

# 三个小麦新品种萌发期和幼苗期抗旱性的综合评价

张龙龙, 杨明明, 董 剑, 赵万春, 高 翔, 陈冬阳

(西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 为了鉴定西农 538、西农 556 和西农 558 三个小麦新品种的抗旱特性, 以抗旱性不同的三个生产上大面积推广的小麦品种晋麦 47、小偃 22 和西农 979 为对照, 通过在不同梯度的渗透胁迫(5%, 10%, 15%, 20% PEG-6000)处理下, 测定这 6 个品种在萌发期和幼苗期的发芽率、发芽势、胚芽鞘长、超氧化物歧化酶活性(SOD)、过氧化物酶(CAT)等指标, 运用相关分析、主成分分析、模拟隶属函数等方法对这 6 个品种的抗旱性进行综合评价。结果表明: (1) 在不同梯度的渗透胁迫处理下, 各单项指标对不同品种抗旱性的影响不同, 各指标间存在不同程度的相关性。(2) 通过主成分分析, 5% 和 10% PEG 胁迫下将 12 个单项指标转化为 4 个相互独立的综合指标, 15% 和 20% PEG 胁迫下将 12 个单项指标转化为 3 个相互独立的综合指标, 4 种胁迫梯度下其累计贡献率依次达到了 92.61%、92.96%、88.74% 和 93.12%。(3) 通过抗旱性综合评价值(*D* 值), 将这 6 个小麦品种分为三类: 西农 538 与对照品种晋麦 47 为强抗旱型; 西农 558 与对照品种小偃 22 为中等抗旱型; 西农 556 与对照品种西农 979 为弱抗旱型。

**关键词:** 小麦; 萌发期; 幼苗期; PEG 胁迫; 抗旱性

**中图分类号:** S512.1; S322.4 **文献标志码:** A

## Comprehensive evaluation of drought resistance of three new wheat cultivars at germination and seedling stage

ZHANG Long-long, YANG Ming-ming, DONG Jian, ZHAO Wan-chun, GAO Xiang, CHEN Dong-yang

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to identify the drought resistance of three new wheat cultivars Xinong 538, Xinong 556 and Xinong 558, three wheat cultivars Jinmai 47, Xiaoyan 22 and Xinong 979 with different drought resistance and large area of promotion were taken as control. The experiment was conducted under four PEG-6000 treatments (5%, 10%, 15% and 20%) for six wheat cultivars. 12 indices (germination rate, germination potential, coleoptile length, SOD, CAT, etc.) was investigated during germination and seedling stage. The comprehensive evaluation for wheat drought resistance was conducted by correlation analysis, principal component analysis and subordinate function analysis. The results indicated that there existed different degree of correlation among these indices and these indices had different effects on the drought resistance of the varieties. By principal component analysis, 12 indices was transformed to three (under 15% and 20% PEG-6000) or four (under 5% and 10% PEG-6000) independent and synthesized indices, and the accumulative contribution rate were 92.61%, 92.96%, 88.74% and 93.12% for stress treatments of 5%, 10%, 15% and 20%, respectively. According to the synthetic evaluation value (*D*), six wheat cultivars were divided into three groups, in which “Xinong 538” and “Jinmai 47” belonged to the high drought resistance group, “Xinong 558” and “Xiaoyan 22” belonged to the medium drought resistance group, and “Xinong 556” and “Xinong 979” belonged to the low drought resistance group.

**Keywords:** wheat; germination stage; seedling stage; PEG stress; drought resistance

小麦是我国三大主要粮食作物之一, 在我国粮食生产、粮食安全及农业的可持续发展中发挥着重要作用。随着全球气候骤变, 旱灾发生的频率和范围也在扩大, 据统计, 世界性干旱导致的减产可超过其它因素所造成的减产的总和<sup>[1-2]</sup>。近 40 年来, 中国因干旱缺水而少产粮食近 1 亿 t<sup>[3]</sup>。干旱已成为制约我国小麦生产的重要因素<sup>[4-8]</sup>。因此, 加强对小麦品种的鉴定、筛选来培育抗旱性小麦, 对保障我

收稿日期: 2016-01-19  
基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2011AA100501); 国家现代农业产业技术体系研究项目(CARS-3-2-47)  
作者简介: 张龙龙(1990—), 男, 甘肃合水人, 硕士, 主要从事小麦抗旱遗传育种。E-mail: zllt2013@163.com  
通信作者: 高翔(1960—), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师, 主要从事小麦遗传育种原理与方法及小麦新品种选育。E-mail: gx@nwsuaf.edu.cn

国粮食安全及农业可持续发展有着重要意义。

近年来,国内外学者就小麦抗旱性的鉴定评价进行了广泛的研究,提出了一系列与抗旱性有关的形态、生理与生化等方面的鉴定方法与指标<sup>[9-13]</sup>。但是由于大多数指标的测定工作量较大、周期长而且需要借助一些昂贵的仪器,成本较高<sup>[14]</sup>。而小麦萌发期和幼苗期形态指标易于调查和测定,鉴定周期短,在进行小麦品种抗旱鉴定方面具有一定的优势。常用的渗透调节物质主要有蔗糖、甘露醇、聚乙二醇 6000 (PEG - 6000) 等<sup>[15-18]</sup>, 其中,PEG - 6000 溶液模拟干旱胁迫具有操作简便、稳定性强、重复性好等优点而被人们广泛使用<sup>[19-23]</sup>。Blum<sup>[24]</sup>和景蕊莲<sup>[25]</sup>等研究认为,PEG - 6000 适合对小麦萌发期及幼苗期抗旱性鉴定筛选。

本研究以西农 538、西农 556 和西农 558 为材料,以晋麦 47、小偃 22 和西农 979 为对照,通过 PEG 模拟干旱胁迫,分析干旱胁迫对不同小麦品种萌发期及幼苗期的影响,采用抗旱指数和隶属函数相结合的方法,综合分析供试材料萌发期和幼苗期的抗旱性,旨在为小麦抗旱育种提供亲本材料,同时为小麦品种的早期抗旱性鉴定提供更多理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试品种西农 538、西农 556 和西农 558 是由西北农林科技大学农学院最新选育的品种,具有高产、优质、适应性广等特点。对照品种晋麦 47、小偃 22 和西农 979 都是生产上大面积推广种植的品种,且抗旱能力具有典型的代表性<sup>[26-27]</sup>。6 个品种均由西北农林科技大学农学院品质改良实验室提供。

### 1.2 试验方法

1.2.1 各品种萌发期指标测定 将待试各品种选取大小一致、均匀度好、无破损、籽粒饱满度较好的种子 1 500 粒,置于 40℃ 的烘箱中烘 8 h 后取出,经 0.1% KMnO<sub>4</sub> 消毒 10 min 后,用蒸馏水冲洗干净,分为 15 份,每份 100 粒,单层滤纸做发芽床,置于培养皿中。每个培养皿加蒸馏水 15 ml,光照培养 24 h 左右至种子萌动,取出种子用吸水纸吸干表面水分。然后设置 5 个不同梯度 (0, 5%, 10%, 15%, 20% PEG - 6000), 3 次重复。0 梯度 PEG - 6000 直接用蒸馏水,作为对照,各浓度溶液分别取 15 ml 置于 20℃ 条件下的人工气候箱中。3 d 和 7 d 后统计种子发芽数 (以芽长超过种子 1/2 为发芽标准), 第 7 天测定胚芽鞘长。

$$\text{发芽率} = \text{发芽总数} / \text{供试种子数} \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = \text{第三天的发芽种子数} / \text{供试种子数} \times 100\%$$

1.2.2 各品种幼苗期指标测定 在人工气候箱中培养小麦,待小麦长至两叶一心期时开始进行胁迫处理。处理加不同梯度 (5%, 10%, 15%, 20%) 的 PEG - 6000 胁迫营养液,对照继续加营养液培养,胁迫处理 72 h 后,随机抽取植株进行抗旱指标的测定; 每个指标设对照和处理,各三次重复,测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性,过氧化物酶活性 (POD), 过氧化氢酶 (CAT) 活性,丙二醛含量 (MDA), 脯氨酸含量 (Pro), 可溶性蛋白含量,叶绿素含量,细胞质膜相对透性,相对含水量等指标。

鉴定指标与测定方法<sup>[28-29]</sup>: 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑 (NBT) 法测定; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用过氧化氢法测定; 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定; 脯氨酸 (Pro) 含量采用酸性茚三酮显色法测定; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G - 250 比色法测定; 叶绿素含量采用 Amon 法测定; 细胞质膜相对透性用相对电导率表示,相对电导率采用电导仪 (DDS - 307) 测定; 相对含水量采用烘干称重法。以上每个指标每个处理测定 3 次,取平均值。

### 1.3 数据分析

用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 对数据进行整理和统计分析。采用相关分析、主成分分析、隶属函数分析和标准差系数赋予权重法进行抗旱性综合评价。即通过主成分分析将所测 12 项单项指标的抗旱指数转化成几个个数较少且相互独立的综合指标,求出各供试品种的综合指标对应的隶属函数值,然后进行加权,最后得到各品种抗旱性的综合评价值。

抗旱指数计算公式为<sup>[30]</sup>:

$$\text{抗旱指数} = \text{抗旱系数} \times \text{胁迫测定值} / \text{所有品种胁迫平均值} \quad (1)$$

$$\text{抗旱系数} = \text{胁迫测定值} / \text{对照测定值} \quad (2)$$

各综合指标的隶属函数值  $U(X_j)$  的计算公式为<sup>[31-32]</sup>:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中,  $X_j$  表示第  $j$  个综合指标,  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  表示第  $j$  个综合指标的最小值和最大值。

各综合指标的权重 ( $W_j$ ) 的计算公式为<sup>[31-32]</sup>:

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中,  $W_j$  表示第  $j$  个综合指标在所有综合指标中的权重,  $P_j$  是每个供试品种第  $j$  个综合指标的贡献率。

各小麦品种抗旱性综合评价值  $D$  的计算公式为<sup>[31-32]</sup>:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad j = 1, 2, \cdots n \quad (5)$$

式中,  $D$  为各供试品种在不同胁迫梯度下用综合评价指标所得出的抗旱性综合评价值。

## 2 结果与分析

### 2.1 各小麦品种萌发期及幼苗期在不同干旱胁迫梯度下的响应差异及相关分析

根据公式(1)和公式(2)计算出每个品种在 4 个

渗透胁迫梯度下的抗旱指数,如表 1 所示,各小麦品种随着渗透胁迫梯度的增加,其发芽势、发芽率、叶绿素含量和相对含水量呈下降趋势,SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、丙二醛含量、脯氨酸含量和相对电导率不同程度上升。而胚芽鞘长和可溶性蛋白含量在各品种间的变化各不相同。可见,用任一单项指标评价小麦的抗旱性都具有片面性,必须用多个指标进行综合评价。利用 SPSS 软件对不同指标之间的抗旱指数进行相关分析可看出(表 2),这 12 个指标之间存在着一定的相关性,这使得它们所提供的信息发生了重叠。因此,还需采用主成分分析法对这些指标进行综合分析。

表 1 PEG 处理下不同小麦品种生理指标变化

Table 1 Physiological indexes of wheat cultivars under different PEG treatments

| 品种<br>Cultivars         | PEG<br>/% | GP   | GR   | CL   | SOD  | POD  | CAT  | MDA  | Pro  | SPC  | Chl  | Re   | RWC  |
|-------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 西农 538<br>Xinong<br>538 | 5         | 0.90 | 0.83 | 1.09 | 1.42 | 1.32 | 1.34 | 2.10 | 1.44 | 1.11 | 2.62 | 1.48 | 0.98 |
|                         | 10        | 0.68 | 0.82 | 0.96 | 1.49 | 1.66 | 2.52 | 2.49 | 3.58 | 1.19 | 2.45 | 1.82 | 0.92 |
|                         | 15        | 0.68 | 0.77 | 0.90 | 1.54 | 2.45 | 3.27 | 3.03 | 3.77 | 1.27 | 1.92 | 2.36 | 0.81 |
|                         | 20        | 0.62 | 0.69 | 0.87 | 1.59 | 3.16 | 4.38 | 3.54 | 6.14 | 1.39 | 1.58 | 2.77 | 0.64 |
| 西农 556<br>Xinong<br>556 | 5         | 0.90 | 0.97 | 0.80 | 0.84 | 1.33 | 1.35 | 1.72 | 0.90 | 1.40 | 1.63 | 1.24 | 0.91 |
|                         | 10        | 0.63 | 0.80 | 0.68 | 1.01 | 1.37 | 1.89 | 2.25 | 1.15 | 2.30 | 0.49 | 1.31 | 0.90 |
|                         | 15        | 0.39 | 0.54 | 0.70 | 1.41 | 1.52 | 2.12 | 2.44 | 1.37 | 2.09 | 0.25 | 1.41 | 0.86 |
|                         | 20        | 0.14 | 0.37 | 0.65 | 2.73 | 1.60 | 2.63 | 2.53 | 1.54 | 3.06 | 0.65 | 1.63 | 0.73 |
| 西农 558<br>Xinong<br>558 | 5         | 0.89 | 0.89 | 0.90 | 1.35 | 0.96 | 2.33 | 0.92 | 1.45 | 1.39 | 2.17 | 1.42 | 0.94 |
|                         | 10        | 0.77 | 0.84 | 0.65 | 1.49 | 1.25 | 3.16 | 1.63 | 2.35 | 1.46 | 1.63 | 1.52 | 0.89 |
|                         | 15        | 0.65 | 0.78 | 0.83 | 1.65 | 1.43 | 3.38 | 1.60 | 2.66 | 1.68 | 0.75 | 1.64 | 0.72 |
|                         | 20        | 0.48 | 0.61 | 0.73 | 1.91 | 2.87 | 3.41 | 2.04 | 4.86 | 1.57 | 0.60 | 2.99 | 0.68 |
| 西农 979<br>Xinong<br>979 | 5         | 0.86 | 0.97 | 0.93 | 1.10 | 1.38 | 0.79 | 1.20 | 1.05 | 0.60 | 1.07 | 1.08 | 0.94 |
|                         | 10        | 0.61 | 0.66 | 0.84 | 1.29 | 1.40 | 0.88 | 1.27 | 1.06 | 0.96 | 1.04 | 1.58 | 0.91 |
|                         | 15        | 0.34 | 0.50 | 0.79 | 1.39 | 1.69 | 0.91 | 1.42 | 1.47 | 1.03 | 0.86 | 1.79 | 0.85 |
|                         | 20        | 0.30 | 0.45 | 0.83 | 1.42 | 1.94 | 1.27 | 1.45 | 1.62 | 1.77 | 0.62 | 1.89 | 0.80 |
| 小偃 22<br>Xiaoyan<br>22  | 5         | 0.97 | 0.96 | 0.85 | 1.36 | 1.41 | 2.30 | 1.40 | 1.94 | 1.19 | 1.22 | 1.38 | 0.97 |
|                         | 10        | 0.86 | 0.81 | 0.69 | 1.44 | 1.64 | 3.24 | 1.36 | 1.97 | 1.62 | 1.11 | 1.70 | 0.94 |
|                         | 15        | 0.66 | 0.82 | 0.73 | 1.45 | 2.21 | 4.73 | 1.64 | 2.16 | 1.80 | 0.67 | 2.34 | 0.92 |
|                         | 20        | 0.49 | 0.69 | 0.57 | 1.59 | 2.65 | 5.97 | 2.02 | 2.41 | 2.16 | 0.25 | 2.64 | 0.69 |
| 晋麦 47<br>Jinmai 47      | 5         | 0.93 | 0.99 | 0.80 | 1.30 | 1.21 | 1.39 | 2.38 | 1.67 | 1.51 | 1.78 | 1.11 | 0.97 |
|                         | 10        | 0.74 | 0.89 | 0.88 | 1.45 | 1.44 | 3.28 | 2.71 | 2.52 | 1.87 | 0.98 | 2.65 | 0.82 |
|                         | 15        | 0.68 | 0.86 | 0.80 | 1.58 | 2.47 | 3.65 | 3.10 | 2.91 | 1.82 | 0.87 | 3.05 | 0.78 |
|                         | 20        | 0.62 | 0.77 | 0.74 | 1.74 | 2.88 | 4.89 | 4.10 | 3.57 | 1.93 | 0.86 | 3.26 | 0.52 |

注:PEG:聚乙二醇;GP:发芽势;GR:发芽率;CL:胚芽鞘长度;SOD:超氧化物歧化酶;POD:过氧化物酶;CAT:过氧化氢酶;MDA:丙二醛;Pro:脯氨酸;SPC:可溶性蛋白;Chl:叶绿素;Re:相对电导率;RWC:相对含水量。下同。

Note: PEG: polyethylene glycol; GP: germination potential; GR: germination rate; CL: coleoptile length; SOD: superoxide dismutase; POD: peroxidase; CAT: cutalase; MDA: malondialdehyde; Pro: proline; SPC: soluble protein content; Chl: chlorophyll; Re: relative conductivity; RWC: relative water content. The same as below.

表 2 不同小麦品种各项指标的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrixes of various index of different wheat cultivars

| PEG<br>/% | 指标<br>Index | GP     | GR     | CL     | SOD    | POD    | CAT    | MAD    | Pro    | SPC    | Chl    | Rc     | RWC   |
|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 5         | GP          | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | GR          | 0.210  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CL          | -0.363 | -0.865 | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | SOD         | 0.370  | -0.536 | 0.482  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | POD         | 0.217  | 0.289  | 0.064  | -0.282 | 1.000  |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CAT         | 0.599  | -0.195 | -0.191 | 0.474  | -0.462 | 1.000  |        |        |        |        |        |       |
|           | MAD         | 0.299  | 0.036  | 0.012  | 0.078  | 0.271  | -0.376 | 1.000  |        |        |        |        |       |
|           | Pro         | 0.814  | -0.066 | -0.032 | 0.812  | -0.071 | 0.646  | 0.157  | 1.000  |        |        |        |       |
|           | SPC         | 0.496  | 0.036  | -0.478 | 0.072  | -0.504 | 0.526  | 0.367  | 0.307  | 1.000  |        |        |       |
|           | Chl         | -0.120 | -0.833 | 0.569  | 0.445  | -0.507 | 0.160  | 0.333  | 0.068  | 0.418  | 1.000  |        |       |
|           | Rc          | 0.262  | -0.822 | 0.528  | 0.531  | -0.242 | 0.645  | -0.158 | 0.351  | 0.243  | 0.648  | 1.000  |       |
|           | RWC         | 0.487  | -0.349 | 0.449  | 0.877  | 0.124  | 0.161  | 0.443  | 0.794  | -0.014 | 0.306  | 0.306  | 1.000 |
| 10        | GP          | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | GR          | 0.549  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CL          | -0.365 | -0.040 | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | SOD         | 0.608  | 0.366  | 0.328  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | POD         | 0.279  | 0.065  | 0.495  | 0.313  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CAT         | 0.854  | 0.897  | -0.175 | 0.607  | 0.176  | 1.000  |        |        |        |        |        |       |
|           | MAD         | -0.199 | 0.660  | 0.506  | -0.013 | 0.138  | 0.298  | 1.000  |        |        |        |        |       |
|           | Pro         | 0.325  | 0.611  | 0.535  | 0.745  | 0.476  | 0.597  | 0.534  | 1.000  |        |        |        |       |
|           | SPC         | 0.106  | 0.545  | -0.452 | -0.545 | -0.205 | 0.319  | 0.451  | -0.234 | 1.000  |        |        |       |
|           | Chl         | 0.121  | 0.162  | 0.499  | 0.710  | 0.408  | 0.236  | 0.154  | 0.852  | -0.622 | 1.000  |        |       |
|           | Rc          | 0.252  | 0.534  | 0.574  | 0.507  | 0.227  | 0.473  | 0.565  | 0.466  | 0.044  | 0.081  | 1.000  |       |
|           | RWC         | 0.077  | -0.511 | -0.230 | -0.087 | 0.432  | -0.279 | -0.611 | -0.113 | -0.349 | 0.249  | -0.743 | 1.000 |
| 15        | GP          | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | GR          | 0.978  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CL          | 0.612  | 0.473  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | SOD         | 0.496  | 0.521  | -0.084 | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | POD         | -0.008 | 0.019  | -0.393 | 0.353  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CAT         | 0.382  | 0.504  | -0.472 | 0.712  | 0.630  | 1.000  |        |        |        |        |        |       |
|           | MAD         | 0.537  | 0.476  | 0.333  | -0.104 | 0.257  | 0.192  | 1.000  |        |        |        |        |       |
|           | Pro         | 0.806  | 0.739  | 0.474  | 0.618  | 0.486  | 0.461  | 0.545  | 1.000  |        |        |        |       |
|           | SPC         | 0.067  | 0.197  | -0.604 | 0.219  | 0.023  | 0.621  | 0.192  | -0.176 | 1.000  |        |        |       |
|           | Chl         | 0.559  | 0.414  | 0.811  | 0.064  | 0.208  | -0.188 | 0.498  | 0.759  | -0.685 | 1.000  |        |       |
|           | Rc          | 0.530  | 0.625  | 0.005  | 0.211  | 0.571  | 0.648  | 0.442  | 0.551  | 0.145  | 0.291  | 1.000  |       |
|           | RWC         | -0.284 | -0.391 | 0.410  | -0.902 | -0.438 | -0.844 | 0.278  | -0.374 | -0.382 | 0.236  | -0.354 | 1.000 |
| 20        | GP          | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | GR          | 0.966  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CL          | 0.276  | 0.039  | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | SOD         | -0.631 | -0.556 | -0.417 | 1.000  |        |        |        |        |        |        |        |       |
|           | POD         | 0.968  | 0.913  | 0.260  | -0.543 | 1.000  |        |        |        |        |        |        |       |
|           | CAT         | 0.692  | 0.825  | -0.443 | -0.203 | 0.673  | 1.000  |        |        |        |        |        |       |
|           | MAD         | 0.597  | 0.600  | 0.231  | 0.060  | 0.519  | 0.486  | 1.000  |        |        |        |        |       |
|           | Pro         | 0.764  | 0.620  | 0.499  | -0.289 | 0.871  | 0.366  | 0.508  | 1.000  |        |        |        |       |
|           | SPC         | -0.744 | -0.578 | -0.665 | 0.808  | -0.766 | -0.116 | -0.113 | -0.732 | 1.000  |        |        |       |
|           | Chl         | 0.441  | 0.258  | 0.774  | -0.131 | 0.455  | 0.006  | 0.653  | 0.719  | -0.455 | 1.000  |        |       |
|           | Rc          | 0.926  | 0.936  | 0.088  | -0.440 | 0.920  | 0.684  | 0.558  | 0.702  | -0.626 | 0.231  | 1.000  |       |
|           | RWC         | -0.758 | -0.815 | -0.015 | 0.079  | -0.689 | -0.682 | -0.894 | -0.520 | 0.223  | -0.363 | -0.825 | 1.000 |

2.2 12 个单项指标的抗旱指数的主成分分析

利用 SPSS 软件对这 6 个小麦品种的 12 个单项指标的抗旱指数进行主成分分析(表 3),特征根值在 1.000 以上的 PEG 胁迫梯度 5% 和 10% 有 4 个, 15% 和 20% 有 3 个,在 5% PEG 胁迫下,前 4 个主成分贡献率依次为: 38. 35%、24. 32%、17. 08% 和 12.86%,累计贡献率达到 92.61%。10% PEG 胁迫下,前 4 个主成分贡献率依次为:39.32%、25.03%、19.05%和 9.56%,累计贡献率达到 92.96%。15% PEG 胁迫下,前 3 个主成分贡献率依次为:52.37%、20.70%和 15.67%,累计贡献率达到 88.74%。20% PEG 胁迫下,前 3 个主成分贡献率依次为:58.96%、20.36%和 13.80%,累计贡献率达到 93.12%。表明在 5% 和 10% PEG 胁迫下,前 4 个主成分分别包含了 12 个单项指标 92.61% 和 92.96% 的信息。在 15% 和 20% PEG 胁迫下,前 3 个主成分分别包含了 12 个单项指标 88.74% 和 93.12% 的信息。这样就把原来的 12 个单项指标转化成了 3 个或 4 个彼此独立的综合指标,同时根据各主成分的贡献率大小就可知道它们的相对重要性。

2.3 不同小麦品种抗旱性综合性评价

根据得出的各主成分的综合指标值,按照公式(3)分别求出 6 个品种在 4 个不同梯度下的隶属函数值  $U(X_j)$ 。再根据各主成分的贡献率按照公式(4)分别求出 6 个品种在 4 个不同梯度下的权重  $W_j$ 。最后根据得出的隶属函数值  $U(X_j)$  和权重  $(W_j)$  按照公式(5)分别求出 6 个品种在 4 个不同梯度下的抗旱性综合评价值  $D$ (表 4)。根据  $D$  值的大小可看出,在 5% PEG 胁迫梯度下,6 个小麦品种抗旱能力从强到弱依次是:晋麦 47 > 小偃 22 > 西农 538 > 西农 558 > 西农 556 > 西农 979。在 10% PEG 胁迫梯度下,6 个小麦品种抗旱能力从强到弱依次是:西农 538 > 小偃 22 > 晋麦 47 > 西农 558 > 西农 979 > 西农 556。在 15% 和 20% PEG 胁迫梯度下,6 个小麦品种抗旱能力从强到弱的次序是一致的,依次是:晋麦 47 > 西农 538 > 小偃 22 > 西农 558 > 西农 556 > 西农 979,说明随着抗旱胁迫梯度的加大,各品种的抗旱能力趋于稳定。综合 4 个胁迫梯度的  $D$  值,6 个小麦品种的抗旱性可分为三类:西农 538 与对照品种晋麦 47 为一类,属于强抗旱型;西农 558 与对照品种小偃 22 为一类,属于中等抗旱型;西农 556 与对照品种西农 979 为一类,属于弱抗旱型。

3 讨 论

小麦萌发期和幼苗期是其生长发育的初始阶

段,该阶段的抗旱能力直接关系到小麦的成苗与后期产量。本试验采用 PEG 模拟干旱胁迫,分析了供试品种在萌发期和幼苗期的抗旱性,抗旱指数是评价作物抗旱性的一个重要参数,在抗旱鉴定中被广泛应用<sup>[33]</sup>。本研究也将其作为不同指标考察的基本依据。作物的抗旱性不但是一个受多种因素影响的复杂数量性状,而且不同品种的抗旱机制也不尽相同,从而使得不同品种在干旱胁迫条件下对某一具体指标的反应也不尽相同。因而用单一指标很难全面准确地反映作物品种抗旱性的强弱,应该用多种指标来综合评价作物的抗逆适应性。对于本试验所测定的 12 个单项指标与抗旱性的关系与前人<sup>[34-36]</sup>的研究基本一致,都表现出随着渗透胁迫

表 3 PEG 胁迫下不同小麦品种的主成分分析结果  
Table 3 Principal component analysis of wheat cultivars in different concentrations of PEG

| PEG<br>/% |                                           | 主成分 Principal component |       |       |       |
|-----------|-------------------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|
|           |                                           | 1                       | 2     | 3     | 4     |
| 5         | 特征值<br>Eigenvalue                         | 4.602                   | 2.918 | 2.050 | 1.543 |
|           | 贡献率/%<br>Contribution rate                | 38.35                   | 24.32 | 17.08 | 12.86 |
|           | 累计贡献率/%<br>Accumulative contribution rate | 38.35                   | 62.67 | 79.75 | 92.61 |
|           | 权重( $W_j$ )<br>Index weight               | 0.414                   | 0.263 | 0.184 | 0.139 |
| 10        | 特征值<br>Eigenvalue                         | 4.719                   | 3.004 | 2.286 | 1.147 |
|           | 贡献率/%<br>Contribution rate                | 39.32                   | 25.03 | 19.05 | 9.56  |
|           | 累计贡献率/%<br>Accumulative contribution rate | 39.32                   | 64.36 | 83.41 | 92.96 |
|           | 权重( $W_j$ )<br>Index weight               | 0.423                   | 0.269 | 0.205 | 0.103 |
| 15        | 特征值<br>Eigenvalue                         | 6.285                   | 2.484 | 1.880 |       |
|           | 贡献率/%<br>Contribution rate                | 52.37                   | 20.70 | 15.67 |       |
|           | 累计贡献率/%<br>Accumulative contribution rate | 52.37                   | 73.07 | 88.74 |       |
|           | 权重( $W_j$ )<br>Index weight               | 0.590                   | 0.233 | 0.177 |       |
| 20        | 特征值<br>Eigenvalue                         | 7.076                   | 2.443 | 1.655 |       |
|           | 贡献率/%<br>Contribution rate                | 58.96                   | 20.36 | 13.80 |       |
|           | 累计贡献率/%<br>Accumulative contribution rate | 58.96                   | 79.32 | 93.11 |       |
|           | 权重( $W_j$ )<br>Index weight               | 0.633                   | 0.219 | 0.148 |       |

表 4 不同小麦品种抗旱性综合评价结果  
Table 4 Comprehensive evaluation of drought resistance of wheat cultivars

| PEG/% | 品种<br>Cultivars          | $CI1$  | $CI2$  | $CI3$  | $CI4$  | $U(X_1)$ | $U(X_2)$ | $U(X_3)$ | $U(X_4)$ | $D$   | 抗旱能力排名<br>Rank of drought<br>resistance |
|-------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|-------|-----------------------------------------|
| 5     | 西农 538<br>Xinong 538     | 2.314  | -2.173 | 1.249  | 0.663  | 1.000    | 0.000    | 1.000    | 0.744    | 0.702 | 3                                       |
|       | 西农 556<br>Xinong 556     | -2.313 | 0.257  | -1.124 | 1.097  | 0.115    | 0.572    | 0.346    | 0.887    | 0.385 | 5                                       |
|       | 西农 558<br>Xinong 558     | 1.555  | -0.654 | -2.382 | -0.485 | 0.855    | 0.358    | 0.000    | 0.363    | 0.498 | 4                                       |
|       | 西农 979<br>Xinong 979     | -2.916 | -1.326 | 0.892  | -1.133 | 0.000    | 0.199    | 0.902    | 0.148    | 0.239 | 6                                       |
|       | 小偃 22<br>Xiaoyan 22      | 1.162  | 2.075  | 0.564  | -1.578 | 0.780    | 1.000    | 0.811    | 0.000    | 0.735 | 2                                       |
|       | 晋麦 47<br>Jinmai 47       | 0.199  | 1.820  | 0.801  | 1.436  | 0.596    | 0.940    | 0.877    | 1.000    | 0.794 | 1                                       |
|       | 权重 $W_j$<br>Index weight |        |        |        |        | 0.414    | 0.263    | 0.184    | 0.139    |       |                                         |
| 10    | 西农 538<br>Xinong 538     | 2.109  | 2.138  | -0.884 | 1.046  | 0.939    | 1.000    | 0.130    | 0.918    | 0.787 | 1                                       |
|       | 西农 556<br>Xinong 556     | -2.434 | -1.929 | -0.521 | 1.240  | 0.049    | 0.000    | 0.230    | 1.000    | 0.171 | 6                                       |
|       | 西农 558<br>Xinong 558     | 0.293  | -0.353 | 1.521  | -1.125 | 0.583    | 0.388    | 0.793    | 0.000    | 0.513 | 3                                       |
|       | 西农 979<br>Xinong 979     | -2.682 | 1.730  | -1.032 | -1.008 | 0.000    | 0.900    | 0.089    | 0.049    | 0.266 | 5                                       |
|       | 小偃 22<br>Xiaoyan 22      | 0.294  | 0.292  | 2.272  | 0.560  | 0.583    | 0.546    | 1.000    | 0.713    | 0.672 | 2                                       |
|       | 晋麦 47<br>Jinmai 47       | 2.421  | -1.878 | -1.356 | -0.713 | 1.000    | 0.013    | 0.000    | 0.174    | 0.444 | 4                                       |
|       | 权重 $W_j$<br>Index weight |        |        |        |        | 0.423    | 0.269    | 0.205    | 0.103    |       |                                         |
| 15    | 西农 538<br>Xinong 538     | 2.869  | -1.659 | 0.824  |        | 1.000    | 0.077    | 0.949    |          | 0.776 | 2                                       |
|       | 西农 556<br>Xinong 556     | -3.056 | 0.993  | -0.171 |        | 0.000    | 0.754    | 0.678    |          | 0.296 | 5                                       |
|       | 西农 558<br>Xinong 558     | 0.545  | -0.297 | -2.656 |        | 0.608    | 0.425    | 0.000    |          | 0.458 | 4                                       |
|       | 西农 979<br>Xinong 979     | -2.813 | -1.959 | 0.748  |        | 0.041    | 0.000    | 0.929    |          | 0.188 | 6                                       |
|       | 小偃 22<br>Xiaoyan 22      | 0.079  | 1.956  | 1.009  |        | 0.529    | 1.000    | 1.000    |          | 0.722 | 3                                       |
|       | 晋麦 47<br>Jinmai 47       | 2.375  | 0.965  | 0.247  |        | 0.917    | 0.747    | 0.792    |          | 0.855 | 1                                       |
|       | 权重 $W_j$<br>Index weight |        |        |        |        | 0.590    | 0.233    | 0.177    |          |       |                                         |
| 20    | 西农 538<br>Xinong 538     | 2.878  | -1.506 | 0.939  |        | 1.000    | 0.143    | 0.782    |          | 0.780 | 2                                       |
|       | 西农 556<br>Xinong 556     | -3.844 | 0.840  | 1.662  |        | 0.000    | 0.738    | 1.000    |          | 0.309 | 5                                       |
|       | 西农 558<br>Xinong 558     | 0.704  | -0.301 | -0.595 |        | 0.677    | 0.448    | 0.319    |          | 0.574 | 4                                       |
|       | 西农 979<br>Xinong 979     | -2.307 | -2.070 | -1.036 |        | 0.229    | 0.000    | 0.186    |          | 0.172 | 6                                       |
|       | 小偃 22<br>Xiaoyan 22      | 0.018  | 1.875  | -1.654 |        | 0.575    | 1.000    | 0.000    |          | 0.582 | 3                                       |
|       | 晋麦 47<br>Jinmai 47       | 2.551  | 1.163  | 0.684  |        | 0.951    | 0.820    | 0.705    |          | 0.886 | 1                                       |
|       | 权重 $W_j$<br>Index weight |        |        |        |        | 0.633    | 0.219    | 0.148    |          |       |                                         |

梯度的增加,各品种发芽势、发芽率、叶绿素含量和相对含水量呈下降趋势,SOD、POD 和 CAT 活性,丙二醛及脯氨酸含量和相对电导率不同程度上升。而胚芽鞘长和可溶性蛋白含量在各品种间的变化各不相同。但评价作物抗逆性的指标较多,指标间又存在不同程度的相关性,采用隶属函数法直接利用这些指标来评价作物的抗逆性也存在一定的局限性。主成分分析法可将原来较多的指标转换成指标数量较少且相互独立的综合指标。本研究采用主成分和隶属函数分析将 12 个抗旱相关指标转化为 3 个(15%和 20% PEG 胁迫下)或 4 个(5%和 10% PEG 胁迫下)彼此独立的综合指标(主成分),进而计算供试品种 3 个或 4 个主成分的综合指标值 $Cl(X_j)$ 及隶属函数值 $U(X_j)$ ;同时结合各综合指标贡献率大小计算权重,得到品种抗旱性综合评价值( $D$  值),用于评价供试品种抗旱性,由于  $D$  值无量纲,使得不同品种抗旱性差异具有可比性,可客观、准确地评价小麦抗旱性,而且主成分分析方法利用了各指标间内在的深层次的联系,克服了信息的重叠与指标的相关性,可以利用数据本身得到各综合指标的权重( $W_j$ ),从而避免了人为确定权重的主观性。二者相结合可客观、准确地评价小麦的抗旱性,为小麦抗旱遗传改良和相关研究提供了科学方法<sup>[37]</sup>。依据该方法,随着胁迫梯度从 5% 增加到 20%,各品种的抗旱能力趋于稳定。综合这 4 个胁迫梯度的  $D$  值,6 个小麦品种的抗旱性可分为三类:西农 538 与对照品种晋麦 47 和小偃 22 的  $D$  值较为接近,属于强抗旱型;西农 558 的  $D$  值介于对照品种小偃 22 和西农 979 之间,属于中等抗旱型;西农 556 与对照品种西农 979 的  $D$  值较为接近,属于弱抗旱型。结合西农 538 在生产上具有分蘖力强,成穗率高,抗干热风,综合抗性突出,成熟黄亮等优良特性<sup>[38]</sup>,可作为小麦早期抗旱育种的亲本材料加以利用。由于作物抗旱性是一个非常复杂的现象,对植物抗旱性的鉴定不能局限在某一时期,采用多个时期、多指标相结合的综合评价方法才会准确对抗旱品种进行筛选评价。由于本研究只是分析了这些品种在萌发期和幼苗期抗旱性,并且本试验仅就 6 个小麦品种进行了研究,因此,对于在其它时期和自然条件下的抗旱性表现以及此结果能否适用于其它小麦品种抗旱性评价有待进一步探讨研究。

#### 参 考 文 献:

- [1] 赵丽英,邓西平,山 仑.水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J].应用生态学报,2004,(3):523-526.
- [2] 山 仑,黄占斌,张岁岐.节水农业[M].北京:清华大学出版社,2000:12-13.
- [3] 康绍忠.新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展[J].干旱地区农业研究,1998,16(1):11-17.
- [4] 郑桂萍,李金峰,钱永德,等.农作物综合抗旱性指标的评价分析[J].中国农学通报,2006,21(10):109-110.
- [5] Lipiec J, Doussan C, Nosalewicz A, et al. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review[J]. International Agrophysics, 2013,27(4):463-477.
- [6] Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. Planta, 2003,218(1):1-14.
- [7] Zhang J, Dell B, Conococono E, et al. Water deficits in wheat: fructan exohydrolase (1-FEH) mRNA expression and relationship to soluble carbohydrate concentrations in two varieties [J]. New Phytologist, 2009,181(4):843-850.
- [8] 吴永成,周顺利,王志敏.小麦与抗旱性有关的根系遗传改良研究进展[J].麦类作物学报,2004,24(3):101-104.
- [9] Loutfy N, El - Tayeb M A, Hassanen A M, et al. Changes in the water status and osmotic solute contents in response to drought and salicylic acid treatments in four different cultivars of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Journal of Plant Research, 2012,125(1):173-184.
- [10] Cairns J E, Crossa J, Zaidi P H, et al. Identification of drought, heat, and combined drought and heat tolerant donors in maize [J]. Crop Science, 2013,53(4):1335-1346.
- [11] Subrahmanyam D, Subash N, Haris A, et al. Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought [J]. Photosynthetica, 2006,44(1):125-129.
- [12] Huang W, Sui Y, Yang X, et al. Spatio-temporal characteristics of crop drought in southern China based on drought index of continuous days without available precipitation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(4):125-135.
- [13] 孙彩霞,沈秀瑛.作物抗旱性鉴定指标及数量分析方法的研究进展[J].中国农学通报,2002,18(1):49-51.
- [14] 杨瑰丽,杨美娜,李帅良,等.水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价[J].华南农业大学学报,2015,36(2):1-5.
- [15] 陈培元,蒋永罗,李 英.不同水分张力和亚适温条件下冬小麦种子萌发特性和抗旱性的关系[J].植物生理学报,1982,8(2):117-125.
- [16] 苏 佩,山 仑.玉米种子萌发成苗不同阶段需水阈值的研究 [J].西北植物学报,1996,16(1):34-37.
- [17] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. Plant, Cell & Environment, 2002,25(2):239-250.
- [18] Hohl M, Schopfer P. Water relations of growing maize coleoptiles comparison between mannitol and polyethylene glycol 6000 as external osmotica for adjusting turgor pressure [J]. Plant Physiology, 1991,95(3):716-722.
- [19] 刘 佳,徐昌旭,曹卫东,等.PEG 胁迫下 15 份紫云英种质材料萌发期的抗旱性鉴定 [J]. 中国草地学报,2013,34(6):18-25.

- [1] 刘智勇, 张鑫, 李小冰. 气候变化对托克逊河流域径流量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 184-190.
- [2] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [3] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文学水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [4] 迪丽努尔·艾克, 巴尔. 新疆主要河流流量变化的时空特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 100-104.
- [5] 普宗朝, 张山清, 李景林, 等. 气候变化对呼图壁河径流量的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 1(5): 44-47.
- [6] 耿峻岭, 高玲, 陈建江, 等. 新疆呼图壁河流域水文特征分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(3): 371-376.
- [7] 白东明, 李卫红, 郝兴明, 等. 新疆呼图壁河流域径流时序变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 19-23.
- [8] King M R. Fractal analysis of eight glacial cycles from an Antarctic ice core[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 25(1): 5-10.
- [9] Rehman S, Siddiqi A H. Wavelet based Hurst exponent and fractal dimensional analysis of Saudi climatic dynamics[J]. Chaos, Solitons &

- [10] 邓建伟,宋松柏,卢书超.石羊河流域年径流序列的变异诊断[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(4):121-124.
- [11] 魏天锋,刘志辉,姚俊强,等.呼图壁河径流过程对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2015,29(4):102-107.
- [12] 王文圣,丁 晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [13] 王 岚,刘志辉,姚俊强,等.1978—2011年呼图壁河径流的变化趋势[J].水土保持通报,2015,35(3):62-67.
- [14] 马 岚,魏晓妹.石羊河下游年径流序列的变异点分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):174-177.
- [15] 凌红波,徐海量,张青青,等.叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及相关性分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1757-1764.
- [16] 陈 峰,袁玉江,魏文寿,等.呼图壁河流域过去 313a 春季平均最高气温序列及其特征分析[J].中国沙漠,2009,29(1):162-167.
- [17] 塔依尔·夏库热,依米提·海米提,艾则孜麦麦提·吐尔逊,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146.

- [20] 王林忠. 利用 PEG6000 胁迫鉴定西葫芦幼苗的抗旱性[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(3): 310-314.
- [21] 朱学海, 宋燕春, 赵治海, 等. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(1): 62-67.
- [22] 冯晓东, 王悦, 王晓洁, 等. 聚乙二醇模拟干旱对甜高粱幼苗生长及抗旱性的影响[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 33-36.
- [23] 彭民贵, 张继, 陈学林, 等. 聚乙二醇模拟干旱胁迫下紫斑牡丹的抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 179-186.
- [24] Blum A, Ebercon A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat[J]. Crop Science, 1981, 21(1): 43-47.
- [25] 景蕊莲, 吕小平. 用渗透剂胁迫鉴定小麦种子萌发期抗旱性的方法分析[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(4): 292-296.
- [26] 李云. 不同冬小麦品种抗旱性鉴定及抗旱指标研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [27] 张军. 小麦骨干亲本小偃 22 抗旱耐寒适应性分析及对其衍生品种的遗传贡献[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [28] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 34-125.
- [29] 张宪政, 陈凤玉. 植物生理学试验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2004: 1-10.

- 术出版社,1994;23-57.
- [30] 兰巨生,胡福顺,张景瑞.作物抗旱指数的概念和统计方法[J].华北农学报,1990,5(2):20-25.
- [31] 谢季坚.农业科学中的模糊数学方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1993.
- [32] 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.
- [33] 兰巨生.农作物综合抗旱性评价方法的研究[J].西北农业学报,1998,7(3):85-87.
- [34] 芦静,曹俊梅,周安定,等.PEG处理下新疆冬小麦品种幼苗期生理指标的抗旱性研究[J].新疆农业科学,2014,51(3):393-402.
- [35] 王曙光,朱俊刚,孙黛珍,等.山西小麦地方品种幼苗期抗旱性的鉴定[J].中国农业大学学报,2013,18(1):39-45.
- [36] 李国瑞,马宏亮,胡雯媚,等.西南麦区小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定及评价[J].麦类作物学报,2015,35(4):479-487.
- [37] 周广生,梅方竹,周竹青,等.小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J].中国农业科学,2003,36(11):1378-1382.
- [38] 董剑,王伟,赵万春,等.小麦新品种西农538的选育及其特征特性[J].种子,2011,(12):105-106.