

市政污泥与餐厨废弃物协同厌氧消化工程实例

陈恒宝¹, 许立群¹, 张有仓¹, 曹波¹, 刘文静², 付玉兰¹

(1. 镇江市水业总公司, 江苏 镇江 212399; 2. 上海同济普兰德生物质能股份有限公司, 上海 200092)

摘要: 针对我国污水处理厂剩余污泥单独厌氧消化营养不足、产气率低和餐厨废弃物单独厌氧消化过程酸累积、氯化钠含量过高导致系统不稳定的难题, 采用了“餐厨预处理+污泥热水解+高含固/协同厌氧消化+沼渣深度脱水干化土地利用+沼气净化提纯制天然气”的组合处理工艺。运行结果表明, 该系统运行效果良好, VS 平均降解率可达 53.5%, 沼气产率约 0.45 m³/kgVS_{投加}, 即 0.84 m³/kgVS_{去除}。

关键词: 市政污泥; 餐厨废弃物; 协同厌氧消化; 沼气

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)06-0079-06

A Case Project for Sewage Sludge and Food Waste Co-digestion

CHEN Heng-bao¹, XU Li-qun¹, ZHANG You-cang¹, CAO Bo¹, LIU Wen-jing²,
FU Yu-lan¹

(1. Zhenjiang Water Co. Ltd., Zhenjiang 212399, China; 2. Shanghai Tongji Plant Biomass Energy Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the insufficient nutrition and low gas production rate of sewage sludge anaerobic digestion in our country, together with the instable system of food waste anaerobic digestion caused by acid accumulation and over-high sodium chloride content, a treatment process combined with food waste pretreatment, sludge thermal hydrolysis, high solids anaerobic co-digestion, biogas residue dehydration and desiccation for land use, biogas purification and enrichment in methane is put forward. Operation results showed that the system operated well. The average VS degradation rate was 53.5% and the biogas production was about 0.45 m³/kgVS_{added}, i. e. 0.84 m³/kgVS_{removed}.

Key words: sewage sludge; food waste; co-digestion; biogas

随着我国城镇化水平的不断推进,城市污水处理能力不断提高,市政污泥量大幅增加。2016年我国城镇污泥年产生量达到3 950 × 10⁴ t(以含水率为80%计),同比增长14%。污泥大量堆积,不仅占用大量土地,造成环境污染,对于城市污水处理厂也是严重负担,因此如何实现污泥的稳定化、减量化、无害化和资源化,已成为我国迫切需要解决的问题。此外,生活垃圾也是我国城市化进程中面临的一个巨大问题。根据国家统计年鉴数据,2016年我国生

活垃圾清运量达到20 362 × 10⁴ t,无害化处理量为19 674 × 10⁴ t,其中卫生填埋无害化处理量为11 866.4 × 10⁴ t,焚烧无害化处理量为7 378.42 × 10⁴ t。餐厨废弃物占生活垃圾的50%以上。目前针对城市污水处理厂污泥和生活垃圾的主要处理方式是土地填埋,不仅占用有限的土地资源,而且易造成二次污染。城市污泥和餐厨废弃物中含有丰富的有机质,适合进行资源化处理。其中餐厨垃圾占生活垃圾比重大、含水率高,若将其从生活垃圾中分流

出来进行集中式资源化处理,既可实现资源化利用,又有利于生活垃圾的减量和后续处理、处置。

厌氧消化因其能够将有机物稳定化和无害化的同时回收能源,故在目前较成熟的固废减量技术中脱颖而出,而在世界各地得到普遍应用^[1,2],在工程上被广泛应用于餐厨垃圾、城市污泥和农业废弃物等的处理与处置^[3,4]。但是餐厨垃圾是一种典型的已酸化物料,在厌氧消化过程总往往出现酸积累、氯化钠含量过高而导致系统不稳定,甚至抑制厌氧消化过程,严重影响产气速率和累积产气量^[5]。此外,我国剩余污泥普遍具有含砂量高、有机质含量低($VS/TS = 30\% \sim 50\%$)的特点,单独厌氧消化普遍存在营养不足、产气率低的难题^[6-8],且污泥厌氧消化过程所产生的高氨氮也对其厌氧消化过程具有一定的抑制作用^[9,10]。近年来,不同有机废弃物的协同厌氧消化因其具有可缓冲抑制性物质、提高厌氧消化设施的利用率等优点,受到越来越多的重视,将餐厨废弃物与污泥进行联合厌氧消化,不仅可以增大消化底物中有机物含量,提高厌氧消化沼气产量,还能有效解决餐厨废弃物带来的环境污染问题^[11]。

为给我国市政污泥和餐厨废弃物共消化处理提供借鉴,介绍一种“餐厨预处理+污泥热水解+高含固/协同厌氧消化+沼渣深度脱水干化土地利用+沼气净化提纯制天然气”组合处理工艺,可在实现市政污泥和餐厨废弃物减量化、无害化的基础上,实现其资源化。

1 工程概况

某餐厨废弃物及市政污泥协同处理项目一期建设规模为 260 t/d,其中餐厨废弃物 140 t/d(餐厨垃圾 120 t/d,其含水率以 85% 计,废弃油脂 20 t/d),生活污水 120 t/d(以含水率为 80% 计)。总占地面积为 3 hm²。餐厨废弃物收集范围为主城四区及三个下辖市,生活污水服务范围为城区的 3 座污水处理厂。餐厨废弃物及污水处理厂污泥特性见表 1。

表 1 餐厨废弃物及脱水污泥特性

Tab. 1 Characteristics of food waste and dewatered sludge

项 目	TS/ %	VS/ %	pH 值	总碱度/ (mg · L ⁻¹)	SCOD/ (mg · L ⁻¹)
餐厨废弃物	15.6	92.3	—	—	—
市政污泥	18.2	53.4	7.1	1 971	1 870

2 工艺流程

工艺流程如图 1 所示。

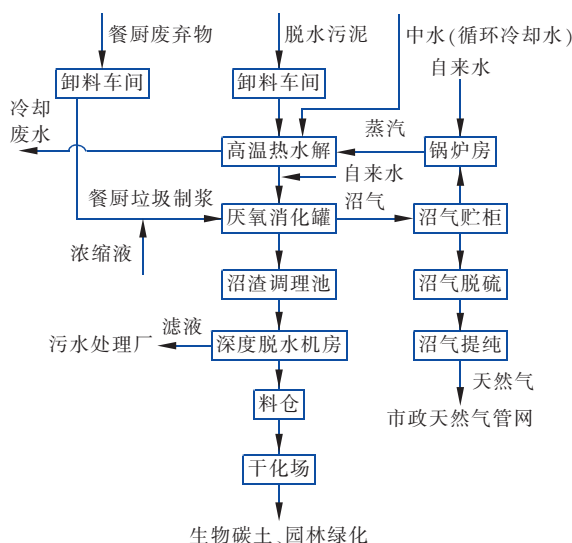


图 1 市政污泥和餐厨废弃物共消化工艺流程

Fig. 1 Flow chart of sewage sludge and food waste co-digestion treatment process

城区污水处理厂 80% 含水率的脱水污泥由车辆运输至该处理中心,餐厨废弃物由一体化分选-打浆预处理车运输至该处理中心,餐厨废弃物及污泥由磅秤称重后,卸入卸料站。污泥经螺杆泵提升至高温热水解系统。高温热水解排出的污泥经换热冷却后与预处理后的餐厨废弃物、消化罐的循环污泥混合,提升进入厌氧消化罐(其中包含一级酸化功能)。有机物在厌氧消化罐内分解,产生沼气。消化罐使用机械搅拌混合方式。厌氧消化设计温度为 38 ℃,停留时间 > 25 d。经消化后的沼渣流入沼渣调理池,暂时储存调理。沼渣通过提升泵进入沼渣脱水机房。采用脱水机将沼渣含水率降至 60%。脱水沼渣输送至太阳能干化场干化至含水率为 40%。沼渣脱水过程中产生的沼液,首先排入京口污水处理厂(可消纳 160 t/d)。消化池产生的沼气进入膜式气柜贮存,部分用于蒸汽锅炉,产生蒸汽用于热水解反应增温,部分经脱硫净化、提纯后制取天然气,进入市政天然气管网。

3 主要构筑物及设计参数

3.1 餐厨收运预处理系统

餐厨废弃物采用源头打浆、分离一体化收运车进行预处理,收运车辆密闭性好,可自动装卸且具有保温功能。收集装置采用与餐厨废弃物收集车配套的标准方桶。车上设有挂桶机构,将餐厨废弃物标准桶提升至车厢顶部,再通过翻料机构将餐厨倒入

车厢内,厢体内设压缩推卸装置、自动破碎分选装置、制浆装置和固渣贮存箱。车下部有大容积污水箱,可贮存压缩沥出的油水,实现固液的初步分离,后密封盖采用液压装置开启和关闭,特殊的结构和密封材料可有效地防止污水的跑漏现象。此外,餐厨浆液输送口与餐厨精制浆处理设备对接,实现密封排放。

3.2 卸料车间

卸料车间尺寸: $B \times L \times H = 25 \text{ m} \times 17.4 \text{ m} \times 11.5 \text{ m}$,其中地下部分尺寸为 $19.2 \text{ m} \times 17.4 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 。卸料间分独立两格:污泥卸料池和餐厨废弃物卸料池。污泥卸料池设2座污泥料斗,共 120 m^3 ,外形尺寸: $8.4 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} \times 9.5 \text{ m}$ 。卸料池下设置螺旋输送机。卸料车间内设有2台自动分选机,对餐厨浆液中的塑料、织物及硬质不易破碎的无机物进行进一步的分离,平均处理能力为 $6 \sim 10 \text{ t/h}$ 。

为减少卸料产生的气味外逸,卸料池设置液压启闭盖,卸料厅设电动堆积门,卸料厅和卸料池通过臭气收集系统保持负压。此外,料斗区域和预处理车间其他区域通过隔离墙分隔,对此区域重点设置臭气收集系统。

3.3 污泥热水解站

由于微生物细胞壁和细胞膜的天然屏障作用,其他活的微生物所分泌的水解酶对这部分有机物进行水解的速率低,因此水解是污泥的厌氧生化降解的控制性步骤^[12]。本工程采用热水解作为改善污泥厌氧消化性能的预处理技术。热水解设备尺寸($L \times B$)= $36.8 \text{ m} \times 13.4 \text{ m}$,处理量 $\geq 24 \text{ tDS/d}$ (120 t/d ,含水率为80%),经过热水解系统后的物料动力粘度应不大于 $800 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,满足污泥预浆化及高温热水解反应的要求,可实现 $150 \sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温、 1 MPa 高压热水解,兼顾 $70 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 中温热水解的反应需求。配备浆化热水解一体化装置2套及4台出料泵($Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 600 \text{ kPa}$,2用2备)。

3.4 厌氧消化罐

厌氧消化单元是沼气工程的核心单元。厌氧消化工艺包括进料单元、厌氧消化单元、保温增温单元等。污泥、餐厨废弃物经预处理后,由螺杆泵向厌氧消化单元分批进料。

共建成4座消化罐,设计尺寸为 $\varnothing 16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$,有效水位为 14 m ,单座厌氧罐总容积为 $3\,200 \text{ m}^3$,有效容积为 $2\,800 \text{ m}^3$,工作温度为 $35 \sim 38 \text{ }^\circ\text{C}$,处理

量为 410 t/d ,物料停留时间为 25 d 。为使进料均匀分布于罐内并充分与厌氧微生物接触,保证罐内温度均匀,每座厌氧反应器内设置推进机械搅拌器和消化液循环泵。安装有罐底推进器,罐顶部泵进料,罐体上部溢流出料。

3.5 综合脱水车间

脱水系统主要用于消化稳定后的沼渣进行深度脱水处理,包括沼渣调理池、沼渣进料系统、旋转挤压式脱水机、直接压滤式脱水机等。

建成综合脱水车间一座,尺寸($L \times B \times H$)为 $54.5 \text{ m} \times 18.9 \text{ m} \times 12 \text{ m}$,结构形式为框架结构,分为两层。一层放置压滤机配套辅助设备,二层布置旋转挤压式脱水机和直接压滤式脱水机操作台。出泥由下部螺旋输送机输送至沼渣料仓。

3.6 沼渣干化场

沼渣干化场进一步通过太阳能干化达到含水率40%的要求。干化场由暖房(干化棚)、翻抛机、通风设备、地热、测试仪器和电控系统等部分组成。沼渣在此干化,降低沼渣含水率,以减少沼渣体积。干化棚尺寸($L \times B \times H$)= $140 \text{ m} \times 13 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$,有效摊晒面积为 $1\,540 \text{ m}^2$,摊晒高度为 5 cm 。

3.7 沼气柜及沼气净化提纯

天然气技术指标见表2。

表2 天然气技术指标

Tab. 2 Natural gas technical indicators

项目	一类	二类	三类
高位发热量 ^a /(MJ·m ⁻³)	≥36.0	≥31.4	≥31.4
总硫(以硫计) ^a /(mg·m ⁻³)	≤60	≤200	≤350
硫化氢 ^a /(mg·m ⁻³)	6	20	350
二氧化碳 y/%	2.0	3.0	—
水露点 ^{b,c} /℃	在交接点压力下,水露点应比输送条件下最低环境温度低 5℃		
注: ^a 表示本标准中气体体积的标准参比条件是压力为 101.35 kPa,温度为 20℃。 ^b 表示在输送条件下,当管道管顶埋地温度为 0℃时,水露点应不高于 -5℃。 ^c 表示进入输气管道的天然气,水露点的压力应该为最高输送压力。			

本工程设双膜沼气柜一座,双层球型结构,直径为 16 m ,有效容积为 $2\,000 \text{ m}^3/\text{座}$ 。甲烷渗透度 $< 3 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$ 。沼气净化提纯利用系统包括沼气预处理系统和提纯及余热利用系统。发酵产生的沼气经预处理、提纯、压缩后,生产的压缩天然气纳入管网,其品质应达到民用天然气中二类气

的指标要求。工艺路线:干法脱硫→预处理(火炬)→沼气压缩→胺法脱碳→变温吸附(TSA)脱水→加臭→缓冲罐→天然气管网。

4 工程启动及运行

该工程于2016年6月开始工程设备调试,2016年9月厌氧消化段培菌结束,2016年12月底完成太阳能干化、沼气处理等系统调试运行,各工艺段调试成功后试运行。2017年3月—5月污泥及餐厨废弃物处理量情况见图2。现污泥平均来泥量为86 t/d(TS=18.2%),餐厨平均收运量为56 t/d(TS=15.6%)。其中餐厨垃圾的收运量不足设计处理量的50%,且日间波动较大。这反映了我国餐厨垃圾集中收运的困境,与文献中报道在集中式处理收运过程中,一些餐饮单位为了不法利益,私下把废油脂、泔水卖给非法收运者,而让正规企业遭遇“无米下锅”的尴尬境地,很多餐厨垃圾处理厂均存在“吃不饱”的现象一致^[13,14]。

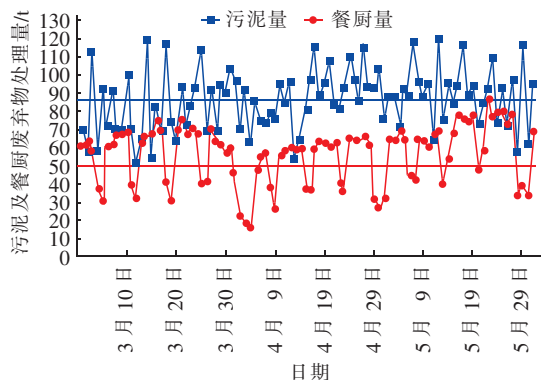


图2 污泥及餐厨废弃物处理量

Fig. 2 Disposal capacity of sludge and food waste

餐厨物料经打浆、分离一体化收运车及自动分选机预处理后均质化良好,无塑料、织物及硬质不易破碎的无机物,可达到较好的预处理效果(见图3)。

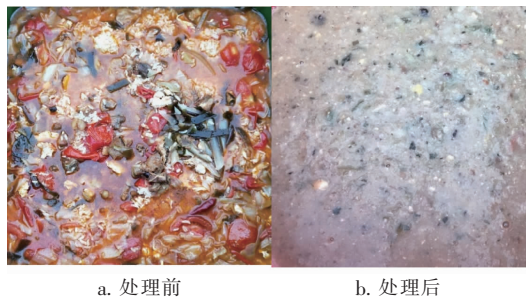


图3 餐厨废弃物预处理效果

Fig. 3 Pretreatment effect of food waste

资料表明,传统的污泥厌氧消化处理效率低,

挥发性固体VS的去除率为30%~40%^[15,16]。丁月玲等^[17]的研究中,VS含量为65.9%的脱水污泥单独厌氧消化时,甲烷产量为174.4 mLCH₄/gVS_{投加}(0.17 m³CH₄/kgVS_{投加})。此外,我国城镇污泥处理厂污泥单独厌氧消化产生的沼气含甲烷为45%~64.8%^[18]。本工程2017年3月—5月厌氧消化月平均总产气量呈递增趋势(见图4),依次为5 336.5、5 985.5和6 425.7 m³/d,沼气中平均甲烷含量为63.64%。

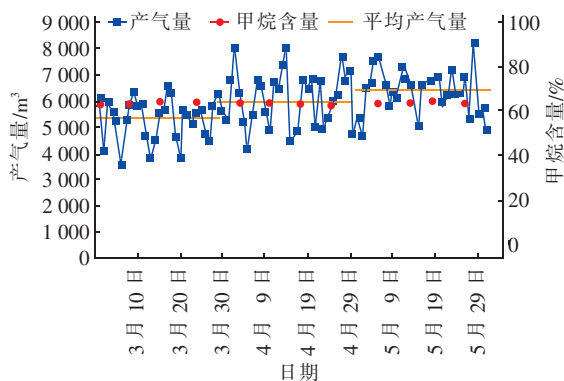


图4 厌氧消化总产气量和沼气甲烷含量

Fig. 4 Total gas production of anaerobic digestion and methane content of biogas

2017年3月—5月厌氧消化VS平均降解率为53.5%,单位VS_{投加}产气率为0.45 m³/kgVS_{投加}(单位VS_{投加}甲烷产率为0.28 mLCH₄/gVS_{投加}),单位VS_{去除}产气率为0.84 m³/kgVS_{去除}(单位VS_{去除}甲烷产率为0.53 mLCH₄/gVS_{去除}),如图5所示。可见餐厨废弃物和污泥协同厌氧消化可稳定运行,污泥浆化-热水解处理技术可显著提高混合物料厌氧消化效率,沼气产率提高,沼气中甲烷含量也处于较高水平。

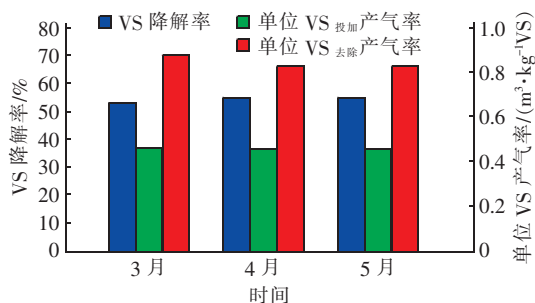


图5 厌氧消化VS降解率和单位VS产气率

Fig. 5 VS degradation rate and unit VS gas yield of anaerobic digestion

图6为稳定运行期间对H₂S的去除情况。可

以看出,进口 H_2S 浓度平均为 22.06 mg/m^3 ,出口 H_2S 平均浓度为 6.40 mg/m^3 ,处理后沼气满足天然气二类标准中 H_2S 浓度 $<20 \text{ mg/m}^3$ 的要求。

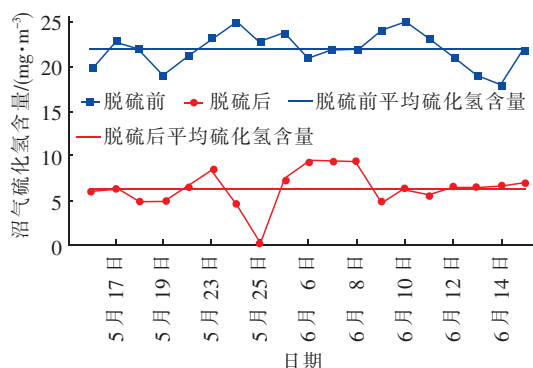


图6 脱硫前后硫化氢含量

Fig. 6 The hydrogen sulfide content before and after desulfurization

5 结论

① 工程实践表明,采用“餐厨预处理+污泥热水解+高含固/协同厌氧消化+沼渣深度脱水干化土地利用+沼气净化提纯制天然气”工艺协同处理市政污泥和餐厨废弃物,系统运行稳定,处理效果较好,耐冲击负荷能力强。

② 经该工艺处理后,餐厨废弃物及脱水污泥物料的 VS 平均降解率可达 53.5%,单位 $\text{VS}_{\text{投加}}$ 产气率可达 $0.45 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{投加}}$,单位 $\text{VS}_{\text{去除}}$ 产气率可达 $0.84 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{去除}}$,沼气产率高,沼气中甲烷含量也处于较高水平。

③ 产生的沼气经“干法脱硫→预处理(火炬)→沼气压缩→胺法脱碳→变温吸附(TSA)脱水”的工艺处理后,满足天然气二类标准,可纳入天然气管网($3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$),实现资源回收。

参考文献:

[1] 陈广银,郑正,常志州,等. NaOH 处理对互花米草高温干式厌氧发酵的影响[J]. 环境科学,2011,32(7): 2158-2163.
Chen Guangyin, Zheng Zheng, Chang Zhizhou, *et al.* Effect of NaOH-treatment on dry-thermophilic anaerobic digestion of spartina alterniflora[J]. Environment Science, 2011, 32(7): 2158-2163 (in Chinese).
[2] Lu S G, Imai T, Ukita M, *et al.* Start-up performances of dry anaerobic mesophilic and thermophilic digestions of organic solid wastes[J]. J Environ Sci, 2007, 19(4):

416-420.

[3] 邱才娣,何若,陈松妹,等. 一种新型的农村生活垃圾资源化工艺技术研究[J]. 环境科学,2009,30(3): 930-936.
Qiu Caidi, He Ru, Chen Songmei, *et al.* Novel resources utilization technique for rural domestic refuse[J]. Environment Science, 2009, 30(3): 930-936 (in Chinese).
[4] Cho J K, Park S C, Chang H N. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes[J]. Fuel Energy Abstracts, 1995, 36(3): 245-253.
[5] Liu Y, Boone D R. Effects of salinity on methanogenic decomposition[J]. Bioresour Technol, 1991, 35(3): 271-273.
[6] Murto M, Björnsson L, Mattiasson B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure[J]. J Environ Manage, 2004, 70(2): 101-107.
[7] Ghosh S. Pilot-scale demonstration of two-phase anaerobic digestion of activated sludge[J]. Water Sci Technol, 1991, 23(7/9): 1179-1188.
[8] 付胜涛,严晓菊,付英. 剩余活性污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化[J]. 环境科学,2006,27(7): 1459-1463.
Fu Shengtao, Yan Xiaoj, Fu Ying. Co-digestion of waste activated sludge and kitchen garbage[J]. Environment Science, 2006, 27(7): 1459-1463 (in Chinese).
[9] Rajagopal R, Massé D I, Singh G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia[J]. Bioresour Technol, 2013, 143: 632-641.
[10] Yenigün O, Demirel B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review[J]. Process Biochem, 2013, 48(5): 901-911.
[11] Duan N, Dong B, Wu B, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: Feasibility study [J]. Bioresour Technol, 2012, 104 (Supplement C): 150-156.
[12] Pavlostathis S G, Gossett J M. A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge[J]. Biotechnol Bioeng, 1986, 28(10): 1519-1530.
[13] 陆炫彤,屈辰玮,邵凡,等. 我国餐厨垃圾收运及处理现状[J]. 中国科技成果,2017,18(7): 7-9.
Lu Xuanton, Qu Chenwei, Shao Fan, *et al.* Status of food waste collection, transportation and treatment in China [J]. China Science and Technology Achievements, 2017, 18(7): 7-9 (in Chinese).

- [14] 毕珠洁, 邵俊, 许碧君. 中国餐厨垃圾管理现状研究[J]. 环境工程, 2016, (S1): 765 - 768.
Bi Zhujie, Tai Jun, Xu Bijun. The current food waste management situation in China[J]. Environmental Engineering, 2016, (S1): 765 - 768 (in Chinese).
- [15] 杨光, 张光明, 王洪臣. 污泥厌氧消化的沼气转化性能讨论[J]. 中国给水排水, 2015, 31(18): 22 - 27.
Yang Guang, Zhang Guangming, Wang Hongchen. Methane conversion performance in sludge anaerobic digestion [J]. China Water & Wastewater, 2015, 32(18): 22 - 27 (in Chinese).
- [16] 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]. Environment Science, 2005, 26(1): 68 - 71 (in Chinese).
- [17] 丁月玲, 张焕焕, 董滨, 等. 有机生活垃圾与脱水污泥协同厌氧消化工艺的性能[J]. 净水技术, 2017, (2): 40 - 44, 50.
Ding Yueling, Zhang Huanhuan, Dong Bin, et al. Performance of anaerobic co-digestion processes of domestic organic wastes and dewatered sludge[J]. Water Purification Technology, 2017, 36(2): 40 - 44, 50 (in Chinese).
- [18] 吴静, 姜洁, 周红明. 我国城市污水处理厂污泥产沼气的前景分析[J]. 给水排水, 2009, 35(S1): 101 - 104.
Wu Jing, Jiang Jie, Zhou Hongming. Analysis on biogas production of sludge digestion from municipal wastewater treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(S1): 101 - 104 (in Chinese).



作者简介: 陈恒宝(1967 -), 男, 江苏镇江人, 本科, 高级工程师, 主要从事污水处理和城市有机质协同处理技术的研究与运营工作, 现为镇江市水业总公司总经理。

E-mail: chb246@sina.com

收稿日期: 2017 - 12 - 15

(上接第78页)

- [5] 周建民, 付永胜, 毛锋, 等. 集成平板膜 MBR 处理列车卧具洗涤废水[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(6): 64 - 67.
Zhou Jianmin, Fu Yongsheng, Mao Feng, et al. Treatment of train bedding washing wastewater by integrated flat sheet membrane MBR [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(6): 64 - 67 (in Chinese).
- [6] 王明锋, 邵建军. 膜生物反应器处理洗涤废水中试[J]. 水处理技术, 2007, 33(7): 61 - 63.
Wang Mingfeng, Shao Jianjun. Pilot-scale treatment of washing-wastewater by membrane bioreactor [J]. Technology of Water Treatment, 2007, 33(7): 61 - 63 (in Chinese).
- [7] 章正勇, 姜怡勤. 洗涤化工企业废水处理工程实例[J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 149 - 151.
Zhang Zhengyong, Jiang Yiqin. Engineering example of detergent production wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 149 - 151 (in Chinese).

nese).



作者简介: 潘国强(1970 -), 男, 江苏宜兴人, 学士, 工程师, 主要从事污水处理及回用技术研究。

E-mail: 452170635@qq.com

收稿日期: 2017 - 07 - 26