

壳聚糖对盐胁迫下小麦种子萌发及 幼苗生理特性的影响

王玉萍^{1,2}, 于 丹², 李 成², 周晓杰²

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省作物遗传改良
与种质创新重点实验室, 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 以小麦品种偃展 08231 和小偃 986 为材料, 在 150 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫处理下, 研究了不同浓度的外源壳聚糖(CTS)对小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响。结果表明: 盐胁迫下, 0.1% ~ 0.5% CTS 浸种预处理的小麦种子具有较高的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数和 α-淀粉酶活性, 两个品种均以 0.3% 的 CTS 处理效果最佳, 与对照相比偃展 08231 和小偃 986 的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数分别提高 27.84% 和 25.33%、9.94% 和 19.95%、38.49% 和 32.30%、72.72% 和 82.83%; 0.1% ~ 0.5% CTS 处理小麦幼苗具有较高的株高、鲜重和干重, 其超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)的活性和脯氨酸含量以及根系活力均较高, 而丙二醛(MDA)含量较低, 其中以 0.3% CTS 处理效果最好, 与对照相比偃展 08231 和小偃 986 的株高、鲜重和干重分别提高 32.60% 和 36.74%、26.08% 和 38.77%、24.05% 和 35.87%。CTS 对小偃 986 盐胁迫的缓解作用强于对偃展 08231 的作用。说明一定浓度的外源 CTS 浸种可促进盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长, 减缓盐胁迫伤害。

关键词: 小麦; 壳聚糖; 种子萌发; 幼苗生长; NaCl 胁迫

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A

Effect of chitosan on seed germination and seedling physiological characters of wheat under salt stress

WANG Yu-ping^{1,2}, YU Dan², LI Cheng², ZHOU Xiao-jie²

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement, Gansu Provincial Key Laboratory
of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Two different wheat varieties Yanzhan 08231 and Xiaoyan 986 were used as materials to examine the effect of exogenous chitosan (CTS) on seed germination and seedlings physiological characteristic under the treatment of 150 mmol·L⁻¹ NaCl. The result showed that the germination energy, germination percentage, germination index, vigor index and relative α-amylase activity of the seed were increased after being presoaked with exogenous 0.1% ~ 0.5% CTS. 0.3% CTS had the best effect, showing 27.84% and 25.33%, 9.94% and 19.95%, 38.49% and 32.30%, and 72.72% and 82.83% increases from the control in germination energy, germination percentage, germination index, vigor index of Yanzhan 08231 and Xiaoyan 986 seeds, respectively. With the treatment of 0.1% ~ 0.5% CTS, the wheat seedling had higher plant height, fresh weight, dry weight, activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), proline content and root activities, but lower content of malondialdehyde (MDA) than the control, and 0.3% CTS treatment also gave the best result. Compared with the control, the plant height, fresh weight, dry weight of Yanzhan 08231 and Xiaoyan 986 seedlings were increased by 32.60% and 36.74%, 26.08% and 38.77%, 24.05% and 35.87%, respectively. Xiaoyan 986 was more salt tolerant than Yanzhan 08231, and mitigation effect of CTS on salt stress was also more obvious on Xiaoyan 986 than Yanzhan 08231. These results indicated that the exogenous CTS (chitosan) could effectively mitigate the injuries of salt stress and increase salt tolerance of wheat seeds and seedlings. The

收稿日期: 2014-12-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(310063; 31260094); 甘肃省高校基本科研业务费项目
作者简介: 王玉萍(1974—), 女, 甘肃天水人, 副教授, 博士, 主要从事作物遗传育种及逆境生理方面的研究。E-mail: wangyp@gsau.edu.cn。

best treatment concentration of chitosan was 0.3%. When the concentration of chitosan was higher than 0.5%, no mitigation effect was observed under the salt stress.

Keywords: wheat; chitosan; seed germination; seedlings growth; salt stress

壳聚糖(Chitosan, CTS)是一种天然的高分子物质,它的许多结构特性与纤维素相似,是一类氨基多糖^[1],能被生物降解,大量存在于昆虫、甲壳纲动物外壳及真菌的细胞壁中^[2]。研究证明,CTS 作为植物生长调节剂,可调节植物生长发育,增强作物抗性,提高作物产量。CTS 可促进大豆(*Glycine max*)^[3]、玉米(*Zea mays*)^[4]、水稻(*Oryza sativa*)^[5]等种子的萌发,增强其幼苗的生化功能。

小麦(*Triticum aestivum*)是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区,是主要的粮食作物之一。近年来研究发现,壳聚糖可增强作物抗性,提高产量^[6],例如可增强小麦和油菜的抗病能力^[7],提高小麦苗期抗旱性^[8-9]等。关于壳聚糖处理对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长影响的研究报道较少。因此,研究壳聚糖对小麦抗盐性的影响,进行小麦抗盐方式的优化,具有重要的意义。

种子萌发和幼苗形态建成是作物生长的关键时期,种子发芽质量好坏直接影响作物生长和经济效益。盐渍土壤中小麦播种后经常会出现发芽率低、出苗延迟、生长不整齐等一系列问题^[9],为了明确 CTS 对盐分胁迫下小麦种子与幼苗的保护作用,本研究分别以小麦种子和幼苗为试材,研究了不同浓度的 CTS 溶液对盐胁迫下小麦种子萌发、幼苗生长以及保护酶活性的影响,旨在探讨 CTS 对小麦种子及苗期抗盐能力的影响,以期为 CTS 作为抗盐剂的开发应用及小麦抗盐栽培提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小麦品种为偃展 08231(纯度 ≥ 99.0 ,发芽率 $\geq 85\%$)和小偃 986(纯度 ≥ 99.0 ,发芽率 $\geq 85\%$),为河南省豫西农作物品种展览中心选育。壳聚糖,白色半透明粉末,脱乙酰度(DD) $\geq 90\%$,pH 值为 7.0~8.0,购于上海国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理:以蒸馏水浸种处理为对照(CK),CTS 浸种处理浓度分别设为 0.1%,0.2%,0.3%和 0.5%(v/v)(T1、T2、T3、T4)。2 个品种小麦各取籽粒饱满、生长程度相似的新鲜种子(种子在蒸馏水中的初始发芽率均达 95%以上),用 0.1%锰酸钾溶液消毒 10 min,去离子水洗净。分别用不同浓

度 CTS 溶液对种子进行浸种,1 h 后,取出种子晾干,CK 用等量蒸馏水浸种处理。采用纸上发芽床法,在洗净、烘干的营养钵(20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 5 cm)中铺 2 层滤纸,将 150 mmol $\cdot$ L⁻¹ NaCl 溶液^[6]分别加入 CK 和不同处理的营养钵内,至滤纸饱和,然后整齐排入 80 粒种子,置于人工气候室培养,培养环境设为温度 26 $^{\circ}$ C/18 $^{\circ}$ C(昼/夜),光周期昼夜各 12 h $\cdot$ d⁻¹,白色荧光灯作为光源,光强为 600 μ mol $\cdot$ m⁻² $\cdot$ s⁻¹ $\pm$ 15 μ mol $\cdot$ m⁻² $\cdot$ s⁻¹,相对湿度 75%。每个处理重复 6 次。每日观察并记录发芽种子数(以胚根伸出种皮作为发芽标准),记录 7 d,测定并计算种子萌发相关指标;15 天后测定幼苗相关生理生化指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 种子萌发指标 种子萌发第 4 天测定发芽势,第 7 天测定发芽率。发芽势(GP)=(t 日的发芽总数/供试种子数) $\times 100\%$;发芽率=(规定天数发芽的种子数/供试种子数) $\times 100\%$;发芽指数(GI)= $\sum(G_t/D_t)$,式中, G_t 为在 t 日的发芽数; D_t 为相应的发芽天数。活力指数(VI)=GI $\times W$,式中, W 为幼苗单株的平均干重(g)。

1.3.2 幼苗生长指标 株高:植株根茎与顶部之间的距离(cm);鲜重和干重的测定采用称量法^[10]。鲜重选取同一种处理下长势良好、均匀一致的植株,冲洗干净,吸干表面水分,称重(g);干重:将材料立即放入恒温干燥箱内 105 $^{\circ}$ C 烘 30 min 杀青后,于 80 $^{\circ}$ C 烘至恒重,称重(g)。实验均设 3 次重复,取其平均值。

1.3.3 生理生化指标 种子萌发第 2 天,参照李合生^[11]的方法测定种子 α -淀粉酶活性。胁迫处理后第 15 天取幼苗,参照李合生^[11]的方法,超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑法;过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚氧化法;丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法;游离脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法;根系活力测定采用 TTC 显色^[12],乙酸乙酯提取。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件对数据进行处理;用 SPSS 17.0 统计软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 CTS 对盐胁迫下种子萌发的影响

不同浓度 CTS 浸种处理,盐胁迫下 2 个小麦品

种种子萌发的相关指标均有明显提高(表 1)。与对照相比,0.1%~0.5%浸种处理可提高种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,说明 CTS 对盐胁迫下小麦种子的萌发起到了促进作用。以 0.3%处理效果最佳,偃展 08231 在 0.2%~0.3%浓度范围内出现发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数随浓度升高而升高,且在 0.3%浓度处理下效果最好,与对照

相比分别提高 27.84%、9.94%、38.49%和 72.72%,差异显著($P<0.05$),0.5%浓度下出现下降情况;小偃 986 的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数在 0.1%~0.5%浓度范围内随浓度升高而提高,以 0.3%浓度处理下效果最好,分别较对照提高 25.33%、19.95%、32.29%和 82.83%,差异显著($P<0.05$)。总体的萌发情况小偃 986 好于偃展 08231。

表 1 CTS 浸种对 NaCl 胁迫下小麦种子萌发的影响					
Table 1 Effects of exogenous chitosan on seed germination of wheat seeds under salt stress					
品种 Varieties	处理 Treatments	发芽势/% Germination power	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
偃展 08231 Yanzhan 08231	CK	38.33d	47.00c	12.55d	0.99d
	T1	40.00c	48.00b	13.24cd	1.21c
	T2	44.67b	50.33ab	15.72b	1.51b
	T3	49.00a	51.67a	17.38a	1.71a
	T4	38.67d	47.29bc	13.93c	1.23c
小偃 986 Xiaoyan 986	CK	65.75d	70.44d	22.70c	2.97d
	T1	70.29c	74.59c	23.86bc	3.49c
	T2	75.30b	79.66b	26.39b	4.22b
	T3	82.41a	84.49a	30.03a	5.43a
	T4	67.64cd	72.22 cd	24.10bc	3.42cd

注:同列不同字母表示同一品种不同处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。
Note: Different letters in the same column meant significant difference among treatments at the 0.05 level, and hereinafter.

2.2 CTS 对盐胁迫下幼苗株高及生物量的影响

两个品种小麦在盐胁迫下幼苗的株高、鲜重和干重均在 CTS 为 0.1%~0.5%浓度范围内随浓度升高而提高(表 2),与对照相比,CTS 对盐胁迫下幼苗的生长均具有促进作用,其中以 0.3%的 CTS 处理效果最佳;与对照相比,偃展 08231 的株高、鲜重和干重分别提高了 32.60%、26.08%和 24.05%,差异均达显著水平($P<0.05$);小偃 986 的株高、鲜重和干重分别提高了 36.74%、38.77%和 35.87%,差异也均达显著水平($P<0.05$),总体指标高于偃展 08231。

2.3 CTS 对盐胁迫下种子 α -淀粉酶活性的影响

CTS 对盐胁迫下小麦种子 α -淀粉酶活性有显著的影响(图 1)。CTS 浓度为 0.1%~0.3%预处理的小麦种子 α -淀粉酶活性均高于对照,差异显著($P<0.05$)。表明外源 CTS 可以缓解盐胁迫对小麦种子萌发的抑制作用。其中,CTS 为 0.3%时, α -淀粉酶活性提高幅度最大,当 CTS 为 0.5%时,2 个品种种子的 α -淀粉酶活性降低,稍高于对照或者降至与对照持平(图 1),总体上呈现“低-高-低”的趋势。

表 2 CTS 对盐胁迫下小麦株高及生物量的影响

Table 2 Effects of exogenous chitosan on height and biomass of wheat seedlings under salt stress				
品种 Varieties	处理 Treatments	株高 Plant height /cm	鲜重 /(g·株 ⁻¹) Wet weight /(g·plant ⁻¹)	干重 /(g·株 ⁻¹) Dry weight /(g·plant ⁻¹)
偃展 08231 Yanzhan 08231	CK	3.19c	0.23c	0.079c
	T1	3.37bc	0.26bc	0.091b
	T2	3.63b	0.27b	0.095ab
	T3	4.23a	0.29a	0.098a
	T4	3.23c	0.24c	0.088bc
小偃 986 Xiaoyan 986	CK	3.62c	0.49c	0.131d
	T1	4.31b	0.58bc	0.146bc
	T2	4.57ab	0.61b	0.158b
	T3	4.95a	0.68a	0.178a
	T4	3.96bc	0.52bc	0.142c

2.4 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗 MDA 含量的影响

CTS 浓度为 0.1%~0.3%处理下 2 个品种的小麦幼苗中 MDA 含量较对照明显降低(图 2)。当 CTS 的处理浓度为 0.3%时,2 个小麦品种幼苗中 MDA 的含量与对照相比降至最低,效果最为显著($P<0.05$)。而 CTS 浓度为 0.5%,2 个小麦品种幼苗的 MDA 含量又有上升趋势,但都远低于对照,差异显

著($P < 0.05$)。说明 CTS 可在一定程度上抑制盐胁迫导致的膜质过氧化,提高小麦幼苗的抗盐性。

性的升降幅度不同,表明不同浓度 CTS 处理对 SOD 和 POD 活性的调节不同。

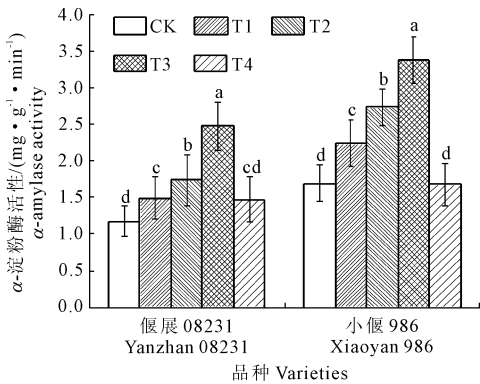


图 1 CTS 对盐胁迫下小麦种子
 α -淀粉酶活性的影响

Fig.1 Effect of exogenous chitosan on the activities of
 α -maylase in wheat seeds under salt stress

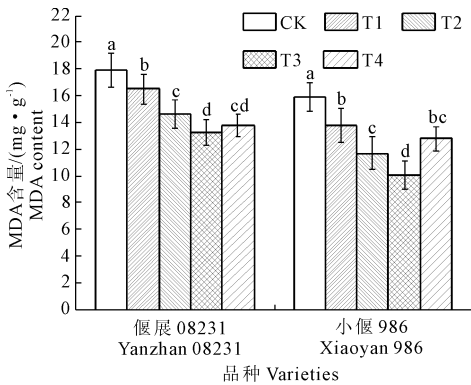


图 2 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗 MDA 含量的影响
Fig.2 Effect of exogenous chitosan on the content of
MDA in wheat seedlings under salt stress

2.5 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响

CTS 对盐胁迫下小麦幼苗 SOD 和 POD 活性有显著影响(图 3,图 4),与对照相比,0.1%~0.3%的 CTS 处理能明显促进小麦幼苗 SOD 和 POD 活性的提高,表明外源 CTS 可以提高盐胁迫下小麦幼苗的抗氧化能力。其中偃展 08231 在 CTS 为 0.2%~0.3%处理时 SOD 和 POD 活性最大,与对照相比,差异达显著水平($P < 0.05$)。CTS 为 0.5%时,SOD 和 POD 活性与对照持平或稍高于对照。小偃 986 在 CTS 浓度为 0.3%时 SOD 和 POD 的活性最大,与对照差异显著($P < 0.05$),CTS 浓度超过 0.3%这两种酶的活性降低。当 CTS 浓度为 0.5%时,2 个小麦品种幼苗的 SOD 活性与对照相同或者低于对照,而 POD 活性均较高于对照。SOD 和 POD 活性的总体呈现出“低-高-低”的趋势,但这两种抗氧化酶活

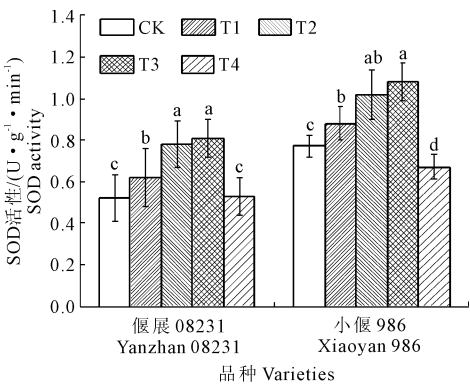


图 3 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗 SOD 活性的影响
Fig.3 Effect of exogenous chitosan on the activities of
SOD in wheat seedlings under salt stress

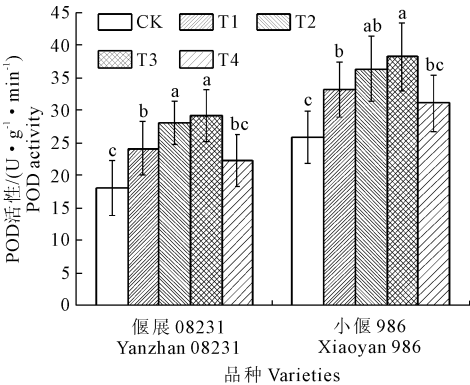


图 4 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗 POD 活性的影响
Fig.4 Effect of exogenous chitosan on the activities of
POD in wheat seedlings under salt stress

2.6 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗脯氨酸含量的影响

在 0.1%~0.3% 浓度范围内,CTS 处理较对照明显促进了 2 个品种幼苗中脯氨酸含量的提高(图 5),CTS 为 0.5%时,脯氨酸含量与对照差异不明显,缓解作用不明显。CTS 为 0.3%,明显促进偃展 08231 脯氨酸含量的提高,与对照差异显著($P < 0.05$),对胁迫的缓解效果最佳。CTS 浓度为 0.2%~0.3%时,小偃 986 的脯氨酸含量增加最高,作用最佳。CTS 处理的脯氨酸含量的变化总体上呈现“低-高-低”的趋势。说明 0.1%~0.3%的 CTS 能够在一定程度提高小麦幼苗的渗透调节能力,与对照相比差异显著($P < 0.05$),超过浓度 0.3%时其幼苗的渗透调节能力降低。

2.7 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗根系活力的影响

CTS 对盐胁迫下小麦幼苗根系活力有显著的影响(图 6)。与对照相比,0.1%~0.5% 浓度范围处

理能明显促进小麦幼苗根系活力的提高,表明外源 CTS 可以提高盐胁迫下小麦幼苗的生长,对小麦根系活力有促进作用,缓解了盐胁迫对植物根系的伤害。其中 2 个品种幼苗 CTS 浓度为 0.3% 处理时根系活力最大,与对照相比,差异均达显著水平 ($P < 0.05$), CTS 浓度为 0.5% 时,2 个品种的幼苗根系活力有降低趋势,但还是明显高于对照 ($P < 0.05$)。小偃 986 的根系活力远高于偃展 08231,说明前者的耐盐性较强,CTS 对小偃 986 的作用效果较偃展 08231 明显。

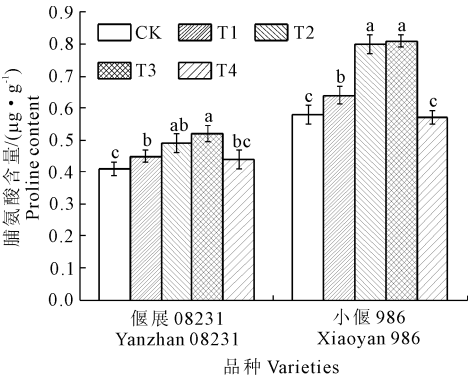


图 5 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗脯氨酸含量的影响
Fig.5 Effect of exogenous chitosan on the content of proline in wheat seedlings under salt stress

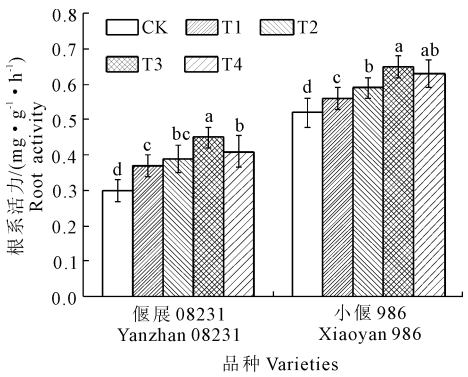


图 6 CTS 对盐胁迫下小麦幼苗根系活力的影响
Fig.6 Effect of exogenous chitosan on the activities in the root of wheat seedlings under salt stress

3 讨论

盐胁迫损害植株细胞正常的代谢过程,抑制种子发芽,影响种子的发芽率、发芽指数及活力指数^[6]。本试验选取介于 2 个不同盐敏感的小麦品种种子萌发盐胁迫临界浓度之间的 NaCl ($150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 进行胁迫处理。结果表明,0.1% ~ 0.5% 的 CTS 可以有效提高盐胁迫下 2 个小麦品种种子的发芽势、发芽率、发芽指数等萌发指标(表 1)。这与顾

丽婧^[13]对番茄的研究结果相似。 α -淀粉酶促进胚乳淀粉水解过程,促进种子萌发^[14]。本研究表明,不同 CTS 浓度处理后,两个小麦品种种子萌发过程中 α -淀粉酶活性、幼苗的株高、鲜重和干重均高于对照。小偃 986 的耐盐性强于偃展 08231,CTS 对小偃 986 的盐胁迫缓解作用较偃展 08231 明显,说明了 CTS 可以用作种子处理剂激发种子发芽,促进幼苗的生长,能增加幼苗有机物质的积累,为植株的生长发育和产量形成奠定了基础。

逆境条件下,植株细胞内活性氧自由基产生和清除的平衡遭到破坏,过量产生的自由基会对植株造成伤害,MDA 是膜脂过氧化产物,其含量的高低表示细胞膜脂过氧化受伤害的程度^[15]。本试验中,0.3% CTS 处理显著降低 2 个小麦品种幼苗中 MDA 的积累,维持膜系统的稳定性,提高幼苗的抗盐性。SOD 和 POD 是植物体内酶促防御系统的重要保护酶类,对清除植株体内过多的活性氧起到积极的作用。抗氧化酶活性的高低,对植物在胁迫条件下的抗逆能力有着重要影响^[16]。通过测定不同浓度 CTS 处理对盐胁迫下这两种酶的活性变化(图 3,图 4),结果表明,盐胁迫下,0.1% ~ 0.3% CTS 处理较对照显著增强了小麦幼苗中 SOD 和 POD 的活性,活性氧被有效清除,膜脂过氧化程度降低,MDA 含量下降,缓解了盐胁迫对幼苗的氧化伤害。这与徐卫红等^[3]对大豆的研究结果相似。但是 CTS 浓度为 0.5% 时,SOD 和 POD 酶活性降低,总体呈现“低-高-低”的趋势,但是这两种抗氧化酶的升降幅度不同,可能是不同浓度 CTS 处理对 SOD 和 POD 活性的调节存在差异,有待于进一步研究。

渗透调节作用是植物抵御胁迫的另一个重要机制^[17],脯氨酸作为主要的渗透调节物质,可以维持细胞膨压,在植株抗盐生理中发挥着重要作用^[18]。本试验结果表明,0.1% ~ 0.3% CTS 处理 2 个小麦品种幼苗脯氨酸含量较对照显著升高。说明一定浓度的 CTS 处理具有增强植株抗盐性的作用。这一结论与在玉米^[4]和番茄^[13]上的研究结果一致。根系是植株的重要器官,根系活力直接影响植株的生长发育、营养水平和产量品质。盐胁迫可危害植株根系,造成根系生理代谢失调,进而生长受到抑制^[18]。图 6 表明,0.1% ~ 0.3% 低浓度的 CTS 对盐胁迫下幼苗根系活力具有显著促进作用,当超过 0.3% 时对根系活力的促进作用降低,这与姜虎生等^[18]对大豆的研究结果相似。表明低浓度的 CTS 能促进盐胁迫下小麦幼苗根系活力的提高,缓解盐胁迫,促进幼苗植株健康生长。

综上所述,外源 CTS 可有效缓解盐胁迫下小麦种子的萌发及幼苗的生长,可以提高种子 α-淀粉酶活性,增强幼苗抗氧化能力、渗透调节能力以及根系活力,诱导小麦种子及幼苗耐盐性提高,减轻和缓解盐胁迫。外源 CTS 浸种和处理的最佳浓度为 0.3%。

参 考 文 献:

[1] 马 力,郭 静,刘 蒲.壳聚糖含磷衍生物的合成和表征及其应用研究[J].化学进展,2010,22(5):938-947.

[2] Dos Santos A L W, Gueddari E I, Trombuotto S, et al. Partially acetylated chitosan oligo and polymers induce an oxidative burst suspension cultured cells of the gymnosperm *Araucaria angustifolia* [J]. *Biomacromolecules*, 2008, 9(12):3411-3415.

[3] 徐卫红,徐芬芬,俞晓凤.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.

[4] 韩玉军,陶 波.壳聚糖对玉米幼苗生长及生理生化活性的影响[J].玉米科学,2012,20(3):73-76.

[5] 叶利民,夏瑾华,徐芬芬.壳聚糖浸种对水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J].广东农业科学,2010,37(6):21-22.

[6] 于汉寿,张益民,陈永萱,等.水溶性壳聚糖对小麦和油菜几丁质酶的诱导作用[J].江苏农业学报,1999,15(2):67-70.

[7] Bautista – Banos S, Hernandez – Lauzardo A N, Velazquez – del Valle M G, et al. Chitosan as a potential natural compound to control pre and post – harvest diseases of horticultural commodities[J]. *Crop Protection*, 2006,25(2):108-118.

[8] 姜 山,朱启忠,张真豪.壳聚糖对小麦种子萌发及干旱胁迫下幼苗保护酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):206-209.

[9] 赵 旭,王林权,周春菊,等.盐胁迫对不同基因型冬小麦发芽和出苗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):108-112.

[10] Kumar D, Ezekiel R. Developmental changes in sugars and dry matter content of potato tuber under sub – tropical climates[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 110:129-134.

[11] 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.

[12] 胡 晋.对种子活力测定方法—TTC 定量法的改进[J].种子,1986,(Z1):73-74.

[13] Liqiang GU. Effects of Chitosan on physiological characteristics of tomato seedlings under salt stress[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2012,13(3):551-553.

[14] 阮松林,薛庆中.壳聚糖包衣对杂交水稻种子发芽和幼苗耐盐性的影响[J].作物学报,2002,28(6):803-808.

[15] 王玉萍,董 雯,张 鑫,等.水杨酸对盐胁迫下花椰菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].草业学报,2012,21(1):213-219.

[16] 马彦霞,郁继华,张国斌,等.壳聚糖对水分胁迫下辣椒幼苗氧化损伤的保护作用[J].中国农业科学,2012,45(10):1964-1971.

[17] 樊国华,金 芳.壳聚糖和水杨酸对低温胁迫下草莓抗寒性的影响[J].甘肃农业大学学报,2008,43(2):83-86.

[18] 姜虎生,石德成.壳聚糖对大豆种子萌发和幼苗生长的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2006,34(2):117-119,123.

(上接第 165 页)

[22] Khan M N, Siddiqui M H, Mmhammad F, et al. Interactive role of nitric oxide and calcium chloride in enhancing tolerance to salt stress [J]. *Nitric Oxide*, 2012,27(4):210-218.

[23] Singh P, Shah K. Evidences for reduced metal – uptake and membrane injury upon application of nitric oxide donor in cadmium stressed rice seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83:180-184.

[24] 谭万能,李志安,邹 碧.植物对重金属耐性的分子生理机制[J].植物生态学报,2006,30(4):703-712.

[25] D’ alessandro A, Taamalli M, Gevi F, et al. Cadmium stress responses in *Brassica juncea*: hints from proteomics and metabolomics [J]. *Journal of Proteome Research*, 2013,12(11):4979-4997.

[26] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, et al. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation[J]. *Chemosphere*, 2006,65(6):1027-1039.

[27] Koffler B E, Polanschutz L, Zechmann B. Higher sensitivity of pad2 – 1 and vtc2 – 1 mutants to cadmium is related to lower subcellular glutathione rather than ascorbate contents [J]. *Protoplasma*, 2014, 251:755-769.

[28] Yu Q, Sun L, Jin H, et al. Lead-induced nitric oxide generation plays a critical role in lead uptake by *Pogona-therum crinitum* root cells[J]. *Plant Cell Physiol*, 2012,53(10):1728-1736.

[29] Saxena I, Shekhawath G S. Nitric oxide (NO) in alleviation of heavy metal induced phytotoxicity and its role in protein nitration[J]. *Nitric Oxide*, 2013,32:13-20.

[30] Corpas F J, Leterrier M, Valderrama R, et al. Nitric oxide imbalance provokes a nitrosative response in plants under abiotic stress[J]. *Plant Science*, 2011,181(5):604-611.

[31] Siddiqui M H, Ai – whaibi M H, Basalah M O. Role of nitric oxide in tolerance of plants to abiotic stress[J]. *Protoplasma*, 2011, 248(3):447-455.