

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.014

CaO₂预处理耦合ZVI强化含油餐厨垃圾厌氧消化

程晓格, 王 琬, 邓冠勇, 苏涵钰, 钱佳鑫, 王建树
(贵州大学 化学与化工学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 餐厨垃圾中油脂降解困难,易导致厌氧消化失败。为促进含油餐厨垃圾的厌氧消化过程,采用过氧化钙(CaO₂)预处理和添加零价铁(ZVI)耦合策略,并优化投加量。结果表明,CaO₂预处理最优投加量为0.05 g/gVS,最佳预处理时间为24 h。预处理后油脂降解率提高了300.06%,溶解性蛋白质和多糖的浓度分别提高了2.87和1.95倍。添加3 g/L的ZVI使累积产气量达368.92 mL/gVS,较空白组提高了95.92%,辅酶F420和电子传递体系(ETS)活性分别提高了46.93%和105.13%。CaO₂预处理促进了有机质的降解,ZVI提高了系统稳定性和相关酶活性。CaO₂预处理和添加ZVI耦合策略可有效提高含油餐厨垃圾的厌氧消化产气性能。

关键词: 餐厨垃圾; 油脂; 过氧化钙(CaO₂); 零价铁(ZVI); 厌氧消化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0090-07

Enhanced Anaerobic Digestion of Greasy Food Waste with Calcium Peroxide Pretreatment Coupled with Zero-valent Iron

CHENG Xiao-ge, WANG Wan, DENG Guan-yong, SU Han-yu, QIAN Jia-xin,
WANG Jian-shu

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: It is difficult to degrade grease in food waste, which easily leads to the failure of anaerobic digestion. This paper adopted calcium peroxide (CaO₂) pretreatment coupled with zero-valent iron (ZVI) to promote the anaerobic digestion process of greasy food waste, and the chemical consumption was optimized to achieve a better digestion performance. The optimal dosage of CaO₂ pretreatment was 0.05 g/gVS, and the optimal pretreatment time was 24 hours. After pretreatment, the degradation rate of grease was increased by 300.06%, and the concentrations of soluble protein and soluble polysaccharide were increased by 2.87 times and 1.95 times, respectively. The addition of ZVI with concentration of 3 g/L increased the cumulative gas production to 368.92 mL/gVS, which increased by 95.92% compared with that of the blank group, and the activities of coenzyme F420 and electron transport system (ETS) increased by 46.93% and 105.13%, respectively. CaO₂ pretreatment promoted the degradation of organic matter, and ZVI improved the system stability and related enzyme activities, indicating that the CaO₂ pretreatment coupled with ZVI effectively improved the gas production performance of greasy food waste in anaerobic digestion.

Key words: food waste; grease; calcium peroxide (CaO₂); zero-valent iron (ZVI); anaerobic

基金项目: 贵州大学培育项目(贵大培育[2019]53号); 一般横向项目(K22-0114-065)

通信作者: 王琬 E-mail: wwang7@gzu.edu.cn

digestion

餐厨垃圾(FW)是餐饮垃圾和厨余垃圾的总称,是城市固体废物(MSW)的重要组成部分^[1]。随着我国经济水平的提高、人口逐年增长和饮食习惯的改变,餐厨垃圾的产量以及在城市固体废物中的比例逐年递增。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,目前全球每年产生的餐厨垃圾约为 16×10^8 t,预计到2025年产量可达 25×10^8 t^[2]。餐厨垃圾的大量堆积及其可持续管理已逐渐成为一个全球性问题,由于其具有有机质高、水分含量高等特点,采用填埋、焚烧或堆肥等传统处理方式极易污染地下水并产生恶臭等问题,给环境造成极大压力^[3]。而利用餐厨垃圾进行厌氧消化可产生清洁能源——沼气,是应对全球不断增长的能源需求、燃料费用、大气污染和废水处理极好的解决方案^[4]。

我国餐厨垃圾具有较高的含油率,约在22.80%~31.45%(干基)之间^[5]。厌氧消化过程中油脂的产气潜能为1 041 L/kgVS,显著高于蛋白质(480 L/kgVS)和碳水化合物(370 L/kgVS)^[6]。油脂的水解产物长链脂肪酸(LCFAs)因降解缓慢易大量积累,其附着在微生物细胞膜上并阻碍微生物与其他基质接触,从而影响 β -氧化和产甲烷步骤,最终导致厌氧消化的失败。此外,LCFAs会抑制厌氧微生物的生长,降低系统活性^[7]。因此,如何提高含油餐厨垃圾厌氧消化产气性能已成为亟需解决的问题。

过氧化钙(CaO₂)是一种同时具有氧化性和强碱性的过氧化物。由于其价格低廉且来源广泛,在固体废物处理和污染物去除领域得到了广泛应用^[8]。Wang等^[9]发现利用CaO₂预处理提高了废活性污泥(WAS)厌氧消化过程的产气性能,当CaO₂投加量为0.14 g/gVS时,WAS的累积甲烷产量从146.3 mL/gVS增加到215.9 mL/gVS。Zhu等^[10]在餐厨垃圾半连续式厌氧消化过程中联合添加CaO₂和磁铁矿,产气率提高了26.8%,辅酶F420活性比空白组提高了149%。研究表明^[11]CaO₂预处理可促进WAS中难降解有机物降解并提高产气量,提高挥发性脂肪酸(VFAs)的产率,但由于产甲烷速率有限,VFAs的生成速率大于消耗速率,从而使系统出现过度酸化现象。因此,很有必要提出一种策略,在最

大限度地促进油脂水解过程的同时缓解厌氧消化系统过度酸化,从而提高甲烷产量。而铁元素作为厌氧消化微生物生长繁殖所必需的微量元素,既是构成微生物的重要结构成分,又可改变生物种群结构、促进胞外聚合物分泌,可以提高VFAs的消耗速率^[12]。

因此,笔者探索了CaO₂预处理耦合零价铁(ZVI)策略在提高含油餐厨垃圾厌氧消化产气方面的可行性及有效性。首先评估了不同浓度CaO₂预处理对油脂降解率及有机质降解的影响,其次在CaO₂最优预处理条件下,探寻CaO₂预处理与添加ZVI耦合策略对含油餐厨垃圾厌氧消化性能的影响,并分析了其协同作用机理。

1 材料和方法

1.1 基质与接种物

由于直接收集的餐厨垃圾成分复杂且难以分化,影响实验稳定性及可信度,为提高实验数据的有效性,本研究分析了食堂餐厨垃圾成分并制备了相应的模拟餐厨垃圾。模拟餐厨垃圾由大米(25%)、面条(13%)、肉(18%)、白菜(20%)、土豆(10%)、胡萝卜(10%)和豆腐(4%)组成。根据之前的实验分析,设置餐厨垃圾中油脂含量为15 g/L,在食品研磨机中加工至粒径小于3 mm后密封存放于4℃冰箱保存。接种污泥取自贵阳市花溪区污水处理厂,筛除污泥中沙子、毛发等大颗粒物质,使用前在36℃条件下驯化2周。餐厨垃圾和接种污泥的理化特性参数见表1(TS、VS以干质量计)。

表1 餐厨垃圾及接种污泥的理化特性参数

Tab.1 Physical and chemical characteristic parameters of food waste and inoculated sludge

项目	餐厨垃圾	接种污泥
pH	6.32	7.62
TS/%	91.52±3.21	20.7
VS/%	85.42±1.58	7.72
COD/(g·L ⁻¹)	445.42±2.52	5.52
氨氮/(mg·L ⁻¹)	485.6±5.96	213.43±2.44
蛋白质/(g·L ⁻¹)	14.21±1.75	—
多糖/(g·L ⁻¹)	150.53±4.82	—

1.2 实验设计

序批式餐厨垃圾厌氧消化在容量为250 mL的

血清瓶中进行,餐厨垃圾与接种污泥的比例为1:1(以VS计),将其置于 $(36\pm 1)^\circ\text{C}$ 的恒温水浴锅中,每天手动摇晃一次,设置3组平行实验。

实验第一部分为探索 CaO_2 预处理餐厨垃圾的最优投加量和最佳时间。 CaO_2 投加量分别为0、0.01、0.03、0.05、0.07和0.09 g/gVS,命名为X0、X1、X2、X3、X4和X5,预处理温度为 36.5°C ,每4 h测一次溶解性蛋白质和多糖浓度,分别在预处理前后测定基质中的油脂含量。

实验第二部分为在 CaO_2 最优预处理条件下,投加不同浓度ZVI进行序批式厌氧消化实验。ZVI投加量分别为0、1、2、3、4和5 g/L,命名为R0、R1、R2、R3、R4和R5;空白组为未进行 CaO_2 预处理且未添加ZVI的餐厨垃圾厌氧消化实验,命名为R6。反应前在反应器内通氮气5 min,保持瓶内上空为无氧状态。

1.3 分析方法

TS、VS采用重量法测定;pH采用便携式pH计测定;油脂含量采用酸水解法测定;溶解性蛋白质和多糖的测定方法为上清液经 $0.45\ \mu\text{m}$ 水系滤膜过滤后,以牛血清白蛋白为标样,采用考马斯亮蓝法测定溶解性蛋白质浓度,以葡萄糖为标样,采用蒽酮-硫酸法测定溶解性多糖浓度;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;VFAs以乙酸为标样,采用酸性乙二醇-羟胺试剂比色法测定;辅酶F420活性为取上清液离心并采用乙醇萃取3次后,通过分光光度法测量吸光度后计算得出^[13]。根据Wang等^[14]报告的INT[2-(对碘代苯)-3-(对硝基苯)-5-苯基氯化四氮唑]法对电子传递体系(ETS)活性进行分析。日产气量和累积产气量采用3 mol/L的NaOH溶液通过排水法测定,NaOH能吸收沼气中的 CO_2 和 H_2S 等气体,吸收后沼气中甲烷含量可达95%以上^[15],每24 h记录一次排出NaOH溶液的体积,并以mL/gVS表示。

2 结果与讨论

2.1 CaO_2 预处理对餐厨垃圾的影响

2.1.1 最佳预处理时间和最佳预处理量

图1为不同 CaO_2 预处理条件下溶解性蛋白质和多糖浓度随时间的变化情况。可知,不同预处理条件下二者浓度在前24 h均逐渐增加,之后浓度基本保持不变,因此可以确定 CaO_2 对餐厨垃圾的最佳预处理时间为24 h。

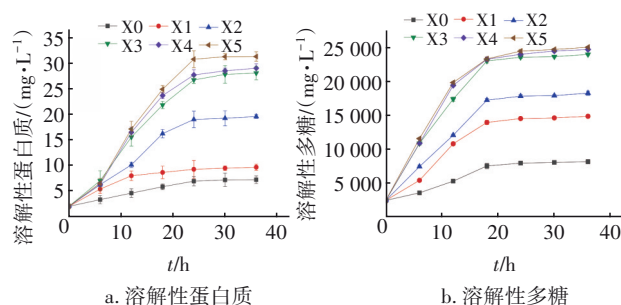


图1 溶解性有机物浓度随时间的变化

Fig.1 Change in dissolved organic matter concentration with time

预处理后,X0~X5各反应器中溶解性蛋白质浓度分别为6.91、9.24、19.03、26.77、27.75和30.84 mg/L。其中0.05 g/gVS CaO_2 预处理后溶解性蛋白质浓度为空白组(X0)的3.87倍,继续提高 CaO_2 投加量,溶解性蛋白质浓度却没有明显提升。与其变化类似,经0.05 g/gVS的 CaO_2 预处理24 h后溶解性多糖浓度为23 585.47 mg/L,较空白组浓度提高了195.40%。因此,本实验餐厨垃圾的 CaO_2 最佳投加量为0.05 g/gVS。 CaO_2 预处理促进了餐厨垃圾中大分子有机物的降解,为后续短链脂肪酸(SCFAs)的生成提供了更多生物可利用基质。

2.1.2 预处理对油脂降解及有机物增溶的影响

图2为经不同投加量 CaO_2 预处理24 h后餐厨垃圾中的油脂降解率。

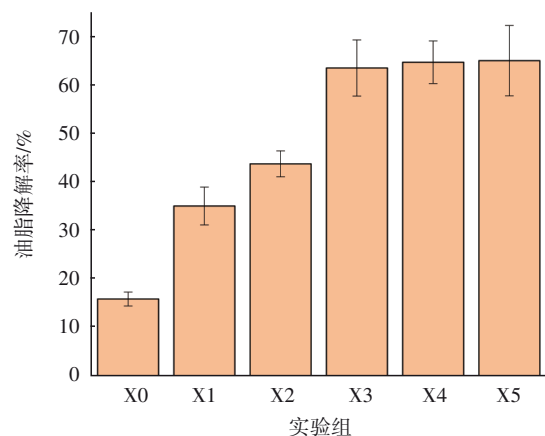


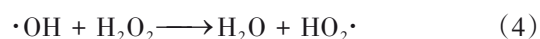
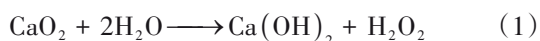
图2 CaO_2 预处理后油脂降解率的变化

Fig.2 Change in the degradation rate of grease after CaO_2 pretreatment

由图2可知,空白组餐厨垃圾的油脂降解率为15.88%,而经0.05 g/gVS的 CaO_2 预处理后油脂降解率达到了63.53%,较空白组提高了300.06%,与蛋白质和多糖的增溶情况表现出类似的趋势。即

CaO₂预处理24 h后,在促进有机物增溶的同时又促进了餐厨垃圾中油脂的降解。

餐厨垃圾中的大分子有机质主要包括蛋白质、油脂和多糖等。CaO₂预处理对油脂的去除及有机物的增溶表明其可以显著促进大分子有机物的降解,释放出更多的可溶性物质。如公式(1)~(5)^[16]所示,CaO₂溶于水后释放出H₂O₂和Ca(OH)₂,形成碱性环境,且产生的H₂O₂可以进一步转化为自由基如·OH和·O₂⁻。碱性环境可以促进固体颗粒膨胀,增大有机质和厌氧微生物的接触面积,将复杂高分子物质转变为小分子物质^[17]。此外,CaO₂溶于水后释放的Ca(OH)₂与油脂发生皂化反应,生成高级脂肪酸盐和甘油,在促进水解的同时可以与油脂水解产物发生反应,如与硬脂酸形成硬脂酸钙等^[18]。另一方面,生成的自由基·OH和·O₂⁻会引起氧化应激反应,对生物体产生不利影响,导致脂质、DNA、RNA等许多细胞器成分的过氧化和体内平衡失衡,破坏细胞膜结构^[16],从而使更多的有机物被释放出来。



2.2 CaO₂预处理耦合ZVI对厌氧消化的影响

2.2.1 沼气产量

不同实验条件下的沼气产量如图3所示。由图3(a)可知,空白组(R6)分别在第10天和第25天出现产气高峰,产气量分别为6.54和11.11 mL/gVS,而预处理后的实验组分别在第9天、第16天、第21天和第32天出现产气高峰,与空白组相比,不仅出现产气峰的时间提前,日产气量也更大。这可能是由于空白组反应器中大分子物质水解过程缓慢,且微生物需要更长的时间来适应环境的变化。由图3(b)可知,空白组的累积产气量为188.30 mL/gVS,而预处理后ZVI添加量为3 g/L时的累积产气量达到368.92 mL/gVS,较空白组提高了95.92%。Tian等^[19]在对小麦秸秆厌氧消化过程中同时采用CaO₂预处理并添加0.4 g/gVS的ZVI,结果发现沼气中CH₄占比较空白组提高了18%,且累积产气量较空

白组提高了35.6%,但当继续增大ZVI投加量时,累积产气量反而出现下降趋势。Wang等^[20]在污泥厌氧消化过程中添加ZVI,当其投加量超过1 g/L时,产气量较空白组下降,可能是由于微生物利用过剩的ZVI形成铁盐或亚铁盐抑制了脱氢酶和产甲烷菌的活性,导致累积产气量降低。

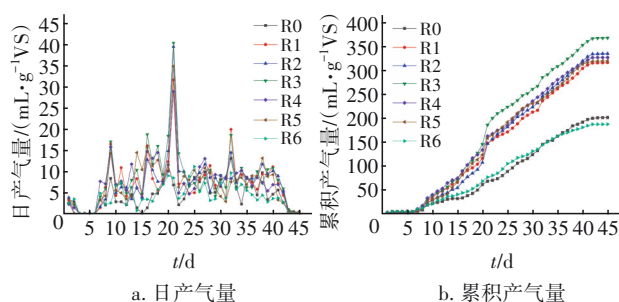


图3 不同条件下的沼气产量

Fig.3 Biogas production under different reaction conditions

2.2.2 系统稳定性分析

系统稳定性评价指标包括氨氮浓度、pH及VFAs浓度等。氨氮浓度会影响相关微生物的活性,是厌氧消化过程的一个重要指标^[21]。过量的氨氮会导致pH以及游离氨氮比例上升,进而穿透细菌细胞膜,影响质子平衡和离子浓度^[22]。图4为氨氮、pH和VFAs浓度的变化。由图4(a)可知,在厌氧消化过程中氨氮浓度逐渐升高,未预处理组(R6)反应结束时氨氮浓度为1 355.78 mg/L,均低于CaO₂预处理组(R0~R5)的氨氮浓度。Zhang等^[13]在对WAS厌氧消化过程添加CaO₂的实验中也得到类似结论,这可能是因为预处理后餐厨垃圾中的含氮物质如蛋白质、尿素、核酸等,更容易转化为氨氮(NH₄⁺、NH₃)。另外,预处理后而未开始厌氧消化反应前,添加ZVI的实验组(R2~R5)中氨氮浓度低于未添加ZVI组(R1)。这一发现与Yang等^[23]结论一致,ZVI的加入会促进形成具有大比表面积且能够吸附氨氮的矿物沉淀物,不仅可以促进VFAs的利用,增大系统pH,而且可以在表面形成氢氧化物吸收氨氮从而使氨氮浓度降低,缓解了氨氮对厌氧消化过程的抑制作用。

pH是调节整个厌氧消化过程中微生物负荷和生长的重要因素,pH的变化如图4(b)所示。当反应至第12天时,R0和R6的pH分别为4.73和4.52,而其他实验组的pH均在4.85以上,未进行CaO₂预处理组(R6)和预处理后未添加ZVI组(R0)的反应

酸化较严重且酸化时间较长。Lizama等^[24]在污泥厌氧消化过程中添加ZVI,发现在整个反应过程中,当ZVI投加量为5 g/L时,pH平均值为7.46,显著高

于未添加ZVI反应组。ZVI作为导电材料,在反应过程中促进了直接种间电子传递(EIDT),提高了产气速率,从而缓解了系统酸化^[25]。

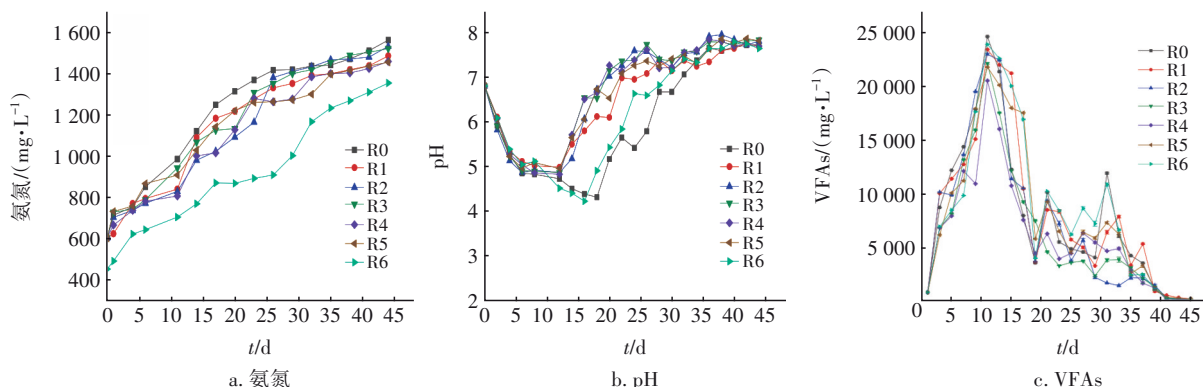


图4 氨氮、pH和VFAs浓度变化

Fig.4 Change of ammonia nitrogen, pH and VFAs concentration

作为餐厨垃圾水解酸化的主要产物,VFAs在产甲烷阶段被产甲烷菌转化为甲烷^[26]。VFAs浓度变化如图4(c)所示,所有反应器中VFAs的浓度都在第11天左右达到峰值后逐渐下降,随后在第21天和第32天左右出现较小峰值,而后浓度逐渐降低至反应结束。这主要是因为初期餐厨垃圾水解酸化产生大量VFAs,与pH变化呈负相关趋势。此外,在反应进行至第11天时,R6中VFAs浓度为23 841.65 mg/L,预处理后未添加ZVI组(R0)反应器中VFAs浓度为24 571.25 mg/L,而当ZVI投加量为3 g/L时,VFAs峰值浓度为22 068.77 mg/L,可能是因为添加了ZVI促使VFAs向产甲烷转变,提高了系统的缓冲能力。这一结果与Tian等^[19]结论一致,对麦草秸秆用0.6 g/gVS CaO₂预处理后反应基质释放出更多的VFAs,添加0.4 g/gVS ZVI后则促进了VFAs的消耗,从而使产气量较空白组提高了35.6%。

2.2.3 辅酶F420活性和ETS活性分析

关键酶活性可以在一定程度上反映出餐厨垃圾厌氧消化过程中的微生物活性,ETS则与细胞间的电子转移速率有关,通常用来评估微生物的呼吸活性和生物活性^[27]。辅酶F420和ETS活性如图5所示。与空白组(R6)相比,预处理后未添加ZVI的反应组(R0)的酶活性提高了13.95%,可能是由于餐厨垃圾分解和水解酸化过程的增强,为后续微生物提供了更丰富的基质。CaO₂预处理后添加ZVI实验组(R1~R5)的酶活性分别较R0提高了18.37%、26.53%、46.93%、30.61%和10.20%。同样的,ZVI

的存在显著提高了反应系统的ETS活性,当ZVI投加量为3 g/L时,ETS活性为27 766.75 μg/(mL·h),较R0提高了105.13%。反应机理^[19]见公式(6)~(8),ZVI在腐蚀过程中伴随H₂的生成,而且ZVI可以直接作为电子供体用于还原CO₂来产生CH₄。此外,Fe—S簇是辅酶F420中的活性基团,Fe(II)可以刺激Fe—S簇的生成以提高产甲烷菌活性。

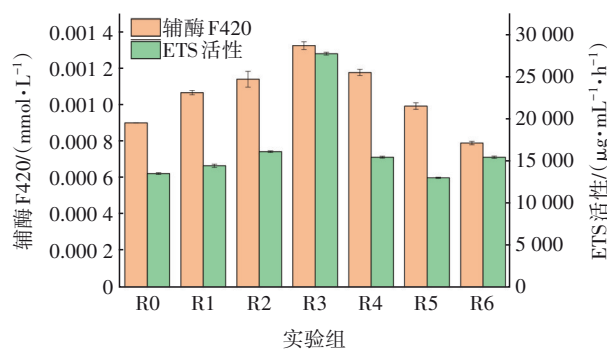
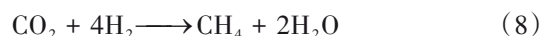
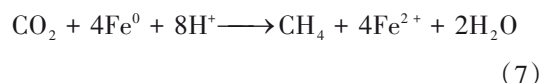
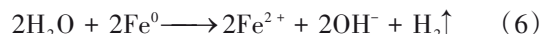


图5 辅酶F420及ETS活性

Fig.5 Activity of coenzyme F420 and ETS

3 结论

① 含油餐厨垃圾采用0.05 g/gVS CaO₂预处理24 h后,溶解性蛋白质和多糖的浓度分别为26.77和23 585.47 mg/L,分别较空白组提高了2.87倍和1.95倍;油脂降解率为63.53%,较空白组提高

了300.06%。CaO₂对富含油脂的餐厨垃圾预处理后促进了有机物的增溶和油脂的降解,为后续产气过程提供了更多的底物。

② 经CaO₂预处理后ZVI添加量为3 g/L时累积产气量最大,为368.92 mL/gVS。添加适量的ZVI可以缓解系统酸化,降低系统氨氮浓度,提高产气量。同时辅酶F420活性和ETS活性分别较空白组提高了46.93%和105.13%。

③ CaO₂预处理联合添加导电材料ZVI是一种新颖且安全的提高含油餐厨垃圾厌氧消化效率的方法。虽然该研究目前仍处于实验室探索阶段,但由于添加剂价格低廉且用量较低,进一步增加了其工程应用的可能性。

参考文献:

- [1] JIN C, SUN S, YANG D, *et al.* Anaerobic digestion: an alternative resource treatment option for food waste in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146397.
- [2] O'CONNOR J, HOANG S A, BRADNEY L, *et al.* A review on the valorisation of food waste as a nutrient source and soil amendment [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 115985.
- [3] PHAM T P T, KAUSHIK R, PARSHETTI G K, *et al.* Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions [J]. *Waste Management*, 2015, 38: 399–408.
- [4] DEENA S R, VICKRAM A S, MANIKANDAN S, *et al.* Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques—a review [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 355: 127234.
- [5] LI X, SHIMIZU N. Effects of lipase addition, hydrothermal processing, their combination, and co-digestion with crude glycerol on food waste anaerobic digestion [J]. *Fermentation*, 2021, 7(4): 284.
- [6] PASTOR L, RUIZ L, PASCUAL A, *et al.* Co-digestion of used oils and urban landfill leachates with sewage sludge and the effect on the biogas production [J]. *Applied Energy*, 2013, 107: 438–445.
- [7] ZHANG J, ZHANG R, WANG H, *et al.* Direct interspecies electron transfer stimulated by granular activated carbon enhances anaerobic methanation efficiency from typical kitchen waste lipid-rape seed oil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135282.
- [8] FU S, CHEN K, ZOU H, *et al.* Using calcium peroxide (CaO₂) as a mediator to accelerate tetracycline removal and improve methane production during co-digestion of corn straw and chicken manure [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172: 588–594.
- [9] WANG D, HE D, LIU X, *et al.* The underlying mechanism of calcium peroxide pretreatment enhancing methane production from anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114934.
- [10] ZHU L, WU B, LIU Y, *et al.* Strategy to enhance semi-continuous anaerobic digestion of food waste by combined use of calcium peroxide and magnetite [J]. *Water Research*, 2022, 221: 118801.
- [11] YANG J, ZHANG J, ZHANG J, *et al.* Roles of calcium-containing alkali materials on dark fermentation and anaerobic digestion: a systematic review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (78): 38645–38662.
- [12] LIU Y, LI X, WU S, *et al.* Enhancing anaerobic digestion process with addition of conductive materials [J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130449.
- [13] ZHANG G, SHI Y, CHEN W, *et al.* Methane production from waste activated sludge by combining calcium peroxide pretreatment with zero valent iron bio-enhancement: performance and mechanisms [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128773.
- [14] WANG W, WANG S, ZHANG J, *et al.* Degradation kinetics of pentachlorophenol and changes in anaerobic microbial community with different dosing modes of co-substrate and zero-valent iron [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 113: 126–133.
- [15] MAILE O I, MUZENDA E, TESFAGIORGIS H. Chemical absorption of carbon dioxide in biogas purification [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 7: 639–646.
- [16] LI X, LIU Y, XU Q, *et al.* Enhanced methane production from waste activated sludge by combining calcium peroxide with ultrasonic: performance, mechanism, and implication [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 279: 108–116.
- [17] KARTHIKEYAN O, TRABLY E, MEHARIYA S, *et al.* Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2018,

- 249: 1025–1039.
- [18] CHEN L, QIN Y, CHEN B, *et al.* Enhancing degradation and biogas production during anaerobic digestion of food waste using alkali pretreatment [J]. *Environmental Research*, 2020, 188: 109743.
- [19] TIAN W, LI J, ZHU L, *et al.* Insights of enhancing methane production under high-solid anaerobic digestion of wheat straw by calcium peroxide pretreatment and zero valent iron addition [J]. *Renewable Energy*, 2021, 177: 1321–1332.
- [20] WANG Y, WANG D, FANG H. Comparison of enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge through adding nano-zero valent iron and zero valent iron [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(48): 27181–27190.
- [21] LI L, PENG X, WANG X, *et al.* Anaerobic digestion of food waste: a review focusing on process stability [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 20–28.
- [22] MENG Q, LIU H, ZHANG H, *et al.* Anaerobic digestion and recycling of kitchen waste: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, 20(3): 1745–1762.
- [23] YANG Y, YANG F, HUANG W, *et al.* Enhanced anaerobic digestion of ammonia-rich swine manure by zero-valent iron: with special focus on the enhancement effect on hydrogenotrophic methanogenesis activity [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 172–179.
- [24] LIZAMA A, FIGUEIRAS C, PEDREGUERA A, *et al.* Enhancing the performance and stability of the anaerobic digestion of sewage sludge by zero valent iron nanoparticles dosage [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 275: 352–359.
- [25] KONG X, NIU J, ZHANG W, *et al.* Mini art review for zero valent iron application in anaerobic digestion and technical bottlenecks [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148415.
- [26] 许跃, 廖欢, 张静, 等. 颗粒活性炭强化餐厨垃圾中食用油厌氧消化产甲烷 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38(11): 109–114.
- XU Yue, LIAO Huan, ZHANG Jing, *et al.* Methanogenesis of edible oil from kitchen waste enhanced by granular activated carbon [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(11): 109–114 (in Chinese).
- [27] DU M, LIU X, WANG D, *et al.* Understanding the fate and impact of capsaicin in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116539.
-
- 作者简介:程晓格(1988–),女,河南三门峡人,硕士研究生,主要研究方向为固体废弃物的资源化再利用。
- E-mail:574986334@qq.com
- 收稿日期:2022-09-14
- 修回日期:2022-11-10

(编辑:沈靖怡)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命