

不同品种春小麦耐旱性分析及鉴定指标筛选

时佳,王重,高新,张宏芝,王立红,
王春生,夏建强,李剑峰,樊哲儒,张跃强

(新疆农业科学院核技术生物技术研究所/农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室/
新疆作物化学调控工程技术研究中心,新疆乌鲁木齐830091)

摘要:为鉴定新疆不同品种春小麦的耐旱性,筛选耐旱关键性指标并建立可靠的耐旱性数学评价模型,以16个新疆主栽春小麦品种为研究材料,在干旱胁迫和充分灌溉两个条件下,测定全生育期15个相关指标,利用隶属函数、聚类分析和主成分分析等方法对新疆春小麦耐旱性进行综合评价。结果表明:与充分灌溉处理相比,干旱胁迫下灌浆初期叶绿素含量($SPAD_1$)和灌浆中期冠层温度(CT)显著升高,其他指标不同程度降低。联合方差分析表明,水分和品种对春小麦的各项生理指标、农艺性状和产量性状等单项指标有不同程度的影响。通过主成分分析,以特征值大于1为标准得到6个主成分,可反映原耐旱指标信息的82.292%;通过隶属函数分析,得到不同品种小麦耐旱性综合评价值(D 值)。根据综合得分进行聚类分析,将16个品种聚类为4种耐旱类型,其中强耐旱型3个、中耐旱型10个、弱耐旱型2个、早敏感型1个。通过逐步回归分析法建立 $SPAD_1$ 、成熟期干物质质量(DM_3)、千粒重(TKW)的回归方程 $D = -2.258 + 1.299DM_3 + 1.148SPAD_1 + 0.475TKW$,方程决定系数 $R^2 = 0.962$, $P = 0.0001$,表明 DM_3 、 $SPAD_1$ 和 TKW 可作为耐旱性的主要鉴定指标,利用回归方程可以进行春小麦品种耐旱性的快速鉴定和预测。

关键词:春小麦;耐旱性;主成分分析;综合评价;逐步回归

中图分类号:S512.1⁺2 文献标志码:A

Drought tolerance analysis and identification index screening of different spring wheat varieties

SHI Jia, WANG Zhong, GAO Xin, ZHANG Hongzhi, WANG Lihong, WANG Chunsheng,
XIA Jianqiang, LI Jianfeng, FAN Zheru, ZHANG Yueqiang

(Institute of Nuclear Technology and Biotechnology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/
Xinjiang Crop Biotechnology Key Laboratory/Key Laboratory of Desert Oasis Crop Physiology,
Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: This study aimed to identify the drought tolerance materials of spring wheat in Xinjiang. The key indicators of drought tolerance were screened and a reliable mathematical evaluation model of drought tolerance was established, which laid a foundation for the selection and breeding of new drought-tolerant varieties of wheat. In this study, 16 Xinjiang spring wheat varieties were used as research materials, and two treatments were set for drought stress and adequate irrigation. Fifteen related indexes of the whole growth period were measured. The results showed that $SPAD_1$ and CT increased significantly with drought stress, and other indexes decreased to varying degrees with drought stress. The variance analysis indicated that treatment and variety had different degrees of effects on the physiological indexes, agronomic traits and yield index traits of spring wheat varieties. Through principal component analysis, 6 principal components were obtained based on the characteristic value greater than 1, which reflected

收稿日期:2022-10-12

修回日期:2023-03-13

基金项目:新疆维吾尔自治区天山青年计划-杰出青年科技人才培养项目(2020Q009);农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室开放课题(25107020-201902)

作者简介:时佳(1991-),女,辽宁丹东人,助理研究员,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail:shijia0401@126.com

通信作者:张跃强(1976-),男,新疆奇台人,研究员,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail:zhangyqyhm@163.com

82.292% of the original drought tolerance index information. Through the membership function analysis, the comprehensive evaluation value (D value) of drought tolerance of different varieties of wheat was obtained. Then, according to the comprehensive score, the cluster analysis was carried out, and the 16 varieties were clustered into 4 drought-tolerant types, including 3 varieties were strong drought-tolerant type, 10 varieties were moderately drought-tolerant, 2 varieties were weakly drought-tolerant, and 1 variety was drought-sensitive. The regression equation $D = -2.258 + 1.299 DM_3 + 1.148 SPAD_1 + 0.475 TKW$ was established by stepwise regression analysis, and the coefficient of determination of the equation $R^2 = 0.962$, $P = 0.0001$, this equation can be used for drought tolerance evaluation, DM_3 , $SPAD_1$, and TKW can be used as the main identification index of drought tolerance test, and the regression equation is used to quickly identify and predict the drought tolerance of varieties.

Keywords: spring wheat; drought tolerance; principal component analysis; comprehensive evaluation; stepwise regression

新疆维吾尔自治区地处内陆,属于典型的干旱半干旱荒漠区,降雨量少且蒸发量大,干旱一直是制约该地区作物产量提高的重要因素^[1]。小麦是新疆最重要的口粮作物^[2-3],据统计新疆小麦年种植面积为 100 万 hm^2 左右,约占粮食作物总面积的 1/2,其中春小麦占比约 30%^[4]。新疆地区由于水资源匮乏,每年干热风期约 10 d,春小麦生产受到严重制约,为保证粮食生产安全稳定,春小麦耐旱品种选育和种质资源筛选显得尤为重要。春小麦耐旱性的遗传背景较为复杂,影响因素较多,且评判标准多样,不同评价指标间各有优劣,单个指标无法全面准确地评价品种耐旱性。主成分分析法是通过降维方式将多个单项指标简化为少数综合指标,用少量不相关的综合指标代替多数单项指标来反映较多信息,此方法能较有效地浓缩数据和简化指标,从而弥补单项指标评价法的缺陷,同时可实现对各参试性状的综合评价。主成分分析法已经广泛应用在生产实践中,任毅等^[5]利用主成分分析鉴定了小麦萌发期抗旱性;宋晓等^[6]基于主成分分析在 27 个小麦品种中筛选出 10 个高产氮高效品种;廖兰等^[7]采用主成分分析和聚类分析将 9 个小麦品种分为 3 类来研究小麦蛋白的结构和功能。近年来,主成分分析方法在小麦品质性状^[8]、农艺性状^[9]等参数筛选方面的应用较多,但关于其在春小麦耐旱性方面的研究鲜有报道。

本研究以近年新审定的 16 个春小麦品种为材料,在水旱调控栽培模式下,以多元统计分析方法对参试小麦的 15 个生长生理指标的干旱胁迫反应进行综合评价,将多个单一指标简化为少数综合指标,同时对各指标干旱胁迫反应与耐旱性关系进行探讨,并基于此建立春小麦耐旱性数学评价模型,以期新疆节水灌溉条件下春小麦耐旱性品种鉴定与选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试材料为新疆近年审定的 16 个春小麦品种(表 1),由新疆农业科学院核技术生物技术研究所小麦研究室提供。

试验于 2019—2020 年在新疆农业科学院核技术生物技术研究所军户小麦育种基地开展,基地位于新疆昌吉回族自治州境内军户农场 8 连($87^{\circ}01'E$, $43^{\circ}96'N$),海拔 717.2 m,属于中温带地区,为典型的温带大陆性气候,以灌溉农业为主,年平均降水量为 190 mm,土壤类型为灰漠土。试验设置充分灌溉和干旱胁迫两个处理,充分灌溉处理为春小麦二叶一心灌头水,全生育期灌溉 7 次,总灌水量约 $320 m^3 \cdot 667m^{-2}$;干旱胁迫处理为春小麦二叶一心灌头水、拔节期灌二水、扬花期灌三水,全生育期灌溉 3 次,总灌水量约 $140 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 。采用完全随机区组设计,小区面积 $2.4 m^2$,每个处理 3 次重复。试验田周围设置有 1 m 宽保护行,处理间设置有 5 m 宽隔离区。春小麦于每年 3 月底用小区播种机播种,密度为 $35 万粒 \cdot 667m^{-2}$,7 月中旬收获。以覆土浅埋滴灌的方式灌水,在春小麦二叶一心和拔节期分别随滴灌施尿素 $10 kg \cdot 667m^{-2}$,除灌水量外各处理生育期田间管理均相同。试验基地设置 EMS-ET 植物生理生态监测系统数据显示,2019 年春小麦全生育期(4~8 月)降水量为 78 mm,2020 年全生育期(4~8 月)降水量为 63 mm。

1.2 测定指标与方法

灌浆中期冠层温度(Canopy temperature, CT):使用手持式红外测温仪 Optris LS LT 在春小麦灌浆中期(扬花后 20 d),选择晴朗无风天气的 13:00—15:00 进行测量,使太阳位于测量人身后,尽量避免阴影出现在测量区域。

表 1 参试小麦品种
Table 1 The tested wheat varieties

序号 No.	品种名称 Variety name	审定年份 Year	品种类型 Variety type	适宜种植区域 Suitable planting area
1	核春 115 Hechun115	2022	早熟 Early maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
2	核春 137 Hechun137	2018	中早熟 Mid-early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
3	核春 213 Hechun213	2022	早熟 Early maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
4	新春 11 号 Xinchun11	2002	中熟 Middle maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
5	新春 17 号 Xinchun17	2005	早熟 Early maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
6	新春 26 号 Xinchun26	2007	早熟 Early maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
7	新春 29 号 Xinchun29	2008	中晚熟 Mid-late maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
8	新春 37 号 Xinchun37	2012	中早熟 Mid-early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
9	新春 38 号 Xinchun38	2012	早熟 Early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
10	新春 40 号 Xinchun40	2013	早熟 Early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
11	新春 43 号 Xinchun43	2015	中晚熟 Mid-late maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
12	新春 44 号 Xinchun44	2016	早熟 Early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
13	新春 46 号 Xinchun46	2017	早熟 Early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
14	新春 47 号 Xinchun47	2017	中早熟 Mid-early maturity	北疆春麦区种植 Spring wheat area of Northern Xinjiang
15	新春 48 号 Xinchun48	2017	早熟 Early maturity	新疆春麦区种植 Spring wheat area of Xinjiang
16	新春 6 号 Xinchun6	1993	早熟 Early maturity	新疆、内蒙古等有水浇条件的春麦区种植 Spring wheat areas with watering conditions such as Xinjiang and Inner Mongolia

灌浆初期叶绿素含量($SPAD_1$)和灌浆中期叶绿素含量($SPAD_2$):使用 SPAD Minolta 502 Plus 分别于灌浆初期(扬花期后 7 d)和灌浆中期(扬花期后 20 d),在每个试验小区随机选择 10 个植株主茎的旗叶进行测定,以平均值计为该小区叶绿素含量。

干物质积累与分配:分别于灌浆初期(扬花后 7 d)、灌浆中期(扬花后 20 d)和成熟期,每个试验小区随机取 10 株植株,带回实验室 105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘至恒重后称重,测定灌浆初期干物质量(Dry matter quantity, DM_1),灌浆中期干物质量(DM_2)及成熟期干物质量(DM_3)。

产量性状和产量构成:于成熟期测定,每个小区随机取 10 个植株,用直尺分别测量其茎基部至主茎顶部之间的距离,计算平均值即为株高(Plant height, PH);10 株样品穗部脱粒称总重即为籽粒重(Kernel weight, KW);10 株样品籽粒计总数,计算平

均值即为单穗粒数(Grain number per spike, GN);10 株样品颖壳和穗轴称总重即为颖壳重(Glume weight, GW)。每个小区取中间未经取样破坏的 0.2 m²样区,统计成穗数量计为穗数(Spike number, SN)。在收获样品中,各处理随机取 250 粒完整无病害的籽粒,分别称重(差值不高于 2%),3 次重复,求平均值后折算成千粒重(Thousand kernel weight, TKW);使用带排气砣的容量筒,各处理量取 1 L 小麦籽粒称重,3 次重复,取平均值计为容重(Bulk density, BD)。各小区收获全部植株脱粒后分别称重,籽粒重量即为小区产量(Plot yield, PY)。

收获指数(Harvest index, HI) = 籽粒重/成熟期干物质量。

1.3 数据统计与分析

使用 Microsoft Excel 软件进行数据统计整理,SPSS 25 软件进行方差分析、主成分分析、聚类分析

及逐步回归等数据分析。

1.3.1 干旱胁迫反应指数 (Drought response index, *DRI*) 各性状干旱胁迫下测定值与充分灌溉下测定值的比值作为干旱胁迫反应指数。计算公式如下^[10]：

$$DRI(\%) = \frac{\text{干旱胁迫测定值}}{\text{充分灌溉测定值}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 不同品种参试小麦各综合指数的隶属函数值

$$u(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $u(X_j)$ 表示第 j 个隶属函数值; X_j 表示第 j 个综合指标; $X_{\min}$ 表示第 j 个综合指标的最小值; $X_{\max}$ 表示第 j 个综合指标的最大值。

1.3.3 各综合指标的权重

$$w_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, w_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度, 即权重; p_j 代表经主成分分析所得各小麦品种第 j 个综合指标的贡献率。

1.3.4 参试小麦的综合耐旱能力

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times w_j] \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, D 为各小麦品种在干旱胁迫下由综合指标评价获得耐旱性综合评价值。

2 结果与分析

2.1 不同处理对春小麦各性状及产量的影响

如表 2 所示, 不同春小麦品种在不同水分条件下的各单项指标存在不同程度差异。充分灌溉下, ‘新春 38 号’ 有 4 个指标最大, 分别是 *KW*、*GW*、*TKW* 和 *DM₃*; ‘新春 11 号’ 有 2 个指标最大, 分别为 *SPAD₂* 和 *GN*; ‘新春 26 号’ 有 2 个指标最大, 分别为 *GN* 和 *HI*; ‘新春 17 号’、‘新春 29 号’、‘新春 37 号’、‘新春 40 号’、‘新春 43 号’、‘新春 44 号’ 和 ‘新春 6 号’ 各有 1 个指标最大。干旱胁迫条件下, ‘核春 137’ 有 4 个指标最大, 分别为 *SPAD₂*、*GN*、*PH* 和 *DM₂*; ‘新春 26 号’ 有 4 个指标最大, 分别为 *CT*、*SN*、*GN* 和 *PY*; ‘新春 46 号’ 有 2 个指标最大, 分别为 *BD* 和 *HI*; ‘新春 11 号’ 有 2 个指标最大, 分别为 *CT* 和 *GN*; ‘新春 6 号’ 有 2 个指标最大, 分别为 *SPAD₁* 和 *HI*; ‘核春 115’、‘核春 213’、‘新春 17 号’、‘新春 37 号’ 和 ‘新春 48 号’ 各有 1 个指标最大。不同品种不同单项指标对干旱胁迫响应程度

不同, 如 ‘新春 38 号’ 在充分灌溉条件下有 4 个指标最大, 在干旱胁迫下无指标最大; ‘核春 137’ 在充分灌溉下有 1 个指标最大, 而在干旱胁迫下有 4 个指标最大。

与充分灌溉处理相比, 干旱胁迫处理下 *SPAD₁* 和 *CT* 有所升高, 增幅分别为 1.83% 和 33.55%。其他指标则出现不同程度降低, 如干旱胁迫下 *PY* 均值降低 35.23%, *GN* 平均降低 19.87%, *PH* 平均值降低 24.17%; *SPAD₂*、*GN*、*GW*、*SN*、*TKW*、*BD*、*HI*、*DM₁*、*DM₂* 和 *DM₃* 的减幅分别为 1.44%、19.87%、16.31%、11.94%、10.84%、1.81%、0.15%、8.38%、18.73% 和 14.87%。

充分灌溉下各性状变异系数为 2.21%~20.34% (均值 12.04%), 干旱胁迫下各性状变异系数为 2.12%~24.47% (均值 14.44%); 干旱胁迫下除 *BD*、*CT* 和 *DM₂* 外, 其他指标变异系数均有不同程度增大, 说明各指标对干旱胁迫的响应程度不同。水分处理间 *BD* 变异系数差异不大, 且均小于 5%, 说明 *BD* 在品种间离散程度小。

方差分析表明 (表 3), 处理和品种单因素对春小麦品种的各单项指标存在不同程度影响, 其中除 *KW* 与 *DM* 外, 品种对春小麦各单项指标有显著影响; 除 *HI* 外, 水分处理对各单项指标存在显著差异。处理与品种互作对 *PH*、*SPAD*、*DM*、*SN*、*GN*、*TKW* 等指标影响不显著, 表明基因型弱化了水分对各单项指标的影响。

2.2 各单项指标的 *DRI* 及相关分析

应用干旱胁迫反应指数 (*DRI*) 这一相对值指标, 可以消除不同品种间的固有差异, 能更准确反映作物的耐旱性强弱。由表 4 可知, 供试小麦在干旱胁迫后, *SPAD₁*、*SPAD₂*、*CT* 和 *HI* 较充分灌溉呈上升趋势 ($DRI > 1$), 其余指标均有所下降。不同品种下降幅度不同, 可见小麦品种不同, 各指标对干旱胁迫响应程度也不尽相同, 因此仅用单项指标的 *DRI* 来评价各品种耐旱性强弱结果不稳定, 由多指标进行综合评价结果较为可靠。

对 15 个单项指标进行相关性分析, 如表 5 所示, 各单项指标的 *DRI* 之间存在一定程度的相关性, 部分指标间相关系数达到显著或极显著水平, 如 *DM₃* 与 *GW* 和 *GN* 呈极显著正相关, 与 *KW* 和 *PH* 呈显著正相关; *SPAD₂* 与 *HI* 呈极显著负相关, 表明不同单项指标 *DRI* 在对小麦品种耐旱性评价中所提供信息存在一定程度重叠性。因此, 采用主成分分

表 2 充分灌溉和干旱胁迫条件下不同品种春小麦各性状差异

Table 2 Differences in the agronomic traits of different spring wheat genotype under adequate irrigation and drought stress conditions

处理 Treatment	品种 Variety	SPAD ₁	SPAD ₂	CT/°C	KW/g	GW/g	SN	GN	TKW/g	PH/cm	BD/g	PV/g	DM ₁ /g	DM ₂ /g	DM ₃ /g	HI
充分灌溉 Full irrigation	核春 115 Hechun115	49.53f	50.60c	22.87bc	12.80cd	4.05d	157.50ab	35.10abc	45.65d	92.33abcd	838.95ab	2312.77abcd	20.87bc	28.45b	28.85b	0.44abcd
	核春 137 Hechun137	52.67e	54.23bc	23.27bc	15.07abcd	5.97abc	145.83abcde	35.58abc	45.76d	96.33a	816.20bc	2426.87abcd	21.10bc	33.70a	34.53bc	0.43bcd
	核春 213 Hechun213	56.50ab	56.20ab	24.03bc	16.10abcd	5.93abc	137.50de	31.87cd	50.93b	88.00defgh	819.52abc	2077.27ef	18.43bc	30.48a	34.28ab	0.47abc
	新春 11 号 Xinchun11	51.82e	60.07a	22.93bc	13.68bcd	5.56abcd	138.58cde	38.42a	37.25f	81.33i	809.48c	2255.08bcde	19.37bc	30.23a	29.53b	0.45abcd
	新春 17 号 Xinchun17	52.22e	54.12bc	27.73a	16.22abc	6.32ab	143.83bcde	37.35ab	49.68bc	86.67fgh	825.20abc	2261.70bcde	20.43bc	34.08a	34.37ab	0.47bcd
	新春 26 号 Xinchun26	53.25de	55.82ab	24.07bc	17.37ab	5.68abcd	161.00ab	38.17a	41.69e	87.67efgh	833.18abc	2264.13bcde	20.40bc	32.83a	34.73ab	0.50a
	新春 29 号 Xinchun29	54.57cd	55.18abc	24.17bc	11.73d	6.08abc	161.67a	32.63cd	42.50c	92.17abcde	818.82bc	2269.58abcd	17.58c	27.78a	30.15b	0.39d
	新春 37 号 Xinchun37	54.70cd	54.97bc	23.70bc	15.60abcd	5.18abcd	153.33abcd	37.33ab	47.31cd	88.33cdefgh	824.77abc	2422.38abcd	19.57bc	31.28a	30.93b	0.50a
	新春 38 号 Xinchun38	49.87f	53.60bc	24.80b	19.22a	6.70a	133.33c	34.08bc	53.85a	90.33bcde	811.08c	2229.70bcde	20.40bc	28.97a	39.10a	0.49abc
	新春 40 号 Xinchun40	57.28a	57.45ab	23.43bc	13.97bcd	4.93abcd	151.92abcd	29.12d	46.64d	84.00hi	826.25abc	2031.60f	22.17ab	30.42a	29.90b	0.47abc
	新春 43 号 Xinchun43	55.45bc	57.47ab	23.53bc	15.20abcd	6.73a	151.00abcd	32.62cd	48.41bcd	95.00ab	824.12abc	2350.55abc	19.83bc	29.23a	35.93ab	0.42cd
	新春 44 号 Xinchun44	54.65bcd	53.83bc	23.57bc	13.92bcd	4.50bcd	147.67abcde	37.47abc	46.53d	93.33abc	830.63abc	2142.08def	25.23a	34.40a	29.20b	0.47abc
	新春 46 号 Xinchun46	52.08e	54.73bc	23.53bc	14.07bcd	4.25cd	144.67abcde	29.80d	47.08cd	86.50fgh	842.35a	2226.28cde	18.00bc	31.30a	28.15b	0.50ab
	新春 47 号 Xinchun47	53.68cde	55.02bc	24.60b	15.52abcd	6.12abc	150.42abcd	32.07cd	48.55bcd	89.00cdefg	812.85c	2478.03a	19.96bc	30.35a	33.60ab	0.47abc
	新春 48 号 Xinchun48	51.88e	52.78bc	22.17c	14.92abcd	4.97abcd	155.67abc	34.92abc	38.75f	90.67hcd	817.45bc	2147.47def	18.03bc	27.28a	31.07b	0.48abc
	新春 6 号 Xinchun6	57.42a	56.55ab	23.80bc	15.98abcd	5.90abc	150.83abcd	37.13ab	49.69bc	85.00ghi	829.32abc	2095.95ef	19.40bc	34.03a	34.10ab	0.47abc
干旱胁迫 Drought stress	平均值 Mean	53.60	55.16	23.89	15.10	5.55	149.05	34.42	46.27	89.17	823.76	2251.97	19.94	30.93	32.40	0.46
	标准差 SD	2.71	4.02	2.21	2.80	1.33	21.92	48.27	5.55	5.10	18.18	184.72	3.04	13.18	5.42	0.04
	变异系数 CV/%	5.06	7.30	9.25	17.58	23.8	15.01	14.77	11.36	5.72	2.21	8.20	15.01	20.34	16.28	8.78
	核春 115 Hechun115	52.70fe	55.42ab	36.27abcd	10.48a	4.32a	136.25abcd	29.62abc	43.79abc	69.50abc	824.98a	1552.80bc	17.58a	22.55ab	25.90a	0.40cd
	核春 137 Hechun137	53.68def	57.05a	34.13de	12.73a	4.71a	128.83abcd	30.75a	44.52ab	77.17a	782.53f	1601.66bc	18.53a	27.60a	29.80a	0.43cd
	核春 213 Hechun213	57.53abc	57.10a	35.93bcd	11.78a	5.08a	117.50 d	23.63bcd	44.25ab	64.50abc	812.10abcd	1262.57hgf	19.90a	25.57ab	26.47a	0.44bcd
	新春 11 号 Xinchun11	53.98def	54.25ab	38.30a	12.48a	4.57a	136.08abcd	32.03a	33.37f	59.67c	796.12def	1213.78hg	18.22a	22.42ab	26.43a	0.47abc
	新春 17 号 Xinchun17	53.43def	52.67ab	37.53ab	14.30a	4.95a	116.17d	25.90abcd	45.02a	63.33abc	812.35abcd	1352.28defg	19.30a	26.37ab	28.87a	0.49ab
	新春 26 号 Xinchun26	53.15ab	53.15ab	38.37a	12.57a	4.75a	147.75a	30.82a	35.18ef	66.17abc	815.43abc	1942.93a	16.85a	25.03ab	27.00a	0.46abc
	新春 29 号 Xinchun29	57.68abc	56.58a	36.87abc	10.85a	5.04a	121.67cd	26.37abcd	37.35de	62.33bc	802.58cde	1158.83h	17.18a	24.65ab	23.50a	0.39d
	新春 37 号 Xinchun37	55.68abcd	54.42ab	35.23bcd	12.25a	4.52a	146.80ab	30.86a	43.35abc	69.17abc	815.68abc	1664.67b	18.63a	25.42ab	24.58a	0.48ab
	新春 38 号 Xinchun38	51.13f	54.65ab	37.63ba	12.62a	4.38a	123.92cd	22.32d	45.59a	62.33bc	799.32cdef	1328.42efg	16.97a	23.38ab	26.67a	0.46abc
	新春 40 号 Xinchun40	57.85ab	52.58ab	36.10abcd	12.77a	4.18a	120.83cd	25.72abcd	41.08bc	69.00abc	806.92abcde	1511.68bcd	18.97a	26.58ab	26.32a	0.48ab
	新春 43 号 Xinchun43	54.88cde	58.02a	35.60ab	13.77a	5.07a	139.00abc	23.02cd	42.43abc	71.00abc	805.77bcde	1368.33defg	20.17a	26.80ab	31.03a	0.44bcd
	新春 44 号 Xinchun44	51.82f	54.83ab	35.30bcd	14.72a	4.10a	132.80abcd	30.00ab	42.09abc	75.17ab	822.65ab	1560.29bc	17.70a	25.25ab	28.30a	0.46abc
	新春 46 号 Xinchun46	51.67f	49.05b	32.67e	13.87a	4.32a	125.83bcd	29.17abc	40.30cd	70.33abc	824.07a	1491.38cde	17.68a	21.57b	27.50a	0.50a
	新春 47 号 Xinchun47	55.13bcde	55.15ab	34.57cde	14.22a	5.23a	141.33abc	25.73abcd	42.33abc	63.50abc	804.40cde	1359.79defg	17.75a	25.32ab	31.12a	0.45bcd
	新春 48 号 Xinchun48	55.02bcde	53.45ab	34.67cde	14.30a	4.63a	140.83abc	27.60abcd	34.59ef	68.83abc	793.53ef	1430.23cdef	19.18a	26.68ab	28.30a	0.51a
	新春 6 号 Xinchun6	58.40a	51.57ab	36.03abcd	15.23a	4.48a	128.40abcd	28.25abcd	44.73ab	69.83abc	822.77ab	1537.00bc	17.75a	26.98ab	29.57a	0.51a
平均值 Mean	平均值 Mean	54.63	54.37	35.95	13.06	4.65	131.25	27.58	41.25	67.61	808.83	1458.54	18.27	25.14	27.58	0.46
	标准差 SD	3.00	4.94	2.45	2.36	1.20	19.59	52.26	5.53	10.72	17.18	221.67	3.98	4.53	4.49	0.06
	变异系数 CV/%	5.49	9.08	6.82	20.19	24.47	15.51	19.24	12.78	15.96	2.12	15.24	21.79	18.15	16.66	13.08

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)；SPAD₁、SPAD₂、CT、KW、GW、SN、GN、TKW、PH、BD、PV、DM₁、DM₂、DM₃和HI分别代表灌浆初期叶绿素含量、灌浆中期叶绿素含量、灌浆中期冠层温度、籽粒重、颖壳重、穗数、单穗粒数、千粒重、容重、小区产量、灌浆初期干物质质量、灌浆中期干物质质量、成熟期干物质质量、收获指数。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). SPAD₁, SPAD₂, CT, KW, GW, SN, GN, TKW, PH, BD, PV, DM₁, DM₂, DM₃ and HI represents, canopy temperature, kernel weight, glume weight, spike number, grain number per spike, thousand kernel weight, plant height, bulk density, plot yield, and harvest index, respectively. The same below.

表 3 供试新疆春小麦各性状方差分析

Table 3 ANOVA of different characters in Xinjiang spring wheat tested

参数 Parameter	<i>SPAD</i> ₁	<i>SPAD</i> ₂	<i>CT</i>	<i>KW</i>	<i>GW</i>	<i>SN</i>	<i>GN</i>	<i>TKW</i>
品种 Variety	10.61 * *	1.81 *	4.85 * *	1.22	1.98 *	3.33 * *	3.15 * *	21.48 * *
重复 Repeat	1.12	2.76	26.20 * *	0.81	0.39	0.26	0.10	0.46
处理 Treatment	9.42 * *	6.26 *	1535.03 * *	6.56 *	4.86 *	71.21 * *	92.60 * *	150.75 * *
处理×品种 Treatment×Variety	1.59	1.72	2.38 *	0.71	0.91	1.29	1.57	1.27

参数 Parameter	<i>PH</i>	<i>BD</i>	<i>PY</i>	<i>DM</i> ₁	<i>DM</i> ₂	<i>DM</i> ₃	<i>HI</i>
品种 Variety	2.06 * *	4.02 * *	7.85 * *	0.80	1.18	0.95	4.28 * *
重复 Repeat	1.18	0.65	0.65	0.06	3.36 *	0.30	3.76 *
处理 Treatment	210.04 * *	124.08 * *	1555.35 * *	8.35 * *	99.06 * *	6.49 *	1.80
处理×品种 Treatment×Variety	0.56	1.33	8.16 * *	0.72	0.70	0.60	1.13

注: * 和 * * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。表格中为 *F* 值。

Note: * and * * means significant at 0.05 and 0.01 level of probability ,respectively. This is *F* in the table.

表 4 各单项指标的干旱胁迫反应指数

Table 4 Drought stress response index of each individual physiological index

品种 Variety	<i>SPAD</i> ₁	<i>SPAD</i> ₂	<i>CT</i>	<i>KW</i>	<i>GW</i>	<i>SN</i>	<i>GN</i>	<i>TKW</i>	<i>PH</i>	<i>BD</i>	<i>PY</i>	<i>HI</i>	<i>DM</i> ₁	<i>DM</i> ₂	<i>DM</i> ₃
核春 115 Hechun115	1.064	1.095	1.586	1.066	0.819	0.865	0.844	0.959	0.753	0.983	0.671	0.906	0.843	0.793	0.898
核春 137 Hechun137	1.019	1.052	1.467	0.789	0.845	0.883	0.864	0.973	0.801	0.959	0.660	0.993	0.878	0.819	0.863
核春 213 Hechun213	1.018	1.016	1.495	0.857	0.732	0.855	0.742	0.869	0.733	0.991	0.608	0.934	1.080	0.839	0.772
新春 11 号 Xinchun11	1.042	0.903	1.670	0.821	0.913	0.982	0.834	0.896	0.734	0.983	0.538	1.048	0.941	0.741	0.895
新春 17 号 Xinchun17	1.023	0.973	1.353	0.784	0.882	0.808	0.693	0.906	0.731	0.984	0.598	1.054	0.945	0.774	0.840
新春 26 号 Xinchun26	1.005	0.952	1.594	0.836	0.724	0.918	0.807	0.844	0.755	0.979	0.858	0.928	0.826	0.762	0.777
新春 29 号 Xinchun29	1.057	1.025	1.526	0.828	0.925	0.753	0.808	0.879	0.676	0.980	0.502	1.024	0.978	0.887	0.865
新春 37 号 Xinchun37	1.018	0.990	1.487	0.872	0.785	0.957	0.827	0.916	0.783	0.989	0.687	0.958	0.952	0.812	0.894
新春 38 号 Xinchun38	1.025	1.020	1.517	0.654	0.657	0.929	0.655	0.847	0.690	0.985	0.596	0.942	0.832	0.807	0.682
新春 40 号 Xinchun40	1.010	0.915	1.541	0.848	0.914	0.795	0.883	0.881	0.821	0.977	0.744	1.039	0.856	0.874	0.880
新春 43 号 Xinchun43	0.990	1.010	1.513	0.752	0.906	0.921	0.706	0.876	0.747	0.978	0.582	1.044	1.017	0.917	0.864
新春 44 号 Xinchun44	0.948	1.019	1.498	0.911	1.057	0.899	0.860	0.905	0.805	0.990	0.728	0.972	0.701	0.734	1.078
新春 46 号 Xinchun46	0.992	0.896	1.388	1.016	0.986	0.870	0.992	0.856	0.813	0.978	0.670	1.011	0.982	0.689	0.977
新春 47 号 Xinchun47	1.027	1.002	1.405	0.856	0.916	0.940	0.802	0.872	0.713	0.990	0.549	0.956	0.889	0.834	0.926
新春 48 号 Xinchun48	1.060	1.013	1.564	0.933	0.959	0.905	0.790	0.893	0.759	0.971	0.666	1.060	1.064	0.978	0.911
新春 6 号 Xinchun6	1.017	0.912	1.514	0.760	0.953	0.851	0.761	0.900	0.822	0.992	0.733	0.915	0.793	0.867	0.867

表 5 各单项指标的相关关系矩阵

Table 5 Correlation matrix of individual physiological indicators under water and drought conditions

指标 Index	<i>SPAD</i> ₁	<i>SPAD</i> ₂	<i>CT</i>	<i>KW</i>	<i>GW</i>	<i>SN</i>	<i>GN</i>	<i>TKW</i>	<i>PH</i>	<i>BD</i>	<i>PY</i>	<i>HI</i>	<i>DM</i> ₁	<i>DM</i> ₂	<i>DM</i> ₃
<i>SPAD</i> ₁	1.000														
<i>SPAD</i> ₂	0.263	1.000													
<i>CT</i>	−0.317	0.006	1.000												
<i>KW</i>	0.104	0.117	−0.029	1.000											
<i>GW</i>	−0.264	−0.275	0.168	0.348	1.000										
<i>SN</i>	−0.141	−0.034	−0.273	−0.073	−0.197	1.000									
<i>GN</i>	−0.174	−0.278	0.000	0.706 * *	0.473	−0.059	1.000								
<i>TKW</i>	0.229	0.466	−0.029	0.266	0.156	−0.053	0.200	1.000							
<i>PH</i>	−0.500 *	−0.382	0.083	0.310	0.421	−0.017	0.586 *	0.311	1.000						
<i>BD</i>	−0.174	−0.151	0.078	−0.027	−0.045	0.106	−0.284	−0.317	−0.177	1.000					
<i>PY</i>	−0.403	−0.227	−0.157	0.217	−0.059	0.032	0.304	0.007	0.688 * *	−0.081	1.000				
<i>HI</i>	0.029	−0.536 *	0.050	−0.267	0.608 *	−0.264	−0.041	0.007	0.261	−0.171	−0.150	1.000			
<i>DM</i> ₁	0.405	−0.096	0.096	0.018	−0.032	−0.101	−0.173	−0.160	−0.225	−0.120	−0.436	0.347	1.000		
<i>DM</i> ₂	0.412	0.362	−0.164	−0.179	−0.021	−0.177	−0.371	0.002	−0.257	−0.317	−0.238	0.239	0.482	1.000	
<i>DM</i> ₃	−0.358	−0.092	0.152	0.612 *	0.868 * *	0.032	0.663 * *	0.307	0.501 *	0.033	0.088	0.202	−0.216	−0.211	1.000

注: * 和 * * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

Note: * and * * mean significant difference at the levels of 0.05 and 0.01 , respectively.

析法对各单项指标的 *DRI* 值开展进一步降维分析,可在损失少量信息的前提下,将多个单项指标转化为少量综合指标,对小麦耐旱性进行综合评价。

2.3 主成分分析

本研究对 15 个单项指标的 *DRI* 进行主成分分析,筛选特征值大于 1 的指标作为有效指标,由表 6 可知,6 个综合指标特征值分别为 3.978、2.413、2.158、1.487、1.255 和 1.053,均大于 1;贡献率分别为 26.518%、16.090%、14.384%、9.913%、8.366% 和 7.021%,累计贡献率为 82.292% > 70%,故认为 6 个综合指标 $PCA_1 \sim PCA_6$ 可以代表原 15 个单项指标的绝大部分信息,可将 15 个单项指标转化为 $PCA_1 \sim PCA_6$ 这 6 个综合指标进行下一步分析。由表 6 成分矩阵可以看出,决定 6 个主成分大小的主要因子分别为 DM_3 、 HI 、 $SPAD_2$ 、 BD 、 CT 和 SN 。

表 6 各综合指标的系数及贡献率							
Table 6 Coefficients of comprehensive indexes and proportion							
参数 Parameter	综合指标 Comprehensive index						
	PCA_1	PCA_2	PCA_3	PCA_4	PCA_5	PCA_6	
特征值 Eigen value	3.978	2.413	2.158	1.487	1.255	1.053	
贡献率/% Contributive ratio	26.518	16.090	14.384	9.913	8.366	7.021	
累计贡献率/% Cumulative contributive ratio	26.518	42.608	56.992	66.905	75.271	82.292	
特征向量 Eigenvector	$SPAD_1$	-0.534	0.455	0.388	-0.098	0.340	-0.133
	$SPAD_2$	-0.370	0.041	0.760	0.261	-0.341	0.149
	CT	0.145	0.088	-0.258	0.550	-0.545	-0.313
	KW	0.566	0.156	0.532	0.217	0.384	-0.333
	GW	0.691	0.535	-0.217	0.232	0.032	0.270
	SN	-0.031	-0.437	0.070	-0.078	0.429	0.552
	GN	0.810	0.109	0.251	-0.045	0.263	-0.266
	TKW	0.241	0.287	0.648	-0.047	-0.314	0.310
	PH	0.826	-0.015	-0.059	-0.385	-0.190	-0.021
	BD	-0.064	-0.423	-0.320	0.551	0.243	0.066
	PY	0.504	-0.453	0.066	-0.559	-0.148	-0.210
	HI	0.172	0.660	-0.608	-0.233	-0.053	0.232
	DM_1	-0.37	0.608	-0.208	-0.005	0.292	-0.283
	DM_2	-0.474	0.585	0.100	-0.250	-0.098	0.093
	DM_3	0.831	0.262	0.106	0.340	0.107	0.261

2.4 综合指标评定

2.4.1 隶属函数值分析 利用公式(2)对参试小麦各综合指标的隶属函数值 $u(X_j)$ 进行计算,如表 7 所示,干旱胁迫条件下,对于综合指标 PCA_1 ,‘新春 44 号’的隶属函数值 $u(X_1)$ 最大(1.000),表明其在综合指标 PCA_1 表现出最强耐旱性;而‘新春 38 号’的隶属函数值 $u(X_1)$ 最小(0),表明其在这一指标上表现出最差耐旱性。以此类推,综合指标 $PCA_2 \sim PCA_6$ 的隶属函数值最大的分别为‘新春 48 号’、‘核春 115’、‘新春 47 号’、‘新春 11 号’和‘新春 11

号’,隶属函数值最小的分别为‘新春 26 号’、‘新春 6 号’、‘新春 26 号’、‘核春 137’和‘新春 46 号’。可见不同品种在单个主成分的耐旱性表现差异较大。

2.4.2 权重值确定 根据各综合指标贡献率利用公式(3)计算权重(w_j),6 个综合指标权重分别为 0.322、0.195、0.175、0.120、0.102 和 0.085(表 7)。

2.4.3 品种综合评价及分类 通过计算获得综合耐旱性评价价值 D (表 7), D 值越大说明品种耐旱性越强。对 D 值进行排序,其中‘新春 44 号’ D 值最大,说明其耐旱性最强,其次为‘核春 115’和‘新春 46 号’,‘新春 38 号’ D 值最小,表明其耐旱性最弱。

对 D 值进行聚类分析(图 1),可将 16 个品种划分为 4 类,其中‘核春 115’、‘新春 44 号’和‘新春 46 号’为强耐旱型,‘新春 29 号’、‘新春 37 号’、‘核春 137’、‘新春 11 号’、‘新春 47 号’、‘新春 48 号’、‘新春 43 号’、‘新春 6 号’、‘新春 40 号’和‘新春 17 号’为中耐旱型,‘核春 213’和‘新春 26 号’为弱耐旱型,‘新春 38 号’为旱敏感型。

2.5 回归模型建立及鉴定指标筛选

为分析各指标与品种耐旱性关系并筛选可靠的耐旱性鉴定指标,以耐旱性综合评价价值(D 值)作为因变量,以各单项指标的 *DRI* 作为自变量进行逐步回归分析,获得最优回归方程: $D = -2.258 + 1.299DM_3 + 1.148SPAD_1 + 0.475TKW$,方程决定系数 $R^2 = 0.962$, $P = 0.0001$ 。由该回归方程可知,15 个单项指标中有 3 个单项指标对小麦耐旱性具有显著影响,分别为 DM_3 、 $SPAD_1$ 和 TKW 。对回归方程精度进行评价(表 7),各品种回归值精度均在 92.20% 以上,平均精度达到 96.41%(表 8),证明回归方程中的指标对小麦耐旱性影响明显,该方程可用于小麦耐旱性评价,在相同条件下测得各小麦品种的 $SPAD_1$ 、 DM_3 和 TKW 的 *DRI* 值,即可利用该公式预测小麦品种的耐旱性。

3 讨论

新疆地处亚欧大陆中部,气候干旱,水源不足,降水量少,年平均降水量只有 150 mm 左右,蒸发量却达 2 000 mm 以上^[11],仅依靠自然降水无法满足农业生产所需水分,因此高效灌溉对当地农业具有重要作用。新疆地区的农业用水主要来自天山雪水,部分地区以地下水进行灌溉,形成独特的荒漠绿洲灌溉农业。本试验区域位于新疆昌吉州,春小麦生育期(4~8 月)降水量只有 70 mm(约 $46.7\text{ m}^3 \cdot 667\text{ m}^{-2}$)左右,远低于春小麦全生育期需水量(需补充灌溉不少于 $320\text{ m}^3 \cdot 667\text{ m}^{-2}$),自然降水对试验

表 7 各品种的综合指标,权重, $u(X_j)$, 综合值

Table 7 Comprehensive index of each variety, weight, $u(X_j)$, comprehensive value

品种 Variety	综合指标 Comprehensive index						隶属函数值 Subordinate function value						D 值 D value
	PCA ₁	PCA ₂	PCA ₃	PCA ₄	PCA ₅	PCA ₆	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$	$u(X_4)$	$u(X_5)$	$u(X_6)$	
核春 115 Hechun115	0.232	-0.233	4.057	0.512	0.518	-0.316	0.532	0.476	1.000	0.603	0.552	0.446	0.606
核春 137 Hechun137	0.643	0.843	2.080	-1.379	-2.141	0.482	0.585	0.657	0.683	0.142	0.000	0.668	0.510
核春 213 Hechun213	-2.231	-0.531	-0.056	0.702	0.297	-1.391	0.216	0.425	0.341	0.649	0.506	0.148	0.354
新春 11 号 Xinchun11	-0.062	0.182	-0.684	-0.467	2.677	1.675	0.494	0.546	0.240	0.364	1.000	1.000	0.538
新春 17 号 Xinchun17	-0.880	0.749	-1.365	1.229	-1.667	-0.457	0.389	0.641	0.131	0.778	0.098	0.407	0.411
新春 26 号 Xinchun26	-0.166	-3.053	0.040	-1.963	0.473	-0.983	0.481	0.000	0.356	0.000	0.543	0.261	0.295
新春 29 号 Xinchun29	-1.869	2.378	0.157	1.048	0.059	-0.721	0.262	0.916	0.375	0.733	0.457	0.334	0.492
新春 37 号 Xinchun37	0.259	-0.950	0.646	0.121	0.412	0.185	0.536	0.355	0.453	0.508	0.530	0.586	0.486
新春 38 号 Xinchun38	-3.912	-2.511	-0.560	-0.078	-0.522	0.320	0.000	0.092	0.260	0.459	0.336	0.623	0.206
新春 40 号 Xinchun40	1.670	0.594	-0.786	-1.752	-0.513	-0.870	0.717	0.615	0.224	0.051	0.338	0.292	0.455
新春 43 号 Xinchun43	-1.288	0.956	-1.121	-0.226	-0.519	1.231	0.337	0.676	0.170	0.423	0.337	0.877	0.430
新春 44 号 Xinchun44	3.875	-1.628	0.242	1.447	-0.863	1.553	1.000	0.240	0.389	0.831	0.265	0.966	0.646
新春 46 号 Xinchun46	3.669	0.260	-1.120	0.845	0.904	-1.922	0.974	0.559	0.170	0.684	0.632	0.000	0.599
新春 47 号 Xinchun47	-0.493	-0.210	-0.065	2.143	0.407	0.427	0.439	0.480	0.339	1.000	0.529	0.653	0.524
新春 48 号 Xinchun48	-0.509	2.875	0.721	-1.269	0.910	0.295	0.437	1.000	0.465	0.169	0.633	0.616	0.554
新春 6 号 Xinchun6	1.062	0.277	-2.183	-0.912	-0.433	0.492	0.639	0.562	0.000	0.256	0.355	0.671	0.439
权重 Index weight(w_j)							0.322	0.195	0.175	0.120	0.102	0.085	

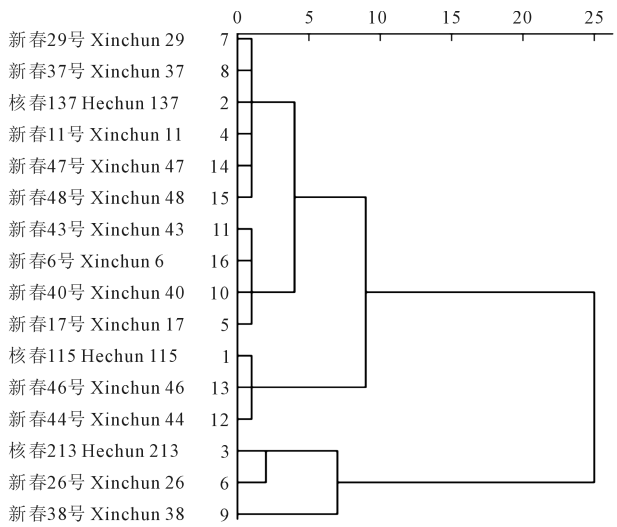


图 1 16 个春小麦品种综合值聚类分析树状图

Fig.1 Cluster analysis dendrogram of comprehensive value of 16 spring wheat varieties

表 8 回归方程的估计精度分析

Table 8 Analysis of estimation precision of regression equation

品种 Variety	原始值 Primary	回归值 Regression	差值 Difference	估计精度 Evaluation accuracy/%
核春 115 Hechun115	0.606	0.585	0.020	96.62
核春 137 Hechun137	0.510	0.495	0.015	97.11
核春 213 Hechun213	0.354	0.327	0.028	92.20
新春 11 号 Xinchun11	0.538	0.526	0.012	97.74
新春 17 号 Xinchun17	0.411	0.438	-0.027	93.44
新春 26 号 Xinchun26	0.295	0.306	-0.011	96.19
新春 29 号 Xinchun29	0.492	0.496	-0.005	99.05
新春 37 号 Xinchun37	0.486	0.507	-0.022	95.57
新春 38 号 Xinchun38	0.206	0.207	-0.002	99.24
新春 40 号 Xinchun40	0.455	0.463	-0.008	98.34
新春 43 号 Xinchun43	0.430	0.416	0.013	96.90
新春 44 号 Xinchun44	0.646	0.660	-0.014	97.80
新春 46 号 Xinchun46	0.599	0.556	0.042	92.92
新春 47 号 Xinchun47	0.524	0.538	-0.014	97.26
新春 48 号 Xinchun48	0.554	0.567	-0.012	97.80
新春 6 号 Xinchun6	0.439	0.463	-0.024	94.46

的影响几乎可忽略。因此本研究直接在大田开展试验,同时采用覆土浅埋滴灌的方式灌水以减少水分蒸发,更符合生产实际。通过对影响试验的因素进行联合方差分析(表 3)发现,不同处理对大部分指标有显著影响,说明本研究选取的性状可用于小麦耐旱性评价;品种对大部分指标有显著影响,说明品种丰富,可用于进行耐旱性鉴定。

耐旱性指作物在干旱条件下减轻损伤的抗逆能力^[12],耐旱性鉴定指利用合适的指标和鉴定方法对不同品种进行鉴定、归类和评价^[13]。近年来,对品种耐旱相关性状进行主成分分析、隶属函数分析、回归分析及聚类分析,并进行综合评价,鉴定耐旱种质的方法已在玉米^[14]、大豆^[15]、谷子^[16]等作物上得到初步应用,但应用主成分分析方法对小麦耐旱性进行研究的报道较少。本研究利用主成分分析的方法,将 15 个小麦生育期的重要指标进行简化,最终获得 6 个可以高度概括 15 个单项指标干旱胁迫反应信息的主成分,6 个主成分贡献率较大的指标分别是 DM_3 、 HI 、 $SPAD_2$ 、 BD 、 CT 和 SN 。由主成分分析结果可以看出,第 1、2、3、4 主成分主要与植株干物质积累量、光合作用和籽粒灌浆有关,说明耐旱性品种在源、库和流方面均优势较强,有利于产量的提高。该结果与前人的耐旱性小麦叶片光合能力强^[17]、干物质积累效率高^[18]、籽粒灌浆速度快^[19]等研究结果较为一致。第 5 主成分主要与冠层温度有关,多项研究表明干旱胁迫会导致小麦冠层温度升高,不同耐旱性品种冠层温差不同^[20-21],表明冠层温度与品种耐旱性关系密切。第 6 主成分主要与田间穗数有关,表明干旱胁迫会对作物的产量及其构成要素产生显著影响^[22]。

有研究表明,在干旱胁迫条件下,光合作用所有相关指标均会随着小麦生育期推进表现出对逆境的适应性^[23-24],小麦产量会有所下降^[25],干物质积累量会随干旱胁迫时间延长而减少,且不同部位受胁迫影响程度不相同^[26]。本研究以耐旱性综合评价价值 D 值为因变量,通过逐步回归分析的方法得到回归方程,确定 $SPAD_1$ 、 TKW 和 DM_3 这 3 个指标的 DRI 可作为耐旱性鉴定指标,在同等条件下测定这 3 个指标的 DRI 后,将其代入该回归模型可以预测不同小麦品种的耐旱性强弱。本研究筛选出的强耐旱品种中,‘新春 44 号’和‘新春 46 号’是当前新疆地区春小麦主栽品种;新审定的强筋小麦品种‘核春 115’具备优质高产节水的特点,符合市场需要,有较好的推广应用前景。

4 结 论

通过主成分分析、隶属函数分析和聚类分析进行春小麦耐旱性分析和综合评价,将 15 个小麦生育期单项指标简化为 6 个主成分,将 16 个品种聚类为 4 种耐旱类型,其中强耐旱型 3 个,中耐旱型 10 个,弱耐旱型 2 个,早敏感型 1 个。以综合评价价值(D 值)为因变量构建回归方程,表明在相同环境下可通过测定 DM_3 、 $SPAD_1$ 和 TKW 这 3 个指标的 DRI 值,利用回归方程进行品种耐旱性的快速鉴定和预测,为春小麦耐旱性品种筛选鉴定和选育提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249-259.
YANG L M, GUAN X F, ZHANG Y X. Atmospheric circulation characteristics of precipitation anomaly in arid regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249-259.
- [2] WANG T T, WEI D, CHANG X E, et al. Tianshanbeilu and the isotopic millet road: reviewing the late Neolithic/Bronze Age radiation of human millet consumption from North China to Europe[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 1024-1039.
- [3] LIU H, JIANG G M, ZHUANG H Y, et al. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: with special references of crop residues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1402-1418.
- [4] 新疆维吾尔自治区统计局, 国家统计局新疆调查总队. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 321-322.
Statistical Bureau of Uygur Autonomous Region, Xinjiang Investigation Team of the National Bureau of Statistics. Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 321-322.
- [5] 任毅, 颜安, 张芳, 等. 国内外 301 份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 1-14.
REN Y, YAN A, ZHANG F, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of 301 wheat varieties(lines) at germination stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 1-14.
- [6] 宋晓, 张珂珂, 黄晨晨, 等. 基于主成分分析的氮高效小麦品种的筛选[J]. 河南农业科学, 2020, 49(12): 10-16.
SONG X, ZHANG K K, HUANG C C, et al. Selection of nitrogen-efficient wheat varieties based on principal component analysis[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(12): 10-16.
- [7] 廖兰, 陈林萍, 倪莉. 基于主成分分析和聚类分析研究改性小麦蛋白的结构和功能特性[J]. 中国食品学报, 2018, 18(7): 263-271.
LIAO L, CHEN LIN P, NI L. Studies on structural and functional characteristics of wheat gluten based on PCA and HCA[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(7): 263-271.
- [8] 赵鹏涛, 赵卫国, 罗红炼, 等. 小麦主要品质性状相关性主成分分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 7-13.
ZHAO P T, ZHAO W G, LUO H L, et al. The main quality traits of wheat: correlation analysis and principal components analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(21): 7-13.
- [9] 袁青锋, 郑新疆, 张静, 等. 黑小麦主要农艺性状的相关性和主成分分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(14): 36-37.
YUAN Q F, ZHENG X J, ZHANG J, et al. Principal component analysis on main agronomic traits of black wheat germplasm[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(14): 36-37.
- [10] 安永平. 水稻抗旱性指标筛选及主要抗旱性状的遗传分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
AN Y P. Screening of drought resistance indexes and genetic analysis of major drought resistance traits in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006.
- [11] 王荣栋, 曹连甫, 张旺锋. 作物高产理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 146-147.
WANG R D, CAO L P, ZHANG W F. Theory and practice of crop high yields[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 146-147.
- [12] OMPRAKASH, GOBU R, BISEN P, et al. Resistance/tolerance mechanism under water deficit (drought) condition in plants[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, 6(4): 66-78.
- [13] 洪双, 李浩, 许鲲, 等. 甘蓝型油菜微核心种质耐旱鉴定与评价指标筛选[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(2): 209-217.
HONG S, LI H, XU K, et al. Identification of a mini-core collection of *Brassica napus* accessions for drought tolerance and selection of evaluation indices[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(2): 209-217.
- [14] 陆大雷, 王鑫, 闫发宝, 等. 鲜食糯玉米籽粒物性差异与主成分分析[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 16-19.
LU D L, WANG X, YAN F B, et al. Genotypic difference and principal component analysis for grain textural properties of fresh waxy maize[J]. Food Science, 2013, 34(21): 16-19.
- [15] GIORDANI W, GONÇALVES L S A, MORAES L A C, et al. Identification of agronomical and morphological traits contributing to drought stress tolerance in soybean[J]. Australian Journal of Crop Science, 2019, 13(1): 35-44.