

# 细菌GBF01分解中药渣木质素的实验初探

杨再昌<sup>1,2\*</sup>, 董红梅<sup>2</sup>, 陈俊贤<sup>2</sup>, 蔡玉香<sup>2</sup>, 潘雄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中药功效成分挖掘与利用全国重点实验室, 贵州医科大学, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>贵州大学药学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年6月23日; 录用日期: 2025年8月26日; 发布日期: 2025年9月5日

## 摘要

木质素是仅次于植物纤维素的可再生资源, 也是中药渣最常见的成分之一。通过筛选, 从土壤中获得一株对中药渣木质素具有广泛降解作用的细菌(GBF01), 鉴定为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)。发酵12天后, GBF01对15种不同中药渣木质素的降解率在30%~68%之间, 显著优于其它测试菌株。在模拟中药厂混合药渣的降解实验中, GBF01在有氧条件下展现出更强的降解效果。LC-MS分析证实, GBF01能够降解木质素并产生新的降解产物, 但其具体的降解机制有待进一步研究。本研究首次报道了贝莱斯芽孢杆菌具有降解木质素的功能, 为利用微生物高效、绿色地处理中药渣, 实现木质素资源的精细化利用提供了新的菌种资源和理论依据。

## 关键词

中药渣, 木质素, 细菌, 降解

# Preliminary Exploration of Bacterial GBF01 in Decomposing Lignin from Traditional Chinese Medicine Residue

Zaichang Yang<sup>1,2\*</sup>, Hongmei Dong<sup>2</sup>, Junxian Chen<sup>2</sup>, Yuxiang Cai<sup>2</sup>, Xiong Pan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Discovery and Utilization of Functional Chinese Medicine, Guizhou Medical University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>College of Pharmacy, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Aug. 26<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 5<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

**Lignin is the second most abundant renewable resource after plant cellulose and is also one of the**

\*通讯作者。

文章引用: 杨再昌, 董红梅, 陈俊贤, 蔡玉香, 潘雄. 细菌 GBF01 分解中药渣木质素的实验初探[J]. 生物过程, 2025, 15(3): 201-209. DOI: 10.12677/bp.2025.153027

most common components in traditional Chinese medicine residue. Through screening, a bacterium (GBF01) with broad lignin-degrading activity against traditional Chinese medicine residue was isolated from soil and identified as *Bacillus velezensis*. After 12 days of fermentation, the lignin degradation rate of GBF01 ranged from 30% to 68% for 15 different types of traditional Chinese medicine residue lignin, significantly outperforming other tested strains. In degradation experiments simulating mixed residue from traditional Chinese medicine factories, GBF01 demonstrated stronger degradation effects under aerobic conditions. LC-MS analysis confirmed that GBF01 can degrade lignin and produce new degradation products, but its specific degradation mechanism requires further investigation. This study is the first to report that *Bacillus velezensis* possesses lignin-degrading capabilities, providing new bacterial resources and a theoretical basis for the efficient and green treatment of traditional Chinese medicine residue using microorganisms, thereby enabling the refined utilization of lignin resources.

## Keywords

Traditional Chinese Medicine Residue, Lignin, Bacteria, Degradation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

中成药生产过程中将产生中药渣。目前对中药渣的处理主要包括堆肥处理、作为饲料添加剂、沼气发酵、生物质燃料、焚烧、填埋等方式。中药渣主要以植物类中药渣为主，其中木质素是中药渣最常见的成分。木质素(Lignin)是一种具有三维网状结构的高分子，包含3类苯丙烷单元，通过醚键和碳碳键相互连接，并与纤维素和半纤维素存在连接，共同构成植物骨架[1]。

在产量上木质素是仅次于植物纤维素的可再生资源，其降解产物如苯丙醇、苯丙酮、芳香酸类、酚类化合物等可替代石油基原料。不同植物木质素的含量和结构单元具有差异性，采用不同的方法降解木质素可得到不同的低分子片段或小分子化合物，因此木质素降解产物本身就是一个丰富的化合物库。木质素低分子片段可以研发得到新型生物功能材料，比如声波吸收涂层、抗氧化膜、混凝土强化剂，木质素降解得到的小分子将为有机合成提供丰富的砌块[2]。可见研发高效、低成本、绿色环保的降解方法对利用中药渣木质素资源具有重要意义[3]。

当前木质素解聚技术主要包括物理法、化学法及生物法三大类。物理法(如机械粉碎、蒸汽爆破)通过破坏木质纤维素超分子结构提升后续处理效率，但无法直接获得降解产物。化学法(如碱性氧化法、低共熔溶剂法)虽能实现木质素的高效解聚，却面临催化剂失活、有毒副产物生成及设备腐蚀等技术经济瓶颈。生物法则依赖真菌、细菌等微生物或其分泌酶系(如漆酶、过氧化物酶)催化木质素降解，具有反应条件温和、环境兼容性好的优势，但普遍存在降解周期长、底物适应性差等局限[4]-[6]。我们从土壤中分离到一株细菌，经发酵优化与共培养体系构建，成功实现对黄芪、甘草等典型中药渣木质素的有效降解，为中药渣的精细化资源利用提供了理论依据与技术支持。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 十五种中草药渣木质素的制备

枇杷叶、淡竹叶、大青叶、淫羊藿、黑骨藤、滇白珠、桂枝、桑白皮、黄柏、板蓝根、丹参、半夏、

菊花、金银花、辛夷共十五种药材均购买自贵阳市同仁堂药店,每个品种均为 100 g。上述药材,采用 80% 的乙醇热回流提取三次,再用水热回流提取 2 次,弃去提取液,得到药渣,60℃烘干备用。

称取 80 克的药渣,用粉碎机打碎后,过 100 目筛,得到细粉。取细粉 50 g,加入 3%的 NaOH 溶液 500 mL 进行预处理,于 55℃下恒温水浴锅中搅拌反应 7 h,反应液经两层纱布反复过滤即得药渣黑液,然后向其中滴加 2 mol/L 的 HCl 溶液至 pH 值为 2~3,置于 55℃恒温水浴锅中保温,直至析出大量沉淀,将反应液于 8000 r/min 的离心机中处理 15 min,弃去上清液,沉淀物烘干后研磨过筛(200 目)即得纯化的药渣木质素,置棕色瓶中保存备用[7]。

## 2.2. 分解木质素微生物的筛选

苯胺蓝-PDA (Potato Dextrose Agar, 马铃薯培养基)平板的制备:马铃薯去皮后切成颗粒(20 g),加入纯水(100 mL),煮沸后过滤,得到滤液(加水补充至 100 mL),100 mL 滤液加 2 g 葡萄糖和 2 g 琼脂,溶解后高压灭菌,冷却至 50℃后,加入无菌苯胺蓝溶液(终浓度 0.2%),倒入平板,平板置 30℃培养箱过夜,无菌生长的平板用于筛选试验。

包含微生物的样本分别采集自:腐木、林下土壤、湖底污泥、牛瘤胃内容物、羊瘤胃内容物、鸡肠道内容物、白蚁、蚯蚓、蜣螂、蚂蚱、甲虫。

上述样本置无菌碾钵中,加入无菌水碾磨,取上清液,涂布接种在苯胺蓝-PDA 平板上,置 30℃培养箱中,培养过程中,每天观察,凡是在菌落周围出现褪色圈的菌被视为木质素降解菌,并立即分离菌株进行纯培养,编号保持。

## 2.3. 木质素降解菌对 15 种中药渣木质素的降解试验

采用 pH = 5.5 的磷酸盐缓冲液(PBS)将 15 种中药渣木质素分别配制成 10 mg/mL 的母液,巴氏灭菌后备用。

真菌采用马铃薯葡萄糖培养液(100 mL 水)中加入 20 g 去皮马铃薯颗粒,煮沸后过滤,滤液加水恢复到 100 mL 后,加入 2 g 葡萄糖,高压灭菌后备用)进行木质素降解试验。细菌采用普通肉汤(100 mL 水)中加入蛋白胨 2 g、牛肉浸膏 1 g、氯化钠 0.5 g,高压灭菌后备用。

在培养液中加入木质素母液,使木质素终浓度为 1 mg/mL,总体积 50 mL,然后接种木质素降解菌 1 mL (每 mL 含新鲜培养物 20 mg),置 30℃摇床中(50 r/min)培养,分别于培养后 4、8、12 日取样,测定木质素含量。同时设培养液对照组和阴性组(含木质素的无菌培养液)。

采集样本培养液 2 mL,离心后取上清液,用纯培养液调零,在 280 nm 分别测定样本培养组和阴性组的 OD 值,木质素降解率按下列公式计算:

$$\text{降解率}(\%) = [(\text{阴性组 OD}_{280} \text{值} - \text{培养组 OD}_{280} \text{值}) \div \text{阴性组 OD}_{280} \text{值}] \times 100\%$$

## 2.4. 对 15 种混合中药渣的木质素降解试验

将前述的十五种中药渣细粉等量混合,高压灭菌后,加入适量灭菌液体培养基(100 mL 水加入葡萄糖 2 g、蛋白胨 2 g、酵母浸膏 2 g、氯化钠 0.5 g),使药渣充分吸水膨胀。

有氧发酵方案:分细菌 GBF01 单独发酵、霉菌 GFF01 单独发酵、细菌 GBF01 和霉菌 GFF01 混合发酵(两种菌接种量相同)、无菌对照四个组,在培养(30℃)过程中向培养瓶供给空气。

厌氧发酵方案:分细菌 GBF01 单独发酵、霉菌 GFF01 单独发酵、细菌 GBF01 和霉菌 GFF01 混合发酵(两种菌接种量相同)、无菌对照四个组,在培养(30℃)过程中培养瓶密闭。

上述培养试验每组平行做 5 份,在保湿条件下,连续培养 60 d,药渣经滤纸过滤,滤渣加入 70%乙醇洗涤,再用纯水洗涤,目的是除去药渣中木质素的降解产物,再次过滤除水后,药渣置烘箱(70℃)烘至

恒重，测定药渣中的木质素。

采用 Klason 法测定木质素。将 2 g 样品放入适量浓硫酸(72%)中，在室温下搅拌 1 小时。然后稀释酸解液至 3%硫酸，并在 95℃下水解 2 小时。过滤水解液，用热水洗涤残渣至中性，将残渣烘干至恒重并称量。药渣木质素含量(%) = (药渣酸解后残渣质量 ÷ 药渣酸解前质量) × 100%。

## 2.5. 细菌 GBF01 的鉴定

采用 16S rDNA 序列测序的方法对细菌 GBF01 进行种属鉴定。包括细菌基因组 DNA 提取、16S rDNA 特异引物 PCR 扩增、扩增产物纯化、DNA 测序、序列比对等步骤。引物序列为：27F: AGAGTTT-GATCMTGGCTCAG/1492R: GGTTACCTTGTTACGACTT。采用 Ezup 柱式细菌基因组 DNA 抽提试剂盒提取 DNA。DNA 电泳采用 1.5%琼脂糖，在 1X TAE 电泳缓冲液中进行。PCR 扩增条件见表 1。送样测序，利用 NCBI 数据库比对测序结果。

**Table 1.** PCR reaction conditions

**表 1.** PCR 反应条件

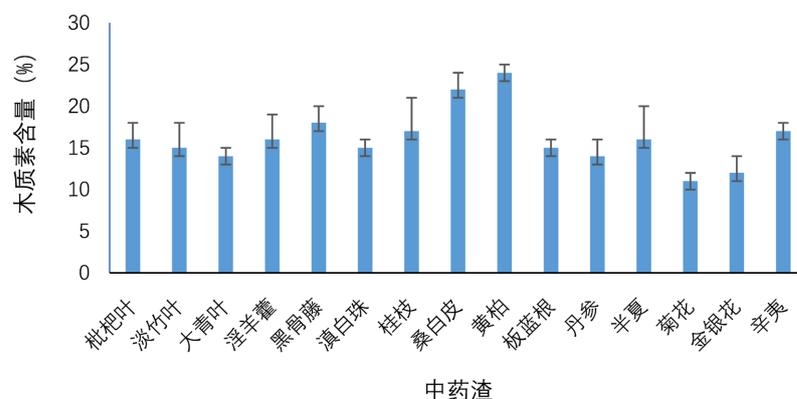
温度(°C)	时间	循环
95	5 min	30 cycle
94	30 s	
57	30 s	
72	90 s	
72	10 min	

## 2.6. 细菌 GBF01 降解木质素的产物分析

将 15 中药渣木质素等量混合，用 PBS 缓冲液(pH = 5.5)配置成 10 mg/mL 的母液，巴氏灭菌后备用。普通肉汤培养液灭菌、冷却后，接种细菌 GBF01，30℃培养过夜后，在细菌培养液中加入上述木质素母液，使终浓度为 1 mg/mL，继续培养 12 d。将培养液在 60℃中蒸干，加入适量甲醇，用玻棒不断搅拌，尽量使残留物溶解，冷却后离心，取上清液，直接进样，采用液质联用仪(BioAccord LC-MS 系统)进行分析。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 十五种中草药渣木质素的含量



**Figure 1.** Lignin content in fifteen types of Chinese medicine residues

**图 1.** 十五种中药渣的木质素含量

木质素是地球上可再生的第二丰富的碳源，可转化为多种化学品和有价值的工业产品。不同的植物其木质素的含量存在差异，比如针叶木材中木质素含量为 25%~30%，在阔叶木材中为 19%~28%，在非木质原料中为 11%~27% [8]。从图 1 看出，十五种中药渣都含木质素，含量在 11%~24%之间，其中黄柏中药渣的木质素含量最高(24%)，菊花中药渣木质素的含量最低(11%)。可见，中药在药效物质被提取后，仍然含有丰富的木质素，这些木质素如果能被充分降解，可以获得多种有机合成砌块。

### 3.2. 具有分解木质素功能的微生物

从腐木、林下土壤、湖底污泥、牛瘤胃内容物、羊瘤胃内容物、鸡肠道内容物、白蚁、蚯蚓、蛻螂、蚂蚱、甲虫等样本都能发现分解木质素的微生物，主要为真菌(霉菌居多)和细菌，根据在苯胺蓝-PDA 平板中形成褪色圈的大小，可以初步判断微生物对木质素的降解能力。表 2 列举了褪色圈直径净值(褪色圈直径减去菌落直径)大于或等于 2 mm 的微生物种类。可以看出，细菌 GBF01、02 和真菌 GFF01、02 具有较强的木质素降解功能。

**Table 2.** Microbial species exhibiting ligninolytic activity

**表 2.** 具有降解木质素功能的微生物

微生物类型	编号	褪色圈直径净值(mm)*	来源
细菌	GBF01	12 ± 2.2	林下土壤
细菌	GBF02	8 ± 1.4	湖底污泥
细菌	GBF03	2 ± 0.2	羊瘤胃内容物
真菌	GFF01	5 ± 0.4	林下土壤
真菌	GFF02	4 ± 0.2	腐木
真菌	GFF03	2 ± 0.1	白蚁

\*: 平均值 ± 标准差。

### 3.3. 细菌 GBF01、02 和真菌 GFF01、02 对 15 种中药渣木质素的降解

**Table 3.** Degradation effects of four microbial species on lignin from 15 types of Chinese Herbal Medicine residues at different time intervals

**表 3.** 四种微生物在不同时间内对 15 种中药渣木质素的降解效果

木质素	GBF01 降解率 (%)			GBF02 降解率 (%)			GFF01 降解率 (%)			GFF02 降解率 (%)		
	4 d	8 d	12 d	4 d	8 d	12 d	4 d	8 d	12 d	4 d	8 d	12 d
枇杷叶	12 ± 2*	40 ± 6	62 ± 8	10 ± 1	22 ± 3	32 ± 4	8 ± 1	12 ± 1	32 ± 4	0	0	5 ± 1
淡竹叶	10 ± 1	36 ± 2	56 ± 4	0	8 ± 1	18 ± 2	10 ± 1	16 ± 2	22 ± 2	0	5 ± 1	5 ± 1
大青叶	16 ± 1	28 ± 2	64 ± 5	0	5 ± 1	10 ± 2	6 ± 1	12 ± 2	16 ± 1	4 ± 1	8 ± 1	16 ± 1
淫羊藿	5 ± 1	24 ± 2	32 ± 4	0	0	0	14 ± 2	22 ± 2	28 ± 3	10 ± 1	16 ± 2	20 ± 3
黑骨藤	20 ± 2	32 ± 2	68 ± 4	10 ± 2	18 ± 1	24 ± 2	5 ± 1	10 ± 2	12 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
滇白珠	5 ± 1	16 ± 1	30 ± 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
桂枝	5 ± 1	12 ± 1	18 ± 1	5 ± 1	10 ± 1	10 ± 1	0	0	0	0	0	0
桑白皮	18 ± 1	36 ± 2	64 ± 4	5 ± 1	10 ± 1	20 ± 1	10 ± 2	20 ± 2	26 ± 2	5 ± 1	12 ± 1	18 ± 2

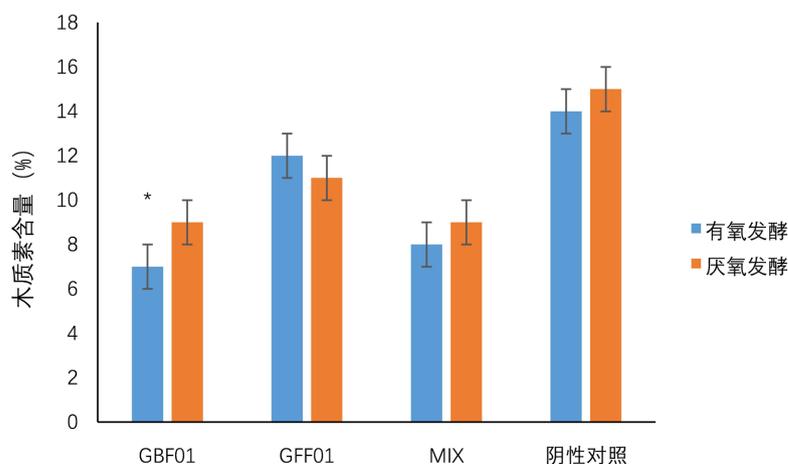
续表

黄柏	5 ± 1	10 ± 1	30 ± 2	0	0	0	0	0	0	5 ± 1	10 ± 1	10 ± 1
板蓝根	14 ± 1	28 ± 1	62 ± 5	5 ± 1	14 ± 2	22 ± 1	10 ± 1	18 ± 2	34 ± 1	0	0	0
丹参	20 ± 2	30 ± 1	48 ± 3	0	0	0	5 ± 1	10 ± 2	10 ± 1	0	0	0
半夏	16 ± 2	28 ± 2	42 ± 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
菊花	12 ± 2	26 ± 1	38 ± 2	0	0	0	5 ± 1	10 ± 1	16 ± 2	0	0	0
金银花	10 ± 1	22 ± 1	32 ± 1	5 ± 1	10 ± 1	20 ± 3	5 ± 1	16 ± 2	32 ± 4	0	0	0
辛夷	14 ± 1	28 ± 1	52 ± 4	5 ± 1	12 ± 3	22 ± 2	0	0	0	5 ± 1	12 ± 3	16 ± 1

\*: 平均值 ± 标准差。

木质素是由高度取代的苯基丙烷单元随机聚合而成的高分子, 苯丙烷是其基本的结构单元, 来源于三种芳香醇前体, 不同植物的木质素其单体构成存在差异。为了获得对不同木质素具有广泛降解功能的微生物, 测试了细菌 GBF01、02 和真菌 GFF01、02 对 15 种中药渣木质素的降解率(表 3)。GBF01 菌株展现出对 15 种中草药渣中木质素成分的显著降解效能, 经过为期 12 天的发酵过程, 其木质素降解率稳定维持在 30%~68% 的区间。相对而言, GBF02 菌株对 9 种药渣的木质素具有降解能力, 其降解效率在 10%~30% 之间(发酵周期同样为 12 天), 但对于 6 种特定药渣的木质素成分则表现出降解功能的缺失。真菌 GFF01 则能针对 10 种药渣的木质素实施降解, 其降解率波动于 10%~34% 的范围内(发酵 12 天), 且对 5 种药渣的木质素缺乏有效的降解机制。真菌 GFF02 的降解谱则覆盖了 8 种药渣的木质素, 其降解效率在 5%~20% 之间(发酵 12 天), 但对 7 种药渣的木质素表现出降解能力的不足。综上所述, 细菌 GBF01 对中草药渣木质素展现出广泛且高效的降解潜能, 而真菌 GFF01 则对约 70% 的中草药渣木质素具有显著的降解活性。基于此, 我们推测 GBF01 菌株可能编码了丰富的木质素降解酶系, 包括但不限于漆酶(laccases)、锰过氧化物酶(manganese peroxidases)和木质素过氧化物酶(lignin peroxidases), 这些酶共同作用以实现木质素的高效分解。

### 3.4. 不同发酵方式对 15 种混合药渣木质素的降解



**Figure 2.** The degradation effect of bacterial GBF01 and fungal GFF01 on lignin in traditional Chinese medicine residues under aerobic and anaerobic conditions, both individually and in co-fermentation

**图 2.** 在有氧和厌氧状态下, 细菌 GBF01 和真菌 GFF01 单独发酵和混合发酵对中药渣木质素的降解效果

中成药厂产生的药渣主要为混合药渣,在前期试验中,已经明确细菌 GBF01 具有广泛降解中药渣木质素的作用,而真菌 GFF01 对大部分中药渣木质素具有降解作用。本试验的混合中药渣直接模拟药厂中药渣,未做碱水处理,即中药渣经干燥、粉碎后,直接发酵。发酵分有氧、厌氧两种方式,并考察 GBF01 和 GFF01 单菌种发酵和混合菌种发酵的降解效果。从图 2 看出,经细菌 GBF01 有氧发酵后混合中药渣中残留的木质素为 7%,而经厌氧发酵后残留的木质素为 9%,在统计学上存在差异( $p < 0.05$ ),提示 GBF01 在有氧发酵条件下对混合中药渣木质素具有更强的降解作用。阴性对照组混合中药渣的木质素含量在有氧和厌氧发酵状态下分别为 14%和 15%,差异无统计学意义。与阴性对比如,GBF01 对混合中药渣木质素的降解率约为 50%。真菌 GFF01 在有氧和厌氧发酵时,混合中药渣残留的木质素分别为 12%和 11%,差异无统计学意义。与阴性对比如, GFF01 对混合中药渣木质素的降解率约为 15%。细菌 GBF01 和真菌 GFF01 等量混合接种,不管是有氧发酵还是厌氧发酵,均未能提高对中药渣木质素的降解作用。

### 3.5. 细菌 GBF01 的鉴定

细菌 GBF01 在有氧时生长良好,为革兰氏阳性杆菌,其 16S rDNA 经特异引物 PCR 扩增后电泳,得到一条大约 1.5 kb 的条带(图 3),扩增测序结果显示细菌 GBF01 16S rDNA 大小为 1486 bp, BLAST 比对结果提示细菌 GBF01 与贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) IM1、B268 和 SF334 等菌株亲缘关系接近。在众多木质素降解技术中,生物方法具有环境兼容性和可持续性[9]。一些细菌已经报道具有降解木质素的功能,例如根瘤菌脂杆菌(*Azospirillum lipoferum*)、地中海海洋单胞菌(*Marinomonas mediterranea*)、埃塞俄比亚热泉菌(*Aquifex aeolicus*)、苜蓿中华根瘤菌(*Sinorhizobium meliloti*)、特基拉芽孢杆菌 SN4(*Bacillus tequilensis* SN4)和粪产碱菌(*Alcaligenes faecalis*) [10]。就我们所知,目前未见贝莱斯芽孢杆菌降解木质素的研究报道。

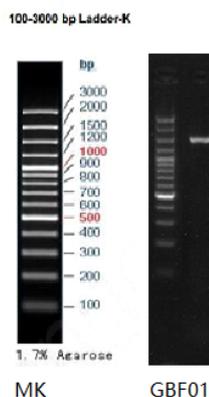
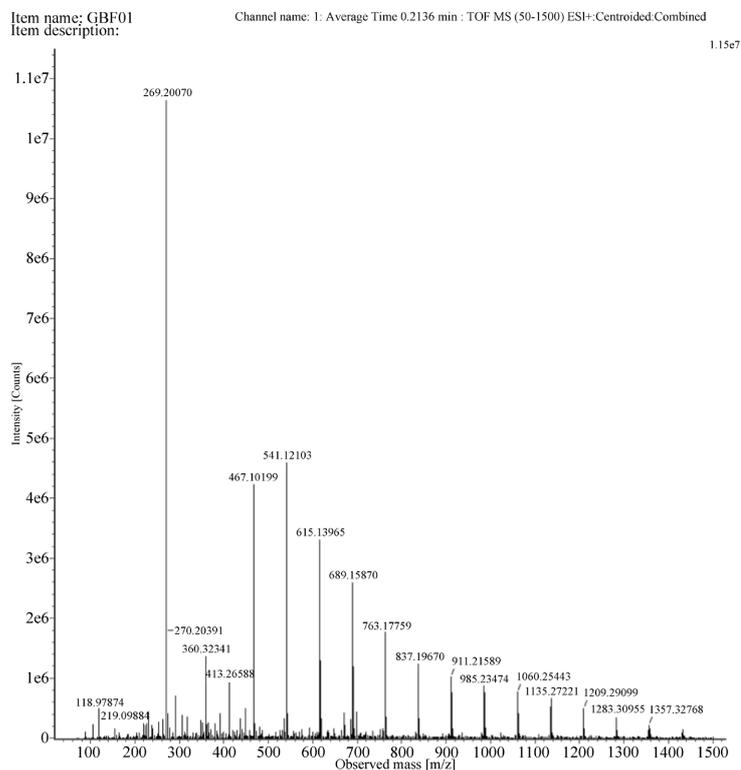


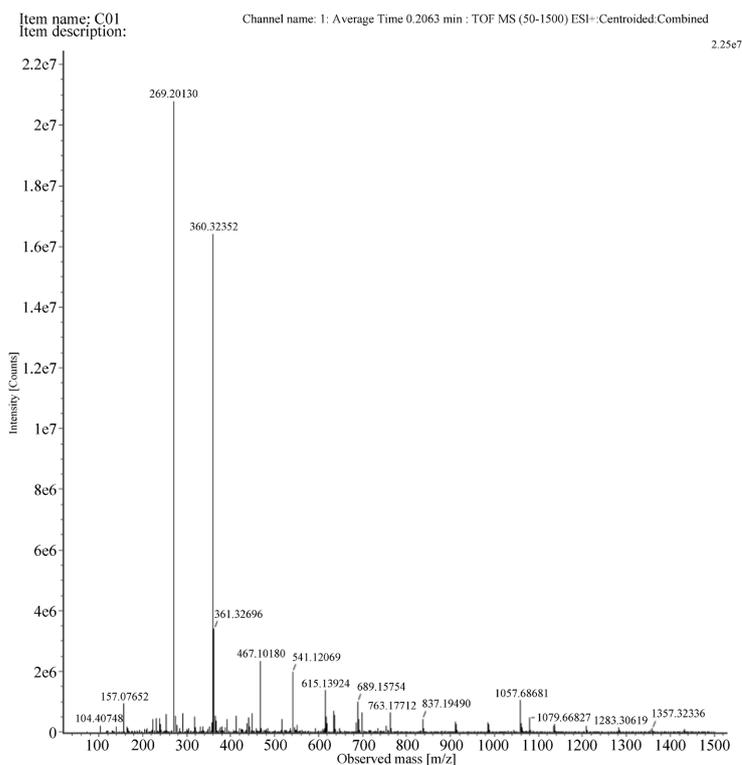
Figure 3. GBF01 strain 16S rDNA PCR amplification fragment  
图 3. GBF01 菌株 16S rDNA PCR 扩增片段

### 3.6. LC-MS 分析细菌 GBF01 降解木质素的产物

与对照相比(图 4),细菌 GBF01 对木质素具有明显的降解作用(图 5)。对照组木质素出现 14 个可积分的分子/离子峰,细菌 GBF01 对木质素进行降解后,出现 18 个分子/离子峰,并且出现了新的分子/离子峰,表明细菌 GBF01 对木质素发酵后,产生了新的降解产物。为了排除细菌 GBF01 的自身代谢产物对结果的干预,对细菌 GBF01 单纯培养物进行了 LC-MS 检测,在相同色谱条件下,未检测到积分明显的峰。在实验中,所采用的木质素是 15 种中药渣的混合木质素,因此难以判断细菌 GBF01 对木质素的降解机制。



**Figure 4.** Molecular/ionic peaks of lignin control group (without bacterial fermentation) analyzed by LC-MS  
**图 4.** 木质素对照组(未经细菌发酵) LC-MS 分析的分子/离子峰



**Figure 5.** Molecular/ionic peaks of lignin after fermentation treatment by bacterial GBF01 by LC-MS analysis  
**图 5.** 木质素经细菌 GBF01 发酵处理后 LC-MS 分析的分子/离子峰

## 4. 结论

本研究系统评估了 15 种中药渣中木质素的含量及其资源化利用潜力。结果显示, 中药渣中木质素含量较高(11%~24%), 表明中药渣是木质素资源的重要来源。通过筛选, 我们从不同环境样本中发现 3 株细菌、3 株真菌对木质素具有降解作用。分别对 15 种中药渣木质素进行降解实验, 发现细菌 GBF01 和真菌 GFF01 对中药渣木质素具有普适降解功能, 其中 GBF01 对 15 种不同中药渣木质素的广泛且高效的降解能力, 12 天发酵后降解率在 30%~68%之间, 显著优于 GFF01。在模拟中药厂混合药渣的降解实验中, 单独采用 GBF01 进行有氧发酵展现出更强的降解效果。采用 16S rDNA 测序, GBF01 被鉴定为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)。LC-MS 分析证实, GBF01 能够降解木质素并产生新的降解产物, 但其具体的降解机制有待进一步研究。

## 基金项目

本研究由中药功效成分挖掘与利用全国重点实验室资助, 合同编号: JBGS-FAMP202303。

## 参考文献

- [1] Gordobil, O., Moriana, R., Zhang, L., Labidi, J. and Sevastyanova, O. (2016) Assessment of Technical Lignins for Uses in Biofuels and Biomaterials: Structure-Related Properties, Proximate Analysis and Chemical Modification. *Industrial Crops and Products*, **83**, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.048>
- [2] Ragauskas, A.J., Beckham, G.T., Bidy, M.J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M.F., *et al.* (2014) Lignin Valorization: Improving Lignin Processing in the Biorefinery. *Science*, **344**, Article ID: 1246843. <https://doi.org/10.1126/science.1246843>
- [3] Dodds, D.R. and Gross, R.A. (2007) Chemicals from Biomass. *Science*, **318**, 1250-1251. <https://doi.org/10.1126/science.1146356>
- [4] Ponnusamy, V.K., Nguyen, D.D., Dharmaraja, J., Shobana, S., Banu, J.R., Saratale, R.G., *et al.* (2019) A Review on Lignin Structure, Pretreatments, Fermentation Reactions and Biorefinery Potential. *Bioresource Technology*, **271**, 462-472. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.070>
- [5] Rinaldi, R., Jastrzebski, R., Clough, M.T., Ralph, J., Kennema, M., Bruijninx, P.C.A., *et al.* (2016) Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis. *Angewandte Chemie International Edition*, **55**, 8164-8215. <https://doi.org/10.1002/anie.201510351>
- [6] Rodrigues Mota, T., Matias de Oliveira, D., Marchiosi, R., Ferrarese-Filho, O. and Dantas dos Santos, W. (2018) Plant Cell Wall Composition and Enzymatic Deconstruction. *AIMS Bioengineering*, **5**, 63-77. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2018.1.63>
- [7] Shakeel, U., Li, X., Wang, B., Geng, F., Rehman, M.S.U., Zhang, K., *et al.* (2022) Structural Characterizations of Lignins Extracted under Same Severity Using Different Acids. *International Journal of Biological Macromolecules*, **194**, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.171>
- [8] Tarasov, D., Leitch, M. and Fatehi, P. (2018) Lignin-Carbohydrate Complexes: Properties, Applications, Analyses, and Methods of Extraction: A Review. *Biotechnology for Biofuels*, **11**, Article No. 269. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1262-1>
- [9] Abdel-Hamid, A.M., Solbiati, J.O. and Cann, I.K.O. (2013) Insights into Lignin Degradation and Its Potential Industrial Applications. In: *Advances in Applied Microbiology*, Elsevier, 1-28. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-407679-2.00001-6>
- [10] 杨静, 蒋剑春, 张宁, 等. 微生物降解木质素的研究进展[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(3): 62-70.