



白宏宇, 卢静洁, 杨培志, 胡跃高, 王小芬. 农用酵素处理餐厨垃圾酸化效果及代谢产物变化特征[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(06): 153-163.
BAI Hongyu, LU Jingjie, YANG Peizhi, HU Yuegao, WANG Xiaofen. Acidification effect and metabolic product changes of agricultural Jiaosu in the treatment of kitchen waste[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 153-163.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.16

农用酵素处理餐厨垃圾酸化效果及代谢产物变化特征

白宏宇¹ 卢静洁² 杨培志¹ 胡跃高^{2*} 王小芬²

(1. 西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

摘要 为探究农用酵素对餐厨垃圾快速产酸发酵的影响, 设置5个处理分别为添加0(JT₀)、1(JT₁)、3(JT₃)、7(JT₇)、10 g/L(JT₁₀)的农用酵素进行餐厨垃圾发酵, 测定各处理发酵过程中pH、有机酸、干物质、粗蛋白、粗脂肪灰分的动态变化。结果表明: 1) 发酵第1天5个处理的pH均显著下降, 第7天后基本处于稳定。在发酵酸化过程前3 d有乳酸、乙酸、丙酸产生, 且乳酸含量显著高于乙酸、丙酸。其中JT₃最终乳酸含量最高, 为50.65 mg/L。乳酸的产生会造成pH的迅速下降。各个处理均在发酵3 d时产生大量的乳酸, 7 d后产酸基本结束, pH也趋于稳定。餐厨垃圾主要产酸时期为前3 d, 并于第7天趋于平缓。2) 在发酵第7天时, JT₃的干物质含量为21.77 g/100 g, 比发酵前降低11.13%, 比其他同时期处理下降最多。从整体趋势上来看, 各处理均在发酵第7天时, 粗蛋白含量达到最大。JT₃在发酵第7天时粗蛋白含量最高, 为19.90 g/100 g。各处理在发酵后粗脂肪含量都有所下降, 除JT₁₀中粗脂肪含量与原料无显著差异, 其余各处理均显著下降($P < 0.05$), 其中, JT₃粗脂肪含量最高为17.54 g/100 g。结合pH、有机酸及各项代谢产物来看, JT₃的发酵效果相对较好。综上, 农用酵素添加量为3 g/L, 发酵时间为4~7 d, 餐厨垃圾发酵酸化效果最佳, 是低成本快速处理餐厨垃圾的有效方法。

关键词 餐厨垃圾; 农用酵素; 餐厨垃圾酸化

中图分类号 X799.3

文章编号 1007-4333(2024)06-0153-11

文献标志码 A

Acidification effect and metabolic product changes of agricultural Jiaosu in the treatment of kitchen waste

BAI Hongyu¹, LU Jingjie², YANG Peizhi¹, HU Yuegao^{2*}, WANG Xiaofen²

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to explore the effect of agricultural Jiaosu on rapid acid production and fermentation of kitchen waste, five treatments were set up by respectively adding 0(JT₀), 1(JT₁), 3(JT₃), 7(JT₇) and 10 g/L(JT₁₀) to kitchen waste for fermentation. The dynamic change of pH, organic acid, dry matter, crude protein and crude fat ash in the fermentation process were determined. The results showed that: 1) The pH of the five treatments decreased significantly on the first day of fermentation and was basically stable after the 7th day. Lactic acid, acetic acid and propionic acid were produced 3 d before fermentation acidification, and the content of lactic acid was significantly higher than that of acetic acid and propionic acid. Among them, the final lactic acid content of 50.65 mg/L under JT₃ treatment was the highest. The production of lactic acid caused the rapid decline of pH. A large amount of lactic acid was produced in

收稿日期: 2023-12-03

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901103)

第一作者: 白宏宇(ORCID:0009-0000-2956-8861), 硕士研究生, E-mail: 2696450617@qq.com

通讯作者: 胡跃高(ORCID:0009-0001-7488-2064), 教授, 主要从事全域有机农业建设研究, E-mail: huyuegao@cau.edu.cn

each treatment after 3 d of fermentation, and the acid production basically ended after 7 d, and pH also tended to be stable. The main acid production period of kitchen waste was in the first 3 d and tended to level off on the 7th day. 2) On the 7th day of fermentation, the dry matter content of JT₃ treatment was 21.77 g/100 g, which was 11.13% lower than that of before fermentation, and the highest decrease compared with other treatments in the same period. Overall, the crude protein content of each treatment reached the maximum on the 7th day of fermentation. On the 7th day of fermentation, the crude protein content of 19.90 g/100 g under JT₃ treatment was the highest. After fermentation, the crude fat content of all treatments decreased significantly ($P < 0.05$), and there was no significant difference between the crude fat content of JT₁₀ and raw materials, among them, the highest crude fat content of JT₃ was 17.54 g/100 g. Combined with pH, organic acids and various metabolites, the fermentation effect of JT₃ treatment was relatively good. In summary, when the addition amount of agricultural Jiaosu is 3 g/L and the fermentation time is 4-7 d, the acidizing effect of kitchen waste fermentation is the best, which can be used as an effective way for low-cost and rapid treatment of kitchen waste.

Keywords kitchen waste; agricultural Jiaosu; acidification of kitchen waste

随着社会快速发展,我国国民生活质量也随之提高,产生了更多的生活垃圾^[1],其中餐厨垃圾就占有很大一部分比例,餐厨垃圾已成为城市生活垃圾的重要组成部分^[2]。据2023年《中国统计年鉴》^[3]统计我国每年餐厨垃圾约为1.32亿~1.47亿t。餐厨垃圾是指居民日常生活厨余垃圾加上食品加工、餐饮服务、消费服务过程中形成的剩余物,如边角料、洗摘的果皮瓜屑、残羹剩饭、废弃食用油脂等物料的混合物^[2,4]。餐厨垃圾具有有机质含量高,各种大量、微量矿质元素齐全,盐分含量高,油脂含量高等特点,可通过微生物转化回收其中的能源物质^[5]。但其易携带病原微生物,易腐烂变质滋生蚊虫,存在运输不便,短时间内会腐败变质,臭味大等问题,如果处理不当,将会导致病原体滋生、恶臭和渗滤液的产生,从而造成严重的环境问题和潜在的健康危害^[6]。因此,低成本快速处理餐厨垃圾酸化产酸的研究对餐厨垃圾资源化利用以及减少环境污染等方面具有重要的意义。

目前,餐厨垃圾处理方法分两类:常规和资源化处理方法^[7]。常规处理方法为机械破碎、卫生填埋、焚烧发电等,现阶段在餐厨废弃物资源化的研究中,主要以厌氧消化、好氧堆肥等技术为主^[8-10]。但是以上方法各有利弊,如,填埋会造成渗滤液污染地下水^[11]、焚烧成本高且会造成大气污染^[11]、好氧堆肥存在资源化利用效率低,且高油高盐导致产品质量低,处理成本高,难以产业化^[12-14]。目前国内餐厨垃圾处理的主流技术是厌氧消化技术^[15],其机理分为3个阶段:水解、产酸、产甲烷。在水解阶段,可溶性的复杂大分子有机物可被水解转化为能被

微生物所利用的小分子有机物;在产酸阶段,小分子有机物在产酸菌的作用下,转化为长链脂肪酸、糖类、氨基酸等物质,形成以短链挥发性有机酸(乳酸、乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、己酸等)为主的发酵产物^[16];在产甲烷阶段,这些短链脂肪酸被产甲烷菌利用合成生产出甲烷^[17]。主流餐厨垃圾厌氧消化技术最终的目的产物是沼气,其主要成分为甲烷^[18]。餐厨垃圾本身具有成分复杂、易酸化等特性,在厌氧消化过程中水解和酸化几乎是紧密结合同时进行且较易控制的进程。通过将厌氧消化控制在酸化阶段,从而将有机废物转化为高值产物,如挥发性脂肪酸、乳酸、乙醇等,具有广泛的应用前景^[19]。已有研究表明餐厨垃圾制酸是基于厌氧消化四阶段原理来获得挥发性脂肪酸及乳酸的过程,将沼液加入餐厨垃圾,可促进餐厨废弃物中乳酸的产生,从而提高乳酸含量^[20]。

农用酵素是指以有机废弃物为主要原材料,通过微生物厌氧发酵而制成的含有特定生物活性的酵素产品,其除了具有酶特性外,还具有低pH,并富含有益微生物、有机酸和其他代谢物的特性^[21]。农用酵素是一种生态产物,具有改良土壤、促进作物生长及防虫抑菌等作用^[22],可作为提升土壤微生物活性和土壤有机质的重要产品,能够在建立良好的土壤微生态环境及促进植物生长方面起到重要的生态综合效应^[22]。农用酵素在沼液处理方面也具有相当不错的效果,可以缩短沼液储存时间、中和沼液pH、招募有益微生物、降低氨毒性,同时也可以改变微生物群落演替方向,巩固优势微生物地位^[23]。农用酵素技术是富集本地有益微生物处理

当地有机废弃物的一项简单易行的方法,具有成本低、设备简易和操作方便等优势^[24]。使用农用酵素作为发酵菌剂进行餐厨垃圾厌氧产酸的发酵过程,其实质也是酵素处理沼液发酵的应用手段。与常规厌氧消化处理餐厨垃圾工艺的高成本、大体积相比,使用农用酵素处理餐厨垃圾无疑是一种经济节能的处理方法^[25]。目前,农用酵素处理餐厨垃圾产酸方面的研究鲜见报道。本研究以农用酵为添加物,设置不同浓度进行餐厨垃圾发酵,测定发酵液中pH、有机酸、发酵产物等指标,分析有机酸含量与pH的关系及不同农用酵素添加量对有机酸产生速率的影响,旨在探索农用酵素在处理餐厨垃圾促进酸化中的作用及对餐厨垃圾发酵转化的效果,以期餐厨垃圾低成本快速产酸发酵工艺提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所用餐厨垃圾来自于中国农业大学西校区和园餐厅一楼,此餐厅大多菜品为炒菜,主食为米饭,其余有一些面食类以及麻辣烫,餐厨废弃物成分复杂。试验所用农用酵素由本实验室所提供,由废弃果蔬为原料制作而成的酸性发酵液,富含乳酸菌等有益微生物。

1.2 试验设计

1.2.1 餐厨垃圾收集和预处理

本试验用50 L的发酵桶进行材料的运输,收集餐厨垃圾时采用无差别收集,无论是固体还是液体,均收集在一起,所收集到的全部餐厨垃圾中,无塑料、木头、纸张、洗涤剂杂质。将坚硬的大块儿骨头剔除后,利用破壁机进行粉碎,完全粉碎至糊状后进行装罐等后续试验。餐厨垃圾发酵初始状态的含水量为75.12 g/100 g,总酸含量0.56 mg/L, pH 5.92,粗蛋白15.25 g/100 g,粗脂肪为18.96 g/100 g;农用酵素添加量设置分别为0(JT₀)、1(JT₁)、3(JT₃)、7(JT₇)和10 g/L(JT₁₀),农用酵素制作方法中酵素菌剂最少添加量为1 g/L,故以此为最少添加量向上设置4个浓度梯度处理,发酵时间均为10 d。

1.2.2 发酵条件

所发酵的餐厨垃圾均装在1 L的小型玻璃发酵罐中进行厌氧发酵,发酵罐放置于控温室中,控温室的温度在32~35℃。

1.2.3 取样

发酵前取未发酵的餐厨垃圾样品(CK,下同),发酵开始后每天固定时间进行取样,每组样品取3次重复,将样品装至10、50 mL离心管中,-80℃冰箱保存备用。

1.3 测定指标

1.3.1 pH

将餐厨垃圾装在50 mL的离心管中,5 000 r/min离心5 min,由于餐厨垃圾中油脂含量较高,所以离心后试样分为3层,上层为油脂,中间层为清液,下层为固体,取出中间的清液转移至10 mL的离心管中,使用三信型号为SX-610的便携式pH计测定。

1.3.2 有机酸含量

使用由LC-20AD高压恒流泵、SIL-20A自动进样器(C泵)、CTO-20A柱温箱、SPD-M20A紫外检测器(PDA)、RID-20A示差折光检测器组成的系统检测乳酸、甲酸、乙酸、丙酸、丁酸的含量,(其中甲酸与丁酸并未从餐厨垃圾中检测出),操作步骤参考高效液相色谱标准操作规程(SOP)^[26],标准样品依次为1.250、0.625、0.312、0.156、0.078和0.039 g/L,待测样品的配置为取餐厨垃圾离心后的清液与色谱纯乙腈1:3(V/V)混合,其余操作步骤与SOP中无差别。

1.3.3 粗蛋白质含量

参考GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的检测》^[27]中的凯氏定氮法,测定发酵罐中餐厨垃圾粗蛋白含量,g/100 g。

1.3.4 粗脂肪含量

参考GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》^[28]中酸水解法,测定发酵罐中的餐厨垃圾的粗脂肪含量,g/100 g。

1.3.5 灰分含量

参考GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》^[29],先将样品在电热恒温干燥箱中进行干燥,再称取试样于坩埚中,在550℃马弗炉中进行高温煅烧,煅烧结束后于干燥器内冷却0.5 h后称量计算。

1.3.6 干物质含量

参考GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[30]测定发酵罐中的餐厨垃圾的干物质含量,g/100 g。

1.4 数据分析

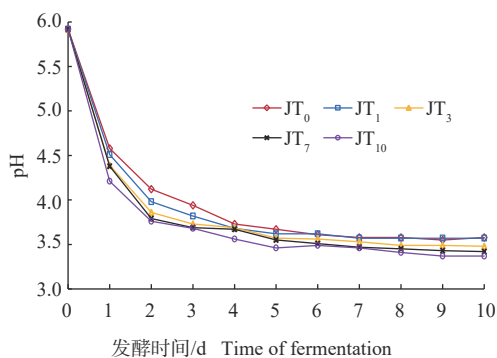
数据采用Excel进行统计与分析、图标制作、平均数、标准差的计算。

2 结果与分析

2.1 餐厨垃圾发酵过程中pH及有机酸动态变化

2.1.1 pH动态变化

由图1可知,餐厨垃圾发酵前的初始pH为5.92,在10 d的发酵过程中,各个处理pH均呈下降趋势:发酵第1天pH显著下降,第2—5天pH下降缓慢,第5—7天时pH下降不明显,第7—10天pH基本稳定。各处理发酵结束时,JT₀~JT₁₀的pH分别为3.58、3.57、3.48、3.42、3.37。从pH动态变化曲线可以看出,5个处理的pH均在第1天迅速下降,其中JT₁₀的pH下降最快,第1天下降1.71,发酵结束后pH也保持最低,为3.37,说明10 g/L的农用酵素添加量可以使餐厨垃圾酸化速率增加;之后4 d各组处理pH下降速率变小,并且JT₁、JT₃和JT₇3个处理pH于第4天趋于一致,说明能直接被转化为有机酸的底物被完全利用;JT₀、JT₁的pH在第6天后趋于一致,说明添加1 g/L(JT₁)的农用酵素在发酵后期对餐厨酸化已经没有促进作用;其他处理pH在第7天以后趋于稳定,不再发生大幅波动,这说明餐厨垃圾发酵进程从第7天以后就进入相对稳定的状态(图1)。



JT₀、JT₁、JT₃、JT₇和JT₁₀,分别为农用酵素添加浓度0、1、3、7及10 g/L的处理。下同。

JT₀、JT₁、JT₃、JT₇ and JT₁₀, were treated with 0, 1, 3, 7, and 10 g/L of agricultural Jiaosu. The same below.

图1 餐厨发酵过程中pH变化

Fig.1 Changes in pH during the kitchen fermentation process

2.1.2 有机酸含量动态变化

由图2可知,餐厨发酵开始前,乳酸含量为0.33 mg/L。各处理在发酵过程中,均产生乳酸。

在发酵第1—3天时,乳酸产生速率较高;在发酵第4—6天时,产乳酸速率下降;在发酵第7—10天时,乳酸含量趋于平缓。发酵10 d后,JT₀的乳酸含量为48.41 mg/L, JT₁的乳酸含量为48.34 mg/L, JT₃的乳酸含量为50.65 mg/L, JT₇的乳酸含量为50.06 mg/L, JT₁₀的乳酸含量为48.89 mg/L, 乳酸含量由大到小依次为 JT₃>JT₇>JT₁₀>JT₀>JT₁。各处理之间乳酸产生速率和发酵结束后乳酸含量差异均不显著。

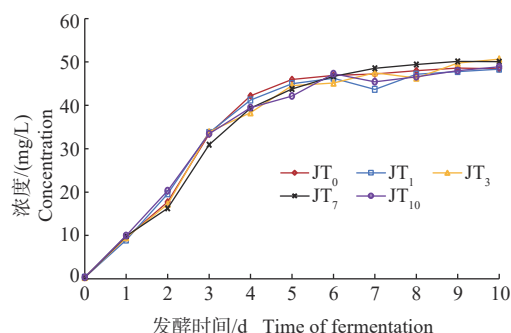


图2 餐厨发酵过程中乳酸含量的变化

Fig.2 Changes in lactic acid content in the process of kitchen fermentation

由图3可知,各处理在发酵过程中均可提高发酵液的乙酸含量。餐厨垃圾发酵前(CK)的初始乙酸浓度为0.23 mg/L。各处理在发酵第1天时,产乙酸速率最大,第2天后开始缓慢波动至平稳,说明乙酸的产生大概发生在发酵的前2 d。各处理发酵液的乙酸含量由高到低为:JT₁₀(3.34 mg/L)>JT₃(3.22 mg/L)>JT₇(3.19 mg/L)>JT₀(3.01 mg/L)>JT₁(2.98 mg/L)。各个处理之间产乙酸速率无显著差异。

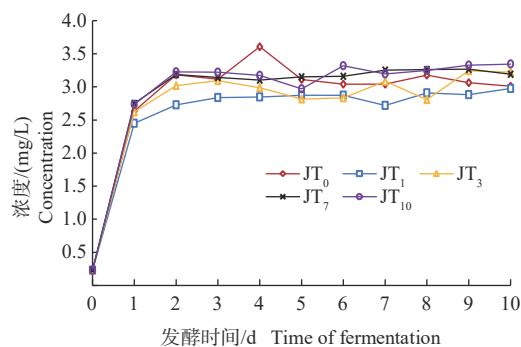


图3 餐厨发酵过程中乙酸含量的变化

Fig.3 Changes in acetic acid content during kitchen fermentation

由图4可知,各个处理发酵液在发酵过程中均产生丙酸。餐厨垃圾在未发酵时,丙酸含量为0 mg/L;各处理在发酵第1天时,丙酸含量仍为0 mg/L;发酵第2天时大量产生丙酸,第2天之后,丙酸含量波动平缓。其中JT₃、JT₇、JT₁₀ 3个处理丙酸含量均在第7天达到峰值,JT₃丙酸含量为1.52 mg/L,JT₇丙酸含量为1.51 mg/L,JT₁₀丙酸含量为1.58 mg/L;在发酵10 d后,JT₁₀丙酸含量为1.50 mg/L;JT₇丙酸含量为1.44 mg/L;JT₃丙酸含量为1.40 mg/L;JT₁丙酸含量为1.46 mg/L;JT₀丙酸含量为1.38 mg/L;各处理丙酸含量无显著差异,由大到小依次为JT₁₀>JT₁>JT₇>JT₃>JT₀。

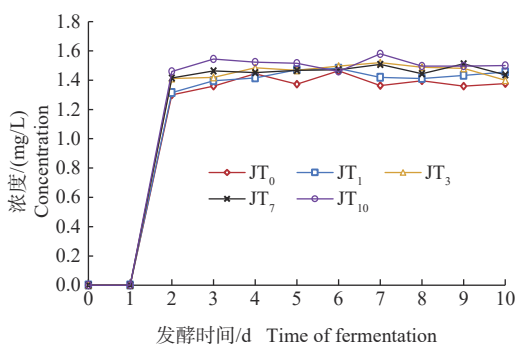


图4 餐厨发酵过程中丙酸含量的变化

Fig.4 Changes in propionic acid content in kitchen fermentation

2.1.3 pH和有机酸含量的综合分析

由图5可知,在这3种有机酸中,乳酸的积累量最大,其次为乙酸,积累量最低的是丙酸,随着有机酸的产生,pH也在迅速下降。各个处理均在前5 d大量产生有机酸,pH也跟着迅速下降,第5天后产酸速率降到最低,pH也趋于稳定,各个处理之间无显著差异。

由图6可知,pH随有机酸含量的增加而降低,各处理组有机酸总量变化趋势与乳酸含量变化趋势一致,说明乳酸是影响pH的主要因素。

2.2 餐厨垃圾发酵过程中代谢产物的动态变化

2.2.1 不同菌剂添加量下餐厨垃圾发酵产物的干物质和粗蛋白质含量变化

由图7可知,各处理在发酵过后干物质含量均会有不同程度的降低,其中JT₁在发酵第3天时干物质含量为21.48 g/100 g,与发酵前(CK)相比下降13.67%,下降比率最大。各个处理在发酵第7天的干物质含量

均显著下降,其中JT₇的含量为23.09 g/100 g,比CK (24.88 g/100 g)降低7.19%,下降幅度最小;而JT₃的干物质含量为21.77 g/100 g,比CK降低11.13%,下降最多(图7(b))。餐厨垃圾在发酵过程中粗蛋白质含量均会有所上升,且均显著高于发酵前(CK)的粗蛋白质含量(图7(c))。添加菌剂的各个处理中,粗蛋白质含量显著高于不添加菌剂的JT₀。JT₃在发酵第7天粗蛋白质含量最高,为19.90 g/100 g,与CK相比升高30.49%;从整体趋势上来看,各个处理在发酵第7天,粗蛋白质含量可达到最大,发酵超过7 d,粗蛋白质含量开始有所下降(图7(d))。JT₀在发酵第7天粗蛋白质含量为17.43 g/100 g,与CK相比升高14.30%;JT₁在发酵第7天粗蛋白质含量为19.36 g/100 g,与CK相比升高26.95%;JT₇在发酵第7天粗蛋白质含量为18.32 g/100 g;与CK相比升高20.13%;JT₁₀在发酵第7天粗蛋白质含量为17.89 g/100 g,比CK升高17.31%。

2.2.2 不同菌剂添加量下餐厨垃圾发酵产物的粗脂肪和灰分含量的变化

由图8可知,各个处理在发酵后粗脂肪含量都有所下降,而随着农用酵素添加量的增加,脂肪减少量在下降,除JT₁₀中粗脂肪含量与发酵前无显著差异,其余各处理均显著下降。本试验所用的餐厨发酵前(CK)粗脂肪的含量为18.96 g/100 g;JT₀在发酵后粗脂肪含量下降到16.13 g/100 g,较CK下降14.93% ($P<0.05$);JT₁在发酵后粗脂肪含量为16.13 g/100 g,较CK下降14.93%,与JT₀中粗脂肪降低比率相等,无显著差异 ($P<0.05$);JT₃在发酵后粗脂肪含量为17.54 g/100 g,较CK下降7.49%,较JT₀多8.74%;JT₇在发酵后粗脂肪含量为17.01 g/100 g,较CK下降10.28%,较JT₀多5.46%;JT₁₀在发酵后粗脂肪含量为18.69 g/100 g,较CK下降1.42%,较JT₀多15.87%。(图8(a))。餐厨垃圾在发酵过后灰分含量均显著上升,灰分含量依次为JT₀>JT₇>JT₃>JT₁₀>JT₁>CK(图8(b))。CK的灰分含量为0.93 g/100 g;在各个处理中,JT₀在发酵过后灰分的含量最高,为1.63 g/100 g,比CK升高75.271%,提升幅度最大;JT₁在发酵后灰分含量提高到1.36 g/100 g,比CK升高46.24%;JT₃发酵后灰分含量为1.44 g/100 g,比CK升高54.84%;JT₇在发酵后灰分含量为1.57 g/100 g,比CK升高

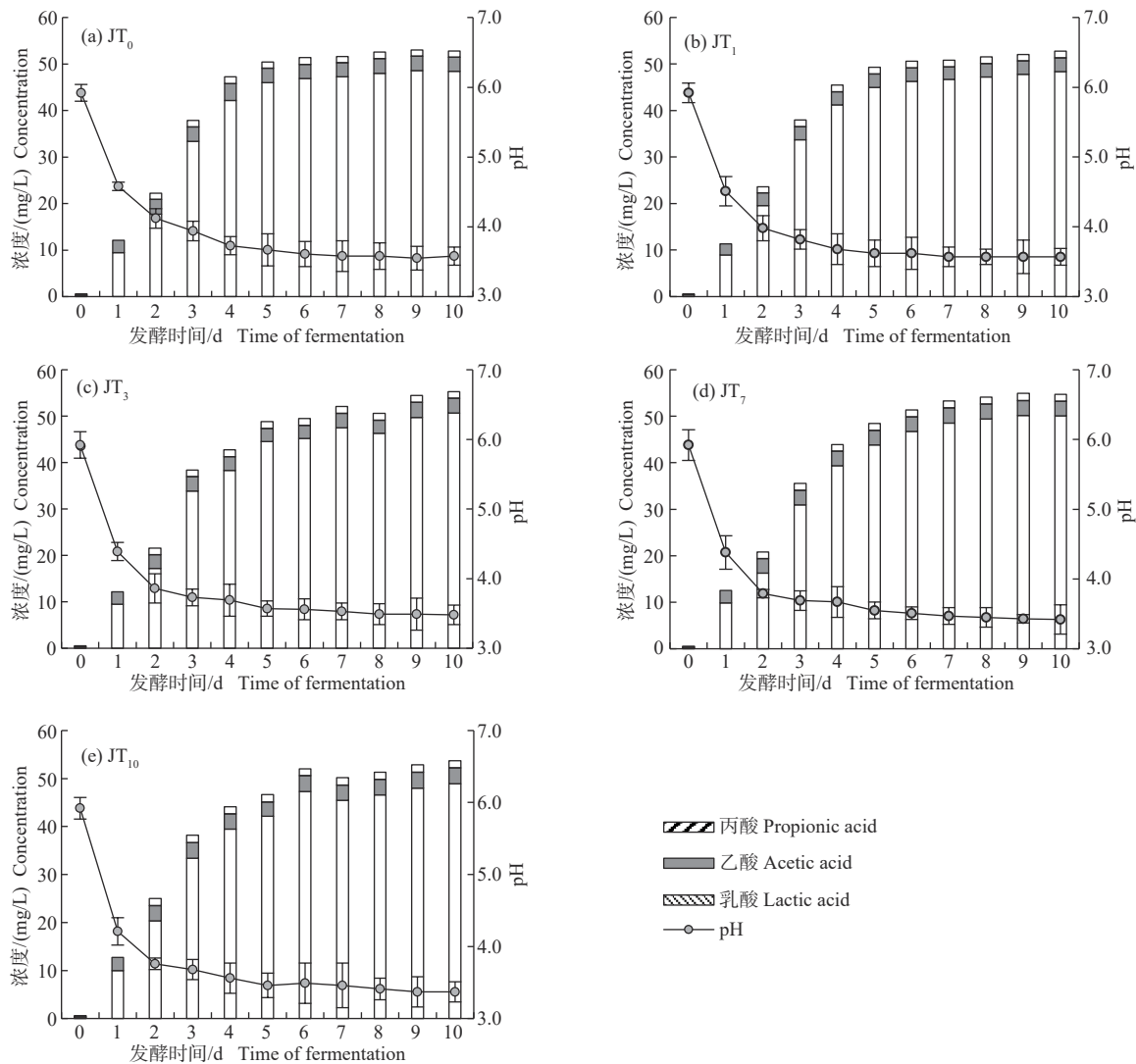


图5 各处理的有机酸与pH变化

Fig.5 Changes in organic acids and pH in various treatments

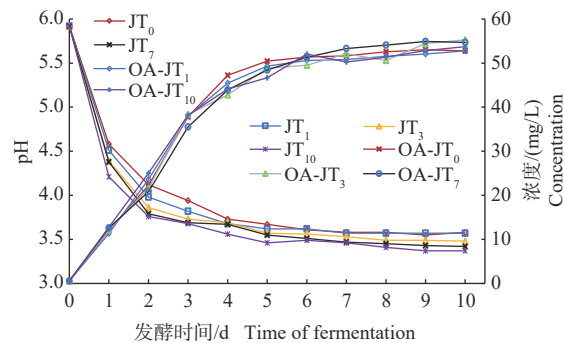


图6 各处理有机酸总量与pH变化

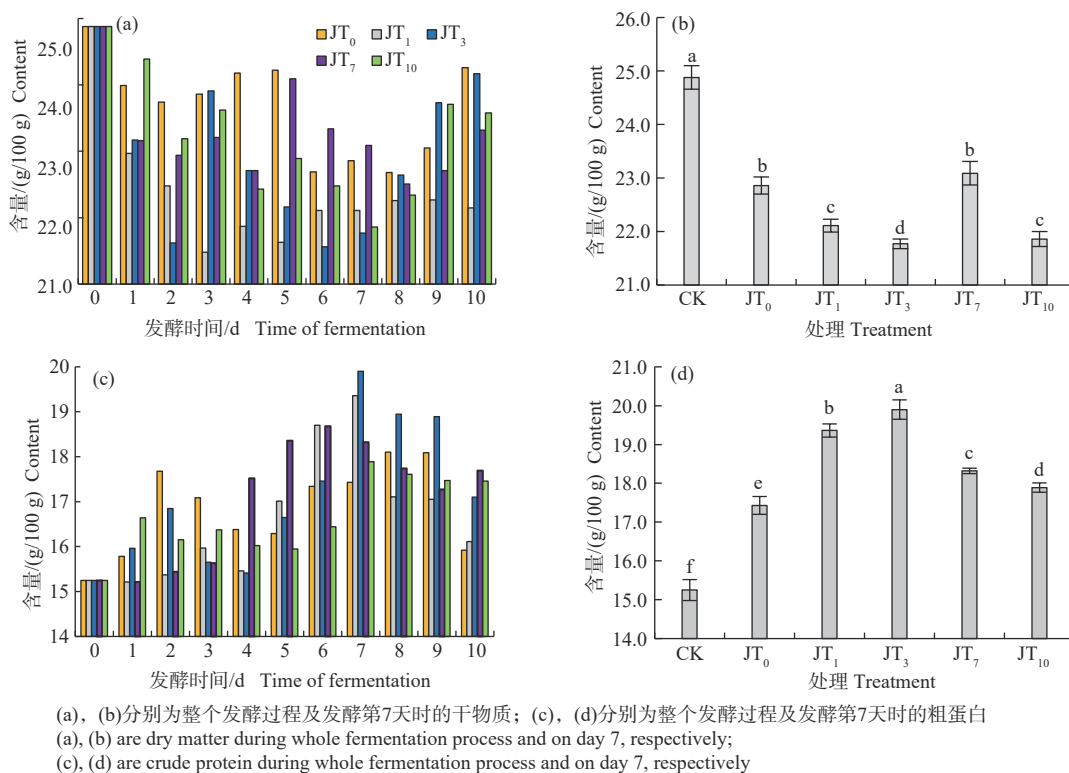
Fig.6 Total organic acid content and pH change in each treatment

68.82%；JT₁₀发酵后灰分含量为1.41 g/100 g，比CK升高51.61%。

3 讨论

3.1 酵素菌剂添加量对餐厨垃圾发酵过程中pH下降速率及有机酸产生速率的关系

在餐厨垃圾发酵过程中，添加微生物菌剂是促进餐厨垃圾资源化转化的有效措施^[31]。pH是餐厨垃圾发酵产酸的重要参数^[32]。在厌氧发酵过程中，会产生大量的游离酸，而在此条件下，酸性物质消耗不掉，导致pH逐渐下降至3.5左右，并且此后pH稳定在此水平^[31,33]。本研究中各组处理pH变化趋势为第1天迅速下降，第2—4天持续下降，4 d以后缓慢下降直到平缓，与蓝苑媛等^[32]、梁曼丽等^[33]和黄宇钊等^[34]研究结果一致。在不同农用酵素添加量的处理中pH的快速下降有利于餐厨发酵过程中



CK, 发酵前的餐厨垃圾样品。下同。

CK, kitchen waste before fermentation process. The same below.

图7 整个发酵过程及发酵第7天时干物质和粗蛋白的变化

Fig.7 Dynamic changes in dry matter and crude protein during whole fermentation process and on day 7

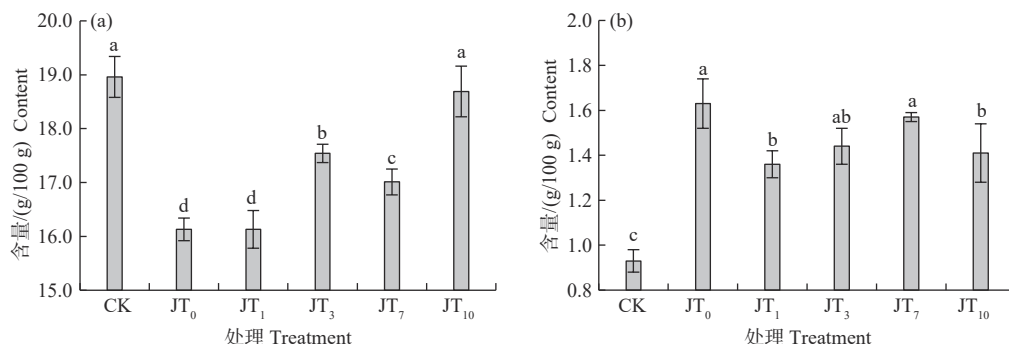


图8 不同处理下第7天粗脂肪(a)和粗灰分(b)含量变化

Fig.8 Crude fat (a) and crude ash (b) content changed on day 7 under different treatment

产酸菌的繁殖与生长及有机酸的水解转化,但是过低的pH也会抑制微生物的生物活性,水解作用大大降低,发酵前4 d易水解的有机物被利用完,剩余难水解的有机物很难被微生物利用,进而导致有机酸的转化速率降低影响最终的产酸量^[33]。本研究中添加农用酵素的处理均比对照pH下降速率快,且农用酵素添加量最多的处理pH下降最快、最低。JT₁₀在同时间段pH下降速率最快,但是在本试验发

酵周期末,经过测定发现JT₁₀乳酸含量低于JT₃。这可能由于过低的pH造成产乳酸菌活性降低,从而影响乳酸产量。在发酵过程前3 d, JT₁₀的乳酸生成速度最大,与pH下降速率一致。说明添加农用酵素有助于餐厨垃圾的酸化进程,提高其酸化速率。

经过测定发现餐厨发酵液中有有机酸主要有3种:乳酸、乙酸、丙酸。有机酸成分主要为乳酸,已有研究发现当pH≤5.0时,餐厨垃圾主要进行乳酸

发酵^[33,35]。另外有机酸成分中含有乙酸、丙酸,这与邹亚娜等^[36]观测到的乙酸和丙酸为有机酸主要成分的现象相似。无论是否添加农用酵素,餐厨垃圾厌氧发酵均可导致pH的下降、乳酸与丙酸的产生以及乙酸含量的上升。本研究结果表明餐厨垃圾产酸主要集中在前3 d,3 d内乳酸大量生成,乙酸主要在第1天迅速增加;丙酸在第2天快速生成,4 d后各类酸含量趋于稳定,这与柯水洲等^[37]研究中产酸过程有一定相似性。前期快速产酸可能是微生物将易水解的有机物迅速水解利用,这主要发生在前4 d,4 d后能够被微生物快速利用的有机物消耗殆尽,加上低pH抑制了微生物活性,导致餐厨垃圾产酸进程缓慢乃至停滞。这3种有机酸中,乳酸的积累量最大,农用酵素菌种之中乳酸菌为优势微生物^[21],可以促进餐厨垃圾产乳酸,在各个处理中添加3 g/L农用酵素对乳酸积累最有利;其次为乙酸,积累量最低的是丙酸,各处理中添加10 g/L农用酵素对乙酸、丙酸增长最有利;不同农用酵素添加量对餐厨垃圾产酸无显著差异,这可能与pH太低有关,很多研究表明pH维持在弱酸性,有助于维持产酸环境的稳定性^[38],同时也可以有效提升产酸积累量^[39]。pH随有机酸含量的增加而降低,各处理间有机酸总量变化趋势与乳酸含量变化趋势一致,说明乳酸是影响pH变化的主要因素。添加了3、7、10 g/L的农用酵素在餐厨垃圾发酵过程中可提高乳酸、乙酸和丙酸的生成速率与最终浓度,加快餐厨垃圾pH的下降。餐厨废弃物发酵酸化过程在发酵的前4 d反应剧烈,4~7 d酸含量缓慢增长,7 d后乳酸、乙酸和丙酸含量基本没有太大波动,pH也基本不再变化,考虑发酵的酸化程度和稳定性,餐厨垃圾厌氧酸化最快周期为4~7 d比较合适。

3.2 酵素菌剂添加量对餐厨垃圾发酵过程中有机物组分及含量的影响

在水解产酸阶段,餐厨垃圾中不溶性物质在微生物的作用下逐渐被水解为溶解性物质,这些溶解性物质在微生物的作用下,进一步发酵产生挥发性脂肪酸等物质^[40]。在本研究中,无论是否添加农用酵素,粗蛋白质与灰分含量均会上升,而粗脂肪与干物质含量均会下降。餐厨垃圾酸化发酵过程中干物质下降是由于碳源有机物被微生物分解利用,用以维持微生物的生命活动,生产出短链脂肪酸^[34]。其中JT₃在发酵第7天的干物质含量为

21.77 g/100 g,比原料降低11.13%,下降最多。这说明JT₃的微生物活性最强,能够最大程度的分解利用有机碳源进行产酸。在发酵第7天时,JT₃的粗蛋白质含量最高,与发酵前相比升高30.49%,这与黄林丽等^[31]研究中酸化处理的结果一致。在发酵第7天时,JT₃粗脂肪含量为17.54 g/100 g,与发酵前相比降低7.49%,相对JT₀、JT₁下降得比较少,可能由于酵素菌种抑制了脂肪酶的活性,添加量越多,脂肪酶受抑制程度更高,使得粗脂肪分解缓慢^[41]。本研究结合发酵产酸情况来看,农用酵素添加量为3 g/L时最有利于餐厨垃圾的酸化发酵。

本试验对农用酵素处理餐厨垃圾酸化转化提供了新的选择,通过这套低成本快速发酵产酸工艺得到的发酵产物可以降低沼液pH、降低沼液和氨氮毒性^[23]。下一步需要结合现有厌氧消化研究领域针对发酵产物特性功能应用及毒害性进行深入研究。

4 结 论

随着农用酵素添加量的增加,餐厨垃圾pH的降低速率增加,乳酸积累量升高,其中添加10 g/L的处理在发酵第3天产酸速率最大;农用酵素添加量为3 g/L的处理于第7天总酸积累量最高,所有处理产酸高峰期均为前3 d,一般第3天产酸速率最快,所以餐厨垃圾酸化最快发酵时间为4~7 d。在不同处理的发酵过程中,均产生乳酸、乙酸和丙酸,并且pH会随之大幅下降,有利于餐厨发酵酸化的过程。考虑餐厨垃圾发酵的酸化程度和稳定性,乳酸等发酵产物的积累,农用酵素添加量为3 g/L。综上,农用酵素添加量为3 g/L,发酵时间为4~7 d,处理餐厨垃圾酸化效果最佳,是低成本快速处理餐厨垃圾的有效方法。

参考文献 References

- [1] 史东晓,汤晓艳,陆祥昕,徐刚,陆燕中,吕清.餐厨垃圾有机残渣资源化利用方式比较研究:以常州市餐厨废弃物综合处置项目(一期)为例[J].环境卫生工程,2022,30(5):55-59,66
Shi D X, Tang X Y, Lu X X, Xu G, Lu Y Z, Lv Q. Comparative study on the resource utilization of organic residues from kitchen waste: A case study of kitchen waste comprehensive disposal project (phase I) in Changzhou [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2022, 30(5): 55-59, 66 (in Chinese)
- [2] 李晨曦,赵宇彭,兰珊,吴春东,杜萌洁,秦德煜,王铭媛.餐厨垃圾厌氧

- 消化技术研究现状及展望[J]. 热带农业工程, 2022, 46(6): 140-142
- Li C X, Zhao Y P, Lan S, Wu C D, Du M J, Qin D Y, Wang M Y. Research status and prospect of anaerobic digestion technology of kitchen waste[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2022, 46(6): 140-142 (in Chinese)
- [3] 马敬议, 许士洪, 李登新. 餐厨垃圾及其渗滤液资源化研究进展[J]. 广东化工, 2023, 50(17): 127-129
- Ma J Y, Xu S H, Li D X. Research progress on the resource recovery of kitchen waste and its leachate[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(17): 127-129 (in Chinese)
- [4] 张燕. 镇江市生活垃圾分类治理问题与对策研究[J]. 资源节约与环保, 2022(9): 13-16, 63
- Zhang Y. Study on the problems and countermeasures of domestic waste classified treatment in Zhenjiang city[J]. *Resources Economization and Environmental Protection*, 2022(9): 13-16, 63 (in Chinese)
- [5] 徐兵, 韩雪, 周月, 温沁雪, 陈志强. 东北某餐厨废弃物处理厂有机质降解及发酵液处理过程分析[J/OL]. 环境工程, (2022-12-12). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20221209.1504.006.html>
- Xu B, Han X, Zhou Y, Wen Q X, Chen Z Q. Analysis of organic matter conversion process in a food waste treatment plant in Northeast China[J/OL]. *Environmental Engineering*, (2022-12-12). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20221209.1504.006.html> (in Chinese)
- [6] 陶兴玲, 詹亚斌, 王宁, 丁晓艳, 丁国春, 魏雨泉, 李季, 朱廷恒, 徐道青. 耐热菌剂对堆肥有机质降解及细菌演替的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6264-6270
- Tao X L, Zhan Y B, Wang N, Ding X Y, Ding G C, Wei Y Q, Li J, Zhu T H, Xu D Q. T Effects of thermophilic microbial consortium on organic matter degradation and bacterial succession in composting[J]. *Science and Technology and Engineering*, 2023, 23(14): 6264-6270 (in Chinese)
- [7] 于森. 强化乙醇型发酵的餐厨垃圾厌氧消化性能及调控机制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019
- Yu M. Study on the anaerobic digestion performance and regulation mechanism of kitchen waste with enhanced ethanol fermentation[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2019 (in Chinese)
- [8] 周海林. 餐厨废弃物资源化利用技术研究现状及展望[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 70-73
- Zhou H L. Research status and prospects of resource utilization technology for kitchen waste[J]. *Comprehensive Utilization of Resources in China*, 2021, 39(5): 70-73 (in Chinese)
- [9] 汪丹, 黄帅宇. 餐厨废弃物资源化利用技术的研究现状及进展[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(13): 132-133
- Wang D, Huang S Y. Research status and progress of kitchen waste resource utilization technology for kitchen waste[J]. *Leather Manufacture and Environmental Protection Technology*, 2021, 2(13): 132-133 (in Chinese)
- [10] 易志刚. 餐厨垃圾废弃物收运与资源化利用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(12): 116-119, 125
- Yi Z G. Research progress on the collection, transportation, and resource utilization of kitchen waste[J]. *Comprehensive Utilization of Resources in China*, 2021, 39(12): 116-119, 125 (in Chinese)
- [11] 詹亚斌, 陈云峰, 陶兴玲, 于科, 魏雨泉, 李季. 熟料回用对餐厨废弃物好氧堆肥进程及臭气排放的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 16253-16259
- Zhan Y B, Chen Y F, Tao X L, Yu K, Wei Y Q, Li J. Effects of recycled materials instead of auxiliary materials on maturity and odor emissions of kitchen waste compost[J]. *Science and Technology and Engineering*, 2022, 22(36): 16253-16259 (in Chinese)
- [12] 朱丽可, 汤晓艳, 田延威, 魏永攀, 张扬. 餐厨废弃物昆虫生物转化资源利用中的应用研究[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(5): 1-6
- Zhu L K, Tang X Y, Tian Y W, Wei Y P, Zhang Y. Study on the application of insect biotransformation resources of kitchen waste utilization[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2023, 43(5): 1-6 (in Chinese)
- [13] 梁晓军, 张华平, 吴国凡. 食品垃圾处理技术分析[J]. 船海工程, 2010, 39(6): 29-33
- Liang X J, Zhang H P, Wu G F. On treatment technology of food residue on site[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2010, 39(6): 29-33 (in Chinese)
- [14] 李华刚, 解帅帅, 刘铮, 刘欣宇, 张铭轩, 魏蕊蕊. 添加不同有机废弃物对餐厨垃圾机器堆肥二次发酵的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(10): 2569-2574
- Li H G, Jie S S, Liu Z, Liu X Y, Zhang M X, Wei X R. Effect of adding different organic wastes on secondary fermentation of machine composting of kitchen wastes[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(10): 2569-2574 (in Chinese)
- [15] 褚祺, 丁乃初, 宦兆军, 田延威, 周杰. 国内餐厨及厨余垃圾处理工艺综述[J]. 广东化工, 2023, 50(22): 103-105, 150
- Chu Z, Ding N C, Huan Z J, Tian Y W, Zhou J. Review of domestic kitchen waste and food residue treatment technology[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(22): 103-105, 150 (in Chinese)
- [16] 王权, 蒋建国, 张昊巍, 李梦露. 油脂对餐厨废弃物单相厌氧定向制酸的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1436-1441
- Wang Q, Jiang J G, Zhang H W, Li M L. Effect of grease on acid fermentation of kitchen waste by single phase anaerobic methods[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(5): 1436-1441 (in Chinese)
- [17] 叶红梅, 刘祖文, 田帅. 污泥厌氧发酵产酸技术研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 588-594
- Ye H M, Liu Z W, Tian S. Research progress on acid production technology of sludge anaerobic fermentation[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(2): 588-594 (in Chinese)
- [18] 周挺进. 餐厨垃圾厌氧消化技术研究[J]. 当代化工研究, 2023(18): 77-79
- Zhou T J. Research on anaerobic digestion technology for kitchen waste[J]. *Contemporary Chemical Research*, 2023(18): 77-79 (in Chinese)
- [19] 马元元, 吴瑒, 王朴淳, 陈银广, 郑雄. 低碳背景下剩余污泥厌氧共发酵产酸研究进展[J/OL]. 环境工程, (2023-11-30). <https://link.cnki.net/urlid/11.2097.x.20231108.1147.004>
- Ma Y Y, Wu Z, Wang P C, Chen Y G, Zheng X. Research progress on anaerobic co fermentation of residual sludge for acid production under low-carbon background[J/OL]. *Environmental Engineering*, (2023-11-30). <https://link.cnki.net/urlid/11.2097.x.20231108.1147.004> (in

- Chinese)
- [20] Wang Q, Yang L X, Feng K, Li H, Deng Z, Liu J G. Promote lactic acid production from food waste fermentation using biogas slurry recirculation [J/OL]. *Bioresource Technology*, (2021-06-09). DOI: doi. org/10. 1016/ j. biortech. 2021. 125393
- [21] Gao Y H, Zhang Y, Cheng X Q, Zheng Z H, Wu X H, Dong X H, Hu Y G, Wang X F. Agricultural Jiaosu: An eco-friendly and cost-effective control strategy for suppressing Fusarium root rot disease in Astragalus membranaceus[J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, (2022-03-31). DOI: doi. org/10. 3389/fmicb. 2022. 823704
- [22] 张越, 王小芬. 农用植物酵素在有机农业生产中的生态作用[J]. 鄱阳湖学刊, 2019(1): 70-74, 125-126
- Zhang Y, Wang X F. Ecological effect of plant enzymes for agriculture in organic agricultural production[J]. *Poyang Lake Journal*, 2019(1): 70-74, 125-126 (in Chinese)
- [23] Xu S L, Gu X H, Wu Q, Gao Y H, Cai Y F, Ma S S, Zheng Z H, Wang X F. An ecological and economic approach to enhancing the agronomic quality of anaerobic digestate: Effects of adding agricultural Jiaosu on metabolism and the microbial community[J/OL]. *Chemical Engineering Journal*. (2023-07-15). DOI: doi. org/10. 1016/j. cej. 2023. 143648
- [24] 张越, 赵宇宾, 蔡亚凡, 刘小平, 胡跃高, 王小芬. 农用植物酵素的生态效应研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 25-35
- Zhang Y, Zhao Y B, Cai Y F, Liu X P, Hu Y G, Wang X F. Ecological effects of agricultural plant Jiaosu for agriculture: A review[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 25-35 (in Chinese)
- [25] Aishwarya R, Suraj N, Athar H, Sunil K. Treatment of urban municipal landfill leachate utilizing garbage enzyme [J/OL]. *Bioresource Technology*, (2019-11-18). DOI: doi. org/10. 1016/j. biortech. 2019. 122437
- [26] GB/T 26792—2019. 高效液相色谱仪[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019
- GB/T 26792—2019. High performance liquid chromatograph [S]. Beijing: China Standards Press, 2019 (in Chinese)
- [27] GB 5009. 5—2016. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的检测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- GB 5009. 5—2016 National food safety standard for protein detection in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016 (in Chinese)
- [28] GB 5009. 6—2016. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- GB 5009. 6—2016 National food safety standard-determination of fat in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016 (in Chinese)
- [29] GB 5009. 4—2016. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- GB 5009. 4—2016 National food safety standard-determination of ash in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016 (in Chinese)
- [30] GB 5009. 3—2016. 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- GB 5009. 3—2016. National food safety standard-determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016 (in Chinese)
- [31] 黄林丽, 谢斌, 陈立, 杨丁玮, 蒲一涛, 何庆华. 公共餐厨垃圾饲料化利用的混合菌发酵工艺[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 148-152
- Huang L L, Xie B, Chen L, Yang D W, Pu Y T, He Q H. Mixed bacterial fermentation process for the utilization of public kitchen waste to animal feed[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(24): 148-152 (in Chinese)
- [32] 蓝苑璇, 吴松, 王磊. 物料调理缓解餐厨垃圾厌氧发酵酸化效应及其机制研究[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(4): 27-34
- Lan Y Y, Wu S, Wang L. Study of material conditioning alleviating acidification effect in anaerobic fermentation of restaurant food waste and its mechanism[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2023, 31(4): 27-34 (in Chinese)
- [33] 梁曼丽, 袁维波, 敖冬, 高婷婷, 李倩, 陈荣. 餐厨垃圾制备高性能反硝化碳源的厌氧发酵条件优化[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(5): 60-66
- Liang M L, Yuan W B, Ao D, Gao T T, Li Q, Chen R. Optimization of anaerobic fermentation conditions for the preparation of high-performance denitrified carbon sources with food waste [J]. *Environmental Hygiene Engineering*, 2022, 30(5): 60-66 (in Chinese)
- [34] 黄宇钊, 冼萍, 李桃, 刘琴, 何顺. 热碱处理污泥协同餐厨垃圾两相厌氧消化的特性[J]. 环境工程, 2018, 36(9): 119-124
- Huang Y Z, Xian P, Li T, Liu Q, He S. Two-phase anaerobic digestion performance of food waste and hot alkali treated sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(9): 119-124 (in Chinese)
- [35] 徐杰. 厨余垃圾厌氧消化水解产酸及动力学研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014
- Xu J. The study of kinetics and hydrolysis and acidogenesis in anaerobic digestion and hydrolysis of kitchen waste [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014 (in Chinese)
- [36] 邹亚娜, 臧越, 王恺元, 秦曦, 甄广印, 陆雪琴. 生物催化调控污泥-餐厨垃圾协同厌氧产酸研究[J]. 环境化学, 2023, 42(1): 298-309
- Zou Y N, Zang Y, Wang K y, Qin X, Zhen G Y, Lu X Q. Regulated VFAs production from sewage sludge and food waste by in situ bioelectrocatalytic regulation [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(1): 298-309 (in Chinese)
- [37] 柯水洲, 莫祺扬, 马晶伟, 赖涵, 刘颖. 餐厨垃圾废水预处理发酵回收溶解性碳源的研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(17): 1-8
- Ke S Z, Mo Q Y, Ma J W, Lai H, Liu Y. Pretreatment of kitchen waste wastewater and recovery of soluble carbon source by fermentation [J] *China Water Supply and Drainage*, 2021, 37(17): 1-8 (in Chinese)
- [38] 王国华, 伊学农, 王峰, 谭学军, 宋桃莉, 刘斌龙. 餐厨垃圾与污水污泥共消化产酸试验研究[J]. 环境工程, 2013, 31(S1): 166-169
- Wang G H, Yi X N, Wang F, Tan X J, Song T L, Liu B L. Experimental study on co-digestion of restaurant-kitchen-waste and sewage sludge to produce acid[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(S1): 166-169 (in Chinese)
- [39] 章钦, 罗景阳, 操家顺, 吴瑒, 张腾. 生物炭对剩余污泥厌氧发酵产酸的影响[J]. 环境科技, 2019, 32(1): 1-6
- Zhang Q, Luo J Y, Cao J S, Wu Z, Zhang T. Effects of biochar on the volatile fatty acids production during sludge anaerobic fermentation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 32(1): 1-6 (in Chinese)
- [40] 杨梦, 蒋建国, 徐一雯, 刘诺. pH对果蔬、园林垃圾混合厌氧水解产酸的影响[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 103-108

Yang M, Jiang J G, Xu Y W, Liu N. pH effects on anaerobic hydrolysis of acid production by mixed fruits, vegetables and garden waste [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(5): 103-108 (in Chinese)

from organic solid waste by anaerobic digestion and its application in biodiesel production [J/OL]. *Fuel Processing Technology*, (2017-05-09). DOI:doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.04.020

[41] Selvakumar P, Sivashanmugam P. Optimization of lipase production

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 白宏宇,西北农林科技大学草业与草原学院农艺与种业专业硕士研究生。曾获西北农林大学校级学业奖学金,参与十四五国家重点研发计划项目(2021YFD1901103)。



通讯作者简介: 胡跃高,博士,教授,博士生导师。中国农业大学山西灵丘教授工作站负责人,中国耕作制度研究会副理事长,中国农学会耕作制度分会副理事长,在农作物栽培耕作技术研究、草业工程、防治荒漠化工程、全域有机农业建设、农业安全工程、区域农业可持续发展、全球农业可持续发展、第六次产业革命领域有研究积累。曾获2003年河北省科学技术奖三等奖、2007年吉林省科学技术进步奖一等奖、2007年湖南省科学技术进步奖三等奖,2000年以来发表论文100余篇,主编或参编出版书籍10余部。