

基于非线性主成分分析的寒地水稻 齐穗期抗旱性评价

李红宇,张巩亮,牛同旭,李逸,刘梦红,郑桂萍

(黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,黑龙江 大庆 163319)

摘要:为鉴定寒地水稻在全生育期干旱条件下的齐穗期抗旱性及筛选抗旱性鉴定的适宜指标,以其齐穗期伤流量、干物质量、高效叶面积等 17 个性状为指标,采用对数主成分分析法对 12 份寒地水稻种质资源进行抗旱性综合评价。结果表明,利用对数主成分分析将 17 个单项指标的抗旱系数转化为 5 个相互独立的综合指标,累积贡献率达 83.829%。依据抗旱综合评价 S_f 值将 12 份材料分成 3 类,第一类包括齐粳 10、DPB120 和 DPB15, S_f 值在 0.548~0.609 之间,属于干旱敏感型;第二类包括垦稻 24、DPB71、绥育 117463、绥育 118146 和绥粳 21, S_f 值在 0.660~0.764 之间,属于中抗旱型;第三类包括 DPB70、绥稻 3 号、DPB112 和莹稻 2, S_f 值在 0.859~0.872 之间,属于强抗旱型。基于灰色关联系数大小和鉴定效率的考虑,确定有效叶面积、高效叶面积、干物质量和主穗颖花数作为寒地水稻在全生育期干旱条件下的齐穗期抗旱性鉴定指标。

关键词:抗旱性评价;水稻;齐穗期;光合;生长代谢;对数主成分分析;寒地

中图分类号:S11⁺4;S511 **文献标志码:**A

Drought resistance evaluation of rice at full heading period based on nonlinear principal component analysis in cold region

LI Hongyu, ZHANG Gongliang, NIU Tongxu, LI Yi, LIU Menghong, ZHENG Guiping

(College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: In order to identify the drought resistance of rice at full heading stage under the condition of drought in the whole growth period in cold region and screen the suitable indexes for drought resistance identification, 17 characters at full heading stage, such as wound flow, dry matter quantity, and high efficiency leaf area, and so on, were used as indexes to evaluate drought resistance of 12 rice germplasm resources in cold region by logarithmic principal component analysis. The results showed that the drought resistance coefficients of 17 individual indexes were transformed into 5 independent comprehensive indexes by logarithmic principal component analysis, and the cumulative contribution rate reached 83.829%. According to the S_f value of drought resistance comprehensive evaluation, 12 materials were divided into three groups, the first group included Qijing 10, DPB120, and DPB15 with the S_f value ranging from 0.548 to 0.609, which belonged to drought sensitive type. The second group included Kendao 24, DPB71, Suiyu 117463, Suiyu 118146, and Suijing 21 with the S_f value between 0.660 and 0.764, belonging to moderate drought resistance type. The DPB70, Suidao 3, DPB112, and Yingdao 2 belonged to the third group, with the S_f value ranging from 0.859 to 0.872, which belonged to strong drought resistance type. Based on the grey correlation coefficient and identification efficiency, the effective leaf area, high efficiency leaf area, dry matter quantity, and the spikelet number of main spike were determined as the identification indexes of drought resistance at full heading stage of cold rice under the condition of drought in the whole growth period.

Keywords: drought resistance evaluation; rice; heading stage; photosynthesis; growth and metabolism; loga-

rithmic principal component analysis; cold region

水稻灌溉用水占中国农业用水的 70% 左右^[1-2], 供水问题已成为制约水稻生产良性发展的瓶颈之一^[3]。筛选和培育抗旱水稻品种是解决这一问题的最有效途径^[4]。

作物抗旱性是其自身对干旱环境的适应性变化^[5], 是多种生理生化性状共同构成的复杂性状, 包括形态特征、生理生化特性及生长发育进程改变等^[6]。品种间及同一品种的不同生育时期抗旱机制存在一定差异, 进行抗旱鉴定时, 单一抗性指标不能全面、准确地反映作物的抗性, 应运用综合指标法对作物复杂性状的抗性进行综合评判^[7]。在统计分析方面, 综合指标法主要采用相关分析、主成分分析、聚类分析、多元逐步回归分析、模糊综合评价、灰色关联分析等方法进行组合评价, 以利用不同统计分析方法在指标体系构建、指标赋权、数据需求等方面的优势, 减少随机偏差和系统误差发生的可能性, 有助于解决评价结论不一致问题, 提高综合评价的质量^[8]。如田又升等^[9]用 PEG-6000 高渗溶液模拟干旱条件, 采用发芽势、发芽率、最大胚根长等 11 个萌发性状指标对 33 份水稻材料进行了萌发期抗旱性综合鉴定, 通过主成分分析将 11 个生长指标归类为 4 个互不相关的因子, 以各指标的隶属函数值进行模糊聚类, 将参试品种的抗旱性分为 4 大类。但是, 多种统计方法的组合评价仍存在一定问题, 如参试指标间可能存在非线性关系, 使用传统主成分分析法进行线性降维, 会导致评价结果发生偏差^[10]。针对此问题, 叶明确等^[11]提出了一种基于非线性投影的对数主成分评价法, 并从理论基础、几何意义和适用范围等方面阐明了该算法的合理性和有效性。纪龙等^[8]首次将其引入作物种质资源综合评价。本研究采用对数主成分评价法, 在全生育期干旱条件下, 从形态特征、物质生产、光合及生理特性方面对 12 份寒地水稻种质资源齐穗期抗旱性进行了综合评价, 以期为寒地水稻抗旱育种和节水栽培提供种质资源支持。

1 材料与方法

1.1 参试材料及其处理

试验于 2017 年和 2018 年在黑龙江八一农垦大学校内试验基地防雨棚内进行。盆栽试验采用二因素完全随机试验设计。品种因素为 12 水平, 包括前期工作筛选出的苗期抗旱材料 (DPB120、垦稻 24、DPB71、DPB112、DPB70、DPB15) 和敏感材料各

6 份 (齐粳 10、绥育 117463、绥稻 3 号、莹稻 2、绥育 118146、绥粳 21)。干旱因素为 2 水平, 即常规灌溉 (对照) 和干旱处理。常规灌溉水管理为浅水插秧、深水扶苗、浅水增温促蘖、减少分裂期深水护苗、结实期干湿交替灌溉; 干旱处理于返青期后开始干旱胁迫处理, 返青期以 80% 以上秧苗早晚叶尖吐水为标志。干旱处理的方法是返青期排干水, 采用负压式土壤湿度计测定土壤水势 (将湿度计的陶头插入土表以下 10 cm 位置), 保持全生育期土壤水势在 $-30 \sim -35$ kPa, 常规灌溉对照和干旱处理每份材料各种植 14 盆, 插秧规格为 4 穴·盆⁻¹。其他管理方法同常规。

1.2 调查与测定

1.2.1 干物质质量和叶面积的测定 齐穗期各品种处理和对照分别取代表性植株 12 穴, 从基部切除根系, 余下部分分为茎鞘、穗、上三叶和其余叶片 4 部分。采用长宽系数法测定上三叶叶面积 (高效叶面积) 和有效叶面积。各部分单独包装, 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒重。

1.2.2 光合指标的测定 在齐穗期天气晴朗的上午 9:00~11:00, 使用 CIRAS-3 型便携式光合荧光测定系统测定剑叶净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_s)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i)。

1.2.3 剑叶 SPAD 值的测定 于齐穗期每处理选主茎剑叶 20 片, 使用叶绿素 SPAD-502 仪 (日本 MINOLTA 产) 测定剑叶中部的 SPAD 值, 测定时注意避开叶脉和有损伤的叶片。

1.2.4 剑叶可溶性蛋白质含量、游离脯氨酸含量、SOD 活性和 POD 活性测定 齐穗期各品种取处理和对照主茎剑叶 6 片, 快速去除叶脉后, 置于液氮中冷冻, 在超低温冰箱中保存备用。采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白质含量^[12]; 采用磺基水杨酸法提取游离脯氨酸, 茚三酮显色法进行测定^[12]; 参照卢少云等^[13]的方法提取、测定还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量。采用任红旭等^[14]的方法提取超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD), 并参照李合生的方法^[12]进行测定。

1.2.5 糖花比的测定 齐穗期每品种处理和对照各选择长势均一的主茎 15 个, 计数主穗颖花数。采用蒽酮比色法测定主茎茎鞘中的淀粉和可溶性糖含量, 并参照赵步洪等^[15]的方法计算糖花比。

糖花比 ($SSR, mg \cdot 颖花^{-1}$) = 茎鞘非结构性碳水化合物含量 / 每穗颖花数

1.2.6 茎秆伤流量的测定 齐穗期每品种处理和对照各选取代表性植株 4 穴,于 17:00 从距地表 10 cm 处横切 10 个茎,用已称重 (W_1) 的脱脂棉完全覆盖切口,自封塑料袋包扎以收集根系伤流液,并记录时间 T_1 ,10 h 后记录时间 T_2 。取下包装物并称重,记为 W_2 。利用下式计算单茎根系伤流量:

单茎根系伤流量($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$) = $(W_2 - W_1) / [10 \times (T_2 - T_1)]$

1.3 数据处理与统计分析

1.3.1 抗旱系数 (DTC) 采用水稻抗旱系数 (drought tolerant coefficients, DTC),即各抗旱指标的相对值进行抗旱性综合分析,以消除参试材料间的基础性状差异。

$DTC = \text{干旱胁迫下指标值} / \text{对照指标值}$ (1)

1.3.2 原始数据无量纲化和对数化 采用均值化方法对原始指标进行无量纲化处理。

$X_i = \sum x_{ij} / n$ ($i = 1, 2, \dots, 17$) (2)

在此基础上进行对数化处理,得到均值化处理后的指标为 $\ln X_i$ ($i = 1, 2, \dots, 18$)。

1.3.3 指标的权重分配 对 $\ln X_i$ 进行主成分分析,根据特征值大于 1 或累积方差贡献率超过 80% (85%) 的原则确定主成分个数。根据主成分载荷矩阵计算 $\ln X_i$ 的权重和主成分 P_j :

$l_{ij} = e_{ij} / \sqrt{\lambda_j}$ (3)

式中, e_{ij} 代表第 i 个评价指标在第 j 主成分中的特征向量, λ_j 表示第 j 个主成分的特征值。

$P_j = l_{ij} \ln X_i$ ($i = 1, 2, \dots, 18, j = 1, 2, \dots, k$) (4)

1.3.4 主成分 P_j 权重 (W_j) 和主成分综合得分 (S_f)

$W_j = \lambda_j / \sum_j \lambda_j$ (5)

$S'_f = \sum_{j=1}^k W_j P_j$ (6)

对公式(6)两边取指数得到 S_f :

$S_f = e^{S'_f} = e^{\sum_{j=1}^k W_j P_j} = \prod_{i=1}^n X_i^{\sum_{j=1}^k W_j l_{ij}}$ (7)

1.3.5 统计分析软件 各指标 2017—2018 年数据平均值用于统计分析。利用 Excel 2010 进行数据整理、描述性分析、权重和抗旱综合评价 S_f 值的计算。利用 DPS 7.05 软件进行主成分分析、聚类分析和灰色关联度分析。

2 结果与分析

2.1 各单项指标的抗旱系数及相关分析

依据公式(1)计算各单项指标的相对值即抗旱系数 (DTC),以消除基因型间本底差异和指标间的量纲差异。表 1 列出了每个性状抗旱系数的均值及描述性分析统计数,17 个性状的抗旱系数平均值为

0.722,数值分布在 0.090~1.919。对各指标的年际间差异进行成组数据 t 测验,伤流量、茎鞘非结构性碳水化合物含量、净光合速率、蒸腾速率、间隙 CO_2 浓度、气孔导度、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶活性、超氧化物歧化酶活性、游离脯氨酸含量、还原型谷胱甘肽含量等 11 个指标的抗旱系数年际间差异显著或极显著,其他指标年际间差异不显著。从变异系数方面看,变异系数最大为伤流量 (185.183%),气孔导度 (133.471%) 次之, SOD 活性 (47.910%) 再次之;变异系数最小为有效叶面积 (11.997%),干物质次之 (12.265%), SPAD 值再次之 (13.637%)。

表 1 各单项指标的抗旱系数

Table 1 Drought tolerant coefficient (DTC) of each single index

| 指标 Index | 均值/% | 标准差 Std. | 变异系数 CV/% | 最小值 Min./% | 最大值 Max./% |
|----------------------------|--------|----------|-----------|------------|------------|
| 伤流量 WF | 0.090* | 0.166 | 185.183 | 0.008 | 0.601 |
| 干物质质量 Biomass | 0.585 | 0.072 | 12.265 | 0.492 | 0.716 |
| 高效叶面积 HELA | 0.627 | 0.087 | 13.899 | 0.424 | 0.748 |
| 有效叶面积 ELA | 0.651 | 0.078 | 11.997 | 0.503 | 0.768 |
| 茎鞘非结构性碳水化合物 NSC | 0.998* | 0.278 | 27.883 | 0.731 | 1.624 |
| 主穗颖花数 SNP | 0.537 | 0.079 | 14.755 | 0.352 | 0.644 |
| 糖花比 SSR | 1.919 | 0.557 | 29.032 | 1.233 | 3.096 |
| 净光合速率 P_n | 0.619* | 0.181 | 29.296 | 0.382 | 0.999 |
| 蒸腾速率 Tr | 0.562* | 0.184 | 32.780 | 0.303 | 0.928 |
| 胞间隙 CO_2 浓度 C_i | 0.877* | 0.152 | 17.359 | 0.586 | 1.096 |
| 气孔导度 G_s | 0.239* | 0.319 | 133.471 | 0.012 | 0.914 |
| SPAD | 0.988 | 0.135 | 13.637 | 0.845 | 1.369 |
| 可溶性蛋白含量 SP | 0.913* | 0.357 | 39.078 | 0.442 | 1.545 |
| 超氧化物歧化酶 SOD | 0.753* | 0.361 | 47.910 | 0.296 | 1.447 |
| 过氧化物酶 POD | 1.268* | 0.524 | 41.339 | 0.577 | 2.349 |
| 游离脯氨酸含量 Pro | 1.106* | 0.485 | 43.839 | 0.559 | 1.842 |
| 还原型谷胱甘肽含量 GSH | 0.946* | 0.206 | 21.758 | 0.668 | 1.394 |

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$). WF: Wound flow; HELA: High effective leaf area; ELA: Efficient leaf area; NSC: Non-structural carbohydrate of the stem and sheath; SNP: Spikelet numbers per main panicle; SSR: Sugar-spikelet ratio; P_n : Photosynthetic rate; Tr : Transpiration rate; C_i : Intercellular carbon dioxide concentration; G_s : Stomatal conductance; SP: Soluble protein; SOD: Superoxide dismutase; POD: peroxidase; Pro: Proline; GSH: Reduced glutathione.

2.2 对数主成分分析

主成分分析可在损失较少信息量的前提下,将多指标简化为少量综合指标,以浓缩数据、简化指标,弥补利用单项指标评价抗旱性的不足。主成分数目的确定应同时满足数据降维和信息综合的要求。确定合适的指标权重是应用主成分分析进行

综合评价的核心内容之一。各指标的权重分配依赖于主成分个数的选取,通常根据特征值大于 1 或累积方差贡献率超过 80% (或 85%) 的原则确定主成分个数。对对数化处理后的数据 ($\ln X_i$) 进行主成分分析,前 5 个主成分的特征值均大于 1,贡献率分别为 28.905%、21.087%、13.811%、11.862% 和 8.164%,其累计贡献率达到 83.829%,即前 5 个相互独立的主成分代表了 17 个指标 83.829% 的变异信息,其余可忽略不计(表 2)。

前 5 个主成分的载荷矩阵如表 3 所示,第一主成分的贡献率为 28.905%,该主成分以蒸腾速率载荷的绝对值最高 (-0.3363),净光合速率、间隙 CO_2 浓度和气孔导度在第一主成分也具有较高载荷,可称为光合因子;第二主成分的贡献率为 21.087%,该主成分以高效叶面积 (0.4188) 和有效叶面积 (0.4344) 载荷最高,可称为叶面积因子;第三主成分

的贡献率为 13.811%,该主成分以 SPAD、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、游离脯氨酸含量载荷最高,称为生理因子;第四主成分的贡献率为 11.862%,伤流量的载荷最高 (0.5040),称为伤流量因子;第五主成分的贡献率为 8.164%,干物质质量的载荷最高 (0.4408),称为干物质质量因子。

表 2 特征值与方差贡献率

Table 2 Eigenvalue and variance contribution rate

| 编码 No. | 特征值 Eigenvalue | 方差贡献率/% Contribution rate | 累积方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate | 权重 W_j Weight |
|-----------|-------------------|------------------------------|---|--------------------|
| 1 | 4.914 | 28.905 | 28.905 | 0.345 |
| 2 | 3.585 | 21.087 | 49.992 | 0.252 |
| 3 | 2.348 | 13.811 | 63.803 | 0.165 |
| 4 | 2.017 | 11.862 | 75.665 | 0.142 |
| 5 | 1.388 | 8.164 | 83.829 | 0.097 |

表 3 主成分载荷矩阵

Table 3 Load matrix of the principal component

| 指标 Index | 主成分因子 Principal component | | | | | $\ln X_i$ 的权重 (l_{ij}) Weight of $\ln X_i$ | | | | |
|--|---------------------------|---------|---------|---------|---------|--|---------|---------|---------|---------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
| 伤流量 $\text{WF}(\ln X_1)$ | 0.1042 | 0.0162 | 0.0404 | 0.5040 | -0.4374 | 0.0470 | 0.0086 | 0.0264 | 0.3549 | -0.3713 |
| 干物质 $\text{Biomass}(\ln X_2)$ | -0.1619 | 0.2420 | -0.1600 | 0.2375 | 0.4408 | -0.0730 | 0.1278 | -0.1044 | 0.1672 | 0.3742 |
| 高效叶面积 $\text{HELA}(\ln X_3)$ | -0.0177 | 0.4188 | 0.2571 | 0.1259 | -0.2681 | -0.0080 | 0.2212 | 0.1678 | 0.0887 | -0.2276 |
| 有效叶面积 $\text{ELA}(\ln X_4)$ | 0.0917 | 0.4344 | -0.0196 | 0.1904 | -0.2360 | 0.0414 | 0.2294 | -0.0128 | 0.1341 | -0.2003 |
| 茎鞘非结构性碳水化合物 $\text{NSC}(\ln X_5)$ | 0.3259 | 0.2375 | 0.1465 | -0.2468 | 0.0176 | 0.1470 | 0.1254 | 0.0956 | -0.1738 | 0.0149 |
| 主穗颖花数 $\text{SNP}(\ln X_6)$ | 0.2318 | -0.1775 | 0.1673 | 0.3803 | 0.2765 | 0.1046 | -0.0937 | 0.1092 | 0.2678 | 0.2347 |
| 糖花比 $\text{SSR}(\ln X_7)$ | 0.1378 | 0.3049 | 0.0309 | -0.4683 | -0.1764 | 0.0622 | 0.1610 | 0.0202 | -0.3298 | -0.1497 |
| 净光合速率 $\text{Pn}(\ln X_8)$ | -0.3081 | 0.0073 | 0.4533 | -0.0745 | -0.0323 | -0.1390 | 0.0039 | 0.2958 | -0.0525 | -0.0274 |
| 蒸腾速率 $\text{Tr}(\ln X_9)$ | -0.3363 | 0.0850 | 0.3021 | -0.1967 | 0.1579 | -0.1517 | 0.0449 | 0.1972 | -0.1385 | 0.1340 |
| 胞间隙 CO_2 浓度 $\text{Ci}(\ln X_{10})$ | -0.3179 | -0.0061 | 0.3518 | 0.2400 | -0.1140 | -0.1434 | -0.0032 | 0.2296 | 0.1690 | -0.0968 |
| 气孔导度 $\text{Gs}(\ln X_{11})$ | -0.3280 | 0.2663 | 0.1912 | -0.0094 | 0.1986 | -0.1480 | 0.1406 | 0.1248 | -0.0066 | 0.1686 |
| SPAD ($\ln X_{12}$) | -0.0826 | 0.2564 | -0.3274 | 0.0309 | 0.0328 | -0.0373 | 0.1354 | -0.2137 | 0.0218 | 0.0278 |
| 可溶性蛋白含量 $\text{SP}(\ln X_{13})$ | 0.3225 | 0.1142 | 0.3106 | 0.0229 | 0.2543 | 0.1455 | 0.0603 | 0.2027 | 0.0161 | 0.2159 |
| 超氧化物歧化酶 $\text{SOD}(\ln X_{14})$ | 0.3111 | 0.0549 | 0.2081 | 0.0312 | 0.4234 | 0.1403 | 0.0290 | 0.1358 | 0.0220 | 0.3594 |
| 过氧化物酶 $\text{POD}(\ln X_{15})$ | 0.2268 | 0.3664 | -0.0531 | 0.0039 | 0.0339 | 0.1023 | 0.1935 | -0.0347 | 0.0027 | 0.0288 |
| 游离脯氨酸含量 $\text{Pro}(\ln X_{16})$ | 0.1612 | -0.3077 | 0.2282 | -0.2886 | -0.2164 | 0.0727 | -0.1625 | 0.1489 | -0.2032 | -0.1837 |
| 还原型谷胱甘肽含量 $\text{GSH}(\ln X_{17})$ | 0.2713 | -0.0854 | 0.3115 | 0.1578 | -0.0866 | 0.1224 | -0.0451 | 0.2033 | 0.1111 | -0.0735 |

根据公式(3)计算 $\ln X_i$ 的权重 l_{ij} (表 3),利用公式(4)得到 5 个主成分的解析式:

$$P_1 = 0.0470\ln X_1 - 0.0730\ln X_2 - 0.0080\ln X_3 + 0.0414\ln X_4 + 0.1470\ln X_5 + 0.1046\ln X_6 + 0.0622\ln X_7 - 0.1390\ln X_8 - 0.1517\ln X_9 - 0.1434\ln X_{10} - 0.1480\ln X_{11} - 0.0373\ln X_{12} + 0.1455\ln X_{13} + 0.1403\ln X_{14} + 0.1023\ln X_{15} + 0.0727\ln X_{16} + 0.1224\ln X_{17}$$

$$P_2 = 0.0086\ln X_1 + 0.1278\ln X_2 + 0.2212\ln X_3 + 0.2294\ln X_4 + 0.1254\ln X_5 - 0.0937\ln X_6 + 0.1610\ln X_7 + 0.0039\ln X_8 + 0.0449\ln X_9 - 0.0032\ln X_{10} + 0.1406\ln X_{11} +$$

$$0.1354\ln X_{12} + 0.0603\ln X_{13} + 0.0290\ln X_{14} + 0.1935\ln X_{15} - 0.1625\ln X_{16} - 0.0451\ln X_{17}$$

$$P_3 = 0.0264\ln X_1 - 0.1044\ln X_2 + 0.1678\ln X_3 - 0.0128\ln X_4 + 0.0956\ln X_5 + 0.1092\ln X_6 + 0.0202\ln X_7 + 0.2958\ln X_8 + 0.1972\ln X_9 + 0.2296\ln X_{10} + 0.1248\ln X_{11} - 0.2137\ln X_{12} + 0.2027\ln X_{13} + 0.1358\ln X_{14} - 0.0347\ln X_{15} + 0.1489\ln X_{16} + 0.2033\ln X_{17}$$

$$P_4 = 0.3549\ln X_1 + 0.1672\ln X_2 + 0.0887\ln X_3 + 0.1341\ln X_4 - 0.1738\ln X_5 + 0.2678\ln X_6 - 0.3298\ln X_7 - 0.0525\ln X_8 - 0.1385\ln X_9 + 0.1690\ln X_{10} - 0.0066\ln X_{11} +$$

$$0.0218\ln X_{12} + 0.0161\ln X_{13} + 0.0220\ln X_{14} + 0.0027\ln X_{15} - 0.2032\ln X_{16} + 0.1111\ln X_{17}$$

$$P_5 = -0.3713\ln X_1 + 0.3742\ln X_2 - 0.2276\ln X_3 - 0.2003\ln X_4 + 0.0149\ln X_5 + 0.2347\ln X_6 - 0.1497\ln X_7 - 0.0274\ln X_8 + 0.1340\ln X_9 - 0.0968\ln X_{10} + 0.1686\ln X_{11} + 0.0278\ln X_{12} + 0.2159\ln X_{13} + 0.3594\ln X_{14} + 0.0288\ln X_{15} - 0.1837\ln X_{16} - 0.0735\ln X_{17}$$

依据各主成分的特征值大小,利用公式(5)计算出各主成分的权重分别为 0.345、0.252、0.165、0.142、0.097。利用公式(7)对 $\ln X_i$ 的权重 l_{ij} 和主成分权重 (W_j) 计算得到抗旱综合评价值 S_f 。

$$S_f = \prod_{i=1}^n X_i^{\sum_j^k W_j l_{ij}} = X_1^{0.037} X_2^{0.050} X_3^{0.071} X_4^{0.069} X_5^{0.075} X_6^{-0.091} \times$$

$$X_7^{0.004} X_8^{-0.008} X_9^{-0.015} X_{10}^{0.002} X_{11}^{0.020} X_{12}^{-0.008} X_{13}^{0.122} X_{14}^{0.116} \times X_{15}^{0.081} X_{16}^{-0.038} X_{17}^{0.073}$$

表 4 结果表明,各品种平均 S_f 值为 0.706,分布区间在 0.548~0.872,95%置信度为 0.077。综合抗旱 S_f 值排名前三位的材料分别为齐粳 10(0.872)、DPB15(0.859)、DPB120(0.859)。综合抗旱 S_f 值排名后三位的材料分别为莹稻 2(0.548)、DPB112(0.549)、绥稻 3 号(0.570)。

2.3 聚类分析

以抗旱综合评价 S_f 值为依据,采用欧氏距离最长距离法对 12 个参试材料进行聚类分析,最长距离大于 0.104 时分为 3 类:强抗旱型、中抗旱型和干旱

表 4 品种抗旱性综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation result of rice varieties on drought resistance

| 品种 Variety | S_f | 排位 Rank | 品种 Variety | S_f | 排位 Rank | 品种 Variety | S_f | 排位 Rank |
|-----------------|-------|---------|------------------------|-------|---------|------------------------|-------|---------|
| DPB120 | 0.859 | 3 | DPB70 | 0.609 | 9 | 绥稻 3 号 Suidao 3 | 0.570 | 10 |
| 垦稻 24 Kendao 24 | 0.660 | 8 | DPB15 | 0.859 | 2 | 莹稻 2 Yingdao 2 | 0.548 | 12 |
| DPB71 | 0.739 | 6 | 齐粳 10 Qijing 10 | 0.872 | 1 | 绥育 118146 Suiyu 118146 | 0.694 | 7 |
| DPB112 | 0.549 | 11 | 绥育 117463 Suiyu 117463 | 0.745 | 5 | 绥粳 21 Suijing 21 | 0.764 | 4 |

敏感型(图 1)。第 I 类包括齐粳 10、DPB120 和 DPB15,属强抗旱类型;第 II 类包括绥育 117463、DPB71、齐粳 10、绥育 118146 和垦稻 24,属中抗旱类型;第 III 类由 DPB70、绥稻 3 号、DPB112 和莹稻 2 组成,属干旱敏感型。对类型间各指标的抗旱系数和综合抗旱值进行方差分析,强抗旱类型的可溶性蛋白、SOD 和 POD 与中抗旱型差异不显著,与旱敏感型差异显著或极显著;强抗旱类型的抗旱综合评价值极显著高于中抗旱类型,中抗旱类型极显著高于干旱敏感类型(表 5)。

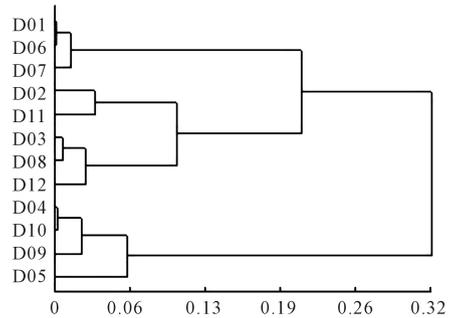


图 1 S_f 值的聚类分析

Fig.1 System clustering of S_f value

表 5 不同抗旱类型水稻的抗旱系数及抗旱综合评价值的方差分析

Table 5 Variance analysis of DTC and S_f of different drought tolerant type

| 抗旱类型 Drought resistance type | 抗旱综合 评价值 S_f | 伤流量 WF | 干物质量 Biomass | 高效叶面 积 HELA | 有效叶面 积 ELA | 茎鞘非结构 性碳水化合物 含量 NSC | 主穗颖花数 SNP | 糖花比 SSR | 净光合速率 P_n |
|------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 强抗旱型 SDT | 0.863aA | 0.246aA | 0.634aA | 0.687aA | 0.707aA | 1.093aA | 0.591aA | 1.833aA | 0.672aA |
| 中抗旱型 MDT | 0.720bB | 0.050aA | 0.548aA | 0.645aA | 0.654aA | 1.113aA | 0.531aA | 2.159aA | 0.516aA |
| 旱敏感型 WDT | 0.569cC | 0.022aA | 0.593aA | 0.561aA | 0.603aA | 0.781aA | 0.505aA | 1.683aA | 0.707aA |
| 抗旱类型 Drought resistance type | 蒸腾速率 Tr | 气孔导度 G_s | SPAD | 可溶性蛋白 含量 SP | 超氧化物歧 化酶 SOD | 过氧化物酶 POD | 游离脯氨 酸含量 Pro | 还原型谷胱甘 肽含量 GSH | |
| 强抗旱型 SDT | 0.536aA | 0.941aA | 0.351aA | 0.942aA | 1.263aA | 1.043aA | 1.620aA | 0.977aA | 1.128aA |
| 中抗旱型 MDT | 0.523aA | 0.803aA | 0.139aA | 1.030aA | 0.959abAB | 0.789abA | 1.417abA | 1.128aA | 0.912aA |
| 旱敏感型 WDT | 0.629aA | 0.923aA | 0.280aA | 0.970aA | 0.593bB | 0.491bA | 0.817bA | 1.176aA | 0.851aA |

注:同列数据后不同大、小写字母分别表示处理之间的差异达到极显著($P < 0.01$)、显著水平($P < 0.05$),下同。

Note: After the same column, values followed by different capital letters and lowercase letters are significant difference between different treatments at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ probability levels, respectively, the same below. SDT: Strong drought tolerance type; MDT: Moderate drought tolerance type; WDT: Weak drought tolerance type.

2.4 抗旱系数与抗旱综合评价值的灰色关联分析

采用灰色关联分析法分析各指标抗旱系数与抗旱综合评价值的关联程度。将所有指标的抗旱系数视为一个灰色系统,每个指标的抗旱系数作为比较数列(子序列),抗旱综合评价值作为参考数列(母序列),将各指标的抗旱系数与抗旱综合评价值作灰色关联分析,关联度越大,说明该指标的抗旱系数与抗旱综合评价值的变化趋势越接近。抗旱

综合评价值与其他指标抗旱系数的关联系数如表 6 所示,除游离脯氨酸含量、伤流量和气孔导度的关联系数小于 0.5,其他 14 个指标关联系数均大于 0.5,与抗旱综合指标值有较大关联。考虑到进行抗旱筛选的效率,可以选用关联系数大,并容易测定的有效叶面积、高效叶面积、干物质量和主穗颖花数为抗旱鉴定指标。

表 6 抗旱系数与抗旱综合评价值的灰色关联系数

Table 6 Grey correlation coefficient of DTC and S_i

| 因子 Factor | 关联系数 CC | 因子 Factor | 关联系数 CC | 因子 Factor | 关联系数 CC |
|-------------------|---------|---------------------|---------|-------------|---------|
| 有效叶面积 ELA | 0.724 | SPAD | 0.638 | 蒸腾速率 T_r | 0.562 |
| 高效叶面积 HELA | 0.706 | 可溶性蛋白含量 SP | 0.636 | 超氧化物歧化酶 SOD | 0.553 |
| 干物质量 Biomass | 0.705 | 胞间隙 CO_2 浓度 C_i | 0.622 | 游离脯氨酸含量 Pro | 0.466 |
| 主穗颖花数 SNP | 0.686 | 净光合速率 P_n | 0.583 | 伤流量 WF | 0.394 |
| 茎鞘非结构性碳水化合物含量 NSC | 0.680 | 糖花比 SSR | 0.583 | 气孔导度 G_s | 0.291 |
| 还原型谷胱甘肽含量 GSH | 0.652 | 过氧化物酶 POD | 0.582 | | |

Note: CC: Correlation coefficient.

3 讨论

3.1 关于采用对数主成分分析合理性的探讨

作物的抗旱性是多种抗旱机理的综合反映,受基因型、环境和基因型×环境的共同影响,目前采用形态、生理、生化等与抗旱性密切相关的多个指标综合反映作物抗旱性已达成共识^[16-17]。当前多数学者^[18-20]采取的方法是以抗旱系数(单项指标处理与对照的比值)描述单项指标变异,对各指标的抗旱系数进行主成分分析,计算各主成分的隶属函数和主成分权重,然后进行多个主成分加权,获得各参试材料的抗旱性评价综合 D 值。但是,传统主成分分析法属于线性降维,而评价指标之间以及主成分和原始数据之间仍可能存在非线性关系,从而导致评价结果的偏差。为此,叶明确等^[11]提出了一种对数主成分评价法,并通过传统的主成分分析法和主成分评价法的比较,证明了传统的主成分分析法运用多个主成分进行综合评价是不可取的,仅用第一主成分进行排名也存在不准确性,而对数主成分评价法解决了指标之间以及主成分与原始数据之间的非线性关系,具有现实意义上的合理性。纪龙等^[8]在运用该方法对绿色超级稻品种进行综合评价的过程中,对数主成分分析的指标权重同专家打分法所得到的指标权重较传统主成分分析更为接近,也从另一个方面验证了其合理性。本研究采用均值化法对抗旱系数进行无量纲化和取对数处理,之后进行主成分分析,将 17 个指标简化为 5

个相互独立的主成分,方差累计贡献率达 83.829%。在对数主成分分析的基础上,计算各指标的 $\ln X_i$ 权重和主成分权重,进而得到抗旱综合评价 S_i 值。各参试品种 S_i 值变幅在 0.548~0.872,平均 0.706,95% 置信度为 0.077,综合抗旱性最强的品种为齐粳 10,最差的品种为莹稻 2。齐粳 10 已经通过黑龙江省品种审定委员会审定,可以应用于旱直播栽培或节水栽培,但其耐旱机理尚需进一步研究。

3.2 关于抗旱筛选指标选择的探讨

在进行作物种质资源抗旱性综合评价时,如何确定与抗旱性关系最密切的评价指标,如何提高评价效率是要解决的基本问题。一般的做法是以利用主成分加权得到的综合评价指标值为因变量,以各单项指标抗旱系数为自变量,进行逐步回归分析,或者对综合评价指标值和各单项指标抗旱系数作直线相关分析,或者将逐步回归与相关分析结合以筛选抗旱评价指标^[21-22]。但是,作物生理因素间复杂的互作关系加之环境因素的影响,构成了一个具有许多不确定因素的灰色系统。当采用白化系统的方法进行分析时,难以确切反映事物的本质,如直线相关分析的 R^2 若小于 0.5,二者关系能用线性解释的分量不足 50%,基本不存在直线关系^[23]。灰色关联度分析是基于灰色系统的灰色过程而进行的因素间时间序列比较,可比较客观地反映出各指标抗旱系数与作物抗旱性之间的相关密切程度。结果表明,参试材料有效叶面积、高效叶面积、干物质量等 14 个指标的抗旱系数与抗旱综合评价 S_i 值的灰

色关联系数较大。考虑到工作效率和鉴定成本,可以选用关联系数排名前 4 位的有效叶面积、高效叶面积、干物质量和主穗颖花数作为抗旱鉴定指标。

4 结 论

通过对数主成分分析和聚类分析,利用抗旱综合评价值 S_i 对 12 份参试材料的抗旱性进行评价,获得强耐旱材料齐粳 10、DPB120 和 DPB15,干旱敏感材料 DPB70、绥稻 3 号、DPB112 和莹稻 2。通过灰色关联分析,从 17 个指标中筛选出有效叶面积、高效叶面积、干物质量和主穗颖花数 4 项适宜作为抗旱性筛选的指标,为寒地水稻种质资源抗旱性鉴定及抗旱育种提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 田又升,谢宗铭,吴向东,等.水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定.干旱地区农业研究[J]. 2015,33(4):173-180.
- [2] Munasinghe M, Price A H. Genetic and root phenotype diversity in Sri Lankan rice landraces may be related to drought resistance [J]. Rice, 2016, 9(24):1-13.
- [3] 刘三雄,黎用朝,吴俊,等.应用隶属函数法综合评价水稻主栽品种抗旱性的研究[J]. 杂交水稻,2015,30(1):74-78.
- [4] Gomez S M, Boopathi N M, Kumar S S, et al. Molecular mapping and location of QTLs for drought-resistance traits in indica rice (*Oryza sativa* L.) lines adapted to target environments [J]. Acta Physiol Plant, 2010, 32:355-364.
- [5] 袁杰,王奉斌,贾春平,等.新疆粳稻苗期对 PEG 胁迫的反应和抗旱性评价[J]. 分子植物育种,2019,17(18):6088-6096.
- [6] 杨瑰丽,杨美娜,黄翠红,等.水稻幼穗分化期的抗旱性研究与综合评价[J].华北农学报,2015,30(6):140-145.
- [7] 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.
- [8] 纪龙,申红芳,徐春春,等.基于非线性主成分分析的绿色超级稻品种

种综合评价基于非线性主成分分析的绿色超级稻品种综合评价[J].作物学报,2019,45(7):982-992.

- [9] 田又升,谢宗铭,吴向东,等.水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):173-180.
- [10] 叶双峰.关于主成分分析做综合评价的改进[J].数理统计与管理,2001,20(2):52-55.
- [11] 叶明确,杨亚娟.主成分综合评价法的误区识别及其改进[J].数量经济技术经济研究,2016,33(10):142-153.
- [12] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2009:100-228.
- [13] 卢少云,黎用朝,郭振飞,等.钙提高水稻幼苗抗旱性的研究[J].中国水稻科学,1999,13(3):161-164.
- [14] 任红旭,陈雄,吴冬秀. CO₂ 浓度升高对干旱胁迫下蚕豆光合作用和抗氧化能力的影响[J].作物学报,2001,27(6):729-736.
- [15] 赵步洪,奚岭林,杨建昌,等.两系杂交稻茎鞘物质运转与籽粒充实特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(10):9-14,19.
- [16] 张笑笑,潘映红,任富莉,等.基于多重表型分析的准确评价高粱抗旱性方法的建立[J].作物学报,2019,45(11):1735-1745.
- [17] 单云鹏,陈新慧,万平,等.小豆种质资源苗期抗旱性评价及抗旱资源筛选[J].植物遗传资源学报,2019,20(5):1151-1159.
- [18] 陈永坤,李灿辉,雷春霞,等.二倍体马铃薯 *S. phureja* 种质资源的抗旱性鉴定与综合评价[J].分子植物育种,2019,17(10):3416-3423.
- [19] 崔静宇,关小康,杨明达,等.基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定[J].玉米科学,2019,27(5):62-72.
- [20] 张宇君,赵丽丽,王普昶,等.燕麦萌发期抗旱指标体系构建及综合评价[J].核农学报,2017,31(11):2236-2242.
- [21] 胡树平,苏治军,于晓芳,等.玉米自交系抗旱相关性状的主成分分析与模糊聚类[J].干旱地区农业研究,2016,34(6):81-88,176.
- [22] 吕学莲,白海波,惠建,等.籼粳稻杂交衍生 RIL 系的苗期抗旱性评价[J].植物遗传资源学报,2019,20(3):556-563.
- [23] 姚素梅,王维金.应用灰色关联度分析影响两系杂交稻结实率的生理因素[J].生物数学学报,2007,(1):157-163.

(上接第 206 页)

- [23] 郭数进,李玮瑜,马艳芸,等.山西不同生态型大豆品种苗期耐低温性综合评价[J].植物生态学报,2014,38(9):990-1000.
- [24] 张勇.冷害对黑龙江克拜地区大豆农艺性状及产量的影响[J].黑龙江农业科学,2013,(10):16-19.
- [25] 陆艳,李佳,孙健,等.烯效唑生物化学效用研究进展[J].大麦与谷类科学,2017,34(1):6-10.
- [26] 刘学庆,孙纪霞,丁朋松,等.低温胁迫对蝴蝶兰内源激素的影响[J].江西农业大学学报,2009,29(5):464-469.
- [27] 沈漫.常春藤质膜透性和内源激素与抗寒性关系初探[J].园艺学报,2005,32(1):141-144.
- [28] 李春燕,徐雯,刘立伟,等.低温条件下拔节期小麦叶片内源激素含量和抗氧化酶活性的变化[J].应用生态学报,2015,26(7):2015-2022.
- [29] 马艳华.烯效唑对黑麦草抗旱生理特性影响的研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [30] 李防洲,冶军,侯振安.外源调节剂包衣对低温胁迫下棉花种子

萌发及幼苗耐寒性的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):192-197.

- [31] 项洪涛,王立志,王彤彤,等.孕穗期低温胁迫对水稻结实率及叶片生理特性的影响[J].农学学报,2016,32(11):1-7.
- [32] 朱木兰,何觉民.烯效唑对农作物的生理效应及应用效果[J].作物研究,1999,(2):40-43.
- [33] 赵江涛,李晓峰,李航,等.可溶性糖在高等植物代谢调节中的生理作用[J].安徽农业科学,2006,34(24):6423-6425.
- [34] 项洪涛,王彤彤,郑殿峰,等.孕穗期低温条件下 ABA 对水稻结实率及叶片生理特性的影响[J].中国农学通报,2016,32(36):16-23.
- [35] 孙福东,冯乃杰,郑殿峰,等.植物生长调节剂 S₃₃₀₇ 和 DTA-6 对大豆荚的生理代谢及 GmAC 的影响[J].中国农业科学,2016,49(7):1267-1276.
- [36] 王畅,赵海东,冯乃杰,等. S₃₃₀₇ 和 DTA-6 对芸豆生殖生长阶段光合特性和产量的影响[J].草业学报,2018,27(11):162-170.