

张燕航,王文珠,师桂英,等.乌头酸对兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)枯萎病的化感抑制作用[J].中国沙漠,2024,44(1):122-129.

乌头酸对兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*) 枯萎病的化感抑制作用

张燕航,王文珠,师桂英,杨宏羽,常桂香,王英,李慧

(甘肃农业大学 园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘要: 乌头酸是兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)根系的重要分泌物。为评估乌头酸作为化感抑制剂防治百合枯萎病的可行性,以CK(清水)、F(接菌,无乌头酸)、T(1 000 mg·L⁻¹乌头酸)、T+F(接菌,1 000 mg·L⁻¹乌头酸)处理,探索了乌头酸对兰州百合枯萎病的化感作用效应。尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)离体培养结果表明,与F处理相比,T+F处理显著降低了尖孢镰刀菌的增殖,减少了尖孢镰刀菌的数量,而且其作用效应有一定的持久性。植株人工接种试验表明,与F处理相比,T+F处理的发病率、病情指数分别显著降低了44.45%、28.21%;T+F处理的超氧化物歧化酶(SOD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)活性、脯氨酸含量比F处理分别显著增加了122.63%、17.49%、45.35%、119.36%、92.59%;与CK相比,T处理的抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、脯氨酸含量比CK分别显著增高了142.58%、52.1%。经主成分分析,不同处理综合指标顺序为CK>T+F>T>F。外源乌头酸可以降低百合枯萎病的发病程度,缓解尖孢镰刀菌对百合植株生长发育的不利影响,具有作为化感抑制剂应用于百合枯萎病防治的可能性。

关键词: 乌头酸;尖孢镰刀菌;连作障碍;化感作用

文章编号: 1000-694X(2024)01-122-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00067

中图分类号: Q945

文献标志码: A

0 引言

兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)是中国唯一的甜百合,是极具地方特色的甘肃名优蔬菜。兰州百合狭域分布,无性繁殖,多年生栽培,连作栽培十分普遍,连作障碍严重。兰州百合枯萎病是典型的土传病害,一般于5月下旬开始发病,6月雨水多时发病程度严重,发病时植株根部腐烂,地上部分黄化、枯萎,继而死亡。该病害在兰州百合产区普遍发生,是形成连作障碍的重要原因^[1]。镰刀菌(*Fusarium*)是引起百合枯萎病发生的典型病原真菌。该病原真菌侵入植物根部,引起维管束病害,植株最终枯萎死亡^[2-3]。枯萎病属于土传病害,相对于地上部病害,其防治工作比较困难^[4]。近年来,利用酚酸类物质化感抑制作用防控枯萎病已成为研究热点。

酚酸类物质是植物根系分泌物中的重要化感

物质,是普遍存在于高等植物组织并与植物生长密切相关的次级代谢产物^[5]。乌头酸(aconitic acid, AA; C₆H₆O₆)是兰州百合根系的重要分泌物^[6]。尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)是兰州百合主产区枯萎病致病病原,是该区百合枯萎病防治的重点防控对象^[2]。乌头酸又名丙烯-1,2,3-三羧酸,在自然界中存在顺式(CAA)和反式(TAA)异构体。在自然或正常的浓度范围内,乌头酸具有生物安全性。乌头酸是小麦^[7]及葡萄^[8]根系中重要的根系分泌物,对尖孢镰刀菌具有抑制作用,利用高含乌头酸的玉米组织拌土可以有效降低南方根结线虫对植株的侵害程度且不影响植株正常生长^[9];近期关于小分子杀线虫毒素反式乌头酸生物合成途径及该毒素应用于植物根结线虫防治的研究也为该物质作为化感抑制剂的应用提供有价值的参考^[10]。

收稿日期:2023-05-17; 改回日期:2023-07-28

资助项目:甘肃省科技厅重点研发计划项目(2023CYZC49);国家自然科学基金项目(31860549);甘肃省教育厅产业支撑项目(22YF7NA108)

作者简介:张燕航(1997—),女,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为蔬菜栽培和生物技术。E-mail: 2315228490@qq.com

通信作者:师桂英(E-mail: shigy@gsau.edu.cn); 杨宏羽(E-mail: 171847248@qq.com)

基于以上研究背景,本课题组前期研究了乌头酸对尖孢镰刀菌的化感效应,证明了该物质对尖孢镰刀菌存在低促高抑的化感抑制效应^[10-11]。本研究以上述研究结果为基础,研究在人工接种尖孢镰刀菌的条件下,乌头酸对镰刀菌在土壤中定殖能力、对百合植株枯萎病的防治效果及其对植株生长发育的影响,以评估乌头酸作为化感抑制剂防治百合枯萎病的可能性。上述研究可为百合枯萎病病原性连作障碍治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种选用“兰百1号”,选取鳞片抱合紧密、无病虫害以及鳞茎盘无损伤的独头鳞茎,用于百合幼苗培养。

供试菌种为尖孢镰刀菌,由本课题组分离自兰州百合枯萎病罹病组织并纯化保存。乌头酸由上海中秦化学试剂有限公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 外源乌头酸对尖孢镰刀菌生长的化感作用

参考牟晓玲等^[2]的方法活化尖孢镰刀菌及制备孢子悬浮液。每培养皿20 mL PDA 培养基,接种5 μL 的孢子悬浮液于28 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温培养7 d。从第3天开始测定菌落直径,每24 h测定1次。菌落直径的测定采用游标卡尺(宁波旗辰仪器有限公司)测定。

1.2.2 外源乌头酸处理条件下尖孢镰刀菌土壤定殖力

菌悬液制备方法同1.2.1,略作改动:取菌饼9~12块,接种在含有300 mL PDB 培养基的三角瓶中,其余同上。取150 g基质(蛭石:珍珠岩=3:1)两份分别置于500 mL烧杯中,121 $^{\circ}\text{C}$,20 min条件下灭菌,然后将菌悬液浇灌在灭过菌的基质里,搅拌均匀,取10 g置于培养皿中封口,28 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温培养。每处理12皿。分别于第0、2、4、6、9、12、16、20、25、32、37、40天取样测定殖力。取样时,用灭过菌的药匙,在无菌条件下,从基质的中心位置取1 g基质稀释 10^7 、 10^6 、 10^5 倍后,分别取100 μL 涂布在马丁氏培养基上,每浓度3次重复。将培养皿放置于28 $^{\circ}\text{C}$ 下培养3 d记录各平板上的菌量,最后计算每克根际基质中的含菌量(CFU $\cdot\text{g}^{-1}$),即定殖密度用来表示处理F和处理T+F在兰州百合根际土壤中的定殖力。

1.2.3 外源乌头酸对百合植株与尖孢镰刀菌的化感作用

1.2.3.1 处理方法

本研究设计采用完全随机试验设计。在人工接种病原菌(尖孢镰刀菌)的兰州百合植株下进行乌头酸处理。处理分别为CK(清水处理,不接菌)、T(1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 乌头酸处理,不接菌)、F(接菌,清水处理)、T+F(接菌,1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 乌头酸处理)。每个处理3次重复,每处理15株幼苗。

菌悬液制备方法同1.2.1,略作改动:取菌饼12~15块,接种在含有400 mL PDB 培养基的三角瓶中,其余同上。

百合植株接种方法参考本课题组已发表的方法^[2],略作改动,用10 mL同浓度的菌液灌根,4 d后等量灌根1次,直至首株植株开始发病,停止灌根。

乌头酸处理采用灌根法,开始处理时间为90%植株株高达到10 cm时,每钵浇灌10 mL乌头酸溶液,每4 d等量灌根1次,直至F处理或T+F处理首株植株开始发病,停止灌根,以清水处理作为对照。处理后植株置于人工气候箱中,于28 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度85%、12 h光暗交替条件下培养,待植株发病15 d后取样进行相关指标的测定。

1.2.3.2 百合植株发病率、病情指数及生长生理指标测定

百合枯萎病在植株水平上的分级参考陈红梅等^[11]病情分级标准,将发病等级划分为5级:0级,全株正常,未发病,无任何发病症状;1级,约1/3及以下的叶片失绿发黄、萎蔫、干枯,茎绿色;2级,约1/2的叶片失绿发黄、萎蔫、干枯,茎出现轻度失绿发黄症状;3级,约2/3的叶片失绿发黄、萎蔫、干枯,茎发黄症状严重;4级,全部叶片失绿发黄、萎蔫、干枯,且茎呈现褐色,全株干枯死亡。以第8天的数据计算发病率及病情指数^[2]。

$$\text{发病率}(\%) = \frac{\text{发病植株数}}{\text{调查总株数}} \times 100\%$$

$$\text{病情指数} = \left[\frac{\sum (\text{病级数值} \times \text{该病级病株数})}{(\text{最高发病级数} \times \text{调查总株数})} \right] \times 100\%$$

用直尺测定株高(植株根颈至生长点)。用数显电子游标卡尺测定茎粗(植株根颈处的茎粗)。叶面积采用YMJ-C叶面积测量仪测定。将植株从根颈部位切断,用千分之一电子天平分别称量植株地上部、地下部鲜重。将称完鲜重的植株在105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青15 min后,于60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,用千分之一电

子天平分别称量植株地上部和地下部质量^[6]。

超氧化物歧化酶(SOD)采用NBT光还原法测定,过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法^[12],过氧化氢酶(CAT)活性、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性和多酚氧化酶(PPO)活性参考《植物生理学实验指南》,苯丙氨酸解氨酶(PAL)的提取和活性测定按照冯立娟等^[13]的方法。脯氨酸含量测定参照王敏瑞等^[14]的方法,可溶性蛋白含量测定参照陈财志等^[15]的方法。

1.3 数据分析

试验数据采用 Microsoft Office Excel 2010 软件

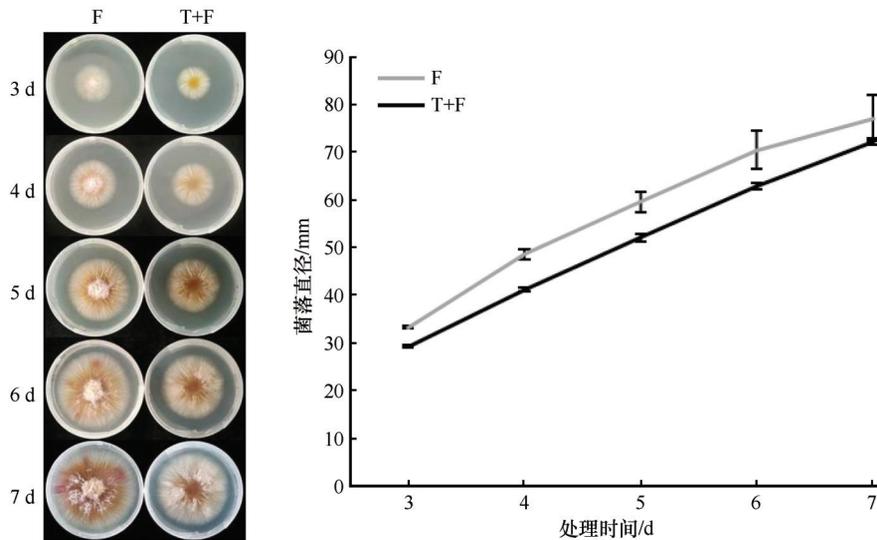


图1 外源乌头酸处理对尖孢镰刀菌菌落生长形态、菌落直径的影响

Fig.1 Effect of exogenous aconitic acid treatment on colony growth morphology and colony growth diameter of *Fusarium oxysporum*

2.2 外源乌头酸处理对尖孢镰刀菌土壤定殖力的影响

外源乌头酸处理减少了尖孢镰刀菌的数量,而且其作用效应有一定的时效性,在0~40 d的测定时间范围内,T+F处理的尖孢镰刀菌数量低于F处理,且其二者的土壤定殖力变化趋势基本一致,从第0天到第40天基本呈下降趋势,定殖密度在第4天时急剧下降,之后持续下降(图2)。

2.3 外源乌头酸处理对兰州百合枯萎病发生的影响

枯萎病病原菌侵染植株后叶片逐渐发黄、变褐、枯萎,且从叶缘两侧向下卷曲;茎秆干枯,变成褐色,最终整株植株变褐、枯萎死亡,地下部鳞茎盘变褐,鳞茎出现褐色病斑(图3)。F处理的植株叶片

进行数据统计;采用 SPSS 20.0 软件进行方差显著性分析及主成分分析;采用 Excel 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 外源乌头酸处理对尖孢镰刀菌菌落生长的影响

外源乌头酸处理抑制了镰刀菌的生长。培养3天后,外源乌头酸处理对尖孢镰刀菌菌落生长产生了显著的抑制作用(图1)。培养3、4、5、6、7 d后,T+F处理的菌落直径分别比F处理菌落直径小12.08%、15.36%、12.63%、10.81%、6.4%;与T处理相比,T+F处理的菌丝密度也相对稀疏。

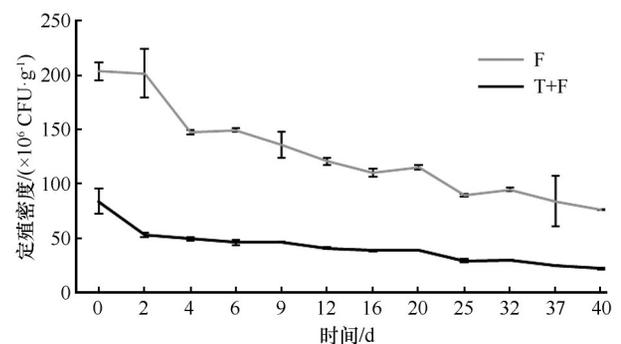
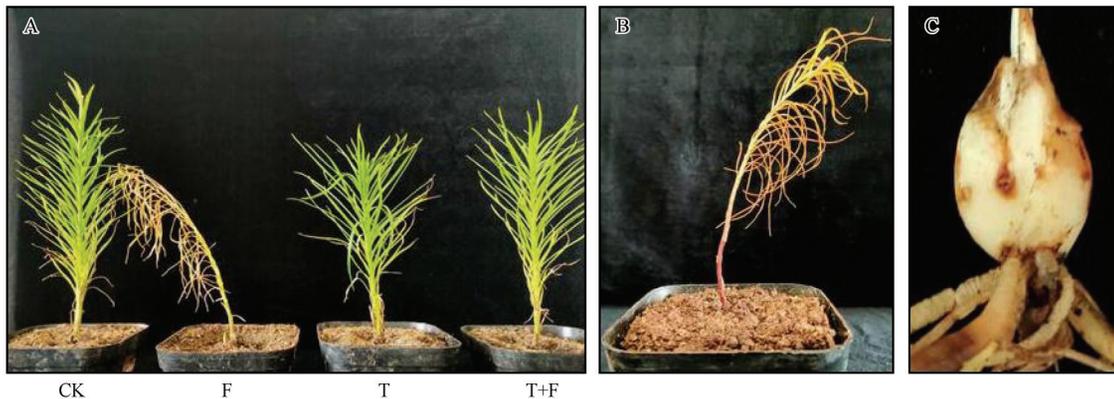


图2 外源乌头酸处理对尖孢镰刀菌土壤定殖力的影响

Fig.2 Effects of exogenous aconitic acid treatment on soil colonization of *Fusarium oxysporum*

全部干枯发黄,茎干黄褐色,地上部枯死。

外源乌头酸处理一定程度上缓解了尖孢镰刀菌对百合植株生长发育的影响。外源乌头酸处理



注:A.不同处理下百合植株生长发育情况;B.植株发病后2/3叶干枯;C.发病百合鳞茎

图3 外源乌头酸处理对兰州百合枯萎病发生及植株生长的影响

Fig.3 Effects of exogenous aconitic acid treatment on the occurrence of *Fusarium oxysporum* and plant growth of Lanzhou lily

可以显著降低兰州百合植株的发病率和病情指数,发病率与病情指数在各处理间均差异显著。T+F处理的发病率显著低于F处理44.45%,T+F处理的病情指数显著低于F处理28.21%(表1)。

表1 外源乌头酸处理对兰州百合枯萎病发病的影响

Table 1 Effects of exogenous aconitic acid on Lanzhou lily wilt disease

处理	发病率/%	病情指数/%
清水CK	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c
乌头酸T	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c
清水、接菌F	60.00±7.51 ^a	48.75±0.43 ^a
乌头酸、接菌T+F	33.33±3.76 ^b	35.00±1.15 ^b

注:表中不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

表2 外源乌头酸处理对兰州百合农艺性状的影响

Table 2 Effects of exogenous aconitic acid treatment on agronomic traits of Lanzhou lily

处理	茎粗/mm	株高/mm	叶面积/mm ²	鲜重/g		干重/mm	
				地上部	地下部	地上部	地下部
清水CK	11.72±0.16 ^a	8.53±1.18 ^a	124.88±8.45 ^a	2.51±0.39 ^a	6.12±1.24 ^a	0.32±0.04 ^a	2.80±0.49 ^a
乌头酸T	11.32±0.28 ^{ab}	8.71±1.89 ^a	127.83±11.84 ^a	2.35±0.34 ^a	4.30±0.59 ^a	0.21±0.04 ^b	1.18±0.28 ^b
清水、接菌F	10.67±0.34 ^b	7.80±0.47 ^b	110.42±5.19 ^b	2.16±0.16 ^a	4.17±0.59 ^a	0.19±0.01 ^b	0.92±0.19 ^b
乌头酸、接菌T+F	11.33±0.35 ^{ab}	8.65±0.28 ^a	109.41±7.70 ^a	2.00±0.24 ^a	4.75±0.58 ^a	0.20±0.02 ^b	1.66±0.29 ^b

注:不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

2.5 外源乌头酸处理对兰州百合抗氧化酶活性及渗透调节物质的影响

POD和SOD属于植物活性氧系统的关键酶,能够减少或阻碍活性氧自由基对植物组织的伤害,调节ROS系统平衡。PAL是植物体次生代谢途径的关键酶,其活性的增加意味着苯丙烷类和与抗生有

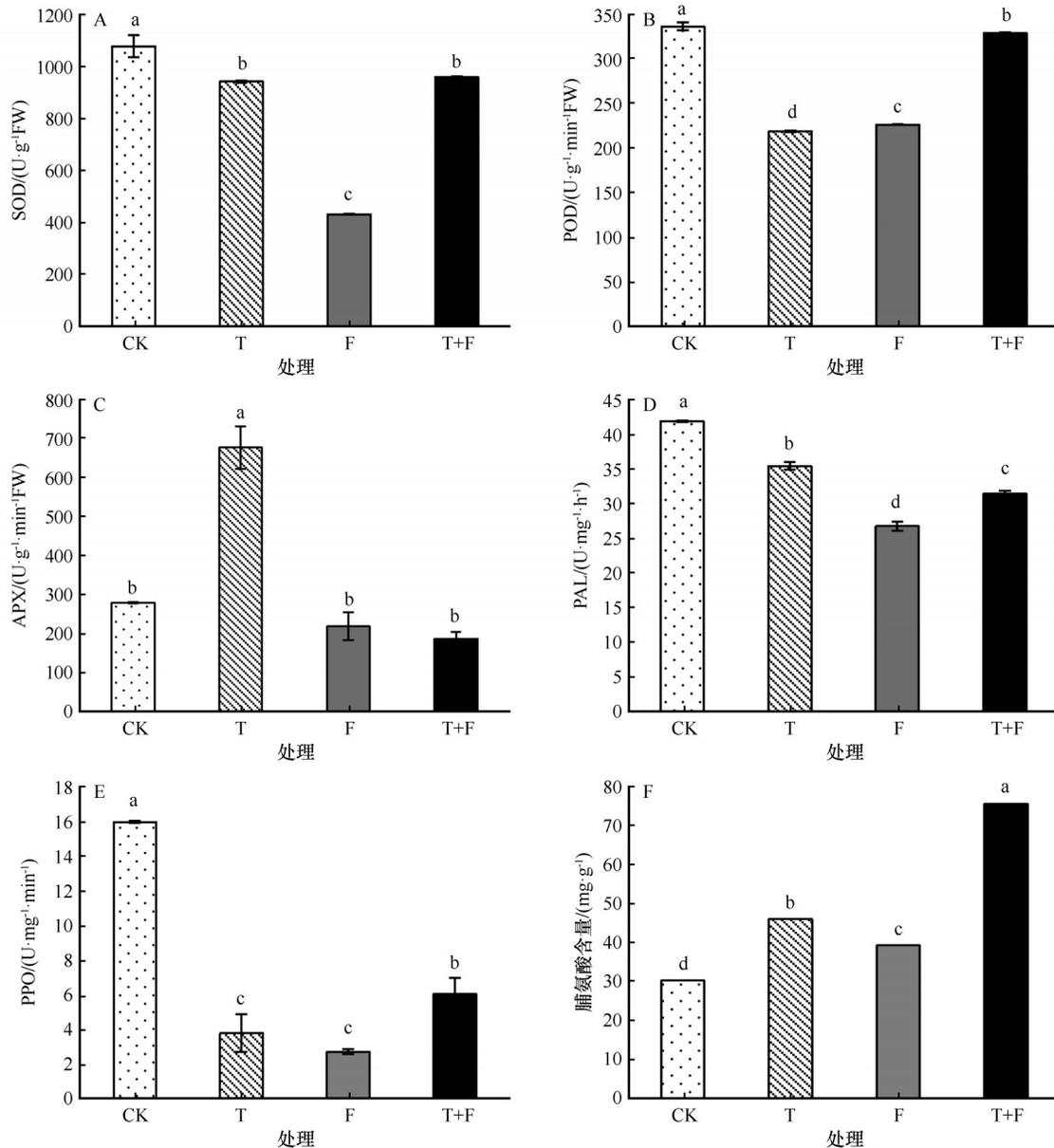
2.4 外源乌头酸处理对兰州百合植株生长的影响

外源乌头酸处理可以在一定程度上缓解由于尖孢镰刀菌侵染对百合植株生长产生的抑制作用。在测定的7个指标中,茎粗、地上部分干重、地下部干重在各处理间差异显著。F处理的植株茎粗、地上部干重、地下部干重分别比CK显著降低了9%、41%、67%;T处理的地下部鲜重、地上部干重、地下部干重分别比CK降低了30%、34%、58%;而与F处理相比,T+F处理的地下部鲜重、地下部干重分别比F处理增加了14%、80%。由此说明,T处理在一定程度上抑制了百合植株的生长,F处理抑制了百合植株的生长,而T+F处理对于由于F处理对植株产生的抑制效应具有一定的缓解作用(表2)。

关的次生代谢产物的生物合成的增加^[16]。PPO能使酚类物质氧化为对病原物毒性更强的醌类物质,其活性的提高对植物的抗病性非常重要。外源乌头酸处理可以在一定程度上缓解由于尖孢镰刀菌侵染对百合抗氧化酶产生的抑制作用。在测定的6个抗氧化酶活性指标中,SOD、POD、PAL在

各处理间差异显著。F处理的SOD、PAL、POD、PPO活性分别比CK显著降低了60.05%、36.22%、32.69%、82.60%;T处理的SOD、PAL、POD、PPO活性分别比CK显著降低了12.6%、15.49%、34.97%、75.86%;而与F处理相比,T+F处理的SOD、PAL、

POD、PPO活性分别显著增加了122.63%、17.49%、45.35%、119.36%。由此说明,F处理显著抑制了百合植株的生长,T处理在一定程度上抑制了百合植株的生长,而T+F处理对于由尖孢镰刀菌对植株产生的抑制效应具有一定的缓解作用(图4)。



注:图中不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$

图4 外源乌头酸处理对兰州百合抗氧化酶活性及渗透调节物质的影响

Fig.4 Effects of exogenous aconitic acid treatment on the enzyme activity and osmotic regulatory substances of Lanzhou lily antioxidant

非生物胁迫条件会导致植物体内脯氨酸含量的增加,大量积累的脯氨酸可维持胞液的渗透平衡,减轻胁迫对细胞的伤害^[16-17]。外源乌头酸处理在一定程度上会对人工接种尖孢镰刀菌百合植株的脯氨酸含量产生影响。在测定的2个渗透调节物

质指标中,脯氨酸含量在各处理间差异显著。F处理的脯氨酸含量比CK显著增加了29.83%;T处理的脯氨酸含量比CK显著增加了52.09%;而与F处理相比,T+F处理的脯氨酸含量比F处理显著增加了92.59%。

2.6 外源乌头酸处理对百合植株生长指标与生理指标影响的主成分分析

通过对百合植株12个生长指标与生理指标进行主成分分析,根据特征值高于1、累积方差贡献率高于85%的原则提取了3个主成分,3个主成分的特征值分别为5.892、3.327和2.781,方差贡献率分别为49.099%、27.728%和23.173%,累计方差贡献率达100%,即这3个主成分涵盖了原始数据信息总

量的100%。因此,将这3个主成分作为综合变量来评价外源乌头酸处理对百合植株生长的影响是可行的。其中主成分1载荷最大的是根冠比干重;主成分2载荷最大的是APX;主成分3载荷最大的是叶面积(表3)。

以各因子得分为基础,以 $F=0.49F_1+0.277F_2+0.232F_3$ 计算4个处理下兰州百合幼苗的综合得分,得分越高,综合指标越好(表4)。

表3 外源乌头酸处理对百合植株生长指标和生理指标影响的主成分分析及载荷系数
Table 3 Principal component analysis and loading coefficient of growth indicators and physiological indexes of lily plants treated with exogenous aconitic acid

主成分	特征值	方差/%	累计方差/%	指标	主成分载荷系数		
					主成分1	主成分2	主成分3
1	5.892	49.099	49.099	过氧化物酶POD活性	0.964	-0.034	-0.265
2	3.327	27.728	76.827	超氧化物歧化酶SOD活性	0.760	0.590	0.282
3	2.781	23.173	100	过氧化氢酶CAT活性	0.963	-0.270	-0.004
				抗坏血酸过氧化物酶APX活性	-0.393	0.635	0.665
				苯丙氨酸解氨酶PAL活性	0.710	0.593	0.380
				多酚氧化酶PPO活性	0.914	-0.170	0.368
				脯氨酸含量	0.055	0.569	-0.820
				可溶性蛋白	-0.029	-0.883	0.468
				茎粗/株高	0.248	-0.939	0.237
				叶面积	0.138	0.349	0.927
				根冠比干重	0.982	0.069	-0.175
				根冠比鲜重	0.957	-0.112	-0.267

注:计算各处理的因子得分可以更好地反映兰州百合在不同处理下的综合指标。

表4 外源乌头酸处理对百合植株生长指标和生理指标影响的主成分得分及排序
Table 4 Principal component scores and ranking of growth indicators and physiological indexes of lily plants by exogenous aconitic acid treatment

处理	F_1	F_2	F_3	F 综合	排序
清水CK	1.06829	0.92107	0.51027	0.897	1
乌头酸T	-0.85218	-0.46039	1.14535	-0.297	3
清水、接菌F	-0.85276	0.72714	-0.99702	-0.448	4
乌头酸、接菌T+F	0.63665	-1.18782	-0.65859	-0.170	2

3 讨论

外源乌头酸处理可以有效缓解枯萎病的发生。与F处理相比,T+F处理植株发病率和病情指数分别显著降低了44.45%、28.21%,防控效果为28.21%,且使尖孢镰刀菌定殖密度下降。有些酚酸

物质在低浓度时对病原真菌的菌丝生长有一定的抑制作用^[18],经高含乌头酸的苏云金芽孢杆菌菌株发酵液处理后,可以显著降低番茄植株的发病程度^[9],水溶性酚酸类化合物都对苏丹草原生丛枝菌根真菌群落的繁殖定居产生明显抑制作用^[19]。乌头酸是小麦^[7]及葡萄^[8]根系中重要的根系分泌物,

对尖孢镰刀菌具有抑制作用,利用高含乌头酸的玉米组织拌土可以有效降低南方根结线虫对植株的侵害程度且不影响植株正常生长^[9];近期有关于小分子杀线虫毒素反式乌头酸生物合成途径及该毒素应用于植物根结线虫防治的研究^[9]。上述文献支持本研究结果。

POD、SOD、PPO和PAL、脯氨酸等是反映植物被诱导抗病虫害和逆境胁迫的重要生理指标。化感物质主要通过改变酶活性进而影响植物的生理代谢系统^[20],其来源于植物根系分泌物和腐解物^[21]。酚酸类物质已被证明是连作体系中活性较强的化感物质^[22]。申太荣^[23]研究邻苯二甲酸二乙酯对黄瓜幼苗抗枯萎病能力的影响,发现此种化感物质是通过抑制枯萎病原菌和促进幼苗生长的共同作用来提高黄瓜幼苗抗病能力;陆胜波等^[24]和刘盟盟等^[25]发现,酚酸类物质含量与PAL酶活性正相关;葛杰克等^[26]发现,酚酸物质可提高栝楼SOD、POD酶活性;王艳芳等^[27]发现经酚酸处理后,平邑甜茶幼苗脯氨酸含量明显升高。本研究中,茎粗、株高、干重、地下部鲜重大于处理F,T+F处理的SOD、POD、PAL、PPO活性及脯氨酸含量均显著大于处理F,说明乌头酸处理能有效阻止病原菌在植物体内侵染及扩展,因而快速产生脯氨酸以减轻渗透失衡引起的各类酶蛋白变性,通过调节渗透压抵御胁迫,发挥抗性作用。经主成分分析,T+F处理的综合指标排序也在F处理之前。这表明外源乌头酸主要通过改变酶活性进而影响植物的抗病性,因此乌头酸处理对于由尖孢镰刀菌对植株产生的抑制效应具有一定的缓解作用。

外源乌头酸处理在一定程度上提高了植物细胞对非生物胁迫的耐受性。本研究中,T处理的脯氨酸含量和APX活性大于CK。APX作为清除活性氧的关键组分,具有在非生物胁迫下清除和防御活性氧自由基的功能,增强植物抗性,保护植物细胞免受氧化伤害,在细胞H₂O₂代谢过程中起着至关重要的作用^[28]。李泽琴等^[29]通过对植物APX的酶学特征、关键催化部位、基因表达调控分子机制以及对植物非生物逆境胁迫响应的途径和生理功能的研究,揭示了该类酶在多种非生物逆境胁迫应答调控网络中的重要作用。通常,细胞面临非生物胁迫导致大量ROS的积累,迅速启动ROS清除机制。一方面,细胞内积累大量的内源性保护物质,如丙二醛、脯氨酸、海藻糖等,减轻对细胞的伤害^[30];另一方面,提高

细胞内抗氧化酶的活性,以清除过量的ROS^[31]。外源乌头酸处理后虽对兰州百合植株生长有影响,但也在一定程度上提高了细胞对非生物胁迫的耐受性。本研究应用1 000 m·L⁻¹的乌头酸进行化感作用研究,但对兰州百合生长有一定抑制作用,因此,对乌头酸在枯萎病防治中的浓度应用有待优化。

4 结论

从各处理的综合指标排序结果(CK>T+F>T>F)分析,尽管乌头酸对兰州百合植株生长有轻微的抑制现象,但是该物质可以有效缓解尖孢镰刀菌胁迫。乌头酸处理降低病原菌在土壤中的定殖能力和病原菌数量,同时提高植物细胞对非生物胁迫的耐受性,可能是该化学物质缓解罹病植株发病症状的重要作用机制。乌头酸在自然或正常的浓度范围内具有生物安全性,因此,可以考虑将其作为化感抑制剂应用于百合枯萎病的防治。本结论对其他作物土传病害的防治也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 张立彭,师桂英,史贵红,等.土壤熏蒸-微生物菌剂联用缓解兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)连作障碍研究[J].中国沙漠,2020,40(5):169-179.
- [2] 牟晓玲,李潇潇,师桂英,等.兰州百合枯萎病病原菌鉴定及罹病组织超微结构观察[J].植物保护学报,2022,49(4):1111-1118.
- [3] 梁巧兰,徐秉良,刘艳梅.观赏百合根腐病原菌鉴定及药剂筛选[J].甘肃农业大学学报,2004(1):25-28.
- [4] Wu H S, Zhou X D, Shi X, et al. In vitro responses of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* to phenolic acids in decaying watermelon tissues[J]. Phytochemistry Letters, 2014, 8: 171-178.
- [5] 李潇潇,师桂英,张立彭,等.荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)在植物病害生物防治中的研究及展望[J].草原与草坪,2021,41(5):148-156.
- [6] 孙鸿强.连作对兰州百合生理特性及土壤环境效应的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
- [7] 董艳,董坤,郑毅,等.不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病的防治及其机理[J].应用生态学报,2014,25(7):1979-1987.
- [8] 郭修武,李坤,孙英妮,等.葡萄根系分泌物的化感效应及化感物质的分离鉴定[J].园艺学报,2010,37(6):861-868.
- [9] 都萃颖.小分子杀线虫毒素反式乌头酸生物合成途径及该毒素应用于植物根结线虫防治的研究[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [10] 王文珠,师桂英,苏国礼,等.乌头酸对尖孢镰刀菌百合专化型抑制作用分析[J].西北农业学报,2022,31(2):224-232.
- [11] 陈红梅,李金花,柴兆祥,等.35个马铃薯品种对镰刀菌干腐病优势病原的抗病性评价[J].植物保护学报,2012,39(4):308-314.
- [12] 梁雪,贺铎,肖蕾,等.菖蒲过氧化物酶测定条件的研究[J].生

- 物学杂志, 2012, 29(6): 87-89.
- [13] 冯立娟, 尹燕雷, 杨雪梅, 等. 石榴果实发育期果皮褐变及相关酶活性变化[J]. 核农学报, 2017, 31(4): 821-827.
- [14] 王敏瑞, 仪慧兰. 二氧化硫对拟南芥植株干旱生理的调节作用[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1285-1291.
- [15] 陈财志, 李水凤, 周东, 等. 生物酵素叶面肥对普通白菜产量和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2023(3): 1-8.
- [16] Koramutla M K, Kaur A, Negi M, et al. Elicitation of jasmonate-mediated host defense in *Brassica juncea* (L.) attenuates population growth of mustard aphid *Lipaphis erysimi* (Kalt.) [J]. *Planta*, 2014, 240: 177-194.
- [17] Kishor P B K, Sreenivasulu N. Is proline accumulation per se correlated with stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(2).
- [18] Hao W Y, Ren L X, Ran W, et al. Allelopathic effects of root exudates from watermelon and rice plants on *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum* [J]. *Plant & Soil*, 2010, 336(1/2): 485-497.
- [19] 陈钰栋. 连作烟草根系微生态特征与绿色修复措施研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2022.
- [20] 杨建欣, 黄秋燕. 园林植物化感作用机理研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 90-97.
- [21] 孙雪冰, 范鹤龄, 黄小龙, 等. 山药化感物质对山药和玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(9): 1853-1861.
- [22] 张宝, 李焯楨, 冯法节, 等. 地黄根系分泌物化感效应与酚酸类物质的关系研究[J]. 中药材, 2015, 38(4): 659-663.
- [23] 申太荣. 大葱根系分泌物中两种化感物质对黄瓜幼苗及其根际微生物的化感作用[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2015.
- [24] 陆胜波, 陈静, 张文娥, 等. 遮光对铁核桃青皮多酚物质及相关酶活性和基因表达的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(6): 1231-1242.
- [25] 刘盟盟, 贾丽, 程路芸, 等. 冷蒿酚酸及其抗氧化防御酶活性对机械损伤的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(2): 219-230.
- [26] 葛杰克, 叶雨蒙, 楼雪怡, 等. 酚酸化感作用对栝楼生理特性及根际微生态的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 258-266+272.
- [27] 王艳芳, 潘凤兵, 张先富, 等. 土壤中不同酚酸类物质对平邑甜茶幼苗光合及生理特性的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 52-59.
- [28] 王润豪, 于永昂, 胡海燕, 等. 小麦抗坏血酸过氧化物酶TaAPX基因克隆与表达分析[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 48-56.
- [29] 李泽琴, 李静晓, 张根发. 植物抗坏血酸过氧化物酶的表达调控以及对非生物胁迫的耐受作用[J]. 遗传, 2013, 35(1): 45-54.
- [30] Huang H, Ullah F, Zhou D, et al. Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 800.
- [31] Baxter A, Mittler R, Suzuki N. ROS as key players in plant stress signalling [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(5): 1229-1240.

Allelopathic effect of aconitic acid on inhabiting wilt disease in Lanzhou lily

Zhang Yanhang, Wang Wenzhu, Shi Guiying, Yang Hongyu, Chang Guixiang, Wang Ying, Li Hui
(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aconitic acid is an important root exudate of Lanzhou lily. In order to evaluate the feasibility of aconitic acid as an allelopathic inhibitor for the prevention and treatment of lily wilt, four treatments were designed: CK (clean water treatment), F (bacteriosis, no aconitic acid treatment), T (1 000 mg·L⁻¹ aconitic acid treatment), T+F (bacteriological treatment, 1 000 mg·L⁻¹ aconitic acid treatment), and the allelopathic effect of aconitic acid on Lily wilt in Lanzhou was studied. The ex vivo culture results of *Fusarium oxysporum* showed that compared with F treatment, T+F treatment significantly reduced the proliferation and number of *Fusarium oxysporum*, and its effect was effective. Compared with F treatment, the incidence and disease index of T+F treatment were significantly reduced by 44.45% and 28.21%, respectively. The SOD, PAL, POD, PPO activity and proline content of T+F treatment increased significantly by 122.63%, 17.49%, 45.35%, 119.36% and 92.59%, respectively. Compared with CK, the APX activity and proline content of T treatment (1 000 mg·L⁻¹ aconitic acid treatment) were significantly increased by 142.58% and 52.1%, respectively. After principal component analysis, the order of composite indexes for different treatments was: CK>T+F>T>F. In summary, exogenous aconitic acid can reduce the incidence of lily wilt and alleviate the adverse effects of *Fusarium acusia* on the growth and development of lily plants, and has the possibility of being applied as an allelopathic inhibitor to the prevention and control of lily wilt.

Key words: aconitic acid; *Fusarium oxysporum*; continuous cropping disorder; allelopathy