

黄腐酸对干旱胁迫下番茄生长及果实产量与品质的影响

任巧萍¹, 朱伟龙², 宋红霞²

(1. 晋中市现代农业产业发展中心 山西晋中 030600; 2. 山西农业大学园艺学院 山西太谷 030801)

摘要:为探究黄腐酸(FA)对干旱胁迫下番茄生长及果实产量和品质的影响,以普罗旺斯番茄为材料,采用日光温室种植方式,设置正常灌溉(CK)、干旱+0 mg·L⁻¹FA(F0)、干旱+400 mg·L⁻¹FA(F4)、干旱+800 mg·L⁻¹FA(F8)4个处理,测定其形态指标、抗旱生理指标以及果实性状、产量和品质。结果表明,干旱胁迫下番茄生长、抗氧化酶活性以及果实产量和品质均受到严重抑制,而喷施 400 mg·L⁻¹FA 后,其株高、茎粗较 F0 分别显著增加 13.56%和 30.25%,超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性分别显著提升 15.68%、42.22%和 56.47%,丙二醛含量显著降低 32.61%;且果实产量、番茄红素含量、维生素 C 含量和可溶性蛋白含量较 F0 分别显著提升 44.55%、86.97%、28.07%和 19.80%,糖酸比显著升高 128.22%,矿质元素 Ca、Mg、K、Fe、Zn 含量较 F0 分别显著提高 25.02%、18.57%、19.34%、30.34%和 34.65%。综上,本试验条件下,喷施 400 mg·L⁻¹FA 能促进干旱及半干旱条件下番茄生长,并提高果实产量,改善品质。研究结果为缺水地区节约灌溉用水及设施种植水果型番茄提高产量与改善品质提供了有效策略。

关键词:番茄;干旱;黄腐酸;生长;产量;品质

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)08-171-07

Effects of fulvic acid on tomato growth, fruit yield and quality under drought stress

REN Qiaoping¹, ZHU Weilong², SONG Hongxia²

(1. Jinzhong Modern Agricultural Industry Development Center, Jinzhong 030600, Shanxi, China; 2. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

Abstract: To investigate the effects of fulvic acid (FA) on tomato growth, fruit yield, and quality under drought stress, Provence tomato plants were cultivated in a solar greenhouse. Four treatments were established: Normal irrigation (CK), drought+0 mg·L⁻¹FA (F0), drought+400 mg·L⁻¹FA (F4), and drought+800 mg·L⁻¹FA (F8). Morphological indices, drought-resistant physiological parameters, fruit characteristics, yield, and quality were assessed. The results demonstrated that drought stress severely inhibited tomato growth, antioxidant enzyme activity, fruit yield, and quality. Foliar application of 400 mg·L⁻¹FA significantly increased plant height and stem diameter by 13.56% and 30.25% versus F0, respectively. Superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) activity increased by 15.68%, 42.22%, and 56.47%, while MDA content decreased by 32.61%. Fruit yield and lycopene, vitamin C, soluble protein content rose by 44.55%, 86.97%, 28.07%, and 19.80% versus F0, respectively, with sugar-acid ratio increasing significantly 128.22%. Mineral Ca, Mg, K, Fe, Zn content increased by 25.02%, 18.57%, 19.34%, 30.34%, and 34.65% versus F0, respectively. In summary, under the experimental conditions, foliar application of 400 mg·L⁻¹FA enhanced tomato growth and increased fruit yield while improving quality parameters under both arid and semi-arid conditions. These findings provide an effective approach for reducing irrigation water consumption and enhancing yield and quality of facility-grown fruit-type tomato in water-scarce region.

Key words: Tomato; Drought; Fulvic acid; Growth; Yield; Quality

收稿日期:2025-02-15;修回日期:2025-06-12

基金项目:山西省现代农业产业技术体系建设专项资金项目(2024CYJSTX08)

作者简介:任巧萍,女,高级农艺师,主要从事蔬菜栽培技术研究与管理。E-mail:1796398360@qq.com

通信作者:宋红霞,女,副教授,主要研究方向为蔬菜栽培、逆境生理和功能物质挖掘。E-mail:13834836584@163.com

随着全球天气异常变化以及生态平衡遭到破坏,目前世界各地水资源贫乏且降雨时空分布不均、水资源短缺已成为人类面临的严重问题之一,且干旱频率及强度持续增加,严重制约农业生产,影响农作物产量与品质^[1-3]。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)属茄科番茄属,是一种重要的设施经济作物,在全球各地广泛种植^[4]。番茄果实营养丰富,富含多种维生素、矿质养分及抗氧化剂等,在人类饮食中发挥着重要作用^[5]。目前番茄已成为研究肉质果实成熟的重要模式植物^[6]。研究表明,干旱胁迫可改变番茄叶片的生理生化特性,对光合系统造成损害,抑制植株生长,降低干物质积累,从而影响开花及坐果^[7-8]。Cui等^[9]和Ali等^[10]研究表明,干旱胁迫下番茄植株的生长发育会受到严重影响,致使番茄大面积减产,且土壤水分是果实品质形成的关键因素之一,与产量的形成密切相关,在生产过程中如果水分供应不足会对产量和果实品质产生不良影响。但给予作物适度的干旱也可以提高果实品质,增加果实风味^[11]。研究表明,干旱处理下植物果实中的总糖、维生素C、有机酸等可溶物含量显著提高,而充分灌溉虽会提高果实产量,但果实内的可溶性糖、有机酸、可溶性固形物及干物质含量反而下降^[12-13]。因此,在水资源匮乏地区,提高番茄自身的耐旱能力,是干旱条件下维持番茄生产、提高产量并改善品质的有效措施之一。

腐植酸是动植物遗骸经过微生物分解和转化以及地球物化反应等一系列过程积累起来的一类有机物质^[14]。黄腐酸(fulvic acid, FA)是腐植酸中具有亲水性、分子质量较小的有机化合物,属于水溶性腐植酸,对植株生长起促进作用^[15]。前人研究表明,黄腐酸能增加植株干物质积累量,提高光合色素含量,增强植株对逆境的抵抗能力,且在干旱胁迫下能提高植株的抗氧化酶活性,增加脯氨酸含量,降低丙二醛含量,促进新陈代谢,增强植物的抗旱能力进而提高作物产量、改善品质^[16-17]。

设施栽培水果型番茄尤其是越冬茬为了获得较佳口感,通常会延长蹲苗时长,往往对番茄生长和果实发育产生不利影响。目前,FA对番茄结果期遭遇干旱胁迫时的作用尚不清楚。因此,笔者以普罗旺斯番茄为材料,通过分析干旱胁迫下黄腐酸对番茄植株形态、生理指标及果实产量和品质的影响,以期FA提升设施种植水果型番茄品质和产

量,同时对干旱地区番茄种植节约用水提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

田间试验于2023年10月至2024年5月在山西省晋中市榆次区东阳镇遼村(晋中市遼宝农业开发专业合作社)日光温室(长度50 m,跨度12 m)中进行。品质和生理等指标在山西农业大学实验室测定。

供试品种为普罗旺斯番茄,购买于广东金作农业科技有限公司。采用54 cm×28 cm×7 cm的15孔穴盘育苗,育苗基质pH 5.5~7.0,腐殖酸含量(w,后同)≥5.0%,有机质含量≥25.0%,购买于寿光市沃德农业科技有限公司。FA为棕褐色粉末,购自上海易恩化学技术有限公司,使用蒸馏水溶解配制。

1.2 试验设计

试验采用完全随机设计,设置4个处理:CK(正常浇水)、F0(干旱+喷施0 mg·L⁻¹FA)、F4(干旱+喷施400 mg·L⁻¹FA)、F8(干旱+喷施800 mg·L⁻¹FA)。于2024年2月25日浇水1次,然后自然干旱,于2月29日16:00叶面喷施FA,喷至叶片正反面滴水为宜,连续喷施3 d,3次重复,每个重复15株。单行种植,株距20 cm,行距80 cm。其他管理按照当地常规方式进行。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标测定 于结果初期采用直尺和游标卡尺测定株高、茎粗;随机挑选10株计算叶片数;叶面积采用辛朗等^[18]的方法计算;比叶质量=叶质量/叶面积。

1.3.2 生理指标测定 在第2~3穗果实成熟时,采集从生长点向下的4~5片叶测定生理指标。采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量;采用磺基水杨酸法测定脯氨酸含量;采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;采用UV-2600i紫外分光光度计法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[18]。

1.3.3 品质与产量指标测定 采收第2穗成熟番茄果实进行品质测定。测定果实横径、纵径,计算果形指数;记录每株结果数、单穗果数,并测量单果质量,折算产量;采用石油醚浸提法测定番茄红素含量,参考张连富等^[19]的方法并修改;采用钼蓝比色法测定维生素C含量;采用考马斯亮蓝G-250法测

定可溶性蛋白含量;使用手持式折光仪测定可溶性固形物含量;采用蒽酮硫酸法测定可溶性糖含量;采用酸碱滴定法测定可滴定酸含量;采用盐酸-甲醇提取法测定类黄酮相对含量;采用硬度计测定果实硬度,每个处理3次重复^[20-21]。

1.3.4 营养元素含量测定 采用 AA-6200 原子吸收分光光度计测定 Ca、Mg、Fe、K、Zn 元素含量^[22]。

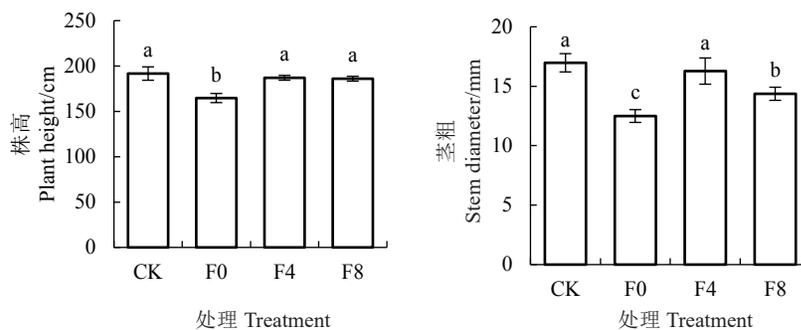
1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 处理数据,采用 SPSS 20.0 软件对数据进行差异显著性分析,采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件作图。

2 结果与分析

2.1 FA 对干旱胁迫下番茄植株形态的影响

当作物受到干旱胁迫时,外部形态会受到严重影响,导致植株生长缓慢,甚至死亡。由图 1 可知,番茄遭遇干旱胁迫后株高、茎粗分别显著下降 14.09%和 26.37%。喷施 FA 缓解了干旱胁迫对植株生长的抑制作用,其中 400 mg·L⁻¹FA 效果最佳,株高、茎粗较 CK 仅分别下降 2.43%和 4.10%,较 F0 显著增加 13.56%和 30.25%。F8 处理的株高与 CK 相比无显著变化,但茎粗显著减小。



注:不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

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

图 1 FA 对干旱胁迫下番茄株高和茎粗的影响

Fig. 1 Effects of FA on tomato plant height and stem diameter under drought stress

叶片是进行光合作用的主要场所,其大小和厚度与产量相关。由图 2 可知,干旱胁迫显著降低了番茄叶面积、比叶质量及叶片数;而外源喷施

400 mg·L⁻¹FA 处理的叶面积、比叶质量及叶片数较 F0 分别显著提升 9.98%、68.28%及 25.49%;F8 处理的各指标虽也有所提升,但与 F0 相比差异不显著。

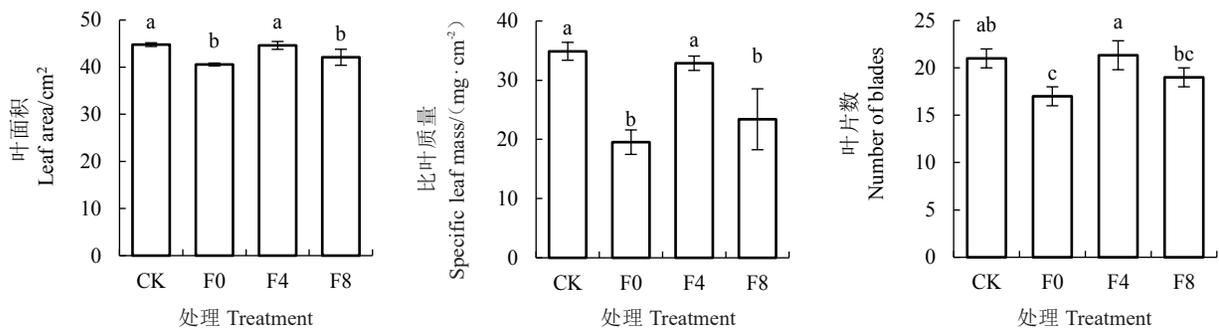


图 2 FA 对干旱胁迫下番茄叶片形态的影响

Fig. 2 Effects of FA on tomato leaf morphology under drought stress

2.2 FA 对干旱胁迫下番茄叶片抗氧化酶活性的影响

如图 3 所示,干旱胁迫影响番茄抗氧化酶活性。其中,F0 处理的 SOD 活性较 CK 提高 16.39%,但 POD 和 CAT 活性分别下降 35.43%、

18.27%。外源喷施 FA 后,F4 和 F8 处理的 SOD、POD、CAT 活性分别较 F0 处理提高 15.68%、42.22%、56.47%和 21.58%、25.86%、41.18%;且 SOD 与 CAT 活性都高于 CK,POD 活性虽与 CK 相比呈

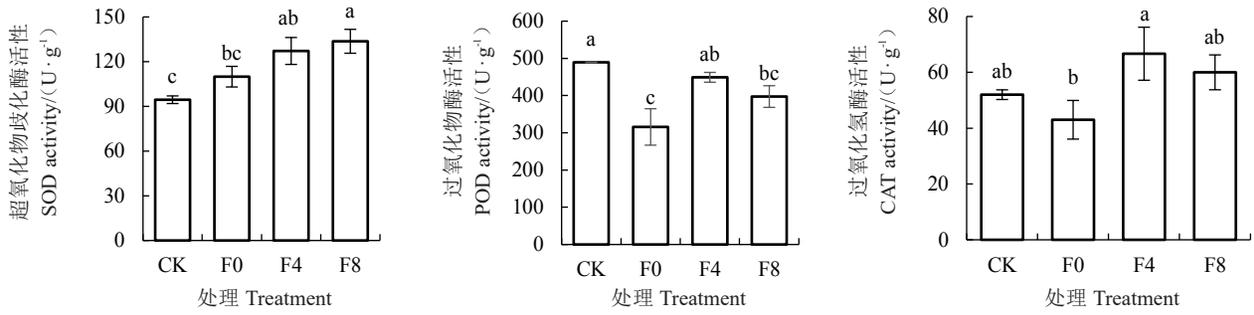


图3 FA对干旱胁迫下番茄叶片SOD、POD、CAT活性的影响

Fig. 3 Effects of FA on SOD, POD and CAT activity in tomato leaves under drought stress

下降趋势,但F4处理与CK差异不显著。

2.3 FA对干旱胁迫下番茄叶片丙二醛及渗透调节物质含量的影响

丙二醛和脯氨酸含量可作为植物抗逆性的关键指标之一。如图4所示,干旱胁迫下F0处理的

MDA和脯氨酸含量较CK分别显著提高52.66%和67.10%。但外源喷施FA后,F4和F8处理抑制了MDA和脯氨酸含量的上升,与F0相比,分别显著降低32.61%、22.40%和33.50%、33.91%,而与CK相比均无显著差异。

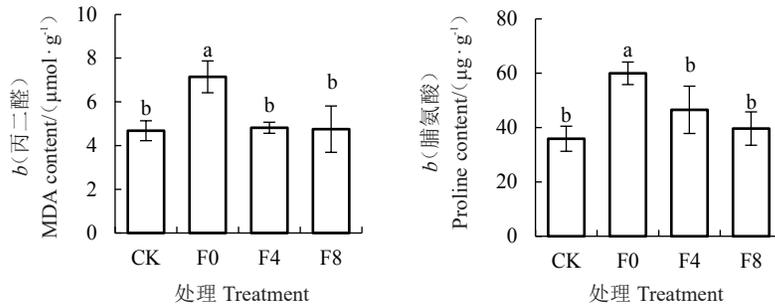


图4 FA对干旱胁迫下番茄叶片丙二醛和脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effects of FA on proline and malondialdehyde content in tomato leaves under drought stress

2.4 FA对干旱胁迫下番茄果实产量与品质的影响

由表1可知,干旱胁迫下番茄果实纵径、横径及产量显著降低。与CK相比,F0处理的果实纵径、横径、单果质量及产量分别显著降低18.32%、10.83%、30.06%和45.69%。而喷施FA后均得到不同程度的缓解,其中F4处理较F0相比,分别提高16.61%、11.06%、43.64%和44.55%;F8处理虽与F0相比也有所提升,但低于F4处理。由番茄果形指数可知,与CK相比,干旱胁迫下的番茄果实呈现出

小而扁圆形,且顶部果脐凹陷;而喷施FA后,促进了番茄果实生长,果实色泽红润,呈近圆形。

由图5可知,干旱胁迫下,与CK相比,番茄红素与维生素C含量下降,但可溶性蛋白含量上升。喷施FA后,与F0相比,F4和F8处理的番茄红素和维生素C含量分别提高86.97%、6.70%和28.07%、8.93%,且F4处理的番茄红素含量较CK提高40.51%。

由图6可知,干旱胁迫导致番茄果实风味品质

表1 FA对干旱胁迫下番茄果实性状及产量的影响

Table 1 Effects of FA on tomato fruit traits and yield under drought stress

处理 Treatment	果实横径 Fruit transverse diameter/mm	果实纵径 Fruit longitudinal diameter/mm	果形指数 Fruit shape index	单果质量 Single fruit mass/g	产量 Yield/(kg·667 m ²)
CK	81.43±3.41 a	67.80±2.21 a	0.83±0.06 ab	245.28±31.03 a	12 526±1384 a
F0	72.61±5.79 bc	55.38±1.16 c	0.76±0.04 b	171.56±25.35 b	6803±862 b
F4	80.64±5.05 ab	64.58±2.28 ab	0.80±0.06 ab	246.43±20.89 a	9834±906 a
F8	68.87±0.87 c	63.17±2.56 b	0.91±0.03 a	233.31±6.79 a	9708±276 a

注:同列不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

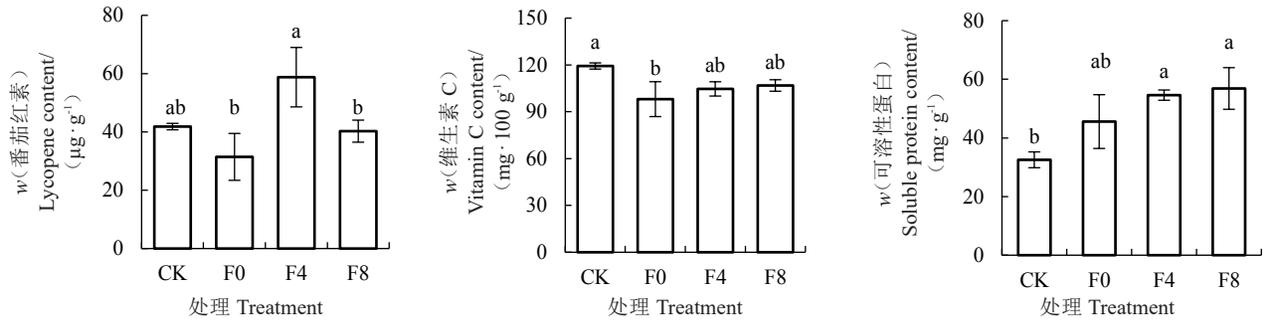


图5 FA对干旱胁迫下番茄营养品质的影响

Fig. 5 Effects of FA on nutrient quality of tomato under drought stress

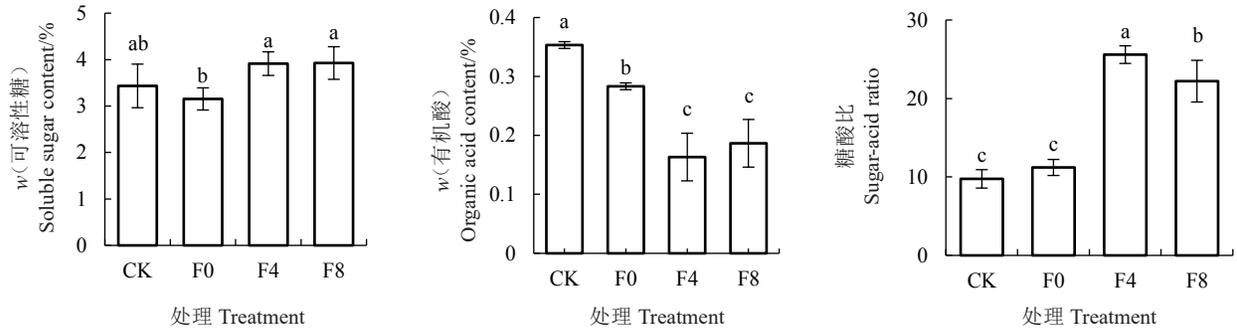


图6 FA对干旱胁迫下番茄风味品质的影响

Fig. 6 Effects of FA on tomato flavor quality under drought stress

下降。与CK相比,F0处理的可溶性糖和有机酸含量分别降低0.28和0.07个百分点,而糖酸比增加14.86%。喷施FA后,F4和F8处理的可溶性糖含量较F0处理分别显著提高0.76和0.78个百分点,糖酸比较F0分别显著提高128.22%和98.09%,有机酸含量分别显著下降0.12和0.09百分点;且与CK相比,有机酸含量也分别显著降低0.19和0.16百

分点,糖酸比分别显著提高162.28%和127.64%。

2.5 FA对干旱胁迫下番茄矿物质含量的影响

由表2可知,与CK相比,F0处理的Ca、Mg、K、Fe、Zn含量分别降低10.48%、13.10%、12.60%、22.71%和9.54%。外源喷施FA后,Ca、Mg、K、Fe、Zn含量与F0相比均有不同程度的提高。其中,以 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ FA提升效果最显著,较F0分别显著提

表2 FA对干旱胁迫下番茄矿物质含量的影响

Table 2 Effects of FA on mineral content of tomato under drought stress

处理 Treatment	w(Ca)	w(Mg)	w(K)	w(Fe)	w(Zn)
CK	1.24±0.02 ab	11.22±0.30 b	11.75±0.28 a	35.32±1.36 ab	9.54±0.77 b
F0	1.11±0.03 b	9.75±0.23 c	10.27±0.22 b	27.30±1.80 b	8.63±0.44 c
F4	1.38±0.12 a	11.63±0.14 a	12.23±0.09 a	37.77±1.27 a	11.52±0.70 a
F8	1.34±0.09 a	11.36±0.27 ab	11.87±0.30 a	32.94±0.47 ab	9.39±0.17 b

高24.32%、19.28%、9.35%、38.35%和33.49%。

3 讨论与结论

土壤水分是作物赖以生存的必需条件之一,水分不足会抑制作物生长,导致植株瘦弱、株高和茎粗下降、叶片呈现萎蔫状态,且叶片特征发生变化^[23]。在本研究中,干旱胁迫下的植株生长发育受阻,导致株高、茎粗显著下降,且叶面积、比叶质量和叶片数也显著低于正常植株,与Li等^[24]的研究结

果一致。研究表明,FA作为一种生长调节剂,能提高作物抗逆性^[25]。在本研究中,干旱胁迫下,外源喷施FA的番茄株高、茎粗均得到不同程度增加,且 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ FA处理的叶面积、比叶质量和叶片数显著增加,表明FA能提高番茄耐旱性,缓解干旱胁迫对其生长发育的限制,从而促进植株生长,与孔繁荣等^[26]的研究结果一致。

当植物处于逆境胁迫时,抗氧化酶作为植物重要的防御系统,其活性会显著升高,从而抵御逆境

胁迫^[27]。在本研究中,干旱胁迫下番茄叶片 POD、CAT 活性下降;而外源喷施 FA 后均表现出上升趋势,并以 400 mg·L⁻¹ FA 效果最佳。由此表明,外源喷施一定浓度的 FA 能提高干旱胁迫下植株叶片抗氧化酶活性,从而清除过量的 ROS,维持细胞内环境的稳定,缓解干旱胁迫造成的氧化损伤,提高番茄耐旱性^[28]。MDA 含量是反映植物在逆境中细胞膜脂过氧化强弱的重要指标之一^[29]。在本研究中,干旱胁迫下番茄叶片 MDA 含量显著提高,而外源喷施 FA 后,叶片 MDA 含量均显著降低,与 CK 无显著差异,与沈伟等^[30]的研究结果一致。脯氨酸作为渗透调节物质,能促进植物细胞吸水,缓解逆境造成的损伤,维持植物正常生长^[31]。在本研究中,干旱胁迫使脯氨酸含量比 CK 显著增加,而外源喷施 FA 处理的番茄叶片脯氨酸含量比 CK 无显著提高,推测可能是由于 FA 能提高植株耐旱性,从而无需积累过多的脯氨酸抵御干旱胁迫,与 Ibrahim 等^[32]的研究结果一致。

叶片是植物体进行光合作用的主要场所,其大小和产量呈正相关^[33]。本研究表明,干旱胁迫下番茄叶片生长受阻,植株矮小、瘦弱,以致于番茄果实性状受到严重影响,导致果实产量显著降低。然而,外源喷施 FA 有效促进了干旱胁迫下番茄植株及叶片的生长,使其叶片在干旱胁迫下能保持较高的光合效率,并促进同化物积累以及向果实中运输,产量显著提高。果实品质是决定市场竞争力的重要因素^[34]。在本研究中,干旱胁迫下番茄果实营养品质、风味品质及矿物质含量均有不同程度的下降,这与黄倩^[34]的研究结果相反,可能是由于本研究中干旱胁迫时间较长,且处于重度胁迫状态(土壤含水量为 30%~35%),从而导致品质下降。然而,外源喷施 FA 后,番茄果实营养品质、风味品质及矿物质含量均有不同程度的提高,甚至高于正常处理。因此,适当的干旱胁迫能提高果实品质,但受胁迫时间和程度的影响,而 FA 能提高植物耐旱性,从而减少干旱胁迫对果实产生的负面影响,致使干旱胁迫下果实品质得到提升^[35]。

综上所述,在本试验条件下,外源喷施 400 mg·L⁻¹ FA 能有效缓解干旱胁迫对番茄植株生长发育的抑制效果,并促进叶片生长;还可提高抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,维持细胞内渗透平衡,降低细胞膜脂过氧化程度,减轻细胞膜损伤,从而增强番茄植株的耐旱性,达到干旱胁迫下提高产量与改善品质的目的。研究结果为干旱地区番茄优质生产和节

约灌溉用水提供了理论参考依据。

参考文献

- [1] EI-ZOHRI M, AL-WADAANI N A, BAFEEL S O. Foliar sprayed green zinc oxide nanoparticles mitigate drought-induced oxidative stress in tomato[J]. *Plants*, 2021, 10(11):2400.
- [2] YANG L, BU S J, ZHAO S X, et al. Transcriptome and physiological analysis of increase in drought stress tolerance by melatonin in tomato[J]. *PLoS One*, 2022, 17(5):e0267594.
- [3] YANG X Y, LU M Q, WANG Y F, et al. Response mechanism of plants to drought stress[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(3):50.
- [4] 汪洋,胡慧,刘晓娇,等.宁夏普罗旺斯番茄品质调查分析[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(3):119-124.
- [5] KHAN M A, IQBAL M, AKRAM M, et al. Recent advances in molecular tool development for drought tolerance breeding in cereal crops: A review[J]. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2013, 100(3):325-334.
- [6] XU J, WAN W L, ZHU X L, et al. Effect of regulated deficit irrigation on the growth, yield, and irrigation water productivity of processing tomatoes under drip irrigation and mulching[J]. *Agronomy*, 2023, 13(12):2862.
- [7] SIVAKUMAR R, SRIVIDHYA S. Impact of drought on flowering, yield and quality parameters in diverse genotypes of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. *Advances in Horticultural Science*, 2016, 30(1):3-11.
- [8] PERVEZ M A, AYUB C M, KHAN H A, et al. Effect of drought stress on growth, yield and seed quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 46(3):174-178.
- [9] CUI J T, SHAO G C, LU J, et al. Yield, quality and drought sensitivity of tomato to water deficit during different growth stages[J]. *Scientia Agricola*, 2020, 77(2):e20180390.
- [10] ALI M M, YOUSEF A F, LI B Q, et al. Effect of environmental factors on growth and development of fruits[J]. *Tropical Plant Biology*, 2021, 14(3):226-238.
- [11] KLUNKLIN W, SAVAGE G. Effect on quality characteristics of tomatoes grown under well-watered and drought stress conditions[J]. *Foods*, 2017, 6(8):56.
- [12] 廉晓娟,王艳,梁新书,等.控水灌溉对口感型番茄产量营养品质及感官评价的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(11):32-34.
- [13] 刘帅.干旱胁迫对苹果树生长及果实品质的影响[J]. *特种经济动植物*, 2024, 27(1):47-49.
- [14] 许新桥,刘俊祥.腐植酸的作用机制及其在林业上的应用[J]. *世界林业研究*, 2013, 26(1):48-52.
- [15] 刘彩娟,吕春雨,艾希珍,等.黄腐酸对于干旱胁迫下黄瓜光合特性及产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5):1300-1310.
- [16] 李英浩,刘景辉,朱珊珊,等.干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶片光合性能的调控效应[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(11):1385-1391.
- [17] EL-SHABRAWI H M, BAKRY B A, AHMED M A, et al. Humic and oxalic acid stimulates grain yield and induces accumulation of plastidial carbohydrate metabolism enzymes in wheat

- grown under sandy soil conditions[J]. *Agricultural Sciences*, 2015, 6(1):175-185.
- [18] 王超,张宗翊,赵宝龙,等.不同叶面肥对温室番茄生长和果实品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(12):126-132.
- [19] 张连富,丁霄霖.番茄红素简便测定方法的建立[J]. *食品与发酵工业*, 2001, 27(3):51-55.
- [20] 黄滕瑶,刘明池,陈婕,等.黄腐酸钾对水培韭菜生长和品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(4):121-129.
- [21] 曾成城,秦芳,李琴,等.外源施硅和水杨酸对盐胁迫下甜瓜幼苗生理特性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(5):125-131.
- [22] 鲁金春子,陈敬东,余忆,等.甘蓝型油菜苗期地上部7种矿质元素含量的全基因组关联分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(12):2042-2057.
- [23] 唐艳领,马凯,米国全,等.葡萄秸秆复合有机肥对设施黄瓜产量、品质及土壤特性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(5):108-115.
- [24] LI B, FENG Y, ZONG Y, et al. Elevated CO₂-induced changes in photosynthesis, antioxidant enzymes and signal transduction enzyme of soybean under drought stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 154:105-114.
- [25] 周海涛,张艳阳,赵孟圆,等.S-诱抗素和黄腐酸对干旱胁迫下皮燕麦抗旱生理特性的影响[J]. *农学学报*, 2020, 10(4):7-13.
- [26] 孔繁荣,李海平,郭文忠,等.干旱低温复合胁迫下黄腐酸钾对西葫芦幼苗生长和生理生化特性的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(1):74-80.
- [27] 毛永成.干旱胁迫对3种地被月季生物量及抗氧化的影响[J]. *特产研究*, 2023, 45(2):6-10.
- [28] 王宏信,袁浪兴,张晓凤,等.干旱胁迫下三种野牡丹科植物的生理响应[J]. *热带林业*, 2023, 51(4):11-17.
- [29] 徐文清,李少楠,宋思言,等.干旱胁迫对葡萄生理特性和叶片胁迫相关基因表达的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2024, 47(6):1049-1057.
- [30] 沈伟,岑湘涛,李艳芳,等.不同外源物质对高温胁迫下三七幼苗生理指标的影响[J]. *中药材*, 2022, 45(11):2566-2570.
- [31] 孙海燕,孔德庸,胡慧影,等.腐植酸浸种对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(13):5385-5397.
- [32] IBRAHIM M F M, ABD ELBAR O H, FARAG R, et al. Melatonin counteracts drought induced oxidative damage and stimulates growth, productivity and fruit quality properties of tomato plants[J]. *Plants*, 2020, 9(10):1276.
- [33] 李雨含.外源褪黑素对低温胁迫下大蒜生长、产量及生理特性的影响[D].山东泰安:山东农业大学, 2024.
- [34] 黄倩.外源褪黑素对干旱胁迫下番茄幼苗生长和果实产量及品质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2023.
- [35] 孔繁荣.干旱低温下黄腐酸钾对西葫芦生长发育的影响[D].山西太谷:山西农业大学, 2023.