引发处理对甜高粱种子萌发阶段生理生态影响*

管 博[1] 曹 迪[2] 于君宝[1**]

([1]中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室,中国科学院烟台海岸带研究所,山东烟台 264003;[2]黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院,黑龙江大庆 163319)

摘 要 为了探讨种子引发处理对甜高粱种子萌发和早期幼苗阶段的影响机制,分别以KCl、$CaCl_2$溶液(50、100和200 mmol·L^{-1})和具有相同水势的PEG溶液为引发试剂,对种子进行吸水-回干处理,分析了"M-81E"甜高粱品种在引发处理过程中的吸湿、回干情况,引发处理后分析了种子在不同浓度NaCl溶液中发芽率、形态响应、生物量分配以及幼苗体内Na^+、K^+、Ca^{2+}积累情况。结果表明:在引发处理过程中,甜高粱种子存在快速吸水期和快速失水期,分别发生在吸湿、回干的前3 h;在随后的发芽试验过程中M-81E甜高粱表现出较高的耐盐性,NaCl浓度低于200 mmol·L^{-1}时,种子发芽率、发芽速度差异不显著,除$CaCl_2$引发处理对50和200 mmol·L^{-1} NaCl胁迫下种子发芽速度有显著的促进作用外($P<0.05$),不同引发试剂对种子发芽率、发芽速度影响差异不显著;引发处理对幼苗胚根长、胚轴长及全长影响差异显著($P<0.05$);在无盐胁迫条件下,引发处理对幼苗生长产生负效应,随着盐胁迫浓度增加,引发处理能够明显促进甜高粱幼苗生长,且不同引发处理效果具有一定的差异性;随着盐浓度升高,幼苗体内Na^+、Ca^{2+}含量显著增加,但对K^+含量无显著影响;引发处理显著降低了K^+含量(KCl引发除外);总体而言,不同引发方式均不同程度地增加了甜高粱幼苗生长、生物量积累以及盐胁迫条件下的离子调节能力,其中$CaCl_2$引发效果略优于其他两种引发方式。

关键词 盐渍化农耕地;发芽率;甜高粱;生物量;离子含量

中图分类号 X171.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)4-0982-07

Eco-physiological responses of seed germination of sweet sorghum to seed priming. GUAN Bo[1], CAO Di[2], YU Jun-bao[1**] ([1]*Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation*, *Yantai Institute of Coastal Zone Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yantai* 264003, *Shandong*, *China*, [2] *College of Life Science and Technology*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *Heilongjiang*, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 982-988.

Abstract: A germination test was conducted to understand the effects of seed priming on seed germination and early seedling growth of sweet sorghum (M-81E). The hydration-dehydration processes of M81-E were analyzed with KCl or $CaCl_2$ solution (50, 100, or 200 mmol·L^{-1}) or isosmotic PEG solution being used for pretreatment, and the germination percentage, germination rate, seedling growth, biomass allocation, and Na^+, K^+ and Ca^{2+} contents in different NaCl solutions were determined after seed priming. The results showed that the first 3 hours of hydration and dehydration processes of M81-E were the quick water absorption period and quick dehydration period. The germination percentage and germination rate were not significantly different when the NaCl stress was lower than 200 mmol·L^{-1}. The different priming conditions had no significant effects on the germination percentage and germination rate except the positive effect of $CaCl_2$ pretreatment to the germination rate in 50 and 200 mmol·L^{-1} NaCl solutions. However, the seed priming significantly affected the radical length, hypocotyl length and the whole seedling length. Seed priming had negative effects on seedling growth in non-salt treatments but significantly improved the seedling growth with the increase of salt concentration, and the different pretreat-

* 山东省自然科学杰出青年基金项目(JQ201114)和山东省自然科学基金项目(ZR2012CQ017)资助。

** 通讯作者 E-mail: Junbao.yu@gmail.com;jbyu@yic.ac.cn

收稿日期:2013-09-10 接受日期:2013-12-14

ment reagents had different effects on seedling growth. The contents of Na^+ and Ca^{2+} in seedlings were significantly increased with the increase of salt concentration, but not for the content of K^+. Seed priming significantly decreased the content of K^+, with the exception of KCl pretreatment. In conclusion, the different pretreatment reagents increased the seedling growth, biomass accumulation and the capacity of ion adjustment to different extents. The seed priming effect of $CaCl_2$ solution was better than that of the other two solutions.

Key words: saline cropland; germination percentage; sweet sorghum; biomass; ion content.

由于全球气候变化以及人类活动加剧引起的土壤盐渍化等问题已经对世界各地农作物的产量产生了极大的影响。据统计,全世界已经有将近50%的耕地产生了土壤盐渍化问题(Rowley,1993;Mahajan & Tuteja,2005)。中国盐渍土面积大,类型多样且分布广泛。农业部第二次全国土壤普查(1979—1985年)资料统计表明,中国盐渍土面积为3.47×10^7 hm^2(不包括滨海滩涂)。其中各类盐化、碱化土壤为1.80×10^7 hm^2。在3.47×10^7 hm^2盐渍土中已开垦种植的有6.67×10^6 hm^2左右。据估计,中国尚有1.73×10^7 hm^2左右潜在盐渍化土壤,这类土壤若开发利用、灌溉耕作等措施不当,则极易发生次生盐渍化。而实际上,中国乃至世界上盐渍土面积仍然在急速增加。

黄河三角洲地区是山东省重要的农产品生产基地,但小清河以北地区均为退海新生陆地,土壤次生盐渍化严重并逐年增加(栗云召等,2011),已经成为制约黄河三角洲农业生产、实现农业、生态、经济可持续发展的重要因素之一。因此,筛选耐盐作物,引入提高植物耐盐性的新技术是解决高效利用盐渍化农耕土壤问题的重要手段。

种子引发(seed priming),是指将种子进行先吸湿再干燥的预处理,是一种在环境恶劣的条件下提高种子发芽能力(包括发芽速度、发芽率、发芽整齐性、出苗率)的技术(Heydecker *et al.*,1973)。而甜高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]作为高粱属的一个变种,是一种糖料作物,也是优良的饲料作物和能源作物,具有高光效、抗旱、耐涝、耐盐碱、高生物产量、高含糖量等特点,被认为是最具开发潜力的能源植物之一。本研究选用耐盐性较强的甜高粱品种"M-81E",选取不同种子引发试剂,探讨不同引发处理条件下甜高粱种子萌发和早期幼苗阶段生理生态的响应机制,为筛选适合于黄河三角洲盐渍化农耕区的作物提供一定的理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料

"M-81E"甜高粱品种种子由中国科学院植物研究所提供。

1.2　种子引发处理

分别用不同浓度的KCl、$CaCl_2$溶液(50、100、200 mmol·L^{-1})和具有相同水势的PEG溶液(130、192、270 g·kg^{-1},实验在室温平均20 ℃下)进行引发处理,同时用水引发作为对照。每个引发处理4次重复,每个重复放置25粒种子。以种子完全浸入溶液为标准,为了了解甜高粱种子吸水情况,每3 h称重1次,以种子在水溶液中吸水饱和为止。吸水12 h之后进行回干处理,同样,平均每隔4 h称重1次,待种子回干到初始重量为止。

统计种子吸水、失水率,计算公式为:

吸水率$=(W_1-W_0)/W_0\times100$ %

式中,W_1为种子吸水后每次称量时的重量,W_0为种子原始重量。

1.3　种子萌发实验

随机挑选1000粒种子,选用100 mmol·L^{-1}引发浓度的不同试剂引发后,进行不同浓度盐(0、50、100、150、200和400 mmol·L^{-1} NaCl溶液)胁迫的发芽实验,在不同试剂引发处理后的种子中选取饱满的种子25粒放置于铺有2层滤纸的培养皿(直径10 cm)中,加入10 mL不同浓度盐溶液,之后用封口膜密封,防止水分蒸发。每处理重复4次。每天同一时间观察种子发芽情况并记录发芽种子数。实验在培养箱(BSG-800,上海)中进行,光照均采用12 h光照(200 μmol·m^{-2}·s^{-1},400~700 nm),12 h黑暗。种子萌发8 d(连续3 d没有新萌发的种子),发芽视为结束。

1.4　测定指标

种子发芽率(germination percentage)=实际发芽数/种子总数×100%

发芽速度(germination rate)= $\sum G/t \times 100\%$

式中:G 为每天的发芽率,t 为发芽总时间。方法来源于文献(Khan & Ungar,1984)。

生物量测定:发芽结束后,将不同浓度 NaCl 溶液条件下发芽的甜高粱幼苗用蒸馏水清洗,去除表面盐溶液,分别测量幼苗胚根、胚轴长度,后于60 ℃烘干至恒重,每10株幼苗为一次重复(随机挑选30株),共3次重复,测量胚根、胚轴生物量。

Na^+、K^+、Ca^{2+} 测定:选择0、50、100和150 mmol·L^{-1} NaCl 溶液处理下的烘干的甜高粱幼苗地上部,取约50 mg干样(称重并记录),3次重复。用10 mL去离子水于100 ℃下提取1 h,冷却后离心取上清液,用原子吸收分光光度计(岛津,AA-6800)测量幼苗体内 Na^+、K^+、Ca^{2+} 含量。

1.5 数据处理

所有数据均经过反正弦转换进行统计分析,应用SPSS 11.5进行数据处理。实验数据均采用单因素方差分析,$\alpha=0.05$。

2 结果与分析

2.1 引发处理对种子吸水的影响

由图1可以看出,甜高粱种子存在快速吸水时期,0~3 h为甜高粱的快速吸水期,之后吸水量逐渐降低;处理12 h后,水引发条件下甜高粱种子吸水接近饱和,吸水率保持不变。不同引发介质条件对比,甜高粱种子在水引发条件下吸水率高于KCl、$CaCl_2$和PEG溶液中吸水率。同样,甜高粱种子在回干过程中,前3个小时失水速率较高,失水量较大,随后失水速率逐渐降低。4种引发试剂比较,KCl和$CaCl_2$引发条件下甜高粱种子失水速率较大,水溶液次之,PEG溶液中种子失水速率相对较小。

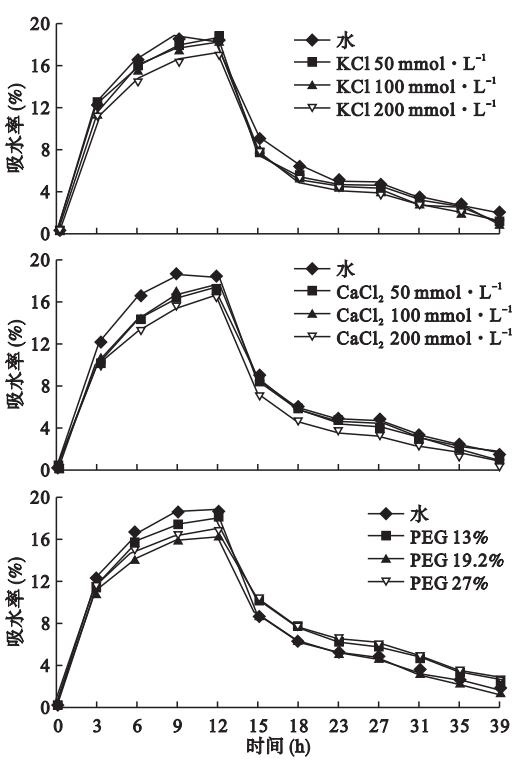

图1 不同引发试剂对甜高粱种子吸水-回干过程中吸水率的影响

Fig.1 Effects of seed priming reagents on water absorption under hydration-dehydration cycle

2.2 引发处理对种子发芽的影响

图2可见,3种引发方式相比,其中$CaCl_2$引发处理对种子发芽率起到了一定的促进作用。当盐胁迫浓度为50 mmol·L^{-1}时,$CaCl_2$溶液引发处理的种子发芽率显著高于对照和其他引发处理($P<0.05$)。当盐胁迫浓度达到150 mmol·L^{-1}时,$CaCl_2$溶液引发处理的种子发芽率显著高于其他两个试剂引发处理($P<0.05$),但与对照相比差异不显著。

发芽速率变化趋势与发芽率结果相似(图2),3种引发方式相比,$CaCl_2$溶液引发后的种子发芽速率在一定盐浓度条件下得到了显著提升。盐浓度为50、150、200 mmol·L^{-1}时,$CaCl_2$溶液引发后的种子发芽速率显著高于其他处理,只有150 mmol·L^{-1}盐浓度下与对照组差异不显著。

2.3 引发处理对幼苗生长及生物量分配的影响

不同引发方式对幼苗生长均产生了一定的影响,其中KCl和$CaCl_2$溶液引发处理效果较为显著

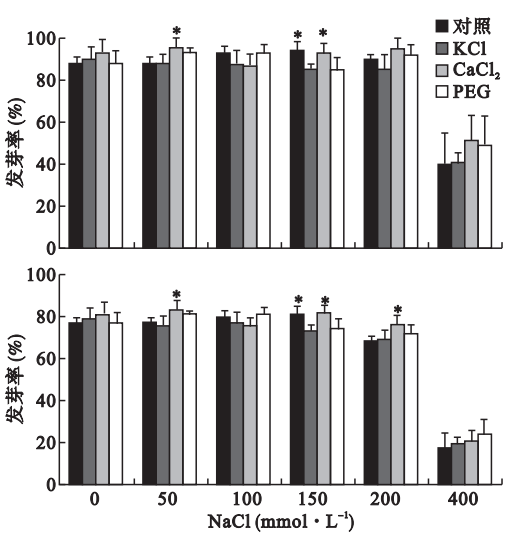

图2 不同引发试剂对甜高粱种子发芽率、发芽速度的影响

Fig.2 Effects of pretreatment reagents on seed germination percentage and germination rate of M81-E

*$P<0.05$。

表 1　不同引发试剂对甜高粱幼苗生长(cm)的影响

Table 1　Effects of pretreatment reagents on seedling growth of M81-E

形态指标	发芽浓度 (mmol · L^{-1})	对照	引发方式		
			KCl	$CaCl_2$	PEG
胚轴长	0	4.4±0.41 ab	4.69±0.44 a	4.23±0.50 b	4.41±0.69 ab
	50	3.57±0.33 a	3.58±0.51 a	3.84±0.37 ab	3.98±0.38 b
	100	2.51±0.30 a	3.0±0.40 b	2.98±0.44 b	2.73±0.40 ab
	150	2.03±0.25 a	2.00±0.35 a	2.7±0.28 b	2.34±0.29 c
胚根长	0	7.01±0.97 a	6.21±0.80 bc	5.68±0.64 c	6.56±0.75 ab
	50	5.05±0.63 a	4.66±0.56 a	4.71±0.85 a	5.2±0.85 a
	100	4.13±0.64 ab	4.63±1.28 a	3.6±0.68 b	3.62±0.30 b
	150	3.08±0.54 a	2.94±0.61 a	3.09±0.59 a	3.27±0.32 a
苗全长	0	11.41±1.25 a	10.9±0.98 a	9.91±1.07 b	10.97±1.20 a
	50	8.62±0.78 ab	8.23±0.91 a	8.55±1.08 ab	9.18±0.85 b
	100	6.63±0.72 a	7.63±0.96 b	6.58±0.49 a	6.34±1.58 a
	150	5.1±0.6 ab	4.91±0.65 a	5.79±0.43 c	5.61±0.81 bc

不同字母表示不同引发处理之间差异显著($P<0.05$)。

(表 1)。在无盐胁迫条件下,不同种子引发方式一定程度上降低了甜高粱幼苗生长能力,与对照相比,KCl 和 $CaCl_2$溶液引发后的幼苗胚根长显著低于对照组,$CaCl_2$溶液引发的幼苗胚轴长和苗的全长均显著低于对照组;当盐胁迫为 50 mmol · L^{-1}时,PEG 引发处理显著增加了胚轴长;盐胁迫为 100 mmol · L^{-1}时,与对照组相比,KCl 溶液引发显著增加了幼苗胚轴长和幼苗全长,而 $CaCl_2$溶液只对胚轴长的促进作用明显,PEG 引发处理与对照组相比促进作用差异不显著,3 种引发方式相比,KCl 溶液引发对胚根长、苗全长的促进作用显著高于 $CaCl_2$和 PEG 引发处理;当盐胁迫浓度达到 150 mmol · L^{-1}时,$CaCl_2$溶液和 PEG 引发处理均显著增加了甜高粱幼苗胚轴长和幼苗全长,其中 $CaCl_2$溶液引发促进效果显著高于 PEG。

引发处理对甜高粱幼苗生物量影响差异显著(表 2)。与幼苗生长指标结果相似,在无盐胁迫处理条件下,与对照组相比,3 种引发方式均显著降低了幼苗地下生物量,但对地上生物量和幼苗总生物量的影响差异不显著;但盐浓度为 50 mmol · L^{-1}时,与对照组相比,$CaCl_2$溶液引发处理显著降低了地下生物量,3 种引发方式处理差异不显著;当种子处于 100 mmol · L^{-1}盐浓度发芽时,$CaCl_2$溶液引发处理显著增加了地上生物量积累,而对于总生物量积累,

表 2　不同引发试剂对甜高粱幼苗单株生物量(mg)的影响

Table 2　Effects of pretreatment reagents on seedling biomass of M81-E

生物量	发芽浓度 (mmol · L^{-1})	对照	引发方式		
			KCl	$CaCl_2$	PEG
地上生物量	0	5.10±0.05 a	5.24±0.46 a	4.99±0.13 a	4.98±0.18 a
	50	4.34±0.06 a	4.44±0.17 a	4.50±0.27 a	4.67±0.15 a
	100	3.17±0.22 a	3.46±0.23 ab	3.80±0.18 b	3.23±0.37 ab
	150	2.63±0.15 a	2.71±0.16 ab	3.36±0.03 c	2.97±0.08 b
地下生物量	0	2.38±0.12 a	2.05±0.15 b	2.03±0.07 b	2.08±0.13 b
	50	1.76±0.04 a	1.69±0.08 ab	1.63±0.06 b	1.71±0.02 ab
	100	1.49±0.18 a	1.54±0.03 a	1.57±0.09 a	1.35±0.08 a
	150	1.2±0.08 a	1.25±0.08 a	1.29±0.11 a	1.28±0.14 a
总生物量	0	7.48±0.07 a	7.29±0.61 a	7.01±0.06 a	7.06±0.29 a
	50	6.1±0.07 a	6.13±0.22 a	6.12±0.32 a	6.38±0.12 a
	100	4.66±0.40 ab	5.00±0.25 ab	5.37±0.27 a	4.57±0.42 b
	150	3.83±0.22 a	4.00±0.14 a	4.64±0.10 b	4.25±0.19 ab
地上生物量/总生物量	0	0.68±0.02 a	0.72±0.00 b	0.71±0.02 b	0.70±0.01 ab
	50	0.71±0.01 a	0.72±0.01 ab	0.73±0.01 b	0.73±0.01 b
	100	0.68±0.02 a	0.69±0.01 a	0.71±0.01 a	0.71±0.03 a
	150	0.69±0.01 a	0.68±0.03 a	0.72±0.02 a	0.70±0.02 a

不同字母表示不同引发处理之间差异显著($P<0.05$)。

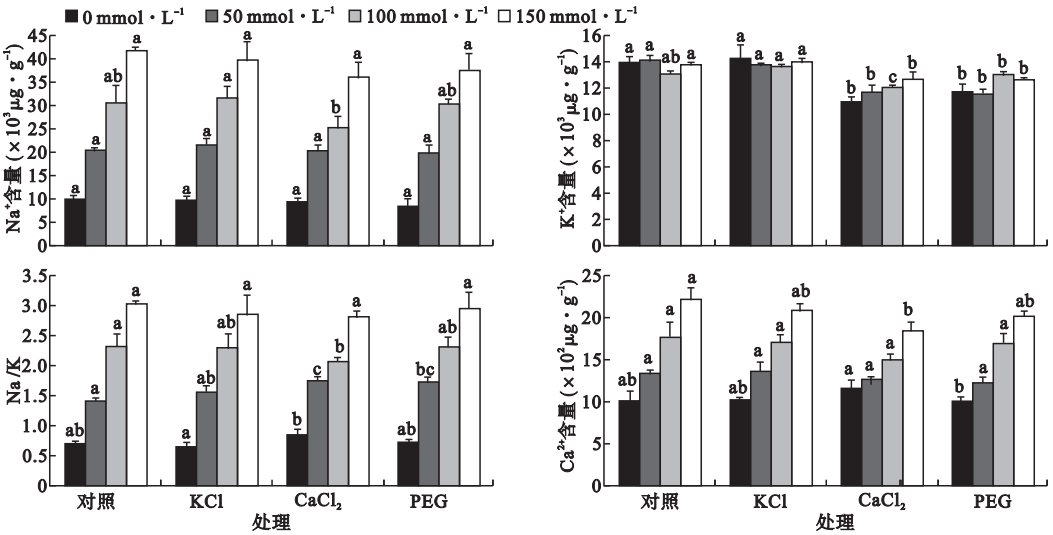

图3 不同引发试剂对不同盐胁迫浓度幼苗体内 Na^+、K^+、Ca^{2+} 积累及 Na/K 的影响

Fig. 3 Effects of pretreatment reagents on Na^+, K^+ and Ca^{2+} accumulation and Na/K ratio of M81-E

不同字母表示不同引发处理之间差异显著($P<0.05$)。

各引发处理与对照组差异不显著,不同处理组比较,$CaCl_2$溶液引发效果显著高于 PEG 处理;当盐胁迫浓度达到 150 mmol · L^{-1}时,$CaCl_2$溶液和 PEG 引发处理显著促进了地上生物量积累,对于总生物量,$CaCl_2$溶液引发效果最好。

2.4 引发处理对幼苗离子含量的影响

由图3可知,随着盐胁迫浓度的增加,幼苗体内 Na^+含量显著升高,但不同引发方式对幼苗体内 Na^+积累影响差异总体不显著,只有 100 mmol · L^{-1}盐胁迫条件下,$CaCl_2$引发处理的幼苗体内 Na^+显著低于 KCl 引发。K^+含量与盐胁迫处理无显著相关关系,但不同引发处理对 K^+积累影响差异显著,其中 $CaCl_2$和 PEG 引发处理后的幼苗体内 K^+积累显著低于对照组,但 KCl 引发处理组与对照组整体差异不显著。Na/K 变化趋势如图3所示,在无盐胁迫条件下,Na/K<1,幼苗体内 K^+含量高于 Na^+含量,盐胁迫条件下,Na^+显著增加,引发处理与对照组相比,在低盐胁迫(0、50、100 mmol · L^{-1})条件下,$CaCl_2$引发处理显著提高了 Na/K,其余引发处理与对照相比差异不显著。幼苗体内 Ca^{2+}浓度随盐胁迫浓度的升高而显著增加,但不同引发处理影响差异不显著,与对照相比,只有 $CaCl_2$引发组在 150 mmol · L^{-1}浓度条件下显著降低了 Ca^{2+}含量。

3 讨 论

植物种子萌发在植物个体发育过程中是一个复杂且动态的阶段,伴随着一系列交互式的代谢过程(Bewley & Black,1994)。通常来说,种子萌发经历3个明显的阶段:(Ⅰ)吸胀阶段(imbibition phase),种子大量吸水但是几乎不发生代谢活动;(Ⅱ)延滞期(lag phase),几乎不再吸水,但发生大量的代谢活动;(Ⅲ)胚根出现(radicle emergence),吸水量显著增加,伴随着胚根生长并伸出种皮(Bewley,1997)。不同物种的种子各个阶段需要时间不同(张玉屏和朱德峰,2002;李兵兵等,2012;周桂生等,2012)。本实验甜高粱种子在水溶液中的吸胀阶段持续时间约为12 h,在此期间存在着快速吸水期(0~3 h)、稳定吸水期(3~9 h)和吸水饱和期(9~12 h),9~12 h 吸胀过程基本停止,吸水率达到37%,不同引发介质中,甜高粱的吸水率均达到了33%~37%。而在回干过程中,同样经历前3 h 的快速回干期,之后回干速率逐渐下降。种子吸湿-回干过程并未经历种子发芽的第3阶段(胚根未出现),但相关研究表明:引发过程使得早期 DNA 复制开始(Garcia *et al.*,1995),能增加 RNA 和蛋白质合成、增强 ATP 可用量(Mazor *et al.*,1984;Fu *et al.*,1988;Dahal & Bradford.,1990),加快胚生长,这是引发的生理基础。

从种子萌发结果可以看出,当盐胁迫浓度低于 200 mmol · L^{-1}时,发芽率、发芽速率与未经盐胁迫处理差异不显著,说明 M-81E 甜高粱品种具有较强的耐盐性。不同引发试剂对甜高粱种子萌发并没有产生很明显的促进作用,只有 $CaCl_2$溶液处理增加了部分浓度下种子的发芽率和发芽速率,分析原因

可能为甜高粱种子本身就具有发芽快、齐性高等特点,同时 M-81E 甜高粱是具有一定程度耐盐性的品种(贝盏临等,2012)。本课题组随机选择了 100 mmol·L^{-1} KCl 溶液作为引发试剂,调查了引发后 M-81E 甜高粱种子在田间出苗率的情况,结果表明,引发后的甜高粱种子最终出苗率达到 80%,显著高于未经引发 53.3% 的出苗率。作物的整个生长季中,种子萌发和早期幼苗阶段抗逆性较差,对盐胁迫相对更加敏感,存活风险较高,而对于盐渍化农耕地区,在播种前对种子进行适当的引发处理,能够显著增加作物存活率,降低苗期在盐胁迫条件下致死的风险。本研究结果表明,从幼苗生长指标以及生物量积累方面来看,不同引发处理对甜高粱幼苗均产生了一定的促进作用(表 1、2),这与前人研究结果相似(Patane *et al.*,2009;马金虎等,2010;杨小环等,2011;Eradatmand-Asli & Houshmandfar,2011)。同时,本研究还发现,适当的引发处理能够显著增加低盐条件下地上部分的生物量分配比例(表 2)。

对照组和不同引发处理组的幼苗体内 Na^+、Ca^{2+} 含量以及 Na/K 均随着盐胁迫强度的增加而显著增加。Na^+ 含量增加主要是因为盐胁迫试剂为 NaCl 溶液,浓度升高会产生渗透胁迫和离子毒害,导致幼苗组织内积累大量的 Na^+,不同引发试剂处理对 Na^+ 积累并没有产生显著的差异。已有研究表明,在种子发芽过程中 Ca^{2+} 能够通过抑制 HKT2 转运子而阻止植物对 Na^+ 的吸收(Nayyar,2003;Bonilla *et al.*,2004;Kronzucker & Britto,2011),能够通过影响植物体内磷脂和蛋白质在细胞膜内的排布而保持细胞膜的结构和功能,降低植物在盐胁迫下受到的伤害(赵可夫等,1993)。本研究中,Ca^{2+} 含量随着 NaCl 溶液浓度升高而显著增加,分析原因可能为,在高盐胁迫环境下甜高粱种子能够在发芽过程中控制种子内部 Ca^{2+} 流失,缓解 Na^+ 大量进入产生的毒害作用,从而形成一种抗性保护机制。多数植物受到盐胁迫时,由于 Na^+、K^+ 之间存在离子交换作用,会在吸收大量 Na^+ 同时阻止或排除体内 K^+(Khan *et al.*,2000;Shi & Wang,2005),但施用如外源水杨酸等调节剂可以提高体内 K^+、Ca^{2+} 含量同时降低体内 Na^+ 含量来缓解盐胁迫(王磊等,2011);而另外有些植物可能是由于 Na^+、K^+ 吸收机制的不同而在受到盐胁迫时会同时在体内积累 Na^+ 和 K^+(Yang *et al.*,2007)。本研究中,不同浓度盐胁迫条件下,幼苗体内 K^+ 含量变化不大,可能是因为甜高粱幼苗在盐浓度低于 150 mmol·L^{-1} 条件下,并没有产生严重的胁迫作用,幼苗组织内能够保持一定浓度的 K^+ 用于抵御 Na 盐胁迫,但甜高粱在盐胁迫条件下的 Na^+ 吸收机制以及 K^+ 保持机制还需继续研究。不同引发处理比较,$CaCl_2$ 和 PEG 溶液引发后 K^+ 含量显著低于对照组,而 KCl 引发条件下 K^+ 含量与对照组相比差异不显著。可能是由于 KCl 引发试剂本身具有一定浓度的 K^+,在引发过程中甜高粱种子吸收了一定量的 K^+ 从而保持了较高的 K^+ 含量。

甜高粱作为具有一定耐盐能力的高能作物,已被证实能够种植于轻度盐渍化地区,为了高效利用黄河三角洲不同盐渍化程度的农耕区,增加作物产量,利用合理的种子引发方式,能够显著增加甜高粱生物量和耐盐能力。本研究表明,3 种引发处理方式均不同程度地提高了甜高粱幼苗生长、生物量积累以及盐胁迫条件下的离子调节能力,3 种引发处理比较,$CaCl_2$ 引发效果略优于其他两种引发试剂。

致　谢　感谢中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站提供的实验条件。

参考文献

贝盏临, 张　欣, 魏玉清. 2012. 盐碱胁迫对 M-81E 甜高粱种子萌发及幼苗生长的影响. 河南农业科学, **41**(2): 45-49.

李兵兵, 魏小红, 徐　严. 2012. 麻花秦艽种子吸水和萌发特性的研究. 甘肃农业大学学报, **10**(5): 88-93.

栗云召, 于君宝, 韩广轩, 等. 2011. 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子. 生态学杂志, **30**(7): 1535-1541.

马金虎, 郭树进, 王玉国, 等. 2010. 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. 生态学杂志, **29**(10): 1950-1956.

王　磊, 隆小华, 孟宪法, 等. 2011. 水杨酸对 NaCl 胁迫下菊芋幼苗光合作用及离子吸收的影响. 生态学杂志, **30**(9): 1901-1907.

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

张玉屏, 朱德峰. 2012. 浸种时间和温度对不同类型水稻品种种子吸水与萌发的影响. 中国农学通报, **18**(5): 25-26, 38.

赵可夫, 卢元芳, 张宝泽, 等. 1993. 钙对小麦幼苗降低盐害效应的研究. 植物学报, **35**(1): 51-56.

周桂生, 刘贵娟, 安琳琳, 等. 2012. 外源钙调节对蓖麻种子萌发吸水和萌发的影响. 安徽农业科学, **40**(35): 16983-16986.

Bewley JD, Black M. 1994. Seeds: Physiology of development and germination. New York: Plenum Publishers.

Bewley JD. 1997. Seed germination and dormancy. *The Plant*

Cell, **9**: 1055-1066.

Bonilla I, El-Hamdaoui A, Bolanos L. 2004. Boron and calcium increase *Pisum sativum* seed germination and seedling development under salt stress. *Plant and Soil*, **267**: 97-107.

Dahal P, Bradford KJ. 1990. Effects of priming and endosperm integrity on seed-germination rates of tomato genotypes: Ⅱ. Germination at reduced water potential. *Journal of Experimental Botany*, **41**: 1441-1453.

Eradatmand-Asli D, Houshmandfar A. 2001. Seed germination and early seedling growth of corn (*Zea mays* L.) as affected by different seed pyridoxine-priming duration. *Advances in Environmental Biology*, **5**: 1014-1018.

Fu JR, Lu XH, Chen RZ, *et al*. 1988. Osmoconditioning of peanut (*Arachis hypogeal* L.) seeds with PEG to improve vigor and some biochemical activities. *Seed Science and Technology*, **16**: 197-212.

Garcia FC, Jimenez LF, Vazquez-Ramos JM. 1995. Biochemical and cytological studies on osmoprimed maize seeds. *Seed Science Research*, **5**: 15-23.

Heydecker W, Higgins J, Gulliver RL. 1973. Accelerated germination by osmotic seed treatment. *Nature*, **246**: 42-44.

Khan MA, Ungar IA, Showalter AM. 2000. Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. *stocksii*. *Annuals of Botany*, **85**: 225-232.

Khan MA, Ungar IA. 1984. The effect of salinity and temperature on the germination of polymorphic seeds and growth of *Atriplex triangularis* Willd. *American Journal of Botany*, **71**: 481-489.

Kronzucker HJ, Britto DT. 2011. Sodium transport in plant: A critical review. *New Phytologist*, **189**: 54-81.

Mahajan S, Tuteja N. 2005. Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives in Biochemistry and Biophysics*, **444**: 139-158.

Mazor L, Perl M, Negbi M. 1984. Changes in some atp-dependent activities in seeds during treatment with polyethyleneglycol and during the redrying process. *Journal of Experimental Botany*, **35**: 1119-1127.

Nayyar H. 2003. Calcium as environmental sensor in plants. *Current Science*, **84**: 893-902.

Patane C, Cavallaro V, Cosentino SL. 2009. Germination and radicle growth in unprimed and primed seeds of sweet sorghum as affected by reduced water potential in NaCl at different temperatures. *Industrial Crops and Products*, **30**: 1-8.

Rowley G. 1993. Multinational and national competition for water in the Middle East: Towards the deepening crisis. *Journal of Environmental Management*, **39**: 187-197.

Shi DC, Wang D. 2005. Effects of various salt-alkali mixed stresses on *Aneurolepidium chinense* (Trin.) Kitag. *Plant and Soil*, **271**: 15-26.

Yang CW, Chong JN, Li CY, *et al*. 2007. Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions. *Plant and Soil*, **294**: 263-276.

作者简介 管 博,男,1981年生,助理研究员,主要从事盐碱地改良,滨海退化湿地修复研究。E-mail: guanb627@gmail.com;bguan@yic.ac.cn。

责任编辑 李凤芹