

doi:10.3969/j.issn.2095-6002.2018.05.015

文章编号:2095-6002(2018)05-0099-07

引用格式:唐仁士,张艳萍,蔡晓阳,等.大豆废水厌氧发酵产甲烷工艺条件优化[J].食品科学技术学报,2018,36(5):99-105.



TANG Renshi, ZHANG Yanping, CAI Xiaoyang, et al. Parameter optimization of methanogenesis of soybean wastewater [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 36(5): 99-105.

大豆废水厌氧发酵产甲烷工艺条件优化

唐仁士, 张艳萍*, 蔡晓阳, 王鑫

(北京工商大学食品学院, 北京 100048)

摘要:为了在大豆废水的降解过程中充分提高甲烷产量,设计 $L_9(3^4)$ 正交试验,研究微量元素、发酵温度、有机负荷和污泥浓度对大豆废水厌氧发酵产甲烷量的影响,确定各影响因素的主次顺序,并根据正交试验结果进行工艺条件优化研究。实验结果表明:对甲烷产量影响最大的因素是有机负荷,其次是微量元素、污泥浓度,发酵温度影响最小。优化的工艺条件组合为:Co 1 mg/L,发酵温度 45 °C,有机负荷 1.52 kg COD/($m^3 \cdot d$),接种污泥浓度 30.00 g VSS/L,在此条件下累积甲烷产量最大为 970 mL,比未优化组合提高 15.10%,累积甲烷产率达 344.49 mL/(g SCOD),甲烷含量最大为 84.12%,SCOD 的去除率达到 84.00%。

关键词:大豆废水;厌氧发酵;甲烷产量;有机物降解;工艺优化

中图分类号: TS210.9

文献标志码: A

厌氧发酵产甲烷受多种因素的影响,微量元素、发酵温度、有机负荷、污泥浓度是其中主要的4个因素。微量元素会作为辅酶、辅基、辅因子的成分在微生物的酶系统对产甲烷阶段起调控作用^[1-2]。Ni、Co、Fe是所需的重要微量元素,Ni是产甲烷菌细胞中 F_{430} 的唯一金属成分^[3];Co是酶 F_{420} 的金属成分,促进微生物细胞的生物合成和产甲烷过程,激活厌氧发酵过程中关键酶 F_{420} 的活性^[4];Fe不仅参与厌氧微生物体内细胞色素、细胞氧化酶的合成,而且是胞内氧化还原反应的电子载体^[5]。温度是影响微生物生长代谢以及酶活性的重要因素,理论上来说温度在10~60 °C,沼气池均能正常发酵产气^[6-10]。有机负荷是厌氧发酵的重要影响因素,沼气和甲烷产量随着有机负荷的增加而增加^[11-12]。此外,反应体系中的污泥浓度也是影响厌氧发酵的关键因素,接种污泥的数量、活性和性质很大程度上影响着启动速度甚至反应器运行的成败^[13]。

近年来,我国大豆深加工产业发展迅速,相应地产生了大量的高浓度有机废水,该废水具有易腐败、有机物浓度高、氮磷含量高等特点^[14];此外该废水可生化性好,适于采用厌氧生物处理。现阶段大豆废水研究主要侧重于反应器形式、COD的去除^[15-17],缺少对该废水厌氧处理过程中甲烷产量的报道,而产甲烷量是困扰大豆废水厌氧发酵技术中的关键问题。本研究以大豆废水为研究对象,研究在厌氧发酵处理过程中提高甲烷产量的优化工艺条件,期望在去除污染物的同时回收更多的能量,创造更高的经济效益。

1 材料与方法

1.1 实验材料

接种颗粒污泥:取自山东省潍坊市昌乐县某公司IC反应器中的颗粒污泥,静置去除上清液,4 °C保存备用。污泥呈亮黑色,近球形或椭圆形,粒径主

收稿日期:2018-04-19

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAC28B01);北京工商大学学科建设与研究生教育专项项目(2017XWYJS019)。

作者简介:唐仁士,男,硕士研究生,研究方向为污水厌氧发酵产沼气;

*张艳萍,女,副教授,博士,主要从事水污染控制理论与应用方面的研究,通信作者。

要分布在 0.45 ~ 2.00 mm, 污泥挥发性悬浮物 (VSS) 约 75 g/L、总固体 (TS) 约 107 g/L, 总固体占污泥样品 13.20%, 灰分占总固体 34.40%, 性能良好。

废水模拟: 通过实验室模拟代替实际工程废水。使用豆浆机将称量、泡好的大豆打碎, 充分溶解在水中, 用 150 目尼龙砂过滤, 取其过滤液作实验用水。

1.2 主要仪器

GC7900 型气相色谱仪, 上海天美科学仪器有限公司; 5B-1 型 COD 快速分析仪, 上海连华科技公司; 雷磁 pHs-25 型数显 pH 计, 上海重逢科学仪器有限公司; GC9790 型气相色谱仪, 浙江福立分析仪器股份有限公司; DHG-9075A 型电热鼓风干燥箱, 上海雷韵试验仪器制造有限公司。

1.3 实验装置

实验装置 (如图 1) 是由 500 mL 的厌氧发酵瓶, 1 L 的集气瓶和 500 mL 的量筒组成。每个发酵瓶在装入 400 mL 不同的反应物质后, 均要充氮气以维持发酵瓶内的厌氧环境, 分别放入恒温振荡水浴器中, 调节不同的温度和相同的转速。发酵瓶中产生的气体经过玻璃导管进入充满饱和食盐水的集气瓶, 排出的食盐水体积通过量筒计量即为沼气产量。

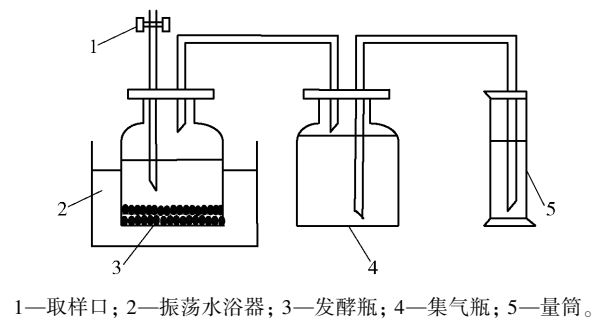


图 1 实验装置图
Fig. 1 Diagram of experimental device

1.4 实验方法

1) 正交试验。采用 $L_9(3^4)$ 正交表, 选定微量元素 (Fe、Co、Ni)、发酵温度、有机负荷和污泥浓度为考察因素, 进行 4 因素 3 水平正交试验。以甲烷的产量为评价指标, 且不考虑因素之间的交互作用, 因素水平见表 1。

微量元素 Fe、Co、Ni 的加入量均使反应体系中浓度控制在 1 mg/L; 有机负荷是通过高浓度废水按照一定的稀释比获得, 实测的 COD 浓度依次为 7 600、4 300、3 170 mg/L; 通过接种不同体积的颗粒

污泥控制污泥浓度; 发酵温度通过调节不同水浴锅的温度来实现, 温度变化在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 正交试验因素水平
Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiments

水平	A ρ (微量元素)/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	B t (发酵)/ $^{\circ}\text{C}$	C 有机负荷/ ($\text{kg COD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	D 污泥浓度/ ($\text{g VSS}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	Fe(1)	35	1.52	11.25
2	Co(1)	40	0.86	20.63
3	Ni(1)	45	0.63	30.00

2) 工艺条件优化实验。通过正交试验分析, 得出较适宜条件组合, 与正交试验 9 组实验条件组合对比。如果分析所得的优化组合是 9 组实验中的某一组条件, 则不需要再进行验证优化。

1.5 测定指标

1) 沼气产量测定: 采用排饱和食盐水方法记录不同条件下的沼气产量。

2) 甲烷含量测定: 采用气相色谱法。色谱柱: TDX-01 碳分子筛填充柱 ($2\text{ m}\times 3\text{ mm}$), 检测器: 热导检测器 (TCD), 载气: 高纯 N_2 , 流速 $30\text{ mL}/\text{min}$, 色谱条件: 进样口温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 检测器温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 柱温: $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 柱前压: 0.3 MPa , 每次进样量: 1 mL 。

3) SCOD 值测定: 采用 COD 快速分析仪测定。

4) VSS、TS 测定: 采用重量法测定。

5) pH 值测定: 采用 pHs-25 型数显 pH 计测定。

6) 总挥发性脂肪酸 (volatile fatty acid, VFAs) 组分和含量测定: 采用气相色谱法测定。色谱条件: 色谱柱采用 KB-Wax $30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}$ 毛细管柱, 氢火焰离子化检测器 (FID), 分流比 20:1。载气为高纯氮气, 柱前压 0.3 MPa 。进样口和检测器温度分别为 $200、260\text{ }^{\circ}\text{C}$, 进样量 $1\text{ }\mu\text{L}$ 。柱温采用程序升温, 初始温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保留 2 min , 以升温速率 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 逐渐升到 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 逐渐升到 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保留 2 min 。

2 结果与分析

2.1 正交试验结果分析

根据实验设计安排, 记录 9 组实验的沼气产量, 每隔 0.5 d 记录一次, 反应进行一周左右, 当日产气量接近零、SCOD 值变化趋于稳定, 可认为发酵反应结束。

2.1.1 VFAs、pH 值动态分析

甲烷产量与 VFA、pH 值的变化有着密切的关系。VFAs 是厌氧消化过程中有机质水解酸化的主要产物,同时也是产甲烷菌所利用底物,因此常常作为评价水解酸化和产甲烷是否平衡的重要指标^[18]。pH 值是影响酶活性的重要因素,微生物又直接受到酶活性的影响^[19],而 pH 值波动主要受到 VFAs 浓度、CO₂的分压和总碱度的影响。研究中考察了 9 组实验的 VFAs 含量变化,结果如图 2。由图 2 可以看出,不同反应条件的 VFAs 含量(以 SCOD 计)变化趋势相似,均是先迅速增加后降低并慢慢趋于稳定。在反应开始 0.5 d 后,9 组 VFAs 都达到了最高值,一方面是因为反应初始废水中的大分子有机物为水解菌及产酸菌提供丰富的营养物质,其代谢能力较强;另一方面也可能是因为污泥表面带负电荷,而本实验所用大豆废水偏碱性(pH = 8.87)负电荷较多,会使胞外聚合物解析出来,从而加速蛋白质水解产酸。

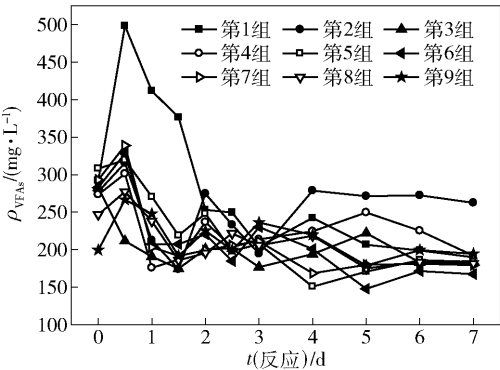


图 2 发酵过程中 9 组实验的 VFAs 含量变化
Fig. 2 Changes of VFAs content in 9 groups of experiments during fermentation

考察了发酵过程中 9 组日甲烷产量变化,结果如图 3。由图 3 可知,随着反应的进行,大豆蛋白的水解产酸能力逐渐减弱,产甲烷菌的代谢能力增强,VFAs 被迅速利用,1 d 后 9 组反应的日甲烷产量均达到峰值,之后产气量下降,直至反应结束。

从 9 组反应中挑出一组累积产气量最大的进行 VFAs 的组分、pH 值变化分析,以第 4 组反应为例。考察了第 4 组 VFAs、VFAs 组分(乙酸、丙酸、丁酸)以及 pH 值变化,结果如图 4。由图 4 可以看出,乙酸含量先增加后降低,之后趋于稳定,和 VFAs 变化一致,且乙酸始终在 VFAs 组分中占比最大,丙酸含量始终最低,且有逐渐降低的趋势,这说明系统中的环境适合产甲烷菌的生长。运行 1 d 后,达到最低

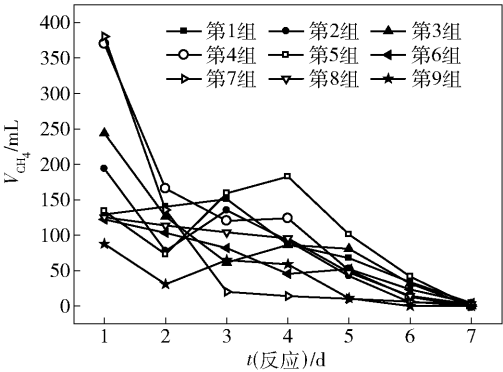


图 3 发酵过程中 9 组实验的日甲烷产量变化
Fig. 3 Changes in daily production of methane in 9 groups of experiments during fermentation

点,此时 VFAs 为 175.77 mg/L,乙酸占 62.72%,丙酸占 15.34%,反应器向着有利于产甲烷方向稳定运行。在整个反应过程中 VFAs 基本在 300 mg/L 以下,没有造成系统 VFAs 积累,这说明成熟厌氧颗粒污泥中的产甲烷菌活性比较强,酸性末端产物能被产甲烷菌及时有效分解。

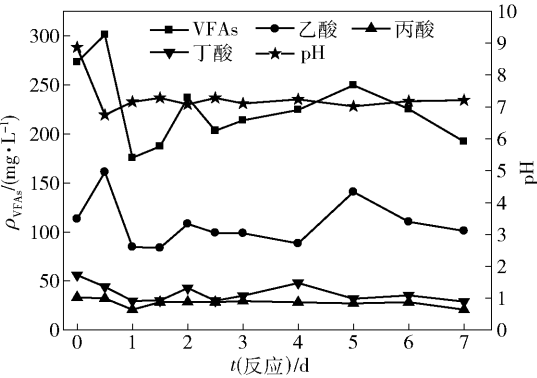


图 4 第 4 组 VFAs、VFAs 组分以及 pH 值变化
Fig. 4 Changes of group 4 VFAs, VFAs composition and pH

第 4 组反应器内 pH 值先迅速降低后缓慢升高,最后逐步达到相对稳定,与 VFAs 变化趋势类似。在反应进行的 0.5 d 后,大分子有机物被大量分解,产酸量上升,pH 值降至 6.75。随着反应器中 VFAs、氢气被利用以及过程中还产生一定数量的碱度,使得 pH 值升高并稳定在 7.00 ~ 7.30,说明此阶段水解酸化与产甲烷过程处在一个平衡状态,该组累积甲烷产量明显高于其他几组。

2.1.2 甲烷产量分析

正交试验数据记录结果见表 2,以甲烷产量为目标,采用极差法对实验结果进行分析,见表 3。

表 2 正交试验结果
Tab.2 Results of orthogonal experiment

实验号	A 微量元素	B t (发酵)/℃	C 有机负荷/ ($\text{kg COD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	D 污泥浓度/ ($\text{g VSS}\cdot\text{L}^{-1}$)	$V(\text{CH}_4)/\text{mL}$	$\rho(\text{SCOD})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	Fe	35	1.52	11.25	614	343.0
2	Fe	40	0.86	20.63	551	227.0
3	Fe	45	0.63	30.00	584	354.5
4	Co	40	1.52	30.00	843	222.0
5	Co	45	0.86	11.25	692	178.0
6	Co	35	0.63	20.63	411	99.7
7	Ni	45	1.52	20.63	567	427.5
8	Ni	35	0.86	30.00	503	165.0
9	Ni	40	0.63	11.25	253	196.0

Fe、Co、Ni 的质量浓度均为 1 mg/L。

表 3 以甲烷产量为目标的正交试验极差分析
Tab.3 Range analysis of orthogonal experiments with
methane production as target

实验号	A	B	C	D
K_1	582.78	509.33	674.58	519.59
K_2	648.55	549.05	581.94	509.85
K_3	441.34	614.28	416.14	643.23
极差 R	207.21	104.96	258.44	123.64

K_1 、 K_2 及 K_3 均为平均值。

分析表 3、表 4，得出结论：

1) 由表 3 中极差的大小可以直观判断出各因素对甲烷产量影响的主次顺序为：有机负荷(C)、微量元素(A)、污泥浓度(D)、温度(B)。

2) 由于本次正交试验的正交设计时空列没有设置，选择 4 因素中偏差平方和最小者为误差列，方差分析见表 4。由表 4 可知，4 个因素的偏差平方和中，温度这一项的偏差平方和明显偏小，所以选用温度的偏差平方和作为误差平方和，温度的偏差平方和对应的自由度为误差平方和的自由度。

表 4 累积甲烷产量的方差分析
Tab.4 Cumulative variance analysis of
methane production

方差来源	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
微量元素	67 264.63	2	3.992	9.000	
温度	16 849.06	2	1.000	9.000	
有机负荷	102 862.07	2	6.105	9.000	
污泥浓度	33 173.66	2	1.969	9.000	
误差	16 849.06	2			

由表 4 可知， $F_{\text{比}}$ 均小于 $F_{0.10}$ ，有 90% 的把握，说明 4 种因素水平的改变对甲烷产量的影响无显著差异，但是，有机负荷与另外 3 种因素相比，其影响的

显著性较为突出。

3) 大豆废水厌氧发酵产甲烷的因素优化工艺条件组合为 $A_2B_3C_1D_3$ ，即 Co 1 mg/L、发酵温度 45℃、有机负荷 1.52 kg COD/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}$)、接种污泥浓度 30.00 g VSS/L。

2.2 工艺优化结果分析

正交试验结果表明，优化条件组合为 $A_2B_3C_1D_3$ ，与 9 组实验中产甲烷量最大的第 4 组条件组合并非一致，故需进行优化实验。实验分两组进行，一组条件组合为：Co 1 mg/L，发酵温度 40℃，有机负荷 1.52 kg COD/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}$)，接种污泥浓度 30.00 g VSS/L，记为甲组；另一组为：Co 1 mg/L，发酵温度 45℃，有机负荷 1.52 kg COD/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}$)，接种污泥浓度 30.00 g VSS/L，记为乙组。

考察了日甲烷产量、甲烷含量变化，结果如图 5。由图 5 可知，反应初始乙组甲烷产量明显高于甲组，甲、乙组的沼气产量在第 1 天均达到最高点，分别为 0.44、0.58 L/d。这是由于接种污泥中的微生物群落结构稳定，乙组温度较高，进一步增强了产甲烷菌等有益微生物的活性，处理效率提高，另外温度的升高可以杀灭寄生虫和大肠杆菌等^[20-21]。随着反应的进行(2 d 后)，有机物被大量消耗，出现营养相对缺乏而导致生存竞争。甲、乙两组微生物的代谢能力均会降低，但甲组的稍慢，所以会出现第 3、4、5 d 日甲烷产量超过乙组的现象。甲、乙组的沼气产量在第 7 天达到最低点，分别为 0.012、0.032 L/d，此时可认为反应器内的大豆废水已接近不再产沼气。

由图 5 可知，甲、乙两组沼气中的甲烷含量变化趋势基本相似，都是先增加后降低，2 d 后含量变化

趋于稳定值。发酵初始,甲、乙两组甲烷含量均增加,1 d 后到达最高点,分别为 82.82%、84.12%。乙组相对甲组甲烷含量有小幅提升,是因为有机物充足,温度越高,有机物分解越快,所获得的甲烷含量也越高^[22]。随着蛋白质的水解,产甲烷菌大量增殖,彼此会有相互竞争;另一方面,有机物的水解产酸以及体系中产生的 CO₂溶解产酸均会对产甲烷菌产生抑制。

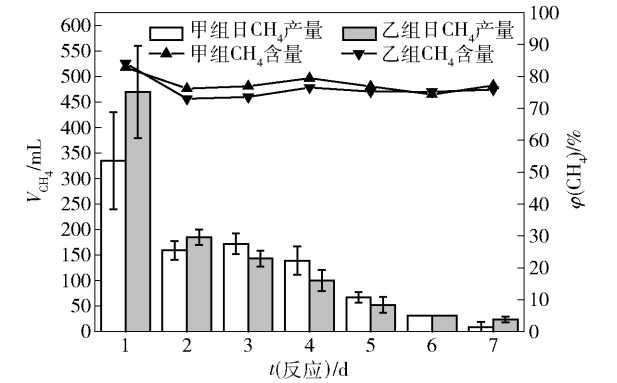


图5 甲、乙两组日 CH₄ 产量、CH₄ 含量变化

Fig. 5 Changes of dailymethane production and methane contents in two groups

由于接种的 IC 反应器中成熟的颗粒污泥是中温发酵型微生物,当发酵温度在 35 ~ 45 ℃ 时产甲烷菌的活性高,故最终甲烷含量可以稳定在 70% 以上。如果继续升高温度,进行高温发酵将不再是优化条件,因为高温发酵产生杂质气体比较多,一方面阻碍了发酵反应的正常运行;另一方面高温代谢产生的副产物,如氨气、硫化氢等的积累对产甲烷菌有一定的毒害作用^[23],在一定程度上抑制了微生物的代谢生长,从而影响了甲烷产量。

整个反应周期,乙组累积甲烷产量 970 mL,比优化前提升了 15.10%,累积甲烷产率达 344.49 mL/(g SCOD),比优化前(293 mL/(g COD))提高了 17.56%,略低于理论甲烷产率 350 mL/(g COD)。Zhu 等^[24]利用 ABR 反应器处理大豆废水,将其产气情况换算后得到甲烷产率在 165.4 ~ 226.33 mL/(g SCOD),与其相比有较大提升;此外实验的 SCOD 去除率达到了 84.00%,故乙组为大豆废水厌氧发酵的优化工艺条件组合。

3 结 论

1) 通过 4 因素 3 水平正交试验对大豆废水厌氧

发酵的影响因素进行分析,实验结果表明,其主次顺序为:有机负荷、微量元素、污泥浓度、温度。

2) 依据正交试验结果对实验的工艺条件进行优化,在组合 Co 1 mg/L、发酵温度 45 ℃、有机负荷 1.52 kg COD/(m³·d)、接种污泥浓度 30.00 g VSS/L 的条件下,最大累积甲烷产率为 344.49 mL/(g SCOD),相比未优化条件组合提高 17.56%,甲烷含量最高为 84.12%,SCOD 去除率可达 84.00%。

参考文献:

[1] ZANDVOORT M H, VAN HULLEBUSCH E D, FER-MOSO F G, et al. Trace metals in anaerobic granular sludge reactors: bioavailability and dosing strategies[J]. Engineering in Life Sciences, 2006, 6(3):293-301.

[2] SCHERER P, LIPPERT H, WOLFF G. Composition of the major elements and trace elements of 10 methanogenic bacteria determined by inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. Biological Trace Element Research, 1983, 5(3):149-163.

[3] 贾丽娟, 俞芳, 宁平, 等. 温度底物浓度和微量元素对牛粪厌氧发酵产沼气的影 响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22):260-266.

JIA L J, YU F, NING P, et al. The influence of temperature substrate concentration and trace elements on the methane production of cow manure anaerobic fermentation [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(22):260-266.

[4] 沈东升, 贺永华, 冯华军, 等. 农村生活污水埋式无动力厌氧处理技术研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):111-115.

SHEN D S, HE Y H, FENG H J, et al. Research on buried non-dynamic anaerobic treatment technology for rural domestic sewage[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2005, 21(7):111-115.

[5] 王媛媛, 张衍林. 以猪粪为发酵底物厌氧发酵产氢工艺的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9):237-242.

WANG Y Y, ZHAGN Y L. The optimization of anaerobic fermentation hydrogen production process using pig manure as fermentation substrate[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2009, 25(9):237-242.

[6] KENWARD P A, GOLDSTEIN R H, GONZÁLEZ L A, et al. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium: the role of methanogenic archaea[J]. Geobiology, 2009, 7(5):556-565.

[7] AHRING B K, IBRAHIM A A, MLADENOVSKA Z. Effect of temperature increase from 55 to 65 degrees C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure [J]. Water Research, 2001, 35(10):2446.

- [8] 刘荣厚, 郝元元, 武丽娟. 温度条件对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响[J]. 可再生能源, 2006(5): 32-35.
LIU R H, HAO Y Y, WU L J. Effects of temperature conditions on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of pig manure [J]. Renewable Energy Resources, 2006(5): 32-35.
- [9] HARIKISHAN S, SUNG S W. Valuable by-products recovery from cattle wastes using temperature-phased anaerobic digestion process[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2001: 1384-1398.
- [10] CONVERTI A, BORGHI A D, ZILLI M, et al. Anaerobic digestion of the vegetable fraction of municipal refuses: mesophilic versus thermophilic conditions[J]. Bioprocess Engineering, 1999, 21(4): 371-376.
- [11] GANIDI N, TYRREL S, CARTMELL E. The effect of organic loading rate on foam initiation during mesophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(12): 6637-6643.
- [12] 曹杰, 陈广银, 常志州, 等. 有机负荷对秸秆床反应器厌氧生物产沼气的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1200-1206.
CAO J, CHEN G Y, CHANG Z Z, et al. Effect of organic load on biogas from anaerobic biogas production in straw bed reactor [J]. Environmental Science of China, 2014, 34(5): 1200-1206.
- [13] 施悦, 任南琪, 刘春爽, 等. 不同种泥对两相厌氧工艺快速启动的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(8): 1257-1261.
SHI Y, REN N Q, LIU C S, et al. Effect of different kinds of mud on the rapid start-up of two-phase anaerobic process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(8): 1257-1261.
- [14] 鲍立新, 李建政, 昌盛, 等. ABR 处理大豆蛋白废水的效能及微生物群落动态分析[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2206-2213.
BAO L X, LI J Z, CHANG S, et al. Performance of ABR in soybean protein wastewater treatment and dynamic analysis of microbial community[J]. Environmental Sciences, 2008, 29(8): 2206-2213.
- [15] 俞汉青, 秦麟源, 朱锦福, 等. 盾式填料厌氧处理豆制品废水的试验研究[J]. 中国给水排水, 1993(3): 14-17.
YU H Q, QIN L Y, ZHU J F, et al. Experimental research on anaerobic treatment of soybean product wastewater with shield type packing[J]. Water Supply and Drainage in China, 1993(3): 14-17.
- [16] 胡明成, 龙腾锐, 傅卫东, 等. UASB 反应器处理酸性大豆蛋白加工废水[J]. 工业水处理, 2007, 27(12): 28-30.
HU M C, LONG T R, FU W D, et al. UASB reactor treats acidic soy protein processing wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2007, 27(12): 28-30.
- [17] 鹿时雨, 高宝玉, 亓秋波, 等. 中试规模 IC 反应器处理大豆蛋白废水的颗粒污泥培养和启动[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1070-1074.
LU S Y, GAO B Y, YUAN Q B, et al. Pilot scale IC reactor for the treatment and start-up of granular sludge for soybean protein wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1070-1074.
- [18] 郭燕锋, 孔晓英, 刘婉玉, 等. 有机负荷对厨余垃圾常温厌氧发酵产甲烷的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(s1): 96-100.
GUO Y F, KONG X Y, LIU W Y, et al. Effects of organic loading on methane production from anaerobic fermentation of kitchen waste at room temperature[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 27(s1): 96-100.
- [19] 高鹏, 张栋, 贾舒婷, 等. 污水厂污泥厌氧消化产短链脂肪酸研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(9): 2227-2232.
GAO P, ZHANG D, JIA S T, et al. Research progress of short-chain fatty acids produced by sewage sludge anaerobic digestion[J]. Chemical Industry Progress, 2013, 32(9): 2227-2232.
- [20] KABOURIS J C, TEZEL U, PAVLOSTATHIS S G, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of municipal sludge and fat, oil, and grease[J]. Water Environment Research, 2009, 81(5): 476-485.
- [21] GANNOUN H, OTHMAN N B, BOUALLAGUI H, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of olive mill wastewaters and abattoir wastewaters in an up-flow anaerobic filter [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(21): 6737-6743.
- [22] 魏荣荣, 成官文, 罗介均, 等. 不同温度猪粪厌氧发酵甲烷产量和产能实验[J]. 农机化研究, 2010, 32(4): 170-174.
WEI R R, CHENG G W, LUO J J, et al. Anaerobic fermentation of methane production and capacity at different temperature pig manure experiments[J]. Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(4): 170-174.
- [23] CHAE K J, AM J, YIM S K, et al. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(1): 1-6.
- [24] ZHU G F, LI J Z, LIU C X, et al. Simultaneous production of bio-hydrogen and methane from soybean protein processing wastewater treatment using anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. Desalination & Water Treatment, 2015, 53(10): 2675-2685.

Parameter Optimization of Methanogenesis of Soybean Wastewater

TANG Renshi, ZHANG Yanping*, CAI Xiaoyang, WANG Xin

(School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University,
Beijing 100048, China)

Abstract: In order to improve the methane production in the process of soybean wastewater degradation, effects of the trace elements, fermentation temperature, organic loading rate, and sludge concentration on the amount of methane produced by anaerobic fermentation of soybean wastewater were studied by the orthogonal experiment. Meanwhile, the effecting order of the factors and optimal technological conditions were confirmed. The results showed that the factors which had the greatest influence on the methane production were organic loading rate, followed by the addition of trace elements and sludge concentration, and the fermentation temperature had the least effect. The optimized combination of technological conditions was as follows: 1 mg/L Co, fermentation temperature 45 °C, organic loading rate 1.52 kg COD/(m³·d), and the sludge concentration was 30.00 g VSS/L. Under this condition, the cumulative methane production was up to 970 mL, which was increased about 15.10%. While the cumulative methane yield, the methane content in the biogas, and the removal rate of soluble chemical oxygen demand (SCOD) were 344.49 mL/(g SCOD), 84.12%, and 84.00%, respectively.

Keywords: soybean wastewater; anaerobic fermentation; methane production; organic degradation; process optimization

(责任编辑:叶红波)

(上接第91页)

Response Surface Methodology to Optimize Fermentation Process of *Vaccinium uliginosum* L. by Mixed Bacteria

SUI Shuang, WANG Ping*

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus plantarum* and *Acetobacter pasteurianus* HN 1.01 was mixed to ferment *Vaccinium uliginosum* L.. After determining the pH value, protein content, reducing sugar content, total phenols, flavonoids, procyanidins and anthocyanins content, antioxidant capacity including hydroxyl radical scavenging rate, and total antioxidant capacity to obtain the proportion of bacteria. The single factor test was conducted with pH value, protein content, reducing sugar content, total phenolic content, hydroxyl radical scavenging rate and total antioxidant capacity in order to determine the optimum range of fermentation time, inoculation volume, fermentation temperature and initial sugar content. The Box-Benhken center combination test was conducted based on the total phenolic content and hydroxyl radical scavenging rate to optimize the fermentation process. The results showed that under the conditions of fermentation time of 62 h, inoculation volume of 6%, fermentation temperature of 38.5 °C, and initial sugar content of 15.5°Bx, the total phenolic content reached (53.27 ± 0.16) mg/100 mL and hydroxyl radical scavenging rate reached (83.88 ± 0.19)% in ten-fold diluted *Vaccinium uliginosum* L. fermentation liquid, which respectively increased by 56.91% and 34.34% after optimized. The hydroxyl radical scavenging rate was significantly higher than that of the positive control group ($p < 0.01$) and it was about 5 folds higher than that of the 2 mg/mL vitamin C solution. The test was expected to provide guidance for the deep processing of *Vaccinium uliginosum* L..

Keywords: *Vaccinium uliginosum* L.; *Saccharomyces cerevisiae*; *Lactobacillus plantarum*; *Acetobacter pasteurianus* HN 1.01; fermentation; antioxidant activity; response surface methodology

(责任编辑:张逸群)