

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.017

热与碱热预处理对高含铁污泥甲烷产率的影响

孙宇佳^{1,2}, 徐志婧^{1,2}, 关帅^{1,3}, 于汇洋¹, 张卓^{1,2}, 刘博^{1,2},
董雯^{1,2}, 王辉^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3. 西安西热水务环保有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对污水处理过程中添加大量铁盐进行化学除磷和调理导致污泥厌氧消化产气效能受到抑制的问题,对污泥实施热和碱热预处理,分析不同预处理方法对高含铁污泥厌氧消化产气效能的影响。结果表明,高含铁污泥[铁含量为 (24.24 ± 0.11) g/kg]累计产甲烷量比生物污泥[铁含量为 (6.63 ± 0.13) g/kg]降低了14.96%。经热和碱热预处理后,高含铁污泥的累计产甲烷量分别提高了40.25%和72.70%,且碱热预处理后最大产甲烷势(U_m)和水解速率常数(k_{hyd})提升幅度最大。高含铁污泥经碱热预处理后释放出的多糖(SC)是热预处理的1.61倍,残渣中腐殖酸的增长率较热预处理提高了5.86%。此外,在碱热预处理系统中,与产甲烷相关的古菌属的相对丰度和辅酶F420活性比热预处理分别提高了5.29%和4.23%。因此,碱热预处理更有利于改善高含铁污泥的产气效能并提高残渣的稳定性。

关键词: 高含铁污泥; 碱热预处理; 甲烷产率; 古菌群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0116-07

Effect of Thermal and Alkali-Thermal Pretreatments on Methane Yield from High-iron-content Sludge

SUN Yu-jia^{1,2}, XU Zhi-qiang^{1,2}, GUAN Shuai^{1,3}, YU Hui-yang¹, ZHANG Zhuo^{1,2},
LIU Bo^{1,2}, DONG Wen^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an TPRI Water-Management & Environment Protection Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The addition of a substantial quantity of iron salts for chemical phosphorus removal and sludge conditioning in sewage treatment process can suppress the gas production efficiency during anaerobic sludge digestion. In this study, thermal and alkaline-thermal pretreatments of sludge were conducted to analyze the impacts of pretreatment methods on the gas production efficiency of anaerobic digestion of high-iron-content sludge. The cumulative methane production from high-iron-content sludge with iron content of (24.24 ± 0.11) g/kg on a dry basis was 14.96% lower than that from biological sludge

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024SF-YBXM-571); 国家自然科学基金资助项目(42107030)

通信作者: 徐志婧 E-mail: 476539251@qq.com

with iron content of (6.63 ± 0.13) g/kg on a dry basis. After undergoing thermal and alkali-thermal pretreatments, the cumulative methane production of high-iron-content sludge increased by 40.25% and 72.70%, respectively. Furthermore, the maximum methane production potential (U_m) and hydrolysis rate constant (k_{hyd}) exhibited the most significant enhancement following the alkali-thermal pretreatment. The yield of soluble carbohydrates (SC) released by alkali-thermal pretreatment was 1.61 times higher than that achieved by thermal pretreatment alone. Additionally, the growth rate of humic acid in sludge following alkali-thermal pretreatment was 5.86% greater compared to thermal pretreatment. In addition, the relative abundance of methanogenic archaea increased by 5.29%, and the activity of coenzyme F420 increased by 4.23% in the alkali-thermal pretreatment system. Therefore, alkali-thermal pretreatment is more advantageous for enhancing the gas production efficiency and ensuring the stability of sludge with high iron content.

Key words: high-iron-content sludge; alkali-thermal pretreatment; methane production efficiency; archaeal community

厌氧消化可实现污泥的稳定化、无害化和资源化,符合我国绿色低碳可持续发展战略。然而在污水处理过程中,为满足日益严格的污水排放标准,常通过化学除磷进一步降低出水磷浓度。另外,剩余污泥含水率高,需进行化学调理来降低污泥比阻。而化学除磷和调理一般采用无机或有机混凝剂,其中氯化铁因除磷效果好、脱水性能强、价格低廉而被广泛使用。相关资料显示^[1],我国的市政污泥经脱水后总铁含量约为 22.1~34.0 g/kg(干基含量,折算成 $FeCl_3$ 投加量约为 1 450~3 200 mg/L)。向剩余污泥中添加 $FeCl_3$,在添加量为 200 mg/L 条件下,污泥厌氧消化累计产甲烷量比未添加时提高了 28.9%~37.4%,且沼气中 H_2S 浓度降低 63.3%^[2-3];而当 $FeCl_3$ 添加量达到 800 mg/L 时, Fe^{3+} 水解作用导致消化系统的 pH 降低,产甲烷过程受到抑制,甲烷产量由 73.18 mL/gVS 降低到 7.32 mL/gVS^[4]。可见,过量添加铁盐会对污泥厌氧消化产气效能产生严重抑制。

Liao 等^[5]将剩余污泥分别在 60、70 与 80 °C 下热解 30 min 后,污泥分解率分别为 9.1%、13.0% 和 16.6%,沼气产量分别提升 7.3%、15.6% 和 24.4%。Zhang 等^[6]在 0.1 mol/L NaOH、反应温度为 80 °C 的条件下处理剩余污泥 80 min,系统的甲烷产率与沼气产量分别达到 305.4 mL/gVS 和 (695.00 ± 16.97) mL,比未处理组分别提升 22.80% 和 51.66%。可见,热与碱热预处理可有效改善污泥厌氧消化产气效能。

基于此,笔者针对氯化铁调理形成总铁含量较高的污泥(高含铁污泥)厌氧消化产甲烷效果不佳问题,分析热和碱热预处理对高含铁污泥产气效能、有机质转化及古菌群落结构的影响,旨在为高含铁污泥厌氧消化的工程化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 污泥来源与性质

实验用污泥取自西安市第四污水处理厂生物池出口和脱水车间。该污水处理厂采用倒置 A^2/O 工艺,总水力停留时间(HRT)与污泥龄分别为 11 h 和 14~20 d。采用氯化铁对浓缩的剩余污泥进行调理和脱水后外运。

生物池污泥(原泥)取回后静置 12 h,去除上清液后控制含水率在 97% 左右,将原泥置于 4 °C 冰箱中冷冻保存,作为序批式厌氧消化实验的底物,实验所用原泥的理化性质:pH 为 6.4~6.7,总固体量(TS)为 29.09~35.28 g/kg,挥发性固体量(VS)为 13.23~14.35 g/kg,VS/TS 为 40.67%~45.50%,总化学需氧量(TCOD)为 13.49~18.60 g/kg,总铁含量为 (6.63 ± 0.13) g/kg(干基含量,下同)。脱水污泥含水率约为 80%,总铁含量为 24.24 g/kg,属于含铁量较高的污泥。实验所用厌氧接种污泥取自青岛集团西安汉斯啤酒厂污水处理中心的 UASB 反应池,取回后置于 4 °C 冰箱冷冻保存,放置 7 d 后作为接种污泥使用。

1.2 实验方法

根据脱水污泥中总铁的含量,配制成 10% 的

FeCl_3 ,取1 500 mg/L的氯化铁溶液加入到原泥中,配制成高含铁污泥[污泥中总铁含量为 (24.24 ± 0.11) g/kg]。向原泥中加入去离子水,使污泥的含水率保持在97%左右。采用全自动甲烷潜力测试系统进行序批式厌氧消化实验(见图1),分析热和碱热预处理对高含铁污泥厌氧消化产甲烷效能的影响。基于课题组前期的研究成果^[7],热和碱热预处理的实验方法如下:①热预处理,将高含铁污泥搅拌均匀后置于水浴锅中,设置温度为70℃并处理60 min;②碱热预处理,将高含铁污泥搅拌均匀后,添加一定量的NaOH(5 mol/L),将pH调节至11后置于水浴锅中,设置温度为70℃并处理60 min。

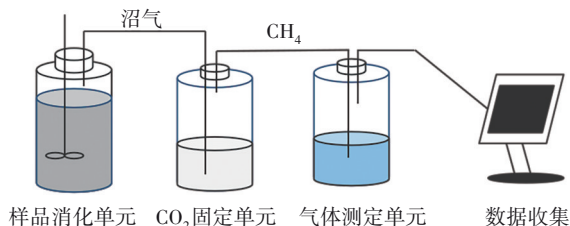


图1 全自动甲烷潜力测试系统示意

Fig.1 Schematic diagram of automatic methane potential test system

分别将原泥(OS)、高含铁污泥(DS)、高含铁污泥-热预处理(DS-R)和高含铁污泥-碱热预处理(DS-JR)四组实验样品与接种污泥按照3:1(体积比)的比例混合,再将混合污泥初始pH调至7.0~7.2。取500 mL混合污泥加入序批式厌氧消化装置(总容积为550 mL)中进行实验。设置反应温度为 (35 ± 0.5) ℃,搅拌速率为120 r/min。以单日产甲烷量小于累计产甲烷量的1%作为实验终止的判据^[8],反应时间为20 d。

1.3 分析方法

辅酶F420的测定:辅酶F420是产甲烷菌所特有的电子载体辅酶,可反映厌氧消化系统内产甲烷菌的活性^[9],辅酶F420的数值越大,表明产甲烷菌活性越强。在消化反应的第4、8、12、16天分别取DS、DS-R和DS-JR中的污泥(10 mL/次,共计40 mL)进行辅酶F420的测定。

厌氧消化动力学模拟分析:选用圆锥模型^[10]对OS、DS、DS-R和DS-JR四组污泥样品的产甲烷过程进行拟合,采用Origin 2023b进行计算拟合,圆锥模型的数学表达式见式(1)。

$$U = \frac{U_m}{1 + (k_{\text{hyd}} t)^{-n}} \quad (1)$$

式中: U 为累计产甲烷量,mL; U_m 为最大产甲烷势,mL; k_{hyd} 为水解速率常数, d^{-1} ; n 为形状因子; t 为消化时间,d。

分别取30 mL厌氧消化反应前后的混合污泥在4 000 r/min下离心15 min,经0.45 μm滤膜过滤后分别测定上清液中的SCOD、蛋白质(SP)、多糖(SC)以及残渣中的SP、SC、腐殖酸(HA)等含量。其中SP采用修正的福林酚法测定,SC采用蒽酮比色法测定,HA采用修正Lowry法测定,总铁采用EDTA滴定法测定。实验结束后将DS、DS-R和DS-JR三组实验的消化产物送至北京百迈克生物科技有限公司进行Illumina NovaSeq高通量测序。

2 结果与讨论

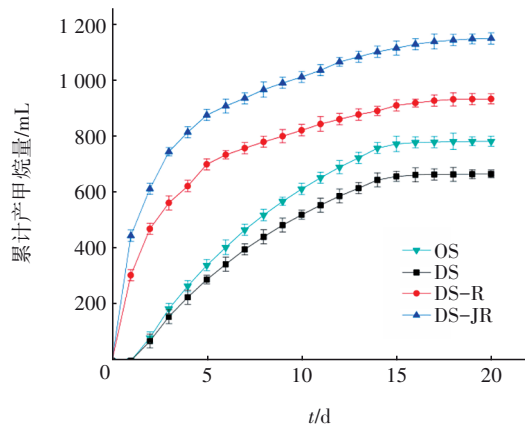
2.1 预处理对高含铁污泥产甲烷效率的影响

2.1.1 产甲烷效能的变化

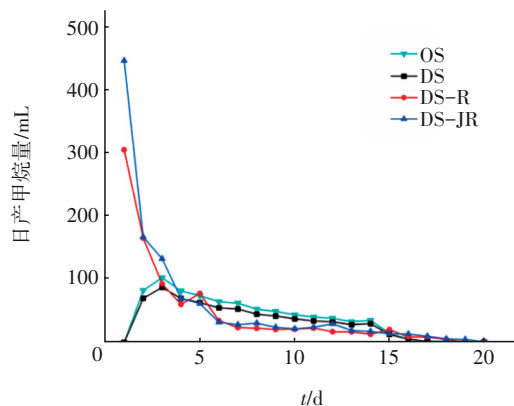
累计产甲烷量与日产甲烷量的变化见图2。由图2(a)可知,DS组累计产甲烷量为650.82~683.42 mL(平均值为667.12 mL),比OS组下降了14.96%。主要是由于DS中的总铁含量是OS的3.65倍,导致厌氧消化过程受到抑制。污泥中适量的铁离子能促进厌氧消化过程酶的活性,但过量的铁离子可使 Fe^{3+} 水解生成羟基聚合离子,进而分解为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀, Fe^{3+} 也能与污泥中的硫化物或硫酸盐等反应,在产甲烷菌细胞表面析出硫化铁,阻止胞外物质跨膜运输与底物接触,进而抑制产甲烷菌的活性^[11]。DS-R组和DS-JR组累计产甲烷量分别为908.97~962.37 mL(平均值为935.67 mL)和1 133.53~1 170.73 mL(平均值为1 152.13 mL),比DS组分别提升了40.25%和72.70%,且DS-JR组的累计产甲烷量比DS-R组提升23.13%。由于碱热预处理对细胞壁和细胞膜的损伤程度高于热预处理^[12],溶解性有机物的释放量高于热预处理,因此DS-JR组的累计产甲烷量高于DS-R组。

从图2(b)可以看出,OS组和DS组的日产甲烷量变化较为相似,前3 d呈上升趋势,达到峰值后逐渐下降,且在第16天下降至10 mL以下。DS-R组和DS-JR组的日产甲烷量在第1天即达到峰值,分别为305.63和446.97 mL,1~5 d内急剧下降,第16天以后降至10 mL以下,在第5~15天内的日产甲烷量低于OS组和DS组,表明热和碱热预处理可导致

产甲烷高效段提前。



a. 累计产甲烷量



b. 日产甲烷量

图2 累计产甲烷量与日产甲烷量的变化

Fig.2 Change in cumulative methane production and daily methane yield

2.1.2 甲烷产率的动力学分析

按照式(1)对四组实验样品累计产甲烷量进行动力学模型拟合,结果如图3所示,拟合曲线相关参数见表1。

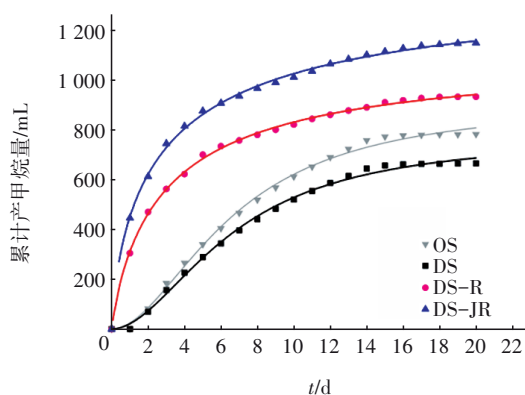


图3 累计产甲烷量拟合曲线

Fig.3 Fitted curve of cumulative methane production

表1 产甲烷动力学参数

Tab.1 Methane production kinetic parameters

项 目	U_m/mL	$k_{\text{hyd}}/\text{d}^{-1}$	R^2
OS	912.28	0.150 5	0.996 6
DS	776.15	0.150 4	0.996 6
DS-R	1 124.78	0.333 8	0.998 9
DS-JR	1 434.45	0.350 9	0.998 9

实验样品累计产甲烷量的相关系数 R^2 介于 0.996 6~0.998 9 之间,说明采用圆锥模型能较好地模拟污泥产甲烷过程。DS组的最大产甲烷势、水解速率常数均小于OS组。而经热和碱热预处理后,最大产甲烷势和水解速率常数大幅提升,且DS-JR组的 U_m 和 k_{hyd} 值最大。

2.2 预处理对高含铁污泥有机质转化的影响

2.2.1 上清液中有机的变化

厌氧消化前后上清液中SCOD和累计产甲烷量的变化如图4所示。

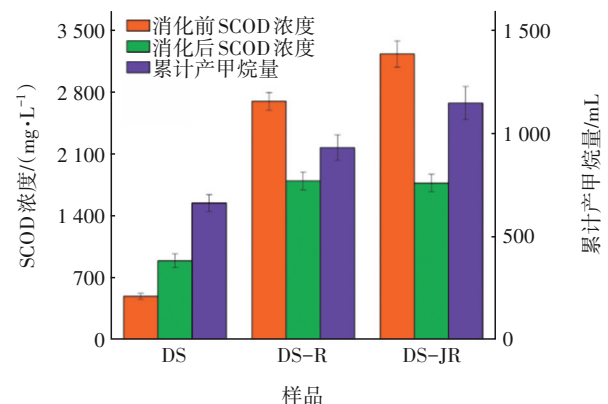


图4 厌氧消化前后上清液中SCOD和累计产甲烷量的变化

Fig.4 Changes in SCOD in supernatant and cumulative methane production before and after anaerobic digestion

从图4可以看出,DS组厌氧消化反应前后SCOD平均浓度从498.74 mg/L增加到902.13 mg/L,而DS-R组和DS-JR组分别从2709.80、3245.20 mg/L降低至1806.56、1783.72 mg/L。这是由于热和碱热预处理导致DS-R组和DS-JR组消化前的SCOD浓度大幅增加,经厌氧消化后,系统内SCOD得到降解与转化。而DS组在厌氧消化前细胞内的有机物未彻底释放,在厌氧消化过程中,污泥细胞受到部分破损,部分被释放的有机物得以降解和转化,但转化不彻底,所以SCOD浓度在消化反应后反而增加。与DS-R组相比,DS-JR组消化前SCOD浓度高19.76%,产气量提高23.13%,说明碱热预处理

比热预处理能更好地改善高含铁量导致的污泥厌氧消化受抑制情况。

厌氧消化前后上清液中SP和SC的变化如图5所示。可以看出,热和碱热预处理促进了污泥细胞中SP和SC的溶出。DS-R组和DS-JR组SP的平均浓度分别比DS组增大了2.23和2.08倍,SC平均浓度分别增大了1.63和3.25倍,其中DS-JR组消化前的SC浓度是DS-R组的1.61倍,是DS组消化前的4.25倍。经厌氧消化后SP被消耗,其中DS-R组和DS-JR组中SP的平均消耗率分别为56.63%和44.35%,比DS组分别提高了17.54%和5.26%;DS-R组和DS-JR组对SC的平均消耗率分别为37.37%和47.14%,比DS组分别提高了2.66%和18.33%。碱热预处理比热预处理污泥细胞溶出的SC更多,可能是由于碱热预处理可以溶解污泥细胞壁的脂质分子,促使细胞壁破裂,强碱环境使胞外聚合物的酸性基团分离,胞外聚合物的相互排斥也增加了其可溶性^[13]。

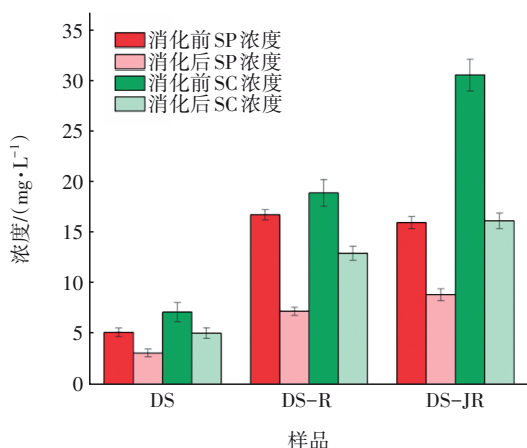


图5 厌氧消化前后上清液中SP和SC浓度的变化

Fig.5 Change in SP and SC concentrations in supernatant before and after anaerobic digestion

2.2.2 残渣中有机质的变化

厌氧消化前后残渣中SP、SC和HA浓度的变化如图6所示。可以看出,经厌氧消化后,DS-JR组残渣中SP平均含量从115.07 mg/gVS降低到84.17 mg/gVS,其平均消耗率最高(26.85%),比DS-R组和DS组残渣中SP平均消耗率分别高8.31%和11.28%。DS-JR组残渣中SC的平均含量从43.96 mg/gVS降低至31.78 mg/gVS,平均消耗率最高(27.71%),比DS-R组与DS组平均消耗率分别高2.45%与8.71%。

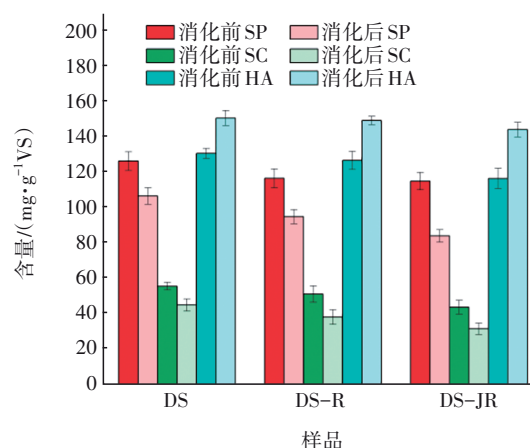


图6 厌氧消化前后残渣中SP、SC和HA含量的变化

Fig.6 Change in SP, SC and HA contents in residues before and after anaerobic digestion

腐殖质由富里酸、腐殖酸与胡敏酸组成,其中腐殖酸约占腐殖质含量的42%^[14]。三个实验组消化反应后残渣中腐殖酸含量均呈上升趋势。其中DS-JR组残渣中腐殖酸平均含量从116.58 mg/gVS增加至144.14 mg/gVS,提高幅度最大(23.64%),DS-R组与DS-JR组残渣中腐殖酸增长率较DS组分别高3.69%和9.55%,DS-JR组残渣中腐殖酸增长率比DS-R组高5.86%。可见,高铁污泥经热与碱热预处理后,通过厌氧消化反应生成了更多的腐殖质类物质,增强了消化产物的稳定性。

2.3 预处理对高含铁污泥微生物群落的影响

2.3.1 辅酶F420活性的变化

厌氧消化过程中辅酶F420活性的变化见图7。

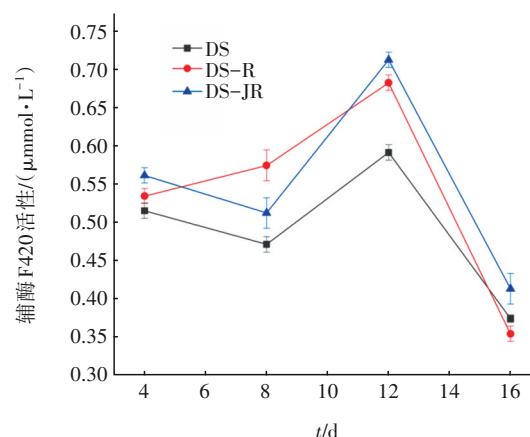


图7 厌氧消化过程中辅酶F420活性的变化

Fig.7 Change in coenzyme F420 activity during anaerobic digestion

由图7可知,第4天时三组污泥样品的辅酶F420活性为0.50~0.56 μmol/L(平均值为0.53

$\mu\text{mmol/L}$),在第 12 天时辅酶 F420 活性均达到峰值。辅酶 F420 活性的排序为: DS-JR (0.69~0.73 $\mu\text{mmol/L}$,平均值为 0.71 $\mu\text{mmol/L}$)>DS-R (0.65~0.71 $\mu\text{mmol/L}$,平均值为 0.68 $\mu\text{mmol/L}$)>DS (0.55~0.63 $\mu\text{mmol/L}$,平均值为 0.59 $\mu\text{mmol/L}$)。DS-JR 组中厌氧消化过程中辅酶 F420 活性比 DS-R 高 4.23%,说明高含铁污泥经碱热和热预处理后,系统内辅酶活性得到增强,且碱热预处理对辅酶活性的增强程度更大。第 12 天后随着系统内有机质浓度的降低,辅酶 F420 活性均呈现下降趋势。

2.3.2 古菌群落的相对丰度

微生物的 Alpha 多样性指数如表 2 所示。可知,DS-JR 组的 ACE、Chao 和 Shannon 指数均低于 DS 组和 DS-R 组,而 Simpson 指数与 DS 组和 DS-R 组接近,说明 DS-JR 组微生物的多样性低于 DS 组和 DS-R 组。

表 2 微生物的 Alpha 多样性指数

Tab.2 Alpha diversity index of microorganisms

项 目	ACE	Chao	Simpson	Shannon	覆盖率
DS	271.646	273.761	0.946	5.299	0.999 8
DS-R	271.841	272.406	0.915	4.788	0.999 1
DS-JR	220.117	225.555	0.892	4.078	0.999 7

古菌群落在属水平上的相对丰度如图 8 所示。

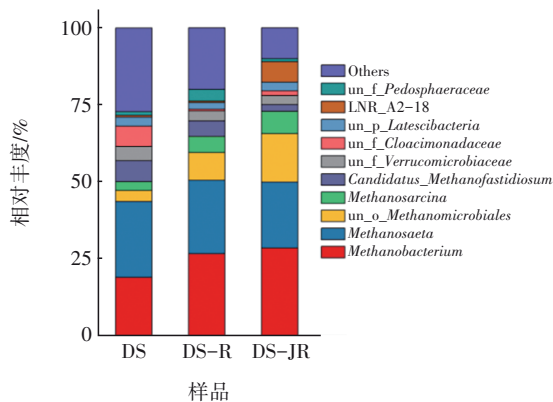


图 8 古菌群落在属水平上的相对丰度

Fig.8 Relative abundance of archaeal community at genus level

从图 8 可知,DS 组、DS-R 组和 DS-JR 组污泥样品在厌氧消化系统中的古菌群落结构类似,但与产甲烷相关的古菌群落相对丰度存在明显差别。其中 DS-JR 组中与产甲烷相关的 *Methanobacterium*、*Methanosaeta*、*Methanomicrobiales*、*Methanosarcina* 和 *Methanofastidiosum* 古菌属的相对丰度高达 75.16%,

比 DS 组和 DS-R 组的相对丰度分别高 18.18% 和 5.29%。另外,在 DS-JR 系统中 *Methanosarcina* 的相对丰度较 DS 组和 DS-R 组分别提高 4.41% 和 2.03%。由此可见,高含铁污泥经碱热和热预处理后,产甲烷菌属的相对丰度得以提高,这也与系统中 SCOD、SC、SP 等浓度的变化密切相关。

3 结论

① 受铁盐调理的污泥中若总铁含量过高,厌氧消化产甲烷效能会被抑制。经热和碱热预处理后,高含铁污泥累计产甲烷量分别提高 40.25% 和 72.70%。圆锥模型拟合结果表明,碱热预处理的 U_m 和 k_{hyd} 值最大,对产甲烷效能改善效果最佳。

② 高含铁污泥经碱热预处理后,上清液中可溶性多糖(SC)浓度是热预处理和未处理污泥的 1.61 和 4.25 倍;其残渣中多糖和蛋白质消耗率比单独热预处理分别高 2.45% 和 8.31%,腐殖酸的提高幅度较大,残渣的稳定性得以改善。

③ 预处理会导致古菌群落多样性降低,但增强了系统中辅酶 F420 的活性,提高了古菌群落相对丰度。而经碱热处理后,系统中与产甲烷相关的古菌相对丰度和辅酶 F420 活性较热预处理分别提高了 5.29% 和 4.23%。

参考文献:

- [1] XU Y, LU Y Q, DAI X H, *et al.* The influence of organic-binding metals on the biogas conversion of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2017, 126 (1): 329-341.
- [2] 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.
- [3] 杨光,张光明,张盼月,等. 添加三氯化铁对中温污泥厌氧消化优化调理[J]. *环境工程学报*, 2017, 11 (8): 4725-4731.
- [4] YANG Guang, ZHANG Guangming, ZHANG Panyue, *et al.* Enhancement and conditioning effects of sludge anaerobic digestion by adding FeCl_3 [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (8): 4725-4731(in Chinese).
- [4] YU B, ZHANG D L, DAI X H, *et al.* The synthetic effect on volatile fatty acid disinhibition and methane

- production enhancement by dosing FeCl_3 in a sludge thermophilic anaerobic digestion system [J]. RSC Advances, 2016, 6(25):21090–21098.
- [5] LIAO X C, LI H, ZHANG Y Y, *et al.* Accelerated high-solids anaerobic digestion of sewage sludge using low-temperature thermal pretreatment [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 106: 141–149.
- [6] ZHANG Y C, XU S Y, CUI M H, *et al.* Effects of different thermal pretreatments on the biodegradability and bioaccessibility of sewage sludge [J]. Waste Management, 2019, 94:68–76.
- [7] 徐志婧, 李瑶, 周爱朝, 等. 污泥热水解过程中磷的释放规律与影响因素[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21):24–30.
- XU Zhiqiang, LI Yao, ZHOU Aichao, *et al.* Phosphate release and influencing factors analysis during sludge thermal hydrolysis [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(21):24–30(in Chinese).
- [8] PELLERA F M, GIDARAKOS E. Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(3):3217–3229.
- [9] GAO M, YANG J H, LI S Q, *et al.* Effects of incineration leachate on anaerobic digestion of excess sludge and the related mechanisms [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 311:114831.
- [10] 蒋昌旺, 李靖, 何迪, 等. 热碱预处理对高含固剩余污泥厌氧消化的影响及其动力学研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(8): 906–909, 915.
- JIANG Changwang, LI Jing, HE Di, *et al.* Influence of thermal-alkaline pretreatment on higher solid containing excess sludge anaerobic digestion and the kinetic study [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(8): 906–909, 915(in Chinese).
- [11] 焦玲洁, 李咏梅, 魏海娟, 等. 铁及其化合物控制污泥厌氧消化VSCs机理研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3454–3463.
- JIAO Lingjie, LI Yongmei, WEI Haijuan, *et al.* A review on the mechanism of adding iron and iron compounds to control volatile sulfur compounds during anaerobic digestion of sludge [J]. China Environmental Science, 2023, 43(7): 3454–3463(in Chinese).
- [12] FEKI E, KHOUI S, LOUKIL S, *et al.* Improvement of anaerobic digestion of waste-activated sludge by using H_2O_2 oxidation, electrolysis, electro-oxidation and thermo-alkaline pretreatments [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(19): 14717–14726.
- [13] 刘金凤. 水热预处理对污泥厌氧消化的影响及有机物的变化规律[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2014.
- LIU Jinfeng. Effect of the Hydrothermal Pretreatment on the Anaerobic Digestion of the Sludge and Variation of the Organic Matters [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2014(in Chinese).
- [14] 郝晓地, 周鹏, 曹亚莉. 污水处理中腐殖质的来源及其演变过程 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 1–11.
- HAO Xiaodi, ZHOU Peng, CAO Yali. Origins and evolution processes of humic substances in wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 1–11(in Chinese).

作者简介:孙宇佳(2000–),男,湖南娄底人,硕士,主要研究方向为污水与污泥资源化利用。

E-mail:1256634151@qq.com

收稿日期:2024-08-01

修回日期:2024-09-29

(编辑:任莹莹)