

西南林业大学学报

Journal of Southwest Forestry University

中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国核心学术期刊

- ◎2018年、2016年入选中国高校优秀科技期刊
- ◎2017年《西南林业大学学报》编辑部入选中国高校科技期刊优秀团队
- ◎2009年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖
- ◎2009年获第三届云南期刊奖改革创新奖
- ◎本刊为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国核心学术期刊（RCCSE）
- ◎美国《乌利希期刊指南》（Ulrich's Periodicals Directory）收录
- ◎美国《化学文摘》（Chemical Abstracts, CA）收录
- ◎波兰《哥白尼索引》（Index Copernicus, IC）收录
- ◎英国《动物学记录》（Zoological Record, ZR）收录
- ◎英国《国际农业与生物科学研究中心》（Centre for Agriculture and Bioscience International, CABI）收录
- ◎中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）全文收录
- ◎中国期刊全文数据库（CJFD）全文收录
- ◎《中国知网》、《中国学术期刊（光盘版）》全文收录
- ◎中国核心期刊（遴选）数据库收录
- ◎中文科技期刊数据库收录
- ◎RCCSE中国权威学术期刊数据库收录



西南林业大学学报
XINAN LINYE DAXUE XUEBAO
（自然科学 1981年创刊）
2022年3月 第42卷 第2期

Journal of Southwest Forestry University
（Natural Sciences, Started in 1981）
Vol. 42 No.2 Mar. 2022

第四十二卷 第二期



主管单位 云南省教育厅
主办单位 西南林业大学
主 编 郭辉军
编辑出版 《西南林业大学学报》编辑部
地址：云南昆明白龙寺300号
邮编：650233
电话：0871-63863029
网址：http://xnldxb.swfu.edu.cn
Email: swfcbjb@vip.163.com
出版日期 2022年3月25日
印刷单位 昆明锦润印刷有限公司
发行订购 《西南林业大学学报》编辑部
发行范围 公开发行

Administrated by Yunnan Provincial Education Department
Sponsored by Southwest Forestry University
Editor-in-chief Guo Huijun
Edited & Published by Editorial Department of Journal of Southwest Forestry University 300 Bailongsi, Kunming, Yunnan 650233, P.R. China
Tel: 0871-63863029
Website: http://xnldxb.swfu.edu.cn
Email: swfcbjb@vip.163.com
Date of Publication March 25, 2022
Printed by Kunming JINRUN Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Department of Journal of Southwest Forestry University
Range of Distribution Openly Published and Distributed

刊号：ISSN 2095 - 1914
CN 53 - 1218/S

定价：20.00元 120.00元/年

二〇二二年三月

ISSN 2095-1914



自然科学
2022
第42卷 第2期 3月出版 2



《中文核心期刊要目总览》入编通知

《西南林业大学学报·自然科学》主编先生/女士：

我们谨此郑重通知：依据文献计量学的原理和方法，经研究人员对相关文献的检索、统计和分析，以及学科专家评审，贵刊《西南林业大学学报·自然科学》入编《中文核心期刊要目总览》2020年版（即第9版）林业类的核心期刊。该书由北京大学出版社出版。书中按《中国图书馆分类法》的学科体系，列出了74个学科的核心期刊表，并逐一核心期刊进行了著录。著录项目包括：刊名、并列刊名、主办单位、出版年、出版频率、中图分类号、ISSN号、CN号、邮发代号、编辑部地址、电话、网址、内容简介等。

评选核心期刊的工作是运用科学方法对各种刊物在一定时期内所刊载论文的学术水平和学术影响力进行综合评价的一种科研活动，研究工作量大。北京地区十几所高校图书馆、中国科学院文献情报中心、重庆维普资讯有限公司、中国人民大学书报资料中心、中国学术期刊（光盘版）电子杂志社、中国科学技术信息研究所、北京万方数据股份有限公司、国家图书馆和北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等相关单位的百余名专家和期刊工作者参加了研究。

项目组对核心期刊的评价理论、评价方法等问题进行了深入研究，进一步改进了核心期刊评价方法，使之更趋科学合理，力求使评价结果符合客观实际。对于核心期刊的评价仍采用定量评价和定性评审相结合的方法。定量评价指标体系采用了被引量（全文、摘要）、被摘率（全文、摘要）、被引量、他引量（期刊、博士论文）、影响因子、他引影响因子、5年影响因子、5年他引影响因子、特征因子、论文影响分值、论文被引指数、互引指数、获奖或被重要检索系统收录、基金论文比（国家级、省部级）、Web下载量、Web下载率16个评价指标，选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达48种，统计到的文献数量共计142亿余篇次，涉及期刊13764种。参加核心期刊评审的学科专家1万多位。经过定量筛选和专家定性评审，从我国正在出版的中文期刊中评选出1990种核心期刊。

需要特别指出的是，该研究成果只是一种参考工具书，主要是为图书情报界、出版界等需要对期刊进行评价的用户提供参考，例如为各图书情报部门的中文期刊采购和读者导读服务提供参考帮助等，不应作为评价标准。谨此说明。

顺颂
撰安

《中文核心期刊要目总览》2020年版编委会
2021年3月



征稿简则

1 征稿范围

本刊是由西南林业大学主办的林业综合性学术期刊，双月刊，公开发刊，面向全国组稿。主要刊登森林生物学、林木遗传育种、森林培育、森林保护、森林经理、野生动植物保护与利用、园林植物与风景园林、水土保持与荒漠化防治、木材科学与技术及林产化学等方面具有创新性的原始科研成果。

本刊对于有国家自然科学基金、国家科技支撑计划项目、“973”国家重点基础研究发展计划项目、“863”国家高技术研究发展计划项目等国家基金项目支撑的学术论文，实行优稿优酬政策，优先刊登，稿酬从优。

2 来稿要求

1) 题名。是对论文内容的高度概括，应准确、简洁地反映文章的主题，中文题名一般不超过20个汉字。

2) 署名及单位。第1作者应是稿件的执笔人和修改人。作者工作单位应写全称，工作单位地址包括所在城市名及邮编。首页脚注处附上第1作者和通信作者简介：姓名（出生年—），性别，学位，职称，研究方向，Email。

3) 基金项目。在首页脚注处注明资助该研究的基金项目名称及编号。

4) 中英文摘要及关键词。中文摘要应包括研究目的、方法、结果和结论，尽可能用规范术语，不用非共知的符号和术语，要用第三人称的写法，省略“本文”、“作者”等主语。关键词3—8个，为代表全文主题内容信息的名词术语。英文摘要、关键词要与中文相对应，写作上应符合英语语法规范。

5) 引言。介绍本研究的背景、前人的研究状况，提出尚待解决的问题；进而阐明本研究的必要性、目的及研究思路等。

6) 材料与方法。包括材料来源、性质和数量，以及材料的选取和处理等事项。方法应写得真实、具体、全面，以便他人能够重复该试验。采用前人的方法时，只须引用有关文献，仅对改进之处加以阐述即可；作者自己发明创造的新方法应详细描述。

7) 结果与分析。描述试验观察到的现象，提供所测定的具体数据，对结果进行定量或定性分析，找出规律性信息。

8) 结论与讨论。讨论的目的在于阐述结果的意义，找出与他人工作的异同，指出论文在理论与实践中的价值及存在的问题。结论是在理论分析和试验验证的基础上，通过严密的逻辑推理得出的具有创造性、指导性、经验性，并高度概括的结果描述。

9) 参考文献。参考文献采用顺序编码制，以“参考文献”作为标识列于正文后。应国国家标准GB/T 7714—2015文后参考文献著录规则，可在本刊网站上查阅。

10) 文稿须用字规范，量和单位等要符合国家标准和国际标准。文稿中外文字母、数码、符号必须分清大、小写，上、下角及正斜体。

3 投稿与稿件处理

1) 来稿请通过本刊网站进行在线投稿，网址为http://xnldxb_ns.swfu.edu.cn。

2) 稿件采用双盲审稿制，审稿费200元/篇，录用与否均由本刊编辑委员会审定。

3) 依照《著作权法》规定，编辑部可以对来稿作文字修改、删节。如作者不允许对文稿作修改，务请在来稿中注明。作者若不同意其他报刊转载或摘编其作品，请在来稿时声明。

4) 来稿刊用后付稿酬（包括著作权使用费），并赠当期杂志2册，来稿请勿一稿两投或多投。

5) 作者投稿后，本着自愿的原则和编辑部签订《版权转让确认书》，编辑部将按授权书的约定处理稿件。

联系地址：云南昆明白龙寺300号西南林业大学129信箱《西南林业大学学报》编辑部。

电话：0871-63863029 Email: swfcbjb@vip.163.com 邮编：650233

西南林业大学学报

自然科学

2

Vol. 42

2022

1981 年创刊

编辑委员会

主任委员：郭辉军

副主任委员：杜官本 彭志远 赵龙庆 何霞红
杨斌 李君

特邀委员：孙汉董 赵忠 陈晓阳 张启翔
陈晓鸣 李德铎 杨宇明 颜帅

委员：（以姓氏拼音为序，排名不分前后）

陈龙清	陈奇伯	崔亮伟	董文渊	杜凡
杜官本	段安安	郭辉军	韩明跃	何承忠
何霞红	华燕	辉朝茂	雷洪	李根前
李君	李莲芳	李乡旺	李永和	廖周瑜
刘惠民	马焕成	邱坚	沈立新	宋维峰
田昆	王昌命	王娟	王克勤	吴章康
熊智	胥辉	徐正会	许彦红	鄢波
杨斌	叶喜	岳彩荣	曾觉民	赵龙庆
赵平	郑毅	周汝良	朱德滨	朱家颖

主编：郭辉军

副主编：韩明跃（常务） 张坤

编辑：冯雪 陆驰

英文编辑：徐写秋

西南林业大学学报(自然科学)

JOURNAL OF SOUTHWEST FORESTRY UNIVERSITY (Natural Sciences)

2022 年 3 月 第 42 卷 第 2 期

Vol. 42 No. 2 Mar. 2022

目 次 CONTENTS

• 研究论文 Research Article •

- 灰楸不同杂交组合杂种后代叶片特征与光合能力的关系 郭小龙 赵秋玲 张 晶 (1)
Relationship Between Leaf Characteristics and Photosynthetic Capacity of Hybrid Progenies of Different
Hybrid Combinations of *Catalpa fargesii* Guo Xiaolong, Zhao Qiuling, Zhang Jing
- 红蓝光质对比对观光木苗木生长及内源激素的影响
..... 刘 涛 李万年 王家妍 陈 凯 莫雅芳 杨 梅 (11)
Effects of Red and Blue Light Ratio on Growth and Endogenous Hormone Synthesis of *Tsoongiodendron*
odorum Seedlings Liu Tao, Li Wannian, Wang Jiayan, Chen Kai, Mo Yafang, Yang Mei
- 有益菌根真菌及其互作对带叶兜兰试管苗生理生长的影响
..... 陈宝玲 杨开太 黄 森 龚建英 李秋荔 汪小玉 苏莉花 (19)
Effects of Mycorrhizal Fungi Interaction on the Growth and Physiology of *Paphiopedilum hirsutissimum*
Seedlings in Vitro
... Chen Baoling, Yang Kaitai, Huang Sen, Gong Jianying, Li Qiuli, Wang Xiaoyu, Su Lihua
- 氮素对践踏草坪生理生长特性的影响 王 齐 师春娟 孟建林 孙吉雄 (26)
Study on Nitrogen Effect to Growth and Physiological Characteristics of *Zoysia japonica* Under Traffic
Stress Wang Qi, Shi Chunjuan, Meng Jianlin, Sun Jixiong
- 藏东南色季拉山不同海拔川滇高山栎叶解剖结构及环境适应性
..... 郭文文 卓么草 何 竹 任毅华 屈兴乐 方江平 (33)
Anatomical Characteristics and Environmental Adaptability of *Quercus aquifolioides* Leaf in Sejila
Mountain, Southeastern Tibet
..... Guo Wenwen, Zhuo Mecao, He Zhu, Ren Yihua, Qu Xingle, Fang Jiangping
- 不同林龄麻栎人工林土壤生态化学计量特征研究
..... 方 培 胡海波 王 霞 陈建宇 阮存鑫 贾西川 (39)
Soil Ecological Stoichiometry Characteristics of Different Aged *Quercus acutissima* Plantations
..... Fang Pei, Hu Haibo, Wang Xia, Chen Jianyu, Ruan Cunxin, Jia Xichuan

昆明市主要城市公园绿地土壤入渗性能及差异性分析	王刘雅 马建刚 (48)
Analysis on Water Infiltration Characteristics and Difference of Soil in Kunming's Main City Parks Green Space	Wang Liuya, Ma Jiangang
哈尼梯田传统耕作方式下的水稻土壤微生物多样性及功能特征分析	
..... 王凯悦 张仲富 王好才 展鹏飞 宋维峰 陆梅 王行 (56)	
Analysis of Microbial Diversity and Functional Characteristics of Paddy Soil Under Traditional Tillage Methods in Hani Terraced Fields	
...Wang Kaiyue, Zhang Zhongfu, Wang Haocai, Zhan Pengfei, Song Weifeng, Lu Mei, Wang Hang	
高效降解巨龙竹白腐菌株筛选及降解机制研究	杨雄 史正军 赵长林 (67)
Screening and Preliminary Degradation Mechanism of White Rot Fungi Strain of <i>Dendrocalamus sinicus</i> ...	
..... Yang Xiong, Shi Zhengjun, Zhao Changlin	
7-羟基香豆素的抑菌活性及其稳定性研究	张国财 安吉缘 徐震霆 马伟虎 孙赫明 柴守权 (77)
Study on the Antifungal Activity and Stability of 7-hydroxycoumarin	
..... Zhang Guocai, An Jiyuan, Xu Zhenting, Ma Weihu, Sun Heming, Chai Shouquan	
福建柏不同部位精油成分及含量分析 ... 黄霞 陈乾 荣俊冬 陈凌艳 何天友 郑郁善 陈礼光 (83)	
Analysis on Ingredient and Content of Essential Oil in Different Parts of <i>Fokienia hodginsii</i>	
...Huang Xia, Chen Qian, Rong Jundong, Chen Linyan, He Tianyou, Zheng Yushan, Chen Liguang	
杉木叶挥发性成分的 GC-MS 指纹图谱构建	
..... 王琪 于晓锐 刘云 杨晓琴 李丽萍 王军民 赵平 (95)	
Establishment of GC-MS Fingerprint of Volatile Components in the Leaves of <i>Cunninghamia lanceolata</i>	
..... Wang Qi, Yu Xiaorui, Liu Yun, Yang Xiaoqin, Li Liping, Wang Junmin, Zhao Ping	
橙子皮提取物对 HCl 溶液中铝的缓蚀作用研究	张富 徐昕 雷然 李向红 (103)
Inhibition Effect of Orange Peel Extract on Aluminum in Hydrochloric Acid Solution	
..... Zhang Fu, Xu Xin, Lei Ran, Li Xianghong	
基于不同预处理的竹纤维磺化改性及其产物热塑性能研究	
..... 彭博 石纯 史正军 杨静 杨海艳 邓佳 (111)	
Sulfonation of Bamboo Fiber and Thermoplasticity of Its Modified Products Based on Different Pretreatments	Peng Bo, Shi Chun, Shi Zhengjun, Yang Jing, Yang Haiyan, Deng Jia
桉树人工林单木地上生物量空间效应分析	罗大鹏 农明川 李会朋 王俊峰 欧光龙 (120)
Spatial Effect Analysis on Individual Aboveground Biomass of <i>Eucalyptus</i> Plantation	
..... Luo Dapeng, Nong Mingchuan, Li Huipeng, Wang Junfeng, Ou Guanglong	
云南山地城镇气温空间分异的影响因素分析 ... 陈永刚 王艳霞 杨兴娇 黄彦 蔡志勇 周汝良 (130)	
Analysis of Influencing Factors on Spatial Variation of Air Temperature in Mountain Towns in Yunnan Province	
..... Chen Yonggang, Wang Yanxia, Yang Xingjiao, Huang Yan, Cai Zhiyong, Zhou Ruliang	

鸭绿江流域跨国界地区水土保持功能时空格局研究

..... 常馨悦 董禹麟 包广道 苗正红 任志彬 张 达 冯恒栋 胡楠林 (139)

Spatial Temporal Pattern of Soil and Water Conservation Function in Trans-boundary Area of Yalu River
Basin Chang Xinyue,

Dong Yulin, Bao Guangdao, Miao Zhenghong, Ren Zhibin, Zhang Da, Feng Hengdong, Hu Nanlin

• 研究简报 Research Bulletin •

番茄斑萎病毒 2 个非结构蛋白 VIGS 体系的初步构建

..... 杨婷婷 赵立华 邱润霜 陈 思 张 洁 李博文 张仲凯 马长乐 (151)

Construction of 2 Non-structural Proteins VIGS System of TSWV Yang Tingting,

Zhao Lihua, Qiu Runshuang, Chen Si, Zhang Jie, Li Bowen, Zhang Zhongkai, Ma Changle

植株样本量对云南松子代苗期遗传力估算的影响

..... 李熙颜 李江飞 车凤仙 孙继伟 陈 诗 吴俊文 蔡年辉 许玉兰 李金才 (157)

Effects of Plant Sample Size on Estimation of Heritability at Seedling Stage of *Pinus yunnanensis*

..... Li Xiyan,

Li Jiangfei, Che Fengxian, Sun Jiwei, Chen Shi, Wu Junwen, Cai Nianhui, Xu Yulan, Li Jincai

西南桦优良无性系选育研究 徐明艳 聂艳丽 邓桂香 唐红燕 (163)

Breeding on Superior Clones of *Betula alnoides* ... Xu Mingyan, Nie Yanli, Deng Guixiang, Tang Hongyan

油棕的花序和花组织形态解剖结构观察 石 鹏 王 永 张大鹏 李东霞 (168)

Anatomical Structure Observation of Inflorescence and Flower in *Elaeis guineensis*

..... Shi Peng, Wang Yong, Zhang Dapeng, Li Dongxia

外源激动素和油菜素内酯对元宝枫结实产量和品质的影响研究 张晨晨 郑豪亮 王迪海 (174)

Effects of Exogenous Kinetin and Epibrassinolide on Seed Yield and Quality of *Acer truncatum*

..... Zhang Chenchen, Zheng Haoliang, Wang Dihai

• 研究综述 Research Review •

食用菌修复重金属污染土壤研究进展 赵麒鸣 吴 鹏 刘鸿高 桂明英 (180)

Research Progress on Remediation of Soil Heavy Metal Pollution by Edible Fungi

..... Zhao Qiming, Wu Peng, Liu Honggao, Gui Mingying

DOI: 10.11929/j.swfu.202007011

引文格式: 杨雄, 史正军, 赵长林. 高效降解巨龙竹白腐菌株筛选及降解机制研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2022, 42(2): 67–76.

高效降解巨龙竹白腐菌株筛选及降解机制研究

杨 雄¹ 史正军² 赵长林¹

(1. 西南林业大学生物多样性保护学院, 云南 昆明 650233; 2. 西南林业大学化学工程学院, 云南 昆明 650233)

摘要: 为了获得高效降解巨龙竹木质素菌株, 采用固体发酵法和化学测定法筛选高效降解巨龙竹木质素的菌株, 并通过形态学与分子系统学相结合方法鉴定菌株; 采用主成分分析揭示存在的降解类型, 运用紫外扫描法揭示木质素初步降解机制。结果表明: 从 30 株白腐菌株中筛选出 1 株高效降解巨龙竹木质素的菌株 SWFU000072 *Cerrena zonata*, 该菌株对巨龙竹具有极强的选择性降解木质素作用; 30 株白腐菌共存在 3 种降解类型: 选择性降解木质素、选择性降解综纤维素、强烈选择性降解综纤维素; 3 株白腐菌降解后的乙醇提取液在 260 nm 处无明显的吸收峰, 表明木质素中芳香环结构遭到破坏。白腐菌通过破坏木质素中的芳香环结构完成高效降解巨龙竹木质素的降解机制。

关键词: 白腐菌; 分离纯化; 巨龙竹; 木质素; 选择性降解; 主成分分析

中图分类号: S718.81

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2022)02-0067-10

Screening and Preliminary Degradation Mechanism of White Rot Fungi Strain of *Dendrocalamus sinicus*

Yang Xiong¹, Shi Zhengjun², Zhao Changlin¹

(1. College of Biodiversity Conservation, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China;

2. School of Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China)

Abstract: In order to obtain high efficient degradation strains of *Dendrocalamus sinicus*, this study employed the solid fermentation method and chemical determination method to screen the strains that could degrade lignin efficiently. The strains were identified by combining morphology with molecular method. The degradation types were revealed by principal component analysis. Ultraviolet scanning was used to reveal the initial degradation mechanism of lignin. The results showed that the strain SWFU000072 of *Cerrena zonata* was selected from 30 white rot fungi to degrade lignin efficiently. The strain had strong selective degradation of lignin and caused little loss of synthetic cellulose. There were 3 degradation types in 30 strains of white rot fungi: selective degradation of lignin, selective degradation of synthetic cellulose, and intense selective degradation of synthetic cellulose. The ethanol extract of the 3 white rot fungi showed unobvious absorption peak at 260 nm, indicating that the aromatic ring structure in lignin was destroyed, thus it revealed that the white rot fungi could degrade lignin efficiently by destroying the aromatic ring structure in lignin.

Key words: white rot fungi; isolate and purification; *Dendrocalamus sinicus*; lignin; selective degradation; principal component analysis

收稿日期: 2020-07-04; 修回日期: 2020-09-02

基金项目: 西南林业大学高层次人才专项 (111715) 资助; 国家自然科学基金面上项目 (31760194) 资助; 云南省教育厅博士后培养项目 (519008) 资助。

第 1 作者: 杨雄 (1997—), 男。研究方向: 白腐真菌降解木质素。Email: fungixiongy@163.com。

通信作者: 赵长林 (1985—), 男, 博士, 教授。研究方向: 真菌分子系统。Email: Fungichanglinz@163.com。

木质素在自然界中含量非常丰富，它是一种拥有极其复杂结构的天然高分子化合物，在高等植物细胞壁中木质素广泛存在，是仅次于纤维素的一种生物多聚体化合物^[1-2]，微生物难以降解木质素的原因在于木质素中各种生物学稳定的复杂键型^[3]。如何高效率的利用这类作物资源为目前所研究的热点课题，传统工业制备纤维素材料的方法不仅浪费大量的化学资源和能源，产生的制浆废液也污染环境^[4-5]；白腐真菌是目前应用广泛的、公认安全环保且无公害的可以将木质素降解为简单无机物的一类微生物^[6]。木材腐朽真菌主要包括白色腐朽菌和褐色腐朽菌 2 种^[7-8]，其中白色腐朽真菌是木材腐朽真菌中最大的类群，包括大部分木生担子菌、少数子囊菌和半知菌^[9-13]，大多白腐菌可产生漆酶和锰过氧化物酶，极少数能产生木质素过氧化物酶^[14-16]，使木质素发生侧链氧化断裂、 β -芳醚键断裂、芳香环氧化开裂以及苯环上脱甲氧基或甲基化反应而降解^[17]；同时木材腐朽真菌也是森林生物多样性的的重要组成部分，在森林生态系统中起着关键的降解还原作用，能维持森林生态系统的物质循环和能量流动^[18-20]。

巨龙竹（*Dendrocalamus sinicus*）属禾本科竹亚科牡竹属竹种，热带巨大型丛生竹，为我国特有物种，发现于云南省西南部临沧、西双版纳地区，其生长速度快、经济用途广、生态效益显著，作为一种特色明显的资源植物具有很大的开

发潜力和广泛的应用前景^[21-26]；因该物种发现时间较晚，分布地区科研资金投入不足、科研水平相对落后，对巨龙竹深入开发应用欠缺，尤其在巨龙竹木质素降解研究方面还远远不够^[27-28]，如巨龙竹在制浆造纸、人造板材和生物精炼工业领域有极高的开发潜力，但由于木质素的存在导致纤维素在分离过程中呈现耗能高、污染大、耗时多、产量低、其不仅浪费资源同时污染环境^[4-5, 29]。因此，针对目前存在木质素限制竹资源高效深度开发利用，传统物理化学预处理方法既不经济又不环保的问题，本研究提出利用生物方法降解竹材中的木质素观点，并利用固体发酵法和化学测定法筛选高效降解巨龙竹木质素的菌株；采用形态学与分子系统学相结合方法将该菌株鉴定；通过主成分分析揭示存在的降解类型；运用紫外扫描法揭示木质素初步降解机制。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

野外调查并采集白色腐朽真菌，并记录采集编号、采集地点、寄主信息，将新鲜标本带回实验室进行分离纯化，将分离纯化出的白色腐朽真菌菌株保存于 4 ℃ 冰箱备用。本研究共分离纯化出可用于巨龙竹竹材降解的菌株 30 号（表 1），现保藏于西南林业大学真菌标本馆（SWFC）。巨龙竹材料采自于云南省临沧市的沧源地区。

表 1 供试白腐菌株
Table 1 The information for the test strain of white rot fungi

菌种编号	拉丁学名	采集地点	寄主
SWFU 000013	<i>Trametes versicolor</i>	云南省文山州小桥沟自然保护区	阔叶树倒木
SWFU 000028	<i>Ganoderma gibbosum</i>	云南省文山州小桥沟自然保护区	阔叶树树桩
SWFU 000042	<i>Armillaria cepistipes</i>	云南省文山州小桥沟自然保护区	阔叶树倒木
SWFU 000072	<i>Cerrena zonata</i>	云南省文山州小桥沟自然保护区	阔叶树倒木
SWFU 000073	<i>Irpex lacteus</i>	云南省文山州八宝镇	阔叶树倒木
SWFU 000074	<i>Phlebia acerina</i>	云南省文山州小桥沟自然保护区	阔叶树倒木
SWFU 000075	<i>Aleurodiscus</i> sp.	云南省文山州富宁县平耶水库	阔叶树落枝
SWFU 000076	<i>Phanerochaete</i> sp.	云南省文山州八宝镇	阔叶树落枝
SWFU 000077	<i>Auricularia auricula</i>	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树倒木
SWFU 000078	<i>Flammulina velutipes</i>	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树倒木
SWFU 000079	<i>Hypsizygus marmoreus</i>	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树倒木
SWFU 000080	<i>Ramalina</i> sp.	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树倒木
SWFU 000081	<i>Hericium erinaceus</i>	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树倒木

续表 1

菌种编号	拉丁学名	采集地点	寄主
SWFU 000082	<i>Lentinula edodes</i>	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树倒木
SWFU 000083	<i>Pleurotus ostreatus</i>	云南省昆明市野鸭湖森林公园	阔叶树树桩
SWFU 000084	<i>Trametes hirsuta</i>	云南省昆明市西南林业大学校园	阔叶树树桩
SWFU 000085	<i>Laetiporus sulphureus</i>	云南省昆明市西南林业大学校园	阔叶树树桩
SWFU 000086	<i>Ganoderma applanatum</i>	云南省昆明市黑龙潭公园	阔叶树树桩
SWFU 000087	<i>Phlebia rufa</i>	云南省昆明市黑龙潭公园	阔叶树倒木
SWFU 000089	<i>Ganoderma australe</i>	云南省昆明市西南林业大学校园	阔叶树树桩
SWFU 000090	<i>Inonotus radiatus</i>	云南省昆明市西南林业大学校园	阔叶树倒木
SWFU 000091	<i>Phlebia</i> sp.	云南省昆明市西南林业大学校园	阔叶树树桩
SWFU 000092	<i>Phlebia</i> sp.	云南省昆明市金殿公园	阔叶树树桩
SWFU 000093	<i>Phlebia</i> sp.	云南省昆明市金殿公园	阔叶树树桩
SWFU 000094	<i>Phlebia</i> sp.	云南省昆明市金殿公园	阔叶树树桩
SWFU 000095	<i>Phlebia</i> sp.	云南省昆明市金殿公园	阔叶树树桩
SWFU 000096	<i>Ganoderma</i> sp.	云南省昆明市金殿公园	阔叶树树桩
SWFU 000097	<i>Vanderbylia</i> sp.	云南省昆明市西南林业大学校园	阔叶树树桩
SWFU 000098	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	云南省昆明市昙华寺公园	阔叶树倒木
SWFU 000115	<i>Ganoderma lingzhi</i>	云南省文山州小桥沟自然保护区	阔叶树树桩

1.2 竹材降解试验

1.2.1 竹材的固体发酵

1) 将新鲜的巨龙竹切成约 3 cm×1 cm×0.3 cm 的竹片，放入烘箱 105 ℃ 烘干至恒质量。

2) 将上述烘干后的竹片取出 5 g (精确到 0.000 1 g) 分别放入培养皿中写上标签，依次加入适量的水，充分淹没浸泡 12 h。

3) 到达规定时间后，沥干表面水分，121 ℃ 灭菌 30 min 备用。

4) 取供试菌株菌柄饼 (约 1 cm²) 接种在装有 2% 麦芽浸粉培养基的 250 mL 三角瓶中，28 ℃ 湿度 75% 静置培养。

5) 待菌丝长满培养基表面，放入上述灭菌的 5 g 竹片，用接种针将其均匀分布于培养基表面，放入恒温恒湿箱培养箱，温度 28 ℃、湿度 75% 静置培养 30 d；每个菌种 2 个重复，未接种的 2 组竹片作为空白对照组。

6) 30 d 后取出样品，洗去木片表面的菌丝 (洗的过程应防止竹材的细小部分掉落，影响失重率的测定)，105 ℃ 风干至恒质量^[30]。

1.2.2 竹材化学组分的测定

用定性滤纸将上述风干后的样品包好并用棉线捆牢，参照国标 GB/T 2677.6—1994^[31] 加入苯醇混合液进行抽提，每小时约 4 次循环，抽提时

间为 6 h，然后将抽提好的样本放入烘箱 105 ℃ 烘至恒质量，参照国标 GB/T 2677.10—1995^[32] 测定综纤维素含量，参照国标 GB/T 2677.8—1994 测定 Klason 木素含量^[30]。

1.2.3 失重率、木质纤维素降解率及选择系数的计算

$$\text{失重率} = \frac{(\text{原样品质量} - \text{降解后样品质量})}{\text{原样品质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Klason 木素降解率} = \frac{\text{Klason 木素的降解总量}}{\text{原料中的 Klason 木素总量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{综纤维素降解率} = \frac{\text{综纤维素降解总量}}{\text{原料中的综纤维素总量}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{脱木质素选择系数 (SI)} = \frac{\text{Klason 木素降解率}}{\text{综纤维素降解率}} \quad (4)$$

1.3 分析方法

1.3.1 主成分分析方法

利用 SPSS 数据分析软件，将竹材失重率及各化学变量提取 2 个主成分并计算其主成分得分系数。根据得分系数计算出每株菌的主成分得分，并做出主成分分析散点图^[30]。

1.3.2 紫外扫描分析方法

1) 取 1 g 过 40 目标标准筛的竹粉与适量的质量体积分数 2% 的麦芽浸粉培养基装入到三角瓶

中 (250 mL) 灭菌备用;

2) 向上述灭菌后的三角瓶中接入供试菌株的菌饼 (约 1 cm^2), 放入培养箱恒温恒湿静置培养 20 d。未接种的作为对照组, 处理同上;

3) 培养 20 d 后, 向每个三角瓶中加入 50 mL 95% 乙醇, 瓶口覆盖上锡箔纸, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发酵 1 h;

4) 发酵结束后放入冰箱中冷却至室温;

5) 取 2 mL 菌液放于离心管中, $10\,000\text{ r/min}$ 离心 2 min;

6) 取上清液以 1:10 的比例与 95% 乙醇混合稀释;

7) 室温下测 220~400 nm 的光谱值^[30]。

1.4 菌株鉴定方法

1.4.1 DNA 提取、PCR 扩增及系统发育分析

OMEGA HP Fungal DNA Kit 试剂盒用于 SWFU 000072 菌株 DNA 基因组提取^[33]。本研究选用 ITS 基因片段完成系统发育分析, 引物 ITS5/ITS4^[34], 订购在生工生物工程 (上海) 股份有限公司。ITS 片段 PCR 程序参考木腐菌系统发育研究^[33], 产物纯化和测序均送至北京擎科生物科技有限公司昆明分公司。

DNA 序列用 MAFFT version 7 (<http://mafft.cbr.jp/alignment/server>) 进行比对, 手工校正和去掉两端参差排列后保存为 NBRF/PIR 格式文件, 再用 ClustalX 1.83^[35] 将 NBRF/PIR 格式文件转化为 NEXUS 格式文件以及 PHYLIP 格式文件; 经过编辑后用于系统发育树的构建。系统发育树构建采用 PAUP* 4.0b10^[36] 中的最大简约法 (maximum parsimony analysis); 设置如下: 1) 非模糊排列的缺失位点处理为新特征 (new state); 2) 模糊排列位点不予采用; 3) 进行 1000 次自持分析^[37]; 4) 所有特征等权; 5) 采用启发式搜索方式 (heuristic search); (6) Max-trees 设为 5000, 其他参数采用默认值^[37]。

1.4.2 形态学研究方法

宏观研究方法: 肉眼直接观察及在体视显微镜下观察林木腐朽真菌标本以下主要特征并拍照记录:

1) 一般特征: 一年生/多年生, 有柄/菌盖/平伏反转/平伏, 大小, 形状, 厚度, 质地;

2) 菌盖表面: 颜色, 光滑/粗糙, 绒毛/粗毛, 环沟/环带, 边缘薄/厚, 锐/钝, 孔口形状及大小。

显微研究方法: 所有显微研究均在 Nikon Eclipse E 100 显微镜和 Leica DM2500 (375582) 生

物正置荧光显微镜下进行。利用 Melzer 试剂 (简称为 IKI)、棉蓝试剂 (简称为 CB) 和 5% 氢氧化钾试剂 (简称为 KOH) 作为浮载剂。真菌定名人名称的缩写基于国际缩写标准 Authors of Plant Names^[38]; 有关子实体的颜色术语则依据文献^[39]。

2 结果与分析

2.1 竹材降解试验结果

采用 30 株白腐菌对巨龙竹竹片开展降解试验, 经过 30 d 培养后, 竹片失重率、综纤维素降解率、酸不溶木质素降解率发生变化 (表 2), 其中失重率表示白腐菌对巨龙竹的分解力, 其失重率越高表明其对巨龙竹的分解能力越强; 由表 2 可知, 巨龙竹竹片的失重率从 0.45% 至 18.36% 不等, 竹材失重率差距较大, 其中 SWFU 000096 的失重率最高为 18.36%, 表明其对巨龙竹的降解能力最强, 两菌株 SWFU 000089, SWFU 000013 次之, 失重率依次为 15.53%, 15.45%。当 Klason 木素降解率与综纤维降解率的比值 (脱木质素选择系数 SI) 大于 1 时, 则可以判断木腐菌产生了选择性脱木质化作用^[30]。根据表 2 中的选择系数 SI 表明, 30 个菌株中有 10 株白腐菌对巨龙竹进行了选择性脱木质化作用, 其菌株编号分别为 SWFU 000072、SWFU 000094、SWFU 000013、SWFU 000084、SWFU 000028、SWFU 000086、SWFU 000074、SWFU 000073、SWFU 000097、SWFU 000080, 其 SI 依次为 3.10、2.71、2.04、1.80、1.70、1.66、1.25、1.22、1.09、1.05; 尽管 SWFU 000096 对巨龙竹的分解能力最强, 但其没有发生脱木质化作用, 它不加选择地降解了木质素和综纤维素, 其综纤维降解率高达 19.16%; 本研究的目的在于筛选高效选择性降解巨龙竹木质素的白腐真菌, 所以该菌株不满足条件。失重率相对于 SWFU 000096 稍低的 3 个菌株 SWFU 000072、SWFU 000094、SWFU 000013, SI 依次为 3.10、2.71、2.04, 表明这 3 个菌株对巨龙竹的选择性脱木质化作用更显著。其中菌株 SWFU 000072 对酸不溶木素的降解率高达 19.65%, 对综纤维素的降解率仅有 6.39%, 且对巨龙竹综纤维损失极少, 综合供试菌株降解巨龙竹的数据分析, 通过 SPSS 软件分析了失重率和选择性系数两者的相关性, 其相关性系数为 0.45012, 其表明 30 株白腐菌降解巨龙竹的能力与其选择性系数之间没有明显的相关关系。

表 2 30 株白腐菌降解巨龙竹 30 d 后各组分情况

Table 2 Degradation of different component of *D. sinicus* treated by 30 white rot fungi for 30 days

编号	失重率/%	酸不溶木素含量/%	综纤维含量/%	酸不溶木素降解率/%	综纤维降解率/%	选择性系数（SI）
SWFU 000072	9.94	19.65	68.34	19.79	6.39	3.10
SWFU 000094	9.69	19.93	67.97	18.66	6.89	2.71
SWFU 000013	15.45	19.08	65.08	22.13	10.85	2.04
SWFU 000084	9.46	21.69	68.63	11.45	6.38	1.80
SWFU 000028	8.57	21.56	67.85	11.99	7.06	1.70
SWFU 000086	13.97	20.73	66.22	15.40	9.30	1.66
SWFU 000074	8.55	22.27	67.67	9.10	7.31	1.25
SWFU 000073	10.56	21.94	66.75	10.47	8.56	1.22
SWFU 000097	6.73	22.70	68.06	7.36	6.77	1.09
SWFU 000080	3.96	23.58	70.40	3.75	3.57	1.05
SWFU 000090	3.45	23.37	69.50	4.61	4.80	0.96
SWFU 000093	3.50	23.56	70.03	3.83	4.07	0.94
SWFU 000096	18.36	20.17	59.01	17.69	19.16	0.92
SWFU 000075	9.35	22.82	67.44	6.85	7.62	0.90
SWFU 000089	15.53	21.83	63.72	10.88	12.71	0.86
SWFU 000083	5.55	23.25	68.63	5.11	5.99	0.85
SWFU 000087	5.90	22.76	66.82	7.09	8.47	0.84
SWFU 000078	3.74	23.61	69.79	3.63	4.41	0.82
SWFU 000091	3.55	23.23	68.30	5.18	6.44	0.80
SWFU 000042	1.51	23.68	69.93	3.36	4.21	0.80
SWFU 000077	7.04	23.03	67.20	6.00	7.95	0.75
SWFU 000076	10.64	22.22	63.59	9.30	12.89	0.72
SWFU 000115	2.37	24.23	71.86	1.11	1.57	0.71
SWFU 000079	3.55	23.80	69.97	2.84	4.15	0.69
SWFU 000081	3.60	23.84	69.18	2.71	5.23	0.52
SWFU 000095	3.29	24.33	71.84	0.70	1.59	0.44
SWFU 000085	5.63	23.95	69.10	2.23	5.35	0.42
SWFU 000082	0.45	24.32	71.61	0.73	1.91	0.38
SWFU 000098	9.96	23.45	64.57	4.30	11.55	0.37
SWFU 000092	3.64	24.06	69.25	1.79	5.14	0.35
空白对照	—	24.50	73.00	—	—	—

2.2 主成分分析结果

为进一步解析 30 株白腐真菌对巨龙的降解类型，利用竹材失重率及各化学变量提取 2 个主成分（PC），第 1 主成分和第 2 主成分分别解释了 85.43% 和 12.54% 的变量，其表明 2 个主成分能解释 3 个指标总计 97.97% 的数据量。组分降解率的 3 个指标的数据做主成分分析（PCA），其结果显示上述 3 个指标。

主成分分析（PCA）结果为：Klason 木质素降解率主成分得分系数 PC1=0.345、PC2=1.221，综纤维降解率主成分得分系数 PC1=0.354、PC2=

1.074，失重率主成分得分系数 PC1=0.382、PC2=0.107 根据上述得分系数利用数据处理软件计算出每株菌的主成分得分，再以表 2 中 30 株白腐菌的编号后 2 位为序号，得出主成分分析散点图（图 1），其表明当 PC1 的得分越高，失重率、综纤维素降解率、木质素降解率就越大；当 PC2 的得分越高，菌株降解巨龙竹时选择系数就越高，结果表明 PC2 所反映的是菌株对木质素的选择性降解。本研究主成分分析数据变化规律与微生物在其他植物降解应用研究结果分析趋势相似^[30, 40]。

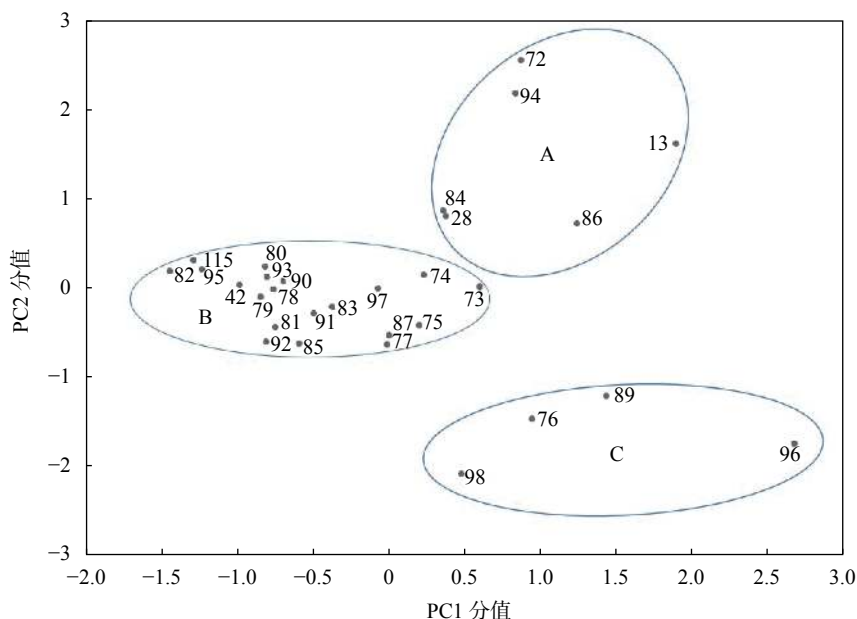


图 1 3 种指标的主成分散点图

Fig. 1 Main dispersion point diagram of 3 indexes

根据主成分分值高低划分类型 (图 1), 30 株白腐菌可分为 3 种主要的降解类型: 类型 A 包含选择性降解木质素的菌株, 菌株的选择系数也越大, PC2 分值也相应增高。类型 B 和 C 都代表选择性降解综纤维素的菌株, 但 B 类型中的菌株对木质纤维素的降解能力极其微弱, C 类型中的菌株对巨龙竹综纤维素和木质素的降解能力都较强, 尤其对综纤维素的降解能力非常强烈, 其降解的强烈程度反映在 PC1 的分值上, PC1 分值越大的菌株则综纤维素降解率越高。图 1 显示 SWFU 000072 的 PC1 得分较低, PC2 得分最高,

其揭示该菌株择性降解木质素能力在 30 株白腐菌中最强。

2.3 紫外扫描分析结果

将选择性系数大于 1 的 3 个菌株 SWFU 000072、SWFU 000013、SWFU 000086 接种于过 40 目筛的巨龙竹粉, 发酵 20 d 后用 95% 乙醇对的竹粉进行提取, 对其提取液进行紫外光谱扫描, 其紫外扫描光谱图 (图 2) 表明空白对照组的在 260 nm 有明显的吸收峰, 该吸收峰代表木质素中芳香环的吸收^[41]; 而其他组别在 260 nm 处无明显的吸收峰。

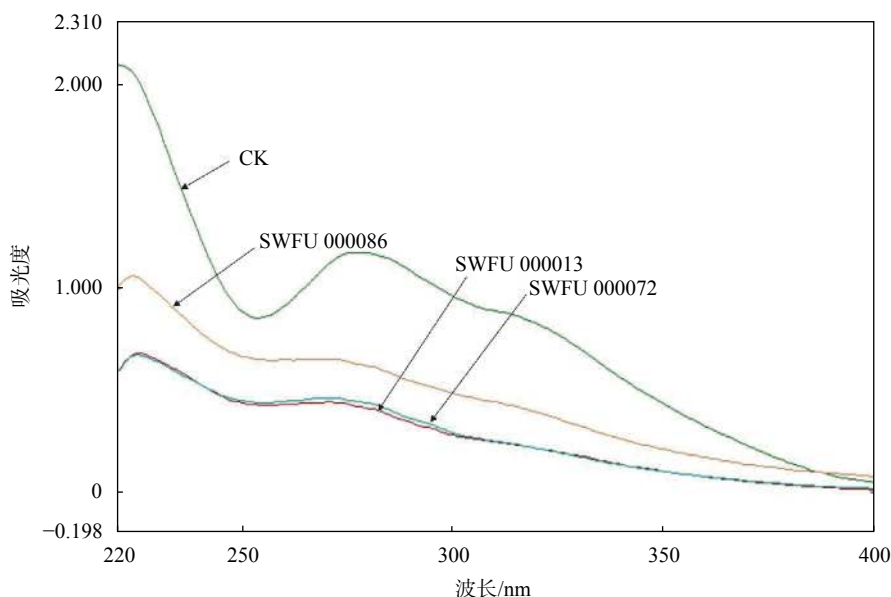


图 2 乙醇提取液的紫外光谱图

Fig. 2 UV spectrum of ethanol extract

2.4 菌株鉴定结果

形态学鉴定结果：如图 3a 所示：担子果 1 年生，菌盖表面具粗毛和轮纹，菌肉异质；如图 3b 所示：子实层体初期为孔状，后期撕裂为齿

状；如图 4 所示：菌丝系统三体系，生殖菌丝具索状联合，菌丝在 Melzer 试剂中无反应，在棉蓝试剂中无反应，在 KOH 试剂中无变化。



图 3 白腐真菌 SWFU 000072 担子果形态特征
Fig. 3 Basidiomata of specimen SWFU 000072

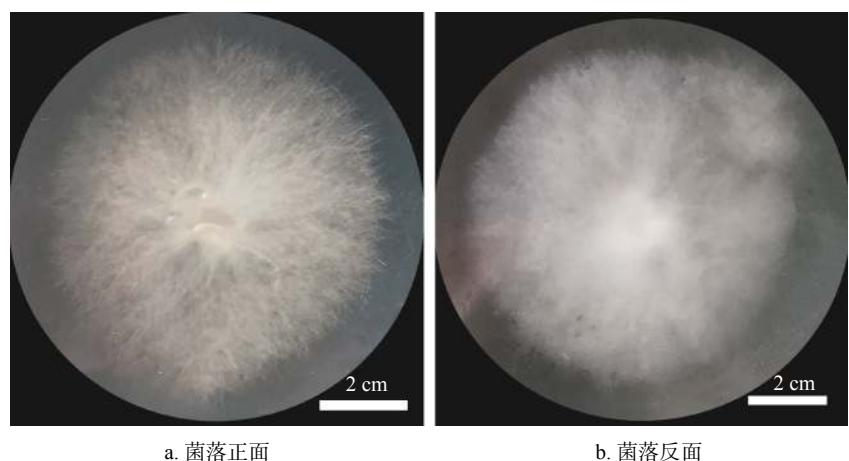


图 4 白腐菌株 SWFU 000072 菌落形态
Fig. 4 Colony characters of white rot fungi strain SWFU 000072

基于宏观生境特征（图 3）、培养菌落性状及显微菌丝数据（图 4），鉴定其为 *Cerrena* 属水平。

分子系统学鉴定结果：如图 5 所示，基于 ITS 序列构建的系统发育树表明，菌株 SWFU

000072（GenBank no. MK809429）在系统发育树中与分子序列 Dai 7872、Dai 7359、JXSB1742 聚为一个支系，且具有高支持率（100% MP）。因此，该菌株鉴定为 *Cerrena zonata*。

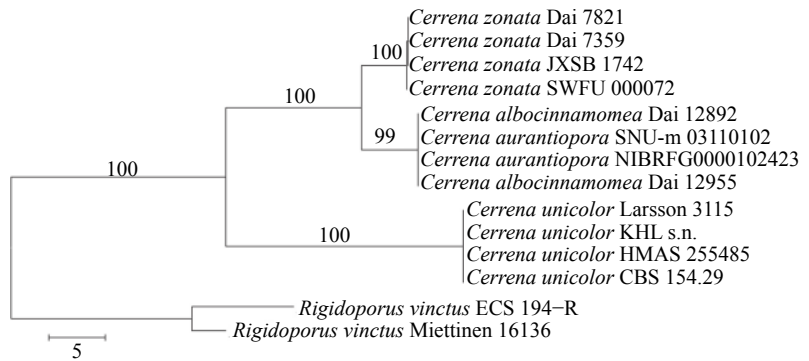


图 5 白腐菌株 SWFU 000072 系统发育树
Fig. 5 The phylogenetic tree of white rot fungi strain SWFU 000072

3 结论与讨论

本研究从30株白腐真菌中筛选出1株高效降解巨龙竹木质素的菌株SWFU 000072, 经过形态学与分子系统学鉴定为 *Cerrena zonata*。基于主成分分析(PCA), 揭示30株白腐菌存在3种降解类型: 选择性降解木质素、选择性降解综纤维素、强烈地选择性降解综纤维素。通过对巨龙竹粉乙醇提取液进行紫外扫描分析表明木质素中的芳香环结构遭到了破坏, 进而揭示了白腐菌通过破坏木质素中的芳香环结构完成高效降解巨龙竹木质素的降解机制。降解木材及农林废弃物木质素的真菌在国内外相继报道, 如 *Ceriporiopsis subvermispora*, *Ganoderma australe*, *Lentinus edodes*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Phlebia radiata*, *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum*, *Trametes versicolor*, 其降解类型属白色腐朽^[30, 42-49]。本研究筛选菌株物种为 *Cerrena zonata*, 该种隶属于 *Cerrenaceae* 科, *Polyporales* 目, 与国内已报道多种林木腐朽真菌均为 *Polyporales* 目, 表明该目物种在降解木材及农林废弃物木质素方面具有独特性, 且该种为新整合种类^[50], 为未来的深入研究提供了特殊材料。利用白腐真菌降解木质素研究结果揭示白腐菌在木材预处理阶段具有节约资源、减少污染物的排放、提高产能的优势^[51-53]。王伟^[54]从23株白腐真菌中筛选出3个高效降解黑杨木质素的物种, *Funalia trogii*, *Trametes orientalis*, *Truncospora ochroleuca*, 并提出了3株白腐真菌降解黑杨的初步降解机制。本研究采用巨龙竹为研究对象, 研究表明竹材失重率比木材失重率较低, 分析其主要原因为竹材与木材木质素不同, 竹材属于典型的禾草类木质素^[28]。尽管真菌降解木质素已研究多年, 但研究成果从实验室走到大田、生产车间还处在瓶颈期, 从成果产出到实际转化、产生效益还有待继续开展深入研究和探索, 尽管困难重重, 始终坚信通过创新的、严谨的、科学的试验研究必定能开发出适合工业生产的高活性白腐菌株和培养体系, 解决木质纤维素材料高效利用的瓶颈问题^[27, 29]。我国竹林面积居世界第一^[55], 竹资源及其丰富, 其孕育了竹资源加工利用及产业化高效快速发展的格局, 但选择性去除竹材中的木质素极大地限制了竹资源深度利用, 已成为竹生物制浆、竹纤维素制备、竹材综合开发与利用的卡脖子问题, 因此如何高

效且有选择性的去除竹材中木质素是一项集基础科学研究与产业应用转化于一体亟待解决的问题^[28, 56]。本研究尽管已筛选出高效降解巨龙竹白腐菌株, 但是将其从实验室研究转移至产业应用转化还需要筛选出适应性较强的菌株。

随着化石资源枯竭, 生物质资源利用研究日益突显。对于巨龙竹这种在制浆造纸、人造板材和生物炼制等工业领域表现出极高的研究开发价值的可再生资源开发利用刻不容缓^[57], 竹木质素的去除还是一个未攻克的难题, 由于工业制备纤维素材料时主要靠传统的高温高压、强碱等方法去除木质素, 这样不仅浪费大量的资源和能源也污染环境。本研究筛选出了能够选择性高效降解巨龙竹木质素白腐菌株并对其进行了鉴定, 同时对其初步降解机制进行了揭示, 为后续的研究提供一定的理论支持。在后续的研究中可选定木腐菌固体发酵培养基成分及培养条件; 运用2个或以上菌株同时或先后培养来进行预处理, 补足木腐菌在不同降解阶段的不同酶系, 优化共生条件使其脱木质程度更高^[54]。

[参 考 文 献]

- [1] Huber G W, Iborra S, Corma A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering [J]. Chemical Reviews, 2006, 106(9): 4044-4098.
- [2] Shankar Tumuluru J, Sokhansanj S, Hess J R, et al, et al. Review: a review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications [J]. Industrial Biotechnology, 2011, 7(5): 384-401.
- [3] Chaudhry A S. Chemical and biological procedures to upgrade cereal straws for ruminants [J]. Nutrition abstracts and reviews, 2008, 68(5): 319-331.
- [4] 吴敏雅. 木质素降解方法的研究进展 [C]//2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集: 第4卷. 北京: 中国环境科学学会, 2019: 509-513.
- [5] 邓诗贵, 杨晨军, 冯加洲, 等. 一株木质素降解白腐菌的筛选、鉴定及其产漆酶培养基的优化 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(16): 178-184.
- [6] Zeng G M, Huang D L, Huang G H, et al. Composting of lead-contaminated solid waste with inocula of white-rot fungus [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(2): 320-326.
- [7] Wei Y L, Dai Y C, Wang L, et al. A preliminary study

- on ecology of wood brown-rot fungi of *Postia* [J]. Forest Research, 2008, 21: 55–59.
- [8] Dai Y C. Polypore diversity in China with an annotated checklist of Chinese polypores [J]. Mycoscience, 2012, 53(1): 49–80.
- [9] Zhao C L, Cui B K. A new species of *Perenniporia* (Polyporales, Basidiomycota) described from Southern China based on morphological and molecular characters [J]. Mycological Progress, 2012, 11(2): 555–560.
- [10] Dai Y C, Cui B K, Si J, et al. Dynamics of the worldwide number of fungi with emphasis on fungal diversity in China [J]. Mycological Progress, 2015, 14(8): 62.
- [11] 李玉, 李泰辉, 杨祝良, 等. 中国大型菌物资源图鉴 [M]. 郑州: 中原农民出版社, 2015.
- [12] Chen J Z, Zhao C L. Morphological and molecular identification of four new resupinate species of *Lyomyces* (Hymenochaetales) from Southern China [J]. MycoKeys, 2020, 65: 101–118.
- [13] He X, Shi Z J, Zhao C L. Morphological and molecular identification of two new species of *Tubulicrinis* (Hymenochaetales, Hymenochaetales) from Southern China [J]. Mycoscience, 2020, 61(4): 184–189.
- [14] 周金燕, 桑原正章. 真菌产生的锰过氧化物酶和漆酶研究 II. 一株产锰过氧化物酶的担子菌: 血红密孔菌 K-2352 [J]. 微生物学通报, 1994, 21(3): 152–156.
- [15] 池玉杰, 伊洪伟. 木材白腐菌分解木质素的酶系统-锰过氧化物酶、漆酶和木质素过氧化物酶催化分解木质素的机制 [J]. 菌物学报, 2007, 26(1): 153–160.
- [16] Huang S H, Huang D Y, Wu Q T, et al. Effect of environmental C/N ratio on activities of lignin-degrading enzymes produced by *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 285–292.
- [17] Andlar M, Rezić T, Mardetko N, et al. Lignocellulose degradation: an overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation [J]. Engineering in Life Sciences, 2018, 18(11): 768–778.
- [18] 崔宝凯, 余长军. 大兴安岭林区多孔菌的区系组成与种群结构 [J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3700–3709.
- [19] 戴玉成. 中国储木及建筑木材腐朽菌图志 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] 魏玉莲, 戴玉成. 木材腐朽菌在森林生态系统中的功能 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1935–1938.
- [21] 普晓兰, 杜凡. 巨龙竹竹材结构及其变异的解剖学研究 [J]. 西南林学院学报, 2003, 23(1): 1–5.
- [22] 普晓兰, 丁雨龙, 杜凡. 巨龙竹营养器官解剖学研究 [J]. 西南林学院学报, 2004, 24(1): 6–11, 19.
- [23] 成聘睿, 史正军, 刘瑞华, 等. 厚壁型巨龙竹秆材的材性特征分析 [J]. 生物质化学工程, 2015, 49(4): 45–48.
- [24] 成聘睿, 史正军, 杨海艳, 等. 巨龙竹木质素化学结构研究 [J]. 世界竹藤通讯, 2015, 13(2): 1–6.
- [25] 刘世罗, 辉朝茂, 王兵益, 等. 厚壁型和薄壁型巨龙竹的分子标记研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学版), 2017, 37(1): 15–19, 35.
- [26] 石纯, 杨静, 杨海艳, 等. 巨龙竹全组分乙酰化膜的制备与性能表征 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2019, 41(1): 123–129.
- [27] 孟右成, 薛永常. 微生物降解木质素及其工业应用 [J]. 生命的化学, 2020, 40(6): 896–902.
- [28] 史正军. 甜龙竹及巨龙竹半纤维素、木质素结构诠释及相互间化学键合机制解析 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [29] 吕世翔, 王秋玉. 白腐菌在木质纤维素降解中的应用进展 [J]. 森林工程, 2009(4): 28–33.
- [30] 王伟, 崔宝凯, 戴玉成. 白腐菌的筛选及其短期降解黑杨的初步机制 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 91–96.
- [31] 国家技术监督局. GB/T 2677.6—1994 造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [32] 国家技术监督局. GB/T 2677.10—1995 造纸原料综纤维素含量的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [33] Zhao C L, Wu Z Q. *Ceriporiopsis kunmingensis* sp. nov. (Polyporales, Basidiomycota) evidenced by morphological characters and phylogenetic analysis [J]. Mycological Progress, 2017, 16(1): 93–100.
- [34] White T J, Bruns T, Lee S, et al. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics [M]//PCR Protocols. Amsterdam: Elsevier, 1990: 315–322.
- [35] Thompson J. The CLUSTAL_X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools [J]. Nucleic Acids Research, 1997, 25(24): 4876–4882.
- [36] Swofford D L. PAUP*: Phylogenetic analysis using parsimony (*and other methods). Version 4.0b10 [M]. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, 2002.
- [37] Felsenstein J. Confidence limits on phylogenies: an approach using the bootstrap [J]. Evolution, 1985, 39(4): 783.
- [38] Brummitt P K, Powell C E. Authors of plant names: a list of authors of scientific names of plants, with recommended standard forms of their names, including abbreviations [M]. St. Louis, Missouri: Edinburgh Uni-

- versity Press, 1992.
- [39] Petersen J H. Farvekort. the danish mycological society's colour-chart[M]. Greve, Denmark: Foreningentil Svampekundskabens Fremme, 1996.
- [40] Ferraz A, Rodriguez J, Freer J, et al. Biodegradation of *Pinus radiata* softwood by white- and brown-rot fungi [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2001, 17: 31–34.
- [41] 蒋挺大. 木质素 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [42] Blanchette R A. Screening wood decayed by white rot fungi for preferential lignin degradation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1984, 48(3): 647–653.
- [43] Hakala T K, Maijala P, Konn J, et al. Evaluation of novel wood-rotting polypores and corticioid fungi for the decay and biopulping of Norway spruce (*Picea abies*) wood [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2004, 34(3/4): 255–263.
- [44] Wolfaardt F, Taljaard J L, Jacobs A, et al. Assessment of wood-inhabiting Basidiomycetes for biokraft pulping of softwood chips [J]. Bioresource Technology, 2004, 95(1): 25–30.
- [45] 叶汉玲, 尤纪雪, 房桂干. 选择性降解木质素白腐菌筛选的研究 [J]. 纤维素科学与技术, 2004, 12(1): 19–26.
- [46] Wu J, Xiao Y, Yu H. Degradation of lignin in pulp mill wastewaters by white-rot fungi on biofilm [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(12): 1357–1363.
- [47] Fackler K, Grading C, Hinterstoisser B, et al. Lignin degradation by white rot fungi on spruce wood shavings during short-time solid-state fermentations monitored by near infrared spectroscopy [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 39(7): 1476–1483.
- [48] 刘正贵, 王海毅, 房桂干, 等. 氮源用量对杨木白腐菌降解效率的影响 [J]. 陕西科技大学学报, 2007(2): 5–8.
- [49] van Erven G, Wang J L, Sun P C, et al. Structural motifs of wheat straw lignin differ in susceptibility to degradation by the white-rot fungus *Ceriporiopsis subvermispora* [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(24): 20032–20042.
- [50] Yuan H S. Molecular phylogenetic evaluation of *An-trodiella* and morphologically allied genera in China [J]. Mycological Progress, 2014, 13(2): 353–364.
- [51] Pérez V, de Troya M T, Martínez A T, et al. *In vitro* decay of *Aextoxicon punctatum* and *Fagus sylvatica* woods by white and brown-rot fungi [J]. Wood Science and Technology, 1993, 27(4): 295–307.
- [52] Elissetche J P, Ferraz A, Parra C, et al. Biodegradation of Chilean native wood species, *Drimys winteri* and *Nothofagus dombeyi*, by *Ganoderma australe* [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2001, 17(6): 577–581.
- [53] Machado E, Matumoto P P T, Ítavo L C V, et al. Reduction in lignin content and increase in the antioxidant capacity of corn and sugarcane silages treated with an enzymatic complex produced by white rot fungus [J]. PloS one, 2020, 15: e0229141.
- [54] 王伟. 白腐菌预处理与酶解转化杨木研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [55] 张之亮, 张元明, 章悦庭, 等. 几种新型植物纤维的开发利用现状 [J]. 新纺织, 2004(5): 16–18.
- [56] Tarchoun A F, Trache D, Klapötke T M. Microcrystalline cellulose from *Posidonia oceanica* brown algae: Extraction and characterization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138: 837–845.
- [57] Xu G F, Shi Z J, Zhao Y H, et al. Structural characterization of lignin and its carbohydrate complexes isolated from bamboo (*Dendrocalamus sinicus*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 376–384.

(责任编辑 张 坤)

