

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.005

SBBR 反应器 SND 脱氮的影响因素分析及响应曲面优化

蔡健明^{a,b}, 操家顺^{a,b,c}, 周碧波^a

(河海大学 a.环境学院; b.水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心;

c.浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要:采用活性炭涂层改性悬浮填料,在连续曝气的条件下,考察了 SBBR 反应器脱氮性能。结果表明,SBBR 反应器表现出良好的同步硝化反硝化(SND)脱氮性能,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别为 80.7%和 63.1%。典型周期内反应器同步硝化反硝化率可达 82.7%。单因素试验发现,脱氮率随着曝气时间 t 的增加而增加,随着溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 和填料投加量 δ 增大而先增大后减小。同时,以溶解氧质量浓度、填料投加量和曝气时间为考察因素,脱氮率为评价指标,采用响应曲面法建立了二次多元回归模型。通过模型求解得出最佳工况:溶解氧浓度为 2.37 mg/L,填料投加量为 40.10%,曝气时间为 5.17 h,此时,脱氮率得到最大值为 69.28%。验证试验表明,回归模型的预测值与实测值偏差率为 1.57%。

关键词: SBBR; 同步硝化反硝化(SND); 脱氮率; 响应曲面法

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)02-034-08

Analysis on influencing factors of nitrogen removal via SND and optimization by RSM in SBBR

CAI Jianming^{a,b}, CAO Jiashun^{a,b,c}, ZHOU Bibo^a

(a. College of Environment; b. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient

Utilization and Engineering Safety; c. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: Nitrogen removal performance of SBBR reactor was investigated under the condition of continuous aeration with suspended packing by activated carbon coating modification. The results indicate that SBBR presents a good simultaneous nitrification and denitrification (SND) performance with the removal rates of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN at 80.7% and 63.1% respectively. During a typical cycle, SND rate can reach 72.8%. Single factor experiments show that nitrogen removal rate increases as the increase of aeration time and it increases first and then decreases as the increase of dissolved oxygen concentration and packing dosing quantity. Secondary multivariate regression model is established with using response surface methodology and taking dissolved oxygen concentration, packing dosing quantity and aeration time as inspective factors and nitrogen removal rate as evaluation index. 69.28% nitrogen removal rate as the maximum value is obtained under optimal working conditions according to the model calculation as follows: dissolved oxygen concentration of 2.37 mg/L, packing dosing quantity of 40.10%, aeration time of

收稿日期: 2015-07-09

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX07101-003, 2011ZX07301-002); 江苏省科研课题(BA2012055)。

Supported by National Science and Technology Major Special (2011ZX07101-003, 2011ZX07301-002) and Scientific Research Project of Jiangsu Province, China (BA2012055).

作者简介: 蔡健明(1983-), 男, 河海大学博士生, 工程师, 主要从事水处理技术研究与应用方面的工作, (E-mail)caihhu@126.com。

5.17 h. Verification test show that the deviation rate between predicted values and measured values is 1.57%.

Keywords: sequencing biofilm batch reactor(SBBR); simultaneous nitrification and denitrification(SND); nitrogen removal rate; response surface methodology(RSM)

SBBR 是序批式生物膜反应器 (sequencing biofilm batch reactor) 的简称, 又称膜法 SBR^[1-3]。SBBR 是目前国内外正在研究、应用的一种污水生物处理工艺。与 SBR 反应器相比, SBBR 投加了生物填料。填料的投加为微生物的生长提供了更为有利的生境条件。填料表层依附的生物膜纵向梯度上所形成的氧梯度的渐减变化, 使得多种形态的微生物能够共生于池中。同时, 填料的投入能够有效提高池内污泥质量浓度, 从而增强了反应器的处理能力和稳定性。SBBR 工艺的研究应用最早主要集中在工业废水处理^[4-5], 但是随着其研究技术的深入和发展, 其应用也扩展到生活污水和难降解的有机废水处理中^[6-8]。研究表明, 通过投加塑料鲍尔环填料^[9]、组合纤维填料^[10]和悬浮球型串状填料^[11]等悬浮填料, 均可实现同步硝化反硝化 (simultaneous nitrification and denitrification, SND)。

响应曲面法 (response surface methodology, RSM) 是一种优化生物过程的统计学试验设计。采用该法建立连续变量曲面模型, 能够对影响生物过程的因子及其交互作用进行评价, 确定最佳水平范围, 而且所需要的试验组数相对较少, 可节省人力物力, 因此, 该方法已经成功应用于各种各样的生化过程优化中^[12-13], 但用于优化 SBBR 反应器 SND 脱氮性能的研究尚未见文献报道。本研究拟采用一种新型的活性炭改性悬浮填料, 以 SBBR 反应器为研究对象, 考察了 SND 脱氮的可行性。同时针对影响 SND 脱氮性能的溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 、填料投加量 δ 和曝气时间 t 等显著因素进行了研究。在单因素试验的基础上, 利用响应曲面法对这 3 个因素进行正交分析, 通过 Design Expert 软件建立了二次多项回归方程, 确定了 SBBR 反应器 SND 脱氮的最佳工况, 旨在为该技术的进一步研究和实际应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

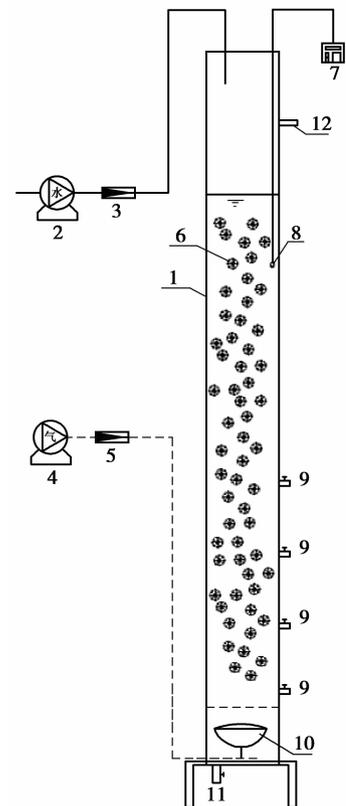
SBBR 反应器采用圆柱形有机玻璃材料制作 (图 1), 有效容积为 50 L。反应器直径为 200 mm, 有效水深为 1 600 mm, 底部有微孔曝气盘接空气泵鼓风曝气, 内装有悬浮填料供生物挂膜。悬浮填料呈球状, 直径为 30 mm, 整体由 10 个直径为 30 mm 的半环形薄片和空心填料核组成。填料材质为添加了抗氧化剂和防腐剂的聚乙烯。填料表面采用活性炭改性涂层处理, 涂层厚度为 1~2 mm。与传统悬浮填料相比, 比表面积增大为 $420 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 比重约为 0.925。根据相关研究报告和经验, 确定填料投加量 $\leq 50\%$ ^[14-16]。反应器运行周期为: 进水 (15 min) — 曝气 (240 min) — 沉淀 (60 min) — 出水 (15 min)。出水口位置根据实际运行情况调整。试验均在常温下进行, 平均温度为 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 试验用水

原水取自某公司宿舍楼化粪池, 进水水质指标为: COD 为 223~354 mg/L, BOD₅ 为 92~139 mg/L, TN 为 35.2~44.6 mg/L, NH₃-N 为 27.7~34.2 mg/L, pH 为 6.8~7.6。水质相对较稳定, 进水 BOD₅/COD 比为 0.38~0.47, COD/TN 比为 6~8。

1.3 挂膜与驯化

SBBR 反应器启动的接种污泥取自前期已稳定实现 SND 的 A²O 工艺剩余污泥。将污泥加入反应器, 逐渐增大进水负荷, 5 d 后即见填料表层有黄褐色生物膜, 15 d 后镜检能观察到菌胶团、丝状菌、累枝虫、轮虫等, 出水 NH₃-N、TN 和 COD 去除率分别能够达到 70%、50% 和 70% 以上, 表明启动成功。



1.SBBR 反应器; 2.进水泵;
3.进水流量计; 4.空气泵;
5.空气流量计; 6.改性悬浮填料;
7.溶解氧检测仪; 8.溶解氧探头;
9.出水/取样口; 10.微孔曝气盘;
11.放空/排泥口; 12.溢流口

图 1 SBBR 试验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental equipment for SBBR

1.4 分析项目与方法

TN、NH₃-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 等测定均采用国家规定的标准方法^[17]。COD 采用 HACH 公司的消解比色法。DO 采用 HACH 在线监测仪测定。

1.5 响应曲面法试验设计

根据 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理,综合单因素试验结果,选择单因素试验中对响应值有显著影响的因素作为自变量,每一自变量的低、中、高试验水平分别以 -1、0、1 进行编码。利用统计软件 Design Expert 8.0 对试验数据进行回归分析,获得二次多元回归模型。该模型通过最小二乘法拟合二次多项方程

$$R = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

式中: R 为响应值; x_i 、 x_j ($i \neq j$) 为自变量编码值; a_0 、 a_i 、 a_j 和 a_{ij} ($i \neq j$) 为常数项。采用 Minitab 16 对模型进行方差分析,用模型对 SBBR 反应器脱氮率进行分析和预测,得出最佳的工况运行条件。

1.6 同步硝化反硝化率(SND%)计算

SND 率的计算方法为^[18]

$$\text{SND}(\%) = \left(1 - \frac{\text{NO}_x^- - \text{N}_{\text{produced}}}{\text{NH}_3 - \text{N}_{\text{removal}}}\right) \times 100, \quad (2)$$

式中: $\text{NH}_3 - \text{N}_{\text{removal}}$ 通过反应器进、出水中氨氮变化量与同化和细胞衰减共同作用的氨氮变化量的差值; $\text{NO}_x^- - \text{N}_{\text{produced}}$ 是反应器出水与进水硝态氮的差值。

2 结果与讨论

2.1 反应器脱氮效能分析

2.1.1 污染物迁移转化规律分析

在填料投加量为 35%,溶解氧质量浓度为 2 mg/L,曝气时间为 4 h 的条件下,考察了不同进水质量浓度条件下,系统脱氮性能(图 2)。结果表明,在硝化反应去除氨氮的同时,有明显的反硝化反应同步发生,使得硝化产物硝态氮进一步转化为氮气逸出。反应器有良好的同步硝化反硝化脱氮性能。对 NH₃-N 和 TN 的平均去除率分别可达 80.7% 和 63.1%,出水 TN 平均质量浓度为 14.8 mg/L。同时,对典型周期内有机物和氮的随时间的变化情况进行了分析(图 3)。由图 3 可知,随着反应的进行,硝态氮浓度缓慢上升,表明与硝化反应相比,反硝化速率有所减缓,这与水中碳源降低有关。至 6 h 时, NH₃-N、TN 和 COD 的去除率分别达到 87.3%、67.3% 和 83.5%。计算发现,系统同步硝化反硝化率(SND%)高达 72.8%。为了进一步考察 SND 脱氮性能,对影响反应器的几个关键因素进行了逐一分析。

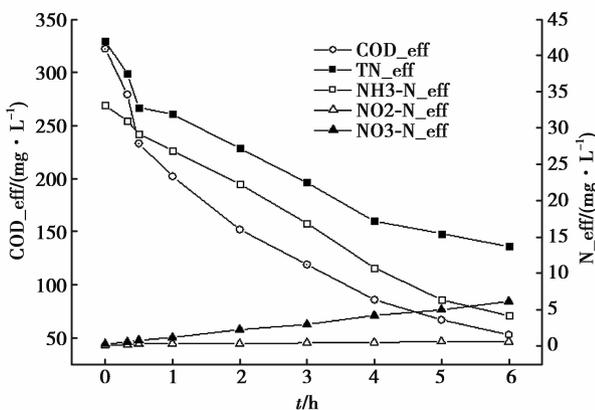


图 2 SBBR 反应器稳定运行期氨氮和总氮的变化情况
Fig.2 Variations of NH₃-N and TN during a stable cycle in SBBR reactor

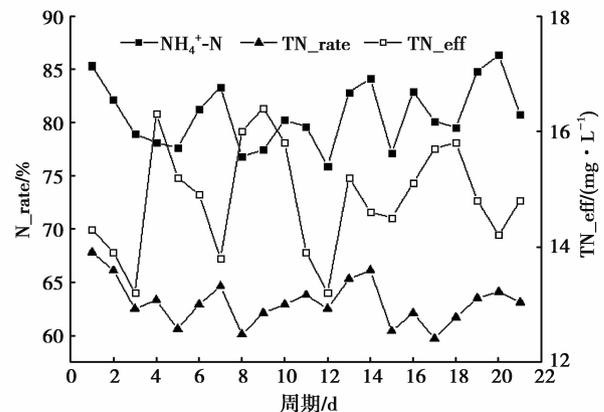


图 3 SBBR 反应器典型周期内有机物和氮的变化情况
Fig.3 Variations of COD and nitrogen during a typical cycle in SBBR reactor

2.1.2 曝气时间对脱氮性能的影响

控制溶解氧浓度为 2.0 mg/L,填料投加量为 35%,分别选取了污染物浓度处于试验期间高、中、低水平条件下的典型周期作为考察对象,考察了不同曝气时间 t 条件下,SBBR 反应器脱氮性能(图 4)。结果表明,

去除率的趋势基本相似,随着反应时间的增长,去除率不断增大。当 $t > 2$ h 时,脱氮率基本可以达到 50%,当 $t > 4$ h 时,去除率趋势线基本趋于平缓。这是由于随着曝气时间的延长,反硝化反应发生的同时,反应器内有机物也随之消耗,所需碳源不足以支撑反硝化的进一步发生。因此,在考察其他因素对脱氮性能的影响时,设定曝气时间 $t = 4$ h。

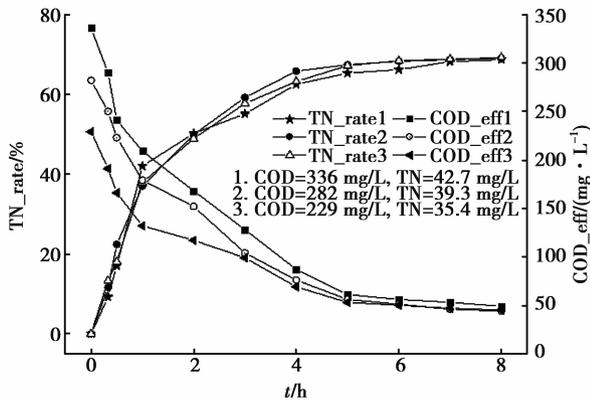


图 4 曝气时间对脱氮率的影响
Fig.4 Effects of aeration time on nitrogen removal rate

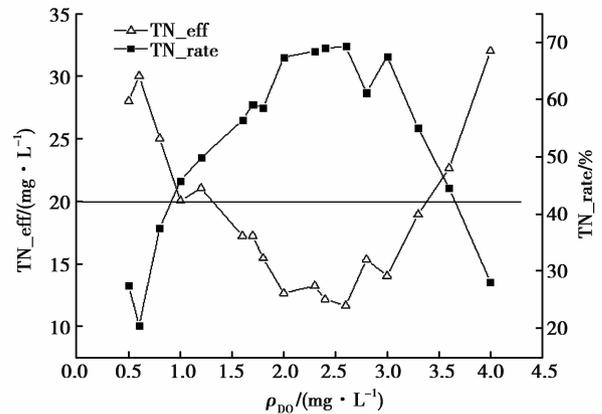


图 5 溶解氧浓度对出水 TN 质量浓度和脱氮率的影响
Fig.5 Effects of DO concentration on TN effluent and nitrogen removal rate

2.1.3 溶解氧质量浓度对脱氮性能的影响

控制填料投加量为 35%,曝气时间为 4 h,在溶解氧质量浓度为 0.5~4.0 mg/L 的范围内选择了若干个点分别考察了不同溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 条件下, SBBR 反应器脱氮性能(图 5)。结果表明,溶解氧质量浓度的高低对反应器脱氮性能有很大影响,出水 TN 去除率随着 ρ_{DO} 的升高呈现先升后降的趋势。当 $\rho_{DO} \leq 1.2$ mg/L 时,出水 TN 去除率低于 50%。这主要是由于氨氧化成羟氨并产生能量的反应过程所需的氧原子来自于分子氧,当反应器溶解氧过低时,在一定程度上限制了此步反应的发生,因此,硝化反应不完全,进而限制了后续的反硝化脱氮^[19]。当 $1.2 < \rho_{DO} \leq 3.3$ mg/L 时, TN 去除率高于 50%,出水 TN 质量浓度基本低于 20 mg/L,表现出良好的同步硝化反硝化效果。这是由于在填料的作用下,形成了多个微“缺氧-好氧”环境,一方面在填料表层的生物膜会增加溶解氧向内部扩散的阻力,从而形成生物膜内层缺氧-外层好氧的微环境;另一方面,填料对于气泡有切割作用,降低了气泡上升速度,从而增加了其传质效果,在反应器内部易形成宏观缺氧微观富氧的生境条件,有利于反应器内硝化菌和反硝化菌的共生^[20]。当 $\rho_{DO} > 3.3$ mg/L 时,出水 TN 去除率逐渐下降。这是由于反硝化反应涉及的两种酶—硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶,在革兰氏阴性菌中属于周质酶,是膜结合蛋白,只有在无氧的条件下才能合成^[21]。当反应器溶解氧过高时, DO 直接穿透了生物膜,无法形成生物膜由内而外的氧梯度,破坏了生物膜上内层缺氧-外层好氧的微环境,因此,限制了反应器内的反硝化反应。

2.1.4 填料投加量对脱氮性能的影响

控制溶解氧浓度为 2.0 mg/L,曝气时间为 4 h,考察了不同填料投加量 δ 条件下, SBBR 反应器脱氮性能(图 6)。结果表明,当 δ 分别为 50%、35%、20% 和 10% 时,平均脱氮率分别为 56.4%、60.3%、51.7% 和 43.1%。反应器内不投加填料时($\delta = 0\%$),平均脱氮率仅为 38.1%。同时,对不同填料投加量情况下生物膜和活性污泥对脱氮的贡献率进行了分析(图 7)。具体步骤是在一定填料投加量条件下,稳定运行后获得生物膜-活性污泥复合系统的脱氮率,再做单独填料(生物膜)的脱氮试验获得生物膜系统的脱氮率,两者之差即为活性污泥系统脱氮率。结果表明,填料投加量越大,反应器生物脱氮对填料的依赖性越强。在本试验条件下,35%的填料投加率下,反应器获得了较为良好的脱氮性能。分析原因,填料投加量为 50% 时,可能是由于过量的悬浮填料在曝气作用下运动所形成的剪切力使得活性污泥发生分散细化现象(活性污泥 $SVI = 150 \sim 180$),絮体相对较小,无法形成正常的絮状结构,从而降低了反应器脱氮性能。当填料投加量减少时,反应器内总污泥浓度也随之降低,脱氮对活性污泥的依赖性增大,反应器内维持硝化和反硝化共生的微环境逐渐减弱,脱氮性能受到影响。

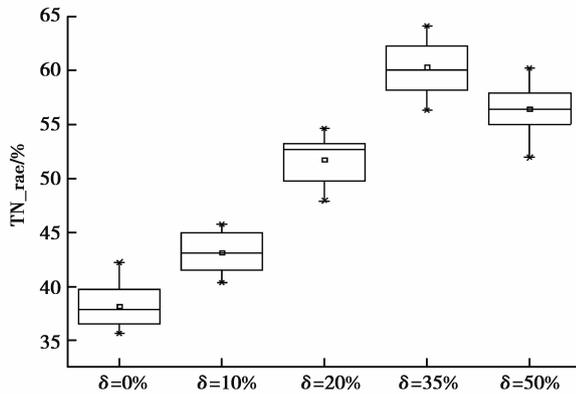


图 6 填料投加量对脱氮率的影响

Fig.6 Effects of carrier filling ratio on nitrogen removal rate

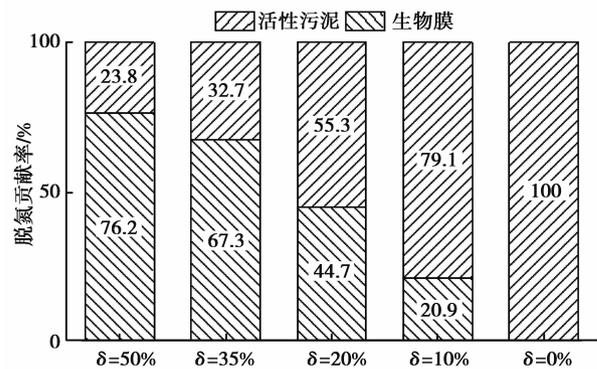


图 7 填料投加量对脱氮贡献率的影响

Fig.7 Effects of carrier filling ratio on nitrogen removal contribution rate

2.2 响应曲面分析

2.2.1 分析因素的选取及方案确定

根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,综合单因素试验结果,选取对 SBBR 反应器 SND 脱氮影响较大的因素:溶解氧质量浓度、填料投加量和曝气时间为主要考察因素,分别用 A 、 B 和 C 表示,并以 -1 、 0 和 1 分别代表自变量的低、中和高水平,以脱氮率为响应值 R ,试验设计因素及水平如表 1 所示。

表 1 脱氮率设计试验因素及水平

Table 1 Factors and levels in response surface design of nitrogen removal rate

因素	编码	-1	0	1
溶解氧质量浓度 $\rho_{DO}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$x_1=A$	1	2	3
填料投加量 $\delta/\%$	$x_2=B$	20	35	50
曝气时间 t/h	$x_3=C$	2	4	6

2.2.2 回归方程的建立与显著性检验

利用 Design expert 8.0,建立了基于 Box-Behnken 响应曲面法的试验设计及响应值,详见表 2。

表 2 响应曲面法试验设计及响应值

Table 2 Response surface design arrangement and experimental results

编号	因素			响应值 R
	$x_1=A$	$x_2=B$	$x_3=C$	
1	-1	-1	0	39.6
2	1	-1	0	40.1
3	-1	1	0	38.6
4	1	1	0	53.8
5	-1	0	-1	36.2
6	1	0	-1	47.0
7	-1	0	1	45.7
8	1	0	1	62.3
9	0	-1	-1	36.1
10	0	1	-1	47.5
11	0	-1	1	47.9
12	0	1	1	61.8

续表 2

编 号	因 素			响应值 R
	$x_1 = A$	$x_2 = B$	$x_3 = C$	
13	0	0	0	65.3
14	0	0	0	66.2
15	0	0	0	67.2

对表 2 中脱氮率试验数据进行多元回归拟合,可获得脱氮率编码自变量的二次多项回归方程:

$$R = 66.23 + 5.39A + 4.75B + 6.36C + 3.68AB + 1.45AC + 0.63BC - 11.87A^2 - 11.34B^2 - 6.57C^2。 (3)$$

对回归方程中回归系数进行估计,得表 3。由表 3 和图 8 可知,回归模型决定系数 $R^2 = 0.979 0$ (调整后为 0.941 1),表明此模型拟合程度良好。同时,对模型 R 进行方差分析可知 F 值较大, $P = 0.001 1 < 0.05$,表明模型显著。残差为正态分布,模型的误差主要以系统误差为主,且在可控范围之内。因此,可以用此模型对 SBBR 反应器脱氮效能进行分析和预测。由表 3 和图 9 可知,模型一次项 x_1 、 x_2 、 x_3 和二次项 x_1x_2 、 x_1^2 、 x_2^2 差异显著($P < 0.05$),表明溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 、填料投加量 δ 和曝气时间 t 对 SBBR 反应器脱氮性能有显著影响。其中,曝气时间 t 对脱氮性能的影响尤为显著。

表 3 拟合二次多项式模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for the fitted quadratic polynomial model

项目	系数	标准误差	F 值	P 值
常量	66.23	1.61	25.863 6	0.001 1
A	5.39	0.99	29.789 1	0.002 8
B	4.75	0.99	23.156 4	0.004 8
C	6.36	0.99	41.546 9	0.001 3
AB	3.68	1.40	6.930 6	0.046 4
AC	1.45	1.40	1.078 9	0.346 5
BC	0.63	1.40	0.200 5	0.673 1
A^2	-11.87	1.45	66.703 5	0.000 4
B^2	-11.34	1.45	60.931 9	0.000 6
C^2	-6.57	1.45	20.425 9	0.006 3

注: $R^2 = 0.979 0$, R^2 (调整后)=0.941 1

2.2.3 脱氮率的响应面分析

应用 Design expert 8.0 软件可分别对回归模型做出等高线图及响应曲面图(图 10~12)。根据响应曲面及其相应的等高线图评价三个显著因素对脱氮率的两两交互作用,从而确定各因素的最佳取值范围。

由图 10~12 可知,在本试验条件下,脱氮率随着曝气时间 t 的增加而增加,随着溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 和填料投加量 δ 增大而先增大后减小。溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 和填料投加量 δ 的交互作用对脱氮率影响显著($P = 0.046 4$),结合二次多项回归式求导可算得两者的曲面斜率。结果表明,溶解氧质量浓度的变化率对于脱氮率的影响大于填料投加量的变化率对脱氮率的影响。本试验条件下,各影响因素变化率对 SBBR 反应器脱氮率的影响排序为:曝气时间 > 溶解氧质量浓度 > 填料投加量。通过对回归方程求解 R ,可得脱氮率的最大值为 69.28%。此时对应 SBBR 反应器脱氮的最佳工况:溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 为 2.37 mg/L,填料投加量 δ 为 40.10%,曝气时间 t 为 5.17 h。

2.2.4 验证试验

在上述优化的工况条件下,即溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 为 2.37 mg/L,填料投加量 δ 为 40.10%,曝气时间 t 为 5.17 h,进行 12 个周期的验证试验,所得结果的脱氮率平均值为 68.19%。回归方程所得脱氮率预测值

69.28%与验证试验平均值 68.19%的误差 1.57%。可见回归方程能较真实地反映各因素对 SBBR 反应器脱氮率的影响,通过响应曲面法优化 SBBR 反应器 SND 脱氮的回归模型较可靠。

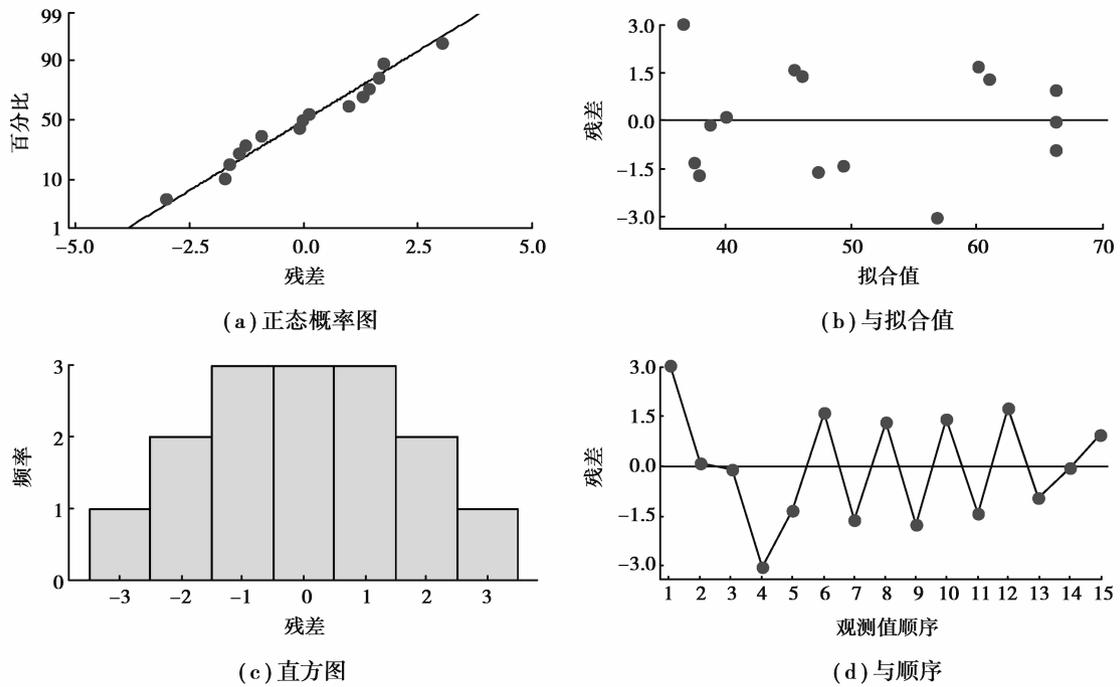


图 8 脱氮率残差图

Fig.8 Residual plots of nitrogen removal rate

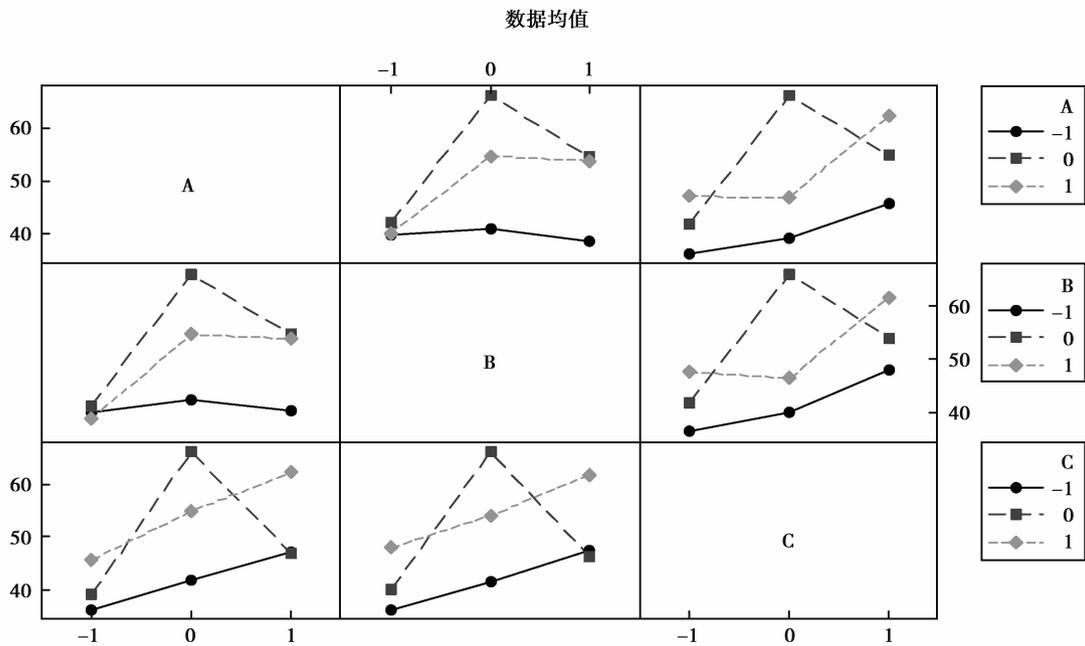


图 9 脱氮率交互作用图

Fig. 9 Interaction plots of nitrogen removal rate

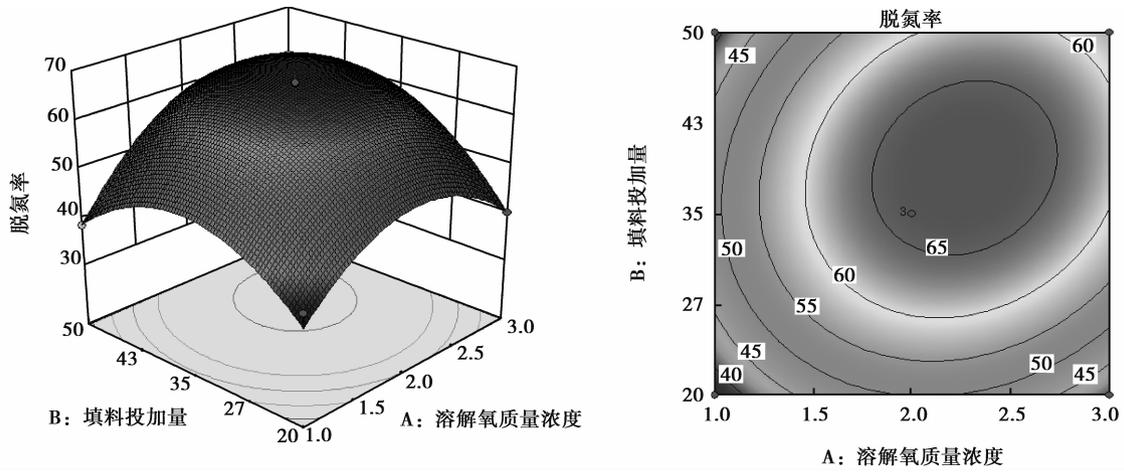


图 10 ρ_{DO} 和 δ 对脱氮率交互影响的响应面和等高线

Fig.10 Response surface and contour plot showing interactions of ρ_{DO} and δ on nitrogen removal rate

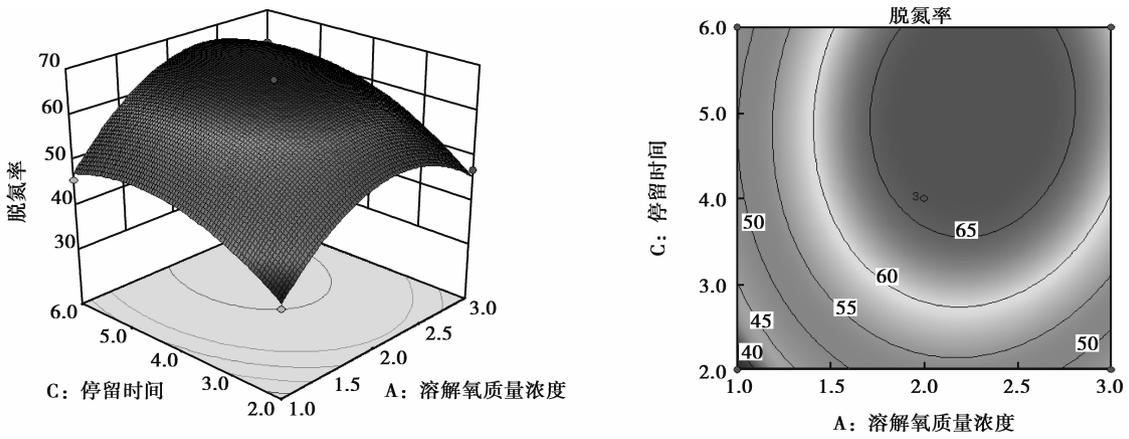


图 11 ρ_{DO} 和 t 对脱氮率交互影响的响应面和等高线

Fig.11 Response surface and contour plot showing interactions of ρ_{DO} and t on nitrogen removal rate

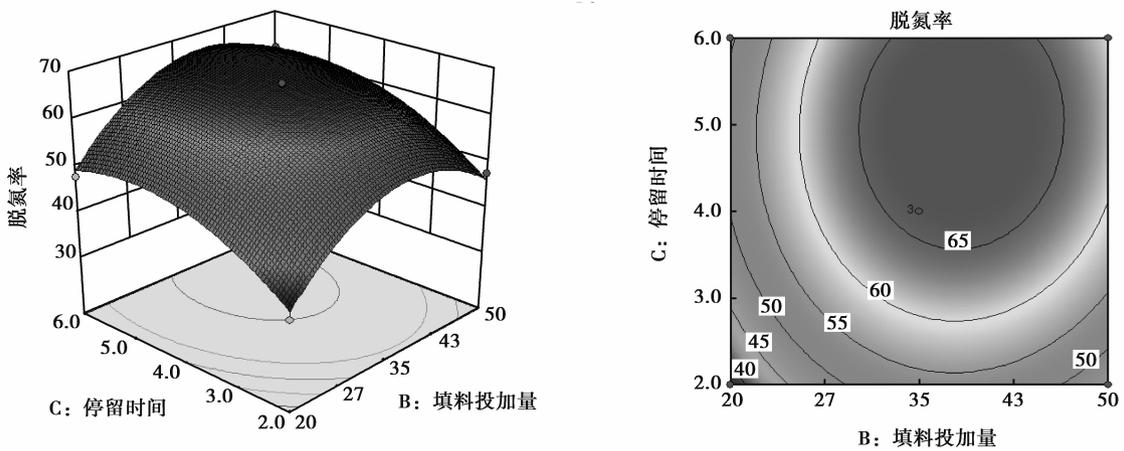


图 12 δ 和 t 对脱氮率交互影响的响应面和等高线

Fig. 12 Response surface and contour plot showing interactions of δ and t on nitrogen removal rate

3 结 论

1) 在填料投加量为 35%, 溶解氧质量浓度为 2 mg/L, 曝气时间为 4 h 的条件下, 反应器有良好的同步硝化反硝化脱氮性能。对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的平均去除率分别可达 80.7% 和 63.1%。典型周期内计算系统同步硝化反硝化率(SND%)高达 72.8%。

2) 单因素试验发现, 脱氮率随着曝气时间 t 的增加而增加, 随着溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 和填料投加量 δ 增大而先增大后减小, 本试验条件下, 各影响因素变化率对 SBBR 反应器脱氮率的影响排序为: 曝气时间 > 溶解氧质量浓度 > 填料投加量。

3) 以曝气时间 t 、溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 和填料投加量 δ 为考察因素, 脱氮率为响应值建立了二次多元回归模型。模型决定系数 $R^2=0.979 0$, 拟合程度良好。 $P=0.001 1 < 0.05$, 模型显著。其中, 溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 和填料投加量 δ 交互作用对脱氮率影响较为显著。

4) 通过模型计算可得本试验条件下最佳工况为: 溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 为 2.37 mg/L, 填料投加量 δ 为 40.10%, 曝气时间 t 为 5.17 h, 脱氮率最大值为 69.28%。验证试验表明, 回归方程的预测值与实际值偏差为 1.57%。

参考文献:

- [1] Gonzales S, Wilderer P A. Phosphate removal in a biofilm reactor[J]. *Water Science & Technology*, 1990, 23(7/8/9): 1405-1415.
- [2] 王东海, 文湘华, 钱易. 处理难降解有机物的新型 SBR 反应器的发展[J]. *环境科学进展*, 1999, 7(6): 38-44.
WANG Donghai, WEN Xianghua, QIAN Yi. Advancement of new type SBR for refractory organic compound treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1999, 7(6): 38-44. (in Chinese)
- [3] Tan C, Ma F, Qiu S. Impact of carbon to nitrogen ratio on nitrogen removal at a low oxygen concentration in a sequencing batch biofilm reactor[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(3): 612-618.
- [4] Di laconi C, Lopez A, Ramadori R, et al. Combined chemical and biological degradation of tannery wastewater by a periodic submerged filter (SBBR)[J]. *Water Research*, 2002, 36(9): 2205-2214.
- [5] Chang C N, Chen H R, Huang C H, et al. Using sequencing batch biofilm reactor (SBBR) to treat ABS wastewater[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(4/5): 433-440.
- [6] Ding D H, Feng C P, Jin Y X, et al. Domestic sewage treatment in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) with an intelligent controlling system[J]. *Desalination*, 2011, 276(1/2/3): 260-265.
- [7] 李志刚, 周健, 张法国, 等. SBBR 处理老龄化垃圾渗滤液的自养脱氮效能[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(17): 27-30.
LI Zhigang, ZHOU Jian, ZHANG Faguo, et al. Study on autotrophic nitrogen removal efficiency of SBBR in treatment of aged landfill leachate[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(17): 27-30. (in Chinese)
- [8] 许秀红, 金蒙蒙, 李宇. SBBR 反应器对低 C/N 城市污水的脱氮效能研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(5): 937-943.
XU Xiuhong, JIN Mengmeng, LI Yu. Study of low C/N domestic sewage in nitrogen removal effect by a sequencing batch biofilm reactor[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2013, 29(5): 937-943. (in Chinese)
- [9] 李军, 彭永臻, 顾国维, 等. SBBR 同步硝化反硝化处理生活污水的影响因素[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(5): 728-733.
LI Jun, PENG Yongzhen, GU Guowei, et al. Factors affecting simultaneous nitrification and denitrification in a SBBR treating domestic wastewater[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(5): 728-733. (in Chinese)
- [10] 张立秋, 韦朝海, 张可方, 等. 常温下 SBBR 反应器中亚硝酸型同步硝化反硝化的实现[J]. *环境工程*, 2009, 27(1): 40-43, 65.
ZHANG Liqiu, WEI Chaohai, ZHANG Kefang, et al. Realization for simultaneous nitrification denitrification via nitrite in sequencing biofilm batch reactor at normal temperature[J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(1): 40-43, 65. (in Chinese)
- [11] 张小玲, 陈莹, 邱静, 等. 曝气量及 COD 浓度对 SBBR 同步硝化反硝化效能的影响[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(9): 129-133.

- ZHANG Xiaoling, CHEN Ying, QIU Jing, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in SBBR: its performances affected by aeration amount and COD concentration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(9): 129-133. (in Chinese)
- [12] 徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 等. 响应曲面法优化固相反硝化的工艺条件[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(2): 489-493.
XU Ying, QIU Tianlei, HAN Meilin, et al. Optimization of solid-phase denitrification process using response surface methodology[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(2): 489-493. (in Chinese)
- [13] Tong J, Chen Y G. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, 43(12): 2969-2976.
- [14] Rodgers M, Zhan X M, Burke M D. Nutrient removal in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) using a vertically moving biofilm system[J]. *Environ Technol*, 2004, 25(2): 211-218.
- [15] Matos M, Alves C, Campos J L, et al. Sequencing batch biofilm reactor: from support design to reactor operation[J]. *Environ Technol*, 2011, 32(9/10): 1121-1129.
- [16] 何争光, 张珂, 谢丽清. SBBR工艺悬浮填料填充率的优化[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(15): 28-30.
HE Zhengguang, ZHANG Ke, XIE Liqing. Optimization of suspended carrier filling ratio in sequencing batch biofilm reactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(15): 1121-1129. (in Chinese)
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Water and waste water monitoring and analyzing method[M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [18] Third K A, Burnett N, Cord-Ruwisch R, et al. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in an SBR[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2003, 83(6): 706-720.
- [19] 彭永臻, 孙洪伟, 杨庆. 短程硝化的生化机理及其动力学[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 817-824.
PENG Yongzhen, SUN Hongwei, YANG Qing. The biochemical reaction mechanism and kinetics of partial nitrification[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 817-824. (in Chinese)
- [20] Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND)[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 39: 61-68.
- [21] 王淑莹, 孙洪伟, 杨庆, 等. 传统生物脱氮反硝化过程的生化机理及动力学[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(5): 732-736.
WANG Shuying, SUN Hongwei, YANG Qing, et al. Biochemical reaction mechanism and kinetics of denitrification[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14(5): 732-736. (in Chinese)

(编辑 郑洁)