

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.003

DN-PN/A工艺处理垃圾填埋场综合废水效能和机理

王思琦^{1,2}, 张连², 何钜源², 史绪川², 陈福明², 董文艺¹,
肖雄³, 梁钊启⁴, 邓舟⁴

(1. 哈尔滨工业大学<深圳>生态环境学院, 广东深圳 518057; 2. 清研环境科技股份有限公司, 广东深圳 518057; 3. 深圳市下坪环境园, 广东深圳 518057; 4. 深圳市利赛环保科技有限公司, 广东深圳 518057)

摘要: 提出了一种耦合前置反硝化的一体式短程硝化-厌氧氨氧化(DN-PN/A)工艺,并用于处理垃圾填埋场综合废水,重点考察了该工艺的脱氮效能及机理。结果表明,DN-PN/A工艺对TN的去除率和去除负荷可稳定达到95%和0.40 kg/(m³·d)左右,出水TN浓度可稳定在40 mg/L以下,出水水质符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)。碳和氮去除贡献分析及微生物分析表明,前置反硝化主要实现COD的去除,提高回流比可有效促进其反硝化作用,减少进水COD对PN/A反应器的影响,保障PN/A反应器中厌氧氨氧化稳定运行的同时,有效提高DN-PN/A耦合工艺的TN和COD去除率;PN/A反应器主要实现高效生物脱氮,通过氨氧化菌(*Nitrosomonas*和*Ellin6067*)和厌氧氨氧化菌(*Candidatus_Kuenenia*)的协同作用实现TN的稳定高效去除。

关键词: 垃圾填埋场综合废水; 短程硝化; 厌氧氨氧化; 前置反硝化; 脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0017-07

Efficiency and Mechanism of DN-PN/A Process in Treating Wastewater in a Landfill

WANG Si-qi^{1,2}, ZHANG Lian², HE Ju-yuan², SHI Xu-chuan², CHEN Fu-ming²,
DONG Wen-yi¹, XIAO Xiong³, LIANG Zhao-qi⁴, DENG Zhou⁴

(1. School of Ecology and Environment, Harbin Institute of Technology <Shenzhen>, Shenzhen 518057, China; 2. Qingyan Environmental Technology Co. Ltd., Shenzhen 518057, China;
3. Shenzhen Xiaping Environmental Park, Shenzhen 518057, China; 4. Shenzhen Lisai Environmental Protection Technology Co. Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: An integrated partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation process combined with pre-denitrification (DN-PN/A) was developed and applied to the treatment of wastewater in a landfill. The nitrogen removal efficiency and underlying mechanisms of the DN-PN/A process were systematically investigated. The TN removal efficiency and removal load achieved by the DN-PN/A process stably reached approximately 95% and 0.40 kg/(m³·d), respectively. The effluent TN remained consistently below 40 mg/L, meeting the requirements specified in *Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste* (GB 16889-2008). Analysis of carbon and nitrogen removal performance, as well

基金项目: 深圳市可持续发展专项(KCXFZ20211020163556020); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52000118)
通信作者: 董文艺 E-mail: dwy1967@qq.com

as microbial community composition, indicated that the pre-denitrification primarily contributed to COD removal. Increasing the reflux ratio could effectively enhance the denitrification process, mitigate the impact of influent COD on the PN/A reactor, and ensure the stable operation of the anaerobic ammonium oxidation reaction within the PN/A reactor. This improvement led to higher removal efficiencies of both TN and COD in the DN-PN/A system. The PN/A reactor mainly facilitated efficient biological nitrogen removal through the synergistic activity of ammonia-oxidizing bacteria (such as *Nitrosomonas* and *Ellin6067*) and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (*Candidatus_Kuenenia*), thereby achieving stable and effective TN removal.

Key words: wastewater in landfill; partial nitrification; anaerobic ammonium oxidation; pre-denitrification; nitrogen removal

废水生物脱氮技术主要包括传统的硝化反硝化、短程硝化反硝化、厌氧氨氧化(Anammox)和硫自养反硝化技术等,其中Anammox是在缺氧条件下,以氨氮为电子供体、亚硝酸盐氮为电子受体,产生氮气和少量硝酸盐氮的过程。以此为基础形成的短程硝化-厌氧氨氧化(PN/A)技术,能够在不加碳源的情况下,实现高负荷自养脱氮,与传统脱氮技术相比,具有低能耗、低成本、低污泥产量和高脱氮率的优势^[1]。近年来,PN/A工艺已被广泛应用于高氨氮废水的处理^[2-3]。目前,PN/A工艺主要分为一体式和两段式,一体式PN/A工艺可以在同一个反应器实现短程硝化和厌氧氨氧化脱氮,相比两段式PN/A工艺,能够节省基建投资且不容易产生底物抑制,受到研究者的广泛青睐^[4-5]。

餐厨发酵沼液、污泥厌氧发酵液、部分垃圾填埋场的废水等,不仅含有高浓度的氨氮,还含有高浓度的有机物,这些有机物如果直接进入PN/A系统,容易导致异养菌大量繁殖,抑制厌氧氨氧化菌的活性,从而影响系统稳定性^[6]。此外,Anammox工艺过程会产生少量的硝酸盐,PN/A工艺的理论TN去除率最高为89%,在进水 NH_4^+-N 浓度较高的情况下,出水 NO_3^--N 浓度仍较高,导致出水TN难以达标^[7]。如果将前置反硝化(DN)与一体式PN/A工艺结合用于处理此类高氨氮有机废水,PN/A系统产生的 NO_3^--N 与原水中的COD进行反硝化反应,不仅有利于降低进水COD对PN/A系统的影响,在保证系统稳定性的同时还可以进一步提高TN去除率。此外,现有的一体式PN/A工艺多采用序批式反应器,不能连续运行,通常需增设中间池,控制比较复杂^[8]。笔者所在课题组前期开发的气升环流一体式

PN/A反应器可以实现氨氧化菌(AOB)和厌氧氨氧化菌(AnAOB)的快速富集以及亚硝酸盐氧化菌(NO₃⁻)的有效抑制,具有反应分离一体化、传质效率高、脱氮效率高、脱氮速率快等优点,且能够连续运行。

针对传统一体式PN/A工艺处理高氨氮有机废水时存在有机物抑制、传质效率低、运行控制复杂等问题,笔者提出一种耦合前置反硝化的一体式PN/A(DN-PN/A)工艺,并将其用于某垃圾填埋场综合废水的处理,在不同回流比条件下运行91 d,考察该工艺的脱氮除碳性能和运行稳定性,并通过碳氮去除贡献、氮平衡计算以及微生物分析探究该工艺的脱氮路径和过程,旨在为高氨氮有机废水处理提供一种节能、高效、经济且运行稳定的技术路线,并为该技术的实际工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行方式

实验装置见图1,主要包括DN反应器和一体式PN/A反应器。DN反应器材质为高密度聚乙烯(HDPE),有效容积为35 L,内置固定化聚酯纤维生物膜填料,填充率为 $30 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。一体式PN/A反应器材质为有机玻璃,直径为0.3 m、高为1.0 m,有效容积为70 L。PN/A反应器底部设有曝气器,顶部设有环流澄清器以实现同步沉淀分离及出水,中部设有挡板可以形成环流反应区以加强传质效果。废水先通过蠕动泵进入DN反应器底部,再经由DN反应器顶部进入PN/A反应器底部,最后通过PN/A反应器顶部旁路通道溢流水,其中一部分出水回流至DN反应器,回流比可通过蠕动泵调节。

系统进水流量为60 L/d,DN反应器和一体式PN/A反应器的水力停留时间(HRT)分别为14 h和

28 h。DN-PN/A耦合工艺系统共运行91 d,分为2个阶段,每个阶段的运行参数如表1所示。阶段I(1~76 d)的回流比为200%,在进水 NH_4^+-N 浓度较高的条件下,通过精准控制曝气逐渐提升PN/A反应器中厌氧氨氧化活性,并通过回流促进DN反应器内反硝化的进行;在该阶段的第14~22天由于实际废水不足,采用自配水作为进水。阶段II(77~91 d)的回流比为300%,探究不同回流比对DN-PN/A耦合工艺脱氮效率和运行稳定性的影响。

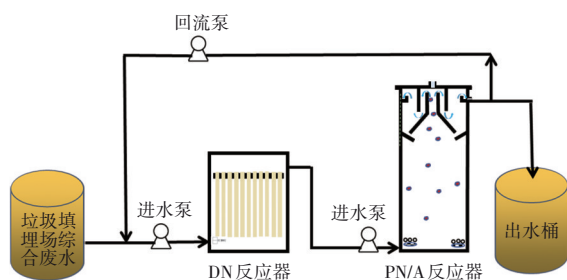


图1 DN-PN/A耦合工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of DN-PN/A process

表1 DN-PN/A耦合工艺运行参数

Tab.1 Operation parameters of DN-PN/A process

阶段	时间/d	NH_4^+-N / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NLR/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	回流 比/%
I	1~76	639~766	194~541	0.36~0.44	200
II	77~91	723~755	462~563	0.41~0.44	300

1.2 实验用水和接种污泥

实验用水为深圳市某垃圾填埋场综合废水,其氨氮浓度较高且含有一定量的有机物,COD为194~563 mg/L 、 NH_4^+-N 为639~766 mg/L 、TN为644~776 mg/L 、TP为2.45~2.70 mg/L 、pH为7.6~8.0。

DN反应器接种污泥取自深圳市某污水处理厂生化池絮状污泥,接种后污泥挂膜量为177.3 g/m^2 。一体式PN/A反应器接种污泥为实验室培养的Anammox污泥和某污水处理厂生化池絮状污泥,接种后Anammox颗粒污泥浓度为1263 mg/L 、絮状污泥浓度为1182 mg/L 、总污泥浓度为2445 mg/L 。

1.3 分析项目与检测方法

NH_4^+-N :纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N :N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^--N :紫外分光光度法;TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;COD:重铬酸盐法;MLSS:重量法;pH:pH计;DO:溶解氧测定仪。

1.4 氮平衡计算方法

参照Zhang等^[9]提出的化学计量方程反应式对一体式PN/A系统进出水氮素指标进行氮平衡计算,以确定PN/A反应器的氮素转化量和脱氮途径。脱氮系统的氮素转化主要考虑氮的氨氧化、亚硝酸盐氧化、反硝化和厌氧氨氧化。

1.5 微生物群落结构及丰度测定

在系统每个阶段运行后期,从一体式PN/A反应器采集不同阶段的代表性污泥样品,分析系统长期运行过程中微生物的群落结构变化。取阶段I(第71天)和阶段II(第89天)混合均匀的污泥样品,使用恒温高速离心机于3000 r/min 转速下离心10 min,去除上清液后寄送至上海美吉生物医药科技有限公司进行微生物多样性分析。首先,利用DNA试剂盒提取污泥样品的DNA,并选用16S rDNA V3-V4区域的引物进行PCR扩增,扩增产物通过Illumina MiSeq平台进行高通量测序,测序结果在美吉生物云平台进行分析。

2 结果与讨论

2.1 DN-PN/A耦合工艺的脱氮除碳性能

DN-PN/A耦合工艺进出水氮素浓度变化如图2所示,氨氮去除率(ARE)、总氮去除率(NRE)和总氮负荷(NLR)、总氮去除负荷(NRR)如图3所示。

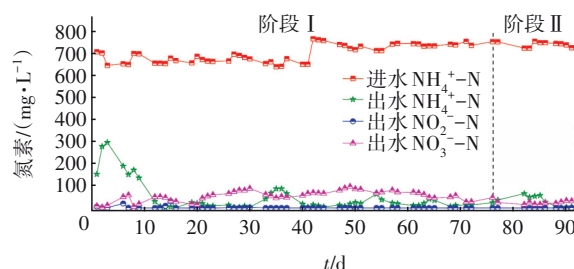


图2 DN-PN/A耦合工艺进出水氮素浓度变化

Fig.2 Variation of nitrogen concentration in influent and effluent of DN-PN/A process

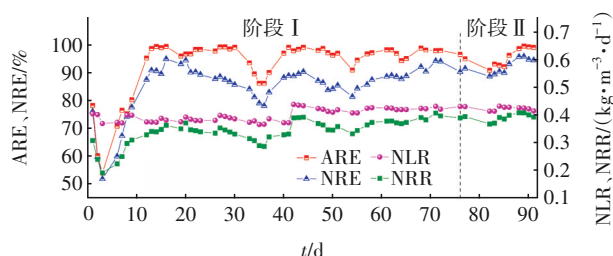


图3 DN-PN/A耦合工艺对氮素的去除性能

Fig.3 Nitrogen removal efficiency of DN-PN/A process

阶段 I, 在系统的进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为 698.29 mg/L、NLR 平均为 0.40 kg/(m³·d)、回流比为 200% 条件下, 系统运行初期(1~15 d), 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐步降低, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度分别可达到 20 和 70 mg/L 以下, 说明 DN-PN/A 耦合工艺启动良好。第 31 天, 进水更换为从项目取回的新一批废水, 水质略有波动, 导致系统未能及时适应, 运行一周后, 系统的 ARE 和 NRE 逐步恢复。42 d 后, ARE 和 NRE 在较小范围内变化, 并逐渐趋于稳定, 说明此时反应器中的微生物已基本适应了进水水质, 能够保持较稳定的脱氮效果。该阶段后期(68~76 d), ARE 和 NRE 分别可以保持在 96% 和 88% 以上, NRR 可达到 0.37 kg/(m³·d) 以上。

为了进一步提高 DN-PN/A 耦合工艺的 TN 去除率, 在阶段 II 将回流比增至 300%, 以提高 DN 对 TN 的去除效果。结果表明, 在系统进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为 739.55 mg/L、NLR 平均为 0.42 kg/(m³·d)、回流比为 300% 的条件下, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别可稳定在 6、2 和 34 mg/L 以下, 出水 TN 浓度稳定低于 40 mg/L, 出水氮浓度满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)。此阶段平均 ARE、NRE 和 NRR 分别为 95.84%、92.55% 和 0.39 kg/(m³·d), 稳定运行后期, ARE、NRE、NRR 分别可达到 99%、95%、0.40 kg/(m³·d) 左右, 说明提高系统回流比能够有效提升耦合工艺的脱氮效果。Miao 等^[10]采用 DN-PN-ANAMMOX 工艺处理老龄垃圾渗滤液, NRE 最高可以达到 90%; Daverey 等^[11]采用一体式 SNAD 工艺(SBBR 反应器)处理高氨氮废水, NRE 和 NRR 最高可以达到 88% 和 0.33 kg/(m³·d)。该研究将 DN 反应器和一体式 PN/A 反应器串联, 充分利用原水中的有机物将回流液中的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 通过前置反硝化去除, 相比传统的分段式 DN-PN-ANAMMOX 工艺和一体式 PN/A 序批式工艺, 可以实现更好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 去除效果, 达到深度脱氮目的。

图 4 为 DN-PN/A 耦合工艺进出水 COD 浓度变化。在阶段 I, 第 14~22 天由于实际废水不足, 采用自配水作为进水, 可生化性 COD 较多, 因此, 这段时间 COD 去除率大幅上升, 之后采用实际废水作为进水, 系统逐渐恢复到原来的状态, COD 去除率稳定在 20% 左右。从阶段 I 到阶段 II, 进水 COD 有逐步上升趋势, 但出水 COD 基本稳定在 200 mg/L 左右,

说明 DN-PN/A 耦合工艺的 COD 去除率逐渐上升, 从阶段 I 后期的 48% 提高至阶段 II 后期的 58%, 与上述氮素去除性能变化趋势相一致, 表明提高系统回流比能同时提高 TN 和 COD 的去除率。陈小珍等^[12]研究发现, 在 UASB-PN-ANAMMOX 组合工艺中, 系统对 COD 的去除主要是由于 UASB 反应器的反硝化作用, COD 去除率约为 40%~50%。本研究中 DN-PN/A 耦合工艺系统在稳定运行阶段能够达到较高的 COD 去除率, 说明 DN 反应器能够充分利用原水中的易降解 COD 进行反硝化反应, 另外通过增加回流比可以强化反硝化作用, 进一步提高 ARE、NRE 和 NRR。

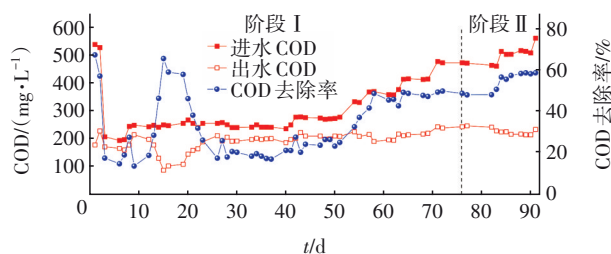


图4 DN-PN/A耦合工艺的COD去除性能

Fig.4 COD removal efficiency of DN-PN/A process

2.2 DN和PN/A反应器的碳氮去除贡献

在本研究中, PN/A 反应器主要用于生物脱氮, DN 反应器主要用于去除 COD。从阶段 I 到阶段 II, DN-PN/A 耦合系统的 TN 和 COD 平均去除率整体呈上升趋势。其中, DN 反应器在阶段 I 和阶段 II 的 TN 平均去除率分别为 9.84% 和 12.35%, COD 平均去除率分别为 20.80%、35.52%, 对 TN 和 COD 的去除贡献率分别由阶段 I 的 11.59% 和 61.60% 增加至阶段 II 的 13.18% 和 64.87%, 说明提升回流比有利于增强 DN 反应器的反硝化脱氮除碳性能, 进而提高 DN-PN/A 耦合系统的 TN 和 COD 去除率。PN/A 反应器在阶段 I 和阶段 II 的 TN 平均去除率分别为 75.31% 和 81.34%, COD 平均去除率分别为 11.71%、19.24%, TN 去除效果逐渐增强, 说明 DN 反应器的反硝化作用增加, 减少了进水 COD 对后续 PN/A 的影响, 有助于促进 PN/A 系统 AnAOB 活性的提高, 从而提升 PN/A 系统的 TN 去除率。

2.3 一体式 PN/A 反应器的脱氮机理

2.3.1 脱氮路径

为了更清晰地了解 PN/A 反应器的脱氮效果及稳定性, 分别选取阶段 I 和阶段 II 中 PN/A 反应器的

进出水氮素平均浓度进行氮平衡分析,得出不同阶段一体式PN/A反应器的氮素转化路径,结果见图5。在阶段I和阶段II分别约有52.38%和51.87%的进水 NH_4^+-N (135.72和96.94 mg/L)通过AOB的短程硝化作用转化为 NO_2^--N ,同时伴随着低活性NOB的硝化作用,分别约有1.92和15.99 mg/L的 NO_2^--N 转化为 NO_3^--N ;在反硝化菌(DNB)的异养反硝化作用下,分别约有0.11和15.60 mg/L的 NO_3^--N 转化为 NO_2^--N ,最终分别约有8.13和0.16 mg/L的 NO_2^--N 通过反硝化生成 N_2 而被去除。另外,通过AnAOB的厌氧氨氧化作用,在阶段I约有93.75 mg/L的 NH_4^+-N 和123.75 mg/L的 NO_2^--N 发生反应生成 N_2 (191.25 mg/L)和 NO_3^--N (24.38 mg/L);在阶段II约有71.41 mg/L的 NH_4^+-N 和94.26 mg/L的 NO_2^--N 发生反应生成 N_2 (145.68 mg/L)和 NO_3^--N (18.57 mg/L)。此外,在氮素转化过程中,阶段I和阶段II分别约有一小部分的 NH_4^+-N (7.60和5.68 mg/L)被AOB、NOB、AnAOB和DNB同化,以有机氮的形式储存于微生物体内,用于其自身生长。

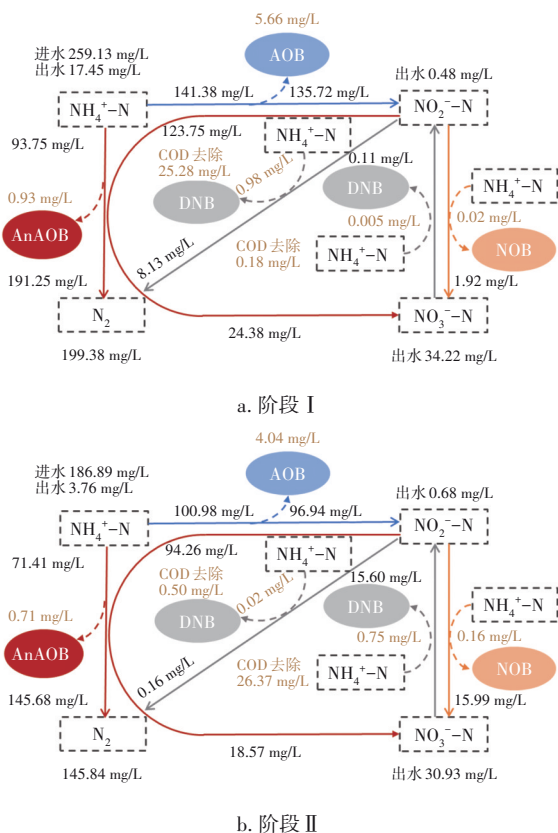


图5 不同阶段一体式PN/A反应器的脱氮路径

Fig.5 Nitrogen removal path diagram of integrated PN/A reactor at different stages

综合以上氮素质量平衡分析结果,可以得出以下结论:①PN/A反应器中进水TN最终包括3个去向,分别是以 N_2 形式被微生物去除、以有机氮形式被微生物同化和在出水中残留,阶段I中3种形式的TN去向占比分别为76.94%、2.93%和20.13%,阶段II中3种形式的TN去向占比分别为78.04%、3.04%和18.92%。②PN/A反应器生物脱氮过程中,阶段I有95.92%的TN通过Anammox去除,4.08%的TN通过反硝化作用去除;阶段II有99.9%的TN通过Anammox去除,0.1%的TN通过反硝化作用去除。从阶段I到阶段II,PN/A反应器的厌氧氨氧化脱氮贡献率增加,反硝化脱氮贡献率降低,说明提升系统回流比有利于降低进水中可生化COD对PN/A反应器的影响,抑制PN/A反应器中反硝化反应的进行,保障PN/A系统稳定性的同时提高厌氧氨氧化脱氮效率。

2.3.2 微生物群落结构变化

一体式PN/A反应器不同阶段微生物群落在属水平上的相对丰度变化如图6所示。

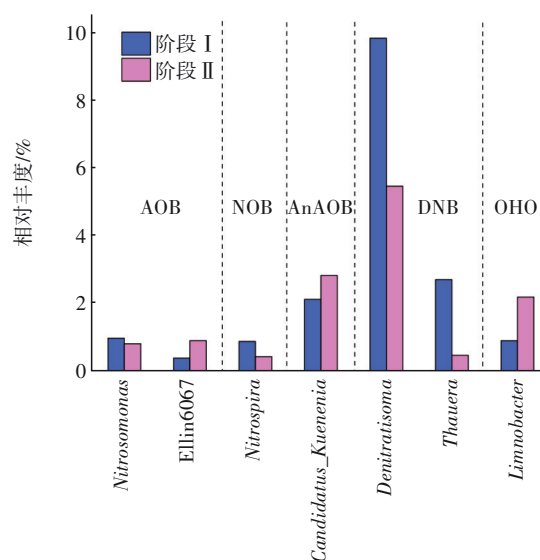


图6 不同阶段微生物群落在属水平上的相对丰度变化

Fig.6 Variation of relative abundance of microbial communities at genus level in different stages

一体式PN/A反应器中存在两种AOB,分别是*Nitrosomonas*和*Ellin6067*,在阶段I中的相对丰度分别为0.98%和0.40%,在阶段II中的相对丰度分别为0.82%和0.92%;相比阶段I,阶段II的AOB总相对丰度有所上升,由1.38%升至1.74%。反应器中存在的NOB主要为*Nitrospira*,从阶段I至阶段

Ⅱ, NOB的相对丰度有所下降,由0.89%降低至0.44%。以上结果表明,在一体式PN/A反应器中AOB活性增强,而NOB被有效抑制,因此PN/A系统在阶段Ⅱ可以实现比较稳定的短程硝化过程,从而提高厌氧氨氧化反应效率。

厌氧氨氧化反应器中常见的AnAOB属主要为 *Candidatus_Brocadia* 和 *Candidatus_Kuenenia*^[13], 从图6可以看出,一体式PN/A反应器中检出的AnAOB属仅有 *Candidatus_Kuenenia*, 其相对丰度呈现上升趋势,由阶段Ⅰ的2.14%增至阶段Ⅱ的2.85%,说明随着反应器的运行,AnAOB逐渐适应实际废水水质,得到有效富集,发挥厌氧氨氧化活性,因此反应器在阶段Ⅱ表现出较好的脱氮效果和稳定性。

PN/A反应器内还存在具有反硝化脱氮功能的 *Denitratisoma* 和 *Thauera*^[14], 在阶段Ⅰ中的相对丰度分别为9.72%和2.88%,在阶段Ⅱ中的相对丰度分别为5.49%和0.48%,可以看出,从阶段Ⅰ至阶段ⅡDNB整体丰度明显下降,说明提高回流比有助于降低PN/A反应器内异养菌活性,促使厌氧氨氧化自养菌处于竞争优势,提高厌氧氨氧化脱氮效率。

另外,PN/A反应器内同时还存在较高丰度的其他异养菌(OHO),主要为 *Limnobacter*。研究发现, *Limnobacter* 属于 *Proteobacteria* 菌门,可与AnAOB共生,并且可以保护AnAOB免受外界干扰^[15],因此反应器内 *Limnobacter* 的存在一定程度上能够增强系统稳定性,从阶段Ⅰ至阶段Ⅱ *Limnobacter* 的相对丰度由0.91%升至2.21%,这可以解释PN/A反应器在阶段Ⅱ表现出更稳定高效的脱氮性能。

综上,结合一体式PN/A反应器的脱氮路径可以得出,PN/A反应器主要通过AOB(*Nitrosomonas* 和 *Ellin6067*)和AnAOB(*Candidatus_Kuenenia*)的协同作用实现对废水中TN的稳定去除。在阶段Ⅱ提升系统回流比,PN/A反应器内的厌氧氨氧化自养菌活性增强,反硝化异养菌处于竞争劣势,因此在该阶段PN/A反应器实现了较高的厌氧氨氧化脱氮贡献率,说明前置DN反应器能够有效降低进水中可生化COD对PN/A反应器的影响,保障PN/A反应器厌氧氨氧化脱氮反应的稳定运行,强化厌氧氨氧化脱氮效率,这印证了2.2节的结果。

2.4 DN-PN/A耦合工艺的优势分析

深圳市某垃圾填埋场综合废水现有处理工艺为A/O+A/MBR,由于垃圾填埋场综合废水的C/N值

较低,因此实际处理过程中需要投加大量碳源以维持硝化反硝化脱氮过程的进行。根据调研,A/O+A/MBR工艺处理垃圾填埋场综合废水,每天需投加复合碳源5 kg/m³,碳源消耗成本为12.5元/m³;另外,该工艺采用浸没式MBR工艺,在运行过程中容易发生膜污染,需要定期冲刷清洗膜表面,同时膜组件需定期更换,这都需要额外的药剂费用和膜组件更换费用。

本研究采用DN-PN/A耦合工艺处理垃圾填埋场综合废水,能够实现TN的高效稳定去除,出水水质可稳定达到《城市生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008),相比现有A/O+A/MBR工艺,DN-PN/A耦合工艺无需外加碳源,运行维护简单,节省碳源费用的同时可大幅降低整体运营成本,为高氨氮有机废水的处理提供了一种经济、低碳、高效的工艺路线。

3 结论

① 开发了一种DN-PN/A耦合工艺,用于垃圾填埋场综合废水的处理,出水NH₄⁺-N和TN浓度可稳定低于25和40 mg/L,符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008),TN去除率可以达到95%,TN去除负荷可达到0.40 kg/(m³·d)左右。

② 在DN-PN/A耦合工艺中,前置DN反应器主要实现COD的去除,提高回流比可有效增强DN反应器的反硝化,减少进水COD对PN/A反应器的影响,保障PN/A反应器中厌氧氨氧化稳定运行的同时,有效提高系统的TN和COD去除率;PN/A反应器主要实现高效生物脱氮,通过AOB(*Nitrosomonas* 和 *Ellin6067*)和AnAOB(*Candidatus_Kuenenia*)的协同作用实现TN的稳定高效去除。

③ 相比现有的A/O+A/MBR工艺,DN-PN/A耦合工艺能够在无需外加碳源、节省运行成本的基础上实现垃圾填埋场综合废水处理出水的稳定达标,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] XIAO R, NI B J, LIU S T, et al. Impacts of organics on the microbial ecology of wastewater anammox processes: recent advances and meta-analysis [J]. Water Research, 2021, 191: 116817.
- [2] REN Z Q, WANG H, ZHANG L G, et al. A review of anammox-based nitrogen removal technology: from

- microbial diversity to engineering applications [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127896.
- [3] 朱琪, 林丽敏, 王婧, 等. 养猪废水中试规模亚硝化-反硝化-厌氧氨氧化组合工艺脱氮效能及群落结构分析 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44(4): 95-105.
- ZHU Qi, LIN Limin, WANG Jing, *et al.* Analysis of nitrogen removal efficiency and community structure in a pilot-scale partial nitrification-denitrification-anammox combined process for swine wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(4): 95-105 (in Chinese).
- [4] MENG J, LIU T, ZHAO J, *et al.* Assessing the stability of one-stage PN/A process through experimental and modelling investigations [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149740.
- [5] WEN X, GONG B Z, ZHOU J, *et al.* Efficient simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) system equipped with a real-time dissolved oxygen (DO) intelligent control system and microbial community shifts of different substrate concentrations [J]. *Water Research*, 2017, 119: 201-211.
- [6] 崔剑虹. 部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理有机高氨氮废水研究 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- CUI Jianhong. The Study on Treatment of Organic Rich-ammonia Wastewater by PN-Anammox Process [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [7] KUMAR M, LIN J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal—strategies and issues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1): 1-9.
- [8] JAGABA A H, KUTTY S R M, LAWAL I M, *et al.* Sequencing batch reactor technology for landfill leachate treatment: a state-of-the-art review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282: 111946.
- [9] ZHANG X X, WU P, XU L Z, *et al.* A novel simultaneous partial nitrification, denitrification and anammox (SPNDA) process in sequencing batch reactor for advanced nitrogen removal from ammonium and nitrate wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 126105.
- [10] MIAO L, WANG K, WANG S Y, *et al.* Advanced nitrogen removal from landfill leachate using real-time controlled three-stage sequence batch reactor (SBR) system [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 159: 258-265.
- [11] DAVEREY A, CHEN Y C, DUTTA K, *et al.* Start-up of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in sequencing batch biofilm reactor using novel biomass carriers [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190: 480-486.
- [12] 陈小珍, 汪晓军, CHAYANGKUN K, 等. 反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 [J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 345-352.
- CHEN Xiaozhen, WANG Xiaojun, CHAYANGKUN K, *et al.* Nitrogen removal from mature landfill leachate via denitrification-partial nitrification-ANAMMOX based on a zeolite biological aerated filter [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 345-352 (in Chinese).
- [13] 李权, 王少坡, 李博洋, 等. 厌氧氨氧化菌种类及其与各类功能菌在ANAMMOX系统内的协作 [J]. *水处理技术*, 2018, 44(7): 10-16.
- LI Quan, WANG Shaopo, LI Boyang, *et al.* Species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria and cooperative regulation of the functional bacterium in ANAMMOX processes [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(7): 10-16 (in Chinese).
- [14] LYU W L, HUANG L, XIAO G Q, *et al.* Effects of carbon sources and COD/N ratio on N_2O emissions in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 171-181.
- [15] WANG C, LIU S T, XU X C, *et al.* Achieving mainstream nitrogen removal through simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification process in an integrated fixed film activated sludge reactor [J]. *Chemosphere*, 2018, 203: 457-466.

作者简介:王思琦(1992-),男,山西临汾人,博士研究生,主要研究方向为污水的快速生化处理技术、工艺及设备研发。

E-mail:wsq921029@163.com

收稿日期:2024-04-10

修回日期:2024-06-02

(编辑:刘贵春)