

## 5份春大豆苗期耐低温性的鉴定及评价

田鑫<sup>1</sup>, 何小玲<sup>1</sup>, 顾卫红<sup>2</sup>, 麻浩<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学 农学院/作物遗传与种质创新国家重点实验室, 江苏 南京 210095; 2. 上海市农业科学院 园艺研究所, 上海 201106)

**摘要:** 低温胁迫严重影响春大豆发芽、幼苗生长和发育。为建立耐低温种质的筛选方法, 以5份春大豆种质为材料, 测定和评价了幼苗在响应低温胁迫生理生化指标上的差异。结果表明: 5份种质在响应胁迫的生理生化指标上存在明显差异, 其中骨粒青较耐低温、南农513不耐低温, 而且耐低温种质在抗氧化胁迫、光合作用及细胞膜的稳定性上优于不耐低温种质。抗氧化酶活性、光合速率及光响应曲线能够判断耐低温种质; 相对电导率、丙二醛含量能够判断不耐低温种质。

**关键词:** 大豆; 低温胁迫; 生理生化指标; 评价

**中图分类号:** S565.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-9841(2013)06-0755-08

## Identification and Evaluation of Seedling Cold Tolerance of Five Spring Soybean Germplasms

TIAN Xin<sup>1</sup>, HE Xiao-ling<sup>1</sup>, GU Wei-hong<sup>2</sup>, MA Hao<sup>1</sup>

(1. Agronomy College of Nanjing Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Nanjing 210095, China; 2. Horticultural Research Institute of Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106, China)

**Abstract:** Cold stress adversely affects seed germination and seedling growth of spring soybean in South China. In this study, the biophysiological and biochemical indexes of seedlings of 5 spring soybean germplasms under cold stress were determined, aiming to establish the method for evaluating and screening cold tolerance germplasms. The results indicated that there were significant differences in biophysiological and biochemical responses to cold stress among the 5 germplasms. Guliquing was cold tolerant, while Nannong 513 cold sensitive. The cold tolerance germplasms were better in oxidation resistance, photosynthesis and stability of cell membrane than the cold sensitive germplasms. Antioxidase activity, photosynthesis rate and light response curve could be used as the indexes for screening cold tolerant germplasms, while relative conductivity and MDA content as the indexes for determining cold sensitive germplasms.

**Key words:** Soybean; Cold stress; Biophysiological and biochemical index; Evaluation

中国南方春大豆在早春常常会遭受低温胁迫, 影响其出芽和幼苗生长发育, 进而降低其产量和经济价值<sup>[1-2]</sup>。因此, 对春大豆低温耐受性进行鉴定及评价, 筛选低温耐受性不同的种质, 对春大豆耐低温育种具有重要意义。大多数豆科植物种子对低温具有不同程度的反应, 在基因型上有着明显的差异<sup>[3-4]</sup>。作物的耐低温性状受多基因控制, 具有数量遗传特性<sup>[5-6]</sup>, 近期研究发现大豆耐低温出苗性状由一对主基因加多基因控制<sup>[7]</sup>。大豆苗比根对低温更敏感, 相对发芽率、相对幼苗全长、相对地上部苗高、相对地上部苗干重、相对根干重、发芽势、萌发指数和活力指数均可作为萌发期耐低温的鉴定指标<sup>[8-10]</sup>。不同低温耐受性大豆在脱氢酶活性、腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)水平、电导率、丙二醛(MDA)含量上调水平、出苗快慢、幼苗存活率、叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、不同形态腐胺、束缚态亚精胺、精胺及PSI和

PSII的协调性等存在差异<sup>[11-15]</sup>; 而电导率、脯氨酸和可溶性糖的含量都升高<sup>[16]</sup>。目前大豆耐低温研究主要集中在东北的大豆材料<sup>[14, 8-9, 11, 13]</sup>, 对我国南方春大豆材料研究较少<sup>[14-15]</sup>, 也缺乏鉴定指标体系。为此, 以5个南方春大豆种质为材料, 研究其响应低温胁迫的生理生化差异, 以期对春大豆苗期耐低温种质选育建立一个可靠的筛选及评价体系。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料

供试南方春大豆种质为青酥2号、骨粒青、95-1、43#和南农513。除南农513来自于南京农业大学外, 其余材料均由上海市农业科学院提供。

#### 1.2 试验设计

种子经1% HgCl<sub>2</sub>消毒10 min后用蒸馏水漂洗3次, 播种于50穴黑色育苗穴盘中, 采用1:1(v/v)的花卉土、蛭石复合基质覆盖1 cm。培养条件

收稿日期: 2013-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(30971840, 31171572); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100097110030, 20120097110025); 上海市科委重点攻关项目(12391900900); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

第一作者简介: 田鑫(1983-), 男, 博士, 主要从事作物耐逆分子生物学研究。E-mail: tianxin\_china@live.com。

通讯作者: 麻浩(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事种子科学与大豆遗传育种研究。E-mail: Lq-ncsi@njau.edu.cn。

26℃/18℃(昼/夜),光周期 12 h/12 h(昼/夜),光强 30 000 lx,相对湿度 75%,每品种(系)30 株。第一片复叶完全展开时,一半幼苗在 5℃ 下处理 5 d,另一半幼苗作为对照。每天测定第一片复叶的叶绿素含量、SOD、POD、CAT 活性、相对电导率及 MDA 含量,共测 5 d。同时,测定 5℃ 低温处理 1,3,6,12,24,48,72,96,120 h 时第一片复叶中间叶的光合速率,测定光强为 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,7 次重复。并测定对照及低温处理 120 h 后的光响应曲线。

### 1.3 测定项目与方法

叶绿素相对含量使用日本 KONICA MINOLTA 公司的叶绿素测定仪 SPAD-502Plus 对第一片复叶中间的叶片进行测定,6 次重复。SOD、POD、CAT 活性、相对电导率、丙二醛含量的测定参照李合生<sup>[17]</sup>的方法。光合速率、光响应曲线采用美国 LICOR 公司的 LI-6400 便携式光合仪测定。

光响应曲线测定方法一:参照刘宇锋等<sup>[18]</sup>提出的方法使用 SPSS 20.0 对数据进行处理,光响应曲线有非直线双曲线模型如下:

$$P = \frac{\varphi Q + P_{\max} - \sqrt{(\varphi Q + P_{\max})^2 - 4\varphi Q P_{\max}}}{2k} - R_d$$

其中  $P$  为净光合速率, $\varphi$  为表观量子效率, $P_{\max}$  为最大净光合速率, $Q$  为光合有效辐射, $k$  为光响应曲线曲角, $R_d$  为暗呼吸速率。在非线性回归模块中输入测定数据,曲角( $k$ )、最大净光合速率( $P_{\max}$ )、表观量子效率( $Q$ )和暗呼吸速率( $R_d$ )的初始值分别为 0.5,13,0.05 和 3。设置参数的限制范围: $k \leq 1$ , $R_d \leq 5$ , $Q \geq 0$ , $Q \leq 0.125$ 。对于低温胁迫下的光响应拟合曲

线,调整  $k$ , $P_{\max}$ , $Q$  和  $R_d$  初始值为 0.5,4,0.05 和 1;约束条件为: $k \leq 1$ , $P_{\max} \leq 4$ , $Q \geq 0$ , $Q \leq 0.125$ 。

方法二:因刘宇锋的方法在  $X$  轴上不能取极值,为解决此问题,用叶子飘<sup>[19]</sup>提出的修正模型对曲线进行拟合,光响应曲线各指标计算公式如下:

$$P_n(I) = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} - R_d$$

$$LCP = \frac{\alpha - \gamma R_d - \sqrt{(\gamma R_d - \alpha)^2 - 4\alpha\beta R_d}}{2\alpha\beta}$$

$$LSP = \frac{\sqrt{(\beta + \gamma)/B} - 1}{\gamma}$$

$$P_{\max} = \alpha \left( \frac{\sqrt{\beta + \gamma} - \sqrt{\beta}}{\gamma} \right)^2 - R_d$$

通过 DPS 7.05 数学模型单因变量模型参数估计中的麦夸特法计算各参数并进行拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 春大豆种质幼苗生理指标对低温胁迫的响应

2.1.1 叶绿素相对含量 由图 1 可知,与对照相比,南农 513 及 43# 在低温胁迫第 1 天叶绿素含量较稳定,与对照差异不显著,之后极显著( $P < 0.01$ )低于对照。其他 3 个材料在低温胁迫的第 1 天叶绿素含量均极显著下降,而在后 4 d,青酥 2 号表现较好,在胁迫的第 4、5 天叶绿素含量略有升高,与对照相比差异也由极显著( $P < 0.01$ )变为显著( $P < 0.05$ );骨粒青上下波动;95-1 基本不变。因此低温胁迫下 5 个材料间叶绿素含量并没有表现种质间显著差异。

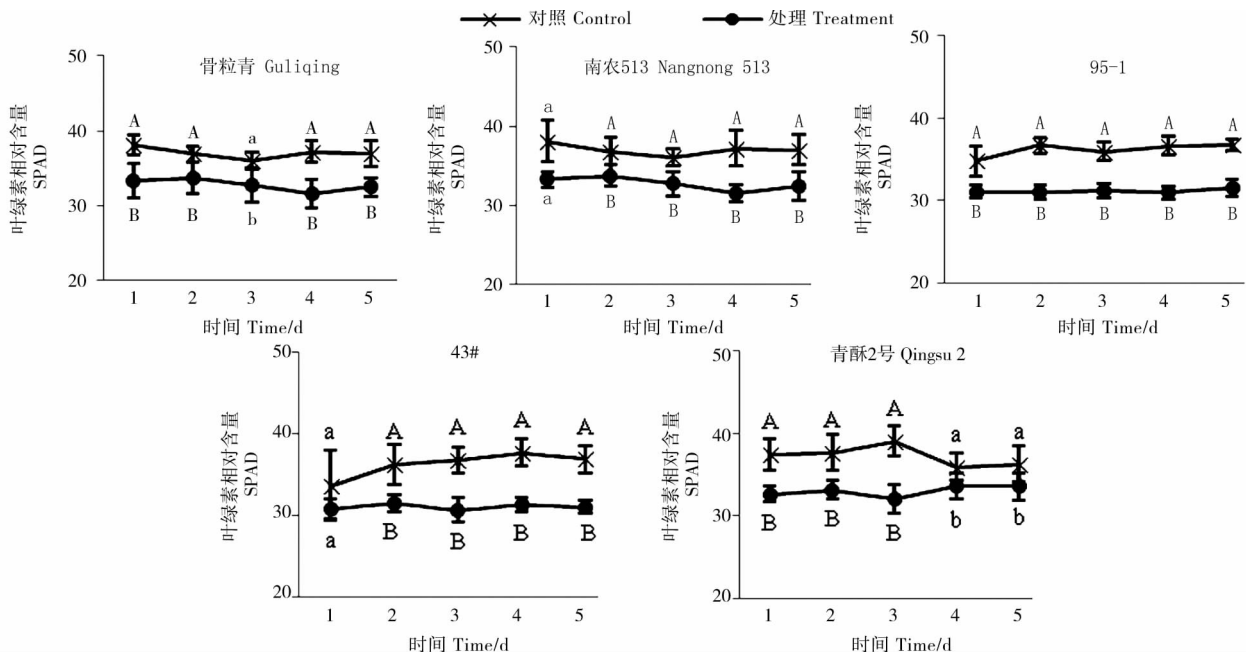


图 1 5 个种质在不同温度下的 SPAD 变化趋势

Fig. 1 Changing trends of the SPAD of 5 germplasms under cold stress

2.1.2 SOD、POD、CAT 活性 由图 2 可知,低温胁迫第 1 天,95-1 及 43#的 SOD 活性显著高于对照,之后变化趋势与对照相同,除 95-1 在胁迫第 3 天显著低于对照,43#在胁迫第 5 天极显著低于对照外,与对照差异不显著;青酥 2 号在低温胁迫第 1 天 SOD

活性显著( $P < 0.05$ ) 低于对照,之后与对照相比起伏变化,但差异不显著;低温胁迫下骨粒青及南农 513 的 SOD 活性与对照始终无显著( $P > 0.05$ ) 差异,表现较稳定。

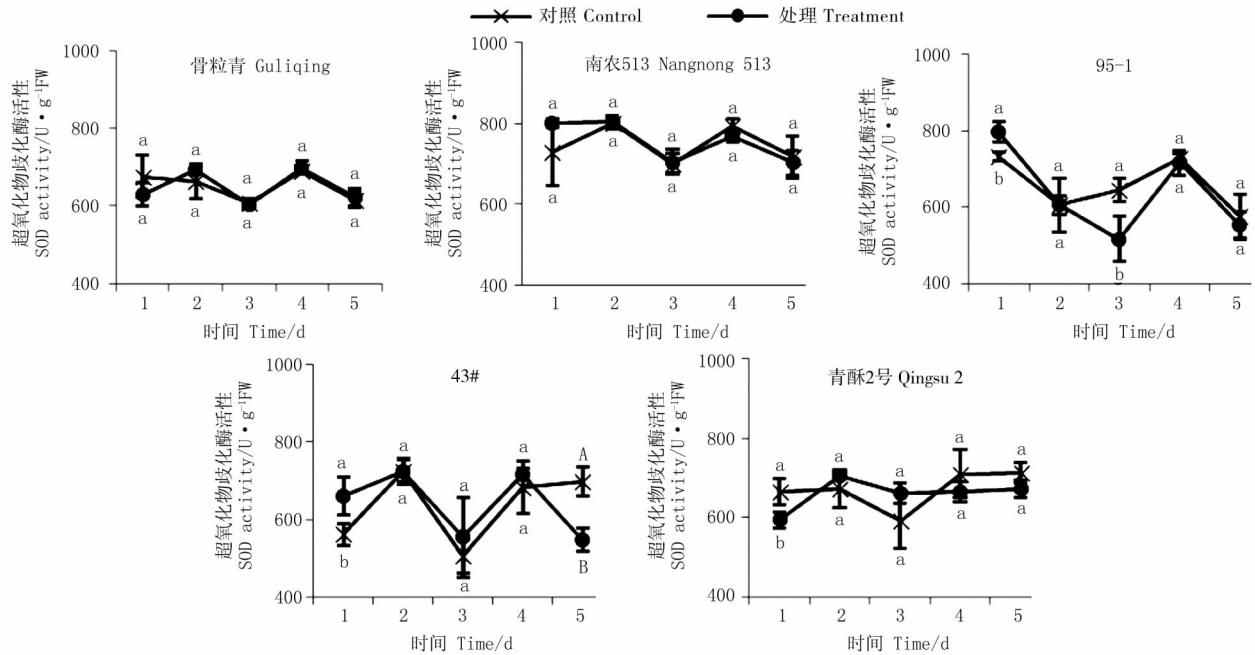


图 2 5 个种质在不同温度下的 SOD 活性变化趋势

Fig. 2 Changing trends of SOD activity of 5 germplasms under cold stress

低温胁迫下,南农 513 的 POD 活性与对照间始终无显著差异;骨粒青在第 5 天极显著( $P < 0.01$ ) 高于对照,青酥 2 号在第 2 天极显著( $P < 0.01$ ) 低于对照,43#在第 5 天极显著( $P < 0.01$ ) 低于对照,

95-1 POD 活性与对照相比变化较大,第 1 天显著高于对照,随着胁迫时间延长,POD 活性显著或极显著低于对照(图 3)。

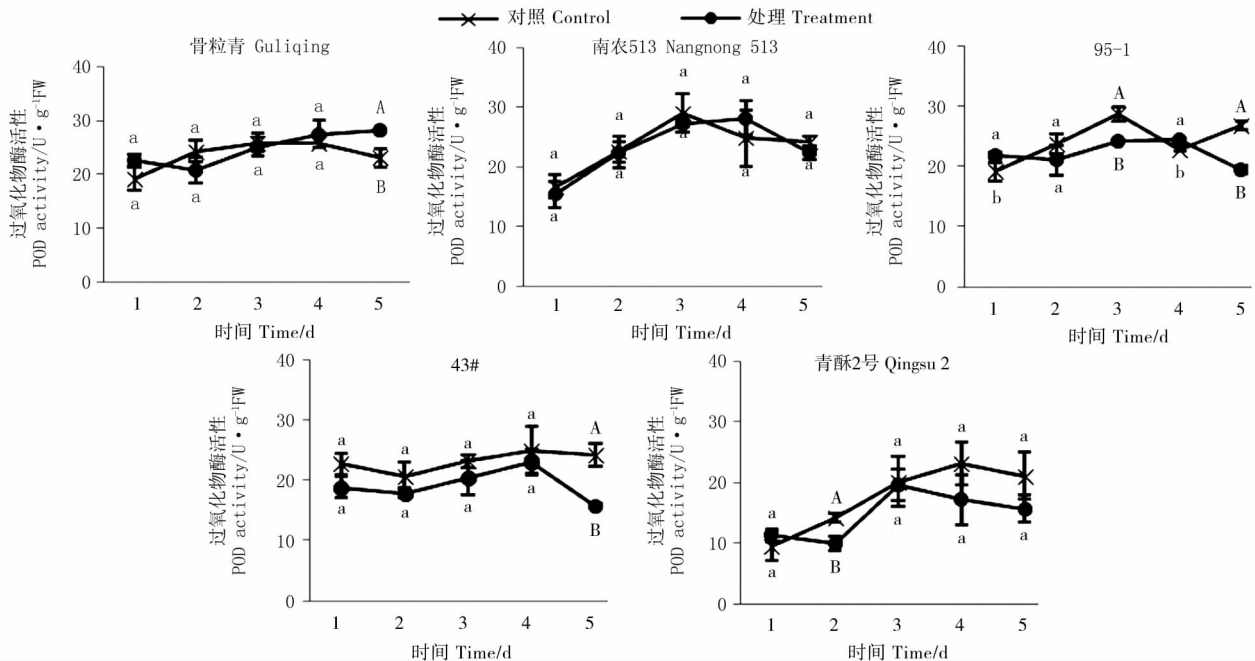


图 3 5 个种质在不同温度下的 POD 活性变化趋势

Fig. 3 Changing trends of POD activity of 5 germplasms under cold stress

由图4可知,骨粒青CAT活性在低温胁迫第2天极显著( $P < 0.01$ )高于对照,第4天显著( $P < 0.05$ )高于对照;95-1CAT活性在低温胁迫的前2d

显著高于对照;43#CAT活性在低温胁迫第1天极显著( $P < 0.01$ )高于对照;青酥2号及南农513的CAT活性与对照间无显著( $P > 0.05$ )差异。

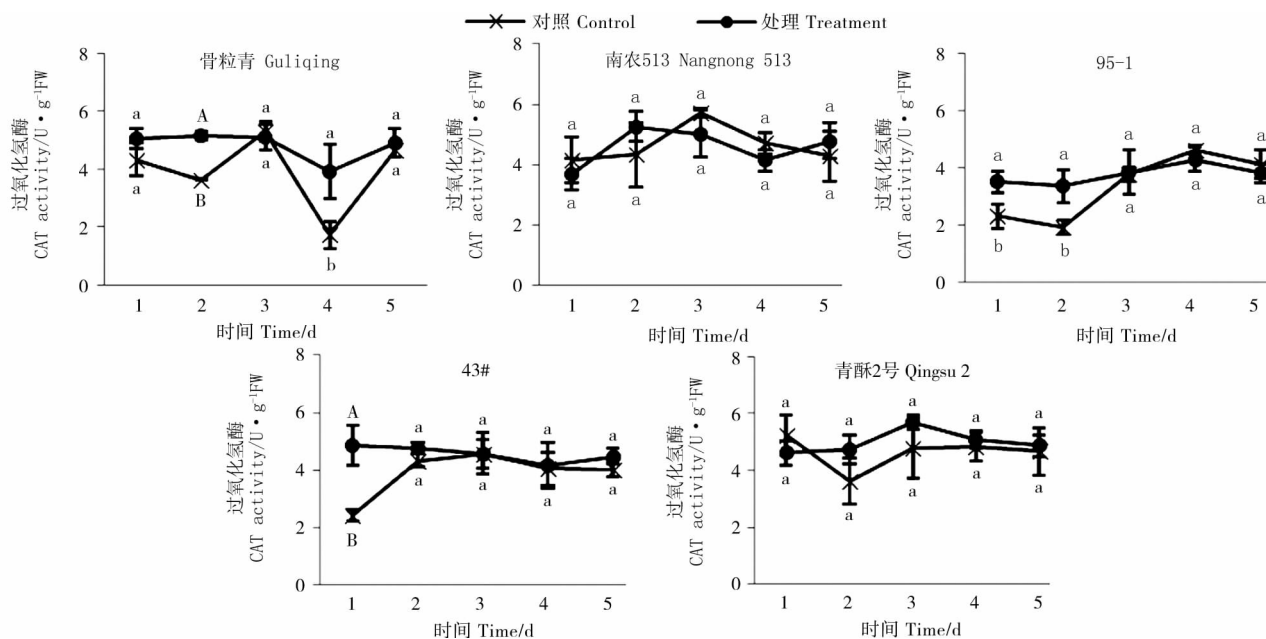


图4 5个种质在不同温度下的CAT活性变化趋势

Fig.4 Changing trends of CAT activity of 5 germplasms under cold stress

综合以上结果可见,骨粒青在5个种质中抗氧化性最强。95-1、43#及青酥2号差异不明显。南农513表现特殊,3种酶的活性在5d内均无显著( $P > 0.05$ )差异,很可能其抗氧化能力最差,酶系统活性受到破坏或已达最高,无法上调应对氧化胁迫。

2.1.3 相对电导率变化 由图5可知,低温胁迫

下,骨粒青、95-1及青酥2号的相对电导率与对照相比无显著( $P > 0.05$ )差异,细胞膜在低温下稳定性良好;而43#在胁迫第1天处理显著高于对照,后4d较稳定,细胞膜低温稳定性相对较差;南农513处理的相对电导率有2d显著( $P < 0.05$ )高于对照,表明细胞膜低温稳定性相对最差。

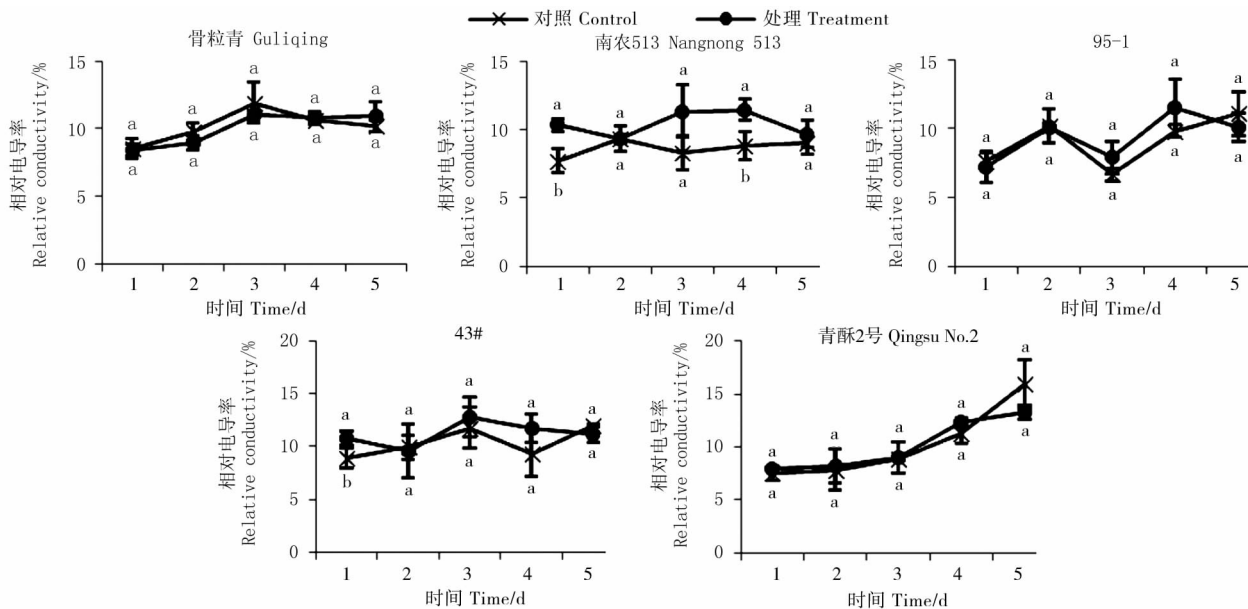


图5 5个种质在不同温度下的相对电导率的变化趋势

Fig.5 Changing trends of the relative conductivity for 5 germplasms under cold stress

2.1.4 丙二醛(MDA)含量 低温胁迫下5个材料的MDA含量均高于对照,表明低温胁迫下MDA含量上升,其中43#表现最好,骨粒青居中,95-1较差,

南农513最差,随胁迫时间延长,其MDA上升幅度极大,表明低温胁迫下幼苗膜脂过氧化现象严重,伤害极大。

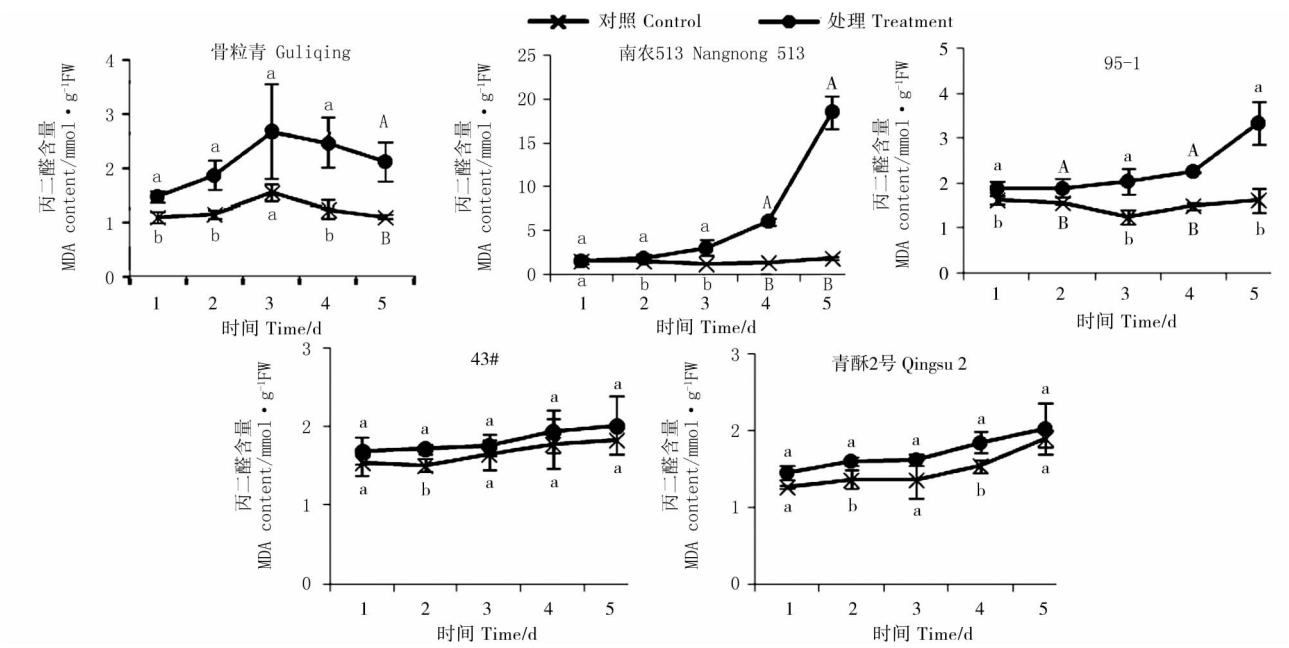


图 6 5 个种质在不同温度下的丙二醛含量变化趋势  
Fig. 6 Changing trends of the MDA content for 5 germplasm under cold stress

2.2 春大豆种质幼苗光合相关指标对低温胁迫的响应

2.2.1 光合速率 低温胁迫下 5 个种质 1 h 内光合速率急剧下降,但在 1~6 h 稍有恢复,而后又继

续下降(图 7)。由误差线及变化趋势可见,5 个材料的光合速率在低温胁迫由初始的不稳定逐步趋近稳定,在低温处理 96 h 后,植株的光合逐渐接近平衡状态。

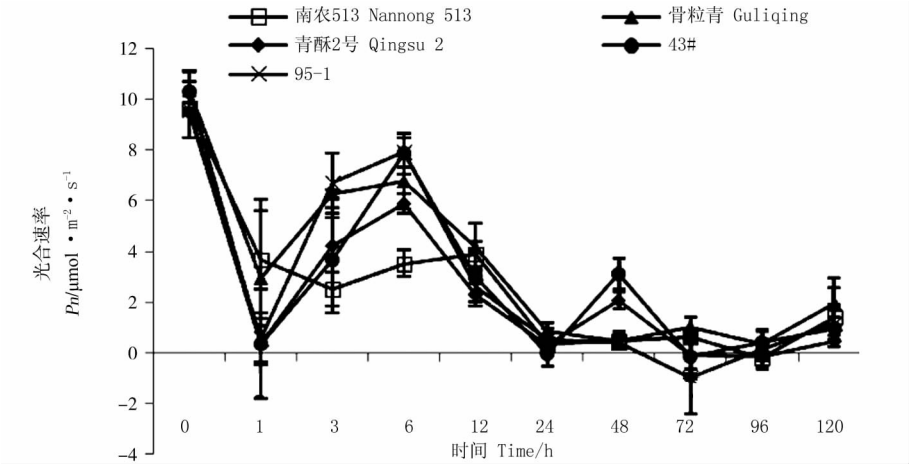


图 7 低温(5℃)下光合速率 120 h 变化趋势  
Fig. 7 Changing trends of photosynthetic rate in 120 h under cold stress(5℃)

表 1 5 个种质低温(5℃)处理 120 h 后光合速率差异显著性分析

处理 Treatment	光合速率 $Pn/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	差异显著性 Significant difference		变异系数 CV/%
		5%	1%	
骨粒青 Guliqing	$2.827\pm0.797$	a	A	28.2
南农 513 Nannong 513	$1.220\pm0.557$	b	B	45.7
95-1	$0.803\pm0.186$	bc	B	23.2
43#	$0.739\pm0.207$	bc	B	28.0
青酥 2 号 Qingsu 2	$0.455\pm0.215$	c	B	47.3

由表 1 可见,骨粒青光合速率最高,与其他 4 个材料相比呈极显著( $P<0.01$ )差异,有利于在低温胁迫下的生存;青酥 2 号光合速率最低,与南农 513 相比有显著( $P<0.05$ )差异,不利于在低温胁迫下

的生存;南农 513、43#、95-1 居中,相互间没有显著 ( $P>0.05$ ) 差异。由变异系数可知 95-1、43#及骨粒青光合速率变异度较小,表明这 3 个材料经过 120 h 低温胁迫后光合速率较稳定。南农 513 及青酥 2 号变异度大,光合速率较不稳定。

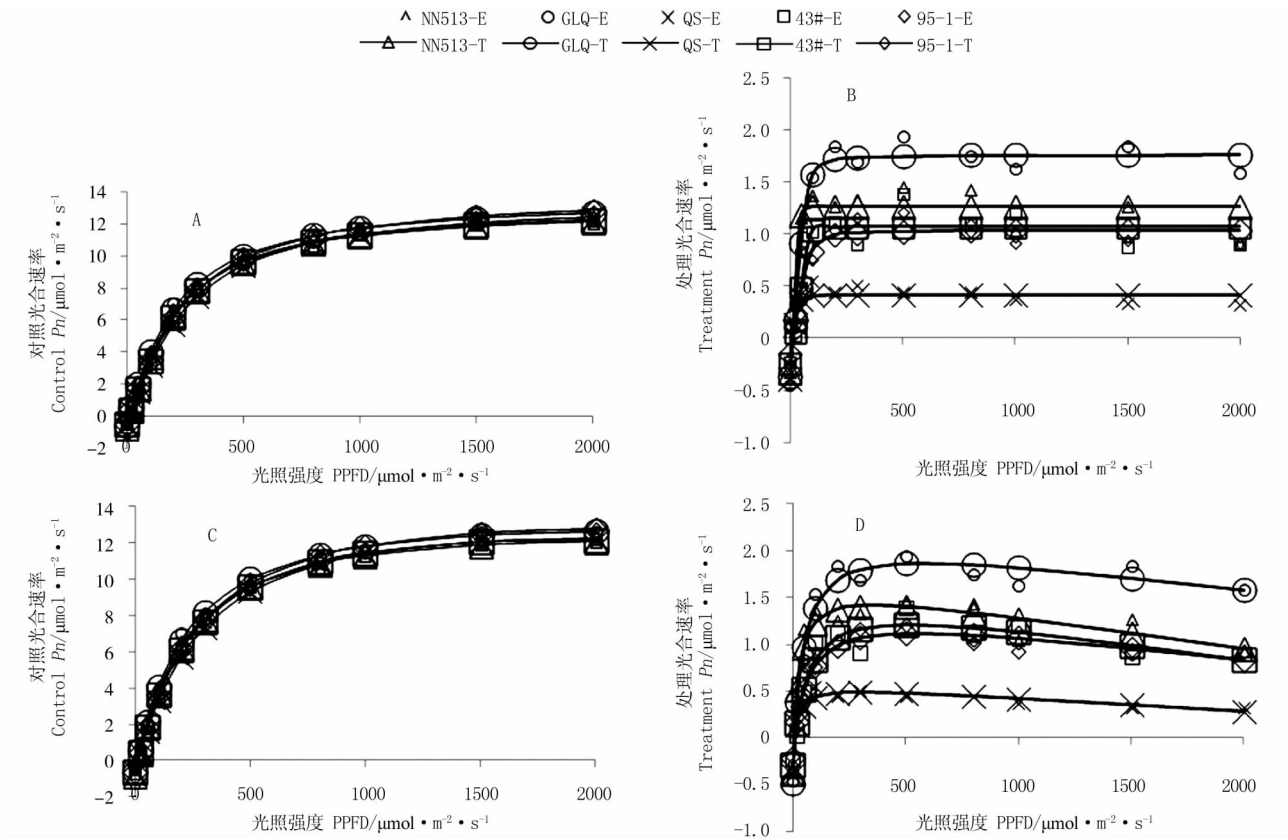
2.2.2 光响应曲线 光响应曲线如图 8 A、B(方法

一)所示,拟合曲线实测值与理论值相近,可正确计算  $LCP$  及  $R_d$  值,但低温条件下  $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  光强及以下数据不呈线性分布,  $R^2$  偏低,不能正确估算  $LSP$  及  $P_{max}$ ,而方法二可正确估算  $LSP$  及  $P_{max}$  (图 8 C、D,表 2),但不能正确计算  $LCP$  及  $R_d$ 。

表 2 通过两种模型得到的  $LCP$ 、 $LSP$ 、 $P_{max}$ 、 $R_d$  值

Table 2 The values of  $LCP$ ,  $LSP$ ,  $P_{max}$  and  $R_d$  calculated by two models

种质 Germplasm		$LCP$		$LSP$		$P_{max}$		$R_d$	
		方法一	方法二	方法一	方法二	方法一	方法二	方法一	方法二
		Method 1	Method 2	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
南农 513 Nannong 513	对照 Control	8.5726	6.96E-11	403.1311	2385.3380	13.849	12.0965	0.757	0.8503
	处理 Treatment	10.3939	1.07E-09	63.5926	361.1241	1.580	1.4155	0.322	0.3721
骨粒青 Guliqing	对照 Control	3.3117	5.02E-11	391.4959	2408.2640	14.324	12.6943	0.541	0.6161
	处理 Treatment	13.6707	4.33E-10	99.0120	584.7194	2.125	1.8665	0.356	0.4779
青酥 2 号 Qingsu 2	对照 Control	6.7730	1.10E-10	462.2993	2084.8250	14.028	12.2841	0.517	0.6182
	处理 Treatment	22.1145	9.25E-10	84.3282	308.6957	0.815	0.4859	0.392	0.3970
43#	对照 Control	6.2598	1.20E-10	417.8308	1993.9480	13.623	12.1390	0.514	0.6330
	处理 Treatment	16.6276	3.67E-10	107.1103	518.1781	1.312	1.2091	0.243	0.2907
95-1	对照 Control	4.6242	6.72E-11	444.9879	2317.9450	14.532	12.7928	0.504	0.5965
	处理 Treatment	12.5379	1.89E-10	102.5379	550.2142	1.188	1.1218	0.151	0.2179



图例中,各品种标“E”者为实测值,标“T”者为理论值。  
Varieties marked with ‘E’ and ‘T’ in the lengerd are experimental and therotical values ,respectively.

图 8 光响应曲线拟合与实测值  
Fig. 8 Fitting light response curve and the measured values

由表 2 可知,5 个材料对照的光响应曲线均高于低温胁迫处理,处理之间的光响应曲线差异较大,而且实测值在理论曲线附近的波动范围明显扩大,表明在低温条件下 5 个材料的光合作用受到抑制的程度不同,光合速率均不稳定,波动幅度较大。

骨粒青的  $LSP$  在对照及胁迫处理中均最高,青酥 2 号均最低,但对照中  $P_{max}$  最高者为 95-1,最低者为南农 513。低温下骨粒青  $P_{max}$  最高,青酥 2 号最低,其余 3 个种质居中。

5 个材料  $R_d$  均降低,  $LCP$  升高(表 3)。表明在  $R_d$  降低的情况下,若光合效率不变,  $LCP$  应随之降低,而结果显示  $LCP$  升高,证明低温导致光合作用效率降低。青酥 2 号  $R_d$  降幅最小,95-1 最大,其他 3 个种质居中。  $LCP$  的提升幅度以骨粒青最高,南农 513 最低,其他 3 个种质居中。

表 3  $R_d$  及  $LCP$  变化倍数

Table 3 The alteration multiples of  $R_d$  and  $LCP$

种质 Germplasm	处理 $R_d$ /对照 $R_d$ Ration of $R_d$ in treatment to control/%	处理 $LCP$ /对照 $LCP$ Ration of $LCP$ in treatment to control/%
南农 513Nannong 513	42.54	121.25
骨粒青 Guliqing	65.80	412.80
青酥 2 号 Qingsu 2	75.82	326.51
43#	47.28	265.63
95-1	29.96	271.14

3 讨 论

Hasselt<sup>[20]</sup>认为低温对叶绿素的破坏是一个光氧化的过程。本试验中幼苗叶绿素含量第 1 天低温胁迫下降较大,可能是受到光氧化的影响,但后期没有显著下降的表现。Friend<sup>[21]</sup>认为低温限制了叶绿素的合成,但是 5 个材料 SPAD 种间差异并不显著,且 5 d 内处理与对照的波动较大,不易观察到变化趋势,因此不适于作为筛选指标。

SOD、POD、CAT 活性的综合测定可确定低温条件下抗氧化性状良好的种质。本研究结果显示骨粒青抗氧化性良好,但抗氧化性差的材料不易判断。南农 513 表现特殊,3 种酶的活性均无显著差异性表达,很可能酶系统被损坏或活性已达最高,无法继续上调应对氧化胁迫。

相对电导率及 MDA 含量均能指示细胞膜受伤程度和植物对逆境胁迫反应的强弱<sup>[22-23]</sup>,相对电导率仅能区分出低温耐受性差的材料南农 513,而不能区分耐受性最优的材料。MDA 含量的测定区分了低温胁迫下 5 个种质膜脂过氧化程度,适于作为鉴定指标,这两个指标均表明南农 513 低温耐受

能力差很可能是由于细胞膜受到极大伤害。

骨粒青光合作用强表明其能量供应较充足。低温下春大豆早期光合速率波动强烈,后期得到的较为稳定的光合速率比较可靠,光合速率高的种质在低温下的生存能力高于光合速率低的种质,虽然此指标并未能直接筛选出不耐低温材料,但可作为区别低温耐受能力的参考指标。

低温胁迫下光合作用降低,光响应曲线整体下降,光饱和点随之降低,表明大豆在较低光强下会受到光抑制,因此低温高光强易对植物造成光氧化伤害,低温下弱光反而利于生存。

骨粒青在低温胁迫下暗呼吸的下降幅度最小,最高光合速率在 5 个材料中最高,  $R_d$  及  $LCP$  的变化显示骨粒青在低温低光强下光合效率较低,光合效率下降是对低温胁迫的一种适应机制,低温下 PSII 反应中心失活,能量过剩,多余的光能通过非光化学猝灭及热耗散消耗掉,避免光氧化及光漂白对植物的伤害<sup>[24]</sup>。随着光照强度的增加,光合效率升高,最终骨粒青最高光合速率及光饱和点在 5 个材料中最高,有利于在低温胁迫下保持能量供给,耐受较高光强,因此骨粒青通过非光化学猝灭耗散过量光能的机制比较完善,有利于抵御光氧化胁迫。青酥 2 号虽然维持较高的呼吸速率,但是其最高光合速率、光饱和点最低,易受光氧化光漂白的伤害,能量在后期也将会匮乏,不利于低温下的生存。43#、南农 513 及 95-1 的光响应曲线水平接近,但 95-1 呼吸作用受到极大抑制,能量代谢减缓,不利于生存。43#各项指标居中。南农 513 的光合效率随着光强的增加而增加,但是其在光补偿点处光合效率并未显著降低,很可能在低光强下受光氧化胁迫。

因此,通过光响应曲线分析在弱光条件下光合效率的变化及抵御光氧化的能力可判断低温耐受性强弱判定。

测定光合速率的同时也获得气孔导度、胞间  $CO_2$  浓度、蒸腾速率的数据,但这 3 个指标之间相互制约,不适于取极值以衡量种质的低温耐受能力。

4 结 论

本研究通过生理指标测定从 5 个大豆材料中成功鉴定了 2 个低温耐受性差异显著的种质,耐受性良好的为骨粒青,耐受性差的为南农 513。发现能够明显判断耐低温种质的指标有抗氧化酶活性、光合速率和光响应曲线;能明显判断不耐低温种质的指标有相对电导率和丙二醛含量。结合这些指标能够初步确定春大豆种质是否具有耐低温性。

## 参考文献

- [1] 张德荣,张学君,孟祥盟,等.大豆低温冷害敏感时期试验研究报告[J].吉林农业科学,1987(1):37-39. (Zhang D R,Zhang X J,Meng X M,et al. Primary study on the key time for soybean plants to be injured by the lower temperature[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences,1987(1):37-39.)
- [2] 张德荣,张学君.大豆低温冷害试验研究报告[J].大豆科学,1988,7(2):125-132. (Zhang D R,Zhang X J. Study on cool injury of soybean[J]. Soybean Science,1988,7(2):125-132.)
- [3] 郑光华,顾增辉,徐本美.大豆种子萌发过程中冷害问题的研究[J].中国农业科学,1981(2):65-72. (Zheng G H,Gu Z H,Xu B M. A physiological study on the chilling injury in germinating soybean seeds[J]. Scientia Agricultura Sinica,1981(2):65-72.)
- [4] 张国栋,龚文娟.高寒地区大豆品种资源的研究—大豆品种的耐寒性及其鉴定[J].黑龙江农业科学,1983(5):14-19. (Zhang G D,Gong W J. Study on soybean germplasm resources which growth in the alpine region-cold tolerance of soybean varieties and its identification[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences,1983(5):14-19.)
- [5] Hodges D M,Andrews C J,Johnson D A,et al. Sensitivity of maize hybrids to chilling and their combining abilities at two developmental stages[J]. Crop Science,1997,37:850-856.
- [6] Hodges D M,Andrews C J,Johnson D A,et al. Antioxidant enzyme and compound responses to chilling stress and their combining abilities in differentially sensitive maize hybrids[J]. Crop Science,1997,37:857-863.
- [7] 胡国玉.大豆耐低温出苗的遗传分析与分子标记[D].南京:南京农业大学,2005. (Hu G Y. Genetic analysis and molecular marker on chilling tolerance of soybean in early stage[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2005.)
- [8] 李育军,常汝镇,赵玉田,等.大豆抗冷性研究—II 萌发期低温处理对生长发育的影响[J].中国油料,1989(4):41-44. (Li Y J,Chang R Z,Zhao Y T,et al. Studies on tolerance to cold in soybean II. Effect of low temperature treatment during germination on growth and development [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,1989(4):41-44.)
- [9] 宋友,王继安.早熟大豆发芽期和苗期耐寒性鉴定[J].大豆科学,2006,25(3):299-303. (Song Y,Wang J A. Identification of chilling tolerance in early soybean varieties at germination and seedling growth stages [J]. Soybean Science,2006,25(3):299-303.)
- [10] 单彩云.大豆耐低温资源筛选及蛋白质组学研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2008. (Shan C Y. Screening and proteome research of soybean low temprature tolerance germplasm[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2008.)
- [11] 顾增辉,宋剑陶.大豆抗冷性生理生化指标的筛选[J].中国农业科学,1992,25(4):15-23. (Gu Z H,Song J T. Studies on screening for physiological and biochemical indicators of chilling resistance of soybean (*Glycine max*(L.) Merr.) [J]. Scientia Agricultura Sinica,1992,25(4):15-23.)
- [12] 任丽丽,高辉远.低温弱光胁迫对野生大豆和大豆栽培种光系统功能的影响[J].植物生理与分子生物学学报,2007,33(4):333-340. (Ren L L,Gao H Y. Effects of chilling stress under weak light on functions of photosystems in leaves of wild soybean and cultivatar soybean[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology,2007,33(4):333-340.)
- [13] 郝晶,张立军,谢甫绶.低温对大豆不同耐冷性中萌发期保护酶活性的影响[J].大豆科学,2008,26(2):171-175. (Hao J,Zhang L J,Xie F T. Effects of the low temperature on defense enzyme activities of different chilling tolerant soybean cultivars during the germination[J]. Soybean Science,2007,26(2):171-175.)
- [14] 陈远东,顾卫红,马坤,等.菜用大豆耐低温弱光鉴定方法和评价指标的研究[J].中国农学通报,2011,27(19):150-155. (Chen Y D,Gu W H,Ma K,et al. Study on index of evaluation and method of identification in low temperature and weak light tolerance of vegetable soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2011,27(19):150-155.)
- [15] 胡俊杰,张古文,胡齐赞,等.低温胁迫对菜用大豆生长,叶片活性氧及多胺代谢的影响[J].浙江农业学报,2011,23(6):1113-1118. (Hu J J,Zhang G W,Hu Q Z,et al. Effect of chilling stress on growth,metabolism of reactive oxygen species and polyamines in vegetable soybean seedlings[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2011,23(6):1113-1118.)
- [16] 张大伟,杜翔宇,刘春燕,等.低温胁迫对大豆萌发期生理指标的影响[J].大豆科学,2010,29(2):228-232. (Zhang D W,Du X Y,Liu C Y,et al. Effect of low-temperature stress on physiological indexes of soybean at germination stage [J]. Soybean Science,2010,29(2):228-232.)
- [17] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000. (Li H S. The experiment principle and technique for plantphysiology and biochemistry[M]. Beijing:Higher Education Press,2000.)
- [18] 刘宇锋,萧浪涛,童建华,等.非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用[J].中国农学通报,2005,21(8):76-79. (Liu Y F,Xiao L T,Tong J H,et al. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2005,21(8):76-79.)
- [19] Ye Z P. A new model for relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica,2007,45:637-640.
- [20] van Hasselt P R. Photooxidation of leaf pigments in *Cucumis* leaf discs during chilling [J]. Acta Botanica Neerlandica,1972,21:539-543.
- [21] Friend D. The control of chlorophyll accumulation in leaves of marquis wheat by temperature and light intensity[J]. Physiologia Plantarum,1960,13:776-785.
- [22] Lyons J M. Chilling injury in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology,1973,24:445-466.
- [23] 郑世英,王丽燕,张海英.镉胁迫对两个大豆品种抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J].江苏农业科学,2007(5):53-55. (Zheng S Y,Wang L Y,Zhang H Y. Effect of cadmium stress on antioxidant enzyme activity and the MDA content of two soybean varieties[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2007(5):53-55.)
- [24] Melis A. Photosystem-II damage and repair cycle in chloroplasts: what modulates the rate of photodamage *in vivo* [J]. Trends in Plant Science,1999,4:130-135.