

短程硝化曝气生物滤池效果分析与运行参数优化

杜亚峰¹, 李 军¹, 卞 伟¹, 赵 珊², 郝书峰²

(1. 北京工业大学建筑工程学院 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124;

2. 北京城市排水集团有限责任公司 科技研发中心, 北京 100022)

摘 要: 为改善短程硝化曝气生物滤池(BAF)的运行效果,通过单因素试验确定了最佳温度、pH 值和溶解氧(DO)浓度,并在此基础上采用响应面分析法中 Box - Behnken 中心组合设计进行了运行参数优化试验与回归模型分析。试验结果表明,短程硝化 BAF 最佳运行条件如下:温度为 30 ℃、pH 值为 8.5、DO 为 2.0 mg/L;基于响应面分析法优化短程硝化 BAF 运行参数得到的最优模型如下:温度为 28.3 ℃、pH 值为 8.1、DO 为 2.15 mg/L,在此条件下对氨氮的去除率达到 92.15%,亚硝酸盐氮积累率为 92.65%。响应面试验回归模型的分析结果显示,该模型具有较高的显著性($P < 0.0001$),pH 值和 DO 对氨氮去除率的影响显著,且交互作用明显;温度、pH 值和 DO 对亚硝酸盐氮积累率的影响显著,且 pH 值和 DO、温度和 pH 值交互作用明显。

关键词: 短程硝化; 曝气生物滤池; 单因素试验; 响应面分析法; 运行参数优化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0099-06

Performance Analysis and Operational Parameter Optimization of a Shortcut Nitrification Biological Aerated Filter

DU Ya-feng¹, LI Jun¹, BIAN Wei¹, ZHAO Shan², HAO Shu-feng²

(1. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Treatment and Resource Utilization Technology, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Research and Development Center, Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: Single factor experiments were used to determine the optimum temperature, pH value and dissolved oxygen (DO) of a shortcut nitrification biological aerated filter (BAF) to improve its operational performance. On this basis, the Box-Behnken central combination design in response surface methodology was used to carry out the operational parameter optimization test and regression model analysis. The results showed that the optimum operational conditions of the BAF were as follows: temperature of 30 ℃, pH value of 8.5 and DO of 2.0 mg/L. Based on the response surface methodology, the obtained optimal operational parameters were as follows: temperature of 28.3 ℃, pH value of 8.1 and DO of 2.15 mg/L. Under this condition, the ammonia nitrogen removal rate reached 92.15%, and nitrite nitrogen accumulation rate was 92.65%. Regression model analysis of response surface experiments indicated that the model had high significance ($P < 0.0001$). pH value and DO had significant influence on ammonia nitrogen removal rate, and the interaction was obvious. In addition, pH

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202-013)

通信作者: 李军 E-mail: jglijun@bjut.edu.cn

value, DO and temperature affected the nitrite nitrogen accumulation rate significantly, and the interaction between pH value and DO, temperature and pH value was obvious.

Key words: shortcut nitrification; BAF; single factor experiment; response surface methodology; optimization of operational parameter

随着对污水处理研究的深入,新型处理工艺快速发展,其中以基于短程硝化 SHARON 工艺等为代表^[1]。为维持工艺的稳定运行,需要生成充足的硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,从而为后期的反硝化反应提供足够的电子受体。相比于全程硝化,短程硝化是将硝化反应控制在亚硝化阶段,可节约 25% 的曝气能耗,并可缩短工艺流程,减少投资与运行费用,但就如何实现短程硝化的稳定运行是当前污水生物脱氮领域的研究热点^[2]。

曝气生物滤池(BAF)是一种新型的生物膜反应器,其整合截留悬浮物和生物氧化于一体,具有占地面积小、出水水质好、运行灵活方便、易于管理、投资省等一系列优点^[3]。与活性污泥法相比,生物膜法的生物量较高,生物相多样化,并耐冲击负荷^[4]。由于短程硝化工艺中好氧氨氧化菌(AOB)世代周期较长^[5-7],若将生物膜技术引入短程硝化工艺中,可以保证 AOB 的有效停留,并且可通过调整游离氨浓度、反应温度、DO 浓度以及 pH 值等参数^[8]抑制亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)的增殖,从而实现亚硝酸盐氮的积累。

笔者以 BAF 为基础,探讨了温度、pH 值和 DO 浓度对短程硝化工艺运行效果的影响,并在单因素试验中以氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率作为评价指标,确定了最佳温度、pH 值和 DO 浓度,然后通过响应面法优化了短程硝化曝气生物滤池的参数并进行了回归模型分析,旨在为短程硝化曝气生物滤池的设计及工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

BAF 试验装置如图 1 所示。曝气生物滤池由有机玻璃加工而成,呈柱状结构,滤池直径为 0.2 m,高度为 2.2 m,滤层高度为 1.1 m,出水口的高度为 2.0 m,填装粒径为 5~8 mm 的竹炭。该试验装置采用上向流,底部曝气,试验用水经由水泵进入水箱,水箱底部与滤柱顶部出水口齐平。原水通过重力自流进入滤柱,通过水箱上的磁翻板液位计记录滤柱的水头损失,并将水头损失的变化作为滤柱反

冲洗的依据。

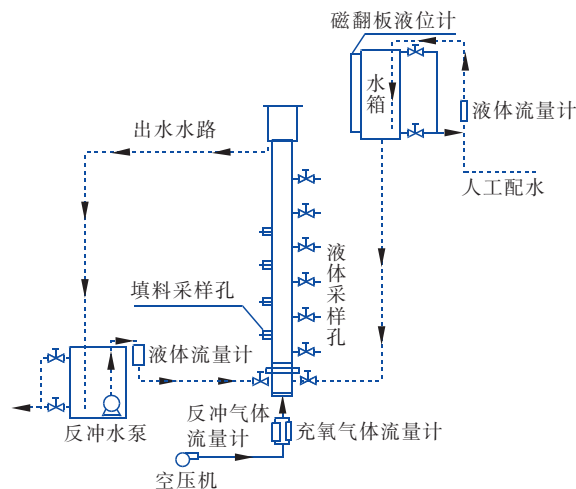


图 1 BAF 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of BAF device

1.2 试验用水

试验用水为人工配水,其中以乙酸钠作为碳源,配制的 COD 浓度为 60~70 mg/L,由氯化铵提供的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 40~45 mg/L,总磷由磷酸二氢钠提供。采用 NaOH 或 H_2SO_4 调节 pH 值。

1.3 试验装置的启动

曝气生物滤池以二沉池回流污泥作为种泥进行接种挂膜,具体方法:将回流污泥注入 BAF 滤柱至刚好浸没滤料,加入试验用水进行闷曝,连续闷曝 1 周后改成连续进水。进水采用人工配制的试验用水,控制温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,pH 值为 8 ± 0.5 ,DO 浓度为 $(2 \pm 0.5) \text{ mg/L}$ 。装置运行期间,监测进、出水中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化。运行 23 d 后,滤料表面的颜色由灰白色慢慢转变为浅黄色,运行 38 d 后对 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别达到 81% 和 85%,亚硝酸盐氮积累率达到 85%,出水水质稳定,装置启动成功。

1.4 分析项目及方法

COD 采用快速测定法进行测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂光度法测定,亚硝酸盐氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定,硝酸盐氮采用酚二磺酸光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 温度对短程硝化的影响

在进水流量为 10.5 L/h、pH 值为 8、DO 浓度为 2.0 mg/L 条件下,考察温度对短程硝化的影响。当温度由 15 °C 逐渐升高到 30 °C 过程中,对氨氮的平均去除率由 73.49% 增加到 89.41%,且在 30 °C 时其最高去除率可达到 93.23%。但当温度升高到 35 °C 时,对氨氮的平均去除率下降到 88.79%,这是由于过高的温度导致了微生物酶的活性降低,从而使反应速率下降。可见,温度过高或者过低对去除氨氮的效果都有一定的影响,在 15 ~ 30 °C 范围内,可以通过提高温度的方式实现更高的氨氮去除率。当温度由 15 °C 升高到 30 °C 过程中,平均出水亚硝酸盐氮浓度由 19.22 mg/L 增加到 33.39 mg/L,而平均出水硝酸盐氮浓度则由 12.62 mg/L 下降至 2.89 mg/L (见图 2)。可见,温度对 AOB 和 NOB 的比增长速率具有不同的影响,可以判断出此时 AOB 的活性高于 NOB,即 AOB 处于优势地位。且在 30 °C 条件下,亚硝酸盐氮积累率最大。综上所述,通过对温度的控制,可以有效去除氨氮,并且亚硝酸盐氮也有较高的积累,且短程硝化曝气生物滤池反应温度控制在 30 °C 为宜。

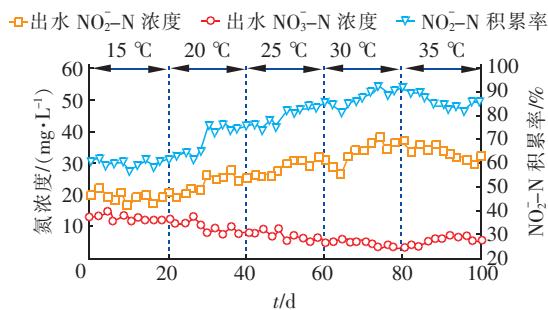


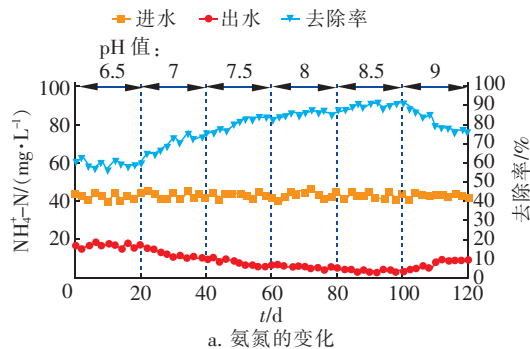
图2 温度对出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的影响

Fig. 2 Effect of temperature on $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations

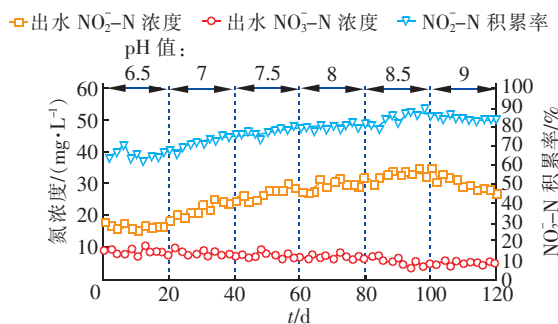
2.2 pH 值对短程硝化的影响

在进水流量为 10.5 L/h、DO 浓度为 2.0 mg/L、温度为 30 °C 条件下,考察 pH 值对短程硝化的影响,结果如图 3 所示。由图 3 (a) 可以看出,当进水 pH 值为 8 时,对氨氮的平均去除率达到了 87.61%,平均出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 5.33 mg/L;当 pH 值为 8.5 时,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率最高,可达到 90.95%,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 3.8 mg/L。由图 3 (b) 可知,当 pH 值 ≥ 7 时,BAF 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度

开始增高,当 pH 值为 7.5 ~ 8 时,亚硝酸盐氮平均积累率达到了 79.33%;当 pH 值为 8.5 时,平均积累率进一步提高至 85.29%,且最高积累率可达到 89.19%;而 pH 值为 9 时,亚硝酸盐氮平均积累率降至 84.93%。



a. 氨氮的变化



b. 硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的变化

图3 pH 值对短程硝化的影响

Fig. 3 Effect of pH value on shortcut nitrification

通过控制 pH 值可以提高氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率,且当 pH 值为 8.5 时,氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率均达到最大。就 NOB 的生长环境而言,NOB 的最适 pH 值一般为 6.0 ~ 7.5, AOB 的最适 pH 值一般为 7.0 ~ 8.5。从硝化细菌的活性角度来看,当 pH 值为 7.4 ~ 8.3 时, AOB 的活性较高,在 pH 值为 8 时,亚硝酸盐氮的生成速率达到最大;而在 pH 值为 7 左右时, NOB 有较高的活性,硝酸盐氮的生成速率也较大,因此在高 pH 值条件下, AOB 的活性高于 NOB,成为优势菌种,从而导致了硝化反应器中亚硝酸盐氮的稳定积累^[9-10]。

2.3 DO 对短程硝化的影响

在进水流量为 10.5 L/h、温度为 30 °C、pH 值为 8.5 条件下,考察 DO 浓度对短程硝化的影响,结果如图 4 所示。可以看出,当 DO 为 0.5 mg/L 时,出水氨氮浓度较高,说明低溶解氧只能将部分氨氮氧化成亚硝酸盐氮,并限制亚硝酸盐氮向硝酸盐氮的

进一步转化^[11],而且反应器内存在亚硝酸盐氮的积累。当 DO > 2.0 mg/L 时, NOB 得到了充足的溶解氧供给,使反应向着生成硝酸盐氮的方向进行,尽管氨氮去除率可稳定在 90% 以上,但亚硝酸盐氮积累率下降趋势明显。当 DO 由 2.0 mg/L 提高到 3.0 mg/L 时,平均亚硝酸盐氮积累率由 84.63% 下降至 74.22%。为了保证较高的氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率,本试验的溶解氧应控制在 2.0 mg/L,此时对氨氮的去除率最高为 90.11%,亚硝酸盐氮积累率最高为 86.42%。由于生物膜与污泥的传质性能不同,生物膜的需氧量因传质阻力增加而增大,相比于纯污泥系统,该反应中的需氧量较高。

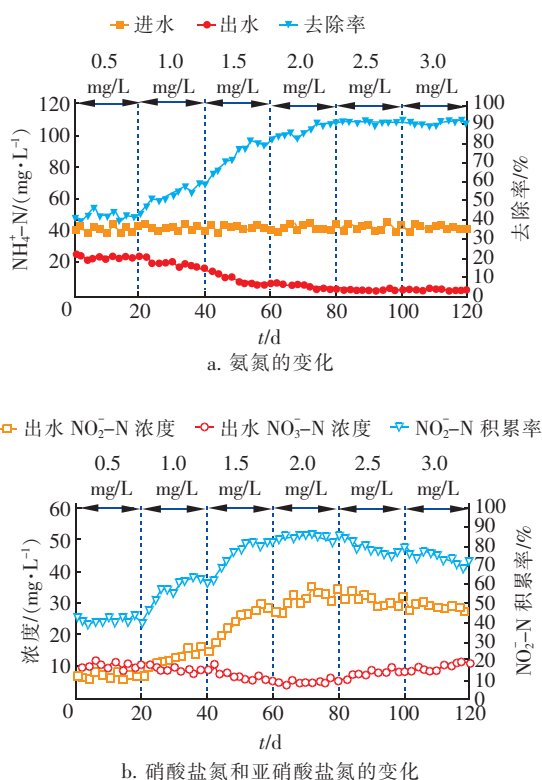


图4 DO对短程硝化的影响

Fig. 4 Effect of DO on shortcut nitrification

2.4 响应面试验结果及模型分析

在上述单因素试验的基础上,以温度(X_1)、pH值(X_2)和DO(X_3)作为自变量,氨氮去除率(Y_1)和亚硝酸盐氮积累率(Y_2)作为响应值,采用响应面Box-Behnken中心组合试验进行短程硝化曝气生物滤池的优化。表1为试验的因素与水平组合及响应值。使用响应面软件Design Expert 8.0.6对表1中的数据进行多元回归分析,得到氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率的回归方程,见式(1)、(2)。两个

方程的相关系数 R^2 均为0.9988,表明回归模型与实际情况拟合性良好,可以用于短程硝化曝气生物滤池运行条件的优化试验。

表1 试验的因素与水平组合及响应值

Tab. 1 Factors and levels test and response values

试验编号	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2	$X_3/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	25	7.75	1.75	85.0	87.00
2	15	6.50	1.75	60.0	45.00
3	15	7.75	0.50	33.0	26.40
4	25	6.50	3.00	57.0	38.90
5	15	9.00	1.75	67.0	55.50
6	25	7.75	1.75	85.0	87.00
7	25	9.00	3.00	73.7	60.00
8	35	9.00	1.75	73.6	75.90
9	35	7.75	0.50	37.0	37.00
10	35	6.50	1.75	62.0	49.98
11	35	7.75	3.00	81.0	64.40
12	25	7.75	1.75	85.0	87.00
13	25	9.00	0.50	28.0	30.00
14	15	7.75	3.00	75.0	46.00
15	25	6.50	0.50	25.0	22.90

$$Y_1 = -579.6794 + 1.64325X_1 + 146.122X_2 + 52.394X_3 + 0.092X_1X_2 + 0.04X_1X_3 + 2.19X_2X_3 - 0.043875X_1^2 - 9.576X_2^2 - 15.432X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = -728.26507 + 4.2429X_1 + 172.9208X_2 + 57.6984X_3 + 0.3084X_1X_2 + 0.156X_1X_3 + 2.24X_2X_3 - 0.12452X_1^2 - 11.4896X_2^2 - 19.9024X_3^2 \quad (2)$$

表2为响应面试验回归模型方差分析,可知模型(Y_1 和 Y_2)具有较高的显著性($P < 0.0001$)。方程(1)的一次项中 X_2 和 X_3 极显著、 X_1 显著,说明pH值和DO对氨氮的去除率影响最大,温度影响次之;交互项中 X_2X_3 显著,说明pH值和DO交互作用对氨氮的去除率有较大影响;二次项中 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 影响非常显著,说明试验因素的二次项对响应值具有较大影响,不仅仅是简单的线性关系。由 P 值的大小可知,在所选各因素水平范围内,对氨氮的去除率而言,pH值和DO的影响程度较大,温度次之。

由表2还可以看出,方程(2)的一次项中 X_1 、 X_2 和 X_3 极显著,说明温度、pH值和DO对亚硝酸盐氮积累率均有较大影响;交互项中 X_1X_2 和 X_2X_3 显著,说明温度和pH值的交互作用、pH值和DO的交互

作用对亚硝酸盐氮积累率影响较大;二次项中 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 影响极显著,说明二次项对亚硝酸盐氮积累率具有较大影响,并不仅仅是简单的线性关系。可见,在所选因素水平范围内,温度、DO 和 pH 值对亚硝酸盐氮积累率均有较大影响。

表 2 响应面回归模型方差分析

Tab.2 Variance analysis of response surface regression model

项目	F 值		P 值	
	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
模型	636.57	667.69	<0.000 1	<0.000 1
X_1	33.61	253.45	0.000 7	<0.000 1
X_2	142.50	357.89	<0.000 1	<0.000 1
X_3	2 603.16	741.29	<0.000 1	<0.000 1
X_1X_2	4.11	40.76	0.082 2	0.000 4
X_1X_3	0.78	10.43	0.407 3	0.014 5
X_2X_3	36.46	33.60	0.000 5	0.000 7
X_1^2	62.99	447.67	<0.000 1	<0.000 1
X_2^2	732.55	930.46	<0.000 1	<0.000 1
X_3^2	1 902.46	2 791.89	<0.000 1	<0.000 1

注: $P < 0.05$, 差异显著; $P < 0.000 1$, 差异极显著。

根据得到的二次回归方程及回归模型方差分析结果,作温度、pH 值、DO 与氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率的响应面图,结果如图 5 所示。

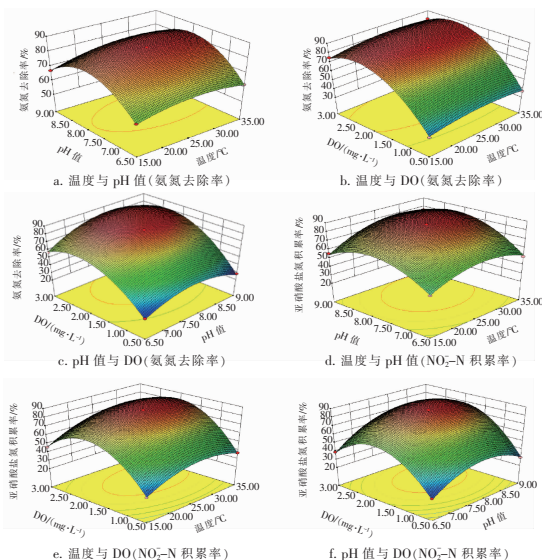


图 5 温度、pH 值和 DO 与氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率的响应分析

Fig.5 Response analysis of temperature, pH value and DO to removal rate of ammonia nitrogen and accumulation rate of nitrite nitrogen

由图 5(a) 可以看出,当温度一定时,氨氮去除率随 pH 值的增加而先增大后减小,但由等高线可

以看出,温度与 pH 值的交互作用不明显;由图 5(b) 可知,当 DO 一定时,氨氮去除率随温度的增加而先增大后减小,但变化不显著;由图 5(c) 可知,当 pH 值一定时,随着 DO 的增加,氨氮去除率随之增加,DO 对氨氮去除率影响显著,且 pH 值与 DO 交互作用显著;由图 5(d) 可知,当温度一定时,亚硝酸盐氮积累率随 pH 值的增加而先增大后减小,pH 值对亚硝酸盐氮积累率影响显著,且温度与 pH 值交互作用明显;由图 5(e) 可知,当 DO 一定时,亚硝酸盐氮积累率随温度的增高而先增大后减小;由图 5(f) 可知,当 pH 值一定时,亚硝酸盐氮积累率随 DO 的增加而先增大后减小,DO 对亚硝酸盐氮积累率影响显著,且 pH 值与 DO 交互作用显著。上述变化均与单因素试验中的相关结论一致,根据建立的数学模型进行参数优化分析,得到模型优化条件如下:温度为 28.3 ℃、pH 值为 8.1、DO 为 2.15 mg/L,此时氨氮去除率达到 93%,亚硝酸盐氮积累率达到 94%。

2.5 响应面最优条件验证试验

表 3 为响应面优化前后的试验结果。编号 1、2 为优化后的平行试验,编号 3、4 为优化前的平行试验,以两组平行试验的均值进行比较。可以看出,优化后温度和 pH 值均降低,在节约成本的基础上依然能够保证处理效果,且试验结果接近理论值。可见,采用响应面分析法优化得到的短程硝化曝气生物滤池的反应条件准确可靠,具有实用价值。

表 3 响应面优化前后的试验结果

Tab.3 Test results before and after response surface methodology optimization

试验编号	$T/^\circ\text{C}$	pH 值	DO/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	28.3	8.1	2.15	92.5	93.3
2	28.3	8.1	2.15	91.8	92.0
3	30.0	8.5	2.00	90.2	90.5
4	30.0	8.5	2.00	89.6	90.0

3 结论

① 通过单因素试验,确定了最优反应条件,其中温度为 30 ℃、pH 值为 8.5、DO 浓度为 2.0 mg/L,此时氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率最高,验证试验中分别为 89.9% 和 90.25%。

② 响应面分析法得到的短程硝化曝气生物滤池运行参数准确可靠,优化后的模型组合条件如下:温度为 28.3 ℃、pH 值为 8.1、DO 值为 2.15 mg/L,

此条件下氨氮去除率为92.15%,亚硝酸盐氮积累率为92.65%。相比于单因素试验,氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率均提高了3%左右,且反应温度和pH值均降低,节约了成本,提高了效率。

③ pH值和DO对氨氮去除率的影响显著性均大于温度,温度、pH值和DO对亚硝酸盐氮积累率的影响均显著,且pH值和DO对氨氮去除率的交互作用明显,pH值和DO、温度和pH值对亚硝酸盐氮积累率的交互作用明显。

参考文献:

- [1] van Dongen U, Jetten M S, van Loosdrecht M C. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. *Water Sci Technol*, 2001, 44(1): 153 - 160.
- [2] 彭赵旭, 彭永臻, 左金龙. 全程硝化与短程硝化的特性对比研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(23): 6 - 10, 15.
Peng Zhaoxu, Peng Yongzhen, Zuo Jinlong. Comparison of characteristics of complete nitrification and shortcut nitrification[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(23): 6 - 10, 15 (in Chinese).
- [3] 李占, 李冬, 陶晓晓, 等. 序批式生物膜反应器常温亚硝化启动试验研究[J]. *现代化工*, 2010, 30(10): 69 - 73.
Li Zhan, Li Dong, Tao Xiaoxiao, *et al.* Start-up experiment of shortcut nitrification in sequencing batch biofilm reactor under room temperature [J]. *Modern Chemical Industry*, 2010, 30(10): 69 - 73 (in Chinese).
- [4] 焦阳, 李军, 朱向东, 等. BAF深度处理二沉池出水的抗冲击能力研究[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(3): 103 - 105.
Jiao Yang, Li Jun, Zhu Xiangdong, *et al.* Impact resistance of BAF for advanced treatment of secondary effluent[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(3): 103 - 105 (in Chinese).
- [5] 张磊, 刘平, 马锦, 等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(6): 2277 - 2282.
Zhang Lei, Liu Ping, Ma Jin, *et al.* Wastewater treatment using a microbubble aerated biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2277 - 2282 (in Chinese).
- [6] 徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 等. PCR-DGGE技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3257 - 3263.
- Xu Ying, Qiu Tianlei, Han Meilin, *et al.* Analysis on microbial community in biofilm coating onto solid carbon source using the PCR-DGGE technique [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8): 3257 - 3263 (in Chinese).
- [7] 梅瑜, 成卓韦, 王家德, 等. 新型生物滴滤填料性能评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(12): 4661 - 4668.
Mei Yu, Cheng Zhuowei, Wang Jiade, *et al.* Performance evaluation of three novel biotrickling packings [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(12): 4661 - 4668 (in Chinese).
- [8] Brockmann D, Morgenroth E. Evaluating operating conditions for outcompeting nitrite oxidizers and maintaining partial nitrification in biofilm systems using biofilm modeling and Monte Carlo filtering[J]. *Water Res*, 2010, 44(6): 1995 - 2009.
- [9] Biswas R, Bagchi S, Bihariya P, *et al.* Stability and microbial community structure of a partial nitrifying fixed-film bioreactor in long run[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(3): 2487 - 2494.
- [10] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(1): 335 - 342.
- [11] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 200: 981 - 990.



作者简介: 杜亚峰(1991 -), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理理论与技术。

E-mail: yafengdu@126.com

收稿日期: 2018-08-12