

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0616

番茄 IL 渐渗系开花坐果期抗旱性评价

李思琪, 赵鑫, 武灿灿, 屈世铎, 王小宁, 谢林杰, 罗涵, 刘玉东, 庞胜群

(石河子大学农学院·特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室 新疆石河子 832003)

摘要:开花坐果期是番茄的水分敏感期,筛选该时期的抗旱种质对育种至关重要。为系统评价番茄渐渗系(ILs)在开花坐果期对长期干旱的耐受性,以潘那利番茄(LA0716)与栽培番茄 M82 构建的 49 份 ILs 为材料,在田间进行为期 28 d(涵盖花期至坐果期)的自然干旱胁迫。通过测定植株形态、果实产量及叶片生理指标,结合赋分法、主成分分析(PCA)与 K-means 聚类分析进行多维度评价。结果表明,长期干旱导致大部分材料产量下降超 50%并伴随氧化损伤。PCA 提取出 4 个主成分,聚类分析将 49 份材料划分为高抗旱型(4 份)、中等抗旱型(31 份)、干旱敏感型(12 份)和特殊响应型(2 份)。其中,高抗旱型材料 IL4-2 在干旱胁迫下株型保持良好,单株产量较对照提高 18.8%,果实大小稳定;生理上表现为 H₂O₂ 未显著积累,丙二醛含量下降,脯氨酸、可溶性糖含量及 SOD、POD、CAT 活性均显著升高。综上,IL4-2 在开花坐果期表现出优异的综合抗旱性,其适应机制可能涉及渗透调节与抗氧化防御系统的协同增强。该材料可作为番茄抗旱育种的重要候选种质资源。

关键词:番茄渐渗系(ILs);开花坐果期;干旱胁迫;抗旱性评价

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-048-13

Evaluation of drought resistance at flowering and fruit-setting period in tomato introgression lines

LI Siqu, ZHAO Xin, WU Cancan, QU Shiduo, WANG Xiaoning, XIE Linjie, LUO Han, LIU Yudong, PANG Shengqun

(College of Agriculture, Shihezi University/Key Laboratory of Specialty Fruits and Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: The flowering and fruit-setting period represents a critical water-sensitive stage for tomato. Screening drought-resistant germplasm specifically adapted to this phase is therefore of paramount importance for breeding. To systematically evaluate the long-term drought tolerance of tomato introgression lines (ILs) at this key reproductive stage, a population of 49 ILs derived from *Solanum pennellii* (LA0716) and the cultivated tomato M82 was subjected to field-imposed natural drought stress for 28 days, encompassing the transition from flowering to fruit setting. A multidimensional assessment was conducted by integrating evaluations of plant morphology and fruit yield with leaf physiological indicators, combined with a scoring method, principal component analysis (PCA), and K-means clustering analysis. The results showed that prolonged drought stress resulted in a yield reduction exceeding 50% for the majority of the ILs, coupled with significant oxidative damage. PCA extracted four principal components, and cluster analysis classified the 49 ILs into four distinct categories: Highly drought-tolerant (4 lines), moderately drought-tolerant (31 lines), drought-sensitive (12 lines), and special-response type (2 lines). Among them, the highly drought-tolerant line IL4-2 maintained optimal plant architecture under drought stress, exhibiting an 18.8% increase in yield per plant and stable fruit size compared to the well-watered control. At the physiological level, IL4-2 displayed no significant accumulation of H₂O₂, a decrease in MDA content, and significant increases the content of Pro and SS, alongside enhanced activity of SOD, POD, and CAT. In conclusion, IL4-2 possesses outstanding comprehensive drought resistance during the flowering and fruit-setting period. Its adaptive mechanism likely involves the synergistic enhancement of both osmotic adjustment and the antioxidant defense

收稿日期:2025-08-27;修回日期:2025-12-21

基金项目:国家自然科学基金(32160713)

作者简介:李思琪,女,在读硕士研究生,研究方向为番茄种质资源改良。E-mail:lisiqu_577@126.com

赵鑫,男,在读本科生,研究方向为蔬菜学。E-mail:16672052186@163.com

通信作者:刘玉东,男,副教授,主要从事蔬菜基因改良与育种相关研究。E-mail:lyd-forever@163.com

庞胜群,女,副教授,主要从事蔬菜栽培与育种相关研究。E-mail:pangshqok@shzu.edu.cn

system. Consequently, IL4-2 can serve as an important candidate germplasm resource for breeding drought-resistant tomato cultivar.

Key words: Tomato introgression line(ILs); Flowering and fruit-setting period; Drought stress; Drought resistance evaluation

水分是植物维持正常生命活动的基础,不仅构成植物体的重要组成部分,还作为光合底物、代谢介质与物质运输载体参与生长发育全过程。适度干旱虽可促进根系发育、提升水分利用效率及作物品质^[1-2],但长期干旱胁迫往往对蔬菜作物造成不可逆的伤害。尤其在开花坐果期,水分亏缺会抑制细胞膨压,限制作物生长与果实膨大^[3],加速叶片衰老^[4],缩短生育周期,最终导致产量显著下降^[5]。因此,解析植物抗旱机制、筛选抗旱种质资源,对保障农业生产可持续发展具有重要的理论与实践意义。

植物对干旱胁迫的应答是一个多层面协同调控的复杂过程,涉及胁迫信号感知与转导、脱落酸等激素积累及其下游响应通路激活^[6-7]。在形态层面,植物通过调节根系构型^[8]、叶片形态与气孔行为^[9-10]等实现节水适应;在生理生化层面,通过渗透调节物质积累、抗氧化酶系统激活以及维持活性氧与膜脂过氧化产物的动态平衡来维持细胞稳态^[11-13]。目前,多指标联合评价已成为作物抗旱性鉴定的常用策略^[14]。

番茄(*Solanum lycopersicum*)作为我国现代农业生产中的重要作物^[15],其种植面积和产量位居世界首位^[16],而干旱是限制番茄产量和品质的主要因素^[17-18]。我国新疆地区虽为全球三大番茄生产基地之一^[19],但干旱少雨的气候严重制约了当地番茄产业的发展^[20]。因此,培育开花坐果期具备强抗旱性的番茄品种,已成为该领域育种的重要目标^[21]。在番茄中,李景富等^[22]和马越等^[23]利用主成分分析、隶属函数法及聚类分析等方法,在萌发期与苗期成功筛选了抗旱材料。此外,亦有研究利用嫁接材料,通过聚类分析评价了接穗在开花坐果期遭遇干旱的产量响应^[24]。这些工作为抗旱育种奠定了方法学基础。然而,现有的番茄抗旱性评价与种质筛选工作主要集中于萌发期和苗期^[22-23]。相比之下,针对开花坐果期这一与最终产量直接挂钩的关键生殖阶段,在长期田间自然干旱条件下,结合产量性状与抗氧化等多维度生理指标进行系统性种质资源评价的研究尚显不足。

鉴于此,为发掘开花坐果期耐旱的优异种质,笔者以49份来自潘那利番茄的渐渗系(ILs)群体为材料,在田间开展为期28d的自然干旱胁迫试验。

通过综合测定胁迫后的植株表型、果实产量、渗透调节物质含量及抗氧化酶活性等指标,并结合赋分法、主成分分析(PCA)与聚类分析进行多维度评价,旨在系统解析该群体在关键生殖阶段的抗旱性差异,从而筛选关键抗旱材料,以期为番茄抗旱遗传改良与育种提供理论依据和资源储备。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验所使用的49份番茄材料来源于潘那利番茄LA0716(轮回亲本)与M82杂交构建的IL渐渗系,保存于石河子大学农学院园艺系种质资源方向实验室。野生潘那利番茄原产于秘鲁干旱荒漠地区,历经长期自然选择,形成了极强的抗旱能力;M82为普通番茄栽培种,对干旱胁迫敏感。

1.2 干旱处理

试验于2024年3月16日在石河子大学农学院温室内,采用50孔穴盘直接播种健康饱满的种子。待幼苗长至4叶1心期,选取长势一致的健壮苗移栽至石河子大学五连试验场露天试验基地。试验采用随机区组设计,设3次重复。定植规格为株距40cm,行距50cm。每个试验小区包含3垄,每垄定植10株,小区两端各设1.0m宽保护行(种植相同材料),包含保护行的小区面积约为10m²。定植后每7d浇水1次。至定植后20d(2024年5月25日),约80%植株第1花序完全开放时,开始干旱胁迫处理(DST)。对照组(CK)维持每7d正常浇水1次,干旱处理组持续28d不浇水。两组试验区之间设置至少5m的隔离带,以防止水分侧渗。除水分管理外,其余田间管理措施均保持一致。28d干旱处理期间,试验地累积降水量21.5mm,属于微量降水范畴,不会改变干旱胁迫的总体设置,对水分亏缺处理的有效性不构成实质影响,试验结论可靠。

在干旱处理28d后(2024年6月22日),分别从各处理小区选取长势相同的植株,混样采集其顶部第3片完全展开的功能叶,每份样品约0.15g,经液氮速冻后置于-80℃冰箱保存,用于生理生化指标测定。

于干旱处理结束时(2024年6月22日)进行植

株整体表型拍摄。干旱处理 28 d 后,所有小区恢复正常浇水,于果实集中成熟期(2024 年 7 月 23 日)统一收获所有材料的红熟果实,称量单株产量,用于计算减产率及抗旱性量化分析。

1.3 测定指标与方法

所有生理指标的测定均在石河子大学特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室完成。每个指标的测定均包含 3 个生物学重复,最终结果使用 3 个重复的平均值±标准差表示。采用苏州格锐思生物科技有限公司的过氧化氢含量试剂盒(货号 G0168W)测定 H₂O₂ 含量;采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定丙二醛(MDA)含量^[25]。采用酸性茚三酮显色法测定脯氨酸(Pro)含量^[26];采用硫酸蒽酮法测定可溶性糖(SS)含量^[27];采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白(SP)含量^[25]。采用氮蓝四唑(NTB)光化学还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[28];采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性^[28];采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[29]。

为了评估 IL 渐渗系群体材料在干旱条件下的商品果产量,笔者对正常浇水与干旱处理的 IL 渐渗系群体的单株成熟果实进行称量,计算减产率。减产率/%=(正常浇水产量-干旱处理产量)/正常浇水产量×100。

参考作物抗旱性研究综合评价方法,对 7 个关键指标(Pro 含量、SS 含量、SP 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性及减产率)进行赋分:干旱处理后相较对照有显著增加的记为+1,无显著变化记为 0,有显著降低记为-1;其中减产率为负向指标,其赋分规则相反,即减产率为正值(即减产)的记为-1,趋近零的记为 0,为负值(即增产)的记为+1。计算各材料所有指标赋分总和,得到其综合赋分。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 整理与计算试验数据。使用 SPSS 21.0 进行独立样本 *t* 检验(independent-samples *t*-test)、主成分分析(PCA)和 K-means 聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下番茄 IL 渐渗系植株表型观察

由图 1 可知,在干旱处理 28 d 后,大部分胁迫处理的番茄渐渗系植株均出现植株高度降低、坐果数量减少和脐腐病加重的表型。其中 IL3-3 相较对照组表现出明显的叶片发育抑制和叶片脱落现象,

植株叶片数减少;IL6-1 和 IL6-2 相较正常浇水的植株形态更矮小紧实,表现出典型的节水型表型特征。与之相反,IL1-4、IL3-1、IL4-2、IL4-4、IL8-3 和 IL12-3 相较对照组无明显株型改变,能够在长期干旱的条件下维持较正常的营养生长,说明这些材料在开花坐果期抵抗干旱胁迫的能力较其他渐渗系材料更强,具有作为抗旱育种资源的潜力。

2.2 长期干旱胁迫影响番茄 IL 渐渗系果实形态及产量

干旱处理 28 d 后,有 35 份材料的红熟果实产量与对照组相比减产率在 50%以上(表 1),并且在果实集中成熟期,IL3-4、IL6-3 及 IL10-2 植株仅 1~2 个果实成熟,其余果实均未成熟或发病严重,商品果产量锐减。值得注意的是,IL4-1 和 IL5-2 的红熟果实产量基本与对照组持平(表 1),表明其对长期干旱耐受性较强,在开花坐果期仍能保持正常生长。红熟果实大小分析表明,IL1-2、IL1-3、IL3-5、IL4-1、IL4-2、IL4-3、IL5-2、IL5-4、IL6-2、IL7-2、IL7-5、IL9-1、IL11-3、IL11-4 及 IL12-3 干旱处理后的果实大小与对照相比,变化较小(图 2)。IL4-2 和 IL4-4 干旱处理后红熟果实产量较对照明显升高(表 1),其中 IL4-2 单果体积还略有增大(图 2),说明长期干旱可能促进了 IL4-2 在开花坐果期果实中物质的积累,使其保持了优良的农艺性状。此外,IL4-4 在干旱胁迫后果实产量增加,但其果实直径显著下降,说明长期干旱虽然抑制了 IL4-4 果实膨大,但却明显提升了坐果率,从而引起产量升高。

2.3 长期干旱胁迫影响番茄 IL 渐渗系 H₂O₂ 积累

由图 3 可知,在干旱处理 28 d 后,IL1-1、IL4-2 及 IL11-3 叶片中 H₂O₂ 含量与对照组无显著差异,说明这 3 份材料可以适应缺水环境,能够较好地维持氧化代谢平衡,可能与其遗传背景中固有的抗氧化能力有关。然而,IL10-3 干旱处理 28 d 的叶片中 H₂O₂ 含量显著低于对照,说明长期干旱能抑制 IL10-3 叶片 H₂O₂ 积累。此外,除 IL1-1、IL4-2、IL11-3 及 IL10-3 外,其他 45 份材料在干旱处理 28 d 后叶片中 H₂O₂ 含量均显著提高,说明长期干旱可能影响其植株的正常生理代谢过程。

2.4 长期干旱胁迫影响番茄 IL 渐渗系 MDA 积累

由图 4 可知,在干旱处理 28 d 后,25 份材料的 MDA 含量较对照显著降低,同时,IL2-4、IL4-1、IL5-5、IL6-1、IL6-4 和 IL7-1 这 6 份材料的 MDA 含量相较对照无显著差异,说明这 31 份材料已经适应了长期干旱胁迫,其潜在的膜脂修复机制能够在



图1 植株形态比较

Fig. 1 Comparison of plant morphology

表1 减产率分析

Table 1 Analysis of yield reduction rate

材料 Material	减产率 Yield reduction rate	材料 Material	减产率 Yield reduction rate	材料 Material	减产率 Yield reduction rate	材料 Material	减产率 Yield reduction rate	材料 Material	减产率 Yield reduction rate	材料 Material	减产率 Yield reduction rate
IL1-1	68.24	IL2-6	74.58	IL4-4	-20.72	IL6-4	84.53	IL9-1	77.48	IL12-1	45.44
IL1-2	53.56	IL3-1	61.53	IL5-1	31.35	IL7-1	81.19	IL9-2	84.12	IL12-2	38.79
IL1-3	52.70	IL3-2	69.47	IL5-2	1.06	IL7-2	66.00	IL9-3	73.62	IL12-3	54.55
IL1-4	69.57	IL3-3	77.87	IL5-3	68.20	IL7-3	71.49	IL10-2	90.94	IL12-4	63.94
IL2-1	41.09	IL3-4	100.00	IL5-4	88.00	IL7-4	44.35	IL10-3	85.80		
IL2-2	72.58	IL3-5	51.82	IL5-5	32.68	IL7-5	36.73	IL11-1	82.44		
IL2-3	70.61	IL4-1	-0.60	IL6-1	53.88	IL8-1	74.45	IL11-2	62.88		
IL2-4	65.04	IL4-2	-18.84	IL6-2	21.79	IL8-2	63.88	IL11-3	67.75		
IL2-5	72.65	IL4-3	22.34	IL6-3	100.00	IL8-3	59.44	IL11-4	38.48		

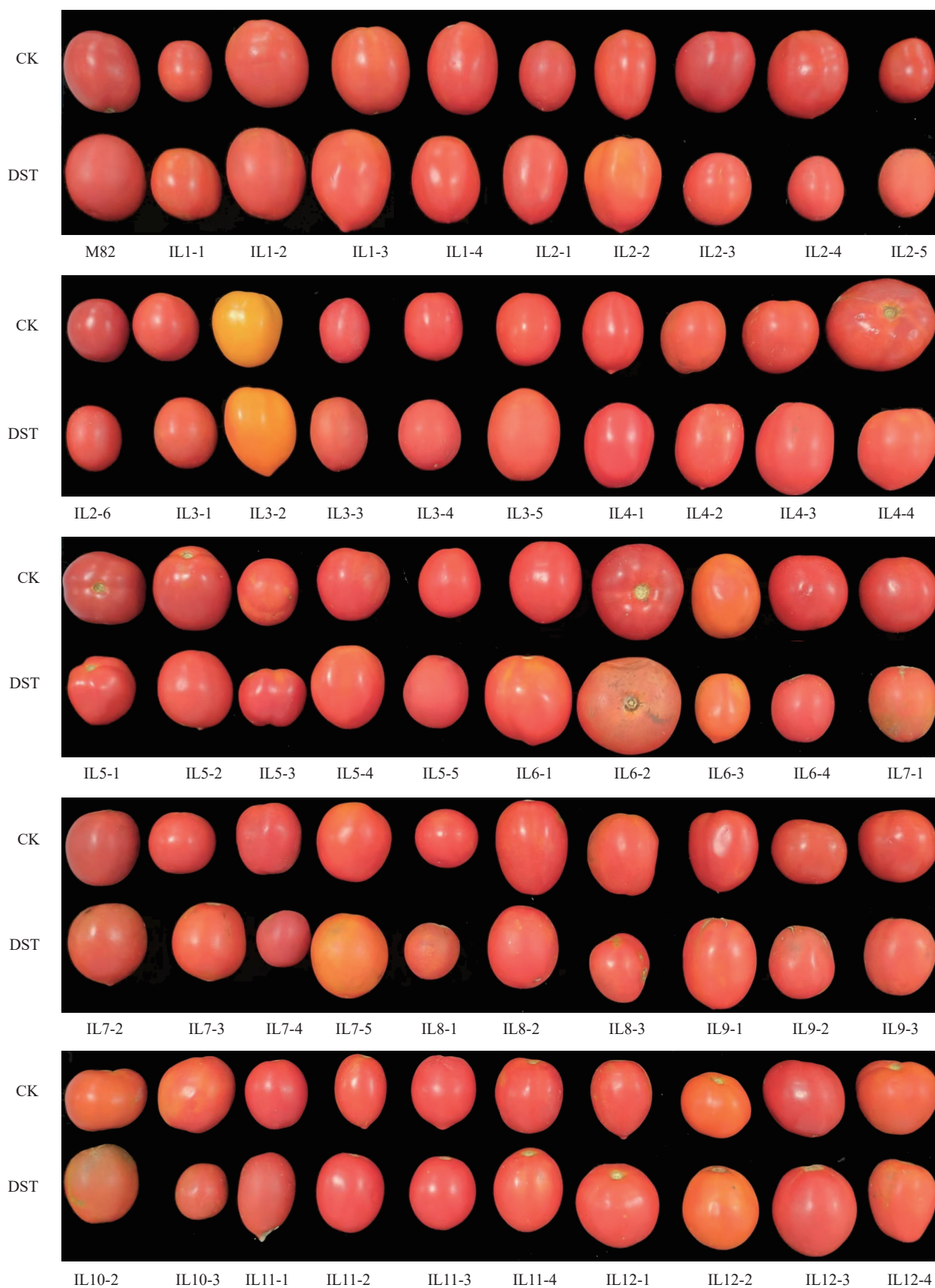
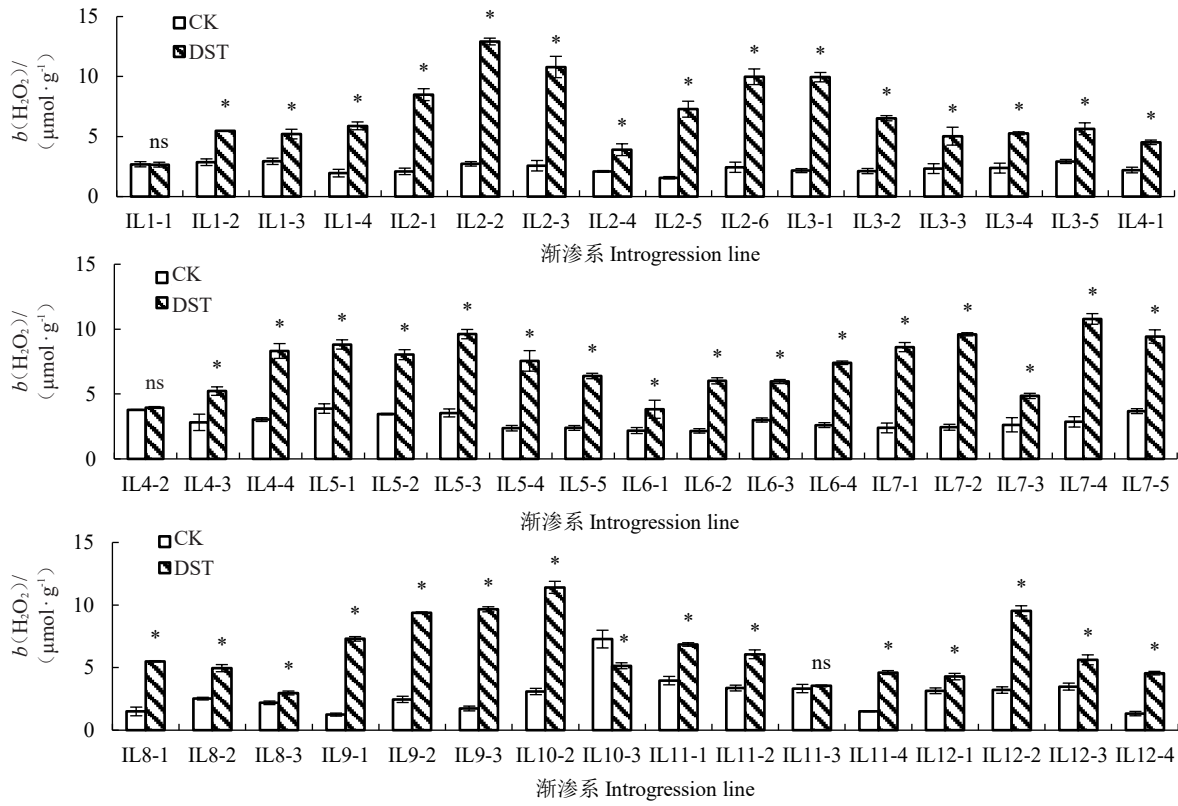


图2 果实形状比较

Fig. 2 Comparison of fruit shape characteristics



注:*表示与对照相比在 0.05 水平差异显著;ns 表示差异不显著。下同。

Note: * represents significant difference with the control at 0.05 level; ns represents difference is not significant. The same below.

图 3 不同材料在干旱胁迫后的过氧化氢含量

Fig. 3 H₂O₂ content of different materials under drought stress

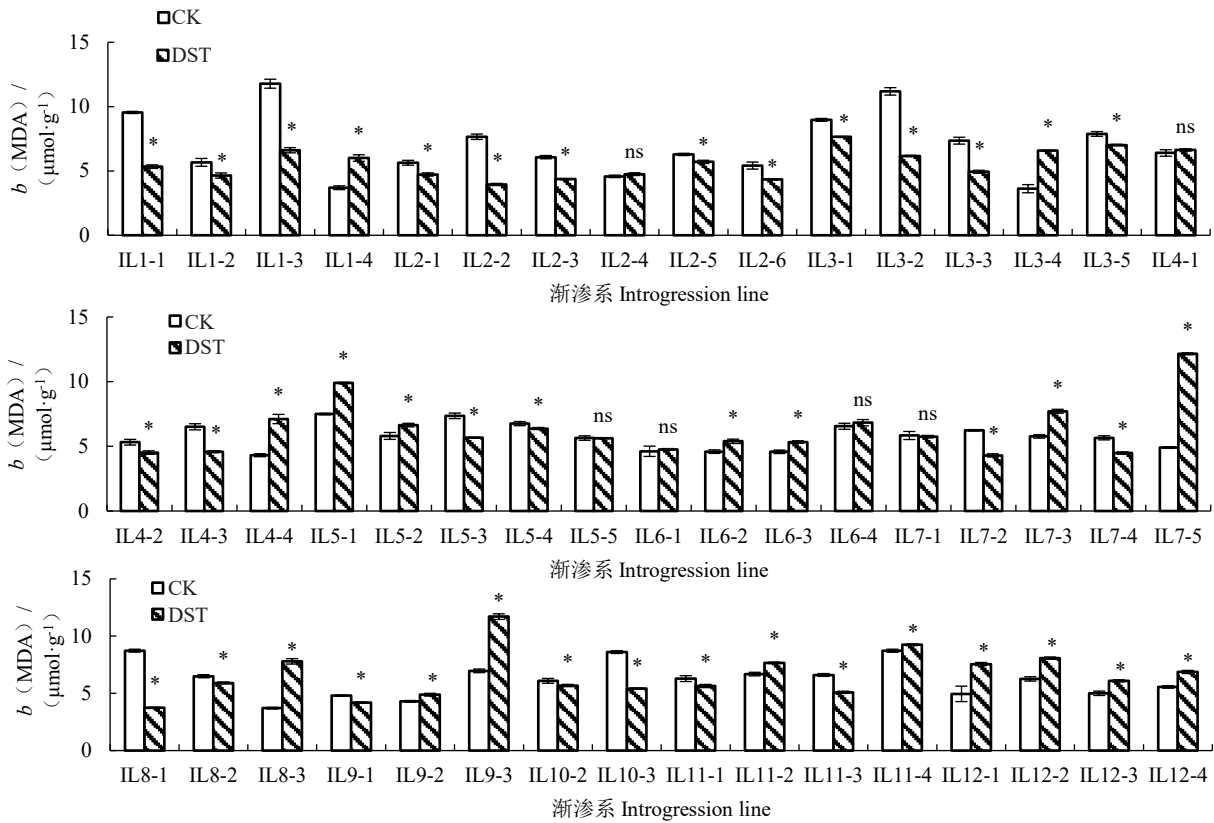


图 4 不同材料在干旱胁迫后的丙二醛含量

Fig. 4 MDA content of different materials under drought stress

长期干旱的条件下保护这些材料的膜系统。此外,其余 18 份材料的 MDA 含量较对照显著升高,说明长期干旱影响了这些材料叶片的细胞膜稳定性,造成了较严重的细胞膜损伤。

2.5 长期干旱胁迫影响番茄 IL 渐渗系 Pro 积累

由图 5 可知,在干旱处理 28 d 后,IL3-5 及 IL8-2 叶片中 Pro 含量与对照无显著差异,说明这 2 份材料对长期干旱环境较为适应,且暗示了这些材料可能通过其他渗透调节物质来维持细胞膜渗透平衡。除 IL3-5 和 IL8-2 外,其他 47 份材料叶片中的 Pro 含量在干旱处理 28 d 后相较对照均显著上升,说明长期的干旱胁迫能推动多数材料叶片大量积累 Pro,在一定程度上调节细胞渗透势,减轻细胞脱水及氧化损伤,维持植株存活。

2.6 长期干旱胁迫影响番茄 IL 渐渗系 SS 积累

由图 6 可知,在干旱处理 28 d 后,IL2-2、IL2-3、IL2-6、IL3-2、IL3-3、IL7-3、IL7-5、IL8-1、IL9-3、IL10-3、IL11-1 及 IL12-2 叶片中可溶性糖积累量与对照无显著差异,说明长期干旱胁迫不能诱导这些材料的叶片通过增加可溶性糖含量来调节细胞渗透势;而在 IL4-3、IL5-4、IL8-3、IL9-1、IL9-2、IL10-2

及 IL11-2 中观察到,在干旱处理 28 d 后,叶片可溶性糖含量显著低于对照,说明长期干旱抑制了这些材料叶片中可溶性糖的积累,这些材料对长期干旱的响应可能涉及其他碳代谢途径。其余 30 份材料在干旱处理 28 d 后,叶片可溶性糖含量较对照均显著上升,说明长期干旱胁迫影响了多数渐渗系材料叶片中可溶性糖的积累,从而影响植株抗旱性。

2.7 长期干旱胁迫影响番茄 IL 渐渗系 SP 积累

由图 7 可知,在干旱处理 28 d 后,IL2-6、IL3-5、IL6-2、IL6-3、IL7-5、IL11-3 及 IL12-1 叶片中的可溶性蛋白含量与对照无显著差异,说明长期干旱胁迫不能通过促进这 7 份材料叶片中可溶性蛋白的积累来提高植株的抗旱能力,同时也暗示了这些材料能够在长期干旱条件下维持蛋白质合成和分解的稳定。IL4-4、IL5-4、IL6-1、IL10-3、IL11-2、IL12-2 及 IL12-4 叶片中可溶性蛋白含量相较对照显著升高,说明干旱胁迫能诱导这 7 份材料叶片中大量积累可溶性蛋白,从而抵御干旱胁迫。此外,剩余的 35 份材料均表现出可溶性蛋白含量显著下降,说明长期干旱胁迫能抑制这些植株叶片中可溶性蛋白的积累。

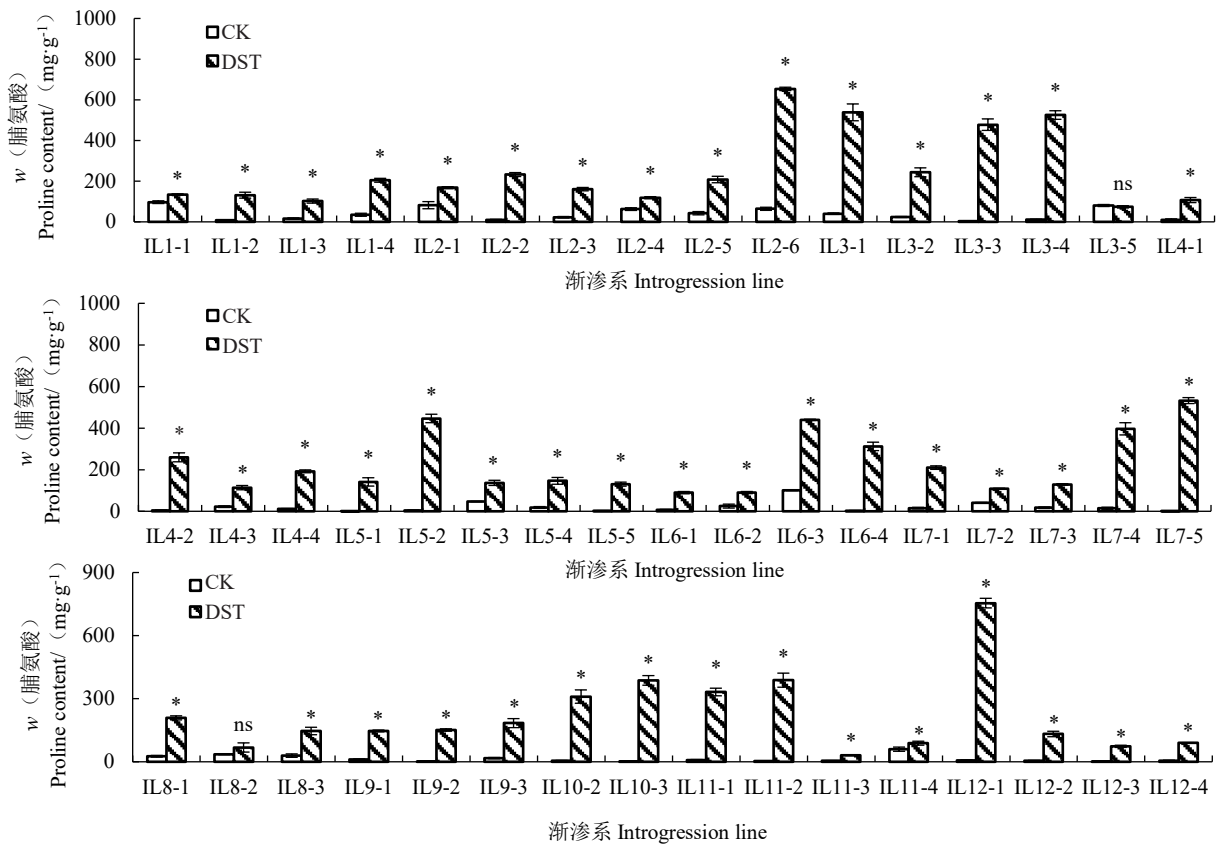


图 5 不同材料在干旱胁迫后的脯氨酸含量

Fig. 5 Proline content of different materials under drought stress

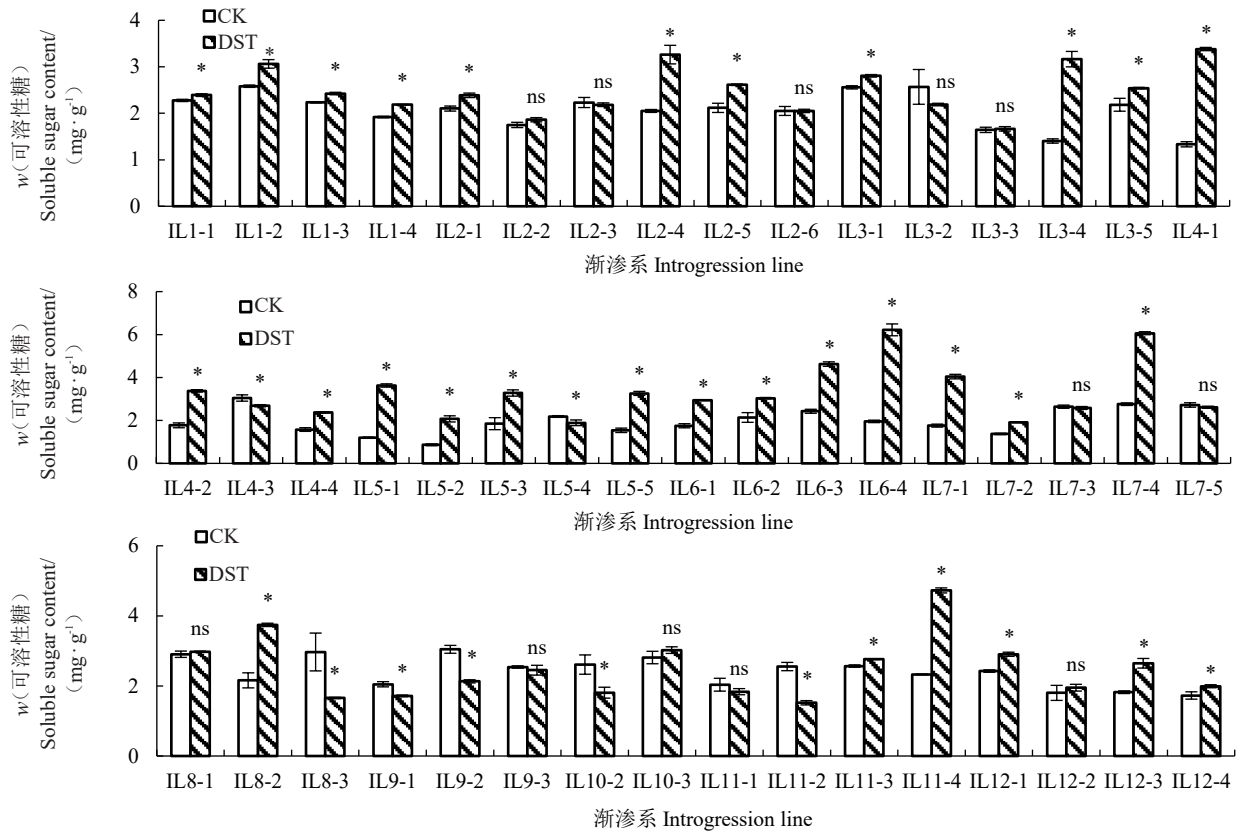


图6 不同材料在干旱胁迫后的可溶性糖含量

Fig. 6 Soluble sugar content of different materials under drought stress

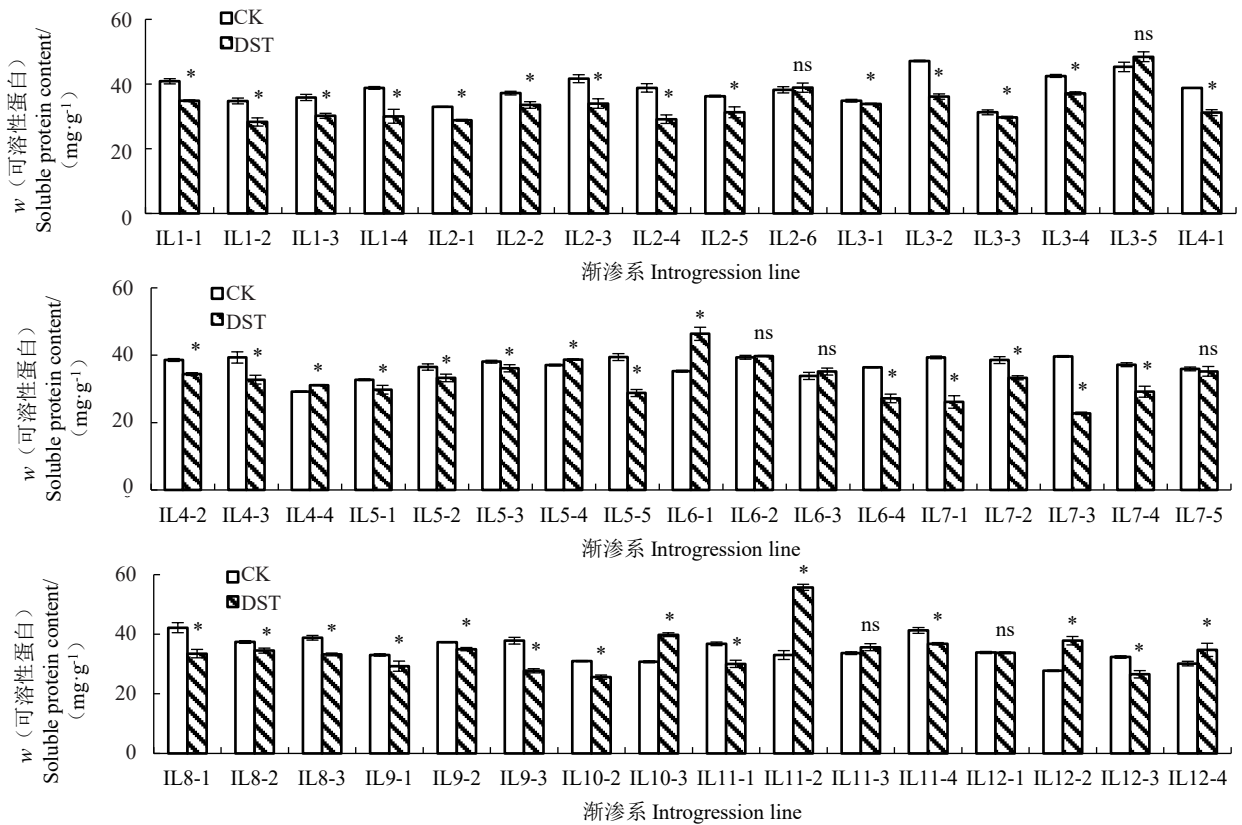


图7 不同材料在干旱胁迫后的可溶性蛋白含量

Fig. 7 Soluble protein content of different materials under drought stress

2.8 长期干旱胁迫影响番茄IL渐渗系CAT活性

由图8可知,在干旱处理28d后,IL2-2、IL3-1、IL3-4、IL5-3、IL6-1及IL11-1叶片CAT活性与对照无显著差异,说明长期干旱胁迫不能诱导这6份材料叶片中CAT活性升高,可能与其他抗氧化酶的补偿作用有关。此外,IL4-3、IL9-2、

IL9-3、IL12-1及IL12-4叶片的CAT活性较对照显著降低,说明长期干旱胁迫显著抑制了这些材料叶片中CAT活性。其余38份材料在干旱处理28d后,CAT活性均显著上升,说明这些植株能够通过增强CAT活性来清除H₂O₂,减轻干旱胁迫对细胞的损伤。

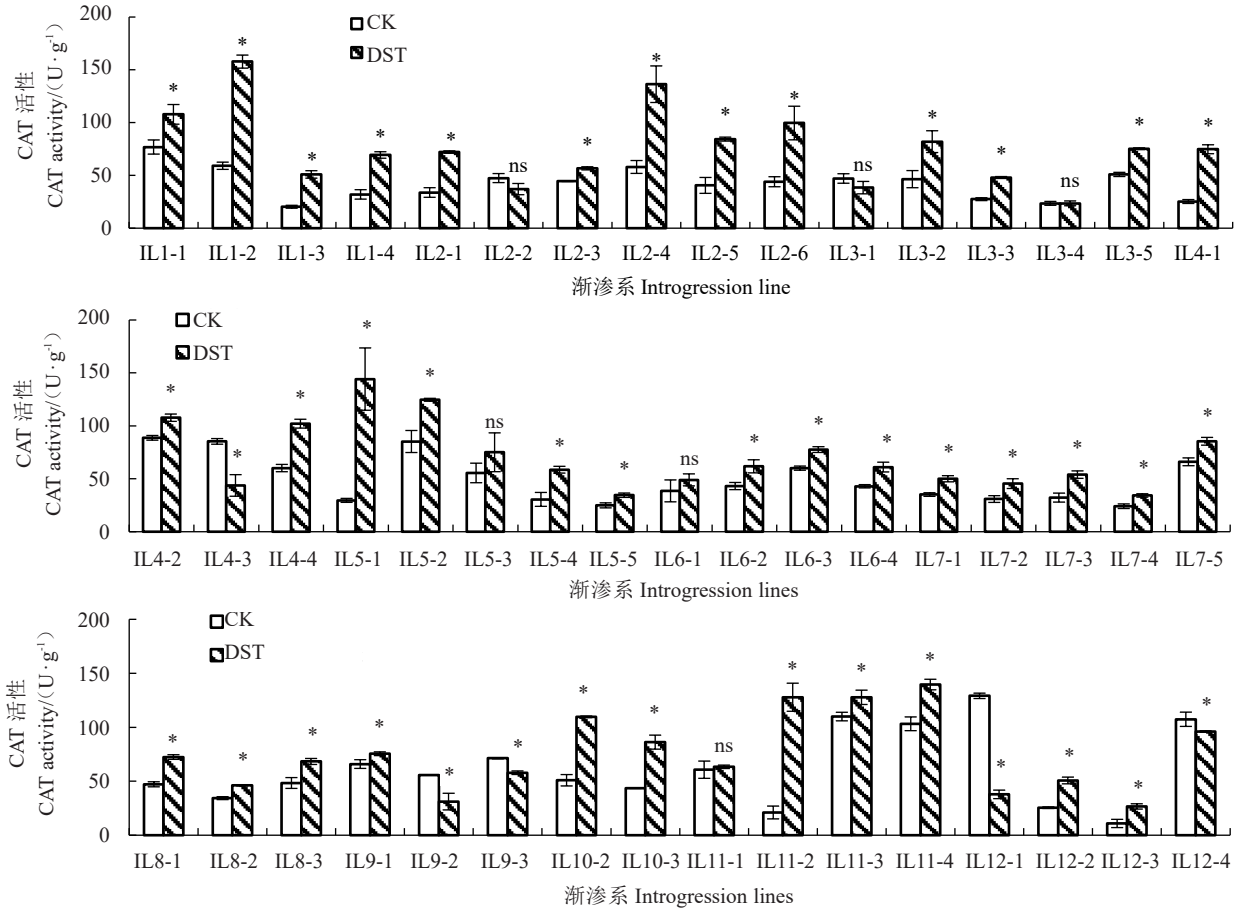


图8 不同材料在干旱胁迫后的CAT活性
Fig. 8 CAT activity of different materials under drought stress

2.9 长期干旱胁迫影响番茄IL渐渗系POD活性

由图9可知,在干旱处理28d后,IL2-1、IL2-2、IL2-4、IL6-1、IL7-4、IL12-1及IL12-3叶片POD活性与对照无显著差异,表明长期干旱胁迫不能通过调节这7份材料叶片中POD活性来影响植株抗旱性,暗示这些材料可能通过增强ASA-GSH循环等非POD依赖的抗氧化系统,补偿其对POD通路的需求。IL3-4、IL5-3、IL7-5、IL8-3、IL9-2和IL11-3叶片POD活性较对照显著降低,说明长期干旱可能抑制了这些材料中的POD活性,从而影响了其对ROS的清除能力。其余36份材料在干旱处理28d后,叶片的POD活性均显著升高,说明长期干旱胁迫能促进这些材料叶片的POD活性升高,提高其ROS清除能力。

2.10 长期干旱胁迫影响番茄IL渐渗系SOD活性

由图10可知,在干旱处理28d后,15份材料叶片的SOD活性与对照相比无显著差异,说明长期干旱胁迫不能通过改变这些材料的叶片SOD活性来影响植株抵御干旱胁迫,可能其超氧阴离子的产生与清除维持在相对平衡状态。IL5-5、IL9-2、IL9-3和IL11-3叶片的SOD活性较对照显著降低,说明长期干旱胁迫严重抑制了这4份材料叶片的SOD活性,导致其清除超氧阴离子自由基的能力下降。其余30份材料与对照相比均显著升高,说明长期干旱环境能够增强这些材料的叶片SOD活性,提升超氧阴离子自由基清除能力,从而改善植株抗旱性。

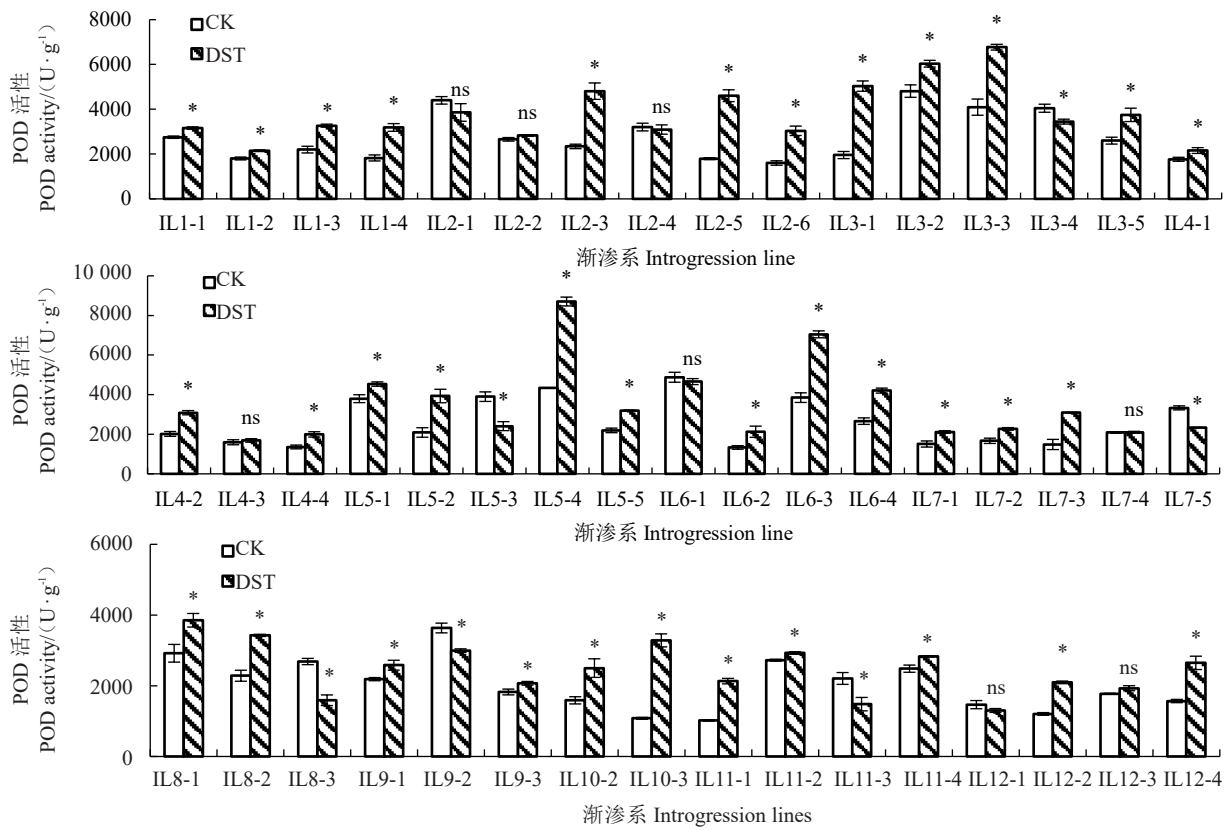


图9 不同材料在干旱胁迫后的POD活性

Fig. 9 POD activity of different materials under drought stress

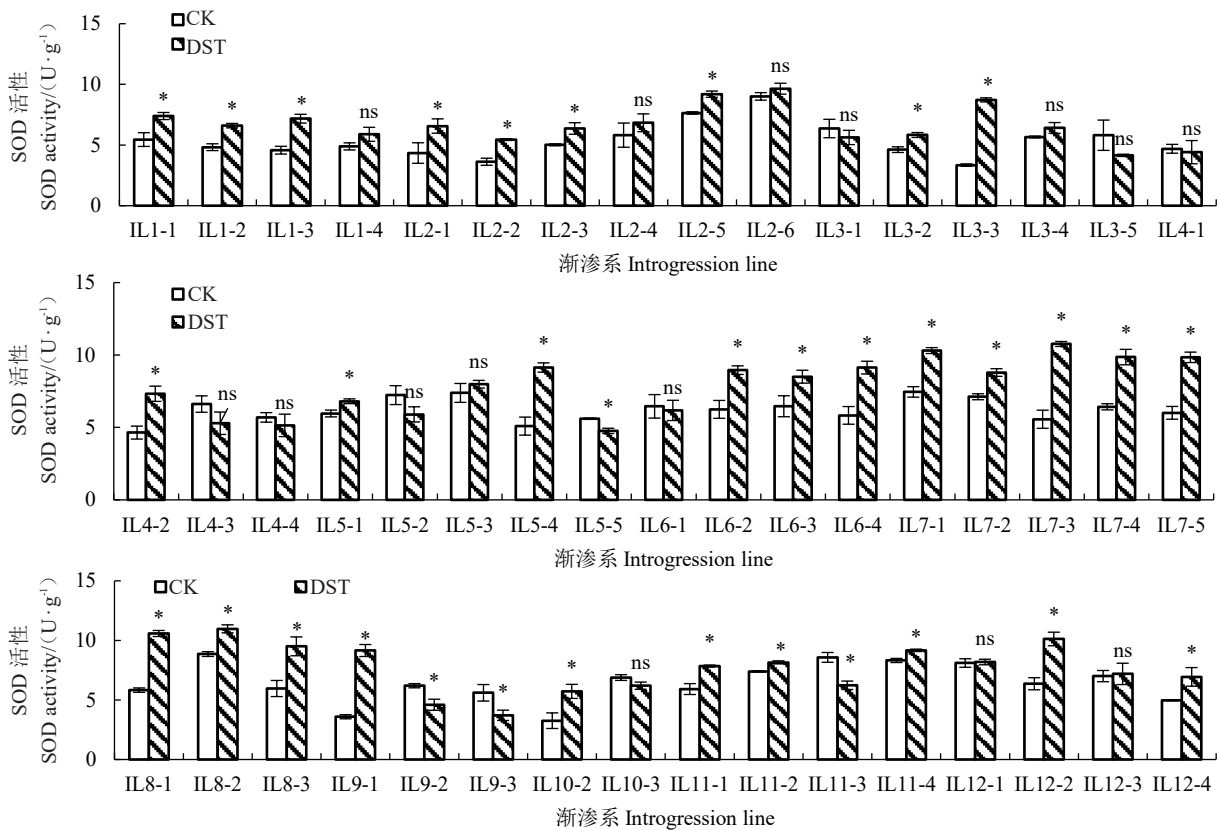


图10 不同材料在干旱胁迫后的SOD活性

Fig. 10 SOD activity of different materials under drought stress

2.11 基于赋分法、主成分分析和聚类分析的综合抗旱性评价

为系统评估 49 份番茄 IL 渐渗系材料的抗旱性,笔者整合赋分法、主成分分析(PCA)与 K-means 聚类分析,构建多维度综合评价体系,以实现材料的抗旱能力分级。

通过赋分法初步评估的结果(表 2)表明,49 份材料间抗旱性差异明显,综合赋分介于-5 至 6 分之间。其中,IL4-4 与 IL4-2 赋分结果均不低于 5 分;IL1-1、IL1-2、IL1-3、IL2-5、IL5-1、IL5-4、IL11-2、IL11-4、IL12-2、IL12-4、IL10-3、IL4-1、IL5-2、IL6-2、IL6-4、IL7-1、IL7-2 和 IL6-3 等 18 份材料赋分结果不低于 3 分;其余材料赋分均低于 3 分,甚至有的材料表现出负分现象。

表 2 不同材料的综合赋分

Table 2 Comprehensive score of different materials

材料 Material	综合赋分 Comprehensive score	材料 Material	综合赋分 Comprehensive score	材料 Material	综合赋分 Comprehensive score
IL1-1	3	IL4-3	-3	IL8-2	2
IL1-2	3	IL4-4	6	IL8-3	-1
IL1-3	3	IL5-1	3	IL9-1	1
IL1-4	2	IL5-2	3	IL9-2	-5
IL2-1	2	IL5-3	-1	IL9-3	2
IL2-2	0	IL5-4	3	IL10-2	1
IL2-3	2	IL5-5	1	IL10-3	3
IL2-4	1	IL6-1	2	IL11-1	1
IL2-5	3	IL6-2	4	IL11-2	3
IL2-6	2	IL6-3	4	IL11-3	0
IL3-1	1	IL6-4	3	IL11-4	3
IL3-2	2	IL7-1	3	IL12-1	0
IL3-3	2	IL7-2	3	IL12-2	4
IL3-4	-1	IL7-3	2	IL12-3	1
IL3-5	2	IL7-4	2	IL12-4	3
IL4-1	3	IL7-5	1		
IL4-2	5	IL8-1	2		

在赋分法基础上,为进一步消除指标间共线性并解析各指标对抗旱性的贡献权重,对赋分数据进行主成分分析,共提取到 4 个主成分。前 4 个主成分累计贡献率达 74.51%(表 3)。旋转后的成分矩阵显示,PC1 主要代表抗氧化酶系统活性(SOD、POD、CAT 活性),PC2 主要关联产量稳定性(减产率)与 SS 积累,PC3 主要反映 Pro 积累量的调节作用,PC4 主要体现 SP 积累量的稳态调节能力。

基于上述 4 个主成分得分,以其方差贡献率为权重,计算各材料的抗旱性综合评价值(D 值)。D 值分布于 0.276 7~0.926 5 之间(表 4),其中 IL4-4、

表 3 主成分特征向量及贡献率

Table 3 Eigenvectors and contribution rate of principal components

指标 Index	PC1	PC2	PC3	PC4
SOD 活性 SOD activity	0.81	-0.29	0.11	-0.08
POD 活性 POD activity	0.71	0.19	-0.13	0.19
CAT 活性 CAT activity	0.76	0.18	-0.08	-0.13
Pro 含量 Proline content	-0.07	0.03	0.94	-0.06
SP 含量 Soluble protein content	-0.02	0.03	-0.06	0.93
SS 含量 Soluble sugar content	0.01	0.68	-0.36	-0.34
减产率 Yield reduction rate	0.10	0.82	0.23	0.22
贡献率 Contribution rate/%	25.71	18.31	15.88	14.61
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	25.71	44.02	59.90	74.51

IL4-2、IL5-4、IL11-2 与 IL12-2 的 D 值均高于 0.7,表明其在开花坐果期具备较强的抗旱能力。

进一步通过 K-means 聚类分析,将 49 份材料划分为 4 个抗旱等级(表 4):高抗旱型(聚类 4,4 份)、中等抗旱型(聚类 1,31 份)、干旱敏感型(聚类 3,12 份)及特殊响应型(聚类 2,2 份)。

3 讨论与结论

开花坐果期是番茄对水分胁迫高度敏感的生殖阶段。干旱会引发气孔关闭、光合抑制、同化物分配失衡及活性氧(ROS)积累,最终导致果实发育受阻与产量及品质下降^[30-33]。本研究对 49 份番茄 IL 渐渗系进行了为期 28 d 的田间自然干旱处理,多数材料表现出植株矮化、叶片脱落及产量明显降低等典型表型,与前人关于干旱抑制番茄生长的研究结论一致^[34]。值得注意的是,IL4-2 与 IL4-4 在干旱胁迫下产量不降反升,其中 IL4-2 单果体积略有增大。这一“负减产”现象可能与适度干旱诱导的光合产物向果实高效分配的“补偿效应”有关,在部分作物研究中亦有类似报道^[35]。然而,尽管 IL4-4 也表现出负减产现象,但干旱胁迫明显减小了果实大小。综合考虑植株形态、果实形态及红熟果实产量,IL4-2 在开花坐果期表现出对新疆干旱少雨气候的良好适应性,对选育开花坐果期强耐旱性加工番茄新品种具有重要意义。

在生理响应机制上,干旱胁迫通常导致氧化损伤与膜脂过氧化^[36]。为应对水分亏缺,植物启动渗透调节、活性氧清除等一系列保护机制。强抗旱性植株能通过积累 Pro、SS 及 SP 等渗透调节物质,提高细胞渗透势,减少水分流失^[37-38]。此外,强抗旱性植株能增强 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性^[39],

表4 49份番茄IL渐渗系的D值及聚类结果
Table 4 D-value and clustering results of 49 tomato IL introgression lines

IL 渐渗系 Introgression line	D 值 D-value	聚类结果 Cluster result	IL 渐渗系 Introgression line	D 值 D-value	聚类结果 Cluster result	IL 渐渗系 Introgression line	D 值 D-value	聚类结果 Cluster result
IL4-4	0.926 5	4	IL7-3	0.605 7	1	IL5-5	0.501 9	3
IL4-2	0.845 1	4	IL8-1	0.605 7	1	IL3-1	0.495 1	3
IL5-4	0.733 3	1	IL1-1	0.597 1	1	IL2-2	0.484 5	1
IL11-2	0.733 3	1	IL1-2	0.597 1	1	IL2-4	0.482 6	3
IL12-2	0.724 6	1	IL1-3	0.597 1	1	IL12-3	0.482 6	3
IL10-3	0.677 0	1	IL2-5	0.597 1	1	IL8-3	0.480 6	1
IL4-1	0.673 5	4	IL5-1	0.597 1	1	IL3-5	0.451 1	2
IL5-2	0.673 5	4	IL6-4	0.597 1	1	IL8-2	0.439 2	2
IL6-2	0.656 5	1	IL7-1	0.597 1	1	IL12-1	0.433 4	3
IL6-3	0.656 5	1	IL7-2	0.597 1	1	IL11-3	0.427 6	3
IL2-6	0.617 6	1	IL11-4	0.597 1	1	IL9-3	0.401 8	3
IL9-1	0.614 3	1	IL11-1	0.551 4	1	IL4-3	0.391 2	3
IL10-2	0.614 3	1	IL1-4	0.549 5	1	IL3-4	0.361 4	3
IL12-4	0.607 4	1	IL6-1	0.547 2	3	IL5-3	0.361 4	3
IL2-3	0.605 7	1	IL7-5	0.531 4	1	IL9-2	0.276 7	3
IL3-2	0.605 7	1	IL2-1	0.530 2	1			
IL3-3	0.605 7	1	IL7-4	0.530 2	1			

以有效清除活性氧,减轻氧化损伤。在长期逆境条件下,作物产量与抗氧化酶活性密切相关^[40]。本研究显示,大部分材料叶片的H₂O₂与MDA含量升高,但IL4-2、IL1-1等材料的H₂O₂含量无显著变化且MDA含量下降,同时其Pro与SS含量显著积累,CAT、POD、SOD活性同步增强,表明IL4-2等材料可能通过协同激活渗透调节与抗氧化防御系统,有效维持了细胞膜稳定与氧化还原稳态,从而缓解了干旱损伤。

与以往研究多集中于萌发期或苗期的抗旱性筛选不同^[22-23],本研究聚焦开花坐果期长期自然干旱环境,更贴近实际生产情境。通过构建包含形态、产量及多维度生理指标的综合评价体系,并结合主成分分析与聚类分析,将供试材料系统划分为高抗旱型、中等抗旱型、干旱敏感型及特殊响应型,筛选到在干旱胁迫下无明显生长抑制且在果实产量及性状方面优秀的IL4-2,推测其具有强抗旱基因。此外,IL5-1、IL6-2和IL12-2等材料在植株形态和产量维持方面也表现出一定耐旱性,具有一定的抗旱潜力。虽然本研究采用田间试验更贴近生产,但环境因子存在一定波动,因此,未来还应考虑在可控条件下对IL4-2等材料进行生理机制的深入验证。后续工作应重点解析IL4-2中来自潘那利番茄的特定渗入片段,综合利用QTL定位与转录组学等方法,挖掘其中的关键抗旱基因;进而系统解析

这些基因如何调控长期干旱下的果实性状及产量稳定性的分子机制,最终解析IL4-2独特表型的成因。

综上所述,49份番茄IL渐渗系在开花坐果期对长期干旱的耐受性存在显著差异,在表型、产量及生理响应上表现出丰富的遗传多样性。成功筛选出高抗旱材料IL4-2,其在干旱胁迫下能保持优良株型,单株产量提高18.8%,并协同增强渗透调节与抗氧化能力,具备优异的综合抗旱性。建立的包含多指标与多元统计方法的综合评价体系,能有效对开花坐果期的番茄材料进行抗旱性分级,为抗旱育种提供了可靠的筛选方法。

参考文献

- [1] DARIVA F, PESSOA H, COPATI M, et al. Yield and fruit quality attributes of selected tomato introgression lines subjected to long-term deficit irrigation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110426.
- [2] 齐红岩, 李天来, 曲春秋, 等. 亏缺灌溉对设施栽培番茄物质分配及果实品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2004(2): 10-12.
- [3] HERNANDEZ-SANTANA V, PEREZ-ARCOIZA A, GOMEZ-JIMENEZ M C, et al. Disentangling the link between leaf photosynthesis and turgor in fruit growth[J]. *The Plant Journal*, 2021, 107(6): 1788-1801.
- [4] 李中海, 郭永峰, 任国栋, 等. 叶片衰老研究进展[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(9): 1627-1656.
- [5] OGUNKANMI L, MCCARTHY D S, ADIKU S G K. Impact of extreme temperature and soil water stress on the growth and yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] [J]. *Agriculture*,

- 2022,12(1):43.
- [6] 于波,秦晓惠,赵杨.植物感应干旱信号的机制[J].生物技术通报,2023,39(11):6-17.
- [7] 赵杨,杨永青,丁杨林,等.植物非生物逆境学科发展综述[J].植物生理学报,2024,60(2):248-270.
- [8] CHUN H, LEE S H, CHOI Y D, et al. Effects of drought stress on root morphology and spatial distribution of soybean and adzuki bean[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(10): 2639-2651.
- [9] PETROV P, PETROVA A, DIMITROV I, et al. Relationships between leaf morpho-anatomy, water status and cell membrane stability in leaves of wheat seedlings subjected to severe soil drought[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2018, 204(3):219-227.
- [10] FLEXAS J, BOTA J, LORETO F, et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants[J]. Plant Biology, 2004, 6(3):269-279.
- [11] 汤章城.植物对水分胁迫的反应和适应性:II.植物对干旱的反应和适应性[J].植物生理学通讯,1983(4):1-7.
- [12] 王霞,侯平,尹林克.植物对干旱胁迫的适应机理[J].干旱区研究,2001,18(2):42-46.
- [13] DERE S, KUSVURAN S, DASGAN H. Does drought increase the antioxidant nutrient capacity of tomatoes? [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(10): 6633-6645.
- [14] 时佳,王重,高新,等.不同品种春小麦耐旱性分析及鉴定指标筛选[J].干旱地区农业研究,2023,41(6):8-16.
- [15] 崔豫蒙,谭占明,程云霞,等.加工番茄育种研究进展及展望[J].新疆农业科技,2023(4):35-39.
- [16] 崔锦,王丽萍.番茄育种现状及发展趋势[J].安徽农学通报,2021,27(6):21-23.
- [17] 董舒超,凌嘉怡,赵丽萍,等.转录因子调控番茄抗旱性研究进展[J].江苏农业科学,2023,51(9):9-16.
- [18] 王光梅,胡兵辉.有机肥施用量和干旱时期对番茄产量及品质的影响[J].南方农业学报,2021,52(4):1040-1049.
- [19] 张浩雷.新疆番茄产业价值综合评价研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
- [20] 姚宇飞,木巴拉克,周国良.浅谈新疆干旱农业区的特点[J].新疆农业科学,2001,38(2):102-104.
- [21] 李金华,王亚玲,潘宇,等.番茄抗旱基因工程研究进展[J].中国蔬菜,2017(12):14-23.
- [22] 李景富,崔亚男,姜景彬,等.抗旱番茄种质资源筛选及抗旱性评价[J].东北农业大学学报,2018,49(4):1-9.
- [23] 马越,李玉姗,王帆,等.番茄种质资源萌发期抗旱性综合评价及筛选[J].植物遗传资源学报,2024,25(7):1056-1069.
- [24] GROZEVA S, GANEVA D. Effects of the drought induced stress on the flowering and the fruit set stages in tomato collection[J]. Agricultural Sciences, 2024, 16(41):29-38.
- [25] 杨小英,黄艳竹,郝春磊,等.渗透胁迫对切花菊幼苗生理指标和叶片结构的影响[J].核农学报,2025,39(7):1566-1580.
- [26] 职明星,李秀菊.脯氨酸测定方法的改进[J].植物生理学通讯,2005,41(3):355-357.
- [27] 郭晓蕾,朱思潮,翟旭峰,等.硫酸蒽酮法与硫酸苯酚法测定灵芝多糖含量比较[J].中华中医药学刊,2010,28(9):2000-2002.
- [28] 王玉钦.番茄 *SIERFBI* 和 *SIGATA17* 转录因子在盐和干旱胁迫下的生物学功能分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [29] 郝舒雪.不同生育期水分胁迫及复水对番茄生理特性、品质及产量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [30] YANG X Y, LU M Q, WANG Y F, et al. Response mechanism of plants to drought stress[J]. Horticulturae, 2021, 7(3):50.
- [31] DIETZ K J, ZÖRB C, GEILFUS C M. Drought and crop yield[J]. Plant Biology, 2021, 23(6):881-893.
- [32] CHALLINOR A J, WHEELER T R, CRAUFURD P Q, et al. Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(1/2):99-120.
- [33] SAKYA A, SULISTYANINGSIH E, INDRADEWA D, et al. Physiological characters and tomato yield under drought stress[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 200(1):012043.
- [34] ALMOHISEN I. Effect of water stress on growth and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Hortscience Journal of Suez Canal University, 2015, 4(1):1-5.
- [35] 王峰,杜天生,邱建建,等.亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):46-52.
- [36] 牛云慧.日光温室番茄对水分亏缺的响应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [37] 孙彩霞,沈秀璞.作物抗旱性鉴定指标及数量分析方法的研究进展[J].中国农学通报,2002,18(1):49-51.
- [38] 蒲伟凤,纪展波,李桂兰,等.作物抗旱性鉴定方法研究进展(综述)[J].河北科技师范学院学报,2011,25(2):34-39.
- [39] 陈由强,叶冰莹,朱锦懋,等.渗透胁迫对花生幼叶活性氧伤害和膜脂过氧化作用的影响[J].中国油料作物学报,2000,22(1):54-57.
- [40] ANJUM S A, ASHRAF U, TANVEER M, et al. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:69.