

转基因玉米种子萌发期抗旱性鉴定

冷益丰¹, 张彪¹, 赵久然², 杨俊品¹, 刘亚², 康继伟¹,
陈洁¹, 唐海涛¹, 谭君¹, 何文铸¹

(1. 四川省农业科学院作物研究所, 四川成都 610066; 2. 北京市农林科学院, 北京 100097)

摘要: 采用聚乙二醇(PEG)高渗溶液, 对13个转基因玉米自交系进行了种子萌发期模拟水分胁迫发芽试验, 研究了渗透胁迫模拟干旱对抗旱转基因玉米种子萌发状况的影响。结果表明: 干旱胁迫对玉米发芽势、发芽率、根数、胚根长、胚芽长、贮藏物质转化率等均有不同程度的影响, 不同转基因玉米自交系在抗旱性上存在明显差异。同时, 使用隶属函数法对参试转基因玉米自交系的种子萌发抗旱性进行了分析评价, 其中SD10为萌发期抗旱性较强的自交系; CBF-3-4、SD13、SD05、CBF-1-4、CBF-6-5、SD-P3、SD-P5为萌发期抗旱性中等的自交系; SD06、CBF-3-1、SD07、SD-P1、SD-P4为萌发期抗旱性较弱的自交系。种子萌发抗旱指数与隶属函数对玉米自交系抗旱性分析结果比较一致。

关键词: 转基因玉米; 种子萌发; 渗透胁迫; 隶属函数

中图分类号: S513.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0177-06

Identification of drought resistance of transgenic maize during seed germination stage

LENG Yi-feng¹, ZHANG Biao¹, ZHAO Jiu-ran², YANG Jun-pin¹, LIU Ya², KANG Ji-wei¹,
CHEN Jie¹, TANG Hai-tao¹, TAN Jun¹, HE Wen-zhu¹

(1. The Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China;

2. Beijing Academy of Agricultural & Forestry Science, Beijing 100097, China)

Abstract: The experiment was carried out with 13 transgenic inbred lines of maize under the polyethylene glycol (PEG) simulated water stress to study the impact of osmotic stress on seed germination. The results showed that the germination potential, germination rate, root number, radicle length, plumule length and transforming rate of storage substance in maize were affected by drought stress to different extend, and there existed significant differences in drought resistance among different inbred lines. The quantitative evaluation by using subordinate function method indicated that SD10 was the inbred line with high drought-resistance; CBF-3-4, SD13, SD05, CBF-1-4, CBF-6-5, SD-P3 and SD-P5 were the inbred lines with mid drought-resistance; and SD06, CBF-3-1, SD07, SD-P1 and SD-P4 were the inbred lines with low drought-resistance. The analysis results obtained by grain drought resistant index (GDMI) were similar to those by subordinate function method.

Keywords: transgenic maize; seed germination; osmotic stress; subordinate function

干旱已成为影响世界粮食减产的重要因素之一, 近3年统计数据表明, 因干旱造成的损失在15.6%~48.5%之间, 严重影响农业生产的可持续发展。近年来我国西南地区伏旱天气出现频繁, 玉米从播种到收获整个生育期均受到不同程度干旱的

影响, 从而导致玉米减产甚至绝收。培育抗旱玉米品种是减少干旱制约玉米生产的有效途径。不同玉米自交系或品种的抗旱性差异较大, 目前, 国内外学者从不同方面开展了玉米抗旱性鉴定研究^[1-4], 已形成规范的利用PEG模拟干旱胁迫试验方法, 如

收稿日期: 2012-05-02

基金项目: 转基因生物新品种培育重大专项(2009ZX08003-007B); 国家玉米支撑计划(2011BAD35B01); 国家玉米863计划(2011AA10A103-2); 四川省农科院青年基金(2011QNJJ-008)

作者简介: 冷益丰(1986-), 男, 重庆垫江人, 硕士, 主要从事玉米分子育种。E-mail: yifeng_71@163.com。

通信作者: 何文铸, 副研究员, 主要从事玉米育种工作。E-mail: wenzu-he@163.com。

《国际种子检验规程》(ISTA)^[5]。本试验通过高渗溶液法,利用 -0.6 MPa PEG-6000 水溶液模拟干旱,对 13 个抗旱转基因玉米自交系进行了种子萌发期抗旱性筛选试验,采用隶属函数法对玉米自交系的耐旱性进行综合评价,以期筛选出抗旱性较强的玉米材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 13 个转基因玉米自交系 SD05、SD06、SD07、SD10、SD13、SD-P1、SD-P3、SD-P4、SD-P5、CBF-3-4、CBF-3-1、CBF-1-4、CBF-6-5 和 3 个非转基因玉米自交系(对照)478、S17、81565,其中 478 为 SD 系列野生型对照,S17 为 CBF 系列野生型对照,81565 为周树峰等^[6]鉴定的耐旱玉米自交系。试验于 2011 年 5—8 月在四川省农科院作物所实验室进行。

CBF 系列、SD 和 SD-P 系列分别是以拟南芥 CBF4 基因、盐生植物盐芥 *TsDREB2A* 基因和玉米 PIS 基因为目标基因,构建高效表达载体,采用基因枪法或农杆菌介导法转入玉米受体先早 17 和 478 中,批量获得转基因植株,并经多代连续筛选分子检测呈阳性且遗传稳定纯合的转基因玉米株系。

1.2 试验方法

选取整齐一致、无破损的玉米种子,用 7% 漂白粉溶液消毒 2~3 min,灭菌蒸馏水冲洗 3 遍后再用滤纸吸干种子表面附着水。将种子置于直径为 9 cm 的灭菌培养皿中,每个培养皿 50 粒,双层滤纸做发芽床,加入 20 mL -0.6 MPa PEG-6000 水溶液做干旱胁迫处理,同时进行蒸馏水正常培养,干旱胁迫与正常均设 3 次重复,种子萌发于人工气候箱中 25℃ 黑暗条件下进行。种子萌发期间培养皿加盖,每天补充适量蒸馏水,避免水分蒸发以保持渗透势不变。

1.3 指标测定

种子萌发期间每隔 2 d 调查 1 次种子发芽情况(以胚根或胚芽突破种皮 2 mm 为发芽标准计算发芽种子数),持续调查至第 8 天。在种子萌发试验进行的第 4 天调查种子发芽势,第 7 天调查种子发芽率;第 8 天统计发芽种子根数,测量胚芽和胚根长度,将胚芽、胚根以及籽粒剩余部分分别用纸包好置于 105℃ 烘箱中杀青 5 min 后,于 80℃ 恒温烘至恒重,分别称量干重。

分别采用以下(1)、(2)、(3)、(4)、(5)公式计算

种子萌发率、萌发指数、萌发抗旱指数、相对发芽率以及贮藏物质转化率:

$$nd = \frac{X_{Ger}}{X_{TS}} \times 100\% \quad (1)$$

$$PI = 1.00nd_2 + 0.75nd_4 + 0.50nd_6 + 0.25nd_8 \quad (2)$$

$$GDRI = \frac{PI_S}{PI_C} \quad (3)$$

式中, nd 为种子萌发率, nd_2 、 nd_4 、 nd_6 和 nd_8 分别为第 2、4、6、8 天的种子萌发率; X_{Ger} 为在特定时间的种子萌发数; X_{TS} 为种子总数; PI 为种子萌发指数, PI_S 和 PI_C 分别为胁迫和正常条件下种子萌发指数; $GDRI$ 为种子萌发抗旱指数。

$$\text{相对发芽率}(\%) = \frac{\text{胁迫发芽率}}{\text{正常发芽率}} \times 100 \quad (4)$$

贮藏物质转化率(%) =

$$\frac{(\text{芽} + \text{根}) \text{干重}}{(\text{芽} + \text{根} + \text{籽粒剩余部分}) \text{干重}} \times 100 \quad (5)$$

隶属值计算参照侯建华等^[4]的方法进行,隶属值(U_{ij}) = $(X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$,其中 U_{ij} 为某玉米自交系对于第 i 项指标的隶属值, X_{ij} 为某玉米自交系第 i 项指标测定值, $X_{i\min}$ 为全部玉米自交系 i 项指标的最小值, $X_{i\max}$ 为全部玉米自交系 i 项的最大值, i 为某项指标, j 为某个玉米自交系。并求出各玉米自交系隶属值平均值。

1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据录入与整理,使用 SPSS 16.0 软件进行数据的相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 种子萌发抗旱指数与玉米抗旱性

种子萌发抗旱指数是种子萌发期进行抗旱性鉴定的重要指标,抗旱性强的材料种子萌发抗旱指数较大。早在 1984 年 Bouslama 等^[7]在研究大豆的抗逆性时提出种子萌发胁迫指数的概念,孙彩霞等^[8]将其称为种子萌发抗旱指数($GDRI$)。本试验结果表明(表 1),不同的转基因玉米种子在萌发时期表现出不同的抗旱性,种子萌发抗旱指数从 0.0319 ~ 0.2727。CBF 系列的 CBF-3-4、CBF-6-5 两个自交系的种子萌发抗旱指数大于其野生型对照 S17;SD 系列的 SD-P5、SD10、SD13、SD05、SD-P3 五个自交系的种子萌发抗旱指数大于其野生型对照 478。CBF-3-4、CBF-6-5 的种子萌发抗旱指数大于抗旱材料 81565,属于可利用的适应四川生态区抗旱性较强的玉米材料。

表 1 不同玉米自交系在干旱胁迫下的种子萌发抗旱指数

Table 1 Grain drought resistant index (*GDR*) of different transgenic inbred lines of maize under drought stress

材料 Material	PI_S	PI_C	<i>GDR</i>
SD05	0.1050	1.2467	0.0842
SD06	0.0717	1.5083	0.0475
SD07	0.0567	1.3183	0.0430
SD10	0.1283	0.9950	0.1290
SD13	0.1717	1.3700	0.1253
CBF-3-4	0.2417	0.9917	0.2437
CBF-3-1	0.0500	0.7417	0.0674
CBF-1-4	0.0867	0.9950	0.0871
CBF-6-5	0.1817	0.8633	0.2104
SD-P1	0.0450	0.9217	0.0488
SD-P3	0.0900	1.2517	0.0719
SD-P4	0.0500	1.5667	0.0319
SD-P5	0.1100	0.8017	0.1372
S17	0.0817	0.8167	0.1000
478	0.0617	1.0117	0.0610
CK	0.1067	0.5483	0.1945

注: PI_S 和 PI_C 分别为干旱胁迫和正常萌发条件下的种子萌发指数; *GDR* 为种子萌发抗旱指数; CK(对照)为四川生态区耐旱玉米自交系材料 81565。下同。

Note: PI_S and PI_C mean seed germination index under drought stress and normal germination, respectively; *GDR* means grain drought resistant index; and CK means 81565, a drought-tolerant inbred line of maize in Sichuan province. The same as below.

2.2 干旱胁迫对不同玉米自交系发芽率的影响

干旱胁迫处理下各玉米自交系的种子萌发明显受到抑制(图 1A), 种子发芽势弱、发芽率低, 萌发的种子胚根、胚芽短小, 有的种子甚至仅有胚根, 而胚芽很难突破种皮, 同时萌发的种子大多仅有胚根长成的主根而无侧根(图 1B)。

干旱胁迫下的种子发芽率可以说明玉米自交系的抗旱发芽能力。干旱胁迫下的玉米种子萌发率较正常萌发明显下降, 且不同转基因玉米自交系间差异显著 ($F = 70.383 > F_{0.05} = 2.00$, 图 2)。CBF 系列 CBF-3-4、CBF-6-5、CBF-1-4 的种子发芽率

超过其野生型对照 S17; SD 系列 SD13、SD-P5、SD10、SD05、SD-P3 的种子发芽率超过其野生型对照 478, 同时种子发芽率均比对照材料 81565 高, 说明抗旱基因的导入增强了玉米的耐旱性。CBF-3-4 在干旱胁迫处理下的种子发芽率最高, 且与正常萌发时的差异最小, 说明干旱对其萌发影响最小, 其抗旱能力较强, 在后续育种中可对其加以利用。

2.3 干旱胁迫对不同玉米自交系胚根、胚芽生长的影响

PEG-6000 渗透胁迫对各玉米自交系的胚根、胚芽生长均有影响, 自交系间敏感程度存在明显差异。种子根系是响应干旱环境较明显的应激部位, 胁迫条件下不同转基因玉米自交系的种子根系生长差异显著 ($F = 108.350 > F_{0.05} = 2.00$, 表 2), SD07、SD-P4 等 5 个自交系种子萌发后仅有胚根长成的主根, 其余 11 个自交系除主根外还有 1~4 条侧根。CBF 系列转基因玉米的根系均比其野生型对照发达, 而 SD 系列只有 SD10 的根系生长超过其野生型对照 478。6 个转基因玉米自交系根数超过对照 81565, 其中 SD10 种子根系最发达, 平均根数达到 3.9, 且其在干旱胁迫处理下的种子根数与正常萌发最为接近, CBF-1-4 也占到正常萌发时的 50% 以上。

抗旱能力强的材料其种子萌发时胚根或胚芽生长较快, 与正常条件下的发芽表现差异愈小。本试验中干旱胁迫下萌发的种子胚根都能够突破种皮进行根的营养生长, 但自交系间种子萌发后的胚根长差异显著 ($F = 130.351 > F_{0.05} = 2.00$, 表 2)。SD 系列 SD10、SD-P3、SD-P5、SD05 的胚根长超过其野生型对照, 同时也超过对照 81565, 而 CBF 转基因系列只有 CBF-3-4、CBF-1-4 的胚根长超过其野生型对照, 同时也超过对照 81565。CBF-3-4 种子萌发后的胚根最长, 平均达到 3.87 cm; 材料 SD-P5 的胚根长度与正常萌发差异最小, 二者相差 36%, 材料 CBF-3-4 和 CBF-1-4 次之, 约为正常萌发时的 63% 和 59%。

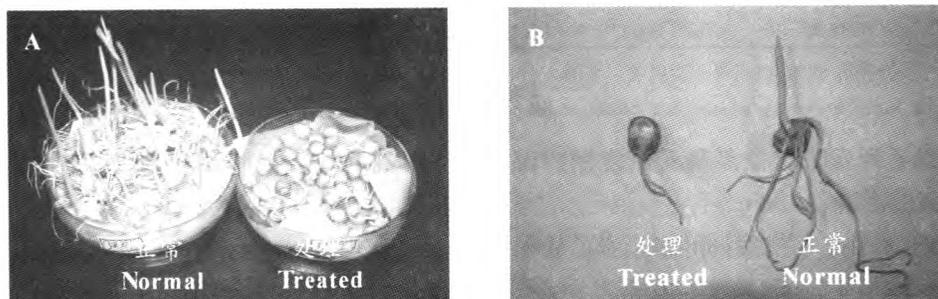


图 1 干旱胁迫处理下的种子萌发表现

Fig. 1 Seed germination performance under drought stress

玉米种子在干旱胁迫下胚芽的生长受到明显抑制,自交系间种子萌发后的胚芽长差异显著 ($F = 29.648 > F_{0.05} = 2.00$, 表 2), 这以自交系 SD06、SD07、SD-P1、SD-P4 的萌发表现最为明显,其种子胚芽不能突破种皮而仅有胚根出现,其余自交系的

胚芽能够突破种皮生长,但胚芽长度均不超过 1 cm,其中 SD10 种子萌发后的胚芽最长,平均为 0.95 cm,其在干旱处理下的种子胚芽长度与正常萌发差异最小,为正常萌发胚芽长度的 20%。

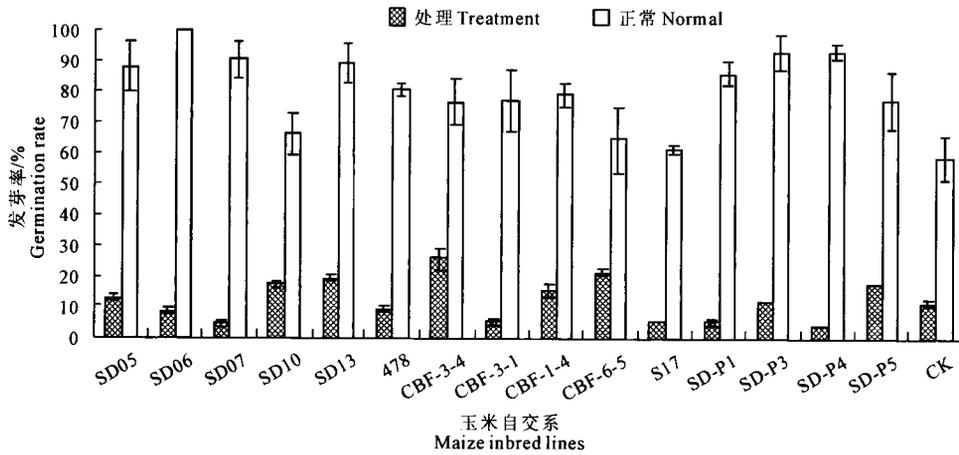


图 2 不同转基因玉米自交系在干旱胁迫下的种子萌发率

Fig.2 Seed germination of different transgenic inbred lines of maize under drought stress

表 2 不同转基因玉米自交系在干旱胁迫下的种子胚根、胚芽生长

Table 2 Seed radicle and plumule growth of different transgenic inbred lines of maize under drought stress

材料 Material	根数 Number of roots		胚根长/cm Radicle length		胚芽长/cm Plumule length	
	处理 Treated	正常 Normal	处理 Treated	正常 Normal	处理 Treated	正常 Normal
SD05	2.7 ± 0.2d	5.7 ± 0.6de	2.89 ± 0.19g	7.74 ± 0.80de	0.37 ± 0.05e	3.64 ± 0.95abc
SD06	1.0 ± 0.0a	6.2 ± 0.3ef	1.93 ± 0.22d	7.54 ± 0.94cde	0.02 ± 0.00a	4.31 ± 0.86abc
SD07	1.0 ± 0.0a	5.9 ± 0.2de	0.82 ± 0.11b	6.40 ± 0.23bcde	0.00 ± 0.00a	2.98 ± 0.25ab
SD10	3.9 ± 0.1f	6.6 ± 0.4ef	3.68 ± 0.03i	7.94 ± 0.73e	0.94 ± 0.27g	4.67 ± 1.09abc
SD13	2.3 ± 0.0e	5.0 ± 0.3bcde	2.81 ± 0.09g	5.52 ± 0.85abcd	0.34 ± 0.12e	3.77 ± 1.07abc
CBF-3-4	1.8 ± 0.2b	6.1 ± 0.8ef	3.87 ± 0.10i	6.11 ± 1.02abcde	0.09 ± 0.01ab	4.58 ± 0.32abc
CBF-3-1	1.3 ± 0.5a	3.8 ± 0.2abc	1.73 ± 0.03d	4.65 ± 0.30ab	0.10 ± 0.07a	2.44 ± 0.80a
CBF-1-4	2.9 ± 0.2d	5.0 ± 1.4bcde	2.47 ± 0.10f	4.14 ± 0.91ab	0.71 ± 0.07f	4.30 ± 0.19abc
CBF-6-5	1.1 ± 0.1a	4.3 ± 0.8abcd	1.86 ± 0.08d	5.66 ± 0.32abcde	0.06 ± 0.01ab	4.54 ± 0.91abc
SD-P1	1.0 ± 0.0a	3.4 ± 1.0ab	1.20 ± 0.27c	4.79 ± 0.86ab	0.00 ± 0.00a	2.72 ± 0.65ab
SD-P3	3.5 ± 0.2e	7.6 ± 0.6f	3.29 ± 0.33h	7.49 ± 0.96cde	0.41 ± 0.08e	4.77 ± 0.56abc
SD-P4	1.0 ± 0.0a	6.2 ± 0.4ef	0.52 ± 0.08a	5.33 ± 0.33abc	0.00 ± 0.00a	5.37 ± 0.21bc
SD-P5	2.1 ± 0.1c	3.7 ± 0.9abc	3.34 ± 0.10h	5.24 ± 0.14abc	0.26 ± 0.05cde	2.55 ± 0.49ab
S17	1.0 ± 0.0a	4.9 ± 0.5bcde	1.01 ± 0.02bc	5.61 ± 1.00abcde	0.00 ± 0.00a	6.34 ± 0.80c
478	3.5 ± 0.2e	5.1 ± 0.4cde	2.90 ± 0.22g	6.20 ± 0.24abcde	0.33 ± 0.01de	4.15 ± 0.36abc
CK	2.1 ± 0.2c	2.7 ± 0.6a	2.20 ± 0.18e	3.93 ± 0.34a	0.21 ± 0.01bcd	4.38 ± 0.24abc

注:同列不同小写字母表示 $SSR0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column show significant difference at $SSR0.05$. Hereinafter the same.

2.4 干旱胁迫对不同玉米自交系种子萌发期贮藏物质转化率的影响

不同转基因玉米种子萌发后的胚根干重差异显著 ($F = 194.012 > F_{0.05} = 2.00$, 表 3), SD 系列 SD06、SD10 的胚根干重超过其野生型对照 478, CBF 转基因系列均比野生型强, 13 份转基因玉米材料只有 SD

-P4 种子萌发后的胚根干重小于对照 81565。SD06 的胚根干物质量最大, 平均每粒种子胚根重 0.0148 g, 且其与正常萌发时差异最小, 达到正常萌发时的 61.6%。不同转基因玉米种子萌发后的胚芽干重差异显著 ($F = 110.641 > F_{0.05} = 2.00$, 表 3), SD06 种子萌发后的胚芽干重最重, 平均每粒种子胚芽重

0.0050 g, SD10 和 CBF-1-4 次之, 其中超过对照 81565 的自交系有 5 个; 供试 13 个转基因玉米自交系中以 SD06 种子萌发后的胚芽干重与正常萌发时差异最小, 为正常萌发时的 25.6%。

种子发芽是一个籽粒贮藏物质从胚乳转运到胚根、胚芽进行营养生长的消耗过程。在干旱胁迫处理下, 不同转基因玉米种子萌发时籽粒贮藏物质转化率差异显著 ($F = 267.362 > F_{0.05} = 2.00$, 表 3), SD10 的贮藏物质转化率最高, 胚根和胚芽干重占到整个籽粒干重的 7.33%, SD06 和 SD05 次之; 贮藏物质转化率超过对照 81565 的转基因自交系有 7 个, 包括 3 个 SD 系列 (SD10、SD06、SD05) 和全部 CBF 系列。自交系 SD06 与正常萌发时的差异最小, 为正常萌发的 39.5%, SD-P5 次之。

2.5 隶属法评价玉米种子萌发期抗旱性

隶属函数均值是玉米抗旱性鉴定的重要指标, 抗旱性越强的玉米材料其均值越高, 目前隶属函数法在评价玉米抗旱性中得到了广泛应用^[2,9]。本研究从测定指标中选出发芽势、发芽率、根数、胚根长、胚芽长、贮藏物质转化率、种子萌发抗旱指数 7 个指标进行隶属值分析, 利用隶属函数均值对 13 个转基因玉米自交系种子萌发期的抗旱性进行综合评价。根据侯建华等^[4]隶属值计算方法和付凤玲等^[10]的评价标准, 隶属值 ≥ 0.7 的为高抗自交系, $0.7 >$ 隶属值 ≥ 0.4 为中抗自交系, 隶属值 < 0.4 为弱抗自交系。本试验中转基因玉米材料 SD10 各指标的隶属值均值最高, 为萌发期抗旱性较强的自交系; CBF

-3-4、SD13、SD05、CBF-1-4、CBF-6-5、SD-P3、SD-P5 为萌发期抗旱性中等的自交系; SD06、CBF-3-1、SD07、SD-P1、SD-P4 均值在 0.4 以下, 为萌发期抗旱性较弱的自交系 (表 4)。

3 讨论

作物的耐旱性与遗传和环境密切相关, 表现为多基因控制的数量性状。在选择抗旱材料或品种上目前还没有发现具体某一性状可以作为唯一的、可靠的耐旱性鉴定指标。玉米抗旱性的鉴定方法主要是田间鉴定法, 但田间鉴定法周期较长, 需要的人力物力较多, 而且水分难以控制, 而室内模拟鉴定法有利于玉米材料的早期鉴定, 环境因素容易控制, 可以同时鉴定较多的材料, 是一种比较理想的鉴定方法。在评价方法上, 因为玉米抗旱性是一个综合性状, 用单一性状评价可靠性不高。本研究采用隶属函数法对 13 个转基因玉米自交系进行了种子萌发期抗旱性综合评价, 消除了单一指标评价的片面性, 隶属值平均值越大表明抗旱性越强。本试验结果表明, SD10 为萌发期抗旱性较强的自交系; CBF-3-4、SD13、SD05、CBF-1-4、CBF-6-5、SD-P3、SD-P5 为萌发期抗旱性中等的自交系; SD06、CBF-3-1、SD07、SD-P1、SD-P4 为萌发期抗旱性较弱的自交系。在各抗旱筛选指标中, 种子萌发抗旱指数与隶属函数对玉米抗旱性分析结果较为一致, 生产实践中需要将两者结合起来对参试材料进行抗旱性综合评价。

表 3 不同转基因玉米自交系在干旱胁迫下的种子胚根干重、胚芽干重

Table 3 Dry weight of radicle and plumule of different transgenic inbred lines of maize under drought stress

材料 Material	胚根干重/g Dry weight of radicle		胚芽干重/g Dry weight of plumule		贮藏物质转化率/% Transformation ratio of storage substance	
	处理 Treated	正常 Normal	处理 Treated	正常 Normal	处理 Treated	正常 Normal
SD05	0.0085g	0.0245abc	0.0033e	0.0180bc	3.98g	16.95de
SD06	0.0148j	0.0241abc	0.0050g	0.0195bc	6.38h	16.18cde
SD07	0.0023bc	0.0236abc	0.0000a	0.0171bc	0.87b	17.17de
SD10	0.0135i	0.0288bc	0.0046f	0.0239c	7.33i	25.91f
SD13	0.0059e	0.0418c	0.0022d	0.0184bc	3.16ef	24.98ef
CBF-3-4	0.0074f	0.0188ab	0.0002ab	0.0154abc	2.97e	15.88cde
CBF-3-1	0.0042d	0.0118ab	0.0004ab	0.0060a	1.31c	5.28 a
CBF-1-4	0.0051e	0.0128ab	0.0034e	0.0166bc	2.85e	11.07abcd
CBF-6-5	0.0041d	0.0130ab	0.0002ab	0.0177bc	1.57c	12.80abcd
SD-P1	0.0027c	0.0078a	0.0000a	0.0137abc	0.89b	7.81ab
SD-P3	0.0072f	0.0242abc	0.0016c	0.0212c	2.45d	12.76abcd
SD-P4	0.0006a	0.0118ab	0.0000a	0.0190bc	0.34a	12.62abcd
SD-P5	0.0055e	0.0091ab	0.0006b	0.0094ab	2.25d	7.33ab
S17	0.0016b	0.0119ab	0.0000a	0.0158abc	0.55ab	10.59abcd
478	0.0095h	0.0200ab	0.0015c	0.0231c	3.43f	15.00bcd
CK	0.0014b	0.0073a	0.0019cd	0.0157abc	1.26c	9.47abcd

表 4 不同转基因玉米自交系的隶属函数值

Table 4 Subordinate function values of different transgenic inbred lines of maize

材料 Material	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	根数 Number of roots	胚根长 Radicle length	胚芽长 Plumule length	转化率 Transformation efficiency	<i>GDRl</i>	平均值 Mean value	抗旱性 Drought resistance
SD05	0.23	0.39	0.6	0.7	0.4	0.52	0.2172	0.44	中抗 Mid resistance
SD06	0.08	0.21	0.0	0.4	0.0	0.86	0.0648	0.23	弱抗 Low resistance
SD07	0.31	0.03	0.0	0.1	0.0	0.08	0.0461	0.08	弱抗 Low resistance
SD10	0.46	0.61	1.0	0.9	1.0	1.00	0.4032	0.77	高抗 High resistance
SD13	0.69	0.70	0.4	0.7	0.3	0.40	0.3879	0.52	中抗 Mid resistance
CBF-3-4	1.00	1.00	0.3	1.0	0.1	0.38	0.8796	0.66	中抗 Mid resistance
CBF-3-1	0.08	0.06	0.2	0.4	0.1	0.14	0.1474	0.15	弱抗 Low resistance
CBF-1-4	0.00	0.52	0.7	0.6	0.7	0.36	0.2292	0.44	中抗 Mid resistance
CBF-6-5	0.77	0.79	0.0	0.4	0.1	0.18	0.7413	0.43	中抗 Mid resistance
SD-P1	0.15	0.06	0.0	0.2	0.0	0.08	0.0702	0.08	弱抗 Low resistance
SD-P3	0.08	0.36	0.9	0.8	0.4	0.30	0.1661	0.43	中抗 Mid resistance
SD-P4	0.23	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0000	0.03	弱抗 Low resistance
SD-P5	0.15	0.64	0.4	0.8	0.3	0.27	0.4373	0.43	中抗 Mid resistance
S17	0.54	0.09	0.0	0.1	0.0	0.03	0.2828	0.16	弱抗 Low resistance
478	0.00	0.24	0.9	0.7	0.3	0.44	0.1208	0.38	弱抗 Low resistance
CK	0.46	0.33	0.4	0.5	0.2	0.13	0.6752	0.38	弱抗 Low resistance

目前,玉米育种中对耐旱玉米材料的筛选利用主要表现在对常规自交系^[6,9,11-12]和不同杂交种^[13-15]的鉴定和评价上,而对新型抗旱转基因材料的利用则较少。本研究对转入抗旱基因 *CBF4*、*TsDREB2A* 和 *PIS* 的玉米自交系进行筛选评定,研究表明不同转基因玉米自交系在萌发期的抗旱性上具有显著差异。种子萌发期抗旱性鉴定是玉米整体抗旱性评价的重要内容,接下来我们将利用鉴定的抗旱性较强的自交系与四川生态区优良玉米材料组配,同时也将进一步对材料在苗期、开花期及灌浆期等不同生育时期的抗旱性表现进行鉴定,全方位评价真正适合于生产上育种利用的抗旱玉米新材料,进而选育出抗旱性优良的玉米新品种。

致谢:感谢北京市农林科学院和山东大学为本试验提供转基因玉米种子。转基因玉米材料中 *CBF* 系列来自北京市农林科学院, *SD* 系列来自山东大学。

参考文献:

- [1] 孙军伟,冀天会,杨子光,等.玉米萌芽期抗旱性鉴定研究[J].中国农学通报,2009,25(3):104-107.
- [2] 张倩,张洪生,盖伟玲,等.玉米品种早期抗旱性分析[J].山东农业科学,2011,(2):21-23.

- [3] 王学智,曹敏建,蒋文春.抗旱剂处理对玉米种子的萌发及苗期抗旱力的影响[J].玉米科学,2005,13(2):82-84,89.
- [4] 侯建华,王茅雁,李明哲.玉米萌发期抗旱性鉴定的初步研究[J].内蒙古农牧学院学报,1994,15(3):19-22.
- [5] 国际种子检验协会,李家义译.国际种子检验规程[M].上海:上海科普技术出版社,1995.
- [6] 周树峰,李晚忱,付凤玲,等.57个常用玉米自交系的耐旱性鉴定[J].干旱地区农业研究,2002,20(2):127-130.
- [7] Bouslama M, Schapaugh W T. Stress tolerance in soybeans II Evaluation of three screening technique for heat and drought tolerance[J]. Crop Sci, 1984,24:933-937.
- [8] 孙彩霞,王志杰,张振平,等.玉米抗旱性评价指标的系统分析[J].农业科学与综合研究,2004,20(1):43-47.
- [9] 魏秀俭,杨婉身,潘光堂,等.22个玉米自交系的耐旱性综合分析[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):134-137.
- [10] 付凤玲,李晚忱,潘光堂.模糊隶属法对玉米苗期耐旱性的拟合分析[J].干旱地区农业研究,2003,21(1):83-85,125.
- [11] 李亮,郝转芳,翁建峰,等.玉米自交系萌发期与苗期的耐旱性评价[J].玉米科学,2011,19(4):5-9.
- [12] 杨杰,雷志刚,梁晓玲,等.新疆玉米新自交系耐旱性鉴定与评价[J].西北农业学报,2011,20(12):66-71.
- [13] 李树军,黄先顺,张建国,等.不同玉米杂交种萌发期及花期抗旱性研究[J].黑龙江农业科学,2011,(12):1-3.
- [14] 孙琦,张世煌,郝转芳,等.不同年代玉米品种苗期耐旱性的比较分析[J].作物学报,2012,(2):1-8.
- [15] 董志强,贾秀领,张丽华,等.玉米种子萌发期抗旱性鉴定方法及不同杂交种抗旱性比较研究[J].华北农学报,2012,27(1):178-183.