

低温早播对玉米苗期生理指标和产量的影响

崔洪秋^{1,2}, 任翠梅¹, 谢 贤¹, 刘 冰¹, 李 杰¹,
刘德福¹, 齐国超¹, 刘春娟², 郑殿峰²

(1. 黑龙江省农业科学院大庆分院, 黑龙江 大庆 163316; 2. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要: 以5个主栽玉米品种进行分期播种, 研究低温早播对玉米苗期生理指标和产量的影响, 筛选耐(抗)低温的玉米品种。结果显示, 播期、品种及两者互作对生理指标影响效果差异显著($p < 0.05$), 产量互作不显著。在5月2日低温早播条件下, 玉米苗期丙二醛(MDA)增加, 保护酶系统中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)降低, 可溶性蛋白质降低和可溶性糖增加, 赤霉素/脱落酸(GA₃/ABA)比值减小, 产量相对适宜播期减产5.89%。5个品种抗寒性存在差异, 耐(抗)低温品种排序为郑单958>京单28>先玉335>德美亚2号>绥玉7。

关键词: 玉米; 低温早播; 品种; 生理指标; 产量

中图分类号: S513.01; S513.047

文献标识码: A

Effect of Low Temperature Sowing on Physiological Indexes and Yield of Maize Seedling

CUI Hong-qiu^{1,2}, REN Cui-mei¹, XIE Xian¹, LIU Bing¹, LI Jie¹, LIU De-fu¹,
QI Guo-chao¹, LIU Chun-juan², ZHENG Dian-feng²

(1. Daqing Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing 163316;

2. Agronomy College of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Five main cultivars of maize were used for early sowing in different low temperature, to research the effect of different sowing date on physiological indexes of seedling and yield of maize. It was screened out the maize varieties with higher resistance to low temperature or tolerant low temperature. The results showed that sowing dates, varieties, and interactions were significant ($p < 0.05$), only interaction of yield was not significant. The low temperature sowing makes the maize seedling leaves, MDA content increased, SOD activity, POD activity of protective enzyme system changed, soluble protein and soluble sugar increased, GA₃/ABA ratio decreased, 5.89% reduction in yield (relatively suitable sowing date). The capacity of resistance to low temperature was different in varieties. The sequencing of tolerant or resistance to low temperature of maize was Zhengdan958> Jingdan28> Demeiya2> Xianyu335> Suiyu7.

Key words: Maize; Low temperature sowing; Variety; Physiological index; Yield

收稿日期: 2015-03-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目子课题(2012BAD20B04)、黑龙江省普通高等学校寒地作物种质改良与栽培重点实验室(2012005)、黑龙江省研究生创新科研项目(YJSCX2012-253HLJ)、黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2014-Y04)

作者简介: 崔洪秋(1981-)女, 黑龙江虎林人, 博士, 从事玉米育种和栽培研究工作。Tel: 18249556003

E-mail: cuihongqiu@126.com

郑殿峰为本文通讯作者。E-mail: zdfnj@263.net

作为国家粮食主产区的种粮大省—黑龙江省玉米的种植面积逐年增加, 由2011年587万hm²增加到2014年800万hm²。黑龙江省地处寒地区域, 生产中经常出现低温冷害等灾害性天气。玉米(*Zea mays* L.)起源于热带亚热带, 是一种喜温作物, 低温冷害是影响其生长发育、产量和品质的主要限制因素之一^[1~3], 逢遇冷害玉米减产20%以上^[4]。低温冷害是黑龙江省玉米产量的主要限制因素之一。黑龙江省以春季低温产生的障碍性冷害为主, 研究低温早播对玉米苗期生理指标和产量影响具有重要意义。

低温胁迫下玉米形态发生的变化,源于其体内所发生的一系列生理生化反应。许多学者提出产量性状作为评价指标最为可靠。本文以5个不同抗低温能力的玉米主栽品种为试验材料,采用接近实际生产的大田小区试验方法,探讨田间自然低温对玉米苗期的MDA、保护酶和激素比例等低温逆境生理指标响应机制,分析不同低温早播胁迫时间下,玉米苗期生理指标的变化规律和产量变化,为玉米抗低温冷害生理研究提供重要的理论依据,并从现有的生产品种中筛选出耐低温品种,为寒地玉米栽培防控减灾技术提供生产指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黑龙江省农业科学院大庆分院红旗泡试验地进行。土壤肥力中等,pH值8.32,速效磷(P_2O_5)40.10 mg/kg,速效钾(K_2O)159.00 mg/kg,有机质28.20 g/kg,碱解氮(N)134.40 mg/kg。

1.2 试验设计

2013年试验是在2012年低温萌芽和苗期抗冷性试验品种筛选工作基础上,选用抗冷性存在差异的5个品种为试验材料。试验设播期为A因素,4水平(A1:5月2日,A2:5月7日,A3:5月12日,A4:5月17日);设品种为B因素,5个品种(B1:德美亚2号,B2:京单28,B3:先玉335,B4:郑单958,B5:绥玉7),共20个处理组合,以当地当年5月12日适宜播期为对照。随机区组设计,4次重复,每个小区种植6行,行长5 m,小区面积19.5 m²。5月2日耕层10 cm土壤温度稳定在6℃。田间管理同大田。出苗后,取地上部分,液氮中速冻30 min,转入-80℃冰柜中保存待测。

1.3 测定项目与方法

粗酶液提取:取1 g叶片,加2 mL(pH值7.8)磷酸缓冲液研磨,离心(5 000 r/min,4℃)20 min,上清液

为粗酶液。MDA采用硫代巴比妥酸显色法测定,以mmol/(g·FW)表示;可溶性糖(mmol/L)=11.71D₄₅₀,D₄₅₀为测定MDA 450 nm OD值;POD愈创木酚法测定,以1 min内A470值增加0.01所需的酶量为1个酶活单位(U),酶活性用U/(g·FW)表示;SOD采用氮蓝四唑(NBT)光化学还原法测定,以抑制NBT光氧化还原50%时的酶量为1个酶活力单位(U),酶活性用U/(g·FW)表示;可溶性蛋白质测定采用考马斯亮蓝法。

ABA、GA₃测定:提取2.0 g叶片,液氮研磨,转入离心管,甲醇-水-甲酸溶液,浸提。4℃、3 000 r/min离心5 min,取上清液,加Vc-乙醇溶液,旋转蒸发浓缩至水相;将上述提取液离心后,过Oasis HLB固相萃取柱,再分别用1 mL 20%甲醇溶液与1 mL 80%甲醇溶液洗脱,收集洗脱液,用氮吹除去甲醇,样液过0.22 μm有机滤膜,供HPLC-MS/MS分析。

收获与测产:收获每小区取中间2行进行测产,考种同常规。

采用Excel 2003进行原始数据处理和制图,采用DPS 7.05软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 播期和品种对产量的显著性分析

由表1可以看出,各处理下的玉米产量,区组间差异不显著,播期和品种对产量影响均达到显著水平。品种对产量影响要高于播期对产量影响。播期和品种表现出一定的互作效应,没有达到显著水平,反映了选用的5个主栽品种总体的适应性较好。

从表2中可以看出,随着播期的推移,产量呈递增趋势,与适宜播期5月12日产量相比,产量最低处理(5月2日早播)减产5.89%;产量最高处理(5月17日晚播)增产11.35%,5月17日与其他播期产量达到显著差异($p<0.05$),其他播期间产量差异不显著。

表1 玉米产量差异方差分析
Table 1 Variance analysis of yield difference

变异来源 Variance	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F-value	p值 p-value
区组间	6 498 629.69	3.00	2 166 209.90	1.11	0.352 9
播期间	25 831 854.39	3.00	8 610 618.13	4.41	0.007 4
品种间	87 292 160.59	4.00	21 823 040.15	11.18	0.000 1
播期×品种	13 548 163.82	12.00	1 129 013.65	0.58	0.850 6
误差	111 305 385.04	57.00	1 952 726.05		
总变异	244 476 193.53	79.00			

表2 播期对玉米苗期生理指标和产量的影响

Table 2 Effect of sowing date on several stress index and yield of maize seedling

播 期 (月·日) Sowing date	产 量 (kg/hm ²) Yield	丙二醛 [mol/(g·FW)] MDA	超氧化物歧化酶 [U/(g·FW)] SOD	过氧化物酶 [U/(g·FW)] POD	可溶性蛋白质 [mol/(g·FW)] Soluble protein	可溶性糖 [mol/(g·FW)] Soluble sugar	赤霉素/脱落酸 GA ₃ /ABA
5·02	8 473.78 b B	0.008 6 a A	699.91 c C	3 094.64 b AB	13.02 b B	2.13 bc B	2.37 c B
5·07	8 918.40 b AB	0.007 0 b B	765.67 b B	3 625.12 a A	13.88 a A	1.92 c B	5.28 b A
5·12	9 004.25 b AB	0.005 8 c C	782.84 b AB	2 860.93 b B	13.81 a A	2.17 b B	7.63 a A
5·17	1 0025.97 a A	0.006 0 c C	823.85 a A	2 185.24 c C	13.05 b B	2.54 a A	6.67 ab A

注:同列不同大、小写字母分别表示在0.01、0.05水平差异显著。下表同。

Note: The different uppercase and lowercase letters in the same column indicated significant difference at 0.01 and 0.05, respectively.

The same below.

随着播期时间的推移,低温胁迫作用减缓至适期播种消失,MDA变化呈递减趋势,从适宜播期5月12日开始,随着低温胁迫的减缓,MDA变化趋于平缓。播期越早,低温胁迫的时间越长,SOD活性开始下降,SOD值较低;播期越晚,低温胁迫的时间越短,SOD活性上升,SOD值较高。POD和可溶性蛋白质的变化趋势呈先增加再降低的趋势,最大值出现在播期5月7日。可溶性糖最低点在播期5月7日,可溶性糖呈先降低再升高的趋势。GA₃/ABA比值随着播期推移,呈先升高再降低的趋势,最高点出现在适宜播期5月12日。在低温播种条件下,GA₃/ABA与苗期质膜的过氧化作用具有同步性,GA₃/ABA比值

降低,内源激素ABA比例增大。分期早播创造的自然低温逆境下,膜脂过氧化作用产物MDA加强、保护酶系统中SOD和POD降低,能够增加细胞保水能力的可溶性蛋白质降低,渗透调节物质可溶性糖升高,内源激素GA₃/ABA比值降低,各指标都受到不同程度的影响。说明播期影响玉米苗期的生理生化反应和最终产量。

2.2 不同基因型品种的产量和若干耐低温指标

从表3可知,不同基因型玉米产量表现为晚熟品种郑单958>京单28>先玉335,差异不显著;早熟品种绥玉7>德美亚2号,差异不显著。晚熟品种大于早熟品种,产量达到了差异显著($p<0.01$)。

表3 不同基因型品种苗期若干生理指标和产量

Table 3 Effect of varieties on several stress index and yield of maize seedling

品 种 Variety	产 量 (kg/hm ²) Yield	丙二醛 [mol/(g·FW)] MDA	超氧化物歧化酶 [U/(g·FW)] SOD	过氧化物酶 [U/(g·FW)] POD	可溶性蛋白质 [mol/(g·FW)] Soluble protein	可溶性糖 [mol/(g·FW)] Soluble sugar	赤霉素/脱落酸 GA ₃ /ABA
德美亚2号	7 678.29 b B	0.63 c B	731.33 c BC	2 728.33 c BC	12.73 b C	0.021 4 bc BC	7.40 a A
京单28	9 776.68 a A	0.77 b A	813.03 ab A	2 644.32 cd C	13.82 a A	0.022 5 b B	4.21 ab A
先玉335	9 651.40 a A	0.56 d B	784.32 b AB	3 315.35 b AB	13.61 a AB	0.017 8 d D	5.76 ab A
郑单958	10 361.50 a A	0.61 cd B	678.76 d C	2 187.21 d C	13.08 b BC	0.0189 cd CD	4.36 b A
绥玉7	8 060.13 b B	0.84 a A	832.90 a A	3 832.19 a A	13.96 a A	0.0289 a A	5.71 b A

绥玉7的MDA含量最高,与其他品种差异显著,郑单958最低。绥玉7的SOD含量最高,郑单958最低;品种绥玉7和品种京单28差异不显著,其他品种间差异显著($p<0.01$)。绥玉7的POD最高,郑单958最低;品种间除了京单28和郑单958差异不显著,其他品种间差异显著。绥玉7的可溶性蛋白质含量最高,德美亚2号最低;绥玉7、郑单958、德美亚2号间差异显著,与郑单958和德美亚2号差异显著,这

2个品种间差异不显著。绥玉7的可溶性糖含量最高,先玉335最低;绥玉7可溶性糖含量与其他品种间差异显著。GA₃/ABA比值,最高的德美亚2号与最低的郑单958达到了差异显著;京单28和先玉335间以及与其他品种的GA₃/ABA比值差异不显著。品种特性影响生理指标值高低,品种间这种差异的存在,导致了抗寒性差异。品种间以单一生理指标对品种耐寒性进行划分,MDA、保护酶、GA₃/ABA等

指标结果不完全一致。

2.3 播期和品种互作对玉米苗期若干生理指标影响

由图1结果可知,MDA、SOD、POD、可溶性蛋白质、可溶性糖和 GA_3 /ABA播期和品种间互作效果显著($P<0.05$),表明5个品种苗期的6个生理指标对低温的敏感性较强,影响玉米苗期生理生化活性和生长。播期和品种互作对产量影响不显著,分析是后期生长条件适宜,玉米生长补偿效应弥合苗期的差异性,反应了5个玉米品种内在基因对环境的协调稳定性较好,环境适应性强。

绥玉7在伤害指标值最大时,保护酶、可溶性蛋白质和可溶性糖值也最大,表明其对低温逆境的反

应相对其他品种要敏感。德美亚2号MDA值次之,保护酶等指标反应与其他品种比居中。先玉335和京单28的MDA相接近,小于绥玉7和德美亚2号;保护酶等指标次于绥玉7,大于德美亚2号。京单28和先玉335品种6个指标值,与其他3个品种相比均处于中等水平,对低温逆境的影响生理指标变化幅度适中。郑单958伤害指标MDA、保护酶和可溶性蛋白质和可溶性糖与其他品种相比总体偏小,对低温逆境指标的影响相对不敏感,评价为耐冷性好的品种。个别品种在自然低温条件下以植株生理指标为依据进行鉴定,与模拟低温冷害条件试验结果存在一定差异。

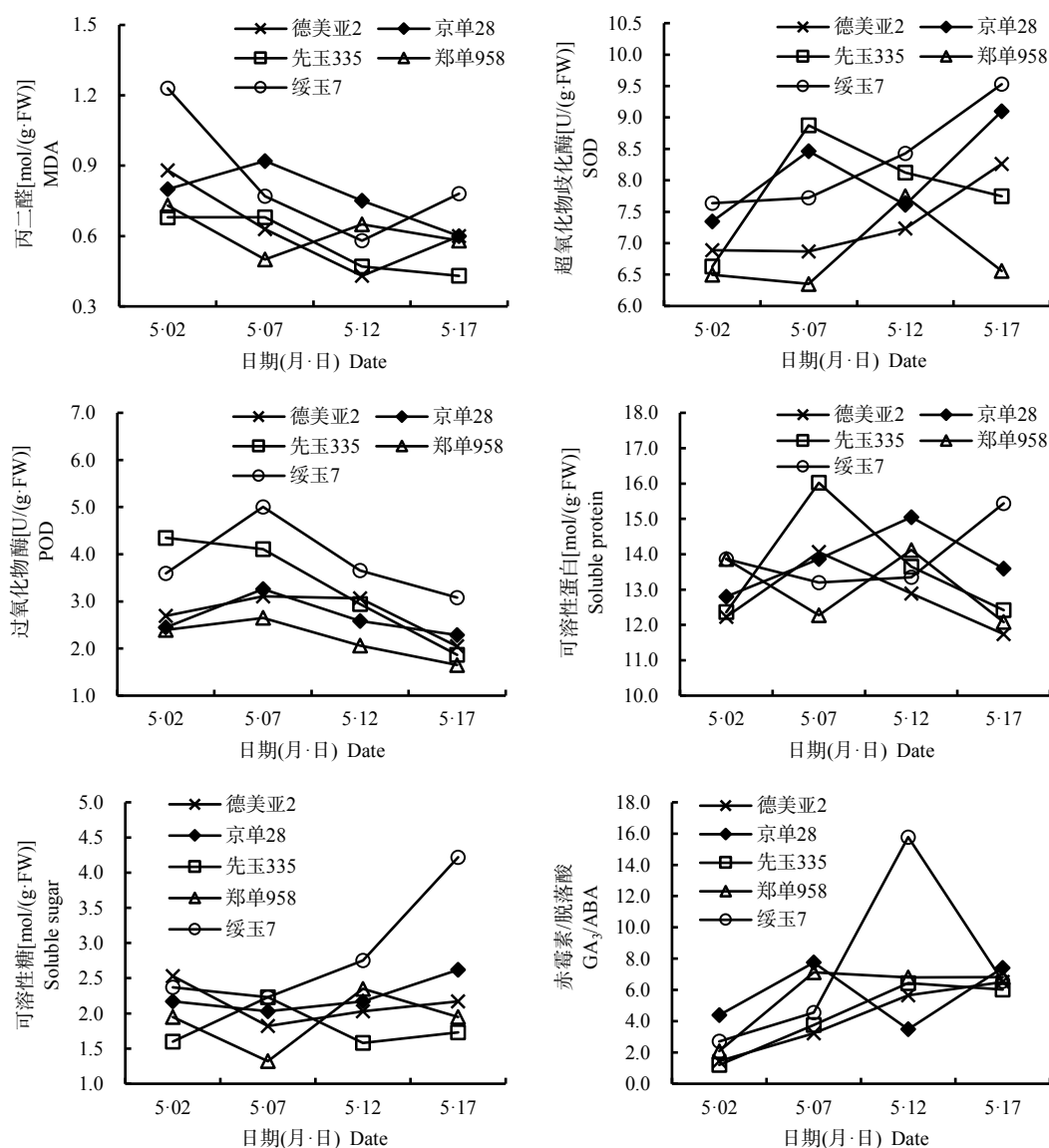


图1 播期和品种互作对玉米苗期若干生理指标和产量的影响

Fig.1 Effect of interaction between sowing date and varieties on several stress index and yield

3 结论与讨论

生物或非生物胁迫会使植物产生过多的活性氧物质,造成细胞膜和细胞器不同程度的损伤^[5,6]。低温下发生的膜脂过氧化(MDA)作用,也是破坏膜系统的一个较重要因素。作物抗冷性与MDA含量变化呈负相关^[7],品种抗冷性越强,其MDA含量越小;品种抗冷性越弱,其MDA含量越高。MDA含量变化可作为鉴定作物抗冷性的主要生理指标之一^[8]。大量研究报道,植物的抗寒性与其细胞内抗氧化酶活性有关,抗寒性强的植物抗氧化能力比抗寒性弱的植物强^[9~13]。玉米体内许多酶类参与光合和呼吸两种作用,能反映低温影响下代谢功能的变化情况,因此,以抗氧化酶的活性作为玉米耐冷性的鉴定指标被许多学者接受。相关研究表明,植物在低温胁迫下可溶性蛋白含量会增加,有利于提高抗寒性^[14~17]。在寒冷胁迫下,所有植物组织中的可溶性糖含量都会升高,这是一个普遍现象^[18~20]。抗寒能力强的植物可溶性糖含量高,且与抗寒能力呈显著正相关,可溶性糖含量常被作为重要的抗寒生理指标^[21,22]。国外学者研究表明,玉米低温胁迫下ABA含量升高^[23,24]。Janowiak等^[25,26]通过分析20个耐冷性具有明显差异的玉米品种在低温处理下ABA含量变化,发现耐冷品种ABA积累量明显比冷敏感品种快,在田间自然低温条件下也得到一致结论。国内学者研究认为,玉米体内ABA含量变化与玉米品种间耐冷性的差异密切相关^[27,28]。也有采用激素比值作为内源激素平衡指标评价抗寒性。正常情况下植物体内激素含量极低,以内源激素含量的高低作为玉米耐冷性鉴定指标的研究相对较少。

玉米的耐寒性是受加性-显性效应控制^[29,30]。对自交系和杂交种的研究发现,发芽率和苗期生长活力的遗传调控符合加性-显性模型,而在萌发出苗和苗期的耐寒性是受不同遗传因子控制。萌发和苗期评价指标的高低不能反映玉米耐寒协调能力的差异。事实上,低温胁迫时,玉米生理指标的变化最终都以影响产量和品质变化为结果。

播期、品种对玉米苗期MDA、SOD、POD、可溶性蛋白质、可溶性糖、GA₃/ABA、产量影响效果差异显著($p<0.05$),仅产量互作不显著,其他指标显著。在分期早播创造的自然低温逆境下,膜脂过氧化作用产物MDA增加、保护酶系统SOD、POD活性下降、细胞渗透压调节物质可溶性蛋白质降低、可溶性糖升高,内源激素GA₃/ABA比值降低,玉米苗期生理活性都受到不同程度的影响,产量相对适宜播期减产

5.89%。不同基因型玉米的生理指标变化存在显著差异($p<0.05$)。品种与播期互作显著影响玉米苗期生理酶活性及内源激素的平衡,可能是品种对低温播种的生理响应结果;互作影响产量结果不显著,可能是后期生长的“补偿效应”作用,说明主栽玉米品种适应性较强。对试验的品种抗寒性进行排序为郑单958>京单28>先玉335>德美亚2号>绥玉7。

参考文献:

- [1] Saltveit M E, Morris L L. Overview on chilling injury of horticultural crops[M]. Chilling injury of horticultural crops. Boca Raton, FL: CRC Press, 1990:3-52.
- [2] Agarwal P K, Agarwal P, Reddy M K, et al. Role of DREB transcription factors in abiotic and biotic stress tolerance in plants[J]. Plant Cell Rep, 2006(25): 1263-1274.
- [3] Xiong L M, Schumaker K S, Zhu J K. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. Plant Cell, 2002(14): 165-183.
- [4] 王绍武, 马树庆, 陈莉, 等. 低温冷害[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [5] Mittler R, Vanderauwera S, Suzuki N, et al. ROS signaling: the new wave[J]. Trends Plant Sci., 2011, 16(6): 300-309.
- [6] Mittler R, Vanderauwera S, Gollery M, et al. Reactive oxygen gene network of plants[J]. Trends Plant Sci., 2004, 9(10): 490-498.
- [7] 王淑杰, 王家民, 李亚东, 等. 可溶性全蛋白、可溶性糖含量与葡萄抗寒性关系的研究[J]. 北方园艺, 1996(107): 13-14. Wang S J, Wang J M, Li Y D, et al. Research on relationship between cold-resistance and soluble protein and sugar of grape[J]. Northern horticulture, 1996(107): 13-14. (in Chinese)
- [8] 张中华, 杨建平, 陈圣栋, 等. 低温胁迫对韭菜膜透性及保护酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2006, 15(2): 124-127. Zhang Z H, Yang J P, Chen S D, et al. Effect of low temperature stress on protective enzyme activity and membrane permeability in Chinese chives[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(2): 124-127. (in Chinese)
- [9] Reena G P, Mulpuri V R, Copinadhan P, et al. Changes in activities of antioxidant enzymes and heir to genetic and paclobutrazol-induced chilling tolerance of maize seedlings[J]. Plant relationship Physiol, 1997, 114(2): 695-704.
- [10] 张毅, 顾蔚连, 戴俊英, 等. 低温对玉米幼苗超氧化物歧化酶活性和膜脂过氧化作用的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1992, 23(2): 140-142. Zhang Y, Gu W L, Dai J Y, et al. Effect of low temperature on protective enzyme activity and membrane permeability in maize seedlings[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1992, 23(2): 140-142. (in Chinese)
- [11] 高灿红, 胡晋, 郑均晔, 等. 玉米幼苗抗氧化酶活性、脯氨酸含量变化及与其耐寒性的关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1045-1050. Gao C H, Hu J, Zheng J Y, et al. Antioxidant enzyme activities and proline content in maize seedling and their relationships to cold endurance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 1045-1050. (in Chinese)
- [12] Sreenivasulu N, Grimm B, Wobus U et al. Differential response of

- antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. *Physiol Plant*, 2000, 109: 435–442.
- [13] Fridovich I. Biological effects of the superoxide radical anion [J]. *Biochem Biophys*, 1986, 247: 1–11.
- [14] 黄国存, 崔四平, 张寒霜, 等. 对冀承单3号玉米品种抗冷性生理基础的研究初探[J]. *中国农学通报*, 1994, 10(6): 6–8.
- Huang G C, Cui S P, Zhang H S, et al. Preliminary study on physiological basis of cold resistance of maize hybrid Jichengdan 3[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 1994, 10(6): 6–8. (in Chinese)
- [15] 栗淑媛, 马华山, 王俊琴, 等. 低温对螺旋藻可溶性蛋白和游离氨基酸外渗的影响[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(6): 1195–1198.
- Li S Y, Ma H S, Wang J Q, et al. Effect of low temperature on the exosmosis of soluble protein and free amino acid from *Spirulina* (*Arthrospira*) [J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2005, 25(6): 1195–1198. (in Chinese)
- [16] 徐广平, 何成新, 李先琨, 等. 园林植物桂花叶片矿质元素及生理特征对冬季异常低温的响应[J]. *核农学报*, 2013, 27(3): 365–372.
- Xu G P, He C X, Li X K, et al. Response of mineral elements and physiological characteristics in garden plants *osmanthus fragrans* leaves to unusual low temperature in winter[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(3): 365–372. (in Chinese)
- [17] 朱政, 蒋家月, 江昌俊, 等. 低温胁迫对茶树叶片SOD、可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(1): 24–26.
- Zhu Z, Jiang J Y, Jiang C J, et al. Effects of low temperature stress on SOD activity, soluble protein content and soluble sugar content in *Camellia sinensis* leaves[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011 38(1): 24–26. (in Chinese)
- [18] Hanson A A. Alfalfa and alfalfa improvement[M]. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc., 1988: 260–284.
- [19] Sasaki H, Ichimura K, Oda M. Changes in sugar content during cold acclimation and deacclimation of cabbage seedlings[J]. *Annals of Botany*, 1996, 78(3): 365–369.
- [20] Koster K L, Lynch D V. Solute Accumulation and compartmentation during the cold acclimation of puma rye[J]. *Plant Physiology*, 1992, 98(1): 108–113.
- [21] Olien C R. Preliminary classification of polysaccharide freezing inhibitors[J]. *Crop Sci.*, 1967, 7: 156.
- [22] 高志红, 章镇, 韩振海. 果梅种质枝条抗寒性鉴定[J]. *果树学报*, 2005, 22(6): 709–711.
- Gao Z H, Zhang Z, Han Z H. Identification of freezing resistance in Japanese apricot germplasm[J]. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(6): 709–711. (in Chinese)
- [23] Nayyar H, Bains T, Kumar S. Low temperature induced floral abortion in chickpea: Relationship with abscisic acid and cryoprotectants in reproductive organs[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53: 39–47.
- [24] Ristic Z, Yang G, Sterzinger A, et al. Higher chilling tolerance in maize is not always related to the ability for greater and faster abscisic acid accumulation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1998, 153: 154–162.
- [25] Janowiak F, Maas B, Dorffling K. Importance of abscisic acid for chilling tolerance of maize seedlings[J]. *J. Plant Physiol*, 2002, 159(6): 635–643.
- [26] Janowiak F, Luck E, Dorffling K. Chilling tolerance of maize seedlings in the field during cold periods in spring is related to chilling-induced increase in abscisic acid level[J]. *J. Agron. Crop Sci.*, 2003, 189(3): 156–161.
- [27] 张雪峰, 胡滨, 金丹. 不同外源药剂预处理对低温胁迫下玉米种子萌发的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2011(4): 69–73, 80.
- Zhang X F, Hu B, Jin D. Effect of exogenous chemical substances pretreatment on maize seed germination under low temperature stress[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2011(4): 69–73, 80. (in Chinese)
- [28] 张雪峰. 低温胁迫对玉米种子萌发过程中内源激素含量变化的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2011, 42(2): 147–151.
- Zhang X F. Effect of endogenous hormones content changing on the chilling tolerance in maize seed germination[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2011 42(2): 147–151. (in Chinese)
- [29] McConnell R L, Gardner C O. Inheritance of several cold tolerance traits in corn[J]. *Crop Science*, 1979, 19(6): 847–852.
- [30] Revilla P, Malvar I R A, Carrea M E, et al. Inheritance of cold tolerance at emergence and during early season growth in maize[J]. *Crop Science*, 2000, 40(6): 1579–1585.

(责任编辑:姜媛媛)