



张子怡, 陈婕, 季延海, 刘明池, 梁浩, 王星. 不同砧木嫁接对番茄幼苗耐旱性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(01): 59-72.
ZHANG Ziyi, CHEN Jie, JI Yanhai, LIU Mingchi, LIANG Hao, WANG Xing. Effects of different rootstock grafting on drought tolerance of tomato plants[J].
Journal of China Agricultural University, 2026, 31(01): 59-72.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.06

不同砧木嫁接对番茄幼苗耐旱性的影响

张子怡^{1,2} 陈婕² 季延海² 刘明池² 梁浩² 王星^{1*}

(1. 河北工程大学 园林与生态工程学院, 河北 邯郸 056009;

2. 北京市农林科学院 蔬菜研究所/农业农村部华北都市农业重点实验室/
国家蔬菜工程技术研究中心, 北京 100097)

摘 要 为探究嫁接技术对缓解番茄干旱胁迫的作用,以樱桃番茄‘京番串红1号’为接穗,分别以‘托鲁巴姆’‘茄砧3号’‘番砧2号’以及‘京番串红1号’自身为砧木,通过自然干旱处理,系统研究不同嫁接组合在干旱胁迫下的生长表现、光合特性、渗透调节能力、抗氧化体系及相关基因转录。结果表明:1)干旱胁迫显著抑制番茄幼苗生长,降低净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs),并诱导膜脂过氧化和活性氧(ROS)积累;2)砧木种类显著影响嫁接植株的耐旱性,‘托鲁巴姆’砧木嫁接植株的表现最佳,相较于正常供水条件下自嫁接植株,其叶绿素总含量和类胡萝卜素含量均降低17.9%,SOD和POD活性分别升高120%和285.6%;脯氨酸、可溶性糖和丙二醛含量分别升高58.6%、41.1%和83.3%。而‘茄砧3号’‘番砧2号’虽具一定耐旱优势,但效果弱于‘托鲁巴姆’;3)基因表达分析表明,‘托鲁巴姆’砧木嫁接植株能够更好地维持光合色素合成相关基因(*GSA*、*PBGD*、*PSY2*、*ZDS*)、水通道蛋白相关基因(*PIP1.2*、*PIP1.5*、*PIP2.1*、*PIP2.4*)的表达水平,并协同上调抗氧化酶基因(*S1SOD1*、*S1SOD2*、*S1POD42*、*S1POD17*)的表达,从而显著增强番茄幼苗整体抗氧化防御能力。本研究揭示了不同砧木在调控番茄耐旱性方面的生理与分子差异,为干旱地区番茄耐旱栽培的砧木筛选与高效利用提供了理论依据和实践参考。

关键词 砧木筛选; 樱桃番茄; 生理机制; 抗氧化防御; 基因表达

中图分类号 S641.2

文章编号 1007-4333(2026)01-0059-14

文献标志码 A

Effects of different rootstock grafting on drought tolerance of tomato plants

ZHANG Ziyi^{1,2}, CHEN Jie², JI Yanhai², LIU Mingchi², LIANG Hao², WANG Xing^{1*}

(1. College of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056009, China;

2. Institute of Vegetables, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences/Key Laboratory of North China Urban Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering Research Center for Vegetables, Beijing 100097, China)

Abstract To investigate the effect of grafting technology on alleviating drought stress in tomato, cherry tomato ‘Jingfan Chuanhong No. 1’ was used as the scion, and ‘Torubam’, ‘Qiezhen 3’, ‘Fanzhen 2’, and self-grafted cherry tomato were used as rootstocks. Through natural drought treatment, the growth performance, photosynthetic characteristics, osmotic adjustment capacity, antioxidant system, and related gene transcription under drought stress were systematic conducted. The results showed that: 1) Drought stress significantly

收稿日期: 2025-07-03; 接受日期: 2025-12-03

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20240407、KJCX20251305); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-23-G-06); 北京市农林科学院蔬菜研究所茄果类协同创新中心建设项目(XTCX202303)

第一作者: 张子怡(ORCID:0009-0007-1905-4278), 硕士研究生, E-mail: zzy1342023@163.com

通讯作者: 王星(ORCID:0009-0007-7735-4033), 副教授, 主要从事蔬菜遗传育种及高效栽培研究, E-mail: wangxing@hebeu.edu.cn

inhibited tomato seedling growth, reduced net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s), and induced membrane lipid peroxidation and reactive oxygen species (ROS) accumulation. 2) The type of rootstock significantly influenced the drought tolerance of grafted plants. The performance of 'Torubam' rootstock-grafted plants was the best. Compared with self-grafted plants under normal water supply, the total chlorophyll content and carotenoid content of 'Torubam'-grafted plants decreased by 17.9%, while the activities of SOD and POD increased by 120% and 285.6%, respectively. The contents of proline, soluble sugar, and malondialdehyde (MDA) increased by 58.6%, 41.1%, and 83.3%, respectively. Although 'Qiezhen 3' and 'Fanzhen 2' provided some drought tolerance advantages, their effects were weaker than 'Torubam'. 3) Gene expression analysis indicated that grafted plants with 'Torubam' rootstock can better maintain the expression levels of genes related to photosynthetic pigment synthesis (*GSA*, *PBGD*, *PSY2*, *ZDS*) and aquaporin-related genes (*PIP1.2*, *PIP1.5*, *PIP2.1*, *PIP2.4*), while coordinately upregulating the expression of antioxidant enzyme genes (*SISOD1*, *SISOD2*, *SIPOD42*, *SIPOD17*), thereby significantly enhancing the overall antioxidant defense capacity of tomato seedlings. This study reveals the physiological and molecular differences among rootstocks in regulating tomato drought tolerance, providing a theoretical basis and practical reference for rootstock selection and efficient utilization in drought-prone areas for tomato cultivation.

Keywords rootstock screening; Cherry tomato; physiological mechanisms; antioxidant defense; gene expression

干旱是限制番茄(*Solanum lycopersicum*. L)生长发育与产量形成的重要非生物胁迫之一。随着全球气候变化加剧,干旱发生频率和强度不断增加,导致植物水分供应不足、活性氧(ROS)过量积累,从而引发膜脂过氧化、叶绿素降解和光合效率下降等一系列生理损伤,严重影响作物的产量和品质^[1-2]。已有研究表明,干旱胁迫会显著降低番茄叶片含水率,抑制光合色素合成与稳定性,降低叶绿素荧光参数和净光合速率,最终导致植株生长停滞甚至死亡^[3];同时,干旱胁迫还能诱导细胞膜透性升高,使丙二醛(MDA)等膜脂过氧化产物大量积累,破坏细胞结构和功能^[4-5]。侯梦媛等^[6]研究表明,干旱胁迫显著降低了番茄的叶片含水率,抑制了光合色素的合成与稳定,降低了叶绿素荧光参数与净光合速率,导致植株生长停滞甚至死亡。张纪涛等^[7]研究表明,干旱胁迫还诱导番茄植株细胞膜透性升高,导致膜脂过氧化产物(如MDA)大量积累,进而使细胞结构和功能受损。因此,提高番茄在干旱条件下的适应能力已成为农业科研和生产中亟待解决的重要问题。

嫁接作为一种提高作物抗逆性的有效农艺措施,已在番茄等作物中得到广泛应用^[8]。Shehata等^[9]研究发现,使用耐旱砧木进行嫁接的番茄幼苗,其光合效率、膜系统稳定性及抗氧化酶活性均显著提高,从而增强了番茄幼苗在干旱胁迫下的生长适应性。Liu等^[10]研究发现,耐旱砧木可通过

上调接穗中抗氧化酶基因的表达,有效清除活性氧(ROS),保护膜系统稳定性。韦建明等^[11]研究指出,以半野生番茄'GZ-01'为砧木嫁接栽培番茄,可以有效降低植株蒸腾速率,提高叶片抗氧化酶活性,减少ROS积累,诱导嫁接植株丝裂原活化蛋白激酶(MAPKs)、脱落酸(ABA)相关基因表达,以增强嫁接植株耐旱性,从而提高植株对干旱的耐受能力。此外,番茄嫁接砧木对植株水分调节的影响也逐渐受到关注。Shekafandeh等^[12]研究表明,通过适宜砧木嫁接后,可提高接穗对水分亏缺的适应性,有效促进渗透调节物质的积累,并维持光合色素和膜系统稳定性,从而缓解干旱胁迫所造成的生理损伤。Sade等^[13]研究发现,水通道蛋白基因家族负责调控水分跨膜运输,在嫁接植株中,耐旱砧木可通过维持水通道蛋白基因的表达来改善接穗的水分状况,从而增强耐旱性。尽管前人研究已从多个角度揭示了番茄嫁接在增强耐旱性方面的作用,但不同砧木材料在干旱条件下对番茄的调控机制仍缺乏系统比较。本研究拟以樱桃番茄'京番串红1号'为接穗,'托鲁巴姆' '番砧2号' '茄砧3号'以及'京番串红1号'自身为砧木,通过自然干旱处理,系统分析不同嫁接组合在光合特性、抗氧化体系、渗透调节机制及相关基因表达方面的差异,旨在揭示不同砧木调控番茄耐旱性的生理和分子机制,探索提高番茄干旱适应性的有效途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2024 年 8—10 月在北京市农林科学院蔬菜研究所玻璃连栋温室内进行。栽培基质为 V(珍珠岩):V(椰糠):V(草炭)=1:1:1。本试验以樱桃番茄‘京番串红 1 号’为接穗,分别选用‘托鲁巴姆’‘茄砧 3 号’‘番砧 2 号’‘京番串红 1 号’为砧木进行嫁接。为尽量控制不同砧木(尤其是生长周期较长的‘托鲁巴姆’)的大小差异,确保能够在同一时期达到适宜嫁接的规格,本研究采取了错期播种、规模化播种与筛选的措施。由于‘托鲁巴姆’砧木从播种到适合嫁接需要的时间明显更长,因此需要比接穗提前约 1 个月进行播种。当接穗长到适合嫁接的大小时,提前播种的‘托鲁巴姆’砧木也刚好达到所需的大小。对于所有类型的砧木(包括‘托鲁巴姆’)都进行大批量播种,当砧木幼苗生长到一定阶段,通过筛选,挑出其中大小规格基本一致的幼苗用于嫁接。各处理均嫁接 100 株左右,成活率在 85%~90%。

于 2024 年 8 月 28 日选取株高(15±0.5)cm、茎粗(2.8±0.2)mm、具 4~5 片真叶的健壮幼苗,采用贴接法进行嫁接。

1.2 试验方法

本试验共设 5 个处理(表 1),嫁接苗恢复生长后每个处理选取生长一致的 15 株进行处理。正常供水的处理每天 10:00 正常浇透水,以盆底出水为准;干旱处理采取自然干旱方式。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatment

编号 Number	砧木 Rootstock	接穗 Graft	处理 Treatment
SS-w	京番串红 1 号	京番串红 1 号	正常浇水
TS	托鲁巴姆	京番串红 1 号	自然干旱
QS	茄砧 3 号	京番串红 1 号	自然干旱
FS	番砧 2 号	京番串红 1 号	自然干旱
SS	京番串红 1 号	京番串红 1 号	自然干旱

1.3 项目测定

1.3.1 生长指标的测定

选取长势一致的番茄幼苗,用卷尺测定嫁接点到生长点株高;用游标卡尺测量嫁接点上 1 cm 处茎的粗度;取番茄幼苗清洗干净后用天平称量测定鲜重(W_1),再在烘箱 105℃杀青然后 80℃烘干测定干

重(W_2),叶片相对含水量=($W_1 - W_2$)/ $W_1 \times 100\%$ ^[14]。每个处理设置 3 次生物学重复,每次重复测定 3 株植株。

1.3.2 光合色素和光合参数的测定

光合色素含量采用 95% 乙醇浸提法测定^[15]。于晴天 09:00—11:00 选取自番茄幼苗生长点起下数第 3~4 片功能叶片测定光合参数。采用 LI-6400XT 光合仪(美国,LI-COR)测定番茄叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)及蒸腾速率(Tr)^[16]。测定时,使用仪器内置的 6400-02B 红蓝光源,气流速度设定为 500 μmol/s;并利用小钢瓶将参比室 CO₂ 浓度稳定在 400 μmol/mol,以模拟大气环境浓度。每个处理设置 3 次生物学重复,每次重复测定 3 株植株。

1.3.3 渗透调节物质的测定

相对电导率采用浸泡法测定^[17]。选取自番茄幼苗生长点起下数第 3~4 片长势一致的功能叶片,洗净后用滤纸吸干表面水分;将叶片剪成适宜的长条,快速称取鲜样 3 份,每份 0.1 g,分别装入含 10 mL 去离子水的刻度试管中;盖上玻璃塞置于室温下浸泡 12 h 用电导仪测定浸提液电导率(R_1);然后沸水浴加热 30 min,冷却至室温后摇匀,再次测定浸提液电导率(R_2)。相对电导率= $R_1/R_2 \times 100\%$ ^[18]。选取自番茄幼苗生长点起下数第 3~4 片长势一致的功能叶片测定番茄叶片渗透调节物质,丙二醛含量采用索莱宝丙二醛含量检测试剂盒(货号:BC0025)、脯氨酸含量采用索莱宝脯氨酸(Pro)含量检测试剂盒(货号:BC0295)、可溶性糖含量采用索莱宝植物可溶性糖含量检测试剂盒测定(货号:BC0035)。以上指标每个处理设置 3 次生物学重复,每次重复测定 3 株植株。

1.3.4 抗氧化酶活性的测定

选取自番茄幼苗生长点起下数第 3~4 片长势一致的功能叶片进行抗氧化酶测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用索莱宝超氧化物歧化酶活性检测试剂盒检测(货号:BC0175),过氧化物酶(POD)采用索莱宝过氧化物活性检测试剂盒(货号:BC0175)测定。每个处理设置 3 次生物学重复,每次重复测定 3 株植株。

1.3.5 荧光定量 PCR 的测定

选取自番茄幼苗生长点起下数第 3~4 片长势一致的功能叶片,采用诺唯赞 Fast Pure Universal Plant Total RNA Isolation Kit 试剂盒,从番茄叶片中提取总 RNA。以提取的总 RNA 为模板(表 2),

表 2 本研究中使用的引物
Table 2 Primers used in this study

引物名称 Primers name	序列 (5'→3') Sequence (5'→3')
SISOD1(<i>Solyc01g067740</i>)-F	GAGCTGTTGTTGTTTCATGCTGATCC
SISOD1(<i>Solyc01g067740</i>)-R	CTGGAGGCCAATAATACCACAAGC
SISOD2(<i>Solyc03g062890</i>)-F	GTTGTGCATGCTGATCCTGATGATC
SISOD2(<i>Solyc03g062890</i>)-R	CCCAATAACGCCACAGCCAAC
SISOD3(<i>Solyc11g066390</i>)-F	ATACCATTGACCGGTCCAAACTCAG
SISOD3(<i>Solyc11g066390</i>)-R	CAGCATTGCCAGTGGTAAGACTGAG
SISOD4(<i>Solyc08g079830</i>)-F	AATCAGACCCAGGACTTACAGCAGC
SISOD4(<i>Solyc08g079830</i>)-R	ACCATCACAAAGTGCAAAGCTTCTTG
SISOD5(<i>Solyc06g048410</i>)-F	GGATACACACCACTCCTCACCATCG
SISOD5(<i>Solyc06g048410</i>)-R	ACTGACTGCTTCCCATGACACCAAC
SISOD6(<i>Solyc03g095180</i>)-F	AGCTTGATCATGGGAGGCAGTGAG
SISOD6(<i>Solyc03g095180</i>)-R	TTCCTCTCTTCTTCTTTTTTCCCGCT
SISOD7(<i>Solyc02g021140</i>)-F	TTGTGGGAGCATGCTTATTATCTGG
SISOD7(<i>Solyc02g021140</i>)-R	AAATTTACAAAGGCCTGTGCTCGAG
SISOD8(<i>Solyc06g048420</i>)-F	CATCGACGTTTGGGAGCATGC
SISOD8(<i>Solyc06g048420</i>)-R	TACTGACTGCTTCCCATGACACCAA
SISOD9(<i>Solyc06g049080</i>)-F	TTGAAACCACTGCAAATCAGGACC
SISOD9(<i>Solyc06g049080</i>)-R	ATGCGTGTTCCCAAACGTCTATACC
SIPOD42(<i>Solyc06g049080</i>)-F	CAAGGAATTTGCAAGAGCCATCAC
SIPOD42(<i>Solyc06g049080</i>)-R	GAGCTTGTTGGCAAGATTACACTGC
SIPOD17(<i>Solyc11g010120</i>)-F	GCCGAAGGAATGGTTAAGATGGG
SIPOD17(<i>Solyc11g010120</i>)-R	GCCGAAGGAATGGTTAAGATGGG
SIPIP1. 2(<i>Solyc01g094690</i>)-F	AAGAACATGCATGGGATGATCATTG
SIPIP1. 2(<i>Solyc01g094690</i>)-R	TTTCCACTCTTGAATGGAATGGCTC
SIPIP1. 5(<i>Solyc08g081190</i>)-F	CATCTACAACGACGAGCATGCATG
SIPIP1. 5(<i>Solyc08g081190</i>)-R	AGACCTGTGGAATGGCATAGCTCTG
SIPIP2. 1(<i>Solyc09g007770</i>)-F	CATTTATTGGTGCTGCAATTGCTG
SIPIP2. 1(<i>Solyc09g007770</i>)-R	ATTGCTCCTGAATGAACCAAGTGCT
SIPIP2. 4(<i>Solyc06g011350</i>)-F	TTATTTTCAATGGTGACAAGGCGTG
SIPIP2. 4(<i>Solyc06g011350</i>)-R	ATGAACCTAGAGCTTTAATTGCGCC
GSA(<i>Solyc04g009200</i>)-F	GAAGACCGGTCATGCAATGTGTG
GSA(<i>Solyc04g009200</i>)-R	TCAGCTGCAGCTACAGTCCTTTGAA
PBGD(<i>Solyc07g066470</i>)-F	ATGCTCTTATGGTCGACCTCTGCC
PBGD(<i>Solyc07g066470</i>)-R	ATTCACCATTCCCTCGGATACACTCC
PSY2(<i>Solyc02g081330</i>)-F	TCTTTGATGAGGCAGAGAAAGGTGTC
PSY2(<i>Solyc02g081330</i>)-R	CTAGAGATCTTGCATAAGCAATGGGC
ZDS(<i>Solyc01g097810</i>)-F	TGCTGGCTCATATACAAAACAGGACTAC
ZDS(<i>Solyc01g097810</i>)-R	AGAGATGTCATTCAACTCAGCAGCAGT
内参 EF-1-α-F	TACTGGTGGTTTTGAAGCTG
内参 EF-1-α-R	AACTTCCTTCACGATTTTCATCATA

使用诺唯赞反转录试剂盒合成cDNA。采用实时荧光定量PCR(qRT-PCR)技术,以合成的cDNA为模板检测目标基因表达水平。基因的相对表达量通过 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 方法进行计算。设置3次独立生物学重复,每个处理随机选取9株植株,每3株混合为一个生物学重复样本。基因表达量采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 方法进行计算,其中 ΔC_t 值为目的基因与内参基因 C_t 值的技术重复差值($n=3$)。

1.4 数据分析

运用Duncan's新复极差法分析各处理之间的差异显著性, $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

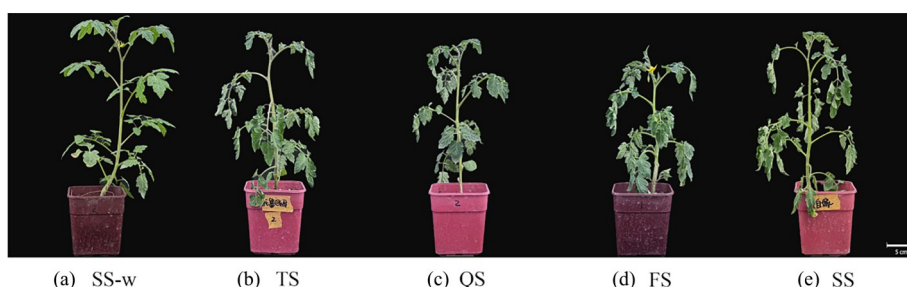
2.1 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗生长的影响

干旱胁迫显著抑制了番茄幼苗的生长(图1和图2)。与SS-w处理相比,干旱胁迫下,各嫁接处理的株高和茎粗增长率均显著降低($P<0.05$)。与SS-w相比,干旱对SS处理的株高抑制程度较轻,株高增长率降低了54.3%;FS处理的茎粗增长率下降幅度相对最小,降低了125.3%(图2(a)和(b))。此外,干旱胁迫显著降低了叶片相对含

水率($P<0.05$,图2(c))。与SS-w相比,SS处理叶片相对含水率下降幅度最大,降低了22.8%;而TS处理降幅最小(5.0%),说明‘托鲁巴姆’能有效维持番茄幼苗水分平衡,降低干旱胁迫造成的水分损失,在提升番茄幼苗耐旱性方面具有较强的调控潜力。

2.2 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗光合色素含量的影响

干旱胁迫对番茄幼苗光合色素含量影响显著,各干旱处理的叶绿素总含量和类胡萝卜素含量均显著下降($P<0.05$,图3)。其中,与SS-w处理相比,SS处理的叶绿素总含量和类胡萝卜素含量下降幅度最大,降幅分别为36.1%和35.7%;而TS处理的叶绿素总含量和类胡萝卜素含量降幅最小(均为17.9%);QS处理的叶绿素总含量和类胡萝卜素含量分别下降了24.8%和23.5%;FS处理的叶绿素总含量和类胡萝卜素含量分别下降了30.4%和27.2%。表明嫁接有利于光合色素稳定,维持幼苗的光合能力。其中,‘托鲁巴姆’嫁接可有效维持番茄幼苗光合色素的稳定性,在缓解干旱胁迫引起的光合色素下降方面,表现显著优于其他砧木及自嫁接。



SS-w:正常供水条件下‘京番串红1号’自嫁接;TS:干旱胁迫下‘托鲁巴姆’嫁接;QS:干旱胁迫下‘茄砧3号’嫁接;FS:干旱胁迫下‘番砧2号’嫁接;SS:干旱胁迫下‘京番串红1号’自嫁接。

SS-w: Self-grafted ‘Jingfan Chuanhong No. 1’ under normal water supply conditions; TS: Tolubam grafting under drought stress; QS: Grafting of eggplant rootstock No. 3 under drought stress; FS: Grafted plants with ‘Fanzhen 2’ rootstock under drought stress; SS: Self-grafted ‘Jingfan Chuanhong No. 1’ under drought stress.

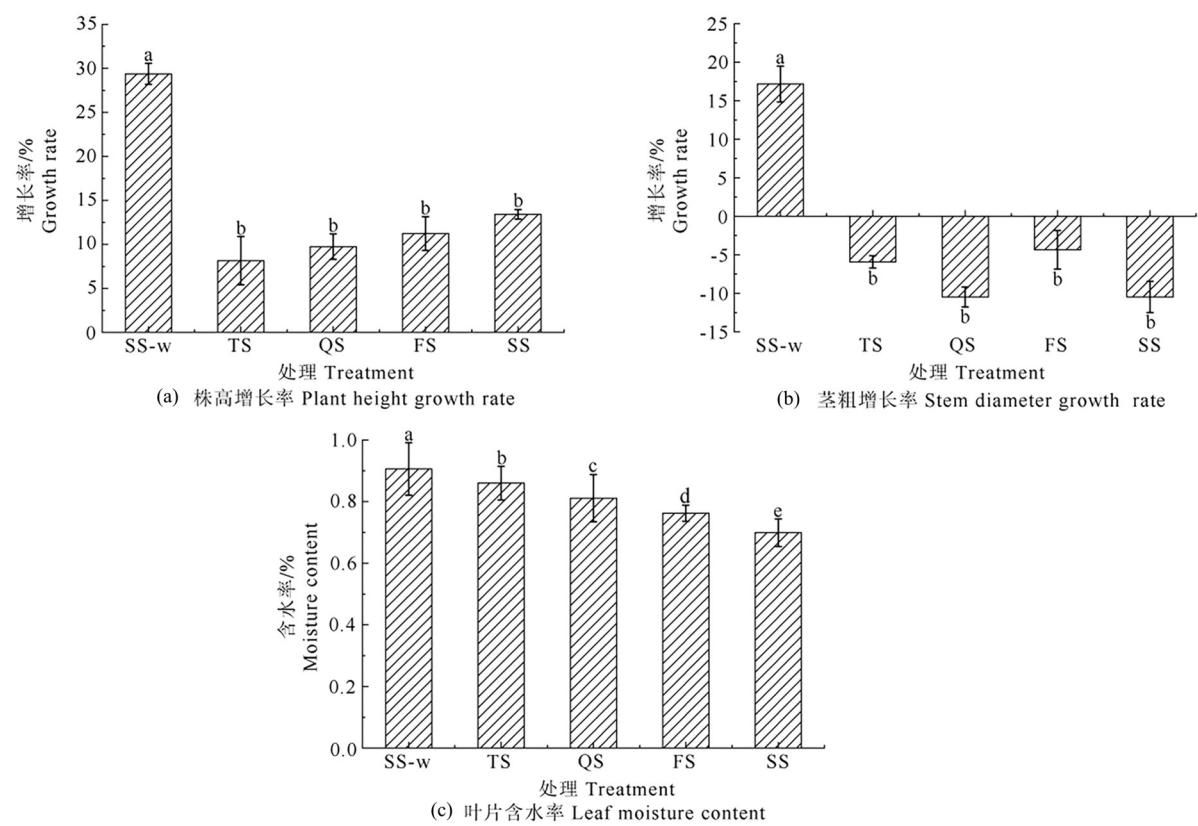
图1 不同嫁接组合番茄幼苗对干旱胁迫的响应

Fig. 1 Response of different grafting combinations of tomato seedlings to drought stress

2.3 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗光合色素相关基因表达的影响

转录层面的分析显示,干旱胁迫也显著抑制了番茄幼苗光合色素合成相关基因的表达,但不同嫁接组合在转录水平上的调控效果存在明显差异(图4)。叶绿素合成途径中, $GSA(Solyc04g009200)$ 与 $PBGD(Solyc07g066470)$ 作为上游关键编码基因,在所有干

旱处理中的表达量均较SS-w处理显著降低($P<0.05$),表明干旱胁迫普遍抑制了叶绿素生物合成过程(图4(a)和(b));同时,这2个基因在各干旱处理中,均在TS处理下表达水平最高,在FS处理下最低。类胡萝卜素合成途径中, $PSY2(Solyc02g081330)$ 与 $ZDS(Solyc01g097810)$ 在所有干旱处理组的表达量同样低于SS-w处理;但不同嫁接组合存在调控差异,其中



图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。下同。
Within the same figure, different letters represent significant differences ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

图2 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗生长及含水率的影响

Fig. 2 Effects of different rootstocks on the growth and leaf moisture content of tomato seedlings under drought stress

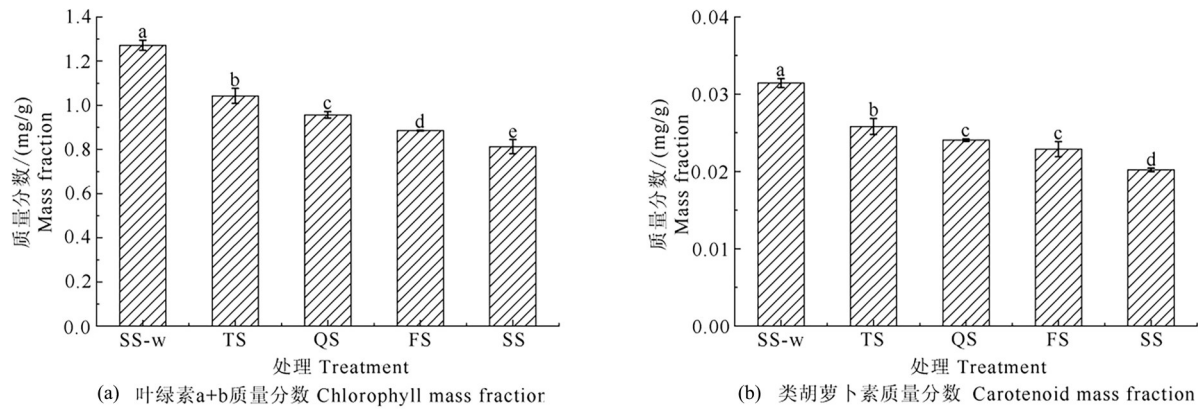


图3 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗光合色素含量的影响

Fig. 3 Effects of different rootstocks on photosynthetic pigment content of tomato seedlings under drought stress

*PSY2*基因的表达量在TS与FS处理中维持在相对较高水平,而在QS与SS处理中较低;*ZDS*基因的表达量则在TS处理组高于其他干旱组,FS处理下最低(图4(c)和(d))。这些结果从基因表达层面证实,砧木类型显著影响光合色素合成途径对干旱胁迫的响

应,其中‘托鲁巴姆’展现出最强的正向调控能力。

2.4 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗光合参数的影响

干旱胁迫显著降低了番茄叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,同时增加了胞间CO₂浓度,但不同嫁接组合对上述指标的缓解程度存在明显差异

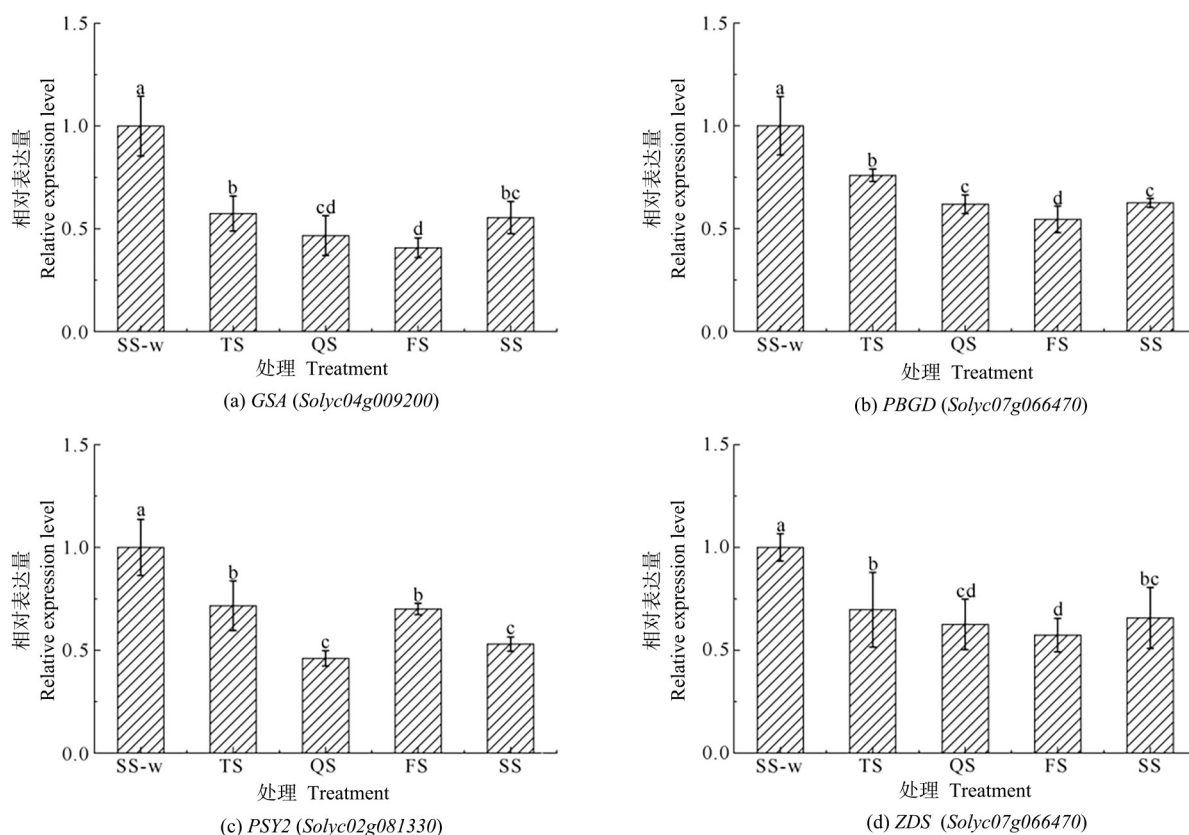


图 4 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗光合色素相关基因表达的影响

Fig. 4 Effects of different rootstocks on the expression of photosynthetic pigment related genes in tomato seedling under drought stress

(表 3)。在蒸腾速率方面,各嫁接处理均较 SS-w 处理显著降低($P<0.05$),表明干旱胁迫对植株水分蒸腾过程产生了强烈的抑制作用。其中,TS 处理下降幅度最小,为 44.7%,QS、FS 和 SS 处理下降幅度分别为 71.3%、66.9% 和 80.8%。在净光合速率方面,与 SS-w 处理相比,SS 处理降幅最大,显著降低

50.9% ($P<0.05$); TS 处理下降幅度最小 ($P<0.05$),为 18.7%;FS 和 QS 处理分别下降 31.8% 和 41.5% ($P<0.05$),说明不同砧木嫁接能在一定程度上维持幼苗叶片的光合能力。气孔导度在干旱胁迫下显著下降 ($P<0.05$),与 SS-w 处理相比,SS 处理降幅最大,下降了 68.9%;TS、QS 和 FS 处理下降幅

表 3 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗光合参数的影响

Table 3 Effects of different rootstocks on photosynthetic parameters of tomato seedling under drought stress

处理 Treatment	蒸腾速率/ ($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Transpiration rate	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Net photosynthetic rate	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度/($\mu\text{mol}/\text{L}$) Intercellular CO_2 concentration
SS-w	7.34 ± 1.00 a	54.80 ± 0.60 a	$1\,245.78 \pm 28.30$ a	0.048 ± 0.000 d
TS	4.06 ± 0.80 b	44.56 ± 0.40 b	657.48 ± 7.30 b	0.067 ± 0.000 d
QS	2.11 ± 0.40 c	37.35 ± 0.80 c	551.00 ± 14.40 bc	0.143 ± 0.000 c
FS	2.43 ± 0.30 bc	32.07 ± 1.10 d	452.70 ± 33.70 c	0.201 ± 0.030 b
SS	1.41 ± 0.10 c	26.91 ± 2.20 e	387.45 ± 0.20 d	0.337 ± 0.020 a

注: 同列数据不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下表同。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

度依次增大,分别为47.2%、55.8%和63.7%,表明‘托鲁巴姆’‘茄砧3号’‘番砧2号’3种砧木都可维持部分气孔功能,减缓水分与CO₂交换受限程度。胞间CO₂浓度则在干旱胁迫下显著上升($P<0.05$),与SS-w处理相比,SS处理显著升高602.1%,FS处理升高318.8%,QS处理升高197.9%,而TS处理仅升高39.6%。综上,不同砧木对干旱胁迫的缓解效果存在显著差异,其中以‘托鲁巴姆’在维持光合作用与水分平衡方面的表现最为优异,‘茄砧3号’嫁接次于‘托鲁巴姆’嫁接,优于‘番砧2号’嫁接。

2.5 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗气孔导度相关基因表达的影响

在番茄中,水通道蛋白家族 *PIP1* 与 *PIP2* 亚类成员在气孔导度调控中发挥关键作用。基因表达显示,干旱胁迫显著抑制了这2类基因的表达,但不同嫁接

组合的调控模式存在差异(图5)。*PIP1.2* (*Solyc01g094690*)、*PIP1.5* (*Solyc08g081190*)、*PIP2.1* (*Solyc09g007770*)、*PIP2.4* (*Solyc06g011350*)基因在所有干旱处理中的表达量均显著低于SS-w处理($P<0.05$),表明干旱胁迫抑制了叶片质膜水通透性。在 *PIP1* 亚家族中,TS处理下 *PIP1.5* 基因的表达水平均显著高于其他干旱处理($P<0.05$),FS和SS处理的表达相对较低。在 *PIP2* 亚家族中,*SIPIP2.1*在TS与QS处理中相对维持较高水平,在FS与SS处理下最低;TS和FS处理的 *SIPIP2.4* 基因表达量略高于QS与SS处理,表明‘托鲁巴姆’砧木在维持干旱胁迫下 *PIPs* 基因的表达方面具有一定优势。以上结果表明,在干旱胁迫下维持较高的水通道蛋白基因表达水平,是‘托鲁巴姆’砧木增强嫁接苗水分代谢与耐旱能力的重要分子机制之一。

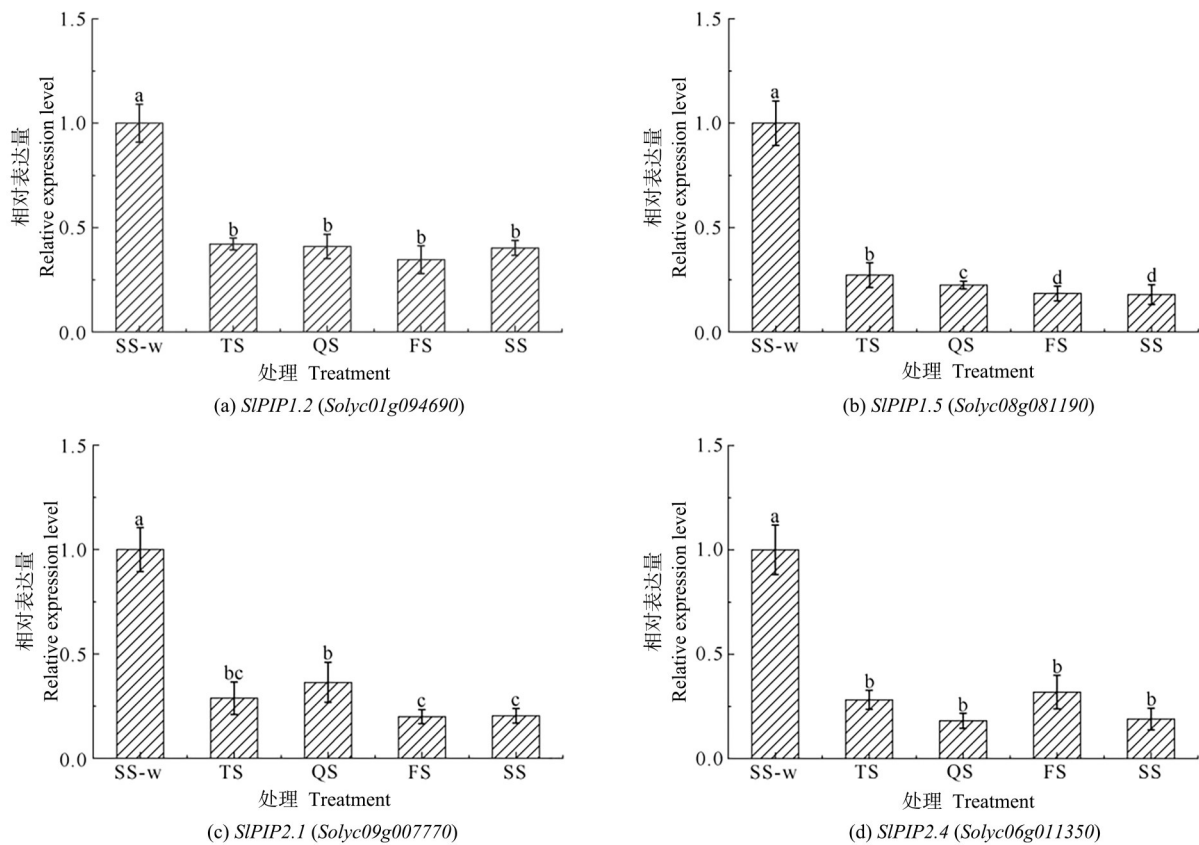


图5 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗气孔导度相关基因表达的影响

Fig. 5 Effects of different rootstocks on the expression of stomatal conductance related genes in tomato seedling under drought stress

2.6 干旱胁迫下不同砧木对番茄叶片膜损伤程度和渗透调节物质的影响

在干旱胁迫条件下,不同嫁接组合的番茄幼

苗在膜损伤程度与渗透调节物质积累方面表现出显著差异(表4)。与SS-w处理相比,SS处理的膜损伤最严重,叶片相对电导率和MDA含量

均为最高 ($P<0.05$), 分别提升了 44.1% 和 138.0%; TS 处理则表现出最佳的膜系统稳定性, 相对电导率和 MDA 含量分别升高了 18.8% 和 83.3%; QS 处理分别升高了 22.4% 和 62.5%; FS 处理分别升高了 30.5% 和 96.2%。在渗透调节方面, 与 SS-w 处理相比, SS 处理通过大量积累脯氨酸和可溶性糖以响应胁迫, 分别升高了 176.5% 和 109.6% ($P<0.05$); TS 处理的脯氨酸

和可溶性糖分别升高了 58.6% 和 41.1% ($P<0.05$); QS 与 FS 处理的缓解效果介于 SS 与 TS 之间, QS 处理的脯氨酸和可溶性糖含量分别升高了 99.6% 和 84.3% ($P<0.05$), FS 处理分别升高了 108.1% 和 84.3% ($P<0.05$)。综上, 砧木嫁接可通过减轻膜脂过氧化和实施更优化的渗透调节策略来增强番茄幼苗的耐旱性, 其中以‘托鲁巴姆’砧木的调控效果最佳。

表 4 干旱胁迫下不同砧木对番茄叶片膜损伤程度和渗透调节物质的影响

Table 4 Effects of different grafting combinations on osmotic adjustment substances of tomato plants under drought stress

处理 Treatment	相对电导率/% Eletrical conductivity	MDA 含量/($\mu\text{mol/g}$) MDA content	可溶性糖含量/% Soluble content	脯氨酸质量分数/($\mu\text{g/g}$) Proline mass fraction
SS-w	29.62 $\pm$ 0.01 c	133.15 $\pm$ 7.36 c	8.33 $\pm$ 0.40 c	27.55 $\pm$ 0.28 d
TS	35.18 $\pm$ 0.01 bc	244.08 $\pm$ 25.70 b	11.75 $\pm$ 0.48 b	43.70 $\pm$ 0.92 c
QS	36.25 $\pm$ 0.02 abc	216.31 $\pm$ 18.73 b	15.10 $\pm$ 1.10 a	54.98 $\pm$ 1.51 b
FS	38.65 $\pm$ 0.04 ab	261.29 $\pm$ 11.56 b	15.35 $\pm$ 0.89 a	57.33 $\pm$ 3.62 b
SS	42.68 $\pm$ 0.01 a	316.84 $\pm$ 16.73 a	17.46 $\pm$ 1.75 a	76.18 $\pm$ 3.09 a

2.7 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗抗氧化酶活性的影响

干旱胁迫显著诱导了番茄叶片中抗氧化酶的活性变化, 不同嫁接组合在应对胁迫时表现出明显差异 (图 6)。与 SS-w 处理相比, 所有干旱处理的超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性均出现不同程度的提升, 表明植物在胁迫下激活了抗氧化防御系统以清除活性氧。相较于 SS-w 处理, SS 处理的 SOD 和 POD 活性分别显著上升了 34.6% 和 31.4% ($P<0.05$), 上

升幅度有限。相比之下, TS、QS 和 FS 处理在抗氧化酶活性方面表现更优, 其中 TS 处理的 SOD 和 POD 活性升幅最为显著 ($P<0.05$), 分别提升了 120.0% 和 285.6%; QS 处理的 SOD 与 POD 活性升高幅度也较大, 分别为 72.0% 和 174.3% ($P<0.05$), 表现出良好的抗氧化潜力; FS 处理的效果则介于 QS 和 SS 处理之间, SOD 和 POD 活性分别升高了 47.9% 和 57.1% ($P<0.05$)。表明砧木嫁接能够显著增强番茄幼苗在干旱胁迫下的抗氧化防御能力, 其中以‘托

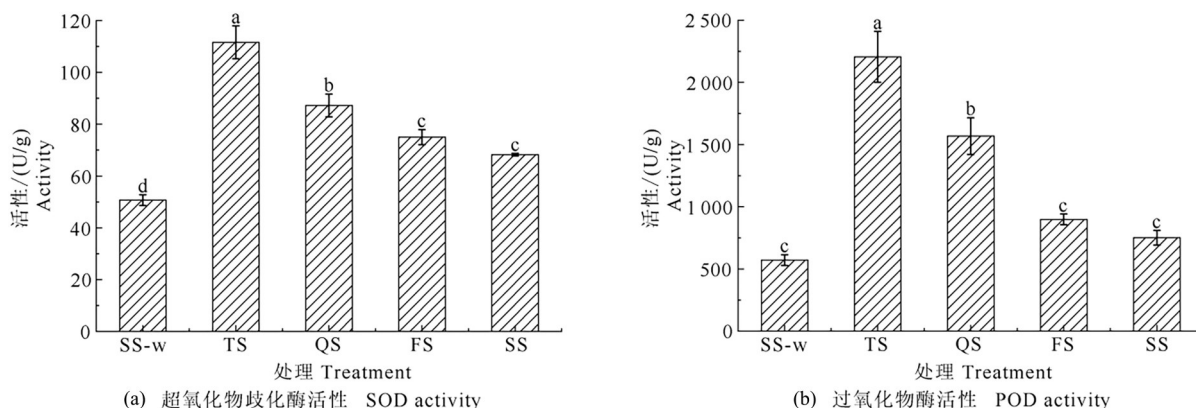


图 6 干旱胁迫下不同嫁接组合对番茄幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig. 6 Effects of different grafting combinations on antioxidant enzyme activities of tomato seedling under drought stress

鲁巴姆’砧木对SOD和POD活性的提升最为显著,从而更有效地缓解了氧化损伤。

2.8 干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗抗氧化酶活性相关基因表达的影响

为了研究干旱胁迫下不同砧木对番茄幼苗抗氧化酶活性相关基因表达的影响,本研究挑选了一些可能参与调控幼苗抗氧化能力的基因,包括2类超氧化物歧化酶基因 *SlSOD1* (*Solyc01g067740*)、*SlSOD2* (*Solyc03g062890*),以及2类过氧化物酶基因 *SlPOD42* (*Solyc02g080530*)、*SlPOD17* (*Solyc11g010120*)。表达分析显示(图7),干旱胁迫均显著诱导了上

述4个基因的表达,其中 *SlSOD1* 在FS嫁接组合中表达量最高,表现出最强的干旱诱导效应; *SlSOD2* 在QS处理中达到最高水平; *SlPOD42* 在QS处理中表达量最高,显著高于其他干旱嫁接组合 ($P<0.05$); 而 *SlPOD17* 则在TS与QS处理中相对较高,均显著高于FS处理 ($P<0.05$)。总体来看,TS处理虽未在单一SOD或POD基因表达上占据优势,但其可能存在协同调控作用,共同调控番茄幼苗在干旱胁迫下的抗氧化防御能力。表明砧木能够通过差异性地激活SOD和POD基因家族的不同成员,共同增强嫁接苗在干旱胁迫下的整体抗氧化防御能力。

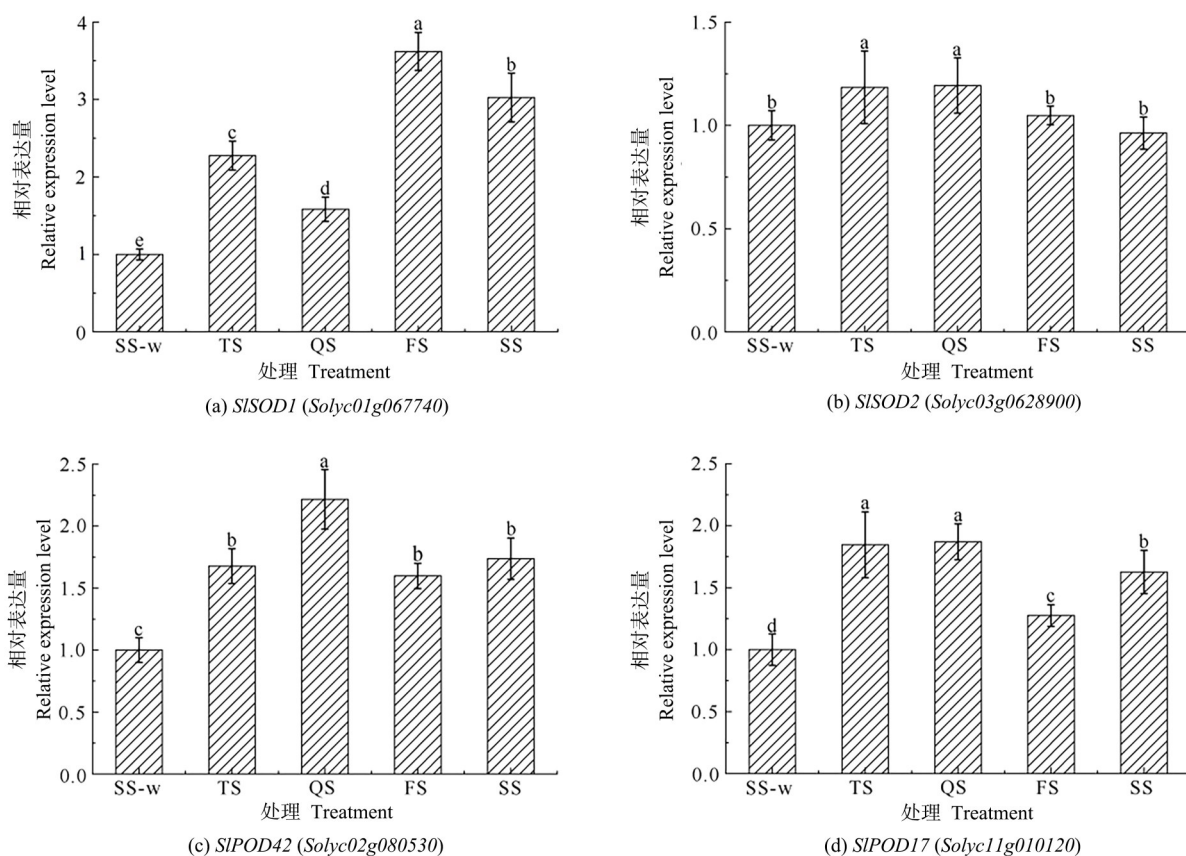


图7 干旱胁迫下不同嫁接组合对番茄幼苗抗氧化酶活性相关基因相对表达量

Fig. 7 The relative expression of antioxidant enzyme activity related genes in tomato seedling under drought stress with different grafting combinations

3 讨论

干旱胁迫显著抑制番茄幼苗的形态发育,表现为株高增长受阻、茎粗增长减缓以及叶片相对含水量下降,严重影响植株正常生长发育^[19-20]。本研究以‘托鲁巴姆’为砧木的嫁接组合(TS)在干旱条

件下表现出显著的耐旱性,其株高、茎粗及叶片含水率降幅最小,说明该砧木能有效缓解干旱带来的生理抑制。这一结果可能与其发达的根系结构密切相关。已有研究表明,耐旱砧木‘Maxifort’在正常条件下的根系生物量比自根苗高31%,且在干旱胁迫下仍能维持较高的水力导度^[9];柴文臣等^[21]发

现,发达根系能有效增强土壤深层水分吸收能力,提升植株整体水分利用效率,从而减轻干旱引起的生理胁迫。因此,‘托鲁巴姆’所具备的优良根系特性可能是其提高接穗抗旱性的关键基础之一,使其在干旱逆境下仍能维持较高的水分供应水平,减轻植株水分胁迫程度。

光合作用是植物生长发育的能量来源,也是响应非生物胁迫最为敏感的生理过程之一。本研究发现,干旱胁迫导致番茄叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率下降,同时伴随胞间 CO_2 浓度升高,表明光合作用受非气孔因素制约^[22-24]。张仁和等^[25]研究表明,干旱可能抑制光合电子传递链及卡尔文循环关键酶活性,从而降低 CO_2 同化效率。本研究发现,‘托鲁巴姆’嫁接植株在干旱条件下仍能维持较高的Pn和Gs水平,‘茄砧3号’‘番砧2号’嫁接植株的光合能力虽优于自嫁接,但仍低于‘托鲁巴姆’。这一差异可能源于砧木根系通过激素信号(如ABA)或营养输送调节接穗叶片的气孔行为,减少水分流失并维持光合系统稳定性^[26]。本研究基因表达分析显示,相比于其他嫁接组合,‘托鲁巴姆’嫁接植株在干旱胁迫下对水通道蛋白基因(*PIP1.2*、*PIP1.5*、*PIP2.1*和*PIP2.4*)的表达下调幅度较小,尤其在*PIP1.5*和*PIP2.1*上表现突出。Sade等^[13]指出,耐旱砧木可通过维持*PIPs*基因的表达来优化接穗的水分状态,增强植株抗旱性。本研究结果表明‘托鲁巴姆’作为砧木可能具有更强的干旱信号感知与传导能力,能够通过维持叶片*PIPs*水通道蛋白基因的表达,在一定程度上保护细胞膜的水运输功能,从而增强接穗在干旱条件下的水分利用效率及气孔调节能力,这一发现与Kudoyarova等^[27]和Sun等^[28]的研究一致。

光合色素(包括叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素)是植物捕获和转化光能的关键物质,其含量变化直接反映番茄幼苗对逆境的适应能力^[29]。蔡欣雨等^[30]研究发现,随着干旱胁迫的加剧,有斑渥丹叶片叶绿素和类胡萝卜素含量均呈现下降的趋势,导致光能捕获能力减弱。邢乃林等^[31]研究发现,嫁接有助于番茄幼苗维持更高的叶绿素含量,延缓光合结构退化。本研究发现,干旱胁迫显著降低自嫁接番茄(SS处理)的光合色素含量,而使用‘托鲁巴姆’砧木(TS处理)能减缓干旱胁迫下植株的叶绿素和类胡萝卜素含量下降趋势。进一步的基因表

达分析发现,干旱胁迫下,‘托鲁巴姆’嫁接植株光合色素合成相关基因(*GSA*、*PBGD*、*PSY2*和*ZDS*)的表达水平均显著高于其他嫁接组合。这表明‘托鲁巴姆’不仅能从生理层面维持色素稳定性,还能在转录水平上积极调控色素合成通路,协同保障光合系统的完整性,提高植株在干旱环境下的光能利用效率^[32]。

番茄幼苗在应对干旱胁迫时常通过积累渗透调节物质(如脯氨酸、可溶性糖)来降低细胞渗透势,维持细胞膨压和水分平衡,防止原生质脱水^[33-34]。袁祖华等^[35]研究表明,在盐胁迫下,活性氧(ROS)的产生和清除失衡,自由基大量积累,导致幼苗的膜脂过氧化作用加强。麦格皮热提古丽·达吾提等^[36]的研究发现,自嫁接植株依赖被动积累渗透调节物质来应对胁迫,而主动防护机制抗逆能力有限。Blum^[37]的研究也说明,渗透调节并非唯一的抗旱途径,其贡献因物种和基因型而异,有些植物可能更依赖于其他机制,如气孔开合、细胞膜稳定性或抗氧化能力。本研究发现,尽管SS处理中脯氨酸和可溶性糖含量上升最为显著,但其膜损伤也最严重,说明此类积累属于应激性反应,未能有效保护细胞结构;相比之下,TS处理中渗透调节物质增幅适度,但伴随更低的MDA积累和更高的膜稳定性,体现出更为高效的防护机制。

干旱胁迫诱导的ROS积累是引发膜脂过氧化与细胞损伤的关键因素^[38-39]。前人已在葡萄^[40]与辣椒^[41]等作物中发现,嫁接可通过提升SOD和POD等抗氧化酶活性来增强接穗的抗逆性,这与本研究的发现一致。本研究中,所有嫁接处理均不同程度地提升了SOD和POD活性,其中TS处理的增幅最大,显著高于QS和FS处理。qRT-PCR分析进一步揭示,抗氧化相关基因*SISOD1*、*SISOD2*、*SIPOD42*和*SIPOD17*在各嫁接组合中均被干旱诱导表达,但其表达模式存在差异。嫁接砧木能协同上调*SISOD1*、*SISOD2*、*SIPOD42*和*SIPOD17*等关键基因的表达^[42-43],从而系统性地增强番茄幼苗的抗氧化防御网络。值得注意的是,TS处理并未在单一基因上占据绝对优势,但整体呈现多基因协同上调的趋势,暗示其可能通过激活多个抗氧化酶基因,构建多层次、广谱性的抗氧化网络,从而实现更强的整体防御能力。该结果支持了Liu等^[10]的观点,即耐旱砧木可通过上调接穗抗氧化基因的表

达,增强ROS清除能力,减轻氧化损伤。相比之下,‘茄砧3号’‘番砧2号’砧木的调控能力则相对有限。

4 结 论

综上所述,本研究通过系统比较不同砧木嫁接对樱桃番茄‘京番串红1号’耐旱性的影响,证实嫁接技术是提高番茄幼苗耐旱性的有效途径,且砧木种类为其核心调控因素。其中,‘托鲁巴姆’砧木表现出最佳的调控效果,能够显著维持光合色素水平、促进渗透调节物质积累并增强抗氧化防御能力,从而有效提升接穗在干旱胁迫下的耐旱性。该砧木通过协同调控水分运输、光合色素合成及抗氧化酶活性等相关基因的表达,构建了更高效的胁迫响应网络。未来研究可结合转录组与代谢组等多组学手段,深入解析砧木在干旱信号感知与转导中的作用机制,集中于‘托鲁巴姆’作为信号源头的关键调控因子,以期番茄耐旱砧木的分子设计育种与高效栽培提供理论依据与技术支持。

参考文献 References

- [1] 刘英,王尧旭,邹新竹,杨光,任生,徐兆师. 作物干旱胁迫响应机制与抗旱分子育种策略[J/OL]. 生物工程学报, 2025: 1-30 [2025-10-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13345/j.cjb.250448>
Liu Y, Wang Y X, Zou X Z, Yang G, Ren S, Xu Z S. Response mechanisms of crops to drought stress and strategies of molecular breeding for drought resistance[J/OL]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2025: 1-30 [2025-10-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13345/j.cjb.250448> (in Chinese)
- [2] 沙天珍,刘莹,海梅荣. 外源褪黑素对干旱胁迫下植物生理及根际土壤影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(15): 8-15
Sha T Z, Liu Y, Hai M R. Research progress on effects of exogenous melatonin on plant physiology and rhizosphere soil under drought stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(15): 8-15 (in Chinese)
- [3] 黄蓉,潘艳花,汤玲,任家玄,王卫成. 芍药响应干旱胁迫的调控机制研究进展[J]. 北方园艺, 2024(23): 120-125
Huang R, Pan Y H, Tang L, Ren J X, Wang W C. Research progress on the regulatory mechanism of *Paeonia lactiflora* pall in response to drought stress[J]. *Northern Horticulture*, 2024(23): 120-125 (in Chinese)
- [4] 王新军,阎世江. 干旱胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(6): 76-80
Wang X J, Yan S J. Drought stress affects physiological characteristics of tomato seedlings[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(6): 76-80 (in Chinese)
- [5] 李晓炜,童婷. 浅谈番茄的抗旱研究[J]. 农家参谋, 2018(9): 81
Li X W, Tong T. Study on drought resistance of tomato[J]. *The Farmers Consultant*, 2018(9): 81 (in Chinese)
- [6] 侯梦媛,杨再强,张曼义. 水分胁迫对设施番茄结果期叶片衰老特性和根系活力的影响[J]. 北方园艺, 2017(1): 52-57
Hou M Y, Yang Z Q, Zhang M Y. Effect of water stress on leaf senescence and root activity in fruiting period of greenhouse tomato[J]. *Northern Horticulture*, 2017(1): 52-57 (in Chinese)
- [7] 张纪涛,马大炜. 番茄幼苗对水分胁迫的生理响应[J]. 北方园艺, 2015(7): 46-49
Zhang J T, Ma D W. Research on physiological response to water stress in tomato seedling[J]. *Northern Horticulture*, 2015(7): 46-49 (in Chinese)
- [8] 杨硕,刘志新,徐绳武,郑丽,夏文娟,邱首哲,施仕胜,黄远. 枸杞砧木品种和嫁接方法对番茄生长和果实品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2025(6): 121-128
Yang S, Liu Z X, Xu S W, Zheng L, Xia W J, Qiu S Z, Shi S S, Huang Y. Effects of wolfberry rootstock cultivars and grafting methods on growth and fruit quality of tomato[J]. *China Vegetables*, 2025(6): 121-128 (in Chinese)
- [9] Shehata S A, Omar H S, Elfaidy A G S, EL-Sayed S S F, Abuarab M E, Abdeldaym E A. Grafting enhances drought tolerance by regulating stress-responsive gene expression and antioxidant enzyme activities in cucumbers[J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1): 408
- [10] Liu J J, Li J Q, Su X H, Xia Z L. Grafting improves drought tolerance by regulating antioxidant enzyme activities and stress-responsive gene expression in tobacco[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 107: 173-179
- [11] 韦建明,黄鑫,米娜,张大龙,李云洲. 半野生番茄GZ-01砧木增强嫁接植株耐旱性[J]. 中国蔬菜, 2023(1): 42-51
Wei J M, Huang X, Mi N, Zhang D L, Li Y Z. Semi-wild tomato GZ-01 rootstock enhances drought tolerance of grafted plant[J]. *China Vegetables*, 2023(1): 42-51 (in Chinese)
- [12] Shekafandeh A, Assar P, Taghipour L. Cell membrane stability and water relations of different scions grafted onto Mexican lime under water stress conditions and recovery[J]. *Plant Physiology Reports*, 2019, 24(2): 182-191
- [13] Sade N, Shatil-Cohen A, Attia Z, Maurel C, Boursiac Y, Kelly G, Granot D, Yaaran A, Lerner S, Moshelion M. The role of plasma membrane aquaporins in regulating the bundle sheath-mesophyll continuum and leaf hydraulics[J]. *Plant Physiology*, 2014, 166(3): 1609-1620
- [14] 龚远博,胡吉怀,胡丁猛,许景伟,王延平. 丛枝菌根真菌对盐碱胁迫下杜梨幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1320-1329
Gong Y B, Hu J H, Hu D M, Xu J W, Wang Y P. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological traits of *Pyrus betulifolia* under salt-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(8): 1320-1329 (in Chinese)
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006
Wang X K. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [16] 王文选,刘明池,陈婕,梁浩,谢龙,季延海. 不同鲜食番茄品种对水分亏缺响应差异的综合分析[J]. 北方园艺, 2025(8): 25-34
Wang W X, Liu M C, Chen J, Liang H, Xie L, Ji Y H. Comprehensive analysis of the difference of response of different tomato varieties to water deficit[J]. *Northern Horticulture*, 2025(8): 25-34 (in Chinese)
- [17] 彭云玲,李伟丽,王坤泽,王汉宁. NaCl胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 62-71
Peng Y L, Li W L, Wang K Z, Wang H N. Effects of salt stress on seed germination and seedlings growth of salt-tolerant line and salt-sensitive line of maize[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 62-71 (in Chinese)
- [18] 张丽兵,焦淑珍,侯应军,毛娟,陈佰鸿. 干旱胁迫下阳光玫瑰/1103P嫁接苗的抗旱性[J]. 甘肃农业大学学报, 2025, 60(1): 138-147, 157
Zhang L B, Jiao S Z, Hou Y J, Mao J, Chen B H. Drought resistance of Shine Muscat/1103P grafted seedlings under drought stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2025, 60(1): 138-147, 157 (in Chinese)
- [19] 程勇,张珉,陈明皋,吴际友,魏志恒,易剑. 林窗面积对连香树幼苗生长及

- 生物量分配的影响[J]. 湖南生态科学学报, 2022(1): 44-49
- Cheng Y, Zhang M, Chen M G, Wu J Y, Wei Z H, Yi J. Effects of forest gap area on growth and biomass allocation of *Cercidiphyllum japonicum* seedling[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2022(1): 44-49 (in Chinese)
- [20] 周智, 张永丽, 王变变, 盖淑杰, 王若仲, 卢向阳, 李瑞莲. 荧光粉激发型LED光对拟南芥生长发育的影响[J]. 植物学报, 2018, 53(4): 502-508
- Zhou Z, Zhang Y L, Wang B B, Gai S J, Wang R Z, Lu X Y, Li R L. The effects of different phosphor excitation-type LED lighting on the growth and development of *Arabidopsis*[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2018, 53(4): 502-508 (in Chinese)
- [21] 柴文臣, 阎世江. 干旱胁迫对嫁接黄瓜幼苗生长发育及生理指标的影响[J]. 北方园艺, 2024(7): 10-17
- Chai W C, Yan S J. Effects of drought stress on growth and physiological indicators of grafted cucumber seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2024(7): 10-17 (in Chinese)
- [22] 李彩龙, 李毛毛, 高彦龙, 张仲兴, 张德, 王双成, 绿旭林, 王延秀. 外源 6-BA 对干旱胁迫下苹果砧木 M26 的生理效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(5): 126-137
- Li C L, Li M M, Gao Y L, Zhang Z X, Zhang D, Wang S C, Xian X L, Wang Y X. Physiological effect of exogenous 6-BA on apple rootstock M26 under drought stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(5): 126-137 (in Chinese)
- [23] 王姝婷, 李伟, 高冠龙. 黄土高原苹果叶片光合作用限制形式研究[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2022, 45(1): 207-216
- Wang S T, Li W, Gao G L. Limited forms of photosynthesis of apple leaves on the Loess Plateau[J]. *Journal of Shanxi University: Natural Science Edition*, 2022, 45(1): 207-216 (in Chinese)
- [24] 包佳林, 李有涵, 李凯峰, 郭华春. 马铃薯/番茄嫁接对苗期干旱胁迫的光合生理响应[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2024, 39(4): 9-14
- Bao J L, Li Y H, Li K F, Guo H C. Photosynthetic physiological response of potato/tomato grafting under seedling stage drought stress[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2024, 39(4): 9-14 (in Chinese)
- [25] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 张兴华, 路海东, 史俊通, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311
- Zhang R H, Zheng Y J, Ma G S, Zhang X H, Lu H D, Shi J T, Xue J Q. Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1303-1311 (in Chinese)
- [26] 冯敬涛, 刘照霞, 徐新翔, 于天武, 葛顺峰, 姜远茂. 海藻提取物对干旱胁迫下苹果砧木幼苗抗旱性和养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 79-85
- Feng J T, Liu Z X, Xu X X, Yu T W, Ge S F, Jiang Y M. Effects of seaweed extract on drought resistance and nutrient absorption of apple rootstock seedlings under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5): 79-85 (in Chinese)
- [27] Kudoyarova G, Veselova S, Hartung W, Farhutdinov R, Veselov D, Sharipova G. Involvement of root ABA and hydraulic conductivity in the control of water relations in wheat plants exposed to increased evaporative demand[J]. *Planta*, 2011, 233(1): 87-94
- [28] Sun Q, Liu X, Kitagawa Y, Calamita G, Ding X D. Plant aquaporins: Their roles beyond water transport[J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(3): 641-655
- [29] 杨喆, 唐才宝, 钱婧雅, 周伟江, 陈光辉, 王悦. 外源 6-BA 和 BR 对干旱胁迫下水稻分蘖期光合色素含量及抗氧化系统的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(8): 2733-2739
- Yang Z, Tang C B, Qian J Y, Zhou W J, Chen G H, Wang Y. Effects of exogenous 6-BA and BR on photosynthetic pigment content and antioxidant system of rice at the tillering stage under drought stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(8): 2733-2739 (in Chinese)
- [30] 蔡欣雨, 路欣萍, 常梦, 张思懿, 杨青杰. 干旱胁迫对有斑溲丹叶片生理功能的影响[J]. 南方农业, 2025, 19(5): 68-72
- Cai X Y, Lu X P, Chang M, Zhang S Y, Yang Q J. Effects of drought stress on physiological functions of leaves of *Lilium concolor*[J]. *South China Agriculture*, 2025, 19(5): 68-72 (in Chinese)
- [31] 邢乃林, 严蕾艳, 王迎儿, 黄芸萍, 王毓洪. 本砧嫁接对西瓜苗期高温耐性的影响[J]. 果树学报, 2025, 42(10): 2373-2381
- Xing N L, Yan L Y, Wang Y E, Huang Y P, Wang Y H. Effect of wild watermelon rootstock grafting on high temperature tolerance of watermelon seedlings[J]. *Journal of Fruit Science*, 2025, 42(10): 2373-2381 (in Chinese)
- [32] 尹鹏龙, 王祖光, 李爽, 周莎莎, 徐继忠, 张学英. 干旱胁迫对苹果不同中间砧及其上嫁接品种光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2023, 38(1): 104-111
- Yin P L, Wang Z G, Li S, Zhou S S, Xu J Z, Zhang X Y. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of different rootstocks and grafted apple variety[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2023, 38(1): 104-111 (in Chinese)
- [33] 王文富. 干旱胁迫对樟子松幼苗生长、土壤养分及渗透调节物质的影响[J]. 林业科技情报, 2025, 57(1): 7-9
- Wang W F. The effects of drought stress on the growth of *Pinus sylvestris* seedlings and soil nutrients[J]. *Forestry Science and Technology Information*, 2025, 57(1): 7-9 (in Chinese)
- [34] 李成红. 干旱对不同砧木嫁接‘阿珍’苹果幼树叶片光合及水力学特性的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2024
- Li C H. Effects of drought on photosynthesis and hydraulic characteristics of young apple leaves grafted with different rootstocks ‘Azhen’[D]. Shihezi: Shihezi University, 2024 (in Chinese)
- [35] 袁祖华, 蔡雁平. 盐胁迫下嫁接黄瓜幼苗有机渗透调节物质含量及膜脂过氧化水平研究[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 33(2): 180-182, 216
- Yuan Z H, Cai Y P. Content of organic osmoregulatory substances and level of membrane lipid peroxidation level in grafted cucumber seedlings under salt stress[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2007, 33(2): 180-182, 216 (in Chinese)
- [36] 麦格皮提热古丽·达吾提, 王海鸥, 陈晓楠, 伊丽努尔·艾力, 马晓东. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对疏叶骆驼刺和多枝柽柳生长及生理的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(11): 1897-1909
- Maigepiretiguli Dawuti, Wang H O, Chen X N, Yiliner Aili, Ma X D. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological characteristics of *Alhagi sparsifolia* and *Tamarix ramosissima* under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(11): 1897-1909 (in Chinese)
- [37] Blum A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2017, 40(1): 4-10
- [38] 赵成凤, 杨梅, 李红杰, 郝淼艺, 王国兴, 张仁和. 叶面喷施褪黑素对干旱及复水下玉米光合特性和抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(9): 1526-1534
- Zhao C F, Yang M, Li H J, Hao M Y, Wang G X, Zhang R H. Effect of foliar spraying melatonin on photosynthesis and antioxidant system of maize leaves under drought stress and rewatering[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(9): 1526-1534 (in Chinese)
- [39] Fazeli F, Ghorbanli M, Niknam V. Effect of drought on biomass, protein

- content, lipid peroxidation and antioxidant enzymes in two sesame cultivars [J]. *Biologia Plantarum*, 2007, 51(1): 98-103
- [40] 马龙. 干旱胁迫下抗旱砧木嫁接对葡萄生理、代谢和转录影响的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023
- Ma L. Effects of drought-resistant rootstock grafting on physiology, metabolism and transcription of grape under drought stress[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023 (in Chinese)
- [41] 李紫瑜. 辣椒耐低温砧木筛选及其嫁接苗耐低温能力的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022
- Li Z Y. Screening of low temperature tolerant rootstocks of pepper and study on low temperature tolerance of grafted seedlings[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [42] 张帆, 刘博, 石玉, 王军娥, 张毅. 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 186-191
- Zhang F, Liu B, Shi Y, Wang J E, Zhang Y. Effects of grafting on growth and physiological characteristics of pepper seedlings under drought stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(5): 186-191 (in Chinese)
- [43] 王建国. 干旱胁迫及海水栽培对茄子生长和生理特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2008
- Wang J G. Effects of drought stress and seawater cultivation on growth and physiological characters of eggplant [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 张子怡, 中共党员, 河北工程大学园林与生态工程学院农艺与种业硕士研究生。主要从事设施蔬菜无土栽培研究。硕士期间, 参加多项学术活动, 曾获“研究生二等奖学金”“研究生三等奖学金”。



通讯作者简介: 王星, 博士, 副教授, 河北工程大学园林与生态工程学院副院长。河北省优秀青年科学基金获得者, 茄果类蔬菜种苗繁育河北省工程研究中心副主任, 邯郸市蔬菜改良与繁育技术创新中心主任, 邯郸市蔬菜学会秘书长, 河北省辣椒产业技术研究院技术负责人, 2021—2022年挂职磁县农业农村局副局长。主要从事蔬菜种质创新及遗传育种、设施蔬菜高效栽培研究。主讲《园艺植物育种》《设施环境调控技术》《农业发展理论与实践》等课程。主持国家自然科学基金1项、河北省优秀青年科学基金1项、其他省级项目4项, 发表代表性成果共计17篇。