

不同配比猪粪、小麦秸秆混合厌氧发酵产气特性研究

楚莉莉^{1a,2},冯永忠^{1b,2},李轶冰^{1b,2},杨改河^{1b,2},任广鑫^{1b,2}

(1 西北农林科技大学 a 林学院, b 农学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】研究不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵的产气特性, 为提高小麦秸秆利用率和产气效率提供依据。【方法】选取猪粪、小麦秸秆及其不同配比(干物质质量比 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1) 的混合物为发酵原料, 以沼液为接种物, 研究不同发酵原料厌氧发酵过程中 pH 值、日产气量、累积产气量、气体成分和干物质产气率的变化。【结果】仅以猪粪为原料进行厌氧发酵时, 日产气量的峰值(2 142. 2 mL/d)、累积产气量(70. 36 L) 和干物质产气率(351. 8 mL/g) 明显高于其他 4 种发酵原料; 在 3 种混合发酵原料中, 猪粪与小麦秸秆配比为 3 : 1 时, 其日产气量的峰值(2 011. 7 mL/d)、累积产气量(49. 08 L) 和干物质产气率(245. 4 mL/g) 明显高于其他 2 种混合发酵原料。随着厌氧发酵时间的延长, 猪粪与小麦秸秆及其按不同比例配比时, 所产气体中的甲烷体积分数呈逐渐增加趋势, 在厌氧发酵中后期甲烷体积分数达到 45% 以上; 所产气体中硫化氢的体积分数呈逐渐下降趋势, 其中猪粪所产气体中硫化氢的体积分数较其他处理高。【结论】在厌氧发酵过程中, 合理调控猪粪与小麦秸秆的配比, 既能提高小麦秸秆的产气量, 又能缩短猪粪的产气周期, 降低硫化氢体积分数。

【关键词】 沼气; 混合发酵; 猪粪; 小麦秸秆; 产气效率

【中图分类号】 S216. 4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)02-0185-06

Characteristics of anaerobic digestion of pig dung, wheat straw combination in various ratios

CHU Li-li^{1a,2}, FENG Yong-zhong^{1b,2}, LI Yi-bing^{1b,2},
YANG Gai-he^{1b,2}, REN Guang-xin^{1b,2}

(1 a College of Forestry, b College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The research was to study the biogas production efficiency of pig dung and wheat straw in various ratios to increase the biogas production efficiency of wheat straw. 【Method】The experiment was carried out in controllable constant-temperature fermented equipment, pig dung, wheat straw with a ratio of 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1 (total solid ratio) were used as fermentation materials, and the fermented slurry was used as inoculum. The pH, daily biogas production, cumulative biogas yield, biogas composition and the biogas production rate of total solid of 5 materials during anaerobic digestion were tested. 【Result】When pig dung was used as fermentation material, the maximal daily biogas production was 2 142. 2 mL/d, cumulative biogas yield 70. 36 L and the biogas production of total solid 351. 8 mL/g, which was significantly better than the other four fermented materials. Among the 3 mixed materials, 3 : 1 was the best, maximal daily biogas production being 2 011. 7 mL/d, cumulative gas production 49. 08 L and the gas production of dry matter 245. 4 mL/g. As the digestion time increased, the methane volume fraction produced

* [收稿日期] 2010-07-08

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD89B16); 陕西省“13115”重大科技计划项目(2009ZDKG-03); 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项(2010ZDKG-06); 国家自然科学基金项目(30700482)

[作者简介] 楚莉莉(1981—), 女, 河南郑州人, 在读博士, 主要从事生态农业技术集成研究。E-mail: chulili123@nwsuaf.edu.cn

[通信作者] 杨改河(1957—), 男, 陕西耀县人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态农业与循环农业技术研究。

E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

by pig dung, wheat straw and the different mixed materials increased, in late anaerobic digestion the methane volume fraction was above 45%. The H₂S volume fraction decreased, the H₂S volume fraction produced by pig dung was higher than other materials. 【Conclusion】 During anaerobic digestion, reasonable ratio of pig manure and wheat straw is used as fermentation materials. Both can increase the biogas production efficiency of wheat straw, shorten the anaerobic digestion cycle and decrease the H₂S volume fraction of pig dung.

Key words: biogas; co-digestion; pig dung; wheat straw; biogas production efficiency

据统计,我国每年生产的农作物秸秆约为 7 亿 t^[1],除少量秸秆被利用外,大多数秸秆被堆放或直接焚烧,造成了严重的环境污染问题。另外,我国每年集约化养殖生产的猪粪便达 2.6 亿 t^[2],这些粪便未经处理直接排放,成为影响土壤、水体的污染源,严重影响饮用水源的安全。如何解决秸秆和粪便对环境的污染问题,已成为目前的研究热点。利用秸秆和粪便进行厌氧发酵,既可产生能源,又能净化环境,目前已被广泛采用。众多学者对秸秆的厌氧发酵进行研究发现^[3-6],秸秆可作为厌氧发酵的底物,但由于其碳氮比较高,且含有较多的大分子物质,导致产气效率较低。如何调节秸秆的碳氮比,成为秸秆发酵研究关键,将秸秆与粪便混合进行厌氧发酵可有效调节其碳氮比。Weiland^[7]提出,混合厌氧发酵以及优化混合原料组合,是厌氧消化技术的重要发展方向。Lehtomäki 等^[8]采用牛粪与不同作物秸秆混合发酵,发现当混入 30% 的作物秸秆时,单位容积甲烷产量较牛粪单独发酵时提高 16%~65%。刘战广等^[9]研究了猪粪与稻秆的混合发酵,发现调节粪草比可以从原料转化速率方面提高发酵效率,但并不能提高原料的产气潜力。陈广银等^[10]研究了在中温条件下猪粪与稻秆的混合发酵,发现添加猪粪可以大幅度提高发酵液中 NO₃-N 含量,将稻秆与猪粪混合发酵完全可行。李轶冰等^[11]研究了温

度对粪便与玉米秸秆混合发酵的影响,发现随着温度的升高,发酵周期缩短。郭欧燕等^[12]研究了温度对鸡粪与秸秆混合发酵的影响,发现随温度的升高混合原料的产气速率增加,最大产气速率出现时间提前,但厌氧发酵时间并没有缩短,累积产气量也未增加。虽然国内外关于粪便和秸秆混合厌氧发酵的报道很多,但对猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵的研究很少。经实地监测发现,农村户用沼气池在产气较高月份的池温为 20~30 ℃,但国内外的厌氧发酵所设温度多为 35 和 55 ℃^[13-15],不符合农村户用沼气池的实际情况。本试验选取猪粪和小麦秸秆为原料,研究了 2 种单一原料及其不同配比混合原料在 30 ℃恒温条件下的厌氧发酵过程,以期对秸秆厌氧发酵效率的提高提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

秸秆:将小麦秸秆粉碎后,用沼液浸湿,充分搅拌后密闭放置 7 d,每 2 d 搅拌 1 次;猪粪:猪粪密闭放置 7 d,每 2 d 搅拌 1 次;接种物:接种物由沼液和鲜牛粪按 4:1 体积比混合后自然发酵 7 d,每 2 d 搅拌 1 次。

预处理后原料和接种物的理化特性见表 1。

表 1 猪粪、小麦秸秆和接种物的基本性状

Table 1 Basic characteristics of pig dung, wheat straw and inoculum

原料 Material	碳含量/(g·kg ⁻¹) Carbon content	氮含量/(g·kg ⁻¹) Nitrogen content	碳氮比 C/N ration	总固体含量/(g·kg ⁻¹) Total solid content
猪粪 Pig dung	344.4	23.3	14.8	212.0
小麦秸秆 Wheat straw	310.5	13.6	22.8	108.0
接种物 Inoculum	351.3	17.4	20.2	99.0

1.2 试验装置

试验采用陕西省循环农业工程技术研究中心实验室自行设置的恒温厌氧发酵装置,主要由发酵装置、集气装置及控温装置 3 部分组成。发酵过程中用 1 kW 电热丝加热,用智能温度控制仪(PC-1000)和继电器控制、显示发酵温度,温度控制在

(30±1) ℃。

1.3 试验方案

发酵原料的总固体含量为 80 g/kg,在 5 L 塑料壶里装入 2 kg 搅拌均匀的发酵原料(按照表 2 配比)和 500 g 的接种物,然后置于 30 ℃恒温水槽内。试验处理编号为 1~5 号,其中猪粪与小麦秸秆配比

(干物质质量比)为 1 : 1,2 : 1,3 : 1 的混合发酵处 编号为 4、5。
理编号为 1、2、3,单独用猪粪或小麦秸秆发酵处理

表 2 发酵混合原料中猪粪与小麦秸秆的配比
Table 2 Ratios of pig dung and wheat straw in combination materials

处理编号 Treatment No.	猪粪/g Pig dung	小麦秸秆/g Wheat straw	自来水/g Water	接种物/g Inoculum	猪粪与小麦秸秆配比 Various ratios of pig dung and wheat straw
1	345.5	691.6	953.9	500.0	1 : 1
2	472.7	461.1	1 066.2	500.0	2 : 1
3	531.8	345.8	1 122.4	500.0	3 : 1
4	709.0	0.0	1 291.0	500.0	
5	0.0	1 383.3	616.7	500.0	

注:表中的各物质质量按湿质量计。
Note:The weight is wet weight.

1.4 测定项目及方法

总固体含量用称重法测定,将样品放在(105±5)℃烘箱中烘至恒质量,然后称质量;总碳含量用K₂Cr₂O₇-外热源法测定^[16];总氮含量用凯氏定氮仪(KDN-08C)测定;产气量用排水法测定;气体成分用沼气气体成分分析仪(ZS-2型)测定;pH值用智能pH计(pHS-3CT型)测定。

2 结果与分析

2.1 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵的产气情况

2.1.1 日产气量 图 1 显示,随着时间的延长,各处理的日产气量均呈先增加后降低最后趋于稳定的变化趋势;处理 1~5 的日产气量达到产气高峰的时间有所不同,分别在第 11,8,6,21,7 天达最高峰,峰值为 1 656.7,1 705.0,2 011.7,2 142.2,1 284.4 mL/d;处理 4 的产气高峰比其他处理要晚 10~15

d,产气高峰之后其日产气量明显高于其他原料。
2.1.2 累积产气量 图 2 显示,在发酵条件相同的情况下,随着时间的延长,处理 1 的最终累积产气量为 37.86 L,0~20 和 0~43 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 56%和 90%;处理 2 的最终累积产气量为 38.2 L,0~20 和 0~41 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 65%和 90%;处理 3 在 0~28 d 的累积产气量明显大于其他 4 种处理,最终累积产气量为 49.08 L,0~20 和 0~30 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 70%和 90%;处理 4 从 29 d 开始累积产气量高于其他 4 种处理,最终累积产气量为 70.36 L,0~20 和 0~47 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 41%和 90%;处理 5 的最终累积产气量为 28.21 L,0~20 和 0~49 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 59%和 90%。由以上分析可知,5 种处理的最终累积产气量为处理 4>处理 3>处理 2>处理 1>处理 5。

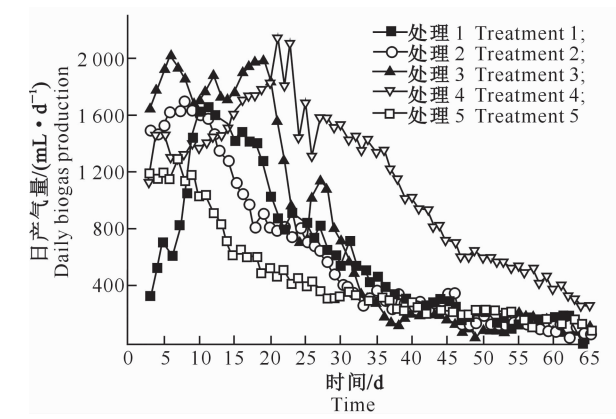


图 1 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵日产气量的变化
Fig. 1 Daily biogas productions of different co-digestion with pig dung and wheat straw

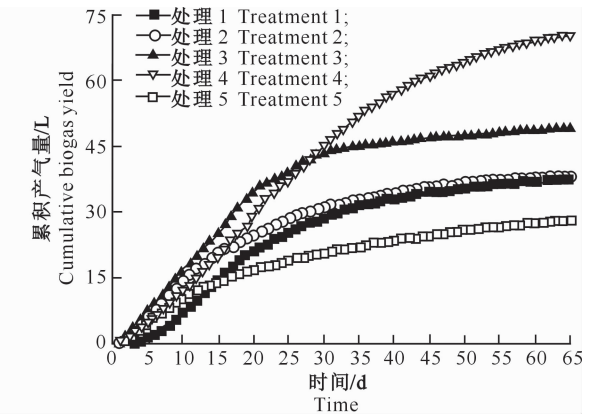


图 2 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵累积产气量的变化
Fig. 2 Cumulative biogas yields of different co-digestion with pig dung and wheat straw

2.1.3 干物质产气率 图 3 显示,处理 1~5 的干物质产气率分别为 189.3,191.2,245.4,351.8,141.0 mL/g,其中处理 4 的干物质产气率最大,比处理 1、2、3 和 5 分别高 85.8%,84.0%,43.4%,149.4%。处理 1 和 2 的干物质产气率差异较小。

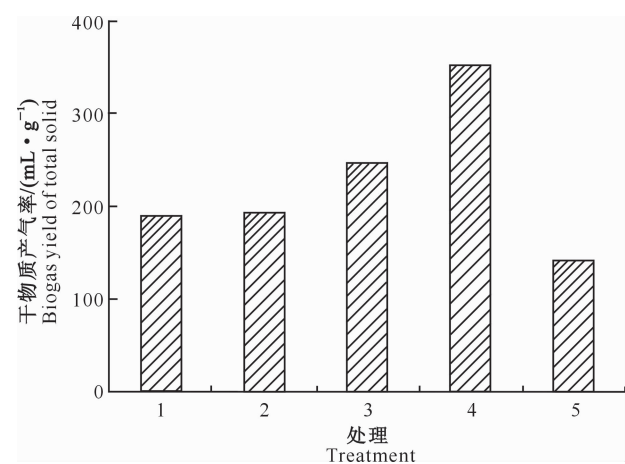


图 3 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵干物质产气率

Fig. 3 Total solid biogas yields of different co-digestion with pig dung and wheat straw

2.2 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵所产气体的成分

2.2.1 甲烷 图 4 显示,厌氧发酵前 8 d,5 种处

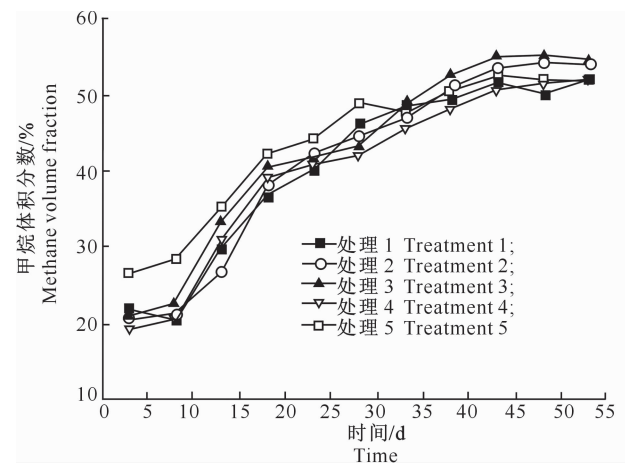


图 4 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵所产甲烷体积分数的变化

Fig. 4 Methane volume fraction of different co-digestion with pig dung and wheat straw

2.3 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵过程中料液 pH 值的变化

图 6 显示,5 种处理的 pH 值在发酵第 3 天时相差很大,但均在发酵适宜的 pH 范围内,其中处理 4 的 pH 值最低为 6.56,明显低于其他 4 种处理;第 8

理所产气体中甲烷体积分数较小,均在 30% 以下,其中处理 5 的甲烷体积分数明显高于其他 4 种处理;随着厌氧发酵的进行,各处理所产气体中甲烷体积分数呈明显的升高趋势,各处理之间的甲烷体积分数差异减小,第 33 天时,各处理所产气中体甲烷体积分数均达到 45% 以上,之后各处理所产气体中甲烷体积分数一直维持在 45~55%,变化比较稳定。

2.2.2 硫化氢 图 5 显示,厌氧发酵的第 3 天,处理 4 即猪粪所产气体中的硫化氢体积分数最高为 0.02%,处理 5 所产气体中的硫化氢体积分数最低,为 0.013%;发酵进行到第 8 天,处理 2、3 和 4 的硫化氢体积分数有所增加,而处理 1 和 5 的硫化氢体积分数有所下降;发酵进行到第 13 天,除处理 4 的硫化氢体积分数继续上升到最大值 0.023% 外,其他 4 种处理的硫化氢体积分数都呈下降趋势;此后,随着发酵的进行,各处理所产硫化氢的体积分数均逐步下降,第 43 天时,处理 5 的硫化氢体积分数先降到 0%;第 48 天,处理 1 和 2 的硫化氢体积分数也降到了 0%;第 53 天时,除处理 4 的硫化氢体积分数为 0.001% 外,其他 4 种处理的硫化氢体积分数均为 0%。在整个发酵过程中,处理 4 的硫化氢体积分数一直高于其他 4 种处理。

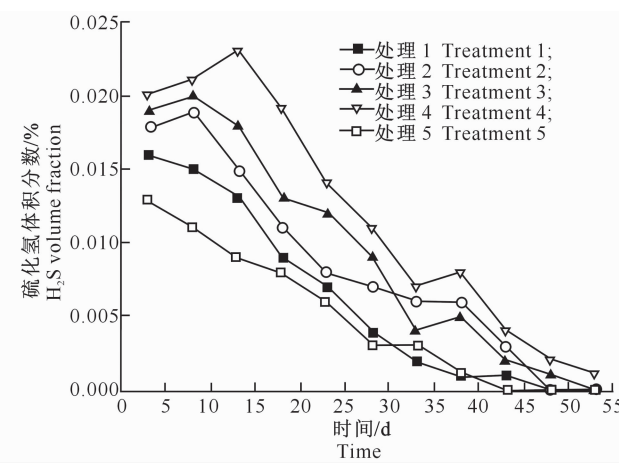


图 5 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵所产硫化氢体积分数的变化

Fig. 5 H₂S volume fraction of different co-digestion with pig dung and wheat straw

天时,除处理 5 的 pH 值有所下降外,其他 4 种处理的 pH 值都呈上升趋势;之后随着厌氧发酵时间的延长,各处理的 pH 值均缓慢上升,到第 23 天时,各处理的 pH 值均在 7 左右;到发酵后期(53 d)时,各处理的 pH 值相差不大,在 7.10 左右波动。

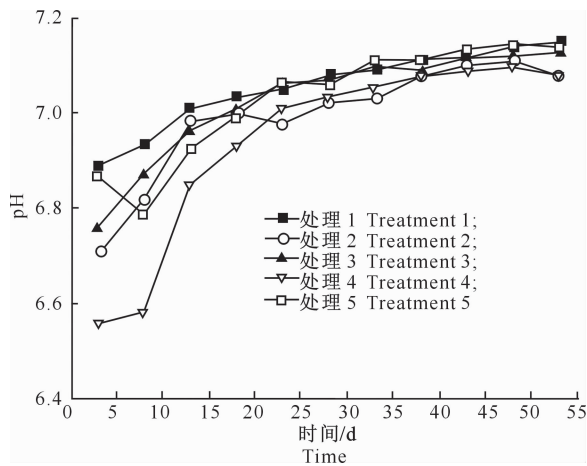


图6 不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵过程中料液pH值的变化

Fig. 6 pH of different co-digestion with pig dung and wheat straw

3 讨论

小麦秸秆中含有较多的高分子物质如纤维素、半纤维素、果胶和木质素等,这些物质的分解比较慢,碳氮比较高。Hansen等^[17]研究表明,沼气发酵细菌的碳需求是氮需求量的20~30倍,厌氧发酵的最佳碳氮比为20:1~30:1。经过预处理,小麦秸秆中复杂的高分子有机物质在厌氧发酵过程中被降解成简单的小分子物质,使碳氮比下降到22.8:1,为甲烷菌提供了适宜的环境和原料,提高了产气量,使产气高峰提前,故本试验中各种含有小麦秸秆发酵原料的产气高峰均出现较早。

在实际生产中,产气量达到总产气量的90%以上时,即可认为厌氧消化完成^[18]。猪粪与小麦秸秆配比分别为1:1,2:1,3:1时,发酵周期分别为43,41和30d;猪粪、秸秆单一原料的发酵周期分别为47,49d,可知混合原料的发酵周期比单一原料缩短了6~19d。

刘战广等^[9]研究发现,猪粪的干物质产气率为250 mL/g,与本试验结果(351.8 mL/g)相差较大;同时他们还发现,猪粪与水稻秸秆混合发酵的干物质产气率低于猪粪、大于稻秆,这与本试验结果一致。

所产气体中的成分是反映发酵工艺参数的重要因素^[19],发酵原料及厌氧发酵的环境不同,各气体成分也不同。本研究中,猪粪所产气体中的硫化氢体积分数一直高于其他原料,这可能是因为猪粪含硫量较高所致,故单独用猪粪作为发酵原料时,应考虑如何降低所产气体中的硫化氢体积分数。Ischi

等^[13]研究发现,棉花废弃物所产沼气中的甲烷体积分数为60%,本试验与之相比略低。

适宜的pH是沼气微生物生长的必要条件,沼气池中产甲烷细菌适宜的pH值为6.5~8.5^[20]。李杰等^[21]研究发现,甲烷菌对pH值较为敏感,适宜的pH值为6.8~7.8,当pH值低于6.8时,甲烷菌活性受到抑制。本研究中,猪粪的产气高峰出现的时间比其他4种发酵原料晚,这是因为猪粪经过7d的预处理,刚开始产气时pH值仅为6.56,与接种物的pH值(7.03)相差较大,甲烷菌活性受到抑制;接种物经过一段时间的适应后,随着猪粪pH值的升高,甲烷菌活性增强,产气量也呈现增长趋势。

由于条件限制,本研究只进行了猪粪与小麦秸秆的混合配比试验,其他粪便与小麦秸秆的混合配比试验还有待于进一步研究。

4 结论

(1)以猪粪为原料进行厌氧发酵的日产气量最大,为2142.2 mL/d;不同配比猪粪与小麦秸秆混合厌氧发酵过程中,配比为3:1处理的最大日产气量最高,为2011.7 mL/d;小麦秸秆处理的最大日产气量最低,仅为1284.4 mL/d。在猪粪中加入小麦秸秆可使产气高峰提前,发酵周期缩短。

(2)猪粪的干物质产气率最大,为351.8 mL/g,是小麦秸秆的2.5倍。猪粪与小麦秸秆配比为3:1时的干物质产气率最大,为245.4 mL/g。

(3)5种处理厌氧发酵所产气体中的甲烷体积分数在厌氧发酵中后期都达到45%以上,所产硫化氢体积分数总体呈下降趋势,单独用猪粪厌氧发酵所产气体中的硫化氢体积分数一直高于其他4种发酵原料。

参考文献

- [1] 张雪松,朱建良. 秸秆的利用与深加工 [J]. 化工时刊, 2004 (5): 1-5.
Zhang X S, Zhu J L. The utility and further processing of straws [J]. Chemical Industry Times, 2004 (5): 1-5. (in Chinese)
- [2] 单计光,谭支良,汤少勋. 养殖业排泄物对环境的潜在影响与生态管理 [J]. 重庆环境科学, 2003, 25(12): 90-92.
Shan J G, Tan Z L, Tang S X. Potential impact on the environment and ecological management of aquaculture waste [J]. Chongqing Environmental Science, 2003, 25 (12): 90-92. (in Chinese)
- [3] 陈小华,朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 179-283.

- Chen X H, Zhu H G. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 279-283. (in Chinese)
- [4] 张 望, 李秀金, 庞云芝, 等. 稻草中温干式厌氧发酵产甲烷的中试研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 2075-2079.
Zhang W, Li X J, Pang Y Z, et al. A pilot study on mesophilic dry anaerobic digestion of rice straw [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 2075-2079. (in Chinese)
- [5] 南艳艳, 邹 华, 严 群, 等. 秸秆厌氧发酵产沼气的初步研究 [J]. 食品与生物技术学报, 2007, 27(6): 64-68.
Nan Y Y, Zou H, Yan Q, et al. Elemental study on the biogas anaerobic fermentation with crops straw [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2007, 27(6): 64-68. (in Chinese)
- [6] 宁桂兴, 申 欢, 文一波, 等. 秸秆厌氧消化试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1279-1283.
Ning G X, Shen H, Wen Y B, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1279-1283. (in Chinese)
- [7] Weiland P. Anaerobic waste digestion in Germany-status and recent developments [J]. Biodegradation, 2000, 11(6): 415-421.
- [8] Lehtomäki A, Huttunen S, Rinjala J A. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production; Effect of crop to manure ratio [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2007, 51: 591-609.
- [9] 刘战广, 朱洪光, 王 彪, 等. 粪草比对干式厌氧发酵产沼气效果的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 196-200.
Liu Z G, Zhu H G, Wang B, et al. Effect of ratios of manure to crop on dry anaerobic digestion for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 196-200. (in Chinese)
- [10] 陈广银, 郑 正, 邹星星, 等. 稻草与猪粪混合厌氧消化特性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 185-188.
Chen G Y, Zheng Z, Zou X X, et al. Anaerobic co-digestion of rice straw and swine feces [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 185-188. (in Chinese)
- [11] 李铁冰, 张翠丽, 杨改河, 等. 温度对粪便与玉米秸秆混合厌氧消化产生特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 66-72.
Li Y B, Zhang C L, Yang G H, et al. Effect of temperature on the characteristics of anaerobic digestion of mixture of dung and crop straw [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(1): 66-72. (in Chinese)
- [12] 郭欧燕, 李铁冰, 白洁瑞, 等. 温度对鸡粪与秸秆混合原料厌氧发酵产气特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 138-143.
Guo O Y, Li Y B, Bai J R, et al. Effect of temperature on gasification characteristics of mixture of chicken feces and crop residue [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(6): 138-143. (in Chinese)
- [13] Isci A, Demirel G N. Biogas production potential from cotton wastes [J]. Renewable Energy, 2007, 32(5): 750-757.
- [14] Romano R T, Zhang R H, Teter S, et al. The effect of enzyme addition on anaerobic digestion of Jose Tall Wheat Grass [J]. Bioresource Technology, 2009, 100: 4564-4571.
- [15] 王寿权, 严 群, 缪恒锋, 等. 接种比例对猪粪与蓝藻混合发酵产甲烷的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 172-176.
Wang S Q, Yan Q, Miao H F, et al. Effect of inoculum to substrate ratios on methane production in mixed anaerobic digestion of pig manure and blue-green algae [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 172-176. (in Chinese)
- [16] 中国科学院成都生物研究所. 厌氧发酵常规分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Science. Routine analysis of anaerobic fermentation [M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [17] Hansen R C, Hoitink H A J. Poultry manure composting; design guidelines for ammonia [C]//ASAE meeting presentation paper. USA: American Society of Agricultural Engineers, 1989.
- [18] 吴满昌, 孙可伟, 李如燕, 等. 不同反应温度的城市生活垃圾厌氧发酵研究 [J]. 化学与生物工程, 2005(9): 28-30.
Wu M C, Sun K W, Li R Y, et al. Study on performance of anaerobic digestion for treating municipal solid waste at different temperature [J]. Chemistry & Bioengineering, 2005(9): 28-30. (in Chinese)
- [19] 卢旭珍. 动植物生产废弃物厌氧消化工艺研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
Lu X Z. Study on anaerobic digestion process of organic waste of animals and vegetation [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese)
- [20] 张全国. 沼气技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Zhang Q G. Technology and application of biogas [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [21] 李 杰, 李文哲, 许洪伟, 等. 牛粪湿发厌氧消化规律及载体影响的研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 186-191.
Li J, Li W Z, Xu H W, et al. Rules of anaerobic digestion of cow manure by wet method and the effect of carriers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 186-191. (in Chinese)