

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2025030402

CSTR:32061.14.hjhx.2025030402

韩晓丽, 李黛青, 张镇松. BAF-强化人工湿地污水处理工艺的 Simulink 仿真模型构建[J]. 环境化学, 2025, 44(6): 2109-2117.

HAN Xiaoli, LI Daiqing, ZHANG Zhensong. Construction of Simulink Simulation Model for BAF-Enhanced constructed wetland wastewater treatment process[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (6): 2109-2117.

BAF-强化人工湿地污水处理工艺的 Simulink 仿真模型构建

韩晓丽¹ 李黛青^{2*} 张镇松²

(1. 中国航天建设集团有限公司, 北京, 100071; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

摘 要 本文以 Monod 模型为基础, 建立 BAF-强化人工湿地对有机污染物、氮去除的 simulink 仿真模型, 将模型预测结果和一级反应动力学模型预测结果进行比对, 并通过搭建 BAF-强化人工湿地实验装置所取得的实测数据进行验证. 研究结果显示: 本模型对出水 COD、氨氮和总氮的模拟平均值误差分别为 12.03%、6.47% 和 1.91%, 一级动力学模型模拟平均值误差分别为 13.80%、14.80% 和 0.29%. 相较于一级动力学模型, 本模型在对出水有机污染物以及氨氮的模拟表现更为出色. 在对出水总氮的模拟上, 本模型与一级动力学模型都能取得较为理想的效果. 本模型能较好预测有机污染物、氨氮、总氮的降解效果, 可为 BAF-强化人工湿地设计和运行效率提供模拟数据, 同时为该系统有机污染物、氮的降解途径研究提供依据.

关键词 BAF-强化人工湿地, 污水处理系统, 动力学, 仿真模型.

中图分类号 X522; O6 文献标识码 A

Construction of Simulink Simulation Model for BAF-Enhanced constructed wetland wastewater treatment process

HAN Xiaoli¹ LI Daiqing^{2*} ZHANG Zhensong²

(1. China Aerospace Construction Group Co., Ltd., Beijing, 100071, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

Abstract In order to simulate the removal of organic pollutants and nitrogen species in Biological Aerated Filter (BAF) – Constructed Wetland (CW) system, a numerical model based on Monod equation was developed and implemented in Simulink. The model was calibrated and verified using measurements obtained from a lab-scale BAF-CW system. Results show that the model can successfully simulate the performance of BAF-CW system. The average errors of the effluent COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen of the proposed model are 12.03%, 6.47%, and 1.91%, respectively, while the errors of a different first-order model are 13.80%, 14.80%, and 0.29%, respectively. Compared with the first-order kinetic model, the proposed model performs better in simulating the degradation of COD and NH₃-N in the effluent. In terms of total nitrogen simulation, both the proposed model and the first-order kinetic model can achieve good results. Collectively, the results of this study indicated that the proposed model can effectively predict the degradation of organic pollutants, ammonia nitrogen, and total nitrogen, and can offer a basis for studying the degradation efficiencies, kinetics and pathways of organic pollutants and nitrogen species in BAF-CW system.

2025 年 3 月 4 日收稿(Received: March 4, 2025).

* 通信联系人 Corresponding author, E-mail: ldq@rcees.ac.cn

Keywords BAF-enhanced constructed wetlands, sewage treatment system, kinetics, simulation model.

人工湿地污水处理系统作为 20 世纪 70 年代兴起的一项污水处理工艺^[1], 与传统的污水二级生化处理工艺相比, 具有净化效果好、去除 N、P 能力强、工艺设备简单、运行维护管理方便、系统配置可塑性强、出水具有一定生物安全性、生态环境效益显著等特点^[2-3]。但是, 人工湿地处理技术也有一些缺陷, 主要体现在占地面积大、受季节变化影响大、易堵塞等^[4]。复合型人工湿地将人工湿地与其他污水处理工艺组合, 能更好地发挥各自的优势, 可极大提高了污水处理效率, 尤其提高氮、磷等的去除效果^[5]。其中, BAF-强化人工湿地将曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)的硝化作用与人工湿地的反硝化作用相结合, 是目前常用高效的复合型人工湿地污水处理技术^[6]。

在当前的污水处理领域中, 多用基于一级反应动力学模型及 Monod 方程建立数学模型, 其中活性污泥法、生物膜法或厌氧消化法等无数处理工艺现已构建了成熟且可靠的机理性数学模型^[7-12]。但人工湿地系统影响因素多, 运行复杂, 湿地运行数据收集需要较长时间, 因此, 目前对人工湿地降解污染物的反应动力学研究较少^[13-14], BAF-强化人工湿地的动力学模型更未见报导。因此, 建立 BAF-强化人工湿地仿真模型, 对污水处理工艺研发、设计优化、效率提高非常必要。

MATLAB(Matrix Laboratory)是由 MathWorks 公司研发的一款具备高性能数值计算与可视化功能的软件, 其应用领域涵盖了数据分析、图像处理、信号处理、量化金融与风险管理、控制系统等诸多领域^[15-17]。Simulink 作为 MATLAB 的一个关键模块, 主要用于多域仿真以及基于模型的设计, 可为用户提供图形化的用户界面, 用户能够通过选择和实验条件一致的模块, 搭建起复杂的动态系统模型, 因而在各个领域都得到了极为广泛的应用^[18-20]。

本文以 Monod 方程为基础, 建立 BAF-强化人工湿地 simulink 仿真模型, 模拟微生物在污水处理过程中的行为及有机污染物和氮的去除效果, 为 BAF-强化人工湿地污水处理系统的优化设计、运行和评估提供参考。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验装置

BAF 实验装置由有机玻璃制成, 装置柱高 2.5 m, 外径 100 mm, 内径 75 mm, 滤料层厚 1.5 m, 采用曝气头曝气, 滤速由转子流量计控制。潜流湿地实验装置床长 1.3 m, 宽 1 m, 深 1 m, 床体前面为进水池, 后面为出水池, 并设出水管。潜流湿地 2 个湿地床可单独运行, 也可串联作为复合湿地系统运行。本实验采用 BAF 串联人工湿地工艺方式, 将 BAF 装置置于人工湿地之前, 实验进水为化粪池预处理过的生活污水, 在系统稳定运行后, 采样测定装置的进出水水质, 分析本实验工艺对各种污染物的去除效果。

1.2 污水处理数学模型

在当前的污水处理领域中, 由国际水协会(IWA)所研发的基于机理的数学模型应用最为广泛。主要包括一级反应动力学模型以及用于描述微生物生长速率与底物浓度关系的 Monod 方程。

(1) 一级反应动力学模型

一级动力学方程广泛用于描述一些污染物例如有机污染物、重金属污染物、卤代化合物等的降解过程。一级动力学模型通常表达为式(1)或式(2)^[21]:

$$C_e = C_0 \exp(-k_v \cdot t) \quad (1)$$

$$C_e = C_0 \exp(-k_A/q) \quad (2)$$

式中, C_e —出水中污染物浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; C_0 —进水中污染物浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; k_v —体积去除速率常数, h^{-1} ; k_A —面积去除速率常数, $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$; t —水力停留时间, h ; q —水力负荷, $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

该模型假设污染物的降解速率与污染物浓度成正比, 模型简单, 计算方便, 适用于污染物浓度较低

且反应速率与污染物浓度线性相关的场景.

(2) Monod 动力学模型

1942 年, Monod 观察到处于均衡生长状态下的微生物, 其生长曲线与活性酶催化的一系列反应曲线呈现出相似性. 1949 年, Monod 公布了一项基于静态反应器的研究成果^[22], 揭示了基质浓度与微生物比增殖速率之间的关系与 Michaelis - Menten 提出的关于酶促反应的动力学模型相契合, 因此, 能够借助经典的 Michaelis - Menten 方程(式(3))予以描述.

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_S + S}$$

(3)

其中, $\mu_{\max}$ 表示微生物最大比增殖速度, h^{-1} , 只与细胞本身及其生长基质的成分有关, 而与生长基质的浓度无关; K_S 为饱和常数, 是当 $\mu = \frac{1}{2}\mu_{\max}$ 时, 对应的营养物浓度值, 也叫半速度常数, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; S 为有机物浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; X 指微生物的浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

该模型能够更全面地描述微生物生长和基质降解过程, 特别是在污染物浓度变化较大的情况下, 能够更准确地模拟微生物的生长和污染物降解过程.

1.3 BAF-强化人工湿地工艺 simulink 仿真模型构建

动力学过程的建模以质量或能量守恒方程为依据, 也就是说输入至反应器的物质, 要么留存于反应器内部, 要么从某处流出.

该模型构建基于如下假定条件:

- ①反应器所处的 pH 值以及温度均处于正常范围;
- ②反应器内微生物的浓度维持在正常水平;
- ③反应器内污染物浓度能够变化, 不过其成分及组成保持恒定;
- ④微生物所需营养充足;
- ⑤反应器内不存在生化反应.

1.3.1 生物法去除过程建模

在利用生物法去除废水中有机污染物和氨的模型里, 除了水, 还包含六个关键组分, 分别是有机污染物(以化学需氧量 COD 表示)、溶解氧(DO)、异养菌(Heterotroph)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮(NO-N)和自养菌(Prototroph). 这些组分在生物处理废水的过程中发挥着不同作用, 共同影响着处理效果.

依据国际水质协会(IAWQ)惯例, 通常使用表格表述生物法的化学计量学和动力学方程, 具体详见下表 1^[23] 和表 2^[24].

表 1 去除过程的化学计量学^[23]

Table 1 Chemometrics of removal process

去除过程的化学计量 Chemical stoichiometry of removal process	组分 Component					
	有机污染物 COD	溶解氧 DO	氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$	硝态氮 NO-N	异养菌 Heterotroph	自养菌 Prototroph
异养菌的好氧生长	$-\frac{1}{Y_H}$	$\frac{Y_H-1}{Y_H}$	$-i_{XB}$		1	
异养菌的缺氧生长	$-\frac{1}{Y_H}$		$-i_{XB}$	$\frac{Y_H-1}{2.86Y_H}$	1	
自养菌的好氧生长		$\frac{Y_A-4.57}{Y_A}$	$-i_{XB}-\frac{1}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$		1
异养菌的衰亡	$1-f_p$		$i_{XB}-f_p i_{XP}$		-1	
自养菌的衰亡	$1-f_p$		$i_{XB}-f_p i_{XP}$			-1

表 2 去除过程的动力学方程^[24]

Table 2 Kinetic equation of removal process

过程 Process	动力学方程 Kinetic equation
异养菌的好氧生长	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_H$

续表 2

过程 Process	动力学方程 Kinetic equation
异养菌的缺氧生长	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_H$
自养菌的好氧生长	$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_A$
异养菌的衰亡	$b_H X_H$
自养菌的衰亡	$b_A X_A$

某污染物去除速率或者微生物生长速率的计算方式为: 将表 1 该组分所在列的所有项目, 分别与表 2 动力学方程(广义的 Monod 模式)相乘, 之后再将这些乘积进行累加。

1.3.2 物料平衡方程

在推流式反应器里, 基质和活性微生物的浓度会沿着反应器的长度方向发生变化。

从质量守恒定律可以得出, 控制单元中基质和活性微生物的物料平衡方程为式(4):

控制单元内物质积累速率 = 物质流进速率 - 物质流出速率 + 物质产生速率 (4)

物质积累速率通常用 $d(VC)/dt$ 来表示, 其中: V 代表控制单元的体积, m^3 ; C 代表物质浓度, $mol \cdot L^{-1}$; d/dt 表示对时间求微分, h^{-1} 。

方程(4)可转化为以下式(5)和式(6):

基质:

$$\Delta V \frac{\Delta S}{\Delta t} = QS - Q(S + \Delta S) + r_{et} \Delta V$$
 (5)

活性微生物:

$$\Delta V \frac{\Delta X}{\Delta t} = QX - Q(X + \Delta X) + r_{net} \Delta V$$
 (6)

在稳定状态下, 进水流量、基质浓度和微生物浓度都不随时间改变, 反应器垂直流动方向的横截面积(A)是常数, $A = \Delta V / \Delta z$; 反应器中流体的流速 $u = Q / A, m \cdot d^{-1}$, Q 是供料的流量, $m^3 \cdot d^{-1}$, A 是反应器的横截面积, m^2 。则有, $Q = u \Delta V / \Delta z$, 将其代入式(5)、式(6), 则可得到稳态状态下的方程式(7)、式(8):

稳定状态下基质:

$$u \frac{\Delta S}{\Delta z} = r_{et}$$
 (7)

稳定状态下活性微生物:

$$u \frac{\Delta X}{\Delta z} = r_{net}$$
 (8)

若 Δz 趋近于 0, 则上述方程变式为式(9)、式(10):

$$u \frac{dS}{dz} = r_{et}$$
 (9)

$$u \frac{dX}{dz} = r_{net}$$
 (10)

由此建立各个组分的质量守恒方程式(11)—式(16), 如下:

异养菌:

$$u \frac{dX_H}{dz} = r_H = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_H + \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_H - b_H X_H$$
 (11)

有机污染物:

$$u \frac{dS_S}{dz} = r_S = -\frac{1}{Y_H} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_H - \frac{1}{Y_H} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_H + (1 - f_p) b_H X_H + (1 - f_p) b_A X_A$$
 (12)

溶解氧:

$$u\frac{dS_O}{dz}r_O=\frac{Y_H-1}{Y_H}\mu_H\left(\frac{S_S}{K_S+S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{OH}+S_O}\right)X_H+\frac{Y_A-4.57}{Y_A}\mu_A\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{OA}+S_O}\right)X_A\tag{13}$$

自养菌:

$$u\frac{dX_A}{dz}=r_A=\mu_A\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{OA}+S_O}\right)X_A-b_AX_A\tag{14}$$

氨氮:

$$u\frac{dS_{NH}}{dz}=r_{HN}=-i_{XB}\mu_H\left(\frac{S_S}{K_S+S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{OH}+S_O}\right)X_H-i_{XB}\mu_H\left(\frac{S_S}{K_S+S_S}\right)\left(\frac{K_{OH}}{K_{OH}+S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}}\right)\eta_gX_H\\-\left(i_{XB}+\frac{1}{Y_A}\right)\mu_A\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{OA}+S_O}\right)X_A+(i_{XB}-f_p i_{XP})b_HX_H+(i_{XB}-f_p i_{XP})b_AX_A\tag{15}$$

硝态氮:

$$u\frac{dS_{NO}}{dz}=r_{NO}=\frac{Y_H-1}{2.86Y_H}\mu_H\left(\frac{S_S}{K_S+S_S}\right)\left(\frac{K_{OH}}{K_{OH}+S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}}\right)\eta_gX_H+\frac{1}{Y_A}\mu_A\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{OA}+S_O}\right)X_A\tag{16}$$

1.3.3 模型仿真

本模型包括以上 6 个质量守恒方程, 涉及 15 个参数, 其中 5 个是化学计量系数, 10 个是反应动力学系数, 模型仿真过程如下:

- ①利用上述 6 个质量守恒方程, 建立系统的动态方程组;
- ②输入方程组的动力学系数和化学计量系数;
- 经反复试算, 确定本模型的化学计量系数和动力学系数, 分别见表 3 和表 4^[25].

表 3 化学计量系数
Table 3 Stoichiometric coefficient

类别 Category	符号 Symbol	单位 Unit	采用值 Value
异养菌产率系数	Y_H	$\text{g(生成细胞COD)}\cdot\text{g(氧化COD)}^{-1}$	0.3
颗粒型衰减产物(COD)的比例	f_p	无量纲	0.08
生物体COD的含氮比例	Y_A	$\text{g(生成细胞COD)}\cdot\text{g(氧化N)}^{-1}$	0.28
生物体产物COD的含氮比例	i_{XB}	$\text{g(N)}\cdot\text{g(细胞COD)}^{-1}$	0.086
自养菌(COD)产率系数	i_{XP}	$\text{g(N)}\cdot\text{g(COD)}^{-1}$	0.06

表 4 动力学系数
Table 4 Kinetic coefficient

类别 Category	符号 Symbol	单位 Unit	采用值 Value
异养菌最大比增长速率	$\hat{\mu}_H$	d^{-1}	0.862
COD半饱和常数	K_S	$\text{g(COD)}\cdot\text{m}^{-3}$	160
异养菌氧半饱和常数	K_{OH}	$\text{g(O}_2\text{)}\cdot\text{m}^{-3}$	0.2
硝态氮半饱和常数	K_{NO}	$\text{g(NO}_3\text{-N)}\cdot\text{m}^{-3}$	0.2
氨氮半饱和常数	K_{NH}	$\text{g(NH}_3\text{-N)}\cdot\text{m}^{-3}$	3.6
自养菌氧半饱和常数	K_{OA}	$\text{g(O}_2\text{)}\cdot\text{m}^{-3}$	0.5
自养菌最大比增长速率	$\hat{\mu}_A$	d^{-1}	0.345
异养菌缺氧生长修正因子	η_g	无量纲	0.8
异养菌的衰减系数	b_H	d^{-1}	0.3
自养菌的衰减系数	b_A	d^{-1}	0.05

- ③输入进水中各组分浓度、反应器参数;

④模型模拟.

创建对应的 simulink 仿真模型, 得出各级方程的可视化编程, 根据实验数据, 利用 4 阶龙格-库塔法(RK4)进行计算, 得到污染物的模拟值.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

采用本研究建立的模型和一级动力学模型, 分别对 BAF 串联水平潜流湿地和垂直潜流湿地 30 d 的污染物去除效果进行模拟, 得到有机物及氮的去除结果, 并通过实验装置实测数据进行验证. 本研究设定模拟值误差处于 20% 以内即为理想模拟.

2.1 有机物去除的模拟和验证结果分析

出水中 COD 模拟值和实测值对比见表 5 和图 1. 在对出水 COD 的模拟中: 本模型模拟平均值误差为 12.03%, 模拟值最大误差为 36.01%, 最小误差为 1.18%, 模拟值有 65% 达到理想模拟; 而一级动力学模型模拟值平均值误差为 13.80%, 模拟值最大误差为 38.20%, 最小误差为 0.14%, 模拟值有 60% 达到理想模拟. 由此可见, 本模型模拟效果相较于一级动力学模型更为理想, 且对水平流湿地的模拟结果优于垂直流湿地. 综合来看, 本模型模拟效果较为理想. 不过本模型模拟值高于实验实测值, 这是因为模型在构建时未考虑强化工艺中有机物迁移转化的部分反应, 如厌氧反应等.

表 5 COD 出水模拟值和实测值对比

Table 5 Comparison of simulated and measured COD values in effluent

		模拟值在不同误差范围的百分数									
		平均值/ (mg·L ⁻¹) AVG	最大值/ (mg·L ⁻¹) MAX	最小值/ (mg·L ⁻¹) MIN	Percentage of simulated values within different error ranges						理想模拟 Ideal simulation ≤20%
					水平流 Horizontal flow			垂直流 Vertical flow			
					<5%	5%—20%	>20%	<5%	5%—20%	>20%	
实验结果	水平潜流	59.97	63.37	56.32							
	垂直流	49.50	54.18	45.35							
本研究模型模拟结果		61.32	64.48	58.90							
本研究模型模拟误差		12.03%	36.01%	1.18%	60%	40%	0%	0%	30%	70%	65%
一级动力学模拟结果		62.29	66.36	58.55							
一级动力学模拟误差		13.80%	38.20%	0.14%	50%	50%	0%	0%	10%	90%	60%

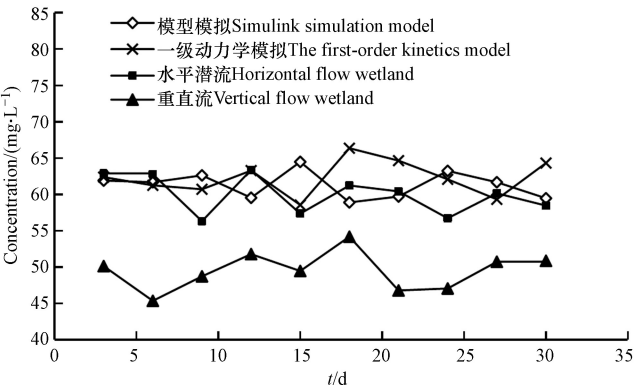


图 1 COD 出水模拟值与实测值对比

Fig.1 Comparison of simulated and measured COD values in effluent

2.2 氮去除的模拟和验证结果分析

出水中氨氮模拟值和实测值对比见表 6 和图 2. 在对出水氨氮的模拟中: 本模型模拟平均值误差为 6.47%, 模拟值最大误差为 33.37%, 最小误差为 0.47%, 模拟值有 80% 达到理想模拟; 反观一级动力学模型, 模拟平均值误差为 14.80%, 模拟值最大误差攀升至 51.85%, 最小误差为 0.11%, 模拟值有 65% 达到理想模拟. 可见本模型在出水氨氮模拟效果上明显优于一级动力学模型, 且对水平流湿地的

模拟效果明显高于垂直流湿地.

表 6 氨氮出水模拟值和实测值对比

		平均值/ (mg·L ⁻¹) AVG	最大值/ (mg·L ⁻¹) MAX	最小值/ (mg·L ⁻¹) MIN	模拟值在不同误差范围的百分数						
					Percentage of simulated values within different error ranges						
					水平流			垂直流			理想模拟
					Horizontal flow			Vertical flow			Ideal simulation
					<5%	5%—20%	>20%	<5%	5%—20%	>20%	≤20%
实验结果	水平潜流	24.64	29.29	21.67							
	垂直流	21.23	25.29	18.78							
本研究模型模拟结果		24.42	25.54	23.32	40%	60%	0%	10%	50%	40%	65%
本研究模型模拟误差		6.47%	33.37%	0.47%							
一级动力学模拟结果		26.33	29.08	23.91	30%	6%	10%	0%	40%	60%	60%
一级动力学模拟误差		14.80%	51.85%	0.11%							

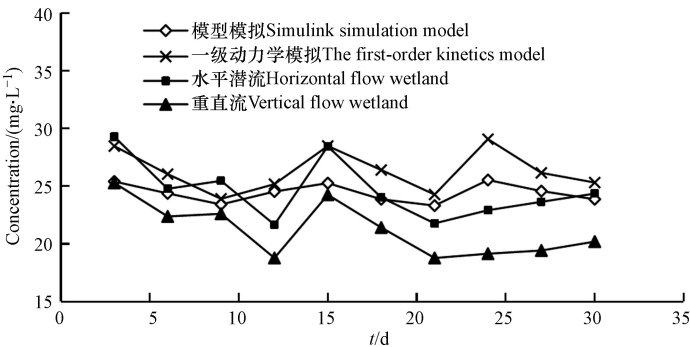


图 2 氨氮出水模拟值与实测值对比

Fig.2 Comparison of simulated and measured values of ammonia nitrogen in effluent

综合来看,本模型对系统的模拟效果较为理想.不过本模型模拟值与实验实测值相比偏高,这是由于本模型构建过程中,未将系统里基质吸附以及植物吸收对氨氮的去除作用纳入考量. Kadle 等就曾借助同位素示踪技术,对水平潜流人工湿地内氮素的迁移转化展开研究,结果显示,氮素在水平潜流人工湿地系统的有机沉积物上,存在多次吸附与解吸的过程^[26].

出水中总氮模拟值和实测值对比见表 7 和图 3.在对出水总氮的模拟中:本模型模拟平均值误差为 1.91%,模拟值最大误差为 18.63%,最小误差为 0.10%,模拟值 100% 达到理想模拟;一级动力学模型模拟平均值误差为 0.29%,模拟值最大误差为 19.54%,最小误差为 0.15%,模拟值 100% 达到理想模拟.由此可见,本模型和一级动力学模型在出水总氮模拟效果上都颇为理想.同时,本模型对垂直流湿地的模拟结果要略优于水平流湿地.与出水氨氮的模拟结果相比,本模型对出水总氮的模拟效果更优,推测这或许源于模型自身存在的补偿性作用.

表 7 总氮出水模拟值和实测值的对比

		平均值/ (mg·L ⁻¹) AVG	最大值/ (mg·L ⁻¹) MAX	最小值/ (mg·L ⁻¹) MIN	模拟值在不同误差范围的百分数						
					Percentage of simulated values within different error ranges						
					水平流			垂直流			理想模拟
					Horizontal flow			Vertical flow			Ideal simulation
					<5%	5%—20%	>20%	<5%	5%—20%	>20%	≤20%
实验结果	水平潜流	42.40	50.10	35.28							
	垂直流	40.28	48.20	31.21							
本研究模型模拟结果		40.55	45.78	35.73	20%	80%	0%	40%	60%	0%	100%
本研究模型模拟误差		1.91%	18.63%	0.10%							

续表 7

	平均值/ (mg·L ⁻¹) AVG	最大值/ (mg·L ⁻¹) MAX	最小值/ (mg·L ⁻¹) MIN	模拟值在不同误差范围的百分数						
				Percentage of simulated values within different error ranges						理想模拟 Ideal simulation
				水平流			垂直流			
				Horizontal flow			Vertical flow			
				<5%	5%—20%	>20%	<5%	5%—20%	>20%	
一级动力学模拟结果	41.46	44.95	37.00	40%	60%	0%	50%	50%	0%	100%
一级动力学模拟误差	0.29%	19.54%	0.15%							

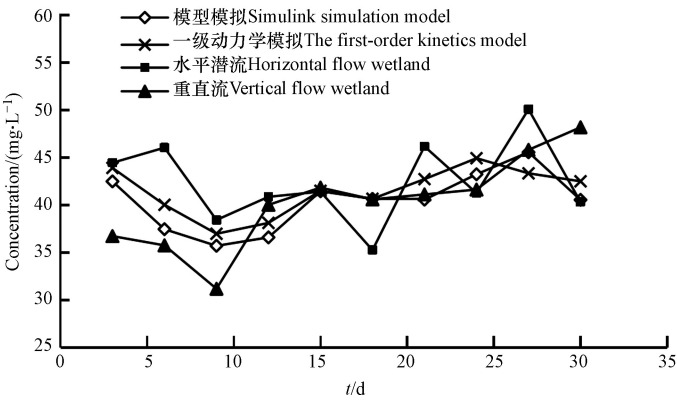


图 3 总氮出水模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison of simulated and measured values of total nitrogen in effluent

经过对本模型的构建、仿真以及和一级动力学模型模拟效果的对比可知:本模型在描述 BAF-强化人工湿地污水处理工艺的污染物去除上表现良好.不过,本模型也存在一定局限性,在模型适用范围和设定方面仍有改进空间,具体体现在以下几点:

- ①模型未涉及水生植物对营养盐的吸收过程;
- ②模型未考虑基质对污染物的吸附作用;
- ③模型未描述潜流人工湿地中磷循环过程.

3 结论(Conclusion)

本文依据 Monod 生态模型,构建了复合湿地对有机污染物以及营养盐污染物去除的 simulink 仿真模型.通过模型模拟结果和实验结果对比,验证了所构建模型在模拟系统出水有机污染物、氨氮以及总氮方面的有效性.研究表明,相较于常用的一级动力学模型,本模型在模拟出水有机污染物和氨氮方面效果更佳,而在模拟出水总氮方面,本模型与一级动力学模型均能取得理想的效果.

参考文献 (References)

[1] 宋序彤.关于我国城市给排水科技优先发展领域的探讨 [J]. 中国给水排水, 1995, 11(2): 25-29.
SONG X T. Discussion on the priority development field of urban water supply and drainage science and technology in China[J]. China Water & Wastewater, 1995, 11(2): 25-29 (in Chinese).

[2] 杨雨萌, 王鸿程, 王爱杰. 强化人工湿地自养脱氮处理低碳氮比污水研究进展 [J]. 水处理技术, 2021, 47(8): 20-25.
YANG Y M, WANG H C, WANG A J. Enhanced autotrophic nitrogen removal in constructed wetland for low C/N wastewater treatment: A review[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(8): 20-25 (in Chinese).

[3] 张忠祥, 钱易. 废水生物处理新技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Z X, QIAN Y. New technology of wastewater biological treatment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004(in Chinese).

[4] WALACE S. Engineered wetlands lead the way. Land and Water[J]. 2004, 48(5): 13-16.

[5] 胡洁, 许光远, 胡香, 等. 组合式人工湿地深度处理小城镇污水处理厂尾水 [J]. 水处理技术, 2018, 44(11): 120-122,132.
HU J, XU G Y, HU X, et al. Tail water advanced treatment by hybrid constructed wetlands in a small town wastewater treatment plant[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(11): 120-122,132 (in Chinese).

[6] 赵大传, 钟丽媛, 杨厚玲, 等. 升流式厌氧生物滤池与温室型人工湿地组合对农村生活污水处理的研究 [J]. 中国农学通报,

- 2012, 28(05): 258-262.
- ZHAO D C, ZHONG L Y, YANG H L, et al. Research on treatment of the rural domestic sewage with integrated up-flow anaerobic bio-filter and greenhouse constructed wetland process[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(05): 258-262. (in Chinese).
- [7] 国际水协废水生物处理设计与运行数学模型课题组著. 张亚雷, 李咏梅译. 活性污泥数学模型 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- ZHANG Y L, LI Y M. Activated sludge models[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002(in Chinese).
- [8] 张蓉. 仿真软件在 AAO、CAST 和 MBR 污水厂的应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- ZHANG R. Research on application of simulation software in AAO, CAST and MBR sewage plants[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).
- [9] 徐承志, 操家顺, 罗景阳, 等. 活性污泥数学模型在污水处理中的研究进展 [J]. 应用化工, 2021, 50(5): 1341-1347,1354.
- XU C Z, CAO J S, LUO J Y, et al. Research progress of activated sludge model application in sewage treatment[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(5): 1341-1347,1354 (in Chinese).
- [10] 周雪飞, 顾国维, 刘建勇, 等. 城市污水厂生物处理工艺运行效果的数学模拟 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 745-748.
- ZHOU X F, GU G W, LIU J Y, et al. Mathematical modeling of biological process in wastewater treatment plant[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(6): 745-748 (in Chinese).
- [11] ZHAO L, DAI T J, QIAO Z, et al. Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 133: 169-182.
- [12] MALVIYA A, JASPAL D. Artificial intelligence as an upcoming technology in wastewater treatment: A comprehensive review[J]. Environmental Technology Reviews, 2021, 10(1): 177-187.
- [13] 黄雄, 刘晓平, 陈晓思. 浅水型人工湖泊湿地生态净水系统水质模型预测 [J]. 中国市政工程, 2023(4): 92-95,113.
- HUANG X, LIU X P, CHEN X S. Prediction of water quality model for shallow water artificial lake wetland ecological water purification system[J]. China Municipal Engineering, 2023(4): 92-95,113 (in Chinese).
- [14] 王晓云, 付爱民. 表面流人工湿地污染物去除与运行参数的相关性及其反应动力学 [J]. 河北工业科技, 2021, 38(6): 486-493.
- WANG X Y, FU A M. Correlation between pollutant removal and operation parameters of surface flow constructed wetland and its reaction kinetics[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2021, 38(6): 486-493 (in Chinese).
- [15] 黄永安, 马路, 刘慧敏. MATLAB 7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- HUANG Y A, MA L, LIU H M. MATLAB 7.0/Simulink 6.0 modeling and simulation development and advanced engineering application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005(in Chinese).
- [16] (法)Mohand Mokhtari, (法)Michel Marie 著. 赵彦玲, 吴淑红译. MATLAB 与 SIMULINK 工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- ZHAO Y L, WU S H. Engineering applications of MATLAB 5.3 and SIMULINK 3[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2002(in Chinese).
- [17] 袁德成, 樊立萍, 于海斌. 典型污水生化处理过程仿真平台的构造 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1509-1513.
- YUAN D C, FAN L P, YU H B. Software development for simulating biological wastewater treatment processes[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2003, 15(11): 1509-1513 (in Chinese).
- [18] 惠若瑾, 黄明. SBR 工艺的 MATLAB 动态系统模拟仿真研究 [J]. 安徽建筑大学学报, 2016, 24(6): 57-60,66.
- HUI R J, HUANG M. Simulation research on MATLAB dynamic system simulation of SBR process[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2016, 24(6): 57-60,66 (in Chinese).
- [19] 刘大伟, 沈文浩. 用 Matlab/Simulink 建立废水处理仿真模型 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30(11): 86-89,120.
- LIU D W, SHEN W H. Set up BSM1 with Matlab/Simulink[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(11): 86-89,120 (in Chinese).
- [20] 郝晓地, 甘一萍, 周军, 等. 数学模拟技术在污水处理工艺设计、优化、研发中的应用(上)[J]. 给水排水, 2004, 30(5): 33-36.
- HAO X D, GAN Y P, ZHOU J, et al. Modeling application in process design, operation optimization and experiments of wastewater treatment processes(I)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(5): 33-36 (in Chinese).
- [21] 雒维国. 潜流型人工湿地对氮污染物的去除效果研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
- LUO W G. Study on removal effect of nitrogen pollutants by subsurface constructed wetland[D]. Nanjing: Southeast University, 2005 (in Chinese).
- [22] CHEN L M, CHAI L H. Mathematical model and mechanisms for biofilm wastewater treatment systems[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2005, 21(8): 1455-1460.
- [23] 姚重华. 环境工程仿真与控制 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- YAO (C/Z)H. Environmental engineering simulation and control[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005(in Chinese).
- [24] (瑞)G. 乌尔松 (Gustaf Olsson), (澳)B. 纽厄尔 (Bob Newell) 编著. 高景峰, 彭永臻译. 污水处理系统的建模、诊断和控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- GAO J F, PENG Y Z. Wastewater treatment systems: Modelling, diagnosis and control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005(in Chinese).
- [25] 陈兆波, 陈志强, 林海龙, 等. 污水处理系统数学模型 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009.
- CHEN Z B, CHEN Z Q, LIN H L. Mathematical model of sewage treatment system[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2009(in Chinese).
- [26] KADLEC R H, TANNER C C, HALLY V M, et al. Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: Implications for treatment response[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(4): 365-381.