



秦娜,秦家范,朱灿灿,代书桃,付森杰,景雅,王春义,李君霞,张程炀,李孟卓. 不同基因型谷子对花期干旱胁迫的生理响应及耐旱性综合评价[J]. 中国农业大学学报,2026,31(04):13-28.

QIN Na, QIN Jiafan, ZHU Cancan, DAI Shutao, FU Senjie, JING Ya, WANG Chunyi, LI Junxia, ZHANG Chengyang, LI Mengzhuo. Physiological responses and comprehensive drought resistance evaluation of diverse foxtail millet (*Setaria italica*) genotypes during flowering under drought stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(04): 13-28.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.02

不同基因型谷子对花期干旱胁迫的生理响应及耐旱性综合评价

秦娜¹ 秦家范² 朱灿灿¹ 代书桃¹ 付森杰¹ 景雅¹ 王春义¹
李君霞^{1*} 张程炀¹ 李孟卓³

(1. 河南省农业科学院 粮食作物研究所, 郑州 450002;

2. 洛阳市农林科学院, 河南 洛阳 471023;

3. 河南农业大学 林学院, 郑州 450002)

摘要 为探究干旱胁迫对谷子花期生长及耐旱性的影响,以26个不同基因型谷子品种为材料,在抽穗开花期设置正常供水(60%的田间持水量,CK)和干旱胁迫(30%~35%的田间持水量,DS)2个处理,测定开花期的生理指标及成熟期产量性状的变化,并基于产量耐旱指数评价品种的耐旱性。结果表明:与CK相比,DS处理显著降低了各品种的叶绿素含量、光合速率(P_n)、PSII最大光化学效率(F_v/F_m)及最大光能转化潜力(F_v/F_0);‘郑谷678’的叶绿素含量、 P_n 和 F_v/F_m 降幅最小,分别为30.0%、3.3%和1.9%;‘豫谷27’和‘豫谷101’的 F_v/F_0 降幅均最小,为1.3%。DS的叶片可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性均显著高于CK;‘赤优金苗1号’的可溶性糖增幅最大,为68%,‘豫谷29’的可溶性蛋白增幅最高,为37%,‘官米1号’的脯氨酸含量和POD活性增幅均为最高,分别较CK增加11.40和2.16倍,‘济谷22’的SOD活性增幅最大,是CK的1.19倍,‘冀谷168’的CAT活性增幅最高,为CK的3.33倍。基于产量耐旱指数(DRI)分析,‘郑谷678’、‘中谷989’和‘济谷30’的DRI分别为1.111、1.192、1.144,均表现强耐旱。通过主成分分析筛选出千粒重、株高、光合速率、 F_v/F_m 、叶绿素含量、脯氨酸含量和SOD活性可作为谷子开花期耐旱性鉴定的重要指标。

关键词 谷子; 干旱胁迫; 生理响应; 耐旱评价

中图分类号 S515

文章编号 1007-4333(2026)04-0013-16

文献标志码 A

Physiological responses and comprehensive drought resistance evaluation of diverse foxtail millet (*Setaria italica*) genotypes during flowering under drought stress

QIN Na¹, QIN Jiafan², ZHU Cancan¹, DAI Shutao¹, FU Senjie¹, JING Ya¹, WANG Chunyi¹,
LI Junxia^{1*}, ZHANG Chengyang¹, LI Mengzhuo³

(1. Cereal Crop Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;

2. Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Luoyang 471023, China;

3. College of Forestry, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China)

收稿日期: 2025-07-16; 接受日期: 2025-09-08

基金项目: 国家谷子高粱产业技术体系(CARS-06); 河南省甘薯杂粮产业技术体系(HARS-25-04-S); 河南省重点研发专项(2311111110300, 241111112100); 河南省农业科学院创新团队(2024TD39)

第一作者: 秦娜(ORCID:0000-0001-6908-5493), 副研究员, 主要从事谷子新品种选育与种质资源创制研究, Email: qinna2004@126.com

通讯作者: 李君霞(ORCID:0000-0001-9507-0471), 研究员, 主要从事谷子遗传育种研究, Email: lijunxia@126.com

Abstract To investigate the effects of drought stress on the growth and drought tolerance of foxtail millet (*Setaria italica*), this study employed 26 diverse foxtail millet genotypes at the heading-flowering stage. Two treatments, well-watered control (soil moisture maintained at 60% field capacity, CK) and drought stress (soil moisture maintained at 30% to 35% field capacity, DS) were designed during the heading to flowering period. Physiological characteristic of flowering stage and yield traits at maturity were measured. Drought resistances were evaluated using the yield-based drought resistance index (DRI). The results demonstrated that: Drought stress significantly reduced chlorophyll content, photosynthetic rate (P_n), maximum photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m), and maximum photochemical energy conversion potential (F_v/F_0) across all genotypes. Compared with CK, ‘Zhenggu 678’ exhibited the smallest reductions in chlorophyll content, photosynthetic rate, and F_v/F_m (decreased by 30.0%, 3.3%, and 1.9%, respectively) under drought conditions, while ‘Yugu 27’ and ‘Yugu 101’ showed minimal decline in F_v/F_0 (decreased by 1.3%). Drought stress remarkably elevated leaf soluble sugar, soluble protein, and proline contents, as well as the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT). ‘Chiyou Jinmiao 1’ displayed the greatest increase in soluble sugar by 68%. ‘Yugu 29’ showed the highest soluble protein accumulation (37% up). ‘Gongmi 1’ exhibited the most pronounced increases in proline content (11.40 times) and POD activity (2.16 times). ‘Jigu 22’ demonstrated the highest SOD activity elevation (1.19 times), and ‘Jigu 168’ showed maximal CAT activity enhancement (3.33 times). Based on yield DRI analysis, ‘Zhenggu 678’ (DRI=1.111), ‘Zhonggu 989’ (DRI=1.192) and ‘Jigu 30’ (DRI=1.144) were identified as genotypes with strong drought resistance. Result of principal component analysis identified the thousand-kernel weight, plant height, photosynthetic rate, F_v/F_m , chlorophyll content, proline content, and SOD enzyme activity as key indicators for assessing drought tolerance at the flowering stage.

Keywords foxtail millet; drought stress; physiological responses; drought resistance evaluation

干旱是全球范围内影响作物生长的主要非生物逆境胁迫因素之一^[1],其在各类自然灾害中对作物生产的危害居于首位^[2],严重抑制作物的光合作用、蒸腾作用等关键生理过程,常导致显著减产甚至绝收^[3]。我国干旱与半干旱地区面积约占国土总面积的 1/2,因干旱造成的粮食损失超过 1 亿 t/年^[4]。谷子(*Setaria italica* (L.) Beauv)属禾本科(Poaceae)狗尾草属(*Setaria*),是中国北方地区的重要粮食作物,年种植面积超过 80 万 hm^2 ,占全世界总种植面积的 80%,谷子脱壳后称为小米,富含蛋白质、脂肪和矿物质等营养成分,具有较高的营养价值,在丰富食物多样性和促进旱区农业可持续发展中发挥着重要作用^[5]。又因其具备抗旱、耐瘠薄、生育期短和适应性广等特性,谷子已成为研究 C_4 高光效生理机制、禾谷类作物基因组解析以及抗旱耐瘠机制的理想模式作物^[6]。尽管谷子具有较强的抗旱能力,但干旱胁迫仍然是限制其品质与产量提升的关键因素之一^[7]。因此,开展谷子不同生育时期耐旱性鉴定及综合评价,对谷子抗旱育种具有重要的意义。

通常情况下,植株正常的生长代谢过程中会产生过氧化氢、单线态氧、羟基自由基和超氧阴离子

等活性氧(ROS)^[8],正常浓度的 ROS 可调控植株的种子萌发、气孔开闭、细胞程序性死亡等应答模式^[9]。但当植株遭受外界干旱胁迫时,体内积累过量的活性氧可引起核酸、蛋白质、脂质过氧化^[10],破坏植株正常生长的平衡。为减轻干旱胁迫对植株造成的伤害,植物会通过一系列生理反应维持细胞正常代谢^[11]。Nezhadahmadi 等^[12]研究表明,干旱胁迫会破坏植株细胞膜系统的稳定性,而植株的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸超氧化物酶(APX)等保护酶的活性会增强,同时提升抗坏血酸、谷胱甘肽等抗氧化物质含量,清除过量的活性氧自由基,从而维持膜系统的稳定性,保持植株正常的生长代谢。

干旱环境下,谷子不同生育期表型性状、植株体内生理生化指标、抗旱相关基因的表达可作为其抗旱性评价的依据^[13]。薛新伟等^[14]通过对 86 份谷子种质材料萌发期抗旱性综合评价发现,干旱胁迫影响谷子种子萌发,萌发指数与发芽率的相关性最强,相关系数(r)为 0.92。李哲^[15]研究表明苗期不同品种谷子干旱胁迫组的地下部鲜重、地上部干重、苗长、根长均呈下降趋势,抗旱性强的品种形态指标测定值与对照组相比降幅较小,抗旱性弱的品

种在干旱胁迫条件下形态指标测定值降幅较大。灌浆期是谷子淀粉合成关键期,灌浆期干旱对于植株后期干物质积累和籽粒品质性状有显著影响,谷子腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(SiAGPase)和可溶性淀粉合成酶(SiSSS)家族基因在淀粉合成过程中与逆境胁迫密切相关,随着干旱胁迫程度增加,SiAGPase和SiSSS表达量显著升高,其合成的蛋白质主要被转运到叶绿体中参与淀粉的合成,从而增强谷子抗旱性^[16]。张海燕等^[17]研究发现,脯氨酸、丙二醛和可溶性糖等渗透调节物质的含量对油菜适应干旱胁迫影响较大,可作为评价作物抗旱性的重要指标。李云等^[18]研究指出,植物遭受外界干旱胁迫时,可通过体内抗氧化酶活性的增加来清除大量积累的活性氧,从而维持细胞活性氧的动态平衡,因此,抗氧化酶活性的增加可作为鉴定植物抗旱指标之一。随着谷子成为禾本科基因组研究的新模式植物,抗旱基因表达及功能的研究逐渐增加。窦祎凝等^[19]研究结果表明,在拟南芥中过表达谷子基因 *SiNAC18*,转基因植株可通过调控ABA信号途径和氧化胁迫途径显著增强植物的抗旱性。王新博等^[20]利用病毒诱导的基因沉默

(VIGS)技术将小麦 *TaEF-1α* 基因沉默后,发现干旱胁迫下植株叶片下垂,丙二醛含量显著升高,抗旱性大幅降低。

目前,谷子抗旱性研究主要集中在萌发期和苗期,关于谷子开花期的田间抗旱性鉴定与品种评价的研究鲜见报道。本试验以 26 份谷子种质为试验材料,通过比较其在正常供水和干旱胁迫条件下开花期生长性状、光合作用、叶绿素含量、叶绿素荧光参数、渗透调节物、抗氧化酶活性的变化,结合成熟期籽粒产量和产量耐旱指数评价及不同性状相关性分析和主成分因子分析,解析不同谷子品种对干旱胁迫的响应机制,筛选耐旱性鉴定重要指标,旨在探究干旱胁迫对谷子花期生长及耐旱性的影响,以期为筛选和创制谷子耐旱新种质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试谷子品种共 26 个,包括河南省 7 个,河北省 5 个,山东省 4 个,北京市 4 个,山西省 2 个,黑龙江省 2 个,内蒙古自治区 1 个,吉林省 1 个(表 1)。

表 1 26 份谷子品种(系)来源
Table 1 The origin of 26 millet varieties varieties (lines)

编号 Number	品种 Variety	来源 Origin	编号 Number	品种 Variety	来源 Origin
1	郑谷 678	河南	14	京谷 4 号	北京
2	豫谷 101	河南	15	中谷 2 号	北京
3	豫谷 27	河南	16	冀谷 168	河北
4	豫谷 18	河南	17	晋谷 40	山西
5	豫谷 29	河南	18	天粟 6 号	河北
6	豫谷 40	河南	19	公谷 88	吉林
7	洛谷 5 号	河南	20	宫米 1 号	河北
8	冀谷 47	河北	21	龙谷 39	黑龙江
9	中谷 989	北京	22	长生 19	山西
10	嫩选 19	黑龙江	23	赤优金苗 1 号	内蒙古
11	K32H	北京	24	济谷 22	山东
12	济谷 20	山东	25	济谷 30	山东
13	济谷 27	山东	26	保谷 22	河北

1.2 试验设计

试验于 2023—2024 年在河南省新乡市现代农业研究开发基地抗旱棚内(34. 55° N 113. 36° E,海

拔 58. 8 m)进行。试验设置正常水分处理(CK)和干旱胁迫处理(DS),每个处理重复 3 次,行距 40 cm,行长 3 m,每个品种每个重复种植 4 行,区组

间隔1 m。作为基肥播种前一次性施入尿素(含N 46 g/100 g) 150 kg/hm²、磷酸二铵 600 kg/hm²。于谷子3~5叶期定苗,每行留苗75株。CK按正常大田生产管理,全生育期土壤含水量控制在60%~70%。干旱胁迫处理在抽穗期前土壤含水量与CK相同,抽穗期后(开花期前7 d)开始降低土壤含水量,于开花期含水量降至30%~35%,并保持该含水量至成熟。土壤含水量测定采用维科美拓公司(中国)生产的WTK-M多参数土壤水分测定仪进行,于花后7 d取样,测定相关生理生化指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生理生化指标

花后7 d,取旗叶叶片分别测定叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性。其中叶绿素含量参照邹琦^[21]乙醇丙酮法进行测定;可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量测定分别采用蒽酮乙酸乙酯法、水合茚三酮比色法、考马斯亮蓝G250法^[22];SOD、POD和CAT活性分别参照Huang等^[23]、Shi等^[24]和Jebara等^[25]的方法进行测定。

1.3.2 光合特性

采用美国PP systems公司CIRAS-3便携式光合仪,于晴天无云的上午(8:30—10:30)测定开花期旗叶的光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)与水分利用效率(WUE)。测定条件为大气CO₂浓度(360±5) μmol/mol,相对湿度(60±5)%,温度31℃,使用仪器自带的LED光源控制光强,光量子通量密度(PPFD)为1 500 μmol/(m² s)。

1.3.3 叶绿素荧光参数

叶绿素荧光参数参照Xu等^[26]的方法,采用英国Hansatech公司的便携式FMS-2型脉冲调制荧光仪进行测定。测定指标包括初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m),可变荧光(F_v)和PSII最大光化学量子产量(F_v/F_m)分别参照Zhong等^[27]方法进行计算。

1.4 农艺性状测定

成熟期单株收获后于挂藏室阴干,从各品种和不同水分胁迫处理中分别随机选取15株,测定农艺性状,包括单株生物量、单株穗重、穗粒重、千粒重等。

1.5 谷子耐旱性综合评价

采用耐旱指数(DRI)法评价材料的耐旱性^[28],公式如下:

$$\text{耐旱指数} = (\text{干旱胁迫产量} \times \text{抗旱系数}) / \text{所有品种干旱胁迫产量的平均值}$$

$$\text{抗旱系数} = Y_a / Y_m,$$

式中: Y_a 为参试品种(系)干旱胁迫籽粒产量,g; Y_m 为参试品种(系)非干旱胁迫籽粒产量,g。谷子抗旱性分5级,从强到弱依次为:1级(抗旱指数≥1.300),极强(HR);2级(抗旱指数1.100~1.299),强(R);3级(抗旱指数0.900~1.099),中等(MR);4级(抗旱指数0.700~0.899),弱(S);5级(抗旱指数≤0.699),极弱(HS)。

1.6 数据分析

采用Excel 2010和SPSS 19.0进行数据处理、统计与分析。其中主成分因子系数(ω_i)的计算公式为:

$$\omega_i = C_i \div \sum_{i=1}^n C_i$$

式中: C_i 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,%。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对谷子叶绿素含量的影响

由表2可知,干旱胁迫(DS)条件下,26个谷子品种叶绿素含量均较正常水分处理(CK)显著下降($P<0.05$)。其中,‘郑谷678’、‘豫谷101’、‘K32H’和‘济谷27’的降幅相对较小,分别为30%、35%、37%和36%;而‘龙谷39’、‘嫩选19’、‘晋谷40’和‘京谷4号’的降幅较大,依次达到70%、62%、60%和59%。干旱胁迫下‘郑谷678’和‘豫谷101’的叶绿素含量均显著高于其他品种($P<0.05$),分别达到叶绿素含量最低品种‘龙谷39’的2.39和2.03倍。表明‘郑谷678’和‘豫谷101’在干旱胁迫下能够维持相对较高的叶绿素合成能力。

2.2 干旱胁迫对谷子渗透调节物质含量的影响

由表3可知,干旱胁迫(DS)处理的供试品种谷子叶片可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量均显著高于CK;各供试品种间可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量存在差异。其中‘赤优金苗1号’可溶性糖含量增幅最高(68%),‘济谷20’增加幅度最低(50%),‘郑谷678’的可溶性糖含量最高,达到28.47 mg/g。‘豫谷29’可溶性蛋白含量增幅最高(37%),‘冀谷47’增幅最低(20%),‘豫谷27’的可溶性蛋白含量最高,为46.31 mg/g。‘宫米1号’叶片脯氨酸含量增幅最大,‘中谷2号’增幅最小,分别是

表2 干旱胁迫下不同谷子品种(系)的叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content of different foxtail millet varieties (lines) under drought stress condition $\mu\text{g/g}$

品种 Variety	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	品种 Variety	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress
郑谷 678	4.21±0.14 ^a	2.95±0.05 ^a	京谷 4 号	3.56±0.07 ^d	1.44±0.03 ^f
豫谷 101	4.07±0.11 ^a	2.64±0.02 ^b	中谷 2 号	3.95±0.16 ^c	1.87±0.02 ^c
豫谷 27	4.35±0.26 ^b	2.61±0.10 ^b	冀谷 168	4.06±0.03 ^a	1.97±0.13 ^c
豫谷 18	3.84±0.21 ^c	1.88±0.01 ^c	晋谷 40	3.52±0.15 ^d	1.39±0.04 ^f
豫谷 29	3.98±0.19 ^c	1.97±0.06 ^c	天粟 6 号	3.74±0.13 ^d	2.01±0.02 ^c
豫谷 40	3.56±0.11 ^d	2.01±0.10 ^c	公谷 88	3.52±0.18 ^d	1.65±0.03 ^d
洛谷 5 号	2.89±0.12 ^c	1.67±0.01 ^d	宫米 1 号	3.69±0.04 ^d	2.04±0.11 ^c
冀谷 47	3.84±0.20 ^c	1.99±0.08 ^c	龙谷 39	2.94±0.02 ^c	0.87±0.09 ^g
中谷 989	4.14±0.30 ^a	2.35±0.01 ^e	长生 19	3.61±0.10 ^d	1.24±0.10 ^f
嫩选 19	3.56±0.21 ^d	1.35±0.06 ^f	赤优金苗 1 号	3.89±0.13 ^c	2.06±0.09 ^c
K32H	4.03±0.18 ^a	2.54±0.10 ^b	济谷 22	4.25±0.11 ^b	2.21±0.04 ^e
济谷 20	3.94±0.16 ^c	1.81±0.04 ^c	济谷 30	4.19±0.13 ^a	1.87±0.07 ^c
济谷 27	4.01±0.09 ^a	2.55±0.01 ^b	保谷 22	3.94±0.04 ^c	2.15±0.08 ^c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. The same below.

CK的11.4和8.5倍;DS处理中,‘中谷989’叶片脯氨酸含量最高,为0.89 mg/g。

2.3 干旱胁迫对谷子抗氧化酶活性的影响

由表4可知,干旱胁迫(DS)处理的谷子叶片SOD、POD和CAT活性均显著高于CK,且品种间差异显著。‘济谷22’SOD活性增幅最大(1.19倍),‘K32H’增幅最小(0.55倍),‘豫谷29’SOD活性最高,为0.61 U/mg。‘宫米1号’的POD活性增幅最高(2.16倍),‘嫩选19’增幅最低(1.43倍),‘郑谷678’的POD活性最高(17.40 U/mg);‘冀谷168’的CAT活性增幅最高(3.33倍),‘中谷989’增幅最低(2.33倍),‘豫谷101’CAT活性最高(13.82 U/mg)。

2.4 干旱胁迫对谷子光合特性的影响

由表5可知,干旱胁迫(DS)的谷子光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)和气孔导度(G_s)均显著低于CK,且品种间差异显著。‘郑谷678’的 P_n 降幅最小(3.3%),‘龙谷39’的 P_n 降幅最大(53.6%),‘郑谷678’和‘豫谷27’ P_n 均较高,分别为28.9和28.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。‘豫谷27’的 T_r 降幅最小(2.1%),‘龙谷39’的 T_r 降幅最大(33.7%),‘济谷22’的 T_r 最高,为10.1 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;‘豫谷29’

WUE的下降幅度最小(3.0%),‘保谷22’的下降幅度最大(36.1%),‘豫谷101’WUE最高,为3.3 g/kg。‘冀谷168’ G_s 下降幅度最小(12.1%),‘赤优金苗1号’下降幅度最大(39.5%);‘冀谷168’的 G_s 最大,‘郑谷678’次之。

由表6可知,干旱胁迫也显著降低了谷子PSII最大光化学效率(F_v/F_m)和PSII最大光能转化潜力(F_v/F_0),且品种间存在显著差异。 F_v/F_m 降幅最大和最小的分别是‘济谷30’(75.3%)和‘郑谷678’(1.9%),‘郑谷678’ F_v/F_m 最高,为3.60。‘豫谷27’ F_v/F_0 最高,为0.76,‘济谷30’的 F_v/F_0 降幅最大(46.8%),‘豫谷27’和‘豫谷101’降幅均较小(1.3%)。综上,‘郑谷678’、‘豫谷27’等品种多个指标参数表现相对稳定,在干旱胁迫下具有较强的光合特性。

2.5 干旱胁迫对谷子农艺性状的影响

由表7可知,干旱胁迫下谷子株高、穗粒重、千粒重、地上部生物量和产量均较CK显著降低。株高降幅最大和最小的分别是‘保谷22’(20.2%)和‘济谷22’(0.5%),‘洛谷5号’的株高最高,为169.0 cm。‘济谷30’的穗粒重最高,为16.7 g,穗粒重下降幅度最大和最小的分别是‘冀谷48’

表3 干旱胁迫下不同谷子品种(系)的渗透调节物质含量变化

Table 3 Changes of permeation regulating substances contents of different foxtail millet varieties (lines)

under drought stress condition

mg/g

品种 Variety	可溶性糖含量 Soluble sugar content		脯氨酸含量 Proline content		可溶性蛋白含量 Soluble protein content	
	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress
郑谷 678	17.31±2.30 ^a	28.47±2.41 ^a	0.082±0.001 ^b	0.88±0.01 ^a	34.51±2.47 ^a	45.32±3.67 ^a
豫谷 101	15.79±1.74 ^b	26.24±1.05 ^b	0.076±0.002 ^c	0.81±0.02 ^b	33.89±1.30 ^b	44.12±2.74 ^b
豫谷 27	16.87±2.01 ^a	26.98±2.01 ^b	0.080±0.001 ^b	0.84±0.04 ^b	34.62±2.85 ^a	46.31±4.85 ^a
豫谷 18	15.60±1.89 ^b	24.81±1.23 ^c	0.073±0.003 ^d	0.77±0.02 ^c	30.54±3.01 ^e	39.89±1.52 ^d
豫谷 29	16.33±1.73 ^b	26.50±0.89 ^b	0.084±0.001 ^a	0.87±0.02 ^a	32.54±3.30 ^c	44.52±3.41 ^b
豫谷 40	15.89±1.85 ^b	25.30±1.04 ^c	0.079±0.002 ^c	0.78±0.05 ^c	30.19±3.04 ^e	38.76±2.32 ^c
洛谷 5号	16.01±2.74 ^b	24.31±2.03 ^c	0.074±0.004 ^d	0.81±0.02 ^c	32.08±3.30 ^c	41.35±1.68 ^c
冀谷 47	14.52±1.25 ^c	23.21±1.82 ^c	0.082±0.003 ^d	0.83±0.02 ^b	33.57±2.96 ^b	40.39±2.95 ^d
中谷 989	17.01±2.34 ^a	27.24±0.74 ^a	0.077±0.003 ^c	0.89±0.03 ^a	32.69±2.75 ^a	43.09±1.89 ^b
嫩选 19	13.20±1.94 ^d	21.59±1.22 ^d	0.067±0.002 ^e	0.70±0.02 ^d	31.54±3.17 ^d	39.76±3.52 ^d
K32H	16.52±2.04 ^b	26.39±0.79 ^b	0.083±0.001 ^b	0.85±0.05 ^a	32.64±2.45 ^c	42.09±3.10 ^c
济谷 20	16.33±1.97 ^b	24.58±1.37 ^c	0.079±0.001 ^c	0.81±0.02 ^c	33.41±3.19 ^b	40.52±2.65 ^d
济谷 27	15.87±2.74 ^b	25.63±2.14 ^c	0.086±0.002 ^a	0.84±0.04 ^b	32.49±2.66 ^c	42.54±2.98 ^c
京谷 4号	15.02±2.07 ^c	23.99±1.31 ^c	0.069±0.002 ^e	0.67±0.01 ^e	29.65±2.58 ^f	38.42±3.31 ^e
中谷 2号	16.30±1.84 ^b	25.61±0.95 ^c	0.073±0.001 ^d	0.69±0.03 ^d	28.61±1.98 ^f	39.25±1.65 ^d
冀谷 168	15.89±2.24 ^b	24.67±0.34 ^c	0.079±0.004 ^c	0.84±0.02 ^b	34.03±2.56 ^a	42.79±2.30 ^c
晋谷 40	14.31±2.14 ^c	22.63±1.46 ^d	0.066±0.002 ^e	0.71±0.02 ^d	29.01±3.45 ^f	39.59±1.54 ^d
天粟 6号	15.09±2.01 ^c	23.84±1.14 ^c	0.070±0.002 ^c	0.79±0.03 ^c	30.14±3.07 ^e	41.21±2.36 ^c
公谷 88	14.30±1.52 ^c	22.97±1.09 ^c	0.065±0.001 ^e	0.74±0.05 ^d	29.30±1.63 ^f	38.64±1.96 ^e
宫米 1号	15.04±1.86 ^c	23.98±0.84 ^b	0.062±0.002 ^f	0.77±0.02 ^c	30.54±2.65 ^e	39.51±3.65 ^d
龙谷 39	14.01±2.34 ^c	22.90±0.74 ^d	0.058±0.001 ^f	0.62±0.01 ^e	27.21±2.87 ^g	35.86±2.96 ^f
长生 19	15.39±2.21 ^c	25.34±1.12 ^c	0.071±0.003 ^d	0.80±0.06 ^b	30.49±1.40 ^e	41.25±3.57 ^c
赤优金苗 1号	15.62±1.24 ^b	26.31±1.03 ^b	0.076±0.004 ^c	0.82±0.06 ^b	32.45±2.46 ^c	42.19±3.66 ^c
济谷 22	16.33±1.14 ^b	25.90±1.23 ^c	0.074±0.001 ^d	0.79±0.04 ^c	31.57±3.24 ^d	42.31±3.65 ^c
济谷 30	17.01±1.02 ^a	26.97±0.85 ^b	0.081±0.005 ^b	0.84±0.03 ^b	32.49±3.07 ^c	43.80±3.41 ^b
保谷 22	16.84±1.63 ^a	25.94±1.20 ^c	0.078±0.002 ^c	0.79±0.02 ^c	30.07±1.74 ^e	40.29±3.07 ^c

表4 干旱胁迫下不同谷子品种(系)的抗氧化酶活性变化

Table 4 Changes of antioxidant enzyme activity of different foxtail millet varieties (lines)

under drought stress condition

 U/mg

品 种 Variety	超氧化物歧化酶 SOD		过氧化物酶 POD			过氧化氢酶 CAT
	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress
郑谷 678	0.31±0.01 ^a	0.58±0.02 ^b	6.31±0.06 ^a	17.40±1.33 ^a	3.23±0.35 ^c	13.81±0.09 ^a
豫谷 101	0.29±0.02 ^b	0.53±0.02 ^d	5.89±0.12 ^c	16.27±0.98 ^b	3.98±0.04 ^a	13.82±0.11
豫谷 27	0.27±0.01 ^c	0.48±0.01 ^f	6.01±0.09 ^b	15.89±1.65 ^c	3.87±0.12 ^a	13.55±0.09 ^b
豫谷 18	0.24±0.01 ^e	0.44±0.04 ^g	5.34±0.23 ^d	13.24±1.01 ^f	3.08±0.09 ^c	10.83±0.10 ^f
豫谷 29	0.30±0.00 ^a	0.61±0.04 ^a	6.03±0.11 ^b	15.20±1.00 ^d	3.81±0.06 ^a	12.69±0.04 ^c
豫谷 40	0.26±0.01 ^c	0.44±0.01 ^g	5.30±0.26 ^d	13.74±0.97 ^f	3.07±0.11 ^c	10.54±0.21 ^f
洛谷 5 号	0.28±0.01 ^b	0.53±0.03 ^d	5.01±0.09 ^e	13.29±2.05 ^f	3.24±0.06 ^c	12.09±0.11 ^c
冀谷 47	0.26±0.02 ^c	0.49±0.01 ^f	4.89±0.10 ^f	13.01±0.65 ^f	3.56±0.02 ^b	12.88±0.06 ^c
中谷 989	0.29±0.00 ^b	0.57±0.06 ^b	6.02±0.09 ^b	14.96±1.11 ^e	3.89±0.10 ^a	12.94±0.03 ^c
嫩选 19	0.24±0.01 ^e	0.43±0.02 ^g	5.35±0.12 ^d	13.04±1.04 ^f	2.99±0.05 ^d	10.11±0.03 ^g
K32H	0.29±0.00 ^b	0.45±0.00 ^g	5.36±0.20 ^d	14.22±1.36 ^e	3.05±0.03 ^c	11.32±0.14 ^e
济谷 20	0.24±0.02 ^c	0.49±0.04 ^f	5.24±0.07 ^e	15.34±0.88 ^d	3.22±0.11 ^c	10.98±0.06 ^f
济谷 27	0.29±0.01 ^b	0.51±0.02 ^e	4.86±0.16 ^f	14.25±1.34 ^e	3.52±0.03 ^b	12.95±0.07 ^c
京谷 4 号	0.25±0.01 ^d	0.48±0.03 ^f	5.51±0.23 ^d	13.67±1.60 ^f	2.88±0.01 ^d	10.56±0.14 ^f
中谷 2 号	0.27±0.02 ^c	0.50±0.01 ^e	5.20±0.06 ^e	15.04±0.74 ^d	3.26±0.01 ^c	11.29±0.10 ^e
冀谷 168	0.25±0.02 ^d	0.51±0.01 ^e	4.78±0.13 ^f	13.95±0.65 ^f	2.97±0.03 ^d	12.87±0.10 ^c
晋谷 40	0.26±0.01 ^c	0.52±0.04 ^d	4.95±0.08 ^f	15.03±1.01 ^d	3.05±0.04 ^c	12.46±0.07 ^d
天粟 6 号	0.29±0.01 ^b	0.55±0.01 ^c	5.03±0.16 ^e	14.62±1.66 ^e	3.25±0.03 ^c	12.53±0.14 ^d
公谷 88	0.28±0.03 ^b	0.56±0.04 ^c	4.92±0.04 ^f	15.14±1.30 ^d	3.28±0.14 ^c	12.35±0.16 ^d
宫米 1 号	0.24±0.00 ^c	0.44±0.03 ^g	4.19±0.08 ^g	13.26±0.98 ^f	2.87±0.03 ^d	11.97±0.09 ^e
龙谷 39	0.30±0.01 ^a	0.59±0.05 ^b	5.02±0.24 ^e	14.95±0.94 ^e	3.54±0.08 ^b	12.86±0.13 ^c
长生 19	0.28±0.02 ^b	0.60±0.02 ^a	5.31±0.16 ^d	14.92±1.01 ^e	3.49±0.10 ^b	13.04±0.12 ^b
赤优金苗 1 号	0.29±0.00 ^b	0.54±0.03 ^c	4.91±0.30 ^f	13.96±1.00 ^f	3.08±0.14 ^c	12.99±0.20 ^c
济谷 22	0.26±0.00 ^c	0.57±0.04 ^b	4.82±0.06 ^f	14.81±1.78 ^e	3.14±0.09 ^c	12.88±0.21 ^c
济谷 30	0.26±0.01 ^c	0.48±0.05 ^f	5.03±0.18 ^e	15.02±1.35 ^d	3.21±0.12 ^c	12.75±0.06 ^c
保谷 22	0.26±0.01 ^c	0.50±0.01 ^e	4.97±0.20 ^f	14.89±1.64 ^e	3.30±0.04 ^c	12.84±0.08 ^c

表5 干旱胁迫下不同谷子品种(系)的光合作用指标和水分利用效率(WUE)
Table 5 Photosynthetic characteristics and water use efficiency of different foxtail millet varieties (lines)
under drought stress condition

品种 Variety	$P_n/(\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$		$T_r/(\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h}))$		$G_s/\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$		WUE/(g/kg)	
	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	对照 CK
郑谷 678	29.9±1.02 ^c	28.9±1.13 ^a	9.4±0.09 ^d	8.6±0.04 ^b	266±4 ^c	230±3 ^b	3.0±0.03 ^c	3.0±0.03 ^c
豫谷 101	30.9±2.10 ^c	28.6±1.89 ^a	8.8±0.04 ^e	8.1±0.10 ^c	224±9 ^f	170±4 ^e	3.5±0.01 ^a	3.5±0.01 ^a
豫谷 27	32.4±2.33 ^c	28.8±0.12 ^a	9.6±0.03 ^c	9.4±0.06 ^b	244±3 ^e	171±6 ^e	3.4±0.03 ^b	3.4±0.03 ^b
豫谷 18	27.2±1.09 ^d	25.9±0.34 ^c	9.9±0.10 ^c	8.4±0.12 ^c	265±6 ^c	189±5 ^d	3.2±0.04 ^b	3.2±0.04 ^b
豫谷 29	33.8±1.54 ^b	28.1±1.05 ^b	10.3±0.09 ^c	8.9±0.09 ^b	278±2 ^b	207±3 ^c	3.3±0.03 ^b	3.3±0.03 ^b
豫谷 40	33.7±2.31 ^b	17.9±0.75 ^f	10.9±0.04 ^b	7.8±0.03 ^c	307±6 ^a	187±7 ^d	3.5±0.01 ^a	3.5±0.01 ^a
洛谷 5号	33.2±1.43 ^b	25.1±1.01 ^c	10.1±0.03 ^c	8.2±0.08 ^c	263±6 ^c	171±6 ^e	3.3±0.04 ^b	3.3±0.04 ^b
冀谷 47	30.6±1.63 ^c	25.3±0.26 ^c	10.4±0.14 ^b	7.6±0.11 ^d	266±3 ^c	153±4 ^f	3.4±0.06 ^b	3.4±0.06 ^b
中谷 989	28.3±1.59 ^d	24.4±1.32 ^d	8.7±0.09 ^e	7.7±0.10 ^d	197±2 ^g	153±2 ^f	3.2±0.01 ^b	3.2±0.01 ^b
嫩选 19	32.3±1.14 ^c	25.6±0.54 ^c	10.2±0.11 ^c	7.8±0.06 ^c	265±3 ^c	169±3 ^e	3.4±0.06 ^b	3.4±0.06 ^b
K32H	35.3±1.36 ^a	27.2±1.07 ^b	10.9±0.08 ^b	7.9±0.03 ^c	301±9 ^a	163±8 ^e	3.4±0.03 ^b	3.4±0.03 ^b
济谷 20	30.0±1.56 ^c	26.5±1.16 ^c	10.6±0.06 ^b	9.5±0.04 ^b	258±8 ^d	225±7 ^b	3.1±0.02 ^c	3.1±0.02 ^c
济谷 27	29.5±2.04 ^c	28.2±1.33 ^b	9.8±0.03 ^c	9.5±0.04 ^b	239±4 ^e	207±4 ^c	3.0±0.03 ^c	3.0±0.03 ^c
京谷 4号	28.5±1.47 ^d	22.2±0.36 ^e	10.0±0.07 ^c	8.1±0.07 ^c	257±6 ^d	173±9 ^d	2.9±0.04 ^c	2.9±0.04 ^c
中谷 2号	26.6±1.52 ^e	25.1±0.54 ^c	8.7±0.11 ^e	6.8±0.11 ^e	199±4 ^g	129±4 ^g	3.6±0.06 ^a	3.6±0.06 ^a
冀谷 168	31.5±1.36 ^c	26.5±1.30 ^c	10.3±0.05 ^b	9.7±0.16 ^b	268±5 ^b	235±6 ^a	3.1±0.03 ^c	3.1±0.03 ^c
晋谷 40	28.2±1.98 ^d	25.1±1.04 ^c	8.5±0.06 ^e	8.1±0.14 ^c	182±3 ^b	116±4 ^g	3.3±0.02 ^b	3.3±0.02 ^b
天粟 6号	24.5±0.87 ^f	22.9±1.36 ^d	8.1±0.14 ^f	7.6±0.06 ^d	231±4 ^f	166±7 ^e	3.2±0.02 ^b	3.2±0.02 ^b
公谷 88	26.8±1.12 ^e	24.1±0.84 ^d	9.9±0.10 ^c	7.8±0.06 ^c	260±3 ^c	224±2 ^b	2.7±0.03 ^d	2.7±0.03 ^d
官米 1号	25.1±1.09 ^e	23.3±0.67 ^d	8.7±0.19 ^e	8.4±0.03 ^c	198±7 ^g	172±4 ^d	2.9±0.03 ^c	2.9±0.03 ^c
龙谷 39	33.0±1.14 ^b	15.3±1.13 ^f	9.8±0.06 ^c	6.5±0.14 ^e	262±8 ^c	217±5 ^c	3.4±0.01 ^b	3.4±0.01 ^b
长生 19	29.3±0.65 ^c	27.4±0.54 ^b	9.3±0.07 ^d	9.0±0.16 ^b	253±5 ^d	174±3 ^e	3.2±0.01 ^b	3.2±0.01 ^b
赤优金苗 1号	27.4±0.35 ^d	24.8±0.75 ^d	10.1±0.06 ^c	7.9±0.09 ^c	220±7 ^f	133±7 ^g	3.5±0.06 ^a	3.5±0.06 ^a
济谷 22	31.5±1.20 ^c	27.0±0.31 ^b	11.6±0.13 ^a	10.1±0.10 ^a	243±3 ^c	166±9 ^e	3.1±0.06 ^c	3.1±0.06 ^c
济谷 30	27.7±0.84 ^d	15.3±0.19 ^f	9.5±0.02 ^c	9.0±0.03 ^b	257±7 ^d	211±5 ^c	2.9±0.03 ^c	2.9±0.03 ^c
保谷 22	28.2±1.01 ^d	22.1±0.87 ^e	9.5±0.03 ^c	7.8±0.13 ^c	230±4 ^f	181±6 ^d	3.6±0.01 ^a	3.6±0.01 ^a

表 6 干旱胁迫下不同谷子品种(系)的光合参数

Table 6 Photosynthetic parameter different foxtail millet varieties (lines) under drought stress condition

品种 Variety	F_v/F_m		F_v/F_0	
	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress
郑谷 678	3.67±0.03 ^a	3.60±0.04 ^a	0.79±0.01 ^a	0.70±0.02 ^b
豫谷 101	3.12±0.01 ^c	2.99±0.01 ^b	0.76±0.00 ^b	0.75±0.01 ^a
豫谷 27	3.32±0.04 ^b	3.12±0.03 ^b	0.77±0.02 ^b	0.76±0.03 ^a
豫谷 18	3.50±0.03 ^a	2.81±0.02 ^c	0.78±0.01 ^a	0.73±0.03 ^b
豫谷 29	2.63±0.07 ^d	2.53±0.04 ^d	0.72±0.02 ^c	0.70±0.02 ^b
豫谷 40	2.80±0.02 ^c	2.63±0.03 ^d	0.73±0.01 ^c	0.72±0.00 ^b
洛谷 5 号	3.58±0.01 ^a	2.05±0.01 ^e	0.78±0.00 ^a	0.67±0.01 ^c
冀谷 47	2.78±0.04 ^c	2.71±0.03 ^c	0.73±0.02 ^c	0.72±0.04 ^b
中谷 989	3.44±0.07 ^b	2.43±0.05 ^d	0.77±0.02 ^b	0.71±0.01 ^b
嫩选 19	3.18±0.03 ^c	2.98±0.04 ^b	0.76±0.01 ^b	0.72±0.03 ^b
K32H	3.51±0.02 ^a	3.09±0.03 ^b	0.78±0.03 ^a	0.75±0.04 ^a
济谷 20	3.22±0.07 ^b	2.99±0.07 ^b	0.76±0.01 ^b	0.74±0.01 ^a
济谷 27	3.40±0.02 ^b	3.03±0.08 ^b	0.77±0.04 ^b	0.75±0.04 ^a
京谷 4 号	3.44±0.04 ^b	1.41±0.06 ^f	0.77±0.02 ^b	0.58±0.02 ^d
中谷 2 号	2.59±0.05 ^d	1.97±0.02 ^e	0.72±0.03 ^c	0.66±0.01 ^c
冀谷 168	3.80±0.05 ^a	1.12±0.04 ^g	0.79±0.01 ^a	0.52±0.03 ^d
晋谷 40	2.42±0.04 ^d	1.55±0.01 ^f	0.70±0.00 ^d	0.56±0.04 ^d
天粟 6 号	2.92±0.08 ^c	1.26±0.04 ^g	0.74±0.01 ^c	0.55±0.01 ^d
公谷 88	3.63±0.04 ^a	1.05±0.01 ^g	0.78±0.03 ^a	0.46±0.03 ^e
宫米 1 号	3.40±0.01 ^b	2.72±0.00 ^c	0.77±0.03 ^b	0.73±0.01 ^b
龙谷 39	3.58±0.08 ^a	1.02±0.07 ^g	0.78±0.04 ^a	0.54±0.01 ^d
长生 19	3.32±0.07 ^b	2.51±0.06 ^d	0.77±0.01 ^b	0.70±0.03 ^b
赤优金苗 1 号	3.62±0.03 ^a	2.86±0.05 ^c	0.78±0.02 ^a	0.73±0.05 ^b
济谷 22	2.96±0.01 ^c	2.01±0.02 ^e	0.75±0.04 ^b	0.66±0.04 ^c
济谷 30	3.36±0.07 ^b	0.83±0.01 ^g	0.77±0.01 ^b	0.41±0.03 ^e
保谷 22	3.38±0.04 ^b	2.76±0.02 ^c	0.77±0.02 ^b	0.73±0.04 ^b

表7 干旱胁迫下不同谷子品种(系)产量性状
Table 7 Yield characteristics of different foxtail millet varieties (lines) under drought stress condition

品种 Variety	株高/cm Plant height		穗粒重/g Spike grain weight		地上部生物量/g Biomass of above ground		千粒重/g Thousand grain weight		产量/(kg/hm ²) Yield	
	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress	对照 CK	干旱胁迫 Drought stress
郑谷678	154.0±5.1 ^d	129.8±3.1 ^b	19.4±0.7 ^d	16.5±0.5 ^f	44.1±1.7 ^e	37.9±2.7 ^e	2.7±0.1 ^a	2.2±0.1 ^b	4 926.4±33.4 ^d	3 993.6±73.5 ^d
豫谷101	151.2±3.2 ^c	131.7±2.1 ^b	17.1±0.9 ^c	13.3±0.4 ^e	36.2±1.0 ^c	35.9±3.1 ^c	2.9±0.4 ^b	2.4±0.2 ^b	5 271.5±57.2 ^e	4 067.4±87.8 ^e
豫谷27	140.0±2.7 ^b	136.0±3.2 ^c	11.9±1.1 ^a	8.4±0.2 ^a	28.6±1.4 ^a	26.6±2.4 ^c	3.0±0.1 ^c	2.5±0.1 ^c	4 681.8±86.0 ^c	3 546.7±62.4 ^d
豫谷18	146.0±1.6 ^c	141.5±1.7 ^c	14.7±0.3 ^b	8.9±0.2 ^b	29.2±2.1 ^b	28.0±2.1 ^d	2.7±0.0 ^a	2.0±0.3 ^a	5 135.1±34.3 ^d	3 683.7±70.5 ^d
豫谷29	156.3±3.1 ^d	149.8±2.7 ^d	21.8±0.1 ^c	12.3±0.3 ^d	43.2±1.8 ^e	35.9±2.0 ^e	3.0±0.2 ^c	2.4±0.1 ^b	5 928.3±102.1 ^e	4 393.5±103.1 ^f
豫谷40	153.8±2.4 ^d	149.5±5.5 ^d	18.0±0.7 ^d	9.8±0.1 ^c	43.2±1.6 ^c	33.5±1.7 ^d	2.6±0.2 ^a	2.4±0.2 ^b	4 759.4±88.2 ^c	3 685.7±81.6 ^d
洛谷5号	181.8±3.1 ^f	169.0±6.3 ^g	11.5±0.4 ^a	8.2±0.1 ^a	26.6±1.5 ^a	23.9±2.6 ^b	3.1±0.1 ^c	2.8±0.2 ^d	4 550.6±69.1 ^b	3 099.3±69.8 ^b
冀谷47	141.0±4.2 ^b	142.8±4.7 ^c	17.6±0.2 ^c	8.7±0.3 ^b	36.2±2.1 ^c	21.5±1.3 ^a	3.3±0.3 ^d	2.8±0.3 ^d	4 792.0±114.6 ^c	3 799.1±107.5 ^d
中谷989	148.2±2.6 ^c	139.7±4.9 ^c	18.1±0.3 ^d	9.2±0.4 ^c	34.1±1.6 ^c	27.4±2.7 ^e	2.7±0.2 ^a	2.5±0.2 ^c	5 264.3±90.3 ^c	4 309.9±49.7 ^f
嫩选19	148.3±4.7 ^c	144.7±3.1 ^d	14.7±0.3 ^b	11.3±0.1 ^d	31.9±1.1 ^b	29.8±0.9 ^d	3.6±0.1 ^c	3.1±0.1 ^d	4 304.1±49.2 ^b	3 137.1±140.4 ^b
K32H	164.2±3.7 ^e	151.5±3.7 ^d	19.7±1.1 ^c	11.6±0.3 ^d	38.5±2.1 ^d	34.2±1.4 ^d	2.9±0.1 ^b	2.4±0.2 ^b	4 810.9±122.4 ^c	3 013.8±132.6 ^b
济谷20	142.7±3.4 ^b	134.2±4.0 ^b	15.1±0.6 ^b	9.0±0.2 ^c	29.5±2.3 ^b	24.6±1.7 ^b	2.5±0.1 ^a	2.2±0.1 ^b	5 059.5±74.3 ^d	3 304.1±91.2 ^c
济谷27	166.3±3.5 ^e	153.0±3.7 ^e	23.9±1.3 ^f	12.6±0.5 ^d	46.9±1.7 ^f	30.3±1.2 ^d	3.1±0.2 ^c	2.4±0.3 ^b	5 313.9±87.5 ^e	3 602.2±62.3 ^d
京谷4号	147.5±1.7 ^c	142.7±3.4 ^c	17.2±0.8 ^c	12.3±0.4 ^d	32.2±0.9 ^b	27.6±2.3 ^c	3.1±0.1 ^c	3.0±0.3 ^d	4 556.5±96.1 ^b	3 596.3±71.7 ^d
中谷2号	154.6±1.5 ^d	150.3±3.1 ^d	22.5±0.3 ^f	16.8±0.3 ^f	44.7±2.3 ^c	39.8±3.1 ^f	2.8±0.3 ^b	2.3±0.2 ^b	5 067.4±114.0 ^d	3 474.9±104.2 ^c
冀谷168	142.2±3.4 ^b	138.8±4.2 ^c	13.4±0.2 ^a	10.8±0.1 ^c	29.4±1.9 ^b	24.2±1.1 ^b	2.8±0.1 ^b	2.5±0.2 ^c	4 516.7±67.2 ^b	3 677.8±83.3 ^d
晋谷40	171.3±4.2 ^f	163.7±3.8 ^f	13.5±0.5 ^a	12.4±0.1 ^d	35.1±2.0 ^c	34.7±1.4 ^d	3.1±0.1 ^c	2.5±0.0 ^c	3 964.2±89.8 ^a	2 504.9±112.9 ^a
天粟6号	134.2±3.4 ^b	132.0±4.1 ^b	12.5±0.4 ^a	8.5±0.2 ^b	27.0±3.0 ^a	25.7±0.9 ^c	3.2±0.2 ^c	2.7±0.1 ^c	4 366.3±71.2 ^b	3 803.1±67.1 ^d
公谷88	107.3±2.7 ^a	106.2±4.1 ^a	15.5±0.7 ^b	8.7±0.4 ^b	25.5±2.4 ^a	19.2±1.7 ^a	2.7±0.2 ^a	2.6±0.1 ^c	5 469.1±167.5 ^e	4 007.8±71.7 ^e
官米1号	149.5±2.4 ^c	140.0±4.2 ^c	15.4±0.3 ^b	10.2±0.2 ^c	36.7±3.0 ^d	28.8±2.1 ^d	3.1±0.2 ^c	2.6±0.2 ^c	5 387.6±142.3 ^e	3 425.4±94.5 ^e
龙谷39	141.0±3.1 ^b	137.8±1.8 ^c	14.5±0.8 ^b	13.0±0.1 ^e	30.9±1.8 ^b	25.9±1.9 ^c	3.2±0.1 ^c	2.7±0.1 ^c	4 055.5±114.8 ^a	2 755.4±71.6 ^a
长生19	167.3±2.6 ^c	152.0±3.9 ^c	17.0±0.4 ^c	9.9±0.1 ^c	36.4±2.4 ^c	25.6±1.5 ^c	2.6±0.3 ^a	2.4±0.3 ^b	4 890.5±84.2 ^c	3 390.3±80.2 ^c
赤优金苗1号	151.7±3.2 ^c	137.8±4.9 ^c	12.1±0.6 ^a	7.0±0.1 ^a	25.0±2.2 ^a	21.0±0.1 ^a	3.3±0.2 ^d	3.0±0.3 ^d	4 970.1±73.3 ^d	3 131.2±64.9 ^b
济谷22	154.0±4.1 ^d	153.2±4.6 ^c	18.0±0.7 ^d	12.1±0.4 ^d	39.2±3.1 ^d	26.0±1.5 ^c	3.1±0.0 ^c	2.4±0.2 ^b	5 105.2±81.4 ^d	3 347.8±73.3 ^c
济谷30	160.2±3.4 ^c	149.5±5.6 ^d	21.0±0.1 ^e	16.7±0.4 ^f	43.4±2.4 ^c	42.7±2.4 ^f	3.1±0.1 ^c	2.5±0.1 ^c	4 794.5±97.2 ^c	4 217.6±114.7 ^d
保谷22	158.2±1.9 ^d	126.2±3.0 ^b	22.8±0.4 ^f	13.1±0.3 ^e	36.1±1.6 ^c	32.8±1.4 ^d	3.1±0.2 ^c	2.3±0.1 ^b	4 977.9±64.1 ^d	3 473.0±109.3 ^c

(50.6%)和‘晋谷 40’(8.1%)。‘冀谷 47’的地上部生物量降幅最大(40.7%),‘豫谷 101’的降幅最小(0.8%),‘冀谷 47’降幅最大(40.7%),‘济谷 30’地上部生物量最高,为 42.7 g。‘京谷 4 号’千粒重降幅最低(3.2%),‘保谷 22’降幅最高(34.8%),‘嫩选 19’千粒重最高,为 3.1 g;‘济谷 30’产量降幅最低(12.0%),‘K32H’降幅最高(37.4%),‘豫谷 29’产量最高,为 4 393.5 kg/hm²。可见,‘济谷 30’、‘豫谷 101’等品种受干旱影响相对较小,表现出较好的产量稳定性。

2.6 产量耐旱指数评价

由表 8 可知,26 个谷子品种(系)产量耐旱指数(DRI)由高到低为:中谷 989>济谷 30>郑谷 678>天粟 6 号>豫谷 101>冀谷 47>冀谷 168>公谷 88>豫谷 29>豫谷 40>京谷 4 号>豫谷 27>豫谷 18>济谷 27>保谷 22>中谷 2 号>长生 19>嫩选 19>济谷 22>宫米 1 号>济谷 20>洛谷 5 号>赤优金苗 1 号>K32H>龙谷 39>晋谷 40。

‘郑谷 678’‘中谷 989’‘济谷 30’耐旱等级为 2 级,耐旱性较强,耐旱指数分别为 1.111、1.192、

表 8 干旱胁迫下不同谷子品种(系)的产量耐旱性指数

Table 8 Yield drought tolerance index of different foxtail millet varieties (lines) under drought stress condition

品种 Variety	产量耐旱指数 Drought tolerance index of yield	耐旱等级 Drought tolerance grade	耐旱性 Drought tolerance
郑谷 678	1.111	2	R
中谷 989	1.192	2	R
济谷 30	1.144	2	R
豫谷 101	0.993	3	MR
豫谷 29	0.916	3	MR
豫谷 40	0.903	3	MR
冀谷 47	0.947	3	MR
冀谷 168	0.942	3	MR
天粟 6 号	1.032	3	MR
公谷 88	0.926	3	MR
豫谷 27	0.856	4	S
豫谷 18	0.843	4	S
嫩选 19	0.743	4	S
济谷 20	0.707	4	S
济谷 27	0.787	4	S
京谷 4 号	0.898	4	S
中谷 2 号	0.770	4	S
宫米 1 号	0.713	4	S
长生 19	0.761	4	S
济谷 22	0.717	4	S
保谷 22	0.782	4	S
洛谷 5 号	0.694	5	HS
K32H	0.631	5	HS
晋谷 40	0.545	5	HS
龙谷 39	0.627	5	HS
赤优金苗 1 号	0.655	5	HS

注:R,耐旱性强;MR,耐旱性中等;S,耐旱性弱;HS,耐旱性极弱。

Note: R, resistance; MR, moderate resistance; S, sensitivity; HS, high sensitivity.

1.144;‘豫谷101’‘豫谷29’‘豫谷40’‘冀谷47’‘冀谷168’‘天粟6号’‘公谷88’等7个品种(系)耐旱等级为3级,属于中等耐旱性;‘豫谷27’‘豫谷18’‘嫩选19’‘济谷20’‘济谷27’‘京谷4号’‘中谷2号’‘宫米1号’‘长生19’‘济谷22’‘保谷22’耐旱等级为4级,耐旱性弱;‘洛谷5号’‘K32H’‘晋谷40’‘龙谷39’‘赤优金苗1号’耐旱等级为5级,耐旱性最弱(表8)。

2.7 干旱胁迫下谷子各性状的相关性分析

由表9可知,干旱胁迫下谷子叶绿素含量与 P_n 、 F_v/F_m 均呈极显著正相关, R^2 分别为0.856($P<$

0.01)和0.831($P<0.01$);脯氨酸含量与SOD活性呈显著正相关, $R^2=0.561$ ($P<0.05$); P_n 与 F_v/F_m 、千粒重和株高分别呈极显著和显著正相关, R^2 分别为0.891($P<0.01$)、0.672($P<0.01$)和0.547($P<0.05$); F_v/F_m 与株高呈显著正相关, $R^2=0.488$ ($P<0.05$)。叶绿素含量与脯氨酸含量、SOD活性分别呈极显著和显著负相关, R^2 分别为 -0.823 ($P<0.01$)、 -0.479 ($P<0.05$);脯氨酸含量与 P_n 呈极显著负相关, $R^2=-0.623$ ($P<0.01$);SOD活性与 P_n 、 F_v/F_m 均呈显著负相关, R^2 分别为 -0.434 ($P<0.05$)和 -0.419 ($P<0.05$)。

表9 干旱胁迫下供试谷子品种(系)各性状的相关性分析
Table 9 Correlation coefficients analysis among different traits of tested foxtail millet varieties (lines)
under drought stress conditions

性状 Trait	叶绿素含量 Chlorophyll content	脯氨酸含量 Proline content	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	P_n	F_v/F_m	株高 Plant height
脯氨酸含量 Proline content	-0.823^{**}					
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	-0.479^*	0.561*				
P_n	0.856**	-0.623^{**}	-0.434^*			
F_v/F_m	0.831**	-0.345	-0.419^*	0.891**		
株高 Plant height	0.256	-0.312	-0.254	0.547*	0.488*	
千粒重 1 000-grain weight	0.301	-0.147	-0.219	0.672**	0.219	0.178

注: *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。
Note: * and ** represent significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

2.8 干旱胁迫下谷子各性状的主成分因子分析

主成分分析结果表明,第1个因子的贡献率为52.87%,株高、千粒重、叶绿素含量、脯氨酸含量、 F_v/F_m 、 P_n 和SOD活性起主要作用,主要反映干旱胁迫下谷子生理特性及产量的情况;第2个因子贡献率为19.41%,主要由株高、千粒重、 P_n 和 F_v/F_m 决定,反映籽粒干物质运输与积累情况;第3个因子贡献率为13.47%, P_n 、 F_v/F_m 和千粒重在该因子中起主要作用,主要反映光合作用对干物质积累的贡献;第4个因子贡献率为10.59%,主要由株高和千粒重决定,反映干旱胁迫对产量性状的影响情况。这4个因子的累计贡献率达到98.34%,可有效反映影响开花期谷子抗旱性的主导因素(表10)。

3 讨论

3.1 干旱胁迫对谷子叶绿素合成及光合作用的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,位于类囊体膜,它在光合作用发挥着重要作用^[29]。干旱胁迫显著降低植物叶绿素含量,严重影响叶绿素荧光参数,抑制叶片光合作用,进而影响植物新陈代谢过程^[30]。Jadidi等^[31]研究发现,干旱胁迫下野生小麦叶绿素含量显著降低,进而导致 P_n 、 F_v/F_m 等光合指标显著下降。樊良新等^[32]研究表明干旱胁迫下紫花苜蓿叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量在一定程度上显著降低, P_n 、 T_r 及 G_s 随之大幅度下降。本研究发现,干旱胁迫(DS)下供试谷子品种叶绿素

表 10 干旱胁迫下供试谷子品种(系)各性状主成分及贡献率分析
Table 10 Principal components and contribution rates analysis of different traits
in tested foxtail millet varieties (lines) under drought stress conditions

性状 Trait	因子载荷 Factor loading			
	F_1	F_2	F_3	F_4
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.902	0.215	0.043	0.025
脯氨酸含量 Proline content	0.856	0.334	0.024	0.017
SOD	0.880	0.512	0.073	0.032
P_n	0.871	0.657	0.245	0.108
F_v/F_m	0.803	0.643	0.302	0.231
株高 Plant height	0.931	0.587	0.149	0.306
千粒重 1 000-grain weight	0.909	0.715	0.315	0.245
贡献率/% Contribution rate	52.87	19.41	13.47	10.59
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	52.87	72.28	85.75	98.34
因子权重 Factor weight	0.465	0.131	0.122	0.104

含量、 P_n 、 T_r 、WUE、 F_v/F_m 和 F_v/F_0 均显著低于正常水分条件(CK),表明干旱胁迫显著抑制了谷子叶绿素合成,减弱了光合速率和最大光化学利用效率,降低了其干物质积累,进而导致株高、穗粒重、地上部生物量、千粒重、产量的降低。

3.2 干旱胁迫对谷子抗旱性的影响

渗透调节物质的含量是植物抵御非生物逆境胁迫的重要生理特性之一,逆境条件下植物渗透调节物含量的高低与渗透调节能力的大小密切相关^[33]。赵孟良等^[34]研究表明,随干旱胁迫程度的增加植株叶片脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量逐渐升高。本研究结果显示,干旱胁迫下 26 个供试谷子品种叶片可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量均较 CK 显著升高,表明谷子在干旱胁迫下,细胞通过积累大量渗透调节物质降低了细胞的渗透势,提高了细胞保水能力,从而增加对干旱胁迫环境的耐受性。

干旱胁迫下,植物细胞内迅速积累 ROS,产生大量 O_2^- 和 H_2O_2 ,膜脂会遭受氧化损伤,导致细胞膜结构和稳定性受到破坏^[35]。为抵御高温、干旱等非生物逆境胁迫造成的伤害,植物体内 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶可有效清除细胞内的 ROS^[36]。高桐梅等^[37]研究表明,随干旱胁迫程度的增加,SOD 和 CAT 酶活性先升高后降低。赵振宁等^[38]研究发现,模拟干旱胁迫下,不同大豆品种的 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于正常水分处理的对照。本

研究结果显示,干旱胁迫下,供试谷子品种叶片 SOD 活性显著升高,表明在干旱胁迫时,谷子植株可通过增强 SOD、POD 和 CAT 活性清除细胞内的 ROS,3 个抗氧化酶同时作用,可最大程度地减轻 ROS 对细胞造成的伤害,增加谷子的耐旱性。

3.3 谷子抗旱性评价方法及抗旱指标筛选

植物抗旱性为数量性状遗传,受内部遗传和外部环境等多因素控制,植株形态、细胞结构、生理生化特性等均与植物抗旱性显著相关,且互相联系、互相制约^[39]。近年来,众多学者研究表明,产量性状及其耐旱指数是评价作物耐旱性的重要方法^[40],且在玉米^[41]、小豆^[42]、大麦^[43]、小麦^[44]、高粱^[45]等多种作物上已得到应用,并筛选出相应的作物耐旱种质资源。本研究通过旱棚田间鉴定结果表明,26 份谷子品种(系)的产量耐旱指数(DRI)由高到低为:中谷 989>济谷 30>郑谷 678>天粟 6 号>豫谷 101>冀谷 47>冀谷 168>公谷 88>豫谷 29>豫谷 40>京谷 4 号>豫谷 27>豫谷 18>济谷 27>保谷 22>中谷 2 号>长生 19>嫩选 19>济谷 22>宫米 1 号>济谷 20>洛谷 5 号>赤优金苗 1 号>K32H>龙谷 39>晋谷 40。耐旱等级在 2~5 级。其中,‘郑谷 678’、‘中谷 989’和‘济谷 30’的耐旱性为 2 级,耐旱性强。‘洛谷 5 号’、‘K32H’、‘晋谷 40’、‘龙谷 39’、‘赤优金苗 1 号’的耐旱性为 5 级,耐旱性最弱。产量 DRI 的应用客观评价了谷子的抗旱性,为谷子耐旱性评价奠定基础。

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^[46]。开花期是筛选作物抗旱性的重要生育时期之一^[47]。已有研究表明,不同作物开花期抗旱特性的指标也有所不同。藜麦开花期的抗旱指标以 P_n 、 T_r 、叶片水分利用效率及单株籽粒产量、千粒重等为主要鉴定指标^[48];而开花期干旱胁迫下总根长、总根表面积和总根体积、叶绿素含量及地上部籽粒产量为玉米开花期抗旱性鉴定的主要指标^[49]。本研究选取了与谷子开花期抗旱性相关的多个指标,通过多种计算方法分析,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。叶绿素含量、光合速率、 F_v/F_m 、脯氨酸含量、SOD活性、千粒重及株高与抗旱性能密切相关(表9)。主成分因子分析得出株高、千粒重、叶绿素含量、脯氨酸含量、 F_v/F_m 、 P_n 和SOD活性均在第1个因子上,贡献率为52.87%(表10),表明以上7个指标在谷子抗旱中有着重要的影响,与相关性分析的结果一致。

4 结 论

干旱胁迫下,26个供试谷子品种的叶绿素含量、光合速率(P_n)、叶绿素荧光参数均较正常水分处理(CK)显著下降;可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量则显著增加,且干旱胁迫下各供试品种间可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量存在差异;SOD、POD和CAT活性均显著升高;株高、穗粒重、千粒重、地上部生物量和产量均显著降低。基于产量耐旱指数分析,‘郑谷678’、‘中谷989’和‘济谷30’表现出强耐旱性,耐旱指数(DRI)分别为1.111、1.192和1.144。通过主成分分析筛选出千粒重、株高、 P_n 、 F_v/F_m 、叶绿素含量、脯氨酸含量和SOD酶活性可作为谷子开花期耐旱性鉴定的重要指标。

参考文献 References

- [1] Zhang X B, Lei L, Lai J S, Zhao H M, Song W B. Effects of drought stress and water recovery on physiological responses and gene expression in maize seedlings [J/OL]. *BMC Plant Biology*, (2018-04-25). DOI: doi. org/ 10. 1186/s12870-018-1281-x
- [2] Albacete A A, Martínez-Andújar C, Pérez-Alfocea F. Hormonal and metabolic regulation of source-sink relations under salinity and drought: From plant survival to crop yield stability[J]. *Biotechnology Advances*, 2014, 32(1):12-30
- [3] Yang P M, Huang Q C, Qin G Y, Zhao S P, Zhou J G. Different drought-stress responses in photosynthesis and reactive oxygen metabolism between

- autotetraploid and diploid rice[J]. *Photosynthetica*, 2014, 52(2):193-202
- [4] 魏志刚,王玉成. 植物干旱胁迫响应机制[M]. 北京:科学出版社,2015
Wei Z G, Wang Y C. *Response Mechanism of Plant Drought Stress* [M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese)
- [5] 李红英,程鸿燕,郭昱,段明,马芳芳. 谷子抗旱机制研究进展[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2018,38(1):6-10
Li H Y, Cheng H Y, Guo Y, Duan M, Ma F F. Research progress on drought resistance mechanism of millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2018,38(1): 6-10 (in Chinese)
- [6] Sun M, Huang D J, Zhang A L, Khan I, Yan H D, Wang X S, Zhang X Q, Zhang J, Huang L K. Transcriptome analysis of heat stress and drought stress in pearl millet based on Pacbio full-length transcriptome sequencing [J/OL]. *BMC Plant Biology*, (2020-07-08). DOI:doi. org/10. 1186/s12870-020-02530-0
- [7] 张雁明,刘晓东,马建萍,温琪汾,韩渊怀. 谷子抗旱研究进展[J]. 山西农业科学,2013,41(3):282-285
Zhang Y M, Liu X D, Ma J P, Wen Q F, Han Y H. Research progress on drought resistance of millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(3): 282-285 (in Chinese)
- [8] 张梦如,杨玉梅,成蕴秀,周滔,段晓艳,龚明,邹竹荣. 植物活性氧的产生及其作用和危害[J]. 西北植物学报,2014,34(9):1916-1926
Zhang M R, Yang Y M, Cheng Y X, Zhou T, Duan X Y, Gong M, Zou Z R. Generation, function and harm of plant reactive oxygen species[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(9): 1916-1926 (in Chinese)
- [9] Farooq M A, Niaz A K, Akhtar J, Saifullah, Farooq M, Souri Z, Karimi N, Rengel Z. Acquiring control: The evolution of ROS-Induced oxidative stress and redox signaling pathways in plant stress responses[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 141: 353-369
- [10] Miller G, Suzuki N, Ciftci-Yilmaz S, Mittler R. Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2010,33(4): 453-467
- [11] Choudhury F K, Rivero R M, Blumwald E, Mittler R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination[J]. *The Plant Journal*, 2017, 90(5): 856-867
- [12] Nezhadadhamadi A, Prodhan Z H, Faruq G. Drought tolerance in wheat [J/OL]. *The Scientific World Journal*, (2013-11-11). DOI: doi. org/ 10. 1155/2013/610721
- [13] 祁东梅,王玉芳,史慎奎,张仁梁,周雪峰,王春芳. 不同谷子品种(系)抗旱性鉴定及抗旱机制[J]. 江苏农业科学,2024,52(19):89-95
Qi D M, Wang Y F, Shi S K, Zhang R L, Zhou X F, Wang C F. Drought resistance identification and drought resistance mechanism different foxtail millet varieties (lines)[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(19): 89-95 (in Chinese)
- [14] 薛新伟,刘丹,张婷,韩雯毓,穆安康,于智坤,杨帆,温雅辉,张家林,张永平,王显瑞. 86份谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及筛选[J]. 中国农业科技导报,2025,27(6):39-51
Xue X W, Liu D, Zhang S, Han W Y, Mu A K, Yu Z K, Yang F, Wen Y H, Zhang J L, Zhang Y P, Wang X R. Comprehensive evaluation and screening of drought resistance of 86 millet germplasm resources at germination stage[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(6):39-51 (in Chinese)
- [15] 李哲. 谷子种质资源抗旱性综合评价与鉴定指标筛选[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2025
Li Z. Drought resistance assessment and indicator selection in foxtail millet germplasm[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2025 (in Chinese)
- [16] 赵晋锋,余爱丽,杜艳伟,王高鸿,张鹏. 谷子SiAGPase和SiSSS家族基因对灌浆期干旱的响应[J]. 核农学报,2025,39(3):504-512
Zhao J F, Yu A L, Du Y W, Wang G H, Zhang P. Response of SiAGPase

- and SiSSS family genes in millet to drought at grain filling stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(3): 504-512 (in Chinese)
- [17] 张海燕,汪宝卿,冯向阳,李广亮,解备涛,董顺旭,段文学,张立明. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(11): 1760-1770
- Zhang H Y, Wang B Q, Feng X Y, Li G L, Xie B T, Dong S X, Duan W X, Zhang L M. Effects of drought stress at different growth stages on growth and the activity of osmotic adjustment of sweet potato[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46 (11): 1760-1770 (in Chinese)
- [18] 李云,李维平,李秀峰. 不同品种冬小麦的抗旱性鉴定与分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 17-21
- Li Y, Li W P, Li X F. Identification and analysis of drought resistance of different winter wheat varieties[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 17-21 (in Chinese)
- [19] 窦祎凝,秦玉海,闵东红,张小红,王二辉,刁现民,贾冠清,徐兆师,李连城,马有志,陈明. 谷子转录因子SiNAC18通过ABA信号途径正向调控干旱条件下的种子萌发[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(16): 3071-3081
- Dou Y N, Qin Y H, Min D H, Zhang X H, Wang E H, Diao X M, Jia G Q, Xu Z S, Li L C, Ma Y Z, Chen M. Millet transcription factor SiNAC18 positively regulates seed germination under drought conditions through ABA signaling pathway in foxtail millet (*Setaria italica* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(16): 3071-3081 (in Chinese)
- [20] 王新博,任永哲,岳慧芳,李乐,吕伟增,史校艳,辛泽毓,王志强,林同保. 基于VIGS技术的小麦干旱响应基因TaEF-1a的功能研究[J]. *华北农学报*, 2018, 33(2): 72-78
- Wang X B, Ren Y Z, Yue H F, Li L, Lv W Z, Shi X Y, Xin Z Y, Wang Z Q, Lin T B. Study on the function of wheat drought response gene TaEF-1a based on VIGS technology[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(2): 72-78 (in Chinese)
- [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 Instruction of Plant Physiology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [22] 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
- Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [23] Huang X S, Liu J H, Chen X J. Overexpression of *PtrABF* gene, a bZIP transcription factor isolated from *Poncirus trifoliata*, enhances dehydration and drought tolerance in tobacco via scavenging ROS and modulating expression of stress-responsive genes[J/OL]. *BMC Plant Biology*, (2010-10-25). DOI:doi.org/10.1186/1471-2229-10-230
- [24] Shi J, Fu X Z, Peng T, Huang X S, Fan Q J, Liu J H. Spermine pretreatment confers dehydration tolerance of *Citrus in vitro* plants via modulation of antioxidative capacity and stomatal response [J]. *Tree Physiology*, 2010, 30(7): 914-922
- [25] Jebara S, Jebara M, Limam F, Aouani M E. Changes in ascorbate peroxidase, catalase, guaiacol peroxidase and superoxide dismutase activities in common bean (*Phaseolus vulgaris*) nodules under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(8): 929-936
- [26] Xu F Y, Wang X L, Zhang X R. Chlorophyll fluorescence, photosynthetic and morphological characteristics of waterlogged sesame seedlings [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2017, 18(4): 596-601
- [27] Zhong X M, Sun S F, Li F H, Wang J, Shi Z S. Photosynthesis of a yellow-green mutant line in maize[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(4): 499-505
- [28] NY/T3851-2021. 谷子抗旱性鉴定技术规程[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021
- NY/T3851-2021. Technical regulations for identification of drought resistance of millet[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)
- [29] 张冠初,史晓龙,慈敦伟,丁红,杨吉顺,田家明,张智猛,戴良香. 干旱和盐胁迫对花生干物质积累及光合特性的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(5): 999-1005
- Zhang G C, Shi X L, Ci D W, Ding H, Yang J S, Tian J M, Zhang Z M, Dai L X. Effects of drought and salt stress on dry matter accumulation and photosynthetic characteristics of peanut[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(5): 999-1005 (in Chinese)
- [30] 吴敏,邓平,赵英,赵仕花,陈金妮,舒颖,黄天凤. 喀斯特干旱环境对青冈栎叶片生长及叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4071-4081
- Wu M, Deng P, Zhao Y, Zhao S H, Chen J N, Shu Y, Huang T F. Effects of karst drought environment on leaf growth and chlorophyll fluorescence kinetic parameters of *Quercus Cyclobalanopsis* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4071-4081 (in Chinese)
- [31] Jadidi O, Pour-Aboughadareh A, Bocianowski J, Jamshidi B, Akbari L. Physiological and molecular responses of bread wheat and its wild relative species to drought stress[J/OL]. *Molecular Biology Reports*, (2025-06-27). DOI: 10.1007/s11033-025-10742-6
- [32] 樊良新,刘国彬,薛莲,杨婷,张昌胜. CO₂浓度倍增及干旱胁迫对紫花苜蓿光合生理特性的协同影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(1): 85-93
- Fan L X, Liu G B, Xue S, Yang T, Zhang C S. Synergistic effects of CO₂ concentration doubling and drought stress on photosynthetic physiological characteristics of alfalfa[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(1): 85-93 (in Chinese)
- [33] 黄海霞,连转红,王亮,杨琦琦,魏振艳,马彦军,张金霞. 裸果木渗透调节物质和抗氧化酶活性对干旱的响应[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 227-235
- Huang H X, Lian Z H, Wang L, Yang Q Q, Wei Z Y, Ma Y J, Zhang J X. Responses of osmotic regulators and antioxidant enzyme activities of naked fruit trees to drought[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 227-235 (in Chinese)
- [34] 赵孟良,赵文菊,郭怡婷,钟启文,任延靖. 干旱胁迫及复水对菊芋生长及叶片光合和生理特性的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(4): 49-57
- Zhao M L, Zhao W J, Guo Y T, Zhong Q W, Ren Y J. Effects of drought stress and rehydration on growth, photosynthesis and physiological characteristics of *Jerusalem artichoke*[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2019, 28(4): 49-57 (in Chinese)
- [35] 何小双,蒋晓琪,彭丹丹,彭燕. H₂S对干旱胁迫下白三叶幼苗抗氧化防御能力的影响[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(1): 88-96
- He X S, Jiang X Q, Peng D D, Peng Y. Effects of hydrogen sulfide on antioxidant defense of white clover leaves in response to drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(1): 88-96 (in Chinese)
- [36] 田莉华,周青平,卢素锦,陈有军,魏小星,刘文辉. 不同种类早熟禾苗期抗旱性综合评价[J]. *草地学报*, 2017, 25(3): 561-566
- Tian L H, Zhou Q P, Lu S J, Chen Y J, Wei X X, Liu W H. Comprehensive evaluation of drought resistance of different species of *Poa pratensis* at seedling stage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(3): 561-566 (in Chinese)
- [37] 高桐梅,吴寅,李丰,曾艳娟,王东勇,田媛,卫双玲. 苗期水分胁迫对芝麻生长和生理特性的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(11): 2229-2235
- Gao T M, Wu Y, Li F, Zeng Y J, Wang D Y, Tian Y, Wei S L. Effects of water stress at seedling stage on growth and physiological characteristics of sesame[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(11): 2229-2235 (in Chinese)
- [38] 赵振宁,赵宝麟. 不同大豆品种在萌发期对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 131-136
- Zhao Z N, Zhao B X. Physiological response and drought resistance evaluation of different soybean varieties to drought stress at germination stage [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 131-136 (in Chinese)
- [39] 种培芳,单立山,苏世平,李毅. 甘肃旱区5个经济林树种的苗期抗旱性综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 198-204, 247
- Chong P F, Shan L S, Su S P, Li Y. Comprehensive evaluation of drought

- resistance of five economic forest tree species in arid areas of Gansu Province at seedling stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 198-204, 247 (in Chinese)
- [40] 陈彦惠,王利明,戴景瑞. 热带、亚热带自交系与中国温带玉米种质杂交种的研究[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 50-57
- Chen Y H, Wang L M, Dai J R. Study on hybrid between tropical and subtropical inbred lines and China temperate maize germplasm[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 50-57 (in Chinese)
- [41] 苏桂华,臧宏图,孙传波,李春雷,孙志超,苏义臣. 49份CIMMYT热带、亚热带玉米种质苗期耐旱性鉴定[J]. 东北农业科学, 2022, 47(6): 7-13
- Su G H, Zang H T, Sun C B, Li C L, Sun Z C, Su Y C. Identification of drought tolerance of 49 CIMMYT tropical and subtropical maize germplasm at seedling stage[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, 47(6): 7-13 (in Chinese)
- [42] 单云鹏,陈新慧,万平,赵波,杨凯,李奕松. 小豆种质资源苗期抗旱性评价及抗旱资源筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(5): 1151-1159
- Shan Y P, Chen X H, Wan P, Zhao B, Yang K, Li Y S. Drought resistance evaluation and drought resistance resource screening of adzuki bean germplasm resources at seedling stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(5): 1151-1159 (in Chinese)
- [43] 徐银萍,潘永东,刘强德,姚元虎,贾延春,任诚,火克仓,陈文庆,赵锋,包奇军,张华瑜. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2020, 46(3): 448-461
- Xu Y P, Pan Y D, Liu Q D, Yao Y H, Jia Y C, Ren C, Huo K C, Chen W Q, Zhao F, Bao Q J, Zhang H Y. Drought resistance identification and drought resistance index screening of barley germplasm resources at adult stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3): 448-461 (in Chinese)
- [44] 李龙,毛新国,王景一,吕小平,柳玉平,景蕊莲. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 988-999
- Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Liu Y P, Jing R L. Evaluation on drought resistance of wheat germplasm resources[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(7): 988-999 (in Chinese)
- [45] 王玉斌,平俊爱,牛皓,楚建强,杜志宏,吕鑫,李慧明,张福耀. 粒用高粱种质中后期抗旱性鉴定筛选与分类指标评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4039-4049
- Wang Y B, Ping J A, Niu H, Chu J Q, Du Z H, Lv X, Li H M, Zhang F Y. Identification, screening and classification index evaluation of drought resistance of grain sorghum germplasm in the middle and late stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(22): 4039-4049 (in Chinese)
- [46] 刘英,王尧旭,邹新竹,杨光,任生,徐兆师. 作物干旱胁迫响应机制与抗旱分子育种策略[J]. 生物工程学报, 2025, 41(11): 4419-4442
- Liu Y, Wang Y X, Zou X Z, Yang G, Ren S, Xu Z S. Response mechanism of crop drought stress and drought-resistant molecular breeding strategy[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2025, 41(11): 4419-4442 (in Chinese)
- [47] 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 resources at adult stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3076-3087 (in Chinese)
- [48] 朱春蓉,华劲松,罗小燕,戴红燕,刘永嘉. 开花期干旱胁迫对藜麦光合特性及产量的影响[J]. 中南农业科技, 2025, 46(1): 25-28, 48
- Zhu C R, Hua J S, Luo X Y, Dai H Y, Liu Y J. Effects of drought stress at flowering stage on photosynthetic characteristics and yield of quinoa[J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2025, 46(1): 25-28, 48 (in Chinese)
- [49] 寸玉洁,郑大圣,王瑞. 氮素对开花期受旱玉米根系特性及产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(1): 139-150
- Cun Y J, Zheng D S, Wang R. Effects of nitrogen on root characteristics and yield formation of drought-affected maize at flowering stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(1): 139-150 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 秦娜, 博士, 中共党员, 河南省农业科学院粮食作物研究所, 副研究员, 河南农业大学硕士生导师, 研究方向: 谷子、绿豆突破性种质创制与鉴定, 重要功能基因挖掘与利用, 新品种选育与评价鉴定。主持国家自然科学基金等国家及省部级科研项目9项、参与国家及省部级项目4项, 获河南省科技进步奖二等奖1项、三等奖1项、河南省农牧渔丰收奖1项, 以第一或通讯作者身份发表学术论文11篇, 获发明专利3项、品种权8项、软件著作权1项、制定国家标准1项、河南省地方标准2项, 河南省农业科学院青年创新营骨干人才。



通讯作者简介: 李君霞, 研究员。现任河南省农业科学院粮食作物研究所特色杂粮研究室主任。国家谷子高粱产业体系郑州综合试验站站长、河南省甘薯杂粮产业技术体系首席科学家, 中国粟类作物学会学术委员会委员、中国农学会杂粮分会委员、河南省杂粮产业创新战略联盟秘书长、河南省特色杂粮工程技术研究中心副主任、河南省谷子产业创新战略联盟副理事长等。主持或参与国家产业技术体系、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国家重点研发计划、河南省科技攻关、河南省政府招标专项(贵州茅台酒用高粱研究)、河南省农业良种联合攻关、中央引导地方科技发展专项等40多项。育成国审杂粮品种8个、河南省审杂粮品种14个。获河南省科技进步奖二等奖4项、三等奖1项, 河南省农牧渔业合作奖1项。获植物新品种授权8项、专利9项、软件著作权6项。发表核心期刊论文49篇, 参编著作6部。参与制定国家标准1项、行业标准2项、河南省地方标准6项、团体标准2项。