果 树 学 报 2026,43(10):2877-2888
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250646

苦豆子浸提液对尖孢镰刀菌致病性及哈密瓜幼苗防御机制的影响

杨 全[1,2],邝作玉[3],达仁•海拉提[1,2],沈正然[1,2],于今烈[1,2],薛娜娜[1,2*]

([1]新疆农业大学资源与环境学院,乌鲁木齐 830052;[2]新疆土壤与植物生态过程重点实验室,乌鲁木齐 830052;[3]伽师县农业技术推广中心,新疆伽师 844300)

摘 要:【目的】探究苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)对哈密瓜枯萎病害的防控潜力。**【方法】**采取水浸粗提取的方式制备了不同浓度(ρ,后同)的苦豆子浸提液(5 g·L^{-1}、25 g·L^{-1}、50 g·L^{-1}),以分析其对尖孢镰刀菌哈密瓜专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *melons*,Fom)生长及致病性的抑制效果。**【结果】**高浓度苦豆子浸提液可显著抑制Fom菌丝生长(P<0.001)。此外,3 d时,苦豆子浸提液可显著抑制其致病性及抗氧化功能相关基因表达(P<0.001)。Fom可显著抑制哈密瓜幼苗主根生长(P<0.05),而高浓度苦豆子浸提液能够缓解Fom对哈密瓜幼苗根系生长的负调控作用。Fom显著抑制CAT、PAL活性,对SOD、POD活性的抑制作用存在时效差异,而不同浓度的苦豆子浸提液可在一定程度上恢复4种酶活性。短期(3 d)内,苦豆子浸提液与Fom均显著抑制根系活力,且浸提液未改变Fom的抑制作用,但随时间延长可显著消减该抑制作用。**【结论】**苦豆子浸提液可显著抑制Fom生长及致病性相关基因表达,并能提高哈密瓜幼苗叶片的防御性酶活以及根系活力,以缓解Fom的致病作用。

关键词:哈密瓜;尖孢镰刀菌哈密瓜专化型;苦豆子浸提液;基因表达;酶活性;根系活力

中图分类号:S652.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)10-2877-12

Effects of *Sophora alopecuroides* aqueous extract on the pathogenicity of *Fusarium oxysporum* and on the defense mechanisms of Hami melon seedlings

Yang Quan[1,2], Kuang Zuoyu[3], Hailati Daren[1,2], Shen Zhengran[1,2], Yu Jinlie[1,2], Xue Nana[1,2*]

([1]College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; [2]Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, Xinjiang, China; [3]Agricultural Technology Promotion Center in Jiashi County, Jiashi 844300, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】The cultivation of Hami melon has a long history, establishing them as a traditional and high-value economic crop in the Xinjiang Uygur Autonomous Region. As a nationally recognized geographical indication product, the expansion of intensive agriculture has led to increased continuous cropping intensity of Hami melon, thereby exacerbating soil-borne diseases, most notably Hami melons fusarium wilt. *Fusarium oxysporumf*. sp. *melonis* (Fom) is a serious pathogen that causes crucial quality and yield loss, which is also a great threat to the green and sustainable development of the Hami melon industry in Xinjiang. In comparison with chemical fungicides, *Sophora alopecuroides* L. is rich in various alkaloids, flavonoids, and terpenoids, giving it a wide range of therapeutic potential. To investigate the potential of *S. alopecuroides* extract in controlling *Fusarium* wilt disease in Hami melon, the present study focus on clarifying the inhibitory mechanism of the *S. alopecuroides* extract on Fom and its regulatory effect on resistance of Hami melon seedlings.【Methods】Aqueous extracts of *S. alo-*

收稿日期:2025-11-24 **接受日期:**2026-03-01

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2024D01B31);新疆维吾尔自治区研究生实践创新项目(XJ2025G139)

作者简介:杨全,男,硕士,主要从事哈密瓜枯萎病害防控研究。E-mail:Quan_Yang9527@163.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:xuenana0522@xjau.edu.cn

pecuroides at different concentrations (5, 25 and 50 g·L^{-1}) were prepared to analyze their inhibitory effects on the growth and pathogenicity of Fom. Plate assays were conducted to investigate the suppression effects of the *S. alopecuroides* extract on the growth of Fom colonies and the expression of pathogenic-related functional genes. And qPCR assays were carried out to detect the copies of key genes related to biosynthesis of chitin synthetase (*Fochs* V), fusaric acid (*FUBT*), superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD). Pot experiments were performed to explore the mitigation effect of the *S. alopecuroides* extract on the pathogenicity of Fom from the perspective of the physiological characteristics and defense enzyme activities of the Hami melon seedlings.【Results】Different concentrations of *S. alopecuroides* extract inhibited the growth of Fom. Low concentration of extract (5 g·L^{-1}) had no significant effect on Fom growth in the short term (3 days and 5 days). After 7 days of treatment, the colony diameter of Fom was 6.45 cm, significantly lower than that in the control group (6.60 cm). In treatment with 25 g·L^{-1} of extract, the Fom colony diameters decreased by 15.06%, 13.61% and 5.37% respectively, compared with the control group. Beside, high concentration of *S. alopecuroides* extract (50 g·L^{-1}) could inhibit the growth of Fom, with an inhibition rate ranging from 7.4% to 17%. Results from qPCR indicated that 50 g·L^{-1} of *S. alopecuroides* extract remarkably restrained the expression of genes related to the pathogenicity and antioxidant capacity of Fom after three days of treatment. After 3 days of treatment, with the increase of the *S. alopecuroides* extract, copies of *Fochs* V decreased from 1.26 × 10^9 copies·g^{-1} to 1.32 × 106 copies·g^{-1}, and copies of FUBT decreased from 7.94 × 10^8 copies·g^{-1} to 7.94 × 10^6 copies·g^{-1}. Moreover, with 3 days treatment of 50 g·L^{-1} *S. alopecuroides* extract, the POD copies were 1.62 × 10^5 copies·g^{-1}, a significant 21% reduction compared with the control. And the SOD gene copies were 5.37 × 10^4 copies·g^{-1}, a significant 26% reduction relative to the control group. Results from the controlled pot experiments revealed that Fom had no effects on the height and real leaves number of Hami melon seedlings. Nevertheless, Fom could clearly suppressed the growth of Hami melon main roots (2.65 cm), compared to the control group (3.82 cm). Notably, 50 g·L^{-1} of *S. alopecuroides* extract application alleviated the suppression of root growth by Fom, which promoted the development of the main roots to a length of 4.25 cm. Although Fom had no significant impact on peroxidase (POD) activity, Fom significantly inhibited the activity of catalase (CAT) and phenylalanine ammonia lyase (PAL). Besides, the inhibitory effects of Fom on superoxide dismutase (SOD) varied with exposure time, as indicated by the detection results from Hami melon leaves enzyme activity. With 3d treatment of Fom, the activity of SOD was clearly inhibited, but there was no clear difference between the treatment and control group. However, with the application of *S. alopecuroides* extract, the activity of the four aforementioned enzymes was restored to varying degrees. For example, the *S. alopecuroides* extract-only treatment did not significantly affect PAL activity in Hami melon seedlings leaves in 3 days. However, results from the cross-experiment revealed that under Fom stress, the PAL activity in the combined treatment groups was significantly higher than that in the Fom-only treatment group (1 488 U·g^{-1}), even restoring the enzyme activity to a level comparable with the CK group (2 457.2 U·g^{-1}). Similar results were also observed in the root vitality test. Both *S. alopecuroides* extract (86.3 U·g^{-1} to 135.8 U·g^{-1}) and Fom (72.6 U·g^{-1}) could significantly inhibit the root activity of Hami melons with three days treatment, in comparison with the control group (139.8 U·g^{-1}). Cross-experiment results indicated *S. alopecuroides* extract did not alter the inhibitory effect of Fom on root viability in the short term (3 days). Dramatically, with increased exposure time, the extract significantly reduced the inhibitory effect of Fom on the root viability of Hami melons.【Conclusion】*S. alopecuroides* extract significantly suppresses the growth of Fom (P＜0.001) mycelial growth. And high concentration of *S. alopecuroides* extract

could inhibit the expression of pathogenicity-related genes in 3 d treatment. Although Fom remarkedly suppressed the taproot growth of Hami melon, medium to high concentrations of the *S. alopecuroides* extract could alleviate this inhibition. Furthermore, the extract of *S. alopecuroides* could mitigate the Fom-induced suppression of SOD, CAT, POD, PAL, and root vitality in Hami melon seedlings.

Keywords: Hami melon; *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*; *Sophora alopecuroides* L. extract; Gene expression; Enzyme activity; Root activity

新疆哈密瓜栽培历史悠久，是当地传统优势经济作物。2009年3月，哈密瓜获批国家地理标志产品。2022年，全球哈密瓜种植面积107.37万hm^2、产量2 846.79万t[1]，统计资料显示，当年新疆哈密瓜种植面积为10.364万hm^2，产量为213.67万t，分别占全球哈密瓜种植面积和总产量的9.7%和7.5%。然而，随着集约化农业高速发展，哈密瓜复种指数不断提高，加剧了哈密瓜土传病害等生态及生产问题[2]。枯萎病是哈密瓜生产中广泛存在的土传病害，常造成哈密瓜大面积整株枯死甚至绝收，严重降低哈密瓜产量与品质[3]。哈密瓜枯萎病发生的重要原因是土壤中存在大量致病菌，主要是尖孢镰刀菌哈密瓜专化型（*Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*，Fom）[4]。尖孢镰刀菌是一种在自然界中广泛分布且适应性极强的腐生真菌，能够以菌丝或孢子的形态越冬存活，成为翌年的初侵染源。其孢子萌发后，可由植株根系的根尖、伸长区及分生区等部位侵入，并在根系内大量繁殖形成菌丝与菌核，阻碍水分和养分运输，最终导致植株萎蔫及死亡[5]。研究表明，哈密瓜连作6年后土壤中Fom丰度提高3.58倍，连作11年可提高4.27倍[6]。该致病菌一旦侵染哈密瓜后，将难以彻底根除且数量随着连续种植年限不断增加，最终加剧病害的发生程度，并严重制约哈密瓜的产量与品质。因此，有效防治尖孢镰刀菌病害对突破哈密瓜的生产限制、推动新疆哈密瓜产业向绿色可持续方向转型具有重要意义。

几丁质合成酶基因（Fochs V）为尖孢镰刀菌关键致病基因，主要参与病原菌的根系定殖，直接影响其侵染效率[7]。*FUBT*是镰刀菌酸合成通路中的关键调控基因。研究表明，植物源活性成分能够特异性地抑制*FUBT*转录活性导致镰刀菌酸合成受阻，进而显著降低尖孢镰刀菌的毒素合成能力[8-9]。当病原菌侵染过程受到干扰时，则会启动相关防御系统。超氧化物歧化酶（SOD）与过氧化物酶（POD）是构成尖孢镰刀菌抗氧化系统的关键酶类。当尖孢镰刀菌接收到抗逆信号后，SOD催化超氧阴离子歧化，维持细胞氧化还原稳态；POD则负责清除宿主活性氧（ROS）并参与细胞壁重塑，这对病原菌在逆境中的存活具有关键作用[10-11]。研究表明，尖孢镰刀菌能够通过调控SOD和POD合成相关基因的表达进而增强自身抗逆性[12-13]。此外，许多植物抗病药剂能够靶向Fom抗氧化基因，以破坏尖孢镰刀菌的代谢稳定性[14]。

苦豆子（*Sophora alopecuroides* L.）含有氧化苦参碱、苦参碱、槐果碱等多种生物碱[15]。生物碱具有一定毒性作用，在中医药方面广泛应用，也是新型杀虫剂的主要有效成分[16]。另有研究表明，生物碱对多种植物病原菌也具有较为显著的抑制作用。如李端等[17]使用正丁醇萃取苦豆子，发现浸提液对瓜果腐霉、黄瓜枯萎病菌、番茄枯萎病菌、番茄早疫病菌、黄瓜角斑病菌和番茄疮痂病菌具有显著地抑制作用。赵庆芳等[18]发现苦豆子浸提液能够显著抑制黄芷尖孢镰刀菌和腐皮镰孢菌的生长。此外，研究表明苦参碱对茶树5种炭疽菌以及山核桃干腐病病原真菌生长具有显著抑制作用[19]。上述研究结果表明苦豆子在防控植物病害方面具有巨大应用潜力。然而，苦豆子对Fom生长及致病性的影响目前尚不清楚。因此，本试验以尖孢镰刀菌哈密瓜专化型（Fom）为研究对象，通过测定Fom菌丝生长情况、相关毒力基因表达水平，并探究其对哈密瓜植株生长指标、抗逆性酶活性及根系活力的影响，旨在从“病原菌生长-致病性-植株响应”三维角度，探讨不同浓度苦豆子浸提液对Fom生长及致病性的影响，以期为深化哈密瓜枯萎病害绿色防控研究提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　材料

供试植物为86-1型哈密瓜，购于昌吉市金丰种业有限公司；供试菌株为Fom，购自国家农业微生物

保藏中心（菌种编号：ACCC36102）。

苦豆水浸提液的制备：苦豆子于2024年9月采自新疆乌鲁木齐三坪农场，去除根及豆荚后干燥，经研磨机粉碎。取100 g粉末加入1 L灭菌去离子水中，于4 ℃（防止发酵）静置24 h。粗提液经50目两层纱布挤压过滤后，置于超净台中，采用无菌针式滤器（0.45 μm水系膜）进行二次过滤，滤液（即100 g·L^{-1}苦豆子水浸提液）于4 ℃冰箱冷藏备用[20]。

1.2 菌种活化及抑菌试验

Fom菌株使用马铃薯葡萄糖琼脂培养基（Potato dextrose agar，PDA）进行培养。PDA固体培养基配制方法：取200 g去皮马铃薯切成小块，加水至约1 L，煮沸20 min后经四层纱布过滤，滤液中加入20 g琼脂粉，待琼脂粉溶解后加入20 g葡萄糖，去离子水定容至1 L，121 ℃高温蒸汽灭菌20 min。Fom液体培养基除不加琼脂粉外，其余配制方法与上述一致[21]。

Fom计数：将液体培养基中Fom悬液，2000 r·min^{-1}离心10 min，去除上清液后，使用0.05%吐温-80灭菌水溶液润洗，在磁力加热搅拌器上振荡使其均匀分散，吸取0.1 mL孢子悬浮液滴入血球计数板中进行计数[22]。

Fom生长测定：Fom固体培养基高温灭菌后，待温度降至约50 ℃时，分别加入苦豆子水浸提液，使其终浓度（ρ，后同）依次为5 g·L^{-1}、25 g·L^{-1}、50 g·L^{-1}。将固体培养基（约30 mL）倒入9 cm平板中，每个处理5次重复，于无菌操作台中静置12 h，待其凝固。使用5 mm打孔器将活化且长势一致的Fom菌饼接种至相应处理平板中。使用封口膜密封后，置于28 ℃恒温避光培养箱中，每日观察并测量菌饼直径[23]。Fom生长抑制率/%＝（对照组直径－处理组直径）/（对照组直径－接种直径）×100。

1.3 盆栽试验

将哈密瓜种子浸入75%乙醇中30 s，随后转入55~60 ℃温水中，持续搅拌15~20 min；待水温自然降至30 ℃后，浸种6~8 h，取出置于湿润脱脂棉上保湿；约24 h后种子露白，将其播种至育种盘中（育种土壤采用哈密瓜瓜田土，经紫外消杀3 d后磨碎过2 mm筛）。待哈密瓜幼苗长至两叶一心时进行处理（表1），其中Fom仅在处理第1天进行接种。以苦豆子浸提液代替日常浇水进行浇灌，于处理14 d后观察并记录植物生长情况（株高、主根长及真叶数量）[24]。

表1 试验处理

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	编号 Number	备注 Remarks
对照组 Control	CK	等体积无菌水 Sterile water with equal volume to the treatment group
苦豆子浸提液 *Sophora alopecuroides* extract	J1	5 g·L^{-1}
	J2	25 g·L^{-1}
	J3	50 g·L^{-1}
苦豆子浸提液+Fom *Sophora alopecuroides* extract+Fom	P	0 g·L^{-1}+2×10^{8} CFU
	PJ1	5 g·L^{-1}+2×10^{8} CFU
	PJ2	25 g·L^{-1}+2×10^{8} CFU
	PJ3	50 g·L^{-1}+2×10^{8} CFU

1.4 DNA提取与基因表达检测

分别于第3、5、7天使用接种铲将Fom孢子转移至RNase free离心管中用于后续荧光定量PCR检测，每个处理4次重复。Fom菌丝DNA提取采用试剂盒法（Omega），所有操作均严格按照试剂盒说明书进行[25]。将质粒原液预稀释50~100倍，依次用ddH_2O开展连续10倍梯度稀释，制备8个梯度模板，浓度范围为n×10^{10}~n×10^{3}copies·μL^{-1}，每个模板3次重复。质粒拷贝数/（copies·μL^{-1}）=6.02×10^{23}×n×10^{-9}/（L×660），L为质粒长度。特异性引物如表2所示[26]。

1.5 哈密瓜酶活性测定

分别于3、7、14 d采集哈密瓜叶片及根系组织，用以检测哈密瓜幼苗叶片超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（Peroxidase，POD）、苯丙氨酸解氨酶（Phenylalanine ammo-nialyase，PAL）和过氧化氢酶（Catalase，CAT）活性以及根系活力（脱氢酶）。检测试剂盒均购置于苏州格锐思生物科技有限公司。所有操作流程均按照说明书进行，采用酶标法进行检测，每个处理4次生物学重复。

表 2　基因引物名称及序列

Table 2　Gene primer name and sequence

基因 Gene	引物 Primer	序列（5'−3'） Sequence (5'−3')	备注 Remarks
Fochs V	FochF	TCTTTTCCCCATCCAAGTGTCT	镰刀菌致病性关键基因 Key pathogenicity genes of *Fusarium*
	FochR	GTGATGTTGGTGTTTCGGTTGT	
FUBT	FUBTF	GGAGCCTGAAGACAGATTGC	镰刀菌酸合成相关关键基因 Fusaric acid biosynthesis-related key gene
	FUBTR	CCGATAATAGGGACGATCCA	
SOD	SODF	GGTCCTCACTTCAACCCTCA	镰刀菌超氧化物歧化酶基因 *Fusarium SOD* gene
	SODR	AGTCGGTGACAGAGCCCTTA	
POD	PODF	GGTCCTCACTTCAACCCTCA	镰刀菌过氧化物酶基因 *Fusarium POD* gene
	PODR	GTAGCATCCTGCTGGTCGAT	

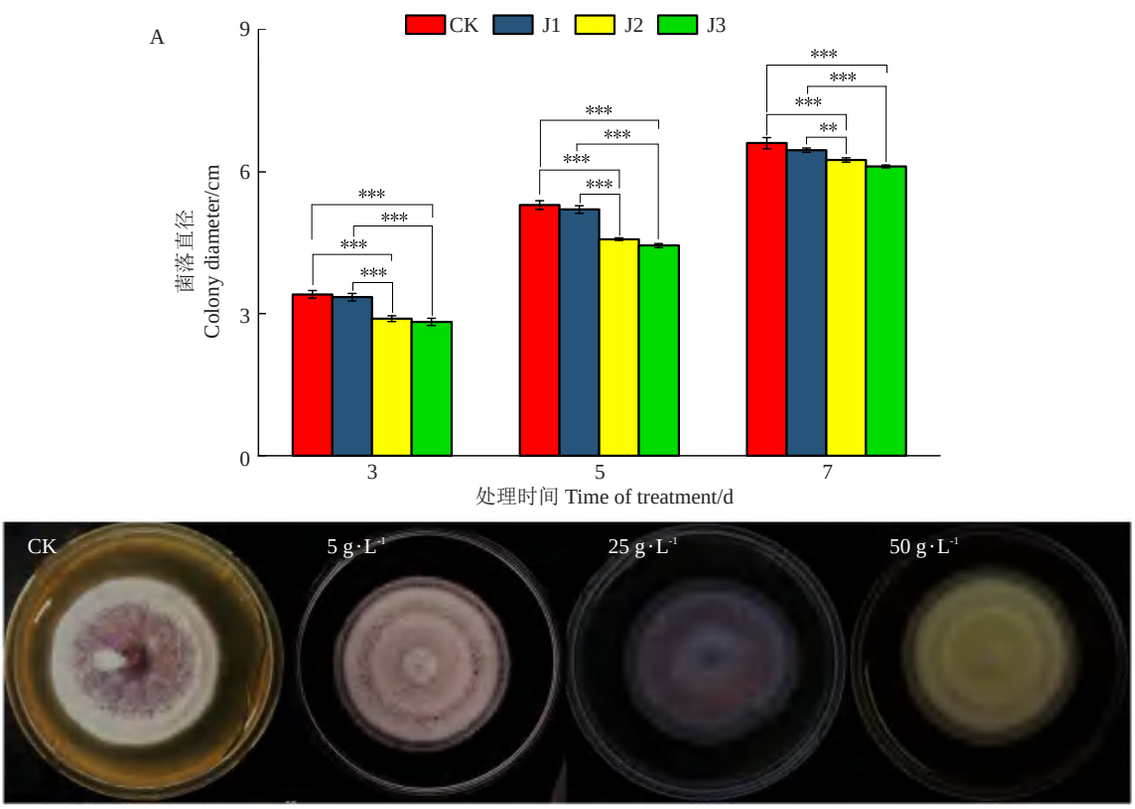
1.6　数据处理

使用 Origin 2021 软件中的 Paired Comparison Plot Apps 插件进行方差分析；采用最小显著差异法（LSD）进行多重比较分析；Fom 菌落直径及试验过程中采集的植株形态图片使用 Image J 软件进行测量与标注。

2　结果与分析

2.1　不同浓度苦豆子浸提液对 Fom 生长的影响

由图 1 可知，不同浓度苦豆子浸提液均可抑制 FOM 生长，抑制效果随浸提液浓度增大而增强。低浓度苦豆子浸提液（5 g·L^{-1}）在短期内（3 d 及 5 d）对 FOM 生长并无显著影响；而在处理 7 d 时，FOM 菌落直径为 6.45 cm，低于 CK（6.60 cm），降低了 0.62%~4.41%。在 25 g·L^{-1} 处理中，抑制率分别为 17.5%、15.2% 及 5.7%；而在 50 g·L^{-1} 处理中，抑制率分别为 19.9%、18.9% 以及 8.0%，表明中高浓度苦豆子浸提液（25 g·L^{-1} 及 50 g·L^{-1}）对 FOM 生长的抑制作用随



*、**和***分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$ 和 $P<0.001$ 差异显著；ns 表示无显著差异。下同。

*, ** and *** indicate significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively; ns indicate no significant difference. The same below.

图 1　不同处理组 Fom 菌饼直径变化（A）及 7 d 时生长情况（B）

Fig. 1　Changes in colony diameter of Fom under different treatments (A) and growth status at 7 days (B)

处理时间的延长而减弱。

2.2 Fom毒力相关基因鉴定

由图2可知（图中基因拷贝数经过 $\log_{10}$ 对数转换），苦豆子浸提液短期处理（3 d）可降低Fom的致病性及抗氧化能力，而长期处理（7 d）则无显著影响。处理3 d时，随着苦豆子浸提液浓度的增加，*Fochs* V基因拷贝数由 1.26×10^{9} copies·g^{-1} 降低至 1.32×10^{6} copies·g^{-1}；*FUBT* 基因拷贝数由 7.94×10^{8} copies·g^{-1} 降至 7.94×10^{6} copies·g^{-1}。此外，50 g·L^{-1} 苦豆子浸提液处理3 d时，*POD* 基因拷贝数为 1.62×10^{5} copies·g^{-1}，较CK显著下降21%；*SOD* 基因拷贝数为 5.37×10^{4} copies·g^{-1}，较CK显著下降26%。当处理时间为5 d时，仅低浓度苦豆子浸提液（5 g·L^{-1}）可以显著抑制 *Fochs* V、*FUBT* 以及POD、SOD合成相关基因表达，基因拷贝数分别下降了3.0%、3.5%、4.3%以及3.7%。

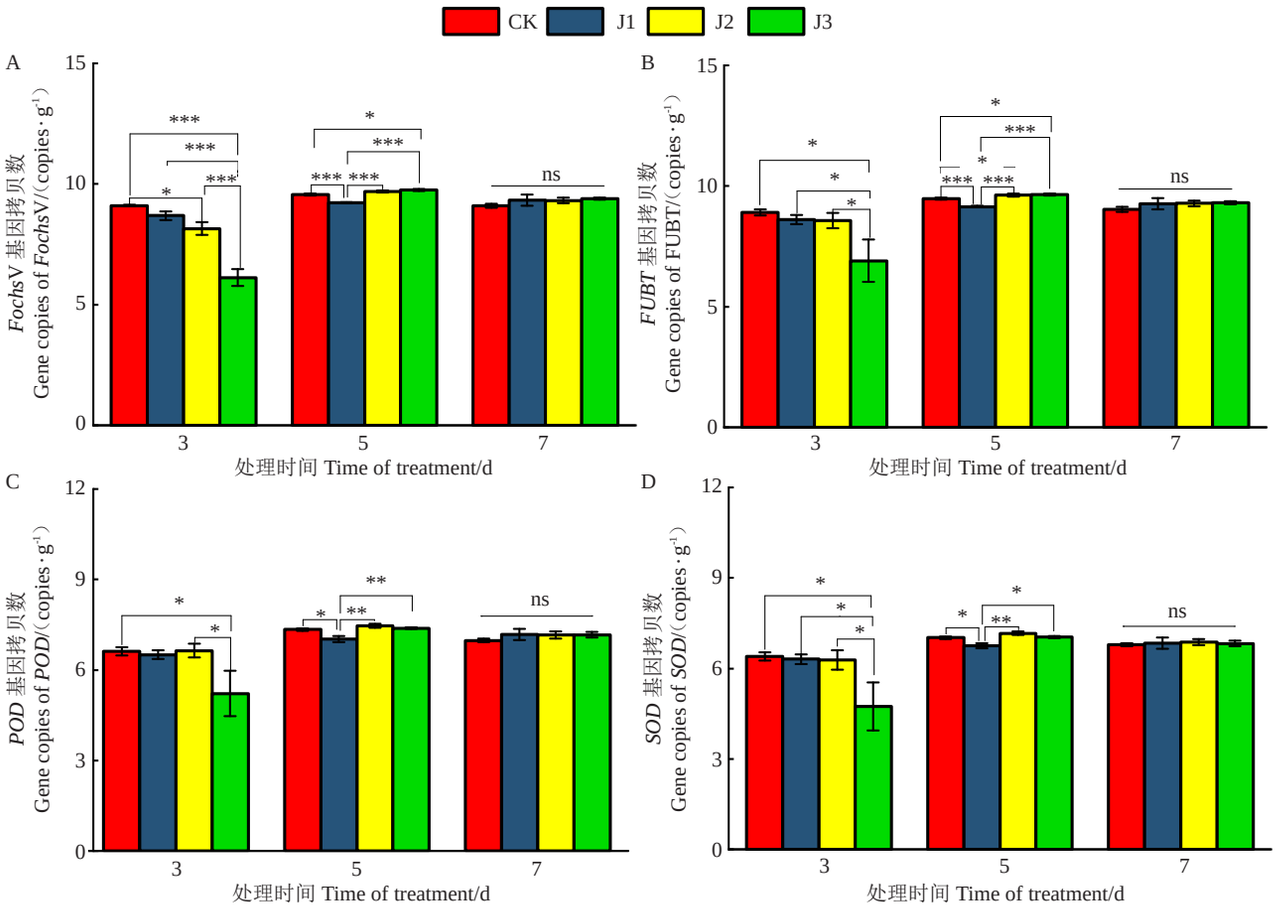


图2 不同处理组 *Fochs* V（A）、*FUBT*（B）、*POD*（C）以及 *SOD*（D）基因拷贝数的变化

Fig. 2 Changes in the gene copies of *Fochs* V (A), *FUBT* (B), *POD* (C) and *SOD* (D) of different treatment groups

2.3 不同浓度苦豆子浸提液对植物生长指标的影响

由表3可知，苦豆子浸提液处理14 d可促进哈密瓜植株生长。Fom主要抑制哈密瓜主根生长，而苦豆子浸提液可以显著降低Fom对哈密瓜主根生长的抑制作用。在不接种Fom的情况下，仅J1处理组主根长度略低于CK，其余处理组哈密瓜幼苗的

表3 处理14 d哈密瓜幼苗生长指标（*n*=10）

Table 3 Growth indicators of Hami melon seedlings with treated for 14 days (*n*=10)

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	主根长 Taproot length/cm	真叶数 Number of real leaves
CK	18.63±0.97 d	3.82±0.15 cd	4.4±0.52 e
J1	25.92±2.55 c	3.74±0.14 cd	6.3±0.82 c
J2	31.66±3.46 b	3.87±0.23 c	6.7±0.48 bc
J3	36.31±1.95 a	4.67±0.32 a	7.6±0.52 a
P	17.18±1.64 d	2.65±0.22 e	4.2±0.42 e
PJ1	26.30±2.97 c	2.39±0.22 f	5.6±0.52 d
PJ2	31.96±3.09 b	3.64±0.20 d	7.2±0.79 ab
PJ3	27.76±2.21 c	4.25±0.26 b	6.5±0.53 c

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: Different small letters indicate significant differences among different treatments in the same column at $P < 0.05$. The same below.

株高、主根长及真叶数量均随苦豆子浸提液浓度升高呈增加趋势，较CK分别增加了39.1%~94.8%、1.3%~22.0%及43%~72%。而在接种Fom后，PJ1~PJ3处理组的株高及真叶数量，相较P处理组分别增加了53%~61%和33%~42%。PJ1处理组主根长显著低于P处理组；PJ2处理组主根长显著高于P处理组，但与CK无显著差异；PJ3处理组主根长为4.25 cm，显著高于P处理组及CK，分别增加了60%和12%。同时，仅P处理组哈密瓜幼苗根系均出现不同程度褐变（图3）。

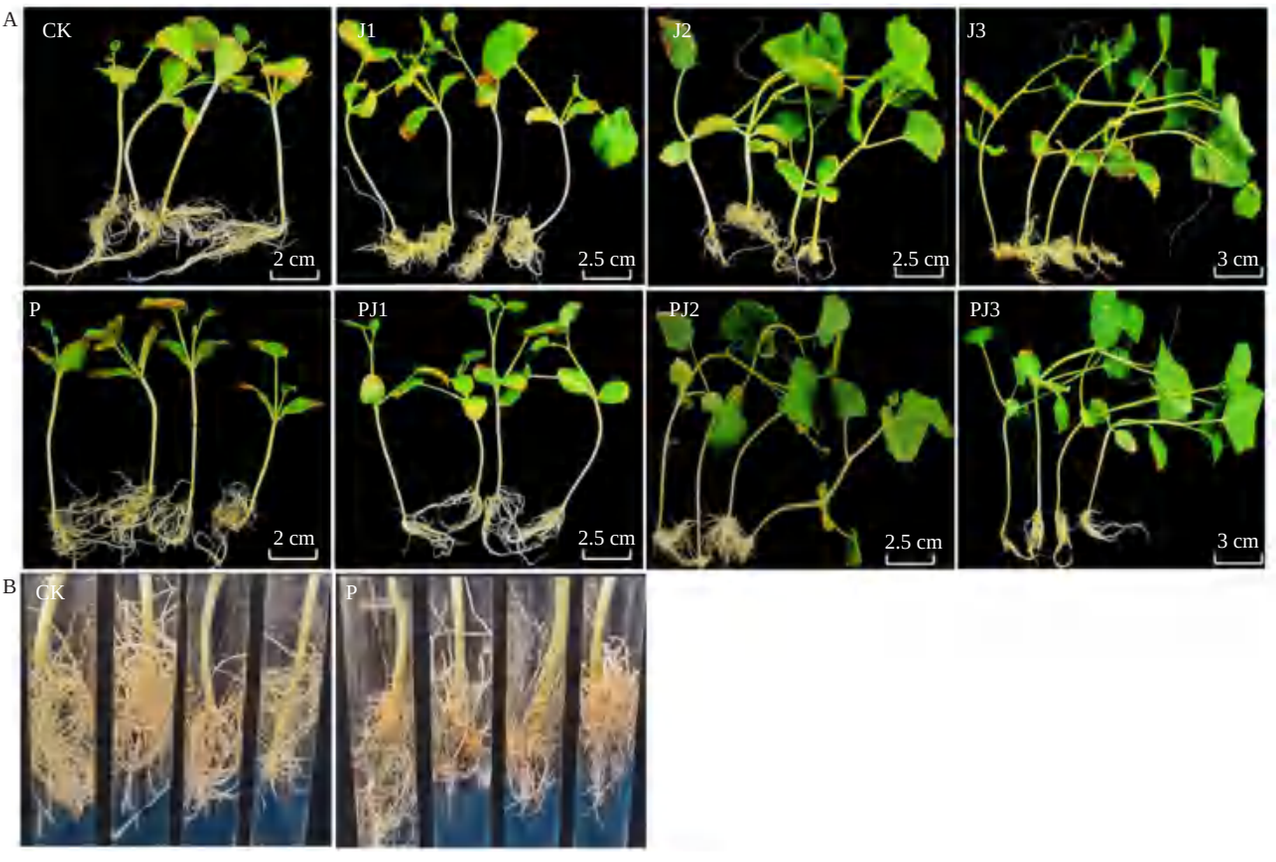


图3　各处理14 d时植株形态（A）及根系生长情况（B）

Fig. 3　Plant morphology of different treatments at 14 days (A) and root comparison between control and pathogen-treated groups (B)

2.4　不同浓度苦豆子浸提液对哈密瓜幼苗叶片防御性酶活性的影响

2.4.1　*哈密瓜幼苗叶片超氧化物歧化酶活性分析*　由图4-A可知，在试验周期内P处理下SOD活性较CK显著下降；在3 d时，J1~J3处理下SOD活性均低于CK，且50 g·L^{-1}苦豆子浸提液处理（J3）下SOD活性最低（177 U·g^{-1}），仅为CK的40%；PJ2与PJ3处理显著高于P处理（190·Ug^{-1}），并且PJ3处理与CK无显著差异。在7 d时，J1处理下SOD活性为156 U·g^{-1}，显著低于除P处理外其他试验组；而J2处理则最高（297 U·g^{-1}），显著高于CK和P处理（P<0.05），分别提高16.4%和38.6%；PJ1~PJ3处理均显著高于P处理。在14 d时，仅J2处理SOD活性（268 U·g^{-1}）显著高于CK（214 U·g^{-1}）及P处理（174.7 U·g^{-1}）；在PJ1~PJ3处理下SOD活性显著高于P处理，而与CK无显著差异，表明在Fom胁迫下添加苦豆子浸提液可提高SOD活性。

2.4.2　*哈密瓜幼苗叶片过氧化物酶活性分析*　由图4-B可知，Fom处理并未显著改变哈密瓜POD活性。在3 d时，各处理间无显著差异。在7 d时，J1~J3处理下POD活性显著高于CK（658.5 U·g^{-1}）和P（579.7 U·g^{-1}）处理，其中以J2处理最高（1128 U·g^{-1}），分别为CK和P处理的1.71和1.94倍。而在Fom胁迫条件下，PJ1处理下POD活性显著高于P组；然而随着苦豆子浸提液浓度的升高，PJ3处理显著低于PJ1和PJ2，而与P无显著差异。在14 d时，J3处理下

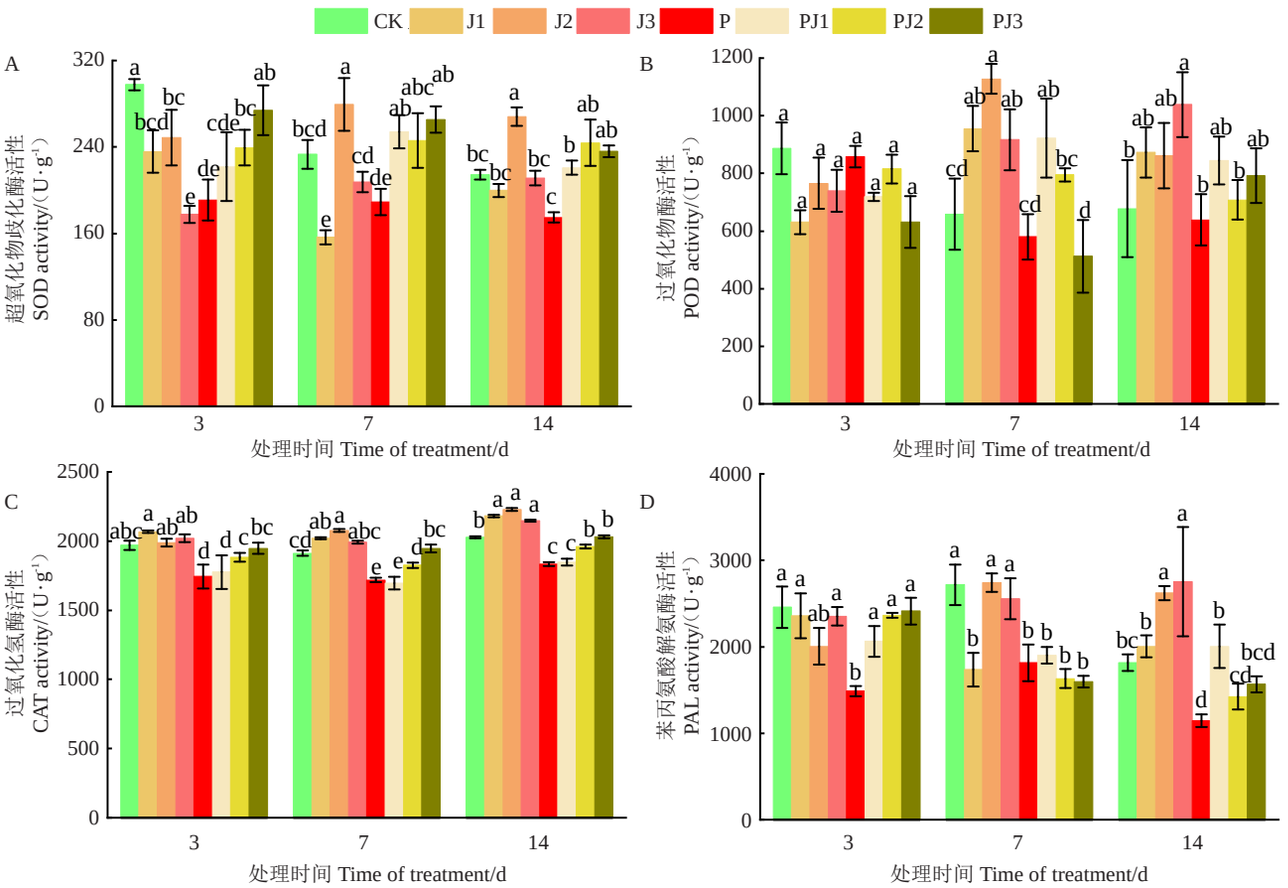


图 4　不同处理下哈密瓜幼苗的酶活性

Fig. 4　Enzyme activity of Hami melon seedling leaves in different treatment groups

POD活性显著高于CK与P处理；而PJ1~PJ3处理与CK（677.2 U·g^{-1}）及P（638.7 U·g^{-1}）均无显著差异。

2.4.3　哈密瓜幼苗叶片过氧化氢酶活性分析　由图4-C可知，Fom处理可显著降低哈密瓜叶片CAT活性。在3 d时，相比CK（1 970.2 U·g^{-1}），单独施用苦豆子浸提液（J1~J3）并未显著改变CAT活性；而在Fom胁迫条件下，CAT活性随苦豆子浸提液浓度升高呈上升趋势。在7 d时，J1和J2处理下CAT活性显著高于CK（1 911.8 U·g^{-1}）；而在Fom胁迫条件下，尽管PJ1（1 695.9 U·g^{-1}）与P（1 718.5 U·g^{-1}）处理间无显著差异，但PJ2~PJ3中CAT活性显著上升。在14 d时，J1~J3处理可显著提高CAT活性。此外研究发现与3、7 d类似，在Fom胁迫条件下，苦豆子浸提液均可提高CAT活性，表明苦豆子浸提液可以减轻Fom侵袭导致的叶片氧化应激损伤。

2.4.4　哈密瓜幼苗叶片苯丙氨酸解氨酶活性分析　由图4-D可知，Fom处理显著抑制了PAL活性。在3 d时，苦豆子浸提液（J1~J3）并未显著改变PAL活性；但在Fom胁迫条件下，PJ1~PJ3处理显著高于P处理（1488 U·g^{-1}），并恢复至与CK（2 457.2 U·g^{-1}）一致水平。在7 d时，低浓度苦豆子浸提液可显著抑制PAL活性，而高浓度苦豆子浸提液并未显著改变PAL活性；同时，相比P处理（1814 U·g^{-1}），PJ1~PJ3处理并未显著改变PAL活性。在14 d时，PAL活性随苦豆子浸提液浓度升高呈上升趋势；但在Fom胁迫条件下，低浓度苦豆子浸提液（PJ1）可显著提高PAL活性（2005 U·g^{-1}），而高浓度处理与P处理间无显著差异。

2.5　不同浓度苦豆子浸提液对哈密瓜幼苗脱氢酶活性的影响

由图5可知，Fom可显著抑制哈密瓜幼苗脱氢酶活性。在整个研究周期内，P处理下幼苗脱氢酶活性相比CK依次下降了48%、54%、68%。在3 d时，脱氢酶活性随苦豆子浸提液浓度升高而降低；在7 d时，J1和J2处理脱氢酶活性分别为126 U·g^{-1}和131 U·g^{-1}，显著高于CK（98 U·g^{-1}）；在14 d时，J1~J3处理哈密瓜脱氢酶活性分别为126 U·g^{-1}、144 U·g^{-1}和106 U·g^{-1}，显著高于CK。在Fom与苦豆子浸提液交互处理中（PJ1~PJ3），3 d时，与P处理无显著差

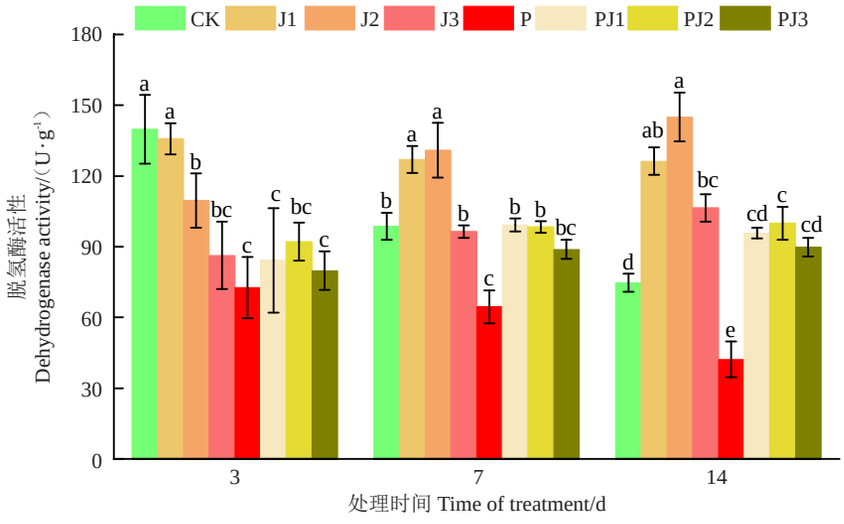


图 5　不同处理下哈密瓜幼苗根系的脱氢酶活性

Fig. 5　Root dehydrogenase activity of Hami-melon seedlings with different treatments

异；7 d 时，PJ1（99 U·g^{-1}）和 PJ2（98 U·g^{-1}）脱氢酶活性显著高于 P 处理（64 U·g^{-1}）；14 d 时，PJ1~PJ3 处理脱氢酶活性分别为 95 U·g^{-1}、99 U·g^{-1} 和 89 U·g^{-1}，显著高于 P 处理（42 U·g^{-1}）。上述结果表明，在处理初期，中高浓度苦豆子浸提液对哈密瓜幼苗脱氢酶活性具有显著抑制作用，但处理后期各试验浓度均可显著提高哈密瓜幼苗脱氢酶活性。

3　讨　论

在面对逆境胁迫时，超氧化物歧化酶是植物抗氧化防御体系的第一屏障[27]；过氧化物酶在木质素合成等植物抗病防御过程中具有重要作用[28]；过氧化氢酶可高效催化过氧化氢以防止产生羟基、自由基而使植物受氧化应激损伤[29]；苯丙氨酸解氨酶参与植物木质素合成及细胞壁构建等，在植物抗逆境和抗病过程中扮演重要角色[30]，4 种酶协同作用可形成关键的抗氧化防御机制[31-32]。在植物抗病研究中，上述酶活性变化常用于反映植株抗病能力的强弱。本研究发现，Fom 侵染明显抑制了哈密瓜叶片中 CAT、POD、PAL 和 SOD 活性，表明 Fom 破坏哈密瓜叶片的活性氧代谢稳态，并阻碍苯丙烷类等抗病物质的合成途径，从而降低哈密瓜的抗病性。此外，施加不同浓度的苦豆子浸提液处理，可有效缓解 Fom 对上述酶系的抑制作用，表明苦豆子浸提液可通过增强哈密瓜叶片的抗氧化防御能力并激活 PAL 抗病途径，提高哈密瓜对 Fom 的抗性，促进木质素、植保素等物质合成，以此削弱 Fom 的定殖能力以及毒性作用。此外，根系脱氢酶活性是衡量植物根系代谢活力的关键指标，能够直接反映植株呼吸与能量代谢的强弱[33]。在本研究中，Fom 侵染显著抑制哈密瓜根系活力，表明 Fom 通过影响哈密瓜根系呼吸代谢和能量供应，降低其对自身的抵抗能力；而施加不同浓度的苦豆子浸提液可在一定程度上降低 Fom 对哈密瓜根系活力的抑制作用。然而，在试验早期（3 d），苦豆子浸提液可抑制根系活力，这可能与植物的化感作用有关[34]。

苦豆子浸提液对尖孢镰刀菌哈密瓜专化型（Fom）的菌丝体生长存在显著的抑制作用，且与浓度梯度呈正相关。这与 Jangir 等[35]关于苦参碱对番茄枯萎病菌的效应规律一致。Ayhan 等[36]研究表明尖孢镰刀菌在植物源抑菌物质持续作用下，能够通过调整细胞膜组成、激活抗氧化系统等方式增强自身耐受性，从而减弱抑菌物质的作用效果。处理 7 d 时的抑制效果显著低于 3 d、5 d，可能的原因：一方面病原菌在苦豆子浸提液的作用下产生了适应性应答；另一方面苦豆子浸提液中的生物碱、黄酮类等活性成分随时间逐步降解[37-38]。此外，苦豆子浸提液能够显著抑制 Fom 致病性相关基因（*Fochs* V 及 *FUBT*）及抗氧化能力相关酶合成基因（SOD 和 POD）的表达。

镰刀菌酸与镰刀菌的致病性直接相关[39]。Urlacher 等[40]研究表明镰刀菌病原菌毒素合成可显著影响镰刀菌对宿主组织的侵染效率。在本研究中，苦豆子浸提液可抑制 *Fochs* V 基因表达。这一过程直接破坏病原菌细胞壁的完整性，导致菌丝生长受阻，同时降低病原菌形成侵染钉等入侵结构的能力，进而削弱其对寄主根系的定殖与侵染效率。此外，

苦豆子浸提液中含有黄酮类化合物（如槲皮素、山柰酚等），可协同其他抑菌组分加强阻断效应[41]。黄酮类成分能干扰真菌细胞内的信号转导通路，推测其可能间接抑制相关毒力基因的表达，辅助降低镰刀菌酸产量。Xiong等[42]研究表明苦参碱可以靶向抑制cAMP（环腺苷酸）/PKA（蛋白激酶A）信号通路，基于这一通路调控的共性机制，推测苦参碱作用Fom时，可以通过抑制细胞内cAMP浓度，导致PKA激酶磷酸化水平下降。这一变化直接削弱转录因子对毒素合成基因簇的转录激活能力[43]，从而进一步抑制*FUBT*介导的镰刀菌酸合成转运通路，降低其致病性。此外，镰刀菌酸还会抑制宿主水杨酸（SA）、茉莉酸（JA）抗病信号通路[13]。因此，苦豆子浸提液可能通过缓解镰刀菌酸对SA/JA通路的抑制效果，恢复并强化哈密瓜的防御能力，从而实现对Fom侵染的防控。

病原菌在侵染宿主时，其抗氧化能力及能量供应严重依赖氧化还原系统[44]。因此，降低POD和SOD活性对抑制Fom抗逆境能力具有重要作用。研究表明，苦豆子植株富含生物碱类以及黄酮类物质，可抑制关键酶活性以发挥抑菌作用[45]。尽管处理7 d时，各处理组和CK间无显著差异；但在3 d和5 d时，苦豆子浸提液对POD和SOD活性具有抑制作用，但其抑制能力与浸提液中有效成分（如黄酮类、生物碱类等）的长期有效性有关[46-47]。在本研究中，经苦豆子浸提液处理后，*FUBT*基因拷贝数较CK明显降低，其中50 g·L^{-1}处理下抑制效果最突出，表明苦豆子浸提液通过抑制Fom毒素合成基因表达，进而直接削弱Fom的致病性。同时，Fom在苦豆子浸提液作用下可能激活了自身的应激适应机制从而进行转录重编程以应对不利环境的选择压力[48]。本研究证实苦豆子浸提液能够在短期（3~5 d）内抑制Fom致病性相关基因（*Fochs* V及*FUBT*）及抗氧化能力相关酶合成基因（SOD和POD）的表达，这为苦豆子浸提液防治哈密瓜枯萎病提供了分子机制层面的科学依据，但其具体作用机制仍需结合代谢组学和蛋白组学免疫印迹（Western Blot）等技术进一步深入解析。此外，苦豆子浸提液在短期（3 d）内对哈密瓜根系脱氢酶活性具有显著的抑制作用，未来仍需对苦豆子浸提液的施用浓度及处理时间进行深入研究，以规避其对哈密瓜根系活力可能带来的抑制风险。

4 结 论

苦豆子浸提液可显著抑制Fom菌丝体生长和致病性相关基因表达，并降低其抗氧化能力。Fom可显著抑制哈密瓜主根生长而对株高及真叶数量并无显著影响，但中高浓度苦豆子浸提液可缓解Fom对哈密瓜主根生长的抑制作用。Fom侵染会显著抑制哈密瓜叶片SOD、CAT、POD、PAL活性及根系脱氢酶活性，降低哈密瓜抗氧化及抗病能力，但适宜浓度的苦豆子浸提液可有效缓解因Fom浸染而导致的氧化应激胁迫。该研究结果为苦豆子绿肥应用及哈密瓜抗枯萎病分子机制解析提供了重要理论依据。

参考文献 References：

[1] 张攀华，鱼坤，王璐，刘大华 . 大食物观背景下我国哈密瓜产业格局及发展路径研究[J]. 现代农业研究，2025，31(1)：71-74.
Zhang Panhua，Yu Kun，Wang Lu，Liu Dahua. Research on the industrial pattern and development path of Hami muskmelon under the background of big food view[J]. Modern Agriculture Research，2025，31(1)：71-74.

[2] 韩润强，石遥，于今烈，杨全，程军回，薛娜娜 . 北疆哈密瓜连作对根际土壤微生物群落的影响[J]. 新疆农业大学学报，2024，47(5)：393-400.
Han Runqiang，Shi Yao，Yu Jinlie，Yang Quan，Cheng Junhui，Xue Nana. Impacts of continuous cropping on the rhizosphere soil microbial community of Hami melon fields in northern Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University，2024，47(5)：393-400.

[3] 高润蕾 . 哈密瓜细菌性叶斑病病原鉴定及不同品种抗病性测定[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2009.
Gao Runlei. Pathogen identification of hamimelon bacterial leaf spot and hamimelon varieties resistance to bacterial leaf spot[D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2009.

[4] 刘思彤，郭宇，袁成志，刘秀杰，刘继秀，高越，赵文，高美玲 . 瓜类作物抗枯萎病育种研究进展[J]. 中国瓜菜，2025，38(7)：1-9.
Liu Sitong，Guo Yu，Yuan Chengzhi，Liu Xiujie，Liu Jixiu，Gao Yue，Zhao Wen，Gao Meiling. Research progress on breeding of resistance to *Fusarium* wilt disease in cucurbit crops[J]. China Cucurbits and Vegetables，2025，38(7)：1-9.

[5] 蔺秀婷，杜茜，路杨，隋丽，张正坤，李启云 . 甜瓜枯萎病病原菌鉴定及高效低毒化学防治农药筛选[J]. 北方园艺，2023(8)：9-16.
Lin Xiuting，Du Qian，Lu Yang，Sui Li，Zhang Zhengkun，Li Qiyun. Pathogen identification of muskmelon of *Fusarium* wilt and chemical fungicides screening with high efficiency and low toxicity[J]. Northern Horticulture，2023(8)：9-16.

[6] 王叶青，刘芳，潘纪源，陆秀君，刘文菊，李博文．巨大芽孢杆菌与噁霉灵联用对甜瓜连作障碍的缓解效果[J]. 农药学学报，2022，24(4)：762-770.
Wang Yeqing，Liu Fang，Pan Jiyuan，Lu Xiujun，Liu Wenju，Li Bowen. Effects of combination of hymexazol and *Bacillus megaterium* on *Fusarium* wilt of continuous cropping melon (*Cucumis sativus* L.)[J]. Chinese Journal of Pesticide Science，2022，24(4)：762-770.

[7] Zuriegat Q，Zheng Y R，Liu H，Wang Z H，Yun Y Z. Current progress on pathogenicity-related transcription factors in *Fusarium oxysporum*[J]. Molecular Plant Pathology，2021，22(7)：882-895.

[8] Ekwomadu T I，Akinola S A，Mwanza M. *Fusarium* mycotoxins，their metabolites (free，emerging，and masked)，food safety concerns，and health impacts[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2021，18(22)：11741.

[9] Suarez-Fernandez M，Álvarez-Aragón R，Pastor-Mediavilla A，Maestre-Guillén A，Del Olmo I，De Francesco A，Meile L，Sánchez-Vallet A. Sas3-mediated histone acetylation regulates effector gene activation in a fungal plant pathogen[J]. mBio，2023，14(5)：e01386-23.

[10] Hou Y H，Hsu L H，Wang H F，Lai Y H，Chen Y L. Calcineurin regulates conidiation，chlamydospore formation and virulence in *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*[J]. Frontiers in Microbiology，2020，11：539702.

[11] Dong J P，Wang Y A，Xian Q Q，Chen X H，Xu J. Transcriptome analysis reveals ethylene-mediated defense responses to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* infection in *Cucumis sativus* L.[J]. BMC Plant Biology，2020，20(1)：334.

[12] Da R F Saraiva A L，Da S Bhering A，Do Carmo M G F，Andreote F D，Dias A C F，Da S Coelho I. Bacterial composition in brassica-cultivated soils with low and high severity of clubroot[J]. Journal of Phytopathology，2020，168(11/12)：613-619.

[13] Chen Y C，Wong C L，Muzzi F，Vlaardingerbroek I，Kidd B N，Schenk P M. Root defense analysis against *Fusarium oxysporum* reveals new regulators to confer resistance[J]. Scientific Reports，2014，4：5584.

[14] Warris A，Ballou E R. Oxidative responses and fungal infection biology[J]. Seminars in Cell & Developmental Biology，2019，89：34-46.

[15] 于平儒．苦豆子等植物样品抑菌活性筛选研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2001.
Yu Pingru. Study on screening of antibacterial activity of *Sophora alopecuroides* and other plant samples[D]. Yangling：Northwest A & F University，2001.

[16] 安佳琳，李勇，董川，刘兵兵，双少敏．新疆不同产地苦豆子种子中生物碱含量测定与分析[J]. 山西大学学报(自然科学版)，2023，46(5)：1188-1195.
An Jialin，Li Yong，Dong Chuan，Liu Bingbing，Shuang Shaomin. Determination and analysis of alkaloids in seeds of *Sophora alopecuroides* L. in different regions of Xinjiang[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)，2023，46(5)：1188-1195.

[17] 李端，周立刚，王敬国，李晓林，唐静，谢敏．苦豆子提取物对黄瓜和番茄病原菌的抑制作用[J]. 西北植物学报，2006，26(3)：558-563.
Li Duan，Zhou Ligang，Wang Jingguo，Li Xiaolin，Tang Jing，Xie Min. Inhibitory effects of *Sophora alopecuroides* extract to pathogens on cucumber and tomato[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2006，26(3)：558-563.

[18] 赵庆芳，周紫鹃，陈建，李巧峡．四种植物不同溶剂浸提液对黄芪根腐病致病菌的抑制[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2010，46(1)：91-95.
Zhao Qingfang，Zhou Zijuan，Chen Jian，Li Qiaoxia. Inhibition of different solvent extracts of four kinds of plants on pathogenic bacteria of *Astragalus membranaceu* root rot[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)，2010，46(1)：91-95.

[19] 程庆华，张志鹏，吴艳萍，万宇鹤，陈应娟．苦参碱对茶树炭疽菌的抑菌作用研究[J]. 园艺学报，2023，50(2)：432-440.
Cheng Qinghua，Zhang Zhipeng，Wu Yanping，Wan Yuhe，Chen Yingjuan. Studies on the antifungal effect of matrine on *Colletotrichum* species on tea plant[J]. Acta Horticulturae Sinica，2023，50(2)：432-440.

[20] 余永婷，冯作山．苦豆子生物碱浸提物的抑菌性研究[J]. 农产品加工(下半月)，2018(5)：22-24.
Yu Yongting，Feng Zuoshan. Study on antimicrobial activity of the extracts from *Sophora alopecuroides* L.[J]. Farm Products Processing，2018(5)：22-24.

[21] 朱博为，于佳玄，刘菊华，李新国．香蕉 A、B 基因组胆碱单加氧酶基因功能验证[J]. 果树学报，2025，42(10)：2262-2272.
Zhu Bowei，Yu Jiaxuan，Liu Juhua，Li Xinguo. Functional validation of choline monooxygenase genes in banana A and B genomes[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(10)：2262-2272.

[22] 武振亮，史延年，张莹芳，郑巧兰，贺志功，李云荫．新植物生长调节剂：骆驼蓬碱对小麦的增产作用及生理效应研究[J]. 作物学报，1993，19(4)：380-383.
Wu Zhenliang，Shi Yannian，Zhang Yingfang，Zheng Qiaolan，He Zhigong，Li Yunyin. Studies on yield gains and physiological effects of a new plant growth regulator-harmaline on wheat[J]. Acta Agronomica Sinica，1993，19(4)：380-383.

[23] 耿芳芳，王慧，秦伟，丁保君．基于构建微生物传感器的甲基对硫磷降解菌的分离鉴定及其降解特性研究[J]. 农业资源与环境学报，2014，31(6)：521-526.
Geng Fangfang，Wang Hui，Qin Wei，Ding Baojun. Isolation and characterization of methyl parathion-degrading bacteria based on microbial sensor construction[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment，2014，31(6)：521-526.

[24] 玉建周．哈密瓜大棚高密度立体栽培技术[J]. 种子科技，2022，40(11)：70-72.
Yu Jianzhou. High-density three-dimensional cultivation technology of hami melon in greenhouses[J]. Seed Science & Technolo-

gy，2022，40(11)：70-72.

[25] Wei Y T，Lin Y X，Zhao J Y，Li D C，Yang Z K，Chen F Y，Han L. Development of a TaqMan probe-based multiplex real-time PCR for the simultaneous detection of four clinically important filamentous fungi[J]. Microbiology Spectrum，2024，12(9)：e0063424.

[26] 王素娜 . 轮作缓解甜瓜连作障碍的机理研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2017.
Wang Suna. The allelopathic mechanism of crop rotation on alleviating muskmelon continuous cropping obstacle[D]. Shenyang：Shenyang Agricultural University，2017.

[27] Alscher R G，Erturk N，Heath L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany，2002，53(372)：1331-1341.

[28] Bernards M A，Summerhurst D K，Razem F A. Oxidases，peroxidases and hydrogen peroxide：The suberin connection[J]. Phytochemistry Reviews，2004，3(1)：113-126.

[29] Gebicka L，Krych-Madej J. The role of catalases in the prevention/promotion of oxidative stress[J]. Journal of Inorganic Biochemistry，2019，197：110699.

[30] Wang L J，Li J F，Liu L T，Dong R S，Liu G D，Rao I M，Chen Z J. Phenylalanine ammonia-lyase 2 regulates secondary metabolism and confers manganese tolerance in *Stylosanthes guianensis*[J]. Plant Physiology，2024，197(1)：kiaf005.

[31] Cárdenas-Laverde D，Barbosa-Cornelio R，Coy-Barrera E. Antifungal activity against *Fusarium oxysporum* of botanical end-products：An integration of chemical composition and antifungal activity datasets to identify antifungal bioactives[J]. Plants，2021，10(12)：2563.

[32] Xie Y P，Chen P X，Yan Y，Bao C N，Li X W，Wang L P，Shen X X，Li H Y，Liu X F，Niu C D，Zhu C，Fang N，Shao Y，Zhao T，Yu J T，Zhu J H，Xu L F，van Nocker S，Ma F W，Guan Q M. An atypical R2R3 MYB transcription factor increases cold hardiness by CBF-dependent and CBF-independent pathways in apple[J]. New Phytologist，2018，218(1)：201-218.

[33] Suliman K H，Gaafar A Z，Abdelmalik A M，AlMunqedhi B M，Elzein A，Hodhod M S. Microbial dynamics and dehydrogenase activity in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) rhizospheres：Impacts on growth and soil health across different soil types[J]. Open Chemistry，2024，22：20230209.

[34] Lei L J，Zhao Y，Shi K，Liu Y，Hu Y X，Shao H. Phytotoxic activity of alkaloids in the desert plant *Sophora alopecuroides*[J]. Toxins，2021，13(10)：706.

[35] Jangir M，Sharma S，Sharma S. Development of next-generation formulation against *Fusarium oxysporum* and unraveling bioactive antifungal metabolites of biocontrol agents[J]. Scientific Reports，2021，11：22895.

[36] Ayhan D H，Abbondante S，Martínez-Soto D，Wu S Y，Rodriguez-Vargas R，Milo S，Rickelton K，Sohrab V，Kotera S，Arie T，Marshall M E，Rocha M C，Haridas S，Grigoriev I V，Shlezinger N，Pearlman E，Ma L J. Host-specific adaptation in *Fusarium oxysporum* correlates with distinct accessory chromosome content in human and plant pathogenic strains[J]. mBio，2025，16(8)：e00951-25.

[37] Andersen E J，Ali S，Byamukama E，Yen Y，Nepal M P. Disease resistance mechanisms in plants[J]. Genes，2018，9(7)：339.

[38] Jha A K，Sit N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods：A review[J]. Trends in Food Science & Technology，2022，119：579-591.

[39] Wei J H，Wu B. Chemistry and bioactivities of secondary metabolites from the genus *Fusarium*[J]. Fitoterapia，2020，146：104638.

[40] Urlacher V B，Girhard M. Cytochrome P450 monooxygenases in biotechnology and synthetic biology[J]. Trends in Biotechnology，2019，37(8)：882-897.

[41] Shishodia S K，Tiwari S，Hoda S，Vijayaraghavan P，Shankar J. SEM and qRT-PCR revealed quercetin inhibits morphogenesis of *Aspergillus flavus* conidia *via* modulating calcineurin-Crz1 signalling pathway[J]. Mycology，2020，11(2)：118-125.

[42] Xiong Z T，Pu J T. Matrine and its derivatives：Multi-pathway regulation in cancer therapy[J]. Cancer Management and Research，2025，17：3285-3297.

[43] Palmieri D，Segorbe D，López-Berges M S，De Curtis F，Lima G，di Pietro A，Turrà D. Alkaline pH，low iron availability，poor nitrogen sources and CWI MAPK signaling are associated with increased fusaric acid production in *Fusarium oxysporum*[J]. Toxins，2023，15(1)：50.

[44] Hu J X，Liu M X，Zhang A，Dai Y，Chen W Z，Chen F，Wang W Y，Shen D Y，Telebanco-Yanoria M J，Ren B，Zhang H F，Zhou H B，Zhou B，Wang P，Zhang Z G. Co-evolved plant and blast fungus ascorbate oxidases orchestrate the redox state of host apoplast to modulate rice immunity[J]. Molecular Plant，2022，15(8)：1347-1366.

[45] Ma Z J，Zhang C E，Wang R L，Zang Q C，Yu X H，Wang J B，Sun C Z，Zhao K J，Pu S B，Xiao X H. Microcalorimetry combined with chemometics for antibacterial evaluation of *Sophora alopecuroides* on *Staphylococcus aureus*[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry，2018，134(3)：1883-1891.

[46] Wan C X，Luo J G，Ren X P，Kong L Y. Interconverting flavonostilbenes with antibacterial activity from *Sophora alopecuroides*[J]. Phytochemistry，2015，116：290-297.

[47] Blessy M，Patel R D，Prajapati P N，Agrawal Y K. Development of forced degradation and stability indicating studies of drugs-a review[J]. Journal of Pharmaceutical Analysis，2014，4(3)：159-165.

[48] Chen J Y，Yang Y J，Meng X Y，Lin R H，Tian X Y，Zhang Y，Lai W F，Yang C X，Ma X Q，Huang M Q. Oxysophoridine inhibits oxidative stress and inflammation in hepatic fibrosis *via* regulating Nrf2 and NF-κB pathways[J]. Phytomedicine，2024，132：155585.