



DOI:10.14188/j.ajsh.20251111001

生姜提取液对黄精根腐病菌的绿色防控效果及其调节机制分析

刘蓉[†], 李佳慧[†], 李嘉丽, 王俊熙, 敖萍, 刘欢, 代娅, 吴望^{*}

(宜宾学院 农林与食品工程学部, 四川 宜宾 644000)

摘要: 探究黄精根腐病的绿色防控方案, 以及天然植物源物质对植物响应病原菌侵染的抗性机制。用不同浓度生姜提取液处理3种黄精根腐病的主要致病菌, 即尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、芬芳镰刀菌(*Fusarium redolens*)和泡盛曲霉(*Aspergillus awamori*), 进行室内抑菌测试以及盆栽实验。同时测定了不同处理条件下滇黄精的理化指标和转录组数据, 并验证了差异表达基因, 分析了生姜提取液对黄精根腐病菌的抑制效果和调节机制。结果显示, 2.5%和5.0%老姜提取液对尖孢镰刀菌和泡盛曲霉均表现出良好的抑菌效果; 其中5.0%提取液对泡盛曲霉的抑制率达42.3%。盆栽实验结果表明, 接菌7d后, 老姜提取液处理后的滇黄精存活率提升50%; 与对照组相比, 该处理组滇黄精根茎超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性升高且在3d时达峰值; 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量显著低于对照组及单接菌组, 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性呈先降后升再降的反向变化趋势。老姜提取液处理后的滇黄精根茎总酚得率呈上升趋势, 在4d时达到峰值且显著高于对照组和单接菌组。转录组测序结合共表达调控网络分析(weighted gene co-expression network analysis)表明, 差异表达基因显著富集于苯丙烷合成、黄酮合成及TCA循环途径, 并从中筛选出6个关键响应候选基因。qRT-PCR分析显示, *F5H*、*POD*、*PAL*、*CAD*、*ISD*基因在IA组高表达, *DRA*基因表达模式相反。总之, 2.5%和5.0%的老姜提取液分别对*F. oxysporum*和*A. awamori*有较好的抑菌效果。老姜提取液对滇黄精响应根腐病原菌侵染具有一定的保护作用, 用其处理可诱导滇黄精内*CAD*、*PAL*、*POD*和*ISD*基因的表达上调, 显著增强其抗病性及抗逆性。

关键词: 生姜提取液; 黄精; 根腐病; 抑菌机制

中图分类号: S435.67

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2026)01-0037-12

Analysis of the green control effect and regulatory mechanism of ginger extract on root rot pathogens of *Polygonatum*

LIU Rong[†], LI Jiahui[†], LI Jiali, WANG Junxi, AO Ping, LIU Huan, DAI Ya, WU Wang^{*}

(Faculty of Agriculture, Forestry and Food Engineering of Yibin University, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: To explore the green prevention and control scheme of *Polygonatum* root rot and the resistance mechanism of natural plant substances to plant response to pathogen infection, different concentrations of ginger extract were used to treat three main pathogens of *Polygonatum* root rot, namely *Fusarium oxysporum*, *Fusarium redolens* and *Aspergillus awamori*. At the same time, the physical and chemical indexes and transcriptome data of *Polygonatum kingianum* under different treatment conditions were determined, and the differentially expressed genes (DEGs) were verified by

收稿日期: 2025-11-11 修回日期: 2025-12-27 接受日期: 2026-02-11

作者简介: 刘蓉(1991-), 女, 博士, 主要从事药用植物学研究, E-mail: liurong@yibinu.edu.cn; 李佳慧(2005-), 女, 从事药用植物学研究, E-mail: 3475911071@qq.com; [†] 为共同第一作者, 对本文有相同的贡献

*通信作者: 吴望(1995-), 女, 硕士, 主要从事植物保护研究, E-mail: 1535670980@qq.com

基金项目: 宜宾市农业科技创新项目(2024NYCX006); 宜宾学院高层次人才“启航”计划(2022QH07; 2022QH03); 宜宾学院校级培育项目(2023PY04)

引用格式: 刘蓉, 李佳慧, 李嘉丽, 等. 生姜提取液对黄精根腐病菌的绿色防控效果及其调节机制分析[J]. 生物资源, 2026, 48(1): 37-48.

Liu R, Li J H, Li J L, et al. Analysis of the green control effect and regulatory mechanism of ginger extract on root rot pathogens of *Polygonatum* [J]. Biotic Resources, 2026, 48(1): 37-48.

qRT-PCR, and the inhibitory effect and regulatory mechanism of ginger extract on *Polygonatum* root rot were analyzed. The results showed that 2.5% and 5.0% old ginger extract exhibited good antifungal effects against both *F. oxysporum* and *A. awamori*, with the 5.0% extract achieving an inhibition rate of 42.3% against *A. awamori*. Pot experiment results showed that 7 days after inoculation, the survival rate of *P. kingianum* in the old ginger extract treatment group increased by 50%. Compared with the control group, the SOD activity in the rhizomes of *P. kingianum* in this treatment group increased and peaked at 3 days. The MDA content was significantly lower than that in the control group and the single inoculation group, and the POD activity showed a reverse trend of decreasing first, then increasing and then decreasing. The total phenol yield of *P. kingianum* rhizomes showed an upward trend after treatment with old ginger extract, reaching the peak on the 4th day and being significantly higher than that in the control group and the single inoculation group. Transcriptome sequencing combined with weighted gene co-expression network analysis (weighted gene co-expression network analysis) indicated that DEGs were significantly enriched in the phenylpropane synthesis, flavonoid synthesis and TCA cycle pathways, and 6 key candidate genes were screened out from these pathways. The qRT-PCR analysis revealed that *F5H*, *POD*, *PAL*, *CAD* and *ISD* genes were highly expressed in the IA, while the gene expression pattern of *DRA* was opposite. In summary, ginger extracts at concentrations of 2.5% and 5.0% both have favorable antifungal activity against *F. oxysporum* and *A. awamori*, respectively. Ginger extract exerts a certain protective effect on *P. kingianum* in response to root rot pathogen infection. Treatment with this extract can induce the upregulated expression of genes *CAD*, *PAL*, *POD*, and *ISD* in *P. kingianum*, thereby significantly enhancing its disease resistance and stress tolerance.

Key words: ginger extract; *Polygonatum*; root rot; antifungal mechanism

0 引言

黄精为天门冬科(Asparagaceae)黄精属(*Polygonatum* Mill.)的多年生草本植物,广泛分布于内蒙古、甘肃、黑龙江、河南、山西和浙江等地^[1]。《中华人民共和国药典》(2020年版)收录的药材黄精有3种基原物种,即滇黄精(*Polygonatum kingianum* Coll.)、多花黄精(*Polygonatum cyrtonema* Hua)和黄精(*Polygonatum sibiricum*)^[2]。现代医学药理学研究发现,黄精的主要活性成分为多糖类、皂苷类、黄酮及蒽醌类化合物,以及生物碱、木脂素、维生素等^[3]。黄精因其在药用和食品领域的显著功效而具有重要价值,市场需求也因此日益增长。随着黄精种植规模的扩大和栽培技术的不断发展,其病害问题也日益凸显。其中,由镰刀菌为主要致病菌的根腐病真菌病害严重影响了黄精的产量与品质^[4]。根腐病是一种土传病害,由多种病原菌单独或复合侵染引起,可导致作物减产甚至绝收,防治较为困难^[5]。从滇黄精中分离出了3种根腐病主要致病菌,分别为尖孢镰刀菌(*Fosarium oxysporum*)、芬芳镰刀菌(*Fosarium redolens*)和泡盛曲霉(*Aspergillus awamori*)。其中,泡盛曲霉的致病性显著强于以上2种镰刀菌^[6]。

目前,黄精根腐病的防治主要依赖化学药剂但无法根治,长期施用化学药剂容易造成病原菌的耐药性、药物残留和环境污染等问题^[7]。绿色种植发

展正成为农业领域的重要趋势。其中,生物防治是治理植物病虫害等问题以及缓解环境压力的最理想方法。生物防治是通过利用自然界中的生物因子,如天敌、微生物或植物本身的抗病机制,来控制植物病害的一种环保、可持续的病害管理方法^[8]。目前,国内外对植物根腐病的生物防治研究已取得显著进展。从健康大豆根际土壤中分离得到5株拮抗细菌,对禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)抑制率可达60%以上^[9],这5株拮抗细菌均具有产蛋白酶、纤维素酶、葡聚糖酶的活性,发酵上清液能破坏病原菌菌丝体结构抑制其孢子萌发。除拮抗作用外,研究人员还开发了如哈茨木霉等的新型生物防治剂,能够有效降低根腐病的发病率^[10]。近年来,天然植物源物质的抑菌作用已成为研究热点,相关研究为开发新型抑菌手段提供了重要参考。研究表明,大蒜提取液对灰霉病原菌具有显著的抑制作用,其作用机制主要在于能够干扰病原真菌体内蛋白质与DNA的正常合成,从而抑制其生长繁殖^[11];独角莲提取物对番茄叶霉病菌的抑制效果尤为突出,对该病菌孢子萌发的抑制率可高达99.50%^[12]。上述研究成果充分验证了天然植物源物质在抑菌领域的应用潜力,也为本研究探索植物源抑菌剂的开发与应用提供了明确且可行的方向。

生姜(*Zingier officinale* Roscoe)为姜科植物。生姜中含有大量的抑菌成分,且具有广谱抑菌性^[13]。相关研究发现,生姜提取液对酵母菌(*Saccharomy-*

ces)、嗜链球菌(*Streptococcus cristatus*)和微黄奈瑟球菌(*Neisseria subflava*)有较强的抑制作用^[14-15]。近年来,对黄精根腐病防治的报道逐年增多,但并未见关于生姜提取液对黄精根腐病防治的报道。因此,本实验以生姜提取液和滇黄精为材料,探究滇黄精根腐病的绿色防控方案,以及天然植物源物质对植物响应病原菌侵染的抗性机制。本实验结果将为绿色农业提供环保、可持续的病害管理方案,减少对化学农药的依赖,保障中药材黄精的产量与品质,推动绿色生态型种植技术的应用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验材料

滇黄精(2~3年生,采自宜宾学院后山农场药用植物种质圃)、多花黄精(2~3年生,采自宜宾学院后山农场药用植物种质圃)、老姜(种植4个月收获,市售)、嫩姜(种植2.5个月收获,市售)。

1.1.2 供试菌种

尖孢镰刀菌、芬芳镰刀菌和泡盛曲霉菌种均由宜宾学院农林与食品工程学部提供,菌种保存于4℃冰箱,活化后备用。

1.1.3 实验仪器

FA2204B型电子天平,上海精密科学仪器有限公司;LZ820型低速旋转榨汁机,九阳股份有限公司;DNP-9022Y型电热恒温培养箱,上海精宏实验设备有限公司;HH-6型数显恒温水浴锅,上海高致精密仪器有限公司;T6新世纪型紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;D3024型高速微量离心机,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;VS-1300L-U型洁净工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;XFH-50CA电热式压力蒸汽灭菌器,浙江新丰医疗器械有限公司;FastAmp-T96PCR基因扩增仪,上海宝予德科学仪器有限公司等。

1.2 致病力测试

选取大小和生长状况相似的滇黄精、多花黄精、老姜和嫩姜,在75%酒精中洗涤30 s,再用无菌水冲漂洗3次,自然风干。取尖孢镰刀菌(G2)、芬芳镰刀菌(G4)和泡盛曲霉(G6),采用针刺法^[16]进行致病力测试。用解剖针分别在滇黄精、多花黄精、老姜和嫩姜根茎上刺出小孔,再取直径约0.5 cm大小的圆形菌饼,将带菌的一面覆盖在针刺伤口上,重复3次。接种后用保鲜膜覆盖。持续观察120 h,记录病斑扩散情况,对比侵染效果及病情指数。

1.3 室内抑菌实验

1.3.1 姜汁的制备

将老姜和嫩姜洗净并进行表面消毒,各称取100 g,加入30 mL纯水用榨汁机榨取鲜姜汁^[17],形成老姜和嫩姜提取液母液,再加入无菌水将母液倍比稀释成50%、25%、12.5%、6.25%、3.12%、1.56%浓度梯度。放入灭菌的锥形瓶中用保鲜膜封口于4℃冰箱中,待用。

1.3.2 抑菌实验

采用菌丝速率生长法进行抑菌实验^[18]。将生姜提取液分别与灭菌后的PDA培养基按照1:9的比例混合均匀,制成含生姜提取液的平板,此时生姜提取液有效浓度依次为5.0%、2.5%、1.25%、0.625%、0.312%、0.156%。取直径为0.5 cm的菌饼分别在平板中央接种,每组3个重复。置28℃恒温培养箱内培养,于24、48、72、96、120 h等不同时间点取出测量菌落直径,比较不同浓度生姜提取液的抑菌效果。

抑制率=(对照菌落平均直径-处理菌落平均直径)/对照菌落平均直径×100%。

1.4 盆栽实验

本实验共设计5个处理组,分为对照组、单接菌组、接菌+后期老姜提取液组、老姜提取液+后期接菌组和单老姜提取液组(每组4株),具体处理方法见表1。其中,老姜提取液浓度由§1.3.2抑菌实验得知为5.0%。7 d后测定黄精植物的存活率、根部患病情况和株高。盆栽实验中采用针刺法对G6进行接种:将培养了7 d的泡盛曲霉,通过血细胞计数板计数法用无菌生理盐水配置成 10^6 cfu/mL的孢子悬浮液,在滇黄精块茎的中心部位用灭菌针刺小孔,用微量移液枪向孔中注入15 μ L孢子悬浮液。

1.5 理化指标检测

对不同处理条件下(对照组、单接菌组和接菌+老姜提取液组)的滇黄精进行室内的理化指标检测。将大小和生长状况相似的滇黄精表面洗净并分组,对应放入铺好纸巾的铁盘中。单接菌组接种方法按照§1.4的方法进行。接菌+姜汁组:在滇黄精块茎接种病原菌后,对块茎喷洒浓度5.0%的老姜提取液,直至块茎全部湿润。对照组和单接菌组则喷洒清水。每组4个重复,处理完后用保鲜膜覆盖,并持续保湿,在1、2、3、4 d等不同时间段取样,并放入-80℃冰箱保存,用于后续理化指标检测。其中,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑法测定^[19],过氧化物酶(peroxidase, POD)活性采用愈创木酚显色法^[20],丙二醛(malo-

表 1 盆栽实验不同处理组实验设计及测定指标

Table 1 Experimental design and determination indicators of different treatment groups in pot experiments

处理组	处理方法	测定指标(7d后)
对照组	移栽滇黄精后,浇灌 500 mL 清水;24 h 后进行常规管理。	
单接菌组	滇黄精接种 G6 后,移栽入花盆并浇灌 500 mL 清水;24 h 后进行常规管理。	1. 存活率
接菌+后期老姜提取液组	移栽已接种 G6 的滇黄精,24 h 后浇灌 500 mL 老姜提取液;再过 24 h 后进行常规管理。	2. 根部患病情况
老姜提取液+后期接菌组	预先在移栽有滇黄精的花盆中浇灌 500 mL 老姜提取液,24 h 后将滇黄精取出并接种 G6;再过 24 h 后进行常规管理。	3. 株高
单老姜提取液组	移栽滇黄精后,浇灌 500 mL 老姜提取液;24 h 后进行常规管理。	

注:常规管理为各组统一的光照、浇水、温度等培养条件。

Note: Routine management includes unified light, watering, temperature and other cultivation conditions for all groups.

ndialdehyde, MDA) 含量采用硫代巴比妥酸显色法^[21],没食子酸标准曲线以及总酚含量的测定参照文献[22]的方法进行。实验结果表明,没食子酸对照品溶液浓度在 0~0.031 2 mg/mL 范围内与吸光度线性关系良好,没食子酸标准曲线为 $y=17.633x+0.0313$, $R^2=0.98$ 。

1.6 转录组测序

本实验对滇黄精接种 G6 病原菌及浓度 5.0% 的老姜提取液处理后的不同分组进行了转录组测序分析。一共 13 个组织样本,分别包括未接菌对照组(CK),接种 G6 24h(IA),对照处理组(CT)(未接菌但用老姜提取液处理),接种后老姜提取液处理组(IAT),每组 3 个生物学重复,处理方法参照§1.5。各样品总 RNA 提取采用纯 RNA 分离试剂盒(中国天津),并使用 Agilent 2100 生物分析仪(安捷伦科技公司)评估其 RNA 完整性。然后在恒温器中把各样本的总 RNA 打成短碎片。使用 NEBNext Ultra RNA Library Prep Kit for Illumina(NEB, USA)生成 12 个测序文库。用 Illumina Hiseq 2000 平台进行测序,并生成双端读长。从原始数据中删除包含低质量 Reads 和包含 ploy-N 的 Reads,获得 Clean Reads,并在双端方法中使用 Trinity 从头组装成转录本。同时,计算 Q20、Q30、GC 含量和序列重复水平。根据序列的相似性和长度,选择最长的转录本作为单个基因进行后续分析。根据数据库对基因的功能进行注释,即 NR、KOG/eggNOG、Pfam、SwissProt、GO、KEGG。使用 DESeq 函数计算 SizeFactors 和 nbinom 检验鉴定差异表达基因(DEGs)。 $P<0.05$, 倍数变化(FC) >2 或 $FC<0.5$ 作为显著差异表达的阈值。

1.7 qRT-PCR 检测

本研究对筛选的 6 个关键基因进行了 qRT-PCR 检测分析,包括 F5H(ferulate 5 hydroxy-

lase)、PAL(phenylalanine ammonia-lyase)、POD、CAD(cinnamyl-alcohol dehydrogenase)、DRA(dihydrolipoyllysine-residue acetyltransferase)和 ISD(isocitrate dehydrogenase)。首先,从滇黄精各组样品中提取总 RNA,通过 TransScript 第一链 cDNA 合成混合液(TransGene, AT301-02)合成第一链 cDNA。使用引物 3([https://bioinfo. ut. ee/primer3-0. 4. 0/](https://bioinfo.ut.ee/primer3-0.4.0/))设计合成引物,以肌动蛋白为内参基因,采用 SYBR Green PCR 试剂盒(Qiagen)进行 qRT-PCR。所有基因做了 3 个生物学重复(每个生物学重复包含 3 个技术重复)。采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法计算基因 mRNA 表达水平。

2 结果与分析

2.1 病原菌的致病力测试

本实验在老姜和嫩姜根茎中接种根腐病病原菌并进行纵切面病斑观察,见图 1(a)。结果表明,3 种病原菌(G2, G4, G6)对老姜几乎没有致病力,对嫩姜会造成轻微伤害,但病斑并不会扩展。由此推测,生姜中可能含有某些活性成分能抑制病原菌的发展。然而,以上 3 株菌株在滇黄精和多花黄精上接种 3 d 后发病较为严重,5d 后更甚,接种部位皆出现软腐症状,为典型的根腐病,见图 1(b)。结果表明,这 3 种菌株对滇黄精以及多花黄精均有较强的致病性,致病性从强到弱依次为 $G6>G2>G4$ 。由此,本实验将 G6 单独接种滇黄精 1、2、3、4、5、6 d 后进行详细纵切观察。结果发现,滇黄精在接种 G6 菌株 3 d 后发病严重(侵染 1/3),且随着时间增加侵染程度也逐渐加深,在 6 d 时滇黄精已经被完全侵染,接种 G6 部位皆出现软腐症状,见图 1(c)。

2.2 姜提取物的抑菌测试及盆栽实验

本实验以不同浓度梯度的嫩姜和老姜提取液进行抑菌实验。实验结果表明,2.5% 和 5.0% 老姜提取液对 G2 和 G6 有较为明显的抑菌效果。其

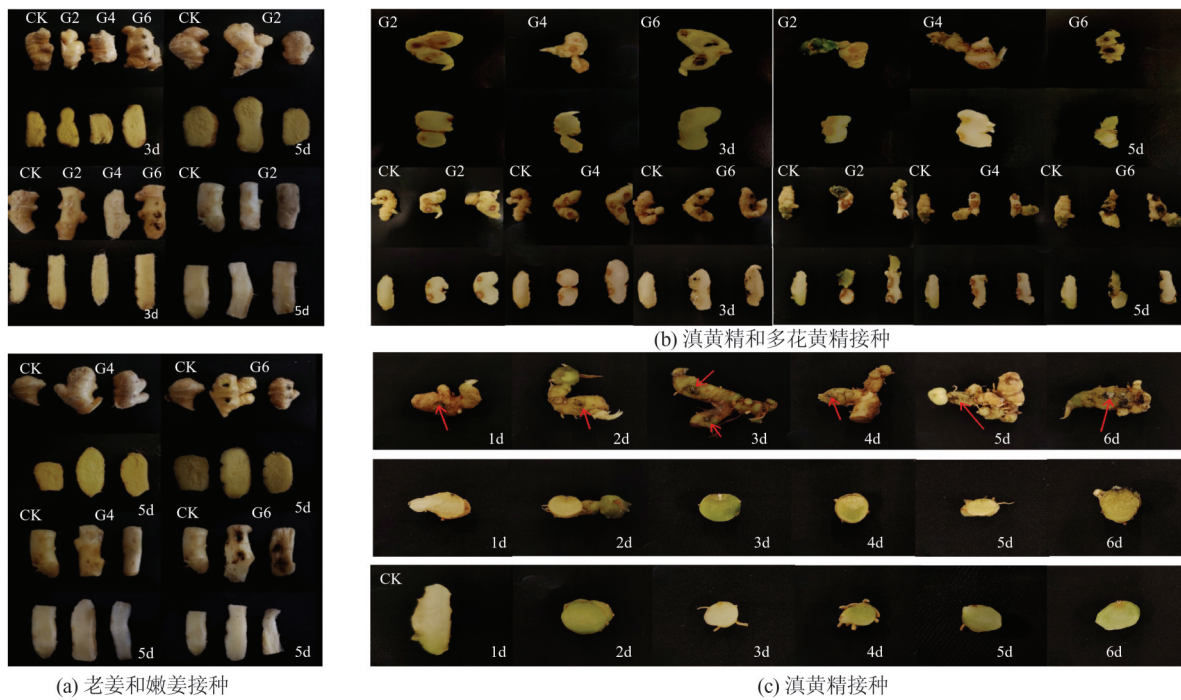


图1 根腐病致病菌的致病力测试结果

Figure 1 Results of pathogenicity tests of plant root rot pathogens

注:(a)为老姜和嫩姜接种尖孢镰刀菌(G2)、芬芳镰刀菌(G4)和泡盛曲霉(G6)3种病原菌3、5 d后感病情况;(b)为滇黄精和多花黄精接种3种病原菌3d、5d后感病情况;(c)为滇黄精接种G6后1d、2d、3d、4d、5d、6d感病情况。图中箭头所标为接种点。

Note: (a) shows the disease conditions of old ginger and young ginger after inoculation with *F. oxysporum* (G2), *F. redolens* (G4), and *A. awamori* (G6) for 3 days and 5 days. (b) shows the disease conditions of *Polygonatum kingianum* and *Polygonatum cyrtonema* after inoculation with the three pathogens for 3 days and 5 days. (c) shows the disease conditions of *Polygonatum kingianum* after inoculation with G6 for 1 day, 2 days, 3 days, 4 days, 5 days, and 6 days. The arrows in the figure indicate the inoculation points.

中5.0%老姜提取液对G6的抑制率可达到42.3% (图2)。嫩姜提取液对以上3株菌株几乎都没有抑菌效果。因此,后续盆栽实验选用5.0%老姜提取液对植物进行处理。盆栽实验结果表明,单接菌组和老姜提取液+后期接菌组发病尤为严重,滇黄精的接种点周围根茎几乎全部出现软腐现象。与对照(未接菌)相比(图3(a)),接菌+后期老姜提取液组中滇黄精根茎约1/3出现软腐现象,见图3(b)、(c)、(d)。接种7 d后进行各组的根茎纵切

观察病斑扩散程度,单接菌组和老姜提取液+后期接菌组几乎全部感染,接菌+后期老姜提取液组感染情况显著轻于前两组,见图3(f)。且单接菌组中有两株的块茎与主干连接处坏死,有脱落现象。这说明接菌后用老姜提取液处理能明显抑制病原菌的扩散。同时,通过测量实验前后各组株高,发现无显著变化。本实验结果表明,老姜提取液对滇黄精响应根腐病病原菌侵染具有一定的保护作用。

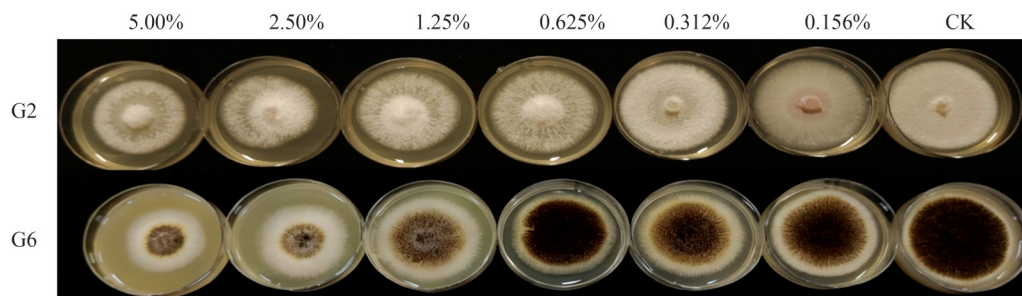


图2 不同浓度老姜提取液对尖孢镰刀菌(G2)和泡盛曲霉(G6)的抑菌效果图

Figure 2 Inhibitory effect of different concentrations of old ginger extract on *F. oxysporum* (G2) and *A. awamori* (G6)

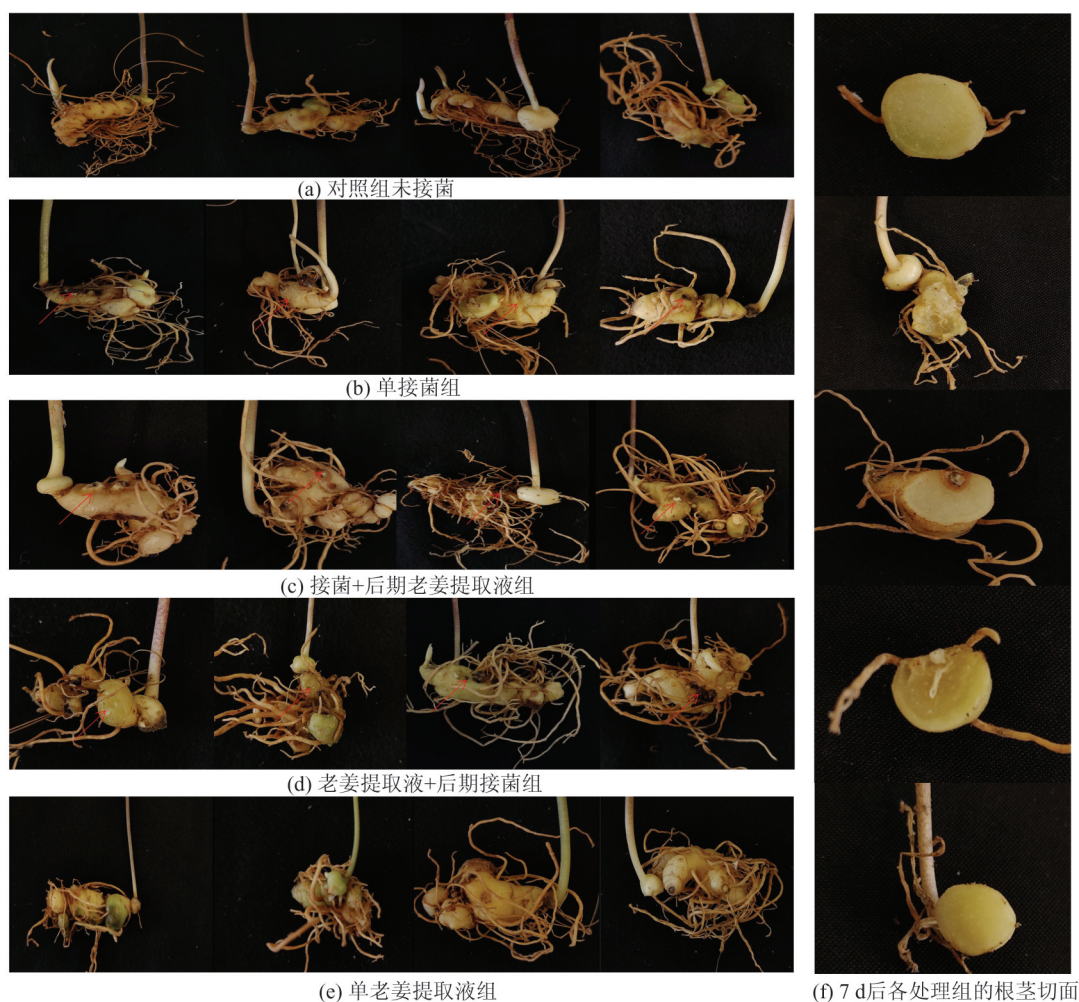


图3 不同处理组滇黄精根部表型以及7 d后各组滇黄精根部感病情况的切面

Figure 3 Root phenotypes of *Polygonatum kingianum* under different treatments and cross-sections of root disease symptoms in each group after 7 days

注:箭头所标为接种点。

Note: The arrows indicate the inoculation points.

2.3 理化指标检测

理化指标检测结果表明,与CK相比,单接菌组和接菌+老姜提取液处理组的黄精根茎中SOD活性在相同时间点均上升,且均在3 d时达到峰值,见图4(a),表明老姜提取液可通过激活抗氧化酶系统,延缓病原胁迫对滇黄精的损伤。与对照组趋势相反,老姜提取液处理后的黄精根茎POD活性呈先下降后上升再下降的趋势,见图4(b)。与CK相比,单接菌组随着接菌时间的延长MDA含量显著增加,而老姜提取液处理后MDA含量显著降低,且变化较平缓,见图4(c)。实验结果表明,对滇黄精施加老姜提取液有一定的抗氧化损伤作用。

总酚得率测定实验的结果表明,1 d时3个组总酚得率无显著差异,随着处理时间的推移,老姜提取液处理后的黄精根茎中总酚得率呈上升趋势,在4 d时达到峰值。单接菌组处理2 d时总酚得率显著低

于老姜提取液处理组 and 对照组,见图4(d)。实验表明,滇黄精在感染根腐病病原菌后其总酚含量会减少,而添加了老姜提取液的感病植株其总酚含量会增加。

2.4 转录组测序分析

转录组测序分析结果表明,整体的差异表达基因(DEG)的表达趋势变化为IA组中的基因表达量较IAT、CT和CK组高,见图5(a)。对这些DEG进行GO富集分析,结果表明,IA vs CK、IA vs IAT、CT vs IAT和CT vs IA比较组中的DEG显著富集到了“细胞对氧气水平的反应”(cellular response to oxygen levels)、“细胞对缺氧的反应”(cellular response to hypoxia)和“细胞对氧气水平降低的反应”(cellular response to decreased oxygen levels)途径中,见图5(b)。IA vs CK和CT vs CK比较组中的DEG显著富集到了“三羧酸循环”(tricarboxylic acid

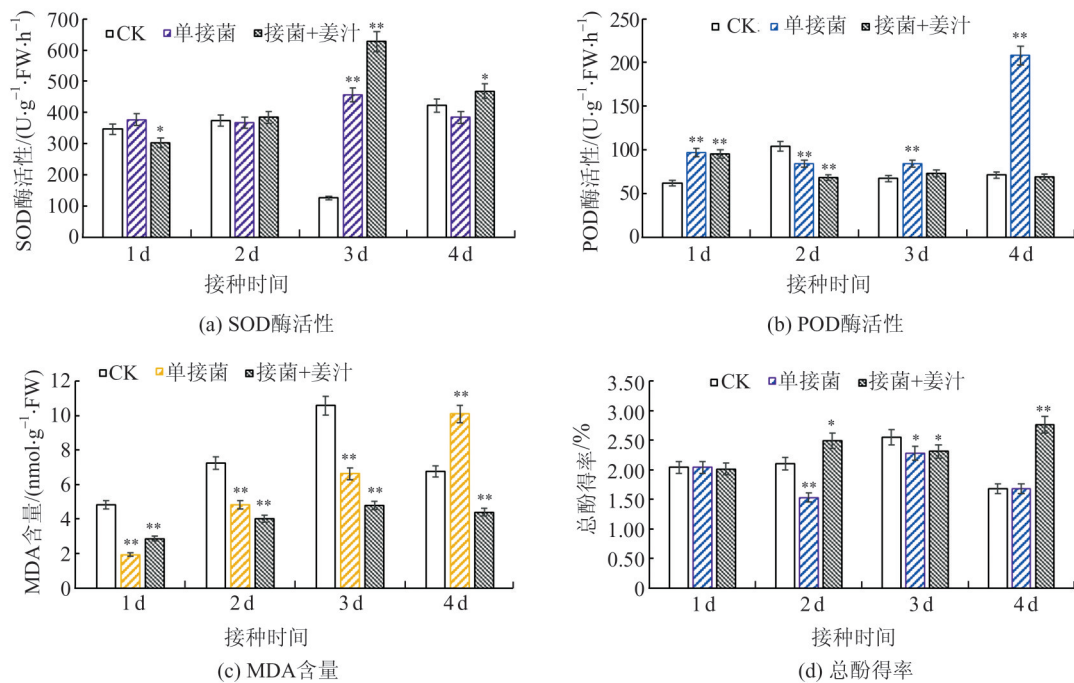


图4 不同处理条件下的理化指标变化图

Figure 4 Variation of physical and chemical indexes under different treatment conditions

注: *表示与CK相比差异显著($P < 0.05$); **表示与CK相比差异极显著($P < 0.01$)。

Note: * means significant difference compared with CK ($P < 0.05$); ** means extremely significant difference compared with CK ($P < 0.01$).

cycle)途径。IA vs CK、IA vs IAT和CT vs IA比较组中的DEG显著富集到了“苯丙烷类生物合成过程”(phenylpropanoid biosynthetic process)途径中。KEGG分析结果表明,所有比较组中的DEG均显著富集到了“苯丙烷类生物合成”(phenylpropanoid biosynthesis)和“类黄酮生物合成”(flavonoid biosynthesis)途径中,见图5(c)。除CT vs IA比较组外的其他组中的DEG均显著富集到了“柠檬酸循环”(TCA cycle)途径中。

2.5 WGCNA分析

接着,本实验对转录组数据进行了WGCNA分析。结果表明,差异表达基因一共分为14个表达模块,见图6(a)。分别对这14个模块进行相关性分析,结果表明三文鱼粉色、绿黄色和灰色这3个模块相关性系数最高,见图6(b)。将相关性最高的2个模块基因的表达模式进行详细分析,结果如图6(c)所示。三文鱼粉色和绿黄色模块中的基因表达模式略有不同,但基本均在IA组中呈现较高的表达水平。

2.6 候选基因的qRT-PCR分析

根据WGCNA分析结果,本实验筛选到6个关键候选基因参与了黄精对病原菌及老姜提取液的响应途径。包括F5H、PAL、POD、CAD、DRA和

ISD。与转录组测序结果相一致,通过qRT-PCR检测发现,F5H、POD、PAL、CAD和ISD均在IA组具有较高的表达量水平,推测其可能受到泡盛曲霉的诱导作用;而DRA基因的表达模式则与之相反(图7)。

3 讨论

根腐病主要危害黄精的根茎,对黄精产业的发展造成了严重的影响,其中镰刀菌属的真菌为其主要致病菌^[23]。本实验在滇黄精、多花黄精、嫩姜和老姜上接种了3种黄精主要的致病菌菌株——泡盛曲霉、尖孢镰刀菌、芬芳镰刀菌,并进行致病力测试。结果表明,3种致病菌对黄精的致病性依次为:泡盛曲霉>尖孢镰刀菌>芬芳镰刀菌,这与文献[6]的研究结果一致。通过后续抑菌实验验证发现,泡盛曲霉对老姜造成的病斑可能是由于其孢子本身携带较深颜色所致。因此,老姜对本研究接种的根腐病主要致病菌具有较强的抗性,老姜内可能存在一些抑菌类物质。后续用老姜提取液进行了抑菌试验。结果发现,老姜提取液对尖孢镰刀菌和泡盛曲霉有较好的抑菌效果。大多数研究报道的均为生姜对细菌的抑菌作用,鲜见对真菌有抑制作用,这也是一个新发现^[24]。

通过盆栽实验发现,老姜提取液对滇黄精有一



图5 转录组数据分析结果

Figure 5 Transcriptome data analysis results

CK: 对照组; IA: 接种泡盛曲 24 h; CT: 对照处理组; IAT: 接种后处理组

CK: the control group; IA: inoculated with *A. awamori* for 24 h; CT: the control treatment group; IAT: the post-inoculation treatment group

定的保护作用,并且接菌+后期姜汁组中病原菌的菌丝生长情况也不如其他接菌组的旺盛,这可能是由于老姜提取液使泡盛曲霉菌丝尖端扭曲,其生长

受阻,从而达到抑制菌丝生长的效果^[25]。抗氧化酶在植物抗病中起关键作用。它们通过清除活性氧(reactive oxygen species, ROS)来保护植物细胞免

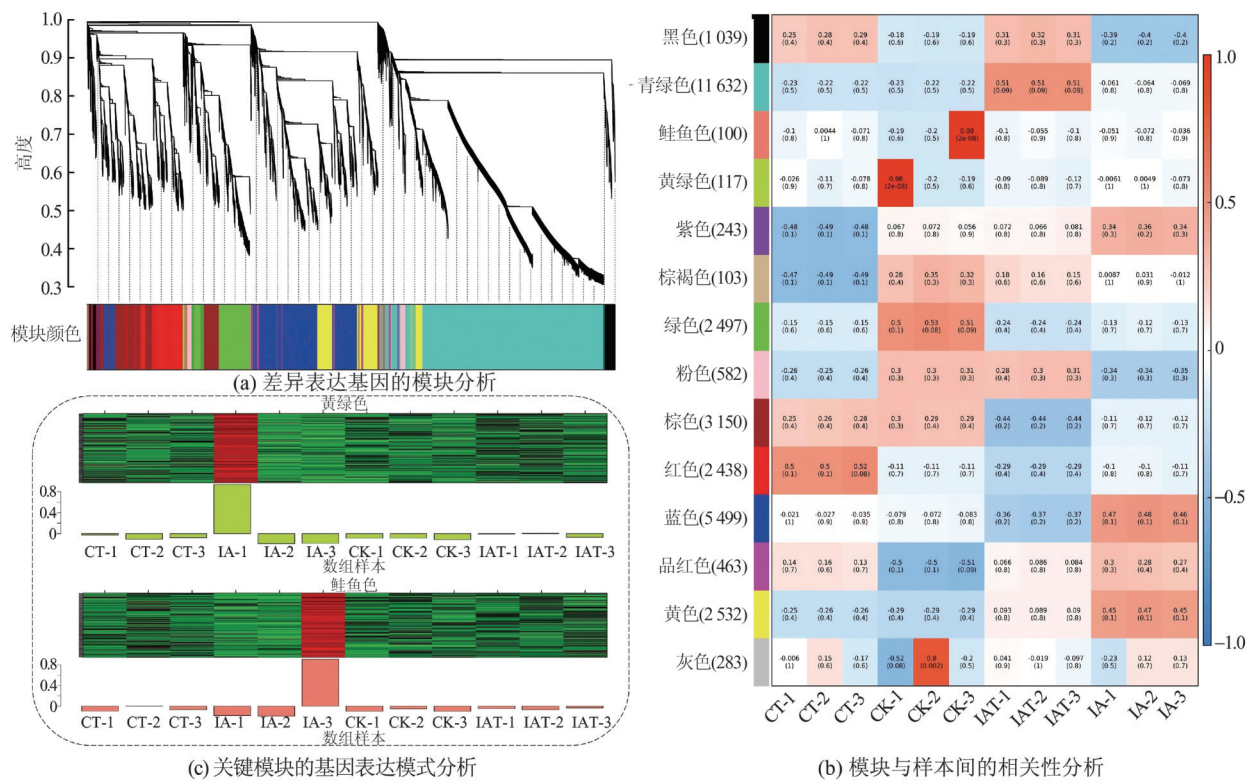


图6 转录组数据的WGCNA分析

Figure 6 WGCNA analysis of transcriptome data

CK: 对照组; IA: 接种泡盛曲霉 24 h; CT: 对照处理组; IAT: 接种后处理组

CK: the control group; IA: inoculated with *A. awamori* for 24 hours; CT: the control treatment group; IAT: the post-inoculation treatment group

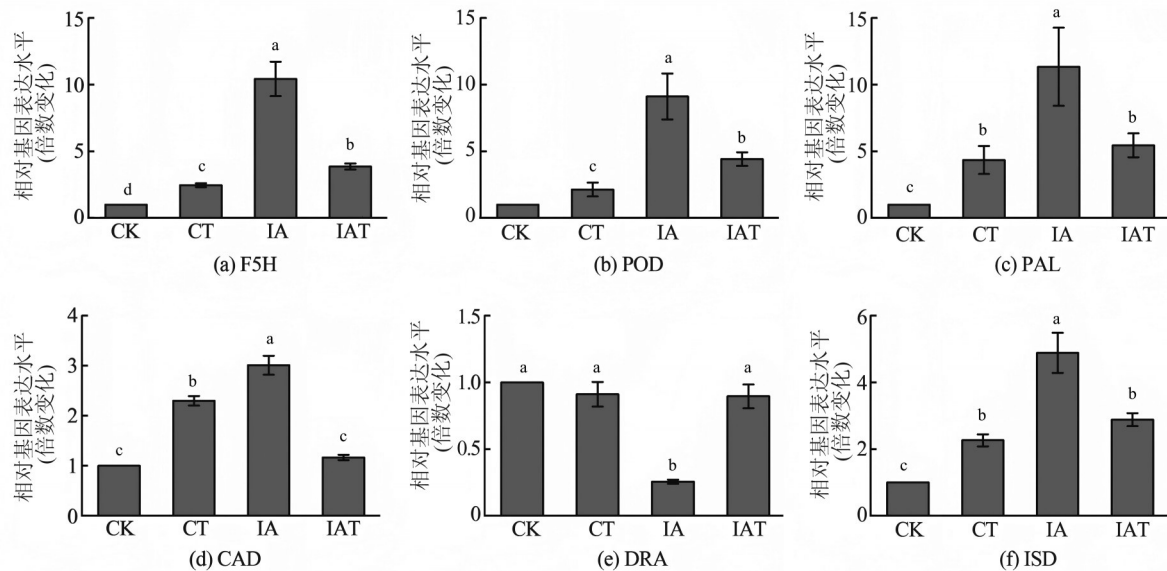


图7 关键候选基因的RT-PCR分析

Figure 7 RT-PCR analysis of key candidate genes

受氧化损伤,从而增强植物的抗病能力^[26]。植物在遭受真菌侵染后SOD活性会呈现先升高后下降趋势^[27],这与本研究的实验结果相似。此外,本实验还发现,接菌+老姜提取液处理组与单接菌组相比,滇

黄精中的SOD活性显著升高且MDA的积累量显著减少,这可能是老姜提取液通过激活抗氧化酶系统延缓了病原菌胁迫对滇黄精的损伤。

通过转录组测序和候选基因的qRT-PCR分析

发现, *F5H*、*POD*、*PAL*、*CAD*、*DRA* 和 *ISD* 等 6 个关键候选基因参与了黄精对病原菌及老姜提取液的响应途径, 且老姜提取液处理组中的 *F5H*、*POD*、*PAL*、*CAD* 和 *ISD* 基因表达量均显著高于对照组。与本研究结果相似, 研究发现, *CAD* 基因在小麦中的过量表达, 能够催化松柏醛和芥子醛还原为相应的醇类, 从而催化木质素的合成, 使细胞壁木质化程度增加, 物理屏障更厚, 限制了病原菌菌丝的穿透和扩展, 提高了植株对致病力禾谷丝核菌的抗性^[28]。在柑橘中过表达 *PAL* 会引起黄酮类合成相关基因 *CHS* 和查尔酮异构酶 *CHI* 基因的表达水平上调, 从而使类黄酮、总酚含量上升, 增强了对绿霉病的抵抗力^[29]。*POD* 基因与植物的抗病性具有正相关性。当植物被病原菌感染时, 抗病品种的过氧化物酶活性迅速上升, 利用底物(如愈创木酚、阿魏酸)将 H_2O_2 分解为水和氧气, 清除 ROS, 防止自身损伤^[30]。异柠檬酸脱氢酶作为 TCA 循环的关键限速酶, 在干旱条件下, 玉米通过 *ISD* 基因表达产生 NADPH 提供还原力, 帮助清除 ROS 并维持细胞膜稳定性^[31]。*ISD* 还参与谷氨酰胺合成途径, 能够通过调节 α -酮戊二酸的水平, 降低细胞内自由铵的毒性, 从而保护植物生长。以上研究说明, 老姜提取液处理后诱导了 *CAD*、*PAL*、*POD* 和 *ISD* 基因的表达, 从而提高了黄精植物的抗病性及抗逆性。

生姜作为一种常见农作物, 其原料获取便捷且成本相对低廉。相较于化学杀菌剂, 植物提取物普遍具有对非靶标生物毒性低、环境残留量少等显著优势。本实验得出低浓度的生姜提取液即可对致病菌有较显著的抑制作用, 一定程度上降低了对非靶标生物的潜在生态风险。基于以上研究, 为推动生姜提取液的实际应用, 后续可在实际田间进行验证性实验, 同时探索生姜提取液与其他天然产物复配使用, 利用协同作用降低单一成分的使用浓度, 从而在保证抑菌效果的同时, 减少资源消耗与环境影响。

4 结 论

实验得出以下结论: (1) 2.5% 和 5.0% 老姜提取液对尖孢镰刀菌和泡盛曲霉有较好的抑菌效果; (2) 老姜提取液对滇黄精具有明确的保护效应, 可有效减缓乃至消除其软腐症状; (3) 老姜提取液处理能够显著提高滇黄精 SOD 活性, 同时降低 MDA 积累水平, 进而激活植株抗氧化酶系统, 减轻病原胁迫引发的损伤; (4) 老姜提取液可诱导滇黄精 *CAD*、*PAL*、*POD* 及 *ISD* 基因的上调表达, 显著增强植株的抗病性与抗逆能力。本研究结果为黄精根腐病的绿色防控提供了新的理论依据与技术支持。

参考文献

- [1] 樊淑森. 黄精化学成分及其代谢组学研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
Fan S M. Chemical constituents and metabolomics of *Polygonatum sibiricum* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [2] 斯金平, 裴雨虹, 孙云娟, 等. 新兴林粮——黄精产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 113-120.
Si J P, Qiu Y H, Sun Y J, et al. Emerging forest-food crop: research on the industrial development strategy of *Polygonatum sibiricum* [J]. China Engineering Science, 2024, 26(2): 113-120.
- [3] 胡舒婷. 黄精的营养成分研究与产品试制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Hu S T. Study on nutritional components of *Polygonatum sibiricum* and trial production of its products [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [4] 高芬, 任小霞, 王梦亮, 等. 中草药根腐病及其微生物防治研究进展[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(21): 4122-4126.
Gao F, Ren X X, Wang M L, et al. Research progress in root rot diseases of Chinese herbal medicine and control strategy by antagonistic microorganisms [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(21): 4122-4126.
- [5] 刘畅, 汤丽丽. 根腐病综合防治技术研究进展[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(3): 25-27, 30.
Liu C, Tang L L. Research progress on integrated control technology of root rot [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2025, 15(3): 25-27, 30.
- [6] 李川, 陈雨睿, 胡云棵, 等. 滇黄精根腐病原菌的分离鉴定及防控药剂筛选[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(9): 1467-1476.
Li C, Chen Y R, Hu Y K, et al. Isolation and identification of pathogenic fungi and screening of prevention and control agents for root rot disease in *Polygonatum kingianum* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(9): 1467-1476.
- [7] 程单单. 多花黄精根腐病拮抗真菌可湿性粉剂的研制及评价[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024.
Cheng D D. Development and evaluation of wettable powder of antagonistic fungi against root rot of *Polygonatum multiflorum* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024.
- [8] 杨依忠. 大豆根腐病病症与生物防治技术[J]. 农家科技, 2025(7): 25-27.
Yang Y Z. Symptoms of soybean root rot and biological control techniques [J]. Farmer's Science and Tech-

- nology, 2025(7): 25-27.
- [9] 姜超, 董禹含, 孟利强, 等. 镰孢菌引发的大豆根腐病及其生物防治研究进展[J]. 大豆科学, 2024, 43(5): 656-662.
- Jiang C, Dong Y H, Meng L Q, et al. Research progress on soybean root rot caused by *Fusarium* and its biological control [J]. Soybean Science, 2024, 43(5): 656-662.
- [10] Mohamed El Khaleely Barakat, Abdel Radi Taher Ba-keer, Wallaa Fathy Mostafa. Potential of the integrated control of cucumber root rot using natural, biological and chemical methods [J]. Journal of Life Sciences, 2011, 5(2): 143-156.
- [11] 宋卫国. 大蒜提取液有效成分抑菌活性及其作用机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- Song W G. Study on the antibacterial activity and mechanism of action of active components in garlic extract [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2004.
- [12] 赵鹏, 杨态娇, 张东华, 等. 植物提取物对4株水稻病原菌的抑菌活性筛选[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(10): 2468-2473.
- Zhao P, Yang T J, Zhang D H, et al. Screening of antimicrobial activity of plant extracts against four pathogenic bacteria strains of rice [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(10): 2468-2473.
- [13] 兰景尧, 薛文通. 姜精油抑菌作用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 387-390.
- Lan J Y, Xue W T. Research progress on antibacterial effect of ginger essential oil [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(19): 387-390.
- [14] 纵凯莉, 杨婷婷, 王大全, 等. 白姜汁对口腔有害菌的抑制效果[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2023, 20(3): 86-93.
- Zong K L, Yang T T, Wang D Q, Yang J T. Inhibitory effect of white ginger juice on harmful bacteria [J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2023, 20(3): 86-93.
- [15] 杨雷鹏. 鲜姜汁对不同酵母菌抑制作用的研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(2): 35-38.
- Yang L P. Study on the inhibitory effect of fresh ginger juice on different yeasts [J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(2): 35-38.
- [16] 方仲达. 植病研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 193-195.
- Fang Z D. Methods of plant disease research [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998: 193-195.
- [17] 宫春波, 杨伟, 刘永红, 等. 鲜姜汁抑菌效果及其在鲜肉保鲜中的研究[J]. 肉类工业, 2005(4): 29-31.
- Gong C B, Yang W, Liu Y H, et al. Study on the antibacterial effect of fresh ginger juice and its application in fresh meat preservation [J]. Meat Industry, 2005(4): 29-31.
- [18] 吴文君. 植物化学保护实验技术导论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987: 141-145.
- Wu W J. Introduction to experimental technology of phytochemical protection [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1987: 141-145.
- [19] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Zou Q. Experimental instruction of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 123-124, 268-269, 274-276.
- Zhang Z L. Experimental instruction of plant physiology [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1990: 123-124, 268-269, 274-276.
- [21] Lin Z F, Li S S, Lin G Z. Relationship between superoxide dismutase as well as lipidperoxidation and the senescence in rice leaves [J]. Acta Bot Sinica, 1984, 26: 605-615.
- [22] 焦劼, 陈黎明, 孙瑞泽, 等. 不同产地黄精主要化学成分比较及主成分分析[J]. 中药材, 2016, 39(3): 519-522.
- Jiao J, Chen L M, Sun R Z, et al. Comparison and principal component analysis of main chemical components of *Polygonatum sibiricum* from different habitats [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(3): 519-522.
- [23] 韩凤, 林茂祥, 章文伟, 等. 多花黄精根腐病对根际土壤酶活性及真菌群落变化的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 53-61.
- Han F, Lin M X, Zhang W W, et al. Effects of *Polygonatum cyrtoneura* root rot on rhizosphere soil enzyme activity and fungal community [J]. Journal of Southwest University (Natural Science edition), 2021, 43(4): 53-61.
- [24] 宫春波, 杨伟, 刘永红, 等. 鲜姜汁抑菌效果的测定[J]. 中国调味品, 2005, 30(9): 50-52.
- Gong C B, Yang W, Liu Y H, et al. Study on inhibiting microorganisms of the ginger juice [J]. China Condiment, 2005, 30(9): 50-52.
- [25] 彭俊森, 林欣, 张琴, 等. 褪黑素诱导果实采后抗病性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 349-357.
- Peng J S, Lin X, Zhang Q, et al. Advances in research on postharvest disease resistance induced by melatonin [J]. Food Science, 2023, 44(9): 349-357.
- [26] 廖振锋, 刘寒, 沈媛媛, 等. 逆境胁迫下药用植物抗氧

- 化酶系统响应研究进展[J/OL]. 分子植物育种, [2023-06-14]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230613.1233.006>.
- Liao Z F, Liu H, Shen Y Y, et al. Research progress on the response of antioxidant enzyme system in medicinal plants under stress [J]. Molecular Plant Breeding, [2023-06-14]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230613.1233.006>.
- [27] 刘楚丽, 鲁海龙, 陈虹瑾, 等. 嗜果刀孢菌在野杏叶片致病过程中主要酶的种类及活性分析[J]. 果树学报, 2023, 40(4): 747-756.
- Liu C L, Lu H L, Chen H J, et al. The kinds and activities of main enzymes in the pathogenic process of shot hole disease caused by *Wilsonomyces carpophilus* in *Prunus armeniaca* [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(4): 747-756.
- [28] 罗美英. *TaCAD12* 和 *TaPK-R1* 过量表达转基因小麦的分子特性与功能分析[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- Luo M Y. Molecular characteristics and functional analysis of transgenic wheat with overexpression of *TaCAD12* and *TaPK-R1* [D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [29] 魏邻邨. 柑橘果实 PAL 基因家族的鉴定及其调控绿霉病抗病性的机理[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- Wei L L. Identification of *PAL* gene family in citrus fruits and its mechanism regulating resistance to green mold [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [30] 冯丽贞, 杨婕, 叶小真, 等. *EuPOD* 基因克隆与焦枯病菌胁迫表达分析[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(4): 392-396.
- Feng L Z, Yang J, Ye X Z, et al. Cloning of *EuPOD* gene and expression analysis under *Cylindrocladium quinqueseptatum* stress [J]. Journal of Forest and Environment, 2016, 36(4): 392-396.
- [31] Wei N N, Zhang Z R, Yang H X, et al. Characterization of the isocitrate dehydrogenase gene family and their response to drought stress in maize [J]. Plants, 2023, 12(19): 3466.