

# 外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗生长的缓解效应及其机理

付乃鑫<sup>1</sup> 贺明荣<sup>2</sup> 诸葛玉平<sup>1</sup> 代兴龙<sup>2</sup> 胡国庆<sup>1</sup> 董元杰<sup>1\*</sup>

(1. 山东农业大学 资源与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018;

2. 山东农业大学 农学院, 山东 泰安 271018)

**摘要** 为明确外源 SA 缓解冬小麦盐胁迫的适宜浓度。本研究以冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种‘山农 22’为试验材料, 水杨酸 (SA) 作为调控物质, 采用室内营养液培养方法, 研究 5 个浓度的 SA (50, 100, 200, 300 和 500  $\mu\text{mol/L}$ ) 对 120 mmol/L NaCl 胁迫下冬小麦幼苗生长、生理特性的影响。结果表明: 添加 SA 能够缓解盐胁迫对小麦造成的损害。200  $\mu\text{mol/L}$  SA 可以显著提高小麦叶片光合色素含量、根系活力, 促进小麦的生长发育; 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 可显著提高抗氧化酶活性, 增加游离脯氨酸和可溶性蛋白等渗透调节物质含量, 缓解膜质过氧化伤害。本研究所采用的 SA 浓度中, 以 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 对冬小麦幼苗盐胁迫的缓解效果最佳。

**关键词** 水杨酸; 小麦; 盐胁迫; 生长; 生理特性

中图分类号 S512.1; Q945.78

文章编号 1007-4333(2019)03-0010-08

文献标志码 A

## Effects and mechanisms of exogenous SA alleviating the growth of winter wheat seedlings under salt stress

FU Naixin<sup>1</sup>, HE Mingrong<sup>2</sup>, ZHUGE Yuping<sup>1</sup>, DAI Xinglong<sup>2</sup>, HU Guoqing<sup>1</sup>, DONG Yuanjie<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer,

Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

**Abstract** In order to clarify the effects and mechanisms of exogenous SA on the growth of winter wheat seedlings under salt stress and optimize the concentration of exogenous SA alleviating the salt stress. In this study, a hydroponic experiment was carried out on cultivating wheat (*Triticum aestivum* L.) by using SA as regulatory substance to explore the effects of extraneous SA at 5 concentrations (50, 100, 200, 300 and 500  $\mu\text{mol/L}$ ) on the growth and physiological properties of wheat under salt stress (120 mmol/L NaCl). The results showed that exogenous SA alleviated salt stress effects in winter wheat seedlings. The alleviating effects were not obvious at 50, 100, 300 and 500  $\mu\text{mol/L}$  SA concentrations, while the concentration of 200  $\mu\text{mol/L}$  SA significantly enhanced the chlorophyll content and root activity of wheat seedling. The 200  $\mu\text{mol/L}$  SA treatment significantly improved antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT) activities and improved proline content and soluble protein content to alleviate lipid peroxidation damage. In conclusion, the effect of 200  $\mu\text{mol/L}$  SA was the best in alleviating salt stress effects of winter wheat seedlings.

**Keywords** salicylic acid; wheat; salt stress; growth; physiological characteristics

我国盐渍土分布广泛, 盐渍化程度高, 对区域农业的发展造成严重的阻碍, 加剧了我国人多地少的矛盾, 因此改良利用盐渍化土壤意义重大<sup>[1]</sup>。滨海

盐渍化土壤含盐量高, 对植物生长造成严重的胁迫效应, 阻碍植物的生长发育。前人研究表明: 盐胁迫诱导植物体内产生大量活性氧, 破坏细胞膜结构, 造

收稿日期: 2018-03-16

基金项目: 本研究由国家重点研发计划(2017YFD0201705); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB150404); 山东省重点研发计划(2016CYJS05A02); 山东省自主创新及成果转化专项(2014ZZCX07402)资助

第一作者: 付乃鑫, 硕士研究生, E-mail: 179846138@qq.com

通讯作者: 董元杰, 副教授, 主要从事土壤与植物营养研究, E-mail: yuanjiedong@163.com

成  $\text{Na}^+$  的过量吸收和  $\text{K}^+$  的外渗, 导致植物不能吸收其他营养元素, 影响植物体内养分离子的平衡, 严重时直接导致植物死亡<sup>[2-3]</sup>。

小麦是我国重要的粮食作物, 也是盐碱地上主要的栽培作物之一。小麦在萌发期和幼苗期长势较弱, 耐盐性较差, 对盐胁迫较为敏感<sup>[4]</sup>, 提高小麦萌发期和幼苗期的耐盐性, 促进小麦苗期的生长和健康群体的构建, 对于提高盐碱地小麦产量和品质具有重要意义。目前, 由于采用外源物质提高植物耐盐性具有成本低、操作性强和效果好的特点, 所以有关利用外源调控物质提高盐碱地作物耐盐性, 促进盐碱地开发利用的研究备受关注<sup>[5-7]</sup>。

水杨酸(SA)是一种可由植物自身产生的激素类物质, 可以增加植物体内抗氧化酶的活性<sup>[8]</sup>, 参与植物体内多种生理调节过程, 保证植物正常生命活动的进行<sup>[9]</sup>。李天来等<sup>[10]</sup>研究发现水杨酸的浓度超过一定程度会抑制植物生长, 甚至导致植物死亡, 只有适宜浓度的水杨酸才能提高植物的抗逆性。因此, 可通过添加适当浓度的外源 SA 来提高小麦苗期的抗盐能力, 促进小麦苗期的生长发育。目前关于水杨酸的应用研究主要集中在水果蔬菜的保鲜和观赏花卉的抗衰老等方面, 国内针对提高小麦苗期耐盐能力的相关研究较少。本研究以水杨酸为外源调控物质, 以冬小麦为研究材料, 通过液培试验研究

不同浓度的外源 SA 对 120 mmol/L NaCl 胁迫下冬小麦生理特性的影响, 以期探明外源 SA 提高小麦耐盐性的生理机制, 找出外源 SA 缓解小麦幼苗盐胁迫的适宜浓度, 为寻求提高盐碱地小麦抗盐能力的新途径提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验在山东农业大学资源与环境学院植物营养学实验室进行。供试冬小麦品种为‘山农 22’, 选取籽粒饱满、大小均匀和无病虫害的种子, 经 0.1% 的 NaClO 消毒 10 min, 然后用蒸馏水反复漂洗干净, 置于 SPX-2501C 型人工智能气候箱中 25 °C 下恒温培养。待种子露白后, 播于洗净的湿润蛭石中, 萌发后用 1/2 Hoagland 营养液浇灌。待小麦长出两片叶后挑选长势一致的植株洗净根部蛭石后, 移栽至盛有 1/2 Hoagland 营养液的玻璃器皿中, 每盆 25 株, 营养液 pH 6.5~6.8, 幼苗生长条件的室内昼/夜温度为 25/18 °C, 光强为 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 光照时间 14 h/d。预培养 5 d 后开始进行各种处理, 每盆每次用 250 mL 配制的混合液进行处理。每隔 2 d 处理 1 次, 处理 14 d 后进行各项指标的测定。本试验共设 7 个处理(表 1)。每个处理设 3 次重复, 随机排列各个处理。

表 1 试验处理

Table 1 The experimental treatment

编号 No.	处理 Treatment
CK	Hoagland 营养液 + 0 mmol/L NaCl + 0 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA
NaCl	Hoagland 营养液 + 120 mmol/L NaCl + 0 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA
NaCl+SA1	Hoagland 营养液 + 120 mmol/L NaCl + 50 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA
NaCl+SA2	Hoagland 营养液 + 120 mmol/L NaCl + 100 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA
NaCl+SA3	Hoagland 营养液 + 120 mmol/L NaCl + 200 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA
NaCl+SA4	Hoagland 营养液 + 120 mmol/L NaCl + 300 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA
NaCl+SA5	Hoagland 营养液 + 120 mmol/L NaCl + 500 $\mu\text{mol}/\text{L}$ SA

### 1.2 试验方法

培养 14 d 后, 各处理浓度随机取样, 将小麦幼苗的叶和根用蒸馏水反复冲洗后利用电子天平分别测量鲜重和干重; 然后剪碎、混匀用于生理生化指标测定; 根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定<sup>[11]</sup>; 叶绿素含量采用乙醇提取法测定<sup>[12]</sup>; 丙二醛

(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定<sup>[13]</sup>; 叶片电解质渗出率用电导法测定; SOD 活性采用氮蓝四唑法测定<sup>[14]</sup>; POD 活性采用愈创木酚法测定<sup>[15]</sup>; 过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法<sup>[16]</sup>。小麦幼苗叶片和根系的游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定<sup>[11]</sup>; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定<sup>[17]</sup>。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2007、Word 2007 软件处理数据,采用 SPSS 21.0 进行统计分析结果,显著性检验采用 Duncan 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗生长指标及根系活力的影响

由表 2 可见,与 CK 相比,120 mmol/L NaCl 胁迫

显著抑制小麦幼苗生长,地上部、地下部鲜重和根系活力分别减少 50.76%、46.15%和 33.23%;添加 SA 能够缓解盐胁迫对小麦生长的抑制,且 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 缓解效果最佳。200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理的小麦地上部和地下部的鲜重比 NaCl 处理分别提高 91.30%和 83.33%,干重分别增加 51.52%和 80.00%,小麦幼苗根系活力提高 13.99%。可见添加外源 SA 能够显著改善盐胁迫对小麦幼苗生长和根系活力的影响。

表 2 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗生长指标及根系活力的影响

Table 2 Effects of exogenous salicylic acid on plant growth and root activity in wheat seedlings under salt stress

处理 Treatment	鲜重/(g/10 plant) Fresh weight		干重/(g/10 plant) Dry weight		根系活力/ ( $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ) Root activity
	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	
	CK	3.27±0.29 a	0.78±0.11 a	0.58±0.05 a	
NaCl	1.61±0.27 d	0.42±0.08 d	0.33±0.05 d	0.05±0.01 d	13.80±0.35 b
NaCl+SA1	2.17±0.22 c	0.62±0.06 bc	0.40±0.01 c	0.07±0.01 bcd	14.25±2.90 b
NaCl+SA2	2.89±0.08 ab	0.63±0.14 abc	0.41±0.05 c	0.08±0.01 ab	14.78±4.07 b
NaCl+SA3	3.08±0.33 a	0.77±0.08 ab	0.50±0.02 b	0.09±0.01 a	15.73±3.27 ab
NaCl+SA4	2.48±0.52 bc	0.56±0.06 cd	0.38±0.03 cd	0.07±0.00 bc	13.87±1.05 b
NaCl+SA5	2.09±0.15 cd	0.46±0.05 d	0.34±0.05 cd	0.06±0.01 cd	10.98±1.96 b

注:同一列中不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

### 2.2 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗叶片光合色素含量的影响

由表 3 可知,盐胁迫显著降低了小麦叶片光合

色素的含量。与 CK 相比,盐胁迫下小麦幼苗叶片的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别降低 20.12%、20.63%、20.51%和 25.93%,随

表 3 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗叶片光合色素含量的影响

Table 3 Effects of exogenous salicylic acid on the chlorophyll contents in leaves of

wheat seedlings under salt stress

mg/g

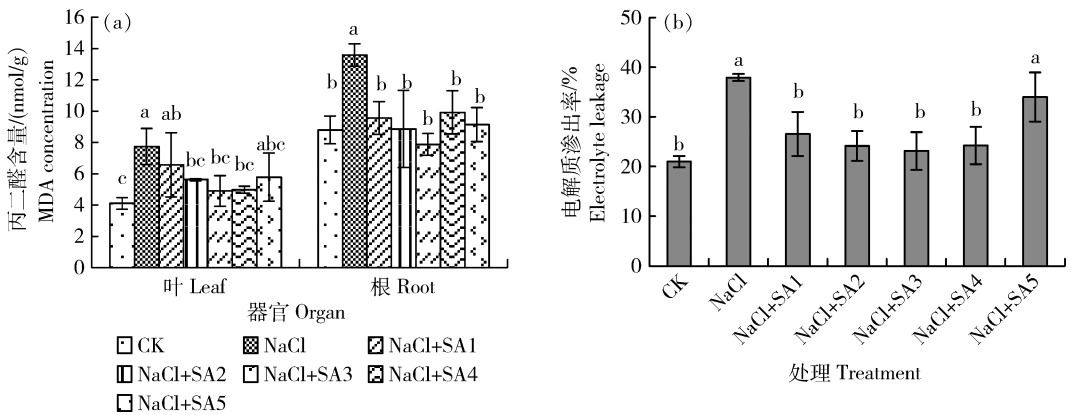
处理 Treatment	叶绿素含量 Total Chl content	叶绿素 a 含量 Chla content	叶绿素 b 含量 Chlb content	类胡萝卜素含量 Carotenoids content
CK	1.64±0.02 a	1.26±0.01 a	0.39±0.01 a	0.27±0.01 a
NaCl	1.31±0.05 e	1.00±0.03 e	0.31±0.01 d	0.20±0.03 c
NaCl+SA1	1.42±0.06 cd	1.09±0.04 cd	0.33±0.02 c	0.23±0.00 ab
NaCl+SA2	1.45±0.08 c	1.12±0.08 bc	0.34±0.01 c	0.24±0.03 ab
NaCl+SA3	1.55±0.02 b	1.18±0.01 ab	0.36±0.01 b	0.25±0.01 ab
NaCl+SA4	1.42±0.02 cd	1.08±0.02 cd	0.34±0.01 c	0.22±0.01 bc
NaCl+SA5	1.34±0.06 de	1.04±0.07 de	0.31±0.01 d	0.19±0.02 c

着 SA 的添加,小麦叶片光合色素含量有着不同程度的增加。与 NaCl 处理相比,添加 50、100、200、300 和 500  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理的叶绿素总含量分别提高了 8.73%,11.22%,18.22%,8.62%和 2.85%,可见 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理对叶绿素总含量的提高效果最佳。叶绿素 a,叶绿素 b 和类胡萝卜素含量有相似的变化规律。

### 2.3 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗丙二醛含量和电解质渗出率的影响

如图 1 所示,NaCl 处理诱导了小麦幼苗体内 MDA 的累积,与 CK 相比,小麦叶片和根系中的

MDA 含量分别增加 88.75%和 54.47%。添加外源 SA 可以抑制盐胁迫下 MDA 的积累,尤其是 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 能够显著降低 MDA 的积累。与 NaCl 相比,200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理下小麦幼苗叶片和根系中的 MDA 含量分别降低了 36.66%和 42.03%。由图 1 可知,盐胁迫造成了细胞膜电解质渗出率增加,较 CK 增加 80.40%。随着不同浓度外源 SA 的添加,小麦幼苗的电解质渗出率均有一定程度的降低,尤其是 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理电解质渗出率显著降低 38.96%,更能缓解盐胁迫的毒害作用。



不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters show a significant difference at the 0.05 level among the treatments. The same below.

图 1 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗丙二醛含量(a)及电解质渗出率(b)的影响

Fig. 1 Effects of exogenous salicylic acid on MDA content (a) and electrolyte leakage (b) of winter wheat seedlings under salt stress

### 2.4 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗抗氧化酶活性的影响

由图 2(a)可知,小麦幼苗叶片和根系 SOD 活性在盐胁迫下显著降低,但添加不同浓度的 SA 减缓了 NaCl 胁迫下 SOD 活性的下降。与 NaCl 处理相比,200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理的小麦叶和根中 SOD 活性分别显著提高 25.50%和 16.30%,而 50 和 500  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理后抗氧化酶活提高不显著。由图 2(b)和 3(c)可知,盐胁迫导致冬小麦幼苗 POD 和 CAT 活性提高,从而使小麦更好地适应盐逆境。随着外源 SA 的添加,POD 和 CAT 活性进一步提高,进而提高小麦幼苗的抗逆性。其中 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 的更能提高抗氧化酶的活性,而 50 和 500  $\mu\text{mol/L}$  SA 的提升效果不显著。

### 2.5 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗游离脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响

由图 3(a)可见,冬小麦叶片中游离脯氨酸含量远高于根系。与 CK 相比,120 mmol/L NaCl 处理显著增加幼苗中脯氨酸含量,其叶和根分别增加 101.97%和 63.50%。添加外源 SA 进一步增加游离脯氨酸的含量,而 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理的小麦叶和根中的游离脯氨酸含量最高,可见 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 更能促进游离脯氨酸的积累。

由图 3(b)可知,当冬小麦幼苗受到 NaCl 胁迫时,其叶和根中可溶性蛋白质含量下降。添加外源 SA 可以提高小麦幼苗叶和根中的可溶性蛋白含量,尤其是 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 提高效果更明显。与 NaCl 处理相比,NaCl+SA3 处理叶和根中可溶性蛋白含量分别显著增加 30.87%和 17.35%。

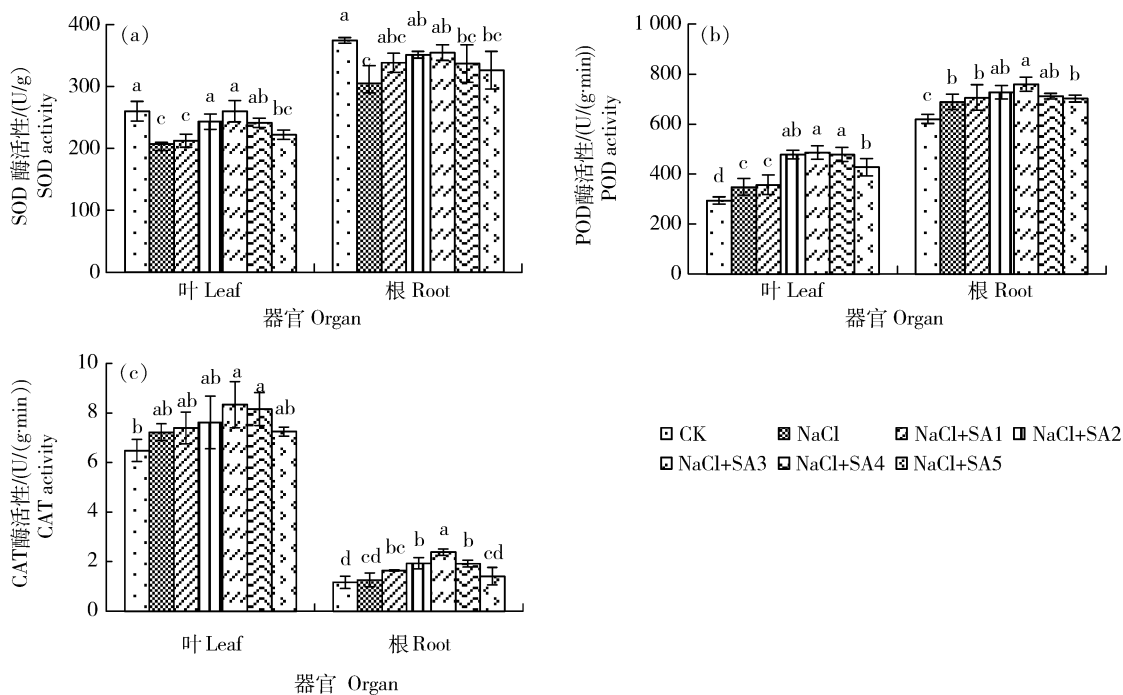


图2 不同浓度的外源SA对盐胁迫下冬小麦幼苗SOD(a)、POD(b)及CAT酶活性(c)的影响

Fig. 2 Effects of exogenous salicylic acid on SOD (a), POD (b) and CAT (c) of winter wheat seedlings under salt stress

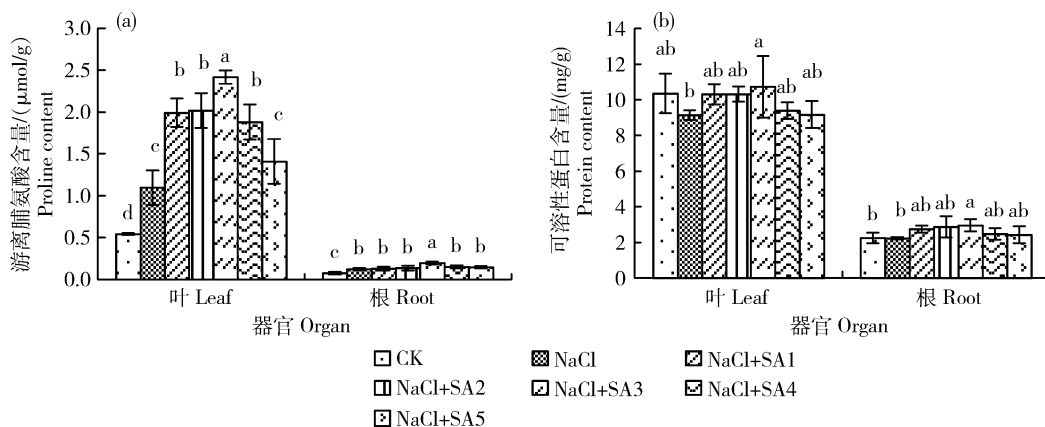


图3 不同浓度的外源SA对盐胁迫下冬小麦幼苗游离脯氨酸(a)及可溶性蛋白含量(b)的影响

Fig. 3 Effects of exogenous salicylic acid on proline (a) and protein content (b) of winter wheat seedlings under salt stress

### 3 讨论

#### 3.1 不同浓度的外源SA对盐胁迫下冬小麦幼苗生长指标及根系活力的影响

盐胁迫会阻碍植物体内蛋白质的合成和脂质代谢、降低叶绿素的生物合成和光合效率,抑制植物生长和干物质积累<sup>[18]</sup>。水杨酸(SA)作为一个重要的信号分子,可以影响植物的多种生理生化功能<sup>[19]</sup>。

本试验研究表明,盐胁迫显著降低了小麦幼苗的干重和鲜重,而添加外源SA可以缓解盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制,显著提高小麦幼苗的干重、鲜重和根系活力,且SA 200 μmol/L的提高效果最明显;高浓度SA 300 μmol/L和500 μmol/L的缓解作用却很低。这可能是因为适宜浓度的水杨酸能够提高盐胁迫下小麦幼苗内的相对含水量,提高根系活力,促进养分的吸收利用和生长发育;而高浓度的水杨

酸在一定程度上会抑制小麦幼苗的气孔导度,抑制光合作用,阻碍小麦幼苗的生长发育。Guo 等<sup>[20]</sup>研究表明不同浓度的 SA 对植物发芽可能有促进或者抑制的双重作用,这与本研究的结果相一致。

### 3.2 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗叶片光合色素含量的影响

盐胁迫下植物体内活性氧大量积累,加大对叶绿体等细胞器的氧化损伤,减少光合色素的合成<sup>[21]</sup>。本研究发现,盐胁迫下添加 50~500  $\mu\text{mol/L}$  SA 不同程度提高了小麦幼苗的光合色素含量,其中 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 提高叶片光合色素含量的效果更明显,这与王晓立<sup>[22]</sup>的研究结果相一致。这主要是由于外源 SA 能够促进小麦幼苗内活性氧清除物质的产生,提高抗氧化系统的清除能力,减小活性氧对叶绿体的破坏;另外 SA 可以提高小麦幼苗的根系活力,增加盐胁迫下小麦幼苗对 Mg 和 Fe 的吸收和积累量,促进叶绿素的合成,增加小麦的叶绿素含量。

### 3.3 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗抗氧化酶活性的影响

植物代谢受阻导致 ROS 等自由基大量产生,同时抑制活性氧清除物质(SOD, POD, CAT 和 APX 等)的产生,最终导致植物体内活性氧的大量积累<sup>[23]</sup>。本研究发现盐胁迫下小麦幼苗体内抗氧化酶活性显著降低,通过添加外源 SA 能显著提高盐胁迫下小麦幼苗体内的 SOD 和 POD 等抗氧化酶的活性,尤其是 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理提升效果最明显,显著增强了小麦的抗盐能力。刘庆等<sup>[24]</sup>研究表明外源水杨酸可以增强盐胁迫下棉花幼苗体内抗氧化酶活性减轻盐害,这与本研究的结果相一致。这可能是由于 SA 可以参与小麦幼苗体内逆境蛋白的合成和表达,调节小麦幼苗内抗氧化机制和植物超敏反应,提高抗氧化酶的活性,增强小麦幼苗的抗逆能力。本研究中与添加 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理相比,添加 300 和 500  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理的小麦受盐害程度加强,这可能是过高浓度的 SA 会在一定程度上对植物造成氧化损伤,引起膜质过氧化,诱导活性氧的生成,对植物造成盐害损伤<sup>[25]</sup>。

### 3.4 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗丙二醛含量和电解质渗出率的影响

盐胁迫会导致膜质过氧化,使膜的透性增加,导致电解质渗出率和 MDA 含量增加。本试验中盐胁迫下小麦幼苗叶片的电解质渗出率显著增加,幼苗

内的 MDA 含量显著增加,通过添加外源 SA 有效降低盐胁迫下小麦幼苗电解质渗出率和 MDA 含量,尤其是 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 处理降低效果最明显。杨瑞红等<sup>[26]</sup>研究表明盐胁迫下施用适当浓度的 SA 能有效降低草莓叶片中的电解质渗出率和 MDA 含量,增强草莓的耐盐能力,与本试验研究结果相一致。这主要是因为 SA 能够提高小麦幼苗体内抗氧化酶的活性,减少活性氧对膜结构的毒害作用,抑制细胞膜的氧化,减轻盐胁迫对小麦的伤害。

### 3.5 不同浓度的外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响

有研究表明脯氨酸可以通过和生物大分子(比如 DNA、蛋白质)相互作用清除羟自由基,稳定生物大分子的结构<sup>[27]</sup>。本研究中,盐胁迫下小麦幼苗叶和根中的游离脯氨酸含量均增加,添加外源 SA 进一步促进脯氨酸的积累,使小麦更好地适应盐胁迫,其中 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 对脯氨酸的提高效果最明显,与周旋<sup>[28]</sup>的研究结果相一致。作物耐盐性和其体内可溶性蛋白含量的多少有一定的关系。本研究发现,盐胁迫下小麦幼苗叶片和根系中的可溶性蛋白含量降低,这可能是因为盐处理导致小麦幼苗多种生理功能受抑,相关酶和蛋白的合成受到抑制。而添加外源 SA 能够增加可溶性蛋白含量,增强小麦幼苗的抗盐性,尤其是 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 更能缓解盐胁迫的毒害作用,增加可溶性蛋白的含量。

## 4 结论

营养液培养条件下,120 mmol/L NaCl 胁迫严重抑制冬小麦幼苗的生长,外源 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 可以显著缓解盐胁迫对冬小麦造成的伤害,提高叶片光合色素含量、抗氧化酶活性和根系活力,促进幼苗的生长;增加游离脯氨酸和可溶性蛋白含量,提高渗透调节能力;降低 MDA 含量,减少盐胁迫带来的氧化损伤,且 200  $\mu\text{mol/L}$  SA 的缓解效果最显著,说明只有适宜浓度的外源 SA 能有效缓解 NaCl 胁迫,提高小麦幼苗的抗盐性。

## 参考文献 References

- [1] 王佳丽,黄贤金,钟大洋,陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报,2011,66(5):673-684  
Wang J L, Huang X J, Zhong T Y. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. *Acta Geographica Sinica*,

- 2011,66(5):673-684 (in Chinese)
- [2] 周洪华,李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应[J]. 植物生态学报,2015,39(1):81-91  
Zhou H H, Li W H. Responses and adaptation of xylem hydraulic conductivity to salt stress in *Populus euphratica*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(1): 81-91 (in Chinese)
- [3] 周万海,冯瑞章,师尚礼,寇江涛. NO对盐胁迫下苜蓿根系生长抑制及氧化损伤的缓解效应[J]. 生态学报,2015,35(11):3606-3614  
Zhou W H, Feng R Z, Shi S L, Kou J T. Nitric oxide protection of alfalfa seedling roots against salt-induced inhibition of growth and oxidative damage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11):3606-3614 (in Chinese)
- [4] 丁同楼,贾玉辉,鲍敬,王宝山. 不同耐盐性小麦根  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  的吸收特性[J]. 植物生理学报,2013,49(1):34-40  
Ding T L, Jia Y H, Bao J, Wang B S. The absorption characteristics of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  in wheat roots with different salt tolerance[J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(1): 34-40 (in Chinese)
- [5] Hayat Q, Hayat S, Irfan M, Ahmad A. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 68(1):14-25
- [6] Farheen J, Mansoor S, Abideen Z. Exogenously applied salicylic acid improved growth, photosynthetic pigments and oxidative stability in mungbean seedlings (*Vigna radiata*) at salt stress [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2018, 50(3):901-912
- [7] Bastam N, Baninasab B, Ghobadi C. Improving salt tolerance by exogenous application of salicylic acid in seedlings of pistachio [J]. *Plant Growth Regulation*, 2013, 69(3):275-284
- [8] Klessig D F, Malamy J. The salicylic acid signal in plants[J]. *Plant Molecular Biology*, 1994, 26(5):1439-1458
- [9] Malamy J, Hennig J, Klessig D F. Temperature-dependent induction of salicylic acid and its conjugates during the resistance response to tobacco mosaic virus infection[J]. *Plant Cell*, 1992, 4(3):359-366
- [10] 李天来,李森,孙周平. 钙和水杨酸对亚高温胁迫下番茄叶片保护酶活性的调控作用[J]. 应用生态学报,2009,20(3):586-590  
Li T L, Li M, Sun Z P. Regulation effect of calcium and salicylic acid on defense enzyme activities in tomato leaves under sub-high temperature stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 586-590 (in Chinese)
- [11] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005  
Zhang Z L, Qu W Q. *Plant Physiology Experiment Instruction* [M]. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2005 (in Chinese)
- [12] Knudson L L, Tibbitts T W, Edwards G E. Measurement of ozone injury by determination of leaf chlorophyll concentration [J]. *Plant Physiology*, 1977, 60(4):606-608
- [13] Heath R L, Packer L. Photo peroxidation in isolated chloroplasts: I Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. *Archives Biochemistry Biophysics*, 1968, 125(1):189-198
- [14] Stewart R C, Bewley J D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes[J]. *Plant Physiology*, 1980, 65(2):245-248
- [15] Nickel R S, Cunningham B A. Improved peroxidase assay method using Ieuco 2,3,6- trichloroindophenol and application to comparative measurements of peroxidase catalysis [J]. *Analytical Biochemistry*, 1969, 27(2):292-299
- [16] Patra H K, Kar M, Mishra D. Catalase activity in leaves and cotyledons during plant development and senescence [J]. *Biochemie Und Physiologie Der Pflanzen*, 1978, 172(4):385-390
- [17] Bradford M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(S1/S2):248-254
- [18] Khan M N, Siddiqui M H, Mohammad F, Naeem M. Interactive role of nitric oxide and calcium chloride in enhancing tolerance to salt stress[J]. *Nitric Oxide*, 2012, 27(4):210-218
- [19] Horváth E, Szalai G, Janda T. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, 26(3):290-300
- [20] Guo Q, Meng L, Mao P C, Jia Y Q, Shi Y J. Role of exogenous salicylic acid in alleviating cadmium-induced toxicity in Kentucky bluegrass[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2013, 50, 50:269-276
- [21] 王弯弯, 诸葛玉平, 王慧桥, 贺明荣, 王振林, 张吉旺, 董元杰. 外源 NO对盐胁迫下小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2):516-524  
Wang W W, Zhuge Y P, Wang H Q, He M R, Wang Z L, Zhang J W, Dong Y J. Effects of exogenous nitric oxide on growth and physiological characteristics of wheat seedlings under salt stress[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 516-524 (in Chinese)
- [22] 王晓立, 韩浩章, 张颖. 水杨酸处理对金钱草光合特性研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(10):4-8  
Wang X L, Han H Z, Zhang Y. Effects of salicylic acid

- treatment on photosynthetic characteristics of *Lysimachia christinae* Hance [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24 (10):4-8 (in Chinese)
- [23] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 陈建林, 刘正鲁. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生理影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39 (3):575-581
- Wu X X, Zhu Y L, Zhu W M, Chen J L, Liu Z L. Physiological effects of exogenous nitric oxide in tomato seedlings under NaCl stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3):575-581 (in Chinese)
- [24] 刘庆, 董元杰, 刘双, 张东. 外源水杨酸(SA)对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生理生化特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 165-168
- Liu Q, Dong Y J, Liu S, Zhang D. Exogenous salicylic acid (SA) on physiological and biochemical characteristics of cotton seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):165-168 (in Chinese)
- [25] Wang D H, Li X X, Su Z K, Ren H X. The role of salicylic acid in response of two rice cultivars to chilling stress[J]. *Biologia Plantarum*, 2009, 53(3):545-552
- [26] 杨瑞红, 刘润进, 刘成连, 王永章, 李培环, 原永兵. AM 真菌和水杨酸对草莓耐盐性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1590-1594
- Yang R H, Liu R J, Liu C L, Wang Y Z, Li P H, Yuan Y B. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and salicylic Acid on salt tolerance of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch) plants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5):1590-1594 (in Chinese)
- [27] Hoque M A, Banu M N, Nakamura Y, Shimoishi Y, Murata Y. Proline and glycinebetaine enhance antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems and reduce NaCl-induced damage in cultured tobacco cells [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(8):813-824
- [28] 周旋, 申璐, 金媛, 毛双双, 陈良超, 肖斌, 肖霄. 外源水杨酸对盐胁迫下茶树生长及主要生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(7):161-167
- Zhou X, Sheng L, Jin Y, Mao S S, Chen L C, Xiao B. Effect of exogenous salicylic acid on growth and physiological character of tea plant (*Camellia sinensis*) under salt stress[J]. *Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition*, 2015, 43(7):161-167 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅