

引用格式:李子庆,陈锡腾,袁海荣,等. 零价铁强化水解酸化对厨余与餐厨垃圾混合厌氧消化性能的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(3):41-48.

LI ZiQing, CHEN XiTeng, YUAN HaiRong, et al. Effect of zero-valent iron enhanced hydrolytic acidification on the anaerobic digestion of kitchen waste and food waste[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2023,50(3):41-48.

零价铁强化水解酸化对厨余与餐厨垃圾混合厌氧消化性能的影响

李子庆 陈锡腾 袁海荣* 李秀金

(北京化工大学 化工资源有效利用国家重点实验室,北京 100029)

摘 要:基于厨余垃圾成分复杂而难以水解酸化的特点,提出通过投加零价铁强化厨余与餐厨垃圾水解酸化进而提高厌氧消化性能的策略。将厨余垃圾和餐厨垃圾按照不同配比混合,设置零价铁投加量为 5、10、15 和 20 g/L,考察不同投加量条件下厌氧体系的消化性能。结果表明:酸化阶段厨余垃圾质量分数 50% 的试验组水解酸化效率最高,产生的乙醇和总挥发性脂肪酸(TVFA)总量比单独厨余垃圾试验组提高了 206.78%;适量投加零价铁可以提高乙醇和 TVFA 的总产量,且投加量与油脂降解率、溶解性化学需氧量(SCOD)、乙醇和 TVFA 产量呈正相关;当投加量超过 10 g/L 后,零价铁对水解酸化的促进效果不明显。利用酸化出料进行甲烷化试验,投加零价铁组的累积产甲烷量有所增加,且产气速率提高,其中厨余垃圾占比 100%、零价铁投加量 10 g/L 试验组的累积产甲烷量为 $(2\ 664 \pm 130)$ mL,比对照组提高了 15.61%。综合以上结果,在酸化相投加零价铁能够提高混合垃圾产气效率。

关键词:厨余垃圾;餐厨垃圾;零价铁;水解酸化

中图分类号: X705 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2023.03.005

引 言

厨余垃圾为家庭在日常生活中产生的食品加工废弃物以及瓜果蔬菜运输过程中腐坏的废弃物等有机垃圾,餐厨垃圾为餐饮行业、酒店等产生的剩余饭菜及后厨的果蔬、肉食、面点等在加工过程中产生的废弃物。厨余和餐厨垃圾在环卫运输和处理过程中经常合并在一起,其有机质含量高、含水量高,且易腐烂变质^[1],如不合理处置会带来严重的环境卫生问题。2020 年我国产生的厨余和餐厨垃圾约为 12 103 ~ 14 524 万吨,约占城市生活垃圾的 51% ~ 61%^[2],大量的厨余和餐厨垃圾亟待处理。

厨余垃圾组分复杂,含有一定的纤维素、半纤维素和木质素^[3],由于其间的复杂结构,难以被微生物快速利用,因而水解酸化进程较缓慢。近年来,有学者提出通过向厌氧发酵反应器中投加导电材料来提高厌氧发酵的效率和过程稳定性,从而提升电子传递效率和产酸效率,加速挥发性脂肪酸的降解,进而提高甲烷产率^[4]。零价铁是一种能够降低系统氧化还原电位且具有较强还原能力的添加剂,可以通过促进酶的活性来提高微生物活性,在偏酸性环境中能够促进某些难生化降解化学物质的转化利用,从而提高有机物的可生化性^[5]。Feng 等^[6]在厌氧污泥消化系统中加入零价铁,发现其可以促进产乙酸,提高污泥中蛋白质的降解率和甲烷产率。Cao 等^[7]发现添加零价铁可以刺激相关微生物的生长以及代谢酶的活性,从而提高挥发性脂肪酸的浓度,进而提高餐厨垃圾厌氧发酵过程中挥发性脂肪酸的浓度。

虽然零价铁已被广泛应用于厌氧发酵领域,但在不同混合垃圾配比情况下利用零价铁提高水解酸化

收稿日期:2022-10-16

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1900903)

第一作者:女,1998 年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: yuanhaiorong75@163.com

效率以及产甲烷性能的研究目前鲜有报道。因此,本文以厨余垃圾和餐厨垃圾为原料,在不同垃圾配比的水解酸化相中投加零价铁,分析零价铁对底物的水解酸化强化作用,并通过厌氧甲烷产量情况考察零价铁对混合垃圾厌氧发酵性能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文所用的厨余垃圾来自北京化工大学食堂后厨,主要成分为菜叶、果皮、蛋壳等,餐厨垃圾来自北京化工大学食堂,主要为剩饭剩菜。两者分拣去除包装塑料袋、砂石等杂物,检出骨头、纸巾后,打成糊状并置于 4 ℃ 环境中保存待用。厌氧发酵酸化相为自然发酵未加接种物,甲烷相所用接种物来自北京市某餐厨处理厂。物料的基本性质如表 1 所示。零价铁采用直径为 0.15 mm 的还原铁粉(Macklin 公司,纯度 98%)。

表 1 物料基本性质
Table 1 The basic characteristics of the substrates and inoculum

基本性质	数值		
	厨余垃圾	餐厨垃圾	接种物
TS ^{a)} /%	13.16±0.62	27.70±1.12	13.17±0.74
VS ^{a)} /%	11.41±0.53	25.90±0.78	6.04±0.52
pH	5.33±0.01	3.71±0.01	8.28±0.01
油脂含量(TS) ^{b)} /%	2.78±1.02	27.52±1.24	—
粗蛋白含量(TS) ^{b)} /%	15.60±0.88	17.18±0.97	—
总糖含量(TS) ^{b)} /%	7.93±0.51	11.85±0.43	—
木质素含量(TS) ^{b)} /%	8.08±0.97	5.99±0.63	—
纤维素含量(TS) ^{b)} /%	22.12±0.15	9.50±0.41	—
半纤维素含量(TS) ^{b)} /%	16.38±0.34	22.94±0.53	—

表中数据均为 3 次测量后的平均值;TS—总固体含量;VS—挥发性固体含量;a—以鲜重计;b—以干重计。

1.2 试验方法

为研究零价铁对不同配比混合垃圾厌氧发酵的影响,将零价铁投加量和原料配比作为试验因子,乙醇和挥发性脂肪酸产量作为响应值,进行全因子分析试验,明确在水解酸化阶段零价铁用量的最优值。零价铁投加量设定为 0、5、10、15 和 20 g/L 共 5 个水平。通过厨余垃圾和餐厨垃圾的不同配比对混合垃圾进行调控,以厨余垃圾的质量分数为试验参数设计值,配比设置为 0、25%、50%、75% 和 100% 共 5 个水平(以厨余垃圾在总发酵底物中的总固体含量占比计),厨余垃圾占比 50%、零价铁投加 10 g/L 的

试验组记为 50% KW + 10 g/L Fe⁰。

水解酸化相试验选用 1 L 批式厌氧反应器,有效工作体积 700 mL,系统含固率为 20%。将厨余垃圾和餐厨垃圾混合,充分搅拌均匀,过程中保持厌氧状态,放入 35 ℃ 水浴反应器中持续运行 5 d,每隔 24 h 充分振荡搅拌一次。在试验初始时刻和发酵结束时测定体系酸化出料的总固体含量(TS)、挥发性固体含量(VS)、溶解性化学需氧量(SCOD)和油脂含量,每日定时测定反应气体的 pH 值、乙醇和挥发性脂肪酸(VFAs)浓度。

通过统计学分析明确最优的水解酸化试验组,利用酸化出料进行甲烷化试验。采用 500 mL 的批式厌氧反应器(有效工作体积为 400 mL),厌氧甲烷化启动阶段加入接种物,接种比(以 TS 计)为 3:1。每天测定气体组分,并通过排水法测定产气量,每个条件的所有试验均设置 3 个平行组,试验结果为三平行平均值。

1.3 分析方法

总固体含量、挥发性固体含量的测定参考国际标准方法^[8]。pH 值使用 FiveEasy Plus FE28 型 pH 计(梅特勒-托利多公司)测量,油脂含量通过索氏提取法(GB 5009.6—2016)测定,SCOD 采用快速消解分光光度法(HJ/T 399—2007)测定,粗蛋白含量采用燃烧法(GB 5009.5—2016)测定,总糖含量采用差值法计算,纤维素、半纤维素、木质素含量由 ANKOM A2000 全自动纤维仪(海能未来技术公司)测定。厌氧发酵沼气组分(甲烷、二氧化碳和氢气)采用气相色谱仪(GC-2014,日本岛津)检测。乙醇和挥发性脂肪酸含量采用 GC-2014 气相色谱仪分析,使用氢火焰离子化检测器和 HP-FFAP 毛细色谱柱,以高纯氮气为载气,进样口温度和检测器温度分别为 220 ℃ 和 250 ℃,色谱柱升温程序如下:初始温度 60 ℃,保留时间 2 min,随后以 20 ℃ 为初始温度升温至 220 ℃,保留时间 10 min。

全因子试验设计和数据分析采用 Minitab 20 软件,各试验组乙酸占总挥发性脂肪酸(TVFA)质量分数的 95% 以上,因此软件响应值仅设置为乙醇和 TVFA 浓度。利用 Canoco 5 进行相关性分析,采用 OriginPro 2022 进行图像绘制。

2 结果与讨论

2.1 原料配比对水解酸化性能的影响

利用 Minitab 20 对厌氧发酵 5 d 后乙醇和 TVFA

的产量进行方差分析,乙醇的多元相关系数 $R^2 = 92.71\%$,修正的多元相关系数 $R^2_{\text{adj}} = 89.07\%$ 。TVFA 的 R^2 和 R^2_{adj} 分别为 90.50% 和 87.76% 。统计分析结果表明, R^2 均高于 90% , P 值小于 0.05 ,由此可知对于乙醇和 TVFA 的产量来说零价铁投加量和原料配比均为显著因子。

在水解酸化过程中,复杂有机物先转化成中间小分子产物进而代谢成乙酸,部分短链脂肪酸产氢产乙酸过程的转化速率顺序为乙醇>乳酸>丁酸>丙酸^[9],因而乙酸和乙醇是理想的发酵产物。利用

全因子设计试验可以确定零价铁投加量、原料配比与响应值的等值关系(图 1),可以看出厨余垃圾占比越低、零价铁投加量越高,发酵体系的乙醇产量越高,而厨余垃圾占比越高、零价铁投加量越高时,发酵体系的 TVFA 产量越高。综合等值关系图,最佳的厨余占比和零价铁投加用量分别为 $40\% \sim 60\%$ 和 $7.5 \sim 12.5 \text{ g/L}$ 。图 2(a) 为发酵 5 d 后不同原料配比组的乙醇和 TVFA 产量,可以看出当厨余垃圾占比在 50% 以下时,乙醇和 TVFA 产量随着厨余垃圾占比提高而增加,厨余垃圾占比 50% 组的乙醇和

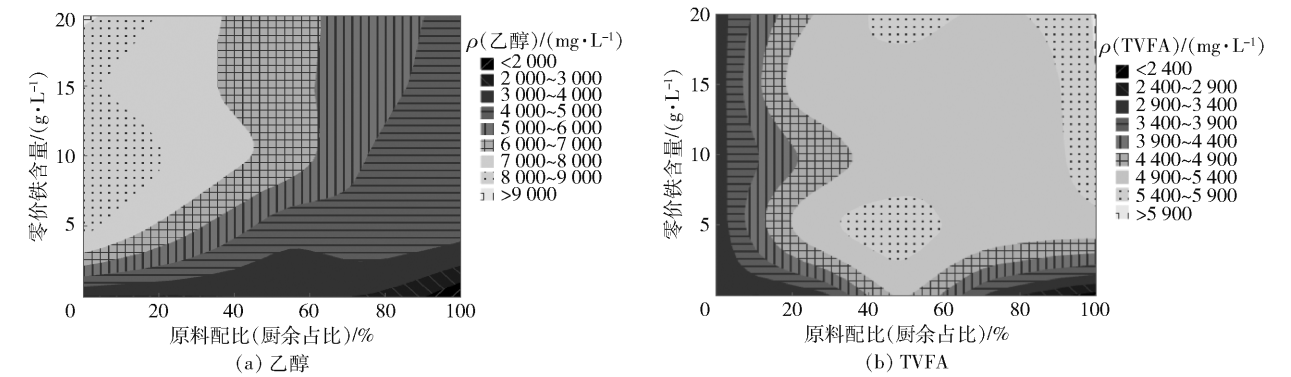


图 1 零价铁投加量和原料配比与响应值的等值线图

Fig. 1 Contour maps of zero-valent iron dosage and raw material ratio and response values

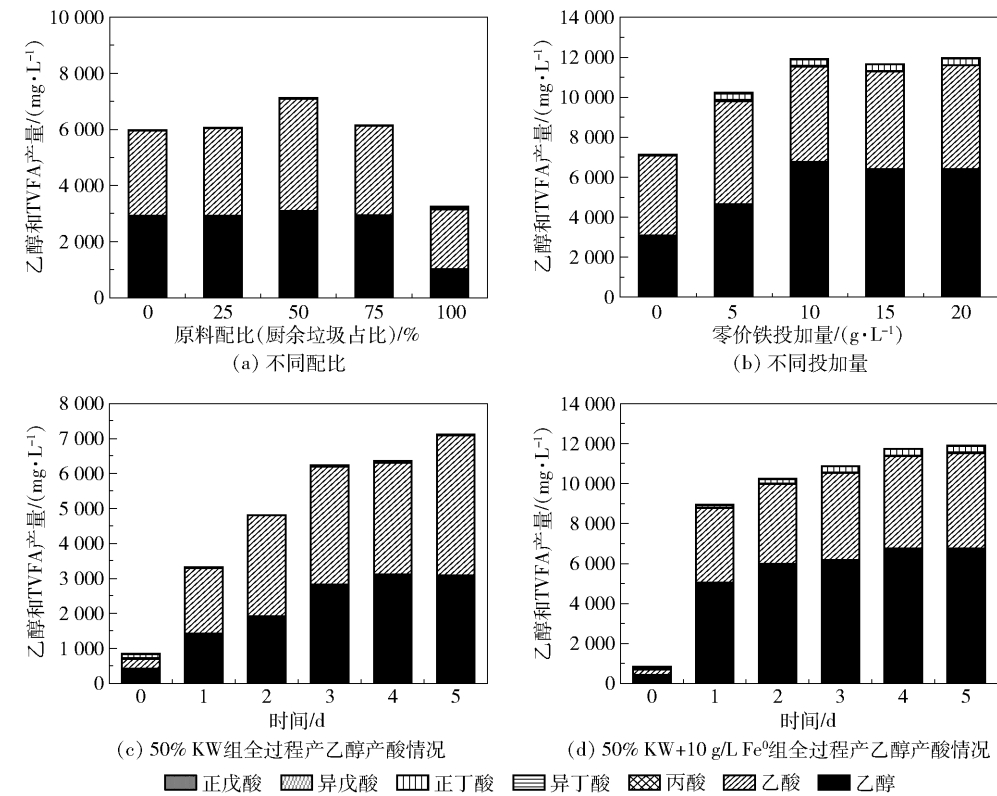


图 2 不同因素对乙醇和 TVFA 产量的影响

Fig. 2 Effects of different factors on the total production of ethanol and TVFAs

TVFA 产量可达 $(7\,119.4 \pm 60)$ mg/L, 与单独厨余垃圾组和单独餐厨垃圾组相比分别提高了 206.78% 和 13.98%。而当厨余垃圾占比超过 50% 后, 系统水解酸化能力下降, 厨余垃圾占比 100% 组的乙醇和 TVFA 产量仅为 $(3\,246.2 \pm 100)$ mg/L, 这主要是因为厨余垃圾中纤维类有机质含量过高^[10], 其水解速率远低于淀粉、蛋白质等有机物, 且在含固率 20% 的发酵体系中物料均质效果较差, 一定程度上也影响了体系的水解酸化进程。

2.2 零价铁对水解酸化性能的影响

乙醇和乙酸是厨余垃圾和餐厨垃圾的主要水解酸化产物, 乙酸在 TVFA 中占比 95% 以上(图 2), 这是因为厨余垃圾和餐厨垃圾的物料初始 pH 值为 4.5 ~ 5.5, 在这个 pH 范围下, 发酵酸化体系以乙醇型发酵和乙酸型发酵为主^[9]。由 2.1 节可知, 在原料配比 40% ~ 60% 和零价铁投加量 7.5 ~ 12.5 g/L 的范围下可以同时获得最高的乙醇和乙酸产量, 因此在厨余垃圾占比 50% 情况下分析零价铁投加量的影响。如图 2(b) 所示, 与空白对照组相比, 投加零价铁能够促进系统产酸, 且投加量为 10 g/L 时产酸情况最佳, 5 d 发酵后乙醇产量为 $(6\,759.1 \pm 100)$ mg/L, 乙酸产量为 $(4\,762.7 \pm 104)$ mg/L, TVFA 和乙醇产量为 $(11\,917.4 \pm 130)$ mg/L。这是由于在厌氧发酵体系中, 零价铁能够与氧化物质发生反应, 从而降低系统的氧化还原电位(ORP), 提供有利于厌氧微生物的生存环境^[11]。此外铁作为微生物生长过程中所需的微量元素, 能够增强水解酸化以及产甲烷过程中相关微生物的酶活性^[12]。但如果零价铁投加过多系统内微生物将无法完全利用, 可能导致发生高渗和盐析作用, 从而对微生物产生毒

害^[13]。因而零价铁投加量超过 10 g/L 后, 乙醇和 TVFA 累积总量的提高效果并不显著。虽然在等值线图 1(b) 中, 投加高浓度的零价铁可以促进产 TVFA, 但由于零价铁在反应体系中会因为被底物包裹或者发生钝化而不再发挥效力, 并不能全部发挥作用^[14], 因此 10 g/L 为最优的零价铁投加比例。

50% KW + 10 g/L Fe^0 空白对照试验组和试验组发酵全过程产乙醇产酸情况如图 2(c)、(d) 所示。可以看出对照组中乙酸和乙醇的浓度是逐日升高的, 而投加零价铁 1 d 后, 试验组中的乙醇和乙酸产量迅速提高, 相对于原始底物分别提高了 706.10% 和 682.22%, 而对照组在发酵 1 d 后相应仅增加了 171.23% 和 292.68%。零价铁对系统产乙醇的促进作用显著, 5 d 发酵后对照组乙醇产量为 $(3\,096.1 \pm 90)$ mg/L, 相比之下零价铁投加组乙醇产量提高了 118.32%。Jing 等^[15]在关于促进餐厨垃圾厌氧消化的研究中, 发现零价铁能够明显提升乙酸乙醇产量。投加零价铁后体系中的拟杆菌门等水解酸化菌群丰度增加^[7], 有助于将大分子有机物转化为 TVFA。零价铁投加组在酸化相运行后期产酸产乙醇趋势放缓, 说明投加零价铁不仅可以提高乙醇和 TVFA 产量, 也提高了水解酸化速率, 加快了水解酸化进程^[16]。

如图 3(a)、(b) 所示, 在不同原料配比情况下, 随着零价铁的投加, TS 去除率有明显的提高, 而除 100% KW 组外 VS 去除率并无明显提高, 可见零价铁的添加与 VS 去除率无明显相关性。投加零价铁可以促进油脂降解(图 3(c)), 因为餐厨垃圾中含有较多的油脂, 所以高餐厨垃圾占比的试验组油脂降解率较高。根据试验效果, 并不是零价铁的用量

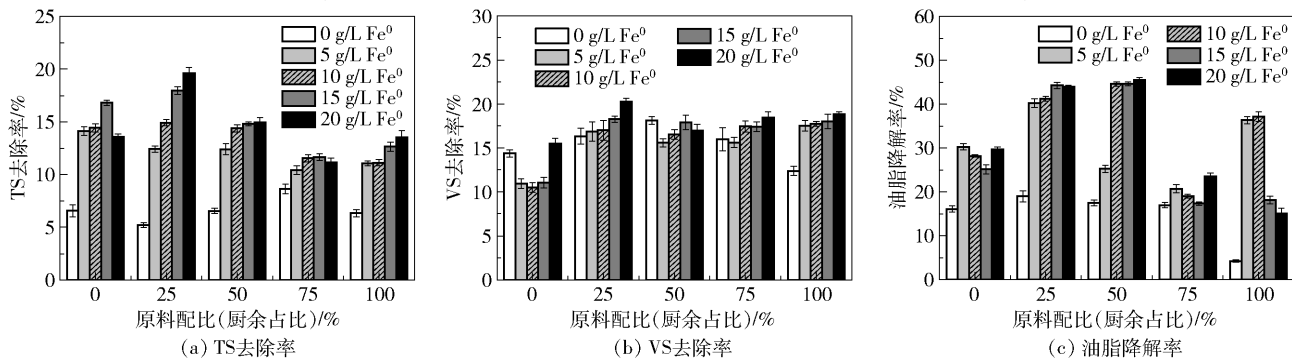


图 3 TS/VS 去除率和油脂降解率

Fig. 3 TS/VS reduction rate and oil degradation rate

越大油脂降解率越好,在厨余垃圾占比 50% 的试验组中,当零价铁投加量为 10 g/L 时,油脂降解率为 44.18%,但投加量提高至 15 g/L 后,降解率为 44.23%,仅提高了 0.05%,由此可见零价铁投加量超过 10 g/L 后,油脂降解率并不能随着零价铁用量的增加而显著提高。适当添加餐厨垃圾能够提高厌氧体系中的沼气产量,但餐厨垃圾中含有大量油脂,油脂含量过高时系统微生物及大颗粒有机物会被包裹,从而阻断了物质传质进程^[17],通过投加零价铁可以明显改善这一情况。

SCOD 浓度反映了发酵体系中有机的水解酸化情况^[18]。经过 5d 酸化发酵,投加不同量零价铁试验组的 SCOD 浓度均有不同程度的提高(表 2)。相比 50% KW 组,50% KW + 10 g/L Fe⁰ 组第 5 天 SCOD 浓度可以提高 76.5%,表明通过投加零价铁可以明显提高 SCOD 浓度,促进水解酸化的进行。除了零价铁投加量,混合垃圾的组分配比也影响着水解酸化的进行。对比不同配比试验组的 SCOD 浓度,100% KW + 20 g/L Fe⁰ 组在第 5 天的 SCOD 浓度仅为(31.70 ± 1.13)g/L,而 50% KW 组在相同零价铁投加量情况下 SCOD 浓度可以达到(57.45 ± 1.61)g/L,这主要是因为厨余垃圾中含量较高的粗纤维相较于淀粉等有机质难以被快速水解^[10],影响了体系的水解酸化进程。

表 2 SCOD 浓度			
Table 2 The concentration of SCOD			
厨余垃圾 占比/%	零价铁投加量/ (g·L ⁻¹)	SCOD 浓度/(g·L ⁻¹)	
		0 d	5 d
0	0	19.34 ± 1.77	47.37 ± 2.07
	5	19.45 ± 1.30	62.95 ± 1.20
	10	19.70 ± 1.30	64.45 ± 2.30
	15	19.95 ± 1.81	65.45 ± 2.11
	20	19.70 ± 1.81	65.70 ± 1.00
50	0	17.59 ± 2.19	31.13 ± 1.47
	5	17.81 ± 1.31	53.95 ± 0.71
	10	17.01 ± 2.27	54.95 ± 1.55
	15	17.11 ± 1.32	56.45 ± 1.14
	20	17.00 ± 1.39	57.45 ± 1.61
100	0	15.84 ± 2.25	25.14 ± 1.31
	5	16.09 ± 1.71	27.45 ± 0.84
	10	15.59 ± 1.39	27.95 ± 1.20
	15	16.09 ± 2.22	29.45 ± 0.72
	20	15.84 ± 1.41	31.70 ± 1.13

2.3 相关性分析

对初始环境参数(标红)和反应过程参数(标蓝)进行冗余分析(RDA),结果如图 4 所示。RDA1 和 RDA2 分别为第一、二排序轴相关系数,轴线刻度代表环境因子与排序轴间的正负相关性,其中箭头连线向量和排序轴的夹角余弦值表示相关性系数,向量与原点的连线长度与因子的重要性成正比。RDA 轴 1 和轴 2 能共同解释所有变量的 72.07%,模拟效果较好。从图 4 可以看出,乙酸与 TVFA 的向量线相近,说明两者之间的关联结果相似,在试验组中乙酸占 TVFA 质量分数的 95% 以上,因此在因子分析中可以用 TVFA 替代乙酸。

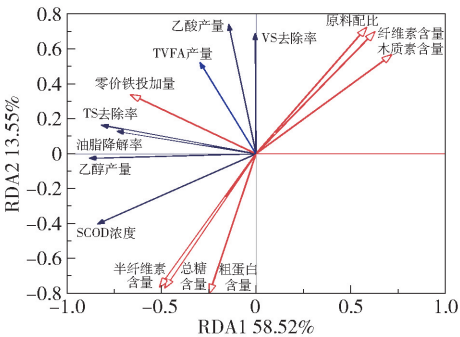


图 4 RDA 相关性分析
Fig.4 RDA correlation analysis

零价铁投加量与乙醇、乙酸、TVFA 产量,TS 去除率,油脂降解率和 SCOD 浓度均为正相关,原料配比(厨余垃圾占比)与 TS 去除率、乙醇产量、油脂降解率和 SCOD 浓度呈负相关。量化原料配比中的底物性质,在图 4 中可以发现纤维素、木质素含量与原料配比的向量线相近,而半纤维素、总糖、油脂和粗蛋白含量与原料配比向量线方向相反。半纤维素、总糖和粗蛋白等组分含量与 SCOD 浓度呈正相关,与纤维素和木质素含量则呈负相关,说明底物性质的差异是不同发酵系统水解酸化相过程存在差异的根本原因,厨余垃圾占比高、纤维素和木质素等难降解的组分含量高会阻碍水解酸化的进行。零价铁投加量向量连线长度小于原料配比,表明原料配比对厌氧水解酸化体系的影响更大。

2.4 投加零价铁条件下混合垃圾的甲烷化性能

将水解酸化相出料进行产甲烷发酵,零价铁投加量采用最优投加量 10 g/L,在此用量水平上研究零价铁对不同原料配比试验组产甲烷的影响。各试验组在甲烷化阶段的日产沼气和累积产甲烷量如

图 5 所示,可以看出各试验组的沼气产量趋势大致相同(图 5(a)):在整个厌氧发酵产气过程中出现了两个产气高峰,各组在发酵第 2 天到达第一个产气高峰,其中 0% KW + 10 g/L Fe^0 组的产沼气量最高,可达 (370 ± 20) mL,这与水解酸化时期的产酸规律相对应。50% KW + 10 g/L Fe^0 组在第 8 天达到第二个产气高峰,为 (304 ± 10) mL,比对照组提高了 27.72%。在投加量相同的情况下,对比各组的累积产甲烷量(图 5(b)),能够看出 0% KW 组产气效果最好,且随着混合底物中厨余垃圾占比的提高,产气效果下降,这主要因为厨余垃圾的水解酸化效果不佳。投加零价铁组普遍比对照组的累积产甲烷量高,100% KW + 10 g/L Fe^0 组累积产甲烷量为 $(2\,664 \pm 130)$ mL,相比对照组提高了 15.61%,这与 Zheng 等^[19]在猪粪厌氧发酵试验中投入零价铁后甲烷产率的提升效果相近,可能与零价铁能够富集氢营养型微生物、促进种间氢转移有关。厌氧发酵 15 d 后各组沼气日产量逐渐减少,100% KW + 10 g/L Fe^0 组最先结束产气。0% KW、50% KW 以及 100% KW

的各投加零价铁试验组比各自对照组的发酵周期分别提前 3、2 和 2 d,这与 Zhang 等^[20]的研究结果一致。

3 结论

(1) 混合垃圾水解酸化体系中餐厨垃圾占比越高,体系乙醇产量越高,而厨余垃圾占比越高,酸化相中的 TVFA 浓度越高。适当提高混合垃圾中的餐厨垃圾配比,可以加速体系的水解酸化。厨余垃圾和餐厨垃圾各占比 50% 试验组的水解酸化效率最高,乙醇和 TVFA 合计总产量与单独厨余垃圾和单独餐厨垃圾相比分别提高了 206.78% 和 13.98%。

(2) 在混合垃圾发酵体系中投加零价铁可以强化水解酸化,进而促进乙醇和 TVFA 的产量提高。零价铁投加量越高促进作用越明显,但投加量超过 10 g/L 后,提升效果有限。零价铁投加量与油脂降解率、SCOD 浓度和乙醇产量呈正相关,而原料配比(厨余垃圾占比)则与之呈负相关。有利于 TVFA 和乙醇总产量提高的最佳厨余垃圾占比和零价铁投加范围为 40% ~ 60% 和 7.5 ~ 12.5 g/L。

(3) 对水解酸化相出料进行厌氧产气,投加零价铁试验组的甲烷产量均高于未加零价铁的对照组,其中厨余垃圾占比 100% 试验组产气提高效果最明显,累积产甲烷量为 $(2\,664 \pm 130)$ mL,比对照组提高了 15.61%。各投加零价铁试验组的厌氧发酵产气周期均缩短,产气效率升高。

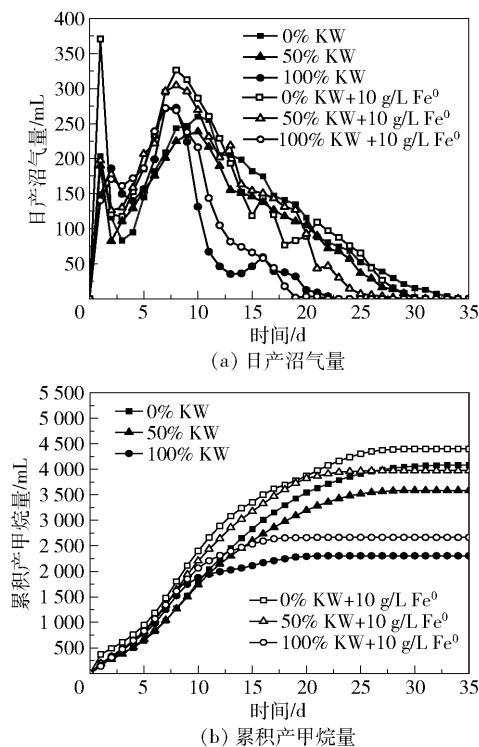


图 5 添加零价铁前后各组别的日产沼气和累积产甲烷量

Fig. 5 Daily biogas production and cumulative methane yield in each group before and after the addition of zero-valent iron

参考文献:

- [1] 时睿佳,宋啸博,王御霏,等. 国内外厨余垃圾现状及资源化处理方法[J]. 现代盐化工,2020,47(4):68-69.
- [2] SHI R J, SONG X B, WANG Y F, et al. Present situation and recycling disposal methods of domestic and foreign kitchen waste[J]. Jiangsu Salt Science & Technology, 2020, 47(4): 68-69. (in Chinese)
- [3] 国家统计局. 2020 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020.
- [4] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. (in Chinese)
- [5] 江志坚. 果蔬与餐厨垃圾混合两相厌氧消化性能的试验研究[D]. 北京:北京化工大学,2013.
- [6] JIANG Z J. Performance of two-phase anaerobic codiges-

- tion of fruit and vegetable waste and kitchen waste[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] CHENG J, HUA J J, KANG T, et al. Nanoscale zero-valent iron improved lactic acid degradation to produce methane through anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 317: 124013.
- [5] ZHU Y H, ZHAO Z Q, YANG Y F, et al. Dual roles of zero-valent iron in dry anaerobic digestion: enhancing interspecies hydrogen transfer and direct interspecies electron transfer[J]. *Waste Management*, 2020, 118: 481 – 490.
- [6] FENG Y H, ZHANG Y B, QUAN X, et al. Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron[J]. *Water Research*, 2014, 52: 242 – 250.
- [7] CAO J S, ZHANG Q, WU S, et al. Enhancing the anaerobic bioconversion of complex organics in foodwastes for volatile fatty acids production by zero-valent iron and persulfate stimulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 540 – 546.
- [8] American Public Health Association/American Water-Works Association/Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 22nd ed. Washington, D. C.: American Water Works Association, 2012.
- [9] YU M, WU C F, WANG Q H, et al. Ethanol prefermentation of food waste in sequencing batch methane fermentation for improved buffering capacity and microbial community analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 187 – 193.
- [10] 张笑,蔡玮玮,王利红,等. 固含率对酒糟与餐厨垃圾混合厌氧发酵产沼气的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 1078 – 1084.
- ZHANG X, CAI W W, WANG L H, et al. Influence of total solid contents on anaerobic co-digestion from distiller's grains and food waste for methane production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1078 – 1084. (in Chinese)
- [11] 朱文彬,高明,阴紫荷,等. 有机废物厌氧发酵生物合成己酸研究进展[J]. *环境工程*, 2020, 38(1): 128 – 134.
- ZHU W B, GAO M, YIN Z H, et al. Research progress on caproic acid production from organic waste by anaerobic fermentation[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(1): 128 – 134. (in Chinese)
- [12] YUAN T G, BIAN S W, KO J H, et al. Exploring the roles of zero-valent iron in two-stage food waste anaerobic digestion[J]. *Waste Management*, 2020, 107: 91 – 100.
- [13] 郭昌梓,强雅洁,武毅,等. 零价铁对厌氧发酵产酸特性的影响[J]. *陕西科技大学学报*, 2019, 37(5): 33 – 39.
- GUO C Z, QIANG Y J, WU Y, et al. Effect of Fe^0 on acid production characteristics of anaerobic fermentation[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2019, 37(5): 33 – 39. (in Chinese)
- [14] WANG P, CHEN X T, LIANG X F, et al. Effects of nanoscale zero-valent iron on the performance and the fate of antibiotic resistance genes during thermophilic and mesophilic anaerobic digestion of food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122092.
- [15] JING H Y, CUI Y, YE M Y, et al. Effect of zero-valent iron on acidification and methane production using food waste under different food-to-microorganism ratios[J]. *Renewable Energy*, 2022, 198: 131 – 143.
- [16] ZHANG Q, CAO J S, WU Y, et al. Shifts of microbial community and metabolic function during food wastes and waste activated sludge co-fermentation in semicontinuous-flow reactors: effects of fermentation substrate and zero-valent iron[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 313: 123686.
- [17] 万红,黄高杰,刘虎成. 油脂对污泥和餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(5): 95 – 98.
- WAN H, HUANG G J, LIU H C. Effects of lipid on anaerobic digestion of sludge and food waste[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44(5): 95 – 98. (in Chinese)
- [18] WU D L, ZHENG S S, DING A Q, et al. Performance of a zero valent iron-based anaerobic system in swine wastewater treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 1 – 6.
- [19] ZHENG S C, YANG F, HUANG W L, et al. Combined effect of zero valent iron and magnetite on semi-dry anaerobic digestion of swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126438.
- [20] ZHANG S, REN Y Y, MA X X, et al. Effect of zero-valent iron addition on the biogas fermentation of food waste after anaerobic preservation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 106013.

Effect of zero-valent iron enhanced hydrolytic acidification on the anaerobic digestion of kitchen waste and food waste

LI ZiQing CHEN XiTeng YUAN HaiRong* LI XiuJin

(State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The effect of adding zero-valent iron on the hydrolytic acidification of kitchen waste (KW) and food waste (FW) during anaerobic digestion (AD) has been investigated. KW and FW were used as AD substrates in different proportions. The dosages of zero-valent iron were set at 5, 10, 15 or 20 g/L in order to investigate the digestibility of anaerobic systems with different dosages. The results showed that the highest hydrolysis acidification efficiency was obtained with 50% KW group, and the ethanol and TVFA concentrations increased by 207% compared with the single KW. Appropriate dosages of zero-valent iron can improve the total production of ethanol and TVFAs, and the dosage of zero-valent iron was positively correlated with the oil degradation rate, SCOD, production of ethanol and TVFA. However, when the dose exceeded 10 g/L, the improvement observed by adding further zero-valent iron was not significant in the case of hydrolysis and acidification. Methanation experiments at varying acidification contents showed that the cumulative methane yield (CMY) of added zero-valent iron increased and the AD speed rate accelerated. The CMY of KW with 10 g/L of zero-valent iron was $(2\,664 \pm 130)$ mL, which is 15.61% higher than that of the control group. These results confirm that adding zero-valent iron during the acidification phase can improve the AD efficiency of KW and FW.

Key words: kitchen waste; food waste; zero-valent iron; hydrolytic acidification

(责任编辑:吴万玲)