

高效降解玉米秸秆细菌复合菌系的构建及降解效果分析

韩群英, 白红娟, 宋雨, 王子豪, 卢静, 贾亚婷

(中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对玉米秸秆降解难、降解效率低的问题, 本文利用分离保存的纤维素降解细菌灿烂类芽孢杆菌 (*Paenibacillus lautus*)J1、千叶类芽孢杆菌 (*Paenibacillus chibensis*)J2、窖泥类芽孢杆菌 (*Paenibacillus vini*)J3 和木质素降解潜力细菌弗留明拜叶林克氏菌 (*Beijerinckia fluminensis*)6-1H、适冷假单胞菌 (*Pseudomonas extremaustralis*)1-2D、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)BS 构建了高效的降解细菌复合菌 D (体积比 J1:J3:6-1H:BS=1:1:1:1), 并研究了复合菌 D 的最佳产酶条件及内在降解机理。结果表明, 最优产酶条件为: CMC-Na 的质量浓度为 10 g/L、蛋白胨的质量浓度为 10 g/L、pH 为 7、接种量为 9% 和温度为 35℃, 此条件下的滤纸酶活性最大, 为 41.97 U/mL, 是单菌最高酶活性的 2.42 倍。经 7 d 处理, 纤维素、半纤维素、木质素的降解率分别为 59.1%, 31.1% 和 51.1%, 秸秆降解率达到 46.2%, 是单菌最高降解率的 1.95 倍。扫描电镜、傅里叶红外光谱分析和 X-射线衍射分析表明, 玉米秸秆表面结构被破坏, 木质纤维素相关化学键强度减弱, 结晶度由 57.32% 降至 55.77%。这些结果表明所构建的组合菌显著增强了木质纤维素的降解效果, 具有较好的应用潜力。

关键词: 细菌复合菌系; 滤纸酶活性; 产酶条件优化; 玉米秸秆降解

中图分类号: Q93

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.09.0002

引用格式: 韩群英, 白红娟, 宋雨, 等. 高效降解玉米秸秆细菌复合菌系的构建及降解效果分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(3): 359-368.

HAN Qunying, BAI Hongjuan, SONG Yu, et al. Construction of bacterial composite strain with efficient degradation of corn straw and analysis of degradation effect[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(3): 359-368.

Construction of Bacterial Composite Strain with Efficient Degradation of Corn Straw and Analysis of Degradation Effect

HAN Qunying, BAI Hongjuan, SONG Yu, WANG Zihao, LU Jing, JIA Yating

(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficult degradation and low efficiency of corn straw, this study used isolated and preserved cellulose degrading bacteria (*Paenibacillus lautus*)J1, (*Paenibacillus chibensis*)J2, (*Paenibacillus vini*)J3 and lignin degrading potential bacteria (*Beijerinckia fluminensis*)6-1H, (*Pseudomonas extremaustralis*)1-2D, (*Bacillus subtilis*)BS to construct highly efficient degrading bacteria complex bacteria D (J1:J3:6-1H:BS=1:1:1:1). The optimum enzyme production conditions and inter-

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(20240010)

作者简介: 韩群英(1998-), 女, 硕士生, 主要从事环境微生物技术的研究。

通信作者: 白红娟(1969-), 女, 教授, 博士, 主要从事环境微生物技术的研究。E-mail: bhj44871@163.com。

nal degradation mechanism of complex bacterium D were studied. The results show that the optimal enzyme production conditions are: CMC-Na 10 g/L, peptone 10 g/L, pH 7, inoculation amount 9% and temperature 35 °C. Under these conditions, the maximum enzyme activity of filter paper is 41.97 U/mL, which is 2.42 times of the maximum enzyme activity of single bacteria. After 7 days of treatment, the degradation rates of cellulose, hemicellulose and lignin are 59.1%, 31.1% and 51.1%, respectively, and the degradation rate of straw reaches 46.2%, which is 1.95 times of the highest degradation rate of single bacteria. Scanning electron microscopy, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction analysis shows that the surface structure of corn straw is destroyed, the chemical bond strength of lignocellulose is weakened, and the crystallinity decreases from 57.32% to 55.77%. The results show that the constructed composite bacteria significantly enhances the degradation effect of lignocellulose and has good application potential.

Key words: bacterial complex strain; filter paper enzyme activity; optimization of enzyme production conditions; corn straw degradation

0 引言

我国作为世界上的农业大国,在生产过程中累积了巨量的农业废弃物,其中玉米秸秆的体量尤为突出。相关数据显示,我国玉米秸秆年均产量约为 2.88×10^8 t,占总秸秆的43.84%^[1]。玉米秸秆作为一种蕴藏丰富木质纤维素的可再生生物质资源,通过采取恰当的处理措施,能够有效地实现其资源化转化与利用^[2]。木质素是一种由苯丙烷基构成的致密结构,它与纤维素以及半纤维素紧密交织,构建了秸秆中高度有序且复杂的结晶结构,致使秸秆难以被降解与资源化^[3]。同时,焚烧秸秆导致的环境问题与“碳达峰、碳中和”的目标背道而驰。在有效降解秸秆与资源化利用方面,生物降解技术因其条件温和、成本低廉和对环境的友好性等优点,比传统的物理化学处理手段有显著的优越性^[4]。因此,通过微生物技术高效降解秸秆已经成为国内外科研领域的一个热点研究方向^[5]。

近年来,针对单菌株降解秸秆的研究较多,李立波等^[6]筛选出一株哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*),固态发酵25 d后其对玉米秸秆的降解率达21.79%,且在发酵12 d时纤维素酶活达到3.61 U/mL;冉一智等^[7]分离筛选得到一株枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*),14 d后其秸秆纤维素、木质素和半纤维素的降解率分别为28.30%,30.80%和53.40%,且滤纸酶活性在5 d达到最高,为16.76 U/mL;然而,由于单一菌株产酶种类的局限性,致使木质素的复杂网状结构难以被

有效破坏,进而阻碍了降解酶与纤维素的充分接触和渗透,最终制约了秸秆高效降解目标的实现^[8]。

研究表明,相较单一菌株而言,添加木质素降解菌复合菌系可以提高纤维素酶对纤维素的利用率,进而增强纤维素的酶活性,并最终实现秸秆降解效率的显著提高^[9]。王珊珊等^[10]构建的复合菌系14 d后的玉米秸秆失重率为29.83%,降解效果明显优于单一菌株;Zhang等^[11]构建的复合菌系SDP展现出较单菌更高的降解玉米秸秆的能力,培养20 d后,其纤维素、半纤维素、木质素的降解率分别为32.15%,23.87%和7.98%;王子苑等^[12]构建的复合菌系F,在发酵26 d后对玉米秸秆的降解率达32.96%,为对照组的4.73倍;Chu等^[13]构建的复合菌系在20 d后对纤维素、半纤维素、木质素的降解率分别为31.29%,48.36%和43.36%,其降解效果显著高于单一菌株。显然,复合菌系的秸秆降解率明显优于单一菌种,因此,构建高效复合菌系在提升秸秆降解效率方面发挥着重要作用。

本实验室分离保存的灿烂类芽孢杆菌(*Paenibacillus lautus*)J1^[4]、千叶类芽孢杆菌(*Paenibacillus chibensis*)J2^[4]和窖泥类芽孢杆菌(*Paenibacillus vini*)J3^[4]具有较高的纤维素降解能力;弗留明拜叶林克氏菌(*Beijerinckia fluminensis*)6-1H^[14]、适冷假单胞菌(*Pseudomonas extremaustralis*)1-2D^[15]和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)BS^[16]能够高效降解木质素及苯环类物质。因此,本研究利用分离保存的菌种构建玉米秸秆高效降解复合菌系,为秸秆的资源化利用提供菌种资源,并进一步优

化产酶条件以提高秸秆的降解效率。该研究对于深入挖掘微生物的潜能以及开发高效的玉米秸秆降解复合菌剂具有显著的意义。

1 材料与方法

1.1 样品来源

玉米秸秆: 河南省商丘市柘城县某农田。使用无菌水冲洗秸秆, 随后进行干燥处理, 研磨粉碎后过 40 目(孔径约 0.425 mm)筛网, 存放于阴凉干燥的环境中, 以备后续使用。

灿烂类芽孢杆菌(*Paenibacillus lautus*)J1^[4]、千叶类芽孢杆菌(*Paenibacillus chibensis*)J2^[4]、窖泥类芽孢杆菌(*Paenibacillus vini*)J3^[4]、弗留明拜叶林克氏菌(*Beijerinckia fluminensis*)6-1H^[14]、适冷假单胞菌(*Pseudomonas extremaustralis*)1-2D^[15]、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)BS^[16]等 6 株菌种均保存于中北大学微生物实验室。

1.2 培养基

苯胺蓝培养基、CMC-Na 培养基、赫奇逊无机盐培养基参照宋雨等^[4]的制备方法制备。

1.3 试验方法

1.3.1 复合菌系的构建

1) 木质素降解菌筛选: 将实验室保存的具有高效降解菲能力的菌株: 弗留明拜叶林克氏菌(*Beijerinckia fluminensis*)6-1H^[14]、适冷假单胞菌(*Pseudomonas extremaustralis*)1-2D^[15]以及被普遍认为具有木质素降解能力的枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)BS^[16]分别点种于苯胺蓝培养基上, 35 °C 倒置培养 3 d, 观察其平板脱色效果。

2) 颞颞试验: 参照嵇少泽等^[17]的方法判断 3 株木质素降解菌和 3 株纤维素降解菌之间的颞颞关系。

3) 复合菌系 D 的构建: 参考郝鹏等^[18]的方法制备菌悬液, 利用 DNS 法^[19]对滤纸酶活性和 CMC 酶活性进行测定, 基于测定结果筛选出具有最高酶活性的菌株组合, 对其产酶条件进行优化。

1.3.2 复合菌系 D 产酶条件的优化

产酶条件: 初始 pH 为 6.5, 接种量为 5%, 温度为 35 °C。对不同碳源质量浓度(5, 10, 15, 20 和 25 g/L)、氮源种类(蛋白胨、牛肉膏、酵母粉、硝酸铵、尿素)和氮源质量浓度(2.5, 5, 7.5,

10 和 12.5 g/L)进行单因素优化试验。

确定优化培养基条件之后, 进一步采用控制变量法分别研究初始 pH(5.0, 6.0, 7.0, 8.0 和 9.0)、接种量(3%, 6%, 9%, 12% 和 15%)和温度(25, 30, 35, 40 和 45 °C)对滤纸酶活性的影响。

1.3.3 秸秆降解效果分析

1) 秸秆降解率与成分分析

将单一菌株和复合菌系菌液按照 9% 体积比分别接种至赫奇逊无机盐培养基中, 该培养基以 10 g/L 玉米秸秆作为唯一碳源。同时, 设立等体积无菌水作为空白对照组, 实验条件设置为 35 °C、180 r/min, 持续培养 7 d, 培养结束后, 收集并处理剩余残渣, 首先使用无菌水冲洗以去除杂质, 随后在 80 °C 下干燥至质量恒定。为评估秸秆的降解效率, 采用质量损失法进行定量分析, 具体公式表述为 $\eta = \frac{(W_0 - W)}{W_0} \times 100\%$ 。其中: η 为降解率, %; W_0 为对照实验中秸秆残渣的干重, g; W 为降解处理后秸秆残渣的干重, g。玉米秸秆的成分分析遵循范式纤维法^[20]测定标准。

2) 降解前后玉米秸秆的理化性质分析

扫描电镜观察: 真空条件下使用溅射镀膜仪对样品进行 45 s 的喷金处理, 喷金电流为 10 mA, 在样品表面均匀镀上导电膜后, 用扫描电子显微镜对秸秆样品降解前后的表面形貌进行拍摄, 加速电压设定为 3 kV。

傅里叶红外光谱分析: 将样品压成透明薄片, 固定在样品夹中以备测试。以纯溴化钾粉末作为空白对照样品, 设置光谱分辨率为 4 cm⁻¹, 并进行 32 次扫描, 覆盖 400~4 000 cm⁻¹ 的波数范围。

X-射线衍射分析: 以 Cu-K α 作为 X-射线的测试靶材, 管电压设置为 40 kV, 管电流为 30 mA, 扫描范围为 5°~80°, 扫描速率为 6 °/min, 步进角度为 0.05°, 采样时间为 0.5 s。

热重分析: 将样品加入坩埚中, 以纯净氮气作为载气, 流速设为 50 mL/min, 在室温下以 10 °C/min 的升温速率加热至 800 °C。

2 结果与分析

2.1 复合菌系的构建

2.1.1 木质素降解菌的筛选结果

所选用的本实验室保存的 3 株菌均具有良好的

木质素降解潜力^[20]。活化后的菌株苯胺蓝脱色结果如图1所示。菌株6-1H和菌株1-2D可将苯胺蓝平板脱至基本无色，而菌株BS对苯胺蓝的脱色效果相对较弱，脱色效果排序为：6-1H>1-2D>BS。

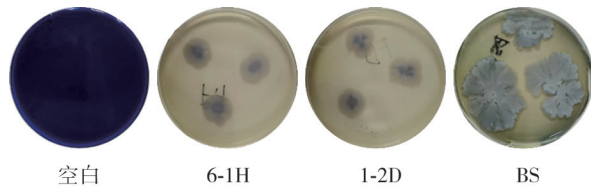


图1 苯胺蓝脱色结果

Fig. 1 Decolorization results of aniline blue

2.1.2 颞颥试验结果

将筛选出的6株菌(J1、J2、J3、6-1H、1-2D、BS)两两相交划线于CMC-Na固体培养基上，其颞颥结果如表1所示。菌株1-2D与6-1H，菌株1-2D与BS，菌株BS与J2存在颞颥作用，其他菌株间均无颞颥作用。

表1 颞颥试验结果

Tab. 1 Results of antagonism experiments

菌株	6-1H	1-2D	BS	J1	J2	J3
6-1H	+	-	+	+	+	+
1-2D		+	-	+	+	+
BS			+	+	-	+
J1				+	+	+
J2					+	+
J3						+

注：“+”表示两菌株之间不存在颞颥作用；“-”表示两菌株之间存在颞颥作用。

2.1.3 最佳复合菌系的构建

基于菌株筛选与颞颥试验结果，构建4组不同复合菌系，体积比分别为A:J1:J2:J3=1:1:1; B: J1: J2: J3: 6-1H=1: 1: 1: 1 ; C: J1: J2: J3: 1-2D=1:1:1:1 ; D: J1:J3:6-1H:BS=1:1:1:1。各组复合菌系纤维素酶活性见图2，其中复合菌系D的酶活性明显比其他复合菌系的更高，具体表现为：5 d后其CMC酶活性达到65.45 U/mL，分别为复合菌系A、B、C的2.59, 1.88和2.41倍；滤纸酶活性达到41.97 U/mL，分别为复合菌系A、B、C的2.18, 1.54和1.66倍。同时，复合菌系D酶活性也远高于单一菌株，其中CMC酶活性分别为单菌J1、J2、J3、6-1H、1-2D、BS的1.85, 5.61, 3.33, 7.02, 8.41和2.12倍；滤纸酶活性分别为单菌J1、J2、J3、6-1H、1-2D、BS的2.96, 2.08, 2.86, 5.26, 3.44和2.42倍。

白狄纯等^[21]研究并筛选构建复合菌系F，3 d后其CMC酶活性为5.145 U/mL，5 d后其滤纸酶活性

为8.201 U/mL，分别为单菌的1.19倍和3.07倍；张必周等^[22]等构建了复合菌系GF-Z，培养30 d后该复合菌系的滤纸酶活性为14.59 U/mL，为单菌的1.21倍；于素素^[23]构建的复合菌系C在3 d后的CMC酶活性和滤纸酶活性分别为20.82和13.68 U/mL，为单菌的1.29倍和1.44倍。本研究构建的复合菌系D比文献中构建的复合菌系的酶活性更高，因此，选择该菌系作为后续产酶条件优化研究和秸秆降解效果分析的最优复合菌。

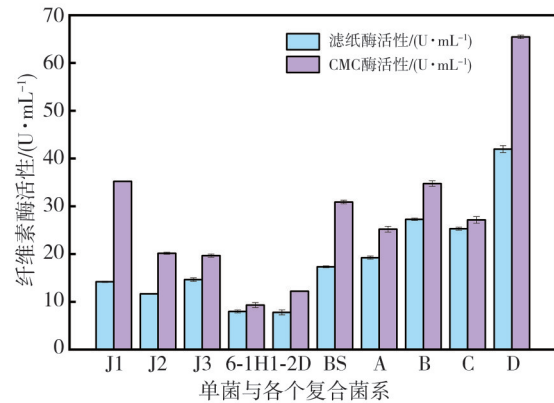


图2 单菌与各复合菌系纤维素酶活性

Fig. 2 Cellulase activity of single bacteria and complex bacterial strain

2.2 复合菌系产酶条件优化

2.2.1 单因素试验筛选培养基营养成分对复合菌系D产酶的影响

随着唯一碳源CMC-Na质量浓度的逐步上升，复合菌系D所展现的滤纸酶活性呈现先增加后减少的趋势，CMC-Na的质量浓度增加至10 g/L时，滤纸酶活性达到峰值，为41.97 U/mL（见图3）。因此，以10 g/L的CMC-Na作为优化培养基的碳源质量浓度。

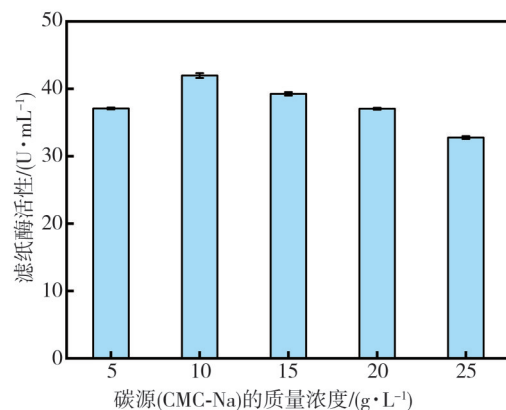


图3 碳源质量浓度对复合菌系D产酶的影响

Fig. 3 Effect of carbon source mass concentration on enzyme production by complex bacterial strain D

不同氮源对复合菌系D滤纸酶活性的影响如图4(a)所示,当以蛋白胨作为培养基氮源时,滤纸酶活性最高,达到54.83 U/mL。因此,决定将蛋白胨作为优化培养基中的氮源。同时,当蛋白胨含量为10 g/L时,滤纸酶活力最高,达到58.70 U/mL(见图4(b))。因此,确定优化培养基中的氮源为最佳质量浓度为10 g/L的蛋白胨。

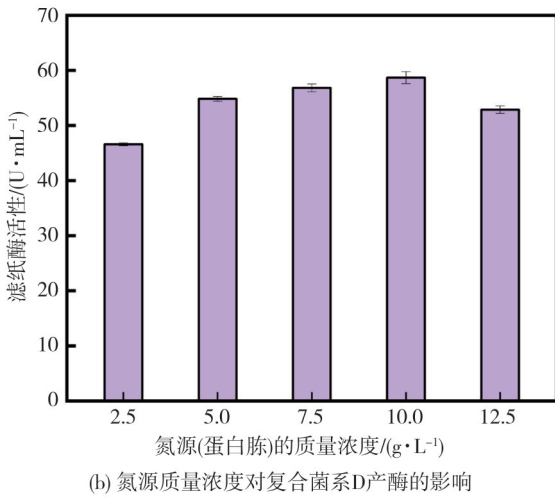
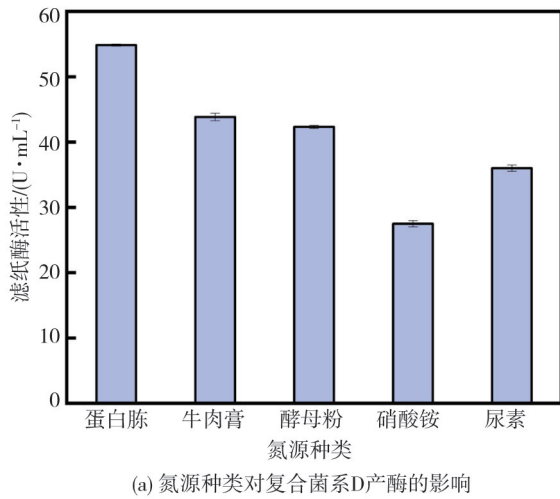


图4 氮源种类及质量浓度对复合菌系D产酶的影响

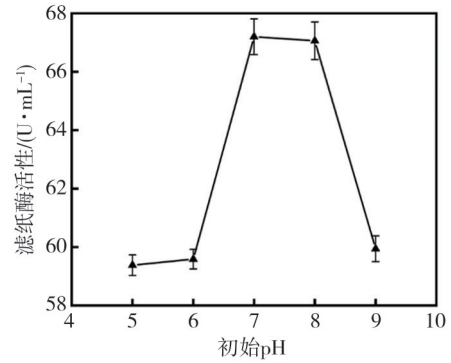
Fig. 4 Effect of nitrogen source and mass concentration on enzyme production by complex bacterial strain D

王新光等^[24]和彭永妍等^[25]研究发现碳氮源的差异是影响滤纸酶活性的一个重要因素。通过调整培养基中的碳氮源的种类和浓度,可以显著影响微生物的生长速率和代谢途径,进而促进酶的合成和分泌。

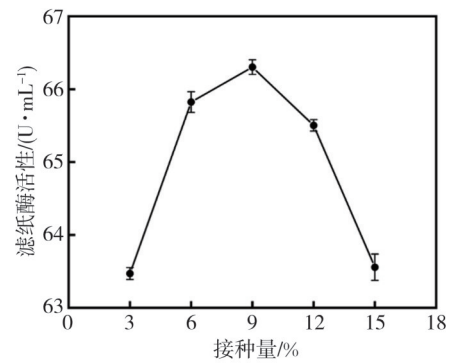
2.2.2 单因素试验考察培养条件对复合菌系D产酶的影响

微生物的生长繁殖及其产酶活性受pH的影响^[26]。在初始pH逐渐增高的过程中,复合菌系D

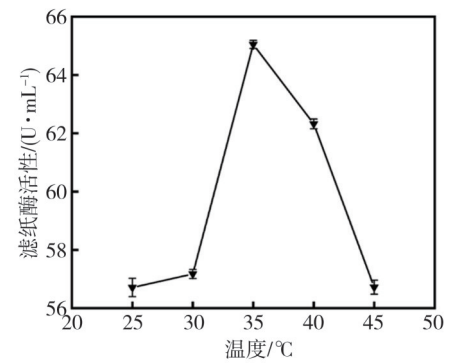
的滤纸酶活性表现为先上升后下降。当初始pH被调至中性环境(即pH=7)时,酶活性达到峰值,为67.20 U/mL(见图5(a)),表明其在中性生长环境中展现出更优越的代谢活性,而极端酸性或碱性环境均抑制该复合菌系的产酶能力。因此,确定最佳初始pH为7。



(a) 初始pH对复合菌系D产酶的影响



(b) 接种量对复合菌系D产酶的影响



(c) 温度对复合菌系D产酶的影响

图5 不同培养条件对复合菌系D产酶的影响

Fig. 5 Effect of different culture conditions on enzyme production by complex bacterial strain D

在产酶过程中,接种量对滤纸酶活性有显著影响。在接种量<9%的情况下,复合菌系D的滤纸酶活性呈现逐步增长的趋势,表明在这一区间适当提高接种量可以促进菌体的增长,从而推动酶的产量上升;当接种量为9%时,滤纸酶活性

达到峰值,为66.30 U/mL;当接种量 $> 9\%$ 后,滤纸酶活性则开始下降(图5(b)),表明过高的接种量并不能增加酶活性,反而可能因为菌体数量过多导致溶氧不足,进而影响酶的产生^[27]。综上,确定最佳接种量为 9% 。

复合菌系D滤纸酶活性的变化与温度呈现出先上升后下降的关联模式(图5(c)),温度较低时,细菌的生长受到明显抑制,进一步影响了酶的生产量;反之,温度过高也可能会抑制微生物体内的活性成分,导致其酶合成能力减弱^[28]。当温度设定为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,滤纸酶展现出最高活性,达到65.05 U/mL,因此,确定 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为该条件下的最佳温度设定。

2.3 复合菌系降解玉米秸秆效果的分析

2.3.1 秸秆降解率及成分分析

图6结果表明,4株单一菌株和复合菌系D都具备降解玉米秸秆的能力,且复合菌系D的降解效果更为显著。7d后,复合菌系D对玉米秸秆的降解率达到 46.2% ,分别为单菌J1、J3、6-1H、BS的3.53, 2.75, 4.41和1.95倍,且该菌系显著降低了其纤维素、半纤维素和木质素的含量。具体而言,纤维素的含量由 42.3% 减少至 17.3% ,降解率为 59.1% ,分别为单菌J1、J3、6-1H、BS的2.19, 1.56, 2.55和2.04倍;半纤维素的含量由 32.5% 降低至 22.4% ,降解率为 31.1% ,分别为单菌J1、J3、6-1H、BS的6.22, 15.55, 4.44和1.83倍;木质素含量则由 22.7% 下降至 11.1% ,降解率为 51.1% ,分别为单菌6-1H、BS的1.46和1.97倍。

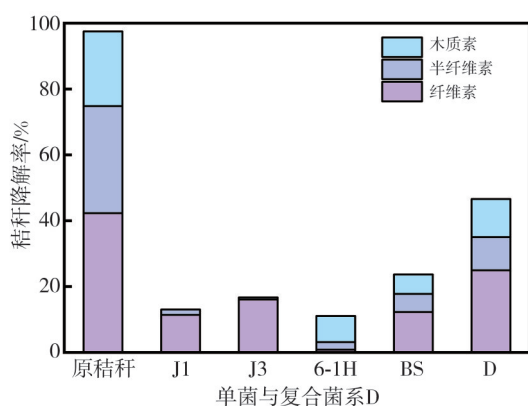


图6 单一菌株和复合菌系D对秸秆的降解效果

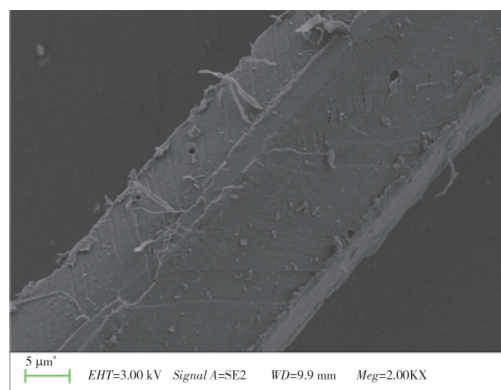
Fig. 6 Degradation of straw by single bacterial and complex bacterial strain D

余婷等^[5]构建的复合菌系处理12d对玉米秸秆的降解率为 23.65% ,为单菌的1.10倍;王继莲等^[29]筛选构建的复合菌系B处理10d对秸秆的降

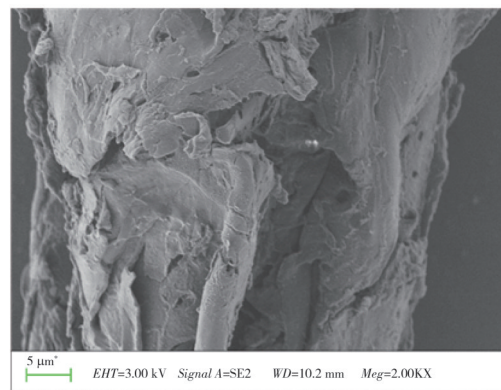
解率可达 24.5% ;李静等^[30]构建的复合菌系C处理20d对秸秆的降解率为 31.8% ,为单菌的1.51倍。本研究以复合菌系D为研究对象,相比现有的复合菌系,其在秸秆降解方面展现出更优效果,显示出在秸秆降解领域较大的潜力。

2.3.2 扫描电镜观察

图7为复合菌系D降解前后玉米秸秆的表观形貌图。降解前秸秆表面呈现平坦光滑的特征,且纤维束排列紧凑而有序。经菌系降解7d后,秸秆外观发生了显著的变化,表面由光滑转为粗糙,并密布细小孔洞,形成近似网状结构,受损纤维结构呈现不规则排列,内部空间变得更为疏松多孔,标志着天然木质纤维素原本复杂的构造体系遭到了有效瓦解^[5],与秸秆成分分析结果一致。



(a) 降解前玉米秸秆的表观形态



(b) 降解后玉米秸秆的表观形态

图7 降解前后玉米秸秆的表观形态

Fig. 7 Apparent morphology of corn straw before and after degradation

2.3.3 傅里叶红外光谱分析

图8中, 3430 cm^{-1} 处为分子间缔合态羟基O—H和酚羟基的伸缩振动谱带,经复合菌系D处理后,谱带减弱,表明纤维素分子间的氢键发生断裂,反映了木质纤维素结构的转变。 2919 cm^{-1} 处的吸收峰是由脂肪族(C—H)的亚甲基以及 $-\text{CH}_2$ 伸缩振动引起的,经降解处理后这一波数的吸收峰强度有所

降低,部分碳链结构受损^[31]。1 730 cm⁻¹处的峰值对应乙酰基或羰基C=O的伸展振动,该处峰值在降解后强度降低,表明木质素降解效果较好。1 635 cm⁻¹处为半纤维素的特征吸收峰^[32],1 604, 1515, 1 426 cm⁻¹的吸收峰与木质素中芳香环上C=C的震动相关,为木质素特征吸收峰,秸秆降解后吸收峰强度降低,表明复合菌系D能够降解秸秆中的木质素^[33]。898 cm⁻¹处的吸收峰为β-D-葡萄糖苷键特征峰,而纤维素是由β-(1,4)-糖苷键连接的β-D-吡喃型葡萄糖基所构成的,秸秆降解后898 cm⁻¹处的吸收峰强度降低,说明秸秆中的纤维素经复合菌系D处理后降解效果较好^[34]。

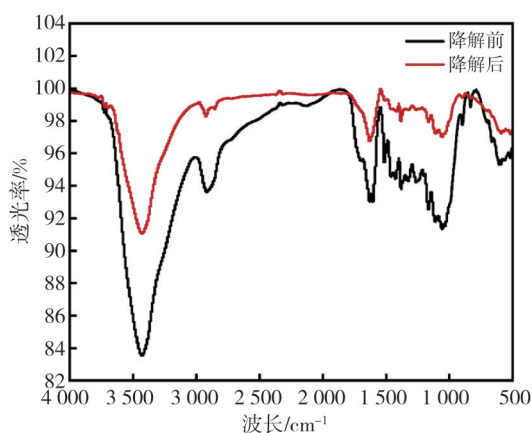


图8 降解前后玉米秸秆的傅里叶红外光谱图

Fig. 8 Fourier infrared spectra of corn straw before and after degradation

2.3.4 X-射线衍射分析

图9为复合菌系D降解前后玉米秸秆的XRD谱图。降解前后的XRD谱图均在2θ为16°和22°处显示出典型的纤维素I型特征峰,表明降解过程破坏了部分纤维素固有的晶型结构,没有改变秸秆的纤维素类型。利用公式计算所得的CrI值反映了秸秆中的纤维素结晶度的变化情况。原秸秆的CrI值为57.32%,降解后为55.77%,其CrI值较原秸秆的CrI值下降1.55%,表明纤维素的结晶区域受到了影响^[35]。

2.3.5 热重分析

使用热重分析仪对复合菌系D降解前后秸秆的热稳定性进行分析(见图10)。秸秆降解后的热解质量总损失为84.66%,比降解前提高了9.34个百分点。秸秆热失重的整个过程主要分为三个阶段:初始阶段发生在50~166℃,质量损失约为4.94%,可在DTG曲线上观察到第一个失重峰;第二阶段为166~400℃,由TG曲线可知,秸秆降解前后均在该阶段

失重明显,降解前秸秆质量损失为56.56%,降解后为79.72%,比降解前提高了23.16个百分点;第三阶段为400~800℃,主要为木质素发生炭化,质量损失相对较小,TG曲线弧度逐渐变得平缓,秸秆的热解速率趋近于零^[36]。

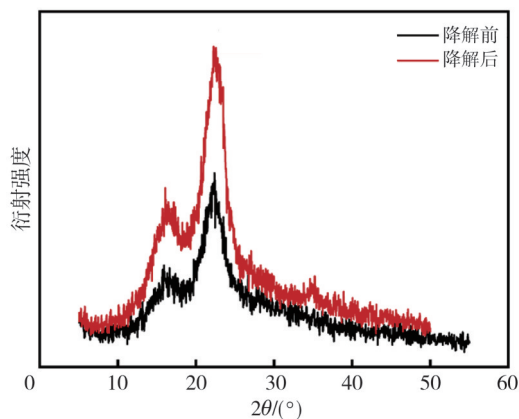
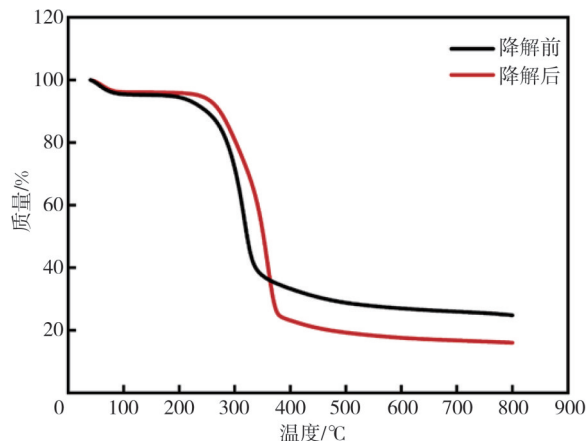
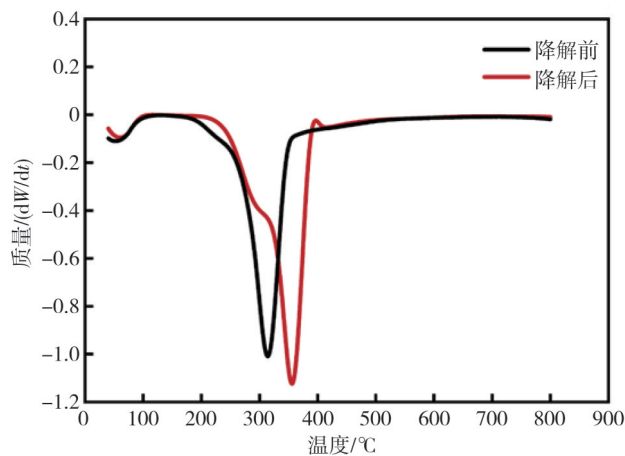


图9 降解前后玉米秸秆的XRD谱图

Fig. 9 XRD spectra of corn straw before and after degradation



(a) 降解前后玉米秸秆的TG曲线图



(b) 降解前后玉米秸秆的DTG曲线图

图10 降解前后玉米秸秆的TG和DTG曲线图

Fig. 10 TG and DTG curves of corn straw before and after degradation

3 结 论

本文根据菌株的筛选及颞颥实验构建了4组秸秆降解复合菌系,以滤纸酶活性为筛选指标选出最优复合菌系D(体积比J1:J3:6-1H:BS=1:1:1:1),5 d后该菌系滤纸酶活性达到了41.97 U/mL,为单菌最高酶活性的2.42倍。在最优产酶条件下,7 d后其玉米秸秆的降解率达到46.2%,为单菌最高降解率的1.95倍。此外,对降解前后玉米秸秆的理化性质进行了分析,结果表明复合菌系D的降解作用显著破坏了玉米秸秆的表面结构,有效去除了其中的纤维素、木质素和半纤维素。总的研究结果表明复合菌系D在降解玉米秸秆方面具有显著效果。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] 赵文萱, 鞠志刚, 郑亚强, 等. 一株高效降解麦秸木质素菌株的筛选及效能评价[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 386-392.
ZHAO Wenxuan, JU Zhigang, ZHENG Yeqiang, et al. Screening and efficacy evaluation on a strain efficiently degrading wheat straw lignin [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 53(3): 386-392. (in Chinese)
- [3] ZHAO L, SUN Z F, ZHANG C C, et al. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives [J]. Biore-source Technology, 2022, 343: 126123.
- [4] 宋雨, 白红娟, 胡锦俊, 等. 秸秆纤维素降解菌的分离筛选、复合菌系构建及产酶条件优化[J]. 中国酿造, 2023, 42(2): 108-114.
SONG Yu, BAI Hongjuan, HU Jinjun, et al. Isolation and screening of straw cellulose degrading bacteria, construction of composite strains and optimization of enzyme production conditions [J]. China Brewing, 2023, 42(2): 108-114. (in Chinese)
- [5] 余婷, 黄越, 李吴晗, 等. 黑翅土白蚁共生微生物对玉米秸秆生物降解作用研究[J/OL]. 南京农业大学学报(2024-05-08) [2024-06-26]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20240506.1627.002>.
YU Ting, HUANG Yue, LI Wuhan, et al. Study on the biodegradation of corn straw by symbiotic microorganisms of *Odontotermes formosanus* [J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University (2024-05-08) [2024-06-26]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20240506.1627.002>. (in Chinese)
- [6] 李立波, 任晓冬, 窦森. 固态发酵中2种微生物降解玉米秸秆效果的对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2136-2142.
LI Libo, REN Xiaodong, DOU Sen. Comparative study of the degradation efficiency of 2 types of microorganisms on the degradation of corn stalks in solid-state fermentation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(10): 2136-2142. (in Chinese)
- [7] 冉一智, 令狐美林, 马士晋, 等. 一株秸秆降解菌株的筛选及降解效果研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2024, 41(5): 118-124.
RAN Yizhi, LINGHU Meilin, MA Shijin, et al. Screening of a straw degradation strain and study on its degradation effect [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2024, 41(5): 118-124. (in Chinese)
- [8] 管浩, 王利妍, 金梦灿, 等. 不同形态氮素对黑曲霉降解小麦秸秆的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2298-2306.
GUAN Hao, WANG Liyan, JIN Mengcan, et al. Impacts of different forms of nitrogen on the decomposition of wheat straw by *Aspergillus niger* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(10): 2298-2306. (in Chinese)
- [9] ZHANG S, SHAN D, LIU X, et al. Cellulose-degrading strains: Their screening and application to corn straw in low-temperature environments [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(5): 2349-2355.
- [10] 王珊珊, 金昱言, 赵凯. 高效玉米秸秆降解复合菌系的筛选[J]. 黑龙江农业科学, 2016(4): 39-41.
WANG Shanshan, JIN Yuyan, ZHAO Kai. Screening of composite microbial system for efficient degradation of maize straw [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(4): 39-41. (in Chinese)
- [11] ZHANG E H, WANG M, PAN X L, et al. Establishment of a highly efficient corn stock-degrading microbial consortium and its degradation effect [J]. Advances in Agriculture, 2022, 2022: 8034553.
- [12] 王子苑, 吉玉玉, 舒健虹, 等. 高效木质纤维素分解菌的筛选及复合菌系降解秸秆效果研究[J]. 中国饲料, 2024(15): 19-26.
WANG Ziyan, JI Yuyu, SHU Jianhong, et al. Screening of high-efficiency lignocellulosic degrading bacteria and study on the degradation effect of straw by complex microbial systems [J]. China Feed, 2024(15): 19-26. (in Chinese)

- [13] CHU X D, AWASTHI M K, LIU Y N, et al. Studies on the degradation of corn straw by combined bacterial cultures[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124174.
- [14] 张晴, 白红娟, 孙慧敏, 等. 一株非高效降解菌的分离鉴定及去除特性[J]. *应用化工*, 2020, 49(7): 1720-1726.
ZHANG Qing, BAI Hongjuan, SUN Huimin, et al. Isolation and identification of an efficient phenanthrene-degrading strain and removal characteristics [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(7): 1720-1726. (in Chinese)
- [15] 张晴, 白红娟, 孙慧敏, 等. 非高效降解菌 1-2D 的筛选鉴定及其降解特性[J]. *精细化工中间体*, 2019, 49(5): 59-65.
ZHANG Qing, BAI Hongjuan, SUN Huimin, et al. Screening and identification of phenanthrene-degrading bacteria 1-2D and its degradation characteristics[J]. *Fine Chemical Intermediates*, 2019, 49(5): 59-65. (in Chinese)
- [16] 白红娟, 卫燕红, 李斌, 等. 多株功能菌种混合培养条件的响应面优化及其生长关系[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42(3): 27-35.
BAI Hongjuan, WEI Yanhong, LI Bin, et al. Optimization of mixed cultivation conditions with response surface methodology and growth relationships of multiple functional strains [J]. *Journal of Microbiology*, 2022, 42(3): 27-35. (in Chinese)
- [17] 稽少泽, 勾长龙, 张喜庆, 等. 病死猪堆肥高效降解复合菌系的构建及应用效果[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(3): 528-533.
JI Shaoze, GOU Changlong, ZHANG Xiqing, et al. Construction and application of a highly efficient complex microbial system to degrade dead-pig carcass in compost and assessment of its efficiency [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(3): 528-533. (in Chinese)
- [18] 郝鹏, 张喜庆, 高云航, 等. 抗生素对复合菌系降解 17 β -雌二醇的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(5): 1274-1280.
HAO Peng, ZHANG Xiqing, GAO Yunhang, et al. Effect of antibiotics on degradation of 17 β -estradiol by compound bacteria[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(5): 1274-1280. (in Chinese)
- [19] 毛婷, 魏亚琴, 杨红建, 等. 牦牛粪便中纤维素降解菌的筛选及产酶优化[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(11): 106-116.
MAO Ting, WEI Yaqin, YANG Hongjian, et al. Screening of cellulolytic bacterium from yak faeces and the optimization of cellulase production conditions [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(11): 106-116. (in Chinese)
- [20] WANG Y X, LIU Q, YAN L, et al. A novel lignin degradation bacterial consortium for efficient pulping [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 139: 113-119.
- [21] 白狄纯, 洪梓萌, 郭娟娟, 等. 小站稻秸秆降解复合菌系的筛选与产酶条件优化[J]. *中国饲料*, 2024(9): 65-71.
BAI Dichun, HONG Zimeng, GUO Juanjuan, et al. Screening and optimization of enzyme-producing conditions of Xiaozhan rice straw degradation composite microbial system [J]. *China Feed*, 2024(9): 65-71. (in Chinese)
- [22] 张必周, 青格尔, 高聚林, 等. 低温复配菌系对玉米秸秆的降解特性及稳定性[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(3): 487-494.
ZHANG Bizhou, QING Geer, GAO Julin, et al. Degradation characteristics and adaptability of corn stover by composite microbial system at low temperature [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3): 487-494. (in Chinese)
- [23] 于素素. 低温玉米秸秆降解菌的筛选及其复合菌系产酶条件优化[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [24] 王新光, 田磊, 王恩泽, 等. 玉米秸秆高效降解微生物复合菌系的构建及降解效果评价[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(4): 217-229.
WANG Xinguang, TIAN Lei, WANG Enze, et al. Construction of microbial consortium for efficient degradation of corn straw and evaluation of its degradation effect [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(4): 217-229. (in Chinese)
- [25] 彭永妍, 杨彬彬, 李志羲, 等. 纤维素降解细菌的筛选、鉴定及产酶条件优化[J]. *贵州科学*, 2023, 41(4): 41-45.
PENG Yongyan, YANG Binbin, LI Zhixi, et al. Screening, identification and enzyme-producing conditions optimization of cellulose-degrading bacterial strains [J]. *Guizhou Science*, 2023, 41(4): 41-45. (in Chinese)
- [26] GONG X J, YU Y, HAO Y B, et al. Characterizing corn-straw-degrading actinomycetes and evaluating application efficiency in straw-returning experiments [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1003157.
- [27] 王文凡, 刘银秀, 谢晓杰, 等. 牛粪堆肥中纤维素高效降解菌的筛选与产酶条件优化[J]. *微生物学通*

- 报, 2023, 50(11): 4796-4811.
- WANG Wenfan, LIU Yinxiu, XIE Xiaojie, et al. Screening of efficient cellulose degrading bacteria in cow manure compost and optimization of enzyme production conditions[J]. *Microbiology China*, 2023, 50(11): 4796-4811. (in Chinese)
- [28] 钟斌, 陶文玲, 倪思毅, 等. 一株纤维素降解菌的筛选、鉴定及产酶条件优化[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(5): 1167-1177.
- ZHONG Bin, TAO Wenling, NI Siyi, et al. Screening and identification of a cellulose-degrading bacterium in the aerobic composting of biogas residues and optimization of enzyme production conditions[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(5): 1167-1177. (in Chinese)
- [29] 王继莲, 李明源, 周茜, 等. 堆肥中纤维素降解菌的筛选及复配菌降解性能研究[J]. *核农学报*, 2023, 37(1): 180-187.
- WANG Jilian, LI Mingyuan, ZHOU Qian, et al. Screening of cellulose degrading microorganisms in composting process and study on degrading performances of composite strains [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(1): 180-187. (in Chinese)
- [30] 李静, 张瀚能, 赵翀, 等. 高效纤维素降解菌分离筛选、复合菌系构建及秸秆降解效果分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 689-696.
- LI Jing, ZHANG Hanneng, ZHAO Chong, et al. Isolation and screening of cellulose decomposing microbe and the straw decomposing effect of complex microbial system [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(4): 689-696. (in Chinese)
- [31] 张靖楠, 明会会, 闫戈, 等. TiO_2/UV 光催化降解玉米秸秆的研究 [J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(9): 52-56.
- ZHANG Jingnan, MING Huihui, YAN Ge, et al. Study on TiO_2/UV photocatalytic degradation of corn straw [J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(9): 52-56. (in Chinese)
- [32] SUN J F, DING R, YIN J. Pretreatment corn ingredient biomass with high pressure CO_2 for conversion to fermentable sugars via enzymatic hydrolysis of cellulose [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 177: 114518.
- [33] WEI W, ZHANG H, JIN Y. Comparison of microwave-assisted zinc chloride hydrate and alkali pretreatments for enhancing eucalyptus enzymatic saccharification [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 186: 42-50.
- [34] WANG Z N, HOU X F, SUN J, et al. Comparison of ultrasound-assisted ionic liquid and alkaline pretreatment of Eucalyptus for enhancing enzymatic saccharification [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 254: 145-150.
- [35] 程佳琪, 郭红光, 张子中. 褐煤与水稻秸秆共降解增产甲烷机理研究 [J]. *煤炭转化*, 2023, 46(1): 39-45.
- CHENG Jiaqi, GUO Hongguang, ZHANG Zizhong. Study on mechanism of lignite and rice straw to increase methane production by co-degradation [J]. *Coal Conversion*, 2023, 46(1): 39-45. (in Chinese)
- [36] 郎盼盼, 刘鹏, 李艳玲, 等. 不同木屑类生物质热解动力学与热力学参数研究 [J]. *林产工业*, 2022, 59(7): 30-37.
- LANG Panpan, LIU Peng, LI Yanling, et al. Study on kinetics and thermodynamic parameters for pyrolysis of different sawdust biomass [J]. *China Forest Products Industry*, 2022, 59(7): 30-37. (in Chinese)