

# 混合液回流比和外碳源对反硝化脱氮效能的影响

姚学文<sup>1</sup>, 罗斌<sup>2</sup>, 邱家国<sup>2</sup>, 许晓毅<sup>1</sup>, 杜宇麟<sup>2</sup>, 吴晓林<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆市渝西水务有限公司, 重庆 402160)

**摘要:** 针对某城镇污水处理厂存在垃圾渗滤液间歇性排入导致进水碳氮比值较低的问题, 为确保出水总氮稳定达标, 进行了混合液回流比优化调控和外碳源乙酸钠投加对反硝化脱氮效果影响的生产性试验研究。结果表明, 当 C/N (COD/TN) 值为 4.48 ~ 6.97, 且混合液回流比分别为 200% 和 300% 时, 对 TN 的平均去除率分别为 50.18% 和 61.88%, 混合液回流比调增可在一定程度上提升 TN 去除率, 但出水 TN 平均浓度的降低较为有限。根据进水水质与出水硝酸盐浓度水平, 以投加乙酸钠的理论计算量为基础, 发现当混合液回流比为 300% 且乙酸钠投加量为理论投加量的 1.3 倍 (182 mg/L 污水) 时, 反硝化脱氮效能显著提升, 出水 TN 浓度达到一级 A 标准, 乙酸钠药剂成本约为 0.55 元/m<sup>3</sup> 污水。

**关键词:** 城镇污水; 混合液回流比; 乙酸钠; 反硝化脱氮

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0058-06

## Effect of Mixed Liquor Recycle Ratio and External Carbon Source on Denitrification Efficiency

YAO Xue-wen<sup>1</sup>, LUO Bin<sup>2</sup>, QIU Jia-guo<sup>2</sup>, XU Xiao-yi<sup>1</sup>, DU Yu-lin<sup>2</sup>, WU Xiao-lin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Yuxi Water Co. Ltd., Chongqing 402160, China)

**Abstract:** One wastewater treatment plant has a low C/N (COD/TN) ratio due to the intermittent landfill leachate influent. A experimental study was conducted to investigate the effect of mixed liquor recycle ratio and additional external carbon source on the removal of TN, and to reduce TN concentration in effluent to satisfy the discharge standard. When the C/N ratio was 4.48 - 6.97, and the mixed liquor recycle ratio was 200% and 300%, the average removal rates of TN in effluent were 50.18% and 61.88%, respectively. The results indicated that the increase of the mixed liquor recycle ratio improved the removal efficiency of TN to a certain extent, but it had limited benefit to the decrease of TN average concentration in effluent. Based on the influent characteristics and nitrate concentration in effluent, the theoretical dosage of sodium acetate was calculated. The results showed that, with the mixed liquor recycle ratio of 300% and 1.3 times of the theoretical dosage of sodium acetate (182 mg/L wastewater), the denitrification efficiency increased significantly and the TN in effluent had met the first level A

基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目 (cstc2018jszx-zdyfxmX0014)

通信作者: 许晓毅 E-mail: xuxiaoyi@cqu.edu.cn

standard specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The cost of sodium acetate was about 0.55 yuan/m<sup>3</sup> wastewater.

**Key words:** municipal wastewater; mixed liquor recycle ratio; sodium acetate; denitrification

随着水体富营养化问题日益突显,城镇污水处理厂出水氮、磷执行标准日益严格,全国城镇污水处理系统的提标升级如火如荼。根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002),一级 B 标准升级为一级 A 标准的核心指标主要为悬浮固体(SS)、总氮(TN)、总磷(TP),其中 SS 与 TP 易于采用深度处理工程措施得以有效保障<sup>[1]</sup>,而 TN 去除效能的提升仍然是目前我国城镇污水处理技术提升的瓶颈,尤其是进水碳氮比普遍偏低的南方城镇污水处理厂或进水需接纳垃圾渗滤液的污水处理厂<sup>[2-3]</sup>,出水 TN 难以稳定达标的问题更为突出。

根据生物脱氮除磷理论,碳源是反硝化过程的电子供体,只有保证充足的微生物可利用的含碳基质才能达到良好的脱氮效果<sup>[4-6]</sup>。城镇污水的 BOD<sub>5</sub>/TN 值是影响生物脱氮效果的关键因素<sup>[7]</sup>,根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),若实现稳定一级 B 标准排放,进水 BOD<sub>5</sub>/TN 值宜大于 4~5;当 BOD<sub>5</sub>/TN 值 < 3 时,污水处理厂进水碳源不足,城镇污水 BOD<sub>5</sub>/COD 值按 0.4~0.5 进行换算,则 COD/TN 值不宜小于 6~7.5。因此,基于运行参数优化的外碳源投加仍然是目前城镇污水挖掘反硝化效能提升空间,并确保出水 TN 稳定达标的重要手段之一。

目前,结合混合液回流比与外碳源投加量,系统考察污水生物脱氮效果的生产性试验研究尚较为缺乏。笔者针对重庆某城镇污水处理厂,在探讨混合液回流比调控对 TN 去除效果提升空间的基础上,重点考察了外碳源投加量对反硝化脱氮强化过程的影响,旨在为低 C/N 值污水处理的生物脱氮工艺优化运行与调控提供技术指导。

## 1 污水处理厂概况

试验在重庆市某城镇污水处理厂进行,该污水处理厂工程设计规模为 5 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d(单组为 2.5 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,共 2 组),实际处理量为 (5.6~6.1) × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,生化单元采用奥贝尔(Orbal)氧化沟工艺,工艺流程如图 1 所示。污水处理厂进水为排入服务片区城市下水道的市政污水,并不定时地接纳垃圾渗

滤液。污水处理厂的氧化沟单元分两组运行,外沟、中沟、内沟的溶解氧浓度分别为 0.06、1.04、2.43 mg/L,体积比为 2.80:1.89:1,现状混合液回流比为 200%,污泥龄为 17~20 d,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准。

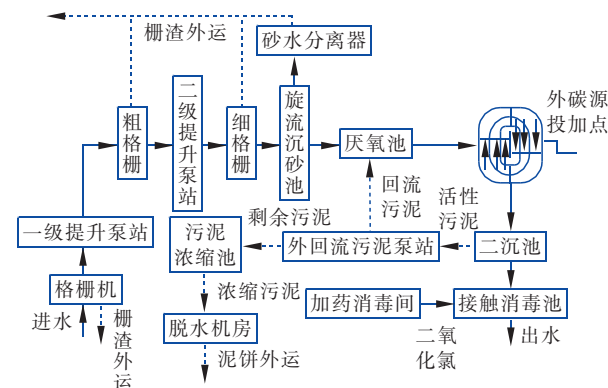


图1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment plant

污水厂 2016 年 6 月—2017 年 5 月的进水水质如下: BOD<sub>5</sub> 为 41~236 mg/L, 平均为 113.36 mg/L; COD 为 79~615 mg/L, 平均为 282 mg/L; TN 为 16.6~87.5 mg/L, 平均为 49.7 mg/L; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 8.2~65.7 mg/L, 平均为 36.9 mg/L; TP 为 1.7~12.9 mg/L, 平均为 4.9 mg/L; SS 为 68~390 mg/L, 平均为 176.2 mg/L; C/N (COD/TN) 值为 2.9~13.6, 平均为 5.8。可以看出, 由于该污水厂存在垃圾渗滤液间歇性排入, 进水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 等水质指标波动较大, 属于典型的低碳源污水。根据污水厂日常运行数据报表, 出水 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮能稳定达到一级 A 标准, TN、TP 能达到一级 B 标准。

## 2 试验方案

### 2.1 混合液回流比的调控

混合液内回流主要为生物反硝化脱氮提供电子受体, 内回流比的大小对 Orbal 氧化沟反硝化脱氮有显著影响。为最大限度发挥外碳源对 TN 去除效能的提升潜能, 不同混合液回流比的试验研究中, 混合液回流比分别设为 200%、300%, 试验时间分别

为1周,每天取样两次。

## 2.2 外碳源的投加

基于混合液回流比调控试验结果,混合液回流比控制为300%,选择乙酸钠作为外碳源<sup>[7-10]</sup>,在单组氧化沟内开展外碳源的投加试验,另一组作为对照。投加乙酸钠试验期间,不改变污水厂其他现状运行条件,包括流量、各生化单元的污泥浓度、外回流比和曝气量等。

外购乙酸钠的COD当量为0.464 gCOD/gNaAc(理论当量为0.78 gCOD/gNaAc),基于进水水质与出水硝酸盐削减量的保守值估算,乙酸钠药剂的理论投加量为140 mg/L污水,单组氧化沟单元(平均流量为 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )的乙酸钠理论用量为3 920 kg/d。分别进行1.0、1.3和1.6倍理论投加量的试验,各批次投加量的试验周期为3 d。

为强化缺氧区微生物对外碳源的充分利用,乙酸钠投加点选择氧化沟外沟,位于氧化沟外沟与中沟连通孔口的下游约2 m处。试验采用半连续式溶液罐投加,每天投加12 h,投加时段为夜间22:00至次日白天10:00。

## 2.3 水质指标检测

检测水样取自污水处理厂的沉砂池出水和二沉池出水,每日采样时间为8:00、10:00、14:00、16:00、22:00,测试指标包括TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD等,污泥指标每天10:00与16:00各检测1次。各指标分析方法参照《水和废水监测分析方法》(第4版)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 混合液回流比对去除TN的影响

混合液回流比分别为200%和300%时,TN去除效果如图2所示。混合液回流比调控前后C/N值范围分别为4.49~6.97、3.40~7.14。调控前生化单元进水TN浓度为24.26~51.54 mg/L(平均值为41.37 mg/L),二沉池出水TN浓度为16.64~20.99 mg/L(平均值为19.87 mg/L),TN去除率为31.30%~62.52%(平均值为50.18%)。混合液回流比优化调控后,生化单元进水TN浓度为39.28~72.57 mg/L(平均值为52.16 mg/L),二沉池出水TN浓度为18.26~20.63 mg/L(平均值为19.44 mg/L),TN去除率为52.76%~71.57%(平均值为61.88%)。混合液回流比优化调控前后,TN平均去除率提升了约11.7%,生化单元的污泥活性较调控前明显改善。在进水TN冲击负荷较高、碳源显著

不足的情况下,出水TN仍存在一定程度的超标风险。一方面,内回流比调增期间,混合液内循环量也增加,COD消耗的潜势增加而加重反硝化碳源的不足<sup>[11]</sup>;同时,混合液回流比的提高也会在一定程度上降低污水的水力停留时间,并将相对更多的溶解氧带入缺氧区,在低C/N值条件下,也是制约反硝化过程显著提升的不利因素。因此,仅靠混合液回流比优化,无法确保TN浓度较高的污水稳定达标排放以及水质进一步提升的要求。

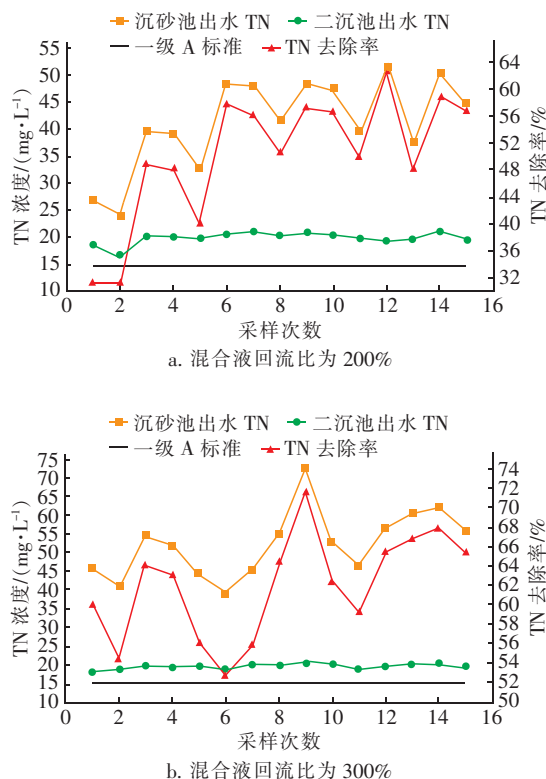


图2 混合液回流比对去除TN的影响

Fig. 2 Effects of mixed liquor recycle ratio on TN removal

### 3.2 投加外碳源的影响

#### 3.2.1 对去除TN的影响

投加外碳源的生产性试验期间,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度稳定低于1 mg/L,不同投加量(I:1.0倍理论投加量;II:1.3倍理论投加量;III:1.6倍理论投加量,下同)对TN去除效果的影响见图3。结果表明,系统脱氮特性对乙酸钠的响应较为迅速,随着乙酸钠投加周期的延长,污泥对外碳源的适应性逐渐改善,各阶段出水TN平均浓度与内沟好氧区SVI值均呈逐渐递减趋势;同时,随着乙酸钠投加量的增加,TN去除率总体上升,污泥活性与沉降性能显著改善。

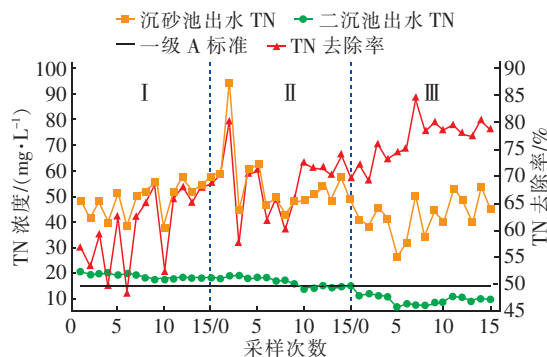


图3 外碳源投加量对去除TN的影响

Fig. 3 Effect of external carbon source dosage on TN removal

在阶段 I 中,进水 TN 平均浓度为 49.12 mg/L 时,出水 TN 可稳定达到一级 B 标准,出水 TN 浓度为 17.57 ~ 20.73 mg/L,相较于未投加外碳源的工况,投加乙酸钠的第 3 天 TN 平均去除率增加了 5.1%。阶段 II 后期,投加外碳源对反硝化效能提升的效应凸显,进水 TN 平均浓度为 51.11 mg/L 时,出水 TN 浓度达到一级 A 标准限值。在阶段 III 中,污水处理系统对 TN 的去除率显著提高,最高可达 84.61%,出水 TN 浓度为 6.76 ~ 11.85 mg/L,远远低于一级 A 标准的限值。

### 3.2.2 对出水 COD 浓度的影响

投加外碳源首先需要遵循出水有机物浓度达标的原则<sup>[8]</sup>,投加外碳源期间各阶段出水 COD 浓度的变化如图 4 所示。

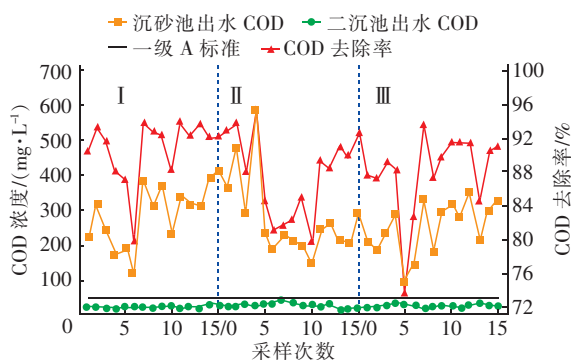


图4 投加外碳源期间出水COD浓度的变化

Fig. 4 Change of COD concentration during the external carbon source dosing experiment

试验期间,各批次乙酸钠投加量条件下,对 COD 的平均去除率为 88.74%,二沉池出水 COD 浓度为 20 ~ 42 mg/L,低于一级 A 标准限值。生化系统中活性污泥对乙酸钠的利用率较高,外碳源的投

加未对出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  产生不利影响。

### 3.2.3 好氧单元污泥浓度的变化

试验阶段生化单元进水 C/N 值与好氧区 MLSS 的变化见图 5。试验期间,进水 C/N 值为 2.79 ~ 9.53,碳源缺乏。在污水厂剩余污泥排泥量不变时,内沟好氧区 MLSS 随着乙酸钠投加时间的增加而增加,外碳源投加试验结束后,生化单元 MLSS 平均浓度增加了 499 mg/L。

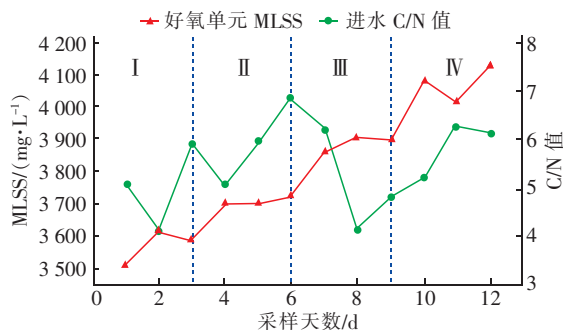


图5 投加外碳源期间好氧单元污泥浓度的变化

Fig. 5 Change of MLSS in aerobic zone during the external carbon source dosing experiment

根据国际水协提供的活性污泥 I 号模型,反硝化过程的有机物消耗量 ( $X$ , gCOD/g $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) 可按下式计算,其中  $Y_H$  为表观污泥产率。

$$X = 2.86 / (1 - Y_H) \quad (1)$$

计算得到 1.0、1.3、1.6 倍乙酸钠理论投加量下,表观污泥产率(以污泥干质量计)分别为 0.24、0.43、0.55 kgDS/(kgCOD · d)。根据文献[12],反硝化 1 mg  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  理论消耗 5 mg  $\text{BOD}_5$ ,乙酸钠的 B/C 值以 0.769 2 计,则反硝化 1 mg  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  理论消耗 6.5 mg COD。比较本试验结果,外碳源投加过程中,单位质量硝酸盐所消耗的外碳源量分别为 3.77、4.68、6.43 gCOD/g $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,均低于理论值,且投加量越低,与理论值相差越大,充分表明,在生化单元缺氧区投加外碳源乙酸钠后,在剧烈的分子扩散作用下乙酸钠迅速扩散并在整个构筑物中循环,而并非定向被反硝化细菌靶向性利用,导致实际投加量高于理论投加量,且不可避免地促进了系统中各类异养微生物对外碳源的利用和微生物的代谢增殖。在碳源投加初期,微生物处于驯化适应阶段,反硝化菌对碳源的利用亦需要适应。

### 3.3 技术经济指标浅析

以乙酸钠投加量为 1.3 倍理论值计,污水厂外



购乙酸钠药剂的投加量为  $182 \text{ g/m}^3$  污水,相较于国内部分城镇污水厂强化生物脱氮的外碳源投加量略高<sup>[13]</sup>,这一方面是由于厂方所购固体外碳源的 COD 当量较低,同时与原污水中 TN 浓度高且波动大也有较大关系。污水厂外购乙酸钠的单价为 3 050 元/t,外碳源投加使得污水处理成本提高了约 0.55 元/ $\text{m}^3$  污水,试验条件下,出水 TN 浓度低于一级 A 标准限值。另一方面,结合污水厂进水水质波动规律,通过优化调控运行条件,深度进行管理提标,外碳源投加量具有进一步降低的空间,在确保出水 TN 浓度达到一级 A 标准的同时,最大限度地控制运行成本。此外,投加外碳源在一定程度上也会增加剩余污泥的处理与处置费用。

#### 4 结论

针对低 C/N 值进水的城镇污水处理厂,混合液回流比的优化仅能在一定程度上改善生物反硝化过程特性,以乙酸钠作为外碳源投加至生化单元缺氧区的适宜点,能够显著提高生化单元的生物脱氮效能,实现出水 TN 浓度达到一级 A 标准排放。外碳源的投加会在一定程度上增加活性污泥的表观产率,污水厂实施外碳源投加应在参考理论计算的基础上,结合进水水质波动的规律,采用非连续性方式进行,以最大程度地降低运行成本。

#### 参考文献:

- [1] 王阿华. 城镇污水处理厂提标改造的若干问题探讨[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 19-22.  
Wang Ahua. Discussion on some problems in upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 19-22 (in Chinese).
- [2] 赵宗升, 刘鸿亮, 李炳伟, 等. 高浓度氨氮废水的高效生物脱氮途径[J]. 中国给水排水, 2001, 17(5): 24-28.  
Zhao Zongsheng, Liu Hongliang, Li Bingwei, et al. Pathways of efficient biological nitrogen removal from wastewater with high ammonia nitrogen concentration [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(5): 24-28 (in Chinese).
- [3] 余建恒, 赵淑贤, 夏耿东, 等. 接入垃圾渗滤液对城市污水厂运行的影响与对策[J]. 中国给水排水, 2010, 26(4): 95-97.  
Yu Jianheng, Zhao Shuxian, Xia Gengdong, et al. Impact and countermeasures of treating landfill leachate in municipal sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(4): 95-97 (in Chinese).
- [4] Henze M. Capabilities of biological nitrogen removal process from wastewater[J]. Water Science & Technology, 1991, 23: 9-11.
- [5] Her J J, Huang J S. Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough[J]. Bioresour Technol, 1995, 54(1): 45-51.
- [6] Nyberg U, Andersson B, Aspegren H. Long-term experiences with external carbon sources for nitrogen removal[J]. Water Sci Technol, 1996, 33(12): 109-116.
- [7] 马勇, 彭永臻, 王淑莹. 不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 820-824.  
Ma Yong, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 820-824 (in Chinese).
- [8] 孙永利, 许光明, 游佳, 等. 城镇污水处理厂外加商业碳源的选择[J]. 中国给水排水, 2010, 26(19): 84-86.  
Sun Yongli, Xu Guangming, You Jia, et al. Selection of external carbon source for municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(19): 84-86 (in Chinese).
- [9] 殷芳芳, 王淑莹, 昂雪野, 等. 碳源类型对低温条件下生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 108-113.  
Yin Fangfang, Wang Shuying, Ang Xueye, et al. Effects of carbon source types on denitrification performance at low temperature [J]. Environmental Science, 2009, 30(1): 108-113 (in Chinese).
- [10] 杨巧林, 奚小英, 陈娜, 等. 外加碳源对污水厂异常进水时的强化脱氮效果[J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 106-108.  
Yang Qiaolin, Xi Xiaoying, Chen Na, et al. Enhanced nitrogen removal efficiency of external carbon source during abnormal influent in municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(3): 106-108 (in Chinese).
- [11] 许方园, 李勇, 黄勇. 内回流比对连续流改进 A<sup>2</sup>/O 反应器性能的影响[J]. 水处理技术, 2009, 35(8):

(下转第 66 页)