

# 芽苗期低温对玉米生长的影响及抗逆栽培措施

晋鹏宇,赵鑫,赵丽晓,陶洪斌,王璞

(农业部作物栽培与耕作学重点实验室,中国农业大学农学与生物技术学院,北京 100193)

**摘要:**芽苗期低温冷害是影响玉米分布和稳产高产的制约因素之一,如何通过栽培技术措施提高玉米的抗寒性是玉米生产过程中亟待解决的问题。本研究综述了芽苗期低温对玉米生长形态和生理生化的影响,并对相关的抗逆栽培措施进行了介绍和评价,以期为抗低温栽培提供可行的思路。

**关键词:**玉米;低温;抗寒性;栽培技术

中图分类号:S513.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2012)增刊-0139-05

## Effects of Low Temperature at Germination and Seedling Stage on Maize Growth and Cultivation Technique for Alleviation

JIN Peng-yu, ZHAO Xin, ZHAO Li-xiao, TAO Hong-bin, WANG Pu

(Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Chilling at germination and seedling stage is one of restrictive factor for maize distribution and achieving high yield. Improving of chilling tolerance through cultivation technique measures played important roles in maize production. In this paper, we reviewed effects of chilling at germination and seedling stage on maize growth and internal physiology processes. Several management strategies to alleviate chilling stress were also proposed and evaluated in order to provide feasible regimes for chilling tolerance cultivation.

**Key words:** Maize; Low temperature; Chilling tolerance; Cultivation technique

我国主要玉米产区在东北和华北,收获面积约占全国玉米总面积的52%(中国农业年鉴,2010),其中45%左右的面积种植的是春玉米。东北和华北地区低温冷害发生频率较高,每隔3~5年有一次一般性的低温冷害,减产5%~15%;每5~10年有一次严重冷害,减产15%以上<sup>[1]</sup>。然而,玉米起源于南美,属于喜温、短日照植物,对温度要求较高。低温对玉米的影响分为延迟型和障碍型两类,前者发生在营养生长期,后者发生在开花授粉期<sup>[2]</sup>。由于玉米生殖器官的形成和发育过程对低温的反应不敏感,所以人们关注最多的是玉米延迟型低温冷害<sup>[2]</sup>;其中,生产中以芽苗期低温造成的减产最为常见<sup>[3]</sup>。并且,芽苗期温度过低也是限制玉米在高纬度、高海拔地区栽培的主要因素<sup>[4]</sup>。本研究重点就玉米的生长形态和生理生化的变化讨论芽期、苗

期低温对玉米的影响及其抗逆栽培措施。

## 1 芽苗期低温对玉米生长的影响

### 1.1 芽苗期低温与玉米幼苗建成

播种至出苗阶段遭遇低温,会出现种子发芽率、发芽势降低,出苗推迟、苗弱、瘦小等现象,且对植株功能叶片的生长有阻碍作用<sup>[3]</sup>。芽期低温主要影响种子的发芽过程。低温条件下,种子吸水膨胀的时间会延长,发芽速度极为缓慢,而且容易受土壤中细菌和真菌的侵害导致其腐烂,影响种子的发芽率,温度越低,种子萌动的速度越慢,所需时间越长;而温度越高,萌动的速度越快,所需时间越短<sup>[5]</sup>。玉米种子发芽下限温度试验表明,≤5℃时,玉米种子不发芽,6℃开始发芽<sup>[6]</sup>。研究表明,温度低于17.5℃,春玉米种子发芽势、发芽率和活力指数均显著降低;温

收稿日期:2012-08-15

基金项目:国家“973”项目(2009CB118602);国家玉米产业技术体系(CARS-02)

作者简介:晋鹏宇(1989-),男,山西大同人,在读硕士,主要从事玉米高产高效栽培方面的研究。

通讯作者:王璞(1957-),男,山西朔州人,教授,博士生导师,主要从事作物高产与资源高效利用研究。

度在 20.0 ~ 25.0℃ 范围内,玉米种子发芽势、发芽率和活力指数较低;温度在 25.0 ~ 32.5℃ 范围内,玉米种子发芽各项指标较高<sup>[7]</sup>。不同玉米品种在低温下的发芽能力差异显著,基因型在很大程度上决定着种子发芽过程的耐冷性<sup>[8-9]</sup>。早、中、晚熟 3 个玉米品种发芽试验结果表明,低温抑制了种子发芽,降低了发芽能力;3 个品种发芽的临界温度为 3.2 ~ 5.2℃,发芽临界温度愈低,种子的耐低温发芽能力愈强<sup>[7]</sup>。李俊明等<sup>[10]</sup>研究了 8 个玉米自交系在 6 月 11 日 28℃ 黑暗条件下的发芽率和发芽指数,得出各自自交系的发芽临界温度为 5.26 ~ 7.78℃,且不同玉米自交系低温下的发芽能力有显著差异,发芽临界温度可以对苗期耐冷性做出可靠估计。

综上所述,低温抑制了种子的发芽。温度愈低,发芽率愈低,不同基因型的玉米对低温的抗性不同。因此,通过品种的选择或转基因<sup>[11]</sup>的手段有助于提高玉米的抗寒性。

玉米幼苗期也易受低温的危害。首先,低温影响玉米的出苗和叶片形态。研究表明,玉米在低温条件下,出苗时间显著增长,最长出苗时间为 35 d,这时,大部分玉米种子已腐败变质,失去生活力;当温度处于 22.5 ~ 25.0℃ 时,玉米正常出苗,温度高于 27.5℃ 时,玉米出苗速度加快<sup>[12]</sup>。并且,玉米苗期低温会造成植株高度降低,叶片数减少,功能叶的有效叶面积减小<sup>[13-14]</sup>。高素华等<sup>[15]</sup>研究结果显示,10℃ 低温处理的幼苗叶龄分别比对照减小 21.8% 和 18.5%,心叶相对生长速率分别降低 33% 和 27%。以上结果均说明苗期低温对植株功能叶片的生长有阻碍作用。其次,低温胁迫下玉米的根系形态也会发生较大的变化。根尖的生长活动以及侧根的形成共同组成了根系结构<sup>[16]</sup>,根际温度严重影响玉米根尖的生长,从 22 ~ 13℃ 范围内随着温度的降低,玉米主根根长呈线性递减<sup>[17]</sup>。随着温度的降低,植株侧根数量呈梯度递减的趋势<sup>[17]</sup>。另外,苗期低温胁迫下,玉米植株的根表面积、根体积和总根长均明显低于对照<sup>[18-19]</sup>,但不同品种玉米的总根长和侧根长对温度的反应程度存在明显差异<sup>[19]</sup>。

以上结果表明,低温除延迟玉米出苗外,对幼苗的株高、叶龄、心叶相对速率均有明显的负作用。低温还影响玉米的根系形态,从而影响植株的吸水,进而造成次生干旱<sup>[4,20]</sup>。

## 1.2 芽苗期低温与玉米体内生理生化过程

芽苗期低温除影响玉米幼苗形态外,其生理生化过程也会受到严重的干扰。低温可以影响幼苗光反应和暗反应过程,从而使其光合作用受阻。首先,

叶绿素存在是光反应的必要条件,承担着对光能的吸收、传递、转化作用。低温降低叶绿素含量,尤其是正在发育和接近发育成熟的叶片,其叶绿素的含量对低温的反应比较敏感,低温明显降低叶片的光合作用,温度越低,下降的幅度也越大<sup>[21]</sup>。低温下叶绿素含量降低的可能原因是低温下 SOD 等保护酶的活性、含量降低,无法保护叶绿素不受自由基伤害,使含量降低。其次,光系统 I 和光系统 II 共同组成植物的光合电子传递链。任一光系统的损伤都会阻碍光能的传递。有研究表明,植物受低温冷害,光系统 I 最先受到攻击,光系统 I 的破坏使光合电子传递链相关产物积累,进而对光系统 II 产生毒害作用,同时破坏类囊体内的叶绿素<sup>[22]</sup>。此外,作为暗反应的一个过程,CO<sub>2</sub> 的固定也会受到低温胁迫的影响。East 等<sup>[23]</sup>将玉米幼苗在 10℃ 或更低温度下处理,结果表明,光饱和点及 CO<sub>2</sub> 固定速率迅速下降。其主要原因可能是低温引起气孔关闭,使得胞间 CO<sub>2</sub> 浓度降低或者是低温诱导有关酶的活性降低。

低温对玉米的呼吸作用同样有影响<sup>[24]</sup>。通过对 6℃ 低温下玉米生长幼苗的线粒体功能和结构进行考查,结果表明,随着低温处理时间的加长,线粒体呼吸功能逐渐下降,结构损伤逐渐加重<sup>[25]</sup>。

低温也会引起玉米幼苗叶细胞透性发生变化,透性变化大小受外界低温的强度和作用时间的长短,以及不同品种耐低温的能力而定<sup>[26]</sup>。肖永璐<sup>[27]</sup>的研究表明,在一定的低温条件下,耐冷性与细胞耐脱水力成正相关,与叶片萎蔫度成负相关;叶片萎蔫度与细胞内的电解质和钾离子的外渗率成正相关。

低温下,根系吸水能力降低,水和矿质元素的吸收量减少<sup>[18]</sup>。10℃ 以下,低温能强烈抑制根对离子的吸收<sup>[24]</sup>。品种之间低温胁迫下维持根系功能方面能力的不同与细胞膜的物理性质差别有关。低温对水分代谢以及矿质离子吸收影响的内在机制是通过低温诱导对根系产生作用,使根生长区肿大、根轴变厚、侧根数目和分支减少、根长度变短以及导水率降低,进而对水分和离子的吸收产生抑制作用<sup>[28]</sup>。

低温胁迫能够诱导玉米的抗氧化酶系统发生变化。据报道,三叶期低温胁迫下,不同玉米品种过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性均呈现先升后降的变化趋势,下降速度与品种本身抗寒性强弱有关<sup>[29]</sup>。相关研究表明,叶片中过氧化物酶的活性随冷害的加重而降低<sup>[30]</sup>。不同品种(系)冷敏性不同的部分原因是抗氧化酶系统的差异,因此,低温诱导下 SOD、APX、GR 等抗氧化酶的变化及其内在机制也

是研究的热点<sup>[31]</sup>。有研究表明,抗氧化酶对低温的反应主要取决于基因型,低温胁迫下植物的损伤情况以及耐低温持久力都可以表现出这些酶的活性<sup>[32]</sup>。因此,低温下抗氧化酶活力的不同可以作为抗寒性品种选择的一个参考指标。

低温还会引起植物体内 ABA 和一些小分子调节物质含量的变化。Janowiak 等<sup>[20]</sup>发现高的抗寒性与植株内 ABA 的快速大量积累有关,ABA 是由低温胁迫直接诱导产生变化的。另有研究表明,低温处理后的叶水分含量大多比未经低温处理的叶高,说明 ABA 的增加并不能归因于低温诱导的水分亏缺<sup>[4]</sup>。Aroca 等<sup>[33]</sup>也证实了这一观点,低温胁迫下叶片中 ABA 含量的上升与叶片中的水分状况并无直接联系,因而它必然是由低温直接诱导的,玉米的抗寒性与积累 ABA 作为保护剂的能力有关<sup>[34]</sup>。低温胁迫下,抗性基因型中 ABA 水平的增加通过调控基因表达,诱导蛋白质或酶的合成来增加膜的稳定性、根系导水率,同时,促进气孔关闭,缓解氧化胁迫进而提高抗寒性<sup>[28]</sup>。高素华等<sup>[15]</sup>通过低温处理玉米三叶期幼苗发现,幼苗脯氨酸含量明显增加,电导率提高,可溶性蛋白含量随着低温处理时间的延长先增加后减少。低温下电导率及脯氨酸含量的升高一方面反映玉米幼苗受到了低温的伤害,另一方面也揭示了植物本身通过代谢调节适应胁迫环境,以减轻受害程度。

综上所述,低温胁迫会对玉米的光合作用、呼吸作用、组织活性、酶活性以及物质代谢产生一定的影响,不同冷敏性的品种(系),其变化差异较为显著,因此,生产上可以选择抗寒性强的品种。

## 2 抗低温栽培措施

### 2.1 选用抗低温品种

作物的不同品种在低温下的发芽能力有显著差异,基因型在更大程度上决定了种子萌发过程中的耐低温能力<sup>[35]</sup>。因此,选用抗冷性强的品种进行早播,充分利用早春的空闲积温,是抵御低温冷害、促进早熟高产的重要措施。

根据 5, 10℃ 低温对各品种种子萌发的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数的综合变化,郑单 958 和吉单 415 为萌发期耐低温强的品种,铁单 18 和辽单 632 为耐低温差的品种<sup>[36]</sup>。低温处理后,辽单 565 的发芽率降幅最低,仅为 5.34%,其次是龙单 13 和中地 77,降幅分别为 5.67% 和 7%,表明这 3 个玉米品种的抗冷性较强,适合在黑龙江等冷害频繁的地区播种<sup>[5]</sup>。

### 2.2 地膜覆盖

地膜覆盖栽培技术是应对低温胁迫的一项颇为有效的措施,它主要通过增加地温,促进土壤微生物活动,提高肥料利用率,改善土壤理化性质等促进根系生长,加快出苗速度进而消除低温胁迫造成的不利影响。

马树庆等<sup>[37]</sup>通过在吉林东部开展玉米地膜覆盖栽培试验,进行了农田小气候、玉米生长发育和产量对比观测。结果表明,该项技术使播种至营养生长期耕层地温晴天提升 3~5℃,阴、雨天气提升 1~2℃;可增加积温 180℃/d 以上。Ramakrishna 等<sup>[38]</sup>研究表明,聚乙烯薄膜覆盖可以使 5 cm 深的土层温度提高约 6℃,10 cm 深的土层温度提高约 4℃。说明地膜覆盖可以在一定程度上缓解低温胁迫带来的危害。

然而,地膜覆盖栽培技术仍存在一系列的问题,如膜回收率低造成农业污染,易引起早衰、烧苗等,这在一定程度上也促进了可降解地膜的推广和应用。

### 2.3 化学处理

随着人们对玉米低温胁迫反应机理的不断深入研究和认识,单纯地依靠改善外部环境来抵御低温已经远远不够。如何对症下药,从根本上解决低温胁迫产生的危害,需要从植物自身出发。化学处理能通过对植物体内物质和代谢的调节达到这一目的,使植物产生抗寒性以适应外界环境胁迫。目前,使用较为普遍和有效的化学物质主要有以下几种:可溶性物质甜菜碱、脯氨酸等,植物激素多胺、水杨酸、ABA 等,氯化钙、氯化钾等。

甜菜碱在低温上的应用相对较早,应用也较为广泛。外施甜菜碱可提高低温下玉米叶片中与 C4 途径相关的丙酮酸磷酸二激酶的活性及减轻膜脂过氧化程度,从而起到抗寒的作用<sup>[39]</sup>。Farooq 等<sup>[40]</sup>研究发现,用 100 mg/L 的甜菜碱处理玉米种子可以显著提高其在低温胁迫下的发芽率,增加根的长度、幼苗高度、幼苗的鲜质量和干质量,增大叶片数和根数,增加相对含水量、可溶性糖含量,提高 α-淀粉酶以及抗氧化物质的活性。

多胺是一类含有 2 个或更多氨基的化合物,最普遍且有重要生理功能的多胺有腐胺、尸胺、亚精胺、精胺等。多胺可能是通过维持膜结构和功能的稳定性来增加植物的抗寒性,其内在的作用机制还不甚清楚。不同种类的多胺作用于不同基因型的玉米产生的效果也不尽相同。郑昫晔等<sup>[41]</sup>以玉米耐寒自交系黄 C 和低温敏感自交系 Mo17 为材料,研

究了亚精胺(Spd)和精胺(Spm)引发对玉米种子吸胀中的耐冷性和种子发芽能力的影响。结果表明,Spd和Spm处理能提高玉米种子吸胀期间的耐冷性,提高低温胁迫下种子发芽能力。

KCl和CaCl<sub>2</sub>在低温抗逆栽培应用中也占据重要的地位。Farooq等<sup>[42]</sup>研究表明,KCl处理玉米杂交种显著提高其抗寒性,主要由于提高低温条件下SOD、CAT、APX的活性,同时还提高出苗率和加快出苗时间,以及根长度、幼苗高度、幼苗干物质量的增加,提高相对含水量和质膜稳定性;100 mg/L KCl的处理能起到最好的效果。CaCl<sub>2</sub>也能起到相同的作用<sup>[43]</sup>。

此外,相关研究表明,肌醇、水杨酸(SA)、聚糖萘合剂(PKN)处理后也可以提高玉米幼苗的抗寒性<sup>[44-46]</sup>。

#### 2.4 合理施肥

作物的正常生长发育离不开肥料的供应,而且合理的施肥也能起到抵抗不良环境的作用。邹国元等<sup>[47]</sup>研究表明,低温胁迫下,适施钾肥有利于质膜透性保持在较低水平,同时,明显降低萎蔫率,增强抗冷性。陈兵兵等<sup>[48]</sup>研究结果表明,低温胁迫下且氮肥含量固定时,施用P肥,超氧化物歧化酶(SOD)的活性逐渐增强,细胞膜透性降低,干物质量增加;施用K肥可以降低电解质的平均渗出率,提高可溶性糖含量;而Si肥能提高叶绿素含量,降低绝对电解质渗出量。从而得出不同用量的磷肥、钾肥和硅肥对玉米可以起到抗寒作用。这项措施较为简单、可操作性高,同时成本低廉,较利于大田的广泛使用。

此外,播期调整、起垄种植、育苗移栽等措施也常用来抵御低温胁迫。

由于受到环境的复杂多变,不同品种的生理反应不同以及药剂适宜浓度和喷施时期的不确定等众多因素的影响,因此,低温抗逆栽培应通过几种合理的措施综合施用,单一的措施往往只能对单方面起作用,甚至会产生一定的副作用,合理手段的搭配是关键。

新措施的产生和应用往往是基于一定生理机制方面的研究,因而应当深入到分子方面研究其内在机理,进一步探究玉米对低温胁迫的反应机制,从而寻找有利有效的措施提高玉米的抗寒性。

#### 参考文献:

[1] 中华人民共和国农业部,中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2011:218,

221.

- [2] 王绍武,马树庆,陈莉,等. 低温冷害[M]. 北京:气象出版社,2009:30.
- [3] 宋凤斌,王晓波,等. 玉米非生物逆境生理生态[M]. 北京:科学出版社,2005:134.
- [4] Janowiak F,Luck E,Dörffling 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 Agronomy & Crop Science 2003,189:156-161.
- [5] 李北齐,张玉胡,王贵强. 不同生态型玉米品种低温下出苗机理研究[J]. 中国农学通报,2011,27(9):120-125.
- [6] 龚文娟,赵洪凯. 低温冷害对玉米生长发育的影响[J]. 黑龙江农业科学,1982(5):27-30.
- [7] 高素华,郭建平,王连敏,等. 低温对玉米种子发芽的影响[J]. 气象,1998,24(5):52-55.
- [8] Janowiak F,Markowski A. Effect of chilling on germination growth survival and membrane permeability in seedlings of different breeding forms of maize (*Zea mays* L.) [J]. Acta Physiologiae Plantarum,1987,9(2):77-87.
- [9] 宋凤斌,王晓波,等. 玉米非生物逆境生理生态[M]. 北京:科学出版社,2005:135.
- [10] 李俊明,耿庆汉. 玉米种子的低温发芽临界温度研究[J]. 种子,1989(4):22-24.
- [11] PóL M,NAGY E. Chilling tolerance of maize [J]. Acta Agronomica Hungarica 2002,50(1):95-106.
- [12] 王洪刚,李丹,李杨. 温度对玉米种子发芽及苗期生长的影响[J]. 黑龙江农业科学,2008(1):37-39.
- [13] 余肇福,高妙贞,杨志伟. 玉米冷害的关键期及生育不良型冷害[J]. 东北农学院学报,1985(3):46-52.
- [14] 宋立泉. 低温对玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学,1997,3(5):58-60.
- [15] 高素华,郭建平,张国民,等. 低温对玉米幼苗生理反应的影响[J]. 应用气象学报,1999,10(2):238-242.
- [16] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiology,1995(109):7-13.
- [17] Nagel K A,Kastenholz B,Jahnke S,et al. Temperature responses of roots: impact on growth,root system architecture and implications for phenotyping [J]. Functional Plant Biology 2009(36):947-959.
- [18] 曹宁符,力,张玉斌,等. 低温对玉米苗期根系生长及磷养分吸收的影响[J]. 玉米科学,2008,16(4):58-60.
- [19] 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.
- [20] Janowiak F,Dörffling K. Chilling of maize seedlings:

- changes in water status and abscisic acid content in ten genotypes differing in chilling tolerance [J]. *J Plant Physiol* ,1996( 147) : 582 – 588.
- [21] 王连敏,王立志,张国民. 苗期低温对玉米体内脯氨酸、电导率及光合作用的影响[J]. *中国农业气象* , 1999 20( 2) : 28 – 30.
- [22] Tjus S E ,Moller B L. Photosystem I is an early target of photoinhibition in barley illuminated at chilling temperatures [J]. *Plant Physiol* ,1998( 116) : 755 – 764.
- [23] Long S P ,East T M ,Baker N R. Chilling damage to photosynthesis in young *Zea mays* L. Effects of light and temperature variation on photosynthetic carbon dioxide assimilation [J]. *Journal of Experimental Botany* ,1983 34( 139) : 177 – 188.
- [24] Carey R W ,Berry J A. Effects of low temperature on respiration and uptake of rubidium ions by excised barley and corn roots [J]. *Plant Physiol* ,1978( 61) : 858 – 860.
- [25] 高吉寅. 低温对玉米幼苗线粒体功能与结构的影响[J]. *中国农业科学* ,1984( 1) : 32 – 35.
- [26] 肖永瑚,郭法申. 低温对玉米幼苗细胞膜透性变化的研究[J]. *吉林农业科学* ,1981( 4) : 32 – 37.
- [27] 肖永瑚. 玉米不同生育期耐冷性研究[J]. *作物学报* , 1984 10( 1) : 41 – 49.
- [28] Farooq M ,Aziz T ,Wahid A ,*et al.* Chilling tolerance in maize: agronomic and physiological approaches [J]. *Crop & Pasture Science* 2009( 60) : 501 – 516.
- [29] 马凤鸣,王瑞,石振. 低温胁迫对玉米幼苗某些生理指标的影响[J]. *作物杂志* 2007( 5) : 41 – 45.
- [30] 张金龙,周有佳,胡敏,等. 低温胁迫对玉米幼苗抗冷性的影响初探[J]. *东北农业大学学报* ,2004 35( 2) : 129 – 134.
- [31] Aroca R ,Irigoyen J J ,Sánchez-Díaz M. Photosynthetic characteristics and protective mechanisms against oxidative stress during chilling and subsequent recovery in two maize varieties differing in chilling sensitivity [J]. *Plant Science* 2001( 161) : 719 – 726.
- [32] Kočov M ,Hol D ,Wilhelmov N ,*et al.* The influence of low-temperature on the photochemical activity of chloroplasts and activity of antioxidant enzymes in maize leaves [J]. *Biologia Plantarum* ,2009 53( 3) : 475 – 483.
- [33] Aroca R ,Vernieri P ,Irigoyen J J ,*et al.* Involvement of abscisic acid in leaf and root of maize (*Zea mays* L.) in avoiding chilling-induced water stress [J]. *Plant Science* 2003( 165) : 671 – 679.
- [34] Janowiak F ,Maas B ,Dörffling K. Importance of abscisic acid for chilling tolerance of maize seedlings [J]. *J Plant Physiol* 2002( 159) : 635 – 643.
- [35] Haskell G ,Singleton W R. Use of controlled low temperature in evaluating the cold hardiness of inbred and hybrid maize [J]. *J Am Soc Agron* ,1949( 41) : 34 – 40.
- [36] 张雪峰,张立军,胡滨. 玉米萌发期种子耐低温鉴定指标的筛选[J]. *辽宁农业科学* 2011( 1) : 25 – 30.
- [37] 马树庆,王琪,王春乙,等. 地膜覆盖栽培防御东北玉米冷害和霜冻试验[J]. *自然灾害学报* ,2004 13( 3) : 133 – 137.
- [38] Ramakrishna A ,Tamb H M ,Wani S P ,*et al.* Effect of mulch on soil temperature ,moisture ,weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam [J]. *Field Crops Research* 2006( 95) : 115 – 125.
- [39] Krall J B ,Edwards G E ,Andreo C S. Protection of puruvate Pi dikinase from maize against cold lability by compatible solutes [J]. *Plant Physiol* ,1989( 89) : 280 – 285.
- [40] Farooq M ,Aziz T ,Hussain M ,*et al.* Glycinebetaine improves chilling tolerance in hybrid maize [J]. *J Agronomy & Crop Science* 2008( 194) : 152 – 160.
- [41] 郑昀晔,曹栋栋,张胜,等. 多胺对玉米种子吸胀期间耐冷性和种子发芽能力的影响[J]. *作物学报* , 2008 34( 2) : 261 – 267.
- [42] Farooq M ,Aziz T ,Cheema Z A ,*et al.* Activation of antioxidant system by KCl improves the chilling tolerance in hybrid maize [J]. *J Agronomy & Crop Science* 2008 ( 194) : 438 – 448.
- [43] Farooq M ,Aziz T ,Basra S M A ,*et al.* Exploring the role of Calcium to improve chilling tolerance in hybrid maize [J]. *J Agronomy & Crop Science* ,2008( 194) : 350 – 359.
- [44] 由继红,杨文杰,李晓玲. 肌醇对玉米幼苗抗寒性的影响[J]. *东北师大学报: 自然科学版* ,2000 32( 3) : 44 – 46.
- [45] 徐田军,董志强,兰宏亮,等. 低温胁迫下聚糖萘合剂对玉米幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20111107.1046.005.html>.
- [46] Janda T ,Szalai G ,Tari I ,*et al.* Hydroponic treatment with salicylic acid decreases the effects of chilling injury in maize (*Zea mays* L.) plants [J]. *Planta* ,1999 ( 208) : 175 – 180.
- [47] 邹国元,杨志福,李晓林. 钾对玉米苗期抗冷性的影响[J]. *植物营养与肥料学报* ,1998 4( 2) : 165 – 169.
- [48] 陈兵兵,石元亮,陈智文. 不同 P、K、Si 肥对玉米苗期抗寒效果的研究[J]. *中国农学通报* 2011 27( 3) : 85 – 89.