

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.04.017

北京高安屯餐厨协同污泥厌氧消化生产性试验

宋晓雅, 张建新, 张荣兵, 石磊, 葛勇涛, 宗倪, 陈靖轩,
李晓晓

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 餐厨与污泥同属城市有机废弃物,均采用厌氧消化作为重要手段来实现资源化、减量化和稳定化。将两者协同处置,理论上可避免餐厨单独厌氧消化易酸化、污泥单独消化产气率低等问题。利用北京高安屯污泥处理中心现况污泥处理设施,开展大型生产性试验,将预处理后的餐厨浆料与污泥实施联合中温厌氧消化以验证协同处置实际效果。试验期间,协同系统稳定,协同处置效应明显,实际产气量与理论产气量基本吻合。消化池中酸碱比低于0.12,氨氮含量低于4 000 mg/L。消化池有机负荷峰值为3.399 kgVS/(m³·d)、有机物分解率平均为63.59%、分解单位有机物产气率平均为1.41 m³/kgVS、单位干固体沼气产量平均为571 m³/tDS,较单独污泥厌氧消化时分别提升2.7%、15.2%、5.2%和31%。但需注意,随着餐厨浆料比例的增加,沼气中甲烷含量略有降低。此外,还针对协同处置消化系统的进排泥操作提出了优化措施。

关键词: 餐厨; 协同效应; 污泥; 厌氧消化; 生产性试验

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)04-0099-08

Productive Experiment of Kitchen Waste and Municipal Sludge Anaerobic Co-digestion in Beijing Gao'antun Sludge Treatment Center

SONG Xiao-ya, ZHANG Jian-xin, ZHANG Rong-bing, SHI Lei, GE Yong-tao,
ZONG Ni, CHEN Jing-xuan, LI Xiao-xiao
(Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Both kitchen waste and municipal sludge are municipal organic wastes, and anaerobic digestion is used as an important means to achieve resource utilization, reduction and stabilization. The co-digestion of the two can theoretically avoid the problems of easy acidification of kitchen waste anaerobic digestion alone and low gas production rate of sludge digestion alone. Using the current sludge treatment facilities of Beijing Gao'antun sludge treatment center, a large-scale productive experiment was carried out to verify the actual effect of co-processing by combined mesophilic anaerobic digestion of pretreated kitchen slurry and municipal sludge. During the experiment, the synergistic system was stable with obvious disposal effect. The actual gas production was basically consistent with the theoretical gas production. The acid-base ratio in the digestion tank was lower than 0.12, and the ammonia nitrogen content was lower than 4 000 mg/L. The peak organic load of digestion tank was 3.399 kgVS/(m³·d), the average decomposition rate of organic matter was 63.59%, the average unit organic matter gas production rate was 1.41 m³/kgVS, and the average dry solid biogas yield was 571 m³/tDS, which was 2.7%, 15.2%, 5.2% and 31% higher than that of sludge anaerobic digestion alone. However, it should be noted that with the increase of the kitchen waste proportion, the methane content in biogas decreased slightly. In addition,

optimization measures are proposed for the sludge inlet and outlet operation of the co-processing digestive system.

Key words: kitchen waste; synergistic effect; sludge; anaerobic digestion; productive experiment

厌氧消化是污泥资源化的重要手段。作为城市另一废弃物的餐厨垃圾,也多采用厌氧消化作为处理技术。如何将这两类废弃物进行协同处置,袁悦等^[1]提出高温预处理市政污泥与餐厨垃圾联合中温厌氧消化的运行策略。申世峰等^[2]试验表明,污泥与餐厨垃圾协同处置时,厌氧消化系统平均有机物降解率可提高137.4%。王磊^[3]开展的市政污泥与餐厨垃圾两相中温厌氧消化试验中,有机物分解率达到54.9%~64.7%。朱英东等^[4]指出餐厨垃圾和市政污泥有机物质量比为1:1时,单位质量有机物甲烷产量和有机物分解率较高。在工程实践方面,挪威 Ecopro 项目^[5]自2008年起采用热水解高级厌氧消化技术集中协同处理餐厨垃圾、市政污泥和动物加工废物。江苏省镇江市餐厨垃圾与市政污泥协同处理项目^[6]设计餐厨垃圾处理量140 t/d(其中餐厨垃圾120 t/d,含水率以85%计;废弃油脂20 t/d)和市政污泥处理量120 t/d(以含水率80%计)已经于2016年投产运行。北京城市排水集团有限责任公司也在积极开展餐厨协同市政污泥联合厌氧消化大型生产性试验,摸索和积累生产运行经验。

1 概述

该试验设置于北京朝阳区高安屯污泥处理中心。项目依托现况2座消化池(6号和7号消化池,

单池容积12 000 m³,柱形钢罐),新增储罐1座(容积20 m³)、进料泵2台(20 m³/h)等设施;此外,进行了消化池部分进、排泥管线改造。

试验设计餐厨浆料处理量为100 t/d(以含水率86.5%计),接收北京市区餐厨处理厂经筛分、破碎制浆和提油后的餐厨浆料;热水解污泥处理量为550 m³/d(以含水率92%计),取自热水解后污泥。餐厨浆料和热水解污泥通过不同管线进入消化池。消化工艺采用单级中温厌氧消化、机械搅拌。消化后污泥进入板框脱水机房进行压滤脱水。沼气并入厂区管网。

工艺流程见图1。

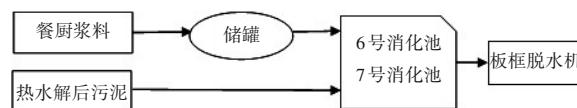


图1 餐厨协同污泥生产性试验工艺流程

Fig.1 Process flow diagram of kitchen waste collaborative sludge productive test

2 运转情况

该项目自2021年9月6日正式启动,截至2023年3月底,已稳定运转19个月。主要运行工况分6个阶段,见表1。

表1 生产性试验主要运行工况

Tab.1 Main operating conditions of productive test

运行时段	6号消化池		7号消化池	
	进料	排泥	进料	排泥
2021年9月6日—2022年1月14日	热水解污泥+餐厨浆料A	底部排泥	热水解污泥	溢流排泥
2022年1月15日—2022年1月20日	热水解污泥+餐厨浆料A	溢流排泥	热水解污泥	溢流排泥
2022年1月21日—2022年3月8日	热水解污泥	溢流排泥	热水解污泥+餐厨浆料A	溢流排泥
2022年3月9日—2022年4月28日	热水解污泥+餐厨浆料A	溢流排泥	热水解污泥	溢流排泥
2022年4月29日—2022年8月14日	热水解污泥+餐厨浆料A+餐厨浆料B	溢流排泥	热水解污泥+餐厨浆料A+餐厨浆料B	溢流排泥
2022年8月15日—2023年3月31日	热水解污泥+餐厨浆料A+餐厨浆料B	底部排泥	热水解污泥+餐厨浆料A+餐厨浆料B	底部排泥

3 运行分析

3.1 处理量

试验期间,整个系统餐厨浆料接收量平均为

153 t/d(以质量计),热水解污泥接收量为345 m³/d(以含水率80%计)。餐厨浆料A平均含水率为87.5%,有机分含量86.7%,COD为185 175 mg/L,

总氮为3 675 mg/L,pH为4.61。浆料B平均含水率为88.4%,有机分含量84.5%,COD为157 480 mg/L,总氮为3 463 mg/L,pH为4.91。热水解污泥平均含水率为91.2%,有机分含量59.7%,氨氮为1 162 mg/L,挥发性脂肪酸为3 242 mg/L,总碱度为4 237 mg/L。

协同消化池的混合进料中,餐厨量平均为150 m³/d(浆料A为88 m³/d,浆料B为62 m³/d),热水解污泥783 m³/d。6号、7号消化池停留时间平均值分别为35、26 d。由于6号消化池在试验期间运行时间较长,故以6号消化池为例进行分析。

3.2 处理效率

3.2.1 处理负荷

试验期间,6号消化池中餐厨浆料占总进料的比例(体积比)为0.48%~97.94%,平均为23%,峰值出现在2022年9月9日。单日餐厨处理量峰值为236 m³,出现在2022年8月5日。个别时段未进餐厨浆料,主要是由于餐厨浆料来量较少以及在6号

和7号消化池之间进行餐厨量调配等。

3.2.2 有机物分解率

试验期间,消化池进料有机负荷峰值为3.399 kgVS/(m³·d),有机物分解率平均值为63.59%。与污泥单独厌氧消化时[2021年1月—8月,6号消化池有机负荷峰值为3.309 kgVS/(m³·d),有机物分解率平均值为55.22%]相比,协同处置时有机负荷峰值提高2.7%,有机物分解率平均值提升15.2%。

3.2.3 分解单位有机物的沼气产量

计算6号消化池分解单位有机物的沼气产量,其变化范围为0.809~1.909 m³/kgVS,均值为1.41 m³/kgVS。较污泥单独厌氧消化时(2021年1月—8月,6号消化池分解单位有机物的沼气产量平均值为1.34 m³/kgVS)提升5.2%,如图2所示。与国内同类项目相比,明显高于镇江餐厨污泥协同项目^[7](0.84 m³/kgVS)。分析差异可知,本试验中有机物分解率(63.59%)远高于镇江项目的有机物分解率(53.5%)。

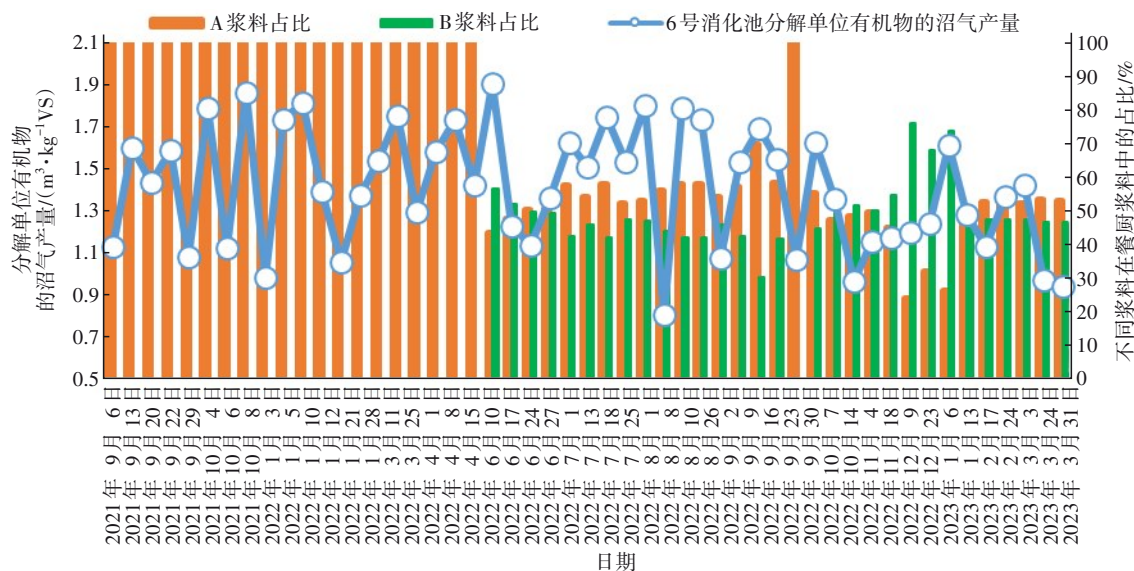


图2 分解单位有机物的沼气产量

Fig.2 Decomposition of biogas yield per kilogram of organic matter

3.3 产气量

3.3.1 理论产气量

根据张健^[8]热水解污泥-餐厨垃圾混合基质理论的甲烷产量估算公式,本试验的理论产气量估算公式如下:

$$y = a_1 \times m_1 + a_2 \times m_2 + a_3 \times m_3 \quad (1)$$

式中: y 为混合基质的理论产气量,m³/kgVS_m; a_1 为热水解污泥单位质量进泥的有机物产气量,

m³/kgVS_m; m_1 为热水解污泥中的有机物量,kg; a_2 为餐厨浆料A单位质量进料的有机物产气量,m³/kgVS_m; m_2 为餐厨浆料A中的有机物量,kg; a_3 为餐厨浆料B单位质量进料的有机物产气量,m³/kgVS_m; m_3 为餐厨浆料B中的有机物量,kg。

在理论计算中, a_1 选取6号消化池未进餐厨浆料的前8个月内(即2021年1月—8月)生产数据的平均值(0.799 m³/kgVS_m); a_2 和 a_3 选自廖晓聪等^[9]调

试100 t/d餐厨厌氧消化工程的实测数据,即 a_2 取值为 $0.821 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{in}}$, a_3 取值为 $0.815 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{in}}$ 。

3.3.2 实际产气量与理论产气量的比较

以2022年8月5日—2023年3月15日进料数据为基础,计算此期间理论产气量,并与实际产气量进行比较,发现除个别时段实际产气量较理论产气量变化有波动外,两者数值基本接近。

进一步分析具体时段两者有差异的原因,发现

与进料中各组分的急剧变化有关。如2022年11月中下旬,进料中热水解污泥有机物占比突增,则单位进料有机物产气量较之前先明显下降,然后再小幅回升,随着热水解污泥有机物占比再增加而再次降低。

6号消化池沼气产率的变化见图3。

6号消化池理论产气量与实际产气量的偏离变化如图4所示。

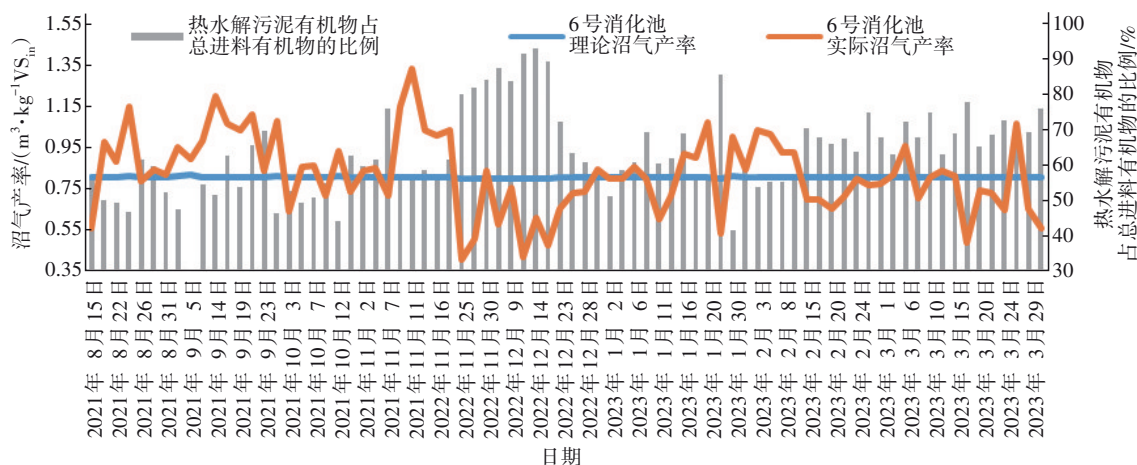


图3 6号消化池沼气产率的变化

Fig.3 Variation of biogas yield in No.6 digestion tank

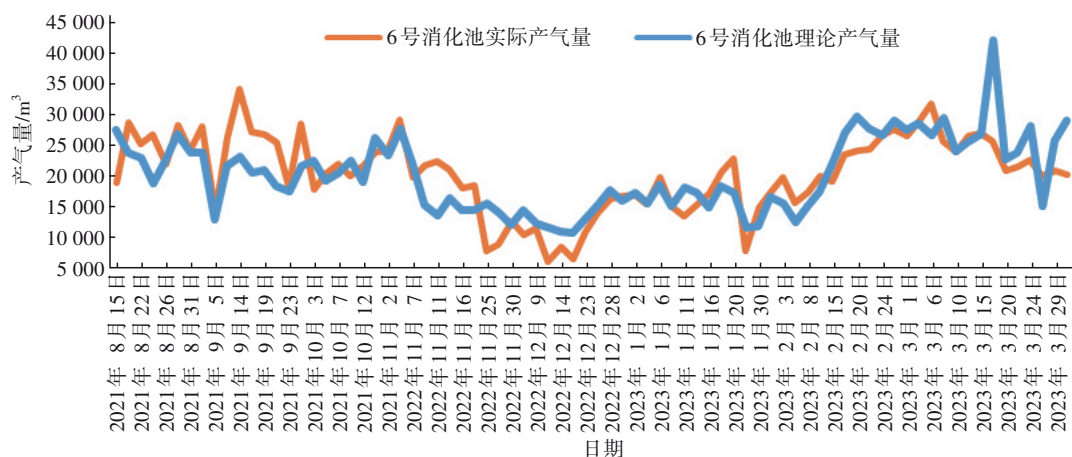


图4 6号消化池理论产气量与实际产气量的偏离变化

Fig.4 Variation of deviation between theoretical gas production and actual gas production in No.6 digestion tank

3.3.3 单位干固体沼气产量

实际生产中,常用单位干固体沼气产量来衡量厌氧消化的运行情况。在整个运行时段,消化池单位干固体沼气产量波动范围为 $126 \sim 1\,257 \text{ m}^3/\text{tDS}$,平均为 $571 \text{ m}^3/\text{tDS}$ 。

消化池进料中餐厨浆料占比(体积比)明显影响产气情况。如2022年9月9日,消化池浆料A在

消化池进料中占比为68.41%,浆料B占比为29.53%,两者之和接近98%,消化池单位干固体沼气产量高达 $1\,257 \text{ m}^3/\text{tDS}$ 。

与之相反,2022年1月21日—3月8日,6号消化池停止进餐厨浆料,只进热水解污泥,可见消化池的单位干固体沼气产量明显偏低。

6号消化池单位干固体沼气含量变化见图5。

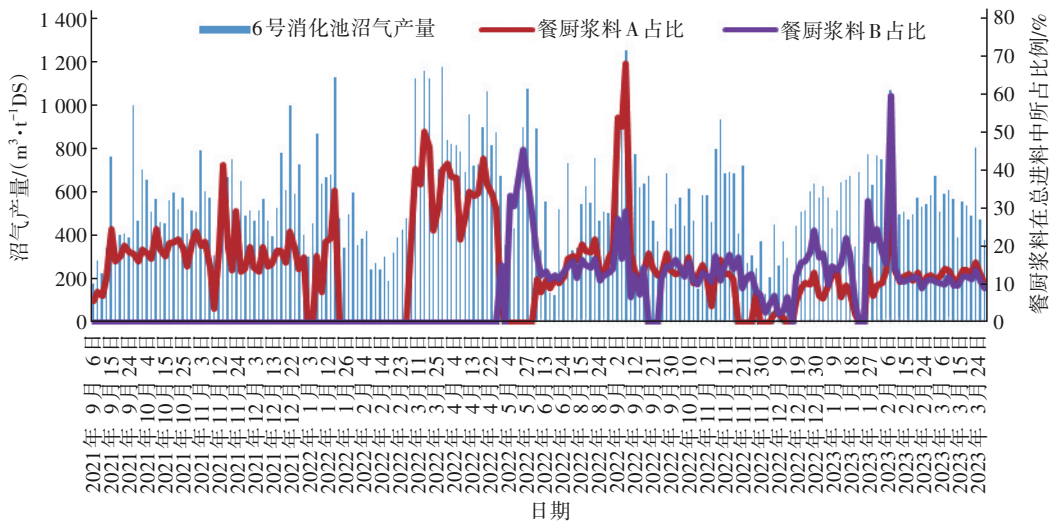


图5 6号消化池单位干固体沼气产量变化

Fig.5 Variation of gas production per unit dry solid in No.6 digestion tank

3.4 理化性质

3.4.1 酸碱比和氨氮

试验期间,6号消化池内挥发性脂肪酸浓度为 500 ~ 1 400 mg/L,总碱度为 8 960 ~ 13 800 mg/L,酸

碱比(挥发性脂肪酸和总碱度的比值)变化范围为 0.042 ~ 0.114,平均值为 0.067。6号消化池内氨氮浓度为 1 480 ~ 3 800 mg/L,平均值为 2 756 mg/L,见图 6。与未进餐厨浆料时的比较见表 2。

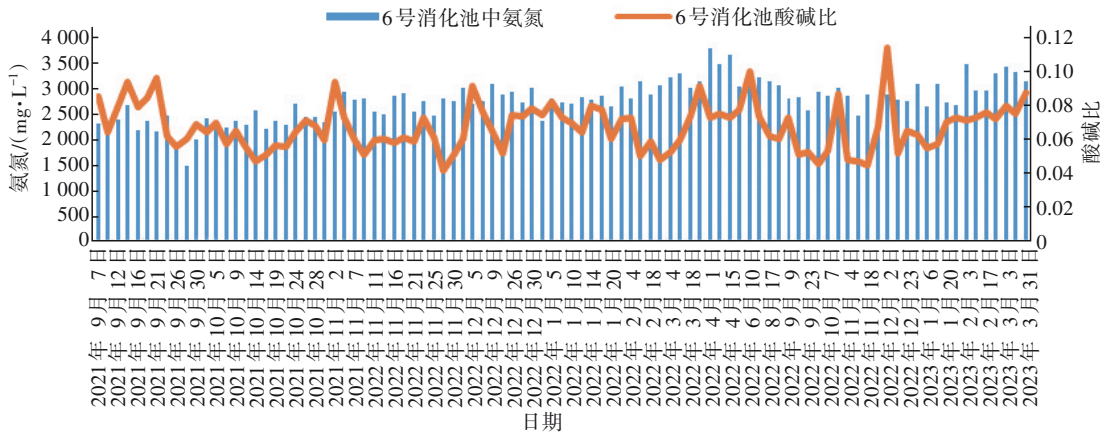


图6 消化池内酸碱比与氨氮变化

Fig.6 Changes of acid-base ratio and ammonia nitrogen in No.6 digestion tank

表2 进餐厨浆料前后消化池内污泥理化性质的变化

Tab.2 Changes of physico-chemical properties of sludge in digestion tank before and after feeding kitchen slurry

项目	挥发性脂肪酸/ (mg·L ⁻¹)	总碱度/(mg·L ⁻¹)	酸碱比范围	酸碱比均值	氨氮变化范围/ (mg·L ⁻¹)	氨氮均值/ (mg·L ⁻¹)
热水解污泥单独厌氧消化	409 ~ 1 750	5 080 ~ 11 000	0.049 ~ 0.229	0.097	1 080 ~ 3 140	2 085
热水解污泥与餐厨协同厌氧消化	500 ~ 1 400	8 960 ~ 13 800	0.042 ~ 0.114	0.067	1 480 ~ 3 800	2 756

进餐厨浆料后,消化池内总碱度和氨氮含量均有增加,酸碱比略有降低。与陈恒宝等^[10]关于污泥与餐厨协同厌氧消化中总碱度和氨氮的变化结论一致。

3.4.2 沼气中甲烷和硫化氢含量变化

6号消化池沼气中甲烷和硫化氢变化如图 7 所示。由图 7 可见,甲烷含量(体积比)随着进料中餐厨浆料量的增加而略有降低,硫化氢含量变化没有

明显规律。将6号消化池与未进餐厨浆料的5号消化池同期数据进行对比,同样表现出进餐厨浆料的

消化池沼气中甲烷含量略有降低,而硫化氢变化无规律。

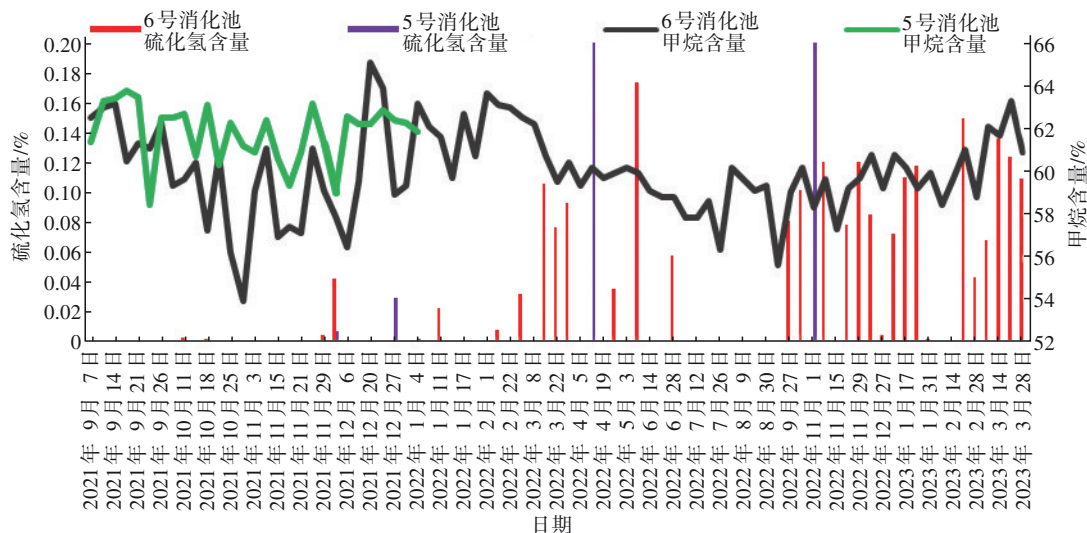


图7 消化池沼气中甲烷和硫化氢含量变化

Fig.7 Changes of methane and hydrogen sulfide content in biogas of digestion tanks

4 协同效应评价

4.1 稳定性

程晓格等^[11]指出,油脂和盐分是影响餐厨垃圾厌氧消化稳定性的重要因素。在运行初期,对餐厨浆料和消化池中的动植物油含量进行了对比(见图8)。

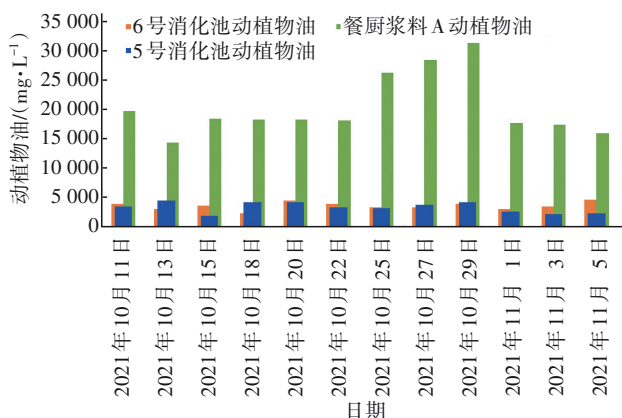


图8 餐厨进料与消化池中动植物油含量

Fig.8 Animal and vegetable oil content in kitchen slurry and digestion sludge

餐厨浆料A中动植物油含量平均为20 367 mg/L,6号消化池中动植物油含量平均为3 273 mg/L,未进餐厨浆料的5号消化池中动植物油含量平均为3 291 mg/L。从数据上看,参与协同处置的消化池与未参与协同处置的消化池中动植物油含量没有明显差

异。分析原因,主要是本试验中餐厨浆料来自餐厨处理厂预处理提油后的浆料,从来源就减少了油脂的制约因素。具体到盐分,在协同处置系统中其影响更小。一方面是餐厨在进料中占比偏低,另一方面更重要的原因是热水解消化系统中钠元素含量较低,如2020年检测热水解进泥中钠元素含量为1 579 mg/kg^[12]。整体而言,热水解污泥作为稳定的缓冲剂,与餐厨实施协同,减少了餐厨浆料单独厌氧消化的不利影响。

4.2 有机负荷

本试验中消化池有机负荷峰值出现在2023年3月17日,为3.399 kgVS/(m³·d);当日消化池热水解污泥进料量为426 m³,餐厨浆料进料量为114 m³(浆料A为61 m³,浆料B为53 m³),消化池停留时间为22 d。在热水解污泥单独厌氧消化系统中,要达到此负荷,按照污泥平均含水率为91.2%、有机物含量为59.7%计算,消化池的进泥量应为776 m³;此时消化池停留时间仅为15 d。两者比较,在同样的停留时间内,餐厨与污泥协同厌氧消化比污泥单独厌氧消化的有机负荷提高潜力更大。

4.3 产气量

未进餐厨浆料前消化池单位干固体沼气产量平均为436 m³/tDS,协同处置期间单位干固体沼气产量平均为571 m³/tDS,较之前提升31%。从试验数据看,协同处理系统中餐厨占比较高时,表现出

单位干固体沼气产量更高。由于本试验中餐厨浆料平均占比仅为23%,随着今后餐厨浆料比例的加大,系统总产气量将有明显提升。这表明,餐厨与污泥协同处置较污泥单独厌氧消化,在产气量上有明显优势。

5 存在的问题及改进措施

5.1 最佳有机负荷

本试验中最大有机负荷与李晓帅等^[13]分析协同处置最佳有机负荷 $7 \sim 8 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的数值还有差距。分析有机负荷未能调至这一数值的原因,一方面是餐厨量的大量提升必将导致现况板框脱水系统负荷的增加、滤液处理量的增加和板框脱水药剂的调整等。由于餐厨量是在现况消化池处理量的基础上增加的,随着餐厨量的提升,会导致消化池总处理量的增加,反馈到脱水环节就是整体板框处理量的增加和板框滤液量的增加。由前述可知,协同处置消化池中总碱度和氨氮较热水解污泥单独厌氧消化时有所增加,碱度增加会影响到原有脱水药剂的絮凝效果,故会涉及板框脱水药剂的调整;氨氮增加会导致原有板框滤液处理系统(厌氧氨氧化系统)中氨氮负荷的增加,也需要处理工况或处理设施的调整。这些都需要大量的资金和设施投入,短期内会制约餐厨处理量的提升。另一方面是项目本身定位为生产性试验,要在确保安全的情况下通过时间来稳步提升负荷、规范运行操作,为后续大规模协同处置设施建设和运行积累经验。

5.2 运行控制

5.2.1 进料(或进泥)

试验中发现,当热水解污泥因故停止进泥时,短时间内存在餐厨浆料单独厌氧消化的问题。由于产气量剧增,消化池出现大量气泡释放。严重时气泡会从溢流口逸出到消化池外。解决此问题的措施是将热水解污泥进泥与餐厨浆料进料实施自控联锁,避免餐厨浆料单独厌氧消化。

5.2.2 排料(或排泥)

试验中验证了消化池不同排泥方式(静压溢流排泥、底部手动排泥等)的操作风险。当采用静压溢流排泥方式,按原消化池设计的溢流排泥液位运行则易出现消化池冒泥。主要原因是原消化池设计产气量比协同处置消化池产气量少。当采用底部手动排泥时,虽然可将消化池液位控制得较低,

但是在进料量突增时,同样可能因排泥不及时而导致消化池冒泥。目前较好的方式是采用底部自动排泥,将消化池保持在较低的液位,但这需要与后续脱水系统联锁。现况板框脱水系统为序批式处理,若消化池大量排泥而板框处理不及时可能导致运行失稳。

6 结论

① 依托现况污泥处理设施来实施餐厨协同污泥中温厌氧消化,在实践中证实切实可行,系统运行状况良好。消化池中酸碱比低于0.12,氨氮含量低于 4000 mg/L ,实际产气量与理论产气量基本吻合。

② 餐厨与污泥协同效应明显。协同系统中消化池有机负荷峰值为 $3.399 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、有机物分解率平均为63.59%、分解单位有机物产气率平均为 $1.41 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ 、单位干固体沼气产量平均为 $571 \text{ m}^3/\text{tDS}$,较污泥单独厌氧消化时分别提升2.7%、15.2%、5.2%和31%。

③ 随着餐厨浆料在消化池总进料量中占比的增加,沼气中的甲烷含量较污泥单独厌氧消化时略有降低,硫化氢变化无明显规律。

④ 针对协同系统中消化池的进排泥操作,应考虑设置餐厨进料与消化池进泥联锁、优先采用底部排泥。

参考文献:

- [1] 袁悦,王博,李永波,等. 高温预处理强化污泥与餐厨垃圾共消化[J]. 环境工程,2023,41(2):91-97.
YUAN Yue, WANG Bo, LI Yongbo, et al. Enhancement of co-digestion of sludge and food waste by high temperature pretreatment [J]. Environmental Engineering, 2023,41(2):91-97 (in Chinese).
- [2] 申世峰,郭兴芳,顾森,等. 污泥厌氧消化产沼性能强化的工程措施研究[J]. 环境卫生工程,2022,30(4):30-34.
SHEN Shifeng, GUO Xingfang, GU Miao, et al. Research on engineering measures for enhancing the performance of methane production of sludge anaerobic digestion [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2022,30(4):30-34(in Chinese).
- [3] 王磊. 污泥与餐厨垃圾联合两相中温厌氧消化效果探析[J]. 净水技术,2015,34(2):67-71.
WANG Lei. Performance analysis of effect of two-phase

- mesophilic and anaerobic co-digestion for kitchen waste and sewage sludge [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(2): 67-71 (in Chinese).
- [4] 朱英东, 周俊, 雍晓雨, 等. 餐厨垃圾和市政污泥配料比对厌氧产甲烷特性及微生物多样性的影响[J]. *生物加工过程*, 2018, 16(3): 60-70.
- ZHU Yingdong, ZHOU Jun, YONG Xiaoyu, *et al.* Biomethane production and microbial community change during the co-digestion of food waste and municipal sludge with different mix ratios [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2018, 16(3): 60-70 (in Chinese).
- [5] 廖足良, KLEIVEN M, 邓缔, 等. 中国大中城市基于热水解高级消化污泥餐厨垃圾集中协同处理的能源资源利用前景分析[C]//第十三届中国城镇水务发展国际研讨会与新技术设备博览会论文集. 重庆:《城镇供水》杂志社, 2018: 136-142.
- LIAO Zuliang, KLEIVEN M, DENG Di, *et al.* Thermal hydrolysis advanced digestion for centralized and co-treatment of sludge and biowaste for energy and resource utilization and the perspective in large and medium sized cities in China [C]// *Proceedings of the 13th China International Symposium on Urban Water Development and New Technology Equipment Expo 2018*. Chongqing: *City and Town Water Supply Press*, 2018: 136-142 (in Chinese).
- [6] 陈小华. 污泥和餐厨垃圾协同处理工程厌氧消化系统的启动调试[J]. *净水技术*, 2018, 37(6): 86-90.
- CHEN Xiaohua. Start-up and commissioning test of anaerobic digestion system for co-digestion project of kitchen waste and sewage sludge disposal [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(6): 86-90 (in Chinese).
- [7] 陈恒宝, 许立群, 张有仓, 等. 市政污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化工程实例[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(6): 79-84.
- CHEN Hengbao, XU Liqun, ZHANG Youcang, *et al.* A case project for sewage sludge and food waste co-digestion [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(6): 79-84 (in Chinese).
- [8] 张健. 热水解污泥—餐厨垃圾协同厌氧消化及产甲烷动力学研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017: 80-82.
- ZHANG Jian. Kinetics of Anaerobic Co-digestion of Thermal Hydrolysis Sludge and Food Waste [D]. Nanning: Guangxi University, 2017: 80-82 (in Chinese).
- [9] 廖晓聪, 罗智宇, 赵野, 等. 餐厨全混厌氧消化工程的启动调试[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(1): 31-37.
- LIAO Xiaocong, LUO Zhiyu, ZHAO Ye, *et al.* Start-up of anaerobic digestion for food waste: strategy and performance [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(1): 31-37 (in Chinese).
- [10] 陈恒宝, 曹波, 许立群, 等. 物料比对污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化的影响[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(1): 13-17.
- CHEN Hengbao, CAO Bo, XU Liqun, *et al.* Effect of mixing ratio on anaerobic co-digestion of municipal sludge and kitchen waste [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(1): 13-17 (in Chinese).
- [11] 程晓格, 王琬, 邓冠勇, 等. 油脂和盐分对餐厨垃圾厌氧消化影响及缓解抑制研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(2): 534-539.
- CHENG Xiaoge, WANG Wan, DENG Guanyong, *et al.* Overview of research on the effect of grease and salt on anaerobic digestion of kitchen waste and mitigation of inhibition [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(2): 534-539 (in Chinese).
- [12] 宋晓雅. 热水解厌氧消化系统中金属和矿物油含量分析[J]. *给水排水*, 2022, 48(S1): 851-855.
- SONG Xiaoya. Analysis of metal and mineral oil content in thermal hydrolysis anaerobic digestion system system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(S1): 851-855 (in Chinese).
- [13] 李晓帅, 张栋, 戴翎翎, 等. 污泥与餐厨垃圾联合厌氧消化产甲烷研究进展[J]. *环境工程*, 2015, 33(9): 100-104.
- LI Xiaoshuai, ZHANG Dong, DAI Lingling, *et al.* State of the art of methane produced from sludge and food waste co-digestion [J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(9): 100-104 (in Chinese).

作者简介: 宋晓雅(1971-), 女, 河北石家庄人, 大学本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为污水污泥的处理处置、运行管理等。

E-mail: songxy@bdc.cn

收稿日期: 2023-05-04

修回日期: 2023-06-05

(编辑: 衣春敏)