

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0590

朝天椒种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选

王虹, 贾毛毛, 李金玲, 鞠乐, 李梦春, 杨玲, 郑明燕

(南阳市科学院 河南南阳 473000)

摘要:为探究适宜的朝天椒抗旱性评价方法、筛选出抗旱性强的朝天椒品种,以河南省栽培推广面积较大的28个朝天椒品种为试验材料,设置0(CK)和5%聚乙二醇-6000(PEG-6000)溶液2个处理水平,测定不同朝天椒种质萌发期的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长和苗高6项指标。以6项指标的抗旱系数作为抗旱性评价依据,运用综合抗旱系数、相关性分析、主成分分析、隶属函数值法、灰色关联度分析、聚类分析等多元方法进行综合评价及评价指标筛选。通过主成分分析将6个单项指标转化为3个相互独立的综合指标,累计贡献率为85.475%。以抗旱性度量值为基础进行聚类分析,将28个朝天椒品种的抗旱性划分为5级,其中超强抗旱型品种2个,分别是朝天椒20号和周园早丰。通过回归分析建立回归方程 $y=-0.107+0.145\times\text{活力指数}+0.094\times\text{发芽势}+0.176\times\text{根长}$,表明活力指数、发芽势、根长是朝天椒萌发期抗旱性鉴定的重要指标。

关键词:朝天椒;萌发期;抗旱性;抗旱指标;综合评价

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-146-09

Comprehensive evaluation of drought resistance of hot pepper germplasm resource during germination stage and drought resistance index screening

WANG Hong, JIA Maomao, LI Jinling, JU Le, LI Mengchun, YANG Ling, ZHENG Mingyan

(Nanyang Academy of Sciences, Nanyang 473000, Henan, China)

Abstract: To explore suitable methods for evaluating drought resistance in hot pepper, and to screen for germplasm resources with strong drought resistance, this study used 28 hot pepper germplasms with relatively large cultivation and promotion areas as experimental materials. Two treatment levels were set: 0(CK) and 5% PEG-6000 solution. Six indexes, including germination rate, germination potential, germination index, vitality index, root length, and seedling height, were measured during the germination period for each material. Using the drought resistance coefficient of each indicators as the evaluation basis, a variety of methods including comprehensive drought resistance coefficient, correlation analysis, principal component analysis, membership function value method, grey correlation analysis, and cluster analysis were applied to conduct a comprehensive evaluation of drought resistance and to screen for identification indicators. The results of principal component analysis showed that the six individual indicators could be transformed into three mutually independent comprehensive indicators, with a cumulative contribution rate of 85.475%. Cluster analysis based on drought resistance measurement values classified the 28 hot pepper germplasms into five drought resistance levels, among which Chaotianjiao No. 20 and Zhouyuanzaofeng exhibited extremely strong drought resistance. Further regression analysis established the equation: $y=-0.107+0.145\times\text{vigor index}+0.094\times\text{germination potential}+0.176\times\text{root length}$, indicating that vigor index, germination potential, and root length were critical indexes for evaluating drought resistance of hot pepper in the germination period.

Key words: Hot pepper; Germination stage; Drought resistance; Drought resistance index; Comprehensive evaluation

干旱是限制植物生长发育的主要环境因子,对作物的产量和品质具有显著影响^[1]。在各类非生物

胁迫中,干旱所造成的农作物损失居于首位,成为农业可持续发展的主要瓶颈^[2]。据统计,全球约

收稿日期:2025-08-18;修回日期:2025-12-23

基金项目:河南省大宗蔬菜产业技术体系(HARS-22-07-Z4)

作者简介:王虹,女,助理研究员,主要从事蔬菜栽培技术研究。E-mail:wanghong316@163.com

通信作者:郑明燕,女,副研究员,主要从事蔬菜栽培技术及遗传育种研究。E-mail:zmy123335@sina.com

36%的土地属于干旱与半干旱地区。在我国,这类地区的总面积占土地面积的47%^[3],占耕地面积的38%^[4],且其他地区在作物生长季也常遭受不同程度的干旱。解决干旱问题的有效途径是筛选和培育抗旱品种^[5],而准确地鉴别作物品种(系)的抗旱性,是培育抗旱品种的基础。种子萌发是植物生长的第一步^[6],直接关系到植物的出苗情况,种子萌发期是对逆境最为敏感的时期,是衡量植物抗性强弱的关键时期。种子萌发期的抗旱性评价是抗旱作物品种筛选的有效途径之一^[7]。现已在谷子、玉米、花生、小麦、豌豆、豇豆、油菜、辣椒等多种农作物上开展了研究^[8-15]。因多种因素综合影响种子萌发期的抗旱性,故单个指标评价存在一定的局限性,采用多指标综合评价能更系统地反映植物的抗旱性^[16]。因此,筛选出简便且有效的鉴定指标与方法,是抗旱性鉴定工作的关键^[17]。

朝天椒为茄科辣椒属作物,是辣椒的1个变种^[18],具有干鲜两用、经济效益好等特点^[19-20]。近年来,朝天椒栽培面积占全国辣椒栽培面积的比重逐年上升,其中,河南省朝天椒种植面积居全国首位,稳定在13.33万hm²左右^[21]。朝天椒根系较细弱,吸水能力不强,对水分有严格的要求,喜欢较干爽的土壤条件。若水分胁迫严重,极易造成根系发育受阻和植株生长迟缓,从而影响产量和品质。因此,筛选出抗旱性强的朝天椒品种尤为重要。目前,已有关于辣椒^[12-13,22]抗旱性的研究报道,但其分析方法相对单一。针对当前朝天椒抗旱性多种分析方法综合评价研究的空白,笔者采用综合评价方法,对河南省栽培推广面积较大的28个朝天椒品种的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、苗高进行鉴定和评价,以期明确朝天椒萌发期抗旱性评价中可利用的指标及简单、可靠的方法,为朝天椒抗旱育种及品种推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

以河南省栽培推广面积较大的28个朝天椒品种为试验材料,详见表1。

1.2 试验设计

本试验于2024年10月至2025年1月在南阳市科学院六楼生化实验室进行。为模拟干旱胁迫,采用5%PEG-6000溶液进行处理(T),并设置蒸馏水处理为对照(CK)。

采取随机区组排列,挑选大小一致并且饱满的

种子50粒,用75%乙醇溶液消毒2min,再用无菌水冲洗3遍,置于铺有2层滤纸的发芽盒里。每个处理3次重复,置于28℃恒温光照培养箱(光照/黑暗为12h/12h)中进行种子萌发试验。发芽期内每4d对滤纸和PEG-6000溶液进行一次更新。

1.3 测定指标及方法

将胚芽突破种皮大于1mm定义为发芽,每日统计发芽数,并据此于第5天和第7天分别计算发芽势和发芽率。培养至第12天时,从各处理中随机取样5株幼苗,使用精度为1mm的刻度尺测其苗高和根长,计算公式如下:

发芽势(GE)/%=(第5天发芽种子数/供试种子数)×100;

发芽率(GR)/%=(第7天发芽种子数/供试种子数)×100;

发芽指数(GI)/%= $\sum(Gt/Dt)$;

活力指数(VI)/%=根长× $\sum(Gt/Dt)$ 。

Gt为发芽试验终期内每日发芽数,Dt为发芽日数。

单项抗旱系数(drought resistance coefficient, DC)、综合抗旱系数(comprehensive drought resistance coefficient, CDC)、权重因子系数(ω_i)、综合指标的隶属函数值 $[\mu(x_i)]$ 、抗旱性度量值(drought resistance comprehensive evaluation value, D)、指标权重系数 $[\omega_i(\gamma)]$ 、加权抗旱系数(weight drought resistance coefficient, WDC)等计算公式参考文献[8]。

1.4 数据统计分析

利用Microsoft Excel 2003进行数据的统计整理,利用SPSS 24.0进行相关性分析、主成分分析和聚类分析。以各项指标DC作为比较序列,D、WDC作为参考序列进行灰色关联度分析。最后,以D为参考序列,对各项指标DC进行逐步回归分析,获得回归方程。

2 结果与分析

2.1 朝天椒萌发期对干旱胁迫的响应

由图1-A可知,材料15、25和27发芽率抗旱系数位居前三,显著高于其他供试材料,材料16发芽率抗旱系数最低;由图1-B可知,材料20和10发芽势抗旱系数较高,二者差异不显著,但显著高于其他供试材料,材料12发芽势抗旱系数最低;由图1-C可知,材料24发芽指数抗旱系数最高,显著高于其他供试材料;从图1-D可以看出,材料15、18和20活力指数抗旱系数较高,三者之间差异不显

表1 供试朝天椒品种名称及来源
Table 1 Name and source of tested pepper varieties

编号 No.	品种名称 Variety name	品种来源 Variety source	类型 Type
1	安椒早辣二号 Anjiaozaola No. 2	安阳市农业科学院 Anyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
2	天椒 2 号 Tianjiao No. 2	驻马店市农业科学院 Zhumadian Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
3	天椒 3 号 Tianjiao No. 3	驻马店市农业科学院 Zhumadian Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
4	周樱红 3 号 Zhouyinghong No. 3	周口市农业科学院 Zhoukou Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
5	洛研香辣 13 号 Luoyanxiangla No. 13	洛阳农林科学院 Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences	簇生型 Cluster type
6	周樱红 6 号 Zhouyinghong No. 6	周口市农业科学院 Zhoukou Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
7	红焰新贵 Hongyanxingui	郑州市蔬菜研究所 Zhengzhou Vegetable Research Institute	簇生型 Cluster type
8	濮椒 201 Pujiao 201	濮阳市农业科学院 Puyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
9	濮椒 202 Pujiao 202	濮阳市农业科学院 Puyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
10	周园早丰 Zhouyuanzaofeng	河南周园种业有限公司 Henan Zhouyuan Seed Industry Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
11	豫园三樱 9 号 Yuyuansanying No. 9	河南省农业科学院蔬菜研究所 Vegetable Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
12	朝天椒 9 号 Chaotianjiao No. 9	河南鼎优农业科技有限公司 Henan Dingyou Agriculture Technology Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
13	豫樱 2 号 Yuying No. 2	河南省农业科学院蔬菜研究所 Vegetable Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
14	朝天椒 11 号 Chaotianjiao No. 11	河南鼎优农业科技有限公司 Henan Dingyou Agriculture Technology Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
15	包黑子十八 Baoheizi 18	河南省农得丰农业有限公司 Henan Province Nongdefeng Agriculture Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
16	包黑子十九 B Baoheizi 19 B	河南省农得丰农业有限公司 Henan Province Nongdefeng Agriculture Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
17	包黑子大撮 Baoheizidacuo	河南省农得丰农业有限公司 Henan Province Nongdefeng Agriculture Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
18	永盈 C1 Yongying C1	河南省农得丰农业有限公司 Henan Province Nongdefeng Agriculture Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
19	朝天椒 18 号 Chaotianjiao No. 18	河南鼎优农业科技有限公司 Henan Dingyou Agriculture Technology Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
20	朝天椒 20 号 Chaotianjiao No. 20	河南鼎优农业科技有限公司 Henan Dingyou Agriculture Technology Co., Ltd.	簇生型 Cluster type
21	红焰 837 Hongyan 837	郑州市蔬菜研究所 Zhengzhou Vegetable Research Institute	簇生型 Cluster type
22	颖科 40 Yingke 40	漯河市农业科学院 Luohe Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
23	颖科 68 Yingke 68	漯河市农业科学院 Luohe Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
24	三樱 8 号 Sanying No. 8	河南省农业科学院蔬菜研究所 Vegetable Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
25	宛椒 207 Wanjiao 207	南阳市农业科学院 Nanyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
26	宛椒 208 Wanjiao 208	南阳市农业科学院 Nanyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
27	宛椒 211 Wanjiao 211	南阳市农业科学院 Nanyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type
28	宛椒 209 Wanjiao 209	南阳市农业科学院 Nanyang Academy of Agricultural Sciences	簇生型 Cluster type

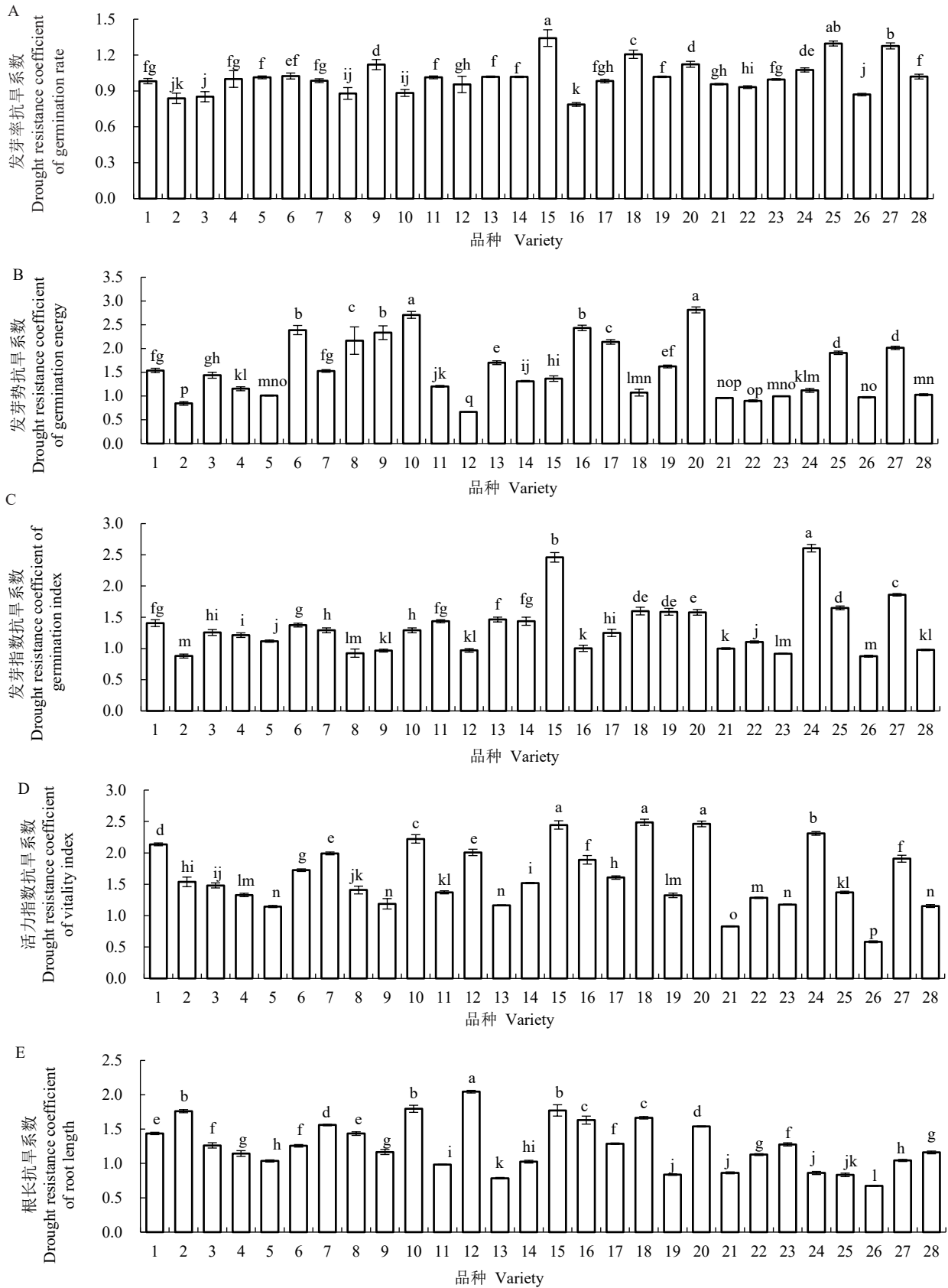
著,但与其他供试材料差异显著,材料 26 活力指数抗旱系数最小;从图 1-E 可知,材料 12 根长抗旱系数最大,显著高于其他供试材料,材料 26 的根长抗旱系数最小;由图 1-F 可知,材料 18 苗高抗旱系数最大,显著大于其他供试材料,材料 4 的苗高抗旱系数最小。

由表 2 可知,干旱胁迫对各指标的影响不同。发芽率抗旱系数和苗高抗旱系数较小,对干旱最敏

感;活力指数抗旱系数和发芽势抗旱系数较大,对干旱反应迟缓。各指标对比显示,发芽势抗旱系数波动范围最大,变异幅度为 2.15,且变异系数高达 39.74%;发芽率抗旱系数变异最小,变异幅度为 0.56,变异系数为 13.46%。

2.2 干旱胁迫下朝天椒各项指标抗旱系数的频率分布

由表 3 可以看出,各性状 DC 值在同一区间的



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significantly difference at 0.05 level.

图 1 不同朝天椒品种干旱胁迫下萌发期发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长和苗高的抗旱系数

Fig. 1 Drought resistance coefficients of germination rate germination energy, germination index, vitality index, root length and seedling height in germination period of different hot pepper varieties under drought stress

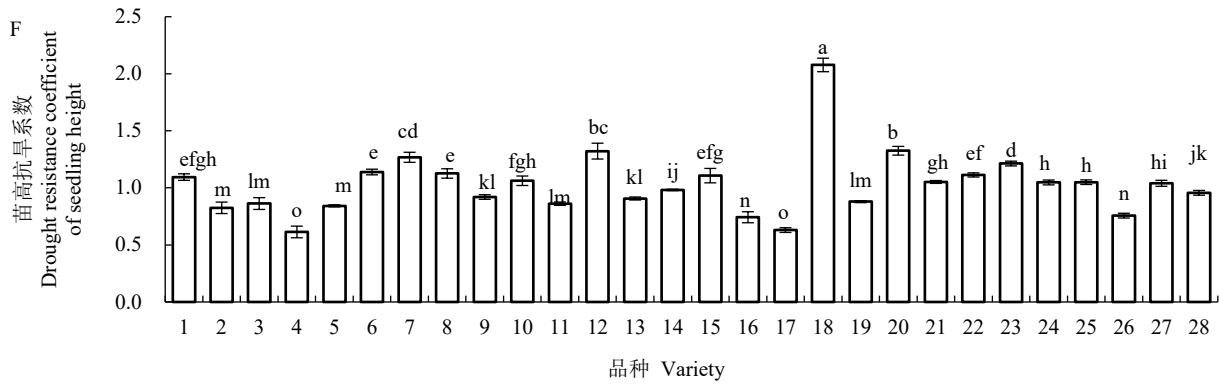


图1 (续)

Fig. 1 (Continued)

表2 萌发期各指标单项抗旱系数对干旱胁迫的响应

Table 2 Response of drought resistance coefficient of each index to drought stress in germination stage

指标 Index	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异幅度 Range of variation	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
发芽率 GP	0.79	1.34	0.56	1.02	0.14	13.46
发芽势 GE	0.67	2.81	2.15	1.55	0.61	39.74
发芽指数 GI	0.88	2.61	1.73	1.34	0.43	32.16
活力指数 VI	0.58	2.49	1.90	1.61	0.51	31.45
根长 RL	0.67	2.04	1.37	1.26	0.36	28.47
苗高 SH	0.61	2.08	1.46	1.03	0.28	26.96

表3 不同朝天椒品种各指标单项抗旱系数(DC)频率

Table 3 Frequency of individual drought resistance coefficient (DC) of index of different hot pepper varieties

指标 Index	0.5<DC≤1.0		1.0<DC≤1.5		1.5<DC≤2.0		2.0<DC≤2.5		2.5<DC≤3.0	
	频数 Sample number	频率 Frequency/%	频数 Sample number	频率 Frequency/%	频数 Sample number	频率 Frequency/%	频数 Sample number	频率 Frequency/%	频数 Sample number	频率 Frequency/%
发芽率 GR	14	50.00	14	50.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
发芽势 GE	6	21.43	9	32.14	5	17.86	6	21.43	2	7.14
发芽指数 GI	8	28.57	13	46.43	5	17.86	1	3.57	1	3.57
活力指数 VI	2	7.14	12	42.86	7	25.00	7	25.00	0	0.00
根长 RL	7	25.00	13	46.43	7	25.00	1	3.57	0	0.00
苗高 SH	13	46.43	14	50.00	0	0.00	1	3.57	0	0.00

频数和频率差异较大。在 0.5~1.0 区间,发芽率的 DC 值分布频数及分布频率分别为 14 和 50.00%, 而活力指数的 DC 值分布频数及分布频率仅为 2 和 7.14%。发芽率、发芽指数、苗高和根长的 DC 值主要分布在 1.0~1.5 区间,分布频率均大于 45.00%,且发芽率和苗高的分布频率达到 50.00%。发芽势和活力指数的 DC 值在 2.0~2.5 区间的分布频数分别是 6 和 7,分布频率分别为 21.43%和 25.00%。说明发芽势和活力指数对干旱胁迫的反应迟缓,发芽指数和根长次之,而发芽率和苗高则对干旱胁迫的反应较为敏感。

2.3 干旱胁迫下朝天椒各指标抗旱系数的相关性

表 4 相关性分析结果表明,活力指数抗旱系数是关键的关键指标:它与发芽指数、根长和苗高的抗旱系数均呈极显著正相关,与发芽率和发芽势的抗旱系数呈显著正相关。此外,发芽率抗旱系数与发芽指数抗旱系数呈极显著正相关,发芽率和根长的抗旱系数均与苗高的抗旱系数呈显著正相关。

2.4 干旱胁迫下朝天椒各指标抗旱系数的主成分分析

由表 5 可知,第 1 个因子的贡献率为 42.708%,活力指数和发芽指数抗旱系数有较高的载荷量;第

表4 朝天椒各指标抗旱系数的相关性

Table 4 Correlation of drought resistance coefficients of all indexes in hot pepper

指标 Index	发芽率 GR	发芽势 GE	发芽指数 GI	活力指数 VI	根长 RL	苗高 SH
发芽率 GR	1					
发芽势 GE	0.088	1				
发芽指数 GI	0.679**	0.101	1			
活力指数 VI	0.340*	0.319*	0.597**	1		
根长 RL	-0.115	0.141	-0.097	0.662**	1	
苗高 SH	0.379*	-0.065	0.204	0.536**	0.402*	1

注:*和**分别表示在 0.05、0.01 水平显著、极显著相关。

Note: *and ** indicate significant correlation at 0.05 level and highly significant correlation at 0.01 level, respectively.

表5 朝天椒各指标抗旱系数主成分的特征向量及贡献率
Table 5 Eigenvectors and contribution rates of principal components of all indexes drought resistance coefficients in hot pepper

指标 Index	因子载荷 Factor loading		
	F_1	F_2	F_3
活力指数 VI	0.223	0.142	0.097
发芽指数 GI	0.173	-0.316	0.082
苗高 SH	0.166	0.110	-0.451
发芽率 GR	0.159	-0.338	-0.069
根长 RL	0.121	0.439	-0.052
发芽势 GE	0.070	0.077	0.806
特征值 Eigenvalue	2.562	1.498	1.068
贡献率 Contribution rate/%	42.708	24.967	17.800
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	42.708	67.675	85.475
因子权重 Factor weight(ω)	0.500	0.292	0.208

2 个因子的贡献率为 24.967%, 根长抗旱系数有较高的载荷量;第 3 个因子的贡献率为 17.800%, 发芽势抗旱系数有较高的载荷量。3 个因子的累计贡献率达到 85.475%, 表明其足以代表并有效提取萌发期朝天椒抗旱性的主导因子。3 个主成分的基本表达式如下:

$$Z_1=0.223X_1+0.173X_2+0.166X_3+0.159X_4+0.121X_5+0.070X_6;$$

$$Z_2=0.142X_1-0.316X_2+0.110X_3-0.338X_4+0.439X_5+0.077X_6;$$

$$Z_3=0.097X_1+0.082X_2-0.451X_3-0.069X_4-0.052X_5+0.806X_6。$$

式中, $X_1 \sim X_6$ 分别表示供试朝天椒的活力指数、发芽指数、苗高、发芽率、根长、发芽势抗旱系数。

2.5 供试种质的综合抗旱性评价

2.5.1 抗旱性度量值(D)排序 基于各因子特征向量, 采用模糊隶属函数法, 计算加权隶属函数值, 将其定义为抗旱性度量值(D)。如表 6 所示, D 值越

大表明抗旱性越强, 该指标可有效评价供试品种的抗旱性。

由表 6 可知, 供试品种 D 值在 0.193~0.795, 平均值为 0.496, 变异系数为 30.531%。根据 D 值对供试品种进行抗旱性排序, 抗旱性强的品种有朝天椒 20 号(20)、周园早丰(10)、永盈 C1(18)、包黑子十九 B(16), 抗旱性弱的品种有红焰 837(21)和宛椒 208(26)。为验证抗旱性度量值(D)排序的可靠性, 本研究引入了综合抗旱系数(CDC)与加权抗旱系数(WDC)进行辅助分析。各品种的 CDC 与 WDC 均值分别为 1.300 和 1.231, 变异系数分别为 19.207%和 17.551%, 其排序结果与 D 值基本一致。相关性分析进一步证实, CDC、WDC 与 D 三者之间均呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.914(CDC 与 D)、0.987(CDC 与 WDC)及 0.887(D 与 WDC), 共同验证了 D 值评价结果的准确性。

2.5.2 灰色关联度分析 由表 7 可知, 各指标的 DC 和 D 之间密切程度依次为苗高、发芽率、根长、发芽指数、发芽势、活力指数。

此外, 各项指标 DC 与 WDC 之间的密切程度依次为发芽率、根长、发芽指数、苗高、活力指数、发芽势, 与各项指标 DC 和 D 的关联系数基本一致。

2.5.3 聚类分析 以 D 值为依据对所选朝天椒种质进行聚类分析, 在欧式距离 10 处将朝天椒品种分为 5 级(图 2)。第 I 级为超强抗旱型品种, 包括朝天椒 20 号(20)和周园早丰(10), 共 2 个, 占总数的 7.14%; 第 II 级为强抗旱型品种, 包括永盈 C1(18)、包黑子十九 B(16)等 8 个, 占总数的 28.57%; 第 III 级为中度抗旱型品种, 包括宛椒 209(28)、天椒 2 号(2)等 6 个, 占总数的 21.43%; 第 IV 级为干旱敏感型品种, 包括颖科 68(23)、宛椒 207(25)等 10 个, 占总数的 35.71%; 第 V 级为干旱极敏感型品种, 包括红焰 837(21)和宛椒 208(26), 共 2 个, 占总数的 7.14%。

表6 供试朝天椒种质抗旱性评价的抗旱系数(CDC)、加权抗旱系数(WDC)和抗旱性度量值(D)
Table 6 CDC-value, WDC-value, and D-value of drought resistance evaluation in tested hot pepper

编号 No.	隶属函数 Subordinate function value			D	D 排序	CDC	CDC 排序	WDC	WDC 排序
	μ_1	μ_2	μ_3		D rank		CDC rank		WDC rank
20	0.845	0.634	0.903	0.795	1	1.806	3	1.684	1
10	0.626	0.949	0.971	0.792	2	1.660	5	1.508	4
18	1.000	0.641	0.000	0.687	3	1.684	2	1.594	3
16	0.380	0.946	1.000	0.674	4	1.414	12	1.252	11
15	0.990	0.238	0.517	0.672	5	1.749	1	1.643	2
7	0.598	0.722	0.479	0.609	6	1.437	8	1.394	7
12	0.576	1.000	0.141	0.609	7	1.327	6	1.199	14
6	0.553	0.537	0.816	0.603	8	1.485	10	1.404	6
1	0.584	0.637	0.571	0.597	9	1.433	9	1.374	8
8	0.379	0.802	0.722	0.574	10	1.323	13	1.243	12
27	0.702	0.105	0.740	0.536	11	1.524	28	1.444	5
17	0.375	0.526	0.935	0.535	12	1.316	16	1.203	13
2	0.292	0.899	0.403	0.493	13	1.114	15	1.041	24
9	0.380	0.440	0.833	0.492	14	1.283	22	1.194	15
24	0.734	0.017	0.527	0.481	15	1.503	25	1.318	9
3	0.317	0.614	0.617	0.466	16	1.192	17	1.154	17
25	0.563	0.000	0.668	0.420	17	1.353	4	1.284	10
14	0.414	0.347	0.525	0.418	18	1.216	14	1.189	16
23	0.339	0.582	0.269	0.395	19	1.092	20	1.081	21
19	0.371	0.213	0.675	0.388	20	1.211	19	1.152	18
22	0.312	0.522	0.312	0.373	21	1.077	21	1.066	22
11	0.351	0.298	0.533	0.373	22	1.145	18	1.118	19
4	0.266	0.393	0.601	0.373	23	1.076	24	1.034	25
13	0.329	0.213	0.678	0.368	24	1.173	23	1.115	20
28	0.286	0.461	0.394	0.360	25	1.050	7	1.046	23
5	0.259	0.367	0.448	0.330	26	1.028	26	1.021	16
21	0.187	0.369	0.338	0.271	27	0.943	27	0.939	27
26	0.000	0.331	0.462	0.193	28	0.790	11	0.772	28
平均值 Average				0.496		1.300		1.231	
变异系数 CV/%				30.531		19.207		17.551	

表7 供试朝天椒种质各指标 DC 与 D 和 WDC 的关联度及各指标权重
Table 7 Correlation degree between DC of all indexes and D together with WDC and indexes weight in tested hot pepper

指标 Index	D 与 DC 关联系数 γ_1 Correlation coefficient γ_1 of D and DC	γ_1 排序 γ_1 rank	权重系数 Weight	WDC 与 DC 关联系数 γ_2 Correlation coefficient γ_2 of WDC and DC	γ_2 排序 γ_2 rank
苗高 SH	0.698	1	0.178	0.721	4
发芽率 GR	0.695	2	0.183	0.769	1
根长 RL	0.613	3	0.172	0.765	2
发芽指数 GI	0.596	4	0.170	0.761	3
发芽势 GE	0.551	5	0.150	0.649	6
活力指数 VI	0.520	6	0.147	0.656	5

2.6 抗旱指标的筛选

通过逐步回归分析,筛选出活力指数、发芽势和根长 3 个关键指标,并建立回归方程($y=-0.107+$

$0.145 \times \text{活力指数} + 0.094 \times \text{发芽势} + 0.176 \times \text{根长}$)。该模型极其显著($P=0.000 < 0.05$)且拟合优度高($R^2=0.992$),表明活力指数、发芽势和根长可以共同解释

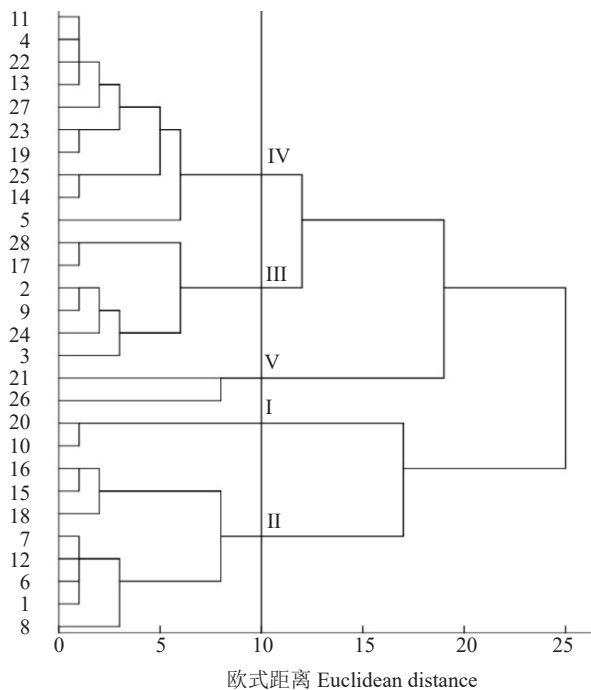


图2 基于D的供试朝天椒材料抗旱性系统聚类分析

Fig. 2 Fuzzy clustering dendrogram of drought resistance in tested hot pepper based on D-value

D值99.2%的变异。

3 讨论与结论

近年来,研究者认为要实现植物抗旱性的精准评价,必须将多项关键指标与多种评价方法相结合进行系统性分析,方能得出可靠结论。尚宏芹等^[23]的研究没有充分考虑到抗旱指标敏感度差异和指标抗旱性评价贡献率的差异。廖博通等^[16]、张菊平等^[9]的研究中仅采用了模糊隶属函数法对辣椒种子萌发特性及抗旱性进行评价。笔者构建了一套系统的朝天椒萌发期抗旱性评价体系。首先,基于多指标采用抗旱性度量值D、综合抗旱系数CDC及加权抗旱系数WDC等综合评价指标,结合单项抗旱指标、频次分布、相关性分析、隶属函数分析、灰色关联度分析等对28个朝天椒品种抗旱性进行综合评价及排序,3个排序结果基本一致;利用主成分分析与逐步回归分析精准提取关键抗旱性状,简化了评价模型;最终,以抗旱性度量值D为核心依据进行聚类分析,将供试的28个朝天椒品种划分为5个抗旱等级,并辅以综合抗旱系数CDC与加权抗旱系数WDC验证,确保了分级结果的科学性与可靠性,为抗旱育种提供了优良种质与鉴别方法。

作物的抗旱性受自身的遗传因素影响^[24],大部分作物品种在整个生育过程中对干旱胁迫比较敏

感,尤以种子萌发阶段极易受干旱胁迫的影响^[25]。有研究表明,不同作物在萌发期用于评价抗旱性的关键指标存在差异。樊瑀等^[8]在谷子萌发期抗旱性的研究中发现,相对芽干质量、相对根长及相对芽鲜质量是影响谷子抗旱性的3个主要指标。而相对发芽率、相对发芽势、相对根长及相对苗高能反映三叶草种子在干旱胁迫下不同品种间的抗性差异^[26]。本试验选取6个朝天椒品种萌发期抗旱性相关指标,通过多种方法,从不同角度进行分析。结果表明,各指标对干旱胁迫的响应程度不同,且各指标之间相关性各异。因此,直接利用这些指标不易客观、全面地反映材料的抗旱性。逐步回归分析得出活力指数抗旱系数、发芽势抗旱系数和根长抗旱系数与D值密切相关。主成分分析得出,活力指数抗旱系数在第一个因子上载荷量最大,根长抗旱系数在第二个因子上载荷量最大,发芽势抗旱系数在第三个因子上载荷量最大,表明活力指数、根长、发芽势在抗旱中有着重要的影响,与逐步回归分析结果一致。通过灰色关联度分析,得到各指标抗旱系数与抗旱性度量值的关联度为苗高抗旱系数>发芽率抗旱系数>根长抗旱系数>发芽指数抗旱系数>发芽势抗旱系数>活力指数抗旱系数,这和各性状抗旱系数与加权抗旱系数的密切程度基本吻合,说明基于抗旱性度量值和加权抗旱系数的性状关联度评价是适宜且准确的。

本研究采用多元统计方法对28个朝天椒品种萌发期抗旱性进行系统评价。结果表明,活力指数、发芽势和根长的抗旱系数可作为核心评价指标,并得到高精度回归模型($y = -0.107 + 0.145 \times \text{活力指数} + 0.094 \times \text{发芽势} + 0.176 \times \text{根长}$)。基于抗旱性度量值(D)将供试品种划分为5个抗旱等级,其中朝天椒20号和周园早丰被鉴定为超强抗旱性种质资源。

参考文献

- [1] 孔冬艳,陈会广.近40年来中国农作物与耕地受灾时空特征及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(5):1236-1246.
- [2] VERSLUES P E, AGARWAL M, KATIYAR-AGARWAL S, et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status[J]. Plant Journal, 2006, 45(4): 523-539.
- [3] 马光恕,廉华.甜瓜种质资源抗旱性生化鉴定指标测定[J].中国农村小康科技,2006(7):44-47.
- [4] 代小冬,朱灿灿,王春义,等.谷子萌芽期抗旱相关QTL定位研究[J].华北农学报,2020,35(6):36-41.
- [5] 张菊平,汪士杰,张会灵,等.十个朝天椒品种的萌发特性与抗

- 旱性评价[J].北方园艺,2022(22):31-36.
- [6] 张文博,刘芸希,李国铭,等.9份番茄材料种子萌发期耐盐碱性评价[J].种子,2023,42(5):26-32.
- [7] 朱世杨,张小玲,刘庆,等.PEG模拟干旱胁迫下花椰菜种质资源萌发特性及抗旱性评价[J].核农学报,2019,33(9):1833-1840.
- [8] 樊瑀,董淑琦,原向阳,等.谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J].中国农业大学学报,2022,27(6):42-54.
- [9] 庄克章,胡晓君,吴荣华,等.18个玉米杂交种萌发期抗旱性评价[J].种子,2020,39(3):68-71.
- [10] 崔宏亮,姚庆,李利民,等.PEG模拟干旱胁迫下花生品种萌发特性与抗旱性评价[J].核农学报,2017,31(7):1412-1418.
- [11] 陈天青,王伟,杨康林,等.小麦萌发期耐旱性材料的筛选与评价[J].种子,2014,33(10):81-84.
- [12] 赵愉风,周清元,郇欢欢,等.菜用豌豆品种资源萌发期耐旱性鉴定[J].核农学报,2019,33(1):48-59.
- [13] 徐小玉,张凤银,李俊芳.PEG渗透胁迫下12个豇豆品种萌芽期抗旱性评价[J].东北农业大学学报,2016,47(1):15-20.
- [14] 李震,杨春杰,张学昆,等.PEG胁迫下甘蓝型油菜品种(系)种子发芽耐旱性鉴定[J].中国油料作物学报,2008,30(4):438-442.
- [15] 张会灵,张菊平,张焕丽.PEG胁迫对辣椒种子萌发的影响[J].种子,2016,35(8):7-8.
- [16] 廖博通,陈琳,唐可兰,等.PEG模拟干旱胁迫下辣椒种子萌发特性及抗旱性评价[J].中国瓜菜,2022,35(3):64-69.
- [17] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,等.重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J].作物学报,2014,40(7):1259-1273.
- [18] 魏家香.辣椒种间杂种创制、种间遗传图谱的构建和主要农艺性状QTL定位[D].浙江金华:浙江师范大学,2018.
- [19] 甘春俊.朝天椒种植产业推广现状及发展对策[J].世界热带农业信息,2021(1):55-56.
- [20] 贺洁,苏亚蕊,张大乐,等.朝天椒遗传多样性的 AFLP 标记分析[J].河南大学学报(自然科学版),2010,40(3):278-282.
- [21] 张涛,韩娅楠,张强,等.河南省朝天椒产业现状及发展对策[J].中国瓜菜,2020,33(1):65-68.
- [22] 张爱民,蓬桂华,王永平,等.PEG模拟干旱胁迫对辣椒种子萌发的影响[J].辣椒杂志,2015,13(3):36-38.
- [23] 尚宏芹,高昌勇.PEG浸种对辣椒种子萌发特性及芽生长的影响[J].种子,2018,37(10):102-106.
- [24] 任小燕,段运平,刘守渠,等.不同玉米品种萌发期和苗期抗旱性鉴定与评价[J].种子,2020,39(11):75-80.
- [25] 孔佳茜,赵铭森,孟晓康,等.PEG模拟干旱胁迫对大麻种子萌发的影响[J].种子,2020,39(9):26-30.
- [26] 屈璐璐,山丹,李晓杰,等.PEG模拟干旱胁迫对5份三叶草材料种子萌发的影响[J].种子,2019,38(12):109-112.