文章编号:1000-7601(2025)05-0015-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.02

谷子种质资源抗旱性鉴定指标筛选及综合评价

李 哲[1,2],郭淑青[1],范子晗[1,2],李红兵[1],张岁岐[1]

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:基于 30 份不同谷子品种开展抗旱性鉴定与评价,苗期水培试验设置干旱胁迫(20% PEG+Hoagland 营养液培养)与对照(Hoagland 营养液培养)2 个处理,田间试验设置正常灌水(补充灌溉)与干旱胁迫(自然降水)2 个处理,通过测定苗期谷子形态指标与生理指标划分不同抗旱等级并筛选抗旱指标,结合成株期产量与水分利用效率共同比选出适宜谷子主产区种植的高产抗旱品种。研究结果表明:谷子苗期的形态指标与生理指标对干旱胁迫都有显著响应。干旱胁迫条件下,形态指标测定值下降幅度依次为:地下部鲜质量(60.14%)>地上部鲜质量(54.99%)>地下部干质量(42.82%)>地上部干质量(38.54%)>苗长(26.97%)>根长(20.9%);生理指标测定值除叶绿素含量外均有上升趋势,上升幅度依次为:脯氨酸含量(448.13%)>可溶性糖含量(224.26%)>丙二醛含量(114.8%)。主成分分析将 10 个指标转化为 4 个主成分,以 *D* 值进行聚类分析,将 30 份谷子种质划分为 4 个不同抗旱类型,其中高度抗旱的品种为陇谷 12、陇谷 32、张杂谷 19 和陇谷 10。逐步回归分析结果表明地上部鲜质量、地下部干质量、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量 5 个指标可作为谷子苗期抗旱性鉴定的关键指标。通过苗期抗旱性鉴定结合田间产量与水分利用效率分析,确定张杂谷 19 与陇谷 32 两份适宜在谷子主产区推广种植的高产抗旱品种。

关键词:谷子;种质资源;抗旱指标;抗旱品种筛选

中图分类号:S515; S338 **文献标志码**:A

Selection and comprehensive evaluation of drought resistance identification indicators in millet germplasm resources

LI Zhe[1,2], GUO Shuqing[1], FAN Zihan[1,2], LI Hongbing[1], ZHANG Suiqi[1]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Based on 30 varieties of foxtail millet, drought resistance identification and evaluation were carried out. During the seedling stage, two treatments, drought stress (20% PEG+Hoagland's nutrient solution) and control (Hoagland's nutrient solution), were set up in a hydroponic experiment, while two treatments, normal irrigation (supplementary irrigation) and drought stress (natural precipitation), were set up in the field experiment. Morphological and physiological indicators at the seedling stage were measured to classify drought resistance levels and screen drought tolerance indices. These were integrated with yield and water use efficiency at the maturity stage to select high-yield, drought-resistant varieties suitable for major foxtail millet production regions.The results showed that the morphological and physiological indicators of foxtail millet seedlings show significant responses to drought stress. Under drought stress conditions, the decrease in morphological parameters was as follows: fresh underground mass (60.14%) > fresh aboveground mass (54.99%) > dry underground mass (42.82%) > dry aboveground mass (38.54%) > seedling length (26.97%) > root length (20.9%). Physiological indicators generally increased except

收稿日期:2025-01-14 **修回日期**:2025-03-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900705,2022YFD1901602)

作者简介:李哲(1999-),男,甘肃酒泉人,硕士研究生,研究方向为谷子抗旱生理生态。E-mail:lz3330284@163.com

通信作者:张岁岐(1966-),男,陕西宝鸡人,研究员,主要从事作物抗旱生理生态研究。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

for chlorophyll content, with the following trends: proline content (448.13%) > soluble sugar content (224.26%) > malondialdehyde content (114.8%). Principal component analysis (PCA) converted 10 indicators into 4 principal components. Based on *D* values, cluster analysis categorized the 30 varieties into 4 drought-resistant groups, with Longgu 12, Longgu 32, Zhangzagu 19, and Longgu 10 classified as highly drought-resistant. The results of stepwise regression analysis indicated that five indicators, including fresh aboveground mass, dry underground mass, chlorophyll content, proline content, and malondialdehyde content, can be used as key indicators for identifying drought resistance in foxtail millet at the seedling stage. By identifying drought resistance during the seedling stage and analyzing field yield and water use efficiency, two high-yield and drought-resistant varieties, Zhangzagu 19 and Longgu 32, were determined to be suitable for promotion and planting in the main production areas of foxtail millet.

Keywords: millet; germplasm resources; drought resistance indicators; drought-resistant variety selection

谷子在我国已经有 8000 年的种植历史,种植面积位居世界第一[1]。其具有抗逆性强、营养价值高等特点,在食物多样性搭配和种植业结构调整中具有不可或缺的作用[2-3]。近年来,随着其全基因组测序的完成,谷子正发展成为一种新型的 C4 模式植物[4]。作为旱作地区的主栽作物,谷子主产区位于黄河流域,包括内蒙古、陕西、甘肃、山西等半干旱地区,在我国西北地区的种植面积可达 30% 以上[5-6]。其生长过程中极易受到干旱胁迫的影响,导致品质变差和产量下降[7]。因此,鉴定分析谷子的抗旱种质资源特性并高效筛选抗旱优质新品种,对于提高干旱和半干旱地区谷子品种适应性、提高土地利用效率及促进旱区农业高质量发展具有重要的现实意义。

抗旱性是植物通过形态结构和生理生化的调整,以适应干旱条件的能力[8]。干旱胁迫对不同作物或同种作物的不同品种影响不同[9-10],这主要归因于植物自身的适应性和抗逆性差异[11]。针对不同作物的抗旱性鉴定研究已有大量报道。王诗音等[12]利用隶属函数分析法对 9 个小麦新品系的抗旱性进行综合分析和评价,筛选出了相对发芽势和相对发芽指数作为快速鉴定小麦萌发期抗旱性的指标。李其勇等[13]依据水稻萌发相关指标与生理指标结合的方式,运用主成分分析及聚类分析将 20 个水稻品种分成了不同的 5 个抗旱类群。李春情等[14]选取 42 份新疆主栽玉米品种,利用抗旱性综合评价值及灰色关联度分析结合的方法筛选出了 3 类抗旱性不同的玉米品种及确定了丙二醛含量和叶绿素含量等作为玉米成株期抗旱性鉴定指标。彭玉琳等[15]运用 PEG 溶液模拟干旱的形式对 84 份大麦进行萌发期和苗期抗旱性鉴定,结合大麦不同生育时期运用聚类分析法筛选出了适宜当地种植的抗旱大麦品种。王瑞霞等[16]针对晋北地区主栽油菜品种进行苗期抗旱性鉴定与品种筛选,确立了与油菜抗旱性关联紧密的有光合参数、千粒重等指标,筛选出了晋油 14 号等抗旱型品种,为晋北地区油菜种植及抗旱性品种筛选提供了参考。有关谷子的抗旱性鉴定研究多集中在萌发期与苗期[17],并且鉴定指标多集中在发芽势、发芽率、萌发指数等[18],少有针对谷子苗期与成株期结合共同验证谷子抗旱性的研究。

本试验设计对照与干旱胁迫两个处理,对来自 6 个地区的 30 份不同品种谷子进行苗期抗旱品种筛选及抗旱性能分析,通过模拟试验测定谷子苗期苗长、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量、根长及叶片中脯氨酸、丙二醛、可溶性糖、叶绿素含量等指标,并结合田间测定产量及水分利用效率进行综合分析,旨在进一步明确和验证谷子抗旱指标体系,并筛选出适合当地种植的耐旱谷子品种,为提高谷子品种适应性及其综合效益提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

选取 30 个谷子品种作为试验材料,其中来自河北省 9 份,山西省 8 份,甘肃省 7 份,山东省 3 份,内蒙自治区 2 份,陕西省 1 份(表 1)。

1.2 试验设计

苗期试验于 2024 年 3 月在西北农林科技大学水土保持研究所人工气候室内进行。将 30 个不同品种谷子种子经 25% 的次氯酸钠溶液浸泡消毒 30 min,每 10 min 摇晃一次。浸泡消毒后用蒸馏水冲洗 2~3 遍,26℃ 催芽。7 d 后选取生长状况良好且长势一致的幼苗移栽至装有 Hoagland 营养液的水培箱中进行培养。每 2 d 更换一次营养液。谷子水培 23 d 后,处理组用 20% PEG-6000 溶液对幼苗模拟干旱胁迫,对照组加入等量 Hoagland 营养液,每个处理设置 3 盆重复。待供试种质表型出现差异后采集样品,用于测定相关指标。

表 1　供试谷子品种

Table 1　Varieties of tested millet

编号 Number	种质名称 Germplasm name	来源 Source	编号 Number	种质名称 Germplasm name	来源 Source
1	冀杂金苗 1 号 Jizajinmiao 1	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	16	长杂谷 466 Changzagu 466	山西谷子研究所 Shanxi Millet Research Institute
2	冀杂金苗 3 号 Jizajinmiao 3	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	17	沁州黄 Qinzhouhuang	山西省沁县 Qin County, Shanxi Province
3	冀杂金苗 4 号 Jizajinmiao 4	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	18	陇谷 10 Longgu 10	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
4	冀谷 39 Jigu 39	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	19	陇谷 11 Longgu 11	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
5	冀谷 42 Jigu 42	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	20	陇谷 12 Longgu 12	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
6	冀谷 45 Jigu 45	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	21	陇谷 23 Longgu 23	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
7	冀谷 48 Jigu 48	河北省农科院 Hebei Academy of Agricultural Sciences	22	陇谷 29 Longgu 29	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
8	张杂谷 10 Zhangzagu 10	张家口农科院 Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences	23	陇谷 32 Longgu 32	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
9	张杂谷 19 Zhangzagu 19	张家口农科院 Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences	24	良谷 Lianggu	甘肃省农科院 Gansu Academy of Agricultural Sciences
10	长农 35 Changnong 35	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	25	济谷 16 Jigu 16	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
11	长农 46 Changnong46	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	26	济谷 20 Jigu 20	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
12	晋谷 21 Jingu21	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	27	济谷 22 Jigu 22	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
13	晋谷 29 Jingu 29	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	28	鑫谷 4 Xingu 4	巴林左旗鑫达种业 Balin Left Banner Xinda Seed Industry
14	晋谷 40 Jingu 40	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	29	鑫谷 5 Xingu 5	巴林左旗鑫达种业 Balin Left Banner Xinda Seed Industry
15	长生 07 Changsheng 07	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences	30	榆谷 1 Yugu 1	榆林农科院 Yulin Academy of Agricultural Sciences

田间试验于 2023—2024 年连续两年在山西省长治市屯留区(112°52′48″E,36°19′12″N)进行,该地气候属于暖温带大陆性季风气候,2023 年和 2024 年谷子生育期内降水量分别为 324.41 mm 和 346.62 mm。试验于 5 月 10 日开始播种,10 月 3 日收获。试验采用随机区组设计,3 次重复,每个品种播种 16 行,行距 40 cm,小区面积 60 m^2(长 10 m,宽 6 m)。设置正常供水(normal irrigation, NI)和干旱胁迫(drought stress, DS)两个处理。正常供水组于拔节期与开花期补水 2 次,每次补水 40 mm 以满足谷子正常发育水分需求;干旱胁迫处理组整个生育期不进行灌水,仅靠自然降水,其他田间管理同正常供水组一致。2023 年播前土壤含水量为 26.9%,收获时正常供水组与干旱胁迫组土壤含水量分别为 17.4%与 15.5%;2024 年播前土壤含水量为 29.3%,收获时正常供水组与干旱胁迫组土壤含水量分别为 18.2%与 14.8%。播种前施用氮磷钾复合肥 450 kg · hm^{-2}(每 100 g 复合肥中含 N∶P∶K=15∶15∶15),2 个处理统一灌水,以保证苗全苗齐。

1.3　样品采集及指标测定

苗期胁迫 7 d 后采集样品,不同品种各处理选取 3 株长势一致的幼苗,将幼苗用蒸馏水清洗干净后用吸水纸擦干表面水分,测定幼苗株高和最大根长。从茎基部分离地上部与地下部,称取幼苗与根鲜质量后,将材料放入烘箱,温度调节至 105℃杀青 30 min 后 80℃烘干至恒重,称量干物质量。

不同品种各处理的幼苗冰浴研磨后进行生理指标测定[19],丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法;叶绿素含量测定采用分光光度法;可溶性糖含量测定采用苯酚法;脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法。

田间试验土壤水分含量采用烘干法进行测定。于播种前和成熟期通过打土钻采集 0~100 cm 土层的土样,分层测定 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层的土壤含水量。采集土样后立即放置铝盒中称取鲜质量,并在烘箱中于 105℃下烘 8 h 后

称取干质量。

谷子成熟后每个小区收获 4 m^2 谷穗,进行脱粒后称重计算产量。

1.4 数据处理

参考兰巨生[20]对作物抗旱性鉴定的方法进行计算与分析。

$$DC_i = \frac{X_d}{X_w} \quad (1)$$

式中,DC_i 为抗旱系数;X_d、X_w 分别表示处理组与对照组的各项指标测定值。

$$U(X_i) = (X_i - X_{i\min})/(X_{i\max} - X_{i\min}), \quad i = 1,2,\cdots,n \quad (2)$$

式中,$U(X_i)$ 为第 i 个指标的隶属函数值,X_i 表示第 i 个抗旱系数;$X_{i\min}$ 表示第 i 个抗旱系数的最小值;$X_{i\max}$ 表示第 i 个抗旱系数的最大值。

各综合指标的权重计算公式为:

$$W_i = P_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} P_I \quad (3)$$

式中,P_i 为第 i 个指标的贡献率;P_I 为 P_i 的累积值。

各供试谷子品种抗旱性综合评价值(D)计算公式为:

$$D = \sum_{i=1}^{n} [U(X_i)\ W_i] \quad i = 1,2,3,\cdots,n \quad (4)$$

$$ET = I + P + \Delta S \quad (5)$$

式中,ET 为谷子生育期总耗水量(mm);I 为灌溉量;P 为降雨量;ΔS 为 0~100 cm 土层中谷子播种前及收获时测定土壤贮水量的变化情况。

$$WUE = Y/ET \quad (6)$$

式中,WUE 为水分利用效率($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$);$Y$ 为籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$),;ET 为谷子生育期总耗水量(mm)。

使用 JASP(版本 0.16.4.0)计算 Cohen's d 及其置信区间。采用 Microsoft Office Excel 2016、IBM SPSS Statistics(版本 25)、Origin 2024(来自美国 Northampton)、GraphPad Prism 9 以及 R 语言(版本 4.3.3)完成数据分析和图像可视化工作。

2 结果与分析

2.1 供试谷子品种苗期生长生理指标差异分析

不同品种谷子对照组与干旱胁迫组各测定指标均存在显著差异(表 2)。不同品种谷子各指标测定值的变异系数为 0.18~0.62,说明本次选取的试验材料来源广泛且各指标对干旱胁迫反应敏感,具有较好的代表性。与对照组相比,干旱处理组的形态指标测定值均有下降趋势,下降幅度排序为:地下部鲜质量(60.14%)>地上部鲜质量(54.99%)>地下部干质量(42.82%)>地上部干质量(38.54%)>苗长(26.97%)>根长(20.90%);干旱处理组的生理指标测定值除叶绿素含量外均有上升趋势,上升幅度排序为:脯氨酸含量(448.13%)>可溶性糖含量(224.26%)>丙二醛含量(114.80%),干旱胁迫对谷子苗期的生长产生了显著的负面影响,并且不同种质在应对干旱胁迫时的生理响应存在差异。因此,基于初步分析,所选的相关性状均适合作为抗旱性鉴定的指标。

表 2 干旱胁迫和对照处理下供试谷子各测定指标差异分析

Table 2 Analysis of differences in measured indicators of tested foxtail millet under drought stress and control conditions

指标 Indicator	苗长 *SL*/cm		根长 *RL*/cm		地上部鲜质量 *AFW*/g		地上部干质量 *ADW*/g		地下部鲜质量 *BFW*	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS
均值 Mean	20.42**(A)	14.91**(B)	17.03**(A)	13.47**(B)	2.98**(A)	1.34**(B)	0.29**(A)	0.18**(B)	0.60**(A)	0.24**(B)
标准误差 *SE*	0.45	0.37	0.32	0.25	0.09	0.06	0.01	0.01	0.02	0.01
变异系数 *CV*	0.21	0.24	0.18	0.18	0.28	0.43	0.34	0.42	0.33	0.53
降幅 Reduction/%	26.97		20.90		54.99		38.54		60.14	

指标 Indicator	地下部干质量 *BDW*/g		叶绿素 *Chl*/(mg·g^{-1})		丙二醛 *MDA*/(mmol·g^{-1})		可溶性糖 *SS*/(mg·g^{-1})		脯氨酸 *Pro*/(ug·g^{-1})	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS
均值 Mean	0.04*(A)	0.02**(B)	32.48**(A)	22.47**(B)	17.79**(A)	38.22**(B)	3.44**(A)	11.16**(B)	43.24*(A)	236.99**(B)
标准误差 *SE*	0.00	0.00	0.65	0.74	0.35	1.19	0.11	0.26	1.01	9.33
变异系数 *CV*	0.62	0.43	0.19	0.31	0.19	0.30	0.30	0.22	0.22	0.37
降幅 Reduction/%	42.82		30.80		−114.80		−224.26		−448.13	

注:**表示不同品种间差异达 $P<0.01$ 显著水平;*表示不同品种间差异达 $P<0.05$ 显著水平;不同大写字母表示各性状在干旱处理和正常灌溉间差异达 $P<0.01$ 显著水平。

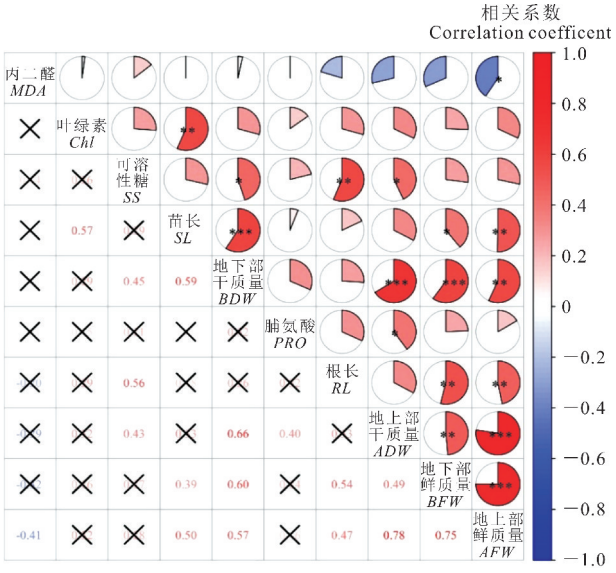
Note: ** indicates significant differences between varieties at the $P<0.01$ level; * indicates significant differences between varieties at the $P<0.05$ level; different uppercase letters indicate significant differences between drought treatment and normal irrigation for each trait at the $P<0.01$ level.

2.2　供试谷子品种苗期抗旱系数的相关性分析

对测定的各指标抗旱系数进行相关性分析结果表明(图 1),谷子丙二醛含量与地上部鲜质量显著负相关;叶绿素含量与苗长显著正相关;可溶性糖含量与地下部干质量、脯氨酸含量、地上部干质量显著正相关;苗长与地下部干质量、地下部鲜质量、地上部鲜质量显著正相关;地下部干质量与地上部干质量、地下部鲜质量、地上部鲜质量显著正相关;根长与地上部干质量显著正相关;脯氨酸含量与地上部鲜质量和地下部鲜质量显著正相关;地上部干质量与地上部鲜质量和地下部鲜质量显著正相关;地下部鲜质量与地上部鲜质量显著正相关。地上部鲜质量与地下部鲜质量的相关系数最大(0.78),丙二醛含量与苗长的相关系数最小(0.005)。

2.3　供试谷子品种苗期抗旱指标体系的主成分分析

在不同测定指标的基础上对各指标抗旱系数进行主成分分析(表 3)。特征值大于 1.629 的因子共有 4 个,提取这 4 个因子形成新的独立综合指标(F1、F2、F3、F4)。F1、F2、F3、F4 的贡献率分别为 42.493%、14.192%、11.974%、10.040%。4 个独立综合指标累计贡献率达到了 78.7%,说明上述 4 个综合指标已涵盖了原始数据的主要信息,可以采用这 3 个综合指标来替代原有的单一指标,作为数据分析的有效成分。F1 主要在苗长和叶绿素含量上有较高载荷量;F2 主要在地上部鲜质量与地下部鲜质量上有较高载荷量;F3 主要在根长与地上部干质量上有较高载荷量;F4 主要在可溶性糖含量和脯氨酸含量上有较高载荷量。



注:* * * 表示不同性状相关性达 $P<0.001$ 显著水平;* * 表示不同性状相关性达 $P<0.01$ 显著水平;* 表示不同性状相关性达 $P<0.05$ 显著水平;×表示两个性状无显著相关性。

Note: * * * indicates a significant correlation between different traits at the $P<0.001$ level; * * indicates a significant correlation between different traits at the $P<0.01$ level; * indicates a significant correlation between different traits at the $P<0.05$ level; × indicates no significant difference.

图 1　供试谷子各性状抗旱系数相关性

Fig.1　Correlation of drought resistance coefficients in tested millet

2.4　供试谷子品种苗期抗旱性综合评价

依据主成分分析 4 个综合因子的得分值运用权重隶属函数计算出谷子抗旱性综合评价值。参试谷子的 D 值介于 0.307~0.842 之间,说明不同基因型的谷子抗旱性存在差异(表 4)。其中陇谷 11、张杂谷 10、陇谷 12、张杂谷 19 的 D 值均大于 0.7,分别为 0.842、0.808、0.738、0.707。济谷 20、晋谷 21、长杂谷 466、长农 35 的 D 值均小于 0.4,分别为 0.380、0.371、0.363、0.307。综合抗旱性评价结果表明陇谷 11 与张杂谷 10 在苗期表现出极强的抗旱性,长农 35 综合抗旱指数最小(0.307),抗旱性极弱。

2.5　供试谷子品种 D 值灰色关联度分析

结合关联系数对各测定指标进行灰色关联度分析计算出关联度值(表 5)。各测定指标的抗旱系数与抗旱性综合评价值的关联度介于 0.796~0.646 之间,关联度超过 0.77 的 5 个指标分别为苗长、地下部干质量、叶绿素含量、地上部鲜质量、地上部干质量,其中与综合评价值关联性最强的指标是苗长,关联性最弱的为丙二醛含量。

表 3　主成分分析因子载荷矩阵和贡献率

Table 3　Principal component analysis (PCA) factor loading matrix and contribution rates

性状 Trait	因子载荷 Factor loading			
	F1	F2	F3	F4
苗长 *SL*	0.507	−0.054	−0.130	−0.134
根长 *RL*	−0.287	−0.146	0.623	0.022
地上部鲜质量 *AFW*	0.117	0.317	0.027	−0.065
地上部干质量 *ADW*	0.005	0.118	0.375	−0.141
地下部鲜质量 *BFW*	0.045	0.266	0.025	0.053
地下部干质量 *BDW*	0.209	−0.090	0.380	−0.214
叶绿素 *Chl*	0.389	−0.087	−0.247	0.151
丙二醛 *MDA*	0.169	−0.576	0.170	0.045
可溶性糖 *SS*	0.018	−0.215	0.005	0.521
脯氨酸 *Pro*	−0.150	0.113	−0.201	0.674
特征根 Eigenvalue	2.286	2.009	1.846	1.629
贡献率 Contribution/%	42.493	14.192	11.974	10.040
累积贡献率 Cumulative contribution/%	42.493	56.685	68.659	78.699
因子权重 *WC*	0.294	0.258	0.237	0.209

表4 供试谷子品种抗旱性评价 D 值及排序

Table 4 Drought resistance evaluation D values and ranking of tested millet varieties

编号 Number	主成分综合因子得分值 Score value of comprehensive factor of principal components				主成分综合因子隶属值 Membership value of comprehensive factor of principal components				D 值 D value	排序 Rank
	F1	F2	F3	F4	μ(F1)	μ(F2)	μ(F3)	μ(F4)		
1	−0.221	1.107	0.235	1.289	0.536	0.855	0.495	0.827	0.670	6
2	1.247	1.278	−0.201	0.409	0.955	0.901	0.399	0.618	0.738	3
3	1.217	1.348	0.214	2.015	0.946	0.920	0.491	1.000	0.842	1
4	0.497	1.484	1.001	1.520	0.741	0.957	0.665	0.882	0.808	2
5	0.321	1.644	0.654	−0.258	0.690	1.000	0.588	0.459	0.698	5
6	1.331	0.203	−1.339	−0.857	0.978	0.611	0.147	0.317	0.547	12
7	−1.972	0.074	−0.531	1.640	0.036	0.576	0.326	0.911	0.428	23
8	−1.797	−0.198	−0.772	−0.443	0.086	0.503	0.272	0.416	0.307	30
9	0.560	0.971	0.687	0.435	0.758	0.818	0.595	0.624	0.707	4
10	−1.434	−0.626	−1.009	1.262	0.190	0.387	0.220	0.821	0.380	27
11	−1.141	0.508	−0.153	−1.206	0.273	0.693	0.410	0.234	0.406	26
12	−0.389	−0.462	1.023	1.018	0.488	0.431	0.670	0.763	0.574	9
13	1.406	−2.009	−0.976	1.162	1.000	0.014	0.227	0.797	0.519	16
14	−0.262	−0.482	1.700	0.368	0.524	0.426	0.819	0.608	0.586	7
15	0.250	−0.747	0.447	−0.168	0.670	0.354	0.542	0.481	0.518	17
16	−1.264	0.200	−0.562	0.198	0.238	0.610	0.319	0.568	0.423	24
17	−2.098	0.106	0.546	−0.471	0.000	0.585	0.564	0.409	0.371	28
18	0.160	0.988	−2.004	−0.562	0.644	0.823	0.000	0.387	0.483	20
19	−0.033	1.213	1.151	−2.190	0.589	0.884	0.698	0.000	0.568	10
20	0.608	0.529	−0.838	−1.520	0.772	0.699	0.258	0.159	0.503	18
21	0.652	−0.047	0.044	−0.529	0.785	0.543	0.453	0.395	0.562	11
22	0.944	−1.731	−0.554	0.350	0.868	0.088	0.321	0.604	0.481	21
23	0.947	−0.412	−1.141	0.122	0.869	0.445	0.191	0.550	0.531	15
24	0.901	−0.680	0.337	−0.017	0.856	0.372	0.518	0.517	0.579	8
25	0.521	−2.059	2.516	−0.486	0.747	0.000	1.000	0.405	0.542	14
26	0.378	0.267	0.523	−1.324	0.707	0.628	0.559	0.206	0.546	13
27	−0.893	−0.394	0.425	0.095	0.344	0.450	0.537	0.544	0.459	22
28	0.022	−0.256	0.000	−0.663	0.605	0.487	0.443	0.363	0.485	19
29	−0.178	−0.682	−1.707	−0.389	0.548	0.372	0.066	0.428	0.363	29
30	−0.279	−1.136	0.284	−0.798	0.519	0.249	0.506	0.331	0.407	25

表5 抗旱性综合评价灰色关联度排序

Table 5 Gray relational analysis ranking for comprehensive evaluation of drought resistance

指标 Indicator	关联度 γ_D	权重系数 Weight coefficient	关联度排序 Correlation ranking
苗长 *SL*	0.796	0.1050	1
根长 *RL*	0.765	0.1009	6
地上部鲜质量 *AFW*	0.782	0.1032	4
地上部干质量 *ADW*	0.775	0.1023	5
地下部鲜质量 *BFW*	0.763	0.1007	7
地下部干质量 *BDW*	0.795	0.1049	2
叶绿素 *Chl*	0.788	0.1040	3
丙二醛 *MDA*	0.646	0.0850	10
可溶性糖 *SS*	0.744	0.0980	8
脯氨酸 *Pro*	0.722	0.0950	9

2.6 供试谷子品种苗期抗旱性聚类分析

依据谷子抗旱性综合评价值对参试谷子品种进行聚类分析,在 $\lambda=5$ 处可将参试谷子分为4个不同的类别(图2)。高度抗旱型主要包括陇谷12、陇谷32、张杂谷19、陇谷10,共计4个品种;中等抗旱型包括张杂谷10和陇谷11,共计2个品种;一般抗旱型包括冀谷45、长农46、冀谷48、冀杂金苗1号、陇谷23、鑫谷5、冀谷39、济谷22、冀杂金苗4号、冀杂金苗3号、冀谷42、鑫谷4、晋谷40、长生07、榆谷1、济谷16,共计16个品种。干旱敏感型包括长农35、晋谷29、陇谷29、沁州黄、良谷、济谷20、长杂谷466、晋谷21,共计8个品种。

2.7 供试谷子品种苗期抗旱指标筛选

依据谷子抗旱性综合评价值与抗旱系数值进行逐步回归分析,将各测定指标的抗旱系数作为自变量,抗旱性综合评价值作为因变量建立谷子抗旱性指标筛选的回归方程。根据回归分析建立的最优多元逐步回归方程为:

$$Y = 0.022 + 0.322X_1 + 0.348X_2 + 0.203X_3 + 0.012X_4 - 0.02X_5$$

回归方程的 R^2 值达到了0.978,并且各自变量

代表的测定指标显著性检验 P 值均小于 0.01,说明谷子抗旱指标筛选的回归方程最优,模型拟合程度良好,预测准确性较高。回归方程中的 X_1 代表地上部鲜质量;X_2 代表地下部干质量;X_3 代表叶绿素含量;X_4 代表脯氨酸含量;X_5 代表丙二醛含量,回归方程筛选的 5 个指标在谷子苗期抗旱性鉴定中具有十分重要的意义,可以作为谷子苗期抗旱性鉴定筛选的指标,使谷子苗期抗旱性鉴定更为便捷。

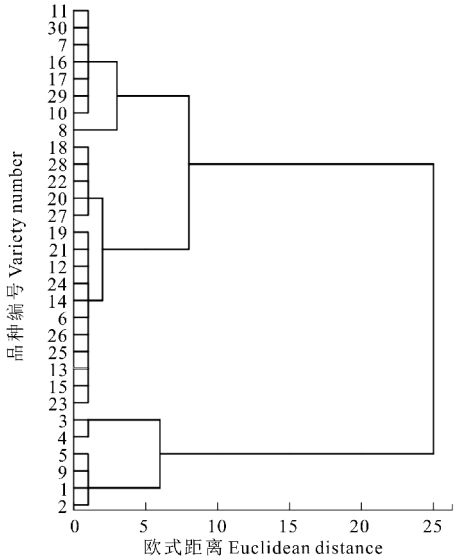


图 2　供试谷子抗旱性评价值聚类分析

Fig.2　Cluster analysis of drought resistance evaluation values for tested millet varieties

2.8　供试谷子品种田间产量及水分利用效率分析

2023 年及 2024 年在干旱胁迫条件下不同品种谷子产量相对于正常灌溉均有下降(图 3),两年间不同品种和不同处理间谷子的产量均存在显著差异(P<0.01)。2023 年谷子在正常灌溉下的平均产量为 4 868 kg · hm^{-2},干旱胁迫下的平均产量为 3 695 kg · hm^{-2},产量下降幅度最大的品种为鑫谷 4(54.17%),下降幅度最小的品种为陇谷 32(2.50%)。2024 年谷子在正常灌溉下的平均产量为 4 082 kg · hm^{-2},干旱胁迫下的平均产量为 3 179 kg · hm^{-2},产量下降幅度最大的品种为长杂谷 466(47.47%),下降幅度最小的品种为张杂谷 19(0.25%)。苗期高度抗旱的 4 个品种在田间试验时有不同表现,干旱胁迫条件下,张杂谷 19 和陇谷 32 产量平均降幅较小,不超过 10%,且张杂谷 19 两年间产量均高于平均产量,在 30 个品种谷子中位于前 10%。陇谷 10 和陇谷 12 产量平均降幅较大,其中陇谷 10 产量降幅达到了 25%,且两年间在不同处理下的产量均低于平均产量,说明在谷子不同生育时期抗旱性存在差异,苗期抗旱性强的陇谷 32 与张杂谷 19 在成株期仍有较强抗旱性,而陇谷 10 与陇谷 12 仅在苗期抗旱性较强,在成株期对干旱胁迫较为敏感,产量降幅较大。

两年间不同品种谷子的水分利用效率均存在显著差异(图 4)(P<0.01)。2023 年谷子在正常灌

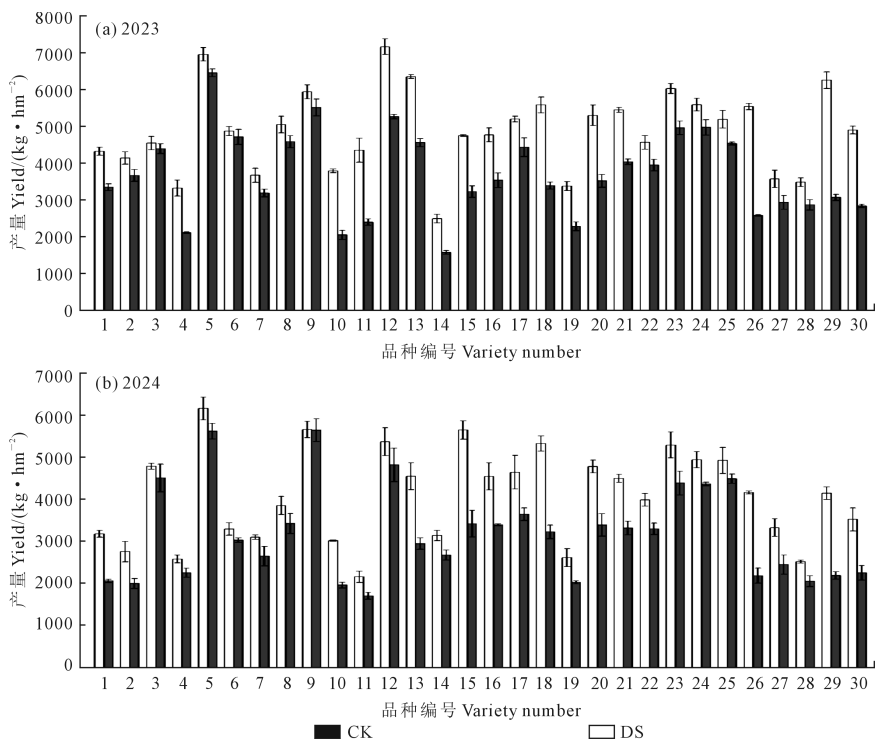


图 3　2023 年和 2024 年不同品种谷子产量

Fig.3　Yield of different millet varieties in 2023 and 2024

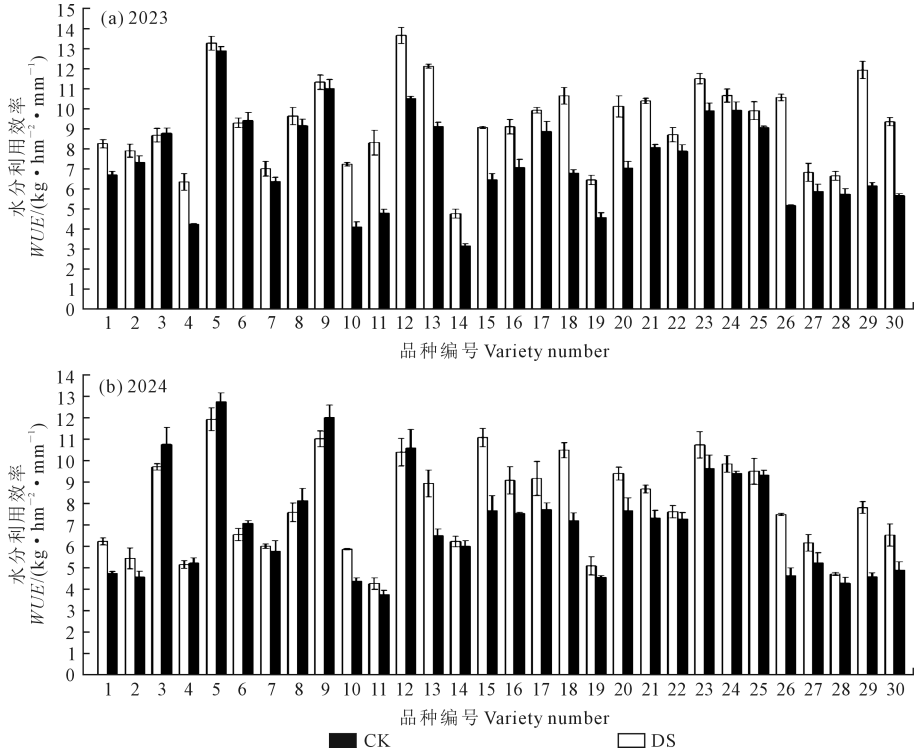


图 4 2023 年和 2024 年不同品种谷子水分利用效率

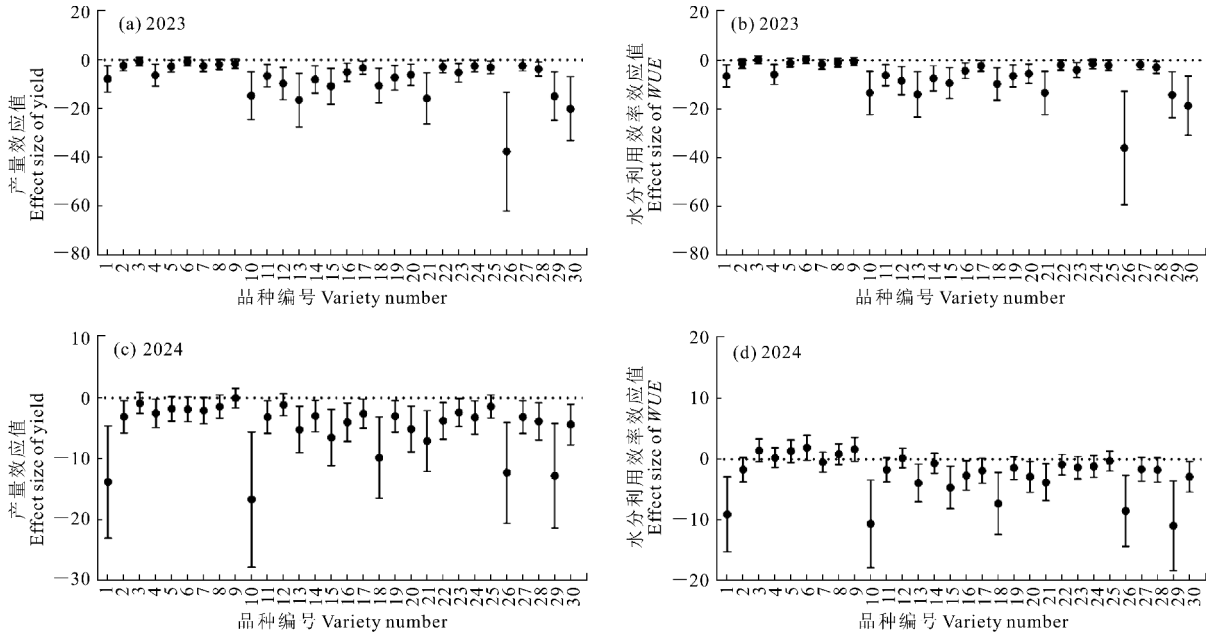
Fig.4 Water use efficiency of different millet varieties in 2023 and 2024

溉下的水分利用效率为 9.32 kg·hm^{-2}·mm^{-1},干旱胁迫下的水分利用效率为 7.39 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。水分利用效率下降幅度最大的品种为长杂谷 466(48.57%),下降幅度最小的品种为晋谷 40(-1.28%)。2024 年谷子在正常灌溉下的水分利用效率为 7.96 kg·hm^{-2}·mm^{-1},干旱胁迫下水分利用效率为 7.12 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。

不同品种谷子两年间在干旱胁迫条件下产量的效应值均小于 0(图 5),说明干旱胁迫对谷子产量的影响呈负效应。2023 年,陇谷 29、陇谷 32、张杂谷 19、晋谷 40、长农 35 共 5 个品种效应值较高;2024 年,张杂谷 19、陇谷 32、济谷 22、冀谷 42、良谷共 5 个品种效应值较高。不同品种谷子在干旱胁迫条件下水分利用效率的效应值 2023 年均小于 0,其中效应值较高的品种有陇谷 12、陇谷 32、张杂谷 10、晋谷 40、长农 35、张杂谷 19、冀谷 48;2024 年有部分品种的效应值超过 0,共有 6 个品种,分别为陇谷 32、陇谷 10、张杂谷 10、晋谷 40、长农 35、张杂谷 19。

3 讨 论

植物在应对干旱胁迫时的反应机理极为复杂,利用单一指标难以全面评估植物耐旱性。因此,需要综合考虑多个指标并结合多变量分析方法评价植物的耐旱性[21-22]。本研究发现干旱胁迫对谷子各指标均有显著影响(表 2),其中苗长、根长、地上部鲜质量、地上部干质量、地下部鲜质量、地下部干质量和叶绿素含量呈下降趋势,而丙二醛、可溶性糖和脯氨酸在干旱胁迫条件下有所上升,这与前人的研究一致[23]。这是由于干旱胁迫通过抑制水分吸收、限制光合作用、干扰激素平衡和加速叶绿素降解等多种途径,导致植物苗长、鲜质量、干质量和叶绿素含量下降[24-25]。丙二醛、脯氨酸、可溶性糖含量上升是植物通过渗透调节、保护酶系统和细胞结构、提供能量和抗氧化保护来适应干旱胁迫的表现[26-27]。这些变化直接影响作物的生长发育和产量形成,是干旱胁迫对作物造成显著负面影响的重要表现[28]。不同指标对于干旱胁迫的敏感度存在一定差异,降幅在-448.0%~60.4%之间,说明脯氨酸、可溶性糖和丙二醛含量对干旱胁迫较为敏感,是因为它们直接参与到植物对干旱胁迫的初期响应中,反映了植物的即时调整和适应机制[29]。相比之下,苗长、根长、植株干鲜质量等形态指标则更多地反映了长期的环境影响和生理状态的累积效应[30]。经过相关性分析表明各独立指标间存在着一定的相关关系,但存在着大量的重叠信息,难以筛选鉴定谷子抗旱性的关键指标。本研究利用主成分分析划分出了 4 个独立的新综合指标来替代原有的 10 个指标,通过对主成分的评分确立了综合抗



注:图中展示了不同谷子品种干旱处理的效应均值±95%置信区间。虚线表示效应值为零,当95%置信区间不包含零时,认为干旱效应具有统计学意义。

Note:The figure shows the ±95% confidence interval of the mean effect of drought treatment for different millet varieties. The dotted line indicates that the effect value is zero. When the 95% confidence interval does not contain zero, the drought effect is considered statistically significant.

图 5　干旱胁迫与正常灌水条件下供试谷子产量与水分利用效率的效应值

Fig.5　Yield and water use efficiency of tested millet varieties under drought stress and normal irrigation conditions

旱指数 *D* 值来作为评价谷子抗旱性的综合指标[31]。本研究依据 *D* 值的灰色关联度分析表明了各测定指标与抗旱度关联大小依次为苗长、地下部干质量、叶绿素含量、地上部鲜质量、地上部干质量、根长、地下部鲜质量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、丙二醛含量。前人的研究多集中于对形态指标或生理指标进行单独分析[32],本研究综合形态指标与生理指标通过进一步利用 *D* 值与各指标抗旱系数的关系建立逐步回归方程进行分析,结果表明与谷子抗旱性有关的核心指标为地上部鲜质量、地下部干质量、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量(表 5)。综上,谷子地上部鲜质量、地下部干质量、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量可以作为衡量不同品种谷子的抗旱能力的关键指标。

作物抗旱性的鉴定较为复杂,前人的研究多集中在利用平均隶属函数或是等价权重的分析方法[33],为了更准确评估作物的抗旱性,必须有效结合不同权重的指标与评价方法。综合评价方法能提供更加精确的结果,确保对作物在干旱条件下的表现有全面了解[34]。本研究利用主成分分析结合权重隶属函数分析的方法计算出了综合抗旱指数 *D* 值来区分不同基因型谷子抗旱性强弱,依据聚类分析将 30 份不同基因型谷子划分为 4 类抗旱性不同的种质资源,其中抗旱性最强的品种包括来自甘肃的陇谷 10、陇谷 12、陇谷 32 和来自河北的张杂谷 19。同种作物不同生育时期的抗旱性表现存在着一定差异。本研究不仅针对谷子苗期进行抗旱性评价,还进一步结合田间试验来综合评价 30 份不同基因型谷子的抗旱性。田间试验结果表明,不同品种谷子两年间在干旱胁迫条件下产量的效应值均小于 0(图 5),干旱胁迫导致所有品种谷子产量均呈下降趋势。这是由于干旱条件下谷子根系无法从土壤中吸收足够水分,导致谷子整体水分亏缺,影响光合作用及营养物质转运[35],干旱胁迫还会引起植株生理代谢紊乱,影响有机物质的积累,导致谷子产量下降[36]。在干旱胁迫条件下,陇谷 32 与张杂谷 19 在两年的田间试验中产量和水分利用效率相较于其他品种均有较高的效应值,与苗期高度抗旱的陇谷 10 和陇谷 12 两个品种相比,陇谷 32 与张杂谷 19 仍具有高产的特性且水分利用效率均高于陇谷 10 与陇谷 12。说明陇谷 32 与张杂谷 19 在田间应对干旱胁迫时有良好的表现。综上,本研究利用苗期初步筛选与田间试验验证的方式,筛选出张杂谷 19 与陇谷 32 两份在苗期与成株期均具极强抗旱性的谷子品种,可作为当地大面积推广种植的高产抗旱品种。

4 结 论

干旱胁迫条件下,不同品种谷子各指标测定值与对照组相比均存在显著差异。通过逐步回归分析建立回归方程($R^2=0.978$),优化了谷子苗期抗旱性鉴定指标体系,筛选出与谷子苗期抗旱性关联密切的地上部鲜质量、地下部干质量、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量5个指标作为评价谷子苗期抗旱性强弱的依据。通过苗期D值综合排序与聚类分析筛选出4个抗旱性极强的品种,分别为陇谷32(0.842)、陇谷10(0.808)、陇谷12(0.738)、张杂谷19(0.707)。依据田间产量结合水分利用效率分析,陇谷32与张杂谷19两年间干旱胁迫条件下产量降幅不超过10%且水分利用效率均超过陇谷10和陇谷12,最终对比筛选出陇谷32和张杂谷19两份适合在山西推广种植的高产抗旱品种。

参 考 文 献:

[1] 贾冠清, 刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 653-665.
JIA G Q, DIAO X M. Chinese academy of agricultural sciences institute of crop sciences.current status and perspectives of innovation studies related to foxtail milletseed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(4): 653-665.

[2] PANT S R, IRIGOYEN S, DOUST A N, et al. Setaria: a food crop and translational research model for C4 grasses[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1885.

[3] 刁现民. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 3943-3949.
DIAO X M.Progresses in stress tolerance and field cultivation studies of orphan cereals in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 3943-3949.

[4] YANG Z R, ZHANG H S, LI X K, et al. A mini foxtail millet with an arabidopsis-like life cycle as a C4 model system[J]. Nature Plants, 2020, 6(9): 1167-1178.

[5] 赵方洋, 曹红霞, 马丽娜, 等. 补充灌溉对黄土高原谷子生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 44-53, 84.
ZHAO F Y, CAO H X, MA L N, et al. Effects of supplementary irrigation on growth,yield,and water use efficiency of millet in the loess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 44-53, 84.

[6] 刘天鹏, 何继红, 董孔军, 等. 敦煌绿洲区覆膜补灌对谷子光合特性农艺性状及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 68-73.
LIU T P, HE J H, DONG K J, et al. Effect of supplemental irrigation on photosynthetic characteristics, agronomic traits and yield of foxtail millet under condition of film mulching in Dunhuang oasis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(2): 68-73.

[7] 王颖, 李会霞, 田岗, 等. 山西谷子生产问题及改进措施[J]. 中国种业, 2024, (12): 46-48, 55.
WANG Y, LI H X, TIAN G, et al. Problems and improvement measures of foxtail millet production in Shanxi province[J]. China Seed Industry, 2024, (12): 46-48, 55.

[8] 赖金莉, 李欣欣, 薛磊, 等. 植物抗旱性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 23-27.
LAI J L, LI X X, XUE L, et al. Research progress in plant drought tolerance[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 23-27.

[9] 陶媛, 张倩, 何亚玲, 等. 宁夏春小麦品种产量及品质性状的抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 14-24.
TAO Y, ZHANG Q, HE Y L, et al. Dorught resistance evaluation of yield and quality traits of spring wheat varieties in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 14-24.

[10] 师晓蓉. 水分胁迫对草莓生长、产量品质和水分利用效率的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2023.
SHI X R. Effects of water stress on growth, yield and quality and water use efficiency of strawberry[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2023.

[11] 张文英, 黄建明, 尉文彬. 我国谷子抗旱性研究进展[J].安徽农业科学, 2013, 41(4): 1469-1470.
ZHANG W Y, HUANG J M, WEI W B. Research Progress on Drought Resistance of *Setariaitalica* in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(4): 1469-1470.

[12] 王诗音, 李增辉, 吴冰瑞, 等. PEG胁迫下小麦新品系萌发期抗旱性鉴定[J]. 山东农业科学, 2024, 56(10): 43-48.
WANG S Y, LI Z H, WU B R, et al. Drought resistance identification of new wheat lines at germination stage under PEG stress[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(10): 43-48.

[13] 李其勇, 朱从桦, 李星月, 等. 水稻芽期抗旱性综合评价及鉴定指标鉴选[J]. 西北农业学报, 2023, 32(1): 18-32.
LI Q Y, ZHU C H, LI X Y, et al. Comprehensive evaluation and identification index of drought resistance at germination stage of rice[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2023, 32(1): 18-32.

[14] 李春情, 屈用函, 农全东, 等. 基于主成分和聚类分析的云南文山典型石漠化区土壤肥力分析[J]. 中国农学通报, 2024, 40(1): 66-72.
LI C Q, QU Y H, NONG Q D, et al. Evaluation ofsoil fertility in typical rocky desertification area in Wenshanof Yunnan based on principal component and cluster analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(1): 66-72.

[15] 彭玉琳, 崔晓漫, 张沥曼玲, 等. 不同生育期大麦抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(8): 36-48, 59.
PENG Y L, CUI X M, ZHANG L M L, et al. Identification of drought resistance and selection of drought resistance indicators in barley at different growth periods[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2024, 52(8): 36-48, 59.

[16] 王瑞霞, 李小玉, 田宏先. 晋北区芥菜型油菜抗旱性鉴定及综合抗旱指标筛选[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(11): 42-51.
WANG R X, LI X Y, TIAN H X. Drought resistance identification and comprehensive drought resistance index screening of rapeseed (*Brassica juncea* L.) in North Shanxi[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(11): 42-51.

[17] 白玉. 谷子萌发期和苗期抗旱性研究及抗旱鉴定指标的筛选[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
BAI Y. Study on drought resistance and screening of drought resistance identification indexes in foxtail millet at germination stage and seedling stage[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009.

[18] 熊雪, 郎万鑫, 王春芳, 等. 不同谷子品种萌发期抗旱性综合评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 93-97.
XIONG X, LANG W X, WANG C F, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of different millet cultivars at germination stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(23): 93-97.

[19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 130-138.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press , 2000: 130-138.

[20] 兰巨生, 胡福顺, 张景瑞. 作物抗旱指数的概念和统计方法[J]. 华北农学报, 1990, (2): 20-25.
LAN J S, HU F S, ZHANG J R. The concept and statistical method of drought resistance index in crops[J]. ActaAgriculturaeBoreali-Sinica, 1990, (2): 20-25.

[21] 张靖. 水稻 Xa5 和 ROS1a 基因在控制细菌性条斑病抗性中的作用分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
ZHANG J. Analysis of the roles of Xa5 and ROS1a genes in the control of resistance to bacterial leaf streak in rice[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.

[22] 陈娇, 甘露, 罗兰, 等. 粘糯杂交后代主要农艺性状遗传变异及相关性和主成分分析[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(6): 33-35, 38.
CHEN J, GAN L, LUO L, et al. Genetic variation and correlation analysis of main agronomic traits in hybrid offspring of glutinous×non-glutinous[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(6): 33-35, 38.

[23] 秦岭, 杨延兵, 陈二影, 等. 不同生态区主要育成谷子品种苗期抗旱性鉴定[J]. 山东农业科学, 2016, 48(6): 28-31.
QIN L, YANG Y B, CHEN E Y, et al. Evaluation on drought tolerance of foxtail millet cultivars developed from different ecological regions[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(6): 28-31.

[24] 曾松, 欧静, 田奥, 等. 干旱胁迫对马缨杜鹃生长和光合生理特征的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(12): 2670-2677.
ZENG S, OU J, TIAN A, et al. Effects of drought stress on growth and photosynthetic physiological characteristics of Rhododendron delavayi[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2023, 36(12): 2670-2677.

[25] 李雪, 陈舟, 孙子钦, 等. 耦合发酵全元有机无机复合肥对小白菜生长及土壤养分的影响[J]. 肥料与健康, 2023, 50(6): 41-46, 52.
LI X, CHEN Z, SUN Z Q, et al. Effects of coupling fermentation of-complete-nutrient organic-inorganic compound fertilizers on the growth of pakchoi and soil nutrients[J]. Fertilizer&Health, 2023, 50(6): 41-46, 52.

[26] 王云梅, 夏惠, 周桂虹, 等. 外源褪黑素和脱落酸对干旱胁迫下葡萄生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 105-111.
WANG Y M, XIA H, ZHOU G H, et al. Effects of exogenous melatonin and abscisic acid on physiological characteristics of grape seedlings under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 105-111.

[27] 王贺正, 黄明, 张均, 等. 秸秆覆盖量对旱地小麦结实期抗氧化性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(11): 96-104.
WANG H Z, HUANG M, ZHANG J, et al. Effects of different quantities of straw mulch on oxidation resistance of dryland wheat at the grain-filling stage [J]. ActaPrataculturaeSinica, 2019, 28(11): 96-104.

[28] ZHANG H, LIU S, REN T, et al. Crucial abiotic stress regulatory network of NF-Y transcription factor in plants [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(5): 13.

[29] 苗青霞, 方燕, 陈应龙. 小麦根系特征对干旱胁迫的响应[J]. 植物学报, 2019, 54(5): 652-661.
MIAO Q X, FANG Y, CHEN Y L. Studies in the responses of wheat root traits to drought stress[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2019, 54(5): 652-661.

[30] 曲涛. 无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)的抗旱性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
QU T. Drought tolerance of *Cleistogenessongorica* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.

[31] 邵欢欢, 陆平, 史梦莎, 等. 黍稷芽、苗期抗旱性评价及抗旱资源鉴定[J]. 分子植物育种, 2021, 19(4): 1284-1296.
SHAO H H, LU P, SHI M S, et al. Evaluation and identification of broomcorn millet resources for drought resistance at germination and seedling stages [J]. MolecularPlant Breeding, 2021, 19(4): 1284-1296.

[32] 高亚宁, 轩正英, 张凯浩, 等. 干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 127-133.
GAO Y N, XUAN Z Y, ZHANG K H, et al. Effects of drought stress on physiological traits of different drought-resistant turnip seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 127-133.

[33] 段敏敏. 新疆野生狗牙根种质抗旱性鉴定及抗旱生理的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
DUAN M M. Evaluationof drought resistance and physiological response of Xingjiangwild bermudagrass germplasm [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.

[34] 姚玉波, 于莹, 赵东升, 等. 不同玉米自交系萌发期抗旱性鉴定[J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 79-85.
YAO Y B, YU Y, ZHAO D S, et al. Drought resistance identification of different maize inbred lines at germination stage[J]. Journal of Maize Science, 2020, 28(1): 79-85.

[35] 杨小霞, 严加坤. 干旱胁迫对不同年代谷子苗期根系表型的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(7): 24-32.
YANG X X, YAN J K. Yulin university college of life science.effects of drought stress on root phenotype of foxtail millet seedlings of varieties of different decades[J]. ChineseAgricultural Science Bulletin, 2023, 39(7): 24-32.

[36] 邵疆, 赵云, 胡相伟, 等. 不同时期干旱胁迫对谷子产量及干物质积累的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(10): 2388-2395.
SHAO J, ZHAO Y, HU X W, et al. Effects of drought stress on foxtail millet yield and dry matter accumulation in different periods[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(10): 2388-2395.