

初沉污泥与剩余污泥热水解厌氧消化性能研究

任征然¹, 王佳伟¹, 高金华^{1*}, 文洋¹, 郝 珊², 张 含¹

(1. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124; 2. 北京排水集团通惠河流域公司, 北京 100082)

摘要: 通过分析初沉污泥和剩余污泥的物化性质及厌氧消化性能, 研究了热水解对初沉污泥和剩余污泥的影响。研究表明, 两种污泥中的有机质主要为糖类、蛋白质和脂肪, 初沉污泥的脂肪含量高于剩余污泥, 而糖类和蛋白质含量则低于剩余污泥。初沉污泥热水解前后厌氧消化产气率分别为 365 和 376 L·kg⁻¹TS, 剩余污泥分别为 102 和 273 L·kg⁻¹TS。热水解对初沉污泥的影响并不明显。但经过热水解处理后, 剩余污泥的厌氧消化性能得到了显著提升, 其 VS 去除率从 29% 提高至 49%, 初沉污泥和剩余污泥的混合污泥也从 33% 提高至 48%。因此, 热水解处理在提升污泥厌氧消化性能方面具有显著效果, 但需针对不同污泥的特性选择适当的热水解工艺。

关键词: 初沉污泥; 剩余污泥; 物化性质; 厌氧消化

中图分类号: X703; X933.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)01-0023-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024010023

Performance of Biogas Production by Anaerobic Digestion of Primary Sludge and Waste Activated Sludge / REN Zhengran¹, WANG Jiawei¹, GAO Jinhua^{1*}, WEN Yang¹, HAO Shan², ZHANG Han¹ / (1. Beijing Engineering Technology Research Center for Municipal Sewage Reclamation, R&D Center, Beijing Drainage Group Co Ltd, Beijing 100124, China; 2. Tonghui River Basin Company, Beijing Drainage Group Co Ltd, Beijing 100082, China)

Abstract: This study investigated the effects of hydrothermal pretreatment on the physicochemical properties, as well as anaerobic digestion performance of primary and waste activated sludge. The results showed that the organic matter in both types of sludge consisted mainly of sugars, proteins, and lipids. The lipid content was higher in primary sludge, while the sugar and protein contents were higher in excess sludge. The anaerobic digestion gas production rates of primary and excess sludge before and after hydrothermal pretreatment were 365 and 376 L·kg⁻¹TS, and 102 and 273 L·kg⁻¹TS, respectively. The effect of hydrothermal pretreatment on primary sludge was not significant, while the anaerobic digestion performance of excess sludge was significantly improved, with a volatile solids removal rate increasing from 29% to 49%. The mixed sludge also showed an increase in volatile solids removal rate from 33% to 48% after hydrothermal pretreatment. Therefore, hydrothermal pretreatment can significantly enhance the anaerobic digestion performance of sludge, but appropriate hydrothermal pretreatment processes should be selected based on the characteristics of different types of sludge.

Key words: primary sludge; waste activated sludge; physicochemical properties; anaerobic digestion

随着城市化和工业化的快速发展, 污水处理厂所产生的初沉污泥和剩余污泥数量不断增加, 如何有效处理这些污泥已成为当前环保领域亟待解决的问题^[1]。传统处理方法只能部分分解这些有机物质, 导致污泥量增加和温室气体排放^[2]。热水解厌氧消化技术可以有效处理这些污泥, 并降低污泥量和减少温室气体排放^[3]。杨鹏^[4]等研究发现, 热水

解可明显促进固体有机物的水解, 195 °C 和 75 min 条件下污泥中挥发性悬浮固体 (Volatile suspended solids, VSS) 水解率为 72.6%, 对后续的厌氧消化有提升作用。研究表明, 热水解污泥可以显著提高产甲烷率。Liu^[5]等研究发现, 污泥经过 175 °C 和 60 min 热水解后产甲烷率为 212 L·kg⁻¹VS, 比未热水解的污泥产气率提高了 35%; Qiao^[6]等研究发现,

收稿日期: 2023-05-17 修回日期: 2023-06-25

项目来源: 国家重点研发计划(2019YFC1906503)

作者简介: 任征然(1994-), 男, 汉族, 河北石家庄人, 硕士, 主要从事污泥处理处置等方面的工作, E-mail: bderzr@163.com

通信作者: 高金华, E-mail: gaojinhua@bdc.cn

170 °C 和 60 min 热水解条件下污泥产甲烷率为 257 L·kg⁻¹VS, 比原污泥提高了 65%。初沉污泥通常含有较高的悬浮颗粒物和有机物质, 这些物质相对来说较易被微生物分解, 因此初沉污泥 (primary sludge, PS) 消化处理相对较为容易; 剩余污泥 (waste activated sludge, WAS) 由于在生物处理过程中已经过了一定的降解作用, 其中的有机物质相对难以被分解^[7]。然而, 目前采用热水解工艺的污水厂普遍处理由初沉污泥和剩余污泥组成的混合污泥 (mixed sludge, MS), 对于初沉污泥和剩余污泥单独消化研究较少^[8]。为此, 本次研究开展了初沉污泥和剩余污泥性质和厌氧消化产气性能的试验, 研究结果将为污泥热水解厌氧消化工程设计提供有意义的借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点

研究试验于 2021 年 12 月至 2022 年 10 月在北京城市排水集团科技研发中心中试平台进行。

1.2 试验材料

1.2.1 取样方法

初沉污泥和剩余污泥取自北京市某再生水厂, 取回后采用卧式离心机将污泥总固体 (total solids, TS) 含量离心至 12% ~ 15%, 置于 4 °C 冰箱备用。混合污泥参考该污水厂实际工况, 按照初沉污泥和剩余污泥 TS 比为 6:4 进行配置。厌氧消化接种污泥取自该污水厂已运行 4 年的厌氧消化池出泥。接种污泥性质见表 1, 初沉污泥和剩余污泥性质详见 2 结果与分析。为了便于比较, 物化性质检测时, 用蒸馏将初沉污泥和剩余污泥的 TS 配至 8%。

表 1 接种污泥性质

指标	平均值	标准偏差(±)	测试数量
TS/%	4.97	0.21	3
VS/%	2.35	0.16	3
SCOD/(mg·L ⁻¹)	3298	228	3
氨氮/(mg·L ⁻¹)	2320	143	3
pH 值	7.48	0.01	3
VFAs/(mg·L ⁻¹)	669	92	3

1.2.2 取样时间

本试验研究了不同季节的初沉污泥和剩余污泥性质, 取样时间分别为冬季 (2021 年 12 月) 春季 (2022 年 4 月)、夏季 (2022 年 7 月) 和秋季 (2022 年

10 月), 每个季节取样 3 次。

1.3 试验方法

1.3.1 分析方法

采用元素分析仪 (型号: vario El cube) 测定样品中 C、H、O、N、S 元素的含量, 采用 Agilent ICP-OES 725 ES 测定样品中 P 元素的含量, 主要参数为 RF 功率: 1.20 KW, 等离子气流量: 15.0 L·min⁻¹, 辅助气流量: 1.50 L·min⁻¹, 雾化气流量: 0.75 L·min⁻¹, 读数次数: 3 次。糖类采用苯酚-硫酸法进行检测^[9], 蛋白质检测采用 Folin-酚法进行检测^[10], 脂肪采用索氏提取法进行检测^[11]。TS、VS、悬浮固体 (suspended solids, SS)、挥发性悬浮固体 (volatile suspended solids, VSS)、氨氮、可溶性总氮 (STN)、总化学需氧量 (total chemical oxygen demand, TCOD) 和 SCOD 采用标准方法进行检测^[12]。VFAs 采用岛津 GC-2010Plus 气相色谱仪测定。

1.3.2 厌氧消化试验

产沼气潜力测试 (biochemical methane potential, BMP) 采用有效容积 0.8 L 的厌氧瓶进行, 控制接种污泥和试验污泥 (初沉泥 PS、经过热水解的初沉污泥 PS-THP、剩余污泥 WAS、经过热水解的剩余污泥) TS 比为 6:4。既将污泥 TS 含量用蒸馏水配至到接种污泥的 TS 水平, 先取新鲜的接种污泥 0.48 kg 置于厌氧瓶中, 后取 0.32 kg 配置好的污泥置于厌氧瓶中。向厌氧瓶中冲入氮气 1 min, 形成厌氧环境后立即用带有微型搅拌器的胶塞密封, 并开启搅拌器, 空白组只加入 0.48 kg 接种污泥。厌氧瓶置于 40 °C 的水浴锅中, 并与 2 L 的集气袋连接, 根据产气情况每 1 ~ 3 d 测量气袋内沼气产量。

连续试验采用 4 个总容积 15 L, 工作容积 10 L 的连续搅拌反应器 (continuous stirred tank reactor, CSTR)。反应器有水浴夹层, 通过加热循环器 (JRXH-40L, 北京瑞成伟业仪器设备有限公司) 控制反应器温度为 40 °C。污泥厌氧消化的水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 为 20 d, 进料 TS 浓度为 8%。每天定时进出料一次, 每次进出料 500 g。4 个反应器进料分别为: 剩余污泥 (WAS), 经过 160 °C 和 30 min 热水解的剩余污泥 (WAS-THP), 混合污泥 (MS) 和经过 160 °C 和 30 min 热水解的混合污泥 (MS-THP)。反应器产气通过集气袋收集, 每天定时用采用湿式气体流量计 (LMF-2, 长春阿尔法仪表有限公司) 测量集气袋内气量。沼气成分 (CH₄ 和 CO₂) 采用 biaoogas 5000 (Geotech, 英国)。

1.3.3 热水解试验

热水解实验采用中试规模装置进行,设计规格为每批次 40 kg(TS 15% 计);本中试热水解装置为 Cambi 模式反应器,包含热水解和闪蒸过程;设计工艺为间歇式热水解,每个批次操作依次包括蒸汽产生、进料、热水解反应、闪蒸反应、排料等步骤。装置主体有热水解反应罐、闪蒸反应罐、尾气处理单元、电蒸汽发生器、螺杆进料泵、温度和压力在线监测仪表系统以及气动阀等。本研究热水解试验控制条件为:160℃,反应 30 min。

1.3.4 统计分析

利用 Excel 2019 进行数据整理和绘图。

2 结果与分析

2.1 污泥物化性质

图 1 和图 2 展示了不同季节污泥 COD 和有机的分布,可看出每个季节初沉污泥的 TCOD 都高于剩余污泥。初沉池通过自然沉降可以去除污水中 40%~55% 的 SS;而通过初次沉淀、活性污泥反应和二次沉淀二级处理,污水中 SS 去除率为 70%~90%,可以看出更多的不可溶 COD 随着 SS 在初沉得到去除^[13]。初沉污泥的 TCOD 浓度范围在 72300~93140 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,剩余污泥的 TCOD 浓度范围在 70700~82273 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两种污泥均呈现出春季和冬季 TCOD 浓度较高,夏季最低,秋季开始回升的趋势。污泥中的有机物质是微生物的营养供体,剩余污泥的有机物质包裹在污泥菌体外的胞外聚合物和细胞膜内,只有打破胞外聚合物将这些有机质释放出来^[14]。因此,剩余污泥可溶性有机质释放的速率受到限制。在不同季节,初沉污泥中 SCOD 占 TCOD 的比例分别为 15.1%、11.3%、7.4% 和 14.9%,而剩余污泥仅为 4.4%、1.2%、1.4% 和 4.5%。VS 包括可生物降解的有机物和难降解挥发性固体。可生物降解的有机物包括糖类、脂类和蛋白质;难降解挥发性固体由木质素和其他不可生物

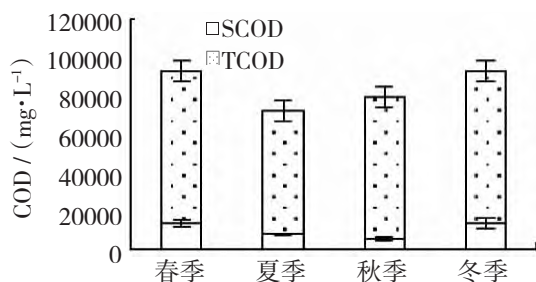


图 1 不同季节初沉污泥 COD 分布

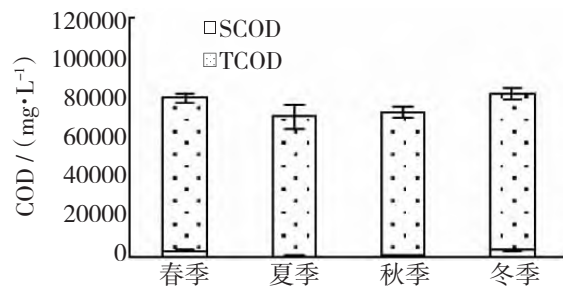


图 2 不同季节剩余污泥 COD 分布

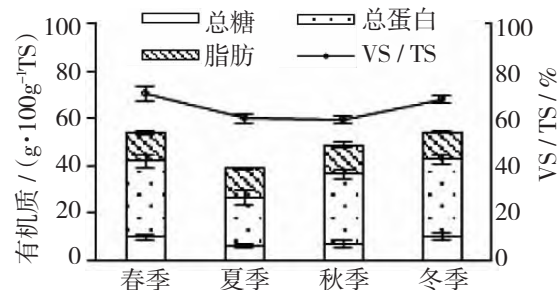


图 3 不同季节初沉污泥有机质分布

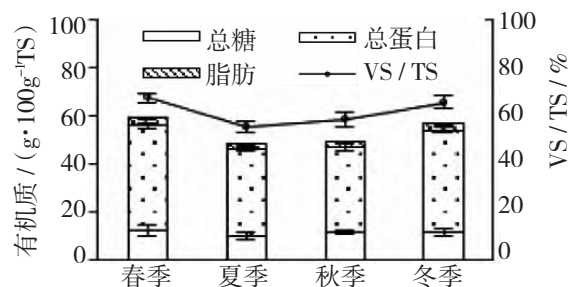


图 4 不同季节剩余污泥有机质分布

降解的物质组成。

通过图 3 和图 4 可以看出,污泥 VS 中主要的有机物是糖类、脂肪和蛋白质。春季初沉污泥 VS/TS 为 70.6%,而夏季为 60.0%;剩余污泥在春季和夏季 VS/TS 分别为 67.4% 和 55.6%。与 TCOD 变化趋势一致,有机质含量也呈现出春季和冬季高,夏季低的趋势。污泥中有机物含量最高的是蛋白质,初沉污泥蛋白质含量为 29.7~33.0 $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}\text{TS}$,剩余污泥为 35.4~43.9 $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}\text{TS}$ 。初沉污泥的脂肪含量在 11.6~12.5 $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}\text{TS}$,剩余污泥仅为 2.1~3.4 $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}\text{TS}$ 。污泥的有机物组成决定了沼气产量和气体成分,从完全厌氧消化产气性能来看,产气性能最高的是脂肪,其次是蛋白质,最后是糖类。产生沼气中甲烷含量最高的是脂类,其次是蛋白质,最后是糖类^[6]。由于初沉污泥中的脂肪含量高于剩余污泥,其产气潜力也高于剩余污泥。初沉污泥中糖类的含量为 6.1~9.7 $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}\text{TS}$,剩余污泥糖

类的含量为 9.9 ~ 12.01 g·100g⁻¹TS。因此,初沉污泥产生的沼气中甲烷含量会高于剩余污泥。

C/N 是影响厌氧消化效果的重要因素之一, C/N 太高,合成细胞的 N 源不足,消化液的缓冲能力低, C/N 太低, N 含量过多会容易抑制消化过程^[15]。从表 2 中可以看出初沉污泥的 C/N 为 11.5 ~ 14.1,高于剩余污泥的 5.6 ~ 6.4。C 元素所占比

例变化趋势与污泥中有机物 VS/TS 的变化趋势基本一致,初沉污泥的有机质含量高,其 C 元素占比为 27.3% ~ 46.2%,高于剩余污泥的 25.9 ~ 39.5%。而剩余污泥中 P 元素占比为 3.0% ~ 3.3%,高于初沉污泥的 0.7% ~ 1.2%,这是因为污水经过生物处理,P 元素会富集在剩余污泥中。在污泥处理过程中,需要注意 P 元素的回收以达到资源化利用的目的。

表 2 不同季节污泥元素分析(干基)

(%)

污泥	季节	C	H	O	N	P	S	C/N
初沉污泥	春季	46.2	6.8	19.6	3.3	0.9	1.1	14.1
	夏季	27.3	4.1	14.3	2.1	0.7	0.8	13.3
	秋季	38.9	5.9	18.2	2.9	1.2	0.8	13.5
	冬季	43.1	6.2	18.6	3.8	0.4	1.1	11.5
剩余污泥	春季	39.5	6.3	22.1	6.2	3.0	1.0	6.4
	夏季	25.9	4.0	23.6	4.3	3.3	0.7	6.0
	秋季	33.4	5.1	22.1	5.9	3.2	0.8	5.6
	冬季	34.1	5.3	23.5	5.7	3.1	0.8	6.0

2.2 热水解对污泥产沼气潜力影响

两种城市污水污泥的沼气产率差异较大,经过 20 天的厌氧消化试验初沉污泥产气率为 365 L·kg⁻¹TS,而剩余污泥仅为 102 L·kg⁻¹TS。经过热水解后,初沉污泥产气率为 376 L·kg⁻¹TS,相比于不热水解仅提升了 3%,而剩余污泥产气率为 273 L·kg⁻¹TS,相比于不热水解提升了 167% (见图 5)。有研究报道,剩余污泥经过热水解后甲烷产率从 74 增加到了 210 L·kg⁻¹TS,增加了 184%;初沉污泥从 205 降低到了 199 L·kg⁻¹TS,降低了 3%^[16]。这可能是由于初沉污泥本身为易降解有机废弃物,热水解加快美拉德反应速率,导致难降解有机物增加^[17];对于剩余污泥,通过热水解,可以使其絮体解体,胞外聚合物溶解,从而提高了剩余污泥的可生化性能^[18]。

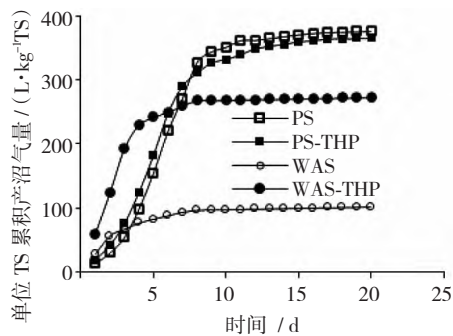


图 5 不同污泥热水解产气提升

2.3 污泥连续厌氧消化的产气性能

连续厌氧消化试验共进行了 93 天,试验原料分别为剩余污泥、热水解剩余污泥、混合污泥和热水解

混合污泥。由图 6 ~ 图 11 可看出,剩余污泥的产气率仅为 94 L·kg⁻¹TS,混合污泥中初沉污泥的比例占到了 60%,其产气率为 248 L·kg⁻¹TS。剩余污泥经过热水解后产气率为 279 L·kg⁻¹TS,增加了 196%。混合污泥热水解后产气率为 363 L·kg⁻¹TS,增加了 46%。混合污泥厌氧消化沼气中甲烷含量为 67.4%,高于剩余污泥的 62.9%。剩余污泥经过热水解后,沼气中甲烷含量从 62.9% 增加到了 65.9%,而混合污泥从 67.4% 降低到了 65.7%。

不经过热水解的剩余污泥和混合污泥 TS 去除率分别仅为 20% 和 22%,经过热水解后剩余污泥和混合污泥 TS 去除率上升到 30% (见图 12)。城镇

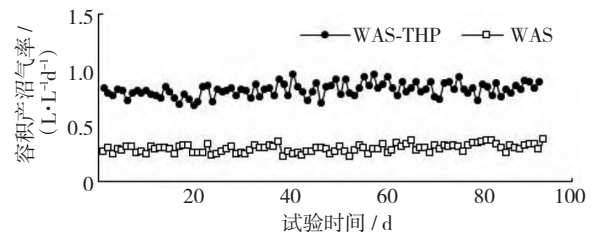


图 6 剩余污泥和热水解剩余污泥容积产沼气率

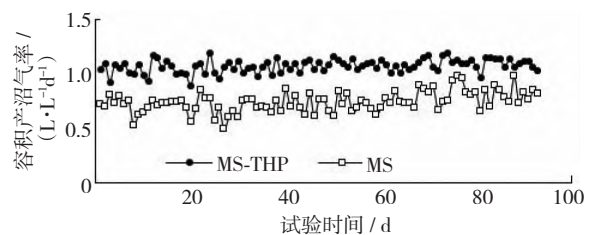


图 7 混合污泥和热水解混合污泥容积产沼气率

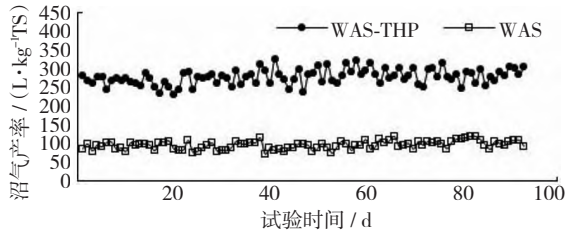


图8 剩余污泥和热水解剩余污泥沼气产率

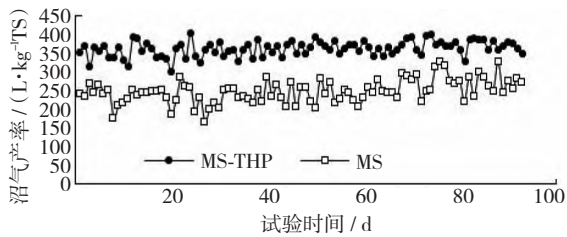


图9 混合污泥和热水解混合污泥沼气产率

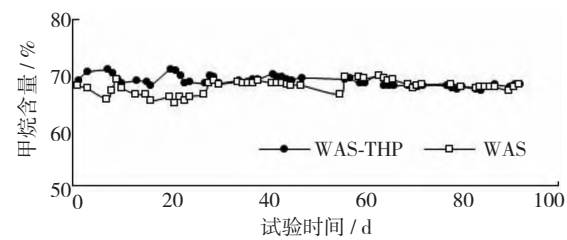


图10 剩余污泥和热水解剩余污泥产沼气中甲烷含量

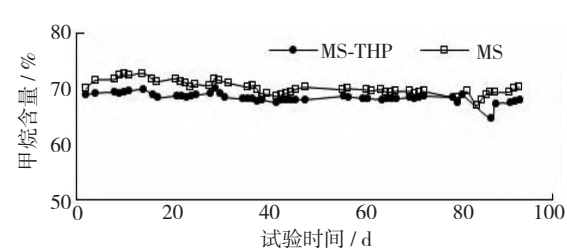


图11 混合污泥和热水解混合污泥产沼气中甲烷含量

污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)要求城镇污水处理厂的污泥应进行稳定化处理,采用厌氧消化技术稳定化处理后应达到有机物降解率超过40%^[19]。不采用热水解预处理时,剩余污泥和混合污泥的VS去除率分别为29%和33%,均无法满足

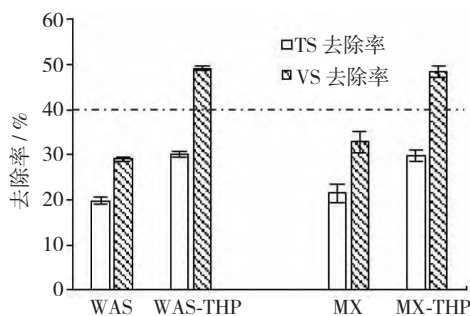


图12 TS和VS去除率

该要求;而采用热水解厌氧消化技术后,两种污泥的VS去除率分别为49%和48%,均超过了该要求。

胞外聚合物导致剩余污泥可溶性物质较低,其中氨氮和STN分别为151和182 mg·L⁻¹,氨氮/STN为83.0%,说明剩余污泥中的可溶性氮大部分以无机形态的氨氮存在;经过热水解后,剩余污泥STN高达2367 mg·L⁻¹,氨氮增加到了667 mg·L⁻¹,氨氮/STN为28.2%,热水解可使剩余污泥的STN释放,其中大部分为有机形态的氮。混合污泥由于含有初沉污泥,其STN略高于剩余污泥为455 mg·L⁻¹,氨氮/STN为87.4%,未经过热水解的混合污泥中的STN也以氨氮为主。经过热水解后混合污泥的氨氮/STN为24.3%,这说明热水解使混合污泥中的可溶性有机氮得到释放。热水解剩余污泥厌氧消化后,氨氮/STN从28.2%增加到了85.2%,热水解混

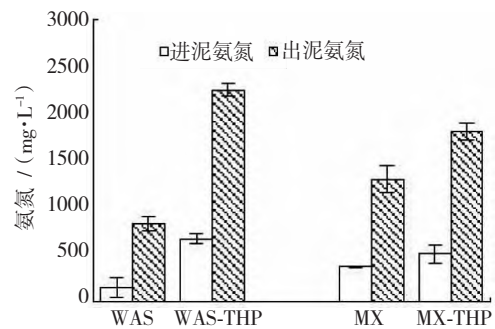


图13 热水解厌氧消化氨氮变化

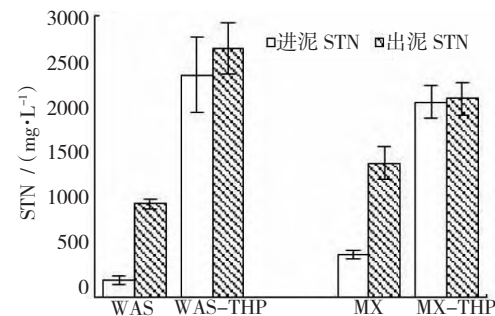


图14 热水解厌氧消化STN变化

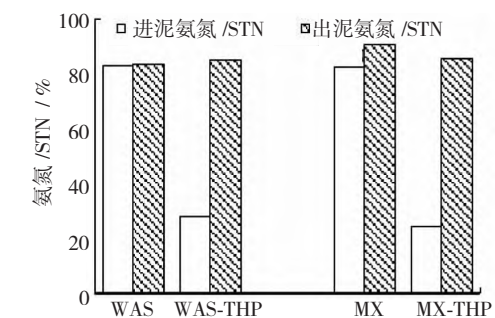


图15 热水解厌氧消化氨氮/STN

合污泥经过厌氧消化后,氨氮/STN 从 24.3% 增加到了 85.7%。经过厌氧消化后,可溶性有机氮会被转换为氨氮(见图 13~15)。

3 讨论

3.1 污泥低 C/N 解决方法

污泥有机质含量较低,虽然经过热水解处理后厌氧消化产气量有所提升,但产生的沼气体量仍然不能对污水处理厂的能量消耗产生足够的抵偿。且污泥中较低的 C/N,使得污泥在较高有机负荷下进行厌氧消化时 pH 值和氨氮浓度偏高,容易产生氨抑制的风险。餐厨垃圾的特点是高水分、高有机质和高盐分含量,极易腐烂变质,滋生细菌,同时还含氮、磷、钾、钙及各种微量元素^[20]。餐厨垃圾单独厌氧消化过程的问题之一是水解速度太快导致 pH 值偏低^[21]。可见,污泥与餐厨在物料性质上具有良好的互补性。城市餐厨垃圾和易腐生活垃圾等产生量大,利用厌氧消化进行能源化和肥料化具有良好的可行性。不过,目前对应的厌氧消化设施相对较少,相应的处理产物和衍生物(废水等)也需要更多的配套措施以满足环境和生态要求。污水处理厂具有中水供水和废水处理的天然优势,在污水处理厂利用厌氧消化设施处理城市生物质废物(污泥、餐厨及易腐生活垃圾等),回收能源并就地利用,以达到污水厂的能量完全自给(甚至外供),对于节约能源和碳减排具有重要意义。

3.2 优化热水解工艺

热水解的主要作用之一是打破污泥厌氧消化的水解限速屏障,显著提高厌氧消化过程的沼气体产率,对于剩余活性污泥,热水解使其沼气体产率提高 100%~200%;然而,对于本身厌氧消化性能良好的固体有机物如初沉污泥等不经过热水解也有良好的产气效果。甚至有些易降解的有机废弃物会由于热水解过程的焦糖化和美拉德等反应的发生导致沼气体产率下降。因此,有必要针对物料自身的厌氧消化性能优化热水解在厌氧消化工艺系统中的配置。为此,有研究者开发了嵌入式热水解工艺(Intermediate Thermal Hydrolysis Process, ITHP),其工艺流程为:初沉污泥一级厌氧消化—“一级消化污泥+剩余污泥”热水解—热水解污泥二级厌氧消化。因为污泥经过初级消化后体量减小,所以该工艺占地只有常规工艺的 2/3,并且由于是两级厌氧消化,因而沼气体产

量更大,沼气体产量可达 $500 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,VS 去除率可达 65%,高于常规热水解 $450 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,VS 去除率可达 60%^[22]。

4 结论

(1) 污泥中的有机质主要以糖类、蛋白质和脂肪 3 种形式存在。初沉污泥中糖类的含量为 $6.1 \sim 9.7 \text{ g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{TS}$,剩余污泥糖类的含量为 $9.9 \sim 12.01 \text{ g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{TS}$;初沉污泥蛋白质含量为 $29.7 \sim 33.0 \text{ g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{TS}$,剩余污泥为 $35.4 \sim 43.9 \text{ g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{TS}$;初沉污泥的脂肪含量在 $11.6 \sim 12.5 \text{ g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{TS}$,剩余污泥仅为 $2.1 \sim 3.4 \text{ g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{TS}$ 。有机质含量呈现出冬季和春季高,夏季低,并开始回升的趋势。污泥 C/N 比较低,剩余污泥的 C/N 为 $5.6 \sim 6.4$,初沉污泥 C/N 为 $11.5 \sim 14.1$ 。

(2) BMP 试验结果显示,初沉污泥的沼气体产率为 $365 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,经过热水解后产气率提高了 3% 至 $376 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$;而剩余污泥产气率仅为 $102 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,但经过热水解后升至 $273 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,增加了 167%。

(3) 连续厌氧消化试验结果表明,剩余污泥的产气率为 $94 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,VS 降解率为 29%;经过热水解后,产气率大幅提高至 $279 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,VS 降解率增加至 48%。混合污泥的产气率为 $248 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,VS 降解率为 33%,经过热水解后产气率为 $363 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{TS}$,VS 降解率提高至 49%。

参考文献:

- [1] SARWAR R, ELBESHBIHY E, PARKER W. Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility of Thickened Waste Activated Sludge and Primary Sludge in Two-stage Anaerobic Digestion [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2015, 2015(10): 1562–1570.
- [2] 彭洁. 城市污水污泥处置方式的温室气体排放比较分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [3] BARBER W. Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review [J]. Water Research, 2016, 104: 53–71.
- [4] 杨鹏, 李伟, 袁彧, 等. 不同热水解条件下剩余污泥固相组成变化研究 [J]. 中国沼气, 2020, 38(4): 13–19.
- [5] LIU X, WANG W, GAO X, et al. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste [J]. Waste Management, 2012, 32

- (2): 249 – 255.
- [6] WEI Q, YAN X, YE J, et al. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(12): 3313 – 3318.
- [7] 刘强, 朱华波, 李斯. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究 [J]. *城市建设理论研究(电子版)*, 2015, 5(026): 3762 – 3763.
- [8] 宋晓雅. 污泥热水解厌氧消化与常规厌氧消化的运行比较 [J]. *给水排水*, 2019, 45(3): 26 – 30.
- [9] 杨勇杰, 姜瑞芝, 陈英红, 等. 苯酚硫酸法测定杂多糖含量的研究 [J]. *中成药*, 2005, 27(6): 706 – 708.
- [10] LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARRAR A L, et al. 福林酚试剂法测定蛋白质 [J]. *食品与药品*, 2011, 13(3): 147 – 149.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T6433—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, nineteenth ed [M]. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1995: 227 – 352.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部及国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S] 北京: 中国计划出版社 2021.
- [14] 张万钦, 戚丹丹, 吴树彪, 等. 不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 187 – 198.
- [15] YE C, CHENG J J, CREAMER K S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(10): 4044 – 4064.
- [16] 张晓红, 李冰, 马文瑾, 等. 温度及热水解对污泥厌氧消化的影响研究 [C] // 深圳: 2015 年中国环境科学学会学术年会, 2015, 4015 – 4021.
- [17] 杜元元, 汪恂, 王珊. 热水解温度和时间对污泥中物质的释放的影响 [J]. *水处理技术*, 2017(08): 78 – 81 + 91.
- [18] 任征然, 李伟, 高金华, 等. 热水解高级厌氧消化研究与应用进展 [J]. *水处理技术*, 2021, 47(11): 23 – 30, 53.
- [19] 国家环境保护总局及国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB18918—2002 [S]. 北京: 中国环境出版社 2002.
- [20] 朱光慧, 张玲. 餐厨垃圾高温厌氧工艺的设计及应用 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2022(7): 184 – 186.
- [21] QIAN M L, ZHANG Y Q, SUN YX, et al. Efficient acetogenesis of anaerobic co-digestion of food waste and maize straw in a HSAD reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2019, 283: 221 – 228.
- [22] RUS E, MILLS N, SHANA A, et al. The intermediate thermal hydrolysis process: results from pilot testing and techno-economic assessment [J]. *Water Practice Technology*, 2017, 12(2): 406 – 422.