

# 基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定

崔静宇<sup>1</sup>, 关小康<sup>1</sup>, 杨明达<sup>1</sup>, 刘影<sup>1</sup>, 丁超明<sup>1</sup>, 李玉华<sup>2</sup>, 王同朝<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学农学院/河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450046; 2. 郑州师范学院, 郑州 450044)

**摘要:** 试验在人工气候室内利用称重法精确控制 75% 和 35% 土壤相对含水量(RWC), 通过分析播种后 7 d 不同玉米品种的发芽率、根系生长、干物质转化等对干旱胁迫的响应差异, 对 10 个玉米品种进行萌发期抗旱性综合评定。结果表明, 干旱胁迫降低了玉米的发芽势、发芽率、发牙指数、种子萌发抗旱指数、地上部与地下根物质积累和贮藏物质转运率, 增大了根冠比。利用主成分分析与热图分析得出, 玉米萌发期抗旱鉴定的四级指标分别为干物质积累量、发牙指数和种子萌发抗旱指数; 根长、根冠比和根干重等; 根体积和贮藏物质转运率; 发牙势。将指标按照对抗旱性影响的差异分为 4 类, 发牙率、发牙指数、种子萌发抗旱指数; 根体积、贮藏物质转运率; 根冠比; 根长和芽长。依据综合值对 10 个玉米品种萌发期抗旱性评价, 其抗旱性强弱依次为浚单 29、蠡玉 35、五谷 704、吉祥 1 号、先玉 335、博优 989、郑单 958、伟科 702、农玉 2 号、登海 605。

**关键词:** 玉米; 萌发期; 抗旱性; 主成分分析; 热图

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

## Integrative Evaluation of Maize Drought Tolerance in Germination Period by PCA Method

CUI Jing-yu<sup>1</sup>, GUAN Xiao-kang<sup>1</sup>, YANG Ming-da<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, DING Chao-ming<sup>1</sup>, LI Yu-hua<sup>2</sup>, WANG Tong-chao<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University /

Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou 450046;

2. Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

**Abstract:** Seeding pot experiment had been conducted with 35% and 75% relative soil water content to evaluate the drought tolerance of 10 summer maize varieties in the germination stage in the climate chamber. The results showed that seed germination potential, germination rate, germination index, aboveground and belowground biomass, storage substance remobilization rate, plant height and root length after seedling had been significantly decreased under drought stress while the root/shoot ratio increased. Principal component analysis (PCA) and heat map analysis showed that four levels of indexes had been established, dry matter, germination index and germination drought resistance index; root and shoot relationship; root volume and the storage substance remobilization rate; germinating potential. In addition, all indexes were divided into four categories according to the response of drought on seedling emergence, germination rate related parameters; root volume and the storage substance remobilization rate; root-shoot ratio and root length; plant height. PCA and heat map clustering analysis showed that drought tolerance of 10 varieties was in the order of XD29, LY35, WG704, JX1, XY335, BY989, ZD958, WK702, NY2, DH605.

**Key words:** Maize; Germination stage; Drought tolerance; PCA; Heat map

录用日期: 2018-10-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301106)、国家自然科学基金(31471452, 31601258)、河南省高等学校重点科研项目(16A210028, 17B180007)

作者简介: 崔静宇(1994-), 女, 河南辉县人, 在读硕士, 研究方向为作物抗旱节水栽培理论与技术。

E-mail: 15738894382@163.com

王同朝为本文通讯作者。E-mail: wtcwrn@126.com

中国的农业用水量占整个用水总量的 60% 以上, 人均占有量只有世界平均水平的 1/4, 且时空分布不均衡。水资源供需矛盾已经成为影响粮食生产的重要制约因素<sup>[1]</sup>。我国玉米生产 50% 以上分布在东北、西北、西南等依靠自然降水、缺水的地区<sup>[2]</sup>, 以干旱为主的自然逆境因素导致减产 9.3% ~ 35.1%<sup>[3]</sup>, 且北方春旱、初夏旱频发, 导致玉米萌发期种子萌发和幼苗正常生长受限<sup>[4]</sup>。萌发期作为水分敏感期,

对作物群体数量和结构具有重要的决定作用<sup>[5,6]</sup>。科学地评价、鉴定和筛选玉米萌发期抗旱材料对于选育抗性品种保证后期正常生长至关重要。

干旱胁迫严重影响作物萌发快慢、幼苗和根系发育,减少干物质积累和贮藏物质转运率,使得成活率降低<sup>[7-12]</sup>。在评价萌发期抗旱性指标体系的研究中,Bousslama等<sup>[13]</sup>最早提出种子萌发抗旱指数后,发芽率、发芽势和萌发抗旱指数等常作为玉米、小麦、水稻、苜蓿等作物萌发期抗旱性评定指标<sup>[14-17]</sup>。前人利用各指标与种子萌发抗旱指数的相关性大小将其进行分级以突出不同指标在评价萌发期抗旱性中的重要程度,并通过相关性分析将贮藏物质转运率、活力抗旱指数、相对发芽率、相对发芽势、相对胚芽长和相对胚根长等作为玉米<sup>[18]</sup>、谷子<sup>[19]</sup>等萌发期抗旱性鉴定指标。此外,种子活力、幼苗成活率与种子吸水速率也常被列入评价作物萌发期抗旱性的指标系统中<sup>[20-23]</sup>。

在抗旱性综合评价方法中,灰色关联度法、五级评分法、聚类分析法、模糊数学隶属函数法、主成分分析法<sup>[24-28]</sup>等常用于作物萌发期指标筛选与抗旱性综合性评价。在试验方法上,多采用PEG-6000、蔗糖溶液和甘露醇等不同浓度高渗溶液进行干旱处理,与土壤物理结构差异较大,不能较好模拟大田生产。研究表明,玉米萌发期抗旱性鉴定指标及评价方法上未有可靠统一的标准。不同指标对于萌发期抗旱性影响不同,因而抗旱性评价指标各异,此外,干旱处理方式和评价方法差异也使得抗旱性评价结果大相径庭。

本试验采用育苗钵土培法,差量法称重精确控水,通过设置不同水分梯度模拟大田土壤干旱环境,探究干旱胁迫对萌发的影响,综合主成分分析与热图分析得出评价萌发期抗旱性的可靠指标,建立一套改进评价鉴定体系,为大田生产及抗旱性种质资源选育提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试夏玉米材料为河南省推广10个玉米品种登海605(DH605)、蠡玉35(LY35)、五谷704(WG704)、农玉2号(NY2)、郑单958(ZD958)、博优989(BY989)、先玉335(XY335)、吉祥1号(JX1)、浚单29(XD29)和伟科702(WK702)。育苗钵选用底部有孔隙的塑料钵盘,每盘50穴,每穴体积为34 cm<sup>3</sup>。覆膜选用透光性强的保鲜膜。试验土壤取自河南农业大学科教园区试验田0~30 cm耕层土,土壤类型为潮土,田间持水量22.67%。土壤基础肥力全氮0.72 g/kg、有效磷9.8 mg/kg、速效钾124 mg/kg、有机质9.59 g/kg、碱解氮17 mg/kg。

### 1.2 试验设计

将试验土粉碎并用20目细筛去除杂质,在鼓风干燥烘箱内105℃下烘8 h使其完全干燥。按照适宜的土壤容重(1.2 g/cm<sup>3</sup>)向育苗钵的每个小穴内装入44.4 g烘干土压实,将育苗盘放置在同等大小金属托盘中,注水至金属托盘,土壤通过育苗钵底的孔吸取托盘内水分直至饱和。用注射器抽取金属托盘内残余水后于室内阴凉处静置缓慢蒸发至设定的土壤水分(土壤上下层水分相对均匀,通过称重差量法计算得出土壤实际含水量)。

选择颗粒饱满、大小均匀无破碎的包衣种子,按照播深2~3 cm进行播种。透明塑料薄膜包裹托盘制作成小型塑料棚,防止水分向空气中蒸发。发芽期间每天称重计算土壤水分含量。播种后水分的日蒸发量不超过5 g,总失水量低于20 g,绝对失水率小于1%,控水方法可行(表1)。

试验设置对照组75% RWC,重度胁迫35% RWC,每组设5个重复。供试材料于恒温光照培养箱(日照时间为15 h,温度28℃,光强6 000 lx;黑暗9 h,温度25℃,光强4 000 lx)内培养一周。

表1 土壤水分变化

Table 1 The change of soil water content

%

水分梯度 Moisture gradient	第一天 1st day	第二天 2nd day	第三天 3rd day	第四天 4th day	第五天 5th day	第六天 6th day	第七天 7th day	失水率 Water loss rate
RWC75%	75.00	75.00	75.00	74.75	74.00	72.52	72.51	0.73
RWC35%	35.00	34.75	34.25	34.50	33.51	34.25	32.01	0.68

### 1.3 测定项目与方法

定点观察测定,连续7 d,每天记录发芽粒数、芽长,称量计算水分蒸发量。第8天开始取样,挑选均

匀一致的玉米苗取出并将根冲洗干净,用滤纸擦拭后记录根数目,用直尺测量胚根胚芽长度;根体积分采用差量法,将整株根系放置于盛有一半水的10 mL

量筒内,升高值即为根系体积。剪取胚芽、胚根用滤纸包裹后置于105℃烘箱中杀青5 min后70℃恒温烘12 h,称其干重。

$$\text{种子发芽指数} = \left( \frac{\text{第一天的发芽粒数}}{1} + \frac{\text{第二天发芽粒数}}{2} + \dots + \frac{\text{第七天发芽粒数}}{7} \right) \times 100\%$$

种子萌发抗旱指数=1.00nd2+0.75nd4+0.50nd6+0.25nd8

其中nd2、nd4、nd6和nd8分别为第2天、第4天、第6天和第8天的发芽率。

$$\text{根冠比} = \frac{\text{地下干重}}{\text{地上干重}} \times 100\%$$

$$\text{贮藏物质转运率} = \frac{(\text{芽} + \text{根})\text{干重}}{(\text{芽} + \text{根} + \text{子粒})\text{干重}} \times 100\%$$

$$\text{相对值/抗旱系数} = \frac{\text{干旱胁迫值}}{\text{正常对照值}} \times 100\%$$

$$\text{种子发芽率} = \frac{\text{七天发芽粒数}}{\text{播种总粒数}} \times 100\%$$

$$\text{种子发芽势} = \frac{\text{播种三天发芽粒数}}{\text{播种总粒数}} \times 100\%$$

## 1.4 数据处理与分析

数据采用Microsoft Excel 2010软件处理,SPSS 19.0进行因子分析和主成分分析,SigmaPlot 12.5作图,MeV 4.9.0进行热图分析与聚类,采用SAS 8.1软件对试验数据进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对玉米萌发的影响

由表2得出,干旱胁迫严重影响玉米发芽势。

表2 10个玉米品种发芽指标相对值

Table 2 Relative value of germination index of ten maize varieties

品种 Variety	相对发芽势(%) Relative germination potential	相对发芽率(%) Relative germination rate	相对发芽指数(%) Relative germination index	种子萌发抗旱指数 Germination drought resistance index
DH605	0	40.00	19.30	0.34
LY35	0	100.00	82.60	0.83
WG704	11.80	100.00	76.00	1.00
NY2	0	75.00	70.20	0.74
ZD958	0	84.20	52.80	0.50
BY989	11.80	85.00	56.00	0.73
XY335	15.00	80.00	54.70	0.73
JX1	0	70.00	61.60	0.61
XD29	15.40	100.00	83.80	1.00
WK702	0	100.00	79.80	0.90

35%RWC下,DH605、LY35、NY2、ZD958、JX1和WK702相对发芽势均为零;G704、BY989、XY335和XD29相对发芽势相对值在10个材料中较大,分别为11.80%、11.80%、15.0%、15.4%。DH605发芽率相对值最低,为40.0%;其他品种在70%以上;LY35、WG704、XD29、WK702相对发芽率为100%。不同品种玉米发芽指数和种子萌发抗旱指数在干旱下差异明显,DH605相对发芽指数和种子萌发抗旱指数皆最小,分别为19.3%和0.34;XD29相对值最大,为83.8%和1;LY35、WG704和WK702相对发芽指数和种子萌发抗旱指数也相对较高,说明这3个品种种子活力较高,在干旱条件下发芽较快。

### 2.2 干旱胁迫对玉米萌发期根系生长的影响

干旱胁迫严重影响了玉米萌发期根系的生长发育。由图1可以看出,在35%RWC下除WG704外根

长均显著降低,其中DH605和ZD958降低幅度达到30.2%和44.7%,NY2、LY35、XY335、XD29和WK702降低幅度在20%以内。根体积在低水分条件下除XY335均显著降低,其中,DH605、WK702、LY35、ZD958、XD29相对根体积分别为55.7%、59.0%、67.2%、64.0%、71.8%,XY335根体积接近对照水平。综合得出,干旱下DH605根长和根体积下降较多;XY335、XD29与对照差异较小;LY35、XD29、WK702根长降低较少,根体积减小较多,说明这3个材料在干旱条件下根系伸长相对较大,生长过程中物质分配与其他品种存在差异。

### 2.3 干旱胁迫对物质积累、根冠比和贮藏物质转运的影响

由图2可以看出,35%RWC下芽长、地上干重、地下干物质量、总干重及贮藏物质转运率显著降低,

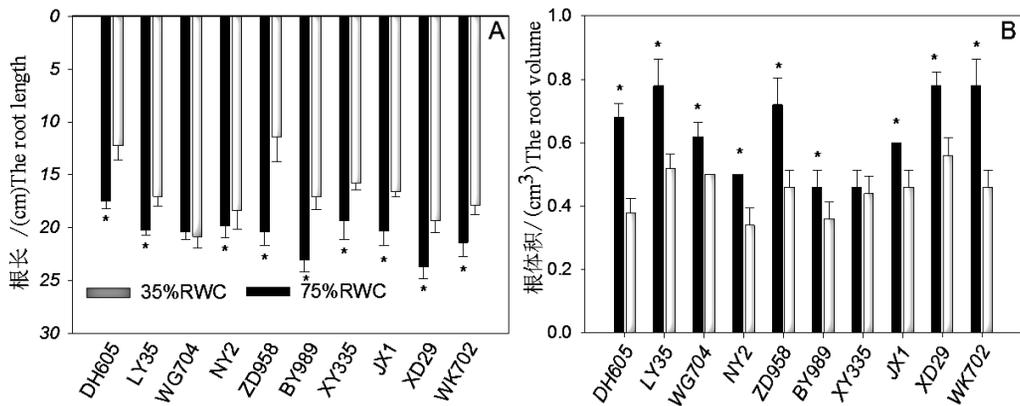


图 1 不同水分条件下10个玉米品种根系对比

Fig.1 The root system of 10 maize varieties under different water conditions

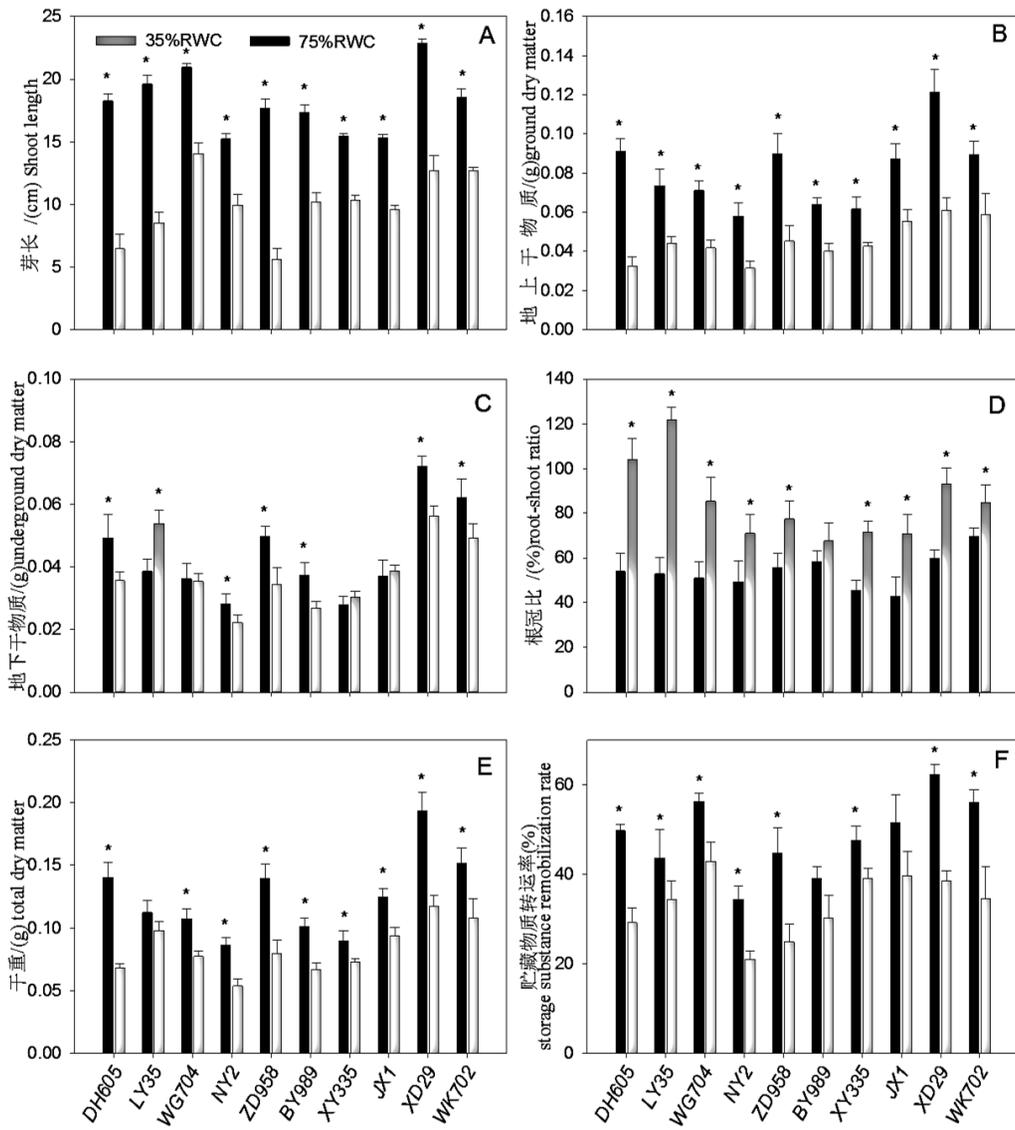


图 2 10个玉米品种萌发期芽长(A),地上干物质(B),地下干物质(C),根冠比(D),总干重(E),贮藏物质转运率(F),在35%RWC和75%RWC下对照图

Fig.2 10 varieties of maize Shoot length(A), ground dry matter (B), underground dry matter (C), root-shoot ratio (D), total dry matter (E), storage substance remobilization rate (F), under 35% RWC and 75% RWC

根冠比显著升高,且品种间降低幅度或增加程度不同。萌发期地上干物质主要取决于芽长和叶片展开程度。在35%RWC下芽长显著降低,其中,DH605、ZD958、LY35相对芽长分别为35.4%、31.7%和43.5%;WG704、WK702和NY2与对照水平相差较小,为37.1%、68.5%、65.2%。干旱胁迫显著降低地上干重,DH605与对照差异最大,其相对值为36%;XY335、JX1、XD29和WK702与对照差异相对较小,相对值分别为62.7%、69.7%、63.5%、65.6%。通过芽长和地上干重可以说明,干旱胁迫对DH605地上部分生长影响最为严重,WK702受影响较小,其他品种间差异不明显。地下干物质量主要取决于根长和根体积,在35%RWC下,LY35地下干物质量显著高于对照水平;WG704、XY335、JX1与对照水分无显著差异;DH605、ZD958、BY989显著低于正常水平。根冠比反映了地上与地下物质分配状况,在低水分下玉米根冠比显著增高,LY35和DH605根冠比相对值为1.899和2.399;XY335和WK702根冠比相对值为1.164和1.217,说明干旱胁迫对LY35和

DH605地上部分生长影响较大,对XY335和WK702地上干物质伤害较小,从而造成了品种间根冠比差异。在35%RWC下玉米萌发期总干重、贮藏物质转运率显著降低,DH605干重和贮藏物质转运率相对值最低,为46.4%和55.7%;ZD958和BY989次之;LY35和JX1在35%RWC下总干重与对照差异较小,分别为88.1%和82.1%,说明水分胁迫对DH605萌发期生长影响较大,LY35和JX1在低水分下能够最大限度地保持地上地下干物质生成及贮藏物质的转运。

#### 2.4 主成分分析与综合抗旱性

以10个玉米品种萌发期12项指标抗旱系数为基础,利用SPSS因子分析和主成分分析,设置特征值大于1得出各主成分的贡献率、旋转后的成分矩阵和特征向量矩阵。由表3得出,主成分分析选取4个主成分,其贡献率分别为第一主成分52.520%,第二主成分18.213%,第三主成分11.564%,第四主成分8.383%,累积贡献率90.679%,即4个主成分涵盖了10个玉米品种12个指标90%以上的数据信息。

表3 各成分的特征值、方差及累积贡献率

Table 3 The characteristic value, variance and cumulative contribution rate of each component.

成份 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取的主成分 The extracted principal component		
	合计 Total	方差的贡献率(%) The contribution rate of variance	累积贡献率(%) Cumulative contribution rate	合计 Total	方差的贡献率(%) The contribution rate of variance	累积贡献率(%) Cumulative contribution rate
1	6.302	52.520	52.520	6.302	52.520	52.520
2	2.186	18.213	70.733	2.186	18.213	70.733
3	1.388	11.564	82.296	1.388	11.564	82.296
4	1.006	8.383	90.679	1.006	8.383	90.679
5	0.829	6.905	97.584			
6	0.146	1.217	98.802			
7	0.102	0.846	99.647			
8	0.027	0.224	99.872			
9	0.015	0.128	100.000			
10	0.000	0.000	100.000			
11	0.000	0.000	100.000			
12	0.000	0.000	100.000			

特征向量矩阵能够反映出各指标在每个主成分上的载荷(表4),第一主成分特征值为6.302,玉米萌发期总干重、地上部分干重、发芽指数和种子萌发抗旱指数在第一主成分上有较高的载荷,说明第一主成分主要是由干物质量、发芽指数和种子萌发抗旱指数决定;根长、根冠比和地下干物质量在第二主成分上有较高的载荷,即第二主成分主要代表了根系

特征;第三主成分上根体积和贮藏物质转运率有较高载荷;第四主成分中发芽势具有较高的载荷。因此,在这10个玉米品种进行萌发期抗旱性评价时,可以认为萌发期地上干物质积累量、发芽指数和种子萌发抗旱指数是主要的评定指标,根长、根冠比和地下干物质量可作为二级指标,根体积、根冠比和贮藏物质转运率作为评价抗旱性的三级指标。

表4 特征向量矩阵  
Table 4 Eigenvector matrix

指标 Indicator	PC1	PC2	PC3	PC4
发芽势	0.121	-0.375	0.108	0.621
发芽率	0.296	-0.174	-0.460	0.189
发芽指数	0.353	-0.080	-0.340	-0.075
种子萌发抗旱指数	0.337	-0.220	-0.293	0.048
地上干重	0.350	-0.122	0.143	-0.053
地下干重	0.295	0.440	-0.073	0.105
根冠比	0.062	0.611	-0.171	0.136
贮藏物质转运率	0.333	0.166	0.338	0.216
总干重	0.365	0.210	-0.001	0.027
芽长	0.269	-0.332	0.159	-0.434
根长	0.261	0.100	0.074	-0.533
根体积	0.248	0.022	0.613	0.128

注:PC1、PC2、PC3、PC4分别为第一主成分、第二主成分、第三主成分和第四主成分。下表同。

Note: PC1, PC2, PC3, PC4 indicated the first principal component, the second principal component, the third principal component, the fourth principal component, respectively. The same below.

为了能进一步分析各评定指标对抗旱性影响的差异,运用SPSS因子分析将成分矩阵旋转后得到旋转后的因子负荷矩阵(表5)。从表5中可以看出,第一个因子与发芽率、发芽指数和种子萌发抗旱指数关系紧密;第二个因子与根体积与贮藏物质转运率关系紧密;第三个因子与根冠比关系紧密;第四个因

子与根长和芽长关系紧密。因此,将12项指标进行归类,可得第一类为发芽性状,第二类为根体积与贮藏物质转运率,第三类为根冠比,第四类为根长与芽长。干旱条件下同类指标响应一致,不同类别指标对玉米萌发期抗旱性影响存在差别。

表5 旋转后的因子负荷矩阵  
Table 5 The rotated factor load matrix

指标 Indicator	因子 Factor			
	因子1	因子2	因子3	因子4
发芽势	0.346	0.326	-0.313	-0.694
发芽率	0.959	0.056	0.086	-0.138
发芽指数	0.930	0.231	0.127	0.172
种子萌发抗旱指数	0.936	0.251	-0.048	-0.005
地上干重	0.611	0.663	-0.071	0.135
地下干重	0.400	0.452	0.772	0.180
根冠比	-0.046	0.015	0.938	0.128
贮藏物质转运率	0.318	0.871	0.326	-0.018
总干重	0.586	0.597	0.448	0.192
芽长	0.535	0.487	-0.498	0.389
根长	0.379	0.418	0.080	0.647
根体积	0.033	0.962	-0.014	-0.021

设变量发芽势、发芽率、发芽指数、种子萌发抗旱指数、地上干重、地下干重、根冠比、贮藏物质转运率、总干重、芽长、根长和根体积的标准化后数据依次为 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 和 $X_{12}$ ,则

根据表4得到主成分表达式:

$$Y_1=0.121X_1 + 0.296X_2 + 0.353X_3 + 0.337X_4 + 0.350X_5 + 0.295X_6 + 0.062X_7 + 0.333X_8 + 0.365X_9 + 0.269X_{10}+0.261X_{11}+0.248X_{12};$$

$$Y_2 = -0.375X_1 - 0.174X_2 - 0.080X_3 - 0.220X_4 - 0.122X_5 + 0.440X_6 + 0.611X_7 + 0.166X_8 + 0.210X_9 - 0.332X_{10} + 0.100X_{11} + 0.022X_{12};$$

$$Y_3 = 0.108X_1 - 0.460X_2 - 0.340X_3 - 0.293X_4 + 0.143X_5 - 0.073X_6 - 0.171X_7 + 0.338X_8 - 0.001X_9 + 0.159X_{10} + 0.074X_{11} + 0.613X_{12};$$

$$Y_4 = 0.621X_1 + 0.189X_2 - 0.075X_3 + 0.048X_4 - 0.053X_5 + 0.105X_6 + 0.136X_7 + 0.216X_8 + 0.027X_9 - 0.434X_{10} - 0.533X_{11} + 0.128X_{12};$$

为了能够更加直观的评价10个玉米品种萌发期抗旱性,对10个玉米品种萌发期主成分值和综合值排名(表6),进行抗旱性综合评价时,可选取4个主成分,以每个主成分的方差贡献率作为权重,构造综合评价指数: $F_{综} = 0.525Y_1 + 0.182Y_2 + 0.116Y_3 + 0.084Y_4$ 。

通过表6可以看出, XD29、LY35、WG704和JX1的综合值较高,因为这些品种在占比权重较大的第一

主成分值比较高。LY35第一主成分和第二主成分都较高,说明在一级指标和二级评定指标都表现较好。XY335、BY989和ZD958的第三主成分值较高,第一主成分和第二主成分都较低,说明干旱胁迫对其萌发期干物质质量和发芽指数影响较大,属于中间型品种。WK702、NY2和DH605是综合值较低的三个品种, DH605在第一主成分得分最低,为-4.941,说明低水分条件下其干物质和发芽指数表现最差。NY2在四个主成分都表现均衡,得分都较低,因此其综合值为-1.725,是除DH605外萌发期抗旱性较弱的品种。WK702第一主成分上得分较高,但第二、三、四主成分皆为负值,说明WK702在四级评判指标中分布不均衡从而影响最终综合值。综合得出, XD29、LY35、WG704和JX1为萌发期抗旱性较强的品种, XY335、BY989、ZD958和WK702为中间型品种, NY2和DH605是抗旱性较差的品种。

表6 10个玉米品种各主成分值与综合值排名

Table 6 The principal component value and comprehensive value ranking of 10 maize varieties

品种 Variety	PC1	PC2	PC3	PC4	综合值 Comprehensive value
XD29	2.412	-0.410	-0.376	1.174	2.133
LY35	2.321	2.935	-1.342	0.406	1.939
WG704	2.406	-0.362	0.066	-0.132	1.095
JX1	1.705	1.132	2.380	-0.397	1.044
XY335	0.292	-1.649	1.442	0.743	0.643
BY989	-1.808	-1.423	-0.599	1.017	-0.426
ZD958	-2.892	0.021	-0.670	0.675	-1.026
WK702	0.779	-1.386	-1.318	-1.431	-1.195
NY2	-0.273	-0.467	-0.085	-1.774	-1.725
DH605	-4.941	1.610	0.502	-0.282	-2.480

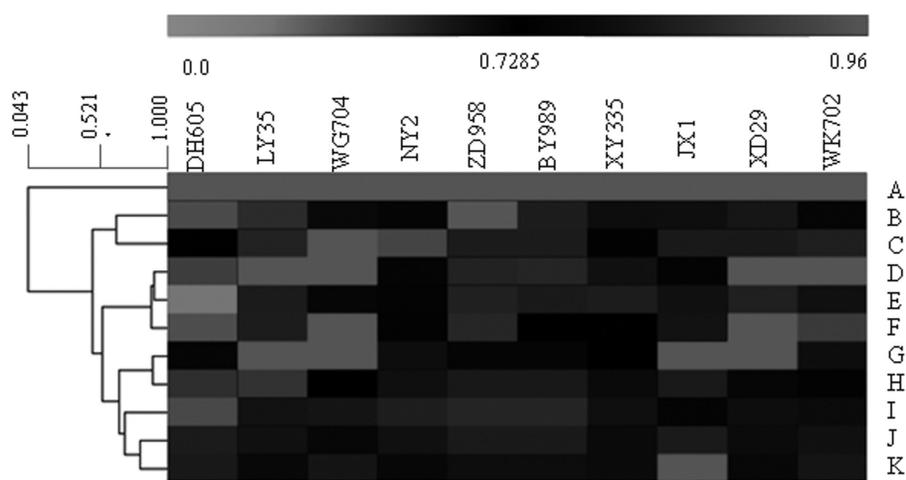
## 2.5 热图抗旱性分析和指标聚类

通过对10个玉米材料萌发期抗旱系数热图分析(图3)可以看出,热图清晰的反映了不同玉米品种萌发期根冠比、芽长、根长、发芽率、发芽指数、种子萌发抗旱指数、地下干重、地上干重、总干重、根体积以及贮藏物质转运率的相对值。由图3可以看出,10个材料根冠比显示区域均呈现极端值浅色,说明干旱显著增加了根冠比。从热图不同明暗程度可以看出,图中DH605整体指标抗旱系数区域较浅,说明其抗旱系数较低。此外ZD958和BY989指标多呈浅色较亮区域,是除DH605外抗旱系数较低的品种。LY35、WG704和XD29在热图中各指标多显示在0.7285区域附近,说明这3个材料抗旱系数较高。NY2、JX1、XY335和WK702各项指标值居中,

属于中间型品种。结果与主成分分析综合排名趋势一致。从图3对玉米萌发期各项评定指标树形聚类可以看出,将指标分为四类。第一类为根冠比,在干旱胁迫后增大;第二类为根长和芽长;第三类为发芽率、发芽指数和种子萌发抗旱指数;第四类为地下干重、地上干重、总干重、贮藏物质转运率和根体积。这与SPSS因子分析旋转后的因子负荷矩阵(表5)结果一致,说明此方法较为可靠。

## 3 结论与讨论

建立可靠的玉米萌发期抗旱性评价方法,完善抗旱性鉴定指标体系,对于提高抗旱高产玉米新品种选择效率、提高水分利用率、节省水资源、缓解和解决干旱危害以及实现农业可持续发展具有重要的



注:A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K分别对应根冠比、芽长、根长、发芽率、发芽指数、种子萌发抗旱指数、地下干重、总干重、地上干重、贮藏物质转运率和根体积。

Note: A, Root-shoot ratio; B, Shoot length; C, Root length; D, Germination rate; E, Germination index; F, Germination drought resistance index; G, Underground dry weight; H, Total dry weight; I, Ground dry weight; J, Storage substance remobilization; K, Root volume.

图3 10个玉米品种萌发期各项指标热图聚类分析

Fig.3 The heat map and clustering analysis of indicators of 10 maize varieties in germination stage.

战略意义和现实意义。

萌发期到苗期抗旱性鉴定具有时间短、容量大、重复性强、易于活体鉴定、破坏小、环境影响小等优点<sup>[29,30]</sup>。在抗旱性鉴定中,将萌发期适应性较差的材料剔除能够节省时间、缩短鉴定周期,并可在极短的时间内获得鉴定结果。在抗旱性鉴定试验方法上,利用蔗糖、PEG等渗透胁迫具有快速准确简单易行的优点,不同品种子粒重量、吸胀到萌发的绝对需水量差异使得等量的胁迫溶液用量可能有利于小粒种子而不利于大粒种子<sup>[31]</sup>,且水培与大田土壤环境差异较大,采用溶液渗透胁迫缺乏可靠性。前人研究表明,当田间土壤含水量为田间持水量的70%左右时利于种子萌发,绝对水分含量低于10%(对应本试验44%RWC)时种子将不能顺利萌发,6%~8%(对应本试验26%RWC~35%RWC)为重度胁迫<sup>[32,33]</sup>。基于此本试验将对照组水分设为75%RWC,干旱组为35%RWC。精确控制误差在1%范围内,土壤在人工气候室内缓慢蒸发,且育苗钵高6cm,上下层水分差异较小,更接近大田土壤干旱环境。在研究内容上,研究者侧重于对玉米苗期和生育后期生理生化和分子抗旱机制的研究,对玉米萌发期抗旱性鉴定体系关注度较低。本研究试验材料选自遗传背景丰富的河南省推广种植品种,有一定的借鉴作用。在严格控制的人工气候室内进行培养,消除了栽培环境差异对结果造成的偏差,具有可重复性,设置5次重复保证了试验结果准确可靠。

干旱条件下,作物出苗的优劣依赖于种子的发芽速度及整齐度,与种子在低水分条件下的发芽能力密切相关<sup>[34,35]</sup>。本试验研究发现,干旱胁迫阻碍了玉米正常的萌发出苗,造成发芽指数及种子萌发抗旱指数降低,原因在于低水分给玉米萌发出苗造成一个逆境环境,使种子活力降低,即种子萌发初始时间推迟,萌发率下降,种苗生长缓慢。水分胁迫所造成种子内部一系列生理生化反应的延迟与破坏是水分胁迫影响种子萌发的直接原因<sup>[36]</sup>。研究表明,萌发早期胚内蛋白质合成与发芽率密切相关<sup>[37]</sup>,水分胁迫有效地控制了胚萌发的蛋白质类型以及与萌发有关的多肽合成<sup>[38]</sup>。不同的玉米品种在抗旱性上存在极显著差异,抗旱性强的品种在水分胁迫下仍然保持较高的发芽势、发芽率、发芽指数和种子萌发抗旱指数。本试验中,DH605、NY2和ZD958萌发情况较差,LY35、WG704和WK702等发芽速度和发芽率等相对较高,其相对发芽率达到100%即干旱处理与对照水平发芽率相同,原因在于土壤湿度对种子萌发快慢影响较大,对种子最终发芽率影响较小,发芽率大小决定于种子活力。

干旱条件下,作物生长需要更为庞大的根系以便吸收和利用土壤中水分。胚根总长体现了根系吸收面积及能够利用的水层深度。本试验中,大部分品种在干旱胁迫下根长、根体积以及根干重都有不同程度的降低,根冠比显著升高。本试验中DH605根长和根体积皆降低较多,WG704根长大于正常水

平,NY2根长虽有降低但不显著,可能是干旱条件促进了根系的伸长和下扎。LY35、XD29、WK702根长降低较少,根体积减少较多,可能是由于这几个品种在干旱胁迫下物质分配发生了变化。贮藏物质运转率反映了种子对贮藏物质的利用效率。本试验研究中干旱降低了玉米萌发期干物质积累及贮藏物质运转率,且子粒较大的品种贮藏物质运转率较低,可能贮藏物质运转率与千粒重存在一定关系。高和平等<sup>[39]</sup>研究认为,千粒重大的材料出苗速度快且成苗素质好。

采用多指标评价盲目性较大且过于繁杂,单一指标简单易行但可靠性差,不能全面、有效、科学地评价不同品种的抗旱性<sup>[40]</sup>。主成分分析通过变量之间的相关性用少数综合变量表示多个变量从而达到将数据降维。本试验主成分分析法消除了品种间固有差异,不仅保证了结果的可靠性,而且使各指标统一为综合抗旱能力(D),结合聚类分析获得抗旱等级评价更为清晰明确。热图对试验数据分布情况分析更为直观和可视化,能够对试验数据质量控制和差异数据具像化展示及对数据和样品进行聚类。Chen等<sup>[41]</sup>采用热图分析清晰的表达作物抗旱性和恢复程度的差异。本试验采用此方法结合主成分分析表达清晰直观且结果一致,可作为玉米萌发期抗旱性鉴定评价主要方法。

作物抗旱性受自身遗传和环境条件影响,有些品种全生育期抗旱性一致,有些品种在不同生育时期对于干旱耐受程度不同。但萌发期作为第一个关键的生育时期对作物群体数量和结构具有重要的决定作用。通过更进一步试验验证发现,WG704在苗期到拔节期抗旱能力较差,LY35则在后期表现也较好。玉米的抗旱性最终表现产量上,产量是其生理生化代谢的最终表现,探究玉米抗旱性还有待对不同生育时期从形态、生理及分子水平进行深入研究。

干旱严重影响发芽快慢,降低发芽势、发芽率、发芽指数和种子萌发抗旱指数;影响幼苗生长,降低地上物质积累及总干重;干旱条件下根系发育受阻,根长、根体积和贮藏物质运转率降低,根冠比增大。通过主成分分析得出,干物质积累量、发芽指数和种子萌发抗旱指数是评价萌发期抗旱性的一级指标;根长、根冠比和根干重等根系特征作为二级指标;根体积和贮藏物质运转率为三级指标;发芽势作为评价的四级指标。由因子分析将各形态指标分为4类:发芽率、发芽指数、种子萌发抗旱指数;根体积、贮藏物质运转率;根冠比;根长和芽长。不同类别指标对玉米萌发期抗旱性影响不同。通过对10个玉

米品种萌发期进行抗旱性综合评价得出,抗旱性强弱依次为XD29、LY35、WG704、JX1、XY335、BY989、ZD958、WK702、NY2、DH605。

#### 参考文献:

- [1] 张燕林. 中国未来粮食安全研究[D]. 西南财经大学, 2010.
- [2] 赵美令. 玉米各生育时期抗旱性鉴定指标的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 66-68.  
Zhao M L. Studies on identification indices for drought resistance in different growing periods of corn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(12): 66-68. (in Chinese)
- [3] 王崇桃, 李少昆. 玉米生产限制因素评估与技术优先序[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1136-1146.  
Wang C T, Li S K. Assessment of limiting factors and techniques prioritization for maize production in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(6): 1136-1146. (in Chinese)
- [4] 范翠丽, 陈景堂, 李育峰, 等. 玉米苗期及萌芽期抗旱性评定方法筛选[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 114-117.  
Fan C L, Chen J T, Li Y F, et al. The filtration of identification methods of maize drought-tolerance during the germination stage and the seeding stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 114-117. (in Chinese)
- [5] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 等. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1233-1246.  
Wu Q, Zhou Y F, Gao Y, et al. Screening and identification for drought resistance during germination in sorghum cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(8): 1233-1246. (in Chinese)
- [6] 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 27-31.  
Shan L, Deng X P, Kang S Z. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 27-31. (in Chinese)
- [7] 杨瑰丽, 杨美娜, 李帅良, 等. 水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价[J]. 华南农业大学学报, 2015(2): 1-5.  
Yang G L, Yang M N, Li S L, et al. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of rice at germination stage [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015(2): 1-5. (in Chinese)
- [8] 胡兴波, 曹敏建, 王学智, 等. 不同玉米品种萌芽期及苗期抗旱性初步研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 66-67.  
Hu X B, Cao M J, Wang X Z, et al. Studies on drought resistance of the different stage in seeding emergence stage and in seeding stage [J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(3): 66-67. (in Chinese)
- [9] 李国瑞, 马宏亮, 胡雯媚, 等. 西南麦区小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定及评价[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(4): 479-487.  
Li G R, Ma H L, Hu W M, et al. Identification and evaluation of wheat cultivars for drought resistance during germination in southwest area[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(4): 479-487. (in Chinese)
- [10] 张健, 池宝亮, 黄学芳, 等. 以活力抗旱指数作为玉米萌芽期抗旱性评价指标的初探[J]. 华北农学报, 2007, 22(1): 22-25.  
Zhang J, Chi B L, Huang X F, et al. Primary Study on the vigour index of drought resistance as the appraise index in corn germination

- stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(1): 22-25. (in Chinese)
- [11] 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.  
Sun J W, Ji T H, Yang Z G, et al. Study on identification of the drought resistant in maize seedling emergence stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(3): 104-107. (in Chinese)
- [12] 赫福霞, 李柱刚, 阎秀峰, 等. 渗透胁迫条件下玉米萌芽期抗旱性研究[J]. *作物杂志*, 2014(5): 144-147.  
He F X, Li Z G, Yan X F, et al. Effect of osmotic stress on drought resistance of maize at germination stage[J]. *Crops*, 2014(5): 144-147. (in Chinese)
- [13] Bouslama M, Schapaugh W T. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance 1[J]. *Crop Science*, 1984, 24(5).
- [14] 杨子光, 张灿军, 冀天会, 等. 小麦抗旱性鉴定方法及评价指标研究Ⅳ 苗期抗旱指标的比较研究[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 156-159.  
Yang Z G, Zhang C J, Ji T H, et al. Study on resistance drought identify method and evaluation Index of wheat Ⅳ the comparative study on resistance drought index of wheat in germination[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 156-159. (in Chinese)
- [15] 张玉梅, 林琪, 姜雯, 等. 渗透胁迫条件下不同抗旱性小麦品种萌发期生理生化指标的变化[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(6): 125-130.  
Zhang Y M, Lin Q, Jiang W, et al. Effect of osmotic stress on physiological and biochemical indices at germination stage of different drought-resistant wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6): 125-130. (in Chinese)
- [16] 敬礼恒, 陈光辉, 刘利成, 等. 水稻种子萌发期的抗旱性鉴定指标研究[J]. *杂交水稻*, 2014, 29(3): 65-69.  
Jing L H, Chen G H, Liu L C, et al. Studies on identification indices of drought resistance of rice in seed germination[J]. *Hybrid Rice*, 2014, 29(3): 65-69. (in Chinese)
- [17] 伏兵哲, 兰剑, 李小伟, 等. PEG-6000 干旱胁迫对 16 个苜蓿品种种子萌发的影响[J]. *种子*, 2012, 31(4): 10-14.  
Fu B Z, Lan J, Li X W, et al. Effects of PEG-6000 drought stress on seed germination of 16 varieties of alfalfa[J]. *Seed*, 2012, 31(4): 10-14. (in Chinese)
- [18] 陈波, 张燕, 蔡光泽, 等. 攀西地区玉米地方品种萌芽期抗旱性研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 58-63.  
Chen B, Zhang Y, Cai G Z, et al. Study on the drought resistance of different maize locale varieties of pan xi area in germination stage [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 58-63. (in Chinese)
- [19] 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.  
Dai X D, Xu X Z, Zhu C C, et al. Seedling stage response to different water availability and drought resistance evaluation of foxtail millet[J]. *Crops*, 2016(1): 140-143. (in Chinese)
- [20] 陈新, 宋高原, 张宗文, 等. PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(6): 1188-1195.  
Chen X, Song G Y, Zhang Z W, et al. Identification and evaluation of drought resistance of Naked Oat (*Avena nuda* L.) under PEG-6000 stress at germination stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(6): 1188-1195. (in Chinese)
- [21] 安永平, 强爱玲, 张媛媛, 等. 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2006, 7(4): 421-426.  
An Y P, Qiang A L, Zhang Y Y, et al. Study on characteristics of germination and drought-resistance index by osmotic stress in rice [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(4): 421-426. (in Chinese)
- [22] 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(3): 19-22.  
Hou J H, Wang M Y, Li M Z. Preliminary studies on appraisal of drought resistance of maize seedlings[J]. *Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry*, 1994(3): 19-22. (in Chinese)
- [23] 王茅雁, 邵世勤, 张建华, 等. 饲用玉米发芽出苗期抗旱鉴定方法和指标的研究[J]. *内蒙古农牧学院学报*, 1994(4): 37-42.  
Wang M Y, Shao S Q, Zhang J H, et al. Appraisal methods and indexes of drought-resistance in the seedling stage of forage maize [J]. *Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry*, 1994(4): 37-42. (in Chinese)
- [24] 种培芳, 苏世平, 李毅. 4 个地理种群红砂的抗旱性综合评价[J]. *草业学报*, 2011, 20(5): 26-33.  
Zhong P F, Su S P, Li Y. Comprehensive evaluation of drought resistance of reaumuria soongorica from four geographical populations [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(5): 26-33. (in Chinese)
- [25] 赵海明, 孙桂枝, 王学敏, 等. 百脉根种质苗期抗旱性鉴定及综合评价[J]. *草原与草坪*, 2011, 31(6): 18-26.  
Zhao H M, Sun G Z, Wang X M, et al. Comprehensive evaluation and identification of drought resistance of *Lotus corniculatus* in seedling stage[J]. *Grassland & Turf*, 2011, 31(6): 18-26. (in Chinese)
- [26] 马文广, 崔华威, 李永平, 等. 20 个烟草品种干旱胁迫下发芽和苗期生理特性及耐旱性评价[J]. *种子*, 2012, 31(2): 25-30.  
Ma W G, Cui H W, Li Y P, et al. Physiological characteristics of 20 tobacco cultivars under drought stress and assessment of their drought tolerance at germination and seedling stages[J]. *Seed*, 2012, 31(2): 25-30. (in Chinese)
- [27] 何雪银, 文仁来, 吴翠荣, 等. 模糊隶属函数法对玉米苗期抗旱性的分析[J]. *西南农业学报*, 2008, 21(1): 52-56.  
He X Y, Wen R L, Wu C R, et al. Analysis of maize drought resistance at seedling stage by fuzzy subordination method[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(1): 52-56. (in Chinese)
- [28] 胡树平, 苏治军, 于晓芳, 等. 玉米自交系抗旱相关性状的主成分分析与模糊聚类[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(6): 81-88.  
Hu S P, Su Z J, Yu X F, et al. Principal component analysis and fuzzy clustering on drought tolerance related traits of maize inbred lines[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(6): 81-88. (in Chinese)

- [29] 降云峰, 马宏斌, 刘永忠, 等. 玉米抗旱性鉴定指标研究现状与进展[J]. 山西农业科学, 2012, 40(7): 800-803.  
Jiang Y F, Ma H B, Liu Y Z, et al. Research status and advances of identification index on drought resistance in maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 800-803. (in Chinese)
- [30] 王 阳, 杨永志, 张 玲, 等. 玉米黄改系材料萌芽期耐旱性鉴定与评价[J]. 玉米科学, 2016(3): 1-6.  
Wang Y, Yang Y Z, Zhang L, et al. Identification and evaluation on drought tolerance of maize Huanggaixi lines in the germination stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2016(3): 1-6. (in Chinese)
- [31] 张 磊, 耿立格, 王丽娜, 等. 不同玉米自交系萌芽期的抗旱性研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(4): 77-81.  
Zhang L, Geng L G, Wang L N, et al. Drought resistance of different maize inbred lines in germination stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(4): 77-81. (in Chinese)
- [32] 苏祯禄, 任和平. 河南玉米[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1994: 253.
- [33] 肖万欣, 赵海岩, 李 明, 等. 水分胁迫对玉米杂交种萌发特性和干物质生产的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(b12): 70-74.  
Xiao W X, Zhao H Y, Li M, et al. Effect of water stress on germination characteristic and dry matter production of maize hybrids[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(b12): 70-74.
- [34] Arjenaki F G. Effects of priming on seed germination of Marigold (*Calendula officinalis*) [J]. Advances in Environmental Biology, 2011, 5(2): 276-280.
- [35] 刘自刚, 沈 冰, 张 雁. 桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2615-2622.  
Liu Z G, Shen B, Zhang Y. Morphological responses to temperature, drought stress and their interaction during seed germination of *Platycodon grandiflorum*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2615-2622. (in Chinese)
- [36] 徐明慧, 关义新, 马兴林, 等. 玉米芽苗期抗旱性研究进展综述[J]. 玉米科学, 2002, 10(4): 35-38.  
Xü M H, Guan Y X, Ma X L, et al. Review on study of drought Resistance in maize seedling emergence stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2002, 10(4): 35-38. (in Chinese)
- [37] 刘 军, 黄上志, 傅家瑞, 等. 种子活力与蛋白质关系的研究进展[J]. 植物学报, 2001, 18(1): 46-51.  
Liu J, Huang S Z, Fu J R, et al. Advances on relation between seed vigor and proteins[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 18(1): 46-51. (in Chinese)
- [38] Abdul-Baki A A. Biochemical aspects of seed vigor[J]. Horticulture, 1980.
- [39] 高和平, 邹礼平, 徐运清, 等. 大豆、玉米种子的千粒重与发芽成苗关系的研究[J]. 孝感学院学报, 2001(9): 68-70.  
Gao H P, Zou L P, Xu Y Q, et al. Study on the relation between seed germination, seedlings development and seed's thousand-grain weight of soybean and corn[J]. Journal of Xiao Gan University, 2001(9): 68-70. (in Chinese)
- [40] Chen D, Wang S, Cao B, et al. Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6(1241).
- [41] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize[J]. Field Crops Research, 2002, 75(2): 161-169.  
(责任编辑: 栾天宇)