

垂直流人工湿地脱氮过程的生态动力学模拟与分析

李亚静¹, 朱文玲², 黄柱坚¹, 栗志芬¹, 崔理华^{1*}

(1.华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系, 广州 510642; 2.广州市水务局, 广州 510640)

摘要:根据实验性模拟垂直流人工湿地进、出水数据和系统动力学研究方法,运用 STELLA 系统动力学软件对模拟垂直流人工湿地脱氮过程进行建模分析。STELLA 分析结果表明:构建的 STELLA 动力学模型能较准确地模拟垂直流人工湿地对废水中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN 的去除率,但对废水中有机氮去除率的模拟性较差;在运行正常的情况下,该模型可以对垂直流人工湿地系统氮的去除过程进行描述,并可为其处理出水浓度变化的预测提供理论依据。

关键词:垂直流人工湿地;脱氮;生态动力学模型;预测

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0776-05 doi:10.11654/jaes.2015.04.024

Modeling Analysis of Denitrification Dynamics in a Vertical Flow Constructed Wetland

LI Ya-jing¹, ZHU Wen-ling², HUANG Zhu-jian¹, LI Zhi-fen¹, CUI Li-hua^{1*}

(1.Department of Environmental Science and Engineering, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Guangzhou Water Authority, Guangzhou 510640, China)

Abstract:Based on our experimental effluent data and the VFCW system dynamics, a STELLA model was developed to analyze the nitrification and denitrification processes. Results showed that the STELLA model had a poor prediction on the removal of organic nitrogen, but a better simulation on NO_3^- -N, NH_4^+ -N and TN removals. This study suggests that the STELLA model developed can be used to predict the nitrogen removal in a VFCW system under normal operational conditions, and therefore provides a theoretical basis to predict the effluent quality in the VFCW system.

Keywords:vertical flow constructed wetland; nitrogen removal; ecological kinetic model; prediction

根据湿地中水流方向的不同,人工湿地通常分为表面流人工湿地系统、垂直流人工湿地和水平流人工湿地系统^[1]。垂直下行流人工湿地由于渗滤速率较快,占地面积较小和优良的氧转移特性,在脱氮除磷方面均有明显优势^[2-3]。人工湿地脱氮过程主要包括:氨挥发、植物吸收、基质吸附沉淀、微生物分解等作用^[4],而微生物硝化-反硝化作用被认为是最主要的去除氮素的途径^[5-6]。

从 19 世纪 70 年代中期开始了湿地模拟研究,随后人工湿地模型报道也逐渐增多。目前常用的 4 种

模型:衰减方程模型、一级动力学模型、Monod 模型和生态动力学模型^[7-10]。还有一些针对人工湿地影响因素建立的模型,可以对湿地的运行与调控进行优化设计^[11-13]。这些模型的原理各不相同,复杂程度和数据需求量也有较大差别。由于其所涉及机理的复杂性和领域的广泛性,虽然有些机理研究已经得到初步的认可,但是仍有许多问题需要进一步研究^[14]。系统动力学建模工具 STELLA 软件因操作简便,建模基于图标对象,有功能强大的输入输出、导航演示、错误检查、调试验证等功能,逐渐成为系统动力学建模的理想工具^[15-16]。有研究表明 STELLA 模型可用于垂直流人工湿地可溶性活性磷的流出浓度和上流式人工湿地出水浓度的模拟^[17-18]。

本文运用 STELLA 软件对模拟垂直流人工湿地脱氮过程进行建模与检验,模型中的一些参数通过查阅相关文献得到,所建立的生态动力学模型可以为垂

收稿日期:2014-12-29

基金项目:国家自然科学基金(40871110,41071214,41271245);广东省教育厅广东高校污水生态处理与修复工程技术研究中心(2012gczx A1004);广东省科技厅农业科技创新团队项目(2012A020100003)

作者简介:李亚静(1990—),女,硕士研究生,主要从事人工湿地污水处理系统研究。E-mail:zhi.chengyi@163.com

*通信作者:崔理华 E-mail:lihui@scau.edu.cn

直流人工湿地的设计与出水预测提供借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 模拟垂直流人工湿地的构建

模拟垂直流人工湿地系统建立在华南农业大学五号楼网室,处理系统由塑料圆桶改造而成,桶容积 120 L,桶内填料上底直径 47 cm,下底直径 38 cm,高 65 cm。桶底部有直径 1 cm、长 10 cm 塑料管出水口,该出水口接 1 m 橡胶软管,由橡胶软管控制水位高度,并在软管末端用止水阀控制出水流量。塑料桶底部铺一层砾石防止出水口堵塞,上铺一层豆石,其上填入 55 cm 的沸石和高炉渣填料。在填料表层种植美人蕉,从而构成垂直流人工湿地模拟系统。灌水时污水由高位水箱进入污水桶,通过控制污水桶底部出水口连接的橡胶软管上的止水阀控制水流流量,使污水均匀连续灌入人工湿地模拟试验系统。系统构造如图 1 所示。

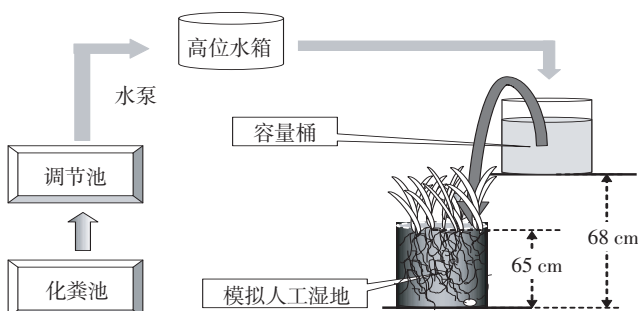


图 1 模拟试验示意图

Figure 1 Sketch map of simulated experiment

1.2 供试污水水质

华南农业大学五号楼化粪池污水。在 2009 年 2 月至 4 月水质监测期间,对化粪池出水的污染物指标进行监测,结果如表 1 所示。

1.3 系统运行方式

系统采用连续灌水模式,水力负荷为 $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,水力停留时间(HRT)为 12 h。每天取一次水样,测

表 1 化粪池供试污水水质

Table 1 Quality of feeding water to a septic tank

水质指标	范围/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准误差/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
NH_4^+-N	115.13~345.61	115.13 $\pm$ 3.88
TN	73.84~578.45	161.47 $\pm$ 6.88
NO_3^--N	0.18~5.13	0.59 $\pm$ 0.07
NO_2^--N	0.005 8~0.39	0.09 $\pm$ 0.01
有机氮	47.92~232.57	47.92 $\pm$ 3.35
COD	15.10~2 411.11	433.721 $\pm$ 37.48

其 TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、有机氮、 NO_2^--N 、COD。

1.4 水质分析

采用国家环境保护总局(2002)推荐的方法测定分析 TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、有机氮、 NO_2^--N 、COD 等。

2 垂直流人工湿地脱氮过程 STELLA 动力学模型的建立

2.1 模拟垂直流人工湿地氮循环模型结构分析

人工湿地中氮的主要存在形式为 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、有机氮和 NO_2^--N ,而 NO_2^--N 不稳定,极易转化成其他形式,且含量很微小,将其忽略^[9]。系统内 pH 值仅为 7.5 以下,而一般在 pH>8.5 时氨挥发发现象才值得考虑,故在本模型中不考虑氨挥发作用^[20]。因此系统脱氮的生态动力学模型主要是上述前三种形态氮之间的传递和转化,以及它们与外界环境之间的传输。垂直流人工湿地氮循环模型简易结构如图 2。

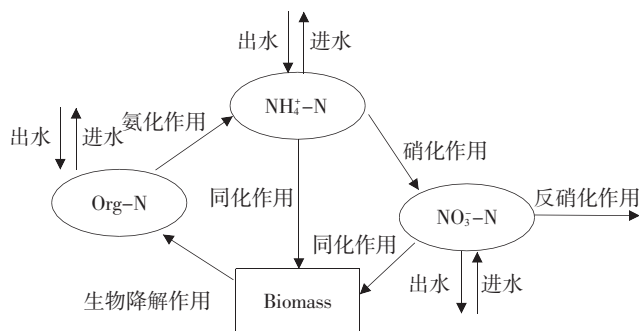


图 2 垂直流人工湿地处理系统中氮素去除模型示意图

Figure 2 Model structure for N removals in a vertical flow constructed wetland

2.2 STELLA 动力学的建立

基于图 2 的模型示意图,运用 STELLA9.0.1 软件建立动力学模型如图 3 所示。

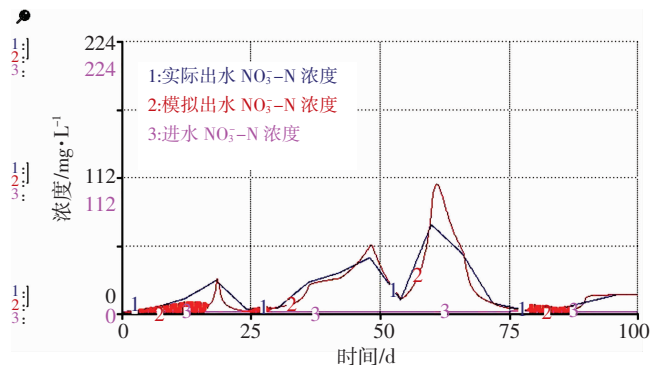
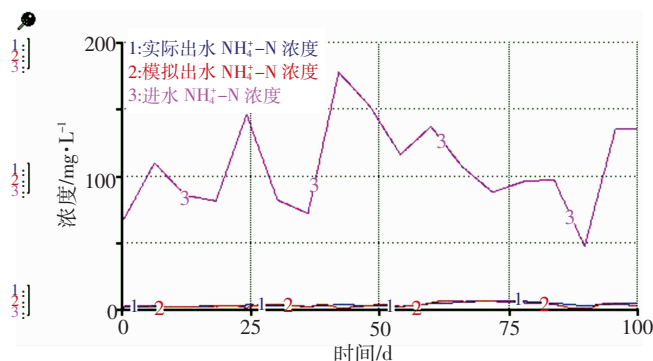
各运行参数输入系统,将其与有关的脱氮过程关联起来^[21],构成了 STELLA 动力学模型结构图。模型的主要运行参数如表 2 所示,参数利用 SAS8.0 软件的 Lenenberg-Marquardt 非线性最优化法进行拟合求解。

3 STELLA 模拟结果与分析

将 STELLA 模型数据对垂直流人工湿地运行时脱氮的行为进行模拟,并将模型模拟的数据与 2—4 月份(共 100 d)的数据进行对比。

3.1 STELLA 对出水 NO_3^--N 浓度的预测

由图 4 可知机理模型对 NO_3^--N 出水的模拟效果

图 4 $\text{NO}_3\text{-N}$ 实测值和模拟值对比Figure 4 Comparison of measured and simulated values of $\text{NO}_3\text{-N}$ 图 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 实测值和模拟值对比Figure 5 Comparison of measured and simulated values of $\text{NH}_4^+\text{-N}$

在 100 d 的模拟中模拟误差在 10% 以内的监测点占 25%, 误差在 10%~20% 之间的占 24%, 误差在 20%~30% 之间的监测点占 38%, 误差在 30% 以上的有 13%, 实测值和模拟值的相关性分析显著, 其 P 值为 0.001 (2-tailed)。综上所述, 所建立的 STELLA 模型对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除有较好的模拟, 但波峰有所偏移。

3.3 STELLA 对出水 TN 浓度的预测

由图 6 可知机理模型对出水 TN 浓度的模拟效果较好。出水 TN 实测平均值为 $25.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 模型模拟平均值为 $24.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水 TN 最大值为 80.53

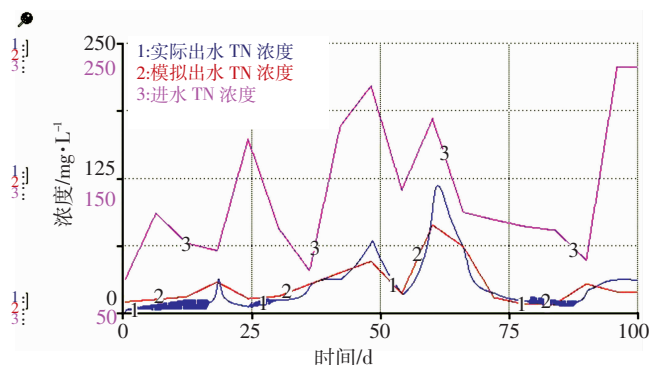


图 6 TN 实测值和模拟值对比

Figure 6 Comparison of measured and simulated values of TN

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在第 62 d, 而模拟最大值为 $117.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在第 63 d; 出水 TN 最小值为 $6.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在第 1 d, 模拟最小值为 $2.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在第 2 d。在 100 d 的模拟中模拟误差在 10% 以内的监测点占 18%, 误差在 10%~20% 之间的占 20%, 误差在 20%~30% 之间的监测点占 28%, 误差在 30% 以上的有 34%, 实测值和模拟值的相关性分析显著, 其 P 值为 0.000 (2-tailed)。所建立的 STELLA 模型对 TN 去除有较好的模拟, 但波峰大小差异较大。

3.4 STELLA 对出水有机氮浓度的预测

由图 7 可知机理模型对出水有机氮含量的模拟效果较差。出水有机氮实测平均值为 $4.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 模型模拟平均值为 $4.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水有机氮最大值为 $12.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在第 100 d, 而模拟最大值为 $16.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在第 92 d; 出水有机氮和模拟最小值均为 0, 前者出现在第 1 d, 后者出现在第 38 d。在 100 d 的模拟中模拟误差在 10% 以内的监测点占 10%, 误差在 10%~20% 之间的占 6%, 误差在 20%~30% 之间的监测点占 9%, 误差在 30% 以上的有 75%, 实测值和模拟值的相关性分析显著, 其 P 值为 0.021 (2-tailed)。综上所述, 所建立的 STELLA 模型对有机氮去除模拟效果较差, 可能是因为实际运行中, 微生物死亡或植物死亡会产生有机氮, 这些有机氮回到系统中加入氮循环, 以及有机氮的矿化作用使其转化为植物可吸收的有效氮形式^[22-23], 本模型未将死亡速率纳入算式中, 故导致有机氮去除的模拟结果较差, 有待进一步对模型进行完善。

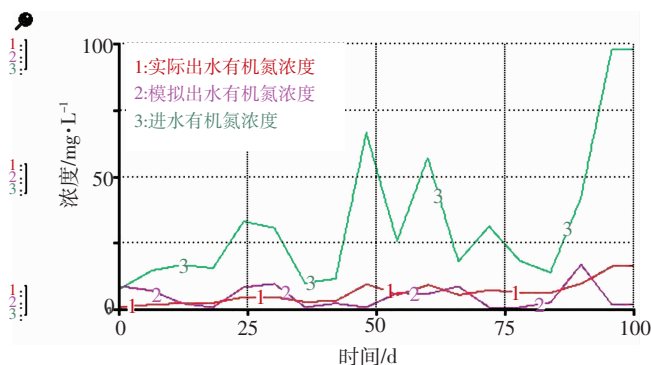


图 7 有机氮实测值和模拟值对比

Figure 7 Comparison of measured and simulated values of organic N

4 结论

STELLA 9.0.1 系统动力学软件构建的垂直流人工湿地生态动力学模型对系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和有机氮的理想模拟 (模拟误差低于 20%) 分

别为49%、38%、53%和16%,无效模拟(模拟误差高于30%)分别为13%、34%、17%和75%,表明该模型可用于垂直流人工湿地出水 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN浓度的预测。

参考文献:

- [1] Kadlec R H. The inadequacy of first-order treatment wetland models[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1-2): 105-109.
- [2] 徐文杰, 姜磊, 王其东, 等. 垂直流与水平流人工湿地污水净化效果的对比研究[J]. 环境保护与循环经济, 2013(4): 35-37.
XU Wen-jie, JIANG Lei, WANG Qi-dong, et al. A comparative study of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands wastewater treatment[J]. *Environmental Protection & Re-cycling Economy*, 2013(4): 35-37.
- [3] 崔理华, 郑离妮, 楼倩, 等. 不同回流比对无植物垂直流人工湿地除氮效果的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1170-1174.
CUI Li-hua, ZHENG Li-ni, LOU Qian, et al. Effect of different recirculation ratios on removal efficiency of nitrogen in unplanted vertical flow constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7): 1170-1174.
- [4] 李伟航. 人工湿地脱氮机理及其主要影响因素研究[J]. 轻工科技, 2013(6): 106-108.
LI Wei-hang. The nitrogen removal mechanism and main influence factor of constructed wetland[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2013(6): 106-108.
- [5] 张政, 付融冰, 顾国维, 等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1385-1390.
ZHANG Zheng, FU Rong-bing, GU Guo-wei, et al. Analysis of nitrogen removal pathways and their effect factors in constructed wetland[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2006, 15(6): 1385-1390.
- [6] 尹连庆, 谷瑞华. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J]. 环境工程, 2008, 26(增刊): 151-155.
YIN Lian-qing, GU Rui-hua. Ammonia nitrogen removal mechanism and affecting factors of constructed wetland[J]. *Environmental Engineering*, 2008, 26(Suppl): 151-155.
- [7] Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J, et al. Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation[M]. London, UK: IWA Publishing, 2000: 55-78.
- [8] Peterz M M, Hernandez J M, Bossens J, et al. Vertical flow constructed wetlands: Kinetics of nutrient and organic matter removal[J]. *Water Science and Technology*, 2014, 70(1): 76-81.
- [9] Bunwong K, Sae-Jie W, Lenbury Y. Modelling nitrogen dynamics of a constructed wetland: Nutrient removal process with variable yield[J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2009, 71(12): e1538-e1546.
- [10] Mayo A W, Bigambo T. Nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands I: Model development[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(11-16): 658-667.
- [11] 李慧峰, 黄津辉, 林超. Subwet模型在人工湿地设计中的应用[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2628-2636.
LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao. Application of Subwet Model in the design of constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2628-2636.
- [12] Morvannou A, Choubert J, Vanclooster M, et al. Modeling nitrogen removal in a vertical flow constructed wetland treating directly domestic wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 379-386.
- [13] 白少元, 宋志鑫, 丁彦礼, 等. 潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 592-596.
BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, et al. Correlation of substrate structure and hydraulic characteristics in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 592-596.
- [14] 刘晓娜, 丁爱中, 陈莉蓉, 等. 潜流人工湿地除氮的生态动力学模拟[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 166-170.
LIU Xiao-na, DING Ai-zhong, CHEN Li-rong, et al. Simulation of nitrogen removal in subsurface flow constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 166-170.
- [15] Robert C, Alexey V. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 143(1-2): 1-7.
- [16] 张修峰, 陆健健. 温州三垟湿地底泥疏浚对水体总磷浓度影响的生态模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 158-162.
ZHANG Xiu-feng, LU Jian-jian. A ecological model of influences on concentrations of total phosphorus in water after dredging of bottom mud in Sanyang wetland of Wenzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 158-162.
- [17] Kumar J L G, Wang Z Y, Zhao Y Q. STELLA software as a tool for modelling phosphorus removal in a constructed wetland employing de-watered alum sludge as main substrate[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2011, 46(7): 751-757.
- [18] Xuan Z M, Chang N B, Daranpob A, et al. Modeling subsurface upflow wetlands systems for wastewater effluent treatment[J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, 27(10): 879-888.
- [19] 连小莹, 金秋, 李先宁, 等. 氮形态对人工湿地氮去除效果的影响[J]. 环境科技, 2011, 24(1): 26-28.
LIAN Xiao-ying, JIN Qiu, LI Xian-ning, et al. Effect of nitrogen forms denitrifying efficiency in constructed wetland[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 24(1): 26-28.
- [20] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2677.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2670-2677.
- [21] Ouyang Y, Luo S M, Cui L H. Estimation of nitrogen dynamics in a vertical-flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(3): 453-459.
- [22] 王洋, 刘景双, 孙志高, 等. 湿地系统氮的生物地球化学研究概述[J]. 湿地科学, 2006, 4(4): 311-320.
WANG Yang, LIU Jing-shuang, SUN Zhi-gao, et al. A review on nitrogen biogeochemistry study in wetland systems[J]. *Wetland Science*, 2006, 4(4): 311-320.
- [23] 周旺明, 秦胜金, 刘景双, 等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 806-811.
ZHOU Wang-ming, QIN Sheng-jin, LIU Jing-shuang, et al. Effects of temperature and freeze-thaw on soil nitrogen mineralization in typical calamagrostis angustifolia wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 806-811.