

不同玉米自交系耐寒性评价及差异分析

彭云玲, 王亚昕, 赵小强, 吕玉燕

(甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室/甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 在室内低温条件下, 对 44 份玉米自交系进行发芽期性状鉴定, 并通过隶属函数法进行耐寒性综合评价, 根据评价结果对耐寒玉米自交系和寒敏感玉米自交系进行苗期生长和生理生化特性分析, 探索不同玉米自交系耐寒性差异生理机理。结果表明, 利用发芽期发芽率、胚芽长、胚根长、根数为隶属函数法综合评价指标筛选出了 3 份强耐寒玉米自交系, 包括玉米自交系 Va35-2、Va102、ND246, 中等耐寒玉米自交系 1 份, 耐寒玉米自交系 2 份, 寒敏感自交系 16 份, 高寒敏感自交系 22 份。另外, 结果显示随着温度逐渐降低(25℃、15℃、10℃、6℃), 不同玉米自交系的发芽率、胚芽长、胚根长和根数呈下降趋势, 但下降幅度不同, 强耐寒玉米自交系各项指标下降的速度较慢; 但是, 从 15℃低温开始, 高寒敏感自交系的各项发芽指标下降很快, 甚至为 0。根据耐寒性综合评价结果, 分别选取高耐寒玉米自交系 Va35-2、Va102、ND246 和高寒敏感玉米自交系 K22、B68 和 H105W 进行苗期耐寒性差异分析。6℃低温胁迫处理 0、2、4、6 d 后, 高耐寒自交系 Va35-2、Va102、ND246 和高敏感自交系 K22、B68 和 H105W 的生长和生理生化指标都有不同程度的变化, 但是 Va35-2、Va102 和 ND246 各项指标变化幅度较小, 而 K22、B68 和 H105W 的变化幅度较大, 不同品种间差异显著。总体来看, 随着低温胁迫时间的延长, 生长指标(株高、根长、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重)和生理生化指标(相对含水量、脯氨酸、可溶性糖含量和保护酶活性(SOD、POD、CAT))呈下降趋势, 高耐寒玉米自交系下降幅度较小, 而高寒敏感玉米自交系下降幅度较大。相对电导率和丙二醛含量呈上升趋势, 耐寒玉米自交系上升幅度较小, 而寒敏感玉米自交系上升幅度较大。苗期性状的相关性分析表明各项生长和生理指标之间联系紧密、互相影响, 在低温胁迫条件下调节植物的生长。

关键词: 玉米自交系; 低温胁迫; 耐寒性评价; 差异分析

中图分类号: S503.4; S513 **文献标志码:** A

Evaluation of chilling tolerance in different maize inbred lines

PENG Yun-ling, WANG Ya-xin, ZHAO Xiao-qiang, LV Yu-yan

(Gansu Key Lab of Crop Improvement and Germplasm Enhancement; Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science; College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this study, the physiological and biochemical characteristics, and some traits of 44 maize inbred lines at germination stage were identified, and the chilling tolerance was also evaluated by the membership function method under indoor low temperature condition. Based on the membership function analysis, we identified three inbred lines with high tolerance including Va35-2, Va102 and ND246, one with medium tolerance, sixteen sensitive, and twenty-two high sensitive at germination stage. We found that germination rate, plumule length, radical length and root number gradually decreased with decrease in temperature (25℃, 15℃, 10℃, 6℃). And there were different degree of decrease among maize inbred lines. From 25℃ to 6℃, the germination indexes of the sensitive lines were nearly 0 under 15℃, while high tolerant lines like K22, B68 and H105W had lower germination indexes. Based on the results of chilling-tolerant evaluation at germination stage, we identified high chilling-tolerant maize inbred lines including Va35-2, Va102, ND246 and chilling sensitive lines like K22, B68, H105W, which were used to perform the analysis of chilling tolerance at seedling stage. After 0, 2, 4, 6 days under 6℃ low temperature stress at seedling stage, there was marked difference in growth indexes and physiological and biochemical indexes between the two kinds maize inbred lines. Com-

收稿日期: 2015-05-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(31260330, 31301333); 教育部博士点基金(20126202120001); 甘肃省高等学校科研项目(2013B-037)
作者简介: 彭云玲(1978—), 女, 河南南阳人, 副教授, 博士, 研究方向为玉米抗逆生理及分子生物学研究。E-mail: pengyunlingpyl@163.com。

pared with three sensitive lines, chilling-tolerant lines had a smaller variation. In general, the growth indexes (plant height, root length, shoot fresh weight, shoot dry weight, root fresh weight and root dry weight) and physiological and biochemical indexes (the relative water content, proline content, soluble sugar content and the enzyme activities of SOD, POD, and CAT decreased as the duration of low temperature stress increased, Compared with chilling sensitive maize inbred lines, chilling-tolerant lines had smaller decrease. In addition, the leaves relative conductivity and MDA content increased, and chilling-tolerant lines were higher than the sensitive lines. Correlation analysis showed that seedling growth and physiological-biochemical indexes were significantly correlated at seedlings stage.

Keywords: Maize inbred lines; low temperature stress; evaluation of chilling tolerance; difference analysis

玉米(*Zea mays*)是喜温作物,0℃以上低温就能发生冷害^[1]。当温度低于 10℃植株生长明显缓慢,6℃~8℃时停止生长,温度更低时细胞和组织产生不可逆的损害。芽期冷害引起出苗率降低、出苗迟缓、成苗率减少;苗期遭遇低温引起幼苗萎焉甚至死亡^[2-3]。在我国北方特别是东北地区,玉米产量年际间差异很大,主要是低温造成的^[1,4-6],在低温冷害严重年份,玉米减产可达 20%以上^[7]。玉米萌发期、苗期对低温十分敏感^[8]。发芽及幼苗期受低温危害所表现的症状通常是中胚轴和胚芽鞘变褐及萎焉、叶片呈水渍状及发育不全甚至因幼苗生长受阻而不能成活^[5]。目前,进行玉米耐寒性研究主要分为室内和田间。田间试验不仅成本高,并且由于不同年份早春温度的变化,试验结果不够准确;室内实验成本低,温度容易控制,结果稳定可靠^[1,9]。因此,在室内低温胁迫条件下研究发芽期和苗期玉米的生长和生理生化指标对玉米耐寒性研究具有重要意义。

近年来关于玉米耐寒性鉴定有了大量的研究^[1,9,10-11],找到了一些耐寒玉米自交系的筛选指标。但是,低温胁迫下采用耐寒玉米自交系和寒敏感玉米自交系进行玉米耐寒性的研究报道并不多见^[12],尤其是在发芽和幼苗期同时对玉米自交系进行研究来评价其耐寒性,并对耐寒性的差异进行分析的文献报道较少。本研究选用 44 份玉米自交系作为实验材料,在室内低温条件下进行萌发期耐寒性鉴定,并通过隶属函数法进行耐寒性综合评价,根据评价结果对选出的耐寒玉米自交系和寒敏感玉米自交系进行苗期生长和生理生化特性分析,探索不同玉米自交系耐寒性差异的原因,以期为玉米耐寒育种研究提供参考,为玉米耐寒遗传机理研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

不同耐寒性玉米自交系由甘肃省农业大学农学院提供(表 1)。

1.2 试验方法

1.2.1 种子清选 每个自交系中均选择饱满、无破损的种子,分别用 0.5% 的次氯酸钠消毒 10 min,用蒸馏水冲洗 3 次,然后用滤纸吸干附着水。

1.2.2 种子萌发试验 将 44 份玉米自交系种子分别置于直径为 12 cm 的培养皿中,双层滤纸作发芽床,每皿 30 粒;分别在 25℃、15℃、10℃、6℃条件下同时进行发芽实验,使其在培养箱中暗发芽,实验设 3 次重复。25℃、15℃、10℃、6℃处理的种子分别在第 7 天、14 天、28 天和第 42 天统计种子发芽率、胚芽长、胚根长、根数。借鉴郝德荣等^[13]方法,利用隶属函数法对 44 份玉米自交系进行耐寒性综合评价,其公式为:

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \tag{1}$$

$$U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \tag{2}$$

式中, U_{ij} 表示 i 材料 j 指标的耐寒性隶属值; X_{ij} 表示 i 材料 j 指标的测定值; X_{jmin} 表示所有材料 j 指标的最小值; X_{jmax} 表示所有材料 j 指标的最大值。若所测指标与材料的耐寒性呈正相关,则采用(1) 式计算隶属值,反之则用(2) 式。累加各指标的具体隶属值,并求出平均值后进行比较,平均值越大,自交系的耐寒性越强。

1.2.3 幼苗生长实验 根据萌发期玉米耐寒性的综合评价结果将耐寒玉米自交系和寒敏感玉米自交系种植在 15 cm × 13 cm 的营养钵中,每钵 30 株,25℃正常生长,实验设 3 次重复;植株长到三叶期时在 6℃低温胁迫条件下分别处理 0、2、4、6 d 后,测定生长指标和生理生化指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 发芽指标测定

发芽率:种子发芽率(%) = (发芽的种子粒数/供试种子粒数) × 100。

胚根长和胚芽长测定:直接用尺子测定各玉米自交系的胚芽长和胚根长,每品种每处理选 10 粒,取其平均值。

表 1 供试自交系及其系谱来源
Table 1 Pedigrees of 44 maize inbred lines used in the study

序号 Code	玉米自交系 Maize inbred lines	系谱来源 Sources of pedigree	序号 Code	玉米自交系 Maize inbred lines	系谱来源 Sources of pedigree
1	R802	法国 France	23	TS66	临洮 Lintao, China
2	Va35 – 2	(C103/T8)/T8	24	430	武威 Wuwei, China
3	掖 478	沈 5003/U8112 Shen 5003/U8112	25	B68	BSSS
4	Va35	(C103/T8)/T8	26	综 3 Zong3	综合种 Collective species
5	AR234	美国 America	27	TS109	临洮 Lintao, China
6	ND246	美国 America	28	吉 853 Ji 853	(黄早四/自 330)/黄早四 (Huangzao 4/Zi 330)/Huangzao 4
7	R802A	法国 France	29	K22	掖 478 衍生系 Derived from Ye 478
8	TS163	临洮 Lintao, China	30	H105W	33 – 16/A6323
9	Mo12	Lancaster 种质 Lancaster germplasm	31	TS164	临洮 Lintao, China
10	丹 340	旅 9/有稃玉米 Lv 9/Pod corn	32	B73	BSSSC5
11	TS8	临洮 Lintao, China	33	W64A	O202 BC3
12	TS161	临洮 Lintao, China	34	DM	德国 Germany
13	CM	BSSS 衍生系 Derived from BSSS	35	A654	A116/W19
14	T165	美国 America	36	WN11	342/She124
15	TS110	临洮 Lintao, China	37	178	先锋 78599 Xianfeng 78599
16	N192	德国 Germany	38	郑 22 Zheng 22	丹 340/E28 Dan 340/E28
17	502 优 –	340/黄早四 340/Huangzao 4	39	H84	[(B37/GE440)B14(14)]Ht
18	Pa91	(W9/Oh40B) S4/[(38 – 11/L317) 38 – 11]S4	40	K12	黄早四/潍春 Huangzao 4/Weichun
19	W182BW	WD/W22	41	DV	From Germany
20	B64	BSSS	42	黄早四 Huangzao 4	四平头杂株 Derived from Sipingtou pollination
21	黄 C	(黄小 162/自 330/02)/墨白 (Huangxiao 162/Zi 330/02)/Mobai	43	自 330 Zi 330	可利/Oh43 Keli/Oh43
22	Va26	Oh43/K55	44	Va102	Va59/Va60

1.3.2 苗期指标测定 幼苗长至三叶期时,分别在 6℃下低温处理 0、2、4、6 d,破坏性取样,每处理选取 10 株,用直尺测定株高、根长;将植株分地上部分和地下部分,分别称鲜重,再将鲜材料 105℃杀青 10 min,80℃烘至恒重,称干重。参照张宪政等^[14]的方法测定相对含水量、相对电导率、丙二醛、脯氨酸、可溶性糖、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等指标。

1.4 统计与分析

所有实验数据使用统计软件 SPSS16.0 进行处理。实验结果用 3 次重复的平均值 ± 标准偏差 (SD)表示。采用 Duncan 进行差异显著性多重比较,并进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 44 份不同玉米自交系萌发期的耐寒性鉴定及综合评价

在不同温度条件下(25℃、15℃、10℃、6℃),对

44 份玉米自交系的发芽率、胚芽长、胚根长、根数进行了统计。如表 1 所示,随着温度的降低,各自交系的发芽率、胚芽长、胚根长、根数大体呈下降趋势。但是不同品种各指标的变化程度不同,如出苗率的变化,玉米自交系 Va35 – 2、Va102、ND246 在不同温度间的变化幅度较小,而 K22、B68 和 H105W 出苗率在不同深度间的变化幅度较大,甚至在 15℃条件下就已经不发芽,说明温度对不同自交系的影响不同。

以发芽率、胚芽长、胚根长、根数为隶属函数法综合评价指标,利用隶属函数法综合评价 44 份自交系的耐寒性的大小,即先分别计算每一材料在 25℃、15℃、10℃和 6℃下的隶属值,再取 4 个温度下的评价值作为每一材料的隶属值,此值越大,耐寒性就越大。由表 2 可以看出,44 份材料的隶属值介于 0.00 ~ 0.87,平均为 0.30,变异系数为 67.20%。根据隶属值的大小将 44 份材料的耐寒性划分为 5 种类型,即:高耐寒性类型(隶属值 > 0.70),包括玉米

自交系 Va35 – 2、ND246、Va102;中等耐寒性类型(隶属值介于 0.60 ~ 0.70 之间),包括 Va35;耐寒性类型(隶属值介于 0.50 ~ 0.59 之间),包括 TS110 和 N192;寒敏感类型(隶属值介于 0.30 ~ 0.49 之间),包括 Pa91、W64A、H84、R802、CM、A654、掖 478、B73、

黄 C、AR234、TS164、R802A、TS66、T58、DM、TS109;高寒敏感类型(隶属值 < 0.30),包括 TS163、T165、丹 340、吉 853、Va26、502 优、黄早四、430、W182BW、WN11、Mo12、TS161、178、自 330、K12、郑 22、B64、综 3、B68、K22、H105W、DV。

表 2 低温胁迫下 44 份不同耐寒性玉米自交系萌发指标的变化

Table 2 Changes of germination indexes in different chilling-tolerant maize inbred lines under different low temperature at germination stage

序号 Code	玉米自交系 Maize inbred lines	温度/℃ Temperature	发芽率/% Germination rate	胚芽长/cm Plumule length	胚根长/cm Radical length	根数 Root number
1	R802	25	85	6.66 ± 0.85	12.49 ± 3.43	3
		15	75	4.55 ± 1.14	13.94 ± 2.04	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
2	Va35 – 2	25	85	8.78 ± 0.35	16.13 ± 3.15	5
		15	90	8.85 ± 0.71	17.21 ± 3.67	3
		10	90	1.94 ± 0.29	4.44 ± 0.74	3
		6	75	1.00 ± 0.04	2.75 ± 0.14	2
3	掖 478 Ye 478	25	70	6.34 ± 0.98	7.59 ± 2.34	4
		15	70	5.20 ± 0.71	10.60 ± 2.72	4
		10	40	1.34 ± 0.46	3.66 ± 0.88	1
		6	—	—	—	—
4	Va35	25	85	7.54 ± 1.05	16.16 ± 1.08	3
		15	85	7.46 ± 1.18	19.30 ± 2.29	3
		10	75	2.68 ± 1.04	6.60 ± 1.07	4
		6	—	—	—	—
5	AR234	25	87	6.59 ± 0.54	12.86 ± 1.05	4
		15	70	5.55 ± 0.63	16.48 ± 3.36	2
		10	55	1.04 ± 0.11	2.76 ± 0.25	1
		6	—	—	—	—
6	ND246	25	85	10.08 ± 0.50	17.89 ± 0.96	5
		15	80	8.65 ± 0.63	12.23 ± 5.38	3
		10	70	0.98 ± 0.44	3.38 ± 1.29	2
		6	65	0.86 ± 0.05	2.25 ± 0.06	1
7	R802A	25	80	6.84 ± 1.10	13.16 ± 1.47	4
		15	65	5.14 ± 0.55	15.26 ± 1.06	3
		10	40	0.92 ± 0.36	2.50 ± 1.04	2
		6	—	—	—	—
8	TS163	25	80	6.68 ± 0.98	8.04 ± 1.07	4
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
9	M102	25	80	5.96 ± 0.61	10.61 ± 2.09	4
		15	40	5.48 ± 0.54	14.63 ± 1.59	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
10	丹 340 Dan 340	25	60	5.04 ± 0.27	8.44 ± 0.81	4
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
11	T58	25	85	5.55 ± 0.99	7.09 ± 1.38	3
		15	55	6.16 ± 0.92	13.58 ± 3.07	3
		10	40	1.52 ± 0.97	2.48 ± 0.73	2
		6	—	—	—	—
12	TS161	25	80	6.98 ± 0.74	7.18 ± 1.28	5
		15	40	5.55 ± 0.64	14.00 ± 1.51	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—

续表 2

序号 Code	玉米自交系 Maize inbred lines	温度/℃ Temperature	发芽率/% Germination rate	胚芽长/cm Plumule length	胚根长/cm Radical length	根数 Root number
13	CM	25	90	5.18 ± 0.63	15.49 ± 1.76	6
		15	60	5.10 ± 0.89	9.66 ± 0.97	2
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
14	T165	25	90	8.51 ± 0.74	14.44 ± 1.46	5
		15	90	8.44 ± 0.75	14.85 ± 1.81	3
		10	90	2.14 ± 0.13	2.72 ± 0.37	1
		6	—	—	—	—
15	TS110	25	50	6.81 ± 0.91	8.10 ± 1.01	4
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
16	N192	25	100	6.56 ± 1.29	12.19 ± 2.56	5
		15	90	7.13 ± 0.85	15.03 ± 2.50	4
		10	55	1.44 ± 0.81	2.00 ± 0.62	2
		6	—	—	—	—
17	502 优 502 You	25	80	4.71 ± 1.08	4.46 ± 0.72	2
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
18	Pa91	25	85	8.56 ± 0.86	10.86 ± 3.30	3
		15	40	7.63 ± 1.24	16.44 ± 5.21	2
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
19	W182BW	25	80	4.16 ± 0.35	5.35 ± 0.86	4
		15	35	4.23 ± 0.29	5.75 ± 0.48	1
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
20	B64	25	80	6.01 ± 1.49	6.19 ± 0.81	4
		15	40	2.86 ± 0.26	4.80 ± 0.73	1
		10	40	1.38 ± 0.49	2.62 ± 2.28	2
		6	—	—	—	—
21	黄 C Huang C	25	80	6.21 ± 0.93	11.25 ± 1.60	5
		15	60	6.06 ± 1.12	9.76 ± 3.14	3
		10	40	0.98 ± 0.44	1.86 ± 1.15	1
		6	—	—	—	—
22	Va26	25	55	3.06 ± 0.78	8.44 ± 0.27	1
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
23	TS66	25	80	6.28 ± 0.60	11.01 ± 0.69	4
		15	50	5.41 ± 0.60	11.58 ± 2.65	3
		10	40	0.90 ± 0.32	3.22 ± 0.64	1
		6	—	—	—	—
24	430	25	80	5.71 ± 0.70	11.66 ± 1.85	4
		15	70	4.66 ± 0.56	13.11 ± 1.03	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
25	B68	25	85	7.90 ± 0.29	15.69 ± 0.65	5
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
26	综 3 Zong 3	25	85	5.46 ± 0.99	8.04 ± 1.21	2
		15	50	5.83 ± 0.79	11.13 ± 3.31	2
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—

续表 2

序号 Code	玉米自交系 Maize inbred lines	温度/℃ Temperature	发芽率/% Germination rate	胚芽长/cm Plumule length	胚根长/cm Radical length	根数 Root number
27	TS109	25	80	8.76 ± 1.07	18.01 ± 1.88	4
		15	35	9.33 ± 0.28	16.03 ± 2.23	3
		10	40	1.58 ± 0.43	3.38 ± 0.28	1
		6	—	—	—	—
28	吉 853 Ji 853	25	68	3.10 ± 0.16	5.36 ± 0.37	2
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
29	K22	25	85	7.45 ± 1.04	15.16 ± 1.28	4
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
30	H105W	25	85	7.51 ± 0.98	11.08 ± 2.14	4
		15	—	—	—	—
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
31	TS164	25	80	6.40 ± 0.98	11.99 ± 0.77	3
		15	70	6.44 ± 1.02	17.99 ± 3.93	3
		10	45	0.76 ± 0.21	3.18 ± 0.40	1
		6	—	—	—	—
32	B37	25	60	6.89 ± 0.49	9.51 ± 1.07	5
		15	65	4.19 ± 0.34	10.59 ± 1.71	4
		10	40	1.18 ± 0.53	3.02 ± 1.04	1
		6	—	—	—	—
33	W64A	25	80	9.25 ± 0.32	14.21 ± 0.53	4
		15	50	7.05 ± 1.86	10.29 ± 2.51	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
34	DM	25	80	8.76 ± 0.93	15.89 ± 1.28	4
		15	75	6.86 ± 0.39	16.11 ± 1.90	2
		10	70	1.46 ± 0.38	2.36 ± 0.72	1
		6	—	—	—	—
35	A654	25	95	5.94 ± 0.52	6.43 ± 0.91	1
		15	80	8.94 ± 0.47	15.05 ± 4.94	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
36	WN11	25	70	6.20 ± 0.88	8.23 ± 1.68	3
		15	35	2.33 ± 0.22	3.60 ± 0.44	1
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
37	178	25	85	6.85 ± 0.50	8.78 ± 1.77	4
		15	45	4.74 ± 0.21	5.64 ± 1.16	2
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
38	郑 22 Zheng 22	25	85	7.59 ± 0.92	8.39 ± 1.91	3
		15	45	7.26 ± 0.67	8.93 ± 1.69	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
39	H84	25	75	8.84 ± 1.25	12.61 ± 1.62	5
		15	60	6.66 ± 0.82	11.93 ± 2.57	3
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
40	K12	25	80	6.56 ± 0.85	12.81 ± 2.15	4
		15	35	2.55 ± 0.35	10.75 ± 3.32	4
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—

续表 2						
序号 Code	玉米自交系 Maize inbred lines	温度/℃ Temperature	发芽率/% Germination rate	胚芽长/cm Plumule length	胚根长/cm Radical length	根数 Root number
41	DV	25	80	6.13 ± 0.22	6.51 ± 0.45	3
		15	45	5.64 ± 0.63	6.66 ± 0.76	1
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
42	黄早四 Huangzao 4	25	70	5.34 ± 0.43	5.06 ± 0.74	2
		15	50	6.51 ± 0.68	8.18 ± 1.72	1
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
43	自 330 Zi 330	25	80	5.10 ± 0.67	7.91 ± 0.44	4
		15	50	4.90 ± 0.58	10.59 ± 1.67	2
		10	—	—	—	—
		6	—	—	—	—
44	Va102	25	80	8.23 ± 0.63	12.09 ± 1.42	4
		15	85	7.26 ± 0.67	12.58 ± 2.18	3
		10	80	2.20 ± 0.30	4.26 ± 0.61	3
		6	70	1.08 ± 0.07	2.89 ± 0.11	2

表 3 44 份自交系萌发期耐寒性综合评价						
Table 3 Comprehensive evaluation of chilling tolerance at germination stage in 44 maize inbred lines						
类型 Type	玉米自交系 Maize inbred lines	隶属值 The membership value	玉米自交系 Maize inbred lines	隶属值 The membership value	玉米自交系 Maize inbred lines	隶属值 The membership value
高耐寒 High chilling tolerance	Va35 – 2	0.48	Va102	0.80	ND246	0.74
中耐寒 Medium chilling tolerance	Va35	0.62	—	—	—	—
耐寒 Chilling-tolerance	TS110	0.57	N192	0.52	—	—
敏感 Chilling sensitive	DM	0.49	TS109	0.49	R802A	0.42
	AR234	0.42	TS164	0.41	掖 478 Ye 478	0.41
	B37	0.41	黄 C Huang C	0.40	T58	0.37
	TS66	0.37	W64A	0.34	H84	0.34
	CM	0.32	A654	0.30	Pa91	0.30
	R802	0.30	—	—	—	—
	B64	0.29	430	0.28	TS161	0.28
	郑 22 Zheng 22	0.27	Mo12	0.27	K12	0.27
高敏感 High chilling sensitive	178	0.24	自 330 Zi 330	0.23	综 3 Zong 3	0.22
	B68	0.20	DV	0.19	黄早四 Huangzao 4	0.18
	K22	0.18	W182BW	0.16	WN11	0.16
	H105W	0.16	TI65	0.11	TS163	0.11
	丹 340 Dan 340	0.09	Mo22	0.07	CV	0.06
	502 优 502 You	0.05	01743 – 2	0.03	Va26	0.02
	吉 853 Ji 853	0.02	K805	0.00	—	—

2.2 苗期低温胁迫处理下不同耐寒性玉米自交系幼苗生长和生理生化特性分析

2.2.1 苗期低温胁迫处理对不同玉米自交系生长指标的影响 根据耐寒性综合评价结果,对选出的 3 份高耐寒性玉米自交系 Va35 – 2、Va102 和 ND246

和 3 份高敏感性玉米自交系 K22、B68 和 H105W 进行 6℃低温胁迫处理。由表 2 可知,6℃低温胁迫处理 2、4、6 d 后,3 个耐寒自交系和 3 个敏感自交系的株高、根长、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重都有不同程度的下降。总体来看,耐寒玉

米自交系下降幅度较小,而寒敏感玉米自交系下降幅度较大。如表 4 所示,与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 6 d 后,耐寒玉米自交系 Va35-2、Va102 和 ND246 的株高分别下降了 6.61%、4.38%、6.25%;根长分别下降 5.98%、9.64%、8.06%;而寒敏感自交系 K22、B68 和 H105W 的株高分别下降 7.48%、11.53%、8.76%;根长分别下降 15.38%、12.03%、14.16%。低温胁迫处理 2、4、6 d 后,Va35-2 的地上部鲜重分别下降 1.20%、6.62%、14.46%;Va102 的地上部鲜重呈现先升高再降低的趋势,变化幅度为处理 2 d 先升高 8.33%,处理 4 d 后的地上部鲜重和对照(0 d)没有差别,而后处理 6 d 后地上部鲜重与对照相

比下降 3.57%;ND246 的地上部鲜重分别下降 5.10%、13.27%、18.36%。相比较而言,3 个敏感自交系下降幅度较大,K22 的地上部鲜重分别下降 27.03%、56.76%、62.16%;B68 的地上部鲜重分别下降 21.35%、47.19%、65.17%;H105W 的地上部鲜重分别下降 29.49%、38.46%、50.00%。同样,低温胁迫对不同耐寒性的玉米自交系地上部干重、地下部鲜重和干重也有影响,表现出耐寒自交系的各项指标下降幅度较大。这些实验结果表明,萌发期筛选出的耐寒品种 Va35-2、Va102 和 ND246 在幼苗期各项幼苗指标仍然表现较好,随着低温处理时间的延长,各项生长指标下降幅度较小。

表 4 6℃条件下不同耐寒性玉米自交系幼苗生长指标随时间的变化							
Table 4 Changes of growth indexes among different chilling-tolerant maize inbred lines under 6℃ stress at seedlings stage							
品种 Varieties	时间/d Days	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	地上部鲜重/g Shoot fresh weight	地上部干重/g Shoot dry weight	地下部鲜重/g Root fresh weight	地下部干重/g Root dry weight
Va35-2	0	25.10±2.33aA	33.10±1.0aA	1.66±0.37aA	0.13±0.04aA	1.74±0.18aA	0.14±0.01aA
	2	24.42±0.94aA	32.34±0.51aAB	1.64±0.20aA	0.12±0.04aA	1.64±0.03aA	0.13±0.02aA
	4	24.22±0.83aA	32.06±0.62abAB	1.55±0.11aA	0.12±0.01aA	1.68±0.07aA	0.13±0.01aA
	6	23.44±1.71aA	31.12±0.99bB	1.42±0.02aA	0.11±0.02aA	1.66±0.07aA	0.13±0.02aA
Va102	0	23.30±0.76aA	23.44±0.63aA	0.84±0.10aA	0.09±0.01aA	1.01±0.03aA	0.08±0.01aA
	2	22.86±1.11aA	22.72±0.28abAB	0.91±0.06abA	0.08±0.02aA	0.95±0.05aAB	0.08±0.01abAB
	4	22.54±0.56aA	22.12±0.70bBC	0.84±0.05abA	0.07±0.10aA	0.87±0.07bBC	0.07±0.01bcAB
	6	22.28±1.90aA	21.18±0.58cC	0.81±0.07bA	0.07±0.01aA	0.81±0.05bC	0.06±0.01cB
ND246	0	24.00±1.27aA	23.56±0.70aA	0.98±0.08aA	0.09±0.01aA	0.93±0.07aA	0.08±0.01aA
	2	23.20±0.84abA	22.82±0.85abAB	0.93±0.04abAB	0.08±0.01abA	0.89±0.04abA	0.07±0.01abA
	4	22.92±0.79abA	21.66±0.59bB	0.85±0.05bcAB	0.07±0.01bA	0.81±0.10bcAB	0.06±0.01abA
	6	22.50±0.74bA	21.66±1.08bB	0.80±0.12cB	0.07±0.01bA	0.73±0.04cB	0.06±0.01bA
K22	0	20.58±0.42aA	18.20±1.55aA	0.74±0.13aA	0.06±0.01aA	0.72±0.07aA	0.06±0.01aA
	2	20.20±0.73abAB	17.00±1.12abA	0.54±0.08bB	0.05±0.01abAB	0.61±0.03bB	0.05±0.01abA
	4	19.48±0.43bcAB	16.16±2.45abA	0.32±0.01cC	0.04±0.01bcBC	0.51±0.05cC	0.04±0.02abA
	6	19.04±1.06bC	15.40±0.82bA	0.28±0.01cC	0.03±0.01cC	0.44±0.03dC	0.03±0.01bA
B68	0	22.88±2.00aA	21.28±1.75aA	0.89±0.05aA	0.07±0.01aA	0.84±0.06aA	0.06±0.01aA
	2	22.10±1.65abA	20.72±1.26aAB	0.70±0.04bB	0.06±0.01aAB	0.76±0.06aAB	0.05±0.01abAB
	4	20.86±1.15abA	19.78±1.06abAB	0.47±0.08cC	0.05±0.01bBC	0.64±0.06bBC	0.04±0.01bcAB
	6	20.24±0.51bA	18.72±0.92bB	0.31±0.02dD	0.04±0.01bC	0.52±0.11cC	0.04±0.01cB
H105W	0	21.46±0.96aA	20.06±1.37aA	0.78±0.10aA	0.07±0.01aA	0.81±0.03aA	0.06±0.02aA
	2	20.88±0.83abA	19.14±1.28aA	0.55±0.07bB	0.06±0.01abAB	0.72±0.05aAB	0.05±0.01abA
	4	19.94±0.42abA	18.92±1.24aA	0.48±0.03bBC	0.05±0.01bcBC	0.61±0.11bBC	0.04±0.01bA
	6	19.58±1.76bA	17.22±1.94aA	0.39±0.04cC	0.50±0.07cC	0.03±0.01bA	

注:不同天数处理下不同玉米自交系同一指标测定值之间,标有大写字母或小写字母表示 1%与 5%水平差异显著。下同。
Note: Different small letters and capital letters denote significance at 5% and 1% level, respectively. The same as below.

2.2.2.2 苗期低温胁迫条件下不同玉米自交系相对含水量、相对电导率和丙二醛(MDA)含量的变化
由表 5 可知,与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 2、4、6 d 后,3 个耐寒玉米自交系的相对含水量下降幅度较

小,Va35-2 分别下降 1.63%、4.08%、5.04%;Va102 分别下降 1.30%、3.54%、4.95%;ND246 分别下降 1.39%、3.32%、5.60%。3 个寒敏感玉米自交系下降幅度较大,K22 分别下降 9.61%、23.58%、

35.37% ; B68 分别下降 7.37%、21.56%、30.48% ; H105W 分别下降 12.33%、22.89%、33.89%。低温胁迫处理 2、4、6 d 后,不同玉米自交系的相对电导率都有升高的趋势,但是上升的趋势不同,耐寒玉米自交系的升高幅度较小,而寒敏感自交系的升高幅度较大。Va35-2 分别升高 1.32 倍、1.46 倍、1.67 倍; Va102 分别升高 1.10 倍、1.20 倍、1.53 倍; ND246 分别升高 1.23 倍、1.56 倍、1.91 倍。K22 分别升高 2.54 倍、4.21 倍、6.18 倍; B68 分别升高 2.15 倍、3.90 倍、5.82 倍; H105W 分别升高 2.79 倍、4.36 倍、

5.94 倍。低温胁迫条件下,不同玉米自交系叶片的 MDA 含量的变化趋势与相对电导率相一致。与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 6 d 后,3 个耐寒玉米自交系 Va35-2、Va102 和 ND246 的丙二醛含量分别升高 50.01%、54.49%、43.08% ; 寒敏感自交系 K22、B68 和 H105W 分别升高 129.32%、153.88%、227.40%。说明耐寒系和较寒敏感体系内清除自由基的还原物质种类较多或含量较高,从而减轻了自由基对膜的伤害,而敏感系的清除作用较小,从而导致丙二醛含量较高。

表 5 6℃条件下不同耐寒性玉米自交系幼苗中相对含水量、相对电导率和丙二醛随时间的变化
Table 5 Changes of relative water content, relative conductivity and MDA content with days in different chilling-tolerant maize inbred lines under 6℃ stress at seedlings stage

玉米自交系 Maize inbred lines	时间/d Days	相对含水量/% Relative water content	相对电导率/% Relative conductivity	丙二醛/(μmol·g ⁻¹) MDA content
Va35-2	0	93.83 ± 0.55aA	9.87 ± 0.50dD	4.94 ± 0.13dD
	2	92.30 ± 0.60abAB	13.10 ± 0.30cC	5.38 ± 0.18cC
	4	90.00 ± 2.30bcB	14.37 ± 0.55bB	6.44 ± 0.01bB
	6	89.10 ± 0.69cB	16.47 ± 0.31aA	7.46 ± 0.11aA
Va102	0	92.37 ± 1.29aA	9.80 ± 0.60dC	4.62 ± 0.10dD
	2	91.17 ± 0.46abA	10.80 ± 0.60cBC	5.26 ± 0.23cC
	4	89.10 ± 4.12abA	11.80 ± 0.40bB	6.21 ± 0.01bB
	6	87.80 ± 0.85bA	15.00 ± 0.20aA	7.23 ± 0.07aA
ND246	0	93.33 ± 1.35aA	8.97 ± 0.21dD	5.71 ± 0.15dD
	2	92.03 ± 1.03aAB	11.03 ± 0.40cC	6.34 ± 0.19cC
	4	90.23 ± 2.56abAB	14.03 ± 0.40bB	7.31 ± 0.18bB
	6	88.10 ± 1.04bB	17.13 ± 0.21aA	8.17 ± 0.02aA
K22	0	91.60 ± 0.75aA	10.17 ± 0.32dD	6.72 ± 0.05dD
	2	82.80 ± 1.61bB	25.83 ± 0.55cC	8.93 ± 0.25cC
	4	70.00 ± 0.50cC	42.83 ± 0.55bB	11.8 ± 0.02bB
	6	59.20 ± 0.46dD	62.83 ± 0.55aA	15.41 ± 0.07aA
B68	0	91.63 ± 0.70aA	10.37 ± 0.45dD	6.31 ± 0.02dD
	2	84.87 ± 0.83bB	22.27 ± 0.31cC	8.62 ± 0.21cC
	4	71.87 ± 1.69cC	40.43 ± 0.45bB	12.11 ± 0.01bB
	6	63.70 ± 0.6dD	60.37 ± 0.55aA	16.02 ± 0.08aA
H105W	0	91.17 ± 0.46aA	10.13 ± 0.25dD	5.62 ± 0.02dD
	2	79.93 ± 0.12bB	28.23 ± 0.25cC	8.82 ± 0.37cC
	4	70.30 ± 0.53cC	44.13 ± 0.25bB	12.62 ± 0.02bB
	6	60.27 ± 0.47dD	60.13 ± 0.25aA	18.40 ± 0.02aA

2.2.2.3 苗期低温胁迫下不同玉米自交系叶片脯氨酸和可溶性糖含量的变化 从图 1 可知,在 6℃低温胁迫条件下 6 个玉米自交系的脯氨酸含量呈上升趋势,耐寒系上升幅度较大,敏感系的上升幅度较小。与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 2、4、6 d 后, Va35-2 分别升高 2.01 倍、3.22 倍、4.30 倍; Va102

分别升高 1.93 倍、3.11 倍、4.09 倍; ND246 分别升高 2.05 倍、3.12 倍、4.21 倍。K22 分别升高 1.34 倍、1.78 倍、2.51 倍; B68 分别升高 1.34 倍、1.90 倍、2.67 倍; H105W 分别升高 1.42 倍、2.05 倍、2.82 倍。这说明耐寒玉米自交系在低温胁迫下有较多的脯氨酸参与植株的渗透调节,以减轻低温胁迫给植

株造成的危害。

另外,低温胁迫条件下 6 个玉米自交系中的可溶性糖含量的变化趋势与脯氨酸含量的变化趋势相一致。与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 2、4、6 d 后,Va35-2 的可溶性糖含量分别升高 1.61 倍、2.13

倍、2.52 倍;Va102 分别升高 1.68 倍、2.19 倍、2.64 倍;ND246 分别升高 1.64 倍、2.18 倍、2.57 倍。K22 分别升高 1.27 倍、1.64 倍、1.89 倍;B68 分别升高 1.25 倍、1.63 倍、1.87 倍;H105W 分别升高 1.35 倍、1.72 倍、2.00 倍。

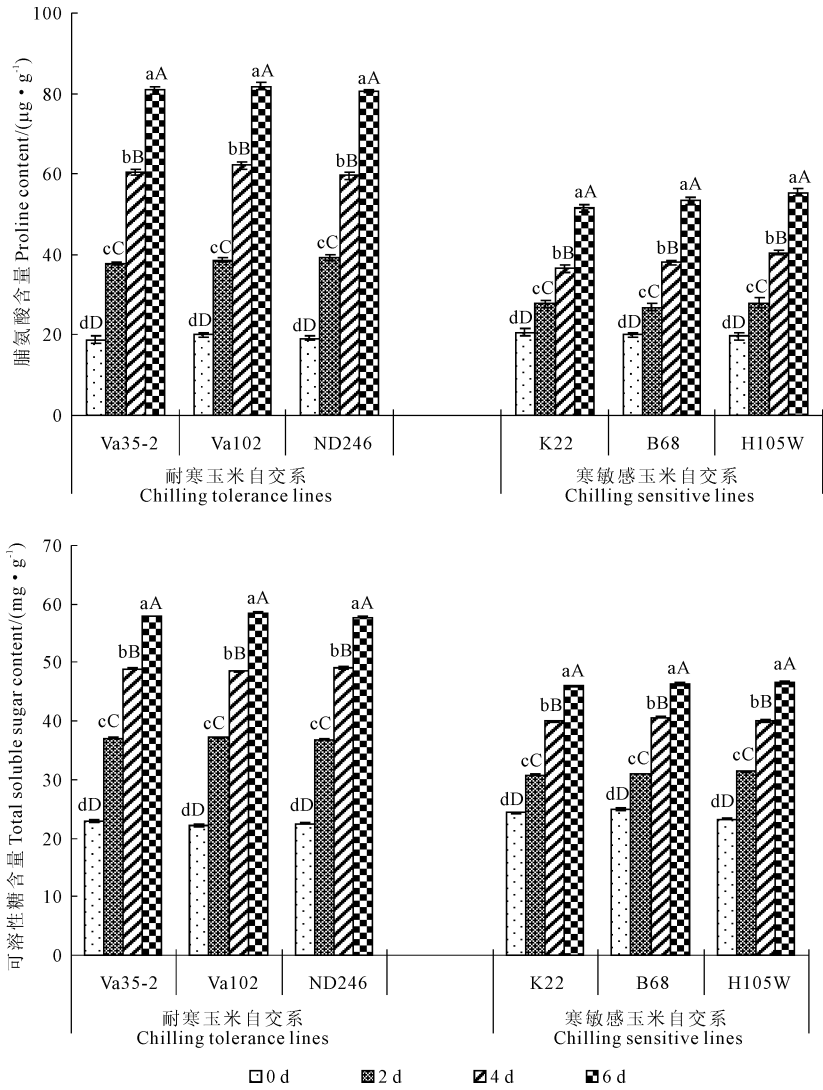


图 1 6℃条件下不同耐寒性玉米自交系幼苗中脯氨酸含量和可溶性糖含量随时间的变化
Fig.1 Changes of proline and total soluble sugar contents with days in different chilling-tolerance maize inbred lines under 6℃ stress at seedlings stage

2.2.4 低温胁迫处理下不同玉米自交系叶片保护酶活性的变化 由图 2 可知,低温胁迫条件下,6 个玉米自交系保护酶的活性降低,但是下降的幅度不同。3 个耐寒玉米自交系下降幅度较小,而 3 个寒敏感玉米自交系下降幅度较大。与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 2、4、6 d 后,Va35-2 的 SOD 酶活性分别下降 1.44%、9.32%、22.47%;Va102 分别下降 6.66%、13.82%、24.17%;ND246 分别下降 5.29%、13.88%、24.68%。K22 分别下降 41.09%、63.92%、76.65%;B68 分别下降 44.22%、64.64%、73.63%;

H105W 分别下降 46.49%、61.70%、70.74%。
低温胁迫后,POD 也有与 SOD 相似的变化趋势。与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 2、4、6 d 后,Va35-2 的 POD 酶活性分别下降 12.52%、23.66%、29.88%;Va102 分别下降 6.63%、19.98%、26.30%;ND246 分别下降 8.66%、20.97%、28.88%;K22 分别下降 34.35%、52.20%、64.81%;B68 分别下降 41.76%、58.39%、70.81%;H105W 分别下降 27.61%、49.85%、64.59%。
同样,CAT 与 SOD 和 POD 酶活性的变化趋势相

一致。与对照(0 d)相比,低温胁迫处理 2、4、6 d 后, Va35-2 分别下降 9.62%、19.04%、28.86%; Va102 分别下降 10.71%、19.96%、28.57%; ND246 分别下降 7.59%、15.96%、22.96%。K22 分别下降

40.21%、60.53%、76.32%; B68 分别下降 34.09%、62.04%、71.72%; H105W 分别下降 39.09%、60.90%、74.95%。

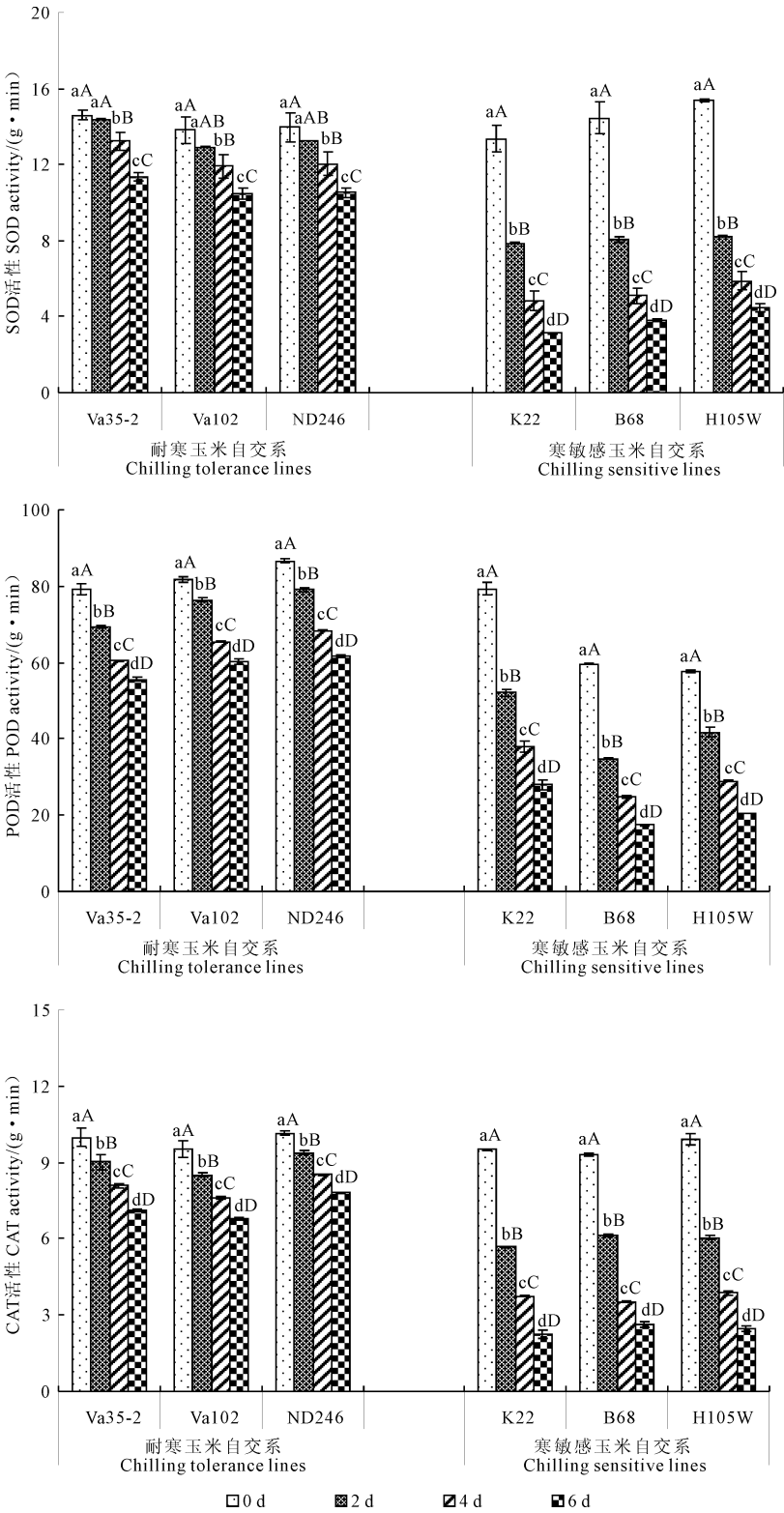


图 2 6℃条件下不同耐寒性玉米自交系幼苗中 SOD、POD 和 CAT 活性随时间的变化
Fig.2 Changes of protective enzyme activity with days in different chilling-tolerance maize inbred lines under 6℃ stress at seedlings stage

2.2.5 苗期低温胁迫处理下不同耐寒性玉米自交系各性状的方差分析 表 6 所示的方差分析结果表明,株高、根长、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重、相对含水量、相对电导率、丙二醛、脯氨酸含量、可溶性糖含量 SOD、POD 和 CAT 14 个性状在不同玉米自交系间达到显著差异,说明在正常或低温胁迫条件下,14 个性状在品种间的变化较大,不同玉米自交系间存在差异,进行耐寒品种选育时,可以将这些指标作为参考。14 个性状在处理间的差异都达到了极显著水平,表明玉米对低温胁迫比较敏感。14 个性状在品种与处理间的显著性表明,只有根长、地下部干重和地上部干重没有达到显著差异,其它性状均达到显著和极显著水平,说明根长、地下部干重和地上部干重受低温胁迫的影响较小,而其它指标受低温胁迫影响较大。

表 6 6℃低温胁迫条件下幼苗生长和生理生化性状的方差分析														
Table 6 Variance analysis of seedling growth and physiological and biochemical indexes in maize inbred lines under 6℃ stress at seedlings stage														
变异来源 Source of variance	株高 Plant height	根长 Root length	地上部鲜重 Shoot fresh weight	地上部干重 Shoot dry weight	地下部鲜重 Root fresh weight	地下部干重 Root dry weight	相对含水量 Relative water content	相对电导率 Relative conductivity	MDA	脯氨酸 Proline content	可溶性糖 Total soluble sugar	SOD活性 SOD activity	POD活性 POD activity	CAT活性 CAT activity
品种间 Varieties	289.466 **	2870.556 **	16.299 **	0.071 **	16.498 **	0.112 **	3754.345 **	8856.295 **	407.231 **	4118.143 **	691.673 **	437.346 **	18236.695 **	180.083 **
处理间 Treats	49.522 **	81.001 **	1.884 **	0.013 **	0.881 **	0.008 **	3230.068 **	8263.045 **	424.504 **	22925.853 **	8493.258 **	488.834 **	11531.072 **	242.729 **
品种间×处理间 Varieties×Treats	6.014	4.997	0.501 **	0.001	0.163 *	0.001	1717.206 **	4999.913 **	169.552 **	2191.446 **	446.714 **	165.771 **	1339.725 **	55.884 **

注: * 或 ** 分别代表 5% 或 1% 水平差异显著。下同。
Note: * or ** separately represent significantly difference at 5% or 1% level. The same is as below.

3 结论与讨论

3.1 低温胁迫处理下不同耐寒性玉米自交系萌发和幼苗生长特点分析

在玉米种子的萌发阶段,种子发芽率、胚根长、胚芽长、根系活力指数等均能反映玉米品种的耐寒性,不同玉米品种在低温下的发芽能力存在差异,耐寒性弱的玉米品种种子萌发、幼苗生长均受到更严重的抑制作用,发芽时间延迟^[9,15]。在幼苗生长阶段,出苗率、出苗指数、幼苗鲜重、幼苗干重、根长等能较有效地反映玉米不同品种的耐寒性^[16-17]。本研究首先在室内低温条件下利用萌发期的发芽率、胚芽长、胚根长和根数 4 个指标对 44 份玉米自交系进行萌发期性状鉴定,并通过隶属函数法进行耐寒性综合评价,而后根据评价结果对选出的 3 份耐寒

2.2.6 苗期低温胁迫条件下不同耐寒性玉米自交系各性状之间的相关性分析 如表 7 所示,对 6 份不同耐寒性玉米自交系在 6℃ 低温胁迫条件下各个性状之间的相关性做了分析。可以看出,低温胁迫条件下,株高除了与 POD 差异性不显著以外,与根长、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重、丙二醛、脯氨酸含量、可溶性糖含量 SOD 和 CAT 均呈显著正相关,而与相对含水量和相对电导率呈显著负相关;SOD 除了与地下部鲜重和地下部干重的差异性不显著以外,与其它指标都存在差异显著性,只是与相对含水量和相对电导率呈显著差异性负相关。地下部干重与株高、根长、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重之间呈显著正相关,这充分体现了植株是一个统一的整体,各项生长和生理指标之间联系紧密、互相影响。

玉米自交系和 3 份寒敏感玉米自交系的 6 个苗期生长指标株高、根长、地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重进行测定,结果表明无论在萌发期还是幼苗生长期高耐寒玉米自交系都有较好的生长潜能,表现出各项指标的下降幅度低于高寒敏感玉米自交系,尤其是在萌发期,从 15℃ 低温开始,3 个高寒敏感自交系的种子已经没有了发芽迹象。该研究通过萌发期和幼苗生长期实验结果的互相印证,进一步确定了萌发期选出的高耐寒玉米自交系的耐寒性特点。

3.2 苗期低温胁迫处理下,不同耐寒性玉米自交系各项生理生化指标的变化与耐寒性的关系分析

低温胁迫引起细胞膜结构破坏是导致植物冷害损伤和死亡的根本原因。玉米在低温胁迫下积累大量的活性氧,产生超氧化物自由基,引发膜脂过氧

表 7 6℃低温胁迫条件下幼苗期不同耐寒性玉米自交系生长和生理生化指标的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of seedling growth and physiological-biochemical indexes of different maize inbred lines under 6℃ stress at seedlings stage

项目 Item	株高 Plant height	根长 Root length	地上部鲜重 Shoot fresh weight	地上部干重 Shoot dry weight	地下部鲜重 Root fresh weight	地下部干重 Root dry weight	相对含水量 Relative water content	相对电导率 Relative conductivity	MDA	脯氨酸含量 Proline content	可溶性糖含量 Total soluble sugar	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity
株高 Plant height	1													
根长 Root length	0.903 *	1												
地上部鲜重 Shoot fresh weight	0.905 *	0.992 * *	1											
地上部干重 Shoot dry weight	0.925 * *	0.990 * *	0.996 * *	1										
地下部鲜重 Root fresh weight	0.845 *	0.990 * *	0.988 * *	0.979 * *	1									
地下部干重 Root dry weight	0.841 *	0.978 * *	0.990 * *	0.977 * *	0.993 * *	1								
相对含水量 Relative water content	0.937 * *	0.756	0.794	0.821 *	0.706	0.728	1							
相对电导率 Relative conductivity	-0.904 *	-0.707	-0.748	-0.782	-0.658	-0.681	-0.995 * *	1						
MDA	-0.893 *	-0.736	-0.778	-0.807	-0.705	-0.727	-0.983 * *	0.989 * *	1					
脯氨酸含量 Proline content	0.888 *	0.705	0.748	0.787	0.661	0.684	0.983 * *	-0.994 * *	-0.981 * *	1				
可溶性糖含量 Total soluble sugar	0.917 *	0.740	0.781	0.813 *	0.695	0.718	0.997 * *	-0.998 * *	-0.989 * *	0.994 * *	1			
SOD 活性 SOD activity	0.939 * *	0.8160 *	0.850 *	0.882 *	0.775	0.791	0.975 * *	-0.970 * *	-0.959 * *	0.981 * *	0.981 * *	1		
POD 活性 POD activity	0.740	0.537	0.615	0.629	0.515	0.575	0.918 * *	-0.929 * *	-0.931 * *	0.913 *	0.924 * *	0.855 *	1	
CAT 活性 CAT activity	0.904 *	0.719	0.766	0.796	0.666	0.699	0.983 * *	-0.979 * *	-0.950 * *	0.980 * *	0.984 * *	0.977 * *	0.914 *	1

化,膜脂过氧化物丙二醛(MDA)大量积累,造成膜透性上升,电解质外渗,使电导率值变大,导致细胞膜系统严重损伤^[10,18-19]。细胞膜结构的稳定性与玉米品种的耐寒性呈正相关,耐寒性强的玉米品种膜透性增大程度较慢,而耐寒性弱的品种膜透性增大迅速,造成细胞膜严重损伤^[12]。在本研究中,6个玉米自交系均表现出相对含水量降低,相对电导率和MDA含量升高,这一结果在其它植物中也有类似的报道^[20-22]。但是,耐寒玉米自交系与敏感玉米自交系相比表现出相对含水量下降较少,相对电导率上升较慢,MDA含量增加较少。说明低温胁迫下,耐寒玉米自交系比寒敏感玉米自交系能保持较高的含水量,能更好地维持细胞膜的完整性以及作物体内环境的稳定性,使各种生理生化反应得以正常进行。

脯氨酸和可溶性糖是非常重要的有机渗透调节物质,对植物具有一定的抗性和保护作用^[23]。玉米游离脯氨酸含量与耐寒性呈正相关,低温可以明显地增加玉米体内脯氨酸含量^[24-25]。高灿红等^[12]指出:玉米幼苗中胚轴对低温反应最敏感,中胚轴脯氨酸含量变化率与玉米耐寒性关系最密切。王迎春等^[10]研究表明,脯氨酸浓度提高显著的玉米品种具有较强的耐寒特性。简令成等^[26]研究表明,经过低温锻炼的玉米幼苗脯氨酸含量较常温下生长的显著增加,可保护锻炼植株在冷胁迫中膜结构的稳定性,避免伤害。脯氨酸也可作为膜稳定剂防止细胞冰冻脱水而引起伤害^[27]。本研究中有相似的研究结果,低温胁迫后,6个玉米自交系的脯氨酸和可溶性糖含量上升。但是,不同耐寒性玉米自交系上升的幅度不同。与寒敏感玉米自交系相比,耐寒玉米自交系 Va35-2、Va102、ND246 上升幅度较大。这些结果表明耐寒玉米自交系有较高的脯氨酸和可溶性糖含量,可能有助于维持细胞的渗透平衡,保护细胞膜免受伤害,从而有较快地适应低温

胁迫的调节能力。

SOD、CAT 和 POD 是生物体内的保护性酶,在清除生物自由基上担负着重要功能,能够有效地减轻因低温造成的氧化胁迫伤害^[8,22,28]。耐寒性强的品种能保持较高的保护酶活性^[29-30]。本研究结果表明,在低温胁迫条件下 6 个玉米自交系中的保护酶都随着处理时间的延长而呈下降趋势,保护能力下降,这与张海艳报道的结果相一致^[29]。但是,耐寒玉米自交系中保护酶的下降幅度低于寒敏感玉米自交系,从而较寒敏感玉米自交系有较高的保护酶活性,这与前人报道的结果相一致^[31-32]。说明在低温胁迫下,耐寒玉米自交系保持了较高的抗氧化酶活性,具有较强的活性氧清除能力。

同时,由表 4、5、图 1、2 可知,耐寒玉米自交系的苗期相关生长和生理生化指标都明显高于寒敏感玉米自交系,且苗期低温胁迫条件下各性状的相关性分析表明,株高和 SOD 其它相关指标的相关性较好,说明低温胁迫条件下株高和 SOD 含量是较好的耐寒性指标,可直接反应出植株耐寒胁迫能力的强弱。

参 考 文 献:

[1] 郑钧晔,胡 晋,张 胜,等.玉米自交系发芽期和苗期耐寒性的鉴定[J].浙江大学学报,2006,32(1):41-45.

[2] Stamp P. Chilling tolerance of young plants demonstrated on the example of maize[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1984,(7):1-83.

[3] Miedema P. The effects of low temperature on *Zea mays* L.[M]. Advances in Agronomy, 1982,35:93-128.

[4] Rodriguez V M, Romay M C, Ordas A, et al. Evaluation of European maize germplasm under cold conditions[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2010,57(3):329-335.

[5] 谭振波,刘 昕,曹鸣庆.玉米抗寒性的研究进展[J].玉米科学,2002,10(2):56-60.

[6] Stewart C R, Martin B A, Linda R. et al. Seeding growth, mitochondrial characteristics and alternative respiratory capacity of corn genotypes differing in cold tolerance[J]. Plant Physiology, 1990,92(3):761-766.

[7] 马树庆,裴祝香,王 琪.中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究[J].自然灾害学报,2003,12(3):137-141.

[8] 马延华,王庆祥,陈绍江.玉米耐寒性鉴定研究进展[J].作物杂志,2012,(4):1-8.

[9] 杨 光,刘宏魁,李世鹏,等.玉米抗冷种质资源的筛选与鉴定[J].玉米科学,2012,20(1):57-60.

[10] 王迎春,褚金翔,孙忠富,等.玉米对低温胁迫的生理响应及不同品种间耐低温能力比较[J].中国农学通报,2006(9):210-211.

[11] 马延华,王庆祥,孙德全,等.玉米自交系芽期耐寒性的鉴定与评价[J].玉米科学,2013,21(2):88-92.

[12] 高灿红,胡 晋,郑昀晔,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.

[13] 郝德荣,程玉静,徐辰武,等.玉米耐盐种质筛选及群体遗传结构分析[J].植物遗传资源学报,2013,14(6):1153-1160.

[14] 张宪政,陈凤玉,王荣富.植物生理学实验技术[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1994.

[15] Zaffar G, Shikari A B, Rather M A, et al. Comparison of selection indices for screening maize (*Zea mays* L.) germplasm for cold tolerance[J]. Cereal Research Communications, 2005,23(2-3):525-531.

[16] Revilla P, Hotchkiss J R, Tracy W F. Cold tolerance evaluation in a diallel among open pollinated sweet corn cultivars[J]. Hort Science, 2003,38(1):88-91.

[17] Fracheboud Y, Jompuk C, Ribaut J M, et al. Genetic analysis of cold tolerance of photosynthesis in maize[J]. Plant Molecular Biology, 2004,56(2):241-253.

[18] 马延华,王庆祥,陈绍江.玉米耐寒性生理生化机理与分子遗传研究进展[J].玉米科学,2013,21(3):76-81,86.

[19] 江福英,李延翁,伯 琦.植物低温胁迫及其抗性生理[J].福建农业学报,2002,17(3):190-195.

[20] 蔡子平,陈 垣,郭凤霞,等.4 外源 Ca^{2+} 对藏药独一味幼苗速冻抗性的效应[J].中国沙漠,2009,29(5):928-932.

[21] 吉春容,邹 陈,陈丛敏,等.低温胁迫下巴旦杏的形态生理变化及抗寒性研究[J].中国沙漠,2012,32(4):955-962.

[22] 王有科,刘 冰,郭凤霞.花椒品种抗冻性比较研究[J].中国沙漠,2006,26(6):1041-1045.

[23] Yang SL, Lan SS, Gong M. Hydrogen peroxide - induced praline and metabolic pathway of its accumulation in maize seedlings[J]. Journal of Plant Physiology,2009,166(15):1694-1699.

[24] 王连敏,王立志,张国民,等.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.

[25] Szabados L, Savoure A. Proline: a multifunction amino acid[J]. Trends in Plant Science, 2010,15(2):89-97.

[26] 简令成,卢存福,李积宏,等.适宜低温锻炼提高冷敏感植物玉米和番茄的抗冷性及其生理基础[J].作物学报,2005,31(8):971-976.

[27] Xin Z, Li P H. Relationship between praline and ABA in the induction of chilling tolerance in maize suspension cultured cells[J]. Plant Physiol, 1993,103(2):607-613.

[28] 张海艳.低温对鲜食玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].植物生理学报,2013,49(4):347-350.

[29] 曾超西,王以桑.水稻幼苗的低温伤害与膜脂过氧化[J].植物学报,1987,29(5):506-512.

[30] 周瑞莲,王海鸥.高温胁迫下差不嘎蒿和冷蒿的生理变化及其抗热性研究[J].中国沙漠,1999,19(1):56-59.

[31] Reena G P, Mulpuri V R, Copinadhan P, et al. Changes in activities of antioxidant enzymes and their relationship to genetic and paclobutrazol induced chilling tolerance of maize seedlings[J]. Plant Physiology, 1997,114(2):695-704.

[32] 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.