



铝胁迫下水杨酸对西瓜幼苗生长的影响

田小曼¹,李朝红²

(1. 杨凌职业技术学院,陕西杨凌 712100;2. 汉中职业技术学院,陕西汉中 723002)

摘要 旨在明确铝胁迫下水杨酸(SA)对西瓜幼苗生长的影响。采用水培法研究铝胁迫(500 $\mu\text{mol/L}$)下不同浓度 SA(10 $\mu\text{mol/L}$ 、50 $\mu\text{mol/L}$)处理对西瓜幼苗根系伸长生长及鲜质量、质膜过氧化程度及营养元素吸收的影响。结果显示,外源 SA 能有效缓解铝胁迫对西瓜幼苗根长和鲜质量的影响,降低质膜过氧化水平,缓解幼苗对 Na、K、Mg、Ca 等元素的吸收障碍。其中,10 $\mu\text{mol/L}$ 外源 SA 效果最佳,在铝胁迫下对根系长度抑制的缓解效果达 62.7%,对根系鲜质量的胁迫缓解效果达 108.9%,对根系中丙二醛(MDA)含量的降幅达 29.6%,同时对调节植株体内 Na、K、Mg、Ca 元素的平衡有促进作用。

关键词 西瓜幼苗;水杨酸;铝胁迫;缓解

中图分类号 S651

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2021)03-0406-07

土壤中的铝在多数情况下以难溶的硅酸盐或氧化铝的形式存在,对植物没有毒害^[1],但当土壤环境 pH 下降到 5 以下时,原固定于晶格中的难溶性铝逐渐转变为离子态可溶性铝(主要是 Al^{3+})释放到溶液中,直接危害植物生长^[2-3]。铝的毒害是酸性土壤或酸化土壤上限制作物产量的主要因子之一^[4-5]。

水杨酸(Salicylic acid, SA)是一种广泛存在于植物中的一类小分子酚类物质,其具有重要的生理功能,在植物的生理方面发挥着重要的作用^[6-7],在植物的抗病^[8]、抗旱^[9]、耐热^[10]和抗盐^[11-12]等方面,以及对种子萌发、果实成熟和园艺产品保鲜上具有明显作用^[13]。水杨酸也可以缓解铝毒等金属离子的胁迫,对含金属离子胁迫等盐碱地的作物高效栽培和产量提高有重要意义^[14-16]。

西瓜铝毒害的缓解可以通过添加钙磷元素、柠檬酸和外源有机酸缓解^[17-19],而水杨酸处理缓解铝毒害还未见报道。本试验研究水杨酸缓解铝胁迫对西瓜幼苗质膜过氧化水平、营养元素吸收和根系伸长及鲜质量生长的毒害作用,旨在揭示水杨酸缓解西瓜幼苗铝胁迫的机理,以便更好地防治铝胁迫对西瓜幼苗的毒害,为铝胁迫地块西瓜优质高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

西瓜品种为市售的‘早佳 8424’,江苏省江蔬种苗科技有限公司生产。

1.2 种子处理

选取大小一致、圆润饱满的西瓜种子,洗净,温汤浸种(55 $^{\circ}\text{C}$, 15 min),自然冷却至室温后继续浸种 24 h,28 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗中催芽。

1.3 盆栽试验

萌发后播种到装有珍珠岩的育苗盘中光照培养,待幼苗第 1 片真叶完全展开后选取长势一致的植株移栽到塑料盆里,每盆 3 株,并采用改良的 Hoagland 培养液浇灌培养。当幼苗长至 5 叶期时,以改良 Hoagland 营养液为母液,设置 6 个处理:(1)营养液(Con);(2)营养液+500 $\mu\text{mol/L}$ AlCl_3 (Al500);(3)营养液+500 $\mu\text{mol/L}$ AlCl_3 +10 $\mu\text{mol/L}$ SA(Al500+SA10);(4)营养液+500 $\mu\text{mol/L}$ AlCl_3 +50 $\mu\text{mol/L}$ SA(Al500+SA50);(5)营养液+10 $\mu\text{mol/L}$ SA(SA10);(6)营养液+50 $\mu\text{mol/L}$ SA(SA50),铝盐和外源水杨酸添加后,采用 HCl/NaOH 调节 pH 至 4.5 左右,每 3 d 更换一次处理液。每处理 10 盆,重复 3 次。

1.4 根长、鲜质量与质膜过氧化水平测定

各浓度处理 7 d 后测定植株根系总长度、鲜

收稿日期:2020-08-01 修回日期:2020-09-30

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划(18JK0886);杨凌职业技术学院自然科学研究基金(A2017029)。

第一作者:田小曼,女,副教授,主要从事植物保护方面的研究。E-mail:505100038@qq.com

质量、质膜过氧化水平。采用 LA-S 型植物根系分析仪系统测量并记录不同处理组根系的总长,并称量其鲜质量。每个处理重复 3 次。

质膜过氧化水平采用张志良^[20]的方法,通过检测硫代巴比妥与丙二醛(MDA)反应生成物的含量来表示。取 0.3 g 新鲜西瓜苗根系材料,加入预冷的三氯乙酸(TCA) 10% (质量体积比) 3 mL,冰浴研磨,研磨液 4 000×g 离心 10 min 后,取上清液留用。然后,将 0.6% 硫代巴比妥(质量体积比)(溶质为 10% 的 TBA 溶液)加入上清液,混匀,沸水浴 15 min,取出后冷却,立即测定 OD₅₃₂、OD₄₅₀ 和 OD₆₀₀。

$$\text{MDA}(\mu\text{mol/g}) = 6.45 \times (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56 \times \text{OD}_{450}$$

1.5 营养元素含量测定

6 个不同处理的盆栽生长 10 d 和 20 d 后,取植株分别用去离子水冲洗,将叶和茎经 105 °C 高温杀青 15 min,与根一起在 70 °C 下烘干至恒质量。将烘干后的样品研磨成粉状;每个样精确称量 0.1 g,加入硝酸进行硝化,将硝化后的结晶状物质用去离子水定容至 50 mL,作为待测溶液。采用电感耦合等离子体质谱法(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)测定 Na、K、Mg、Ca 4 种元素的含量^[21]。

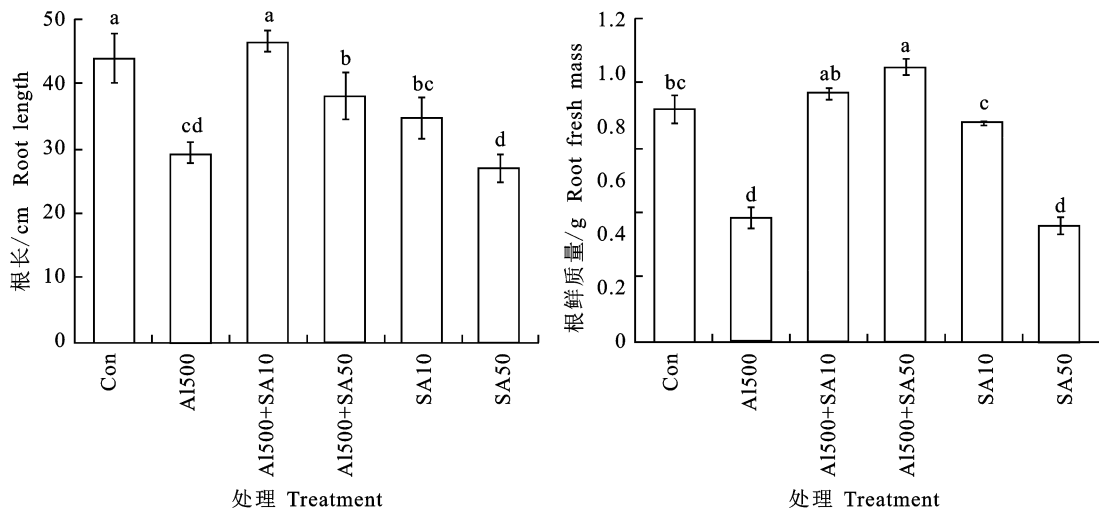
1.6 数据处理

用 Spss 13.0 进行数据统计分析,用 Excel 2013 作图,分析外源 SA 对 Al³⁺ 胁迫下西瓜幼苗生长及对营养元素吸收的影响。

2 结果与分析

2.1 外源 SA 对 Al³⁺ 胁迫下西瓜幼苗根系伸长生长及鲜质量的影响

结果表明,以空白对照组相比,高浓度 Al³⁺ 胁迫处理西瓜幼苗时,根系伸长生长明显受到抑制,浓度为 500 μmol/L 的铝处理时,抑制程度高达 33.3%;外源 SA 的加入能缓解 Al³⁺ 胁迫对根系伸长生长的抑制作用,且浓度愈低,缓解作用愈明显,分析发现,Al500+SA10 处理时的根长 > Al500+SA50 处理时的根长,且 Al500+SA10 处理后其根长较 Al500 单独处理增加 62.7%。高浓度 Al³⁺ 胁迫处理西瓜幼苗时,根系鲜质量亦明显受到抑制,浓度为 500 μmol/L 的 Al³⁺ 处理时,较空白对照组相比,其对西瓜幼苗根系鲜质量的抑制作用比对根系伸长生长的抑制作用更加明显,抑制程度达到 50.0%;外源 SA 的加入能缓解 Al³⁺ 胁迫对根鲜质量的抑制作用,其中 SA10 和 SA50 较 Al500 胁迫时的缓解效果分别达 108.9% 和 153.3%(图 1)。



不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below

图 1 Al³⁺ 胁迫下不同处理西瓜的生长

Fig. 1 Growth of watermelon seedling under aluminum stress

2.2 外源 SA 对 Al³⁺ 胁迫下西瓜幼苗质膜过氧化水平的影响

Al³⁺ 胁迫后可显著提升西瓜幼苗根系中

MDA 的含量,当 Al³⁺ 浓度为 500 μmol/L 单独处理时,根系 MDA 含量高达 1.38 μmol/g,是空白对照组含量的 2.22 倍;500 μmol/L 的 Al³⁺ 胁迫

时,经低浓度外源 SA(10 $\mu\text{mol/L}$)处理,能较有效地降低西瓜幼苗根系中 MDA 含量,根系 MDA 含量降低至 0.92 $\mu\text{mol/g}$,是空白对照组的 1.48 倍,缓解效果达 29.6%;高浓度 SA 用于缓解 Al^{3+} 胁迫或单独处理时,不但不能起到缓解作用,反而进一步增加了根系 MDA 含量。

对于西瓜幼苗叶片 MDA 分析时发现, Al^{3+} 胁迫后其含量较空白组上升 6.1%;低浓度外源

SA(10 $\mu\text{mol/L}$)具有缓解作用,缓解效果达 8.2%,缓解后叶片 MDA 含量甚至低于空白对照组;但当 SA 处理浓度增大后,其缓解作用降低;当 SA 单独处理时,反而引发叶片 MDA 含量上升(图 2)。

2.3 外源 SA 对 Al^{3+} 胁迫下西瓜幼苗营养元素吸收的影响

2.3.1 Na 元素

Al^{3+} 胁迫下西瓜幼苗茎和叶中 Na 元素含量在短期(10 d)内未发生明显变化,长时间(20 d)处理后 Na 元素含量下降,其中茎中 20 d 处理后的 Na 元素含量较 10 d 处理后下降 49.4%,叶片中 Na 元素含量 20 d 处理较 10 d 下降 11.7%;根系中 Na 元素含量表现出相反的变化,短期(10 d)内含量下降,长时间(20 d)处理后反而上升,较 10 d 处理的含量上升达 2.87 倍(表 1)。

低浓度外源 SA(10 $\mu\text{mol/L}$)和铝胁迫处理在短时间内(10 d)表现出促进植株对 Na 元素的吸收,较 Al^{3+} 单独处理时提升 48.3%,较空白对照组提升 28.8%;高浓度外源 SA(50 $\mu\text{mol/L}$)和铝胁迫处理在短时间内(10 d)对缓解 Al^{3+} 胁迫对 Na^+ 元素的吸收效果不明显;但二者长时间(20 d)同时作用于西瓜幼苗植株后,西瓜幼苗对 Na 元素吸收量趋于对照组水平。

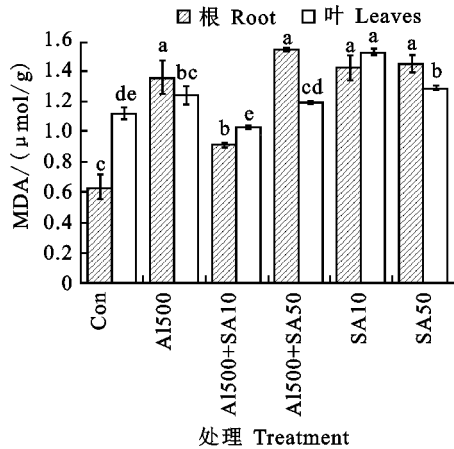


图 2 水杨酸对铝胁迫下西瓜幼苗根系和叶片 MDA 含量的影响

Fig. 2 MDA content of watermelon seedlings under aluminum stress

表 1 不同处理下西瓜幼苗对 Na 元素的吸收

Table 1 Absorption of Na in watermelon seedlings under aluminum stress

处理 Treatment		Na^+ /(mg/g)			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总和 Sum
Con	10 d	2.35±0.04 e	2.31±0.04 a	2.27±0.08 bc	6.93±0.16 b
	20 d	2.90±0.05 d	1.55±0.05 b	2.37±0.09 b	6.82±0.19 b
Al500	10 d	1.39±0.02 g	2.41±0.10 a	2.22±0.09 c	6.02±0.21 c
	20 d	5.38±0.05 a	1.22±0.05 c	1.96±0.07 d	8.56±0.17 a
Al500+SA10	10 d	4.50±0.26 b	2.32±0.06 a	2.11±0.05 cd	8.93±0.33 a
	20 d	3.76±0.08 c	0.91±0.07 d	2.19±0.03 c	6.86±0.18 b
Al500+SA50	10 d	2.07±0.02 f	1.14±0.02 cd	2.72±0.05 a	5.93±0.09 c
	20 d	4.24±0.02 b	1.34±0.04 bc	1.38±0.08 ef	6.96±0.14b
SA10	10 d	2.34±0.03e	1.30±0.07 bc	2.97±0.01 a	6.61±0.11bc
	20 d	2.84±0.06 d	1.56±0.08 b	1.58±0.04 e	5.98±0.18c
SA50	10 d	2.07±0.03 f	1.75±0.02 b	2.83±0.02 a	6.65±0.07bc
	20 d	3.98±0.05 c	1.06±0.09 d	1.39±0.08 ef	6.43±0.22bc

注:数据为“平均数±标准差”。同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Data are “mean±SD”. Different lowercase letters within same rows indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below.

2.3.2 K 元素

Al^{3+} 胁迫下西瓜幼苗根系中 K 元素含量较空白对照组下降 37.4%,但随处理时

间的延长(20 d),其含量略微上升;茎中 K 含量短期内(10 d)略微下降 4.9%,长时间(20 d)胁迫下

K 含量反而上升 7.5%;在 Al^{3+} 胁迫下短时间和长时间处理叶中 K 含量明显下降,分别下降 3.33%和 18.1%。但对于西瓜幼苗整株植株来说,总 K 含量在 Al^{3+} 胁迫短期(10 d)内急剧降低,降幅达 13.9%;但随处理时间的延长(20 d),总 K 含量有上升趋势(表 2)。

外源 SA 的加入将影响 Al^{3+} 胁迫对西瓜幼苗植株 K 元素的吸收作用:以根系中 K 含量为例,在低浓度或高浓度外源 SA(10 $\mu\text{mol/L}$ 或 50 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} (500 $\mu\text{mol/L}$) 同时处理时短期内(10 d)表现出大幅增加,较 Al^{3+} 单独处理时分

别增加 98.6%和 135.1%;低浓度 SA 单独处理时能提升 K 含量,但高浓度 SA 处理反而在一定程度上起到抑制作用。

植株总 K 含量在低浓度外源 SA (10 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} (500 $\mu\text{mol/L}$) 同时处理时短期内(10 d)表现出缓解 Al^{3+} 胁迫作用,较 Al^{3+} 单独处理时上升 27.0%;高浓度外源 SA(50 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} (500 $\mu\text{mol/L}$) 同时处理时短期内(10 d)表现出更为明显的上升趋势,较 Al^{3+} 单独处理时上升 37.0%;但长时间(20 d)处理后该作用出现下降趋势。

表 2 不同处理下西瓜幼苗对 K 元素的吸收

Table 2 Absorption of K in watermelon seedlings under aluminum stress

处理 Treatment		$K^+ / (\text{mg/g})$			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总和 Sum
Con	10 d	32.44±0.05 c	47.87±0.05 c	31.80±0.06 bc	112.12±0.16 c
	20 d	22.86±0.02 e	48.45±0.16 c	33.26±0.08 ab	104.58±0.24 d
Al500	10 d	20.31±0.06 e	45.53±0.02 e	30.74±0.05 c	96.59±0.13 f
	20 d	21.05±0.08 e	52.10±0.13 b	27.23±0.04 d	100.38±0.25 e
Al500+SA10	10 d	40.34±0.14 b	52.15±0.16 b	30.14±0.07 c	122.63±0.37 b
	20 d	30.69±0.51 c	56.45±0.08 a	32.45±0.05 b	119.59±0.64 bc
Al500+SA50	10 d	47.75±0.56 a	51.35±0.21 b	33.25±0.10 ab	132.35±0.87a
	20 d	25.95±0.30 d	46.92±0.06 d	32.49±0.09 b	105.36±0.15d
SA10	10 d	41.65±0.12 b	50.20±0.85 bc	30.98±0.03 c	122.84±0.10 b
	20 d	29.80±0.16 c	46.10±0.09 de	34.02±0.11 a	109.93±0.36 c
SA50	10 d	28.85±0.07 c	42.55±0.05 f	30.78±0.05 c	102.19±0.17 e
	20 d	25.23±0.16 d	45.23±0.12 e	31.40±0.06 bc	100.87±0.34 e

2.3.3 Mg 元素 Al^{3+} 胁迫下西瓜幼苗根系中 Mg 含量短期内(10 d)下降,较空白对照下降约 15.2%;长时间(20 d)处理后, Mg 含量也上升 15.8%;茎中 Mg 含量在短期(10 d) Al^{3+} 胁迫下变化甚小,但长时间(20 d)处理后与相同处理时间的对照组相比上升 18.9%;叶中 Mg 含量在短期(10 d) Al^{3+} 胁迫下上升 10.5%,但长时间(20 d)处理后 Mg 含量与相同处理时间的对照组相比下降 37.3%;对整株植株来说,短期(10 d) Al^{3+} 胁迫能提高 Mg 的总含量,增幅 5.0%;但长时间(20 d)处理后其总含量下降 12.9%(表 3)。

外源 SA 能改变西瓜幼苗对 Mg 吸收的影响:短时间(10 d)时, SA(10 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} (500 $\mu\text{mol/L}$)、SA(50 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} (500 $\mu\text{mol/L}$)、SA10 或 SA50 处理后,植株总体 Mg 含量均表现增加,其中 Al500 + SA10 组较 Al500 组增加 12.8%, Al500 + SA50 组较 Al500 组增加 4.9%,

SA10 处理较空白对照组增加 23.7%, SA50 处理较空白对照组增加 3.1%。长时间(20 d)处理后分析发现, SA(10 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} (500 $\mu\text{mol/L}$) 可进一步促进 Mg 的吸收,较 Al500 处理组增加 26.9%。

2.3.4 Ca 元素 Al^{3+} 胁迫下西瓜幼苗根系和茎中 Ca 元素含量短期内(10 d)下降,但长时间(20 d)处理后, Ca 含量急剧上升;西瓜幼苗叶中 Ca 含量变化与根系和茎中 Ca 含量变化相反;西瓜幼苗整株植株体内 Ca 的总含量在 Al^{3+} 胁迫下短期内(10 d)略有上升,但长时间(20 d)处理后 Ca 的总含量急剧下降(表 4)。

外源 SA 的加入,能明显改变 Al^{3+} 胁迫下西瓜幼苗各组织部分 Ca 的含量:当 SA + Al^{3+} 同时处理西瓜幼苗时,根系中 Ca 的含量均有很明显的上升;低浓度外源 SA(10 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} 能提高西瓜幼苗茎中 Ca 的含量,而高浓度外源 SA

(10 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} 反而降低其含量; SA + Al^{3+} 同时处理时, 短期内(10 d)能提高叶片中 Ca 的含量, 长时间(20 d)处理则得到相反结果; 西瓜幼苗整株植株体内 Ca 的总含量在低浓度外源 SA(10

$\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} 处理时有较明显的上升, 而高浓度外源 SA(50 $\mu\text{mol/L}$) + Al^{3+} 处理时短期内(10 d)能提高其含量, 经过 20 d 处理后其含量反而下降。

表 3 不同处理下西瓜幼苗对 Mg 元素的吸收

Table 3 Absorption of Mg in watermelon seedlings under aluminum stress

处理 Treatment		$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg/g})$			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总和 Sum
Con	10 d	1.32±0.12 ef	3.89±0.02 b	8.15±0.08 d	13.36±0.20 e
	20 d	1.84±0.03 d	3.17±0.06 de	10.90±0.36 a	15.91±0.45 bc
Al500	10 d	1.12±0.09 f	3.90±0.04 b	9.01±0.10 c	14.03±0.23 de
	20 d	2.13±0.02 cd	3.77±0.10 bc	7.94±0.08e	13.85±0.20 de
Al500+SA10	10 d	2.51±0.04 b	3.57±0.06 c	9.75±0.06 b	15.83±0.16 bc
	20 d	2.22±0.01 c	4.49±0.04 a	10.86±0.27 a	17.57±0.32 a
Al500+SA50	10 d	1.67±0.21 e	3.24±0.05 d	9.81±0.05 b	14.72±0.31 d
	20 d	2.38±0.02 bc	3.11±0.01e	9.66±0.07 b	15.15±0.10 cd
SA10	10 d	2.88±0.03 a	3.48±0.03 c	10.17±0.15 ab	16.53±0.21 b
	20 d	2.09±0.05 cd	3.92±0.08 b	9.54±0.11 bc	15.55±0.24 c
SA50	10 d	2.21±0.04 c	3.23±0.03 d	8.33±0.06 d	13.77±0.13 de
	20 d	2.32±0.08 bc	3.18±0.04 de	7.82±0.03 e	13.32±0.15 e

表 4 不同处理下西瓜幼苗对 Ca 元素的吸收

Table 4 Absorption of Mg in watermelon seedlings under aluminum stress

处理 Treatment		$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg/g})$			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总和 Sum
Con	10 d	8.12±0.05 e	22.23±0.25 b	39.30±1.52 de	69.65±1.82 d
	20 d	12.68±0.19 d	18.50±0.56 cd	52.65±1.20 ab	83.83±1.95 b
Al500	10 d	6.29±0.11 f	21.87±0.35 b	42.49±0.98 d	70.65±1.41 d
	20 d	15.15±0.18 c	19.24±0.19 cd	36.53±1.58 e	70.91±1.95 d
Al500+SA10	10 d	19.59±0.13 a	23.51±0.52 a	49.35±1.73 b	92.45±2.38 a
	20 d	13.06±0.12 d	21.94±0.15 b	51.80±1.61 ab	86.80±1.88 ab
Al500+SA50	10 d	8.24±0.07 e	17.79±0.28 cd	47.78±0.95 b	73.81±1.30 c
	20 d	16.35±0.10 bc	16.50±0.06 e	42.46±1.02 d	75.31±1.18 c
SA10	10 d	16.33±0.05 bc	19.98±0.12 c	55.55±2.59 a	91.86±2.76 a
	20 d	13.67±0.21 d	22.75±0.34 ab	46.29±0.68 c	82.71±1.23 b
SA50	10 d	15.03±0.16 c	17.53±0.17 d	45.86±1.19 c	78.42±2.52 bc
	20 d	17.17±0.04 b	16.58±0.29 e	34.89±0.85 e	68.64±1.18 d

3 结论与讨论

植物根尖细胞 Al^{3+} 的积累是对植物产生伤害的先决条件, 主要表现为根系伸长受到抑制, 从而影响作物的生长^[22], 外源 SA 可以减弱 Al^{3+} 对作物根长的抑制作用, 增加根吸收营养物质的能力, 恢复作物的生理生长^[14]。本试验中 Al^{3+} 胁迫

迫下西瓜幼苗根系伸长生长与鲜质量均受到抑制, 其中 10 $\mu\text{mol/L}$ 外源 SA 在缓解 Al^{3+} 胁迫对西瓜幼苗生长的抑制作用效果较佳, 对根系长度缓解效果达 62.7%, 对根系鲜质量的胁迫缓解效果达 108.9%。

当植物受到逆境胁迫时, 植物体内活性氧含量增加, 活性氧与细胞内的成分反应, 直接或间接

启动质膜过氧化,导致膜损伤^[14]。本试验结果表明,Al³⁺胁迫导致西瓜幼苗植株质膜过氧化水平上升,而外源 SA 能降低甚至解除 Al³⁺胁迫所造成的西瓜幼苗植株质膜过氧化水平上升的幅度,其中 10 μmol/L 外源 SA 在缓解 Al³⁺胁迫时对根系中 MDA 含量的降幅达 29.6%。

闫改各等研究表明,外源 SA 对盐碱胁迫下海滨锦葵植株根和叶对 Na⁺的富集能力增强,其中较高浓度的 SA(1.5 mmol/L)喷施更能促进 Na⁺在根部富集^[23]。本试验中,不同处理组 Na⁺浓度在植物组织中表现为:根>叶>茎,Al³⁺胁迫下西瓜幼苗对 Na 元素的吸收表现出促进作用,铝胁迫加外源 SA 不同浓度均对西瓜幼苗根部的 Na⁺有富集作用。铝胁迫对 K、Mg、Ca 3 种元素的吸收均表现出抑制作用,外源水杨酸的加入,可缓解 Al³⁺胁迫对这些元素吸收的影响作用,且对于钙元素来说,低浓度外源 SA 的缓解作用较高浓度外源 SA 的缓解作用更为明显。

参考文献 Reference:

- [1] LIU K, LUAN S. Internal aluminum block of plant inward K⁺ channels[J]. *Plant Cell*, 2001(13):1453-1465.
- [2] KIEGLE E, GILLIHAM M, HASELOFF J. Hyperpolarisation-activated calcium currents found only in cells from the elongation zone of *Arabidopsis thaliana* roots[J]. *The Plant Journal*, 2000(21):225-229.
- [3] KONG F X, LIU Y, CHENG F D. Aluminum toxicity and nutrient utilization in the mycorrhizal fungus *Hebeloma mesophacus*[J]. *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology*, 1997(59):125-131.
- [4] 林咸永,章永松,陶勤南.不同耐铝性的小麦基因型在酸性铝毒土壤的适应性及其与体内养分状况的关系[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2000, 26(6):635-639.
LIN X Y, ZHANG Y S, TAO Q N. Adaptation of wheat genotypes with differential aluminum tolerance to acid, aluminum toxic soil in relation to their nutrient composition in shoots[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2000, 26(6):635-639.
- [5] 杨野,王伟,刘辉,等.铝胁迫对不同耐铝小麦品种根伸长生长影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3):584-590.
YANG Y, WANG W, LIU H, et al. Effects of aluminum stress on root elongation of different aluminum tolerance wheat cultivars[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):584-590.
- [6] TAHARA K, YAMANOSHITA T, NORISADA M. Aluminum distribution and reactive oxygen species accumulation in root tips of two *Melaleuca* trees differing in aluminum resistance[J]. *Plant Soil*, 2008, 307:167-178.
- [7] 杨婉身,陈惠,王晓丽,等.酸铝对杉木磷吸收和代谢的影响[J]. *林业科学*, 2000, 36(3):73-76.
YANG W SH, CHEN H, WANG X L, et al. Influence of acid aluminum on absorption and metabolism of phosphorus in Chinese fir[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(3):73-76.
- [8] 丁秀英,张军,苏宝林,等.水杨酸在植物抗病中的作用[J]. *植物学通报*, 2001, 18(2):163-168.
DING X Y, ZHANG J, SU B L, et al. Role of salicylic acid in plant disease resistance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(2):163-168.
- [9] 张永福,刘秀青,董翠莲,等.葡萄苗铝-旱胁迫交叉适应对水杨酸的生理响应[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(12):1-8.
ZHANG Y F, LIU X Q, DONG C L, et al. Physiological response of cross adaptation to Al-drought on Salicylic acid in grape seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(12):1-8.
- [10] 孙军利,赵宝龙,郁松林.外源水杨酸(SA)对高温胁迫下葡萄幼苗耐热性诱导研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3):290-294.
SUN J L, ZHAO B L, YU S L. Study of exogenous Salicylic acid(SA) on the heat tolerance in grape seedlings under high temperature stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):290-294.
- [11] 葛淑芳,章艺,梅笑漫,等.外源水杨酸对铜胁迫下烟草叶片碳代谢的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4):324-329.
GE S F, ZHANG Y, MEI X M, et al. Effect of exogenous Salicylic acid on carbon metabolism of tobacco leaves under copper stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4):324-329.
- [12] 董慧,段小春,常智慧.外源水杨酸对多年生黑麦草耐盐性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 2(1):128-135.
DONG H, DUAN X CH, CHANG ZH H. Effect of exogenous salicylic acid on salt tolerance in perennial ryegrass[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 2(1):128-135.
- [13] 阎田,沈全光,刘存德.水杨酸(SA)对果实成熟的影响[J]. *植物学通报*, 1998, 15(3):61-64.
YAN T, SHEN Q G, LIU C D. Effects of Salicylic acid(SA) on ripening fruits[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(3):61-64.
- [14] 高培培,章艺,吴玉环,等.外源水杨酸对铝胁迫下栝楼光合特性及耐铝性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6):268-273.
GAO P P, ZHANG Y, WU Y H, et al. Effect of exogenous SA on photosynthesis and Al tolerance of *Trichosanthes kirilowii* Maxim under aluminum stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):268-273.
- [15] 吴亚.外源水杨酸和 NO 对铝胁迫下黑麦草的缓解研究[D]. 江苏扬州:扬州大学, 2019.
WU Y. Alleviation of exogenous salicylic acid and NO on ryegrass under Al stress[D]. Yangzhou Jiangsu: Yangzhou University, 2019.
- [16] 孟长军,赵银萍,杜喜春,等.水杨酸缓解白苦瓜幼苗铝毒害的生理机制研究[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(7):38-41.
MENG C J, ZHAO Y P, DU X CH, et al. Study on physiological mechanism of mitigation of salicylic acid on alumi-

- num toxicity to white balsam pear seedlings[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(7):38-41.
- [17] 张立文. 钙磷元素对西瓜铝毒害缓解作用的研究[D]. 四川雅安:四川农业大学, 2018.
ZHANG L W. Study on the effects of calcium and phosphorus on the toxic effects of aluminum watermelon[D]. Ya'an Sichuan; Sichuan Agricultural University, 2018.
- [18] 孙远秀, 邱爽, 张伟伟, 等. 柠檬酸对西瓜幼苗铝毒害的缓解作用[J]. *核农学报*, 2016, 30(10):2072-2079.
SUN Y X, QIU SH, ZHANG W W, *et al.* Alleviating effects of citric acid on aluminum toxicity in watermelon seedlings[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(10):2072-2079.
- [19] 孙远秀. 外源有机酸对西瓜铝毒害缓解作用的研究[D]. 四川雅安:四川农业大学, 2016.
SUN Y X. Study on the alleviating effects of exogenous organic acids on aluminum toxicity in watermelons [D]. Ya'an Sichuan; Sichuan Agricultural University, 2016.
- [20] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社, 1990:154, 257.
ZHANG ZH L. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 1990:154, 257.
- [21] 王同蕾, 任硕, 卓勤. ICP-MS法测定不同基质保健品中10种微量元素的方法[J]. *中国食物与营养*, 2018, 24(3):30-33.
WANG T L, REN SH, ZHUO Q. Determination of 10 kinds of elements in health products for different matrix by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Food and Nutrition in China*, 2018, 24(3):30-33.
- [22] MATSUMOTO H, MOTODA H. Oxidative stress is associated with aluminum toxicity recovery in apex of pea root[J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2):399-410.
- [23] 闫改各, 周建. 外源水杨酸对盐碱胁迫下海滨锦葵生长、Na⁺富集与转运的影响[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 2019, 47(4):10-15.
YAN G G, ZHOU J. Effects of exogenous salicylic acid on growth characteristics, Na⁺ accumulation and transferring coefficient in *Kosteletzkya virginica* plants under salin-alkali stress[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(4):10-15.

Effect of Salicylic Acid on Growth of Watermelon Seedlings under Aluminum Stress

TIAN Xiaoman¹ and LI Zhaohong²

(1. Yangling Vocation and Technical College, Yangling Shaanxi 712100, China;

2. Hanzhong Vocational and Technical College, Hanzhong Shaanxi 723002, China)

Abstract In order to explore the effect of salicylic acid (SA) on growth of the watermelon seedling under aluminum stress, the water culture method was used to treat the watermelon seedlings with different SA concentration (10 $\mu\text{mol/L}$, 50 $\mu\text{mol/L}$) under aluminum stress (500 $\mu\text{mol/L}$). The effects of different SA concentrations on the root elongation and fresh mass, the degree of plasma membrane peroxidation and the absorption of nutrients were studied. The results showed that exogenous SA could effectively alleviate the effect of aluminum stress on root length and fresh mass of watermelon seedlings, could reduce the level of plasma membrane peroxidation and alleviate the absorption obstacles of Na, K, Mg, CA, etc. Among them, 10 $\mu\text{mol/L}$ SA had the best effect. Under Al stress, the alleviating effects on root length inhibition, root fresh mass and root MDA content were 62.7%, 108.9% and 29.6%, respectively, at the same time, it could promote the balance of Na, K, Mg, CA in plants.

Key words Watermelon seedlings; Salicylic acid; Aluminum toxicity; Alleviate

Received 2020-08-01

Returned 2020-09-30

Foundation item Special Scientific Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education (No. 18JK0886); Project of Natural Science Research Fund of Yangling Vocational and Technical College (No. A2017029).

First author TIAN Xiaoman, female, associate professor. Research area: plant protection. E-mail: 505100038@qq.com

(责任编辑:郭柏寿 Responsible editor: GUO Baishou)