

研究报告

优势复合菌对烟草秸秆的降解特性及应用潜力

卢肖肖^{#1,2}, 刘京^{#3}, 苟剑渝³, 周郑刚³, 谢世爽³, 王坡^{1,2}, 杨苹^{1,2}, 黄莺^{*1,2}

1 贵州大学 烟草学院, 贵州 贵阳 550025

2 贵州省烟草品质研究重点实验室, 贵州 贵阳 550025

3 贵州省烟草公司遵义市公司, 贵州 遵义 563000

卢肖肖, 刘京, 苟剑渝, 周郑刚, 谢世爽, 王坡, 杨苹, 黄莺. 优势复合菌对烟草秸秆的降解特性及应用潜力[J]. 微生物学通报, 2025, 52(7): 3156-3164.

LU Xiaoxiao, LIU Jing, GOU Jianyu, ZHOU Zhenggang, XIE Shishuang, WANG Po, YANG Ping, HUANG Ying. Degradation characteristics and application potential of dominant composite bacteria on tobacco straw[J]. Microbiology China, 2025, 52(7): 3156-3164.

摘要: 【背景】烟草秸秆富含木质素、纤维素和半纤维素, 且结构复杂, 自然状态下难以降解。

【目的】探讨烟草秸秆的降解过程, 并通过复合菌剂有效提高其降解效率。【方法】构建由纤维素降解菌、木质素降解菌和氨化细菌组成的复合菌剂, 按 1:1:1 的比例形成 2 种复合菌群(复合菌 1 和复合菌 2)。采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析烟草秸秆在降解过程中的化学基团变化, 并通过田间试验验证复合菌的实际应用效果。【结果】FTIR 分析表明, 复合菌可能破坏烟草秸秆的复杂结构, 分解秸秆中的纤维素和木质素, 释放小分子糖类和芳香族化合物等产物, 推测了其降解过程。田间试验中, 复合菌处理显著提高了烟草秸秆的降解效果; 尤其是复合菌 2, 第 15 天腐解率达到 40.44%, 105 d 后腐解率达到 64.20%。【结论】本研究探讨了复合菌对烟草秸秆的降解过程, 并显著提高了烟草秸秆的降解效率, 为秸秆资源化利用提供了科学依据。

关键词: 烟草秸秆降解; 复合菌; 傅里叶变换红外光谱

资助项目: 贵州省烟草公司遵义市公司科技项目(2022XM05)

This work was supported by the Zunyi Company Science and Technology Project of Guizhou Tobacco Company (2022XM05).

[#]These authors contributed equally to this work.

^{*}Corresponding author. E-mail: yhuang6@gzu.edu.cn

Received: 2024-10-25; Accepted: 2024-12-13; Published online: 2025-01-15

Degradation characteristics and application potential of dominant composite bacteria on tobacco straw

LU Xiaoxiao^{#1,2}, LIU Jing^{#3}, GOU Jianyu³, ZHOU Zhenggang³, XIE Shishuang³, WANG Po^{1,2}, YANG Ping^{1,2}, HUANG Ying^{*1,2}

1 College of Tobacco Science, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China

2 Key Laboratory of Tobacco Quality Research in Guizhou Province, Guiyang 550025, Guizhou, China

3 Zunyi Company, Guizhou Tobacco Company, Zunyi 563000, Guizhou, China

Abstract: [Background] Tobacco straw is rich in lignin, cellulose, and hemicellulose, while the complex structure makes it difficult to be degraded under natural conditions. [Objective] To explore the degradation process of tobacco straw and enhance the degradation efficiency by using composite bacterial agents. [Methods] Cellulose-degrading bacteria, lignin-degrading bacteria, and ammonifying bacteria were mixed in a 1:1:1 ratio to form two composite bacterial agents (composite Bacteria 1 and composite Bacteria 2). Fourier transform infrared spectroscopy (Fourier Transform Infrared) was employed to analyze the chemical group changes in tobacco straw during the degradation process. Field experiments were conducted to evaluate the application performance of the composite bacterial agents. [Results] FTIR results suggested that the composite bacteria might disrupt the complex structure of tobacco straw, degrading cellulose and lignin to release small-molecule sugars and aromatic compounds. Field experiments demonstrated that composite bacterial treatments significantly enhanced the degradation of tobacco straw. Especially, the treatment with composite Bacteria 2 achieved a weight loss rate of 40.44% on day 15 and 64.20% after three and a half months. [Conclusion] This study explored the degradation process of tobacco straw by composite bacteria and significantly improved its degradation efficiency, providing scientific support for the utilization of tobacco straw resources.

Keywords: tobacco straw degradation; composite bacterial agent; Fourier transform infrared spectroscopy

我国每年产生大量烟草秸秆,其处理方式对环境保护和农业的可持续发展具有深远影响^[1]。烟草秸秆富含纤维素、半纤维素和木质素,提供了资源化利用的可能^[2]。然而,烟草秸秆的复杂结构增加了其自然降解的难度,微生物降解技术作为一种绿色高效的解决方案,不仅能提高烟草秸秆的降解效率,还有助于减少环境污染^[3]。单一菌株难以分解烟草秸秆复杂组分,复合菌可以通过协同作用提升降解效率,促进其转化为有机肥或生物质能源^[4]。本研究旨在利用复合菌群进行烟草秸秆降解

实验,探索其降解潜力及相关机理,为烟草秸秆的高效资源化利用提供理论支持和应用参考。

1 材料与方法

1.1 样品

筛选土壤来自贵州省安顺市杨武乡的植烟黄壤,主要种植作物为烤烟和玉米。土壤的基本理化性质包括水解性氮 243 mg/kg,全氮含量 2.04 g/kg,有机质含量 42.6 g/kg,速效钾 563 mg/kg,有效磷含量 78.0 mg/kg, pH 值 6.38。

烟梗采自贵州省安顺市杨武乡烤后烟叶主叶脉;烟秆粉末采自贵州省安顺市杨武乡,烟秆经 60 目筛分后于室温下储存;田间验证试验位于贵州省遵义市桐梓县,处理用烟秆段长度为 40 cm;烟秆均来自云烟 87。

1.2 培养基

富集培养基依据文献[5]制备。分离培养基包括营养琼脂(nutrient agar, NA)培养基(细菌)、马丁氏琼脂培养基(真菌)及改良高氏I号培养基(放线菌),参照文献[6]配制。LB 培养基和 PDA 培养基分别按照文献[7]和文献[8]制备。筛选培养基包含 CMC-Na 培养基^[9]、苯胺蓝培养基(细菌与放线菌:在 LB 固体培养基中添加 0.4 g/L 苯胺蓝;真菌:在 PDA 固体培养基中加入 0.4 g/L 苯胺蓝)、愈创木酚培养基(细菌与放线菌:在 LB 固体培养基中添加 0.4 mL/L 愈创木酚;真菌:在 PDA 固体培养基中加入 0.4 mL/L 愈创木酚),以及牛肉膏蛋白胨液体培养基^[10]。烟秆液体培养基按文献[11]配制。

1.3 主要试剂和仪器

羧甲基纤维素钠,国药集团化学试剂有限公司;刚果红,天津市致远化学试剂有限公司;碱性木质素,北京华迈科生物技术有限责任公司;水溶苯胺蓝和愈创木酚,天津市光复科技发展有限公司;细菌基因组 DNA 提取试剂盒,天根生化科技(北京)有限公司;1.1×T3 Super PCR Mix,北京擎科生物科技有限公司。傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)仪,赛默飞世尔科技公司。

1.4 分离、纯化和筛选降解菌

称取 10.0 g 土壤,加入 90 mL 灭菌蒸馏水(含玻璃珠),25 °C、150 r/min 振荡 1 h,静置 5 min 后取 2 mL 上清液接种至富集培养基,于 30 °C、180 r/min 培养 3 d。将富集培养液按无菌操作要求进行梯度稀释,取 10^{-6} 、 10^{-7} 和 10^{-8} 稀释液各 0.1 mL 涂布于 NA 培养基进行细菌分离;取 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} 稀释液各 0.1 mL 涂布于马丁氏琼脂培养基及改良高氏I号培养基,用

于真菌和放线菌的分离^[12]。从分离纯化的细菌、真菌、放线菌单菌落中挑取菌株,分别接种至 CMC-Na 鉴别培养基、苯胺蓝培养基和愈创木酚培养基进行功能筛选。挑选在 CMC-Na 培养基上 30 °C 培养 24 h 后生长良好的菌株,用 0.1% 刚果红染色 10 min,接着用 1 mol/L NaCl 脱色 15 min,去除多余液体。根据透明圈直径(D)与菌落直径(d)的比值,筛选出高效纤维素降解菌。将菌株接种至苯胺蓝和愈创木酚培养基,于 30 °C 培养 24 h 后观察生长情况。根据是否出现透明圈或显色圈,筛选出具有木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶或漆酶活性的菌株。同时测定菌落直径及透明圈或显色圈直径,计算比值,筛选出高效木质素降解菌。采用纳氏法^[13]检测纯化菌株,若培养液出现深黄色或黄色沉淀,表明菌株分解蛋白质生成 NH_3 ,具备氨化细菌特性。最终筛选出沉淀呈深黄色或黄色的菌株作为高活性候选株。

1.5 菌株的分子生物学鉴定

使用细菌基因组 DNA 提取试剂盒提取菌株 DNA,并采用细菌 16S rRNA 基因通用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')和 1492R (5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3')进行 PCR 扩增。PCR 反应体系(25 μL): 1.1×T3 Super PCR Mix 22.0 μL ,上、下游引物(10 $\mu\text{mol/L}$)各 1.0 μL ,模板 DNA 1.0 μL 。PCR 反应条件:98 °C 2 min;98 °C 10 s,55 °C 10 s,72 °C 20 s,32 个循环;72 °C 2 min;4 °C 保存。取 2 μL PCR 产物在 1% 琼脂糖凝胶上进行电泳检测,并将产物送至北京擎科生物科技有限公司进行基因测序。测序结果利用 NCBI 的 BLAST 工具进行序列比对分析。

1.6 菌株拮抗试验

将选出的优势菌株分别在 LB 培养基上划交叉线,30 °C 倒置培养 2–3 d,观察菌株生长情况,检查交叉点周围是否形成抑菌圈。若未观察到抑菌圈,表明菌株之间无拮抗作用。

1.7 复合菌的复配及筛选方法

按纤维素降解菌、木质素降解菌、氨化细菌 1:1:1 的比例进行复合菌的复配。复合菌按 6% 的接种量(菌株含量 $\geq 1 \times 10^{10}$ CFU)分别接种于 5 cm 长的烟梗中,进行室内降解试验。以施用无菌水为对照,每种复合菌重复 3 次,在接菌后 10 d 和 20 d 分别取样测定腐解率。

1.8 复合菌降解烟秆前后的 FTIR 测定

将复合菌按 6% 的接种量(菌株含量 $\geq 1 \times 10^{10}$ CFU)分别接种在以烟秆粉末为唯一碳源的烟秆液体培养基中,每种复合菌重复 3 次,在 28 °C、180 r/min 条件下培养,并于接菌后 7、14、28 d 分别取样测定降解产物的 FTIR。

1.9 复合菌对烟草秸秆降解效果的田间试验

将烟草秸秆切成约 40 cm 长,设置 3 个处理组:L1 组(烟草秸秆+复合菌 1)、L2 组(烟草秸秆+复合菌 2)、L3 组(对照组,不添加菌剂),每组设 3 个重复。复合菌接种量为 6%,菌株浓度不低于 1×10^{10} CFU。空白对照组(L3)使用无菌水代替菌剂。分别在试验的第 15、45、75、105 天取样,测定秸秆的腐解率,以评估各处理组的降解效果。

1.10 分析测试方法

FTIR 分析:将液体培养基冷冻真空干燥后获得降解产物粉末,与溴化钾(KBr)按体积比为 1:99 的比例混合,再在玛瑙研钵中研磨后压片,并利用 FTIR 仪进行观察,波数范围为 400–4 000 cm^{-1} 。

腐解率的测定:秸秆腐解率(%)=
$$\frac{\text{未降解秸秆质量}-\text{降解后秸秆质量}}{\text{未降解秸秆质量}} \times 100。$$

2 结果与分析

2.1 降解菌株筛选结果

经 24 h 培养后,菌株 LXX-2022-12、LXX-2022-13、WP-2022-14、WP-2022-15 在 CMC-Na 培养基上产生了明显的褪色圈, D/d

值均 ≥ 2.5 (表 1),可有效分解纤维素。经过 24 h 培养后,菌株 YP-2023-01 在苯胺蓝培养基上产生了明显的褪色圈, D/d 值 ≥ 2.5 (表 1),可有效分解木质素。对分离的氨化菌株滴加纳氏试剂进行检测,观察到黄色反应,其颜色深度指示氨化活性强弱(颜色越深活性越强),最终筛选出能发生深黄色反应的氨化菌株 Z6。

2.2 菌株鉴定结果

通过 16S rRNA 基因鉴定,纤维素降解菌分别为:印度不动杆菌(*Acinetobacter indicus*) LXX-2022-12、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*) LXX-2022-13、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) WP-2022-14,以及栖黏液无色杆菌(*Achromobacter mucicolens*) WP-2022-15。木质素降解菌 YP-2023-01 被鉴定为东洋芽孢杆菌(*Bacillus toyonensis*),氨化细菌 Z6 被鉴定为花椒芽孢杆菌(*Bacillus zanthoxyli*)。

2.3 拮抗试验结果

由图 1 可知,筛选出的 4 株纤维素降解菌、1 株木质素降解菌和 1 株氨化细菌在 LB 培养基中生长旺盛时,两两相交处未观察到抑菌圈,表明菌株间无明显拮抗效应,可用于复合菌剂的制备。

2.4 复合菌的复配及筛选结果

按照纤维素降解菌、木质素降解菌和氨化细菌 1:1:1 的比例复配出 4 种复合菌:复合菌 1(LXX-2022-12、YP-2023-01、Z6)、复合菌 2(WP-2022-14、YP-2023-01、Z6)、复合菌 3

表 1 菌株的褪色圈直径与菌落直径比值

Table 1 Ratio of decolorization zone diameter to colony diameter for the strains

Medium	Strain code	D/d
CMC-Na medium	LXX-2022-12	6.97
	LXX-2022-13	4.28
	WP-2022-14	5.21
	WP-2022-15	5.45
	YP-2023-01	5.22
Aniline blue culture medium	YP-2023-01	5.22

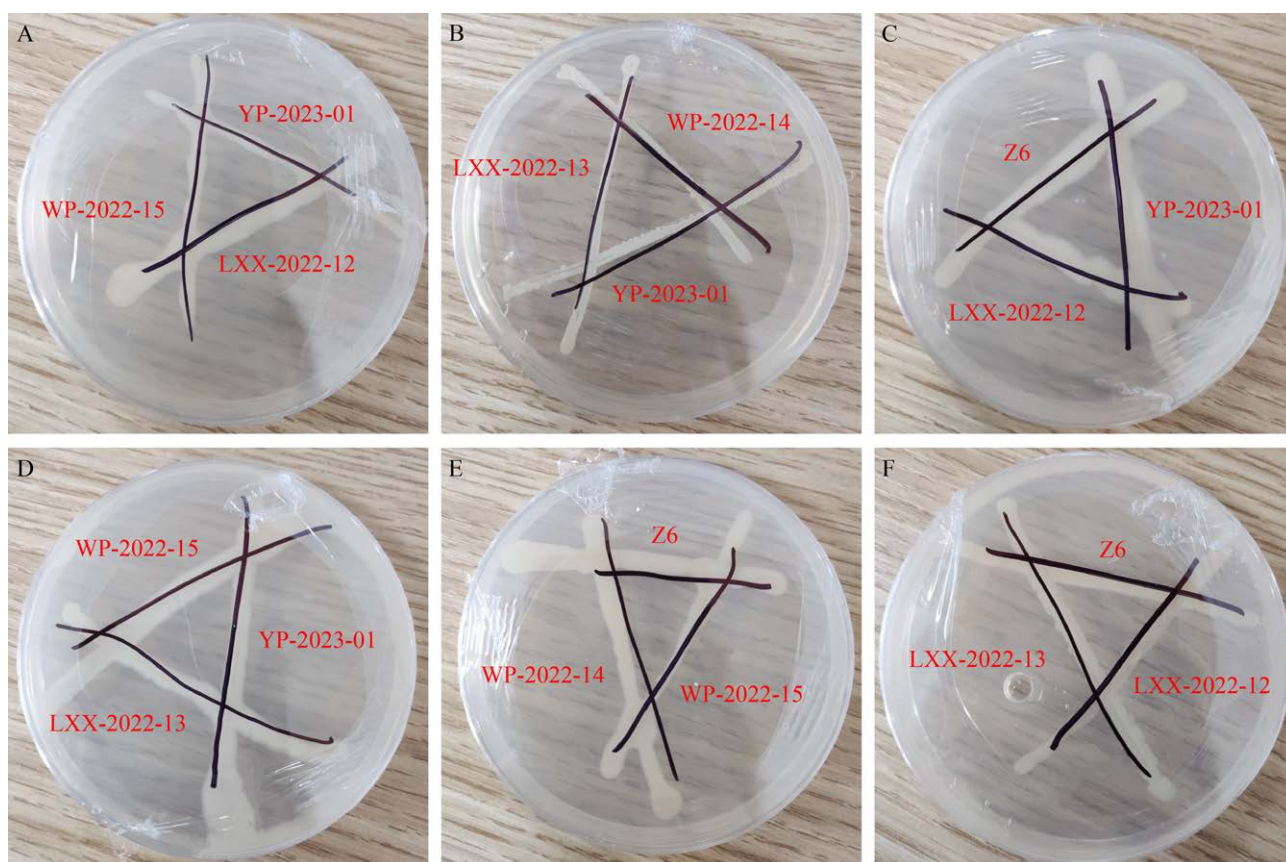


图 1 菌株间拮抗试验

Figure 1 Antagonistic experiment among strains.

(WP-2022-15、YP-2023-01、Z6)以及复合菌 4 (LXX-2022-13、YP-2023-01、Z6)。通过表 2 复合菌对烟梗的室内降解实验可以看出,在降解第 10、20 天,复合菌处理的腐解率都显著高于对照 X0。其中,在降解第 10 天,X1、X2 腐解率显著大于其他处理;在降解第 20 天,X1、X2 腐解率大于其他处理,其中 X2 降解效果最好。由此筛选出 X1、X2 这 2 种优势复合菌进行进一步研究验证。

2.5 复合菌降解烟秆前后 FTIR 结果分析

FTIR 在不同波数处的吸收峰反映了烟秆降解过程中相关化学基团的变化(图 2)。1 050 cm^{-1} 和 1 109 cm^{-1} 处的吸收峰与二氧化硅中的 Si-O 伸缩振动及多糖类的 C-O 伸缩振动有关^[14-15],吸收峰均增强可能表明烟秆硅化层被破坏,纤

表 2 复合菌对烟梗的室内降解效果

Table 2 Field decomposition effects of composite bacteria on tobacco stalks

Group	10 d (%)	20 d (%)
X0	64.06±0.32c	83.53±0.81c
X1	75.53±0.88a	92.39±0.36ab
X2	79.31±0.15a	92.88±0.38a
X3	70.17±0.14b	90.57±0.26b
X4	69.85±0.39b	90.44±0.21b

同列不同小写字母表示处理间差异显著。X0: 烟梗+无菌水; X1: 烟梗+复合菌 1; X2: 烟梗+复合菌 2; X3: 烟梗+复合菌 3; X4: 烟梗+复合菌 4。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments. X0: Tobacco stalk+sterile water; X1: Tobacco stalk+composite bacteria 1; X2: Tobacco stalk+composite bacteria 2; X3: Tobacco stalk+composite bacteria 3; X4: Tobacco stalk+composite bacteria 4.

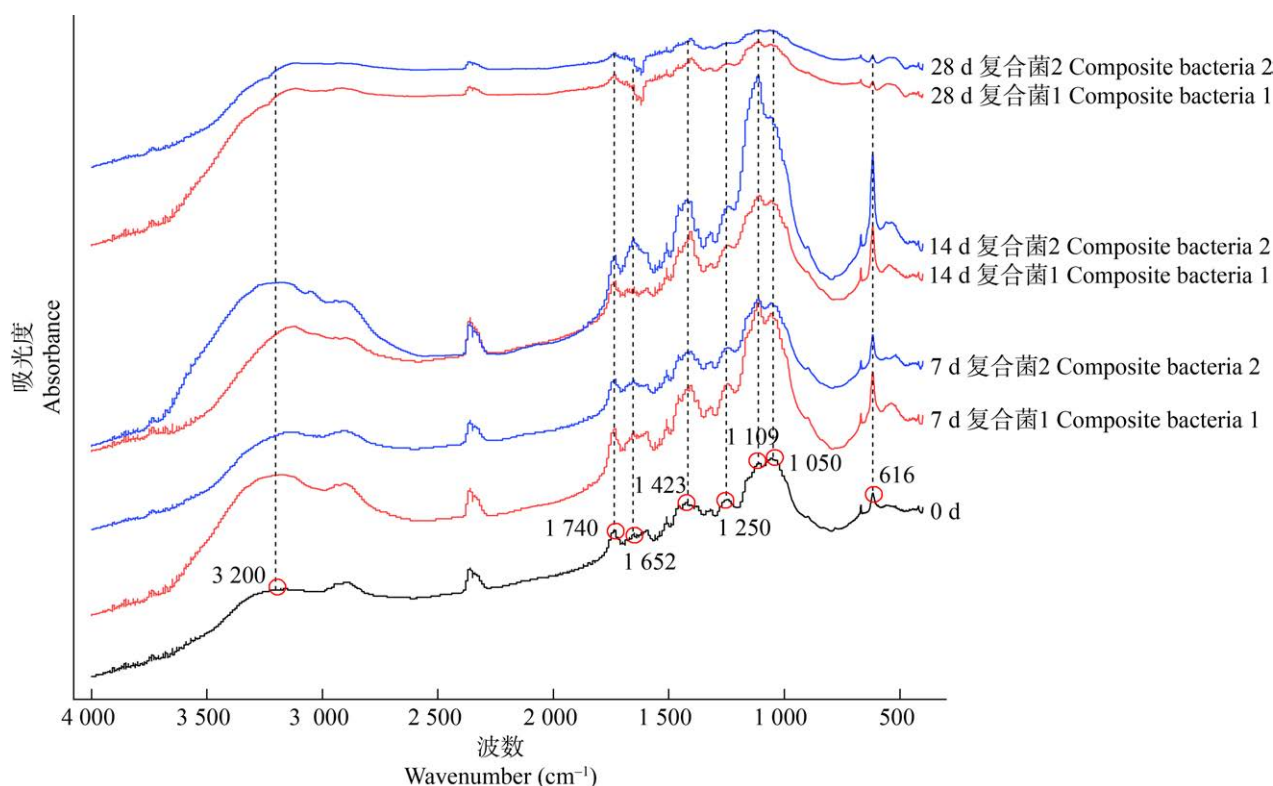


图2 复合菌处理烟秆后 0、7、14、28 d 傅里叶变换红外光谱

Figure 2 Fourier transform infrared spectroscopy of tobacco straw treated with composite bacteria at 0, 7, 14, and 28 days.

纤维素和半纤维素分解并释放出小分子糖类和寡糖。616 cm^{-1} 处的吸收峰反映苯环和 C-H 的面外弯曲振动^[7], 吸收峰均增强可能表明木质素中的芳香环结构部分降解, 生成了含苯环的芳香族化合物。1 423 cm^{-1} 处的吸收峰与木质素和脂肪族化合物中的 $-\text{CH}_2$ 变形振动相关^[16], 吸收峰均增强可能表明木质素被分解并释放出更多的含 $-\text{CH}_2$ 基团的脂肪族化合物。1 652 cm^{-1} 和 1 740 cm^{-1} 处的吸收峰分别与 $\text{C}=\text{C}$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动以及 $\text{C}=\text{O}$ 振动相关^[17-18], 吸收峰的变化可能反映了木质素分解生成芳香族化合物、不饱和脂肪族化合物、醛类及酮类, 以及这些中间产物后续分解的过程。1 250 cm^{-1} 处的吸收峰反映了 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 和 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动^[19], 吸收峰逐渐减弱可能表明烟草秸秆中木质素、纤维素、酚类、芳醚和酯类等含 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 和 $\text{C}-\text{O}$ 的化合物被逐步降解。3 100–3 254 cm^{-1} 处的吸

收峰则与醇类、酚类中的 $-\text{OH}$ 伸缩振动有关^[20], 吸收峰变化可能表明木质素分解形成了醇类、酚类并进一步分解。复合菌 1 在第 7 天吸收峰的变化大于其他处理。到降解第 14 天, 烟秆的结构破坏加剧, 更多的纤维素和木质素暴露出来, 复合菌 2 的吸收峰变化显著大于其他处理。这表明不同复合菌对烟秆的降解过程在时间和效率上有所不同。

2.6 复合菌对烟秆的田间降解效果

添加复合菌处理烟秆后, 不同腐熟阶段 L1 和 L2 处理组的腐解率均显著高于 CK 对照组 (表 3), 并且 L2 处理的腐解效果显著优于 L1 处理。这表明与 CK 对照相比, 复合菌能够有效加速烟草秸秆的降解过程, 并且复合菌 2 的降解效率明显更高。经过 105 d 的腐解, 复合菌 1 和复合菌 2 处理的腐解率分别达到了 40.30% 和 64.20%, 显著高于 CK 的 26.75%。

表3 复合菌对秸秆的田间降解效果

Table 3 Decomposition effects of composite bacteria on straw in the field

Time (d)	CK (%)	L1 (%)	L2 (%)
15	5.08±4.64c	23.48±4.0b	40.44±3.29a
45	7.29±3.55b	31.27±7.24a	47.63±8.69a
75	11.77±6.52c	31.44±2.32b	51.38±2.04a
105	26.75±3.91c	40.30±3.71b	64.20±1.53a

同列不同小写字母标注表示处理间差异显著。L1: 烟草秸秆+复合菌 1; L2: 烟草秸秆+复合菌 2; L3: 烟草秸秆+不添加菌剂。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments. L1: Tobacco straw+composite bacteria 1; L2: Tobacco straw+composite bacteria 2; L3: Tobacco straw without bacterial inoculation.

3 讨论

FTIR 分析揭示了复合菌降解烟草秸秆前后化学基团的变化,通过这些变化探讨了其降解的可能过程。在降解初期,复合菌破坏了烟草的复杂结构,暴露出纤维素和木质素,并推测其分解产生了小分子糖类、芳香族化合物和脂肪族化合物;中后期,木质素和纤维素可能继续分解,生成的小分子中间产物进一步降解或矿化为 CO₂ 和水。实验表明,复合菌 1 在降解第 7 天吸收峰变化显著,而复合菌 2 在第 14 天吸收峰变化显著,由此推测复合菌 2 可能在降解后期表现出更好的效率。田间试验进一步验证了上述结果。复合菌处理显著提高了烟草秸秆的腐解率,特别是复合菌 2 在处理第 15 天腐解率达到 40.44%,最终腐解率高达 64.20%,显著高于复合菌 1。这表明复合菌 2 在实际应用中的降解效率更高,与 FTIR 推测的结果相吻合,进一步说明复合菌 2 在烟草秸秆降解中的优势。

目前,关于烟草秸秆还田的研究相对较少,大部分研究集中在玉米、小麦和水稻等作物的秸秆处理^[21-23]。常见的处理方式是将秸秆粉碎成约 1-10 cm 的小段^[24],也有部分研究将烟草秸秆粉碎或处理成 5-10 cm 后还田^[25-27]。本研究采取了较为简便的处理方式,将每根烟秆仅

简单切割为三节,长度约为 40 cm 的长段还田。接种复合菌 2 后,秸秆达到了较高的腐解率,显著降低了烟草秸秆的处理成本。在实际推广中,可结合大型拖拉机作业,喷施复合菌剂后,在整地过程中直接将整根烟草秸秆旋切成长段并翻压至土壤中,从而实现高效的烟草秸秆还田。这一策略不仅降低了处理成本,还提高了秸秆还田效率,具有广泛的应用前景。

4 结论

本研究构建了由纤维素降解菌、木质素降解菌和氨化细菌组成的复合菌,通过协同作用显著提升了烟草秸秆的降解效率。FTIR 分析揭示了复合菌在降解过程中对烟草秸秆复杂结构的有效破坏,促进了纤维素和木质素的分解,释放出小分子糖类和芳香族化合物。田间降解效果表明,复合菌直接作用在秸秆上,腐解率显著高于对照组,尤其是经过复合菌 2 处理的烟草秸秆降解效果更加显著,第 15 天的腐解率达 40.44%,第 105 天的腐解率达到 64.20%。这些结果为烟草秸秆直接还田利用提供了重要的理论依据,表明复合菌群在农业废弃物降解中的潜在应用价值。

作者贡献声明

卢肖肖:数据收集、数据分析、撰写文章;刘京:监管、撰写文章;苟剑渝:提出概念、监管;周郑刚:数据收集、提供资源;谢世爽:数据收集、提供资源;王坡:数据收集、数据分析;杨苹:数据收集;黄莺:提出概念、获取资金、方法论。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] 汪朔帆,张翠萍. 废弃烟草秸秆的综合利用研究进展[J]. 农村经济与科技, 2023, 34(17): 19-22.
WANG SF, ZHANG CP. Research progress on

- comprehensive utilization of waste tobacco straw[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2023, 34(17): 19-22 (in Chinese).
- [2] 陈丽鹃. 烟田秸秆腐解特性及其对土壤微生物和烟草疫霉菌的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021. CHEN LJ. Analysis of Tobacco Straw Decomposition and Its Impact on Soil Microbial Communities and Tobacco Phytophthora[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021 (in Chinese).
- [3] 李春黎, 李文豪, 余君, 孙敬国, 王昌军, 陈守文, 杨勇. 烟秆高效复合降解菌群的筛选、鉴定及组合应用[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(6): 26-32. LI CL, LI WH, YU J, SUN JG, WANG CJ, CHEN SW, YANG Y. Screening, identification and combination of high efficiency degrading bacteria for tobacco stem[J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(6): 26-32 (in Chinese).
- [4] 武红亮. 秸秆和养分综合管理下黑土的固碳效应及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. WU HL. Carbon fixation effect and mechanism of black soil under comprehensive management of straw and nutrients[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021 (in Chinese).
- [5] 刘东阳, 王蒙蒙, 马磊, 赵政, 邱强, 沈其荣. 高效纤维素分解菌的分离筛选及其分解纤维素研究[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(6): 49-58. LIU DY, WANG MM, MA L, ZHAO Z, QIU Q, SHEN QR. Isolation of the efficient lignocelluloses degrading microbes and decomposition of cellulose[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2014, 37(6): 49-58 (in Chinese).
- [6] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 364-368. LI ZG, LUO YM, TENG Y. Research Method of Soil and Environmental Microorganisms[M]. Beijing: Science Press, 2008: 364-368 (in Chinese).
- [7] 韩月颖, 张喜庆, 曲云鹏, 高云航. 一株低温木质素降解菌的筛选、产酶优化及酶学性质[J]. 微生物学通报, 2021, 48(10): 3700-3713. HAN YY, ZHANG XQ, QU YP, GAO YH. Screening, enzyme-production optimization and enzymatic properties of a low-temperature lignin-degrading bacteria[J]. Microbiology China, 2021, 48(10): 3700-3713 (in Chinese).
- [8] 李雅琳, 李素艳, 孙向阳, 郝丹, 蔡琳琳, 常晓彤. 1 株木质素降解菌的筛选、鉴定及液态发酵条件优化[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(6): 1297-1304. LI YL, LI SY, SUN XY, HAO D, CAI LL, CHANG XT. Screening and identification of a lignin degrading strain and its optimized liquid fermentation conditions[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(6): 1297-1304 (in Chinese).
- [9] 李娜, 王迪, 任翠梅, 芮海英, 于吉东, 杨柳. 1 株耐低温玉米秸秆纤维素降解真菌的分离与鉴定[J]. 玉米科学, 2024, 32(8): 114-119. LI N, WANG D, REN CM, RUI HY, YU JD, YANG L. Isolation and identification of a low temperature-tolerant maize stalk cellulose-degrading fungus[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(8): 114-119 (in Chinese).
- [10] 张琳, 余红凤, 毕钰, 王志刚, 徐伟慧, 刘桂林. 辣椒根际促生菌的筛选及促生效应分析[J]. 农业生物技术学报, 2024, 32(9): 2124-2136. ZHANG L, YU HF, BI Y, WANG ZG, XU WH, LIU GL. Screening of rhizosphere growth-promoting bacteria of pepper (*Capsicum annuum*) and analysis of their beneficial effects[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2024, 32(9): 2124-2136 (in Chinese).
- [11] MEI JF, SHEN XB, GANG LP, XU HJ, WU FF, SHENG LQ. A novel lignin degradation bacteria-Bacillus amyloliquefaciens SL-7 used to degrade straw lignin efficiently[J]. Bioresource Technology, 2020, 310: 123445.
- [12] 杨苹, 刘京, 周郑雄, 王坡, 谢世爽, 黄莺. 一株耐烟碱木质素降解菌的筛选及其对烟梗的降解效果[J]. 微生物学通报, 2024, 51(6): 2182-2192. YANG P, LIU J, ZHOU ZX, WANG P, XIE SS, HUANG Y. A lignin-degrading strain with nicotine tolerance: screening and the degradation effect on tobacco stems[J]. Microbiology China, 2024, 51(6): 2182-2192 (in Chinese).
- [13] 王小花, 黄莺, 陈雪, 夏梓林, 代飞, 刘昌, 张恒. 植烟土壤高活性氨化菌的筛选鉴定及其氨化能力分析[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(3): 31-38. WANG XH, HUANG Y, CHEN X, XIA ZL, DAI F, LIU C, ZHANG H. Screening, identification and ammoniation ability analysis of high activity ammonia bacteria in tobacco growing soil[J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(3): 31-38 (in Chinese).
- [14] 王仁耀. 高效水稻秸秆降解菌群的构建及降解性能研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021. WANG RY. Construction and effectiveness of a high efficient microbial system for rice straw degradation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2021 (in Chinese).
- [15] 王加友, 赵彭年, 杨德玉, 龙惊惊, 周悦, 王远. 一株纤维素分解菌的筛选、鉴定及其对玉米秸秆的降解效果[J]. 生物技术进展, 2018, 8(2): 132-139, 187. WANG JY, ZHAO PN, YANG DY, LONG JJ, ZHOU Y, WANG Y. Screening and identification of a cellulose decomposing fungus and its degradation effect on corn straw[J]. Current Biotechnology, 2018, 8(2): 132-139, 187 (in Chinese).
- [16] 许伟. 基于气质联用和红外光谱的混合培养降解木质纤维素机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013. XU W. GC-MS and FTIR spectroscopy research the mechanism of degradation of lignocellulose by mixed culture[D]. Changsha: Hunan University, 2013 (in Chinese).
- [17] 陈露露. 玉米秸秆降解菌的分离鉴定及其降解性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2019. CHEN LL. Isolation and identification of corn straw degradation bacteria and its degradation properties[D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [18] 刘瑞, 郭琪, 曹颖, 徐刚, 张丽, 孙鹏, 胡尚连, 赵博. 一株竹木质素降解菌的筛选及降解效果[J]. 微生物学通报, 2024, 51(6): 2170-2181. LIU R, GUO Q, CAO Y, XU G, ZHANG L, SUN P, HU SL, ZHAO B. A bamboo lignin-degrading strain: screening and degradation performance[J]. Microbiology China, 2024, 51(6): 2170-2181 (in Chinese).
- [19] 高磊. 基于甘油/水协同预处理的玉米秸秆解聚特征及其资源化利用[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2023. GAO L. The depolymerization feature of corn stover

- under glycerol/water pretreatment strategy and its recycled utilization[D]. Huai'an: Huaiyin Institute of Technology, 2023 (in Chinese).
- [20] 刘欣. 有机化学 I[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021. LIU X. Organic Chemistry I[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021 (in Chinese).
- [21] 赵婷婷, 李鹏, 李德萍, 贺丹, 姜虹, 代红喜, 温晓莹. 作物秸秆还田及秸秆促腐剂的应用研究概述[J]. 北方水稻, 2024, 54(5): 51-54. ZHAO TT, LI P, LI DP, HE D, JIANG H, DAI HX, WEN XY. Overview of application and research of crop straw returning to field and straw decomposition accelerator[J]. Northern Rice, 2024, 54(5): 51-54 (in Chinese).
- [22] GAO XY, LIU WZ, LI XQ, ZHANG WZ, BU SL, WANG AJ. A novel fungal agent for straw returning to enhance straw decomposition and nutrients release[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 30: 103064.
- [23] SONG KL, ZHOU CH, LI HP, ZHOU ZC, NI GR, YIN X. Effects of rumen microorganisms on straw returning to soil at different depths[J]. European Journal of Soil Biology, 2023, 114: 103454.
- [24] 李文才, 战利, 韩月颖, 张喜庆, 高云航. 一株高效木质素降解菌的筛选、鉴定及降解效果评价[J]. 东北农业科学, 2023, 48(6): 125-131. LI WC, ZHAN L, HAN YY, ZHANG XQ, GAO YH. Screening, identification and degradation effect evaluation of a high-efficiency lignin degrading bacteria[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 125-131 (in Chinese).
- [25] 房体磊. 秸秆还田配施改良剂对烟稻轮作土壤性质和作物生长的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022. FANG TL. Effects of straw returning and application of amendments on soil properties and crop growth in tobacco-rice rotation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [26] HUANG J, WANG XY, YANG LL, LI YH, XIA B, LI HL, DENG XH. Analysis of tobacco straw return to the field to improve the chemical, physical, and biological soil properties and rice yield[J]. Agronomy, 2024, 14(5): 1025.
- [27] 樊俊, 谭军, 王瑞, 赵秀云, 李伟. 秸秆还田和腐熟有机肥对植烟土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. 烟草科技, 2019, 52(2): 12-18, 61. FAN J, TAN J, WANG R, ZHAO XY, LI W. Effects of straw returning and decomposed organic manure on soil nutrient contents, enzyme activities and microbial diversity for tobacco-planting[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(2): 12-18, 61 (in Chinese).