

# 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选

樊瑀<sup>1</sup> 董淑琦<sup>1</sup> 原向阳<sup>1</sup> 杨雪萍<sup>1</sup> 姚翔<sup>2</sup> 郭平毅<sup>1</sup> 杨雪芳<sup>1\*</sup>

(1. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801;

2. 繁峙县平型关镇农业技术站, 山西 繁峙 034300)

**摘要** 为探究适宜的谷子抗旱性评价方法,以35个谷子品种为材料,设置0.03 mol/L PEG-6000溶液模拟干旱胁迫以及正常浇水2个处理,采用频次分析和相关性分析比较了9个与谷子萌发期抗旱性相关的指标,依据隶属函数求出最适宜的综合抗旱性鉴定标准,并以此为依据对所选品种进行聚类并划分抗旱等级。结果表明:在干旱胁迫下,受试品种谷子的发芽势、发芽率、萌发指数、根干重、根鲜重、芽干重、芽鲜重、芽长和根长均受到不同程度的抑制,干旱对发芽势的影响最大;除萌发系数以外发芽势与其余各指标均呈显著或极显著相关,通过因子分析将9个单项性状指标转化为4个因子,累计贡献率达86.74%。通过隶属函数结合聚类分析将35个谷子品种的抗旱性划分为4级,其中强抗旱型品种7个、中度抗旱型品种15个、干旱敏感型品种9个和干旱极敏感型品种4个。通过回归分析建立了可准确评估谷子萌发期抗旱性的回归方程  $y = -0.187 + 0.554x_{\text{RBDW}} + 0.550x_{\text{RRLL}} + 0.264x_{\text{RRFW}}$ , 筛选出相对根鲜重、相对芽干重和相对根长作为谷子萌发期抗旱性鉴定的重要指标。干旱胁迫下,可通过测定这3个指标对不同品种谷子萌发期的耐旱性进行快速准确的鉴定及评价。

**关键词** 谷子; 萌发期; 抗旱性; 抗旱指标; 综合评价

中图分类号 S515

文章编号 1007-4333(2022)06-0042-13

文献标志码 A

## Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening

FAN Yu<sup>1</sup>, DONG Shuqi<sup>1</sup>, YUAN Xiangyang<sup>1</sup>, YANG Xueping<sup>1</sup>,

YAO Xiang<sup>2</sup>, GUO Pingyi<sup>1</sup>, YANG Xuefang<sup>1\*</sup>

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Agricultural Technology Station of Pingxingguan Town, Fanshi County, Fanshi 034300, China)

**Abstract** In order to identify suitable drought resistance evaluation methods of foxtail millet, a total of 35 foxtail millet cultivars were used in this study. Experiments were conducted under both normal irrigation and 0.03 mol/L PEG-6000 solution drought stress to simulate drought resistance. Frequency analysis and correlation analysis were conducted to compare the correlation between the selected nine indicators and the drought resistance during foxtail millet germination. Factor analysis combined with step wise regression analysis was used to screen the effective evaluation indicators for drought resistance of germination. The most suitable comprehensive drought resistance identification standard was obtained through the membership function, and based on this, the selected cultivars were clustered and the drought resistance levels were classified. The results showed that: The germination potential, germination rate,

收稿日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(31800461); 国家现代农业产业技术体系(CARS-06-13.5-A28); 山西农业大学科技创新基金(2018YJ19); 晋中市科技重点研发计划(Y202009)

第一作者: 樊瑀, 硕士研究生, E-mail: sxndfy@163.com

通讯作者: 杨雪芳, 副教授, 主要从事植物种间及种内化学关系、化感物质的开发利用及其作用机理及植物-土壤微生物互作机制研究, E-mail: yang\_xue\_fang1@126.com

germination index, root fresh and dry weight, bud fresh and dry weight, bud and root length of the 35 cultivars were inhibited, among which the germination potential was affected most by the drought stress. Except the germination coefficient, the germination potential was extremely significant or significantly correlated with other indicators. Through factor analysis, the nine individual traits were transformed into four factors with a cumulative contribution rate of 86.74%. The drought resistance of 35 foxtail millet cultivars was divided into four levels, including 7 highly resistant, 15 moderately resistant, 9 susceptible, and 4 extremely intolerant foxtail millet cultivars through membership function combined with cluster analysis. Meanwhile, a regression equation,  $y = -0.187 + 0.554x_{\text{RBDW}} + 0.550x_{\text{RRL}} + 0.264x_{\text{RRFW}}$ , was established to estimate the tolerance of foxtail millet cultivars to drought stress. The relative root fresh weight, relative bud dry weight and relative root length were identified as important indicators to assess the resistance of foxtail millet germination. In conclusion, under drought stress, the drought tolerance of different varieties of foxtail millet at germination stage could be identified and evaluated quickly and accurately by measuring the three indicators.

**Keywords** foxtail millet; germination; drought resistance; drought resistance index; comprehensive evaluation

干旱是作物生长发育和产量品质的主要限制因子<sup>[1]</sup>。我国干旱、半干旱地区占国土面积的 50% 左右<sup>[2]</sup>, 占全国耕地面积的 38%<sup>[3]</sup>。我国每年因干旱造成的粮食减产占气象灾害损失的 50% 左右。同时农业生产大量超采地下水已造成严重的生态问题。种子萌发期是作物对干旱的敏感时期, 也是体现作物抗旱能力的重要时期, 萌发期的抗旱评价是筛选抗旱作物品种的重要途径之一。作物萌发期的生长情况直接关系到后期出苗率以及最终的产量形成<sup>[4]</sup>, 萌发期抗旱性鉴定<sup>[5]</sup>可以在实验室内进行, 因其条件易控、可操作性强和试验周期较短等优点, 现已在多种农作物上开展了相关研究<sup>[6-9]</sup>。汪灿等<sup>[10-11]</sup>研究指出薏苡萌发期和成株期的耐旱性高度一致, 而萌发期耐旱性测定更方便快捷。吴奇等<sup>[12]</sup>通过高粱萌发期耐旱性试验筛选出耐旱杂交组合‘13218A’×‘20982R’。抗旱性指标可以反映农作物抗旱性强弱, 因此选择与农作物抗旱显著相关的鉴定指标是抗旱鉴定过程中的关键环节<sup>[13]</sup>。为避免单一指标的片面性和不稳定性, 以及相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、聚类分析、灰色关联度分析和逐步回归分析方法自身存在的样本量局限、难以消除共线性等缺陷, 将上述多种分析方法相结合, 进行综合评价, 能够有效提高评价标准的准确性, 现已在薏苡<sup>[10-11]</sup>、胡麻<sup>[14-15]</sup>、大豆<sup>[16-17]</sup>、油菜<sup>[18-19]</sup>、棉花<sup>[20]</sup>和绿豆<sup>[21-23]</sup>等作物抗旱性鉴定上应用。

谷子[*Setaria italica* (L.) Beauv.] 属禾本科狗尾草属, 是中国的传统粮食作物, 抗旱、耐贫瘠, 对环境具有较高的适应性。与玉米和小麦等作物相比, 谷子的种子萌发需水量较低, 仅为种子重量的 26%, 但其在萌发期对水分较为敏感, 严重制约谷子的出苗率及幼苗成活率。因此, 提高谷子萌发期的

抗旱能力, 是保证谷子出苗及后期产量的关键环节。已有很多对谷子萌发期抗旱性的研究报道, 但抗旱指标的筛选尚未达成共识<sup>[24-26]</sup>。秦岭等<sup>[24]</sup>的研究仅使用萌发耐旱指数对所选品种进行抗旱性排序。代小冬等<sup>[25]</sup>研究认为, 在 PEG 渗透剂模拟干旱胁迫下, 谷子活力抗旱指数、相对发芽势、相对发芽率、相对胚芽长和相对胚根长 5 个指标与萌发抗旱指数均呈极显著正相关, 可以作为谷子萌芽期抗旱性鉴定的指标。高汝勇等<sup>[27]</sup>分析 12 个谷子品种的发芽率、发芽指数、根长、苗高、鲜质量和活力指数, 采用模糊隶属函数对其抗旱性进行评价。孟庆立等<sup>[26]</sup>采用主成分分析和模糊聚类的方法对谷子进行抗旱等级分类。但上述研究存在指标选取较少和分析方法单一等方面的缺陷。目前, 采用多种分析方法相结合对谷子抗旱性进行综合评价的研究鲜有报道。本试验利用综合评价的方法, 对 35 个谷子品种的发芽势、发芽率、萌发指数、根干重、根鲜重、芽干重、芽鲜重、根长和芽长进行鉴定和评价, 旨在筛选谷子萌发期适宜的抗旱性指标, 以为谷子抗旱品种选育提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试谷子种质 35 份, 包括山西省 17 份, 河北省 6 份, 黑龙江省 4 份, 内蒙古自治区 2 份, 河南省 2 份, 北京市 2 份, 甘肃省 1 份, 辽宁省 1 份(表 1)。

### 1.2 试验设计

本试验于 2019—2020 年在山西农业大学农学院化学调控实验室进行。用 0.03 mol/L PEG-6000 溶液培养, 模拟干旱胁迫(T), 蒸馏水处理作为对照(CK)。

表1 35份谷子种质的来源

Table 1 Origins of 35 foxtail millet resources

编号 Number	品种 Variety	来源(省、市、自治区) Origin (Province, City, Autonomous region)	编号 Number	品种 Variety	来源(省、市、自治区) Origin (Province, City, Autonomous region)
1	晋谷 28 JG 28	山西 Shanxi	19	冀谷 36 JG 36	河北 Hebei
2	晋谷 29 JG 29	山西 Shanxi	20	冀谷 38 JG 38	河北 Hebei
3	晋谷 42 JG 42	山西 Shanxi	21	冀谷 41 JG 41	河北 Hebei
4	晋谷 54 JG 54	山西 Shanxi	22	冀谷 42 JG 42	河北 Hebei
5	晋谷 57 JG 57	山西 Shanxi	23	青绿 1 QL 1	河北 Hebei
6	晋汾 107 JF 107	山西 Shanxi	24	龙谷 25 LG 25	黑龙江 Heilongjiang
7	晋汾 109 JF 109	山西 Shanxi	25	龙谷 31 LG 31	黑龙江 Heilongjiang
8	长农 4 CN 4	山西 Shanxi	26	龙谷 38 LG 38	黑龙江 Heilongjiang
9	长农 35 CN 35	山西 Shanxi	27	龙谷 39 LG 39	黑龙江 Heilongjiang
10	改良晋谷 21 GLJG 21	山西 Shanxi	28	小香米 XXM	内蒙古 Inner Mongolia
11	汾选 3 FX 3	山西 Shanxi	29	黄金谷 HJG	内蒙古 Inner Mongolia
12	大毛谷 DMG	山西 Shanxi	30	豫谷 18 YG 18	河南 Henan
13	新吨 XD	山西 Shanxi	31	豫谷 34 YG 34	河南 Henan
14	大白谷 DBG	山西 Shanxi	32	龙爪谷 LZG	北京 Beijing
15	农家红谷 NJHG	山西 Shanxi	33	中谷 9 ZG 9	北京 Beijing
16	阳城红苗谷 YCHMG	山西 Shanxi	34	陇谷 13 LG 13	甘肃 Gansu
17	吨谷分蘖 DGFN	山西 Shanxi	35	锦谷 5 JG 5	辽宁 Liaoning
18	冀谷 35 JG 35	河北 Hebei			

采取完全随机设计,选取籽粒饱满的种子 50 粒,均匀播种在垫有 2 张中速滤纸的直径为 90 mm 的培养皿里,每个培养皿中加入 5 mL 0.03 mol/L PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫(T)<sup>[28-29]</sup>,以添加等量蒸馏水作为对照(CK),每个处理重复 3 次。将所有培养皿置于 25 °C,相对湿度为 40%的光照培养箱中培养,光照/黑暗时间为 16 h/8 h,每 2 d 补充 0.03 mol/L PEG-6000 溶液或蒸馏水。

### 1.3 测定指标及方法

以根与种子长度相同,芽长是根长的一半为发芽标准<sup>[28]</sup>。每天在相同时间统计种子的发芽数量直至第 7 天。分别以第 2 天和第 7 天的发芽数量计算发芽势和发芽率。第 7 天从每个培养皿中随机选取 10 株长势一致且具有代表性的幼苗,测量幼苗的根长和芽长,称量其鲜重,105 °C 杀青 15 min,82 °C 烘干至恒重后称量干重。各指标计算公式如下:

$$\text{发芽势} = n_2 / N \quad (1)$$

式中: $n_2$ ,第 2 天种子的发芽数; $N$ ,试验种子数。

$$\text{发芽率} = n_7 / N \quad (2)$$

式中: $n_7$ ,第 7 天种子的发芽数; $N$ ,试验种子数。

$$\text{萌发指数 PI} = (1.00)n_1 / N_1 + (0.75)n_2 / N_2 + (0.50)n_4 / N_3 + (0.25)n_3 / N_4 \quad (3)$$

式中: $n_1 / N_1$ 、 $n_2 / N_2$ 、 $n_3 / N_3$  和  $n_4 / N_4$  分别为第 1、2、3 和 4 天的种子萌发率。

### 1.4 数据统计分析

用 Microsoft Excel 2007 整理数据,SPSS 25.0 进行统计分析。参考罗俊杰等<sup>[15]</sup>的方法,按照式(4)求得发芽势、发芽率、萌发指数、根鲜重、芽鲜重、根干重、芽干重、根长和芽长处理与对照的相对值,为相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数、相对根鲜重、相对芽鲜重、相对根干重、相对芽干重、相对根长和相对芽长,记作以上各项指标的单项抗旱系

数(DC, drought resistance coefficient)。

按照式(5)计算综合抗旱系数(comprehensive drought resistance coefficient, CDC),

$$DC = T_i \div CK_i \quad (4)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC \quad (5)$$

式中:CK<sub>i</sub> 和 T<sub>i</sub> 分别表示对照和干旱处理的指标测定值。按照式(6)计算权重因子系数(ω<sub>i</sub>)。

$$\omega_i = C_i \div \sum_{i=1}^n C_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中:C<sub>i</sub> 为第 i 个综合指标贡献率,表示第 i 个指标在所有指标中的重要程度。

按照式(7)计算各种质的综合指标的隶属函数值[μ(x<sub>i</sub>)]。

$$\mu(x_i) = (x_i - x_{imin}) \div (x_{imax} - x_{imin}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

式中:x<sub>i</sub>, x<sub>imin</sub>, x<sub>imax</sub> 分别表示第 i 个综合指标及第 i 个综合指标的最小值和最大值。

根据因子权重(ω<sub>i</sub>)以及隶属函数值[μ(x<sub>i</sub>)],按照式(8)计算抗旱性度量值(drought resistance comprehensive evaluation value, D)。

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x_i) \times (C_i \div \sum_{i=1}^n C_i)], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

将各指标 DC 作为比较序列, D 作为参考序列进行灰色关联度分析,获得各项指标 DC 与 D 之间的关联度(γ<sub>1</sub>)。按照式(9)计算各指标权重系数

[ω<sub>i</sub>(γ)]。

$$\omega_{i(\gamma)} = \gamma_i \div \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (9)$$

式中:γ<sub>i</sub> 为各指标关联度。

按照式(10)计算加权抗旱系数(weight drought resistance coefficient, WDC)。

$$WDC = \sum_{i=1}^n [DC \times \omega_{i(\gamma)}] \quad (10)$$

式中:γ<sub>i</sub> 为各指标关联度。以各项指标 DC 作为比较序列,WDC 作为参考序列进行灰色关联度分析,获得各项指标的 DC 与 WDC 之间的关联度(γ<sub>2</sub>)。最后针对不同供试谷子品种的 D,采取欧式距离进行聚类分析,并以 D 为参考序列,对各指标 DC 进行逐步回归分析,获得回归方程,通过回归方程筛选出相应的抗旱指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 谷子萌发期各指标对干旱胁迫的响应

由表 2 可知,谷子在干旱胁迫下,所测的发芽势、发芽率、根长、芽长、根鲜重和芽鲜重等指标的相对值均≤1,表明各性状均受到干旱胁迫的抑制作用。但各个指标对干旱胁迫的敏感程度存在差异,相对发芽势和相对萌发指数较小,对干旱最敏感;相对根干重和相对芽干重较大,对干旱最不敏感。各指标之间以萌发指数的变异最大,变幅为 0~65.68%,变异系数为 143%;相对根干重的变异最低,变幅为 8.47%~79.77%,变异系数为 33%。

表 2 萌发期各指标对干旱胁迫的响应

Table 2 Indicators of foxtail millet under drought stress during germination

参数 Parameter	范围/% Range	均值/% Mean	均方 Mean square	变异系数/% CV
相对发芽势 RGE	0.00~33.36	6	0.003 9	106
相对发芽率 RGR	0.78~30.88	14	0.005 9	55
相对萌发指数 RGI	0.00~65.68	7	0.010 9	143
相对根干重 RRDW	8.47~79.77	68	0.041 3	33
相对根鲜重 RRFW	18.52~93.75	58	0.062 3	41
相对芽干重 RBDW	3.28~92.04	63	0.040 9	40
相对芽鲜重 RBFW	15.30~97.21	39	0.055 0	52
相对芽长 RBL	15.87~95.86	56	0.054 3	42
相对根长 RRL	19.61~100.00	50	0.050 1	41

## 2.2 干旱胁迫下谷子各项指标单项抗旱系数的频率分布

由表3可知,供试谷子品种各项指标单项抗旱系数(DC)分布频数和频率相差较大。发芽势、发芽率和萌发指数的DC均主要分布在0~0.2,分布频数分别为34、29和34,分布频率分别为97%、83%

和97%。根干重、根鲜重、芽干重、芽鲜重、芽长和根长的DC分布均在0.2~1.0,频率最高的分布区间分别为0.6~0.8、0.4~0.6、0.8~1.0、0.4~0.6、0.6~0.8和0.4~0.6,分布频数分别为12、10、12、12、14和13,分布频率为34%、29%、34%、34%、40%和37%。

表3 不同谷子品种各指标单项抗旱系数(DC)频率

Table 3 Frequency of individual drought resistance coefficient (DC) of index of different foxtail millet varieties

指标 Index	0<DC≤0.2		0.2<DC≤0.4		0.4<DC≤0.6		0.6<DC≤0.8		0.8<DC≤1	
	频数 Sample number	频率/% Frequ- ency	频数 Sample number	频率/% Frequ- ency	频数 Sample number	频率/% Frequ- ency	频数 Sample number	频率/% Frequ- ency	频数 Sample number	频率/% Frequ- ency
发芽势 GE	34	97	1	3	0	0	0	0	0	0
发芽率 GR	29	83	6	17	0	0	0	0	0	0
萌发指数 GI	34	97	0	0	0	0	1	3	0	0
根干重 RDW	1	3	4	11	7	20	12	34	11	31
根鲜重 RFW	3	9	5	14	10	29	8	23	9	26
芽干重 BDW	1	3	8	23	6	17	8	23	12	34
芽鲜重 BFW	9	26	8	23	12	34	6	17	0	0
芽长 BL	4	11	4	11	8	23	14	40	5	14
根长 RL	2	6	10	29	13	37	8	23	2	6

## 2.3 干旱胁迫下谷子各指标的相关性

由表4可知,相对芽鲜重与相对芽长呈极显著正相关, $R^2=0.815(P<0.01)$ 。相对芽干重和相对芽长均与相对芽鲜重呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.758( $P<0.01$ )和0.837( $P<0.01$ )。相对发芽势、相对芽长和相对芽鲜重3个指标与相对芽干重均呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.568( $P<0.01$ )、0.490( $P<0.01$ )和0.652( $P<0.01$ )。相对根长和相对芽长、相对芽鲜重和相对芽干重4个指标均与相对发芽势呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.784( $P<0.01$ )、0.726( $P<0.01$ )、0.735( $P<0.01$ )和0.495( $P<0.01$ )。相对芽长、相对芽鲜重、相对芽干重、相对发芽势和相对根长5个指标均与相对发芽率呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.582( $P<0.01$ )、0.505( $P<0.01$ )、0.672( $P<0.01$ )、0.611( $P<0.01$ )和0.715( $P<0.01$ )。相对芽长、相对芽鲜重和相对发芽势3个指标均与相对根鲜重呈显著正相关, $R^2$ 分

别为0.401( $P<0.05$ )、0.425( $P<0.05$ )和0.383( $P<0.05$ );相对芽干重、相对根长和相对发芽率3个指标均与相对根鲜重呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.495( $P<0.01$ )、0.581( $P<0.01$ )、0.559( $P<0.01$ )。相对发芽势和相对根鲜重2个指标均与相对根干重呈显著正相关, $R^2$ 分别为0.415( $P<0.05$ )和0.389( $P<0.05$ );相对芽干重、相对根长和相对发芽率3个指标均与相对根干重呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.492( $P<0.01$ )、0.563( $P<0.01$ )和0.645( $P<0.01$ )。相对根鲜重与相对根干重2个指标均与相对萌发指数呈显著正相关, $R^2$ 为0.365( $P<0.05$ )和0.402( $P<0.05$ )。

## 2.4 干旱胁迫下谷子各指标的因子分析

由表5可知,KMO=0.823,说明变量之间存在较强的相关性,因此,因子分析的结果有较强的说服力;而Bartlett检验中显著性为0.000,同样说明各变量之间存在相关性,因子分析有效。

表4 供试谷子种质各指标抗旱系数的相关性

Table 4 Correlation coefficients among drought resistance coefficients of all indexes in tested foxtail millet germplasm

指标 Index	发芽势 GE	发芽率 GR	萌发指数 GI	根干重 RDW	根鲜重 RFW	芽干重 BDW	芽鲜重 BFW	芽长 BL
发芽率 GR	0.611**							
萌发指数 GI	0.079	0.313						
根干重 RDW	0.415*	0.645**	0.402*					
根鲜重 RFW	0.383*	0.559**	0.365*	0.389*				
芽干重 BDW	0.652**	0.672**	0.026	0.492**	0.495**			
芽鲜重 BFW	0.490**	0.505**	-0.022	0.292	0.425*	0.837**		
芽长 BL	0.568**	0.582**	-0.033	0.238	0.401*	0.758**	0.815**	
根长 RL	0.495**	0.715**	0.255	0.563**	0.581**	0.735**	0.726**	0.784**

注：\* 和 \*\* 分别表示在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平显著相关。

Note: \* and \*\* are significant correlation at  $P<0.05$  and  $P<0.01$ , respectively.

表5 KMO 和巴特利特检验

Table 5 KMO and Bartlett test

KMO 和巴特利特检验 KMO and Bartlett test	值 Value
KMO 取样適切性量数 KMO measure of sampling adequacy	0.823
近似卡方 Approximate chi-square	209.914
巴特利特检验 Bartlett test	
自由度 df	36
显著性 Significance	0.000

由表6可知,第1个因子的贡献率为37.91%,相对芽鲜重、相对芽长、相对根鲜重和相对根长起主要作用,主要反映根芽的生长情况;第2个因子贡献率为17.28%,主要由相对芽干重和相对根干重决定,反映根芽的干物质积累;第3个因子贡献率为15.80%,相对发芽率和相对发芽势在该因子中起主要作用,主要反映1d的萌发情况;第4个因子贡献率为15.75%,主要由相对萌发系数决定,反映前四天萌发情况。这4个因子的累计贡献率达到86.74%,可有效反映影响萌发期谷子抗旱性的主导因素。

## 2.5 供试种质的综合抗旱性评价

### 2.5.1 抗旱性度量值(D)排序

由表7可知,所选品种D处于0.011~0.965,

平均值为0.589,变异系数为48%。根据D对所选品种进行抗旱性排序,抗旱性强的品种有‘农家红谷’(0.938)、“龙谷38”(0.868)、“晋汾107”(0.857)、“冀谷36”(0.965),抗旱性弱的品种有‘黄金谷’(0.011)和‘冀谷38’(0.044)。其他品种的抗旱性都处于两者之间。为验证D所得出的排序结果,采用CDC和WDC辅助D进行排序,各品种CDC和WDC均介于0.116~0.584,平均值均为0.384,变异系数为33.7%和34.2%,与基于D所得出的抗旱性结果基本一致。综合抗旱系数(CDC)与抗旱性度量值(D)和加权抗旱系数(WDC)均呈极显著正相关, $R^2$ 分别为0.994( $P<0.01$ )和0.998( $P<0.01$ );抗旱性度量值(D)和加权抗旱系数(WDC)呈极显著正相关, $R^2$ 为0.994( $P<0.01$ )。

表6 供试谷子种质各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 6 Eigenvectors and contribution rates of principal components of all indexes in tested foxtail millet germplasm

指标 Index	因子载荷 Factor loading			
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
相对芽鲜重 RBFW	0.924	0.067	0.052	0.159
相对芽长 RBL	0.894	0.036	0.057	0.260
相对根鲜重 RRFW	0.791	0.385	0.304	0.129
相对根长 RRL	0.789	0.262	0.062	0.410
相对芽干重 RBDW	0.194	0.889	0.173	0.215
相对根干重 RRDW	0.457	0.529	0.311	0.462
相对发芽率 RGE	0.373	0.016	0.795	0.317
相对发芽势 RGR	-0.126	0.470	0.746	-0.145
相对萌发指数 RGI	0.331	0.207	0.069	0.871
特征根 Characteristic root	3.412	1.556	1.422	1.418
贡献率/% Contribution rate	37.91	17.28	15.80	15.75
累积贡献率/% Cumulative contribution rate	37.91	55.19	70.99	86.74
因子权重 Factor weight	0.437	0.199	0.182	0.182

表7 供试谷子种质抗旱性评价的抗旱系数(CDC)、加权抗旱系数(WDC)和抗旱性度量值(D)

Table 7 CDC-value, WDC-value, and D-value of drought resistance evaluation in tested foxtail millet resources

品种 Variety	隶属函数 Subordinate function value				$D$	$D$ 排序 $D$ rank	CDC	CDC 排序 CDC rank	WDC	WDC 排序 WDC rank
	1	2	3	4						
冀谷 36	1.000	0.928	0.969	0.916	0.965	1	0.582	1	0.584	1
豫谷 34	0.985	1.000	0.828	1.000	0.962	2	0.555	4	0.554	6
晋谷 29	0.989	0.905	0.970	0.918	0.956	3	0.575	3	0.581	2
农家红谷	0.968	0.917	0.910	0.917	0.938	4	0.579	2	0.574	3
改良晋谷 21	0.956	0.859	0.876	0.919	0.915	5	0.548	6	0.560	4
龙谷 38	0.944	0.795	0.829	0.808	0.868	6	0.548	5	0.555	5
晋汾 107	0.881	0.837	0.848	0.831	0.857	7	0.543	7	0.537	7
冀谷 41	0.807	0.783	0.763	0.813	0.795	8	0.491	12	0.495	11
大毛谷	0.839	0.708	0.868	0.705	0.794	9	0.516	9	0.526	9
晋谷 42	0.782	0.796	0.713	0.845	0.784	10	0.492	10	0.488	12
豫谷 18	0.759	0.773	0.898	0.705	0.778	11	0.533	8	0.527	8
长农 35	0.792	0.738	0.669	0.836	0.767	12	0.481	13	0.488	13
晋谷 54	0.851	0.670	0.734	0.698	0.766	13	0.491	11	0.497	10
晋汾 109	0.755	0.759	0.699	0.816	0.757	14	0.467	14	0.468	14

表 7(续)

品种 Variety	隶属函数 Subordinate function value				<i>D</i>	<i>D</i> 排序 <i>D</i> rank	CDC	CDC 排序 CDC rank	WDC	WDC 排序 WDC rank
	1	2	3	4						
龙谷 25	0.794	0.746	0.575	0.740	0.735	15	0.464	15	0.452	16
阳城红苗谷	0.746	0.694	0.797	0.561	0.711	16	0.459	16	0.449	17
龙谷 31	0.691	0.679	0.676	0.781	0.702	17	0.447	17	0.453	15
长农 4	0.652	0.708	0.564	0.698	0.656	18	0.406	20	0.404	20
新吨	0.649	0.521	0.796	0.520	0.627	19	0.437	19	0.443	18
冀谷 42	0.639	0.481	1.000	0.291	0.610	20	0.443	18	0.428	19
龙爪谷	0.590	0.518	0.535	0.624	0.572	21	0.393	21	0.395	21
龙谷 39	0.613	0.552	0.584	0.397	0.557	22	0.382	22	0.378	22
小香米	0.618	0.390	0.320	0.467	0.491	23	0.374	23	0.372	23
汾选 3	0.500	0.474	0.525	0.352	0.472	24	0.342	24	0.325	24
大白谷	0.404	0.396	0.471	0.458	0.424	25	0.311	25	0.323	25
青绿 1	0.424	0.357	0.281	0.386	0.378	26	0.282	26	0.295	26
晋谷 57	0.296	0.312	0.486	0.279	0.331	27	0.282	27	0.278	28
陇谷 13 号	0.359	0.223	0.418	0.157	0.306	28	0.281	28	0.280	27
锦谷 5	0.366	0.226	0.256	0.224	0.292	29	0.259	30	0.257	30
冀谷 35	0.262	0.203	0.496	0.218	0.285	30	0.264	29	0.265	29
晋谷 28	0.342	0.251	0.056	0.262	0.257	31	0.233	31	0.214	31
吨谷分蘖	0.196	0.080	0.313	0.000	0.159	32	0.203	32	0.200	32
中谷 9	0.078	0.050	0.231	0.017	0.089	33	0.167	33	0.166	33
冀谷 38	0.070	0.019	0.001	0.055	0.044	34	0.139	34	0.135	34
黄金谷	0.000	0.000	0.000	0.060	0.011	35	0.116	35	0.117	35
平均值 Average					0.751		0.481		0.481	
变异系数/% CV					47.832		33.718		34.210	

### 2.5.2 灰色关联度分析

各指标的 DC 和 *D* 之间的关联度由大到小依次为相对芽干重 > 相对根长 > 相对芽鲜重 > 相对芽长 > 相对发芽率 > 相对萌发指数 > 相对根干重 > 相对发芽势 > 相对根鲜重。与因子分析中各项指标对干旱胁迫的敏感程度基本吻合。此外,各项指标 DC 和 WDC 之间的关联度由大到小依次为相对根长 > 相对芽干重 > 相对芽长 > 相对根干重 > 相对芽鲜重 > 相对萌发指数 > 相对发芽率 > 相对发芽势和相对根鲜重,与各项指标 DC 和 *D* 的关联系数基本一致(表 8)。

### 2.5.3 聚类分析

以 *D* 为依据对所选谷子种质进行聚类分析,在欧氏距离 5.0 处将 35 个谷子品种分为 4 级(图 1)。

第 I 级为强抗旱品种,包括‘龙谷 38’、‘晋汾 107’、‘冀谷 36’、‘豫谷 34’、‘晋谷 29’、‘农家红谷’和‘改良晋谷 21’,共 7 个,占总数的 20%;第 II 级为中度抗旱型品种,包括‘晋谷 54’、‘长农 35’、‘晋汾 109’、‘大毛谷’、‘冀谷 41’、‘晋谷 42’、‘豫谷 18’、‘龙谷 31’、‘阳城红苗谷’、‘龙谷 25’、‘龙爪谷’、‘龙谷 39’、‘新吨’、‘冀谷 42’和‘长农 4’,共 15 个,占总数的 42.9%;第 III 级为干旱敏感型品种,包括‘锦谷 5’、‘冀谷 35’、‘陇谷 13’、‘晋谷 57’、‘晋谷 28’、‘小香米’、‘汾选 3’、‘大白谷’和‘青绿 1’,共 9 个,占总数的 25.7%,第 IV 级为干旱极敏感型品种,包括‘黄金谷’、‘冀谷 38’、‘中谷 9’和‘吨谷分蘖’,共 4 个,占总数的 11.4%。



## 2.6 抗旱指标的筛选

各指标的 DC 以  $D$  为参考序列,进行逐步回归分析,得出相关的回归方程  $y = -0.187 + 0.554x_{\text{RBDW}} + 0.550x_{\text{RRL}} + 0.264x_{\text{RRFW}}$ ,且回归方程的决定系数  $R^2 = 0.960$ ,意味着相对芽干重( $x_{\text{RBDW}}$ )、相对根鲜重( $x_{\text{RRFW}}$ )和相对根长( $x_{\text{RRL}}$ )可以解释  $D$  96%的变化原因。而且  $P = 0.000 < 0.05$ ,说明模型有效。根据该回归方程可知,相对根鲜重( $x_{\text{RRFW}}$ )、相对芽干重( $x_{\text{RBDW}}$ )和相对根长( $x_{\text{RRL}}$ )是谷子萌发期抗旱性鉴定的重要指标。

## 3 讨论

### 3.1 萌发期抗旱性评价方法

关于植物的抗旱性评价不仅要选择合适的指标还要选择适宜的评价方法<sup>[30]</sup>。近年来,许多学者采用多方法多指标相结合进行作物抗旱性综合评价<sup>[11-12]</sup>。朱学海等<sup>[31]</sup>的研究中忽略了所选的各项指标对干旱胁迫敏感程度的差异和各项指标对抗旱性评价的贡献率。汪灿等<sup>[10]</sup>的研究中采用了主成分分析结合隶属函数和回归分析对薏苡种质资源进行抗旱性评价和抗旱指标筛选,通过主成分分析排除了因各项指标对干旱胁迫敏感程度不同而造成的差异,使得抗旱性评价和抗旱指标筛选的结果更加准确。本试验对谷子萌发期抗旱性相关的 9 个指标,采用抗旱性度量值  $D$ 、综合抗旱系数 CDC 和加权抗旱系数 WDC 等综合评价指标,结合单项抗旱指标、频次分析、相关性分析、灰色关联度分析、隶属函数分析等对谷子种质资源的抗旱性进行综合评价。同时,本研究采取因子分析和逐步回归分析 2 种方法,消除各项指标因单位不同带来的影响。抗旱性鉴定的最终目的是划分试验材料的抗旱等级,以此来判定抗旱能力,从而筛选出抗旱品种<sup>[26]</sup>。本研究以抗旱性度量值( $D$ )、综合抗旱系数(CDC)和加权抗旱系数(WDC)对 35 个谷子品种的抗旱性进行排序,结果表明 3 个排序结果基本一致。依据抗旱性度量值( $D$ )进行聚类分析,将供试种质分为 4 个抗旱等级,其中‘冀谷 36’的抗旱性最强,‘黄金谷’的抗旱性最弱。本研究通过综合抗旱系数和加权抗旱系数作为抗旱性度量值的辅助评价指标,使得评价结果客观、可靠。

### 3.2 谷子种质资源萌发期抗旱指标的筛选

作物的抗旱性是由多基因控制的数量遗传性状,受基因型、水分胁迫以及生育阶段等多因素制

约<sup>[32-33]</sup>。因此,明确生育时期并筛选合适的指标是鉴定作物抗旱能力的关键。萌发期是筛选作物抗旱性的重要生育时期之一<sup>[34]</sup>。有研究表明,不同作物萌发期抗旱特性的指标也有所不同。薏苡萌发期的抗旱性指标有芽长、芽干重、根长、根鲜重和根干重<sup>[10]</sup>;而萌发指数、发芽率和根长则是高粱萌发期抗旱性的主要指标<sup>[12]</sup>。本试验选取了与谷子萌发期抗旱性相关的 9 个指标,通过多种计算方法,从不同层面进行分析。结果表明各项指标对干旱胁迫响应有所不同,且各项指标之间存在不同程度的相关性。因此,将所选的各项指标直接进行评价分析,所得到的结果很难客观、准确地反映所选谷子品种的抗旱性。逐步回归分析得到相对芽干重、相对根长和相对根鲜重与  $D$  密切相关。因子分析得出相对根鲜重和相对根长均在第一个因子上,相对芽干重在第二个因子上,表明以上 3 个指标在谷子抗旱中有着重要的影响,与逐步回归分析的结果相一致。通过将各项指标与抗旱性度量值和加权抗旱系数进行灰色关联度分析,得到各项指标与抗旱性度量值的关联程度由高到低为相对芽干重>相对根长>相对芽鲜重>相对芽长>相对发芽率>相对萌发指数>相对根干重>相对发芽势>相对根鲜重。所得结果和各项指标与加权抗旱系数的关联程度大小相吻合,进而增强了指标筛选的准确性和全面性。但灰色关联度分析中相对根鲜重与抗旱性度量值的关联性较小,可能是灰色关联度分析的模型不完备所致。

## 4 结论

本研究通过相关性分析、因子分析、隶属函数分析、聚类分析结合逐步回归分析等多种分析方法相结合评价了 35 个谷子品种萌发期各生长指标对干旱胁迫的响应。在测定的 9 个指标中相对芽干重、相对根长和相对根鲜重是谷子萌发期抗旱性的有效评价指标,并建立最优回归方程,  $y = -0.187 + 0.554x_{\text{RBDW}} + 0.550x_{\text{RRL}} + 0.264x_{\text{RRFW}}$ 。确定抗旱性度量值为最适宜的综合抗旱性鉴定标准,并以此为依据对所选的种质进行聚类,将 35 个谷子品种分为强抗旱、中度抗旱、干旱敏感和极度敏感 4 个类型。其中 7 个强抗旱型品种是‘龙谷 38’、‘晋汾 107’、‘冀谷 36’、‘豫谷 34’、‘晋谷 29’、‘农家红谷’和‘改良晋谷 21’。

## 参考文献 References

- [1] 山仑, 徐炳成. 论高粱的抗旱性及在旱区农业中的地位[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2342-2348  
Shan L, Xu B C. Discussion on drought resistance of Sorghum and its status in agriculture in arid and semiarid regions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2342-2348 (in Chinese)
- [2] 杨阳, 申双和, 马绎皓, 王润元, 赵鸿. 干旱对作物生长的影响机制及抗旱技术的研究进展[J]. 科技通报, 2020, 36(1): 8-15  
Yang Y, Shen S H, Ma Y H, Wang R Y, Zhao H. Advances in the effects of drought on crop growth and research on drought resistance techniques [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2020, 36(1): 8-15 (in Chinese)
- [3] 代小冬, 朱灿灿, 王春义, 秦娜, 宋迎辉, 代书桃, 李君霞. 谷子萌芽期抗旱相关 QTL 定位研究[J]. 华北农学报, 2020, 35(6): 36-41  
Dai X D, Zhu C C, Wang C Y, Qin N, Song Y H, Dai S T, Li J X. Mapping of drought resistance QTLs at germination stage of foxtail millet[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(6): 36-41 (in Chinese)
- [4] Khajeh-pour M. *Industrial Crops*[M]. Isfahan: University Jihad Publications of Isfahan Branch, 2004
- [5] 陈冰嫻, 徐宁, 李淑杰, 李继洪, 侯佳明, 李伟, 石贵山, 檀辉, 高士杰, 王甯. 高粱亲本系萌芽期抗旱性鉴定[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 17-29  
Chen B R, Xu N, Li S J, Li J H, Hou J M, Li W, Shi G S, Tan H, Gao S J, Wang N. Identification of the drought resistance of sorghum parental lines at germination stage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(8): 17-29 (in Chinese)
- [6] 任杨柳, 乔大河, 胡春辉, 张龙, 李玉玲. 不同种质玉米自交系种子萌发的干旱胁迫[J]. 中国农学通报, 2017, 33(9): 17-21  
Ren Y L, Qiao D H, Hu C H, Zhang L, Li Y L. Drought stress on different maize inbred lines at germination stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(9): 17-21 (in Chinese)
- [7] 陈天青, 王伟, 杨康林, 何庆才. 小麦萌芽期耐旱性材料的筛选与评价[J]. 种子, 2014, 33(10): 81-84  
Chen T Q, Wang W, Yang K L, He Q C. The analysis and screening of drought tolerance materials of wheat at germination stage [J]. *Seed*, 2014, 33(10): 81-84 (in Chinese)
- [8] 田又升, 谢宗铭, 王志军, 张国丽, 陈林, 朱江艳. 水稻种子萌芽期抗旱性与产量抗旱系数关系分析[J]. 作物杂志, 2014, (5): 148-153  
Tian Y S, Xie Z M, Wang Z J, Zhang G L, Chen L, Zhu J Y. Relationship between the drought resistance of rice shoots and drought resistance coefficient of yield[J]. *Crops*, 2014, (5): 148-153 (in Chinese)
- [9] 刘永惠, 詹成芳, 沈一, 陈志德. 不同花生品种(系)萌芽期抗旱性鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(2): 233-238  
Liu Y H, Zhan C F, Shen Y, Chen Z D. Identification of drought tolerance in peanut varieties/lines at the germination stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(2): 233-238 (in Chinese)
- [10] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源萌芽期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 846-859  
Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification, and indices screening of drought resistance in job's tears germplasm resources at germination stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(5): 846-859 (in Chinese)
- [11] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2017, 43(9): 1381-1394  
Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification and indices screening of drought resistance at adult plant stage in job's tears germplasm resources[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(9): 1381-1394 (in Chinese)
- [12] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 张姣, 陈冰嫻, 许文娟, 黄瑞冬. 不同高粱品种萌芽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, Zhang J, Chen B R, Xu W J, Huang R D. Screening and identification for drought resistance during germination in sorghum cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(8): 1233-1246 (in Chinese)
- [13] 敬礼恒, 刘利成, 梅坤, 陈光辉. 水稻抗旱性能鉴定方法及评价指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 1-5  
Jing L H, Liu L C, Mei K, Chen G H. Research progress of drought resistance identification and evaluation in rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(12): 1-5 (in Chinese)
- [14] 张彦军, 苟作旺, 王兴荣, 陈伟英, 祁旭升. 胡麻种质萌芽期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(3): 520-527  
Zhang Y J, Gou Z W, Wang X R, Chen W Y, Qi X S. Comprehensive valuation of drought resistance of flax germplasm in germination [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(3): 520-527 (in Chinese)

- [15] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1259-1273  
Luo J J, Ou Q M, Ye C L, Wang F, Wang Y Z, Chen Y L. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1259-1273 (in Chinese)
- [16] 王利彬, 刘丽君, 裴宇峰, 董守坤, 孙聪姝, 祖伟, 阮英慧. 大豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 36-43  
Wang L B, Liu L J, Pei Y F, Dong S K, Sun C S, Zu W, Ruan Y H. Drought resistance identification of soybean germplasm resources at bud stage[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(1): 36-42 (in Chinese)
- [17] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 王兴荣, 苟作旺, 常汝镇, 邱丽娟. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 665-674  
Qi X S, Liu Z X, Guan R X, Wang X R, Gou Z W, Chang R Z, Qiu L J. Comparison of evaluation methods for drought-resistance at soybean adult stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 665-674 (in Chinese)
- [18] 朱宗河, 郑文寅, 张学昆. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1775-1787  
Zhu Z H, Zheng W Y, Zhang X K. Principal component analysis and comprehensive evaluation on morphological and agronomic traits of drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1775-1787 (in Chinese)
- [19] 谢小玉, 张霞, 张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485  
Xie X Y, Zhang X, Zhang B. Evaluation of drought resistance and analysis of variation of relevant parameters at seedling stage of rapeseed (*Brassica napus* L)[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(3): 476-485 (in Chinese)
- [20] 陈玉梁, 石有太, 罗俊杰, 王蒂, 厚毅清, 李忠旺, 张秉贤. 甘肃彩色棉抗旱性农艺性状指标的筛选鉴定[J]. 作物学报, 2012, 38(9): 1680-1687  
Chen Y L, Shi Y T, Luo J J, Wang D, Hou Y Q, Li Z W, Zhang B X. Screening of drought tolerant agronomic trait indices of colored cotton varieties (lines) in Gansu Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(9): 1680-1687 (in Chinese)
- [21] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(3): 498-503  
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at bud stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(3): 498-503 (in Chinese)
- [22] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源苗期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 145-153  
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 145-153 (in Chinese)
- [23] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1287-1294  
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Identification of mungbean germplasm resources resistant to drought at adult stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(8): 1287-1294 (in Chinese)
- [24] 秦岭, 杨延兵, 管延安, 张华文, 王海莲, 刘宾, 陈二影. 不同生态区主要育成谷子品种芽期耐旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(1): 146-151  
Qin L, Yang Y B, Guan Y A, Zhang H W, Wang H L, Liu B, Chen E Y. Identification of drought tolerance at germination period of foxtail millet cultivars developed from different ecological regions [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(1): 146-151 (in Chinese)
- [25] 代小冬, 杨育峰, 朱灿灿, 鲁晓民, 王春义, 杨晓平, 杨国红, 李君霞. 谷子萌芽期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 华北农学报, 2015, 30(4): 139-144  
Dai X D, Yang Y F, Zhu C C, Lu X M, Wang C Y, Yang X P, Yang G H, Li J X. Seed germination response to drought stress and drought resistance evaluation of foxtail millet[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(4): 139-144 (in Chinese)
- [26] 孟庆立, 关周博, 冯佰利, 柴岩, 胡银岗. 谷子抗旱相关性状的主成分与模糊聚类分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2667-2675  
Meng Q L, Guan Z B, Feng B L, Chai Y, Hu Y G. Principal component analysis and fuzzy clustering on drought-tolerance related traits of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2009, 42(8): 2667-2675 (in Chinese)
- [27] 高汝勇, 时丽冉, 崔兴国, 李明哲. 谷子品种抗旱性评价[J]. 河南农业科学, 2013, 42(12): 28-32  
Gao R Y, Shi L R, Cui X G, Li M Z. Assessment of drought resistance of *Setaria italica* varieties[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(12): 28-32 (in Chinese)
- [28] 申洁, 卫林颖, 郭美俊, 王玉国, 原向阳, 郭平毅. 腐植酸对干旱胁迫下谷子萌发的影响[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2019, 39(6): 26-33  
Shen J, Wei L Y, Guo M J, Wang Y G, Yuan X Y, Guo P Y. Effects of humic acid on seed germination of foxtail millet under drought stresses[J]. *Journal of Shanxi Agricultural*

- University: Natural Science Edition*, 2019, 39(6): 26-33 (in Chinese)
- [29] 许冰霞, 尹美强, 温银元, 裴帅帅, 柯贞进, 张彬, 原向阳. 谷子萌发期响应干旱胁迫的基因表达谱分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(8): 1431-1486
- Xu B X, Yin M Q, Wen Y Y, Pei S S, Ke Z J, Zhang B, Yuan X Y. Gene expression profiling of foxtail millet (*Setaria italica* L.) Under Drought Stress During Germination [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1431-1486 (in Chinese)
- [30] 李龙, 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 王述民. 普通菜豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(4): 600-605
- Li L, Wang L F, Wu J, Jing R L, Wang S M. Drought tolerance in common bean germplasm at bud stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(4): 600-605 (in Chinese)
- [31] 朱学海, 宋燕春, 赵治海, 石云素, 刘颖慧, 黎裕, 王天宇. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(1): 62-67
- Zhu X H, Song Y C, Zhao Z H, Shi Y S, Liu Y H, Li Y, Wang T Y. Methods for identification of drought tolerance at germination period of foxtail millet by osmotic stress [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2008, 9(1): 62-67 (in Chinese)
- [32] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3076-3087
- Qi X S, Wang X R, Xu J, Zhang J P, Mi J. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3076-3087 (in Chinese)
- [33] 刘光辉, 陈全家, 吴鹏昊, 曲延英, 高文伟, 杨军善, 杜荣光. 棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(1): 53-62, 69
- Liu G H, Chen Q J, Wu P H, Qu Y Y, Gao W W, Yang J S, Du R G. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of cotton at blossing and boll-forming stages [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(1): 53-62, 69 (in Chinese)
- [34] 胡雯媚, 李国瑞, 樊高琼, 李金刚, 荣晓椒. 增强小麦种子萌发期抗旱性的植物生长调节物质的筛选与评价[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(8): 1093-1100
- Hu W M, Li G R, Fan G Q, Li J G, Rong X J. Evaluation and selection of plant growth adjusting substances related to enhancing wheat seed germination under drought stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(8): 1093-1100 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅