

新培育玉米自交系苗期生理生化指标 与其抗旱性综合评价

孙欢欢¹, 韩兆雪², 谭登峰¹, 张小燕¹

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以 73 份新培育的玉米自交系和 7 份已知玉米抗旱自交系为材料, 采用培养间自然干旱胁迫处理方法, 研究相关生理生化指标与玉米抗旱性的关系。通过玉米叶片失水率(WLR)和相对含水量(RWC)的测定分析, 筛选出 15 份自交系进行脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性共 5 项生理生化指标的测定, 对 5 项指标的耐旱系数分级, 对玉米自交系的抗旱性进行综合评价。结果表明, 干旱胁迫下大多数自交系表现出相对含水量下降趋势, 失水率、脯氨酸含量、丙二醛含量和三个抗氧化酶类活性均表现出升高趋势。筛选出高抗旱自交系 4 份, 抗旱自交系 3 份, 中抗旱自交系 2 份, 敏感自交系 3 份, 高敏自交系 3 份。

关键词: 玉米; 自交系; 抗旱性; 指标
中图分类号: S332.1 **文献标志码:** A

Comprehensive evaluation of physiological and biochemical indexes and drought resistance of new maize inbred lines during seedling stage

SUN Huan-huan¹, HAN Zhao-xue², TAN Deng-feng¹, ZHANG Xiao-yan¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Seventy-three new maize inbred lines cultivated by our research group and seven known lines were cultivated under simulated drought-stress condition in greenhouse to investigate the relationships between drought tolerance related physiological and resistance and drought. Through testing and analyzing their WLR and RWC, 15 inbred lines were selected. Five physiological and biochemical indexes of these inbred lines were examined including proline content, malondialdehyde (MDA) content, SOD activity, CAT activity, and POD activity. Based on the classification of five physiological and biochemical indexes, drought tolerance of the inbred lines was evaluated. The results indicated that WLR, proline content, MDA content, SOD activity, CAT activity and POD activity were increased, but relative water content became decreased. The comprehensive evaluation on drought tolerance of these lines classified them into high drought tolerance (four lines), drought tolerance (three lines), medium drought tolerance (two lines), drought susceptibleness (three lines), and high drought susceptibleness (three lines).

Keywords: maize; inbred line; drought tolerance; index

干旱是影响玉米产量的主要因素, 玉米是对水分敏感的作物之一^[1]。我国干旱半干旱耕地约占全国总耕地面积的 51%^[2]。研究发现, 不同玉米种质的抗旱性存在明显差异^[3]。抗旱玉米品种的选育、推广和种植是控制因干旱导致的玉米减产的重要手段^[4]。

水分缺乏会引起植物形态、生理及生化上相应的变化^[5], 苗期干旱会导致玉米幼苗生长受阻, 进而引起减产。植株对干旱的综合反应体现在生长受到抑制, 其主要是由体内各种生理代谢反应所决定的^[6-10], 生理生化特性形成了一系列抵御干旱胁迫的机制^[11]。因此, 对其中典型生理指标的研究有助

收稿日期: 2015-04-10
基金项目: 国家自然科学基金(31201268); 陕西省自然科学基金(2011JQ3005); 中央高校基本科研业务费专项资金(QN2011114 和 2452015412)
作者简介: 孙欢欢(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事玉米抗旱研究。E-mail: sunhuanhuan000@gmail.com。
通信作者: 张小燕, 教授, 主要从事品种资源与品种生态研究。E-mail: zhangxiang8504@126.com。

于对抗旱性的深入了解,以及抗旱种质的选育。

本研究以 7 份已知玉米抗旱自交系和本课题组新培育的 73 份玉米自交系为试验材料,采用失水率和相对含水量两个指标进行玉米抗旱自交系的初筛,筛选出叶片失水率低、相对含水量高的玉米自交系 12 份和失水率高、相对含水量低的材料 3 份,进一步通过对正常和干旱条件下玉米脯氨酸、丙二醛和抗氧化酶活性等生理生化指标的测定,对玉米自

交系进行抗旱性综合评价,为抗旱玉米自交系的选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

80 份玉米自交系,其中 73 份玉米材料为本课题组新培育的玉米自交系,7 份已知抗旱性的材料来自中国农业科学院(ZM74 – ZM80)(表 1)。

表 1 玉米自交系及编号
Table 1 Maize Inbred Lines and their numberings

编号 Number	自交系 Inbred line	编号 Number	自交系 Inbred line	编号 Number	自交系 Inbred line	编号 Number	自交系 Inbred line
ZM01	12YWT160	ZM21	12360009	ZM41	12YWT146	ZM61	12YWT256
ZM02	12YWT262	ZM22	237	ZM42	12YWT116	ZM62	12YWT106
ZM03	12YWT121	ZM23	12YWT266	ZM43	12YWT112	ZM63	12YWT182
ZM04	12YWT138	ZM24	12YWT166	ZM44	12YWT239	ZM64	12YWT218
ZM05	12YWT247	ZM25	5CML203	ZM45	12YWT136	ZM65	12YWT108
ZM06	12YWT169	ZM26	SCLWL203	ZM46	12YWT126	ZM66	12YWT148
ZM07	12YWT010	ZM27	SCWL202	ZM47	12YWT254	ZM67	12YWT269
ZM08	12YWT110	ZM28	渝 561	ZM48	12YWT248	ZM68	12YWT1234
ZM09	12YWT140	ZM29	CA211	ZM49	12YWT144	ZM69	12YWT184
ZM10	12YWT232	ZM30	12YWT204	ZM50	12YWT104	ZM70	12YWT186
ZM11	12YWT11 – 2	ZM31	12YWT212	ZM51	12YT170 – 1	ZM71	12YWT172
ZM12	12YWT210	ZM32	12YWT240	ZM52	12YWT238	ZM72	12YWT211
ZM13	12YWT186	ZM33	12YWT267	ZM53	12YWT162	ZM73	12YWT156
ZM14	12YWT270	ZM34	12YWT224	ZM54	12YWT268	ZM74	E28
ZM15	12YWT241	ZM35	12YWT11 – 1	ZM55	12YWT103	ZM75	H21
ZM16	12YWT164	ZM36	12YWT243	ZM56	12YWT154	ZM76	海 14
ZM17	12YWT182	ZM37	12YWT184	ZM57	12YWT206	ZM77	CA339
ZM18	12YWT228	ZM38	12YWT134	ZM58	12YWT260	ZM78	K70
ZM18	12YWT246	ZM39	12YWT252	ZM59	12YWT242	ZM79	吉 818
ZM20	12YWT0010	ZM40	12YWT152	ZM60	12YWT230	ZM80	吉 853

1.2 材料培养和干旱胁迫处理

所选玉米自交系材料培养于西北农林科技大学生命科学学院组织培养间,培养间温度 28/26℃(白天/晚上),16/8h 光照。供试材料种植于盛有蛭石的小圆盆中(高 8 cm × 半径 3.5 cm,每个自交系至少 20 株,每盆 4 株,置于黑色方盘中(40 × 20 × 15 cm),正常浇水,幼苗长至一叶一心期开始浇灌 1/2 Hoagland 营养液保持幼苗长势良好。待幼苗长至三叶一心期时,每个自交系选取整齐一致的三盆幼苗,滤纸上进行空气干旱处理 12 h(失水率和相对含水量两个指标的测定是选取两叶一心期幼苗进行处理)。

1.3 生理生化指标测定

1.3.1 失水率测定 将待处理材料每盆各选取一

株,剪取第二片叶,立即称量样品鲜重,将叶片置于铺有干燥滤纸的培养皿中,于 22℃,相对湿度 70 ± 5%的温室放置,24 h 后,称取失水后的质量,然后继续置于 70℃烘箱中处理 24 h,称取干重。失水率计算公式如下: $WLR(\%) = (FW - W_{24}) / (DW \cdot 24) \times 100\%$ (FW :样品的鲜重, W_{24} :离体叶片 24 h 失水重, DW :样品干重)。方法参照《植物生理学实验》^[12]。

1.3.2 相对含水量测定 两叶一心期玉米幼苗被分为两组:对照组正常浇水避免干旱,干旱处理组滤纸干旱处理 12 h。剪取对照和处理幼苗的第二片叶,立即称量样品的鲜重,随后将其漂浮于盛满蒸馏水的三角瓶中,放置于 4℃冰箱中 24 h 后取出,用滤纸吸去叶片表面的水滴后,立即称取叶片的吸胀重。

将叶片置于干燥滤纸的培养皿中,继续置于 70℃ 的烘箱 24 h 后,称取干重。

相对含水量按如下公式计算: $RWC(\%) = [(FW - DW)/(TW - DW)] \times 100\%$ (FW :样品的鲜重, TW :叶片 24 h 吸水重, DW :样品干重)。方法参照《植物生理学实验》^[12]。

1.3.3 脯氨酸、丙二醛和三种抗氧化酶活性测定
选择失水率和相对含水量差异大的 15 份玉米自交系材料进一步进行脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)及三种抗氧化酶活性测定。同一植株的第二片叶和第三片叶分别用于脯氨酸和丙二醛含量测定;同一植株的第二片和第三片叶混合用于三种酶类 SOD、CAT 和 POD 的提取和分别测定,每个指标均进行三个生物学重复测定。

采用茚三酮法测定离体叶片游离脯氨酸的含量;采用硫代巴比妥酸法测定离体叶片丙二醛含量,具体方法参考《植物生理学研究技术》^[13];SOD 活性、CAT 活性、POD 活性按 Donahue, Okapodu 和 Aebi 等方法测定^[14-16]。

1.4 数据分析

数据处理与作图分析使用 Excel 软件;统计分析使用 SPSS 软件。

脯氨酸含量、SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性的耐旱系数计算公式如下^[17]:

耐旱系数 = (干旱测定值 - 对照测定值)/对照测定值

MDA 含量的耐旱系数计算公式如下:

耐旱系数 = 1 - (干旱测定值 - 对照测定值)/对照测定值

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对玉米幼苗 WLR 和 RWC 的影响

本研究结果表明,80 份玉米自交系的失水率差异较大,在 0.073% ~ 0.357% 范围之间,失水率较低的材料主要有 ZM13 和 ZM41,失水率较高的材料主要有 ZM7、ZM14 和 ZM61。

正常浇水条件下,80 份玉米自交系的相对含水量变化幅度不大,在 85.473% ~ 98.102% 之间,经过 12 h 干旱处理后,80 份玉米材料的相对含水量均明显下降,下降程度较低的主要有 ZM41、ZM77 和 ZM79 等。此外,有些失水率较低的玉米自交系在干旱处理后相对含水量下降幅度也较小,如 ZM13、ZM41 和 ZM49。

根据失水率和相对含水量的测定结果,初步筛选出失水率低相对含水量高的材料 12 份(ZM11、ZM13、ZM21、ZM25、ZM41、ZM49、ZM52、ZM75、ZM76、ZM77、ZM78、ZM79)、失水率高相对含水量低的材料 3 份(ZM7、ZM14、ZM61),再次进行 WLR 和 RWC 的 3 个生物学重复测定,结果表明,与最初的 WLR 和 RWC 测定结果基本吻合(图 1 和图 2),由此说明 WLR 与 RWC 是抗旱性初步筛选的可靠指标。将筛选出来的 15 份自交系材料进一步进行脯氨酸、丙二醛、SOD、CAT 和 POD 指标的测定分析。

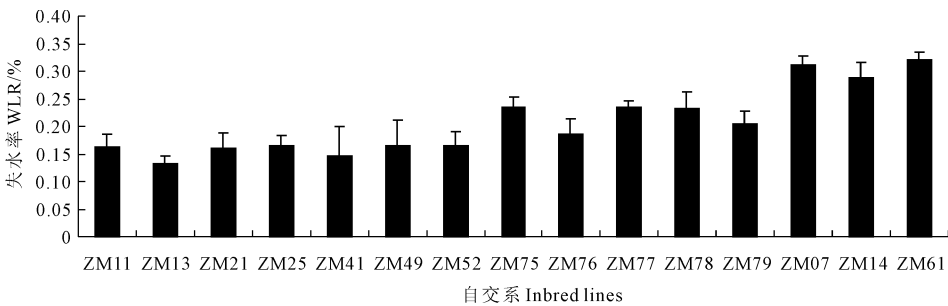


图 1 干旱胁迫对 15 份玉米自交系材料失水率的影响
Fig.1 Effects of drought stress on WLR of 15 inbred lines

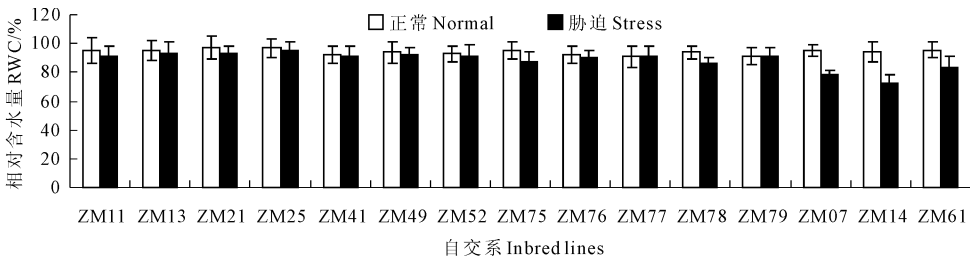


图 2 干旱胁迫对 15 份玉米自交系材料相对含水量的影响
Fig.2 Effects of drought stress on RWC of 15 inbred lines

2.2 各指标的方差分析

通过对 15 个玉米自交系进行干旱胁迫处理,测定 3 个生物学重复的 5 个生理及生化指标,对测定结果进行方差分析。从表 2 可以看出,5 个指标在品种间和处理间的差异都达到了极显著水平,表明不同玉米自交系的抗旱性不同,且玉米对干旱胁迫

处理比较敏感。5 个指标在品种与处理间的交互作用中除 MDA 含量为显著水平,其余 4 个指标均达到极显著水平,说明在干旱处理下不同自交系呈现出不同程度的抗旱性。即在干旱胁迫下,不同玉米自交系的 5 个指标的测定结果主要取决于自交系、干旱胁迫及其互作。

表 2 5 个指标品种间与不同处理的方差分析

Table 2 Variance analysis of five indexes among different varieties by various treatments

变异来源 Variance source	Pro 含量 Pro content	MDA 含量 MDA content	SOD 活性 SOD activities	CAT 活性 CAT activities	POD 活性 POD activities
品种间 Variety	7.977 **	27.629 **	47.833 **	15.123 **	34.539 **
处理间 Treatment	285.971 **	22.902 **	362.61 **	151.017 **	121.889 **
品种 × 处理间 Variety × Treatment	8.311 **	1.939 *	26.289 **	3.804 **	10.503 **

注: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$ 。

2.3 干旱胁迫对 Pro 和 MDA 含量的影响

与对照组相比,干旱胁迫下 15 份玉米自交系的

Pro 含量均明显上升,其中 ZM11 和 ZM77Pro 含量升高明显(图 3)。

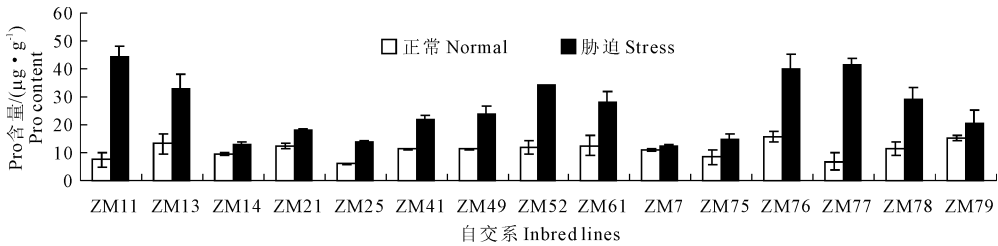


图 3 干旱胁迫对 Pro 含量的影响

Fig.3 Effects of drought stressed on Proline content

干旱处理后 15 份自交系材料 MDA 含量呈现不同程度上升。除 ZM25 外,其余 14 个自交系 MDA 含量升高倍数均小于 2,其中自交系 ZM61 和 ZM7MDA

含量约为对照组的 1.01 倍,表明这两份材料受干旱胁迫影响较小(图 4)。

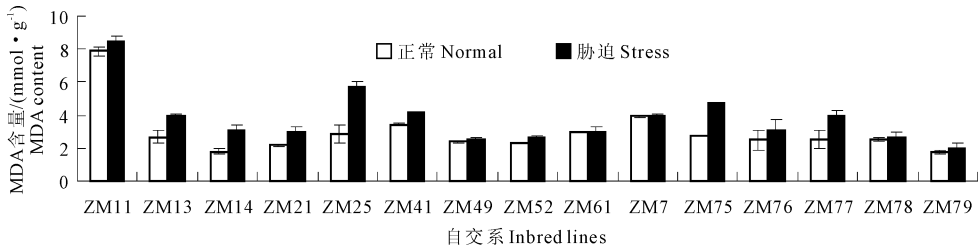


图 4 干旱胁迫对 MDA 含量的影响

Fig.4 Effects of drought stress on MDA

2.4 干旱胁迫对三种抗氧化酶活性的影响

图 5 ~ 图 7 显示,与对照组相比,干旱胁迫下 15 份玉米自交系三种抗氧化酶活性均呈现不同程度的上升,其中 ZM25 和 ZM76 在干旱处理后 SOD、CAT 和 POD 活性上升水平高,ZM13、ZM7、ZM75 和 ZM79

中抗氧化酶活性上升水平低。干旱处理后,SOD 活性上升超过对照组 3 倍的自交系有 ZM25 和 ZM76; CAT 活性上升超过对照组 3 倍的自交系有 ZM11、ZM25、ZM52 和 ZM76;POD 活性上升超过对照组 3 倍的自交系有 ZM14。

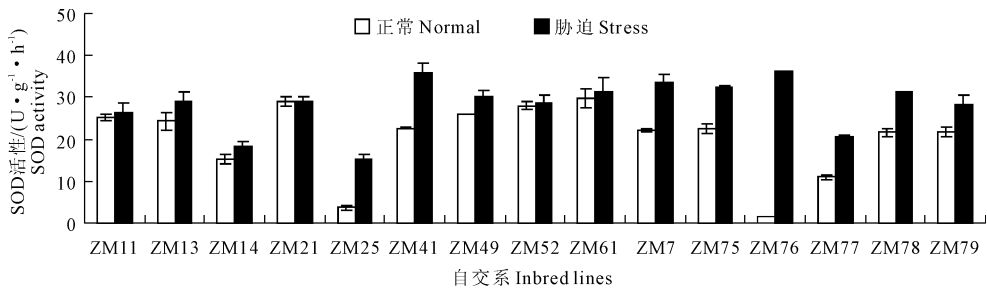


图 5 干旱胁迫对 SOD 活性的影响
Fig.5 Effects of drought stress on SOD

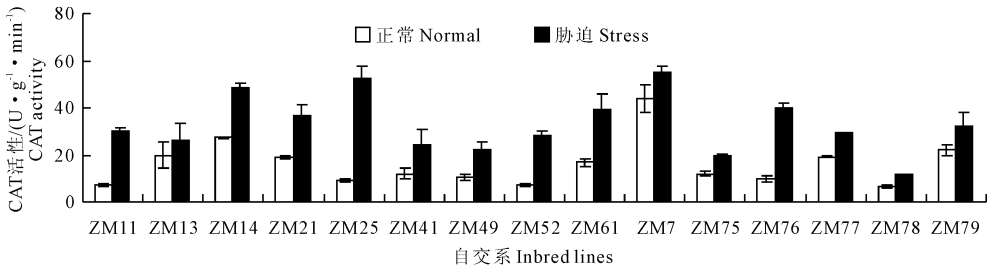


图 6 干旱胁迫对 CAT 活性的影响
Fig.6 Effects of drought stress on CAT

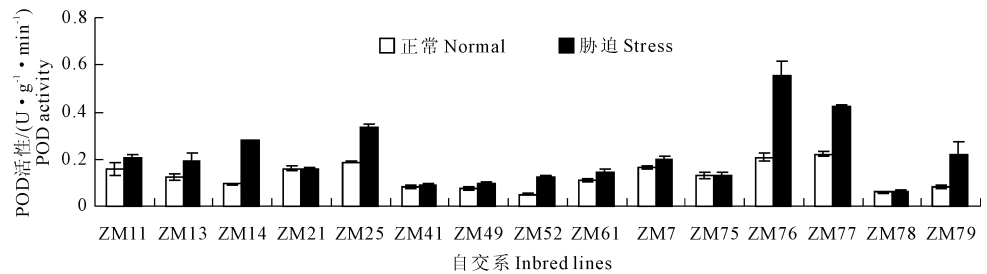


图 7 干旱胁迫对 POD 活性的影响
Fig.7 Effects of drought stress on POD

2.5 耐旱系数及抗旱性综合评价

耐旱系数可用于评价作物抗旱性,在一定程度上反映了作物的抗旱水平。对 15 个自交系的生理指标测定结果进行耐旱系数分析,结果表明,各自交系间、各生理指标耐旱系数不同,但不同生理指标的耐旱系数水平基本相当(表 3),而同一自交系不同指标的耐旱系数或同一指标不同自交系的耐旱系数均有较大变幅,用单项指标的耐旱系数来评价玉米自交系的抗旱性具有片面性,不能准确评价各自交系的抗旱性^[18]。因此,为从总体上准确把握玉米的抗旱性,避免从单一指标上片面地判断玉米抗旱性,将每个指标下 15 个自交系的耐旱系数分为五级,再将同一自交系所有指标的分级数累加得到其抗旱性的总评价结果,即为该自交系的分级结果,最终将所有自交系的分级结果进行统一观察比较。结果表

明,本研究中 15 份自交系材料的抗旱性可以分为 5 级,即高抗、抗、中抗、敏感和高感(表 4),据此筛选出高抗旱自交系 4 份,抗旱自交系 3 份,中抗旱自交系 2 份,干旱敏感自交系 3 份,干旱高敏感自交系 3 份。其中 ZM76、ZM11、ZM25、ZM77 为高抗旱自交系,ZM14、ZM21、ZM75 为高敏感自交系。

3 讨 论

根据生理生化指标对玉米自交系的抗旱性进行综合评价,以若干个可靠指标结合科学的统计分析考察材料抗旱性的评价方法,适用于植物自交系抗旱鉴定^[7]。本研究采用自交系抗旱性分级方法,将各个指标综合联系起来,避免单一指标评价产生的片面性,15 个自交系 5 个生理生化指标下的分级结果显示出明显的差异。

表 3 玉米自交系生理生化指标的耐旱系数分析

Table 3 Drought tolerant indexes of each indicator for maize inbred lines					
自交系 Line	Pro 含量 Pro content /%	MDA 含量 MDA content /%	SOD 活性 SOD activities /%	CAT 活性 CAT activities /%	POD 活性 CAT activities /%
ZM11	5.03a	0.93cd	0.04c	3.29b	0.31h
ZM13	1.50e	0.52h	0.20c	0.33h	0.53g
ZM14	0.34i	0.30j	0.18c	0.78f	2.03a
ZM21	0.46h	0.66g	0.01c	0.95e	0.00i
ZM25	1.30d	0.03k	3.15b	4.60a	0.77f
ZM41	0.96f	0.79f	0.60c	1.03e	0.06i
ZM49	1.12e	0.94c	0.16c	1.06e	0.26h
ZM52	1.88b	0.88e	0.03c	2.92c	1.47d
ZM61	1.25d	0.99a	0.06c	1.35d	0.30h
ZM7	0.13j	0.98ab	0.52c	0.25h	0.21h
ZM75	0.78g	0.28j	0.44c	0.66f	0.02i
ZM76	1.58c	0.76f	22.22a	3.00c	1.66c
ZM77	5.11a	0.47i	0.89c	0.53g	0.93e
ZM78	1.56c	0.95bc	0.45c	0.73f	0.07i
ZM79	0.34i	0.9de	0.29c	0.47g	1.81b

表 4 玉米自交系苗期抗旱性综合评价

Table 4. Comprehensive evaluation of drought tolerance for the inbred lines						
自交系 Line	Pro 含量 Pro content	MDA 含量 MDA content	SOD 活性 SOD activities	CAT 活性 CAT activities	POD 活性 POD activities	总和 Total
ZM76	4	3	5	5	5	22
ZM11	5	4	1	5	3	18
ZM25	3	1	5	5	4	18
ZM77	5	2	5	2	4	18
ZM52	5	3	1	4	4	17
ZM61	3	5	2	4	3	17
ZM78	4	5	4	2	2	17
ZM49	3	4	2	4	2	15
ZM79	1	4	3	1	5	14
ZM13	4	2	3	1	3	13
ZM41	2	3	4	3	1	13
ZM7	1	5	4	1	2	13
ZM14	1	1	2	3	5	12
ZM21	2	2	1	3	1	9
ZM75	2	1	3	2	1	9

许多研究表明 WLR、RWC、Pro 含量、MDA 含量、SOD、CAT 及 POD 活性是玉米苗期抗旱性鉴定的可靠指标^[19-21]。其中,RWC 与所受干旱胁迫呈负相关,WLR、MDA 含量与干旱胁迫呈正相关,它们的变

化幅度越小抗旱性越强;Pro 含量、SOD、CAT、POD 活性与干旱胁迫呈正相关,且一定范围内变化幅度越大抗旱性越强^[7]。本研究结果也说明了各生理生化指标与自交系所受干旱胁迫的相关性是吻合的。

SOD 是机体内天然存在的超氧自由基清除因子,它将有害的超氧自由基转化为过氧化氢,尔后过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)会立即将其分解为完全无害的水,三种酶组成了一个完整的防氧化链条。而丙二醛(MDA)是常用的膜脂过氧化指标,推测干旱处理下 MDA 含量的相对变化程度,可能与 SOD、CAT、POD 三种酶活性存在负相关关系。但本研究结果表明,在实验室条件下自交系 MDA 含量指标与 SOD、CAT、POD 活性指标较吻合的只有 ZM76 和 ZM79,吻合程度较低。其原因可能来自不同自交系的膜透性;脯氨酸作为植物细胞质内渗透调节物质,推测其与 WLR 可能存在负相关的关系,本研究中并未能体现两者明显的吻合度,其原因可能是不同自交系苗期材料的气孔开度存在差异。结合 15 个自交系苗期抗旱性的综合评价结果与它们失水率和相对含水量结果比较,表明在 ZM76、ZM11、ZM25、ZM77、ZM52、ZM78、ZM49 和 ZM14 自交系中这些结果较吻合。

综上所述,采用分级方法对自交系抗旱性进行综合评价,结果表明玉米自交系间的抗旱性存在明显差异。该方法中筛选得到的高抗旱自交系 ZM76、ZM11、ZM25、ZM77 在干旱地区具有一定推广价值,其中 ZM76 与 ZM77 为已知的玉米抗旱自交系,ZM11 和 ZM25 为本课题组新培育的玉米自交系。

参 考 文 献:

[1] Vamerali T, Saccomani M, Bona S, et al. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids [J]. Plant And Soil, 2003,255(1):157-167.

[2] 谭 静,黄必华,陈红梅,等.玉米品种耐旱性鉴定及耐旱指标筛选[J].云南农业大学学报(自然科学版),2010,25(2):189-194.

[3] 路贵和.玉米种质资源抗旱性评价及其遗传基础研究[D].北京:中国农业大学,2005.

[4] 任 君,卢成达.玉米抗旱种质资源的筛选[J].山西农业科学,2010,38(10):10-12. DOI: 10.3969/j. issn. 1002 - 2481. 2010. 10. 03.

[5] 吴文荣.玉米不同品种芽苗期抗旱性及指标的研究[D].北京:中国农业科学院,2008.

[6] 王 毅.干旱胁迫对作物影响研究概况[J].现代农业,2015,(4):28-29.

配引发增强了 SOD、POD、CAT 和 APX 活性,同时减少了 MDA 和 O_2^- ,进一步证实了该结论。

本研究虽对盐渍土壤条件下高粱幼苗引发的生理机制做了一些剖析,但对其离子含量、细胞结构变化等方面的生理特性尚未研究,希望相关学者将来能对其生理机制进行更深入的探寻。

参 考 文 献:

[1] 杨淑萍,危常州,梁永超.盐胁迫对海岛棉不同基因型幼苗生长及生态特征的影响[J].生态学报,2010,30(9):2322-2331.

[2] 龚 秋,王 欣,后 猛,等.盐胁迫对紫甘薯光合特性及干物质积累的影响[J].西南农业学报,2015,28(5):1986-1991.

[3] 杨小环,马金虎,郭数进,等.种子引发对盐胁迫下高粱种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(1):103-109.

[4] 张云华,孙守均,王 云,等.高粱萌发期和苗期耐盐性研究[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2004,19(3):300-304.

[5] 谷思玉,周连仁,王佳佳.不同品种玉米萌发期耐盐性的比较[J].中国农学通报,2011,27(33):34-39.

[6] 杨小环,王玉国,杨文秀,等.种子引发对水分胁迫下大豆幼苗生理特性的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(6):1191-1195.

[7] Jisha K C, Vijayakumari K, Jos Puthur T. Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview[J]. Acta Physiol Plant, 2013,35:1381-

1396.

[8] 贺长征,胡 晋,朱志玉,等.混合盐引发对水稻种子在逆境条件下发芽及幼苗生理特性的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(2):175-178.

[9] 阮松林,薛庆中,王清华.种子引发对杂交水稻幼苗耐盐性的生理效应[J].中国农业科学,2003,36(4):463-468.

[10] Passam H C, Kakouriotis D. The effects of osmoconditioning on the germination, emergence and early plant growth of cucumber under saline conditions[J]. Hortscience,1994,57:233-240.

[11] Cano E A, Bolatin M C, Perez-Alfoea F. Effects of NaCl priming on increased salt tolerance in tomato[J]. Journal of Horticultural Science,1991,66:621-628.

[12] 赵 旭,王林权,周春菊,等.盐胁迫对不同基因型冬小麦发芽和出苗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):108-112.

[13] 史雨刚,孙黛珍,雷逢进,等.种子引发对 G3 + 5 胁迫下小麦幼苗生理特性的影响[J].核农学报,2011,25(2):342-347.

[14] 马金虎,郭数进,王玉国,等.种子引发对盐胁迫下高粱幼苗生物量分配和渗透物质含量的影响[J].生态学杂志,2010,29(10):1950-1956.

[15] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:208-215.

[16] Mithen R. Glucosinolates-biochemistry, genetics and biological activity[J]. Plant Growth Regulation,2001,34:91-103.

[17] Reichelt M, Brown P D, Schneider B, et al. Benzoic acid glucosinolate esters and other glucosinolates from Arabidopsis thaliana[J]. Phytochemistry,2002,59:663-671.

(上接第 14 页)

[7] 朴明鑫,张春宵,杨书华,等.69 份玉米自交系的苗期耐旱性分析[J].吉林农业科学,2011,36(3):13-17. DOI: 10.3969/j. issn. 1003 - 8701.2011.03.004.

[8] 郭春芳,孙 云.干旱胁迫下植物的渗透调节及脯氨酸代谢研究进展[J].福建教育学院学报,2015,16(1):114-118.

[9] 陈勋基,阿不来提,郑 军,等.玉米不同自交系抗旱性综合评价研究[J].新疆农业科学,2008,45(2):317-322.

[10] 杨光梅,赵 致.贵州玉米品种抗旱性比较试验[J].山地农业生物学报,2003,22(2):110-113. DOI: 10.3969/j. issn. 1008-0457. 2003.02.004.

[11] 李智元,刘锦春.植物响应干旱的生理机制研究进展[J].西藏科技,2009,(11):70-72. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-3403. 2009. 11.031.

[12] 蔡庆生.植物生理学实验[M].北京:中国农业大学出版社,2013,15-17.

[13] 孙 群,胡景江.植物生理学研究技术[M].陕西杨凌:西北农林科技大学出版社,2006:176-177.

[14] Donahue J L, Okapodu M C, Cramer C L, et al. Response of antiox-

idants to paraquat in pea leaves[J]. Plant Physiol, 1997,113:249-257.

[15] Schickler H, Caspi H. Response of antioxidative enzymes to nickel and cadmium stress in hyperaccumulator plants of the genus Alyssum [J]. Physiologia Plantarum, 1999,105:39-44.

[16] Aebi H E. Catalase [C]//Bergmeyer H U. Methods of Enzymatic Analysis. Weheim: Verlag Chmie, 1983:273-282.

[17] 鲍巨松.不同生育时期水分胁迫对玉米生理特性的影响[J].作物学报,1991,17(4):261-266.

[18] 冯朋飞,远红杰,郭晋杰等.不同玉米自交系苗期抗旱性鉴定[J].广东农业科学,2013,40(9):9-13. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-874X.2013.09.004.

[19] 宋凤斌,徐世昌.玉米抗旱性鉴定指标的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(1):127-129.

[20] 罗淑平.玉米抗旱性及鉴定指标的相关分析[J].干旱地区农业研究,1990,(3):72-78.

[21] 白向历,齐 华,刘 明,等.玉米抗旱性与生理生化指标关系的研究[J].玉米科学,2007,15(5):79-83.