

田礼欣, 李丽杰, 刘 旋, 等. 外源海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(4): 754-759.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.04.005

## 外源海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系生长及生理特性的影响

田礼欣, 李丽杰, 刘 旋, 毕文双, 佟昊阳, 魏 湜, 顾万荣, 李 晶

(东北农业大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为了探讨施加外源海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系生长及生理特性的影响, 以玉米品种郑单 958 为材料, 采用水培法, 利用 1/2 Hoagland 营养液配制不同浓度海藻糖, 分析 150 mmol/L NaCl 胁迫条件下玉米幼苗根系的变化。结果表明, 盐胁迫下, 玉米幼苗根系鲜质量、干质量、根总长度、根表面积以及根体积均显著下降, 与对照相比, 分别下降 37.21%、35.71%、35.78%、34.33% 和 40.42%。不同浓度海藻糖处理后, 幼苗根系生长量、相对含水量和根系活力显著提高, MDA 含量、 $H_2O_2$  含量以及  $O_2^-$  产生速率显著降低。其中以 10 mmol/L 海藻糖处理效果最好。说明适宜浓度的海藻糖可以提高盐胁迫下玉米幼苗根系的抗盐性, 缓解盐胁迫对玉米幼苗的伤害。

**关键词:** 海藻糖; 盐胁迫; 玉米; 根系; 生理特性

**中图分类号:** S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)04-0754-06

## Root growth and physiological characteristics of salt-stressed maize seedlings in response to exogenous trehalose

TIAN Li-xin, LI Li-jie, LIU Xuan, BI Wen-shuang, TONG Hao-yang, WEI Shi, GU Wan-rong, LI Jing

(College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** To investigate the effects of exogenous trehalose on the root growth and physiological characteristics of maize seedling under salt stress, maize variety Zhendan958 was applied with different concentrations of trehalose to analyze the response of seedling root system under the stress of 150 mmol/L NaCl by hydroponic experiment. The fresh weight, dry weight, total length, surface area and volume of maize seedling roots decreased significantly under salt stress by 37.21%, 35.71%, 35.78%, 34.33% and 40.42% respectively. With the applications of trehalose of different concentrations, the growth, relative water content and root vitality of maize seedling root were increased, and the contents of MDA and  $H_2O_2$  and  $O_2^-$  generating rate reduced. The concentration of 10 mmol/L trehalose showed the best effect. This indicated that appropriate concentration of trehalose could improve the salt tolerance of maize seedlings and alleviate the damage caused by salt stress.

**Key words:** trehalose; salt stress; maize; root; physiological characteristic

在世界范围内, 土壤盐渍化是一个越来越突出

的问题<sup>[1]</sup>。世界上有近  $8 \times 10^8$   $hm^2$  土地受到盐分影响, 占世界陆地总面积的 6% 以上<sup>[2]</sup>。受土地盐碱化影响, 全球每年农业生产收入大约有  $1.2 \times 10^9$  美元的损失<sup>[3]</sup>。植物在盐碱土壤中生长不仅能引起渗透胁迫和离子平衡失调的原初胁迫, 也可造成氧化胁迫和营养亏缺等次生危害<sup>[4]</sup>。前人研究结果表明, 盐胁迫下, 小麦、水稻根系生长受到抑制<sup>[5-7]</sup>,

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B06); “十三五” 重点研发计划项目 (2017YFD0300405)

作者简介: 田礼欣 (1993-), 男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 研究方向为玉米高产栽培生理。 (E-mail) 18845634496@163.com

通讯作者: 李 晶, (E-mail) jingli1027@163.com

黄瓜幼苗根系生长不良,电解质外渗<sup>[8]</sup>。

海藻糖(Trehalose)是一种非还原性二糖<sup>[9]</sup>。许多研究发现,海藻糖具有保持生物活力的特殊功能,其耐热性、耐寒性、耐渗透性的作用倍受关注<sup>[10]</sup>。Yang等<sup>[11]</sup>报道植物对盐胁迫的响应中海藻糖起到重要的作用。外源施加海藻糖可以提高植物的抗逆性,目前已在水稻<sup>[12]</sup>、小麦<sup>[13]</sup>和油菜<sup>[14]</sup>等植物中得到验证,体现在抗离子渗透、干旱、高温、低温胁迫等方面。

根系在水分、矿物质营养以及有机化合物的吸收中起到重要作用<sup>[15]</sup>。连俊方等<sup>[16]</sup>研究认为,适宜浓度的海藻糖可缓解高盐胁迫对黑麦幼苗生长的抑制作用。盐胁迫下,外源海藻糖可以缓解马铃薯幼苗根系形成受抑制程度<sup>[17]</sup>。杨巧玲等<sup>[18]</sup>对盐胁迫下海滨锦葵研究发现,外源施加一定浓度的海藻糖可以提高幼苗的鲜质量,提高幼苗对盐胁迫的环境适应性。目前,海藻糖在经济作物上应用比较广泛,但在粮食作物上应用比较少。本研究探讨外源海藻糖对盐胁迫下玉米根系生长及生理指标的影响,以期探寻出适宜的海藻糖浓度用于盐胁迫下玉米栽培。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验选用的玉米品种为郑单 958,由黑龙江唯农种业公司提供。海藻糖购自国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

试验于东北农业大学农学院玉米栽培生理实验室进行。挑选籽粒饱满种子于 75%乙醇中浸泡 10 s,然后放入 2%次氯酸钠溶液中消毒 5 min,经蒸馏水冲洗数次后于蒸馏水中浸泡 24 h,将种子均匀摆放在长 40.5 cm、宽 31.0 cm、高 10.0 cm 的长槽中,放置在 HPG-280HX 型人工智能培养箱(北京东联哈尔仪器制造有限公司生产)中培养(温度 28 ℃,湿度 70%,光照度 4 000 lx)。待种子胚芽生长至 0.5 cm 左右,选取长势均匀一致的植株,移栽到装有 0.9 L 1/2 Hoagland 营养液(pH6.2±0.1)的 1 L 硬质塑料盒中,每盒定苗 6 株,待幼苗生长到三叶一心时开始用海藻糖预处理,24 h 后进行盐胁迫处理。

为了避免盐分对玉米幼苗的冲击效应,每 12 h 向营养液中加入 50 mmol/L NaCl,直至营养液中 NaCl 总浓度达到 150 mmol/L(前期筛选的最适浓度),设定此时为 0 d。整个水培过程中保持通气,调节 pH 为 6.2±0.1,营养液每 2 d 更换 1 次。处理

后第 3 d 取幼苗整株根系,测定相应生理指标。试验设置 6 个处理,每个处理 4 次重复。分别为:(1) CK(1/2Hoagland 营养液);(2) T0(0 mmol/L海藻糖+150 mmol/L NaCl);(3) T1(5 mmol/L海藻糖+150 mmol/L NaCl);(4) T2(10 mmol/L海藻糖+150 mmol/L NaCl);(5) T3(15 mmol/L海藻糖+150 mmol/L NaCl);(6) T4(20 mmol/L海藻糖+150 mmol/LNaCl)。

### 1.2 测定指标与方法

1.2.1 干、鲜质量的测定 将植株的地上部和地下部分开,用清水冲洗表面杂物,用蒸馏水冲洗干净,用滤纸吸干表面水分,分别称鲜质量,105 ℃下杀青 30 min,80 ℃下烘干至恒质量,称量干质量。

1.2.2 根系形态指标的测定 将幼苗根系放置在台式扫描仪(EPSON EXPERSION 1680)中扫描,采用 WinRHIZO(加拿大 Regent 公司)图像分析软件分析根体积、根表面积和根长。

1.2.3 相对含水量的测定 根系鲜质量称量后,将其于蒸馏水中浸泡 6 h,称量饱和鲜质量,再放入烘箱中,80 ℃烘干,直到恒质量。相对含水量=[(鲜质量-干质量)/(饱和鲜质量-干质量)]×100%。

1.2.4 根系活力的测定 采用 α-萘胺氧化法<sup>[19]</sup>测定。

1.2.5 丙二醛(MDA)含量的测定 采用硫代巴比妥酸法<sup>[20]</sup>测定。

1.2.6 过氧化氢含量的测定 采用 Velikova 等方法<sup>[21]</sup>测定。

1.2.7 超氧阴离子产生速率的测定 采用王爱国等的方法<sup>[22]</sup>测定。

### 1.3 数据处理

采用 DPS7.05 和 Microsoft Excel 2010 软件分析试验数据,对各处理间的差异性采用 LSD 法进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系生长的影响

盐胁迫下经海藻糖处理后玉米幼苗根系地下部鲜质量和干质量变化表现为随海藻糖浓度的增加先增加后降低的趋势,T0 处理生长抑制作用最大,较 CK 降低 37.21%和 35.71%;T2 处理缓解盐胁迫效果最显著,T2 处理地下部鲜质量和干质量较 CK 分

别降低 13.89% 和 13.51%, 较 T0 处理分别增加 36.21% 和 36.50% (表 1)。与 T0 处理相比, T1 处理地下部鲜质量和干质量分别增加 9.76% 和

22.26%, T3 处理地下部鲜质量和干质量分别增加 28.53% 和 17.67%, T4 处理地下部鲜质量和干质量分别增加 16.94% 和 10.22%。

表 1 海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系鲜(干)质量及形态特征的影响

Table 1 Effect of trehalose on fresh (dry) weight and morphology of maize seedling roots under salt stress

处理	鲜质量(g)	干质量(g)	根总长度(cm)	根表面积(cm <sup>2</sup> )	根体积(cm <sup>3</sup> )
CK	1.29±0.02a	0.14±0.003a	431.49±6.34a	104.00±2.22a	3.90±0.06a
T0	0.81±0.02e	0.09±0.003e	277.10±5.36e	68.30±1.20e	2.33±0.03e
T1	0.89±0.02d	0.11±0.005c	300.25±8.34d	76.90±2.35cd	2.90±0.09c
T2	1.11±0.01b	0.13±0.003b	366.86±5.73b	89.34±0.99b	3.10±0.03b
T3	1.05±0.02c	0.11±0.004cd	347.65±7.90c	80.11±1.29c	2.66±0.07d
T4	0.95±0.03d	0.10±0.002d	296.87±6.59d	73.80±1.23d	2.57±0.04d

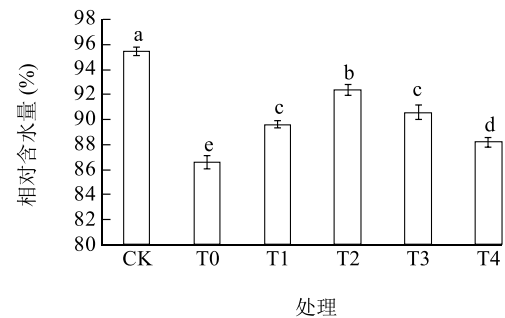
CK: 1/2 Hoagland 营养液(对照); T0: 0 mmol/L 海藻糖+150 mmol/L NaCl; T1: 5 mmol/L 海藻糖+150 mmol/L NaCl; T2: 10 mmol/L 海藻糖+150 mmol/L NaCl; T3: 15 mmol/L 海藻糖+150 mmol/L NaCl; T4: 20 mmol/L 海藻糖+150 mmol/L NaCl。同列中不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

根系的总长度、表面积和体积等指标共同构成了玉米根系的表现型。盐胁迫下, 根系的总长度、表面积和体积显著降低, T0 处理较 CK 分别降低 35.78%、34.33% 和 40.42%。施加海藻糖后, 不同程度缓解了盐胁迫。随着海藻糖浓度的增加, 根系指标的变化趋势均表现为先增加后降低, 其中 T2 处理变化最显著。T2 处理较 T0 处理分别增加 32.39%、30.81% 和 33.37%。说明外源海藻糖施用可以缓解盐分对玉米幼苗根系生长的胁迫。

## 2.2 不同浓度海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系生理特性的影响

相对含水量是植物在逆境条件下水分亏缺程度的重要参考指标。从图 1 可以看出, 随着海藻糖浓度的增加, 玉米幼苗根系的相对含水量总体呈现先上升后下降的特点。T2 处理相对含水量最高, 与其他浓度海藻糖处理相比差异显著, 较 T0、T1、T3 和 T4 处理分别增加 6.63%、3.07%、2.01% 和 4.72%, 较 CK 显著降低 3.33%。说明盐胁迫下适宜浓度的海藻糖可以增加根系的吸水能力, 提高幼苗根系对盐胁迫的适应性, 增强其抗盐能力。

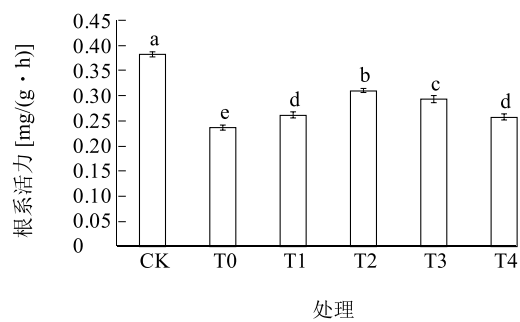
根系活力是衡量植物对逆境条件适应能力的重要指标。盐胁迫显著抑制了玉米幼苗的根系活力, 与 CK 相比 T0 处理根系活力降低 61.69% (图 2)。施加不同浓度海藻糖, 均不同程度提高了玉米幼苗的根系活力, 与 T0 处理相比 T1、T2、T3 和 T4 处理分别增加 10.65%、31.22%、23.92% 和 9.07%, 均达到显著水平。其中, T2 处理根系活力最高, 说明 10 mmol/L 海藻糖可以显著提高幼苗根系对盐胁迫的适应性。



各处理见表 1 注。不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系相对含水量的影响

Fig.1 Effect of trehalose on relative moisture content in the roots of maize seedlings under salt stress



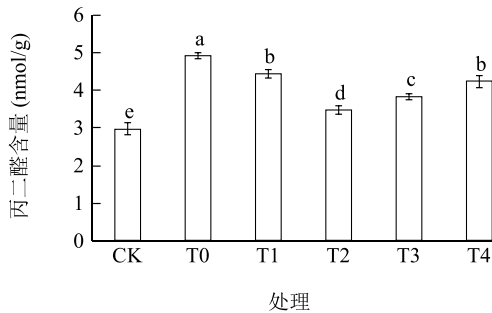
各处理见表 1 注。不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 2 不同浓度海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系活力的影响

Fig.2 Effect of trehalose in different concentrations on the root vitality of maize seedlings under salt stress

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物,其含量是衡量膜脂过氧化程度的重要指标。从图 3 可以看出,盐胁迫下,施加不同浓度海藻糖后, T1、T2、T3 和 T4 处理丙二醛含量比 T0 处理分别降低 9.59%、

29.31%、21.89%和13.71%,差异显著。海藻糖浓度为10 mmol/L时,MDA含量最低。说明盐胁迫使玉米幼苗根系发生膜脂过氧化作用,外源施加海藻糖能够降低膜脂过氧化作用的影响,缓解膜脂过氧化对幼苗根系的伤害。

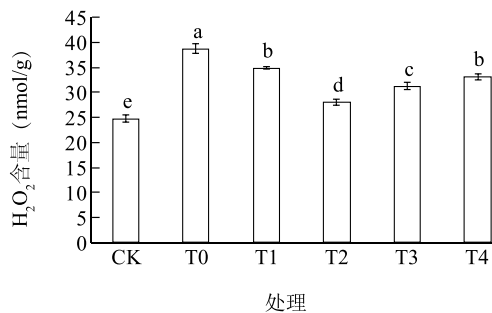


各处理见表1注。不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图3 海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系丙二醛含量的影响

Fig.3 Effect of trehalose on MDA content in the roots of maize seedlings under salt stress

$H_2O_2$ 是植物体内一类有毒的活性氧(ROS)成分,逆境胁迫下产生的 $H_2O_2$ 会增加细胞膜内不饱和脂肪酸的过氧化程度,打破细胞膜的完整性和稳定性<sup>[23]</sup>。盐胁迫下,与CK相比,T0处理幼苗根系 $H_2O_2$ 含量增加54.60%(图4)。施加不同浓度海藻糖后, $H_2O_2$ 含量显著降低了10%~28%,其中T2处理 $H_2O_2$ 含量最低。说明施加海藻糖能够降低盐胁迫下玉米幼苗根系中活性氧的积累,缓解膜脂过氧化对幼苗根系的损害。



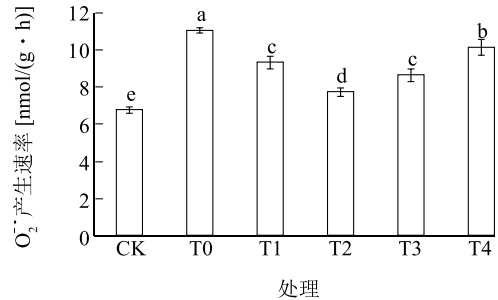
各处理见表1注。不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图4 海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系 $H_2O_2$ 含量的影响

Fig.4 Effect of trehalose on  $H_2O_2$  content in the roots of maize seedlings under salt stress

盐胁迫下,植物体内的 $O_2^{\cdot-}$ 等活性氧含量增加,启动膜脂脱膜作用,导致质膜的系统性破坏,使植株受到伤害。从图5可以看出,盐胁迫下,T2处理的

$O_2^{\cdot-}$ 产生速率最低,较T0、T1、T3和T4处理分别降低30.02%、16.94%、10.59%和23.71%,均达到显著水平。说明适宜浓度的海藻糖可诱导玉米幼苗根系中抗氧化系统的活性,减轻盐胁迫引起的氧化损伤,从而保护幼苗根系的功能,促进玉米幼苗根系的生长。



各处理见表1注。不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图5 海藻糖对盐胁迫下玉米幼苗根系 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响

Fig.5 Effect of trehalose on  $O_2^{\cdot-}$  generation rate in the roots of maize seedlings under salt stress

## 2.3 玉米幼苗期根系生长量与生理特性的相关性

相关分析结果(表2)显示,T2处理的干质量和根体积均与根系活力呈显著正相关,根体积与 $H_2O_2$ 含量呈极显著正相关,干质量与 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率呈极显著正相关;T3处理的根体积与MDA含量呈显著正相关,干质量与 $H_2O_2$ 含量呈显著正相关;T0处理的干质量和T4处理的根体积均与MDA含量呈负相关。可见,适宜浓度外源海藻糖处理后,玉米幼苗根系生长与内在生理指标关联更加密切。

表2 玉米幼苗根系生长量与生理指标的相关性

Table 2 Correlation between the growth and physiological indices in the roots of maize seedlings

处理	生长量	根系活力	丙二醛含量	$H_2O_2$ 含量	$O_2^{\cdot-}$ 产生速率
CK	干质量	0.89	0.81	0.92	0.47
	根体积	0.92	0.41	0.75	0.72
T0	干质量	0.76	-0.72	0.41	0.69
	根体积	0.37	0.30	0.87	0.41
T1	干质量	0.50	0.66	0.44	0.36
	根体积	0.43	0.61	0.68	-0.84
T2	干质量	0.98*	0.85	0.43	1.00**
	根体积	0.96*	0.78	0.99**	0.74
T3	干质量	0.68	0.79	0.97*	0.91
	根体积	0.75	0.96*	0.43	0.57
T4	干质量	0.78	0.55	-0.53	-0.39
	根体积	0.25	-0.79	0.78	0.66

各处理见表1注。\*和\*\*分别表示相关性达0.05和0.01显著水平。



### 3 讨论

盐胁迫下,植株的根系是最先受到伤害的部位,表现为地下部须根减少,根系发黄。同时,盐胁迫对幼苗根系造成生理代谢平衡失调,从而抑制植株根系的生长和分化。郑柱荣等<sup>[24]</sup>的试验结果表明,盐胁迫下花生的干、鲜质量和根系指标均逐渐降低。弋良朋等<sup>[25]</sup>研究发现,在 480 mmol/L 的盐分胁迫下,滨海盐生植物的根总长度、根表面积和根体积会受到较严重的抑制作用。侯林琳等<sup>[26]</sup>研究结果表明,盐胁迫明显降低花生单株根干质量。本研究发现,盐胁迫明显抑制玉米幼苗根系的生长,显著降低玉米幼苗根系的干质量、鲜质量、根总长度、根表面积以及根体积,这与前人的研究结果一致。贾永霞等<sup>[17]</sup>通过喷施 0.4% 海藻糖缓解了盐胁迫对番茄幼苗生长的抑制。马光恕等<sup>[27]</sup>在 0.6% 的盐胁迫下通过叶面喷施 0.4% 海藻糖增加了甜瓜幼苗的干鲜质量。本研究中,150 mmol/L 盐胁迫下,外源施加 10 mmol/L 藻糖后,玉米幼苗根系的干质量、鲜质量、根总长度、根表面积以及根体积均显著增加,说明施加海藻糖能够显著缓解盐胁迫对玉米幼苗根系的伤害,提高玉米幼苗根系对盐胁迫的适应性。

根系活力的变化会影响地上部器官的形态建成,从而影响植物的营养状况、生长发育以及产量品质<sup>[28]</sup>。周万海等<sup>[29]</sup>研究结果表明,盐胁迫抑制了苜蓿幼苗根系活力。本研究中,盐胁迫导致玉米幼苗根系活力显著降低,破坏了玉米幼苗根系的生长功能。而孟祥浩等<sup>[30]</sup>发现,小麦根系活力随着盐浓度的增加呈先增加后降低的趋势。这可能是由于小麦根系对盐胁迫比较敏感,开始升高是小麦的自身调节作用,但不能长时间维持,随着胁迫时间的延长,小麦的根系活力开始下降。盐胁迫下,外源施加海藻糖可以显著提高番茄的根系活力<sup>[31]</sup>。武俊英等<sup>[32]</sup>研究结果表明,用葡萄糖浸种可以提高白麦 8 号的根系活力。本研究发现,施加不同浓度的海藻糖,均不同程度增加了玉米幼苗的根系活力,说明施加海藻糖确实能缓解盐胁迫对根系的伤害,增强根系活力和植株对逆境的适应能力。

MDA 含量增幅越小,表示细胞膜的损伤程度越小,越有利于根系维持地上部的生理活性<sup>[33]</sup>。陈晓云等<sup>[34]</sup>的研究结果表明,外源蔗糖能明显降低盐胁迫下荞麦叶片的 MDA 含量。壳聚糖处理可以降低

盐胁迫下大豆幼苗的 MDA 含量<sup>[35]</sup>,水杨酸处理可以降低盐胁迫下新单 29 玉米幼苗的 MDA 含量<sup>[36]</sup>。本研究发现,在正常情况下生长的玉米幼苗根系 MDA 含量比较低,盐胁迫会导致其含量增加,施加海藻糖后,其含量显著降低,盐胁迫会使细胞膜透性增加,引起膜质损伤,而海藻糖可以缓解膜脂过氧化程度。但是,前人对盐胁迫下施加海藻糖对玉米幼苗根系 MDA 含量的影响研究较少,因此,有待于进一步研究。

盐胁迫下,植物体内会产生大量自由基,如果不能被及时清除,就会攻击脂类蛋白质和核酸等大分子物质,破坏生物膜结构而严重扰乱正常生理代谢<sup>[37]</sup>。有研究结果表明,盐胁迫下,苜蓿、西瓜、杜梨幼苗根系中  $O_2^-$  产生速率和  $H_2O_2$  含量均显著升高<sup>[29,38-39]</sup>,这与本研究结果一致。赵莹等<sup>[40]</sup>研究发现,盐胁迫下,外源葡萄糖和蔗糖处理明显降低了叶片中  $H_2O_2$  含量。本研究中外源海藻糖处理后, $O_2^-$  产生速率和  $H_2O_2$  含量均明显下降,与未加海藻糖对照相比, $O_2^-$  产生速率最高下降 30.02%, $H_2O_2$  含量最高下降 27.60%,说明施加海藻糖可以清除植物体内产生的过量自由基,维持活性氧代谢平衡,减轻膜脂过氧化作用,维持生物膜的完整性,增强植物的抗盐性。

综上所述,盐胁迫抑制了玉米幼苗根系的生长,根鲜质量、干质量、总长度、表面积、体积和相对含水量均显著下降,根系 MDA 含量、 $O_2^-$  产生速率和  $H_2O_2$  含量都明显增加。外源施加海藻糖后,缓解了盐胁迫对玉米幼苗根系的抑制作用,提高了根系的持水能力,减轻了盐胁迫对玉米幼苗根系生物膜损害,保护了生物膜结构的稳定性和正常生理代谢。本研究条件下,海藻糖调节盐胁迫对玉米幼苗根系影响的最适浓度是 10 mmol/L。

#### 参考文献:

- [1] STUART J R, SONIA N, MARK T. Salt resistant crop plants[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2014, 26: 115-124.
- [2] FAO. FAO Land and plant nutrition management service [EB/OL]. (2008-8-26) [2010-5-24]. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>.
- [3] ZHU J K. Plant salt tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(2): 66-71.
- [4] QADIR M, TUBEILEH A, AKHTAR J, et al. Productivity Enhancement of salt-affected environments through crop diversification[J]. *Land Degradation and Development*, 2008, 19: 429-453.

- [5] 王康君,王 龙,顾正中,等.盐胁迫对小麦种子萌发与幼苗生长的影响及外源物质调控效应[J].江苏农业科学,2016,44(1):111-115.
- [6] 素 芳,于 洋,葛 青,等.外源蔗糖对小麦幼苗耐盐性的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(2):225-230.
- [7] 潘世驹,李红宇,姜玉伟,等.寒地水稻幼苗期耐盐资源筛选[J].南方农业学报,2015,46(10):1775-1779.
- [8] 段九菊,郭世荣,康云艳,等.盐胁迫对黄瓜幼苗根系生长和多胺代谢的影响[J].应用生态学报,2008,19(1):57-64.
- [9] 刘传斌,云 战,冯朴荪,等.海藻糖在生物制品活性保护中的应用前景[J].中国医药工业杂志,1998,29(7):327-330.
- [10] 李 莉,黄群策,秦广雍.海藻糖在提高植物抗逆性方面的研究进展[J].生物学通报,2003,38(6):6-7.
- [11] YANG L, ZHAO X, ZHU H, et al. Exogenous trehalose largely alleviates ionic unbalance, ROS burst, and PCD occurrence induced by high salinity in Arabidopsis seedlings[J]. Frontiers in Plant Science, 2013,5(570):1-11.
- [12] THEERAKULP P, PHONGNGARM S. Alleviation of adverse effects of salt stress on rice seedlings by exogenous trehalose[J]. Asian Journal of Crop Science, 2013,5(4):405-415.
- [13] 王 迪,罗 音,高亚敏,等.外施海藻糖对高温胁迫下小麦幼苗膜脂过氧化的影响[J].麦类作物学报,2016,36(7):925-932.
- [14] 周启贵,汤绍虎,孙 敏,等.海藻糖对渗透胁迫下油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2007,32(1):39-42.
- [15] 闻 玉,赵 翔,张 骁.水分胁迫下一氧化氮对小麦幼苗根系生长和吸收的影响[J].作物学报,2008,34(2):344-348.
- [16] 连俊方,闫道良,郭 坤,等.海藻糖对NaCl胁迫下多年生黑麦草苗期生长和离子平衡的影响[J].安徽林业科技,2012,38(4):9-12.
- [17] 贾永霞,靳亚忠,马光恕,等. NaCl胁迫下海藻糖对番茄根系及活性的影响[J].安徽农学通报(上半月刊),2010,16(15):46-48.
- [18] 杨巧玲,杨晓梅,闫道良,等.外源海藻糖对盐胁迫下海滨锦葵种子萌发的影响[J].江西林业科技,2014,42(2):1-5.
- [19] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等.不同供水吸力对温室黄瓜光合特性及根系活力的影响[J].应用生态学报,2010,21(1):67-73.
- [20] 李合生.植物生理学实验技术指导[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [21] VELIKOVA V, YORDANOV I, EDREVA A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants-protective role of exogenous polyamines[J]. Plant Science, 2000,151:59-66.
- [22] 王爱国,罗广华.植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J].植物生理学通讯,1990(6):55-57.
- [23] PETROV V D, VAN B F. Hydrogen peroxide-a central hub for information flows in plant cells[J]. AoB Plants, 2012,10:1-14.
- [24] 郑柱荣,张瑞祥,杨婷婷,等.盐胁迫对花生幼苗根系生理生化特性的影响[J].作物杂志,2016(4):412-415.
- [25] 弋良朋,王祖伟.盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布[J].生态学报,2011,31(5):1195-1202.
- [26] 侯林琳,张佳蕾,郭 峰,等.盐胁迫下外源Ca<sup>2+</sup>对花生植株性状的影响[J].山东农业科学,2015,47(10):25-28.
- [27] 马光恕,廉 华,靳亚忠,等.海藻糖对NaCl胁迫下甜瓜幼苗生长的影响[J].广东农业科学,2013(16):40-43.
- [28] LIU R X, ZHOU Z G, GUO W Q, et al. Effects of N fertilization on root development and activity of water-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(11):1261-1270.
- [29] 周万海,冯瑞章,师尚礼,等. 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.
- [30] 孟祥浩,刘义国,张玉梅,等.不同小麦品种苗期抗氧化特性及根系活力对盐胁迫的响应[J].麦类作物学报,2015,35(8):1168-1175.
- [31] 杨 瑾,廉 华,王彦宏,等.外源海藻糖对NaCl胁迫下番茄幼苗生理指标的影响[J].河南农业科学,2009(12):97-100.
- [32] 武俊英,赵宝平,刘景辉,等.葡萄糖浸种对NaCl胁迫下燕麦幼苗生长和渗透调节的影响[J].麦类作物学报,2014,37(4):983-989.
- [33] 李明玉,曹辰兴,于喜艳,等.低温锻炼对冷胁迫下黄瓜幼苗保护性酶的影响[J].西北农业学报,2006,15(1):160-164.
- [34] 陈晓云,刘洪庆,李发良,等.外源蔗糖和Ca<sup>2+</sup>对荞麦幼苗耐盐性的影响[J].植物生理学报,2012,48(12):1187-1192.
- [35] 徐卫红,徐芬芬,俞晓风.壳聚糖对盐胁迫下大豆幼苗抗盐性的影响[J].湖北农业科学,2010,49(8):1859-1861.
- [36] 汤菊香,赵元增,单长卷.水杨酸对盐胁迫下新单29玉米幼苗生理特性的影响[J].江苏农业科学,2015,43(6):93-95.
- [37] CHA-UM S, SUPAIBULWATANA K, KIRDMANEE C. Water relation, photosynthetic ability and growth of Thaijasmine rice (*Oryza saliva* L. ssp. indica cv. KDML 105) to salt stress by application of exogenous glycinebetaine and choline[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2006,192(1):25-36.
- [38] 陈 罡,管安琴,万云龙,等.外源5-氨基乙酰丙酸(ALA)对盐胁迫下小型西瓜幼苗抗氧化酶活性的影响[J].江苏农业科学,2016,44(6):252-255.
- [39] 韩金龙,李 慧,蔺 经,等.核黄素对盐胁迫下杜梨叶片抗氧化系统的影响[J].江苏农业学报,2015,31(4):893-898.
- [40] 赵 莹,杨克军,赵长江,等.外源糖调控玉米光合系统和活性氧代谢缓解盐胁迫[J].中国农业科学,2014,47(20):3962-3972.

(责任编辑:张震林)