

种子引发对盐渍土壤条件下高粱芽苗生理特性的影响

张 飞, 朱 凯, 王艳秋, 张志鹏, 邹剑秋

(辽宁省农业科学院创新中心, 辽宁 沈阳 110161)

摘 要: 为探索引发种子对不同盐渍土壤条件下高粱芽苗的生理效应, 增强高粱芽苗期的耐盐能力, 采用盆栽沙培试验, 将氯化钠和硫酸钠复配引发(CSP)、氯化钠单独引发(SSP)和不引发(NSP)处理后的高粱种子分别播种在 0、40、80、120 mmol·L⁻¹ 和 160 mmol·L⁻¹ 盐溶液漫灌的细沙盐渍土壤条件下, 研究上述各种状态下种子萌发和幼苗生理特性。结果表明: 种子引发可提高盐胁迫下高粱的发芽率、成苗率和活力指数, 尤其是盐复配引发(CSP)效果更为明显; 引发后的种子(特别是 CSP)可显著减少中、高盐胁迫条件下叶片和根系相对含水量的下降幅度, 减缓叶绿素 a + b、叶绿素 a 的下降; 氯化钠和硫酸钠复配引发(CSP)下净光合速率在盐浓度低于 80 mmol·L⁻¹ 时下降幅度较小, 气孔导度和蒸腾速率与之变化趋势基本一致; 种子引发增强了 SOD、POD、CAT 和 APX 活性, 同时减少了 MDA 和 O₂⁻, 其中 MDA、O₂⁻ 和 POD 反应较为敏感, 三种种子引发处理对高粱芽苗期抗氧化系统的影响效应表现为: 复配引发(CSP) > 单盐引发(SSP) > 不引发(NSP)。盐渍土壤条件下种子引发, 特别是氯化钠和硫酸钠复配引发种子可增强其生理适应性, 进而提高高粱芽苗期的耐盐性。

关键词: 种子引发; 高粱; 盐胁迫; 发芽; 生理特性

中图分类号: S514 **文献标志码:** A

Effects of seed priming on the physiological characteristics of sorghum seedlings under saline stress

ZHANG Fei, ZHU Kai, WANG Yan-qiu, ZHANG Zhi-peng, ZOU Jian-qiu

(Liaoning Provincial Academy of Agricultural Sciences, Innovation Center, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: To explore the physiological effects of sorghum seedlings by seed priming under saline soil conditions and enhance the salt tolerance of sorghum at sprouting and seedling stages, a pot culturing experiment was employed in this study to investigate complex salt priming (CSP), single salt priming (SSP), none salt priming (NSP) on sorghum seeds that were sown in the sandy soil conditions treated with 0, 40, 80, 120 mmol·L⁻¹ and 160 mmol·L⁻¹ salt solution irrigations. Consequently, seed germination and seedling physiological characteristics were studied. The results showed that seed priming could improve the seed germination rate, emergence rate and vigor index of sorghum seeding, especially through the effect of complex salt initiator (CSP) treatment with NaCl and Na₂SO₄ under different soil salt stresses. In addition, after seed priming, especially when treated by CSP, it could significantly relief the relative reduction of water content in leaves and roots, particularly under middle and high salt stresses. Also, the amounts of chlorophyll a + b and chlorophyll a showed a slow decline. When the concentration of salt was no more than 80 mmol·L⁻¹ (Salt - 80), the net photosynthesis showed a little reduction, and stomatal conductance and transpiration rate were consistent with the varying trend. Moreover, seed priming enhanced the SOD, POD, CAT and APX activities, while reduced the MDA and O₂⁻. MDA, O₂⁻ and POD were the more sensitive factors than others. The effects on the antioxidant system were in the order of the following: complex salt priming (CSP) > single salt priming (SSP) > complex salt priming (NSP). In conclusion, seed priming with NaCl and Na₂SO₄ complex solution could enhance the physiological adaptation of sorghum seedlings and improve the salt tolerance of sorghum at the sprouting and seedling stages.

Keywords: seed priming; sorghum; salt stress; germination; physiological

收稿日期: 2015-07-05
基金项目: 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2015022); 现代农业产业技术体系项目(CARS-06); 国家科技支撑计划(2014BAD07B02)
作者简介: 张 飞(1982—), 男, 博士, 助研, 主要从事高粱遗传育种与高产栽培技术研究。E-mail: zhangfei19821121@163.com。
通信作者: 邹剑秋, 研究员, 主要从事高粱遗传育种研究。E-mail: jianqizou@126.com。

土壤盐渍化是限制作物芽苗形态建成和制约其生长发育的重要生态环境因子^[1]。目前,全球范围内约有 10 亿 hm^2 的土地存在不同程度的盐渍化,主要分布于土壤蒸发量大,降水量少的干旱、半干旱和滨海地区^[2]。中国盐渍土面积约 9 913 万 hm^2 ,且随着工农业的发展、人口的剧增以及耕地面积的减少,盐碱化和次生盐渍化每年都在不断加重,土壤盐渍化已经严重影响了我国乃至全世界的作物生产^[3]。在此背景下,合理开发利用这些受盐渍危害的边际性土地,充分利用土地资源的问题,亟待解决。高粱作为世界五大作物之一,具有较强的耐盐性,但在芽苗期对盐胁迫较为敏感^[4],时常在盐渍地上种植高粱种子萌发困难、出苗差和苗期形态建成受阻,进而影响中后期生长和物质积累^[5]。因此,如何挖掘和提高高粱芽苗期的耐盐能力成为开发利用盐渍化土地和发展高粱产业的一个关键问题。

种子引发处理技术是基于种子萌发生物学机制提出的促进种子萌发、提高幼苗抗性、改善营养状况的一种种子处理手段^[6-7]。早期学者主要对盐胁迫下番茄、黄瓜、油菜等园艺作物做了种子引发研究,普遍认为引发种子能提高种子活力、增强其苗期的耐盐能力^[8-9]。Passam 和 Kakouriotis^[10]用 NaCl 引发黄瓜种子,研究认为 NaCl 引发种子能促进种子在盐逆境下萌发,提高出苗率,加快幼苗生长;Cano 等^[11]指出 NaCl 引发番茄种子不仅对种子萌发期和苗期效应显著,对植株后期的成熟和产量也有积极影响。随着研究的深入,也有学者从玉米、小麦、向日葵等作物种子引发研究其耐盐性。赵旭等^[12]研究认为引发后的种子发芽率、光合速率和生物量均有所提高;史雨刚等^[13]以耐盐性强和耐盐性弱两个冬小麦品种种子为试材,研究发现引发处理提高了小麦的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数,而膜透性显著降低。

对种子引发单一的发芽研究前人曾有相关报道。Jisha K 等^[7]研究认为氯化钠引发种子可以有效缓解盐胁迫下水稻、玉米等作物的生长;贺长征等^[8]对盐胁迫下高粱种子的萌发进行了研究,认为种子引发可提高种子的发芽性能;马金虎等^[14]曾采用 NaCl 作为引发材料对高粱种子进行了处理,结果表明种子引发可提高盐胁迫下高粱种子的发芽质量。另外,这些研究都是基于单一物质或单一的盐浓度处理,将氯化钠和硫酸钠复配且采用不同盐浓度模拟土壤盐渍化对高粱发芽和苗期生理特性影响的研究尚未见报道。因此,本研究比较了不同盐浓度胁迫下盐复配引发、单盐引发和不引发处理下高粱种

子发芽和苗期生理特性,旨在探明盐复配引发高粱芽苗期的生理调节效应,为高粱耐盐栽培提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料和基本条件

试验品种为辽粘 6 号,2014 年在辽宁省农科院创新中心人工气候室进行。其生长条件为昼/夜温度为 $28^\circ\text{C}/25^\circ\text{C}$,湿度为 50%,光照处理为照光 16 h、黑暗 8 h 模拟自然条件,光强为 $187 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.2 种子处理

试验设 3 种盐分处理,分别为单盐引发(Simple salt priming, SSP)、盐复配引发(Complex salt priming, CSP)和不引发(None salt priming, NSP)。单盐引发采用 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠(NaCl)溶液进行引发;盐复配引发采用 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠(NaCl)和硫酸钠(Na_2SO_4)溶液(NaCl 和 Na_2SO_4 按 9:1 的摩尔比混合)进行引发;不引发不用任何盐溶液,采用与盐分处理等量的蒸馏水处理种子。3 种盐分处理过的种子均在 20°C 条件下浸泡 30 h,取出后立即用蒸馏水将种子冲洗干净,用滤纸吸干种子表面水分,然后在恒温室中 20°C 下干燥 30 h,之后在室温下晾干至原始重量。

1.3 试验设计

采取沙培盆栽试验,每盆装满细沙,分别用 0 (用蒸馏水漫灌作为对照,CK)、40、80、120、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐溶液进行漫灌,直至形成具有不同盐浓度的人工模拟盐分胁迫,分别简称 Salt - 40、Salt - 80、Salt - 120 和 Salt - 160。待细沙含水量降到 30% 时(采用 LZB - SW 土壤水分测定检测仪检测)开始播种,每盆 10 穴,每穴 3 株。随机区组设计,三次重复。每隔 10 d 每处理浇灌等量浓度的盐溶液,其它时间用自来水补充所失水分。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 发芽率、活力指数和成苗率 自种子播种第 4 天开始每天调查、统计发芽数,直至第 10 天,并在第 10 天测定叶长、根长以及胚根、叶鲜重和干重,同时调查成苗率,计算发芽指数和活力指数。

发芽指数(G_i) = $\sum (G_t/D_t)$, 其中 G_t 为第 t 日的发芽种子个数, D_t 为相应的发芽日数;

活力指数(V_i) = 发芽指数(G_i) $\times$ 胚根鲜重。

1.4.2 相对含水量 播种后 24 d 取样,测定叶片和根系鲜重(FW)、干重(DW)和吸水后的重量(Treatment weight, TW),其中 DW 测定时样品在烘箱中于 65°C 烘至恒重, TW 指将样品在 4°C 的去离子水中浸泡 24 h 后测得的重量。计算相对含水量。

$RWC(\%) = [(FW - DW)/(TW - DW)] \times 100$ 。

1.4.3 光合参数 播种后 24 d 采用便携式光合作
用测定系统(LI-6400, LI-COR 公司, 美国)测定净
光合速率, 采用红蓝光源, 测定光强 PAR 为 1 000
 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 每处理选取 5 株长势一致植株测定
净光合速率, 测定时间为上午 9:30~11:00 时, 同步
记录气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率。

1.4.4 抗氧化指标 播种后 24 d 取样, 采用张宪
政(1992)^[15]的方法测定叶绿素含量、抗坏血酸过氧
化物酶 (APX)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶
(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛 (MDA)和超
氧阴离子自由基(O_2^-)等指标。

1.5 数据统计与分析

采用 GraphPad Prism 5 软件、Excel 和 DPSv7.50
数据统计分析系统作图和数据分析。

2 结果与分析

2.1 对发芽率、出苗率和活力指数的影响

由图 1 可以看出, 不同土壤盐分处理下高粱的
发芽率、成苗率和活力指数均随着盐浓度的增加而

下降, 种子引发处理可提高这些指标。盐复配引发
(CSP)、单盐引发 (SSP) 和不引发 (NSP) 在正常土壤
盐分 (CK) 条件下差异较小, 而随着土壤盐分的增加
盐复配引发 (CSP) 可显著提高高粱种子的发芽率、
出苗率和活力指数, 其作用效果明显优于单盐引发
(SSP) 和不引发 (NSP)。在土壤盐分 40、80、120 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 发芽率 CSP 比 SSP 分别高
4.11%、7.50%、23.55% 和 154.40%, 成苗率 CSP 比
SSP 分别高 5.04%、9.13%、27.29% 和 233.02%, 活
力指数 CSP 比 SSP 分别高 4.11%、14.04%、22.50%
和 76.92%。同时, 随着土壤盐浓度的增加, 二者的
差异有增大趋势。

显著性检验结果表明, 种子引发处理 (SP) 和土
壤盐分处理 (Salt) 均达到了显著水平。在种子引发
处理间, 发芽率、成苗率和活力指数三者的显著性大
小为成苗率 ($F = 33.67^{**}$) > 发芽率 ($F = 19.36^{**}$)
> 活力指数 ($F = 13.09^*$); 土壤盐分处理 (Salt) 间发
芽率 ($F = 703.12^{**}$) > 成苗率 ($F = 684.29^{**}$) > 活
力指数 ($F = 78.61^*$), 二者的互作效应 (SP $\times$ Salt) 不
显著。

表 1 种子引发对盐渍土壤条件下高粱发芽率、出苗率和活力指数的影响

Table 1 Effects of seed priming on seed germination rate, emergence rate and vigor index of sorghum seeding
under different soil salt content conditions

土壤盐分处理 Soil salt treatment	发芽率/% Germination percentage			成苗率/% Emergence percentage			活力指数 Activity index		
	CSP	SSP	NSP	CSP	SSP	NSP	CSP	SSP	NSP
CK	91.42a	91.58a	92.65a	86.33b	87.57b	90.51a	0.81a	0.84a	0.83a
Salt-40	84.69b	81.35c	88.53a	80.68b	76.81c	85.79a	0.76b	0.73b	0.80a
Salt-80	72.67b	67.6c	78.47a	61.54b	56.39c	72.64a	0.65b	0.57c	0.72b
Salt-120	40.29b	32.61c	49.31a	30.13b	23.67c	41.38a	0.49b	0.40c	0.59a
Salt-160	9.82b	3.86c	17.37a	3.53b	1.06c	8.97a	0.23b	0.13c	0.38a
SP <i>F</i> 值 <i>F</i> value	19.36 ^{**}			33.67 ^{**}			13.09 [*]		
Salt <i>F</i> 值 <i>F</i> value	703.12 ^{**}			684.29 ^{**}			78.61 ^{**}		
SP $\times$ Salt <i>F</i> 值 <i>F</i> value	2.31ns			2.52ns			1.43ns		
误差 Error	0.82			1.16			SRE		

注: CSP, NaCl 和 Na_2SO_4 复配引发种子; SSP, NaCl 引发种子; NSP, 未引发种子; SP 为不同种子引发处理间比较, Salt 为不同盐分处理间比较; SRE, 误差极小 (小于 0.01); ns, 差异不显著; * 表示 0.05 水平显著, ** 表示 0.01 水平显著; 多重比较为发芽率、成苗率和活力指数在不同种子引发处理间的比较。下同。

Note: CSP indicates NaCl and Na_2SO_4 complex primed seeds; SSP indicates single NaCl primed seeds; NSP indicates none primed with seeds; SP indicates the comparison in different seed priming treatments; Salt indicates the comparison in different salt treatments; SRE indicates error is very small (less than 0.01); ns indicates the difference was not significant; * indicates a significant level of 0.05, ** indicates a significant level of 0.01; multiple comparison due to different initiators from seed priming treatments, including germination percentage, emergence percentage and vigor index, and hereinafter.

2.2 对高粱叶片和根系相对含水量的影响

叶片和根系的相对含水量可反映植株的生长状
况和代谢活力, 随着盐浓度的增加高粱叶片和根系的
相对含水量均呈下降趋势, 而种子引发处理可明

显降低下降的幅度 (图 1, 图 2)。种子引发可提高叶
片和根系的相对含水量, 尤其在 80 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Salt-
80) 至 160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Salt-160) 这一区间效果更为明
显, 差异均达到了显著水平。盐复配引发 (CSP)、单

盐引发(SSP)和不引发(NSP)在正常土壤盐分(CK)条件下叶片和根系相对含水量差异较小,而随着土壤盐分的增加引发处理对叶片和根系的相对含水量

的影响逐渐增大,其影响效应表现为:复配引发(CSP) > 单盐引发(SSP),且其差异均达到了显著水平。

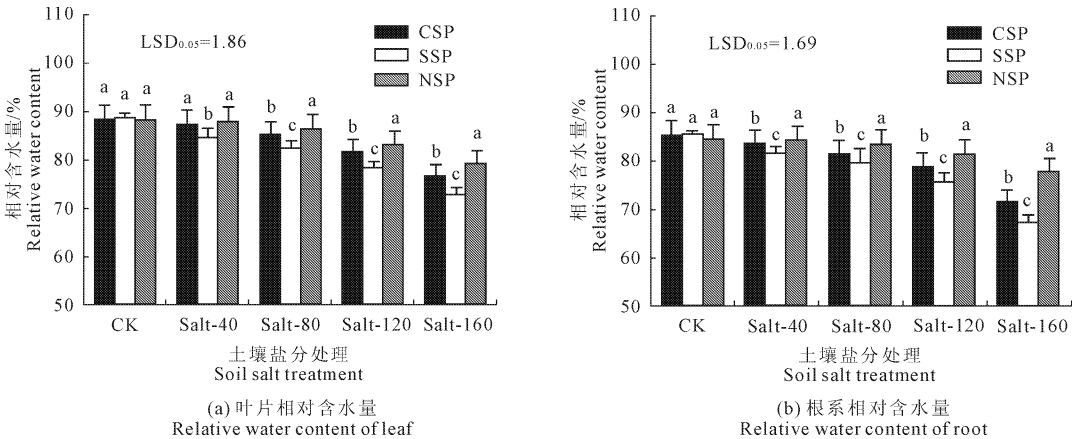


图 1 种子引发对盐渍土壤条件下高粱相对含水量的影响

Fig.1 Effects of seed priming on relative water content of sorghum seeding under different soil salt content conditions

2.3 对叶绿素含量的影响

由表 2 可以看出,盐渍土壤条件对高粱叶绿素含量具有较大影响,而种子引发可显著提高不同盐浓度下叶绿素含量。叶绿素 a + b 随着盐浓度的降低而下降,在盐浓度 40 mmol·L⁻¹(Salt - 40)和 80 mmol·L⁻¹(Salt - 80)下与对照差异较小,而当浓度进一步增加至 120 mmol·L⁻¹(Salt - 120)和 160 mmol·L⁻¹(Salt - 160)时,下降幅度明显增大;叶绿素 a 变化趋势与叶绿素 a + b 基本一致,而叶绿素 b 除 160 mmol·L⁻¹(Salt - 160)外,其它处理间差异很小。说明盐胁迫对叶绿素 a 的影响大于叶绿素 b。同时,种子引发处理对叶绿素 a + b、叶绿素 a 和叶绿素 b

都具有一定的提高效应,尤其是盐复配引发(CSP)作用效果更为明显,在不同盐分处理下与单盐引发(SSP)和不引发(NSP)的差异均达显著水平,说明在中高度盐分胁迫下,盐复配引发(CSP)在减少叶绿素含量下降幅度方面具有较好的效果。

方差分析结果表明:种子引发(SP)处理下,叶绿素 a + b (*F* 值 = 75.38^{**})、叶绿素 a (*F* 值 = 13.51^{**})差异显著,而叶绿素 b (*F* 值 = 0.97^{ns})差异不显著;土壤盐分处理间(Salt)和种子引发和盐分处理交互间(SP × Salt)也均表现为叶绿素 a + b 和叶绿素 a 差异显著,而叶绿素 b 差异不显著。

表 2 种子引发对盐渍土壤条件下高粱叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of seed priming on chlorophyll content of sorghum seeding under different soil salt content conditions

土壤盐分处理 Soil salt treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content/(mg·g ⁻¹ FW)								
	叶绿素 a + b Chl a + b			叶绿素 a Chl a			叶绿素 b Chl b		
	CSP	SSP	NSP	CSP	SSP	NSP	CSP	SSP	NSP
CK	1.62a	1.67	1.65a	1.09a	1.11	1.10a	0.53a	0.56	0.55a
Salt - 40	1.60a	1.61	1.63ab	1.07a	1.07	1.10a	0.53a	0.54	0.53a
Salt - 80	1.56b	1.53	1.60b	1.04ab	1.01	1.06ab	0.52a	0.52	0.54a
Salt - 120	1.49c	1.42	1.54c	0.99b	0.96	1.01b	0.50a	0.46	0.53a
Salt - 160	1.35d	1.31	1.45d	0.92c	0.89	0.98b	0.43b	0.42	0.47b
SP <i>F</i> 值 <i>F</i> value	75.38 ^{**}			13.51 ^{**}			0.97 ^{ns}		
Salt <i>F</i> 值 <i>F</i> value	294.63 ^{**}			9.78 [*]			2.08 ^{ns}		
SP × Salt <i>F</i> 值 <i>F</i> value	6.15 [*]			0.37 ^{ns}			1.13 ^{ns}		
误差 Error	SRE			SRE			SRE		

2.4 对光合参数的影响

盐胁迫对高粱幼苗的光合参数存在较大影响,

而种子引发处理(尤其是 CSP)可改善幼苗的光合性能。表 3 表明,净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)和

蒸腾速率 (T_r)均随着盐浓度的增加而下降,在盐浓度不超过 $80\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Salt – 80)时,盐复配引发(CSP)、单盐引发(SSP)和不引发(NSP)处理间差异较小,而随着盐浓度的进一步加大三者间差异效果更为明显。

方差分析结果表明,种子引发(SP)、盐分处理(Salt)及其二者互作下, P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 均达到了极显著水平;种子引发(SP)处理下受影响程度均表现为 $T_r > P_n > C_i > G_s$,盐分处理(Salt)和二者互作间表现为 $P_n > T_r > C_i > G_s$ 。

表 3 种子引发对盐渍土壤条件下高粱光合参数的影响

Table 3 Effects of seed priming on photosynthetic parameters of sorghum seeding under different soil salt content conditions									
土壤盐分处理 Soil salt treatment	光合参数 Photosynthetic parameters								
	P_n $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			G_s $/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			T_r $/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	CSP	SSP	NSP	CSP	SSP	NSP	CSP	SSP	NSP
CK	26.63a	27.01a	26.87a	0.38a	0.39a	0.37a	5.53a	5.83a	5.64a
Salt – 40	25.58b	25.34b	26.32a	0.35ab	0.35a	0.36a	5.42b	5.41b	5.68a
Salt – 80	24.14b	24.02b	25.86a	0.33bc	0.31c	0.36a	5.09b	4.87c	5.22a
Salt – 120	21.91b	20.87c	23.94a	0.29b	0.26c	0.32a	4.68b	4.22c	4.97a
Salt – 160	17.52b	16.89c	20.37a	0.24b	0.25b	0.27a	3.77b	3.09c	4.53a
SP F 值 F value	172.54 ^{**}			11.39 [*]			186.34 ^{**}		
Salt F 值 F value	605.83 ^{**}			10.56 [*]			598.63 ^{**}		
SP $\times$ Salt F 值 F value	114.25 ^{**}			21.35 ^{**}			32.46 ^{**}		
误差 Error	0.24			SRE			SRE		

2.5 对抗氧化系统的影响

随着土壤盐分的增加,高粱幼苗体内的抗氧化系统发生相应的变化,种子引发处理可对其产生较大影响(图 2)。在 SOD、POD、MDA、CAT、 O_2^- 和 APX 中,SOD 随着土壤盐分的增加而增大,而 POD、MDA、CAT、 O_2^- 和 APX 则随着胁迫的增加呈直线增加的趋势。种子引发增强了 SOD、POD、CAT 和 APX 活性,同时减少了 MDA 和 O_2^- ,增强了机体的抗氧化能力,总体上表现为引发种子后在盐浓度为 Salt – 40 至 Salt – 120 区间引发对抗氧化系统的影响更为明显,而在盐引发条件下,对非盐渍化土壤(CK)中幼苗的生长影响较小,盐浓度过大(Salt – 120)引发效果也会降低,可能是因为当盐浓度过大时,严重影响了根系的吸水。另外,盐复配引发(CSP)作用效果更为明显,在不同盐分处理下对抗氧化参数的调节效应均优于单盐引发(SSP)和不引发(NSP),说明盐复配引发(CSP)对盐分逆境下高粱幼苗的抗氧化系统具有较好的调节作用。

对抗氧化系统在不同土壤盐渍下的 F 值显著性检验结果表明(表 4):除 SOD 外,盐浓度处理(Salt)对幼苗的生长的影响总体上大于种子引发处理(SP),种子引发处理对不同盐分胁迫下抗氧化物质的影响存在差异。同时,种子引发处理(尤其是 CSP)作用效果更为明显,在不同盐分处理下表现为:盐复配引发(CSP) > 单盐引发(SSP) > 不引发(NSP),说明盐复配引发(CSP)可使植株通过抗氧化系统的自我调节来增强对盐分逆境的适应能力。

种子引发处理(SP)对抗氧化物质表现为 $\text{MDA} > \text{O}_2^- > \text{POD} > \text{SOD} > \text{CAT} > \text{APX}$,其中 MDA (F 值 = 129.54^{**})、 O_2^- (F 值 = 114.67^{**})和 POD (F 值 = 98.27^{**})受影响程度明显大于其他因子。而种子引发与土壤盐分处理互作间(SP $\times$ Salt)POD (F 值 = 16.34^{*})、SOD (F 值 = 15.63^{*})和 O_2^- (F 值 = 25.34^{**})差异显著,而 MDA (F 值 = 1.02ns)、CAT (F 值 = 3.69ns)和 APX (F 值 = 2.14ns)差异不显著。

表 4 种子引发对抗氧化系统在不同土壤盐渍下的 F 值显著性检验

Table 4 Significant test on F values for antioxidant system of sorghum seeding by seed priming under different soil salt contents							
变异源 Source of variance	df	F 值 F value					
		SOD	POD	MDA	O_2^-	CAT	APX
SP F 值 F value	2	67.59 ^{**}	98.27 ^{**}	129.54 ^{**}	114.67 ^{**}	62.38 ^{**}	60.50 ^{**}
Salt F 值 F value	4	63.58 ^{**}	257.41 ^{**}	144.87 ^{**}	161.87 ^{**}	284.65 ^{**}	176.39 ^{**}
SP $\times$ Salt F 值 F value	8	15.63 [*]	16.34 [*]	1.02ns	25.36 ^{**}	3.69ns	2.14ns
误差 Error		3.61	3.24	SRE	4.05	SRE	SRE

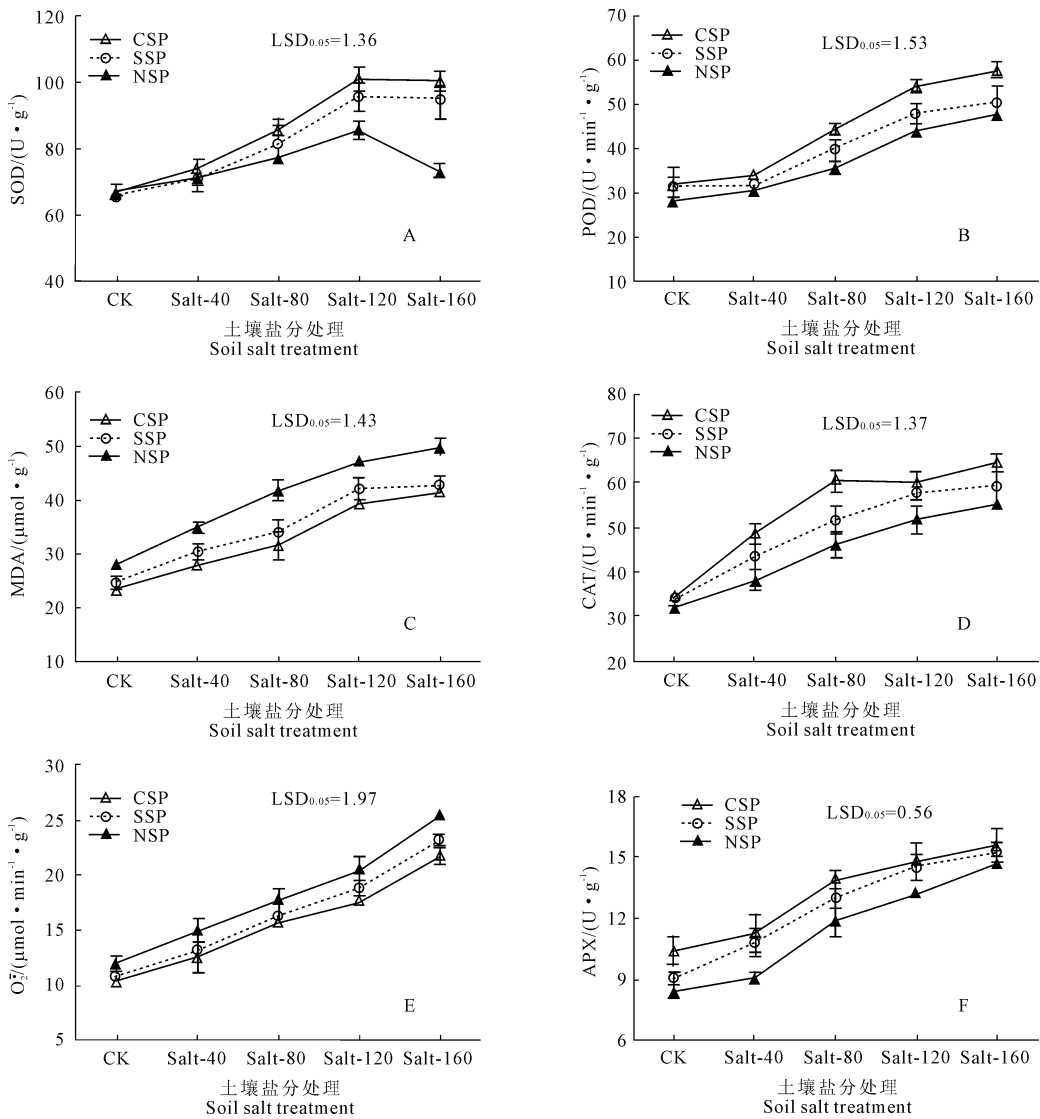


图 2 种子引发对盐渍土壤条件下高粱抗氧化系统的影响

Fig.2 Effects of seed priming on antioxidant system of sorghum seedling under different soil salt content conditions

3 讨 论

种子引发技术作为一种有效的耐盐手段已经越来越多的应用在作物抗性栽培和育种中。本研究认为在中、高盐胁迫条件下种子引发对高粱种子萌发和幼苗的形态建成作用效果更为明显。此结果与贺长征等^[8]对水稻引发提高了种子发芽力的结果基本一致；马金虎等^[14]、阮松林等^[9]对高粱种子引发研究也得出类似的结论。但本结论通过复配引发和单盐引发的比较发现复配引发对种子萌发更为有利，可能是由于促进了种子在盐渍逆境下的渗透吸水。

引发药剂常被认为是种子引发作用效果优劣的关键环节。本试验采用的单剂和复配剂的研究结果总体表现为：复配引发(CSP) > 单盐引发(SSP) > 不引发(NSP)。可能是因为在盐分胁迫下氯离子

(Cl⁻)和硫酸根离子(SO₄²⁻)以及二者的互作效应在对种子的抗性上具有多重调节作用,促进了种子在盐渍逆境下的渗透吸水,进而增加了种子的耐盐适应能力。此研究结果与贺长征等^[8]对水稻复配引发促进种子发芽效果较好的研究结果基本一致,同时对其研究结果进行了补充与深化;而与史雨刚等^[13]对小麦引发的研究结果略有差异,可能是因为种子引发剂不同或是试验条件存在差异所致。

高粱的耐盐机制主要包括抗氧化酶活性的变化、可溶性物质的生物合成和渗透调节物质的诱导等^[16]。POD 和 SOD 等抗氧化保护酶可有效清除活性氧自由基,保护细胞免受活性氧的伤害^[16]。在一定浓度的盐胁迫下 POD 活性的增加伴随着 CAT 和 SOD 活性的增加或减少,表明高粱抗氧化酶系统是相互协调的^[17]。本研究认为种子引发,尤其是盐复

配引发增强了 SOD、POD、CAT 和 APX 活性,同时减少了 MDA 和 O_2^- ,进一步证实了该结论。

本研究虽对盐渍土壤条件下高粱幼苗引发后的生理机制做了一些剖析,但对其离子含量、细胞结构变化等方面的生理特性尚未研究,希望相关学者将来能对其生理机制进行更深入的探寻。

参 考 文 献:

[1] 杨淑萍,危常州,梁永超.盐胁迫对海岛棉不同基因型幼苗生长及生态特征的影响[J].生态学报,2010,30(9):2322-2331.

[2] 龚秋,王欣,后猛,等.盐胁迫对紫甘薯光合特性及干物质积累的影响[J].西南农业学报,2015,28(5):1986-1991.

[3] 杨小环,马金虎,郭数进,等.种子引发对盐胁迫下高粱种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(1):103-109.

[4] 张云华,孙守均,王云,等.高粱萌发期和苗期耐盐性研究[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2004,19(3):300-304.

[5] 谷思玉,周连仁,王佳佳.不同品种玉米萌发期耐盐性的比较[J].中国农学通报,2011,27(33):34-39.

[6] 杨小环,王玉国,杨文秀,等.种子引发对水分胁迫下大豆幼苗生理特性的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(6):1191-1195.

[7] Jisha K C, Vijayakumari K, Jos Puthur T. Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview[J]. Acta Physiol Plant, 2013,35:1381-

1396.

[8] 贺长征,胡晋,朱志玉,等.混合盐引发对水稻种子在逆境条件下发芽及幼苗生理特性的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(2):175-178.

[9] 阮松林,薛庆中,王清华.种子引发对杂交水稻幼苗耐盐性的生理效应[J].中国农业科学,2003,36(4):463-468.

[10] Passam H C, Kakouriotis D. The effects of osmoconditioning on the germination, emergence and early plant growth of cucumber under saline conditions[J]. Hortscience,1994,57:233-240.

[11] Cano E A, Bolatin M C, Perez-Alfoea F. Effects of NaCl priming on increased salt tolerance in tomato[J]. Journal of Horticultural Science,1991,66:621-628.

[12] 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.

[13] 史雨刚,孙黛珍,雷逢进,等.种子引发对 G3 + 5 胁迫下小麦幼苗生理特性的影响[J].核农学报,2011,25(2):342-347.

[14] 马金虎,郭数进,王玉国,等.种子引发对盐胁迫下高粱幼苗生物量分配和渗透物质含量的影响[J].生态学杂志,2010,29(10):1950-1956.

[15] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:208-215.

[16] Mithen R. Glucosinolates-biochemistry, genetics and biological activity[J]. Plant Growth Regulation,2001,34:91-103.

[17] Reichelt M, Brown P D, Schneider B, et al. Benzoic acid glucosinolate esters and other glucosinolates from Arabidopsis thaliana[J]. Phytochemistry,2002,59:663-671.

(上接第 14 页)

[7] 朴明鑫,张春宵,杨书华,等.69 份玉米自交系的苗期耐旱性分析[J].吉林农业科学,2011,36(3):13-17. DOI: 10.3969/j. issn. 1003 - 8701. 2011. 03. 004.

[8] 郭春芳,孙云.干旱胁迫下植物的渗透调节及脯氨酸代谢研究进展[J].福建教育学院学报,2015,16(1):114-118.

[9] 陈勋基,阿不来提,郑军,等.玉米不同自交系抗旱性综合评价研究[J].新疆农业科学,2008,45(2):317-322.

[10] 杨光梅,赵致.贵州玉米品种抗旱性比较试验[J].山地农业生物学报,2003,22(2):110-113. DOI: 10.3969/j. issn. 1008-0457. 2003. 02. 004.

[11] 李智元,刘锦春.植物响应干旱的生理机制研究进展[J].西藏科技,2009,(11):70-72. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-3403. 2009. 11. 031.

[12] 蔡庆生.植物生理学实验[M].北京:中国农业大学出版社,2013,15-17.

[13] 孙群,胡景江.植物生理学研究技术[M].陕西杨凌:西北农林科技大学出版社,2006:176-177.

[14] Donahue J L, Okapodu M C, Cramer C L, et al. Response of antiox-

idants to paraquat in pea leaves[J]. Plant Physiol, 1997,113:249-257.

[15] Schickler H, Caspi H. Response of antioxidative enzymes to nickel and cadmium stress in hyperaccumulator plants of the genus Alyssum[J]. Physiologia Plantarum, 1999,105:39-44.

[16] Aebi H E. Catalase[C]//Bergmeyer H U. Methods of Enzymatic Analysis. Weinheim: Verlag Chemie, 1983:273-282.

[17] 鲍巨松.不同生育时期水分胁迫对玉米生理特性的影响[J].作物学报,1991,17(4):261-266.

[18] 冯朋飞,远红杰,郭晋杰等.不同玉米自交系苗期抗旱性鉴定[J].广东农业科学,2013,40(9):9-13. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-874X. 2013. 09. 004.

[19] 宋凤斌,徐世昌.玉米抗旱性鉴定指标的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(1):127-129.

[20] 罗淑平.玉米抗旱性及鉴定指标的相关分析[J].干旱地区农业研究,1990,(3):72-78.

[21] 白向历,齐华,刘明,等.玉米抗旱性与生理生化指标关系的研究[J].玉米科学,2007,15(5):79-83.