文章编号:1000-7601(2025)05-0234-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.23

外源物质预处理对连作党参根腐病抗性及生理特性的影响

胡玉蓉[1,2],邱黛玉[1],马 澜[1,2],陈鲜鲜[1,2],徐锋宾[1,2]

(1. 甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070;2. 干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探究 3 种外源物质缓解连作党参根腐病的作用机制,本研究以盆栽 1 年生党参幼苗为材料,设置空白对照(CK_1)、病原菌侵染(CK_2)、28-高芸苔素内酯灌根(T_1)及叶喷(T_2)、枯草芽孢杆菌(J_1)和解淀粉芽孢杆菌(J_2)接种及氨基酸水溶肥喷施(F_a)处理,30 d 后接种病原菌,测定外源物质抑菌率及叶片生理生化指标变化。结果表明:J_1和 J_2处理显著抑制病原菌侵染钉生长,抑菌率均超 70%;相较于 CK_2,T_1、T_2和 F_a处理显著提高叶绿素 a 含量(39.85%~81.52%),叶绿素 b 含量(68.94%~168.45%),并增强过氧化物酶(POD)活性(81.33%~95.33%)和过氧化氢酶(CAT)活性(8.91%~39.36%),同时有效减轻细胞膜损伤和脂质过氧化;J_1 和 J_2 处理则显著降低超氧化物歧化酶(SOD)活性 16.85%和 13.76%、丙二醛(MDA)含量 47.83%和 50.44%、脯氨酸含量 20.55%和 18.23%、可溶性糖含量 35.82%和 35.01%、可溶性蛋白含量 35.46%和 35.21%,使这些胁迫指标恢复至接近正常水平。综上,生防菌可有效抑制病原菌菌丝的生长及孢子萌发;生长调节剂和氨基酸水溶肥可平衡渗透调节系统,增强抗氧化防御机制,促进光合作用,增强植物抗逆性,从而缓解病害。

关键字:党参;根腐病;外源调控;抑菌率;生理特性

中图分类号:S567;S435.6 **文献标志码**:A

Effects of exogenous substance pretreatment on root rot resistance and physiological characteristics of continuous cropping *Codonopsis pilosula*

HU Yurong[1,2], QIU Daiyu[1], MA Lan[1,2], CHEN Xianxian[1,2], XU Fengbin[1,2]

(1. *College of Agronomy, Gansu Agricultural A&F University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
2. *State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to explore the mechanism of three exogenous substances to alleviate the root rot of *Codonopsis pilosula*, potted annual *C. pilosula* seedlings were used as materials in this study. Blank control (CK_1), pathogen infection (CK_2), 28-homobrassinolide root irrigation (T_1), and leaf spray (T_2), *Bacillus subtilis* (J_1), and *Bacillus amyloliquebilis* (J_2) were inoculated, and amino acid water-soluble fertilizer spraying (F_a) treatments were set up. The pathogenic bacteria were inoculated 30 days later, and the inhibition rate of exogenous substances and the changes of physiological and biochemical indexes of leaves were measured. The results showed that J_1 and J_2 treatments significantly inhibited the growth of pathogenic infected nails, and the inhibition rate was over 70%. Compared with CK_2, T_1, T_2, and F_a treatments significantly increased the contents of chlorophyll a (39.85%~81.52%) and chlorophyll b (68.94%~168.45%) and enhanced the activities of peroxidase (POD) (81.33%~95.33%) and catalase (CAT) (8.91%~39.36%), while effectively reducing cell membrane damage and lipid peroxidation. J_1 and J_2 treatments significantly reduced the activities of superoxide dismutase (SOD) by 16.85% and 13.76%, malondialdehyde (MDA) by 47.83% and 50.44%, proline by 20.55% and 18.23%, soluble sugar by 35.82% and 35.01%, and soluble protein by 35.46% and 35.21%, respectively, and these stress indexes returned to near-normal levels. In conclusion, biocontrol bacteria can effectively inhibit the growth of pathogenic mycelium and spore germination. Growth regulators and amino acid water-soluble fertilizers can balance the osmoregu-

收稿日期:2024-10-25 **修回日期**:2024-11-00

基金项目:国家自然科学基金(31960395)

作者简介:胡玉蓉(1999-),女,甘肃古浪人,硕士研究生,研究方向为药用植物资源与利用。E-mail: 2191554037@qq.com

通信作者:邱黛玉(1978-),女,甘肃民勤人,副教授,硕士导师,主要从事药用植物生态种植研究。E-mail: qiudy@gsau.edu.cn

latory system, enhance antioxidant defense mechanisms, promote photosynthesis, and enhance plant stress resistance, thereby alleviating diseases.

Keywords: *Codonopsis pilosula*; root rotdisease; exogenous regulation; bacteriostatic rate; physiological characteristics

中药党参为桔梗科党参属(*Codonopsis* Wall.)植物党参、素花党参或川党参的干燥根,性平味甘,具有健脾益肺、养血生津的功效[1]。党参作为甘肃道地药材之一,其质优效佳,具有较高的经济价值以及巨大的市场需求。近年来,随着农业产业规模化发展,连作重茬导致土传病原菌积累,土传病害加重,以根腐病最为严重。党参根腐病病原菌的优势菌种分别为尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、锐顶镰刀菌(*Fusarium acuminatum*)[2]。镰刀菌经植物的根部渗入并定植于植物维管束内,分泌细胞壁降解酶,利用其降解产物堵塞植物维管束,阻碍水分和营养物质的运输;感染早期叶片黄萎,但随着病程的加重,根茎逐渐变黑腐烂直至死亡,且分泌的真菌毒素协同促进病原菌入侵,降低寄主的防御能力[3-4]。目前,对于根腐病的防控措施非常有限。其中,优化栽培模式、改进农艺措施可改善土壤理化性质及根际微生态环境,有效减少土传病害的发生;化学杀菌剂虽然可快速有效地杀灭病原微生物或降低土壤中病原微生物的种群数量,但过度使用危害环境将使植物病原菌对其产生耐药性,从而降低防治效果;生物防治可优化土壤结构,补充土壤养分,调整微生物群落结构,抑制有害微生物,诱导植物抗性,减轻土壤退化引发的土传病害。

众所周知,芽孢杆菌多以拮抗和竞争的方式与病原菌相互作用,通过抑制病原菌菌丝生长及孢子萌发发挥生防作用[5]。枯草芽孢杆菌可分泌细菌素、酶类、活性蛋白和脂肽类等抑菌物质抑制病原菌的生长,同时激活植物系统抗性,增强寄主免疫应答以提升抗病性[6]。枯草芽孢杆菌破坏瓜果腐霉菌的菌丝结构,导致菌丝解体、扭曲和原生质浓缩,从而有效防治番茄根腐病[7]。解淀粉芽孢杆菌通过合成脂肽类抗生素(表面活性素、芽孢素)、细菌溶素及细胞壁降解酶(几丁质酶、蛋白酶),直接靶向抑制植物病原真菌的生长[8]。解淀粉芽孢杆菌干扰菌丝体的正常生长,使其生长不均、受损,对孢子萌发的抑制率高达 91.96%,其代谢物的抗真菌蛋白 SpoVG 可有效抑制病原体的生长,对葡萄霜霉病防效达 43.8%[9]。28-高芸苔素内酯作为一种“多效性激素”,可促进植物根系的发育,提高核酸和碳水化合物水平,调节抗氧化机制和光合作用,从而促进植物生长并提高植物抗逆性[10]。氨基酸型肥料有利于促进植物的生长发育、提高抗逆性和改善产品品质。Wang 等[11]研究发现氨基酸水溶肥可有效促进番茄生长,改善果实品质,提升产量,并通过调节根系分泌物,招募有益微生物提高植株的抗逆性。然而,外源物质在防控党参根腐病方面的研究较少,且不同的外源物质对党参抗病的机制尚不清楚。基于此,本研究以盆栽党参为试验材料,探究生长调节剂、生防菌剂、氨基酸水溶肥对患病党参叶片、根部细胞结构及抗逆生理指标的影响,旨在筛选出安全高效的外源物质,为党参产业绿色发展提供参考依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

党参种苗(*Codonopsis pilosula*)由甘肃省岩昌县理川镇六合合作社提供,选用生长均一且健康的 1 年生苗;供试土为灭菌处理的 4 年生党参连作土(0~30 cm);病原菌菌株经测序比对确认为尖孢镰刀菌和锐顶镰刀菌,由甘肃农业大学植保学院提供;药剂为 0.01%和 0.004%的 28-高芸苔素内酯可溶液剂(江西新瑞丰生化股份有限公司);枯草芽孢杆菌(活菌数≥2×10^{10} CFU·g^{-1})和解淀粉芽孢杆菌(活菌数≥2×10^{9} CFU·g^{-1})(济宁市夏农生物科技有限公司);氨基酸水溶肥(氨基酸≥100 g·L^{-1},Zn+B+Mn≥20 g·L^{-1})(山东施美特农业科技限公司);多菌灵(四川国光农化股份有限公司);复合肥料(N∶P_2O_5∶K_2O=18∶18∶18)(湖北奥尔特化工有限公司)用作基肥。

1.2　试验设计

经预试验确定外源物质用量。试验采用盆栽法,共设置正常对照(CK_1,无病原菌和外源物质处理)、病原菌侵染对照(CK_2)、0.1 μmol·L^{-1} 的 0.01% 28-高芸苔素内酯灌根(T_1)、0.1 μmol·L^{-1} 的 0.004% 28-高芸苔素内酯叶喷(T_2)、接种 0.014 g·kg^{-1}枯草芽孢杆菌(J_1)、接种 0.014 g·kg^{-1}解淀粉芽孢杆菌(J_2)、喷施 0.028 g·kg^{-1}氨基酸水溶性肥(F_a)7 个处理,每处理重复 3 次。

移栽前,每盆(口径 39 cm、高度 35 cm)称取复

合肥6.7 g作为基肥,并称取相应外源物质混合于16 kg供试土后装盆。供试苗经800倍多菌灵蘸根后移栽,每盆8株。外源物质处理30 d后,分别用注射及刺伤方式将孢子浓度为5×10^6 · mL^{-1}根腐病菌(尖孢镰刀菌和锐顶镰刀菌)的混合悬浮液注入党参茎叶及根部,每处理重复3次。于7 d后观察菌丝生长情况、致病菌入侵方式以及细胞结构变化,10 d和20 d分别采集叶片测定其生理生化指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 病原菌侵染情况检测 (1)抑菌率测定:抑菌率采用PDA平板接种菌饼,将外源提取液用涂布棒均匀涂布,25℃暗培养2~3 d,测定抑菌圈直径,重复3次,并据此计算抑菌率[(对照菌落直径-处理组菌落直径)/(对照菌落直径-菌饼直径)]×100%。(2)菌丝生长及显微结构观察:采用徒手切片法将健康和染病幼苗植株叶及根部进行切片,取薄片置载玻片上,滴加水合氯醛溶液于酒精灯上透化至完全后,滴加稀甘油,加盖盖玻片,置于光学显微镜(徕卡DM500,徕卡显微系统上海贸易有限公司)下观察[12]。

1.3.2 党参叶片生理生化指标测定 叶片生理生化指标参照李胜[13]的测定方法。丙酮提取法测光合色素含量;苯酚法测可溶性糖含量;考马斯亮蓝法测可溶性蛋白含量;酸性茚三酮法测脯氨酸(Pro)含量;硫代巴比妥酸法测丙二醛(MDA)含量;氮蓝四唑光还原法测超氧化物歧化酶(SOD)活性;过氧化氢法测过氧化氢酶(CAT)活性;愈创木酚法测过氧化物酶(POD)活性。

1.4 数据处理

运用Excel 2010进行数据整理,SPSS 19.0进行数据统计分析,Duncan法进行方差分析及显著性检验,Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 受病原菌侵染的党参叶片和根部细胞显微结构特征

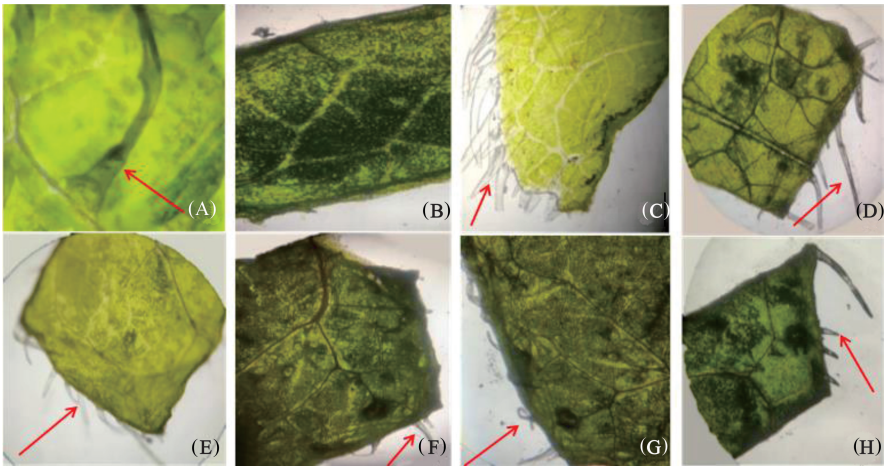
2.1.1 叶组织显微结构特征 光学显微镜观察发现,党参根腐病病原菌以钉子型侵入叶片细胞壁(图1A),健康党参叶片(CK_1)细胞颜色深绿且排列整齐,结构均匀,无侵染钉(图1B)。病原菌侵染后(CK_2),叶片叶脉黄化,透光性增强,部分褪绿,细胞结构中可见大量侵染钉(图1C)。在28-高芸苔素内酯灌根(T_1)、叶喷(T_2)处理后,叶片分别呈绿色和黄绿色,部分叶脉褪绿,侵染钉数量减少,但侵染情况依然严重(图1D、E)。枯草芽孢杆菌(J_1)、解淀粉芽孢杆菌(J_2)处理组叶片深绿,叶脉清晰,侵染钉数量减少且形态卷曲或截断,表明对病原菌侵染有一定抑制效果(图1F、G)。氨基酸水溶肥(F_a)处理组叶脉虽为绿色,但侵染钉数目较多且多聚集于叶脉附近,侵染严重(图1H)。

2.1.2 根部细胞显微结构特征 光学显微镜观察发现,健康党参的根部横切面中,石细胞排列紧密有序,结构完整(图2A);病原菌侵染病变后,根部细胞形态受损,颜色较健康根部的细胞加深,呈黄色至黑褐色(图2B)。经28-高芸苔素内酯(T_1和T_2)处理后,党参根部细胞多呈黄褐色且木栓层及韧皮部破坏严重(图2C、D)。在生防菌(J_1和J_2)处理下,根部微观结构显示石细胞排列清晰,韧皮部宽广,根部细胞形态保持较好(图2E、F)。而氨基酸水溶肥(F_a)处理组的党参根部细胞呈现黄黑褐色,受病原菌破坏严重(图2G)。综上,生防菌处理对根部微观结构的保护效果最为显著。

2.1.3 外源物质对党参根腐病病原菌的抑制效果 外源物质在不同时间段均对党参根腐病病原菌有显著抑制作用,且生防菌处理的抑菌效果显著优于其他处理。对于锐顶镰刀菌,J_1处理在48 h和72 h的抑菌率分别为51.73%和76.21%,较同期J_2处理分别显著增高13.65%和7.87%;且在培养72 h时较培养48 h时增高47.32%(图3A)。对于尖孢镰刀菌,J_2处理在48 h和72 h的抑菌率最高,分别为47.73%和71.67%;较同期J_1处理分别增高23.32%($P<0.05$)和4.07%($P>0.05$)(图3B)。以上结果说明生防菌的抑菌效果明显优于其他外源物质,能有效抑制病原菌菌丝生长。

2.2 外源物质处理对受侵染党参叶片叶绿素含量的影响

党参植株叶片光合色素含量在根腐病病原菌侵染后均比同期CK_1显著降低,在各类外源物质处理后又比同期CK_2不同程度升高,且均以T_1和T_2处理增幅最大,恢复甚至显著超越同期CK_1水平(图4)。其中,在根腐病菌侵染10 d时,党参叶片叶绿素a、类胡萝卜素含量在T_1处理下达到最高,并稍高于CK_1,较CK_2分别显著增加77.74%和49.97%,其叶绿素b含量以T_2处理最高,分别是CK_1和CK_2的2.13倍和3.16倍。在根腐病菌侵染20 d时,党参叶片叶绿素a和类胡萝卜素含量均以T2处理最高,分别较CK_2处理显著增加85.66%和119.61%,其叶绿素b含量则以T_1处理最高,比CK_1和CK_2分别显著提高101.14%和168.18%。综上,5种外源物质处理均有利于促进染病党参叶片光合色素的合成,以T_1和T_2处理效果最显著。

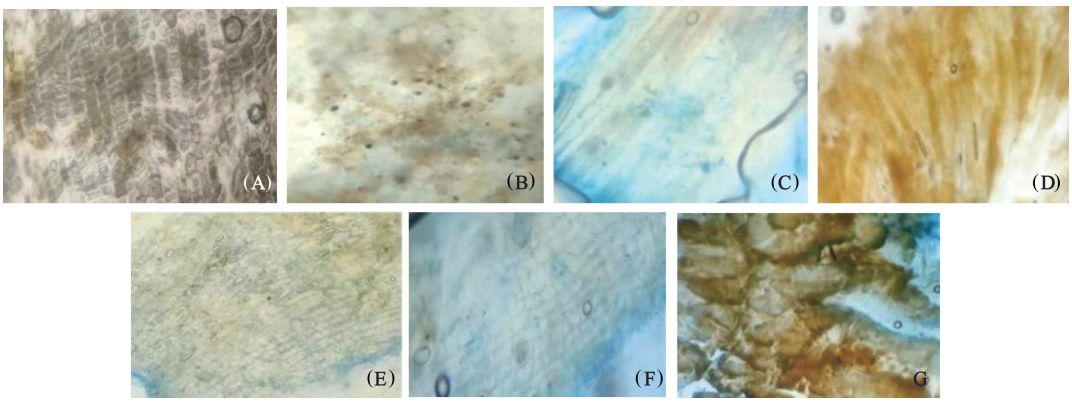


注:A:党参根腐病病原菌;B:健康党参(CK_1);C:受病原菌侵染党参(CK_2);D:28-高芸苔素内酯灌根处理(T_1);E:28-高芸苔素内酯叶喷处理(T_2);F:枯草芽孢杆菌处理(J_1);G:解淀粉芽孢杆菌处理(J_2);H:氨基酸水溶肥处理(F_a)。

Note: A: *Codonopsis* root rot pathogenic bacteria; B: Healthy *Codonopsis*(CK_1); C: Pathogen infestation(CK_2); D: 28-homobrassinolide root irrigation treatment(T_1); E: 28-homobrassinolide leaf spray treatment(T_2); F: *Bacillus subtilis* treatment(J_1); G: *Bacillus amylolique* treatment(J_2); H: Amino acid and water-soluble fertilizer treatment (F_a).

图 1　受病原菌侵染党参叶片显微结构特征(10 μm×10 μm)

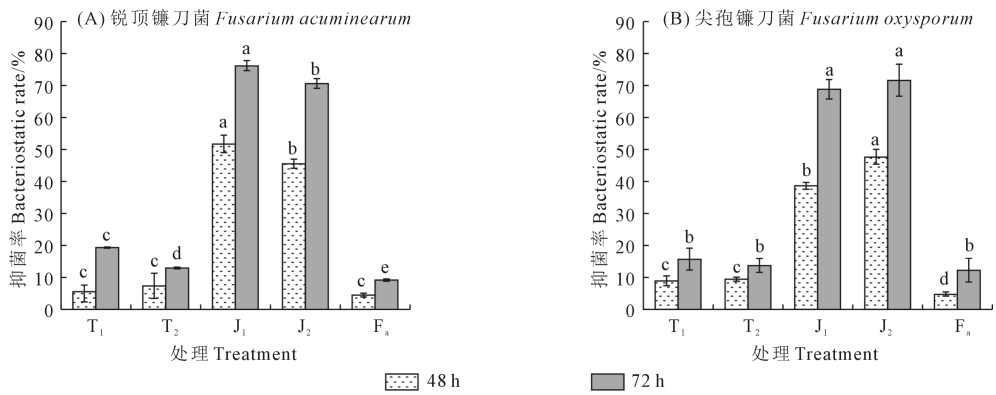
Fig.1　Microstructure characteristics of leaf tissue of *Codonopsis pilosula* infected by pathogen



注 Note: A: CK_1; B: CK_2; C: T_1; D: T_2; E: J_1; F: J_2; G: F_a.

图 2　受病原菌侵染党参根部细胞显微结构特征(10 μm×40 μm)

Fig.2　Microstructural characteristics of root cells of *Codonopsis pilosula* infected by pathogen (10 μm×40 μm)



注:同一处理时间下不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Under the same processing time, different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

图 3　外源物质处理对党参根腐病病原菌的抑菌率

Fig.3　Inhibition rate of exogenous substace treatment on pathogen of *Codonopsis pilosula* root rot disease

2.3 外源物质处理对受侵染党参叶片渗透调节物质含量的影响

党参植株叶片受病原菌侵染(CK_2)不同时间后其渗透调节物质均比同期 CK_1 显著提高,经各外源物质处理后又比 CK_2 不同程度降低。其中,党参叶片可溶性蛋白含量在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别较 CK_1 显著增高 34.05%和 29.40%;各外源物质处理可溶性蛋白含量在各时期均显著低于 CK_2,并均以 F_a 处理最高且稍高于 CK_1,其他外源物质处理大多显著低于 CK_1(图 5A)。党参叶片可溶性糖含量在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别较 CK_1 显著增高 68.61%和 42.28%;各外源物质处理在各时期也均显著低于 CK_2,但均显著高于同期 CK_1,并均以 T_1、T_2 处理较高,F_a 处理次之,J_1、J_2 处理显著较低(图 5B)。党参植株叶片游离脯氨酸含量在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别较 CK_1 显著增加 44.08%和 63.31%,在外源物质处理后也均显著高于同期 CK_1,但除 T_2 处理脯氨酸含量与 CK_2 处理相近外,其余均显著低于 CK_2 处理(图 5C)。可见,外源物质处理可有效调节病原菌侵染下党参叶片的渗透平衡,减轻胁迫损伤。

2.4 外源物质处理对受侵染党参叶片抗氧化酶活性的影响

图 6 显示,在两个时间段内,党参叶片 CAT 和 POD 活性在 CK_2 处理较 CK_1 显著降低,经外源物质处理后均比 CK_2 处理显著升高,而其 SOD 活性却与之相反;同时,各处理的抗氧化酶活性均随着根腐病菌侵染时间的增加而升高。其中,叶片 CAT 活性在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别较 CK_1 显著下降 39.70%和 39.07%;各外源物质处理 CAT 活性各时期均显著高于相应 CK_2 处理,在 10 d 和 20 d 时分别以 F_a 处理和 J_1 处理最高,分别较同期 CK_2 处理显著提高 39.36%和 40.64%(图 6A)。叶片 POD 活性在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别较 CK_1 显著降低 48.45%、49.32%,在施加各浓度外源物质后均显著高于同期 CK_2 处理,并均以 T_1 处理最高,分别比同期 CK_2 处理显著升高 96.05%、81.98%、56.67%、44.0%和 81.33%,且恢复至同期 CK_1 水平(图 6B)。党参植株叶片 SOD 活性在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别较 CK_1 显著提高 16.72%和 10.79%,在 5 种外源物质处理下均比 CK_2 处理显著降低,并均趋于正常水平

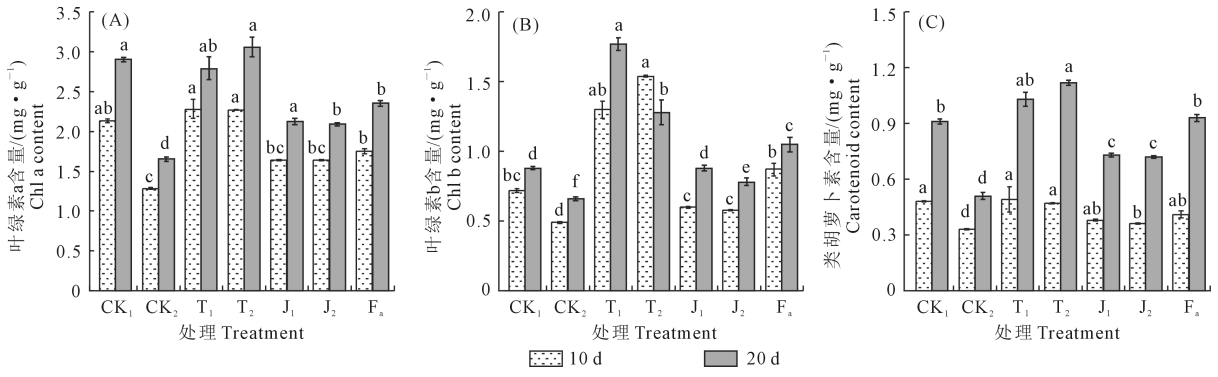


图 4 外源物质处理对受侵染党参叶片光合色素含量的影响

Fig.4 Effects of exogenous substance treatment on photosynthetic pigment content in *Codonopsis pilosula* leaves infected by pathogen

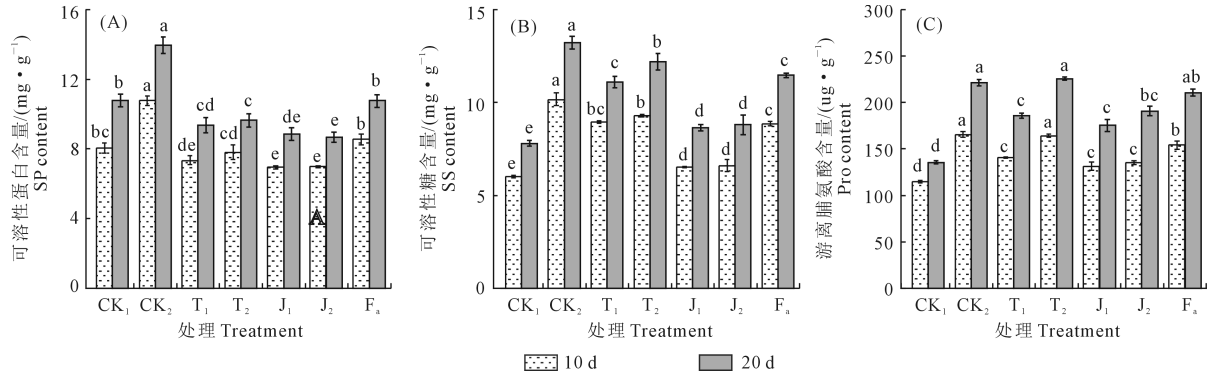


图 5 外源物质处理对受侵染党参叶片渗透调节物质含量的影响

Fig.5 Effects of exogenous substance treatment on the content of osmoregulation substance in *Codonopsis pilosula* leaves infected by pathogen

(CK_1),且各处理间大多无显著差异(图 6C)。综上,病原菌侵染削弱了党参叶片的 CAT、POD 活性但增强了 SOD 活性;施加外源物质可有效提升 CAT、POD 活性,并使其恢复正常水平,从而增强幼苗的抗氧化与抗病防御能力。

2.5　外源物质处理对受侵染党参叶片细胞膜透性的影响

病原菌感染引起植物生长异常,致使细胞膜完整性和透性发生改变。图 7 显示,党参植株受根腐病病原菌侵染后,叶片丙二醛(MDA)含量随时间增长而上升,在 CK_2 处理 10 d 和 20 d 时分别比 CK_1 显著增加 90.06% 和 88.20%,在各外源物质处理后均比同期 CK_2 处理显著降低,其中 J_1 和 J_2 处理最低,基本趋于健康党参(CK_1)水平。同时,党参植株受病原菌侵染后,其细胞膜透性被破坏,电解质外渗,相对电导率增大,且随侵染时间延长而增加;叶片相对电导率在 5 种外源物质处理下均比同期 CK_2 处理显著降低,甚至低于正常水平,以 J_1 和 J_2 处理最低,在处理 10 d 时较 CK_1 分别显著降低 49.10% 和 48.15%。可见,外源物质处理减轻了病原菌侵染引起的 MDA 积累,保护细胞膜的完整性,减少电解质渗漏,提高其抗氧化能力,从而增强植物抗病性。

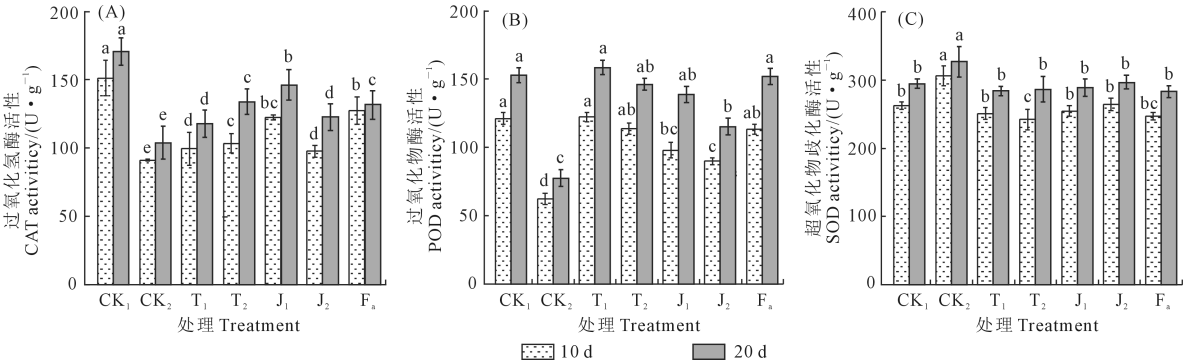


图 6　外源物质处理对受侵染党参叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.6　Effects of exogenous substance treatment on antioxidant enzyme activities in *Codonopsis pilosula* leaves infected by pathogen

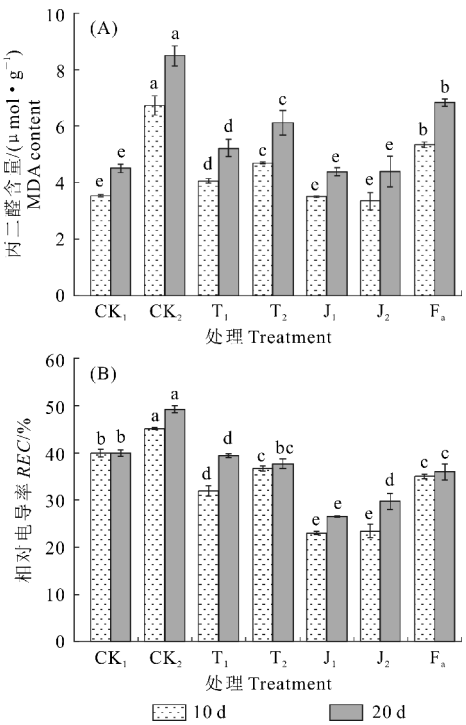


图 7　外源物质处理对受侵染党参叶片相对电导率和丙二醛含量的影响

Fig.7　Effects of exogenous substance treatments on relative conductivity and MDA content in *Codonopsis pilosula* leaves infected by pathogen

2.6　党参植株根腐病侵染情况与其生理生化指标的相关性分析

外源物质处理 10 d 的党参幼苗 12 项指标相关性分析(表 1)表明,其抑菌率与 MDA 含量、*REC* 及可溶性蛋白含量呈极显著负相关($P<0.01$);SOD 活性与可溶性蛋白、MDA 含量及 *REC* 呈显著正相关($P<0.05$),但与叶绿素 a、类胡萝卜素含量呈显著负相关($P<0.05$);脯氨酸含量则与可溶性糖和 MDA 含量呈极显著正相关;POD 活性与 MDA、可溶性蛋白含量呈显著负相关($P<0.05$),与叶绿素 a 和类胡萝卜素含量呈极显著正相关($P<0.01$),且 SOD 与 POD 活性呈极显著负相关($P<0.01$),这可能与病原菌种类及连作引发的盐分胁迫有关。综上,外源物质可能通过提高党参叶片叶绿素含量以增强光合效率,促进营养物质积累并调控离子转运,增强其对病原菌的抵抗力。

3　讨　论

3.1　外源物质处理下受病原菌侵染党参的根部细胞显微结构特征

病原菌侵染导致植物组织结构发生改变,进而表现出明显的病态特征。受到根腐病胁迫的三七,

表 1 外源物质处理对党参根腐病生理生化指标影响的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of exogenous substance treatment on physiology and biochemistry indices of *Codonopsis pilosula* root rot

指标 Index	抑菌率 Bacteriostatic rate	过氧化物酶 POD	超氧化物歧化酶 SOD	过氧化氢酶 CAT	叶绿素 a chl a	叶绿素 b chl b	类胡萝卜素 CAR	脯氨酸 Pro	可溶性蛋白 SP	可溶性糖 SS	丙二醛 MDA	电导率 *REC*
抑菌率 Bacteriostatic rate	1.000											
过氧化物酶 POD	−0.057	1.000										
超氧化物歧化酶 SOD	−0.201	−0.609**	1.000									
过氧化氢酶 CAT	0.001	0.117	−0.399	1.000								
叶绿素 a chl a	−0.319	0.716**	−0.582**	0.215	1.000							
叶绿素 b chl b	−0.150	0.515*	−0.155	−0.036	0.406	1.000						
类胡萝卜素 CAR	−0.239	0.694**	−0.479*	0.116	0.857**	0.536*	1.000					
脯氨酸 Pro	−0.107	−0.302	0.231	−0.472*	−0.255	0.055	−0.042	1.000				
可溶性蛋白 SP	−0.672**	−0.546*	0.686**	−0.173	−0.432	−0.269	−0.433*	0.260	1.000			
可溶性糖 SS	−0.515*	−0.310	0.314	−0.307	−0.178	0.209	−0.023	0.824**	0.551**	1.000		
丙二醛 MDA	−0.596**	−0.484*	0.438*	−0.237	−0.384	−0.181	−0.295	0.659**	0.832**	0.860**	1.000	
电导率 *REC*	−0.934**	−0.218	0.452*	−0.043	0.066	−0.049	−0.027	0.197	0.843**	0.552**	0.715**	1.000

注：* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 水平显著性相关和 $P<0.01$ 水平极显著相关。

Note: * and * * indicate a significant correlation at the $P<0.05$ level and a very significant correlation at the $P<0.01$ level, respectively.

根和茎变褐腐烂，叶片黄化下垂，严重时植株萎蔫死亡[14]。本试验发现，健康党参叶片细胞呈深绿色且分布均匀；病原菌侵染后，病原菌以钉子型侵入叶片细胞壁，导致叶脉黄化，细胞组织结构中侵染钉数目增加。28-高芸苔素内酯灌根、叶喷、氨基酸水溶肥处理后，叶片中侵染钉数量减少，但根部细胞形态未见明显变化，这可能与芸苔素内酯激活植物体内的防御相关基因，增强植物细胞壁的机械强度，维持膜系统的完整性，减少病原菌侵染钉的形成和扩展有关[15]。此外，枯草芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌处理后，叶片显微观察可见侵染钉数量锐减且形态发生卷曲或截断；根部石细胞排列清晰，有效抑制了病原菌对党参的侵染。这可能与芽孢杆菌释放的环脂肽(LP)、铁载体以及几丁质酶和葡聚糖酶有关，此类物质可破坏细胞膜的完整性，导致真菌的菌丝体和分生孢子裂解，使菌丝结构畸变，抑制孢子萌发[16]。

3.2 外源物质对党参根腐病病原菌的抑制效果

研究发现，生防菌通过分泌抗菌物质来改变病原菌细胞膜的通透性，导致细胞内容物泄露、内部离子释放、菌丝异常生长和孢子萌发受阻，有效抑制病原菌的增殖[17]。枯草芽孢杆菌菌株 LY-1 能够产生抗真菌脂肽类物质(iturins)从而抑制花生根腐病菌丝的生长，其生防效率高达 44.71%[18]。解淀粉芽孢杆菌 B15 发酵液中的伊枯草菌素 A 和芬芥素可诱导葡萄灰霉病病原菌灰葡萄孢的细胞凋亡，抑制其菌丝生长[19]。本试验通过抑菌率测定，发现生防菌处理在培养各时期均显著优于其他处理。生防菌在作物根、茎、叶等部位定殖和繁殖过程中，分泌脂肽类、蛋白酶、嗜铁素及挥发性有机化合物等在内的多种抑菌、溶菌物质，抑制菌丝体的生长和繁殖，破坏其细胞结构；并在缺氧环境下与

病原菌竞争空间与营养,最终实现抑菌效果[20]。氨基酸水溶肥处理抑菌效果较差,可能是缺乏特定的抗真菌机制、土壤微生物群落的影响、环境条件的限制以及施用方法和时机的不当等多种因素综合作用的结果。

3.3　外源物质对受病原菌侵染党参叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物捕获光能的关键分子,其含量直接影响植物的光能吸收效率。病原菌侵入植物体内并以此为宿主建立寄生关系,破坏根系组织结构,其产生的小型分生孢子随木质部蒸腾流沿维管束向地上部分迁移,导致叶片细胞结构改变,同时激活叶绿素酶以加速叶绿素分解,降低叶绿素含量[21]。本研究结果与杨峰等[22]在染病大豆中的发现一致,即病原菌侵染通过减少光合色素积累及有效光合面积来协同抑制寄主光合作用能力。与未经处理的侵染党参相比,外源处理均能促进其叶片总叶绿素的合成,尤以 28-高芸苔素内酯处理效果显著。这与 28-高芸苔素内酯保护叶绿体膜和细胞的超微结构,下调叶绿素编码基因来减少叶绿素降解,同时激活 Rubisco 酶活性,提高 CO_2 固定速率,促进光合作用有关[23]。氨基酸水溶肥通过提供有机氮源,直接参与叶绿素的生物合成以及通过调节植物激素信号传导网络和光合作用来间接影响叶绿素的合成。

3.4　外源物质对受病原菌侵染党参叶片渗透调节物质含量的影响

面对生物和非生物胁迫,植物通过积累可溶性物质来调节细胞渗透势,增强吸水力,稳定渗透压,提升逆境适应力。MDA 作为脂质过氧化终产物,其积累水平反映了植物膜系统受损程度及抗逆性;而脯氨酸则通过稳定细胞内膜结构、清除活性氧,并作为分子伴侣维持蛋白质构象来增强酶活性[24]。本试验中,病原菌胁迫下党参叶片 MDA 含量显著上升,较健康党参增加了 90.06%。28-高芸苔素内酯和氨基酸水溶肥处理显著降低 MDA 含量,使其接近健康党参水平。作为植物体内主要的渗透调节物质,各处理下党参叶片脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量均随时间的增长而增高,且被侵染党参较健康党参其含量显著升高。这与李明倩[25]在大豆干旱胁迫研究中观察到的渗透调节物质积累趋势一致,进一步证实植物通过主动调控此类物质合成以维持细胞渗透平衡的逆境适应机制。病原菌侵染党参后,通过分泌细胞壁降解酶及真菌毒素破坏细胞壁结构,并诱导细胞膜透性改变与跨膜电位去极化,进而激发活性氧爆发;同时利用效应蛋白干扰植物激素信号通路,协同抑制寄主免疫反应,最终破坏党参正常生理功能[26]。28-高芸苔素内酯和氨基酸水溶肥处理降低了病原菌胁迫下党参植株的脂质过氧化以及电解质渗透,提高了膜稳定性指数,使党参渗透系统趋于稳定,但生防菌处理略逊于上述 3 种处理,可能是高效清除病原菌后,未能有效激发植物自身的系统性抗性或诱导系统抗性通路。

3.5　外源物质对受病原菌侵染党参叶片抗氧化酶系统的影响

抗氧化酶是植物细胞的保护性酶,主要功能在于清除逆境诱导产生的活性氧自由基,抑制膜脂过氧化,并激活防御机制以增强植物免疫力[27]。有研究表明,增强 POD 活性有助于催化酚类物质转化为木质素,推动木质化进程,从而防止病原菌的侵染[28]。SOD 通过中和反应性超氧自由基阴离子来促进细胞对活性氧的耐受性。CAT 催化分解细胞内的 H_2O_2 产生 O_2,激活苯甲酸 2-羟化酶促进水杨酸合成,进而激发超敏反应以抵御细菌侵染[29]。相较于健康党参,病原菌胁迫下叶片 CAT 与 POD 活性显著下降,而 SOD 活性显著升高;经外源物质处理后,三者活性均恢复接近对照水平。表明外源处理通过激活或抑制相关基因的转录,进而影响抗氧化酶活性的表达,提高清除自由基的效率,保护细胞膜和生物大分子,从而增强党参植株抗逆性。其中,28-高芸苔素内酯通过激活谷胱甘肽 S-转移酶和谷胱甘肽还原酶活性,特异性提高还原型谷胱甘肽含量而不改变氧化型谷胱甘肽水平,协同增强抗氧化酶系统,从而系统性增强植物氧化胁迫抗性[30]。生防菌通过激活 ISR 系统,诱导植物产生防御酶类及干扰细胞正常的生理代谢功能,增强植物对病原菌的抵抗力[31]。

4　结　论

外源物质处理改变了病原菌侵染党参相应抗逆生理指标,增强了植物对病原菌的抗性。28-高芸苔素内酯灌根、叶喷及氨基酸水溶肥处理可提高侵染党参叶片叶绿素含量,平衡渗透调节系统,调控抗氧化酶活性,有效提升自由基的清除速率,增强党参抵御胁迫及保护自身膜系统的能力;生防菌

处理显著抑制了锐顶镰刀菌及尖孢镰刀菌的菌丝生长,有效缓解病原菌胁迫对党参的危害,为防治党参根腐病提供了更多可能。

参 考 文 献:

[1] 郭丁禹, 李娜, 曲晓波, 等. 基于标准汤剂的党参配方颗粒制备工艺研究[J]. 吉林中医药, 2019, 39(11): 1505-1508, 1523.
GUO D Y, LI N, QU X B, et al. Study on preparation process of codonopsis formula granules based on standard decoction[J]. Jilin Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 39(11): 1505-1508, 1523.

[2] 徐雪芬, 李惠霞, 倪春辉, 等. 甘肃省党参根腐病菌的分子生物学鉴定及区域分布[J]. 植物保护, 2022, 48(2): 130-138.
XU X F, LI H X, NI C H, et al. Molecular biological identification and regional distribution of pathogens causing root rot of *Codonopsis pilosula* in Gansu Province[J]. Plant Protection, 2022, 48(2): 130-138.

[3] 卓梦霞, 刘思文, 李春雨, 等. 镰刀菌属真菌毒素在植物和病原菌互作中的研究进展[J]. 广东农业科学, 2024, 51(3): 56-69.
ZHUO M X, LIU S W, LI C Y, et al. Research progress on *Fusarium* mycotoxins in plant and pathogen interactions[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2024, 51(3): 56-69.

[4] ZHANG N, WANG Z Q, SHAO J H, et al. Biocontrol mechanisms of *Bacillus*: improving the efficiency of green agriculture[J]. Microbial Biotechnology, 2023, 16(12): 2250-2263.

[5] 韩琴, 高惠惠, 马香, 等. 枸杞根际根腐病拮抗细菌的筛选及其防效检测[J]. 园艺学报, 2024, 51(5): 1162-1172.
HAN Q, GAO H H, MA X, et al. Screening and identification of antagonistic rhizosphere bacteria and their biological control effect on root rot of *Lycium barbarum*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2024, 51(5): 1162-1172.

[6] 姚凤琴, 林发壮, 陈昌铭, 等. 枯草芽孢杆菌Bv17对非洲菊根腐病抑菌作用及防治效果[J]. 福建农业科技, 2019, (12): 55-59.
YAO F Q, LIN F Z, CHEN C M, et al. Antibacterial effect and control effect of *Bacillus subtilis* Bv17 on root rot of *Gerbera jamesonii*[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2019, (12): 55-59.

[7] 侯彩霞, 任娟, 赵思峰, 等. 2株枯草芽孢杆菌防治加工番茄根腐病的效果和防治机理研究[J]. 石河子大学学报, 2012, 30(2): 152-156.
HOU C X, REN J, ZHAO S F, et al. Efficacy and mechanism of two *Bacillus subtilis* against processing tomato root-rot disease[J]. Journal of Shihezi University, 2012, 30(2): 152-156.

[8] 刘爽, 唐锐, 谭丹, 等. 解淀粉芽孢杆菌OMR1-7菌株对拟石莲花属多肉植物黑腐病的生防效果[J]. 云南农业大学学报, 2024, 39(1): 54-63.
LIU S, TANG R, TAN D, et al. Biocontrol efficiency of *Bacillus amyloliquefaciens* OMR1-7 against echeveria black rot disease[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Social Science), 2024, 39(1): 54-63.

[9] QIAO W, KANG X, MA X, et al. New strain of *Bacillus amyloliquefaciens* G1 as a potential downy mildew biocontrol agent for grape[J]. Agronomy, 2024, 14(7): 1532-1532.

[10] ASLAM M A, AHMED S, SALEEM M, et al. Mitigation of chromium-induced phytotoxicity in 28-homobrassinolide treated *Trigonella corniculata* L. by modulation of oxidative biomarkers and antioxidant system[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 263(8): 115354.

[11] WANG X, ZHANG Y, XU W Y, et al. Amino acid fertilizer strengthens its effect on crop yield and quality by recruiting beneficial rhizosphere microbes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(12): 5970-5980.

[12] 漆永红, 张新瑞, 曹素芳, 等. 腐烂茎线虫对当归细胞结构和生理特性的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(6): 36-41.
QI Y H, ZHANG X R, CAO S F, et al. Ditylenchus destructor:effects on the cell structure and the physiological characteristics of *Angelica sinensis*[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(6): 36-41.

[13] 李胜. 植物生理学试验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 29-42.
LI S. Plant physiology experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014: 29-42.

[14] 李迎宾, 刘屹湘, 朱书生, 等. 三七根腐病田间分级标准研究及评价[J]. 植物病理学报, 2020, 50(4): 450-461.
LI Y B, LIU Y X, ZHU S S, et al. Grading system for *Panax notoginseng* root rot disease[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2020, 50(4): 450-461.

[15] LÓPEZ-GÓMEZ M, HIDALGO-CASTELLANOS J, LLUCH C, et al. 24-epibrassinolide ameliorates salt stress effects in the symbiosis *Medicago truncatula-Sinorhizobium meliloti* and regulates the nodulation in cross-talk with polyamines[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 108: 212-221.

[16] WOLDE M A, JENS P, FRANK R. Inhibitory activity of bacterial lipopeptides against *Fusarium oxysporum* f.sp. *Strigae*[J]. BMC Microbiology, 2024, 24(1): 227.

[17] 沈晓熳, 杨炽光, 翁晨虹, 等. 枯草芽孢杆菌RN8的抗菌活性成分分离及其作用机制[J]. 中国生物工程杂志, 2024, 44(7): 12-28.
SHEN X M, YANG C G, WENG C H, et al. Isolation of antibacterial active components from *Bacillus subtilis* RN8 and their mechanism of action[J]. China Biotechnology, 2024, 44(7): 12-28.

[18] LI Y, ZHANG X, HE K, et al. Isolation and identification of *Bacillus subtilis* LY-1 and its antifungal and growth-promoting effects[J]. Plants, 2023, 12(24): 4158.

[19] 潘虹余, 金玮鋆, 张晓蒙, 等. 解淀粉芽孢杆菌B15抑菌物质对葡萄灰霉病灰葡萄孢的抑菌机理[J]. 微生物学报, 2018, 58(7): 1245-1254.
PAN H Y, JIN W J, ZHANG X M, et al. Inhibition of antifungal substances from *Bacillusamyloquefaciens* B15 against botrytis cinerea-the agent of "gray mold" of grape[J]. Acta microbiologica Sinica, 2018, 58(7): 1245-1254.

[20] AL M D M K, ALZAWAR N S A, NOMAN M, et al. Suppression of fusarium wilt in watermelon by *Bacillus amyloliquefaciens* DHA55 through extracellular production of antifungal lipopeptides[J]. Journal

of Fungi, 2023, 9(3): 336.

[21] 漆永红, 曹素芳, 李雪萍, 等. 燕麦镰孢菌侵染对不同抗性青稞叶片及根系生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(32): 101-107.
QI Y H, CAO S F, LI X P, et al. *Fusarium avenaceum* Infection: Effects on physiological indexes of leaves and roots of naked barley with different resistance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(32): 101-107.

[22] 杨峰, 黄山, 武晓玲, 等. 根腐病胁迫对大豆光谱特征和叶绿素荧光特性的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(4): 490-495, 500.
YANG F, HUANG S, WU X L, et al. Effects of phytophthora root rot stress on canopy spectra reflectance and chlorophyll fluorescence characteristics of soybean[J]. Soybean Science, 2013, 32(4): 490-495, 500.

[23] AHMED S, MUDASSAR S, SARDAR R, et al. 28-homo-brassinolide confers cadmium tolerance in *Vigna radiate* L. through modulating minerals uptake, antioxidant system and gas exchange attributes[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(12): 7500-7514.

[24] 周扬锟, 廖锴涛, 丁先锋, 等. 芸苔素内酯调控植物生长发育及抗逆性的研究进展[J]. 农业科学, 2020, 10(6): 407-418.
ZHOU Y K, LIAO Q T, DING X F, et al. Advances in brassinolide regulation of plant growth and development and stress resistance[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2020, 10(6): 407-418.

[25] 李明倩. 大豆对干旱胁迫的生理响应与分子调控机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
LI M Q. Study on the physiological response and molecular regulatory mechanism of soybean to drought stress[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[26] FUKADA F. Morphogenesis and adaptive strategies for infection in plant pathogenic fungi[J]. Journal of General Plant Pathology, 2024, 90(6): 371-373.

[27] PARK J, SON H. Antioxidant systems of plant pathogenic fungi: functions in oxidative stress response and their regulatory mechanisms [J]. The Plant Pathology Journal, 2024, 40(3): 235-250.

[28] 于庆涛, 姚廷山. 烟草镰刀菌根腐病研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(17): 34-36.
YU Q T, YAO T S. Advances in tobacco root rot caused by *Fusarium* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 34-36.

[29] LEFEVERE H, BAUTERS L, GHEYSEN G. Salicylic acid biosynthesis in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 338.

[30] NOLAN T M, VUKAŠINOVIC N, LIU D R, et al. Brassinosteroids: multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses[J]. The Plant Cell, 2020, 32(2): 295-318.

[31] 刘慧迪, 黄继宁, 成志军, 等. 作物镰刀菌枯萎病及其生物防治的研究进展[J]. 植物医学, 2022, 1(5): 8-22.
LIU H D, HUANG J N, CHENG Z J, et al. Research progress on crop *Fusarium* wilt disease and its biological control[J]. Plant Health and Medicine, 2022, 1(5): 8-22.

(上接第 198 页)

[29] JIANG Y W, ZHANG L H, ZHANG B Q, et al. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 37-45.

[30] 郑立龙. 半干旱区地膜覆盖及补灌对玉米产量及干物质积累和分配的影响[J]. 节水灌溉, 2015, (12): 47-51.
ZHENG L L. Effect of film mulching and supplementary irrigation on yield and dry matter distribution of maize in semi-arid area[J]. Water Saving Irrigation, 2015, (12): 47-51.

[31] 付雪丽, 王晨阳, 郭天财, 等. 水氮交互对弱筋小麦蔗糖含量和籽粒淀粉积累及品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, (4): 67-71.
FU X L W, GUO T C, ZHANG H Q, et al.The effect of water nitrogen interaction on sucrose content, grain starch accumulation, and quality of weak gluten wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, (4): 67-71.

[32] 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 145-155.
ZOU H Y, ZHANG F C, ZHANG Y X, et al.Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 145-155.

[33] 齐月, 蒋菊芳, 胡蝶, 等. 关键生育期持续水分胁迫对春玉米土壤水分动态变化和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(29): 41-46.
QI Y, JIANG J F, HU D, et al. Continuous water stress at key growth stages of spring maize: effects onsoil moisture dynamics and yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(29): 41-46.

[34] AL-KAISI M M, YIN X H. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(6): 1475-1482.