

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.002

污泥中温厌氧消化最佳温度及改善机理分析

李金河^{1,2}, 张波涛^{1,2}, 刘宝玉^{1,2}, 潘越齐^{1,2}, 张振旺^{1,2}, 轩兴歧^{1,2},
刘 圣^{1,2}, 张亚雄^{1,2}, 王晓阳^{1,2}

(1. 天津创业环保集团股份有限公司, 天津 300381; 2. 天津凯英科技发展股份有限公司,
天津 300000)

摘 要: 我国市政污泥的中温厌氧消化普遍存在有机物降解率低、消化速率慢及沼气产量少等不足。为改善这种现状,基于天津某污泥处理设施的泥质和运行工况,通过小试、中试和生产性试验,考察了反应温度对污泥消化过程中产气量的影响,并对提高温度促进厌氧消化的机理进行了分析。结果表明,在 40 ℃ 和 45 ℃ 下生物产甲烷势(BMP)较 35 ℃ 分别提高了 28.4% 和 37.5%;在 200 L 中试水平上,稳定期 40 ℃ 日均产气量比 35 ℃ 增加 25.5%,两种温度下沼气中的甲烷含量基本相当;生产罐反应温度升至 40 ℃ 后,绝干有机物产甲烷量较往年同期提升近 40%。40 ℃ 下污泥厌氧消化的溶解速率、水解速率和酸化速率分别较 35 ℃ 提高 73.3%、50.0% 和 34.7%,为后续的甲烷化提供了充足的底物。没有接受过温度驯化的污泥,40 ℃ 和 35 ℃ 的甲烷生成速率几乎相当,而对于经过 40 ℃ 驯化半年的污泥而言,不仅甲烷生成速率比 35 ℃ 快 20.5%,而且甲烷产量高 12.2%。与其他厌氧消化改良工艺相比,该方法低廉、绿色与高效,具有推广应用价值。

关键词: 污泥; 厌氧消化; 反应温度; 产气量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0009-07

Optimal Reaction Temperature in Mesophilic Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge and Its Promotion Mechanism

LI Jin-he^{1,2}, ZHANG Bo-tao^{1,2}, LIU Bao-yu^{1,2}, PAN Yue-qi^{1,2}, ZHANG Zhen-wang^{1,2},
XUAN Xing-qi^{1,2}, LIU Sheng^{1,2}, ZHANG Ya-xiong^{1,2}, WANG Xiao-yang^{1,2}

(1. Tianjin Capital Environmental Protection Group Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Tianjin
Caring Technology Development Co. Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge in China is hindered by low organic dry solids degradation efficiency, slow fermenting rate and restricted methanogenic production. In order to improve this situation, the impact of reaction temperature on methane (CH₄) generation of anaerobic digestion based on a sludge treatment plan in Tianjin was assessed through lab-scale, pilot-scale and full-scale test. Also, the promotion mechanism of anaerobic CH₄ production was investigated. The biochemical methane potential (BMP) at 40 ℃ and 45 ℃ increased by 28.4% and 37.5% respectively, compared with that at 35 ℃. The average CH₄ generation in the experimental digester at 40

基金项目: 住房和城乡建设部重大科技攻关和能力建设项目(2020-Z-001); 天津创业环保集团股份有限公司科研项目

通信作者: 李金河 E-mail: li_jinhe@tjcep.com

℃ was 25.5% higher than that in the control digester at 35 ℃ during stable period on 200-litre scale, and the methane content in biogas was equivalent at the two temperatures. After the reaction temperature of manufacturing digesters was adjusted from 35 ℃ to 40 ℃, an approximate 40% increase of CH₄ yield (expressed as cumulative CH₄ volume per volatile solid mass fed) was observed according to the running records of previous years. The mechanisms investigation for improved CH₄ generation showed that the rates of solubilization, hydrolysis and acidification of waste activated sludge at 40 ℃ were accelerated by 73.3%, 50.0% and 34.7% respectively than those at 35 ℃, which was beneficial to providing more substrates for subsequent CH₄ generation. It was found that the methanation process at 40 ℃ was almost the same as that at 35 ℃ for undomesticated activated sludge. For domesticated activated sludge at 40 ℃ lasted for half a year, it caused 20.5% higher of the methanogenesis rate and 12.2% higher of CH₄ generation compared with the data at 35 ℃. As a more economical, environmental and efficient process, this approach possesses value of promotion and application.

Key words: waste activated sludge; anaerobic digestion; reaction temperature; methane generation

厌氧消化技术具有能够缓解能源紧缺和降低环境污染的双重功能,被广泛应用于工业废水处理、有机废弃物处理与市政污泥处理等领域^[1-4]。然而在实际工程中,受限于市政污泥成分复杂、有机质含量低、生物降解性差和微生物破壁难等因素,污泥厌氧消化存在污泥有机物含量低、有机物降解率差及产气量不足等问题^[5]。为了提高污泥厌氧消化效率,科研人员开发了一系列污泥预处理技术,如超声波^[6]、微波^[7]、热水解^[8]、高压匀浆^[9]、碱破壁^[10]、臭氧氧化^[11]、生物酶水解^[12]和投加化学促进剂^[13]等。但令人遗憾的是,以上预处理措施需要投入大量的能源或消耗昂贵的化学药品,对环境也不友好,难于规模化应用^[14-15]。另外,对标《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》,国内污水处理厂常采用长泥龄^[16]或超越初沉池^[17]的运行策略,由此导致因剩余污泥有机物含量更低、生物降解性更差而沼气产能难以实现污泥厌氧消化工艺能量平衡。因此,当务之急是开发一种低廉、绿色和高效的污泥厌氧消化改良工艺。

《城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治最佳可行技术指南》(试行)指出,按产甲烷菌最适温度不同,分为中温厌氧消化[(35±2)℃]和高温厌氧消化[(53±2)℃],考虑到整体工艺能量平衡,工程上往往以中温厌氧消化为主^[18]。污泥中有机物转化为甲烷,需经历4个重要的步骤即溶解、水解、酸化和甲烷化^[19],由此可见污泥厌氧消化是一个多菌群、多相及多反应的复杂体系,而该系统受温度影

响显著^[20-21]。国内外学者研究发现,改变发酵温度(35~60℃),可以革新微生物菌群结构和丰度,从而调节微生物的活性及代谢途径,进而优化厌氧消化效果^[22-24];更有研究表明,适当提高温度,如提高至40~50℃,可增加产甲烷古菌的丰度,提高甲烷产量^[25-26]。而有关剩余污泥中温厌氧消化最适温度的研究鲜有报道,尤其是打破“(35±2)℃”的技术惯例。鉴于此,笔者依托天津某污泥处理设施,于小试、中试和生产水平上,系统考察了不同温度下污泥中温厌氧消化产气性能,结合人工模拟厌氧消化过程中重要反应环节,深入研究相应的机理,以期改善污泥厌氧消化产气效率、促进污泥处理事业发展提供理论基础和数据支撑。

1 材料和方法

1.1 样品来源

污泥样品取自天津某污泥处理设施,其采用高浓度高效污泥厌氧消化工艺。试验所用污泥均为现用现取,泥质随季节变化有一定波动,其中生污泥由天津某污水厂运输至污泥处理设施处,100%为剩余污泥,总固体含量(TS)为8%~9%,有机物含量(VS/TS)为55%~63%。熟污泥分3种,第一种是天津某污泥处理设施(消化温度为35℃、停留时间为22~25d)的出泥,用于中试接种;第二种是来源于35℃中试装置稳定运行半年的出泥,又称未驯化污泥;第三种是来源于40℃中试装置稳定运行半年的出泥,又称驯化污泥,熟污泥的TS为6%~7%,VS/TS为44%~50%。

1.2 温度影响厌氧消化的BMP试验

小试装置为 Bioprocess 甲烷潜势仪,反应瓶体积为 650 mL,有效体积为 300~400 mL,所产沼气经碱液吸收二氧化碳后进入自动体积计量仪,每天的数据储存于系统中,可随时调取。

每个试验组设置 3 个平行,每个样本加入 350 g 生污泥,充入氮气 2 min,分别置于 35、40 和 45 °C 的水浴中,直到所有样本都不产气后终止反应,分析每种温度下污泥消化累积产甲烷量。

1.3 温度影响厌氧消化的中试研究

中试所用的两个发酵罐购自上海百伦科技有限公司,有效容积为 200 L,根据天津某污泥处理设施的实际运行状况,对该发酵罐进行了改进:①增加外源循环泵,使发酵罐底部污泥抽至上部,加强污泥立体搅拌;②增设定制进样器,每天手动补加定量的新鲜生污泥。

基于小试结果,考虑到工艺能量平衡,选择 40 °C 做中试及生产研究。取天津某污泥处理设施的出泥,装满两个发酵罐,温度分别设定为 40 °C 和 35 °C,发酵罐自带搅拌桨的转速设定为 100 r/min,待两个中试罐都不产气后,开始补充新鲜生污泥,每个罐进泥 8 L/d(停留时间为 25 d),进泥方式采用间歇式,每 3 h 进泥 1 L,进泥后启动循环泵运行 15 min。中试所产沼气接入湿式气体流量计记录并计算日产气量,并采用气相色谱检测甲烷含量。

1.4 温度影响厌氧消化的生产性验证

以天津某污泥处理设施作为试验对象,按照每月提高 1 °C 的速度,将厌氧消化罐温度由 35 °C 调整至 40 °C,待运行稳定后,根据运行记录比较提温后与往年同期的绝干有机物产气量。

1.5 温度对污泥溶解影响的BMP试验

设计两组试验,于 BMP 反应瓶中进行,每组 3 个平行,每个样本加入 350 g 新鲜生污泥,同时加入 20 mmol/L 的 2-溴乙基磺酸钠用于阻断产气进程,分别置于 40 °C 和 35 °C 水浴中。每隔 12 h,取样检测污泥上清液中的 SCOD,用于评价不同温度下污泥的溶解速率。

1.6 温度对污泥水解影响的BMP试验

分别取 35 °C 和 40 °C 中试装置稳定运行半年的熟污泥,单独装入 BMP 反应瓶中,每瓶 350 g,来源于 35 °C 中试罐的 3 个样品置于 35 °C 水浴中,来源于 40 °C 中试罐的 3 个样品置于 40 °C 水浴中,BMP

检测不产气后(表明营养物消耗殆尽),每个样品加入 300 mg/L 的牛血清蛋白(BSA),各样品的水浴温度保持不变,每 4 h 取样检测污泥上清液中剩余 BSA 溶度,以 BSA 的降解速率代表污泥中大分子化合物的水解速率。

1.7 温度对污泥酸化影响的BMP试验

分别取 35 °C 和 40 °C 中试装置稳定运行半年的熟污泥,单独装入 BMP 反应瓶中,每瓶 250 g,来源于 35 °C 中试罐的 3 个样品置于 35 °C 水浴中,来源于 40 °C 中试罐的 3 个样品置于 40 °C 水浴中,BMP 检测不产气后,每个样品加入 100 g 新鲜生污泥,同时加入 20 mmol/L 的 2-溴乙基磺酸钠用于阻断甲烷化反应,每个样品的水浴温度保持不变。每 12 h 取样检测污泥上清液中挥发性脂肪酸的累积量,用于比较不同温度下污泥的酸化速率。

1.8 温度对污泥产甲烷影响的BMP试验

对于未驯化污泥,取 35 °C 中试装置稳定运行半年的熟污泥,装入 BMP 反应瓶中,每瓶 350 g,共 6 个样品,均置于 35 °C 水浴中,待不产气后分别加入 3 g/L 乙酸钠,其中 3 个样品置于 35 °C 水浴中,另外 3 个样品置于 40 °C 水浴中,产气结束后,再重复投加 3 g/L 乙酸钠 2 次,利用 Bioprocess 甲烷潜势仪记录甲烷产量,并计算甲烷产生速率。对于驯化污泥,取 40 °C 中试装置稳定运行半年的熟污泥,装入 BMP 反应瓶中,每瓶 350 g,共 6 个样品均置于 40 °C 水浴中,待不产气后,分别加入 3 g/L 乙酸钠,其中 3 个样品置于 35 °C 水浴中,另 3 个样品置于 40 °C 水浴中,产气结束后,再重复投加 3 g/L 乙酸钠 2 次,利用甲烷潜势仪记录甲烷产量,并计算产生速率。

1.9 分析项目与方法

TS、VS、COD 和挥发性脂肪酸等均采用国家标准方法进行检测;溶解性蛋白质采用考马斯亮蓝显色法检测;中试沼气流采用湿式气体流量计进行计量,沼气中甲烷含量采用气相色谱仪进行测定。

2 结果与讨论

2.1 不同温度对污泥BMP的影响

BMP 作为一种快速、准确评价手段,通过自动计量并记录每个样品所产甲烷量,被广泛用于优化污泥厌氧消化参数^[18]。测定结果显示,传统消化温度(35 °C)的甲烷累积量为 1 374.8 mL,温度调整为 40 °C 和 45 °C 后甲烷累积量分别为 1 765.3 和 1 890.6 mL,较 35 °C 时分别提高了 28.4% 和

37.5%。可见,适当提高反应温度后,污泥中温厌氧消化产甲烷量呈增加的趋势。考虑到实际工程污泥加热和保温环节的能量消耗,后续试验选择40℃进行研究。

2.2 不同温度下污泥厌氧消化中试效果

于200 L发酵体系中,待消化系统稳定后,选取51 d的中试数据进行比较,结果见图1。在相同的运行负荷下,40℃的日均产气量较35℃提高了25.5%,且两种温度下所产沼气甲烷浓度相当,为64%~65%,这与小试BMP的结果基本吻合。张晓红^[26]于小试水平上研究小红门污水处理厂初沉污泥厌氧消化时,也得出“40℃厌氧消化日产气量高于35℃”的结果,但并未开展温度影响污泥厌氧消化的深入研究。Chae等^[27]研究了温度变化对猪粪厌氧消化的影响,也得到了相似的结论,即随着温度升高沼气的提升。以上研究表明,在一定范围内适当提高温度有利于增加污泥厌氧消化沼气产量。

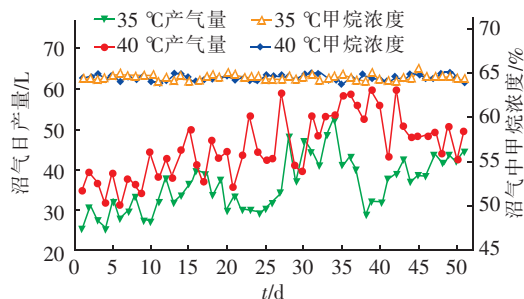


图1 中试温度对污泥厌氧消化产气量的影响

Fig.1 Effect of temperature on CH₄ production from waste activated sludge anaerobic digestion in pilot-scale test

2.3 不同温度下污泥厌氧消化生产性验证

基于小试和中试研究结果,结合天津某污泥处理设施的运行现状,于2018年8月对生产消化罐的运行温度进行调整,历时5个月将温度由35℃提升至40℃,系统运行稳定后,选取2019年某2个月的运行效果与2017年及2018年同期记录进行对比,结果如图2所示。可以看出,生产罐的控制温度由35℃调整为40℃后,没有引发系统的不良反应,40℃下的绝干有机物产甲烷量均值为199.2 m³/t,相比于2017年同期的142.8 m³/t和2018年的143.6 m³/t,分别提高了39.5%和38.7%,增强效果好于小试和中试,分析原因可能是由于生产性试验的参数稳定性和搅拌强度均更好,优化效果被放大。生产性试验期间天津某污泥处理设施的运行负荷为设

计值的90%,同时本研究以历年单位有机物所产甲烷为评价指标,消除了运行负荷、泥质波动和补泥量起伏等因素的干扰。假设以处理量为700 t/d(含水率为80%)计算,提温导致能量损耗增加约3.5 × 10⁷ kJ/d,增产甲烷折合能源约1.6 × 10⁸ kJ/d,整体工艺能量富余约1.3 × 10⁸ kJ/d。

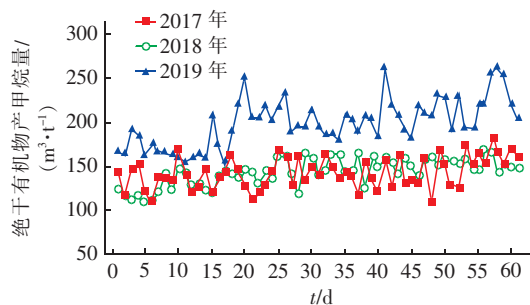


图2 生产性试验中温度对污泥厌氧消化产气量的影响

Fig.2 Effect of temperature on CH₄ production from waste activated sludge anaerobic digestion in full-scale test

众所周知,厌氧消化过程是由体系内庞大复杂的微生物代谢网络所构成,其厌氧消化菌群主要分为水解产酸菌和产甲烷菌,而这两类菌的最适代谢条件相差较大,在一个体系中,维持菌群之间的代谢平衡是比较困难的。对于拥有特殊泥质的市政污泥而言,污泥中有机物的溶解以及有机质酸化往往是限速步骤,被认为是控制污泥厌氧消化的主要因素。本研究中适当提高消化温度促进厌氧消化的原因,可能是提温增强了污泥中有机物的溶解以及水解酸化,为后续甲烷化提供了更多的反应底物,从而提高了甲烷产量。

2.4 温度对污泥溶解的影响

不同温度下污泥的SCOD随着时间的变化如图3所示。在两种温度下,污泥释放到上清液中的SCOD随着时间延长,呈现先增长后逐渐降低的趋势,这与有机物参与微生物代谢的反应过程相一致。40℃有机物的“逃逸”速度和数量均高于35℃,例如40℃时污泥释放到发酵上清液中的SCOD于60 h处于峰值为5 625 mg/L,此时35℃的SCOD为3 660 mg/L,由此计算,40℃下污泥有机物的溶解速率较35℃增加了73.3%。有机物参与厌氧消化代谢途径的前提是转变为溶解态,然而大量的有机物处于微生物细胞内,被胞外聚合物及细胞壁紧紧包裹着,无法有效释放变成游离状态。有研究指出,热处理可有效破坏污泥胞外聚合物的稳定结构,使

微生物细胞壁遭受不可逆损伤,从而加速胞内有机物脱离束缚^[28]。本研究中以 40 ℃ 作为反应温度,高于传统消化温度(35 ℃),更有助于打破胞外聚合物和细胞壁的包围网,诱发更多有机物溶出进而参与厌氧消化反应。

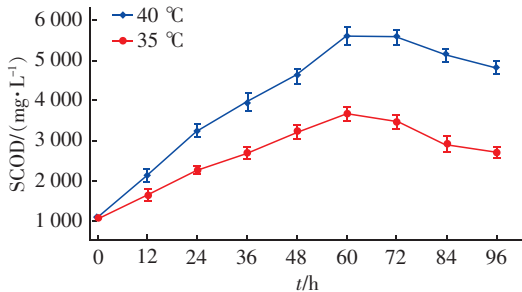


图3 温度对污泥溶解速率的影响

Fig. 3 Effect of temperature on solubilization of waste activated sludge

2.5 温度对污泥水解的影响

有机物溶解后,大分子有机物需水解转化为小分子化合物才可进行后续利用。人工模拟大分子聚合物 BSA 的水解见图 4。以 300 mg/L BSA 为模式底物,40 ℃ 下 BSA 降解速率为 10.5 mg/(L·h),较 35 ℃ 的 7.0 mg/(L·h) 提升了 50.0%,这表明提高反应温度,对保持蛋白酶活性、促进蛋白质水解是有益的。Yuan 等^[29]研究剩余污泥产挥发性脂肪酸时发现,剩余污泥水解反应高度依赖于温度,且随温度升高,水解速率常数呈上升趋势。

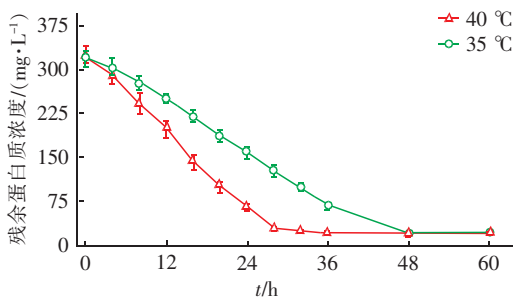


图4 温度对污泥水解速率的影响

Fig. 4 Effect of temperature on hydrolysis of waste activated sludge

2.6 温度对污泥酸化的影响

不同温度下污泥中挥发酸的累积量及 pH 值变化如图 5 所示。可见,产甲烷菌的活性被抑制后,两种温度下反应液 pH 值与挥发酸含量均呈负相关,随时间推移,受挥发酸增加的影响,pH 值先降低后趋于稳定(7.2~7.3),这说明两种温度下发酵液中

的碱度足以中和反应过程中积累的挥发酸,未发生过度酸败的风险。受益于前述增强的溶解和水解所导致的更多化合物参与酸化反应,40 ℃ 下挥发酸累积量于 60 h 达到峰值为 3 397.4 mg/L,而 35 ℃ 于 72 h 达到最大值为 2 837.6 mg/L。相应地,0~60 h 内 40 ℃ 挥发酸累积速率为 47.7 mg/(L·h),相比 35 ℃ 的 35.4 mg/(L·h),提高了 34.7%。有研究发现,在两相厌氧消化过程中,采用较高温度进行厌氧产酸有利于提高挥发酸产量^[30]。

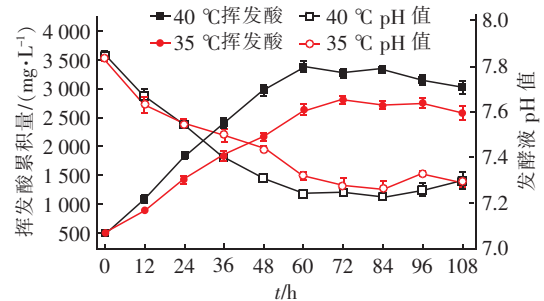


图5 温度对污泥酸化速率的影响

Fig. 5 Effect of temperature on acidification of waste activated sludge

2.7 温度对污泥甲烷化的影响

以乙酸钠为模式底物,探讨温度对甲烷化的影响。结果显示,不同类型污泥试验呈现出截然不同的结果(见表 1),对于未驯化的污泥,40 ℃ 和 35 ℃ 的甲烷累积量及甲烷生成速率相当,无显著性差异,这与污泥处理处置技术规范及其他研究结论^[31]有所不同。而对于经 40 ℃ 驯化半年的污泥,40 ℃ 甲烷累积量较 35 ℃ 增加了 12.2%,甲烷生成速率比 35 ℃ 高 20.5%。借助于环境压力定向进化微生物菌种是常用的育种手段,由此可见甲烷菌接受长期驯化后已适应 40 ℃ 的环境。张晓红^[26]的研究表明,40 ℃ 比 35 ℃ 更有利于提高沼气中的甲烷含量,并且在 40 ℃ 下产甲烷菌群代谢有机物向甲烷转化的效率更高。

表1 温度对污泥甲烷化的影响

Tab. 1 Effect of temperature on methanogenesis of waste activated sludge

| 温度/ ℃ | 未驯化污泥 | | 驯化污泥 | |
|----------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| | 甲烷累积 量/mL | 甲烷生 成速率/ (mL·h ⁻¹) | 甲烷累积 量/mL | 甲烷生 成速率/ (mL·h ⁻¹) |
| 40 | 789.4 ± 11.5 | 4.3 ± 0.1 | 823.8 ± 9.5 | 4.7 ± 0.2 |
| 35 | 794.3 ± 8.7 | 4.2 ± 0.2 | 734.0 ± 18.4 | 3.9 ± 0.1 |

3 结论

① 基于小试和中试结果,将天津某污泥处理设施的发酵温度由传统 35 ℃ 调整至 40 ℃,其消化系统运行良好,甲烷产量提升近 40%,提高了污泥处理的综合收益。

② 提温可以充分利用污泥中的有机物,提高了溶解、水解、酸化效果,为甲烷化创造出更多的底物,进而增加了产气量。

③ 提温增强污泥厌氧消化产气量,是一种简单、经济及有效的方法,建议其他污泥处理厂依据自身泥质并结合试验确定具体的运行温度。

参考文献:

- [1] THAUER R K, KASTER A K, SEEDORF H, *et al.* Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(8): 579–591.
- [2] 李慧莉, 何芙蓉, 刘鹏程. 外源酶强化秸秆污泥混合厌氧条件优化[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 6–12.
LI Huili, HE Furong, LIU Pengcheng. Optimization of anaerobic co-digestion conditions of straw and sludge enhanced by exogenous enzymes [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(15): 6–12 (in Chinese).
- [3] Ratanatamskul C, Onnum G, Yamamoto K. A prototype single-stage anaerobic digester for co-digestion of food waste and sewage sludge from high-rise building for on-site biogas production[J]. *International Biodeterioration Biodegradation*, 2014, 95: 176–180.
- [4] ZAHEDI S, ICARAN P, YUAN Z G, *et al.* Exploring alternatives to reduce economical costs associated with FNA pre-treatment of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 315–318.
- [5] XU Y, LU Y Q, DAI X H, *et al.* The influence of organic-binding metals on the biogas conversion of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2017, 126: 329–341.
- [6] 张博, 赵益华, 季民, 等. 工业化规模超声波预处理对不同固体浓度污泥厌氧消化性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2225–2232.
ZHANG Bo, ZHAO Yihua, JI Min, *et al.* Effect of full-scale ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion performance of sludge with different solid concentrations [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(9): 2225–2232 (in Chinese).
- [7] ESKICIOGLU C, TERZIAN N, KENNEDY K J, *et al.* A thermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, 41(11): 2457–2466.
- [8] 宋晓雅. 小红门污泥热水解厌氧消化项目运行两周年之回顾[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(22): 116–122.
SONG Xiaoya. Review of biennial operation of Xiaohongmen thermal hydrolysis anaerobic digestion system [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(22): 116–122 (in Chinese).
- [9] ZHANG S, ZHANG P, ZHANG G M, *et al.* Enhancement of anaerobic sludge digestion by high-pressure homogenization [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 496–501.
- [10] ZHANG D, CHEN Y G, ZHAO Y X, *et al.* New sludge pretreatment method to improve methane production in waste activated sludge digestion [J]. *Environment Science and Technology*, 2010, 44(12): 4802–4808.
- [11] CHENG C J, HONG P A, LIN C F. Improved solubilization of activated sludge by ozonation in pressure cycles [J]. *Chemosphere*, 2012, 87(6): 637–643.
- [12] DAVIDSSON A, WAWRZYNCZYK J, NORRLOW O, *et al.* Strategies for enzyme dosing to enhance anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Journal of Residuals Science and Technology*, 2007, 4(1): 1–7.
- [13] 谢文浩, 吴晓辉, 明银安. 磁铁矿对厌氧消化产甲烷的影响[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(19): 7–11.
XIE Wenhao, WU Xiaohui, MING Yin'an. Effect of magnetite on methane production of anaerobic digestion [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(19): 7–11 (in Chinese).
- [14] ABELLEIRA-PEREIRA J M, PEREZ-ELVIRA S I, SANCHEZ-ONETO J, *et al.* Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by advanced thermal hydrolysis pretreatment [J]. *Water Research*, 2015, 71: 330–340.
- [15] SUANON F, SUN Q, MAMA D, *et al.* Effect of nanoscale zero-valent iron and magnetite (Fe_3O_4) on the fate of metals during anaerobic digestion of sludge [J]. *Water Research*, 2016, 88: 897–903.
- [16] 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*, 2019, 39(4): 1511–1520.
CHEN Sisi, YANG Dianhai, PANG Weihai, *et al.* Main influencing factors and mechanisms of anaerobic

- digestion transformation of excess sludge in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 39(4):1511–1520(in Chinese).
- [17] 张玲玲,尚巍,孙永利,等. 高标准下天津市津沽污水处理厂提标改造效果分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10):37–41.
- ZHANG Lingling, SHANG Wei, SUN Yongli, *et al.* Analysis of the upgrading effect of Tianjin Jingu Wastewater Treatment Plant under high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10):37–41(in Chinese).
- [18] ZHANG L G, DUAN H R, YE L, *et al.* Increasing capacity of an anaerobic sludge digester through FNA pre-treatment of thickened waste activated sludge[J]. Water Research, 2019, 149:406–413.
- [19] DONG B, GAO P, ZHANG D, *et al.* A new process to improve short-chain fatty acids and bio-methane generation from waste activated sludge[J]. Journal of Environment Science, 2016, 43(5):159–168.
- [20] WATTS S, HAMILTON G, KELLER J. Two-stage thermophilic – mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge from a biological nutrient removal plant [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(8):149–157.
- [21] 刘海涛,李彩斌,王立宁,等. 城市污泥分级分相厌氧消化中试工艺研究[J]. 给水排水, 2013, 39(8):52–54.
- LIU Haitao, LI Caibin, WANG Lining, *et al.* Pilot study on two-phase anaerobic digestion of municipal sludge [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(8):52–54(in Chinese).
- [22] CONRAD R, KLOSE M, NOLL M. Functional and structural response of the methanogenic microbial community in rice field soil to temperature change[J]. Environmental Microbiology, 2009, 11:1844–1853.
- [23] 吴美容,张瑞,周俊,等. 温度对产甲烷菌代谢途径和优势菌群结构的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(5):1602–1606.
- WU Meirong, ZHANG Rui, ZHOU Jun, *et al.* Effect of temperature on methanogens metabolic pathway and structures of predominant bacteria[J]. CIESC Journal, 2014, 65(5):1602–1606(in Chinese).
- [24] NAZARI L, YUAN Z, SANTORO D, *et al.* Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation [J]. Water Research, 2017, 113:111–123.
- [25] WILSON C A, MURTHY S M, FANG Y, *et al.* The effect of temperature on the performance and stability of thermophilic anaerobic digestion[J]. Water Science and Technology, 2008, 57:297–304.
- [26] 张晓红. 污泥厌氧消化工艺运行分析与强化产沼气生产性试验研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- ZHANG Xiaohong. Operational Analysis and Methanogenic Enhancement of Anaerobic Digestion Process for Municipal Sludge [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015(in Chinese).
- [27] CHAE K J, JANG A, YIM S K, *et al.* The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(1):1–6.
- [28] WANG D B, SHUAI K, XU Q X, *et al.* Enhanced short-chain fatty acids production from waste activated sludge by combining calcium peroxide with free ammonia pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2018, 262:114–123.
- [29] YUAN Q, SPARLING R, OLESZKIEWICZ J A. VFA generation from waste activated sludge: effect of temperature and mixing [J]. Chemosphere, 2011, 82(4):603–607.
- [30] SHIMADA T, MORGENROTH E, TANDUKAR M, *et al.* Syntrophic acetate oxidation in two-phase (acid – methane) anaerobic digesters [J]. Water Science and Technology, 2011, 64(9):1812–1820.
- [31] 王艳飞. 厌氧消化过程中温度对产甲烷代谢途径及微生物群落结构变化的影响研究[D]. 昆明:云南师范大学, 2019.
- WANG Yanfei. The Effects of Temperature on Methanogenic Metabolic Pathways and Microbial Community during the Processes of Anaerobic Digestion [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019(in Chinese).

作者简介:李金河(1970–),男,河北成安人,硕士,正高级工程师,从事市政工程系统设计与环境治理工作。

E-mail:li_jinhe@tjcep.com

收稿日期:2020–09–20

修回日期:2020–10–09

(编辑:李德强)