for treating industrial, municipal and agricultural wastewater [J]. *Water Sci Technol*, 44(11/12): 399-405
- Chan S Y, Tsang Y F, Cui L H, *et al.* 2008. Domestic wastewater treatment using batch-fed constructed wetland and predictive model development for  $\text{NH}_3\text{-N}$  removal [J]. *Process Biochem*, 43(3): 297-305
- Chung A K C, Wu Y, Tam N F Y, *et al.* 2008. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater [J]. *Ecol Eng*, 32(1/3): 81-89
- 丁晔, 韩志英, 吴坚阳, 等. 2006. 不同基质垂直流人工湿地对猪场污水季节性处理效果的研究 [J]. *环境科学学报*, 26(7): 1093-1100
- Ding Y, Han Z Y, Wu J Y, *et al.* 2006. Seasonal performances of three vertical-flow constructed wetlands filled with different packing materials for piggery wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(7): 1093-1100 (in Chinese)
- Francois A. 2003. Sensitivity analysis of distributed environmental

- simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale [J]. *Reliab Eng Syst Safe*, 79(2): 205-218
- Gross A, Shmueli O, Ronen Z, *et al.* 2007. Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW)—a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households [J]. *Chemosphere*, 66(5): 916-923
- Halling S B, Nielsen S N. 1996. A model of nitrogen removal from wastewater in a fixed bed reactor using simultaneous nitrification and denitrification(SND) [J]. *Ecol Model*, 87(1): 131-141
- 郝芳华, 任希岩, 张雪松, 等. 2004. 洛河流域非点源污染负荷不确定性的影响因素 [J]. *中国环境科学*, 24(3): 270-274
- Hao F H, Ren X Y, Zhang X S, *et al.* 2004. Uncertain affecting factor of the non-point source pollution load [J]. *China Environmental Science*, 24(3): 270-274 (in Chinese)
- Kadlec R H. 1995. Overview: Surface flow constructed wetlands [J]. *Water Sci Technol*, 32(3): 1-12
- Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J. 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Process, Performance, Design and Operation* [M]. London, UK: IWA Publisher. 156
- Lai D Y F, Lam K C. 2009. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff [J]. *Ecol Eng*, (35): 735-743
- Metcalf and Eddy Inc. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse* (4th edition) [M]. New York: McGraw-Hill Inc. 1334
- 国家环保总局《水与废水监测分析方法》编辑委员会. 2002. 水与废水监测分析方法(第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 105-218
- SEPA, Editorial Committee of Monitoring and Analytical Methods of Water and Wastewater. 2002. *Monitoring and Analytical Methods of Water and Wastewater* (4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 105-218 (in Chinese)
- Sun G, Gray K R, Biddlestone A J. 1998. Treatment of Agricultural wastewater in downflow reed beds: experimental trials and mathematical model [J]. *J Agr Eng Res*, 69(1): 63-71
- Tee H C, Seng C E, Noor A M, *et al.* 2009. Performance comparison of constructed wetlands with gravel- and rice husk-based media for phenol and nitrogen removal [J]. *Sci Total Environ*, 407(11): 3563-3571
- 吴树彪, 张东晓, 柳清青, 等. 2010. 潮汐流人工湿地床处理生活污水的优化研究 [J]. *中国农业大学学报*, 15(2): 106-113
- Wu S B, Zhang D X, Liu Q Q, *et al.* 2010. Performance optimization of a lab-scale tidal flow constructed wetland for domestic wastewater treatment [J]. *Journal of China Agricultural University*, 15(2): 106-113 (in Chinese)
- 吴晓磊. 1995. 人工湿地废水处理机理 [J]. *环境科学*, 16(3): 83-86
- Wu X L. 1995. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 16(3): 83-86 (in Chinese)
- 肖海文, 邓荣森, 翟俊, 等. 2006. 溶解氧对人工湿地处理受污染城市河流水体效果的影响 [J]. *环境科学*, 27(12): 2426-2431
- Xiao H W, Deng R S, Zhai J, *et al.* 2006. Effect of DO Distribution on contaminated urban stream water treatment performance in constructed wetland [J]. *Environmental Science*, 27(12): 2426-2431 (in Chinese)
- 谢龙, 汪德權, 戴昱, 等. 2009. 水平潜流人工湿地有机物去除模型研究 [J]. *中国环境科学*, 29(5): 502-505
- Xie L, Wang D G, Dai Y, *et al.* 2009. Modelling organic matter removal in horizontal subsurface constructed wetland [J]. *China Environmental Science*, 29(5): 502-505 (in Chinese)
- 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 2004. 生态模型的灵敏度分析 [J]. *应用生态学报*, 15(6): 1056-1062
- Xu C G, Hu Y M, Chang Y, *et al.* 2004. Sensitivity analysis in ecological modeling [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(6): 1056-1062 (in Chinese)
- 尹连庆, 谷瑞华. 2008. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究 [J]. *环境工程*, 26(S1): 151-155
- Yin L Q, Gu R H. 2008. Ammonia nitrogen removal mechanism and affecting factors of constructed wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 26(S1): 151-155 (in Chinese)
- Zador J, Zsely I G, Turanyi T. 2006. Local and global uncertainty analysis of complex chemical kinetic systems [J]. *Reliab Eng Syst Safe*, 91(10/11): 1232-1240