

# 西安第五污水处理厂污泥消化及沼气利用效果分析

王社平<sup>1,2</sup>, 赵恩泽<sup>1</sup>, 韩芸<sup>1</sup>, 张华<sup>3</sup>, 武少华<sup>3</sup>, 马明华<sup>3</sup>, 邓涛<sup>3</sup>,  
石鑫<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市政设计研究院  
有限公司, 陕西 西安 710068; 3. 西安市第五污水处理厂, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 通过对西安市第五污水处理厂污泥厌氧消化系统实际运行参数的测试与分析,探讨了该厂污泥消化池实际运行中影响产气效果的主要因素和沼气实际利用情况。该厂3号消化池由于搅拌设备故障导致碱度和VFA含量有增大趋势;实测产气率为 $8.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 泥,产气量为 $1.186 \text{ L/gVS}$ ,污泥的产气能力较好;沼气锅炉、沼气拖动鼓风机和废气燃烧塔消耗沼气体积分别占总产气量的41%、33%和26%,沼气利用率较低。因此,建议在运行中强化沼气拖动鼓风机设备的维护,提高产气量和沼气利用率,以降低污水处理厂运行电耗。

**关键词:** 污水处理厂; 污泥厌氧消化; 沼气利用; 沼气能量平衡

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0015-06

## Analysis of Sludge Anaerobic Digestion and Biogas Utilization in Xi'an No. 5 WWTP

WANG She-ping<sup>1,2</sup>, ZHAO En-ze<sup>1</sup>, HAN Yun<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>3</sup>, WU Shao-hua<sup>3</sup>,  
MA Ming-hua<sup>3</sup>, DENG Tao<sup>3</sup>, SHI Xin<sup>3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China; 3. Xi'an No. 5 Wastewater Treatment Plant, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** On the basis of the actual operation parameters of the sludge anaerobic digestion system in Xi'an No. 5 WWTP, the major influence factors to biogas production in actual operation of sludge digestion tank and actual utilization of methane were investigated. The results showed that alkalinity and VFA concentration in No. 3 digestion tank trended to increase due to failure of mixing equipment. The biogas production rate of digestion tank was  $8.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  sludge and biogas production of decomposing unit VS was  $1.186 \text{ L/g}$ , which was showing a satisfactory biogas production capacity of sewage sludge. The biogas consumption of biogas boiler, methane air blower and biogas burning tower accounted for 41%, 33% and 26% of the total production respectively, which was showing a low biogas utilization ratio. Thus, it is recommended to intensify maintenance of methane air blower and improve gas production rate and utilization ratio of biogas to reduce energy consumption of wastewater treatment plant in operation.

**Key words:** WWTP; sludge anaerobic digestion; biogas utilization; energy balance of biogas

## 1 工艺流程

西安市第五污水处理厂一期工程处理规模为  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 采用改良型  $A^2/O$  工艺, 出水水质执行一级 A 标准。污泥处理采用中温厌氧消化 + 机械脱水 + 卫生填埋的工艺, 污泥处理流程如图 1 所示。剩余污泥经浓缩后与初沉污泥混合, 然后投加到 3 座卵形消化池中, 设计进泥量为  $1\,943.5 \text{ m}^3/\text{d}$ 、含水率为 96.61%, 单座消化池的容积为  $12\,254 \text{ m}^3$ , 消化时间为 20 d, 消化温度为  $35^\circ\text{C}$ , 沼气产量为  $17\,800 \text{ m}^3/\text{d}$ 。产生的沼气经湿式和干式脱硫系统处理后, 用于沼气热水锅炉和鼓风机的运行。该工程于 2012 年 5 月建成, 2013 年 8 月正式启动调试, 经历两个多月的调试, 于 10 月 15 日 3 座消化池先后成功启动, 产生的沼气也逐步达到燃烧条件, 经干式脱硫后满足沼气热水锅炉运行条件<sup>[1]</sup>。

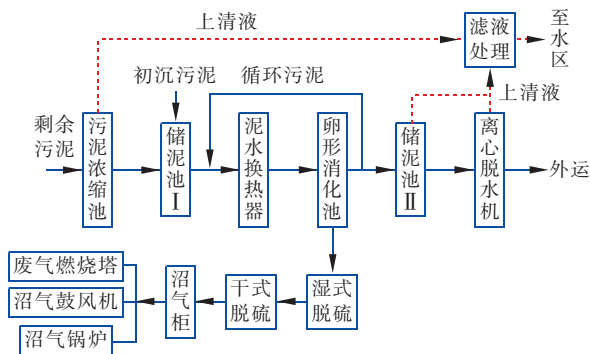


图1 污泥处理系统工艺流程

Fig. 1 Flow chart of sludge treatment process

## 2 检测项目及方法

含水率: 重量法, 总碱度: 指示剂滴定法, 有机物含量: 重量法, VFA: 蒸馏滴定法, pH 值: 电极法, 沼气成分: 四合一气体分析仪, COD: 重铬酸钾法。

## 3 消化池运行情况

### 3.1 进泥量与产气量

2015 年 6 月—2016 年 5 月, 3 号消化池实际进泥量和产气量统计分析见图 2。不同月份的进泥量变化较大, 且实际进泥量远远小于设计进泥量, 仅达到设计值的 10.41% ~ 78.49%。这主要是由于在运行过程中出现了进泥管堵塞和进泥泵故障等问题, 如 2015 年 9 月和 2016 年 5 月消化池有十几天未能进泥, 直接导致这两个月的平均进泥量急剧减小。消化池实际产气量仅为设计沼气产量的 21.22% ~ 68.88%, 沼气产量与进泥量的变化基本

一致, 说明进泥量是影响产气量的直接因素。另外, 消化池内微生物活性、进泥性质等也对产气量有影响, 可能会出现进泥量减少而产气量增大的现象, 如 2016 年 2 月的进泥量为  $11\,508.5 \text{ m}^3$ 、产气量为  $84\,411 \text{ m}^3$ , 而 4 月的进泥量为  $9\,696.1 \text{ m}^3$ 、产气量却增至  $98\,193 \text{ m}^3$ , 产气率达  $10.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$  泥。

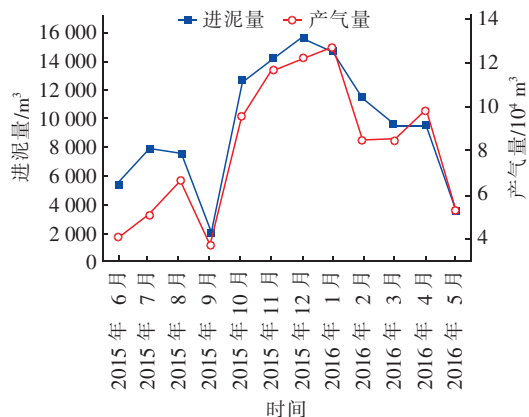
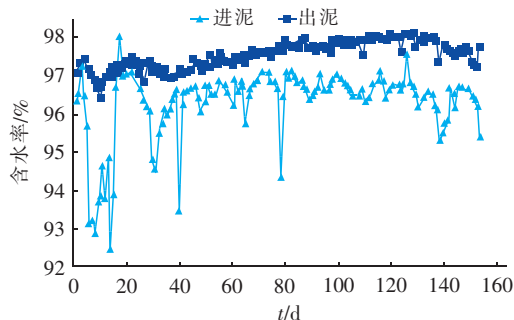


图2 消化池进泥量与产气量

Fig. 2 Amount of sludge and biogas production in digestion tank

### 3.2 含水率和有机物含量

3 号消化池进泥含水率在 90.67% ~ 98.04% 之间, 平均值为 96.30%, 有 75.3% 的进泥含水率在 96% ~ 97% 之间, 与设计进泥含水率基本一致 (见图 3)。进泥中有机物含量在 39.19% ~ 70.93% 之间, 平均值为 58.89%。对实测数据的统计分析表明, 实际分析监测期前 60 d 消化池进泥中有机物含量在 39.19% ~ 60.87% 之间, 标准偏差为 4.74%, 而后 90 d 进泥有机物含量在 48.08% ~ 69.15% 之间, 标准偏差为 4.14%, 即前 60 d 的进泥有机物含量较低且变化较大。这可能是由于监测期间降雨较多, 污水厂进水中无机物含量增加。但污泥消化池出泥含水率较稳定, 在 96.36% ~ 98.12% 之间; 出泥中有机物含量变化范围为 32.16% ~ 51.75%。



a. 进出泥含水率的变化

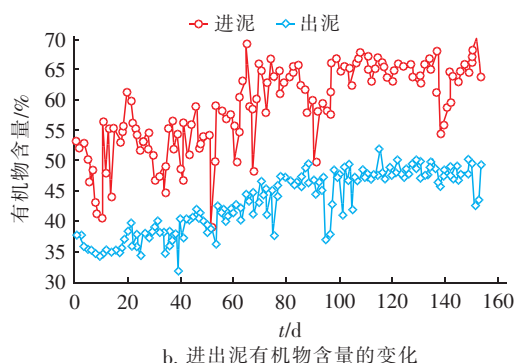


图3 3号消化池进出泥的含水率及有机物含量

Fig. 3 Moisture and organic content of influent and effluent sludge in No. 3 digestion tank

消化池进泥的泥质会影响污泥厌氧消化的效果,污泥消化效率可用下式计算:

$$\eta = \{1 - (100 - \alpha) \times \beta / [(100 - \beta) \times \alpha]\} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\eta$ ——污泥的消化效率

$\alpha$ ——消化前污泥中有机物的含量, %

$\beta$ ——消化后污泥中有机物的含量, %

结合该消化系统的实际运行监测数据,利用上式计算其消化效率,2015年9月—2016年5月各月的消化效率在44.48%~55.32%之间变化,平均为49.02%,与《给水排水设计手册》(第5册)中的要求(当新鲜污泥含水率为96%~97%时,污泥中有机物经厌氧消化后分解率达50%以上)相比略低。

### 3.3 碱度与VFA

消化池内的碱度和VFA是日常运行时监控的重要指标<sup>[2]</sup>。厌氧微生物的代谢能力受环境pH值的影响,而消化液的实际pH值主要由VFA与碱度的相对含量决定,并且其稳定性取决于溶液的缓冲能力,而碱度是判断缓冲能力的重要指标。监测期间3号消化池碱度和VFA值的变化情况见图4。

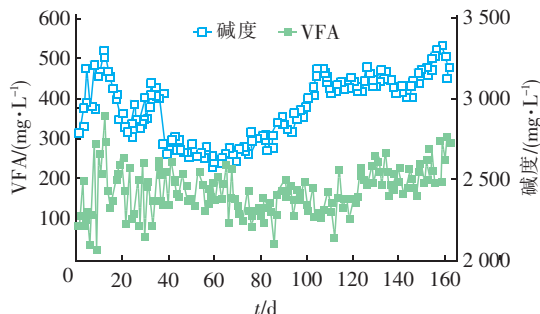


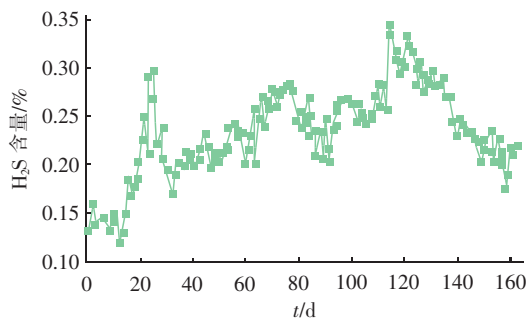
图4 3号厌氧消化池中碱度和VFA的变化

Fig. 4 Variation of alkalinity and VFA in No. 3 digestion tank

从图4可知,3号消化池中的碱度保持在2580~3316 mg/L之间,VFA为29~359 mg/L,酸碱比为0.01~0.11。碱度与VFA的变化大致相同,碱度在10~60 d呈整体减小趋势,60 d之后呈整体增大趋势;VFA在10~70 d呈整体减小趋势,在70 d之后呈整体增大趋势。这可能是由于在第60天左右(2015年10月底)搅拌机发生故障而停止运行,在这之后仅依靠循环污泥泵进行搅拌,由于搅拌效果不佳,可降解有机物很难与微生物充分接触,且容易使消化池内浮渣与沉砂量增多,减小了消化池的有效容积。而消化过程中水解和产氢产乙酸阶段反应速率较快,其产物未能够及时被产甲烷菌利用,故碱度和VFA都有逐渐增大趋势。

### 3.4 沼气成分

该厂日常分析监测的气体成分主要是CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S。其中,CH<sub>4</sub>含量较高,达到61.64%~75.08%,CO<sub>2</sub>含量为20.29%~33.85%,O<sub>2</sub>含量为0.02%~0.64%,并且上述气体含量均比较稳定。H<sub>2</sub>S含量为0.112 1%~0.343 5%,变化范围较大(见图5),这可能与进泥的性质有关。H<sub>2</sub>S主要产生于蛋白质水解、硫酸盐的还原和硫化物的直接转化。蛋白质主要来自于生活污水,而硫酸盐和硫化物主要来自于工业废水,故工业废水的排入会极大影响H<sub>2</sub>S的含量,特别是在冬季污水厂进水量较小的情况下,所以H<sub>2</sub>S的含量会呈较大波动。为了沼气的后续利用,在沼气柜前设有湿式+干式除硫系统,经除硫系统后H<sub>2</sub>S含量明显降低,符合后续设备的利用要求。

图5 H<sub>2</sub>S含量的变化Fig. 5 Variation of H<sub>2</sub>S

### 3.5 污泥的消化性能

忽略沼气中微量气体(N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S等)的影响,假设污泥在厌氧消化过程中消耗的碳全部转化为CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>,根据消化前后碳的物料守恒,参照

莫氏曲线确定中温消化条件下污泥中有机物含量与其分解率之间的线性关系,结合污泥性质,可估算污泥的理论产气量<sup>[3]</sup>。

CH<sub>4</sub> 气体密度为 0.716 8 g/L, CO<sub>2</sub> 气体密度为 1.976 9 g/L, 则 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 中碳的含量分别为 0.536 7 和 0.539 5 g/L, 沼气中 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的平均含量分别为 67.94% 和 30.45%, 则沼气中碳含量约为 0.528 9 g/L, 可以算出污泥中被分解的 TOC 的产气量为 1.891 L/g。进泥中平均有机物含量为 58.89%, 参照莫氏曲线其有机物分解率为 46.8%, 污泥 VS 含量平均为 21 058 mg/L, VS 中 TOC 含量一般按 55% 计算, 则污泥消化的理论产气量为 10.25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 泥。根据进泥量和产气量计算出实际的平均产气量为 8.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 泥, 达到了理论产气量的 82.93%。

平均每天进泥 313.87 m<sup>3</sup>, 产气 2 670.79 m<sup>3</sup>, 进泥 VS 含量为 21 058 mg/L, 出泥 VS 含量为 13 884 mg/L, 可算得单位 VS 产气量为 0.404 L/g, 分解单位 VS 产气量为 1.186 L/g。美国污水处理厂设计手册中这两个指标的最佳范围分别为 0.5~0.75 L/g 和 0.75~1.12 L/g<sup>[4]</sup>。分解单位 VS 产气量考虑到了厌氧消化温度、搅拌条件等因素对 VS 分解率的影响, 因而能更真实、准确地反映污泥的消化性能和产气能力。该消化系统分解单位 VS 产气量较高, 而单位 VS 产气量偏低, 说明污泥的产气能力较强, 但 VS 分解率依然有提高空间。

#### 4 污泥消化能量平衡及沼气利用

##### 4.1 污泥消化能量平衡计算

通过对 2015 年 6 月—2016 年 5 月沼气成分和产量的分析, 该消化系统产生的沼气中甲烷含量平均为 67.94%, 平均产气量为 2 974 m<sup>3</sup>/d。甲烷的燃烧热值为 35 900~40 020 kJ/m<sup>3</sup>, 故沼气的燃烧热值为 24 390~27 190 kJ/m<sup>3</sup>, 取均值为 25 790 kJ/m<sup>3</sup>。

该厂卵形消化池最大外径为 26.97 m, 单池容积为 12 254 m<sup>3</sup>, 池体高为 42.11 m (地上 34.71 m, 地下 7.4 m)。采用将卵形池切割成圆台求其表面积, 池体地上部分表面积为 2 357 m<sup>2</sup>, 地下部分表面积为 336 m<sup>2</sup>。池体的热传递系数参考《给水排水设计手册》中有关规定, 考虑到气温、新鲜污泥和土壤温度等因素, 分别以夏季、冬季和年平均运行工况来计算消化处理需要的热量, 对 3 号消化池的具体计算见表 1, 其中 5 月—8 月为夏季, 11 月—2 月为冬

季, 室外温度和土壤温度参考文献[5]。

表 1 沼气能量平衡

Tab. 1 Energy balance of biogas

项 目	夏季	冬季	年均
室外温度/℃	27.1	1.9	15.4
土壤温度/℃	16	14.5	15.3
鲜泥温度/℃	24.7	15.4	20.1
设计运行温度/℃	35	35	35
沼气锅炉效率/%	90	90	90
消化池热损失/kW	23	81	50
污泥加热需热量/kW	113	439	227
管道散热量/kW	14	52	28
理论总需热量/kW	167	636	339
沼气产量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	1 725	3 660	2 671
污泥消化产能/kW	515	1 092	797
净产能/kW	348	456	458

计算结果表明, 3 号消化池产生的热量能满足自身运行需要, 在夏季、冬季和年均运行工况下净产热量分别为 348、456 和 458 kW。与冬季相比, 夏季消化池需热量较小, 且正常情况下比冬季的净产热量大。但在监测期间, 6 月—8 月由于进泥较少, 沼气产量远小于冬季, 导致冬季净产能反而多于夏季。

##### 4.2 沼气利用

污泥消化产生的沼气用于沼气锅炉和沼气拖动鼓风机, 多余部分通过废气燃烧塔燃烧掉。沼气产量和利用情况如表 2 所示。

表 2 沼气产量与利用情况

Tab. 2 Biogas production and utilization

项目	沼气产量/m <sup>3</sup>	锅炉用气量/m <sup>3</sup>	沼气拖动鼓风机运行台时/h
6 月	142 045	43 523	139
7 月	122 926	34 991	13
8 月	88 302	16 652	122
9 月	37 778	4 265	123
10 月	95 445	29 340	196
11 月	116 656	49 704	288
12 月	121 987	73 154	152
1 月	126 686	74 591	179
2 月	84 411	59 535	70
3 月	85 459	47 389	121
4 月	98 193	33 456	199
5 月	52 216	13 221	49
共计	1 172 104	479 821	1 651
月均	97 675	39 985	138

沼气拖动鼓风机耗气量为 220~250 m<sup>3</sup>/h, 若取平均耗气量为 235 m<sup>3</sup>/h, 则沼气拖动鼓风机月平



均耗气量为  $32\,336\text{ m}^3$ , 沼气锅炉、沼气拖动鼓风机和废气燃烧塔三者的耗气量分别占总产气量的 41%、33% 和 26%。可以看出, 有 26% 的沼气未能被利用, 与沼气拖动鼓风机的耗气量仅相差 7%, 说明沼气的利用率偏低, 因此, 沼气拖动鼓风机对沼气利用方面有一定的提升空间。

沼气拖动鼓风机月平均运行 138 h, 单台鼓风机功率为 630 kW, 则沼气拖动鼓风机月平均等效节能  $86\,940\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。表 3 所示为 2015 年 6 月—2016 年 5 月消化系统主要能耗设备运行情况, 可知维持消化系统运行的月平均电耗为  $94\,573\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。而在此期间通过对沼气的利用, 消化系统的运行未能达到降低整个污水处理厂运行电耗的效果。主要原因是, 污泥消化系统和沼气利用设备存在故障, 影响了沼气产量和对沼气的利用。由于消化池搅拌机故障, 自 9 月份起 3 座消化池中仅有 3 号消化池保持运行。到 10 月底后, 3 号消化池的搅拌机也停止运行, 仅依靠污泥循环泵的运行起到一定的搅拌作用。同时, 消化池也多次因进泥泵故障而长时间停止进泥。这些设备的非正常运行对消化系统的高效运行和沼气产量都有直接的不利影响。该厂设有 2 台沼气拖动鼓风机, 但月平均运行台时仅为 138 h, 平均设备利用率仅为 9.6%, 沼气拖动鼓风机故障频发而未能及时利用沼气, 是沼气利用率低的主要原因。

表 3 厌氧消化系统的运行电耗

Tab. 3 Electricity consumption of anaerobic digestion system

项 目	功率/kW	月平均运行台时/h	月平均电耗/(kW·h)
消化池搅拌机	58	517	29 986
消化池进泥泵	5.5	663	3 646.5
破碎机	4	662	2 648
循环污泥泵	22	1 121	24 662
热水循环泵	5.5	538	2 959
热水泵	5.5	675	3 712.5
锅炉热水循环泵	7.5	1 250	9 375
污泥热水循环泵	22	676	14 872
沼气增压泵	4	678	2 712
共计			94 573

另外, 据调查, 2015 年 4 月和 5 月污泥消化系统和沼气利用设备运行比较良好, 3 座消化池正常运行, 产生的沼气也能及时被沼气拖动鼓风机和锅炉利用。这两个月份的月平均产气量为  $176\,907\text{ m}^3$ ,

沼气锅炉耗气量为  $59\,216\text{ m}^3$ , 沼气拖动鼓风机平均运行 539 h, 消化系统月平均能耗为  $233\,739\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。经计算, 通过沼气拖动鼓风机对沼气的利用, 污泥消化系统每月能节约近  $105\,831\text{ kW}\cdot\text{h}$  的电量。可见, 消化系统和沼气利用设备的运行状况会直接影响污水处理厂节能降耗的效果。

## 5 结论

① 该污水厂 3 号消化池污泥平均消化效率为 49.02%, 沼气中甲烷含量为 61.64% ~ 75.08%。但由于搅拌机故障, 污泥混合效果不佳, 碱度和 VFA 浓度呈不断增大趋势, 因此, 应强化搅拌设备维护, 确保消化池中微生物生存环境和稳定运行。

② 污泥消化的理论产气量为  $10.25\text{ m}^3/\text{m}^3$  泥, 而实际的平均产气量为  $8.5\text{ m}^3/\text{m}^3$  泥。分解单位 VS 的产气量为  $1.186\text{ L/g}$ , 略高于美国污水处理厂设计手册中相关数值, 污泥产气能力较好。

③ 消化池产生的沼气能够满足自身的运行需要, 但沼气锅炉、沼气拖动鼓风机和废气燃烧塔消耗的沼气分别占总产气量的 41%、33% 和 26%, 沼气利用率较低。

④ 污泥厌氧消化系统和沼气利用设备的正常运行能够大大降低污水处理厂运行能耗, 具有明显的节能效果。因此, 大中型污水处理厂推广污泥厌氧消化处理工艺有利于污水处理厂的节能降耗。

## 参考文献:

- [1] 马明华, 李立军, 石鑫, 等. 西安市第五污水处理厂卵形消化池的调试及运行[J]. 中国给水排水, 2015, 31(6): 100 - 104.  
Ma Minghua, Li Lijun, Shi Xin, et al. Commissioning and operation of egg-shaped digesters in Xi'an Fifth WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(6): 100 - 104(in Chinese).
- [2] 蒋玲燕, 杨彩凤, 胡启源, 等. 白龙港污水处理厂污泥厌氧消化系统的运行分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(9): 33 - 37.  
Jiang Lingyan, Yang Caifeng, Hu Qiyuan, et al. Operation analysis of sludge anaerobic digestion system at Bailonggang Wastewater Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(9): 33 - 37(in Chinese).
- [3] 戴前进, 李艺, 方先金. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 95 -

(下转第 25 页)