

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.002

铁系导电介质粒度对剩余污泥厌氧消化效能的影响

赫俊国¹, 尹诗敏¹, 赵美花¹, 崔鑫鑫¹, 江志峰¹, 李碧清²,
唐霞², 肖先念²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510000; 2. 广州市净水有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 剩余污泥厌氧消化存在周期长、效率较低等问题,而铁系导电介质可通过促进种间电子传递来提高厌氧消化效能。为此,分别以零价铁粉和磁铁矿为导电介质,考察了不同粒度的导电介质对污泥厌氧消化效能的影响。结果表明,铁粉和磁铁矿的粒度变化对污泥厌氧消化效能的影响较大,而且两种导电介质促进厌氧消化的途径不同:磁铁矿可促进水解酸化过程,提供更多的产甲烷底物;而铁粉会加快水解酸化产物的消耗,从而促进产甲烷过程。随着铁粉和磁铁矿粒度的减小,沼气产量呈增加趋势,当粒度为400目时沼气产量分别达到了457.8、447.6 mL/gVSS,比空白组分别提高了16.8%、14.2%,甲烷含量比空白组分别提高了5.7%、4.4%;同时,有机物降解率的提升效果明显,有利于污泥减量化。另外,铁粉组和磁铁矿组污泥上清液的电导率比空白组有较大提升,这有利于微生物种群间电子传递效率的提升;污泥表面扫描电镜分析表明,铁粉和磁铁矿与微生物团聚紧密,可提高直接种间电子传递效率;微生物测序分析表明,铁粉和磁铁矿可以促进微生物种群多样化,在磁铁矿组 *Firmicutes* 得到富集,对水解酸化过程产生促进作用,而在铁粉组,随着铁粉粒度的减小, *Methanosaeta* 产甲烷菌的相对丰度增加,对产甲烷阶段产生促进作用。

关键词: 剩余污泥; 厌氧消化; 导电介质; 零价铁; 磁铁矿; 粒度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0011-08

Effect of Particle Size of Iron Conducting Media on Anaerobic Digestion Efficiency of Excess Sludge

HE Jun-guo¹, YIN Shi-min¹, ZHAO Mei-hua¹, CUI Xin-xin¹, JIANG Zhi-feng¹,
LI Bi-qing², TANG Xia², XIAO Xian-nian²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510000, China;

2. Guangzhou Sewage Purification Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Anaerobic digestion of excess sludge has some problems such as long cycle time and low efficiency. Iron conducting media are capable of improving anaerobic digestion efficiency by promoting interspecific electron transfer. Therefore, the effects of two conducting media [zero-valent iron (ZVI) powder and magnetite] with different particle sizes on anaerobic digestion efficiency of excess sludge were investigated. The change of particle size of ZVI and magnetite had a great influence on sludge anaerobic digestion efficiency, and the two conducting media promoted anaerobic digestion in different ways. Magnetite promoted hydrolysis and acidification process and provided more methanogenic

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778179); 广东省重点领域研发计划项目(2019B110209002)

substrates. However, ZVI accelerated the consumption of hydrolytic acidification products, thus promoting methanogenesis. Profile of biogas yield was an increasing trend with the decrease of particle size of ZVI and magnetite. When the particle size was 400 mesh, the biogas yield reached 457.8 mL/gVSS and 447.6 mL/gVSS, respectively, which were 16.8% and 14.2% higher than that of the blank group, and the methane contents were 5.7% and 4.4% higher than that of the blank group, respectively. The organic degradation rate increased obviously, which was beneficial to sludge reduction. In addition, the conductivity of sludge supernatant in ZVI group and magnetite group was significantly higher than that in the blank group, which was conducive to the improvement of electron transfer efficiency among microbial populations. SEM analysis of sludge surface showed that the agglomeration of ZVI and magnetite with microorganisms was close, which directly improved the efficiency of direct interspecific electron transfer. The high-throughput sequencing results indicated that ZVI and magnetite promoted the diversity of microbial community. *Firmicutes* was enriched in the magnetite group, which promoted the hydrolysis and acidification process. In the ZVI group, the relative abundance of *Methanosaeta* increased with the decrease of ZVI particle size, which promoted the methane production in methanogenic stage.

Key words: excess sludge; anaerobic digestion; conducting medium; zero-valent iron (ZVI); magnetite; particle size

厌氧消化作为目前应用最为广泛的剩余污泥处置方式,具有能耗低、污染少、可回收生物质能等优点。但同时污泥厌氧消化也存在产甲烷率低、停留时间长以及有机物降解率较低等缺点^[1]。针对这些问题,近年来国内外众多学者都在探寻提升污泥厌氧消化效率的方法,其中研究较多的是对剩余污泥进行预处理,如碱预处理、热水解预处理、超声预处理以及多种预处理方法耦合等^[2-3]。但这些预处理方法存在成本高、能耗大的问题,因此探寻新型产甲烷途径,突破复杂有机物水解酸化的速率约束,是提高厌氧消化效率的关键^[4]。

研究表明,在污泥厌氧消化产甲烷过程中,除了以氢气/甲酸等小分子物质为载体的种间电子传递方式外,还存在直接种间电子传递(DIET)^[5-6]。DIET是以微生物自身结构(如纳米导线、细胞色素c等)或外源导电材料为媒介传递电子,克服了种间氢气/甲酸电子转移的热力学限制,从而提高了种间电子传递效率^[7]。目前很多研究表明投加外源导电材料如炭材料(活性炭^[8]、生物炭^[9]等)和铁系材料(磁铁矿^[10-11]、零价铁^[12-13]等)可以加强DIET作用、富集功能微生物菌群,从而提升污泥厌氧消化效率。铁系导电材料主要有零价铁和磁铁矿,笔者对比分析了这两种铁系导电材料对污泥厌氧消化效能的影响,并探究了材料粒度变化的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置与流程

实验用剩余污泥取自某污水处理厂的脱水污泥,接种污泥取自某污泥处理厂的厌氧发酵罐,剩余污泥与接种污泥的混合比为4:1,混合后污泥的pH值为7.2、VSS为26.2 g/L、COD为33 238 mg/L。

实验采用序批式方式进行,以500 mL血清瓶作为反应器,加入混合污泥。在预实验得出的铁粉及磁铁矿的最佳投加量(分别为10、5 g/L)条件下,分别投加不同粒度(16、50、100、200、400目)的两种材料进行实验,同时设一组空白对照。反应器充10 min氮气后,连接集气袋,用于测定产气量以及采集气体测定甲烷含量。污泥厌氧消化时间为25 d。实验期间,将各血清瓶置于恒温培养振荡箱中,温度恒定为35℃,振荡速率为120 r/min。

1.2 分析项目与方法

pH值:玻璃电极法;TSS、VSS、含水率:重量法;COD:快速消解分光光度法;蛋白质:改良BCA试剂盒;电导率:电导率仪;甲烷和挥发性脂肪酸(VFAs):气相色谱仪。

2 结果与讨论

2.1 材料粒度对溶解性物质的影响

2.1.1 SCOD浓度的变化

厌氧消化初期,污泥开始进行水解过程,复杂

的大分子有机物转化为小分子溶解性有机物,水解酸化速率大于产甲烷速率,导致溶解性有机物在污泥中积累,因此SCOD浓度可以作为水解过程的指标。实验中SCOD浓度的变化如图1所示。

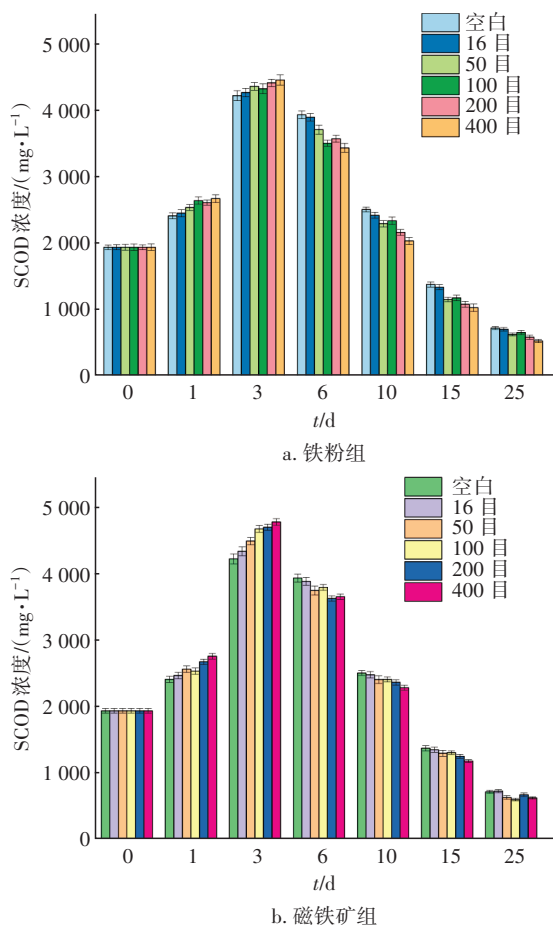


图1 SCOD浓度的变化

Fig.1 Change of SCOD concentration

从图1可以看出,在厌氧消化过程的前3 d,铁粉组和磁铁矿组污泥的SCOD浓度快速增加,第3天时,400目铁粉组和磁铁矿组的SCOD浓度分别为4 452、4 769 mg/L,较空白组分别增加了5.5%和13.1%,表明磁铁矿对水解酸化阶段的促进效果较铁粉更明显。随着粒度从16目变化至400目,铁粉组的SCOD浓度由4 256 mg/L增至4 452 mg/L,增加了4.4%;磁铁矿组的SCOD浓度由4 330 mg/L增至4 769 mg/L,增加了10.1%,可见随着粒度的减小,导电介质对污泥水解过程的促进作用更明显。3 d后SCOD浓度开始下降,这是由于随着产甲烷过程的进行,溶解性有机物不断被消耗。由图1可知,铁粉组和磁铁矿组SCOD浓度的下降速度比空白组要

快,而且随着粒度的减小,对SCOD的降解促进作用更明显,第10天时,400目磁铁矿组和铁粉组的SCOD浓度分别为2 296、2 045 mg/L,比空白组分别低了8.7%和18.7%,可见铁粉组在厌氧消化产甲烷阶段对SCOD的消耗较磁铁矿组更快,说明铁粉能加快水解酸化产物的消耗,从而对产甲烷过程有明显促进作用。

2.1.2 VFAs浓度的变化

VFAs是污泥厌氧消化过程的中间产物,大分子有机物的水解酸化过程会导致VFAs的积累,而产甲烷过程则会促进VFAs的消耗。因此,VFAs浓度可以作为评价污泥水解效率的指标。实验中VFAs浓度的变化如图2所示。

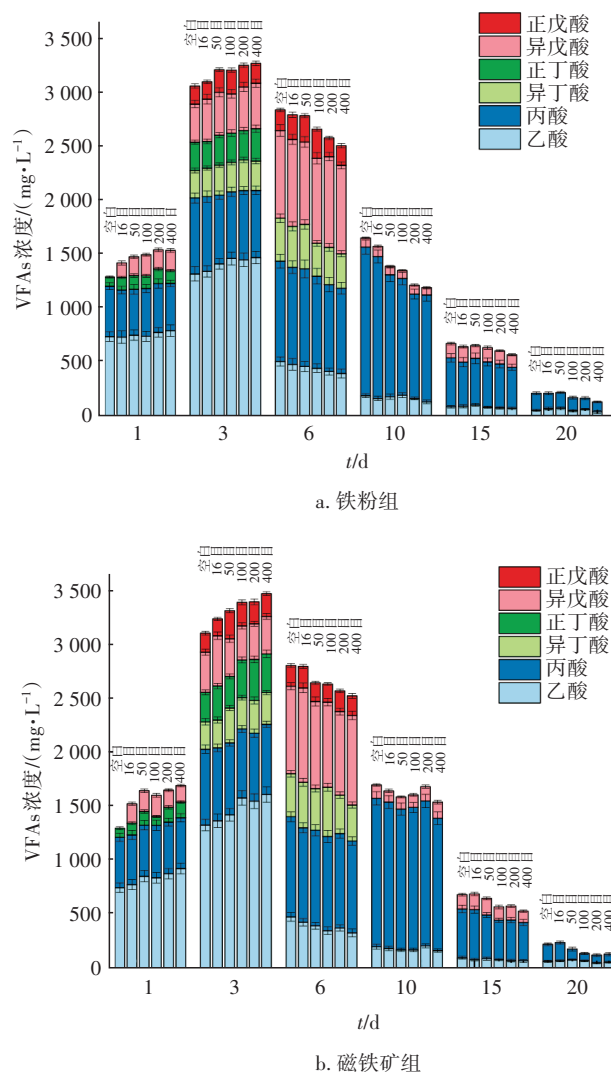


图2 VFAs浓度的变化

Fig.2 Change of VFAs concentration

由图2可知,各组VFAs浓度在反应初期均逐渐

增加,并在第3天达到最高,此时16、50、100、200、400目磁铁矿组的VFAs浓度比空白组分别高5.6%、8.1%、10.6%、10.8%、13.2%,而铁粉组VFAs浓度最高的400目仅比空白组高6.9%,说明磁铁矿对厌氧消化产酸阶段的促进作用比铁粉组更明显,且随粒度的减小促进作用增强。3 d后铁粉组对VFAs的降解速率较空白组和磁铁矿组更快,400目铁粉组在第6天时VFAs浓度为2 512 mg/L,比空白组低11.7%,第10天时VFAs浓度为1 201 mg/L,比空白组和400目磁铁矿组分别低27.6%和22.0%,说明铁粉能加快水解酸化产物的消耗,从而对产甲烷过程有明显促进作用。另外,与空白组相比,磁铁矿组和铁粉组的VFAs中乙酸占比更大,第3天时16、50、100、200、400目磁铁矿组的乙酸浓度比空白组分别高3.0%、7.1%、18.9%、16.6%、21.2%,而16、50、100、200、400目铁粉组的乙酸浓度比空白组分别高1.7%、7.0%、10.7%、9.8%、11.4%,说明投加磁铁矿和铁粉均能促进乙酸型发酵,但磁铁矿的促进作用更明显,且该促进作用随其粒度的减小而增强。此外,第3天和第6天时400目铁粉组的丙酸浓度比空白组分别低11.8%和15.0%,表明投加铁粉能促进丙酸的转化。

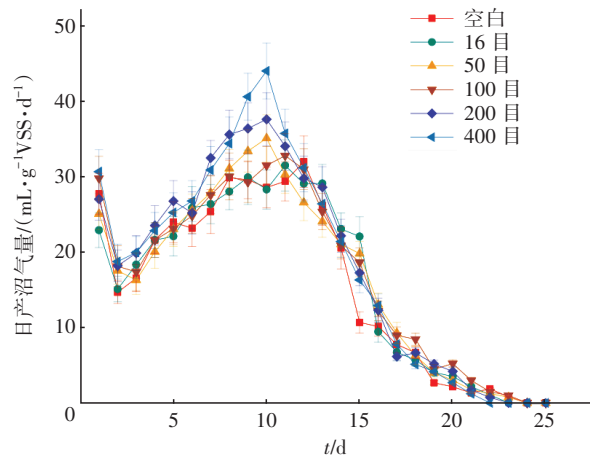
图1和图2表明,铁粉和磁铁矿促进污泥厌氧消化的途径有所不同:在污泥厌氧消化前3 d的水解酸化阶段,磁铁矿组的SCOD和VFAs浓度均高于铁粉组,说明磁铁矿对污泥厌氧消化的水解酸化阶段促进作用更明显,产生更多的产甲烷底物,从而可提高甲烷产量;而在3 d后的污泥厌氧消化产甲烷阶段,铁粉组对SCOD和VFAs的消耗较磁铁矿组更快,说明铁粉能促进水解酸化产物的消耗,且该促进作用随其粒度的减小而增强,对产甲烷阶段产生促进作用,从而使厌氧消化效率得到提升。

2.2 材料粒度对产气效果的影响

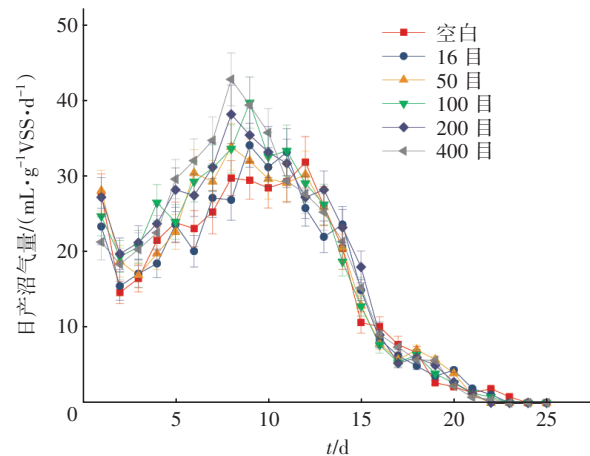
2.2.1 日产沼气量及甲烷含量的变化

铁粉组、磁铁矿组及空白组各反应器的日产沼气量变化如图3(a)和(b)所示。各组反应器日产沼气量在第3天开始迅速增加,铁粉组的最大日产沼气量出现在第10、11天,磁铁矿组出现在第8、9天,而空白组出现在第12天,表明投加铁粉和磁铁矿能缩短产气的延滞期,且磁铁矿的促进作用更明显。结合SCOD和VFAs的变化可知,由于磁铁矿在前期对水解酸化过程的促进作用使得

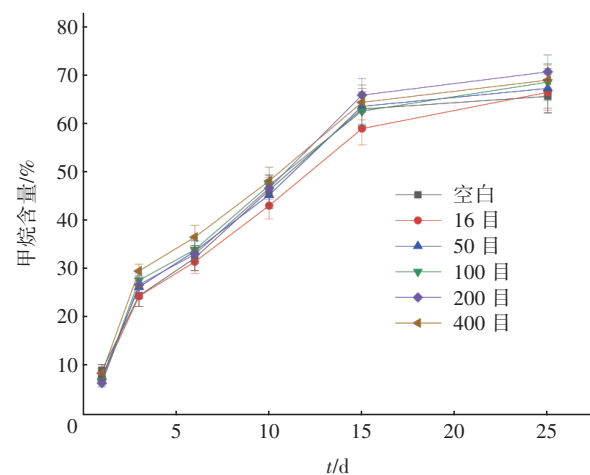
产甲烷阶段有充足的底物,所以促进了产气高峰的提前出现;而铁粉组在第10天左右SCOD和VFAs降解速率最快,与第10天左右出现产气高峰相对应。



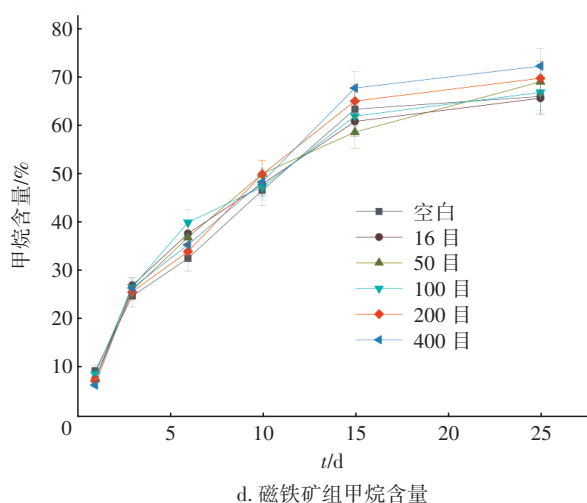
a. 铁粉组日产沼气量



b. 磁铁矿组日产沼气量



c. 铁粉组甲烷含量



d. 磁铁矿组甲烷含量

图3 产气指标的变化

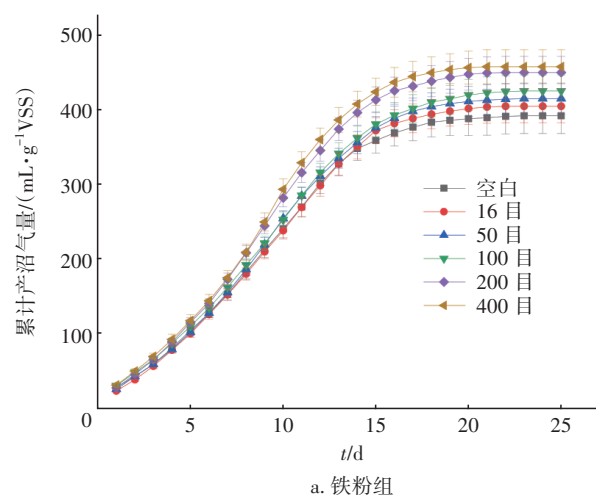
Fig.3 Change of biogas production index

甲烷含量的变化如图3(c)和(d)所示,各反应器甲烷含量变化规律趋势基本一致:在反应初期,甲烷含量较低,随着厌氧消化的进行,甲烷含量逐渐增加,并在第15天左右达到最大,第15天后甲烷含量变化趋于平稳。投加铁粉和磁铁矿的反应器整体上含量变化较空白组有所提升,其中铁粉组400目在厌氧消化前10 d提升效果较明显,而磁铁矿400目在反应15 d后提升效果较明显,其甲烷含量较空白组分别提升5.7%、4.4%。

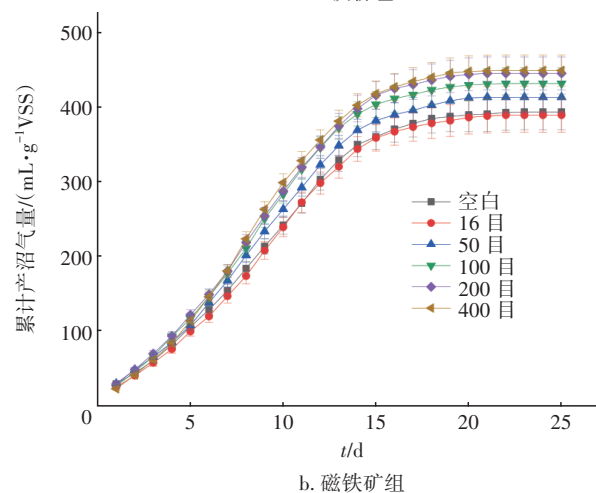
2.2.2 累计产沼气的变化

各反应器累计产沼气的变化如图4所示。与空白组相比,铁粉组和磁铁矿组的累计产沼气的量都有所提升,且随粒度的减小,提升效果更加明显。其中,空白组的累计产沼气的量为392.1 mL/gVSS,16、50、100、200、400目铁粉组的累计产沼气的量分别为404.9、415.1、425.3、450.2、457.8 mL/gVSS,较空白组分别提升了3.3%、5.9%、8.5%、14.8%和16.8%,铁粉组累计产沼气的量与铁粉目数的拟合二次方程为: $y = -0.0005x^2 + 0.3487x + 398.45$ ($R^2 = 0.99$);而16、50、100、200、400目磁铁矿组的累计产沼气的量分别为387.8、414.9、434.1、442.8、447.6 mL/gVSS,较空白组分别提升了-1.1%、5.0%、9.7%、12.9%、14.2%,磁铁矿组的累计产沼气的量与磁铁矿目数的拟合二次方程为: $y = -0.0008x^2 + 0.4757x + 385.72$ ($R^2 = 0.96$)。可以发现,两种铁系导电材料的粒度由16目变化到200目对累计产沼气的量提升效果明显,而再由200目变化到400目则

提升效果不大,说明粒度减小到一定值后对污泥厌氧消化的促进效果不变甚至可能降低。累计产沼气的量随铁系导电材料粒度的减小而增加的原因可能是:粒度减小则比表面积增大,与污泥以及微生物能更好地接触,充分发挥传质效果;另外,粒度小的导电颗粒在相同搅拌速率下在污泥中分布更加均匀,不易产生团聚抑制作用。16目铁粉组和磁铁矿组的累计产沼气的量与空白组相比提升效果不明显,主要是因为16目粒径过大,同样的搅拌速率下导电颗粒分布均匀度较低,容易产生团聚现象,导电颗粒不能与污泥充分接触,导致导电性能下降,进而影响产甲烷速率。



a. 铁粉组



b. 磁铁矿组

图4 累积产沼气的变化

Fig.4 Change of cumulative biogas production

2.3 材料粒度对污泥减量效果的影响

污泥厌氧消化过程中VSS含量的变化如图5所示。可知,与空白组相比,其他各组反应器在反应结束后VSS含量均有所降低,且VSS去除率随着导

电材料粒度的减小而逐渐升高。空白组的VSS去除率为34.4%,随着粒度从16目变化到400目,铁粉组的VSS去除率从34.7%增至39.3%,磁铁矿组的VSS去除率从35.5%增至38.9%,说明在一定范围内投加粒度更小的铁系导电材料更有利于VSS的去除。此外,COD和蛋白质的变化趋势与VSS基本一致,铁粉组和磁铁矿组的COD和蛋白质含量较空白组更低,且随着粒度的减小,铁粉组的COD去除率从36.7%增至43.9%,蛋白质降解率从49.4%增至56.9%;磁铁矿组的COD去除率从36.2%增至42.0%,蛋白质降解率从50.0%增至56.1%。可见,减小铁粉和磁铁矿的粒度可以促进污泥减量化。

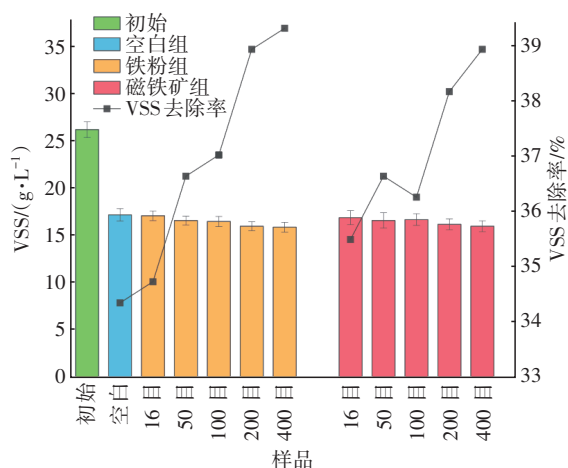


图5 VSS含量的变化

Fig.5 Change of VSS content

2.4 材料粒度对污泥上清液电导率的影响

反应结束后铁粉组和磁铁矿组的污泥上清液电导率较空白组更高,其中400目铁粉组和磁铁矿组的电导率分别为5.35、5.16 mS/cm,比空白组分别高28.3%、23.7%,这表明投加外源导电材料可以提高污泥厌氧消化体系的电导率,从而可以促进微生物种群间的直接电子传递。而且,200目和400目铁粉组的电导率较16~100目铁粉组的明显增高,而100~400目磁铁矿组的电导率比16目和50目磁铁矿组的更高,说明减小导电介质的粒度可以进一步提升体系的电导率,促进体系中的电子传递。

2.5 材料粒度对污泥表面形貌的影响

空白组、400目铁粉组和磁铁矿组污泥的扫描电镜图片如图6所示。由图6(a)可知,空白组污泥中的优势菌种主要为杆菌和球菌,且微生物富集效果较投加导电材料的实验组要弱,只能利用传统的

氢气/甲酸等小分子物质作为微生物间电子传递的载体,因此产甲烷速率较低。而400目铁粉组的污泥中优势菌为杆菌[见图6(b)],且微生物与铁粉接触紧密,微生物利用铁粉作为电子供体,附着于铁粉表面生长,从而使得直接电子传递的效率得到了较大提高^[14]。而400目磁铁矿组的污泥中除了杆菌外,还有球菌和丝状菌等,其中大部分微生物深入到磁铁矿表面结构内,与磁铁矿连接紧密,有利于充分发挥磁铁矿的导体作用,缩短电子传递距离,更有效地进行互营微生物间的种间电子传递^[15]。

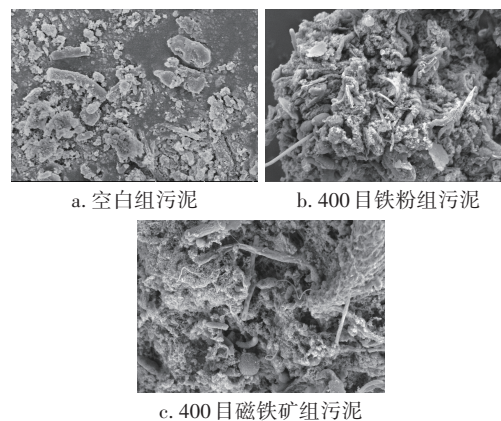


图6 污泥的扫描电镜图片

Fig.6 SEM images of sludge

2.6 材料粒度对污泥微生物群落的影响

Shannon指数可用来表征样本中微生物的多样性,Shannon指数值越大,说明群落多样性越高。污泥厌氧消化结束后,铁粉组和磁铁矿组的Shannon指数值都比空白组的要大,说明投加铁系导电材料能提高厌氧消化过程中微生物的多样性。

图7(a)为厌氧消化结束后悬浮污泥中细菌在门水平上的群落结构分布。可以看出,*Firmicutes*和*Chloroflexi*是占比最多的两个菌种,*Firmicutes*是典型的降解不同有机质产生VFAs的互营细菌,可加速乙酸盐的产生^[16],而*Chloroflexi*具有电化活性,是DIET的潜在功能微生物^[17]。*Firmicutes*在200目和400目磁铁矿组中的相对丰度分别为32.29%、27.41%,而在空白组中的相对丰度仅为20.64%。*Firmicutes*在投加磁铁矿的反应器中得到富集,这与其反应器在水解酸化阶段生成更多SCOD、VFAs等水解酸化产物相对应。*Chloroflexi*在200目和400目铁粉组中的相对丰度分别为17.29%、14.08%,而在空白组中的相对丰度为10.03%。*Chloroflexi*在投加

铁粉的反应器中富集效果更加明显,有利于产酸微生物和产甲烷微生物的DIET过程,这与铁粉组对产甲烷阶段的促进作用相对应。

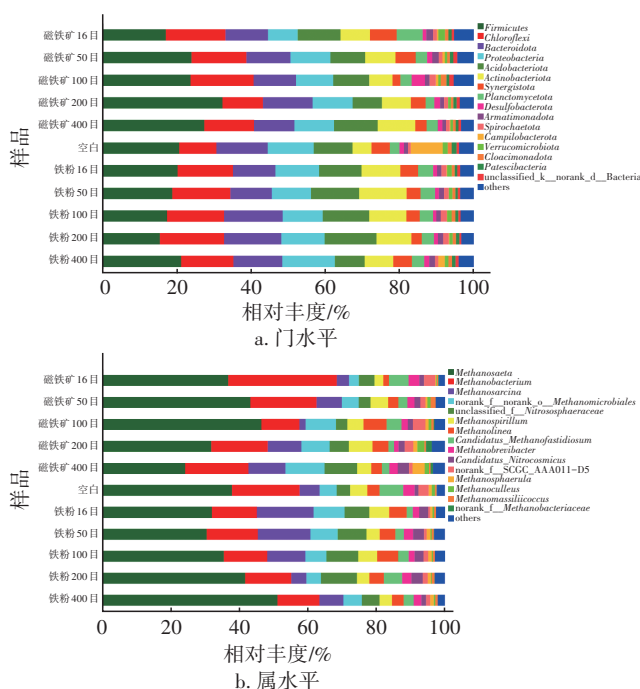


图7 各反应器的微生物群落结构分布

Fig.7 Distribution of microbial community in different reactors

图7(b)为厌氧消化结束后悬浮污泥中古菌在属水平上的群落结构分布。污泥中的优势古菌为 *Methanosaeta*、*Methanobacterium* 和 *Methanosarcina*, 其中, *Methanosaeta* 和 *Methanosarcina* 是最常见的利用乙酸盐产甲烷的菌群,同时也是具备细胞外电子交换能力的电活性微生物^[18]。*Methanobacterium* 作为占比最大且最重要的耗氢产甲烷菌,在铁粉组中的相对丰度较空白组更低,说明铁粉组通过耗氢产甲烷这一途径的占比减小;而 *Methanosaeta* 菌群的相对丰度随着粒度的减小逐渐增加,其在400目铁粉组中的相对丰度最高,达到51.1%,而在空白组中的相对丰度仅为37.8%,*Methanosaeta* 产甲烷菌的富集有利于促进种间直接电子传递这一途径产甲烷,对提升产甲烷阶段的效率有明显促进作用。在磁铁矿粉组,随着粒度从16目变化到100目, *Methanosaeta* 菌群的相对丰度升高,而随着粒度从100目继续变化到400目, *Methanosaeta* 菌群的相对丰度又开始降低,但 *Methanosarcina* 的相对丰度在升高, *Methanosaeta* 和 *Methanosarcina* 这两种电活性

微生物在磁铁矿组各反应器中的总量相差不大,进一步说明投加磁铁矿对污泥厌氧消化的促进作用是缘于对水解酸化阶段的促进作用。

3 结论

① 铁粉和磁铁矿促进污泥厌氧消化的途径不同:随着材料粒度的减小,磁铁矿对水解酸化阶段产生促进作用,提供更多的产甲烷底物;而铁粉则随着粒度的减小,对水解酸化产物的消耗加快,对产甲烷阶段产生促进作用。

② 铁粉组和磁铁矿组均是在投加粒度为400目时累计产沼气量最大,分别达到了457.8、447.6 mL/gVSS,较空白组分别提升了16.8%、14.2%,甲烷含量呈上升趋势,且两种铁系材料随粒度的减小,对VSS、COD及蛋白质的降解率都有所提升。

③ 投加铁粉和磁铁矿能提高污泥厌氧消化体系的电导率,有利于提高微生物种间电子传递效率;与空白组相比,铁粉组和磁铁矿组的污泥表面导电介质与微生物接触紧密,在其中呈现媒介的作用,由此推测投加铁粉和磁铁矿有利于菌种之间的电子传递,从而使得直接电子传递的效率得到了极大的提高。

④ 铁粉和磁铁矿对剩余污泥厌氧消化过程中的微生物种群产生影响, *Firmicutes* 在投加磁铁矿的反应器中得到富集,对水解酸化过程产生促进作用;而在投加铁粉的反应器中, *Methanosaeta* 产甲烷菌的相对丰度增加,与铁粉组对产甲烷阶段产生促进作用相对应。

参考文献:

- [1] GENG Y, ZHANG B, DU L, *et al.* Improving methane production during the anaerobic digestion of waste activated sludge: CaO-ultrasonic pretreatment and using different seed sludges [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 743-752.
- [2] XUE Y G, LIU H J, CHEN S, *et al.* Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 264: 174-180.
- [3] NGUYEN V K, CHAUDHARY D K, DAHAL R H, *et al.* Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Fuel*, 2021, 285: 119105.
- [4] 赵智强, 李杨, 张耀斌. 厌氧消化中直接种间电子传

- 递产甲烷机理研究与技术应用[J]. 科学通报, 2020, 65(26): 2820-2834.
- ZHAO Zhiqiang, LI Yang, ZHANG Yaobin. Direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion: research and technological application [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65 (26) : 2820-2834 (in Chinese).
- [5] ZHAO Z, LI Y, YU Q, *et al.* Ferroferric oxide triggered possible direct interspecies electron transfer between *Syntrophomonas* and *Methanosaeta* to enhance waste activated sludge anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 79-85.
- [6] ZHAO Z, LI Y, ZHANG Y, *et al.* Sparking anaerobic digestion: promoting direct interspecies electron transfer to enhance methane production[J]. iScience, 2020, 23 (12): 101794.
- [7] 安彤, 吴宗林, 庞悦, 等. 导电材料强化挥发性脂肪酸互营氧化产甲烷菌群的种间直接电子传递研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (3) : 800-807.
- AN Tong, WU Zonglin, PANG Yue, *et al.* Direct interspecies electron transfer strengthened by conductive materials between syntrophic methanogenic communities of volatile fatty acids [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2021, 27 (3) : 800-807 (in Chinese).
- [8] YANG Y, ZHANG Y, LI Z, *et al.* Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 1101-1108.
- [9] WANG G, LI Q, LI Y, *et al.* Redox-active biochar facilitates potential electron transfer between syntrophic partners to enhance anaerobic digestion under high organic loading rate[J]. Bioresource technology, 2020, 298: 122524.
- [10] LIU F H, ROTARU A E, SHRESTHA P M, *et al.* Magnetite compensates for the lack of a pilin-associated c-type cytochrome in extracellular electron exchange[J]. Environmental Microbiology, 2015, 17(3): 648-655.
- [11] ZHAO Z, ZHANG Y, LI Y, *et al.* Comparing the mechanisms of ZVI and Fe_3O_4 for promoting waste-activated sludge digestion [J]. Water Research, 2018, 144: 126-133.
- [12] HAO X D, WEI J, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Analysing the mechanisms of sludge digestion enhanced by iron[J]. Water Research, 2017, 117: 58-67.
- [13] SUANON F, SUN Q, LI M, *et al.* Application of nanoscale zero valent iron and iron powder during sludge anaerobic digestion: impact on methane yield and pharmaceutical and personal care products degradation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321: 47-53.
- [14] DINH H T, KUEVER J, MUSSMANN M, *et al.* Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms [J]. Nature, 2004, 427(6977): 829-832.
- [15] VIGGI C C, ROSSETTI S, FAZI S, *et al.* Magnetite particles triggering a faster and more robust syntrophic pathway of methanogenic propionate degradation [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48 (13) : 7536-7543.
- [16] QI Q X, SUN C, ZHANG J X, *et al.* Internal enhancement mechanism of biochar with graphene structure in anaerobic digestion: the bioavailability of trace elements and potential direct interspecies electron transfer[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406: 126833.
- [17] BLANCHET E, PÉCASTAINGS S, ERABLE B, *et al.* Protons accumulation during anodic phase turned to advantage for oxygen reduction during cathodic phase in reversible bioelectrodes [J]. Bioresource Technology, 2014, 173: 224-230.
- [18] 李静, 张宝刚, 刘青松, 等. 导电材料强化微生物直接种间电子传递产甲烷的研究进展[J]. 微生物学报, 2021, 61(6): 1507-1524.
- LI Jing, ZHANG Baogang, LIU Qingsong, *et al.* Research progress on enhancement of methane production through direct interspecific electron transfer by conductive materials [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(6): 1507-1524 (in Chinese).

作者简介:赫俊国(1970—),男,黑龙江海伦人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为饮用水水质安全保障与应急、污水处理及资源化、污泥减量化及资源化。

E-mail:junguohe@263.net

收稿日期:2021-09-15

修回日期:2021-10-21

(编辑:刘贵春)