

胡俊松, 刘卓, 朱亚东. 含砂量对污泥碱性发酵产挥发性脂肪酸的影响[J]. 净水技术, 2024, 43(3):117-123.

HU J S, LIU Z, ZHU Y D. Effect of grit content on volatile fatty acids production in sludge alkaline fermentation [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3): 117-123.

含砂量对污泥碱性发酵产挥发性脂肪酸的影响

胡俊松*, 刘卓, 朱亚东

(南大环境规划研究院<江苏>有限公司, 江苏南京 210000)

摘要 我国城市污水处理厂普遍存在污泥含砂量较高的现象。研究了含砂量(15%、30%、45%和60%)对污泥碱性发酵产挥发性脂肪酸(VFAs)的影响。结果表明,含砂量的升高抑制了污泥的水解酸化,含砂量从15%升高至60%,VFAs从(314.0±11.93)mg COD_{Cr}/(g VSS)降至(257.1±12.34)mg COD_{Cr}/(g VSS)。随含砂量的升高,溶解性蛋白质浓度从(75.83±2.79)mg/(g VSS)下降至(58.40±0.90)mg/(g VSS),类色氨酸和类芳香蛋白质的荧光强度以及小相对分子质量(<1 kDa)蛋白质的浓度均有所下降,Firmicutes(厚壁菌门)、Proteobacteria(变形菌门)及Acinetobacter(不动杆菌属)等水解酸化细菌的丰度也明显降低,进而导致了VFAs产量的降低。本研究对于高含砂量污泥碱性发酵产酸系统的运行优化具有指导意义。

关键词 污泥碱性发酵 挥发性脂肪酸 含砂量 蛋白质 微生物群落结构

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)03-0117-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.014

Effect of Grit Content on Volatile Fatty Acids Production in Sludge Alkaline Fermentation

HU Junsong*, LIU Zhuo, ZHU Yadong

(Nanjing University Environmental Planning and Research Institute <Jiangsu> Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract High grit content has been widely found in sludge of wastewater treatment plants in China. This paper investigated the effects of grit content (15%, 30%, 45% and 60%) on volatile fatty acids (VFAs) production during sludge alkaline fermentation. Results showed that the increase of grit content inhibited the sludge hydrolysis and acidification. VFAs concentration decreased from (314.0±11.93)mg COD_{Cr}/(g VSS) to (257.1±12.34)mg COD_{Cr}/(g VSS) as the grit content increased from 15% to 60%. With the increase of grit content, the concentration of soluble protein decreased from (75.83±2.79)mg/(g VSS) to (58.40±0.90)mg/(g VSS). The fluorescence intensity of tryptophan-like and aromatic protein-like substances, and the concentration of low molecular weight (<1 kDa) soluble protein decreased with the increase of grit content. Meanwhile, the abundance of hydrolytic acidification bacteria such as Firmicutes, Proteobacteria and Acinetobacter also decreased with the increase of grit content. These findings resulted in the decrease of VFAs production. This study provides guiding significance for the optimized operation of alkaline fermentation system for VFAs production of sludge with high grit content.

Keywords sludge alkaline fermentation volatile fatty acid(VFA) grit content protein microflora structure

以生物法为主的城镇污水处理厂产生大量剩余污泥,厌氧发酵可将剩余污泥中的有机物转化为沼气或挥发性脂肪酸(VFAs)等,已成为最常用的污泥处理技术之一,且是实现污水厂低碳运行的重要方法^[1-2]。VFAs相比于沼气具有更高的附加值,而且具有广泛的用途,如作为污水厂脱氮除磷的碳源、作

为原料进行工业化学品(可降解塑料、醋酸乙烯等)的合成等^[3]。因此,污泥厌氧发酵产VFAs受到了研究者广泛关注。

污泥碱性发酵中通常将pH值控制在10左右,可有效促进污泥有机物[特别是蛋白质(PN)]的释放,并对产甲烷菌产生极大的抑制,进而导致VFAs的大量累积^[4-5]。已有研究表明,污泥碱性发酵产酸效率受到温度^[6]、污泥停留时间^[7]、碱的种类^[8]等操作参数的影响。此外,通过预处理和外源添加

[收稿日期] 2023-06-01

[通信作者] 胡俊松(1989—),男,硕士,研究方向为城镇污水处理及资源化技术,E-mail:jshu@njuae.cn。

剂的使用,也可促进污泥碱性发酵产酸效率的提升^[9]。基于上述发现,研究者们已建立了一些强化污泥厌氧发酵产酸的措施。然而,这些研究主要考察了操作参数优化、添加剂使用等方法对污泥碱性发酵产酸的影响,关于污泥本身的性质对其碱性发酵产酸效果的影响研究还较少。

进水泥沙含量高、污泥龄较长以及直接在二沉池投加除磷药剂等原因^[10],导致我国污水厂污泥普遍存在含砂量高的问题,含砂量可达 14%~56.8% (平均含量约为 35%,中位粒径约为 30 μm)^[11],明显高于欧美等国家污泥含砂量。研究^[12]发现,有机物可吸附至砂粒表面进而改变污泥有机质的空间结构,阻碍污泥有机物的溶出和水解。Dai 等^[13]研究发现,污泥中的 PN 是与砂粒结合的主要有机物,其结合导致污泥絮体粒径增大,污泥水解效率降低,进而甲烷产量也有所下降。污泥碱性发酵过程中,污泥有机质的高效水解为酸化提供了丰富的底物,是 VFAs 大量积累的主要原因^[14-15]。因而,含砂量的升高很可能对污泥碱性发酵产酸产生不利影响,解析含砂量对污泥碱性发酵过程的影响机制将有助于进一步开发提高 VFAs 产量的方法。然而目前,关于含砂量对污泥碱性发酵产酸过程的影响研究鲜有报道。

本研究运行 4 组不同含砂量(15%、30%、45%和 60%)的污泥碱性发酵反应器,考察了含砂量对 VFAs 产量和组成的影响,并从溶解性有机物的浓度、荧光特征和 PN 相对分子质量分布以及微生物群落结构的角解析含砂量影响 VFAs 产生的作用机制,以期对污泥碱性发酵产酸的强化提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 污泥特征和试验装置

污泥取自某污水厂沉淀后的剩余污泥,污泥经 1.6 mm 孔径的滤网过滤后,分为均等的 4 份放置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱备用。接种污泥取自实验室运行的污泥厌氧消化反应器。剩余污泥的基本性质如表 1 所示。

采用 4 个有效体积为 400 mL 的血清瓶作为反应器,开展含砂量对污泥发酵产酸影响试验。反应器命名为 R1、R2、R3 和 R4,通过添加 400~500 目的二氧化硅颗粒调整 R2、R3 和 R4 的进泥含砂量分别约为 30%、45%和 60%,R1 以原污泥为进料(含砂量

表 1 剩余污泥的基本性质

Tab. 1 Basic Properties of Excess Sludge

指标	参数
总悬浮固体(TSS)/(g·L ⁻¹)	20.46±0.72
挥发性悬浮固体(VSS)/(g·L ⁻¹)	12.35±0.44
pH 值	6.8±0.3
溶解性 COD _{Cr} (SCOD _{Cr})/(mg·L ⁻¹)	203.9±31.28
总 COD _{Cr} (TCOD _{Cr})/(g·L ⁻¹)	18.58±0.96
含砂量	15.3%±1.1%

约为 15%)。添加氢氧化钠溶液(1 mol/L),每天 3 次调节反应器 pH 值为 10±0.2。每个反应器每天排出 50 mL 污泥,而后加入 50 ml 新鲜污泥,污泥停留时间为 8 d^[4],有机负荷为 1.54 g VSS/(L·d),气体采用气袋收集。反应器置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 摇床中,摇晃频率为 120 r/min。

1.2 分析项目和方法

1.2.1 水质指标分析

SCOD_{Cr}、TCOD_{Cr}、TSS、VSS 的测定均按照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[16]执行。测定 SCOD_{Cr}、VFAs、溶解性有机物的样品均经离心、0.45 μm 滤膜过滤后,进行指标的检测。SCOD_{Cr} 每 3~5 d 检测一次,VFAs 浓度、溶解性 PN 和多糖(PS)浓度待反应器运行稳定后(反应器运行时长>32 d)进行检测,样品数均大于 3 个。PN 浓度采用 BCA 试剂盒(Thermo Fisher Scientific, Rockford, IL, 美国)测定,PS 浓度采用苯酚-硫酸法测定。VFAs 采用安捷伦 7890A 气相色谱仪进行测定,色谱柱采用 DB-FFAP 柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm),进样口、柱箱和检测器的温度分别为 240、260 $^{\circ}\text{C}$ 和 210 $^{\circ}\text{C}$,氮气为载气,每次进样体积为 1 μL 。污泥含砂量的测定参照戴晓虎等^[17]报道的方法,将样品在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,600 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧,剩余残渣用 32% 的盐酸浸泡,滤纸过滤,同时用 32% 的盐酸反复淋洗滤渣,直至滤液颜色不变,而后烘干所得砂粒,称重。

1.2.2 溶解性有机物特征分析

使用 3 种再生纤维超滤膜(相对分子质量分别为 1、10、30 kDa)对污泥碱性发酵液中 PN 的相对分子质量分布进行分析。将经过 0.45 μm 滤膜后的发酵液加入超滤杯,逐级过滤,测定过滤前后 PN 浓度,得出 PN 相对分子质量分布。

采用 F-7000 荧光光谱仪检测发酵液溶解性有

机物荧光特征,检测方法根据文献^[18],检测前样品 pH 值调节至 7.0~7.2。

1.2.3 微生物群落结构分析

在反应器运行的第 48 d,取污泥样品进行微生物群落结构的分析。使用 Fast DNATM Spin Kit 试剂盒,按试剂盒说明书操作步骤完成 DNA 的提取,经 PCR 扩增、纯化后送至美吉生物科技公司(上海),进行基于 MiSeq 平台的 16 S rRNA 基因高通量测序分析。

1.3 数据统计分析

数据绘图采用 Origin 2021 软件。采用 SPSS 17.0 软件(IBM, Armonk, NY, 美国)对相关指标进行显著性差异检验(*t*-test)。每克乙酸、丙酸、丁酸及异丁酸、戊酸及异戊酸对应的 COD_{Cr} 质量为 1.07、1.51、1.81、2.04 g。

2 结果与讨论

2.1 反应器基本运行效果

4 组反应器的 SCOD_{Cr} 和 VFAs 组成如图 1 所示,反应器运行约 16 d 后,SCOD_{Cr} 浓度趋于稳定。随含砂量的升高,SCOD_{Cr} 呈现出逐渐降低的趋势,R1、R2、R3 和 R4 反应器 SCOD_{Cr} 质量分数分别为(538.5±9.67)、(528.3±14.30)、(519.2±7.65) mg/(g VSS)和(481.8±14.67) mg/(g VSS)。该结果与 Dai 等^[13]的研究结论相一致,即含砂量的升高可抑

制污泥有机质的溶出,导致 SCOD_{Cr} 浓度的下降。VFAs 也随着含砂量的增加而降低(*p*<0.05),R1 中 VFAs 质量分数为(314.0±11.93) mg COD_{Cr}/(g VSS),而 R4 中 VFAs 的浓度仅为(257.1±12.34) mg COD_{Cr}/(g VSS),下降了约 18.12%。乙酸(41.28%~46.05%)和丙酸(20.01%~21.81%)是 4 个反应器中主要的 VFAs,该结果与前人^[19]的研究报道相一致,即污泥碱性发酵产酸反应器中乙酸占比最高,丙酸次之。Wan 等^[20]研究发现,污泥碱性发酵可富集大量以乙酸为主要产物的细菌,且同型产乙酸基因大量表达。Chen 等^[21]发现,PN 为主要底物的发酵中乙酸为主要产物,而以碳水化合物为主要底物的发酵中丙酸是主要产物。剩余污泥的主要成分为 PN,因而乙酸是污泥碱性发酵的主要产物。此外,4 个反应器中 SCOD_{Cr} 向 VFAs 转化的效率分别为:58.30% (R1)、55.81% (R2)、55.27% (R3) 和 53.35% (R4),这表明随污泥含砂量的增加,SCOD_{Cr} 向 VFAs 转化的也受到了抑制。Duan 等^[12]研究发现,含砂量的升高可导致甲烷产量和 VSS 去除率的降低,同时含砂量最低的反应器(15%)具有最高的 VFAs 浓度。以上结果表明,含砂量的升高抑制了碱性发酵过程中污泥有机质的水解和酸化,进而导致了 SCOD_{Cr} 和 VFAs 浓度的降低。

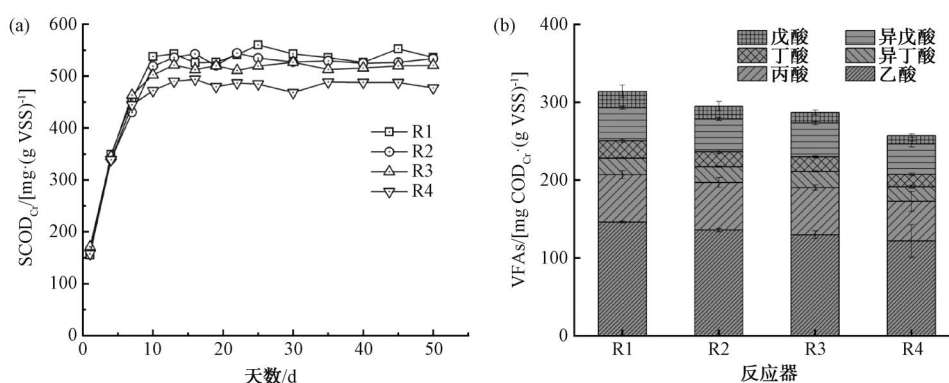


图 1 反应器污泥水解酸化效果

Fig.1 Hydrolysis and Acidification Performance of the Reactors

2.2 反应器中污泥有机物水解特征

水解是污泥厌氧发酵产酸的限速步骤,污泥水解所得的溶解性有机物是发酵产 VFAs 的基质。PN 的高效水解是污泥碱性发酵过程 VFAs 产量提升的主要原因^[3]。因此,探究污泥有机物(尤其是 PN)的水解特征,是阐明含砂量对污泥碱性发酵产酸影

响的重要方面。

2.2.1 溶解性 PN 和 PS 浓度

各反应器中溶解性 PN、PS 和氨氮的浓度如图 2 所示。含砂量较高的 R3(45%)、R4(60%)中 PN 质量分数 [(66.73±1.19)、(58.40±0.90) mg/(g VSS)]显著低于含砂量较低的 R1(15%)和

R2(30%)的PN质量分数 $[(75.83 \pm 2.79)、(74.99 \pm 1.05) \text{ mg}/(\text{g VSS})]$ ($p < 0.05$)。Dai等^[13]的研究指出,污泥中的有机物可与砂粒结合,增大污泥絮体粒径,其中PN是与砂结合的主要物质,进而抑制污泥有机物(尤其是PN)的水解。溶解性PS的浓度随含砂量的升高而略微下降,且其浓度远低于PN的浓度,该现象与前人^[18]的报道相一致。此外,氨氮浓度也随着含砂量的升高逐渐降低。以上分析表明,碱性环境下污泥PN的高效溶出,为发酵菌产VFAs提供了大量的基质,但随着含砂量的升高,PN的水解效率降低,进而导致了VFAs产量的降低[图1(b)]。

2.2.2 发酵液三维荧光光谱

为了进一步探究含砂量对污泥碱性发酵过程中有机物水解特征的影响,采用三维荧光光谱仪对发酵液溶解性有机物的荧光组成进行了分析,结果如图3所示。发酵液三维荧光光谱主要包括2个荧光峰:位于 $E_x/E_m = 220 \text{ nm}/(332 \sim 342) \text{ nm}$ 的类色氨酸峰(峰A)和位于 $E_x/E_m = (270 \sim 275) \text{ nm}/(336 \sim 344) \text{ nm}$ 类芳香PN峰(峰B)^[22]。可以看出,类色

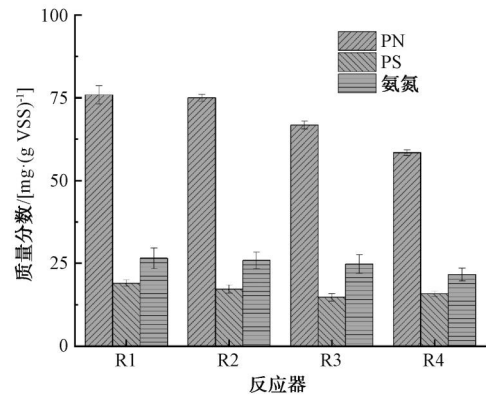


图2 不同反应器中溶解性PN与PS及氨氮浓度
Fig. 2 Soluble PN and PS and Ammonia Concentration in Different Reactors

氨酸峰和类芳香PN峰的荧光强度均随着污泥含砂量的升高逐渐降低,该结果与2.2.1小节分析结果相似,表明含砂量的增加抑制了污泥PN的水解。此外,峰B荧光强度的下降幅度相比于峰A更大。前人^[13]的研究指出,PN可通过静电作用、氢键力等与二氧化硅(砂的主要成分)相结合,进而降低PN的溶解,对污泥厌氧消化产生不利影响。类色

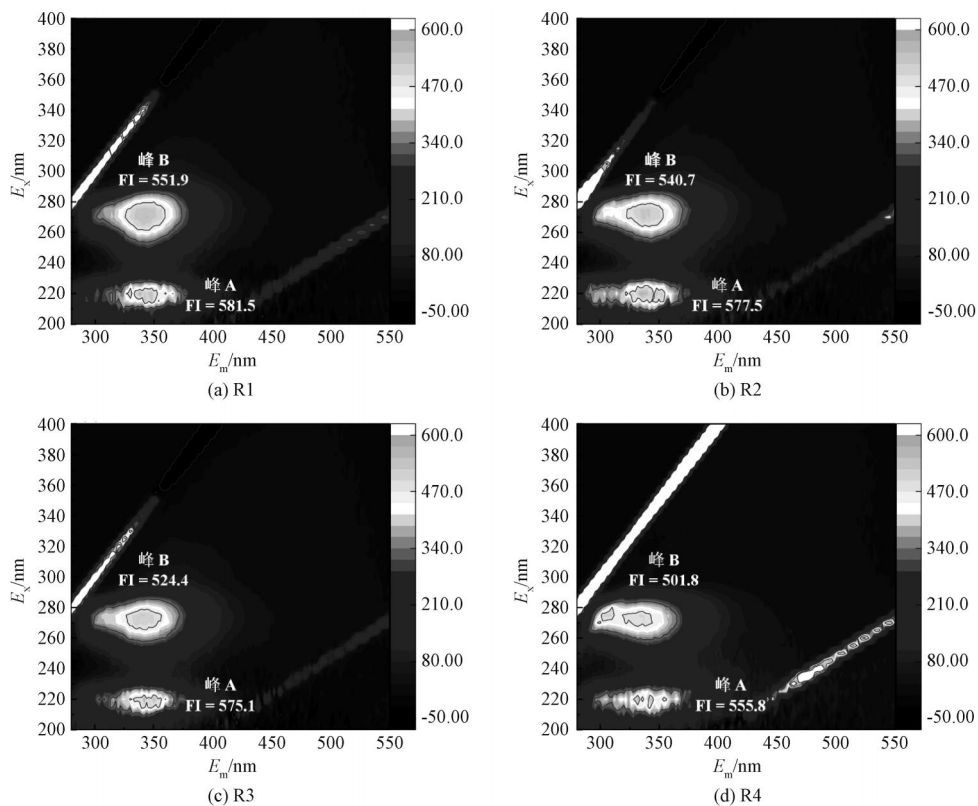


图3 4个反应器中发酵液的三维荧光光谱

Fig. 3 Three-Dimensional Fluorescence Spectrums of the Fermentation Liquid in Four Reactors

氨酸和类芳香 PN 是污泥碱性发酵产 VFAs 的关键底物^[18],其荧光强度的降低(即含量的降低),将不利于 VFAs 的产生。以上结果表明,含砂量的增加抑制了类色氨酸和类芳香 PN 物质的水解,进而导致 VFAs 产量的下降。

2.2.3 溶解性 PN 的相对分子质量分布

相对分子质量是影响 PN 生物可利用性的关键指标之一,小相对分子质量(< 1 kDa)PN 的增加有利于 VFAs 的产生;同时相对分子质量也是影响 PN 与其他物质相互作用的重要因素。对 4 组反应器中溶解性 PN 的相对分子质量分布进行了分析,结果如图 4 所示。相对分子质量<30 kDa 的 PN 在 4 组反应器中均占据主导,该结果与 Xiao 等^[23]研究相类似。污泥含砂量为 15%时,相对分子质量<1 kDa 的 PN 质量浓度为(364.8±24.15)mg/L,而当含砂量升高至 60%时,其质量浓度仅为(296.2±7.86)mg/L,这表明含砂量较高的反应器中发酵菌可直接利用的 PN 更少,进而 VFAs 的产生受到了抑制。此外,相对分子质量>30 kDa 的 PN 浓度也呈现出逐渐下降的趋势,且下降幅度相比于小相对分子质量(<1 kDa)PN 更为明显。乔春光等^[24]的研究发现,砂滤池对大相对分子质量的溶解性有机物具有较高的去除效果,而对于小相对分子质量的有机物去除率则相对较低。大相对分子质量 PN 更易与砂形成相互作用,可能是造成该现象的原因。以上分析表明,含砂量的升高不仅抑制了 PN 的释放,还抑制了小相对分子质量(<1 kDa)PN 的产生,进而降低了 VFAs 产量。

以上结果表明,含砂量的升高明显抑制了污泥

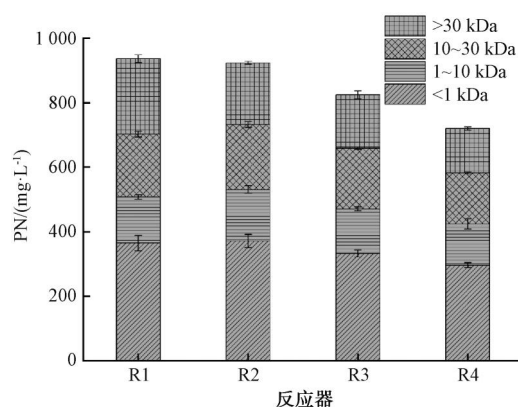


图 4 4 个反应器中溶解性 PN 的相对分子质量分布
Fig. 4 Molecular Weight Distribution of the Soluble Protein in Four Reactors

PN 的水解,进而对污泥碱性发酵产酸产生不利影响,导致了 VFAs 产量的降低。因此,针对我国污水厂污泥普遍存在含砂量较高(14.0%~56.8%)的现状,需进一步探究高含砂量污泥碱性发酵产酸的强化方法,其中提高 PN 的水解效率是关键。前人的研究^[25]指出,碱(pH 值为 11~13)、热以及热碱预处理可高效地促进污泥有机物的溶出,其中碱和热碱预处理是促进 PN 释放更为有效的措施。

2.3 反应器微生物群落结构

污泥碱性发酵过程中 VFAs 的生成主要是在微生物的作用下完成而不是化学水解所引起^[26],因而分析微生物群落结构差异,将有助于深入了解含砂量对污泥碱性发酵产酸的影响机制。4 个反应器中微生物在门级别和属级别的分布情况如图 5 所示。反应器中的微生物菌群主要由 Firmicutes(厚壁菌门)、Proteobacteria(变形菌门)、Actinobacteria(放线

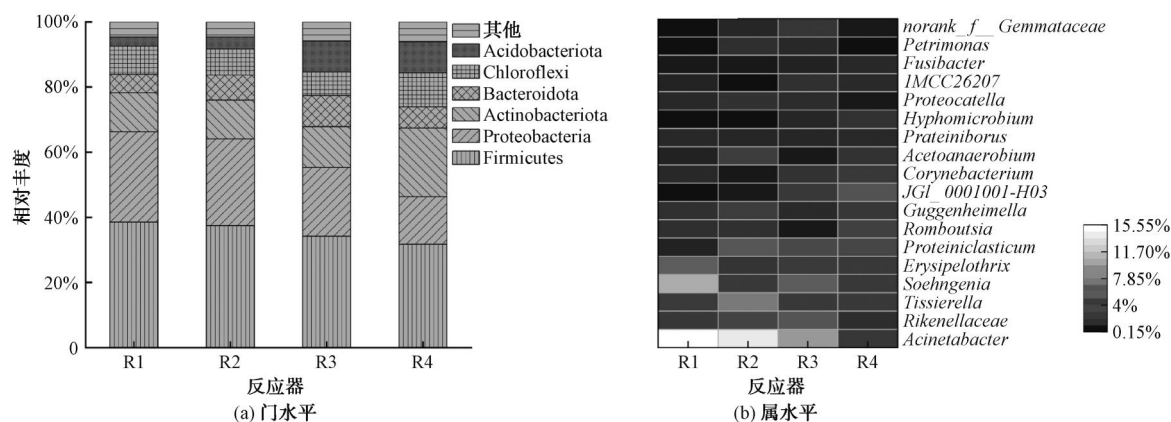


图 5 4 个反应器中的微生物群落结构
Fig. 5 Microflora Structure in Four Reactors

菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)和 Chloroflexi(绿弯菌门)组成,该结果与前人^[4,27]报道相一致。R1 和 R2 的微生物群落结构变化较小,随含砂量的进一步增加,Firmicutes 和 Proteobacteria 的丰度出现了明显的下降,R4 中其丰度分别降低至 31.73% 和 14.59%,而 Actinobacteria 呈现出升高的趋势。Firmicutes 和 Proteobacteria 在污泥碱性发酵反应器中扮演着重要的水解酸化角色,其富集有利于 VFAs 的产生。Chen 等^[28]发现,在污泥碱性发酵过程中,Firmicutes 的相对丰度最高时,VFAs 的产量也达到了最高。Ma 等^[4]的研究指出,污泥碱性发酵反应器中,Firmicutes 可能是影响 VFAs 产生的关键功能微生物,其富集促进了 VFAs 的生成。在属水平上,Acinetobacter(不动杆菌)、Soehngenia、Erysipelothrix(丹毒丝菌属)和 Acetoanaerobium(厌氧醋菌属)的相对丰度随着含砂量的增加逐渐降低。这些微生物是典型的产酸菌属^[3,29],在污泥碱性发酵过程中起着重要的产酸作用,其含量降低不利于 VFAs 的产生。以上结果表明,含砂量的增加使得污泥碱性发酵反应器中 Firmicutes、Proteobacteria 以及 Acinetobacter 等水解发酵菌的丰度降低,进而不利于 VFAs 的产生。

3 结论

(1)含砂量的升高不利于碱性发酵过程中污泥有机物的水解和酸化,污泥含砂量从 15% 升高至 60%,VFAs 浓度下降了约 18.12%。

(2)含砂量的升高主要抑制了污泥 PN 的水解,溶解性 PN 的浓度、类色氨酸和类芳香 PN 的荧光强度以及小相对分子质量(<1 kDa)溶解性 PN 浓度均随着污泥含砂量的升高而降低,进而抑制了 VFAs 的产生。

(3)含砂量的升高导致了 Firmicutes、Proteobacteria 以及 Acinetobacter 等水解发酵细菌丰度的降低,进而不利于 VFAs 的生成。

参考文献

[1] 盛德洋,朱洁,安东璇,等. 基于碳减排的污水厂污泥处理处置全流程最佳技术路线分析[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 75-82.
SHENG D Y, ZHU J, AN D X, et al. Analysis of the optimized technical route for the whole process of sludge treatment and disposal in WWTPs based on carbon emission reduction [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 75-82.

[2] 丁豪,胡凯,许航,等. 老化轮胎微塑料对剩余污泥厌氧发

酵产酸的影响[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 68-76, 150.

DING H, HU K, XU H, et al. Effect of ageing tire microplastics on acid-production of anaerobic fermentation for excess sludge [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 68-76, 150.

[3] WANG X, LI Y B, ZHANG Y, et al. Stepwise pH control to promote synergy of chemical and biological processes for augmenting short-chain fatty acid production from anaerobic sludge fermentation [J]. Water Research, 2019, 155: 193-203. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.032.

[4] MA S J, YANG D L, XU K, et al. Bacterial survival strategies in sludge alkaline fermentation for volatile fatty acids production: Study on the physiological properties, temporal evolution and spatial distribution of bacterial community [J]. Bioresource Technology, 2021, 340: 125701. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125701.

[5] LI J, XIN W Z, LIANG J H, et al. Alkaline fermentation of refinery waste activated sludge mediated by refinery spent caustic for volatile fatty acids production [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116317. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116317.

[6] YUAN Y, LIU Y, LI B K, et al. Short-chain fatty acids production and microbial community in sludge alkaline fermentation: Long-term effect of temperature [J]. Bioresource Technology, 2016, 211: 685-690. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.138.

[7] 黄达然,冯雷雨,陈银广,等. 连续流反应器中污泥停留时间对剩余污泥碱性厌氧发酵生产短链脂肪酸的影响[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(10): 16-19.

HUANG D R, FENG L Y, CHEN Y G, et al. Effect of solids retention time on short-chain fatty acids production from waste activated sludge under alkaline conditions in continuous flow reactors [J]. Environmental Pollution & Control, 2008, 30(10): 16-19.

[8] JIN B D, WANG S Y, XING L Q, et al. Long term effect of alkali types on waste activated sludge hydrolytic acidification and microbial community at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 587-597. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.10.036.

[9] 刘展华. 过硫酸氢钾复合盐耦合污泥碱性发酵获取碳源合成 PHA [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

LIU Z H. Synthesis of PHAs using carbon source from alkaline fermentation of sludge coupled with potassium perbisulfate compound salt [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[10] 何莉. 生化处理系统无机固体分布特性及累积机制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

HE L. Distribution characteristics and accumulation mechanisms of inorganic suspended solids in wastewater treatment biochemical

- system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [11] FENG L Y, LUO J Y, CHEN Y G. Dilemma of sewage sludge treatment and disposal in China [J]. *Environment Science Technology*, 2015, 49: 4781–4782. DOI: 10.1021/acs.est.5b01455.
- [12] DUAN N, DAI X, DONG B, et al. Anaerobic digestion of sludge differing in inorganic solids content: Performance comparison and the effect of inorganic suspended solids content on degradation[J]. *Water Science Technology*, 2016, 74(9): 2152–2161.
- [13] DAI X H, XU Y, DONG B. Effect of the micron-sized silica particles (MSSP) on biogas conversion of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2017, 115: 220–228. DOI: 10.1016/j.watres.2017.02.064.
- [14] YU G, HE P, SHAO L, et al. Toward understanding the mechanism of improving the production of volatile fatty acids from activated sludge at pH 10.0 [J]. *Water Research*, 2008, 42(18):4637–4644.
- [15] MASPOLIM Y, ZHOU Y, GUO C H, et al. The effect of pH on solubilization of organic matter and microbial community structures in sludge fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190: 289–298. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.087.
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method* Editorial Board. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] 戴晓虎, 赵玉欣, 沙超, 等. 我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研[J]. *给水排水*, 2014, 50(s1):75–79.
- DAI X H, ZHAO Y X, SHA C, et al. Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 50(s1): 75–79.
- [18] MA S J, HU H D, WANG J F, et al. The characterization of dissolved organic matter in alkaline fermentation of sewage sludge with different pH for volatile fatty acids production [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114924. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114924.
- [19] 刘子娟, 王寅义, 徐肖甜, 等. 剩余污泥碱性发酵产酸及脱水性能研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(3): 92–98.
- LIU Z J, WANG Y Y, XU X T, et al. Acid production and dewatering performance of excess sludge with alkaline fermentation[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(3): 92–98.
- [20] WAN J J, JING Y H, ZHANG S C, et al. Mesophilic and thermophilic alkaline fermentation of waste activated sludge for hydrogen production: Focusing on homoacetogenesis [J]. *Water Research*, 2016, 102: 524–532. DOI: 10.1016/j.watres.2016.07.002.
- [21] CHEN Y G, LUO J Y, YAN Y Y, et al. Enhanced production of short-chain fatty acid by co-fermentation of waste activated sludge and kitchen waste under alkaline conditions and its application to microbial fuel cells [J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 1197–1204. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.056.
- [22] WU L J, ZHU R, HAN X X, et al. Sulfite altered permanganate effects on acetate-enriched short-chain fatty acids production during sludge anaerobic fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 371: 128589. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128589.
- [23] XIAO K K, CHEN Y, JIANG X, et al. Comparison of different treatment methods for protein solubilisation from waste activated sludge[J]. *Water Research*, 2017, 122: 492–502. DOI: 10.1016/j.watres.2017.06.024.
- [24] 乔春光, 魏群山, 王东升, 等. 典型南方水源溶解性有机物分子量分布变化及去除特性[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(2):195–200.
- QIAO C G, WEI Q S, WANG D S, et al. Molecular weight distribution and removal characters of DOM in the typical source water in south of china [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):195–200.
- [25] ZHENG T L, ZHANG K, CHEN X Y, et al. Effects of low- and high-temperature thermal-alkaline pretreatments on anaerobic digestion of waste activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125400. DOI:10.1016/j.biortech.2021.125400.
- [26] YUAN H, CHEN Y, ZHANG H, et al. Improved bioproduction of short-chain fatty acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(6): 2025–2029.
- [27] ZHOU L J, GAO Y, YU K, et al. Microbial community in in-situ waste sludge anaerobic digestion with alkalization for enhancement of nutrient recovery and energy generation [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 295: 122277. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122277.
- [28] CHEN Y, JIANG X, XIAO K K, et al. Enhanced volatile fatty acids (VFAs) production in a thermophilic fermenter with stepwise pH increase – Investigation on dissolved organic matter transformation and microbial community shift [J]. *Water Research*, 2017, 112: 261–268. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.067.
- [29] YUAN Y, WANG S, LIU Y, et al. Long-term effect of pH on short-chain fatty acids accumulation and microbial community in sludge fermentation systems[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 197: 56–63. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.025.