

物料比对污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化的影响

陈恒宝¹, 曹波², 许立群¹, 刘东²

(1. 镇江市水业总公司, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏泓润生物质能科技有限公司, 江苏 镇江 212001)

摘要: 依托市政污泥与餐厨废弃物协同处理工程, 考察了物料比对市政污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化效果的影响。结果表明, 在不同物料比下, 厌氧消化液的酸碱比(VFA/ALK)保持在0.10~0.12, 挥发性脂肪酸(VFA)维持在1 093~1 529 mg/L, 碱度(ALK)维持在10 321~13 688 mg/L, 厌氧消化系统处于稳定状态; 随着餐厨废弃物比例的增加, VS降解率和VS添加产气率呈增加趋势, 当污泥与餐厨废弃物的比例为1:2时, 两者协同厌氧消化效果最好, 此时VS降解率达到79.4%, VS添加产气率为0.56 m³/(kgVS·d), 沼气中的甲烷含量达到61.4%, H₂S产量为77.4 mg/m³; 污泥与餐厨废弃物的协同处理有利于减少沼气中的H₂S含量。

关键词: 市政污泥; 餐厨废弃物; 协同厌氧消化; 物料比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0013-05

Effect of Mixing Ratio on Anaerobic Co-digestion of Municipal Sludge and Kitchen Waste

CHEN Heng-bao¹, CAO Bo², XU Li-qun¹, LIU Dong²

(1. Zhenjiang Water Service Group, Zhenjiang 212001, China; 2. Jiangsu Hongrun Bioenergy Technology Company, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: Based on an anaerobic co-digestion project of municipal sludge and kitchen waste, the effect of mixing ratio on co-digestion efficiency was investigated. The anaerobic digestion system was stable under different mixing ratios, in which the volatile fatty acid (VFA) was maintained at 1 093 – 1 529 mg/L, the alkalinity (ALK) was maintained at 10 321 – 13 688 mg/L, and the VFA/ALK ratio of the anaerobic digestive fluid was maintained at 0.10 – 0.12. With the increase of the proportion of kitchen waste, the VS degradation rate and VS gas yield increased. When the ratio of municipal sludge to kitchen waste was 1 : 2, the performance of the anaerobic digestion system was the best, in which the VS degradation rate reached 79.4%, the VS gas yield was 0.56 m³/(kgVS·d), the proportion of methane in the biogas reached 61.4%, and the H₂S content was 77.4 mg/m³. The results also indicated that the co-digestion of municipal sludge and kitchen waste was beneficial to reduce the H₂S content in the biogas.

Key words: municipal sludge; kitchen waste; anaerobic co-digestion; mixing ratio

随着我国国民经济的快速发展以及人民生活水平的提高,城市固体垃圾逐年增加,其中餐厨废弃物与市政污泥是主要组成部分^[1],已成为困扰经济发展和环境治理的重大问题。由于餐厨废弃物和市政

污泥自身的特性,其单一厌氧消化过程难以实现系统的高效稳定运行^[2-3],因此二者协同厌氧消化处理成为了研究热点,其中,物料比是影响协同厌氧消化效果的重要因素,是协同处理工艺的重要研究方

向^[1,4]。笔者依托市政污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化处理实际工程项目,研究了物料比对协同厌氧消化系统的稳定性、产气率、物料降解率以及终端生物碳资源化等的影响,旨在为实际生产运行提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用污泥为镇江市某污水处理厂的剩余污泥,pH值为7.15,SCOD为6 800 mg/L,总固体(TS)含量为17.8%,其中挥发性固体(VS)占比为47.06%;餐厨废弃物来自镇江市主城区的学校、企业和大中型饭店,pH值为4.17,TS含量为14.7%,其中VS占比为90.40%。

1.2 试验装置与方法

试验采用全混式厌氧反应器(CSTR),厌氧消化罐由2台穿壁搅拌器和1台循环泵组成。厌氧消化罐的有效容积为2 800 m³,温度维持在(38±1)℃,搅拌方式为搅拌30 min、停止60 min。

考虑到厌氧消化罐的设计负荷,试验中不同物料配比的进料负荷设为3.00 kgVS/(m³·d)。按照污泥与餐厨废弃物的比例(S/K,以TS计)设计5组不同物料配比的厌氧消化试验,污泥与餐厨废弃物的进料量如表1所示,每组试验的停留时间保持在45 d以上。

表1 污泥与餐厨废弃物的进料量

Tab.1 Addition of municipal sludge and kitchen waste

试验 编号	投加量(污泥+ 餐厨)/(t·d ⁻¹)	S/K 值	TS/ (t·d ⁻¹)	有机负荷/ (kgVS·m ⁻³ ·d ⁻¹)
1	43.5+0	1:0	8.7	1.30
2	29.0+19.0	2:1	8.7	1.84
3	21.8+29.0	1:1	8.7	2.15
4	39.0+14.5	1:2	8.7	2.44
5	0+58.0	0:1	8.7	3.00

1.3 检测项目与方法

厌氧消化罐中消化液的检测指标包括:pH值、挥发性脂肪酸(VFA)、碱度(ALK)、TN、NH₃-N、TP、TS、VS、COD及沼气量等。其中,pH值采用电极法测定,VFA、ALK采用滴定法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,NH₃-N采用纳氏试剂分光光度法测定,TP采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定,TS、VS采用重量法测定,COD采用重铬酸钾法测定,沼气量及其组分采用在线仪表测定。

2 结果与讨论

2.1 物料比对厌氧消化系统稳定性的影响

厌氧消化过程中pH值、VFA、ALK以及酸碱比(VFA/ALK)的变化能够真实反映系统的稳定性,其中VFA/ALK值可以表征中间产物的积累以及微生物生存环境情况,是评价厌氧系统稳定性的重要指标^[5]。一般认为pH值维持在6.5~8.2、VFA<3 000 mg/L且VFA/ALK值为0.1~0.3时^[6],厌氧消化系统处于稳定状态。在本研究中,不同物料比下厌氧消化系统内pH值、VFA、ALK以及VFA/ALK值的变化如表2所示。可知,在不同物料比下,pH值均保持在稳定的范围内,VFA/ALK值保持在0.10~0.12,VFA维持在1 093~1 529 mg/L,ALK维持在10 321~13 688 mg/L,由此表明,污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化克服了两者的缺点(污泥厌氧消化时,可生化降解性差,碱度较高;餐厨废弃物厌氧消化时,可生化降解性强,碱度较低,缓冲能力差^[7]),提高了可生化降解性,并使碱度保持在正常范围,提高了系统的稳定性。

表2 物料比对pH值、VFA、ALK及VFA/ALK值的影响

Tab.2 Effect of mixing ratio on pH,VFA,ALK and VFA/ALK

项 目	pH 值	VFA/ (mg·L ⁻¹)	ALK/ (mg·L ⁻¹)	VFA/ ALK 值
S/K=1:0	7.33~7.86	1 093	10 321	0.11
S/K=2:1	7.17~7.68	1 434	11 863	0.12
S/K=1:1	7.28~7.69	1 261	11 463	0.11
S/K=1:2	7.48~7.78	1 187	11 720	0.10
S/K=0:1	7.47~7.80	1 529	13 688	0.11

随着餐厨废弃物比例的增加,厌氧消化液的TS含量呈下降趋势,纯污泥时厌氧消化液的TS含量为80 631 mg/L,而纯餐厨废弃物时仅为56 069 mg/L,餐厨废弃物中有机物含量高,更容易被降解。

此外,厌氧消化液中的NH₃-N浓度也是反映厌氧消化系统稳定性的重要指标,有研究表明,当NH₃-N在50~200 mg/L范围内时有利于消化反应的稳定运行,当NH₃-N>1 500 mg/L时会抑制消化过程^[8]。在本研究中,当S/K值为1:0、2:1、1:1、1:2、0:1时,NH₃-N浓度分别为1 064、1 125、1 567、1 811、1 625 mg/L,厌氧消化系统保持在稳定状态。与实验室的小型厌氧反应器相比,实际工程中的厌氧反应器容积较大,具有更大的缓冲能力,产甲烷菌能够适应较高负荷的NH₃-N。

2.2 物料比对厌氧消化系统降解率的影响

VS 降解率可以直观反映厌氧消化罐中有机物的降解情况。在本研究中,当物料比 S/K 值为 1:0、2:1、1:1、1:2、0:1 时,VS 降解率分别为 32.4%、50.6%、64.1%、79.4%、86.5%。由于市政污泥中有机物含量较低,纯污泥厌氧消化时 VS 降解率较低,随着餐厨废弃物添加比例的增加,VS 降解率呈现增加趋势,纯餐厨废弃物厌氧消化时 VS 降解率达到 86.5%,显著高于其他文献报道的结果(67.2%^[9]、40.4%^[10]);当 S/K=1:2 时,VS 降解率达到 79.4%,也显著高于其他小试研究结果^[1]。污泥中胞外聚合物(EPS)占总有机质的 50%~90%,其水解过程直接影响污泥的降解速率与程度^[11],随着餐厨废弃物的加入,物料中易水解酸化的组分比例增加,促进了甲烷菌的增殖,同时也促进了 EPS 的降解,提高了系统的物料降解率。

2.3 物料比对厌氧消化系统产气率的影响

物料的 VS 添加产气率是评价厌氧消化效率的重要指标,本研究将产气量和 VS 添加产气率作为评价不同物料比下厌氧系统运行效果的指标。当物料比 S/K 值为 1:0、2:1、1:1、1:2、0:1 时,VS 添加产气率分别为 0.31、0.42、0.48、0.56、0.59 m³/(kgVS·d),可知,纯污泥时 VS 添加产气率较低,添加餐厨废弃物后 VS 添加产气率显著上升,当 S/K 值为 1:2 时,VS 添加产气率较纯污泥时提高了 80.6%。另外,产气量亦随着物料中餐厨废弃物比例的增加而增加(见图 1)。污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化促进了营养物质比例平衡,提高了物料的降解率和产气率,进而提高了厌氧消化效率。

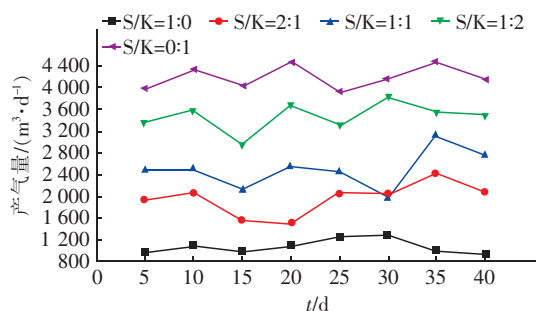


图1 物料比对厌氧消化系统产气量的影响

Fig. 1 Effect of mixing ratio on gas yield of anaerobic digestion system

2.4 物料比对厌氧消化系统沼气组成的影响

沼气成分主要包括 CH₄、CO₂、H₂S,不同物料比

对厌氧消化系统沼气组成的影响如图 2 所示。纯污泥时,沼气中 CH₄ 含量最高,达到 64.1%,添加餐厨废弃物后,CH₄ 含量呈降低的趋势,但各添加比例之间无明显变化规律。物料比对 CO₂ 含量的影响不大且无明显规律。随着餐厨废弃物添加比例的增加,H₂S 产量呈增加趋势,特别是纯餐厨废弃物时,H₂S 产量显著高于其他物料比,平均值达到了 418.9 mg/m³,而物料中有污泥时 H₂S 产量均在 100 mg/m³ 以下,这表明污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化有助于减少 H₂S 的产生。主要原因为:①污泥中的 Fe³⁺ 对厌氧消化过程中 H₂S 的产生和释放有较好的抑制作用^[12];②污泥中蛋白质含量较高,降解蛋白质产生的沼气中甲烷含量比降解其他有机质要高。因此,污泥与餐厨废弃物协同处理工程项目中沼气脱硫设计仅考虑干式脱硫法(氧化铁脱硫法)就可以达到降低沼气中 H₂S 含量的目的。

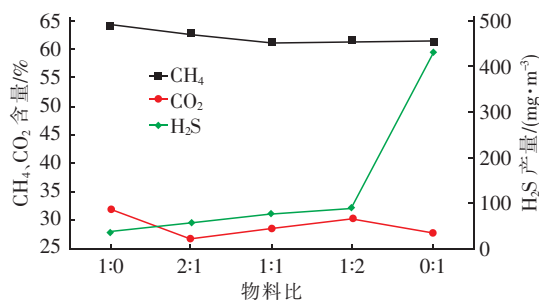


图2 物料比对厌氧消化系统沼气组成的影响

Fig. 2 Effect of mixing ratio on composition of biogas in anaerobic digestion system

2.5 物料比对后端资源化的影响

污泥与餐厨废弃物厌氧消化工程终端的沼渣经过“高干脱水+太阳能干化”处理后含水率降至 50% 以下,成为生物碳土,其主要用于园林绿化、土地改良等。生物碳土中的盐分以及重金属含量对其资源化利用起着至关重要的作用。不同物料比下生物碳土中的重金属含量如表 3 所示。可以看出,各物料比下生物碳土中的重金属含量均符合《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)中 A 级污泥的要求;随着物料中餐厨废弃物比例的增加,各重金属含量均呈显著下降趋势;当污泥与餐厨废弃物的比例为 1:2 时,重金属含量显著低于纯污泥时的,为资源化利用奠定了良好的基础。另外,生物碳土中的盐分采用全盐量表征,当物料比 S/K 值为 1:0、2:1、1:1、1:2 时,生物碳土中的全盐量分别为

2 553、3 980、4 583、4 670 mg/L,当S/K值为1:2与1:1时全盐量无显著差异。

表3 物料比对生物炭土中重金属含量的影响

Tab.3 Effect of mixing ratio on heavy metals content of biochar soil $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

项 目	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	As	Hg
纯污泥	513	557	96	49	41.4	0.81	18.4	0.839
S/K=2:1	503	538	66	44	41.8	0.92	18.1	0.820
S/K=1:1	392	415	53	38	33.2	0.57	15.6	0.727
S/K=1:2	246	269	42	31	25.3	0.22	13.7	0.604
GB 4284—2018 的 A 级标准	500	1 200	500	100	300	3	30	3

3 结论

① 市政污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化系统具有良好的缓冲能力,不同物料比下厌氧消化液的VFA/ALK值保持在0.10~0.12,VFA维持在1 093~1 529 mg/L,碱度维持在10 321~13 688 mg/L,厌氧消化系统处于稳定状态。

② 污泥与餐厨废弃物协同处理促进了厌氧消化系统的产气能力,随着餐厨废弃物比例的增加,VS降解率和VS添加产气率均呈现增加趋势,当污泥与餐厨废弃物的配比为1:2时,协同厌氧消化效果最好,VS降解率达到79.4%,VS添加产气率为 $0.56 \text{ m}^3/(\text{kgVS} \cdot \text{d})$,甲烷含量达到61.4%, H_2S 产量为 $77.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

③ 纯污泥时,沼气中的 CH_4 比例最高, H_2S 产量最低;纯餐厨废弃物时, H_2S 产量最高,添加污泥后, H_2S 产量迅速下降,餐厨废弃物与污泥协同处理有利于减少沼气中 H_2S 的含量。

④ 随着物料中餐厨废弃物比例的增加,生物炭土中的重金属含量呈现显著下降趋势,全盐量则呈升高趋势;当污泥与餐厨废弃物的比例为1:2时,生物炭土中的重金属含量显著低于纯污泥时的,全盐量则与比例为1:1时无显著差异。

参考文献:

[1] 刘长青,薛珊,金秋燕,等. 餐厨垃圾与市政污泥混合比对共厌氧消化性能的影响[J]. 中国沼气,2018,36(2):48-51.
Liu Changqing, Xue Shan, Jin Qiuyan, et al. Effect of mixing ratio of food waste and municipal sludge on anaerobic co-digestion[J]. China Biogas,2018,36(2):

48-51(in Chinese).

[2] Hyunmin J, Misun K, Jeonghyub H, et al. Reactor performance and methanogenic archaea species in thermophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge mixed with food wastewater[J]. Chem Eng J, 2015,276:20-28.
[3] Dai X H, Duan N N, Dong B, et al. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance[J]. Waste Manage,2013,33(2):308-316.
[4] 黄宇钊,冼萍,李桃,等. 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 Yuzhao, Xian Ping, Li Tao, et al. Two-phase anaerobic digestion performance of food waste and hot alkali treated sludge[J]. Environmental Engineering, 2018,36(9):119-124(in Chinese).
[5] 曹秀芹,袁海光,丁浩,等. 餐厨垃圾湿式厌氧消化最优有机负荷及其失稳指标[J]. 环境工程学报,2018,12(7):2123-2131.
Cao Xiuqin, Yuan Haiguang, Ding Hao, et al. Exploration of optimal organic loading rates and instability indicators in wet anaerobic digestion of kitchen waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2018,12(7):2123-2131(in Chinese).
[6] Li L, He Q, Wei Y, et al. Early warning indicators for monitoring the process failure of anaerobic digestion system of food waste[J]. Bioresour Technol,2014,171:491-494.
[7] 李浩,黄慧群. 餐厨垃圾与污泥厌氧发酵动力学特性分析[J]. 环境工程,2018,36(7):107-112.
Li Hao, Huang Huiqun. Kinetics characterization of anaerobic digestion of food waste and waste activated sludge[J]. Environmental Engineering,2018,36(7):107-112(in Chinese).
[8] Rajagopal R, Masse D I, Singh G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia[J]. Bioresour Technol,2013,143:632-641.
[9] 张晨光,祝金星,王小韦,等. 餐厨垃圾、粪便和污泥联合厌氧发酵工艺优化研究[J]. 中国沼气,2015,33(1):13-16.
Zhang Chenguang, Zhu Jinxing, Wang Xiaowei, et al. Optimization of anaerobic fermentation with mixed material of kitchen waste, faeces and sludge[J]. China Biogas,2015,33(1):13-16(in Chinese).

- [10] 夏芳芳,谭婧,周洋,等. 杭州天子岭餐厨垃圾厌氧消化沼气项目案例研究[J]. 中国沼气,2018,36(2): 76-80.
Xia Fangfang, Tan Jing, Zhou Yang, *et al.* Case study of Hangzhou Tianziling food waste anaerobic digestion project[J]. China Biogas, 2018, 36(2): 76-80 (in Chinese).
- [11] 卢鹏程. 以剩余污泥胞外聚合物为处理对象的厌氧发酵预处理研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2017.
Lu Pengcheng. Study of Pretreatment of Anaerobic Fermentation Based on Extracellular Polymeric Substances of Waste Activated Sludge[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [12] 张玲,郑西来,余宗莲,等. FeCl_3 及 AlCl_3 对中温厌氧消化系统产生 H_2S 的抑制作用[J]. 环境工程学报, 2015,9(12):5907-5914.
Zhang Ling, Zheng Xilai, She Zonglian, *et al.* Inhibition effect of FeCl_3 and AlCl_3 on H_2S from sludge mesotherm anaerobic system[J]. Chinese Journal of Environmental

Engineering, 2015, 9(12): 5907-5914 (in Chinese).



作者简介:陈恒宝(1967-),男,江苏镇江人,本科,高级工程师,主要从事污水处理和城市有机质协同处理技术的研究与运营工作,现为镇江市水业总公司总经理。

E-mail: chb246@sina.com

收稿日期:2019-06-15

(上接第12页)

- 2018,34(15):6-11 (in Chinese).
- [5] 方土,周家中,吴迪,等. 长三角地区某污水处理厂准IV类水提标改造分析[J]. 中国给水排水,2018,34(17):94-99.
Fang Tu, Zhou Jiazhong, Wu Di, *et al.* Analysis on upgrading and reconstruction of class IV surface water in a wastewater treatment plant in Yangtze River Delta region[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 94-99 (in Chinese).
- [6] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria[J]. Nature, 2015, 528(7583): 504-509.
- [7] Seviour R. Microbial Ecology of Activated Sludge[M]. London: IWA Publishing, 2010.
- [8] Gao P, Xu W, Sontag P, *et al.* Correlating microbial community compositions with environmental factors in activated sludge from four full-scale municipal wastewater treatment plants in Shanghai, China[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2016, 100(10): 4663-4673.
- [9] 周石磊,黄廷林,白士远,等. 贫营养好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 238-248.

Zhou Shilei, Huang Tinglin, Bai Shiyuan, *et al.* Isolation, identification, and nitrogen removal characteristics of oligotrophic aerobic denitrifiers[J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 238-248 (in Chinese).



作者简介:郑志佳(1988-),男,河北承德人,硕士,工程师,主要从事污水处理工艺系统设计与研发工作。

E-mail: qingdaospr@163.com

收稿日期:2019-06-15