

外源水杨酸对淹水胁迫下辣椒幼苗生长及活性氧代谢的影响

夏文荣

(德州学院 山东德州 253023)

摘要:为了明确外源水杨酸(SA)对辣椒耐涝的调控作用,以德红1号辣椒为试材,叶面喷施0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mmol·L⁻¹ SA溶液,研究淹水胁迫下对辣椒幼苗生长和活性氧代谢的影响。结果表明,淹水胁迫下,辣椒幼苗根长、株高、鲜质量及干质量均显著低于CK(未淹水+未外施SA),喷施外源SA后,农艺性状指标下降幅度减小,SA1.5处理的辣椒农艺性状最好,根长、株高、鲜质量和干质量比淹水对照分别提高66.37%、14.55%、56.35%和93.75%。淹水胁迫(CK)使辣椒幼苗叶片中膜脂过氧化物含量和电解质渗漏率显著升高,而SA处理可显著降低O₂^{·-}产生速率、H₂O₂含量、MDA含量和电解质渗漏率,SA1.5处理O₂^{·-}产生速率降幅最大,比CK1下降了43.95%。同时SA处理显著提高了淹水胁迫下辣椒幼苗叶片中渗透调节物质含量,SA1.5处理游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量比CK1提高了37.37%、32.51%和20.12%。与CK1相比,SA1.5处理辣椒幼苗叶片的POD和GR活性最高,分别升高81.76%和87.84%,CAT、SOD活性分别升高55.47%和83.02%。通过综合指标总加权值比较,评价出各处理抗涝性强弱依次为:SA1.5、SA2.0、SA1.0、SA2.5、SA0.5、CK1,其中SA1.5处理和SA2.0处理两者总综合加权值得分接近。综合比较,1.5 mmol·L⁻¹ SA处理的效果最好。

关键词:辣椒;水杨酸;淹水胁迫;活性氧代谢

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2022)09-073-06

Exogenous salicylic acid affects growth and reactive oxygen metabolism of pepper seedlings under waterlogging stress

XIA Wenrong

(Dezhou University, Dezhou 253023, Shandong, China)

Abstract: In order to clarify the regulatory effect of exogenous salicylic acid on pepper waterlogging tolerance, Dehong 1 pepper was used as the test material, and SA solutions of different concentrations (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mmol·L⁻¹) were sprayed on the leaves to study the growth and reactive oxygen species metabolism of pepper seedlings under flooding stress. The results showed that under flooding stress, root length, plant height, fresh weight and dry weight of pepper seedlings were significantly reduced than that without flooding. After spraying with exogenous SA, the decreasing range of agronomic traits decreased, and SA1.5 treatment had the best agronomic traits, the root length, plant height, fresh weight and dry weight were 66.37%, 14.55%, 56.35% and 93.75% higher than the flooded control, respectively. Waterlogging stress significantly increased the membrane lipid peroxide content and electrolyte leakage rate in leaves of pepper seedlings, while SA treatment could significantly reduce the O₂^{·-} production rate, H₂O₂ content, MDA content and electrolyte leakage rate. The rate of O₂^{·-} production decreased the most in SA1.5 treatment, which was 43.95% lower than that of CK1. At the same time, SA treatment significantly increased the content of osmotic regulators in leaves of pepper seedlings under flooding stress. SA1.5 treatment increased the content of free proline, soluble sugar and soluble protein by 37.37%, 32.51% and 20.12% compared with CK1 it also had the highest POD and GR activities, which were increased by 81.76% and 87.84%, respectively, and CAT and SOD activities were increased by 55.47% and 83.02%, respectively. Through the comparison of the total weighted value of the comprehensive index, the waterlogging resistance of each treatment is evaluated as follows: SA1.5, SA2.0, SA1.0, SA2.5, SA0.5, CK1. The overall weighted score of the SA1.5 treatment and the SA2.0 treatment was similar. To comprehensively compare the effects of different concentra-

收稿日期:2022-04-21;修回日期:2022-06-27

基金项目:山东省蔬菜产业技术体系(SDAIT-05)

作者简介:夏文荣,女,副教授,主要从事蔬菜栽培与育种研究。E-mail:787629514@qq.com

tions of SA on pepper seedling growth and reactive oxygen species metabolism under flooding stress, 1.5 mmol · L⁻¹SA treatment was the best.

Key words: Pepper; Salicylic acid; Waterlogging; Active oxygen metabolism

近年来,全球气候异常,降雨量分布不均,暴雨天气出现频率增加,据国家防汛抗旱总指挥部统计,仅2020年一年,全国因洪涝致农作物受灾719.0万hm²,直接经济损失高达2669.8亿元^[1]。目前,淹水胁迫已成为农业生产中经常发生的非生物胁迫之一^[2]。

辣椒在我国播种面积和产值均居蔬菜首位^[3],辣椒和辣椒制品多达1000余种,国际间贸易量逐年增加,辣椒已经成为最具发展潜力的农业作物之一^[4]。山东省集辣椒种植、加工、出口为一体,形成辣椒集散地,大量出口干、鲜辣椒^[5]。辣椒是浅根系作物,根系不发达,再生能力弱,不易发生不定根,多为露地栽培。山东地区雨热同季,7—8月份容易造成涝害,正值辣椒生长盛期,辣椒田水分过多,对植株地上部分和地下部分均产生影响^[6]。淹水胁迫下一些作物植株叶片的叶绿素含量减少,叶片气孔开度下降,气孔密度增加,光合能力弱,根系缺氧,根系活力下降,植株的主要代谢和生长被抑制,进而造成叶片变黄枯萎以及果实产量和品质下降^[6-11]。

水杨酸(salicylic acid, SA)是一种酚类生长调节剂,在植物体内主要通过异分支酸合酶途径合成^[12]。SA能够在植物体内的许多抗逆生理过程中起调节作用,增强植物抗性。前人研究表明,外源水杨酸在植株抵御病原菌侵染和盐碱、低温、高温、干旱等胁迫方面发挥作用^[13-17]。外源SA在缓解辣椒淹水胁迫方面的研究和报道较少。笔者以辣椒为材料,采用拱棚和双套盆法模拟涝害环境,研究淹水胁迫下外源SA对辣椒幼苗生长及活性氧代谢的影响,并利用模糊隶属函数法对不同浓度SA处理辣椒幼苗耐涝性差异进行综合比较,以期筛选出缓解辣椒涝害最适宜的SA浓度。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试辣椒品种为德红1号,种子由德州市农业科学研究院提供。

1.2 试 验 方 法

试验于2020年3—5月在德州市现代农业科技园进行。供试辣椒种子经催芽后于穴盘中育苗,在5叶1心时期取生长健壮、长势一致的幼苗移至28 cm×28 cm营养钵中,每钵3株,装土到距

盆上沿6 cm。试验采用随机区组排列,设置7个处理,分别为:(1)对照(CK),未淹水+不外施SA;(2)CK1,淹水+不外施SA;(3)SA0.5,淹水+外施0.5 mmol · L⁻¹SA;(4)SA1.0,淹水+外施1.0 mmol · L⁻¹SA;(5)SA1.5,淹水+外施1.5 mmol · L⁻¹SA;(6)SA2.0,淹水+外施2.0 mmol · L⁻¹SA;(7)SA2.5:淹水+外施2.5 mmol · L⁻¹SA。每个处理10钵,3次重复,共210钵。当辣椒幼苗长至6叶1心时,分别用0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mmol · L⁻¹SA进行全株叶面喷施至叶面有液体下滴,每天喷1次,连续喷3 d。3 d后进行淹水处理,以水面保持在土壤表面1.0 cm为淹水状态,每天补水保持淹水状态,淹水处理7 d,于淹水处理后(第8天)9:00取样进行各项指标的测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 农艺性状指标测定及方法 各处理随机选取5株辣椒苗进行农艺性状指标测定。用直尺测量辣椒幼苗根长、株高;分别剪取植株的地上部与地下部,用去离子水冲洗后擦干水分,使用天平测定鲜质量后于105℃烘箱杀青30 min,75℃烘干至恒质量,测定干质量,计算根冠比(植株地下部与地上部干质量比值)。

1.3.2 生理生化指标 参照高俊凤等^[18]的方法测定叶绿素含量和类胡萝卜素含量。参照李合生^[19]的方法测定活性氧产生速率、过氧化氢含量、丙二醛含量、电解质渗漏率、游离脯氨酸含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量。采用试剂盒法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶(GR)等抗氧化酶活性。

1.4 数 据 处 理

使用Excel 2010和SPSS19.0软件处理数据,差异显著性用Duncan法进行多重比较。隶属函数值计算参考张晓丽等^[20]的方法。某一性状测定值减去该性状最小值与该性状的极差值的比值即为该性状的隶属函数值。计算公式为:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min});$$

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})。$$

公式中, X_i 为某一指标的测定值; X_{\max} 为所有处理中该指标的最大值; X_{\min} 为所有处理中该指标的最小值。计算各指标的隶属函数值,以其平均值综合评价不同处理辣椒幼苗耐涝性,平均值越大,外

源 SA 对辣椒淹水胁迫缓解能力越强。

2 结果与分析

2.1 喷施不同浓度 SA 处理对辣椒幼苗农艺性状的影响

从表 1 可知,淹水胁迫 7 d 后,与 CK 和 CK1 相比,辣椒幼苗不同处理农艺性状差异显著。淹水胁迫下,辣椒幼苗根长、株高、鲜质量及干质量均显著低于不淹水的正常对照,而喷施外源 SA 后,农艺性状指标下降幅度减小;其中喷施 1.5 mmol·L⁻¹SA

处理的农艺性状最好,根长、株高、鲜质量和干质量比淹水对照分别提高 66.37%、14.55%、56.35% 和 93.75%;SA2.0 处理农艺性状次之,且与 SA1.5 处理差异不显著;SA0.5 处理最差,根长、株高、鲜质量和干质量仅比 CK1 分别提高 25.71%、9.54%、30.16% 和 37.50%。同时,CK1 植株根冠比增大,喷施 SA 预处理后,辣椒植株的根冠比均显著小于淹水对照,表明喷施 SA 预处理均能有效增加植株地上部生物量。与 CK 相比,CK1 根冠比增幅最大,达到 49.26%;SA 处理中 SA0.5 增幅最大,上升 34.56%,

表 1 SA 处理对辣椒幼苗农艺性状的影响

处理	根长/cm	株高/cm	鲜质量/g	干质量/g	根冠比
CK	9.53±0.85 a	15.79±1.03 a	2.53±0.23 a	0.34±0.03 a	0.136±0.011 e
CK1	4.55±0.42 f	12.37±0.77 e	1.26±0.08 e	0.16±0.02 e	0.203±0.015 a
SA0.5	5.72±0.38 e	13.55±0.62 c	1.64±0.12 d	0.22±0.03 d	0.183±0.012 b
SA1.0	6.47±0.52 c	13.75±0.85 c	1.86±0.97 c	0.27±0.03 c	0.166±0.013 c
SA1.5	7.57±0.61 b	14.17±1.22 b	1.97±0.12 b	0.31±0.02 b	0.156±0.014 d
SA2.0	7.43±0.48 b	14.02±1.04 b	1.94±0.18 b	0.31±0.03 b	0.152±0.011 d
SA2.5	6.12±0.32 d	13.11±0.88 d	1.66±0.09 d	0.23±0.02 d	0.169±0.016 c

注:同列数字后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

SA2.0 处理增幅最小,仅上升 11.76%。

2.2 SA 处理对辣椒幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

从表 2 可知,在淹水胁迫下,各处理辣椒幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量均显著低于 CK,CK1 辣椒幼苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量分别比 CK 下降 18.65%、24.87%、20.42% 和 36.84%。SA0.5 处理辣椒幼苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均显著低于其他 4 个 SA 处理,其他 4 个 SA 处理间辣椒幼苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均无显著差异,所有 SA 处理均显著高于 CK1。

表 2 SA 处理对辣椒幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量影响

处理	w(叶绿素 a)/ (mg·g ⁻¹)	w(叶绿素 b)/ (mg·g ⁻¹)	w(总叶绿素)/ (mg·g ⁻¹)	w(类胡萝卜素)/ (mg·g ⁻¹)
CK	9.65±0.54 a	3.82±0.27 a	13.47±0.98 a	0.38±0.03 a
CK1	7.85±0.68 d	2.87±0.19 d	10.72±1.02 d	0.24±0.02 d
SA0.5	8.36±0.87 c	3.02±0.17 c	11.38±0.87 c	0.29±0.03 c
SA1.0	9.02±0.65 b	3.36±0.12 b	12.38±1.05 b	0.34±0.02 b
SA1.5	9.07±0.39 b	3.35±0.29 b	12.42±0.77 b	0.33±0.02 b
SA2.0	9.12±0.72 b	3.27±0.31 b	12.39±0.86 b	0.34±0.03 b
SA2.5	8.98±0.64 b	3.38±0.21 b	12.36±0.93 b	0.34±0.04 b

2.3 SA 处理对辣椒幼苗叶片膜脂过氧化物含量和电解质渗漏率的影响

从表 3 可以看出,淹水胁迫使辣椒幼苗叶片中膜脂过氧化物含量和电解质渗漏率均显著升高,而 SA 处理可显著降低超氧阴离子(O₂⁻)产生速率、过氧化氢(H₂O₂)含量、丙二醛(MDA)含量和电解质渗漏率。SA1.5 处理 O₂⁻产生速率降幅最大,比淹水对照(CK1)下降 43.95%,且与 SA2.0、SA2.5 处理差异不显著。SA2.5 处理 H₂O₂ 含量和电解质渗漏率降幅最大,分别比 CK1 降低 51.14% 和 36.75%,但与 SA1.5、SA2.0 处理无显著差异。SA2.0 处理 MDA 含量降幅最大,比淹水对照下降 33.72%,SA1.5 处理降幅次之,但二者差异不显著。

表 3 SA 处理对辣椒幼苗膜脂过氧化物含量和电解质渗漏率的影响

处理	O ₂ ⁻ 产生速率/ (nmol·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	b(H ₂ O ₂)/ (μmol·g ⁻¹)	b(MDA)/ (μmol·g ⁻¹)	电解质渗 漏率/%
CK	10.78±0.92 d	8.58±0.65 e	2.56±0.15 e	25.18±2.33 d
CK1	36.45±1.65 a	36.55±2.22 a	6.82±0.38 a	55.67±4.21 a
SA0.5	26.85±2.24 b	27.05±2.04 b	5.65±0.41 b	42.38±3.85 b
SA1.0	24.44±1.56 b	22.38±1.91 c	5.04±0.36 c	41.55±4.07 b
SA1.5	20.43±1.37 c	18.42±0.58 d	4.63±0.40 d	36.24±2.97 c
SA2.0	20.78±0.95 c	18.21±1.14 d	4.52±0.29 d	35.47±3.02 c

2.4 SA 处理对辣椒幼苗渗透调节物质含量的影响

从表 4 可以看出,淹水胁迫下,辣椒幼苗叶片中渗透调节物质含量显著升高,游离脯氨酸、可溶

性糖和可溶性蛋白含量相对 CK 分别升高 30.67%、61.22%和 50.29%。SA 处理显著提高了淹水胁迫下辣椒幼苗叶片中渗透调节物质含量。SA2.5 处理辣椒幼苗叶片中游离脯氨酸含量升幅最大,分别比 CK1 和 CK 升高 37.83%和 80.11%,但与 SA1.5 处理无显著差异;SA1.0 处理叶片中可溶性糖和可溶性蛋白含量升幅最大,分别比淹水对照升高 36.74%和 46.47%,但其可溶性糖含量与 SA1.5 处理无显著差异。SA1.5 处理游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量比 CK1 提高了 37.37%、32.51%和 20.12%。

表 4 SA 处理对辣椒幼苗渗透调节物质含量的影响

处理	w(游离脯氨酸)/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	w(可溶性糖)/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	w(可溶性蛋白)/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK	36.45±2.85 e	16.58±1.12 e	25.63±2.54 e
CK1	47.63±3.24 d	26.73±2.04 d	38.52±3.02 d
SA0.5	56.65±4.56 c	30.05±1.98 c	50.53±3.12 b
SA1.0	58.32±3.92 c	36.55±2.64 a	56.42±2.24 a
SA1.5	65.43±3.87 a	35.42±2.02 a	46.27±3.85 c
SA2.0	62.78±2.14 b	32.24±2.22 b	45.22±3.14 c
SA2.5	65.65±4.08 a	29.56±1.45 c	51.36±3.07 b

2.5 SA 处理对辣椒幼苗抗氧化系统的影响

从表 5 可以看出,CK 处理辣椒叶片 SOD、POD、CAT 和 GR 正常生长下均保持一定的活性。淹水胁迫下,除 GR 外,CK1 其他抗氧化酶活性均显著低于 CK,SA 处理则显著提高了辣椒幼苗抗氧化酶活性,均显著高于 CK 和 CK1。在所有 SA 处

理中,SA2.0 处理辣椒幼苗 SOD 和 CAT 活性最高,分别比 CK1 升高 83.22%和 56.39%,但与 SA1.5 处理相比,二者无显著差异;SA1.5 处理 POD 和 GR 活性最高,分别比淹水对照升高 81.76%和 87.84%,CAT、SOD 活性分别升高 55.47%和 83.02%,且显著高于其他处理;SA0.5 处理辣椒各抗氧化酶活性增幅最小,CAT、POD、SOD 和 GR 活性分别比 CK1 升高 35.58%、49.66%、72.92%和 11.70%。

表 5 SA 处理对辣椒幼苗抗氧化系统的影响

处理	SOD 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	POD 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	CAT 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	GR 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
CK	166.02±12.55 d	192.65±13.35 e	6.98±0.56 d	15.23±1.12 f
CK1	102.81±10.64 e	138.87±11.24 f	5.48±0.48 e	17.44±1.04 e
SA0.5	177.78±14.27 c	207.83±15.62 d	7.43±0.33 c	19.48±1.54 d
SA1.0	181.41±10.05 b	228.56±16.66 c	7.98±0.37 b	27.82±1.92 c
SA1.5	188.16±13.34 a	252.41±17.85 a	8.52±0.63 a	32.76±2.01 a
SA2.0	188.37±12.87 a	239.45±10.06 b	8.57±0.57 a	29.34±1.55 b
SA2.5	180.98±10.43 b	224.61±15.27 c	7.82±0.55 b	26.24±1.62 c

2.6 不同处理辣椒幼苗耐涝性差异综合比较

根冠比、 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量、MDA 含量和电解质渗漏率等指标采用反隶属函数值法计算函数值,其他指标均采用隶属函数值法计算函数值。不同处理的 18 个指标加权值和总加权值大小。从表 6 中可以看出,综合总加权值评价出的抗涝性强弱顺序为:SA1.5>SA2.0>SA1.0>SA2.5>SA0.5>CK1,其中 SA1.5 处理和 SA2.0 处理两者总综合加权值得分接近,差异不显著。

表 6 综合指标的加权隶属函数值

处理	根长	株高	鲜质量	干质量	根冠比	总叶绿素含量	类胡萝卜素含量	O_2^- 产生速率	H_2O_2 含量	MDA 含量
CK1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SA0.5	0.39	0.66	0.54	0.40	0.39	0.39	0.50	0.60	0.51	0.51
SA1.0	0.64	0.77	0.85	0.73	0.73	0.98	1.00	0.75	0.76	0.77
SA1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	1.00	0.90	1.00	0.97	0.95
SA2.0	0.95	0.92	0.96	1.00	1.00	0.98	1.00	0.98	0.98	1.00
SA2.5	0.52	0.41	0.56	0.47	0.67	0.96	1.00	0.99	1.00	0.73
处理	电解质渗漏率	游离脯氨酸含量	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	CAT 活性	POD 活性	SOD 活性	GR 活性	总综合加权值	
CK1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SA0.5	0.65	0.50	0.34	0.67	0.88	0.61	0.63	0.13	9.30	
SA1.0	0.69	0.59	1.00	1.00	0.94	0.79	0.81	0.68	14.48	
SA1.5	0.95	0.99	0.88	0.43	1.00	1.00	0.98	1.00	16.97	
SA2.0	0.99	0.84	0.56	0.37	1.00	0.89	1.00	0.78	16.20	
SA2.5	1.00	1.00	0.29	0.72	0.91	0.76	0.76	0.57	13.32	

3 讨论与结论

辣椒幼苗在淹水胁迫后,会产生一系列生理生化反应,影响其农艺性状^[21],同时植物会通过改变自

身的生长和形态特征来适应逆境条件^[22]。淹水胁迫下植物生长发育受到影响,主要是由淹水产生的低氧环境导致光合作用减弱,叶绿素降解,细胞内正常的电子传递链被阻断,细胞膜脂过氧化加剧、保

护酶等系统遭到损害,引起细胞结构和功能的破坏^[23]。笔者研究表明,淹水胁迫下,辣椒幼苗根长、株高、整株鲜质量及干质量均显著低于CK,叶绿素含量和胡萝卜素含量显著下降, O_2^- 产生速率和丙二醛含量等显著升高,表明淹水胁迫对辣椒幼苗生长有显著影响,与前人研究结果一致^[24]。

抗氧化酶活性的变化是植物对非生物胁迫的响应方式之一^[25]。植株在正常条件下生长,体内细胞活性氧的产生和清除处于动态平衡状态,活性氧水平较低,非生物胁迫条件下会破坏活性氧的动态平衡,从而产生过多的自由基,所积累的活性氧可引发或加剧细胞膜脂过氧化,从而引起膜的渗漏,进而细胞的正常生理功能受到伤害^[26]。淹水胁迫时活性氧产生速率快速升高,为维持细胞膜的稳定,保护细胞免受膜脂过氧化作用伤害,植株活性氧清除系统加快清除活性氧^[24]。为适应淹水胁迫,植物会调节相应的代谢机制从而维持正常的生命活动。淹水胁迫下,细胞能主动积累可溶性糖、可溶性蛋白及游离脯氨酸等有机渗透调节物质,来调节细胞渗透势,维持体内水分平衡,保护植物组织内各种酶类和细胞膜结构的正常功能^[27]。SA作为一种广泛存在的植物内源性信号分子,参与调节植物许多生理过程^[28]。前人研究结果表明,外施SA可以提高植物叶片SOD、POD、CAT等抗氧化酶的活性,缓解胁迫对植物造成的伤害,提高植物的抗逆性^[29-30]。SA可诱导淹水桔梗、棉花植株生理特性发生改变, H_2O_2 含量上升,显著提高叶片POD和CAT等抗氧化酶活性,增加脯氨酸积累,降低MDA含量,保护细胞膜结构完整性,提高叶片光合效率及根系活力,提高植物体内的ATP含量,为各种物质代谢的正常进行提供充足的能量,诱导多种与非生物胁迫反应相关基因表达,从而缓解植株水涝造成的伤害^[31-32]。笔者试验表明,淹水胁迫下,外源SA可有效地阻止辣椒幼苗植株体内MDA积累,促进脯氨酸的积累,缓解淹水胁迫对辣椒幼苗造成的膜脂过氧化,增强辣椒幼苗的抗涝性。淹水胁迫下喷施SA可提高活性氧清除系统中SOD和POD的活性,提高可溶性糖、可溶性蛋白质的含量,降低电解质渗漏率和MDA含量,从而增强辣椒幼苗耐淹水胁迫的能力。

不同浓度SA处理对淹水辣椒造成伤害的缓解程度不同。喷施 $1.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA后,淹水条件下辣椒叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖、可溶性蛋白含量增加,CAT、POD、SOD和GR酶活性

升高, O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量、MDA含量和电解质渗漏率降低,农艺性状显著优于其他处理,表明淹水胁迫前喷施SA能够在胁迫发生前引起细胞预响应并在淹水发生初期迅速开启应答反应机制,进行一系列生理生化变化以适应淹水胁迫。通过综合指标总加权值比较评价出抗涝性强弱顺序依次为:SA1.5、SA2.0、SA1.0、SA2.5、SA0.5、CK1,其中SA1.5处理和SA2.0处理两者综合总加权值得分相近。

4 结论

笔者以德红1号辣椒为试材,叶面喷施不同浓度SA溶液,研究淹水胁迫对辣椒幼苗生长和活性氧代谢的影响。结果表明,淹水胁迫下,SA处理辣椒幼苗农艺性状改善,叶绿素、类胡萝卜素、膜脂过氧化物、渗透调节物质含量增加,抗氧化酶活性增强,综合比较淹水胁迫下不同浓度SA对辣椒幼苗生长及活性氧代谢的影响,以 $1.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA处理效果最好,但其对辣椒产量及品质等的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 万海斌. 中国水旱灾害防御公报[EB/OL]. [2020-9-24]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgshzhgb/202112/t20211208_1554245.html
- [2] KHAN A, TAND K Y, FRIDI M Z, et al. Nitrogen fertility and abiotic stresses management in cotton crop: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (17): 14551-14566.
- [3] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. *园艺学报*, 2020, 47(9): 1715-1726.
- [4] 赵帮宏, 宗义湘, 乔立娟. 2021年度中国特色蔬菜产业发展报告[M]. 北京: 经济管理出版社, 2021.
- [5] 贺洪军, 张自坤, 李腾飞. 加工型辣椒绿色高效栽培技术[M]. 山东青岛: 青岛出版社, 2019.
- [6] 徐道青, 刘小玲, 王维, 等. 淹水胁迫下棉花叶片高光谱特征及叶绿素含量估算模型[J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (10): 3289-3296.
- [7] 古成彬, 薛莲, 陆玲鸿, 等. ‘浙猕砧1号’对长期淹水处理的响应特征[J]. *果树学报*, 2019, 36(3): 327-337.
- [8] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1022-1028.
- [9] 刘周斌, 杨博智, 欧立军, 等. 不同时期外施 Ca^{2+} 缓解辣椒淹水胁迫伤害的研究[J]. *园艺学报*, 2015, 42(8): 1487-1494.
- [10] YANG B Z, LIU Z B, ZHOU S D, et al. Exogenous Ca^{2+} alleviates waterlogging-caused damages to pepper[J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(4): 620-629.
- [11] 王彬, 胡安胜. 辣椒涝害的原因及防治措施[J]. *吉林农业*, 2011 (1): 40.
- [12] CHEN Z, ZHENG Z, HUANG J, et al. Biosynthesis of salicylic acid in plants[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2009, 4 (6):

- 493-496.
- [13] ALI S, MIR Z A, TYAGI A, et al. Overexpression of *NPR1* in *Brassica juncea* confers broad spectrum resistance to fungal pathogens[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1693.
- [14] 邵长安. 外源水杨酸对盐碱胁迫下燕麦生理的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
- [15] 王维领, 赵灿, 李国辉, 等. 水杨酸在植物抵御低温胁迫中的作用[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(12): 2585-2594.
- [16] 杨军, 蔡哲, 刘丹, 等. 高温下喷施水杨酸和磷酸二氢钾对中稻生理特征和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4202-4210.
- [17] 马碧花, 蔺伟虎, 高敏, 等. 干旱胁迫下水杨酸和内生真菌对多年生黑麦草的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(1): 135-144.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版社, 2000.
- [19] 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.
- [20] 张晓丽, 陶伟, 陈雷, 等. 基于隶属函数值法的直播稻芽期和幼苗期耐低温淹水能力综合评价[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(1): 78-85.
- [21] 刘周斌, 周宇健, 杨博智, 等. 植物抗涝性研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(18): 4385-4389.
- [22] FALSTER D S, WESTOBY M. Plant height and evolutionary games[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(7): 337-343.
- [23] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2662-2672.
- [24] 王辉, 杜振标, 赵世民, 等. 逆境条件下外源水杨酸对植物抗氧化系统影响的研究进展[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(8): 154-158.
- [25] 马乐元, 陈年来, 韩国君, 等. 外源水杨酸对干旱胁迫下小冠花叶片活性氧水平及抗氧化系统的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(10): 129-139.
- [26] 徐松华. 逆境条件下植物体内活性氧代谢研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(21): 29-32.
- [27] 聂功平, 陈敏敏, 杨柳燕, 等. 植物响应淹水胁迫的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(18): 57-64.
- [28] CHEN Y, WANG H, HU W, et al. Combined elevated temperature and soil waterlogging stresses inhibit cell elongation by altering osmolyte composition of the developing cotton (*Gossypium hirsutum* L.) fiber[J]. *Plant Science*, 2017, 256: 196-207.
- [29] 陈锦芬, 侯爽, 顾开元, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下低温敏感性不同的烤烟品种烟叶生理特性的影响[J]. *中国烟草学报*, 2022, 28(3): 35-43.
- [30] 马永慧, 李永洁, 李进. NaCl 与干旱双重胁迫下黑果枸杞幼苗对外源水杨酸的生理响应[J]. *广西植物*, 2022, 42(4): 668-675.
- [31] 孙晓春, 黄文静, 李铂. 水杨酸对干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.
- [32] ZHANG Y, SONG X, YANG G, et al. Physiological and molecular adjustment of cotton to waterlogging at peak-flowering in relation to growth and yield[J]. *Field Crops Research*, 2015, 179: 164-172.