

# 晋中市污水水质及低 C/N 值进水反硝化特征

曹岳<sup>1</sup>, 端允<sup>1</sup>, 周爱娟<sup>1</sup>, 杨志宏<sup>2</sup>, 岳秀萍<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西正阳污水净化有限公司  
晋中市污水处理厂, 山西 晋中 030060)

**摘要:** 针对城市污水处理厂出水总氮浓度超标和低 C/N 值(C/N 值<4)的现象,以晋中市某污水处理厂为研究对象,深入分析其污染物指标分布概率和污水水质特征。采用间歇式反硝化试验,对比了以沉砂池、初沉池出水为进水的反硝化过程中,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  及 COD 的去除效果,并用动力学方法分析两种进水反硝化特征的差异。试验结果表明,沉砂池出水和初沉池出水的反硝化过程均可分为快速反应期、减速反应期和慢速反应期。碳氮比较低条件下,反硝化过程呈一级动力学反应。取消初沉池后,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率可提高 9%,颗粒性有机物碳源( $\text{COD}_{\text{ss}}$ )可起到增加外碳源的作用。同时表明,取消初沉池为反硝化微生物提供颗粒性有机碳源的工艺思路合理可行,对实际城市污水处理具有指导意义和应用价值。

**关键词:** 水质特征; 低 C/N 值; 反硝化; 动力学

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0102-04

## Wastewater Quality of Jinzhong City and Denitrification Characteristics of Influent with Low C/N Ratio

CAO Yue<sup>1</sup>, DUAN Yun<sup>1</sup>, ZHOU Ai-juan<sup>1</sup>, YANG Zhi-hong<sup>2</sup>, YUE Xiu-ping<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Wastewater Treatment Plants of Jinzhong City, Shanxi Zhengyang Wastewater Treatment Co. Ltd., Jinzhong 030060, China)

**Abstract:** To deal with the high concentration of TN and low C/N ratio (lower than 4) in the effluent from wastewater treatment plants, a wastewater treatment plant in Jinzhong City was selected to analyze the distribution probability of contaminant indexes and the characteristics of wastewater quality. The removal efficiencies of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and COD during denitrification with the effluents from the grit chamber and primary sedimentation tank as influent were compared through batch denitrification tests. The differences in denitrification characteristics between the two influents were analyzed using kinetics method. The results showed that the denitrification processes using the effluents from the grit chamber and primary sedimentation tank could both be divided into three stages, namely rapid reaction stage, deceleration reaction stage and slow reaction stage. Under the condition of insufficient C/N ratio, the denitrification process followed first-order kinetics reaction. After eliminating the primary sedimentation tank, the removal rate of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  could be increased by 9%, and  $\text{COD}_{\text{ss}}$  had positive impact as adding external car-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378330); 山西省重点研发(社会发展方面)项目(201603D321012); 山西省国际科技合作项目(2014081007-1)

通信作者: 端允 E-mail: duanyun@tyut.edu.cn; 岳秀萍 E-mail: yuexiuping@tyut.edu.cn

bon source. It is feasible to eliminate the primary sedimentation tank to provide organic suspended matter for denitrifying microorganisms, and it has a better guiding significance and practical value for urban sewage treatment.

**Key words:** water quality characteristic; low C/N ratio; denitrification; kinetics

晋中市中心城区某污水厂采用改良 A/A/O + 混凝沉淀过滤工艺,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 A 标准,但污水中氮源不足现象显著。笔者以山西省市政工程研究生教育创新中心——城市污水处理厂研究基地为研究对象,以三年来的实际污水量和实际进水水质数据为样本,利用数学统计分析法,研究了污水中 COD、BOD<sub>5</sub>、SS、TP、NH<sub>3</sub>-N 和 TN 浓度的概率分布、季节变化规律。分别以污水厂实际的沉砂池出水和初沉池出水作为反硝化缺氧段进水,采用间歇式反硝化试验,分析了两种进水条件下反硝化速率的特点及差异,旨在为城市污水处理厂的运行调控、工艺设计、监测数据的可靠性判断及科学研究提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与方法

反硝化速率试验采用有效容积为 1 L 的间歇式反应装置,加入活性污泥、原水、KNO<sub>3</sub> 后用橡胶塞密封瓶口,保持缺氧环境。利用磁力搅拌器搅拌,转速为 80 r/min,使污泥处于悬浮状态。溶解氧仪通过橡胶塞插入瓶中以监测溶解氧浓度。

接种污泥取自污水厂 A/A/O 工艺缺氧池中的污泥混合液。MLSS 在 7 000 ~ 8 000 mg/L,MLVSS 在 3 000 ~ 4 000 mg/L。为了避免污泥混合液中含有的有机物和硝态氮对初始 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的干扰,将污泥混合液经滤膜抽吸过滤或高速离心(4 000 r/min,离心 2 min)处理后使用。

### 1.2 试验用水水质

沉砂池反硝化速率试验:取污水处理厂沉砂池出水为反硝化原水,其 COD 为 200 ~ 300 mg/L,SCOD 为 50 ~ 150 mg/L。KNO<sub>3</sub> 作为氮源,为模拟晋中市污水低 C/N 值,使反应器内初始 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 45 ~ 50 mg/L(按 BOD<sub>5</sub>/COD 值为 0.4 ~ 0.6 估算,使反应器中的 BOD<sub>5</sub>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 值 < 0.3 ~ 2.0)。

初沉池反硝化速率试验:取污水处理厂初沉池出水为反硝化原水,KNO<sub>3</sub> 作为氮源,使反应器内初始 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 45 ~ 50 mg/L。

### 1.3 检测项目

SS、VSS、COD、SCOD、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>3</sub>-N、TP 等常规指标采用国标法测定<sup>[1]</sup>,颗粒态 COD(COD<sub>ss</sub>)为 COD 与 SCOD 的差值,溶解氧采用溶解氧仪测定。

拟合反硝化反应曲线斜率的绝对值表示反硝化速率,其值除以污泥浓度后即为比反硝化速率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 进水水质及污染物特征

#### 2.1.1 进水水质分布特征和统计分析

统计了 2013 年—2015 年晋中市污水中 BOD<sub>5</sub>、COD、SS、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 等六项水质指标,并进行了分布检验。Kolmogorov-Smirnov 和 Lilliefors 检验的显著性水平都远远低于 0.05,表明样本不是正态分布。其中 BOD<sub>5</sub>、COD、SS 和 TP 的偏度系数为正值,表明此四项水质指标样本为正偏态分布,而 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 偏度系数为负值,表明该两项水质指标样本为负偏态分布。COD、BOD<sub>5</sub>、SS 与 TP 的峰度系数大于 3,表明此四项水质指标的总体分布密度曲线在峰值附近比正态分布陡峭;NH<sub>3</sub>-N 与 TN 的峰度系数小于 3,表明该两项水质指标的总体分布密度曲线在峰值附近比正态分布平缓。

五项测试指标的逐月变化规律表明,1 972 个 COD 样本均值与中位数接近且基本稳定,一年中,中位数多数在 310 ~ 400 mg/L 之间,只有 8 月份的中位数低于 300 mg/L。2 032 个样本的 BOD<sub>5</sub> 浓度均值在 1 月—5 月基本平稳,5 月之后逐渐降低,至 8 月达到最低值,随后 BOD<sub>5</sub> 浓度又回升,到 12 月再次趋于稳定。分析原因,可能是 6 月—8 月进入夏季,部分雨水混入污水管道造成进厂污水中污染物浓度降低。一年中,BOD<sub>5</sub> 浓度的中位数在 120 ~ 170 mg/L 之间,只有 8 月的中位数低于 100 mg/L。2 034 个样本的 SS 浓度均值在 154 ~ 243 mg/L 之间波动,其中 8 月份最低,5 月份达到最高值,中位数在 148 ~ 248 mg/L 之间波动,其中 1 月份最低,5 月份达到最高值,样本均值与中位数差值的变化有一定的幅度,1 月份差值达到 28 mg/L,12 月份差值仅

0.6 mg/L。2 003 个样本的  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度均值与中位数基本接近,略低于 45 mg/L,在 7 月和 9 月样本均值与中位数均最小,5 月份最高,其余月份居中。2 034 个样本的 TN 浓度均值在 50 ~ 62 mg/L 之间波动,中位数在 48 ~ 64 mg/L 之间,两者均在 9 月份最低,5 月份达到最高值;均值与中位数在数值上很接近,8 月份两者相差 2.7 mg/L。2 034 个样本的 TP 浓度均值在 5 ~ 7.5 mg/L 之间波动,其中 8 月份达到最低值,5 月份达到最高值,中位数在 4.7 ~ 6.8 mg/L 之间,其中 1 月份达到最低值,5 月份达到最高值。

### 2.1.2 进水水质组成特征分析

进水  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  值、 $\text{BOD}_5/\text{TN}$  值、 $\text{BOD}_5/\text{TP}$  值、 $\text{TN}/\text{TP}$  值可以分别作为衡量污水可生化性、反硝化能力、生物除磷可行性、微生物营养物质比例适宜性的重要指标<sup>[2,3]</sup>。统计数据表明, $\text{BOD}_5/\text{COD}$  值在 0.1 ~ 0.95 之间,平均值为 0.41,比值分布小于 0.2 的概率为 1.6%,在 0.2 ~ 0.4 之间的概率为 62.9%,在 0.4 ~ 0.6 之间的概率为 25.2%,因此晋中市污水可生化性较强,但存在较多难生物降解物质。 $\text{BOD}_5/\text{TN}$  值在 1 ~ 8 之间,均值为  $2.58 \pm 1.16$ ,比值分布在 1 ~ 3.3 之间的概率为 89.7%,大于 4 的概率不到 10%,因此该市污水采用生物脱氮工艺的主要限制因素是进水碳源,不仅需要充分利用进水碳源,而且还应该采用外加碳源等措施。同时也证明了该市在设计污水处理工艺时,应取消初沉池。 $\text{BOD}_5/\text{TP}$  值在 8 ~ 105 之间,均值为  $25.89 \pm 11.89$ ,比值分布在 20 ~ 41 之间的概率为 79.6%,小于 20 的概率不到 15%,因此  $\text{BOD}_5/\text{TP}$  值基本能满足生物除磷要求。 $\text{TN}/\text{TP}$  值在 3 ~ 29 之间,比值分布在 6.5 ~ 14 之间的概率为 88.1%,小于 5 的概率低于 8.5%,因此  $\text{TN}/\text{TP}$  值可满足微生物的营养物质要求。

### 2.2 沉砂池及初沉池出水碳源特征分析

在污水厂沉砂池出水点和初沉池出水点取样,分析 COD、SS 和 TN 的变化规律及其相互关系。结果表明,沉砂池对 COD 的平均去除率为 5%,出水  $\text{COD}_{\text{ss}}/\text{COD}$  平均值为 50%;初沉池对 COD 的平均去除率为 25%,出水  $\text{COD}_{\text{ss}}/\text{COD}$  平均值为 38%。从碳源总量来看,通过取消初沉池来增加进入生物反应池的碳源是必要的。

悬浮固体分为挥发性悬浮固体(VSS)和非挥发

性悬浮固体(ISS)两种。试验结果表明,污水处理厂沉砂池出水的 VSS/SS 平均值为 43%,初沉池出水的 VSS/SS 平均值为 66%,且初沉池对 SS 的去除率高达 42%,说明取消初沉池为反硝化微生物提供有机悬浮物的工艺思路合理可行。

### 2.3 低 C/N 值进水反硝化速率

#### 2.3.1 反硝化过程中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化

图 1 为反硝化过程中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的变化情况。

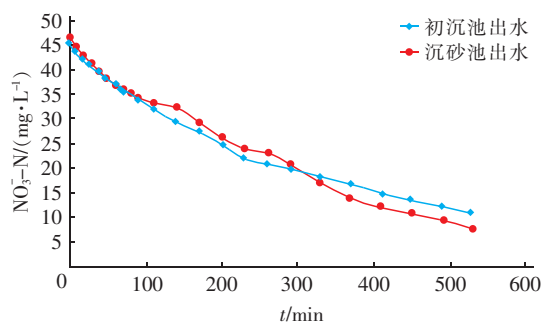


图 1  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的变化

Fig. 1 Variation of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  concentration

由图 1 可知,随着时间的延长  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度不断下降,可将反硝化过程分为 3 个阶段:快速反应期、减速反应期和慢速反应期<sup>[4]</sup>。另外,初沉池出水和沉砂池出水对反硝化的影响不同。

① 两种进水条件下,3 个阶段的速率分界点不同。如果把第 3 阶段的始点看作是内碳源被利用或是慢速反硝化阶段的起始点(慢速反应期),则可粗略地确定两种进水反硝化过程的慢速反应期起始点。当沉砂池出水为反硝化原水时,可认为慢速反应期的起始点出现在反应进行至 370 min;当初沉池出水为反硝化原水时,该点出现在反应后 290 min,两者相差 80 min。

② 两种进水条件下,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率有所不同。当沉砂池出水反硝化进行至慢速反应期起始点(370 min)时,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率为 70%;而当初沉池出水反硝化进行至该点(290 min)时,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率为 57%。初沉池出水对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率比沉砂池的降低了 19%。若以反硝化结束点(530 min)计算,沉砂池出水反硝化对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率为 83%;初沉池出水反硝化对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率为 76%。因此,若取消初沉池则对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率提高了 9%,说明  $\text{COD}_{\text{ss}}$  在一定程度上可以起到增加外碳源的作用。

### 2.3.2 反硝化过程的动力学分析

沉砂池出水试验在 3 个阶段的反硝化速率分别为 9.6、4.4、2.4  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{L} \cdot \text{h})$ , 比反硝化速率分别为 7.9、3.6、2.0  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ; 初沉池出水试验对应的反硝化速率分别为 8.9、4.6、2.2  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{L} \cdot \text{h})$ , 比反硝化速率分别为 8.1、4.2、2.0  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。可以看出, 两种进水条件下, 随着反应的进行, 反硝化速率和比反硝化速率均逐渐降低。若以反硝化开始至结束点 (即全过程) 计算, 则沉砂池出水的平均比反硝化速率为 3.6  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ; 初沉池出水的平均比反硝化速率为 3.5  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。设置了初沉池的平均比反硝化速率降低了 3%。但如果以反硝化开始至慢速反应起始点来计算, 沉砂池出水为原水时, 其平均比反硝化速率则为 4.4  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ; 而初沉池出水为原水时, 其平均比反硝化速率为 4.9  $\text{mgNO}_3^- - \text{N} / (\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。设置初沉池的平均比反硝化速率提高 11%。

根据文献报道, 当碳氮比较大时, 去除  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的反硝化过程为零级反应<sup>[5]</sup>。试验通过模拟污水厂低 C/N 值的情况进行动力学拟合, 从而求解沉砂池出水和初沉池出水反硝化的反应级数。图 2 为两种进水反硝化开始至慢速反应过程反应级数拟合情况 ( $S_0$  和  $S$  分别为初始和  $t$  时刻的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度)。

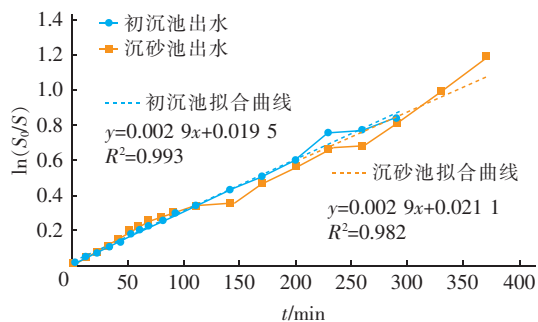


图2 两种进水反硝化开始至慢速反应过程反应级数拟合

Fig.2 Reaction series fitting of different water from starting to slow reaction stage in denitrification process

由图 2 可知, 在本试验条件下两种进水的反硝化过程均呈一级动力学反应。

### 3 结论

① 2013 年—2015 年晋中市污水中  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}$ 、 $\text{SS}$  和  $\text{TP}$  样本为正偏态分布, 而  $\text{NH}_3 - \text{N}$  和

$\text{TN}$  样本为负偏态分布。

② 晋中市污水可生化性较强, 但有难生物降解物质。多数情况下污水中  $\text{BOD}_5$  不能满足反硝化对碳源的需求, 应该取消初沉池。

③ 取消初沉池为反硝化微生物提供有机悬浮物的工艺思路合理可行, 沉砂池出水中含有较多的颗粒性有机物, 且  $\text{COD}_{\text{ss}}/\text{COD}$  的平均值为 50%,  $\text{VSS}/\text{SS}$  平均值为 43%。

④ 将反硝化过程划分为 3 个阶段。两种进水条件下, 各阶段的速率分界点、对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率、反硝化速率均有差异。

⑤ 碳氮比较低时, 无论是否有初沉池, 反硝化过程均呈一级动力学反应。

### 参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] Ganigue R, Volcke E I P, Puig S, et al. Impact of influent characteristics on a partial nitrification SBR treating high nitrogen loaded wastewater[J]. Bioresour Technol, 2012, 111: 62–69.
- [3] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [4] 王社平, 王卿卿, 惠灵灵, 等. 分段进水 A/O 脱氮工艺反硝化速率的测定 [J]. 环境工程, 2008, 26(3): 56–58.
- [5] 郑兰香, 鞠兴华. 温度和 C/N 比对生物膜反硝化速率的影响 [J]. 工业安全与环保, 2006, 32(10): 13–15.



作者简介: 曹岳 (1990—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理理论与技术。

E-mail: 307901138@qq.com

收稿日期: 2016-06-02