

畜禽粪便厌氧发酵的影响因素分析

伍高燕 (广东广垦畜牧工程研究院有限公司, 广东广州 510507)

摘要 利用厌氧发酵技术处理畜禽粪污, 既是国家节能减排的政策要求, 也是企业降低环保成本的重要手段。为提高厌氧发酵技术在畜禽粪便实际处理过程中的应用效率, 结合查阅文献及工程实际经验, 对畜禽粪便厌氧发酵的影响因素进行了分析, 得出以下结论: 在工程上, 综合考虑成本、操作便利性等因素, 可以选择中温发酵; 水力停留时间以 20~40 d 为宜; 反应过程宜进行低速缓慢搅拌; 抑制物不宜超过一定的浓度; pH 控制在中性至弱碱范围较佳; 适宜碳氮比为 20:1~30:1; 有机负荷宜在 6.0 g/(L·d) 以下; 总固体浓度宜控制在 6%~10%; 适当添加微量金属元素或吸附剂类添加剂可以提高发酵效率。

关键词 畜禽粪便; 厌氧发酵; 影响因素

中图分类号 X 713 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)02-0221-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.02.064



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis on the Factors Affecting the Anaerobic Fermentation of Livestock and Poultry Manure

WU Gao-yan (Guangdong Guangken Animal Husbandry Engineering Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510507)

Abstract To dispose livestock manure by using anaerobic fermentation technology is not only a policy requirement for national energy conservation and emission reduction, but it is also an important means for enterprises to reduce environmental costs. In order to improve the efficiency of anaerobic fermentation technology used in the actual disposal of livestock manure, this paper gave an overview of the factors affecting the anaerobic fermentation of livestock and poultry manure by consulting literature and drawing upon practical experience, and concluded the following conclusions: in the engineering, considering cost, operation convenience and other factors, medium temperature fermentation was recommended; the hydraulic retention time was preferably 20-40 days; the material should be slowly stirred at low speed during reaction process; Inhibitors should not be exceed a certain concentration; pH was preferred in the neutral to weak base range; the suitable carbon-nitrogen ratio should be 20:1~30:1; the organic load should be below 6.0 g/(L·d); the total solid concentration should be controlled at 6%-10%; appropriate addition of trace metal elements or adsorbent additives can improve fermentation efficiency.

Key words Livestock and poultry manure; Anaerobic fermentation; Influencing factors

厌氧发酵, 又称厌氧消化, 是指兼性菌和厌氧细菌在无氧的条件下, 将可降解的有机物分解为 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 和 H_2S 的过程。这是一种能将污水处理和能源回收相结合的技术, 因其投资省、能耗低、可回收利用沼气能源、负荷高、产泥少、耐冲击负荷等优点而受到养殖业及环保界的重视。目前, 厌氧发酵技术被广泛用于畜禽粪污的处理, 因而调控和协调影响发酵的因素、提高厌氧发酵效率成为业界关注的焦点。影响厌氧发酵效率的因素很多, 如温度、水力停留时间、搅拌、抑制物、pH、碳氮比、有机负荷、总固体浓度、添加剂等。笔者对影响畜禽粪便厌氧发酵的因素进行了分析。

1 影响畜禽粪便厌氧发酵的因素分析

1.1 温度 温度是影响厌氧发酵最重要的因素^[1]。它通过影响厌氧微生物细胞内酶的活性和发酵料液的溶解度, 进而影响微生物的生长速率和微生物对发酵底物的代谢速率以及沼气产量和气体的组成^[2]。一般来说, 厌氧发酵过程中主要存在水解酸化菌群和产甲烷菌。水解酸化菌群对温度的适应范围很大, 甚至在 100 °C 环境下也能很好地生存^[3]。产甲烷菌对温度却十分敏感。产甲烷菌有 3 个适宜生长的温度范围, 分为低温 (10~25 °C)、中温 (30~40 °C) 和高温 (50~60 °C)。相应的发酵工艺分别为低温厌氧发酵、中温厌氧发酵以及高温厌氧发酵^[4]。低温厌氧发酵效率很低, 一般中温发酵和高温发酵比较常见。

高温条件下发酵速率最高。此时, 水解酸化菌成为优势

菌群, 有利于有机物的水解、酸化和溶解, 甚至连一些难以降解的纤维素物质也可以得到分解^[5]。其次, 在产甲烷菌的耐受范围内, 温度越高, 其酶的活性越大, 因而产气速度越快, 发酵启动时间和周期越短^[3,6]。此外, 高温发酵还可以灭活病毒和病菌, 尤其是对寄生虫卵的杀灭率高达 99%。然而, 高温发酵也存在不足之处。若产甲烷菌不能及时利用水解酸化菌群产生的有机酸, 则发酵液容易酸化, 进而抑制产气。高温产甲烷菌在维持自身生长和酶反应时需要更多的能量参与, 因此需要消耗较多的能量用于反应料液的加温和保温, 发酵设备比较复杂, 增加投资费用, 投入产出比较低。此外, 微生物在高温情况下很容易衰减, 死亡率增加。

中温厌氧发酵产甲烷量最大。研究表明, 中温厌氧发酵甲烷产量最高, 高温厌氧发酵其次, 而低温厌氧发酵最低^[3,7]。这是因为在中温条件下产甲烷菌占据优势地位, 产甲烷作用可能得到加强^[5]。大多数研究表明, 中温 35 °C 更适合以鼠粪、牛粪、兔粪和熊粪等畜禽粪便为原料的厌氧发酵反应, 其产沼气量更大, 沼气甲烷浓度更高^[8-10]。

因此, 在实际生产中, 当处理量很大时, 不宜采用发酵速率略有优势的高温厌氧发酵, 而应选用处理原料效率高、产气量高、消耗能量少的中温厌氧发酵。也有研究建议采用 2 阶段发酵程序, 即利用高温加速水解, 水解反应结束后降低温度, 利用中温促进产甲烷菌产气^[11]。

1.2 水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) HRT 是指物料在反应器内的平均停留时间, 是反应器的有效容积与单位时间内进料体积的比值。工程上, 常会根据进料量和设计的 HRT 确定反应器的大小。若 HRT 过短, 废水处理不

作者简介 伍高燕 (1990—), 女, 广西玉林人, 工程师, 硕士, 从事畜禽废弃物处理与资源化利用研究。

收稿日期 2019-05-15; **修回日期** 2019-08-20

彻底,有机物去除率低。若 HRT 过长,微生物生长繁殖所需的能源和营养元素已被消耗过多而无法满足微生物的活动所需,致使微生物活性急剧下降,从而导致厌氧发酵过程产气量降低,发酵系统的运行效果变差^[12]。选用过长的 HRT 必定增大了反应器的容积,进而增加了占地面积和造价。在实际应用中,HRT 可以结合实地可利用的空间和出水要求,尽量延长。这是因为产甲烷菌的生长很缓慢且世代时间长,它只能利用简单的物质生长繁殖,如 CO_2 、 H_2 、甲酸、甲醇、乙酸和甲基胺等。这些物质又必须由水解酸化菌群将有机物分解后提供,所以产甲烷菌一定要等到其他细菌都大量生长后才能生长。同时,产甲烷菌世代周期也长,需要几天至几十天才能繁殖一代。因此,只有使产甲烷菌等微生物与有机物充分接触并在反应器内有足够长的停留时间才能最大限度地分解有机物产生沼气。工程上,一般中温厌氧发酵的 HRT 可以选择 20~40 d,随着温度的升高,HRT 可以适当减少。乔小珊^[13]研究表明,30℃条件下奶牛粪便厌氧发酵 HRT 为 20 d 时,可获取最大池容产气率。

1.3 搅拌 一般情况下,厌氧发酵体系本身内部是不均匀的,包括温度、微生物和发酵底物混合、新旧料液混合等多方面的不均匀。搅拌不仅可以使发酵系统充分混合均匀,而且增加了微生物中的酶与发酵原料的接触面积,有效地破坏沼气池内悬浮的浮渣层面,提高产气量^[2]。但过度地剧烈搅拌会破坏发酵系统内某些菌种的共生关系。因此,厌氧发酵系统内应进行低速缓慢搅拌。

1.4 抑制物 常见的微生物抑制物有重金属、盐类、抗生素、氯酚及卤代脂肪族化合物、杀虫剂、木质素水解产物以及消化过程中产生的挥发性脂肪酸(VFA)、长链脂肪酸、柠檬烯、硫化物和无机氮等^[14-15]。其中,重金属、盐类、抗生素、硫化物和无机氮因其在发酵系统中含量较高,对发酵过程的影响较大^[16]。

畜禽粪便中常见的有明显生物毒性的重金属有 Zn、Cu、Cd、Pb、Cr、Hg、Ni 等,主要来自不能被畜禽完全吸收利用的饲料添加剂^[17-20]。在不同畜禽的粪便中,猪粪中重金属含量较高^[21-22]。与其他抑制物不同的是,重金属不能被微生物降解,积累到一定程度时会降低微生物活性甚至引起微生物死亡^[3]。其主要原因是重金属可以与蛋白质分子中的巯基或其他基团结合,破坏微生物酶的结构和功能,或者取代酶分子中的相关离子,从而影响酶活性^[23]。当外源 Cu 和 Gr 含量超过 0.2 mg/L 时开始抑制总产气量和产甲烷量^[24]。当 Zn 含量超过 0.6 mg/L 时也会抑制产气^[25]。

无机盐是微生物不可缺少的营养。当无机盐浓度较低时,可以促进微生物的生长,但高浓度的无机盐会产生较高的外界渗透压,因而会降低微生物代谢酶的活性,甚至会引起细胞壁分离,抑制微生物的生长^[26]。

抗生素能直接杀灭某些微生物或抑制其生长,改变厌氧发酵系统中微生物的群落组成。四环素类抗生素在畜禽粪便中最常见,以金霉素和土霉素的应用最为广泛^[27-28]。研究表明,金霉素、土霉素对厌氧发酵均有抑制作用,其产生抑制

的临界浓度值分别为 0.1 和 0.3 mg/L^[28]。当二者联合作用时,抑制效应更强。

H_2S 气体是发酵过程的产物,在沼气中的含量一般为 0.2%~0.9%^[29]。 H_2S 有强烈的刺激性,且有剧毒,其溶于发酵液并超过一定浓度时,对厌氧微生物极其不利。当 S^{2-} 浓度不超过 65.6 mg/L 时,厌氧消化无抑制作用,但当 S^{2-} 浓度超过 164 mg/L 时则产生明显的抑制现象^[30]。一般可以通过添加 FeCl_2 、 FeCl_3 、 AlCl_3 抑制 H_2S 的产生,降低其毒害程度^[30]。

氨氮主要来自厌氧发酵过程中有机氮的水解,一般以铵态氮和游离 NH_3 的形式存在。虽然低浓度的氨氮对于维持厌氧发酵的平衡有着重要的作用,但高浓度的氨氮会抑制产甲烷菌,从而影响厌氧发酵的正常运行^[26]。研究表明,在鸡粪厌氧发酵过程中,发酵料液中铵态氮含量可以高达 3 600 mg/L 以上,严重抑制了产气^[15]。在实际工程中,要使液铵态氮对厌氧消化无拮抗作用,一般应控制其含量低于 500 mg/L^[31]。

1.5 pH 厌氧消化体系的酸碱性是气-液相间的 CO_2 平衡和 NH_3 平衡、液相内的酸碱平衡以及固-液相间的溶解平衡共同作用的结果,它通过影响微生物的细胞膜、胞外水解酶、代谢过程以及消化液中的组分解离,进而影响微生物的活性^[32]。畜禽粪便在厌氧发酵过程中由于挥发性脂肪酸的积累,容易酸化,产生酸抑制,尤以猪粪最为明显。当猪粪发酵液 pH 降至 5 左右时,会严重制约产气^[33]。一般情况下,厌氧发酵的最佳 pH 为 6.8~7.4,即在中性至弱碱范围内对厌氧发酵比较有利^[1,3]。

1.6 碳氮比(carbon-nitrogen ratio, C/N) 碳氮比(C/N)是指有机物中碳的总含量与氮的总含量的比值,是微生物生长过程中必不可少的营养物质。在厌氧发酵系统中,若 C/N 过高,即氮素相对不足,发酵液的缓冲能力降低,pH 容易下降;若 C/N 过低,即氮素相对过量,发酵系统将产生大量游离铵,pH 容易升高,且铵盐过剩导致微生物中毒,抑制产气^[2-3]。通常情况下,以 C/N 达到 20~30 为宜^[34]。常温下应控制牛粪或者鸭粪的 C/N 为 25,均可获得最高的甲烷产气量^[13,35-36]。鸡粪发酵的最适 C/N 一般为 20^[37]。猪粪在高温条件下厌氧发酵的 C/N 可以取 16^[38-39]。

然而,畜禽粪便是富氮原料,单一畜禽粪便发酵原料往往缺少碳源,例如兔粪的 C/N 较小,约为 6;鸡粪 C/N 约为 10;猪粪 C/N 一般在 12 左右;牛粪 C/N 高一些,其中黄牛粪和奶牛粪的 C/N 分别为 21 和 24^[24]。在实际生产中,可以适当添加稻秆、稻草、葡萄糖、甘蔗渣、米糠、麦秸、杂木屑等富碳原料来提高发酵系统的 C/N^[13,34-36,38-39]。

1.7 有机负荷 发酵液的浓度常用容积有机负荷表示,即单位体积污水处理反应器(或单位体积介质滤料)每天所承受的有机物的质量。在工程设计上,当进料基本稳定时,反应器容积将影响发酵过程的有机负荷。若反应器过小,负荷过高,发酵原料不易分解,反应器内容易积累大量挥发性脂肪酸(VFA),影响正常产气;若反应器过大,负荷过低,单位容

积里的有机物含量相对较低,不利于反应器的充分利用^[40]。事实上,在一定范围内,有机负荷越高,产气率越高^[8]。因此,在反应器容积设计时,为节约成本和用地,使反应器充分利用,可考虑在不影响产气的前提下,使容器内有机负荷尽可能高。

研究表明,当有机负荷控制在 $2.5 \sim 5.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时,厌氧消化系统中挥发性脂肪酸浓度较低,且氨氮浓度低于 6.7 g/L ,沼气最大容积产气率为 2.58 L/L 。然而,当有机负荷提高到 $6.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时,会引起乙酸和丙酸的快速累积,氨氮浓度也升高到 6.7 g/L ,沼气容积产气率降低约 23.5% ^[41]。因此,一般情况下可控制有机负荷在 $6.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 以下。

1.8 总固体(total solid, TS) 浓度 发酵液的总固体浓度是指发酵液中干物质的百分比含量。该指标的大小与反应器容积无关,取决于发酵料液本身的含固量。在一定范围内,随着 TS 浓度的增加,产气量增大。然而,发酵系统中 VFA 的浓度与 TS 成正比。为了避免发酵过程中 VFA 大量积累导致 pH 急剧下降,根据不同的发酵原料,一般将 TS 控制在 $6\% \sim 10\%$,且在夏季和初秋温度较高的季节,可以保持较高的发酵浓度^[34]。研究表明,用猪粪或者奶牛粪便进行试验,可取发酵料液的 TS 浓度为 6% 或 8% ^[13,42-43]。

1.9 添加剂 常用的厌氧发酵添加剂主要是微量金属元素和吸附剂。微量金属元素作为电子导体参与厌氧消化过程的细胞外电子转移,促进生物的代谢效率^[44]。吸附剂依靠其多孔、比表面积大的结构,可以吸附发酵液中微生物的有害抑制物(如 NH_3 、氢氧化铵、硫化物等),同时给微生物提供附着载体或者促进电子传递,也能提高产气效率^[15]。铁、锰、镍、钴是常用的金属添加剂,而沸石、活性炭、生物炭、粉煤灰等是常用的吸附剂^[45-49]。

对于微量金属添加剂,以应用较多的 Fe 元素为例,往稻秆和猪粪的混合发酵物中添加 3% 的 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$,则总产气量和产甲烷量可分别提高 32.01% 和 51.48% ^[44]。添加 5% 的 FePO_4 也可以有效促进鸭粪和向日葵秸秆混合发酵的产气量、产气效率及产气稳定性,总产气量高达无添加剂时的 9 倍^[50]。

对于吸附剂,生物炭、粉煤灰、磁性粉煤灰能将猪粪产气总量和产甲烷量分别提高 $5\% \sim 12\%$ 、 $4\% \sim 10\%$ ^[51]。一些经过热处理的炭具有更强的促进作用。例如,以 190°C 水热法制备的沼渣水热炭,可以将中温厌氧消化系统中猪粪的产气总量和产甲烷量分别提高 29.81% 和 26.22% ,而麦秸热解生物炭可以将二者分别提高至 96.1% 和 101.8% ^[52]。

此外,还有一种复合添加剂,即微量金属元素与传统吸附剂的复合物,例如铁氧化物/沸石。在铁元素促进电子转移的同时,沸石能够吸附 NH_3 ,缓和 NH_3 对产甲烷菌的抑制作用,且能为厌氧消化系统提供多种微量元素。研究表明,往牛粪中加入铁氧化物/沸石复合物可以显著提高粪便的生化降解效率,其中累积产气量可以提高 96.8% ,VS 和 COD 的去除率分别提高 37.5% 和 44.6% ^[53]。

2 结论

控制厌氧发酵条件对于提高厌氧发酵效率以及提高沼气的产量和质量极为重要。在工程上,综合考虑成本、操作便利性等因素,可以选择中温发酵;水力停留时间以 $20 \sim 40 \text{ d}$ 为宜;反应过程宜进行低速缓慢搅拌;抑制物不宜超过一定的浓度;pH 控制在中性至弱碱范围更佳;适宜碳氮比为 $20:1 \sim 30:1$;有机负荷宜在 $6.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 以下;总固体浓度宜控制在 $6\% \sim 10\%$;适当添加微量金属元素或吸附剂类添加剂可以提高发酵效率。

参考文献

- [1] 龚舒静,段青松,杨姝,等.不同发酵条件对杂交狼尾草厌氧发酵产沼气的的影响[J].中国沼气,2014,32(6):26-32,73.
- [2] 夏挺.高固浓度玉米秸秆厌氧发酵产酸特性及其对产沼气的的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2017:11-13.
- [3] 邹书珍.不同预处理工艺厌氧发酵产气效率及其综合效益评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2017:3-4.
- [4] 李江浩.玉米秸秆氢氧化钾及蒸汽爆破耦合预处理厌氧发酵产沼气的研究[D].北京:北京化工大学,2015:3.
- [5] 王腾旭,马星宇,王萌萌,等.中高温污泥厌氧消化系统中微生物群落比较[J].微生物学通报,2016,43(1):26-35.
- [6] 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,2007,26(6):64-68.
- [7] 傅建辉.牛粪高效沼气的发酵工艺的探讨[J].中国沼气,1991,9(4):48-49.
- [8] 范云.家畜粪便厌氧发酵制沼气的的影响因素及工艺特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012:37.
- [9] 韩东全,董良杰.温度及总固体浓度对实验动物粪便厌氧发酵产气特性的影响[J].农业与技术,2017,37(1):21-24.
- [10] 王法武,刘德新,陈浩,等.温度与 pH 对静态厌氧发酵产甲烷的影响[J].安徽农业科学,2014,42(33):11839-11841.
- [11] MAO C L, FENG Y Z, WANG X J, et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion [J]. Renewable and sustainable energy review, 2015, 45: 540-555.
- [12] 王荣辉,饶国良,李盟军,等.影响猪场厌氧发酵系统运行效果的因素分析[J].广东农业科学,2015,42(23):28-31.
- [13] 乔小珊.总固体浓度、碳氮比和水力停留时间对奶牛粪便厌氧发酵产气及其沼液性质的影响[D].重庆:西南大学,2014:29,39.
- [14] FAGBOHUNGBE M O, HERBERT B M J, HURST L, et al. The challenges of anaerobic digestion and the role of biochar in optimizing anaerobic digestion [J]. Waste management, 2017, 61: 236-249.
- [15] 靳红梅,杜静,郭瑞华,等.沼渣水热炭添加对猪粪中温厌氧消化的促进作用[J].中国沼气,2018,36(1):47-53.
- [16] JIN H M, CHANG Z Z. Distribution of heavy metal contents and chemical fractions in anaerobically digested manure slurry [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2011, 164(3):268-282.
- [17] 王瑞,魏源送.畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J].农业环境科学学报,2013,32(9):1705-1719.
- [18] 吴大伟,李亚学,吴萍,等.规模化猪场有机肥猪饲料、猪肉及粪便中重金属含量调查[J].畜牧与兽医,2012,44(4):38-40.
- [19] 王玉婷,吕梦园,韩新燕.宁波地区不同规模猪场粪便中重金属含量分析[J].家畜生态学报,2016,37(3):55-58,64.
- [20] 彭丽.杨陵区规模化养殖场畜禽饲料及粪便中养分与重金属含量分析及环境管理启示[D].杨凌:西北农林科技大学,2016:4-5.
- [21] 刘健龙.养猪粪污中重金属 Cu 的去除技术研究[D].重庆:重庆大学,2016:6.
- [22] 侯月卿,沈玉君,刘树庆.我国畜禽粪便重金属污染现状及其钝化措施研究进展[J].中国农业科技导报,2014,16(3):112-118.
- [23] 孙建平.抗生素与重金属对猪场废水厌氧消化的抑制效应及其调控对策[D].杭州:浙江大学,2009:12.
- [24] 李轶,杨晓桐,唐佳妮,等.外源重金属对猪粪厌氧发酵产气特性的影响[J].中国沼气,2015,33(6):8-13.
- [25] 陈芬,余高,武春燕,等.外源 Cu、Zn 对猪粪与玉米秸秆混合物料产甲烷特性影响机理分析[J].环境科学学报,2016,36(12):4428-4436.
- [26] 王巧玲.餐厨垃圾厌氧发酵过程的影响因素研究[D].南京:南京大学,2012:32.
- [27] 刘志富.典型抗生素在土壤上的吸附-解吸及迁移性研究[D].北京:

- 中国地质大学, 2016: 2.
- [28] 刘芳. 畜禽养殖废水中土霉素和金霉素对厌氧消化作用的研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013: 11.
- [29] 张玲, 郑西来, 余宗莲, 等. FeCl_3 及 AlCl_3 对中温厌氧消化系统产生 H_2S 的抑制作用 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5907-5914.
- [30] 郑新, 闵航. 亚硫酸盐、硫化物对厌氧消化的影响 [J]. 环境污染与防治, 1995, 17(4): 1-4.
- [31] RAJAGOPAL R, MASSÉ D I, SINGH G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia [J]. Bioresource technology, 2013, 143(17): 632-641.
- [32] 张旭, 王宝贞, 朱宏. 厌氧消化体系的酸碱性及其缓冲能力 [J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 492-496.
- [33] 史金才, 廖新伟, 吴银宝. 4 种畜禽粪便厌氧发酵产甲烷特性研究 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 632-636.
- [34] 柴阳, 铜盐, 铬盐对芦苇和牛粪混合厌氧发酵的影响 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 3-4.
- [35] 刘智敏, 朱建航, 成家杨. 高温厌氧发酵有机废物生产沼气综述 (英文) [J]. 生物学杂志, 2017, 34(1): 58-64.
- [36] 李礼, 徐龙君. 碳氮比对鸭粪中温厌氧消化的影响 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1903-1906.
- [37] 李淑兰, 刘萍, 梅自力. 中高温条件下不同碳氮比对鸡粪原料厌氧发酵产气特性的影响 [J]. 中国沼气, 2018, 36(5): 73-76.
- [38] 沈飞, 史晶亮, 李汉广, 等. 碳氮比对猪粪和稻秆协同生物降解的影响 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2499-2504.
- [39] 沈飞, 李汉广, 钟斌, 等. 碳氮比对稻草和猪粪生物处理及厌氧消化的影响 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4212-4219.
- [40] 黄岳海, 赵伟. 沼气发酵的基本条件 (一) [J]. 新农业, 2006(8): 61.
- [41] 傅国志, 马宗虎, 廖子文. 有机负荷对鸡粪厌氧发酵产气特性及其动力学的影响 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 80-83.
- [42] 常华, 李海红, 闫志英. 总固体浓度对猪粪中温连续厌氧发酵的影响 [J]. 陕西科技大学学报, 2017, 35(4): 27-31.
- [43] 杨贵运. 总固体浓度和粪秆比对沼气发酵的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2015: 42.
- [44] 范信生, 刘春软, 李玉成, 等. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 对稻秆和猪粪混合厌氧发酵产气的影响 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 1159-1165.
- [45] LOVELEY D R. Extracellular electron transfer: Wires, capacitors, iron lungs, and more [J]. Geobiology, 2008, 6(3): 225-231.
- [46] GURUNG A, VAN GINKELB S W, KANG W C, et al. Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: A lab-scale study [J]. Energy, 2012, 43(1): 396-401.
- [47] POBEHEIM H, MUNK B, LINDORFER H, et al. Impact of nickel and cobalt on biogas production and process stability during semi-continuous anaerobic fermentation of a model substrate for maize silage [J]. Water research, 2011, 45(2): 781-787.
- [48] 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 等. 针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1988-1993.
- [49] SUANON F, SUN Q, MAMA D, et al. Effect of nanoscale zero-valent iron and magnetite (Fe_3O_4) on the fate of metals during anaerobic digestion of sludge [J]. Water research, 2016, 88: 897-903.
- [50] 张艺, 陈胜文, 韩伟, 等. 制备磷酸铁添加对厌氧发酵产气的影响 [J]. 上海第二工业大学学报, 2017, 34(3): 176-182.
- [51] 刘春软, 童巧, 汪晶晶, 等. 不同添加剂对猪粪厌氧发酵的影响 [J]. 中国沼气, 2018, 36(5): 30-35.
- [52] 许彩云, 靳红梅, 常志州, 等. 麦秸生物炭添加对猪粪中温厌氧发酵产气特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1167-1172.
- [53] 鹿晓菲, 王海东, 马放. 铁氧化物/沸石添加剂强化畜禽粪便污水厌氧消化 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 101-105.

(上接第 220 页)

对各层土壤温度的影响。由表 4 可知, 16:00, 在土壤耕层 5 cm 降解地膜 BSF-A2、BSF-B2、XFHS-1 覆盖的土壤温度比对照 (CK) 分别高 0.33、0.67 和 0.50 $^{\circ}\text{C}$; 10 cm 土层, 除 XFHS-1 外, 其他降解地膜覆盖土壤耕层温度均低于对照 (CK); 15 cm 土层 BSF-B2、XFHS-1、XFHS-2 处理土壤温度高于对照 (CK)。由此可见, 降解地膜对土壤具有保温作用。

3 讨论

不同生物降解地膜由于配方、材料等因素不同导致地膜的降解启动期和降解速率存在差异。该试验结果发现, 在实际生产应用中, 各降解地膜在甜瓜定植灌水后压土部分的地膜会出现部分降解, 且土壤湿度越大, 降解速度越快; 在甜瓜的生长过程中, 肥料的酸碱性以及喷洒农药均未影响其使用效果, 且在甜瓜生长收获后, 各降解地膜的纵向拉力均发生了变化, 但由于条件有限, 并未对降解地膜的降解程度和拉力变化做相应的测试。同时, 为了了解降解地膜的降解产物是否对土壤环境有影响, 该研究对使用后的地膜进行还田, 持续采集土壤样品对其进行理化分析, 以此来确定降解地膜的生物可降解性。

4 结论

通过分析不同生物降解地膜覆盖栽培对土壤温度和甜瓜生长发育及品质的影响, 结合土壤各耕层温度发现, XFHS-1 降解地膜的保温效果较好; 生长发育方面, 降解地

膜对甜瓜植株茎粗的影响较小, 而对株高和叶绿素含量的影响较大; 品质和产量方面, 降解地膜优于普通地膜, 以 XFHS-1 为最优, 边糖含量提高了 31.7%, 产量提高了 8.5%。综合以上结果, 建议 XFHS-1 降解地膜在甜瓜等作物生长周期一致的作物上推广使用。在此同时, 为了了解降解地膜的降解产物是否对土壤环境有影响, 该研究对使用后的地膜进行还田, 持续采集土壤样品对其进行理化分析, 以此来确定降解地膜的生物可降解性。

参考文献

- [1] 汪洪鹰, 易永健, 石磊, 等. 塑料大棚内麻地膜覆盖草莓效应的初步研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(8): 226-229.
- [2] 李婷, 曾剑波, 刘中华, 等. 新型可降解地膜对网纹甜瓜产量和品质的影响 [J]. 长江蔬菜, 2018(2): 71-73.
- [3] 曹玉军, 程兆东, 郑百行, 等. 地膜覆盖残留的危害及防治对策研究 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(6): 258-259.
- [4] 陈东城. 我国农用地膜应用现状及展望 [J]. 甘蔗糖业, 2014(4): 50-54.
- [5] 孙铁珩, 宋雪英. 中国农业环境问题与对策 [J]. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 646-648, 652.
- [6] 何文清, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 533-568.
- [7] 李英挺. 地膜, 地魔 [N]. 海南日报, 2013-10-29(A04).
- [8] 吕江南, 王朝云, 易永健. 农用薄膜应用现状及可降解农膜研究进展 [J]. 中国麻业科学, 2007, 29(3): 150-157.
- [9] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 111-116.
- [10] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响 [J]. 作物学报, 2011, 34(7): 1249-1258.