

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.014

好氧颗粒污泥处理低碳氮比废水的运行参数优化

李正昊, 何浩林, 聂嘉乐, 康建林, 杨小丽, 龙 焙, 程媛媛
(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 研究了好氧颗粒污泥(AGS)处理低碳氮比(C/N为3和1)废水的脱氮性能,通过单因素试验探究了污泥浓度、碳源投量、自养AGS占比及碱度对总无机氮(TIN)去除率的影响,以确定各影响因素适宜的范围;利用响应曲面法分析各因素对TIN去除率的影响,以确定最佳运行工况。当进水C/N为3时,显著性影响因子排序为:污泥浓度>碳源投量>自养AGS占比>碱度;当进水C/N为1时,显著性影响因子排序为:碳源投量>污泥浓度>自养AGS占比>碱度。当C/N为3时,最佳工况参数如下:污泥浓度为6 260.32 mg/L、碱度为556 mg/L、自养AGS占比为39.96%、碳源投量为165.61 mg/L,预测AGS对TIN的去除率为94.61%;参考德国ATV标准(ATV-DVWKA131E)推荐的碳源投量,在最佳工况下可节省17.2%的外投碳源、22.1%的碱度及16.7%的能耗。当C/N为1时,最佳工况参数如下:污泥浓度为5 172.11 mg/L、碱度为1 166 mg/L、自养AGS占比为21.88%、碳源投量为857.43 mg/L,预测TIN去除率为56.95%。

关键词: 好氧颗粒污泥; 低碳氮比; 污泥浓度; 碳源; 碱度; 接种污泥

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0093-08

Optimization of Operational Parameters of Aerobic Granular Sludge for Treating Wastewater with Low Carbon to Nitrogen Ratio

LI Zheng-hao, HE Hao-lin, NIE Jia-le, KANG Jian-lin, YANG Xiao-li,
LONG Bei, CHENG Yuan-yuan

(School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: This paper investigated the nitrogen removal performance of aerobic granular sludge (AGS) for treating the wastewater with low carbon to nitrogen ratio (C/N ratio of 3 and 1). The effects of sludge concentration, carbon source dosage, autotrophic AGS proportion and alkalinity on the removal rate of total inorganic nitrogen (TIN) were explored by single factor experiments, and then the approximate range of each influencing factor was determined. The influence of each factor on TIN removal rate was analyzed by using the response surface method, and the best operating parameters were eventually determined. When the influent C/N ratio was 3, the significant of influencing factors in descending order was as follows: sludge concentration, carbon source dosage, autotrophic AGS proportion and alkalinity, and that was carbon source dosage, sludge concentration, autotrophic AGS proportion and alkalinity when

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52060007); 2022年江西省大学生创新训练项目(S202210407024); 江西理工大学研究生创新专项资金资助项目(XY2022-S128)

通信作者: 程媛媛 E-mail: yuancheng37@163.com

the influent C/N ratio was 1. When the influent C/N ratio was 3, the optimal operating parameters for nitrogen removal were as follows: sludge concentration of 6 260.32 mg/L, alkalinity of 556 mg/L, autotrophic AGS proportion of 39.96% and carbon source dosage of 165.61 mg/L, and the predicted TIN removal rate was 94.61%. According to the carbon source dosage recommended by the German ATV standard (ATV-DVWKA131E), 17.2% of carbon source dosage, 22.1% of alkalinity and 16.7% of energy consumption were saved under the optimal operating conditions in this study. When the influent C/N ratio was 1, the optimal operating parameters were as follows: sludge concentration of 5 172.11 mg/L, alkalinity of 1 166 mg/L, autotrophic AGS proportion of 21.88% and carbon source dosage of 857.43 mg/L, and the predicted TIN removal rate was 56.95%.

Key words: aerobic granular sludge; low C/N ratio; sludge concentration; carbon source; alkalinity; seed sludge

好氧颗粒污泥(AGS)是微生物通过自凝聚作用形成的颗粒状生物聚集体,与传统活性污泥相比,具有沉降速度快、高耐毒性、抗冲击负荷强等优点^[1]。同时,AGS还可利用自身微环境实现单级同步脱氮除磷^[2],能有效处理有机及无机含氮废水^[3],并呈现出较传统工艺更高的脱氮效率及更低的运行成本^[4-5]。

我国市政污水常呈现出低碳氮比(C/N)特征^[6],通常将C/N<5的废水称为低C/N废水^[7],而低C/N会导致反硝化过程中因缺少有机碳源而影响脱氮效率。虽然AGS可耐受高氨氮负荷,并表现出较好的脱氮效果,但缺乏有机碳源亦会影响其脱氮效率。影响AGS脱氮性能的因素众多^[8],其中,进水C/N作为一种生物选择压对AGS脱氮性能有重要影响^[9-10],例如,Zhang等^[10]利用AGS处理C/N值由10降低到5的模拟废水时,TN去除率由85%降至75%左右。

针对低C/N废水,现有研究主要是通过优化运行条件、外投碳源等策略来提高AGS的脱氮效果。Long等^[11]利用AGS处理低C/N污泥深度脱水液时出现了明显的硝态氮积累,通过外投乙酸钠使TN去除率提高至90%以上;曾敏静等^[12]探究了碱度对AGS脱氮效果的影响,发现出水氨氮随着碱度的增大呈现明显降低趋势。实际上,一些影响AGS的脱氮因素之间还存在交互作用,如pH和碱度、曝气方式与溶解氧(DO)等,如何实现这些因素之间的最佳组合仍需探索。为此,笔者通过单因素试验分别探究了污泥浓度、碳源投量、自养AGS占比及碱度对总无机氮(TIN)去除率的影响,研究各因素变量和

TIN去除率之间的关系,从而确定最佳工艺参数组合,为低C/N废水的高效处理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 接种污泥

自养AGS取自实验室序批式反应器(SBR),该反应器有效水深为180 cm,内径为14 cm,有效容积为27.69 L,换水率为60%,处理对象为模拟无机高氨氮废水。自养AGS呈暗黄色,形状多为椭球状(见图1),污泥体积指数(SVI)为35.52 mL/g,MLVSS/MLSS为0.87,胞外聚合物(EPS)为23.92 mg/gMLSS,多糖/蛋白质(PN/PS)为1.99,比耗氧速率(SOUR)为38.75 mgO₂/(gMLVSS·h),平均粒径为1.12 mm,氨氮去除率为95.44%,TIN去除率为55.64%。异养AGS取自实验室另一SBR(有效水深为180 cm,内径为19.8 cm,有效容积为55.42 L,换水率为60%),呈黄褐色,多为不规则球状,并夹杂着许多破碎颗粒(见图1),SVI为39.68 mL/g,MLVSS/MLSS为0.85,EPS为45.59 mg/gMLSS,PN/PS为3.58,SOUR为28.81 mgO₂/(gMLVSS·h),平均粒径为1.04 mm,氨氮去除率为83.76%,TIN去除率为47.52%。高通量测序发现,自养AGS中的硝化细菌优势属为*Nitrosomonas*(丰度为39.37%),反硝化细菌优势属为unclassified_*Xanthomonadaceae*(丰度为7.91%);异养AGS中的硝化细菌优势属为*Nitrosomonas*(丰度为0.2%),反硝化细菌优势属为*Thauera*(丰度为10.4%)、unclassified_*Comamonadaceae*(丰度为8.8%)、unclassified_*Chitinophagaceae*(丰度为7.9%)、unclassified_*Burkholderiales*(丰度为7.8%)及*Aeromonas*(丰度为7%)。

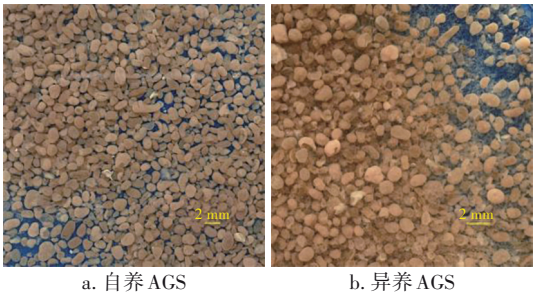


图1 接种污泥形态

Fig.1 Morphology of the seed sludge

1.2 试验方法

从两个SBR内各取400 mL泥水混合液,待混合

液完全沉降后去除上清液,用去离子水冲洗3次,随后按所需比例转移至500 mL锥形瓶内,加模拟废水至300 mL。由六联磁力搅拌器提供加热与搅拌,试验过程中保持30℃恒温,反应周期为6 h,采用3次循环“60 min曝气+60 min搅拌”的间歇运行模式。好氧反应通过电磁式空气泵进行曝气,曝气量由玻璃转子流量计控制在2.8 L/min,缺氧反应则进行磁力搅拌,曝气和搅拌时间由时控开关进行精确控制。通过批次试验考察污泥浓度、碳源投量、碱度及自养AGS占比对不同C/N下AGS脱氮性能的影响,具体试验方案见表1。

表1 影响因子及水平

Tab.1 Influence factors and levels

项目	C/N=3					C/N=1				
	污泥浓度/ (mg·L ⁻¹)	碱度/(mg· L ⁻¹)	碳源投量/ (mg·L ⁻¹)	自养AGS 占比/%	异养AGS 占比/%	污泥浓度/ (mg·L ⁻¹)	碱度/(mg· L ⁻¹)	碳源投量/ (mg·L ⁻¹)	自养AGS 占比/%	异养AGS 占比/%
水平1	3 000	0	0	100	0	3 000	0	0	100	0
水平2	4 000	200	50	75	25	4 000	500	250	75	25
水平3	5 000	400	100	50	50	5 000	1 000	500	50	50
水平4	6 000	600	150	25	75	6 000	1 500	750	25	75
水平5	7 000	800	200	0	100	7 000	2 000	1 000	0	100

1.3 模拟水质

用去离子水配制模拟废水,进水氨氮由氯化铵提供(C/N为3时进水氨氮为100 mg/L,C/N为1时进水氨氮为300 mg/L),试验所需碱度(以CaCO₃计)由碳酸氢钠提供,进水碳源由乙酸钠提供(以COD计,配制成COD为1 000 mg/L的使用液),C/N为3与1时液体碳源初始投量均为300 mg/L,并在每个批次试验第2段曝气完成后(即180 min时)投加液体碳源,当C/N为3时分别投加0、50、100、150、200 mg/L液体碳源,当C/N比为1时分别投加0、250、500、750、1 000 mg/L液体碳源。模拟废水的具体组成见龙焙等^[13]推荐的配方。

1.4 分析项目与方法

SVI、MLSS、MLVSS、COD、氨氮、亚硝态氮等均采用国家标准方法测定,硝态氮采用麝香草酚分光光度法测定,TIN为氨氮、硝态氮及亚硝态氮三者之和。污泥形态变化用数码相机拍照记录,平均粒径采用湿筛分法测定^[14]。EPS采用超声热提取方法测定,PN采用考马斯亮蓝试剂法测定,PS采用硫酸-苯酚法测定,SOUR采用Ochoa等^[15]推荐的方法测定,高通量制样及测序参考Zhang等^[16]推荐的方法。

1.5 游离氨(FA)计算方法

将氨的电离常数和水的电离常数代入解离平衡公式,得到游离氨的计算公式^[17-18],即:

$$FA = \frac{17}{14} \frac{NH_4^+ - N \times 10^{pH}}{e^{6.344/(273+T)} + 10^{pH}} \quad (1)$$

式中:T为水温,℃。

2 单因素及响应曲面优化分析

2.1 单因素试验

2.1.1 污泥浓度对TIN去除率的影响

污泥浓度对TIN去除率的影响如图2所示。当C/N为3时,控制碳源投量为100 mg/L、碱度为400 mg/L、异养和自养AGS占比均为50%,随着污泥浓度的增大,出水氨氮与亚硝态氮浓度呈降低趋势,而硝态氮浓度先升高后逐渐趋于稳定。当C/N为1时,控制碳源投量为500 mg/L、碱度为1 000 mg/L、异养和自养AGS占比均为50%,随着污泥浓度的增大,出水氨氮浓度先降低后趋于稳定,亚硝态氮浓度先升高后趋于稳定,硝态氮浓度变化不大。随着污泥浓度的增大,不同C/N下TIN去除率均先增大后趋于稳定,但是C/N为1时的TIN去除率明显低于C/N为3时的。

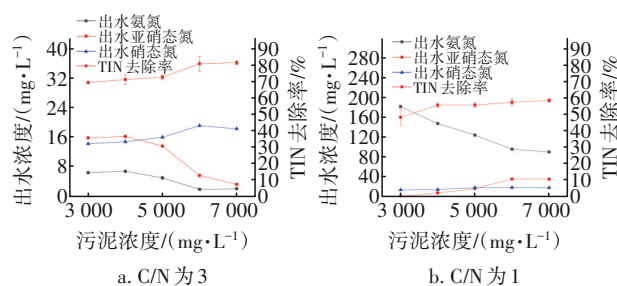


图2 污泥浓度对TIN去除率的影响
Fig.2 Influence of sludge concentration on TIN removal rate

2.1.2 碳源投量对TIN去除率的影响

碳源投量对TIN去除率的影响见图3。当C/N为3时,控制污泥浓度为5 000 mg/L、碱度为400 mg/L、异养和自养AGS占比均为50%,随着碳源投量的增大,出水氨氮和硝态氮浓度下降,亚硝态氮先升后降。当C/N比为1时,控制污泥浓度5 000 mg/L、碱度为1 000 mg/L、异养和自养AGS占比均为50%,出水氨氮、亚硝态氮与硝态氮浓度均随着碳源投量的增大而降低。随着碳源投量的增大,不同C/N下TIN去除率均呈增大趋势,但当碳源投量超过500 mg/L后,TIN去除率增大趋势明显变缓。

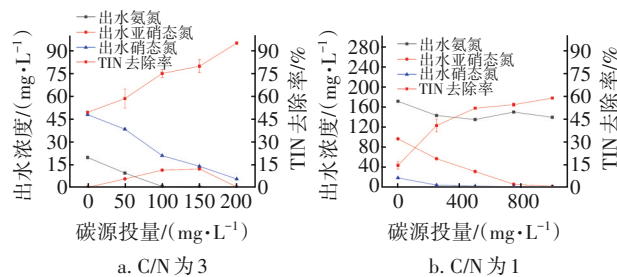


图3 碳源投量对TIN去除率的影响
Fig.3 Influence of carbon source dosage on TIN removal rate

2.1.3 自养AGS占比对TIN去除率的影响

自养AGS占比对TIN去除率的影响见图4。当C/N为3时,控制污泥浓度为5 000 mg/L、碳源投量为100 mg/L、碱度为400 mg/L,随着自养AGS占比的减少,出水氨氮浓度呈先降低后升高的趋势,亚硝态氮及硝态氮浓度呈降低趋势。当C/N为1时,控制污泥浓度为5 000 mg/L、碳源投量为500 mg/L、碱度为1 000 mg/L,随着自养AGS占比的减少,出水氨氮浓度呈升高趋势,亚硝态氮浓度则呈明显降低趋势,硝态氮浓度变化不大。在不同C/N下,随着自养AGS占比的减少,TIN去除率先增大后减小。由

于自养AGS占比减少导致硝化细菌比例减小,硝化能力的减弱使得氨氮无法有效降解,从而导致TIN去除率降低。

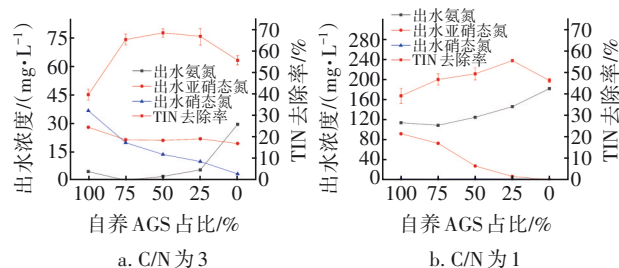


图4 自养AGS占比对TIN去除率的影响
Fig.4 Influence of autotrophic AGS proportion on TIN removal rate

2.1.4 碱度对TIN去除率的影响

碱度对TIN去除率的影响见图5。当C/N为3时,控制污泥浓度为5 000 mg/L、碳源投量为100 mg/L、自养AGS占比为50%,随着碱度的增大,出水氨氮浓度先下降后趋于稳定,而亚硝态氮浓度则呈升高趋势,硝态氮浓度为先上升后下降。当C/N为1时,控制污泥浓度为5 000 mg/L、碳源投量为500 mg/L、自养AGS占比为50%,随着碱度的增大,出水氨氮先下降后趋于稳定,亚硝态氮在16.14~38.18 mg/L之间波动,硝态氮变化不大。随着碱度增大,不同C/N下TIN去除率均先增大后趋于稳定。

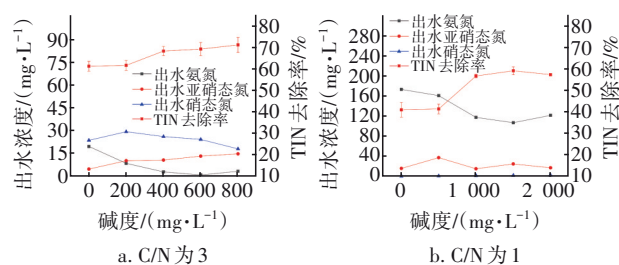


图5 碱度对TIN去除率的影响
Fig.5 Influence of alkalinity on TIN removal rate

2.2 响应曲面优化分析

2.2.1 C/N为3时的优化分析

根据单因素试验结果,采用Design-Expert 8.06软件,以Box-Behnken Design (BBD)方法设计试验方案,探究在C/N为3时污泥浓度(A)、碱度(B)、自养AGS占比(C)及碳源投量(D)对TIN去除率的影响。污泥浓度在5 000~7 000 mg/L、碱度在400~800 mg/L、碳源投量在100~200 mg/L、自养AGS占比在75%~25%为适宜的脱氮条件。试验方案设计和结果如表2所示。

表2 试验方案设计和结果(C/N=3)

Tab.2 Design and results of the experiment (C/N=3)

序号	A/(mg·L ⁻¹)	B/(mg·L ⁻¹)	C/%	D/(mg·L ⁻¹)	TIN 去除率/%
1	5 000	600	50	150	94.00
2	7 000	600	50	150	94.00
3	6 000	600	25	150	79.74
4	6 000	600	50	100	84.45
5	6 000	600	75	100	73.35
6	6 000	600	75	200	77.68
7	6 000	600	50	150	94.00
8	5 000	400	50	150	85.03
9	6 000	800	50	100	78.88
10	6 000	400	50	100	79.59
11	7 000	600	75	150	76.15
12	5 000	600	50	200	68.06
13	5 000	600	50	100	73.17
14	5 000	600	75	150	79.78
15	6 000	400	25	150	81.21
16	6 000	800	50	200	89.02
17	6 000	600	50	150	94.00
18	7 000	600	25	150	89.22
19	6 000	400	50	200	87.47
20	6 000	400	75	150	84.89
21	6 000	600	25	100	75.31
22	6 000	600	50	150	94.00
23	7 000	400	50	150	84.14
24	6 000	600	25	200	86.48
25	5 000	800	50	150	84.26
26	6 000	800	75	150	81.03
27	7 000	600	50	200	91.07
28	6 000	800	25	150	82.04
29	7 000	800	50	150	81.70

由 Design-Expert 8.06 软件分析试验数据,得到 TIN 去除率回归方程为: $Y_1=94.00+3.06A-0.45B-1.76C+2.92D-0.42AB-3.28AC+2.93AD-1.17BC+0.56BD-1.71CD-6.31A^2-3.50B^2-7.55C^2-7.84D^2$ 。

使用方差分析(ANOVA)方法对模型的结果进行显著性分析,试验模型的 F 值为 3.86,可见该模型有明显的回归性,其中 A 、 B 、 C 和 D 的 F 值分别为 5.50、0.12、1.82、5.01,则对 TIN 去除率的影响因子排序为 $A>D>C>B$ 。精密度为 5.675(>4),说明模型对 TIN 去除率的分析有较好的准确性。模型的相关系数(R^2)为 79.41%,说明该模型能够较好地解释数据的变异性。模型的 p 值为 0.008 3(<0.05),表明数据分析结果显著,模型中的 A 、 D 、 A^2 、 B^2 及 C^2 的 p 值小于显著水平 0.05,说明是显著的模型因素。残差分析后,残差与概率呈线性关系,计算得到的响应曲面法结果显著,数据分析具有可靠性。

针对 TIN 去除率因变量得到响应曲面(见图 6),从 4 种因素两两交互的情况分析可知,污泥浓度和碳源投量、碱度和自养 AGS 占比、碱度和碳源投量的交互影响较大;污泥浓度和自养 AGS 占比的交互影响次之;污泥浓度和碱度、自养 AGS 占比和碳源投量的交互影响最小。采用对响应曲面数据的预测分析法,得出 4 种因素最优工况为: $A=6\ 260.32$ mg/L, $B=556$ mg/L, $C=39.96\%$, $D=165.61$ mg/L,对 TIN 去除率的预测值为 94.61%。

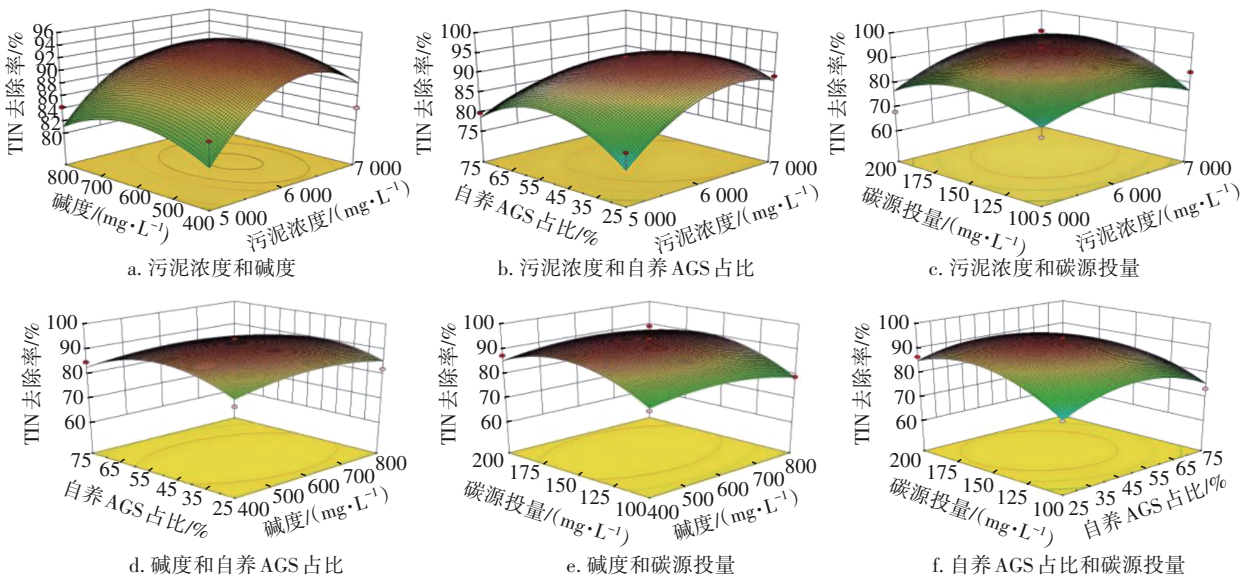


图6 交互影响分析(C/N=3)

Fig.6 Interactive impact analysis (C/N=3)

2.2.2 C/N为1时的优化分析

根据单因素试验结果,以BBD方法设计试验方案,探究在C/N比为1时污泥浓度(A)、碱度(B)、自养AGS占比(C)及碳源投量(D)对TIN去除率的影响。污泥浓度在4 000~6 000 mg/L、碱度在1 000~2 000 mg/L、碳源投量在500~1 000 mg/L、自养AGS占比在0~50%为脱氮适宜条件。试验方案设计和结果如表3所示。

根据Design-Expert 8.06软件分析试验数据,得到TIN去除率的二次多项式回归方程为: $Y_2=55.99+3.35A-0.14B+1.32C+4.04D+1.40AB-1.40AC-0.61AD+2.76BC-0.99BD-1.81CD-3.87A^2-2.03B^2-7.00C^2-3.17D^2$ 。

使用方差分析(ANOVA)方法对模型的结果进行显著性分析,试验模型的 F 值为3.50,说明该模型具有一定的回归性,其中 A 、 B 、 C 、 D 的 F 值分别为8.35、0.014、1.3、12.13,则对TIN去除率的显著性影响顺序为 $D>A>C>B$ 。精密度为6(>4),说明模型对TIN去除率的分析有较好的准确性。模型的相关系数(R^2)为77.79%,说明该模型能够解释数据的变异性。模型的 p 值为0.012 7(<0.05),数据分析结果显著,模型中的 A 、 D 、 A^2 及 C^2 的 p 值小于显著水平0.05,说明是显著的模型因素。残差分析后,残差与概率呈线性关系,计算得到的响应曲面法结果显著,数据分析具有可靠性。

针对TIN去除率因变量得出响应曲面,见图7。

表3 试验方案设计和结果(C/N=1)

Tab.3 Design and results of the experiment (C/N=1)

序号	$A/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$B/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$C/\%$	$D/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TIN去除率/%
1	5 000	1 500	0	1 000	53.34
2	5 000	1 000	0	750	50.70
3	4 000	1 000	25	750	44.55
4	5 000	1 000	25	1 000	53.31
5	4 000	1 500	25	500	44.57
6	6 000	1 500	25	1 000	53.15
7	6 000	2 000	25	750	55.35
8	5 000	1 500	25	750	55.99
9	5 000	1 000	50	750	50.64
10	6 000	1 500	0	750	52.02
11	5 000	2 000	25	500	52.32
12	5 000	1 000	25	500	48.54
13	4 000	1 500	25	1 000	50.72
14	5 000	1 500	25	750	55.99
15	5 000	1 500	25	750	55.99
16	5 000	1 500	50	1 000	51.71
17	5 000	1 500	50	500	38.82
18	6 000	1 000	25	750	48.81
19	5 000	2 000	50	750	49.78
20	6 000	1 500	25	500	49.43
21	5 000	1 500	0	500	33.22
22	5 000	1 500	25	750	55.99
23	6 000	1 500	50	750	49.70
24	4 000	1 500	50	750	43.11
25	4 000	1 500	0	750	39.83
26	4 000	2 000	25	750	45.47
27	5 000	2 000	25	1 000	53.14
28	5 000	2 000	0	750	38.82
29	5 000	1 500	25	750	55.99

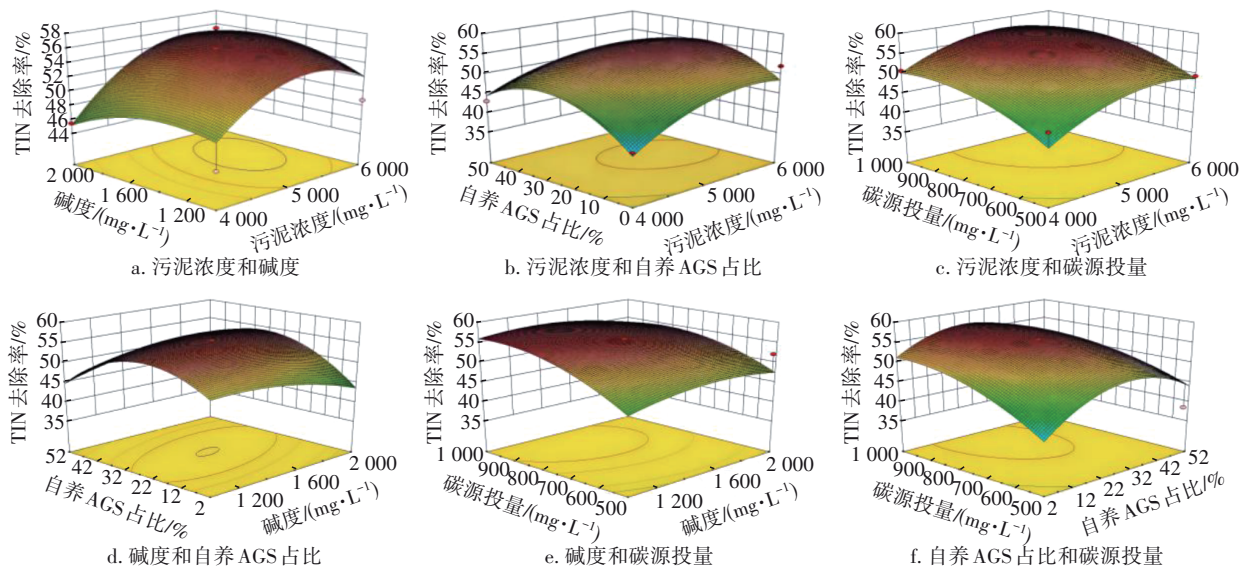


图7 交互影响分析(C/N=1)

Fig.7 Interactive impact analysis (C/N=1)

从4种因素两两交互的情况分析可知,碱度和自养AGS占比、碱度和碳源投量交互影响最大;污泥浓度和自养AGS占比、污泥浓度和碳源投量、自养AGS占比和碳源投量的交互影响次之;污泥浓度和碱度交互影响最小。通过响应曲面数据的预测分析法,得出4种因素最优工况为: $A=5\ 172.11\text{ mg/L}$, $B=1\ 166\text{ mg/L}$, $C=21.88\%$, $D=857.43\text{ mg/L}$,其对TIN去除率的预测值为56.95%。

进水氮负荷的增大会产生大量游离氨(FA),而研究表明FA对氨氧化细菌(AOB)与亚硝酸盐氧化细菌(NO₂-OB)的抑制范围分别为10~150、0.1~60 mg/L^[17]。根据试验中进出水氨氮及pH变化,由式(1)可计算出反应器内FA为16.08~33.86 mg/L。可见,C/N为1时反应器内的FA均在AOB与NO₂-OB抑制浓度范围内,进而会抑制AGS的硝化能力。另外,由于未设置驯化期,导致没有实现硝化细菌及反硝化细菌的最佳耦合,进而影响脱氮效果。

2.3 药耗及能耗分析

参照德国ATV标准(ATV-DVWKA131E),活性污泥去除1 g氮需要消耗5 g碳源(以COD计)。因此,当C/N为3时,理论上需要500 mg/L的COD,除进水碳源外仍需投加200 mg/L的COD。然而,响应曲面法得出仅需投加165.61 mg/L的COD即可实现94.61%的TIN去除,可节省17.2%的外投碳源。完全硝化1 g氨氮需要碱度7.14 g(以CaCO₃计)。当氨氮为100 mg/L时,理论需要714 mg/L的碱度,而最优条件下仅需556 mg/L碱度,可节省22.1%的碱度。采用该O/A曝气模式的能耗为18.75 W·h,而采用全程曝气时能耗为22.5 W·h,故可节省16.7%的曝气能耗。相比之下,AGS处理C/N为1的废水时,由于硝化能力不足导致仍有大量氨氮残余,即便增大碳源投量亦难以有效提高TIN去除率。考虑到本研究未设置缓冲期以使接种AGS适应新环境,但C/N为1时仍能实现最大56.95%的TIN去除,表明通过控制污泥浓度、自养/异养AGS占比、碱度及碳源投量可快速构建AGS脱氮系统,后续研究可进一步考虑耦合厌氧氨氧化以节省曝气能耗和碳源投量。

3 结论

① 当进水C/N为3时,AGS脱氮效率受污泥浓度和碳源投量影响较大且具有交互作用,最佳工

况参数如下:污泥浓度为6 260.32 mg/L、碱度为556 mg/L、自养AGS占比为39.96%、碳源投量为165.61 mg/L,预测TIN去除率为94.61%;参照德国ATV标准,在最佳工况下可节省17.2%的外投碳源、22.1%的碱度及16.7%的能耗。

② 当进水C/N为1时,AGS的脱氮效率受碱度和自养AGS占比影响较大且具有交互作用,最佳工况参数如下:污泥浓度为5 172.11 mg/L、碱度为1 166 mg/L、自养AGS占比为21.88%、碳源投量为857.43 mg/L,预测TIN去除率为56.95%。

参考文献:

- [1] WINKLER M K H, MEUNIER C, HERIET O, *et al.* An integrative review of granular sludge for the biological removal of nutrients and recalcitrant organic matter from wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 336: 489-502.
- [2] 张立楠,曾敏静,黄思浓,等. 自养硝化颗粒污泥的异养反硝化性能研究 [J]. *江西理工大学学报*, 2020, 41(5): 11-18.
ZHANG Linan, ZENG Minjing, HUANG Sinong, *et al.* Heterotrophic denitrifying performance of autotrophic nitrifying granular sludge [J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2020, 41(5): 11-18 (in Chinese).
- [3] 董晶晶,吴迪,马柯,等. 好氧颗粒污泥工艺强化脱氮研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(1): 177-186.
DONG Jingjing, WU Di, MA Ke, *et al.* Review on enhanced denitrification of aerobic granular sludge technology [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2018, 24(1): 177-186 (in Chinese).
- [4] SEPULVEDA-MARDONES M, JOSE L C, ALBERT M, *et al.* Moving forward in the use of aerobic granular sludge for municipal wastewater treatment: an overview [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2019, 18(4): 741-769.
- [5] 赵锡锋,李兴强,李军. 好氧颗粒污泥技术中试研究及应用进展 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(8): 30-37.
ZHAO Xifeng, LI Xingqiang, LI Jun. A review on pilot-scale study and application progress of the aerobic granular sludge technology [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(8): 30-37 (in Chinese).

- [6] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.
GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi, *et al.* Analysis on characteristics of water quality typical municipal sewage treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 12-15 (in Chinese).
- [7] CYDZIK-KWIATKOWSKA A, RUSANOWSKA P, ZIELINSKA M, *et al.* Structure of nitrogen-converting communities induced by hydraulic retention time and COD/N ratio in constantly aerated granular sludge reactors treating digester supernatant [J]. Bioresource Technology, 2014, 154: 162-170.
- [8] 龙焙, 程媛媛, 朱易春, 等. 好氧颗粒污泥的快速培养研究进展[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 31-36.
LONG Bei, CHENG Yuanyuan, ZHU Yichun, *et al.* Research progress on rapid cultivation of aerobic granular sludge [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 31-36 (in Chinese).
- [9] WU L, PENG C Y, PENG Y Z, *et al.* Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(2): 234-241.
- [10] ZHANG Z M, YU Z D, DONG J J, *et al.* Stability of aerobic granular sludge under condition of low influent C/N ratio: correlation of sludge property and functional microorganism [J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 391-399.
- [11] LONG B, YANG C, PU W, *et al.* The stability of aerobic granular sludge treating municipal sludge deep dewatering filtrate in a bench scale sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2014, 169: 244-250.
- [12] 曾敏静, 张斌超, 曾玉, 等. 碱度及外投碳源浓度对好氧颗粒污泥脱氮效果影响[J]. 精细化工, 2021, 38(8): 1679-1685.
ZENG Minjing, ZHANG Binchao, ZENG Yu, *et al.* Effects of alkalinity and external carbon source concentration on denitrification efficiency of aerobic granular sludge [J]. Fine Chemicals, 2021, 38(8): 1679-1685 (in Chinese).
- [13] 龙焙, 程媛媛, 赵珏, 等. 好氧颗粒污泥处理化工废水的应用研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 26-32.
LONG Bei, CHENG Yuanyuan, ZHAO Jue, *et al.* Treatment of chemical wastewater by aerobic granular sludge [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 26-32 (in Chinese).
- [14] 龙焙, 程媛媛, 赵珏, 等. 培养过程中投加部分好氧颗粒对颗粒化的影响[J]. 中国给水排水, 2017, 33(15): 13-19.
LONG Bei, CHENG Yuanyuan, ZHAO Jue, *et al.* Impact of inoculating with part of mature aerobic granule on aerobic granulation during cultivation [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(15): 13-19 (in Chinese).
- [15] OCHOA J C, COLPRIM J, PALACIOS B, *et al.* Active heterotrophic and autotrophic biomass distribution between fixed and suspended systems in a hybrid biological reactor [J]. Water Science and Technology, 2002, 46(1/2): 397-404.
- [16] ZHANG L N, LONG B, WU J F, *et al.* Evolution of microbial community during dry storage and recovery of aerobic granular sludge [J]. Heliyon, 2019, 5(12): e03023.
- [17] 张亮, 张树军, 彭永臻. 污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 75-79.
ZHANG Liang, ZHANG Shujun, PENG Yongzhen. Review of study on the effects of free ammonia inhibitions on nitrifying bacteria in wastewater treatment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 75-79 (in Chinese).
- [18] 李冬, 陈冠宇, 曾辉平, 等. 连续流全程自养脱氮工艺启动及脱氮性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(10): 182-188.
LI Dong, CHEN Guanyu, ZENG Huiping, *et al.* Start-up and denitrification performance analysis of CANON process in a continuous flow reactor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(10): 182-188 (in Chinese).

作者简介: 李正昊(1999-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为废水生物处理技术。

E-mail: 1697159206@qq.com

收稿日期: 2022-11-29

修回日期: 2023-01-18

(编辑: 刘贵春)