

城镇污水污泥协同处理厨余垃圾厌氧消化的 标准化研究

杨 雪, 李春鞠

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 在“双碳”背景下,城镇污水污泥与厨余垃圾协同厌氧消化得到广泛关注和工程化实施,在多地取得了良好效益。首先分析了我国典型协同厌氧消化工程的规模、进料配比、主要技术参数、产物资源化利用等内容,对比了现行污泥和厨余垃圾单独厌氧消化技术标准的主要内容,分析了现行标准对工程建设的指导性,提出亟需制定针对污泥协同处理厨余垃圾的厌氧消化技术标准,以指导工程建设。其次,对美国、欧洲等国家在协同厌氧消化工程建设情况、主要技术条件和产物处置标准等内容,进行了分析和总结,以期协同厌氧消化相关标准制定提供参考。

关键词: 污泥;厨余垃圾;厌氧消化;资源化利用;标准

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0332-05

Standardized Research on Anaerobic Digestion of Kitchen Waste in Co-treatment of Municipal Sewage Sludge

YANG Xue, LI Chunju

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Under the “dual-carbon” background, the co-anaerobic digestion of municipal sewage sludge and kitchen waste has received extensive attention and engineering implementation, and the good benefits have been achieved in many places. Firstly, the scale, feedstock ratio, main technical parameters, and product resource utilization of typical co-anaerobic digestion projects in China are analyzed. The main contents of the current technical standards for separate anaerobic digestion of sludge and kitchen waste are compared. The guidance of the current standards for engineering construction is analyzed. It is proposed that there is an urgent need to formulate the anaerobic digestion technology standards for the co-treatment of sludge and kitchen waste in order to guide the engineering construction. Secondly, the construction situation, main technical conditions and product disposal standards of co-anaerobic digestion projects in the United States and Europe are analyzed and summarized, which provides the references for the formulation of relevant standards for the co-anaerobic digestion.

Keywords: sludge; kitchen waste; anaerobic digestion; resource utilization; standard

0 引 言

“双碳”背景下,城镇污水处理和垃圾分类收集处理受到国家各个部委的高度重视。2021年6月,国家发展改革委、住房和城乡建设部联合发布《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》(发改环资〔2021〕827号),鼓励采用污泥和餐厨、厨余废弃物共建处理设施方式,提升城市有机废弃物综合处置水

平,以破解污泥处置难点,实现无害化推进资源化。随后,国家发展改革委在《“十四五”循环经济发展规划》中再次提出,将厨余垃圾、园林废弃物、污水厂污泥等低值有机废物的统筹协调处置作为重点任务。

截至2023年底,城市污水干污泥产生量达1 505.4万t,县级污水干污泥产生量228.7万t,以含水率80%湿污泥计,县级及以上城市污水湿污泥产生量为8 670.5万t^[1]。但我国污泥资源利用率只有2%,而美国和欧盟地区污泥资源利用率都在50%以上,英国甚至高达到75%。在各种污泥处理处置技术路线中,厌氧消化的碳排放很低,而且产生沼气不仅可以作为能源满足污水厂自用,多余的沼气还可

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”技术标准项目,基于减碳增效的污泥协同处理厨余垃圾技术标准研究(23DZ2200200)

作者简介: 杨雪(1986—),女,博士,高级工程师,从事污泥处理和资源化利用工作。

以用于热电联产和精制提纯天然气外供,是实现污水处理厂碳循环的关键途径^[2]。然而,因我国管网建设不完善,我国污泥含砂量高,有机质含量仅为30%~50%,普遍低于发达国家污泥有机质含量(60%~80%)^[3],由此与厨余垃圾协同厌氧消化等高级厌氧消化技术得到了广泛关注和普遍应用^[4]。

1 我国协同厌氧消化现状

1.1 协同厌氧消化处理工程建设

污泥单独厌氧消化往往存在碳源不足或氨氮积累导致的抑制问题,使得污泥挥发性固体去除率和产气率较低等,未能充分达到厌氧消化处理效能。厨余垃圾单独厌氧消化则可临系统易酸化、氯化钠浓度过高等引起的系统运行失败问题。污泥和厨余垃圾协同厌氧消化过程具备以下优点:(1)能够平衡二者有机组分,提高系统缓冲抑制能力,减少单一组分带来的限制;(2)能够获得更多样化的微生物种群,充分发挥微生物种群间的协同作用,维持系统稳定性;(3)能够获得更理想更稳定的挥发性固体去除

率、产气率和甲烷含量,如:长三角地区某污泥厌氧消化工程平均挥发性固体去除率为41.6%、产气率为0.45 m³/kgVS、沼气中甲烷含量在42%~55%之间,而污泥和厨余垃圾协同处理工程的平均挥发性固体去除率可提高至53.5%、产气率达0.84 m³/kgVS、沼气中甲烷含量提高至61.5%;(4)相比于二者单独建厂处理的用地面积而言,卸料、厌氧处理、脱水、污泥气净化、厂区管理等设施可以共用,使得协同处理设施占地通常较小

目前,协同厌氧消化在我国镇江、苏州、常州等10余个城市得到了广泛应用,通过沼气提纯燃气外供、毛油提炼生物柴油、沼渣深度脱水用于园林绿化等资源化利用途径,实现了良好的经济和环境效益。

表1列举了几个典型的污水污泥和厨余垃圾协同厌氧消化工程,各项工程进料中污水污泥与厨余垃圾的配比差距较大,其中,镇江协同处理工程污泥占比最高(二者配比为1:1),苏州协同处理工程中污泥占比最低(二者配比1:5)。从协同厌氧消化工艺选择看,以湿式为主,反应温度以中温为主。

表1 我国典型协同厌氧消化工程

序号	地点	建设规模	进料	工艺	温度/℃	负荷VS/[kg·(m ³ ·d) ⁻¹]	产气率VS/(m ³ ·kg ⁻¹)	沼气用途	沼渣处置	沼液处理
1	镇江	240 t/d	120 t/d 污泥、120 t/d 厨余垃圾	湿式	38±1	2.2	0.52~0.84	自用120万m ³ 、提纯燃气外供92万m ³	深度脱水后用于园林绿化	排入邻近污水厂
2	大连	800 t/d	600 t/d 污泥、200 t/d 厨余垃圾	湿式	35±1	4.4	0.2	提纯燃气外供	脱水干化用于园林绿化或填埋覆盖土	排入邻近污水厂
3	苏州	260 t/d	40 t/d 污泥、200 t/d 厨余垃圾、20 t/d 地沟油	湿式	33~35	1.1	0.63	优先厂内供热,剩余部分热电联产并网	脱水后外运,电厂焚烧	采用气浮—MBR—纳滤进行处理,纳滤浓缩液经高级氧化处理后和纳滤清液送至临近污水厂
4	泰州	355 t/d	180 t/d 厨余垃圾、100 t/d 污水污泥、15 t/d 粪便、30 t/d 地沟油	干式	40	—	—	优先厂内供热,剩余部分热电联产并网	脱水后外运焚烧	采用水解酸化—MBR—纳滤处理后达到纳管标准,送至污水厂
5	深圳	500 t/d	300 t/d 污泥、200 t/d 厨余垃圾	湿式	35~38	0.4	0.65	优先厂内供热,剩余部分热电联产并网	外运粪渣厂,经处理后作为肥料出售	排入邻近污水厂

本文以镇江协同处理工程项目为例,说明协同处理工程技术路线和产出效益情况。该项目为独立设厂建设,建设规模240 t/d,其中:餐厨垃圾120 t/d,市政污泥120 t/d,项目用地2.13 hm²。进料污泥含水率80%、厨余垃圾含水率85%,为了保证污泥和餐厨垃圾中有机质能有效降解,污泥采用高温热水解进行预处理,餐厨垃圾采用分选-浆化-提油进行预处

理,随后随后,利用螺杆泵将预处理后物料中温、湿式厌氧消化反应器。经处理后,沼渣经浓缩干化后用于园林绿化,沼液送至污水处理厂用作补充碳源,沼气采用干法脱硫—胺法脱碳—变温吸附脱水处理后优先厂内自用,其余部分提纯为燃气经管网外供入户(见图1)。

项目自投产运行以来,运行效果良好、稳定,挥

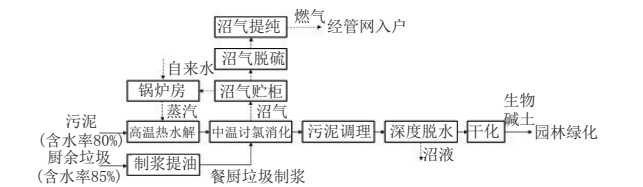


图1 镇江污水污泥和厨余垃圾协同处理工程技术路线^[5]

发性固体降解率可达53.5%，沼气产率0.84 m³/kgVS，甲烷含量61.5%，年平均沼气产量332.4万m³，其中厂内自用120万m³，提纯气外供92.4万m³。相较于污泥或厨余垃圾单独建厂处理，可实现节地40%以上，沼气产量增加15%以上。

1.2 现行相关技术标准

对于污泥单独厌氧消化或厨余垃圾单独厌氧消化的工艺设计，分别制定有国家标准或行业标准的约束。通过对相关标准提出的设计参数进行比较可知（见表2），二者在常用工艺形式、进料要求（包括含固率和粒度）、停留时间、C/N、挥发性固体容积负荷等方面均有明显不同。在协同厌氧消化的工程实践过程中，因底物物理化学性质差异较大，难以以单一底物厌氧消化标准所提出的技术参数开展工程设计。其次，已建工程规模和进料底物配比情况差异较大，也存在难以借鉴已建工程经验的情况，为了能够获得准确的设计参数，保障工程建设效益，部分工程在设计前需根据污水污泥和厨余垃圾的理化性质，开展实验研究，以提出适用的设计参数。

表2 污泥和厨余垃圾单独厌氧消化的典型设计参数^[6-9]

内容	污泥单独	厨余单独
常用工艺	湿式	湿式、干式
含固率/%	常规：2~6 高含固：8~10	湿式：8~18 干式：18~30
粒度/mm	砂砾：小于0.2 mm 纤维：小于40 mm	湿式：小于10 mm 干式：小于25 mm
停留时间/d	20~30	湿式：15 干式：20
C/N	(10~20)：1	(25~30)：1
pH值	—	6.5~7.8
挥发性固体容积负荷/ [kgVSS·(m ³ ·d) ⁻¹]	按预处理方式不同：重 力浓缩：0.6~1.5；机械 浓度：不大于2.3；高温 热水解：2.8~5.0	6~8

值得注意的是，表1中泰州协同厌氧消化工程采用了干式工艺。干式厌氧消化因负荷高、沼液量少、预处理要求低、系统简单、易于模块化设计等诸多优势，在有机固体废物处理领域逐渐得到了应用。目前，我国干式厌氧消化设备以欧洲成套进口设备为主，如瑞典的KOMPOGAS干式厌氧消化设备、德国

Strabag干式厌氧消化设备、法国的仓筒型干式厌氧消化设备等。这些主流进口设备处理能力只有50、75、100 t/d三种规格，难以满足我国处理需求。其次，我国污泥含砂量高，厨余垃圾含油和盐分高，国外干式厌氧消化设备在国内应用时，罐内物料形态与设计工况差距较大，导致设计有机负荷过高、物料输送管道频繁堵塞等问题。因此，有必要结合国内实际工程经验制定适合我国污泥和厨余垃圾组分特征的协同厌氧消化技术标准，指导干式厌氧消化设备国产化进程。

2 国外协同厌氧消化现状

2.1 美国

2.1.1 总体情况

美国厨余垃圾长期以来多采用填埋或焚烧的方式处理，但这些方法存在二次污染、经济投入高、资源化利用程度不足等问题^[10]。协同厌氧消化作为一种新型生物有机固体处理技术，能够有效地减少进入填埋的废弃物比例、减少温室气体排放、减少地下水和空气污染，并实现较高程度的资源化利用^[11]。美国污水厂对协同消化厨余垃圾平均收取约1.11元/t(0.06美分/gal)的处理费，根据进料性质的不同，最高可收取1.58元/t(0.1美分/gal)的处理费。

在政策导向方面，美国相继出台的废物管理政策、税收豁免、可再生能源信贷（如：可再生能源识别号码（renewable identification numbers，RINs））等政策激励了厌氧消化技术的实施，以满足环境法规和能源目标。可再生能源燃料标准（renewable fuel standard，RFS）于2005年提出，随后于2007年将来自垃圾填埋场、污水处理厂、沼气池产生的沼气被指定为可再生能源燃料，2014年补充认定了增加纤维素生物燃料产生沼气的级别（D3 RINs），这种燃料要求纤维素含量不低于75%^[12]。但厨余垃圾以油脂、糖类和蛋白质为主，无法符合75%纤维素含量的要求，因此接收厨余垃圾的设施产出的沼气被限制在D5 RINs，这些RINs需求较低且价值较低。基于此，污水厂在接收厨余垃圾时，通常采取分类分拣措施提高厨余垃圾品级，以满足相关政策要求。

据EPA统计，截至2021年，美国共有128个污水污泥与厨余垃圾协同厌氧消化设施，占厨余垃圾厌氧消化处理设施的46.5%，总处理规模约9 522.2 t/d，设施平均处理能力43.1 t/d。污水厂协同厌氧消化设施接收的厨余垃圾包括油脂（占比66%）、食品加工

行业废弃物(占比 8.8%)、饮料行业废弃物(占比 4.4%)、餐厨垃圾(占比小于 1%)等。

2.1.2 工艺设计和运行情况

为了保障厌氧消化设施运行效能,污水厂通常要对厨余垃圾进行预处理,方式包括:筛分、破碎、除杂、热处理、酸碱调节等。同时,部分污水厂要求进料厨余垃圾不能含有塑料、玻璃等无机杂质,确保其符合厌氧消化处理相关标准。协同厌氧消化设施反应条件如下:(1)以中温为主;(2)全部采用湿式厌氧消化(含固率小于 15%);(3)以连续搅拌罐式反应器为主^[13]。

污水厂协同厌氧消化设施年产气量可达 44 497.8 万 m³,沼气优先厂内自用,剩余沼气通过热电联产方式向外供给,年可产生电力 693×10⁶ kW·h,可供 58 333 户家庭一年使用。沼渣资源化利用途径以土地利用为主(占比 74%)。沼液经氮、磷回收处理后,回流至前端污水处理池或消化池中。

2.1.3 产物处置标准

污水污泥协同厨余垃圾厌氧消化产物处置需按污泥土地利用标准(40 CFR PART 503)执行,当污泥中重金属污染限值高于表 3 时,不可进行土地利用。

表 3 污泥土地利用的重金属标准限值(干重) 单位:mg/kg

指标	砷	镉	铬	铜	铅	汞	钼	镍	硒	锌
限值	75	85	3 000	4 300	840	57	75	420	100	7 500

根据污泥土地利用施用地块类型,将污泥归为 A 和 B 两类,分别执行不同的病原体控制要求(见表 4)。当污泥用于农田、森林、复垦场地或可能与公众接触场地时,需满足 A 类污泥限值要求,或同时满足 B 类污泥病原体限值和场地限制要求。当污泥用于草坪、家庭花园或出售时,因与人接触可能性极高,需满足 A 类要求。B 类污泥场地限制包括:限制公众进入施用区域;限制作物种植期间(如收获前一定时间内不得施用污泥);禁止在特定区域(如水源、湿地等)施用。

B 类污泥一般通过厌氧消化处理即可实现,而需进一步达到 A 类污泥标准时,需采取高温消化、热处

表 4 污泥土地利用时病原体限值^[12]

类型	类大肠杆菌	肠道病毒	寄生虫卵
Class A	1 000 MPN/g-干重或沙门氏菌 3 MPN/4g-干重	1 PFU/4g-干重	1 个/4g-干重
Class B	2 000 000 MPN/g-干重	—	—

理、高 pH 处理、辐射处理等工艺。

2.2 欧洲

2.2.1 总体情况

自 1997 年开始,丹麦、芬兰、瑞典、英国等国家纷纷提出有机固体废弃物不可直接填埋的法规要求^[14],加之《巴黎协定》、《京都议定书》等协议目标,使得有机固体废弃物资源和能源回收得到极大重视,进而使得厌氧消化工艺得到了广泛应用,如:瑞典提出计划将沼气产量自 2 TW·h 增加至 2030 年的 7 TW·h。

欧洲的协同厌氧消化主要以畜禽粪便、厨余垃圾、农业废弃物、食品工业废弃物等直接源自生物的有机固体废弃物为进料,这样做的好处在于能够避免重金属、微塑料、病原体等潜在污染风险,以便沼渣可用于农业肥料等土地利用产品。

欧洲部分污水厂污泥厌氧消化设施会接收厨余垃圾、食品加工业废弃物、农业废弃物等有机原料,以提升沼气产量。在筛选协同处理底物时,通常要考虑下列几项因素:(1)有机质、氮、磷含量高的原料,如:厨余垃圾、乳制品副产品;(2)富含纤维的固体原料不宜用连续搅拌罐式反应器,以免导致管道、泵、阀门等设备堵塞、磨损,如:园林绿化废弃物;(3)含有高浓度氨或硫化氢、某些重金属、消毒剂、抗生素等抑制剂的原料,如确有必要接受的,其进料量必须受到限制;(4)含塑料、石头、金属、玻璃等杂质的原料需经预处理,以免损坏泵、管道、搅拌系统等;(5)油脂类废物更适合在污水处理厂中进行协同消化,必要时需采取预处理,避免管道堵塞或 pH 值波动。

污水厂污泥厌氧消化以湿式、中温为主,因此协同厌氧消化反应条件也为湿式、中温,设计停留时间、产气率、有机质降解率等其他协同厌氧消化推荐技术参数见表 5。

表 5 欧盟厌氧消化工艺主要技术参数参考值

指标	HRT/d	温度/℃	产气率 VS/(L·kg ⁻¹)	有机物降解率/%	沼气中甲烷含量/%
参数值	16 ~ 25 d	35 ~ 39	450 ~ 500	45 ~ 55	63 ~ 67

处理产生的生物气与美国的资源利用方式相同,以热电联产转化为主,优先厂内使用,多余时外供。为了进一步回收有机固体废物中营养物质,沼渣多以就近土地利用为主,且不推荐焚烧处置。沼液需经处理后将氮含量减少 85%~90% 后,再回流至

污水处理厂前端,以免氮负荷影响污水处理工艺正常运行,最常用的沼液处理技术是厌氧氨氧化(Anammox)技术^[15]。

2.2.2 处理处置标准

污水厂污泥经处理后产生的沼渣,用于农业时,要符合 86/278/EEC 的有关规定,法规要求要根据表 4 中土壤和污泥重金属浓度限值,提出每单位面积每年可用于土壤的污泥最大数量(以干物质质量表示),或满足表 4 中每单位面积每年向土壤中引入重金属总量限值。除遵循重金属污染浓度限值之外,欧盟要求要根据污泥中营养物质含量和植物营养物质需求,确定污泥施用量;当土壤 pH 值低于 6 时,要考虑重金属移动性和植物可吸收性增加造成污染严重的情形,必要时会降低表 6 所列限值^[16]。

表 6 污泥土地利用的重金属标准限值

指标	镉	铜	铅	汞	镍	锌
土壤(干重)/ (mg·kg ⁻¹)	1~3	50~140	50~300	1~1.5	30~75	150~300
污泥(干重)/ (mg·kg ⁻¹)	20~40	1 000~1 750	750~1 200	16~25	300~400	2 500~4 000
每公顷每年增加 的重金属总量/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	0.15	12	15	0.1	3	30

3 结 语

现今,发展低碳经济、循环经济已成为世界各国的重要议题,协同厌氧消化能够弥补单一组分反应所带来的运行不稳定、产气效率不高、挥发性固体去除率低等问题,能够充分发挥有机固体废弃物厌氧消化技术应有的产物资源化优势,同时兼具节地、降低投资等社会和经济效益,近年来得到了广泛的工程化应用。污泥或厨余垃圾单独厌氧消化技术标准难以指导协同工程设计,难以充分发挥协同厌氧消化工程效益,亟需制定针对污泥协同处理厨余垃圾的厌氧消化技术标准,以指导后续相关工程建设。

(1)有必要开展协同厌氧消化工程建设标准编制,涵盖工程规模规划和设计、进料中污泥和厨余垃圾配比、厌氧消化工艺选择、湿式和干式厌氧消化技术参数、产物处理和资源化利用方式等内容。

(2)有必要开展协同干式厌氧消化设备产品标准编制,结合我国工程实际需求,统一干式厌氧消化反应器规格,明确干式厌氧消化设备的进料要求,提出暂存、输送、换热、脱水、控制等通用设备配置和技术要求,规范反应罐防腐、保温、防爆等技术条件。

(3)有必要充分研判国外相关法规制定背景、应用实施条件、效益产出等内容,在深入分析我国协同处理工程实践需求基础上,梳理、提取有利于指导我国工程建设或设备生产的参考内容。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2023 年城乡建设统计年鉴 [EB/OL]. (2024-10-25) [2025-01-16]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjn/index.html>.

[2] 戴晓虎,张辰,章林伟,等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1-5.

[3] 陈思思,杨殿海,庞维海,等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(4): 1511-1520.

[4] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145-153.

[5] 张辰,王盼,杨雪,等. 双碳背景下城镇污水系统减碳技术研究与应用[J]. 给水排水, 2024, 50(10): 1-7.

[6] GB 50014—2021, 室外排水设计标准[S].

[7] T/CECS 20007—2021, 城镇污水处理厂污泥厌氧消化工艺设计与运行管理取南[S].

[8] GB 55012—2021, 生活垃圾处理处置工程项目规范[S].

[9] CJJ 184—2012, 餐厨垃圾处理技术规范[S].

[10] Demirbas A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review[J]. Applied Energy, 2009(86): 108-117.

[11] Bolzonella D, Fatone F, Gottardo M, et al. Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: techno-economic assessment of full scale applications[J]. Journal of Environmental Management, 2018(216): 111-119.

[12] 40 CFR PART 503, Standards for the use or disposal of sewage sludge[S].

[13] John S, Orise F. Anaerobic digestion facilities processing food waste in the united states(2019) [M]. Washington D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2023.

[14] Nathalie B. Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants[M]. Paris: IEA Bioenergy, 2015.

[15] Fux C, Siegrist H. Nitrogen removal from sludge digester liquids by nitrification/denitrification or partial nitrification/anammox: environmental and economical considerations[J]. Water Science and Technology, 2004, 50(10): 19-26.

[16] Directive 86/278/EEC, The protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture[S].