

汪晨晨, 程方奎, 吕锡武. 响应曲面法对优化侧向回流一体化生物膜反应器去除氨氮的效果模拟[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 94-99.

WANG C C, CHENG F K, LÜ X W. Simulation of effect of response surface methodology for optimized lateral reflux integrated biofilm reactor on ammonia nitrogen removal[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 94-99.

响应曲面法对优化侧向回流一体化生物膜反应器去除氨氮的效果模拟

汪晨晨^{1,2}, 程方奎^{1,2}, 吕锡武^{1,*}

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096; 2. 东南大学无锡太湖水环境工程研究中心, 江苏无锡 214000)

摘要 针对农村分散式生活污水的处理,设计了侧向回流一体化生物膜反应器,缩短了污水处理工艺流程,减小了设施占地面积。文章从优化反应器对氨氮的处理效果出发,运用 Box-Behnken 响应曲面法,建立了关于氨氮去除率的数学模型,以寻求反应器水力停留时间、填料填充率和气水比的最佳参数组合。响应曲面法的结果表明:影响因素的显著性顺序为填料填充率>水力停留时间>气水比,并且填料填充率与水力停留时间、水力停留时间与气水比、填料填充率与气水比的交互作用均为显著。模型预测结果表明,当水力停留时间为 6.98 h、填料填充率为 39.67%、气水比为 7.73 时,侧向回流一体化反应器对氨氮的去除率为 97.70%,验证试验结果为 98.09%,与模型预测值偏差仅为 0.39%。

关键词 农村生活污水 一体化反应器 氨氮 生物膜 响应曲面法

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)01-0094-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.01.012

Simulation of Effect of Response Surface Methodology for Optimized Lateral Reflux Integrated Biofilm Reactor on Ammonia Nitrogen Removal

WANG Chenchen^{1,2}, CHENG Fangkui^{1,2}, LÜ Xiwu^{1,*}

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Engineering Research Center of Taihu Lake Water Environment (Wuxi), Wuxi 214000, China)

Abstract For the treatment of rural decentralized domestic wastewater, an integrated biofilm reactor with lateral reflux was designed to simplify the wastewater treatment process and reduce the area of facilities. In this paper, the mathematical model of ammonia nitrogen removal rate was established by Box-Behnken response surface methodology (RSM) to optimize the treatment effect of ammonia nitrogen removal in the reactor, so as to find the optimal parameters combination of hydraulic retention time, filler packing rate and gas water ratio. The results of response surface methodology showed that the significant order of influencing factors was filler packing rate > hydraulic retention time > gas water ratio, and the interaction between filler packing rate and hydraulic retention time, hydraulic retention time and gas water ratio, filler filling rate and gas water ratio were significant. Model predicted when HRT was 6.98 h, packing ratio was 39.67%, and gas water ratio was 7.73, the removal rate of ammonia nitrogen in the lateral reflux integrated reactor was 97.70%, and the verification experimental result was 98.09%, which was only 0.39% deviation from the model prediction.

Keywords rural domestic wastewater integrated reactor ammonia nitrogen biofilm response surface methodology (RSM)

分散式污水处理系统是一种能耗和化学消耗均较小的废水处理方法^[1]。目前对于某些由于地形

地势难以建设统一的污水收集管网的地区,一体化处理技术因其安装简单和占地面积较小成为了较为合适的选择。但如何控制一体化反应器的运行条件,使其既能达到理想的处理效果,又能够尽可能地节约能耗,仍然是一体化反应器实际应用于农村生活污水处理中需要着重考虑的问题。本文从优化所设计的侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮处理效

[收稿日期] 2021-07-23

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07701001-016)

[作者简介] 汪晨晨(1997—),女,硕士,研究方向为分散式农村生活污水治理,E-mail:1120228514@qq.com。

[通信作者] 吕锡武,教授,E-mail:xiwulu@seu.edu.cn。

果的运行条件出发,力求在满足处理要求的同时做到节约能耗。

响应曲面法(RSM)是一种基于统计学的,将试验设计和数学建模相结合的试验条件寻优方法^[2-4]。该方法首先通过设计回归方程拟合影响因素与响应输出值之间的函数关系,然后对数学模型进行检验^[5],评价影响因素及其相互作用,进而得出预测的优化响应量及优化试验条件^[6]。与传统的数理统计方法相比,RSM更为快速简便,可以高效地确定显著性影响因素进而优化工艺参数,被广泛地应用于污水治理领域^[7]。

本文从自主设计的侧向回流一体化生物膜反应器出发,优化了一体化反应器的构型,在一个反应器内同时实现对污水中有机物、氨氮、总氮和总磷等污染物进行去除。设计的侧向回流通道一方面能够稀释进水,提高反应器的抗冲击负荷能力,另一方面也能充分利用回流液中的硝态氮,在填料区中的缺氧部分实现反硝化,增强对污染物的去除效果。为了探究反应器的最佳参数组合,利用RSM建立侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮的去除率与水力停留时间、填料填充率和气水比的数学模型,进而确定各因素对氨氮去除率的影响大小顺序。在此基础上,研究多因素对氨氮去除率的交互影响,从而确定侧向回流一体化生物膜反应器的最优运行参数,最后

比较最优运行参数下氨氮去除率的模型预测值和实际值,反映模型的精确性。

1 试验部分

1.1 试验装置

采用自主设计的侧向回流一体化生物膜反应器,结构如图1所示。

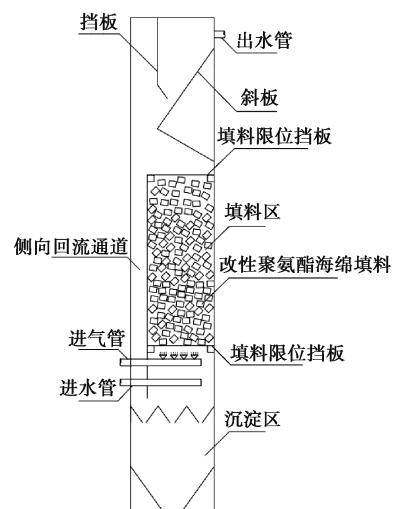


图1 侧向回流一体化生物膜反应器

Fig. 1 Lateral Reflux Integrated Biofilm Reactor

反应器采用亚克力材质,有效容积为6.5 L,填料区装填的填料为改性聚氨酯海绵填料,相关性质如表1所示。

表1 改性聚氨酯海绵填料性质参数
Tab. 1 Property Parameters of Modified Polyurethane Sponge Packings

品名	素材	空孔率	气孔数/ [个·(25 mm) ⁻¹]	气孔径/mm	比表面积/ (m ² ·m ⁻³)	真相对密度/ (g·cm ⁻³)
AQ-30	改性聚氨酯海绵	95%	20	1.5	91 000	1.1

设计待处理污水从反应器底部进入,在气流的推动下污水向上流动经过填料区^[8],污水中的污染物被填料上生长的生物膜吸附转化降解,污水从而得到净化^[9-10]。由于侧向回流通道的存在,填料区出水一部分回流至反应器底端,与进水充分混合。设计的侧向回流通道能够起到稀释进水、提高一体化反应器的抗冲击负荷能力的作用。填料区上部设置的挡板起到泥水分离的作用,并且使出水不易受气流紊乱。反应器下部设置的泥斗收集填料上脱落下沉的生物膜,通过排泥管定期排放。

1.2 试验污水和接种污泥来源

试验模拟污水水质为农村单户或相邻连户排放的黑水经化粪池厌氧处理后与灰水混合后的水质。

采用人工配水的方法,以葡萄糖作为碳源,氯化铵作为氮源,磷酸二氢钾作为磷源,添加一定的碳酸氢钠补充硝化反应所消耗的碱度以维持正常的反应速率,同时添加适量的微量元素维持微生物的正常新陈代谢^[11]。污水中 COD_{Cr} 质量浓度为 220~280 mg/L,氨氮质量浓度为 30~45 mg/L,温度为 24~27 °C, pH 值为 7.75~7.90。试验接种的污泥提取自无锡某污水厂好氧池,污泥 MLSS 质量浓度为 6 210 mg/L。

1.3 试验设计

本研究采用 Box-Behnken RSM 优化侧向回流一体化生物膜反应器去除氨氮的处理效果。该方法可以用来分析评价指标与影响因素之间的线性和非线

性关系^[12],并且不需要运行连续测试^[13]。因此,设计运用 Box-Behnken 法可以在最少试验运行次数的情况下,对影响氨氮去除效果的运行条件进行准确模拟优化,还可以分析多因素之间的交互作用^[14]。基于 Box-Behnken 响应曲面模型设计原理,考虑优化侧向回流一体化生物膜反应器的实际运行参数。结合前期试验结果,选取水力停留时间、填料填充率、气水比作为考察因素,以氨氮去除率作为模型的响应值。应用 Design-Expert 12.0.3.0 软件设计 3 因素 3 水平的试验,试验设计的各因素和水平如表 2 所示。

表 2 试验设计各影响因子和水平

Tab. 2 Influencing Factors and Levels for Experimental Design

编码	影响因子	编码水平		
		-1	0	1
X_1	水力停留时间/h	4	6	8
X_2	填料填充率	20%	35%	50%
X_3	气水比	5	10	15

根据 Box-Behnken 中心组合原理,对响应曲面回归建模,其模型如式(1)^[15]。

$$R = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

其中: R ——模型的响应值,即氨氮去除率;

β_0 ——常数项表示中心点修正值;

β_i 、 β_{ii} 和 β_{ij} ——线性系数、平方系数和交互作用项系数;

X_i 和 X_j ——不同因素水平变量;

ε ——构建模型的残差。

1.4 分析方法

采用哈希快速消解法测定 COD_{Cr}(哈希消解器 DRB200, 哈希可见光分光光度计 DR3900), 纳氏试剂分光光度法测定氨氮含量[《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)], 使用便携式 YSI-100pH 测定仪测定 pH, YSI550A 溶解氧测量仪测定 DO 含量。

2 结果与讨论

2.1 模型建立与方差分析

试验设计和操作结果如表 3 所示,共 17 组试验,其中有 5 组为零点试验。

由表 3 可知,在不同运行参数组合下,氨氮的去

表 3 试验设计方案与运行结果

Tab. 3 Experimental Design and Operation Results

试验编号	水力停留时间 (X_1)/h	填料填充率 (X_2)	气水比 (X_3)	R
1	6	20%	15	77.79%
2	4	35%	5	58.48%
3	4	35%	15	98.09%
4	6	50%	5	98.40%
5*	6	35%	10	92.89%
6	4	50%	10	95.43%
7	6	20%	5	54.16%
8	8	50%	10	98.25%
9	4	20%	10	48.19%
10*	6	35%	10	91.68%
11*	6	35%	10	93.25%
12	8	35%	5	96.58%
13*	6	35%	10	92.97%
14	6	50%	15	98.63%
15	8	35%	15	98.26%
16*	6	35%	10	87.74%
17	8	20%	10	90.34%

注: * 代表该组试验为零点试验

除率在 48.19% ~ 98.63%, 分散度较大。利用 Design-Expert 12.0.3.0 软件对试验所得数据进行多元线性回归分析,拟合可得氨氮去除率模型方程如式(2)。

$$R = 91.71 + 10.40X_1 + 15.03X_2 + 8.14X_3 - 9.83X_1X_2 - 9.48X_1X_3 - 5.85X_2X_3 - 1.52X_1^2 - 7.13X_2^2 - 2.33X_3^2 \quad (2)$$

氨氮去除率的模型预期值与实际值的对比如图 2 所示,反映了模型预期值和实际值的契合程度。由图 2 可知,氨氮去除率的实际值与模型的预期值较为接近,近似满足 $Y=X$ 的关系,说明模型的拟合度较好。

为了进一步判断模型的显著性,还需对上述建立的氨氮去除率模型进行方差分析及显著性检验。显著性判断依据是 $P < 0.0001$ 时,影响程度为极其显著; $0.0001 < P < 0.0500$ 时,影响程度为显著; $P > 0.0500$ 时,影响程度为不显著。方差分析和显著性检验结果如表 4 所示。

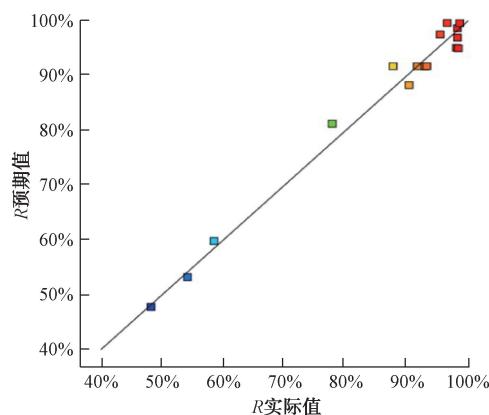


图2 模型预期值和实际值对比

Fig. 2 Comparison between Expected Value and Actual Value of the Model

表4 方差分析结果
Tab. 4 Results of Variance Analysis

来源	平方和	自由度	方差	F	P
模型	4 349.62	9	483.29	43.92	<0.000 1
X_1	866.11	1	866.11	78.71	<0.000 1
X_2	1 806.91	1	1 806.91	164.21	<0.000 1
X_3	530.57	1	530.57	48.22	0.000 2
X_1X_2	386.71	1	386.71	35.14	0.000 6
X_1X_3	359.67	1	359.67	32.69	0.000 7
X_2X_3	136.89	1	136.89	12.44	0.009 6
X_1^2	9.77	1	9.77	0.887 6	0.377 5
X_2^2	214.08	1	214.08	19.46	0.003 1
X_3^2	22.87	1	22.87	2.08	0.192 6
残差	77.03	7	11.00	—	—
失拟项	55.91	3	18.64	3.53	0.127 3
纯误差	21.11	4	5.28	—	—
合计	4 426.65	16	—	—	—

由表4可知,模型的F值为43.92,且P<0.000 1,表明该模型对氨氮去除率的影响极其显著,拟合程度较好。

进一步对试验的统计值进行分析以判断模型的精密度,试验的统计值如表5所示。

表5 试验统计结果
Tab. 5 Statistics Results of the Experiment

来源	数据	来源	数据
标准差	3.32	R^2	0.982 6
均值	86.54	调整拟合度 R_{adj}^2	0.960 2
变异系数 CV	3.83%	预测拟合度 R_{pre}^2	0.790 5
精密度	20.364 3		

由表5可知,模型的 R^2 为0.982 6,表明98.26%的响应值变化可通过该模型解释,试验误差小。调整拟合度 R_{adj}^2 为0.960 2,表明仅有3.98%的响应值不能由模型预测,模型的回归性较好。变异系数 $CV=3.83\%<10\%$,表明该模型的精密度较高。

综上,从方差分析和显著性检验的角度,该模型能够较为精确地描述侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮的去除率与反应器所选取的填料填充率、运行时所采用的水力停留时间、气水比之间的真实关系,可以运用该回归模型优化侧向回流一体化生物膜反应器去除水中氨氮的运行条件以及对运行结果进行预测。

2.2 氨氮去除率的响应曲面分析

为了更好地研究水力停留时间 X_1 、填料填充率 X_2 和气水比 X_3 这3个影响因素及其交互作用对氨氮去除率的影响,建立氨氮去除率模型的响应曲面图,如图3~图5所示。

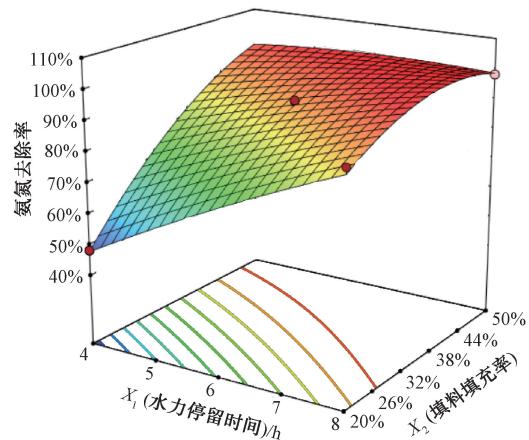


图3 水力停留时间与填料填充率对氨氮去除率的影响

Fig. 3 Effect of Hydraulic Retention Time and Filler Packing Rate on Ammonia Nitrogen Removal Rate

由图3可知,随着水力停留时间的增加,氨氮的去除率逐渐增加,增加趋势较为稳定。随着反应器内填料填充率的增加,刚开始氨氮的去除率迅速增加,当填料填充率大于38%时,氨氮去除率的增加趋于平缓。且氨氮去除率随填料填充率的变化比随水力停留时间的变化更敏感,两者的交互作用极其显著,这与方差分析的结果相一致。

由图4可知,氨氮的去除率随着水力停留时间 X_1 和气水比 X_3 的增大而增大,两者的作用效果类似,说明水力停留时间和气水比对侧向回流一体化反应器去除氨氮的效果具有协同作用。

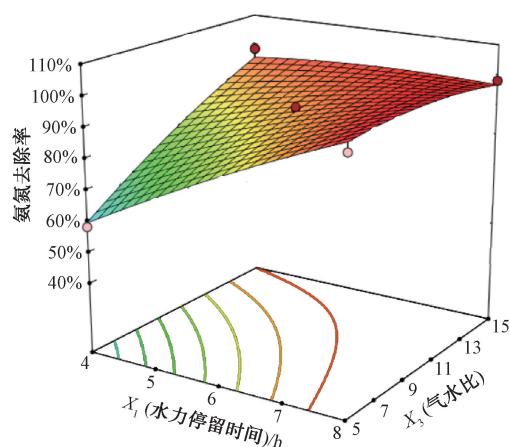


图 4 水力停留时间与气水比对氨氮去除率的影响
Fig. 4 Effect of Hydraulic Retention Time and Gas Water Ratio on Ammonia Nitrogen Removal Rate

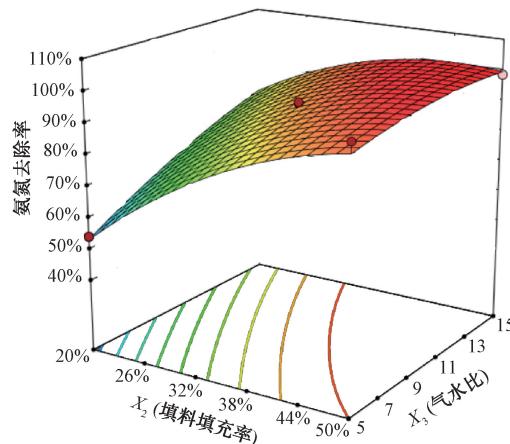


图 5 填料填充率与气水比对氨氮去除率的影响
Fig. 5 Effect of Filler Packing Rate and Gas Water Ratio on Ammonia Nitrogen Removal Rate

由图 5 可知,氨氮去除率随着气水比的增加而增大,随着填料填充率的增加而增大。在填料填充率一定时,氨氮去除率随着气水比的变化趋势近似线性增长,增长速率较快。在气水比较低时,随着填料填充率的增加,氨氮去除率增长的速度较快,当气水比较高时,随着填料填充率的增加,氨氮去除率的增长较为平缓。当填料填充率为 32%、气水比大于 7.5 时即可保证氨氮的去除率大于 85.00%。

综合方差分析的结果以及对响应曲面图的分析可知,3 个试验因素对氨氮去除率的显著性影响顺序为填料填充率>水力停留时间>气水比,其中填料填充率对氨氮去除率的影响最显著。当水力停留时间大于 6 h、填料填充率大于 32%、气水比大于 7.5 时,侧向回流一体化反应器对氨氮的去除率可以保

持在 85.00%以上。

2.3 优化参数及模型的验证

根据 Design-Expert 12.0.3.0 软件建立的侧向回流一体化生物膜反应器去除氨氮的数学模型,对模型预测结果分析表明,当氨氮的进水质量浓度为 30~45 mg/L 时,侧向回流一体化生物膜反应器在水力停留时间为 6.98 h、填料填充率为 39.67%、气水比为 7.73 的条件下,预测对氨氮的去除率为 97.70%。在此条件下进行了 3 组平行试验,实际试验结果表明氨氮的平均去除率为 98.09%,与模型预测值偏差仅为 0.39%。因此,该模型对侧向回流一体化生物膜反应器去除氨氮的运行条件的优化和结果预测较为精确。

3 结论

(1) 氨氮是农村分散式污水重要的排放指标之一,基于 Box-Behnken RSM 构建以水力停留时间、填料填充率和气水比为影响因素,氨氮去除率为响应值的侧向回流一体化生物膜反应器氨氮处理效率预测模型。模型的 R^2 为 0.9826,说明运用模型所得的预期值与实际值拟合程度较好,预测结果准确可靠。

(2) 对回归方程和模型的方差进行分析可知,各影响因素对响应量的影响次序为:填料填充率>水力停留时间>气水比。各影响因子之间的交互作用均为显著,其中填料填充率和水力停留时间之间的交互作用最为显著。

(3) 综合考虑,当水力停留时间为 6.98 h、填料填充率为 39.67%、气水比为 7.73 时,在氨氮初始质量浓度为 30~45 mg/L 的进水条件下,运用模型预测侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮的去除率为 97.70%。在此条件下进行了 3 次平行试验,实际试验结果表明氨氮的平均去除率为 98.09%,与模型预测值偏差值仅为 0.39%,说明模型的预测较为精确。

参考文献

- [1] SINGH A, SAWANT M, KAMBLE S J, et al. Performance evaluation of a decentralized wastewater treatment system in India [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(21): 21172~21188. DOI: 10.1007/s11356-019-05444-z.
- [2] 杨盟,张宝刚,李家欣,等.微生物燃料电池修复钒污染地下水的响应曲面优化研究[J].北京大学学报(自然科学)

- 版), 2018, 54(4): 865-872.
- YANG M, ZHANG B G, LI J X, et al. Optimization of microbial fuel cells for remediation of vanadium contaminated groundwater using response surface methodology (RSM) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(4): 865-872.
- [3] 郭洋洋. Sc-Ag 无机抗菌材料优化制备与应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- GUO Y Y. Optimal preparation and application of Sc - Ag inorganic antibacterial materials [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [4] 李富华, 陈敏, 孔青青, 等. 响应面法研究 NO_3^- 、 NO_2^- 和 Fe^{3+} 对布洛芬光解的复合影响[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 1988-1995.
- LI F H, CHEN M, KONG Q Q, et al. Combined effects of NO_3^- , NO_2^- and Fe^{3+} on photodegradation of ibuprofen using response surface methodology [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(11): 1988-1995.
- [5] 刘辉, 田秉晖, 张松林. 基于 Box-Behnken 实验设计的电渗析脱盐效率影响因素实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(24): 124-131.
- LIU H, TIAN B H, ZHANG S L. The experimental research for influence factors of desalting efficiency of electrodialysis based on the box-behnken experiment design[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(24): 124-131.
- [6] 王凌霄, 李再兴, 李涛, 等. 响应曲面法优化污泥碱解上清液中氮磷回收[J]. 水处理技术, 2020, 46(11): 62-67.
- WANG L X, LI Z X, LI T, et al. Optimization of nitrogen and phosphorus recovery in sludge alkaline solution by response surface methodology[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(11): 62-67.
- [7] 宋亚玲. 化学联酶法脂肪酸甲酯环氧化过程及反应动力学研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2013.
- SONG Y L. Study on chemo-enzymatic epoxidation process of fatty methyl esters and reaction kinetic mathematical model[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2013.
- [8] 毛勇. ABR+A/O 工艺处理方便面调料生产废水的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- MAO Y. Research of ABR + A/O process for instant noodle seasoning production wastewater treatment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [9] 黄亮, 赵子玲. 湖水净化处理工艺[J]. 广东化工, 2012, 39(10): 195-195, 197.
- HUANG L, ZHAO Z L. purification process of lake water[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, 39(10): 195-195, 197.
- [10] 卢乐. 曝气生物滤池处理含硝氮废水工艺及其过程控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- LU L. Study on the craft and process control of nitrate wastewater treatment with biological aerated filter [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [11] 邵宇琪. $\text{Fe}(\text{II})$ 对低 C/N 污水的生物脱氮性能及种群影响研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- SHAO Y Q. Study on the effect of $\text{Fe}(\text{II})$ on biological nitrogen removal performance and microbial population of low-C/N-ratio sewage[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.
- [12] 冯雪娇. 基于神经网络的空气质量源受体分析方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- FENG X J. Research on method of air quality source receptor analysis based on neural network [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [13] 熊思. 油井产出液预脱水用新型水力旋流器的设计与特性研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2015.
- XIONG S. Design and property research of new-type hydrocyclone for well production dewatering[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2015.
- [14] 李露, 徐国荣, 邵天宝, 等. 海水淡化纳滤工艺的性能模拟与优化[J]. 净水技术, 2017, 36(10): 64-69.
- LI L, XU G R, SHAO T B, et al. Performance simulation and optimization of nanofiltration process for sea water desalination [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(10): 64-69.
- [15] 李娟红, 吕锡武. 响应曲面优化跌水生物转盘去除氨氮的研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(11): 41-44, 48.
- LI J H, LÜ X W. Response surface methodology for ammonium removal from domestic wastewater by four-stage water-dropping-self-rotating biological contactor [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(11): 41-44, 48.

(上接第 31 页)

- [71] TANG S F, YUAN D L, RAO Y, et al. Percarbonate promoted antibiotic decomposition in dielectric barrier discharge plasma [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 366: 669-672. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.056.
- [72] WANG T C, JIA H Z, GUO X T, et al. Evaluation of the potential of dimethyl phthalate degradation in aqueous using sodium percarbonate activated by discharge plasma[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 346: 65-76. DOI: 10.1016/j.cej.2018.04.024.
- [73] WANG T H, ZHOU Y, CAO S X, et al. Degradation of sulfanilamide by Fenton-like reaction and optimization using response surface methodology [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 172(5): 334-340. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.106.
- [74] GAO J, DUAN X D, O' SHEA K, et al. Degradation and transformation of bisphenol A in UV/sodium percarbonate: Dual role of carbonate radical anion[J]. *Water Research*, 2020, 171: 115394. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115394.