

韩 松, 吉庆勋, 杨曼利, 等. 添加抗寒剂对包衣棉花种子萌芽及其耐冷性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 78–81.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.04.017

添加抗寒剂对包衣棉花种子萌芽及其耐冷性的影响

韩 松¹, 吉庆勋¹, 杨曼利¹, 党永富¹, 乔传令^{1,2}

(1. 河南奈安生物科技股份有限公司/农药副作用及药害防控技术河南省工程实验室, 河南郑州 450001;

2. 中国科学院动物研究所/农业虫鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100080)

摘要:为探讨低温条件下包衣时添加抗寒剂对棉花种子萌发及幼苗的影响, 采用不同抗寒剂和种衣剂混合后对银山 6 号棉花种子包衣, 分别设置 5 ℃ 低温胁迫 2 d 和 25 ℃ 培养 2 d 再 5 ℃ 低温胁迫 2 d, 共同转入 25 ℃ 恢复培养。运用多指标数据综合统计分析方法研究了棉花种子用卫福 200FF 包衣, 以及不同的抗寒剂和卫福 200FF 种衣剂混合后包衣, 对于低温胁迫下棉花种子萌芽耐冷性的影响。结果表明, 与萌发前相比, 棉花在正常萌芽时实施低温胁迫使种子发芽活力下降更明显, 萌发的种子更容易遭受损伤; 抗寒剂与卫福 200FF 种衣剂混合包衣可明显促进低温胁迫下棉花种子萌发, 提高其耐冷性; 3 种抗寒剂处理的棉花幼芽耐冷性不同, γ -聚谷氨酸与外源调节物质复配处理效果最佳。

关键词: 抗寒剂; 包衣; 棉花; 萌芽; 耐冷性; 主成分分析; 隶属函数分析; 综合评价

中图分类号: S562.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)04-0078-04

众所周知, 非生物胁迫都会对作物造成一定程度的伤害^[1], 其中低温是影响棉花生长发育和产量品质形成的重要逆境因子之一, 若在棉花苗期遇持续低温天气, 常造成大面积死苗, 给农业生产及农户带来较大损失^[2]。研究发现, 抗低温种衣剂处理后棉花的保苗效果和产量明显高于普通种衣剂, 且对低温造成的烂种、烂芽具有明显的防治效果^[3-4], 但是 Baxter 等指出, 种衣剂衣膜影响种子的吸水透气过程, 进而影响种子的发芽^[5]。因此, 研究一种抗寒剂, 既能提高作物的耐冷性, 同时也不影响种子发芽尤为重要。 γ -聚谷氨酸是由微生物发酵产生的一种 γ -谷氨酸链状高聚物, 它富含侧链羧基, 具有无毒、无害、无残留等特性, 还具有高吸水保水性, 螯合多种无机离子等功能^[6]。基于 γ -聚谷氨酸这种自身独特的物理化学性质, 在农业上常用作保水剂、肥料促进剂和种子包衣剂等^[7-8]。乔长晟等应用 γ -聚谷氨酸对种子进行包衣, 结果表明能促进种子萌发和幼苗的生长^[9]。王建平等研究发现, γ -聚谷氨酸处理可有效提高种子活力和发芽率, 缩短出苗时间, 提高种子萌发时淀粉酶和过氧化物酶的活性, 并且使幼芽在低温胁迫后也能保持较高的根系活力, 增强耐冷性^[10-12]。低温影响种子萌发的研究已有较多报道, 但通过抗寒剂处理来提高棉花种子耐冷性的研究报道较少。鉴于以上 2 点, 本研究从棉花种子处理入手, 研究不同时期低温胁迫下含 γ -聚谷氨酸的不同抗寒剂处理对棉花种子萌发的影响, 并在研究中采用了多指标综合评定的方法来判断不同处理耐冷性差异, 如因子分析、主成分分析法和隶属函数等, 避免了因使用单一指标判断植物的耐冷性极易受到外界环境影响

响而导致结果不可靠的问题, 并探讨了外源物质对种子萌发耐冷性的影响, 为进一步提高棉花产量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试品种为银山 6 号, 由河南省农业科学院经济作物研究所选育, 抗寒剂 A、B、C 由河南奈安生物科技股份有限公司/农药副作用及药害防控技术河南省工程实验室自主研发, 其主要有效成分如下: 抗寒剂 A: γ -聚谷氨酸、水溶性腐植酸和无机盐; 抗寒剂 B: γ -聚谷氨酸、赤霉素和芸薹素内酯; 抗寒剂 C: γ -聚谷氨酸和生化黄腐酸。

1.2 试验方法

1.2.1 种子包衣处理 每 10 kg 种子用卫福 200FF(萎锈灵 200 g/L, 福美双 200 g/L) 40 mL 包衣时分别添加 10 mL 抗寒剂 A、B、C, 分别记作处理 A、B、C, 以包衣时添加 10 mL 蒸馏水的种子作为对照 CK。

1.2.2 低温胁迫处理 挑选饱满、未破损的包衣种子置于垫有 2 层滤纸的培养皿中(滤纸及培养皿采取高温蒸汽灭菌法灭菌处理), 转入光照培养箱中恒湿状态下模拟早春低温天气分批进行培养, 发芽试验于 2016 年 9 月中旬在农药副作用及药害防控技术河南省工程实验室进行, 具体设计如下: 第 1 批为萌发前低温胁迫: 培养箱中 5 ℃ 低温处理 2 d 转入 25 ℃ 恢复培养, 每个处理 3 个培养皿, 每皿 100 粒种子; 第 2 批为萌发中低温胁迫: 培养箱中 25 ℃ 培养 2 d 再 5 ℃ 低温处理 2 d 转入 25 ℃ 恢复培养, 每个处理 3 个培养皿, 每皿 100 粒种子; 第 3 批为常温培养: 培养箱中恒温 25 ℃ 培养, 只设对照 CK, 每皿 100 粒种子。

1.2.3 测定指标及方法 各处理种子 25 ℃ 恢复培养, 种子发芽 2 d 后取样手工去皮后测定幼芽胚根的超氧化物歧化酶(SOD) 活性、丙二醛(MDA) 含量、可溶性糖含量和质膜透性。SOD 活性的测定采用氮蓝四唑光化还原抑制法^[13-14]; MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法^[14-15]; 可溶性糖含量的

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家公益性行业(农业) 科研专项(编号: 201303030)。

作者简介: 韩 松(1984—), 男, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 主要从事作物逆境生理方向的研究。Tel: (0371) 55638512; E-mail: jqx1213@163.com。

通信作者: 乔传令, 博士, 研究员, 主要从事环境生物学研究。Tel: (0371) 55638512; E-mail: qiaocli@ioz.ac.cn。

测定采用萘酚比色法^[10];质膜透性采用电导率仪法,其中相对电导率=浸泡液中电导率/煮沸后电导率×100%。

以胚芽鞘长度大于等于 0.5 cm 为发芽标准^[16],每天同一时间检查种子发芽数,恢复培养后第 7 日统计发芽率,幼芽鲜质量和幼芽活力。发芽率采用计数法,幼芽鲜质量采用称量法,发芽活力=发芽率×幼芽鲜质量^[17]。

1.3 数据统计与分析

数据整理与分析采用 Microsoft Excel 2007 软件,作图采用 Sigmaplot 12.0 软件。参照周广生等的方法^[18-19]将各指标的原始数据转化为相对值,运用 SPSS 18.0 软件对各指标的相对值进行主成分分析,并利用隶属函数值对几个抗寒剂处理的棉花种子萌芽期的耐冷性进行综合评价。主要公式如下:

隶属函数值:

$$u(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), j = 1, 2, \cdots, n_0 \quad (1)$$

各综合指标权重:

$$w_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j, j = 1, 2, \cdots, n_0 \quad (2)$$

耐冷性综合评价:

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times w_j], j = 1, 2, \cdots, n_0 \quad (3)$$

式中: X_j 表示第 j 个综合指标; X_{\min} 表示第 j 个综合指标的最

小值; X_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值。 w_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重; p_j 为各处理第 j 个综合指标的贡献率; D 值为各处理在低温胁迫条件下由综合指标评价所得的耐寒性度量值。

2 结果与分析

2.1 指标的相对值分析

由表 1、表 2 可知,无论是萌芽前还是萌芽中,低温胁迫之后,各处理棉花幼芽与常温对照相比均受到了不同程度的低温影响,不同处理棉花经低温胁迫后的发芽率和幼芽鲜质量与常温(25 ℃)对照相比均有所下降(相对值<1),而且温度越低下降越明显;而 SOD 活性、MDA 含量、可溶性糖含量和质膜透性与常温(25 ℃)对照相比均有所上升(相对值>1),但不同处理各单项指标的变化幅度不尽相同,各有差异。各指标的相对值在一些文献中又叫做抗寒系数或耐冷系数^[2,20],只指示该指标下的耐冷性强弱。因此,用任何单一指标的相对值来评价棉花耐寒性存在片面性和不稳定性,也表明棉花耐寒性是一个复杂的综合性状,必须用多个指标进行综合评价才较为可靠。为弥补单项指标耐寒性评价的不足,需在此基础上进一步利用其他多元统计方法进行分析。

表 1 第 1 批棉花低温胁迫下 6 个指标的原始值和相对值

处理	发芽率(%)		鲜质量(g)		SOD 活性[U/(g·h)]		MDA 含量(μmol/g)		可溶性糖含量(mg/g)		质膜透性(%)	
	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值
对照 CK	75.2	0.817	0.341	0.795	194.3	1.975	5.73	1.592	48.16	1.318	55.9	1.961
处理 A	77.5	0.842	0.366	0.853	142.0	1.443	4.82	1.339	66.87	1.830	48.0	1.685
处理 B	83.4	0.907	0.384	0.895	123.2	1.252	4.48	1.243	76.44	2.092	41.4	1.453
处理 C	79.9	0.868	0.397	0.925	166.9	1.696	3.94	1.094	60.11	1.645	34.9	1.225
常温培养	92.0	1.000	0.429	1.000	98.4	1.000	3.60	1.000	36.54	1.000	28.5	1.000

表 2 第 2 批棉花低温胁迫下 6 个指标的原始值和相对值

处理	发芽率(%)		鲜质量(g)		SOD 活性[U/(g·h)]		MDA 含量(μmol/g)		可溶性糖含量(mg/g)		质膜透性(%)	
	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值	原值	相对值
对照 CK	44.3	0.482	0.265	0.618	81.1	0.824	10.03	2.785	47.68	1.305	71.6	2.512
处理 A	52.7	0.573	0.311	0.725	143.4	1.457	6.83	1.897	98.18	2.687	41.0	1.439
处理 B	56.9	0.618	0.339	0.790	132.0	1.341	5.34	1.483	85.50	2.340	53.1	1.863
处理 C	60.0	0.652	0.289	0.674	162.4	1.650	7.83	2.175	69.90	1.913	34.6	1.214
常温培养	92.0	1.000	0.429	1.000	98.4	1.000	3.60	1.000	36.54	1.000	28.5	1.000

2.2 主成分分析

主成分分析就是在尽可能不损失信息或少损失信息的情况下,将多个变量减少为少数几个潜在因子,这几个因子可以高度概括大量数据中的信息,这样既减少了变量的个数,又能再现变量间的内在联系^[21]。主成分的特征值以及贡献率是选择主成分的重要依据^[22]。通过对 6 个单项指标相对值进

行主成分分析,提取综合成 2 个主成分指标 $CI-1$ 和 $CI-2$ (表 3、表 4),其在 2 批低温胁迫处理中衡量耐冷性的贡献率分别为 78.713%、18.702% 和 76.167%、18.378%,其累计贡献率分别达到 97.415% 和 94.545%,其余贡献率较小,可以忽略不计。这样可将原来 6 个单项指标转换为 2 个新的相互独立的主成分指标,并代表了原始指标携带的绝大部分信息。

表 3 第 1 批棉花低温胁迫下各指标系数及贡献率

主成分	指标系数						贡献率(%)
	发芽率	鲜质量	SOD 活性	MDA 含量	可溶性糖含量	质膜透性	
$CI-1$	0.426	0.429	-0.367	-0.424	0.389	-0.413	78.713
$CI-2$	0.164	-0.341	-0.553	0.358	0.501	0.415	18.702

在第 1 批低温胁迫处理中,第 1 主成分($CI-1$)中的发芽率、鲜质量和 MDA 含量等指标的系数值较大,说明这些指标可以较好地反映该批低温胁迫下棉种的耐冷性;第 2 主成分

($CI-2$)中的 SOD 活性、可溶性糖含量和质膜透性等指标的系数值较大,说明这些指标与棉种的耐冷性也存在一定关系;在第 2 批低温胁迫处理中,第 1 主成分($CI-1$)中的 SOD 活

表 4 第 2 批棉花低温胁迫下各指标系数及贡献率

主成分	指标系数						贡献率 (%)
	发芽率	鲜质量	SOD 活性	MDA 含量	可溶性糖含量	质膜透性	
<i>CI-1</i>	0.413	0.380	0.420	-0.420	0.405	-0.410	76.167
<i>CI-2</i>	-0.327	0.536	-0.419	-0.398	0.290	0.434	18.378

性、MDA 含量和发芽率等指标的系数值较大,说明这些指标可以较好地反映棉种萌芽期的耐冷性;第 2 主成分(*CI-2*)中的鲜质量、质膜透性和 SOD 活性等指标的系数值较大,说明这些指标与棉种萌芽时的耐冷性也存在一定关系。

在 2 批低温胁迫处理中,发芽率、鲜质量和 SOD 活性都会作为主成分的指标出现,说明低温冷害对植物体最直接的伤害表现就是阻碍生长、不易发芽,在低温胁迫下植物体内积极响应生理变化就是 SOD 活性升高;在任何一批低温胁迫中,质膜透性和 MDA 含量都会作为构成主成分的主要指标存在,说明低温胁迫时首先遭到破坏的是膜质结构。

2.3 隶属函数分析和综合评价

2.3.1 隶属函数分析和权重的确定 根据各指标的系数及各单项指标的相对值,求出不同处理的 2 个主成分综合指标值 *C(CI-1)* 和 *C(CI-2)* (表 5、表 6)。在同一批低温胁迫下,哪个处理的综合指标数值越大,说明该处理在这一综合指标上的耐冷性越强,反之越差。但各处理的耐冷性由 2 个综合指标值所共同决定,单独用任何一个综合指标都无法准确评价出耐冷性。

表 5 第 1 批低温胁迫下棉花综合指标值 *C(X)*、隶属函数值 *u(X)*、综合评价值 *D*

处理	<i>C(CI-1)</i>	<i>C(CI-2)</i>	<i>u(CI-1)</i>	<i>u(CI-2)</i>	<i>D</i> 值
对照 CK	-2.992	-0.072	0.000	0.584	0.113
处理 A	-0.167	0.651	0.578	0.888	0.637
处理 B	1.893	0.918	1.000	1.000	1.000
处理 C	1.269	-1.461	0.872	0.000	0.705
贡献率 (%)	78.713	18.702	—	—	—
权重	—	—	0.808	0.192	—

表 6 第 2 批低温胁迫下棉花综合指标值 *C(X)*、隶属函数值 *u(X)*、综合评价值 *D*

处理	<i>C(CI-1)</i>	<i>C(CI-2)</i>	<i>u(CI-1)</i>	<i>u(CI-2)</i>	<i>D</i> 值
对照 CK	-3.194	0.137	0.000	0.634	0.123
处理 A	1.028	0.264	0.935	0.658	0.882
处理 B	1.321	1.053	1.000	1.000	1.000
处理 C	0.845	-1.453	0.895	0.000	0.721
贡献率 (%)	76.167	18.378	—	—	—
权重	—	—	0.806	0.194	—

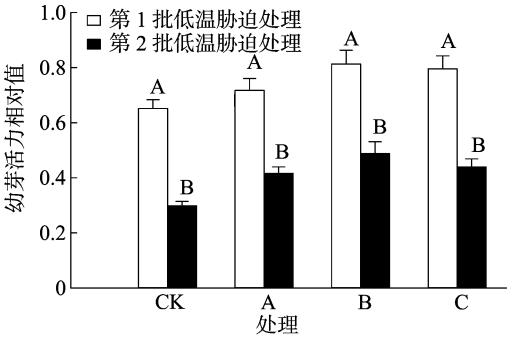
根据公式(1)和公式(2)分别计算每个处理各综合指标的隶属函数值 *u(X)* 及其对应的权重 *w_i* (表 5 和表 6),据公式(3)计算各处理的耐冷性量度值 *D*,该值是隶属函数值与其对应的权重乘积的求和,同时涵盖了 2 个主成分综合指标,反映了不同处理的综合耐冷性。

2.3.2 综合评价值的确定 耐冷性综合评价值反映了各处理综合耐冷性的强弱,并可根据 *D* 值的大小(表 5 和表 6)对耐冷性强弱进行排序,数值越大越耐冷。研究表明,在第 1 批低温胁迫下 CK、处理 A、处理 B、处理 C 的 *D* 值分别为 0.113、0.637、1.000、0.705,可以判定处理 B 耐冷性最强,而 CK 耐

冷性最弱,处理 A 和处理 C 耐冷性居中;在第 2 批低温胁迫下 CK、处理 A、处理 B、处理 C 的 *D* 值分别为 0.123、0.882、1.000、0.721,可以判定处理 B 耐冷性最强,而 CK 耐冷性最弱,处理 A 和处理 C 耐冷性居中。在 2 批低温胁迫下,CK 耐冷性都表现为最弱,说明包衣时添加抗寒剂有助于提高种子的耐冷抗寒能力;处理 B 均表现为耐冷性最强,说明抗寒剂 B 能有效提升棉花种子萌芽前和萌芽时的耐冷性,效果最佳。

2.4 不同批次低温胁迫对不同处理发芽指标的影响

低温胁迫直接影响种子的发芽率和鲜质量,而发芽活力则是发芽率和鲜质量的综合指标,既反映了发芽总数又反映了幼芽的生长势,能比较全面地反映种子活力^[4]。在第 2 批低温胁迫下的各处理幼芽活力相对值明显低于第 1 批低温胁迫的各处理(图 1),差异达到极显著水平,这说明种子在萌发期对低温胁迫更加敏感,萌发期的低温胁迫使种子发芽活力下降,更容易遭受低温冷害损伤。通过对 2 批低温胁迫数据对比,从不同处理的发芽活力中发现,对照 CK 在萌芽期种子发芽活力下降幅度超过其他处理,而在不同批次低温胁迫下其他处理的种子发芽活力均高于对照,说明抗寒剂处理可以有效减轻低温胁迫下种子发芽活力下降的情况,对种子有一定的保护作用。



图中不同大写字母表示不同批次间差异极显著(*P*<0.01)
图1 低温胁迫下各处理发芽活力相对值

3 讨论与结论

由于主成分分析利用降维的思想,在损失较少信息的前提下,可以把多个关系错综复杂的指标转换成新的个数较少的且彼此独立或不相关的综合指标,比较准确地了解各性状的综合表现,同时根据各自贡献率大小可以确定其相对重要性^[23]。以此为基础,再采用隶属函数法对各处理的耐冷性进行综合评价,不仅可以避免单一指标的片面性和稳定性,而且可以较好地揭示各指标与耐冷性的关系^[24-25]。本研究利用主成分分析法将低温胁迫下棉花幼芽的 6 个单项指标转换成 2 个彼此独立的综合指标,进一步得到不同处理幼芽的隶属度值(*D* 值),并据此判定不同抗寒剂对提高棉花幼芽耐冷性的试验效果,更加科学合理^[26]。但因该方法中综合指标值 *C(X)* 转化为隶属函数值 *u(X)* 时只限定在同一批低温胁迫范

围内,因此无法比较2个不同低温胁迫批次之间的耐冷性差异,该问题的解决有待进一步研究。

利用外源物质来诱导提高棉花抗寒性的研究比较普遍,目前已报道的主要有水杨酸、茉莉酸甲酯、芸薹素、亚精胺等激素及类似物以及一氧化氮、硝酸钙、氯化钙等其他调节物质^[27-32]。芸薹素内酯参与植物体内的信号转导,可能是通过阻止植物幼苗产生过多的自由基或诱导形成较多的自由基清除剂缓解膜脂过氧化过程,并激活不饱和脂肪酸的合成途径,增加膜质不饱和脂肪酸含量从而稳定膜的结构与功能,增强膜的防卫能力,提高植物对低温、高温和盐碱环境的耐性^[33-34];而 γ -聚谷氨酸的缓释能力有助于调节物质持久长效,因此二者复配(抗寒剂B)处理种子能够明显提高种子萌芽时的耐冷性。张彦芳等研究发现,用无机盐混合试剂与 γ -聚谷氨酸复合处理水稻种子,能够增强水稻低温信号传导转录途径的表达而增强了水稻的耐冷性^[35]。本研究发现类似组合(抗寒剂A)处理同样能够增强棉花种子萌芽期的耐冷性。

综上所述,种子分别在萌芽前和萌芽期进行低温胁迫后的耐冷性存在差异,而且添加抗寒剂的拌种处理耐冷性明显强于对照,这表明在种衣剂中添加 γ -聚谷氨酸、芸薹素内酯等附加成分能够提高包衣种子在萌芽期的耐冷性,这可能与种衣剂和抗寒剂之间的互作有关,而耐冷性差异与包衣时添加成分的不同有关。

通过研究添加不同的抗寒剂可有效改善棉花种子萌芽期耐冷性,提高其抗低温的能力,但抗寒剂提高棉花种子萌发耐冷性的作用机制及其在大田中效果如何尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] Banuelos G S, Fakra S C, Walse S S, et al. Selenium accumulation, distribution, and speciation in spineless prickly pear cactus: a drought- and salt- tolerant, selenium- enriched nutraceutical fruit crop for biofortified foods [J]. *Plant Physiology*, 2011, 155 (1): 315-327.
- [2] 武 辉, 侯丽丽, 周艳飞, 等. 不同棉花基因型幼苗耐寒性分析及其鉴定指标筛选[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(9): 1703-1713.
- [3] 阿里普·艾尔西, 孙良斌, 张少民, 等. 棉花抗低温种衣剂田间筛选及效果分析[J]. *种子*, 2012, 31(3): 90-92.
- [4] 刘明分, 王丽英, 张彦才, 等. 丸粒化处理对棉花种子萌发期抗寒性与生理特性的影响[J]. *棉花学报*, 2008, 20(1): 73-75.
- [5] Baxter L, Waters L. Effect of a hydrophilic polymer seed coating on the imbibition, respiration, and germination of sweet corn at 4 matric potentials [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1986, 111(4): 517-520.
- [6] 李晶博, 李 丁, 邓毛程, 等. γ -聚谷氨酸的特性、生产及应用[J]. *化工进展*, 2008, 27(11): 1789-1792, 1799.
- [7] Xu Z Q, Lei P, Feng X H, et al. Effect of poly (gamma - glutamic acid) on microbial community and nitrogen pools of soil [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science*, 2013, 63(8): 657-668.
- [8] 王 萌, 许孝瑞. γ -聚谷氨酸在农业应用中的研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2014(10): 161-163.
- [9] 乔长晟, 高明昊, 张 帅, 等. 高效种子包衣剂: 201210594917. X [P]. 2013-04-17.
- [10] 王建平, 王晓丽, 王昌军, 等. 聚- γ -谷氨酸对烟草种子萌发及苗期生长的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(3): 340-343.
- [11] 郝荣华, 张晓元, 刘 飞, 等. 不同分子量 γ -聚谷氨酸对绿豆萌发及幼苗的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(6): 169-171.
- [12] 朱安婷. 聚 γ -谷氨酸缓解水稻干旱、高盐和低温胁迫的生理机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [13] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276-287.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210-213.
- [15] Tewari R K, Kumar P, Neetu, et al. Signs of oxidative stress in the chlorotic leaves of iron starved plants [J]. *Plant Science*, 2005, 169(6): 1037-1045.
- [16] 李志博, 魏亦农. 北疆主栽棉花种子对渗透胁迫的响应及其萌发力差异评价[J]. *种子*, 2010, 29(7): 1-4.
- [17] 纪 瑛, 胡虹文. 种子生物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 129-130.
- [18] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1378-1382.
- [19] 孟凡珍, 张振贤, 于贤昌. 不同生态型结球大白菜抗寒性的评价[J]. *中国农业大学学报*, 2004, 9(4): 35-39.
- [20] 许桂芳, 张朝阳, 向佐湘. 利用隶属函数法对4种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(3): 24-26.
- [21] 鲜孟筑, 杨 萍, 胡立勇, 等. 油菜种子萌发成苗期耐低温性评价[J]. *作物杂志*, 2015(5): 116-122.
- [22] 傅泰露, 马 均, 王贺正, 等. 水稻开花期耐冷性综合评价及鉴定指标的筛选[J]. *西南农业学报*, 2007, 20(5): 965-969.
- [23] 李 飞, 王清连, 李成奇. 陆地棉品种(系)资源的主成分分析和聚类分析[J]. *江苏农业学报*, 2015, 31(6): 1211-1217.
- [24] 田治国, 王 飞, 张文娥, 等. 多元统计分析方法在万寿菊品种抗旱性评价中的应用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3315-3320.
- [25] 代小冬, 徐心志, 朱灿灿, 等. 谷子苗期对不同程度干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. *作物杂志*, 2016(1): 140-143.
- [26] 罗俊杰, 石有太, 陈玉梁, 等. 甘肃不同色彩陆地棉抗旱指标筛选及评价研究[J]. *核农学报*, 2012, 26(6): 952-959.
- [27] 杜 磊, 王长彪. 棉花主要逆境及研究方法[J]. *生物技术通报*, 2012(5): 9-14.
- [28] 辛慧慧, 李防洲, 侯振安, 等. 低温胁迫下棉花幼苗对外源水杨酸的生理响应[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5): 660-664.
- [29] 李 锐, 李生泉, 范月仙. 外源亚精胺对棉花幼苗抗冷性的生理生态特征影响[J]. *激光生物学报*, 2011, 20(2): 175-179, 185.
- [30] 杨美森, 虎晓兵, 罗宏海, 等. 外源一氧化氮对棉花种子吸胀期间耐冷性和发芽能力的影响[J]. *棉花学报*, 2012, 24(3): 265-271.
- [31] 辛慧慧, 李志强, 李防洲, 等. 外源调节物质对棉花幼苗耐寒生理特性的效应[J]. *棉花学报*, 2015, 27(3): 254-259.
- [32] 廖金柯, 朱新霞, 胡小燕, 等. 低温胁迫下棉花幼苗对外源钙的生理响应[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(2): 60-64.
- [33] 王红红, 李凯荣, 侯华伟. 油菜素内酯提高植物抗逆性的研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 213-219.
- [34] 束红梅, 郭书巧, 沈新莲, 等. 油菜素内酯对NaCl胁迫下棉花幼苗生理特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2011, 27(6): 198-202.
- [35] 张言芳, 周慧梅, 蔡克桐, 等. 无机盐混合试剂与 γ -PGA复合处理对早稻苗期耐冷性的引发和分子效应分析[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2323-2330.