

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.001

基于PN/A的组合工艺处理餐厨沼液的中试研究

王思琦^{1,2}, 刘旭², 张连², 黎紫江², 邓昭滨², 陈锦财²,
罗泳翔², 陈福明², 董文艺¹

(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)

摘要: 开发了一套缺氧/反应沉淀一体式矩形气升环流反应池-短程硝化/厌氧氨氧化反应池-反应沉淀一体式矩形气升环流反应池(A/RPIR-PN/A-RPIR)组合工艺,并开展了中试规模的餐厨沼液处理研究,考察该组合工艺的脱氮除碳性能及其机理。结果表明,A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和COD的平均去除率分别可达到97.10%、87.39%和82.36%,总氮去除负荷最高可达到 $0.31\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。A/RPIR单元在进水水质波动较大的情况下,出水C/N值始终保持在0~1的较低范围,保障了后续PN/A单元厌氧氨氧化反应的稳定进行。PN/A单元的总氮去除负荷可达到 $0.57\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,厌氧氨氧化菌(AnAOB)和氨氧化菌(AOB)的相对丰度分别由低负荷运行阶段的6.18%和0.66%升至满负荷运行阶段的12.59%和2.23%,亚硝酸盐氧化菌(NO_B)和反硝化菌(DNB)的相对丰度则分别由0.59%和15.20%降至0.49%和4.04%,说明该组合工艺可以有效解决PN/A反应过程中菌群竞争和短程硝化不稳定的问题,实现高效稳定脱氮。

关键词: 餐厨沼液; 短程硝化-厌氧氨氧化; 脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0001-09

A Pilot-scale Investigation into Treatment of Kitchen Waste Biogas Slurry Using Partial Nitrification-Anammox Combined Process

WANG Si-qi^{1,2}, LIU Xu², ZHANG Lian², LI Zi-jiang², DENG Zhao-bin²,
CHEN Jin-cai², LUO Yong-xiang², CHEN Fu-ming², DONG Wen-yi¹

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

Abstract: A combined process comprising an anoxic/reaction-precipitation integrated rectangular airlift circulation reactor, followed by a partial nitrification/Anammox reactor and a subsequent reaction-precipitation integrated rectangular airlift circulation reactor (A/RPIR-PN/A-RPIR), was developed and implemented for the pilot-scale treatment of kitchen waste biogas slurry. The performance and underlying mechanisms of nitrogen and carbon removal in this integrated system were systematically investigated. The average removal efficiencies of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and COD achieved by the A/RPIR-PN/A-RPIR combined process were 97.10%, 87.39%, and 82.36%, respectively, with a maximum TN removal load of

基金项目: 深圳市可持续发展专项(KCXFZ20211020163556020)

通信作者: 董文艺 E-mail: dwy1967@qq.com

0.31 kg/(m³·d)。Even under significant fluctuations in influent quality, the effluent C/N ratio of the A/RPIR unit remained consistently low, within the range of 0 to 1, thereby ensuring stable operation of the subsequent Anammox process in the PN/A unit. The TN removal load of the PN/A unit reached 0.57 kg/(m³·d). The relative abundances of Anammox bacteria (AnAOB) and ammonia-oxidizing bacteria (AOB) increased from 6.18% and 0.66% during the low-load operation phase to 12.59% and 2.23% during the full-load operation phase. In contrast, the relative abundances of nitrite-oxidizing bacteria (NOB) and denitrifying bacteria (DNB) decreased from 0.59% and 15.20% to 0.49% and 4.04%, respectively. The above results indicated that the combined process effectively mitigated bacterial competition and maintained stable partial nitrification throughout the PN/A reaction, thereby enabling efficient and sustained nitrogen removal.

Key words: kitchen waste biogas slurry; partial nitrification and Anammox; nitrogen removal

近年来,随着城镇化和人民生活水平的不断提高,餐厨垃圾产生量逐步增加。厌氧发酵由于能耗低、占地少、资源可回收等优点成为餐厨垃圾的主流处理工艺^[1],但会产生大量成分复杂且含有高浓度氨氮、SS、有机物和盐分的餐厨沼液^[2],餐厨沼液的有效处理处置对于餐厨垃圾无害化和资源化具有重大意义。目前国内对餐厨沼液的处理大部分采用“预处理+两级A/O生化处理+深度处理”工艺^[3]。但是在实际工程应用中,两级A/O生化处理工艺通常需要投加大量碳源,并且曝气能耗较高、占地面积较大、运行成本较高^[4]。因此有必要开发新型高效、经济、节能的餐厨沼液处理工艺。

短程硝化-厌氧氨氧化(PN/A)被认为是目前最高效的生物脱氮工艺^[5],与传统的硝化-反硝化生物脱氮工艺相比,PN/A工艺具有曝气能耗低、无需外加碳源、污泥产率低等优势,目前已被用于垃圾渗滤液、污泥消化液等高氨氮、低C/N废水的处理^[6-8]。但餐厨沼液具有较高的COD浓度,直接进入PN/A系统容易引起异养菌的过度繁殖,与厌氧氨氧化菌(AnAOB)竞争NO₂⁻-N^[9]。因此,采用PN/A工艺处理餐厨沼液之前,需采用合适的前处理手段降低沼液的COD浓度。常见的降碳前处理手段包括混凝沉淀化学强化、厌氧消化(AD)和A/O生物处理等^[5]。其中,混凝沉淀工艺会引入新的化学物质,可能会抑制AnAOB活性,并且该工艺对有机物的去除能力有限^[10];AD工艺虽然技术较为成熟,运行成本较低,但是反应时间较长,且需设置沼气收集和处理系统,操作管理复杂^[11];A/O工艺在实际工程中应用较为普遍,且流程简单,反应时间相对较短,是去

除COD的有效途径。鉴于此,笔者以一体式PN/A池为核心脱氮单元,在其前端设置缺氧/反应沉淀一体式矩形气升环流反应池(A/RPIR)^[12]作为除碳单元,并在其后端设置RPIR池作为深度处理单元,构建A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺中试装置,用于处理深圳市某环境园的餐厨沼液,研究该组合工艺对餐厨沼液的脱氮除碳性能,并探讨各单元的运行特性和对目标污染物的去除过程及机制,以期为餐厨沼液的处理提供一种经济、高效的技术路径。

1 材料与方法

1.1 工艺流程及设计参数

如图1所示,中试采用的反应器为一体化撬装式设备(V=53.7 m³),包括A/RPIR池(V=24.3 m³)、PN/A池(V=22.5 m³)和RPIR池(V=6.9 m³)3个反应单元。其中,A/RPIR池通过中间隔墙分为缺氧区(8.1 m³)和好氧区(16.2 m³),设有内回流装置,实现好氧区到缺氧区的混合液回流,回流比在200%~400%之间;PN/A池的溶解氧(DO)浓度控制在0.5 mg/L以下,pH控制在7.0~8.5,不控制水温,实际监测温度为25~35℃;RPIR池的DO浓度控制在2~5 mg/L。各反应单元底部均设有曝气系统,上部均设有RPIR模块。各反应单元的混合液通过曝气气升作用进入RPIR模块,在其内部发生沉淀分离,污泥回流至池体内,上清液出水进入下一反应单元。该组合工艺设计处理水量为10 m³/d,无需设置沉淀池,减少占地面积的同时实现污泥龄的单独控制。以10 m³/d的设计处理水量计算,A/RPIR池、PN/A池和RPIR池的水力停留时间(HRT)分别为2.4、2.2和0.7 d。

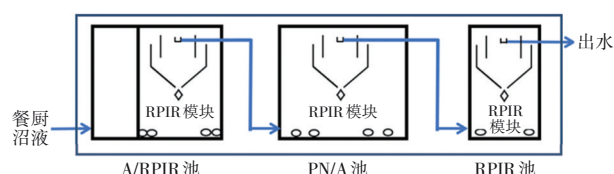


图1 组合工艺流程

Fig.1 Flow chart of combined process

组合工艺中试系统处理餐厨沼液的过程如下:沼液首先进入A/RPIR池发生硝化与反硝化反应,以去除有机物及少量TN;A/RPIR池出水进入PN/A池进行厌氧氨氧化(Anammox)脱氮,实现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的大幅去除;最后PN/A池出水进入RPIR池,进一步降低出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD浓度。

1.2 试验用水和接种污泥

中试装置位于深圳市某环境园,收集的餐厨垃圾经分离去渣、破碎制浆、三相离心后进入到CSTR反应器进行厌氧消化,厌氧消化之后的混合物通过板框压滤机进行固液分离,分离后的液体为高氨氮、高有机物的餐厨沼液。本研究以此餐厨沼液为试验用水,具体水质如下:COD为2 214~8 577 mg/L、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1 017~1 579 mg/L、TN为1 046~1 748 mg/L、SS为340~1 480 mg/L、pH为7.25~7.87。

A/RPIR池和RPIR池的接种污泥均取自深圳市

某污水处理厂生化池污泥,接种后A/RPIR池缺氧区和好氧区的污泥浓度分别为5 540、9 000 mg/L, RPIR池的污泥浓度为4 420 mg/L。PN/A池的接种污泥取自实验室培养的厌氧氨氧化颗粒污泥和污水处理厂的生化池污泥,接种后颗粒污泥浓度为1 072 mg/L,絮状污泥浓度为2 208 mg/L,总污泥浓度为3 280 mg/L。

1.3 运行方式

A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺中试系统共运行86 d,分为3个阶段,各个阶段的运行参数如表1所示(NLR为总氮负荷)。阶段I为低负荷运行阶段,系统启动初期PN/A池的厌氧氨氧化活性较低,因此将该阶段A/RPIR池的一部分出水排入PN/A池,另一部分出水进入RPIR池,以缓解PN/A池的运行负荷压力,并通过间歇曝气方式精准控制PN/A池DO浓度,促进该阶段PN/A池内AnAOB活性的逐步提升;阶段II为负荷提升阶段,在该阶段将PN/A池的曝气方式改为连续曝气,使得PN/A池的DO浓度能够对应负荷增加的正向相关关系,保证AnAOB活性逐渐提高;阶段III为满负荷运行阶段,该阶段的处理水量稳定在10 m³/d以上,达到设计规模,系统稳定运行。

表1 组合工艺运行参数

Tab.1 Operation parameters of combined process

阶段	运行时间/d	处理水量/(m ³ ·d ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ /(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	NLR/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)
I	1~19	2.5~5.0	2 924~4 090	1 238~1 423	1 259~1 447	0.05~0.14
II	20~70	6.6~9.6	2 214~8 577	1 017~1 413	1 046~1 438	0.15~0.24
III	71~86	10.6~11.0	2 548~5 598	1 328~1 579	1 508~1 748	0.30~0.36

1.4 分析项目及检测方法

各水质指标均采用标准方法进行测定。TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定;COD采用重铬酸盐法测定;SS采用称重法测定;pH和DO分别采用pH计和溶解氧测定仪测定。

氮平衡计算:参照Zhang等^[13]采用的化学计量方程反应式对PN/A单元进出水氮素指标进行氮平衡计算,以确定PN/A单元的氮素转化质量和脱氮途径。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。

微生物测定: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 组合工艺的脱氮除碳效果

2.1.1 氮素去除效果

A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺对氮素的去除效果如图2所示。系统运行第3天,PN/A池出水TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为358和346 mg/L, RPIR池出水TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为291和223 mg/L,远超过中试项目设计出水水质要求,这是由于启动初期PN/A池的AnAOB活性不足,系统脱氮能力有限。因此,

为快速降低 PN/A 池的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度,在第 4~17 天将 A/RPIR 池的一部分出水超越至 RPIR 池,降低 PN/A 池进水氮负荷,并配合间歇曝气方式精准控制 DO 浓度,以促进 AnAOB 活性的提升,在此期间 PN/A 池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度逐步降至 45 和 115 mg/L,系统的厌氧氨氧化脱氮能力逐渐提高,总氮去除负荷(NRR)从 0.04 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)提高至 0.08 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)。运行至第 19 天, A/RPIR 池出水全部进入 PN/A 池, PN/A 池采用连续曝气方式, PN/A 池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度能够降至 100 mg/L 以下,组合工艺中试系统的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 去除率分别可达到 91.15% 和 83.54%, NRR 可达到 0.10 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),可见此时系统已适应进水水质,实现了初步启动,因此在后续阶段系统保持全进全出的进水方式,正常运行并逐步提高进水 NLR,探究逐步提高到满负荷运行条件下组合工艺中试系统的脱氮性能及稳定性。

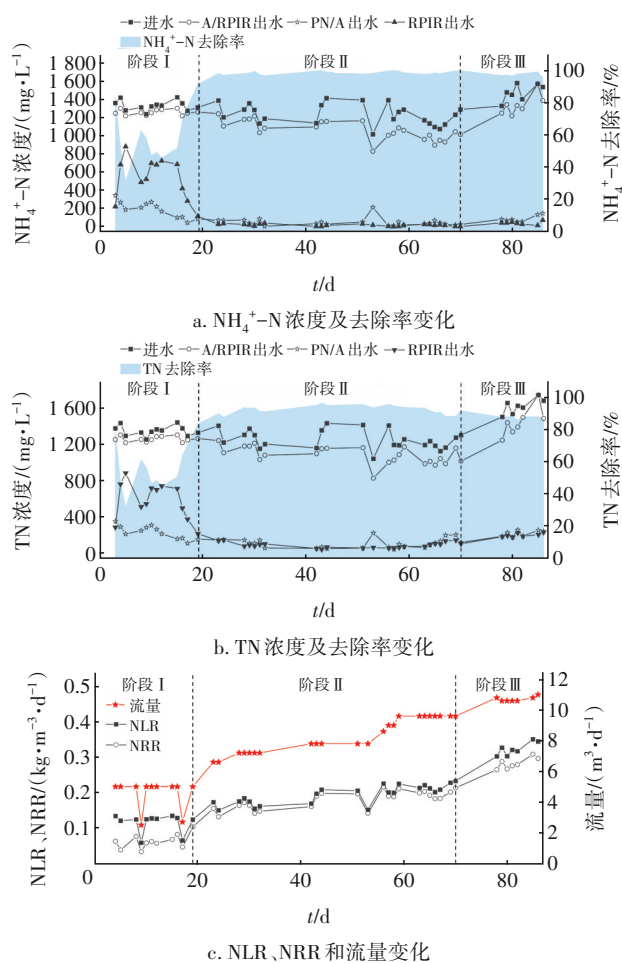


图2 组合工艺的氮素去除效果

Fig.2 Removal effect of nitrogen by combined process

在阶段 II,总氮负荷逐渐提升,组合工艺中试系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度稳定在 45 mg/L 以下,出水 TN 浓度维持在 40~150 mg/L 之间, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 平均去除率分别为 98.43% 和 92.57%, NRR 由 0.10 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)逐步提升至 0.21 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),说明在负荷逐渐增加的条件下,系统仍能够保持良好的脱氮效果,工艺稳定运行,具有一定的抗冲击负荷能力。在阶段 III,系统处理水量保持在 10 m^3/d 以上,达到设计规模, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 平均去除率分别为 97.10% 和 87.39%,最高分别可达 98.96% 和 88.09%, NRR 由 0.21 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)逐步提升至 0.31 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),说明此阶段系统能够维持稳定高效的脱氮效果。汤萌萌等^[14]采用预处理-两级硝化反硝化-臭氧氧化工艺处理餐厨废水,总 HRT 约为 7 d,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均值约为 1 250 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率可达到 98.87%, NRR 约为 0.18 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$);朱霞等^[15]采用 UASB-A²O-MBR 组合工艺处理餐厨废水,进水 TN 浓度在 180~430 mg/L, TN 去除率达到 70% 以上, NRR 约为 0.05 kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)。总体而言,组合工艺中试系统在满负荷运行条件下,能够实现餐厨沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的高效稳定去除,达到较好的氮素污染物去除效果,而且相比传统“预处理-两级 AO 或 A²O-深度处理”工艺,其脱氮效率更高、占地面积小,同时无需外加碳源、节省曝气能耗,为餐厨沼液的处理提供了一种高效、低成本的新途径。

另外,从图 2(a)和(b)可以明显看出,系统稳定运行期间, PN/A 池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度相较于 A/RPIR 池出水大幅下降, RPIR 池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度相较于 PN/A 池出水略微下降。在阶段 III,餐厨沼液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 平均浓度分别为 1 477 和 1 626 mg/L, A/RPIR 池、PN/A 池和 RPIR 池 3 个反应单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除量分别为 171、1 217 和 46 mg/L,对 TN 的去除量分别为 206、1 197、18 mg/L,由此得出 3 个反应单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除贡献率分别为 11.92%、84.87% 和 3.21%,对 TN 的去除贡献率分别为 14.50%、84.24% 和 1.26%,表明在组合工艺中试系统中 PN/A 池起到主要的生物脱氮作用,通过厌氧氨氧化自养脱氮实现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的大量去除, A/RPIR 池和 RPIR 池分别通过硝化-反硝化和硝化作用去除少量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN。

2.1.2 COD 去除效果

A/RPIR-PN/A-RPIR 组合工艺对 COD 的去除

效果如图3所示。可以看出,系统进水COD浓度存在较大波动,但系统出水COD能够稳定在较低水平,在阶段Ⅱ和阶段Ⅲ稳定运行后期,出水COD浓度维持在500 mg/L左右,阶段Ⅱ和阶段Ⅲ对COD的平均去除率分别达到83.58%和82.36%。王潇^[16]采用AnMBR+PN-ANAMMOX组合工艺处理餐厨废水,COD去除率能够稳定在60%~70%;李恒英^[17]采用前置厌氧UASB-短程硝化-厌氧氨氧化组合工艺处理餐厨垃圾发酵废水,COD去除率平均值为82%。相比国内类似研究,本研究组合工艺中试系统对COD的去除效果能够达到较高水平,同时具有良好的抗进水有机负荷波动性能。

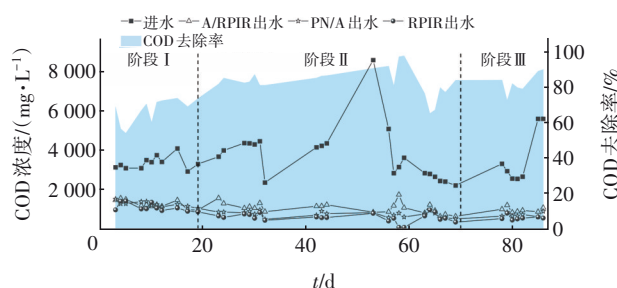


图3 组合工艺COD去除效果

Fig.3 Removal effect of COD by combined process

另外,值得注意的是,A/RPIR池、PN/A池和RPIR池3个反应单元出水COD浓度相差不大(在阶段Ⅲ出水COD均值分别为982、731、577 mg/L),表明餐厨沼液中大部分可生化有机物已通过A/RPIR池的反硝化作用去除。在阶段Ⅲ,A/RPIR池、PN/A池和RPIR池对COD的去除量分别为2 620、251、154 mg/L,对COD的去除贡献率分别为86.61%、8.30%和5.09%,表明A/RPIR池起到主要的COD去除作用,A/RPIR池能够充分利用并降解餐厨沼液中的可生化COD,避免进水COD对后续PN/A池的厌氧氨氧化脱氮性能产生不良影响。

2.2 A/RPIR单元的除碳特性

图4为A/RPIR单元进出水C/N和COD去除率的变化。可以看出,尽管A/RPIR单元进水C/N波动较大(在1.56~8.19范围内变化),进水水质不稳定,但A/RPIR单元出水始终能够保持较稳定的C/N(基本维持在0~1范围内);在阶段Ⅲ稳定运行期间,A/RPIR单元出水C/N平均值为0.62,同时A/RPIR单元能够一直保持较高的COD去除率,COD平均去除率可达69.93%。Chamchoi等^[18]研究表明,当进水

C/N超过2时,有机质的过度干预使异养菌在基质和生存空间的竞争中相对于自养菌[氨氧化菌(AOB)和AnAOB]具有绝对优势,从而抑制PN/A反应过程中AOB和AnAOB的活性;Ni等^[19]研究发现,当进水C/N在0~1之间时,AnAOB能够保持较高活性,有机物对厌氧氨氧化脱氮性能影响不大。综上可知,组合工艺中试系统的A/RPIR单元具有较强的耐有机负荷冲击能力和水质适应能力,能够在进水水质波动较大的情况下实现高效、稳定的除碳性能,出水C/N保持在0~1的低水平,为后续PN/A单元创造了良好的进水条件,避免过多有机物产生竞争干扰,保障PN/A单元厌氧氨氧化脱氮过程的稳定进行。

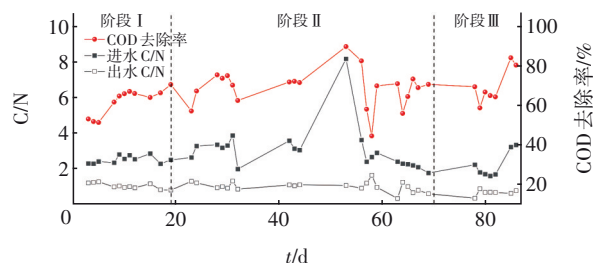


图4 A/RPIR单元进出水C/N和COD去除率的变化

Fig.4 Changes in C/N ratio of influent and effluent and COD removal efficiency in A/RPIR unit

2.3 PN/A单元的脱氮机理

2.3.1 PN/A单元的氮素去除过程

图5为PN/A单元进出水氮素浓度和NRR的变化。在阶段Ⅰ,PN/A单元进水NLR平均值仅为0.16 kg/(m³·d),出水NH₄⁺-N浓度由346 mg/L逐渐降至88 mg/L,NRR由0.06 kg/(m³·d)逐渐提升至0.25 kg/(m³·d),表明PN/A单元能够在较短时间内完成厌氧氨氧化自养脱氮工艺的启动。在阶段Ⅱ提升进水氮负荷,PN/A单元进水NLR平均值为0.39 kg/(m³·d),出水NH₄⁺-N、NO₂⁻-N和NO₃⁻-N浓度基本保持稳定,在66~70 d出水NH₄⁺-N和NO₂⁻-N浓度分别稳定低于45和10 mg/L,NRR提升至0.38 kg/(m³·d),说明PN/A单元逐步呈现出较高的脱氮性能,AOB和AnAOB达到良好的协同脱氮作用,实现出水水质的稳定控制。在阶段Ⅲ,处理水量达到设计规模,PN/A单元进水NLR平均值达到0.63 kg/(m³·d),由于进水NH₄⁺-N浓度较高,出水NH₄⁺-N浓度相比阶段Ⅱ有所增加,但出水氮素浓度仍保持稳定,NRR显著提升至0.57 kg/(m³·d)。葛聪等^[20]采用微氧曝气—一段式厌氧氨氧化—反硝化组合工艺

处理餐厨沼液,稳定运行后厌氧氨氧化单元的NRR为 $0.48 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。赵航等^[21]采用陶瓷膜-微氧曝气-MABR(PN/A)处理餐厨沼液,在最佳运行条件下NRR为 $0.30 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。综上可知,本研组合工艺的PN/A单元启动周期短、脱氮效果稳定高效,在进水氮负荷较高条件下仍能呈现优异的脱氮性能。

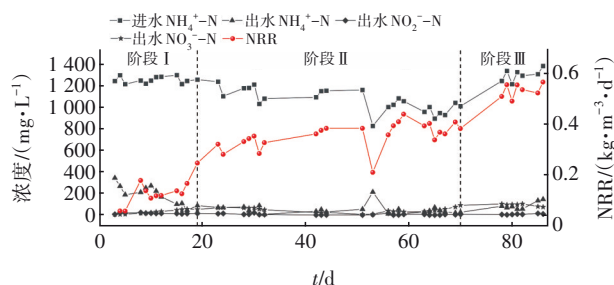


图5 PN/A单元进出水氮素浓度和NRR的变化

Fig.5 Changes in nitrogen concentration of influent and effluent and NRR in PN/A unit

为了进一步明确PN/A单元的氮素转化规律,对运行稳定后阶段Ⅲ的进出水氮素指标进行氮平衡计算,结果如图6所示。可知,PN/A单元进水中大约有82.12%的TN通过Anammox和反硝化作用转化为 N_2 ,有3.27%的TN以有机氮形式贮存在AOB、NOB、AnAOB和反硝化菌(DNB)等微生物体内,剩余14.61%的TN残留在出水中。PN/A单元生物脱氮过程中Anammox脱氮贡献率为97.26%,反硝化脱氮贡献率为2.74%,这进一步说明在PN/A单元中,厌氧氨氧化过程处于优势状态,而反硝化过程处于辅助状态,这也充分说明了此PN/A单元和组合工艺的稳定性 and 优越性,保证厌氧氨氧化过程可以充分发挥高效的脱氮性能,实现TN的稳定去除。

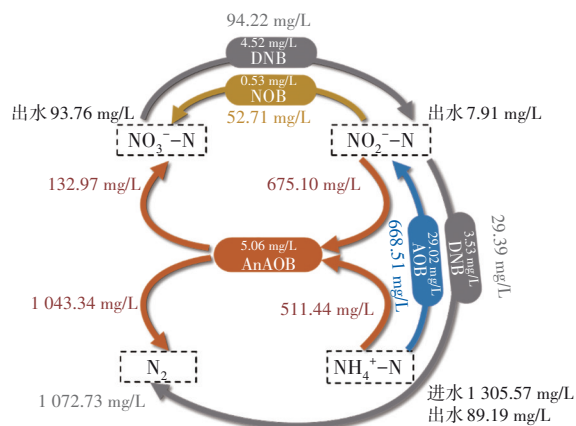
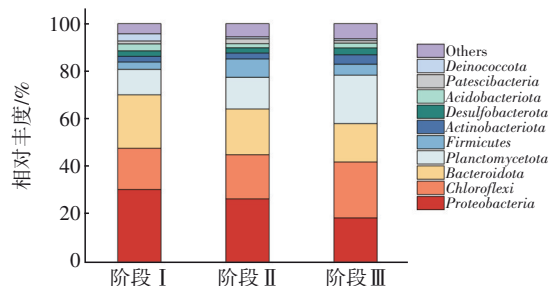


图6 PN/A单元的氮素转化路径

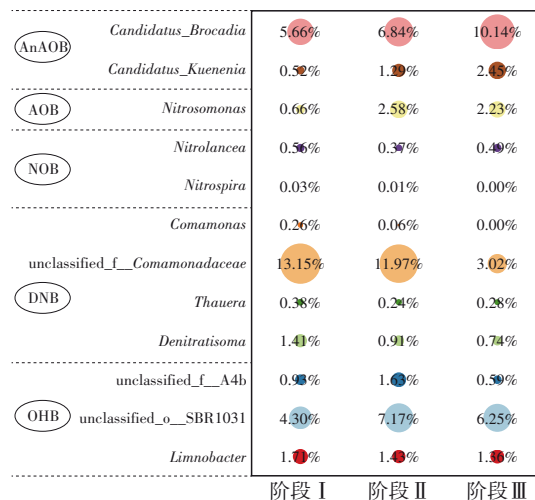
Fig.6 Nitrogen conversion path in PN/A unit

2.3.2 PN/A单元的微生物群落结构

PN/A单元在不同阶段的门水平微生物群落组成及相对丰度变化如图7(a)所示。可知,在不同阶段PN/A单元的主要优势菌门均为 *Proteobacteria*、*Chloroflexi*、*Bacteroidota* 和 *Planctomycetota*, 四者的相对丰度之和在各个阶段均超过70%。



a. 门水平微生物群落组成及相对丰度



b. 属水平功能菌群相对丰度

图7 不同阶段PN/A单元的微生物群落结构变化

Fig.7 Changes in microbial community structure of PN/A units at different stages

Proteobacteria 是污水处理系统中的常见菌门,包含多种AOB、NOB和DNB^[22]。*Bacteroidota* 大部分为厌氧杆菌,可以存在于缺氧和低氧条件下,参与反硝化降解有机物过程^[23]。*Planctomycetota* 是目前已知AnAOB所属的唯一菌门^[24]。*Chloroflexi* 是一类多细胞丝状细菌,其丝状结构能在絮体污泥中起到骨架作用,丝状菌相互缠绕形成颗粒核心,有利于颗粒污泥的形成,并且 *Chloroflexi* 可分解死亡的AnAOB,因此 *Chloroflexi* 在厌氧氨氧化体系中发挥着重要作用^[23]。阶段Ⅰ至阶段Ⅲ, *Proteobacteria* 和 *Bacteroidota* 的相对丰度逐渐下降,分别由30.51%和22.38%降至18.67%和16.07%,而 *Chloroflexi* 和

Planctomycetota 的相对丰度逐渐上升,分别由17.33%和10.73%升至23.41%和20.32%,*Chloroflexi*和*Planctomycetota*在阶段Ⅲ成为相对丰度最高和次高的菌门,说明随着反应的进行,厌氧氨氧化自养菌群正在逐渐生长富集。

PN/A单元在不同阶段的属水平功能菌群相对丰度变化如图7(b)所示。可知,PN/A单元存在*Candidatus_Brocadia*和*Candidatus_Kuenenia*两种AnAOB属,在阶段Ⅰ两种AnAOB属的相对丰度分别为5.66%和0.52%,随着运行时间的增长,AnAOB属的相对丰度逐渐提高,在阶段Ⅱ升至6.84%和1.29%,在阶段Ⅲ进一步升至10.14%和2.45%,表明AnAOB在PN/A单元得到有效富集,培养的AnAOB能很好地适应水质环境,在体系中维持较高丰度,因此PN/A单元在阶段Ⅱ和阶段Ⅲ表现出优越的脱氮效果和稳定性。*Nitrosomonas*是目前唯一已知的自养AOB属^[24],从阶段Ⅰ至阶段Ⅲ其相对丰度呈上升趋势,由0.66%升至2.23%。*Nitrospira*和*Nitrolancea*是本研究PN/A单元中检测出的两种NOB属,从阶段Ⅰ至阶段ⅢNOB属的丰度有所下降,*Nitrolancea*和*Nitrospira*相对丰度之和由0.59%降至0.49%。以上结果说明,反应过程中AOB活性逐渐增强,NOB活性被抑制,这是由于本研究在组合工艺运行期间通过采用低DO浓度(0.02~0.50 mg/L)、间歇曝气及弱碱性pH等多种手段结合的方式有效降低NOB活性,使得AOB处于竞争优势^[25],最终控制PN/A单元短程硝化不稳定的现象,保障厌氧氨氧化脱氮反应稳定进行。DNB是反应器内常见的菌属,本研究PN/A单元中检测到*Denitratisoma*、*unclassified_f__Comamonadaceae*、*Thauera*、*Comamonas*四种主要的DNB,从阶段Ⅰ至阶段Ⅲ四种DNB的总相对丰度显著下降,由15.20%降至4.04%,印证了*Proteobacteria*和*Bacteroidota*菌门相对丰度的变化趋势,证实DNB在PN/A单元中处于竞争劣势,餐厨沼液经过A/RPIR单元处理后,有机物被大量去除,进入PN/A单元的沼液C/N得到有效控制,使得异养DNB未能实现富集,为AnAOB的富集和发挥脱氮性能提供了优质的环境,PN/A单元最终实现了对TN的稳定高效去除。另外,在PN/A单元中还检测出一些丰度相对较高的其他异养菌群(OHB),主要包括*unclassified_f__A4b*、*unclassified_o__SBR1031*和*Limnobacter*。其中,*unclassified_f__A4b*、*unclassified_o__SBR1031*均属于*Chloroflexi*菌门,在阶段Ⅱ和Ⅲ

相对丰度有所提高,促进厌氧氨氧化颗粒污泥的形成;*Limnobacter*属于异养菌,研究表明*Limnobacter*能够与AnAOB共生并可缓解有机物对AnAOB的影响,因此*Limnobacter*的存在在一定程度上能够强化厌氧氨氧化脱氮系统的稳定性^[26]。

综上所述,PN/A单元经过86 d的运行,AnAOB和AOB等脱氮功能菌得以富集,NOB和DNB的活性受到抑制,这从微观层面上解释了2.3.1节中从阶段Ⅰ至阶段ⅢPN/A单元的脱氮效率逐渐强化并维持稳定的原因,同时也印证了2.2节的结论,前端A/RPIR单元能够有效降低进水有机物对PN/A单元的影响,避免反硝化异养菌和AnAOB菌群竞争问题,保障厌氧氨氧化脱氮反应的稳定进行,最终实现高效稳定脱氮。

3 结论

① 采用A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺处理餐厨沼液可实现高效稳定的脱氮除碳效果, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和COD平均去除率分别可以达到97.10%、87.39%和82.36%,系统和PN/A单元的NRR最高分别可达0.31和0.57 kg/(m³·d),相比传统“预处理-两级AO或A²/O-深度处理”工艺,该组合工艺具有高效、节能且低成本的优势。

② 在A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺中试系统中,A/RPIR单元对COD的平均去除率可达69.93%,在组合工艺中占据86.61%的贡献度;另外,在进水水质波动较大的情况下,A/RPIR单元出水C/N始终保持在0~1的较低范围,为后续PN/A单元创造了良好的进水条件,避免过多有机物进入PN/A单元而导致菌群竞争,保障了厌氧氨氧化脱氮反应的稳定进行。

③ 在A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺中试系统中,PN/A单元对脱氮的贡献率达到了84.24%;微生物高通量测序结果显示,在PN/A单元中AnAOB和AOB的相对丰度分别由阶段Ⅰ的6.18%和0.66%升至阶段Ⅲ的12.59%和2.23%,NOB和DNB的相对丰度分别由阶段Ⅰ的0.59%和15.20%降至阶段Ⅲ的0.49%和4.04%,说明A/RPIR-PN/A-RPIR组合工艺可以有效解决PN/A反应过程中功能菌群间竞争和短程硝化不稳定的问题,实现高效稳定的除碳脱氮性能。

参考文献:

- [1] 邓俊. 餐厨垃圾无害化处理与资源化利用现状及发展趋势[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 637-642.
- DENG Jun. Harmless treatment and resource utilization of kitchen waste: development status and trend [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(6): 637-642 (in Chinese).
- [2] SHIN D Y, CHO H U, UTOMO J C, *et al.* Biodiesel production from *Scenedesmus bijuga* grown in anaerobically digested food wastewater effluent [J]. Bioresource Technology, 2015, 184: 215-221.
- [3] 宋欣欣, 闵海华, 丁西明. 预处理+两级 A/O+UF+Fenton+BAF 处理餐厨沼液[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 143-148.
- SONG Xinxin, MIN Haihua, DING Ximing. Treatment of food waste biogas slurry by process of pretreatment, two-stage A/O, UF, Fenton advanced oxidation and BAF [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 143-148 (in Chinese).
- [4] SHANG T T, ZHU X R, GONG X F, *et al.* Efficient nitrogen removal in a total floc sludge system from domestic wastewater with low C/N: high anammox nitrogen removal contribution driven by endogenous partial denitrification [J]. Bioresource Technology, 2023, 378: 128995.
- [5] 任书博, 张宁, 张瑞昌, 等. 短程硝化-厌氧氨氧化工艺的 Challenge 与对策[J]. 化学通报, 2024, 87(2): 209-217, 225.
- REN Shubo, ZHANG Ning, ZHANG Ruichang, *et al.* Challenges and countermeasures of partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation process [J]. Chemistry Bulletin, 2024, 87(2): 209-217, 225 (in Chinese).
- [6] LI X, WANG J E, YUAN Y, *et al.* Construction and operation characteristics of a fully quantified low-carbon treatment process for old landfill leachate [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139547.
- [7] 韩晓宇, 常江, 孟春霖, 等. 短程硝化/厌氧氨氧化一步法自养脱氮中试研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(19): 1-5, 10.
- HAN Xiaoyu, CHANG Jiang, MENG Chunlin, *et al.* Single-stage autotrophic nitrogen removal based on partial nitrification and Anammox [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(19): 1-5, 10 (in Chinese).
- [8] 王元月, 魏源送. 新型控制模式下短程硝化/厌氧氨氧化法处理污泥水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(17): 24-27.
- WANG Yuanyue, WEI Yuansong. Combined partial nitrification and ANAMMOX process for treating sludge water under new control pattern [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(17): 24-27 (in Chinese).
- [9] PIJUAN M, RIBERA-GUARDIA A, BALCAZAR J L, *et al.* Effect of COD on mainstream anammox: evaluation of process performance, granule morphology and nitrous oxide production [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 136372.
- [10] ASLAN S, SIMSEK E. Influence of salinity on partial nitrification in a submerged biofilter [J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 24-29.
- [11] XU G H, CHEN S H, SHI J W, *et al.* Combination treatment of ultrasound and ozone for improving solubilization and anaerobic biodegradability of waste activated sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 180(1/3): 340-346.
- [12] 刘旭, 刘淑杰, 段美娟, 等. 反应沉淀一体式矩形环流生物反应器处理屠宰废水[J]. 工业用水与废水, 2018, 49(4): 26-31.
- LIU Xu, LIU Shujie, DUAN Meijuan, *et al.* Treatment of slaughter wastewater using reaction-precipitation integrated rectangular airlift loop bioreactor [J]. Industrial Water & Wastewater, 2018, 49(4): 26-31 (in Chinese).
- [13] 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.
- [14] 汤萌萌, 张亚琳, 丁西明, 等. 预处理/MBR/臭氧高级氧化工艺处理餐厨垃圾废水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 71-73.
- TANG Mengmeng, ZHANG Yalin, DING Ximing, *et al.* Treatment of kitchen wastewater with pretreatment unit/MBR/ozone-based advanced oxidation process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 71-73 (in Chinese).
- [15] 朱霞, 李鹤超, 任洪强. UASB-A²O-MBR 组合工艺处理餐厨废水工程[J]. 水处理技术, 2019, 45(2): 124-128.
- ZHU Xia, LI Hechao, REN Hongqiang. Treatment of restaurant wastewater by UASB-A²O-MBR combined

- process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(2): 124-128 (in Chinese).
- [16] 王潇. AnMBR+PN-ANAMMOX组合工艺处理餐厨废水效能研究[D]. 无锡:江南大学,2023.
- WANG Xiao. Performance of AnMBR-PN-ANAMMOX Combined Process for Treating Kitchen Wastewater[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023 (in Chinese).
- [17] 李恒英. 前置厌氧-短程硝化-厌氧氨氧化处理餐厨垃圾发酵废水研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
- LI Hengying. Study on Pre-anaerobic-Shortcut Nitrification-Anaerobic Ammonia Oxidation Treatment of Kitchen Waste Fermentation Wastewater [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021(in Chinese).
- [18] CHAMCHOI N, NITISORAVUT S, SCHMIDT J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(9): 3331-3336.
- [19] NI S Q, NI J Y, HU D L, *et al.* Effect of organic matter on the performance of granular anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 701-705.
- [20] 葛聪, 薛晓飞, 穆永杰, 等. 微氧曝气-一段式厌氧氨氧化-反硝化组合工艺处理餐厨沼液[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(4): 1111-1117.
- GE Cong, XUE Xiaofei, MU Yongjie, *et al.* The treatment of food waste digestate by combined process of micro-oxygen aeration, one-stage anaerobic ammoxidation and denitrification[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(4): 1111-1117 (in Chinese).
- [21] 赵航, 薛晓飞, 穆永杰, 等. 陶瓷膜微氧曝气 MABR 强化 PN/anammox 工艺处理餐厨沼液[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(4): 1118-1127.
- ZHAO Hang, XUE Xiaofei, MU Yongjie, *et al.* Treatment of food waste digestate by ceramic membrane-micro oxygen aeration-MABR enhanced PN/anammox process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(4): 1118-1127 (in Chinese).
- [22] GONZALEZ-GIL G, SOUGRAT R, BEHZAD A R, *et al.* Microbial community composition and ultrastructure of granules from a full-scale anammox reactor[J]. *Microbial Ecology*, 2015, 70(1): 118-131.
- [23] LI X R, DU B, FU H X, *et al.* The bacterial diversity in an anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) reactor community [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, 32(4): 278-289.
- [24] 陈昊. 基于多级氨氧化的PN/A/PN/A城市污水脱氮研究[D]. 北京:北京工业大学,2023.
- CHEN Hao. Study on Nitrogen Removal from Municipal Wastewater Based on Multi-stage Ammonia Oxidation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023 (in Chinese).
- [25] 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).
- [26] 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:2024-11-13

修回日期:2025-01-15

(编辑:刘贵春)