

山西44份谷子地方品种农艺性状 与芽期耐旱性评价

侯森, 秦慧彬, 李萌, 王海岗, 穆志新

(山西农业大学农业基因资源研究中心/农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室/

杂粮种质资源发掘与遗传改良山西省重点实验室, 山西太原 030031)

摘要:对山西不同地区的44份谷子地方品种(系)进行了田间农艺性状调查、品质鉴定,调查了不同遗传背景谷子材料的叶鞘色、幼苗叶色、主茎长度、主茎直径、主茎节数、主穗长度、穗松紧度、穗形、粒色、米色、全生育期、千粒重等12个农艺性状,测定了成熟籽粒淀粉含量和蛋白质含量两个品质相关性状。利用PEG-6000模拟干旱胁迫,以-0.5 MPa渗透势的PEG溶液测定了各谷子材料芽期的萌发指数、发芽率、根长、芽长、根芽比等耐旱相关指标。试验结果表明:各数量性状中主茎直径变异系数最大(22.31%),淀粉含量变异系数最小(1.32%)。相关性分析结果显示,主茎节数与主茎长度呈显著正相关,与主茎直径呈显著负相关;千粒重与主茎直径和主穗长度均呈显著正相关,与主茎节数呈显著负相关;蛋白质含量与主茎长度和淀粉含量均呈显著负相关。在干旱处理下萌发指数变异系数最大(22.86%),根长变异系数最小(13.7%);在对照下根芽比变异系数最大(17.82%),根长变异系数最小(10.92%)。相关性分析结果表明,萌发耐旱指数(GDRI)与相对发芽率、相对根长及相对芽长互为显著正相关关系;相对根芽比与相对根长呈显著正相关关系,与相对芽长呈显著负相关关系。通过萌发耐旱指数结合聚类分析对各谷子材料的芽期耐旱性进行了评价并分为5个等级,筛选出“长脖谷”等1级耐旱资源17份。

关键词:谷子;农艺性状;耐旱性;芽期;山西地方品种

中图分类号:S515;S330.2 **文献标志码:**A

Identification of agronomic traits and drought tolerance at germination stage of 44 local foxtail millet varieties from Shanxi Province

HOU Sen, QIN Huibin, LI Meng, WANG Haigang, MU Zhixin

(Center for Agriculture Genetic Resources Research, Shanxi Agriculture University, Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Shanxi Key Laboratory of Genetic Resources and Genetic Improvement of Minor Crops, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: Totally 44 foxtail millet varieties (lines) collected from different areas in Shanxi were used. Twelve agronomic traits, two quality related traits and drought tolerance related indicators at germination stage were identified, which drought condition was simulated by PEG-6000. Agronomic traits including sheath color (*ShC*), seedling leaf color (*SLC*), main stem length (*MSL*), main stem diameter (*MSD*), main stem node number (*MSNN*), panicle length (*PL*), panicle type (*PT*), panicle tightness (*PTi*), grain color (*GC*), millet color (*MC*), whole growth period (*WGP*) and 1000-grain weight (*1000-GW*). Quality related traits including starch content (*SC*) and protein content (*PC*). Promptness index (*PI*), germination rate (*GR*), root length (*RL*), sprout length (*SL*) and root length per sprout length (*R/S*) as drought-related traits were measured under -0.5 MPa PEG stress. The coefficients of variation (*CV*, %) of quantitative traits ranged from 1.32% (*SC*) to 22.31% (*MSD*). Correlation analysis indicated that *MSNN* showed significant and positive correlation with *MSL*, and significant and negative correlation with *MSD*. *1000-GW* showed significant and positive correlation with *MSD* and *PL*, and significant and

收稿日期:2023-05-28

修回日期:2023-08-30

基金项目:山西农业大学博士科研启动项目(2021BQ118);山西省博士毕业生来晋工作科研项目(SXBYKY2022075);山西谷子种业创新良种联合攻关项目(2022XCZX04-6);国家作物种质资源库山西分库运行服务项目(NCGRC-2022-026)

作者简介:侯森(1990-),男,山西大同人,博士,助理研究员,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:saashs@126.com

通信作者:王海岗(1981-),男,山西平定人,博士,副研究员,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:nkywhg@126.com

穆志新(1974-),男,山西浑源人,学士,研究员,主要从事作物种质资源研究。E-mail:muzx2008@sina.com

negative correlation with *MSNN*. *PC* showed a significant and negative correlation with *MSL* and *SC*. The *CV* of drought-related traits ranged from 13.7% (*RL*) to 22.86% (*PI*) under drought stress, and 10.92% (*RL*) to 17.82% (*R/S*) under normal condition, respectively. Germination drought resistance index (*GDRI*) was calculated to identify drought tolerance capacity of foxtail millet accessions, seventeen elite drought tolerance accessions were selected. Correlation analysis was conducted to explore the relationships among drought-related traits. Relative root length per sprout (*RR/S*) showed significant and positive correlation with *RRL*, and significant and negative correlation with *RSL*. The drought resistance of various millet materials during the bud stage was evaluated by combining the germination drought resistance index with cluster analysis, and they were divided into 5 levels. Seventeen first-level drought resistant resources, such as ‘Changbogu’ were selected.

Keywords: foxtail millet; agronomic traits; drought tolerance; germination stage; Shanxi local varieties

干旱是限制农业生产的主要非生物逆境之一，严重的干旱甚至会导致作物绝产^[1]。因全球气候变暖和水土资源不平衡等原因,农业干旱灾害日益加剧^[2]。面对严峻干旱形势带来的挑战,对作物耐旱育种研究成果的需求愈发紧迫^[3]。在作物耐旱机制研究及耐旱育种工作中,耐旱相关基因资源发挥着重要作用^[4-6],作物耐旱性鉴定及优异耐旱资源的筛选则是发掘耐旱相关基因的前提^[7-9]。谷子是人类最早驯化的作物之一^[10]。山西气候干旱少雨,在长期的自然选择与人为驯化下,山西地区蕴藏着大量的优异耐旱谷子资源,是理想的耐旱研究对象^[11-12]。

在谷子的各生育时期中,芽期是对干旱胁迫最为敏感的时期之一,芽期遭受的干旱损害会影响到后期生长发育,探究谷子芽期耐旱性有着重要的现实意义^[13-14]。作物耐旱研究方法在干旱处理手段上大致分为自然干旱与人工模拟干旱两类,鉴定指标有形态指标、生理生化指标、产量指标和品质指标等^[15-17]。使用渗透剂人工模拟干旱条件,相较于自然干旱有着胁迫程度精准可控、可重复性好的优点,且更适合于芽期耐旱相关鉴定试验的实施^[18]。樊瑀等^[19]以 35 个谷子品种为研究对象,利用 0.03 mol·L⁻¹的 PEG-6000 溶液模拟干旱处理,比较了 9 个与谷子萌发期抗旱性相关的指标,并筛选出根相对鲜质量、芽相对干质量和相对根长 3 个重要指标。依据抗旱等级将谷子材料分为 4 级,其中强抗旱性品种 7 个。熊雪等^[20]以 10 个谷子品种为材料,通过 20%浓度的 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫,测定了丙二醛、叶绿素等苗期抗旱相关指标,筛选出‘山西红谷’等 3 个抗旱性较强的材料。Zhang 等^[21]以 20%浓度 PEG-6000 溶液模拟干旱条件,鉴定了小 RNA *simiR936d* 对谷子芽期耐旱性的影响,发现其过量表达后根长显著大于野生型,抑制表达后根长显著小于野生型。肖继兵等^[22]以 30 份谷子种质为

试验材料,通过自然干旱处理进行了全生育期耐旱性鉴定,测定了株高等 11 个耐旱相关指标,基于主成分分析和隶属函数评价了各材料耐旱性并聚类为 5 类,筛选出 G26 等一类耐旱资源 9 份。

本研究利用 PEG-6000 溶液模拟干旱条件,对收集自山西的 44 份谷子材料进行了模拟干旱条件下的萌发试验,测定了发芽率等芽期耐旱相关指标,评价谷子材料耐旱性并筛选出优异耐旱材料。同时鉴定了各谷子品种的叶鞘色等田间农艺性状,以及成熟籽粒的淀粉含量和蛋白质含量。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验谷子材料共 44 份,均为山西农业大学农业基因资源研究中心于山西各地收集的谷子地方品种,分别收集自大同、忻州、吕梁、长治和临汾地区(表 1)。

1.2 试验方法

1.2.1 农艺性状调查 各谷子材料在旱作大田种植,普通大田栽培管理。苗期调查叶鞘色与幼苗叶

表 1 供试山西谷子资源来源分布					
Table 1 Distribution of Shanxi millet resources for testing					
市 City	区/县 District/ County	经度/(°E) Longitude	纬度/(°N) Latitude	海拔/m Altitude	材料份数 Number
大同 Datong	天镇 Tianzhen	114.19	40.53	1172	3
	云州 Yunzhou	113.47	40.32	1325	1
	广灵 Guangling	113.99	39.81	1420	1
	浑源 Hunyuan	113.82	39.56	1503	2
	灵丘 Lingqiu	114.14	39.39	1150	7
忻州 Xinzhou	繁峙 Fanshi	113.62	39.28	1206	6
	五台 Wutai	113.50	38.76	1220	7
	五寨 Wuzhai	111.72	38.67	1412	2
吕梁 Lvliang	兴县 Xingxian	111.05	38.29	1063	4
	石楼 Shilou	110.72	37.06	924	4
长治 Changzhi	武乡 Wuxiang	112.84	37.01	1163	6
临汾 Linfen	隰县 Xixian	110.84	36.69	1006	1
合计 Total		12			44

色,成熟期调查主茎长度、主茎直径、主茎节数、主穗长度、穗松紧度、穗形、粒色、米色、全生育期和千粒重。各农艺性状调查标准参照《谷子种质资源描述规范和数据标准》^[23]。

1.2.2 品质相关性状测定 谷子成熟期测定饱满籽粒的干基淀粉含量与蛋白质含量。淀粉含量测定采用旋光法,参考国标 GB/T 20378-2006^[24]。蛋白质含量测定采用凯氏法,参考国标 GB/T 5511-2008^[25]。

1.2.3 芽期干旱胁迫处理 随机选取采自不同地区的 3 份材料进行试验。PEG-6000 溶液浓度梯度分别设置为-0.3 (13.1% PEG)、-0.5 (16.8% PEG)、-0.7 (19.6% PEG)、-0.9 (21.8% PEG)、-1.1 (23.7% PEG)、-1.3 (25.4% PEG)、-1.5 MPa (26.9% PEG) 7 级不同的渗透势。在直径 9 cm 平板中铺双层滤纸,加入 7 mL 不同浓度的 PEG 溶液,对照加入等量蒸馏水。将 50 粒经酒精消毒后的种子均匀放置在滤纸上,在 25℃ 人工培养箱中进行暗培养,设置 3 次重复。分别调查第 2、4、6、8 d 的发芽种子数(统计胚芽、胚根长度均超过 1 mm 的个体),计算种子萌发指数和萌发耐旱指数^[26]。

萌发指数 (PI) = (1.00nd₂+0.75nd₄+0.50nd₆+0.25nd₈)/N

式中,nd₂、nd₄、nd₆、nd₈分别为第 2、4、6、8 天的萌发种子数,N 为种子总数。

萌发耐旱指数 (GDRI) = (PI₁ + PI₂ + ... + PI_n)/nPI_{ck}

式中,PI_n为第 n 次重复的种子萌发指数,PI_{ck}为对照平均种子萌发指数,n 为重复数。

随着 PEG-6000 溶液渗透势增大,谷子的萌发耐旱指数逐渐下降。萌发耐旱指数的方差分析显示当 PEG-6000 溶液渗透势为-0.5 Mpa 时,各材料间萌发耐旱指数差异最大,选取该浓度为谷子芽期耐旱鉴定模拟干旱处理浓度(图 1)。

1.2.4 芽期耐旱性鉴定 按照上述培养方法,以

-0.5 MPa (16.8%) 浓度 PEG 溶液模拟干旱条件,将谷子材料置于 25℃ 人工培养箱中进行暗培养,3 次重复。计算种子萌发指数和萌发耐旱指数。统计种子发芽率,测量培养至第 8 天时种子的胚芽及胚根长度。

1.3 数据处理与分析

使用 EXCEL 2019 和 SPSS 20 软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 质量农艺性状

对叶鞘色、幼苗叶色、穗松紧度、穗形、粒色和米色 6 个质量农艺性状进行统计,结果显示,供试谷子材料叶鞘色和幼苗叶色均以绿色为主,占比分别达到了 93.18% 和 59.09%。穗松紧度多数材料为松 (47.73%),穗形以纺锤形为主 (50.00%)。籽粒粒色多为黄色 (34.09%) 和红色 (31.82%),米色以黄色为主 (86.36%) (表 2)。

2.2 数量农艺性状与品质相关性状

鉴定了主茎长度、主茎直径、主茎节数、主穗长度、全生育期和千粒重 6 个数量农艺性状,并测定了成熟籽粒淀粉含量和蛋白质含量两个品质相关性状。其中,主茎直径的变异系数最大 (22.31%),淀粉含量的变异系数最小 (1.32%) (表 3)。

2.3 芽期耐旱相关性状

对 44 份谷子材料进行芽期模拟干旱处理后,获得了萌发指数、发芽率、根长、芽长和根芽比 5 个耐旱相关指标,计算了萌发耐旱指数及各指标相对值(干旱处理数值/对照数值)。其中萌发指数、发芽率和芽长在干旱胁迫下的极值和均值均低于对照,根长和根芽比在干旱胁迫下的极值和均值均高于对照。5 个耐旱相关指标的变异系数在干旱胁迫下为 13.70% (根长)~22.86% (萌发指数),在对照下为 10.92% (根长)~17.82% (根芽比) (表 4)。

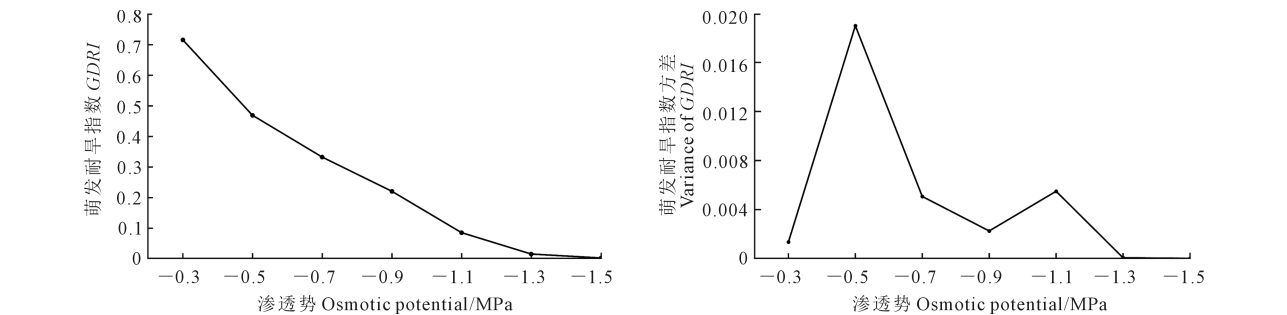


图 1 不同渗透势下谷子萌发耐旱指数及其方差变化
Fig.1 GDRI and its variance of foxtail millet under different osmotic potentials

表 2 谷子质量农艺性状统计

Table 2 Summary of qualitative agronomic traits in foxtail millet

性状 Trait				性状 Trait			
		数量 No.	占比 Ratio/%			数量 No.	占比 Ratio/%
叶鞘色 <i>ShC</i>	绿 Green	41	93.18	穗形 <i>PT</i>	纺锤形 Spindle	22	50.00
	紫 Purple	2	4.55		圆筒形 Cylinder	15	34.09
	红 Red	1	2.27		猫爪形 Cat paw	3	6.82
幼苗叶色 <i>SLC</i>	绿 Green	26	59.09		鸭嘴形 Duck beak	2	4.55
	紫绿 Purplish green	13	29.55		鸡嘴形 Chicken beak	1	2.27
	黄绿 Yellowish green	5	11.36		棍棒形 Ball bat	1	2.27
穗松紧度 <i>PTi</i>	松 Loose	21	47.73	粒色 <i>GC</i>	黄 Yellow	15	34.09
	中 Middle	17	38.64		红 Red	14	31.82
	紧 Tight	6	13.64		白 White	11	25.00
米色 <i>MC</i>	黄 Yellow	38	86.36		褐 Brown	2	4.55
	浅黄 Light yellow	5	11.36		黑 Black	1	2.27
	白 White	1	2.27		青 Cyan	1	2.27

表 3 谷子数量农艺性状与品质相关性状的描述统计

Table 3 Statistics of quantitative agronomic traits and quality-related traits

性状 Trait	主茎长度 <i>MSL</i> /cm	主茎直径 <i>MSD</i> /cm	主茎节数 <i>MSNN</i>	主穗长度 <i>PL</i> /cm	全生育期 <i>WGP</i> /d	千粒重 1000- <i>GW</i> /g	淀粉含量 <i>SC</i> /%	蛋白质含量 <i>PC</i> /%
极小值 <i>Min</i>	104.50	0.41	9.0	20.20	110.0	2.40	83.64	9.43
极大值 <i>Max</i>	167.50	1.22	17.0	48.40	138.0	4.60	88.18	13.50
均值 <i>Mean</i>	142.66	0.71	11.7	32.83	130.0	3.67	85.85	11.20
标准差 <i>SD</i>	15.60	0.16	1.8	6.87	9.1	0.52	1.13	0.80
变异系数 <i>CV</i> /%	10.94	22.31	15.3	20.94	7.0	14.19	1.32	7.13

表 4 谷子芽期耐旱相关性状的描述统计

Table 4 Statistics of germinating stage traits related to drought tolerance

性状 Trait	干旱处理 Drought					性状 Trait	对照 CK					性状 Trait	萌发耐	相对	相对	相对	相对
	萌发 指数 <i>PI</i>	发芽率 <i>GR</i> /%	根长 <i>RL</i> /cm	芽长 <i>SL</i> /cm	根芽比 <i>R/S</i>		萌发 指数 <i>PI</i>	发芽率 <i>GR</i> /%	根长 <i>RL</i> /cm	芽长 <i>SL</i> /cm	根芽比 <i>R/S</i>		旱指数 <i>GDRI</i>	发芽率 <i>RGR</i>	根长 <i>RRL</i>	芽长 <i>RSL</i>	根芽比 <i>RR/S</i>
极小值 <i>Min</i>	0.55	37.33	3.37	3.11	0.74	极小值 <i>Min</i>	1.09	60.00	3.25	5.59	0.44	极小值 <i>Min</i>	0.33	0.51	0.73	0.37	1.29
极大值 <i>Max</i>	1.54	96.00	6.55	5.60	1.70	极大值 <i>Max</i>	2.10	97.00	5.67	9.32	0.96	极大值 <i>Max</i>	0.78	1.07	1.43	0.79	2.52
均值 <i>Mean</i>	1.07	73.67	4.69	4.40	1.08	均值 <i>Mean</i>	1.78	84.39	4.49	7.43	0.61	均值 <i>Mean</i>	0.60	0.87	1.05	0.60	1.80
标准差 <i>SD</i>	0.24	14.38	0.64	0.60	0.19	标准差 <i>SD</i>	0.22	9.28	0.49	0.86	0.11	标准差 <i>SD</i>	0.11	0.12	0.15	0.11	0.36
变异系数 <i>CV</i> /%	22.86	19.52	13.70	13.74	17.32	变异系数 <i>CV</i> /%	12.51	10.99	10.92	11.52	17.82	变异系数 <i>CV</i> /%	18.45	14.27	14.47	18.31	19.79

2.4 相关性分析

数量农艺性状与品质相关性状的的相关性分析结果显示,主茎节数与主茎长度体现为显著正相关,与主茎直径体现为显著负相关;千粒重与主茎直径和主穗长度体现为显著正相关,与主茎节数体现为显著负相关;蛋白质含量分别与主茎长度和淀粉含量体现为显著和极显著负相关(表 5)。

使用发芽率、根长、芽长以及根芽比的相对值和萌发耐旱指数进行相关性分析,结果表明萌发耐旱指数、相对发芽率、相对根长和相对芽长之间互为显著正相关关系;相对根芽比与相对根长呈显著正相关关系,与相对芽长呈显著负相关关系(表 6)。

2.5 芽期耐旱性评价

利用萌发耐旱指数对谷子芽期耐旱性进行评价,通过系统聚类方法将谷子材料依据其萌发耐旱指数分为 5 个等级。其中 1 级 17 份(0.64~0.78),2 级 12 份(0.58~0.63),3 级 8 份(0.50~0.56),4 级 5 份(0.43~0.47),5 级 2 份(0.33~0.34)。筛选出‘长脖谷’等一批优异芽期耐旱谷子资源(表 7)。

3 讨 论

本研究在对山西谷子地方品种大田农艺性状的调查中发现,叶鞘色以绿色为主,米色以黄色为主,穗形以纺锤形居多^[27]。米色中黄色和浅黄色材料

表 5 谷子数量农艺性状与品质相关性状的相关性分析

Table 5 Correlation analysis among quantitative agronomic traits and quality-related traits

指标 Item	主茎长度 <i>MSL</i>	主茎直径 <i>MSD</i>	主茎节数 <i>MSNN</i>	主穗长度 <i>PL</i>	全生育期 <i>WGP</i>	千粒重 1000- <i>GW</i>	淀粉含量 <i>SC</i>	蛋白质含量 <i>PC</i>
主茎长度 <i>MSL</i>	1.000							
主茎直径 <i>MSD</i>	0.068	1.000						
主茎节数 <i>MSNN</i>	0.365 * *	-0.359 * *	1.000					
主穗长度 <i>PL</i>	0.077	0.075	-0.088	1.000				
全生育期 <i>WGP</i>	-0.063	0.048	-0.019	0.012	1.000			
千粒重 1000- <i>GW</i>	0.073	0.473 * *	-0.449 * *	0.352 * *	0.213	1.000		
淀粉含量 <i>SC</i>	0.008	-0.020	-0.085	0.076	-0.167	0.185	1.000	
蛋白质含量 <i>PC</i>	-0.320 *	0.072	-0.010	-0.240	0.241	-0.151	-0.556 * *	1.000

注：* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。
Note: * and * * indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively. The same below.

表 6 谷子芽期耐旱相关性状的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of drought tolerance related traits in millet germinating stage

指标 Item	萌发耐旱 指数 <i>GDRI</i>	相对发 芽率 <i>RGR</i>	相对 根长 <i>RRL</i>	相对 芽长 <i>RSL</i>	相对跟 芽比 <i>RR/S</i>
萌发耐旱指数 <i>GDRI</i>	1.000				
相对发芽率 <i>RGR</i>	0.850 * *	1.000			
相对根长 <i>RRL</i>	0.494 * *	0.390 * *	1.000		
相对芽长 <i>RSL</i>	0.427 * *	0.423 * *	0.335 *	1.000	
相对根芽比 <i>RR/S</i>	-0.063	-0.132	0.384 * *	-0.722 * *	1.000

表 7 44 份谷子材料来源及耐旱性
Table 7 Information on 44 foxtail millet accessions used in this study

编号 No.	材料名称 Name	来源地 Region	萌发耐旱 指数 <i>GDRI</i>	耐旱性 分类 Group
1	红谷 Honggu	兴县 Xingxian	0.75	1
2	红谷 Honggu	兴县 Xingxian	0.56	3
3	三变化 Sanbianhua	灵丘 Lingqiu	0.71	1
4	长沟小谷 Changgouxiaogu	灵丘 Lingqiu	0.54	3
5	尖穗谷 Jiansuigu	灵丘 Lingqiu	0.67	1
6	龙爪谷 Longzhuagu	灵丘 Lingqiu	0.69	1
7	兔咀谷 Tuzuigu	灵丘 Lingqiu	0.69	1
8	狼尾巴谷 Langweibagu	灵丘 Lingqiu	0.58	2
9	红谷 Honggu	兴县 Xingxian	0.61	2
10	黄谷 Huanggu	兴县 Xingxian	0.74	1
11	小黄谷 Xiaohuanggu	五台 Wutai	0.74	1
12	软谷子 Ruanguzi	五台 Wutai	0.56	3
13	白秆硬谷 Baiganyinggu	五台 Wutai	0.62	2
14	红秆硬谷 Hongganyinggu	五台 Wutai	0.74	1
15	黑铁锈 Heitieuxiu	五台 Wutai	0.61	2
16	长脖谷 Changbogu	五台 Wutai	0.78	1

续表 7

Continued table 7

编号 No.	材料名称 Name	来源地 Region	萌发耐旱 指数 <i>GDRI</i>	耐旱性 分类 Group
17	小红谷 Xiaohonggu	五台 Wutai	0.58	2
18	红谷子 Hongguzi	五寨 Wuzhai	0.60	2
19	红谷 Honggu	五寨 Wuzhai	0.50	3
20	小日月谷子 Xiaoriyueguzi	石楼 Shilou	0.72	1
21	小日期谷子 Xiaoriqiguzi	石楼 Shilou	0.64	1
22	答谷 Dagu	石楼 Shilou	0.59	2
23	黑谷子 Heiguzi	隰县 Xixian	0.61	2
24	旺庄谷 Wangzhuangu	灵丘 Lingqiu	0.65	1
25	小红谷 Xiaohonggu	石楼 Shilou	0.68	1
26	黄谷 Huanggu	繁峙 Fanshi	0.71	1
27	白谷 Baigu	繁峙 Fanshi	0.63	2
28	小红谷 Xiaohonggu	繁峙 Fanshi	0.60	2
29	牛缰绳 Niujiangsheng	繁峙 Fanshi	0.62	2
30	老来梢 Laolaishao	繁峙 Fanshi	0.51	3
31	谷子 Guzi	繁峙 Fanshi	0.34	5
32	青谷 Qinggu	武乡 Wuxiang	0.47	4
33	爪爪谷 Zhuazhuagu	武乡 Wuxiang	0.74	1
34	黑谷 Heigu	武乡 Wuxiang	0.52	3
35	红谷 Honggu	武乡 Wuxiang	0.43	4
36	黄谷 Huanggu	武乡 Wuxiang	0.69	1
37	白谷 Baigu	武乡 Wuxiang	0.61	2
38	红秆谷 Honggangu	广灵 Guangling	0.68	1
39	小红谷 Xiaohonggu	浑源 Hunyuan	0.33	5
40	黄谷 Huanggu	浑源 Hunyuan	0.51	3
41	红谷 Honggu	天镇 Tianzhen	0.43	4
42	油绿谷子 Youlvguzi	天镇 Tianzhen	0.52	3
43	小白谷子 Xiaobaiguzi	天镇 Tianzhen	0.44	4
44	谷子 Guzi	云州 Yunzhou	0.46	4

共占比 97.73%,白色材料仅 1 份,表明多数谷子材料籽粒中富含天然类胡萝卜素^[28]。数量农艺性状与品质相关性状的相关性分析中,蛋白质含量与主茎长度呈显著负相关的结果在其他研究中亦有体现^[29]。

种子萌发是作物生长的初始阶段,一般在萌发期都需要充足的水分供给^[30-31]。本研究中不同谷子品种萌发指数、发芽率、根长、芽长差异明显,各材料间耐旱性的差异得以体现。干旱胁迫对谷子芽长体现为抑制作用,对根长在不同材料中则分别体现出抑制或促进作用。从各材料相对根芽比均大于 1 可看出,即使干旱胁迫对某谷子材料的根长体现为抑制作用,对其芽长的抑制作用将更为明显,最终仍体现为根芽比增大。说明谷子在芽期遭受干旱胁迫时会通过增大根芽比或直接增加胚根长度的方式来对抗胁迫。

通过萌发耐旱指数对谷子材料芽期耐旱性进行评价和分类,前人研究中依照萌发耐旱指数的大小划分了 5 个等级^[32]。本研究同样依照萌发耐旱指数的大小评价谷子芽期耐旱性,同时引入了聚类分析方法,使同类个体的相似性与类间个体的差异性最大化^[33]。本研究中各谷子材料的萌发耐旱指数均大于 0.30,参照前人研究中的分类均为中度抗旱及以上的耐旱材料。山西地区谷子种质资源耐旱性优异,对其进一步深度挖掘耐旱相关基因资源,可为谷子耐旱育种及作物耐旱机制研究提供参考。

4 结 论

44 份山西谷子地方品种农艺性状与芽期耐旱性鉴定结果表明,主茎节数与主茎长度呈显著正相关,与主茎直径呈显著负相关;千粒重与主茎直径和主穗长度呈显著正相关,与主茎节数呈显著负相关;蛋白质含量与主茎长度和淀粉含量呈显著负相关。萌发耐旱指数与相对发芽率、相对根长及相对芽长互为显著正相关关系;相对根芽比与相对根长呈显著正相关关系,与相对芽长呈显著负相关关系。根据芽期耐旱性将谷子品种分为 5 个等级,筛选出‘长脖谷’等 1 级耐旱资源 17 份。

参 考 文 献:

[1] DIETZ K J, ZÖRB C, GEILFUS C M. Drought and crop yield[J]. Plant Biology, 2021, 23(6): 881-893.

[2] 倪深海,王亨力,刘静楠,等. 中国农业干旱灾害特征及成因分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(10): 106-111.

NI S H, WANG H L, LIU J N, et al. Characteristics and causes of ag-

ricultural drought disasters in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(10): 106-111.

[3] LANGRIDGE P, REYNOLDS M. Breeding for drought and heat tolerance in wheat[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2021, 134(6): 1753-1769.

[4] 蔡肖,王海涛,李兴河,等. 亚洲棉 *NCED3* 基因克隆及其抗旱功能分析[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1713-1722.

CAI X, WANG H T, LI X H, et al. Cloning and functional analysis of *NCED3* on drought resistance in *Gossypium arboreum* [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(9): 1713-1722.

[5] ZHAO W, ZHANG L L, XU Z S, et al. Genome-wide analysis of *MADS-box* genes in foxtail millet (*Setaria italica* L.) and functional assessment of the role of *SiMADS51* in the drought stress response[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 659474.

[6] WANG K, BU T T, CHENG Q, et al. Two homologous *LHY* pairs negatively control soybean drought tolerance by repressing the abscisic acid responses[J]. New Phytologist, 2021, 229(5): 2660-2675.

[7] 李洁,张小宁,晋凡生,等. 普通菜豆种质资源苗期抗旱性综合评价[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1516-1529.

LI J, ZHANG X N, JIN F S, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance at seedling stage in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) material [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(8): 1516-1529.

[8] QIN L, CHEN E Y, LI F F, et al. Genome-wide gene expression profiles analysis reveal novel insights into drought stress in foxtail millet (*Setaria italica* L.) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(22): 8520.

[9] GUO J, LI C H, ZHANG X Q, et al. Transcriptome and GWAS analyses reveal candidate gene for seminal root length of maize seedlings under drought stress[J]. Plant Science, 2020, 292: 110380.

[10] YANG X Y, WAN Z W, PERRY L, et al. Early millet use in northern China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(10): 3726-3730.

[11] 温琪汾,王纶,王星玉. 山西省谷子种质资源及抗旱种质的筛选利用[J]. 山西农业科学, 2005, 33(4): 32-33.

WEN Q F, WANG G, WANG X Y. The foxtail millet germplasm resources and screening and utilization of drought resistance germplasm in Shanxi [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2005, 33(4): 32-33.

[12] PENG R H, ZHANG B H. Foxtail millet: a new model for C4 plants [J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(3): 199-201.

[13] 李云,杨梦涵,王健,等. PEG 胁迫下谷子品种(系)萌发期耐旱性鉴定及评价[J]. 种子, 2022, 41(4): 29-35, 43.

LI Y, YANG M H, WANG J, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of millet varieties (lines) at germination stage under PEG stress [J]. Seed, 2022, 41(4): 29-35, 43.

[14] 王燕,吴桂丽,牛瑞明,等. 谷子种子萌发对模拟干旱胁迫的响应及其耐旱性综合评价[J]. 种子, 2013, 32(5): 4-7.

WANG Y, WU G L, NIU R M, et al. Evaluation of drought resistant and response of millet seed germination under drought stress [J]. Seed, 2013, 32(5): 4-7.

[15] 温琪汾,刘润堂,王纶,等. 山西省谷子品种资源的抗旱性和丰产性研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2004, 24(3):

224-226.

WEN Q F, LIU R T, WANGL, et al. Drought resistance and high yield of the foxtail millet germplasm in Shanxi Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2004, 24 (3): 224-226.

[16] 邢媛, 贾馥翠, 陈凌, 等. 模拟干旱胁迫下黍稷资源抗旱性评价[J]. 山西农业科学, 2022, 50(7): 965-972.

XING Y, JIA F C, CHEN L, et al. Drought resistance evaluation of broomcorn millet under simulated drought stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 965-972.

[17] 王向东, 甄胜虎, 张凤琴. 甜糯玉米全生育期抗旱性鉴定指标的筛选与评价[J]. 玉米科学, 2021, 29(5): 41-49.

WANG X D, ZHEN S H, ZHANG F Q. Estimating and screening with drought resistance indexes of sweet glutinous corn in growth stage [J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 41-49.

[18] 朱学海, 宋燕春, 赵治海, 等. 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, et al. 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.

[19] 樊瑀, 董淑琦, 原向阳, 等. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6): 42-54.

FAN Y, DONG S Q, YUAN X Y, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(6): 42-54.

[20] 熊雪, 朱国芬, 梁燕, 等. 不同谷子品种苗期抗旱性综合评价[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(11): 25-28.

XIONG X, ZHU G F, LIANG Y, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of different millet varieties at seedling stage [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(11): 25-28.

[21] ZHANG Y F, XIAO T, YI F, et al. *SimiR396d* targets *SiGRF1* to regulate drought tolerance and root growth in foxtail millet[J]. Plant Science, 2023, 326: 111492.

[22] 肖继兵, 刘志, 辛宗绪, 等. 基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 34-44.

XIAO J B, LIU Z, XIN Z X, et al. Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 34-44.

[23] 陆平. 谷子种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 7-21.

LU P. Descriptors and data standard for foxtail millet [*Setaria italica* (L.) Beauv.][M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 7-21.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 原淀粉 淀粉含量的测定 旋光法: GB/T 20378-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Native starch-determination of starch content-towers polarimetric method: GB/T 20378-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

[25] 国家粮食局. 谷物和豆类 氮含量测定和粗蛋白质含量计算 凯氏法: GB/T 5511-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Grain Administration. Cereals and pulses-determination of the nitrogen content and calculation of the crude protein content-kjeldahl method: GB/T 5511-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[26] BOUSLAMA M, SCHAPAUGH W T. Stress tolerance in soybeans. I. evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance [J]. Crop Science, 1984, 24(5): 933-937.

[27] 王海岗, 贾冠清, 智慧, 等. 谷子核心种质表型遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 19-30.

WANG H G, JIA G Q, ZHI H, et al. Phenotypic diversity evaluations of foxtail millet core collections[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(1): 19-30.

[28] 杨延兵, 张涵, 王润丰, 等. 谷子籽粒小米黄色素含量的测定[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 121-125.

YANG Y B, ZHANG H, WANG R F, et al. Determination of yellow pigment content in foxtail millet[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(3): 121-125.

[29] 冯铨, 田翔, 乔治军, 等. 谷子农艺性状与蛋白质含量相关性分析[J]. 河南农业科学, 2022, 51(6): 43-53.

FENG L, TIAN X, QIAO Z J, et al. Correlation analysis between protein content and agronomic traits of foxtail millet [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(6): 43-53.

[30] 张娟伟, 石亚飞, 路旭平, 等. 种子萌发期粳稻种质资源耐旱性综合评价[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2093-2103.

ZHANG J W, SHI Y F, LU X P, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of japonica rice germplasm resources at seed germination stage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36 (11): 2093-2103.

[31] THABET S G, MOURSI Y S, KARAM M A, et al. Genetic basis of drought tolerance during seed germination in barley[J]. PLoS One, 2018, 13(11): e0206682.

[32] 秦岭, 杨延兵, 管延安, 等. 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, et al. 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.

[33] 吕建珍, 任莹, 王宏勇, 等. 264 份谷子主要育成品种(系)表型多样性综合评价[J]. 作物杂志, 2022, (4): 22-31.

LV J Z, REN Y, WANG H Y, et al. Comprehensive phenotype evaluation of 264 major foxtail millet bred varieties (lines) [J]. Crops, 2022, (4): 22-31.