

引用格式:

江鸿, 卿东山, 陈浩杰, 张露瑶, 孙龙俊, 戴思慧, 孙小武. 外源水杨酸对淹水胁迫下西瓜幼苗光合特性及抗氧化酶系统的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 47–54.

JIANG H, QING D S, CHEN H J, ZHANG L Y, SUN L J, DAI S H, SUN X W. Exogenous salicylic acid affects photosynthetic properties and antioxidant protective enzyme system of watermelon seedlings under waterlogging stress[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(3): 47–54.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 外源水杨酸对淹水胁迫下西瓜幼苗光合特性及抗氧化酶系统的影响

江鸿<sup>1,2</sup>, 卿东山<sup>1,2</sup>, 陈浩杰<sup>1,2</sup>, 张露瑶<sup>1,2</sup>, 孙龙俊<sup>3</sup>, 戴思慧<sup>1,2</sup>, 孙小武<sup>1,2\*</sup>

(1.园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 湖南长沙 410128; 2.湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128; 3.湖南雪峰种业有限责任公司, 湖南邵阳 422001)

**摘要:**以‘雪龙1号’西瓜品种为材料, 采用不同浓度(0.0、0.5、1.0、1.5、2.5、3.5 mmol/L)水杨酸(SA)溶液喷施幼苗叶片, 测定淹水胁迫下西瓜幼苗的生长性状、根系构型、光合参数、叶绿素含量、SPII光能转换效率和抗氧化酶活性等指标, 结合主成分分析, 研究水杨酸处理对淹水胁迫下西瓜幼苗生理特性的影响。结果表明: 喷施 SA 溶液缓解了淹水胁迫对西瓜幼苗的不利影响, 提高了淹水胁迫下西瓜幼苗的叶绿素含量、类胡萝卜素含量、实际光化学效率 PSII和超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性, 降低了植株的丙二醛(MDA)含量, 提高了植株耐涝性; 与 0.0 mmol/L 的 SA 处理相比, 1.0 mmol/L SA 处理的西瓜幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量分别显著提高 18.80%、34.74%、23.57%、67.27%; 总根长、根尖数分别显著提高 116.41%、101.25%; 叶绿素 a、叶绿素 a+叶绿素 b、类胡萝卜素含量分别提升了 66.55%、67.46%、73.81%; CAT 活性显著提高 20.92%, MDA 含量显著下降 53.32%; 主成分分析结果表明, 1.0、1.5、2.5、0.5、3.5、0.0 mmol/L SA 处理的西瓜的耐涝性依次降低。

**关键词:**西瓜; 外源水杨酸; 淹水胁迫; 根系构型; 光合特性; 抗氧化系统

中图分类号: S651.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)03-0047-08

## Exogenous salicylic acid affects photosynthetic properties and antioxidant protective enzyme system of watermelon seedlings under waterlogging stress

JIANG Hong<sup>1,2</sup>, QING Dongshan<sup>1,2</sup>, CHEN Haojie<sup>1,2</sup>, ZHANG Luyao<sup>1,2</sup>,  
SUN Longjun<sup>3</sup>, DAI Sihui<sup>1,2</sup>, SUN Xiaowu<sup>1,2\*</sup>

(1.Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 2.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;3. Hunan Xuefeng Seed Industry Co.Ltd, Shaoyang, Hunan 422001, China)

**Abstract:** To investigate the regulatory effect of salicylic acid(SA) on the growth of watermelon seedlings under flooding stress, the ‘Xuelong 1’ watermelon variety was used as material. Six concentrations(0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5 mmol/L) of SA solution were sprayed, and the growth of watermelon seedlings, root system configuration, photosynthetic parameters, chlorophyll content, SPII light energy conversion efficiency, antioxidant enzyme activity and other indicators under flooding stress were measured and then were subjected to the principal component analysis to analyze the effects of SA

收稿日期: 2023-09-05

修回日期: 2024-06-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFD1000300); 农业部岗位体系专家(CARS-25); 湖南省重点领域研发计划项目(2022NK2007)

作者简介: 江鸿(2000—), 女, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事西瓜分子遗传育种研究, 492178034@qq.com; \*通信作者, 孙小武, 硕士, 教授, 主要从事瓜类分子遗传育种研究, sun0070@139.com

treatment on the physiological characteristics of watermelon seedlings under flooding stress. The results showed that different concentrations of SA alleviated the adverse effects of flooding stress on watermelon seedlings, and increased the activities of chlorophyll content, carotenoid content, actual photochemical efficiency of PSII, superoxide dismutase (SOD), catalase(CAT), peroxidase(POD), and decreased the MDA content, of watermelon seedlings under flooding stress. It could be concluded that exogenous SA could improve the flooding tolerance of watermelon seedlings. Compared with 0.0 mmol/L SA treatment, under 1.0 mmol/L SA treatment the plant height, stem thickness, fresh mass and dry mass of watermelon seedlings were significantly increased by 18.80%, 34.74%, 23.57% and 67.27%, respectively; the total root length and the number of root tips were significantly increased by 116.41% and 101.25%, respectively; and the content of chlorophyll a, chlorophyll a+chlorophyll b and carotenoids were increased by 66.55%, 67.46% and 73.81%, respectively; CAT activity increased significantly by 20.92% and MDA content decreased significantly by 53.32%. The results of principal component analysis showed that waterlogging tolerance of watermelons treated with 1.0, 1.5, 2.5, 0.5, 3.5 and 0.0 mmol/L SA decreased successively.

**Keywords:** watermelon; exogenous salicylic acid; flooding stress; root conformation; photosynthetic properties; antioxidant system

西瓜为葫芦科一年生草本植物,耐旱,对淹水胁迫敏感。由于南方地区雨量充沛,生长在该区域的作物易遭受淹水胁迫。当植物遭受淹水胁迫时,根系缺氧,活力下降,光合能力减弱,植株的代谢和生长被抑制,严重时会导致植株受损或死亡<sup>[1]</sup>。不同植物对涝害的适应能力差异很大,耐涝性、淹水深度、淹水时间对植物的影响较大,植物能根据胁迫程度产生与之适应的调节机制<sup>[2]</sup>。

水杨酸(SA)是植物中常见的酚类化合物,具有多种生理作用<sup>[3]</sup>,可以通过诱导胁迫相关基因的表达来调节细胞的抗氧化机制,从而增强植物对不利条件的适应性<sup>[4]</sup>。余婷等<sup>[5]</sup>研究发现,SA能缓解淹水条件下香云幼苗的胁迫效应。有研究<sup>[6]</sup>表明,SA调节产生2种不同的生理反应:一是细胞内SA的增加导致根细胞壁中脂质过氧化,加速老细胞程序性死亡,同时促进根内新的分生细胞的发育,产生的分生细胞可以推动氧气向根组织转移,提升植株的根系活力,缓解内涝压力;二是植物体内SA的积累刺激了不定根原基,诱导大量不定根的生长,增强植株耐涝性。

已有部分关于植物淹水胁迫生理机制的研究,但西瓜应对淹水胁迫及淹水胁迫解除后植株的自我调节机制尚不清楚。本研究中,以‘雪龙1号’西瓜品种为试验材料,设置不同浓度SA溶液喷施处理,探究SA对淹水胁迫下西瓜幼苗生长、生理的调控效应,为SA在西瓜栽培淹水胁迫中的应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

‘雪龙1号’西瓜种质由湖南雪峰种业有限责任公司提供;水杨酸(SA)纯度大于99.5%,购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 试验设计

试验于2023年4—7月在湖南农业大学试验基地进行。供试西瓜种子播种于50孔穴盘中育苗,至3叶1心时期选取生长健壮、长势一致的幼苗移栽至12 cm×12 cm营养钵中,每盆1株,装土至距离盆上边缘2 cm。试验采用随机区组排列,设置7个处理:对照(CK),未淹水,不外施SA,喷施等量清水;SA0,淹水,不外施SA,喷施等量清水;SA0.5,淹水,外施0.5 mmol/L SA;SA1.0,淹水,外施1.0 mmol/L SA;SA1.5,淹水,外施1.5 mmol/L SA;SA2.5,淹水,外施2.5 mmol/L SA;SA3.5,淹水,外施3.5 mmol/L SA。每个处理20钵,3次重复,共420盆。SA采用叶面喷施,对西瓜苗全株叶片正面进行喷施,以叶面有液滴滴落为适,于18:00进行喷施,每2 d喷施1次,共喷4次。2 d后进行淹水处理(水面保持在土面2.0 cm),每天补水保持淹水状态。

### 1.3 指标的测定

#### 1.3.1 农艺性状的测定

淹水处理第6天,各处理随机选取3株西瓜苗,测量西瓜幼苗株高和茎粗;分别剪取植株地

上部分与地下部分,使用天平测定植株地上部鲜质量、地下部鲜质量,将地上部和地下部放入烘箱中,105 ℃下杀青 15 min 后于 75 ℃下烘干至恒重,测定干质量,计算根冠比(植株地下部鲜质量与地上部分鲜质量的比值)。各处理随机选取 3 株西瓜苗,收集其根系,用清水洗净,采用 MICROTEK ScanMaker i800 plus 根系扫描仪扫描根系,采用 V2.1.1RHIZOpheno 测定根长、平均直径、体积、根系表面积、投影面积、根尖数。

### 1.3.2 叶绿素荧光参数的测定

淹水处理第 6 天,各处理随机选取 3 株西瓜苗,使用 FluorPen FP 110 便携式充电荧光计,测定各处理西瓜幼苗从顶端往下数第 3 片叶的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、实际光化学效率( $\Phi PSII$ )、光化学猝灭系数(qP)和非光化学猝灭系数(NPQ)。

### 1.3.3 叶片光合参数的测定

淹水处理第 5 天 8:00—11:00,各处理随机选取 3 株西瓜苗,用 LI-6400XT 型便携式光合作用分析仪测定叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO<sub>2</sub>浓度(Ci)、蒸腾速率(Ts)。

### 1.3.4 生理生化指标的测定

淹水处理第 6 天,参照沈伟其<sup>[7]</sup>的方法测定叶绿素含量和类胡萝卜素含量。参照王学奎<sup>[8]</sup>的方法测定过氧化物酶(POD)、氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量。

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 处理数据;采用单因素方差分析比较各处理的差异性,采用邓肯多重范围检验法分析 0.05 水平下的显著性,运用 SPSS 22.0 软件对原始数据进行标准化处理,得到平均值为 0、标准差为 1 的无量纲数据。根据标准化后的数据和主成分载荷矩阵进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 SA 处理对淹水胁迫下西瓜幼苗农艺性状的影响

从表 1 可知,SA0 处理淹水胁迫 6 d 后,西瓜幼苗生长势下降,茎粗、鲜质量和干质量均显著低于 CK 的。而喷施外源 SA 后,农艺性状指标下降幅度减小。与 SA0 相比,SA1.0 处理后,西瓜幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量分别显著提高 18.80%、34.74%、23.57%、67.27%;SA1.5 处理下,西瓜幼苗鲜质量显著提升 38.38%;SA2.5 处理的 5 个指标比 SA0.5 处理的都有提高,但差异均不显著;SA3.5 处理下,西瓜幼苗株高、茎粗、鲜质量、干质量比 SA0 的提高 2.86%、39.61%、16.89%、29.09%,且与 SA0.5 处理的差异不显著。与 CK 相比,淹水处理下西瓜的根冠比均减小,其中 SA0.5 与 SA3.5 处理的均显著低于 SA0 的,分别降低 15.69%、2.94%;SA1.0、SA1.5、SA2.5 处理下根冠比均高于 SA0 的,分别增加了 20.59%、13.73%、20.59%。

表 1 淹水胁迫下不同 SA 处理西瓜幼苗的农艺性状

处理	株高/cm	茎粗/mm	鲜质量/g	干质量/g	根冠比
CK	(46.53±6.61)ab	(4.95±0.54)a	(20.54±1.54)a	(1.83±0.34)a	(0.130±0.019)a
SA0	(42.03±3.10)b	(3.08±0.44)c	(9.12±0.37)d	(0.55±0.05)c	(0.102±0.002)abc
SA0.5	(47.23±4.57)ab	(4.16±0.36)ab	(9.56±0.25)cd	(0.66±0.06)bc	(0.086±0.013)c
SA1.0	(49.93±1.78)a	(4.15±0.61)ab	(11.27±0.53)bc	(0.92±0.04)b	(0.123±0.012)ab
SA1.5	(45.93±5.35)ab	(4.06±0.50)ab	(12.62±1.59)b	(0.68±0.13)bc	(0.116±0.006)ab
SA2.5	(47.13±1.95)ab	(3.69±0.27)bc	(10.88±0.42)bcd	(0.78±0.04)bc	(0.123±0.020)ab
SA3.5	(43.23±1.70)ab	(4.30±0.61)ab	(10.66±1.07)cd	(0.71±0.04)bc	(0.099±0.009)bc

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.2 SA 处理对淹水胁迫下西瓜幼苗根系构型的影响

从图 1 可知,试验处理第 6 天时,CK 植株的

叶片明显偏大,颜色偏墨绿;淹水胁迫下植株叶片偏小且叶片大部分呈现黄绿色。CK 植株的根系丰富,分布广泛,淹水胁迫下根系数量显著减少。

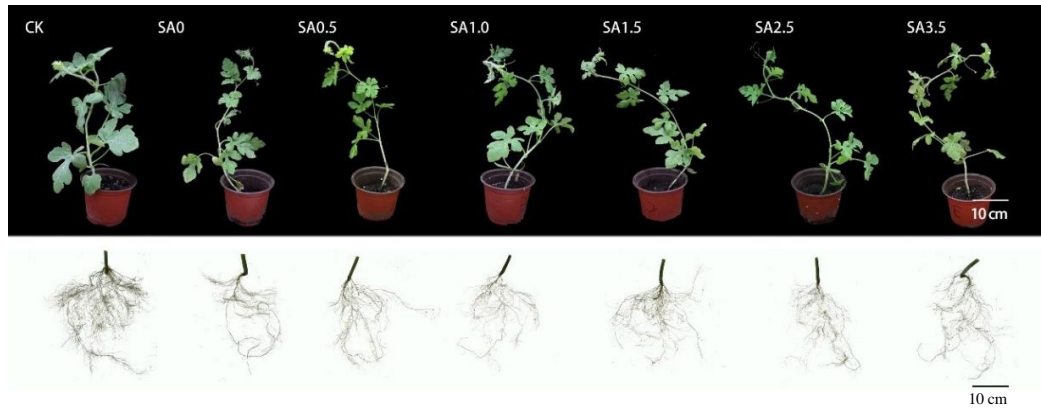


图 1 淹水胁迫下不同处理西瓜幼苗的植株及根系状况

Fig. 1 Plant and root conformation of watermelon seedlings under flooding stress with different treatments

由表 2 可知, 与 CK 相比, SA0 处理下西瓜幼苗总根长、平均直径、根体积、根系表面积、根系投影面积、根尖数均显著降低, 降幅分别达 74.76%、45.16%、85.35%、85.84%、86.84%、70.91%。淹水胁迫下, 与 SA0 相比, 喷施不同浓

度 SA 处理的西瓜根系构型指标均有所提高, 其中 SA1.0、SA1.5、SA2.5 处理的总根长分别显著提高了 116.41%、104.32%、65.72%; 根尖数分别显著提高了 101.25%、100.98%、117.06%。

表 2 淹水胁迫下不同 SA 处理西瓜幼苗的根系构型

Table 2 Root conformation of SA-treated watermelon seedlings under flooding stress

处理	总根长/cm	平均直径/mm	根体积/cm <sup>3</sup>	表面积/cm <sup>2</sup>	投影面积/cm <sup>2</sup>	根尖数
CK	(1 328.82±53.76)a	(0.93±0.05)a	(8.33±1.03)a	(385.10±5.38)a	(131.83±1.14)a	(3 390.33±400.51)a
SA0	(335.43±72.63)d	(0.51±0.03)c	(1.22±0.23)c	(54.52±15.90)d	(17.35±5.06)d	(986.33±644.90)c
SA0.5	(480.93±137.70)cd	(0.57±0.10)ab	(2.45±1.88)c	(89.93±41.09)cd	(28.62±3.08)cd	(1 438.33±227.40)bc
SA1.0	(725.92±94.88)b	(0.66±0.05)b	(5.08±1.46)b	(157.85±29.92)b	(56.84±3.64)b	(1 985.00±135.19)b
SA1.5	(685.36±186.55)b	(0.58±0.01)ab	(2.94±0.64)c	(124.27±31.10)bc	(39.55±9.90)c	(1 982.33±568.06)b
SA2.5	(555.87±61.06)bc	(0.52±0.01)c	(2.14±0.18)c	(92.36±12.61)cd	(29.39±4.02)cd	(2 141.00±187.32)b
SA3.5	(401.36±86.49)cd	(0.52±0.08)c	(1.34±0.23)c	(64.92±2.33)b	(20.66±0.74)d	(1 545.66±577.92)bc

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.3 SA 处理对淹水胁迫下西瓜幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

从表 3 可知, 在淹水胁迫下, 各处理西瓜幼苗叶绿素含量均低于 CK 的, SA0 西瓜幼苗叶片中叶

绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+叶绿素 b、类胡萝卜素含量分别显著下降 46.98%、63.51%、50.44%、32.80%; SA 处理下叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+叶绿素 b 含量均显著高于 SA0 的, 其中 SA1.0

表 3 淹水胁迫下 SA 处理西瓜幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量

Table 3 Chlorophyll and carotenoid contents of SA-treated watermelon seedlings under flooding stress

处理	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+叶绿素 b	类胡萝卜素
CK	(5.30±0.02)a	(1.48±0.02)a	(6.78±0.03)a	(1.25±0.01)c
SA0	(2.81±0.07)g	(0.54±0.04)e	(3.35±0.12)g	(0.84±0.01)f
SA0.5	(3.46±0.18)e	(0.97±0.01)b	(4.43±0.19)e	(0.92±0.02)e
SA1.0	(4.68±0.11)b	(0.93±0.09)bc	(5.61±0.17)b	(1.46±0.01)a
SA1.5	(4.36±0.03)c	(0.98±0.05)b	(5.34±0.04)c	(1.30±0.02)b
SA2.5	(4.16±0.03)d	(0.81±0.01)d	(4.97±0.03)d	(1.04±0.04)d
SA3.5	(3.13±0.01)f	(0.86±0.02)cd	(3.99±0.02)f	(0.87±0.01)ef

同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

处理下叶绿素 a、叶绿素 a+叶绿素 b 增长最为显著，分别提升了 66.55%、67.46%；SA1.5 处理下叶绿素 b 显著提升了 81.48%。SA3.5 处理下西瓜叶片类胡萝卜素与 SA0 的差异不显著，SA0.5、SA1.0、SA1.5、SA2.5 处理的类胡萝卜素含量均显著高于 SA0 的，分别提高了 9.52%、73.81%、54.76%、23.81%。

### 2.4 SA 处理对淹水胁迫下西瓜幼苗荧光参数的影响

由表 4 可知，与 CK 相比，SA0 处理下西瓜幼苗  $F_v/F_m$ 、 $\Phi PSII$ 、qP 均显著下降，降幅分别达 11.11%、19.30%、15.22%，而 NPQ 显著增加 50.00%；与 SA0 相比，喷施不同浓度 SA 处理下的西瓜幼苗叶片的  $F_v/F_m$  均无显著差异，NPQ 均显著下降，其中 SA1.0、SA1.5 和 SA2.5 处理的分别降低了 21.21%、27.27%、28.79%。SA1.5 处理的  $\Phi PSII$ 、qP 比 SA0 的分别显著增加了 23.91%、12.82%。

表 4 淹水胁迫下 SA 处理西瓜幼苗的荧光参数

Table 4 Fluorescence parameters of SA-treated watermelon seedlings under flooding stress

处理	$F_v/F_m$	$\Phi PSII$	qP	NPQ
CK	(0.81±0.05)a	(0.57±0.01)a	(0.92±0.05)a	(0.44±0.03)c
SA0	(0.72±0.03)b	(0.46±0.02)b	(0.78±0.02)c	(0.66±0.05)a
SA0.5	(0.74±0.01)b	(0.52±0.01)ab	(0.85±0.03)b	(0.55±0.07)b
SA1.0	(0.77±0.03)ab	(0.50±0.06)b	(0.84±0.06)bc	(0.52±0.06)bc
SA1.5	(0.74±0.03)b	(0.57±0.05)a	(0.88±0.02)ab	(0.48±0.07)bc
SA2.5	(0.76±0.01)ab	(0.53±0.02)ab	(0.84±0.02)bc	(0.47±0.02)bc
SA3.5	(0.76±0.02)ab	(0.51±0.04)ab	(0.83±0.02)bc	(0.56±0.06)b

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.5 SA 处理对淹水胁迫下西瓜幼苗叶片光合参数的影响

由表 5 可知，与 CK 相比，SA0 西瓜幼苗叶片  $P_n$ 、 $C_i$ 、 $T_s$  分别显著降低 38.58%、43.73%、38.10%。淹水胁迫下喷施 SA 后，SA1.5、SA2.5 处理的叶片  $G_s$  较 SA0 的分别提高了 87.80%、114.63%；SA1.0、SA1.5 处理的叶片  $C_i$  较 SA0 的分别显著提高了 42.75%、57.00%；与 SA0 相比，喷施 SA 增加了  $P_n$ 、 $T_s$ ，但无显著性差异。

表 5 淹水胁迫下 SA 处理西瓜幼苗叶片的光合参数

Table 5 Photosynthetic parameters of leaves of SA-treated watermelon seedlings under flooding stress

处理	$P_n / (\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$G_s / (mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$C_i / (\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$T_s / (mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$
CK	(12.26±1.93)a	(0.43±0.26)b	(216.98±38.63)a	(4.62±0.62)a
SA0	(7.53±1.81)b	(0.41±0.25)b	(122.10±13.68)d	(2.86±1.66)b
SA0.5	(8.22±0.43)b	(0.56±0.10)ab	(153.93±37.55)bcd	(3.66±0.61)ab
SA1.0	(9.84±1.04)ab	(0.47±0.19)b	(174.30±18.09)abc	(4.24±2.21)ab
SA1.5	(9.68±1.35)ab	(0.77±0.04)a	(191.70±7.59)ab	(4.91±0.19)ab
SA2.5	(10.12±2.00)ab	(0.88±0.11)a	(149.00±12.49)bcd	(5.53±0.64)ab
SA3.5	(7.63±0.69)b	(0.38±0.16)b	(135.20±19.90)cd	(3.22±0.55)b

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.6 SA 处理对淹水胁迫下西瓜幼苗抗氧化酶活性及 MDA 含量的影响

从表 6 可以看出，与 CK 相比，SA0 的 POD、SOD、CAT 活性及 MDA 含量均有显著性差异，其中 POD、SOD、CAT 活性分别显著下降 40.72%、29.54%、28.61%，MDA 含量增加 132.37%。SA 处理后，POD、SOD 活性均显著高

于 SA0 的；其中 SA0.5、SA1.0、SA1.5 处理下 CAT 活性均显著高于 SA0 的，分别显著增加 25.55%、20.92%、15.50%；与 SA0 处理相比，SA0.5、SA1.0、SA1.5、SA2.5、SA3.5 处理后西瓜幼苗的 MDA 含量均显著降低，分别降低了 17.61%、53.32%、26.31%、13.75%、13.75%。

表6 淹水胁迫下 SA 处理西瓜幼苗的抗氧化酶活性及 MDA 含量

处理	POD 活性/(U g <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	SOD 活性/(U g <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	CAT 活性/(U g <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	MDA 含量/(μmol g <sup>-1</sup> )
CK	(52.53±5.20)f	(77.65±2.37)d	(71.05±3.02)a	(14.15±0.10)f
SA0	(31.14±0.83)g	(54.71±1.53)g	(50.72±4.96)de	(32.88±0.09)a
SA0.5	(76.50±0.75)d	(63.10±0.50)f	(63.68±0.32)ab	(27.09±0.18)c
SA1.0	(63.24±2.34)e	(80.03±0.77)c	(61.33±0.42)bc	(15.35±0.12)e
SA1.5	(87.49±10.33)c	(90.18±0.31)b	(58.58±5.31)abc	(24.23±0.12)d
SA2.5	(107.00±0.41)b	(101.04±0.83)a	(53.60±6.30)cd	(28.36±0.23)b
SA3.5	(120.46±1.28)a	(74.14±0.51)e	(41.81±1.02)e	(28.36±0.23)b

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

## 2.7 不同处理西瓜幼苗耐涝性差异综合评价

将各处理西瓜幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量、根冠比、总根长等 27 个指标进行主成分分析。由表 7 可知,前 5 个主成分的特征值均大于 1,累计贡献率达到 98.19%。第 1 主成分的特征值和贡献率分别为 18.56、68.75%,总根长、根尖数、叶绿素 a+叶绿素 b 的载荷值较高,均高于

0.96;第 2 主成分的贡献率为 14.82%,气孔导度的载荷值较高,为 0.92;第 3 主成分的贡献率为 6.57%,POD 活性的载荷值较高,为 0.62;第 4 主成分的贡献率为 4.15%,根冠比的载荷值较高,为 0.45;第 5 成分的贡献率为 3.91%,CAT 活性的载荷值较高,为 0.41。

表7 淹水胁迫下西瓜幼苗各性状的主成分载荷值

性状	主成分的载荷值				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
株高(X1)	0.57	0.35	-0.45	-0.52	-0.15
茎粗(X2)	0.80	-0.14	0.44	-0.37	-0.12
鲜质量(X3)	0.92	-0.24	0.21	0.24	0.06
干质量(X4)	0.91	-0.33	0.13	0.18	-0.09
根冠比(X5)	0.75	0.25	-0.30	0.45	-0.27
总根长(X6)	0.98	-0.18	0.01	0.10	0.05
平均直径(X7)	0.91	-0.40	0.00	0.04	0.02
体积(X8)	0.95	-0.29	-0.13	-0.02	-0.05
根系表面积(X9)	0.94	-0.31	0.04	0.13	0.04
根系投影面积(X10)	0.94	-0.33	0.01	0.12	0.00
根尖数(X11)	0.97	0.04	0.13	0.17	-0.06
最大光化学效率(X12)	0.85	-0.16	0.20	0.02	-0.42
实际光化学效率(X13)	0.75	0.35	0.38	-0.05	0.37
光化学淬灭系数(X14)	0.91	0.09	0.27	-0.11	0.26
非光化学淬灭系数(X15)	-0.87	-0.46	-0.16	0.06	-0.01
叶绿素 a(X16)	0.96	0.17	-0.20	-0.01	-0.05
叶绿素 b(X17)	0.93	-0.15	0.28	-0.17	0.10
叶绿素 a+叶绿素 b(X18)	0.99	0.10	-0.09	-0.05	-0.02
类胡萝卜素(X19)	0.73	0.22	-0.48	-0.20	-0.14
净光合速率(X20)	0.96	0.13	-0.11	0.20	0.02
气孔导度(X21)	0.07	0.92	-0.10	0.13	0.32

表 7(续)

性状	主成分的载荷值				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度(X22)	0.95	0.03	-0.03	-0.10	0.20
蒸腾速率(X23)	0.62	0.75	-0.11	0.15	0.07
POD 活性(X24)	-0.12	0.68	0.62	-0.21	-0.32
SOD 活性(X25)	0.44	0.86	0.04	0.16	-0.19
CAT 活性(X26)	0.78	-0.17	-0.32	-0.22	0.41
MDA 含量(X27)	-0.89	0.14	0.22	0.25	0.23
特征值	18.56	4.00	1.77	1.12	1.05
方差贡献率/%	68.75	14.82	6.57	4.15	3.91
累计方差贡献率/%	68.75	83.57	90.13	94.29	98.19

以每个主成分对应的方差相对贡献率为权重，可以得到综合评价模型  $F_{总} = 0.70F_1 + 0.15F_2 + 0.07F_3 + 0.04F_4 + 0.04F_5$ ，计算各处理西瓜幼苗质量综合得分，分值越大，说明该处理抗涝性越好。

从表 8 可以看出，综合评价各处理抗涝性从强至弱依次为 SA1.0、SA1.5、SA2.5、SA0.5、SA3.5、SA0。可以看出淹水胁迫下，喷施 1.0 mol/L 水杨酸预处理的西瓜幼苗抗涝性最好。

表 8 淹水胁迫下西瓜幼苗的主成分得分和综合评价结果

Table 8 Component scores and comprehensive evaluation results of SA-treated watermelon seedlings under flooding stress

处理	得分					综合得分	排名
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>		
SA0	-16.82	-0.67	-0.10	0.05	0.02	-17.51	6
SA0.5	-5.57	-0.16	0.03	-0.07	0.05	-5.73	4
SA1.0	5.27	-0.04	-0.19	-0.04	-0.05	4.94	1
SA1.5	3.19	0.62	-0.00	0.00	0.05	3.87	2
SA2.5	-0.69	0.97	-0.01	0.04	-0.02	0.30	3
SA3.5	-9.36	-0.12	0.21	-0.01	-0.05	-9.34	5

### 3 结论与讨论

植物生长发育除了受遗传因素调控外，还受环境条件的影响，淹水胁迫是影响露地栽培作物生长的重要因素。本试验中，与 CK 相比，淹水胁迫处理明显抑制了西瓜幼苗的生长，植株的农艺性状、根系构型等各项指标显著低于对照，这与前人的结果研究一致<sup>[9]</sup>。淹水胁迫后植株会产生一系列生理生化反应，水分过多导致土壤水势降低，植株根系产生的信号物质传递到植株地上部分的能力降低，气孔闭合和蒸腾拉力减小，水力传导度降低<sup>[10]</sup>。朱进等<sup>[11]</sup>研究发现，淹水胁迫下丝瓜幼苗根系总长度、平均直径、根系体积显著降低。李颖等<sup>[12]</sup>的研究结果表明，淹水抑制了花生幼苗根系生长，其根系长度、根系干质量及根长密度均显著降低。本研究中，淹水胁迫下西瓜幼苗根系总根长、平均直径、体积、根系表面积、根系投影面积、根尖数显著降低，而喷施适

当浓度的 SA 可以有效促进淹水胁迫下西瓜幼苗根系的生长，改善根系构型，以适应淹水胁迫。

叶绿素和类胡萝卜素是植物对光能吸收和转化的必要色素，而叶绿素含量高低直接影响植株同化物的积累，能准确反映植物光合作用的强弱<sup>[13]</sup>。王俊良等<sup>[14]</sup>研究表明，随着淹水胁迫时间的延长，甜瓜品系幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和总叶绿素含量均呈下降趋势。本试验也得出了类似的结果。而淹水胁迫下喷施不同浓度的水杨酸可显著提高西瓜幼苗的叶绿素及类胡萝卜素含量，缓解淹水胁迫对光合作用的影响。

植物本身的生理变化如衰老或者逆境胁迫等都能直接或间接地伤害 PSII 供体侧，影响植物的实际光化学效率<sup>[15]</sup>。有研究<sup>[16]</sup>表明，高温处理使 PSII 的荧光产量降低。CRITCHLEY 等<sup>[17]</sup>研究发现，PSII 之间的电子传递受阻时，荧光强度变小。本试验中，在淹水胁迫下，SA0 处理的  $F_v/F_m$ 、 $\Phi PSII$ 、

qP 均显著低于正常处理的, 而 NPQ 显著高于正常处理的, 在淹水胁迫下, 喷施 SA 则可以促进叶片光合能力的提升。

在非生物胁迫下, 植物的活性氧 ROS 增加, 以维持植物体内复杂的 ROS 平衡调控机制<sup>[3,18]</sup>。植株发生逆境伤害时, MDA 的含量变化与伤害程度密切相关<sup>[19]</sup>。本试验结果表明, 淹水胁迫下西瓜幼苗抗氧化酶活性显著降低, MDA 含量显著提高。淹水胁迫前外施一定浓度 SA 可以有效提升 POD 和 SOD 等抗氧化酶活性, 降低 MDA 含量, 缓解西瓜幼苗淹水胁迫程度, 这与甜瓜<sup>[20]</sup>、辣椒<sup>[21]</sup>、水稻<sup>[22]</sup>的研究结果相一致。

主成分分析结果表明, 前 5 个主成分的累计贡献率为 98.19%, 包含了耐涝指标的大部分信息, 可作为西瓜幼苗耐涝指数评价的综合指标。SA1.0、SA1.5、SA2.5、SA0.5、SA3.5、SA0 处理下西瓜幼苗的综合得分依次降低。

综上所述, 淹水胁迫前喷施 SA 可以改善西瓜幼苗的农艺性状, 改变根系构型, 缓解淹水胁迫对光合作用的影响, 增强抗氧化酶活性。淹水胁迫下 1.0 mmol/L 的 SA 处理的西瓜幼苗的耐涝性最好, 植株生长状态更接近正常培养状态, 但淹水胁迫解除后 SA 对西瓜植株生长的影响还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] PAN J W, SHARIF R, XU X W, et al. Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: research progress and prospects[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 11: 627331.
- [2] 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.
- [3] 何俊瑜, 任艳芳. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下生菜幼苗生长和光合性能的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2009, 35(6): 628-631.
- [4] ZHOU Z S, GUO K, ELBAZ A A, et al. Salicylic acid alleviates mercury toxicity by preventing oxidative stress in roots of *Medicago sativa*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(1): 27-34.
- [5] 余婷, 蔡翠萍. 水杨酸对香云幼苗淹水胁迫的缓解和恢复作用[J]. *农家参谋*, 2020(16): 155.
- [6] LUAN H Y, SHEN H Q, PAN Y H, et al. Elucidating the hypoxic stress response in barley(*Hordeum vulgare* L.) during waterlogging: a proteomics approach[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9655.
- [7] 沈伟其. 测定水稻叶片叶绿素含量的混合液提取法[J]. *植物生理学通讯*, 1988, 24(3): 62-64.
- [8] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 王寒. 淹水胁迫对玉米幼苗生长的影响及生理响应机制[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [10] 葛建坤, 平盈璐, 龚雪文, 等. 水分亏缺对温室覆膜滴灌番茄根系生长及吸水量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(3): 1-9.
- [11] 朱进, 徐兰婷, 李文静. 淹水胁迫对不同丝瓜品种根系生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(6): 22-28.
- [12] 李颖, 赵继浩, 李金融, 等. 外源 6-BA 对不同生育时期淹水花生根系生长和荚果产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(18): 3665-3678.
- [13] 宋苗影. 外源蔗糖对弱光下南瓜幼苗生长与生理的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [14] 王俊良, 龙启炎, 汪李平, 等. 淹水胁迫及胁迫解除对甜瓜光合色素和光合特性的影响[J]. *中国蔬菜*, 2013(8): 50-55.
- [15] 孙凤岭, 陈昆, 姜涛, 等. 盐胁迫对西瓜幼苗光合色素、光合特性及抗氧化保护酶系统的影响[J]. *园艺与种苗*, 2022, 42(12): 4-6.
- [16] LU C M, QIU N W, WANG B S, et al. Salinity treatment shows no effects on photosystem II photochemistry, but increases the resistance of photosystem II to heat stress in halophyte *Suaeda salsa*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(383): 851-860.
- [17] CRITCHLEY C, BAIANU I C, GOVINDJEE, et al. The role of chloride in O<sub>2</sub> evolution by thylakoids from salt-tolerant higher plants[J]. *Biochimica et Biophysica Acta(BBA)-Bioenergetics*, 1982, 682(3): 436-445.
- [18] 江生泉, 薛正帅, 梁建军, 等. 外源水杨酸对盐胁迫高羊茅生长和生理的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(2): 166-170.
- [19] 张清航, 张永涛. 植物体内丙二醛(MDA)含量对干旱的响应[J]. *林业勘查设计*, 2019(1): 110-112.
- [20] 刁倩楠, 蒋雪君, 陈幼源, 等. 外源水杨酸预处理对低温胁迫下甜瓜幼苗生长及其抗逆生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2018, 38(11): 2072-2080.
- [21] 夏文荣. 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[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(9): 73-78.
- [22] 黄万勇, 卢成, 郑世宗, 等. 淹水胁迫对水稻植株抗氧化酶变化的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(11): 1008-1012.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 柳正