

张帆,刘博,石玉,等. 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.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.028

干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生长及生理特性的影响

张帆¹,刘博²,石玉¹,王军娥¹,张毅¹

(1. 山西农业大学园艺学院,山西太谷 030801; 2. 华中农业大学园艺林学学院,湖北武汉 430070)

摘要:以辣椒品种红缨枪为砧木、奥黛丽为接穗进行嫁接,采用水培方式,以奥黛丽辣椒自根苗为对照,模拟干旱处理(1/2 日本山崎甜椒营养液 + 10% PEG)与正常营养液培养(1/2 倍日本山崎甜椒营养液),研究干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生长、水分代谢、抗氧化特性的影响。结果表明,与正常培养条件(CK)相比,干旱胁迫显著抑制辣椒自根苗的生物量与叶绿素含量的积累,并显著提高自根苗的丙二醛含量及相对电导率,降低 SOD、POD、CAT 的活性,自根苗叶片的相对含水量、叶片水势、根系活力、根系水力学导度在干旱胁迫下分别显著降低 34.55%、42.37%、28.13%、96.85% ($P < 0.05$)。在干旱胁迫下,嫁接苗的生物量与叶绿素含量显著高于自根苗,嫁接苗的 SOD、POD、CAT 活性较自根苗显著上升,丙二醛含量、相对电导率显著下降,且嫁接苗的根系活力、叶片相对含水量较自根苗分别显著提高 20.36%、39.03% ($P < 0.05$)。因此,干旱胁迫下,辣椒幼苗的抗氧化系统与水分代谢会受到不同程度的破坏,幼苗的生长发育受阻;嫁接处理可有效提高辣椒幼苗的抗旱能力,干旱胁迫下嫁接苗生物量、叶绿素含量的积累比自根苗显著提高,并显著提高幼苗的抗氧化酶活性和水分调节能力,有效缓解干旱胁迫对辣椒幼苗的伤害。

关键词:干旱胁迫;嫁接;辣椒;生长指标;水分代谢;抗氧化系统

中图分类号:S641.301;S641.304

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2024)05-0186-06

干旱是影响农作物生长发育的主要非生物胁迫之一,严重制约农作物的生长发育与正常生理代

谢的进程^[1]。研究表明,干旱胁迫会直接影响植物体内的水分状况,在水分亏缺条件下,植物的光合作用、抗氧化防御等生理代谢系统会遭到不同程度的破坏,影响植株的生物量累积与形态发育^[2]。近年来,我国作物的干旱受灾面积每年达 1 500 万 hm^2 以上;干旱是制约我国农作物生长的主要环境因子之一^[3]。研究干旱胁迫对农作物生长及其生理代谢的影响,对促进农作物生长发育、提高抗逆性均具有重要意义。

收稿日期:2023-04-11

基金项目:山西省重点研发计划(编号:201903D221065);山西省重点研发计划重点项目(编号:201903D211011-03)。

作者简介:张帆(1998—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail:752278872@qq.com。

通信作者:石玉,博士,副教授,主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail:ayu-shi@163.com。

[22]王倩. 干旱条件下不同苹果品种氮利用效率比较及差异机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019:22-28.

[23]崔佩佩,丁玉川,焦晓燕,等. 氮肥对作物的影响研究进展[J]. 山西农业科学,2017,45(4):663-668.

[24]于肖. 水、氮处理下谷子生长发育、生理特性及水肥利用效率的响应[D]. 济南:山东师范大学,2022:22-33.

[25]高宏伟,杨武德,冯美臣,等. 氮运筹对冬小麦氮素积累量和氮素吸收利用效率的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(3):392-395.

[26]夏来坤,陶洪斌,朱金城,等. 施氮时期对夏玉米碳氮运转及氮肥利用的影响[J]. 华北农学报,2009,24(3):208-211.

[27]路永强,刘玉秀,周发宝,等. 不同水分供应对小麦氮素积累、分配和产量的影响[J]. 西北农业学报,2019,28(11):1760-1768.

[28]Dordas C A, Sioulas C. Dry matter and nitrogen accumulation,

partitioning, and retranslocation in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) as affected by nitrogen fertilization[J]. Field Crops Research, 2019,110(1):35-43.

[29]Quemada M, Gabriel J L. Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously[J]. Global Food Security, 2016,9:29-35.

[30]张秋英,刘晓冰,金剑,等. 水肥耦合对玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学,2001(2):64-67.

[31]褚丽丽. 营养生长期水分胁迫和氮素对大豆干物质及产量的影响[J]. 节水灌溉,2016,251(7):31-35.

[32]Cui Z F, Effah Z, Yan B, et al. Water and nitrogen coupling increased the water-nitrogen use efficiency of oilseed flax[J]. Plants,2022,12(1):51-52.

[33]李孝良,程婷婷,王付春,等. 水氮耦合对道地药材滁菊产量及生物量的影响[J]. 中药材,2013,36(9):1381-1385.

辣椒(*Capsicum annuum* L.)是茄科辣椒属一年生或多年生双子叶草本植物,其根系浅弱,养分吸收能力相对较差,对水分盈亏敏感。干旱条件下,辣椒植株体内水分供应不足、水分耗散加剧,根系吸收及运输养分能力下降,植株体内正常的水分代谢遭到破坏,从而影响植株正常的生理代谢进程^[4-5]。有研究表明,水分亏缺会直接导致辣椒水势下降,降低其水分利用效率,造成细胞膨压降低、植株体内活性氧增加、细胞膜脂分子结构紊乱等,抑制植株的光合作用与碳同化作用,进而阻碍植株的叶片生长、茎伸长及根系发育^[2]。

山西省位于黄土高原东部地区,属大陆性季风气候,其独特的地理位置与气候特点导致旱灾常年频发,严重制约当地农作物生长与增产提质^[6]。基于该地区试验环境,研究提高辣椒苗抗旱性措施具有重要的现实意义。

嫁接技术是改善作物根系生长发育的有效农艺措施,在果蔬类园艺作物上的应用越来越广泛^[7]。嫁接利用砧木提供的优良根系能增强目标作物根系的生长势与抗性,有效改善作物整体的生长发育与生理特性,进而增强作物的抗逆抗病虫害能力,提高作物的水肥利用率、果实品质,优化施肥和土壤等资源的利用率^[8-9]。辣椒因其根系生长与再生能力差,受土传病虫害与非生物胁迫的影响严重^[7],因此利用不同特性的砧木嫁接,是改善辣椒作物抗性、克服连作障碍、提高作物产量的重要农艺措施^[10]。目前,关于嫁接对改善辣椒植株生长和抗逆性生理的影响机理已有大量研究。裴云的研究表明,多种砧木嫁接可不同程度地提高辣椒植株的渗透调节能力与抗氧化能力,提高辣椒的耐盐性^[11]。于迪研究发现,辣椒嫁接苗能有效抑制辣椒疫病的发病率,同时显著增加土壤根际微生物总数,提高辣椒产量及果实品质^[12]。有关干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗水分代谢影响的研究目前鲜有报道。因此,本试验通过模拟干旱环境,研究干旱胁迫下辣椒嫁接苗与自根苗的生长发育与生理生化的变化,旨在为改善辣椒植株抗旱性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验以辣椒品种红缨枪为砧木、奥黛丽为接穗进行嫁接,以奥黛丽辣椒自根苗与嫁接苗为试材(辣椒材料均来源于山东伟丽种苗有限公司),于

2021 年 8—12 月在山西农业大学园艺试验站和试验大楼开展试验。待辣椒幼苗长至 3 叶 1 心时,选取长势一致的幼苗,定植于含 1/4 日本山崎甜椒营养液的水培槽内,每槽定植 8 株,每个处理定植 2 槽,调节营养液的 pH 值至 (6.0 ± 0.2) 。缓苗 3 d 后,更换为 1/2 日本山崎甜椒营养液,以 10% PEG 模拟干旱环境对辣椒幼苗进行干旱处理。试验设置 CK(自根苗 + 1/2 日本山崎甜椒营养液)、J 处理(嫁接苗 + 1/2 日本山崎甜椒营养液)、P 处理(自根苗 + 1/2 日本山崎甜椒营养液 + 10% PEG 处理)、PJ 处理(嫁接苗 + 1/2 日本山崎甜椒营养液 + 10% PEG 处理),共 4 个处理,处理 18 d 后取样,测定生长指标、水分代谢指标和抗氧化指标。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生长指标 (1)地上部/地下部干鲜重的测定。洗净植株,吸干表面水分,称鲜重,105 ℃杀青 15 min,65 ℃烘干至恒质量,干燥冷却后称干重。(2)根系形态指标的测定。采用根系扫描仪(Epson Perfection V850 Pro,北京)扫描辣椒幼苗根系,将根系图像用 WinRHIZO 系统分析并读取总根长、表面积、总体积、平均直径等参数值,每个处理作 5 次生物学重复。

1.2.2 生理生化指标 叶绿素(主要包括叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + 叶绿素 b、类胡萝卜素)含量采用 96% 乙醇浸提法^[13]测定;根系活力采用 TTC 染色法^[14]测定;叶片相对含水量采用称重法^[15]测定;叶片水势、根系水力导度使用 PMS 1505D 型便携式植物水势压力室^[16]测定,每个处理作 5 次生物学重复。MDA 含量采用硫代巴比妥酸法^[13]测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 光还原法^[13]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[13]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外光吸收法^[13]测定;相对电导率采用浸泡法^[14]测定,每个处理 3 次生物学重复。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生物量的影响

由表 1 可知,正常营养液条件下,J 处理的地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重、总鲜重、总干重分别比 CK 显著增加 24.97%、33.54%、88.80%、126.17%、42.74%、56.64%($P < 0.05$);而干旱胁迫下,PJ 处理的地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重、总鲜重、总

干重分别比 P 处理显著增加 99.58%、64.93%、77.47%、59.26%、91.58%、63.30% ($P<0.05$)。

2.2 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗根系形态的影响

由表 2 可知,干旱胁迫显著抑制幼苗的根系发育。P 处理幼苗根系的总根长、表面积、总体积、平均

直径分别比 CK 显著减小 30.57%、80.34%、44.27%、88.48% ($P<0.05$);PJ 处理幼苗根系的总根长、表面积、平均直径分别比 P 处理显著增加 0.45、1.68、1.33 倍($P<0.05$)。

表 1 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生物量的影响

处理	鲜重(g)			干重(g)		
	地上部	地下部	总和	地上部	地下部	总和
CK	39.57±2.66b	15.27±1.99b	54.84±3.70b	3.22±0.25b	1.07±0.09b	4.29±0.32b
J	49.45±7.61a	28.83±6.39a	78.28±5.12a	4.30±0.95a	2.42±0.36a	6.72±0.76a
P	9.62±2.58d	5.46±1.74d	15.08±4.13d	1.34±0.38d	0.54±0.13c	1.88±0.47d
PJ	19.20±1.35c	9.69±1.38c	28.89±2.72c	2.21±0.21c	0.86±0.12b	3.07±0.31c

注:同列数据后不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著。表 2、表 3、表 4 同。

表 2 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗根系形态的影响

处理	总根长 (cm)	表面积 (mm ²)	总体积 (mm ³)	平均直径 (mm)
CK	84.69±5.34b	396.99±29.07a	1.92±0.49a	14.85±4.97a
J	110.13±9.56a	305.18±29.42b	1.32±0.25b	7.26±0.90b
P	58.80±9.25c	78.03±40.74d	1.07±0.06bc	1.71±0.44c
PJ	85.53±7.29b	209.47±21.13c	0.72±0.06c	3.98±0.40bc

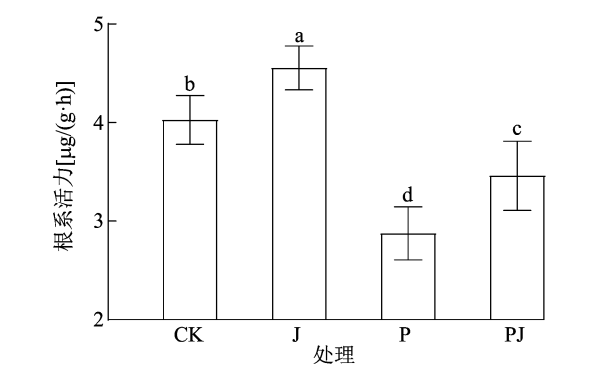
2.3 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗根系活力的影响

由图 1 可知,正常营养液条件下,J 处理与 CK 相比,幼苗的根系活力显著提高 13.10% ($P<0.05$);干旱胁迫显著抑制了嫁接苗与自根苗的根系活力,PJ 处理辣椒幼苗的根系活力比 P 处理显著提升 20.36% ($P<0.05$)。

2.4 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗叶绿素含量的影响

由表 3 可知,正常营养液条件下,J 处理叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+叶绿素 b、类胡萝卜素的含量,分别比 CK 明显提高 24.73%、30.08%、26.16%、13.51%;干旱胁迫能显著抑制嫁接苗和自根苗叶绿素的合成,即 PJ 处理叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿

素 a+叶绿素 b、类胡萝卜素的含量分别比 P 处理显著提高 53.47%、105.56%、67.68%、64.29% ($P<0.05$)。



柱上不同小写字母代表在 0.05 水平差异显著, 图 2 至图 6 同
图1 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗根系活力的影响

表 3 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗叶绿素含量的影响

处理	含量(mg/g)			
	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+叶绿素 b	类胡萝卜素
CK	3.64±0.30b	1.33±0.10b	4.97±0.40b	0.74±0.06a
J	4.54±0.45a	1.73±0.18a	6.27±0.62a	0.84±0.09a
P	1.44±0.26d	0.54±0.08c	1.98±0.33d	0.28±0.06c
PJ	2.21±0.37c	1.11±0.21b	3.32±0.57c	0.46±0.10b

2.5 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗水分状况的影响

2.5.1 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗叶片相对含水量的影响 由图 2 可知,干旱胁迫下,嫁接苗与自根苗的叶片相对含水量较正常营养液条件下均显著下降;而 PJ 处理幼苗叶片的相对含水量比 P 处理显著提升 39.03% ($P < 0.05$)。

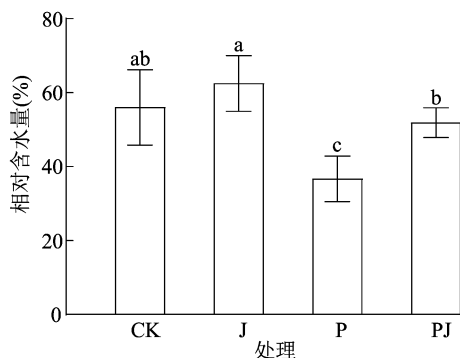


图2 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗叶片相对含水量的影响

2.5.2 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗叶片水势的影响 由图 3 可知,正常营养液条件下,J 处理的叶片水势比 CK 显著提高 23.26% ($P < 0.05$);干旱胁迫显著降低嫁接苗与自根苗的叶片水势,其中 P 处理的叶片水比 CK 显著下降 42.37% ($P < 0.05$)。

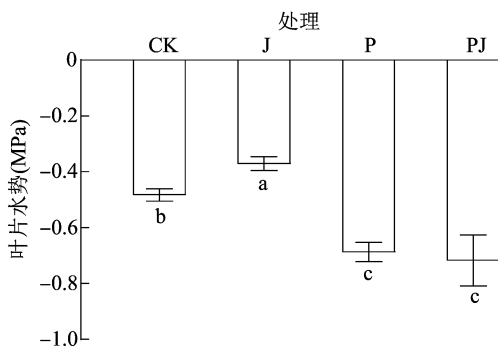


图3 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗叶片水势的影响

2.5.3 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗根系水力学导度的影响 由图 4 可知,正常营养液条件下,J 处理根系的水力学导度比 CK 显著提高 45.45% ($P < 0.05$);干旱胁迫明显抑制嫁接苗与自根苗的根系水力学导度,其中 P 处理根系的水力学导度比 CK 显著降低 30.73 倍,而 PJ 处理根系的水力学导度比 P 处理提高 5.67 倍。

2.6 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗抗氧化特性的影响

2.6.1 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗相对电导率的影响 由图 5 可知,正常营养液条件下,J 处理幼苗的叶片相对电导率比 CK 显著降低 24.38% ($P <$

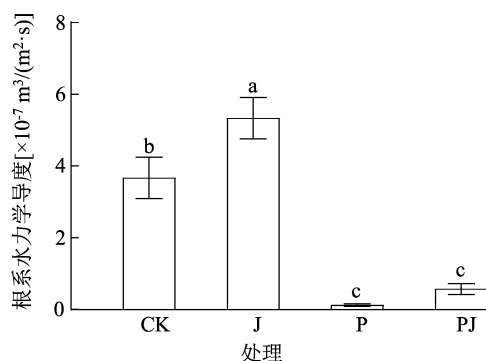


图4 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗根系水力学导度的影响

0.05);干旱胁迫显著提高了嫁接苗与自根苗植株的相对电导率,PJ 处理幼苗叶片、根系的相对电导率分别比 P 处理显著降低 17.60%、14.61% ($P < 0.05$)。

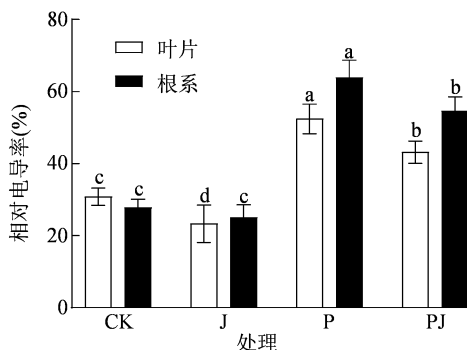


图5 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗相对电导率的影响

2.6.2 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗丙二醛含量的影响 由图 6 可知,正常营养液条件下,J 处理幼苗叶片、根系中的丙二醛含量比 CK 分别显著降低 52.29%、21.41% ($P < 0.05$);干旱胁迫下,嫁接苗、自根苗植株体内的丙二醛含量均显著提高,其中 P 处理植株叶片、根系的丙二醛含量分别比 CK 显著上升 58.94%、77.17% ($P < 0.05$);PJ 处理幼苗叶片、根系的丙二醛含量则分别比 P 处理显著降低 25.53%、35.28% ($P < 0.05$)。

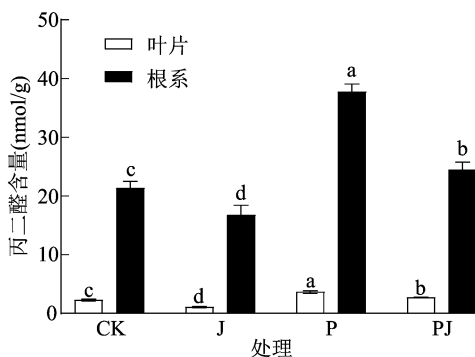


图6 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗丙二醛含量的影响

2.6.3 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗抗氧化酶活性的影响 由表 4 可知,正常营养液条件下,与 CK 相比,J 处理叶片的 SOD、POD 活性分别显著提高 11.62%、22.31% ($P<0.05$),根系的 POD、CAT 活性分别显著提高 52.87%、13.80% ($P<0.05$);干旱胁迫、显著抑制了嫁接苗、自根苗植株的抗氧化酶活性,与 CK 相比,P 处理叶片的 SOD、POD、CAT 活

性分别显著下降 48.48%、57.33%、45.32% ($P<0.05$),根系的 SOD、POD、CAT 活性分别显著下降 61.45%、73.20%、28.88% ($P<0.05$);另外,在干旱胁迫下,与 P 处理相比,PJ 处理幼苗叶片的 SOD、POD、CAT 活性则分别显著提高 80.67%、74.13%、44.17% ($P<0.05$),根系的 SOD、POD、CAT 活性分别显著提高 1.14、1.02、0.21 倍($P<0.05$)。

表 4 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗抗氧化酶活性的影响

处理	SOD 活性(U/g)		POD 活性[U/(g·h)]		CAT 活性[U/(g·h)]	
	叶片	根系	叶片	根系	叶片	根系
CK	542.39 ± 5.69b	598.07 ± 2.58a	2 598.67 ± 47.81b	2 948.89 ± 22.24b	144.00 ± 1.85b	147.33 ± 0.55b
J	605.42 ± 1.31a	629.58 ± 2.43a	3 178.56 ± 63.71a	4 507.89 ± 420.01a	153.98 ± 2.73a	167.66 ± 4.79a
P	279.42 ± 15.61d	230.58 ± 12.88c	1 108.89 ± 41.20d	790.44 ± 27.18d	78.74 ± 8.80d	104.78 ± 4.51d
PJ	504.82 ± 7.78c	492.81 ± 49.44b	1 930.89 ± 93.41c	1 599.67 ± 67.00c	113.52 ± 2.57c	127.04 ± 4.92c

3 讨论

水分是影响辣椒作物正常生长发育及生理代谢的重要因素之一,幼苗期是其对水分最敏感的时期,采用抗性优异的砧木嫁接,可有效改善其对水分的吸收与运输,提高植株的抗旱性^[17]。本试验结果表明,在干旱胁迫下,辣椒自根苗的根系活力显著下降,幼苗根系吸水与吸收养分的能力减弱,植株的生物量积累与根系形态发育受到显著抑制;以红缨枪辣椒为砧木嫁接处理后,嫁接苗较自根苗的根系活力显著提高。在干旱胁迫下,叶片中叶绿体的形态膨胀变圆,甚至被膜破裂^[18-19],抑制叶片总叶绿素的合成;另外,干旱胁迫导致根系细胞的伸展性能降低,根系的增粗与伸长生长受到抑制,自根苗根系的总根长、表面积、总体积、平均直径均显著减小,严重影响自根苗的根系形态发育,同时抑制根系活力^[20]。有研究发现,在一定程度的干旱胁迫下,黄瓜、番茄嫁接抗旱性强的砧木后,有效缓解了叶绿体结构与根系形态的破坏,抗旱性较强^[21-22]。自根苗对干旱胁迫的耐受性较嫁接苗弱,阻碍根系的增粗与伸长生长,其根系活力减弱,地上部的养分供给受到严重抑制;另外,幼苗为抵御干旱胁迫,也相对促进根系发育,增强自身吸收水分与养分的能力,因此影响地上部发育,降低叶片的叶绿素合成^[23]。红缨枪辣椒砧木有效促进了接穗的抗性与根系发育,根系吸收水分和养分的能力显著增强,在干旱胁迫下,对地上部的水分与养分供应相对充足,改善了叶片叶绿素的合成,同时提

高了地上部养分的供给,从而相对缓解了根系的过度发育^[24]。

植物的水分代谢是指植物对水分的吸收、运输、损耗的过程,是植物所有代谢活动正常进行的基础^[25-26]。本试验结果表明,在干旱胁迫下,辣椒自根苗的叶片相对含水量、叶片水势、根系水力学导度大幅度降低;红缨枪辣椒作为砧木嫁接后,嫁接苗叶片的相对含水量显著提升,叶片水势及根系水力学导度均有不同程度的提高。植株为适应生长环境的水分亏缺,降低了自身根系的水分运输与植株整体耗水量^[27-28],红缨枪辣椒砧木显著改善幼苗根系在干旱条件下的水分吸收与利用效率,促进根系水分向上运输,同时缓解干旱胁迫对叶绿素合成的抑制效果,有效增强生理代谢的调节能力,改善植株的生物量积累与能源分配。

依靠 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶快速清除活性氧,是植物体内防止细胞膜损伤的重要防御手段^[29]。逆境胁迫会导致植物体内氧化代谢失衡,细胞膜脂结构受到过氧化危害^[15]。而膜脂的过氧化反应产物丙二醛会破坏细胞膜的选择透过性,提高电解质渗透率^[28]。本试验结果表明,在干旱胁迫下,辣椒自根苗叶片及根系细胞的 SOD、POD、CAT 活性受到显著抑制,同时体内的相对电导率、丙二醛含量显著上升。红缨枪辣椒作为砧木嫁接处理后,相比于自根苗,嫁接苗的 SOD、POD、CAT 活性显著升高,进而降低了相对电导率及丙二醛含量。干旱胁迫引发植株体内的抗氧化酶活性下降,导致代谢产生的活性氧无法及时清除;活性氧的大量积累

造成细胞膜结构损伤,同时细胞内脂质、蛋白质等大分子物质也遭受破坏^[29]。辣椒幼苗叶片及根系的丙二醛含量大幅上升,细胞膜正常结构与功能的破坏降低了细胞膜的选择透过性,膜透性增大^[15],导致幼苗叶片与根系细胞内电解质外渗,相对电导率显著提高。红缨枪辣椒砧木显著增强了辣椒幼苗体内的 SOD、POD、CAT 活性,清除活性氧的能力增强,因此嫁接苗显著缓解了干旱胁迫导致的细胞膜过氧化程度,降低了胞内丙二醛含量与电解质外渗^[28]。

4 结论

在干旱胁迫下,以辣椒品种红缨枪作为砧木嫁接的辣椒幼苗与辣椒自根苗相比,可显著促进根系与地上部的生长发育,提高幼苗对水分的吸收利用,能够较好地维持幼苗的叶绿体结构与根系形态,缓解水分代谢失调与活性氧代谢的失衡,上调抗氧化酶活性,提高幼苗的抗旱性。

参考文献:

- [1] Drine S, Guasmi F, Bacha H, et al. Polymorphism of microsatellite markers in barley varieties contrasting in response to drought stress [J]. Brazilian Journal of Botany, 2017, 40(2): 463–473.
- [2] 杨秋悦, 罗影子, 杨 洋, 等. 干旱胁迫对铁皮石斛生理及不同部位活性成分的影响 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 142–149.
- [3] 孔冬艳, 陈会广. 近 40 年来中国农作物与耕地受灾时空特征及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1236–1246.
- [4] Gbadegesin K K, Okunlola G O, Olowolaju E D, et al. Determination if type of potassium salt affects growth and yield of *Capsicum annum* and *Capsicum chinense* under drought stress [J]. Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 2021, 17(2): 147–154.
- [5] 杨秀霞, 燕 辉, 周春火, 等. 水分胁迫下氮形态对水稻根系孔隙度及水分吸收的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 144–149.
- [6] 李 娜, 霍治国, 钱锦霞, 等. 山西省干旱灾害风险评估与区划 [J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(5): 100–107.
- [7] 张永香, 任 苗, 洪茵恬, 等. 不同砧木嫁接对线辣椒生长发育及光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 94–101, 108.
- [8] Mavlyanova R F, Lyan E E, Karimov B A, et al. The vegetative grafting effect on increasing tomato fruit quality [J]. IOP Conference Series(Earth and Environmental Science), 2020, 613(1): 012077.
- [9] 张 捷, 艾 迪, 孟景祥, 等. 植物嫁接砧木与接穗互作机制研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(5):

139–145.

- [10] 陈 阳, 林永胜, 周先治, 等. 不同砧木嫁接对番茄产量、品质及抗病性影响的研究 [J]. 福建农业学报, 2015, 30(5): 483–488.
- [11] 裴 云. 嫁接提高辣椒耐盐性生理基础、品质及产量的研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [12] 于 迪. 嫁接克服设施辣椒连作障碍效果研究初探 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 朱永兴. 硅对黄瓜幼苗盐胁迫损伤的缓解效应及机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [16] 石 玉. 外源硅对番茄幼苗水分胁迫伤害的缓解效应及机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [17] 李盛有, 孙旭刚, 王昌陵, 等. 不同嫁接方式下大豆对干旱胁迫的响应 [J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 632–639.
- [18] Wen Z, Kuliku L, Zhang M. Effect of soil drought stress on the ultrastructures of chloroplasts and mitochondria in three desert plants with different photosynthetic types [J]. Acta Botanica Boreali–Occidentalia Sinica, 2016, 36(3): 1155–1162.
- [19] Filek M, Łabanowska M, Kurdziel M, et al. Structural and biochemical response of chloroplasts in tolerant and sensitive barley genotypes to drought stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 207: 61–72.
- [20] 冯红玉, 张璐璐, 陈惠萍. 外源乙酸对水稻幼苗根系干旱胁迫的缓解效应 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 209–218.
- [21] 张珂珂. 嫁接黄瓜幼苗对高温、干旱的生理反应及适应性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [22] 张志焕. 番茄砧木耐旱性鉴定及其嫁接苗对水分胁迫的响应 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [23] 杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 等. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(3): 748–757.
- [24] 徐晓昀. 黄瓜嫁接苗对低温胁迫的生理响应及分子机制研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [25] Shao R X, Jia S J, Tang Y L, et al. Soil water deficit suppresses development of maize ear by altering metabolism and photosynthesis [J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 192: 104651.
- [26] 王 建, 赵 单. 丛枝菌根真菌与绿色木霉对干旱胁迫下苹果树苗生长、生理特征及水分利用的影响 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 164–170.
- [27] 曾继娟, 李瑞芳, 王国义, 等. 水分胁迫对 4 种灌木幼苗生长与耗水特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 117–122.
- [28] 李 跃, 万里强, 李向林, 等. 水分胁迫对不同紫花苜蓿品种幼苗生长特性和根系 ABA 含量的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(10): 75–83.
- [29] 苏文桢, 李根新, 朱强龙, 等. 邻苯二甲酸对辣椒种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 北方园艺, 2021(24): 8–15.