

沈 昀,马 甜,王梦雨. 水杨酸对于干旱胁迫下凤仙花生长、生理特性及相关基因表达的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):143-149.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.023

水杨酸对于干旱胁迫下凤仙花生长、生理特性 及相关基因表达的影响

沈 昀,马 甜,王梦雨

(江苏农牧科技职业学院,江苏泰州 225300)

摘要:为探讨凤仙花对于干旱胁迫的应答机制及水杨酸(SA)对凤仙花抗旱性的影响,以凤仙花幼苗为试材,研究外源 SA 不同浓度水平(0、1、2 mmol/L,分别记为 SA0、SA1、SA2)对不同基质含水率(95%、75%、55%,分别记为 WW95、WW75、WW55)下凤仙花幼苗生长发育、叶绿素含量、抗氧化酶活性、渗透调节物质及相关合成基因的影响。结果表明,随着干旱程度加剧,凤仙花植株地上部、根系生长参数及光合色素含量随之受到显著影响,在此基础上外源施用 SA 减轻了干旱胁迫带来的不利影响,并增加了植株水分利用及水势,且 SA2 处理整体优于 SA1 处理。与 WW95 处理相比,干旱胁迫处理(WW75、WW55)提高了植株丙二醛(MDA)、 H_2O_2 含量及 CAT、SOD、APX 活性,而 SA 施用处理(SA1、SA2)条件下脯氨酸含量呈相反趋势。此外,轻度和中度干旱(75%、55%)下,与 SA0 处理相比,SA2 处理的 *P5CS* 基因相对表达量分别显著提高 91.51%、4.58%,*P5CR* 基因则分别显著上调 47.65%、54.87%。综上,干旱胁迫下外源施用 2 mmol/L 水杨酸可有效改善凤仙花的生长发育,保护光合色素,提高抗氧化酶活性,上调 *P5CS*、*P5CR* 基因表达及促进脯氨酸合成,从而降低干旱胁迫导致的脂质过氧化和氧化损伤。

关键词:干旱胁迫;水杨酸;氧化酶;脯氨酸;基因表达;*P5CS* 基因;*P5CR* 基因

中图分类号:S681.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)17-0143-06

随着人类活动导致气候持续变暖,环境干旱性问题已成为全球植物生存及生产效率面临的主要问题^[1-2]。干旱是典型的非生物胁迫,会影响作物生长、养分关系、光合作用及同化物分配。活性氧(ROS)积累与酶促/非酶促抗氧化防御系统间不平衡导致氧化应激是干旱胁迫的主要机制^[3],直接特征表现为蒸腾速率、相对含水量(RWC)及叶片水势(Ψ_w)降低^[4]。水分胁迫会损害光合作用系统及叶绿体和其他细胞区室中的电子传递,导致 ROS 的积累,包括超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)、羟基自由基($\cdot OH$)、过氧化氢(H_2O_2)和单线态氧(1O_2)^[5]。ROS 可与蛋白质、膜脂及其他细胞成分发生反应,导致氧化损伤^[4,6]。膜脂过氧化的产物之一是丙二醛(MDA),是表征 ROS 形成和膜损伤的重要指示物^[7]。脯氨酸(Pro)是常见的细胞溶质之一,参与调控细胞膜的稳定性,可缓冲压力下的细胞氧化还原电位、金属螯合和信号传导,充当碳和氮的汇,从

而在逆境下维持植物生长^[8]。此外,植物拥有各种酶促和非酶促抗氧化剂以缓解过量 ROS 累积对细胞带来的不利影响。超氧化物歧化酶(SOD)是消除超氧自由基的初始酶,其可催化超氧阴离子歧化为 H_2O_2 ,随后 H_2O_2 被过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)转化为 H_2O 和 O_2 ,从而有效缓解环境胁迫^[9]。

水杨酸(SA)是植物体内含量最多且作用最广的激素之一,参与许多植物生理和发育代谢过程,包括植物病原体防御反应和对非生物胁迫的调控^[4],因此 SA 通常用作外源植物激素/植物生长调节剂^[10]。一些证据证明,即使在低浓度下,SA 对增强抗氧化系统同样具备高效的功能^[11]。非生物胁迫下 SA 可刺激植物 H_2O_2 合成,进而诱导基因相关抗氧化酶的表达^[12],提高植物中 SOD、过氧化物酶(POD)和 CAT 等抗氧化酶的活性,最终上调植物相关防御基因表达以缓解应激反应带来的损伤。同时,SA 的应用可降低膜脂过氧化产物 MDA 的积累和叶膜通透性^[13]。迄今为止,多项研究报告了非生物胁迫下外源 SA 应用对植物调节作用的影响,发现其效果取决于应用方法(如喷叶、浸种、茎注、根施)、时间、外源和内源 SA 水平、胁迫因子、植物种

收稿日期:2022-03-17

基金项目:江苏农牧科技职业学院科研项目(编号:NSF2021RK04)。

作者简介:沈 昀(1986—),女,江苏泰州人,硕士,讲师,主要从事园林植物应用研究。E-mail:sy_jsmy@163.com。

类以及发育阶段^[10,14]。凤仙花 (*Impatiens walleriana*) 是广泛分布于亚洲与非洲的重要园艺植物,因叶子多肉、花色多样及次生代谢旺盛,因此具有较好的观赏及药用价值,然而在种植、运输及应用过程中易受到干旱和高温等影响,且凤仙花对干旱反应极为敏感,当水分供应不足时植株枯萎迅速^[15]。目前,关于干旱胁迫对凤仙花生理及生化反应的研究较少,对应用水杨酸的耐旱机制亦知之甚少。基于此,本研究探索了水杨酸不同用量对不同干旱程度下凤仙花生理代谢及相关基因表达的影响。研究结果有助于为水杨酸应用于干旱胁迫提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试地点与供试材料

试验于 2021 年 6—8 月在江苏农牧科技职业学院温室中进行。空气相对湿度为 75%,温度为 18~28℃。凤仙花植物来自江苏省沭阳县九洲苗木场。水杨酸[SA, 2-(HO)C₆H₄CO₂H]购自 Sigma-Aldrich 化工试剂公司。供试培养基质为泥炭、珍珠岩、蛭石按体积比 2:1:1 复配而成。

1.2 试验试剂与仪器

(1) 仪器: AKF-IS2020V 型水分仪, 购自上海禾工科学仪器有限公司; UV-1800 紫外分光光度计, 购自上海美谱达仪器有限公司; TP-PW-II 自动植物水势仪(数显式), 购自浙江托普云农科技股份有限公司; Nanodrop 2000 分光光度计, 购自美国赛默飞世尔科技公司。(2) 试剂: A003-3-1 丙二醛试剂盒、A107-1-1 脯氨酸试剂盒、A064-1-1 过氧化氢试剂盒、A001-4-1 超氧化物歧化酶试剂盒、A123-1-1 过氧化氢酶试剂盒、抗坏血酸过氧化物酶(APX)试剂盒, 均购自南京建成生物工程研究所; OMEGA BS8231450 植物 DNA 提取试剂盒, 购自天根生化科技(北京)有限公司; PrimerScript RT 试剂盒, 购自日本 TaKaRa 生物试剂公司。

1.3 试验设计

试验采用完全随机设计, 设置 3 个水杨酸处理(SA): 0、1、2 mmol/L, 分别记为 SA0、SA1、SA2, 3 个基质含水率处理(WW): 95%、75%、55%, 分别对应为水分充沛、轻度干旱和中度干旱, 分别记为 WW95、WW75、WW55, 共 9 个组合处理。各处理重复 3 次。盆栽器具采用塑料圆桶, 每盆装培养基质 3 kg, 将各处理的 1 株凤仙花小植株移入桶中, 采用

配备时域反射计(TDR)的水分仪保持相应处理基质含水率。SA 处理为每周进行 10 mL 药液的叶片喷施。期间及时补充培养基质水分并记录用水量, 凤仙花培育 75 d。

1.4 样品采集及测定分析

1.4.1 凤仙花生长参数测定 凤仙花生长参数包括株高、有效叶数、叶面积、茎粗、根长、根体积及干物质。株高、有效叶数、叶面积、茎粗、根长采用数字尺测定, 鲜质量采用电子天平称量, 叶面积=长×宽×0.643 5, 根体积采用排水法测定。以上农艺性状测定完毕后将凤仙花植株 105℃ 杀青 30 min, 65℃ 烘干至恒质量, 记录干物质累积量。

1.4.2 光合色素含量及植株水分利用测定 光合色素含量测定: 选取第 6 张(从上往下数)完全展开叶测定光合色素含量, 光合色素包含叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素, 三者皆采用丙酮-乙醇混合浸提, 采用紫外分光光度计分别在 665、649、470 nm 处测定, 具体步骤参照李合生的方法^[16]。

凤仙花植株的叶片水势(Ψ_w)采用 TP-PW-II 自动植物水势仪(数显式)测定。植株水分利用效率(WUE)=DW/用水量, 式中: DW 代表干质量; 植株相对含水量(RWC)采用烘干称质量法测定, $RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100\%$, 式中: FW、DW、TW 分别为鲜质量、干质量、膨压质量。

1.4.3 植株渗透物质及氧化酶活性测定 凤仙花的丙二醛、脯氨酸、过氧化氢含量及超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶活性均采用南京建成生物工程研究所生产的相应试剂盒测定。

1.4.4 脯氨酸合成基因相对表达水平测定 采用植物 DNA 提取试剂盒对凤仙花进行基因组总 RNA 的提取。通过在 0.7% 琼脂糖凝胶上电泳并使用 Nanodrop 2000 分光光度计评估总 RNA 的浓度和质量。第 1 链 cDNA 合成参照 PrimerScript RT 试剂盒说明书进行。借助 Primer Express 3 软件设计扩增引物(表 1), 以肌动蛋白基因(*ACTIN*)为内标进行 qRT-PCR 分析。使用 SYBR Premix ExTaq II (TliRNaseH Plus; TaKaRa 生物公司, 日本)在主循环仪系统(ABI, 生物系统, 美国)上进行 qRT-PCR 分析。反应程序、反应条件及反应体系参照 Safari 等所述^[17]。实时定量试验结果采用 $2^{-\Delta\Delta C_T}$ 算法进行相对表达水平计算。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 进行数据整理, 采用 SPSS 19.0

表 1 脯氨酸合成基因的 qRT-PCR 引物序列信息

基因名	NCBI 登录号	正向引物序列(5'→3')	反向引物序列(5'→3')	熔点温度(℃)
<i>ACTIN</i>	AB181991.1	CCCAGCAATGTATGTCGCAA	CAGCAAGGTCCAAACGAAGG	58.4
<i>P5CS</i>	AY888045.1	GTGTCCGTGAAATGGCTGTT	CGAACAGATTTGGCAAGGCT	60.5
<i>P5CR</i>	AY880317.1	GATGCGGTTACTGGCTTGAG	GAAACGAACCCTTCTCGAGC	60.5

软件进行单因素方差分析(ANOVA),采用邓肯氏多重比较进行统计分析($\alpha=0.05$),采用 Origin 8.5 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花生长的影响

由表 2 可知,不同基质含水率处理(WW)在地上部生长参数(株高、有效叶数、叶面积、茎粗、地上部干质量)、根系生长参数(根长、根体积、根系干质量)的规律基本一致,即同一水杨酸浓度处理(SA)下,随着基质含水率的降低,地上部、根系生长参数随之降低。而同一基质含水率处理下,不同水杨酸浓度处理在不同生长参数指标中表现不一。特别地,在上述生长参数中,整体皆以水杨酸处理(SA1、

SA2)下的 WW95 处理生长最佳,在株高、有效叶数及根长中,最大值皆为 SA1-WW95 处理,而在叶面积、茎粗、根体积、地上部干质量、根系干质量中,峰值皆出现在 SA2-WW95 处理,而在干旱胁迫处理(WW75、WW55)中,整体而言,以水杨酸处理(SA1、SA2)的生长参数数值大于无水杨酸处理(SA0)。在株高、有效叶数及根长中,其他处理较 SA1-WW95 处理分别降低 3.38%~45.57%、5.32%~77.43% 及 10.46%~23.38%;在叶面积、茎粗、根体积、地上部干质量及根系干质量中,其他处理较 SA2-WW95 处理分别降低 35.08%~66.42%、3.35%~54.24%、12.66%~82.76%、15.45%~83.96% 及 10.42%~79.17%。

表 2 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花生长参数的影响

处理		株高 (cm)	有效叶数 (张)	叶面积 (cm ²)	茎粗 (mm)	根长 (cm)	根体积 (cm ³)	地上部干质量 (g/株)	根系干质量 (g/株)
SA	WW								
SA0	WW95	18.32±0.21a	63.19±3.78ab	9.53±1.15b	8.77±1.02b	30.85±1.02bc	22.67±1.52b	3.92±0.22b	0.83±0.09a
	WW75	12.01±1.08deg	17.64±1.99de	6.29±0.21e	5.68±0.21e	28.14±0.82bcd	6.37±0.49de	1.25±0.21e	0.29±0.02b
	WW55	10.32±0.42efg	16.52±1.12ef	4.93±0.52g	4.64±0.35f	26.67±2.14d	4.97±1.11e	0.81±0.13d	0.20±0.05e
SA1	WW95	18.96±0.81a	66.74±2.56a	9.28±0.88b	9.80±0.88ab	34.81±1.05a	25.18±2.12b	4.27±0.24b	0.86±0.09a
	WW75	13.72±0.38cd	25.75±2.62d	7.85±0.32d	7.07±0.72cde	30.22±1.11bc	7.31±2.95de	1.46±0.18e	0.26±0.12b
	WW55	10.82±0.59efg	15.06±0.95f	5.04±0.18g	5.98±0.68de	29.35±0.87bcd	5.17±0.63e	1.21±0.25e	0.24±0.08bc
SA2	WW95	16.81±0.29b	59.17±3.08b	14.68±1.56a	10.14±0.55a	31.17±0.75b	28.83±1.05a	5.05±0.29a	0.96±0.11a
	WW75	14.48±0.63c	36.52±2.11c	8.43±0.17c	7.25±0.46c	29.99±0.95bc	9.61±1.24cd	1.37±0.15c	0.29±0.04b
	WW55	12.37±0.65de	17.36±2.55ef	5.92±0.26f	5.69±0.55e	29.57±1.23bcd	5.76±0.76e	0.86±0.08d	0.21±0.03e

注:表中数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

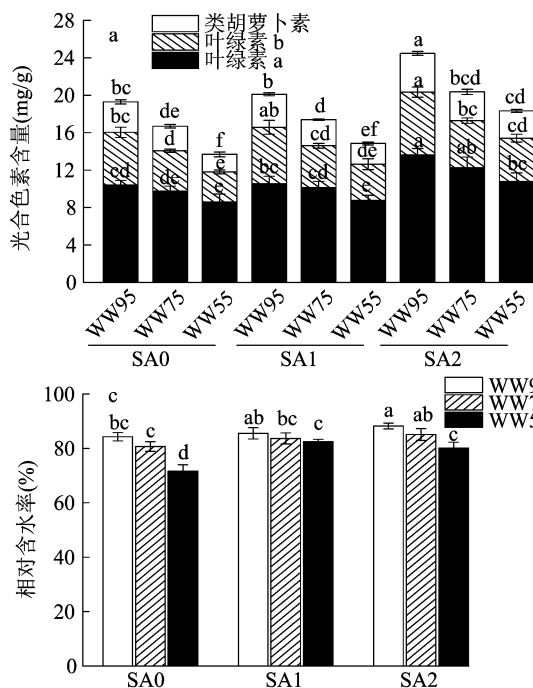
2.2 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花水分利用及光合色素含量的影响

由图 1-a 可知,在凤仙花光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)中,各色素含量呈叶绿素 a>叶绿素 b>类胡萝卜素。在 SA 与 WW 的组合处理中,当水杨酸浓度一定时,随着基质含水率降低,上述光合色素含量均呈降低趋势;相反地,当培养基质含水率不变时,随着水杨酸浓度增加,上述光合色素含量均呈升高趋势。此外,皆以 SA2-WW95 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量最高。由图 1-b 可知,在凤仙花水分利用效率中,同一水

杨酸浓度处理下,随着基质含水率降低,WUE 呈显著降低趋势,同一培养基质含水率处理下,随着水杨酸浓度增加,WUE 呈升高趋势,且相应基质含水率的 SA2 处理皆显著大于 SA0 处理。由图 1-c 可知,在凤仙花相对含水率中,当水杨酸浓度处理一定时,随着基质含水率降低,RWC 呈降低趋势,均表现为 WW95 吨 WW75 处理无显著差异,但 WW95 处理显著大于 WW55 处理,且就 WW55 处理而言,以 SA1、SA2 处理显著大于 SA0 处理。由图 1-d 可知,在凤仙花叶水势中,SA0 处理下,基质含水率处理间呈 WW95>WW75>WW55;在 SA1、SA2 处理

中,则皆呈 $WW55 < WW95 < WW75$, 且 $WW75$ 处理皆显著大于 $WW55$ 处理,就试验数据来看,以

$SA2 - WW75$ 处理的 Ψ_w 最高,除与 $SA1 - WW75$ 处理无显著差异外,皆显著大于其余处理。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同

图1 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花水分利用及光合色素含量的影响

2.3 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花渗透物质含量的影响

由图 2 - a 可知,在凤仙花丙二醛含量中,随着水杨酸浓度水平提高,MDA 含量整体呈下降趋势,且 SA 处理($SA0$ 、 $SA1$ 、 $SA2$)下,基质含水率处理均呈 $WW95 < WW75 < WW55$,所有处理中 MDA 含量以 $SA0 - WW55$ 处理最大,余下处理显著小于 $SA0 - WW55$ 处理 25.63% ~ 49.62%。由图 2 - b 可知,各处理的 H_2O_2 含量与 MDA 指标规律基本一致,即 H_2O_2 含量随着水杨酸浓度的增加而呈降低

趋势,以 $SA0 - WW55$ 处理 H_2O_2 含量最大,相较 $SA0 - WW55$ 处理而言,其他处理显著降低 8.02% ~ 22.85%。由图 2 - c 可知,水杨酸处理中,凤仙花基质含水率处理亦均呈 $WW95 < WW75 < WW55$;在 $WW55$ 、 $WW75$ 处理下,随着水杨酸处理水平提高,脯氨酸分泌量整体呈增加趋势,而在 $WW95$ 处理下,随着水杨酸施用水平提高,脯氨酸含量呈缓慢下降趋势;此外,脯氨酸含量最大值为 $SA2 - WW55$ 处理,除与 $SA1 - WW55$ 处理差异不显著外,余下处理较 $SA2 - WW55$ 处理相比显著降低 22.43% ~ 69.72%。

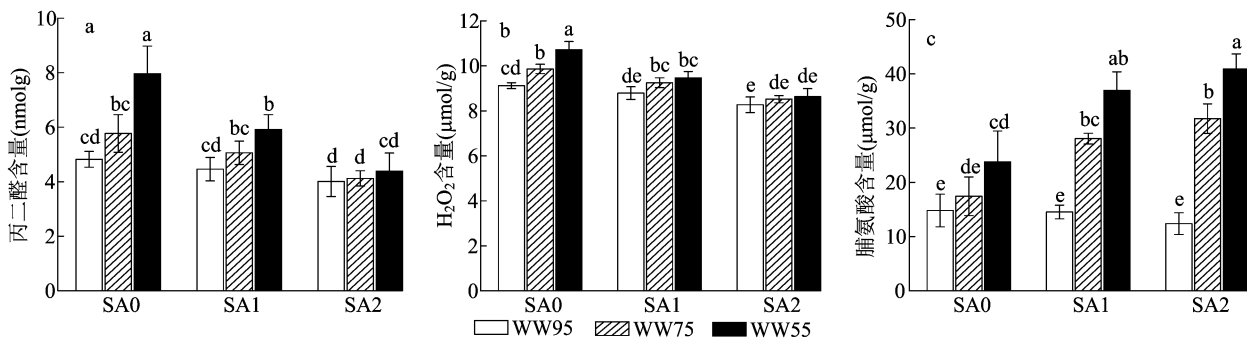


图2 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花渗透物质含量的影响

2.4 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花抗氧化酶活性的影响

由图 3 - a、图 3 - b 可知,各处理的过氧化氢

酶、超氧化物歧化酶活性规律基本一致,SA 处理不变条件下,基质含水率处理(WW)表现为 $WW95 < WW75 < WW55$,WW 处理不变条件下,SA 处理间表

现为 $SA0 > SA1 > SA2$, CAT、SOD 指标中,酶活性皆以 $SA0 - WW55$ 处理最高,余下处理较 $SA0 - WW55$ 处理在 CAT、SOD 活性中分别降低 27.10% ~ 80.50%、2.65% ~ 50.96%。由图 3 - c 可知,在抗坏血酸过氧化物酶中,同一水杨酸施用浓度条件

下,随着基质含水率降低,APX 随之显著升高;APX 以 $SA0 - WW55$ 处理活性最高, $SA1 - WW55$ 处理其次,两者无显著差异,且皆显著大于余下处理;此外,以 $SA0 - WW95$ 、 $SA1 - WW95$ 处理活性最低,两者均显著低于其他处理。

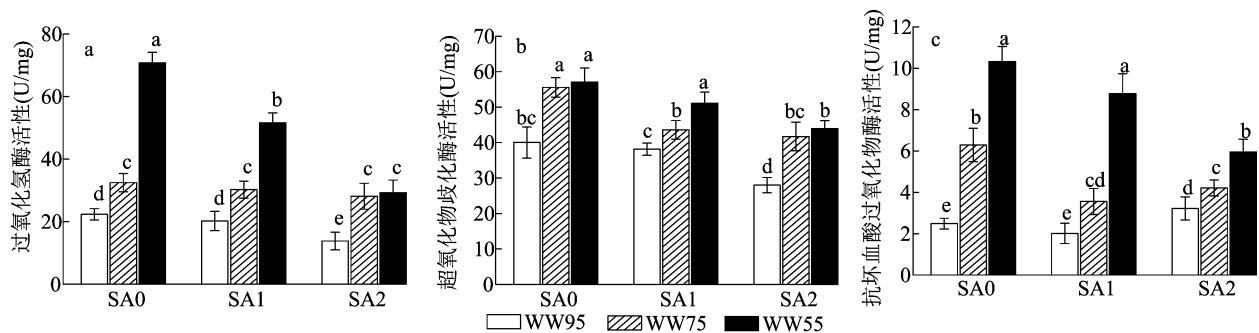


图3 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花抗氧化酶活性的影响

2.5 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花脯氨酸合成基因表达的影响

由图 4 - a 可知,在 $\Delta 1 -$ 吡咯啉 - 5 - 羧酸合成酶基因 ($P5CS$) 中, $SA0$ 、 $SA1$ 、 $SA2$ 条件下皆以 $WW55$ 处理显著高于 $WW75$ 和 $WW95$ 处理,其中在 $SA0$ 处理中 $WW95$ 、 $WW75$ 处理较 $WW55$ 处理分别显著降低 86.46%、57.14%,同理,在 $SA1$ 处理中分别显著降低 75.66%、72.65%,在 $SA2$ 处理中分别显著降低 60.76%、21.52%;整体来看,以 $SA1 -$

$WW55$ 处理相对表达水平最高,除与 $SA2 - WW55$ 处理无显著差异外皆显著大于余下处理。由图 4 - b 可知,脯氨酸还原酶基因 ($P5CR$) 中,随着水杨酸施用水平增加, $P5CR$ 表达水平整体呈增加趋势,且任一 SA 水平处理中,基质含水率处理均表现为 $WW55 > WW75 > WW95$,且两两处理间均差异显著;此外,整体来看,以 $SA2 - WW55$ 处理表达水平最高,余下处理较其显著降低 24.40% ~ 83.61%。

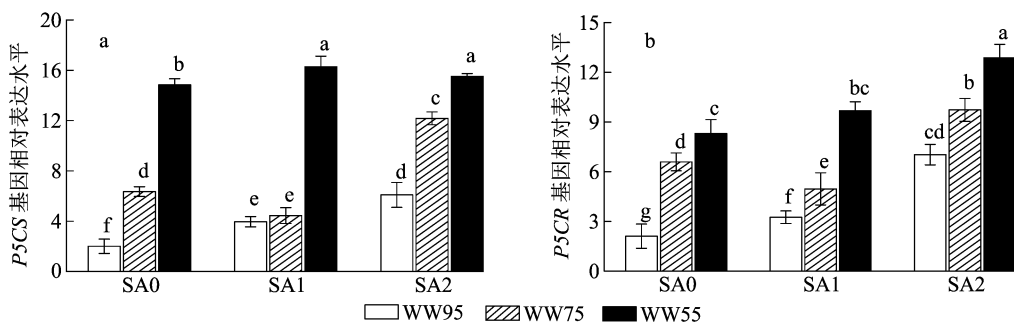


图4 干旱胁迫下水杨酸对凤仙花脯氨酸合成基因表达的影响

3 讨论与结论

干旱胁迫是植物面临的主要非生物胁迫之一,干旱会抑制植株的生长、生理代谢及产量形成^[3]。水杨酸是植物莽草酸代谢途径中的酚酸物质,对植株生长发育、开花及信号传导等一系列生理生化过程具有显著影响^[18]。本研究,生长参数(株高、有效叶数、叶面积、茎粗、根长、根体积、地上部干质量、根系干质量)及光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)中,任一水杨酸浓度处理下,随着基质含水率降低,生长参数、光合色素随之降低,即表现

为 $WW95 > WW75 > WW55$, 参数峰值均出现在 $WW95$ 处理;表明随着干旱程度加剧,植株长势受到严重影响^[19]。此外,就试验数据来看,干旱胁迫处理($WW75$ 、 $WW55$)下,整体皆以 $SA1$ 、 $SA2$ 处理的长势参数大于 $SA0$ 处理,且整体来看 $SA2$ 处理长势优于 $SA1$ 处理。

植株水分利用强度是反映植物水分状况和脱水生理的重要表征,且植株含水量可一定程度上反映植物细胞活力^[20]。本研究中,各处理凤仙花水分利用效率及水分相对含量规律基本一致,即 WW 处理中均呈 $WW95 > WW75 > WW55$, SA 处理中表现

为 SA2、SA1 > SA0;且整体来看,同一基质含水率条件下,SA2 处理在上述 2 个指标皆显著大于 SA0 处理($P < 0.05$)。前人研究表明,外源施用水杨酸可有效提高苜蓿的相对含水量,维持植株生长^[20]。本研究结果与前人研究结论基本一致,这可能是由于外源水杨酸为信号小分子物质,可介导气孔关闭,从而重分配水分及维持植株含水量的缘故^[21]。干旱条件下维持较高叶水势的能力是植物抗旱性的重要机制^[22]。本研究中,SA0 处理下,随着基质含水率降低,叶水势随之减小,而在 SA1、SA2 处理下,皆以 WW75 处理水势最大,这从侧面说明,当轻度干旱胁迫处理下,外源喷施水杨酸是较为理想的抗旱策略^[18]。

干旱胁迫会破坏电子传递链,导致叶绿体、线粒体、过氧化物酶体以及质膜中电子传递副产物 ROS 含量增加^[23],积累的 ROS 会损害蛋白质、核酸、膜脂和其他细胞成分,从而导致氧化应激^[5-6,24]。本研究中,与 WW95 处理相比,WW75 和 WW55 处理的 MDA 和 H_2O_2 含量更高,表明轻度、中度干旱皆对凤仙花造成了过氧脂质损伤。进一步研究表明,各处理 CAT、SOD、APX 活性与 MDA、 H_2O_2 含量呈相同趋势,且随着水杨酸施用水平升高,抗氧化系统相关酶活性随之降低。这意味着干旱条件下,SA 可调节抗氧化酶活性从而降低凤仙花植株的 ROS 累积及膜脂过氧化损伤,这与相关研究结果^[23]趋于一致。

为了应对水分不足,植物细胞可以通过生物合成和积累相容溶质(如脯氨酸)来降低其渗透势并保持细胞膨压,脯氨酸的生物合成涉及谷氨酸(Glu)和鸟氨酸(Orn)途径^[4,25]。谷氨酸可以通过 $\Delta 1$ -吡咯啉-5-羧酸合成酶还原为谷氨酸-半醛,并自发地转化为 $\Delta 1$ -吡咯啉-5-羧酸,然后被 $\Delta 1$ -吡咯啉-5-羧酸还原为脯氨酸还原酶^[26]。本研究中,各处理的 Pro 含量与抗氧化酶(CAT、SOD、APX)活性规律呈相反趋势,SA 的外源应用刺激了干旱胁迫植物中脯氨酸的积累,尤其表现在中等干旱程度处理(WW55)。在脯氨酸合成的 2 个酶基因(*P5CS*、*P5CR*)中,随着干旱程度加剧,*P5CS*、*P5CR* 被诱导上调表达,且同一干旱程度水平下,SA 处理(SA1、SA2)整体大于 SA0 处理,尤其表现在 SA2 处理。再次表明高水平的水杨酸施用处理效果较优。综上,干旱胁迫下外源叶施水杨酸可有效改善凤仙花的生长发育,保护光合膜和色素防止叶绿

素降解。此外可提高抗氧化酶活性,上调 *P5CS*、*P5CR* 基因表达从而提高脯氨酸含量,减少干旱胁迫导致脂质过氧化和氧化损伤。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,李玉朋,李 稚,等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展,2022,37(2):111-119.
- [2] 曹本福,姜海霞,刘 丽,等. 丛枝菌根菌丝网络在植物互作中的作用机制研究进展[J]. 应用生态学报,2021,32(9):3385-3396.
- [3] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(1):185-212.
- [4] 温 琦,赵文博,张幽静,等. 植物干旱胁迫响应的研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):11-15.
- [5] Lian X, Piao S L, Chen A P, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(4):232-250.
- [6] 王复标,戎玲玲,安 婷,等. 功能叶早衰突变体水稻后期自然衰老的生理特性研究[J]. 核农学报,2021,35(3):518-525.
- [7] 王 彬,陈敏氢,林 亮,等. 植物干旱胁迫的信号通路及相关转录因子研究进展[J]. 西北植物学报,2020,40(10):1792-1806.
- [8] 许祥明,叶和春,李国风. 脯氨酸代谢与植物抗渗透胁迫的研究进展[J]. 植物学通报,2000,17(6):536-542.
- [9] Papalia T, Panuccio M R, Sidari M, et al. Reactive oxygen species and antioxidant enzymatic systems in plants: role and methods [J]. Advances in Plant Ecophysiology Techniques, 2018, 55:177-193.
- [10] La V H, Lee B R, Zhang Q, et al. Salicylic acid improves drought - stress tolerance by regulating the redox status and proline metabolism in *Brassica rapa* [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2019, 60(1):31-40.
- [11] 黄红晶,詹 蕾,覃 磊,等. 植物中水杨酸合成途径及其调控的研究进展[J]. 激光生物学报,2021,30(1):22-29.
- [12] Bidabadi S S, Ghobadi C, Baninasab B. Influence of salicylic acid on morphological and physiological responses of banana (*Musa acuminata* cv. 'Berangan', AAA) shoot tips to in vitro water stress induced by polyethylene glycol [J]. Plant Omics Journal, 2012, 5(1):33-39.
- [13] Maghsoudi K, Emam Y, Ashraf M, et al. Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination [J]. Crop and Pasture Science, 2019, 70(1):36.
- [14] 王 铮,顾毓敏,潘义宏,等. 水杨酸不同施用方式对诱导烟草抗病性的影响[J]. 植物保护,2016,42(4):236-241.
- [15] 罗 英,杨仁强,肖 莲,等. 水杨酸预处理对水分胁迫下凤仙花幼苗抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业科学,2010,38(6):243-245.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京:高等教育出版社,2000.

王浩, 安宁, 陈燕, 等. IAA 和脱萘剂处理对库尔勒香梨果实发育过程质地及相关酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 149–156.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.024

IAA 和脱萘剂处理对库尔勒香梨果实发育过程 质地及相关酶活性的影响

王浩¹, 安宁¹, 陈燕¹, 张倩¹, 张天正¹, 李萧婷¹, 陶书田², 包建平^{1,3}

(1. 塔里木大学植物科学学院, 新疆阿拉尔 843300; 2. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210000;

3. 塔里木大学/新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室/

新疆特色果树高效优质栽培与深加工技术国家地方联合工程实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:为研究生产中使用吲哚-3-乙酸(IAA)和脱萘剂对果实质地及口感的影响,以库尔勒香梨为试验材料,于大蕾期分别喷施 100 mg/L IAA、100 mg/L 脱萘剂,以喷清水处理作为对照,采用质构仪的多面分析功能(TPA,参数包括硬度、破裂力、黏附性、弹性、内聚性、咀嚼性、胶黏性)测定果实不同发育时期的质地,使用分光光度计测定纤维素酶(CX)、淀粉酶(AM)活性,研究果实发育过程中硬度变化与酶活性的关系,并分析之间的相关性。结果表明,花期经过生长调节剂处理的库尔勒香梨果实,各项质构参数及酶活性与对照组相比均有不同程度的差异,IAA 会增加库尔勒香梨果实的硬度、破裂力,会轻微降低库尔勒香梨果实的内聚性、胶黏性和咀嚼性;脱萘剂会增加库尔勒香梨果实的黏附性,会降低库尔勒香梨果实的硬度、破裂力、内聚性、胶黏性和咀嚼性;用脱萘剂处理后,8 月 27 日的果实 CX 活性明显大于其他 3 种处理,此外用 IAA 处理后,AM 活性在不同发育时期的果实各部位均显著提升。于库尔勒香梨花期使用 IAA 处理果实后,可能会发生果实硬化的现象。此外,多数质构参数之间存在相关性,用脱萘剂处理果实的硬度、破裂力要低于对照宿萼果、脱萼果。AM 参与调控库尔勒香梨果实硬度的变化,CX 与果实硬度、破裂力无显著相关性。

关键词:库尔勒香梨;生长调节剂;质构;酶活性

中图分类号:S661.201 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)17-0149-08

库尔勒香梨(*Pyrus brestschneideri* Rehd.) 因具

有香气浓郁、皮薄肉细、酥脆爽口等特点而被誉为“梨中珍品”“果中王子”^[1]。近年来,随着库尔勒香梨栽培面积的不断扩大,其管理难度上升,人们为提升库尔勒香梨的产量和果实品质,常常会使用生长素,如吲哚-3-乙酸(IAA)来提升坐果率^[2],使用脱萘剂可以提升脱萘率从而优化果形并且可以在一定程度上提升果实的综合品质^[3],并进一步提

收稿日期:2021-11-26

基金项目:国家自然科学基金(编号:31860528,U2003121)。

作者简介:王浩(1993—),男,新疆阿拉尔人,硕士,研究方向为园艺果树栽培生理。E-mail:wang18399226681@163.com。

通信作者:包建平,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为园艺果树栽培生理。E-mail:baobao-xinjiang@126.com。

[17] Safari M, Mousavi - Fard S, Rezaei Nejad A, et al. Exogenous salicylic acid positively affects *Morpho* - physiological and molecular responses of *Impatiens walleriana* plants grown under drought stress[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(2): 969–984.

[18] 孙晓春, 黄文静, 李 铂. 水杨酸对于旱胁迫下桔梗幼苗生理生化指标及相关基因表达的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(1): 63–70.

[19] 黄 程, 文小梅, 唐 殷, 等. 外源水杨酸对盐胁迫下小白菜幼苗生理的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(7): 147–151.

[20] 耿志卓, 丁立人, 逯亚玲, 等. 外源水杨酸对不同水分胁迫下分枝期紫花苜蓿生长和生理特性的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 369–376.

[21] Rekhter D, Lüdke D, Ding Y L, et al. Isochorismate - derived

biosynthesis of the plant stress hormone salicylic acid[J]. Science, 2019, 365(6452): 498–502.

[22] 陈亮亮, 黄高宝, 李玲玲, 等. 不同耕作措施对小麦水分利用的影响及机制[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(1): 48–53.

[23] 范思静, 王亚男. 外源水杨酸诱导油菜幼苗响应干旱胁迫的生理机制[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(1): 30–32.

[24] 朱 丹, 赵宝林, 韩科学, 等. 水分及高温环境胁迫对薄荷幼苗活性氧代谢与总黄酮累积的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(4): 600–605.

[25] 罗巧玉, 王彦龙, 陈 志, 等. 水分逆境对发草脯氨酸及其代谢途径的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(5): 75–83.

[26] 曾紫君, 曾 钰, 闫 磊, 等. 低硼及高硼胁迫对棉花幼苗生长与脯氨酸代谢的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(8): 1616–1623.