

绿色木霉预处理协同外源氢对秸秆厌氧发酵产气性能提升的影响

施付艳¹, 苏小红¹, 王欣¹, 孟利强², 刘泽¹, 王雪¹, 陆佳¹, 刘伟^{1*}

(1. 黑龙江省能源环境研究院, 哈尔滨 150000; 2. 黑龙江省科学院微生物研究所, 哈尔滨 150000)

摘要: 以提高玉米秸秆预处理后还原糖含量和厌氧发酵产甲烷性能为目的, 采用绿色木霉进行玉米秸秆预处理, 通入外源氢气加强厌氧发酵产甲烷性能。实验结果表明, 当预处理温度为 36℃, 时间为 2 d, 初始料液比为 1:1 的绿色木霉处理条件时, 还原糖含量最高, 为 27.66 mg·g⁻¹, 预处理后累计产甲烷量比未经预处理实验组提高了 39.0%, 绿色木霉加氢组累计产甲烷量为木霉预处理组的 2.6 倍。表明绿色木霉预处理对玉米秸秆厌氧发酵有促进作用, 外源加氢可有效提升厌氧发酵甲烷产量。

关键词: 绿色木霉; 厌氧发酵; 还原糖; 甲烷; 外源加氢

中图分类号: S216.4; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)01-0047-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023010047

Effects of Pretreatment with *Trichoderma Viridis* and Exogenous Hydrogen on the Improvement Gas Production Performance on Anaerobic Fermentation of Straw / SHI Fuyan¹, SU Xiaohong¹, WANG Xin¹, MENG Liqiang², LIU Ze¹, WANG Xue¹, LU Jia¹, LIU Wei^{1*} / (1. Heilongjiang Institute of Energy and Environment, Haerbin 150000, China; 2. Institute of Microbiology Heilongjiang Academy of Science, Haerbin 150000, China)

Abstract: In order to improve the reducing sugar content and methane production performance for anaerobic fermentation of corn straw, *Trichoderma viride* was used to pretreat corn straw, and exogenous hydrogen was introduced to enhance the methane production performance of anaerobic fermentation. The experimental results showed that when the pretreatment temperature was 36 °C, the time was 2 days, and the initial material liquid ratio was 1:1, the content of reducing sugar was the highest, 27.66mg · g⁻¹. The cumulative methane production of the pretreated group was 39.0% higher than that of the untreated group. The cumulative methane production of the hydrogenated group of *Trichoderma viride* was 2.6 times that of the pretreated group of *Trichoderma viride*. The results showed that the pretreatment of *Trichoderma viride* could promote the anaerobic fermentation of corn straw, and exogenous hydrogenation could effectively increase the methane production of anaerobic fermentation.

Key words: *Trichoderma Viridis*; anaerobic fermentation; reducing sugar; Methane; exogenous hydrogenation

我国是农业大国, 秸秆资源丰富, 年均产量约为 8.65 亿 t^[1-3]。在我国广大农村地区农户大规模露天焚烧废弃农作物秸秆已成为显著的社会问题^[4], 秸秆焚烧不仅对土壤造成影响, 还易引发火灾, 导致人身财产损失, 影响群众生活和空气质量^[5-7], 秸秆中含有较高的有机质, 其资源化利用一直是我国研究和讨论的热点。

农业秸秆的主要成分是木质素、纤维素及半纤维素^[8], 三者通过化学键紧密缠绕包裹形成难以降

解的木质纤维素结构, 是秸秆资源化利用的天然屏障。木质素主要存在于植物细胞壁中, 给植物提供结构支撑, 因其具有抗渗, 抗微生物, 抗氧化, 非水溶性和无光学活性等特性, 使得很难降解^[9-10]。纤维素和半纤维素包裹于木质素中, 且纤维素、半纤维素和木质素分子之间存在着不同的结合力, 极大地阻碍了玉米秸秆的厌氧发酵性能, 降低了秸秆的利用率^[11-12]。苏小红^[13-15]等的研究中表明预处理过程可将秸秆中的纤维素-半纤维素-木质素结构破坏,

收稿日期: 2022-10-10 修回日期: 2022-10-30

项目来源: 黑龙江省科学院揭榜挂帅项目(ZXJS202201); 黑龙江省科学院科学研究基金项目(KY2021NY02); 黑龙江省科学院人才队伍建设平台项目(RC2022NY01)。

作者简介: 施付艳(1996-), 女, 硕士生, 主要从事生物质能源化利用研究等工作, E-mail: 1329185679@qq.com

通信作者: 刘伟, E-mail: Lw_790613@126.com

使得纤维素与半纤维素更多地暴露出来,为后续厌氧发酵产能过程提供了条件,可有效提高厌氧发酵产能效益。

生物预处理是既环保又有效的预处理方法之一,其中木霉预处理是利用木霉菌分泌的纤维素酶对秸秆中的木质纤维素进行降解,将秸秆中复杂的多聚糖分解为便于利用的单糖^[16]。经过预处理后的秸秆在厌氧发酵过程中通过水解酸化、产氢产乙酸及产甲烷3个步骤实现生物质能源的转化,生产出清洁能源甲烷^[17]。此外,俞游^[18]等的研究表明外源加入氢气可以促进厌氧发酵中食氢产甲烷途径,从而提升厌氧发酵甲烷产量。

本实验以还原糖为指标探索了木霉预处理玉米秸秆的最佳初始料液比、处理时间和处理温度,通过

表1 玉米秸秆理化性质

(%)

总固体含量 TS	挥发性固体含量 VS	纤维素	半纤维素	木质素	还原糖含量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
84.45 ± 0.14	73.34 ± 0.22	39.61 ± 0.11	23.92 ± 0.25	4.78 ± 0.31	19.74

厌氧发酵接种物选择黑龙江省能源环境研究院正在运行的厌氧发酵中试平台的沼液。

绿色木霉(*Trichoderma viride*)来自本实验室驯化培养,由黑龙江省科学院微生物研究所提供源菌株。

1.2 实验设计

1.2.1 木霉预处理秸秆实验设计

本实验通过改变绿色木霉预处理玉米秸秆的初始料液比、预处理温度及预处理时间,进行单因素及正交实验,优化绿色木霉预处理玉米秸秆条件,具体方案如下。

1.2.1.1 单因素实验设计

木霉预处理玉米秸秆单因素实验设计见表2。

表2 木霉预处理玉米秸秆单因素实验因素水平选取表

因素	水平					接菌量
初始料液比	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	
温度/°C	18	23	28	33	38	3 mL
时间/d	2	4	6	8	10	

1.2.1.2 正交实验设计

木霉预处理玉米秸秆正交实验设计见表3。

表3 木霉预处理玉米秸秆正交实验因素水平选取表

水平	温度/°C	时间/d	初始料液比
1	30	1	1:1
2	33	2	1:2
3	36	3	1:3

正交实验得到最佳预处理条件组合,在此基础上进行厌氧发酵产甲烷实验及加氢厌氧发酵实验,分析木霉预处理和外源加氢对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷的影响,为秸秆厌氧发酵产甲烷预处理技术的研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

采用自然条件下风干的玉米秸秆作为实验材料。取自黑龙江省哈尔滨市松北区松花江村的玉米农田,粉碎成2~3 cm的小段,并取适量置于250 mL锥形瓶中,用6层纱布封口,于121°C高压蒸汽灭菌30 min。

玉米秸秆理化性质如表1。

1.2.2 发酵实验设计

将预处理后的玉米秸秆进行厌氧发酵产甲烷潜力分析,未经过预处理的玉米秸秆作为对照组,同时设置一组预处理秸秆进行外源加氢厌氧发酵产甲烷实验,每个样品做3个平行。厌氧发酵装置采用全自动产甲烷分析测试系统(AMPTSII°碧普仪器有限公司),发酵温度为55°C,发酵总固体含量(TS)为8%,发酵15 d。加氢组每日通气2次,每次通气45 mL,通气时间为2 min。

1.3 实验装置

1.3.1 预处理实验装置

预处理实验装置见图1。

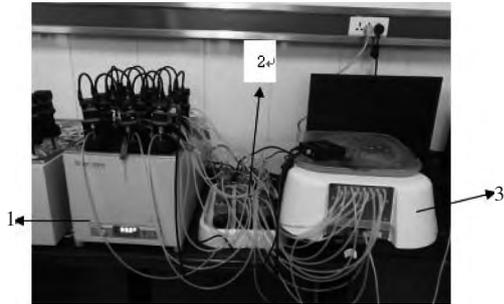


图1 预处理实验装置

1.3.2 厌氧发酵实验装置

本实验使用AMPTSII°产甲烷潜力分析测试系统(型号01-0000-02,瑞典)作为厌氧发酵实验装置,

具体如图 2 所示,由恒温水浴发酵装置、CO₂ 脱除装置及甲烷产量计量装置组成。



1. 水浴锅; 2. 脱除 CO₂ 的百里酚酞试剂; 3. 气体计数装置

图 2 厌氧发酵实验装置

1.4 实验方法

1.4.1 菌悬液制备

PDA 培养基配制:土豆洗净削皮取 200 g,加入 1000 mL 蒸馏水煮沸 30 min,以两层纱布过滤得滤液,加入 20 g 葡萄糖。固体培养基加入 15~20 g 琼脂粉。

菌液制备:取实验室封存的绿色木霉菌液 200 μ L 接种于 PDA 液体培养基中于 28 $^{\circ}$ C 摇床培养 48 h,再次取 200 μ L 活化菌液接种于 PDA 固体培养基中,于 28 $^{\circ}$ C 恒温培养 48 h,挑取单菌落接种于事先准备的 PDA 液体培养基中,于 28 $^{\circ}$ C 恒温培养箱培养 72 h(调整菌液浓度为 7.5×10^7 个 \cdot mL⁻¹),用于玉米秸秆预处理。

1.4.2 基质液制备

取 2 g 预处理后玉米秸秆,加入蒸馏水 20 mL,于 28 $^{\circ}$ C,140rpm 振荡浸提 1 h,用 5 mL 注射器抽取混合液,经 0.45 μ m 滤膜进行过滤得基质液,用于还原糖测定。

1.4.3 指标测定

纤维素、木质素及半纤维素测定:范氏 Van Soest 纤维素测定法^[19](ANKOM220 型半自动纤维素分析仪);还原糖含量测定:DNS(3,5-二硝基水杨酸)比色法^[20];干物质含量(TS 含量)测定:烘干法(电热恒温鼓风干燥机,102 $^{\circ}$ C \pm 3 $^{\circ}$ C,4 h);挥发性固体含量(VS 含量)测定:烘干法(马弗炉,600 $^{\circ}$ C,2 h);气体成分产气量:岛津气相色谱仪。

2 实验结果与分析

2.1 初始料液比对木霉预处理玉米秸秆还原糖含量的影响

初始料液比决定玉米秸秆基质中水分的含量,

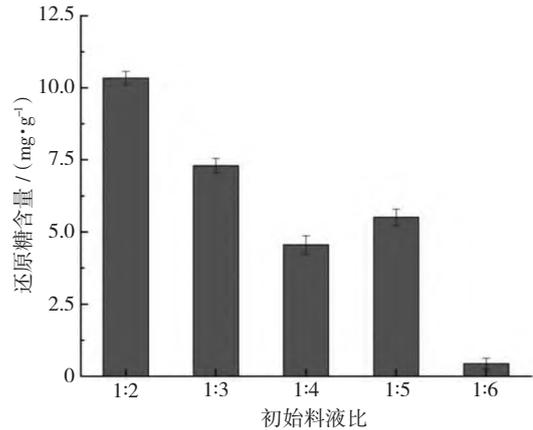


图 3 初始料液比对预处理后秸秆还原糖含量的影响

张玉辉^[21]等的研究表明基质中水分含量过高,会导致基质透气性下降,氧气供给不足,使菌体生长不良,产酶能力下降,还原糖得率下降;水分含量过低,木霉菌产生的纤维素酶不能进行有效传质作用于基质表面。从图 3 可知,还原糖含量随着初始料液比的升高呈下降趋势,当初始料液比为 1:6 时,木霉预处理所产还原糖含量最低为 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,此时基质中水分含量过高,抑制了木霉菌在基质中的生长繁殖,不能产生纤维素酶对玉米秸秆进行降解。当料液比为 1:2 时,还原糖含量最高为 $10.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,表明在该料液比条件下木霉菌生长活性旺盛,产生的纤维素酶可对玉米基质进行有效降解,转化还原糖的能力提高。

2.2 温度对木霉预处理玉米秸秆还原糖含量的影响

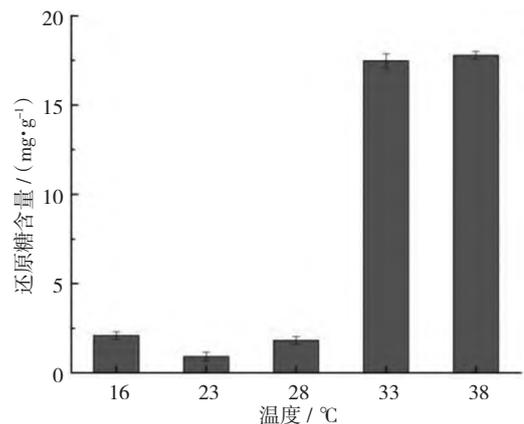


图 4 温度对预处理后秸秆还原糖含量的影响

纤维素酶活性和木霉生长活性与预处理温度关系密切。越靠近最适酶活温度,纤维素酶的吸附和纤维素糖化效果越好^[22];越靠近最适生长温度条件,木霉生长繁殖对还原糖消耗越大。图 4 表明,木

霉预处理玉米秸秆还原糖含量随温度增加而呈上升的趋势,当预处理温度为 38℃ 时,还原糖含量最高为 17.78 mg·g⁻¹。在该温度条件下,纤维素酶活性增大,对玉米秸秆基质降解效果增强,因此还原糖含量明显增加。当预处理温度为 23℃ 时,木霉预处理玉米秸秆还原糖含量出现最低值 0.91 mg·g⁻¹,其原因可能是该预处理温度适宜木霉生长而不适宜纤维素酶的产生,木霉菌的生长繁殖对原基质中的还原糖和酶降解产生的少量还原糖进行消耗,导致还原糖含量降低。赵爽^[23]关于两种不同来源绿色木霉固态发酵及甘草药渣对玉米生长效应的研究同样表明纤维素酶最佳反应温度高于木霉最适生长温度。

2.3 预处理时间对木霉预处理玉米秸秆还原糖含量的影响

木霉预处理玉米秸秆时间越长,微生物对还原糖的消耗越多。从图 5 可看出,当预处理时间为 2 d 时,还原糖含量最高为 6.27 mg·g⁻¹,当预处理时间为 10 d 时,还原糖含量最低为 0.95 mg·g⁻¹。该结果与赵爽^[24]等人的研究结果相同,其原因是预处理时间越长,木霉菌繁殖数量增多,对基质中原有的还原糖及纤维素酶降解产生的还原糖消耗越大,因而累计还原糖含量减少。

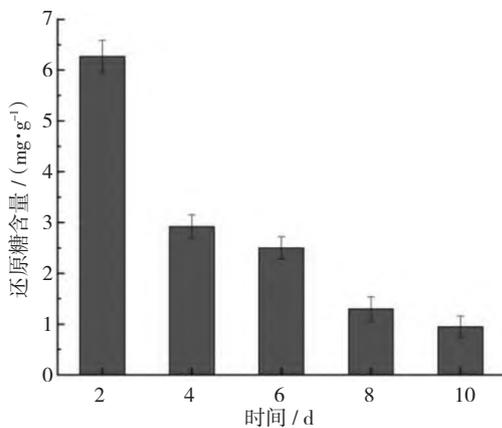


图 5 时间对预处理后秸秆还原糖含量的影响

2.4 木霉预处理条件优化

根据单因素实验结果设计三因素三水平正交试验,采用 L₉(3³) 正交表考察各因素之间的相互作用,得到 9 个正交试验组,结果见表 4。

从表 4 可以看出,最佳木霉预处理条件为温度 36℃,处理时间为 2 d,初始料液比为 1:1。3 个因素对木霉预处理影响顺序为 R_A、R_C、R_B,即温度 > 初始料液比 > 处理时间。对实验结果进行方差检验数

据结果如表 5,可看出温度对实验影响显著($p < 0.05$)。以温度 36℃、处理时间 2 d、初始料液比 1:1 进行验证性试验,还原糖含量为 27.66 mg·g⁻¹,高于正交表中所有试验。

表 4 木霉预处理玉米秸秆正交实验设计及结果

编号	温度(A)	时间(B)	初始料液比(C)	还原糖含量 (mg·g ⁻¹)
1	1	1	1	11.47
2	1	2	2	10.48
3	1	3	3	4.72
4	2	1	3	9.45
5	2	2	1	19.63
6	2	3	2	12.76
7	3	1	2	14.27
8	3	2	3	19.47
9	3	3	1	25.17
k1	8.89	11.73	18.76	—
k2	13.95	16.53	12.50	—
k3	19.64	14.22	11.21	—
R	10.75	2.31	7.54	—

表 5 正交试验方差分析表

变异来源	方差	df	均方差	F	P
校正模型	305.635 ^a	6	50.939	13.144	0.072
截距	1803.984	1	1803.984	465.499	0.002
A	173.437	2	86.718	22.377	0.043
B	34.528	2	17.264	4.455	0.183
C	97.670	2	48.835	12.601	0.074
误差 e	7.751	2	3.875	—	—
总计	2117.369	9	—	—	—
校正的总计	313.385	8	—	—	—

2.5 木霉预处理对厌氧发酵产甲烷的影响

对木霉预处理的玉米秸秆进行厌氧发酵产甲烷实验及外源加氢产甲烷实验,分析木霉预处理玉米秸秆的产甲烷性能。从图 6 可知,木霉预处理玉米秸秆产甲烷效果显著,与未经预处理的实验组相比,木霉预处理组产甲烷高峰出现在第 4 天,产甲烷高峰稍有滞后。自第 4 天起,木霉预处理组日产甲烷量均高于未预处理实验组,其原因可能是在厌氧发酵过程中,预处理组挥发性脂肪酸的产生速度大于其消耗速度,导致挥发性脂肪酸累积,从而影响了原

料的产甲烷效果,之后随着挥发性脂肪酸的消耗,解除了其所产生的抑制,复杂有机物逐渐被厌氧菌群消化,产甲烷能力恢复,产甲烷量升高^[25]。比较木霉加氢组可看出,外源氢气对预处理后玉米秸秆厌氧发酵产甲烷效果提升显著,日产甲烷量均高于木霉预处理未加氢组和未预处理组。其原因是外源氢气的加入促进了嗜氢产甲烷菌对氢气和二氧化碳的转化,从而实现了甲烷产量的提升。乔玮^[26]等人的研究表明氢气通入对嗜氢厌氧途径有促进作用。木霉预处理组最大日产甲烷量为 $22.20 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}$,较未预处理组提高了 56.8%。木霉加氢组最大日产甲烷量为 $34.57\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}$,较未加氢组提高了 55.7%。表明木霉预处理可有效提高玉米秸秆降解能力,提升产甲烷潜力,外源加氢对厌氧发酵产甲烷有显著促进作用。

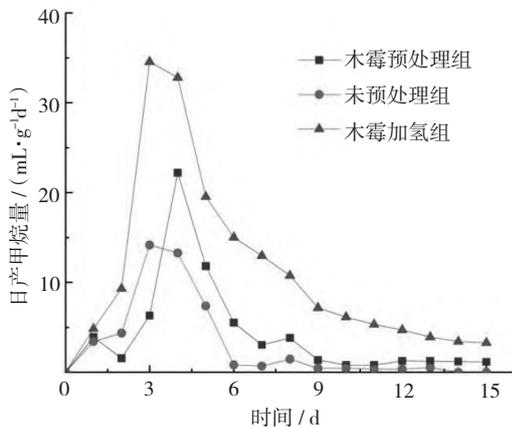


图6 木霉预处理对日产甲烷量的影响

由图7可知,木霉预处理组、木霉加氢组与未预处理组累积产气量的变化趋势一致,都是先快速增长后趋于平稳。在第4天之前,未预处理组累积产气量高于木霉预处理组,而第4天之后,木霉预处理组累积产气量超过干秸秆组。木霉预处理组累积产气量为 $65.96 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,未预处理组累积产气量为 $47.46 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,产气量提高 39.0%。黄文博^[27]等利用白腐菌对玉米秸秆进行前期预处理以提高沼气产气量研究中,经过白腐菌处理后的玉米秸秆在厌氧发酵试验中的累积产气量较未经处理的空白对照组提高了 12.32%;赵肖玲^[28]等利用黑曲霉与木霉复合菌剂处理秸秆提高产甲烷性能研究中发现,经过微生物处理后的玉米秸秆在厌氧发酵中的累积产气量较未经微生物处理的对照组提高了 10.06%。李靖^[29]等复合微生物菌剂对玉米秸秆的预处理与厌氧产气性能的研究中,经过复合微生物菌剂 CM-2

预处理后的玉米秸秆在厌氧发酵中的累积产气量与未经预处理的对照组相比提高了 30.18%。由此可见,木霉预处理可有效提升玉米秸秆的累积产甲烷量。比较图7中甲烷累计产气量变化趋势,木霉加氢组均高于木霉预处理未加氢组和未预处理组,木霉加氢组甲烷累积产气量为 $173.77 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,为木霉预处理组的 2.6 倍,表明外源加入氢气可有效提升厌氧发酵甲烷产量。

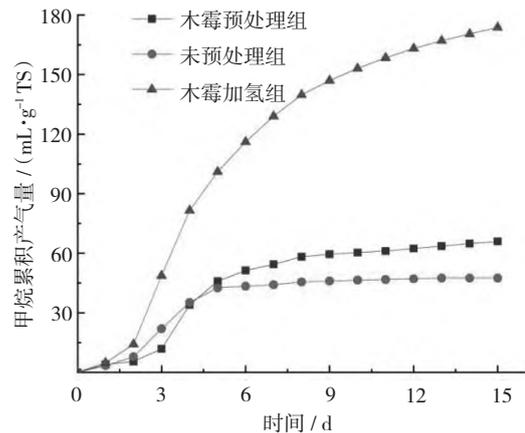


图7 木霉预处理对甲烷累积产气量的影响

3 结论

本文研究了绿色木霉预处理及外源氢气对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷性能的影响,通过分析还原糖产量和产甲烷量,优化了预处理条件,得到绿色木霉最佳预处理条件为:预处理温度 36°C ,初始料液比 1:1,预处理时间 2 d,在此预处理条件下,还原糖产量为 $27.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,绿色木霉预处理组最大日产甲烷量为 $22.20 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}$,较未预处理组提高了 56.8%,累积产甲烷量为 $65.96 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,较未预处理组提高了 39.0%,绿色木霉加氢组最大日产甲烷量为 $34.57\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}$,较绿色木霉预处理组提高了 55.72%,累积产甲烷量为 $173.77 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,为绿色木霉预处理组的 2.6 倍。上述结果表明,绿色木霉预处理可有效提升秸秆厌氧发酵产甲烷潜力,外源氢气对厌氧发酵产甲烷有显著促进作用,可为秸秆类生物质厌氧发酵产甲烷提供理论支持。

参考文献:

- [1] 张晓庆,王梓凡,参木友. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(09): 30-41.
- [2] 霍丽丽,赵立欣,姚宗路. 中国玉米秸秆草谷比及其

- 资源时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 227-234.
- [3] 薛胜荣, 杨志娟, 祝其丽, 等. 秸秆沼气发酵技术现状与发展趋势[J]. 中国沼气, 2021, 39(06): 15-21.
- [4] 冯伟, 张利群, 庞中伟. 中国秸秆废弃焚烧与资源化利用的经济与环境分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(06): 350-354.
- [5] 魏庆华. 秸秆露天焚烧的危害及综合利用研究[J]. 农业技术, 2012, 23(10): 177-183.
- [6] 覃诚, 毕于运, 高春雨. 中国农作物秸秆禁烧管理与效果[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(07): 181-189.
- [7] 靳红燕, 颜廷山, 李黎杰. 中国秸秆沼气工程技术难点分析及建议[J]. 现代农业科技, 2021(06): 163-165+175.
- [8] 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.
- [9] 熊乙, 杨富裕, 倪奎奎, 等. 微生物在木质纤维素降解中的应用进展[J]. 草学, 2019, 249(5): 1-5.
- [10] 熊乙. 木质纤维素降解菌的筛选鉴定及降解产物研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2016.
- [11] 贾丽萍, 姚秀清, 杨磊, 等. 木质纤维素的预处理技术进展[J]. 纤维素科学与技术, 2022, 30(02): 72-80.
- [12] Nasi Ar, Zhang Q, Liu Z Y, et al. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic materials for bio-based products[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2020, 104(2): 455-473.
- [13] 王雪, 苏小红, 陆佳. NaOH与超声联合预处理玉米秸秆实验条件优化研究[J]. 中国沼气, 2022, 40(01): 24-32.
- [14] 苏小红, 王欣, 王玉鹏, 等. 亚硫酸氢盐预处理对黄贮玉米秸秆产甲烷潜力机理研究[J]. 中国沼气, 2022, 40(03): 50-57.
- [15] 苏小红, 范超, 王欣. 黄贮预处理干玉米秸秆厌氧发酵产气特性研究[J]. 中国沼气, 2020, 38(06): 30-36.
- [16] 沈丽君, 苏瑛杰, 于潇潇, 等. 木质纤维素诱导里氏木霉产纤维素酶及酶解增效作用研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(06): 681-685.
- [17] 麻微微. 沼气发酵复合菌系厌氧发酵特性及微生物群落结构分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [18] 俞游. 利用外源氢气厌氧发酵原位合成甲烷的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [19] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. J Dairy Sci, 1991, 74: 3583-3597.
- [20] 齐香君, 苟金霞, 韩戎珺, 等. 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定溶液中还原糖的研究[J]. 纤维素科学与技术, 2004(03): 17-19+30.
- [21] 张玉辉, 贾翠英, 杨天佑. 绿色木霉发酵玉米秸秆产糖条件的研究[J]. 生物学杂志, 2010, 27(03): 44-47.
- [22] Hasunuma T, Kondo A. Consolidated bioprocessing and simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulose to ethanol with thermotolerant yeast strains[J]. Process Biochemistry, 2012, 47(9): 1287-1294.
- [23] 赵爽. 两种不同来源绿色木霉固态发酵及甘草药渣对玉米生长效应研究[D]. 合肥: 河北大学, 2020.
- [24] 赵爽, 李婉云, 杨静雅, 等. 两种不同来源的绿色木霉降解木质纤维素研究[J]. 菌物学报, 2020, 39(05): 856-869.
- [25] 黄开明, 赵立欣, 冯晶, 等. 复合微生物预处理玉米秸秆提高其厌氧消化产甲烷性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 184-189.
- [26] 乔玮, 任征然, 熊林鹏, 等. 通入外源氢提高秸秆发酵沼气中甲烷浓度的研究[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(03): 628-635.
- [27] 黄文博, 袁海荣, 刘春梅, 等. 4种白腐菌预处理提高玉米秸秆厌氧消化性能研究[J]. 中国沼气, 2017, 35(2): 28-35.
- [28] 赵肖玲, 郑泽慧, 蔡亚凡, 等. 哈茨木霉和黑曲霉粗酶液预处理改善秸秆产甲烷性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 219-226.
- [29] 李靖, 董良杰, 崔彦如, 等. 复合微生物菌剂对玉米秸秆的预处理与厌氧产气性能的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(02): 212-217.