

6个番茄砧木品种对枯萎病菌及盐胁迫的抗性评价

孙清珍¹, 何曼莉¹, 刘恒心¹, 杨晨宇¹, 申顺善², 朴凤植¹, 杜南山¹

(1. 河南农业大学园艺学院 郑州 450046; 2. 河南农业大学植物保护学院 郑州 450046)

摘要:针对番茄栽培中枯萎病频发和土壤盐渍化导致产量和品质下降的问题,开展番茄抗枯萎病和耐盐砧木筛选。以野生型番茄 Ailsa Craig(简称 AC)为对照,对番茄商品种粉都金冠王和6个砧木品种进行枯萎病和盐胁迫的苗期抗性鉴定。采用人工接种枯萎病菌和250 mmol·L⁻¹ NaCl溶液灌根处理的方法,通过盆栽试验进行表型分析和生理指标测定,综合评价试验材料的抗病性和耐盐性。结果表明,在接种枯萎病菌14 d后,强砧73号对枯萎病表现出显著抗病性,病情指数低于对照及其他砧木品种,为14.17,与AC和商品种相比分别降低了82.17%、69.63%,其他6个砧木品种病情指数为33.75~79.17,表现为低抗性,强砧73号的抗氧化酶活性和病程相关蛋白基因(*PR1*、*PR5*)表达量较强砧100号和强砧74号显著升高,与其抗病性呈正相关。而盐处理14 d后,强砧74号的盐害指数为18.33%,与AC和商品种相比分别降低了68.21%和42.12%,展现出较强的耐盐性,其丙二醛含量、相对电导率、超氧阴离子含量、过氧化氢含量较强砧100号和强砧73号显著降低,而抗氧化酶活性大幅上升,与耐盐性呈正相关。通过试验筛选出的抗枯萎病的番茄品种强砧73号和耐盐番茄砧木强砧74号,为番茄抗逆栽培提供了优质材料,也为后续试验提供参考依据。

关键词:番茄砧木;枯萎病;盐胁迫;抗氧化酶活性;抗病性;耐盐性

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)08-083-12

Resistance evaluation of six tomato rootstock varieties to *Fusarium* wilt and salt stress

SUN Qingzhen¹, HE Manli¹, LIU Hengxin¹, YANG Chenyu¹, SHEN Shunshan², PIAO Fengzhi¹, DU Nanshan¹

(1. College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: In order to address the frequent occurrence of *Fusarium* wilt and the decline in yield and quality caused by soil salinization in tomato cultivation, this study conducted screening of tomato rootstock resistant to wilt disease and salt tolerance. Using the wild-type tomato Ailsa Craig as the control, the resistance to *Fusarium* wilt and salt stress in seedling stage of commercial tomato Fendu Golden Crown King and 6 rootstock cultivars were identified. The methods of artificial inoculation of *Fusarium* wilt and root irrigation with 250 mmol·L⁻¹ NaCl solution were used to conduct phenotypic analysis and physiological index determination through pot experiment, and the disease resistance and salt tolerance of the test materials were comprehensively evaluated. The results showed that after 14 days of inoculation with *Fusarium* wilt pathogen, Strong Rootstock 73 exhibited significant resistance to *Fusarium* wilt disease, with a disease index of 14.17%, which was significantly lower than the control and other rootstock varieties. Compared with AC and commercial cultivars, the disease index of the other six rootstock varieties decreased by 82.17% and 69.63%, respectively. The disease index of the other six rootstock varieties ranged from 33.75% to 79.17%, indicating low resistance. At the same time, the antioxidant enzyme activity and the expression levels of pathogenesis-related protein genes (*PR1* and *PR5*) in Strong Rootstock 73 were significantly higher than those in Qiangzhen 100 and Strong Rootstock 74, which were positively correlated with its disease resistance. After 14 days of salt treatment, the salt damage index of Strong Rootstock 74 was 18.33%, which was 68.21% and 42.12% lower than that of AC and commercial cultivars, respectively, demonstrating strong salt tolerance.

收稿日期:2025-04-03;修回日期:2025-06-03

基金项目:河南省高校重点科研项目(25A210001);国家自然科学基金面上项目(NSFC32472728)

作者简介:孙清珍,女,在读硕士研究生,研究方向为设施蔬菜连作障碍绿色防控。E-mail:zhen3340673560@163.com

通信作者:朴凤植,男,教授,主要从事园艺设施结构与环境优化,设施土壤微生态调控与绿色管理技术研发。E-mail:piao1203@163.com

杜南山,男,副教授,主要从事设施蔬菜连作障碍生态修复技术研究。E-mail:fangshan711@163.com

The content of malondialdehyde, relative conductivity, superoxide anion content, and hydrogen peroxide content in Strong Rootstock 74 were significantly lower than those in Strong Rootstock 100 and Strong Rootstock 73, while the activity of antioxidant enzymes increased significantly, which was positively correlated with its salt tolerance. The tomato rootstocks screened out in this experiment for resistance to *Fusarium* wilt, Strong Rootstock 73 and salt tolerance tomato rootstock Strong Rootstock 74, provide high-quality materials for tomato stress-resistant cultivation and lay important material for subsequent study.

Key words: Tomato rootstock; *Fusarium* wilt; Salt stress; Antioxidant enzyme activity; Disease resistance; Salt tolerance

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)是全球重要的蔬菜作物,在设施和露地中均得到广泛种植。其果实富含维生素、矿物质及抗氧化物质,是食品加工和鲜食市场的重要原料^[1]。然而,随着番茄种植面积的不断扩大和种植年限的增加,枯萎病和土壤盐渍化已成为制约番茄生产的两大主要因素^[2-3]。番茄枯萎病是由尖孢镰刀菌番茄专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersic*, FOL)引起的一种维管束病害,症状具体表现为植株生长发育不良,比健康番茄植株矮小瘦弱、叶片发黄,植株因严重缺水而叶片枯萎,最终整株植物枯萎死亡^[4-7]。王恩启等^[8]研究指出,连作多年的田块枯萎病发病率高达40%,并有逐年加重的趋势。李蝶等^[9]研究表明,勇士6号砧木对枯萎病的抗性最强,表现为高抗,病情指数显著低于对照,而千叶和亲农等砧木的抗病性相对较弱。Li等^[10]通过基因编辑技术创制抗枯萎病和耐盐番茄砧木,发现 *PR1* 和 *PR5* 基因的表达量与砧木抗性呈正相关。土壤盐渍化也是当前番茄生产面临的严峻问题。邹宜静等^[11]研究认为,不合理的灌溉方式、施肥习惯以及地下水位上升等因素,导致土壤中盐分积累过多,形成盐渍化土壤。在盐胁迫条件下,番茄植株生长受到抑制,表现为植株矮小、叶片黄化、果实品质下降等^[12-13]。而嫁接栽培技术可缓解连作障碍,大幅提高植株对生物、非生物胁迫的耐受能力,提升番茄产量和种植效益^[14]。因此,筛选抗病性、抗逆性强的砧木品种对番茄产业可持续发展具有重要意义。研究表明,抗性砧木通过调控根系分泌物、激活保护酶系统、调控基因表达等方式,增强接穗的抗病性和耐盐性^[15]。合适的砧木能将自身抗病、耐盐等优良特性传递给接穗,进而增强番茄植株对枯萎病和盐胁迫的抵抗能力^[16]。

目前对番茄砧木抗枯萎病和耐盐性的研究多是进行单一抗性方面的筛选,缺乏对同一砧木分别在枯萎病与盐胁迫条件下的抗性表现差异研究。笔者以6种番茄砧木为材料,通过对砧木材料分别进行枯萎病与盐胁迫处理,对比分析不同砧木分别

在枯萎病和盐胁迫下的抗性表现,筛选出抗枯萎病和耐盐的优异砧木,为番茄嫁接栽培中根据不同胁迫类型科学选择砧木提供理论依据。

1 材料与方法

抗病砧木筛选于2024年2—5月进行,耐盐砧木筛选于2024年6—9月进行,抗病砧木及耐盐砧木生理指标测定试验于2024年10—12月进行,试验均在河南农业大学园艺学院设施结构优化与环境调控实验室人工气候室内进行。

1.1 材料

1.1.1 供试番茄 野生型番茄供试品种:Ailsa Craig(简称AC);供试砧木品种6个:强砧59号(简称QZ59)、强砧71号(简称QZ71)、强砧73号(简称QZ73)、强砧74号(简称QZ74)、强砧100号(简称QZ100)、强砧103号(简称QZ103);商品种:粉都金冠王(简称FD,作为对照品种)。其中,AC番茄材料由河南农业大学园艺学院设施结构与环境实验室提供,且经前人研究发现其对枯萎病和盐害比较敏感^[17-18],QZ59、QZ71、QZ73、QZ74、QZ100、QZ103、FD番茄材料由河南豫艺种业科技发展有限公司提供。

1.1.2 供试菌株 番茄枯萎病菌 FOL (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersic*)由本实验室前期从枯萎病发病较为严重的番茄植株上分离纯化得来,并于-80℃冰箱中保存待用。

1.1.3 供试培养基 PDA 培养基($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$):取马铃薯200.0 g,加入蒸馏水煮沸30 min,取3层纱布过滤收集滤汁,加入葡萄糖20.0 g,定容至1000 mL,后续进行分装,加15 g琼脂,121℃高压灭菌20 min。

PDB 培养基($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$):取马铃薯200.0 g,加入蒸馏水煮沸30 min,取八层纱布进行过滤收集滤汁,加入葡萄糖20.0 g,定容至1000 mL,后续进行分装,121℃高压灭菌20 min。

1.1.4 菌株悬浮液的制备 番茄枯萎病菌悬液制备:超净工作台下将实验室保存的番茄枯萎病菌在新配置的PDA固体培养基上活化,1周后将活化好

的枯萎病菌菌块挑入 PDB 液体培养基中,在 28 ℃ 摇床(转速为 160 r·min⁻¹)中培养 7 d 后取出用纱布过滤,在显微镜下用血球计数板计数后,再用无菌水调节至 1×10⁷ 个孢子·mL⁻¹ 备用。

1.2 试验处理

选择出大小一致、颗粒较为饱满的番茄种子,对其进行 NaClO 消毒,后用无菌水清洗,置于培养箱内,28 ℃ 环境下催芽,选择出芽较为一致的种子,置于 72 孔育苗穴盘内,以纯蛭石作为栽培基质育苗。待子叶露出展平时,选择用 1/3 浓度的霍格兰营养液浇灌进行水肥管理。待番茄长至 2 片真叶时,选择长势良好且长势较为一致的番茄苗移栽至内含纯蛭石的育苗容器内(长 7.3 cm×宽 7.3 cm×高 11.5 cm),光照周期为 16 h(昼)/8 h(夜),温度为 25 ℃,相对湿度为 75%,光合光通量密度(PPFD)为 200 μmol·m⁻²·s⁻¹。待幼苗生长至 3 片真叶时,进行枯萎病菌和 NaCl 处理。

具体处理如下:(1)FOL 处理,加入 50 mL FOL 孢子悬浮液(1×10⁷ 个孢子·mL⁻¹);(2)NaCl 处理,加入 50 mL 浓度为 250 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液。本试验

采用随机区组设计,每个处理 20 株幼苗,3 次重复。处理 14 d 后拍照记录,观察番茄生长状况,统计发病株数和病情指数并随机取生长点下第一片叶用于各项生长指标和生理指标的测定。

1.3 方法

1.3.1 RNA 的提取与 qRT-PCR 使用北京天根生化科技有限公司快速通用植物总 RNA 提取试剂盒对番茄根部进行 RNA 的提取,提取方式按照说明书进行。逆转录试剂选择使用莫纳生物科技有限公司的 MonScript™ RTIII All-in-One Mix with dsD-Nase 试剂盒。qRT-PCR 采用 MonAmp™ SYBR Green qPCR Mix(Low ROX),以 *actin* 为内参基因,以不同的 cDNA 序列设计特异性引物。反应缓冲液体系为 20 μL,其中 SYBR Green qPCR Mix 10 μL, ddH₂O 8.2 μL,正向引物 F 0.4 μL,反向引物 R 0.4 μL,逆转录所得 cDNA 1 μL。反应程序为:95 ℃ 3 min,95 ℃ 10 s 和 60 ℃ 30 s,40 个循环。在 StepOne™ 实时 PCR 系统(Applied Biosystems, Singapore)上运行,定量的计算方式采用 2^{-ΔΔCt} 法。所有用到的引物序列见表 1。

表 1 基因和引物序列

Table 1 Genes and primes used for real-time qRT-PCR analysis

基因名 Gene name	上游引物(5'-3') Forward primer (5'-3')	下游引物(5'-3') Reverse primer (5'-3')
<i>Actin</i>	TGTCCCTATTACGAGGGTTATGC	CAGTTAAATCACGACCAGCAAGAT
<i>PR1</i>	CTCGGTACGTCTTGTTGTG	TCCAGTTACCTGGTGGATCA
<i>PR5</i>	GTGCCTCTGAATTGTGGGAG	AAATGAACCAACCACCGTTG

1.3.2 番茄病情相关指数统计 接种 FOL 14 d 后,番茄出现叶片变黄萎蔫现象,统计番茄发病程度,根据邹宜静等^[11]的番茄枯萎病病情分级标准进行枯萎病病情指数分析。

病情指数(DI)=[Σ(病级株数×病级数)/(总植株数×最高病级数)]×100。

番茄枯萎病情分级标准:0 级,无特征;1 级,1~2 片子叶明显变黄、脱落;2 级,1~2 片真叶变成黄色或全株叶片变成黄绿色,叶片下垂呈轻微萎蔫;3 级,全株明显萎蔫或叶片严重变黄,植株生长受阻,稍矮化;4 级,全株叶片严重萎蔫甚至枯死。

番茄抗病性类型划分标准如下:

免疫(I): DI = 0; 高抗(HR): 0 < DI ≤ 5; 抗病(R): 5 < DI ≤ 20; 中抗(MR): 20 < DI ≤ 40; 感病(S): 40 < DI ≤ 60; 高感(HS): 60 < DI ≤ 100。

1.3.3 番茄耐盐相关指数统计 利用 250 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液灌根处理 14 d 后对番茄出现盐害症状的

株数和盐害指数进行调查。根据薛璐等^[10]的盐害分级标准进行分级:0 级,无盐害特征;1 级,真叶完好,叶缘黄化;2 级,25%真叶萎蔫黄化;3 级,50%真叶萎蔫黄化;4 级,75%真叶萎蔫黄化;5 级,所有叶片失水萎蔫。

盐害指数/%=Σ(代表级数×株数)/(最高级数×总株数)×100。

1.3.4 生长相关指标测定 从不同处理中随机选择 3 株番茄幼苗,使用直尺测量番茄茎基部处至生长点最高处作为番茄株高;使用游标卡尺测量番茄茎基部茎粗;将植株的根部用清水洗干净后,用吸水纸擦干,使用千分之一电子秤分别称量植株的地上部及地下部鲜质量,并将称量后的番茄苗分装放置烘箱,105 ℃ 杀青 20 min,在 75 ℃ 下烘干至恒质量后用电子秤称量干质量。

1.3.5 生理指标的测定 采用浸泡法使用便携式电导率仪测定相对电导率。采用便携式叶绿素

含量测定仪测定叶绿素相对含量,采用 Fluor Cam 封闭式叶绿素荧光成像系统测定叶绿素荧光 PSII最大光化学效率(F_v/F_m)。采用过氧化氢(H_2O_2)试剂盒(OX002,江苏,中国)、超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)试剂盒(OX002,江苏,中国)、丙二醛(MDA)试剂盒(OX005,江苏,中国)、超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒(SR003,江苏,中国)、过氧化物酶(POD)试剂盒(SR007,江苏,中国)、过氧化氢酶(CAT)试剂盒(SR005,江苏,中国)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)试剂盒(G0203W,江苏,中国)、木质素含量(Lignin)试剂盒(OT034,江苏,中国)和苯丙氨酸解氨酶(PAL)试剂盒(G0114F,江苏,中国)测定生理指标,测定方法及其计算公式均按照测定样本质量和试剂盒说明书进行。

1.3.6 数据处理与分析 测定结果随机取样,试验样本至少3次重复,用 Microsoft Excel 2010 对

数据进行整理和作图,采用 IBM SPSS Statistics 23 进行 LSD 差异显著性分析,最后采用 GraphPad. Prism 8.0 制图。

2 结果与分析

2.1 枯萎病菌胁迫下不同砧木品种番茄的抗性表型分析

2.1.1 枯萎病菌胁迫下不同砧木品种番茄的生长情况 从图 1-A 可以看出,与 AC 相比,在接种枯萎病 14 d 后,各砧木品种的发病情况存在明显差异,其中 QZ73 的发病株系大多表现为 1~2 片子叶明显变黄、脱落的 1 级症状或 1~2 片真叶变成黄色,叶片下垂呈轻微萎蔫的 2 级症状,说明该强砧品种感染枯萎病后,多数植株处于轻微发病状态。同时从图 1-B~E 可以看出,QZ73 的病情指数最低,为 14.17(R),而 QZ100 和 QZ74 的病情指数高达 70.00(HS)、67.92(HS),显著高于其他品种。此外,



注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 枯萎病菌胁迫下不同砧木品种番茄的生长情况

Fig. 1 Growth of different tomato rootstock cultivars under *Fusarium* wilt stress

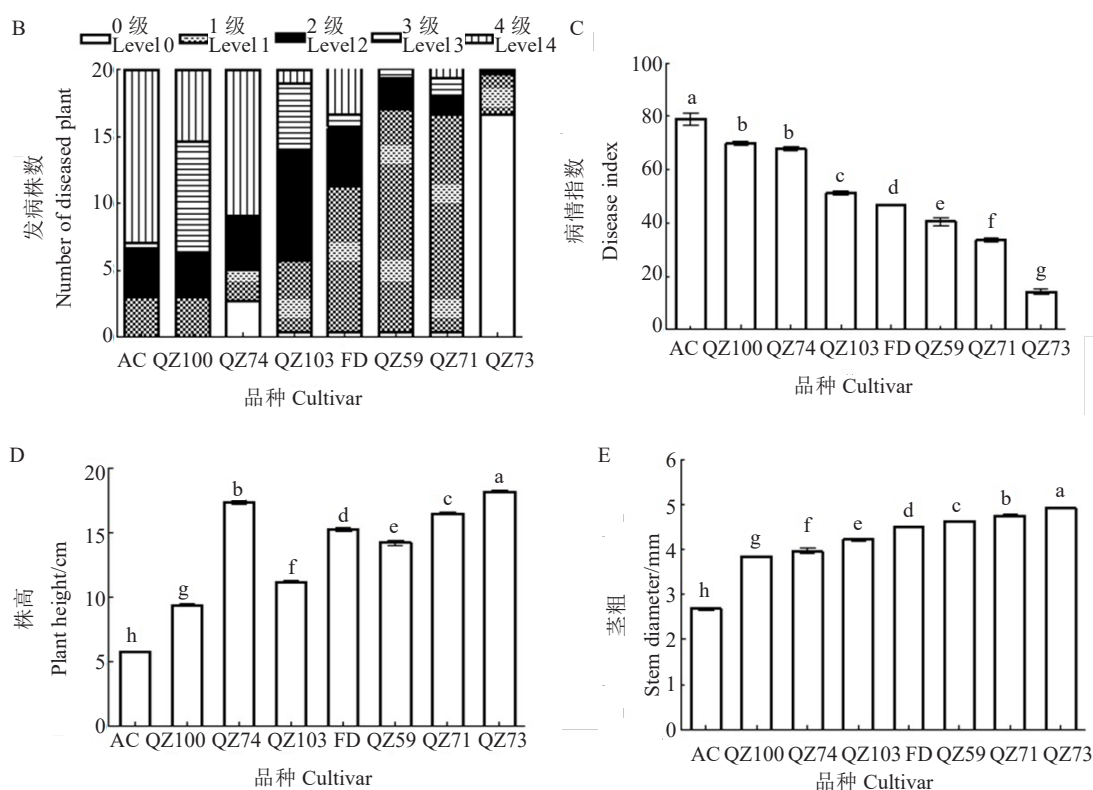


图1 (续)

Fig. 1 (Continued)

QZ73 的株高是 AC 的 3.15 倍,茎粗是 AC 的 1.84 倍,这些结果表明,不同砧木品种中 QZ73 对番茄枯萎病菌的抗性最强,而 QZ100 和 QZ74 发病较为严重且生长受到明显抑制,因此后续试验将选取 QZ73、QZ100 和 QZ74 进行深入探究。

2.1.2 枯萎病菌胁迫对不同砧木品种番茄叶绿素荧光和膜系统的影响 从叶绿素荧光图(图 2)可以看出,在 FOL 处理下,QZ73 番茄株系叶绿素荧光明显高于 QZ100 和 QZ74,叶绿素相对含量相较于 QZ74 和 QZ100 分别显著提升了 28.13%、80.67%,表明 QZ73 对枯萎病具有很好的抗性。为了进一步验证枯萎病抗性,通过测定番茄叶片的相对电导率和 MDA 含量来进一步评估枯萎病菌引起的膜损伤程度,与枯萎病菌胁迫下的 QZ100 和 QZ74 番茄相比,QZ73 的相对电导率显著降低,此外,在 FOL 条件下,QZ73 番茄中的 MDA 含量也显著降低,这说明 QZ73 可以减轻枯萎病菌胁迫引起的细胞膜损伤。

2.1.3 枯萎病菌胁迫对不同砧木品种番茄抗氧化酶系统的影响 由图 3 可知,QZ73 的叶片 H_2O_2 含量(b)为 $0.13 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, $O_2^{\cdot-}$ 含量为 $300.37 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,此时,其 SOD 活性达到 $52.04 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,POD 活性为 $5266.67 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,

CAT 活性为 $581.4 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,APX 活性为 $3.37 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。而 QZ74 和 QZ100 的叶片 H_2O_2 含量分别为 0.23 、 $0.20 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, $O_2^{\cdot-}$ 含量分别为 320.13 、 $303.87 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此时,其 SOD 活性分别达到 43.17 、 $10.92 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,POD 活性分别为 2597.33 、 $2629.00 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,CAT 活性分别为 214.20 、 $180.54 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,APX 活性分别为 1.48 、 $2.00 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,由此表明,面对番茄枯萎病的侵害,QZ73 的活性氧积累量相对较少,同时抗氧化酶活性较高,能够有效地清除活性氧,减轻氧化损伤,表现出比 QZ100 和 QZ74 更强的枯萎病抗性。这说明 QZ73 在受到枯萎病菌侵染后,能更迅速启动抗氧化防御机制,维持细胞内的氧化还原平衡,从而减轻枯萎病对植株的伤害。

2.1.4 枯萎病菌胁迫对不同砧木品种番茄木质素含量和苯丙氨酸解氨酶活性以及抗病相关蛋白基因表达量的影响 由图 4 可知,各砧木品种的木质素含量存在显著差异,QZ73 的木质素含量达到了 119.62 mg g^{-1} ,是 QZ74 的 31.65 倍,与 QZ100 相比显著增加了 11.56%,这表明 QZ73 在受枯萎病菌胁迫时,通过促进木质素合成来增强细胞壁的机械强度,从而阻碍病菌的入侵和扩展。

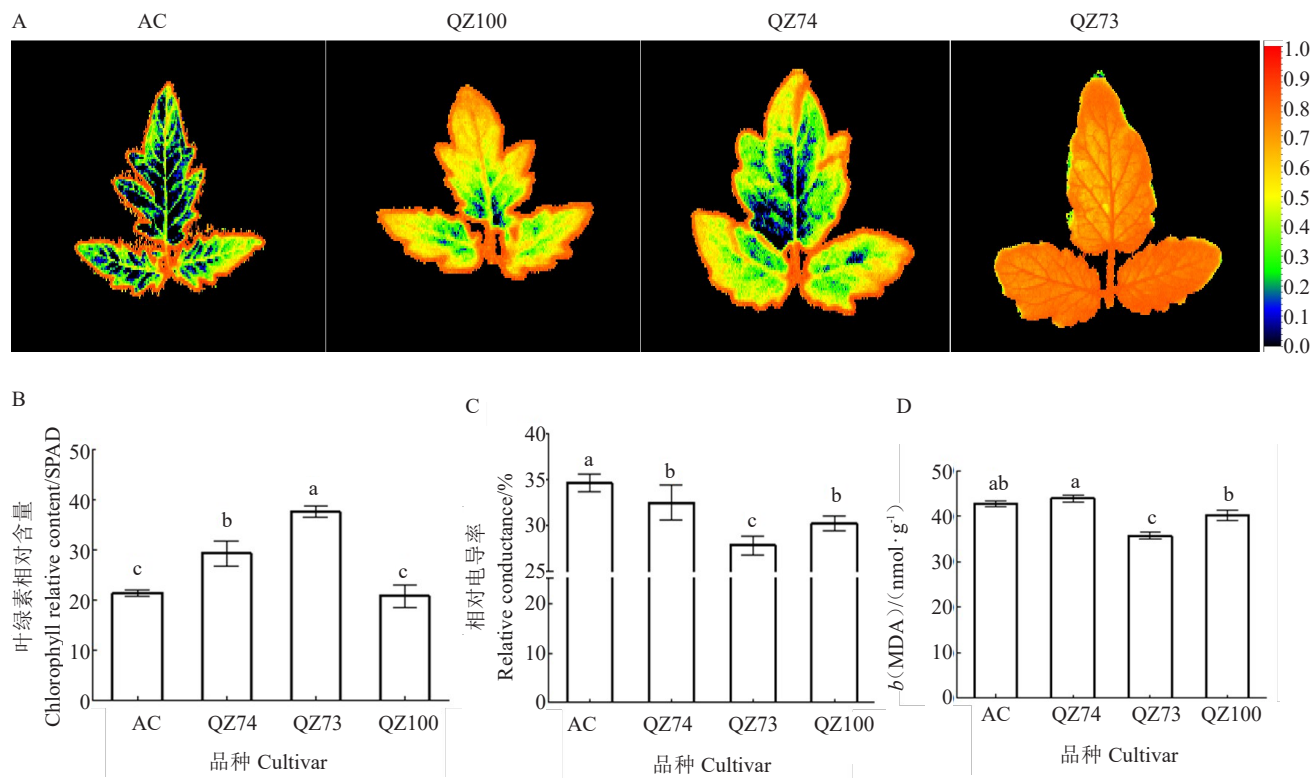


图2 枯萎病菌胁迫对不同砧木品种番茄叶绿素荧光和膜系统的影响

Fig. 2 Effects of *Fusarium* wilt stress on chlorophyll fluorescence and membrane system of tomato rootstock cultivars

QZ73 的 PAL 活性最强,是 QZ100 的 2.50 倍,相比 QZ74 显著上升了 12.53%,强大的 PAL 活性为木质素等抗病物质的合成提供了充足动力,有助于 QZ73 快速启动防御机制,合成更多的酚类化合物等,增强对病菌的抵抗力。

与 QZ74 和 QZ100 相比,QZ73 的病程相关蛋白基因 *PR1* 表达量分别显著上调了 4.8 倍、1.52 倍,病程相关蛋白基因 *PR5* 表达量分别上调了 13.12 倍、11.03 倍,表明其通过激活一系列抗病相关基因,构建起复杂的防御网络。

综合以上结果,在枯萎病菌胁迫后的第 14 天,QZ73 在木质素含量积累、PAL 活性提升以及抗病相关蛋白基因表达量上调等方面均显著优于 QZ100 和 QZ74,这也进一步解释了不同番茄砧木品种对枯萎病菌抗性差异的内在生理和分子机制。

2.2 盐胁迫下不同番茄砧木品种的筛选

2.2.1 盐胁迫下不同砧木品种番茄的生长情况

由图 5 可知,在盐胁迫 14 d 后,不同砧木品种番茄的生长状况呈现出显著差异,QZ74 的盐害指数为 18.33%,显著低于其他品种,展现出较强的耐盐性,其株高受影响较小,为 11.57 cm,是 AC 的 1.36 倍,而 QZ100 和 QZ73 在盐胁迫条件下株高受到抑制且叶片出现明显的发黄现象,其株高分别为 7.2、

6.8 cm,与 AC 相比分别下降了 18.47%、25.44%,对盐分耐受性低。QZ73 受盐胁迫影响最为严重,其地上部鲜质量和地下部鲜质量相较于 AC 分别减少了 78.48%、137.14%,而 QZ74 的地上部鲜质量和地下部鲜质量分别是 AC 的 1.58 倍、2.13 倍,显示出良好的维持植株鲜质量的能力,表明其在盐胁迫下仍能保持较为正常的生理活动和物质积累。

干质量的变化反映了植株在盐胁迫下物质合成和积累的情况。QZ73 和 QZ59 的地上部干质量和地下部干质量显著低于 AC,分别减少了约 58.33%、46.15%、78.04%、50%,QZ74 的地上部干质量和地下部干质量分别是 AC 的 1.71 倍、1.59 倍,展现出在盐胁迫下较强的物质合成和积累能力,这可能与其高效的光合作用机制以及对盐分的有效调节能力有关。

这些结果表明,不同番茄砧木在盐胁迫下的生长情况差异显著,QZ74 在株高、鲜质量和干质量等方面均表现出较强的耐盐性,更适合在盐胁迫环境中作为砧木使用,为番茄的耐盐栽培提供了新的选择和参考依据,而盐胁迫下 QZ100 和 QZ73 叶片萎蔫发黄且生长受到抑制,因此,后续试验将选取 QZ73、QZ100 和 QZ74 进行深入的探究。

2.2.2 盐胁迫对不同砧木品种番茄叶绿素荧光和

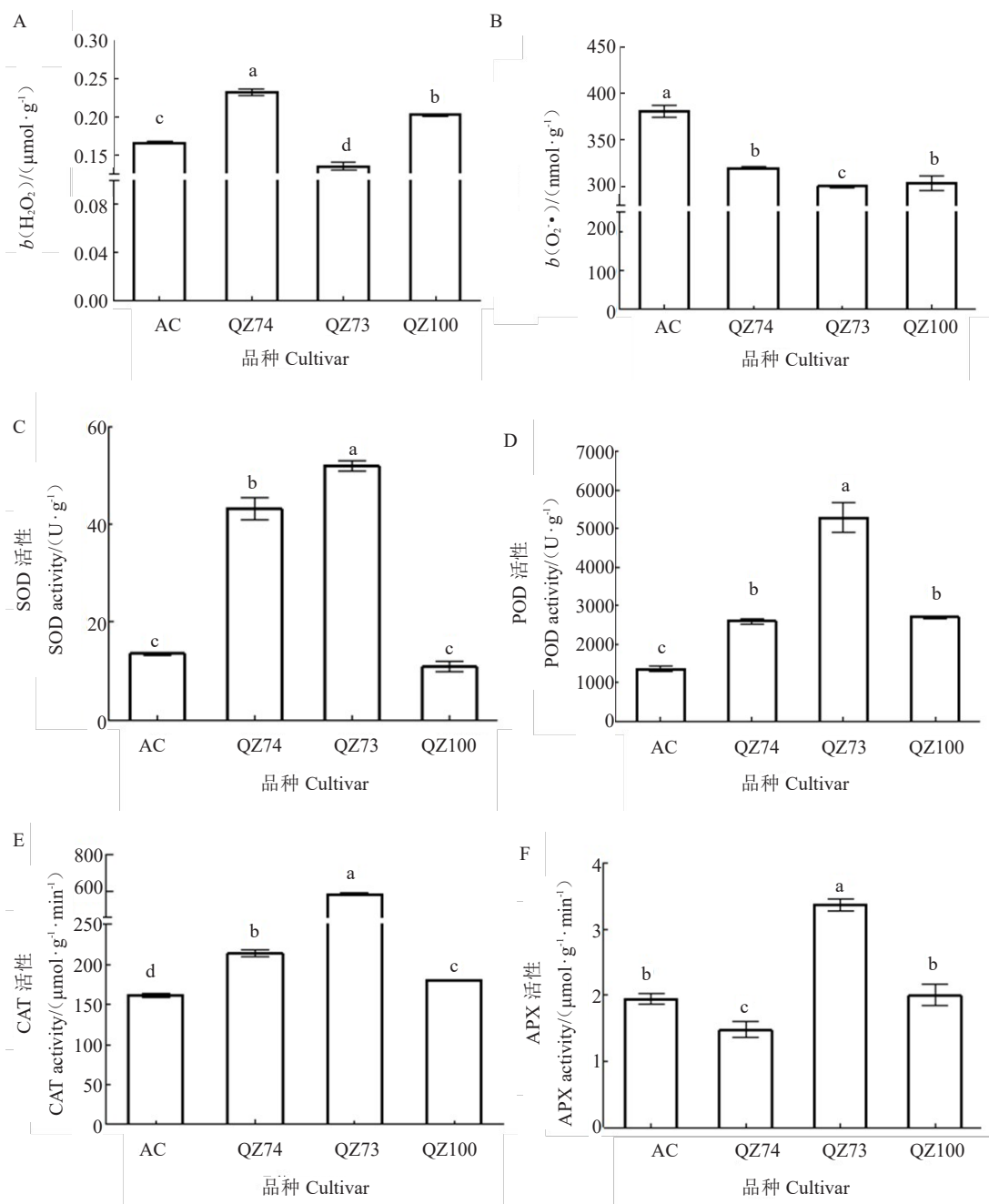


图3 枯萎病菌胁迫对不同砧木品种番茄抗氧化酶系统的影响

Fig. 3 Effects of wilt pathogen stress on tomato antioxidant enzyme system of different stock cultivars

膜系统的影响 从图6可以看出,在NaCl处理下,QZ74番茄叶绿素荧光显著高于QZ100和QZ73,叶绿素相对含量分别是QZ73和QZ100的1.67倍、1.74倍,这表明盐胁迫强烈抑制了QZ73和QZ100PSII反应中心的活性,影响其光能的捕获及转化效率,而耐盐性强的QZ74的PSII受盐胁迫的影响程度较轻,能更好地维持光合机构的稳定性,保障光合作用的相对稳定。

如图6所示,与NaCl胁迫下的QZ73和QZ100相比,QZ74的相对电导率显著降低。此外,

在盐胁迫条件下,QZ74的MDA含量也显著降低,结果表明QZ74膜系统在盐胁迫下能够较好地保持完整性,维持细胞的正常生理功能。此外,盐胁迫还会诱导活性氧(ROS)的积累,过量的ROS会攻击膜脂,引发膜脂过氧化,产生MDA,在盐胁迫处理14d后,QZ74的MDA含量相比QZ73和QZ100分别减少了106.03%、125.98%,这充分说明QZ74具有更强的ROS清除能力,能够有效减轻膜脂过氧化程度,维持膜系统的稳定性。

2.2.3 盐胁迫对不同番茄砧木抗氧化酶系统的影响

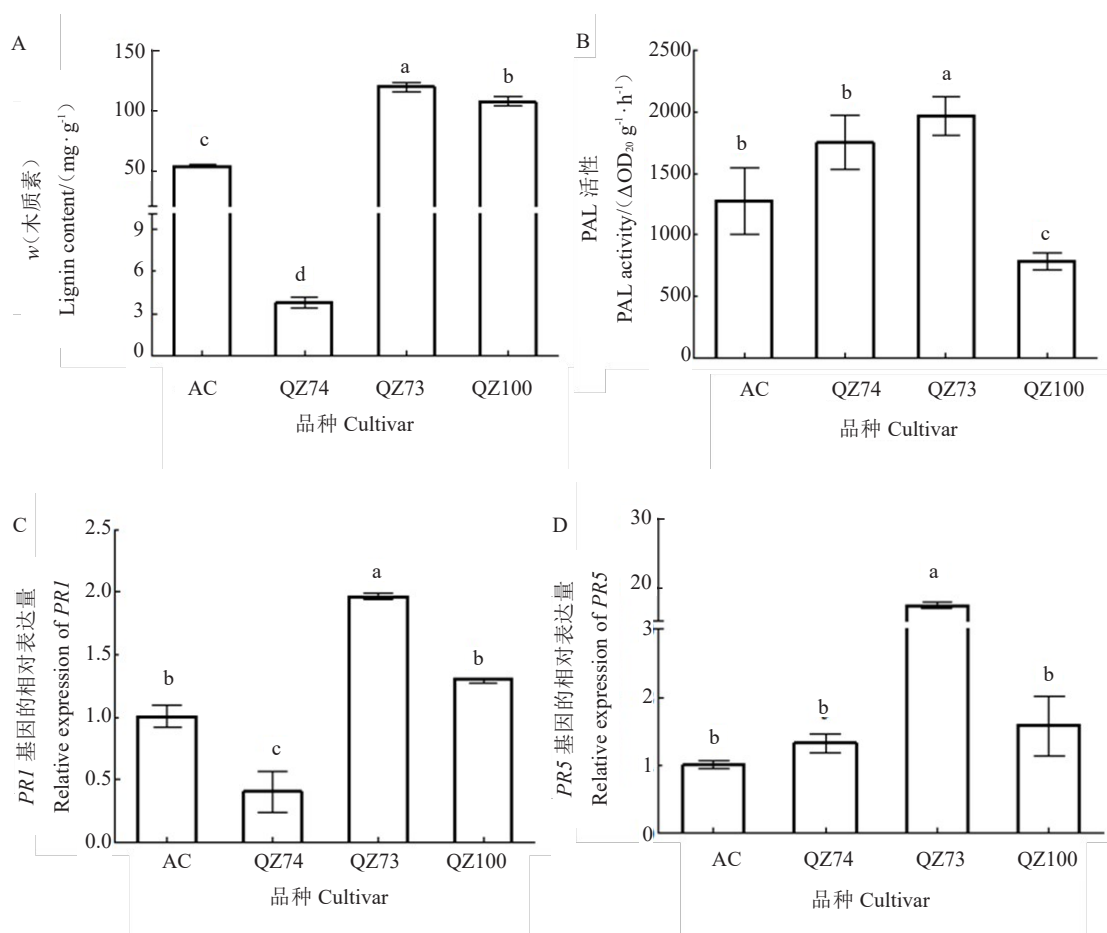


图4 枯萎病菌胁迫对不同砧木品种番茄木质素含量和苯丙氨酸解氨酶活性以及抗病相关蛋白基因表达量的影响
Fig. 4 Effects of wilt pathogen stress on the content of lignin and phenylalanine ammonia lyase activity and disease resistance related protein gene expression in tomato of different stock cultivars

响 由图7可知,QZ74的叶片 H_2O_2 含量(b)为 $0.45 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量为 $114.27 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$,此时,其SOD活性达到 $60.89 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,POD活性为 $3572.00 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,CAT活性为 $553.86 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,APX活性为 $3.02 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。而QZ73和QZ100的叶片 H_2O_2 含量分别为 0.63 、 $0.82 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量分别为 258.64 、 $141.72 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。此时,其SOD活性分别达到 29.66 、 $34.21 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,POD活性分别为 1025.33 、 $2632.00 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,CAT活性分别为 141.68 、 $186.35 \text{ nmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,APX活性分别为 2.45 、 $2.46 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,由此表明,NaCl处理后QZ74的抗氧化酶系统能够更有效地被激活,通过多种抗氧化酶的协同作用,更高效地清除细胞内的活性氧,从而减轻盐胁迫对植株的氧化损伤,这也进一步揭示了不同砧木品种番茄耐盐性差异的生理机制。

3 讨论与结论

砧木是影响嫁接蔬菜生长、产量和品质的关键

因素之一^[20]。叶绿素作为光合作用中的核心参与者,在光能捕获、传递与转化过程中发挥着不可替代的作用^[21]。本研究结果表明,枯萎病菌侵染后,番茄叶片的叶绿素含量降低,而抗性较好的砧木品种QZ73叶绿素含量降幅小于其他品种。在海南黄瓜抗枯萎病嫁接砧木筛选研究中,黄瓜叶片在接菌21 d后,抗性强的砧木品种SPAD值显著高于对照^[22],与上述结果一致。当植株遭受到枯萎病菌的侵染或盐胁迫,植株会产生一系列生理生化反应进行抵御,其中抗氧化酶活性的变化尤为明显。以SOD、POD、CAT等为代表的抗氧化酶在调节活性氧代谢的动态平衡中起重要作用^[23]。在枯萎病菌侵染后,QZ73体内的防御酶活性如SOD、POD、CAT、APX等活性迅速提高,这与枯萎病菌侵染香蕉的研究结果一致^[24]。曹言勇等^[25]发现,接种层出现镰孢茎腐病后,玉米的木质素含量增加,细胞壁强度增强,有效阻碍病原菌的入侵与扩散,为植物构建起坚固的防御屏障,而病原侵染后幼苗苯丙氨酸解氨酶活性迅速升高,这为木质素等抗病物质的合成提

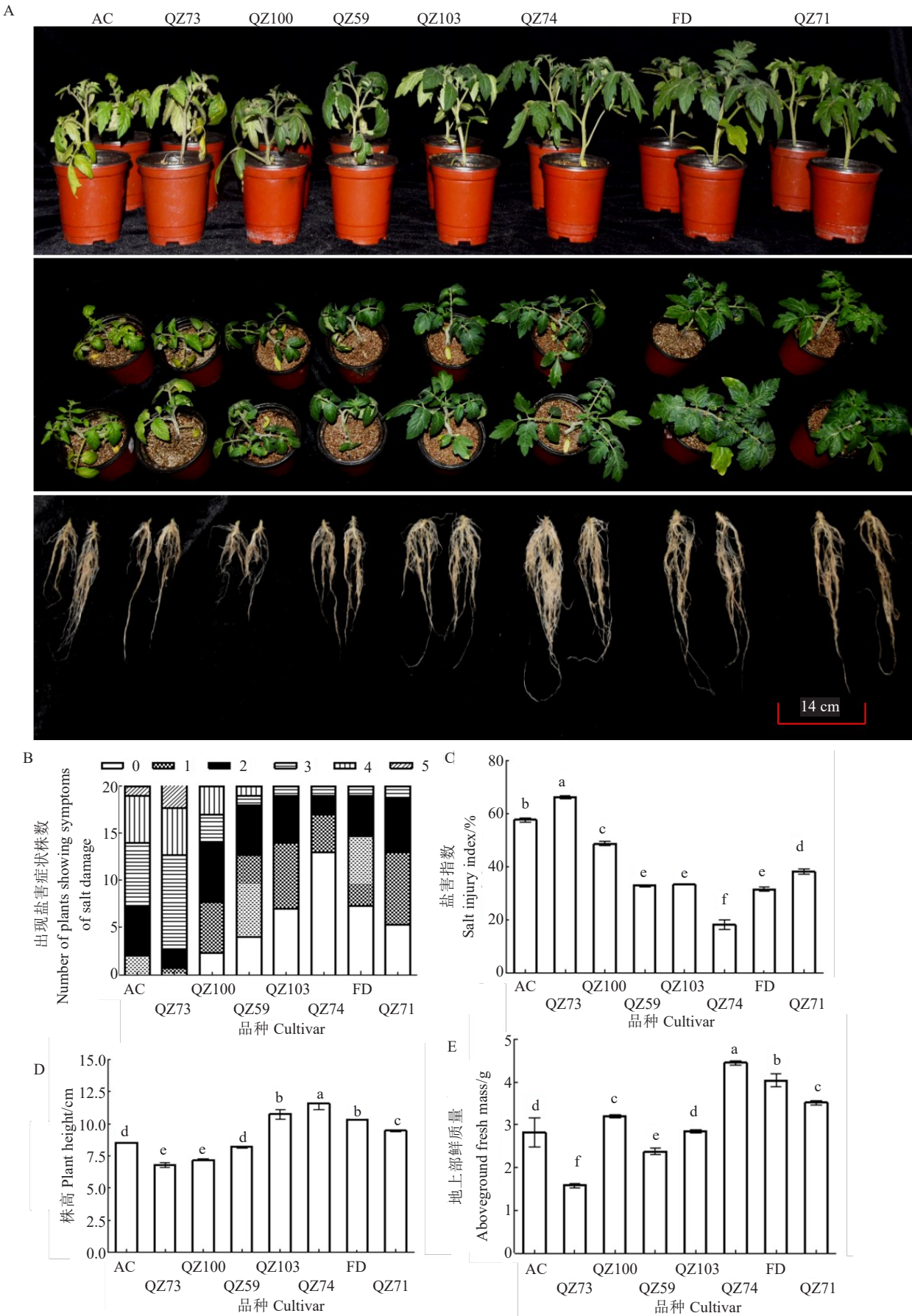


图5 盐胁迫下不同砧木品种番茄的生长情况

Fig. 5 Growth conditions of tomato plants grafted on different rootstocks under salt stress

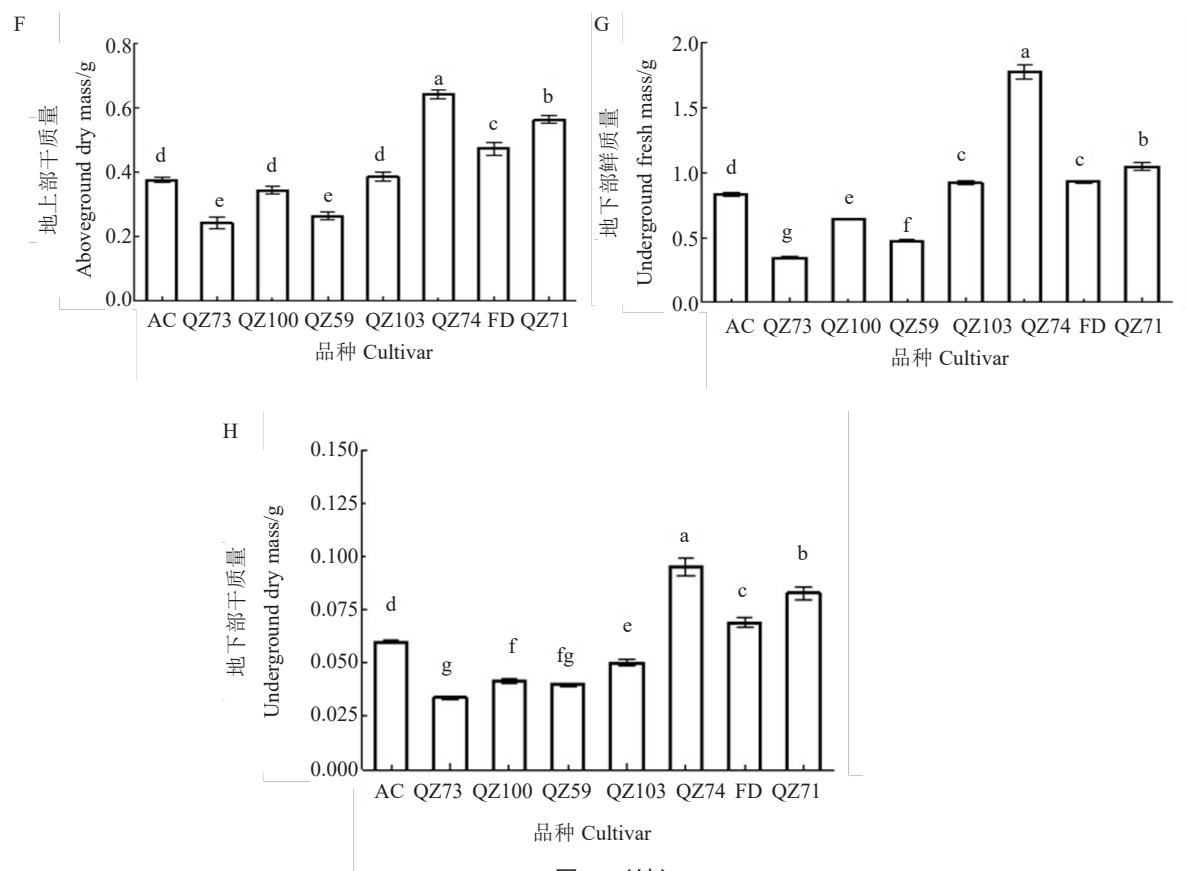


图 5 (续)
Fig. 5 (Continued)

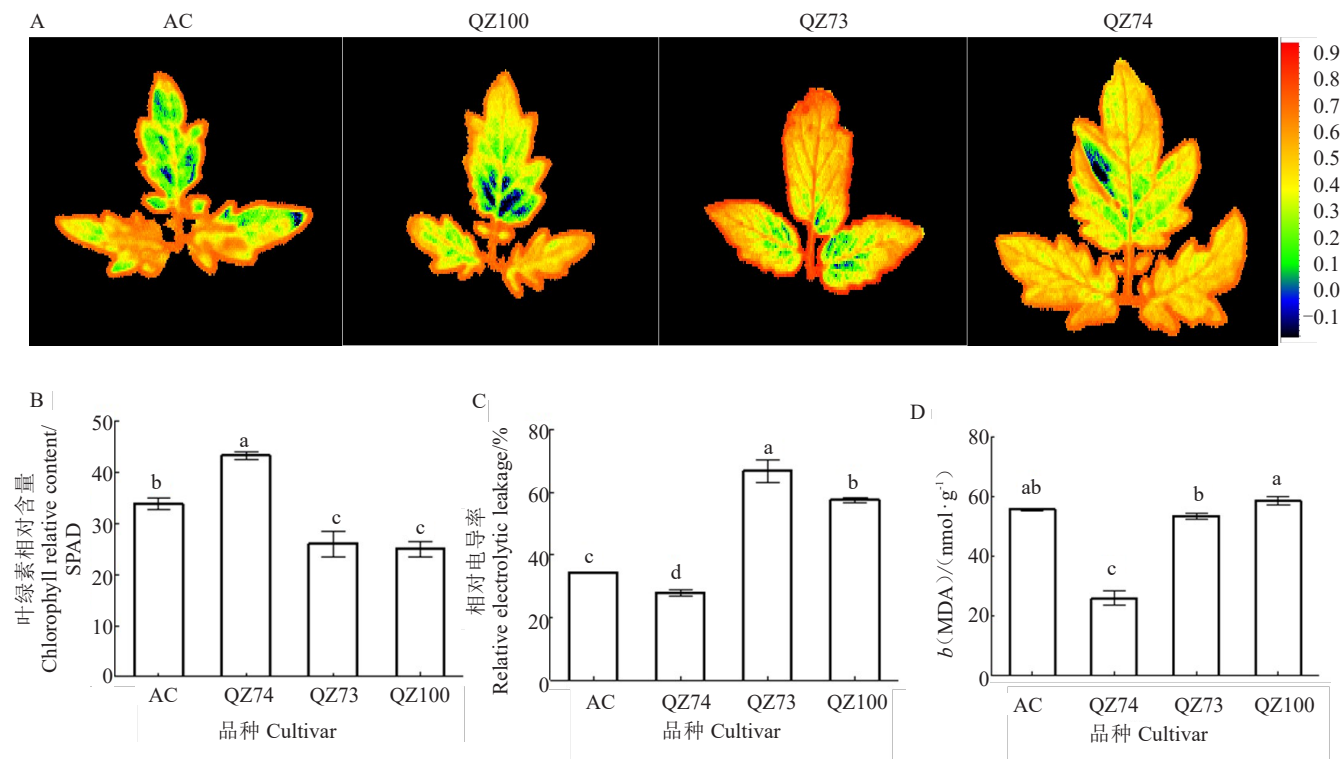


图 6 盐胁迫对不同砧木品种番茄叶绿素荧光和膜系统的影响
Fig. 6 Effects of salt stress on chlorophyll fluorescence and membrane system of tomato rootstock cultivars

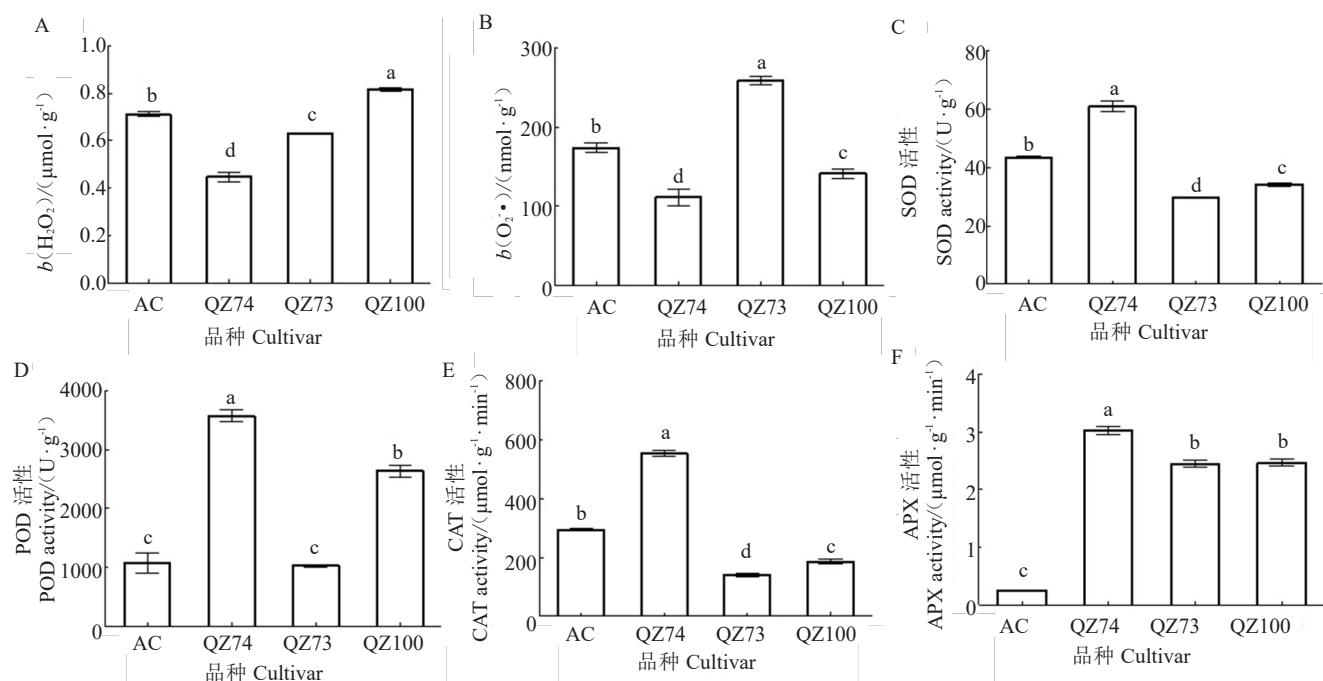


图7 盐胁迫对不同砧木品种番茄抗氧化酶系统的影响

Fig. 7 Effects of salt stress on antioxidant enzyme system of tomato rootstock cultivars

供了充足动力。在本研究中,接种枯萎病后,QZ73木质素含量增加,苯丙氨酸解氨酶活性快速升高,这与曹言勇等^[25]的研究结果一致。Li等^[26]研究表明,枯萎病菌侵染后会激活 *PR1* 等抗病相关基因表达,在本研究中,与其他砧木品种相比,QZ73的病程相关蛋白基因 *PR1*、*PR5* 表达量提高幅度较大,反映了接种枯萎病菌后可以激活番茄的抗病相关基因表达,从而构建起复杂的防御网络,这与 Li等^[26]的研究结果一致。

盐胁迫处理 14 d 后,与 AC 和商品种相比,砧木番茄的株高、茎粗、鲜质量和干质量显著降低,这与王毅等^[27]的盐胁迫抑制番茄生长的研究结果一致。QZ74 的株高为 11.57 cm,通过测定其叶绿素含量、电导率等发现,QZ74 受盐害程度均低于其他试验材料,表现出较强的耐盐性,这与李悦等^[28]的研究结果一致。盐胁迫下 QZ74 叶片内的 SOD、POD 和 CAT 活性增强,并显著降低了叶片内 H_2O_2 、 $O_2\cdot^-$ 及 MDA 含量,这与贾邱颖等^[29]的耐盐能力较强的番茄砧木品种能缓解盐胁迫对番茄幼苗的伤害的结果一致。

综上所述,笔者通过人工接种枯萎病菌,并采用 $250\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液进行灌根处理的方式,开展了苗期枯萎病抗性与盐胁迫耐受性的鉴定工作。试验成功筛选出抗枯萎病砧木 QZ73 与耐盐砧木 QZ74,不仅为番茄抗逆栽培提供了优质材料,也

为后续番茄抗逆育种、栽培技术优化等相关研究奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 史艳玮. 番茄种质资源评价及多抗砧木新品种选育[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [2] 梅文宇, 黎振兴, 陈兴平, 等. 不同砧木嫁接番茄对酶活和激素含量的影响[J]. 广东农业科学, 2024, 51(12): 64-75.
- [3] 王天一, 周炳庆, 刘荣国. 休棚期土壤处理技术[J]. 上海蔬菜, 2015(5): 74-75.
- [4] SINGH V K, SINGH H B, UPADHYA R S. Role of fusaric acid in the development of 'Fusarium wilt' symptoms in tomato: Physiological, biochemical and proteomic perspectives[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 118: 320-332.
- [5] ZURIEGA Q, ZHENG Y R, LIU H, et al. Current progress on pathogenicity-related transcription factors in *Fusarium oxysporum*[J]. Molecular Plant Pathology, 2021, 22(7): 882-895.
- [6] 孟臻, 张伟萍, 王莹, 等. 番茄枯萎病菌 RT-PCR 检测技术的建立与应用[J]. 园艺学报, 2022, 49(11): 2479-2488.
- [7] SRINIVA C, DEVI D N, MURTHY K N, et al. *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: Biology to diversity: A review[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(7): 1315-1324.
- [8] 王恩启, 武亚芬, 梁斌, 等. 一株番茄枯萎病拮抗菌的筛选、鉴定及其生长条件研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 174-181.
- [9] 李蝶, 范宋进, 何小艳, 等. 不同砧木嫁接对番茄抗性及果实品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2024(10): 52-55.
- [10] LI T D, YANG X P, YU Y, et al. Domestication of wild tomato is accelerated by genome - editing[J]. Nature Biotechnology, 2024, 42(1): 1-10.

- 2018,36(12):1160-1163.
- [11] 邹宜静,王光锋,任国华,等.不同品种砧木抗病性鉴定及嫁接对番茄植株生长和果实品质的影响[J].上海农业学报,2021,37(6):108-113.
- [12] 王松,莘冰茹,周艳,等.外源一氧化氮对盐胁迫下鲜食番茄幼苗形态及光合特性的影响[C]//中国园艺学会.中国园艺学会2015年学术年会论文摘要集,2015:136.
- [13] 张蓓蓓,高梓元,赵立福,等.嫁接番茄的耐盐性筛选及综合评价[J].山东农业大学学报(自然科学版),2023,54(6):820-827.
- [14] 刘德兴,荆鑫,焦娟,等.嫁接对番茄产量、品质及耐盐性影响的综合评价[J].园艺学报,2017,44(6):1094-1104.
- [15] 彭玉全.南瓜砧木 CmoNAC1 和 CeO₂ 纳米材料提高黄瓜耐盐性的机制[D].武汉:华中农业大学,2024.
- [16] WANG F B, KONG W L, WONG G, et al. AtMYB12 regulates flavonoids accumulation and abiotic stress tolerance in transgenic *Arabidopsis thaliana*[J]. Molecular Genetics and Genomics, 2016,291(4):1545-1559.
- [17] DU N S, GUO H, FU R K, et al. Comparative transcriptome analysis and genetic methods revealed the biocontrol mechanism of *Paenibacillus polymyxa* NSY50 against tomato *Fusarium wilt*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022,23(18):10907.
- [18] DU N S, XUE L, XUE D Q, et al. The transcription factor *Sl-NAPI* increases salt tolerance by modulating ion homeostasis and ROS metabolism in *Solanum lycopersicum*[J]. Gene, 2023, 849:146906.
- [19] 薛璐,杨倩,郭慧,等.黄瓜耐盐根际促生菌的筛选及评价[J].中国瓜菜,2021,34(9):26-32.
- [20] 刘德兴.嫁接对番茄生长、品质和耐盐性的综合影响及评价模型初探[D].山东泰安:山东农业大学,2017.
- [21] 潘瑞炽.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [22] 梁含云,李先宽,王广苹,等.外源茉莉酸甲酯对盐胁迫酸枣幼苗的生理影响[J/OL].西北农业学报,1-8(2024-10-09)[2025-04-16].<https://link.cnki.net/urlid/61.1220.s.20250415.2013.004>.
- [23] CHU N, ZHOU J R, ROTT P C, et al. ScPR1 plays a positive role in the regulation of resistance to diverse stresses in sugarcane (*Saccharum* spp.) and *Arabidopsis thaliana*[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 180:114736.
- [24] 罗英,丁月,郑泗军,等.硒驱动香蕉抗氧化系统激活抵御枯萎病菌的机制[J].生态学杂志,1-13(2025-01-26).<https://link.cnki.net/urlid/21.0048.Q.20250310.1649.004>.
- [25] 曹言勇,程泽强,马娟,等.整合转录组和代谢组学分析揭示玉米对层出镰孢茎腐病的响应机制[J].中国农业科学,2025,58(1):75-90.
- [26] LI J T, YANG L M, DING S Z, et al. Plant PR1 rescues condensation of the plastid iron-sulfur protein by a fungal effector[J]. Nature Plants, 2024, 10:1775-1789.
- [27] 王毅,门立志,曹云娥,等.番茄品种与砧木苗期耐盐性指标评价及耐盐品种筛选[J].中国蔬菜,2014(2):24-30.
- [28] 李悦,蔡亚南,任安琦,等.盐碱胁迫对元宝枫幼苗生长和生理特性的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(8):5-14.
- [29] 贾邱颖,吴晓蕾,冀胜鑫,等.盐胁迫下番茄砧木对嫁接苗生物量、氨基酸含量和活性氧代谢的影响[J].应用生态学报,2020,31(9):3075-3084.