

## EGSB 反应器处理低浓度猪粪废水的效能研究\*

朱明, 尹芳, 刘健峰, 王昌梅,  
赵兴玲, 吴凯, 柳静, 杨红, 张无敌

(云南师范大学, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为处理低浓度的猪粪废水,采用 EGSB 反应器进行实验研究.结果表明,当猪粪废水进水 COD 浓度为 1 200~1 300 mg/L 时,EGSB 反应器最佳 HRT 为 0.7 d,COD 去除率可达到 80%,平均日产沼气量为 1.33 L,平均甲烷含量可达到 68.5%,池容产气率可达到 0.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),平均能源转化率在 HRT=1 d 时达到最高 68.71%.

**关键词:** EGSB 反应器;猪粪废水;能源转化率 经济效益

**中图分类号:** X703;S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9793(2018)03-0008-06

我国是生猪养殖业大国,2016 年生猪产业产值占畜牧业产值的 43.2%,生猪养殖业支撑了我农村经济的发展,然而生猪养殖业在迅猛发展的同时,生猪养殖与资源环境之间的矛盾日益尖锐<sup>[1-3]</sup>.养猪污水治理难度大,处理费用高,寻找一种低成本环境友好型的养猪废水治理技术,是保证养猪业可持续发展的重要措施<sup>[4]</sup>.厌氧消化技术是目前针对猪粪废水最为高效、节能的处理方法,由于在处理废水的同时得到沼气,已逐渐成为大型养猪场的首选.Boothapy<sup>[5]</sup>的实验结果表明,采用 ABR(折流板反应器)处理猪粪废水,在反应器总体积相同的情况下,五格发酵室的处理能力要高于两格或三格发酵室,甲烷产率可达 0.94~1.46 m<sup>3</sup>/kg. Hasen 等人<sup>[6]</sup>的实验结果表明,CSTR(全混合反应器)系统中温发酵处理生猪粪能够得到 0.188 m<sup>3</sup>/kg 的甲烷产率.为了提高能源转化效率,Murto 等人<sup>[7]</sup>利用 CSTR 共发酵猪粪、工业废弃物、屠宰场废弃物和厨余废弃物,在 OLR 为 2.6 kg/(m<sup>3</sup>·d)、HRT 为 30 d 条件下,

甲烷产率为 0.564 m<sup>3</sup>/kg.

近 20 年来,废水的厌氧消化技术取得了巨大进展,但在处理猪粪废水时仍存在产能效率不高、系统运行不稳定等问题,这是由其特殊的水质特征所决定的.养猪废水主要来源于两个方面:一是生猪自身产生的粪尿;二是清洗猪场所产生的废水,生猪自身生长产生的废水约占养猪废水总量的 10%,而剩下的 90%则来源于清理猪场所产生的废水.这类养猪废水经沉淀过筛之后 COD 浓度较低,只有 1 000~1 500 mg/L 左右;当废水中有机物浓度很低时,反应器底物的浓度低,实际污泥活性远低于最佳值,污泥长期处于饥饿状态;同时底物浓度低还使产气量减少,底物和污泥之间的传质效果较差;因而处理低浓度废水要求污泥的流失量要少,这就对反应器保留污泥的能力有较高的要求.第三代高效厌氧反应器 EGSB(膨胀颗粒污泥床)是在 UASB(上流式厌氧污泥床)基础上发展起来的<sup>[8]</sup>,采用较大的高径比和较快的出水循环,使上升流速大大增加,引起颗粒污泥床膨

\* 收稿日期:2018-04-10

基金项目:云南省新能源重大专项(2015ZB001、2015ZB005)、云南省国际科技特派员(2015IA022)、云南省农村能源工程重点实验室基金(2017KF03)、西南地区可再生能源研究与开发协同创新中心项目(05300205020516009)和农业部洱海流域特大型生物天然气工程试点项目(2015)联合资助。

作者简介:朱明(1981-),男,陕西西安人,博士,主要从事农业工程方面研究。

通信作者:张无敌.E-mail:wootichang@163.com.

胀,使废水和污泥之间传质良好,消除死区.目前EGSB正在研制中,EGSB反应器占地面积小,投资小,处理效率高,因此对其性能评价及效能进行实验研究具有重要的现实意义.

## 1 材料与方 法

### 1.2 方 法

#### 1.2.1 反应器及试验设计

EGSB反应器系统结构如图1所示.

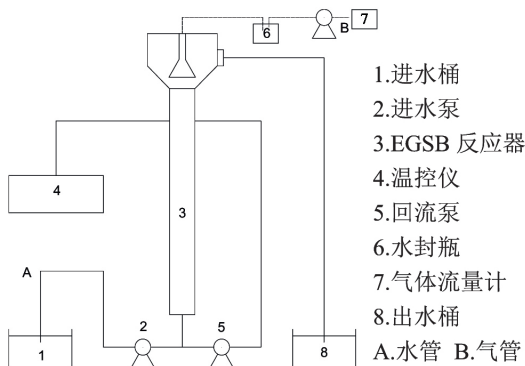


图1 EGSB反应器系统

Fig.1 Schematic diagram of EGSB reactor system

EGSB反应器由圆柱状有机玻璃制成,总容

#### 1.1 材 料

采用猪粪配制成猪粪废水,纱布过滤后,经测定其COD浓度在1 200~1 300 mg/L,TS浓度小于1%.接种物采用实验室长期驯化的猪粪厌氧发酵活性污泥,通过孔径为1 mm的筛网过滤后,经测定TS为9.6%,VS为66.91%.

猪粪原水与配制废水水质情况如表1所示.

表1 猪粪原水与配制废水水质情况

Table 1 Swine manure water quality

水样	pH/d	COD/(mg/L)	BOD/(mg/L)	NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	T-N/(mg/L)
猪粪原水	6-8	1 000-1 500	600-800	600-800	900-1 200
配制废水	6.5-7.5	1 200-1 300	720-780	-	-

积为3 L,有效容积为2.92 L,高径比为11:1(高为77 cm,内径为7 cm).反应器自上而下设置3个直径8 mm的取样口.反应器工作温度保持在室温20 ℃.猪粪废水经蠕动泵以一定流速进入EGSB反应器,通过布液器均匀分配到整个反应器,气、液、固充分接触.混合液通过反应器上部的三相分离器实现气、液、固三相分离.气体经水封后流经湿式气体流量计,通过气柜收集,再通过气相色谱仪测定甲烷含量.液体经过分离之后,再经循环泵以一定比例与原料一起混合进入反应器,以提高反应器内的上升流速,达到充分混合,提高传质以及反应的目的.最后,废液经三相分离器流出,测定其COD含量.污泥膨胀后通过三相分离器仍保留在反应器内,长期驯化形成颗粒污泥.

EGSB反应器运行工况如表2所示.

表2 EGSB反应器运行工况

Table 2 EGSB reactor operating conditions

日期	运行时间/d	进水流量/(L/d)	HRT/d	COD有机负荷/(kg/(m <sup>3</sup> ·d))
2017.07.18-2017.07.25	1-8	1.5	2	0.6
2017.07.26-2017.07.31	9-14	3	1	1.2
2017.08.01-2017.08.06	15-20	4.5	0.7	1.8
2017.08.07-2017.08.13	21-27	6	0.5	2.4

#### 1.2.2 测试方法及计算依据

试验原料总固体(TS)、挥发性固体(VS)采用重量法测定,105 ℃烘干4 h测定TS,再550 ℃灼烧3 h测定VS.反应器进出水pH值采用5.7-8.5的精密pH试纸测定,进出水COD浓度采

用COD max II Online COD Analyzer(HACH)测定,COD去除率为COD降低值与进水COD的比值.产气量采用排水法收集,并用湿式气体流量计进行测定,甲烷含量采用GC9790II型气相色谱仪(FULI)测定,测定条件为:气化室温度

80 ℃、柱箱温度 80 ℃、TCD 温度 120 ℃、载气为纯氮气。COD 产气率为实际日产气量与进水 COD 的比值,池容产气率为实际日产气量与反应器有效体积的比值,能源转化率为实际日产甲烷量与理论日产甲烷量的比值,理论产甲烷量按 0.35 m<sup>3</sup>/kgCOD 计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果

#### 2.1.1 COD 进出水浓度、COD 去除率及 COD 有机负荷随运行时间的变化

整个试验期间,COD 进出水浓度的变化情况及 COD 去除率的结果见图 2。

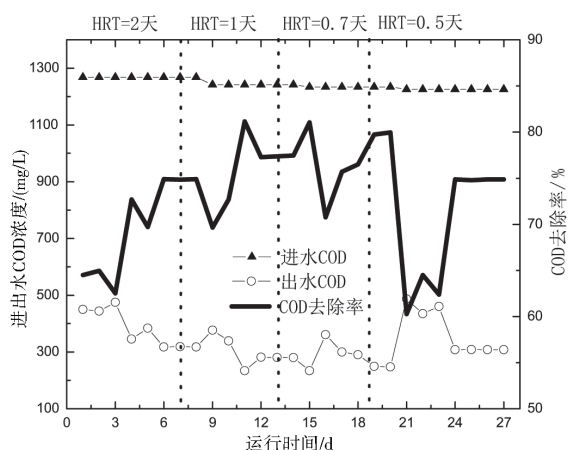


图 2 COD 进出水浓度及 COD 去除率随运行时间的变化曲线

Fig.2 Diagram of COD influent and effluent water concentration and COD removal rate changing with reaction time

由图 2 可以看出,进水 COD 浓度基本稳定在 1 250 mg/L 左右,每次提升负荷(缩短 HRT)之后,出水 COD 浓度会有两三天波动,之后趋向稳定。随着 HRT 的缩短,出水 COD 浓度不断减小,EGSB 反应器处理效率不断提高。当 HRT = 0.7 d 时,出水 COD 浓度达到最低 248 mg/L, COD 去除率达到最高 80%。随着 HRT 的继续缩短,出水 COD 浓度波动之后会升高,COD 去除率开始减小。原因在于,EGSB 反应器随着 HRT 的缩短,上升流速提高,反应器内污泥充分膨胀,加强了与猪粪废水的混合,接触面积增大,强化了传

质过程,微生物充分吸收有机物质,COD 浓度降低。但随着 HRT 的继续缩短,污泥的膨胀程度过高,反应器超过满负荷运行,使得三相分离器负荷增大,出水含有一些颗粒污泥,COD 去除率很快下降,而且在短时间内很难恢复。因此,为保证在低浓度下的去除率,反应器最佳 HRT 为 0.7 d。

整个试验期间,COD 有机负荷的变化情况及 COD 去除率的结果见图 3。

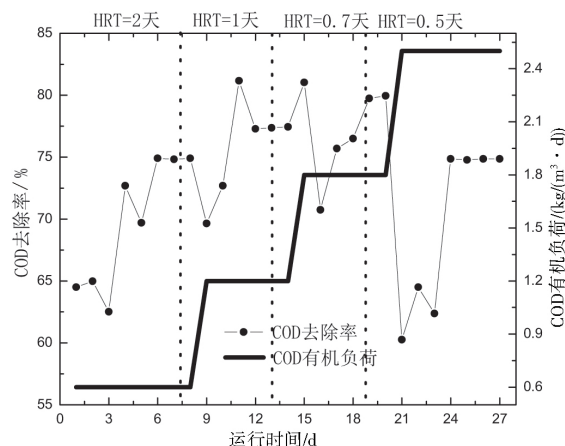


图 3 COD 有机负荷及 COD 去除率随运行时间的变化曲线

Fig.3 Diagram of COD organic loading rate and removal rate changing with reaction time

由图 3 可以看出,EGSB 可以在低浓度低有机负荷下稳定运行,最低负荷为 0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,COD 去除率可达 75%。随着 COD 有机负荷的依次提升,COD 去除率增加。当 COD 有机负荷率达到 1.8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,COD 去除率达到 80%。但是当 COD 有机负荷继续提升,COD 去除率下降。原因在于,在低浓度 1 250 mg/L 的进水浓度下,有机负荷过高,EGSB 反应器受到冲击,反应器处理效率下降。因此在低浓度下采用 EGSB 反应器处理猪粪废水,为保证其高效和稳定性,最高耐受负荷为 1.8 kg/(m<sup>3</sup>·d)。

#### 2.1.2 产气量、甲烷含量及产气率随运行时间的变化

整个试验期间,日产气量和累积产气量以及气体中的甲烷含量见图 4。

由图 4 可以看出,从产气量来看,在 HRT 固定的条件下,日产气量基本稳定。随着 HRT 的不断缩短,日产气量增加,产气速率升高,甲烷含量也不断提高。当 HRT < 0.7 d 时,日产气量减少,

产气速率开始下降,甲烷含量略有减少.日产气量在 10 d 到 20 d 达到最高峰,为 1.4 L/d,此阶段为 HRT=1 d 或 0.7 d 的阶段.甲烷含量基本稳定在 55%以上,最高达到 73%.原因在于,此阶段反应器内部混合充分,传质效果好,在此条件下产甲烷菌活跃,产气量较高,甲烷含量较高.因此,此 EGSB 反应器在低浓度条件下,为保证其产气效果,最佳的 HRT 时间为 1 d 和 0.7 d.

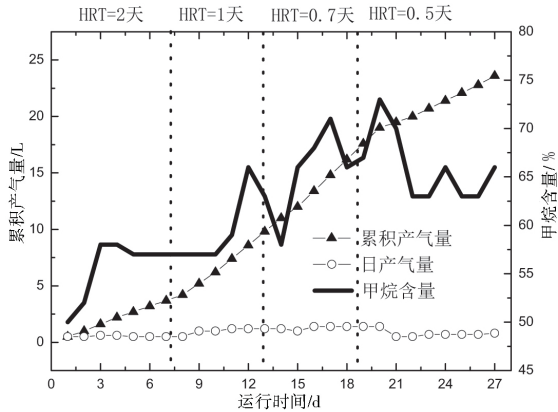


图 4 产气量及甲烷含量随运行时间的变化曲线

Fig.4 Diagram of gas production and methane content changing with reaction time

整个试验期间,COD 产气率和池容产气率的变化情况见图 5.

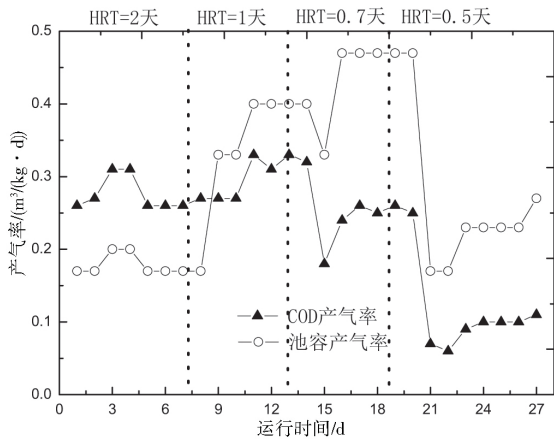


图 5 COD 产气率及池容产气率随运行时间的变化曲线

Fig.5 Diagram of COD gas production rate and volumetric gas production rate changing with reaction time

由图 5 可以看出,COD 产气率和池容产气率在固定 HRT 的条件下基本保持稳定.随着 HRT 的不断缩短,COD 产气率和池容产气率不断增

加.但是 COD 产气率在 HRT=1 d 时达到最高 0.30 m<sup>3</sup>/(kg·d),而池容产气率在 HRT=0.7 d 时达到最高 0.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d).之后随着 HRT 的不断缩短,COD 产气率和池容产气率明显降低.原因在于,反应器随着 HRT 的缩短,内部流动混合加强,有机物的 COD 充分被利用,反应器由于颗粒污泥的充分膨胀其体积也有效被利用.因此,为达到最佳产气率,此 EGSB 反应器在低浓度下处理猪粪废水,可选择 HRT=1 d 或 0.7 d.

### 2.1.3 能源转化率随运行时间的变化

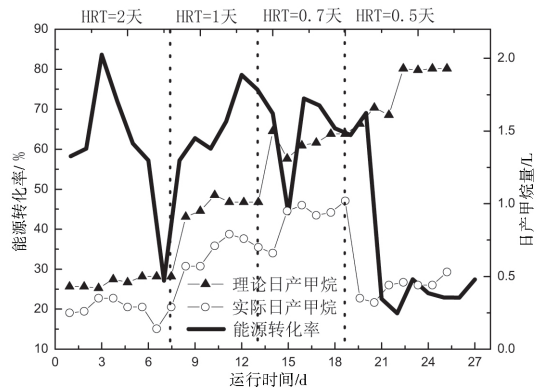


图 6 能源转化率随运行时间的变化曲线

Fig.6 Diagram of energy conversion rate changing with reaction time

由图 6 可以看出,能源转化率波动较大,但是有一定规律.在 HRT≥0.7 d 时,能源转化率基本都大于 55%.但当 HRT<0.7 d 时,能源转化率突然降低低于 30%.能源转化率在运行 3 d 和 12 d 时,分别达到最大值 85%和 80%.原因在于,随着 HRT 的缩短,微生物在反应初期由于不断适应微生物群落,能源转化率不断升高.当达到最佳反应条件时,反应器内的微生物刚好可以把全部的有机物转化为甲烷,这时能源转化率最高,也就是有机负荷达到饱和点.再随着 HRT 的缩短,反应器内的微生物没有足够的能力把所有的有机物转化为甲烷,使得能源转化率降低,出水的相关指标也会随着提高.因此,为保证最佳能源转化率,此 EGSB 反应器在低浓度下处理猪粪废水,可选择 HRT≥0.7 d.

### 2.2 分析与讨论

相关学者也对猪粪废水的厌氧消化进行了研究,大部分的工艺均采用全渣厌氧发酵方式,一部

分过筛或者稀释猪粪废水的处理采用了高效厌氧反应器,表 3 汇总了近年来不同厌氧工艺处理猪粪废水的部分研究结果.

表 3 猪粪废水厌氧处理工艺的负荷以及有机物去除特性  
Table 3 Anaerobic processes treating swine manure in literature

废水类型	反应器	体积 /L	温度 /°C	OLR / $(\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d})$	HRT /d	COD 去除率 /%	甲烷产率 / $(\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d}))$	来源
冲栏废水	发酵罐	300	35	3.02—7.5	2—5	37.4—49.3	0.22—0.36	[9]
生猪粪	ABR	15	35	4—8	14	70—78	0.48—0.71	[6]
生猪粪	CSTR	3	55	—	15—30	—	0.067—0.188	[7]
过筛猪粪	ASBR	42	15—37	1.1—1.2	15	78.9—89.5	0.080—0.266	[10]
冲栏废水	ASBR	12	20—35	0.12	4	73—80	—	[11]
过筛猪粪	UASB	350	35	1.1—5.8	3.5—7	74.0—78.7	0.28—0.33	[12]
冲稀猪粪	UASB	40.4	35	0.76—2.23	2.7	55—80	0.5—2.7	[13]
稀释猪粪	SGBR	10	16—24	2.4—2.9	0.7—1.0	68—88.5	—	[14]
混合猪粪	AnMBR	6	37	1—3	6	>86	—	[15]
猪粪废水	EGSB	3	20	0.6—2.4	0.5—2	75—80	0.2—0.5	本文

由表 3 可以看出,目前规模化养猪场采用现有的厌氧技术都能够有效降解猪粪废水并实现资源化回收.对比不同的厌氧工艺处理猪粪废水的能力和效果,较为传统、常规的厌氧工艺运行成本较低、稳定可靠、处理效果一般、能够一定程度实现资源化回收;而以 ASBR 和 AnMBR 为代表的新型厌氧技术具有有机物降解能力和产气能力都较强、反应器结构紧凑、占地小等优点,其工艺出水 COD 基本可以达到国家排放标准.本文所研究的 EGSB 用于猪粪废水的厌氧处理去除率基本与其他高效厌氧反应器相同,可以达到 75%~80%,并且本试验可处理低 COD 浓度(1 000~1 500 mg/L)的猪粪原水.综上所述,在猪粪废水的厌氧处理中,新型高效厌氧反应器的研究具有一定的实际应用价值.

### 3 结 论

(1)采用 EGSB 反应器处理低浓度猪粪废水是可行的.当猪粪废水进水 COD 浓度为 1 200~1 300 mg/L 时,EGSB 反应器最佳 HRT 为 0.7

d,COD 去除率可达到 80%.在低浓度下采用 EGSB 反应器处理猪粪废水,为保证其高效和稳定性,最高耐受负荷为 1.8  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ .

(2)采用 EGSB 反应器处理低浓度猪粪废水,可以产生沼气.当 HRT=0.7 d 时,产气效果最好,平均日产沼气量为 1.33 L,平均甲烷含量可达到 68.5%.COD 产气率在 HRT=1 d 时达到最高 0.30  $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ,而池容产气率在 HRT=0.7 d 时达到最高 0.5  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ .

(3)采用 EGSB 反应器处理低浓度猪粪废水具有一定的能源转化率,HRT 应大于 0.7 d,能源转化率基本都大于 55%.平均能源转化率在 HRT=1 d 时达到最高 68.71%.本试验中,能源转化率在运行 3 d 和 12 d 时,达到最大值 85%和 80%.

### 参 考 文 献:

[1] 雷贤忠,刘望宏,倪德斌.中国养猪业的发展趋势与战略思考[J].养殖与饲料,2013 (5):1-4.  
[2] 王景成,杨秋凤,周佳萍,等.利用沼气工程实践规模养猪业可持续、循环发展[J].饲料工业,2010,31 (11):52-55.  
[3] 张田,卜美东,耿维.中国畜禽粪便污染现状及产沼

- 潜力[J].生态学杂志,2012,31(5):1 241-1 249.
- [4] 姜超,陈梅雪,魏源送,等.我国集约化养猪废水污染现状与处理工艺研究进展[J].中国猪业,2015(S1):22-31.
- [5] BOOPATHY R. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors[J]. Bioresource Technology, 1998, 64(1): 1-6.
- [6] HANSEN K H, ANGELIDAKI I, AHRIN B K. Improving thermophilic anaerobic digestion of swine manure[J]. Water Research, 1999, 33(8): 1 805-1 810.
- [7] MURTO M, BJÖRNSSON L, MATTIASSON B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70(2): 101-107.
- [8] LETTINGA G. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 1995, 67(1): 3-28.
- [9] HILL D T, BOLTE J P. Methane production from low solid concentration liquid swine waste using conventional anaerobic fermentation[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(3): 241-247.
- [10] MASSÉ D I, MASSE L, CROTEAU F. The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure[J]. Bioresource Technology, 2003, 89(1): 57-62.
- [11] NDEGWA P M, HAMILTON D W, LALMAN J A, et al. Effects of cycle-frequency and temperature on the performance of anaerobic sequencing batch reactors (ASBRs) treating swine waste[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 1 972-1 980.
- [12] SONG M, SHIN S G, HWANG S. Methanogenic population dynamics assessed by real-time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(1): 523-528.
- [13] 赵青玲, 杨世关, 张百良. UASB 处理养猪废水条件下进水浓度对污泥颗粒化的影响[J]. 可再生能源, 2005(5): 35-38.
- [14] LIM S J, FOX P. A kinetic evaluation of anaerobic treatment of swine wastewater at two temperatures in a temperate climate zone[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(4): 3 724-3 729.
- [15] PADMASIR S I, ZHANG J Z, FITCH M, et al. Methanogenic population dynamics and performance of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating swine manure under high shear conditions [J]. Water Research, 2007, 41(1): 134-144.

## Study on the Efficacy of EGSB Reactor to Treat Low Concentration Swine Manure Wastewater

ZHU Ming, YIN Fang, LIU Jian-feng, WANG Chang-mei, ZHAO Xing-ling,

WU Kai, LIU Jing, YANG Hong, ZHANG Wu-di

(Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to deal with low concentration swine manure wastewater, this paper uses EGSB reactor to carry out the experimental research. The results show that, it is feasible to use EGSB reactor to treat low concentration swine manure wastewater. When the influent COD concentration of swine manure wastewater is 1 200—1 300 mg/L, the best HRT in the EGSB reactor is 0.7 day, the COD removal rate can reach 80%, the average biogas production is 1.33 L per day, and the average methane content can reach 68.5%, and the volumetric gas production rate can reach 0.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup> · d). When HRT is 1 day, the average energy conversion rate reaches 68.71%.

**Keywords:** EGSB reactor; Swine manure wastewater; Energy conversion rate; Economic benefit