

水杨酸和甜菜碱浸种对低温干旱胁迫下玉米苗期生长的影响

许高平¹, 刘秀峰¹, 袁文娅¹, 王璞², 楼辰军¹, 杨兆顺¹

(1. 天津市农作物研究所, 天津 300380; 2. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193)

摘要: 沙培条件下, 研究不同浓度水杨酸和甜菜碱浸种后对胁迫下玉米萌发和解除胁迫后苗期生长性状的影响, 比较不同胁迫类型间的药剂浸种效果差异。结果表明, 与低温胁迫相比, 低温干旱双胁迫使玉米发芽势、地上部干鲜重和鲜重根冠比极显著下降。水杨酸和甜菜碱均能显著提高不同胁迫下玉米子粒发芽势, 显著减少可溶性糖含量。对于幼苗高度和幼苗干鲜重, 药剂浸种表现为低温胁迫下抑制效果和低温干旱双胁迫下促进作用。根系总长对药剂浸种的响应强于其他根系性状, 且对甜菜碱的响应更为显著; 地上部生长对水杨酸的响应强于甜菜碱。随着药剂浓度升高, 水杨酸效果减弱, 甜菜碱效果增强。

关键词: 玉米; 低温胁迫; 干旱胁迫; 水杨酸; 甜菜碱

中图分类号: S135.01

文献标识码: A

Effects of Presoaking with Salicylic Acid and Betaine on Germination and Seedling Growth of Maize under Chilling and Drought Stresses

XU Gao-ping¹, LIU Xiu-feng¹, YUAN Wen-ya¹, WANG Pu², LOU Chen-jun¹, YANG Zhao-shun¹

(1. Tianjin Crop Research Institute, Tianjin 300380;

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Chilling and drought are two main stresses for the germination of spring maize. Through sand-culture method, an experiment was conducted to investigate the effect of presoaking maize seed with salicylic acid and betaine on germination under chilling and chilling+drought stresses and on the following seedling growth without any stresses. Also, the presoaking effects with salicylic acid or betaine between two stress types were compared. The main results showed that germinability, fresh and dry weights of shoot, and root/shoot ratio of fresh weight of maize seed were significantly decreased under chilling+drought stress when compared with that under single chilling stress. Both salicylic acid and betaine significantly improved germinability and reduced soluble sugar content under two stress types. Contrary effects of presoaking on height and fresh and dry weights of seedlings occurred between single chilling stress and chilling+drought stress, that is, inhibition effect under chilling and promotion effect under chilling+drought were manifested respectively. The response of total root length to presoaking was stronger than that of other root characteristics, and this response was more significant in betaine treatments than in salicylic acid treatments, to which that shoot growth showed better response. With the increase of chemicals concentration, the effect of salicylic acid decreased, and on the contrary, the effect of betaine enhanced.

Key words: Maize; Chilling stress; Drought stress; Salicylic acid; Betaine

录用日期: 2017-12-01

基金项目: 天津市农业科学院院长基金(15008、17015)

作者简介: 许高平(1986-), 男, 江苏高淳人, 博士, 从事作物高产栽培和资源高效利用研究。Tel: 17702211986

E-mail: xugaoping01@126.com

杨兆顺为本文通讯作者。Tel: 022-27796076

东北春玉米区是我国玉米生产的核心优势区之一, 与其他玉米产区相比, 具有明显区位优势 and 先进技术效率与模式^[1]。受地理位置和季风性气候的影响, 东北地区春玉米苗期易遭受低温冷害^[2]和季节性干旱, 特别是4、5月份降水量少, 易发生春旱^[3], 这是导致东北春玉米产量不稳定的主要原因^[4,5]。近年来全球气候变暖, 东北地区存在暖干化趋势^[6], 季

节性干旱进一步加剧^[7],但低温冷害的潜在威胁仍存在。由于不同熟期玉米品种种植区域北移东延^[8],严重低温冷害出现频率明显增加^[9],种植风险不断增大。

萌发期是决定玉米群体的重要阶段,前人对玉米萌发期非生物逆境的研究主要集中于低温或干旱单一胁迫对发芽率和幼苗生长特性的影响,低温干旱并发的影响远大于单一胁迫^[10]。曹士亮^[11]等分析不同梯度低温与干旱胁迫对玉米发芽率的影响。徐文强^[12]等研究发现,低温干旱双胁迫导致幼苗生长受抑制和贮藏物质转运率下降。根系的构型和分布对玉米生长具有重要影响^[13,14],低温干旱双胁迫对萌发期玉米根系的影响少见报道。

本试验通过设置低温和低温干旱双胁迫,研究低温干旱双胁迫对萌发期玉米性状特别是根系构型的影响及不同浓度水杨酸和甜菜碱浸种对低温干旱胁迫的缓解作用,探索非生物逆境下春玉米萌发的有效化控技术。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试品种为自选组合CB15098(昌7-2改良系×郑58改良系)。试验前选取子粒中等、均匀一致的种子,用1%次氯酸钠溶液消毒玉米种子10 min,然后用蒸馏水冲洗干净,用吸水纸吸干。

采用砂中(S)发芽床,砂床用无化学污染的细砂为材料,盐酸浸泡,清水洗涤,120℃~140℃高温烘干(2 h),使用前过筛(0.80 mm和0.05 mm孔径的土壤筛)。发芽采用标准发芽盒(19 cm×13 cm×12 cm),每盒50粒。播种后,将发芽盒放置在人工气候箱内,光周期14/10 h(光/暗)的活跃光环境中萌发。

1.2 试验设计

胁迫类型:试验设10℃低温处理,参照兰星的方法设砂床饱和含水量的65%为正常水分;砂床饱和含水量的40%为干旱胁迫,胁迫时间为10 d。砂床饱和含水量用称重法定时称重补水。3次重复,以胚芽露出沙面为标准,逐日统计种子的发芽数。至幼苗露出沙面1~2 cm时,将发芽盒取出置于25℃条件下生长,1叶1心期取样测定生理生化指标。

浸种处理:甜菜碱浓度设50、100、150 mg/L(GBC1, GBC2, GBC3),水杨酸浓度设10、30、60 mg/L(SAC1, SAC2, SAC3),在常温下浸泡种子,每隔0.5 h用玻璃棒搅拌通气,浸泡处理24 h。每个处理50粒,3次重复,置于10℃的培养箱中萌发,设正常水分与干旱胁迫(标准同上),其他条件设置与上述试验保

持一致。

1.3 测定项目与方法

发芽势=开始发芽后3 d发芽种子数/供试种子数×100%;

发芽率=最终发芽数/供试种子数×100%。

采用根扫描仪测定根系总长度、根系表面积、根体积和平均直径;采用刻度尺测量地上部和根系长度。分样洗净后吸干水分,用电子天平称量地上部和根系鲜重,于105℃鼓风干燥箱中杀青30 min,75℃烘干至恒重,用电子天平称量干重。叶片可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法,叶片丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2016进行数据整理,采用Sigma Plot 10.0与作图,采用SPSS 22.0进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 低温干旱胁迫对玉米发芽势和发芽率的影响

由图1可知,不同药剂浓度处理有效促进胁迫下发芽势,对胁迫解除后室温下发芽率的影响较小。低温胁迫下,SAC1、SAC2、SAC3和GBC1、GBC2、GBC3浸种处理后发芽势较对照分别极显著增加155.6%、145.8%、141.7%和100.0%、141.7%、161.1%;低温干旱双胁迫下,与对照相比,SAC1、SAC2、SAC3和GBC1、GBC2、GBC3浸种处理后发芽势分别极显著增加506.7%、480.0%、486.7%和460.0%、520.0%、520.0%。低温胁迫下,SAC3浸种处理发芽率较对照显著降低22.5%;低温干旱双胁迫下,与对照相比,各处理浸种后发芽率变化幅度均未达显著水平。

与单一低温胁迫相比,低温干旱双胁迫下CK处理发芽势显著降低72.2%。经药剂浸种处理后,SAC2和GBC3处理发芽势小幅下降,其余处理发芽势小幅上升,两种胁迫类型间差异均未达显著水平。SAC3和GBC1处理发芽率小幅上升,其余处理发芽率小幅下降,两种胁迫类型间差异均未达显著水平。

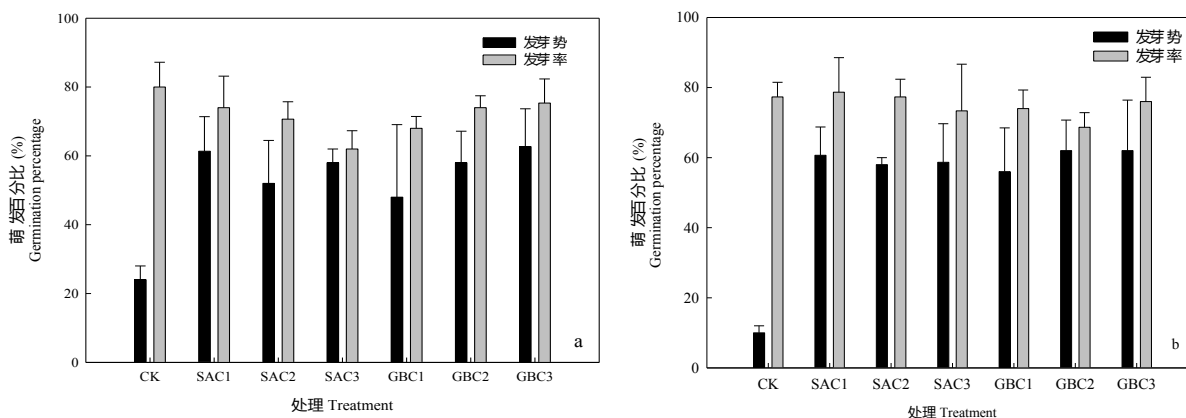
2.2 低温干旱胁迫对干鲜重的影响

由图2可知,药剂浸种能显著减少低温胁迫下的地上部干鲜重。低温胁迫下,SAC1、SAC2、SAC3和GBC1、GBC2、GBC3浸种处理后地上部鲜重较对照分别极显著降低了28.7%、25.2%、26.1%和24.9%、25.0%、24.0%。与对照相比,SAC1、SAC3和GBC1、GBC3浸种处理后地上部干重分别极显著降低35.0%、32.5%和25.8%、22.5%;SAC2和GBC2处

理使地上部干重分别显著降低 18.3%和 20.0%。除 GBC2 处理外,各浸种处理不同比例的增加根系鲜重,增幅均未达显著水平。各浸种处理不同比例的

减少了根系干重,降幅均未达显著水平。

低温干旱胁迫下,各药剂浸种处理能不同程度增加地上部和地下部干鲜重,增幅均未达显著水平。



注:图 a 表示低温胁迫,图 b 表示低温干旱双胁迫。下同。

Note: Fig.a chilling stress, Fig.b chilling+ drought stress. The same as below.

图 1 不同浓度药剂处理对发芽势和发芽率的影响

Fig.1 Germinability and germination percentage of maize seeds presoaked with two different chemicals under chill and chill+drought stresses

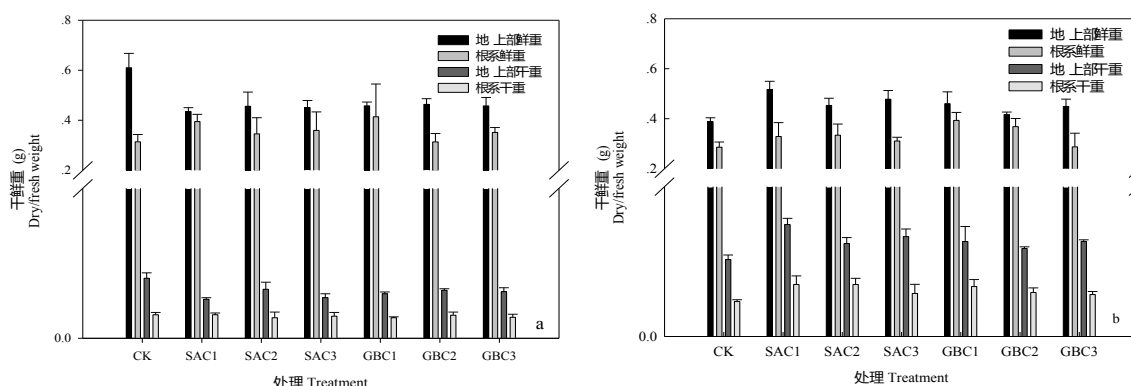


图 2 不同浓度药剂处理对幼苗干鲜重的影响

Fig.2 Dry and fresh weights of seedlings treated with two different chemicals under chilling and chilling+drought stresses

与单一低温胁迫相比,低温干旱双胁迫下 CK 处理幼苗鲜重和干重分别极显著降低 27.8%和 32.5%,GBC2 浸种处理后幼苗鲜重和干重分别显著降低 10.9%和 11.4%,SAC1 浸种处理后幼苗鲜重显著增加 19.5%,幼苗干重极显著增加 27.6%,SAC3 浸种处理后幼苗干重显著增加了 16.5%。

2.3 低温干旱胁迫对根冠比的影响

药剂浸种对地上部高度的影响较为明显。低温胁迫下(图 3),SAC1、SAC2、SAC3 和 GBC1、GBC2、GBC3 浸种处理后地上部高度较对照分别减少 27.1%、15.9%、20.7%和 14.5%、16.5%、13.0%,GBC3 处理地上部高度降幅达显著水平,其他处理的地上部高度降幅均达极显著水平。SAC2 浸种处理后根

系长度较对照显著减少了 47.0%,其他处理均未达显著水平。各处理对地上部高度和根长长度占全株总长度的比值的影响均不显著。

低温干旱胁迫下,与对照相比,SAC1 和 GBC1 浸种处理后地上部高度显著增加了 10.9%和 9.9%,其他处理对地上部高度的影响均不显著,各浸种处理对根系长度、根冠长度占全株总长度比值的影响均不显著。与单一低温胁迫相比,低温干旱双胁迫下 CK 处理地上部高度和根系长度分别极显著减少了 18.9%和 34.9%,SAC1 浸种处理后地上部高度极显著增加 15.5%,SAC2 浸种处理后根系长度极显著增加 27.2%。

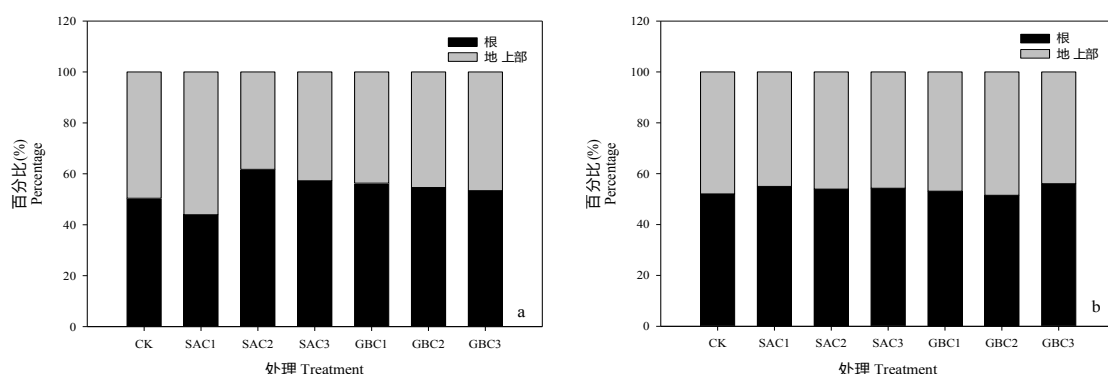


图3 不同浓度药剂处理对根冠长度比值的影响

Fig.3 Ratio between stem length and root length of seedlings treated with two different chemicals under chilling and chilling+drought stresses

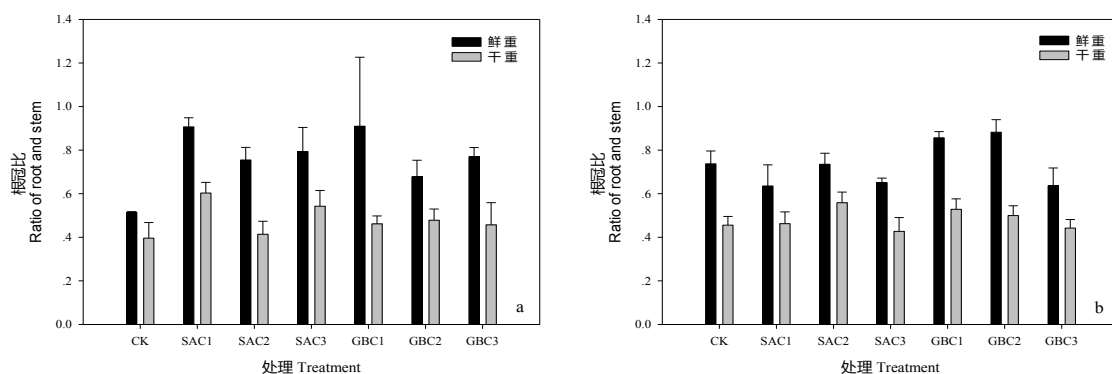


图4 不同浓度药剂处理对鲜、干重根冠比的影响

Fig.4 Ratio of fresh/dry weight between stem and root of seedlings treated with two different chemicals under chilling and chilling+drought stresses

低温胁迫下(图4),SAC1和GBC1浸种处理后使鲜、干重根冠比均极显著增加76.1%和76.7%,SAC2、SAC3和GBC3浸种处理后鲜重根冠比较对照分别增加46.7%、56.1%和49.5%,增幅均达显著水平,SAC1和SAC3浸种处理后使干重根冠比较对照显著增加52.3%和37.1%。

低温干旱胁迫下,与对照相比,GBC1和GBC2浸种处理后鲜重根冠比分别显著增加16.2%和19.7%,SAC2浸种处理后干重根冠比显著增加20.9%。与单一低温胁迫相比,低温干旱双胁迫下CK处理鲜重根冠比极显著增加58.3%,SAC2浸种处理后干重根冠比显著增加15.7%。

2.4 低温干旱胁迫对幼苗根系形态的影响

药剂浸种处理对根系的影响主要集中在根系长度(表1)。低温胁迫下,SAC2和GBC1、GBC2、GBC3浸种处理后根系总长较对照显著增加13.4%和27.7%、26.2%、30.8%;SAC2处理的平均直径和根系总体积较对照显著减少34.2%和29.2%;其他处理对

平均直径和根系总体积的影响均未达显著水平,各处理对根系总表面积的影响均不显著。

低温干旱胁迫下,与对照相比,SAC1和GBC1、GBC2、GBC3浸种处理后根系总长较对照显著增加56.7%和76.9%、50.4%、50.4%,SAC1和GBC1、GBC2浸种处理后根系总表面积分别增加27.9%和39.9%、25.9%,其中,SAC1和GBC2处理根系总表面积增幅达显著水平,GBC1处理的根系总表面积增幅达极显著水平。与单一低温胁迫相比,CK处理低温干旱双胁迫下根系总体积显著下降14.1%,SAC1浸种处理后根系总长极显著增加77.5%,GBC1浸种处理使平均直径显著增加53.4%

2.5 低温干旱胁迫对幼苗可溶性糖和丙二醛含量的影响

可溶性糖含量对药剂浸种处理的响应幅度要大于MDA含量的响应幅度。低温胁迫下(图5),SAC1、SAC2、SAC3和GBC3浸种处理后可溶性糖含量较对照分别极显著降低61.9%、54.3%、57.1%和28.2%;

GBC1 和 GBC2 浸种处理后可溶性糖含量较对照分别显著降低 6.9% 和 5.4%。低温干旱双胁迫下,与对照相比,SAC1、SAC2、SAC3 和 GBC1、GBC2、GBC3 浸种处理后可溶性糖含量分别极显著降低 40.6%、51.1%、44.7% 和 47.1%、52.8%、42.7%。

低温胁迫下,SAC2 浸种处理后丙二醛含量较对照极显著增加 43.1%,SAC1、SAC3 和 GB 各处理的丙二醛含量增幅较对照均未达显著。低温干旱双胁迫下,与对照相比,SA 和 GB 各处理浸种后丙二醛含量变化幅度均不显著。

表 1 不同浓度药剂处理对萌发期玉米子粒根系形态性状的影响
Table 1 Effect of presoaking with different chemicals on root traits of maize seedling

胁迫类型 Stress	药剂 Chemical	根系总长(cm) Root length	总表面积(cm²) Total root surface area	平均直径(mm) Mean diameter	根系总体积(cm³) Total root volume
低温胁迫	CK	76.9	17.4	1.4	0.3
	GBC1	98.2*	16.8	1.1	0.2
	GBC2	97.1*	16.8	1.1	0.2
	GBC3	100.6*	17.3	1.1	0.2
	SAC1	76.4	15.5	1.1	0.3
	SAC2	87.2*	15.6	0.9*	0.2*
	SAC3	81.9	16.1	1.0	0.3
低温干旱双胁迫	CK	69.2	14.0	1.1	0.2
	GBC1	122.4**	19.6**	1.0	0.3
	GBC2	104.1*	17.7*	1.1	0.2
	GBC3	104.1*	17.1	1.0	0.2
	SAC1	108.4*	17.9*	1.1	0.2
	SAC2	87.5	16.3	1.2	0.2
	SAC3	88.4	15.9	1.1	0.2

注:**、*表示同种胁迫后与对照差异达极显著、显著水平。
Note: ** and * indicated significant difference at 0.01, 0.05 levels, respectively.

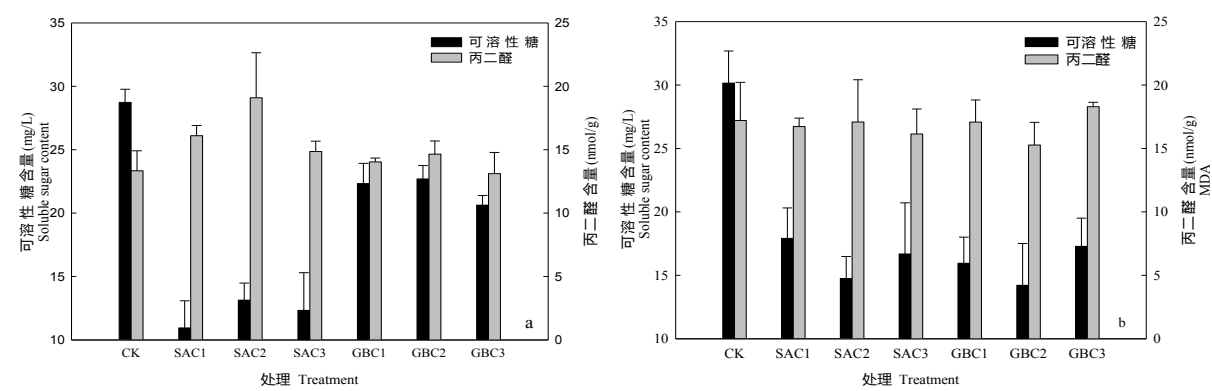


图 5 不同浓度药剂处理对幼苗可溶性糖含量和丙二醛含量的影响
Fig.5 Effects of presoaking with different chemicals under chilling and chilling+drought stresses on soluble sugar and malonaldehyde contents

与单一低温胁迫处理相比,低温干旱双胁迫下 GBC1 和 SAC1 处理可溶性糖含量显著下降 6.2% 和 28.8%;SAC2 和 GBC3 处理可溶性糖含量上升但增幅不显著,其余处理可溶性糖含量下降但降幅不显著。低温干旱双胁迫下 GBC1 处理丙二醛含量显著减少 21.3%;GBC3 处理丙二醛含量极显著减少 9.1%;CK、SAC1 和 SAC3 丙二醛含量上升但增幅不

显著,其余处理丙二醛含量下降但降幅不显著。

3 结论与讨论

低温胁迫下,萌发阶段玉米子粒最先发生吸胀冷害,造成种子损伤和活力下降,直接影响出苗和苗期的生长质量^[19~15]。吸胀冷害的危害程度受到种子初始含水量、低温胁迫强度、胁迫持续时间、胁迫时

所处萌发阶段的影响^[16],同时萌发环境的水分状况对吸胀冷害也有较大影响。低温干旱双胁迫发生时由于种子萌发环境的水分含量下降,降低了种子的吸胀速率,延缓或减轻了吸胀冷害的影响。前人研究发现,5℃低温下吸胀期油菜种子通过适当降低土壤水势有利于种子萌发^[17]。本研究表明,与低温胁迫相比,低温干旱双胁迫下发芽势极显著增加,可能是干旱胁迫在一定程度上减缓了低温吸胀对种子萌发的伤害,使萌发初期种子减轻或免受吸胀冷害的结果。药剂浸种能够显著提升低温和低温干旱胁迫下的发芽势,胁迫解除后,药剂浸种对发芽率的提升并不显著。

非生物胁迫使根系形态和结构会做出调整以适应和抗御逆境。低温胁迫导致玉米轴根长^[18],根体积和表面积明显下降^[19],强化根皮层通气组织^[20]和降低根皮层细胞层数^[21]可增强玉米的抗旱性。本研究发现,低温干旱双胁迫导致根系总长和根表面积较单一胁迫时显著降低,说明萌发出苗阶段低温干旱双胁迫对根系伸长的抑制作用较低温胁迫更强,这可能与干旱胁迫下根系伸长的机械抗阻增强有关^[22]。低温和低温干旱双重胁迫时,甜菜碱均比水杨酸更有效提升根系总长和根表面积,水杨酸则对地上部高度和鲜重的影响更为显著。

低温冷害和干旱缺水的共同危害特征之一是渗透胁迫,植物保持细胞内外稳定的水分和离子交换有助于维持细胞膨压,增强抗逆性^[23]。可溶性糖作为主要渗透调节物质,其含量降低导致细胞质浓度降低^[24],使膜透性增加,破坏膜的稳定性^[25]。本研究发现,低温和低温干旱双胁迫下药剂浸种处理后可溶性糖含量较对照显著或极显著下降。本研究中部分药剂浸种处理通过增加干、鲜重根冠比的方式表现出提升种子抗御低温以及低温干旱胁迫能力,这与前人低温^[26]和干旱^[27]的研究结果相一致,减少地上部干鲜重、降低地上部高度和增加根系长度和表面积。本研究中药剂浸种造成可溶性糖含量下降的原因可能是逆境下药剂浸种增强根系的相对生长,减缓地上部相对生长,促使自养阶段的玉米幼苗养分更多地向根系转移;同时幼苗光合性能偏弱、地上部未能生产足够的光合产物等原因共同造成的。

参考文献:

- [1] 钟鑫,张忠明,王琛,等. 中国玉米核心优势区技术效率及技术进步模式研究——基于2000~2013年的省际面板数据[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 166-172.
Zhong X, Zhang Z M, Wang C, et al. Technology efficiency and technical progress in Chinese core advantage area——Based on the provincial panel data 2001-2013[J]. Journal of Maize Science, 2016, 24(1): 166-172. (in Chinese)
- [2] 杨若子,周广胜. 东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1141-1153.
Yang R Z, Zhou G S. A comprehensive risk assessment of the main maize agro-meteorological disasters in the three provinces of Northeast China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(6): 1141-1153. (in Chinese)
- [3] 肖俊夫,刘战东,南纪琴,等. 不同水分处理对春玉米生态指标,耗水量及产量的影响[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 94-97.
Xiao J F, Liu Z D, Nan J Q, et al. Effects of different moisture treatments on ecological index, water consumption and yield of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6): 94-97. (in Chinese)
- [4] 张建平,王春乙,赵艳霞,等. 基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4132-4138.
Zhang J P, Wang C Y, Zhao Y X, et al. Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4132-4138. (in Chinese)
- [5] 高晓容,王春乙,张继权,等. 东北地区玉米主要气象灾害风险评价模型研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(21): 4257-4268.
Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q, et al. A risk assessment system of the main meteorological disasters for maize in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(21): 4257-4268. (in Chinese)
- [6] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961-2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
He W, Bu R C, Xiong Z P, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531. (in Chinese)
- [7] Song X, Li L, Fu G, et al. Spatial-temporal variations of spring drought based on spring-composite index values for the Songnen Plain, Northeast China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(3-4): 371-384.
- [8] 赵俊芳,杨晓光,刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6544-6551.
Zhao J F, Yang X G, Liu Z J. Influence of climate warming on serious low temperature and cold damage and cultivation pattern of spring maize in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6544-6551. (in Chinese)
- [9] 张梦婷,刘志娟,杨晓光,等. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征:东北春玉米延迟型冷害[J]. 中国农业气象, 2016, 37(5): 599-610.
Zhang M T, Liu Z J, Yang X G, et al. Temporal and spatial variations of agro-meteorological disasters of major crops in China under the background of climate change: delayed chilling damage of spring maize in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(5): 599-610. (in Chinese)
- [10] 郑琪,王威,王汉宁,等. 低温冻害对玉米种子发芽特性的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 58-61.
Zheng Q, Wang W, Wang H N, et al. Effect of freezing injury on germination characteristics of maize seeds[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(6): 58-61. (in Chinese)

- [11] 杨 静,毛笈华,于永涛,等.低温对甜玉米种子氧化酶活性的影响及相关基因表达分析[J].核农学报,2016,30(9):1840-1847.
Yang J, Mao J H, Yu Y T, et al. Effects of chilling on antioxidant enzyme activity and related gene expression levels during seed germination[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2016, 30(9): 1840-1847. (in Chinese)
- [12] 江绪文,李贺勤,王晓琨,等.PEG-6000模拟干旱胁迫对5个玉米品种种子萌发及活力的影响[J].种子,2015,34(5):5-8.
Jiang X W, Li H Q, Wang X K, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on seed germination and vigor of five maize varieties[J]. Seed, 2015, 34(5): 5-8. (in Chinese)
- [13] 谢 倩,陈冠英,陶洪斌,等.玉米播种期水分胁迫及补水对幼苗生长的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(6):16-24.
Xie Q, Chen G Y, Tao H B, et al. Effects of drought and irrigation after sowing on maize seedling growth[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 16-24. (in Chinese)
- [14] 郑江平,王春乙.低温、干旱并发对玉米苗期生理过程的影响[J].应用气象学报,2006,17(1):119-123.
Zheng J P, Wang C Y. Impact of chilling temperature and drought on corn physiological process in seedling stage[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2006, 17(1): 119-123. (in Chinese)
- [15] 曹士亮,王成波,于 滔,等.低温与土壤水分含量对玉米种子萌发的影响[J].中国种业,2016(2):44-48.
Cao S L, Wang C B, Yu T, et al. Effects of low temperature and soil moisture content on seed germination of maize[J]. China Seed Industry, 2016(2): 44-48. (in Chinese)
- [16] 徐文强,杨祁峰,牛俊义,等.温度与土壤水分对玉米种子萌发及幼苗生长特性的影响[J].玉米科学,2013,21(1):69-74.
Xu W Q, Yang Q F, Niu J Y, et al. Effects of temperatures and soil moisture content on seed germination and seedling growth characteristics of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(1): 69-74. (in Chinese)
- [17] Lynch J P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems[J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 347-357.
- [18] Saengwilai P, Tian X, Lynch J P. Low crown root number enhances nitrogen acquisition from low-nitrogen soils in maize[J]. Plant Physiology, 2014, 166(2): 581-589.
- [19] 晋鹏宇,赵 鑫,赵丽晓,等.芽苗期低温对玉米生长的影响及抗逆栽培措施[J].华北农学报,2012,27(增刊):139-143.
Jin P Y, Zhao X, Zhao L X, et al. Effects of low temperature at germination and seedling stage on maize growth and cultivation technique for alleviation [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27 (B12): 139-143. (in Chinese)
- [20] Afzal I, Hussain B, Basra S M A, et al. Priming with moringa leaf extract reduces imbibitional chilling injury in spring maize[J]. Seed Science and Technology, 2012, 40(2): 271-276.
- [21] Greaves, A. Improving suboptimal temperature tolerance in maize—the search for variation[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47, 307-323.
- [22] Bedi S, Basra A S. Chilling injury in germinating seeds: basic mechanisms and agricultural implications[J]. Seed Science Research, 1993, 3(4): 219-229.
- [23] 刘姗姗,杨特武,黄海东,等.吸胀期低温与水分条件对油菜种子萌发的耦合效应[J].中国油料作物学报,2014,36(1):44-50.
Liu S S, Yang T W, Huang H D, et al. Interactive effects on rapeseed germination at low temperature and moisture during seed imbibition[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(1): 44-50. (in Chinese)
- [24] Lukatkin A S, Brazaityte A, Bobinas C, et al. Chilling injury in chilling-sensitive plants: a review[J]. Agriculture, 2012, 99(2): 111-124.
- [25] 曹 宁,张玉斌,闫 飞,等.低温胁迫对不同品种玉米苗期根系性状的影响[J].中国农学通报,2009,25(16):139-141.
Cao N, Zhang Y B, Yan F, et al. Effect of low temperature on different type of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(16): 139-141. (in Chinese)
- [26] Zhu J, Brown K M, Lynch J P. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.)[J]. Plant, cell & environment, 2010, 33(5): 740-749.
- [27] Chimungu J G, Brown K M, Lynch J P. Reduced root cortical cell file number improves drought tolerance in maize[J]. Plant Physiology, 2014, 166(4): 1943-1955.
- [28] Bengough A G, McKenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 59-68.
- [29] Chaumont, F, Tyerman, S D. Aquaporins: highly regulated channels controlling plant water relations. Plant Physiology, 2014, 164, 1600-1618.
- [30] Poonam R B, Handa N, Kaur H, et al. Sugar signalling in plants: A novel mechanism for drought stress management[J]. Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach, 2 Volume Set, 2016: 287.
- [31] Jarzyniak K M, Jasiński M. Membrane transporters and drought resistance – a complex issue[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 687.
- [32] 郑子漂,张春庆,吴承来,等.萌动期低温胁迫对玉米自交系幼苗器官建成的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2016,34(4):403-408.
Zheng Z P, Zhang C Q, Wu C L, et al. Effects of low temperature stress on seedling morphogenesis in maize inbred lines under sprouting period[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2016, 34(4): 403-408. (in Chinese)
- [33] 赵先丽,张玉书,纪瑞鹏,等.辽宁苗期玉米根叶对水分胁迫的响应[J].中国农学通报,2011,27(30):21-26.
Zhao X L, Zhang Y S, Ji R P, et al. Response of roots and leaves of spring maize to water stress during seedling in Liaoning province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(30): 21-26. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)