

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.003

污泥高含固厌氧消化研究进展

齐利格娃^{1,2}, 李 伟¹, 高金华³, 任征然¹, 王佳伟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. 北京北排科技有限公司, 北京 100124; 3. 北京北排水务设计研究院有限公司, 北京 100077)

摘 要: 相对于传统厌氧消化,污泥高含固厌氧消化具有反应器容积小、有效容积沼气产率高、建设和运行成本低等优势。从技术优势、控制参数、消化性能、存在问题和优化方式等方面,对污泥高含固厌氧消化系统进行了综述。通过调控优化污泥高含固厌氧消化过程控制参数,采用多种预处理技术耦合+厌氧消化/混合基质共消化等工艺形式,可以有效解决污泥高含固厌氧消化搅拌困难,传质、传热效果差,中间产物积累抑制等问题,并提高其厌氧消化性能。实践表明,高含固厌氧消化是污泥厌氧消化技术发展的重要趋势之一。

关键词: 污泥; 高含固厌氧消化; 预处理; 控制参数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0014-06

Research Progress on High-solids Anaerobic Digestion of Sewage Sludge

QI Li-ge-wa^{1,2}, LI Wei¹, GAO Jin-hua³, REN Zheng-ran¹, WANG Jia-wei¹

(1. Beijing Sewage Resource Engineering Technology Research Center, Technology Research and Development Center, Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Technology Co. Ltd., Beijing 100124, China; 3. Beijing Drainage Group Water Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100077, China)

Abstract: High-solids anaerobic digestion (HSAD) of sewage sludge shows the advantages of smaller reactors, larger volumetric biogas production, lower construction and operation cost compared to traditional anaerobic digestion technology. In this paper, the technological superiority, control parameters, digestion performance, existing problems and optimization methods of sewage sludge HSAD were reviewed. It can be inferred that the problems of agitation difficulties, poor mass transfer and heat transfer effects, and the accumulation and inhibition of intermediate products during sewage sludge HSAD can be effectively solved by adjusting and optimizing the control parameters of sewage sludge HSAD and adopting a variety of pretreatment process coupling plus anaerobic digestion/co-digestion and other technological forms. Moreover, the anaerobic digestion performance can also be improved. HSAD is an important trend in the development of sewage sludge anaerobic digestion technology.

Key words: sewage sludge; high-solids anaerobic digestion; pretreatment; control parameters

随着经济的发展和环境保护意识的增强,我国污水处理厂迅猛发展,污泥产量也随之逐年提升,预计 2020 年污泥产量将突破 $6\,000 \times 10^4 \text{ t}^{[1]}$ 。如何有

效实现污泥的“减量化、无害化、稳定化、资源化、资源化”已成为世界普遍关注的问题。厌氧消化技术可以高效利用污泥生产清洁能源,减少碳排放,是城

市污水处理厂污泥处理与利用的主要发展方向^[2]。然而传统厌氧消化系统总固体浓度(TS)较低,占地面积大,处理周期长,建设和运行成本相对较高。由于我国污泥有机质含量较低,导致消化过程污泥减量化程度和有效容积沼气产率(volumetric biogas production, VBP)较低。采用高含固厌氧消化技术可以提高污泥厌氧消化性能及其经济性^[3]。

目前国内建有厌氧消化设施的污水处理厂的污泥处理主要采用传统厌氧消化技术,消化系统 TS 浓度仅为 2% ~ 6%^[4]。北京某污水处理厂污泥处理中心采用污泥高级厌氧消化技术,利用热水解预处理污泥,使得消化系统 TS 浓度达到 8% ~ 12%,尽管厌氧消化系统 TS 浓度得以提升,但仍相对较低,停留时间相对较长,设施占地面积及建设成本仍然较大^[5]。污泥高含固厌氧消化技术相对于传统厌氧消化具有单位容积处理量大、处理周期短、有效容积沼气产率高、沼液排放少等优点^[6-7],其消化系统 TS 浓度为 10% ~ 20%。国内关于污泥高含固厌氧消化的研究工作相对较少,且尚无成熟技术。国外已开发多种污泥高含固厌氧消化技术,例如芬兰的 HLAD(high loaded anaerobic digestion)工艺,其消化系统 TS 浓度达到 10% ~ 15%^[8]。但是高含固厌氧消化也存在一些不可避免的问题,由于污泥自身黏度较高,导致反应器传质、传热效果受到影响,并且搅拌困难^[9]。因此,为了更好地研究与应用污泥高含固厌氧消化技术,有必要对其技术优势、控制参数、消化性能、存在问题和优化方式进行全面分析,为污泥高含固厌氧消化技术的优化升级提供参考和支撑。

1 技术优势

1958 年,Schulze^[10]提出了污泥高含固厌氧消化技术,将消化系统 TS 浓度提高至 6% ~ 20%,使得反应器容积减少一半,沼气产量增加,能耗降低。污泥高含固厌氧消化技术根据消化温度不同可分为常温、中温和高温消化;按照进料方式又可分为连续式和序批式消化,随着有机负荷率(OLR)的提高,序批式高含固厌氧消化的迟滞期(微生物生长曲线的第一个时期)会有所延长;除此之外,污泥高含固厌氧消化技术按照是否在同一反应器内也可分为单相和两相厌氧消化。目前,我国 80% 以上污水处理厂的污泥在处理前都要进行浓缩脱水,高含固厌氧消化可以直接利用脱水污泥作为消化原料。污泥高

含固厌氧消化与传统厌氧消化对比见表 1。由表 1 可知,污泥高含固厌氧消化较传统厌氧消化 OLR 提高 181.3% ~ 440.0%,平均 VBP 提高 374.2%,挥发性固体(VS)降解率与甲烷产率略有降低。在处理相同干污泥的情况下,高含固厌氧消化在反应器容积、建设和运行成本上都较传统厌氧消化更为经济,污泥减量化率更高,是污泥厌氧消化技术发展的一个重要趋势。

表 1 污泥高含固厌氧消化与传统厌氧消化对比

Tab.1 Comparison between HSAD and traditional anaerobic digestion of sewage sludge

项目	污泥高含固厌氧消化	污泥传统厌氧消化
TS/%	10 ~ 20	2 ~ 6 ^[4]
OLR/(gVS · L ⁻¹ · d ⁻¹)	2.7 ~ 4.5 ^[11]	0.5 ~ 1.6 ^[7]
VS 降解率/%	30 ~ 45 ^[12-13]	40 ~ 50 ^[7]
甲烷产率/(L · g ⁻¹ VS _{add})	0.20 ~ 0.39 ^[12-13]	0.30 ~ 0.45 ^[14]
VBP/(L · L ⁻¹ · d ⁻¹)	0.68 ~ 0.79 ^[11]	0.06 ~ 0.25 ^[7]
反应器容积	小	大
建设成本	低 ^[3]	高 ^[3]
运行成本	低 ^[3]	高 ^[3]
污泥减量化率	高	低

2 影响因素

一些影响污泥传统厌氧消化的因素,如温度、搅拌、pH 值和 C/N 等,也同样影响着污泥高含固厌氧消化。

温度是影响厌氧微生物生长代谢的主要因素之一。根据温度不同,厌氧消化主要分为中温消化和高温消化。中温消化产气稳定,产气率较高;高温消化产气速率快,但能耗较高,且小范围内的温度变化会影响嗜高温微生物的活性,稳定性相对较差。Wang 等^[15]研究了温度对污泥高含固厌氧消化的影响,结果表明,对于单相厌氧消化反应器,高温消化 VS 降解率高于中温消化,但甲烷产率相近;而对于两相厌氧消化反应器(高温酸化),中温甲烷化比高温甲烷化更有利于 VS 的降解,甲烷产率更高。可见,厌氧消化反应器和处理工艺的不同,对消化过程的温度要求也不同,厌氧消化温度的选择还需考虑能耗等经济性问题。

在厌氧消化过程中,对原料进行搅拌可以提高产气速率和产气量。对于污泥高含固厌氧消化系统,消化系统 TS 浓度较高,且黏度增大,通过搅拌可以使污泥与微生物充分接触,提高传质、传热效率,

加速沼气释放,从而提高厌氧消化性能。搅拌又可分为沼气搅拌、射流搅拌和机械搅拌等。其中沼气搅拌对于沼气产生量较少的消化系统来说效果并不明显,且操作费用较高,回流气体量难以确定,对消化系统微生物的影响尚不清楚;射流搅拌在回流过程中容易使空气进入消化系统,且由于微生物浓度不均匀,在消化系统中的路径会发生改变,使反应器出现死区;机械搅拌被认为是最有效的搅拌方式,在污泥高含固厌氧消化过程中,可以有效地提高传质、传热效果,均匀物料,但由于污泥黏度增大,搅拌功率也随之增加,因此污泥高含固厌氧消化系统搅拌的设计应在保证传质、传热的效果下,尽量降低搅拌能耗。间歇式搅拌不仅可以提高沼气产量,还可以降低能耗,而过度的搅拌则会破坏消化系统微生物的稳定性。杨梦^[16]研究了不同搅拌强度(2 h/d, 50 r/min; 2 h/d, 25 r/min; 2 h/d, 10 r/min; 6 h/d, 50 r/min; 6 h/d, 25 r/min; 6 h/d, 10 r/min)的污泥高含固厌氧消化性能,在 6 h/d、50 r/min 的搅拌条件下沼气产率最高,达到 0.19 L/gVS_{add},而在 2 h/d、25 r/min 的搅拌条件下最为经济,可获得的剩余能量达到 7.25 MJ/(m³·d),沼气产率为 0.18 L/gVS_{add}。

pH 值是影响厌氧消化过程的重要指标之一,传统厌氧消化的最适 pH 值在 6.8~7.6 之间,而污泥高含固厌氧消化系统在 pH 值为 7~8 时保持稳定^[11-12]。由于污泥高含固厌氧消化系统 TS 浓度较高,启动困难,消化前期容易出现挥发性脂肪酸(VFAs)积累现象,导致 pH 值降低,严重时会引起“酸中毒”现象,此时需要向消化系统添加碱等物质来调节 pH 值。随着产甲烷菌对 VFAs 的消耗,消化系统的 pH 值逐渐回升。因此,维持水解产酸速率与产甲烷菌代谢速率的平衡对污泥高含固厌氧消化过程十分重要,适宜的 pH 值能够保证污泥高含固厌氧消化系统的顺利进行。

氨氮和 VFAs 是厌氧消化过程中重要的中间产物,也是消化系统稳定性的重要影响因素,它们的浓度取决于消化系统的 C/N 值。当消化系统 C/N 值过低时,氨氮浓度升高,系统容易发生氨抑制;当 C/N 值过高时,系统对有机酸的缓冲能力不足,会造成 VFAs 的大量积累^[9]。传统厌氧消化合适的 C/N 值为 20:1~30:1,而有研究表明,高含固厌氧消化的适宜 C/N 值为 27:1~32:1^[17]。污泥高含固厌氧消化系统的蛋白质含量高,C/N 值低,经过微

生物作用,消化系统的氨氮浓度提高,游离氨浓度不断上升,对微生物产生毒害作用,使消化系统受到抑制^[12]。戴晓虎等^[18]对系统 TS 浓度为 15% 的污泥中温厌氧消化进行游离氨的调控,当游离氨从 (400±173) mg/L 提高到 (526±25) mg/L 后,相比对照组,系统的日产气量和 VS 降解率分别降低了 14.2% 和 33.7%,但消化系统仍稳定运行。可见,消化系统游离氨浓度的增加,导致产气效率和 VS 降解率大幅度降低。对于污泥蛋白质含量高、C/N 值低的问题,混合基质共消化可以调节系统至合适的 C/N 值,提高厌氧消化性能^[19]。

3 消化性能

Li 等^[11]开展了污泥高含固厌氧消化的性能研究,结果表明,当 OLR 为 3.5~3.7 gVS/(L·d) 时,厌氧消化性能最佳,污泥有机物含量(VS/TS)达到 60%~65%,VS 降解率为 32.2%,甲烷产率为 0.16 L/gVS_{add}。在消化稳定期(60~577 d),污泥高含固厌氧消化系统保持了稳定的产气量,沼气利用满足系统自身的能源需求,可产出总能量的 72%~80%。此外,稳定期内系统 TS 浓度由 14.3% 变化到 22.0%,污泥 VS/TS 由 50.2% 变化到 65.6%,OLR 由 2.7 gVS/(L·d) 变为 4.5 gVS/(L·d)。由于原料的变化,VS 降解率在 10.3%~46.0% 之间显著变化,最低值出现在高 OLR 和低 VS/TS 的污泥条件下。尽管消化系统表现出了正常的性能,但它确实受到了污泥 VS/TS 和相应 OLR 的影响。基于 OLR 划分,污泥高含固厌氧消化系统在低 OLR 下具有更好的性能。例如,当污泥 VS/TS 为 55%~60%,OLR 由 3.1~3.3 gVS/(L·d) 增加到 4.1~4.3 gVS/(L·d) 时,甲烷产率由 0.16 L/gVS_{add} 下降到 0.11 L/gVS_{add}。另一方面,高有机物含量的污泥在相同的 OLR 水平下表现更好,在 OLR 为 3.1~3.3 gVS/(L·d)、污泥 VS/TS 由 50%~55% 增加到 60%~65% 时,甲烷产率由 0.15 L/gVS_{add} 增加到 0.16 L/gVS_{add}。随着 OLR 的增加,有机物去除率的变化趋势并不明显,但较高的 OLR 确实从整体上抑制了沼气的产生。然而,通过统计分析进一步确定,污泥有机物含量低是限制系统性能的关键因素,而不是 OLR。因此,高 OLR 适合于低有机质污泥,因为它可以实现较高的 VBP,提高厌氧消化反应器的能源效率。

Duan 等^[12]研究了消化系统不同 TS 浓度和

OLR下,VS/TS为50%~60%的污泥高含固厌氧消化,当TS浓度为20%、OLR为3.0 gVS/(L·d)时,甲烷产率与VS降解率分别为0.22 L/gVS_{add}和38.7%;Dai等^[13]研究了系统TS浓度为19%~21%的污泥高含固厌氧消化,甲烷产率与VS降解率分别为0.16~0.24 L/gVS_{add}和26.8%~38.2%,他们的结果与Li等^[11]的研究接近。如上所述,尽管污泥高含固厌氧消化性能低于传统厌氧消化的一般水平,但其在技术上是可行的,限制污泥高含固厌氧消化系统的关键因素是污泥本身有机物含量低,而不是系统的高OLR。虽然系统高OLR会抑制沼气产率,但目前多种预处理技术可以加速污泥高含固厌氧消化的水解,提高厌氧消化性能。

4 存在问题与优化方式

污泥絮体是一种多相介质,由微生物聚集体、丝状菌群、有机和无机颗粒、胞外聚合物(EPS)和大量水组成^[20]。EPS来源于微生物活动(分泌和细胞溶解)和废水本身,是污泥有机部分的主要成分,由蛋白质、多糖、核酸、腐殖物质、脂类等组成。EPS控制着污泥基质的表面物理化学性质,并提供保护性屏蔽,防止细胞破裂和溶解,从而影响污泥的功能完整性、强度、絮凝性和脱水性,甚至生物降解性。除了EPS的保护,微生物细胞本身还具有一个由肽交联的多糖链组成的硬细胞膜,EPS和细胞含量高的污泥具有刚性结构,水解和消化难度较大。因此,污泥高含固厌氧消化较传统厌氧消化存在搅拌阻力大,传质、传热效果差,中间产物积累抑制等问题^[21]。

首先,高含固污泥作为高黏度触变流体,搅拌困难,搅拌功率与能耗也随之增加。然而,搅拌虽能够促进底物与微生物的有效接触,但强度和频率过高的搅拌会影响微生物的稳定与代谢。其次,随着污泥高含固厌氧消化系统TS浓度的提高,物料流动性降低,接种效果变差,导致消化系统启动困难,迟滞期长;同时,随着消化系统OLR的提高,系统传质、传热效率降低,导致中间产物VFAs与氨氮的积累,抑制产甲烷菌的生长代谢,降低甲烷产率^[22]。此外,为保证厌氧消化反应器的稳定运行,高含固污泥在进料前应保证与消化温度相同,否则温度的波动也会影响微生物的稳定性。这些都需要进一步的研究探索和工程实践的验证。

为了加速污泥高含固厌氧消化的水解,提高厌氧消化性能,目前已有多种预处理技术,包括机械预

处理(超声、微波、冻融等)、热水解、化学预处理[酸解、碱解、臭氧氧化、芬顿、Fe(II)-过硫酸盐氧化等]以及生物预处理等。容明知等^[23]研究了超声预处理在低能量输入条件下对污泥蛋白酶和脱氢酶活性的影响,结果表明20 kHz的超声频率对其具有较好的促进效果。张琦东^[24]研究了热水解对污泥厌氧消化可降解性的影响,结果表明170℃的热水解预处理产生的甲烷量是原污泥实验组的1.5倍。Devlin等^[25]研究了酸处理对污泥厌氧消化的影响,结果表明,经37%的盐酸处理后的污泥厌氧消化13 d的产气量与原污泥实验组厌氧消化21 d的产气量相当。王莹莹等^[26]研究发现,高温条件下生物酶强化厌氧消化能有效去除污泥中的药理活性化合物(PhACs)。

此外,多种技术耦合、混合基质共消化和分级分相厌氧消化等技术也是目前研究的热点。蒋昌旺等^[27]研究发现,热碱联合预处理有助于促进剩余污泥的溶胞效果,改善剩余污泥的厌氧消化性能,当碱投加量为60 mg/g(按单位质量SS的NaOH投加量计)时累积甲烷产量最大。Aloun等^[19]将污泥与猪粪按2:1进行联合厌氧消化,甲烷产率(0.68 L/gVS_{add})较污泥单独厌氧消化提高了120%,VS降解率达到63.1%。曹知平等^[28]采用“超高温酸化(70℃)-高温甲烷化(55℃)”的强化两相厌氧消化工艺处理剩余污泥,系统VS降解率为35.7%,甲烷产率达到0.65 L/gVS_{add}。可见,污泥预处理技术可有效破坏污泥细胞结构,提高厌氧消化性能,但各类方法也均存在一定的不足。对于相同的预处理方法,其性能也可能因污泥特性、预处理条件和厌氧消化工艺参数的不同而有很大差异,需要进一步从能源、经济和环境的角度对这些技术进行评估。

5 结论与展望

虽然污泥高含固厌氧消化具有一定优势,但也存在一些问题:①污泥高含固厌氧消化虽然较传统厌氧消化的有机负荷、有效容积沼气产率大幅提高,但VS降解率与甲烷产率略有降低,污泥有机物含量低是限制系统性能的关键因素;②污泥高含固厌氧消化系统的蛋白质含量高,C/N值低,容易发生氨氮、挥发性脂肪酸等中间产物积累现象;③高含固污泥黏度很大,在消化过程中传质、传热效果差,搅拌困难。预处理强化高含固厌氧消化和混合基质共消化可以优化污泥高含固厌氧消化性能;另一方面,

污泥高含固厌氧消化系统采用间歇式搅拌可以在保证传质、传热效果条件下降低搅拌能耗。多种预处理技术耦合+厌氧消化/混合基质共消化等工艺形式是污泥高含固厌氧消化的主要研究方向之一。

参考文献:

- [1] 李东,陆文静,刘彦廷,等. 污泥生物干燥影响因素中试[J]. 环境工程,2019,37(增刊):275-279.
LI Dong, LU Wenjing, LIU Yanting, *et al.* Pilot study on influence factors of sludge bio-drying[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(S): 275-279 (in Chinese).
- [2] 江水英,吴声东. 微量元素强化污泥和油脂厌氧共消化生物产气[J]. 科学技术与工程,2018,18(6):346-349.
JIANG Shuiying, WU Shengdong. Simulated digestive gas production from sludge and grease anaerobic co-digestion by trace element addition [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(6): 346-349 (in Chinese).
- [3] 张玉瑶. 高含固污泥厌氧消化特性及能效评估[D]. 北京:清华大学,2016.
ZHANG Yuyao. Characteristics and Energy Efficiency Evaluation of High-solid Sludge Anaerobic Digestion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [4] QIN Y J, CHEN L Y, WANG T Y, *et al.* Impacts of ferric chloride, ferrous chloride and solid retention time on the methane-producing and physicochemical characterization in high-solids sludge anaerobic digestion [J]. Renewable Energy, 2019, 139: 1290-1298.
- [5] 孙晨翔,李伟,陈湛,等. 基于热水解的高效污泥厌氧消化技术研究进展[J]. 生物产业技术,2019(2):58-64.
SUN Chenxiang, LI Wei, CHEN Zhan, *et al.* Development status and achievements of thermal hydrolysis pretreated efficient anaerobic digestion process [J]. Biotechnology & Business, 2019(2): 58-64 (in Chinese).
- [6] FORSTER-CARNEIRO T, PÉREZ M, ROMERO L I. Anaerobic digestion of municipal solid wastes: dry thermophilic performance[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17): 8180-8184.
- [7] 廖晓聪,程英超,李欢. 污泥高固体厌氧消化研究进展[J]. 四川环境,2013,32(6):118-121.
LIAO Xiaocong, CHENG Yingchao, LI Huan. Research progress of high-solids sludge anaerobic digestion [J]. Sichuan Environment, 2013, 32(6): 118-121 (in Chinese).
- [8] 孙晓. 高含固率污泥厌氧消化系统的启动方案与试验[J]. 净水技术,2012,31(3):78-82.
SUN Xiao. Experiment and start-up solution of anaerobic digestion system for high-solid content sludge[J]. Water Purification Technology, 2012, 31(3): 78-82 (in Chinese).
- [9] 盛迎雪,曹秀芹. 高固体污泥厌氧消化技术特点及存在问题分析[J]. 北京建筑大学学报,2016,32(2):41-45,59.
SHENG Yingxue, CAO Xiuqin. Analysis on technological characteristics and existing problems of high-solids anaerobic digestion [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016, 32(2): 41-45, 59 (in Chinese).
- [10] SCHULZE K L. Studies on sludge digestion and methane fermentation: I. sludge digestion at increased solids concentrations [J]. Sewage and Industrial Wastes, 1958, 30(1): 28-45.
- [11] LI H, SI D D, LIU C, *et al.* Performance of direct anaerobic digestion of dewatered sludge in long-term operation [J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 355-364.
- [12] DUAN N N, DONG B, WU B, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 150-156.
- [13] 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 Management, 2012, 33(2): 308-316.
- [14] Water Environment Federation, American Society of Civil Engineers/Environmental, Water Resources Institute. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants[M]. 5th ed. Alexandria: Water Environment Federation Press, 2009.
- [15] WANG G P, DAI X H, ZHANG D, *et al.* Two-phase high solid anaerobic digestion with dewatered sludge: improved volatile solid degradation and specific methane generation by temperature and pH regulation [J]. Bioresource Technology, 2018, 259: 253-258.
- [16] 杨梦. 搅拌对高含固污泥厌氧消化性能及流态的影响[D]. 无锡:江南大学,2018.
YANG Meng. Effect of Agitation on Performance and

- Flow Patterns of High-solid Sludge Anaerobic Digestion [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018 (in Chinese).
- [17] ZESHAN, KARTHIKEYAN O P, VISVANATHAN C. Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 113: 294 – 302.
- [18] 戴晓虎, 何进, 严寒, 等. 游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38 (2): 679 – 687.
- DAI Xiaohu, HE Jin, YAN Han, *et al.* Effects of free ammonia regulation on the performance of high solid anaerobic digestion with dewatered sludge [J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (2): 679 – 687 (in Chinese).
- [19] ALOUN Manosane, 杨朝晖, 徐锐, 等. 猪粪与污泥不同配比对其厌氧共消化与微生物多样性的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11 (11): 6014 – 6021.
- ALOUN Manosane, YANG Zhaohui, XU Rui, *et al.* Impacts of different mix ratio of pig manure and dewatered sludge on anaerobic digestion performance and microbial community diversity [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (11): 6014 – 6021 (in Chinese).
- [20] SUBRAMANIAN S B, YAN S, TYAGI R D, *et al.* Extracellular polymeric substances (EPS) producing bacterial strains of municipal wastewater sludge; isolation, molecular identification, EPS characterization and performance for sludge settling and dewatering [J]. *Water Research*, 2010, 44: 2253 – 2266.
- [21] 王庆, 马思佳, 许柯, 等. 铁粉/鼠李糖脂对高含固率脱水污泥的强化厌氧消化[J]. *净水技术*, 2018, 37 (10): 62 – 67.
- WANG Qing, MA Sijia, XU Ke, *et al.* Enhanced anaerobic digestion for dewatered sludge of high solid content by dosing of iron powder/rhamnolipid [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37 (10): 62 – 67 (in Chinese).
- [22] LIU C, LI H, ZHANG Y Y, *et al.* Characterization of methanogenic activity during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 109: 96 – 100.
- [23] 容明知, 何国富, 徐慧敏. 超声预处理对剩余污泥酶活性的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11 (7): 4320 – 4324.
- RONG Mingzhi, HE Guofu, XU Huimin. The effects of ultrasonic pretreatment on enzyme activities of waste activated sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (7): 4320 – 4324 (in Chinese).
- [24] 张琦东. 热水解对污泥厌氧消化可降解性的影响及其机理探究[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44 (2): 57 – 60.
- ZHANG Qidong. Effect of thermal hydrolysis on desiccability of sludge anaerobic digestion and its mechanism [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44 (2): 57 – 60 (in Chinese).
- [25] DEVLIN D C, ESTEVES S R, DINSDALE R M, *et al.* The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (5): 4076 – 4082.
- [26] 王莹莹, 周海东, 刘积成, 等. 生物酶强化厌氧消化去除污泥中的 PhACs [J]. *环境科学研究*, 2018, 31 (2): 345 – 352.
- WANG Yingying, ZHOU Haidong, LIU Jicheng, *et al.* Removal of pharmaceutically active compounds in sewage sludge using anaerobic digestion enhanced with bio-enzyme treatments [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31 (2): 345 – 352 (in Chinese).
- [27] 蒋昌旺, 李靖, 何迪, 等. 热碱预处理对高含固剩余污泥厌氧消化的影响及其动力学研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41 (8): 906 – 909, 915.
- JIANG Changwang, LI Jing, HE Di, *et al.* Influence of thermal-alkaline pretreatment on higher solid containing excess sludge anaerobic digestion and the kinetic study [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, 41 (8): 906 – 909, 915 (in Chinese).
- [28] 曹知平, 吴静, 左剑恶, 等. 强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落[J]. *环境科学*, 2017, 38 (5): 2059 – 2064.
- CAO Zhiping, WU Jing, ZUO Jian'e, *et al.* Microbial structure of an enhanced two-phase high-solid anaerobic digestion system treating sludge [J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (5): 2059 – 2064 (in Chinese).

作者简介: 齐利格娃 (1993 –), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事固体废物废弃物的处理与利用工作。

E-mail: qlgw9346@163.com

收稿日期: 2020 – 03 – 23

修回日期: 2020 – 04 – 23

(编辑: 丁彩娟)