杨帆,王康乐,刘昱希,等.绿豆种质资源苗期耐旱性鉴定及耐旱种质筛选[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(4):112-123.
Yang F, Wang K L, Liu Y X, et al.Identification of drought tolerance at seedling stage and screening of drought-tolerant germplasm resources in mung bean[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(4):112-123.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202501015

绿豆种质资源苗期耐旱性鉴定及耐旱种质筛选

杨帆,王康乐,刘昱希,赵子涵,王晗,张心瑜,张蕾,刘冬晔,魏爱丽*

(太原师范学院 生物科学与技术学院,山西 晋中 030619)

摘　要:[目的]绿豆是重要的药食同源作物,在全世界广泛种植。随着种植业结构优化和公众保健理念及膳食结构的改变,市场对绿豆的需求量日益增加。山西省是我国绿豆主产区之一,但当地自然降雨量少,干旱是制约农业发展的重要因素之一,积极筛选耐旱绿豆种质资源对于促进旱地利用及产业发展有重要战略意义。[方法]本研究以35份绿豆种质资源为试验材料,采用10%的聚乙二醇6000(PEG6000)溶液模拟干旱胁迫,对绿豆幼苗进行处理,之后测定绿豆幼苗的株高、根长、鲜重、干重、根表面积等12项形态指标和丙二醛、可溶性蛋白、过氧化物酶、叶绿素、超氧阴离子自由基等10项生理指标。计算各品系的耐旱系数,并进行相关性分析。同时,结合隶属函数分析、主成分分析和聚类分析方法,对35份绿豆品系的耐旱性进行综合评价。[结果]依据绿豆苗期耐旱性分级标准和耐旱性综合评价结果,将35份绿豆品系划分为高耐旱、耐旱、中耐旱、对干旱敏感和对干旱高敏感5个等级。筛选出1份高耐旱绿豆品系(529),9份耐旱绿豆品系(311、360、368、386、500、307、751、92和940),14份中耐旱绿豆品系,7份对干旱敏感绿豆品系和4份对干旱高敏感绿豆品系。[结论]本研究从35份绿豆品系中筛选出1份高耐旱性和9份耐旱性绿豆品系,这些耐旱性强的绿豆种质资源可为绿豆的种植实践与产业生产提供理论依据,有利于绿豆产业在干旱地区的可持续发展以及山西省旱地高效利用。

关键词:绿豆;种质资源;苗期;耐旱性;综合评价
中图分类号:Q945.78　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)04-0112-12

Identification of drought tolerance at seedling stage and screening of drought-tolerant germplasm resources in mung bean

Yang Fan, Wang Kangle, Liu Yuxi, Zhao Zihan, Wang Han, Zhang Xinyu, Zhang Lei, Liu Dongye, Wei Aili*

(*College of Biological Sciences and Technology, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China*)

Abstract: [Objective] Mung bean is an important dual-purpose crop for both medicinal and food uses, widely cultivated worldwide. With ongoing optimization of agricultural production systems and evolving public health consciousness and dietary patterns, market demand for mung beans continues to rise. As one of China's main production regions, Shanxi Province faces significant agricultural constraints due to limited natural precipitation and frequent drought conditions. The active identification of drought-tolerant mung bean germplasm resources holds strategic importance for promoting arid land utilization and agricultural industry development. [Method] In this study, 35 mung bean germplasm resources were evaluated under simulated drought stress using 10% polyethylene glycol 6000 (PEG6000) solution at seedling stage. Twelve morphological traits, including plant height, root length, fresh weight, dry weight, and root surface area, and 10 physiological indicators, including malondialde-

收稿日期:2025-01-11　　**修回日期**:2025-04-04
基金项目:2024年山西省高等学校大学生创新创业训练计划项目(20241075);太原市国家重大人才工程专家工作站(TYSGJ202201);山西省基础研究计划项目(20210302124365, 20210302124235, 20210302124235)
作者简介:杨帆(ORCID:0000-0002-1247-0566),讲师,博士,研究方向:作物基因功能和作物种质资源
*通信作者**:魏爱丽,教授,博士,E-mail: weial@tynu.edu.cn

hyde, soluble protein, peroxidase, chlorophyll, and superoxide anion radicals, were measured. Drought tolerance coefficients were calculated for each strain, followed by correlation analysis. Comprehensive evaluation of drought tolerance were performed using integrated approaches including membership function analysis, principal component analysis, and hierarchical cluster analysis. [Result] Based on established drought tolerance classification criteria and comprehensive evaluation, the 35 mung bean strains were categorized into five distinct groups: highly drought-tolerant (one strain: 529), drought-tolerant (9 strains: 311, 360, 368, 386, 500, 307, 751, 92 and 940), moderately drought-tolerant (14 strains), drought-sensitive (7 strains), and highly drought-sensitive (4 strains). [Conclusion] This study successfully identified one highly drought-tolerant and nine drought-tolerant mung bean germplasm resources from the 35 evaluated. These drought-tolerant mung bean germplasm resources provided a robust theoretical basis for mung bean cultivation practices and industrial production, while supporting sustainable development of mung bean industry in arid areas and promoting efficient utilization of dryland resources in Shanxi Province.

Keywords: Mung bean, Germplasm resources, Seedling stage, Drought tolerance, Comprehensive evaluation

绿豆(*Vigna radiata* (L.) Wilczek)的经济价值显著,被誉为"绿色珍珠"[1],在全球农业中占据重要地位。作为一种广泛种植的豆类植物,绿豆在全球多个地区均有分布,中国的绿豆种植规模为世界第2,而山西省以其独特的优势成为中国的绿豆主产区之一,其种植面积在全国排名第3[2]。

山西省长期以来"煤多水少、频繁干旱",干旱状况极为严峻。干旱对山西省的生态环境和农业生产造成了深远的影响,不仅降低了作物的产量和品质,还增加了病虫害的发生概率和防治难度。选育高产、耐旱的作物新品种,有利于适应干旱,促进山西省农业可持续发展、保障粮食安全和农民增收[3]。绿豆作为山西省的主要杂粮作物,具有耐旱、耐瘠薄、适应性强等特点,在山西省的农业种植结构调整和可持续发展中起着至关重要的作用。因此,选育优质绿豆品系对于应对干旱挑战、提升绿豆产业效益具有重要意义。现阶段,绿豆耐旱性的鉴定时期涉及范围广泛,从种子的芽期开始,历经幼苗生长的苗期,一直延伸至整个生育阶段[4]。在这些阶段中,苗期抗旱鉴定因其具备培育周期相对较短、试验操作简便以及所得鉴定结果稳定可靠等多种优势,已在玉米[5]、水稻[6]、大麦[7]等众多作物中广泛运用。在绿豆的整个生长发育进程中,苗期占据着举足轻重的地位,同时,这一时期也是绿豆耐旱特性得以显著展现的重要阶段。此阶段绿豆根系开始发育,叶片逐渐展开,对水分的需求和响应较为敏感。研究绿豆品系苗期的耐旱性,可以更加直观地观察到不同品种或处理条件下绿豆的耐旱性表现,为后续的耐旱性鉴定和基因发掘提供科学依据[8]。

绿豆及其它作物的耐旱特性属于由多基因调控的遗传特征,主要通过形态层面的改变以及生理机能的调整而呈现。不同品系作物对土壤干旱的适应与抗性存在差异,耐旱性强的品系在形态结构和生理生化等方面会形成一系列应对干旱的响应与机制[9-10]。在形态指标方面,Comas等[11]研究根系形态特征(如根长、根深、根直径和根毛密度)在植物抗旱性中的作用,发现深层根系和较高的根冠比能够显著提高植物在干旱条件下的水分吸收效率,从而增强耐旱性;在生理指标方面,抗氧化系统的调节、细胞内渗透势的调控、细胞膜结构的动态调整等机制尤为关键。通过这些机制的协同,植物能够合成并积累多种保护性物质,进而有效缓解因干旱引发的细胞损伤,降低干旱对自身生长发育的负面影响[12]。研究显示,丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、可溶性蛋白(Soluble protein, SP)和脯氨酸(Proline, Pro)等渗透调节物质的积累,常被视作胁迫信号,其在干旱条件下的含量变化与作物品系的耐旱性密切相关[13];超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)与过氧化氢酶(Catalase, CAT)等酶,构成植物抗氧化调节机制中的关键部分。它们能够清除植物体内的活性氧,高效地降低活性氧对植物细胞造成的氧化损伤,在维持植物细胞内氧化还原平衡、增强植物对干旱胁迫的耐受性方面发挥着不可或缺的作用[14]。如段义忠等[10]选用了茎高、茎粗、叶面积、叶绿素含量、脯氨酸含量等10个指标对21份绿豆种质资源进行抗旱期综合评价。但现有对绿豆耐旱性研究多集中于单一或少数几个形态和生理指标,缺乏对多指标协同作用的系统性分析。本研究综合分析22个形态和生理指标以评价绿豆耐旱性,通过填补现

有研究的空白,旨在为绿豆抗旱栽培技术的优化提供科学支持。

现阶段多种作物耐旱评价方法的广泛应用,为农业科研人员和育种专家提供了更为精准和科学的评估手段,显著提升了耐旱性评估的准确性和效率[15]。何源等[5]针对玉米苗期与萌发期进行耐旱指数筛选及评价时,借助逐步回归法构建出最优回归方程;同时,综合运用相关性分析、隶属度分析以及聚类分析,对玉米种质资源的耐旱性进行鉴定,并筛选耐旱指标,进一步拓展了耐旱性评价的维度。张军等[16]在对8份强筋小麦品种的耐旱性进行评价时,通过主成分分析、聚类分析以及隶属函数法,对不同小麦品种的耐旱性能展开综合评估,在此过程中还精简了评价指标,从而提升了评价工作的效率。因此,本研究采用主成分分析、隶属函数分析及聚类分析方法,旨在更为准确地综合评价多个绿豆品系的耐旱性,遴选出耐旱性较强的绿豆种质资源。

本研究以35个不同的绿豆品系为试验材料,于绿豆苗期用10%的聚乙二醇6000(PEG6000)模拟干旱环境,之后测定35个绿豆品系的株高、根长、鲜重、脯氨酸含量、叶绿素含量等总计22项形态与生理指标。依据干旱胁迫下绿豆苗期的耐旱性分级标准,将供试绿豆品系划分为5个耐旱等级,并运用了相关性分析、主成分分析、隶属函数分析以及聚类分析等一系列统计分析手段,深入了解各形态和生理指标与耐旱性之间的关系,以筛选出耐旱性优异的种质资源,为后续耐旱作物育种和农业生产提供种质资源和理论依据,促进干旱地区绿豆产业的可持续发展。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为35个不同绿豆品系(来源地信息见表1),由太原师范学院生物科学与技术学院和山西农业大学农业基因资源研究中心共同繁殖保存。

1.2 试验方法

1.2.1 绿豆幼苗培育及模拟干旱胁迫

预试验阶段,从表1的35个绿豆品系中随机挑选10个绿豆品系,分别用5%、10%和15%浓度的PEG6000进行处理。发现5%的PEG6000处理下绿豆幼苗生长正常,10%的PEG6000处理下约半数的绿豆幼苗出现叶片卷缩现象,15%的PFG6000处理下绿豆幼苗几乎全部出现叶片卷缩,且有少数死亡。另外,以10%的PEG6000溶液进行处理时,各品系之间生长特征差异相比另外2个浓度更加明显。基于此结果,开展绿豆苗期耐旱性筛选试验时,选用10%的PEG6000溶液。

表1 35个绿豆品系来源地信息

Table 1 The origins of 35 mung bean strains

品系 Accession	来源地 Origins	品系 Accession	来源地 Origins	品系 Accession	来源地 Origins
31	湖南	360	山东	781	湖北
49	湖南	362	山东	818	湖北
61	湖南	368	山东	824	湖北
92	湖北	376	山东	844	湖北
159	湖北	386	山东	860	湖北
200	黑龙江	447	山西	876	湖北
239	江苏	449	山西	877	江苏
301	河南	500	河北	889	江苏
307	河南	514	安徽	940	江苏
311	河南	529	河北	944	江苏
313	河南	751	湖南	935	吉林
348	山东	780	湖北		

正式试验时,从35个绿豆品系中分别挑选80粒外观形态统一且颗粒饱满的绿豆种子,将其浸泡于70%酒精溶液中进行30 s的消毒处理,随后使用超纯水冲洗3次。完成冲洗后,向装有种子的容器内加入足量超纯水,确保种子完全被浸没,再将其放置于温度设定为25 ℃的培养箱中进行恒温培育。在培育期间,每隔12 h取出绿豆,观察其萌发情况,并更换1次超纯水。48 h后,挑选芽长为2~3 mm的绿豆,移植到育苗盘中,并保证胚芽向下。待幼苗生长到两叶一心时间苗,用10%的PEG6000对绿豆进行干旱胁迫处理。7 d后观察不同绿豆品系的表型特征并拍照记录。

1.2.2 对干旱处理后绿豆幼苗进行分级

基于肉眼观察不同品系绿豆幼苗的形态特征对被试35个绿豆品系进行分级,分级标准如下:

1级(高耐旱型):植株生长旺盛,茎杆粗壮,分枝多且生长正常,在干旱胁迫下与正常水分条件下无明显差异,无萎蔫、黄叶等现象。

3级(耐旱型):植株生长基本正常,茎杆较为粗壮,分枝略有减少,叶片颜色稍淡,轻度萎蔫,中午高温时叶片稍有卷曲,但早晚可恢复。

5级(中耐旱型):植株生长受抑制,茎杆细弱,

分枝明显减少,叶片出现较多萎蔫,颜色发黄,卷曲程度加重,早晚恢复不明显。

7级(对干旱敏感型):植株生长严重受阻,茎杆纤细,几乎无新分枝,叶片大部分枯黄,萎蔫下垂,部分叶片开始脱落。

9级(对干旱极敏感型):植株濒临死亡,茎杆干枯,叶片几乎全部脱落,仅残留少量枯黄叶片,生长基本停止[17]。

1.2.3　形态指标测定

干旱处理7 d后,在各绿豆品系中抽取长势一致的幼苗5株,测定株高、地上部鲜重、干重(将根和地上部分分别放于滤纸内,置于80 ℃烘箱中烘干48 h以上,至恒重时测定干物质量),根部相关指标(根长、根体积、根表面积、单位体积根长、根平均直径、根尖数和根分枝数)用MICROTEK扫描仪(型号:MRS-9600TFU2L)进行扫描分析,上述指标均重复3次。

1.2.4　生理指标测定

用紫外可见分光光度法测定叶绿素(CHL)含量[18];用酸性茚三酮显色法测定脯氨酸(Pro)含量[19];用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量[20];用考马斯亮蓝法[21]测定可溶性蛋白(SP)的含量;用蒽酮比色法[22]测定可溶性糖(SS)含量;用愈创木酚法[23]测定过氧化物酶(POD)活性;用磺基水杨酸法[24]测定过氧化氢酶(CAT)活性;用SOD抑制氮蓝四唑(NBT)在光下的还原作用原理[25]来测定超氧化物歧化酶(SOD)的活性;用过氧化氢反应法[26]测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性;用化学显色法[27]测定超氧阴离子自由基($O_2^-\cdot$)活性。各生理指标均重复3次。

1.3　统计分析

通过对比干旱胁迫与正常水分供应条件下不同绿豆品系的形态与生理指标相对值,即耐旱系数(Drought resistance coefficient, DC),来分析这些品系在干旱条件下的耐旱性差异。该方法可消除不同个体间的固有差异,使得耐旱性评价结果更具科学性与可比性[28]。

$$DC=\text{干旱胁迫环境中某一指标的测定值}/\text{正常水分供应状态下该指标的测量值} \quad (1)$$

变异系数(Coefficient of variation,CV)可用于衡量各观测值离散程度或变异状况,能够有效反映出数据相对于均值的离散趋势,在评估数据的稳定性与变异性等方面有着广泛应用[29]。

$$CV=SD/Mean\times 100\% \quad (2)$$

采用隶属函数法对供试35份绿豆的耐旱性进行评价分析,并基于各指标的权重计算综合得分D值。最后结合耐旱等级、耐旱系数和D值结果来综合评价绿豆各品系对干旱胁迫的耐受性[29]。

$$U(X_{ij})=(Xi,j-Xi,\min)/(Xi,\max-Xj,\min),i=1,\cdots,n \quad (3)$$

式中,U为隶属函数值,Xi,j为第j个品种在第i个主成分上所对应的数值,$Xi,\min$为第i个主成分数值集合中的最小值,$Xi,\max$为第i个主成分数值集合中的最大值。

$$w_i=p/\sum(i=1,n)pi,i=1,\cdots,n \quad (4)$$

式中,wi为第i个主成分在整体分析中的重要程度,此重要程度以权重形式体现;Pi为第i个主成分在整个数据变异解释中所占的贡献率,反映了第i个主成分对总体信息的贡献份额。

$$D=\sum(i=1,n)[U(X_{ij})\times w_i] \quad (5)$$

式中,D为第i个绿豆品系于干旱胁迫环境下,经综合考量各项因素后得出的耐旱性综合评估数值。

用Excel 2023软件对耐旱系数和变异系数进行计算;用SPSS 28软件进行主成分分析和隶属函数分析,并计算D值;用迈维云中的高级相关性聚类热图绘制各指标相关性分析图;用R(4.4.2)绘制系统聚类图。

2　结果与分析

2.1　绿豆种质苗期耐旱性分级

依据绿豆苗期耐旱性分级准则,将绿豆的耐旱性分为1、3、5、7和9共5个级别。其中,1级代表高耐旱的绿豆品系,9级则表示对干旱高度敏感的绿豆品系。各等级的表型特征见图1。研究结果显示,高耐旱(1级)的绿豆品系仅有1份,耐旱(3级)的绿豆品系有9份,中耐旱(5级)的绿豆品系有14份,对干旱敏感(7级)的绿豆品系有7份,对干



1:高耐旱,生长情况基本正常,没有出现旱害症状;3:耐旱,生长情况基本正常,几乎没有或仅有少数叶片边缘出现卷缩;5:中耐旱,一半以上叶片面积出现卷缩,且有叶片青枯;7:对干旱敏感,叶片大面积干枯;9:对干旱高敏感,严重受害,植株完全枯萎

1: Highly drought-tolerant, growth essentially normal, no visible drought symptoms; 3: Drought-tolerant growth essentially normal, minimal leaf edge curling; 5: Moderately drought-tolerant, more than half of the leaf area curled with partial leaf desiccation; 7: Drought-sensitive, extensive leaf desiccation (>75% leaf area affected); 9: Highly drought-sensitive, severe damage, complete plant withering

图1 绿豆苗期耐旱性单株分级标准

Fig. 1 Drought tolerance grading standards for individual mung bean plants at seedling stage

旱高敏感(9级)的绿豆品系有4份。

2.2 35份绿豆品系的形态及生理指标耐旱系数分析

由表2可见,株高、地上部鲜重、根鲜重、地上部干重、根长、根表面积、单位体积根长、根体积、根尖数和根分枝数10项形态指标的平均值均低于1,说明在受到外界干旱胁迫后,这些指标都呈现下降趋势,表明绿豆在干旱环境下生长受到了明显的抑制。其中,株高是反映植物生长状况的重要指标,干旱胁迫会抑制细胞伸长和分裂,导致株高显著降低;地上部鲜重反映了植物地上部分的生物量积累,干旱胁迫会抑制光合作用和营养物质的合成与运输,导致地上部鲜重下降;单位体积根长反映了根系的密度和分枝情况,干旱胁迫会抑制根系分枝和密度,导致单位体积根长下降。由表3可见,在生理指标中,丙二醛、可溶性糖、脯氨酸、抗坏血酸过氧化物酶、过氧化氢酶和超氧阴离子自由基的平均值都大于1,说明上述指标在绿豆幼苗遭受干旱胁迫后呈上升趋势。丙二醛含量的提高与细胞膜受损程度有关,含量越高,细胞膜受损程度越大,该品系的耐旱性可能越差;可溶性糖和脯氨酸活性提高与其参与调节绿豆受到干旱胁迫时的细胞渗透压有关;过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化物酶活性的提高,表明绿豆抗氧化能力增强,有利于缓解干旱胁迫所带来的不利影响。各指标耐旱系数的变异系数差异较大,根平均直径和叶绿素的变异系数最小(1.6%和30.0%),这表明在不同样本中,这2个指标相对稳定,干旱胁迫后的变化幅度较小;株高和过氧化氢酶的变异系数最大(110.3%和150.6%)说明这2个指标在不同样本间差异较大,受干旱胁迫后变化程度较大。

2.3 35份绿豆品系各性状的耐旱系数开展相关性剖析

由图2可见,在12项形态指标中,地上部鲜重与根长、根鲜重、根分枝数之间呈现极显著正相

表2　绿豆干旱胁迫后各形态指标耐旱系数

Table 2　Drought tolerance coefficients of morphological indicators in mung bean under drought stress

性状 Trait	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数/% CV
PH	0.125	5.667	0.883	0.974	110.3
AFW	0.091	1.569	0.572	0.322	56.2
RFW	0.342	1.236	0.707	0.238	33.6
ADW	0.203	0.582	0.923	0.669	72.4
RDW	0.026	6.138	1.251	1.106	88.4
RL	0.251	1.565	0.587	0.269	45.7
RSA	0.272	0.119	0.660	0.327	49.5
RAD	0.798	1.550	1.146	0.144	12.6
RLPV	0.491	1.555	0.825	0.227	27.5
RV	0.295	0.856	0.753	0.433	57.5
RT	0.244	1.131	0.621	0.245	39.5
RF	0.218	1.530	0.584	0.299	51.2

注:PH:株高;AFW:地上部鲜重;RFW:根鲜重;ADW:地上部干重;RDW:根干重;RL:根长;RSA:根表面积;RAD:根平均直径;RLPV:单位体积根长;RV:根体积;RT:根尖数;RF:根分枝数。图2、表5同。

Note:PH: Plant height; AFW: Above ground fresh weight; RFW: Root fresh weight; ADW: Above ground dry weight; RDW: Root dry weight; RL: Root length; RSA: Root surface area; RAD: Root average diameter; RLPV: Root length per unit volume; RV: Root volume; RT: Root tip number; RF: Root branching number; The same as Fig 2 and Table 5.

表3　绿豆干旱胁迫后各生理指标耐旱系数

Table 3　Drought tolerance coefficients of physiological indicators in mung bean under drought stress

性状 Trait	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数/% CV
CHL	0.416	1.473	0.948	0.285	30.0
Pro	0.156	5.386	1.354	0.955	70.5
MDA	0.648	0.654	1.211	0.477	39.4
SP	0.241	0.104	0.874	0.476	54.4
SS	0.490	4.119	1.260	0.799	63.4
POD	0.107	5.565	0.815	1.061	130.2
CAT	0.091	25.000	0.829	5.767	150.6
SOD	0.246	0.063	0.918	0.489	53.3
APX	0.436	0.343	1.354	0.504	37.2
$O_2^-\cdot$	0.580	4.225	1.711	0.804	47.0

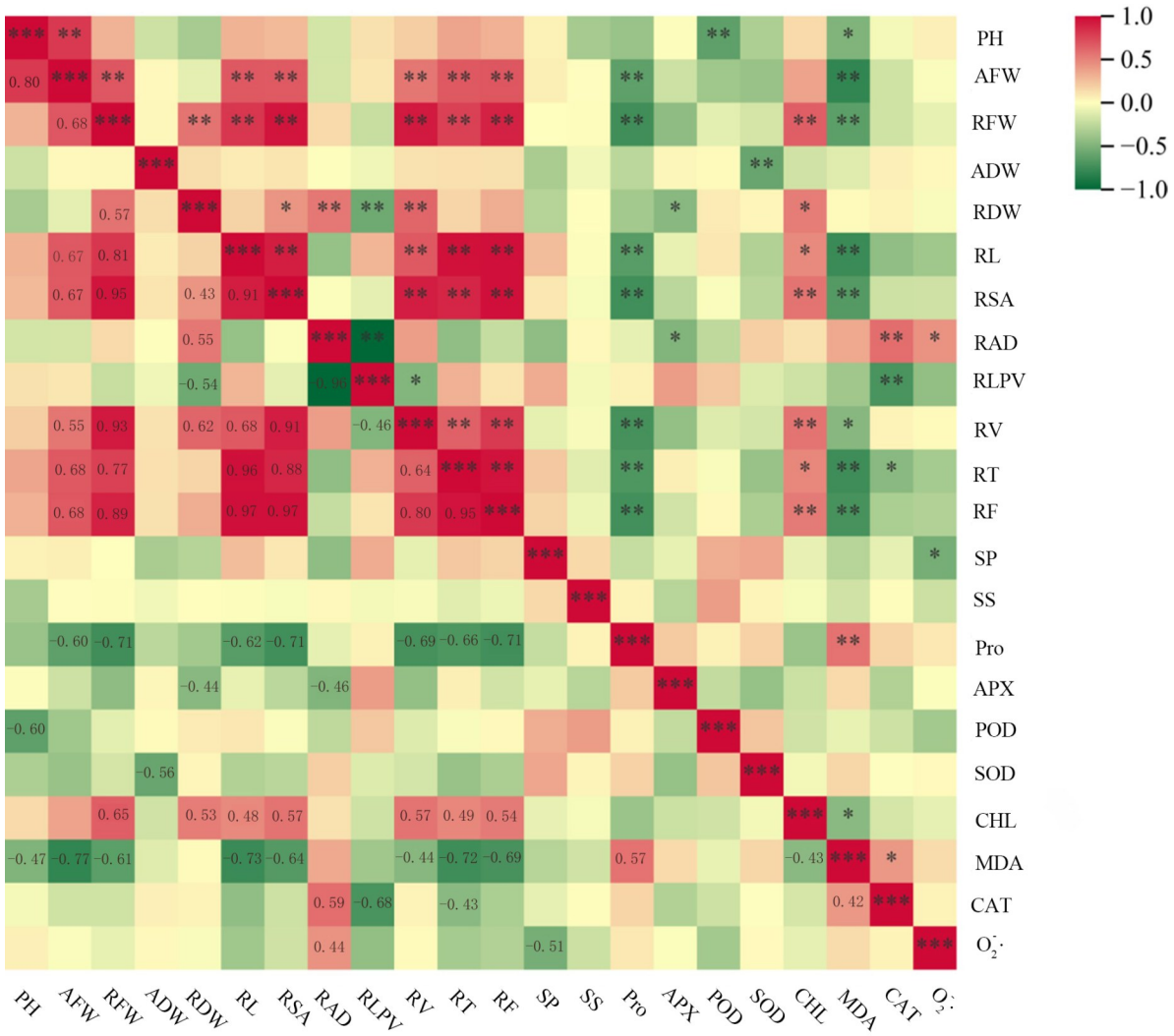
注:CHL:叶绿素;Pro:脯氨酸;MDA:丙二醛;SP:可溶性蛋白;SS:可溶性糖;POD:过氧化物酶;CAT:过氧化氢酶;SOD:超氧化物歧化酶;APX:抗坏血酸过氧化物酶;$O_2^-\cdot$:超氧阴离子自由基。图2、表5同。

Note:CHL: Chlorophyll; Pro: Proline; MDA: Malondialdehyde; SP: Soluble protein; SS: Soluble sugar; POD: Peroxidase; CAT: Catalase; SOD: Superoxide dismutase; APX: Ascorbic acid Peroxidase; $O_2^-\cdot$: Superoxide anion radical; The same as Fig 2 and Table 5.

关。此外,根鲜重与多项根系特征指标,包括根干重、根长、根表面积、根体积、根尖数以及根分枝数,均呈现出极显著的正相关关系;而根平均直径与单位体积根长之间则呈现极显著的负相关。在10个生理指标中,可溶性蛋白与超氧化物歧化酶表现出极显著的正相关,丙二醛和过氧化氢酶之间同样存在极显著的正相关。分析形态与生理指标之间的关联,发现地上部鲜重与过氧化氢酶呈极显著正相关;根的平均直径与丙二醛含量之间同样表现出极显著的正相关趋势。

2.4　35份绿豆品系各性状的主成分分析

对35份绿豆品系的22个指标进行主成分分析(表4),可进一步筛选鉴定绿豆耐旱性的关键指标。根据累计贡献率超过80%的标准,本试验选定了8个主成分,其累积贡献率为81.079%。在主成分分析结果中,各主成分对数据变异的解释程



*为显著相关($P<0.05$),**为高度显著相关($P<0.01$),***为极高度显著相关($P<0.001$)

* represented significant correlation ($P<0.05$), ** represented highly significant correlation ($P<0.01$), *** represented extremely highly significant correlation ($P<0.001$)

图2 干旱胁迫下绿豆苗期各性状耐旱系数相关性

Fig.2 Correlation analysis of drought tolerance coefficients of various traits in mung beans at the seedling stage under drought stress

度有所不同。其中,第1主成分的贡献率达到27.436%,这表明该主成分在解释数据整体差异方面具有较高的影响力。第2主成分的贡献率为14.353%,其对数据变化的解释能力次之。第3至第8主成分贡献率为4.161%~8.688%,这些主成分虽然各自的贡献率相对前几个主成分较低,但它们共同补充了对数据中不同方面变异的解释,为进一步分析不同绿豆品系耐旱性提供了多维度的视角。从表5可以看出,主成分因子F1主要与根分枝数、可溶性糖和丙二醛等性状密切相关;主成分因子F2主要与地上部干重和丙二醛等因子密切相关;主成分因子F3主要与地上部鲜重、叶绿素和过氧化物酶等性状密切相关;主成分因子F4主要与抗坏血酸过氧化物酶等因子密切相关;主成分因子F5主要与抗坏血酸过氧化物酶、过氧化物酶和超氧阴离子自由基等性状密切相关;主成分因子F6主要与单位体积根长等因子密切相关;主成分因子F7主要与POD等性状密切相关;主成分因子F8主要与MDA等因子密切相关。综上,从第1与第2主成分可见,影响绿豆耐旱性的指标主要为地上部干重、根分枝数、可溶性糖含量和丙二醛含量。

表4　主成分因子特征值及贡献率

Table 4　Principal component factor eigenvalues and contribution rates

主成分因子 Comprehensive factors	特征值 Eigen values	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Accumulative contribution rate
F1	6.036	27.436	27.436
F2	0.158	14.353	41.788
F3	1.911	8.688	50.477
F4	1.889	8.585	59.062
F5	1.604	7.293	66.355
F6	1.263	5.740	7.095
F7	1.061	4.823	76.918
F8	0.916	4.161	81.079

2.5　35份绿豆品系耐旱性能综合评估

*D*值作为耐旱性综合评估数值,是通过对12个形态指标(株高、根长、鲜重等)和10个生理指标(丙二醛、可溶性蛋白、叶绿素含量等)进行标准化处理后,结合隶属函数分析计算得出的综合评价值。它能够全面反映35个绿豆品系在干旱胁迫下的整体表现,避免单一指标的局限性。表6中,*D*值最大的品系为529,其*D*值为0.619,表明该品系耐旱性最强;*D*值最小的品系为49,其*D*值为0.220,表明该品系耐旱性最弱。比较不同品系绿豆*D*值可见,随着排名的递增,*D*值逐渐减小。

2.6　对35份绿豆品系的聚类分析

利用R语言对35个绿豆品系进行系统聚类分析(图3),通过计算距离矩阵,采用平均欧氏距离法将35份供试绿豆划分为5类(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ)。其中529为第Ⅰ类(*D*值为0.619),311、360、368、386、500、307、751、92和940为第Ⅱ类(*D*值为0.534～0.464),313、944、889、159、876、348、780、818、301、362、514、935、449和877为第Ⅲ类(*D*值为0.434～0.354),31、844、860、61、200、447和824为第Ⅳ类(*D*值为0.339～0.286),239、781、49和376为第Ⅴ类(*D*值为0.261～0.220)。将聚类分析所得5个类别中的绿豆品系分别与本文2.1节中5个等级所对应的绿豆品系进行对比,可见,聚类分析结果与材料实际耐旱情况基本一致。

表5　绿豆8个主成分因子载荷矩阵

Table 5　Eight principal component factors loading matrices of mung beans

性状 Trait	主成分因子 Comprehensive factors							
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
PH	−1.107	0.069	−0.171	−0.571	0.573	−0.371	−1.295	−0.134
AFW	−1.179	−0.977	−0.002	0.972	−1.220	−0.189	0.572	−0.770
RFW	−0.142	−0.366	−1.071	−0.110	−0.375	−0.189	−0.090	−1.069
ADW	−0.538	0.005	−0.238	−0.371	0.597	1.590	0.113	1.410
RDW	0.251	−0.022	−0.136	−0.906	−1.392	0.245	0.436	0.365
RL	−1.093	−0.787	−0.157	−0.564	0.271	0.168	−0.476	−1.024
RSA	0.413	−1.802	0.755	1.058	0.830	1.240	−0.298	−0.173
RAD	0.039	0.693	0.339	−0.144	0.766	1.611	0.889	−1.392
RLPV	0.901	−1.421	1.191	1.378	0.402	0.068	1.854	0.392
RV	0.028	0.078	−0.065	−1.086	−0.040	−0.397	−0.747	0.140
RT	0.139	0.461	0.795	−0.831	−0.067	−0.928	−0.543	−0.681
RF	1.839	−0.157	−0.450	0.043	−0.118	0.236	−0.432	1.311
CHLA	−1.149	0.724	0.630	−0.578	0.921	−0.873	0.577	0.958
Pro	−0.733	−1.260	−0.554	−0.731	−0.555	−0.039	−1.321	−1.170
MDA	1.912	0.315	0.996	1.051	−0.661	0.361	−0.485	−0.287
SP	0.459	−0.058	−1.524	1.131	0.914	−1.090	1.230	0.115
SS	0.571	−1.792	−0.028	−1.358	0.606	−1.367	−0.341	−0.117
POD	−0.950	0.002	0.045	0.363	−0.310	−1.643	0.505	−0.411
CAT	0.347	1.226	−0.664	−0.704	−0.081	0.920	1.242	0.156
SOD	−0.044	0.028	0.346	0.577	−0.264	−0.662	0.016	1.637
APX	−0.003	0.820	−0.321	0.072	0.446	−1.817	0.785	−0.020
$O_2^-\cdot$	−0.693	0.386	0.962	−0.238	0.170	−1.145	−0.688	−0.464

表6 不同绿豆品系耐旱性综合评价D值

Table 6 Comprehensive evaluation of D—value for drought tolerance of different mung bean strains

品系 Accession	D值 D—value	排名 Rank	品系 Accession	D值 D—value	排名 Rank	品系 Accession	D值 D—value	排名 Rank
529	0.619	1	301	0.428	13	824	0.339	25
311	0.534	2	449	0.412	14	447	0.333	26
368	0.525	3	877	0.408	15	860	0.320	27
360	0.518	4	514	0.404	16	61	0.318	28
386	0.488	5	935	0.403	17	200	0.316	29
500	0.484	6	348	0.387	18	844	0.301	30
92	0.473	7	780	0.381	19	31	0.286	31
940	0.471	8	876	0.373	20	781	0.261	32
307	0.466	9	159	0.372	21	239	0.259	33
751	0.464	10	889	0.370	22	376	0.222	34
818	0.434	11	944	0.356	23	49	0.220	35
362	0.428	12	313	0.354	24			

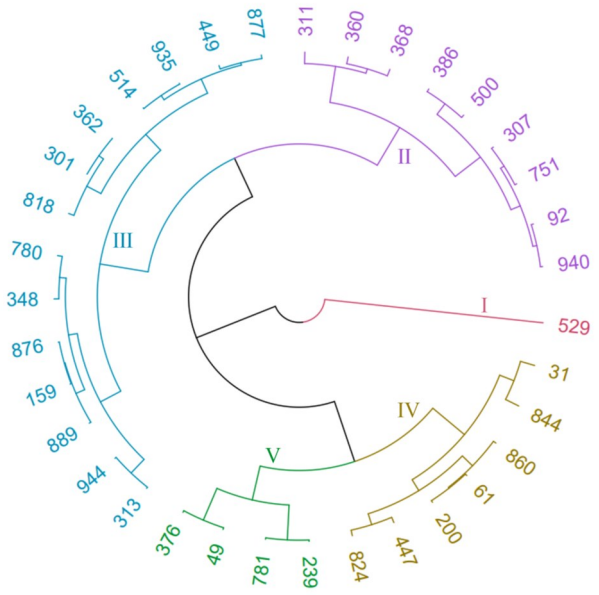


图3 35种绿豆品系基于D值的耐旱性分析

Fig.3 Analysis of drought tolerance based on D-value for 35 mung bean strains

3 讨论

3.1 适用于绿豆干旱胁迫的PEG6000溶液浓度

PEG6000作为一种高分子的渗透剂,不会穿透植物细胞壁进入细胞内部进而引发细胞质壁分离,能够让植物的组织和细胞遭受类似自然干旱条件下的水分压力[30]。尹智超等[31]分析了10%的PEG6000溶液模拟干旱胁迫下绿豆的生理和生化响应,发现干旱胁迫导致绿豆叶片相对含水量下降,同时抗氧化酶活性和渗透调节物质含量显著增加。为了更准确地评估不同品系绿豆的耐旱性,进行了不同浓度梯度(5%、10%和15%)PEG6000对不同品系试验材料影响的预试验,发现相较于其它2种浓度,10%的PEG6000处理下的不同绿豆品系在形态指标上差异最为明显,综合前人研究及预试验结果,本次试验选用10%的PEG6000溶液对绿豆进行干旱胁迫。

3.2 绿豆耐旱性评价

在对作物进行耐旱性评价时,首先要注意耐旱性评价指标的重要性,选择合适恰当的指标。薛新伟等[32]在对内蒙古86份谷子种质中后期抗旱性鉴选及评价中选用了穗长、株高等9个指标,并对其综合抗旱系数(CDC)进行了排序;黄年英等[33]在鉴定56份绿豆种质种子萌发期耐旱性时,以相对发芽率、相对发芽势和相对根长等10个指标作为耐旱性评价指标。本研究使用12个形态指标和10个生理指标来评价绿豆种质的耐旱性,包括地上及地下长度、鲜重、叶绿素含量等,这些指标可综合反映绿豆种质在干旱胁迫下的生理响应和生长特征,有利于更加全面地评估绿豆种质资源耐旱性。对各项变异系数进行分析时,在形态指标中,发现根平均直径的变异系数最小,这可能表明在干旱环境下,绿豆植株对根平均直径的调控展现出较高的一致性;株高变异系数最大,可能是因为株高会受到其自身和外界环境多种因素的影响,在干旱条件下,植物可能会通过调整株高来适应环境,例如降低株高以减少水分蒸发等[34]。在生理指标中,叶绿素变异系数最小,因为叶绿素

与植物的光合作用密切相关,可能在干旱条件下,植物对叶绿素的调节相对较为稳定,以维持一定的光合作用能力;过氧化氢酶变异系数最大,是由于过氧化氢酶是一种重要的抗氧化酶,在干旱条件下,植物可能会通过调节过氧化氢酶的活性来应对氧化应激,其变异系数大可能意味着不同植物在应对干旱时对过氧化氢酶的调节策略差异较大。由此可见,本文所调查的22项指标中,株高和过氧化氢酶这2项指标对干旱较为敏感。对作物进行耐旱性评价时,还要注意所选用耐旱性评价方法的有效性。本研究运用了主成分分析、隶属函数分析以及聚类分析等多元化的评估手段来鉴定绿豆品系的耐旱性能。这些方法能够有效地整合多个指标的数据,进而增强耐旱性评价的精确度和可信度。

目前,对于绿豆耐旱性鉴定及评价主要集中于筛选优良耐旱品种,如郭容秋[17]对67份绿豆品种的16个农艺性状进行综合分析,利用平均隶属函数法将被试绿豆分为耐旱型品种、中间型品种、敏感型品种和极敏感型品种4类;徐宁等[8]运用隶属函数值法对18份绿豆种质进行耐旱性鉴定,结果筛选出洮98502、冀绿2号、吉绿11号、吉绿9号为耐旱型(R)种质,及7份耐旱中间型(MR)绿豆种质和7份耐旱敏感型(S)绿豆种质。相较于前人研究,本研究的品系更加广泛、评价指标更加多元,通过22个形态和生理指标对来自10个省份的35份绿豆品系的耐旱性进行综合评价,最终筛选出1份高耐旱绿豆品系529及9份耐旱绿豆品系,可丰富绿豆耐旱种质资源。

3.3　研究展望

虽然本研究对不同绿豆品系的耐旱性进行了初步鉴定和筛选,但仍存在一定的局限性。耐旱性作为一个复杂的性状,受到众多环境因素如温度、湿度、土壤条件以及遗传因素等的共同影响,特定条件下所得的结果,难以完全反映绿豆在自然环境中的真实耐旱表现。未来的研究方向可以从多个方面展开,例如,Rajkhowa等[35]使用Motif Search工具进行Motif预测,突出了与绿豆干旱胁迫响应相关的特定基序,致力于鉴定和理解绿豆耐旱性的分子机制,通过深入研究相关基因的表达和调控,为培育耐旱绿豆品系提供更科学有效的方法。还可在不同的气候区域、土壤类型等环境条件下进行大田试验,明确绿豆在野外环境中的耐旱性,为农业生产提供适应性更强的绿豆品系,助力农业可持续发展。

4　结论

本研究选取了35个不同的绿豆品系,运用10% PEG6000模拟干旱法对绿豆实施干旱胁迫处理,以探究各品系在干旱环境下的响应情况。之后,依据所观察到的表型特征,将供试的绿豆材料初步划分为5个等级,即1、3、5、7和9级。同时,测定不同绿豆品系的株高、根长和侧根数等12个形态指标和脯氨酸、叶绿素和丙二醛等10个生理指标,计算耐旱系数和变异系数,结合耐旱系数进行相关性分析,隶属函数分析,主成分分析以及聚类分析,最终筛选得到高耐旱绿豆品系529。未来可通过基因鉴定、大田试验等手段,进一步理解绿豆耐旱性的遗传基础、挖掘耐旱作物种质资源,从而推动绿豆产业可持续发展。

参　考　文　献

[1]石少龙. 绿豆产业待新篇——杂粮系列谈之七[J]. 中国粮食经济,2024(11):78-79.
Shi S L. Green bean industry awaits a new chapter——The seventh series of miscellaneous grains [J]. China Grain Economy, 2024(11): 78-79.

[2]刘慧. 我国绿豆生产现状和发展前景[J]. 农业展望,2012,8(6):36-39.
Liu H.Present situation and development prospect of mung bean production in China [J]. Agricultural Outlook, 2012, 8(6): 36-39.

[3]李娜,霍治国,钱锦霞,等. 山西省干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(5):100-107.
Li N, Huo Z G, Qian J X, et al. Risk analysis and zoning of drought disaster in Shanxi [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(5): 100-107.

[4]赵雪英,张泽燕,朱慧珺,等. 绿豆全生育期抗旱性鉴定及形态指标研究[J]. 华北农学报,2017,32(S1):180-184.
Zhao X Y, Zhang Z Y, Zhu H J, et al. Analysis of drought resistance and morphological index of the whole growth of mung bean [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(S1): 180-184.

[5]何源,谷晓童,冯莉情,等. 玉米苗期和萌发期抗旱指数筛选及评价[J]. 中国农业科技导报,2024,26(10):30-40.
He Y, Gu X T, Feng L Q, et al. Screening and evaluation of drought resistance index for maize hybrids during seedling and germination stages [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(10): 30-40.

[6]陈晨. OsWRKY95调控水稻抗旱性的功能研究[D]. 长春:吉

林大学,2024.
Chen C. Study on the function of OsWRKY95 in regulating drought resistance of rice[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[7]汪军成,孟亚雄,徐先良,等.大麦苗期抗旱性鉴定及评价[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):135-143.
Wang J C, Meng Y X, Xu X L, et al. Identification and assessment on drought-resistance of *Hordeum vulgare* L. at seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013,31(4): 135-143.

[8]徐宁,王明海,包淑英,等.18份绿豆品种资源苗期耐旱性鉴定[J].吉林农业科学,2015,40(6):17-20.
Xu N, Wang M H, Bao S Y, et al. Identification of drought tolerance of 18 mungbean germplasm resources at seedling stage[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences,2015,40(6): 17-20.

[9]Jiang W, Wu Z G, Wang T, et al. Physiological and transcriptomic analyses of cadmium stress response in *Dendrobium officinale* seedling[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 148: 152-165.

[10]段义忠,张雄,亢福仁,等.绿豆抗旱指标鉴选与评价[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):256-261.
Duan Y Z, Zhang X, Kang F R, et al.Evaluation and selection of drought resistance of mung bean (*Vigna* radiate L.)[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 256-261.

[11]Comas L H, Becker S R, Cruz V M V, et al. Root traits contributing to plant productivity under drought[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 442.

[12]Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M B, Zulfiqar F, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator[J]. Antioxidants, 2020, 9(8): 681.

[13]Vilela R D, Bezerra B K L, Froehlich A, et al. Antioxidant system is essential to increase drought tolerance of sugarcane[J]. Annals of Applied Biology, 2017, 171(3): 451-463.

[14]Kyu K L, Taylor C M, Douglas C A, et al. Genetic diversity and candidate genes for transient waterlogging tolerance in mungbean at the germination and seedling stages[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1297096.

[15]Tardieu F, Simonneau T, Muller B. The physiological basis of drought tolerance in crop plants: a scenario-dependent probabilistic approach[J]. Annual Review of Plant Biology, 2018, 69: 733-759.

[16]张军,魏国,彭彦珉,等.8份强筋小麦品种抗旱性评价[J].麦类作物学报,2024,44(4):442-452.
Zhang J, Wei G, Peng Y M, et al. Drought resistance evaluation of eight strong gluten wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(4): 442-452.

[17]郭容秋.绿豆品种资源农艺性状评价与萌发期耐旱性鉴定[D].长春:吉林农业大学,2021.
Guo R Q. Evaluation of agronomic traits of mungbean variety resources and identification of drought tolerance in germination period[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.

[18]张凤艳,蒋万枫,张宁.紫外可见分光光度法测定橄榄油中的叶绿素铜[J].中国食品添加剂,2017,28(12):197-203.
Zhang F Y, Jiang W F, Zhang N. Determination of copper chlorophyll in olive oil by ultraviolet spectrophotometry[J]. China Food Additives, 2017, 28(12): 197-203.

[19]杨艳君,冯志威,赵红梅,等.除草剂胁迫下谷子脯氨酸含量及代谢酶活性的比较[J].山西农业科学,2019,47(9):1501-1504,1550.
Yang Y J, Feng Z W, Zhao H M, et al.Comparison of proline content and metabolic enzymes activities of foxtail millet under herbicide stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(9): 1501-1504, 1550.

[20]Polzin A, Dannenberg L, Schneider T, et al. Malondialdehyde assay in the evaluation of aspirin antiplatelet effects[J]. Pharmacology, 2019, 103(1-2): 23-29.

[21]Seleiman M F, Ali N, Nungula E Z, et al. Enhancing germination and seedling growth of barley using plasma-activated water (PAW) with neutralized pH[J]. Cogent Food & Agriculture, 2024, 10(1): 2390162.

[22]谢冰,饶在生,向金友,等.蒽酮比色法测定烟叶中可溶性糖的不确定度评定[J].中国测试,2015,41(S1):10-13.
Xie B, Rao Z S, Xiang J Y, et al. Evaluation of uncertainty of the determination of soluble sugar in tobacco by anthrone colorimetry[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(S1): 10-13.

[23]吕春芳,李海霞,贾然然,等.植物过氧化物酶活性测定实验方法的改良[J].轻工科技,2024,40(2):15-18.
Lü C F, Li H X, Jia R R, et al. Improvement of experimental method for determination of plant peroxidase activity[J]. Light Industry Science and Technology, 2024, 40(2): 15-18.

[24]Hadwan M H, Hussein M J, Mohammed R M, et al. An improved method for measuring catalase activity in biological samples[J]. Biology Methods & Protocols, 2024, 9(1): bpae015.

[25]Jiang J M, Zhang N, Srivastava A K, et al. Superoxide dismutase positively regulates Cu/Zn toxicity tolerance in *Sorghum bicolor* by interacting with Cu chaperone for superoxide dismutase[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 480: 135828.

[26]张艺腾,管清杰,于洋,等.紫穗槐抗坏血酸过氧化物酶(APX2)基因的克隆及抗旱性功能验证[J].黑龙江农业科学,2024(8):51-59.
Zhang Y T, Guan Q J, Yu Y, et al. Cloning of ascorbate peroxidase (APX2) gene from *Amorpha fruticosa* L. and functional validation of drought resistance[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(8): 51-59.

[27]Rohman M M, Ahmed I, Molla M R, et al. Evaluation of salt tolerant mungbean (*Vigna radiata* L.) genotypes on growth through bio-molecular approaches[J]. Bangladesh Journal of Agricultural Research, 2019, 44(3): 469-492.

[28]Mafakheri A, Siosemardeh A, Bahramnejad B, et al. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars[J]. Australian Journal of Crop

Science, 2010, 4(8): 580-585.

[29]周学超,胡海波,李峰,等. 不同基因型大豆田间抗旱性综合评价及抗旱品种筛选[J]. 山西农业科学,2024,52(4):16-24.
Zhou X C, Hu H B, Li F, et al. Comprehensive evaluation of field drought resistance and selection of drought-resistant varieties of different genotypes of soybean [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(4): 16-24.

[30]Tahir N A, Rasul K S, Lateef D D, et al. *In vitro* evaluation of Iraqi Kurdistan tomato accessions under drought stress conditions using polyethylene glycol-6000[J]. Life, 2024, 14(11): 1502.

[31]尹智超,卢环,秦萍,等. 绿豆苗期对聚乙二醇模拟旱胁迫的生理响应[J]. 作物杂志,2014(1):109-115.
Yin Z C, Lu H, Qin P, et al. Physiological responses of polyethylene glycol-induced water stress on mungbean seedlings[J]. Crops, 2014(1): 109-115.

[32]薛新伟,杨帆,穆安康,等. 内蒙古86份谷子种质中后期抗旱性鉴选及评价[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(5):34-43.
Xue X W, Yang F, Mu A K, et al. Identification and evaluation of drought tolerance for 86 milletgermplasms at mid to late growth stage in Inner Mongolia [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 34-43.

[33]黄年英,朱珍珍,刘昌燕,等. 绿豆萌发期耐旱种质资源筛选评价和遗传多样性分析[J]. 福建农业学报,2021,36(3):255-263.
Huang N Y, Zhu Z Z, Liu C Y, et al. Genetic diversity of mung bean germplasms with drought-tolerance at seed germination stage[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36(3): 255-263.

[34]Azeem A, Mai W X, Ali R, et al. Growth prediction models and dynamics of three fodder crops under fresh and brackish water irrigation in dry-land regions [J]. Sustainable Environment, 2024, 10(1):2379145.

[35]Rajkhowa S, Zaheen A, Hussain S Z, et al. Harnessing virtual insights: a computational study on the molecular characterization of a drought-inducible RNA-binding protein for enhancing drought tolerance in mungbean(*Vigna radiata* L.)[J]. ChemistrySelect, 2024, 9(36): e202403028.

(编辑:郭玥微)