

牲畜粪便与秸秆混合的厌氧发酵效果及影响因素分析

王晓娇^{1,2}, 杨改河^{1,2*}, 冯永忠^{1,2}, 任广鑫^{1,2}, 韩新辉^{1,2}, 宋籽霖²

(1.西北农林科技大学农学院, 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:为进一步明确混合原料厌氧发酵效果及影响因素,以牛粪、鸡粪和麦秆为发酵原料,按总固体质量比分别设定了单一原料、两种及3种原料混合发酵组,分别在20℃和35℃下进行厌氧消化试验,研究了原料不同比例混合、温度、C/N比和pH值对厌氧发酵效果的影响。结果表明,原料混合发酵可显著提高总产气量、TS利用率和TS产气率;牛粪、鸡粪和麦秆3种原料混合后发酵效果显著好于单一原料以及牛粪与麦秆、鸡粪与麦秆两种原料混合的发酵效果。中温发酵效果显著好于低温发酵;牛粪、鸡粪与麦秆混合厌氧发酵的最适C/N比为25.64~27.54;混合原料发酵的pH值变化平稳且更容易维持在发酵适宜pH范围内。原料混合、温度、C/N比和pH值对厌氧发酵均有影响。

关键词:混合;厌氧发酵;温度;C/N比;pH值

中图分类号:S216.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2594-08

Anaerobic Co-digestion Effects of Manure and Straw and Analysis of Influencing Factors

WANG Xiao-jiao^{1,2}, YANG Gai-he^{1,2*}, FENG Yong-zhong^{1,2}, REN Guang-xin^{1,2}, HAN Xin-hui^{1,2}, SONG Zi-lin²

(1.College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shannxi Province, Yangling 712100,China)

Abstract: In order to investigate the effects of anaerobic co-digestion and related influences, selected raw materials, cow dung, chicken manure and straw, were divided into groups with single and mixture of two or three kinds of materials according to the proportion of total solid concentration. The experiments were conducted at 20℃ and 30℃, and the effects of mixture, temperature, C/N ratio, pH and on anaerobic co-digestion were studied. The results indicated that anaerobic co-digestion could significantly improve the total gas volume, the utilization ratio and efficiency of TS after fermentation; and the effects of co-digestion of three types of raw materials—cow dung, chicken manure and straw was significantly better than those of the single digestion and co-digestion of two kinds of materials. The effect of co-digestion at mesophilic temperature was greatly better than that at cryophilic temperature; the C/N ratio and pH of the mixed raw materials were accommodated into a feasible scope to improve the effects of co-digestion; the optimal C/N ratio of three types of raw materials was 25.64~27.54; the change of the pH value of the mixed raw materials in the co-digestion was stable and it was easier to maintain in optimum pH range during fermentation. Mixture, temperature, C/N ratio and pH were all major factors to determine co-digestion.

Keywords: mixture; anaerobic digestion; temperature; C/N ratio; pH

厌氧发酵是指畜禽粪便、秸秆、垃圾等有机物质在厌氧条件下,通过各类微生物的分解代谢作用产生沼气的过程。近年来,厌氧发酵技术发展迅速,已经成

为农村畜禽粪便和农作物秸秆资源化利用的有效途径。作为一种有效的废物资源化利用方式,其对减轻环境污染,解决能源短缺问题都具有重要的意义。提高原料发酵效率是农业废弃物厌氧发酵处理中首要的问题,由于发酵原料本身营养特性、结构等方面的局限性,单一原料发酵效率的提高受到很大的限制^[1];同时,受种养规模制约,单一原料供应量不能满足正常发酵而导致经济效益低下的问题也日益突出。

两种原料混合发酵可提高厌氧消化效率。王永成^[2]

收稿日期:2011-05-05

基金项目:陕西“13115”重大专项(2010ZDKG-06);农业部农村能源综合建设项目专项(2011-65);陕西省自然科学基金(2009JM3004)

作者简介:王晓娇(1984—),女,宁夏银川人,在读博士,主要从事生物质能与循环农业技术研究。E-mail:xjw1023@hotmail.com

* 通讯作者:杨改河 E-mail:ygh@nwsuaf.edu.cn

研究了 25 ℃下鸡粪和猪粪以不同比例混合的厌氧消化特性,结果表明,猪粪与鸡粪 2:1 混合可提高厌氧反应器中 pH 值、沼气产量和 COD 去除率;刘战广等^[3]研究了 35 ℃下粪草比对干式厌氧发酵产沼气效果的影响,发现用稻草和猪粪混合发酵产气高峰出现时间较它们单独发酵产气高峰出现时间提前了 11~15 d,产气峰值高出 85~265 mL;Wang 等^[4]研究结果表明,在 55 ℃连续反应体系中,向 1 t 猪粪中添加 4.6 kg 麦秆的厌氧发酵甲烷产量比猪粪单独发酵时提高 10%;Somayaji 和 Khanna^[5]研究发现向牛粪中分别添加 100%稻秆和 40%麦秆时,日产气量由 176 L·kg⁻¹ TS 提高到 331 L·kg⁻¹ TS 和 194 L·kg⁻¹ TS。但迄今为止,对于混合原料的厌氧发酵特性研究都只停留在两种原料的混合,对 3 种及其以上原料混合的发酵研究报告还比较少见。

本试验以牛粪、鸡粪和麦秆为发酵原料,分别设置了单一原料、粪秆两种原料混合以及粪粪秆 3 种原料混合的厌氧发酵试验,系统研究了温度、C/N 比及 pH 对牛粪、鸡粪与麦秆混合的厌氧发酵产气速率、累积产气量、干物质利用率和干物质产气率的影响,比较了多种原料混合厌氧发酵效果,并对影响原料混合厌氧发酵效果的各个因素进行了全面分析,以期为多物料混合厌氧发酵技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 发酵原料与接种物及预处理

发酵原料:牛粪、鸡粪、小麦秸秆均取自附近沼气示范村崔西沟村。麦秆粉碎成 3~5 cm,用水和沼液浸湿后装入 125 L 塑料桶内密封堆沤 5 d 以加速秸秆纤维素结构的降解,新鲜牛粪、新鲜鸡粪直接装入 125 L 塑料桶内,密封堆沤 5~7 d,每 2 d 搅拌 1 次。

接种物:从崔西沟村农户家产气良好的沼气池中取沼液,用牛粪与沼液体积比为 1:10 混合后进行常温密封驯化,驯化时间为 6 d。

1.2 试验装置

本研究所用试验装置为陕西省循环农业工程技术研究中心实验室自行设置的控温性恒温厌氧发酵装置(图 1)。主要由发酵装置、集气装置及控温装置组成,发酵瓶选用 5 L 的塑料壶,集气装置选用 1 000 mL 的三角瓶和 1 000 mL 的量筒,壶口和瓶口均用适宜大小的橡胶塞密封,装置间用玻璃管和橡胶管连接。将连接好的发酵装置放置于 1 000 W 电热丝水浴加热的水槽内,用智能温度控制仪(PC-1000)和继电器控

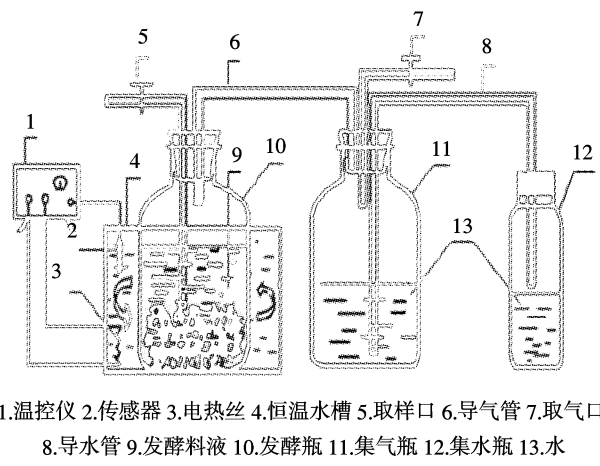


图 1 厌氧发酵装置(可控恒温)
Figure 1 Controlled and constant temperature anaerobic fermentation device

制和显示发酵温度,温度波动范围为±1 ℃。

1.3 试验设计

本试验发酵原料为牛粪、鸡粪和小麦秸秆,按各原料总固体质量比例设 9 个处理组(表 1),保持发酵料液总固体浓度为 8%。将 2 000 g 搅拌均匀的发酵料液和 500 g 接种物分别装入 5 L 的塑料壶里进行发酵。试验设置在 20 ℃和 35 ℃两个温度下进行,每组设 3 个重复。试验过程中各发酵壶同时加料并采用排水集气法每日定时测量产气量。

表 1 原料配比及原料初始指标						
Table 1 The ratio of different materials and initial index						
处理	配比/%			C/N	TS/%	pH
	牛粪:鸡粪:麦秆(质量比)					
T1	100	0	0	23.9:1	8.21	7.71
T2	0	100	0	10.2:1	7.98	6.58
T3	0	0	100	46.2:1	8.05	8.23
T4	67	0	33	31.3:1	8.07	7.86
T5	54	13	33	29.5:1	7.98	7.43
T6	40	27	33	27.6:1	8.11	7.58
T7	27	40	33	25.8:1	8.08	7.22
T8	13	54	33	23.9:1	8.09	7.02
T9	0	67	33	22.1:1	7.86	6.92

1.4 测定项目和方法

- (1)总固体(total solid, TS): 又称干物质,指发酵原料除去水分以后剩下的物质。将装有发酵原料的铝盒放入 105 ℃烘箱内烘至恒重后测定^[6]。
- (2)挥发性固体(volatile solid, VS): 采用灼烧法。
- (3)产气速率(biogas production rate): 即日产气

量,采用排水集气法测定,每日 9:00 用量筒测量 1 次水的体积(产气高峰期每日测 2 次,在当日 21:00 加测 1 次)。

(4)pH 值:智能 pH 计(pHs-3CT)型,每 5 d 测定 1 次。

(5)C/N:C 以 VS 估算, $C=0.47VS$ [7];N 用凯氏定氮仪(KDN-08C)测定。

2 结果与分析

2.1 各处理组厌氧发酵过程中产气速率的变化

20 ℃和 35 ℃发酵条件下,各混合处理组原料都能在较短时间内启动发酵并正常产气。发酵初期,各组产气速率相差不大,随发酵进行,各组产气速率均经历先增大后减小的过程,但不同组间产气高峰出现

时间及高峰值存在差别。

由图 2(A)可以看出,在 20 ℃恒温条件下,T4 最早出现产气高峰(正常产气后的第 10 d),峰值为 $740 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$;T1 在第 12 d 达到产气高峰,峰值为 $980 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$;T3、T5、T6、T7 和 T8 均在第 15~17 d 附近出现产气高峰,峰值分别为 500、710、810、990 $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $780 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$;T2 和 T9 的峰值来的最晚,均在第 20 d 达到产气高峰,峰值分别为 $720 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $790 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$ 。各组在为期 50 d 的发酵过程中产气速率变化趋势显著,产气峰值明显,产气期集中在第 9~23 d,其平均累积产气量占总累积产气量的 45.1%。由图 2(B)可以看出,35 ℃恒温条件下,各处理组发酵比 20 ℃下启动更快,产气高峰更为明显,主要集中在第 8~12 d,峰值在 $1400 \sim 1710 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间;产气期集中在第 3~24

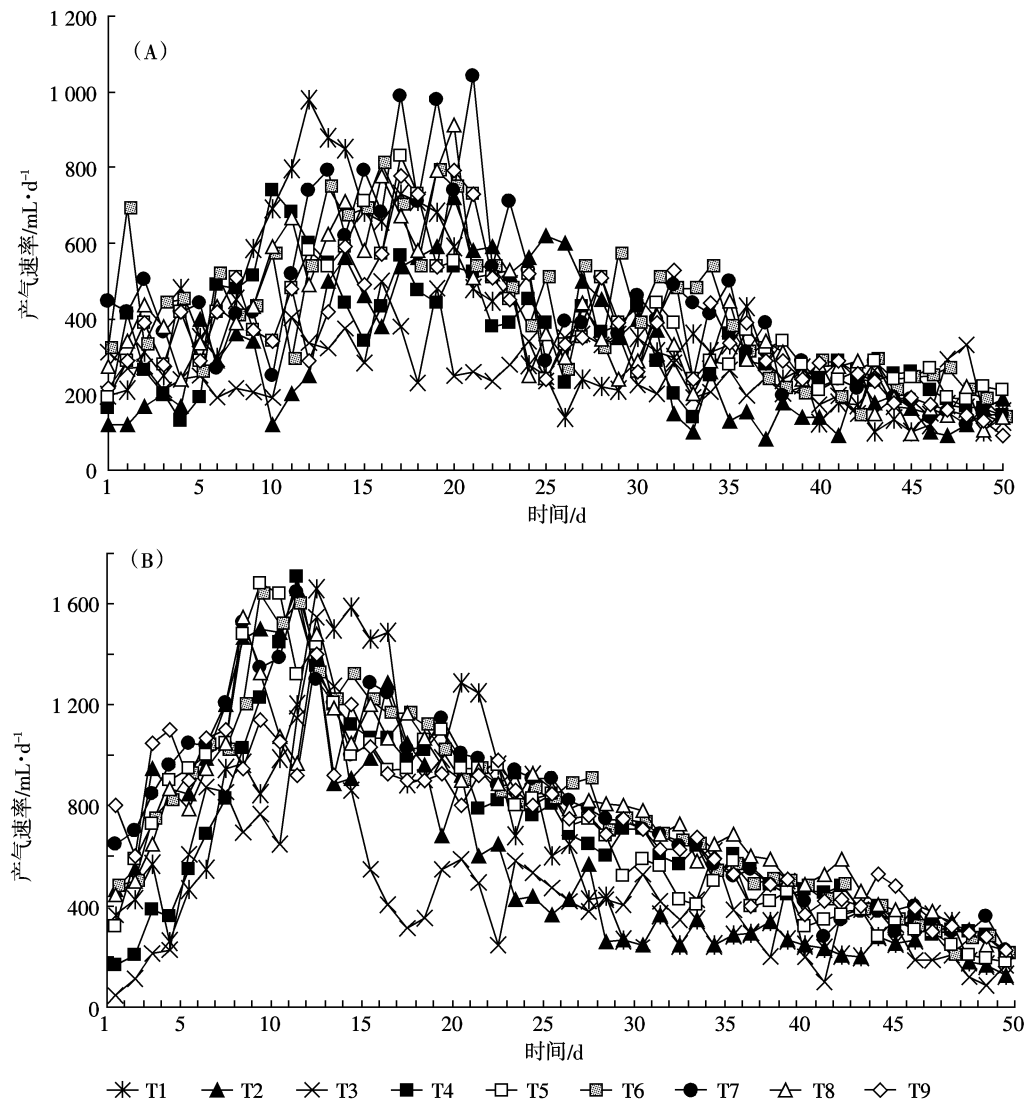


图 2 20 ℃(A)和 35 ℃(B)下各处理组厌氧发酵过程中产气速率变化

Figure 2 Changes of biogas production rate during anaerobic digestion in 20 °C(A) and 35 °C(B)

d,其平均累积产气量占总累积产气量的 62.8%。

20 ℃低温发酵条件下,鸡粪发酵产气速率低,达到产气高峰所需时间最长;而原料混合发酵时,随鸡粪所占比例的增加,达到产气高峰的时间也变长,这可能由于低温发酵条件下鸡粪易酸败,抑制了厌氧发酵正常运行,但鸡粪丰富的营养又为发酵提供了一定的有利条件,使得高峰值呈先增大后减小的趋势,说明混合处理可以充分利用单一原料发酵优势,并在一定程度上弥补其缺陷。35 ℃中温发酵条件下,各处理组产气高峰出现时间及产气高峰值差异不大,但产气速率比 20 ℃下有显著提高,说明温度升高显著提高了微生物的活性,发酵原料得到了更充分的利用。

2.2 混合组与单一原料组发酵结束时组分降解及产气效果比较

由表 2 可以看出,除 20 ℃低温发酵条件下,T4 和 T9 总产气量低于 T1(纯牛粪组)外,其他混合原料组总产气量均高于单一原料组。20 ℃和 35 ℃下,T4 至 T9 混合原料组平均总产气量比 T1 至 T3 组平均值分别高 24.2%和 32.1%,而 T5 至 T8 组平均总产气量比 T4、T9 组分别高 18.2%、14.1%和 19.2%、9.1%。各混合组的理论总产气量为按 3 种原料单一发酵时总产气量及原料混合比例计算得来,20 ℃和 35 ℃下,混合组实际总产气量的平均值分别比理论总产气量平均值高 24.1%和 32.0%。

原料发酵前后 TS 的变化反映了其被厌氧微生物利用的程度。20 ℃低温及 35 ℃中温发酵下,除 T4 的 TS 利用率低于 T1 和 T2 外,其他混合原料组 TS 利用率均显著高于单一原料组。20 ℃和 35 ℃下,T4~T9 混合原料组平均 TS 利用率比 T1~T3 组平均值分别高 13.0%和 9.5%,而 T5~T8 组平均 TS 利用率与 T4、T9

组间无显著差异($P>0.05$)。

TS 产气率是原料总产气量与 TS 利用率的比值。除 20 ℃下,T1 的 TS 产气率高于各混合组外,其他混合原料组 TS 产气率均高于单一原料组。20 ℃和 35 ℃下,T4~T9 混合原料组平均 TS 产气率比 T1~T3 组平均值分别高 9.3%和 20.1%,而 T5~T8 组 TS 产气率比 T4、T9 组分别高 6.2%、9.6%和 10.0%、0.2%。

以上结果表明,原料混合发酵效果比原料单一发酵有显著提高,3 种原料混合发酵效果比两种原料混合有显著提高($P<0.05$)。原料混合后 TS 利用效率也显著提高,其原因可能是原料混合后微生物菌群种类互补,且混合使发酵环境更适宜微生物生长和繁殖。

2.3 温度对混合原料厌氧发酵效果的影响

温度是影响厌氧生物处理的重要工艺参数,其主要是通过通过对厌氧微生物细胞内某些酶的活性的影响而影响微生物的生长速率和微生物对基质的代谢速率。一般根据微生物对温度的适应性,将沼气发酵划分为 3 个发酵区:即常温发酵区 10~26 ℃;中温发酵区 28~38 ℃,最适温度为 35 ℃;高温发酵区 46~60 ℃^[8]。由表 2 可以看出,原料中温厌氧发酵效果显著优于低温发酵($P<0.05$)。T1~T3 处理组 35 ℃下平均总产气量、TS 利用率及 TS 产气率分别比 20 ℃下提高 44.0%、20.1%和 31.7%,而对 T4~T9 混合组间进行比较,也分别提高 47.3%、17.0%和 38.6%。由此说明,温度是影响原料混合发酵效果的重要因素。

2.4 C/N 比对混合原料厌氧发酵效果的影响

发酵原料的 C/N 比,是指原料中有机碳素和氮素含量的比例关系。碳是厌氧消化微生物所需能量的重要来源,它主要用于组成微生物细胞结构;氮是微生物合成蛋白质的必需成分,所以原料的碳氮比是影响

表 2 发酵结束时总产气量、TS 利用率和 TS 产气率

Table 2 Total gas volume, the utilization ratio and efficiency of TS after fermentation

处理	实际总产气量/mL		理论总产气量/mL		TS 利用率/%		TS 产气率/mL·g ⁻¹	
	20 ℃	35 ℃	20 ℃	35 ℃	20 ℃	35 ℃	20 ℃	35 ℃
T1	18 850	31 125	18 850	31 125	35.56	42.56	268.7	370.8
T2	15 580	30 615	15 580	30 615	35.89	43.26	217.6	354.7
T3	13 065	23 055	13 065	23 055	31.58	36.88	205.6	310.6
T4	17 445	32 665	16 940	28 461	35.51	42.15	243.5	384.1
T5	19 425	36 270	16 515	28 395	36.28	44.56	268.4	408.0
T6	22 215	38 995	16 058	28 324	41.77	46.69	262.3	411.9
T7	21 475	41 895	15 632	28 257	41.45	47.12	256.5	440.2
T8	19 345	38 530	15 175	28 186	38.71	44.89	247.1	424.4
T9	18 075	35 670	14 750	28 120	39.15	43.19	235.0	420.3

生物转化的重要因素之一。研究表明,不同原料混合发酵可以通过调节 C/N 平衡而促进厌氧消化反应^[9-10]。本试验通过调节 3 种发酵原料的比例实现了各混合原料处理组不同的 C/N 比(表 1)。T4~T9 组混合发酵试验结果(图 3)表明,20℃低温和 35℃中温发酵条件下,随 C/N 比增大,总产气量、TS 利用率和 TS 产气率均呈现先增大后减小的趋势。通过二次多项式逐步回归分析得出,20℃和 35℃下,混合原料的最适 C/N 比为 26.61 和 26.06 时,可获得最大总产气量 21 557 mL 和 40 439 mL;混合原料的最适 C/N 比为 25.64 和

26.45 时,TS 利用率最大,分别为 40.85%和 46.78%;混合原料的最适 C/N 比为 27.54 和 25.02 时,TS 产气率最大,分别为 263.22 mL·g⁻¹ 和 431.07 mL·g⁻¹。由此可以得出,牛粪、鸡粪与麦秆混合厌氧发酵的最适 C/N 比为 25.64~27.54。一般认为,物料厌氧发酵的 C/N 比在 25~30 之间最好。如果 C/N 比超出了这一范围,微生物便会努力氧化多余的碳,导致处理的时间增加及有机碳转化效率的降低;如果比值过小,系统内会形成铵盐的积累,从而危害产甲烷菌,抑制了消化过程的进行^[11]。因而,本试验结果说明,不同原料混合厌

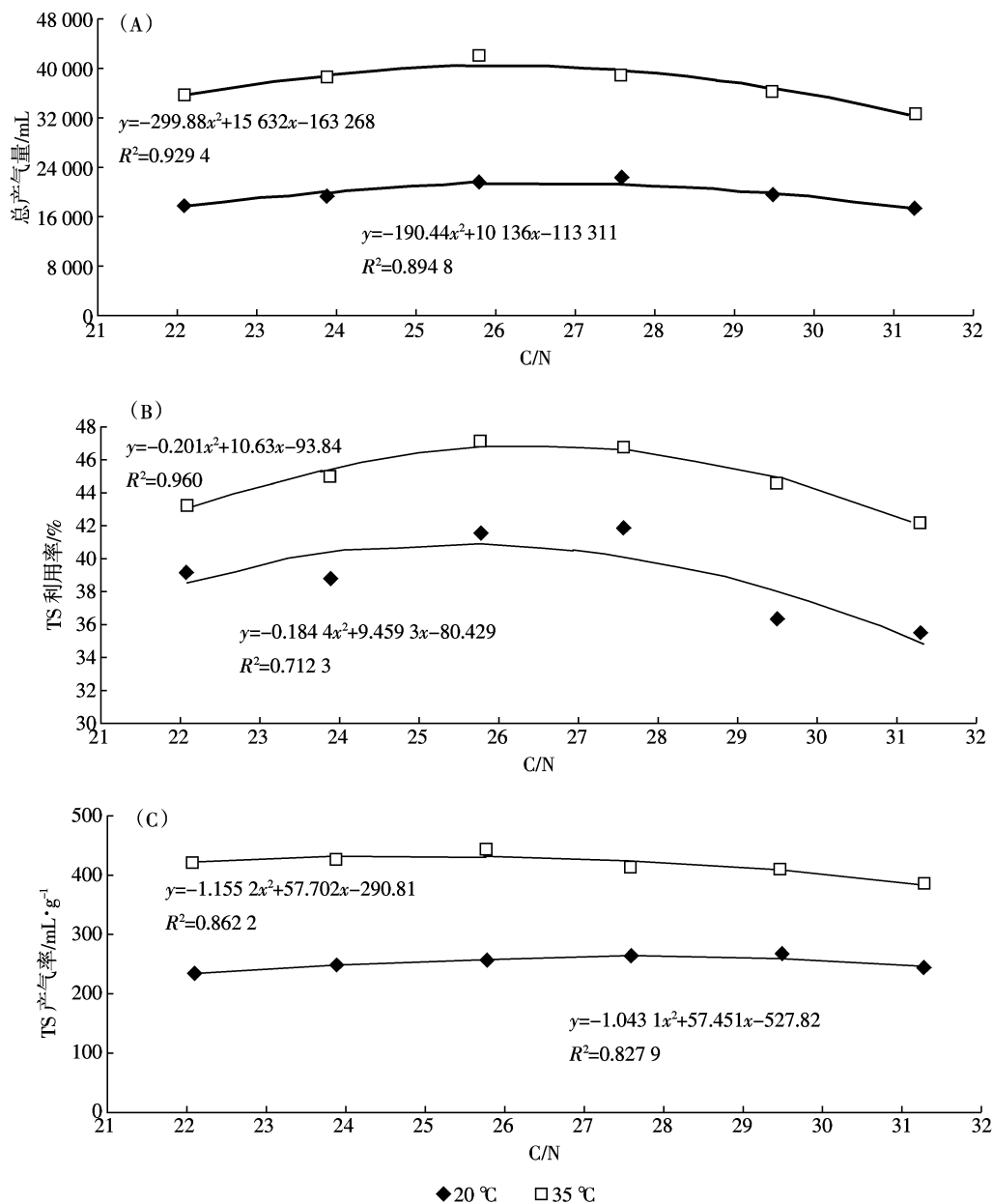


图3 C/N比与总产气量、TS利用率和TS产气率的关系

Figure 3 Relationships between total biogas yield and the utilization ratio and efficiency of TS

氧发酵主要是通过调节其 C/N 比实现发酵效果的显著提升。

2.5 pH 值的变化及其对厌氧发酵效果的影响

在厌氧消化处理废弃物过程中, 厌氧系统的 pH 值也是影响微生物活性的主要因素, 其会影响产气效率、消化程度等处理效果。甲烷菌最佳生长 pH 范围在 6.8~7.2 之间, pH 低于 6.6 时甲烷菌活性会受到显著抑制^[12]。由图 4 可以看出, 不论在 20 ℃低温还是 35 ℃中温发酵条件下, 产甲烷阶段, 混合原料发酵组 T4~T9 的 pH 值都能够相对稳定地维持在 6.5~7.2 范围内, 这为产甲烷菌提供了良好的生长环境; 而单一原料组, 如 20 ℃下 T2、T3 及 35 ℃下 T2 均很大程度上偏离了最适 pH 范围, 这是因为厌氧系统的 pH 值与原料 C/N 比有很大关系。20 ℃下, 纯鸡粪(T2)厌氧消化容易酸败, 其原因是鸡粪中含有较多的尿酸, 且 C/N 较低不利于产甲烷菌的生长, 造成 VFA 的积累, 导致较低的 pH, 而低 pH 抑制了甲烷菌的生长, 导致

发酵过程中产气率较低; 麦秆 C/N 比高, 单独发酵时(T3)氮素供应不足, 会使产甲烷菌的降解能力减弱, 降低消化液的缓冲能力, 造成有机酸的积累, pH 值降低。35 ℃下, 纯鸡粪(T2)可正常发酵, 但因鸡粪氮素含量高, 胺盐容易积累, 造成 pH 值升高, 抑制消化进程。当牛粪、鸡粪和麦秆混合发酵时, 适宜的 C/N 比使得厌氧系统的 pH 值保持在产甲烷菌生长的合适范围内, 因而原料混合发酵利于提高发酵效果。

3 讨论

原料混合厌氧发酵是指将两种或多种发酵底物混合后同时消化以提高生物转化率以及甲烷产量的技术, 其主要通过改善营养平衡, 降低发酵过程中有毒化合物的毒害作用以及改善发酵底物流变学特性而提高发酵效果^[13-15]。诸多研究表明, 不同发酵原料以一定比例混合后的发酵效果较单一原料发酵效果有显著提高^[16-18]。本试验中, 粪秆比例恒为 2:1, 各混

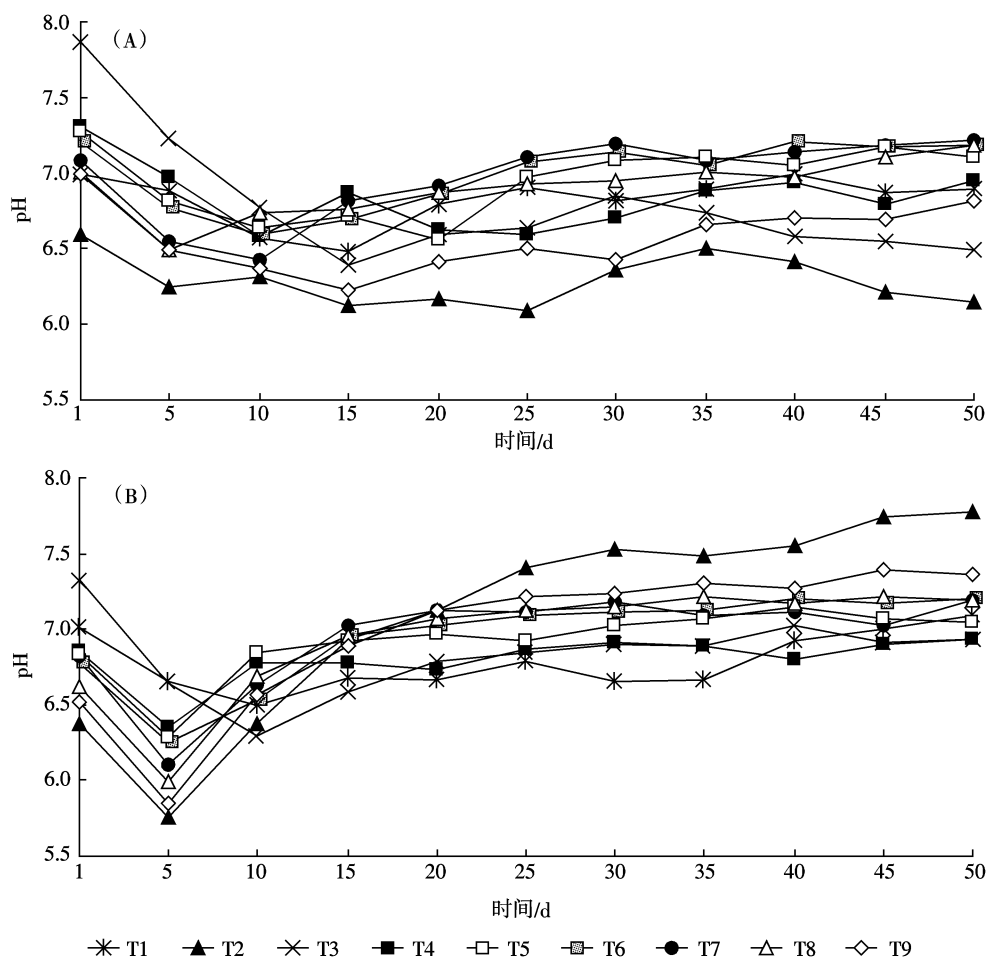


图 4 20 ℃(A)和 35 ℃(B)下各处理组厌氧发酵过程中 pH 的变化

Figure 4 pH changes during anaerobic digestion in 20 °C(A) and 35 °C(B)

合组发酵效果显著优于单一原料组,而随混料中鸡粪所占比例的增加,总产气量、TS利用率及TS产气率均呈先增大后减小的趋势,说明牛粪、鸡粪与麦秆3种原料混合较单一原料及两种原料混合的发酵效果更好。

秸秆中的纤维素和淀粉是细菌的碳素营养,牲畜粪便中的含氮物质则是细菌的氮素营养。秸秆具有很高的C/N比,可以为牲畜粪便提供充足的碳源。在鸡粪和牛粪中添加麦秆可以调节C/N比至适宜的范围。Hills^[19]在牛粪中添加葡萄糖使得C/N比达到25:1时获得了最大甲烷产量。Wu^[20]分别向猪粪中添加玉米秆、燕麦秆和小麦秆使C/N比达到20:1,甲烷产量比对照分别提高了11.4、8.45倍和6.12倍。因而,粪便与秸秆混合以调节C/N比是提高原料混合厌氧发酵效果的理论依据。

鸡粪营养物质含量丰富,降解效率高,但C/N比不适合微生物的繁殖代谢,且其在发酵过程中易酸败,影响其降解与转化;牛粪中因粗纤维含量较丰富,营养物质较少,降解效率低,但牛粪自身的C/N比适合微生物的繁殖代谢,且发酵过程中pH值变化平稳(图4),甲烷的生物转化效率高^[21]。所以用牛粪与鸡粪混合,不但可以提高鸡粪的C/N比,还可以稳定厌氧系统pH值,同时补充牛粪在发酵过程中所需养分,提高原料降解效率。这也揭示了试验中牛粪、鸡粪与麦秆3种原料混合发酵效果比牛粪与麦秆、鸡粪与麦秆两种原料混合发酵效果好的原因。

由此可见,原料混合发酵不仅可以弥补单一原料的发酵缺陷,还可以实现发酵原料间的优势互补,从而提高发酵效果。

4 结论

(1)原料混合发酵可显著提高总产气量、TS利用率和TS产气率。牛粪、鸡粪和麦秆3种原料在一定比例下混合后发酵效果显著好于单一原料以及牛粪与麦秆、鸡粪与麦秆两种原料混合的发酵效果,混料厌氧发酵技术是提高沼气发酵效果的有效方法。

(2)温度、C/N比、pH值是影响沼气发酵的重要因素。中温发酵效果显著高于低温发酵;牛粪、鸡粪与麦秆混合厌氧发酵的最适C/N比为25.64~27.54;混合原料发酵较单一原料发酵可更好的维持厌氧系统中适宜、稳定的pH值。混料厌氧发酵通过对不同原料混合比例的调配而对这些影响因素起到了直接的调节作用,进而影响了发酵效果。

参考文献:

- [1] 楚莉莉. 不同原料及配比厌氧发酵产气效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学农学院, 2008.
CHU Li-li. The anaerobic fermentation biogas production effect of different organic materials and its proportion[D]. Yangling: College of Agronomy, Northwest A & F University, 2008.
- [2] 王永成, 李杰, 许宏伟. 猪鸡粪便及其不同混合比例厌氧处理性能的研究[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(7): 79-83.
WANG Yong-cheng, LI Jie, XU Hong-wei. Study on performance of anaerobic treatment of pig and chicken manure in different proportion [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(7): 79-83.
- [3] 刘战广, 朱洪光, 王彪, 等. 粪草比对于干式厌氧发酵产沼气的效果的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 130-134.
LIU Zhan-guang, ZHU Hong-guang, WANG Biao, 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): 130-134.
- [4] Wang G, Gavala H N, Skiadas I V, et al. Wet explosion of wheat straw and co-digestion with swine manure: Effect on the methane productivity [J]. *Waste Management*, 2009, 29: 2830-2835.
- [5] Somayaji D, Khanna S. Biomethanation of rice and wheat straw [J]. *Microbiol Biotechnol*, 1994, 10: 521-523.
- [6] 朱洪光, 陈小华, 唐集兴, 等. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 201-204.
ZHU Hong-guang, CHEN Xiao-hua, TANG Ji-xing, et al. Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 201-204.
- [7] 张翠丽, 杨改河, 卜东升, 等. 温度对秸秆厌氧消化产气量及发酵周期影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 2069-2074.
ZHANG Cui-li, YANG Gai-he, BO Dong-sheng, et al. Effect of temperature on biogas production and fermentation period length from the anaerobic digestion of crop residue [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 2069-2074.
- [8] Vavlin V A, Lokshina L Y, Ritov S V, et al. Description of two-steps kinetics in methane formation during psychrophilic H_2/CO_2 and mesophilic glucose conversion [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71: 195-209.
- [9] Mshandete A, Kivaisi A, Rubindamayugi M, et al. Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(1): 19-24.
- [10] Parawira W, Murto M, Zvauya R, et al. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves [J]. *Renewable Energy*, 2004, 29: 1811-1823.
- [11] 张碧波, 曾光明, 张盼月, 等. 高温厌氧消化处理城市邮寄垃圾的正交试验研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 15(4): 87-89.
ZHANG Bi-bo, ZENG Guang-ming, ZHANG Pan-yue, et al. A study of thermophilic digestion of municipal solid waste [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2002, 15(4): 87-89.
- [12] Mosey F E, Fernandes X A. Patterns of hydrogen in biogas from the anaerobic-digestion of milk-sugars [J]. *Water Science and Technology*,

- 1989, 21:187-196.
- [13] Ahring BK, Angelidaki I, Johansen K. Anaerobic treatment of manure together with industrial waste[J]. *Water Science Technology*, 1992, 25: 211-218.
- [14] Mata-Alvarez J, Mace S, Llabre's P. Anaerobic digestion of organic solid wastes: An overview of research achievements and perspectives[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74:3-16.
- [15] Murto M, Bjornsson L, Mattiasson B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70:101-107.
- [16] Panichnumsin P, Nopharatana A, Ahring B, et al. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure[J]. *Biomass Bioenergy*, 2010, 34:1117-1124.
- [17] Ferreira L, Duarte E, Silva C, et al. Fruit wastes bioconversion for anaerobic co-digestion with pig manure: Process development for the recycling in decentralized farm scale plants[R]/Proceedings of the International Conference Progress in Biogas. Stuttgart, Germany:135-140.
- [18] Fountoulakis M S, Drakopoulou S Terzakis, et al. Potential for methane production from typical Mediterranean agro-industrial [J]. *Biomass Bioenergy*, 2008, 32:155-161.
- [19] Hills D J. Effects of carbon-nitrogen ratio on anaerobic-digestion of dairy manure[J]. *Agricultural Wastes*, 1979, 1:267-278.
- [20] Wu X, Yao W Y, Zhu J, et al. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:4042-4047.
- [21] 许洪伟. 不同温度牛鸡混合粪厌氧发酵性能的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
- XU Hong-wei. The study of anaerobic fermentation efficiency of cow and chicken manure in different temperature[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007.

欢迎订阅 2012 年

《农业环境科学学报》

《农业环境科学学报》是由农业部主管、农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊, 列于被引频次最高的中国科技期刊 100 名之内并入编《中国学术期刊(光盘版)》。本刊还被国外多家著名检索机构收录, 如美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ), 美国《剑桥科学文摘社网站: 水系统、水科学与渔业文摘、环境工程、水资源文摘及环境科学与污染管理》等 7 种国际检索系统列为来源期刊。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果, 包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊, 每月 20 日出版, 大 16 开, 224 页, 每本定价 40.00 元, 全年定价 480.00 元。国内外公开发行, 全国各地邮局征订, 邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订, 可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外, 编辑部存有 2000 年以前的各卷合订本, 欢迎选购。

编辑部地址: 天津市南开区复康路 31 号

邮编: 300191

电话: (022)23674336

传真: (022)23674336

电子信箱: caep@vip.163.com

网址: <http://www.aes.org.cn>