

超声/碱预处理对青霉素菌渣厌氧消化的影响研究

李再兴^{1,2}, 高妍^{1,2}, 钟为章^{1,2}, 李贵霞^{1,2}, 刘春^{1,2}, 郭嘉运³, 王勇军⁴, 杨永会⁴

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北省污染防治生物技术实验室, 河北石家庄 050018; 3. 河北衡水第一中学, 河北衡水 053000; 4. 华北制药集团有限责任公司环境保护研究所, 河北石家庄 050015)

摘要:为了提高菌渣厌氧消化生产沼气的效率, 最终实现菌渣的资源化和减量化, 采用超声/碱预处理方法处理青霉素菌渣, 考察了 pH 值、超声声能密度、含水率和反应时间对预处理效果的影响, 并通过生化产甲烷潜力(BMP)试验考察了菌渣的可生化性。正交试验结果表明: 超声/碱预处理可强化菌渣破壁效果, 促进胞内有机物溶出, 其最佳预处理条件: pH 值为 10, 声能密度为 2.0 W/mL, 含水率为 97%, 反应时间为 5 min, COD 溶出率最高能达到 84.69%, 是单独超声预处理的 2.08 倍。BMP 试验表明, 预处理各因素对菌渣沼气产率的影响程度为含水率 > 声能密度 > 反应时间 > pH 值。按照甲烷产率确定最佳预处理条件: pH 值为 9, 声能密度为 0.5 W/mL, 含水率为 96%, 反应时间为 30 min, 其甲烷产率最高可达 335 mL/g, 是未处理菌渣甲烷产率的 2.2 倍。

关键词:三废处理与综合利用; 青霉素菌渣; 超声/碱预处理; 厌氧消化; 生化产甲烷潜力

中图分类号: X703 文献标志码: A

Effect study of ultrasonic/alkaline pretreatment on anaerobic digestion of penicillin bacterial residue

LI Zaixing^{1,2}, GAO Yan^{1,2}, ZHONG Weizhang^{1,2}, LI Guixia^{1,2}, LIU Chun^{1,2},
GUO Jiayun³, WANG Yongjun⁴, YANG Yonghui⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Hengshui No. 1 High School, Hengshui, Hebei 053000, China; 4. Environmental Protection Institute, NCPC, Shijiazhuang, Hebei 050015, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of anaerobic digestion for biogas production and achieve the resource recovery and decrement of antibiotic bacterial residue, ultrasonic/alkaline pretreatment is used to treat penicillin bacterial residues (PBR), the influence of pH value, ultrasonic sound energy density, moisture content and reaction time on pretreatment effect are inves-

收稿日期: 2015-03-08; 修回日期: 2015-05-11; 责任编辑: 王海云

基金项目: 国家自然科学基金(51478160); 河北省重大技术创新项目(12276703Z)

作者简介: 李再兴(1973—), 男, 四川安岳人, 教授, 博士, 主要从事水污染防治及污水资源化技术方面的研究。

E-mail: li_zaixing@163.com

李再兴, 高妍, 钟为章, 等. 超声/碱预处理对青霉素菌渣厌氧消化的影响研究[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(3): 302-308.

LI Zaixing, GAO Yan, ZHONG Weizhang, et al. Effect study of ultrasonic/alkaline pretreatment on anaerobic digestion of penicillin bacterial residue[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 302-308.

tigated, and the biodegradability of PBR is evaluated by biochemical methane potential (BMP) test. The orthogonal experiment result shows that ultrasonic/alkaline pretreatment can enhance the residue cell wall broken effect, and promote intracellular organic matter dissolution. The optimum pretreatment conditions are pH of 10, ultrasonic sound energy density of 2.0 W/mL, moisture content of 97%, and pretreatment time of 5 min. In this case, the highest COD dissolution rate can reach 84.69%, which is 2.08 times higher than that by the ultrasonic pretreatment only. The BMP test results show that the impact of the pretreatment factors is as follows: moisture content > ultrasonic sound energy density > reaction time > pH value. The optimum pretreatment conditions according to methane productivity are pH of 9, ultrasonic sound energy density of 0.5 W/mL, moisture content of 96%, and reaction time of 30 min. In this case, the methane yield rate can reached 335 mL/g, which is 2.2 times higher than that from the untreated bacteria residue.

Keywords: wastes disposal and comprehensive utilization; penicillin bacterial residue; ultrasonic/alkaline pretreatment; anaerobic digestion; biochemical methane potential

抗生素菌渣作为一种特殊的危险废物,其安全、合理、有效地处理处置已成为目前制药行业亟待解决的难题^[1-5]。抗生素菌渣(干基)中有机质含量高达90%以上,可作为生物质能源被开发利用^[6-10],其中采用厌氧消化技术是实现菌渣减量化、资源化的有效途径之一^[11]。但是由于抗生素菌渣中的菌丝体具有刚性的细胞壁^[12],胞内有机质释放困难,难以被快速降解。为此,需采取物理、化学等手段对菌渣中的菌丝体进行破壁预处理,以提高菌渣中有机质的利用率和沼气产率^[13]。研究表明采用超声/碱预处理方法对污泥、秸秆等生物质进行预处理^[14-17],可增加胞内有机质的溶出率,有利于提高产气量,进而提高厌氧消化效率。李再兴等^[13]采用碱热联合等工艺对链霉素菌渣进行预处理,结果表明菌渣中的溶解性化学需氧量(SCOD)提高了66.39%,甲烷产量提高了14.21%。钟为章等^[11]利用碱热联合法预处理链霉素菌渣,结果证明预处理能够有效地提高沼气产量,挥发性固体(VS)去除率达到64%左右。抗生素菌渣与污泥构成类似,可参考相应的处理方法进行预处理。采用正交试验对青霉素菌渣进行超声/碱预处理试验研究,考察不同预处理时间、pH值、声能密度和菌渣含水率等条件下菌渣的破胞效果,并进行生物化学产甲烷潜能试验(BMP)对不同处理条件下菌渣的可生化性进行评价,从而确定最佳的预处理工艺条件,为开展抗生素菌渣厌氧消化处理提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

1) 超声波破碎装置

超声波破碎装置采用宁波新芝生物科技股份有限公司生产的超声波细胞粉碎机,型号为JY98-ⅢN,最大功率为1 200 W,工作频率的范围为20~25 kHz。

2) BMP 试验装置

BMP 试验装置如图1所示。厌氧消化瓶采用150 mL锥形瓶,接种70 mL厌氧污泥,加入一定量的菌渣后,将其置于35℃恒温水箱中,产生的沼气通过导气管进入排水集气系统计量。

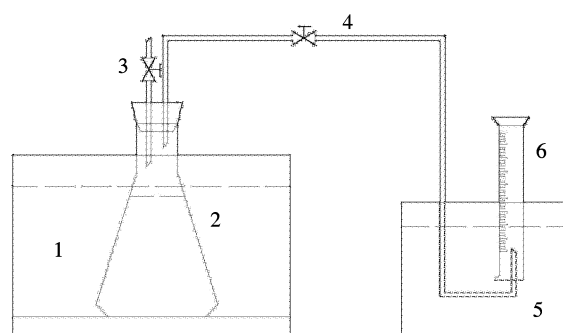
1.2 试验菌渣和接种污泥

1) 试验菌渣

试验用青霉素菌渣取自华北制药集团青霉素生产车间,其主要理化性质见表1。

2) 接种污泥

接种污泥取自某淀粉厂废水处理站的厌氧颗粒污泥,颗粒较大成灰黑色或灰褐色,具有良好的沉降性能,污泥的最大比产甲烷速率为240 mL/(g·d)。



1—恒温水箱;2—厌氧消化瓶;3—气体采样阀;4—导气管;
5—NaCl溶液槽;6—集气筒。

图1 BMP 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of device of BMP test

1.3 试验方法

1) 单独超声预处理

取一定量的菌渣,加水调配至不同的含水率,进行超声预处理试验,反应一定时间后取样分析。

2) 超声/碱预处理

本试验拟采用正交试验法,开展超声/碱预处理试验研究。正交试验因素、水平见表2,试验条件见表3。取一定量的菌渣,加水调配至不同的含水率,再用5 mol/L NaOH溶液调节其pH值,然后进行超声处理,反应一定时间后取样分析。

表1 青霉素菌渣主要理化性质

Tab.1 Characteristics of the penicillin bacterial residue

指标	数值
pH值	5.98~6.21
含水率/%	76.34~83.62
$w(\text{TS}_{\text{菌渣}})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	202.61~254.82
$w(\text{VS}_{\text{菌渣}})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	179.14~230.90
$w(\text{SS}_{\text{菌渣}})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	191.32~243.74
$w(\text{VSS}_{\text{菌渣}})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	160.83~219.80
$w(\text{SCOD}_{\text{菌渣}})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	13.69~16.98
$w(\text{TCOD}_{\text{菌渣}})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	15.43~18.43

注:TS_{菌渣}为菌渣的总固体;VS_{菌渣}为菌渣的挥发性固体;SS_{菌渣}为菌渣的悬浮固体;VSS_{菌渣}为菌渣的挥发性悬浮固体;SCOD_{菌渣}为菌渣的溶解性化学需氧量;TCOD_{菌渣}为菌渣的总化学需氧量。

表2 正交试验的因素和水平

Tab.2 Factor and level of orthogonal design

水平	因素 A pH 值	因素 B 声能密度/(W · mL ⁻¹)	因素 C 含水率/%	因素 D 反应时间/min
1	原样	0	96	5
2	9	0.5	97	10
3	10	1.0	98	20
4	11	2.0	99	30

表3 正交试验表

Tab.3 Orthogonal design

试验 编号	因素 A pH 值	因素 B 声能密度/(W · mL ⁻¹)	因素 C 含水率/%	因素 D 反应时间/min
1	原样	0	96	5
2	原样	0.5	97	10
3	原样	1.0	98	20
4	原样	2.0	99	30
5	9	0	97	20
6	9	0.5	96	30
7	9	1.0	99	5
8	9	2.0	98	10
9	10	0	98	30
10	10	0.5	99	20
11	10	1.0	96	10
12	10	2.0	97	5
13	11	0	99	10
14	11	0.5	98	5
15	11	1.0	97	30
16	11	2.0	96	20

3) BMP 试验

将一定量预处理后的菌渣与70 mL的接种污泥充分混合,然后置于150 mL的锥形瓶中,定容到

100 mL,并以 0.5 L/min 的流速通入 N₂ 以排除空气中的氧气,最后用橡胶塞密封并置于 35 ℃ 的恒温水浴中振荡发酵 20 天,另取 70 mL 接种污泥(作为空白)和未处理的菌渣(作为对照)分别单独进行厌氧消化。

1.4 分析方法

pH 值采用酸度计法测定,TS,VS,SS,VSS 和含水率采用称重法测定,COD 采用重铬酸钾法测定,其中溶解性化学需氧量(SCOD)的测定方法:先通过转速为 10 000 r/min 的离心机离心 10 min,再用 0.45 μm 的滤纸过滤,然后取污泥上清液,用重铬酸钾法测定样品。上述指标均按照《水和废水分析检测方法》(第 4 版)^[18] 进行测定。沼气产量由排水集气系统计量;沼气成分采用 GC7900 型气相色谱仪测定。

2 结果与讨论

2.1 单独超声预处理试验

超声预处理产生的强大的空化作用,以及大量微气泡的瞬间爆破力,能够破坏胞外聚合酶和细胞壁结构,使青霉素菌渣固相 COD 向液相中转化,通过液相中 COD 的变化衡量超声预处理效果,本研究旨在重点考察超声预处理对菌渣 COD 溶出率的影响。COD 溶出率表示预处理时青霉素菌渣中有机物从固相向液相的转化程度,COD 溶出率 = $(\text{SCOD}_{\text{后}} - \text{SCOD}_{\text{前}}) / \text{TCOD} \times 100\%$ ^[19-20]。不同声能密度下的超声预处理对青霉素菌渣(含水率 96%)预处理过程中 COD 溶出率的影响如图 2 所示。

由图 2 可知,在不同声能密度下,COD 溶出率均随时间增加不断升高,当超声时间超过 30 min 时,COD 溶出率升高缓慢。在相同处理时间下,声能密度在 0.5~2.0 W/mL 范围内,随声能密度的增加 COD 溶出率升高,最高可达 40.69%;当声能密度达到 2.5 W/mL 时,COD 溶出率下降到 34.44%。可能是因为一定声能密度范围内,声能密度增加,超声预处理产生的机械剪切力越强,对菌渣细胞壁的破坏作用越明显,有利于 COD 向液相溶出。综合考虑,确定菌渣含水率为 96% 时,最优声能密度为 2.0 W/mL,超声时间为 30 min,该条件下 COD 溶出率为 40.69%。

2.2 菌渣超声/碱预处理试验

青霉素菌渣超声/碱预处理试验结果见图 3。

由图 3 可知,1# 对照组(原样 pH 值、未超声处理、含水率为 96%、反应时间为 5 min)的 COD 溶出率最低,为 24.78%;12# 试验组(pH 值为 10,声能密度为 2.0 W/mL,含水率为 97%,反应时间为 5 min)的 COD 溶出率最高,能达到 84.69%,是单独超声预处理(菌渣含水率为 96%,声能密度为 2.0 W/mL,反应时间为 30 min)的 COD 溶出率 40.69% 的 2.08 倍。其主要原因是通过超声与碱的协同作用,强化了菌渣中菌丝体的破壁效果,使胞内有机物能快速释放到液相中,使菌渣 COD 溶出率提高,为提高菌渣厌氧处理效率奠定了基础。

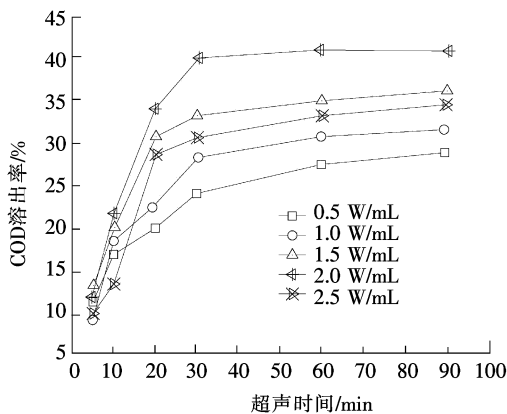


图 2 不同声能密度下 COD 溶出率随时间的变化

Fig. 2 Variation of the COD dissolution rate at different ultrasonic pretreatment time and sound energy density

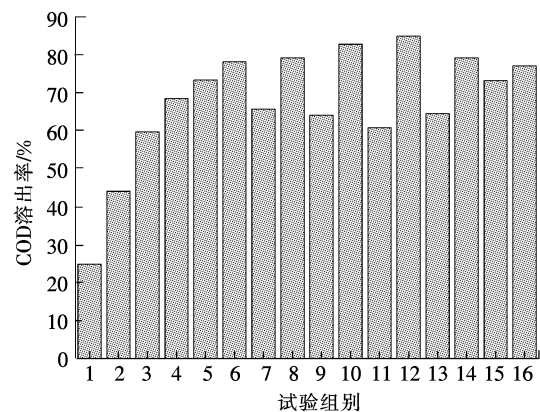


图 3 菌渣超声/碱预处理后 COD 溶出率

Fig. 3 COD dissolution rate under different ultrasonic/alkaline pretreatment conditions

2.3 超声/碱预处理后菌渣 BMP 试验

取超声/碱预处理后的菌渣开展 BMP 试验研究,考察不同超声/碱预处理条件下的青霉素菌渣厌氧消化沼气产率,见图 4。

由图 4 可知,经过超声/碱预处理的累计产气量明显高于未处理对照组的产气量,且产气速率较快。其中 6# 试验组(pH 值为 9,声能密度为 0.5 W/mL,含水率为 96%,反应时间为 30 min)的沼气产率高达 481.2 mL/g,相较于 1# 对照组,沼气产率提高了 68.18%。CLARK 等^[21]研究表明污泥超声预处理后厌氧消化沼气产量可以提高 61%,ONYECHE 等^[22]将经超声预处理后的污泥进行厌氧消化可使产气量提高 23%;同时本试验采用超声/碱预处理后菌渣沼气产率高于董永博^[23]对未预处理青霉素菌渣厌氧消化的沼气产率 337.33 mL/g。这说明超声预处理对于污泥和抗生素菌渣具有较好的破胞效果,可以加速胞内有机物释放,有利于提高厌氧消化产气率。

由于沼气中有效成分为甲烷,本试验以甲烷产率为指标对超声/碱预处理正交试验结果进行统计分析,结果见表 4。

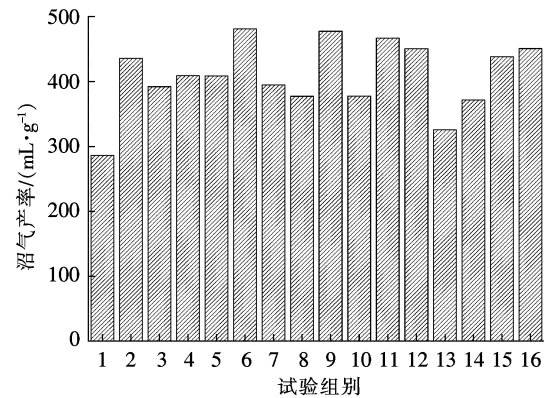


图 4 超声/碱预处理后菌渣沼气产率

Fig. 4 Biogas yield under different ultrasonic/alkali pretreatment conditions

表 4 正交试验结果

Tab. 4 Experimental results of the orthogonal design

序列	因素 A pH 值	因素 B 声能密度/(W · mL ⁻¹)	因素 C 含水率/%	因素 D 反应时间/min	甲烷产率/ (mL · g ⁻¹)
1	原样	0	96	5	152
2	原样	0.5	97	10	289
3	原样	1.0	98	20	235
4	原样	2.0	99	30	253
5	9	0	97	20	239
6	9	0.5	96	30	335
7	9	1.0	99	5	227
8	9	2.0	98	10	258
9	10	0	98	30	311
10	10	0.5	99	20	218
11	10	1.0	96	10	311
12	10	2.0	97	5	286
13	11	0	99	10	193
14	11	0.5	98	5	256
15	11	1.0	97	30	227
16	11	2.0	96	20	308
K ₁	929	895	1 106	921	
K ₂	1 059	1 078	1 041	1 051	
K ₃	1 126	1 020	1 060	1 000	
K ₄	984	1 105	891	1 126	
R	197	210	215	205	

由表4可知,超声/碱预处理对青霉素菌渣厌氧消化甲烷产率的影响程度差异不大,其影响因素依次为含水率>声能密度>反应时间>pH值。由于超声波作用需要较高的含水率(一般含水率在95%以上),才能够在液体表面产生大量的空化气泡和较大的剪切力,进而破坏细胞壁,使内含物溶出,因此含水率的影响程度较其他因素大。依据甲烷产率确定本试验的最佳条件:pH值为9,声能密度为0.5 W/mL,含水率为96%,反应时间为30 min,其甲烷产率最高可达335 mL/g,是未处理菌渣甲烷产率152 mL/g的2.2倍。

3 结论

1)青霉素菌渣超声/碱联合预处理试验表明,最佳预处理条件:pH值为10,声能密度为2.0 W/mL,含水率为97%,反应时间为5 min,COD溶出率最高可达84.69%,是单独超声预处理(菌渣含水率为96%,声能密度为2.0 W/mL,反应时间为30 min)COD溶出率40.69%的2.08倍。

2)经过超声/碱联合预处理后的菌渣的BMP试验表明,预处理中各因素对甲烷产率的影响程度大小为含水率>声能密度>反应时间>pH值,按照甲烷产率确定最佳预处理条件:pH值为9、声能密度为0.5 W/mL、含水率为96%、反应时间为30 min,其甲烷产率最高可达335 mL/g,是未处理菌渣甲烷产率152 mL/g的2.2倍。

参考文献/References:

- [1] 工业和信息化部. 中国医药统计年报(2013年):综合册[M]. 北京:中国医药出版社,2014.
- [2] 周穰. 国家危险固体废物名录[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [3] WHITE J E, CATALLO W J, LEGENDRE B L. Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91(4): 1-31.
- [4] 周保华,高勤,王洪华,等. 青霉素、土霉素菌渣研究利用现状及特性分析[J]. *河北工业科技*, 2011, 28(5): 291-294.
ZHOU Baohua, GAO Qin, WANG Honghua, et al. Research and utilization of penicillin bacterial residue and oxytetracycline bacterial residue and analysis of the characteristics[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2011, 28(5): 291-294.
- [5] 赵卫凤,鲍晓磊,张媛,等. 河北省发酵类抗生素菌渣处置现状及存在的问题[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(31): 12417-12421.
ZHAO Weifeng, BAO Xiaolei, ZHANG Yuan, et al. Investigation on status of antibiotics fermentation residues and existing problems in Hebei[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(31): 12417-12421.
- [6] 李再兴,田宝阔,左剑丞,等. 抗生素菌渣处理处置技术进展[J]. *环境工程*, 2012, 30(2): 72-75.
LI Zaixing, TIAN Baokuo, ZUO Jian'e, et al. Progress in treatment and disposal technology of antibiotic bacterial residues[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(2): 72-75.
- [7] 贡丽鹏,郭斌,任爱玲,等. 抗生素菌渣理化特性[J]. *河北科技大学学报*, 2012, 33(2): 190-196.
GONG Lipeng, GUO Bin, REN Ailing, et al. Physical and chemical properties of antibiotics bacterial residue[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2012, 33(2): 190-196.
- [8] 任晓琼,赵凤清,胡倩倩,等. 利用青霉素废菌丝体制备脱硫石膏缓凝剂的研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(2): 134-137.
REN Xiaoqiong, ZHAO Fengqing, HU Qianqian, et al. Preparation of gypsum retarder from waste penicillin mycelium[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(2): 134-137.
- [9] 陈昆,郭斌,贡丽鹏,等. 土霉素菌渣热解液的理化特性及成分分析[J]. *河北科技大学学报*, 2013, 34(6): 565-571.
CHEN Kun, GUO Bin, GONG Lipeng, et al. Analysis on physicochemical properties and composition of terramycin mushroom residue pyrolysis liquid[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2013, 34(6): 565-571.
- [11] ZHONG Weizhang, LI Zaixing, YANG Jingliang, et al. Effect of thermal-alkaline pretreatment on the anaerobic digestion of streptomycin bacterial residues for methane production[J]. *Bioresour. Technology*, 2013, 151: 436-440.
- [12] 韩庆,苏海佳. 废菌渣高值化研究中细胞破壁工艺的比较[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(5): 144-147.
HAN Qing, SU Haijia. Comparison of cell wall broken in the research of high value utilization of mycelium residue[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(5): 144-147.
- [13] LI Zaixing, ZUO Jian'e, TIAN Baokuo, et al. Thermal-alkaline pretreatment on the decomposition of the streptomycin bacterial residue[J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2012, 26(3): 2971-2975.
- [14] LEE K, CHANTRASAKDAKUL P, KIM D, et al. Ultrasound pretreatment of filamentous algal biomass for enhanced biogas production[J]. *Waste Management*, 2013, 34(6): 1035-1040.
- [15] 薛向东,金奇庭,朱文芳,等. 污泥超声破解效应及厌氧消化性能研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(1): 50-53.
XUE Xiangdong, JIN Qiting, ZHU Wenfang, et al. The effect of ultrasound and anaerobic digestion performance on sludge[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1): 50-53.

- [16] 赵庆良, 苗礼娟, 胡凯, 等. 超声碱预处理剩余污泥的中温厌氧消化效果[J]. 中国给水排水, 2009, 25(15): 25-27.
ZHAO Qingliang, MIAO Lijuan, HU Kai. Mesophilic anaerobic digestion of excess sludge after ultrasonic and alkaline pretreatment[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(15): 25-27.
- [17] 张婷. 超声波与稀碱法联合预处理对秸秆厌氧发酵产沼气的影晌[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
ZHANG Ting. Effect of Ultrasound and Alkali Co-pretreatment on Biogas Production in Stalk Anaerobic Fermentation[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2009.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 尹军, 臧立新, 于海侠, 等. 超声与碱预处理低有机质剩余污泥特性分析[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 179-182.
YIN Jun, ZANG Lixin, YU Haixia, et al. Characteristics of waste activated sludge with low VSS content by ultrasonic and alkaline pretreatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 179-182.
- [20] 由美雁, 谢里阳, 朱彤, 等. 超声波破解剩余污泥的试验研究[J]. 化学工程, 2013, 41(4): 6-10.
YOU Meiyang, XIE Liyang, ZHU Tong, et al. Experimental study on excess sludge disintegration by ultrasonic treatment[J]. Chemical Engineering, 2013, 41(4): 6-10.
- [21] CLARK P, NUJJOO I. Ultrasonic sludge pretreatment for enhanced sludge digestion[J]. Water and Environment Journal, 2000, 14(1): 66-71.
- [22] ONYECHE T I, SCHLÄFER O, BORMANN H, et al. Ultrasonic cell disruption of stabilized sludge with subsequent anaerobic digestion [J]. Ultrasonics, 2002, 40(1): 31-35.
- [23] 董永博. 青霉素菌渣厌氧发酵制取沼气工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
DONG Yongbo. Process Study for Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residue for Biogas Production[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 15 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此, 本编辑部特向这些专家表示敬意, 对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

边省锋 段彦栋 郭建博 海热提 韩 敏 郝爱友 郝冬雪 何雪滨
胡昌勤 黄洪钟 季 民 考宏涛 李瑞杰 林 锋 刘中良 石 磊
石江宏 王广春 王淑勤 吴然超 武德珍 熊万里 杨 光 姚小兰
张春会 张宏博 张明铎 张荣军 赵林惠 赵庆良 赵燕芳 郑国强

(本刊编辑部)