

旱地与补灌条件下不同基因型 小麦耐旱性评价

孙宪印¹, 吕广德¹, 亓晓蕾¹, 徐加利¹, 孙盈盈¹, 米勇¹,
牟秋焕¹, 尹逊栋¹, 张继波², 王瑞霞¹, 钱兆国¹, 高明刚³

(1. 泰安市农业科学院, 山东 泰安 271000; 2. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 3. 潍坊学院, 山东 潍坊 261061)

摘要:为在干旱胁迫条件下从不同小麦品系中筛选耐旱性强且具有高产稳产特性的基因型,采用随机区组设计,于2022—2023年在泰安市农业科学院马庄试验农场开展田间试验,以14个不同基因型小麦品系为材料,设置自然干旱和补灌条件2个处理,以旱地与补灌条件下产量为基础,采用平均产量(*MP*)、几何平均产量(*GMP*)、抗旱系数(*DRC*)、抗旱指数(*DRI*)和干旱耐受指数(*STI*)共5个抗旱性指标对不同品系进行比较和抗旱性分级。结果表明,对比不同品系的干旱指标数值的大小与位次变化,V7、V14、V2和V12基因型排名靠前,具有高产、稳产特点。同时*STI*、*GMP*、*MP*指标与旱地产量和补灌产量均呈极显著正相关关系且表现出较好的产量一致性;主成分分析和聚类分析结果均进一步明确了这些基因型的耐旱及高产稳产特性。综上,在干旱与补灌条件下,*STI*、*GMP*、*MP*和*DRI*指标可用于耐旱高产基因型的鉴别和分级,综合利用5种抗旱指标筛选出耐旱高产品系分别为V7、V14、V2和V12,各品系抗旱性级别分别为1、2级和1级。

关键词:小麦;基因型;干旱胁迫;主成分分析;聚类分析;耐旱性指标

中图分类号:S512.1;S275;S32 **文献标志码:**A

Evaluation of drought tolerance of different wheat genotypes under dryland and supplementary irrigation conditions

SUN Xianyin¹, LV Guangde¹, QI Xiaolei¹, XU Jiali¹, SUN Yingying¹, MI Yong¹,
MU Qiuhan¹, YIN Xundong¹, ZHANG Jibo², WANG Ruixia¹, QIAN Zhaoguo¹, GAO Minggang³

(1. Tai'an Academy of Agricultural Science, Tai'an, Shandong 271000, China; 2. Shandong Provincial Meteorological Center, Jinan, Shandong 250031, China; 3. Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China)

Abstract: This study was conducted to determine genotypes with strong drought tolerance and high and stable yield characteristics from different wheat lines under drought stress conditions. Using a randomized block design, 14 different genotype wheat lines were tested at Mazhuang Experimental Farm of Tai'an Academy of Agricultural Sciences during 2022–2023. The experiment set up drought and irrigation treatments, based on dryland yield and irrigation yield, and adopted mean productivity (*MP*), geometric mean productivity (*GMP*), drought resistance coefficient (*DRC*), drought resistance index (*DRI*), and stress tolerance index (*STI*) to compare the drought resistance of different lines. The result showed that according to the values and ranks of different drought indicators for different lines, genotypes V7, V14, V2, and V12 ranked higher, demonstrating high and stable yield performance. The *STI*, *GMP*, and *MP* indicators were significantly positively correlated with both dryland yield and irrigation yield and exhibited good yield consistency. Both principal component analysis and cluster analysis further clarified the drought-tolerant, high-yield, and stable-yield characteristics of these genotypes. This study demonstrated that

收稿日期:2024-05-06

修回日期:2024-08-02

基金项目:国家小麦产业技术体系泰安综合试验站项目(CARS-03-61);山东省现代农业产业技术体系项目(SDAIT-01-05);山东省重点研发计划项目(2018GNC2302);泰安市科技创新发展项目(2020NS078)

作者简介:孙宪印(1969–),男,山东岱岳人,正高级农艺师,主要从事节水小麦新品种选育与推广研究。E-mail:sunxianyin2005@sina.com

通信作者:钱兆国(1971–),男,山东肥城人,研究员,主要从事小麦育种与推广研究。E-mail:qianzhaoguo@126.com

高明刚(1978–),男,山东潍坊人,讲师,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:hgaoming@126.com

under drought and irrigation conditions, the *STI*, *GMP*, *MP*, and *DRI* indicators were effective for identifying and classifying drought-tolerant and high-yielding genotypes. By comprehensively utilizing these four drought-resistance indicators, the drought-tolerant and high-yielding lines V7, V14, V2, and V12 were identified, with drought resistance grades of 1, 2, 2, and 1, respectively.

Keywords: wheat; genotype; drought stress; principal component analysis; cluster analysis; drought tolerant index

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是世界上重要的谷类作物之一,也是全球人口能量和蛋白质的基本来源。干旱是一种广泛存在的现象,对世界各地的小麦种植区均有不同程度影响,导致小麦平均产量下降,预计气候变化将通过提高温度和改变降水模式加剧干旱胁迫的发生频率和严重程度^[1]。干旱作为我国最大的自然灾害之一,是制约小麦高产稳产的重要因素^[2]。小麦作为我国第二大口粮作物,在保障国家粮食安全中占有重要地位^[3]。提高植株抗旱能力,培育抗旱性强的品种,可以降低干旱对小麦产量的影响,而对小麦新品系开展耐旱性评价是培育抗旱新品种的重要环节^[4]。

小麦耐旱性遗传基础包括多个基因和性状的综合作用,并受到多种干旱适应机制的驱动,这些机制由多基因控制,通过不同产量与生理性状表达^[1,5-6]。尽管物候、植物形态和生理性状等与作物产量密切相关,但产量仍然是衡量耐旱性的主要依据,因此籽粒产量常被作为小麦耐旱性评价的主要指标^[5-6]。有些基因型只在某种特定的环境中有产量优势,如适应当地逆境的地方品种或只在充分灌溉条件下高产的品种,而优良的耐旱品种应在不同胁迫强度的环境中均具有优势。目前,新品种在不同区域的产量比较试验是了解其对环境适应性的主要方法,但该过程耗时且费力。耐旱性的选择通常是在不同程度的水分胁迫下评估高产潜力或稳定表现的基因型^[7]。

许多学者在田间试验中常采用基于水分胁迫条件与非胁迫条件下产量变化与耐旱性参数来筛选抗旱基因型^[8-9]。Rosielle 等^[10]将胁迫耐受性定义为胁迫和灌溉环境之间的产量差异,将平均产量 (mean productivity, *MP*) 定义为胁迫和非胁迫条件下同一基因型产量的平均值。不少育种者经常采用几何平均产量 (geometric mean productivity, *GMP*) 比较不同基因型的稳定性^[11]。Fernandez^[12]定义了干旱耐受指数 (stress tolerance index, *STI*),其可用于鉴定在胁迫和非胁迫条件下均能高产的基因型。综合利用干旱敏感指数 (stress susceptibility index, *SSI*)、耐受指数 (tolerance index, *TOL*) 和产量稳定性

指数 (yield stability index, *YSI*) 可以鉴定出在干旱胁迫环境下高产的基因型,但在有利环境下产量潜力较低^[13-16];采用干旱耐受指数 (*STI*)、几何平均产量 (*GMP*)、平均产量 (*MP*)、产量指数 (yield index, *YI*) 和调和平均产量 (harmonic mean, *HARM*) 等参数可鉴定出高产稳产基因型^[15-16]。这些指数基于基因型的耐旱性或干旱易感性,已用于包括面包小麦、硬质小麦、大麦和马铃薯等在内的多种作物研究^[13-16]。我国农业科研人员常用抗旱系数 (drought resistance coefficient, *DRC*) 和抗旱指数 (drought resistance index, *DRI*) 来评价小麦的抗旱性,其中抗旱系数表示某一品系胁迫产量与非胁迫产量的比值,抗旱指数是国内抗旱性分级的重要依据^[17-20]。抗旱基因型的最优选择指标应该能区分在胁迫和非胁迫环境中表现出统一优势的基因型及仅在一种环境中表现出优势的基因型。

本研究以旱地产量和补灌产量为基础数据,比较不同抗旱性参数值 (*MP*、*GMP*、*DRC*、*DRI*、*STI*) 及其与产量的一致性,采用相关性分析、主成分分析及聚类分析等方法,结合抗旱性分级标准,探讨不同抗旱性参数在小麦耐旱性评价中的作用,并以此为基础筛选出适合旱地种植的品系,以期作为作物抗旱育种与新品种耐旱性评价提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2022—2023 年在山东省泰安市农业科学院马庄试验农场 (36°18'N, 117°04'E) 进行,试验田土质为砂姜黑土, pH 值为 7.3, 试验地 20 cm 土层有机质含量为 16.8 g · kg⁻¹。小麦生长季中期降水少于常年,田间干旱胁迫性状明显,生长季平均气温较常年偏高 (图 1)。小麦产量在生产上属于平产年份。

1.2 试验设计

选取 14 个不同基因型小麦品系 ('洛旱 7 号' 为对照品种) 为参试品系 (表 1)。小麦种植时间为 2022 年 10 月 17 日。每个品系播种 6 行,行长 4 m,行间距 23.6 cm,基本苗密度均为 225 万株 · hm⁻²,

收获时间为 2023 年 6 月 11 日。在旱地与补灌条件下,采用完全随机区组设计,3 次重复。旱地为自然降水;补灌分别在拔节期和灌浆期进行,于 2023 年 4 月 3 日浇拔节水,5 月 15 日浇灌浆水,每次灌水 90 mm。复合肥(氮:磷:钾=14%:15%:16%)及氮肥(尿素)施用量分别为 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均在播种前一次性基施,无追肥。

1.3 测定项目与方法

在小麦成熟期对整片小区收获计产,产量按照 13% 水分含量折算。抗旱指数分级标准参照表 2。

不同基因型小麦品系的耐旱性参数干旱胁迫强度 SI (stress intensity)、平均产量 MP (mean productivity)、几何平均产量 GMP (geometric mean productivity)、抗旱系数 DRC (drought resistance coefficient)、抗旱指数 DRI (drought resistance) 及干旱耐受指数 STI (stress tolerance index) 分别按照公式(1)~(6)计算。

$$SI = 1 - \bar{Y}_s / \bar{Y}_p \quad (1)$$

$$MP = (Y_s + Y_p) / 2 \quad (2)$$

$$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s} \quad (3)$$

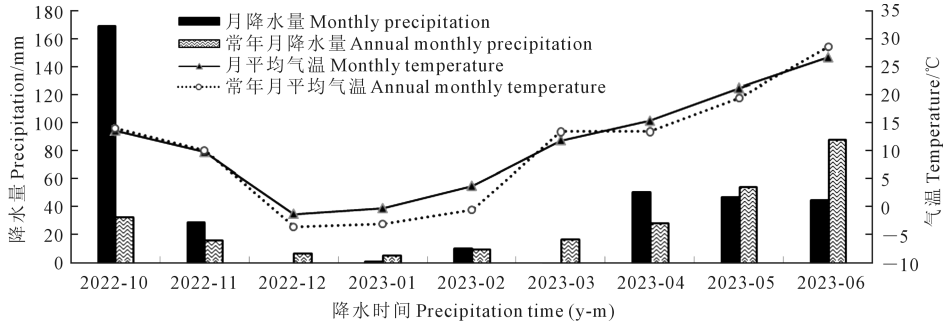


图 1 2022—2023 年小麦生长期月降水量、常年月降水量、月平均气温及常年月平均气温的变化

Fig.1 Variations of monthly precipitation, annual monthly precipitation, monthly temperature and annual monthly temperature in 2022-2023

表 1 14 个小麦基因型的名称与杂交组合

Table 1 Names and hybrid combinations of the 14 wheat genotypes

| 编号 No. | 名称 Name | 组合 Parentage | 编号 No. | 名称 Name | 组合 Parentage |
|--------|----------------------------|---|--------|---------|--|
| V1 | 洛旱 7 号(对照) Luohan 7(CK) | 豫麦 49/山农 45 Yumai 49/Shannong 45 | V8 | 5206121 | 山农 25/良星 77 Shannong 25/Liangxing 77 |
| V2 | 5204128 | 7088(H)/CG15-009 | V9 | 5206222 | 山农 25/众信 5199 Shannong 25/Zhongxin 5199 |
| V3 | 5204550 | 众信 8678/良星 517 Zhongxin 8678/Liangxing 517 | V10 | 5207499 | 济麦 22/泰山 28 Jimai 22/Taishan 28 |
| V4 | 5204711 | 济麦 22/众信 8678 Jimai 22/Zhongxin 8678 | V11 | 5207813 | 鲁原 185/良星 99 Luyuan 185/Liangxing 99 |
| V5 | 5205169 | 烟农 21/FC009 Yannong 21/FC009 | V12 | 5850913 | LS5539/SN09-63 |
| V6 | 5206108 | 山农 25/济麦 22 Shannong 25/Jimai 22 | V13 | 596655 | 济麦 22/泰山 28 Jimai 22/Taishan 28 |
| V7 | 5207357 | 济麦 22/泰农 9236 Jimai 22/Tainong 9236 | V14 | TKM4835 | 良星 99/KY088 Liangxing 99/KY 088 |

表 2 小麦全生育期抗旱性评价标准

Table 2 Evaluation criteria of drought resistance of wheat during the whole growth period

| 抗旱等级 Classification | 抗旱指数 DRI | 抗旱性 Drought resistance |
|------------------------|---------------|---------------------------|
| 1 | ≥ 1.3000 | 极强 High resistance(HR) |
| 2 | 1.1000~1.2999 | 强 Resistance(R) |
| 3 | 0.9000~1.0999 | 中等 Middle resistance(MR) |
| 4 | 0.7000~0.8999 | 弱 Sensitivity(S) |
| 5 | ≤ 0.6999 | 极弱 High sensitivity(HS) |

$$DRC = Y_s / Y_p \quad (4)$$

$$DRI = \frac{Y_s}{Y_{cks}} \times \frac{Y_s}{Y_p} \times \frac{Y_{ckp}}{Y_{cks}} \quad (5)$$

$$STI = (Y_s \times Y_p) / \bar{Y}_p^2 \quad (6)$$

式中, Y_s 与 Y_p 分别表示旱地产量与补灌产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); \bar{Y}_s 与 \bar{Y}_p 分别表示旱地平均产量与补灌平均产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_{cks} 与 Y_{ckp} 分别表示对照品种的旱地产量与补灌产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2013 进行数据整理,通过 DPS 7.05 统计软件进行差异显著性检验(Duncan 法);利用 R 语言(版本号 3.6.2)的 chart.correlation 程序包进行相关性图形的绘制,同时进行主成分分析及聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同小麦基因型的旱地产量、补灌产量与耐旱性指标的方差分析

由表 3 可知,不同基因型小麦的旱地产量、平均产量、几何平均产量、抗旱指数及干旱耐受指数的基因型差异达极显著水平,补灌产量与抗旱系数的基因型差异达显著水平。因此,通过比较产量及相关参数的变化可以区分不同基因型小麦产量与耐旱性的差异。

表 3 14 个小麦基因型的旱地产量(Y_s)、补灌产量(Y_p)与耐旱性指标的方差分析

Table 3 Analysis of variance of Y_p , Y_s , and drought tolerance indexes for 14 wheat genotypes

| 变异来源 Source of variation | 自由度 <i>df</i> | 旱地产量 Y_s | 补灌产量 Y_p | 平均产量 <i>MP</i> | 几何平均产量 <i>GMP</i> | 抗旱系数 <i>DRC</i> | 抗旱指数 <i>DRI</i> | 干旱耐受指数 <i>STI</i> |
|-----------------------------|------------------|---------------|---------------|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 重复 Rep | 2 | 110494.1 | 170953.6 | 24685.4 | 24220.9 | 0.0190 | 1.2051 | 0.0230 |
| 基因型 Genotype | 13 | 268297.6 ** | 120838.7 * | 140775.9 ** | 146768.1 ** | 0.0096 * | 0.0639 ** | 0.0248 ** |
| 误差 Error | 26 | 55833.3 | 55626.7 | 32855.6 | 33277.6 | 0.0040 | 0.0184 | 0.0058 |

注: * 表示基因型差异达到 5% 显著水平, ** 表示基因型差异达到 1% 显著水平。

Note: * indicates genotypic differences at the 5% level, and ** indicates genotypic differences at the 1% level.

表 4 14 个小麦基因型的旱地产量(Y_s)、补灌产量(Y_p)与耐旱性指标的变化

Table 4 Variations of Y_s , Y_p and drought tolerance indexes of 14 wheat genotypes

| 项目 Item | 旱地产量 $Y_s/(kg \cdot hm^{-2})$ | 补灌产量 $Y_p/(kg \cdot hm^{-2})$ | 平均产量 $MP/(kg \cdot hm^{-2})$ | 几何平均产量 $GMP/(kg \cdot hm^{-2})$ | 抗旱系数 <i>DRC</i> | 抗旱指数 <i>DRI</i> | 干旱耐受指数 <i>STI</i> |
|------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 平均值 Mean | 8496.75 | 9234.80 | 8865.77 | 8854.02 | 0.9204 | 1.1862 | 0.9213 |
| 最大值 Max. | 9301.67 | 9742.22 | 9365.00 | 9364.79 | 0.9912 | 1.3875 | 1.0283 |
| 最小值 Min. | 7350.56 | 8402.78 | 7929.73 | 7915.60 | 0.7946 | 0.8830 | 0.7347 |
| 标准差 <i>SD</i> | 598.11 | 401.40 | 433.24 | 440.11 | 0.0571 | 0.1456 | 0.0898 |
| 变异系数 <i>CV</i> % | 7.04 | 4.35 | 4.89 | 4.97 | 6.2000 | 12.2700 | 9.7500 |

表 5 14 个基因型小麦旱地产量(Y_s)、补灌产量(Y_p)与耐旱性评价指标值

Table 5 Values of Y_s , Y_p and drought tolerance evaluation indexes of 14 wheat genotypes

| 品系 Line | 旱地产量 Y_s $/(kg \cdot hm^{-2})$ | 补灌产量 Y_p $/(kg \cdot hm^{-2})$ | 平均产量 <i>MP</i> $/(kg \cdot hm^{-2})$ | 几何平均产量 <i>GMP</i> $/(kg \cdot hm^{-2})$ | 抗旱系数 <i>DRC</i> | 抗旱指数 <i>DRI</i> | 干旱耐受指数 <i>STI</i> | 抗旱分级 Classification |
|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| V1 | 7456.67B | 8402.78A | 7929.73B | 7915.60B | 0.8874A | 1.0005AB | 0.7347B | 3 |
| V2 | 9005.56AB | 9571.67A | 9288.62A | 9284.30A | 0.9409A | 1.2810AB | 1.0107A | 2 |
| V3 | 8366.67AB | 8812.22A | 8589.45AB | 8586.56AB | 0.9494A | 1.2010AB | 0.8645AB | 2 |
| V4 | 8372.22AB | 9670.56A | 9021.39AB | 8998.00AB | 0.8657A | 1.0959AB | 0.9494AB | 3 |
| V5 | 8294.44AB | 9742.22A | 9018.33AB | 8989.23AB | 0.8514A | 1.0677AB | 0.9475AB | 3 |
| V6 | 8000.00AB | 9134.44A | 8567.22AB | 8548.42AB | 0.8758A | 1.0593AB | 0.8569AB | 3 |
| V7 | 9301.67A | 9428.33A | 9365.00A | 9364.79A | 0.9866A | 1.3875A | 1.0283A | 1 |
| V8 | 8540.00AB | 9221.67A | 8880.84AB | 8874.29AB | 0.9261A | 1.1957AB | 0.9234AB | 2 |
| V9 | 8977.78AB | 9057.22A | 9017.50AB | 9017.41AB | 0.9912A | 1.3455AB | 0.9535AB | 1 |
| V10 | 8943.33AB | 9437.78A | 9190.56AB | 9187.23AB | 0.9476A | 1.2813AB | 0.9897AB | 2 |
| V11 | 8297.78AB | 8601.67A | 8449.73AB | 8448.36AB | 0.9647A | 1.2102AB | 0.8369AB | 2 |
| V12 | 9027.78AB | 9370.00A | 9198.89AB | 9197.30AB | 0.9635A | 1.3151AB | 0.9919AB | 1 |
| V13 | 7350.56B | 9251.11A | 8300.84AB | 8246.26AB | 0.7946A | 0.8830B | 0.7974AB | 4 |
| V14 | 9020.00AB | 9585.56A | 9302.78A | 9298.48A | 0.9410A | 1.2833AB | 1.0138A | 2 |

注:同列不同大写字母表示品系间差异显著($P < 0.01$)。

Note: Different capital letters in the same column indicate significant differences between lines ($P < 0.01$).

2.2 不同小麦基因型的旱地产量、补灌产量和耐旱性指标差异

由表 4 可知,小麦旱地平均产量比补灌平均产量减少 738.05 $kg \cdot hm^{-2}$,平均减产率达 7.99%;旱地产量变异系数大于补灌产量的变异系数,表明不同小麦品系在干旱条件下产量变化范围较大,不同基因型小麦间的产量差异较大;几何平均产量的变异系数略大于平均产量的变异系数,此外,抗旱指数的变异系数 > 干旱耐受指数的变异系数 > 抗旱系数的变异系数。

2.3 不同基因型小麦间耐旱性评价指标的比较

由表 5 可知,不同品系小麦的几何平均产量均略低于平均产量。V9 在旱地与补灌的籽粒产量分别位居第 5 位和第 11 位,产量明显低于 V7(旱地与

补灌产量分别位居第 1 位和第 6 位),但 V9 的抗旱系数(0.9912)高于 V7 的抗旱系数(0.9866)(表 5、6)。依照抗旱指数评价标准(表 2),从表 5 可以看出,抗旱性极强的 3 个品系为 V7、V9 和 V12,抗旱性强的 6 个品系为 V2、V3、V8、V10、V11、V14,抗旱性中等的 4 个品系为 V1、V4、V5 和 V6,抗旱性弱的品系 1 个(V13)。同时干旱耐受指数高的品系旱地产量与补灌产量一般较高。

由表 6 可知,旱地产量排序前 4 位的品系表现为 V7>V12>V14>V2,平均产量前 4 位品系、几何平均产量前 4 位品系及干旱耐受指数前 4 位品系的排序相同,均为 V7>V14>V2>V12。抗旱系数表现为 V9>V7>V11>V12,抗旱指数表现为 V7>V9>V12>V14,干旱耐受指数与产量排序的一致性比其与抗旱指数排序的一致性,抗旱系数排序与产量排序一致性最差。

2.4 小麦产量性状和耐旱指标的相关性分析及主成分聚类分析

由图 2 可知,小麦产量与不同耐旱指标间存在相关性,其中补灌产量与旱地产量呈正相关关系,相关系数为 0.48;旱地产量与抗旱指数、干旱耐受指数、几何平均产量呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.96、0.93、0.93;补灌产量与平均产量、几何平均产量、干旱耐受指数呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.80、0.78、0.78;抗旱系数与补灌产量呈负相关关系,且只与旱地产量呈极显著正相关关系。

主成分分析结果表明,前两个主成分解释了试验数据 99% 以上的信息(表 7)。主成分 1 在数据矩阵中证明了 78.12% 变化,MP、GMP 和 STI 等耐旱指标显示出与旱地产量的高度协调,因此被称为高产

和耐干旱分量;该主成分在两种环境中分离出具有高产的耐旱基因型。主成分 2 占总变化的 21.85%,该主成分中补灌产量和抗旱系数高度协调,因此被称为干旱敏感性分量;该主成分可在不同条件下分离出产量变化幅度较大的基因型。

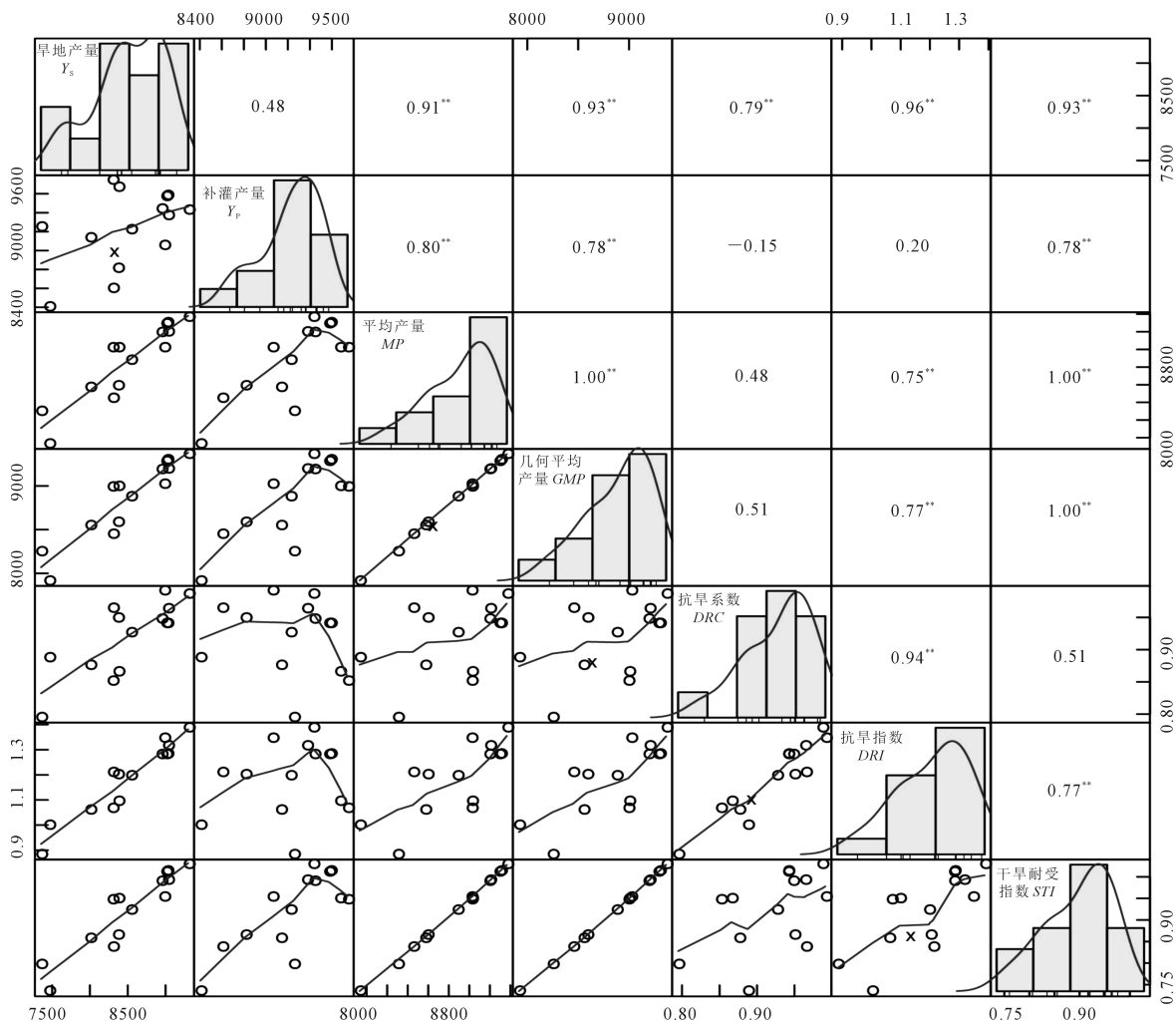
计算 14 个品系的主成分得分,利用前 2 个主成分得分,通过集群最长距离法进行不同基因型分组的层次聚类分析(图 3)。14 个品系被分为 4 类,结合产量结果及抗旱性分析可知,第 I 类产量相对较高,但耐旱性弱;第 II 类表现为高产稳产,耐旱性强,根据 MP、GMP 和 STI 等指标,这些基因型在补灌和旱地条件下的产量优于其他基因型,其中包含旱地与补灌产量均位于前 4 位的 V2、V7、V12、V14;第 III 类产量较低,耐旱性一般;第 IV 类产量最低,耐旱性最差。此外,聚类分析结果与产量比较结果一致(表 6、图 3)。

3 讨论

不同自然降水量对小麦的干旱胁迫程度存在差异,由于目前对小麦干旱胁迫反应的生理和分子机制的研究仍不够深入,通过产量直接选择仍被认为是一种有价值的品种筛选策略^[21]。研究人员提出了仅基于非胁迫条件下产量的选择标准,其中低基因型与环境互作效应可充分表达基因型的产量潜力,但在非胁迫条件下具有高产潜力的基因型在干旱条件下不一定产量高^[22]。同样,在逆境条件下具有较优产量表现的基因型,由于其产量潜力低,在有利于农艺性状表达的年份可能不是最佳选择。一种可能的解决方案是在温和胁迫环境中选择具有高产潜力的基因型,在严重胁迫环境中选择具有低产量潜力的高抗性基因型^[23]。与以上两种选择方

表 6 14 个不同基因型小麦旱地产量(Y_s)、补灌产量(Y_p)与耐旱性评价指标排序
Table 6 Ranking of Y_s , Y_p and drought tolerance evaluation indexes in 14 wheat genotypes

| 位次 Ranking | 旱地产量 Y_s | 补灌产量 Y_p | 平均产量 MP | 几何平均产量 GMP | 抗旱系数 DRC | 抗旱指数 DRI | 干旱耐受指数 STI |
|---------------|---------------|---------------|------------|---------------|-------------|-------------|---------------|
| 1 | V7 | V5 | V7 | V7 | V9 | V7 | V7 |
| 2 | V12 | V4 | V14 | V14 | V7 | V9 | V14 |
| 3 | V14 | V14 | V2 | V2 | V11 | V12 | V2 |
| 4 | V2 | V2 | V12 | V12 | V12 | V14 | V12 |
| 5 | V9 | V10 | V10 | V10 | V3 | V10 | V10 |
| 6 | V10 | V7 | V4 | V9 | V10 | V2 | V9 |
| 7 | V8 | V12 | V5 | V4 | V14 | V11 | V4 |
| 8 | V4 | V13 | V9 | V5 | V2 | V3 | V5 |
| 9 | V3 | V8 | V8 | V8 | V8 | V8 | V8 |
| 10 | V11 | V6 | V3 | V3 | V1 | V4 | V3 |
| 11 | V5 | V9 | V6 | V6 | V6 | V5 | V6 |
| 12 | V6 | V3 | V11 | V11 | V4 | V6 | V11 |
| 13 | V1 | V11 | V13 | V13 | V5 | V1 | V13 |
| 14 | V13 | V1 | V1 | V1 | V13 | V13 | V1 |



注: ** 表示指标间存在极显著相关关系 ($P < 0.01$)。

Note: ** indicates significant correlation between the indicators ($P < 0.01$).

图 2 14 个基因型小麦产量与耐旱性评价指标的相关性

Fig.2 Correlation between yield and drought tolerance evaluation indexes of 14 wheat genotypes

表 7 14 个基因型小麦产量与耐旱性

评价指标的主成分分析

Table 7 Principal component analysis of yield and drought tolerance evaluation indexes of 14 wheat genotypes

| 项目 Item | 主成分 1 Component 1 | 主成分 2 Component 2 |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| 旱地产量 Y_s | 0.420 | 0.152 |
| 补灌产量 Y_p | 0.273 | 0.622 |
| 平均产量 MP | 0.417 | -0.183 |
| 几何平均产量 GMP | 0.419 | -0.159 |
| 抗旱系数 DRC | 0.285 | 0.602 |
| 抗旱指数 DRI | 0.377 | 0.379 |
| 干旱耐受指数 STI | 0.419 | -0.157 |
| 特征值 Eigenvalue | 2.338 | 1.237 |
| 贡献率 Percent of variation/% | 78.120 | 21.850 |
| 累计贡献率 Cumulative percentage/% | 78.120 | 99.970 |

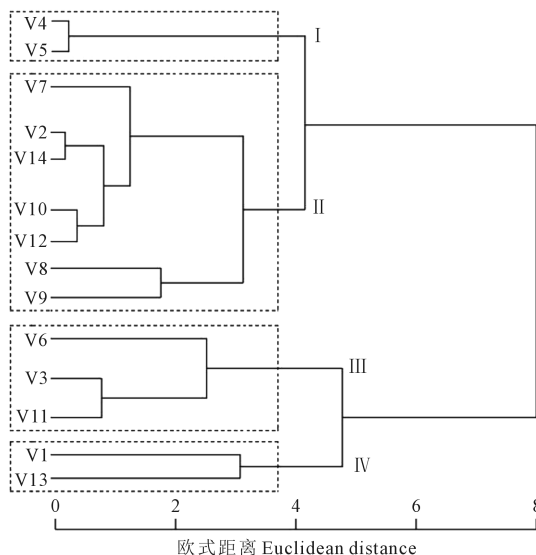


图 3 14 个基因型小麦的聚类分析图

Fig.3 Cluster analysis of 14 wheat genotypes

法不同,在雨养环境不可预测的年度干旱情景下,提出胁迫和非胁迫条件下产量的优化解决方案,旨在进行更详尽、全面和有效的选择^[22-23]。本研究在旱地和补灌条件下进行,受试验年份小麦生长中期降水较少的影响,有利于筛选抗旱性强且高产稳产性好的品系(图 1、图 3),同时证明了优化解决方案的有效性。干旱强度通常被划分为 3 类,分别为轻度强度($SI < 0.4$)、中等强度($0.4 < SI < 0.7$)和严重强度($SI > 0.7$)^[24-25]。研究表明,开展产量筛选试验建议在轻度压力条件下进行,因为严重的胁迫会导致大多数基因型的产量大幅下降,从而降低表型变异性^[13,26-28]。本试验年度自然降水无法满足小麦正常生长需要,中期干旱胁迫现象明显。干旱强度(SI)为 0.08,小于轻度干旱分类阈值 0.4,属于轻度干旱压力^[28]。同时,干旱与补灌条件下,不同品系田间表型性状如株高、群体大小、不孕小穗等方面存在明显区别,便于农艺性状选择。

前人研究表明,旱地与补灌条件形成不同的小麦生长环境,不同环境下产量及其耐旱性参数的变异系数不同,旱地与补灌条件下籽粒产量间差异显著,两种环境下的耐旱性指数的差异性达到显著水平,存在选择有利基因型的可能性^[29-30]。本研究也证实了这一点,试验中产量及抗旱性指标的变异系数的变化范围为 4.35%~12.27%;5 个抗旱性参数中,除 DRC 表现基因型差异达到 5%显著水平外,其他 4 个参数 MP 、 GMP 、 DRI 及 STI 表现基因型差异达到 1%极显著水平(表 3)。

在小麦抗旱性评价中,常根据多种耐旱性指标参数值来评价不同基因型的耐旱性。本研究采用 MP 、 GMP 、 DRC 、 DRI 及 STI 等耐旱性参数鉴别最佳基因型,其中 STI 、 GMP 和 MP 与旱地产量(Y_s)、补灌产量(Y_p)均呈极显著正相关关系(图 2),同时 14 个品系抗旱相关参数 MP 、 GMP 和 STI 的排序与产量顺序及各个品系分类结果基本一致(表 6、图 3),因此这些指标可以作为选择干旱条件下高产基因型的备选指标,这与前人研究结果一致^[24-25,31]。Mohammadi 等^[25]通过一致性检验表明,在逆境和最优条件下, MP 、 STI 和 GMP 比其他抗旱指标更能识别高产基因型;而对于 SSI 、 DRC 和 TOL 而言,一致性的置信度水平随着干旱胁迫的程度而变化,这表明它们在筛选基因型方面的价值高度依赖于胁迫的性质和强度。本研究的水分胁迫强度属于轻度干旱压力,同样证实了 MP 、 STI 和 GMP 参数在识别高产稳产基因型方面的有效性。 SSI 、 DRC 和 TOL 为表征不同干旱程度下产量变化的指标,但其主要

关注自身品种不同胁迫条件下的产量变化^[31]。本试验中 V9(5206222)的产量(旱地与补灌的籽粒产量分别位居第 5 位和第 11 位)明显低于 V7(5207357)的产量(旱地与补灌产量分别位居第 1 位和第 6 位),但是 V9 的抗旱系数(0.9912)大于 V7(0.9866),可以看出以抗旱系数(DRC)作为筛选指标的局限性,这一点在面包小麦、大麦、硬质小麦和马铃薯等其他作物的抗旱性研究中也证实^[13-16]。抗旱指数(DRI)作为我国用于小麦抗旱性分级的鉴定指标,以对照品种的产量为参照,兼顾品种的相对产量(抗旱系数)和绝对产量^[18]。本研究中,抗旱指数与产量的一致性比抗旱系数与产量的一致性高,相关分析中 DRI 与 Y_s 呈极显著正相关关系,而与 Y_p 正相关系数仅为 0.20,筛选出高产稳产的抗旱品系 V7、V14、V2 和 V12,其产量均高于其他基因型,位列前 4 位,抗旱等级分别为 1、2、2、1 级(表 5、6、图 2)。

主成分分析一般结合聚类分析进行,已被广泛用于描述遗传多样性和基于相似特征的分组,明确分组结果,显示组间差异^[32-33]。本研究在相关性分析的基础上提取了前 2 个主成分,累计贡献率达 99.97%,依据 14 个品系前 2 个主成分得分,将 14 个品系划分 4 类,明确了不同类别的特点。聚类分析结果与产量比较结果一致(表 6、图 3)。具体选择过程中除产量性状外,同时要关注不同品系农艺、抗病等性状的田间表现差异并做出综合评价。

4 结 论

在轻度干旱胁迫下,5 种耐旱性参数对不同基因型小麦品系耐旱性评价的效应不同,干旱耐受指数(STI)、几何平均产量(GMP)、平均产量(MP)指标与旱地产量和补灌产量均呈极显著正相关关系且表现出较好的产量一致性,这些指标可以作为选择干旱条件下高产稳产基因型的备选指标。本研究依据不同耐旱性参数差异筛选出 4 个高产耐旱品系,产量表现为 V7(520735) > V14(TKM4835) > V2(5204128) > V12(5850913),抗旱性为 1~2 级,可作为小麦育种研究的备选品种。

参 考 文 献:

- [1] POGGI G M, CORNETI S, ALOISI I, et al. Environment-oriented selection criteria to overcome controversies in breeding for drought resistance in wheat[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 280: 153895.
- [2] 齐月, 王鹤龄, 王润元, 等. 甘肃省小麦干旱灾害风险评估及区划研究[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(4): 33-38.
- [3] QI Y, WANG H L, WANG R Y, et al. Risk assessment and region division of wheat drought disaster in Gansu Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(4): 33-38.
- [3] 韩一军, 韩亭辉. “十四五”时期我国小麦增产潜力分析与实现路径

- [J]. 农业经济问题, 2021, (7): 38-46.
- HAN Y J, HAN T H. China's wheat yield increase potential and realization path during the "14th Five-Year Plan" period[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2021, (7): 38-46.
- [4] 赵岩, 马艳明, 蒋方山, 等. 黄淮海区小麦品种(系)成株期抗旱性综合评价[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(12): 4100-4107.
- ZHAO Y, MA Y M, JIANG F S, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of wheat cultivars (lines) in Huang-Huai wheat region at adult stage[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(12): 4100-4107.
- [5] MWADZINGENI L, SHIMELIS H, DUBE E, et al. Breeding wheat for drought tolerance: progress and technologies[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(5): 935-943.
- [6] HILL C B, TAYLOR J D, EDWARDS J, et al. Whole-genome mapping of agronomic and metabolic traits to identify novel quantitative trait Loci in bread wheat grown in a water-limited environment[J]. *Plant Physiology*, 2013, 162(3): 1266-1281.
- [7] AHMAD R, QADIR S, AHMAD N, et al. Yield potential and stability of nine wheat varieties under water stress conditions [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2003, 5(1): 7-9.
- [8] MITRA J. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants[J]. *Current Science*, 2001, 80(6): 758-763.
- [9] CLARKE J M, DEPAUW R M, TOWNLEY-SMITH T F. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat [J]. *Crop Science*, 1992, 32(3): 723-728.
- [10] ROSIELLE A A, HANBLIN J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment[J]. *Crop Science*, 1981, 21(6): 943-946.
- [11] BOUSLAMA M, SCHAPAUGHW T. Stress tolerance in soybeans. I. evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance [J]. *Crop Science*, 1984, 24(5): 933-937.
- [12] FERNANDEZ G C J. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance[C]//Proceeding of the international symposium on adaptation of vegetables and other food crops in temperature and water stress, Shanhu, Taiwan; AVRDC, 1992; 257-270.
- [13] SIO-SE MARDEH A, AHMADI A, POUSTINI K, et al. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions [J]. *Field Crops Research*, 2006, 98(2/3): 222-229.
- [14] RIZZA F, BADECK F W, CATTIVELLI L, et al. Use of a water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigated conditions[J]. *Crop Science*, 2004, 44(6): 2127-2137.
- [15] MOHAMMADI R, SADEGHZADEH D, ARMION M, et al. Evaluation of durum wheat experimental lines under different climate and water regime conditions of Iran[J]. *Crop & Pasture Science*, 2011, 62: 137-15.
- [16] CABELLO R, MONNEVEUX P, DE MENDIBURU F, et al. Comparison of yield based drought tolerance indices in improved varieties, genetic stocks and landraces of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. *Euphytica*, 2013, 193(2): 147-156.
- [17] 杨进文, 元建芳, 王曙光, 等. 不同品种春小麦抗旱性研究[J]. *山西农业科学*, 2013, 41(7): 672-675.
- YANG J W, YUAN J F, WANG S G, et al. Drought resistance analysis in spring wheat varieties[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(7): 672-675.
- [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): 103-106.
- 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): 103-106.
- [19] 景蕊莲. 作物抗旱研究的现状与思考[J]. *干旱地区农业研究*, 1999, 17(2): 79-85.
- JINGR L. Present situation and approach of study on crop drought resistance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(2): 79-85.
- [20] 邵千顺, 王斐, 王克雄, 等. 宁夏南部山区冬小麦抗旱指标鉴定研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 66-71.
- SHAO Q S, WANG F, WANG K X, et al. Studies on identification of drought resistance index of winter wheat in southern mountain area of Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 66-71.
- [21] DUGASA M T, CAO F B, IBRAHIM W, et al. Differences in physiological and biochemical characteristics in response to single and combined drought and salinity stresses between wheat genotypes differing in salt tolerance [J]. *Physiologia Plantarum*, 2019, 165(2): 134-143.
- [22] PATEL J, PATEL A, PATEL C, et al. Evaluation of selection indices in screening durum wheat genotypes combining drought tolerance and high yield potential [J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(4): 1165-1178.
- [23] MOHAMMADI R, ARMION M, KAHRIZI D, et al. Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought conditions[J]. *International Journal of Plant Production*, 2010, 4: 11-24.
- [24] MOHAMMADI M, KARIMIZADEH R, ABDIPOUR M. Evaluation of drought tolerance in bread wheat genotypes under dryland and supplemental irrigation conditions[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(4): 487-493.
- [25] MOHAMMADI R. Efficiency of yield-based drought tolerance indices to identify tolerant genotypes in durum wheat [J]. *Euphytica*, 2016, 211: 71-89.
- [26] SANJARI P A, YAZDANSEPAS A. Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under pre-and post-anthesis drought stress conditions[J]. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 2008, 10: 109-121.
- [27] TALEBI R, FAYAZ F, MOHAMMAD NAJI A. Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) [J]. *General and Applied Plant Physiology*, 2009, 35(1/2): 64-74.
- [28] NOURI A, ETMINAN A, TEIXEIRA J A, et al. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turjidum* var. *durum* Desf.) [J]. *Aust J Crop Science*, 2011, 5(1): 8-16.
- [29] TRETOWAN R M, GINKEL M V, RAJARAM S. Progress in breeding wheat for yield and adaptation in global drought affected environments[J]. *Crop Science*, 2002, 42(5): 1441-1446.
- [30] SALLAM A, ALQUDAH A M, DAWOOD M F A, et al. Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(13): 3137.
- [31] AYED S, OTHMANI A, BOUHAOUEL I, et al. Multi-environment screening of durum wheat genotypes for drought tolerance in changing climatic events[J]. *Agronomy*, 2021, 11(5): 875.
- [32] GOLESTANI M, PAKNIAT H. Evaluation of drought tolerance indices in sesame lines[J]. *Journal of Science & Technology of Agriculture & Natural Resources*, 2007, 41: 141-149.
- [33] 孙亮印, 牟秋焕, 米勇, 等. 基于 GT 双标图对小麦新品系的分类评价[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(7): 14-24.
- SUN X Y, MU Q H, MI Y, et al. Classification and evaluation of new wheat lines based on GT biplot [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(7): 14-24.