麦类作物学报 2026,46(9):1165－1173
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.05

网络出版时间:2025-03-14
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250313.1320.004

南疆冬小麦抗旱种质筛选

赵靖怡[1,2],马帅国[1,2],艾明军[1,2],徐芳媛[1,2],翟云龙[1,2],胡银岗[3],文卿琳[1,2,3]

(1.塔里木大学农学院,新疆阿拉尔市 843300;2.南疆干旱区特色作物遗传改良与高效生产兵团重点实验室,新疆阿拉尔市 843300;
3.西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100)

摘 要:干旱问题是导致作物减产的主要原因,其影响超过其他逆境导致减产的总和。因此,筛选抗旱性优良的小麦种质对保障中国粮食安全具有重要意义。本试验以国内外140份小麦品种(系)为研究对象,在大田条件下设置对照和干旱两种处理,测定株高、茎节及旗叶性状等10个指标,通过相关性分析、主成分分析、隶属函数法和聚类分析对小麦品种(系)的抗旱性进行综合评价。结果表明,小麦抗旱系数与各节间长度无显著相关性,但与株高及旗叶长宽呈显著或极显著正相关。通过对各性状指标的抗旱系数值进行主成分分析,提取到5个主成分,解释了78.450%的变异。基于各指标的权重和隶属函数法计算出140份小麦材料的抗旱性综合评价值(*D*值)。通过R studio软件进行聚类分析,将小麦品种(系)分为高抗旱型、较抗旱型、一般抗旱型、较敏感型和高敏感型5个抗旱等级。其中,高抗旱型的3个小麦品种为小偃6号、轮选715和兰天10号,其*D*值分别为0.548、0.520和0.493。

关键词:小麦;抗旱;种质筛选

中图分类号:S512.1;S330 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1165-09

Screening of Drought Resistant Germplasm of Winter Wheat in Southern Xinjiang

Zhao Jingyi[1,2], Ma Shuaiguo[1,2], Ai Mingjun[1,2], Xu Fangyuan[1,2], Zhai Yunlong[1,2], Hu Yingang[3], Wen Qinglin[1,2,3]

(1. College of Agriculture, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Key Laboratory of Genetic Improvement and Efficient Production for Specialty Crops in Arid Southern of Xinjiang, Alar, Xinjiang 843300, China; 3. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Drought is the main cause of crop yield reductions, and its impact is greater than all other stresses combined. Therefore, the selection of wheat germplasm with excellent drought resistance is of great significance to ensure China's food security. In this study, 140 wheat varieties(lines) at home and abroad were used as research materials, and 10 morphological indices such as plant height, stem nodes traits, and flag leaves traits were measured under two treatments, control and drought in the field. Correlation analysis, principal component analysis, membership function method, and cluster analysis were used to comprehensively evaluate the drought resistance of wheat varieties(lines). The results of correlation analysis showed that there was no significant correlation between the drought resistance coefficient and the length of each node, but it was significantly positively correlated with plant height and flag leaf length and width. Principal component analysis was carried out on the drought resistance values of each index, and a total of five principal components were extracted,

收稿日期:2024-04-09 修回日期:2026-07-22
基金项目:兵团科技计划项目/科技创新人才计划项目(2023CB009-08);旱区作物生物学国家重点实验室开放课题(CSBAA202209);塔里木大学重大培育项目(TDZKZD202103)
第一作者 E-mail:10757222039@stumail.taru.edu.cn(赵靖怡);1105956083@qq.com(马帅国)
通讯作者 E-mail:wenqinglin@nwsuaf.edu.cn(文卿琳)

which explained 78.450% of the total variance. Based on the weights and membership function of each index, the comprehensive drought resistance evaluation index(*D* value) of the 140 wheat varieties(lines) was calculated, and the cluster analysis was carried out by R studio software. The results showed that the wheat varieties were divided into five drought resistance grades: highly drought resistant type, relatively drought resistant type, moderately drought resistant type, more sensitive type, and highly sensitive type. Among them, the three wheat varieties with high drought resistant type were Xiaoyan 6, Lunxuan 715 and Lantian 10, and their D values were 0.548, 0.520, and 0.493, respectively.

Keywords: Wheat; Drought resistance; Germplasm screening

小麦是世界上主要粮食作物之一[1-3]，其生产的稳定性直接影响市场粮食的供应[4]。随着全球气候变暖和干旱问题日益加剧[5]，作物因干旱缺水导致的减产比其他因素导致的减产总和还要多[6]。抗旱种质资源匮乏是制约小麦生产的首要问题。土壤水分缺失也对小麦的生长和产量造成了严重的影响[7]。中国北方地区是小麦生产主区，北方地区的耕种面积占全中国耕种面积的一半以上，而水资源仅是全中国的 1/3，水资源不充足严重制约小麦种植面积[8-9]，也是影响小麦产量的主要因素[10]，因而对中国现有的小麦种质资源进行抗旱性鉴定与筛选有重要意义[11]。小麦生长受多种环境因素影响，在干旱胁迫下，水分对于小麦的生长至关重要，如果水分不足，小麦的产量将会大大降低，甚至可能导致绝收。李迎春等[12]研究表明，小麦在受到干旱胁迫后，株高、穗下节和穗长均降低、缩短，叶面积变小，拔节期时受干旱的影响最大。当没有足够多的水分供叶片生长时，就会影响干物质积累，降低株高，由此导致产量减少[13]。石耀辉等[14]和叶龙华等[15]研究发现，植株在干旱环境下，叶片会萎蔫以及发生曲折。赵吉平等[16]的研究结果显示，小麦受到干旱胁迫后，株高与产量都呈下降趋势。刘德政等[17]研究认为，小麦叶片在轻度干旱和不干旱的情况下差异不大，随着干旱程度的增加叶片长呈先升再降的趋势；叶片宽也受到影响。所以，鉴定筛选抗旱品种是解决干旱地区农业资源用水短缺、有效促进小麦产量提高的重要措施之一。本研究以国内外 140 份小麦材料为对象，进行抗旱处理，测定了株高、茎叶等 10 项指标，对小麦材料抗旱性进行分析，以筛选出抗旱小麦种质。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验以 140 份小麦品种(系)为供试材料(表 1)，其中河南品种 50 份，甘肃 26 份，山东 23 份，陕西 19 份，河北 5 份，宁夏 4 份，江苏 3 份，山西 1 份，安徽 1 份，国外 8 份。

1.2 试验设计

本试验于 2022 年 10 月－2023 年 7 月在第一师十团试验田进行，设置正常灌溉和干旱 2 个处理。其中，正常灌溉处理为对照(CK)，在全生育期共灌水 6 次；干旱处理全生育期共灌水 4 次(表 2)，其余管理方式均与大田常规管理一致。

1.3 各性状指标测定方法

在抽穗期，从每个品种(系)中随机选取 10 株小麦，测量旗叶长和旗叶宽；在成熟期，随机选取 15 株小麦，分别测量株高、穗长、穗叶距、穗下节间、倒二节间、第二节间长、基部节间长以及第二节间粗。

对每个材料的同一性状指标，分别记录每一株的具体测量值。将该性状指标的所有测量值(10 株或 15 株的数据)总和除以测量的株数，得到该性状指标的平均值。

1.4 数据处理

计算出各性状指标的抗旱系数、隶属函数、综合抗旱性评价值(*D* 值)。

抗旱系数＝干旱胁迫处理值/对照处理值

隶属函数：$R(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$；其中 X_i 为第 i 个综合指数；X_{min} 是第 i 个综合指数的最小值；X_{max} 是第 i 个综合指数的最大值。

各综合指标权重：

$$W_i=P_i/\sum_{i=1}^{n}P_i$$

W_i 表示第 i 个指标在所有指标中的权重；P_i 为第 i 个指标的贡献率。

计算综合评价值(*D* 值)：

$$D=\sum_{i=1}^{n}W_iR(X_i) \qquad i=1,2,\cdots n$$

表 1　140 份供试小麦材料

Table 1　140 wheat tested materials

序号 No.	名称 Name	来源 Source	D 值 D value	序号 No.	名称 Name	来源 Source	D 值 D value	序号 No.	名称 Name	来源 Source	D 值 D value	序号 No.	名称 Name	来源 Source	D 值 D value
1	轮选 715 Lunxuan 715	河南 Henan	0.520	36	百农 207 Bainong 207	河南 Henan	0.227	71	陇麦 671 Longmai 671	甘肃 Gansu	0.220	106	西农 928 Xinong 928	陕西 Shaanxi	0.338
2	洛麦 23 Luomai 23	河南 Henan	0.461	37	河南 2 Henan 2	河南 Henan	0.227	72	陇鉴 301 Longjian 301	甘肃 Gansu	0.207	107	小偃 33 Xiaoyan 33	陕西 Shaanxi	0.326
3	新麦 35 Xinmai 35	河南 Henan	0.426	38	漯麦 18 Luomai 18	河南 Henan	0.225	73	陇鉴 127 Longjian 127	甘肃 Gansu	0.203	108	西农 895 Xinong 895	陕西 Shaanxi	0.316
4	洛麦 21 Luomai 21	河南 Henan	0.409	39	新麦 45 Xinmai 45	河南 Henan	0.224	74	陇鉴 196 Longjian 196	甘肃 Gansu	0.199	109	西农 887 Xinong 887	陕西 Shaanxi	0.315
5	商麦 167 Shangmai 167	河南 Henan	0.383	40	周麦 26 Zhoumai 26	河南 Henan	0.224	75	旱麦 906 Hanmai 906	甘肃 Gansu	0.194	110	西农 904 Xinong 904	陕西 Shaanxi	0.296
6	洛麦 26 Luomai 26	河南 Henan	0.367	41	众麦 7 号 Zhongmai 7	河南 Henan	0.220	76	陇鉴 111 Longjian 111	甘肃 Gansu	0.171	111	西农 981Xinong 981	陕西 Shaanxi	0.272
7	泉麦 890 Quanmai 890	河南 Henan	0.343	42	丰德存 1 号 Fengdecun 1	河南 Henan	0.217	77	长 6878 Chang 6878	山东 Shandong	0.450	112	西农 896 Xinong 896	陕西 Shaanxi	0.268
8	西农 509 Xinong 509	河南 Henan	0.338	43	新科麦 169 Xinkemai 169	河南 Henan	0.204	78	长 6388 Chang 6388	山东 Shandong	0.390	113	西农 905Xinong 905	陕西 Shaanxi	0.265
9	新麦 18 号 Xinmai 18	河南 Henan	0.324	44	偃高 21 Yangao 21	河南 Henan	0.193	79	济麦 21 Jimai 21	山东 Shandong	0.384	114	西农 902 Xinong 902	陕西 Shaanxi	0.237
10	许科 718 Xuke 718	河南 Henan	0.321	45	新麦 2111 Xinmai 2111	河南 Henan	0.190	80	烟农 936 Yannong 936	山东 Shandong	0.374	115	西农 906 Xinong 906	陕西 Shaanxi	0.237
11	周麦 24 Zhoumai 24	河南 Henan	0.312	46	子麦 603 Zimai 603	河南 Henan	0.186	81	齐麦 5 号 Qimai 5	山东 Shandong	0.362	116	西农 903 Xinong 903	陕西 Shaanxi	0.226
12	周麦 16 Zhoumai 16	河南 Henan	0.309	47	新麦 58 Xinmai 58	河南 Henan	0.185	82	济麦 23 Jimai 23	山东 Shandong	0.362	117	西农 529 Xinong 529	陕西 Shaanxi	0.221
13	福麦 3 号 Fumai 3	河南 Henan	0.301	48	漯麦 8 号 Luomai 8	河南 Henan	0.180	83	济麦 19 Jimai 19	山东 Shandong	0.358	118	西农 893 Xinong 893	陕西 Shaanxi	0.192
14	郑 618 Zheng 618	河南 Henan	0.297	49	周 18 Zhou 18	河南 Henan	0.179	84	中新 78 Zhongxin 78	山东 Shandong	0.340	119	Drysdale	国外 Foreign	0.412
15	陕 512 Shaan 512	河南 Henan	0.289	50	新麦 38 Xinmai 38	河南 Henan	0.134	85	荔高 6 号 Ligao 6	山东 Shandong	0.334	120	SeriM82	国外 Foreign	0.330
16	中信麦 99 Zhongxinmai 99	河南 Henan	0.284	51	兰天 10 号 Lantian 10	甘肃 Gansu	0.493	86	瑞华 1101 Ruihua 1101	山东 Shandong	0.325	121	Lassit	国外 Foreign	0.257
17	新麦 36 Xinmai 36	河南 Henan	0.282	52	天民 285 Tianmin 285	甘肃 Gansu	0.421	87	山农 24 号 Shannong 24	山东 Shandong	0.315	122	Clearwhite	国外 Foreign	0.255
18	周麦 32 Zhoumai 32	河南 Henan	0.280	53	兰天 575 Lantian 575	甘肃 Gansu	0.375	88	明丰 5088 Mingfeng 5088	山东 Shandong	0.301	123	Lassit	国外 Foreign	0.228
19	郑麦 369 Zhengmai 369	河南 Henan	0.278	54	普冰 143 Pubing 143	甘肃 Gansu	0.374	89	齐麦 2 号 Qimai 2	山东 Shandong	0.296	124	SD29589	国外 Foreign	0.215
20	洛麦 22 Luomai 22	河南 Henan	0.277	55	天民 180 Tianmin 180	甘肃 Gansu	0.372	90	济麦 22 Jimai 22	山东 Shandong	0.292	125	Quarron	国外 Foreign	0.196
21	周麦 23 Zhoumai 23	河南 Henan	0.274	56	红芒麦 Hongmangmai	甘肃 Gansu	0.358	91	济宁 13 Jining 13	山东 Shandong	0.286	126	SH4300	国外 Foreign	0.159
22	新麦 26 Xinmai 26	河南 Henan	0.268	57	铜麦 6 号 Tongmai 6	甘肃 Gansu	0.354	92	泰山 5 号 Taishan5	山东 Shandong	0.237	127	邯 6172 Han 6172	河北 Hebei	0.307
23	周 17 Zhou 17	河南 Henan	0.266	58	陇鉴 19 Longjian 19	甘肃 Gansu	0.353	93	泰科麦 33 Taikemai 33	山东 Shandong	0.233	128	石麦 19 Shimai 19	河北 Hebei	0.296
24	存麦 12Cunmai 12	河南 Henan	0.264	59	长旱 58 Changhan 58	甘肃 Gansu	0.349	94	良星 99 Liangxing 99	山东 Shandong	0.221	129	邯 115276 Han 115276	河北 Hebei	0.248
25	兰考 198 Lankao 198	河南 Henan	0.260	60	陇鉴 107 Longjian 107	甘肃 Gansu	0.344	95	光泰 68 Guangtai 68	山东 Shandong	0.207	130	石家庄 8 号 Shijiazhuang 8	河北 Hebei	0.223
26	周麦 27 Zhoumai 27	河南 Henan	0.254	61	普冰 322 Pubing 322	甘肃 Gansu	0.341	96	丰产 3 号 Fengchan 3	山东 Shandong	0.189	131	石 10-4393 Shi 10-4393	河北 Hebei	0.197
27	洛麦 24 Luomai 24	河南 Henan	0.253	62	天民 319 Tianmin 319	甘肃 Gansu	0.340	97	济麦 44 Jimai 44	山东 Shandong	0.172	132	宁春 45 Ningchun 45	宁夏 Ningxia	0.284
28	洛旱 6 号 Luohan 6	河南 Henan	0.249	63	陇鉴 101 Longjian 101	甘肃 Gansu	0.340	98	良星 66 Liangxing 66	山东 Shandong	0.171	133	宁冬 10 号 Ningdong 10	宁夏 Ningxia	0.270
29	洛旱 13 Luohan 13	河南 Henan	0.248	64	陇鉴 110 Longjian 110	甘肃 Gansu	0.328	99	济麦 60 Jimai 60	山东 Shandong	0.170	134	宁冬 6 号 Ningdong 6	宁夏 Ningxia	0.243
30	大地 528 Dadi 528	河南 Henan	0.242	65	陇鉴 108 Longjian 108	甘肃 Gansu	0.317	100	小偃 6 号 Xiaoyan 6	陕西 Shaanxi	0.548	135	宁冬 11 号 Ningdong 11	宁夏 Ningxia	0.197
31	优选 134 Youxuan 134	河南 Henan	0.241	66	天民 360 Tianmin 360	甘肃 Gansu	0.279	101	西农 961 Xinong 961	陕西 Shaanxi	0.427	136	优麦 2 号 Youmai 2	江苏 Jiangsu	0.389
32	郑麦 366 Zhengmai 366	河南 Henan	0.241	67	普冰 151 Pubing 151	甘肃 Gansu	0.274	102	西农 885 Xinong 885	陕西 Shaanxi	0.398	137	淮麦 25 Huaimai 25	江苏 Jiangsu	0.331
33	郑麦 113 Zhengmai 113	河南 Henan	0.234	68	龙科 1221 Longke 1221	甘肃 Gansu	0.252	103	中育 1211 Zhongyu 1211	陕西 Shaanxi	0.393	138	徐麦 35 Xumai 35	江苏 Jiangsu	0.268
34	旱选 1 号 Hanxuan 1	河南 Henan	0.229	69	陇麦 678 Longmai 678	甘肃 Gansu	0.228	104	西农 585 Xinong 585	陕西 Shaanxi	0.363	139	涡麦 66 Womai 66	安徽 Anhui	0.237
35	百农 160 Bainong 160	河南 Henan	0.229	70	天民 380 Tianmin 380	甘肃 Gansu	0.223	105	新麦 19 Xinmai 19	陕西 Shaanxi	0.353	140	晋麦 47 Jinmai 47	山西 Shanxi	0.277

表 2 各处理灌溉次数

Table 2 Irrigation times for each treatment

时期 Stage	灌水处理 Watering treatment	
	对照 Control	抗旱处理 Drought treatment
越冬期 Overwintering stage	+	+
返青期 Regreening stage	+	+
拔节期 Jointing stage	+	+
孕穗期 Booting stage	+	−
灌浆期 Grouting stage	+	+
乳熟期 Milk ripening stage	+	−

+：灌水；−：未灌水。

+: Irrigation; −: No irrigation.

利用 Excel 2016 进行数据初步整理，用 SPSS 27 统计软件进行数据分析，相关性分析，主成分分析，利用 R studio 软件进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种(系)在干旱胁迫下性状指标变化

由表 3 可知，干旱处理后 140 份小麦品种(系)的株高、穗长、穗叶距、穗下节、倒二节、第二节长、基部节长、第二节茎粗、旗叶长和旗叶宽等性状指标的变异系数范围为 11.67%～41.11%(CK)和 12.85%～46.76%(干旱)。其中，穗叶距的变异系数最高，第二节茎粗的变异系数最小。

在干旱胁迫下，相较于 CK，10 个性状指标中除穗下节外，其余指标均呈现下降趋势，表明干旱胁迫对小麦的生长有明显的抑制作用。具体来说，干旱处理的基部节长平均值为 2.54 cm，较 CK 下降了 8.30%，是 10 个性状中下降幅度最大的；其次为穗叶距、第二节间长、倒二节间、穗长、株高、第二节间茎粗、旗叶长和旗叶宽，分别减少了 5.60%、5.11%、4.97%、4.38%、4.21%、2.67%、2.45%和 0.67%。

从 CK 与干旱处理的配对 t 检验结果可以看出，干旱胁迫后株高、穗长、穗叶距、第二节间长和旗叶长的变化达到显著水平($P<0.05$)，倒二节间变化达到极显著水平($P<0.01$)。这说明干旱胁迫对大多数指标产生了不同程度的影响。

2.2 各性状抗旱系数描述性统计

对 140 份小麦材料在不同处理下的 10 个性状抗旱系数进行描述性统计。由表 4 可知，穗长抗旱系数的变异系数是 10 个性状中最小的，为 14.74%，对应的抗旱系数最大值为 1.30，最小值为 0.61。株高和第二节茎粗抗旱系数的变异系数分别为 16.65%和 16.97%。穗叶距抗旱系数的变异系数为 62.76%，对应的范围为 0.14～4.67。穗下节、倒二节和第二节长的抗旱系数变异系数分别为 36.70%、35.30%和 30.42%，对应的抗旱系数最大值分别为 2.19、4.11 和 1.93，最小值分别为 0.41、0.32 和 0.25。

表 3 不同小麦品种(系)各性状指标的变化

Table 3 Changes in agronomic traits of different wheat varieties(lines) cm

处理 Treatment	指标 Index	PH	SL	SLS	TFIL	TSIL	BIL2	BIL1	SD2	FLL	FLW
CK	最大值 Max.	98.33	11.83	24.83	42.20	49.20	11.13	6.33	4.48	21.50	3.33
	最小值 Min.	37.00	5.30	2.50	10.67	7.50	2.33	0.67	2.36	10.39	1.10
	平均值 Average	56.36	7.08	12.49	21.70	13.69	5.48	2.77	3.37	15.12	1.49
	标准差 SD	13.01	1.03	5.13	6.83	4.72	1.56	1.07	0.39	2.40	0.27
	CV/%	23.08	14.49	41.11	31.46	34.48	28.38	38.71	11.67	15.86	18.02
干旱 Drought	最大值 Max.	86.67	10.00	28.50	39.50	38.33	9.83	5.33	4.32	23.97	3.28
	最小值 Min.	38.00	3.90	1.23	10.03	7.57	1.07	0.67	2.28	9.10	0.92
	平均值 Average	53.99	6.77	11.79	21.85	13.01	5.20	2.54	3.28	14.75	1.48
	标准差 SD	11.33	1.13	5.51	6.58	3.79	1.39	0.87	0.42	2.31	0.24
	CV/%	20.98	16.72	46.76	30.11	29.13	26.80	34.33	12.85	15.65	16.10
较 CK 变化 Difference	均值 Average	−2.37	−0.31	−0.70	0.15	−0.68	−0.28	−0.23	−0.09	−0.37	−0.01
	CV/%	−2.10	2.23	5.65	−1.35	−5.35	−1.58	−4.38	1.18	−0.21	−1.92
	t 值 t value	6.52*	4.47*	6.06*	−1.30	11.16**	4.85*	1.33	1.56	3.87*	0.13

PH：株高；SL：穗长；SLS：穗叶距；TFIL：穗下节间；TSIL：倒二节间；BIL2：第二节间长；BIL1：基部节间长；SD2：第二节间粗；FLL：旗叶长；FLW：旗叶宽。下同。

PH: Plant height; SL: Spike length; SLS: Spike leaf spacing; TFIL: The first internode length; TSIL: The second internode length; BIL2: Basal internode length 2; BIL1: Basal internode length 1; SD2: Stem diameter 2; FLL: Flag leaf length; FLW: Flag leaf width. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. The same in tables 4−6 and figures 1 and 3.

表 4　各性状抗旱系数指标描述性统计

Table 4　Descriptive statistics of traits drought resistance

性状 Trait	抗旱系数 Drought resistance coefficient				变异系数 CV/%
	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Average	标准差 SD	
PH	1.73	0.61	0.97	0.16	16.65
SL	1.30	0.61	0.96	0.14	14.74
SLS	4.67	0.14	1.09	0.69	62.76
TFIL	2.19	0.41	1.08	0.40	36.70
TSIL	4.11	0.32	1.00	0.35	35.30
BIL2	1.93	0.25	0.99	0.30	30.42
BIL1	6.80	0.23	1.07	0.70	65.97
SD2	1.54	0.61	0.99	0.17	16.97
FLL	1.63	0.70	0.99	0.20	19.70
FLW	2.67	0.45	1.02	0.24	23.35

基部节间长抗旱系数的变异系数为所有指标中最大,为 65.97%,对应的抗旱系数最大值为 6.80,最小值为 0.23。旗叶长和旗叶宽抗旱系数的变异系数分别为 19.70%和 23.35%,其中旗叶长抗旱系数范围为 0.70～1.63,旗叶宽的抗旱系数范围为 0.45～2.67。

2.3　不同小麦品种(系)各性状指标相关性分析

对 140 份小麦材料的农艺性状进行相关性分析,结果如表 5 所示。在 CK 条件下,有 32 组性状指标之间呈极显著正相关,3 组性状指标呈显著正相关,而 10 组性状指标间无显著相关性;在干旱处理下,有 28 组性状指标之间呈极显著正相关,1 组性状指标间呈显著正相关,而 16 组性状指标间无显著相关性。

从具体性状看,在 CK 条件下,株高、穗长、倒二节间和第二节间长与除旗叶宽以外的所有性状指标均呈显著或极显著正相关;穗叶距与穗下节、倒二节间、第二节间粗以及旗叶长之间呈极显著正相关;穗下节除与基部节长和旗叶宽无显著相关性外,与其余所有性状指标均呈极显著正相关;第二节间粗与旗叶长和旗叶宽呈极显著正相关;旗叶长与旗叶宽之间也呈极显著正相关。

在干旱处理下,株高、倒二节间和第二节间长与除旗叶宽无显著相关性,与其余所有性状指标均呈显著或极显著正相关;穗长与除基部节间长和旗叶宽外的其余性状指标均呈极显著正相关;穗叶距仅与穗下节间和倒二节间呈极显著正相关,与其他性状指标无显著相关性;穗下节间与倒二节间、第二节间长及旗叶宽呈极显著正相关;基部节长与除株高、倒二节间和第二节间长外所有

表 5　不同小麦品种(系)农艺性状的相关性分析

Table 5　Correlation analysis of agronomic traits of different wheat varieties(lines)

处理 Treatment	性状 Trait	PH	SL	SLS	TFIL	TSIL	BIL2	BIL1	SD2	FLL
CK	SL	0.496**								
	SLS	0.507**	0.283**							
	TFIL	0.732**	0.363**	0.698**						
	TSIL	0.793**	0.326**	0.352**	0.565**					
	BIL2	0.736**	0.338**	0.139	0.395**	0.620**				
	BIL1	0.427**	0.206*	−0.058	0.119	0.363**	0.715**			
	SD2	0.353**	0.259**	0.229**	0.347**	0.310**	0.363**	0.238**		
	FLL	0.580**	0.326**	0.276**	0.408**	0.488**	0.418**	0.216*	0.310**	
	FLW	−0.001	0.019	−0.080	−0.010	−0.004	0.119	0.082	0.224**	0.176*
干旱 Drought	SL	0.541**								
	SLS	0.564**	0.411**							
	TFIL	0.783**	0.393**	0.717**						
	TSIL	0.676**	0.298**	0.282**	0.477**					
	BIL2	0.603**	0.237**	0.122	0.310**	0.460**				
	BIL1	0.262**	0.150	−0.081	0.022	0.209*	0.697**			
	SD2	0.303**	0.334**	0.136	0.130	0.297**	0.282**	0.152		
	FLL	0.500**	0.307**	0.165	0.428**	0.360**	0.309**	0.116	0.305**	
	FLW	0.068	0.083	−0.065	−0.085	0.096	0.115	0.124	0.249**	0.251**

性状指标均无显著相关性；第二节间粗与旗叶长和旗叶宽呈极显著正相关；旗叶长与旗叶宽之间也呈极显著正相关。

综合两种处理的分析结果可以看出，株高和倒二节间在两种环境下均与除旗叶宽外的其余性状指标呈显著或极显著正相关；第二节间粗与旗叶长和旗叶宽，两两之间始终呈极显著正相关。这说明，在不同的环境下，小麦的主要农艺性状之间仍表现出较为一致的相关性特征。

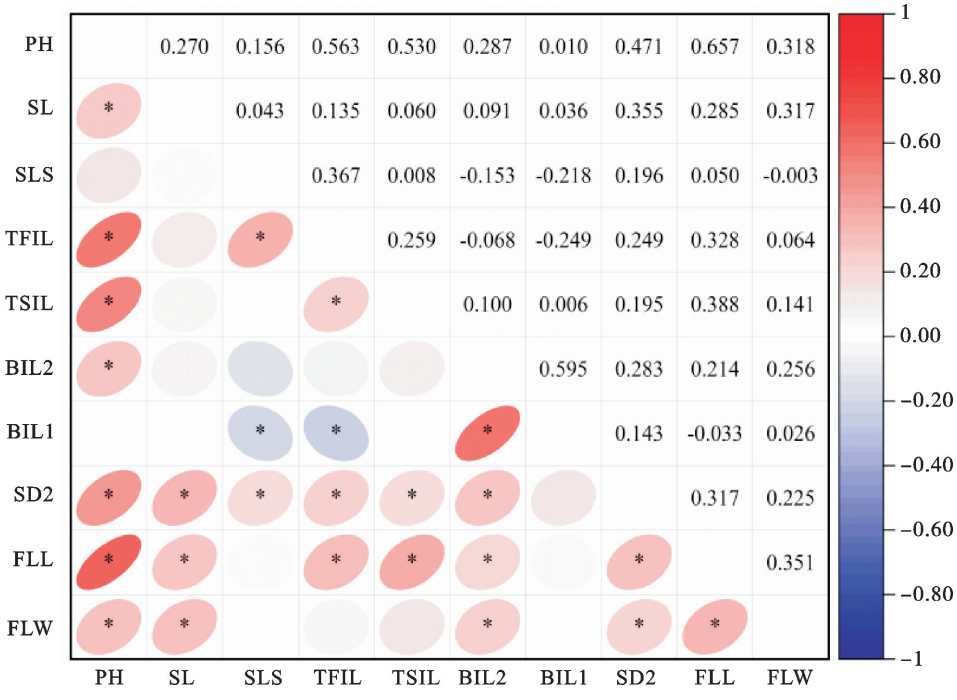
以上结果表明，大多数性状指标之间存在一定的相关性。这种相关性为进一步分析性状指标之间的内在联系和机制提供了基础，但 CK 与干旱处理的差异也表明环境胁迫对性状指标间相关性的影响值得深入探讨。通过与 CK 的比较，可以更清晰地理解干旱对小麦农艺性状的作用模式与影响程度。

2.4 不同小麦品种(系)农艺性状抗旱系数相关分析

从图 1 可以看出，株高抗旱系数与穗长、穗下节间、倒二节间、第二节间长、第二节间粗、旗叶长和旗叶宽呈显著正相关；穗长与第二节间粗、旗叶长和旗叶宽抗旱系数呈显著正相关，与其余性状指标无显著相关性；穗叶距抗旱系数与穗下节抗旱系数呈显著正相关，与基部节长呈显著负相关，与第二节间粗抗旱系数呈显著正相关，与其余性状指标均无显著相关性；穗下节抗旱系数与倒二节间、第二节间粗、旗叶长抗旱系数呈显著正相关，与基部节长抗旱系数呈显著负相关；倒二节间抗旱系数与第二节间长抗旱系数呈显著正相关，与旗叶长抗旱系数呈显著正相关；第二节间长抗旱系数与所有性状指标均呈显著正相关；基部节长抗旱系数与所有性状指标均无显著相关性；第二节间粗和旗叶长抗旱系数与所有性状指标均呈显著正相关。由此可见，在受到干旱胁迫后，小麦不同农艺性状的表现存在差异，单一性状的变化难以反映品种(系)的抗旱性。

2.5 不同小麦品种(系)抗旱系数主成分分析

利用 SPSS 对 140 份小麦种质的 10 个性状指标进行主成分分析，共提取了 5 个主成分(表 6)。其中，第一主成分特征值为 1.760，贡献率为 30.950%，特征向量中株高的特征向量系数最大(0.502)，其次是旗叶长；第二主成分特征值为 1.370，贡献率为 18.830%，基部节长的特征向量系数最大(0.594)，其次是第二节长，但是穗叶距和穗下节的负特征向量系数较高，第三主成分特征向量系数为 1.050，贡献率为 11.060%，穗长的特征值向量系数大(0.601)，其次为旗叶宽；第四主成分特征向量系数为 1.020，贡献率为 10.310%，穗叶距特征向量系数最大(0.546)，其次是基部节长；第五主



*：$P<0.05$.

图 1 小麦品种(系)各性状抗旱系数相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of drought resistance coefficients of different traits of wheat varieties(lines)

表 6　10 个农艺性状主成分分析

Table 6　Principal component analysis of 10 agronomic traits

性状 Trait	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
PH	0.502	−0.064	−0.211	0.026	−0.006
SL	0.270	0.060	0.601	−0.229	−0.502
SLS	0.124	−0.396	0.263	0.546	0.366
TFIL	0.322	−0.393	−0.100	0.240	0.028
TSIL	0.320	−0.052	−0.550	−0.154	−0.212
BIL2	0.217	0.543	−0.075	0.261	0.255
BIL1	0.041	0.594	−0.078	0.357	−0.056
SD2	0.367	0.083	0.284	0.329	−0.308
FLL	0.432	−0.017	−0.134	−0.258	0.071
FLW	0.287	0.152	0.319	−0.444	0.632
特征值 Eigenvalue	1.760	1.370	1.050	1.020	0.850
贡献率 Contribution/%	30.950	18.830	11.060	10.310	7.300
累积贡献率 Cumulative contribution/%	30.950	49.790	60.840	71.150	78.450

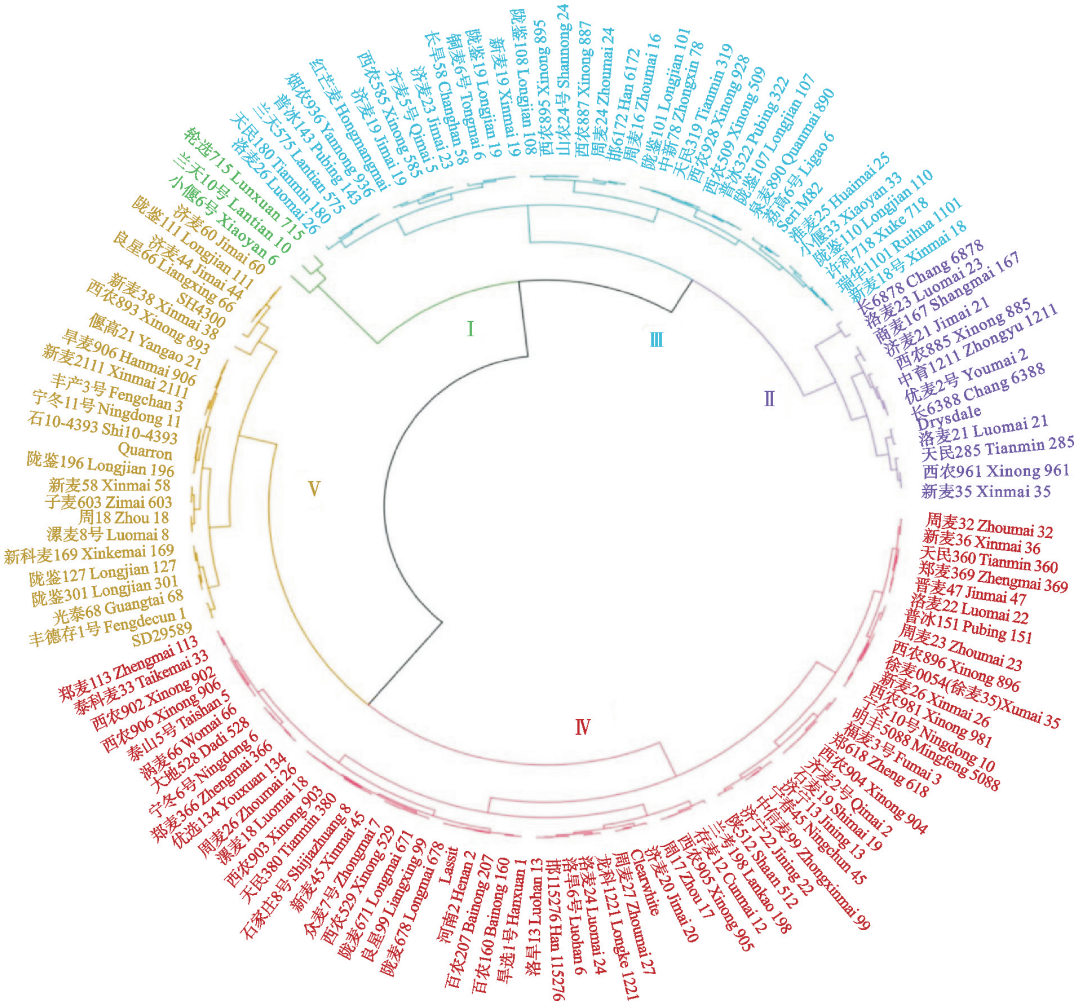


图 2　不同小麦品种(系)抗旱性聚类图

Fig. 2　Cluster map of drought resistance of different wheat varieties(lines)

成分的特征向量系数为 0.850，贡献率为 7.300%，其中旗叶宽的特征向量系数最大(0.632)，其次为穗叶距，而穗长、第二节茎粗、倒二节呈现出负特征向量系数。

2.6 不同小麦品种(系)农艺性状综合评价及聚类分析

根据隶属函数法将数据进行整理计算出 140 份小麦品种各性状的隶属函数值及权重，再根据公式计算出每个品种的抗旱性综合评价值(*D* 值)(表 1)，从而筛选出抗旱性较好的品种。

利用 R studio 进行聚类分析，将 140 份小麦材料分为 5 类(图 2)。结合表 1 和图 2 可知，高抗旱型 *D* 值在 0.493～0.548，共 3 份小麦品种(系)；较抗旱型 *D* 值在 0.383～0.461，共 13 份小麦品种(系)；一般抗旱型 *D* 值在 0.307～0.375，共 37 份小麦品种(系)；较敏感型 *D* 值在 0.220～0.301，共 62 份小麦品种(系)；高敏感型 *D* 值在 0.134～0.217，共 25 份小麦品种(系)。其中高抗旱型的 3 份小麦品种为小偃 6 号、轮选 715 和兰天 10 号，其 *D* 值为 0.548、0.520 和 0.493。

3 讨论

为全面评估小麦的抗旱能力，本研究对 140 份小麦品种(系)进行了系统的抗旱性评价。通过对这些品种(系)的株高、茎节、旗叶等 10 个性状指标的抗旱性综合评价分析，筛选出具有优异抗旱性能的种质资源。农艺性状指标易于观察，是作物抗旱性研究中应用最广泛的指标，主要反映地上部的形态特征。株高、穗长、旗叶长、旗叶宽等农艺性状在生育后期是小麦抗旱性鉴定中常用的形态指标。冀天会等[18]认为，成穗数、籽粒饱满程度和结实性与小麦的抗旱性密切相关。在生育后期，穗下节节长、籽粒长宽比、籽粒饱满度等表型值在不同抗旱性品种间存在显著差异，常被用作小麦抗旱性的评价指标[19-20]。根据研究需要，在不同生育期选择相应的形态指标用于小麦抗旱性评价。

试验结果表明，140 份小麦品种(系)可分为 5 大类：高抗旱型、较抗旱型、一般抗旱型、较敏感型和高敏感型。其中，高抗旱型的 3 个品种分别为小偃 6 号、轮选 715 和兰天 10 号。结果显示，抗旱变异系数范围为 14.74%～65.97%，其中基部节间长和穗叶距的变异系数最高，分别排在第一和第二，穗长的变异系数最低。此外，主成分分析提取了 5 个主成分，共解释了近 80% 的数据变异。由于小麦的农艺性状种类繁多，不同的测定指标可能会影响抗旱性筛选结果。杨宏羽等[21]通过两种分析方法对马铃薯进行研究后，筛选出 33 份高耐旱型品种。白旭瑞[22]通过测定小麦苗期的发芽势、发芽率等指标，并利用相对值进行抗旱种质筛选，认为这些数据是抗旱性筛选的重要参考指标。

综上所述，从前人研究的耐旱系数与抗旱综合评价值来看，不同的测定指标和筛选方法可能导致筛选结果的差异，这反映了抗旱性研究的复杂性与多样性。本试验通过对 140 份小麦品种(系)的系统分析，筛选出具有优异抗旱性能的种质资源，为后续的抗旱性研究提供了科学参考。此外，试验结果揭示了部分关键农艺性状与小麦抗旱性能之间的相关性，这为深入理解小麦抗旱性提供了新的视角。在未来研究中，可以结合不同抗旱型小麦品种(系)在干旱胁迫下的多项指标响应，进一步揭示抗旱性形成的内在机理，明确关键性状的遗传和调控机制，从而为小麦抗旱性改良和优质种质筛选提供更加精准的理论依据。

本试验以 140 份小麦品种(系)为材料，对其株高、茎节间、旗叶等 10 个性状指标进行了测定。相关性分析表明，10 个性状指标之间均存在相关性，其中穗叶距和穗下节间与第二节间长和基部节间长呈负相关；基部节间长与旗叶长呈负相关；而旗叶指标之间均呈正相关。主成分分析提取了 5 个主成分，涵盖了主要数据信息。通过主成分分析和隶属函数法，计算了干旱胁迫下各品种(系)的抗旱性综合评价值(*D* 值)，并基于 *D* 值对 140 份小麦品种(系)进行聚类分析。结果显示，这些品种(系)可分为 5 类：高抗旱型 3 个，较抗旱型 13 个，一般抗旱型 37 个，较敏感型 62 个，高敏感型 25 个。

参考文献：

[1] International Wheat Genome Sequencing Consortium (IWGSC). A chromosome-based draft sequence of the hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum*) genome [J]. *Science*, 2014, 345(6194): 1251788.

[2] Toulotte J M, Pantazopoulou C K, Sanclemente M A, *et al*. Water stress resilient cereal crops: Lessons from wild relatives [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2022, 64(2): 412.

[3] 冯举伶，姚立蓉，汪军成，等. 119 份春小麦种质萌发期抗旱性鉴定及抗旱相关基因表达特性分析[J]. 麦类作物学报，2022，42(3)：253.

Feng J L, Yao L R, Wang J C, *et al*. Drought resistance identification and drought-resistance related gene expression analysis of 119 spring wheat germplasms at germination stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(3): 253.

[4]Farooq M, Hussain M, Siddique K H M. Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, 33(4): 331.

[5]Fahad S, Bajwa A A, Nazir U, *et al*. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1147.

[6]赵丽英,邓西平,山 仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523.
Zhao L Y, Deng X P, Shan L. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 523.

[7]Lobell D B, Burke M B, Tebaldi C, *et al*. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030 [J]. *Science*, 2008, 319(5863): 607.

[8]Guo Z, Shi Y, Yu Z, *et al*. Supplemental irrigation affected flag leaves senescence post-anthesis and grain yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 100.

[9]杨录国. 高效节水灌溉技术在农田水利工程中的应用[J]. 河北农机, 2021(10): 135.
Yang L G. Application of high-efficiency water-saving irrigation technology in farmland water conservancy projects [J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2021(10): 135.

[10]胡 实,莫兴国,林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239.
Hu S, Mo X G, Lin Z H. Projections of spatial-temporal variation of drought in North China [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(2): 239.

[11]Pour-Aboughadareh A, Etminan A, Abdelrahman M, *et al*. Assessment of biochemical and physiological parameters of durum wheat genotypes at the seedling stage during polyethylene glycol-induced water stress [J]. *Plant Growth Regulation*, 2020, 92(1): 81.

[12]李迎春,张超英,庞启华,等. 干旱胁迫下小麦在不同生育时期的耐旱性研究[J]. 西南农业学报, 2008, 21(3): 621.
Li Y C, Zhang C Y, Pang Q H, *et al*. Study on wheat resistance to drought in the different growing stages under drought stress [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(3): 621.

[13]胡正元,肖 琳. 烯效唑在杂交水稻育秧中的应用效果研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2005, 18(3): 326.
Hu Z Y, Xiao L. Study on effect of different methods with spraying uniconazole to growing hybrid rice seedlings [J]. *Journal of Xinyang Teachers College (Natural Science Edition)*, 2005, 18(3): 326.

[14]石耀辉,周广胜,蒋延玲,等. 贝加尔针茅响应降水变化敏感指标及关键阈值[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2620
Shi Y H, Zhou G S, Jiang Y L, *et al*. Thresholds of *Stipa baicalensis* sensitive indicators response to precipitation change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2620.

[15]叶龙华,黄香兰,薛 立. 干旱对树木叶片性状及抗旱生理的影响[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 29.
Ye L H, Huang X L, Xue L. Effects of drought on leaf traits and drought-resistant physiology of trees [J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(1): 29.

[16]赵吉平,周 伟,郭鹏燕,等. 干旱胁迫对小麦品种株高与产量及抗旱性相关分析[J]. 种子, 2020, 39(9): 120.
Zhao J P, Zhou W, Guo P Y, *et al*. Correlation analysis of plant height, yield and drought resistance of wheat varieties under drought stress [J]. *Seed*, 2020, 39(9): 120.

[17]刘德政,卢 山,高珅奥,等. 大田和旱棚环境下小麦旗叶气孔性状变异及其与光合参数的关系[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(3): 360.
Liu D Z, Lu S, Gao S A, *et al*. Variations of flag leaf and stomatal traits of wheat in field and drought shed environment [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(3): 360.

[18]冀天会,张灿军,谢惠民,等. 小麦品种抗旱性鉴定产量指标的比较研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 103.
Ji T H, Zhang C J, Xie H M, *et al*. A comparative study on yield index of wheat varieties drought resistance [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1): 103.

[19]张 军,吴秀宁,王新军. 小麦抗旱节水生理和遗传育种研究进展[J]. 商洛学院学报, 2022, 36(2): 7.
Zhang J, Wu X N, Wang X J. Research progress on drought resistance and water saving physiology and genetic breeding of wheat [J]. *Journal of Shangluo University*, 2022, 36(2): 7.

[20]张维军,袁汉民,陈东升,等. 小麦抗旱性生理生化机制及QTL研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 139.
Zhang W J, Yuan H M, Chen D S, *et al*. Advances in studies on physiological and biochemical indexes and QTL for drought resistance in wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 139.

[21]杨宏羽,李瑞瑞,何 雷,等. 马铃薯 StCIPK 基因家族鉴定及表达特征分析[J]. 植物生理学报, 2022, 58(10): 1919.
Yang H Y, Li R R, He L, *et al*. Identification and expression characterization of StCIPK gene family in potato (*Solanum tuberosum*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, 58(10): 1919.

[22]白旭瑞. 小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱品种筛选[D]. 保定:河北农业大学, 2021.
Bai X R. Identification of drought resistance of wheat at seedling stage and selection of drought resistant varieties [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.