

幼苗期低盐锻炼对小麦耐盐抗氧化特性的影响

师长海, 刘琦, 夏镇卿, 张书发, 孙怀奎, 孙聪聪, 刘义国*

(青岛农业大学农学院山东省旱作农业技术重点实验室, 山东青岛 266109)

摘要 [目的]研究幼苗期低盐锻炼对小麦抗氧化特性的影响。[方法]在不同盐胁迫梯度下,研究了经过耐盐锻炼的小麦幼苗体内的抗氧化特性。[结果]随着胁迫时间的增加,小麦体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)的活性显著下降,但经锻炼处理小麦体内 POD、SOD 活性明显高于对照;丙二醛(MDA)的含量呈不同程度的上升趋势,经锻炼处理小麦的 MDA 含量显著低于对照,可溶性蛋白的含量明显高于对照,两者存在显著差异。[结论]幼苗期采用低盐锻炼方法可增强小麦的耐盐能力,经过低盐锻炼的小麦能够更好地调节体内渗透压,同时增强了上部组织内清除活性氧的防护能力,在随后的盐胁迫中更易诱导清除活性氧防护系统,并及时做出自我保护和延缓自身衰老。

关键词 小麦幼苗期;低盐锻炼;盐胁迫;抗氧化特性

中图分类号 S512.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)25-0049-04

Effects of Low Salt Priming on Salt Tolerance and Antioxidation Characteristics in Seedling Stage of Wheat

SHI Chang-hai, LIU Qi, XIA Zhen-qing et al (Shandong Provincial Key Laboratory of Dry Farming Techniques, College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109)

Abstract [Objective]To study the effects of lower salt stress on the antioxidant properties of wheat at seedling stage. [Method]Under different salt stress gradients, we researched the antioxidant characters in wheat seedlings after salt resistant. [Result]With the stress time prolonged, the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in wheat decreased significantly, but the activities of POD and SOD after low salt pretreatment was significantly higher than those of control. The content of malondialdehyde (MDA) increased to some extent, and the content of MDA in wheat was significantly lower than that of control after low salt pretreatment. Soluble protein content was significantly higher than that of control, showing significant differences. [Conclusion]Low salt pretreatment at seedling stage enhanced the salt tolerance of wheat. The wheat after low salt pretreatment can better regulate osmotic pressure and enhance the ability to clean the active oxygen in the upper tissue. In the subsequent salt stress, it can be more easily induced to clear the active oxygen protection system, carry out the self-protection in time to retard selfaging.

Key words Wheat seedling stage;Low salt pretreatment;Salt stress;Antioxidation characters

作为农业大国,我国每年农作物的总产量居世界领先地位,但人均产量仍然不足。小麦是我国最重要的粮食作物之一,在我国农业生产中有着举足轻重的地位。但是,我国小麦的种植现状面临巨大的挑战,气候因素、耕作水平、病虫害、逆境胁迫等均在一定程度上影响着小麦产量,其中逆境胁迫逐渐成为影响小麦产量的主要因素之一。调查显示我国目前约有 0.4 亿 hm^2 盐渍化土地,约占耕地总面积的 25%,盐碱地面积的不断扩大给我国农业发展带来巨大的挑战。在逆境条件下幼苗期小麦体内生理特性变化最明显,其苗期受盐碱胁迫的主要症状表现为小麦叶片干枯、麦苗萎蔫、生长迟缓,甚至生长后期枯死,这些给小麦生产带来严重的威胁,因此研究小麦耐盐性及提高耐盐性的方法已经成为解决该问题的迫切需求^[1-2]。研究人员对小麦的抗逆生理机制做了部分研究,发现在胁迫条件下小麦苗期体内超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性会随胁迫时间和胁迫浓度的不同而出现明显差异,2种活性氧代谢特征的变化是判

断小麦抗衰老特性的重要指标^[3-7]。可溶性蛋白及游离脯氨酸等物质的含量也会在不同培养时期出现明显不同的变化,这与小麦的抗逆水平均有一定的相关性^[8-11]。孟祥浩等^[12]、申玉香等^[13]、张玉^[14]研究表明在盐胁迫条件下小麦体内 SOD 和 POD 活性会出现不同程度的下降,且抗逆性强的小麦品种活性下降幅度较小^[15],而丙二醛(MDA)在小麦体内含量会出现明显上升,脯氨酸作为植物体内渗透调节的主要物质在逆境条件下随胁迫程度的增大逐渐累积,可有效缓解逆境对植物体的胁迫,延缓自身衰老^[16]。

因此,在逆境胁迫条件下小麦体内 SOD、POD 活性以及 MDA 等生理指标都会出现明显变化,以积极调解自身抗逆机制。为探索小麦提高耐盐性的方法,明确幼苗期低盐锻炼能否提高小麦后期生长抗逆性,针对盐碱地小麦耐盐阈值低、受盐胁迫影响生长发育等问题,笔者以青麦 6 号为试验材料,研究低盐锻炼后小麦耐盐性差异,以期阐明低盐锻炼对小麦抗逆性的影响,进一步完善小麦盐碱地抗逆高产栽培技术。

1 材料与方法

1.1 供试材料 小麦品种为青麦 6 号。

1.2 试验方法 该研究于 2016 年 3 月—2017 年 10 月在青岛农业大学山东省旱作农业技术重点实验室进行。挑选小麦饱满、健康籽粒,0.1%双氧水消毒 5 min,蒸馏水反复冲洗数次后,蒸馏水浸泡 24 h 在 25 °C 恒温光照培养箱中避光培养 24 h 露白后,挑选露白均匀一致的籽粒用 1/2 霍格兰氏(Hoagland)营养液通氧培养。出苗均匀后第一周用 1/2 Ho-

基金项目 山东省重点研发计划“盐碱地生物高效生态共生关键技术研究”与示范”(2017CXGC0307);国家大学生创新训练计划项目;山东省渤海粮仓科技示范工程“黄河三角洲盐碱地粮果饲专用品种筛选及示范”(2017BHLC021);山东省重点研发计划“盐碱地粮经饲绿色开发关键技术研究”与示范”(2016CJYS05A07-7)。

作者简介 师长海(1981—),男,山东新泰人,讲师,博士,从事作物抗逆生理生态研究;刘琦(1996—),女,山东淄博人,从事作物抗逆栽培生理研究;师长海和刘琦为共同第一作者。*通讯作者,副教授,博士,从事小麦抗逆栽培理论与技术研究。

收稿日期 2018-04-25;修回日期 2018-05-18

agland 营养液培养,生长7 d后换成 Hoaland 全营养液。小麦生长至一叶一心时,选取生长一致的幼苗将根系洗净,对照 CK 不做处理,锻炼处理换为 0.2% NaCl 营养液进行培养。5 d 后停止锻炼进行恢复,对照和处理均换成 Hoaland 全营养液进行培养。至小麦生长到三叶一心时,将对照 CK 分为 CK₁ 和 CK₂,锻炼处理为 T₁ 和 T₂,CK₁ 和 T₁ 营养液中 NaCl 浓度为 0.2%、CK₂ 和 T₂ 营养液中 NaCl 浓度为 0.3%(表 1),继续进行培养。在 0、2、4、6、8 d 分别对植株叶片取样并进行测定。

表 1 不同试验处理方案

Table 1 Treatment scheme of different stresses

处理编号 Treatment code	锻炼培养液 Pretreatment nutrient solution	恢复培养液 Recovery nutrient solution	胁迫培养液 Stress nutrient solution
CK ₁	Hoaland 营养液	Hoaland 营养液	0.2% NaCl Hoaland 营养液
CK ₂	Hoaland 营养液	Hoaland 营养液	0.3% NaCl Hoaland 营养液
T ₁	0.2%NaCl Hoaland 营养液	Hoaland 营养液	0.2% NaCl Hoaland 营养液
T ₂	0.2%NaCl Hoaland 营养液	Hoaland 营养液	0.3% NaCl Hoaland 营养液

1.3 测定项目及方法 采用王爱国等^[17]的方法测定超氧化物歧化酶活性;采用愈创木酚法^[18]测定过氧化物酶活性;采用林植芳等^[19]的方法测定丙二醛含量;采用考马斯亮蓝法^[20]对可溶性蛋白含量进行测定;采用磺基水杨酸法^[21]对游离脯氨酸含量进行测定;采用蒽酮比色法^[22]测定可溶性糖含量。

1.4 数据处理 采用 Excel 2007 处理数据、图表,统计分析和差异性显著性采用 SAS 9.3 处理。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对小麦叶片 SOD 活性的影响 从表 2 可以看出,在整个试验过程中小麦体内 SOD 活性明显呈下降趋势,且 CK₁、CK₂ 处理的 SOD 活性下降幅度明显大于 T₁、T₂ 处理。培养时间为 4 d 时,CK₁ 与 T₁ 处理相比、CK₂ 与 T₂ 处理相比幼苗体内 SOD 活性差异性均不显著;培养至 8 d 时,CK₁ 与 T₁ 处理相比差异性显著,CK₂ 与 T₂ 处理相比差异性也不显著,但 CK₂ 和 T₂ 处理的 SOD 活性分别下降了 47.85% 和 30.67%,CK₂ 下降幅度明显大于 T₂ 处理。由此可见,在盐胁迫培养过程中,经过前期低盐锻炼的处理后体内 SOD 活性下降幅度明显低于未经锻炼的小麦处理。由此可知,幼苗期低盐锻炼对维持小麦体内 SOD 活性有显著效果。

表 2 不同处理对小麦叶片 SOD 活性动态变化的影响

Table 2 Effects of different treatments on the dynamic changes of SOD activity in wheat leaves

处理编号 Treatment code	胁迫天数 Stress days//d				
	0	2	4	6	8
CK ₁	381.44 a	341.44 a	305.23 ab	274.54 b	248.82 b
CK ₂	390.14 a	311.73 ab	287.49 b	227.21 c	203.43 b
T ₁	384.80 a	350.27 a	335.32 a	319.02 a	289.02 a
T ₂	378.63 a	340.63 a	308.95 ab	259.41 bc	262.49 ab

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)
Note:Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments at 0.05 level

2.2 盐胁迫对冬小麦叶片 POD 活性的影响 从表 3 可以看出,在胁迫试验过程中小麦叶片内 POD 的活性呈持续下降趋势,但各处理间下降幅度各有不同。当胁迫时间同为 8 d 时,CK₁ 和 CK₂ 的 POD 活性分别下降了 44.37% 和 47.40%,而 T₁ 和 T₂ 处理的 POD 活性仅下降了 29.20% 和 36.20%;胁迫 8 d 时 CK₁ 与 T₁ 处理相比、CK₂ 与 T₂ 差异性显著。且在胁迫时间从 4 d 开始,CK₁ 与 T₁ 处理差异性显著,CK₁ 的 POD 活性高于 T₁ 处理;在 CK₂ 与 T₂ 处理从胁迫时间为 6 d 时开始表现为差异性显著,T₂ 处理的 POD 活性高于 CK₂。由此可明显看出,小麦幼苗期的低盐锻炼能更明显地提高后期生长逆境中体内的抗氧化酶活性,更易通过自身的生理调节协调形成有效自我保护机制,延缓自身衰老。

表 3 不同处理对小麦叶片 POD 活性动态变化的影响

Table 3 Effects of different treatments on the dynamic changes of POD activity in wheat leaves

处理编号 Treatment code	胁迫天数 Stress days//d				
	0	2	4	6	8
CK ₁	417.36 a	365.46 ab	309.05 b	267.26 b	232.17 bc
CK ₂	407.42 a	343.00 a	297.86 b	243.24 c	214.31 c
T ₁	401.35 a	384.78 a	356.76 a	308.78 a	287.12 a
T ₂	396.98 a	369.49 ab	326.40 ab	283.75 ab	253.27 b

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)
Note:Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments at 0.05 level

2.3 盐胁迫对小麦叶片 MDA 含量的影响 由表 4 可知,随着胁迫时间的增加,小麦体内 MDA 的含量呈不同程度的缓慢上升,CK₁ 在整个试验过程的每相邻 2 次取样对比中 MDA 含量均表现为差异性不显著,同样未经低盐锻炼的 CK₂ 处理也是如此。T₁ 处理在胁迫时间为 2 和 0 d 时的 MDA 含量差异显著,T₂ 处理中胁迫时间 4 和 2 d 时的 MDA 含量差异性显著,4 d 时的 MDA 含量高于未开始胁迫时。在相同的低盐锻炼条件下,T₁ 处理的 MDA 含量明显低于 T₂ 处理,且在第 6 天时差异显著。在 8 d 时 T₁ 处理的 MDA 含量比 CK₁ 低 23.52%,且在 6 d 时 2 个处理差异性显著;T₂ 的 MDA 含量比 CK₂ 低 12.18%,且在 6 d 时表现为差异性显著。丙二醛是植物细胞膜过氧化程度的反映,其含量的高低说明植物细胞膜过氧化程度的高低,也间接反映植物细胞膜受到的伤害严重程度。由此可见,T₁、T₂ 处理中小麦对于逆境条件的适应性高于 CK₁、CK₂。

表 4 不同处理对小麦叶片 MDA 含量动态变化的影响

Table 4 Effects of different treatments on the dynamic changes of MDA content in wheat leaves

处理编号 Treatment code	胁迫天数 Stress days//d				
	0	2	4	6	8
CK ₁	9.96 ab	12.04 ab	15.10 ab	18.23 a	21.05 ab
CK ₂	10.66 a	14.61 a	17.01 a	19.34 a	23.24 a
T ₁	10.03 a	11.69 b	12.69 b	12.87 c	16.10 c
T ₂	11.11 a	12.89 ab	13.51 b	16.24 b	20.41 b

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)
Note:Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments at 0.05 level

2.4 盐胁迫对小麦叶片可溶性蛋白含量的影响 由表 5 可知,在低盐胁迫条件下小麦叶片中可溶性蛋白的含量随胁迫时间的增加呈逐渐降低趋势,前期经过低盐锻炼的处理降低幅度相对较小。在胁迫浓度同为 0.2% NaCl、胁迫时间同为 8 d 的条件下,CK₁ 与 T₁ 处理的差异不显著,但 T₁ 处理小麦叶片中可溶性蛋白含量比原来减少了 35.05%,CK₁ 处理比原来减少了 55.43%;在胁迫浓度同为 0.3% NaCl、胁迫时间同为 8 d 的条件下,CK₂ 与 T₂ 处理差异不显著,但 T₂ 处理小麦叶片中可溶性蛋白含量比原来减少了 40.87%,而 CK₂ 减少了 64.10%。植物体内的可溶性蛋白对逆境条件下植物的生长状态起到良好的渗透调节作用,增加细胞的保水能力,保护细胞的生命物质及生物膜。由上述分析结果可知,前期经低盐锻炼 T₁、T₂ 处理可溶性蛋白含量高于未经低盐锻炼的 CK₁、CK₂,说明低盐锻炼对小麦的逆境生理调节起到了一定的适应性。

表 5 不同处理对小麦叶片可溶性蛋白含量动态变化的影响

Table 5 Effects of different treatments on the dynamic changes of soluble protein content in wheat leaves mg/g

处理编号 Treatment code	胁迫天数 Stress days/d				
	0	2	4	6	8
CK ₁	55.13 a	45.46 a	36.42 a	29.94 ab	24.57 ab
CK ₂	54.37 a	33.96 b	26.99 b	22.14 b	19.52 b
T ₁	44.88 b	42.27 a	38.60 a	31.07 a	29.15 a
T ₂	43.65 b	41.40 ab	38.89 a	28.57 ab	25.81 ab

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments at 0.05 level

2.5 盐胁迫对小麦叶片游离脯氨酸含量的影响 由表 6 可知,在盐胁迫条件下小麦叶片中脯氨酸的含量随胁迫时间的增加呈不断上升的趋势,且在第 4~8 天上升幅度较大。T₁ 与 CK₁ 处理在 6 d 时的脯氨酸含量差异性显著,T₁ 处理高于 CK₁;T₂ 与 CK₂ 处理在 4 d 时差异性显著,T₂ 处理高于 CK₂。胁迫时间为 4 d 时 T₁ 与 T₂ 处理差异性显著,T₁ 处理脯氨酸的含量是 T₂ 处理的 1.38 倍。自胁迫时间 2 d 起,各处理脯氨酸含量顺序为 T₁ 处理 > CK₁ 处理 > T₂ 处理 > CK₂ 处理,在幼苗期的低盐锻炼和胁迫浓度的不同是影响小麦体内脯氨酸含量的两大重要因素,且在相同胁迫浓度下经低盐锻炼过程后,小麦更易在逆境条件下协调自身生理平衡,减缓逆境伤害,延缓衰老。

表 6 不同处理对小麦叶片游离脯氨酸含量动态变化的影响

Table 6 Effects of different treatments on the dynamic changes of proline content in wheat leaves μg/g

处理编号 Treatment code	胁迫天数 Stress days/d				
	0	2	4	6	8
CK ₁	53.72 a	82.02 a	108.92 ab	144.68 b	173.52 b
CK ₂	52.64 a	61.76 b	89.28 c	108.02 c	156.88 b
T ₁	49.95 a	92.15 a	138.07 a	188.45 a	210.11 a
T ₂	50.86 a	78.21 ab	99.70 b	111.42 bc	165.59 b

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments at 0.05 level

2.6 盐胁迫对小麦可溶性糖含量的影响 由表 7 可知,随着胁迫时间的增加,小麦体内可溶性糖含量呈缓慢上升趋势,且 T₁、T₂ 处理上升幅度大于 CK₁ 与 CK₂。CK₁ 在胁迫时间 8、6 d 时可溶性糖含量差异显著,同为未经过低盐锻炼胁迫浓度高的 CK₂ 处理在 4、2 d 表现为差异显著;T₁ 处理在整个胁迫过程中差异均不显著,T₂ 在处理 4、2 d 表现为差异显著。在相同的胁迫时间下,T₁ 处理与 CK₁ 在 8 d 时可溶性糖含量差异显著,T₁ 处理为 CK₁ 处理的 1.13 倍;T₂ 与 CK₂ 处理在 4 d 时差异性显著,T₂ 处理为 CK₂ 的 1.16 倍。T₁ 与 T₂ 处理在 8 d 时可溶性糖含量分别增加为原来的 2.52 和 2.11 倍;CK₁ 与 CK₂ 处理在 8 d 时可溶性糖含量分别增加为原来的 1.93 和 1.73 倍。由此可见,幼苗期经低盐锻炼的小麦更易在逆境生长条件中调节自身可溶性糖含量,为生长发育提供能量、调节自身生命周期、延缓衰老。

表 7 不同处理对小麦可溶性糖含量动态变化的影响

Table 7 Effects of different treatments on the dynamic changes of soluble sugar in wheat mg/(g·h)

处理编号 Treatment code	胁迫天数 Stress days/d				
	0	2	4	6	8
CK ₁	18.86 a	19.11 a	25.50 a	30.29 a	36.58 b
CK ₂	17.83 a	18.47 a	22.62 b	26.30 b	30.88 c
T ₁	16.42 a	18.68 a	25.62 a	30.16 a	41.46 a
T ₂	16.98 a	18.63 a	20.58 b	27.31 b	35.87 b

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments at 0.05 level

3 讨论

植物体在逆境条件下的自我调节、疏导机制主要依靠提高抗氧化酶活性与积累渗透调节物质来实现^[23-24]。抗氧化酶系统中,SOD 和 POD 是通过清除植物逆境条件下积累的活性氧来降低逆境对植物体产生伤害的主要调节物质。其中 SOD 是生物体内重要的抗氧化酶,具有特殊的生理活性,是生物体内清除超氧阴离子自由基的首要物质,SOD 在生物体内的高低是衰老与死亡的直观指标^[12]。该试验结果表明,幼苗期经过低盐锻炼的小麦在逆境条件下体内 SOD 活性高于未经低盐锻炼的小麦,且生长状态好,这与薛远赛等^[25]在盐碱胁迫的条件下植物体内 SOD 活性降低的研究结果一致。

POD 是植物体内参与调控生理循环代谢的另一种重要的保护酶,主要进行植物体内过氧化物的清除,与植物的呼吸、光合作用及植物激素的氧化等生理过程关系密切,在植物逆境和衰老时表达,活性较高,而幼嫩组织较少,活性较弱,所以 POD 活性可以作为组织老化的指标之一^[2]。在前人的研究进展中,贺岩等^[26]、高永生等^[27]研究指出植物体在应对逆境条件时体内 POD 活性会出现先缓慢上升后下降的趋势。但在该试验过程中 POD 活性随胁迫时间的增加呈整体下降趋势,且未经低盐锻炼的处理下降幅度大于低盐锻炼的处理,该结果差异的出现可能是由于试验所选的供试品种为“青麦 6 号”,其本身具有较强的抗逆能力。

丙二醛含量是植物细胞膜质过氧化程度的体现,MDA含量与植物细胞的受损程度和植物体抗逆性强弱有很大关系^[25]。Bowler等^[28]研究发现一般植物在逆境条件下,如高温,盐碱以及强光等逆境条件下就会产生膜质过氧化,使得植物体内MDA含量明显升高。在该试验中,小麦体内MDA含量虽有升高但却较为缓慢,表明低盐锻炼降低了小麦幼苗受盐胁迫的影响。

脯氨酸(Pro)是植物蛋白质的重要组成部分之一,并以游离状态广泛存在于植物体内。赵勇等^[16]在研究中指出干旱、盐渍等胁迫条件下,许多植物体内Pro大量积累。积累的Pro除了作为植物细胞质内渗透调节物质外,还在稳定生物大分子结构、降低细胞酸性、解除氨毒以及作为能量库调节细胞氧化还原势等方面起重要作用。在该试验中接受低盐锻炼的处理与对照处理之间从胁迫培养第4天起便有了显著差异。经过低盐锻炼的处理小麦体内Pro含量明显高于未经低盐锻炼的处理,充分说明低盐锻炼有利于小麦适应逆境(盐胁迫)生存条件。

可溶性糖,如葡萄糖、蔗糖不仅为植物的生长发育提供能量和代谢中间产物,而且具有信号功能,是植物生长发育和基因表达的重要调节因子。在该试验中不同胁迫浓度下经低盐锻炼的处理中可溶性糖含量约为未经低盐锻炼处理的2倍,这与邵红雨等^[29]的研究结果一致。可溶性蛋白是重要的渗透调节物质和营养物质,其增加和积累能提高细胞的保水能力,对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用,因此经常用作筛选抗性的指标之一。在该试验中经低盐锻炼的处理体内可溶性蛋白的含量比最初降低35%~40%,而未经低盐锻炼的处理体内可溶性蛋白含量比最初降低50%~60%,表明未经低盐锻炼的小麦在盐胁迫逆境条件下细胞受损较经低盐锻炼的小麦严重。

4 结论

幼苗期采用低盐锻炼方法可增强小麦的耐盐能力,经过低盐锻炼的小麦能够更好地调节体内渗透压,同时增强上部组织内清除活性氧的防护能力,在随后的盐胁迫中更易诱导清除活性氧防护系统,并及时做出自我保护和延缓自身衰老。该研究结果初步阐明了幼苗期低盐锻炼对小麦抗逆性的衰老特性影响,但要更加深入地认识其调节机制,还要从分子生物学的角度进行进一步探究。

参考文献

[1] 高美玲,张旭博,孙志刚,等.中国不同气候区小麦产量及发育期持续时间对田间增温的响应[J].中国农业科学,2018,51(2):386-400.
 [2] 丁锦峰,苏盛楠,梁鹏,等.拔节期和花后渍水对小麦产量、干物质及氮素积累和转运的影响[J].麦类作物学报,2017,37(11):1473-1479.
 [3] 郭振飞,卢少云,李宝盛,等.不同耐旱性水稻幼苗对氧化胁迫的反应[J].植物学报,1997,39(6):748-752.

[4] 邓莹明,熊格生,袁小玲,等.棉花不同耐高温品系的SOD、POD、CAT活性和MDA含量差异及其对盛花期高温胁迫的响应[J].棉花学报,2010,22(3):242-247.
 [5] 王长发,张嵩午.冷型小麦旗叶衰老和活性氧代谢特性研究[J].西北植物学报,2000,20(5):727-732.
 [6] PALLITT K E, YOUNG A J, CAROTENOIDS A R, et al. Antioxidants in higher plants[J]. Journal of science of food and agriculture, 1999, 54: 641-648.
 [7] 张雅倩,林琪,刘家斌,等.干旱胁迫对不同肥水类型小麦旗叶光合特性及产量的影响[J].麦类作物学报,2011,31(4):724-730.
 [8] SOUSSI M, OCANA A, LIUCH C. Effects of salt stress on growth, photosynthesis and nitrogen fixation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. Journal of experimental botany, 1998, 49(325): 1329-1337.
 [9] PETRUSA L M, WINICOV I. Proline status in salt-tolerant and salt-sensitive alfalfa cell lines and plants in response to NaCl [J]. Plant physiology and biochemistry, 1997, 35(4): 303-310.
 [10] SANADA Y, VEDA H, KURIBAYASHI K, et al. Novel light-dark change of proline levels in halophyte (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) and glycophytes (*Hordeum vulgare* L. and *Triticum aestivum* L.) leaves and roots under salt stress [J]. Plant Cell Physiol, 1995, 36(6): 965-970.
 [11] SANTA-CRUZ A, ACOSTA M, RUS A, et al. Short-term salt tolerance mechanisms in differentially salt tolerant tomato species [J]. Plant Physiol Biochem, 1999, 37(1): 65-71.
 [12] 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].东南传播,2015,35(8):1168-1175.
 [13] 申玉香,郭文善,周影,等.盐分胁迫对小麦花后剑叶衰老特性和产量的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2007,28(1):59-63.
 [14] 张玉.灌溉期高温和渍水对小麦籽粒产量和品质形成的影响[D].南京:南京农业大学,2012.
 [15] 赵远伟,刘小京,李存东,等.温度对盐胁迫小麦抗氧化机制的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(12):1460-1468.
 [16] 赵勇,马雅琴,翁跃进.盐胁迫下小麦甜菜碱和脯氨酸含量变化[J].植物生理与分子生物学学报,2005,31(1):103-106.
 [17] 王爱国,罗广华,邵从本,等.大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J].植物生理学报,1983,9(1):77-84.
 [18] 施特尔夫赫 B. 酶的测定方法[M]. 钱嘉渊,译.北京:中国轻工业出版社,1992:186-194.
 [19] 林植芳,李双顺,林桂珠,等.水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系[J].植物学报,1984,26(6):605-615.
 [20] BRADFORD M M. Protein measurement with the follin phenol reagent [J]. Biochem, 1976, 72(1): 248-254.
 [21] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:72-75.
 [22] 韩勇,许映飞,顾超,等.不同种植方式对盐碱地棉花干物质质量及氮磷钾积累的影响[J].棉花学报,2014,26(2):184-188.
 [23] MAYM J, VERNOUX T, LEAVER C, et al. Glutathione homeostasis in plants; Implications fore environmental sensing and plant development [J]. J Exp Bot, 1998, 49(321): 649-667.
 [24] 扬素欣,王振镒.盐胁迫下小麦愈伤组织生理生化特性的变化[J].西北农业大学学报,1999,27(2):48-52.
 [25] 薛远赛,孟祥浩,刘义国,等.盐胁迫下不同小麦品种(系)旗叶衰老特性分析[J].中国农学通报,2015,31(24):37-41.
 [26] 贺岩,李志岗,李新鹏,等.盐胁迫条件下两种基因型小麦生长及保护酶活性的反应[J].山西农业大学学报(自然科学版),2005,25(1):42-44.
 [27] 高永生,陈集双.盐胁迫下镉对小麦幼苗叶片抗氧化系统活性的影响[J].中国稀土学报,2005,23(4):490-494.
 [28] BOWLER C, VAN MONTAGU M, INZÉ D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1992, 43: 83-116.
 [29] 邵红雨,孔广超,齐军仓,等.植物耐盐生理生化特性的研究进展[J].安徽农学通报,2006,12(9):51-53.