

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.002

UVA诱导实现短程硝化反硝化工艺启动与运行效能

桂智刚, 赫俊国, 曾鑫辉, 张晨阳, 储昭瑞
(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 利用强度为 $232.96 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外线A(UVA, 365 nm)照射活性污泥,研究了在连续流下实现城市污水短程硝化反硝化的可行性,考察了UVA对活性污泥中氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂-oxidizing bacteria)、反硝化菌等活性的影响。采用连续流AO反应器进行无UVA辐照与有UVA辐照的对比,在常温以及进水COD为100 mg/L、NH₄⁺-N为50 mg/L的条件下,运行80 d后无UVA辐照的脱氮率达到50%以上,有UVA辐照的脱氮率达到80%以上,说明试验组成功实现了城市污水的短程硝化反硝化。紫外辐照对AOB的影响不大,其活性值在8 mg/(gVSS·h)左右,而对NOB的活性影响较大,从无UVA辐照的10 mg/(gVSS·h)左右减少到2 mg/(gVSS·h)左右。这与UVA能够诱导微生物氧化应激效应机制有关,NOB因胞内缺乏相应的抗氧化酶,导致其无法在短时间内有效清除胞内的活性氧(ROS)。紫外辐照对反硝化菌活性有提高作用,活性值从8 mg/(gVSS·h)左右提升到12 mg/(gVSS·h)左右。

关键词: 活性污泥; UVA; AO反应器; 短程硝化反硝化; 生物脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0008-05

Startup and Operation Efficiency of Shortcut Nitrification and Denitrification Process in AO Reactor Induced by UVA

GUI Zhi-gang, HE Jun-guo, ZENG Xin-hui, ZHANG Chen-yang, CHU Zhao-ru
(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Ultraviolet A (UVA, 365 nm) with a strength of $232.96 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ was used to irradiate activated sludge, the feasibility of achieving shortcut nitrification and denitrification of urban sewage was studied under continuous flow conditions, and the effects of UVA on the activity of ammonia-oxidizing bacteria (AOB), nitrite-oxidizing bacteria (NOB) and denitrifying bacteria were investigated. In a continuous flow AO reactor, the effects of no UVA irradiation and UVA irradiation were compared. Under the conditions of normal temperature, influent COD of 100 mg/L and NH₄⁺-N of 50 mg/L, the nitrogen removal rate of without UVA irradiation and with UVA irradiation reached more than 50% and over 80% respectively after 80 days of operation, indicating that the experimental group successfully realized the shortcut nitrification and denitrification. The effect of UV irradiation on AOB was very small, and the activity value was about 8 mg/(gVSS·h). While the activity of NOB was reduced from about 10 mg/(gVSS·h) without UVA irradiation to about 2 mg/(gVSS·h). It is speculated that this is related to the mechanism that UVA can induce microbial oxidative stress effects. NOB generally lacks corresponding antioxidant

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515030099)

通信作者: 储昭瑞 E-mail: zrchu@gzhu.edu.cn

enzymes, resulting in the inability to effectively clear intracellular reactive oxygen species (ROS) in a short period of time. UVA irradiation increased the activity of denitrifying bacteria from 8 mg/(gVSS·h) to about 12 mg/(gVSS·h).

Key words: activated sludge; UVA; AO reactor; shortcut nitrification and denitrification; biological nitrogen removal

与传统硝化反硝化工艺相比,短程硝化反硝化工艺缩短了脱氮流程,可以节省25%氧气消耗和40%的反硝化碳源投加量,且具有剩余污泥产量少、反应时间短、反应器容积小等优势^[1]。如何控制硝化反应保持在生成 NO_2^- -N阶段是实现短程硝化反硝化的关键。短程硝化主要取决于对氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)的控制,这两种硝化菌在生理机制及动力学特征上存在固有的差异,导致某种因素对它们有不同程度的抑制作用,进而影响整个硝化过程。因此,实现短程硝化反硝化生物脱氮的途径就是找出并有效控制那些能对这两类细菌产生不同影响的因素。简而言之,实现短程硝化主要是淘洗NOB,而对AOB影响很小。根据Wang^[2]的研究,可以通过三个因素来抑制NOB的增殖,即生长速率(μ)、衰减速率(b)和污泥流失率($1/\text{SRT}$)。目前,研究者通过减少生长速率来抑制NOB,主要从控制DO、pH、温度等参数入手^[3-4];而在增大衰减速率抑制NOB方面,可以通过FA、FNA以及超声波等^[5]实现。

光照也被认为是影响硝化菌活性的一个因素^[6],这是因为硝化菌具有光敏性,且NOB对光照的敏感程度高于AOB,因此采用光照进行NOB抑制有可能实现短程硝化。Chu等人^[7]首次提出利用低剂量UVA辐照选择性抑制NOB,进而实现稳定可靠的短程硝化。黄晓遇^[8]采取UVA辐照策略,历时46 d在SBR中成功实现了短程硝化,并在此后的40 d内维持稳定的高亚硝态氮积累率。为此,笔者以模拟城市生活污水为处理对象,采用AO反应器探究UVA辐照实现短程硝化反硝化的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

AO反应器结构如图1所示。反应器总容积为40 L,其中每一边的AO容积均为20 L,每个AO都有进水、硝化液回流(内回流)和污泥回流(外回流)。A区(缺氧区)设有搅拌桨,O区(好氧区)底部设有

微型气孔曝气装置,S区为污泥沉淀区。

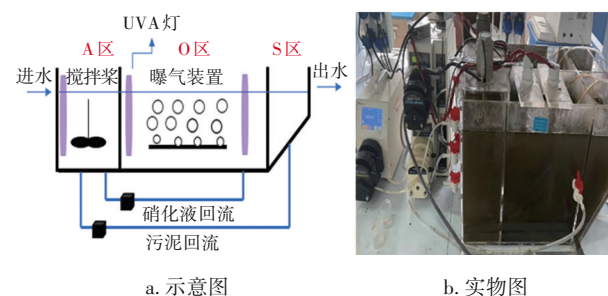


图1 AO反应器装置

Fig.1 Schematic and physical diagram of AO reactor

反应器采用连续运行的方式,进水、硝化液和污泥回流通过蠕动泵实现,外回流比为200%,内回流比为100%。A区水力停留时间(HRT)为3.33 h,DO<0.5 mg/L。O区HRT为6.67 h,DO在1~2 mg/L左右。SRT为15 d,控制温度在25~30℃。污水从上端进入后首先在A区进行反硝化,再从A区下端流入O区进行硝化作用。试验分为试验组和对照组,前者进行UVA辐照,后者则不进行UVA辐照,辐照强度为232.96 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

1.2 原水与接种污泥

原水为低碳氮比模拟生活污水,以氯化铵为氮源、碳酸氢钠为无机碳源、乙酸钠为有机碳源,COD、 NH_4^+ -N、 NaHCO_3 浓度分别为100、50、600 mg/L。同时,加入一定量的微量元素^[7]。

接种污泥取自广州某污水处理厂,经12 h闷曝处理后被接种至反应器。接种后反应器内MLVSS和MLSS浓度分别为1 400、2 000 mg/L。

1.3 常规指标分析方法

NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、COD、MLSS、MLVSS、SV及SVI均采用国家标准方法进行测定,DO采用哈希HQ 40便携式溶解氧仪测定,pH及温度采用台式pH和温度仪(Starter3100,奥豪斯)测定,UVA辐照强度用紫外辐照计测定。

1.4 AOB和NOB活性分析

在反应器内取出400 mL泥水混合物,水洗、静

置沉淀、去上清液,重复3次后全部转移至活性测试装置中。加入培养液,用蒸馏水定容至400 mL,使装置内的污泥浓度与反应器一致。用0.1 mol/L盐酸和氢氧化钠溶液调节初始pH在 7.5 ± 0.1 范围内,测定全程 $DO > 4.0$ mg/L。每隔30 min取样一次,经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,测定水样中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度,试验结束后对装置内的MLVSS进行测定。根据 NH_4^+-N 的消耗速率和 NO_3^--N 的生成速率,分别除以MLVSS,计算得到AOB和NOB活性。为保证结果的可靠性,每次试验均重复操作3次。

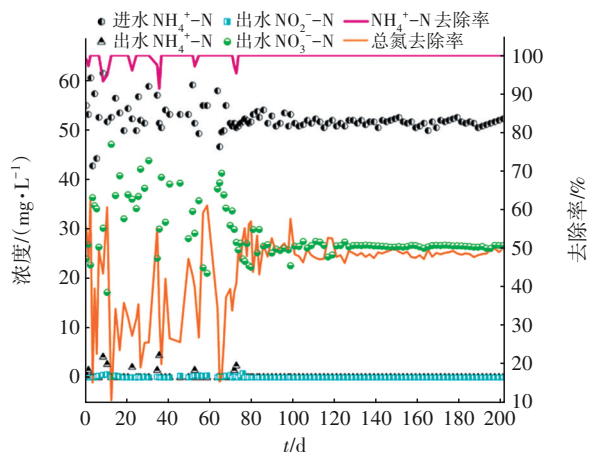
1.5 反硝化菌活性分析

反硝化过程需要有机碳源(试验中采用无水乙酸钠),由于反应产生OH⁻使pH升高,所以采用0.1 mol/L盐酸调节初始pH,使其控制在 7.5 ± 0.1 ,测试全程保持装置内溶解氧 < 0.1 mg/L以营造缺氧环境。每隔10 min取样一次,经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,测定水样中 NO_3^--N 浓度,试验结束后测定装置内MLVSS。根据 NO_3^--N 去除速率和MLVSS,计算得到反硝化菌活性。为保证结果的可靠性,每次试验均重复操作3次。

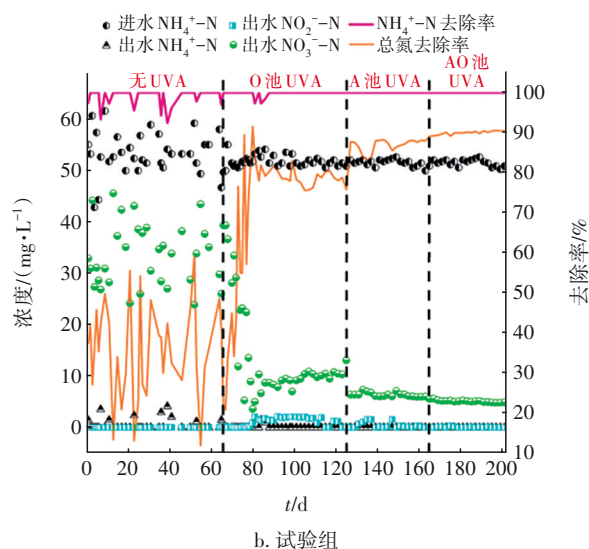
2 结果与讨论

2.1 反应器运行效能

对照组全程无UVA辐照,试验组分为4个阶段。试验全程反应器运行效能见图2。在阶段一(0~65 d),对照组和试验组的脱氮率分别为 $(35 \pm 14)\%$ 和 $(36 \pm 12)\%$,出水氨氮与亚硝态氮浓度均较低,所含氮素主要以硝态氮形式存在,氨氮去除率维持在99%以上,说明反应器内主要发生硝化作用,进水中氨氮在硝化菌作用下完全被氧化为硝态氮,并没有形成短程硝化,即NOB没有得到抑制。



a. 对照组



b. 试验组

图2 不同AO反应器的脱氮效能

Fig.2 Nitrogen removal in different AO reactors

进入阶段二(66~125 d)后,试验组在O池开启UVA,反应器运行10 d后出水硝态氮浓度不断降低;运行14 d后,反应器脱氮率维持在 $(75 \pm 5)\%$;再继续运行46 d,试验组O段出水硝态氮浓度维持在 (10 ± 2) mg/L,脱氮率在 $(80 \pm 6)\%$ 。对照组O段出水硝态氮为 (25 ± 2) mg/L,O段出水氨氮、亚硝态氮一直维持在0,对照组脱氮率为 $(50 \pm 4.0)\%$,标志着试验组反应器在O池UVA辐照下成功启动了短程硝化反硝化。

进入阶段三(126~165 d)后,试验组在A池开启UVA,运行10 d后反应器脱氮率维持在 $(85 \pm 5)\%$,且硝态氮生成率为 $(8 \pm 2)\%$,表明在A池UVA辐照的辅助下能够在长时间内形成稳定的短程硝化反硝化,且脱氮效果比在O池进行UVA辐照更好。

进入阶段四(166~200 d)后,试验组在A池和O池同时开启UVA,运行10 d后,反应器脱氮率维持在90%,且硝态氮生成率为 $(4 \pm 2)\%$,证明反应器在A池和O池UVA辐照的辅助下能够在长时间内形成短程硝化反硝化,且脱氮效果比在A池或O池单独辐照的效果更好。

综上所述,在UVA辐照下AO反应器能形成短程硝化反硝化,且脱氮率高于对照组。这可能与UVA对硝化和反硝化起到促进作用有关,即在O池促进硝化作用,在A池促进反硝化作用,且对反硝化的促进作用大于硝化。

连续测定结果显示,在进水COD维持在100 mg/L左右条件下,对照组出水COD约为5 mg/L,总

COD去除率约为95%;而试验组在前期由于无UVA辐照,出水COD也在5 mg/L左右,后期由于加了UVA辐照,导致出水COD浓度升至20 mg/L左右,去除率降到约80%。这表明UVA辐照会影响对COD的去除。UVA辐照能够诱导氧化应激效应,提升微生物胞内的活性氧(ROS)水平,诱发氧化性损伤,加速微生物裂解死亡,微生物衰亡后胞内物质被释放至水中,从而引起COD浓度的上升。

总的来说,UVA的开启虽然会在一定程度上导致出水COD浓度升高,但仍能满足城镇污水处理厂一级A排放标准,证明UVA的引入并不会对实际处理效果产生严重影响。

2.2 pH、DO及MLSS等的变化

硝化菌分为AOB和NOB,水中的碱度会影响硝化菌的生长与繁殖,碱度过低或过高都会使硝化菌的生长与繁殖受到明显抑制。此外,硝化过程需要氧的参与,而反硝化是在缺氧下进行的,因此,需要调控不同单元的溶解氧浓度。试验过程中,对照组A池和O池的pH分别为7.7~8.3、7.8~8.2,DO分别为0.2~0.4、1.2~2.2 mg/L;试验组A池和O池的pH分别为7.8~8.5、7.8~8.2,DO分别为0.1~0.3、1.5~2.5 mg/L。对污泥浓度的测定结果显示,在UVA辐照下污泥浓度大幅度下降,从2 000 mg/L降至1 010 mg/L左右,对照组污泥浓度则稳定在2 000 mg/L左右(见图3)。这可能是因为反应器内存在不耐受UVA辐照的微生物,由于无法适应UVA辐照而逐渐死亡。此外,对照组的污泥粒径较试验组小,说明UVA辐照会增加污泥颗粒的粒径,且UVA诱导下污泥浓度降幅要高于其粒径增幅,所以试验组污泥的SVI越来越大。

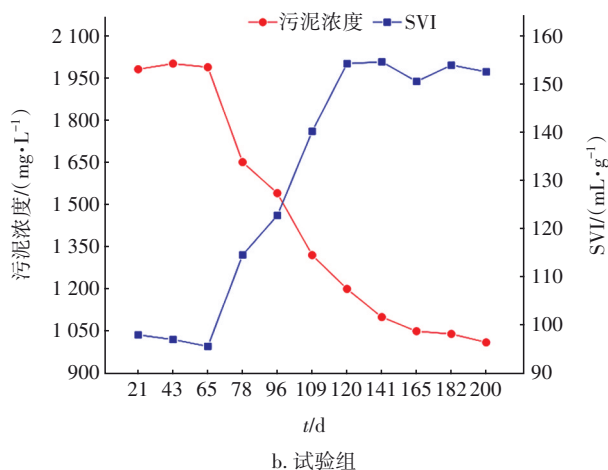
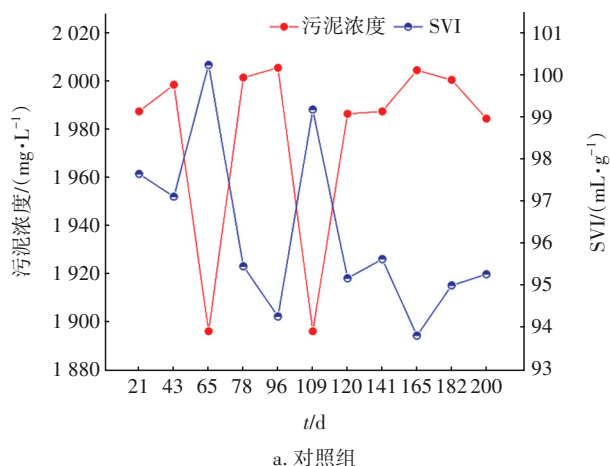
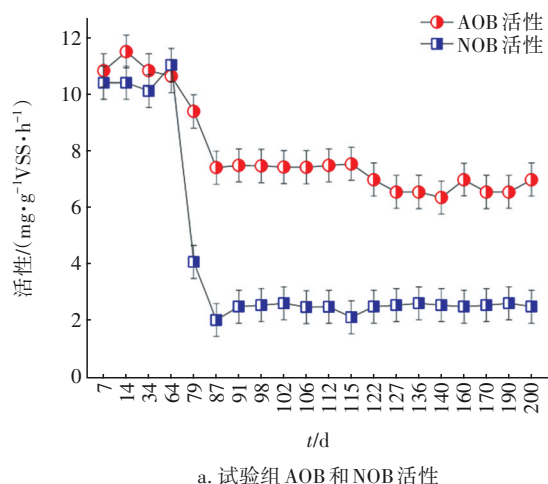


图3 反应器中污泥浓度和SVI的变化

Fig.3 Changes of sludge concentration and SVI during reactor operation

2.3 AOB、NOB和反硝化菌活性变化

为进一步探究特定氮代谢功能微生物活性的变化,在反应器运行稳定后,分别对AOB、NOB以及反硝化菌的活性进行检测。对照组AOB和NOB活性的变化基本保持一致,活性较高且稳定,分别为 (12 ± 2) 、 (11 ± 2) $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。当试验组无UVA辐照时,AOB和NOB的活性也很高,分别为 (11 ± 1) 、 (10 ± 1) $\text{mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。当增加了UVA辐照后,AOB和NOB活性都出现降低,但是相对于NOB活性,AOB活性降幅较小(见图4)。表明UVA能够抑制NOB,这可能与氧化应激相关,即在UVA辐照胁迫作用下污泥胞内ROS水平激增,对细胞膜产生氧化性损伤,破坏了细胞膜结构的完整性,加速其衰亡。而NOB缺少相对应的降低ROS的过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)等,因此受到的影响更大。



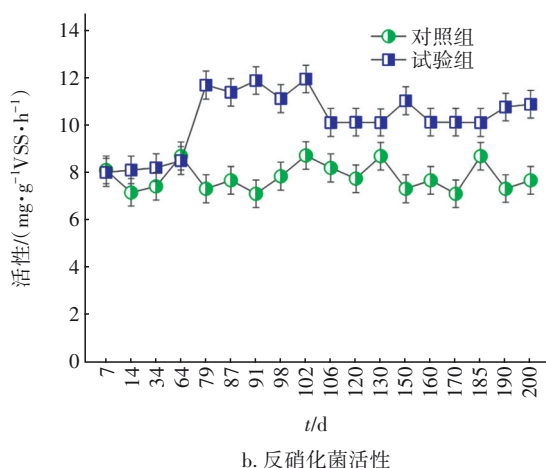


图4 AOB、NOB以及反硝化菌活性变化

Fig.4 Changes in activity of AOB, NOB and denitrifying bacteria

由图4(b)可知,对照组的反硝化菌活性为 $(8 \pm 1) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$;在无UVA辐照的条件下,试验组的反硝化菌活性与对照组相当,而在开启UVA后反硝化菌活性提高了 $2 \sim 4 \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,达到了 $(11 \pm 1) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。可见,UVA辐照提高了反硝化菌活性,这与UVA增加电子传递有关。

3 结论

① 在常温及进水COD为 100 mg/L 、 NH_4^+-N 为 50 mg/L 条件下,运行80 d后无UVA辐照AO反应器的脱氮率达到50%以上,有UVA辐照的脱氮率则达到80%以上,说明试验组成功实现了城市污水的短程硝化反硝化。这是因为NOB对UVA的耐受性低于AOB,这有利于淘汰NOB,从而实现短程硝化。

② 对照组和试验组对COD的去除率分别约为95%和80%,表明UVA辐照会降低COD去除率。这与UVA辐照下微生物衰亡后胞内物质释放有关。

③ 对照组的AOB和NOB活性差异不大,但是试验组NOB活性下降明显,即UVA辐照对NOB有抑制作用。对照组的反硝化菌活性要低于试验组,表明UVA辐照能够提高反硝化菌活性。

参考文献:

[1] 张冰, 郭莲, 黄书昌, 等. 运行模式及C/N对强化AGS短程硝化反硝化的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1): 9-18.

ZHANG Bing, WU Lian, HUANG Shuchang, et al. Effect of different operational modes and C/N ratios on

enhanced partial nitrification and denitrification of AGS [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1): 9-18 (in Chinese).

[2] WANG Z, ZHENG M, DUAN H, et al. A 20-year journey of partial nitrification and Anammox (PN/A): from sidestream toward mainstream [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 7522-7531.

[3] 刘心怡, 李汶倩, 蔡芹, 等. 一段式PN/A中NOB细菌的常见抑制策略研究进展[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 23-32.

LIU Xinyi, LI Wenqian, CAI Qin, et al. Research advancement in common NOB suppression strategies in one-stage PN/A system [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 23-32 (in Chinese).

[4] ZHANG L Q, WEI C H, ZHANG K F, et al. Effects of temperature on simultaneous nitrification and denitrification via nitrite in a sequencing batch biofilm reactor [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2009, 32(2): 175-182.

[5] ZHENG M, LIU Y C, XIN J, et al. Ultrasonic treatment enhanced ammonia-oxidizing bacterial (AOB) activity for nitrification process [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(2): 864-871.

[6] WANG L F, QIU S, GUO J H, et al. Light irradiation enables rapid start-up of nitrification through suppressing nxrB gene expression and stimulating ammonia oxidizing bacteria [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(19): 13297-13305.

[7] CHU Z, HUANG X, SU Y, et al. Low-dose ultraviolet-A irradiation selectively eliminates nitrite oxidizing bacteria for mainstream nitrification [J]. Chemosphere, 2020, 261: 128172.

[8] 黄晓遇. 基于UVA辐照的城市污水短程硝化工艺效能及作用机制研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.

HUANG Xiaoyu. Study on Efficiency and Mechanism of Short-range Nitrification Process of Municipal Wastewater Based on UVA Irradiation [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022 (in Chinese).

作者简介: 桂智刚(1999-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事污水处理及其资源化研究。

E-mail: guizhigang2021@163.com

收稿日期: 2023-11-30

修回日期: 2024-01-02

(编辑: 李德强)