

# 普通菜豆苗期耐旱性鉴定

蔡德宝<sup>1</sup>, 杨树琼<sup>1</sup>, 马郡妍<sup>1</sup>, 陈吉宝<sup>1,2</sup>

(南阳师范学院水资源与现代农业学院, 河南南阳 473061; 河南省菌类食品工程技术研究中心, 南阳 473061)

**摘要:** 普通菜豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 是主要食用豆类作物之一, 干旱是限制普通菜豆生长的最严重非生物胁迫因子, 培育耐旱品种是减少干旱对普通菜豆生长不利影响的重要措施。本研究利用自然干旱法, 在苗期对 60 个普通菜豆品种进行干旱处理, 并测定叶片相对含水量、水分利用效率和叶绿素荧光参数等 12 项生理指标, 分别以幼苗萎蔫指数法和耐旱隶属函数综合值法 (*D* 值法) 对 60 个普通菜豆品种进行耐旱性评价, 筛选耐旱品种。结果表明, 依据 *D* 值大小, F00000017、F00000518、F00002179、F00003370、F00004321 和“南阳黑”共 6 个品种被判定为高耐旱品种, 其中除“南阳黑”外的 5 个品种也被幼苗萎蔫指数法判定为高耐旱品种; F00001280、F00003346、F00005237、F00004357、F00004392、F00005243 共 6 个品种用幼苗萎蔫指数法被判定为高水敏性品种, 其中前 3 个品种用 *D* 值法也被判定为高水敏性品种, 后 3 个为水敏性品种。以上结果说明两种方法对于高耐旱品种和高水敏性品种的判定有很好的 consistency。本研究获得高耐旱品种和高水敏性品种可应用于普通菜豆耐旱机理研究和耐旱品种选育。

**关键词:** 普通菜豆; 苗期; 耐旱

## Screening of Drought Tolerant Germplasm of Common Bean in Seedling Stage

GAI Debao<sup>1</sup>, YANG Shuqiong<sup>1</sup>, Ma Junyan<sup>1</sup>, CHEN Jibao<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Water Resources and Modern Agriculture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan;

<sup>2</sup>Engineering Technology Research Center of Fungal Food in Henan Province, Nanyang 473061)

**Abstract:** Drought is the most important abiotic stress factor limiting the growth of common bean. In this study, 60 representative common bean germplasms were treated with drought stress using natural drought method. 12 leaf physiology characters, such as leaf electrical conductivity, water use efficiency (WUE) and 5 the Photosystem II chlorophyll fluorescence parameters, were analyzed between drought stress treatment group and control group. The drought tolerance of 60 common beans was evaluated by seedling wilting grade and drought tolerance subordinate function value (*D* value). The results showed that 6 varieties, including F00000017, F00000518, F00002179, F00003370, F00004321 and Nanyang Black variety, were classified as the strongest drought tolerance variety based on the leaf wilting index. Among the 6 varieties, 5 varieties except for Nanyang Black variety were also identified as the strongest drought tolerance variety based on the *D* value. 6 varieties, including F00001280, F00003346, F00005237, F00004357, F00004392 and F00005243, were classified as the strongest drought-susceptible variety based on the leaf wilting index. F00001280, F00003346, F00005237 were also identified as the strongest drought-susceptible variety based on *D* value. These results indicated that there were higher consistency in identifying the common bean drought tolerance between the seedling wilting grade method and drought tolerance subordinate function value (*D* value) method. The strongest drought tolerance varieties and the strongest drought-susceptible varieties identified in this study could be used in the study of common bean drought tolerance mechanism and breeding.

**Key words:** common bean, seedling, drought tolerance

普通菜豆是世界上最重要的食用豆科作物, 它是人们蛋白质、碳水化合物、以及矿物质的主要来源之

收稿日期: 2024-12-27 网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为作物抗逆种质资源发掘及抗逆分子机理研究, E-mail: 643147683@qq.com

**通信作者:** 陈吉宝, 研究方向为作物抗逆种质资源发掘及抗逆分子机理研究, E-mail: chenjibao2012@163.com

**基金项目:** 河南省科技攻关计划项目 (212102110248)

**Foundation project:** Science and Technology Project of Henan Province (212102110248)

一。在众多非生物胁迫中，干旱是对普通菜豆生产最具破坏性的，全球约 60%的产区受干旱胁迫的影响并造成重大损失，在干旱和半干旱地区尤为明显<sup>[1]</sup>。普通菜豆在我国主要分布于黑龙江西北部、山西、陕西和新疆的北部等干旱和半干旱地区<sup>[2]</sup>。由于气候的变化，这些产区的旱灾将会进一步加剧，严重影响当地普通菜豆的生产。

我国具有丰富的普通菜豆种质资源，从现有的种质资源中筛选耐旱材料直接作为品种推广，是开展普通菜豆耐旱新品种选育的一条捷径。已有研究者分别从苗期、开花期、鼓粒期和全生育期等生育阶段对普通菜豆耐旱性进行了研究，筛选出一大批具有较强耐旱性的种质，有力推动了普通菜豆耐旱育种的发展<sup>[3-7]</sup>。在普通菜豆的整个生育期中，苗期对干旱反应比较敏感，因此在苗期对普通菜豆的耐旱性鉴定可以筛选出大量耐旱品种。李龙等<sup>[8]</sup>采用灰色关联度理论进行苗期耐旱性指标筛选，通过加权耐旱指数和耐旱度量值 *D* 值对供试材料进行耐旱性综合评价并通过聚类分析划分耐旱等级，在 50 个参试普通菜豆品种中筛选出白金德利豆、跃进豆、兔子腿、圆白菜豆和 260205 耐旱性强的材料；增辉等<sup>[9]</sup>通过隶属函数法和灰色关联分析法对普通菜豆进行耐旱性和耐旱指标综合评定，鉴定出 F00001863、F00002973、F00003992 和 F00003057 耐旱性较的普通菜豆；李洁等<sup>[10]</sup>通过测定干旱胁迫 12 d 和复水 3 d 后各项形态和生理指标，采用干旱胁迫和复水后两者的耐旱度量值 (*D* 值)、聚类分析、逐步回归方程以及通径分析相结合的方法，对普通菜豆进行苗期的耐旱鉴定，筛选出阿尔当、黑芸豆、五月先、等 10 份高抗材料。尽管我国科学家对大量普通菜豆种质资源的耐旱性进行了鉴定，但仍有大部分种质资源未曾开展过耐旱性分析，因此，继续深入开展普通菜豆耐旱种质鉴定筛选研究是很有必要的。

本研究以 60 份普通菜豆为材料，在三叶期进行干旱胁迫处理，通过对干旱胁迫处理与正常浇水条件下不同品种的叶片相对含水量、水分利用效率和叶绿素荧光参数等指标的分析，筛选耐旱种质资源，为耐旱菜豆优异资源发掘、耐旱新品种培育提供材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

60 份普通菜豆种质由中国农业科学院作物科学研究所食用豆课题组惠赠，其中国内种质 40 份，国外品种 20 份（表 1）。

表 1 供试材料

Table1 Germplasm used in this study

编号	统一编号	产地	编号	统一编号	产地	编号	统一编号	产地	编号	统一编号	产地
Number	Unified No.	Origin	Number	Unified No.	Origin	Number	Unified No.	Origin	Number	Unified No.	Origin
C01	F00000003	北京	C16	F00002502	吉林	C31	F00004392	CIAT	C46	F00005244	黑龙江
C02	F00000117	内蒙古	C17	F00002513	黑龙江	C32	F00004398	CIAT	C47	F00005245	黑龙江

C03	F0000314	黑龙江	C18	F00002959	贵州	C33	F00004410	CIAT	C48	F00005248	黑龙江
C04	F00000483	黑龙江	C19	F00003346	黑龙江	C34	F00004497	湖北	C49	F00005263	甘肃
C05	F00000507	吉林	C20	F00003370	美国	C35	F00004837	中国	C50	F00005300	河北
C06	F00000518	吉林	C21	F00003817	贵州	C36	F00004845	中国	C51	F00005849	哥伦比亚
C07	F00001280	北京	C22	F00003970	贵州	C37	F00004851	中国	C52	F00005857	阿根廷
C08	F00001405	山西	C23	F00004025	甘肃	C38	F00004852	中国	C53	F00005861	阿根廷
C09	F00001704	山西	C24	F00004321	CIAT	C39	F00005035	云南	C54	F00005862	阿根廷
C10	F00001850	贵州	C25	F00004334	CIAT	C40	F00005038	云南	C55	F00005879	哥伦比亚
C11	F00002032	陕西	C26	F00004341	CIAT	C41	F00005039	云南	C56	Manaus-N03	巴西
C12	F00002036	陕西	C27	F00004349	CIAT	C42	F00005040	云南	C57	Manaus-N05	巴西
C13	F00002127	CIAT	C28	F00004357	CIAT	C43	F00005054	甘肃	C58	龙 25535	黑龙江
C14	F00002179	来源不明	C29	F00004374	CIAT	C44	F00005237	黑龙江	C59	龙 4	黑龙江
C15	F00002476	吉林	C30	F00004381	CIAT	C45	F00005243	黑龙江	C60	南阳黑	河南

## 1.2 试验方法

**1.2.1 试验设计** 试验选择大小一致、无病虫害、无损的普通菜豆种子，经次氯酸钠（10%）消毒 20 min 后用无菌水清洗 5 次备用。以铺有 2 张滤纸的培养皿（直径 90 mm）为发芽床，将消毒后的种子放入培养皿中，培养至种子萌发。将萌发的种子播种到装有 300 g 过 2 mm 筛风干土的培养钵内，每钵 5 芽，浇水使土壤相对含水量达到 70%（±2%），在温室内培养（温度 20~25 °C，光照条件为光/暗=16 h/8 h），出苗后每盆留长势一致幼苗 2 株，培养至第一三出复叶完全展开时（约 17 d 左右）开始干旱胁迫处理。干旱胁迫处理采用自然干旱法，即干旱胁迫处理前浇水，使土壤相对含水量达到 70%（±2%），然后放置于温室内，任普通菜豆幼苗自然生长，期间不再浇水，待土壤相对含水量降至 40%（±2%）时停止干旱胁迫，开始检测各指标。土壤相对含水量采用整钵称重法计算。干旱胁迫处理设 3 次重复，每次重复处理 10 钵。土壤相对含水量达 40%，相当于中等程度的干旱<sup>[11]</sup>。

**1.2.2 光合参数的测定** 于 9:00~11:30，利用 LI-6800 便携式光合仪测定叶片的光合参数，叶室选用 6800-01F 荧光叶室（圆形，4 cm<sup>2</sup>），选择无遮挡、受光条件好且刚刚完全展的第一三出复叶。光合仪参数：光强为 1500 μmol/m<sup>2</sup>·s，CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μmol/mol，相对湿度为 60%，温度 25°C，气体流速为 500 μmol/s。测定的光合参数包括叶片的净光合速率（Pn）、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度（Ci）、蒸腾速率（Tr）、气孔导度（Gs）。利用光合参数计算水分利用效率（water use efficiency, WUE），计算公式为 WUE = Pn/Tr。每个品种处理组与对照组各选取 5 株，测定 3 次重复，取平均值。

**1.2.3 叶绿素荧光参数的测定** 采用 IMAGING-PAM 叶绿素荧光成像系统（德国 WALZ 公司），在干旱胁迫处理结束后，于 9:00~11:30 期间进行对照组和处理组叶绿素荧光参数的测定，每个品种处理组与对照组各选取 5 株，重复 3 次。参照仪器使用说明，在黑暗条件下适应 30 min 后，饱和脉冲光设为 8000 μmol/m<sup>2</sup>·s，测定暗适应下的初始荧光（F<sub>0</sub>）、暗适应下最大荧光（F<sub>m</sub>）、光适应下的初始荧光（F<sub>0</sub>'）、光适应下最大

荧光 (Fm')、稳态荧光 (Fs) 和可变荧光 (Fv) 等基本参数, 通过以下公式计算其他荧光参数:

$$(1) \text{ PSII最大光化学量子产量 } (Fv/Fm) = (Fm-F_0)/Fm$$

$$(2) \text{ PSII潜在活性 } (Fv/F_0) = (Fm-F_0)/F_0$$

$$(3) \text{ PSII 的实际光合效率 } (Y(II)) = (Fm'-Fs)/Fm'$$

$$(4) \text{ 光化学猝灭系数 } (qP) = (Fm'-Fs)/(Fm'-F_0')$$

$$(5) \text{ 非光化学淬灭系数 } (NPQ) = (Fm-Fm')/Fm'$$

1.2.4 叶片相对含水量 (relative water content, RWC) 的测定 每个品种处理组和对照组各选取 5 株, 取第一三出复叶中间小叶 1 片, 称取鲜重后用蒸馏水浸泡 10 h 后称重作为水饱和重, 水饱和后在 65 °C 下烘干 48 h 后称重记为干重, 计算叶片相对含水量。相对含水量计算公式为:  $RWC (\%) = (\text{鲜重}-\text{干重}) / (\text{水饱和重}-\text{干}) \times 100\%$ 。

1.2.5 叶片电导率 (electrical conductivity, EC) 的测定 取普通菜豆幼苗第一三出复叶中间小叶 1 片, 将整个叶片用去离子水洗净, 晾干后浸泡在去离子水中, 每隔 20 min 轻轻搅动一次, 1 h 后测定浸泡液电导率。叶片电导率用 DDB-303A 型便携式电导率仪测定。每个品种处理组与对照组各选取 5 株, 每株每片叶测定 1 次, 取平均值代表该品种的电导率。

1.2.6 耐旱性综合评价值计算 单项指标的耐旱系数 (drought resistance coefficient, DC)、综合指标隶属函数值 (subordinative function value, U)、综合指标权重 ( $\omega$ ) 和耐旱性综合评价值 (drought resistance comprehensive evaluation value, D) 计算公式如下:

$$DC = X_i / CK_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $X_i$  和  $CK_i$  分别表示第  $i$  个材料干旱胁迫处理和正常供水处理的指标测定值。

$$U_{i,j} = (X_{i,j} - X_{j,\min}) / (X_{j,\max} - X_{j,\min}), \quad i = 1, 2, \dots, 60; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $U_{i,j}$  表示第  $i$  个材料  $j$  个主成分指标的耐旱隶属函数值;  $X_{i,j}$  表示第  $i$  个材料第  $j$  个主成分指标值;  $X_{j,\min}$  和  $X_{j,\max}$  分别表示所有材料中第  $j$  个主成分指标的最小值和最大值。

$$\omega_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $\omega_j$  表示第  $j$  个主成分的重要程度即权重;  $P_j$  代表各品种第  $j$  个主成分指标的贡献率。

$$D = \sum_{j=1}^n (U_{i,j} \times \omega_j), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $D$  值为第  $i$  个普通菜豆材料在干旱胁迫条件下的耐旱性综合评价值。

1.2.7 数据分析 利用 Excel 2010 进行数据整理。利用统计分析软件 SPSS 26 进行描述性分析、相关性分析、主成分分析、方差分析。采用 Origin 2021 软件进行聚类分析, 得出聚类树状图。

## 2 结果与分析

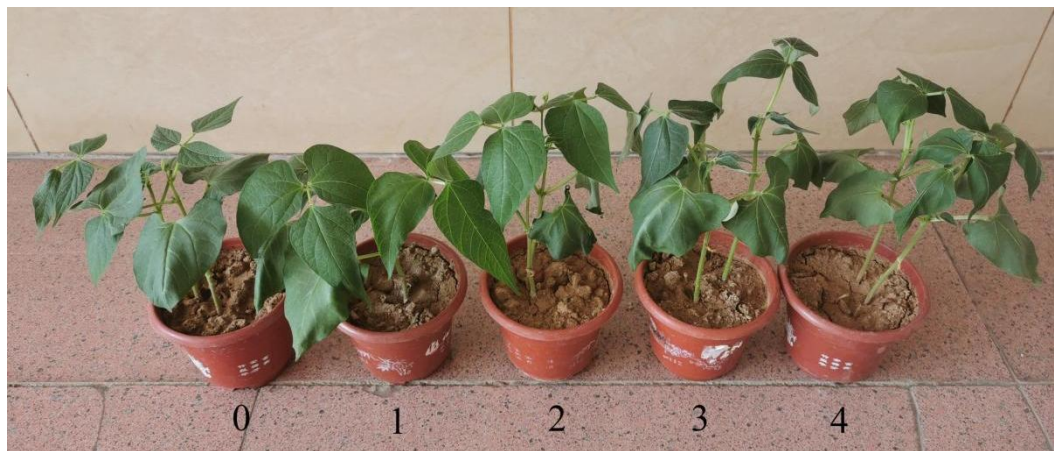
### 2.1 普通菜豆苗期干旱胁迫萎蔫指数分级

参考大豆耐旱性叶片萎蔫指数分级标准<sup>[12]</sup>制定普通菜豆叶片萎蔫程度分级标准（表 2）。依据叶片干旱胁迫萎蔫程度分级标准和植株萎蔫程度对参试材料进行耐旱等级划分（图 1,表 3）。本研究 60 份材料中，高耐旱（0 级）材料有 5 份，耐旱（1 级）材料有 9 份，中度耐旱（2 级）材料 16 份，耐旱敏感（3 级）材料有 24 份，高敏感（4 级）材料 6 份。

表 2 基于幼苗叶片萎蔫程度的普通菜豆幼苗耐旱性分级标准

Table 2 Classification of drought tolerance of common bean at seedlings based on leaf wilting

等级	耐旱性	叶片萎蔫程度分级标准
Grade	Drought tolerance	Standard of leaf wilting
0	高耐旱	生长正常，未出现旱害症状
1	耐旱	轻微萎蔫（萎蔫出现在个别植株）
2	中耐旱	萎蔫（一半的植株或较多的植株）
3	敏感	明显萎蔫（多数植株萎蔫）
4	高敏感	严重萎蔫（大部分植株叶片卷曲）



0、1、2、3、4 分别代表高耐旱、耐旱、中耐旱、敏感、高敏感 5 种耐旱等级

The number 0, 1, 2, 3, 4 represent the drought tolerance grade of the strongest drought tolerance, drought tolerance, middle drought tolerance, drought sensitivity, and the strongest drought sensitivity, respectively

图 1 普通菜豆幼苗干旱胁迫萎蔫指数分级标准

Fig. 1 Standard for classification of drought stress wilting index of common bean at seedlings

表 3 基于幼苗萎蔫程度的普通菜豆耐旱性等级评价

Table 3 Drought resistance grade of 60 common bean germplasms based on seedlings wilting index

编号	等级	编号	等级	编号	等级	编号	等级	编号	等级	编号	等级
Number	Grade	Number	Grade	Number	Grade	Number	Grade	Number	Grade	Number	Grade
C01	2	C11	3	C21	3	C31	4	C41	3	C51	1

C02	0	C12	2	C22	3	C32	1	C42	2	C52	1
C03	2	C13	2	C23	3	C33	3	C43	2	C53	3
C04	3	C14	0	C24	0	C34	2	C44	4	C54	3
C05	2	C15	2	C25	1	C35	3	C45	4	C55	2
C06	0	C16	3	C26	2	C36	1	C46	2	C56	2
C07	4	C17	2	C27	3	C37	3	C47	2	C57	3
C08	3	C18	3	C28	4	C38	2	C48	3	C58	3
C09	3	C19	4	C29	1	C39	3	C49	1	C59	3
C10	3	C20	0	C30	1	C40	3	C50	3	C60	1

## 2.2 普通菜豆苗期干旱胁迫各性状耐旱系数分析

60 份材料的 12 个性状的耐旱系数计算显示（表 4），除 REC、WUE 外，各指标耐旱系数平均值均小于 1，说明在干旱胁迫条件下，这些性状表型值较对照组均明显降低。EC、RWC、Fv/F0、Fv/Fm、Y(II)、NPQ、qP、Tr、Gs、Pn、Ci、WUE 的耐旱系数的变异系数分别是 11.16%、12.08%、18.23%、11.04%、11.26%、37.93%、7.96%、50.02%、48.02%、43.03%、15.50%、24.98%。其中 NPQ、Tr、Gs、Pn、WUE 指标耐旱系数变异丰富，蒸腾速率变异系数最大（50.02%），说明该干旱处理能够很好的区分这 60 份普通菜豆的上述生理指标，特别是对于反映光合作用的指标影响最明显。EC 和 RWC 的变异系数较低，说明该干旱处理对于区分材料之间的叶片电导率和含水量不明显。

表 4 普通菜豆干旱胁迫下各性状耐旱系数

Table 4 Drought tolerance index of common bean traits

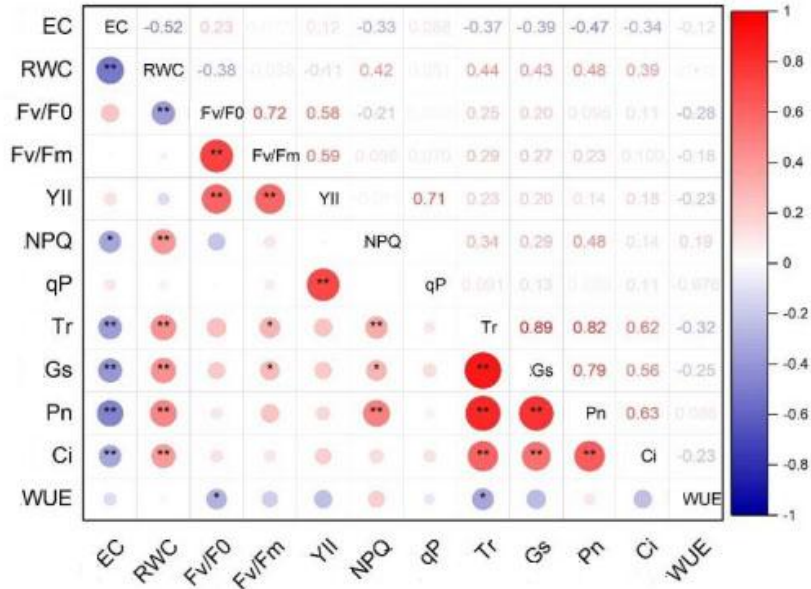
编号 Number	电导率 EC	相对含水量 RWC	叶绿素荧光参数					蒸腾速率 Tr	气孔导度 Gs	光合速率 Pn	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Ci	水分利用率 WUE
			Fv/F0	Fv/Fm	Y(II)	NPQ	qP					
C01	1.12	0.91	0.71	0.88	0.84	1.78	0.95	0.35	0.31	0.33	0.88	0.94
C02	1.08	0.98	0.99	0.99	1.04	1.84	1.04	0.57	0.49	0.48	0.87	1.09
C03	1.19	0.83	0.77	0.92	0.96	1.66	1.04	0.26	0.19	0.31	0.75	1.21
C04	1.12	0.84	0.75	0.91	0.88	1.68	0.98	0.30	0.27	0.33	0.76	1.12
C05	1.20	0.91	0.70	0.88	0.86	1.63	0.98	0.33	0.42	0.46	0.80	1.04
C06	1.08	0.94	1.14	1.04	0.97	1.52	0.93	0.63	0.47	0.54	0.96	1.05
C07	1.16	0.84	0.81	0.73	0.71	1.20	0.73	0.19	0.20	0.19	0.71	1.17
C08	1.24	0.87	0.73	0.78	0.74	0.66	0.97	0.43	0.27	0.16	0.69	1.37
C09	1.38	0.86	0.79	0.80	0.80	0.79	1.00	0.14	0.38	0.28	0.55	1.68
C10	1.26	0.85	0.77	0.81	0.89	1.32	1.00	0.30	0.27	0.18	0.77	0.61
C11	1.31	0.72	0.86	0.84	0.80	1.16	0.96	0.13	0.26	0.29	0.72	1.69
C12	1.11	0.91	0.78	0.82	0.82	1.56	1.00	0.60	0.49	0.49	0.86	0.83
C13	1.52	0.72	1.17	1.05	0.98	0.83	0.96	0.20	0.18	0.14	0.91	0.74
C14	1.06	0.75	0.91	0.96	0.86	1.91	0.90	0.52	0.55	0.59	0.92	1.39
C15	1.52	0.72	0.99	0.99	0.91	1.59	0.92	0.20	0.17	0.23	0.51	1.12
C16	1.10	0.84	0.71	0.88	0.91	1.09	1.02	0.30	0.31	0.28	0.86	0.92
C17	1.14	0.91	0.88	0.94	0.91	1.22	0.97	0.20	0.13	0.22	0.85	1.08
C18	1.10	0.96	0.73	0.88	0.64	0.93	0.77	0.38	0.35	0.50	1.10	1.32
C19	1.14	0.77	0.80	0.93	0.65	1.06	0.76	0.19	0.17	0.16	0.67	0.83
C20	1.19	0.99	0.98	0.99	1.05	1.66	1.06	0.52	0.54	0.55	0.83	1.11
C21	1.09	0.70	0.94	0.98	0.84	1.27	0.86	0.15	0.16	0.16	0.63	1.05
C22	1.40	0.65	0.92	0.97	0.90	0.72	0.93	0.16	0.15	0.21	0.66	1.32
C23	1.15	0.89	0.73	0.89	0.89	0.94	1.00	0.18	0.17	0.20	0.58	1.09
C24	0.96	0.97	1.03	1.00	1.00	1.98	0.99	0.63	0.56	0.56	1.08	0.69
C25	1.15	0.92	0.63	0.83	0.82	1.96	0.98	0.24	0.26	0.34	0.91	1.44
C26	1.32	0.84	0.83	0.94	0.87	1.70	0.94	0.22	0.24	0.26	0.72	1.23
C27	1.33	0.61	0.97	0.99	0.98	0.99	0.98	0.27	0.21	0.23	0.62	0.86
C28	1.28	0.76	0.64	0.64	0.89	0.79	1.08	0.20	0.20	0.23	0.92	0.90
C29	1.09	0.95	0.73	0.91	0.91	1.90	1.00	0.39	0.41	0.40	0.92	1.09
C30	1.16	0.98	0.66	0.88	0.89	2.50	1.02	0.37	0.13	0.61	0.85	1.67
C31	1.42	0.91	0.68	0.69	0.76	1.03	0.97	0.26	0.26	0.18	0.81	0.70
C32	1.35	0.78	1.07	1.02	0.95	0.80	0.93	0.42	0.35	0.41	0.86	0.97
C33	1.29	0.72	0.79	0.93	1.02	0.92	1.10	0.15	0.17	0.22	0.79	1.42
C34	1.14	0.84	0.89	0.96	0.96	1.57	1.01	0.49	0.53	0.40	0.89	0.84
C35	1.28	0.76	0.76	0.62	0.90	0.75	0.98	0.21	0.16	0.22	0.84	1.28
C36	1.57	0.59	1.29	1.09	1.18	0.69	1.13	0.31	0.28	0.27	0.84	0.87
C37	1.33	0.89	0.90	0.97	0.85	0.88	0.87	0.26	0.17	0.32	0.82	1.28
C38	1.02	0.78	0.97	0.99	1.03	1.06	1.04	0.14	0.24	0.19	0.68	1.40

C39	1.49	0.76	0.89	0.95	0.88	0.90	0.89	0.12	0.12	0.14	0.71	1.16
C40	1.31	0.79	0.87	0.98	1.02	0.86	1.06	0.12	0.12	0.20	0.72	1.67
C41	1.09	0.95	0.55	0.82	0.77	0.89	0.94	0.17	0.21	0.29	0.68	1.75
C42	1.09	0.95	0.54	0.84	0.84	1.76	1.01	0.55	0.55	0.59	0.89	1.16
C43	1.33	0.76	0.68	0.79	0.74	2.16	0.90	0.17	0.15	0.33	0.63	1.94
C44	1.31	0.78	0.79	0.85	0.78	0.94	0.91	0.15	0.15	0.12	0.52	0.82
C45	1.43	0.77	0.70	0.73	0.85	0.97	0.94	0.22	0.16	0.20	0.78	0.97
C46	1.19	0.89	0.82	0.94	0.97	0.94	1.02	0.41	0.44	0.37	0.88	0.91
C47	1.16	0.94	0.66	0.87	0.82	2.44	0.95	0.14	0.17	0.24	0.71	1.68
C48	1.19	0.95	0.68	0.87	0.87	0.90	1.03	0.23	0.22	0.29	0.82	1.21
C49	1.15	0.99	0.90	0.98	0.88	0.98	0.90	0.47	0.50	0.55	1.02	1.18
C50	1.28	0.87	0.72	0.89	0.89	1.34	1.02	0.18	0.17	0.16	0.68	0.91
C51	1.15	0.85	0.81	0.87	0.86	2.14	0.88	0.24	0.20	0.34	0.79	1.55
C52	1.28	0.90	0.86	0.95	0.83	1.81	0.87	0.64	0.55	0.54	0.75	1.11
C53	1.08	0.93	0.82	0.93	0.95	0.89	1.04	0.36	0.37	0.36	0.87	1.01
C54	1.32	0.59	0.82	0.75	0.75	0.69	0.94	0.30	0.28	0.34	0.86	1.16
C55	1.23	0.93	0.57	0.83	0.82	1.95	1.01	0.24	0.31	0.34	0.83	1.40
C56	1.23	0.93	0.87	0.97	0.87	0.82	0.92	0.24	0.27	0.21	0.78	1.04
C57	1.15	0.77	0.91	0.96	0.79	1.52	0.85	0.26	0.24	0.28	0.76	1.09
C58	1.11	0.79	0.79	0.83	0.84	0.74	0.91	0.15	0.15	0.33	0.78	1.31
C59	1.06	0.77	0.94	0.81	0.84	0.77	0.91	0.22	0.21	0.34	0.81	1.48
C60	1.03	0.84	1.10	1.03	1.00	1.40	0.97	0.58	0.54	0.60	0.91	1.16
最小值 Min	0.96	0.59	0.54	0.62	0.64	0.66	0.73	0.12	0.12	0.12	0.51	0.61
最大值 MAX	1.57	0.99	1.29	1.09	1.18	2.50	1.13	0.64	0.56	0.61	1.10	1.94
均值 Average	1.22	0.84	0.83	0.90	0.88	1.29	0.96	0.30	0.29	0.32	0.79	1.17
方差 STDEV	0.136	0.102	0.151	0.099	0.099	0.489	0.076	0.150	0.137	0.138	0.123	0.292
变异系数 CV	0.112	0.121	0.182	0.110	0.113	0.379	0.080	0.500	0.480	0.430	0.155	0.250

### 2.3 普通菜豆苗期各性状耐旱系数相关性分析

对 12 个性状耐旱系数进行相关性分析表明, EC 与 RWC、Tr、Gs、Pn、Ci 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与 NPQ 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); RWC 与 Fv/F0 呈极显著负相关, 与 NPQ、Tr、Gs、Pn、Ci 呈极显著正相关; Fv/F0 与 Fv/Fm、Y(II)呈极显著正相关, 与 WUE 呈显著负相关; Fv/Fm 与 Tr、Gs 呈显著正相关; Y(II)与 qP 呈极显著正相关; NPQ 与 Tr、Pn 呈极显著正相关, 与 Gs 呈显著正相关; Tr 与 Gs、Pn、Ci 呈极显著正相关, 与 WUE 呈显著负相关; Gs 与 Pn、Ci 呈极显著正相关; Pn 与 Ci 呈极显著正相关 (图 2)。





\*: 表示  $P < 0.05$  的显著水平; \*\*: 表示  $P < 0.01$  的显著水平

\*: Indicates a significant level of  $p < 0.05$ ; \*\*: indicates a significant level of  $p < 0.01$

图 2 普通菜豆干旱胁迫下各性状耐旱系数相关性

Fig. 2 Correlation of drought tolerance index of common bean traits under drought stress

## 2.4 普通菜豆苗期各性状耐旱系数主成分分析

为降低数据的冗余性，以较少的主成分替代原始指标，对各性状耐旱系数进行主成分分析，以便进一步确定和评价耐旱鉴定的重要指标（表 5）。根据特征值大于 1 的原则，选取了前 4 个主成分因子（表 5 中 F1、F2、F3、F4），各因子的贡献率分别为 34.65%、22.57%、11.06%、9.68%，累计贡献率达到 77.96%，说明这 4 个主成分因子可代表 12 个单项指标的绝大部分信息。从表 5 可以看出，主成分因子 F1 主要与 Tr、Gs、Pn、Ci 光合参数以及 EC 和 RWC 密切相关，主成分因子 F2 和主成分因子 F3 主要与 Fv/F0、Fv/Fm、Y(II)以及 qP 等叶绿素荧光参数密切相关，主成分因子 F4 主要与 WUE 密切相关。综上，通过主成分分析，可以把普通菜豆的 12 个抗干旱性能指标分解成 4 个单独的、可进行更全面抗旱性分析的综合指标。

表 5 各性状的主成分特征值及特征向量描述

Table 5 Eigen values and eigenvectors of the Traits principal components

性状 Trait	前 4 个主成分因子 Comprehensive factors			
	F1	F2	F3	F4
电导率 EC	-0.529	0.476	-0.006	-0.115
相对含水量 RWC	0.579	-0.519	0.186	-0.086
PSII潜在活性 Fv/F0	0.213	0.831	-0.333	0.263
PSII最大光化学量子产量 Fv/Fm	0.384	0.653	-0.122	0.484
PSII实际光合效率 Y(II)	0.332	0.778	0.479	0.048
非光化学淬灭系数 NPQ	0.464	-0.372	0.245	0.455

光化学猝灭系数 qP	0.190	0.37	0.848	-0.272
蒸腾速率 Tr	0.918	0.045	-0.178	-0.113
气孔导度 Gs	0.887	0.017	-0.130	-0.115
净光合速率 Pn	0.891	-0.171	-0.026	0.161
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Ci	0.723	-0.031	-0.081	-0.326
水分利用效率 WUE	-0.208	-0.426	0.32	0.628
特征值 Characteristic value	4.158	2.709	1.327	1.161
累计贡献率 Accumulative contribution rate (%)	34.652	57.223	68.279	77.957
因子权重 Factor weight ( $\omega$ )	0.445	0.290	0.142	0.124

## 2.5 不同基因型普通菜豆耐旱性综合评价

根据不同基因型普通菜豆的主成分值，计算出前 4 个综合指标的隶属函数值。然后根据综合指标的隶属函数值和权重，计算出不同基因型普通菜豆耐旱性综合评价值（D 值）（表 6），并依据本实验 D 值大小对普通菜豆苗期耐旱能力大小进行分级。D 值法分级标准采用样本均值-标准差分类法，共分 5 级（表 7）。

依据 D 值大小，参试的 60 份普通菜豆，耐旱性被评为 0、1、2、3、4 级的分别有 6、16、10、25、3 份（表 6）。对比 D 值评定和幼苗萎蔫指数评定结果发现：6 个高耐旱材料按 D 值从大到小依次为 C24、C02、C20、C06、C60、C14，其中除 C14 外，其余 5 份材料被幼苗萎蔫指数分级法评定为高耐旱等级；16 个耐旱材料中各有 7、8、1 个材料被幼苗萎蔫指数法判定耐旱、中耐旱、敏感材料；10 个中耐旱材料中分别有 1、6、2 个材料幼苗萎蔫指数法判定耐旱、中耐旱和敏感材料；25 个敏感材料中分别有 1、21、3 个材料被幼苗萎蔫指数法判定为耐旱、敏感、高敏感材料；3 高敏感材料按 D 值从小到大依次为 C44、C19、C07，这 3 个材料也被幼苗萎蔫指数法判定为高敏感材料。以上结果说明，在材料的高耐旱性和高敏感性评价中，幼苗萎蔫指数法和耐旱隶属函数值法具有较高的一致性，而对中等程度的耐旱性评价一致性较差。

表 6 基于耐旱隶属函数值的 60 份材料耐旱性评价

Table 6 Evaluation of drought resistance of 60 germplasm based on subordinate function value

编号 Number	隶属函数值				D 值 D value	耐旱等级 Drought tolerance grade	Y 值 Y value	估计精度 Estimated accuracy
	U1	U2	U3	U4				
C01	0.537	0.260	0.461	0.426	0.432	1	0.438	0.987
C02	0.829	0.404	0.526	0.574	0.632	0	0.639	0.989
C03	0.374	0.349	0.658	0.553	0.430	1	0.434	0.990
C04	0.439	0.301	0.539	0.518	0.424	1	0.427	0.992
C05	0.545	0.288	0.487	0.440	0.449	1	0.455	0.988
C06	0.829	0.493	0.237	0.504	0.608	0	0.615	0.989
C07	0.138	0.260	0.184	0.397	0.190	4	0.212	1.002
C08	0.130	0.356	0.303	0.248	0.235	3	0.236	0.995
C09	0.057	0.349	0.500	0.475	0.257	3	0.257	0.998
C10	0.325	0.466	0.316	0.142	0.342	3	0.347	0.986

C11	0.122	0.336	0.513	0.610	0.300	3	0.302	0.994
C12	0.715	0.315	0.316	0.291	0.491	1	0.495	0.991
C13	0.179	0.822	0.079	0.170	0.350	2	0.351	0.998
C14	0.772	0.260	0.421	0.723	0.569	0	0.630	0.903
C15	0.163	0.534	0.421	0.610	0.363	2	0.365	0.994
C16	0.374	0.418	0.382	0.213	0.368	2	0.370	0.995
C17	0.285	0.425	0.408	0.383	0.355	2	0.360	0.987
C18	0.480	0.212	0.092	0.326	0.329	3	0.332	0.990
C19	0.130	0.390	0.000	0.284	0.191	4	0.206	1.001
C20	0.797	0.445	0.526	0.525	0.623	0	0.577	1.081
C21	0.163	0.459	0.250	0.482	0.301	3	0.303	0.993
C22	0.000	0.589	0.276	0.397	0.259	3	0.260	0.997
C23	0.130	0.418	0.434	0.312	0.279	3	0.279	1.001
C24	1.000	0.459	0.329	0.411	0.676	0	0.688	0.982
C25	0.463	0.103	0.737	0.660	0.422	1	0.428	0.987
C26	0.317	0.349	0.526	0.596	0.391	2	0.395	0.990
C27	0.171	0.678	0.237	0.298	0.343	3	0.344	0.998
C28	0.146	0.432	0.408	0.000	0.248	3	0.250	0.993
C29	0.675	0.240	0.592	0.518	0.518	1	0.522	0.992
C30	0.667	0.000	1.000	0.965	0.558	1	0.565	0.000
C31	0.187	0.404	0.250	0.021	0.189	3	0.241	0.990
C32	0.407	0.671	0.092	0.255	0.420	2	0.423	0.994
C33	0.122	0.514	0.605	0.411	0.354	3	0.340	1.001
C34	0.691	0.459	0.342	0.355	0.533	1	0.542	0.984
C35	0.073	0.397	0.408	0.199	0.245	3	0.231	0.997
C36	0.260	1.000	0.224	0.213	0.464	1	0.463	1.002
C37	0.211	0.466	0.250	0.390	0.363	3	0.316	0.991
C38	0.220	0.500	0.539	0.539	0.386	2	0.389	0.993
C39	0.000	0.555	0.276	0.348	0.243	3	0.245	0.993
C40	0.057	0.500	0.645	0.546	0.363	3	0.33	0.999
C41	0.114	0.151	0.579	0.511	0.240	3	0.242	0.991
C42	0.764	0.137	0.566	0.454	0.516	1	0.524	0.986
C43	0.220	0.027	0.855	1.000	0.351	2	0.352	0.997
C44	0.008	0.486	0.211	0.213	0.185	4	0.200	1.005
C45	0.089	0.438	0.316	0.163	0.191	3	0.193	1.000
C46	0.488	0.514	0.289	0.177	0.429	1	0.433	0.991
C47	0.382	0.014	0.947	0.972	0.429	1	0.431	0.995
C48	0.244	0.363	0.474	0.270	0.314	3	0.318	0.989
C49	0.650	0.418	0.197	0.326	0.479	1	0.483	0.992
C50	0.203	0.418	0.487	0.319	0.320	3	0.321	0.998
C51	0.439	0.144	0.697	0.858	0.443	1	0.444	0.997
C52	0.740	0.308	0.303	0.567	0.532	1	0.539	0.987
C53	0.455	0.473	0.342	0.213	0.415	2	0.42	0.987

C54	0.146	0.473	0.145	0.184	0.246	3	0.247	0.994
C55	0.447	0.110	0.776	0.631	0.419	2	0.422	0.994
C56	0.236	0.500	0.224	0.255	0.313	3	0.315	0.995
C57	0.350	0.370	0.276	0.525	0.367	3	0.369	0.995
C58	0.130	0.390	0.316	0.333	0.257	3	0.257	1.001
C59	0.187	0.390	0.303	0.418	0.291	3	0.293	0.994
C60	0.805	0.493	0.289	0.518	0.606	0	0.614	0.988
均值 Average	-	-	-	-	0.381		0.384	0.977
变异系数 CV/%	-	-	-	-	31.961		32.302	1.211
标准差 Stdv.					0.121		0.124	

表 7 基于耐旱隶属函数值的耐旱性评价标准

Table 7 Standard of drought resistance based on subordinate function value

等级	耐旱性	分级标准	D 值范围
Grade	Drought tolerance	Standard	Scope of D value
0	高耐旱	$D \geq \text{均值} + 1.3 \text{ 标准差}$	$D \geq 0.542$
1	耐旱	$\text{均值} + 0.3 \text{ 标准差} \leq D < \text{均值} + 1.3 \text{ 标准差}$	$0.421 \leq D < 0.542$
2	中耐旱	$\text{均值} - 0.3 \text{ 标准差} \leq D < \text{均值} + 0.3 \text{ 标准差}$	$0.348 \leq D < 0.444$
3	敏感	$\text{均值} - 1.3 \text{ 标准差} \leq D < \text{均值} - 0.3 \text{ 标准差}$	$0.227 \leq D < 0.348$
4	高敏感	$D < \text{均值} - 1.3 \text{ 标准差}$	$D < 0.227$

## 2.6 回归模型建立

为建立可用于评价不同基因型普通菜豆耐旱性的数学模型，将 12 个性状的耐旱系数作为自变量，耐旱性综合评价值  $D$  值作为因变量，进行逐步回归分析，建立了回归方程： $Y = -0.577 + 0.157Pn + 0.223Y(II) + 0.112NPQ + 0.134Tr + 0.172Fv/Fm + 0.132Gs + 0.086Ci - 0.048EC + 0.115Fv/F0 + 0.181qP + 0.063RWC + 0.006WUE$ 。方程决定系  $R^2 = 0.999$ ， $P = 0.0001$ 。由方程的决定系数和  $P$  值可看出，该方程可以很好地估计不同基因型菜豆的耐旱性评价价值（ $Y$  值），对该回归方程的估计精度评价发现，各供试材料的估计精度均值为 97.7%（表 6）。

为探究各指标对  $Y$  值直接作用的大小及各指标间的相互作用大小，对 12 个指标的  $Y$  值进行了通径分析（表 7）。结果表明，除  $EC$  外，其余 11 个指标对  $Y$  值起正向作用，各性状的直接贡献大小顺序为： $NPQ > Y(II) > Pn > Tr > Gs > Fv/Fm > Fv/F0 > RqP > Ci > RWC > WUE > EC$ 。 $EC$  的直接通径系数与间接通径系数均为负，说明  $EC$  对  $Y$  值起负向作用， $EC$  越高的材料其耐旱性相对越差。 $WUE$  与  $Y$  值的相关系数和间接通径系数均为负，但直接通径系数为正，说明  $WUE$  对  $Y$  值的贡献较为复杂。以上结果表明，本研究中选定的 12 个指标均可作为普通菜豆苗期耐旱种质资源筛选优先考虑指标。

表 7 干旱胁迫下各指标与 D 值的通径分析

Table 7 Path analysis of single index and D value under drought stress condition

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient											合计 Total	
			EC	RWC	Fv/F0	Fv/Fm	Y(II)	NPQ	qP	Tr	Gs	Pn	Ci		WUE
EC	-0.435**	-0.048		-0.026	0.026	-0.005	0.015	-0.156	0.008	-0.067	-0.062	-0.086	-0.032	-0.001	-0.035
RWC	0.437**	0.049	0.026		-0.052	-0.005	-0.019	0.183	0.006	0.071	0.062	0.083	0.033	0.001	0.035
Fv/F0	0.316*	0.138	-0.009	-0.018		0.101	0.105	-0.092	-0.001	0.041	0.029	0.017	0.009	-0.005	0.016
Fv/Fm	0.528**	0.14	0.002	-0.002	0.100		0.105	0.043	0.008	0.048	0.039	0.041	0.008	-0.003	0.035
Y(II)	0.510**	0.179	-0.004	-0.005	0.081	0.082		-0.005	0.080	0.037	0.029	0.025	0.015	-0.004	0.030
NPQ	0.658**	0.44	0.017	0.020	-0.029	0.014	-0.002		0.001	0.055	0.041	0.084	0.012	0.004	0.020
qP	0.304*	0.112	-0.004	0.002	-0.001	0.010	0.127	0.004		0.015	0.019	0.010	0.009	-0.001	0.017
Tr	0.798**	0.163	0.020	0.021	0.035	0.041	0.040	0.150	0.010		0.129	0.143	0.051	-0.006	0.058
Gs	0.753**	0.145	0.021	0.021	0.028	0.037	0.036	0.126	0.015	0.145		0.138	0.046	-0.005	0.055
Pn	0.815**	0.174	0.024	0.023	0.013	0.033	0.025	0.213	0.006	0.134	0.115		0.052	0.002	0.058
Ci	0.543**	0.083	0.019	0.019	0.015	0.014	0.033	0.062	0.013	0.100	0.081	0.110		-0.004	0.042
WUE	-0.097	0.019	0.003	0.002	-0.039	-0.025	-0.040	0.085	-0.009	-0.053	-0.037	0.015	-0.019		-0.011

\*: 表示  $P < 0.05$  的显著水平; \*\*: 表示  $P < 0.01$  的显著水平

\*: Indicates a significant level of  $P < 0.05$ ; \*\*: indicates a significant level of  $P < 0.01$

### 3 讨论

在作物耐旱性评价方面，耐旱系数法是应用最早的一种评价方法<sup>[13]</sup>。但该方法是以单个性状的表现为依据进行评价，不能对多个性状同时进行评价。基于主成分分析的隶属函数法是以耐旱系数为基础，通过对多个耐旱性状进行加权分析获得对一个品种的综合评价，评价的准确性远高于单个性状的耐旱系数；同时，因为隶属函数综合值（*D* 值）是一个无量纲的纯数，消除了不同生理生化指标之间量纲的差异，便于比较不同品种间的耐旱、耐盐等抗逆性差异，因此是目前作物耐旱性评价的主要方法<sup>[14-19]</sup>。单云鹏等<sup>[16]</sup>根据隶属函数法和主成分分析法结合不同类型根系形态，可将总根表面积作为小豆苗期耐旱性评价的主要指标，成功步筛选出 15 份小豆耐旱资源材料；汪灿等<sup>[17]</sup>以 *D* 值、综合耐旱系数、加权耐旱系数为标准对参试材料进行耐旱性排序，结果显示基于 *D* 值的聚类分析结果与各材料在田间的实际耐旱表现更接近；胡亮亮等<sup>[18]</sup>结合盐害症状分级法和 *D* 值综合评价方法筛选绿豆苗期耐盐种质，结果表明综合评价结果与盐害症状分级情况较为一致；常利芳等<sup>[19]</sup>基于主成分分析和隶属函数分析的抗旱性综合评价 *D* 值，筛选出 11 份在萌发期和成株期均表现较强抗旱性的小偃麦衍生系，可以作为小麦抗旱育种及遗传研究的优异种质资源。本研究通过主成分分析将 12 个单一指标变换成了 4 个主成分因子，可解释 77.957% 的表型变异。根据 4 个主成分因子，运用隶属函数法得到的耐旱性综合指标值（*D* 值）对菜豆种质进行综合评价，评价结果与基于叶片萎蔫程度的耐旱等级划分结果基本一致，特别是对高耐旱品种和高敏感品种的评价一致性较高，说明 *D* 值评价法在普通菜豆耐旱性评价中具有较高的可靠性。

本研究采用了逐步回归分析，基于 12 个生理指标建立了用于普通菜豆苗期耐旱性评价的数学模型。基于该模型对 60 份普通菜豆的耐旱性综合指标值（*Y* 值）进行计算，获得的拟合值与基于 4 个主成分因子获得耐旱隶属函数综合值（*D* 值）之间的平均精度为 0.977，最小精度为 0.903（表 6）。以上结果说明，本研究获得数学模型对于普通菜豆耐旱性评级具有较高的可靠性。在实践中，通过检测不同品种的 12 项生理指标，应用该公式计算出 *Y* 值，可评价不同品种之间的耐旱性强弱。基于回归分析获得的不同抗旱生理生化指标的作物耐旱性评价数学模型值（*Y* 值）越大，说明抗旱性越强。公式中各指标的系数大小代表该指标对 *Y* 值的贡献大小。本研究获得普通菜豆耐旱性评价数学模型中，指标系数最大的是 *Y*(II)，其次是 *qP* 和 *Fv/Fm*，并且这 3 个指标均属于叶绿素荧光参数，说明在本实验条件下，叶绿素荧光参数相关指标在评价普通菜豆抗旱性方面具有决定作用，这与 Javornik 等<sup>[20]</sup>、Fox 等<sup>[21]</sup>、Hussain 等<sup>[22]</sup>的结果类似。本研究中干旱处理下 *NPQ* 均值明显高于对照组，说明干旱胁迫使 *NPQ* 上升，而油菜中的研究显示 *NPQ* 随着干旱胁迫程度的递增先增加后递减<sup>[23]</sup>，银杏树中的研究<sup>[24]</sup>显示 *NPQ* 随着干旱程度加深而升高，这种矛盾的现象说明将 *NPQ* 作为植物耐旱鉴定指标的应用需要谨慎对待。本研究拟合的 *Y* 值评价数学模型的决定系数较高（ $R^2 = 0.999$ ），说明模型对 *Y* 值的评价具有较高的可靠性，相关指标与耐旱性 *Y* 值关系密切；同时因为本模型参

考的自变量较多（12个耐旱性指标），也是造成 $R^2$ 值高的原因之一。

水分是活细胞的必要组成和代谢活动的重要物质，因此叶片的保水力直接体现了植物的耐旱能力，因此叶片含水量经常作为评价作物耐旱性的首选指标<sup>[8-9,13,25-27]</sup>。Martí'nez-Barradas等<sup>[25]</sup>的研究表明，干旱条件下，在智利大面积种植的耐旱普通菜豆品种“Zoral”比不耐旱品种“Arooa Tuscola”能保持更加稳定的叶片相对含水量；李龙等<sup>[8]</sup>发现，在研究的10个指标中，普通菜豆苗期叶片相对含水量与综合耐旱指数的关联度最大，为0.7726；在大豆<sup>[26]</sup>和油菜<sup>[23]</sup>中，相同条件下叶片重度萎蔫的材料相对含水量明显低于叶片轻微症状和无症状的材料。本研究中，相关性分析和通径分析均显示叶片相对含水量与 $Y$ 值呈正相关，说明叶片相对含水量可作为普通菜豆耐旱性评价的指标。随着干旱胁迫程度的加重，细胞膜结构与功能的损失会引起选择性渗透能力的降低，导致吸胀过程中细胞内含物外渗，渗出液使得电导率升高。增辉等<sup>[9]</sup>的研究表明，对于旱敏感的材料其相对电导率较高，在苜蓿<sup>[27]</sup>、老芒麦<sup>[28]</sup>中也有类似报道，本实验中EC均值为1.217，相关性和通径分析均表明EC与 $Y$ 值呈负相关。

干旱胁迫会导致叶片气孔关闭以降低蒸腾速率，但气孔闭合在减少水分散失的同时也减少了 $CO_2$ 的进入，从而使光合速率不断下降<sup>[29]</sup>。本研究中，相关性分析表明 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$ 和 $C_i$ 均与 $Y$ 值呈极显著正相关，而WUE与 $Y$ 值无显著相关性，虽然这5项光和指标的直接通径系数均为正值，但WUE的间接通径系数之和为负。有报道表明，油菜幼苗叶片的 $P_n$ 、WUE、 $G_s$ 、 $C_i$ 均在受到干旱胁迫时迅速降低，且同一品种幼苗在不同处理间差异显著，而 $Tr$ 在干旱胁迫下无显著变化<sup>[23]</sup>；尹希龙等<sup>[30]</sup>研究结果显示，干旱胁迫使甜菜幼苗的 $P_n$ 、WUE、 $G_s$ 、 $C_i$ 和 $Tr$ 显著下降。这些研究结果说明，干旱胁迫下 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 与植物耐旱性呈正相关，但WUE和 $Tr$ 与植物的耐旱性的关系却较为复杂，因此在实际生产中应更多关注 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $C_i$ 。

## 参考文献

- [1] Kasapoglu A G, Ilhan E, Aydin M, Yigider E, Inal B, Buyuk I, Taspinar M S, Ciltas A, Agar G. Characterization of two-component system gene (TCS) in melatonin- treated common bean under salt and drought stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2023, 29(11):1733-1754
- [2] 王兰芬, 武晶, 王昭礼, 余莉, 吴宪志, 张时龙, 王述民. 普通菜豆种质资源表型鉴定及多样性分析. *植物遗传资源学报*. 2016, 17 (6): 976-983  
Wang L, Wu J, Wang Z, Yu L, Wu X, Zhang S, Wang S. Morphological diversity and classification of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17 (6): 976-983
- [3] Martí'nez-Barradas V, Inostroza-Blancheteau C, Tighe-Neira R, Romero-Romero J L, Schwember A R, Arce-Johnson P. Drought tolerance evaluation of 'Zorzal' the most cultivated common bean in Chile, a country facing desertification. *Agricultural Research*, 2024, 13(1): 41-52
- [4] Wu L, Chang Y, Wang L, Wang S, Wu J. The aquaporin gene PvXIP1:2 conferring drought resistance identified by GWAS at seedling stage in common bean. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, 135:485-500
- [5] Wu L, Chang Y, Wang L, Wang S, Wu J. Genome-wide association analysis of drought resistance based on seed germination vigor and germination rate at the bud stage in common bean. *Agronomy Journal*. 2021, 113: 2980-2990
- [6] Dolatkhan Dashtman A, Hosseini Mazinani S M and Pazoki A. Exogenous chitosan nanoparticles modulated drought stress through changing yield, biochemical attributes, and fatty acid profile of common bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) cultivars. *Gesunde Pflanzen*, 2023, 75, 2463-2476
- [7] 李龙, 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 王述民. 普通菜豆抗旱生理特性. *作物学报*. 2014, 40 (4): 702-710

- Li L, Wang L F, Wu J, Jing L, Wang S M. Physiological characteristics of drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40 (4): 702-710
- [8] 李龙, 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 王述民. 普通菜豆品种苗期抗旱性鉴定. *作物学报*, 2015, 41(06): 963-971.  
Li L, Wang L F, Wu J, Jing L, Wang S M. Identification of drought resistance at seedlings stage in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(6): 963-971
- [9] 曾辉, 曹苑南, 王述民, 王兰芬, 董海鸿, 陈吉宝. 30份普通菜豆苗期抗旱性鉴定及抗旱指标的确定. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(6): 1014-1021  
Zeng H, Cao Y, Wang S, Wang L, Dong H, Chen J. Evaluation of drought tolerance of 30 common bean in seedling stage and screening of drought-tolerance assessment index. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(6): 1014-1021
- [10] 李洁, 张小宁, 晋凡生, 韩彦龙, 李海金. 普通菜豆种质资源苗期抗旱性综合评价. *核农学报*, 2022, 36(8): 1516-1529  
Li J, Zhang X, Jing F, Han Y, Li H. Comprehensive evaluation of drought resistance at seedling stage in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) material. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(8): 1516-1529
- [11] 中华人民共和国国家标准.《农业干旱等级》(GB/T 32136-2015)  
National standard of the People's Republic of China. 《Grade of agricultural drought》(GB/T 32136-2015)
- [12] 梁成第. 大豆抗旱性状的探讨及应用. *辽宁农业科学*, 1988,6: 30-32  
Liang C. Study and application of drought tolerance traits of soybean. *Liaoning agricultural sciences*, 1988, 6: 30-32
- [13] 兰巨生. 农作物综合抗旱性评价方法的研究. *西北农业学报*, 1998, 7(3): 85-87  
Lan J S. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1998, 7(3): 85-87
- [14] 吴磊. 普通菜豆种质资源抗旱性鉴定与抗旱生理特性研究. 北京: 中国农业科学院作物科学研究所, 2014  
Wu L. Drought resistance identification of germplasm resources and study on physiological characteristics related to drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Beijing: Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014
- [15] 王兴荣, 刘章雄, 张彦军, 李玥, 李永生, 苟作旺, 祁旭升, 邱丽娟. 大豆种质资源不同生育时期抗旱性鉴定评价. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(6): 1582-1594  
Wang X, Liu Z, Zhang Y, Li Y, Li Y, Gou Z, Qi X, Qiu L. Evaluation on drought resistance of soybean germplasm resources at multiple growth periods. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(6): 1582-1594
- [16] 单云鹏, 陈新慧, 万平, 赵波, 杨凯, 李奕松. 小豆种质资源苗期抗旱性评价及抗旱资源筛选. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(5): 1151-1159  
Shan Y, Chen X, Wan P, Zhao B, Yang K, Li Y. Drought resistance evaluation of adzuki bean germplasm at seedling stage and screening of the drought-resistant resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(5): 1151-1159
- [17] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 徐燕, 张立异, 高旭, 高杰, 姜讷, 邵明波. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. *中国农业科学*, 2017, 50(8): 1388-1402  
Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Xu Y, Zhang L Y, Gapo X, Gao J, Jiang N, Shao M B. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of Liquor-making waxy sorghum resources at adult plant stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(8): 1388-1402
- [18] 胡亮亮, 王素华, 王丽侠, 程须珍, 陈红霖. 绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选. *作物学报*, 2022, 48(2): 367-379  
Hu L L, Wang S H, Wang L X, Cheng X Z, Chen H L. Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean (*Vigna radiate* L.) at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 367-379
- [19] 常利芳, 乔彦玮, 陈芳, 乔麟轶, 郭慧娟, 李欣, 张树伟, 畅志坚, 张晓军. 小偃麦衍生系萌发期和成株期抗旱性综合评价. *植物遗传资源学报*. 2023, 24(5): 1321-1333  
Chang L, Qiao Y, Chen F, Qiao L, Guo H, Li X, Zhang S, Chang Z, Zhang X. Comprehensive evaluation on drought resistance of wheat-thinopyrum intermedium introgression lines at germination and adult stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(5): 1321-1333
- [20] Javornik T, Carović-Stanko K, Gunjača J, Vidak M, Lazarević B. Monitoring drought stress in common bean using chlorophyll fluorescence and multispectral imaging. *Plants Basel*, 2023, 2(6): 1386
- [21] Fox J P, Quinones J E, Hussain K, Ma X, Rossi L. Influences of cerium oxide nanoparticles and salinity on common bean (*Phaseolus vulgaris*) growth, physiology, and root system architectural and anatomical traits. *NanoImpact*, 2024, 36: 100535
- [22] Hussain M A, Li S, Gao H, Feng C, Sun P, Sui X, Jing Y, Xu K, Zhou Y, Zhang W, Li H. Comparative analysis of physiological variations and genetic architecture for cold stress response in soybean germplasm. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13(6): 1095335



- [23] 庞进平, 王永生. 油菜幼苗光合及叶绿素荧光参数对干旱胁迫的响应及其抗旱性分析. 西北植物学报, 2023, 43(2): 276-284  
Pang J and Wang Y. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses of rape seedlings to drought stress and its drought resistance evaluation. 2023, 43(2): 276-284
- [24] 肖石红, 孙红斌, 张卫强, 黄芳芳, 甘先华, 唐成波. 干旱胁迫对银叶树幼苗光合生理特性的影响. 森林与环境学报, 2021, 41(6): 584-592  
Xiao S, Sun H, Zhang W, Huang F, Gan X, Tang C. Effect of drought stress on photosynthetic physiology of *heritiera littoralis* seedlings. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(6): 584-592
- [25] Marti'nez-Barradas V, Inostroza-Blancheteau C, Tighe-Neira R, Romero-Romero J L, Schwember A S, Arce-Johnson P. Drought tolerance evaluation of 'Zorzal' the most cultivated common bean in Chile, a country facing desertification. Agricultural Research, 2024, 13, 41-52
- [26] 刘志强, 王建立, 赵景云, 仇永康. 花期干旱对大豆生理及光合特性的影响. 热带农业科学, 2022, 42(1): 17-21  
Liu Z, Wamh J, Zhao J, Qiu Y. Effects of drought on physiological and photosynthetic characteristics of soybean at the flowering stage. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2022, 42(1): 17-21
- [27] 王焱, 沙柏平, 李明雨, 李雪, 高雪芹, 伏兵哲. 苜蓿种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 598-609  
Wang Y, Sha B, Li M, Li X, Gao X, Fu B.. Indices screening and comprehensive evaluation of drought resistance in alfalfa germplasm resources at germinating stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 598-609
- [28] 王传旗, 刘文辉, 张永超, 周青平. 野生老芒麦苗期耐旱性品种筛选及鉴定. 草业科学, 2021, 38(5): 903-917  
Wang C, Liu W, Zhang Y, Zhou Q. Screening and identification of drought tolerance varieties of wild *elymus sibiricus* at seedling stage. Pratacul Tural Science, 2021, 38(5): 903-917
- [29] Mageed T A A E, Semida W, Hemida K A, Gyushi M A H, Rady M M, Abdelkhalik A, Merah O, Brestic M, Mohamed H I, Sabagh A E, Abdelhamid M T. Glutathione-mediated changes in productivity, photosynthetic efficiency, osmolytes, and antioxidant capacity of common beans (*Phaseolus vulgaris*) grown under water deficit. Peer J., 2023, 11: e15343
- [30] 尹希龙, 石杨, 李王胜, 兴旺. 甜菜幼苗光合生理对干旱胁迫的响应. 作物杂志, 2022(6): 152-158  
Yi X, Shi Y, Li W, Xing W. Photosynthetic physiological response to drought stress in sugar beet at seedling stage. Crop, 2022(6): 152-158