

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.015

分步进水 SBR 工艺生物脱氮运行条件优化及数学模拟

黄子洪, 向 婷, 方 华, 卢新玥, 王心培, 于江华
(南京信息工程大学环境科学与工程学院 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏
南京 210044)

摘 要: 以低碳氮比污水为处理对象,采用实验室规模生化反应器试验和数学模拟相结合的方法,开展分步进水 SBR 工艺生物脱氮效能及工艺优化研究。结果表明,常规 SBR 法受工艺局限性的影响,对总氮的去除效率偏低。分步进水 SBR 工艺可高效地去除 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,对 TN 的去除效果优于传统 SBR 工艺,但低于理论去除率。基于 STOAT 软件构建的数学模型可较好地模拟该工艺的生物脱氮过程。采用数学模拟的方法开展正交试验,确定分步进水 SBR 工艺的优化运行条件:HRT 为 9 h,流量分配比为 5 : 3 : 2,A/O 运行时间比为 3 : 2。

关键词: SBR; 分步进水; 生物脱氮; 运行条件优化; 数学模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2020)23 - 0089 - 06

Operational Condition Optimization and Mathematical Simulation of Biological Denitrification in Step-feed SBR Process

HUANG Zi-hong, XIANG Ting, FANG Hua, LU Xin-yue, WANG Xin-pei, YU Jiang-hua
(Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Biological denitrification efficiency and process optimization of step-feed SBR process treating low carbon nitrogen ratio sewage were explored by combining lab-scale bioreactor experiments and mathematical simulation. Due to process limitation, the total nitrogen removal efficiency of conventional SBR was low. Step-feed SBR process could remove COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ efficiently, and the removal efficiency of total nitrogen was higher than that of the traditional SBR process, but lower than the theoretical removal value. The biological denitrification process could be properly simulated through the established mathematical model based on STOAT software. Optimized operational conditions were determined by using mathematical simulated orthogonal experiments, which were as follows: HRT of 9 hours, flow distribution ratio of 5 : 3 : 2 and anoxic and oxic operational time ratio of 3 : 2.

Key words: SBR; step-feed; biological denitrification; operational condition optimization; mathematical simulation

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900805); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019 - K - 141); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810300048)

通信作者: 方华 E-mail: fanghua@nuist.edu.cn

当前,国内城镇污水处理厂普遍存在因进水C/N值偏低而引起的生物脱氮效率低、出水总氮不能稳定达标的问题^[1]。鉴于此,多种改进工艺与策略被提出和关注^[2],如短程硝化反硝化、同步硝化反硝化和分(多)段进水等。分段进水工艺是将生化反应池按空间顺序设置为多个缺氧(或厌氧)和好氧工段交替运行,系统进水则按比例分别由各缺氧(厌氧)工段进入^[3-4]。相比传统生物脱氮工艺,该工艺具有内碳源利用率高、无混合液回流的优点,并已被工程应用^[5],但目前,分段进水还主要集中在连续流工艺中^[6]。SBR法为代表性的间歇流活性污泥工艺,其集进水、调节、反应、沉淀等多功能于一池,运行灵活,并可实现高效脱氮除碳,具有占地面积小、节省基建等费用、耐冲击负荷等优点^[7],被广泛用于中小型污水处理工程中。笔者借鉴连续流分段进水工艺的理念,构建时间顺序上的多级A/O交替运行分步进水SBR工艺,针对低C/N值污水,采用理论推导、试验运行和数学模拟相结合的方法开展工艺研究与优化,以期污水生物脱氮新工艺的开发提供技术参考。

1 试验部分

1.1 试验废水

试验废水为模拟废水,采用奶粉、淀粉及葡萄糖等为碳源,氯化铵为氮氮来源,具体废水水质指标见表1。

表1 试验废水水质

Tab.1 Experimental wastewater quality

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	COD/TN
数值	152 ~ 160	28.82 ~ 30.56	29.03 ~ 31.34	7.6 ~ 7.8	4.8 ~ 5.5

1.2 试验装置与运行

试验所用SBR反应器采用有机玻璃制备,有效容积10 L,内设曝气、搅拌和温控装置。试验期间控制反应器内混合液温度为22℃,排水比0.5,MLVSS为1 500 mg/L左右,污泥龄约40 d。常规SBR生物脱氮工艺运行时,将反应器设置为缺氧/好氧(A/O)两个主要运行工段;试验废水在缺氧段瞬时投入,控制A/O停留时间比为1:2,缺氧段和好氧段DO分别在0.2 mg/L以下和2.0 mg/L左右。分步进水SBR工艺运行时,采用时间顺序上的多级A/O工段交替运行,试验废水在各缺氧段瞬时投

入,工艺运行条件由常规SBR工艺试验和理论分析确定。

1.3 分析项目及方法

试验中主要水质指标均采用国标法测定。

1.4 数学模型的建立

STOAT是由英国水研究中心开发的水处理仿真软件,包含ASM系列模型及其各种简化、发展的模型,可以模拟现有主流的活性污泥污水处理工艺,并具有灵敏度分析、图形结果输出、参数校正等功能^[8]。本研究中(以3步进水为例),利用STOAT软件建立了一个缺氧/好氧工艺运行SBR反应器,设置反应器连续运行3次,第1、2次运行结束后不排水,以第3次模拟后的出水结果作为系统的模拟结果。模型按分步进水SBR工艺的运行方式设置,模型初始条件按实际装置初始条件设置。初步模拟中,模型的动力学参数和化学计量参数采用ASM1模型中的动力学参数和化学计量参数默认值^[9]。

2 结果与讨论

2.1 SBR工艺常规脱氮试验

4种HRT(厌氧/好氧时间分别为1.5/3.0、2.0/4.0、2.5/5.0、3.0/6.0 h)工况条件下,各稳定运行30 d,常规SBR工艺对污染物的去除效果见图1。可见,工艺对COD的去除效果较好,不同HRT下的去除率大部分可达95%以上。工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除效果随HRT延长而提高;当总HRT增加至9 h时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN浓度可分别降至1.5和11 mg/L以下,平均去除率可分别达95%和59%左右。试验中设定排水比为0.5,通过传统硝化反硝化脱氮可达到的最高理论脱氮效率约为50%;因此,受工艺运行特点的制约,总氮去除将成为影响常规SBR工艺除污效能的主要因素。

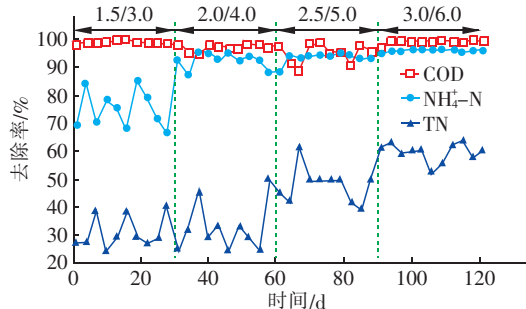


图1 不同HRT条件下常规SBR工艺的污染物去除率

Fig.1 Removal rates of pollutants of conventional SBR at different HRT

2.2 分步进水 SBR 工艺运行参数理论推导

依据 SBR 工艺常规脱氮试验结果,设定分步进水工艺总 HRT 为 9 h, A/O 时间比为 1 : 2, 开展主要运行参数的理论推导。

2.2.1 脱氮效率和分步数推导

假设,进水中氮均以凯氏氮形式存在,第 i 步进水中的氮在该步好氧硝化阶段被完全氧化为硝酸盐氮,且在后步(第 $i+1$ 步)缺氧反硝化阶段被进水所含有有机物完全还原为 N_2 而去除。设工艺分步数(A/O 交替运行次数)为 n ,各步进水水量比例系数为 r_i ,则有:

$$r_1 + r_2 + \cdots + r_i + \cdots + r_n = 1 \quad (1)$$

已知进水中的 COD 与总氮的比(C/N)为 ω ,反硝化阶段还原 1 g 的硝酸盐氮为 N_2 所消耗的 COD 为 ε (理论值为 2.86 g),那么可得:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_2}{r_3} = \cdots = \frac{r_{i-1}}{r_i} = \cdots = \frac{r_{n-1}}{r_n} = \frac{\omega}{\varepsilon} \quad (2)$$

进一步,第 i 步进水的 r_i 可表示为:

$$r_i = r_1 \left(\frac{\varepsilon}{\omega} \right)^{i-1} \quad (3)$$

同时,分步进水 SBR 工艺理论最大脱氮效率 η 仅与系统最后一步进水流量系数 r_n 和排水比 P 有关,可表示为:

$$\eta = 1 - P \cdot r_n \quad (4)$$

联立式(3)、(4),计算不同分步数和排水比条件下的理论脱氮效率,如图 2 所示。可见, P 越小、分步数越多,则脱氮效率越高。但 P 过低,系统的处理能力过小,没有实用价值。本研究中,依据相关设计规范和运行经验设定 P 为 0.5,则当分步数为 1、2、3 时,理论脱氮效率分别为 50%、82%、91%;若继续增加分步数,脱氮效率提高趋缓,但会使系统的流程控制过于复杂,实际应用意义不大。因此,选择

分步数为 3 开展后续试验。

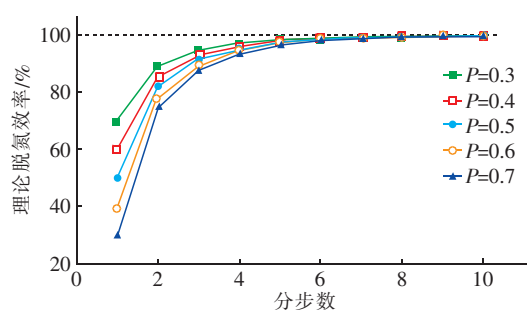


图 2 分步进水 SBR 工艺的理论脱氮效率

Fig. 2 Theoretical denitrification efficiency of step-feed SBR process

2.2.2 基于等负荷法的分步进水比和反应时间

基于分步数为 3,原污水 ω (C/N) 为 5,理论 ε 为 2.86 g,总进水量为 5 L,设各步进水体积分别为 V_1 、 V_2 和 V_3 ,结合式(2),可求得, $V_1 \approx 2.5$ L, $V_2 \approx 1.5$ L, $V_3 \approx 1$ L,即 3 步进水比为 5 : 3 : 2。

在此进水比的基础上,依据等污泥负荷流量分配法^[10],可确定每步进水缺氧段和好氧段反应时间分别为 17 (A1)、160 (O1)、105 (A2)、115 (O2)、58 (A3)、85 (O3) min。

2.3 分步进水 SBR 工艺脱氮试验

根据理论推导所得工艺参数,分步进水 SBR 工艺稳定运行 60 d 的主要污染物去除效能如图 3 所示。可见,系统对 COD 和 $NH_4^+ - N$ 有很好的去除效果,平均去除率分别达到 98% 和 96%,略高于常规工艺,表明 A/O 交替运行方式未影响工艺对有机物和氨氮的去除。系统对 TN 的平均去除率为 71%,显著优于常规 SBR 工艺,并与相关报道中连续流分段进水工艺的脱氮效率相近^[11];但低于理论去除率(91%),表明实际运行中存在着限制因素,使得缺氧段反硝化过程中未能实现完全脱氮。

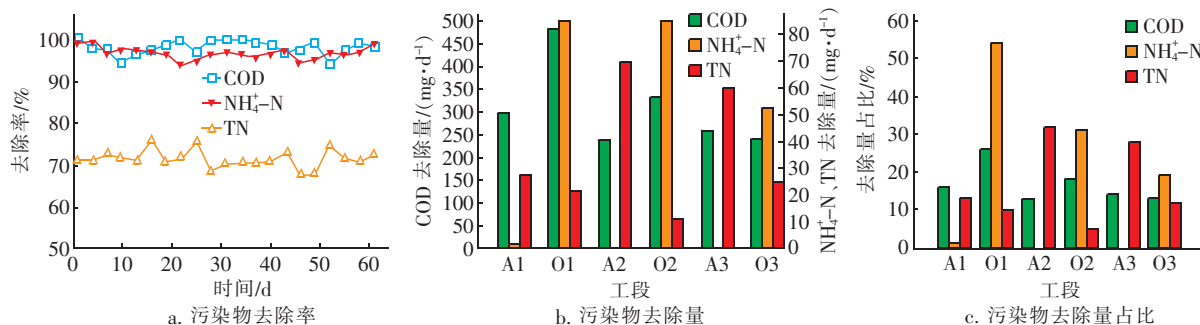


图 3 分步进水 SBR 工艺的污染物去除效能

Fig. 3 Pollutants removal efficiency of step-feed SBR process

系统各工段对 COD 均有显著的去除效果,表明分步进水有利于提高反硝化过程对内碳源的有效利用。系统对氨氮的去除主要集中在好氧段(约占总去除量的 99%),对总氮的去除主要集中在缺氧段(约占总去除量的 73%),与传统生物脱氮的基本原理相符^[7]。

值得注意的是,好氧段中的 COD 去除量仍高于缺氧段,这可能是因为缺氧段停留时间偏短,限制了微生物对有机物的完全降解。而好氧段则出现了一定幅度的氮亏(即氨氮的减少量大于硝酸盐氮的生成量),表现出对总氮的小幅去除(约占总去除量的 27%)。污水生物处理中,总氮主要可通过反硝化、同化和同步硝化反硝化(SND)等作用去除^[12]。由微生物经验组成式($C_5H_7NO_2$)可知,污泥中的氮所占质量比约为 12%^[13],再由系统污泥浓度和污泥龄,可估算得同化作用总氮去除量约为 45 mg/d,即占总氮去除量的 20%左右,显著小于好氧段总氮去除量;且同化作用在工艺全过程中均会发生,则可证明,好氧段中总氮损失并非全部由同化作用去除。由此可推断分步进水 SBR 反应器的好氧段中存在着同步硝化反硝化作用。张立秋等^[14]在序批式生物反应器的运行中也发现了这一现象。总体来看,通过延长缺氧段停留时间,提高缺氧反硝化段有机碳利用量,以及强化好氧段的同步硝化反硝化作用,可成为进一步提高系统脱氮效能的重要改进方向。

2.4 分步进水 SBR 工艺数学模拟

对试验所得运行数据,利用 STOAT 软件开展分步进水 SBR 工艺的数学模拟。并采用敏感度分析法对模型中的动力学参数进行修正,结果见表 2。

表 2 修正后的主要模型参数

Tab. 2 Main modified model parameters

项 目	模型默认值	修正值
异养菌最大生长速率 μ_H/d^{-1}	0.18	0.13
自养菌最大生长速率 μ_A/d^{-1}	0.028	0.03
异养菌半饱和系数 $K_s/(gCOD \cdot m^{-3})$	20	40
自养菌氧半饱和系数 $K_{O_A}/(gO_2 \cdot m^{-3})$	0.4	0.18
异养菌氧半饱和系数 $K_{O_H}/(gO_2 \cdot m^{-3})$	0.2	0.9
异养菌死亡系数 b_H/d^{-1}	0.014	0.01
自养菌死亡系数 b_A/d^{-1}	0.003 6	0.005
自养菌产率系数 $Y_A/(g \text{ 细胞 COD 产生} \cdot g^{-1}N)$	0.67	0.35
异养菌产率系数 $Y_H/(g \text{ 细胞 COD 产生} \cdot g^{-1}COD)$	0.24	0.2

模型修正前后,工艺过程的 TN 模拟值与实测值对比如图 4 所示。可见,出水 TN 绝对误差为 0.6 mg/L,相对误差为 6.9%,表明基于 STOAT 软件构建的修正后模型对分步进水 SBR 工艺生物脱氮过程有较好的模拟结果。

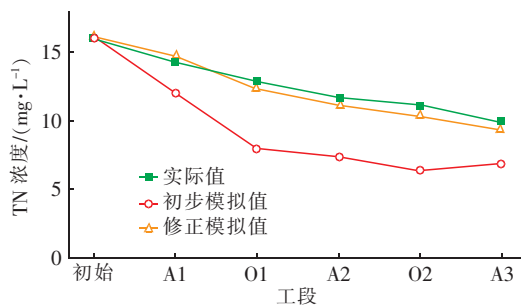


图 4 TN 初步模拟值、修正值及实测值的沿程变化

Fig. 4 Initial simulated value, modified value and measured value of TN along the process

2.5 基于数学模拟的分步进水 SBR 工艺优化

由上述可知,分步进水 SBR 工艺实际运行并未达到理论脱氮效果,且工艺过程中影响因素多、交互作用复杂^[15],难以通过运行试验获得最优工艺条件。因此,选取反应器总 HRT(因素 1)、流量分配比(因素 2)、A/O 运行时间比(因素 3)为主要影响因素,利用所建数学模型开展 3 因素 4 水平模拟正交试验[套用 $L_{16}(4^5)$ 正交表],进行分步进水 SBR 工艺条件优化。试验因素、水平见表 3,试验结果分析见表 4。

表 3 正交试验因素及水平

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	总 HRT/h	流量分配比	A/O 运行时间比
1	9	5 : 3 : 2	1 : 2
2	8	4 : 4 : 2	2 : 3
3	7	4 : 3 : 3	1 : 1
4	6	1 : 1 : 1	3 : 2

表 4 因素水平及效果分析

Tab. 4 Factor level and effect analysis

项目	列号		
	1	2	3
\bar{K}_1	8.36	9.21	10.3
\bar{K}_2	9.67	9.42	9.91
\bar{K}_3	9.70	9.61	9.14
\bar{K}_4	10.15	9.67	8.55
R	1.79	0.46	1.75

由试验结果可知,延长 HRT、减小最后一段进

水量和增大 A/O 运行时间比均有利于提高系统的脱氮效能;在试验设定的水平范围内,HRT 和 A/O 运行时间比对出水 TN 浓度影响较大。由此,确定优化后运行条件如下:HRT 为 9 h,流量分配比为 5:3:2,A/O 运行时间比为 3:2。

3 结论

① 延长停留时间可提高常规 SBR 工艺对氨氮和总氮的去除效果,但受工艺局限性的影响,总氮去除效率难以进一步提升。

② 由理论推导可知,排水比越小、分步数越多,则分步进水 SBR 工艺的脱氮效率越高;设定排水比为 0.5、分步数为 3、A/O 运行时间比为 1:2、总 HRT 为 9 h 时,利用等污泥负荷流量分配法可得理论最优流量分配比为 5:3:2,各步反应时间分别为 $t_{A1} = 17 \text{ min}$ 、 $t_{A2} = 105 \text{ min}$ 、 $t_{A3} = 58 \text{ min}$ 、 $t_{O1} = 160 \text{ min}$ 、 $t_{O2} = 115 \text{ min}$ 、 $t_{O3} = 85 \text{ min}$,理论最高脱氮率为 91%。

③ 试验运行结果表明,分步进水 SBR 工艺对 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有很好的去除效果,对 TN 的平均去除率为 71%,显著优于传统 SBR 工艺,但低于理论去除率;延长缺氧段停留时间,强化好氧段同步硝化反硝化作用,是提高系统脱氮效能的改进方向。

④ 基于 STOAT 软件构建的数学模型可较好地模拟分步进水 SBR 工艺生物脱氮过程。采用模型模拟的方法开展正交试验,确定了优化后运行条件:HRT 为 9 h,流量分配比为 5:3:2,A/O 运行时间比为 3:2。

参考文献:

- [1] 张静,陈洪斌. 低碳源污水的脱氮除磷技术研究进展[J]. 水处理技术,2014,40(1):1-6,15.
Zhang Jing, Chen Hongbin. Review on nitrogen and phosphorus removal technology for low C/N municipal wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(1):1-6, 15 (in Chinese).
- [2] Peng Y Z, Ge S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(11):6405-6413.
- [3] 陈强,王伟,彭永臻. 连续流分段进水工艺的研究进展与展望[J]. 中国给水排水,2016,32(12):20-25.
Chen Qiang, Wang Wei, Peng Yongzhen. Research progress and prospect of continuous step feed process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12):20-25 (in Chinese).
- [4] Cao G, Wang S, Peng Y, et al. Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater [J]. Bioresour Technol, 2013, 128:604-611.
- [5] Daigger G T, Parker D S. Enhancing nitrification in North American activated sludge plants [J]. Water Sci Technol, 2000, 41(9):97-105.
- [6] Ma B, Wang S, Cao S, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances [J]. Bioresour Technol, 2015, 200:981-990.
- [7] 高廷耀,顾国维,周琪. 水污染控制工程[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2015.
Gao Tingyao, Gu Guowei, Zhou Qi. Water Pollution Control Project [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2015 (in Chinese).
- [8] Li H, Zhang Y, Yang M, et al. Effects of hydraulic retention time on nitrification activities and population dynamics of a conventional activated sludge system [J]. Front Environ Sci Eng, 2013, 7(1):43-48.
- [9] Bordeleau étienne L, Droste R L. Municipal wastewater treatment plant model with sludge pretreatment incorporation for design and feasibility determinations [J]. Proc Water Environ Fed, 2010, 2(12):4788-4814.
- [10] 王伟,王淑莹,孙亚男,等. 分段进水 A/O 工艺流量分配专家系统的建立与应用[J]. 化工学报,2008,59(10):2608-2615.
Wang Wei, Wang Shuying, Sun Yanan, et al. Establishment and application of influent flow distribution expert system in step-feed A/O process [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(10):2608-2615 (in Chinese).
- [11] 王伟,彭永臻,殷芳芳,等. 改进分段进水 A/O 生物脱氮工艺强化生物除磷[J]. 环境科学,2009,30(10):2968-2974.
Wang Wei, Peng Yongzhen, Yin Fangfang, et al. Modified step-feed A/O biological nitrogen removal process for enhanced phosphorus removal [J]. Environmental Science, 2009, 30(10):2968-2974 (in Chinese).
- [12] 李志华,秋亮,吴晓婷,等. MAAO 工艺处理低碳氮比污水时流量的优化控制[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2019,51(2):288-293,300.

(下转第 107 页)