网络出版时间:2026-05-11 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.007

松材线虫病疫木栽培茯苓的生物学效率及菌核品质评价

谭云[1,2,3],喻锦秀[1,3],谭著明[1,2,3],沈宝明[1,2,3],李赛男[1],周长富[4],钟武洪[1,3],申爱荣[1,2,3],刘丽娜[1,2,3]

(1 湖南省林业科学院,湖南 长沙 410004;2 湖南省林下特色生物资源培育与利用工程技术研究中心,湖南 长沙 410004;3 长沙市林业有害生物防控技术创新中心,湖南 长沙 410004;4 浏阳市林业局,湖南 长沙 410300)

[摘 要] 【目的】研究利用感染松材线虫病的马尾松木段栽培茯苓的生物学效率和茯苓菌核品质,为松材线虫病疫木的高值化利用提供参考。【方法】以松材线虫病疫木栽培茯苓为试验组(FY),以健康马尾松栽培茯苓为对照组(FM),测定茯苓菌核产量和生物学效率,同时在接种茯苓菌种前和采收茯苓菌核后,分别检测疫木中木质纤维(半纤维素、纤维素和木质素)含量,调查疫木中松材线虫和松褐天牛的生存情况。测定2组茯苓菌核(FY和FM)的质量指标(含水率、总灰分含量、醇溶性浸出物含量、β-(1→3)-葡聚糖含量)和生物活性成分含量(总三萜、总多糖、总黄酮、总多酚),用HPLC法检测采收茯苓菌核中11种三萜类物质的组成,采用相关性分析、聚类分析和主成分分析综合评价2组茯苓菌核的品质差异。【结果】感染松材线虫病马尾松木段栽培茯苓的菌核产量为4.07 kg/窖,生物学效率达24.89%,疫木中纤维素和半纤维素是茯苓生长的营养来源。2组茯苓菌核的含水率、总灰分含量、醇溶性浸出物含量和β-(1→3)-葡聚糖含量之间均无显著差异,且均符合《中国药典》的规定标准。对松材线虫和松墨天牛生存状况的调查发现,疫木中松材线虫的减退率为100%,疫木中仍存活的天牛幼虫虫体短小干瘪,因丧失营养来源而无法正常发育为成虫。生物活性成分的测定表明,FY组的总三萜、总多糖、总多酚和总黄酮含量高于FM组,但均无显著差异。11个茯苓三萜化合物的总含量和主要成分(茯苓酸和3-表去氢土莫酸)含量在茯苓FY组和FM组之间无显著差异。11个三萜化合物中,FY组茯苓中的3-表去氢茯苓酸含量显著高于FM组,而6α-羟基猪苓酸C、茯苓新酸B、茯苓酸C的含量显著低于FM组,其余7个化合物含量在2组茯苓之间均无显著差异。相关性分析表明,醇溶性浸出物含量与总多糖含量呈显著正相关($P<0.05$);总灰分含量与总三萜含量呈显著正相关($P<0.05$);总黄酮含量与总多酚含量呈极显著正相关($P<0.01$)。聚类分析和主成分分析表明,FY组茯苓和FM组不能完全分开,说明2组茯苓菌核的品质无显著差异。【结论】用松材线虫病疫木栽培茯苓时的产量和生物学效率均较高,茯苓菌核品质符合《中国药典》标准,可以实现疫木的安全高值化利用。

[关键词] 茯苓;松材线虫;马尾松疫木;生物学效率;菌核品质评价

[中图分类号] S567.3+2;S763.18 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)11-0060-13

Biological efficiency and quality evaluation of *Wolfiporia hoelen* sclerotia cultivated on *Bursaphelenchus xylophilus*-infected wood

TAN Yun[1,2,3], YU Jinxiu[1,3], TAN Zhuming[1,2,3], SHEN Baoming[1,2,3], LI Sainan[1], ZHOU Changfu[4], ZHONG Wuhong[1,3], SHEN Airong[1,2,3], Liu Lina[1,2,3]

(1 *Hunan Academy of Forestry, Changsha, Hunan* 410004, *China*; 2 *Hunan Engineering Research Center for Cultivation and*

[收稿日期] 2025-09-26 [修回日期] 2025-11-03

[基金项目] "十四五"国家重点研发计划项目(2023YFD2200903);湖南省林业科技创新项目(XLSF2023002,XLSF2026010)

[作者简介] 谭云(1989—),男,湖南宁乡人,助理研究员,主要从事微生物资源学研究。E-mail:tany_hncu@163.com

[通信作者] 喻锦秀(1979—),女,湖南临湘人,副研究员,主要从事植物病理学研究。E-mail:yujinxiu2000@hnlky.cn

谭著明(1966—),男,湖南沅江人,研究员,主要从事菌物学研究。E-mail:tanzm@hnlky.cn

Utilization of Distinctive Bio-resources Under Forest, *Changsha*, *Hunan* 410004, *China*; 3 *Changsha Forestry Pest Prevention and Control Technology Innovation Center*, *Changsha*, *Hunan* 410004, *China*; 4 *Liuyang Forestry Bureau*, *Liuyang*, *Hunan* 410300, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the biological efficiency and quality of *Wolfiporia hoelen* sclerotia cultivated on *Pinus massoniana* wood infected with *Bursaphelenchus xylophilus* (BX), to provide a reference for the high-value utilization of BX-infected wood. 【Method】 In the experimental group (FY), *W. hoelen* strain was inoculated to BX-infected *P. massoniana* wood. In the control group (FM), *W. hoelen strain* was inoculated to healthy *P. massoniana* wood. The yield and biological efficiency of *W. hoelen* sclerotia were measured. Before inoculation and after sclerotia harvesting sclerotia, the contents of hemicellulose, cellulose, and lignin in BX-infected *P. massoniana* wood were detected, and survival status of *B. xylophilus* and *M. alternatus* were also investigated. The quality indicators including moisture content, total ash content, alcohol-soluble extractives content, β-(1→3)-glucan content and the contents of bioactive components including total triterpenoids, total polysaccharides, total flavonoids, total polyphenols of *W. hoelen* sclerotia in two groups (FY and FM) were determined. HPLC were employed to analyze the composition of 11 triterpenoid components in *W. hoelen* sclerotia. Correlation analysis, cluster analysis, and principal component analysis were performed to comprehensively evaluate the quality differences of *W. hoelen* sclerotia between the two groups. 【Result】 The yield of *W. hoelen* sclerotia cultivated with BX-infected *P. massoniana* wood was 4.07 kg/plot, with a biological efficiency of 24.89%. Cellulose and hemicellulose in BX-infected wood served as nutritional sources for the growth of *W. hoelen*. There was no significant difference in moisture content, total ash content, alcohol-soluble extractives content and β-(1→3)-glucan content between the two groups of *W. hoelen* sclorotia, all of which met the standards specified in the Chinese Pharmacopoeia. Investigation on *B. xylophilus* and *M. alternatus* revealed that the decline rate of *B. xylophilus* in infected wood was 100%, surviving *M. alternatus* larvaes in infected wood were short and shriveled, failing to develop into adults due to nutrient depletion. The results of bioactive component content showed that the contents of total triterpenoid, total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid in the FY group were higher than those in the FM group, with no significant difference. No significant difference were observed in the total content of 11 triterpenoid compounds and the contents of major components including pachymic acid and 3-epidehydrotumulosic acid between the two groups. Among the 11 triterpenoid compounds, the content of 3-epidehydropachymic acid in the FY group was significantly higher than that in the FM group, whereas the contents of 6α-hydroxyprolic acid C, poricoic acid B, and poricoic acid C were notably lower. No significant difference was observed in the contents of the other seven compounds between the two groups. Correlation analysis showed that alcohol-soluble extractives content showed a significantly positive correlation with the total polysaccharide content ($P<0.05$). Total ash content was significantly positively associated with total triterpenoid content ($P<0.05$). Total flavonoid content was significantly positively correlated with total polyphenol content ($P<0.01$). Cluster analysis and principal component analysis indicated that the FY group and FM group of *W. hoelen* can not be clearly distinguished, suggesting no significant difference in sclerotium quality between the two groups. 【Conclusion】 Cultivating *W. hoelen* on BX-infected wood resulted in high scrotia yield and biological efficiency, with the sclerotial quality meeting the standards of the Chinese Pharmacopoeia. The approach enables the safe and high-value utilization of BX-infected wood.

Key words: *Wolfiporia hoelen*; *Bursaphelenchus xylophilus*; BX-infected *Pinus massoniana* wood; biological efficiency; sclerotial quality evaluation

松材线虫病是由松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 引起的一种毁灭性病害，具有传播范围广、致病力强、染病寄主死亡速度快等特点[1]。该病起源于北美洲，亚洲地区1905年首次发现于日本，后于1982年在我国江苏省南京市中山陵发现松材线虫病[2]。根据国家林业和

草原局公告(2025年第4号),至2025年3月我国松材线虫病疫区包括18个省(区、市)620个县级行政区,其中江西省、广东省、湖北省、湖南省和浙江省是松材线虫病发生较严重的地区。目前,松材线虫病的寄主植物也从最开始的黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)、马尾松(*P. massoniana* Lamb.)逐步扩大到湿地松(*P. elliottii* Engelm.)、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)[3]、樟子松(*P. sylvestris var. mongolica*)[4]和红松(*P. koraiensis* Siebold & Zucc.)[5]。松墨天牛(*Monochamus alternatus*)是我国松材线虫病的主要传播媒介昆虫[6],于海英等[7]首次确认云杉花墨天牛(*M. saltuarius* Gebler)也是松材线虫的有效传播媒介。可见,松材线虫病经过多年的演变,不论是寄主植物还是传播媒介,范围都在扩大,进而加大了该病害的防控难度。

根据《松材线虫病疫区和疫木管理办法》(林生规〔2023〕7号)的要求,松材线虫病疫区松科植物只能进行除治性采伐,且采伐的疫木必须在山场就地烧毁或转运至指定加工点进行粉碎(旋切),经过无害化处理后才可以进行再利用。现行的疫木处理方式存在三大弊端:一是造成松木资源极大浪费,增加碳排放量,也增加了森林火灾隐患[8-9];二是未经原位除害处理疫木,转运过程中容易流失,这是造成疫情远距离人为传播扩散的重要途径[10-11];三是疫木的粉碎和旋切处理易受到疫木除治时间和市场收购能力的制约[12]。采用致松材线虫死亡的木腐真菌进行松材线虫病疫木无害化处理是疫木安全利用的一种新思路。有研究表明,丝状真菌的次级代谢产物能够杀死松材线虫,如秦飞飞等[13]对近20年丝状真菌产生的具杀松材线虫活性产物的结构、活性进行了总结,发现共有57个活性产物有杀松材线虫的作用,且结构多种多样,活性差别较大,为真菌毒杀松材线虫提供了理论依据。前人关于用茯苓来处理松材线虫病疫木的安全性已进行了较多研究。如胡赛蓉等[14]指出,疫木接种茯苓后63 d,疫木中的松材线虫可全部死亡,77 d后松墨天牛可全部死亡;吴云忠[15]发现,接种茯苓60 d后,疫木中的松材线虫和松墨天牛全部死亡;蒙海勤等[16]将茯苓液体培养菌丝和固体培养菌丝分别接种到疫木上,150 d后疫木内的松材线虫数量分别减少了74.51%和65.78%;谭著明等[9]发现,将茯苓菌种接种到松材线虫病疫木后能有效降解疫木、杀死松材线虫并产出安全的茯苓菌核。但上述研究主要针对松材线虫病疫木利用过程的安全性展开,并未对疫木和健康松木栽培茯苓的品质进行对比,缺乏对疫木栽培茯苓菌核药效成分的系统分析。

茯苓为多孔菌科真菌茯苓(*Wolfiporia hoelen* (Fr.) Y. C. Dai & V. Papp)的干燥菌核[17],是我国传统中药,收载于《中国药典》2025版,其含水率、总灰分含量、醇溶性浸出物含量和茯苓β-(1→3)-葡聚糖含量是中药茯苓的基础质量指标。茯苓在2002年入选国家药食同源目录,是重要的食品原料,据国家市场监督管理总局的特殊食品查询平台检索数据显示,截至2025年9月,以茯苓及其提取物为主要原料的保健食品共计有159种。茯苓富含多糖[18]、黄酮、多酚等多种生物活性成分[19],具有抗氧化、抗菌、增强免疫力等功效,其生物活性成分含量是衡量其作为功能性食品的重要指标。茯苓三萜是茯苓发挥抗肿瘤、抗炎作用的关键药效成分,其含量高低是评价中药茯苓质量优劣的主要参考标准[20]。本研究以松材线虫病疫木木段栽培茯苓为试验组,以健康马尾松木段栽培茯苓为对照组,在接种茯苓菌种前和采收茯苓菌核后,检测疫木中木质纤维的分解情况,同时调查疫木中松材线虫和松墨天牛的存活情况,综合对比2组茯苓菌核产量及品质(质量指标、生物活性成分和药效成分)的差异,以期为松材线虫病疫木的合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验材料 茯苓菌种购自湖南靖州苗族侗族自治县茯苓专业合作社,菌株编号为"湘靖28"(湖南省非主要农作物品种,登记编号为XPD007-2010)。选用浏阳市松材线虫病疫区内当年枯死的马尾松疫木,树龄18~20年,截成45.0~50.0 cm的木段,选择直径17.0~21.0 cm有松褐天牛危害痕迹的木段为供试疫木木段。健康松木选自长沙县,木段处理方法同疫木木段。

1.1.2 仪器与试剂 恒温振荡水浴箱(THZ-82),酶标仪(MD SpectraMax190),超声波清洗机(YX-100S),台式大容量低速离心机(MD-550A),石墨消解仪(SH220N),电热鼓风恒温干燥箱(DGT-G250S),高温电炉(YTH-4-10),高效液相色谱仪(Agilent 1200),色谱柱 Agilent 5 TC-C_{18}(2)(4.6 mm×250 mm,5 μm)。

标准品芦丁、没食子酸、齐墩果酸、葡萄糖,质

量分数均≥98.5%，购自北京普天同创生物科技有限公司；标准品 6α-羟基猪苓酸 C、茯苓新酸 A、茯苓新酸 B、土莫酸、3-表去氢茯苓酸、茯苓酸 C、3-表去氢土莫酸、去氢茯苓酸、茯苓酸、松苓新酸，质量分数均≥98.0%，购自成都克洛玛生物科技有限公司；去氢土莫酸，质量分数≥98.0%，购自成都埃法生物科技有限公司。

1.2　试验地概况

试验地位于湖南省长沙市浏阳市普迹镇五丰村（27°55′59" N，113°25′24" E），系丘陵地带，海拔 99 m；属亚热带季风性湿润气候，多年平均气温 17.5 ℃；无霜期年平均 271 d；年平均日照时长 1 656 h；年平均降水量 1 552 mm。试验地位于东北坡，土壤为板岩发育的黄壤，土壤平均厚度 60 cm。

1.3　试验方法

1.3.1　试验设计　按坡地等高线开挖栽培窖，窖大小规格（长×宽×深）为 0.8 m×0.6 m×0.6 m，将各木段分别称质量并记录后，每窖按“井”字形排列方式埋入 4 根木段。以放入松材线虫病疫木木段为试验组（FY 组），放入健康马尾松木段为对照组（FM 组），每组各 10 窖。FY 组栽培窖编号分别为 Y1～Y10，FM 组栽培窖编号分别为 M1～M10。每窖木材用量为 18.0～22.0 kg，接种方法参考《茯苓栽培及产地初加工技术规程》HNNY 395－2023[21]，每窖茯苓菌种用量为 2.0 kg，菌种和栽培料质量比约为 10.0%，施入天然白蚁驱避剂后，覆土至与地面齐平。2023 年 11 月下旬接种茯苓菌种，2024 年 10 月下旬采收茯苓菌核。

1.3.2　茯苓产量与生物学效率测定　（1）结苓率。收获期对每个栽培窖单独采收，分别调查 2 组栽培窖中茯苓菌核的发育情况。结苓率为正常结苓的栽培窖数与总栽培窖数的比值[22]。（2）产量。每个栽培窖单独采收，清洗菌核表面泥土，室温晾干表面水分后称质量，测定各窖茯苓菌核产量。（3）生物学效率。接种茯苓菌种前，分别对 2 组栽培窖中的松木进行取样，编号后于（30±2）℃的鼓风干燥箱中风干至恒质量。生物学效率为茯苓菌核鲜质量与松木干质量的比值[23]。（4）木材失重率。在接种茯苓菌种前和采收茯苓菌核后，分别对 2 组栽培窖中的松木进行取样，10 个重复，编号后于（100±5）℃的烘箱中烘干至恒质量。失重率为松木接种茯苓菌种后损失的干质量与接种茯苓菌种前干质量的比值[24]。

1.3.3　疫木中木质纤维降解测定　将接种茯苓菌种前的疫木和采收茯苓菌核后的疫木分别取样，10 个重复，编号后放入（100±5）℃的烘箱中烘干至恒质量。采用范式洗涤法[25]测定疫木中半纤维素、纤维素、木质素的相对含量，结果用%表示，并计算其干质量。

1.3.4　疫木中松材线虫和松墨天牛调查　（1）松材线虫。将接种茯苓菌种前的疫木和采收茯苓菌核后的疫木，分别取样（约 200 g）带回实验室，采用贝尔曼漏斗法进行松材线虫分离和检测，采用稀释法计算松材线虫含量[26]。（2）松墨天牛。统计接种茯苓菌种前每窖疫木的总侵入孔数和采收茯苓菌核后疫木的总羽化孔数，并将采收茯苓菌核后的疫木用斧头劈开，调查松墨天牛的生存情况。

1.3.5　茯苓菌核品质指标测定　在试验组和对照组中，随机选取来自不同栽培窖的 6 个茯苓菌核，鲜质量为 500.0～700.0 g，分别编号为 FY1～FY6 和 FM1～FM6，用于 2 组茯苓菌核的品质指标测定：（1）含水率。参照《中国药典》2025 版四部通则水分测定法测定[27]。（2）总灰分。参照《中国药典》2025 版四部通则总灰分测定法测定[27]。（3）醇溶性浸出物。参照《中国药典》2025 年版四部通则浸出物测定法，以体积分数 50% 乙醇为溶剂，采用热浸法测定[27]。（4）茯苓 β-(1→3)-葡聚糖含量。参照《中国药典》2025 年版四部通则高效液相色谱法[27]测定，以无水葡萄糖为标准品。以上结果均用质量分数（%）表示。

1.3.6　茯苓菌核生物活性成分含量测定　（1）总三萜。采用香草醛-冰乙酸法测定茯苓菌核总三萜含量[19]，以齐墩果酸为标准品，体积分数 5% 香草醛-冰乙酸溶液和高氯酸为显色剂，测定 560 nm 处吸光度值。（2）总多糖。采用苯酚-硫酸比色法测定茯苓菌核总多糖含量[19]，以葡萄糖为标准品，测定 490 nm 处吸光度值。（3）总黄酮。采用三氯化铝比色法测定茯苓菌核总黄酮含量[19]，以芦丁为标准品，在 510 nm 处测定吸光度值。（4）总多酚。采用福林酚比色法测定茯苓菌核总多酚含量[28]，以没食子酸为标准品，测定 765 nm 处吸光度值。

1.3.7　茯苓三萜含量测定　（1）供试品溶液制备。准确称取过孔径 250 μm（60 目）筛后的茯苓菌核粉末 1.00 g，置于干燥具塞锥形瓶中，加入无水甲醇 20.0 mL，称质量。超声提取 30 min，放冷后用无水甲醇补足质量。过滤后取续滤液，经 0.22 μm 微孔

滤膜过滤,即得供试品溶液。(2)对照品制备。精密称取各茯苓三萜酸标准品适量,加甲醇溶解制成6α-羟基猪苓酸C、茯苓新酸B、去氢土莫酸、土莫酸、茯苓新酸A、3-表去氢茯苓酸、茯苓酸C、3-表去氢土莫酸、去氢茯苓酸、茯苓酸、松苓新酸混合对照品溶液,其质量浓度分别为0.036 0,0.052 0,0.031 6,0.114 0,0.024 7,0.058 0,0.018 0,0.130 0,0.045 0,0.190 0和0.146 2 mg/mL。置于4 ℃冰箱保存,备用。(3)色谱条件及方法。具体见参考文献[29]。

1.4 数据处理

利用Origin 2018软件处理和分析数据,结果均用"平均值±标准差"表示,采用IBM SPSS Statistics 22.0软件进行单因素方差分析,用Duncan's法进行多重比较和显著性差异分析,用Graphpad Prism 8.01软件绘图。

2 结果与分析

2.1 茯苓菌核产量与生物学效率

由表1可知,将茯苓菌种分别接种到松材线虫病疫木和健康马尾松木,其结苓率均达到100%,FY组茯苓菌核的平均产量为4.07 kg/窖,低于FM组的4.91 kg/窖,但二者之间无显著差异,表明疫木能够提供充分的营养成分供茯苓菌种发育并结苓。从茯苓菌丝对基质的利用效率来看,2组的生物学效率和木材失重率之间无显著差异,表明用疫木代替健康木栽培茯苓是可行的。

表1 茯苓菌核的产量与生物学效率比较(n=10)

Table 1 Comparison of yield and biological efficiency of *Wolfiporia hoelen* sclerotia (n=10)

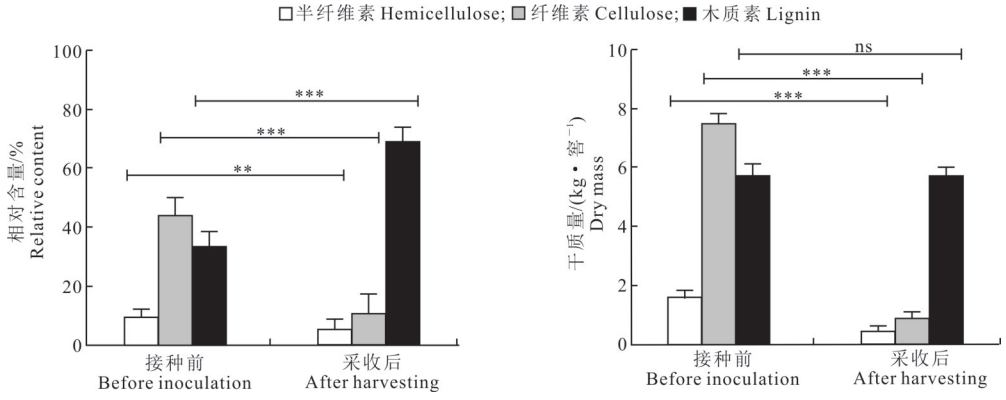
分组 Group	结苓率/% Production ratio of *W. hoelen* sclerotia	产量/(kg·窖$^{-1}$) Yield	生物学效率/% Biological efficiency	失重率/% Weight loss rate
FY	100	4.07±0.95 a	24.89±6.75 a	50.99±4.57 a
FM	100	4.91±0.89 a	25.16±4.87 a	54.16±3.18 a

注:同列数据后标不同小写字母表示两个处理间差异显著(P<0.05),标相同字母表示差异不显著(P>0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between the two treatments (P<0.05), and the same letter indicates no significant differences (P>0.05).

2.2 疫木中木质纤维的降解

疫木的主要成分为木质纤维,占比将近90%,主要包括半纤维素、纤维素和木质素三大类。由图1可知,接种茯苓菌种前,疫木中半纤维素、纤维素和木质素的相对含量分别为9.51%,44.31%和33.97%。经过一个栽培周期在采收茯苓菌核后,残木中半纤维素相对含量极显著降低至5.44%,纤维素相对含量极显著降低至10.94%,木质素相对含量则极显著上升到69.22%。从木质纤维降解程度来看,半纤维素的干质量从接种前的1.61 kg/窖下降至0.45 kg/窖,降低了71.99%;纤维素的干质量从接种前的7.52 kg/窖下降至0.91 kg/窖,降低了87.91%;而木质素的干质量在接种茯苓菌种前为5.76 kg/窖,采收茯苓菌核后为5.75 kg/窖,干质量几乎无变化,表明茯苓主要以松木中的纤维素和半纤维素为营养来源,而不能利用木质素,且采收茯苓菌核后,疫木变为褐色(图2)。



ns表示P>0.05;*表示P<0.05;**表示P<0.01;***表示P<0.001。

ns means P>0.05. * means P<0.05. ** means P<0.01. *** means P<0.001.

图1 接种茯苓菌种前和采收茯苓菌核后疫木中木质纤维素相对含量和干质量的比较(n=10)

Fig. 1 Comparison of relative lignocellulose content and dry mass in BX-infected wood before inoculation with *Wolfiporia hoelen* strain and after harvesting its sclerotia (n=10)



图 2　接种茯苓菌种前（左）和采收茯苓菌核后（右）疫木颜色的比较

Fig. 2　Color comparison of BX-infected wood before inoculation with *Wolfiporia hoelen* strain (left) and after harvesting its sclerotia (right)

2.3　疫木栽培茯苓的安全性调查

疫木中的松材线虫是病原线虫，而松褐天牛是其传播媒介。由表 2 可知，在接种茯苓菌种前，疫木中松材线虫的平均含量为 102.14～218.75 条/cm^3；接种茯苓 11 个月后，疫木中的松材线虫含量为 0，减退率为 100%，说明茯苓能够有效杀死松材线虫。疫木接种茯苓菌种前，共统计到 374 个松墨天牛侵入孔，采收茯苓菌核时，只发现 2 个羽化孔，在 Y4 窖的羽化孔周围找到成虫尸体残骸；Y9 窖发现有成虫头部钻出羽化孔，但虫体已经死亡。对茯苓处理后的疫木进行解剖，共发现死亡的天牛幼虫 192 头，蛹 7 头；存活的天牛幼虫 29 头，未见存活的蛹。观察发现，疫木中仍存活的天牛幼虫虫体短小干瘪，发育进度明显滞后，且此时疫木已经被茯苓降解，存活的天牛幼虫丧失营养来源，无法正常发育为成虫，表明疫木接种茯苓后，松材线虫和松墨天牛均无法正常繁殖和发育。上述结果表明，疫木从接种茯苓菌种到采收菌核的整个栽培周期中，松材线虫疫病传播风险极低。

表 2　接种茯苓菌种前和采收茯苓菌核后疫木中松材线虫和松墨天牛的生存情况

Table 2　Survival status of *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus alternatus* in BX-infected wood before inoculation with *Wolfiporia hoelen* strain and after harvesting its sclerotia

栽培窖编号 Cultivation plot number	接种前 Before inoculation		采收后 After harvesting			
	松材线虫含量/（条·cm^{-3}） Content of *B. xylophilus*	天牛侵入孔数 Number of invasion holes of *M. alternatus*	松材线虫含量/（条·cm^{-3}） Content of *B. xylophilus*	死亡天牛数 Number of dead *M. alternatus*	存活天牛数 Number of surviving *M. alternatus*	天牛羽化孔数 Number of eclosion holes of *M. alternatus*
Y1	137.56±97.48	35	0	18	6	0
Y2	107.58±75.08	31	0	20	0	0
Y3	102.14±84.41	35	0	21	0	0
Y4	179.66±99.47	41	0	23	6	1*
Y5	148.74±95.30	40	0	19	2	0
Y6	178.46±97.35	40	0	22	2	0
Y7	118.74±75.67	37	0	21	0	0
Y8	128.12±87.58	39	0	16	5	0
Y9	218.75±114.53	46	0	16	5	1*
Y10	188.79±103.67	30	0	23	3	0

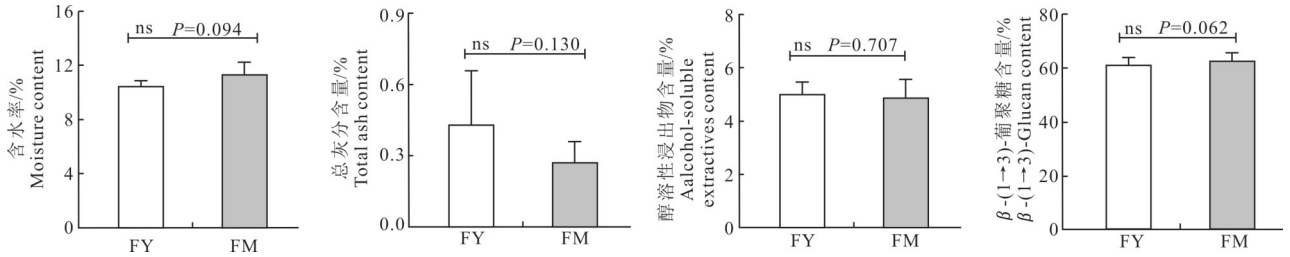
注：*表示松墨天牛成虫已死亡。

Note: * indicates that the adult of *Monochamus alternatus* has died.

2.4　疫木和健康松木栽培茯苓品质的对比

2.4.1　菌核质量　《中国药典》2025 版规定，茯苓中水分不得超过 15.0%，总灰分不得超过 2.0%，醇溶性浸出物不得少于 2.5%，茯苓 β-(1→3)-葡聚糖不得少于 50.0%。从图 3 可知，茯苓 FY 和 FM 的含水率分别为 10.63% 和 11.05%，总灰分含量分别为

0.43%和0.27%,醇溶性浸出物含量分别为5.02%和4.89%,茯苓β-(1→3)-葡聚糖含量分别为61.24%和62.89%,二者之间均无显著差异,且均符合《中国药典》2025版规定的质量控制指标,表明用松材线虫病马尾松疫木栽培茯苓的品质符合《中国药典》的质量标准要求。



FY为疫木栽培茯苓菌核,FM为健康马尾松栽培茯苓菌核。下同。

FY represents *Wolfiporia hoelen* sclerotia cultivated on BX-infected wood, while FM represents those cultivated on healthy *Pinus massoniana*. The same below.

图3 疫木和健康马尾松栽培茯苓菌核质量的比较

Fig. 3 Comparison of sclerotium weight in *Wolfiporia hoelen* cultivated on BX-infected wood and healthy *Pinus massoniana*

2.4.2 菌核活性成分 疫木和健康马尾松栽培茯苓菌核活性成分的测定结果见图4。由图4可知,茯苓FY和FM的总三萜含量分别为21.92和17.35 mg/g,总多糖含量分别为16.43和16.25 mg/g,总黄酮含量分别为0.36和0.29 mg/g,总多酚含量分别为0.43和0.39 mg/g,二者之间均无显著差异。上述结果表明,茯苓FY和茯苓FM之间4种代表性活性成分含量无显著差异,表明用松材线虫病疫木代替健康马尾松栽培茯苓的品质并无明显变化。

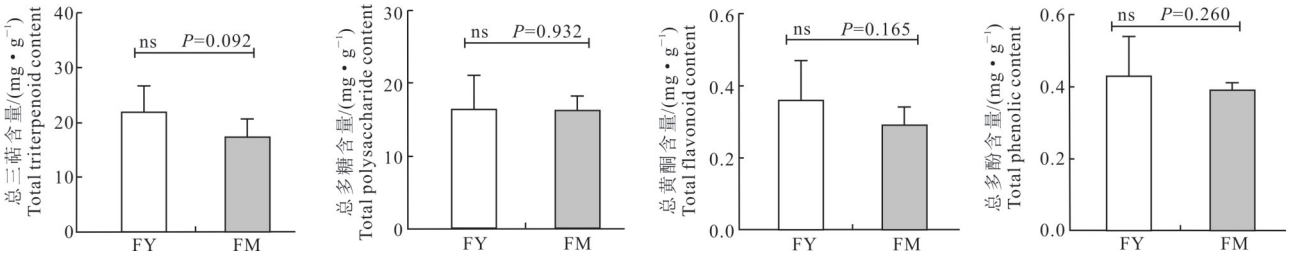


图4 疫木和健康马尾松栽培茯苓菌核生物活性成分含量的比较

Fig. 4 Comparison of bioactive component contents in *Wolfiporia hoelen* sclerotia cultivated on BX-infected wood and healthy *Pinus massoniana*

2.4.3 茯苓三萜含量 茯苓三萜类化合物是茯苓发挥抗肿瘤、抗炎、抗氧化活性的表征性物质,主要包括茯苓酸类、土莫酸类、茯苓新酸类和松苓新酸类等11个化合物[30],疫木和健康马尾松栽培茯苓三萜类化合物组成的测定结果见图5。由图5可见,茯苓FY的11个茯苓三萜化合物总量(7.77 mg/g)与茯苓FM(8.76 mg/g)无显著差异。其中含量大于2.0 mg/g和含量在1.0~2.0 mg/g的化合物各有1个,分别为茯苓酸和3-表去氢土莫酸;含量小于1.0 mg/g的化合物有9个,分别为土莫酸、6α-羟基猪苓酸C、去氢茯苓酸、3-表去氢茯苓酸、苓新酸B、去氢土莫酸、茯苓酸C、松苓新酸和茯苓新酸A,这表明茯苓酸和3-表去氢土莫酸是茯苓三萜的最主要成分(含量大于1.0 mg/g)。

图5显示,茯苓FY中茯苓酸、3-表去氢土莫酸的含量分别为2.60和1.68 mg/g,茯苓FM的茯苓酸、3-表去氢土莫酸的含量分别为2.87和1.84 mg/g,虽后者均高于FY组,但二者之间并无显著差异。茯苓FY的6α-羟基猪苓酸C、茯苓新酸B、茯苓酸C含量分别为0.42,0.37和0.23 mg/g,茯苓FM的6α-羟基猪苓酸C、茯苓新酸B、茯苓酸C含量分别为0.72,0.54和0.29 mg/g,后者均显著高于前者($P<0.05$)。茯苓FY的3-表去氢茯苓酸含量为0.53 mg/g,茯苓FM的3-表去氢茯苓酸含量为0.39 mg/g,后者显著低于前者($P<0.05$)。而去氢土莫酸、土莫酸、茯苓新酸A、去氢茯苓酸、松苓新酸含量在两组茯苓之间均无显著差异。

上述结果表明,11个茯苓三萜化合物的总含量和主要药效成分(茯苓酸和3-表去氢土莫酸)及其含量在茯苓FY和茯苓FM之间无显著差异。所测11个三萜类化合物中,共有7个化合物含量在2组茯苓之间无显著差异,可见用疫木栽培茯苓的药效

成分含量并无明显变化。至于茯苓FY中有1个化合物的含量显著高于FM，有3个化合物的含量显著低于FM，这是否对茯苓药效品质构成实质性影响，还有待今后进一步研究。

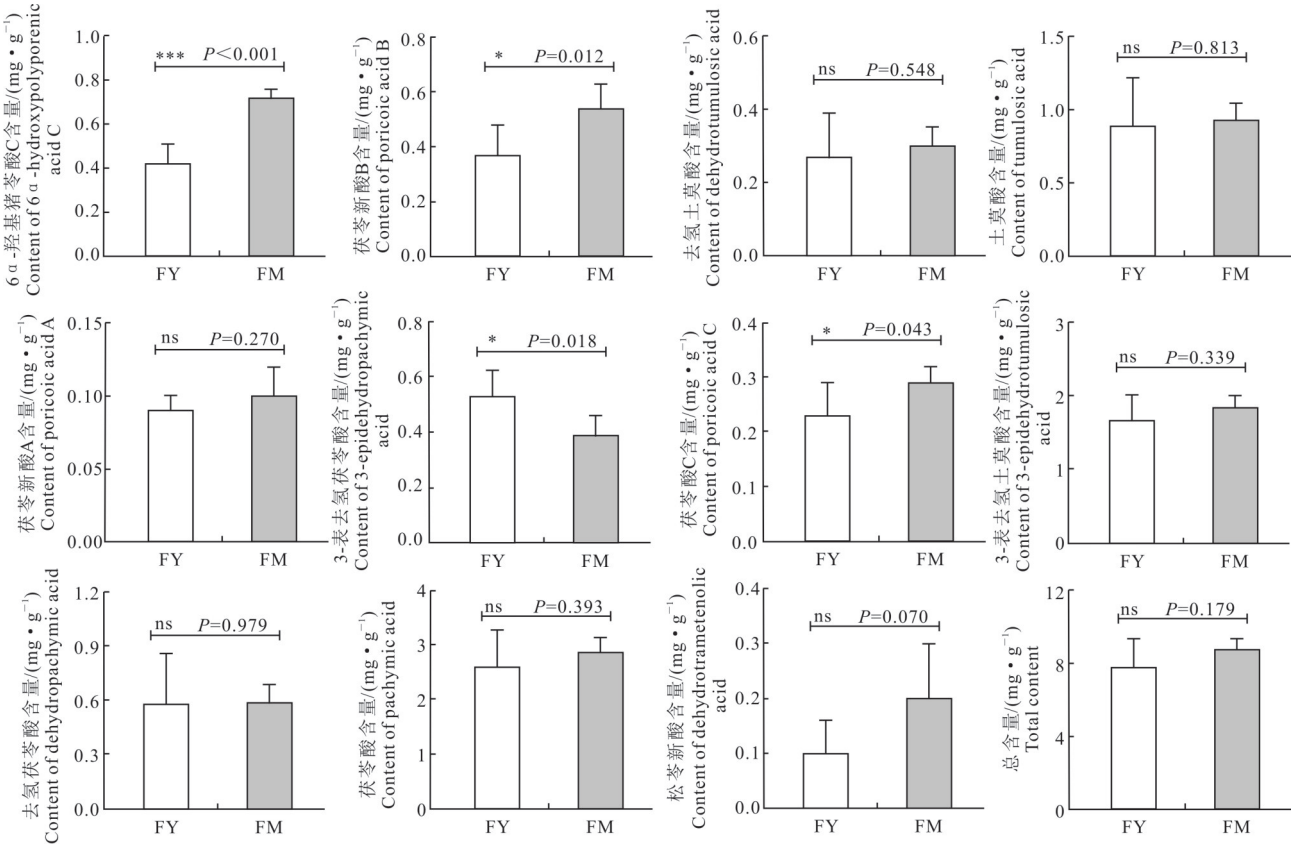


图5　疫木和健康马尾松栽培茯苓菌核三萜类成分的比较

Fig. 5　Comparison of triterpenoid contents in *Wolfiporia hoelen* sclerotia cultivated on BX-infected wood and healthy *Pinus massoniana*

2.5　疫木和健康松木栽培茯苓的品质评价

2.5.1　茯苓菌核品质指标的相关性分析　选择2组茯苓菌核的质量指标（β-(1→3)-葡聚糖含量、醇溶性浸出物含量、总灰分含量、含水率）、活性成分（总三萜含量、总多糖含量、总黄酮含量、总多酚含量）和主要药效成分（含量均大于1.0 mg/g的3-表去氢土莫酸含量、茯苓酸含量）共10个指标进行Pearson相关性分析，结果如表3所示。表3显示，β-(1→3)-葡聚糖与总三萜含量呈显著负相关（$P<0.05$）；醇溶性浸出物含量与总多糖含量呈显著正相关（$P<0.05$），表明用体积分数50%乙醇提取的茯苓浸出物中多糖占比较高；总灰分含量与总三萜含量呈显著正相关（$P<0.05$），推测茯苓三萜类化合物对金属离子具有一定的螯合能力；总黄酮含量与总多酚含量呈极显著正相关（$P<0.01$）；茯苓酸含量与总多糖含量、总黄酮含量呈显著负相关（$P<0.05$）。

2.5.2　茯苓菌核品质指标聚类分析　对2组茯苓中的10个指标进行聚类分析，结果（图6）显示，从茯苓品质指标来看，总黄酮含量（Tfc）和总多酚含量（Tpc）聚在1个分支，这与表2中总黄酮含量和总多酚含量存在显著正相关的结论一致；总三萜含量（Ttc）和总灰分含量（Tac）聚在1个分支，与表2中总三萜含量与总灰分含量存在显著正相关的结论一致；醇溶性浸出物含量（Aec）与总多糖含量（Tpsc）聚在1个分支，这与表2中醇溶性浸出物含量与总多糖含量存在显著正相关的结论一致。从茯苓样品来看，12个茯苓样品可以聚为两大类，一类为6个样本（FY2、FY1、FY3、FY6、FM1、FY4），二类为6个样本（FY5、FM2、FM6、FM4、FM5、FM3），茯苓FY组和茯苓FM组不能完全分开。该结果表明，从茯苓10个品质指标的聚类分析结果来看，茯苓FY和茯苓FM的品质极为接近，即用疫木栽培茯苓的品质与健康松木栽培茯苓的品质无显著差异。

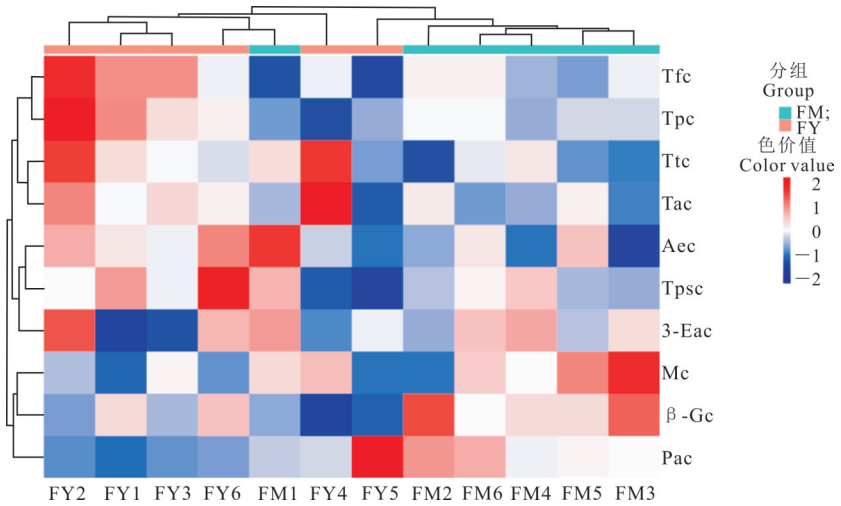
表 3 茯苓菌核品质指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of quality indicators of *Wolfiporia hoelen* sclerotia

因子 Indicator	β-Gc	Aec	Tac	Mc	Ttc	Tpsc	Tfc	Tpc	3-Eac	Pac
β-Gc	1.000									
Aec	−0.235	1.000								
Tac	−0.381	0.266	1.000							
Mc	0.082	−0.134	−0.016	1.000						
Ttc	−0.687*	0.357	0.693*	−0.039	1.000					
Tpsc	0.333	0.583*	−0.097	−0.286	0.083	1.000				
Tfc	0.062	0.100	0.486	−0.186	0.432	0.205	1.000			
Tpc	0.109	0.267	0.144	−0.345	0.252	0.323	0.823**	1.000		
3-Eac	0.006	0.243	−0.257	0.131	0.160	0.275	−0.125	0.165	1.000	
Pac	−0.040	−0.489	−0.493	−0.100	−0.525	−0.610*	−0.605*	−0.449	0.055	1.000

注:β-Gc. β-(1→3)-葡聚糖含量;Aec. 醇溶性浸出物含量;Tac. 总灰分含量;Mc. 含水率;Ttc. 总三萜含量;Tpsc. 总多糖含量;Tfc. 总黄酮含量;Tpc. 总多酚含量;3-Eac. 3-表去氢土莫酸;Pac. 茯苓酸。*表示在 0.05 水平(双侧)显著相关;**表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。图 6~7 同。

Note: β-Gc. β-(1→3)-glucan content; Aec. The alcohol-soluble extractives content; Tac. Total ash content; Mc. Moisture content; Ttc. Total triterpenoid content; Tpsc. Total polysaccharide content; Tfc. Total flavonoid content; Tpc. Total polyphenol content; 3-Eac. 3-dehydroxylomolic acid; Pac. Pachymic acid content. * indicates significant correlation at the 0.05 level (bilateral). ** indicates significant correlation at the 0.01 level (bilateral). The same as in Fig. 6−7.



横轴为茯苓编号,纵轴为茯苓的 10 个品质因子。各因子数值经过归一化处理后分为 5 个色阶,其中−2 代表最低值,用蓝色表示;2 代表最高值,用红色表示;0 为中间值,用白色表示;颜色的深浅表示数值的大小。图 7 同。

The horizontal axis represents the *W. hoelen* sample number, and the vertical axis represents the 10 quality factors of *W. hoelen*. After normalization, the values of each factor were divided into 5 color levels. −2 stands for the lowest value and is represented in blue. 2 stands for the highest value and is represented in red. 0 stands for the median value and is represented in white. The depth of the color reflects the magnitude of the value. The same as in Fig. 7.

图 6 疫木和健康马尾松栽培茯苓菌核的聚类分析图

Fig. 6 Cluster analysis of *Wolfiporia hoelen* sclerotia cultivated on BX-infected wood and healthy *Pinus massoniana*

2.5.3 茯苓菌核品质的主成分分析 相关性分析结果表明,茯苓各品质指标之间存在强相关性,单一的评价指标不能科学评价 FY 和 FM 2 组茯苓的品质差异。由于含水率和总灰分含量属于限量指标,其指标值越小,茯苓的品质越高,故总灰分含量和含水率不适合作为主成分分析的因子。为了进一步综合评价 2 组茯苓的品质差异,选择质量指标(β-(1→3)-葡聚糖含量、醇溶性浸出物含量)、活性成分(总三萜含量、总多糖含量、总黄酮含量、总多酚含量)和主要药效成分(3-表去氢土莫酸含量、茯苓酸含量)共 8 个指标进行主成分分析,得到其载荷矩阵、特征值及方差贡献率见表 4。Bartlett 球形度检验 P 值为 0.003,数据呈球形分布,说明各个变量在一定程度上相互独立,符合检验标准。

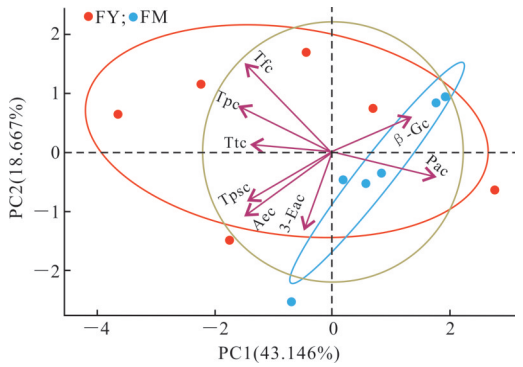
表 4　茯苓菌核 2 个主成分的载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 4　Loading matrix，eigenvalues，and contribution rates of the two principal components in *Wolfiporia hoelen* sclerotia

因子 Factor	主成分 Principal component		因子 Factor	主成分 Principal component	
	PC1	PC2		PC1	PC2
β-(1→3)-葡聚糖含量 β-(1→3)-glucan content	−0.661	−0.296	茯苓酸含量 Poria acid content	−0.804	0.191
醇溶性浸出物含量 Alcohol-soluble extractives content	0.684	0.498	3-表去氢土莫酸含量 3-dehydroxylomolic acid content	0.225	0.610
总三萜含量 Total triterpenoid content	0.642	−0.060	特征值 Eigenvalue	3.452	1.493
总多糖含量 Total polysaccharide content	0.661	0.377	方差贡献率/% Variance contribution rate	43.146	18.667
总黄酮含量 Total flavonoid content	0.675	−0.688	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	43.146	61.813
总多酚含量 Total polyphenol content	0.738	−0.362			

由表 4 可知，8 个指标经主成分分析后，可以得到特征值大于 1 的 2 个主成分，累计方差贡献率达 61.813%，表明 2 个主成分能够反映出 8 个指标的大部分信息。PC1 的特征值为 3.452，方差贡献率为 43.146%，其中贡献较大的指标有总多酚含量（荷载值 0.738）、醇溶性浸出物含量（荷载值 0.684）、总黄酮含量（荷载值 0.675）、总多糖含量（荷载值 0.661）和总三萜含量（荷载值 0.642）；PC2 的特征值为 1.493，方差贡献率为 18.667%，其中贡献最大的为 3-表去氢土莫酸含量（荷载值 0.610）。

茯苓菌核 8 个主要指标的 PCA 图如图 7 所示。



圆点代表茯苓样品，箭头代表原始变量，其方向代表原始变量与主成分的相关性。

Dots represent Wolfiporia hoelen samples，and arrows represent original variable. The direction of each arrow represents the correlation between the original variable and the principal component.

图 7　茯苓菌核各指标 PCA 图

Fig. 7　PCA plot of *Wolfiporia hoelen* sclerotia

由图 7 可知，Ttc、Tpsc、Aec、Tpc、Tfc 和 3-Eac 与左 X 轴的夹角都小于 90°，表明其与 PC1 呈正相关，而 β-Gc 和 Pac 与左 X 轴的夹角都大于 90°，表明其与 PC1 呈负相关。3-Eac、Aec、Tpsc 和 Pac 与下 Y 轴的夹角都小于 90°，表明其与 PC2 呈正相关；Ttc、β-Gc、Tpc 和 Tfc 与下 Y 轴的夹角都大于 90°，表明其与 PC2 呈负相关，结果均与表 3 一致。图 7 中圆环为相关环，其中 Tpsc 和 Aec 在相关环附近，表明总多糖含量和醇溶性浸出物含量具有强相关性，与表 3 中相关性分析结果一致。图 7 中红色和蓝色的椭圆分别代表茯苓 FY 组和 FM 组按 68% 置信区间的核心区域，其中 FY 组和 FM 组各有 4 组数据在置信椭圆内，且 FM 组和 FY 组在 PC1 和 PC2 中均不能完全分开，说明 2 组茯苓的品质在 PCA 中无显著差异，即疫木栽培茯苓的品质与健康松木栽培茯苓品质一致。

3　讨　论

3.1　疫木栽培茯苓的安全性分析

松材线虫病疫木中的生物复合体是由病原线虫、媒介昆虫、真菌、细菌等构成的复杂生物群落。木腐真菌茯苓作为生物群落中的分解者，具备在病死木上大量繁殖并通过分解木材实现物质循环的能力。本项目组在 2021 年对以疫木为基质栽培茯苓的安全性进行了研究，发现松材线虫病疫木接种茯苓菌种后初始 20 d，疫木内松材线虫含量迅速降低；60 d 后 60% 抽检疫木样品中的松材线虫密度降为 0；83 d 后所有疫木抽检样品中活体松材线虫的致死率达 97.50%～100.00%，已很难形成有效传播[9]。本研究在论证疫木种植茯苓生物转化率和菌核品质的同时，也对此疫木处理方式的安全性进行了调查，结果表明，FY 组 40 段马尾松疫木接种茯苓菌种前，共统计到 374 个松墨天牛侵入孔，采收茯苓菌核时只发现 2 个羽化孔，且成虫已经死亡；疫木中虽仍存活少量的天牛幼虫，但虫体短小干瘪，发育进度明显滞后，并且此时疫木已经被茯苓降解，天牛幼虫丧失营养来源而无法正常发育为成虫。另外，在每段疫木取样检测后均未检测到松材线虫，说明疫木从接种茯苓到采收菌核的整个周期中，均无松材线虫病疫情的传播风险。

3.2 疫木栽培茯苓的效益分析

现有研究表明,粘褶菌[31]、松生拟层孔菌[32]、虎掌菌[32]、茯苓[33]、*Neonothopanus nambi*[34]、硫磺菌[24]、桦褶孔菌[35]和红缘层孔菌[35]等木腐菌均能杀死松材线虫,降低疫情传播风险。上述木腐真菌中,茯苓以大宗食药用菌的独特优势,具备经济价值高、市场需求量大、价格稳定的特点,可作为处理松材线虫病疫木的首选真菌。我国每年因松材线虫病疫情而砍伐的疫木数量十分巨大,以湖南省为例,每年松材线虫病疫木的砍伐量超过100万株[12],健康的松木资源经过多年砍伐已经不能满足茯苓产业发展的需求,而砍伐的疫木刚好可以弥补茯苓栽培菌材的缺口。本研究证明,利用松材线虫病马尾松疫木栽培茯苓的生物学效率达24.89%,即干质量为100 kg的疫木可产鲜茯苓24.89 kg。根据全国茯苓(中药材)及其制品电子贸易平台(www.chinaflw.cn/)发布的信息,鲜茯苓的平均成交价格为10.40元/kg(2025年6月30日成交数据),1 000 kg的疫木用来栽培茯苓可以产生2 588.56元的价值。现阶段疫木再利用的主要方式是粉碎后用于造纸,1 000 kg干松木片的市场收购价为1 220.00元(参考晨鸣纸业集团股份有限公司2025年7月31日发布数据),可见用疫木栽培茯苓有更高的经济效益。若采取就地焚烧疫木的方式,不仅不产生经济价值,还会造成环境污染。因此,利用松材线虫病疫木栽培茯苓,既能实现疫木的无害化处理,又能使疫木显著升值,利国利民利生态,具有极大的推广意义。

茯苓作为褐腐真菌,以纤维素和半纤维素为主要营养来源,基本不利用木质素[36]。本研究结果显示,采收茯苓菌核后,疫木残体中木质素相对含量显著提升到69.22%,可作为工业提取木质素的上乘原料,从而为树脂、分散剂、表面活性剂和皮革鞣剂等的制备提供便利[37],进一步提高松材线虫病疫木的附加值。

3.3 疫木栽培茯苓的适应性分析

本研究结果表明,在接种茯苓菌种11个月后,疫木中纤维素和半纤维素仍然还有剩余,说明疫木能为茯苓成熟菌核的形成提供充足的营养来源,从营养角度证明用疫木代替健康木栽培茯苓是可行的。根据茯苓栽培及产地初加工技术规程HNNY 395—2023,湖南省茯苓接种时间分为3—5月和9—10月2个阶段,栽培周期为7~9个月。而本试验中茯苓接种时间选择在11月上旬,栽培周期11个月,原因有三:一是疫木的集中砍伐期始于10月,采伐后疫木需自然干燥2~3周后才能用于茯苓栽培;二是茯苓属于中温菌,其菌丝生长温度在15~30 ℃,最佳温度为22 ℃左右。因此,在湖南、江西、浙江等中亚热带地区,用疫木栽培茯苓的接种时间以10—11月为佳,这样可确保冬季气温骤降前菌丝爬满疫木,进而充分发挥杀灭松材线虫的效果;三是湖南省松墨天牛的自然羽化期为4—10月[38],疫木接种茯苓的时间应尽量避开此时段,以免个别疫木段受茯苓菌丝发菌速度限制,疫木中的松材线虫和松墨天牛仍然存活,增加疫病传播风险。

由此可见,疫木接种茯苓菌种的时间应依松墨天牛羽化期及当地气候条件而定,确保在媒介昆虫自然羽化前60~90 d接种,且接种后日均地温应在18~25 ℃。由此,中亚热带地区推荐在10—11月接种,南亚热带地区冬季气温较高,接种时间可以从10月延至12月,而北亚热带地区冬季气温偏低,接种时间控制在9—10月为佳。

疫木利用的关键在于安全。虽然多项研究证实茯苓能杀死疫木内的松材线虫,但需揭示其对松材线虫的致死机理,其安全性才能最终被确信。此外,选育菌丝生长速度快、菌核产量高、品质好并兼具杀松材线虫活力高的茯苓菌株,应是以后研究的重点方向。随着松材线虫疫情不断往北扩散,北方的落叶松、樟子松、红松、黑松等都已成为松材线虫病的感染对象,但温带地区气温较南方低,开发能适应低温环境的优质茯苓品种也很有必要。

4 结 论

利用松材线虫病马尾松疫木栽培茯苓的菌核产量为4.07 kg/窖,生物学效率达24.89%,与健康马尾松木栽培茯苓无显著差异。同时,与健康松木栽培的茯苓菌核相比,疫木栽培茯苓菌核的含水率、总灰分含量、醇溶性浸出物含量和茯苓β-(1→3)-葡聚糖含量4个质量评价指标均无显著差异,且均符合《中国药典》2025版的相关规定。聚类分析和主成分分析表明,疫木和健康马尾松栽培茯苓菌核的生物活性成分和药效成分含量无显著差异。综上所述,利用松材线虫病疫木栽培茯苓安全可行,值得在松材线虫病疫区推广应用。

[参考文献]

[1] 叶建仁. 松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析[J]. 林业科学,2019,55(9):1-10.

YE J R. Epidemic status of pine wilt disease in China and its prevention and control techniques and counter measures[J]. Scientia Silvae Sinicae，2019，55(9)：1-10.

[2] 孙永春. 南京中山陵发现松材线虫[J]. 江苏林业科技，1982，9(4)：47-27.
SUN Y C. *Bursaphelenchus xylophilus* were found in Zhongshan Mausoleum in Nanjing[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology，1982，9(4)：47-27.

[3] 于海英，吴昊，张旭东，等. 落叶松自然条件下感染松材线虫初报[J]. 中国森林病虫，2019，38(4)：7-10.
YU H Y，WU H，ZHANG X D，et al. Preliminary study on *Larix* spp. infected by *Bursaphelenchus xylophilus* in natural environment[J]. Forest Pest and Disease，2019，38(4)：7-10.

[4] 于海英，吴昊，黄瑞芬，等. 辽宁抚顺樟子松松材线虫分离与鉴定[J]. 中国森林病虫，2020，39(2)：6-10.
YU H Y，WU H，HUANG R F，et al. Separation and identification of *Bursaphelenchus xylophilus* from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Fushun city[J]. Forest Pest and Disease，2020，39(2)：6-10.

[5] LI D B，YU Y Z，TIAN C，et al. The impact of pine wilt disease on the endophytic microbial communities structure of *Pinus koraiensis*[J]. Frontiers in Microbiology，2024，15：1493808.

[6] 庞帅，陈本文，陈桂芳，等. 基于松墨天牛种群动态及其影响因素分析的松材线虫病风险评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2018，46(9)：81-90.
PANG S，CHEN W B，CHEN G F，et al. Risk assessment of pine wood nematode disease based onpopulation dynamics and impact factors of *Monochamus alternatus*[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)，2018，46(9)：81-90.

[7] 于海英，吴昊. 辽宁发现松材线虫新寄主植物和新传播媒介昆虫[J]. 中国森林病虫，2018，37(5)：61.
YU H Y，WU H. Discovery of new host plants and new media insects of *Bursaphelenchus xylophilus* in Liaoning[J]. Forest Pest and Disease，2018，37(5)：61.

[8] 张丽荣，关旭，孙莉，等. 浅谈松材线虫病疫木利用：制作机制炭[J]. 吉林林业科技，2019，48(5)：42-43.
ZHANG L R，GUAN X，SUN L，et al. Utilizing of diseased wood caused by *Bursaphelenchus xylophilus*：preparing mechanism carbon[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology，2019，48(5)：42-43.

[9] 谭著明，沈宝明，谭云，等. 以松材线虫病疫木为基质栽培茯苓的安全性评价[J]. 湖南林业科技，2025，52(1)：91-95.
TAN Z M，SHEN B M，TAN Y，et al. A safety evaluation of culturing *Wolfiporia hoelen* with plague wood as base material which infected with *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Hunan Forestry Science & Technology，2025，52(1)：91-95.

[10] 梁玮莎，方天松. 广东省松材线虫病防控现状、存在问题与对策[J]. 广东园林，2012，34(4)：7-10.
LIANG W S，FANG T S. The progress，problems and countermeasures on the control of pine wilt disease in Guangdong[J]. Guangdong Landscape Architecture，2012，34(4)：7-10.

[11] 苏乾杰，杨荣平. 邻水县松材线虫病防治工作存在的问题及其对策[J]. 南方农业，2024，18(16)：247-249.
SU Q J，YANG R P. Problems and countermeasures in the prevention and control of pine wood nematode disease in Linshui county[J]. South China Agriculture，2024，18(16)：247-249.

[12] 孙凯，曾志，戴立霞，等. 湖南省松材线虫病防控现状与对策[J]. 湖南林业科技，2024，51(3)：105-111.
SUN K，ZENG Z，DAI L X，et al. Current situation and countermeasures for the prevention and control of pine wilt disease in Hunan Province[J]. Hunan Forestry Science & Technology，2024，51(3)：105-111.

[13] 秦飞飞，杨晓刚，杨立霞. 丝状真菌杀松材线虫代谢产物研究进展[J]. 微生物学报，2023，63(9)：3335-3349.
QIN F F，YANG X G，YANG L X. Research progress in metabolites of filamentous fungi against *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Acta Microbiologica Sinica，2023，63(9)：3335-3349.

[14] 胡赛蓉，赵宇翔，李北屏，等. 松材线虫病疫木安全利用新途径[J]. 中国森林病虫，2006，25(5)：26-28.
HU S R，ZHAO Y X，LI B P，et al. New method of safe application of pine wood nematode infected wood[J]. Forest Pest and Disease，2006，25(5)：26-28.

[15] 吴云忠. 松材线虫病疫木种植茯苓试验[J]. 福建林业科技，2013，40(4)：51-55.
WU Y Z. A preliminary study on cultivation of *Poria cocos* on nematode affected pine wood[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology，2013，40(4)：51-55.

[16] 蒙海勤，叶建仁，王旻嘉，等. 木腐真菌对松材线虫病疫木处理初探[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2021，45(4)：183-189.
MENG H Q，YE J R，WANG M J，et al. Using wood rot fungi to treat plague wood caused by pine wilt disease[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)，2021，45(4)：183-189.

[17] PAPP V，DAI Y C. What is the correct scientific name for 'Fuling' medicinal mushroom[J]. Mycology，2022，13(3)：207-211.

[18] 刘珮瑶，王琨，梁杉，等. 茯苓多糖组成结构及生物活性研究进展[J]. 食品科学，2023，44(1)：380-391.
LIU P Y，WANG K，LIANG S，et al. Advances in understanding the structure and biological activity of *Poria cocos* polysaccharides[J]. Food Science，2023，44(1)：380-391.

[19] 谭云，申爱荣，沈宝明，等. 不同茯苓菌株胞外代谢产物及抗氧化活性比较[J]. 食品科学，2024，45(24)：150-160.
TAN Y，SHEN A R，SHEN B M，et al. Comparison of extracellular metabolites and antioxidant activity of different strains of *Wolfiporia hoelen*(Fr.) Y. C. Dai & V. Papp[J]. Food Science，2024，45(24)：150-160.

[20] 占慧慧，丁婵，彭思源，等. 茯苓皮与白茯苓中三萜类成分的HPLC指纹图谱与化学模式识别研究[J]. 天然产物研究与开发，2023，35(9)：1469-1479.
ZHAN H H，DING C，PENG S Y，et al. Study on HPLC fingerprint and chemical pattern recognition of triterpenoids in Poriae Cutis and White Poria[J]. Natural Product Research and

Development,2023,35(9):1469-1479.

[21] 方伟,伍贤进,胡兴,等. 茯苓栽培及产地初加工技术规程:HNNY 395—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
FANG W,WU X J,HU X,et al. Code for cultivation and producer primary processing of *Poria cocos*:HNNY 395—2023[S]. Beijing:China Standards Press,2023.

[22] 吴岩课,李根岳,吴春红. 茯苓袋料木引栽培技术的试验研究[J]. 食药用菌,2016,24(2):111-112.
WU Y K,LI G Y,WU C H. Experimental study on the cultivation technology of *Poria cocos* bagged wood[J]. Edible and Medicinal Mushrooms,2016,24(2):111-112.

[23] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 食用菌术语:GB/T 12728—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
GENERAL Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine,Standardization Administration of the People's Republic of China. Terms of edible mushroom:GB/T 12728—2006[S]. Beijing:Standards Press of China,2006.

[24] 王旻嘉,叶建仁,涂煜昇,等. 处理松材线虫病疫木的木腐真菌筛选[J]. 林业科学,2021,57(6):93-102.
WANG M J,YE J R,TU Y S,et al. Screening of wood rot fungi for treating the infected wood by *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2021,57(6):93-102.

[25] 李朝英,郑路,杨文娟,等. 用范氏法测定多类植物中酸性洗涤木质素的影响因素研究[J]. 江西农业学报,2019,31(3):61-64.
LI Z Y,ZHENG L,YANG W J,et al. Research on factors affecting determination of acid detergent lignin in many types of plants by using van soest method[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2019,31(3):61-64.

[26] 喻锦秀,万辉,张敏,等. 枯死松树伐桩中松材线虫和钻蛀性昆虫分布及数量[J]. 湖南林业科技,2020,47(6):68-71,85.
YU J X,WAN H,ZHANG M,et al. Distribution and quantity of *Bursaphelenchus xylophilus* and boring insects in dead pine stumps[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2020,47(6):68-71,85.

[27] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典2025年版:四部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2025.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's Republic of China,2025:Part 4[S]. Beijing:China Medical Science Press,2025.

[28] 李静,聂继云,李海飞,等. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报,2008,25(1):126-131.
LI J,NIE J Y,LI H F,et al. On determination conditions for total polyphenols in fruits and its derived products by Folin-phenol methods[J]. Journal of Fruit Science,2008,25(1):126-131.

[29] 占慧慧,黄丹,邓丹,等. 基于一测多评策略的茯苓不同部位三萜酸分析研究[J]. 药物分析杂志,2023,43(6):1061-1074.
ZHAN H H,HUANG D,DENG D,et al. Triterpenes analysis in different parts of *Poria cutis* by QAMS[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis,2023,43(6):1061-1074.

[30] 谭云,申爱荣,喻锦秀,等. 茯苓胞外三萜与甾醇分析及其抗氧化活性发掘[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2026,54(1):156-167.
TAN Y,SHEN A R,YU J X,et al. Analysis of extracellular triterpenes and sterols in *Wolfiporia hoelen* and exploration of antioxidant activity[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed),2026,54(1):156-167.

[31] 张建平,赵博光. 木腐菌及病死木中的真菌对松材线虫的影响[J]. 福建林学院学报,2003,23(3):245-248.
ZHANG J P,ZHAO B G. Influences of fungi isolated from dead pine trees and other wood decaying fungi on the population growth of *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Journal of Fujian College of Forestry,2003,23(3):245-248.

[32] 陈瑶,汪来发,朴春根,等. 处理松材线虫病病死松树伐桩木腐菌的筛选[J]. 林业科学研究,2008,21(4):548-554.
CHEN Y,WANG L F,PIAO C G,et al. Screening of wood-rotting fungi to treat stumps of dead pine trees caused by PWN(*Bursaphelenchus xylophilus*)[J]. Forest Research,2008,21(4):548-554.

[33] 陈元生,李新远,于海萍,等. 松材线虫病疫木生物除害技术研究[J]. 中国植保导刊,2019,39(2):82-86,52.
CHEN Y S,LI X Y,YU H P,et al. Study on techniques of biological treatment of diseased wood caused by *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. China Plant Protection,2019,39(2):82-86,52.

[34] 李玉中,滕涛,刘最. 杀松材线虫的两株野生担子菌[J]. 菌物学报,2020,39(2):457-463.
LI Y Z,TENG T,LIU Z. Two basidiomycetes destructive to nematode *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Mycosystema,2020,39(2):457-463.

[35] YUAN Y Z,WANG Y N,LI Y,et al. Development of composite microbial products for managing pine wilt disease in infected wood stumps[J]. Microorganisms,2024,12(12):2621.

[36] 王玉万,王云. 茯苓木腐特点的研究[J]. 中国食用菌,1990,9(1):8-10.
WANG Y W,WANG Y. Study on degeneration of wood by fu-Ling(*Poria cocos*)[J]. Edible Fungi of China,1990,9(1):8-10.

[37] 李改云,任海青,秦特夫,等. 茯苓褐腐过程中木材化学成分的变化[J]. 林业科学研究,2009,22(4):592-596.
LI G Y,REN H Q,QIN T F,et al. Changes of main wood chemical components during brown-rot decay by *Wolfiporia cocos*[J]. Forest Research,2009,22(4):592-596.

[38] 余德,王子斌,李密,等. 湖南省长沙县松褐天牛羽化规律[J]. 湖南林业科技,2023,50(5):73-79.
YU D,WANG Z B,LI M,et al. Eclosion rule of *Monochamus alternatus* in Changsha county in Hunan province[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2023,50(5):73-79.

(责任编辑:温晓平)