

蚓粪与玉米秸混合厌氧消化实验

陈广银, 郑正*, 邹星星, 方彩霞, 罗艳

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 在中温 ($35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) 条件下, 考察了玉米秸不同 TS 负荷单独发酵和与蚓粪混合发酵对玉米秸厌氧消化过程的影响。结果表明, 玉米秸单独发酵时, 单位 TS 产气量随 TS 负荷的增加先增加后降低, 以 TS 负荷为 4.80% 的最大, 单位 TS 甲烷产量为 217.60 mL/g。当 TS 负荷为 6.00% 时, 发酵前期出现酸化, pH 最低为 5.10。混合发酵提高了微生物的活性, 增强了系统的缓冲能力, 避免了发酵过程可能出现的酸化, 玉米秸 TS 产气量提高了 4.42% ~ 58.61%, 但对甲烷含量的影响不大, 且对碱度的提高并无促进作用; 当蚓粪与玉米秸混合比例为 2:3 时, 玉米秸的 TS 产气量最高, 达 410.30 mL/g, 甲烷含量为 63.21%; 厌氧微生物可在一定程度上破坏玉米秸纤维素的结晶区, 混合发酵促进了微生物对纤维素结晶区的破坏, 以蚓粪与玉米秸混合比例为 2:3 时处理的效果最好, 破坏率达 29.36%。

关键词: 玉米秸; 蚓粪; 有机负荷; 混合发酵

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)02-0520-06

Anaerobic Co-digestion of Corn Stalk and Vermicompost

CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, ZOU Xing-xing, FANG Caixia, LUO Yan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract The characteristics of corn stalk digested alone at different total solid (TS) loading rates and co-digestion of various proportions of corn stalk and vermicompost were investigated by batch model at $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. The organic loading rates (OLRs) studied were in the range of 1.2%–6.0% TS and increasing proportions of vermicompost from 20% to 80% TS. A maximum methane yield of corn stalk digested alone was 217.60 mL/g obtained at the TS loading rate of 4.8%. However, when the TS loading rate was 6.0%, the anaerobic system was acidified and the lowest pH value was 5.10 obtained on day 4 and the biogas productivity decreased. Furthermore, co-digestion of vermicompost and corn stalk in varying proportions were investigated at constant of 6.0% TS. Co-digestion with vermicompost improved the biodegradability of corn stalk and the methane yield was improved by 4.42%–58.61%, and led to higher pH values, higher volatile fatty acids (VFAs) concentration and lower alkalinity content compared with corn stalk digested alone. The maximum biogas yield and methane yield of 410.30 mL/g and 259.35 mL/g were obtained for 40% vermicompost and 60% corn stalk respectively. Compared with corn stalk digested alone, co-digested with vermicompost didn't affect methane content and the fermentation type, but promoted the destruction of crystalline of cellulose and the highest destruction rate was 29.36% for 40% vermicompost and 60% corn stalk. Therefore, adding vermicompost was beneficial for the decomposition and increasing the biotransformation rate of corn stalk.

Key words corn stalk; vermicompost; organic loading rate; anaerobic co-digestion

在各种可开发利用的新能源中, 生物质能是比较安全稳定的能源, 也是目前国家重点鼓励的新能源领域^[1]。特别是农作物秸秆, 据联合国环境规划署 (UNEP) 报道, 世界上种植的各类谷物每年可提供秸秆 17 亿 t, 我国每年大概产生 7 亿 t 各类农作物秸秆^[2], 其中玉米秸产量达 1.99 亿 t^[3]。将玉米秸厌氧发酵制沼气, 国内外学者在这方面进行了大量研究^[4~6]。玉米秸单独发酵存在单位干物质产气率低、发酵周期长、原料来源受季节影响以及消化液肥效低等问题, 很多学者将目光转向秸秆与其它有机物混合厌氧消化研究上^[7~9], 但国内这方面的研究还不多。

蚓粪是蚯蚓新陈代谢产生的排泄物, 富含多种

养分, 目前已被广泛用于土壤的改良培肥和作物增产。其中, 蚓粪作为有机肥在生产上的应用最为普遍^[10, 11]。随着环境问题的恶化以及环境污染研究的深入, 很多学者将蚓粪引入环境污染的治理中^[12~14]。但将蚓粪引入厌氧发酵过程还不多, 张彦等^[15]研究了蚓粪对废水厌氧发酵的影响, 结果表明, 蚓粪对厌氧发酵微生物有明显的促进作用, 沼气发酵反应器中加入 5% 的蚓粪可以提高沼气产率与 COD 降解速率, 使 pH 值更趋稳定。

收稿日期: 2009-03-12; 修订日期: 2009-04-27

基金项目: 江苏省科技项目 (BS2007148); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-004)

作者简介: 陈广银 (1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物资源化利用, E-mail: xzcf2004@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zzheng@nju.edu.cn

本研究探讨了蚓粪对玉米秸厌氧生物转化的影响以及蚓粪与玉米秸不同比例混合厌氧发酵对玉米秸厌氧生物转化的影响, 从产气特性、物质转化等角度进行了较系统地分析, 以期 为农业秸秆厌氧发酵制沼工程化应用提供理论参考.

1 材料与方法

1.1实验材料

蚓粪购自南京某蚯蚓养殖场, 蚯蚓品种为赤子爱胜蚓, 蚯蚓的食料为牛粪, 购回的蚓粪粉碎后过 20 目筛, 取筛下物置于 4℃ 下备用. 玉米秸取自江苏省大丰市某农场, 玉米秸为刚收获玉米后的地上部分, 取回的玉米秸经粉碎后备用. 污泥是前次厌氧消化实验的消化液, 过纱布后于 35℃ 下保存待用. 各实验材料的基本性质见表 1.

1.2 实验方法

表 1 厌氧消化原料的基本特性 %
Table 1 Basic properties of raw materials for anaerobic digestion %

物料	C	H	O	N	TS	VS ¹⁾	C/N	pH
玉米秸	39.34	4.93	39.32	1.32	30.77	89.05	29.97	7.46
蚓粪	18.32	2.50	16.74	1.55	43.93	36.57	11.86	8.02
污泥	31.60	4.16	14.67	3.18	3.32	64.80	9.94	7.14

1) VS volatile solid

采用 1 000 mL 广口瓶模拟厌氧反应器, 将实验原料放入瓶中, 接种, 用蒸馏水调整到合适的 TS (total solid) 浓度, 用橡胶塞密封. 实验开始时, 向反应器内充入氮气 2 min 以驱赶反应器内的空气, 密封后放入 35.0℃ ± 1.0℃ 的恒温水浴锅中培养, 每组 2 个平行, 取平均值进行分析, 定期取样进行相关指标的分析. 实验方案如表 2 所示, 玉米秸与蚓粪的比例以 TS 计. 同时, 进行玉米秸不同 TS 负荷厌氧发酵实验, 本实验除不添加蚓粪外, 其余条件与混合发酵实验相同, 玉米秸 TS 负荷分别为 1.2%、2.4%、3.6%、4.8% 和 6.0%.

表 2 实验设计
Table 2 Experimental set-up

处理	玉米 秸: 蚓粪	TS 负荷 %	总重 /g	玉米秸 TS 质量 /g	蚓粪 TS 质量 /g	污泥 /g
C100	100: 0	6	800	48	0	400
C80	80: 20	6	800	38.4	9.6	400
C60	60: 40	6	800	28.8	19.2	400
C40	40: 60	6	800	19.4	28.6	400
C20	20: 80	6	800	9.6	38.4	400
C0	0: 100	6	800	0	48	400

以排水 (饱和 NaCl 溶液) 集气法收集气体, 每日测定产气量; 消化液的 pH 值用精密 pH 计测定 (METER 6219); 将消化液在 4℃ 下 12 000 r·min⁻¹ 离心 20 min 后, 取上清液过 0.45 μm 滤膜后用于测定乙酸、丙酸和丁酸 (GC-2014 日本岛津); 碱度采用酸碱滴定法测定^[16]; 分别取发酵前后的玉米秸用蒸馏水清洗干净后冰冻干燥, 粉碎, 过 100 目筛后用于测定 X 射线衍射谱图 (XTRA, 瑞士 ARL 公司).

结晶度的变化: 纤维素的结晶度是指纤维素构成的结晶区占纤维素整体的百分率, 它反映纤维素

聚集时形成结晶的程度, 其计算公式如下:

$$C_r I = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}}$$

式中, C_rI 为相对结晶度; I₀₀₂ 为 2θ = 22° 附近 (002) 晶面衍射强度; I_{am} 为无定形区衍射强度, 对于天然纤维素, 为 2θ 接近 18° 时的衍射强度^[17].

2 结果与分析

2.1 不同有机负荷对玉米秸厌氧消化产气的影响

图 1 是发酵过程中日产气量的变化曲线. 除 TS 负荷为 6.0% 的处理外, 各处理日产气量的变化趋势相似, 均为先迅速增加后缓慢降低, TS 负荷为 1.20%、2.40%、3.60% 和 4.80% 的处理分别在实验第 6、6、7 和 3 d 日产气量达到最大值 (以 TS 计, 下同), 分别为 20.52、20.57、21.49 和 26.09 mL/g 之后不断降低. TS 负荷为 6.0% 的处理在实

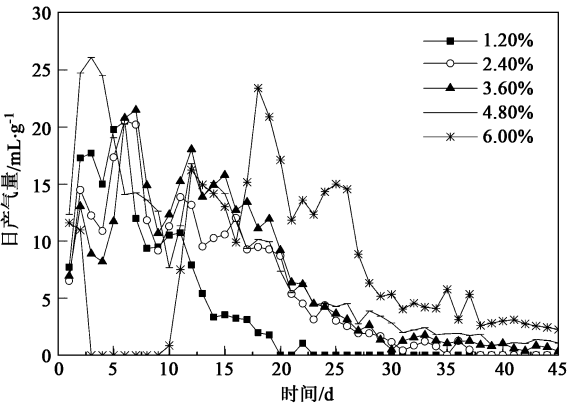


图 1 日产气量的变化

Fig 1 Daily biogas yield during anaerobic digestion of corn stalk at different TS loading rates

验第 3 d 停止产气, 第 8 d 用 6. 00% 的盐酸调节 pH 至 6. 5Q 第 10 d 后产气逐渐恢复并在第 18 d 达到最大值, 为 23. 42 mL/g 之后迅速降低. 实验结束时, 各处理累积产气量和甲烷含量的数据见表 3. 从中可知, 玉米秸单位干物质累积产气量随 TS 负荷的增加而增加, 当 TS 负荷为 4. 80% 时最大, 为

337. 62 mL/g TS 负荷为 6. 00% 的处理累积产气量与 4. 8% 的相当, 甲烷产量的变化与此相同. 各处理间甲烷含量相差不大, 均在 65. 00% 左右. 从以上结果看出, 无论是从沼气产量、甲烷产量还是产气稳定性来看, TS 负荷为 4. 80% 均具有明显的优势.

表 3 玉米秸单独发酵和与蚓粪混合发酵的产气数据¹⁾

Table 3 Gas data of com stalk anaerobic digested abne and co-digested with verm kompost

处理	参数	玉米秸 TS 负荷 /%				
		1. 2	2. 4	3. 6	4. 8	6. 0
单独发酵	沼气产量 /mL• g ⁻¹	172. 62	261. 85	299. 73	337. 62	335. 83
	甲烷产量 /mL• g ⁻¹	115. 36	167. 82	193. 51	217. 60	217. 89
	甲烷含量 /%	66. 83	64. 09	64. 56	64. 45	64. 88
混合发酵	混合物中玉米秸比重 /%	20	40	60	80	100
	沼气产量 /mL• g ⁻¹	289. 43	359. 90	410. 30	356. 03	335. 83
	甲烷产量 /mL• g ⁻¹	182. 98	234. 29	259. 35	227. 22	217. 89
	甲烷含量 /%	63. 22	65. 10	63. 21	63. 82	64. 88
	促进效果 (以甲烷计) /%	58. 61	39. 61	34. 02	4. 42	0

1)沼气和甲烷产量以 TS 计

2. 2 蚓粪对玉米秸厌氧消化的影响

2. 2. 1 产气量

蚓粪单独发酵的处理除在实验第 1 d 产生 40 mL 气体外, 其余均不产气. 因此, 认为实验所用蚓粪没有产气能力, 在计算产气结果时认为玉米秸是唯一产气源. 图 2 是发酵过程中日产气量的变化曲线.

盐酸调节 pH 至 6. 5Q 第 10 d 后产气逐渐恢复并在第 18 d 达到最大值, 为 23. 42 mL/g 之后迅速降低. 结合玉米秸不同 TS 负荷发酵的日产气量变化曲线 (见图 1) 可知, 混合发酵的产气高峰明显提前, 峰值明显增大, 且未出现酸积累抑制产气的现象.

表 3 为厌氧发酵实验结束时各处理的产气数据. 从中可以看出, 玉米秸 TS 产气量和甲烷产量均随蚓粪比重的增加先增加后降低, 当蚓粪与玉米秸混合比例为 2: 3 时, 玉米秸单位 TS 产气量最大, 达 410. 30 mL/g 甲烷含量为 63. 21%. 添加蚓粪对甲烷含量的影响不大, 各处理甲烷含量均在 63% ~ 67% 之间. 对比玉米秸单独发酵的产气结果发现, 混合发酵明显提高了玉米秸的产气能力, 且与混合物中蚓粪的比例呈正比, 增加幅度达 4. 42% ~ 58. 61%, 这可能是因为蚓粪中的微生物或酶的加入提高了厌氧微生物的活性, 微生物繁殖速度加快, 进而产气高峰提前, 且高峰值增加.

2. 2. 2 碱度和 pH 的变化

碱度和 pH 的变化见图 3 碱度是指溶液中含有的能与强酸定量作用的物质总量, 主要包括碳酸盐、重碳酸盐、氢氧化物、铵盐、磷酸盐、硅酸盐、有机碱和金属水解性盐类等^[16], 厌氧系统中主要包括挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids VFAs) 碱度和 CO₂ 碱度 (前者占 80%, 后者占 20%)^[18]. 适当的碱度能有效缓冲反应体系 pH 值的下降, 增加系统运行的稳定性. Raghila 等^[19] 认为在产甲烷阶段, 当反应器中没有足够的碱度中和 VFA s 未分解的 VFA s 将

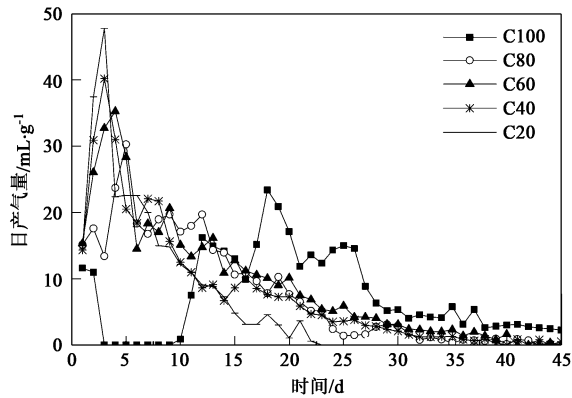


图 2 日产气量的变化

Fig 2 Changes of daily biogas production during anaerobic digestion

从图 2 可以看出, 除 C100 外, 各处理的变化曲线相似, 均为先迅速增加后缓慢降低, C8Q C6Q C40 和 C20 分别在第 5 4 3 和 3 d 达到最大值, 分别为 30. 31、35. 31、40. 21 和 47. 81 mL/g 混合物中蚓粪的比例越高产气高峰的峰值越大, 产气高峰越提前. C100 在第 3 d 停止产气, 第 8 d 用 6. 00% 的

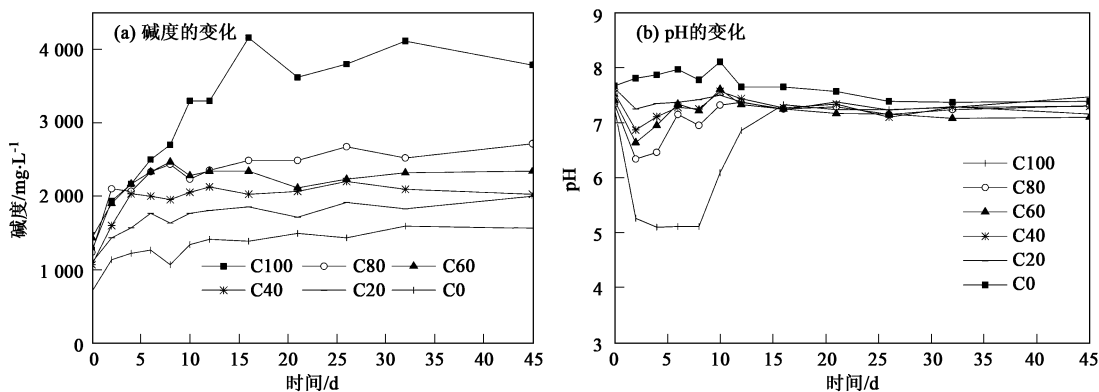


图 3 碱度和 pH 的变化曲线

Fig 3 Changes of alkalinity and pH value during anaerobic digestion

会使系统 pH 下降, 抑制产甲烷菌的生长, 造成 VFAs 的积累, 导致厌氧反应器系统酸化, 严重的甚至导致反应失败。

图 3 是厌氧发酵过程中各处理碱度和 pH 的变化曲线。由图 3(a) 可知, 除 C100 外各处理碱度在反应初期均迅速增加, 4 d 后增速减缓但仍保持缓慢增加的趋势。反应前期, 由于 VFAs 的积累导致 pH 下降, 抑制了产甲烷菌活性, 导致所产沼气中 CO_2 含量较高, CO_2 溶于发酵液形成碳酸盐、重碳酸盐和碳酸氢盐; 同时, 发酵物中有机物在厌氧微生物作用下分解形成一些无机盐, 使碱度增加。实验后期, 由于发酵液中可溶解的 CO_2 几近饱和, 同时发酵原料的水解酸化作用已很微弱, 碱度增加缓慢。实验结束时, C100 ~ C0 的碱度较反应前分别增加了 198.95%、120.00%、63.26%、90.00%、81.82% 和 122.86%。由于 C0 在实验过程中不产气, 因此 C0 碱度的增加主要是因为蚓粪中的无机盐等溶于发酵液所致。虽然蚓粪的 C/N 较低, 但蚓粪中的氮大多以有机氮的形式存在于腐殖质中, 对碱度的贡献不大。各处理中以 C100 的增加幅度最大, 结合 VFAs 的结果可知, 由于玉米秸中有机物的大量水解溶出, 产生铵态氮以及一些无机盐类, 使碱度大幅增加。

合适的 pH 是保证厌氧消化过程顺利进行的重要条件, 产甲烷菌适宜的 pH 值为 6.5~7.8^[20]。由图 3(b) 可知, 除 C0 外, 各处理的 pH 均先降低后增加, 蚓粪的比例越高 pH 的降幅越小, C20~C100 分别在第 2、2、2 和 4 d 达最低值, 分别为 7.25、6.87、6.64、6.34 和 5.10。此后, 除 C100 外, 各处理的 pH 均迅速回升并很快稳定; C100 在实验第 2~8 d pH 维持在较低水平, 第 8 d 时仍仅为 5.11 用

6.00% 的盐酸调节 pH 至 6.50 后 pH 迅速回升, 16 d 后已基本稳定。添加蚓粪有利于发酵前期 pH 的稳定, 对发酵后期的影响不大。

对比碱度和 pH 的结果发现, 蚓粪与玉米秸混合发酵增强了厌氧系统的缓冲能力, 避免了 pH 的大幅下降。添加蚓粪降低了碱度, 且蚓粪的比例越大碱度越小。这是因为蚓粪的 pH 为 8.02 但碱度较低, 因此添加蚓粪提高了 pH 却降低了碱度。

2.2.3 乙酸、丙酸、丁酸和总挥发性脂肪酸 (TVFAs) 的变化

总挥发性脂肪酸 (total volatile fatty acids, TVFAs) 是厌氧消化过程中的中间产物, 主要包括甲酸、乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸等, 文中的丁酸为正丁酸和异丁酸之和。图 4 是各处理发酵过程中乙酸、丙酸、丁酸和 TVFAs 的变化曲线。

由图 4(a) 可知, C100~C60 在发酵过程中均出现 2 个高峰, 第 1 个高峰均在第 2 d, 第 2 个高峰分别在第 10、12 和 12 d, 且玉米秸比例越高乙酸峰值越大; C40 在实验前期不断降低, 8 d 后缓慢增加, 12 d 时达最大, 之后缓慢降低; C20 和 C0 发酵过程中不断降低。实验结束时, 各处理乙酸含量趋近, 均在 160.00 mg/L 左右。由图 4(b) 可知, 除 C0 外, 各处理的丙酸含量在实验过程中均出现 2 个高峰, 分别为第 2 d 和第 10 d, 第 2 个峰值明显较第 1 个大, 且玉米秸比例越高峰值越大。混合发酵提高了系统中丙酸的含量。C0 在发酵过程中不断降低, 26 d 后已检测不出丙酸。丁酸的变化规律与丙酸相同。混合发酵提高了丁酸的含量, 增强了玉米秸的产气潜力。30 d 后丁酸已不能检出。TVFAs 的变化与丙酸和丁酸的变化相似, 混合物中玉米秸比例越高 TVFAs 含量越高。由 C100 和 C80 中 TVFAs 含量的变化可

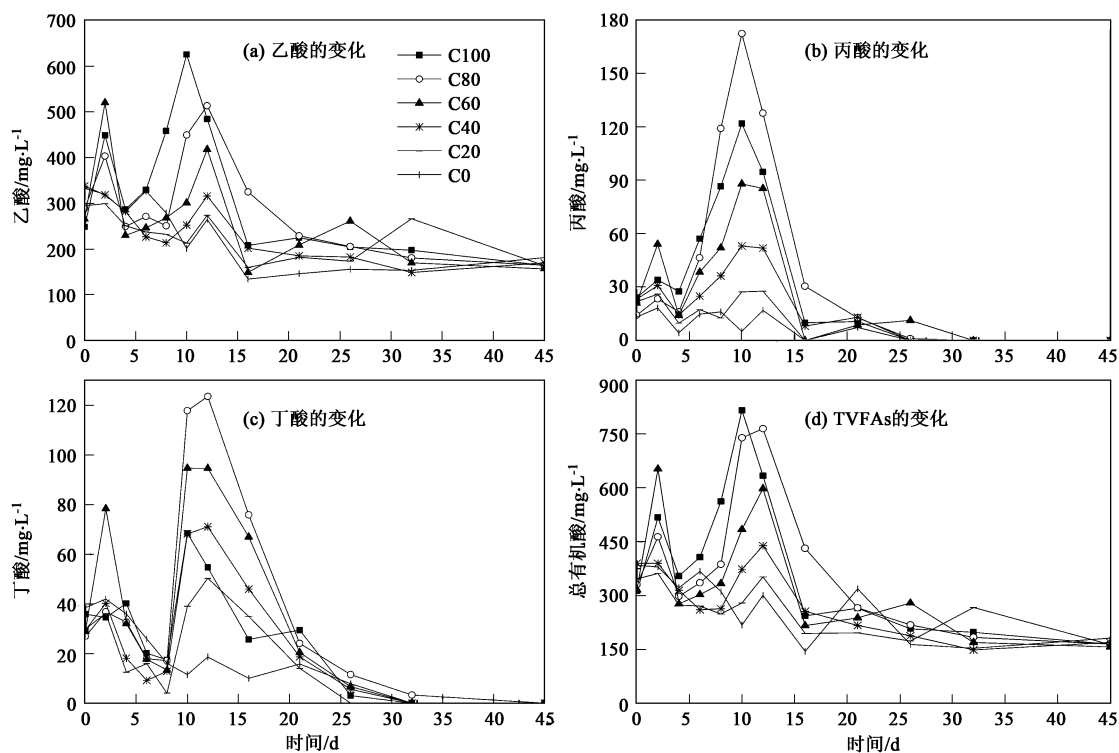


图 4 消化过程中乙酸、丙酸、丁酸和 TVFAs 的变化

Fig 4 Changes of acetate, propionate, butyrate and total volatile fatty acids during anaerobic digestion

以看出,混合发酵明显促进了玉米秸中有机物的水解溶出,提高了 TVFAs 含量,从而提高了产气潜力,这与产气的结果一致(见图 2)。

从乙酸、丙酸和丁酸的结果来看,发酵液中丙酸和丁酸含量均较低,乙酸含量相对较高,因此玉米秸厌氧发酵过程属混合型发酵.混合发酵并未改变玉米秸的厌氧发酵类型,但提高了挥发性脂肪酸的含量.对比 pH 和有机酸的结果发现, VFAs 出现高峰的时间较 pH 的低谷期出现时间要滞后几天,其他一些研究人员的研究也出现了相同的结果^[21-22],这是因为 pH 和 VFAs 的积累是相互影响的,发酵前期玉米秸中有机物的大量水解溶出,有机酸少量积累,加之较低的碱度,导致 pH 迅速下降. pH 的下降抑制了产甲烷菌的活性,产甲烷菌利用有机酸的速度降低,有机酸不断积累.同时,由于玉米秸中有机物的水解溶出,产生一些缓冲性物质提高了系统的缓冲能力, pH 逐渐回升,微生物从低 pH 的抑制中恢复活性需要一定时间,从而导致 pH 的低谷期出现时间较 VFAs 高峰期出现时间提前的现象。

2.2.4 XRD 谱图分析

经 45 d 的厌氧发酵处理后,各处理玉米秸的 X 射线衍射 (XRD) 谱图见图 5

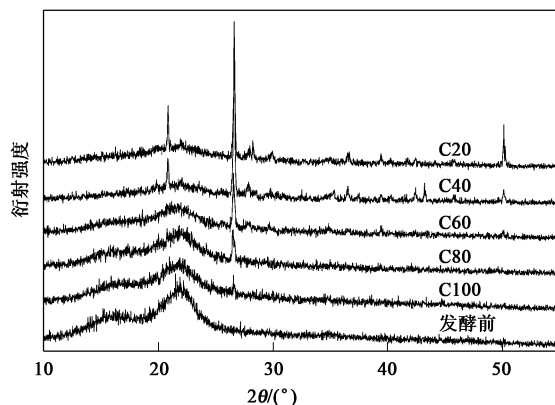


图 5 厌氧发酵处理前后玉米秸的 X 射线衍射谱图

Fig 5 X-ray diffraction patterns of corn stalk

由图 5 可知,各处理均在 $2\theta = 22^\circ$ 附近有一极大峰,这是 002 晶面的衍射峰,单从图谱来说,衍射峰越尖锐,晶体结晶程度越高^[23],厌氧发酵后各处理在该处的衍射峰强度均明显减弱,各处理在该处的峰高由高到低依次是未发酵的玉米秸 > C100 > C80 > C60 > C20 > C40. 结晶度指数可以反映玉米秸中纤维素结晶区被破坏的程度.未发酵的玉米秸和发酵后的玉米秸 (C100) 的结晶度指数 $C_r I$ 分别为 0.496 和 0.383 4,表明厌氧发酵可以有效地破坏

玉米秸纤维素的结晶区, C10Q C8Q C6Q C4Q和 C2Q的结晶度指数 $C_{r,i}$ 分别为 0.383 4、0.390 1、0.350 4、0.366 3和0.419 6。当蚓粪与玉米秸混合比例为 2:3 时对玉米秸纤维素结晶区的破坏最大, 破坏率达 29.36%, 这与产气的结果一致。混合物中蚓粪的比例太高对纤维素结晶区的破坏有一定的抑制作用, 这可能是因为蚓粪中的腐殖质抑制了某些可破坏纤维素结晶区的微生物活性^[24]。

从图 5 还可以看出, 除未发酵的玉米秸外, 发酵后的玉米秸在 $2\theta = 26.60^\circ$ 左右均出现一个较强的峰, 此处是 SD_2 的衍射强度峰, 各处理在该处的峰强度由高到低依次为 $C4Q > C2Q > C6Q > C8Q > C10Q$ 。总体趋势为混合物中蚓粪的比例越高该处的峰强度越高, 可能是因为蚓粪中硅酸盐类物质进入玉米秸木质纤维孔隙中所致。

3 结论

(1) 在 TS 负荷为 1.20% ~ 6.00% 下, 玉米秸厌氧消化过程可正常进行, 当 TS 负荷为 4.80% ~ 6.00% 时单位 TS 产气量最大, 甲烷产量为 217 mL/g。有机负荷过高或过低都不利于厌氧消化过程的进行, 综合考虑产气量和厌氧消化过程稳定性后认为玉米秸 TS 负荷为 5.00% 较合适; 厌氧微生物对玉米秸中纤维素结晶区的破坏有一定作用。

(2) 将蚓粪与玉米秸混合发酵提高了厌氧微生物的活性和系统的缓冲能力, 玉米秸产气率大幅提高, 对破坏玉米秸中纤维素的结晶区有一定的促进作用, 但对沼液中甲烷含量的影响不大, 且不会改变玉米秸的厌氧发酵类型。在各种混合比例中, 以玉米秸与蚓粪 TS 比为 2:3 的效果最好。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国全国人民代表大会. 中华人民共和国可再生能源法[R]. 北京: 2006.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 2005 年中国国家统计局年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [3] 国家统计局网站. 中国统计年鉴 2007[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2007/indexch.htm>.
- [4] 边义, 刘庆玉, 李金洋. 玉米秸秆干发酵制取沼气的实验[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 440-442.
- [5] Radwan A M, Sebak H A, Mistry N R, et al. Dry anaerobic fermentation of agricultural residues[J]. Biomass and Bioenergy, 1993, 5(6): 495-499.
- [6] Alastair J W, Phil J H, Peter J H, et al. Application of rumen microorganisms for enhanced anaerobic fermentation of com stover[J]. Process Biochemistry, 2005, 40: 2371-2377.
- [7] Skoulou V, Zabaletta A. Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005, 12: 1-22.
- [8] Lehtomäki A, Huttunen S, Rintala 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 and Recycling, 2007, 51: 591-609.
- [9] Misra S N, Forster C F. Batch co-digestion of multi-component agro-wastes[J]. Bioresource Technology, 2001, 80: 19-28.
- [10] Lee K E. Earthworms: their ecology and relationship with soils and land use[M]. Sydney: Academic Press, 1985.
- [11] Johann G Z. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 12: 191-199.
- [12] Maib G D, Aranda M A Z. Vermicompost as natural adsorbent for removing metal ions from laboratory effluents[J]. Process Biochemistry, 2003, 39: 81-88.
- [13] Taylor M, Clarke W P, Greenfield P F. The treatment of domestic wastewater using small-scale vermicompost filter beds[J]. Ecological Engineering, 2003, 21: 197-203.
- [14] Silvia M C R, Dieselina A B, Luc D. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil amended with biosolid or vermicompost in the presence of earthworms (*Eisenia fetida*) [J]. Soil Biology Biochemistry, 2008, 40: 1954-1959.
- [15] 张彦, 杨世关, 张百良. 蚓粪对厌氧发酵影响的初步研究[J]. 中国沼气, 2006, 24(2): 8-10.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 120.
- [17] Segal L, Creely J J, Martin E, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. Textile Research Journal, 1959, 29: 786-794.
- [18] Anderson G K, Yang G. Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration[J]. Water Environ Res, 1992, 13(4): 64-68.
- [19] Raghida L, Jukka R. Extreme thermophilic (70°C), VFA-Fed UASB reactor performance temperature response, load potential and comparison with 35 and 55°C UASB reactors[J]. Water Res, 1999, 33(14): 3162-3170.
- [20] 贺延龄. 废水厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 48-52, 125.
- [21] 吴江, 徐龙君, 谢金连. 碱浸泡预处理对固体有机物厌氧消化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 252-255.
- [22] Zhang P Y, Zeng G M, Zhang G N, et al. Anaerobic co-digestion of biosolids and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89: 485-489.
- [23] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [24] Brons H J, Field J A, Lexmond W A C, et al. Influence of humic acids on the hydrolysis of potato protein during anaerobic digestion[J]. Agricultural Wastes, 1985, 13(2): 105-114.