



移动扫码阅读

杨开宇,林常枫.畜禽粪污厌氧发酵预处理技术研究进展[J].能源环境保护,2021,35(6):42-48.

YANG Kaiyu, LIN Changfeng. Reearch progress on anaerobic fermentation pretreatment technology of livestock and poultry manure[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(6):42-48.

畜禽粪污厌氧发酵预处理技术研究进展

杨开宇,林常枫

(中国电建集团江西省电力建设有限公司,江西 南昌 330001)

摘要: 畜禽粪污中含有大量木质纤维素和氨氮,会抑制厌氧发酵进程并减少甲烷产量。为提高厌氧过程甲烷产量,分析了物理、化学、生物 3 个类型预处理技术的原理和特点,论述了各类技术的发展现状和应用前景。分析认为:生物预处理技术具有成本低、能耗低、环境友好等优点,应用前景最好;建议筛选培育高效的生物预处理菌种,开发以生物处理为主的复合预处理技术;在解除氨抑制方面,可进一步培育高活性耐氨厌氧微生物菌群,提高反应物 TS 浓度和发酵容积负荷,从而在保证甲烷产量的同时降低发酵设施规模和沼液产生量。

关键词: 畜禽粪污;厌氧发酵;木质纤维素;预处理技术;氨氮

中图分类号:X713

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)06-0042-07

Reearch progress on anaerobic fermentation pretreatment technology of livestock and poultry manure

YANG Kaiyu, LIN Changfeng

(Powerchina Jiangxi Electric Power Construction Co., Ltd., Nanchang 330001, China)

Abstract: Livestock and poultry manure contains a large amount of lignocellulose and ammonia nitrogen, which inhibits the anaerobic fermentation process and reduces methane production. In order to improve the methane production, the principles and characteristics of physical, chemical and biological pretreatment technologies were analyzed. The development status and application prospect of each technology were discussed. The analysis shows the biological pretreatment technology has the advantages of lower cost, lower energy consumption and environment-friendly, so its application prospect is the best of the three technologies. It is suggested to screen and cultivate efficient biological pretreatment strains and develop composite pretreatment technology based on biological treatment. In order to remove the inhibition of ammonia, highly active ammonia-resistant anaerobic microorganisms can be cultivated to improve the TS concentration of reactant and fermentation volume load. Thus, the scale of fermentation facilities and biogas slurry production can be reduced while ensuring methane production.

Key Words: Livestock and poultry manure; Anaerobic fermentation; Lignocellulose; Pretreatment technology; Ammonia nitrogen

0 引 言

我国是畜禽养殖业大国,据国家统计局网站数据显示,2020 年我国畜牧业总产值 40 266.67 亿元,年底全国猪、牛、羊存栏量分别为 40 650.42 万头、9 562.06 万头和 30 654.77 万头。农业部数据

表明,我国年畜禽粪污总量超 38 亿吨,畜禽粪污排放已经成为农业的首要污染源。粪污中含有大量的有机污染物、重金属、病原体等有害物质,直接排放会造成土壤、水体、空气污染,破坏生态环境,威胁人类健康^[1-3]。此外,粪污中蕴藏着丰富的有机质,若不加以利用还将造成资源的巨大浪

费^[4]。当前,粪污的安全处理已成为制约我国养殖业发展的头号难题。

以厌氧发酵技术为核心的畜禽粪污处理工艺可获得沼气、沼肥多种副产品,符合循环经济理念,解决环境污染的同时还能获取清洁的沼气能源,因此广受业内关注^[5]。研究表明,粪污原料直接进行发酵时普遍存在一些制约甲烷产生的因素,以最主要的牛粪、猪粪和鸡粪三种养殖粪污为例,三种粪污中含有的木质素会抑制酶对纤维素和半纤维素的降解,导致厌氧消化困难^[6];猪粪、鸡粪中高含量的氨氮同样会抑制微生物活性,阻碍厌氧反应进程^[7]。为获得更高的甲烷产量和发酵速率,在粪污原料进行厌氧发酵前通常需要进行预处理。本文综述了近年来的畜禽粪污厌氧发酵预处理研究成果,并对预处理技术机理进行分析,以便为研发可工业应用的高效畜禽粪污厌氧发酵预处理技术和促进粪污厌氧发酵产业化进程提供参考。

1 粪污中木质纤维素预处理技术

1.1 预处理的必要性

有研究表明牛粪、猪粪和鸡粪中均具有大量的木质纤维素,该三种粪污中木质纤维素干基占比依次高达 67.4%、51.4%、42.1%^[8]。厌氧发酵的第一步是水解作用,即将大分子有机物转化成小分子物质供微生物新陈代谢产生沼气,而该反应往往是整个厌氧反应的限速步骤,因此木质纤维素的生物降解性能是决定粪污甲烷产量的关键。

木质纤维素是木质素、纤维素和半纤维素的统称,预处理前后的木质纤维素结构如图 1 所示。半纤维素由多糖链组成,结构疏松易被微生物分解。纤维素为 D-吡喃葡萄糖单体形成的长链糖类物质,聚合度通常 1 000 以上,不溶于水和有机溶剂,较难降解^[9]。木质素由苯丙烷及其衍生物单体聚合而成,通过碳-碳键、醚键等多种化学键紧密相连,断键能耗非常高,具有很好的化学稳定性^[10]。自然界中能对木质素进行降解的微生物种类极少,即使是在木质素分解酶催化下分解效率也同样很低,这为植物的生长构建了避免微生物侵害的屏障,但同时也让对木质素的厌氧降解难度增大。Benner 等的研究表明,294 天的厌氧消化只能实现草中木质素 16.9% 的分解转化^[11]。

此外,木质素所形成的三维不定型网状结构

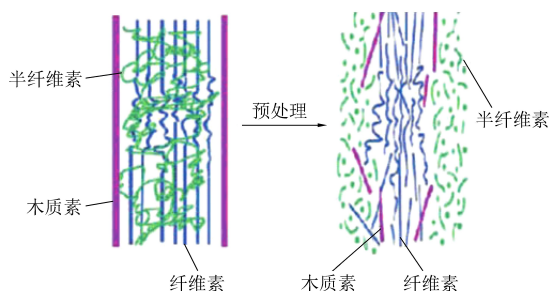


图 1 木质纤维素预处理前后的结构^[12]

Fig.1 Structures of lignocellulose before and after pretreatment^[12]

异常稳固,将纤维素和半纤维素紧密包裹其中。在厌氧发酵系统中,只有将大分子有机物水解成可溶性分子方能为后续微生物所利用。网状的木质素将纤维素、半纤维素与分解酶之间产生物理屏蔽作用,抑制水解进程,造成甲烷产量低。研究表明厌氧发酵过程中,木质纤维素原料的生物降解率不到 50%,即甲烷产气量低于 200 mL/g 干物质^[13]。

为此,在将畜禽粪污送入厌氧罐进行发酵之前非常有必要对猪粪、牛粪和鸡粪进行预处理,提高粪污中木质纤维素的降解性能,从而促进有机物的分解率,提升甲烷产量。

1.2 物理预处理

1.2.1 机械预处理

物理预处理法通常有机械处理、热处理等。机械处理法可通过固液分离的方式,将粪污原料分成含水率 60% 左右的固态粪渣和低含固率的分离液^[14]。实验表明^[14-15],牛粪固液分离后近 95% 的木质纤维素集中在粪渣中,使得固态粪渣中木质纤维素 TS 占比高达 82.74%,简单的固液分离可高效去除发酵原料中生物降解性低的木质纤维素。与相同 VS 含量的稀牛粪污相比,分离液发酵具有如下几方面优势:分离液中木质纤维素含量极低,因此加快了水解步骤速率,产沼气速率更高,可有效缩短发酵周期;同时,难以厌氧消化的木质纤维素的去除让原料利用率得到大幅提升,单位干物质沼气产量增加了 36.8%;此外,COD 去除率高,厌氧出水更容易达到环保标准。而分离的固态粪渣则可用于堆肥、制备压缩成型燃料等。可见,固液分离的方式为粪污厌氧发酵工艺提供了更多的衍生形式,对于沼气工程周边无大量种植面积可消纳沼液时,该方式更容易实现沼液的达标排放,减轻环保压力。

1.2.2 蒸汽爆破

热处理方式包括蒸汽爆破法、加热法等。蒸

汽爆破法利用参数为 160~260 °C、0.69~4.83 MPa 的水蒸气瞬间爆破降压的方式破坏木质纤维素晶体结构,让细胞内可溶性有机物得到释放,同时降低了木质素对纤维素和半纤维素的物理屏蔽作用,增加原料中有机物的生物降解性^[16]。170 °C 的蒸汽进行爆破预处理 30 min 后,可将猪粪甲烷产量提升一倍,明显缩短发酵周期^[17]。但蒸汽爆破法处理条件苛刻,对设备要求高,处理成本也较大。

1.2.3 加热法

加热法通过加热将纤维素和半纤维素部分溶解,破坏木质素、纤维素和半纤维素分子之间形成的相互作用,降低纤维素结晶度。在猪粪、牛粪的预处理中,将原料加热一段时间再降温后进行厌氧发酵实验可明显获得更高的甲烷产率^[18-19]。加热处理温度为 70~190 °C 时,可起到增加可溶有机组分占比、提升甲烷产量的作用,190 °C 时可获得最佳的产气量^[20]。另外,仅从简单能量衡算来看,加热法所提升的甲烷产量可覆盖预处理额外消耗的能量^[19]。但对于沼气工程项目,处理粪污量巨大,使用加热法实施难度和成本均很大。

1.3 化学预处理

化学预处理指的是通过化学试剂将粪污中的木质纤维素进行断键、溶解等处理的方法。化学预处理具有处理效率高,可有效破坏木质纤维素晶体结构,增加木质纤维素与微生物接触比表面积,加快水解进程的作用^[21]。但同时化学法成本高,对设备容易造成腐蚀,还可能造成环境污染。此外,化学试剂如果选用不当也将破坏后续厌氧发酵进程,具有降低甲烷产量的风险。当前化学预处理法仍处于实验室研究阶段,而在畜禽粪污工程处理中的使用案例仍极少。常用的化学预处理法主要有酸法和碱法。

1.3.1 酸法预处理

酸法通常选用盐酸、磷酸、硫酸、醋酸等对原料进行预处理。酸处理可有效破坏纤维素和半纤维素之间较弱的醚键结构,将半纤维素分解成小分子,同时还能溶解纤维素,降低纤维素和半纤维素结晶度,预处理后纤维素和半纤维素的 TS 占比明显减少,利于厌氧消化^[22-23]。酸预处理的温度控制上,通常认为浓度大于 10% 的酸处理可在 100 °C 下进行,而浓度低于 5% 的酸处理则需要将温度升至 100~240 °C^[9]。但研究也表明,原料中的木质素几乎不受酸处理的影响,其 TS 占比和分子结

构变化均不显著。同时,在酸的催化下,原料水解产生的多聚糖更加容易形成糠醛、5-羟甲基糠醛等抑制后续厌氧发酵的产物^[24]。因此,酸预处理法对畜禽粪污中的木质纤维素类原料的处理效果有限,考虑到酸处理容易带来的设备腐蚀和发酵酸化的风险,在工业应用中酸法预处理将面临较大的阻碍。

1.3.2 碱法预处理

相较于酸法而言,碱法反应条件更加温和,可避免发酵系统酸化和降低设备腐蚀的风险,因此从实施条件来看具有更大的前景。常用的碱性试剂有 NaOH、氨水、Ca(OH)₂ 等。碱预处理后,羟基可作用于纤维素、半纤维素之间的氢键和皂化酯键,帮助纤维素和半纤维素脱离木质素的束缚^[25]。另一方面,碱处理使得木质纤维素结构润胀,增加原料表面积和孔隙度,破坏木质素结构,促进木质纤维素水解^[26]。对猪粪原料进行 NaOH 预处理后,原料中木质纤维素降解显著,可溶性有机物分子量提升了 57%^[27],5% 的 Ca(OH)₂ 预处理实验则证实能让猪粪发酵产甲烷量提升 12%^[28]。氨水预处理可让牛粪与秸秆混合厌氧发酵沼气产量和发酵周期分别增加和缩短 20% 左右^[29]。

1.4 生物预处理

生物预处理有降解酶法和木质纤维素降解菌法两类。粪污中的木质纤维素虽然难以被厌氧微生物侵蚀,但却容易被真菌降解^[30]。在研究中,如白腐菌^[31]、褐腐菌^[32] 等木腐菌常用于降解木质素。生物预处理具有成本低、实施简单、条件温和、环境友好等优势,对粪污原料进行该类生物预处理还能达到降解臭气分子的效果,但生物预处理也存在处理时效长的缺点^[33]。在猪粪预处理中,使用木质纤维素降解菌群处理之后纤维素和半纤维素的降解得以提升,送入发酵罐中进行厌氧消化沼气产量提升了 40%,单位 VS 沼气产量可达 355 mL/g^[34]。降解酶也可用于粪污中木质纤维素的预处理,具有绿色环保、过程温和的特性,但处理时间过长。将淀粉酶用于猪粪的预处理过程中,原料中的 TS、VS 转化率得以明显提升,发酵产沼气量增加了 13.1%^[35]。

此外,考虑到厌氧发酵过程中产酸菌和产甲烷菌所需最优反应条件的不同,有学者提出将产酸和产气反应由在单一反应器中进行转变为在不同反应器中进行的思路,即两相厌氧发酵反

应^[15,36]。如此便可调控各阶段反应均处于最适宜条件之中,提升甲烷产气量,在工程实践中得到了较多应用。研究表明^[37-38],产酸菌最适宜的 pH 为 5.5~7.0,最佳温度为 20~35 ℃,所需水力停留时间约为 3 d 左右,相较而言产甲烷菌适宜的 pH、反应温度以及水力停留时间均更高,通过产酸菌预处理可显著提升甲烷产量。

1.5 联合预处理

在解决粪污中木质纤维素降解难的问题上,单种预处理方式总存在一定局限性。例如,化学法对环境有污染、成本较高、生物法处理周期长、物理法能耗大等。事实证明,多方法耦合在许多情景中均能起到发挥协同优势,同时避免各方法劣势的效果。热处理和化学处理联合对粪污进行预处理,可通过加热的方式加快化学反应速率,增加木质纤维素的降解度,对于减少化学试剂的使用也有帮助。例如,在对猪粪预处理时,NaOH 处理和加热法耦合,可让沼气产量得到明显提升,并在预处理条件为 pH = 10、温度 150~190 ℃ 时,获得最优的预处理条件^[39]。而当使用 Ca(OH)₂ 在不同温度下加热进行猪粪预处理时,原料产气量均得以提升,优化后的加热温度为 70 ℃,较之空白组,该预处理方法可让原料转化率提升,最高甲烷产量增加 86%^[40]。

2 粪污中高浓度氨氮预处理技术

2.1 预处理的必要性

动物粪便中氮含量普遍偏高,鸡粪便全氮含量达 43.5 g/kg, C/N 比为 7.65^[41],猪粪 C/N 比为 13。厌氧发酵过程中,微生物可将蛋白质、尿素、尿酸、核酸等含氮有机物中的绝大部分有机氮代谢成氨氮。而氨氮质量浓度的增加易产生氨抑制作用,降低厌氧消化效率,甚至导致厌氧发酵系统崩溃^[42],称为氨抑制。事实上,氨抑制普遍存在于富氮有机物厌氧发酵过程中,如猪粪、鸡粪、城市污泥等的厌氧发酵。

研究表明^[43],发酵原料 TS > 15.6% 的中温发酵和 TS > 7.4% 的高温发酵均可能发生氨抑制,初始抑制质量浓度约为 1 100 mg/L。猪粪厌氧发酵的甲烷产率与氨氮浓度之间的关系式为: $y = 410 - 5x^2 - 0.3618x + 1283 (R^2 = 0.9846)$,甲烷产率与氨氮浓度之间呈明显负相关性^[44]。也有研究表明,当猪粪中氨氮浓度 400 mg/L 以上便会降低乙酸营养型产甲烷菌活性,减少甲烷产量^[45]。氨抑制

的现象在鸡粪厌氧发酵中也同样普遍存在。高浓度鸡粪厌氧发酵中,氨氮浓度 < 200 mg/L 时有利于微生物生长,而氨氮浓度超过 1 500 mg/L 则对微生物起到抑制作用,当氨氮浓度继续增加至 4.05~5.73 g/L 时可减弱产甲烷微生物 56.5% 的活性^[46]。

关于氨抑制产生的机理目前尚无统一定论,主流的作用机制主要有三种,可概括为: NH₄⁺ 抑制甲烷合成酶^[44]; NH₃/NH₄⁺ 减缓 H₂ 和 CO₂ 合成 CH₄ 的反应速率,导致丙酸盐积聚从而抑制乙酸盐产甲烷菌的活性^[47]; 游离氨分子进入细胞导致胞内质子失衡^[48]。

2.2 物理预处理

2.2.1 发酵物浓度稀释

粪污发酵原料尤其是鸡粪通常含固率较高,通常 TS 均在 20% 以上,在该浓度下进行厌氧发酵氨抑制的问题难以避免。由于氨抑制的决定因素是总氮浓度(TAN),因此在预处理阶段,通过简单加水稀释降低 TAN 浓度的方法便可取到很好的氨抑制解除效果。一般鸡粪发酵底物浓度需要稀释至 TS = 0.5%~3.0%^[49]。通过将鸡粪浓度从 44.3% 降至 10% 后,并采取气提氨预处理新鲜鸡粪,可在发酵温度 35 ℃ 时获得单位 VS 甲烷产量为 0.25 L/g^[50]。

但加水稀释底物浓度的弊端也非常明显,一方面需消耗水量,增加运行成本,同时还会大幅增加沼液产量,造成沼液消纳的难题。另一方面,底物浓度低意味着减小了容积负荷,往往需要建设更大的发酵罐,增加项目投资成本。

为解决加水稀释带来的诸多问题,有研究人员提出使用沼液进行回流来稀释底物的方法,事实上该法在秸秆发酵中已较为常见。但粪污发酵沼液中由于氨浓度很高,为避免氨抑制需先采取降氨处理后方可使用。有研究表明,在屠宰场和餐厨垃圾的厌氧发酵系统中,将部分沼液气提氨后用于稀释底物浓度可解决发酵系统氨抑制问题^[51]。

2.2.2 原料混合发酵

混合发酵通常是通过添加如秸秆等含氮低的原料与粪污进行充分混合,稀释粪污中氨氮浓度的同时可调整发酵系统整体 C/N 比至 20~30 之间^[52]。该 C/N 比的原料适合于微生物新陈代谢,可避免厌氧发酵氨抑制问题。而当 C/N 比过低时,意味着原料中含有多余的含 N 物质无法被微

生物吸收,被转化成氨氮后便很可能对系统造成氨抑制。

高 N 含量粪污通常需与玉米秸秆、水稻秸秆等富碳原料进行共发酵^[53-54]。共发酵是当前使用最为广泛的避免氨抑制的方法,但由于生物质原料受地区和季节制约,因此也会让发酵原料的保障难度更大。

2.2.3 气提脱氨法

气提法脱氨是基于亨利定律提出的,针对易挥发的氨组分,使用惰性气体降低溶液表面氨气分压,从而促使溶液中的氨挥发出来,降低溶液中的氨浓度。在鸡粪发酵中,有研究使用沼气作为介质进行沼液气提氨,来降低鸡粪中温发酵罐内沼液的氨浓度避免氨抑制的产生,可使得沼气产量增长 14%^[55]。

气提脱氨法也存在一定的局限性,即有机氮含量高的粪污原料的气提脱氨效果并不明显。对新鲜猪粪进行气提脱氨的实验表明^[56],只有将 pH 提升至 11.5,温度高达 80 °C 时方能让氨氮彻底脱出,因此在新鲜粪污中不具备应用条件。

2.3 化学预处理

利用黏土或分子筛具备的离子交换功能,可实现发酵物中的 NH_4^+ 与吸附剂中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的交换,从而降低氨氮浓度。常使用膨润土、天然沸石以及斜发沸石、丝光沸石、蒙脱石等应用于猪粪、牛粪的厌氧发酵系统中用以脱氨,可达到提升甲烷产量的目的。

离子交换法提升甲烷产量的机理主要有两方面:其一,降低发酵液中的 NH_4^+ 浓度,通过与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子交换避免氨抑制;其二,进入发酵液中的 Ca^{2+} 对高氨氮浓度的厌氧发酵甲烷产量有促进作用^[57]。

但离子交换法也存在一些弊端,实际运用中需混入大量的黏土或分子筛,导致管道和发酵罐底部沉积现象更加严重。另外,过多的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度会对微生物活性产生抑制。

化学沉淀法也是种常见的化学预处理方式,其原理为利用可溶性镁盐和磷酸盐与原料中的铵离子结合形成磷酸镁铵 (MAP) 结晶体沉淀,从而降低原料氨氮浓度。在实际运用中,反应 pH 和离子浓度配比等因素是值得关注的问题。有研究指出^[58],当选取 $\text{pH}=10.0\sim 10.5$, $n(\text{Mg}^{2+}):n(\text{NH}_4^+):n(\text{PO}_4^{3-})=1.3:1:1.1$,反应时间为 20 min,转速为 300 r/min 时,氨氮去除率最高达到 75.79%。

2.4 生物预处理

硝化细菌是一类可将底物中的含氮物质转化成硝酸根离子的微生物,常与反硝化细菌共同作用于废水氨氮处理系统中。在 30 °C 时将质量占比为 3% 的硝化细菌用于新鲜鸡粪污预脱氨处理 5 d,而后与秸秆混合至 TS 为 12% 后可大幅降低原料初始氨氮浓度,始终控制在安全水平。该方法可缩短厌氧发酵启动时间,促进 VS 降解,增强原料产气率^[59]。

也有报道指出^[60],可通过驯化厌氧菌群的氨耐受能力来解除氨抑制,在以鸡粪污为原料的大型沼气工程中,TS 浓度可增加至 8%~10%,氨耐受浓度提升至 5 500 mg/L。

3 结 论

近年来,研究人员在畜禽粪污厌氧发酵预处理方面进行了众多探索,并取得了一定的研究成果。但总体来看,木质纤维素预处理的方法均存在一些劣势:化学法成本高,存在腐蚀设备且可能破坏发酵环境等问题;物理加热法耗能巨大;生物法则处理效率低。这些方式在大规模粪污沼气工程中实行难度均较大,与实际工业化应用尚存在一定差距。在当前沼气工程中基本尚未对粪污中的木质纤维素进行预处理。事实上,即使在以高木质纤维素含量的秸秆为原料的发酵预处理中,工业应用的也仅仅是粉碎和好氧堆沤两种容易实现的方式。另外,在畜禽粪污厌氧发酵解除氨抑制方面,工业上则普遍采取混合发酵和调控 TS 浓度两种简便易行的方法,其他预处理方法限于技术成熟性和经济性尚无工业应用。

针对当前粪污原料的厌氧发酵预处理研究进展,需从工程应用角度出发,探索低成本、高效率、操作简便易行、投资省、环境友好型的新型预处理技术。生物预处理技术具有成本低、能耗小、环境友好、条件温和等一系列优点,在粪污厌氧发酵的木质纤维素和氨氮预处理过程中,筛选培育高效的生物预处理菌种,开发以生物预处理为主,多种预处理手段相结合的处理技术。在解除氨抑制方面,还可进一步从筛选培育高活性的耐氨厌氧微生物菌群入手,提高反应物 TS 浓度和发酵容积负荷,从而在保证甲烷产量的同时减少发酵设施规模和沼液产生量。

高效预处理技术的研发和工业化应用,将有效提升畜禽粪污厌氧发酵的甲烷产量和有机物去

除率,提高我国畜禽粪污沼气工程产业化进程技术水平。

参考文献

- [1] 陈绍华. 清江流域畜禽养殖污染负荷研究 [J]. 环境污染与防治, 2016, 38 (7): 25-30.
- [2] 杨璐, 于书霞, 李夏菲, 等. 湖北省畜禽粪便温室气体减排潜力分析 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (7): 2650-2657.
- [3] 戴婷, 章明奎, DAITing, 等. 长期畜禽养殖污水灌溉对土壤养分和重金属积累的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 29 (1): 36-39.
- [4] 许文志, 欧阳平, 罗付香, 等. 中国畜禽粪污处理利用现状及对策探讨 [J]. 中国农学通报, 2017, 33 (23): 106-112.
- [5] 徐卫佳. 用厌氧发酵技术处理农村养殖场畜禽粪便 [J]. 可再生能源, 2004 (1): 57.
- [6] Syaftika N, Matsumura Y. Comparative study of hydrothermal pretreatment for rice straw and its corresponding mixture of cellulose, xylan, and lignin [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 5 (255): 1-6.
- [7] 聂红. 高浓度鸡粪厌氧发酵产甲烷的氨抑制研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2016: 13.
- [8] 尚斌, 董红敏, 朱志平, 等. 畜禽粪便热解气体的红外光谱分析 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (4): 259-263.
- [9] 祝其丽, 何明雄, 谭芙蓉, 等. 木质纤维素生物质预处理研究现状 [J]. 生物技术进展, 2015 (6): 414-419.
- [10] 杨淑蕙. 植物纤维化学, 第3版 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 31.
- [11] Benner R, Maccubbin A E, Hodson R E. Anaerobic biodegradation of the lignin and polysaccharide components of lignocellulose and synthetic lignin by sediment microflora [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1984, 47 (5): 998-1004.
- [12] 李登龙, 李明源, 王继莲, 等. 木质纤维素预处理方法研究进展 [J]. 食品工业科技, 2019, 40 (19): 326-332.
- [13] Lissens G, Thomsen A B, De Baere L, et al. Thermal wet oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38 (12): 3418-3424.
- [14] 关正军, 李文哲, 郑国香, 等. 固液分离对牛粪利用效果的影响 [J]. 科技传播, 2011, 27 (13): 259-263.
- [15] 关正军, 李文哲, 郑国香, 等. 牛粪固液分离液两相厌氧发酵技术 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (7): 300-305.
- [16] 康鹏, 郑宗明, 董长青, 等. 木质纤维素蒸汽爆破预处理技术的研究进展 [J]. 可再生能源, 2010, 28 (3): 112-116.
- [17] Ferreira L C, Souza T S O, Fdz-Polanco F, et al. Thermal steam explosion pretreatment to enhance anaerobic biodegradability of the solid fraction of pig manure [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 152: 393-398.
- [18] Mladenovska, Hartmann Z, Kvist H, et al. Thermal pretreatment of the solid fraction of manure; Impact on the biogas reactor performance and microbial community [J]. *Water Science & Technology*, 2006, 53 (8): 59-67.
- [19] 胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 等. 热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 [J]. 环境科学, 2015 (8): 3094-3098.
- [20] Hélène Carrère, Sialve B, Bernet N. Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (15): 3690-3694.
- [21] 崔美, 黄仁亮, 苏荣欣, 等. 木质纤维素新型预处理与顽抗特性 [J]. 化工学报, 2012, 63 (3): 677-687.
- [22] 梁仲燕. 不同酸预处理对水稻秸秆厌氧消化产沼气的的影响 [J]. 广东化工, 2018, 45 (21): 47-49.
- [23] 田永兰. 酸预处理玉米秸秆与牛粪混合厌氧发酵试验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012: 85.
- [24] Gomez-Tovar F, Celis L B, Elías Razo-Flores, et al. Chemical and enzymatic sequential pretreatment of oat straw for methane production [J]. *Bioresour Technology*, 2012, 116: 372-378.
- [25] Kim T H, Lee Y Y. Pretreatment of corn stover by soaking in aqueous ammonia at moderate temperatures [J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2007, 137-140 (1): 81-92.
- [26] 吕晓静. 基于碱的木质纤维素预处理和酶解及相关机理研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2018: 20.
- [27] Gonzálezfernández C, Leóncofreces C, Garcíaencina P A. Different pretreatments for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (18): 8710-8714.
- [28] Rafique R, Poulsen T G, Nizami A S, et al. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production [J]. *Energy*, 2010, 35 (12): 4556-4561.
- [29] 魏域芳, 李秀金, 刘研萍, 等. 不同预处理玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气性能比较 [J]. 中国沼气, 2016, 34 (2): 36-40.
- [30] 孙聪聪, 宁维光, 苏忠亮. 木质素降解微生物的研究进展 [J]. 化学与生物工程, 2017, 34 (4): 6-9.
- [31] 何荣玉, 刘晓凤, 闫志英, 等. 白腐真菌组合培养提高漆酶酶活的作用机制研究 [J]. 环境科学, 2010, 31 (2): 465-471.
- [32] 彭木, 王秋玉, 晔晓雪. 褐腐菌在木质纤维素降解中的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (10): 287-293.
- [33] Mackuřák Tomáš, Prousek J, Švorc Lubomír, et al. Increase of biogas production from pretreated hay and leaves using wood-rotting fungi [J]. *Chemical Papers*, 2012, 66 (7): 649-653.
- [34] Tueson S, Wongwilaiwalin S, Champreda V, et al. Enhancement of biogas production from swine manure by a lignocellulolytic microbial consortium [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 144 (3): 579-586.
- [35] Li J, Sun K, He J, et al. Using amylase pretreatment of pig manure to enhance biogas production [C]. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011: 1-5.

- [36] 吴志清, 李文哲, 王忠江. 畜禽粪便两相厌氧发酵的实验 [J]. 农机化研究, 2008 (2): 148-152.
- [37] 邓玉洁. 牛粪两相厌氧发酵产酸产气条件优化研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018: 17.
- [38] 罗立娜, 李文哲, 王小伟, 等. 水力停留时间对牛粪两相厌氧发酵特性的影响 [J]. 农机化研究, 2013 (4): 220-223.
- [39] Hélène Carrère, Sialve B, Bernet N. Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pre-treatments [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (15): 3690-3694.
- [40] Rafique R, Poulsen T G, Nizami A S, et al. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production [J]. *Energy*, 2010, 35 (12): 4556-4561.
- [41] 杜丽芳, 王燕, 廖新倮, 等. 不同碳氮比和接种量对蛋鸡粪厌氧发酵氨氮抑制效应的影响 [J]. 中国家禽, 2014, 36 (12): 28-33.
- [42] 周博, 李洪枚, 徐一帆, 等. 污泥厌氧发酵产沼气抑制物影响的研究进展 [J]. 化学工程与装备, 2018 (2): 248-250.
- [43] 王悦超. 高固体浓度猪粪的厌氧发酵特性研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011: 67.
- [44] 梅凯, 董红敏, 陶秀萍, 等. 水泡粪物料中固体和氨氮含量对厌氧消化产气特性的影响 [J]. 中国农业气象, 2014, 35 (6): 622-627.
- [45] 高文萱, 张克强, 梁军锋, 等. 氨胁迫对猪粪厌氧消化性能的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (10): 1997-2003.
- [46] Koster I W, Lettinga G. Anaerobic digestion at extreme ammonia concentrations [J]. *Biological Wastes*, 1988, 25 (1): 51-59.
- [47] Wiegant W M, Zeeman G. The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes [J]. *Agricultural Wastes*, 1986, 16 (4): 243-253.
- [48] Kayhanian M. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: An overview and practical solutions [J]. *Environmental Technology*, 1999, 20 (4): 355-365.
- [49] Niu Q, Qiao W, Qiang H, et al. Microbial community shifts and biogas conversion computation during steady, inhibited and recovered stages of thermophilic methane fermentation on chicken manure with a wide variation of ammonia [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 146 (10): 223-233.
- [50] Niu Q, Qiao W, Qiang H, et al. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137 (11): 358-367.
- [51] Sernamaza A, Heaven S, Banks C J. Ammonia removal in food waste anaerobic digestion using a side-stream stripping process. [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 152 (1): 307-315.
- [52] 李淑兰, 刘萍, 梅自立. 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): 76-79.
- [53] 成喜雨, 李强, 王静, 等. 典型秸秆废弃物与猪粪共发酵过程碳氮比的影响研究 [J]. 可再生能源, 2014, 32 (6): 848-853.
- [54] 宁静, 朱葛夫, 吕楠, 等. 碳氮比对猪粪与玉米秸秆混合厌氧消化产沼气性能的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (S1): 93-98.
- [55] Abouelenien F, Fujiwara W, Namba Y, et al. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (16): 6368-6373.
- [56] Bonmatí A, Flotats X. Air stripping of ammonia from pig slurry: Characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion [J]. *Waste Management*, 2003, 23 (3): 261-272.
- [57] Chika Tada, Yingnan Yang, Toshiaki Hanaoka, et al. Effect of natural zeolite on methane production for anaerobic digestion of ammonium rich organic sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96 (4): 459-464.
- [58] 段鲁娟, 曹井国, 熊发, 等. 鸟粪石沉淀法处理鸡粪发酵沼液的试验研究 [J]. 环境工程, 2015, 33 (7): 66-71.
- [59] 翟佳宁, 刘博林, 车一一, 等. 硝化细菌脱氨氮预处理对鸡粪和玉米秸秆混合厌氧发酵的影响 [J]. 可再生能源, 2019, 37 (6): 796-802.
- [60] 陈智远, 宫亚斌, 詹偶如, 等. 高浓度高氨氮鸡粪沼气工程运行分析 [J]. 中国沼气, 2018, 36 (3): 78-82.