

于国红,张莹莹,周淑梅,等. 60份小麦品种(系)萌发期抗旱性鉴定与综合评价[J]. 山西农业科学, 2025, 53(2): 124-131.

YU G H, ZHANG Y Y, ZHOU S M, et al. Identification and comprehensive evaluation of drought resistance of 60 wheat varieties (lines) at germination stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(2): 124-131.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.02.15

60份小麦品种(系)萌发期抗旱性鉴定与综合评价

于国红¹,张莹莹^{1,2},周淑梅²,赵明辉¹,孟祥海¹

(1.河北省农林科学院旱作农业研究所/河北省农作物抗旱研究重点实验室,河北衡水 053000;

2.山东农业大学生命科学学院/小麦育种全国重点实验室,山东泰安 271018)

摘要:为探究小麦萌发期对干旱胁迫的响应,采用20% PEG-6000溶液模拟干旱胁迫,对60份小麦种质资源进行抗旱性鉴定,测定发芽率、发芽势、发芽指数和抗旱系数等指标。结果表明,干旱胁迫下,不同种质资源的发芽势和发芽率显著降低,平均降幅分别为42.59%和35.84%;不同种质资源的根长、芽长也显著降低,且不同品种间存在显著差异。通过主成分分析和综合评价法,对不同种质资源的抗旱性进行综合评价,确定3个独立主成分作为抗旱性评价的综合指标,其累计贡献率达78.026%。基于综合评价可知,60份小麦种质资源被划分为4个抗旱等级,其中,23份小麦种质资源被鉴定为高耐旱性品种。综上所述,该研究系统鉴定了不同小麦种质资源萌发期的抗旱性,并筛选出抗旱性强的小麦新品系。

关键词:小麦;萌发期;干旱胁迫;抗旱性;主成分分析

中图分类号:S512.17

文献标识码:

文章编号:1002-2481(2025)02-0124-08

Identification and Comprehensive Evaluation of Drought Resistance of 60 Wheat Varieties(Lines) at Germination Stage

YU Guohong¹, ZHANG Yingying^{1,2}, ZHOU Shumei², ZHAO Minghui¹, MENG Xianghai¹

(1. Institute of Dry Farming Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Key Lab of Crop Drought

Tolerance Research of Hebei Province, Hengshui 053000, China; 2. College of Life Sciences, Shandong

Agricultural University/National Key Laboratory of Wheat Breeding, Tai'an 271018, China)

Abstract: To explore the response of wheat to drought stress at the germination stage, in this study, 20% of PEG-6000 solution was utilized to simulate drought stress and the drought resistance of 60 wheat germplasm resources was identified. The indicators including germination percentage, germination vigor, germination index, and drought resistance coefficient were measured. The results indicated that drought stress significantly decreased the germination vigor and germination percentage of different germplasm resources (with average reductions of 42.59% and 35.84%, respectively), and also suppressed root length and bud length, with significant differences observed among different varieties. Principal component analysis and comprehensive evaluation value method were employed to conduct a comprehensive evaluation of the drought resistance of different germplasm resources, identifying three independent principal components as the comprehensive indicators for drought resistance evaluation, which accounted for a cumulative contribution rate of 78.026%. Based on the comprehensive evaluation values, the 60 materials were categorized into four drought tolerance levels, with 23 materials identified as highly drought-tolerant varieties. In conclusion, the drought resistance of different wheat germplasm resources at the germination stage was systematically evaluated in this study, and new wheat lines with strong drought resistance were selected.

Keywords: wheat; germination stage; drought stress; drought resistance; principal component analysis

全球气候变化加重了非生物胁迫对作物产量的影响。小麦(*Triticum aestivum* L.)作为全球粮

收稿日期:2024-12-24

基金项目:河北省农林科学院现代农业科技创新专项课题(2022KJCXZX-HZS-2);小麦核辐射生物诱变产品创制与示范(2020-2024);山东省自然科学基金(ZR2023MC058)

作者简介:于国红,副研究员,博士,主要从事作物育种与抗逆机理解析研究,E-mail:guangwen19840104@163.com

通信作者:孟祥海,副研究员,主要从事小麦遗传育种研究,E-mail:mengxianghai5229@163.com

食安全的主要作物,其生产受到干旱的严重影响^[1-2]。干旱不仅限制了小麦的地理分布,还严重影响了其产量和品质^[3-5]。因此,鉴定和评价小麦种质资源的抗旱性,培育抗旱性强的小麦品种对于小麦产业至关重要^[6-9]。

种子萌发期对于水分缺乏非常敏感,是评估作物抗旱能力的关键阶段。种子萌发过程中,生理机制主要包括维持相对含水量、有效的根部发育以及管理氧化应激的能力^[10-11]。通过聚乙二醇(PEG)模拟萌发期干旱胁迫已经在谷子^[12]、大麦^[13]、绿豆^[14]、水稻^[15]等作物广泛使用。MOHAMED等^[16]对41份不同基因型春小麦进行萌发期干旱胁迫后,发现所有性状与对照组均存在显著差异。GHAFAR等^[17]从生理、生化、光合作用等方面综合解析了40个小麦品种的抗旱差异性适应机制。在抗旱性评价指标方面,马越等^[18]综合分析多个抗旱相关指标,基于隶属函数法结合聚类分析,综合评价了92份番茄种质资源的抗旱性,将种质资源分为抗旱、较抗旱、较敏感和敏感4类。赵少迪等^[19]采用梯度浓度PEG-6000法,利用相对发芽势、相对发芽率和相对萌发指数作为抗旱的关键指标,将110份苦荞种质划分为5个亚群。在评价方法方面,主成分分析和综合评价法可以有效整合多维度数据,实现种质资源

分级。张宇君等^[20]使用主成分分析法降维7个评价指标,构建出不同燕麦品种萌发期抗旱性评价体系。李静静等^[21]结合主成分分析和综合评价法,评价了20个小麦品种的抗旱性。王永刚等^[22]采用主成分分析法鉴定出10个强抗旱性小麦品种,并发现8个抗旱相关指标中,芽鲜质量和芽长受到干旱胁迫的显著影响。张军等^[23]通过测定不同生育期8个强筋小麦品种的指标,结合综合抗旱能力评价(D值),评价了萌发期抗旱性。

本研究利用20% PEG-6000模拟干旱胁迫,对60份小麦种质资源萌发期进行了抗旱性综合评价,测定了发芽势、发芽率、发芽指数和抗旱系数等10个指标,采用主成分分析和综合评价法对小麦萌发期的抗旱性进行了综合评价,旨在全面评价小麦种质资源的抗旱性,进而鉴定不同品种的抗旱能力,为选育抗旱品种提供参考,并为干旱胁迫下的播种策略优化提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选取大小一致且籽粒饱满、无损伤的小麦种子用于萌发期抗旱性鉴定试验,所有材料均由河北省农林科学院旱作农业研究所提供(表1)。

表1 60份小麦种质资源

Tab.1 Information table of 60 wheat germplasm resources

编号 Num- ber	名称 Name	编号 Num- ber	名称 Name	编号 Num- ber	名称 Name	
1	衡麦 28	Hengmai 28	21 衡麦 L226149	Hengmai L226149	41 衡麦 H194008	Hengmai H194008
2	衡麦 29	Hengmai 29	22 衡麦 T226390	Hengmai T226390	42 衡麦 Z204184	Hengmai Z204184
3	衡麦 S29	Hengmai S29	23 衡麦 L226195	Hengmai L226195	43 衡麦 164435	Hengmai 164435
4	济麦 22	Jimai 22	24 衡麦 H224233	Hengmai H224233	44 衡麦 Z204195	Hengmai Z204195
5	石麦 22	Shimai 22	25 衡麦 H226046	Hengmai H226046	45 衡麦 T193209	Hengmai T193209
6	洛早 7 号	Luohan 7	26 衡麦 T224294	Hengmai T224294	46 衡麦 Y194194	Hengmai Y194194
7	晋麦 47	Jinmai 47	27 衡麦 Z224012	Hengmai Z224012	47 衡麦 Z215320	Hengmai Z215320
8	中麦 175	Zhongmai 175	28 衡麦 Z226133	Hengmai Z226133	48 衡麦 Z1033	Hengmai Z1033
9	师栾 02-1	Shiluan 02-1	29 衡麦 T215114	Hengmai T215114	49 衡麦 T204002	Hengmai T204002
10	衡麦 H20 观 128	Hengmai H20 guan 128	30 衡麦 T224172	Hengmai T224172	50 衡麦 H204017	Hengmai H204017
11	衡麦 H215025	Hengmai H215025	31 衡麦 T225398	Hengmai T225398	51 衡麦 T215419	Hengmai T215419
12	衡麦 H224006	Hengmai H224006	32 衡麦 T225507	Hengmai T225507	52 衡麦 T203239	Hengmai T203239
13	衡麦 Z225136	Hengmai Z225136	33 衡观 35	Hengguan 35	53 衡麦 L215121	Hengmai L215121
14	衡麦 Z225088	Hengmai Z225088	34 衡麦 32	Hengmai 32	54 衡麦 T215603	Hengmai T215603
15	衡麦 Z226157	Hengmai Z226157	35 衡麦 33	Hengmai 33	55 衡麦 J215603	Hengmai J215603
16	衡麦 T215157	Hengmai T215157	36 衡麦 36	Hengmai 36	56 衡麦 L214332	Hengmai L214332
17	衡麦 Y204169	Hengmai Y204169	37 衡麦 38	Hengmai 38	57 衡麦 T215649	Hengmai T215649
18	衡麦 L215132	Hengmai L215132	38 衡麦 39	Hengmai 39	58 衡麦 Z215351	Hengmai Z215351
19	衡麦 L214286	Hengmai L214286	39 衡麦 Z215220	Hengmai Z215220	59 衡麦 L215105	Hengmai L215105
20	衡麦 Z227029	Hengmai Z227029	40 衡麦 H20 观 37	Hengmai H20 guan 37	60 衡麦 Y204169	Hengmai Y204169

1.2 试验设计

采用20% PEG-6000溶液模拟干旱条件,无菌水处理为对照组,每个处理设置3次重复。将种子在不同处理液中浸泡4 h,无菌水冲洗2~3次,1%次氯酸钠溶液浸泡20 min,无菌水冲洗3次,点播于含有不同处理液且垫有双层滤纸的培养皿中,每个培养皿中均匀放置25粒,将培养皿置于组培间中培养8 d,培养条件为14 h光照/8 h黑暗,昼夜温度为26℃/21℃。以胚芽长度超过种子长度的1/3或胚根超过种子长度的1/2为发芽标准,统计8 d发芽数。萌发8 d后,对每个处理每个品种每个重复随机取5株幼苗测量根长和芽长,取9株测定芽鲜质量与根鲜质量,80℃烘箱内烘干后测定芽干质量与根干质量,计算抗旱指标。

1.3 测定指标及方法

发芽势(GP)=第4天发芽种子数/供试种子数×100% (1)

发芽率(GR)=第8天发芽种子数/供试种子数×100% (2)

发芽指数(GI)= $\sum Gt/Dt$ (3)

式中,Gt表示第t天的发芽数,Dt表示对应的发芽天数。

种子萌发指数=1.00×(nd 2)+0.75×(nd 4)+0.50×(nd 6)+0.25×(nd 8) (4)

式中,nd 2、nd 4、nd 6、nd 8分别为第2、4、6、8天的种子萌发率。

$U(X_j) = \frac{X_j - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$ (j=1, 2, ..., n) (5)

式中,U(X_j)表示第j个综合指标的隶属函数

值,X_j为第j个综合指标值,X_{max}、X_{min}分别为第j个综合指标的最大值、最小值。

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中,W_j表示第j个综合指标权重,P_j为第j个综合指标的贡献率。

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \cdot W_j], j=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中,D为小麦种质抗旱能力综合评价值。鉴定的相对指标值=胁迫组指标值/对照组指标值。

1.4 数据处理与分析

用Microsoft Excel 2019对试验数据进行处理,用SPSS 19.0软件进行相关性分析和主成分分析,用Origin绘制聚类图。

2 结果与分析

2.1 萌发期小麦抗旱相关指标分析

采用20% PEG-6000模拟干旱胁迫法,对60份小麦种质资源进行了萌发期抗旱性筛选与鉴定,结果表明(表2),干旱胁迫条件下,不同小麦种质资源所有测定指标都受到不同程度的抑制,芽鲜质量和芽长受干旱胁迫影响最大,平均值分别降低了83.37%和79.65%。发芽势、发芽率、发芽指数、根长、根鲜质量、芽干质量和根干质量分别降低了42.59%、35.84%、56.27%、47.32%、70.00%、71.10%和36.40%。与对照组相比,干旱胁迫后所有指标的变异系数均增大,变异系数增幅最大的是芽鲜质量。

表2 干旱胁迫前后小麦抗旱相关指标的变异分析

Tab.2 Variation analysis of drought-resistance-related indicators of wheat before and after drought stress

指标 Index	干旱胁迫 Drought stress					对照 Control				
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
发芽势 GV	0.91	0.13	0.55	0.20	0.36	1.00	0.25	0.96	0.10	0.10
发芽率 GP	0.93	0.15	0.63	0.20	0.31	1.00	0.91	0.98	0.02	0.02
发芽指数 GI	29.95	3.64	17.83	6.95	0.39	55.26	16.20	40.78	4.05	0.10
根长 RL	8.64	2.70	4.87	1.16	0.24	12.16	3.06	9.25	1.49	0.16
芽长 BL	6.66	0.76	2.24	0.98	0.44	14.50	9.58	11.02	0.81	0.07
芽鲜质量 BFW	0.22	0.01	0.05	0.03	0.64	0.36	0.21	0.29	0.03	0.11
根鲜质量 RFW	0.15	0.02	0.05	0.02	0.40	0.26	0.09	0.15	0.04	0.26
芽干质量 BDW	0.02	0.00	0.01	0.00	0.35	0.05	0.03	0.04	0.00	0.13
根干质量 RDW	0.02	0.01	0.02	0.00	0.21	0.04	0.01	0.02	0.00	0.19

2.2 小麦萌发期抗旱系数相关性

干旱胁迫下,不同小麦种质资源的相对发芽

势与相对发芽率、相对发芽指数和萌发耐旱指数均呈现极显著正相关(P<0.01),与相对芽长、相

对芽干质量和相对根干质量均呈显著正相关($P < 0.05$);相对发芽率与相对发芽指数、相对芽长、相对芽干质量、相对根干质量和萌发耐旱指数均呈极显著正相关($P < 0.01$),与相对根长和相对根鲜质量呈现显著正相关($P < 0.05$);相对发芽指数与相对芽长、相对芽干质量、相对根干质量和萌发耐旱指数均呈极显著正相关($P < 0.01$),与相对根鲜质量呈现显著正相关($P < 0.05$);相对根长与相对芽长、相对芽干质量和相对根干质量均呈极显著

正相关($P < 0.01$);相对芽长与相对芽干质量、相对根干质量和萌发耐旱指数均呈极显著正相关($P < 0.01$);相对芽干质量与相对根干质量和萌发耐旱指数均呈极显著正相关($P < 0.01$)。值得注意的是,萌发耐旱指数与相对发芽势、相对发芽指数、相对芽长、相对芽干质量、相对根鲜质量均呈极显著正相关,这些指标提供的抗旱信息之间存在交叉重叠现象,不能直接用于评价种质资源的抗旱性。

表 3 小麦萌发期抗旱系数的相关性

Tab.3 Correlation of drought resistance coefficients at germination stage of wheat

指标 Index	发芽势 GP	发芽率 GR	发芽指数 GI	根长 RL	芽长 BL	芽鲜质量 BFW	根鲜质量 RFW	芽干质量 BDW	根干质量 RDW	萌发耐旱指数 GDTI
发芽势 GV	1									
发芽率 GP	0.709**	1								
发芽指数 GI	0.865**	0.918**	1							
根长 RL	0.137	0.285*	0.239	1						
芽长 BL	0.265*	0.433**	0.400**	0.579**	1					
芽鲜质量 BFW	-0.111	-0.074	-0.083	0.009	0.081	1				
根鲜质量 RFW	0.132	0.313*	0.287*	0.165	0.237	0.165	1			
芽干质量 BDW	0.290*	0.527**	0.458**	0.445**	0.805**	0.061	0.249	1		
根干质量 RDW	0.257*	0.470**	0.451**	0.485**	0.560**	0.010	0.200	0.622**	1	
萌发耐旱指数 GDTI	0.941**	0.860**	0.977**	0.165	0.359**	-0.037	0.288*	0.433**	0.405**	1

注:表中所有值为干旱处理前后的相对值,**表示极显著相关($P < 0.01$),*表示显著相关($P < 0.05$)。

Note: All values in the table were relative values before and after drought treatment, ** indicated a extremely significant correlation at the 0.01 level(two-tailed), and * indicated a significant correlation at the 0.05 level(two-tailed).

2.3 小麦种质资源萌发期抗旱性主成分分析

对小麦种质资源的 10 个抗旱性相关指标进行主成分分析,以特征值大于 1,累计贡献率大于 70% 为阈值选择主成分(表 4),确定 3 个独立的主

成分作为评价耐旱性的综合指标,第 1 主成分、第 2 主成分和第 3 主成分特征值分别为 4.803、1.819 和 1.095,累计贡献率达到了 77.169%。

表 4 总方差解释

Tab.4 Explanation of total variance

成分 Ingre- dients	初始特征值 Initial eigenvalues			提取载荷平方和 Extract the sum of squares of the load			旋转载荷平方和 Sum of squares of rotational loads		
	特征值 Eigen- value	方差贡献率/% Variance Con- tribution Rate	累计贡献率/% Cumulative Con- tribution Rate	特征值 Eigen- value	方差贡献率/% Variance Con- tribution Rate	累计贡献率/% Cumulative Con- tribution Rate	特征值 Eigen- value	方差贡献率/% Variance Con- tribution Rate	累计贡献率/% Cumulative Con- tribution Rate
1	4.803	48.026	48.026	4.803	48.026	48.026	3.684	36.841	36.841
2	1.819	18.191	66.217	1.819	18.191	66.217	2.837	28.374	65.216
3	1.095	10.951	77.169	1.095	10.951	77.169	1.195	11.953	77.169
4	0.769	7.686	84.854						
5	0.569	5.691	90.546						
6	0.482	4.820	95.366						
7	0.254	2.537	97.903						
8	0.158	1.577	99.480						
9	0.044	0.436	99.916						
10	0.008	0.084	100.000						

为判断每个主成分中的关键抗旱指标,生成了成分得分系数矩阵(表5)。其中,第1主成分中相对发芽势,萌发耐旱指数,相对发芽指数和相对发芽率贡献率最大;第2主成分中相对根长、相对芽长、相对芽干质量和相对根干质量贡献率最大;第3主成分中相对芽鲜质量和相对根鲜质量贡献率最大。综上所述,本研究选定的发芽势、发芽率、发芽指数、根长、芽长、芽鲜质量、根鲜质量、芽干质量、根干质量和萌发耐旱指数可以作为评价小麦萌发期抗旱性的评价指标。

2.4 小麦种质资源抗旱性综合评价

计算不同种质资源的隶属函数值(表6),衡麦

38在U(1)中的隶属函数值最大,数值为1,表明衡麦38在综合指标1中的抗旱性最强,衡麦T203239在U(1)中隶属函数值最小,数值为0,表明衡麦T203239在综合指标1中的抗旱性最弱;衡麦Y194194在U(2)中的隶属函数值最大,数值为1,表明衡麦Y194194在综合指标2中的抗旱性最强,衡麦38在U(2)中隶属函数值最小,数值为0,表明衡麦38在综合指标2中的抗旱性最弱;衡麦T203239在U(3)中的隶属函数值最大,数值为1.278,表明衡麦T203239在综合指标3中的抗旱性最强,衡麦Z215351在U(3)中隶属函数值最小,数值为0,表明衡麦Z215351在综合指标3中的抗旱性最弱。

表5 干旱胁迫下小麦种质资源抗旱指标的得分系数

Tab.5 Scoring coefficients of drought resistance index of wheat germplasm resources under drought stress

指标 Index	成分 Ingredients			指标 Index	成分 Ingredients		
	1	2	3		1	2	3
相对发芽势 RGV	0.303	-0.122	-0.054	相对芽鲜质量 RBFW	-0.060	-0.073	0.724
相对发芽率 RGP	0.229	0.000	0.033	相对根鲜质量 RRFW	0.049	-0.048	0.578
相对发芽指数 RGI	0.277	-0.052	0.018	相对芽干质量 RBDW	-0.049	0.310	0.021
相对根长 RRL	-0.121	0.350	-0.107	相对根干质量 RRDW	-0.044	0.298	-0.062
相对芽长 RBL	-0.079	0.341	0.010	相对萌发耐旱指数 RGDTI	0.293	-0.078	-0.005

表6 不同小麦种质资源隶属函数值、D值及抗旱性排序

Tab.6 Membership function values, D values, and drought resistance rankings of different wheat germplasm resources

编号 Number	隶属函数值 Membership function value			D值 D value	排序 Ranking	编号 Number	隶属函数值 Membership function value			D值 D value	排序 Ranking
1	0.806	0.427	0.312	0.590	9	22	0.628	0.712	0.460	0.633	1
2	0.511	0.490	0.407	0.487	24	23	0.316	0.959	0.135	0.524	19
3	0.816	0.421	0.441	0.613	2	24	0.815	0.381	0.189	0.558	14
4	0.513	0.265	0.241	0.379	45	25	0.881	0.338	0.322	0.595	6
5	0.538	0.377	0.295	0.441	34	26	0.809	0.525	0.156	0.603	3
6	0.558	0.349	0.167	0.421	36	27	0.411	0.655	0.258	0.477	27
7	0.814	0.386	0.329	0.582	10	28	0.430	0.425	0.307	0.409	39
8	0.472	0.511	0.259	0.453	32	29	0.539	0.316	0.237	0.410	38
9	0.655	0.326	0.246	0.470	30	30	0.662	0.320	0.210	0.466	31
10	0.669	0.371	0.444	0.524	20	31	0.525	0.376	0.281	0.432	35
11	0.319	0.452	0.416	0.383	44	32	0.416	0.408	0.199	0.379	46
12	0.557	0.430	0.306	0.471	29	33	0.734	0.343	0.268	0.518	22
13	0.686	0.513	0.278	0.559	13	34	0.574	0.506	0.338	0.512	23
14	0.530	0.264	0.217	0.384	42	35	0.378	0.533	0.197	0.407	40
15	0.480	0.699	0.311	0.534	18	36	0.495	0.514	0.350	0.479	26
16	0.739	0.616	0.077	0.591	8	37	1.000	0.000	0.046	0.484	25
17	0.567	0.835	0.135	0.599	4	38	0.680	0.567	0.415	0.597	5
18	0.624	0.567	0.349	0.560	12	39	0.068	0.507	0.246	0.257	57
19	0.655	0.484	0.326	0.541	17	40	0.241	0.488	0.249	0.333	50
20	0.808	0.373	0.449	0.592	7	41	0.339	0.290	0.187	0.298	55
21	0.226	0.484	0.361	0.342	48	42	0.361	0.452	0.290	0.383	43

60份小麦种质资源抗旱性分为较耐旱、耐旱、敏感和高敏4个级别,其中较耐旱品种23个,耐旱品种23个,敏感品种11个,高敏品种3个。较耐旱品种包括衡麦H20观128、衡麦L226195、衡麦Z225136、衡麦H224233、衡麦28、衡麦T215157、衡麦T204002、衡麦Y204169、衡麦39、衡麦164435、衡麦Z1033、衡麦L215132、衡麦Z227029、衡麦L214286、衡麦H226046、衡麦35、衡麦32、衡麦Y194194、衡麦Z226157、衡麦T224294、晋麦47、衡麦S29和衡麦T226390;耐旱品种包括衡麦Z225088、衡麦Z204184、济麦22、衡麦T225507、衡麦H215025、师栾02-1、衡麦H224006、衡麦Z226133、衡麦T215114、衡麦Z215320、衡麦Z224012、衡麦36、衡麦29、衡麦38、衡麦33、衡麦J215603、衡麦Z204195、石麦22、衡麦H204017、衡麦T224172、中麦175、洛早7号和衡麦T225398;敏感品种包括衡麦Z215220、衡麦T203239、衡麦L226149、衡麦T193209、衡麦L215121、衡麦Z215351、衡麦H20观37、衡麦Y204169、衡麦T215649、衡麦H194008和衡麦L215105;高敏感品种包括衡麦T215603、衡麦L214332和衡麦T215419。

3 结论与讨论

干旱胁迫严重影响小麦产量,选育耐旱性强的小麦新种质资源对于小麦产业和粮食安全至关重要。本研究对60份小麦种质资源进行了萌发期抗旱性鉴定与评价,研究发现发芽率、发芽势、萌发耐旱指数等指标与种质资源的耐旱性密切相关。研究发现,小麦萌发显著受到干旱胁迫的影响,王永刚等^[22]鉴定到萌发期小麦受影响最大的2个指标是芽鲜质量与芽长,干旱胁迫后与对照相比分别下降了65.56%和62.30%。本研究也观察到芽鲜质量与芽长受到的影响在所有观测指标中最为显著,分别下降了83.37%和79.65%。这一结果与前人的研究结果一致,表明这2个指标是评估小麦抗旱性的关键指标。此外,发芽势、发芽率、发芽指数等关键指标的显著下降,也进一步证实了干旱胁迫对小麦萌发的负面影响。

干旱胁迫后,所有抗旱相关指标的变异系数均增大,其中,芽鲜质量变化最显著,这表明在干旱条件下,不同小麦种质间的抗旱性呈现显著差异,更加体现出种质资源抗旱性鉴定的重要性。

张军等^[23]研究发现,干旱胁迫条件下,除发芽势、发芽率和胚芽鞘长外,其余指标变异系数均大于10%,此结果与本研究结果一致,证明这些指标作为抗旱性鉴定指标的可靠性。采用单一指标难以评价作物的抗旱性,实际应用中应选取多个指标来综合评定作物的抗旱性^[24]。本研究通过对小麦种质资源的10个抗旱性相关指标进行主成分分析,确定了3个独立的主成分,他们共同解释了77.169%的总方差。

综合指标隶属函数值分析和综合指标权重的确定,为小麦种质资源抗旱性鉴定提供了方法,这不仅有助于筛选高抗旱性种质,也为小麦抗旱育种提供了新的策略。60份小麦种质资源在干旱胁迫后各种指标发生了不同变化,大多数抗旱指标之间存在显著相关性。利用主成分分析将3个独立的主成分确定为抗旱鉴定的综合指标。本研究基于综合指标评价的耐旱度量值(D值)法进行聚类分析,将不同小麦种质资源的抗旱性按照D值排序,并分为4个抗旱级别,60个品种中有23个为较耐旱品种,23个为耐旱品种,11个为敏感品种,3个为高敏感品种。这一结果有助于筛选和利用优质抗旱性小麦种质资源,对于指导小麦育种有重要意义。综上所述,本研究不仅揭示了干旱胁迫对小麦萌发的影响,而且通过综合评价体系为小麦抗旱性的评估和育种提供了新的试验依据。未来的研究应进一步验证这些指标的适用性,并探索新的抗旱性状,以增强小麦的抗旱能力。

参考文献:

- [1] CHENG S F, FENG C, WINGEN L U, et al. Harnessing Landrace diversity empowers wheat breeding[J]. *Nature*, 2024, 632:823-831.
- [2] KOPECKÁ R, KAMENIAROVÁ M, ČERNÝ M, et al. Abiotic stress in crop production[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(7):6603.
- [3] 杨莉,桑萌育,丁志强,等. 干旱胁迫对小麦籽粒相关性状的影响[J]. *山西农业科学*, 2023, 51(6):620-627.
YANG L, SANG M Y, DING Z Q, et al. Effect of drought stress on grain related traits in common wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2023, 51(6):620-627.
- [4] DUVNJAK J, LONČARIĆ A, BRKLJAČIĆ L, et al. Morphophysiological and hormonal response of winter wheat varieties to drought stress at stem elongation and anthesis stages[J]. *Plants*, 2023, 12(3):418.
- [5] KUMAR S, KUMAR H, GUPTA V, et al. Capturing agromorphological variability for tolerance to terminal heat and combined heat-drought stress in landraces and elite cultivar collec-

- tion of wheat[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1136455.
- [6] Down-to-earth drought resistance[J]. *Nature Plants*, 2024, 10(4): 525-526.
- [7] RAZA A, MUBARIK M S, SHARIF R, et al. Developing drought-smart, ready-to-grow future crops[J]. *The Plant Genome*, 2023, 16(1): e20279.
- [8] SELEIMAN M F, AL-SUHAIBANI N, ALI N, et al. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects[J]. *Plants*, 2021, 10(2): 259.
- [9] SHARMA N, RAMAN H, WHEELER D, et al. Data-driven approaches to improve water-use efficiency and drought resistance in crop plants[J]. *Plant Science*, 2023, 336: 111852.
- [10] AZMAT A, YASMIN H, HASSAN M N, et al. Co-application of bio-fertilizer and salicylic acid improves growth, photosynthetic pigments and stress tolerance in wheat under drought stress[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9960.
- [11] KONG H Y, MENG X Z, AKRAM N A, et al. Seed priming with fullerol improves seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme system of two winter wheat cultivars under drought stress[J]. *Plants*, 2023, 12(6): 1417.
- [12] 王小艳, 于国红, 张盼盼, 等. 不同基因型谷子萌发期抗旱性鉴定及综合评价[J]. *榆林学院学报*, 2024, 34(2): 56-62.
WANG X Y, YU G H, ZHANG P P, et al. Identification and comprehensive evaluation of drought resistance of different foxtail millet during germination[J]. *Journal of Yulin College*, 2024, 34(2): 56-62.
- [13] 彭玉琳, 崔晓漫, 张泚曼玲, 等. 不同生育期大麦抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J/OL]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024: 1-14.
PENG Y L, CUI X M, ZHANG L, et al. Drought resistance identification and drought resistance index screening of barley at different growth stages[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1-14.
- [14] 李诗晴, 王素华, 张耀文, 等. 769 份绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定[J/OL]. *植物遗传资源学报*, 2024: 1-15.
LI S Q, WANG S H, ZHANG Y W, et al. Identification of salt tolerance of 769 mung bean germplasm resources at germination stage[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1-15.
- [15] 张娟伟, 石亚飞, 路旭平, 等. 种子萌发期粳稻种质资源耐旱性综合评价[J]. *核农学报*, 2022, 36(11): 2093-2103.
ZHANG J W, SHI Y F, LU X P, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of Japonica rice germplasm resources at seed germination stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11): 2093-2103.
- [16] MOHAMED E A, AHMED A A M, SCHIERENBECK M, et al. Screening spring wheat genotypes for *TaDreb-B1* and *Fehw3* genes under severe drought stress at the germination stage using KASP technology[J]. *Genes*, 2023, 14(2): 373.
- [17] GHAFFAR A, HUSSAIN N, AJAJ R, et al. Photosynthetic activity and metabolic profiling of bread wheat cultivars contrasting in drought tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1123080.
- [18] 马越, 李玉姗, 王帆, 等. 番茄种质资源萌发期抗旱性综合评价及筛选[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(7): 1056-1069.
MA Y, LI Y S, WANG F, et al. Comprehensive evaluation and screening of drought resistance of tomato germplasm resources during germination period[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(7): 1056-1069.
- [19] 赵少迪, 胡传伟, 张玉莲, 等. 苦荞种质资源萌发期抗旱性综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(3): 13-21.
ZHAO S D, HU C W, ZHANG Y L, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) germplasm resources at germination stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(3): 13-21.
- [20] 张宇君, 赵丽丽, 王普昶, 等. 燕麦萌发期抗旱指标体系构建及综合评价[J]. *核农学报*, 2017, 31(11): 2236-2242.
ZHANG Y J, ZHAO L L, WANG P C, et al. Construction and comprehensive evaluation of drought resistance index system in oatmea during germination[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(11): 2236-2242.
- [21] 李静静, 任永哲, 白露, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫下不同基因型小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(3): 368-377.
LI J J, REN Y Z, BAI L, et al. Comprehensive identification and evaluation of drought tolerance of different genotypic wheat varieties at germination stage by PEG-6000 simulated drought stress[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(3): 368-377.
- [22] 王永刚, 张胜军, 刘亚丽, 等. 新疆冬小麦品种资源萌发期耐旱性鉴定与筛选[J]. *新疆农业科学*, 2021, 58(11): 2024-2034.
WANG Y G, ZHANG S J, LIU Y L, et al. Identification and screening of drought tolerance in winter wheat cultivars in Xinjiang during germination period[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(11): 2024-2034.
- [23] 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.
- [24] 刘珮君, 王晓敏, 李国花, 等. 166 份番茄种质资源的综合评价[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(4): 792-803.
LIU P J, WANG X M, LI G H, et al. Comprehensive evaluation of 166 tomato germplasm resources[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2020, 42(4): 792-803.