

响应面法用于优化污水厂脱氮工艺的研究

肖飞,董文明,王维红*

(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:在单因素试验基础上,采用 Box-Behnken 响应面法对新疆某联合式污水厂的脱氮单元进行优化,结果表明,对脱氮性能的影响由强到弱依次为碳氮比(C/N)、有机负荷(F/M)和内回流比(R)。模型优化后的最佳工况条件 C/N 为 7.45、R 为 52.61%、F/M 为 0.10 d^{-1} ,污水厂在该工况下进行验证试验,其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 平均去除率分别为 87.23%、91.20%,在出水中的测定均值分别为 0.37 mg/L 、 6.09 mg/L ,均满足一级 A 标准。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 去除率与预测值相对误差分别为 0.38% 和 0.55%,与模型预测值较接近。

关键词: 响应面法;脱氮性能;参数优化;污水处理

中图分类号:X703

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)06-0052-04

Response Surface Methodology for Optimization of Denitrification Process in Sewage Plant

XIAO Fei, DONG Wen-ming, WANG Wei-hong*

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: On the basis of single factor experiment, the denitrification unit of a combined sewage plant in Xinjiang was optimized by Box-Behnken response surface method. The results showed that the effect on denitrification performance from strong to weak was carbon-nitrogen ratio (C/N), organic load (F/M) and internal reflux ratio (R). The optimum working conditions after model optimization were $\text{C/N} = 7.45$, $R = 52.61\%$, $\text{F/M} = 0.10 \text{ d}^{-1}$, the verification tests were conducted under these working conditions in the sewage plant, the average removal rates of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN were 87.23% and 91.20%, respectively. The average values of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN in effluent were 0.37 mg/L and 6.09 mg/L , respectively, all met class I A standard. The relative error between the removal rates and the predicted values of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN were 0.38% and 0.55%, respectively, which were close to the predicted values of the model.

Key words: Response surface methodology; Denitrification performance; Parameter optimization; Sewage disposal

近年来,部分污水厂排水水质不达标引起的环境问题日益突出^[1-2]。其中,以氮、磷超标排放引起的水环境污染较为显著,且是引起水体富营养化的重要原因。据报道,生物脱氮除磷在废水处理中具有高效便捷、处理彻底、无二次污染等优点,却往往受污水厂进水水质、水量波动大不易控制等因素影响,难以达到预期效果。由此可见,生物处理过程须找出最佳变量,防止氮、磷超标排放,降低污水厂因提标改造带来的投资成本。研究表明^[3-6],响

应面法(RSM)具有应用方便、精度高等优点,已被部分学者应用于污水处理。今以新疆某污水厂为研究对象,采用响应面法考察污水厂运行中碳氮比(C/N)、内回流比(R)和有机负荷率(F/M)与脱氮

收稿日期:2020-08-26;修订日期:2021-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968071)

作者简介:肖飞(1993—),男,四川绵阳人,在读研究生,研究方向为污水处理。

*通信作者:王维红 E-mail: 2209319288@qq.com

的关联,以期为污水厂的高效脱氮提供理论参考,从而最大限度地去除污水中含氮化合物。

1 试验

1.1 主要仪器与试剂

BOD-2030型在线BOD监测仪,WD-HBA-200型COD监测仪,KL-2200A型 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和KL-2030A型TP监测仪,上海科蓝仪表科技有限公司;TN-8000型在线TN监测仪,杭州慕迪科技有限公司。

重铬酸钾、钼酸铵、过硫酸钾、盐酸和抗坏血酸(分析纯),武汉兴银河化工公司。

1.2 进水来源与水质指标

新疆乌鲁木齐市某污水厂进水涵盖该区域内的生活污水(70%)和工业废水(30%)。进水水质涉及指标^[7]:化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、生化需氧量(BOD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)。实际进水平均值分别为COD 695 mg/L,SS 400 mg/L,BOD 200 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 37.5 mg/L,TN 39 mg/L,TP 20.4 mg/L。水质监测方法均采用标准方法^[8]。

1.3 工艺介绍

污水厂实际工程采用联合I期工艺(水解酸化)+同步脱氮除磷工艺(A^2/O),即联合工艺为改良水解酸化+ A^2/O 工艺。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

试验时,固定好氧池水力停留时间(HRT)为5.5 h,污泥停留时间(SRT)为15 d, R 为200%,从得到的数据集中选取相似工况的运行数据,至少选择3组,以3次 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN平均值作为最终值。当 R 为50.00%, F/M 为 0.10 d^{-1} 时, C/N 在6.30、7.30和8.30处, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率分别为72.32%、82.96%和79.78%,TN平均去除率分别为78.38%、85.46%和81.33%;当 C/N 为7.30、 F/M 为 0.10 d^{-1} 时, R 在40.00%、50.00%和60.00%处, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率分别为77.20%、80.87%和79.38%,TN平均去除率分别为77.63%、85.21%和82.05%;当 C/N 为7.30, R 为50.00%时, F/M 在 0.08 d^{-1} 、 0.10 d^{-1} 和 0.12 d^{-1} 处, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率分别为76.54%、82.52%和76.34%,TN平均去除率分别为78.88%、85.87%和79.33%。试验表明, C/N 和 F/M 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率

影响较大, C/N 和 R 对TN去除率影响较大,对脱氮性能的影响由强到弱依次为 C/N 、 F/M 和 R 。

2.2 响应面法结果分析

根据单因素试验结果,利用响应面软件Box-Behnken Design(BBD)模块对工艺参数进行优化^[9-10],见表1。TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率由污水厂实际运行得出。设 $C/N = x_1$, $R = x_2$, $F/M = x_3$,且 y_1 为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率响应值, y_2 为TN去除率响应值。

2.2.1 $\text{NH}_3\text{-N}$ 响应面法结果分析

以 y_1 和 x_1 、 x_2 、 x_3 建立二次回归方程,见公式(1):

$$y_1 = -403.28 + 93.70x_1 + 0.17x_2 + 2550.99x_3 + 0.16x_1x_2 - 14.13x_1x_3 + 7.04x_2x_3 - 6.60x_1^2 - 0.02x_2^2 - 14023.75x_3^2 \quad (1)$$

$\text{NH}_3\text{-N}$ 模型 P 值 <0.001 ,适应性极其显著;失拟项值为0.06,失拟项不显著;多元相关系数 R^2 为86.01%,相关性良好,拟合效果较好;调整相关系数 R^2 为81.43%,表明有81.43%的响应值的变化可通过该试验方法建立的模型进行阐释^[11]。由 F 分布值可知, $F(x_1) > F(x_3) > F(x_2)$,表明 C/N 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率影响较显著,不显著的是 R 。进水因素对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率影响的曲面示意图1(a)(b)(c)。由图1(a)可知,当 C/N 为7.50~8.10时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率变化较快,同时发现 C/N 和 R 均处于低水平时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率最低,该阶段厌氧池有少许异味溢出,这可能是由亚硝化菌氧化 $\text{NH}_3\text{-N}$ 不彻底所致。进一步分析可知,在进水初期, $\text{BOD}/\text{COD} < 0.30$ 占比较大,比值为68.42%,说明水质可生化性较差,不利于微生物进行氨化作用。随着进水水质的改善,氨化作用增强,消耗基质碳源,亚硝化作用减弱, $\text{NH}_3\text{-N}$ 滞留过多。

由图1(b)可知,当 F/M 为 0.09 d^{-1} ~ 0.10 d^{-1} 时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率达到最高,该范围内去除率变化较快;当 C/N 为7.30~7.80时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率达到最高,且 C/N 变化的弯曲程度较 F/M 变化的弯曲程度大,说明 C/N 对脱氮性能的影响更为显著。同时,当 C/N 为6.30, F/M 为 0.08 d^{-1} 时,系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果不明显,这可能是由于该工况下 C/N 和 F/M 负荷过低导致反应基质不足,微生物无法正常增殖。随着提高 C/N 和 F/M , $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率明显提升,这是由于氨化菌在增殖过程中加速了氯化物的分解,增强了自养微生物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的摄取能力,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的氧化速率提高。

由图 1(c)可知,当 F/M 为 $0.09 \text{ d}^{-1} \sim 0.11 \text{ d}^{-1}$ 时, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率达最大值; $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率随 R 增加变化较小,表明 R 对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率的影响不显著,这与 C/N 和 R 曲面图结果一致。试验结果表明,当 F/M 为 $0.08 \text{ d}^{-1} \sim 0.11 \text{ d}^{-1}$ 时,去除率最大值为 86.00%,去除效果较好,最小值为 75.21% ,

去除效果较差,即不同的有机负荷对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率存在差异。

综上所述, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除不彻底主要受 C/N 和 F/M 的影响,而 R 对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率影响较小, F/M 对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率影响较显著,故污水厂运行中应避免低有机负荷的状况出现,并且应控制 C/N 为 7.30 ~ 7.80, F/M 为 $0.09 \text{ d}^{-1} \sim 0.11 \text{ d}^{-1}$, 利于亚硝化作用。

表 1 水质参数的设计工况及运行数据

Table 1 Design conditions and operation data of water quality parameter

试验组别	C/N 值	R/%	F/M 值 / d^{-1}	TN 去除率/%	$\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率/%
1	8.30	50.00	0.08	79.00	78.89
2	7.30	50.00	0.10	87.40	84.91
3	6.30	60.00	0.10	81.50	77.90
4	8.30	50.00	0.12	79.30	78.93
5	6.30	50.00	0.08	78.00	68.67
6	7.30	40.00	0.12	79.00	78.76
7	8.30	60.00	0.10	88.70	85.81
8	6.30	40.00	0.10	75.00	72.87
9	6.30	50.00	0.12	79.00	69.84
10	7.30	40.00	0.08	80.50	82.58
11	7.30	50.00	0.10	91.20	87.69
12	7.30	50.00	0.10	89.00	88.60
13	7.30	60.00	0.12	80.00	77.81
14	7.30	50.00	0.10	91.00	86.99
15	7.30	50.00	0.10	93.00	83.28
16	7.30	60.00	0.08	78.00	76.00
17	8.30	40.00	0.10	76.00	74.60

2.2.2 TN 响应面法结果分析

以 y_2 和 x_1, x_2, x_3 建立二次回归方程, 见公式(2):

$$y_2 = -413.74 + 71.47x_1 + 3.39x_2 + 2961.38x_3 + 0.16x_1x_2 - 8.75x_1x_3 + 4.38x_2x_3 - 5.29x_1^2 - 0.05x_2^2 - 15525x_3^2 \quad (2)$$

同理, TN 模型的适应性极显著, 失拟项值为 0.09, 不显著, 多元相关系数 R^2 为 82.82%, 调整相关系数 R^2 为 78.17%。由等高线图可知, TN 去除率交互图均显圆形, 表明 C/N、R 和 F/M 对 TN 去除影响极其显著, 而 $F(x_2) > F(x_1) > F(x_3)$, R 对 TN 去除率影响最为显著, 较不显著的是 F/M。进水因素对 TN 去除率影响的曲面示意图 2(a)(b)(c)。由图 2(a)可知, 当 R 为 48.00% ~ 50.00% 时, TN 去除率较好; R 一定时, C/N 与 TN 去除率呈正相关。

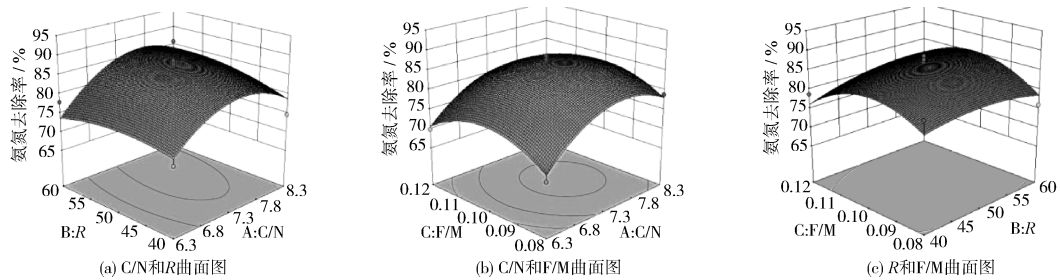


图 1 进水因素对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率影响的曲面示意

Fig. 1 Curved surface diagram of influence of influent factor on $\text{NH}_3 - \text{N}$ removal rate

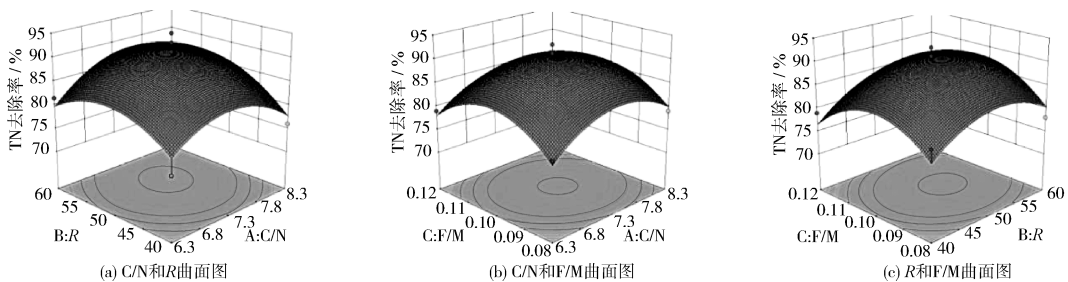


图 2 进水因素对 TN 去除率影响的曲面示意

Fig. 2 Curved surface diagram of influence of influent factor on TN removal rate

当 C/N 为 7.30 ~ 7.80、 R 为 48.00% ~ 50.00% 时, TN 去除率达最大值, 缺氧池 DO 为 0.38 mg/L, 该阶段发现硝化液回流至缺氧池时 DO 夹带率最低, 有助于反硝化菌在该阶段进行脱氮作用。由图 2 (b) 可知, 当 F/M 为 $0.09 d^{-1}$ ~ $0.11 d^{-1}$ 时去除率达最大值; C/N 为 7.30 ~ 8.30 时 TN 去除率开始下降。等高线在 F/M 为 $0.09 d^{-1}$ ~ $0.10 d^{-1}$ 、 C/N 为 6.80 ~ 7.80 时最密集, 表明该范围对 TN 去除率的影响较大, 并且 C/N 和 F/M 变化的弯曲程度相同。当 F/M 和 C/N 都处于较低水平时, TN 去除率最低, 这与两者的变化弯曲程度不符, 查阅相关资料可知, 该现象可能是由于: ①新疆正处于低温期, TN 去除率不佳, 在低温环境, 温度会抑制酶与底物的结合, 导致酶促反应速率下降, 生物活性减弱; ②在 F/M 处于低水平时, SRT 较高, 污泥停留时间较长, 微生物老化, 活性衰退, 不利于 TN 的去除。结合现场观察, 污泥颗粒细碎, 颜色暗黑, 活性不好, 造成这一现象的原因与②有关。

由图 2 (c) 可知, 当 F/M 为 $0.12 d^{-1}$ 、 R 为 40.00% 时, TN 去除率较低。这是由于: ①较高的 F/M 将加快有机物的降解, 影响反硝化速率, F/M 越高, SRT 越低, 微生物增殖减弱, 无法弥补老化的生物量; ② R 较小, 回流至厌氧池的硝酸盐较低, 排出量较高, 未充分降解。 R 引起 TN 去除率变化的曲线坡度较 F/M 明显, 曲率更陡, 当 F/M 较低时, R 引起 TN 去除率变化在 8% 以内, 相反 F/M 引起 TN 去除率变化较小, 表明 R 对 TN 去除率影响更显著。当 R 为 50.00% ~ 55.00%、 F/M 为 $0.09 d^{-1}$ ~ $0.10 d^{-1}$ 时, 有助于 TN 去除率提高。

综上所述, 响应面法验证的最优工况结果为 $C/N = 7.45$ 、 $R = 52.61\%$ 和 $F/M = 0.10 d^{-1}$, 该工况下, 污水厂的脱氮性能达到最佳, 其 $NH_3 - N$ 和 TN 去除率分别为 86.90% 和 90.70%。

2.3 最佳脱氮参数的验证

通过调整污水厂的运行参数, 使其最大程度接近理论最优工况进行验证试验, 且连续运行 28 d。运行期间, $NH_3 - N$ 平均去除率为 87.23%, 在出水中的测定均值为 0.37 mg/L, TN 平均去除率为 91.20%, 在出水中的测定均值为 6.09 mg/L, 均满足一级 A 标准。 $NH_3 - N$ 和 TN 实际去除率与模型工况值相对误差分别为 0.38% 和 0.55%, 该模型的模拟值与污水厂实测数据结果相吻合。从实际运行数据可知, 当 C/N 为 7.42、 R 为 52.00%、

$F/M = 0.11 d^{-1}$ 时, $NH_3 - N$ 去除率为 93.31%, TN 去除率为 94.64%, 系统脱氮最佳。

3 结语

采用单因素试验对污水厂脱氮性能进行考察, 发现 C/N 和 F/M 对 $NH_3 - N$ 去除率影响较大, C/N 和 R 对 TN 去除率影响较大。对脱氮性能的影响由强到弱依次为 C/N 、 F/M 和 R 。经过响应面法优化的最佳工况条件 C/N 为 7.45、 R 为 52.61%、 F/M 为 $0.10 d^{-1}$, $NH_3 - N$ 和 TN 去除率分别为 86.90% 和 90.70%。污水厂在响应面最佳工况条件下验证试验, 得到的 $NH_3 - N$ 和 TN 的平均去除率分别为 87.23% 和 91.20%, 与模拟值高度接近, 说明采用的模型可靠。实践证明, 当 $C/N = 7.42$ 、 $R = 52.00\%$ 、 $F/M = 0.11 d^{-1}$ 时, 系统脱氮最佳。

[参考文献]

- [1] 张景炳, 范海涛, 王洪臣, 等. 某污水处理厂 A^2/O 工艺冬季生物反硝化过程的影响因素研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(6): 689 - 693.
- [2] WANG Q S, YUAN R F, LIU C C, et al. Denitrification process of deep bed denitrification filter for secondary effluent from urban sewage treatment plant [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 189(2): 1 - 7.
- [3] 韩微, 雷志超, 韩蕊敏, 等. 响应面法优化实际污水厂的除磷过程 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2968 - 2973.
- [4] 何雯茵, 郭诺玮, 童峙, 等. 响应面法优化污水处理厂化学强化除磷工艺 [J]. 给水排水, 2019, 55(S1): 190 - 193.
- [5] WANG Y Z, WANG S Z, GUO Y, et al. Oxidative degradation of lurgi coal gasification wastewater: Optimization using response surface methodology [J]. Environmental Progress, 2014, 33(4): 1258 - 1265.
- [6] 刘亚珍, 武荣芳, 赵梦梦, 等. 响应面法优化污水处理厂改性污泥对水中 Cu^{2+} 的吸附作用 [J]. 化学研究, 2018, 29(3): 279 - 282.
- [7] 林海, 李阳, 李冰, 等. 北京市奶水河水水质现状评价 [J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(2): 40 - 43.
- [8] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
- [9] VEMBU V, GANESAN G. Heat treatment optimization for tensile properties of 8011Al/15% SiCp metal matrix composite using response surface methodology [J]. Defence Technology, 2015, 11(4): 390 - 395.
- [10] 边云峰, 李杰. 响应面法优化预氧化强化混凝处理铁锰地下水 [J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 55 - 58.
- [11] 王子凌, 信欣, 刘琴, 等. 响应面法优化 CANON 工艺处理猪场沼液脱氮性能研究 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2326 - 2334.