

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.013

# 反硝化生物滤池亚硝酸盐积累研究及管控实践

于 斓<sup>1,2</sup>, 李鹏飞<sup>1,2</sup>, 张达飞<sup>1,2</sup>, 赵梦升<sup>1,2</sup>, 孙冀垆<sup>1,2</sup>, 蒋奇海<sup>1,2</sup>,  
何 政<sup>2</sup>, 李魁晓<sup>1</sup>, 王 慰<sup>1</sup>, 李亚明<sup>1,2</sup>, 张新勃<sup>1,2</sup>

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022; 2. 北京北排水环境发展有限公司,  
北京 100124)

**摘 要:** 根据反硝化生物滤池脱氮运行时的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况,从甲醇投配率、反冲洗周期、进水负荷、磷浓度、乙酸钠投配率角度进行试验,探究降低 $\text{NO}_2^-$ -N积累量的管控措施。结果表明,当甲醇投配率在20~40 mg/L时,投配率越高, $\text{NO}_2^-$ -N积累越严重,最高可达6 mg/L以上;不同反冲洗周期以及磷浓度对反硝化菌群未产生明显影响, $\text{NO}_2^-$ -N积累仍较高;当进水负荷降至50%时,可有效增加脱氮停留时间,出水 $\text{NO}_2^-$ -N稳定在2 mg/L左右,但需根据实际运行设定差异化的负荷配比;更换碳源为乙酸钠后,对 $\text{NO}_2^-$ -N积累的缓解效果较好,最大积累量可控制在2~3 mg/L,可以作为 $\text{NO}_2^-$ -N积累管控的有效措施。

**关键词:** 亚硝酸盐; 反硝化生物滤池; 甲醇; 反冲洗周期; 进水负荷; 乙酸钠

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0088-06

## Nitrite Accumulation Investigation and Control Strategies in Denitrifying Biofilter

YU Lan<sup>1,2</sup>, LI Peng-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Da-fei<sup>1,2</sup>, ZHAO Meng-sheng<sup>1,2</sup>, SUN Ji-lu<sup>1,2</sup>,  
JIANG Qi-hai<sup>1,2</sup>, HE Zheng<sup>2</sup>, LI Kui-xiao<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LI Ya-ming<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Xin-bo<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China; 2. Beijing Drainage Water  
Environment Development Co. Ltd., Beijing 100124, China)

**Abstract:** According to the  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation observed in the denitrifying biofilter during operation, experiments were carried out from multiple perspectives, including methanol dosing rate, backwash cycle, influent load, phosphorus concentration, and sodium acetate dosing rate, to investigate effective control strategies for mitigating  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation. When the methanol dosing rate was in the range of 20–40 mg/L, a higher dosing rate resulted in more severe  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation, with the maximum level exceeding 6 mg/L. Different backwash cycles and phosphorus concentrations had no significant impact on the denitrifying bacterial community; however, the accumulation of  $\text{NO}_2^-$ -N remained at a relatively high level. When the influent load was decreased to 50%, the residence time for nitrogen removal could be significantly enhanced, and the effluent  $\text{NO}_2^-$ -N remained consistently about 2 mg/L. However, the differentiated load ratio should be determined based on actual operational conditions. After substituting the carbon source with sodium acetate, the accumulation of  $\text{NO}_2^-$ -N was alleviated, and

the maximum accumulation was maintained within the range of 2–3 mg/L. This approach can serve as an effective strategy for controlling  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation.

**Key words:** nitrite; denitrifying biofilter; methanol; backwash cycle; influent load; sodium acetate

反硝化生物滤池主要利用滤料中附着的微生物,在水中残留有机物及外加碳源提供电子供体的情况下进行反硝化作用脱氮<sup>[1]</sup>。反硝化过程是一个涉及多种酶( $\text{NO}_3^-$ -N 还原酶 NaR、 $\text{NO}_2^-$ -N 还原酶 NiR 等)在内的复杂生化反应,通常伴随  $\text{NO}_2^-$ -N 等中间副产物的产生。反硝化过程中 NaR 对电子的竞争能力大于 NiR,导致出现  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累现象<sup>[2-3]</sup>。因此,通过工艺参数管控,达到促进  $\text{NO}_2^-$ -N 还原的作用,减少  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累,对再生水厂的稳定高效运行至关重要。

在实际生产运行中发现,当以甲醇作为碳源进行脱氮时,反硝化生物滤池在高负荷下更容易出现  $\text{NO}_2^-$ -N 积累。研究表明<sup>[3]</sup>,以甲醇作为电子供体时,其对微生物活性具有抑制作用,系统碳源利用率和反硝化速率明显降低。即当甲醇氧化过程所提供的电子速率无法满足各种还原酶同时获得电子时, $\text{NO}_3^-$ -N 优先被还原,导致中间产物  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累。

笔者主要根据某大型再生水厂反硝化滤池的  $\text{NO}_2^-$ -N 积累现状,从甲醇投配率<sup>[4]</sup>、反冲洗周期、进水负荷<sup>[5]</sup>、磷浓度、乙酸钠投配率<sup>[6]</sup>角度开展试验,分析各种措施降低  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的效果,从而提出可行的  $\text{NO}_2^-$ -N 管控建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 反硝化生物滤池简介

以北京市某大型再生水厂的反硝化生物滤池作为研究对象,开展缓解  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的相关生产性试验。反硝化生物滤池作为污水深度处理单元,主要作用为深化脱氮。再生水厂的工艺流程为初沉池→改良型 A<sup>2</sup>O→二沉池→反硝化生物滤池→超滤膜→臭氧→紫外消毒,设计处理能力为  $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,共 4 个系列,单系列包括 16 组反硝化生物滤池(1<sup>#</sup>~16<sup>#</sup>),单组滤池平面尺寸为  $10.8 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$ ,采用陶粒滤料(直径为 4~6 mm),滤料深度为 3 m,设计进水负荷为  $0 \sim 8.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

反硝化生物滤池工艺流程如图 1 所示。

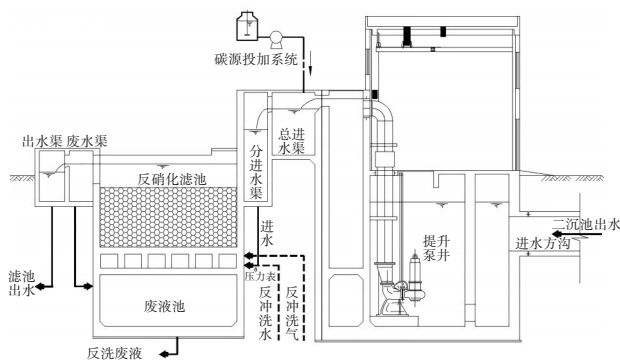


图 1 反硝化生物滤池工艺流程

Fig.1 Process flow of denitrifying biofilter

### 1.2 试验方法

不同甲醇投配率试验,采用隔膜泵投加甲醇药剂;不同反冲洗周期试验,采用可设置 12 h 及 24 h 反冲洗周期的自动反冲洗程序;不同进水负荷试验,通过控制进水闸门开度实现不同进水负荷,即进水负荷占正常负荷的百分比为 100%、85%、75%、50%;不同磷浓度试验,采用蠕动泵投加磷酸二氢钾溶液;不同乙酸钠投配率试验,采用螺杆泵投加乙酸钠药剂。

### 1.3 常规检测指标及方法

$\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、COD、磷、色度等常规指标采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)测定,其中用于检测  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 的水样经滤纸过滤后,取滤液进行测定;甲醇投配率、乙酸钠投配率根据药剂投加在线流量计的数据折算进行核定。

## 2 结果与分析

### 2.1 滤池 $\text{NO}_2^-$ -N 积累的影响

在反硝化生物滤池实际生产运行中,当投加甲醇作为碳源脱氮时,滤池出水  $\text{NO}_2^-$ -N 主要在 2~4 mg/L,最高可达 6~8 mg/L,如图 2 所示。一方面,微生物消耗部分碳源将  $\text{NO}_3^-$ -N 转化为  $\text{NO}_2^-$ -N,而未生成  $\text{N}_2$  彻底完成脱氮反应,造成碳源浪费;另一方面,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 作为还原性物质消耗后续工艺的臭氧等氧化剂,使臭氧投加量增大,且  $\text{NO}_2^-$ -N 为还原性物质,影响出水 COD 检测。

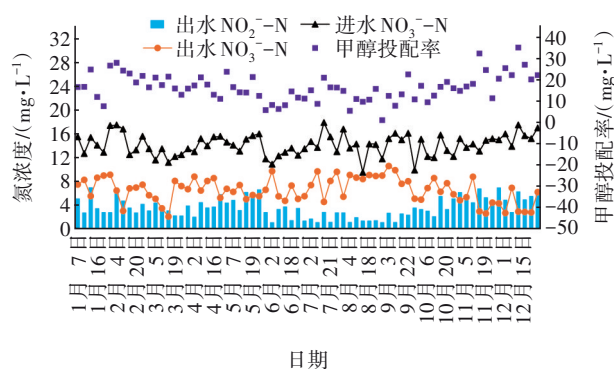
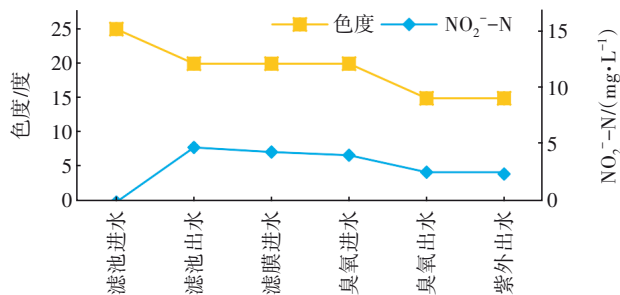


图2 滤池出水水质与甲醇投配率关系

Fig.2 Relationship between effluent quality and methanol dosing rate in biofilter

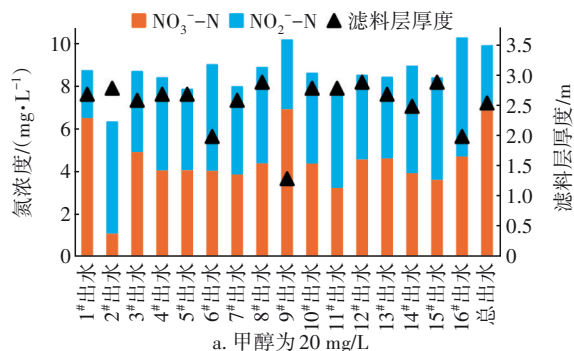
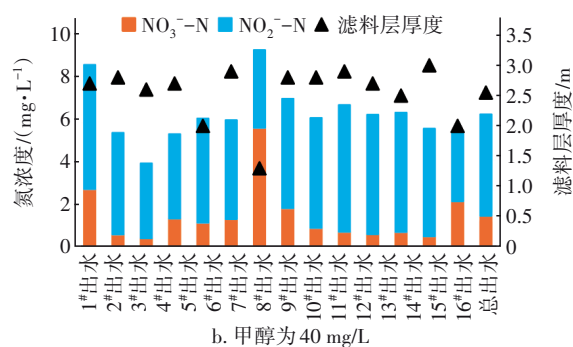
通过对深度处理区沿程色度及 $\text{NO}_2^-$ -N浓度进行检测分析,可知:①若去除 $1.65 \text{ mg/L}$ 的 $\text{NO}_2^-$ -N,需消耗臭氧约 $1.70 \text{ mg/L}$ ;②当臭氧氧化单元进水 $\text{NO}_2^-$ -N为 $4.11 \text{ mg/L}$ 时,该单元出水仍残留 $2.60 \text{ mg/L}$ 的 $\text{NO}_2^-$ -N;③臭氧氧化及紫外消毒出水色度仍处于高位值(15度),部分臭氧被消耗用于去除 $\text{NO}_2^-$ -N,如图3所示。

图3 色度及 $\text{NO}_2^-$ -N变化Fig.3 Change in chromaticity and  $\text{NO}_2^-$ -N

## 2.2 甲醇投配率对 $\text{NO}_2^-$ -N积累的影响

### 2.2.1 不同甲醇投配率下 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况

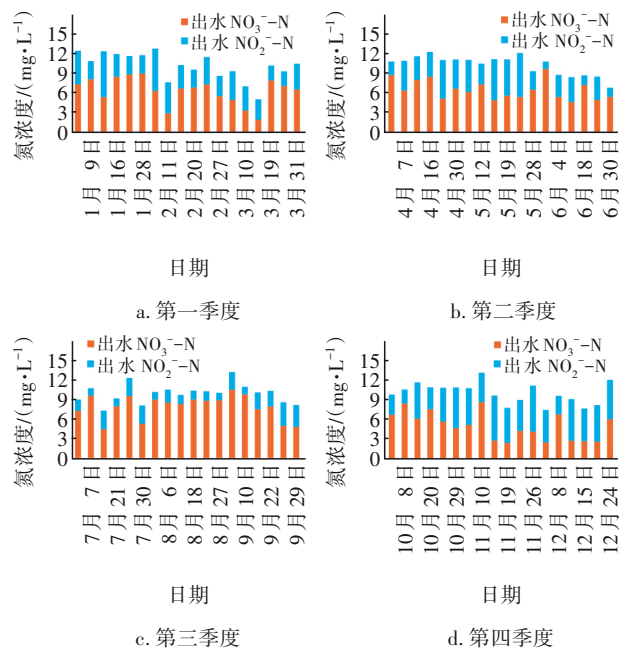
C/N影响反硝化生物滤池中 $\text{NO}_2^-$ -N的积累<sup>[7]</sup>,在相同工况条件下,开展不同甲醇投配率下的 $\text{NO}_2^-$ -N积累试验,得到 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况(见图4)。

a. 甲醇为 $20 \text{ mg/L}$ b. 甲醇为 $40 \text{ mg/L}$ 图4 不同甲醇投配率下 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况Fig.4  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation under different methanol dosing rates

在低甲醇投配率( $20 \text{ mg/L}$ )下, $\text{NO}_2^-$ -N积累较多,在 $3\sim 4 \text{ mg/L}$ 左右;在高甲醇投配率( $40 \text{ mg/L}$ )下, $\text{NO}_2^-$ -N积累严重,可达 $4\sim 6 \text{ mg/L}$ 。由于以甲醇作为电子供体时,反硝化两个阶段的抑制作用存在差异,导致高投配率下大量 $\text{NO}_3^-$ -N优先被还原为 $\text{NO}_2^-$ -N,而 $\text{NO}_2^-$ -N的还原相对滞后,使得 $\text{NO}_2^-$ -N大量积累。

### 2.2.2 不同季度的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况

为分析不同季度的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况,持续对滤池出水水质进行全年跟踪检测,结果如图5所示。

图5 不同季度的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况Fig.5  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation under different quarters

由图5可知,1月—3月,甲醇平均投配率为 $18.7 \text{ mg/L}$ , $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量为 $3.68 \text{ mg/L}$ ;4月—6月,甲醇平均投配率为 $13.6 \text{ mg/L}$ , $\text{NO}_2^-$ -N平均积

量为 3.65 mg/L;7 月—9 月,甲醇平均投配率为 12.6 mg/L,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 1.92 mg/L;10 月—12 月,甲醇平均投配率为 20.0 mg/L,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 4.84 mg/L。全年不同季度下滤池脱氮需求存在差异,第二、三季度温度高,滤池脱氮需求小,甲醇投配率低,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累较少;第一、四季度温度低,滤池脱氮需求大,甲醇投配率高,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累严重。

## 2.3 反冲洗周期及进水负荷的影响

### 2.3.1 反冲洗周期的影响

延长反冲洗周期可降低淘洗频率,影响菌种筛选及菌群结构。故选取一组生物滤池,保持滤池负荷和甲醇投配率不变,分别设定初始组(12 h)及试验组(24 h)的不同反冲洗周期,每个试验周期维持 7 d,评估 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累情况。

两组试验稳定运行后,不同反冲洗周期下的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累情况如图 6 所示。可知,初始组出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 4.08 mg/L,同系列 16 组滤池出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 3.19 mg/L;试验组出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 5.25 mg/L,同系列总出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 5.06 mg/L,可知反冲洗周期对出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度影响较小。延长反冲洗周期未起到菌种筛选作用,可能是由于滤池进水的复氧(DO 可达 3~5 mg/L)影响反硝化环境、滤池反冲洗导致滤料表面附着力不强等,使得 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 转为氮气的菌群和生物酶流失。

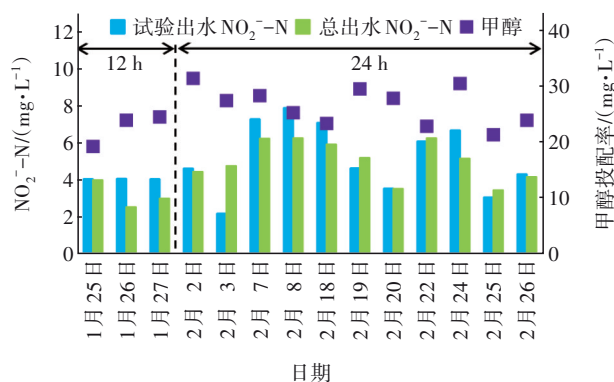


图 6 不同反冲洗周期下的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累情况

Fig.6 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N accumulation under different backwash cycles

### 2.3.2 进水负荷的影响

在滤池脱氮运行中,进水负荷直接影响脱氮有效停留时间,高进水负荷有利于 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累,但

随着 C/N 的提高,其促进作用减弱<sup>[8]</sup>。本研究选取进水负荷占正常负荷百分比为 100%、85%、75%、50% 进行试验,反冲洗周期为 12 h,反冲洗步骤为气洗→水洗→气水洗,碳源为甲醇。

当反冲洗周期为 12 h 时,85% 进水负荷试验组出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 4.65 mg/L;75% 进水负荷试验组出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量为 2.58 mg/L;50% 进水负荷试验组出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量可降低至 1.83 mg/L,较 100% 进水负荷试验组出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量(6.59 mg/L)降低了 72%,具体如图 7 所示。

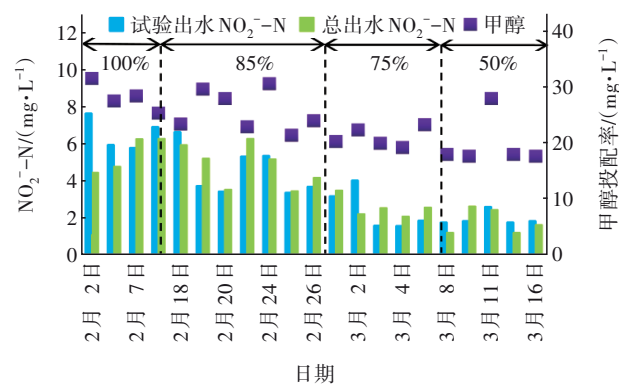


图 7 不同进水负荷下的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累情况

Fig.7 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N accumulation under different influent loads

由图 7 可知,随着进水负荷降低,滤池出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 平均积累量呈下降趋势,主要原因是滤池内部脱氮有效停留时间大幅增加,使中间产物 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 在低进水负荷下也有足够时间转化为 N<sub>2</sub>,进而降低 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累量。

但在实际工程中,为了保障反硝化生物滤池的处理水量,无法过度降低进水负荷,因此需要结合 24 h 进水负荷峰谷变化趋势,对投加碳源脱氮的滤池设定差异化的负荷配比,寻求较佳的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 管控效果。

## 2.4 磷和乙酸钠对 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累的影响

### 2.4.1 磷浓度的影响

污水处理中微生物营养比例一般维持在 C:N:P=100:5:1,而实际运行中,再生水厂二级处理已经控制 TP 在 0.3 mg/L 以下,这可能会影响后续反硝化生物滤池中的菌群结构,进而影响 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累。在不同磷浓度(0.1、0.5、1 mg/L)试验中,滤池于相同工况下连续运行 15 d 后 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累程度基本一致,具体如图 8 所示。可知,调节磷浓度不能有效改善滤池反硝化微生物的菌群结构,初步验证磷浓度



对 $\text{NO}_2^-$ -N的积累无明显作用。

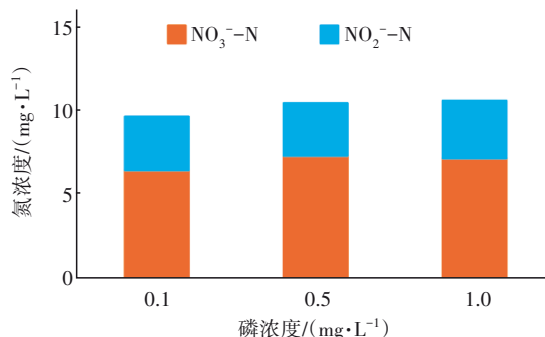


图8 不同磷浓度下的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况

Fig.8  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation under different phosphorus concentrations

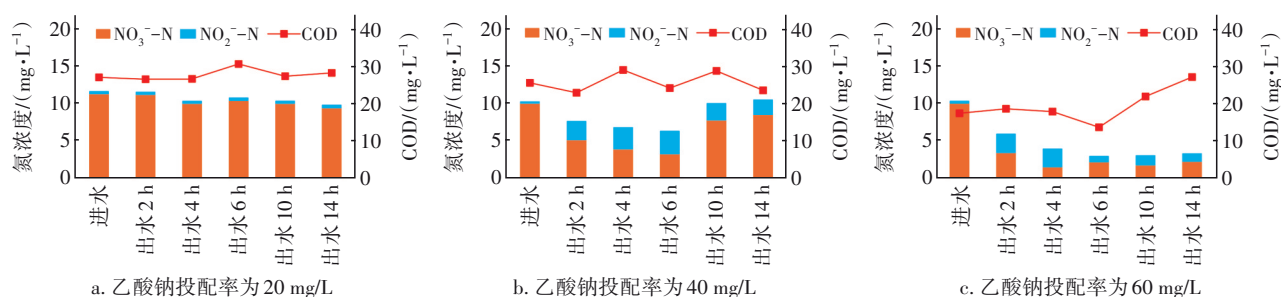


图9 不同乙酸钠投配率下的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况

Fig.9  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation under different sodium acetate dosing rates

通过文献资料<sup>[1]</sup>可知,以乙酸钠作为碳源,在反应初始阶段, $\text{NO}_3^-$ -N的还原速率最大,在电子供体充足的前提下,更有利于增加NaR活性,而NiR活性受到抑制,从而导致 $\text{NO}_2^-$ -N的积累。在反硝化末期,乙酸钠利用速率不变,其提供电子的速率不变,而 $\text{NO}_3^-$ -N浓度的降低导致其利用电子的速率降低,因此部分电子可以分配至NiR,使 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N能够同时得到还原。而当以甲醇作为反硝化电子供体时,其提供电子的速率较低,该电子仅能满足 $\text{NO}_3^-$ -N的还原,因此当 $\text{NO}_3^-$ -N还原结束后,才进行 $\text{NO}_2^-$ -N的还原。

## 2.5 反硝化滤池 $\text{NO}_2^-$ -N管控实践

针对前期试验效果,生产实践中落实更换碳源为乙酸钠进行 $\text{NO}_2^-$ -N脱氮管控,从而在保障总氮达标前提下,降低出水 $\text{NO}_2^-$ -N。选取单系列16组生物滤池进行乙酸钠投加生产性试验,从而验证乙酸钠在实际 $\text{NO}_2^-$ -N积累管控中的应用前景,结果见图10。当乙酸钠投配率为40 mg/L时,总氮去除量为3.6 mg/L, $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量为1.84 mg/L;而当甲醇投配率为20 mg/L时,总氮去除量为3.4 mg/L, $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量为4.18 mg/L。将甲醇更换为乙

## 2.4.2 乙酸钠投配率的影响

设定乙酸钠投配率分别为20、40、60 mg/L,考察不同碳源种类及浓度对 $\text{NO}_2^-$ -N积累的影响,评估其是否具有可替代性。图9为不同乙酸钠投配率下的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况。当乙酸钠投配率为20 mg/L时,滤池出水 $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量为0.28 mg/L;当乙酸钠投配率为40 mg/L时,滤池出水 $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量为2.49 mg/L,远低于以甲醇为碳源的出水 $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量;当乙酸钠投配率提高至60 mg/L时,滤池出水 $\text{NO}_2^-$ -N平均积累量仅为1.56 mg/L。因此,投加乙酸钠对缓解 $\text{NO}_2^-$ -N积累具有明显作用,可作为后续 $\text{NO}_2^-$ -N管控的有效措施。

酸钠进行碳源投加时,滤池出水COD均值为21.1 mg/L,与滤池进水COD基本一致,维持在25 mg/L以内,可以有效避免投加碳源带来的COD超标风险。

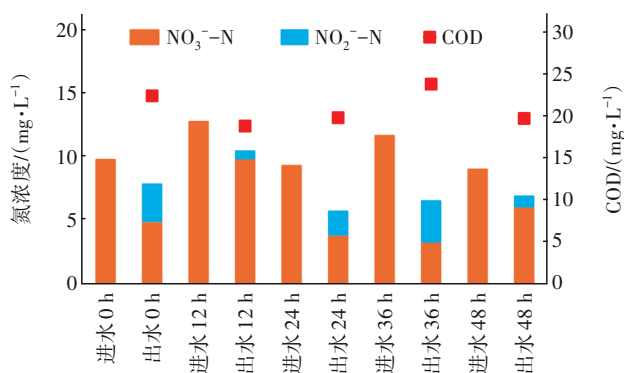


图10 乙酸钠投配率为40 mg/L时生产性试验的 $\text{NO}_2^-$ -N积累情况

Fig.10  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation in full-scale test with sodium acetate dosing rate of 40 mg/L

从经济成本角度考虑,经核算,乙酸钠、甲醇药剂单位总氮去除成本分别约为0.034 8和0.013 6元/m<sup>3</sup>,乙酸钠投加成本较高。但从安全角度来看,乙酸钠投加设备简单,而甲醇需要极其完备的碳源储存和投加系统,并配备安全设施,生产运行中安

全风险较大。

### 3 结论

① 当甲醇投配率在 20~40 mg/L 时,投配率越高, $\text{NO}_2^-$ -N 积累越严重,最高可达 6 mg/L。

② 不同反冲洗周期及磷浓度对  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的缓解效果不显著, $\text{NO}_2^-$ -N 积累量仍较高。

③ 当进水负荷降至 50% 时,能有效增加脱氮停留时间,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 可稳定在 2 mg/L 左右。实际运行中需结合滤池 24 h 进水负荷峰谷变化,设定差异化的负荷配比,寻求较佳的  $\text{NO}_2^-$ -N 管控效果。

④ 更换滤池脱氮碳源为乙酸钠后, $\text{NO}_2^-$ -N 最大积累量在 2~3 mg/L, $\text{NO}_2^-$ -N 积累缓解效果较好,可作为反硝化生物滤池  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的管控措施。

### 参考文献:

- [1] 李鹏飞,蒋奇海,张达飞,等. 北京某大型再生水厂反硝化生物滤池运行管控实践[J]. 给水排水, 2021, 47(4): 39-44.  
LI Pengfei, JIANG Qihai, ZHANG Dafei, *et al.* Operation control practice of denitrification biofilter in a large scale reclaimed water plant in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(4): 39-44 (in Chinese).
- [2] 葛士建,王淑莹,杨岸明,等. 反硝化过程中亚硝酸盐积累特性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 140-146.  
GE Shijian, WANG Shuying, YANG Anming, *et al.* Analysis of nitrite accumulation during denitrification [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1): 140-146 (in Chinese).
- [3] 巩有奎,贾文振,彭永臻. 不同碳源反硝化过程  $\text{NO}_2^-$  及  $\text{N}_2\text{O}$  积累特性[J]. 工业水处理, 2019, 39(9): 28-32.  
GONG Youkui, JIA Wenzhen, PENG Yongzhen. Effect of carbon sources on nitrite and  $\text{N}_2\text{O}$  accumulation during denitrification process [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(9): 28-32 (in Chinese).
- [4] 曹相生,付昆明,钱栋,等. 甲醇为碳源时 C/N 对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响[J]. 化工学报, 2010, 61(11): 2938-2943.  
CAO Xiangsheng, FU Kunming, QIAN Dong, *et al.* Effect of C/N ratio on nitrite accumulation in denitrifying process with methanol as carbon source [J]. CIESC Journal, 2010, 61(11): 2938-2943 (in Chinese).
- [5] 金秋,陈昊,崔敏华,等. 反硝化生物滤池反冲洗周期优化及水力特性[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1425-1434.  
JIN Qiu, CHEN Hao, CUI Minhua, *et al.* Optimization of backwashing cycle and hydraulic characteristics of denitrifying biofilter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(6): 1425-1434 (in Chinese).
- [6] 袁怡,黄勇,邓慧萍,等. C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1416-1420.  
YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Huiping, *et al.* Effect of C/N ratio on nitrite accumulation during denitrification process [J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1416-1420 (in Chinese).
- [7] 盛韩微,曹相生. 反硝化生物滤池亚硝酸盐积累特性的研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(12): 56-58.  
SHENG Hanwei, CAO Xiangsheng. Research on nitrite accumulation in denitrification biofilter [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(12): 56-58 (in Chinese).
- [8] 田夏迪,张树军,杨岸明,等. 城市污水厂部分反硝化滤池启动及运行[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1068-1074.  
TIAN Xiadi, ZHANG Shujun, YANG Anming, *et al.* Study on start-up and operation of partial denitrification filter in municipal wastewater treatment plant [J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1068-1074 (in Chinese).

作者简介:于斓(1986- ),女,北京人,本科,工程师,主要研究方向为城镇污水处理及再生水利用。

E-mail:yulan@bdc.cn

收稿日期:2023-01-13

修回日期:2023-02-04

(编辑:沈靖怡)