

废弃烟秆厌氧消化产甲烷工艺的研究进展*

张洪波, 张 昱, 张瑜瑜, 沈 放, 程 威, 李燕萍,
张 蓉, 王 洁, 王 淞, 夏 云**

(昆明学院 农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214)

[摘 要] 为探讨废弃烟秆厌氧消化应用和推广的可能性, 总结了近年来废弃烟秆厌氧消化产甲烷的研究进展和发展趋势, 重点对不同研究进行废弃烟秆厌氧消化的接种物、预处理、温度、pH、碳氮比、有机负荷和TS质量分数等影响因素进行了对比分析, 并总结了近年来研究出现不同结果的可能原因及目前存在的问题, 可为后续探测废弃烟秆厌氧消化最佳的工艺条件, 提高产气效率提供理论依据, 也可为进一步推广利用厌氧消化技术处理废弃烟秆的资源化利用提供技术支持。

[关键词] 废弃烟秆; 厌氧消化; 工艺参数; 优势菌群

[中图分类号] TQ914.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5639(2023)06-0055-09

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2023.06.008

烟草作为我国的重要经济作物之一, 在我国各地被广泛种植, 每年产量约占世界总产量的43%^[1], 烟草秸秆(Tobacco stalks, 简称烟秆)是烟草生产中最大的副产品, 每年烟叶采收后所剩余的大量烟秆(烟叶与烟秆的产量比为1:1)是让烟叶种植地区颇为头疼的问题^[2], 这些烟秆通常被丢弃于农田或被晒干燃烧, 资源浪费的同时造成大气污染^[3]。一方面, 田间烟秆若不能得到及时清理, 其腐烂降解产生的尼古丁等成分会渗入田地降低土壤肥力; 烟草病菌会直接进入土壤, 容易造成烟草病害蔓延而降低烟叶产量^[4]。有研究^[5]表明烤烟黑胫病原菌可在土壤及病株残体中存活2~3年, 烤烟猝倒病、菌核病等一些病原菌可以在土壤中存活5年以上, 一旦这些病原菌侵入土壤, 可能会长期影响烤烟种植; 另一方面, 烟秆中含有大量的木质素、纤维素和尼古丁, 普通的分解细菌难以对其进行分解, 因而传统的就地还田不能使烟秆得到有效的降解^[6]。并且, 就地焚烧还田和集中掩埋的处理方式与《“十四五”全国农业绿色发展规划》中所提出的“推进农业绿色发展”目标背道而驰。因此如何合理、高效、环保地利用烟秆成为我国烟草种植产业当前的紧迫任务。烟秆的再利用途径之一是用来生产比木材成本更低的烟秆纤维板, 虽然烟秆纤维板在抗弯强度、内部粘结强度和表面持钉能力等方面都符合纤维板制定的标准, 但是由于烟秆粉颗粒较大, 用于粘合的表面积有限, 易吸水溶胀, 使用范围受限^[7]。除此之外, 由于烟秆中含有烟碱, 可通过一定的技术手段提取其中的烟碱作为生产绿色食品理想的高效杀虫剂和生物性农药^[8]; 还可利用烟秆制备一些, 如功能性低聚木糖^[9]、高性能活性炭吸附剂^[10]等高附加值的产品; Mijailovic^[11]对烟秆的化学性质和热值进行了测定, 发现烟秆具有较高的热值, 可作为一种可再生能源。但部分用途在实际生产中还面临技术的改进和高额的经济投入。如何更经济和有效地利用烟秆, 获得更好的经济效益是当前的研究热点。

刘超等^[12]总结了如何利用烟秆制备活性炭、提取化学原料、造板、造纸、生产生物质燃料和生产肥料共6个方面的进展, 认为在推广烟秆资源化利用的过程中, 应结合当地的实际情况和市场行情, 开发出

* [收稿日期] 2023-02-28

[作者简介] 张洪波, 男, 云南曲靖人, 昆明学院在读硕士研究生, 研究方向为农业废弃物资源化利用。

** [通信作者] 夏云, 女, 云南昆明人, 昆明学院教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为分子微生物, E-mail: 3098933205@qq.com.

[基金项目] 云南省教育厅研究生类项目(2023Y0877); 云南省大学生创新创业训练计划项目(S202211393057)。

多层次、多途径的综合利用方式,才能促进烟秆资源化的进程;覃佐东等^[13]分析了烟秆生物质的理化性质,对烟秆生物质的利用进行了分析,提出了在利用烟秆的过程中,可根据产地原料的获取难易、可实行的工艺条件及发展需求选择不同的利用方式进行灵活开发利用烟秆;夏鸣^[14]等从可行性研究和实际工程应用方面总结了烟草废弃物厌氧发酵产沼气的研究进展,对预处理方法和接种物的选择进行了对比分析,认为预处理技术的组合使用和优秀接种物中优势菌群的筛选培育是今后实际工程应用的重要研究方向;符德龙等^[15]对烟秆的肥料化、燃料化、基料化、原料化和饲料化5个方面综合利用进行了评估,结论提出应该加大相关配套机械设备的研发和生产. 姜晓平^[16]等总结了田间废弃鲜烟叶、烟叶采后秸秆、废弃病虫害烟株、机械损伤烟株及雹灾烟株的现状和利用方式,认为必须通过地方政府联合社会各方力量解决烟草废弃物综合利用的问题,并针对烟草废弃物不同部分的理化性质提出了不同的利用方法和处理思路,特别提出烟秆厌氧消化产生新能源的过程是最有前景的方法之一.

采用厌氧消化技术处理烟秆不仅能将烟秆中可降解的有机物转化为清洁能源——甲烷(CH_4)^[17],产生的沼渣还可作为优质有机肥^[18],既不会对环境造成负面的影响,又可充分利用农业资源. 相比于其他资源化利用和无害化处理的方法,厌氧消化技术具有成本较低、设备要求简单、运行条件易满足、最易实现产业化等优点,是目前对废弃烟秆进行无害化处理和资源利用的合适选择.

本文针对烟草废弃物组成之一的烟秆为总结对象,概括了近15年来利用厌氧消化技术对烟秆进行资源化利用的研究结果,分析了不同研究结果之间存在差异可能的原因,旨在为烟秆厌氧消化的研究提供一定的理论参考和借鉴,为积极发展该技术在工程中的应用提供技术支持.

1 烟碱抑制烟秆厌氧消化产气性的研究

现有研究^[19-22]对利用烟秆进行厌氧消化的可行性进行了探索. 杨斌^[12]曾报道过烟叶中特有的烟碱(Nicotine, 尼古丁)会抑制厌氧微生物的代谢,不能作为单一原料进行厌氧消化. 但相较于烟叶,烟秆中的烟碱含量一般较低^[23]. 杨叶昆^[24]报道云南烟草种植区部分烟叶的烟碱含量达到2%~5%. 姚玉霞^[25]比较了吉林省多个烟秆样品的烟碱含量,发现烟秆上部的烟碱含量(质量分数,下同)大于下部,范围在0.15%~2.0%之间. 早在2009年,陈智远^[26]等采用干式发酵,探究了玉米秸秆、稻草秸秆和烟秆3种秸秆的厌氧消化产气情况,得出烟秆的甲烷产气量(426 mL/g VS)高于稻秆(387 mL/g VS),但不及玉米秸秆(470 mL/g VS),虽然没有考虑烟秆中烟碱可能带来的影响,但是试验过程中并没有发现烟碱抑制烟秆厌氧消化产气的现象. 张鸿雁^[23]将烟碱以不同质量分数(0.01%, 0.05%, 0.10%, 0.05%, 1.00%, 4.00%, 7.00%, 10.00%)添加到葡萄糖的厌氧消化中,结果表明,烟碱含量较低的环境(<4%)对葡萄糖的厌氧消化产气性能没有显著影响,而较高质量分数(7.00%, 10.00%)的烟碱对葡萄糖的厌氧消化有一定抑制作用,产气量分别下降了10.9%和21.2%. 该研究首次在试验中探明了较低浓度的烟碱含量不会对厌氧消化产生抑制,同时也证明了烟秆厌氧消化是可行的.

2 烟草品种对烟秆厌氧消化产气性的研究

研究表明烟草的品种会对烟秆的厌氧消化产生影响. 由于不同品种的烟秆在物质组成上存在一定的差异,包括烟秆的C/N(碳氮比)、TS(总固体质量)、VS(可挥发性固体)、纤维素和木质素等,烟秆厌氧消化的产气效果会直接受到影响^[20,23]. Li^[20]研究了云烟85(TS为63.73%, VS为60.43%, 木质素为11.37%)、云烟99(TS为82.87%, VS为75.01%, 木质素为13.75%)、云烟114(TS为78.21%, VS为71.11%, 木质素为9.05%)、贵烟2号(TS为68.48%, VS为62.24%, 木质素为13.60%)4种烟秆厌氧消化产甲烷潜力,结果发现云烟114(木质素含量低于其他品种)的秸秆甲烷累积产量最高,为130.2 mL/gVS;张鸿雁^[23]研究了云烟116(TS为91.32%, VS为88.19%, 木质素为14.85%)、云烟99(TS为92.51%, VS为89.76%, 木质素为15.27%)和云烟85(TS为92.07%, VS为89.02%, 木质素为14.88%)3个品种烟草烟秆厌氧消化产甲烷潜力,结果发现云烟116的秸秆最大累加甲烷产量为148.0 mL/gVS,高于同试验的另外2个品种(云烟99和云烟85). 说明烟秆的木质素越低,VS/TS越高,厌氧消化产甲烷量就越多.

3 厌氧消化工艺参数对烟秆厌氧消化产气性的研究

3.1 接种物和消化工艺类型的选择

接种物的选择对烟秆厌氧消化产气性有重要影响^[27]。厌氧消化本质上是数百种厌氧微生物在无氧(或少氧)的环境中进行能量代谢的过程^[28], 由不同的接种物造成产气性较大差异的主要原因在于厌氧消化系统中的微生物组成和结构之间存在的差异较大。在烟秆厌氧消化的过程中, 一般选择驯化时间较长、微生物活性较强的活性污泥为接种物。在前期的研究中, 接种物主要来源于沼气站和养殖场^[21,22], 也有来自于实验室将作物秸秆与各种畜禽粪便混合进行长期驯化所得到高活性的厌氧污泥^[21](见表1)。不同的研究对烟秆进行消化的时间长短也不同, 最长的 90 d^[26], 最短的 30 d^[20], 大多数在 40 ~ 60 d^[19,20,23,29], 这可能与烟秆的品种、接种物、工艺参数以及烟秆的不同处理方式有关^[22]。

表 1 关于烟秆厌氧消化类型和接种物的部分研究信息对比

烟草品种	消化工艺	消化类型	接种物	消化时间/d	作者(发表年份)
-	序批式	干式	活性污泥	90	陈智远等 ^[26] (2009)
-	序批式	湿式	活性污泥	40	丁琨等 ^[19] (2013)
-	序批式	湿式	厌氧污泥	44	Liu, et al. ^[29] (2015)
-	序批式	湿式	活性污泥	50	李雪 ^[21] (2018)
云烟 116、云烟 85、 云烟 99	序批式	湿式	厌氧污泥 + 猪粪, 厌氧污泥 + 牛粪, 厌氧污泥 + 鸡粪	46	张鸿雁 ^[23] (2019)
云烟 116	序批式	湿式	厌氧污泥	55	张鸿雁 ^[23] (2019)
云烟 85、云烟 99、 云烟 114、贵烟 2 号	序批式	湿式	厌氧污泥	30	Li, et al. ^[20] (2019)
-	序批式	湿式	猪粪 + 接种污泥	85	安银敏 ^[22] (2020)

厌氧消化工艺类型有多种分类标准。根据 TS 质量分数的高低可分为: 湿式厌氧消化(TS 质量分数 < 10%), 高固体厌氧消化(10% ≤ TS 质量分数 ≤ 20%) 和干式厌氧消化(TS 质量分数 > 20%) 3 种^[29]。根据温度的高低分为: 低温厌氧消化(15 ~ 25 °C)、中温厌氧消化(30 ~ 35 °C) 和高温厌氧消化(50 ~ 55 °C)^[21]; 根据投料运行方式分为连续式、半连续式和序批式厌氧消化。由于对烟秆的厌氧消化工艺的探索还处在起始阶段, 还未形成规模化和产业化, 而大部分烟秆的厌氧消化工艺和消化类型基本都采用中温湿式序批式厌氧消化(表 1、表 2)。

3.2 预处理

预处理会直接影响烟秆厌氧消化的产气效果, 主要可分为物理预处理、化学预处理和生物预处理^[23], 其中物理粉碎是烟秆预处理中最常用的手段。早期关于烟秆厌氧消化的产气潜力研究中, 都对烟秆进行物理预处理, 并根据处理后的粒径大小(最粗的为 2 ~ 3 cm^[26]; 最细的 40 目(相当于 0.425 mm)^[20,22])进行了产气性比较。在工艺条件一致的前提下, 粒径越小, 微生物可作用面越大, 理论上厌氧反应器启动就越快, 产气效率也越高, 所以一般情况下选择粒径较小的烟秆粒径进行厌氧消化处理^[30,31]。张鸿雁^[23]将烟秆粉碎过 20 目筛后, 又采用了不同的化学试剂对烟秆进行了处理, 其中包括强氧化剂处理(碱性过氧化氢 AHP), 3 种碱预处理(NaOH、Ca(OH)₂、KOH), 和 2 种酸预处理(草酸、HCl), 各处理浓度均为 1.00%, 3.00%, 5.00%, 7.00%, 对比发现 7.00% AHP 预处理效果最佳, 累积甲烷产量为 350.7 mL/g VS, 是未预处理条件下产气量(170.5 mL/g VS)的 2 倍多。总的来说, 物理预处理有着操作简单的优点, 但也存在设备昂贵、耗能过高的问题; 而化学预处理虽然试剂成本相对较低, 但容易造成二次污染; 与前述二者相比, 生物预处理有着环境污染小成本低的优点, 但还是存在处理时间长、预处理效果不显著等问题, 因此还需要进一步的研究和开发。

3.3 温度、有机负荷和 TS 质量分数

温度是影响厌氧消化的重要因素之一, 温度会影响微生物菌群的新陈代谢速率, 最终改变有机物的降解速度^[32]. 其中甲烷菌对温度非常敏感^[33], 当产甲烷菌在某温度下被驯化后, 温度波动超过 0.6 °C 即会影响消化效果, 温度波动超过 1 °C 时产气量将急剧降低^[34]. 对不同营养类型的产甲烷菌而言, 温度降低导致其活性的抑制程度存在显著差别, 在 20 ~ 30 °C 范围内, 乙酸营养型产甲烷菌对温度胁迫表现出更好的耐受性, 而在 15 °C 以下时, 氢营养型产甲烷菌则表现出更好的耐受性. 安银敏^[22]研究了不同发酵温度 (25 °C、35 °C、45 °C) 和物料配比对烟秆发酵特性的影响发现, 相较于物料配比对烟秆发酵效果的影响, 温度对其影响更为显著. 消化温度不同则厌氧消化特性也有所不同, 一般而言, 中温 (30 ~ 35 °C) 条件下微生物的活性最高, 同时在消化过程中还要避免温度波动, 减少对关键产气菌群的干扰^[35]. 在升温技术研发方面, 云南师范大学最先实现了利用太阳能加热对烟秆厌氧消化进行升温, 实现了烟秆中温发酵, 产生的沼气又用于替代燃煤来烘烤烟叶, 形成了太阳能与废弃烟秆资源化高效利用的有机结合, 促进了烟草节能生产与碳中和理念的协调发展^[36].

厌氧消化系统中的有机负荷 (OL) 和 TS 质量分数相关, 有机负荷可表现出厌氧消化系统中的挥发性固体在系统中的占比情况, 而 TS 质量分数反映的是总固体在系统中的占比情况^[29]. 张鸿雁^[23]通过 3D 响应面法研究发现, 不同烟草品种最适有机负荷不同. 如, 云烟 116 烟秆最适 OL 为 20.1 g VS/L; 云烟 85 烟秆为 26.3 g VS/L; 云烟 99 烟秆为 23.6 g VS/L. 丁琨^[19]以烟秆与接种物按总固体质量比 4:6 配制发酵底物, 研究烟秆在室温 (22 °C) 和中温 (28 °C) 条件下厌氧发酵产沼气的情况, 结果表明室温条件下 (TS 质量分数 9.63%) 的总产气量比中温条件下 (TS 质量分数 8.7%) 高 52%. 在全国烟草种植的区域中, 西南地区年平均温度较高 (12 ~ 20 °C), 厌氧消化系统不需要人工增温也可正常运行. 大量数据^[19-29]表明, 选择合适的温度和 TS 质量分数是提升产气效率的关键, 而现有的研究中, 对 TS 质量分数的设置比较单一, 大多集中在 6%^[21,23]和 8%^[22] (表 2).

表 2 关于烟秆厌氧消化主要工艺参数及产气效果的部分研究信息对比

预处理	粒径大小/mm	有机负荷/(g VS/L)	接种比(烟秆:接种物)	温度/°C	pH	碳氮比	TS 质量分数/%	最佳处理产气效果/(mL/g VS)	参考文献
物理粉碎	4.000	18.00	1.00	37	-	-	-	最高累积甲烷产量为 130.2	Liu et al. ^[29] (2015)
物理粉碎	0.425	-	0.49	35	-	23.17	-	最高甲烷产量为 163	Li et al. ^[20] (2019)
化学处理 (7% AHP 预处理)	0.850	20.00	1.00	37	6.50 ~ 7.50	-	≈6.00	最高累积甲烷产量为 350.7	张鸿雁 ^[23] (2019)
物理粉碎	0.425	-	1.00	35	7.00	-	6.00	最高沼气产量 3 628.3	李雪 ^[21] (2018)
物理粉碎	4.00	≈37.15	≈3.87	22	7.61	-	9.63	最高沼气产量约 332.5	丁琨等 ^[19] (2013)
物理粉碎	0.425	≈9.98	≈3.50	45	7.00	-	8.00	最高沼气产量约 1 711.1	安银敏 ^[22] (2020)
物理切碎	20 ~ 30	-	≈0.94	38	7.30	-	20.12	最高沼气产量 426	陈智远等 ^[26] (2009)

3.4 pH

厌氧消化需要在一个相对稳定的 pH 值范围才能正常运行^[37]. pH 值 6.5 ~ 7.5 之间是大部分产酸菌能适应的环境^[38], 在 6.5 ~ 8.0 之间比较适合甲烷菌生长^[39]. 如果反应中 pH > 8.0 或 pH < 6.0, 则产甲烷菌的生长会被抑制, 会导致酸碱不平衡, 对反应系统产生严重影响. 张鸿雁^[23]在试验开始前将各处理组

pH 调节至 6.5 ~ 7.5. 丁琨^[19]对 2 种配比后消化液的 pH 进行了测定, 分别为 7.61 和 7.55, 均在可进行厌氧消化需要的 pH 值范围内. 李雪^[21]将 pH 调节至 7.0; 安银敏^[22]在试验开始时并没有对 pH 值进行关注. 但是, 在试验进行的第 5 ~ 7 d, 各处理组相继进入停滞期, 经开盖检查发现酵罐内 pH 在 5.5 ~ 6.0 之间, 已偏离厌氧发酵适宜 pH. 最终通过添加 NaOH 粉末将发酵罐内 pH 值调至 7.0 左右. 所以在厌氧消化试验前, 对反应器的 pH 值进行测量并调整至需要的范围是厌氧消化反应器正常运行的基本要求和必要条件.

3.5 碳氮比

厌氧消化最适的 C/N 在 20:1 ~ 30:1 之间^[40-42]. 发酵基质 C/N 过高或过低都不利于厌氧消化的进行, C/N 过低, 会导致 pH 过高, 发生氨抑制现象^[43], 抑制微生物的生长; C/N 过高, 氮含量不足, 容易发生酸累积现象, 同样会影响甲烷的产生^[44]. Li^[20]设置了 10 个 C/N (5.51、17.53、16.50、17.62、17.15、18.26、23.17、24.14、23.64、24.59) 对烟秆的产气潜力进行了对比研究, 研究发现 C/N 为 23.17 处理组的甲烷产量最大.

3.6 其他条件

有研究^[45]表明外源添加剂可作为良好的催化剂促进各阶段菌群的代谢. 如微量元素 (Fe、Cu、Zn、Co、Ni、Se、Mo 等) 不仅参与了合成体系中的各种微生物的能量代谢, 还能激活各种酶的活性, 对烟秆厌氧消化系统的稳定和产气效率的提升都有可研究的空间^[46,47]. 除此之外, 还有一些碳基材料, 比如生物炭和改良的活性炭, 不仅能为厌氧微生物提供一个良好的发酵环境, 其超强的吸附能力还可解决厌氧消化过程可能遇到的有机酸和氨氮导致的抑制^[47,48], 再者, 一些新材料 (高分子碳纤维、纳米金属等) 的应用研究都可以在烟秆厌氧消化中进行尝试.

4 烟秆厌氧消化中的优势菌群的研究进展

在烟秆的厌氧消化研究中, 前期研究对各阶段主要参与的优势菌群关注较少^[22,28]. 李雪^[21]通过高通量测序发现烟秆厌氧消化过程中的优势菌群为 (基于门分类) Firmicutes (硬壁菌门)、Bacteroidetes (拟杆菌门)、Chloroflexi (绿弯菌门)、Euryarchaeota (广古菌门), 其中 Euryarchaeota 中的 *Methanosarcina* (甲烷八叠球菌属) 在产甲烷阶段中占主导地位, 其丰度为 37.07%, 是乙酸代谢产甲烷的主要菌群.

厌氧消化是复杂的连续生化过程, 一般分为 4 个阶段^[49,50], 即水解阶段、酸化阶段、产酸阶段和产甲烷阶段. 4 个阶段同时发生, 微生物种群之间相互依赖并且相互制约. 在水解阶段^[34,51], 主要参与水解的菌群主要包括 *Bacteroides* (拟杆菌属)、*Fibrobacter* (纤维杆菌属)、*Clostridium* (梭菌属)、*Ruminococcus* (瘤胃球菌属) 和醋弧菌属 (*Acetivibrio*), 它们将大分子有机物 (纤维素、蛋白质、脂肪等) 转化为小分子单体物质 (如可溶性糖类、氨基酸和长链脂肪酸等); 在酸化阶段, 主要参与酸化的菌群主要包括 *Clostridium* (梭菌属)、*Butyrivibrio* (丁酸弧菌属)、嗜热厌氧杆菌属 (*Thermoanaerobacter*) 和大部分的芽孢乳杆菌科 (*Sporolactobacillaceae*), 它们将小分子有机物降解为 C1-C5 的短链挥发性脂肪酸 (如丁酸、丙酸、乳酸和乙酸等)、醇等; 在产酸阶段, 主要参与产酸的菌群主要包括以下 6 种^[52]: *rod-shaped bacterium* (杆状细菌)、*Thermacetogenium phaeum* (棕色嗜热产醋菌)、*Thermotoga lettingae* (莱廷格热袍菌)、*Syntrophaceticus schinkii* (施林克乙酸互营菌)、*Tepidanaerobacter acetatoxydans* (温需气杆菌) 和 *Clostridium ultunense* (乌尔蒂纳梭菌), 此阶段将上一阶段产物进一步转化为乙酸、甲醇等, 此阶段主要靠 2 类微生物, 一种是同型乙酸菌以 H₂ 和 CO₂ 为原料生成乙酸, 同时还能代谢糖类产生乙酸; 另一种是异型乙酸菌 (与甲烷菌共生) 以脂肪酸和醇类物质转化为乙酸, 其中甲酸和甲醇可直接被产甲烷菌利用. 在产甲烷阶段, 按营养类型可将产甲烷菌分为 3 类, 嗜乙酸型、嗜氢型和嗜甲基型, 嗜乙酸甲烷菌会将乙酸代谢生成甲烷和 CO₂^[53,54], 嗜氢甲烷菌将 H₂ 和 CO₂ 转化为甲烷^[55,56], 甲基营养型甲烷菌将甲酸和甲醇转化为甲烷和水^[57-59]. 然而, 产甲烷菌对温度高度敏感且增殖周期长, 一般情况下产甲烷是有机物甲烷化过程的限速步骤, 在实际研究中, 可以通过调节温度控制产甲烷的优势菌群. 产甲烷阶段主要的优势菌群如表 3.

表3 主要的产甲烷菌群

主要的产甲烷菌属	最适生长温度	营养类型	参考文献
<i>Methanosarcina</i> (甲烷八叠球菌属)	中温菌:30~40℃;嗜热菌: 50~55℃	嗜乙酸型	Saha et al. [52] (2021)
<i>Methanothrix</i> (甲烷微丝菌属)	中温菌:35~45℃;嗜热菌: 65℃	嗜乙酸型	Kamagata et al. [53] (1990)
<i>Methanobrevibacter</i> (甲烷短杆菌属)	37~40℃	嗜氢型	Savant et al. [54] (2004)
<i>Methanosphaera</i> (甲烷球形菌属)	35~40℃	嗜氢型	Ros et al. [55] (2017)
<i>Methanobacterium</i> (甲烷杆菌属)	中温菌:37~45℃;嗜热菌: 55℃	嗜氢型	Sánchez et al. [60] (2022)
<i>Methanothermobacter</i> (沃氏甲烷嗜热杆菌属)	55~65℃	嗜氢型	Kouzuma et al. [61] (2017)
<i>Methanococcus</i> (甲烷球菌属)	中温菌:35~40℃;嗜热菌: 65℃;极端嗜热菌:85~91℃	嗜氢型	Ziemiński et al. [62] (2012)
<i>Methylobacterium</i> (甲基杆菌属)	25~30℃	嗜甲基型	Wu et al. [56] (2021)

但上述4个阶段处于动态的变化中,既相互依赖又相互制约.只有设置合理的工艺条件,让4个阶段的代谢达到平衡,才能发挥厌氧消化系统最佳的产气性能,否则可能会出现停滞期.安银敏^[22]在第5~7d内所有试验处理组均进入停滞期,且停滞期持续10d左右.值得注意的一点,与其他秸秆厌氧消化存在较大差异的是,烟秆厌氧消化的高峰期都出现在前3~5d内^[19,23],在丁琨^[19]的研究中第25d还出现了第2个高峰期,这可能是在第25d左右,某一个产甲烷菌群的活性得到提高,成为了该厌氧消化系统的优势菌群,导致产气效率突增.所以明确烟秆厌氧消化过程中各阶段的优势菌群,对试验开始前工艺参数的设定和试验过程的调节都有重要的意义.采用荧光原位杂交^[64](fluorescence in situ hybridization, FISH)技术来对厌氧消化过程中各阶段的优势菌群进行追踪,通过对比高峰期前后产甲烷菌的丰度变化,就可得到该阶段的优势菌群,这对甲烷菌的代谢途径的研究和如何调控特定产甲烷菌的活性来提高产气效率都有重要的研究前景.

由于接种物和厌氧消化工艺条件多样化,前期研究中指明的在各个阶段的优势菌群都可能存在较大差异,进一步筛选烟秆厌氧消化中产气效率高的优势菌群对烟秆厌氧消化的推广具有重要意义.

5 结语与展望

厌氧消化是农业秸秆资源化利用的主要途径之一,该方法可回收能源,生产沼肥并消灭病原菌,减轻环境危害.

目前在烟秆厌氧消化相关研究中,消化类型的选择上基本都采用中温湿式序批式厌氧消化.接种物宜选择微生物活性较强的活性污泥.由于前期对于烟秆厌氧消化产甲烷工艺的研究还处于试验阶段,与实际应用阶段还有一定距离,主要体现在以下几个方面:

1) 对预处理方法进行总结:化学预处理具有投入少、反应快和产气效率高等优点,但会对环境造成二次污染;而物理预处理操作简单,但需要较高的能耗.生物预处理则需要开发具有较高活性微生物菌剂.烟秆预处理的方法有待进一步的研究完善.

2) 随着对烟秆厌氧消化工艺条件的不断深入研究,应加强对厌氧消化各阶段过程中起主要功能的微生物的研究,提高优势菌群的活性和丰度是未来研究的方向.

3) 目前所有的研究都只是关注了烟秆发酵过程中产酸、产气以及理化指标的变化,而发酵工艺只应用了序批式,缺少对半连续式和连续式发酵工艺的研究,应用不同发酵工艺过程研究烟秆厌氧消化是未来研究的热点.

4) 烟秆厌氧消化结束后,沼液沼渣中含有大量的有机质,是制作有机肥的良好原料.对沼液沼渣的进一步资源化利用也是未来研究的方向.

5) 能源危急和生态环境保护是全人类发展所必须会面临,也必须被解决的问题.我国对实现碳达峰、碳中和作出了重大战略决策,对相关可持续农业在政策上做出了支持.在农业废弃物资源化利用追求绿色发展,合理利用的大背景下,采用厌氧消化技术对烟秆进行资源化利用具有广阔的推广和应用前景.

[参考文献]

- [1] ZHANT X L, XU X X, XU M G, et al. The impact of tobacco taxation policy on slim cigarette use and the growing popularity of slim cigarettes in China since 2014 [J]. Health Journal Stats, 2019, 11, 711-720.
- [2] LIAO Q, WEI G P, JIANG Z P, et al. Research progress on resource utilization of livestock and poultry manure [J]. Agricultural Science and Technology, 2014, 15 (1): 105-110.
- [3] 阮昊天. 烟秆基生物炭载体催化剂同时脱除 H₂S、COS 和 CS₂ 的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, 2017.
- [4] ESPOSITO G, FRUNZO L, GIORDANO A, et al. Anaerobic codigestion of organic wastes [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2012, 11: 325-341.
- [5] 李小龙, 张明宇, 沈建平, 等. 利用吨包式堆肥技术处理烟秆废弃物的效果评价 [J]. 云南农业科技, 2020 (4): 19-23.
- [6] CASTRO R C, AGRUPIS S C, LORENZO J L. 利用烟秆制造纤维板的研究 [J]. 烟草科技, 2000 (7): 32-34.
- [7] REYNALDO C C, SHIRLEY C A, JULIE L L. Industrial utilization of agricultural wastes: particleboard from tobacco stalks [J]. Cooperation Centre for Scientific Research Relative to Tobacco, 1997. 322-329.
- [8] 王莹, 杨海朝, 刘凤霞, 等. 微波和超声波辅助萃取废弃烟叶及烟秆中烟碱的研究 [J]. 农产品加工, 2019 (19): 1-5.
- [9] 芦广银. 烟草秸秆低聚木糖的制备和纯化 [D]. 阜阳: 阜阳师范学院硕士学位论文, 2018.
- [10] 柏松, 周健齐, 唐芹, 等. 烟秆活性炭的制备及吸附性能研究 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (13): 263-266.
- [11] MIJAILOVIC I, RADOJICIC V, ECIM-DJURIC O, et al. Energy potential of tobacco stalks in briquettes and pellets production [J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2014, 15 (3): 1034-1041
- [12] 刘超, 翟欣, 许自成, 等. 关于烟秆资源化利用的研究进展 [J]. 江西农业学报, 2013, 25 (12): 116-119.
- [13] 覃佐东, 汪美凤, 靳志丽, 等. 烟秆生物质全价利用现状及应用前景 [J]. 生物加工过程, 2016, 14 (4): 76-80.
- [14] 夏鸣, 汪云, 孙运兰. 烟草废弃物厌氧发酵产沼气的研究进展 [J]. 中国新技术新产品, 2018 (18): 90-91.
- [15] 符德龙, 孟辉, 张富贵, 等. 我国烟秆综合利用及设备研究进展 [J]. 贵州农机化, 2019 (4): 8-12.
- [16] 娄晓平, 赵炯平, 张保全, 等. 田间烟草废弃物综合利用实践与思考 [J]. 江西农业学报, 2020, 32 (12): 100-105.
- [17] 杨斌, 李彦, 张无敌, 等. 废弃烟叶厌氧消化的实验探究 [J]. 云南师范大学学报 (自然科学版), 2012, 32 (3): 28-32.
- [18] 姚利, 王艳芹, 郭兵. 农沼结合发展模式典型案例调研与模式优选 [J]. 农学学报, 2019, 9 (10): 18-22.
- [19] 丁琨, 田光亮, 苏有勇, 等. 烤烟秸秆厌氧发酵产沼气的动力学研究 [J]. 农机化研究, 2013, 35 (2): 217-220.
- [20] LI L, WANG R, JIANG Z, et al. Anaerobic digestion of tobacco stalk: biomethane production performance and kinetic analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26, 14250-14258.
- [21] 李雪. 秸秆厌氧发酵产沼气潜力及微生物群落研究 [D]. 延边: 延边大学硕士学位论文, 2018.
- [22] 安银敏. 烟秆沼气化应用及提升产气率研究 [D]. 贵阳: 贵州大学硕士学位论文, 2020.
- [23] 张鸿雁. 烟秆的厌氧消化产气性能与预处理技术研究 [D]. 北京: 北京化工大学硕士学位论文, 2019.
- [24] 杨叶昆, 李雪梅, 周瑾, 等. 超临界 CO₂ 流体萃取降低上部烟叶中的烟碱 [J]. 烟草科技, 2006 (1): 38-40.
- [25] 姚玉霞, 菜建培, 年淑清. 烟秆的综合利用 [J]. 农业与技术, 1995 (1): 26-27.
- [26] 陈智远, 姚建刚. 秸秆厌氧干发酵产沼气的研究 [J]. 农业工程技术 (新能源产业), 2009 (10): 24-26.
- [27] 高健, 李娟, 左晓宇, 等. 沼渣制备生物炭添加对小麦秸秆厌氧消化产气性能及微生物群落的影响 [J]. 中国沼气,

- 2020, 38 (6): 14-20.
- [28] 徐圣君, 王华彩, 姜参参, 等. 畜禽养殖废水生物处理技术研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2021, 44: 153-162.
- [29] 黄召亮, 乔杰, 庞晓怡, 等. 餐厨垃圾厌氧消化系统酸化调控研究进展 [J]. 四川环境, 2022, 41 (2): 262-266.
- [30] LIU Y, DONG J X, LIU G J, et al. Co-digestion of tobacco waste with different agricultural biomass feedstocks and the inhibition of tobacco viruses by anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 189, 210-216.
- [31] 安明明, 朱孟祺, 周伦祎, 等. 生物质快速热解及水蒸气气化实验研究 [J]. 工业加热, 2019, 48 (1): 1-4.
- [32] 田帅, 朱易春, 黄书昌, 等. 厌氧生物处理低浓度污水研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40 (4): 2338-2346.
- [33] 王瞢遇. 长江经济带典型污泥处理厂工艺介绍及运行特性分析 [J]. 环境生态学, 2022, 4 (4): 98-104.
- [34] 魏海娟. 白龙港污水处理厂污泥厌氧消化运行特性分析 [J]. 给水排水, 2018, 44 (10): 53-55.
- [35] 张欣. 3种不同秸秆原料预处理对厌氧发酵产沼气潜力及微生物群落动态影响研究 [D]. 延边: 延边大学硕士学位论文, 2017.
- [36] 赵崧岐. 低次烟叶厌氧消化产沼气的研究 [D]. 昆明: 云南师范大学硕士学位论文, 2015.
- [37] LATIF M A, MEHTA C M, BATSTONE D J. Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2017, 113: 42-49.
- [38] WANG D, HE D, LIU X, et al. The underlying mechanism of calcium peroxide pretreatment enhancing methane production from anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114934.
- [39] 方卉, 赵剑斐, 彭道平, 等. 秸秆混合厌氧发酵研究进展 [J]. 四川环境, 2019, 38 (3): 187-192.
- [40] 李玉春, 陈广银, 常志州, 等. 碳氮比对稻秸厌氧发酵过程的影响 [J]. 中国沼气, 2012, 30 (4): 25 - 29.
- [41] 马茹霞, 赵一全, 李家威, 等. 玉米秸秆厌氧发酵过程中的氮源优化 [J]. 可再生能源, 2018, 36 (11): 1593-1599.
- [42] 张彤彤, 顾平道, 黄跃武. 碳氮比对法国梧桐落叶、香樟青叶与猪粪混合厌氧发酵特性的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2019, 53 (1): 99 -105.
- [43] 张娟. 不同原料配比产气效果及沼液中产甲烷菌群落结构研究 [D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2009.
- [44] 喻爱和, 刘昭兵, 赵克勤, 等. 提高稻草产沼气效率的 C/N 和 C/P 参数初步研究 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49 (3): 547-550.
- [45] 张文存, 王丽莉, 张国辉. 提高厌氧消化中产甲烷效能的技术进展 [J]. 现代化工, 2021, 41 (6): 41-45.
- [46] 李如意. 有机固体废物厌氧消化技术现状研究及前景分析 [J]. 科技风, 2021 (18): 175-178.
- [47] 李伟, 吴树彪, BAH H, 等. 沼气工程高效稳定运行技术现状及展望 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (7): 187-196.
- [48] 胡玉瑛, 张世豪, 郑晓环, 等. 生物炭对厌氧消化效率及微生物群落的影响研究进展 [J]. 水处理技术, 2022, 48 (3): 19-24.
- [49] CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T, et al. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012 (16): 1462-1476.
- [50] XU F Q, LI Y B. Solid-state co-digestion of expired dog food and corn stover for methane production [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 219-226.
- [51] WATANABE K, KOYAMA M, UEDA J, et al. Effect of operating temperature on anaerobic digestion of the Brazilian waterweed *Egeria densa* and its microbial community [J]. *Anaerobe*, 2017, 47: 8-17.
- [52] 邓玉营. 共培养菌群强化秸秆厌氧消化及微生物学机制研究 [D]. 无锡: 江南大学博士学位论文, 2017.
- [53] SAHA S, KURADE M B, HA G S, et al. Syntrophic metabolism facilitates *Methanosarcina*-led methanation in the anaerobic digestion of lipidic slaughterhouse waste [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 335: 125250.
- [54] KAMAGATA Y, MIKAMI E. Some characteristics of two morphotypes of *Methanotrix soehngenii* from mesophilic anaerobic digesters [J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1990, 70 (4): 272-274.
- [55] SAVANT D V, RANADE D R. Application of *Methanobrevibacter acididurans* in anaerobic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50 (6): 109-114.
- [56] ROS M, DE S O J, MURCIA M D P, et al. Mesophilic anaerobic digestion of pig slurry and fruit and vegetable waste: dis-

- section of the microbial community structure [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 757-765.
- [57] WU L, WEI W, SONG L, et al. Upgrading biogas produced in anaerobic digestion: biological removal and bioconversion of CO₂ in biogas [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111448.
- [58] 王保玉, 刘建民, 韩作颖, 等. 产甲烷菌的分类及研究进展 [J]. *基因组学与应用生物学*, 2014, 33 (2): 418-425.
- [59] DAI X, TIAN Y, LI J, et al. Metatranscriptomic analyses of plant cell wall polysaccharide degradation by microorganisms in the cow rumen [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81 (4): 1375-1386.
- [60] SANCHEZ-SANCHEZ C, ARANDA-MERCEDES M, RODRIGUEZ A, et al. Development of real-time PCR methods for the quantification of *Methanoculleus*, *Methanosarcina* and *Methanobacterium* in anaerobic digestion [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2022, 199: 106529.
- [61] KOUZUMA A, TSUTSUMI M, ISHII S, et al. Non-autotrophic methanogens dominate in anaerobic digesters [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 1-13.
- [62] ZIEMINSKI K, FRAC M. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11 (18): 4127-4139.
- [63] 唐治. 生活污水厌氧消化强化技术的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2016.
- [64] XIA Y, MASSÉ D I, MCALLISTER T A, et al. Identity and diversity of archaeal communities during anaerobic co-digestion of chicken feathers and other animal wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 111-119.

Research Progress on Methane Production Process by Anaerobic Digestion of Waste Tobacco Stalks

ZHANG Hongbo, ZHANG Yu, ZAHNG Yuyu, SHEN Fang, CHENG Wei, LI Yanping,
ZHANG Rong, WANG Jie, WANG Song, XIA Yun
(*School of Agronomy and Life Sciences, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214*)

Abstract: In order to study the possibility of application and promotion of anaerobic digestion of waste tobacco stalks, the amount of data about the research progresses and development trends of methane production through anaerobic digestion of waste tobacco stalks in these years were summarized. The key factors including inoculum, pretreatment, temperature, pH, carbon-nitrogen ratio, organic load rates and substrate concentration during anaerobic digestion of waste tobacco stalks were compared and analyzed. Then the reasons of causing different results from primary studies and the problems which we must face now were summarized. This paper provides the theoretical data of how to optimize technical conditions and how to improve the gas productions for the further studies. The purposes of this paper are to provide the technical supports for promoting the utilization of anaerobic digestion technology to treat waste tobacco stalks.

Key words: waste tobacco stalks; anaerobic digestion; process parameters; dominant flora

(责任编辑: 陈伟超)