

接种物对农作物秸秆厌氧发酵的影响研究

顾禹 (同济大学现代农业科学与工程研究院生物质能研究中心, 上海 201804)

摘要 首先,介绍了几种常用的接种物(消化的畜禽粪便、消化污泥、动物瘤胃胃液、微生物菌剂等),然后比较了不同接种物的发酵效果,最后分析了接种比对厌氧发酵效果的影响。

关键词 秸秆;木质纤维素;厌氧发酵;接种物;接种比

中图分类号 S216.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2012)35-00754-03

Effects of Inoculums on Anaerobic Digestion of Crop Straws

GU Yu (Bio-Energy Research Center, Modern Agricultural Science & Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract Several common inoculums (digestion of livestock and poultry manure, sludge, animal rumen gastric juice, microbial inoculants and so on) were introduced, the fermentation effects of different inoculums were compared. Finally, effects of inoculum to substrate ratio on anaerobic digestion were analyzed.

Key words Straw; Lignocellulose; Anaerobic digestion; Inoculum; Inoculum to substrate ratio

我国每年秸秆类废弃物的产生总量超过8亿t,其中粮食谷物类占60%^[1]。秸秆中含有丰富的有机物、氮、磷、钾和微量元素,具有一定的回收再利用价值。然而,目前秸秆利用率整体偏低,在部分不发达地区综合利用率甚至不足40%^[2]。全国每年有1.4亿t秸秆在野外被露天焚烧^[3]。秸秆焚烧会产生大量的烟雾、烟尘、一氧化碳、二氧化硫等污染物,对周边城市的大气环境产生严重污染,带来一系列的环境和社会问题^[4-6]。厌氧发酵是处理秸秆类废弃物的有效途径。利用厌氧发酵技术用秸秆进行厌氧发酵,可以提高秸秆的回收利用率,实现秸秆废弃物的减量化、无害化,还能产生沼气、氢气、乙醇等生物质能源。可是由于秸秆本身的生物质顽抗性,厌氧发酵存在效率低、周期长、易酸化等问题^[7]。

我国从建国以来就开始对秸秆发酵产生生物质能源进行研究。20世纪60、70年代大量农业秸秆就被用作厌氧发酵生产沼气^[8-9],但由于秸秆类农业废弃物降解速率慢、产气不稳定,于20世纪90年代逐渐被其他发酵底物所取代^[10]。国外关于秸秆发酵产生生物质能源的研究一直没有间断,自从20世纪80年代玉米产乙醇作为燃料后,秸秆发酵产乙醇工艺即成为研究的主要方向^[11]。利用秸秆发酵产生生物质能源本质是一个微生物代谢过程,微生物的种类和种群数对发酵结果有着重要影响,因此合适的接种物和接种比能提高秸秆发酵的效率,降低发酵周期。另外,由于不同的木质纤维素秸秆有不同的理化特性,所以针对不同的秸秆需要不同的接种物和接种比。如何减少发酵过程中接种物的投加量以及降低生物转化时间是目前研究的重点^[12]。笔者从接种物的角度,综述了秸秆类农业废弃物厌氧发酵产沼气过程中各种来源接种物、接种比对发酵效果的影响。

1 接种物来源

厌氧发酵中,接种物的选择有很多,常用的有牛粪、鸡

粪、猪粪等畜禽粪便发酵后的消化粪肥、市政消化污泥、工业颗粒活性污泥等。另外,草炭、河床底泥、人工微生物菌剂、食草动物瘤胃胃液等均可作为接种物。利用不同来源的接种物进行接种,在控制其他条件不变时,试验结果差异也会很大,这主要是由于不同接种物所含菌群的种类和数量都存在很大的差异^[13]。

1.1 消化污泥 市政污泥来源广泛,全国市政污泥年产量超过140万t^[14]。作为秸秆发酵接种物时,通常使用经消化后的污泥^[15-16]。也有使用二沉池污泥、污泥浓缩池污泥、干化脱水后的泥饼作为厌氧发酵接种物的研究,但这3种污泥虽然来源相似,发酵效果相对较差^[17]。市政消化污泥中厌氧菌群种类和数目都较多,以甲烷螺菌、甲烷八叠球菌为主^[18],是常用的接种物之一。

1.2 颗粒污泥 颗粒污泥也可以作为发酵接种物。颗粒污泥中微生物在空间分布上并不是均一的。水解菌、发酵产酸菌、产氢产乙酸菌通常分布在颗粒污泥外层。一方面因为它们不是十分严格的厌氧微生物,另一方面它们的代谢活动需要直接利用或吸收底物中的有机物。而产甲烷菌是严格的厌氧细菌,因此它主要分布在颗粒污泥的内层,利用外层细菌的代谢产物进行发酵产生甲烷。随着反应器运行时间的延长,外层微生物种群结构始终保持稳定,而内层微生物种群逐渐减少,最终维持在几个特定的种群^[19]。

1.3 消化粪肥 消化粪肥即经厌氧消化后的畜禽粪便,是常见的厌氧发酵接种物。牛粪等畜禽粪便本身就是动物代谢食物的产物,许多食草动物如牛、羊以木质纤维素为食,微生物广泛存在于食草动物的前胃中,帮助食草动物进行木质纤维素的消化^[20-21]。因此在食草动物的粪便中存在着能够消化木质纤维素的各种微生物,消化后的粪肥也很适合作为秸秆发酵的接种物。

1.4 动物瘤胃胃液 食草动物瘤胃胃液中含有非常丰富的微生物菌群,包括细菌、真菌、原生动物和古细菌,以异产厌氧菌为主。在降解粗纤维的过程中,瘤胃细菌起主要作用,真菌和其他微生物也有一定的降解能力,真菌和细菌在降解纤维素时还有协同作用^[22]。动物瘤胃胃液可以作为厌氧发

酵接种物,但是胃液与传统的消化粪肥相比产量很少,难以在工程实践中广泛应用。

1.5 人工微生物菌剂 人工微生物菌剂通常是由人工培养、驯化的微生物菌群。厌氧发酵时将人工微生物菌剂与其他接种物如沼液一同添加进反应器,能够促进秸秆分解、提高产气效率^[25]。

袁长波等利用玉米、小麦秸秆作为发酵底物,沼液和人工微生物菌剂作为发酵接种物进行厌氧发酵,并且与未加菌剂只加沼液的反应进行了比较。结果表明,添加人工微生物菌剂作为接种物后,玉米和小麦的累积产气量和日均产气量都远高于未添加人工微生物菌剂的对照组,人工微生物菌剂对发酵时产生的结壳有良好的抑制作用^[26]。除此以外,有的人工微生物菌剂还具有良好的低温适应性。在水温 15 ℃ 左右时,加入了耐低温微生物菌剂的发酵池比未加入微生物菌剂的发酵池的沼气产量提高 40%^[27]。

1.6 抗酸化接种物 在厌氧发酵中,出现酸累积时普遍采用的调整方法是往反应器内加入碱,将 pH 调节至适合产甲烷菌工作的范围,但是这会增加厌氧发酵的成本。Steinberg 等通过接种耐酸产甲烷微生物菌群,使厌氧发酵过程具备更好的抗冲击负荷的能力,采用酸化沼泽底泥、市政消化污泥、以及二者混合物作为发酵接种物研究其抗有机物冲击负荷能力。结果表明,经过两次冲击负荷后,产甲烷微生物菌群得到了很好的适应,能够在产生酸积累的情况下将醋酸盐分解,使 pH 回升至正常范围^[28]。

2 不同接种物发酵效果的比较

对于不同的底物和发酵条件,最适合的接种物是不同的。Mabel 等人用甘蔗渣作为底物,对 7 种接种物(发酵后牛粪、发酵后猪粪、瘤胃胃液、消化污泥、瘤胃胃液 + 发酵后牛粪、瘤胃胃液 + 发酵后猪粪、瘤胃胃液 + 废水污泥)厌氧产沼气的接种效果进行了测定。经瘤胃胃液 + 发酵后猪粪接种的底物产气效果是最好的,经 30 d 发酵后产气率为 0.3 m³CH₄/kgVS,而经发酵后猪粪接种底物厌氧发酵 30 d 的产气率为 0.2 m³CH₄/kgVS^[29]。Suwat 等人分别用发酵牛粪、消化污泥、草炭作为接种物降解青草,比较了其在快速高温发酵启动时的区别。结果表明,以消化污泥为接种物时,发酵 14 d 产沼气率为 9.5 L/L,比用发酵牛粪和草炭接种效率高^[30]。庞云芝采用麦秸作为发酵底物,分别用猪粪消化液、麦秸消化液、污泥消化液作为接种物,测试其发酵效果。试验表明,污泥消化液发酵效果最差,麦秸消化液接种的麦秸厌氧发酵 45 d 后产气率可达 0.38 L/g,甲烷含量为 53.88%,与猪粪消化液相比,麦秸消化液产气率和 TS/VS 降解率分别提高了 2.7% 和 3.9%/1.1%^[31]。

不同的发酵接种物对厌氧发酵产气的启动时间等有显著影响^[32],增加接种物数量和种类可以加快厌氧消化的启动^[33]。Li 等^[34]分别用牛粪沼渣、猪粪沼渣、玉米秸秆沼渣和消化市政污泥作为接种物,处理经 2% NaOH 预处理过的玉米秸秆。不同的接种物接种后的产气趋势基本相同,但是启动时间、高峰产气量和高峰维持时间有所不同。结果表明,

消化市政污泥接种效果最佳,启动时间比其他接种物提前 3 ~ 8 d,高峰产气量最大提升了近 30%。接种物接种效果的不同,可能是因为不同接种物所含有的活性微生物量有所不同^[35]。

3 接种比的影响

接种比即接种物与底物质量比,通常用 S/I(底物比接种物)、I/S(接种物比底物)表示。最常用的两种接种比表示方法是 VS 之比和 TS 之比,即接种物与底物所含挥发性固体之比和所含总固体之比。接种比反映了发酵底物与发酵接种微生物量的关系,接种物相同时,接种比越大,则单位质量底物上可能作用的微生物量越多;接种比越小,则单位质量底物上可能作用的微生物量越少。接种比的大小直接影响了发酵效果的优劣。

接种比的不同会影响到底物降解速率的不同。S/I 值越大,意味着单位质量底物上能吸附的酶的个数越多,酶解速率就越快,底物的降解速率也越快;反之,S/I 值越小,意味着单位质量底物上能吸附的酶的个数就越少,酶解速率就越慢,底物的降解速率也越慢^[36]。

Eskicioglu 等^[37]用玉米废渣作为发酵原料,厌氧消化污泥作为接种物厌氧发酵制取沼气,研究不同接种比对发酵的影响,采用接种比(I/S)范围为 0.46 ~ 3.67 gVS/gVS,结果表明,接种比无法改变原料的生物可降解性,但是随着接种比的减小,一级生物降解速率常数也随之减小,即接种比 S/I 越小,底物降解速率越快,接种比 S/I 越大,底物降解速率越慢。并且,相对于较大的 S/I 值,以较小的 S/I 值接种可以增加产气稳定阶段气体中甲烷的含量^[38-39]。在总质量一定的情况下,S/I 值越小意味着单位质量反应物可利用的发酵底物越少,单位质量反应物的产气潜力也就越低;反之,当 S/I 值过高时,由于反应底物浓度的增加,水解酸化菌群反应产生酸的速率远大于产甲烷菌群反应消耗酸的速率,反应器内可能出现酸累积现象,导致 pH 急剧下降,从而使产甲烷菌无法正常工作^[40]。Zhou 等^[41]的研究表明,S/I 值为 0.9 gVS/gVS 时发酵效果最好,若 S/I 值继续增加,由于酸累积的影响,厌氧发酵效果变差,当 S/I > 1.6 gVS/gVS 时,酸累积的影响无法被消除。Cui 等^[42]用马厩中废弃的麦秸作为底物,厌氧发酵制取沼气也得出了相似的结论。因此秸秆厌氧发酵中选择合适的接种比十分关键,既要保证发酵反应的高效进行,又要确保反应不会因为酸累积而中止。

4 结语

目前,对于秸秆厌氧发酵接种物的研究主要集中在不同接种物的筛选和不同接种比的比较。通过选择不同接种物和改变不同接种比,可以提高原料产气率、提高甲烷含量、缩短产气周期。由于接种物的来源很多,所以选取一种含有高效发酵菌群的接种物或者人工培养的高效的微生物菌剂可能是未来接种物研究的重点。其次,厌氧发酵存在易酸化的问题,产甲烷菌很容易因酸累积出现的酸化而停止工作。目前,普遍采用添加化学药剂调整 pH 的方法来克服酸化现象,可是化学添加药剂存在费用昂贵和二次污染的问题,因此抗

酸化的接种物、合适的不易酸化的接种比也是决定秸秆发酵成败的重要因素,如果能找到其他解决酸化问题的途径,对秸秆发酵的大规模工程应用有极大的意义。

参考文献

- [1] 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报,2009,25(12):211-217.
- [2] 鞠昌华. 我国农作物秸秆处理的困境与对策[J]. 贵州农业科学,2011,39(6):221-224.
- [3] 王丽,李雪铭,许妍,等. 中国大陆秸秆露天焚烧的经济损失研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(2):170-175.
- [4] 朱彬,苏继锋,韩志伟,等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析[J]. 中国环境科学,2010,30(5):585-592.
- [5] ZHANG T, CLAEYS M, CACHIER H, et al. Identification and estimation of the biomass burning contribution to Beijing aerosol using levoglucosan as a molecular marker[J]. Atmos Environ, 2008, 42(29):7013-7021.
- [6] WANG Q, SHAO M, LIU Y, et al. Impact of biomass burning on urban air quality estimated by organic tracers: Guangzhou and Beijing as cases[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41:8380-8390.
- [7] HIMMEL M E, DING S Y, JOHNSON D K, et al. Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production[J]. Science, 2007, 315(5813):804-807.
- [8] 陈玲,赵立欣,董保成,等. 我国秸秆沼气工程发展现状与趋势[J]. 可再生能源,2010,28(3):145-148.
- [9] 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):279-283.
- [10] 熊承永,李健,黄利宏,等. 户用沼气池秸秆利用浅析[J]. 可再生能源,2003(3):44-45,57.
- [11] SUN Y, CHENG J Y. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1):1-11.
- [12] ALVIRA P, TOMAS-PEJO E, BALLESTEROS M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(13):4851-4861.
- [13] 周岭,李文哲,石长青. 厌氧发酵接种物的特性研究[J]. 农机化研究,2004(3):152-153,156.
- [14] 许晓萍. 我国市政污泥处理现状与发展探析[J]. 江西化工,2010(3):24-32.
- [15] PANG Y Z, LIU Y P, LI X J, et al. Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4):2761-2766.
- [16] ZHENG M X, LI X J, LI L Q, et al. Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21):5140-5145.
- [17] 崔凤杰,汪宇研,李向菲,等. 不同来源污泥对玉米秸秆固态厌氧发酵的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(7):4173-4174.
- [18] 张翔,余建峰,刘金盾,等. 不同接种物对牛粪高温厌氧发酵的影响[J]. 广西师范大学学报:自然科学版,2007(1):78-81.
- [19] 邢薇,左剑恶,孙寓姣,等. 利用 FISH 和 DGGE 对产甲烷颗粒污泥中微生物种群的研究[J]. 环境科学,2006,27(11):2268-2272.
- [20] CHACKHIANI M, DABERT P, ABZIANIDZE T, et al. 16S rDNA characterisation of bacterial and archaeal communities during start-up of anaerobic thermophilic digestion of cattle manure[J]. Bioresource Technology, 2004, 93(3):227-232.
- [21] BAYANE A, GUIOT S R. Animal digestive strategies versus anaerobic digestion bioprocesses for biogas production from lignocellulosic biomass[J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 2011, 10(1):43-62.
- [22] 吴宏志,丁晓娟,胡真虎,等. 瘤胃微生物不同种群对小麦秸秆体外降解的研究[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(3):285-288.
- [23] HU Z H, YU H Q. Application of rumen microorganisms for enhanced anaerobic fermentation of corn stover[J]. Process Biochemistry, 2009, 40(7):2371-2377.
- [24] HU Z H, YU H Q. Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures[J]. Waste Management, 2006, 26(11):1222-1228.
- [25] 叶子良,刘荣厚,郝元元,等. 沼气发酵接种物对沼气及沼液成分的影响[J]. 农机化研究,2007(6):82-85.
- [26] 袁长波,刘英,姚利,等. 微生物菌剂促进秸秆发酵产沼气试验研究[J]. 中国沼气,2009,27(6):15-16.
- [27] 姚利,王艳芹,袁长波,等. 高效沼气微生物菌剂的冬季产气试验[J]. 山东农业科学,2010(8):57-60.
- [28] STEINBERG L M, REGAN J M. Response of lab-scale methanogenic reactors inoculated from different sources to organic loading rate shocks[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(19):8790-8798.
- [29] QUINTERO M, CASTRO L, ORTIZ C, et al. Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique's bagasse as an example[J]. Bioresource Technology, 2012, 108:8-13.
- [30] SUWANNOPPADOL S, HO G, CORDE-ROUWISCH R. Rapid start-up of thermophilic anaerobic digestion with the turf fraction of MSW as inoculum[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(17):7762-7767.
- [31] 庞云芝. 基于提高麦秸厌氧消化性能的碱预处理方法研究及工程应用[D]. 北京:北京化工大学,2010.
- [32] 张婷,杨立,王永泽,等. 不同接种物厌氧发酵产沼气的比较[J]. 能源工程,2008(4):30-33.
- [33] 张翔,刘金盾. 接种物特性对牛粪高温厌氧发酵的影响[J]. 农机化研究,2007(6):86-89.
- [34] LI L, YANG X, LI X, et al. The influence of inoculum sources on anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stover[J]. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2011, 33(2):138-144.
- [35] NEVES L, OLIVEIRA R, ALVES M M. Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(12):2019-2024.
- [36] CHANG V S, HOLTZAPPLE M T. Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2000, 84:65-37.
- [37] ESKICIOGLU C, GHORBANI M. Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode[J]. Process Biochemistry, 2011, 46(8):1682-1687.
- [38] FORSTER-CARNEIRO T, PEREZ M, ROMERO L I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15):6994-7002.
- [39] 赵洪,邓功成,高礼安,等. 接种物数量对沼气产气量的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(13):6278-6280.
- [40] RAPOSO F, BANKS C J, SIEGERT I, et al. Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(6):1444-1450.
- [41] ZHOU Y L, ZHANG Z Y, NAKAMOTO T, et al. Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse - okara under mesophilic conditions[J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35(7):3251-3256.
- [42] CUI Z F, SHI J, LI Y. Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(20):9432-9437.
- [43] LIU X J, LI H, XUE J H, et al. Study on biogas production using anaerobic fermentation of rice straw[J]. Agricultural Science & Technology, 2011, 12(12):1761-1764.
- [44] 陆宇明,于平福,董颖聪,等. 广西秸秆综合利用科技发展研究[J]. 西南农业学报,2011(6):2420-2423.
- [45] LI X F, PAN W, CUI F J, et al. Effect of sludge from different sources on solid anaerobic digestion of corn straw[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(3):605-607.
- [46] 高翔. 江苏省农作物秸秆综合利用技术分析[J]. 江西农业学报,2010,22(12):130-133.
- [47] 梁榕旺,徐淑莉. 我国秸秆资源现状及其利用[J]. 畜牧与饲料科学,2011,32(11):21-22.