

# 基于3种水分控制条件的玉米品种抗旱性综合评价

张文新<sup>1</sup>, 段迎新<sup>1</sup>, 章爽<sup>1</sup>, 杨晶淇<sup>1</sup>, 张建军<sup>2</sup>,  
黄蕊<sup>3</sup>, 杨晓军<sup>4</sup>, 王富贵<sup>5</sup>, 薛吉全<sup>1</sup>, 张兴华<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学农学院 西北旱区玉米生物学与遗传改良重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730000; 3.山西省农业科学院旱地农业研究中心, 山西 太原 030031;

4.陕西省榆林市农业科学院, 陕西 榆林 719000; 5.内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:**基于大田试验、人工控制生长环境的旱棚与 PEG 模拟干旱胁迫的水培试验, 对 8 个玉米品种成株期及苗期的抗旱性进行系统研究, 调查分析了不同品种在 3 种水分控制条件下农艺性状、生理指标及产量表现, 筛选出综合抗旱较好的品种。结果表明:通过 2 a 5 个试验点的大田试验和 2 a 旱棚试验筛选的抗旱性较强品种一致, 分别为九圣禾 2468、陕单 650、联创 825 和 MC703, 在干旱和灌水条件下产量较高且抗旱指数较大, 其中在大田条件下的抗旱指数分别为 0.910、0.909、0.907 和 0.873, 具有较短的散粉吐丝间隔期(ASI)、较高的 SPAD 值、较多的干物质等特点;水培试验通过相关指标隶属值筛选出的抗旱品种有陕单 650、先玉 335、九圣禾 2468 和 MC703, 隶属值分别为 0.871、0.697、0.680 和 0.596, 具有较发达的根系、较强的生理酶活性等特点。综合 3 种水分控制条件, 结合第一性状(产量、抗旱指数)和第二性状(根系、ASI、生理)等指标的鉴定结果, 筛选出稳定抗旱的玉米品种为 MC703、九圣禾 2468 和陕单 650。

**关键词:**玉米; 抗旱性; 抗旱指数; 综合评价

**中图分类号:**S513 **文献标志码:**A

## Comprehensive evaluation of drought resistance in maize varieties based on three water conditions

ZHANG Wenxin<sup>1</sup>, DUAN Yingxin<sup>1</sup>, ZHANG Shuang<sup>1</sup>, YANG Jingqi<sup>1</sup>, ZHANG Jianjun<sup>2</sup>,  
HUANG Rui<sup>3</sup>, YANG Xiaojun<sup>4</sup>, WANG Fugui<sup>5</sup>, XUE Jiquan<sup>1</sup>, ZHANG Xinghua<sup>1</sup>

(1. Northwest A&F University, College of Agronomy, The key Laboratory of Biology and Genetics Improvement of Maize in Arid Area of Northwest Region, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Dryland Agriculture Research Center, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

4. Yulin Academy of Agricultural Sciences, Yulin, Shaanxi 719000, China;

5. Inner Mongolia Agricultural University, Agricultural College, Hohhot Municipality, Inner Mongolia 010000, China)

**Abstract:** To identify the drought resistance ability for different maize varieties and select strong drought resistance varieties accurately, a systematic study about drought resistance was conducted at adult and seedling stages for 8 maize varieties based on field experiment, drought shed and PEG simulating drought stress hydroponic experiment. By investigating and analysis of agronomic characters, physiological indexes and yield characters under three-controlled water conditions, varieties with better comprehensive drought resistance were screen out. These results showed, under 2 years 5 pilot field tests and 2 years dry shed experiments, the varieties including Jiushenghe

收稿日期:2021-04-05

修回日期:2021-06-16

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0101203)

作者简介:张文新(1993-),女,宁夏中卫人,硕士研究生,研究方向为玉米抗旱鉴定。E-mail:1915273218@qq.com

通信作者:薛吉全(1964-),男,陕西武功人,教授,博士生导师,主要从事玉米遗传育种研究。E-mail:xjq2934@163.com

张兴华(1975-),男,陕西咸阳市,副研究员,硕士生导师,主要从事玉米遗传育种研究。E-mail:zhxh4569@163.com

2468, Shandan 650, Lianchuang 825 and MC703 performed large drought resistance index (*DRI*) with higher yields under drought and irrigation conditions. The *DRI* for each variety was 0.910, 0.909, 0.907 and 0.873 in the field conditions respectively, which had shorter powder separation (*ASI*) and more dry matter with higher SPAD. Based on the hydroponic test, the varieties of Shandan 650, Xinyu 335, Jiushenghe 2468 and MC703 were selected as drought resistant varieties, and its membership was 0.871, 0.697, 0.680 and 0.596, respectively. This group had more developed roots and strong physiological enzymatic activities. Combining the identification results of the first traits (yield, *DRI*) with the second traits (root, *ASI*, physiology) under three controlled water conditions, MC703, Jiushenghe 2468 and Shandan 650 were selected as drought resistant varieties.

**Keywords:** maize; drought resistance; *DRI*; comprehensive evaluation

玉米 (*Zea mays* L.) 是旱地作物中需水量较大, 对水分胁迫较为敏感的作物之一<sup>[1]</sup>。我国每年有 50% 左右的玉米种植在干旱半干旱地区, 主要依靠自然降水给玉米提供生长所需水分<sup>[2]</sup>, 干旱会影响玉米植株的生长发育和生理代谢过程, 降低籽粒品质, 导致减产 20%~30%, 严重年份直接导致绝收, 是制约我国玉米产业发展的第一限制因素<sup>[3-5]</sup>。增强玉米抗旱能力一方面要完善农田灌溉设施、保障水分供给, 另一方面要培育筛选抗旱性较强的玉米新品种<sup>[6]</sup>。干旱是目前农业生产上亟需解决的问题, 而培育抗旱玉米品种是解决因干旱而造成玉米减产的最为环保、有效的途径之一<sup>[7]</sup>。增强玉米抗旱性是玉米抗旱育种的主要目标, 精准的评价方法和有效抗旱指标是玉米抗旱研究的基础。因此, 了解不同玉米品种的抗旱性, 筛选并推广抗旱性较强的玉米品种, 对提高我国玉米生产水平具有重要意义。

玉米抗旱性鉴定主要包括鉴定方法、鉴定指标和评价方法 3 个方面<sup>[8]</sup>。国内外研究者分别就这 3 个方面进行了大量的研究, 从不同角度提出了抗旱性鉴定的方法和指标。张赛楠等<sup>[9]</sup>通过大田试验得出花丝间隔期 (*ASI*)、穗位高、百粒重可作为玉米抗旱性评价的第二性状指标; 师亚琴等<sup>[10]</sup>以产量为基础, 筛选出茎秆强度、叶绿素含量 (*SPAD* 值)、花后干物重为玉米抗旱性评价的第二性状指标; Lu 等<sup>[11]</sup>将 *ASI*、叶片衰老、*SPAD* 值、根电容、产量作为抗旱性评价的主要指标。罗淑平<sup>[12]</sup>通过旱棚试验研究了 8 个玉米自交系抗旱性强弱, 筛选出结实性、叶面积、水势、电导率、黄叶数等为重要抗旱指标; 贾凯旋等<sup>[13]</sup>通过水培试验分析幼苗株高、根长、根鲜重、根表面积和体积进行抗旱分级, 筛选出抗旱性较强的品种; 赵永峰等<sup>[14]</sup>通过沙培试验得出根长、根表面积和干重根冠比可以作为玉米苗期抗旱性评价的主要指标。由此可以看出, 由于水分控制条件不同, 应用评价指标和方法不同, 筛选的抗旱材料和抗旱相关指标存在一定差异, 评价结果与生

产实践的一致性较差。

抗旱性鉴定是玉米抗旱研究中的基础工作, 明确不同玉米品种的抗旱能力强弱, 是提高干旱条件下玉米产量的重要途径之一。目前, 建立一套简单高效的鉴定体系是玉米抗旱性研究的重要模块。在借鉴和总结前人经验的基础上, 本试验通过 2 a 5 点的大田抗旱性鉴定试验、2 a 的旱棚控水试验及 PEG 模拟干旱胁迫水培试验, 对 8 个玉米品种成株期及苗期的抗旱性进行系统研究, 利用 GGE 双标图, 以抗旱指数为评价目标, 结合隶属函数对供试品种的抗旱能力进行综合评价, 明确 3 种水分控制条件下玉米品种的抗旱性表现, 为旱区玉米增产增效提供科学理论依据和技术支撑, 同时也为旱区玉米的优质选育和推广奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用已通过国家或省级审定的 8 个玉米品种, 其中郑单 958 和先玉 335 由市场采购, 其余品种由各育种单位提供 (表 1)。

### 1.2 试验地概况

试验于 2019、2020 年分别在陕西省杨凌西北农林科技大学、陕西省榆林农业科学院、甘肃省农业科学院旱地农业研究所、内蒙古农业大学、山西省农业科学院旱地农业研究中心的试验地进行, 各试验点概况见表 2。

### 1.3 试验设计

大田试验: 2019 年于杨凌、榆林、甘肃、内蒙古种植, 2020 年于杨凌、榆林、甘肃、内蒙古、山西种植; 试验采用两因素裂区试验设计, 主区为水分处理, 分别设置干旱胁迫组 (*DS*) 和灌水对照组 (*CK*), 副区为 8 个玉米品种。4 行区, 小区行长 4 m, 行距 0.6 m, 密度 5 000 株·667m<sup>-2</sup>, 株距 22.5 cm, 3 次重复, 2 个处理间设立隔离带, 小区周边种植 2 行保护行 (图 1); 对照组 (*CK*) 在苗期、拔节期、开花期和灌

浆期各浇水 1 次,每次灌溉量为  $0.9 \text{ t} \cdot 667\text{m}^{-2}$ ,保证整个生育期供水充足,干旱组(DS)在花期不浇水,每隔 2 d 用 PMS710 土壤水分测定仪测定 15~20 cm 土层的土壤含水量,待含水量自然降至田间持水量

( $21\% \pm 2\%$ )的 50%~60%(中度胁迫)停止胁迫,调查相关指标,控水结束后两处理进行灌水,使其恢复至正常水平,其他管理均采用常规的大田管理;成熟期收获小区中间两行果穗测产。

表 1 试验材料及选育单位

Table 1 Tested corn inbred and breeding unit

编号 Code	名称 Name	选育单位 Breeding unit	编号 Code	名称 Name	选育单位 Breeding unit
1	九圣禾 2468 Jiushenghe 2468	北京九圣禾农业有限公司 Beijing Jiushenghe Agriculture Limited Company	5	MC703	北京农林科学院 Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences
2	联创 825 Lianchuang 825	北京联创种业股份有限公司 Beijing Lianchuang Seed Industry Co., Ltd	6	陕单 650 Shandan 650	西北农林科技大学农学院 Northwest A&F University, College of Agronomy
3	瑞普 909 Ruipu 909	山西农业科学院玉米研究所 Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Maize Research Institute	7	郑单 958 Zhengdan 958	河南农科院粮食作物研究所 Henan Academy of Agricultural Sciences, Grain Crop Institute
4	新玉 108 Xinyu 108	新疆农业科学院粮食作物研究所 Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Institute of Food Crops	8	先玉 335 Xianyu 335	铁岭先锋种子研究有限公司 Tieling Pioneer Seed Research Limited Company

表 2 试验地概况

Table 2 Test locations overview

试点 Location	经纬度 Latitude and longitude	农业生态区 Agricultural ecology	气候类型 Climate type	海拔 Elevation /m	降水量 Precipitation /mm	年均气温 Average temperature /°C	土壤类型 Soil type
杨凌 Yangling	34°54'N, 108°07'E	关中平原夏玉米区 Guanzhong plain summer maize area	温带半干旱大陆性气候 Extratropical semi-arid continental climate	521	635	12.9	褐土 Cinnamon
榆林 Yulin	38°16'N, 109°45'E	陕北灌溉春玉米区 Northern Shaanxi irrigation spring maize area	中温带干旱大陆性气候 Middle temperate arid continental climate	1100	365	8.3	沙壤土 Sandy
甘肃 Gansu	36°03'N, 103°40'E	西北灌溉春玉米区 Northwest irrigation spring maize area	温带半干旱大陆性气候 Extratropical semi-arid continental climate	1503	327	10.3	栗钙土 Chestnut
内蒙 Inner Mongolia	40°48'N, 111°41'E	西北灌溉春玉米区 Northwest irrigation spring maize area	温带半干旱大陆性气候 Extratropical semi-arid continental climate	1040	500	14.0	棕钙土 Brown
山西 Shanxi	37°87'N, 112°53'E	西北旱作春玉米区 Northwest rain-fed spring maize area	北温带干旱大陆性气候 Northern temperate arid continental climate	800	468	9.5	褐土 Cinnamon

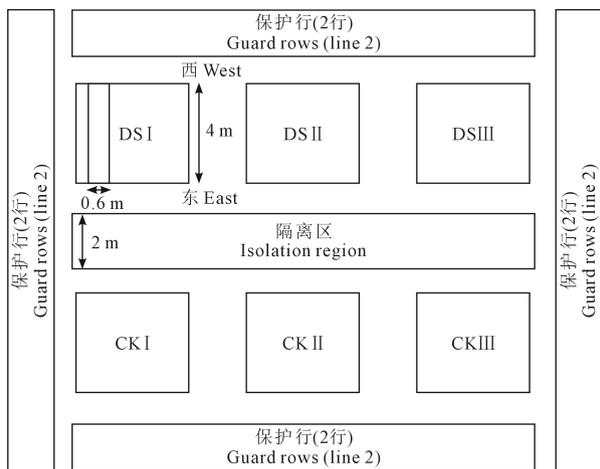


图 1 田间试验布局  
Fig.1 Field trials layout

旱棚试验:2019 年和 2020 年 5 月中旬于杨凌种植,2 行区,小区行长 5.5 m,行距 0.6 m,密度  $5000 \text{ 株} \cdot 667\text{m}^{-2}$ ,株距 22.5cm,3 次重复;对照组(CK)在苗期、拔节期、花期和灌浆期分别浇水一次,保证整个生育期供水充足,干旱组(DS)在花期(7 月中旬)进行干旱胁迫,胁迫 10 d 左右,雨天关棚遮雨,晴天拉开;至中度胁迫停止处理,调查相关指标,控水结束后两处理进行灌水,使其恢复至正常水平;其他管理采用常规的田间管理;成熟期收获小区全部果穗进行测产。

水培试验:种子用 0.3%  $\text{H}_2\text{O}_2$  消毒后用蒸馏水浸泡 6~8 h,种在育苗盘中(营养土:蛭石=3:1),置于培养室(温度: $25\text{°C} \pm 2\text{°C}$ ,湿度 65%~70%,光照 8:00—18:30),待幼苗第二片叶完全展开时,选

取生长一致的完整植株用海绵条包好移至提前打好孔的黑色泡沫板上,然后置于通有氧气泵和装有霍格兰全营养液的大塑料盆(长 50 cm,宽 40 cm,高 15 cm)中培养,试验设置 6 盆,每盆里 8 个品种,每个品种一排(10 株),每 2 天换一次营养液,三叶一心期进行水分胁迫处理,对照组继续用营养液培养,干旱组换用含有 15%PEG-6000 营养液培养,每个处理 3 次重复,干旱胁迫 4 d,胁迫后取样测定各项指标。

#### 1.4 测定指标及抗旱性评价方法

1.4.1 测定指标及方法 散粉吐丝间隔期(ASI),雄穗散粉与雌穗吐丝间隔时间;株高、穗位高,灌浆期用塔尺测量株高、穗位高;统计绿叶数,成熟期单株绿叶数;干物质积累,胁迫后和成熟期每小区选 2 株有代表性的植株,取地上部自然晾晒至恒重后称重;叶面积,采用长宽系数法<sup>[15]</sup>,叶面积=叶长×叶宽×0.75;根系,采用 LA-S 多功能根系扫描仪;叶绿素含量(SPAD 值),采用 SPAD-502plus 叶绿素仪测量植株穗位叶的 SPAD 值;根系活力,采用伤流法<sup>[16]</sup>测定;茎秆强度,成熟期采用 M391942 植物茎秆测量仪测定植株地上部第三节的茎秆强度;光合荧光参数,胁迫后采用 MultispeQ 植物测量仪(PhotosynQinc,美国)测量;生理酶活性,超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定<sup>[17]</sup>,过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定<sup>[18]</sup>,过氧化氢酶(CAT)采用紫外吸收法测定<sup>[19]</sup>,脯氨酸(Pro)采用磺基水杨酸法测定<sup>[20]</sup>,丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸法<sup>[21-22]</sup>测定;产量,收获前调查有效株数等指标,成熟期收获小区果穗,称总鲜重,统计总穗数,挑选 10 个有代表性的果穗使其重量等于平均单穗重乘以 10,晒干后脱粒称重,用 PM-8188 谷物水分测定仪(Kett Electric Laboratory,日本)测定籽粒含水量,计算单位面积产量。

#### 1.4.2 抗旱性评价方法

(1)根据不同试点产量,计算不同水分处理下的产量最佳线性无偏差预测值(BLUP)<sup>[23]</sup>:

$$y_{ij} = \mu + S_j + SG_{i(j)} + e_{ij} \quad (1)$$

式中, $i$ 为第 $i$ 个品种; $j$ 为第 $j$ 个环境; $y_{ij}$ 为单个品种产量; $\mu$ 为多环境产量均值; $S_j$ 为第 $j$ 个环境的固定效应; $SG_{i(j)}$ 为第 $i$ 个品种与第 $j$ 个环境的随机交互效应; $e_{ij}$ 为剩余残差。

(2)根据产量做 GGE 双标图<sup>[24]</sup>分析:

$$P_{ij} = \mu + g_i + e_j + \varphi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中, $\mu$ 为多试点两种水分条件下的产量均值, $g_i$ 为品种主效应, $e_j$ 为环境主效应, $\varphi_{ij}$ 为品种-环境互作

效应, $\varepsilon_{ij}$ 为随机误差。

(3)根据灌水和干旱处理下产量 BLUP 值,参照兰巨生等<sup>[25]</sup>的方法计算供试品种抗旱指数(DRI):

$$DRI = Y_d^2 / (Y_w \times Y_{di}) \quad (3)$$

式中, $Y_d$ 为待测材料干旱条件下籽粒产量; $Y_w$ 为待测材料灌水条件下籽粒产量; $Y_{di}$ 为所有供试材料干旱处理下平均产量。

(4)根据隶属函数公式<sup>[26-27]</sup>计算相关性状的隶属度:

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (4)$$

$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$

式中, $U_{ij}$ 为第 $i$ 个品种待测性状的隶属值, $X_{ij}$ 为第 $i$ 个品种第 $j$ 个性状的旱/水相对值, $X_{i\min}$ 、 $X_{i\max}$ 分别为所有供试品种中第 $j$ 个指标性状相对值中的最大、最小值。

#### 1.5 数据处理

采用 WPS 2019 进行数据统计与整理,采用 Origin 2017 作气泡图、三维图及雷达图,采用 IBM SPSS Statistics 25 进行产量联合方差分析、鉴定指标主成分分析及系统聚类分析,采用 SAS System 进行产量 BLUP 值计算,采用 GenStat 进行 GGE 稳定性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 大田试验条件下不同玉米品种抗旱性评价

大田种植受外界环境的影响较大,1 a 的鉴定结果具有偶然性,多年多点的鉴定结果更准确可靠。分别对 2 a 5 个试点的产量进行联合方差分析,结果显示,不同玉米品种、不同水分处理及不同试点间的产量均存在极显著差异,说明不同玉米品种间存在遗传基础上的差异,水分胁迫对产量的影响较大,干旱胁迫有效,试点的选择具有代表性;重复间差异不显著,重复性好(表 3)。因此,可以用产量作为评价本试验不同玉米品种抗旱性强弱的第一性状指标。

综合 2 a 5 个试点的大田产量分别计算灌水和干旱条件下的产量 BLUP 值,根据产量 BLUP 值作三维图抗旱性分析(图 2)。联创 825、九圣禾 2468、陕单 650 和 MC703 在两种水分处理条件下的产量均较高,其中联创 825、九圣禾 2468 和陕单 650 的 DRI 较大,表明这 3 个品种在两种水分处理条件下均具有较高产量和较大 DRI,属于高产抗旱性较强品种;MC703 的 DRI 较小,说明该品种在大田种植条

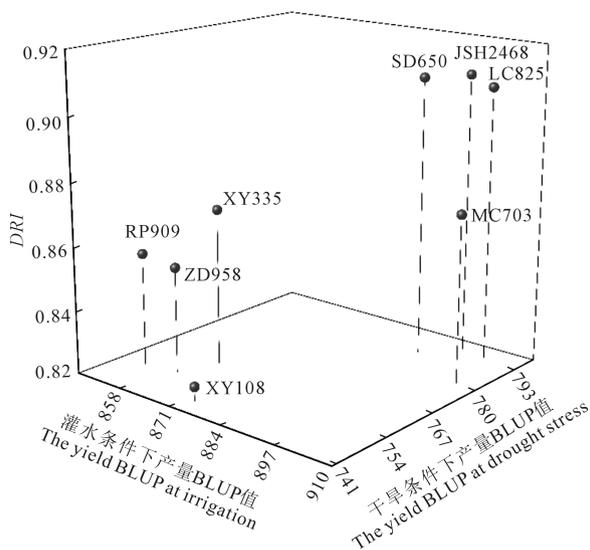
表 3 大田试验条件下产量性状联合方差分析

Table 3 Analysis of comprehensive variance for grain yield in field test conditions

变异来源 Source of variation	2019			2020		
	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P 值 P value	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P 值 P value
品种 Genotype	7	26.53 **	<0.001	7	5.29 **	<0.001
处理 Treatment	1	515.50 **	<0.001	1	234.73 **	<0.001
试验点 Environment	3	2224.73 **	<0.001	4	502.05 **	<0.001
重复 Repeat	2	0.12	0.892	2	2.39	0.095
处理×试验点 Treatment×environment	3	87.75 **	<0.001	4	48.17 **	<0.001
品种×试验点 Genotype×environment	21	14.25 **	<0.001	28	3.41 **	<0.001
品种×处理 Genotype×treatment	7	1.93	0.07	7	0.31	0.949
品种×处理×试验点 Genotype×treatment×environment	21	1.71 *	0.037	28	0.38	0.998

注: \*、\*\* 分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平上的差异显著性,下同。

Note: \*, \*\* indicate significant differences at the  $P<0.05$  and  $P<0.01$  probability levels, respectively, the same below.



注 Note: JISH2468—九圣禾 2468 Jiushenghe 2468, LC825—联创 825 Lianchuang 825, RP909—瑞普 909 RuiPu 909, XY108—新玉 108 Xinyu 108, SD650—陕单 650 Shandan 650, ZD958—郑单 958 Zhengdan 958, XY335—先玉 335 Xianyu 335。下同。The same below.

图 2 大田干旱和灌水条件下不同品种产量三维图  
Fig.2 3D chart of yield of different varieties in field under drought and irrigation conditions

件下的抗旱性相对较弱,属于高产抗旱性一般品种;先玉 335、瑞普 909、郑单 958 和新玉 108 在两种水分处理条件下的产量较低,且 DRI 较小,表明这 4 个品种在两种水分处理条件下的产量及抗旱性表现一般,属于低产抗旱性一般品种。

基于 2 a 2 种水分处理条件下的产量进一步作 GGE 双标图分析(图 3)。由图 3A 可知,在丰产性方面,联创 825 更靠近于平均环境轴走向,丰产性最

好,九圣禾 2468 和 MC703 次之,瑞普 909 的丰产性较差;在稳产性方面,联创 825 到平均环境轴的垂线较短,稳产性最好,陕单 650 和新玉 108 次之,先玉 335 的垂线较长,稳产性较差。由图 3B 可知,联创 825 距离理想品种(圆心)最近,陕单 650 和九圣禾 2468 次之,先玉 335 和瑞普 909 离圆心较远,不同品种到圆心的距离为:联创 825<陕单 650<九圣禾 2468<MC703<新玉 108<郑单 958<先玉 335<瑞普 909。综上,联创 825、陕单 650、九圣禾 2468、MC703 产量较高且稳定性较好,更接近理想抗旱品种。

干旱导致植株的株高、穗位高、SPAD 值、成熟期绿叶数、根系活力、茎秆强度、雄穗分枝数、花后及成熟期干物质积累量均有所下降,ASI 增大(表 4),不同性状变化幅度不同,其中根系活力的变化幅度最大,下降了 34.68%,ASI 次之,增加了 27.78%。各性状值在不同水分处理间均存在显著或极显著差异,说明干旱胁迫对玉米植株的表型性状会有不同程度影响;且干旱处理下各性状值的变异系数范围普遍有所增大,正常灌水下的变异系数范围为 2.40%~52.04%,干旱胁迫下的变异系数范围为 3.58%~53.18%,说明干旱胁迫增加了品种间的区分力度;不同品种的株高、穗位高、ASI、SPAD 值、绿叶数、根系活力、茎秆强度、雄穗分枝数及花后干物质间差异显著,说明不同品种对于干旱的响应机制不同,可作为大田玉米抗旱性鉴定的第二性状指标。

基于方差分析,选择不同处理及不同品种间均存在显著差异的株高、穗位高、ASI、SPAD 值、绿叶数、根系活力、茎秆强度、雄穗分枝数及花后干物质

做雷达分析(图 4),由图 4 可以看出,不同玉米品种的各性状间差异较为明显。其中抗旱较强品种:联创 825 具有较高的株高、较多的绿叶数、较多的花后干物质积累;陕单 650 具有较整齐的株高、较短的 ASI、较大的 SPAD 值、较强的根系活力;MC703 具有较高的株高、较短的 ASI、较大的 SPAD 值和较强的根系活力和茎秆强度、较多的绿叶数及较多的干物质积累;九圣禾 2468 具有较高的株高、较强的根系

活力和茎秆强度。抗旱性一般品种:郑单 958、先玉 335、新玉 108、瑞普 909 的 ASI 较长、SPAD 值较低、根系活力及茎秆强度较弱,且不同处理间的差异较大,说明品种的稳定性较差,且对干旱胁迫较为敏感。综上,抗旱性较强品种联创 825、陕单 650、MC703、九圣禾 2468 具有较短的 ASI、较高的 SPAD 值、较强的根系活力和茎秆强度,较多的绿叶数及较多的花后干物质积累等特点。

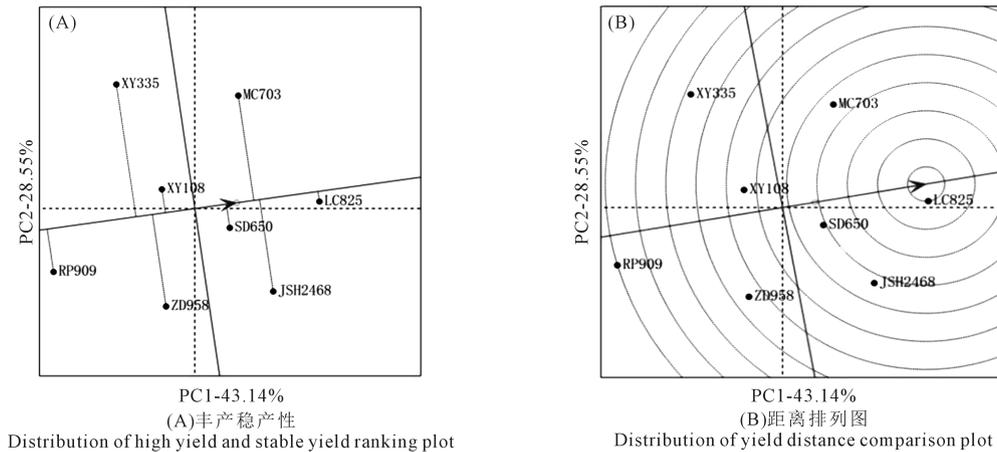


图 3 大田试验条件下不同玉米品种的 GGE 双标图分析

Fig.3 Analysis of GGE biplot of different maize varieties in field test conditions

表 4 大田试验条件下不同处理玉米植株各性状的均值、变异系数及方差分析

Table 4 Average, variation coefficient and variance analysis about traits of maize under different water treatment in field test conditions

性状 Trait	正常灌水(CK) Irrigation		干旱胁迫(DS) Drought stress		F 值 F value	
	均值 Mean	变异系数 CV/%	均值 Mean	变异系数 CV/%	均值 Mean	品种 Variety
株高 Plant height/cm	274.84	5.33	256.34	5.31	41.09 **	11.95 **
穗位高 Ear height/cm	97.43	7.80	89.01	7.65	41.13 **	14.89 **
散粉吐丝间隔期 ASI/d	1.98	11.99	2.53	7.51	17.14 **	3.41 *
SPAD 值 SPAD value	59.96	11.50	58.50	13.77	52.65 **	6.76 **
绿叶数/(片·株 <sup>-1</sup> ) Green leaf numbers /(piece·plant <sup>-1</sup> )	7.09	13.66	5.68	14.84	56.50 **	11.26 **
根系活力 Root vitality/(mg·h <sup>-1</sup> )	204.74	2.40	133.74	7.05	792.42 **	3.47 *
茎秆强度 Straw stiffness (N)	51.75	2.93	49.07	3.58	30.54 **	5.55 **
雄穗分枝数/(枝·株 <sup>-1</sup> ) Male ear branches /(branch·plant <sup>-1</sup> )	6.16	52.04	5.32	53.18	10.26 **	56.94 **
花后干物质/(kg·株 <sup>-1</sup> ) Dry matter at post-silking /(kg·plant <sup>-1</sup> )	0.24	10.76	0.20	12.20	5.82 **	2.18 *
成熟期干重/(kg·株 <sup>-1</sup> ) Dry matter at mature/(kg·plant <sup>-1</sup> )	0.28	9.94	0.24	11.84	9.30 **	1.02

### 2.2 旱棚人工控水条件下不同玉米品种抗旱性评价

基于 2019 年和 2020 年旱棚的产量对不同品种、处理、年份进行联合方差分析(表 5),结果显示,不同玉米品种、不同水分处理间均存在极显著差

异,说明所选材料具有代表性,不同品种间存在遗传基础上的差异,干旱处理有效,对产量的影响较大;年际间差异不显著,说明两年旱棚种植条件相似,且受外界环境的影响较小,重复间差异不显著,年际间重复性好。

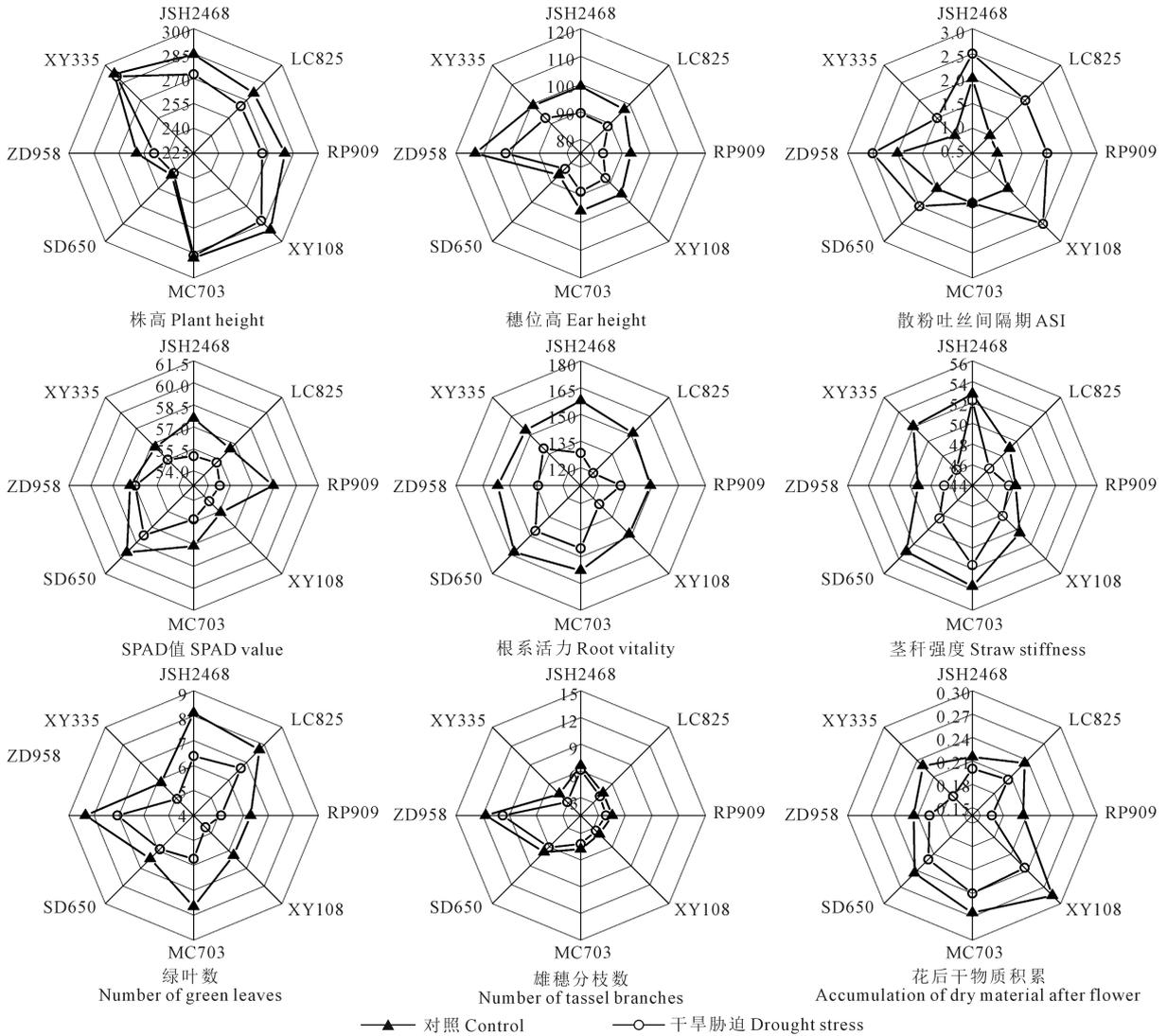


图 4 大田试验条件下干旱胁迫对不同玉米品种农艺性状的影响

Fig.4 Effects of drought stress on agronomic traits of different maize varieties in field test conditions

表 5 旱棚人工控水条件下玉米产量性状联合方差分析

Table 5 Analysis of comprehensive variance for grain yield under drought and irrigation conditions in shad

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares (SS)	自由度 Degree of freedom (DF)	均方 Mean squares (MS)	F 值 F value	P 值 P value
品种 Genotype	39611.903	7	5658.843	4.201 **	<0.001
处理 Treatment	1319896.43	1	1319896.43	979.78 **	<0.001
年份 Year	1760.124	1	1760.124	1.307	0.257
重复 Repeat	4363.738	2	2181.869	1.620	0.206
品种×处理 Genotype×treatment	2037.184	7	291.026	0.216	0.980
品种×年份 Genotype×year	1862.751	7	266.107	0.198	0.985
处理×年份 Treatment×year	665.468	1	665.468	0.494	0.485
品种×处理×年份 Genotype×treatment×year	1290.105	7	184.301	0.137	0.995

基于 2019 年和 2020 年产量计算 BLUP 值并作三维图分析(图 5),由图 5 可知,MC703、陕单 650、九圣禾 2468 和联创 825 在两种水分处理条件下的产量 BLUP 值较高,其中 MC703、陕单 650 的 *DRI* 较大,属于高产抗旱性较强品种;九圣禾 2468、联创 825 的 *DRI* 较小,属于高产抗旱性一般品种;先玉 335 在灌水条件下产量较低,在干旱条件下产量较高,*DRI* 较大,表明该品种的稳产性较好;郑单 958、瑞普 909 和新玉 108 在两种水分处理下的产量 BLUP 值均较低,且 *DRI* 较小,属于低产抗旱性一般品种。

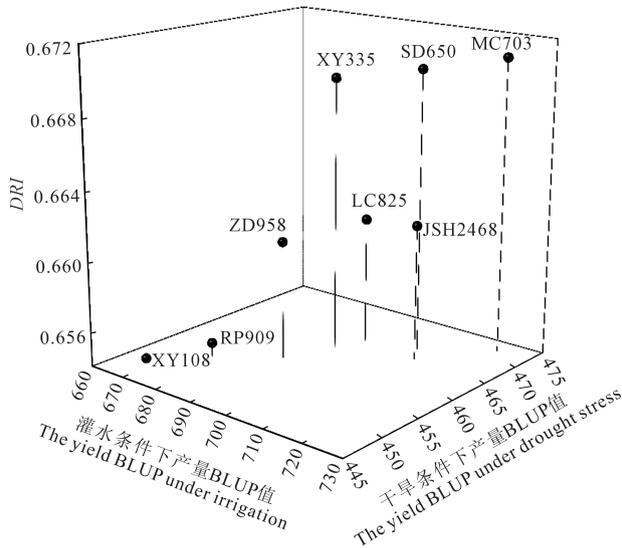


图 5 旱棚干旱和灌水条件下不同品种产量三维图

Fig.5 3D chart of yield of different varieties under drought and irrigation conditions in shad

两种水分处理下的各性状值均达到极显著水平(表 6),与灌水处理相比,干旱导致植株的株高、穗位高降低,ASI 延长,绿叶数减少,根系活力及茎秆强度减弱,且不同性状变幅不同,其中变幅最大的是根系活力,下降 69.72%,ASI 和花后干物质次之,分别上升了 42.22%和 35.71%,说明干旱胁迫对玉米植株的生长发育影响较大;不同品种间的株高、穗位高、ASI、绿叶数、根系活力及茎秆强度存在极显著差异,说明不同品种对干旱胁迫的响应机制不同,干旱胁迫能有效增大不同品种间的区分度。综上,选择不同处理及不同品种间均存在显著差异的株高、穗位高、ASI、绿叶数、根系活力及茎秆强度为旱棚种植条件下抗旱品种鉴定的第二性状指标。

根系活力基于方差分析,对筛选的 6 个指标进行气泡图分析(图 6),气泡大小表示不同处理间性状值变化幅度。由图 6 可知,不同抗性玉米品种对干旱的响应机制不同,其中抗旱性较强品种:MC703 在两种处理下具有较高的株高、穗位高,较短的 ASI,较稳定的绿叶数,较强的根系活力及茎秆强度;陕单 650 具有较稳定的株高、穗位高,较短的 ASI、较大且稳定的绿叶数;九圣禾 2468 具有较高的株高,较稳定的 ASI,较多的绿叶数,较强的根系活力和茎秆强度;联创 825 具有较短的 ASI,较多的绿叶数。抗旱性一般品种:新玉 108、瑞普 909 的 ASI 较长、SPAD 较低、绿叶数较少,且气泡较大,即对干旱胁迫较为敏感,受干旱的影响较大,稳定性较差。

表 6 旱棚人工控水条件下不同处理玉米植株各性状的均值、变异系数及方差分析

Table 6 Average, variation coefficient and variance analysis about traits characters of maize under different water treatment in shad

性状 Trait	正常灌水(CK) Irrigation		干旱胁迫(DS) Drought stress		<i>F</i> 值 <i>F</i> value	
	均值 Mean	变异系数 CV/%	均值 Mean	变异系数 CV/%	均值 Mean	品种 Variety
株高 Plant height/cm	294.70	3.90	273.79	3.57	31.69**	4.01**
穗位高 Ear height/cm	106.00	8.48	92.98	8.14	153.50**	30.76**
散粉吐丝间隔期 ASI/d	2.25	19.45	3.20	15.31	35.22**	4.00**
SPAD 值 SPAD value	57.25	1.73	54.08	2.00	14.64**	0.76
绿叶数/(片·株 <sup>-1</sup> ) Green leaf numbers /(piece·plant <sup>-1</sup> )	6.87	15.97	5.66	21.52	19.59**	8.85**
根系活力 Root vitality/(mg·h <sup>-1</sup> )	65.72	8.21	19.90	21.58	170.77**	17.53**
茎秆强度 Straw stiffness/N	42.19	2.96	35.85	4.24	582.68**	13.68**
花后干物质/(kg·株 <sup>-1</sup> ) Dry matter weight at post-silking /(kg·plant <sup>-1</sup> )	0.28	10.76	0.18	18.60	37.21**	0.32
成熟期干重/(kg·株 <sup>-1</sup> ) Dry matter weight at mature/(kg·plant <sup>-1</sup> )	0.33	9.94	0.26	13.74	14.40**	0.65

### 2.3 水培 PEG 模拟干旱胁迫下不同玉米品种苗期抗旱性评价

通过 PEG 模拟干旱胁迫后各性状值的相对值(相对值 = PEG 胁迫处理下指标值/正常对照下指标值)进行苗期抗旱性评价(表 7),由表 7 可知,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{13}$  的平均值均小于 1,说明 PEG 胁迫会导致玉米植株的这些指标值降低,从而影响玉米的生长发育;而  $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$  的平均值均大于 1,说明植株通过提高这些性状来降低干旱胁迫对自身的影响。各项指标相对值

的变异系数范围为 1.59%~11.95%,变异系数越大,说明对于干旱胁迫的反应越敏感,其中,  $X_6$  的变异系数最大,为 11.95%,其次是  $X_5$ 、 $X_3$ ,分别为 10.23%和 9.13%,而  $X_{10}$ 、 $X_4$  的变异系数较低,分别为 1.59%和 2.86%。基于 15 个鉴定指标相对值变异系数的大小,各指标对 PEG 模拟干旱胁迫的敏感程度为:  $X_6 > X_5 > X_3 > X_{11} > X_{14} > X_2 > X_1 > X_8 > X_{15} > X_{13} > X_9 > X_7 > X_{12} > X_4 > X_{10}$ 。作 2 a 5 个试点大田产量的 *DRI* 与 15 个苗期鉴定指标相对值的相关性分析(表 8),根据相关系数的大小对鉴定指标进行筛选,消除与抗旱相关

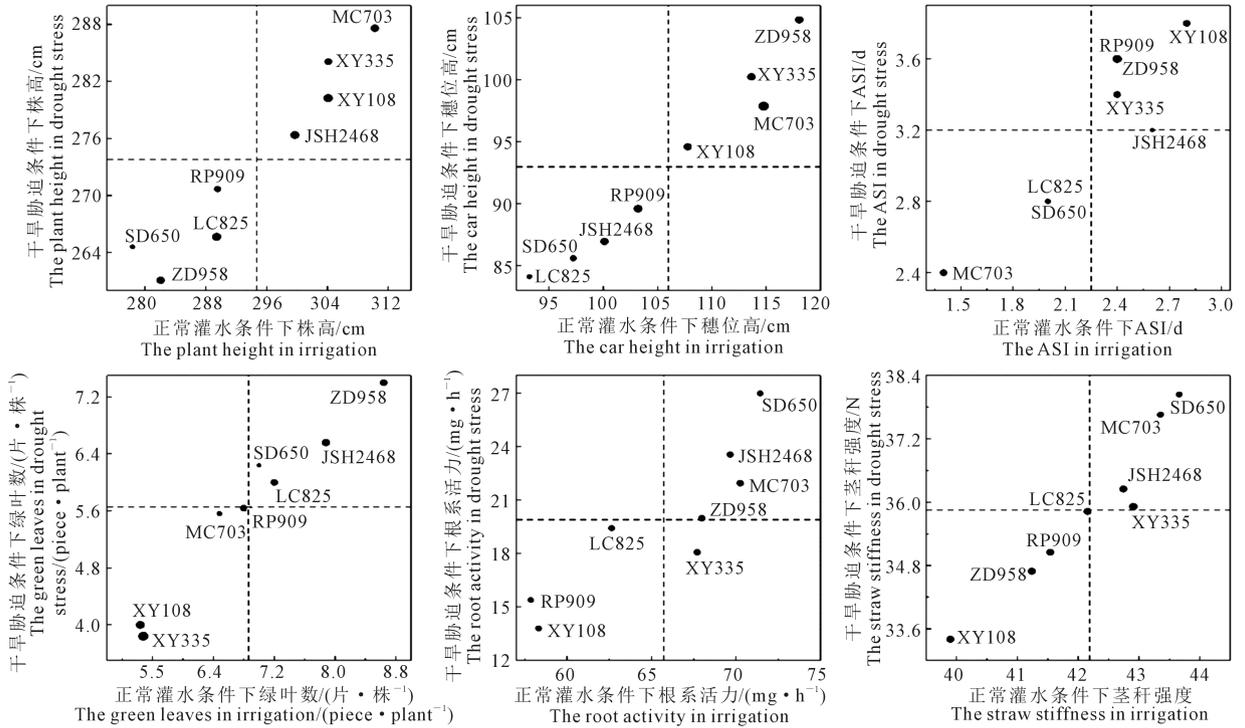


图 6 旱棚人工控水条件下灌水和干旱处理不同玉米品种各性状气泡图

Fig.6 Bubble charts of different maize varieties under irrigation and drought in shad

表 7 水培玉米苗期 15 个鉴定指标的相对值分析

Table 7 Relative value analysis of 15 identification indexes in water culture seedling stage

指标 Index	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
相对株高( $X_1$ ) Relative plant height	0.850	0.975	0.907	0.040	4.38
相对根长( $X_2$ ) Relative root length	0.818	0.956	0.875	0.043	4.89
相对叶面积( $X_3$ ) Relative leaf area	0.673	0.885	0.788	0.072	9.13
相对根体积( $X_4$ ) Relative root volume	0.881	0.949	0.92	0.026	2.86
相对地上部干重( $X_5$ ) Relative DW at overground	0.625	0.838	0.751	0.077	10.23
相对地下部干重( $X_6$ ) Relative DW at underground	0.581	0.786	0.697	0.083	11.95
相对 SOD 酶活性( $X_7$ ) Relative SOD enzyme activity	1.034	1.161	1.099	0.037	3.37
相对 POD 酶活性( $X_8$ ) Relative POD enzyme activity	1.098	1.268	1.180	0.051	4.33
相对 CAT 酶活性( $X_9$ ) Relative CAT enzyme activity	1.126	1.249	1.174	0.042	3.60
相对 Pro 含量( $X_{10}$ ) Relative Pro content	1.014	1.056	1.037	0.016	1.59
相对 MDA 含量( $X_{11}$ ) Relative MDA content	1.024	1.292	1.121	0.081	7.18
SPAD 值( $X_{12}$ ) SPAD value	0.873	0.962	0.933	0.030	3.16
相对实际光合速率( $X_{13}$ ) Relative PH II Phi <sub>2</sub>	0.855	0.949	0.903	0.034	3.77
相对叶片厚度( $X_{14}$ ) Relative thickness	1.062	1.251	1.151	0.062	5.40
相对非光化学猝灭系数( $X_{15}$ ) Relative NPQ	1.067	1.205	1.139	0.047	4.12

较小指标对鉴定评价结果的影响。由表 8 可知,与产量 *DRI* 呈显著相关的有 5 个指标,分别为  $X_1$ 、 $X_5$ 、 $X_8$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{15}$ ,筛选出的 5 个主要指标既包含形态指标,又包含生理生化指标,说明所选的 5 个指标具有一定的代表性,可以作为苗期抗旱性鉴定的主要评价指标。

基于相关性分析,分别计算供试品种所筛选指标的隶属值(表 9),隶属值越大,表明抗旱性越强,其中陕单 650 的综合隶属函数值最大,为 0.784,即苗期抗旱性最强,九圣禾 2468、MC703 次之,分别为 0.735 和 0.675,联创 825 的隶属度较小,为 0.284,即苗期抗旱性较弱。依据综合隶属值大小,不同玉米品种苗期抗旱性为:陕单 650>先玉 335>九圣禾 2468>MC703>联创 825>郑单 958>新玉 108>瑞普

表 8 玉米产量 *DRI* 与鉴定指标间的相关性分析

Table 8 Analysis of yield *DRI* and identification index

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$
<i>DRI</i>	0.76*	-0.44	-0.16	-0.18	0.87**	0.13	0.33	0.86**	0.03	0.07	0.40	0.08	0.74*	0.41	0.91**

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上相关性显著。

Note: \*, \*\* indicates significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 9 水培玉米苗期主要指标相对值的隶属度

Table 9 Subordinate degree of relative value of main indexes in hydroponic seedling stage

名称 Name	隶属度 Subordinate degree (SV)					综合评价 Evaluation	排序 Rank
	株高 Plant height	地上干重 Above ground dry weight	过氧化物酶活性 POD	实际光合速率 $\Phi_{i2}$	非光化学猝灭系数 NPQ		
九圣禾 2468 Jiushenghe 2468	0.576	1.000	1.000	0.526	0.300	0.680	3
联创 825 Lianchuang 825	0.466	0.266	0.352	0.180	0.720	0.397	5
瑞普 909 RuiPu 909	0.542	0.000	0.453	0.000	0.181	0.235	8
新玉 108 Xinyu 108	0.000	0.469	0.462	0.293	0.000	0.245	7
MC703	0.555	0.747	0.755	0.369	0.553	0.596	4
陕单 650 Shandan 650	1.000	0.989	0.548	1.000	0.819	0.871	1
郑单 958 Zhengdan 958	0.046	0.418	0.000	0.845	0.602	0.382	6
先玉 335 Xianyu 335	0.505	0.833	0.295	0.852	1.000	0.697	2

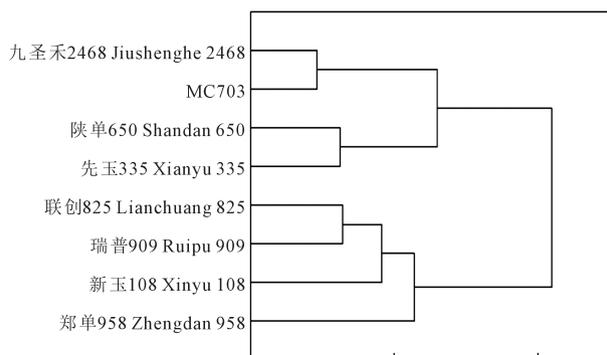


图 7 水培苗期供试玉米品种聚类分析

Fig.7 Clustering analysis of tested varieties in hydroponic seedling stage

909。基于相关指标隶属函数值,利用 ward 平方距离法进行聚类分析,将供试品种聚成 2 大类(图 7),其中苗期抗旱性较强品种:陕单 650、先玉 335、九圣禾 2468 和 MC703,具有较高的株高、较多的地上部干重、较高的酶活性、较高的  $\Phi_{i2}$  等特点;苗期抗旱性一般品种:联创 825、郑单 958、新玉 108 和瑞普 909,表现出株高较低、冠干重较低,相关酶活性较低、 $\Phi_{i2}$  较低等特点。

#### 2.4 不同水分控制条件下玉米品种抗旱性综合评价

将大田、旱棚、水培 3 种水分控制条件下的抗旱性鉴定结果进行整合(表 10),大田种植条件下,基于距离理想抗旱品种的远近,筛选出抗旱性较强品种为联创 825、陕单 650、九圣禾 2468 和 MC703,筛选株高、穗位高、ASI、SPAD、根系活力、茎秆强度、雄

穗分枝数和花后干物质为第二性状指标;旱棚种植条件下,基于距离理想抗旱品种的远近,筛选出抗旱性较强品种为 MC703、陕单 650、九圣禾 2468、联创 825,筛选株高、穗位高、ASI、绿叶数、根系活力及茎秆强度为第二性状指标;水培 PEG 模拟干旱胁迫条件下,筛选出抗旱性较强的品种为 MC703、陕单 650、九圣禾 2468 和先玉 335,通过鉴定指标与抗旱指数的相关性分析,筛选出冠高、地上部干重、过氧化物酶活性、实际光合速率及非光化学猝灭系数为苗期抗旱性鉴定的主要指标。综合 3 种水分控制条件抗旱性鉴定结果,筛选在 3 种控水条件下稳定抗旱的品种:MC703、陕单 650、九圣禾 2468 为抗旱性较强品种。

表 10 不同水分控制条件下玉米品种抗旱性综合评价结果比较

Table 10 Comparison of evaluation results of drought resistance under different water control conditions

抗旱类型 Type of drought resistance	大田 Field		旱棚 Drought shed		水培 Hydroponic	
	品种 Variety	抗旱指数 DRI	品种 Variety	抗旱指数 DRI	品种 Variety	抗旱指数 DRI
抗旱较强品种 Drought resistant strong varieties	九圣禾 2468 Jiushenghe 2468	0.910	MC703	0.671	陕单 650 Shandan 650	0.871
	陕单 650 Shandan 650	0.909	陕单 650 Shandan 650	0.670	先玉 335 Xianyu 335	0.697
	联创 825 Lianchuang 825	0.907	九圣禾 2468 Jiushenghe 2468	0.662	九圣禾 2468 Jiushenghe 2468	0.680
	MC703	0.873	联创 825 Lianchuang 825	0.662	MC703	0.596
抗旱一般品种 Drought resistant general varieties	先玉 335 Xianyu 335	0.870	先玉 335 Xianyu 335	0.670	联创 825 Lianchuang 825	0.397
	瑞普 909 Ruiyu 909	0.856	郑单 958 Zhengdan 958	0.661	郑单 958 Zhengdan 958	0.382
	郑单 958 Zhengdan 958	0.854	瑞普 909 Ruiyu 909	0.655	新玉 108 Xinyu 108	0.245
	新玉 108 Xinyu 108	0.824	新玉 108 Xinyu 108	0.654	瑞普 909 Ruiyu 909	0.235

### 3 结论与讨论

玉米抗旱性是由多个性状相互作用的复杂性状,不仅与作物种类、品种基因型、种植模式有关,还受胁迫的生育时期、胁迫强度及持续时间的影响<sup>[28]</sup>。利用单一的水分控制条件和单个指标评价的抗旱性存在片面性,无法全面真实地反映玉米抗旱能力,要全面评价玉米品种抗旱性,需要依据第一性状(产量、DRI)、第二性性状(根系、ASI、SPAD 值、绿叶数、干物质积累)等指标,综合不同生育期的抗旱鉴定结果进行评价。常用的抗旱性评价包括大田直接鉴定法、干旱棚人工控水法和实验室法,几种方法各有优缺点,大田抗旱性鉴定评价结果真实直观,但受环境的影响较大,年际间可比性和重复性差,适合多年多点的试验;旱棚抗旱性鉴定受环境影响较小,生长条件人为可控,可用于各个时期的抗旱性鉴定,鉴定结果稳定可靠,但需要一定设备,不能大规模进行;水培抗旱性鉴定结果高效稳定,重复性好,但仅适用于苗期试验,不适合全阶段模拟干旱<sup>[29-30]</sup>。因此应将 3 种方法相互结合,优势互补,是建立高效玉米品种抗旱评价体系的最佳方法。本研究通过 2 a 5 个点的大田试验、2 a 的旱棚人工控水试验和实验室 PEG 模拟干旱胁迫试验,研究了 8 个玉米品种在成株期和苗期干旱胁迫后植株相关农艺性状、生理指标及产量的表现,筛选出在大田、旱棚和水培 3 种水分控制条件下稳定抗旱的 3 个玉米品种:陕单 650、MC703 和九圣禾 2468。瑞普 909、新玉 108、郑单 958 为抗旱性一般品种;联创 825 成株期抗旱性较强,苗期抗旱性较弱;先玉 335 成株期抗旱性较弱,苗期抗旱性较强。通过 2 a 5 个点的大田试验,8 个品种的 DRI 都在 0.8 以上,可以看出供试品种的抗旱性整体较好,抗旱性强弱只是相对于参试品种进行划分。

在玉米抗旱性研究进程中,筛选出快速、直观、

可靠的鉴定指标具有重要意义。目前,产量是大家公认抗旱性鉴定的第一性状指标,在区域试验及育种工作中得到广泛应用,然而单纯以产量作为玉米抗旱性评价指标时,只能在收获后进行分析,评价效率较低。因此,筛选与抗旱相关的第二性状指标是至关重要的;同时在玉米的抗旱性鉴定中,将产量与第二性状指标结合分析,消除单个指标带来的片面性,使抗旱性鉴定与利用研究更有预见性。王喜慧等<sup>[30]</sup>通过实验室、旱棚、大田分别对萌发期、苗期、成熟期供试玉米自交系的抗旱性进行鉴定,筛选出各个时期综合抗旱性较好且稳定的自交系为优质的种质资源。徐蕊<sup>[31]</sup>通过大田、旱棚、PVC 棚对参试玉米材料不同时期抗旱研究发现不同时期筛选的抗旱指标不同,抗旱性评价结果也不同。本试验在成株期以产量性状为主,结合相关的农艺性状进行具体分析,其中抗旱性较强品种:联创 825、九圣禾 2468、陕单 650 和 MC703 在灌水和干旱条件下的产量较高且稳定性较好,更接近理想抗旱品种,具有较短的 ASI、较高的 SPAD 值、较强的根系活力和茎秆强度,较多的绿叶数及较多的花后干物质等特点;水培苗期试验,通过主成分分析,筛选出冠高、地上部干重、POD、 $\Phi_2$  及 NPQ 为苗期抗旱性鉴定的主要评价指标,其中抗旱性较强品种:陕单 650、先玉 3358、九圣禾 246 和 MC703,具有较多的干物重、较强的酶活性、较高的  $\Phi_2$  等特点。

大田、旱棚、水培 3 种水分控制条件下供试玉米品种抗旱性评价所排位次虽然存在一定差异,但筛选出的抗旱性较强品种具有相似性,其中大田和旱棚条件下筛选的抗旱性较强品种一致,为 MC703、陕单 650、九圣禾 2468、联创 825,筛选的指标也相似;水培试验与大田、旱棚筛选抗旱性较强品种一致的有 MC703、九圣禾 2468、陕单 650。因此,为了提高玉米品种抗旱性评价效率,成株期抗旱鉴定试验可考虑用旱棚试验替代,水培试验主要是苗期抗

旱性鉴定,筛选的指标及评价结果与成株期存在一定的差异,不能用大田、旱棚的成株期鉴定结果代替水培苗期抗旱性强弱,该结果可为不同控水条件下抗旱玉米品种的选育提供理论依据和借鉴。

#### 参 考 文 献:

- [1] TOKATLIDIS I S. Adapting maize crop to climate change [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(1): 63-79.
- [2] 刘胜群,宋凤斌,周璇.玉米植株叶片和根系的抗旱性差异分析[J]. *干旱地区农业研究*,2010,28(4):54-58.  
LIU S Q, SONG F B, ZHOU X. Difference in drought resistance of root and leaf in maize [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 54-58.
- [3] GRASSINI P, YANG H S, CASSMAN K G. Limits to maize productivity in Western corn-belt: a simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(8): 1254-1265.
- [4] GRASSINI P, YANG H S, IRMAK S, et al. High-yield irrigated maize in the Western U.S. corn belt: II. Irrigation management and crop water productivity [J]. *Field Crops Research*, 2011, 120(1): 133-141.
- [5] 王瑜莎,张钦仁,白月明.西北地区干旱对农业影响的评估方法——以甘肃省春玉米为例[J]. *气象科技进展*,2013,3(2):55-58.  
WANG Y S, ZHANG T R, BAI Y M. The research of the assessment method of drought for the impact on agriculture in the northwest-the spring corn in Gansu Province[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(2): 55-58.
- [6] 王绍新,许洛,曹志艳,等.12个玉米杂交种及其亲本抗旱性鉴定[J]. *江苏农业科学*,2018,46(3):66-69.  
WANG S X, XU L, CAO Z Y, et al. Identification of the twelve maize hybrids and their parental drought resistance[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(3): 66-69.
- [7] 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.  
SONG F B, XU S C. Study on the drought-resistant identification indexes in maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 127-129.
- [8] 陈志辉,李立,黄虎兰.玉米品种抗旱性鉴定方法与指标研究[J]. *农业现代化研究*,2011,32(1):120-124.  
CHEN Z H, LI L, HUANG H L. Appraisal method and indexes of drought resistance in maize [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(1): 120-124.
- [9] 张赛楠,苏治军,高聚林,等.玉米自交系抗旱性评价及指标筛选[J]. *北方农业学报*,2019,47(3):18-25.  
ZHANG S N, SU Z J, GAO J L, et al. Drought resistance evaluation and index screening of maize inbred lines[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2019, 47(3): 18-25.
- [10] 师亚琴,李艺博,李亚楠,等.陕A群、陕B群选育的玉米自交系抗旱性鉴定[J]. *玉米科学*,2017,25(4):17-25.  
SHI Y Q, LI Y B, LI Y N, et al. Drought resistance identification of maize inbred lines selected from Shaan A group and Shaan B group [J]. *Journal of Maize Science*, 2017, 25(4): 17-25.
- [11] LU Y L, HAO Z F, XIE C X, et al. Large-scale screening for maize drought resistance using multiple selection criteria evaluated under water-stressed and well-watered environments [J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(1): 37-45.
- [12] 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*,1990,8(3):72-78.  
LUO S P. Related analysis of corn drought resistance and identification index [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1990,8(3): 72-78.
- [13] 贾凯旋,魏俊杰,冯梦凡,等.河北省主要推广玉米品种萌发期抗旱性鉴定和生理性状分析[J]. *种子*,2020,39(8):76-80.  
JIA K X, WEI J J, FENG M F, et al. Drought resistance identification and physiological characters analysis of main maize varieties for promotion during germination in Hebei Province[J]. *Seed*, 2020, 39(8): 76-80.
- [14] 赵永锋,王亚卿,贾晓艳,等.玉米杂交种苗期抗旱性鉴定与评价[J]. *安徽农业科学*,2018,46(9):51-53.  
ZHAO Y F, WANG Y Q, JIA X Y, et al. Identification and evaluation on drought resistance of maize hybrids in seedling stage[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2018, 46(9): 51-53.
- [15] 郑永照.我国不同年代玉米骨干自交系根系及养分特性研究[D]. 长春:吉林农业大学,2011.  
ZHENG Y Z. Characteristics of root and nutrient of different years maize elite inbred lines in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011.
- [16] 卢贤丰.测定伤流液诊断水稻根系活力[J]. *农业科技通讯*,1977,(9):19.  
LU X F. Determination of bleeding fluid to diagnose rice root activity [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 1977,(9):19.
- [17] BEAUCHAMP C, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276-287.
- [18] 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.
- [19] JANERO D R. Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1990, 9(6): 515-540.
- [20] 职明星,李秀菊.植物体内游离脯氨酸含量测定方法的改良[C]//科技、工程与经济社会协调发展——中国科协第五届青年学术年会论文集.北京:中国科学技术出版社,2004:287-288.  
ZHI M X, LI X J. Improvement of determination method of free proline in plants[C]//Coordinated Development of Science and Technology, Engineering, Economy and Society-Proceedings of the Fifth Annual Youth Academic Conference of China Association for Science and Technology. Beijing: China Science and Technology Press, 2004: 287-288.
- [21] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.  
ZOU Q. Experimental guidance on plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] 张清航,张永涛.植物体内丙二醛(MDA)含量对干旱的响应[J]. *林业勘查设计*,2019,(1):110-112.  
ZHANG Q H, ZHANG Y T. Study on response to drought stress of MDA content in plants[J]. *Forest Investigation Design*, 2019,(1): 110-112.
- [23] 胡世洋,杨慧赞,张永德,等.基于BLUP的单体性状动物育种模型的研究及实现[J]. *贺州学院学报*,2016,32(1):142-146.  
HU S Y, YANG H Z, ZHANG Y D, et al. Research and implementation of single trait animal breeding models based BLUP[J]. *Journal of Hezhou University*, 2016, 32(1): 142-146.