

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0211

进料有机负荷及回流比对餐厨垃圾协同水葫芦 发酵产氢的影响研究

李哲璇¹, 孙叶衍², 董志颖^{1*}, 余俊新¹, 李兵¹, 胡甜甜¹, 蒋丽¹

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市生态环境局慈溪分局, 浙江 慈溪 315302)

摘要: 有机固体废物进行多组分协同厌氧发酵可以产生清洁能源气体, 从而达到资源化处理的目的。本文通过设置不同进料有机负荷及回流比, 分析餐厨垃圾协同水葫芦厌氧产氢过程中产气量、氢气含量、SCOD、挥发性脂肪酸(VFAs)、pH及氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)各参数的变化。结果显示, 高有机负荷和高回流比会导致系统的VFAs累积, 使系统pH值降到5.0以下; 进料有机负荷对于餐厨垃圾协同水葫芦厌氧产氢的影响更大, 系统内的氨氮浓度及SCOD浓度均与进料有机负荷呈正相关; 当进料有机负荷为 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 、回流比为30%时, 系统产氢效果最好, 累计产气量为80946 mL, 氢气含量为35.83%。本研究结果可为有机固体废物资源化处理提供参考。

关键词: 进料有机负荷; 回流比; 餐厨垃圾; 水葫芦; 厌氧发酵; 产氢

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2023)04-0064-06

餐厨垃圾是一种重要的生物质资源, 其目前最主要的资源化处理方式是厌氧发酵。厌氧发酵技术能够回收餐厨垃圾中97.3%的能量^[1], 包含清洁能源——氢气。氢气的热值大约是焦炭和汽油等碳氢燃料的3倍, 可作为内燃机和燃气轮机的替代燃料; 氢气燃烧时仅产生水, 也被视为燃料电池的最佳燃料^[2]。与传统高能耗制氢技术相比, 发酵制氢具有微生物比产氢速率高、原料来源广泛、工艺简单等优点, 是理想的制氢方法^[3]。有机废物厌氧产氢可利用传统厌氧发酵工艺前半段过程中的副产物, 通过技术手段和工艺参数优化来提高产氢效率和氢气量^[4]。餐厨垃圾是较为典型的有机废物, 具有丰富可降解组分含量、高油脂与高含盐量等特性, 若其单独发酵, 在水解阶段会产生大量VFAs, 容易产生酸抑制, 而造成厌氧发酵失败。水葫芦作为一种外来入侵水生生物种, 在快速繁殖过程中会消耗大量溶解氧, 加剧水体富营养化, 对我国的水体环境造成严重破坏。水葫芦主要特点是纤维素

含量高, 水解速度慢, 发酵周期长。将水葫芦作为餐厨垃圾发酵产氢辅料, 不仅可以削弱盐和油对微生物的抑制作用, 同时能有效调节系统营养, 还可以减轻当前水葫芦对水体的污染现状。

进料有机负荷是影响厌氧发酵产氢效果的重要因素之一。有机负荷过低会使系统缺乏充足的能量和营养, 导致产气潜力受到抑制^[5]; 合适的有机负荷能使系统内部处于较好的动态平衡, 最大程度发挥系统消纳有机物与产气能力。与此同时, 合适回流比能够帮助维持反应器内的pH值, 有助于提升反应器内微生物活性^[6]。熊杰等^[7]对餐厨垃圾两相厌氧消化特性试验研究发现, 餐厨垃圾最优酸化条件为有机负荷 $30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 酸化时间5 d。郭燕峰等^[8]对厨余垃圾厌氧发酵的研究表明, 当有机负荷控制在 $3.89\sim 6.49\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间, 池容产气率可稳定在 $2.5\sim 4.5\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 。于涛等^[9]以餐厨垃圾为发酵原料, 研究有机负荷与工艺参数相互间的作用, 结果表明, 系统最佳有机负荷为 $3.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。从

收稿日期: 2023-02-06.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(42007367); 宁波大学One health交叉学科研究项目(HY202203)。

第一作者: 李哲璇(1998-), 女, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 固体废弃物处理及水利工程。E-mail: zxlee0311@163.com

*通信作者: 董志颖(1977-), 女, 吉林农安人, 讲师, 主要研究方向: 环境污染与微生物。E-mail: dongzhiying@nbu.edu.cn

上述研究结果看,不同发酵底物的有机负荷间没有显著相关性,且目前研究主要集中在厌氧发酵产甲烷方面.王星等^[10]也在试验基础上研究了消化液回流比与有机负荷对餐厨垃圾厌氧消化的影响.由此可见,关于进料有机负荷及回流比对厌氧发酵产氢的影响都未见相关报道.

基于此,本文以餐厨垃圾及水葫芦作为发酵原料,分析了不同进料有机负荷及回流比对餐厨垃圾协同水葫芦厌氧发酵的产氢效果及产氢过程的影响,以期为固体废物厌氧发酵产氢技术提供理论和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用餐厨垃圾取自宁波某大学食堂,主要成分为米饭、面食、蔬菜和肉类等.人工分选出骨头、纸巾、鱼刺、塑料袋及其他难降解物质,然后用小型粉碎机将其打碎至粒径为 2~5 mm 的糊状,再将其密封至于 4℃ 的冰箱中冷藏待用.水葫芦取自宁波某大学校园景观河,人工去除枯枝烂叶和贝壳类生物,风干后,用小型粉碎机将其充分粉碎,并置于干燥器中待用.接种液取自宁波某餐厨垃圾处理企业厌氧发酵罐中的发酵液,发酵液经高压灭菌锅 100℃ 灭菌处理 30 min,以灭活杂菌,后将其密封至于 4℃ 的冰箱中冷藏待用.餐厨垃圾、水葫芦、接种液的各种理化参数见表 1.

表 1 餐厨垃圾干燥基、水葫芦干燥基、接种液的理化参数

参数	餐厨垃圾	水葫芦	接种液
TS/%	18.36±0.19	94.61±0.26	7.63±0.18
VS/%	92.43±0.21	84.69±0.19	94.36±0.21
pH	5.63±0.06	—	7.12±0.08
脂肪/%	18.24±0.11	—	—
粗蛋白/%	24.18±0.15	—	—
碳水化合物/%	43.68±0.17	—	—
TC/%	53.84±0.18	36.57±0.19	—
TN/%	3.04±0.09	0.63±0.05	—
C/N	20.67±0.21	58.32±0.26	—

注: TS 为总固体; VS 为挥发性固体; TC 为总碳; TN 为总氮.

从表 1 中可以看出,餐厨垃圾 C/N 比值低,水葫芦 C/N 比值高,将餐厨垃圾与水葫芦进行厌氧共发酵能均衡系统 C/N,以满足微生物生长需求.

1.2 实验装置

图 1 厌氧反应器主体由亚克力玻璃和不锈钢组成.反应器容积为 8 L,本实验中有有效容积为 5 L.反应器采用隔层水浴加热.顶部设有电机,连接罐体内的搅拌轴,反应器上端进料,下端出料.反应器内置 pH 值在线监测系统,反应产生的气体采用集气袋收集.

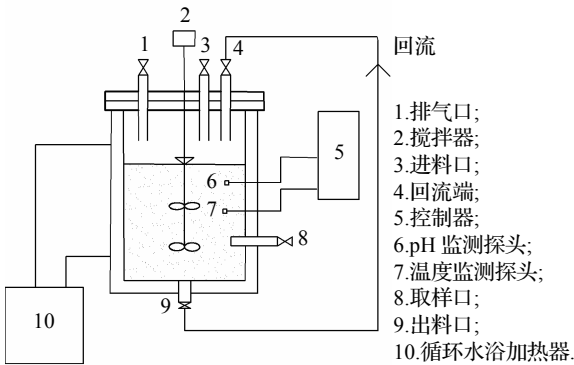


图 1 实验装置示意图

1.3 实验设计

根据前期餐厨垃圾协同水葫芦厌氧产氢的物料配比及预处理实验结果,将餐厨垃圾与水葫芦按照最佳比例 6:1(以 TS 计)配比,并采用高温进行预处理后,按照不同进料有机负荷及回流比分为 9 组,分别编号 A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、C3.其中,A、B、C 分别代表进料有机负荷为 5、10、15 kg·m⁻³·d⁻¹,1、2、3 分别代表回流比为 10%、30%、50%,具体实验方案设计见表 2.将物料与接种液按 VS 质量比 6:1 进行接种,随后投入到图 1 所示的反应器中.前期实验结果显示,系统运行至 24 h,产气效率最高,因此实验中每隔 24 h 出料(经过发酵产氢阶段后排出的物料)一次,同

表 2 实验方案设计

实验编号	有机负荷/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	回流比/%
A1	5	10
A2	5	30
A3	5	50
B1	10	10
B2	10	30
B3	10	50
C1	15	10
C2	15	30
C3	15	50

时将出料物按照设计回流比进行回流,水浴温度设定为 55 ℃,电动搅拌器转速设置为 400 r·min⁻¹,实验过程中产生气体采用 E-Switch 集气袋进行收集,所有实验在相同条件下设置 3 组平行试样.为定性分析不同阶段产气量以及系统内各组分变化情况,每隔 4 h 进行一次取样.厌氧发酵系统持续反应时间设定为 48 h.

1.4 分析方法和数据处理

氢气含量及挥发性脂肪酸采用北京北分瑞利 SP2100 气相色谱仪进行测定, pH 采用梅特勒-托利多 FE28-Standard pH 计测量, NH⁺-N 通过尤尼柯 7200 型可见分光光度计测定, SCOD 采用重铬酸钾法^[11]进行测量.采用 Excel 2019、Origin 2018 等软件进行数据处理及图形绘制.

2 结果与讨论

2.1 进料有机负荷和回流比对产氢量的影响

图 2 为不同进料有机负荷及回流比下,协同厌氧发酵过程中的产气量及氢气含量.在发酵前 8 h,接种液内的厌氧微生物逐渐适应新环境,并大量增殖,此时产气量及氢气含量均呈现快速增长趋势.随着反应进行,系统内有机物被大量消耗,因此在 12 h 后,部分实验组的产气量和氢气含量开始逐渐下降.系统运行至 24 h,随着物料的回流,部分实验组的产气量及氢气含量又逐步提升.但 A3 组、B3 组及有机负荷为 15 kg·m⁻³·d⁻¹ 实验组的产气量及氢气含量均呈现下降趋势,并直至为 0.表明高回流比和高有机负荷都会对系统造成较大冲击,并不能有效地提升产氢效果.原因可能是由于过高回流比会使出料中的大量耗氢细菌及抑制剂随着回流液与原料混合^[12],过高的有机负荷增大了有机质之间的传质阻力,不利于微生物与底物接触,且底物浓度过高会造成氨氮、重金属、VFAs 大量累积,抑制微生物活性^[13].

从图 3 可见,在 10 kg·m⁻³·d⁻¹ 有机负荷及 30% 回流比(B2 组)的情况下,系统的累计产气量和氢气含量均处于最高值,累计产气量达到 80 946 mL,氢气含量为 35.83%,系统的产气效果达到最佳.因此,在餐厨垃圾与水葫芦以较高进料有机负荷协同发酵过程中,辅以合适的回流比可以更好地减轻系统内 VFAs 与氨氮的累积,平衡系统酸碱性,

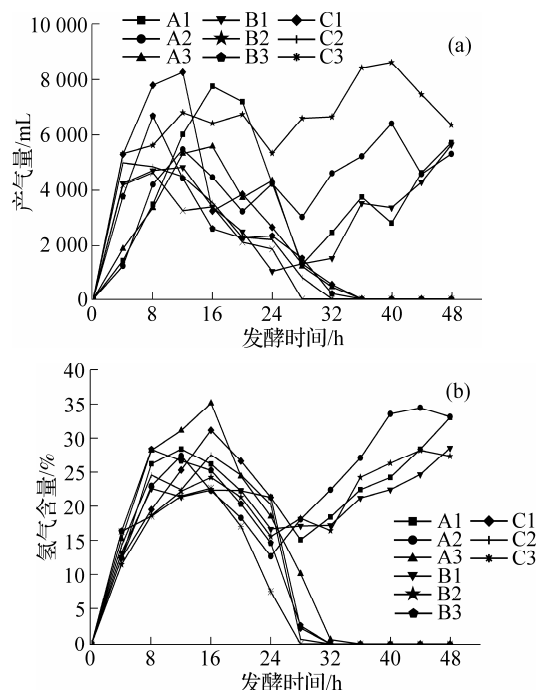


图 2 厌氧发酵过程中的产气量(a)及氢气含量(b)

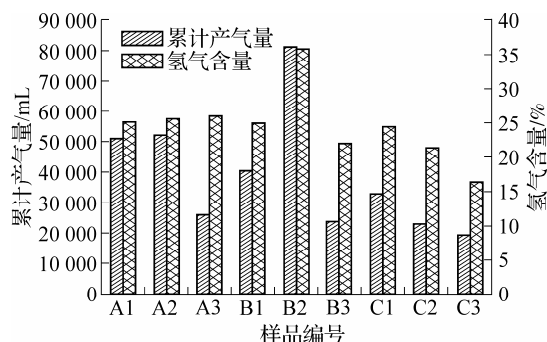


图 3 厌氧发酵 48 h 的累计产气量及氢气含量

削弱有机质之间的传质阻力,激发产氢菌活性,从而可以提高系统产氢效果,这与 Nordberg 等^[14]及傅国志^[15]的研究结果较接近.

2.2 进料有机负荷和回流比对产氢过程的影响

SCOD 是表征厌氧发酵液中有有机物含量的重要指标.厌氧发酵体系中碳水化合物和蛋白质多以固相形式存在,它们在转化为 VFAs 之前首先需要溶解,并释放至发酵液中,通过 SCOD 可以表征发酵过程中有机物的溶出情况^[16],这些可溶性的有机物是厌氧发酵产氢系统内微生物进行生命代谢活动的主要能量来源.

在厌氧发酵产氢过程中,系统内 SCOD 含量随反应时间变化情况如图 4(a)所示.在发酵前期,系统内 SCOD 在 22 000 mg·L⁻¹ 左右,随着反应的进行,

大量的固态有机废物在微生物及酶的作用下被水解为溶解性的有机物, 系统内的 SCOD 浓度迅速上升, 反应进行 12 h 时, 系统内 SCOD 质量浓度已经接近 $45\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在发酵 12~24 h 内, SCOD 浓度持续下降, 这是由于系统内的厌氧微生物正在进行生命活动, 消耗了大量溶解性有机物. 在 24 h 时, 排出物料大大降低了 SCOD 浓度; 后期随着新物料的不断分解, 系统中 SCOD 浓度又再一次升高. 在发酵后期的 SCOD 浓度变化中可以看出, 不同的有机负荷对于厌氧发酵系统内 SCOD 浓度的影响更加明显, 有机负荷越高, SCOD 浓度越高, 这与孟宪武等^[17]的研究结果一致. 在厌氧发酵 32 h 之后, SCOD 浓度开始下降, 这是由于溶解性有机物的消耗速率大于有机物从固相中溶出的速率. 相对于其他组别, C1 组、C2 组、C3 组、B3 组及 A3 组的 SCOD 浓度降幅并不明显, 且其浓度处于较高水平, 结合图 4(b)和图 4(c)所示, 其 VFAs 和氨氮产生积累, 且 pH 值降至 5.0 以下, 因此产氢菌的活性在此阶段内受到严重抑制.

由于 pH 值会影响到生物酶的活性以及产氢细菌的代谢途径, 是厌氧发酵系统中的重要参数. 而 VFAs 浓度会影响到系统 pH 值, 并且 VFAs 是厌氧发酵产氢过程中的重要中间产物. 图 4(b)及图 4(d)展示了不同有机负荷和回流比下, 各组厌氧发酵 48 h 的 VFAs 浓度及 pH 值变化. 餐厨垃圾中含有大量淀粉和糖类等易水解碳水化合物, 因而在发酵过程中会产生大量有机酸, 造成 VFAs 浓度迅速升高, 系统 pH 值逐渐下降. 在 24 h 进行物料回流后, A1 组、A2 组、A3 组、B1 组及 B2 组的 pH 值有短暂回升, 可能是由于回流物料中携带的 NH_4^+ 中和了部分酸性物质. 随着回流物料中有机物被微生物分解, 系统中 VFAs 浓度再次升高, A1 组、A2 组、B1 组以及 B2 组的 pH 值再次呈现出缓慢下降趋势, 而 A3 组的 pH 值迅速下降, 说明此时系统稳定性已经被破坏. 从图 4(b)中还可以看出, A3 组、B3 组、C1 组、C2 组及 C3 组的 VFAs 浓度始终处于较高状态, 且系统的 pH 值跌落至 5.0 以下. 这表明 $15\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 的高有机负荷及 50% 的高回流比会为系统提供大量的有机底物及营养物质, 从而使有机酸大量积累, 最终使系统崩溃.

在厌氧发酵的过程中, 氨氮主要来源于蛋白

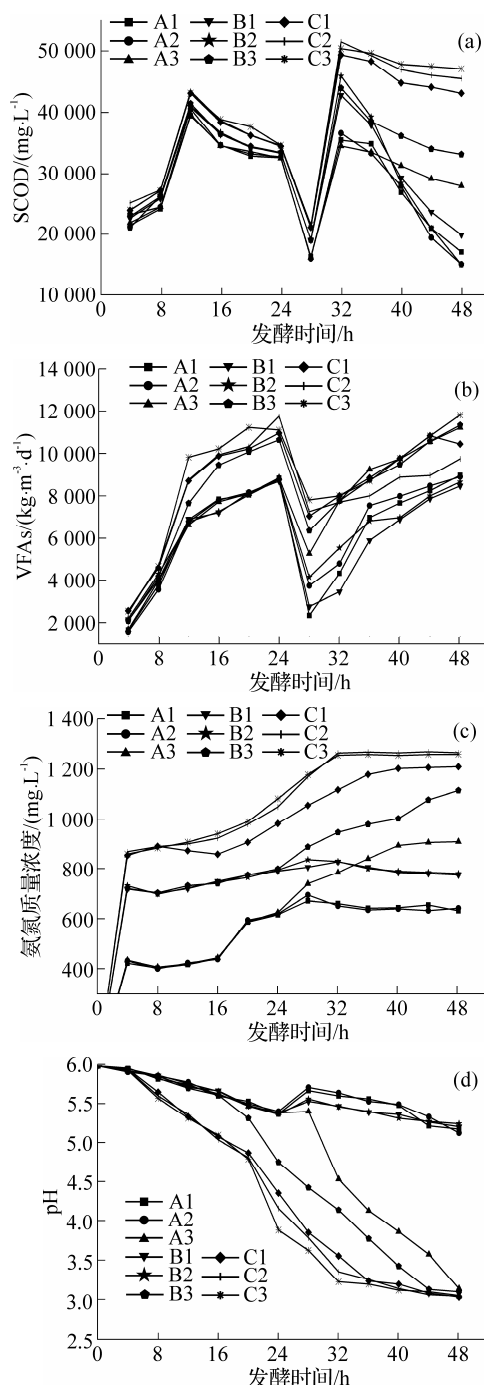


图4 厌氧发酵过程中 SCOD 质量浓度(a)、VFAs 浓度(b)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度(c)及 pH(d)的变化规律

质、氨基酸等含氮有机物的降解, 其形态以铵离子(NH_4^+)为主, 能够维持系统中 pH 值的稳定, 同时氮元素也是厌氧微生物生长所需要的基本营养元素之一. 图 4(c)展示了各组厌氧发酵 48 h 的氨氮浓度变化. 从图中可见, 不同有机负荷对于厌氧发酵系统内氨氮浓度的影响更加明显, 有机负荷越高, 氨

氮浓度也随之越高。由于回流比的不同,各组氨氮浓度也出现明显变化。回流比为50%的A3组及B3组的氨氮浓度在回流后增势迅猛,可能是因为发酵剩余物中的氨氮浓度通常情况下比进料高,发酵余物的过多回流会提高系统内的氮素含量。氨氮中的游离氨能自由透过细胞膜引起细胞内质子的不平衡和钾离子的缺失,改变细胞内部的pH值,可能会导致对特定酶反应的抑制,因而氨氮浓度过高会对细胞产生毒害作用^[18]。结合各组的产气情况,在餐厨垃圾协同水葫芦厌氧发酵过程中,高有机负荷和高回流比会导致系统内氨氮浓度的增加,并对产氢过程产生抑制作用。

在水解酸化过程中,大量氢元素以化合态形式存在于各种类型的脂肪酸中,其类型主要包含乙酸、丙酸、丁酸和戊酸,其中乙酸和丁酸对厌氧发酵产氢最有利,而丙酸积累则会降低厌氧发酵的产氢效果^[19]。Shen等^[20]在对果蔬废物与餐厨垃圾厌氧共消化的研究中,发现高有机负荷会导致丙酸占据主导地位。Yasin等^[21]研究了不同pH值下发酵餐厨垃圾中产氢细菌的微生物特征,结果表明,系统pH值低于5.0会导致梭状芽胞杆菌等有效产氢菌数量大大降低,进而使氢气产量下降。结合图4(a)及图4(b),排料时会流失大量SCOD及VFAs,对系统稳定性造成不利影响,而物料回流可及时补充系统所缺失的营养物质及微生物,但高有机负荷叠加高回流比会使系统失衡甚至崩溃,这也与A3组、B3组、C1组、C2组及C3组的累计产气量低相对应,因此合适的有机负荷及回流比对产氢影响十分重大。结合图4(c)及图4(d), $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 有机负荷及30%回流比条件下,系统的pH值维持在 5.5 ± 0.1 ,基本处于最佳产氢的pH值范围内,且不会引起氨氮浓度的过量累积。

3 结论与建议

将餐厨垃圾与水葫芦进行厌氧共发酵,通过分析各参数的变化,研究进料有机负荷及回流比对产氢能力的影响,得到如下结论:

(1)进料有机负荷及回流比同时提高,会促进有机物的水解溶出,导致系统内SCOD及VFAs浓度处于较高水平,对系统造成较大冲击,最终使系统的pH值跌落至3.0左右,有效产氢量大大降低。

(2)过度提高进料有机负荷会提升系统内的氨氮浓度, $15\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 有机负荷会使氨氮质量浓度达到 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,系统内厌氧微生物正常生命代谢活动受到严重抑制,使产气量大大降低。

(3)在较高进料有机负荷协同发酵过程中,辅以合适回流比可大大提高产氢效果。 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 进料有机负荷以及30%回流比被认为是本实验的最佳条件,其累计产气量为 $80\,946\text{ mL}$,氢气含量为35.83%。

在后续研究中,可考虑延长 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 进料有机负荷及30%回流比的实验周期,进一步考察该有机负荷与回流比条件下发酵系统的稳定情况,同时从分子生物学角度,进一步探究 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 进料有机负荷及30%回流比条件下,系统内部微生物态反馈,以此为固体废物资源化提供数据支持。

参考文献:

- [1] Suarez E, Tobajas M, Mohedano A F, et al. Energy recovery from food waste and garden and park waste: Anaerobic co-digestion versus hydrothermal treatment and anaerobic co-digestion[J]. Chemosphere, 2022, 297: 134223.
- [2] Xu X, Zhou Q, Yu D. The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(79):33677-33698.
- [3] 牛冬杰, 赵雅萱, 刘常青, 等. 餐厨垃圾厌氧产氢综述[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5):371-375.
- [4] Wang N, Chui C M, Zhang S Y, et al. Hydrogen production by the thermophilic dry anaerobic co-fermentation of food waste utilizing garden waste or kitchen waste as co-substrate[J]. Sustainability, 2022, 14(12):1-12.
- [5] 尤惠. 厨余垃圾两相厌氧发酵工艺优化研究[D]. 常州: 江苏理工学院, 2021.
- [6] Algapani D E, Qiao W, Ricci M, et al. Bio-hydrogen and bio-methane production from food waste in a two-stage anaerobic digestion process with digestate recirculation[J]. Renewable Energy, 2019, 130:1108-1115.
- [7] 熊杰, 袁海荣, 王奎升, 等. 餐厨垃圾两相厌氧消化特性试验研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(3):25-29.
- [8] 郭燕锋, 孔晓英, 刘婉玉, 等. 有机负荷对厨余垃圾常温厌氧发酵产甲烷的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1):96-100.
- [9] 于涛, 黄涛, 潘膺希, 等. 厌氧发酵连续运行中有机负

- 荷与工艺参数相互作用研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4):181-185.
- [10] 王星, 王德汉, 张玉帅, 等. 消化液回流比与有机负荷率对餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(10):748-752.
- [11] HJ 828—2017. 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法[S].
- [12] 郭强. 餐厨垃圾滚筒式发酵制氢反应器设计及运行参数调控[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [13] 吴云奇. 两相双温厌氧发酵产氢产甲烷工艺优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [14] Nordberg A, Jarvis A, Stenberg B, et al. Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(1):104-111.
- [15] 傅国志. 搅拌和沼液回流对麦秸序批式厌氧消化性能影响的试验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [16] 谷士艳, 闫屹嵩, 张文一, 等. 高盐高油对餐厨垃圾厌氧发酵酶活性及产 VFAs 的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6):228-234.
- [17] 孟宪武, 许晓晖, 杨智满, 等. 有机负荷对餐厨垃圾单相厌氧发酵的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 5567-15569.
- [18] 陈祥. 餐厨垃圾两相厌氧发酵氨氮特性与控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [19] Kim S, Choi K, Kim J O, et al. Biological hydrogen production by anaerobic digestion of food waste and sewage sludge treated using various pretreatment technologies[J]. Biodegradation, 2013, 24(6):753-764.
- [20] Shen F, Yuan H R, Pang Y Z, et al. Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase[J]. Bioresource Technology, 2013, 144:80-85.
- [21] Yasin N H M, Rahman N A, Man H C, et al. Microbial characterization of hydrogen-producing bacteria in fermented food waste at different pH values[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(16): 9571-9580.

Effect of feed organic loading and reflux ratio on hydrogen production from kitchen waste and water hyacinth fermentation

LI Zhexuan¹, SUN Yekan², DONG Zhiying^{1*}, YU Junxin¹, LI Bing¹, HU Tiantian¹, JIANG Li¹

(1.School of Civil & Environment Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Cixi Branch of Ningbo Municipal Bureau of Ecology and Environment, Cixi 315302, China)

Abstract: The co-anaerobic fermentation of organic solid waste can produce clean energy gas and hydrogen so as to achieve the goal of resource-based treatment. By setting different organic feed load and reflux ratio, analysis is conducted on the changes of gas production, hydrogen content, SCOD, volatile fatty acids (VFAs), pH and ammonia nitrogen ($\text{NH}^+\text{-N}$) in the process of anaerobic hydrogen production from kitchen waste and water hyacinth. The results show that high organic loading and high reflux ratio can lead to the accumulation of VFAs in the system and decrease the pH value of the system to less than 5.0. The effect of organic load on the co-production of hydrogen by kitchen waste and water hyacinth is greater, and the concentration of ammonia nitrogen and SCOD in the system is positively correlated with the organic load. When the organic load is $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ with the reflux ratio being 30%, the system has the best hydrogen production effect, the accumulative gas production reaches 80 946 mL with 35.83% of the hydrogen content. The results of this study are expected to provide reference for organic solid waste recycling treatment.

Key words: feed organic load; reflux ratio; kitchen waste; water hyacinth; anaerobic fermentation; hydrogen production

(责任编辑 章践立)