



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

## 《天津科技大学学报》网络首发论文

题目： 草药烟熏防腐剂研制及抑菌机制探究  
作者： 胡乃珺, 冯敏, 于晓莉, 莫丽媛, 乔丽萍  
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250048  
收稿日期: 2025-03-14  
网络首发日期: 2026-01-28  
引用格式: 胡乃珺, 冯敏, 于晓莉, 莫丽媛, 乔丽萍. 草药烟熏防腐剂研制及抑菌机制探究[J/OL]. 天津科技大学学报.  
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250048>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



## 草药烟熏防腐剂研制及抑菌机制探究

胡乃珺<sup>1</sup>, 冯敏<sup>1</sup>, 于晓莉<sup>1</sup>, 莫丽媛<sup>1</sup>, 乔丽萍<sup>1,2</sup>

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 天津捷盛东辉保鲜科技有限公司, 天津 300300)

**摘要:** 为开发高效、低毒的化学农药防腐保鲜剂替代产品, 以云木香 (*Aucklandia costus*)、川黄柏 (*Phellodendron chinense*) 为研究对象, 评估其对农产品贮藏期常见致病菌灰霉菌 (*Botrytis cinerea*)、黄曲霉 (*Aspergillus flavus*) 的抑制效应, 确定了两者的最佳复配比例, 同时对抑菌机理进行初步研究。结果表明: 以云木香、川黄柏的半数抑菌浓度进行复配, 当复配比为 3:7 时, 对灰霉菌与黄曲霉均具有协同增效抑菌作用, 抑制率可达 100%; 超微结构观察发现, 复配草药熏蒸处理显著改变了菌丝形态, 造成了核酸泄漏, 灰霉菌和黄曲霉的胞内可溶性蛋白含量分别下降了 16.36% 与 20.88%。本研究结果为以草药为农药主剂的研发与应用提供新思路。

**关键词:** 草药; 烟雾熏蒸; 共毒因子; 抑菌机理

中图分类号: S436.5 文献标志码: A

## Development and Antibacterial Mechanism Investigation of Herbal Fumigant Preservatives

HU Naijun<sup>1</sup>, FENG Min<sup>1</sup>, YU Xiaoli<sup>1</sup>, MO Liyuan<sup>1</sup>, QIAO Liping<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Gasin-DH Preservation Technology Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To develop efficient and low-toxic alternatives of chemical antifungal preservatives, *Aucklandia costus* and *Phellodendron chinense* were selected as botanical materials to evaluate the inhibitory effects of compound fumigants on *Botrytis cinerea* and *Aspergillus flavus* common pathogenic fungi during agricultural product storage. The optimal compounding ratio was determined, while preliminary investigations were conducted on the antimicrobial mechanisms. When the ratio of concentration for 50% of maximal effect of *Aucklandia costus* to *Phellodendron chinense* was 3:7, the combination exhibited synergistic antifungal activities against both *B. cinerea* and *A. flavus*, achieving an inhibition rate of 100%. Ultrastructural observations revealed that the fumigation treatment with the herbal significantly altered hyphal morphology, induced nucleic acid leakage, and reduced the intracellular soluble protein content by 16.36% and 20.88%. These findings provide novel insights for expanding herbal-based active ingredients in pesticide formulations.

**Key words:** herbal medicine; fumigation; co-toxicity factor; antimicrobial mechanism;

与喷洒药物抑制农产品霉变相比, 烟雾熏蒸不仅具有使用方便、防治效果好、成本低等特点, 还具有

较为广泛的应用场景<sup>[1]</sup>。而草药烟雾熏蒸相较传统化学农药烟雾熏蒸而言, 不仅具有安全有效的抑菌防腐

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-06-22

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目课题 (2024YFD2100801); 天津市科学普及项目 (24KPMRC00310)

作者简介: 胡乃珺(2000—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生; 通信作者: 乔丽萍, 副教授, qiao369@126.com

效果,还能够缓解由于长时间烟雾熏蒸所导致的抗药性与环境残留等问题。目前,草药烟雾熏蒸在干制龙眼、开心果与鲜食核桃贮藏等方面已有应用<sup>[2-4]</sup>,但仍缺少对于植物病原真菌抑菌机制的进一步研究。此外,草药烟雾熏蒸多以单一草药的抑菌效果作为主要研究内容,对两种及多种草药复配后抑菌协同效果的综合考量却鲜少报道。

近年来的研究表明,云木香(*Aucklandia costus*)、川黄柏(*Phellodendron chinense*)中富含生物活性物质(如去氢木香内酯、盐酸小檗碱等),这类物质对多种微生物的生长均具有抑制作用<sup>[5-8]</sup>。因此,将云木香、川黄柏相结合,探究抑菌协同增效比例,开展两种草药作为农药主剂的研发与应用前景。

本研究以云木香、川黄柏两种草药作为研究对象,通过对灰霉菌、黄曲霉进行烟雾熏蒸处理,评估两种草药不同剂量下的抑制效果。通过绘制毒力回归曲线,计算相对应的半数抑菌浓度(concentration for 50% of maximal effect,  $EC_{50}$ ),再根据共毒因子法(co-toxicity factor, CTF)确定两种草药的复配比例。同时,通过观察两种霉菌的菌丝形态与检测胞内物质释放情况,探究复配草药熏蒸的抑菌机理。本研究旨在探究云木香、川黄柏两种草药协同增效复配比例,以及复配草药熏蒸对灰霉菌、黄曲霉两种霉菌的直接抑菌活性,对复配草药熏蒸的抑菌机理进行初步研究,以期为复配草药烟熏杀菌剂的进一步开发和利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

实验所用云木香与川黄柏草药粉末购自北京同仁堂药房。

戊二醛、氯化钠、考马斯亮蓝,分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;无水乙醇,分析纯,天津市津东天正精细化学试剂厂;磷酸盐缓冲液(0.01 mol/L, pH 7.2)、牛血清蛋白、马铃薯葡萄糖肉汤培养基(PDB),北京索莱宝科技有限公司;马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA),北京奥博星生物技术有限责任公司。

EPOCH-1908028 型酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;GR60DA 型灭菌锅,致微(厦门)仪器有限公司;SU3800 型扫描电子显微镜,日本株式会社日立

制作所;振荡培养箱,上海知楚仪器有限公司;DM4000 型显微镜,徕卡仪器有限公司;TGL-20M 型高速冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 菌饼的制备

本研究使用的菌种为灰霉菌(*Botrytis cinerea*)和黄曲霉(*Aspergillus flavus*),均为实验室保存于-80 °C冰箱的冻藏菌株,经活化后培养使用。

在无菌条件下,取 20 mL 经灭菌后冷却至 45 °C 的 PDA 培养基加入培养皿,制成 PDA 平板,待冷却凝固后在平板中央接种灰霉菌菌丝,28 °C 培养 5 d,在已长好的灰霉菌平皿中用直径 8 mm 的打孔器在菌落边缘切取菌落圆块,备用<sup>[9]</sup>。黄曲霉菌饼与灰霉菌菌饼的制备方式相同。

#### 1.2.2 孢子悬浮液的制作

无菌条件下,取 28 °C 培养 5 d 的灰霉菌进行复合草药熏蒸处理,随后选取 5 个取样点,切成 0.5 cm × 0.5 cm 大小、厚度均一的小块,放置在 10 mL 生理盐水中涡旋振荡至液体浑浊,使孢子均匀分散到生理盐水中,用 4 层无菌擦镜纸过滤以除去菌丝,并使用血球计数板对滤液进行观察,将孢子悬浮液调整至  $1 \times 10^5$  CFU/mL,并以未作草药熏蒸处理制成的孢子悬浮液为对照组。黄曲霉孢子悬浮液与灰霉菌孢子悬浮液的制备方式相同。

#### 1.2.3 草药熏蒸的毒力测定

将制备好的菌饼接种到备用的 PDA 培养基上,待不同剂量(40、80、120、160、200 mg/L)的草药燃烧形成稳定烟雾后将其与含有菌饼的培养基一同放置在 15 L 密闭容器中进行烟熏处理 1 h;之后,放入 28 °C 霉菌培养箱,培养 72 h,采用十字交叉法每隔 24 h 测量菌丝生长情况,测量空白组菌落直径

( $d_{\text{空白}}$ )和处理组菌落直径( $d_{\text{处理}}$ )按照式(1)计算抑制率( $R$ ),根据抑制率-机率值换算表将抑制率换算成机率值,以草药剂量对数值为横坐标,机率值为纵坐标,制作毒力回归曲线,得到毒力回归方程及相关系数,并计算  $EC_{50}$  值。

$$R = \frac{(d_{\text{空白}} - 8) - (d_{\text{处理}} - 8)}{(d_{\text{空白}} - 8)} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.4 复配草药的药效评价结果

根据共毒因子法<sup>[10-11]</sup>对两种杀菌剂的复配效果进行评价,按照木香与黄柏的  $EC_{50}$  进行复配,分别以 8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7 和 2:8 的比例进行混合,根据式(2)和式(3)计算共毒因子。

$$H_0 = H_m + H_n \quad (2)$$

$$\Sigma = \frac{(H_1 - H_0)}{H_0} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $H_m$  为一种杀菌剂的理论抑制率,  $H_n$  为另一种杀菌剂的理论抑制率,  $H_0$  为复配杀菌剂的理论抑制率,  $H_1$  为复配杀菌剂的实际抑制率,  $\Sigma$  为共毒因子。

若  $\Sigma > 20$ , 表示两种杀菌剂复配产生增效作用; 若  $\Sigma < -20$ , 表示两种杀菌剂复配产生拮抗作用; 若  $-20 \leq \Sigma \leq 20$ , 表示两种杀菌剂复配产生相加作用。

### 1.2.5 复配草药熏蒸对菌丝体形态的影响

参考 Wang 等<sup>[12]</sup>的方法,将制备好的菌饼接种在 PDA 平板上,对接种板进行复配草药熏蒸处理,其剂量为复配草药对灰霉菌、黄曲霉的  $EC_{50}$ 。在 28 °C 恒温条件下培养 3 d 后,利用无菌刀片取材,选取 3 个取样点,切成 0.5 cm × 0.5 cm 大小、厚度均一的小块,放置在 2.5% 戊二醛中固定,并保存于 4 °C 冰箱过夜。将固定好的菌丝用磷酸盐缓冲液 (0.1 mol/L, pH 7.2) 冲洗 3 次后,再用乙醇梯度脱水 (30%、50%、70%、90%、100%), 每次处理 10 min。待样品自然

风干后,将其贴台喷金,用扫描电子显微镜观察。

### 1.2.6 复配草药熏蒸对胞内物质释放的影响

核酸泄漏的测定<sup>[13]</sup>: 将制备好的孢子悬浮液加到含 50 mL PDB 培养液的三角瓶中, 28 °C、200 r/min 摇床孵育培养。将每隔 24 h 收集混合液放入离心管中,将收集的样品 4000 r/min 离心 15 min 后获得上清液,用酶标仪测定 260 nm 波长处的吸光度 ( $A_{260}$ )。

菌丝中可溶性蛋白含量的测定<sup>[13]</sup>: 在无菌条件下,将孢子悬浮液接种于 PDB 培养液中,摇床培养,每隔 24 h 离心收集菌丝。经无菌水与磷酸盐缓冲液冲洗菌丝体,用滤纸吸干,称取 0.5 g 菌丝,冰浴中研磨至糊状,加缓冲液补足 10 mL,冷冻离心 15 min,取 0.1 mL 上清液,按照标准曲线制作方法测定其可溶性蛋白含量,每个处理重复 3 次。

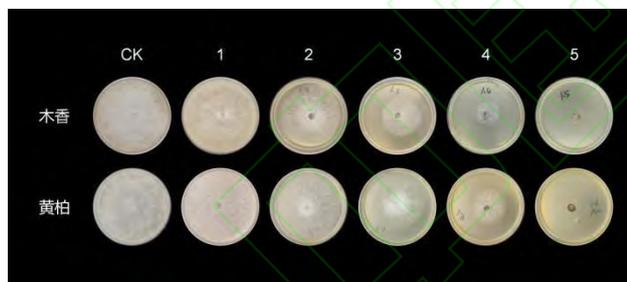
### 1.3 数据处理

所有数据采用 Excel 2024 进行处理,结合 SPSS 23.0 软件统计分析,每组实验重复 3 次,取平均值。

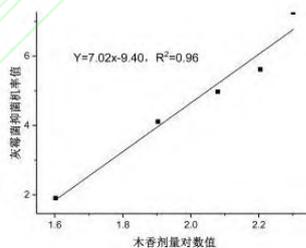
## 2 结果与讨论

### 2.1 草药熏蒸对灰霉菌菌丝生长的抑制作用

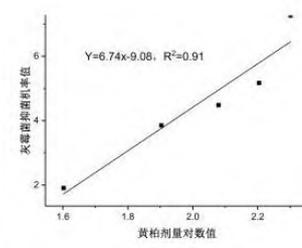
云木香、川黄柏熏蒸对灰霉菌菌丝生长抑制情况及其毒力回归曲线如图 1 所示。



(a) 灰霉菌菌丝生长



(b) 云木香



(c) 川黄柏

图 1 云木香、川黄柏熏蒸对灰霉菌菌丝生长抑制情况及其毒力回归曲线

Fig. 1 Effect of *S. costus* and *P. chinense* Fumigation on Mycelial Growth Inhibition and Virulence Regression Curves of *B. cinerea*

表 1 云木香、川黄柏对灰霉菌的毒力回归方程与  $EC_{50}$

Tab. 1 Virulence regression equations and  $EC_{50}$  of *S. costus* and *P. chinense* against *B. cinerea*

草药	毒力回归方程	相关系数 $R^2$	$EC_{50}$ / (mg L <sup>-1</sup> )
云木香	$y=7.02x-9.40$	0.96	112.00
川黄柏	$y=6.74x-9.08$	0.91	122.00

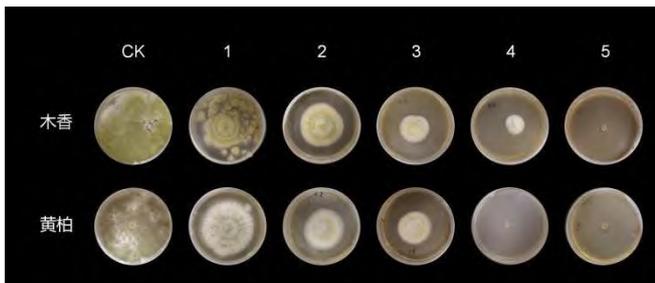
图 1 (a) 直观反映了云木香、川黄柏两种草药熏蒸对灰霉菌的抑制作用,随着熏蒸剂量的增加,两种草药显著抑制灰霉菌的菌丝生长。根据 72 h 时云木香、川黄柏的不同剂量对灰霉菌菌丝生长的抑制率,以草药剂量对数值为横坐标,机率值为纵坐标,绘制出毒力回归曲线,得到云木香、川黄柏的毒力回归方程(表 1)为  $y=7.02x-9.40$  和  $y=6.74x-9.08$ 。根据毒力

回归方程计算出云木香、川黄柏熏蒸对灰霉菌的  $EC_{50}$ ，分别为 112.00、122.00 mg/L。

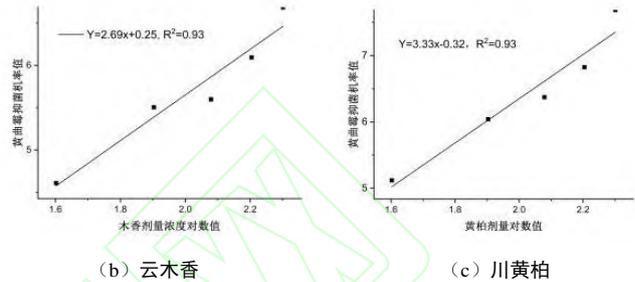
### 2.2 草药熏蒸对黄曲霉菌丝生长的抑制作用

云木香、川黄柏熏蒸对黄曲霉菌丝生长抑制情况及其毒力回归曲线如图 2 所示。根据 72 h 时云木香、

川黄柏的不同剂量对黄曲霉菌丝生长的抑制率，以草药剂量对数为横坐标，机率值为纵坐标，绘制出毒力回归曲线，得到云木香、川黄柏的毒力回归方程（表 1）为  $y=2.69x+0.25$  和  $y=3.33x-0.32$ 。根据毒力回归方程计算出云木香、川黄柏熏蒸对黄曲霉的  $EC_{50}$  分别为 57.33、39.33 mg/L。



(a) 黄曲霉菌丝生长



(b) 云木香

(c) 川黄柏

图 2 云木香、川黄柏熏蒸对黄曲霉菌丝生长抑制情况及其毒力回归曲线

Fig. 2 Effect of *S. costus* and *P. chinense* fumigation on mycelial growth inhibition and virulence regression curves of *A. flavus*

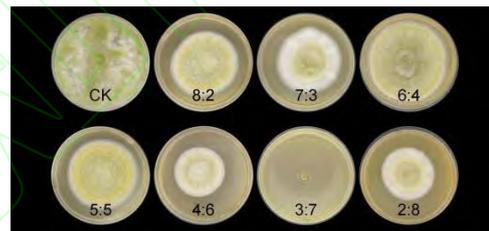
表 2 云木香、川黄柏对黄曲霉的毒力回归方程与  $EC_{50}$

Tab. 2 Virulence regression equations and  $EC_{50}$  of *S. costus* and *P. chinense* against *A. flavus*

草药	毒力回归方程	相关系数 $R^2$	$EC_{50}/(mg L^{-1})$
云木香	$y=2.69x+0.25$	0.93	57.33
川黄柏	$y=3.33x-0.32$	0.93	39.33

### 2.3 复配草药对灰霉菌和黄曲霉的药效评价结果

复配草药对灰霉菌、黄曲霉菌丝生长抑制如图 3 所示。图 3 (a) 直观反映了云木香、川黄柏复配各比例对灰霉菌菌丝生长的抑制效果，当复配比为 6 : 4、5 : 5、3 : 7 时对灰霉菌菌丝生长具有较好的抑制效果。表 3 为云木香、川黄柏复配的共毒因子评价结果。由表 3 可知，当云木香与川黄柏比例为 7 : 3、6 : 4、5 : 5、4 : 6、3 : 7、2 : 8 时，产生增效作用，当复配比为 8 : 2 时，产生相加作用，复配比为 2 : 8 时，产生拮抗作用。



(b) 黄曲霉

图 3 复配草药对灰霉菌、黄曲霉菌丝生长抑制

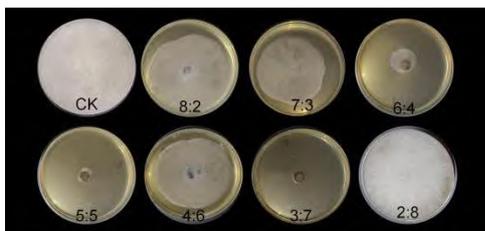
Fig. 3 Effect of herbal formulation on mycelial growth inhibition of *B. cinerea* and *A. flavus*

表 3 复配草药对灰霉菌的药效评价

Tab. 3 Efficacy evaluation of herbal formulation against *B. cinerea*

比例	$H_0$ (理论)	$H_1$ (实际)	$\Sigma$	效果
8 : 2	28.50	26.62	-6.59	相加
7 : 3	14.00	42.53	203.78	增效
6 : 4	6.40	79.87	1147.96	增效
5 : 5	3.80	93.51	1235.85	增效
4 : 6	7.00	34.35	132.09	增效
3 : 7	14.80	100.00	289.10	增效
2 : 8	25.70	0.00	-100.00	拮抗

图 3 (b) 直观反映了云木香、川黄柏各复配比例对黄曲霉菌丝生长的抑制效果，与其他组相比，当复配比为 3 : 7 时对黄曲霉菌丝生长具有明显的抑制作用。表 4 为云木香与川黄柏复配的共毒因子评价结果。由表 4 可知，当云木香与川黄柏比例为 8 : 2、4



(a) 灰霉菌

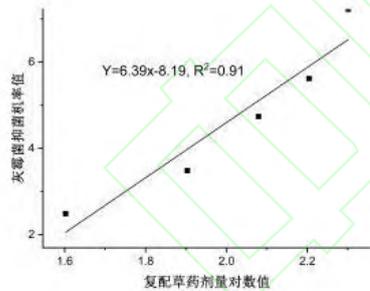
: 6 : 3 : 7 时, 产生增效作用, 当比例为 7 : 3 : 5 : 5 时, 产生相加作用, 当比例为 6 : 4 时, 产生拮抗作用。

表 4 复配草药对黄曲霉的药效评价

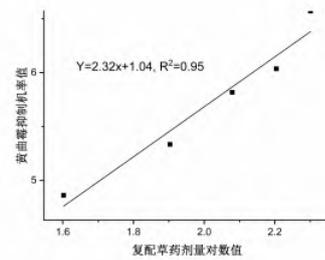
Tab. 4 Efficacy evaluation of herbal formulation against *A. flavus*

比例	$H_0$ (理论)	$H_1$ (实际)	$\Sigma$	效果
8 : 2	43.50	36.17	-17.24	增效
7 : 3	35.70	41.08	14.84	相加
6 : 4	36.60	23.52	-37.15	拮抗
5 : 5	36.50	32.63	-12.32	相加
4 : 6	37.10	57.84	53.63	增效
3 : 7	38.00	100.00	163.15	增效
2 : 8	40.30	49.12	21.58	增效

综上所述, 当云木香、川黄柏  $EC_{50}$  值的复配比例为 3 : 7 时, 对灰霉菌、黄曲霉均具有增效作用, 且作用效果明显。将复配草药按照单一草药的剂量梯度 (40、80、120、160、200 mg/L) 对灰霉菌、黄曲霉进行毒力测定并绘制毒力回归曲线 (图 4), 得到复配草药对灰霉菌、黄曲霉的毒力回归方程分别为  $y=6.39x-8.19$ 、 $y=2.32x+1.04$ ,  $EC_{50}$  分别为 115.33、50.79 mg/L。



(a) 灰霉菌



(b) 黄曲霉

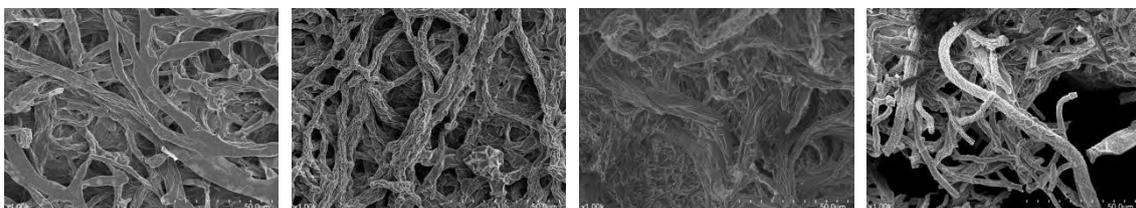
图 4 复配草药对灰霉菌、黄曲霉的毒力回归曲线

Fig. 4 Virulence regression curves of herbal formulation against *B. cinerea* and *A. flavus*

研究<sup>[3]</sup>表明 20 g 肉桂皮、印楝叶和丁香花在 10.3 L 的密闭空间中烟熏处理 45 min 后对黄曲霉的生长抑制率可达 100%、85% 和 75%。王晓钊<sup>[9]</sup>研究表明, 当 1-辛烯-3 醇的熏蒸处理空间浓度为 74.40  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时, 能够完全抑制褐腐菌菌丝体生长。与之相比, 复配草药在保证抑制灰霉菌、黄曲霉生长的同时大大减少了草药的剂量, 节省了复配草药烟熏剂的制作成本。

#### 2.4 复配草药熏蒸对菌丝体形态的影响

利用扫描电子显微镜观察经复合草药熏蒸处理后灰霉菌、黄曲霉超微菌丝体的形态变化, 如图 5 所示。由图 5 (a) 和图 5 (b) 可知, 对照组中灰霉菌菌丝表面较为光滑, 菌丝相对饱满, 而经草药熏蒸处理后灰霉菌菌丝表面出现皱缩严重、菌丝干瘪的情况, 甚至部分菌丝发生坍塌和挤压, 萎缩变形严重。由图 5 (c) 和图 5 (d) 可知, 对照组中黄曲霉菌丝表面光滑菌丝饱满, 与之相比, 经草药烟熏处理后的黄曲霉菌丝表面有明显褶皱, 部分菌丝表面有颗粒状凸起, 甚至出现菌丝断裂的现象。林波<sup>[14]</sup>研究发现盐酸小檗碱能够改变指状青霉的菌丝体形态, 泄漏细胞壁和细胞膜之间的碱性磷酸酶 (AKP); 毕燕<sup>[15]</sup>研究发现, 去氢木香内酯处理的亚洲镰孢菌菌丝体褶皱。这说明在复配草药熏蒸过程中云木香、川黄柏中具有抑菌作用的生物活性成分逸散于密闭空间中, 并破坏了灰霉菌与黄曲霉的超微结构。



(a) 灰霉菌对照组 (b) 灰霉菌草药熏蒸处理组 (c) 黄曲霉对照组 (d) 黄曲霉草药熏蒸处理组

图 5 复配草药熏蒸对灰霉菌、黄曲霉菌丝体形态的影响

Fig. 5 Morphological alterations in *B. cinerea* and *A. flavus* mycelia induced by herbal formulation fumigation

### 2.5 复配草药熏蒸对胞内物质释放的影响

复配草药熏蒸对灰霉菌、黄曲霉胞内物质释放的影响如图 6 所示。

膜完整性的破坏通常会导致细胞内容物（如核酸、可溶性蛋白等物质）的泄漏，最终导致细胞死亡 [16-17]。因此，通过测定复合草药熏蒸处理后细胞内物质的泄漏情况，可以验证扫描电子显微镜的观察结果。吸光度表示检测物吸收掉的光密度， $A_{260}$  增大，表明菌丝内部核酸物质泄漏。由图 6 (a) 和图 6 (b) 可知，随着时间的增加，复配草药熏蒸处理后灰霉菌、黄曲霉上清液中  $A_{260}$  呈现上升趋势，而对照组灰霉菌、黄曲霉上清液中  $A_{260}$  则分别保持在 3.85、3.84 左右。在观察检测期间，复配草药熏蒸处理后两种菌的

$A_{260}$  与对照组相比均出现显著增加 ( $P < 0.05$ )，这说明复配草药熏蒸导致灰霉菌、黄曲霉胞内核酸的泄漏。

菌丝中可溶性蛋白含量反应菌丝的合成情况 [18-19]。由图 6 (c) 和图 6 (d) 可知，对照组在观察期间未出现明显波动，灰霉菌和黄曲霉菌丝中可溶性蛋白含量始终保持在 100.25  $\mu\text{g/g}$ 、114.10  $\mu\text{g/g}$  左右，而经处理后灰霉菌、黄曲霉的菌丝中可溶性蛋白含量在 2 d 时均呈现骤降而后缓慢下降的趋势，但其含量始终显著 ( $P < 0.05$ ) 低于对照组。在 4 d 时，灰霉菌、黄曲霉的可溶性蛋白含量相较 1 d 分别下降了 16.36% 与 20.88%，这表明复配草药熏蒸对灰霉菌、黄曲霉菌丝的合成具有一定抑制效果。

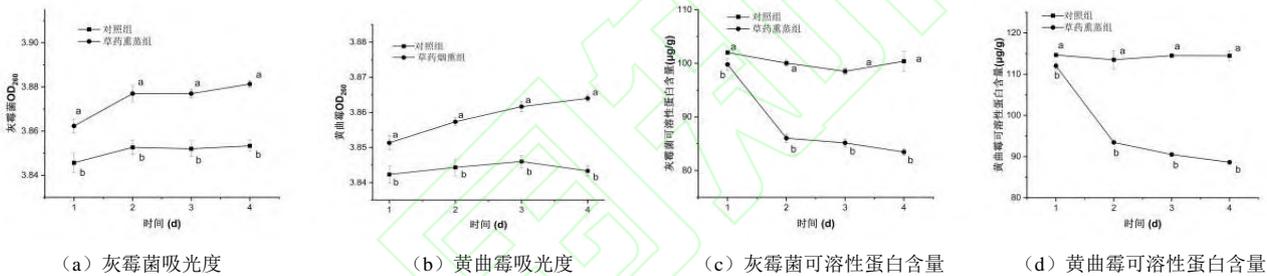


图 6 复配草药熏蒸对灰霉菌、黄曲霉胞内物质释放的影响

Fig. 6 Intracellular substance release in *B. cinerea* and *A. flavus* following herbal formulation fumigation

综上所述，复配草药熏蒸对灰霉菌、黄曲霉胞内物质释放的作用效果显著，这与用扫描电子显微镜所观察到的实验结果一致，这也证实复配草药熏蒸抑制了灰霉菌、黄曲霉的菌丝合成，破坏了两种霉菌的细胞膜完整性，从而实现杀菌作用。

### 3 结 语

本研究根据共毒因子法，确定云木香、川黄柏的复配比例为 3 : 7 时，对两种霉菌的抑制具有增效作用。通过对复配草药熏蒸抗真菌机制进行初步探究，发现熏蒸处理后灰霉菌、黄曲霉的细胞膜完整性被破坏，导致胞内物质释放，同时还能破坏两种霉菌的菌丝形态，使其菌丝表面出现不同程度的褶皱与干瘪，甚至有部分菌丝出现坍塌、断裂的情况，从而达到抑制菌丝生长的效果。本研究对云木香-川黄柏复配草药熏蒸的抑菌机理作出了初步研究，为复配草药烟熏

杀菌剂的进一步开发和利用提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 任娜. 大棚蔬菜病虫害烟剂防治技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [2] YANG K M, CHIANG P Y. Effects of smoking process on the aroma characteristics and sensory qualities of dried longan[J]. Food chemistry, 2019, 287 : 133-138.
- [3] SHATERIAN MOHAMMADI A, AMINIAN H, JAMSHIDNIA A. Effects of smoke produced from smoldering plants on the *Aspergillus flavus* growth and production of aflatoxin in pistachio[J]. Journal of food safety, 2020, 40(6) : e12847.
- [4] QIAO L, JIAO Y, LI X, et al. Herbal smoke fumigation for controlling *Penicillium crustosum* in fresh walnuts[J]. Food research international, 2023, 167 : 112709.

- [5] 秦光炜. 川芎和木香代谢产物抑菌活性及活性成分研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
- [6] 郑加梅, 尚明越, 王嘉乐, 等. 木香的化学成分、药理作用、临床应用研究进展及质量标志物预测[J]. 中草药, 2022, 53(13): 4198-4213.
- [7] KIM G, GAN R Y, ZHANG D, et al. Large-scale screening of 239 traditional Chinese medicinal plant extracts for their antibacterial activities against multidrug-resistant *Staphylococcus aureus* and cytotoxic activities[J]. Pathogens, 2020, 9(3): 185.
- [8] 马颖超. 骆驼源金黄色葡萄球菌的分离鉴定及 16 味中草药对其体外抑菌效果研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
- [9] 王晓钊. 1-辛烯-3-醇抑制桃果实采后病害的作用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [10] 陈福良, 郑斐能, 王仪. 农药混配室内毒力测定的一种实验技术[J]. 农药科学与管理, 1997(4): 30-31.
- [11] 刘金蓉. 小檗碱对两种重要植物病原真菌的抑制作用及其烟剂的研制[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [12] WANG L, HU W, DENG J, et al. Antibacterial activity of *Litsea cubeba* essential oil and its mechanism against *Botrytis cinerea*[J]. RSC Advances, 2019, 9(50): 28987-28995.
- [13] 张娟. 蓝莓采后链格孢果腐病的食品级抑菌剂研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [14] 林波. 盐酸小檗碱对采后柑橘指状青霉和酸腐病菌的抑菌机理初探[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
- [15] 毕燕. 去氢木香内酯对亚洲镰孢菌生长和产毒的影响机制研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024.
- [16] 林福兴. 抗菌脂肽 Bacillomycin D 对樱桃番茄果实采后病害的防治及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [17] QU S, YANG K, CHEN L, et al. Cinnamaldehyde, a promising natural preservative against *Aspergillus flavus*[J]. Frontiers in microbiology, 2019, 10: 2895.
- [18] 钟涛. 荧光假单胞菌 ZX 挥发性产物生物防治采后葡萄灰霉病及其抑菌机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [19] MA W B, ZHAO L L, ZHAO W H, et al. (E)-2-hexenal, as a potential natural antifungal compound, inhibits *Aspergillus flavus* spore germination by disrupting mitochondrial energy metabolism[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2019, 67(4): 1138-1145.