



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202003047

中图分类号 X797

文献标识码 A

宁杏芳, 崔海伟, 杜金宝, 等. 基于碳源条件的燃料乙醇生产废水脱氮工艺优化[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 334-340.

NING Xingfang, CUI Haiwei, DU Jinbao, et al. Optimization of denitrification treatment process of fuel ethanol wastewater based on carbon source[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 334-340.

## 基于碳源条件的燃料乙醇生产废水脱氮工艺优化

宁杏芳<sup>1</sup>, 崔海伟<sup>2</sup>, 杜金宝<sup>1</sup>, 杨洋<sup>2,\*</sup>

1. 国投广东生物能源有限公司, 湛江 524399

2. 北京国电龙源环保工程有限公司, 北京 100039

第一作者: 宁杏芳(1988—), 女, 硕士, 助理工程师。研究方向: 水污染治理技术与工程。E-mail: 79393291@qq.com

\*通信作者: 杨洋(1979—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 水污染治理等。E-mail: 20045054@chnenergy.com.cn

**摘要** 某厂稻谷燃料乙醇 DDG 废水处理工艺因好氧进水碳氮比失调, 导致出水 TN 难以达标。通过对反硝化系统碳源种类的筛选, 寻找适宜的碳源并对废水处理系统工艺进行调整, 以提升反硝化脱氮效率。碳源筛选实验在葡萄糖、乙醇和清液(原废水), 3 种碳源条件下进行。通过考察实验系统 pH 和 TN 浓度的变化, 对反硝化系统投加不同碳源时 TN 去除速率, 以及相应碳源条件下的运行成本进行对比。结果表明: 乙醇作为碳源时系统的 TN 去除速率最大, 为  $8.33 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , 是清液为碳源时的 1.1 倍、葡萄糖为碳源时的 1.18 倍; 而清液作为碳源的运行成本是乙醇为碳源的 9%、葡萄糖为碳源的 37%。综合对比反硝化投加不同碳源情况下的脱氮反应速率和运行成本, 以清液作为碳源来调整脱氮工艺是最佳方案。经现场工艺验证, 当 A/O 系统进水 TN 为  $300 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、投加清液量使废水中 COD/TN 达到 12.1 以上时, 可确保该厂废水处理系统经处理外排废水 TN 稳定在  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下。上述研究结果可为 DDG 废水的处理提供经济合理的碳源补充方案, 并能为可生化性较好的发酵行业废水处理提供参考。

**关键词** 稻谷燃料乙醇 DDG 废水; TN; 反硝化; 碳源

燃料乙醇是我国重点发展的新能源之一, 其生产废水的处理和资源化利用很受关注<sup>[1]</sup>。燃料乙醇的生产以稻谷为原料, 经过发酵、精馏后的酒糟通过简单的挤压处理后, 所得滤渣经干燥后进入干酒糟工艺(distillers dried grains, DDG)处理流程<sup>[2]</sup>。产生废水主要成分为糖类、蛋白质、纤维素等, 其中粗蛋白含量约占 27%<sup>[3]</sup>。该废水经厌氧生物处理后, TN 主要以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  形式存在, 且浓度较高, 一般为  $300 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 即使经过好氧硝化反应也仅发生氮形态的变化, 而出水 TN 未降低, 这主要是由于好氧进水碳氮比失调导致反硝化反应效果差。为实现 TN 达标排放, 需要在好氧系统段补充进水碳源。

影响反硝化效率的因素较多, 活性污泥中微生物组成种类也会影响碳源的选择。在调整脱氮系统工艺前, 通过在现场开展指导性实验, 研究投加不同碳源时的反硝化脱氮效率, 以期获得适宜的碳源补充方案, 提高 A/O 反硝化系统脱氮效率。本研究从脱氮反应速率和经济性综合分析以选择适宜的碳源, 并优化运行条件, 应用于工程实践中, 指导 DDG 废水处理的 A/O 脱氮系统高效运行。

## 1 实施方案

### 1.1 分析方法

研究采用快速消解法测定水样中的 COD；重量法测定活性污泥浓度；玻璃电极测定水样中的 pH；碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定 TN；半自动凯氏定氮仪测定 TNK。

### 1.2 水质概况

某污水站主要有高浓度废水和低浓度废水两股来水。高浓度废水即为 DDG 废水（俗称清液）。低浓度水中包含实验室废水、净水器排泥水、锅炉除盐水、设备冲洗水、循环水排水和生活区废水等。经过处理后的外排水水质满足《广东省地方标准-水污染物排放限值》(DB 44/26-2001) 第二时段一级标准，TN 满足《发酵酒精和白酒工业水污染排放标准》(GB 27631-2001)(即  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 排放标准，排至市政污水管网。水质指标如表 1 所示。

表 1 水质指标汇总  
Table 1 Quality and flow indicators of wastewater

水样及标准	水量/( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	COD/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	SS/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	TN/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
清液	1 800~2 100	45 000~65 000	5 000~8 000	13 00~16 00	10~23
低浓度水	360~400	100~200	20~80	30~50	5~10
出水标准	—	100	60	50	10

### 1.3 工艺流程

该污水站采取的主要工艺为 CSTR+UASB+A/O+芬顿，废水处理量约  $2\ 800\sim 3\ 400 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。工艺流程见图 1。

### 1.4 污水站水质问题分析及碳源种类选择

该污水站运行稳定，除 TN 外，其他指标均达到排放要求。外排水 TN 一直为  $300\sim 360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为解决这个问题，对该污水站 A/O 系统的进、出水水质进行了分析，结果如表 2 所示。

由表 2 可知，该污水站 A/O 系统进水的 COD/TN 约 3.1~4.0。TNK 反映了水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和有机氮的情况，说明系统进水中的总氮主要以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和有机氮为主，故可认为 A/O 工艺适合该废水的处理。杨健等<sup>[4]</sup>的研究表明，实验室酒精废水经过两级厌氧消化后系统 BOD/COD 约为 0.5。据此计算，该污水站 A/O 系统进水 BOD/TN 约为 1.6~2.0，明显低于反硝化过程 BOD/TN>3 的需求<sup>[5-6]</sup>。因此，可以判断该污水站 TN 去除率低归因于 A/O 生化系统进水的 BOD/TN 失调。影响 TN 去除率因素较多，针对上述问题结合工程实践，通过对比研究寻找合适的碳源、确定优化运行条件。

根据生产实际，把葡萄糖、乙醇和清液作为主要考察对象，主要原因有：1) 葡萄糖作为典型碳源添加剂，广泛应用于市政污水处理厂，操作方便且安全稳定；2) 该工厂主要产品为燃料乙醇，有丰富的乙醇可作碳源；3) 该污水站来水清液含有大量氨基酸、残糖和纤维素等有机物，而

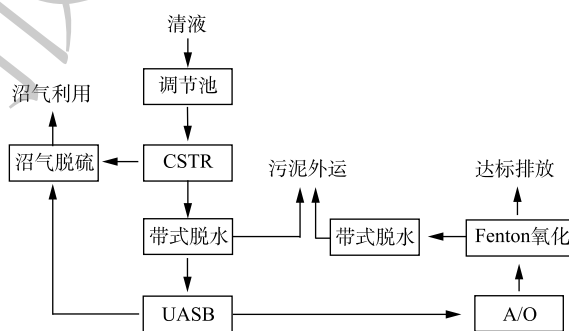


图 1 某污水站工艺流程图

Fig. 1 Process diagram of wastewater treatment plant

表 2 A/O 系统进出水水质  
Table 2 Water quality index of A/O system  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

阶段	COD	TN	TNK	$\text{NH}_4^+\text{-N}$
A/O进水	1 530~2 300	480~560	476~556	394~462
A/O出水	450~610	378~410	15~23	未检出

发酵酒精清液的 BOD/COD 一般为 0.4~0.5, 可生化性较好, 因此, 清液可作为碳源加以利用, 也可实现污水处理的可持续发展<sup>[7-8]</sup>。

### 1.5 实验方法

1) 取 400 mL A/O 系统生化污泥, 用去离子水进行清洗以除去原污水中 TN 对实验的干扰。按照实际进水流量比例, 取 A/O 出水 250 mL 与上述污泥混合, 混合后的污泥浓度约  $8\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2) 取上述比例混合后的污泥 300 mL, 分别添加葡萄糖、乙醇和清液, 每组实验取 3 组平行样。在 500 mL 烧杯内搅拌, 搅拌强度以水面无漩涡为标准, 防止搅拌剧烈充氧。通过前期摸索性实验得知, 当反应起始的 COD/TN 不低于 20 时, 反硝化过程的最大反应速率不受碳源浓度的影响, 因此, 实验中确保 COD/TN 不低于 20。为避免因添加碳源带来的 pH 干扰会影响反应初期的反硝化速率, 在添加碳源后统一调整 pH 为 6.9。

3) 在不同碳源和不同 COD/TN 的情况下, 通过监测反应系统上清液 pH 和 TN 的变化来研究反硝化过程。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 葡萄糖为碳源对处理效果的影响

以葡萄糖为碳源的研究结果如图 2 所示。由图 2 可知, 在反应初始阶段 (0~24 h), TN 浓度从  $222.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $215.6\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而反应初始 pH 由 6.90 降至 6.55。此阶段 pH 的下降可能是葡萄糖水解产生有机酸导致的<sup>[9]</sup>。该阶段 TN 去除量很少, 可能是污泥系统中的微生物种群对于基质的变化需要有适应过程, 原污水中的葡萄糖较少。加入葡萄糖后, 参与反硝化过程的大多数微生物需要时间去适应。反应第 2 阶段 (24~36 h), TN 浓度从  $215.6\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $130.9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 pH 从 6.55 下降至 6.34。这主要是因为在该系统内主要存在两大类反应: 水解酸化和反硝化。在此阶段, 葡萄糖水解产酸的速率明显大于反硝化的产碱速率, 所以虽然 TN 已经有了明显下降, 但 pH 仍然下降。反应第 3 阶段 (36~48 h), TN 浓度从  $130.9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $52.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 pH 从 6.34 上升至 8.17, 这是典型的反硝化过程, 表明在此阶段系统的反硝化产碱速率已明显超过了有机物的水解酸化速率, 故系统的 pH 明显上升。

### 2.2 乙醇为碳源对处理效果的影响

以乙醇为碳源的实验结果如图 3 所示。反应初始阶段 (0~24 h) 的 TN 由  $225.6\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $210\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而反应初始 pH 由 6.97 上升至 7.17。结果表明: 反应初始阶段系统中已经有了微弱的反硝化作用; 与葡萄糖作为碳源情况类似, 污泥中的微生物菌群在更换反应基质后都需要一定的时间去适应<sup>[10]</sup>。

反应第 2 阶段 (24~36 h) 的 TN 由  $210.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至  $146.4\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 pH 从 7.17 上升至 7.31。说明微生物经一定时间的适应后, 反硝

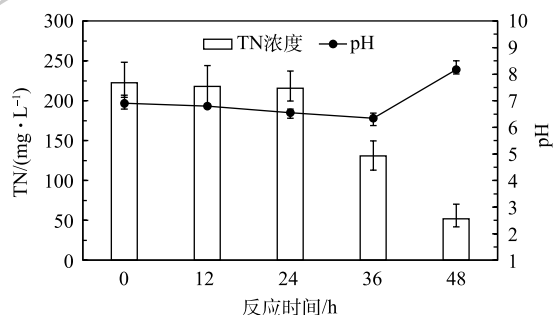


图 2 以葡萄糖为碳源的反硝化系统变化曲线

Fig. 2 Variation of denitrification system with glucose as carbon source

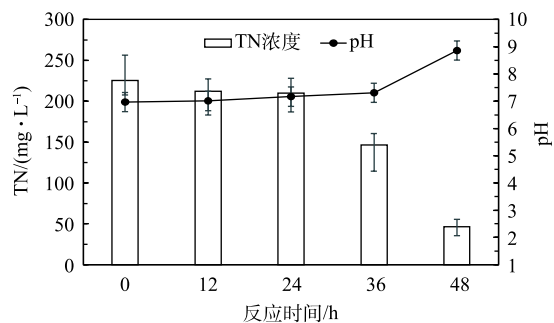


图 3 以乙醇为碳源的反硝化系统中各指标的变化

Fig. 3 Variation of denitrification system with ethanol as carbon source

化反应速率明显增加。反应第3阶段(36~48 h)的TN由 $146.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $46.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，而pH从7.31上升至8.86，表明此阶段反硝化过程反应速率达到了较高水平。

与葡萄糖作为碳源相比，乙醇为碳源的反应体系中pH值提升速率更快，这可能是由于实际生产废水中本来残存乙醇，微生物菌群对于乙醇的适应能力要强于对葡萄糖的适应能力。

### 2.3 清液为碳源对处理效果的影响

清液实际上是发酵酒精产物，其中所含营养物质主要有糖分、蛋白质、纤维素、残糖、短纤维、挥发酸、有机氮、有机磷、钾等，还有大量胶质和菌丝体等<sup>[11]</sup>。以清液为补充碳源加入后，体系中各参数变化如图4所示。反应初始阶段(0~15 h)的TN由 $308.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $270.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，而反应pH基本维持不变。这表明在反应初期，虽然有明显的反硝化作用，但清液中存在的有机酸、氨基酸等物质会消耗反硝化过程产生的碱性物质，故反应体系的pH无明显变化。反应第2阶段(15~24 h)的TN由 $270.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $179.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，pH由6.89上升至6.93。在此阶段，TN下降明显，而pH上升速率较慢。这是由于清液中存在的酸性物质继续缓冲了反硝化产生的碱，导致系统的pH变化缓慢。反应第3阶段(24~36 h)的TN由 $179.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $131.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，pH由6.93上升至7.18。该阶段TN的反应速率开始下降，但pH上升幅度比第2阶段要快。这可能是由于清液中的酸性物质已消耗殆尽，缓冲作用已明显削弱，故系统pH变化明显。反应第4阶段(36~48 h)的TN在 $132 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右不再继续下降，但pH从7.15上升至7.65。这可能是由于经过一段时间的反应，清液中的含氮有机物开始了氨化反应，氨化反应产生的游离氨使系统的pH升高<sup>[12-13]</sup>。

相比葡萄糖和乙醇，清液作为碳源时，系统的最终pH最低。这可能是由于清液中含有大量酸性物质所致。这部分酸性物质主要由乳酸、琥珀酸、乙酸和丁酸等发酵副产物组成。而葡萄糖比乙醇更容易发生水解酸化，使得葡萄糖作碳源时反硝化反应的最终pH更低。

### 2.4 不同碳源反应条件下TN去除速率对比

根据上述实验结果，对比3种碳源在反硝化反应中的TN去除速率，计算公式如式(1)所示，结果如表3所示。

$$\Delta N = \frac{N_s - N_0}{\Delta T} \quad (1)$$

式中： $\Delta N$ 为TN反应速率即在单位时间内TN下降浓度， $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ； $N_s$ 为在一定反应时间后的TN浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $N_0$ 为在反应初始期的TN浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $\Delta T$ 为反应时间，h。

由表3可知，在较长反应时间内，以上3种碳源条件下的平均TN去除速率接近，分别为 $3.55$ 、 $3.73$ 和 $3.67 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。这表明在碳源充足的情况下，当反应时间足够长时，碳源种类对反硝化过程的影响较小。但对于某一

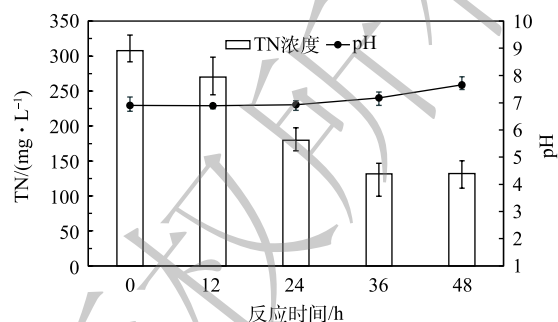


图4 以清液为碳源的反硝化系统变化曲线

Fig. 4 Variation of denitrification system with raw wastewater as carbon source

表3 3种碳源的TN去除速率

Table 3 Removal rate of total nitrogen with addition of three carbon sources

反应时间/h	TN去除速率/(mg·(L·h) <sup>-1</sup> )		
	葡萄糖	乙醇	清液
12	0.38	1.10	3.15
24	0.20	0.20	7.56
36	7.06	5.30	3.98
48	6.58	8.33	0
平均值	3.55	3.73	3.67



段内的反应速率, 3种碳源还是有明显区别的。分时段内3种碳源下的最大TN去除速率分别为葡萄糖  $7.06 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 、乙醇  $8.33 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 、清液  $7.56 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。乙醇去除速率最快主要是由于反硝化细菌优先利用小分子醇类<sup>[14]</sup>, 而葡萄糖作为相对复杂的有机物, 需要水解酸化后才被吸收。而清液由于能被反硝化细菌快速利用的小分子酸类物质占比较小, 该条件下反应速率低于乙醇做碳源的条件。吴代顺等<sup>[15]</sup>研究表明, 当利用乙醇作为碳源进行反硝化反应时, 最大反硝化速率超过葡萄糖等有机物。

## 2.5 经济性比较

假定 A/O 系统的进水参数为: 流量  $200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ; COD  $1\ 800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 投加碳源后的 COD/TN=20。以此计算3种碳源投加条件下, 生物脱氮过程增加的运行成本, 结果见表4, 其中葡萄糖和乙醇的单价采用市场采购价格, 而清液单价以清液未进行厌氧反应而损失的沼气发电收益来计。

上述计算过程未考虑添加碳源后系统运行成本的增加。这是由于即使添加的碳源全部以曝气方式去除, 在该污水站的曝气系统效率及电价基础上, 每吨污水的处理成本增加量也不到0.5元。与表4中的成本增加相比, 影响较小, 所以未作过多考虑。表4计算结果显示, 清液成本为仅为乙醇成本的9%, 葡萄糖成本的37%。从经济角度出发, 应该充分利用废水中的有机物来进行生物脱氮; 而充分利用原废水中的碳源也可实现污水资源利用, 符合污水处理可持续发展的需要。

表4 3种不同碳源运行成本对比

Table 4 Comparison of operation costs among three different carbon sources

碳源	单位时间碳源投加量/( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	单位TN碳源投加量/( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	单位体积废水增加的运行成本/( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	备注
葡萄糖	1 620	20.3	24.3	葡萄糖市场价格为3 000元·t <sup>-1</sup>
乙醇	3 348	41.9	100.4	乙醇市场价格为6 000元·t <sup>-1</sup>
清液	47 787	587.0	9.0	投加清液减少沼气发电收益, 该厂清液发电收益为28.6元·m <sup>-3</sup> 清液

## 3 工程运行调整及工艺验证

投加不同碳源时, 清液的最大反硝化速率是乙醇的90%; 从经济成本方面考虑, 投加清液的成本仅是乙醇的10%。通过实验研究分析, 综合脱氮反应速率和运行成本经济性两方面考虑, 以清液作为反硝化碳源具有较明显的优势。

该污水站 A/O 系统进水流量  $200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , 反硝化停留时间为 50 h, 内回流比为 450%, 外回流比 100%。未添加清液时, A/O 进水 COD 为  $1\ 792\sim 2\ 023 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。外加碳源清液的 COD 为  $50\ 000\sim 62\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN 为  $1\ 100\sim 1\ 500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对不同清液投加量下的 A/O 系统 TN 去除率进行了比较, 结果如图5所示。未添加清液前, A/O 系统进水的 COD/TN 在 5~6, TN 去除率约 41%; 在添加清液后, COD/TN 在 6.0~9.3, TN 去除率上升幅度较快。这主要是由于清液中的有机物被反硝化细菌快速利用, TN 去除得以加速。当 COD/TN 在 9.3~12.1 时, 进水 COD 在  $3\ 058\sim 5\ 097 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN 在  $378\sim 422 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水 COD 在  $425\sim 504 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN 在  $46\sim 48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,

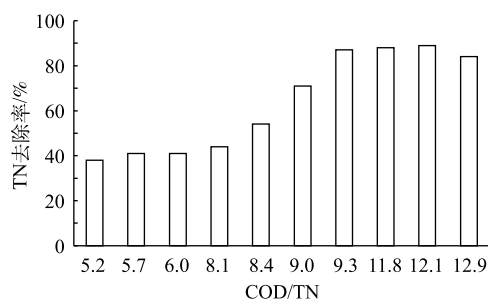


图5 现场调整中不同 COD/TN 对应 TN 的平均去除率  
Fig. 5 Relationship between different COD/TN ratio and TN average removal rate in field process regulation

TN 去除率可以稳定在 85% 以上，最高达到 89%，且水中 TNK 未检出，说明系统中氨化反应和硝化反应进行彻底，则 TN 主要以  $\text{NO}_3\text{-N}$  存在。而当 COD/TN 继续升高至 12.9 时，TN 去除率反而下降。这主要是因为清液自身带有一定浓度的有机氮，这些氮的存在影响了原水中 TN 去除量的计算，从而影响了系统的 TN 去除率。

根据上述实验结果对污水站的运行参数进行了相应调整，当混合液回流比和污泥回流比分别为 450% 和 100% 时，采用 COD/TN=12.1，即每 kg TN 投加清液约 307 L，该污水站的外排 TN 可稳定在  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下。综上所述，DDG 项目废水脱氮工艺中，A/O 系统进水 TN 约  $300\sim 600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，可通过投加清液作为碳源，以确保 A/O 系统废水 COD/TN 在 12.1 以上，使 A/O 系统保持较高的 TN 去除率的同时，对运行成本的影响有限。

#### 4 结论

1) 对于反硝化脱氮碳源不足废水处理，通过投加葡萄糖、乙醇、清液 3 种不同碳源进行反硝化实验，结果表明：采用葡萄糖、乙醇和清液分别做反硝化碳源时，脱氮效率分别为 76.6%、79.4% 和 57.2%；同时，以葡萄糖作碳源时的 TN 去除速率最小，清液次之，乙醇作碳源的 TN 去除速率最大为  $8.33 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ，反硝化细菌优先利用小分子醇和酸类有机物作为反硝化碳源。

2) 对 3 种碳源条件的经济性比较发现，清液为乙醇成本的 9%、为葡萄糖的 37%。利用原废水中的有机物经济性最佳，也符合污水处理可持续发展的需要。

3) 在 DDG 项目废水处理脱氮工艺中，A/O 系统进水 TN 约  $300\sim 600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，可通过投加清液作为碳源确保 A/O 系统废水的 COD/TN 在 12.1 以上，从而使 A/O 具有较高 TN 去除率的同时，对运行成本的影响有限。

4) 实际工程应用研究为 DDG 废水的处理提供了经济合理的碳源补充方案，能为可生化性较好的发酵行业废水处理提供参考。为获得更好的脱氮效率，下一步还需探讨好氧系统内回流比及反硝化停留时间对反硝化效率的影响。

#### 参 考 文 献

- [1] 黄宇彤, 杜连祥, 赵继湘. 世界燃料酒精生产形势[J]. 酿酒, 2001, 28(5): 24-26.
- [2] 谢林. 玉米酒精生产新技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000.
- [3] 张欣, 王少惠. 酒糟废水处理工程设计[J]. 给水排水, 2001, 27(3): 65-67.
- [4] 杨健, 周小波. 酒精废水消化液生物硝化和脱氮试验[J]. 环境工程, 2006, 24(1): 27-30.
- [5] 张仲玲. 反硝化脱氮外加碳源的选择[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 尹志轩, 谢丽, 周琪, 等. 碳源性质和 COD/ $\text{NO}_3\text{-N}$  对硝酸盐还原途径的影响[J]. 工业水处理, 2018, 38(5): 58-61.
- [7] 周小波, 杨健. 缺氧/好氧 SBR 工艺去除酒精废水中的氮[J]. 工业用水与废水, 2006, 37(6): 27-30.
- [8] 聂静. 酒精废水厌氧消化液深度处理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [9] AKUNNA J C, BIZEAU C, MOLETTA R. Nitrate reduction by anaerobic sludge using glucose at various nitrate concentrations: Ammonification, denitrification and methanogenic activities[J]. Environmental Technology, 1994, 15(1): 41-49.
- [10] 李基东. 反硝化脱氮补充碳源选择与研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] 杨从发. 木薯酒精废糟培养小球藻工艺及灵芝生物转化小球藻的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [12] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002.

- [13] 林炜. 有机氮在厌氧及好氧生化条件下氨化效果的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [14] 胡国山, 张建美, 蔡惠军, 等. 碳源、C/N和温度对生物反硝化脱氮过程的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(14): 74-77.
- [15] 吴代顺, 桂丽娟, 陈晓志, 等. 不同类型碳源及其投加量对污泥反硝化的影响研究[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(3): 99-103.

(本文编辑: 靳炜, 郑晓梅)

## Optimization of denitrification treatment process of fuel ethanol wastewater based on carbon source

NING Xingfang<sup>1</sup>, CUI Haiwei<sup>2</sup>, DU Jinbao<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2,\*</sup>

1. Guangdong Bio-Energy of SDIC Co.Ltd., Zhanjiang 524399, China

2. Beijing Guodian Longyuan Environmental Engineering Co.Ltd., Beijing 100039, China

\*Corresponding author, E-mail: 20045054@chnenergy.com.cn

**Abstract** The C/N ratio in the A/O influent of the the rice fuel ethanol DDG wastewater treatment process in a plant was too low to meet the the discharge standard of total nitrogen for the effluent. In this study, the carbon sources in the denitrification system were screened, and a suitable carbon source was determined and the wastewater treatment process was adjusted for the increase of denitrification efficiency. The carbon source screening test was conducted among the three carbon sources of glucose, ethanol and clear liquid (raw wastewater). The changes of pH value and total nitrogen concentration in the the reaction system were investigated, then the total nitrogen removal rates and operating costs were compared when different carbon sources are added to the denitrification system. The results showed that the when ethanol was taken as carbon source, the fastest removal rate of total nitrogen occurred with a value of  $8.33 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , which was 1.1 or 1.18 times of the carbon source of glucose or clear liquid (raw wastewater), respectively. The operating cost with the carbon source of raw wastewater was 9% of ethanol and 37% of glucose, respectively. Through the comprehensive analysis and comparison of denitrification reaction rate and operating cost among different carbon sources additions for denitrification, the best choice was to add raw wastewater to adjust A/O denitrification process in this wastewater treatment plant. After verification in field process, when the total nitrogen in the influent of A/O system was about  $300 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and the COD/TN ratio in the wastewater was above 12.1 by adding raw wastewater, the effluent total nitrogen concentration could be stabilized lower than  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The research provides an economic and reasonable carbon supplement scheme for DDG wastewater treatment, and provides a reference for fermentation wastewater treatment with good biodegradability.

**Keywords** rice fuel ethanol DDG wastewater; total nitrogen; denitrification; carbon source