

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.005

初沉和二沉污泥经高温热水解后的厌氧消化性能

张 涵¹, 张 含², 吴宝利³, 任征然², 王佳伟², 齐利格娃²,
李相昆¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 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; 3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘 要: 以北京某大型污水处理厂的初沉污泥、剩余活性污泥为研究对象,通过考察厌氧消化系统的生物产甲烷潜力(BMP)、有机物降解能力,以及水解、产酸、产甲烷率、系统稳定性等,探讨了初沉池污泥和二沉池污泥经高温热水解预处理后的厌氧消化性能。结果表明,在厌氧消化阶段,初沉热水解污泥的产气率和有机物降解率相比初沉原泥均无明显提高;相比原泥,二沉池剩余污泥经热水解后最高日产气率、总固体(TS)累积产气率分别提高了67%、80%左右,总化学需氧量(TCOD)、总蛋白、总糖的降解率分别提高了5%、7%、14%。高温热水解工艺对提高剩余污泥的水解率、产酸率、产甲烷率效果更加明显。从系统稳定性方面看,初沉污泥高温热水解后可能会造成厌氧消化系统出现挥发性脂肪酸(VFA)大量积累,导致系统不稳定,影响产气速率;而热水解后的剩余污泥厌氧消化系统能够保持稳定运行。综合来看,剩余活性污泥更适合采用热水解预处理,初沉污泥可不进行热水解预处理。

关键词: 初沉污泥; 剩余活性污泥; 热水解; 厌氧消化; 系统稳定性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0032-07

Anaerobic Digestion Performance of Primary and Secondary Sludge after Hydrothermal Hydrolysis

ZHANG Han¹, ZHANG Han², WU Bao-li³, REN Zheng-ran², WANG Jia-wei²,
QI Li-ge-wa², LI Xiang-kun¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Beijing Municipal Sewage Resource Engineering Technology Research Center, Science and Technology Research and Development Center of Beijing Urban Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100124, China; 3. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Taking the sludge of primary sedimentation tank (primary sludge) and secondary sedimentation tank (excess activated sludge) respectively from a large-scale wastewater treatment plant in Beijing as the research object, the anaerobic digestion (AD) performance fed with the pretreatment sludge by high temperature thermal hydrolysis (TH) was investigated. For this purpose, biological methane

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52000057)

通信作者: 李相昆 E-mail: xkli312@163.com

production potential (BMP), organic matter degradation capacity, hydrolysis, acid production, methane production rate and system stability were all concerned. The results showed that in the AD stage, the gas production rate and organic matter degradation rate of the primary sludge were not significantly higher than that of the excessive activated sludge. Compared with the sludge without TH, the maximum daily gas production rate and TS cumulative gas production rate of excess activated sludge increased by 67% and 80% respectively after TH, and the TCOD degradation rate, total protein degradation rate and total sugar degradation rate increased by 5%, 7% and 14% respectively. The high-temperature TH pretreatment was more effective in improving the hydrolysis rate, acid production rate and methane production rate for excess activated sludge in AD system. For the system stability, a large amount of VFA accumulated in the AD system when fed with primary sludge after TH, which led to system instability and gas production decrease. Meanwhile, the AD system fed with excess activated sludge with TH pretreatment kept stable. In general, the excess activated sludge from secondary sedimentation tank was more suitable for high temperature TH pretreatment, however the sludge from primary tank had better feed AD system directly without TH.

Key words: primary sludge; excess activated sludge; thermal hydrolysis (TH); anaerobic digestion (AD); system stability

随着我国城市污水厂数量和规模的不断扩增,污泥产量也在急剧增加^[1]。污泥若得不到妥善处理,会造成二次环境污染,因此,污泥的减量化和资源化成为了目前研究的热点^[2]。厌氧消化是目前比较常用的一种污泥处理技术,也是城市污水处理厂污泥处理与利用的主要发展方向^[3]。但由于受水解这一限速步骤的影响^[4],传统厌氧消化工艺存在效率低、装置体积大、沼气产量低等问题^[5],因此,多种污泥预处理技术被开发与应用,例如热水解^[6]、碱解^[7]、超声^[8]、臭氧氧化^[9]等。相比其他预处理技术,高温热水解能够使污泥具有良好的流变性能和降解性能,从而提供厌氧消化高含固进料和高负荷运行的可行性,大幅减少消化设施的建设投资^[10]。污泥高温热水解-厌氧消化工艺在北京地区已有多个成功运行案例^[11-12]。

高温热水解污泥预处理技术始于20世纪40年代,其原理为:在高温高压下通过热效应促使污泥中的有机质破碎,释放出大分子有机物,并进一步水解为小分子物质^[13-15],从而提高后续的厌氧消化性能。Bougrier等^[16]发现污泥高温热水解最适宜反应温度为160~180℃,反应时间为30~60 min,可以使甲烷产量提高40%~100%。王治军等人^[17]发现热水解预处理能促使污泥固体溶解和水解,从而提高其厌氧消化性能,预处理后的初沉污泥和剩余

污泥中的溶解性化学需氧量(SCOD)、溶解性碳水化合物和溶解性蛋白质的含量都有所提高。

目前我国城市污水处理厂厌氧消化对象主要为初沉污泥、剩余污泥或混合污泥(初沉+剩余污泥),初沉污泥主要由悬浮颗粒和一些大分子有机物组成,而剩余污泥主要由微生物组成,并且剩余污泥中的有机物主要存在于污泥絮体和细胞内部,泥质是影响污泥厌氧消化性能的重要因素^[18]。由于两种污泥结构不同,热水解预处理对其改善效果可能存在差异,同时考虑到热水解温度过高可能发生美拉德反应而影响厌氧消化进程,以北京市某大型污水处理厂的初沉污泥、剩余活性污泥为处理对象,通过160℃、30 min的高温热水解分别对两种污泥进行预处理,探究热水解对不同种类污泥后续厌氧消化过程的影响,为热水解-厌氧消化工艺处理不同污泥提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验原料

初沉污泥、剩余活性污泥均取自北京某污水处理厂,经离心脱水后含水率在85%左右。污泥取回后储存在4℃冰箱待用。

厌氧消化系统的接种污泥来自北京某污水处理厂,驯化结束后污泥静置14 d左右,待污泥完全不产气后接种到厌氧消化系统中。

1.2 高温热水解试验装置

高温热水解装置如图1所示,主体结构由不锈钢制成,具有良好的抗腐蚀性和密封性,其中反应罐有效容积为5 L。



图1 试验用热水解装置

Fig.1 Thermolysis device for test

在进行新一批次的试验前需要清洗试验装置,使用时先预热反应器,确保各阀门处于关闭状态,将3 L含水率在85%左右的初沉污泥和剩余污泥分别打入两侧反应罐,通过阀门控制蒸汽流量和调节反应器压力,当压力达到设定值0.62 MPa后开始计时,此时对应热水解温度为160℃。物料反应期间,时刻观察压力表读数,确保压力正常。当到达设定的反应时间后,轻缓地将反应器的压力降低,打开阀门使物料从反应器进入闪蒸罐。冷却30 min后,放置接料桶,放出热水解物料。检测各项指标并将含固率调至8%,作为后续厌氧消化系统进料。

1.3 中温厌氧消化试验

厌氧消化小试系统包含4个消化反应器,分别为R1(初沉原泥)、R2(初沉160℃热水解污泥),有效容积为10 L;R3(剩余原泥)、R4(剩余160℃热水解污泥),有效容积为5 L。反应器以批式运行,温度均控制在(40±1)℃,水力停留时间为20 d。进料热水解污泥含固率调为8%,BMP试验接种比大致在1:1~1:5之间,4个反应器初始均采用热水解污泥:驯化污泥=1:4(质量比)接种并启动,连续机械搅拌,转速控制在100~120 r/min。

1.4 测定指标及方法

测定指标包括总指标及溶解态指标两类。其中,总指标包括TCOD、总糖、总蛋白,取样方法:取

反应器消化出泥经匀浆机匀浆后待测;溶解态指标包括SCOD、可溶糖、可溶蛋白、VFA,取样方法:取反应器消化出泥至50 mL离心管,在9 000 r/min下离心15 min,取上清液经0.45 μm膜过滤后待测。TS、VS、SS、VSS采用标准重量法测定;COD采用哈希试剂-快速测定法测定;蛋白质采用Folin-酚试剂法测定;还原糖采用苯酚-硫酸法测定;pH采用pH计测定;VFA采用气相色谱-质谱法测定;产气量采用湿式气体流量计测定;气体成分采用biagas5000气体成分分析仪测定。

2 结果与讨论

2.1 热水解对不同污泥理化性质的影响

经热水解后,初沉污泥和剩余污泥的VS/TS均有不同程度的下降(64.56%→64.35%和58.33%→57.97%),VS降解是因为细胞壁被破坏,污泥中的大分子有机物不断水解为小分子有机物,部分有机物在高温下水解生成二氧化碳而进入气相。相较于初沉原泥,初沉160℃热水解污泥的VSS/SS降低了约4.4%(分别为64.47%和60.11%),剩余160℃热水解污泥的VSS/SS相比原泥降低了约5.8%(分别为57.43%和51.66%)。可见,剩余污泥经热水解后有机物溶出更多。

从有机物方面看,初沉污泥的TCOD含量高于剩余污泥,本次取样时间为10月下旬,检测得到的初沉污泥的有机物含量更高,所以TCOD含量也更高。热水解前后,初沉污泥和剩余污泥的TCOD、总糖、总蛋白变化均不大(见表1),其中初沉污泥经热水解后TCOD升高,原因可能是取样不均导致的误差。

表1 不同污泥热水解前后理化性质变化

Tab.1 Change of physical and chemical properties of different sludge before and after hydrolysis

项 目	pH	TCOD/ (mg·L ⁻¹)	总蛋白/ (mg·L ⁻¹)	总糖/ (mg·L ⁻¹)
初沉原泥	6.48	91 370	19 319	4 888
初沉热水解污泥	6.10	102 021	22 110	5 230
剩余原泥	7.44	69 848	21 414	6 177
剩余热水解污泥	6.84	68 104	21 471	6 593

初沉污泥、剩余污泥经热水解后pH均降低,原因可能是热水解导致污泥中有机酸浓度升高,两种污泥对比,剩余污泥的下降程度更大,表明热水解过程对于剩余污泥产酸的效果更加明显。

2.2 热水解对不同污泥厌氧产气效能的影响

图2为不同污泥的TS日产气率变化。在厌氧消化过程中,初沉原泥和初沉160℃热水解后污泥均在第6天达到日产气率高峰,而经160℃热水解后初沉污泥的最高日产气率更高,为65.03 mL/g,相比原泥提高了15%。第8天,经160℃热水解的初沉污泥达到第二个日产气率高峰,原因可能是初沉污泥热水解后有机物溶出更多,开始出现VFA大量积累,影响了产气速率,随着反应的进行,累积的酸进一步产甲烷,故出现第二次产气峰值。

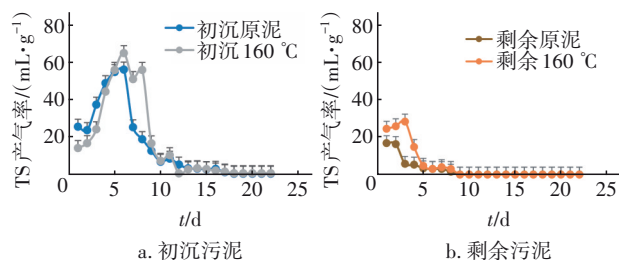


图2 不同污泥TS日产气率的变化

Fig.2 Change of daily gas production rate of different sludge with time

由图2(b)可知,剩余原泥在第1天达到日产气率高峰,经热水解预处理后的剩余污泥在第3天达到日产气率高峰,之后日产气率快速下降。剩余原泥、热水解后剩余污泥的最高日产气率分别为17.14、28.78 mL/g,相比剩余原泥,经过热水解后最高日产气率提高了67%左右。

经气体成分检测,初沉原泥、初沉热水解污泥、剩余原泥、剩余热水解污泥所产气体的平均甲烷含量分别为76.8%、71.2%、59.6%、67.3%,即初沉污泥的消化气体甲烷含量明显高于剩余污泥。初沉污泥经热水解后甲烷含量降低了5.6%,剩余污泥经热水解后甲烷含量则升高了约8%,表明热水解对于提高剩余污泥产气甲烷含量效果明显。

从累积产气率(见图3)来看,初沉原泥TS累积产气率达到了335.85 mL/g,最大日产气速率达到53.19 mL/L;初沉污泥经热水解后TS累积产气率和最大日产气速率相比初沉原泥仅略有提高,分别为376.60 mL/g和65.15 mL/L。剩余污泥经热水解后TS累积产气率提高,是剩余原泥的1.8倍左右(分别为62.50、111.64 mL/g),最大日产气速率是剩余原泥的3.2倍(分别为9.13、28.86 mL/L)。

对热水解前后初沉、剩余污泥的产气率数据通过Origin 2021软件运用改进的Gompertz模型进行

拟合,得到 R^2 分别为0.997 4、0.995 7、0.983 6、0.995 9,说明拟合效果良好。从迟滞期方面看,初沉原泥的迟滞期为3.60 d,说明初沉原泥的厌氧消化启动时间较长,有机物的水解需要更长的时间。初沉污泥经热水解后迟滞期增加到4.55 d,表明热水解反而会延长初沉污泥的迟滞期,这可能是因为初沉污泥热水解过程中有机物大量溶出,产生VFA的大量积累,影响了初沉污泥的产气速率。剩余污泥经热水解后迟滞期由1.22 d降为0.70 d,表明热水解可以有效缩短剩余污泥厌氧消化的迟滞期,使剩余污泥厌氧反应更快,并提高了产气率。

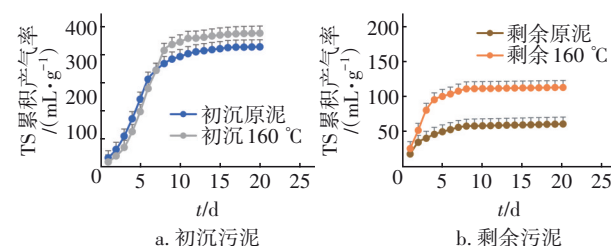


图3 不同污泥的TS累积产气率

Fig.3 Cumulative gas production rate of different sludge

综上所述,热水解预处理能够有效提高剩余污泥厌氧消化的产气性能,而对于初沉污泥则提高不明显。热水解能促进剩余污泥中有机物快速水解,部分有机物从细胞壁、EPS和胶体的束缚包裹中释放,使污泥中有机物可生化性得到提高。所以,剩余污泥更适合进行热水解预处理以提高产气效果,初沉污泥可直接进行厌氧消化,以节省能耗。

2.3 热水解后厌氧消化系统的有机物降解

污泥厌氧消化处理的主要目的是降低污泥中有机物含量从而使污泥稳定化,经过热水解预处理后的初沉污泥、剩余污泥在20 d的中温厌氧消化过程中,在前10 d总糖、TCOD、总蛋白的降解率均快速增加,之后增幅趋缓。

从热水解前后的初沉污泥有机物降解率来看,初沉原泥、初沉160℃热水解污泥的TCOD分别降解了61.11%、62.19%,总蛋白分别降解了61.25%、61.66%,总糖分别降解了62.95%、63.90%,可见相比初沉原泥,经热水解后的初沉污泥在消化阶段的有机物降解率并无明显提高。

剩余原泥、剩余160℃热水解污泥的TCOD分别降解了50.98%、56.20%,总蛋白和总糖分别降解了42.85%、49.73%和43.03%、57.62%,经过热水解预处理后TCOD、总蛋白、总糖的降解率分别提高

了5%、7%、14%左右,即热水解能明显促进剩余污泥中有机物的降解。

从两种污泥降解率的变化可知,初沉原泥与初沉热水解污泥的TCOD降解率、总蛋白降解率、总糖降解率并无明显差异,而剩余原泥的TCOD降解率、总蛋白降解率、总糖降解率上升速度要慢于热水解剩余污泥,表明剩余污泥经热水解后TCOD、总糖、总蛋白的降解速率均有提高。

2.4 水解、产酸、产甲烷特性分析

厌氧消化过程主要分为水解、产酸、产甲烷三个阶段,为了更好地理解和表征这三个过程,将总转化率分解为水解率、产酸率及产甲烷率,可以通过测算不同成分占进料总化学需氧量(TCOD)的比例实现,计算公式如下:

$$\text{水解率} = \frac{\text{SCOD}_{\text{出}} - \text{SCOD}_{\text{进}} + \text{GCOD}}{\text{TCOD}_{\text{进}} - \text{SCOD}_{\text{进}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{产酸率} = \frac{\text{VFA}_{\text{出}} - \text{VFA}_{\text{进}} + \text{GCOD}}{\text{TCOD}_{\text{进}} - \text{VFA}_{\text{进}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{产甲烷率} = \frac{\text{GCOD}}{\text{TCOD}_{\text{进}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:TCOD_进、SCOD_进分别为进料污泥的TCOD和SCOD,mg/L;VFA_进为进料污泥中的VFA(以COD计,下同),mg/L;SCOD_出、VFA_出分别为发酵液的SCOD、VFA,mg/L;GCOD为沼气的COD,在标准大气压和温度下COD与甲烷的转化系数为350 mL/g。

试验结果表明,热水解对不同污泥厌氧消化进程有较大影响。如图4(a)、(b)所示,初沉热水解污泥相比初沉原泥,水解率并无明显差异;剩余热水解污泥的水解率在消化第一天高于剩余原泥,表明热水解破坏了剩余污泥的结构,使其更容易被水解,之后剩余热水解污泥的水解率迅速下降,原因可能是热水解对剩余污泥的水解作用显著,剩余污泥中一部分有机物在热水解阶段已经充分溶出到液相,因此在厌氧阶段没有明显的水解作用。

从产酸率看,经热水解后的初沉污泥产酸率在第3天开始升高,第6天达到峰值53.66%,随后产酸率下降,且始终低于初沉原泥。综合来看,热水解对于提高初沉污泥产酸率并无明显正向作用。剩余污泥经热水解后产酸率随着消化时间的延长不断下降,但始终高于剩余原泥,表明热水解能够有效提高剩余污泥的产酸率。

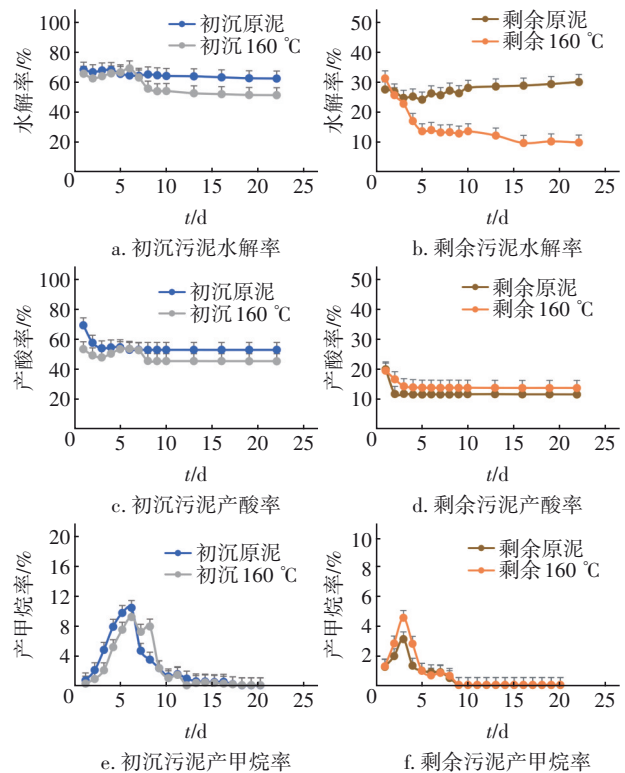


图4 不同污泥的水解率、产酸率、产甲烷率

Fig.4 Hydrolysis rate, acid production rate and methane production rate of different sludge

在产甲烷率方面,初沉原泥和初沉热水解污泥均在第6天达到高峰,之后在第8天,初沉热水解污泥达到第二个产甲烷率高峰,该趋势与初沉污泥TS日产气率一致。由于初沉原泥产气中的甲烷含量高于初沉热水解污泥,所以最大产甲烷率高于初沉热水解污泥。剩余原泥、剩余热水解污泥的产甲烷率均在第3天达到峰值,随后迅速下降,剩余热水解污泥最大产甲烷率高于剩余原泥,表明热水解对于提高剩余污泥的产甲烷效果有明显正向作用。

综上所述,初沉原泥已有较高的水解、产酸、产甲烷率,并无热水解预处理的必要。而水解阶段是厌氧消化过程的主要限速步骤,热水解预处理能够快速、高效地水解剩余污泥中的有机物,加速其厌氧消化进程。

2.5 稳定性分析

厌氧消化过程中,产酸菌对pH不敏感,在消化的开始阶段能够快速增殖,并将有机物转化为VFA,VFA是厌氧消化过程中重要的中间产物。有研究表明,VFA/碱度能够用于判断厌氧消化系统的稳定性,当VFA/碱度值<0.4时,可以判定系统稳

定;VFA/碱度值介于0.4~0.8时,系统可能发生不稳定;VFA/碱度值>0.8时,系统表现出明显的不稳定性^[19]。在运行过程中4个反应器内VFA、碱度的变化如图5所示。

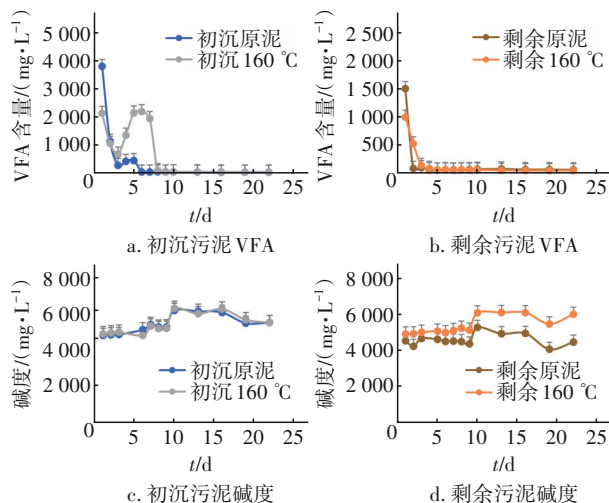


图5 不同消化时间初沉、剩余污泥的VFA和碱度变化

Fig.5 Change of VFA and alkalinity of primary sedimentation and excess sludge at different digestion times

热水解后的初沉污泥在第6~7天出现了VFA的大量积累,含量超过2000 mg/L,结合碱度数据计算得到的VFA/碱度=0.44,表明VFA的积累已经影响到初沉热水解污泥的产气速率,使产气速率和水解速率下降。经热水解后的剩余污泥在消化阶段并未出现VFA的大量积累,厌氧消化系统基本保持稳定。消化阶段初沉、剩余污泥的碱度均有上升趋势,原因可能为VFA的消耗。由此可见,剩余污泥更适合进行热水解预处理,初沉污泥热水解会造成VFA的大量积累,影响产气速率,因此不建议对初沉污泥进行热水解预处理。

3 结论

① 热水解后初沉污泥的厌氧消化产气率并无显著提高,即热水解预处理对初沉污泥厌氧消化的强化效果不显著。从有机物降解率来看,初沉污泥经过热水解后降解率并无明显提高,并在厌氧消化第6天出现VFA积累,影响其反应速率,所以不建议对初沉污泥进行热水解预处理。

② 经热水解后剩余污泥的TCOD、总蛋白、总糖降解率分别提高了约5%、7%、14%,同时产气率大幅度提升,表明热水解预处理能够破碎细胞,将胞内易降解的碳水化合物、蛋白质大量溶出,提高

后续厌氧消化过程的产气性能。因此,建议单独对剩余污泥进行热水解预处理后再与初沉池污泥进行混合处理。

参考文献:

- [1] LI H, LI C, LIU W, *et al.* Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123:189-94.
- [2] 谭学军,王磊. 我国重点流域典型污水厂污泥处理处置方式调研与分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(14): 1-8.
- TAN Xuejun, WANG Lei. Investigation and analysis on the treatment and disposal methods of typical sewage treatment plant sludge in China's key river basins [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(14): 1-8 (in Chinese).
- [3] 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 codigestion by trace element addition [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(6): 346-349 (in Chinese).
- [4] APPELS L, BAEYENS J, DEGRÈVE J, *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(6):755-781.
- [5] 孙晨翔,李伟,陈湛. 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. Development status and achievements of thermal hydrolysis pretreated efficient anaerobic digestion process [J]. *Biotechnology & Business*, 2019(2): 58-64 (in Chinese).
- [6] 李伟,常菁,王佳伟,等. 热水解高级厌氧消化系统的污泥消毒、减量与能量回收[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(16):19-26.
- LI Wei, CHANG Jing, WANG Jiawei, *et al.* Sludge disinfection, reduction and energy recovery of advanced anaerobic digestion system [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(16): 19-26 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 肖雄,李伟,袁彧,等. 热水解条件对剩余污泥物理特性的影响[J]. *中国沼气*, 2020, 38(4): 27-33.
- XIAO Xiong, LI Wei, YUAN Yu, *et al.* Effect of hydrohydrolysis conditions on physical properties of excess sludge[J]. *China Biogas*, 2020, 38(4): 27-33 (in Chinese).
- [12] 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.
- YANG Peng, LI Wei, YUAN Yu, *et al.* Study on the change of solid phase composition of excess sludge under different thermal hydrolysis conditions [J]. *China Biogas*, 2020, 38(4): 13-19 (in Chinese).
- [13] 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, 43(8): 73-76,86.
- DU Yuanyuan, WANG Xun, WANG Shan. Effect of thermohydrolysis temperature and time on material release from sludge [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(8): 73-76,86 (in Chinese).
- [14] 肖本益,阎鸿,魏源送. 污泥热处理及其强化污泥厌氧消化的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 673-682.
- XIAO Benyi, YAN Hong, WEI Yuansong. Research progress on heat treatment of sludge and its enhancement of anaerobic digestion [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 673-682 (in Chinese).
- [15] 庄修政,阴秀丽,黄艳琴,等. 城市污泥水热脱水处理的工业应用与研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(11): 4224-4231.
- ZHUANG Xiuzheng, YIN Xiuli, HUANG Yanqin, *et al.* Industrial application and research progress of hydrothermal dewatering of municipal sludge [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(11): 4224-4231 (in Chinese).
- [16] BOUGRIER C, DELGENÈS J P, CARRÈRE H. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 139(2):236-244.
- [17] 王治军,王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能[J]. *环境科学*, 2005,26(1): 68-71.
- WANG Zhijun, WANG Wei. Enhancement of sewage sludge anaerobic digestibility by thermal hydrolysis pretreatment[J]. *Environmental Science*, 2005,26(1): 68-71 (in Chinese).
- [18] 董滨,高君,陈思思,等. 我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化[J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3384-3391.
- DONG Bin, GAO Jun, CHEN Sisi, *et al.* Main influencing factors and enhancement of anaerobic digestion of excess sludge in China [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3384-3391 (in Chinese).
- [19] CALLAGHAN F J, WASE D A J, THAYANITHY K, *et al.* Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 22(1):71-77.

作者简介:张涵(1998-),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为高级厌氧消化技术。

E-mail:569030941@qq.com

收稿日期:2022-10-25

修回日期:2023-03-06

(编辑:李德强)