

姜 振,董 航,曹昆鹏,等. 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜防御酶活性及抗性基因表达的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):110-116.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.19.017

小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜防御酶活性及抗性基因表达的影响

姜 振¹,董 航²,曹昆鹏¹,刘守伟¹,吴凤芝¹

(1. 东北农业大学,黑龙江哈尔滨 150000; 2. 黑龙江省农业科学院牡丹江分院,黑龙江牡丹江 157000)

摘要:以黄瓜为试材,采用盆栽的方式,研究在尖孢镰刀菌胁迫下,小麦伴生对黄瓜叶片抗氧化酶活性及相关抗性基因表达的影响。结果表明,在尖孢镰刀菌胁迫下,小麦伴生处理的黄瓜叶片苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶、 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶、超氧化物歧化酶活性,整体上均高于对照,均呈先升高后降低的趋势,其中,苯丙氨酸解氨酶、 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性均是在处理后 48 h 时最高,分别比对照显著增加了 30.70%、85.72%;过氧化物酶、超氧化物歧化酶活性均是在处理后 24 h 时最高,分别比对照增加 113.40%、95.01%,均差异显著。在接种尖孢镰刀菌后,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *POD*、*SOD*、*PR1*、*EIN2* 基因的相对表达量均是呈先升高后降低的趋势,均是在处理后 24 h 时相对表达量最高,分别是对照的 6.34、2.50、7.39、3.45 倍;*PAL* 基因相对表达量在处理后 48 h 达到最高,是对照的 4.57 倍;*LOX* 基因相对表达量在 120 h 时是对照的 11.15 倍。综上,在尖孢镰刀菌胁迫下,小麦伴生处理提高了黄瓜叶片相关防御酶活性及相关抗性基因的表达,在一定程度上,增加了黄瓜抵抗枯萎病原菌的能力。

关键词:小麦;黄瓜枯萎病;防御酶活性;抗性基因;尖孢镰刀菌

中图分类号:S436.421.1⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)19-0110-06

由于长期连作,黄瓜容易受到土传病害的影响^[1-2]。黄瓜枯萎病是由黄瓜专化型尖孢镰刀菌引起的一种常见且危害最为严重的真菌性土传病害,该病害在全世界地区都广泛发生,给黄瓜栽培产业带来严重影响^[3]。

近年来合理的间、轮、套作模式是缓解连作障碍的有效措施之一,这些种植模式通过增加植物多样性来缓解植物土传病害的发生^[4-5]。伴生作为一种不以收获为目的的特殊间作模式,在一定程度上缓解了连作障碍的发生^[6]。有研究表明,采用分蘖洋葱伴生番茄的栽培方式,番茄灰霉病的发生能够得到显著缓解^[7]。黄瓜与西芹间作可以降低黄瓜枯萎病的发生,促进植株的生长发育、提高产量、改善品质,且两者间作改变了土壤真菌、细菌的群落结构及土壤酶活性^[8]。吴绍军等研究发现,大蒜伴生西瓜显著增加了西瓜植株地上、地下干鲜质量及产量,显著降低了西瓜枯萎病的发病率^[9]。小麦是一种化感植物,其在设施蔬菜生产中往往以伴生植

物的形式出现,采用其伴生,可以降低西瓜枯萎病的发生,同时可以增加西瓜的产量^[10-11]。小麦与黄瓜间作能够降低黄瓜枯萎病发病率,并且增加黄瓜根际土壤微生物群落多样性^[12-13]。有研究发现,相同作物间的不同品种在间作或伴生栽培模式中所起的作用也有所不同,采用不同品种的小麦品种间作对蚕豆枯萎病的抗性有明显差异,其中云麦 47、云麦 42 这 2 个处理后,蚕豆的根际微生物有显著变化^[14]。白晶芝等研究表明,分蘖洋葱伴生番茄可以显著降低番茄的发病率,其中 M29、M51 与番茄伴生后,与对照相比能够显著降低番茄的发病率^[15]。董艳等研究表明,不同抗病品种的蚕豆根分泌物对病原菌抑制率不同,不同品种小麦伴生对蚕豆枯萎病的发病率都有显著差异,说明不同品种之间伴生效果也不同^[16-17]。

前期研究表明,不同品种小麦对黄瓜枯萎病的防控效果有所不同,其中,采用东农 123 小麦伴生可以降低黄瓜枯萎病发病率,防治效果较好^[18]。本研究在此基础上,采用盆栽方式,用东农 123 小麦与黄瓜伴生栽培,通过测定超氧化物歧化酶、过氧化物酶等防御酶活性以及 *PR1*、*EIN2* 等相关抗性基因的表达量,研究东农 123 小麦伴生黄瓜栽培,对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜防御酶活性及相关基因表达的影

收稿日期:2023-01-19

作者简介:姜 振(1995—),男,吉林榆树人,硕士研究生,从事设施园艺与蔬菜生理生态研究。E-mail:2644324628@qq.com。

通信作者:刘守伟,博士,教授,从事设施园艺与蔬菜生理生态研究。

E-mail:liushouwei1974@126.com。

响,以期为小麦伴生缓解黄瓜连作障碍问题提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为大田土,土壤基本理化性质:铵态氮含量为 44.78 mg/kg,硝态氮含量为 66.50 mg/kg,速效磷含量为 326.37 mg/kg,速效钾含量为 315.79 mg/kg,有机质含量为 64.37 g/kg,pH 值为 7.6,EC 值为 1.15 mS/cm。试验材料黄瓜品种为金秋 1 号,购自黑龙江省哈尔滨市新春天种子商店。试验材料小麦品种为东农 123,由东北农业大学园艺园林学院蔬菜生理生态研究室提供。供试菌株为黄瓜枯萎病菌,从东北农业大学园艺站温室内的黄瓜枯萎病病株中分离得到。

1.2 试验设计

试验于 2022 年 3—6 月在东北农业大学园艺中心温室内进行。黄瓜常规育苗,子叶展平时分苗于营养钵中,2 叶 1 心时选取生长一致的幼苗定植于塑料盆(外口径为 22.5 cm×高 14.0 cm)内。定植 7 d 后,在每株黄瓜一侧,分别成簇撒播 20~30 粒小麦,当小麦生长到 20 cm 时割掉,以不影响黄瓜生长为准,常规方法进行黄瓜管理,黄瓜生长过程中适时适量浇水。在伴生小麦后 20 d 浇灌 30 mL 黄瓜枯萎病原菌孢子悬浮液,浓度为 1.0×10^7 CFU/mL,试验设置 2 个处理,以黄瓜伴生小麦并接种病原菌为处理,以黄瓜接种病原菌且不伴生小麦为对照,每个处理 3 次重复,每个重复 15 盆,随机区组排列。在接种前及接种后 6、12、24、48、72、120 h,分别选取各处理长势一致的黄瓜叶片样品,放在液氮中速冻后,于 -80 ℃ 冰箱保存,用于相关酶活性测定,并提取 RNA 用于相关抗性基因的测定,每个处理的每个重复选取 3 株,结果取平均值。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 病原菌的活化 采用马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基进行病原菌的活化培养^[19]。将灭过菌的培养基放在超净室中冷却,当温度达到室温时,将培养基快速倒入灭过菌的培养皿内,将培养基倒到刚好铺满培养皿底部为止。接下来将倒入培养皿内的培养基继续冷却,直到培养皿上无明显水汽后再进行下一步,用灭菌后的枪头挑取菌块放在培养基上,并封口,放在培养箱中,看到菌落长满培养皿为止,拿出后放于 4 ℃ 保存。

1.3.2 制备孢子悬浮液 用灭菌后的枪头取 1 点“1.3.1”节制备好的菌饼,放进重新制备好并灭完菌的液体培养基中,倒入三角瓶中并将瓶口封死,放在摇床培养,7 d 左右取出,将菌液用离心管分装好后,放在离心机里离心,弃掉离心管中离心好的上清液,用无菌水将刚离心出来的病原菌孢子沉淀配制成浓度为 1×10^7 CFU/mL 的孢子悬浮液备用。

1.3.3 黄瓜叶片相关酶活性测定 超氧化物歧化酶活性测定采用氮蓝四唑光化还原法,过氧化物酶活性测定采用愈创木酚法,苯丙氨酸解氨酶活性测定采用苯丙氨酸法, β -1,3 葡聚糖酶活性测定参考田菲菲的方法^[20]。

1.3.4 黄瓜叶片相关抗性基因的测定 Trizol Reagent 试剂提取方法参照孙国胜等的方法^[21]进行,提取的 RNA 用 1% 琼脂糖凝胶电泳进行检测。抗性基因荧光定量 PCR(RT-PCR)采用 20 μ L 反应体系:8.0 μ L TipGreenqPCR SuperMix(2 \times),上下游引物各 0.5 μ L,cDNA 模板 1 μ L,加水至 20 μ L;RT-PCR 的反应程序为:95 ℃ 预变性 30 s;94 ℃ 5 s,60 ℃ 退火/延伸 30 s,45 个循环。引物见表 1,由生工生物工程(上海)股份有限公司合成。

1.4 数据处理

数据分析以管家基因 *Actin* 作为内参,采用公式

表 1 qRT-PCR 所用引物

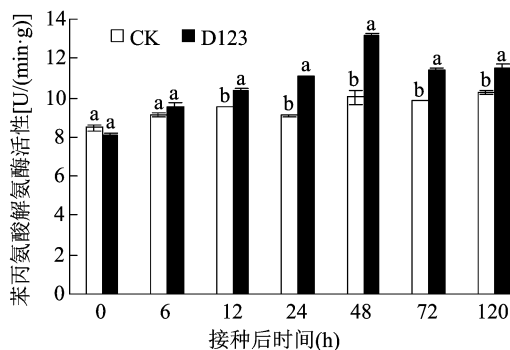
基因	上游引物序列(5'→3')	下游引物序列(5'→3')	基因号
<i>PR1</i>	TGGGTGGATGAGAAGCCATT	GTGCATCTCACTTTGGCACA	CsaV3_7G007630
<i> EIN2</i>	CAGCTAGCATTGGTGTGGTC	ATCCAAGCAGAGGCTTCTGT	CsaV3_6G039650
<i>PAL</i>	TCTCGTCCAACAGTCATT	TTGTGGAGGATGGATATGAA	CsaV3_5G008430
<i>LOX</i>	CAGCTCTTCATGCTGCAGTT	AAGGGCTTGCAACTGTGAAG	CsaV3_2G005360
<i>SOD</i>	AGCACCCAGGCATCCTTACTT	GAACCTCCAATGTCTCCGA	CsaV3_1G039270
<i>POD</i>	CACATTCGGGCGTTCAAGAT	ATGTGCCTGACCCTGATTGA	CsaV3_4G023590
<i>Actin</i>	CAGGAATCCACGAAACTACT	GTGTTTGGATTGGAGGGTCT	CsaV3_6G041900

$2^{-\Delta\Delta C_T}$ 方法计算相关基因表达量。数据分析采用 Graphpad Prism 7.0 软件。

2 结果与分析

2.1 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片防御酶活性的影响

2.1.1 对苯丙氨酸解氨酶活性的影响 由图 1 可知,接种尖孢镰刀菌后,处理后 6 h 及之后各时期,小麦伴生处理的苯丙氨酸解氨酶活性均高于对照,其中除处理后 6 h 外,均与对照有显著差异,在 48 h 时,苯丙氨酸解氨酶活性最高,与对照相比增加 30.70%。



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著, 下图同
图1 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片苯丙氨酸解氨酶活性的影响

2.1.2 对过氧化物酶活性的影响 由图 2 可知,在接种尖孢镰刀菌 6 h 及之后,与对照相比,除接种后 120 h 外,各时期的黄瓜叶片过氧化物酶活性均显著高于对照,在 24 h 时最高,较对照增加 113.40%。

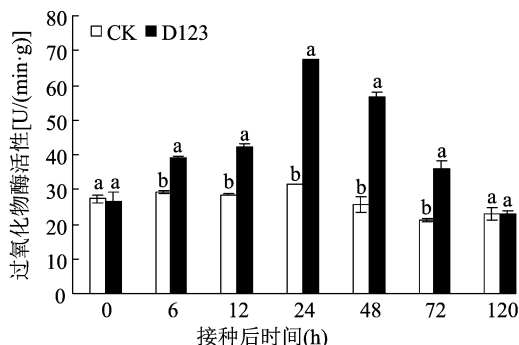


图2 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片过氧化物酶活性的影响

2.1.3 对 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性的影响 由图 3 可知,在接种尖孢镰刀菌 6 h 及之后,与对照相比,在各取样时期,伴生小麦处理的黄瓜叶片 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性均高于对照,均与对照有显著差异。在接种后 6 h 时, $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性开始升高,在 48 h 时达到最高,较对照增加 85.72%。

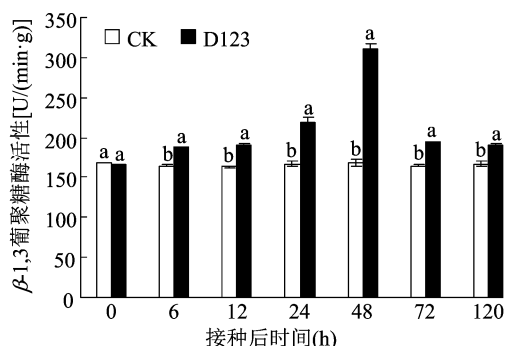


图3 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性的影响

2.1.4 对超氧化物歧化酶活性的影响 由图 4 可知,在接种尖孢镰刀菌后,小麦伴生处理的黄瓜叶片超氧化物歧化酶活性呈先升高后降低的趋势,在接种后 12、24、48 h 等 3 个取样时期,伴生处理的黄瓜叶片超氧化物歧化酶活性均显著高于对照。在接种后 24 h 时最高,较对照增加了 95.01%。

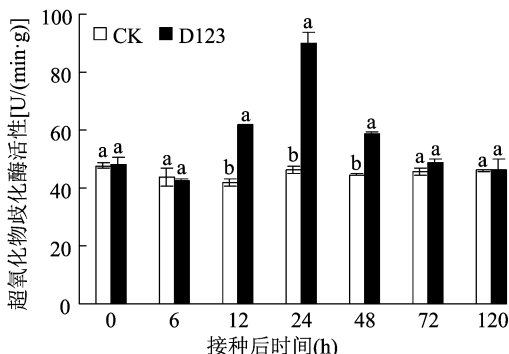


图4 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片超氧化物歧化酶活性的影响

2.2 小麦伴生对黄瓜尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片抗性相关基因表达的影响

2.2.1 对 *PAL* 基因相对表达量的影响 由图 5 可知,与对照相比,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *PAL* 基因表达量,在接菌后的各取样时期,均显著高于对照,整体上呈先升高后降低的趋势,在 48 h 达到最高,是对照的 4.57 倍。

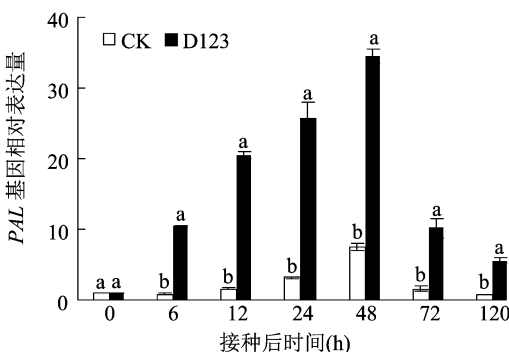


图5 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 *PAL* 基因相对表达量的影响

2.2.2 对 *POD* 基因相对表达量的影响 由图 6 可知,接种尖孢镰刀菌后,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *POD* 基因表达量呈先升高后降低的趋势,在各时期均比对照高,且均差异显著,在 24 h 时的表达量最高,是对照的 6.34 倍。

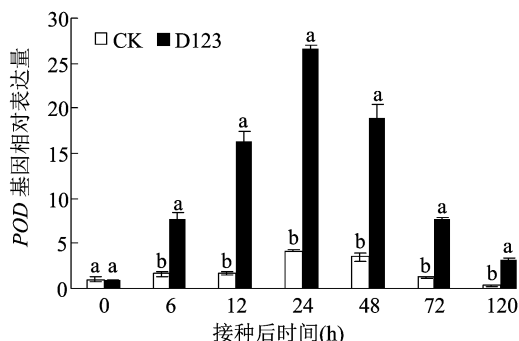


图6 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 *POD* 基因相对表达量的影响

2.2.3 对 *SOD* 基因相对表达量的影响 由图 7 可知,在接种尖孢镰刀菌后,除 120 h 外,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *SOD* 基因表达量均比对照高且均差异显著,整体上呈先升高后下降的趋势,在接种后 24 h 时达到最高,是对照的 2.5 倍。

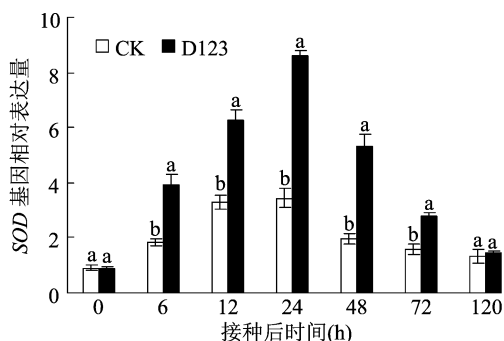


图7 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 *SOD* 基因相对表达量的影响

2.2.4 对 *PR1* 基因相对表达量的影响 由图 8 可知,接种尖孢镰刀菌后,在各取样时期,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *PR1* 基因表达量均显著高于对照,在 24 h 时达到最高,此时的表达量是对照的 7.39 倍。

2.2.5 对 *EIN2* 基因相对表达量的影响 由图 9 可知,接种尖孢镰刀菌 24 h 时,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *EIN2* 基因表达量最高,是对照的 3.45 倍,其他各时期的表达量也比对照高,差异均显著,整体上表达量呈先升高后降低的趋势。

2.2.6 对 *LOX* 基因相对表达量的影响 由图 10 可知,在接种尖孢镰刀菌后,小麦伴生处理的黄瓜叶片 *LOX* 基因表达量呈升高趋势,除接种后 12、24 h 外,在其他各取样时期,均显著高于对照,在接种后

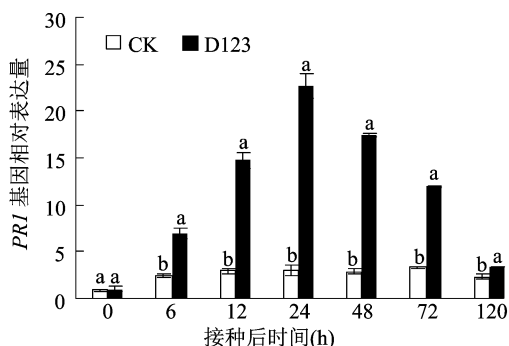


图8 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 *PR1* 基因相对表达量的影响

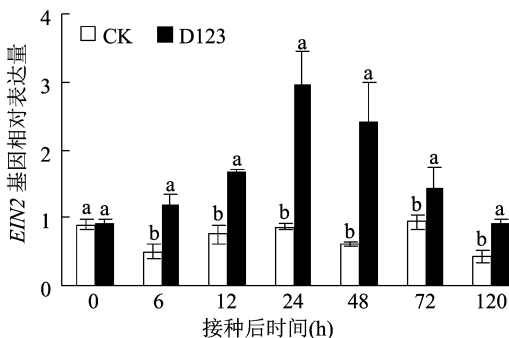


图9 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 *EIN2* 基因相对表达量的影响

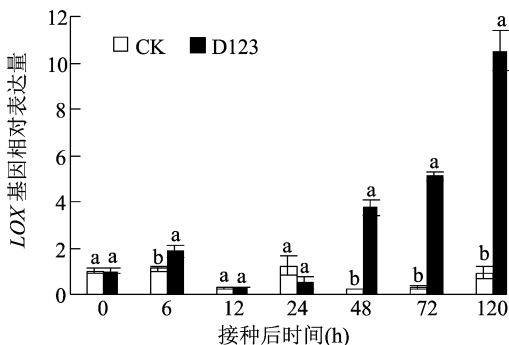


图10 小麦伴生对尖孢镰刀菌胁迫下黄瓜叶片 *LOX* 基因相对表达量的影响

120 h 时最高,是对照的 11.15 倍。

3 讨论与结论

充分利用不同作物之间化感作用的性质和特点,是农业可持续发展的新思路^[22]。小麦是典型的化感型植物,会影响不同植物的生长^[23]。当植物受到病原菌侵染时,会产生一系列的生理生化反应。其中抗氧化酶系统是植物自身保护的一个重要机制,当植株在受到外界环境刺激时,植株体内活性氧激增,损伤植物细胞膜系统,植物免疫组织受到影响^[24]。有研究表明,苯丙氨酸解氨酶在一些抗病性物质合成中起重要作用^[11]。过氧化物酶作为活性氧清除酶系统中的一个重要保护酶,在植物抵抗

病原菌侵入中起重要作用^[18]。当病原菌入侵植物体时, $\beta-1,3$ 葡聚糖酶可以破坏真菌的细胞壁,从而杀死病原菌,保护植株正常生长^[25]。超氧化物歧化酶作为催化剂,可以催化过氧化氢的合成,过氧化氢可作为防御物质存在于植物体内,提高植物抗性^[26]。有研究表明,在连作土壤栽培条件下,小麦伴生处理的西瓜叶片苯丙氨酸解氨酶和超氧化物歧化酶活性显著高于西瓜单作^[27]。Xu 等研究发现,与西瓜单作相比,小麦伴生处理增加了连作西瓜叶片内 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性,可能是西瓜枯萎病菌尖孢镰刀菌的细胞壁被降解,阻止了致病菌侵染^[28]。吴绍军等研究表明,在连作西瓜栽培条件下,大蒜伴生西瓜处理的西瓜叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性均显著高于西瓜单作^[29]。本研究表明,在尖孢镰刀菌胁迫下,小麦伴生处理的黄瓜苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶、 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶、超氧化物歧化酶活性,整体上均高于对照,其中,苯丙氨酸解氨酶、 $\beta-1,3$ 葡聚糖酶活性均是在接种后 48 h 时最高,过氧化物酶、超氧化物歧化酶活性均是在接种后 24 h 时最高。其可能的原因是小麦伴生黄瓜栽培后,在尖孢镰刀菌逆境胁迫下,小麦根系分泌物诱导了黄瓜植株体内氧化酶活性的升高,消除黄瓜体内多余的超氧阴离子自由基,提升了黄瓜抵抗病原菌侵染的能力。魏彦梅等在用西芹鲜根及浸提液对黄瓜枯萎病菌的化感作用机制的试验中发现,采用浸提液处理后的黄瓜,过氧化物酶、多酚氧化酶、苯丙氨酸解氨酶等 3 种酶活性均呈现先升高后降低的趋势,且各处理均高于对照,其研究结果^[30]与本试验结果类似。

有研究报道发现,病程相关蛋白基因(*PRs*)在对抗植物病害中起重要的作用,主要是在病原体入侵植物体时发挥作用。*PR1* 基因表达量与水杨酸的积累密切相关并且具有防御真菌的功能^[31]。*LOX* 编码的脂氧合酶是茉莉酸生物合成途径的第一关键酶,当不利的外界因素影响植物正常生长时,*LOX* 是植物响应外界信号的关键基因^[32]。加速乙烯生物合成的主要条件有 3 个,其中之一就是受逆境胁迫诱导的乙烯生物合成,在乙烯信号转导途径中,*EIN2* 是乙烯相关防卫信号响应的必需因子^[33]。有研究表明,在小麦伴生体系栽培中,接种西瓜枯萎病菌病原菌后,小麦伴生提高了西瓜根系抗病基因 *PR1* 的表达量^[34]。杨帆研究发现,接种根结线虫后,在不同的取样时间点,分蘖洋葱、油菜、薄荷、茴

香的根系分泌物处理的 *LOX* 基因相对表达量都高于对照^[35]。石延霞等研究表明,在接种尖孢镰刀菌后,经 BDO-1 处理后,黄瓜体内 *EIN2* 基因相对表达量从第 1 天到第 7 天都有显著升高^[36]。本试验研究结果表明,在接种尖孢镰刀菌后,伴生小麦处理的黄瓜 *PR1* 基因、*EIN2* 基因及 *PAL* 基因表达量都显著高于对照,*LOX* 基因表达量除 12、24 h 外,都显著高于对照,其中 *PR1* 基因、*EIN2* 基因及 *PAL* 基因表达量都是随着时间的增加呈现先升高后降低的趋势。*SOD* 基因、*POD* 基因分别调控超氧化物歧化酶和过氧化物酶的合成,其变化趋势与超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性的变化趋势基本一致,皆呈现先升高后降低的趋势。而两者之间酶活性及基因达到峰值的时间不一致,可能是因为基因指导蛋白质的合成需要经过转录、翻译等过程,使其表达时间出现错峰情况。吕慧芳研究表明小麦—西瓜间作通过增加西瓜根系中 SA 积累,诱导西瓜根系与抗性密切相关基因表达量增加,从而诱导整体抗性的提高^[37]。小麦伴生黄瓜模式中,小麦根系分泌物可能是通过诱导黄瓜相关抗病基因的表达,来提高整体抗性,从而提高黄瓜对枯萎病抗性。

综合以上试验结果可知,在接种尖孢镰刀菌后,小麦伴生提高了黄瓜植株抗氧化酶活性及相关抗性基因的表达。分析其可能的原因是小麦根系分泌物进入黄瓜根区土壤后,在尖孢镰刀菌胁迫下,是小麦根系分泌物诱导了黄瓜植株体内酶活性及相关抗性基因的表达,从而间接地提高了黄瓜植株对尖孢镰刀菌胁迫的抵御能力。根系分泌物作为植物—土壤—微生物的重要媒介,它能够起到物质交换以及信息传递的重要作用,是植物根际区微生态特征的关键,同时也是植物响应外界环境胁迫的途径之一^[38]。根系分泌物可以作为一种化感物质,促进或者抑制植物之间的关系,化感物质可以通过诱导细胞结构变化、影响植物生长调节剂和酶等方式来影响植物间的关系。李春霞采用小麦伴生及外源添加小麦根系分泌物的方式,在接种西瓜枯萎病菌后,与对照相比,无论是小麦伴生还是外源添加小麦根系分泌物的方式都显著增加了西瓜根系内的抗性基因的表达^[39]。刘一鸣等研究表明在对羟基苯甲酸胁迫下,采用小麦与蚕豆间作的栽培方式,可以发现小麦间作处理能够显著增加蚕豆根系内相关抗氧化酶活性,从而降低了镰刀菌对蚕豆的侵染^[40]。同样有研究发现,在接种西瓜枯萎病

后,间作小麦处理显著提高了西瓜根系内抗氧化酶活性及相关抗性基因的表达^[37]。有研究发现,玉米的根系分泌物可以抑制帚梗柱孢菌的生长,同时能够诱导大豆体内相关病程基因的表达,从而使大豆红冠腐病的发生可以得到缓解^[41]。根系分泌物诱导黄瓜提高自身抗性不仅仅局限于上述相关防御酶活性及差异表达基因诱导抗性的产生,还有可能是根系分泌物自身的特异性物质提升了黄瓜的抗病性,接下来的工作重点将是深入研究根系分泌物中的组成成分物质对黄瓜枯萎病或枯萎病病原菌的影响。

参考文献:

- [1] Chang C L, Zhou X G, Fu X P, et al. Soil enzymes and bacterial community composition in cucumber (*Cucumis sativus* L.) monocropping and companion cropping systems [J]. *Allelopathy Journal*, 2016, 38(2): 133–46.
- [2] Zhou X G, Yu G B, Wu F Z. Effects of intercropping cucumber with onion or garlic on soil enzyme activities, microbial communities and cucumber yield [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(5): 279–287.
- [3] Koike N, Hyakumachi M, Kageyama K, et al. Induction of systemic resistance in cucumber against several diseases by plant growth – promoting fungi: lignification and superoxide generation [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2001, 107: 523–533.
- [4] Bennett A J, Bending G D, Chandler D, et al. Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations [J]. *Biological Reviews*, 2012, 87(1): 52–71.
- [5] Couëdel A, Alletto L, Justes É. Crucifer – legume cover crop mixtures provide effective sulphate catch crop and sulphur green manure services [J]. *Plant and Soil*, 2018, 426(1): 61–76.
- [6] 孙文浩, 余叔文. 相生相克效应及其应用 [J]. *植物生理学通讯*, 1992, 28(2): 81–87.
- [7] 吴 瑕, 吴凤芝, 周新刚. 分蘖洋葱伴生对番茄矿质养分吸收及灰霉病发生的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 734–742.
- [8] 秦立金. 黄瓜与西芹间作对黄瓜枯萎病菌的化感作用及其土壤生物学机理的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019: 102–104.
- [9] 吴绍军, 孟佳丽, 沈 虹, 等. 大蒜伴生对连作西瓜生长、产量及品质的影响 [J]. *江西农业学报*, 2021, 33(3): 44–49.
- [10] Xu W H, Wang Z G, Wu F Z. The effect of D123 wheat as a companion crop on soil enzyme activities, microbial biomass and microbial communities in the rhizosphere of watermelon [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 899.
- [11] Zeng K F, Cao J K, Jiang W B. Enhancing disease resistance in harvested mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Matsu’) fruit by salicylic acid [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(5): 694–698.
- [12] 吴凤芝, 周新刚. 不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响 [J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 899–906.
- [13] 王东凯, 杨 威, 刘 博, 等. 不同栽培方式对设施黄瓜主要病害及品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2012(9): 10–13.
- [14] 杨智仙, 汤 利, 郑 毅, 等. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 570–579.
- [15] 白晶芝, 于洪杰, 安冬梅, 等. 不同分蘖洋葱品种伴生对番茄生长及根结线虫的影响 [J]. *北方园艺*, 2018(18): 1–8.
- [16] 董 艳, 董 坤, 杨智仙, 等. 间作减轻蚕豆枯萎病的微生物和生理机制 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1984–1992.
- [17] 董 艳, 董 坤, 郑 毅, 等. 不同抗性蚕豆品种根系分泌物对枯萎病菌的化感作用及根系分泌物组分分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(3): 292–299.
- [18] 董 航, 吴金宝, 秦 开, 等. 不同品种小麦根系分泌物对黄瓜生长、枯萎病发生及病原菌的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2022(9): 30–38.
- [19] 董新堂, 凌志波. 马铃薯葡萄糖培养基常备法 [J]. *生物学通报*, 1998, 1: 48.
- [20] 田菲菲. 菜粉蝶提取物诱导黄瓜对炭疽病的抗性及其机理研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2007: 31–36.
- [21] 孙国胜, 马志虎, 戴忠良, 等. 3 种方法提取辣椒根总 RNA 的效果比较 [J]. *中国瓜菜*, 2016, 29(1): 8–10.
- [22] 阎 飞, 杨振明, 韩丽梅. 论农业持续发展中的化感作用 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 633–635.
- [23] 马亚飞, 杨 平, 吴凤芝. 不同品系小麦根系分泌物对黄瓜化感作用的初步研究 [J]. *中国蔬菜*, 2011(10): 23–27.
- [24] Deng Y M, Shao Q S, Li C C, et al. Differential responses of double petal and multi petal jasmine to shading: II. Morphology, anatomy and physiology [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 144: 19–28.
- [25] El – Katatny M, Gudelj M, – H Robra K, et al. Characterization of a chitinase and an *endo* – β – 1, 3 – glucanase from *Trichoderma harzianum* Rifai T24 involved in control of the phytopathogen *Sclerotium rolfsii* [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, 56(1): 137–143.
- [26] 李 莲. 超氧化物歧化酶 – 2 在豌豆蚜免疫防御反应中的作用研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [27] 徐伟慧, 吴凤芝, 王志刚, 等. 连作西瓜光合特性及抗病性对小麦伴生的响应 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(6): 655–660.
- [28] Xu W H, Liu D, Wu F Z, et al. Root exudates of wheat are involved in suppression of *Fusarium* wilt in watermelon in watermelon – wheat companion cropping [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2015, 141(1): 209–216.
- [29] 吴绍军, 孟佳丽, 沈 虹, 等. 连作西瓜抗逆系统及土壤微生态对大蒜伴生的响应 [J]. *西北植物学报*, 2021, 41(4): 635–642.
- [30] 魏彦梅, 李 蕾, 陈 磊, 等. 西芹鲜根及根际区物浸提液对黄瓜枯萎病菌化感作用机理的研究: 浸提液处理后黄瓜叶片内防御酶活性的变化 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(2): 37–43.

和滢埏,唐军荣,李亚麒,等. 外源氮磷添加对云南松苗木生长及根系形态的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):116-124.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.19.018

外源氮磷添加对云南松苗木生长及根系形态的影响

和滢埏^{1,2}, 唐军荣^{1,2}, 李亚麒³, 母德锦¹, 陈诗^{1,2}, 蔡年辉^{1,2}, 许玉兰^{1,2}, 陈林^{1,2}

(1. 西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南昆明 650224;

2. 西南林业大学西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 云南昆明 650224;

3. 云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000)

摘要:为探究不同氮磷配施对云南松苗木生长的影响,从苗木生长量、根系形态、叶绿素含量、生物量以及异速生长分析和相关性分析等方面探究外源氮磷添加对云南松苗木生长的影响,从而找到最适合云南松苗木生长的氮磷配比。以 2 年生云南松苗木为研究材料,通过氮磷配施,定期测定云南松苗木的生长量、叶绿素含量、根系形态以及生物量,并分析这些指标对氮磷配施的响应规律。结果表明,氮磷肥可以有效促进云南松苗木生长,改变云南松苗木生长轨迹,且相关性分析结果表现为两两指标间均为正相关关系。氮磷配施的效果明显优于单施氮肥或单施磷肥,单施氮肥或磷肥效果不佳,但氮磷配比含量过高会抑制云南松生长。施肥可以显著促进云南松苗木生长,整体而言,氮 0.4 g/株、磷 0.8 g/株的氮磷配比为云南松苗木生长最佳施肥量,对云南松苗木生长具有明显的促进作用,进而为培育优质云南松实生苗提供理论参考依据。

关键词:云南松;最佳施肥量;苗木生长;根系形态;氮磷配施;异速生长

中图分类号:S791.257 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)19-0116-09

云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 是松科

(Pinaceae) 松属 (*Pinus*) 常绿针叶乔木,主要运用于木材和木纤维工业原料制造等,是我国西南地区重要的乡土树种^[1]。在园林绿化、水土保持、涵养水源等方面起到重要作用,同时对分布区的社会、经济和生态可持续方面具有重要意义^[2-5]。近年来,云南松林分开始表现出衰退的现象,一些优良种质资源逐渐减少^[6]。因此,云南松遗传改良极为重要,其中良种壮苗是关键。施肥可以促进云南松实生苗树干和根系生长,为提高造林成活率奠定基础,同时还能促进苗期生长^[7]。因此,对云南松苗

收稿日期:2023-02-01

基金项目:云南省万人计划青年拔尖人才项目(编号:YNWR-QNBJ-2019-075);国家自然科学基金(编号:31860203);云南省研究生导师团队建设项目(编号:2022-97);西南林业大学校科研基金项目(编号:01108-18200133);云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项(编号:XDYC-QNRC-2022-0250)。

作者简介:和滢埏(1997—),女,云南丽江人,硕士研究生,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:2476747423@qq.com。

通信作者:陈林,博士,副研究员,主要从事微生物生态与森林培育研究。E-mail:linchen@swfu.edu.cn。

[31] Kinkema M, Fan W, Dong X. Nuclear localization of NPR1 is required for activation of *PR* gene expression[J]. *The Plant Cell*, 2000, 12(12): 2339-2350.

[32] Reymond P, Farmer E E. Jasmonate and salicylate as global signals for defense gene expression[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 1998, 1(5): 404-411.

[33] 徐曼宇. 小麦韧皮部抗蚜防卫反应与乙烯信号的调控作用[D]. 南京:南京农业大学,2015:7-8.

[34] Lv H F, Cao H S, Nawaz M A, et al. Wheat intercropping enhances the resistance of watermelon to *Fusarium* wilt[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9:696.

[35] 杨帆. 伴生植物根系分泌物对根结线虫及番茄抗性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.

[36] 石延霞,张晓慧,谢学文,等. 新化合物吡唑并嘧啶衍生物(BDO-

1)和哒嗪酮衍生物(PDZ-1)的诱导抗病性研究[J]. *农药学报*, 2018, 20(6): 721-728.

[37] 吕慧芳. 小麦||西瓜间作体系中根系分泌物的变化及其对西瓜枯萎病抗性的影响机制[D]. 武汉:华中农业大学,2019:26-27.

[38] 蔡莹,于晓菲. 植物根系分泌物的生态效应研究[J]. *环境生态学*, 2022, 4(9): 9-16.

[39] 李春霞. 伴生小麦对西瓜枯萎病抗性调控的机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019:45-46.

[40] 刘一鸣,杨智仙,董艳. 对羟基苯甲酸胁迫下间作对蚕豆枯萎病发生和根系抗氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(5): 987-995.

[41] Gao X, Wu M, Xu R N, et al. Root interactions in a maize/soybean intercropping system control soybean soil-borne disease, red crown rot[J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e95031.