

# 臭氧—活性炭—反硝化生物滤池在污水再生回用中的应用

白 宇<sup>1,2</sup> 刘金瀚<sup>3</sup> 甘一萍<sup>2</sup> 胡洪营<sup>1</sup> 周 军<sup>2</sup>

(1 清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2 北京城市排水集团有限责任公司,北京 100022;

3 北京科技大学,北京 100083)

**摘要** 在酒仙桥污水处理厂建立 200 m<sup>3</sup>/d 的示范工程进行高品质再生水的生产,在二级出水强化脱氮除磷的基础上,采用臭氧(O<sub>3</sub>) - 活性炭(GAC) - 反硝化生物滤池(DNBF)工艺进行试验研究。经过 13 个月的试验证明,该工艺由于 O<sub>3</sub> 在脱色除臭基础上,能够强化活性炭滤池的生物多样性及活性,从而使出水 COD<sub>Cr</sub> 能够长期稳定在 30 mg/L 以下,NH<sub>3</sub> - N 小于 1 mg/L。在外加碳源 CH<sub>3</sub>COONa 条件下,系统经 DNBF 后出水 TN 小于 2 mg/L。同时试验发现,为了实现经济节能及良好的污水再生效果,DNBF 和 O<sub>3</sub> 单元在流程中的位置设置非常关键,有别于污水二级处理工艺。

**关键词** 再生水 臭氧 活性炭 反硝化生物滤池 酒仙桥污水处理厂

## Pilot study on reclaimed wastewater treatment by O<sub>3</sub>—granular activated carbon—denitrification biofilter process

Bai Yu<sup>1,2</sup>, Liu Jinhan<sup>3</sup>, Gan Yiping<sup>2</sup>, Hu Hongying<sup>1</sup>, Zhou Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China;

3. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A 200 m<sup>3</sup>/d pilot-scale project has been established to produce reclaimed water in Jiu Xianqiao Wastewater Treatment Plant. A technique using ozone, granular activated carbon (GAC), and denitrification biofilter (DNBF) is added to treat the denitrogenated and dephosphorized wastewater. Data collected in a period of 13 months indicate that the process not only removes the color and odor in wastewater in ozone reaction tower, but also increases the biodiversity and activities of biomass in the GAC tank due to the ozonation treatment. The COD<sub>Cr</sub> values of effluent maintain less than 30 mg/L, while NH<sub>3</sub> - N less than 1 mg/L stably. The TN values of the effluent are below 2 mg/L under the treatment of DNBF process. Meanwhile, it is found that the correct collocation of DNBF and ozone cells is significant, which is different from that of the secondary treatment process.

**Keywords:** Reclaimed wastewater; O<sub>3</sub>; Granular activated carbon; Denitrification biofilter; Jiu Xianqiao Wastewater Treatment Plant

### 1 北京市再生水现状

为了更好地服务于 2008 年北京奥运,北京城市排水集团负责向奥林匹克森林公园提供优质再生水,其中 20 多万 m<sup>3</sup> 主要用于公园景观用水。由于北京严重缺水,生产高品质再生水是未来北京市再生

水的重要发展方向。近年来,北京已先后建成高碑店污水资源化再生利用工程、酒仙桥再生水厂、吴家村再生水厂、方庄再生水厂、清河再生水厂。截至 2007 年底,再生水回用总量达到 1.79 亿 m<sup>3</sup>,回用率达到 46%。

再生水的合理利用有效缓解了北京水资源匮乏的现状,但随着社会需求的提高,再生水无论在水质还是水量上都无法满足用户要求。为解决地下水及地表水稀缺的问题,北京市已将地表水、地下水、应急水源和再生水联合利用,形成了境内水源保障体系,该体系的形成势必会对再生水的水质提出更高的要求。根据北京市的发展需要,将大规模开发再生水,将再生水净化到地表类水体水质甚至饮用水标准程度,即“高质出水、稳定运行”是未来北京市再生水发展的目标。

## 2 再生水水质分析

目前北京市再生水生产以混凝—沉淀—过滤工艺(以下简称“老三段”工艺)为主,该工艺已日趋成熟,具有工艺简单、工程投资省、操作管理方便、运行成本低等特点。

表1为老三段工艺与超滤—活性炭工艺出水以及与景观用水、地表类水体水质标准的比较。从表中数据可以看出,老三段工艺10月份出水的 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 及感官性指标色度、浊度能够满足景观用水和地表类水体要求。但由于老三段工艺抗冲击负荷能力有限,其出水指标受前序处理工艺及季节变化的影响很大,因此运行稳定性较差。工程应用表明,老三段工艺之前采用长泥龄的氧化沟工艺,其出水水质要优于前处理采用 $\text{A}^2/\text{O}$ 工艺。运用超滤膜技术生产再生水能够有效去除水中悬浮物,但就其工艺原理来说,超滤—活性炭仍以机械过滤为主,只是截污粒径范围更广而使出水浊度更低,故如表1所示,超滤—活性炭工艺对营养盐及感官性指标的去除并没有提高。

工程运行中发现,污水经过老三段深度处理工艺后,再生水中还会残留臭味。这是由于处理过程中添加的混凝剂会刺激藻类或放线菌释放IBMP(2-甲氧基-3-异丁基-吡嗪),而IBMP不会自发形成絮体沉降下来,所以水中IBMP的含量不但没有下降反而上升,正是IBMP形成了臭味。另外,污水经过二级生化处理后,色度主要由真色组成,部分由微生物代谢产物构成,利用老三段或超滤工艺亦较难去除。表1中无论是景观用水还是地表类水体水质标准,对色度、臭味等感官性指标的要求都不高。但由于北京市地表水水源稀缺,无法与再生水

表1 不同工艺再生水水质与相关水质标准比较

| 项目                                   | 老三段出水 | 超滤—活性炭出水 | 景观用水(观赏湖泊) | 地表类水体 |
|--------------------------------------|-------|----------|------------|-------|
| $\text{BOD}_5/\text{mg/L}$           | <2    | <2       | 6          | 6     |
| $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{mg/L}$ | 28.44 | 21       | 无要求        | 30    |
| $\text{SS}/\text{mg/L}$              | 6.88  | <5       | 10         | 无要求   |
| $\text{NH}_3-\text{N}/\text{mg/L}$   | 3.22  | 0.54     | 5          | 1.5   |
| $\text{TP}/\text{mg/L}$              | 0.24  | 1.28     | 0.5        | 0.3   |
| $\text{TN}/\text{mg/L}$              | 10.53 | 18.1     | 15         | 1.5   |
| 浊度/NTU                               | 0.76  | 0.6      | 无要求        | 无要求   |
| 色度/度                                 | 19.4  | 22       | 30         | 无要求   |
| 粪大肠菌群/个/L                            | <3    | 10 000   | 10 000     | 2 000 |

注:某再生水厂10月均值;某再生水厂5月均值。

协同作为城市地表及景观的补水水源,所以即便老三段及超滤—活性炭出水能够满足相关标准,但实际应用时水体美学效果差,易暴发水华。由此表1中标准值的界定还有待商榷。

水中的氮、磷过剩是制约再生水发展的另一个原因。氮、磷一般在污水二级处理中采用生物法去除,尤其是氮的去除,主要依靠生物硝化反硝化过程。实际运行的污水处理厂为了节省化学药剂,往往最大限度挖掘微生物同时脱氮除磷的能力,这就需要大量碳源,而我国北方污水水质碳源稀缺现象比较普遍,污水中VFA含量多在100 mg/L以下,聚磷菌在利用碳源释磷后,碳源明显不足,这就造成后续脱氮效率较低,无法实现同时脱氮除磷。在碳源不足的情况下,缺氧、厌氧的顺序设置已不再是影响工艺效能的主要因素,这也就是目前普遍发现的倒置 $\text{A}^2/\text{O}$ 工艺并不比正置 $\text{A}^2/\text{O}$ 效果更好的原因。解决这个问题,需要尽量挖掘内部碳源或是在深度处理中进行协同脱氮。从表1中的数据可知,老三段及超滤—活性炭工艺对于营养盐的处理效果无法满足相关标准要求,尤其是地表水

类水体水质要求。因此,本文提出了臭氧( $\text{O}_3$ )—活性炭(GAC)—反硝化生物滤池(DNBF)的新三段工艺。

## 3 试验设备与方法

### 3.1 试验工艺流程

为提供高品质再生水,中试采用 $\text{O}_3$ —GAC—DNBF工艺对二级出水进行深度处理,工艺流程如图1所示。

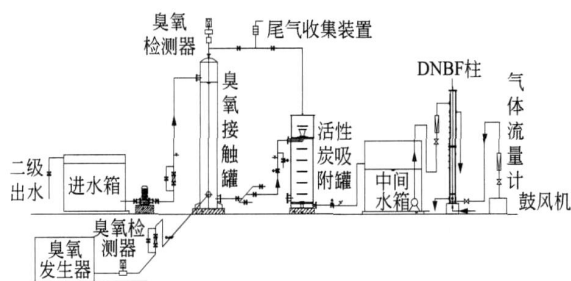


图1 中试试验工艺流程

臭氧发生器采用空气源臭氧发生器,气体流量 20 L/min,最大产气浓度 200 mg/L。臭氧接触罐直径 0.9 m,高 4.4 m,容积 2.8 m<sup>3</sup>。活性炭吸附罐直径 1 m,高 3.2 m,容积 2.5 m<sup>3</sup>,填料高度 2 m。

反硝化 DNBF 柱材质为有机玻璃,内径 300 mm,高 4 000 mm,其中底部卵石承托区高 400 mm,火山岩填料装填高度 2 000 mm。沿滤层高度共设置 12 个取样口,取样口间隔 200 cm。

### 3.2 试验进水水质

试验进水为酒仙桥污水处理厂二级出水,水质见表 2。由表 2 可知水中有机物含量较低,且多不易生物降解,因此后续脱氮过程需要外加碳源。

表2 试验进水水质

| 水质指标                                  | 数值                                 |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ mg/L | 0.62 ~ 10.4 (5.04)                 |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/ mg/L | 0 ~ 0.8 (0.46)                     |
| NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ mg/L | 0.29 ~ 6.67 (3.63)                 |
| TN/ mg/L                              | 5.07 ~ 12.3 (7.01)                 |
| TP/ mg/L                              | 0.09 ~ 1.26 (0.4)                  |
| TOC/ mg/L                             | 8.46 ~ 8.58 (8.52)                 |
| BOD <sub>5</sub> / mg/L               | 6.4 ~ 12.5 (9.8)                   |
| COD <sub>Cr</sub> / mg/L              | 20.3 ~ 45.1 (35.4)                 |
| 浊度/ NTU                               | 1.27 ~ 6.95 (2.84)                 |
| 色度/ 度                                 | 20 ~ 35 (30.2)                     |
| 细菌总数/ 个/mL                            | 10 <sup>7</sup> (10 <sup>7</sup> ) |
| 粪大肠菌数/ 个/L                            | 10 <sup>6</sup> (10 <sup>6</sup> ) |

注:括号中为平均值。

### 3.3 工艺运行参数

臭氧投加量为 3 ~ 5 mg/L,进水在臭氧接触罐停留时间为 15 min,在活性炭吸附罐里的停留时间 10 min。活性炭吸附罐每天反冲洗一次。反硝化 DNBF 柱投加乙酸钠(CH<sub>3</sub>COONa)为碳源,维持 DNBF 进水 COD<sub>Cr</sub> 在 60 mg/L 左右。DNBF 水力负荷为 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),正常运行情况下,每天反冲洗一次。采用

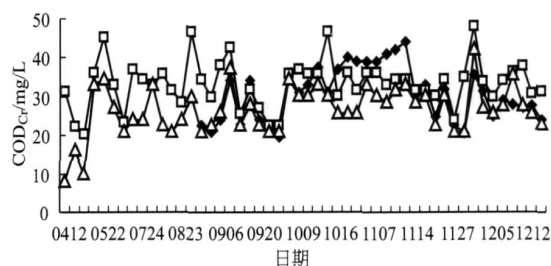
气水联合反冲的方法,反冲洗水强度为 7 L/(s·m<sup>2</sup>)、气强度为 15 L/(s·m<sup>2</sup>),持续时间约 3 min。

## 4 结果与讨论

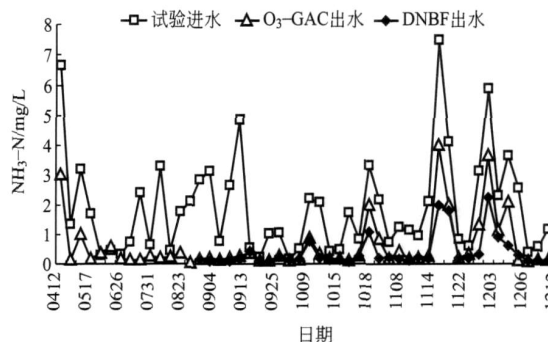
### 4.1 有机物和氨氮的去除效果

从表 2 可知,试验进水有机物及 NH<sub>3</sub>-N 含量较低,但波动性较大,要实现长期稳定出水,抗冲击负荷能力要强。如图 2, O<sub>3</sub>-GAC-DNBF 能够有效降解并去除水中有机物。O<sub>3</sub>-GAC 出水基本稳定在 COD<sub>Cr</sub> 小于 30 mg/L,10 月中旬后的三周 DNBF 出水 COD<sub>Cr</sub> 有所升高是受外加碳源投量过多所致。

□ 试验进水 △ O<sub>3</sub>-GAC 出水 ◆ DNBF 出水

图2 O<sub>3</sub>-GAC-DNBF 工艺对 COD<sub>Cr</sub> 的去除效果

臭氧氧化是 O<sub>3</sub>-GAC 工艺关键技术之一,它在一定程度上决定着工艺对有机物的去除效果。臭氧能部分氧化分解水中的有机物及其他还原性物质,从而降低活性炭吸附罐的有机负荷。臭氧氧化还能对原水起充氧作用,在丰富的溶解氧环境下,微生物以有机物为养料更易于生存繁殖,其生物降解能力得到提高,因此臭氧氧化对有机物和 NH<sub>3</sub>-N 的去除具有强化作用,如图 3 所示,系统出水 NH<sub>3</sub>-N 基本长期稳定在 1 mg/L 以下<sup>[1]</sup>。

图3 O<sub>3</sub>-GAC-DNBF 工艺对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果

### 4.2 脱色除臭效果

长期以来,二级出水色度、臭味较高的问题是制约再生水利用的瓶颈之一,其中光吸收和散射引起

的表色较易去除,溶解性有机物引起的真色较难去除。二级出水经过生物氧化和沉淀后,色度主要由真色构成。致色有机物的特征结构是带双键和芳香环,代表物是腐殖酸和富里酸。臭氧通过与不饱和官能团反应、破坏碳碳双键而去除真色;同时臭氧可氧化铁、锰等无机呈色离子。臭氧的微絮凝效应还有助于有机胶体和颗粒物的混凝,并通过活性炭过滤去除致色物<sup>[2]</sup>。

试验发现,臭氧对色度的去除效果主要是由臭氧的投加量和接触时间决定的,同时还受到原水水质及水温的影响。由图4可以看出,工艺对色度的去除效果很好,且十分稳定。在初期,由于活性炭的吸附作用使出水色度基本在5度以下。随着生物膜的逐渐成长,色度的去除逐渐转变为依靠 $O_3$ 及微生物对致色有机物的降解,出水色度有所提高,但均在10度以下,出水的感官效果得到有力保证。 $O_3$ -GAC出水再经过DNBF后,色度基本没有变化。应该指出的是:由于污水处理厂二级出水中的有机物具有多样性的特点,所以处理过程中臭氧的投量较给水处理大。

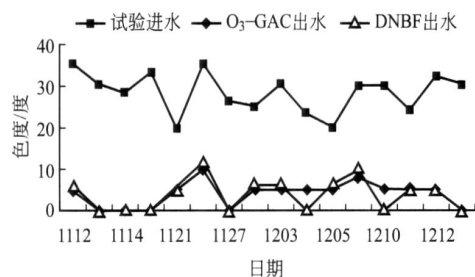


图4  $O_3$ -GAC-DNBF工艺对色度的去除效果

#### 4.3 DNBF脱氮效果及分析

如图5所示,经过 $O_3$ -GAC工艺处理之后,水中的氮主要以 $NO_3^-$ -N的形态存在。中试在 $O_3$ -GAC之后串联DNBF进行生物反硝化脱氮。从图5可以看出,进入DNBF的水中 $NO_3^-$ -N为5~10 mg/L,启动后稳定运行期间出水 $NO_3^-$ -N小于0.5 mg/L,基本实现了 $NO_3^-$ -N的全部转化。碳源的投加是实现 $NO_3^-$ -N转化的关键因素,其投量在计算时要充分考虑到 $O_3$ -GAC出水中溶解氧对碳源的消耗及反冲洗过程中碳源的损失<sup>[3]</sup>。这一点在实际工程中尤为重要。一般来说,在进水TN为7~14 mg/L,DO为8 mg/L时,碳源投量要增加25%~30%。

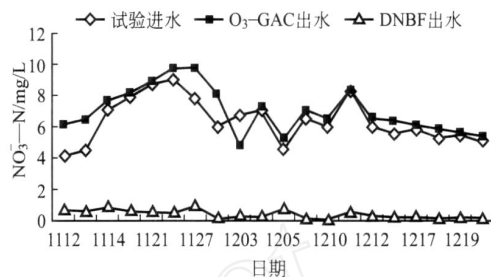


图5 DNBF对 $NO_3^-$ -N的去除效果

DNBF进水中的TN主要由 $NO_3^-$ -N构成,如图6所示,TN的去除趋势同 $NO_3^-$ -N基本一致,图6中出水TN后期上升主要是由于 $NO_2^-$ -N积累造成,此时出水中仍含有乙酸钠,碳源尚有剩余,分析主要是由于负荷增加,滤柱高度不够,导致反硝化不完全而造成<sup>[4]</sup>。

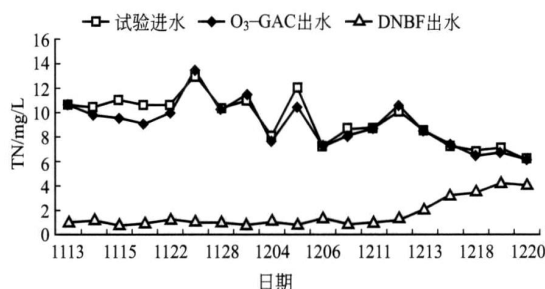


图6 DNBF对TN的去除效果

#### 5 存在问题探讨

中试目前历时13个月,仍在继续进行,同时发现一些问题。

(1) 根据文献报道, $O_3$ -GAC工艺能够提高BOD/COD值,进而提高底物的可生化性。但分析本试验的数据,并未发现此现象,这可能与进水水质有关。从工程经济角度考虑,臭氧在脱色的基础上,若要实现可生化性的提高,势必增加投量,从而造成成本增加,失去这一作用,臭氧前置值得商榷。

(2) 试验发现,后置DNBF由于进水中缺乏可以利用的碳源,故需要外加碳源,此时碳源的品种和用量十分关键,如没有精细化操作,易导致出水 $COD_{Cr}$ 超标<sup>[5]</sup>。同时,后置DNBF要消耗由于臭氧工艺带来的高DO,也浪费了大量碳源。

#### 6 结论

(1) 采用 $O_3$ -GAC工艺, $O_3$ 可以强化GAC中的生物活性,稳定保持出水 $COD_{Cr} < 30$  mg/L, $NH_3$ -N < 1 mg/L。

## 变截面滤床过滤器在农村水厂中的应用

陆天友<sup>1</sup> 姚晓园<sup>2</sup>

(1 贵州大学土木建筑工程学院, 贵阳 550002; 2 贵州省建筑设计研究院, 贵阳 550002)

**摘要** 变截面滤床过滤器充分发挥了滤床的纵向截污能力, 延长了过滤周期, 在高滤速的情况下滤料不易流失, 能保证出水水质, 具有占地面积少、投资省、运行管理方便和施工工期短等优点, 在贵州省的农村水厂中得到广泛应用。以开阳县哨上水厂为例对变截面滤床过滤器的原理、构造、参数及运行情况进行简要介绍。

**关键词** 变截面滤床 过滤器原理 设计参数 开阳县

## 1 工程概况

开阳县哨上水厂的设计服务范围为哨上乡高砚、土桥、双塘三个行政村, 设计年限为 2015 年。主要解决当地 11 900 人及 2 800 头大牲畜的饮用水问题。

设计建设规模为  $1\ 100\ \text{m}^3/\text{d}$ , 水源为蚌壳塘水库, 水质常年平均浊度为 10 NTU, 汛期时浊度达 500~1 000 NTU, 具有典型的山区水库水质特征。该厂建设时出厂水水质执行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—85), 其水处理工艺流程见图 1。

## 2 变截面滤床的原理

滤床上下层的面积相等时, 称为等截面滤床; 滤

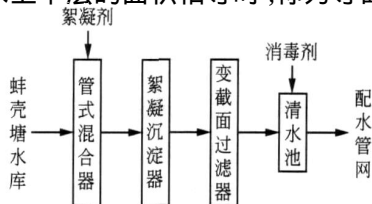


图 1 工艺流程示意

床上下层面积沿过滤水流的方向发生变化时, 称为变截面滤床。等截面滤床在水力反冲洗时由于重力的作用会在滤层内产生“水力分级”现象, 从而导致滤床利用率低、过滤周期短、产水量低和自耗水量大等缺点, 同时在水力反冲洗时由于滤料颗粒之间的碰撞、摩擦强度不足, 致使滤料冲洗不干净。

变截面滤床在水力反冲洗时, 其流速分布与等截面滤床有显著区别。变截面滤床在反冲洗时不同截面和同一截面内的流速分布不同, 主要表现为滤床上部截面的流速小, 下部截面的流速大; 同一截面内中间流速大, 两侧流速小。由于流速分布不同, 在反冲洗过程中整个滤床内部会产生循环运动, 大小不同的颗粒被冲起来后, 小颗粒被抛向两侧, 沿池壁回流至滤床底部, 而粗颗粒则紧靠内层落下, 然后又被再次冲到滤床上部。停止反冲洗时, 滤床内部的颗粒排列大致形成如下规律: 上部滤床中粗颗粒占多数, 下部滤床中细颗粒则占多数, 整个滤床实现了

(2) 采用  $\text{O}_3$  - GAC - DMBF 工艺, 在外加碳源时, 可实现  $\text{NO}_3^- - \text{N} < 0.5\ \text{mg/L}$ ,  $\text{TN} < 2\ \text{mg/L}$ 。

(3) 用臭氧处理城市二级出水, 在投量 3~5  $\text{mg/L}$  下, 不能强化水质可生化性, 如采用前置臭氧, 易造成 DO 升高而导致脱氮效率下降。

## 参考文献

- 1 于宏兵, 范伟民. 超滤/臭氧/生物炭组合工艺预处理源水. 中国给水排水. 2003, 19(8): 1~3
- 2 张杰, 陈秀荣. 曝气生物滤池反冲洗特性. 环境科学, 2003, 24(5): 58~61

- 3 Cecen F, Gonenc I E. Nitrogen removal characteristics of nitrification and denitrification filters. Water Science and Technology, 1994, 29, (10-11): 409~416
- 4 Pujol R, Tarallo S. Total nitrogen removal in two-step biofiltration. Wat Sci Tech, 2000, 41(4-5): 65~68
- 5 Dee A, James N, Jones I, et al. Pre- or post denitrification at biological filter works: A case study. Wat Sci Tech, 1994, 29(10-11): 145~155

E-mail: baiyu75322@163.com

收稿日期: 2008-03-28