

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.014

热水解污泥厌氧产酸开发易降解碳源的可行性研究

樊鹏超^{1,2}, 王佳伟^{1,2}, 任征然^{1,2}, 焦二龙^{1,2}, 文洋^{1,2},
李伟^{1,2}, 李东辉^{1,2}, 屈格非^{1,2}, 李隆博^{1,2}, 李雷^{1,2}

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 2. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 利用热水解污泥厌氧产酸制备反硝化碳源,是实现污泥碳资源化的有效途径。为此,探究了污泥厌氧产酸效果、产酸液作为反硝化碳源的可行性及微生物群落演变规律。结果表明,在适宜产酸条件下污泥产酸液的SCOD为20.0~29.5 g/L, VFAs为7.7~13.2 g/L, 乙酸占比约为50%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1 060~1 917 mg/L。反硝化速率试验结果显示,以产酸液为碳源时,反硝化速率为1.784 mg/(gMLVSS·h),可达到乙酸钠反硝化速率的83%,具备作为反硝化碳源的潜力。污泥厌氧产酸过程中,水解发酵的两大主要菌属即拟杆菌(*Bacteroides*)和梭状芽孢杆菌(*Clostridium*)的丰度显著提高,优势产甲烷菌为甲烷短杆菌属(*Methanobrevibacter*)。研究结果证实了热水解污泥厌氧产酸制备反硝化碳源的可行性,后续可通过强化产甲烷抑制、优化氮磷去除进一步提升技术实用性。

关键词: 污泥; 热水解; 厌氧产酸; 碳源; 微生物群落结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0097-07

Feasibility Study on Developing Easily Degradable Carbon Sources from Anaerobic Acidogenesis of Thermally Hydrolyzed Sludge

FAN Pengchao^{1,2}, WANG Jiawei^{1,2}, REN Zhengran^{1,2}, JIAO Erlong^{1,2}, WEN Yang^{1,2},
LI Wei^{1,2}, LI Donghui^{1,2}, QU Gefei^{1,2}, LI Longbo^{1,2}, LI Lei^{1,2}

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Technology Research Center for Municipal Sewage Reclamation, Beijing 100124, China)

Abstract: Producing denitrification carbon sources through anaerobic acidogenesis of thermally hydrolyzed sludge is an effective way to realize the carbon resource utilization of sludge. To this end, this study explored the effect of anaerobic acidogenesis of sludge, the feasibility of using the acidified liquid as a denitrification carbon source, and the evolution law of the microbial community. The results showed that under suitable acidogenesis conditions, the SCOD of the sludge acidified liquid was 20.0–29.5 g/L, VFAs were 7.7–13.2 g/L, the proportion of acetic acid was about 50%, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was 1 060–1 917 mg/L. The results of the denitrification rate test showed that when the acidified liquid was used as the carbon source, the denitrification rate was 1.784 mg/(gMLVSS·h), which could reach 83% of the denitrification rate of sodium acetate, indicating that it had the potential to serve as a denitrification carbon source. During the anaerobic acidogenesis process of sludge, the relative abundances of *Bacteroides* and

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2025ZD1203800); 北京城市排水集团内部课题(BPJ201909-2025)
通信作者: 王佳伟 E-mail: wangjiawei@bdc.cn

Clostridium, the two main genera responsible for hydrolysis and fermentation, increased significantly, and the dominant methanogen was *Methanobrevibacter*. The research results confirm the feasibility of preparing denitrification carbon sources through anaerobic acidogenesis of thermally hydrolyzed sludge, and the practicality of the technology can be further improved by strengthening methanogenesis inhibition and optimizing nitrogen and phosphorus removal in subsequent studies.

Keywords: sludge; thermal hydrolysis; anaerobic acidogenesis; carbon source; microbial community structure

在城市污水处理过程中,污水中约40%~60%的碳元素最终富集于污泥相。这一碳资源分布特征与当前污水处理厂普遍面临的进水碳源不能满足生物脱氮除磷需求问题形成了显著矛盾^[1]。因此,将剩余污泥中的碳元素转化为高品质碳源应用到污水处理过程中,既可以实现污泥中碳元素的资源化回收与循环利用,又可以节省污水处理厂的药剂投加成本。

由于剩余污泥中胞外聚合物(EPS)的包裹效应,直接厌氧酸化效率显著受限。目前的研究主要通过碱发酵、超声波等预处理技术,或高温发酵强化厌氧产酸体系的碳源转化效率^[2-4]。研究表明,在超声预处理(10 min, 1 kW/L)及碱性(pH=10)条件下,温度对污泥厌氧发酵系统的挥发性脂肪酸(VFAs)产量呈现显著的影响,10℃时VFAs产量为1 078 mg/L,37℃时则提升至3 705 mg/L。然而,碱性发酵需持续投加NaOH等化学药剂,不仅增加运行成本,更易引发盐分积累问题;超声波处理则受限于能耗高等技术瓶颈^[4]。相比之下,热水解技术通过高温高压作用直接破解微生物细胞壁,避免化学药剂投加的同时显著提升有机物水解效率,为后续厌氧产酸阶段提供更丰富的易降解底物,最终使VFAs产率提升^[5]。

尽管热水解技术已在国内外工程实践中得到了广泛应用,但其应用领域主要集中在提升厌氧消化产气效率和改善污泥脱水性能等方面,鲜有将该技术用于开发反硝化碳源的研究。鉴于此,本研究探究了热水解污泥厌氧产酸液作为替代碳源对反硝化速率的强化效应,并解析产酸过程中微生物群落结构的动态演变规律,旨在系统评估热水解预处理对污泥厌氧产酸效果的提升作用,为污水处理厂碳源回收与资源化利用提供创新性解决方案和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验用污泥

试验所用污泥取自北京市某再生水厂。其中,预脱水污泥为初沉污泥与剩余污泥按6:4混合后经离心脱水得到的污泥,该污泥微生物含量丰富且活性较高;热水解污泥由预脱水污泥经160℃高温热水解处理制得,在高温高压作用下,污泥絮体结构及微生物细胞壁被破坏,大量有机物得以释放,且污泥中微生物几乎完全灭活;消化污泥取自该厂运行稳定的厌氧消化池,其含有大量厌氧消化过程的特征微生物,如水解菌、产酸菌和产甲烷菌等。

为实现水解酸化系统的快速启动,试验采用热水解污泥、消化污泥、预脱水污泥按质量比2:1:1混合制备接种污泥。三种污泥混合均匀后,用自来水将体系总固体(TS)含量稀释至8%,以此启动厌氧发酵罐。试验用污泥的主要性质如表1所示。

表1 试验用污泥的主要性质

Tab.1 Main properties of sludge in this study

mg/L				
项目	SCOD	STN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
预脱水污泥	5 494±752	455±46	376±92	—
热水解污泥	24 867±1 734	2 109±103	770±342	15±8
消化污泥	6 673±372	3 013±45	2 824±152	—
项目	NO ₂ ⁻ -N	STP	PO ₄ ³⁻ -P	VFAs
预脱水污泥	—	—	—	2 757±154
热水解污泥	9±9	79±18	32±15	3 324±1 505
消化污泥	—	—	—	1 503±362

注: SCOD为可溶性化学需氧量;STN为可溶性总氮;STP为可溶性总磷;VFAs含量以COD计。

1.2 试验装置

试验采用连续搅拌反应器系统(CSTR),工作体积为10 L,内部设置的搅拌器转速为150 r/min,于室温条件下运行,并通过温度计实时监测反应温度。反应器上部设有气体收集口和进料口,分别用于收

集产气与投加热水解污泥;底部设置污泥出料口,兼具污泥排放与取样功能。

1.3 试验方法

试验过程中,反应器工作体积恒定维持在10 L。重点考察水力停留时间(HRT)分别为4 d和3 d时,热水解污泥的厌氧产酸特性。反应器运行前4 d为静置阶段,此阶段不进行进出料,使接种污泥适应反应环境,促进系统内微生物的增殖;第5~18天为驯化阶段,每天进出热水解污泥2.5 L,促进厌氧产酸菌的生长繁殖;第19~39天,每天进出热水解污泥2.5 L,对应HRT为4 d;第40~57天,每天进出热水解污泥3.3 L,对应HRT为3 d。在反应器连续运行期间,定期监测系统pH、温度、产气量及气体成分,并分析产酸液中的SCOD、VFAs、STN等关键指标。

1.4 检测方法

发酵污泥样品经离心机(转速为8 000 r/min)离心5 min,取上清液过0.45 μm 微孔滤膜后,测定SCOD、VFAs、STN、 NH_4^+-N 、STP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 指标,检测方法分别为快速消解分光光度法、气相色谱法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂比色法、钼酸铵分光光度法、钼酸铵分光光度法。污泥样品的pH采用便携式pH仪测定,气体成分采用便携式气体成分仪测定。

在25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,以城镇污水处理厂的活性污泥作为接种污泥测定反硝化速率。反应体系内初始 NO_3^--N 为40 mg/L,DO控制在0.2 mg/L以下。搅拌30 min后,分别投加乙酸钠(对照组)和产酸液,于1、15、30、45、60、75、90、105 min时取样,样品过滤后测定SCOD、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 指标。绘制 NO_3^--N 和 NO_2^--N 随时间的变化曲线,根据曲线斜率计算反硝化速率。

1.5 高通量测序分析方法

试验分别于第0、8、25和57天取污泥样品,分析微生物群落结构。离心后的污泥样品保存于4 $^{\circ}\text{C}$ 下,并在12 h内送至上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序分析。细菌扩增采用引物338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3');古菌扩增采用引物524F10extF(TGYCAGCCGCCGCGTAA)和Arch958RmodR(YCCGCGCTTGAVCCAATT)。对扩增产物进行纯化、定量和均一化处理后,利用Illumina MiSeq测序平台完成高通量测序。

2 结果与讨论

2.1 热水解污泥厌氧产酸效果

在厌氧消化系统中,HRT是平衡水解酸化阶段与产甲烷阶段的关键因素^[6],因此,本研究通过缩短HRT,将世代周期长的产甲烷菌淘洗出系统,完成产酸污泥的驯化。热水解污泥厌氧产酸效果如图1所示。在HRT为4 d条件下,沼气产率均值为16.8 L/kgTS,产气组分中 CH_4 含量为25%~33%、 CO_2 含量为67%~75%;由气体组分分析可见,此时厌氧产酸体系已稳定停留在水解酸化阶段,具有较好的产酸效果。进一步缩短HRT至3 d后,沼气产率均值降至10.8 L/kgTS,降幅为36%;产气组分中 CH_4 含量维持在27%~32%、 CO_2 含量维持在68%~73%,与HRT为4 d时基本一致。上述结果表明,缩短HRT可有效抑制产甲烷过程,使系统维持较高的产酸效率,在较短HRT条件下实现产酸过程的稳定进行。

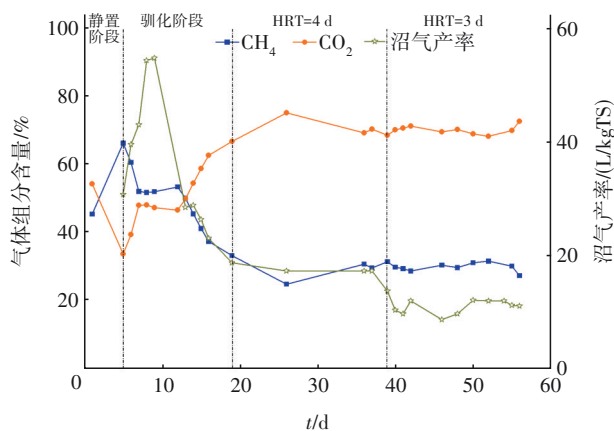


图1 沼气产率和气体成分

Fig.1 Biogas production rate and gas composition

产酸液中的有机物成分如图2所示。由图2(a)可知,当HRT为4 d时,产酸液的SCOD为21.8~24.6 g/L、VFAs为7.7~13.2 g/L, VFAs/SCOD为32.5%~54.6%。将HRT缩短至3 d后,产酸液的SCOD为20.0~29.5 g/L, VFAs为7.9~11.2 g/L, VFAs/SCOD为31.0%~49.4%。当HRT为4 d时, VFAs浓度波动明显,波动幅度达5.5 g/L。这可能是由于系统在从驯化阶段向稳定运行过渡时,微生物群落尚处于调整期,产酸菌与产甲烷菌之间的动态平衡尚未完全建立。当HRT缩短至3 d后, VFAs浓度反而趋于稳定,波动幅度降至3.3 g/L,说明系统产酸功能并未因HRT缩短而受损,反而表现出更强的稳定性。从资源化利用角度分析,HRT由4 d

缩短至3 d后,SCOD浓度均值由23.6 g/L升至25.7 g/L,增幅约为9%,且VFAs/SCOD值保持在较高范围,表明有机物水解溶出效率提高,为后续厌氧产酸提供了更丰富的底物来源,证实了缩短HRT有利于可溶性有机物释放与资源化利用^[7]。已有研究表明,未经热水解处理的污泥通常需在HRT为4~6 d时达到最大VFAs产量的80%^[8],说明与常规污泥厌氧产酸系统相比,热水解污泥可以在更短的HRT条件下实现更优的酸化效果。

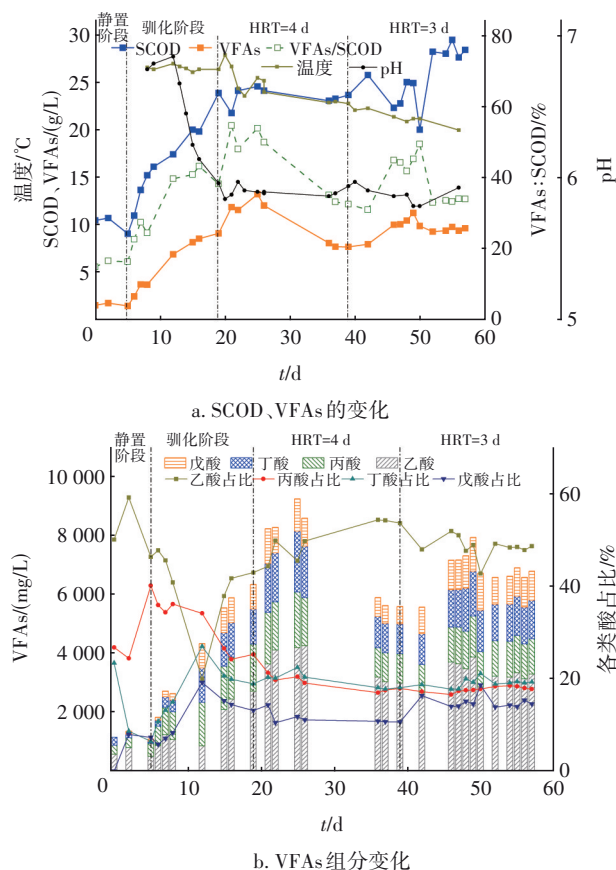


图2 产酸液中的有机物成分

Fig.2 Organic components of acidified liquid

如图2(b)所示,当HRT为4 d时,乙酸浓度为2 090~4 254 mg/L,占VFAs总量的43%~54%;丙酸浓度为981~1 880 mg/L,占VFAs总量的17%~25%;丁酸浓度为996~2 067 mg/L,占VFAs总量的18%~22%;戊酸浓度为592~1 176 mg/L,占VFAs总量的10%~14%;当HRT为3 d时,乙酸浓度为2 660~3 867 mg/L,占VFAs总量的43%~52%;丙酸浓度为956~1 389 mg/L,占SCOD总量的17%~18%;丁酸浓度为1 039~1 520 mg/L,占VFAs总量的18%~21%;戊酸浓度为908~1 245 mg/L,占VFAs总量的14%~

19%。因此,当热水解污泥厌氧发酵体系的pH维持在5.7~6.0时,VFAs组分以乙酸为主,与碱性污泥厌氧产酸的相关研究结果一致^[2]。同时,已有研究表明,在pH为6.0~6.5的酸性环境下,VFAs同样以乙酸为主要组分^[9],与本研究结果相符。

2.2 产酸液替代反硝化碳源的可行性

厌氧产酸过程会释放大量的氮和磷等无机污染物,产酸液若直接投入到生物脱氮除磷系统中会增加系统的污染负荷,因此,本研究通过分析产酸液的C/N、C/P以及反硝化速率等关键参数,系统评估其作为替代碳源的利用效果。产酸液中氮和磷浓度的变化如图3所示。当HRT为4 d时,STN为1 912~2 200 mg/L、 NH_4^+-N 为1 415~1 692 mg/L、STP为89~113 mg/L、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为33~53 mg/L、 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{STN}$ 为67%~85%;当HRT为3 d时,STN为1 875~2 338 mg/L、 NH_4^+-N 为1 060~1 917 mg/L、STP为77~113 mg/L、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为17~49 mg/L、 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{STN}$ 为51%~87%。产酸液的C/N均值为12、C/P均值为256,均高于城市污水处理厂进水的C/N和C/P值。这一结果表明,污泥厌氧产酸液可作为城市污水强化脱氮除磷的替代碳源,其较高的氨氮和总磷浓度不会对出水水质产生明显的负面影响^[10]。但需注意,后续研究应重点关注产酸液中氮和磷的去除方法,进一步提高C/N和C/P值,减少产酸液去除自身氮、磷过程中碳源的消耗,最大化实现产酸液的碳元素在生物脱氮除磷过程中的高效利用。

反硝化速率试验表明,在初始C/N为7条件下,乙酸钠的反硝化速率为2.144 mg/(gMLVSS·h),产酸液的反硝化速率为1.784 mg/(gMLVSS·h)。产酸液中含有可溶性碳水化合物、酰胺类、VFAs、醇类及可溶性蛋白质等物质,其作为反硝化碳源时,反硝化菌可利用这些物质实现共同脱氮效果^[11]。甲醇、乙酸钠为污水处理中常用的碳源,乙酸钠的反硝化速率为1.2~2.9 mg/(gMLVSS·h)^[12],甲醇的反硝化速率为2.406 mg/(gMLVSS·h)^[13],复合碳源的反硝化速率为1.1~3.1 mg/(gMLVSS·h)^[14]。在本研究中,热水解污泥酸化液的反硝化速率与餐厨垃圾水解酸化液^[12]、牛粪秸秆发酵沼液^[14]的反硝化速率处于同一水平,且与甲醇的反硝化速率接近。以乙酸钠为高效易降解碳源参照,产酸液的反硝化速率为乙酸钠的83%。综上,污泥厌氧产酸液可归类于用于反硝化的易降解碳源。

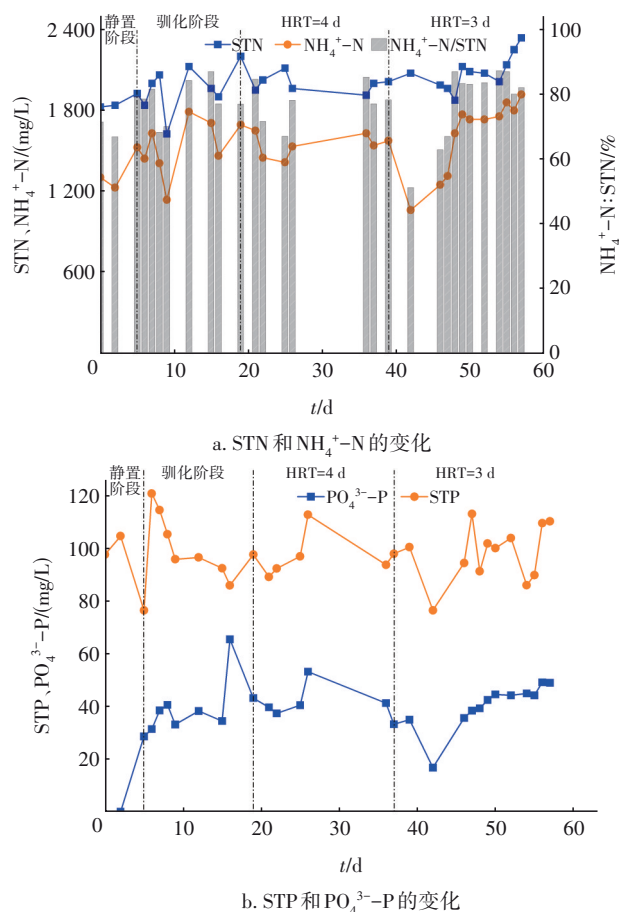


图3 产酸液中氮和磷浓度的变化

Fig.3 Variation of nitrogen and phosphorus concentrations in acidified liquid

2.3 产酸过程中微生物群落的演变

为揭示厌氧发酵过程中微生物群落的动态变化,对第0、8、25和57天的污泥样品进行微生物群落组成分析。其中,第25天为HRT=4 d条件下的稳定运行期,VFAs为13 g/L;第57天为HRT=3 d条件下的稳定运行期,VFAs为9.6 g/L。厌氧发酵过程中有多种微生物存在,主要包括变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)等20个门的真菌菌和甲烷微菌纲(Methanomicrobia)、甲烷杆菌纲(Methanobacteria)等5种纲的古菌。随着厌氧发酵反应的进行,细菌的Shannon指数降低,群落多样性降低。如图4所示,在门水平上,静置阶段优势菌门是厚壁菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、放线菌门(Actinobacteria)、Caldatibacteriota,相对丰度分别为37%、16%、12%、11%。驯化阶段,厚壁菌门(Firmicutes)丰度大幅增加。厌氧产酸阶段(HRT为4 d和3 d),Firmicutes成为优势菌门,占比在70%以

上。Firmicutes是厌氧发酵水解酸化阶段的优势细菌类群,大量存在于厌氧消化污泥、废水、粪便、餐厨垃圾厌氧反应器中^[15]。由此可见,产酸污泥的形成过程主要伴随Firmicutes、拟杆菌门(Bacteroidota)相对丰度的升高,以及绿弯菌门(Chloroflexi)和Caldatibacteriota相对丰度的降低。

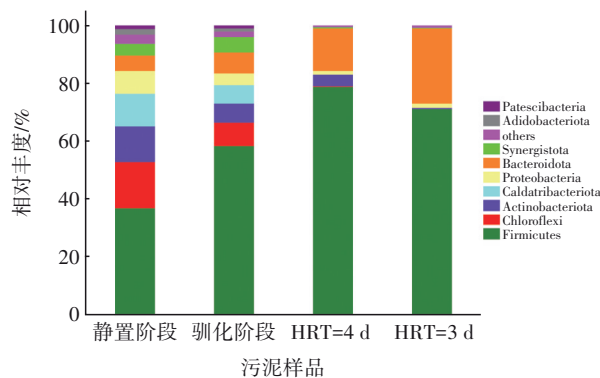


图4 发酵过程中菌群变化情况
Fig.4 Variation of microbial community during fermentation

污泥厌氧产酸过程中,以VFAs为末端代谢产物的功能菌群主要有水解发酵产酸菌、产氢产乙酸菌和同型产乙酸菌^[16]。污泥厌氧发酵依赖多种发酵细菌的协同作用,其中拟杆菌(*Bacteroides*)和梭状芽孢杆菌(*Clostridium*)为最主要的两大菌属,也是系统中同型产乙酸菌的主要类群。因此,在属水平上重点分析*Bacteroides*和*Clostridium*的相对丰度变化,以揭示产酸过程的微生物群落演替规律。与静置及驯化阶段相比,产酸阶段*Bacteroides*的相对丰度从0.05%增至1.50%以上,*Clostridium*的相对丰度从1.50%增至3.30%以上。在厌氧产酸过程中,*Bacteroides*和*Clostridium*两者共同作用显著强化了污泥的水解酸化作用,进而提高了系统中的VFAs产量。

产甲烷过程是系统消耗VFAs的关键途径,因此可通过分析产甲烷菌的菌属变化,反映系统中VFAs的消耗特征。随着产酸污泥驯化完成,广古菌门(Euryarchaeota)的相对丰度从64.0%增至99.9%,广古菌门包含了古菌中的大多数种类,主要包括产甲烷菌、极端嗜盐菌、硫酸盐还原菌和极端嗜热菌^[17]。如图5所示,在属水平上,优势产甲烷菌从驯化阶段的甲烷杆菌(*Methanobacterium*)和甲烷八叠球菌(*Methanosarcina*)转化为产酸阶段的甲烷

短杆菌(*Methanobrevibacter*),相对丰度达到90%以上。根据代谢底物类型,产甲烷菌分为乙酸营养型产甲烷菌和氢营养型产甲烷菌。*Methanosarcina*为典型的乙酸营养型产甲烷菌,可利用乙酸产甲烷,而*Methanobacterium*主要以 H_2 或甲酸为底物^[16]。*Methanobrevibacter*属于氢营养型产甲烷菌,可利用 H_2 、甲酸盐等作为电子供体还原 CO_2 生成 CH_4 ^[18]。据此可判断,在静置和驯化阶段,产甲烷过程主要由*Methanobacterium*和*Methanosarcina*共同完成,可利用乙酸和 H_2 或甲酸盐等多种底物产 CH_4 。在厌氧产酸阶段,产甲烷的途径转变为以 H_2 和甲酸盐为电子供体还原 CO_2 生成 CH_4 为主。结合体系中 H_2 浓度及细菌、古菌的结构变化可知,厌氧产酸过程中,*Bacteroides*和*Clostridium*的相对丰度增加,VFAs产量增加;同时,优势产甲烷菌由*Methanobacterium*和*Methanosarcina*转化为*Methanobrevibacter*,以乙酸为底物的产甲烷途径减弱,乙酸消耗减少。多种功能微生物协同作用,最终实现了厌氧产酸体系中VFAs的高效产出与积累。

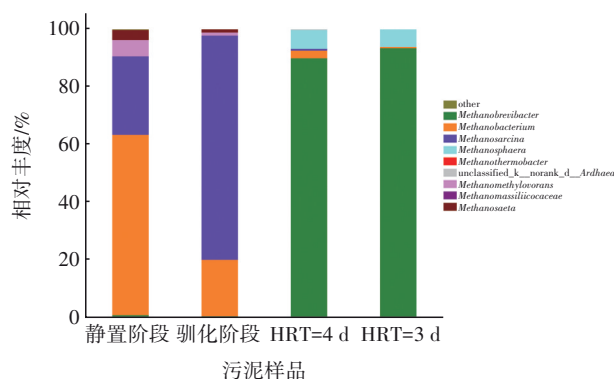


图5 厌氧产酸过程中的古菌群落结构

Fig.5 Archaeal community structure during anaerobic acidogenesis

3 结论

① 热水解污泥厌氧产酸液富含大量易生物降解有机物,其SCOD为20.0~29.5 g/L、VFAs为7.7~13.2 g/L,其中乙酸占比约为50%,具备作为反硝化碳源的良好潜力。

② 反硝化速率试验结果表明,以产酸液作为碳源时,反硝化速率为1.784 mg/(gMLVSS·h),可达到乙酸钠反硝化速率的83%,说明其碳源利用效率与传统碳源相近,能够有效支持反硝化过程,适用于污水处理厂的脱氮工艺。

③ 微生物群落演变规律分析显示,*Bacteroides*、*Clostridium*等关键功能菌群的富集与系统中VFAs的积累密切相关;*Methanobrevibacter*为优势产甲烷菌,产甲烷途径以氢营养型为主,乙酸消耗途径减弱,有利于VFAs在系统中的积累。

④ 本研究仍需在产甲烷抑制、氮磷协同去除及工程化应用等方面进一步完善。未来可结合工艺优化与中试研究,推动热水解污泥厌氧产酸液在实际污水处理中的规模化工程应用。

参考文献:

- [1] 李冬娜, 马晓军. 污泥厌氧发酵产酸机理及应用研究进展[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(2): 51-60.
LI D N, MA X J. Mechanism and research progress of acid synthesis during sludge anaerobic fermentation[J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(2): 51-60 (in Chinese).
- [2] 曾薇, 郭京京, 纪兆华, 等. pH值对剩余污泥微氧水解酸化溶出物及微生物群落结构的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 471-482.
ZENG W, GUO J J, JI Z H, et al. Effect of pH value on hydrolysis and acidification of waste activated sludge and microbial community structures at microaerobic conditions [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 471-482 (in Chinese).
- [3] ESTEBAN-GUTIÉRREZ M, GARCIA-AGUIRRE J, IRIZAR I, et al. From sewage sludge and agri-food waste to VFA: individual acid production potential and up-scaling[J]. Waste Management, 2018, 77: 203-212.
- [4] 闫怡新, 高健磊, 丁静雨. 超声波促进污泥过程减量化的研究进展及展望[J]. 环境工程, 2017, 35(8): 116-120.
YAN Y X, GAO J L, DING J Y. Progress and prospect on sludge process reduction by ultrasonic irradiation[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(8): 116-120 (in Chinese).
- [5] CHEN J C, ZHANG J H, LIU J Y, et al. Co-pyrolytic mechanisms, kinetics, emissions and products of biomass and sewage sludge in N_2 , CO_2 and mixed atmospheres[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 397: 125372.
- [6] QIN Y J, CHEN L Y, WANG T Y, et al. Impacts of ferric chloride, ferrous chloride and solid retention time on the methane-producing and physicochemical characterization in high-solids sludge anaerobic digestion

- [J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 1290–1298.
- [7] 朱凤霞, 李平, 冯涛, 等. 酸性/碱性启动模式下SRT对剩余污泥水解酸化的影响[J]. *现代化工*, 2017, 37(7): 128–132.
- ZHU F X, LI P, FENG T, et al. Influences of SRT on hydrolytic acidification of excess sludge in acid/alkaline startup modes[J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, 37(7): 128–132 (in Chinese).
- [8] 刘毅, 高洋, 田玉斌, 等. 脱水污泥两相厌氧消化系统的启动试验[J]. *净水技术*, 2018, 37(2): 74–80.
- LIU Y, GAO Y, TIAN Y B, et al. Start-up experiment of two-phase anaerobic digestion system for dewatered sludge [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(2): 74–80 (in Chinese).
- [9] YU H Q, FANG H H P. Acidogenesis of dairy wastewater at various pH levels [J]. *Water Science and Technology*, 2002, 45(10): 201–206.
- [10] 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 等. 污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(3): 1000–1005.
- LUO Z, ZHOU G J, LIU H B, et al. Enhanced nitrogen and phosphorus removal of wastewater by using sludge anaerobic fermentation liquid as carbon source in a pilot-scale system [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1000–1005 (in Chinese).
- [11] 石舟翔, 杨建红, 刘康齐, 等. 厨余发酵液作为外增碳源对微污染河水脱氮效果的影响[J]. *中国沼气*, 2020, 38(6): 62–68.
- SHI Z X, YANG J H, LIU K Q, et al. Effect of kitchen waste fermentation liquid as an external carbon source on denitrification of slightly polluted river water [J]. *China Biogas*, 2020, 38(6): 62–68 (in Chinese).
- [12] 钟美霞. 餐厨垃圾水解酸化液碳源的制备及其反硝化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- ZHONG M X. Preparation of Carbon Source from Food Waste Hydrolysis–Acidification Liquid and Investigation of Its Denitrification Performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024 (in Chinese).
- [13] 王淑莹, 殷芳芳, 侯红勋, 等. 以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(11): 1521–1526.
- WANG S Y, YIN F F, HOU H X, et al. Biological denitrification with methanol as external carbon source [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(11): 1521–1526 (in Chinese).
- [14] 代卓莹, 李晓明, 章圣龙, 等. 以牛粪秸秆发酵沼液为外加碳源对污水的生物脱氮效果[J]. *环境工程学报*, 2025, 19(11): 2837–2845.
- DAI Z Y, LI X M, ZHANG S L, et al. Biological nitrogen removal in wastewater treatment using straw-fermented cattle manure biogas slurry as external carbon source [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(11): 2837–2845 (in Chinese).
- [15] 章恬恬, 关正军, 张洋洋, 等. 过滤养猪废水厌氧发酵微生物菌群结构及动态变化[J]. *环境工程*, 2021, 39(8): 55–61.
- ZHANG T T, GUAN Z J, ZHANG Y Y, et al. Microbial flora structure and its dynamic changes during anaerobic fermentation of filtered swine wastewater [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(8): 55–61 (in Chinese).
- [16] 王晋. 厌氧发酵产酸微生物种群生态及互营关系研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- WANG J. Research of Microbial Community Ecology and the Trophic Link during Acidogenic Fermentation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013 (in Chinese).
- [17] 段昌海, 张翠景, 孙艺华, 等. 新型产甲烷古菌研究进展[J]. *微生物学报*, 2019, 59(6): 981–995.
- DUAN C H, ZHANG C J, SUN Y H, et al. Recent advances on the novel methanogens [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2019, 59(6): 981–995 (in Chinese).
- [18] 承磊, 郑珍珍, 王聪, 等. 产甲烷古菌研究进展[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(5): 1143–1164.
- CHENG L, ZHENG Z Z, WANG C, et al. Recent advances in methanogens [J]. *Microbiology China*, 2016, 43(5): 1143–1164 (in Chinese).

作者简介: 樊鹏超(1990—), 女, 河北衡水人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水污染控制方法与
技术。

E-mail: fanpengchao1225@163.com

收稿日期: 2025-08-05

修回日期: 2025-09-02

(编辑: 刘贵春)