

引用格式:

常明娟, 楚宗艳, 杜玉倍, 赵国建, 吴超, 占亚楠, 刘素玲, 汤玉煊. 高温胁迫下小麦生理指标的主成分分析及综合评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 1-11.

CHANG M J, CHU Z Y, DU Y B, ZHAO G J, WU C, ZHAN Y N, LIU S L, TANG Y X. Principal component analysis and comprehensive evaluation of the physiological indices in wheat under high temperature resistance[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(1): 1-11.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 高温胁迫下小麦生理指标的主成分分析及综合评价

常明娟, 楚宗艳, 杜玉倍, 赵国建, 吴超, 占亚楠, 刘素玲, 汤玉煊\*

(开封市农林科学研究院, 河南 开封 465008)

**摘要:** 为了解小麦对花后高温胁迫的生理响应, 以洛旱 2 号、郑麦 366 等 26 个品种为材料, 测定高温胁迫(搭棚增温)下和大田自然生长条件(CK)下叶片的相对含水量、可溶性蛋白含量、丙二醛(MDA)含量等 11 个生理指标及籽粒产量。结果表明: 高温胁迫下, 26 个小麦品种的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、SPAD 值、叶片相对含水量整体呈下降趋势, 可溶性蛋白含量、丙二醛(MDA)含量整体呈上升趋势, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性的变化趋势并不明确; 以 11 项指标的抗逆系数作为衡量抗高温性的指标, 主成分分析结果表明, 11 个生理指标可以综合成 5 个相互独立的综合指标, 其累计贡献率为 80.561%; 根据产量相关指标可将 26 个小麦品种划分为 4 类, 周麦 22、新麦 11 号等 11 个品种为中抗高温型品种, 郑麦 366、兰考矮早 8 等 10 个属于高抗高温型小麦品种, 西农 979、洛旱 6 号等 4 个品种属于低抗高温型品种, 洛旱 2 号的千粒质量热感指数和产量的热感指数均大于 2, 且千粒质量的抗逆指数和抗逆系数均小于 80%, 属于高温敏感型品种。结合 D 值聚类分类结果综合判断, 郑麦 366、兰考矮早 8、冀麦 47 属于高抗高温型小麦品种; 新麦 11、周麦 19、郑麦 7698、丰德存麦 1 号属于中抗高温型小麦品种; 西农 979、洛旱 6 号、北京 8 号属于低抗高温型小麦品种。

**关键词:** 小麦; 高温胁迫; 生理指标; 主成分分析; 综合评价; 产量

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)01-0001-11

## Principal component analysis and comprehensive evaluation of the physiological indices in wheat under high temperature resistance

CHANG Mingjuan, CHU Zongyan, DU Yubei, ZHAO Guojian, WU Chao, ZHAN Ya'nan, LIU Suling, TANG Yuxuan\*

(Kaifeng Academy of Agriculture and Forestry, Kaifeng, Henan 465008, China)

**Abstract:** In order to understand the physiological response of wheat to post-anthesis high temperature, 26 wheat cultivars including Luohan2, Zhengmai366, etc were screened. And 11 physiological indexes including the content of leaf relative water content, soluble protein, malondialdehyde(MDA), etc were analyzed under post-anthesis high temperature stress(plastic-covered tunnel) and natural growth conditions(CK). The results showed that under high temperature stress, the change trend of the photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, chlorophyll content, and leaf relative water content decreased as a whole, while the change trend of soluble protein content and malondialdehyde(MDA) content increased as a whole, but the change trend of superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD), and catalase(CAT) were not obvious in 26 wheat cultivars. And we took each high temperature resistance coefficient as the index of high temperature resistance, and evaluated different cultivars wheat comprehensively through principal components analysis. The results showed that 11 indices were transformed to 5 independent comprehensive indices, which total cumulative rate reached to 80.561% through analysis of principal component. Based on the relevant indexes of yield, 26 wheat cultivars

收稿日期: 2022-05-23

修回日期: 2023-02-08

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0300204)

作者简介: 常明娟(1992—), 女, 河南博爱人, 硕士, 研究实习员, 主要从事作物遗传育种研究, 1071807095@qq.com; \*通信作者, 汤玉煊, 研究员, 主要从事作物遗传育种研究, tyx3391009@163.com

were divided into 4 groups. The first category included 11 cultivars, such as Zhoumai22, Xinmai11 belonged to the medium-level high temperature resistant wheat cultivars. The second category included 10 cultivars, such as Zhengmai366, Lankaoaizao8 belonged to high-level high temperature resistant wheat cultivars. The last category included 4 cultivars, such as Xinong979, Luohan6, belonged to low-level high temperature resistant wheat cultivars. Among them, Luohan2 was high temperature sensitive cultivar and its heat sensitivity index of 1000-grain weight and yield were higher than 2, the index and coefficient of resistance of 1000-grain weight were less than 80%. Comprehensive judgment based on *D*-value clustering classification results, Zhengmai366, Lankaoaizao8 and Jimai47 belonged to the high temperature resistant wheat varieties; Xinmai11, Zhoumai19, Zhengmai7698 and Fengdecunmai1 belonged to the medium-high temperature resistant wheat varieties; Xinong979, Luohan2 and Beijing8 belonged to low and high temperature resistant wheat cultivars.

**Keywords:** wheat; high temperature stress; physiological indices; principal component analysis; comprehensive evaluation; yield

小麦生长发育后期常受到异常高温天气影响, 导致籽粒品质变劣、产量降低<sup>[1]</sup>。黄淮海地区是中国小麦主产区之一, 小麦灌浆期经常出现 30 ℃以上的高温天气, 可造成小麦减产 5%~10%, 严重年份减产幅度高达 20%以上<sup>[2]</sup>。有研究发现, 高温胁迫可破坏细胞膜的稳定性<sup>[3]</sup>, 加速小麦叶片老化<sup>[4]</sup>, 降低光合速率<sup>[5]</sup>, 影响氮代谢相关酶的活性<sup>[6]</sup>。也有研究表明, 小麦籽粒的直链淀粉、支链淀粉和总淀粉的积累速率与淀粉分支酶等的活性均存在显著相关性, 高温胁迫会提高淀粉积累速率, 加快籽粒发育进程, 使成熟期提前<sup>[7-8]</sup>。在抗逆性方面, 前人对小麦的非生物胁迫机制进行了深入研究, 并筛选出了多个与小麦抗逆性相关的生理指标, 如可溶性蛋白含量<sup>[9]</sup>、丙二醛(MDA)含量<sup>[10]</sup>、超氧化物歧化酶(SOD)活性<sup>[11]</sup>、叶片含水量<sup>[12]</sup>等。由于评价小麦抗逆性的指标较多, 且指标之间存在一定的相关性, 故可采用主成分分析法将原来多个彼此相关的指标转换成少数几个彼此独立的综合指标<sup>[13-14]</sup>, 在此基础上, 求出所有品种的每一个综合指标值及

其相应的隶属函数值, 然后进行加权, 得到品种抗逆性的综合评价值。有研究表明, 小麦籽粒灌浆期日均温度每增加 1 ℃, 籽粒质量下降 2.78 mg<sup>[15-16]</sup>。灌浆期籽粒质量是影响产量的主要因素, 通常用千粒质量的稳定性来判断小麦的抗逆能力<sup>[17]</sup>。热感指数和抗逆指数可作为作物抗高温性评价指标, 其中热感指数反映作物对高温逆境的敏感性, 抗逆指数用于鉴别品种的抗逆能力<sup>[18]</sup>。本试验选用 26 个小麦品种, 采用搭棚增温的方式, 研究花后高温胁迫对不同品种生理指标及籽粒产量的影响, 采用隶属函数法和主成分分析法对各指标进行分析, 进而评价小麦的抗高温性。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验选用的 26 个小麦品种均已通过审定, 其生育期特性见表 1。

表 1 供试小麦品种及其生育期特性

Table 1 General information of wheat cultivars used

| 品种名称    | 生育期特性  | 品种名称    | 生育期特性  | 品种名称     | 生育期特性  |
|---------|--------|---------|--------|----------|--------|
| 西农 979  | 半冬性早熟  | 西农 2208 | 半冬性早熟  | 洛早 6 号   | 半冬性中熟  |
| 北京 8 号  | 冬性中早熟  | 郑麦 7698 | 半冬性中晚熟 | 洛麦 23    | 半冬性中晚熟 |
| 新麦 11 号 | 半冬性早熟  | 兰考矮早 8  | 弱春性晚熟  | 德选 1 号   | 半冬性中晚熟 |
| 矮抗 58   | 半冬性中熟  | 早选 10 号 | 半冬性中晚熟 | 周麦 18    | 半冬性中熟  |
| 周麦 16   | 半冬性中熟  | 周麦 22   | 半冬性中熟  | 济麦 22    | 半冬性中晚熟 |
| 洛早 2 号  | 半冬性早熟  | 周麦 27   | 半冬性中熟  | 丰德存麦 1 号 | 半冬性中晚熟 |
| 周麦 19   | 半冬性中熟  | 豫农 416  | 半冬性中熟  | 冀麦 47    | 半冬性早熟  |
| 郑麦 366  | 半冬性中早熟 | 新麦 26   | 半冬性中熟  | 矮丰 3 号   | 半冬性早熟  |
| 豫麦 66 号 | 半冬性中晚熟 | 新麦 18 号 | 半冬性中早熟 |          |        |

## 1.2 方法

### 1.2.1 试验设计

试验于河南农业大学科技园进行。于 2016 年 10 月 20 日播种, 2017 年 6 月 5 日收获。在小麦开花后 7 d(灌浆初期), 用聚氯乙烯塑料(厚度为 0.12 mm)大棚覆盖 14 d。每个大棚长 6.5 m, 宽 3 m。大棚四周均设置 2 行保护行。采用随机区组设计, 小区面积为 6 m<sup>2</sup>, 每小区种植 1 个品种, 采用点播方

式播种, 株距 5 cm, 行距 20 cm。设置 2 个处理, 高温处理用 HT 表示, 以大田自然生长为对照(CK)。3 次重复。

### 1.2.2 测定项目与方法

用 TRSIS-RC-4HC 型温度记录仪测量灌浆期间(5月13日—5月26日)棚内外的温度和相对湿度。从表 2 可以看出, 高温胁迫与对照日均温差最高达 3.9 °C。

表 2 小麦灌浆期自然生长和高温胁迫处理下的日均温度和相对湿度

| 测定时间  | 日均温度/°C |      | 日均温差/°C | 日最高温度/°C |      | 日最高温差/°C | 日均相对湿度/% |      |
|-------|---------|------|---------|----------|------|----------|----------|------|
|       | CK      | HT   |         | CK       | HT   |          | CK       | HT   |
| 5月13日 | 22.0    | 23.0 | 1.0     | 29.7     | 32.2 | 2.5      | 45.6     | 48.2 |
| 5月14日 | 18.7    | 19.4 | 0.7     | 24.6     | 26.1 | 1.5      | 55.5     | 56.7 |
| 5月15日 | 17.1    | 18.3 | 1.2     | 24.7     | 26.8 | 2.1      | 71.2     | 79.7 |
| 5月16日 | 20.5    | 22.7 | 2.2     | 32.2     | 35.6 | 3.4      | 54.0     | 62.3 |
| 5月17日 | 23.5    | 27.1 | 3.6     | 33.5     | 41.1 | 7.6      | 52.8     | 54.5 |
| 5月18日 | 24.3    | 26.6 | 2.3     | 35.1     | 38.9 | 3.8      | 55.7     | 57.0 |
| 5月19日 | 24.0    | 26.7 | 2.7     | 32.8     | 38.7 | 5.9      | 43.0     | 51.6 |
| 5月20日 | 22.3    | 25.4 | 3.1     | 31.2     | 36.8 | 5.6      | 56.3     | 58.0 |
| 5月21日 | 23.5    | 26.2 | 2.7     | 32.2     | 36.6 | 4.4      | 56.7     | 60.8 |
| 5月22日 | 22.7    | 26.3 | 3.6     | 32.3     | 41.6 | 9.3      | 51.8     | 60.8 |
| 5月23日 | 18.4    | 21.2 | 2.8     | 28.6     | 33.4 | 4.8      | 51.6     | 64.3 |
| 5月24日 | 19.4    | 22.2 | 2.8     | 30.4     | 36.3 | 5.9      | 47.2     | 61.7 |
| 5月25日 | 22.3    | 26.2 | 3.9     | 34.7     | 41.6 | 6.9      | 39.6     | 46.4 |
| 5月26日 | 24.2    | 27.9 | 3.7     | 34.7     | 42.3 | 7.6      | 40.7     | 47.2 |

采用 Li-6400 光合仪测定光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)等, 设定光量子通量密度为 1000 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 测定时间为 09:00—11:00 和 14:00—16:00。

采用 SPAD-502 型叶绿素测定仪测定叶片 SPAD 值, 每小区选择 5 片叶测定, 结果取平均值。

搭棚 7 d 后, 每个小区分别取植株旗叶 5 片, 称取初始鲜质量, 然后将剪取叶完全浸于清水 8 h, 取出并吸去叶片多余水分, 称取饱和含水量, 置于 60 °C 烘箱烘干至恒重, 计算叶片相对含水量(L)。

参照文献[19]的方法测定丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)活性和超氧化物歧化酶(SOD)活性; 参照文献[20]的方法测定过氧化氢酶(CAT)活性和可溶性蛋白(PRO)含量。测定时, 对不同品种不同处理(正常条件和高温胁迫)小麦鲜叶进行取样和测定。

## 1.3 数据分析方法

参照文献[12]的方法计算抗逆系数; 参照文献[12,21]的方法计算各综合指标的隶属函数值; 参照文献[12]的方法, 计算各小麦品种的综合抗性; 根据公式(1)计算千粒质量和产量热感指数。

$$S=(1-Y_D/Y_P)/(\bar{Y}_P/\bar{Y}_D) \quad (1)$$

式中: S 为千粒质量或产量的热感指数; Y<sub>D</sub> 为某品种在高温胁迫下的千粒质量或产量; Y<sub>P</sub> 为某品种在自然生长环境下的千粒质量或产量;  $\bar{Y}_D$  为所有参试品种在高温胁迫处理下的平均千粒质量或产量;  $\bar{Y}_P$  为所有参试品种在自然生长环境下的平均千粒质量或产量。

参照文献[22]的方法计算抗逆指数(AI)。本研究中, 将 AI ≥ 100% 的划分为高抗型品种, 90% ≤ AI < 100% 的划为中抗型品种, 80% ≤ AI < 90% 的划分为抵抗型品种, AI < 80% 为高温敏感型品种<sup>[22]</sup>。

## 1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2007、SPSS 20.0 和 SAS 进行数据整理及方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 高温胁迫下供试小麦光合指标的响应差异

由表 3 可知, 高温下 26 个品种的净光合速率、气孔导度呈整体下降趋势。其中, 西农 979、新麦 26、洛早 2 号、洛早 6 号、豫麦 66 号、西农 2208、丰德存麦 1、矮丰 3 号的净光合速率下降较为明显, 下降幅度分别为 39.42%、64.39%、52.26%、65.79%、49.59%、47.42%、33.40%、47.13%; 西农 979、新麦 11 号、新麦 26、洛早 2 号、洛早 6 号、洛麦 23、豫麦 66 号、西农 2208 的气孔导度下降幅度较大,

下降幅度分别为 30.77%、62.50%、68.57%、64.29%、55.00%、34.78%、56.25%、31.58%。高温对不同小麦品种的胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率也有影响, 高温下胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均有下降的品种有西农 979、新麦 11 号、周麦 22、周麦 27、洛早 2 号、新麦 18、洛早 6 号、周麦 19、洛麦 23、豫麦 66 号、西农 2208、郑麦 7698, 其中胞间 CO<sub>2</sub> 浓度分别下降 9.34、157.33、27.33、8.66、28.66、81.00、62.00、5.67、15.66、80.33、43.00、8.67 μL/L, 蒸腾速率分别下降 1.43、1.28、0.46、0.24、1.97、0.22、3.29、0.01、2.05、2.46、2.66、0.68 mmol/(m<sup>2</sup>·s)。综上所述, 高温对洛早 2 号、洛早 6 号、豫麦 66、西农 2208、西农 979 的光合相关指标影响较大。

表 3 灌浆期不同小麦品种的光合指标

Table 3 Photosynthetic indexes of different wheat cultivars at grain filling stage

| 品种      | 净光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |                  | 气孔导度/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |                   |
|---------|---|------------------|--|-------------------|
|         | CK  | HT               | CK   | HT                |
| 西农 979  | (5.53±0.58)bcdefgh  | (3.35±0.69)jgk   | (0.13±0.03)defghi  | (0.09±0.04)cdef   |
| 北京 8 号  | (4.33±0.23)fgh  | (3.14±0.43)jk    | (0.11±0.02)fg  | (0.06±0.01)ef     |
| 新麦 11 号 | (4.36±0.62)efgh   | (3.83±0.04)hijk  | (0.16±0.05)bcdefgh   | (0.06±0.01)ef     |
| 矮抗 58   | (5.41±0.29)bcdefgh  | (5.59±0.22)def   | (0.20±0.02)bcde  | (0.19±0.06)abc    |
| 周麦 22   | (7.12±0.77)abcdef   | (5.55±0.40)def   | (0.21±0.05)bcd   | (0.18±0.10)abcd   |
| 周麦 27   | (8.27±1.95)ab   | (7.61±0.53)b     | (0.25±0.02)b   | (0.18±0.03)abcd   |
| 豫农 416  | (6.26±1.13)bcdefg   | (5.39±0.68)defg  | (0.16±0.04)cdefgh  | (0.24±0.02)a      |
| 周麦 16   | (6.71±0.54)bcdefg   | (6.00±0.60)cde   | (0.20±0.05)bcde  | (0.23±0.08)ab     |
| 新麦 26   | (9.94±0.52)a  | (3.54±0.22)ijk   | (0.35±0.04)a   | (0.11±0.04)cdef   |
| 洛早 2 号  | (5.32±0.26)cdefgh   | (2.54±0.40)jk    | (0.14±0.03)cdefghi   | (0.05±0.01)f      |
| 新麦 18   | (6.25±1.00)bcdefg   | (6.11±0.65)bcde  | (0.18±0.02)bcdefgh   | (0.16±0.02)abcde  |
| 洛早 6 号  | (7.25±0.86)abcd   | (2.48±0.31)k     | (0.20±0.05)bcde  | (0.09±0.03)cdef   |
| 周麦 19   | (6.40±0.80)bcdefg   | (6.59±0.15)bcd   | (0.10±0.05)ghi   | (0.16±0.05)abcde  |
| 郑麦 366  | (5.87±0.39)bcdefgh  | (5.32±0.86)defgh | (0.12±0.01)efghi   | (0.13±0.02)bcdef  |
| 洛麦 23   | (7.58±1.41)abc  | (6.00±0.70)cde   | (0.23±0.02)bc  | (0.15±0.04)abcdef |
| 豫麦 66 号 | (6.13±1.49)bcdefg   | (3.09±0.36)jk    | (0.16±0.01)cdefgh  | (0.07±0.03)ef     |
| 德选 1 号  | (9.77±0.72)a  | (9.32±0.54)a     | (0.19±0.01)bcdefg  | (0.18±0.03)abcd   |
| 周麦 18   | (7.22±1.50)abcde  | (5.42±0.81)defg  | (0.20±0.04)bcde  | (0.14±0.02)bcdef  |
| 西农 2208 | (7.74±1.14)abc  | (4.07±0.43)fj    | (0.19±0.05)bcdef   | (0.13±0.00)bcdef  |
| 济麦 22   | (6.71±0.98)bcdefg   | (7.36±0.55)bc    | (0.22±0.02)bc  | (0.23±0.03)ab     |
| 郑麦 7698 | (6.14±0.65)bcdefg   | (5.47±1.08)defg  | (0.11±0.04)efjhii  | (0.12±0.01)cdef   |
| 丰德存麦 1  | (5.06±0.75)cdefgh   | (3.37±0.47)ijk   | (0.11±0.01)fg  | (0.08±0.02)def    |
| 兰考矮早 8  | (3.86±1.43)gh   | (4.71±0.47)efghi | (0.10±0.00)hi  | (0.14±0.04)abcdef |
| 冀麦 47   | (4.47±2.35)defgh  | (3.95±0.54)ghijk | (0.10±0.03)ghi   | (0.13±0.04)bcdef  |
| 矮丰 3 号  | (5.22±1.09)cdefgh   | (2.76±0.41)k     | (0.12±0.04)efghi   | (0.09±0.03)cdef   |
| 早选 10 号 | (3.11±0.32)h  | (3.05±0.18)jk    | (0.06±0.01)j   | (0.06±0.01)ef     |

表 3(续)

| 品种      | 胞间 CO <sub>2</sub> 浓度/( $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |              | 蒸腾速率/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |                    |
|---------|---|--------------|--|--------------------|
|         | CK  | HT           | CK   | HT                 |
| 西农 979  | (269.67±30.12)ab  | 260.33±40.81 | (3.99±0.58)efghi   | (2.56±1.06)fgh     |
| 北京 8 号  | (234.67±43.90)ab  | 257.67±42.83 | (3.62±0.31)fghi  | (1.93±0.47)h       |
| 新麦 11 号 | (399.33±45.18)a   | 242.00±33.86 | (4.02±0.80)efghi   | (2.74±0.32)efgh    |
| 矮抗 58   | (289.33±43.67)ab  | 285.33±35.98 | (4.90±0.37)bcdefgh   | (5.06±0.71)abcde   |
| 周麦 22   | (289.00±36.97)ab  | 261.67±54.11 | (5.46±0.90)bcdefgh   | (5.00±2.22)abcde   |
| 周麦 27   | (276.33±16.34)ab  | 267.67±43.70 | (6.15±1.29)abcde   | (5.91±0.59)abc     |
| 豫农 416  | (279.33±37.90)ab  | 314.00±36.64 | (4.23±0.19)cddefghi  | (6.29±0.38)a       |
| 周麦 16   | (299.67±46.68)ab  | 284.00±37.82 | (5.03±0.83)bcdefgh   | (6.12±1.47)ab      |
| 新麦 26   | (272.00±3.51)ab   | 280.33±46.37 | (8.05±0.44)a   | (3.75±1.32)cddefgh |
| 洛早 2 号  | (283.33±37.87)ab  | 254.67±28.61 | (4.08±0.90)defghi  | (2.11±0.12)h       |
| 新麦 18   | (316.67±47.89)ab  | 235.67±36.26 | (4.99±0.69)bcdefgh   | (4.77±0.23)abcdefg |
| 洛早 6 号  | (300.67±17.15)ab  | 238.67±53.65 | (6.60±1.23)abcd  | (3.31±1.38)defgh   |
| 周麦 19   | (254.67±29.46)ab  | 249.00±41.67 | (5.16±1.09)bcdefgh   | (5.15±1.21)abcd    |
| 郑麦 366  | (285.33±46.70)ab  | 312.00±18.23 | (4.35±1.02)cddefghi  | (4.90±0.39)abcdef  |
| 洛麦 23   | (276.33±11.17)ab  | 260.67±37.88 | (6.75±0.25)abc   | (4.70±0.40)abcdefg |
| 豫麦 66 号 | (320.00±39.75)ab  | 239.67±24.66 | (4.90±0.81)bcdefgh   | (2.44±0.68)gh      |
| 德选 1 号  | (276.00±44.86)ab  | 312.33±6.33  | (7.08±0.89)ab  | (6.82±0.17)a       |
| 周麦 18   | (263.00±38.03)ab  | 276.00±44.51 | (5.47±0.89)bcdefgh   | (4.96±0.78)abcde   |
| 西农 2208 | (290.00±40.63)ab  | 247.00±43.71 | (6.08±1.48)abcdef  | (3.42±0.35)defgh   |
| 济麦 22   | (234.00±37.69)ab  | 288.33±19.22 | (5.96±1.25)abcdefg   | (6.65±0.59)a       |
| 郑麦 7698 | (258.67±22.61)ab  | 250.00±20.53 | (4.24±0.16)cddefghi  | (3.56±0.57)cddefgh |
| 丰德存麦 1  | (272.33±46.97)ab  | 319.33±8.95  | (3.50±1.38)ghi   | (3.47±0.57)defgh   |
| 兰考矮早 8  | (274.67±38.74)ab  | 274.33±33.94 | (3.36±1.52)hi  | (4.88±0.64)abcdef  |
| 冀麦 47   | (249.00±33.25)ab  | 281.67±58.90 | (3.51±0.56)ghi   | (3.78±0.45)bcdefgh |
| 矮丰 3 号  | (206.67±31.17)b   | 224.67±18.89 | (3.94±0.46)efghi   | (2.30±0.11)h       |
| 旱选 10 号 | (271.67±37.54)ab  | 294.00±22.01 | (2.29±0.28)j   | (2.40±0.55)gh      |

同列数据不同字母表示品种间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

由表 4 可知, 高温下不同小麦品种的叶片相对含水量、SPAD 值、丙二醛含量、可溶性蛋白含量均有所变化。其中, 洛早 2 号、丰德存麦 1 号、旱选 10 号的叶片相对含水量降幅较明显, 降幅分别为 11.54%、18.75%、10.53%; 北京 8 号、洛早 2 号、旱选 10 号的 SPAD 值的降幅较大, 降幅分别达 8.71%、7.19%、13.36%; 西农 979、北京 8 号、

新麦 26、洛早 2 号、豫麦 66、西农 2208、矮丰 3 号的丙二醛含量增幅较大, 分别为 58.82%、68.00%、43.48%、111.76%、116.67%、100.00%、75.00%; 新麦 11 号、洛早 2 号、洛麦 23、郑麦 7698 的可溶性蛋白含量增幅较大, 分别为 54.55%、39.44%、35.71%、36.11%。综上所述, 高温损伤了小麦细胞膜, 尤其对洛早 2 号的细胞膜损伤较为严重。

表 4 灌浆期不同小麦品种的部分生理指标

Table 4 Physiological indexes of different wheat cultivars at grain filling stage

| 品种      | 叶片相对含水量            |                  | SPAD 值             |                    |
|---------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|
|         | CK                 | HT               | CK                 | HT                 |
| 西农 979  | (0.85±0.01)abcde   | (0.75±0.01)bcdef | (55.52±2.18)cddefg | (51.02±2.14)ijk    |
| 北京 8 号  | (0.78±0.03)fghi    | (0.71±0.03)def   | (53.85±4.40)fg     | (49.16±0.41)kl     |
| 新麦 11 号 | (0.90±0.02)a       | (0.88±0.00)a     | (61.38±0.83)a      | (59.98±0.95)a      |
| 矮抗 58   | (0.82±0.05)cddefgh | (0.83±0.03)abc   | (53.46±1.31)fg     | (53.60±1.17)defghi |
| 周麦 22   | (0.86±0.01)abcd    | (0.78±0.06)abcde | (54.82±0.99)defg   | (51.14±0.67)ghijk  |
| 周麦 27   | (0.79±0.01)efghi   | (0.75±0.02)cdef  | (58.58±0.90)abcde  | (57.70±1.34)abc    |

表 4(续)

| 品种       | 叶片相对含水量           |                  | SPAD 值            |                     |
|----------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|          | CK                | HT               | CK                | HT                  |
| 豫农 416   | (0.86±0.00)abc    | (0.82±0.03)abc   | (56.10±1.41)bcdef | (53.34±1.14)defghij |
| 周麦 16    | (0.81±0.01)cdefgh | (0.84±0.04)abc   | (54.88±0.39)defg  | (52.54±0.87)fghj    |
| 新麦 26    | (0.87±0.02)abc    | (0.85±0.02)abc   | (54.96±1.41)defg  | (51.30±1.64)ghijk   |
| 洛旱 2 号   | (0.78±0.02)ghi    | (0.69±0.04)ef    | (55.06±1.06)defg  | (51.10±1.00)hijk    |
| 新麦 18    | (0.86±0.03)abc    | (0.78±0.01)abcde | (56.14±1.71)bcdef | (53.08±0.82)efghij  |
| 洛旱 6 号   | (0.81±0.01)cdefgh | (0.85±0.02)abc   | (62.32±1.70)a     | (58.64±0.66)ab      |
| 周麦 19    | (0.89±0.01)ab     | (0.87±0.00)a     | (59.46±1.51)abc   | (56.54±1.63)bcd     |
| 郑麦 366   | (0.83±0.03)bcdefg | (0.82±0.04)abc   | (54.94±0.48)defg  | (54.76±2.20)cdef    |
| 洛麦 23    | (0.83±0.02)bcdefg | (0.86±0.02)ab    | (59.78±0.46)ab    | (57.26±1.73)abc     |
| 豫麦 66 号  | (0.86±0.00)abcd   | (0.82±0.03)abc   | (56.32±0.99)bcdef | (55.60±0.35)bcdef   |
| 德选 1 号   | (0.84±0.01)abcdef | (0.75±0.01)cdef  | (55.54±0.60)cdefg | (55.98±0.50)bcde    |
| 周麦 18    | (0.86±0.03)abc    | (0.80±0.01)abcd  | (55.16±1.81)defg  | (51.16±0.74)ghijk   |
| 西农 2208  | (0.87±0.01)abc    | (0.86±0.05)ab    | (58.66±1.54)abcd  | (57.36±0.90)abc     |
| 济麦 22    | (0.85±0.00)abcd   | (0.84±0.04)abc   | (55.80±0.47)bcdef | (54.46±0.57)cdefg   |
| 郑麦 7698  | (0.87±0.01)abc    | (0.82±0.02)abc   | (55.62±0.91)cdefg | (54.38±1.04)cdefgh  |
| 丰德存麦 1 号 | (0.80±0.03)defghi | (0.65±0.09)f     | (48.72±1.41)hi    | (46.78±1.63)l       |
| 兰考矮早 8   | (0.75±0.04)i      | (0.70±0.08)def   | (51.54±1.39)gh    | (50.16±0.87)jk      |
| 冀麦 47    | (0.83±0.02)bcdefg | (0.79±0.02)abcde | (52.66±0.80)fgh   | (55.12±1.37)cdef    |
| 矮丰 3 号   | (0.82±0.03)cdefgh | (0.75±0.03)bcdef | (54.52±0.93)efg   | (51.14±0.47)ghijk   |
| 旱选 10 号  | (0.76±0.03)hi     | (0.68±0.04)ef    | (47.16±1.66)j     | (40.86±1.14)m       |

| 品种       | 丙二醛含量/( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                  | 可溶性蛋白含量/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                   |
|----------|---|------------------|---|-------------------|
|          | CK  | HT               | CK  | HT                |
| 西农 979   | (3.4±0.2)ab                                 | (5.4±0.60)a      | (5.9±0.3)hijk                               | (6.6±0.6)jkl      |
| 北京 8 号   | (2.5±0.3)bcd                                | (4.2±0.40)b      | (5.7±0.7)hijk                               | (7.3±0.6)fghijk   |
| 新麦 11 号  | (3.1±0.5)abc                                | (4.0±0.50)bc     | (5.5±0.4)ijk                                | (8.5±0.4)cdefghi  |
| 矮抗 58    | (3.5±0.3)ab                                 | (2.5±0.20)ghi    | (6.2±0.3)ghijk                              | (6.9±0.7)hijk     |
| 周麦 22    | (3.2±0.2)abc                                | (2.3±0.10)i      | (8.3±0.2)bcdef                              | (9.1±1.8)bcdefg   |
| 周麦 27    | (2.5±0.4)abcd                               | (2.4±0.10)hi     | (7.3±0.7)efgh                               | (7.2±0.5)ghijk    |
| 豫农 416   | (3.1±0.2)abc                                | (3.8±0.40)bc     | (5.2±0.6)jkl                                | (6.7±0.5)ijkl     |
| 周麦 16    | (3.5±0.8)ab                                 | (2.6±0.10)fghi   | (7.8±0.5)cdefg                              | (7.7±0.2)efghij   |
| 新麦 26    | (2.3±0.3)cd                                 | (3.3±0.20)bcdefg | (8.8±0.4)abcde                              | (8.7±0.7)cdffgh   |
| 洛旱 2 号   | (1.7±0.1)d                                  | (3.6±0.20)bcde   | (7.1±0.3)efghi                              | (9.9±0.9)abc      |
| 新麦 18    | (3.2±0.4)abc                                | (3.3±0.70)cdefgh | (6.7±0.6)fghij                              | (5.6±0.3)kl       |
| 洛旱 6 号   | (3.1±0.6)abc                                | (2.9±0.40)defghi | (8.9±0.9)abcde                              | (9.4±0.6)abcde    |
| 周麦 19    | (3.5±0.1)ab                                 | (3.3±0.10)bcdefg | (10.6±0.7)a                                 | (11.0±0.4)a       |
| 郑麦 366   | (3.5±0.8)ab                                 | (2.9±0.10)defghi | (4.7±0.4)k                                  | (4.9±0.2)l        |
| 洛麦 23    | (1.7±0.1)d                                  | (2.3±0.30)i      | (7.0±1.1)fghij                              | (9.5±0.7)abcde    |
| 豫麦 66 号  | (1.8±0.4)d                                  | (3.9±0.10)bc     | (7.4±0.6)defgh                              | (8.5±0.9)cdefghi  |
| 德选 1 号   | (3.5±0.3)ab                                 | (3.9±0.20)bc     | (7.5±0.3)defgh                              | (9.3±0.6)abcde    |
| 周麦 18    | (2.3±0.3)cd                                 | (3.7±0.05)bcd    | (6.7±0.5)fghij                              | (7.3±0.5)fijk     |
| 西农 2208  | (1.7±0.1)d                                  | (3.4±0.03)bcdef  | (7.9±0.9)cdefg                              | (9.2±0.9)absdef   |
| 济麦 22    | (3.1±0.2)abc                                | (3.6±0.02)bcde   | (8.5±0.2)bcdef                              | (9.5±0.2)abcde    |
| 郑麦 7698  | (3.1±0.2)abc                                | (3.3±0.03)bcdefg | (7.2±0.7)efghi                              | (9.8±0.3)abcd     |
| 丰德存麦 1 号 | (2.6±0.7)abcd                               | (3.5±0.03)bcdef  | (9.6±0.2)abc                                | (8.6±0.7)cdefghi  |
| 兰考矮早 8   | (2.3±0.3)cd                                 | (3.6±0.01)bcde   | (6.9±0.6)fghij                              | (7.9±0.7)defghij  |
| 冀麦 47    | (1.7±0.2)d                                  | (2.3±0.01)i      | (7.2±0.7)efghi                              | (9.7±0.1)abcd     |
| 矮丰 3 号   | (1.6±0.1)d                                  | (2.8±0.03)efghi  | (9.8±0.3)ab                                 | (10.7±0.3)ab      |
| 旱选 10 号  | (3.6±0.1)a                                  | (4.1±0.01)bc     | (9.2±1.1)abcd                               | (8.5±0.8)cdefghij |

同列数据不同字母表示品种间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

由表 5 可知, 高温条件下不同品种的抗氧化酶活性都有所变化。过氧化物酶(POD)活性变化幅度较小的有矮抗 58、豫农 416、周麦 18、西农 2208、郑麦 7698、旱选 10 号; 超氧化物歧化酶(SOD)活性变化幅度较小的为北京 8 号、周麦 22、新麦 26、洛早 6 号、德选 1 号、周麦 18、西农 2208、旱选

10 号; 过氧化氢酶(CAT)活性变化幅度较小的有矮抗 58、洛早 6 号、洛麦 23、德选 1 号、西农 2208、济麦 22、兰考矮早 8、矮丰 3 号、旱选 10 号。综上所述, 高温胁迫对西农 2208、旱选 10 号抗氧化酶活性影响较小。

表 5 灌浆期不同小麦品种的抗氧化酶活性

**Table 5 Antioxidant enzyme activity of different wheat cultivars at grain filling stage** U/g

| 品种       | POD 活性              |                   | SOD 活性             |                  | CAT 活性                |                     |
|----------|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
|          | CK                  | HT                | CK                 | HT               | CK                    | HT                  |
| 西农 979   | (24.07±0.86)cdefg   | (18.64±2.00)cdef  | (310.57±2.71)abcd  | (353.15±9.75)ab  | (2035.56±73.27)cdef   | (1886.67±76.98)d    |
| 北京 8 号   | (21.32±2.61)cdefgh  | (11.42±2.42)f     | (320.23±16.14)abc  | (332.51±25.01)ab | (2253.33±69.39)abcd   | (2088.89±98.31)bcd  |
| 新麦 11 号  | (33.22±1.96)b       | (20.82±4.62)bcdef | (367.24±3.12)a     | (322.19±29.55)ab | (1851.11±72.86)ef     | (2564.44±41.02)ab   |
| 矮抗 58    | (19.07±1.49)defghij | (18.78±1.57)cdef  | (262.74±27.12)abcd | (298.12±15.85)ab | (2042.22±75.15)cdef   | (1940.00±83.86)cd   |
| 周麦 22    | (27.94±2.31)bc      | (21.39±6.55)bcde  | (274.20±34.75)abcd | (260.93±63.47)b  | (2273.33±73.43)abcd   | (1886.67±30.00)d    |
| 周麦 27    | (21.47±2.08)cdefgh  | (24.37±1.17)bc    | (263.23±52.76)abcd | (347.42±12.34)ab | (2324.44±72.04)abcd   | (2566.67±66.78)ab   |
| 豫农 416   | (15.22±3.28)hij     | (15.45±2.13)cdef  | (234.56±66.16)cd   | (320.72±36.25)ab | (2311.11±59.92)abcd   | (2571.11±67.81)ab   |
| 周麦 16    | (21.03±3.45)cdefghi | (23.31±0.51)bcde  | (293.20±50.31)abcd | (336.94±11.43)ab | (2337.78±50.23)abcd   | (2624.45±102.87)ab  |
| 新麦 26    | (22.15±7.49)cdefgh  | (23.35±5.71)bcde  | (360.20±7.34)ab    | (336.28±42.12)ab | (2326.67±108.39)abcd  | (2773.33±50.92)a    |
| 洛早 2 号   | (33.63±2.24)ab      | (29.12±7.68)ab    | (192.14±3.21)d     | (302.05±62.08)ab | (2400.00±42.86)abc    | (2768.67±16.78)a    |
| 新麦 18    | (23.87±1.09)cdefg   | (14.00±3.34)def   | (326.45±2.91)abc   | (270.11±87.07)ab | (1793.33±90.01)f      | (2628.89±46.40)ab   |
| 洛早 6 号   | (21.45±2.56)cdefgh  | (20.42±2.34)bcdef | (348.08±9.49)abc   | (359.21±15.28)ab | (2335.56±43.52)abcd   | (2241.67±62.67)abcd |
| 周麦 19    | (26.06±2.56)bcde    | (23.32±1.58)bcde  | (242.75±34.58)bcd  | (336.28±11.64)ab | (2413.33±102.05)abc   | (2748.89±34.71)a    |
| 郑麦 366   | (12.94±1.73)ij      | (18.58±0.89)cdef  | (310.07±31.77)abcd | (344.96±12.52)ab | (2015.56±106.97)def   | (2366.67±64.06)abcd |
| 洛麦 23    | (17.56±3.92)fghij   | (29.05±0.76)ab    | (278.95±44.88)abcd | (368.39±6.35)a   | (2257.78±100.69)abcd  | (2311.11±60.85)abcd |
| 豫麦 66 号  | (24.96±3.70)cdef    | (22.66±2.84)bcde  | (288.94±33.09)abcd | (359.87±8.31)ab  | (2097.78±143.52)bcdef | (2257.78±22.83)abcd |
| 德选 1 号   | (18.81±3.36)defghij | (20.05±4.66)bcdef | (333.66±16.64)abc  | (336.28±25.92)ab | (2480.00±23.09)ab     | (2437.78±78.24)abcd |
| 周麦 18    | (16.29±3.32)ghij    | (16.90±0.65)cdef  | (294.35±39.57)abcd | (288.45±16.84)ab | (2504.44±23.52)a      | (2322.22±48.30)abcd |
| 西农 2208  | (19.05±2.79)defghij | (19.20±2.17)cdef  | (318.10±36.49)abc  | (325.47±8.19)ab  | (2562.22±81.86)a      | (2504.44±90.14)abc  |
| 济麦 22    | (26.80±0.77)bcd     | (17.05±2.55)cdef  | (357.41±4.54)ab    | (318.10±45.78)ab | (2548.89±32.05)a      | (2575.56±102.51)ab  |
| 郑麦 7698  | (12.53±3.27)j       | (11.13±1.92)f     | (281.41±76.07)abcd | (325.47±32.76)ab | (2297.78±96.86)abcd   | (2500.00±17.64)abc  |
| 丰德存麦 1 号 | (18.46±2.82)efj     | (23.50±1.89)bcd   | (305.49±35.98)abcd | (332.84±41.62)ab | (1353.33±45.92)g      | (2226.66±45.21)abcd |
| 兰考矮早 8   | (18.85±1.70)defghij | (24.55±1.00)bc    | (306.31±20.22)abcd | (335.30±14.75)ab | (2542.22±16.02)a      | (2497.78±64.56)abc  |
| 冀麦 47    | (19.33±1.03)defghij | (13.72±1.87)ef    | (324.16±16.37)abc  | (319.57±39.68)ab | (2215.56±77.87)abcde  | (2471.11±81.32)abc  |
| 矮丰 3 号   | (41.43±1.05)a       | (36.65±1.66)a     | (342.51±9.94)abc   | (323.51±35.54)ab | (2222.22±35.40)abcde  | (2142.22±59.09)bcd  |

同列数据不同字母表示品种间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

2.2 各项指标的抗高温系数的相关分析

对测定的 11 项指标进行相关性分析, 从分析结果(表 6)可知, Pn 与 Gs、Tr 呈极显著正相关, 与 MDA 呈极显著负相关; Gs 与 Tr 呈极显著正相关,

与 MDA 呈显著负相关; Ci 与 Tr 呈显著正相关; Tr 与 MDA 呈极显著负相关。可见, 各指标显示的抗高温信息存在折叠。

表 6 各单项指标的相关系数

**Table 6 Correlation coefficient of every single index**

| 指标     | 相关系数    |         |        |       |       |        |        |        |        |        |
|--------|---------|---------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | Pn      | Gs      | Ci     | Tr    | L     | SPAD 值 | MDA 含量 | PRO 含量 | CAT 活性 | SOD 活性 |
| Gs     | 0.732** |         |        |       |       |        |        |        |        |        |
| Ci     | 0.314   | 0.245   |        |       |       |        |        |        |        |        |
| Tr     | 0.804** | 0.862** | 0.462* |       |       |        |        |        |        |        |
| L      | 0.051   | 0.095   | -0.306 | 0.020 |       |        |        |        |        |        |
| SPAD 值 | 0.316   | 0.303   | -0.104 | 0.273 | 0.269 |        |        |        |        |        |

表 6(续)

| 指标     | 相关系数     |         |        |          |        |        |        |        |        |        |
|--------|----------|---------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | Pn       | Gs      | Ci     | Tr       | L      | SPAD 值 | MDA 含量 | PRO 含量 | CAT 活性 | SOD 活性 |
| MDA 含量 | -0.515** | -0.425* | -0.123 | -0.507** | -0.316 | -0.127 |        |        |        |        |
| PRO 含量 | -0.032   | -0.107  | -0.088 | -0.194   | 0.138  | 0.296  | 0.316  |        |        |        |
| CAT 活性 | 0.024    | -0.041  | 0.228  | 0.089    | -0.286 | 0.154  | -0.049 | -0.163 |        |        |
| SOD 活性 | -0.063   | 0.150   | -0.051 | 0.048    | 0.072  | 0.010  | 0.155  | 0.229  | -0.026 |        |
| POD 活性 | 0.042    | 0.134   | 0.262  | 0.240    | 0.249  | 0.136  | -0.097 | -0.148 | 0.040  | 0.371  |

“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别示相关性显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。

### 2.3 主成分分析及其聚类分析

对 11 个单项指标的抗逆系数进行主成分分析,

结果(表 7)表明, 11 个单项指标可转换为 5 个新的相互独立的综合指标, 分别定义为第 1 至第 5 主成

表 7 单项指标抗逆系数的主成分分析结果

Table 7 Principle component analysis on different heat-stress resistance indexes

| 指标     | 单项指标系数 |        |        |        |        | 指标      | 单项指标系数 |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | CI1    | CI2    | CI3    | CI4    | CI5    |         | CI1    | CI2    | CI3    | CI4    | CI5    |
| Pn     | 0.474  | 0.007  | -0.127 | 0.205  | -0.139 | PRO 含量  | -0.112 | 0.408  | 0.167  | 0.559  | -0.155 |
| Gs     | 0.475  | 0.079  | 0.003  | 0.091  | -0.226 | CAT 活性  | 0.062  | -0.339 | 0.229  | 0.205  | 0.698  |
| Ci     | 0.244  | -0.386 | 0.337  | 0.055  | -0.123 | SOD 活性  | 0.016  | 0.292  | 0.602  | -0.101 | -0.194 |
| Tr     | 0.519  | -0.060 | 0.049  | 0.049  | -0.124 | POD 活性  | 0.163  | 0.153  | 0.518  | -0.470 | 0.207  |
| L      | 0.078  | 0.558  | -0.200 | -0.336 | 0.186  | 特征值     | 3.334  | 1.787  | 1.426  | 1.262  | 1.052  |
| SPAD 值 | 0.204  | 0.373  | 0.005  | 0.398  | 0.493  | 贡献率/%   | 30.311 | 16.246 | 12.966 | 11.473 | 9.595  |
| MDA 含量 | -0.360 | -0.007 | 0.342  | 0.294  | -0.172 | 累积贡献率/% | 30.311 | 46.557 | 59.523 | 70.996 | 80.561 |

分(CI1、CI2、CI3、CI4、CI5), 其贡献率分别为 30.311%、16.246%、12.966%、11.473%、9.595%, 累积贡献率达 80.561%。利用 5 个综合指标对供试的 26 个小麦品种进行抗高温型综合评定。

根据公式(3)分别计算 5 个综合指标对应的隶属函数值。各隶属函数值分别乘以 5 个主成分的权重值并进行加权, 可得出 26 个小麦品种的抗高温综合指标的评价结果(表 8)。依据  $D$  值的大小, 采用聚类分析法对 26 个小麦品种进行分类, 根据最大

距离法可将 26 个小麦品种分成 3 类。高抗高温型品种有 4 个, 分别是豫农 416、郑麦 366、兰考矮早 8、冀麦 47; 中抗高温型品种有 10 个, 分别是洛麦 23、新麦 11 号、德选 1 号、周麦 19、周麦 27、郑麦 7698、矮抗 58、周麦 16、济麦 22、丰德存麦 1 号; 低抗高温型品种有 12 个, 分别是西农 979、洛早 2 号、豫麦 66 号、西农 2208、周麦 18、北京 8 号、周麦 22、新麦 26、新麦 18、洛早 6 号、矮丰 3 号、早选 10 号。

表 8 不同小麦品种抗高温能力的综合评价结果

Table 8 Comprehensive evaluation results of heat-stress resistance of different wheat cultivars

| 品种      | 综合指标值  |        |        |        |        | 隶属函数值 |       |       |       |       | 综合评价值 ( $D$ ) |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|         | CI1    | CI2    | CI3    | CI4    | CI5    | U1    | U2    | U3    | U4    | U5    |               |
| 西农 979  | -1.804 | -0.680 | -0.054 | -0.045 | -1.264 | 0.226 | 0.471 | 0.425 | 0.465 | 0.173 | 0.335         |
| 北京 8 号  | -2.238 | -0.534 | -0.781 | 0.903  | -1.509 | 0.153 | 0.494 | 0.268 | 0.669 | 0.112 | 0.309         |
| 新麦 11 号 | -0.983 | 0.093  | -0.686 | 2.446  | 1.353  | 0.365 | 0.596 | 0.288 | 1.000 | 0.830 | 0.545         |
| 矮抗 58   | 1.704  | 1.504  | -0.976 | -0.444 | 0.316  | 0.820 | 0.824 | 0.225 | 0.379 | 0.570 | 0.633         |
| 周麦 22   | 0.017  | -0.384 | -1.793 | -0.472 | -1.108 | 0.534 | 0.518 | 0.049 | 0.373 | 0.212 | 0.392         |
| 周麦 27   | 0.811  | 0.481  | 0.451  | -0.815 | 0.639  | 0.669 | 0.659 | 0.534 | 0.300 | 0.651 | 0.590         |
| 豫农 416  | 2.394  | 0.374  | 1.511  | 0.477  | -1.179 | 0.937 | 0.641 | 0.763 | 0.577 | 0.194 | 0.710         |
| 周麦 16   | 2.021  | 0.485  | -0.315 | -1.380 | 0.405  | 0.873 | 0.659 | 0.368 | 0.178 | 0.592 | 0.617         |
| 新麦 26   | -2.503 | -0.622 | -0.318 | -1.361 | 1.302  | 0.108 | 0.480 | 0.368 | 0.182 | 0.817 | 0.320         |
| 洛早 2 号  | -3.142 | 0.287  | 2.609  | 0.974  | -0.789 | 0.000 | 0.627 | 1.000 | 0.684 | 0.292 | 0.420         |
| 新麦 18   | 0.458  | -2.276 | -2.019 | 0.311  | 1.502  | 0.609 | 0.212 | 0.000 | 0.542 | 0.867 | 0.452         |



表 8(续)

| 品种       | 综合指标值  |        |        |        |        | 隶属函数值 |       |       |       |       | 综合评价值 (D) |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|          | C11    | C12    | C13    | C14    | C15    | U1    | U2    | U3    | U4    | U5    |           |
| 洛早 6 号   | -2.266 | 1.134  | -1.526 | -2.210 | 0.563  | 0.148 | 0.764 | 0.107 | 0.000 | 0.632 | 0.302     |
| 周麦 19    | 1.831  | 0.921  | -0.092 | -0.407 | -0.478 | 0.841 | 0.730 | 0.416 | 0.387 | 0.370 | 0.630     |
| 郑麦 366   | 2.465  | 0.107  | 0.968  | -1.038 | 1.159  | 0.949 | 0.598 | 0.645 | 0.252 | 0.781 | 0.710     |
| 洛麦 23    | -0.315 | 2.590  | 1.721  | -1.365 | 0.427  | 0.478 | 1.000 | 0.808 | 0.182 | 0.598 | 0.609     |
| 豫麦 66 号  | -2.642 | 0.909  | 0.857  | 0.452  | 0.504  | 0.085 | 0.728 | 0.621 | 0.572 | 0.617 | 0.433     |
| 德选 1 号   | 0.898  | 0.323  | -0.148 | 1.088  | 0.014  | 0.684 | 0.633 | 0.404 | 0.708 | 0.494 | 0.609     |
| 周麦 18    | -0.686 | -0.626 | -0.137 | -0.483 | -0.883 | 0.416 | 0.479 | 0.407 | 0.371 | 0.269 | 0.403     |
| 西农 2208  | -1.909 | 0.836  | 0.120  | 0.034  | 0.235  | 0.209 | 0.716 | 0.462 | 0.482 | 0.549 | 0.431     |
| 济麦 22    | 1.350  | 0.072  | -1.855 | 0.762  | -0.279 | 0.760 | 0.592 | 0.035 | 0.638 | 0.420 | 0.552     |
| 郑麦 7698  | 0.589  | 0.570  | 0.193  | 1.003  | -0.149 | 0.631 | 0.673 | 0.478 | 0.690 | 0.453 | 0.602     |
| 丰德存麦 1 号 | 0.596  | -3.586 | 2.263  | 0.171  | 2.031  | 0.632 | 0.000 | 0.925 | 0.512 | 1.000 | 0.578     |
| 兰考矮早 8   | 2.769  | 0.422  | 0.708  | 0.341  | -1.001 | 1.000 | 0.649 | 0.589 | 0.548 | 0.239 | 0.708     |
| 冀麦 47    | 1.408  | 1.081  | -0.578 | 2.390  | 0.585  | 0.770 | 0.756 | 0.311 | 0.988 | 0.637 | 0.709     |
| 矮丰 3 号   | -2.040 | -0.363 | -0.498 | -0.099 | -0.443 | 0.186 | 0.522 | 0.329 | 0.453 | 0.379 | 0.338     |
| 早选 10 号  | 1.215  | -3.114 | 0.377  | -1.232 | -1.954 | 0.737 | 0.076 | 0.518 | 0.210 | 0.000 | 0.406     |

2.4 高温胁迫对小麦千粒质量及产量的影响

矮抗 58、郑麦 366、兰考矮早 8、周麦 22、豫农 416、新麦 26、丰德存麦 1 号、矮丰 3 号、周麦 27、洛

从表 9 可以看出,26 个供试品种中,郑麦 7698、

表 9 不同小麦品种的产量及热感指数

Table 9 Yield and thermal indexes of different wheat cultivars

| 品种       | 千粒质量/g         |                  | 产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |                 | S <sub>T</sub> | S <sub>Y</sub> | 分类  | AC <sub>T</sub> /% | AI <sub>T</sub> /% | 抗性等级 |
|----------|----------------|------------------|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|-----|--------------------|--------------------|------|
|          | CK             | HT               | CK                       | HT              |                |                |     |                    |                    |      |
| 洛早 2 号   | (39.92±0.93)f  | (31.12±0.00)i**  | (6.32±0.01)ef            | (4.77±0.07)ef** | 4.79           | 2.28           | S/S | 78.0               | 56.9               | S    |
| 西农 979   | (46.74±0.34)bc | (41.53±0.19)e**  | (6.45±0.11)e             | (5.50±0.20)e*   | 2.42           | 1.36           | S/S | 88.9               | 86.5               | LR   |
| 北京 8 号   | (42.92±1.47)de | (40.17±1.00)ef   | (6.04±0.06)g             | (4.93±0.03)ef** | 1.39           | 1.71           | S/S | 93.6               | 88.1               | LR   |
| 新麦 11 号  | (42.91±0.65)e  | (41.76±0.65)e    | (4.80±0.15)h             | (4.47±0.14)g**  | 0.58           | 0.63           | R/R | 97.3               | 95.2               | MR   |
| 周麦 19    | (40.64±0.29)ef | (40.13±0.53)ef   | (4.02±0.03)i             | (3.72±0.08)g*   | 0.27           | 0.69           | R/R | 98.8               | 92.9               | MR   |
| 豫麦 66 号  | (44.93±0.44)cd | (43.42±0.12)cd*  | (4.35±0.01)hi            | (3.28±0.08)g**  | 0.73           | 2.29           | R/S | 96.6               | 98.3               | MR   |
| 西农 2208  | (42.10±0.27)e  | (41.95±0.71)e    | (7.86±0.04)cd            | (6.74±0.09)d**  | 0.08           | 1.32           | R/S | 99.6               | 97.9               | MR   |
| 郑麦 7698  | (47.69±0.57)b  | (45.00±1.12)bc   | (4.75±0.08)h             | (4.97±0.06)ef   | 1.22           | -0.43          | S/R | 94.4               | 99.5               | MR   |
| 早选 10 号  | (43.80±0.47)de | (41.26±0.18)e**  | (2.38±0.06)k             | (2.12±0.04)i*   | 1.26           | 1.03           | S/S | 94.2               | 91.1               | MR   |
| 周麦 16    | (47.24±1.34)b  | (47.07±0.06)b    | (9.21±0.16)a             | (8.28±0.12)b*   | 0.08           | 0.94           | R/R | 99.6               | 109.9              | HR   |
| 矮抗 58    | (46.73±1.00)bc | (45.57±1.72)bc   | (5.45±0.05)g             | (5.50±0.21)e    | 0.54           | -0.08          | R/R | 97.5               | 104.2              | HR   |
| 郑麦 366   | (44.59±2.20)cd | (44.48±0.46)cd   | (5.58±0.15)g             | (5.30±0.29)e    | 0.05           | 0.46           | R/R | 99.8               | 104.0              | HR   |
| 兰考矮早 8   | (51.37±1.22)a  | (51.33±0.84)a    | (4.88±0.17)h             | (4.75±0.09)ef   | 0.02           | 0.24           | R/R | 99.9               | 120.2              | HR   |
| 洛早 6 号   | (47.80±0.23)b  | (41.62±0.40)e**  | (7.87±0.15)cd            | (5.73±0.52)e**  | 6.10           | 3.32           | S/S | 87.1               | 72.8               | LR   |
| 周麦 18    | (49.14±0.43)ab | (49.07±0.28)ab   | (9.65±0.30)a             | (7.83±0.14)bc** | 0.07           | 2.30           | R/S | 99.9               | 81.2               | LR   |
| 周麦 22    | (50.73±0.20)a  | (48.35±1.65)ab   | (6.78±0.30)e             | (6.46±0.17)d    | 2.21           | 0.58           | S/R | 95.3               | 95.3               | MR   |
| 豫农 416   | (49.37±0.70)ab | (47.91±1.15)ab   | (8.44±0.17)bc            | (8.24±0.37)b    | 1.40           | 0.29           | S/R | 97.0               | 97.6               | MR   |
| 新麦 26    | (41.15±0.62)ef | (43.88±1.06)cd   | (8.82±0.31)b             | (8.01±0.43)bc   | -3.12          | 1.12           | R/S | 106.6              | 90.9               | HR   |
| 新麦 18    | (40.50±0.87)ef | (36.39±1.14)gh*  | (6.62±0.04)e             | (6.22±0.20)de*  | 4.79           | 0.73           | S/R | 89.8               | 94.0               | MR   |
| 丰德存麦 1 号 | (47.81±0.61)b  | (44.72±1.80)bcd* | (6.66±0.13)e             | (6.25±0.39)de   | 3.05           | 0.76           | S/R | 93.5               | 93.8               | MR   |
| 矮丰 3 号   | (30.23±1.30)h  | (30.25±0.37)j    | (3.42±0.21)ij            | (3.01±0.43)gh   | -0.04          | 1.48           | R/S | 100.1              | 87.9               | MR   |
| 周麦 27    | (44.75±0.79)cd | (45.41±1.03)bc   | (8.16±0.33)bcd           | (7.84±0.34)bc   | -0.70          | 0.47           | R/R | 101.5              | 96.1               | HR   |
| 洛麦 23    | (38.70±0.43)fg | (38.92±0.08)fg   | (7.55±0.24)d             | (7.37±0.29)c    | -0.28          | 0.29           | R/R | 100.6              | 97.7               | HR   |
| 德选 1 号   | (42.27±0.79)e  | (43.29±0.47)cd   | (10.07±0.08)a            | (9.25±0.31)a*   | -1.13          | 0.99           | R/R | 102.4              | 91.9               | HR   |
| 济麦 22    | (50.57±0.05)a  | (49.38±0.72)ab   | (8.31±0.22)bc            | (8.32±0.48)b    | 1.11           | -0.01          | S/R | 97.7               | 100.1              | HR   |
| 冀麦 47    | (44.26±0.77)cd | (45.85±1.97)bc   | (8.62±0.25)b             | (8.16±0.96)b    | -1.70          | 0.65           | R/R | 103.6              | 94.7               | HR   |

R 示抗; S 示感; LR 示低抗; MR 示中抗; HR 示高抗; S<sub>Y</sub> 示产量热感指数; S<sub>T</sub> 示千粒质量热感指数; AC<sub>T</sub> 示千粒质量抗逆系数; AI<sub>T</sub> 示千粒质量抗逆指数。同列数据不同字母表示品种间的差异有统计学意义(P<0.05); “\*~\*\*\*”分别示同一品种不同处理的差异有统计学意义(P<0.05、P<0.01)。

麦 23、济麦 22、冀麦 47 在高温胁迫条件下产量变化幅度不明显,其中新麦 11 号、周麦 19、周麦 16、矮抗 58、郑麦 366、兰考矮早 8、周麦 27、洛麦 23、德选 1 号、冀麦 47 的千粒质量热感指数和产量热感指数均小于 1,说明其抗高温性较强。再结合千粒质量抗逆系数和抗逆指数进行综合判断,周麦 16、矮抗 58、郑麦 366、兰考矮早 8、济麦 22 的千粒质量抗逆系数大于 90%,千粒质量抗逆指数大于 100%;新麦 26、周麦 27、洛麦 23、德选 1 号、冀麦 47 的千粒质量抗逆系数大于 100%,千粒质量抗逆指数大于 90%。由此可知,周麦 16、矮抗 58、郑麦 366、兰考矮早 8、济麦 22、新麦 26、周麦 27、洛麦 23、德选 1 号、冀麦 47 属于高抗高温型品种。西农 979、北京 8 号、洛早 6 号、周麦 18 的千粒质量抗逆系数或千粒质量抗逆指数在 80%~90%之间,属于低抗高温型品种;洛早 2 号的千粒质量抗逆系数和千粒质量抗逆指数均小于 80%,属于高温敏感型品种;其余品种新麦 11、周麦 19、豫麦 66 号、西农 2208、郑麦 7698、早选 10 号、周麦 22、豫农 416、新麦 18、丰德存麦 1 号、矮丰 3 号属于中抗高温型小麦品种。

### 3 结论与讨论

在高温胁迫等逆境条件下,小麦会通过多种生理生化过程调节体内环境以适应高温条件,形成一定的抗高温机制。本研究中,综合各品种可溶性蛋白含量、光合指标、超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性等 11 个生理指标,结合主成分分析结果,将 11 个指标转换为 5 个新的相互独立的综合指标,根据这 5 个综合指标计算出的综合值  $D$  对供试小麦品种进行抗高温型综合评定:筛选出豫农 416、郑麦 366、兰考矮早 8、冀麦 47 为高抗高温型小麦品种;洛麦 23、新麦 11 号、德选 1 号、周麦 19、周麦 27、郑麦 7698、矮抗 58、周麦 16、济麦 22、丰德存麦 1 号等 10 个品种为中抗高温型;西农 979、洛早 2 号、豫麦 66 号、西农 2208、周麦 18、北京 8 号、周麦 22、新麦 26、新麦 18、洛早 6 号、矮丰 3 号、早选 10 号等 12 个品种为低抗高温型。这些生理指标的复杂反应是小麦耐高温机理的一部分,最终影响小麦籽粒质量和产量。陈冬梅等<sup>[23]</sup>提出济麦 22 为千粒质量高温敏感品种,而本研究

发现高温胁迫下济麦 22 抗高温性较强,这可能与作物的生长环境有关。

有研究<sup>[24-25]</sup>表明,外界环境对籽粒的发育具有重要作用,灌浆期高温天气会影响小麦籽粒质量。有研究结果<sup>[26-28]</sup>表明,灌浆期高温胁迫导致灌浆期时间缩短、籽粒质量下降。抗逆指数和抗逆系数可作为鉴定不同小麦品种抗逆性的指标。本研究同时利用千粒质量的抗逆系数和抗逆指数来评价小麦的抗高温性。将 26 个小麦品种划分为 4 类:周麦 16、矮抗 58、郑麦 366、兰考矮早 8、济麦 22、新麦 26、周麦 27、洛麦 23、德选 1 号、冀麦 47 属于高抗高温型小麦品种;新麦 11、周麦 19、豫麦 66 号、西农 2208、郑麦 7698、早选 10 号、周麦 22、豫农 416、新麦 18、丰德存麦 1 号、矮丰 3 号属于中抗高温型小麦品种;西农 979、北京 8 号、洛早 6 号、周麦 18 的千粒质量抗逆系数或千粒质量抗逆指数在 80%~90%之间,属于低抗高温型小麦品种;洛早 2 号的抗逆指数和抗逆系数均小于 80%,属于高温敏感型品种。

根据  $D$  值的分类结果与根据千粒质量的抗逆系数和抗逆指数的分类结果存在部分一致性。经 2 种方法综合分析,郑麦 366、兰考矮早 8、冀麦 47 属于高抗高温型小麦品种;新麦 11、周麦 19、郑麦 7698、丰德存麦 1 号属于中抗高温型小麦品种;西农 979、洛早 6 号、北京 8 号属于低抗高温型小麦品种。

### 参考文献:

- [1] 卢红芳,石向军,胡阳阳,等. 灌浆期高温与干旱对小麦籽粒淀粉合成相关酶基因表达的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(5): 517-525.
- [2] 仪小梅,孙爱清,韩晓玉,等. 黄淮麦区小麦主推品种(系)干热风抗性鉴定[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2): 274-284.
- [3] 杨程,李向东,杜思梦,等. 高温对冬小麦旗叶光合机构的伤害机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 399-408.
- [4] 石慧清,龚月桦,张东武. 花后高温对持绿型小麦叶片衰老及籽粒淀粉合成相关酶的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 769-778.
- [5] 陈冬梅,马永安,苏玉环,等. 不同落黄型小麦品种光合器官衰老及产量对花后高温的响应[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(12): 1596-1603.
- [6] 卢红芳,王晨阳,郭天财,等. 灌浆前期高温和干旱

- 胁迫对小麦籽粒蛋白质含量和氮代谢关键酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3612–3619.
- [7] 李春艳, 付凯勇, 张润琪, 等. 灌浆期高温对冬小麦淀粉粒发育的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(10): 1395–1402.
- [8] WANG Z B, LI W H, QI J C, et al. Starch accumulation, activities of key enzyme and gene expression in starch synthesis of wheat endosperm with different starch contents[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(3): 419–429.
- [9] 王晓宇, 张艳娥, 张林生. 4 种非生物胁迫下小麦幼苗表型及可溶性蛋白含量的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 113–117.
- [10] 姜丽娜, 杨娜娜, 方保停, 等. 不同小麦品种对灌浆期高温的响应差异[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1365–1373.
- [11] 李同花, 王笑, 蔡剑, 等. 不同小麦品种对干旱锻炼响应的综合评价[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(1): 65–73.
- [12] 李敏, 苏慧, 李阳阳, 等. 黄淮海麦区小麦耐热性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 中国农业科学, 2021, 54(16): 3381–3393.
- [13] 耿晓丽, 张月伶, 臧新山, 等. 北方冬麦区与黄淮北片优良小麦品种(系)耐热性评价[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 172–181.
- [14] 孙彩玲, 曲辉英, 吕建华, 等. 基于主成分和聚类分析的山东省区试小麦品种(系)品质的综合评价[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 545–551.
- [15] REHMAN A, HABIB I, AHMAD N, et al. Screening wheat germplasm for heat tolerance at terminal growth stage[J]. *Plant Omics Journal*, 2009, 2(1): 9–19.
- [16] 李永庚, 于振文, 张秀杰, 等. 小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 361–366.
- [17] 李素, 姜鸿明, 宫德衬, 等. 48 份冬小麦主要田间农艺性状的主成分分析及抗旱性综合评价[J]. 山东农业科学, 2014, 46(7): 25–30.
- [18] 傅晓艺, 何明琦, 史占良, 等. 灌浆期高温胁迫对小麦灌浆特性和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 867–872.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版社, 2006.
- [20] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 259–261.
- [21] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4264–4272.
- [22] 韩利明, 张勇, 彭惠茹, 等. 从产量和品质性状的变化分析北方冬麦区小麦品种抗热性[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1538–1546.
- [23] 陈冬梅, 马永安, 刘保华, 等. 小麦耐热种质资源的鉴定与筛选[J]. 河北农业科学, 2017, 21(4): 64–69.
- [24] DEGEN G E, ORR D J, CARMO-SILVA E. Heat-induced changes in the abundance of wheat Rubisco activase isoforms[J]. *The New Phytologist*, 2021, 229(3): 1298–1311.
- [25] 胡吉帮, 王晨阳, 郭天财, 等. 灌浆期高温和干旱对小麦灌浆特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(6): 597–601.
- [26] CORREIA P M P, DA SILVA A B, ROITSCH T, et al. Photoprotection and optimization of sucrose usage contribute to faster recovery of photosynthesis after water deficit at high temperatures in wheat[J]. *Physiologia Plantarum*, 2021, 172(2): 615–628.
- [27] 苗永杰, 阎俊, 赵德辉, 等. 黄淮海区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系[J]. 作物学报, 2018, 44(2): 260–267.
- [28] 樊永惠, 李宇星, 马亮亮, 等. 灌浆期高温胁迫下外源水杨酸对小麦旗叶抗氧化生理特性的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1878–1886.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 柳 正