

30 份普通菜豆苗期抗旱性鉴定及抗旱指标的确定

曾 辉¹, 曹苑南¹, 王述民², 王兰芬², 董海鸿¹, 陈吉宝¹

(¹ 南阳师范学院, 河南南阳 473061; ² 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要:以 30 份普通菜豆为试验材料, 采用 PEG₆₀₀₀ 溶液模拟干旱胁迫处理种子和苗期盆栽自然干旱法, 研究了干旱胁迫对种子发芽率、植株地上部鲜重、地下部鲜重、叶片含水量、电导率和叶绿素荧光参数等 11 个指标的影响, 通过隶属函数法和灰色关联分析法对普通菜豆进行抗旱性和抗旱指标综合评定。结果显示, 每个抗旱指标在不同材料之间都具有明显差异, 说明材料之间存在明显的抗旱差异性; 发芽率、地下鲜重、地上鲜重、全株鲜重、电导率和 F_v/F_m 的关联度均大于 0.8, 与综合抗旱指数的关系较为紧密, 可以作为普通菜豆苗期抗旱性筛选的主要鉴定指标; 鉴定出 F1863、F2973、F3992 和 F3057 抗旱性较强的普通菜豆。以上结果表明应用多抗旱指标综合分析法能很好地评价材料的抗旱性。

关键词: 普通菜豆; 干旱胁迫; 苗期; 灰色关联分析; 隶属函数

Evaluation of Drought Tolerance of 30 Common Bean in Seedling Stage and Screening of Drought-tolerance Assessment Index

ZENG Hui¹, CAO Yuan-nan¹, WANG Shu-min², WANG Lan-fen², DONG Hai-hong¹, CHEN Ji-bao¹

(¹ Nanyang Normal University, Nanyang Henan 473061; ² Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: 30 accessions of common bean were employed for evaluation of drought tolerance in seedling stage. Drought stress treatments for common bean seed germination modulated using PEG₆₀₀₀ solution and for common bean seedlings used the method of withholding water content of soil. Eleven traits were evaluated for assessment of drought resistance, including seed germination rate, relative shoot fresh weight, relative root fresh weight, relative water content, relative electrical conductivity and three chlorophyll fluorescence parameters. Comprehensive assessment of drought tolerance based on membership function and grey-relation analysis indicate that the materials have different responses to drought stress, accessions of F1863, F2973, F3992 and F3057 showed the strongest drought tolerance among all tested materials. Relative seed germination rate, relative shoot fresh weight, relative root fresh weight, relative plant fresh weight, relative electrical conductivity and chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_m has closed association with comprehensive drought resistance index, and the association degree are more than 0.8, thus could be used as comprehensive index for identification of drought resistance at the seedling stage.

Key words: common bean, drought stress, seedling stage, grey-relation analysis, membership function

菜豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 又称为四季豆、芸豆等, 属于豆科 (Leguminosae) 蝶形花亚科菜豆属, 是世界上主要的食用豆类之一。干旱是影响普通菜豆生产的重要因素, 优异的抗旱种质资源是普通菜

豆抗旱育种的基础。研究表明, 从现有的资源中筛选抗旱种质是一条行之有效的方法^[1-2]。I. M. Rao 等^[3] 和 H. Terán 等^[4] 从国际热带农业研究中心 (CIAT) 保存的普通菜豆种质资源中筛选到 5 份抗

收稿日期: 2016-01-21 修回日期: 2016-03-24 网络出版日期: 2016-09-23

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20160923.0944.002.html>

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-09), 河南省高等学校重点科研项目 (15A210042)

第一作者研究方向为园艺作物遗传育种。E-mail: 461840775@qq.com

通信作者: 陈吉宝, 主要从事植物抗逆种质资源发掘及抗逆分子机理研究。E-mail: chenjibao2012@163.com

旱材料 RAB 650、SEA23、SER16、SER5 和 SEA5,它们在干旱条件下有较高的抗旱系数或收获指数。李龙等^[5]通过对芽期相关指标的分析,初步筛选到几个具有抗旱潜质的材料。截至目前,在推广品种中具有抗旱性的材料仍相对较少,筛选抗旱资源依然为育种工作的核心内容。

干旱胁迫会影响植物细胞结构和内环境的稳定,最终表现为生长状况和生理生化特征的变化,因而形态特征和生理生化指标可以反映出不同品种的抗旱性,能够作为作物抗旱性鉴定的指标^[6]。截至目前,已有相关研究分析了普通菜豆生理生化特性与抗旱性之间的关系,并成功筛选出一些与抗旱性密切相关的指标。M. F. Mohamed 等^[7]测定了干旱胁迫下普通菜豆的地上部干重、根干重、根系分布,认为根干重与根冠比可以较好的区分品种间的抗旱性。M. A. Rosales 等^[8]发现,相对生长速率、保护酶活性、渗透物质含量与普通菜豆抗旱性较密切。M. G. Costa Franca 等^[9]通过分析普通菜豆叶部性状,认为叶片水势、气孔导度、净同化率可以作为抗旱鉴定指标。

由于作物在干旱环境下的表现是其本身的遗传特性和环境互作的结果,因此,对作物抗旱能力的评估可能因时因地而异,也可能因作物种类或发育阶段而异,以致目前还没有形成统一的标准进行衡量^[10]。应用旱棚或人工气候箱模拟干旱胁迫,通过测定作物不同生育时期生理指标,对比材料间的生长状况,进而评价不同品种的抗旱性,是一种比较实

用可行的办法^[11]。在生产中,最希望得到的是各个生育期都抗旱的种质资源和鉴定指标。但是在普通菜豆抗旱种质资源筛选中有一个问题是不可回避的,那就是现有所筛选出的抗旱材料都是只在某一个生育时期具有较好的抗旱性,而不是整个生育期都表现抗旱。例如,CIAT 经过多年所选出的抗旱材料只是在生育后期(子粒形成期)具有抗旱性^[12],李龙等^[5,13]选出的抗旱材料也只在芽期具有抗旱性。这种现象在其他作物的抗旱种质资源筛选中都存在^[14-17]。育种工作者希望找到整个生育期都有较好抗旱性的材料,这就需要从理论上深入研究不同生育期抗旱性的相关性问题的。

前人有关普通菜豆抗旱性鉴定结果^[5,9]表明,云贵两地区不但夏季气温高而且干旱频繁,因此该地区的品种具有更强的抗旱性,也有利于选出抗旱强的材料。因此,本研究材料选自中国普通菜豆核心种质库中云南和贵州两省的地方品种,共 30 份普通菜豆种质,分别在芽期和幼苗期进行干旱胁迫,利用隶属函数法和灰色关联分析法对芽期生理指标和幼苗期生理指标进行综合分析,以期筛选芽期和苗期均抗旱的普通菜豆种资源和适合两个生育期的抗旱鉴定指标。

1 材料与方法

1.1 材料及来源

30 份普通菜豆种子由中国农业科学院作物科学研究所食用豆课题组提供(表 1)。

表 1 供试材料名称、产地

Table 1 Name and origin of tested germplasm resources

材料	统一编号	名称	产地	材料	统一编号	名称	产地
Material	Accession number	Name	Origin	Material	Accession number	Name	Origin
C01	F0565	鸡油豆	贵州	C16	F3761	红肉角豆	贵州
C02	F3260	大花金豆	贵州	C17	F0570	黄四季豆	贵州
C03	F0666	小杂豆	云南	C18	F0607	白刀豆	云南
C04	F0679	腰子豆	云南	C19	F0671	红桩豆	云南
C05	F0708	四季豆	云南	C20	F0750	四季豆	云南
C06	F0738	四季豆	云南	C21	F1053	雀蛋豆	云南
C07	F0867	菜豆	云南	C22	F1858	四季豆	贵州
C08	F1036	鸡腰子豆	云南	C23	F3729	白豆	贵州
C09	F1833	鸡油豆	贵州	C24	F3891	棒棒豆	贵州
C10	F2864	菜豆	贵州	C25	F3992	红花豆	贵州
C11	F2946	白占豆	贵州	C26	F2906	黄四季豆	贵州
C12	F3057	小白豆	贵州	C27	F2915	白壳黄鳞豆	贵州
C13	F3112	砂豆	贵州	C28	F2973	黑鳞豆	贵州
C14	F3268	猪腰子豆	贵州	C29	F3010	笔划豆	贵州
C15	F1863	棒豆	贵州	C30	F3145	水黄豆	贵州

1.2 试验方法

1.2.1 芽期干旱胁迫处理及指标测定 选择大小一致、无病虫害、无损、自然风干的普通菜豆种子,用 15% 的次氯酸钠消毒 20 min,然后用无菌水清洗 4~6 次备用。以内铺 2 张滤纸的培养皿(90 mm)为发芽床,将消毒后的种子放入培养皿中,先用 -0.7 MPa 的 PEG₆₀₀₀ 溶液浸没种子 20 h,使种子充分吸胀,然后将 PEG₆₀₀₀ 溶液倒掉,将吸胀后的种子均匀摆放在培养皿内并放置于 25 °C 培养箱中避光培养使种子萌发,种子萌发期间培养皿内滤纸用 -0.7 MPa 的 PEG₆₀₀₀ 溶液始终保持湿润。对照以蒸馏水代替 PEG₆₀₀₀ 溶液培养。每皿处理 30 粒种子,重复 3 次。于种子萌发的第 4 天开始统计发芽数,计算种子相对发芽率(RGR, relative germination rate)。

种子发芽率 = 发芽种子数/总种子数 × 100%

相对发芽率 = 处理条件下种子发芽率/对照条件下种子发芽率。

1.2.2 苗期干旱胁迫处理及指标测定 参照 1.2.1 的方法,用蒸馏水培养至种子萌发。将萌发的种子转移到装有 30 g 营养土的培养钵内,每钵 1 芽,在温室(25 °C, 8 h/d 光照)培养,至第 1 对真叶完全展开时(10 d)开始干旱胁迫处理。干旱胁迫处理采用自然干旱法,即干旱胁迫处理前统一用蒸馏水浇灌营养钵,使营养土绝对含水量达到 17%~20%,停止浇灌直至土壤绝对含水量降至 12%。对照每隔 5 d 浇水 1 次,使营养土绝对含水量维持 17%~20%。每个材料处理 45 钵。

苗期生理指标测定在干旱胁迫处理结束后进行。叶片相对含水量的测定每个材料选取 10 株,每株取相同叶位新鲜叶片 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 后称重作为干重,计算叶片相对含水量(RWC, relative water content)。相对含水量计算公式如下: $RWC [\%] = [(鲜重 - 干重) / (水饱和重 - 干重)] \times 100\%$ 。

叶绿素荧光参数测定采用便携式叶绿素荧光仪测定。随机选取不同处理组幼苗各 10 株,在 9:00~11:00 进行活体测定,取相同叶位的叶片进行测定,每次测定选取 10 片受光一致的叶片,重复 5 次。主要测定初始荧光(F_0 , original fluorescence yield)、最大荧光(F_m , maximal fluorescence yield)、可变荧光($F_v = F_m - F_0$)3 个参数,并计算 F_v/F_0 和 F_v/F_m 参数。

叶片电导率用 DDB-303A 型便携式电导率仪测定,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,计算相对电导率(REC, relative electrical conductivity)。

相对电导率(%) = 处理叶片单位鲜重电导率/对照叶片单位鲜重电导率 × 100%。

取 10 株干旱处理后幼苗称重作为幼苗全株重(g),然后从第一侧根发生处将主茎剪断,主茎连同叶片称重作为地上部分鲜重(g),将根部称重作为地下部分鲜重(g)。计算相对地下鲜重(RRW, relative root fresh weight)、相对地上鲜重(RSW, relative shoot fresh weight)、相对全株鲜重(RPW, relative plant fresh weight)和地上鲜重/地下鲜重(Shoot/Root)。

相对地下鲜重 = 处理幼苗单株地下鲜重/对照幼苗单株地下鲜重

相对地上鲜重 = 处理幼苗单株地上鲜重/对照幼苗单株地上鲜重

相对全株鲜重 = 处理幼苗单株鲜重/对照幼苗单株鲜重

地上鲜重/地下鲜重 = 处理幼苗单株地上鲜重/处理幼苗单株地下鲜重。

1.3 统计分析

试验中原始数据的整理采用 Microsoft Excel 2010 软件完成,数据处理采用 SAS 9.0 软件,方差分析使用 ANOVA 过程,SPSS 19.0 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对普通菜豆生长的影响

为消除试验材料间存在的差异,本研究采用各指标的相对值来表现不同供试材料的耐旱性(表 2)。结果表明,在干旱胁迫下,30 份普通菜豆材料的生长指标变化幅度差异显著不同($P < 0.05$),相对发芽率、相对地下鲜重、相对地上鲜重、地上鲜重/地下鲜重、相对全株鲜重的变化范围分别为 7.2%~127.4%、48.9%~122.1%、43.5%~83.7%、45.9%~125.8%、46.0%~87.7%。变化范围最大的是相对发芽率,组距相差 120.2%;最小的是相对地下鲜重和地上鲜重/地下鲜重比,组距相差 40.2%和 41.7%,相对地上鲜重和相对全株鲜重变化范围相似,组距相差 73.2%和 79.9%。

表 2 干旱胁迫下普通菜豆苗期 5 个生长指标的相对值

Table 2 Relative values of five growth indexes of common bean under drought stress in seedling stage

材料 Material	相对发芽率 RGR	相对地下鲜重 RRW	相对地上鲜重 RSW	地上鲜重/地下鲜重 Shoot/Root	相对全株鲜重 RPW
C01	0.965 ± 0.04cd	0.580 ± 0.04hij	0.484 ± 0.00fg	0.831 ± 0.06def	0.499 ± 0.01gh
C02	0.241 ± 0.00gh	0.891 ± 0.14defg	0.674 ± 0.10cde	0.756 ± 0.00efg	0.704 ± 0.11cde
C03	0.250 ± 0.01gh	0.640 ± 0.06ghij	0.435 ± 0.03g	0.679 ± 0.01ghij	0.460 ± 0.04h
C04	0.292 ± 0.13fg	0.919 ± 0.02def	0.828 ± 0.15a	0.896 ± 0.15bcd	0.843 ± 0.13ab
C05	0.250 ± 0.02gh	0.732 ± 0.04fghi	0.657 ± 0.13cde	0.891 ± 0.13bcd	0.669 ± 0.11def
C06	1.078 ± 0.00bc	1.043 ± 0.02cd	0.669 ± 0.06cde	0.602 ± 0.01h	0.714 ± 0.05 cde
C07	0.973 ± 0.25cd	0.877 ± 0.02defg	0.628 ± 0.16cdef	0.696 ± 0.17fghi	0.664 ± 0.14 def
C08	0.268 ± 0.02fgh	0.913 ± 0.15def	0.682 ± 0.21cd	0.724 ± 0.11efgh	0.714 ± 0.20 cde
C09	0.922 ± 0.03cd	0.641 ± 0.02ghij	0.669 ± 0.14cde	1.038 ± 0.19ab	0.664 ± 0.12 def
C10	0.125 ± 0.05hi	0.581 ± 0.09hij	0.497 ± 0.08efg	0.787 ± 0.00ef	0.511 ± 0.08gh
C11	0.511 ± 0.01e	1.041 ± 0.15cde	0.796 ± 0.09a	0.770 ± 0.03efg	0.829 ± 0.09ab
C12	0.968 ± 0.03cd	0.781 ± 0.01fghi	0.653 ± 0.11cdef	0.833 ± 0.13def	0.675 ± 0.09cdef
C13	0.431 ± 0.03e	1.065 ± 0.44a	0.733 ± 0.07ab	0.466 ± 0.08j	0.843 ± 0.11ab
C14	0.901 ± 0.03d	0.693 ± 0.09ghij	0.719 ± 0.12ab	1.000 ± 0.04ab	0.714 ± 0.12cde
C15	1.051 ± 0.04bc	0.999 ± 0.12cde	0.720 ± 0.02ab	0.733 ± 0.06efgh	0.763 ± 0.04bcd
C16	0.251 ± 0.02gh	0.794 ± 0.01fghi	0.592 ± 0.05def	0.749 ± 0.07efg	0.625 ± 0.04defg
C17	0.151 ± 0.02hi	1.044 ± 0.12ab	0.657 ± 0.04cde	0.459 ± 0.06j	0.752 ± 0.02bcd
C18	0.963 ± 0.04cd	0.634 ± 0.14ghij	0.518 ± 0.01efg	0.856 ± 0.18cde	0.534 ± 0.03fgh
C19	0.072 ± 0.00i	1.082 ± 0.11cd	0.734 ± 0.09ab	0.686 ± 0.01fghi	0.774 ± 0.09bcd
C20	1.202 ± 0.20ab	0.567 ± 0.07hij	0.707 ± 0.01bc	1.258 ± 0.19a	0.681 ± 0.00cdef
C21	0.150 ± 0.02hi	0.489 ± 0.00j	0.693 ± 0.03cd	1.157 ± 0.04a	0.646 ± 0.02def
C22	0.934 ± 0.00cd	0.822 ± 0.09efgh	0.668 ± 0.00cde	0.821 ± 0.10def	0.689 ± 0.01cdef
C23	0.901 ± 0.10d	1.219 ± 0.03bc	0.666 ± 0.13cde	0.515 ± 0.12hi	0.712 ± 0.12cde
C24	0.956 ± 0.05cd	0.841 ± 0.13efgh	0.555 ± 0.08def	0.684 ± 0.20ghij	0.588 ± 0.05efgh
C25	0.963 ± 0.04cd	0.856 ± 0.09efgh	0.808 ± 0.03a	0.952 ± 0.06bc	0.814 ± 0.04ab
C26	1.001 ± 0.08cd	0.826 ± 0.26efgh	0.739 ± 0.05ab	0.950 ± 0.24bc	0.753 ± 0.08bcd
C27	0.073 ± 0.00i	0.860 ± 0.16efgh	0.683 ± 0.00cd	0.816 ± 0.15def	0.717 ± 0.03bcde
C28	1.274 ± 0.09a	1.221 ± 0.09bc	0.837 ± 0.12a	0.697 ± 0.15fghi	0.877 ± 0.10a
C29	0.184 ± 0.02ghi	0.706 ± 0.10ghij	0.598 ± 0.02def	0.859 ± 0.09cde	0.611 ± 0.03efgh
C30	0.193 ± 0.01ghi	0.921 ± 0.34def	0.695 ± 0.07bc	0.837 ± 0.23cdef	0.732 ± 0.12 bcde

同列不同字母表示 0.05 水平差异显著,下同

Different letters at the same column represent significant difference at 0.05 levels,the same as below

2.2 干旱胁迫对普通菜豆生理指标的影响

干旱胁迫对普通菜豆 6 个生理指标影响显著 ($P<0.05$),相对含水量、相对电导率、 F_o 、 F_m 、 F_v/F_o 和 F_v/F_m 的变化范围分别为 82.2% ~ 106.2%、100.0% ~ 183.0%、76.7% ~ 97.4%、93.6% ~ 117.3%、98.2% ~ 138.4%、99.1% ~ 112.6%,其组距相差分别为 24.0%、83.0%、20.7%、23.7%、

40.2% 和 23.5% (表 3)。

2.3 指标筛选与评价

本研究计算了各指标的抗旱系数,以 0.1 为组距统计了参照次数分布(表 4)。结果表明,普通菜豆不同抗旱指标对干旱胁迫的敏感程度各异。供试材料中 96% 的生理指标(叶绿素荧光参数、相对含水量和相对电导率)的抗旱系数(PI)大于 0.8,43%

表 3 干旱胁迫下普通菜豆苗期 6 个生理指标的相对值

Table 3 Relative values of six physiological indexes of common bean under drought stress in seedling stage

材料 Material	相对含水量 RWC	相对电导率 REC	初始荧光量 F_o	最大荧光量 F_m	可变荧光量/ 初始荧光量 F_v/F_o	可变荧光量/ 最大荧光量 F_v/F_m
C01	0.896 ± 0.08cde	1.049 ± 0.22e	0.866 ± 0.04cd	1.049 ± 0.15a	1.263 ± 0.21bcd	1.048 ± 0.04bc
C02	0.993 ± 0.09abc	1.458 ± 0.18bc	0.884 ± 0.00bbcd	0.948 ± 0.09b	1.093 ± 0.28cde	1.012 ± 0.06c
C03	0.921 ± 0.06bcd	1.376 ± 0.10bcd	0.890 ± 0.02bcd	1.011 ± 0.07ab	1.166 ± 0.20cd	1.029 ± 0.01bc
C04	1.062 ± 0.14a	1.543 ± 0.11b	0.894 ± 0.04bcd	0.959 ± 0.14b	1.095 ± 0.23cde	1.013 ± 0.05c
C05	0.894 ± 0.04cde	1.161 ± 0.33cde	0.957 ± 0.04a	1.017 ± 0.09ab	1.069 ± 0.08de	1.015 ± 0.02bc
C06	0.956 ± 0.08bcd	1.104 ± 0.12de	0.854 ± 0.03cd	0.954 ± 0.25b	1.106 ± 0.33cde	1.021 ± 0.07bc
C07	1.000 ± 0.14abc	1.063 ± 0.27e	0.933 ± 0.04abc	1.008 ± 0.13ab	1.101 ± 0.15cde	1.018 ± 0.03bc
C08	0.863 ± 0.03efg	1.377 ± 0.27bcd	0.847 ± 0.03cd	1.051 ± 0.18a	1.313 ± 0.26bc	1.055 ± 0.01ab
C09	0.873 ± 0.07defg	1.081 ± 0.36de	0.911 ± 0.03bc	1.088 ± 0.15a	1.249 ± 0.17cd	1.045 ± 0.03bc
C10	0.960 ± 0.14bcd	1.218 ± 0.24cde	0.864 ± 0.02cd	1.094 ± 0.15a	1.330 ± 0.26ab	1.070 ± 0.04ab
C11	1.004 ± 0.06abc	1.156 ± 0.38de	0.941 ± 0.05ab	1.023 ± 0.11ab	1.106 ± 0.13cde	1.020 ± 0.02bc
C12	0.874 ± 0.03defg	1.148 ± 0.30de	0.923 ± 0.04abc	1.173 ± 0.13a	1.343 ± 0.12ab	1.065 ± 0.02ab
C13	0.854 ± 0.01efg	1.830 ± 0.10a	0.974 ± 0.06a	1.007 ± 0.14ab	1.042 ± 0.17de	1.006 ± 0.03c
C14	0.894 ± 0.09cde	1.040 ± 0.28e	0.879 ± 0.08bcd	1.024 ± 0.16ab	1.208 ± 0.14cd	1.039 ± 0.02bc
C15	0.937 ± 0.02bcd	1.030 ± 0.07e	0.863 ± 0.01cd	1.085 ± 0.06a	1.345 ± 0.19ab	1.060 ± 0.03ab
C16	0.922 ± 0.07bcd	1.317 ± 0.21bcd	0.904 ± 0.12bc	1.078 ± 0.08a	1.254 ± 0.13cd	1.047 ± 0.02bc
C17	0.880 ± 0.06defg	1.216 ± 0.13cde	0.884 ± 0.03bcd	1.099 ± 0.09ab	1.320 ± 0.10bc	1.064 ± 0.02ab
C18	0.917 ± 0.05bcd	1.138 ± 0.10de	0.825 ± 0.05cd	1.028 ± 0.09ab	1.312 ± 0.07bc	1.058 ± 0.01ab
C19	0.931 ± 0.03bcd	1.026 ± 0.13e	0.948 ± 0.04ab	0.936 ± 0.17b	0.982 ± 0.23e	0.991 ± 0.06c
C20	0.923 ± 0.06bcd	1.000 ± 0.08e	0.935 ± 0.08abc	1.072 ± 0.07a	1.195 ± 0.12cd	1.037 ± 0.02bc
C21	0.895 ± 0.05cde	1.149 ± 0.23de	0.864 ± 0.05cd	1.035 ± 0.10ab	1.245 ± 0.16cd	1.056 ± 0.02ab
C22	0.904 ± 0.02cde	1.320 ± 0.22bcd	0.918 ± 0.04abc	1.041 ± 0.09ab	1.167 ± 0.08cd	1.034 ± 0.01bc
C23	1.015 ± 0.06ab	1.216 ± 0.28cde	0.939 ± 0.08ab	1.014 ± 0.03ab	1.108 ± 0.15cde	1.019 ± 0.03bc
C24	0.892 ± 0.03cde	1.603 ± 0.70b	0.841 ± 0.06cd	1.019 ± 0.05ab	1.261 ± 0.10bcd	1.055 ± 0.02ab
C25	0.994 ± 0.08abc	1.075 ± 0.10de	0.930 ± 0.02abc	1.065 ± 0.09a	1.178 ± 0.11cd	1.034 ± 0.02bc
C26	0.832 ± 0.04gf	1.014 ± 0.21e	0.852 ± 0.06cd	1.027 ± 0.08ab	1.253 ± 0.03cd	1.050 ± 0.00bc
C27	0.822 ± 0.13gf	1.098 ± 0.21de	0.767 ± 0.04d	1.068 ± 0.08a	1.384 ± 0.06a	1.126 ± 0.01a
C28	0.984 ± 0.03abc	1.306 ± 0.67bcd	0.907 ± 0.08bc	1.027 ± 0.09ab	1.167 ± 0.01cd	1.040 ± 0.00bc
C29	0.844 ± 0.03gf	1.046 ± 0.20e	0.839 ± 0.10cd	1.011 ± 0.07ab	1.269 ± 0.10bcd	1.053 ± 0.02bc
C30	0.876 ± 0.02defg	1.141 ± 0.17de	0.882 ± 0.04bcd	1.019 ± 0.10ab	1.192 ± 0.09cd	1.039 ± 0.02bc

相对发芽率的抗旱系数 (PI) 小于 0.3, 45% 相对发芽率的抗旱系数 (PI) 大于 0.9, 相对地下鲜重和地上鲜重/地下鲜重的抗旱指数均在 0.4 以上, 相对地上鲜重和相对全株鲜重的抗旱指数分布在 0.4 ~ 0.9 之间。这说明叶片生理指标, 特别是叶绿素荧光参数在本研究中对于干旱胁迫的反应迟钝; 相对发芽率对于干旱反应较为敏感; 地下鲜重、地上鲜重、全株鲜重和地上鲜重/地下鲜重之比对于干旱胁迫的反

应比较温和, 属中间类型。因此, 用任何单一指标的抗旱系数进行评价缺乏稳定性和客观性, 必须用多个指标进行综合评价才较为可靠。

依照灰色关联度理论, 将 30 份材料的综合抗旱指数和干旱胁迫下的 11 个指标视作一个整体。以综合抗旱指数作为母序列, 各指标原始数据标准化值作为子数列建立灰色关联系统, 计算各指标与其综合抗旱指数的关联度 (表 4)。结果显示, 在干旱

胁迫下,11 个指标与综合抗旱指数的关联度大小顺序为:相对发芽率 > 相对地下鲜重 > 相对全株鲜重 > 相对地上鲜重 = 相对电导率 > F_v/F_o > F_v/F_m > 相对含水量 > F_m > F_o > 地上鲜重/地下鲜重。其中地上鲜重/地下鲜重和 F_o 的关联度小于 0.74,不适合

普通菜豆抗旱种质资源评价;其余指标的关联度均大于 0.74,可以作为综合评价指标加以利用;其中相对发芽率、相对地下鲜重、相对全株鲜重、相对地上鲜重、相对电导率和 F_v/F_o 的关联度均大于 0.8,与综合抗旱指数的关系较为紧密。

表 4 普通菜豆各指标的抗旱系数在不同区间的分布及各指标与综合抗旱指数的关联度

Table 4 Distributions of drought-resistance coefficients of tested indices and correlation degree between different parameters and comprehensive drought-resistance index of common bean

指标 Parameters	相对发芽率 RGR	相对地下鲜重 RRW	相对地上鲜重 RSW	地上鲜重/地下鲜重 Shoot/Root	相对全株鲜重 RPW	相对含水量 RWC	相对电导率 REC	初始荧光量 F_o	最大荧光量 F_m	可变荧光量/初始荧光量 F_v/F_o	可变荧光量/最大荧光量 F_v/F_m
$0 \leq PI < 0.1$	2										
$0.1 \leq PI < 0.2$	5										
$0.2 \leq PI < 0.3$	6										
$0.3 \leq PI < 0.4$											
$0.4 \leq PI < 0.5$	1	1	3	2	2						
$0.5 \leq PI < 0.6$	1	3	4	1	3						
$0.6 \leq PI < 0.7$		4	13	6	9						
$0.7 \leq PI < 0.8$		4	7	6	11			1			
$0.8 \leq PI < 0.9$		7	3	9	5	14		16			
$0.9 \leq PI < 1.0$	10	4		2		12		13	4	1	1
$1.0 \leq P$	5	7		4		4	30		26	29	29
关联度	0.830	0.820	0.808	0.638	0.815	0.785	0.808	0.645	0.762	0.804	0.788
权重	0.098	0.096	0.095	0.075	0.096	0.092	0.095	0.076	0.090	0.095	0.093
排序	1	2	4	10	3	7	4	9	8	5	6

2.4 干旱胁迫下普通菜豆的模糊隶属函数的抗旱性评价

因为各性状与综合抗盐碱指数关联度的临界值为 0.7,因此本研究选取关联度大于 0.7 的 9 个指标,采用隶属函数法分析了 30 份普通菜豆对干旱胁迫

的抗性。对各个指标的隶属函数值累加求平均值,隶属值越大,则抗旱性越强。结果表明,抗旱性较强的普通菜豆是 C15、C28、C25 和 C12,其抗旱隶属值均大于 0.6;抗旱性较差材料是 C29、C19、C02、C05 和 C03,其抗旱隶属值均小于 0.4(表 5)。

表 5 干旱胁迫对普通菜豆幼苗生长指标相对值和生理指标变化率的隶属值

Table 5 Membership function values of relative values of growth and change rates of physiological parameters of common bean seedlings under drought stress

材料 Material	抗旱指标隶属值 Membership function value									均值 Average	排序 Rank
	RGR	RRW	RSW	RPW	RWC	REC	F_m	F_v/F_o	F_v/F_m		
C01	0.74	0.08	0.12	0.09	0.31	0.94	0.47	0.70	0.42	0.431	21
C02	0.14	0.35	0.59	0.59	0.71	0.45	0.04	0.28	0.15	0.367	28
C03	0.15	0.13	0.00	0.00	0.41	0.55	0.31	0.46	0.29	0.255	30
C04	0.18	0.37	0.98	0.92	1.00	0.35	0.09	0.28	0.16	0.481	15
C05	0.15	0.21	0.55	0.50	0.30	0.81	0.34	0.22	0.18	0.361	29
C06	0.84	0.48	0.58	0.61	0.56	0.87	0.07	0.31	0.22	0.505	13
C07	0.75	0.33	0.48	0.49	0.74	0.92	0.30	0.30	0.20	0.502	14

表 5(续)

材料 Material	抗旱指标隶属值 Membership function value									均值	排序
	RGR	RRW	RSW	RPW	RWC	REC	F _m	F _v /F _o	F _v /F _m	Average	Rank
C08	0.16	0.36	0.61	0.61	0.17	0.55	0.48	0.82	0.48	0.472	17
C09	0.71	0.13	0.58	0.49	0.21	0.90	0.64	0.66	0.40	0.525	11
C10	0.04	0.08	0.16	0.12	0.58	0.74	0.66	0.87	0.59	0.425	22
C11	0.37	0.47	0.89	0.89	0.76	0.81	0.36	0.31	0.22	0.565	6
C12	0.74	0.25	0.54	0.52	0.22	0.82	1.00	0.90	0.55	0.615	4
C13	0.29	1.00	0.74	0.92	0.13	0.00	0.29	0.15	0.11	0.404	25
C14	0.69	0.17	0.70	0.61	0.30	0.95	0.37	0.56	0.36	0.524	12
C15	0.81	0.44	0.71	0.73	0.48	0.96	0.63	0.90	0.51	0.686	1
C16	0.15	0.26	0.39	0.40	0.42	0.62	0.59	0.68	0.41	0.435	20
C17	0.06	0.81	0.55	0.70	0.24	0.74	0.68	0.84	0.54	0.575	5
C18	0.74	0.13	0.21	0.18	0.40	0.83	0.38	0.82	0.50	0.464	18
C19	0.00	0.51	0.74	0.75	0.45	0.97	0.00	0.00	0.00	0.381	27
C20	0.94	0.07	0.68	0.53	0.42	1.00	0.57	0.53	0.34	0.563	7
C21	0.06	0.00	0.64	0.45	0.30	0.82	0.41	0.65	0.48	0.425	23
C22	0.72	0.29	0.58	0.55	0.34	0.61	0.44	0.46	0.32	0.478	16
C23	0.69	0.63	0.57	0.60	0.80	0.74	0.32	0.31	0.20	0.542	10
C24	0.73	0.30	0.29	0.31	0.29	0.27	0.35	0.69	0.48	0.414	24
C25	0.74	0.32	0.93	0.85	0.72	0.91	0.54	0.49	0.32	0.645	3
C26	0.77	0.29	0.76	0.70	0.04	0.98	0.38	0.68	0.44	0.560	8
C27	0.00	0.32	0.62	0.62	0.00	0.88	0.55	1.00	1.00	0.554	9
C28	1.00	0.63	1.00	1.00	0.68	0.63	0.38	0.46	0.36	0.682	2
C29	0.09	0.19	0.41	0.36	0.09	0.94	0.31	0.71	0.46	0.396	26
C30	0.10	0.37	0.65	0.65	0.22	0.83	0.35	0.52	0.36	0.450	19

3 讨论

普通菜豆抗旱育种工作在许多国家和地区具有悠久的历史^[18-19],工作重心集中于抗旱性种质的评价与筛选。普通菜豆对于干旱最敏感的时期是苗期、开花期和鼓粒期^[12]。因此,普通菜豆抗旱性的评价也应从不同时期开展。目前,国内外育种家采用不同的方法从现有的种质资源中筛选到一系列在不同生育期具有抗旱性的资源,J. W. White 等^[20]通过田间筛选得到了 BAT 477、A 195 和 BAT 1289 抗旱材料,其中 BAT 477 能够在干旱条件下加强根系的生长,吸取深层土壤的水分,从而延缓植株的脱水。I. M. Rao 等^[3]和 H. Terán 等^[4]是依据鼓粒期到成熟期普通菜豆的抗旱性,从国际热带农业研究中心(CIAT)保存的普通菜豆种质资源中筛选抗旱材料。C. M. Guimarães 等^[19]也是以鼓粒期到成熟期的抗旱性为依据,通过 2 年大田实验,从 49 个材料中筛选到 3 个抗旱性强的品种。李龙等^[5]是根据芽期抗

旱性来筛选抗旱材料的。本研究应用隶属函数法和灰色关联分析法对抗旱性进行分析,通过比较分析芽期和苗期的相关指标,最终在参试的 30 份材料中发现,F1863、F2973、F3992 和 F3057 的抗旱性较好,F3010、F0671、F3260、F0708 和 F0666 的抗旱性较差。

多年来,国内外学者在抗旱鉴定方面作了大量工作,并从不同角度提出了许多作物抗旱性的评价指标^[21-22]。本研究结果显示地上鲜重/地下鲜重和 F_o的关联度小于 0.74,不适合普通菜豆抗旱种质资源评价,相对发芽率、相对地下鲜重、相对全株鲜重、相对地上鲜重、相对电导率和 F_v/F_o的关联度均大于 0.8,与综合抗旱指数的关系较为紧密,是普通菜豆抗旱筛选的主要鉴定指标。类似的研究结果也表明,种子的相对发芽率是普通菜豆芽期抗旱性鉴定的有效指标^[5];另外,T. Assefa 等^[23]用 34 个高代自交系为材料,通过 2 年 2 点试验证明,普通菜豆鼓粒期的冠层生物量与材料的耐旱性高度相关,这与本研究中的生物量指标(相对地下鲜重、相对全株鲜

重、相对地上鲜重)与综合抗旱指数的关系较为紧密的结果相似。这说明,干旱条件下生物量降低越小的材料抗旱性越强^[8]。

植物叶片相对含水量能间接反映植物在干旱胁迫下水分亏缺的程度,干旱胁迫下抗旱性强的植物叶片相对含水量下降迟缓,以保障植物体生理生化的正常运转,因此叶片含水量是鉴定作物抗旱性强弱的重要指标^[23-24]。M. F. Mohamed 等^[7]认为,干旱环境下的叶片相对含水量可以评价普通菜豆的保水能力;李龙等^[13]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抗旱指数的关联度最大,为 0.7726;M. A. Rosales 等^[8]比较了抗旱和水敏感品种发现,无论是在温室还是在田间,叶片相对含水量和气孔导度与材料的抗旱性密切相关,是材料抗旱性鉴定的有益指标。本研究表明,虽然和生长指标相比,相对含水量的关联度较小,但是在 5 个生理指标中,相对含水量的关联度和 F_v/F_m 的类似,都位于前列,说明作为生理指标,相对含水量是普通菜豆抗旱性鉴定较好的指标之一。

目前叶绿素荧光动力学技术逐渐成为农业领域的一项热门技术,广泛应用于农业生产和科研,尤其在鉴定评价作物的耐逆境能力(抗旱性、耐寒性、耐盐性等)方面的应用越来越多^[8,25]。本研究结果显示,在干旱胁迫条件下, F_v 均有不同程度增加,但是与综合抗旱指数的关联度较小,不适合用于普通菜豆抗旱鉴定,而 F_v/F_m 与综合抗旱指数的关联度较大,是普通菜豆抗旱鉴定的较灵敏的生理指标。M. Wentworth 等^[26]也认为叶绿素荧光参数的变化能够反映普通菜豆的抗旱性;李龙等^[13]认为,苗期抗旱性鉴定较好的指标为 PSII 最大量子产量和叶绿素含量;D. Ambachew 等^[27]发现,在干旱胁迫下,普通菜豆的产量与叶绿素含量、根的耐拉力等指标呈显著正相关,可作为普通菜豆抗旱性鉴定的指标。但是 M. A. Rosales 等^[8]的研究结果表明,叶绿素含量与材料的抗旱性没有显著的关系。因此,在实际生产中,叶绿素荧光参数作为抗旱鉴定指标的应用需要谨慎对待。

参考文献

- [1] Miklas P N, Kelly J D, Beebe S E, et al. Common bean breeding for resistance against biotic and abiotic stresses: from classical to MAS breeding [J]. *Euphytica*, 2006, 147: 105-131
- [2] Mukeshimana G. Dissecting the genetic complexity of drought tolerance mechanisms in common bean *Phaseolus vulgaris* L. [M]. East Lansing (American): Michigan State University, 2013: 5-10
- [3] Rao I M, Beebe S, Polania J. Differences in drought resistance of advanced lines developed for the last 3 decades. Annual Report 2006. Project IP-1: Bean improvement for the tropics [M]. CIAT, Cali, Colombia, 2006: 2-6
- [4] Terán H, Singh S P. Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean [J]. *Crop Sci*, 2002, 42: 64-70
- [5] 李龙, 王兰芬, 武晶, 等. 普通菜豆种质资源芽期抗旱性鉴定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(4): 600-605
- [6] 畅建武. 粒用菜豆种质资源芽期抗旱性研究 [J]. *山西农业科学*, 1996(24): 31-34
- [7] Mohamed M F, Schmitz-Eiberger N, Keutgen N, et al. Comparative drought postponing and tolerance potentials of two tepary bean lines in relation to seed yield [J]. *Afr Crop Sci J*, 2005, 13: 49-60
- [8] Rosales M A, Cuellar-Ortiz S M, Arrieta-Montiel M, et al. Physiological traits related to terminal drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *J Sci Food Agr*, 2012, 93: 324-331
- [9] Costa Franca M G, Thi A T P, Pimentel C, et al. Differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress [J]. *Environ Exp Bot*, 2000, 43: 227-237
- [10] 李真, 梅淑芳, 梅忠, 等. 甘蓝型油菜 DH 群体苗期抗旱性的评价 [J]. *作物学报*, 2012, 38(11): 2108-2114
- [11] 何继红, 刘天鹏, 董孔军, 等. 糜子育成品种成株期抗旱性鉴定与评价 [J]. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(1): 45-52
- [12] Beebe S E, Rao I M, Blair M W, et al. Phenotyping common beans for adaptation to drought [J]. *Front Physiol*, 2013, 4: 35
- [13] 李龙, 王兰芬, 武晶, 等. 普通菜豆抗旱生理特性 [J]. *作物学报*, 2014, 40(4): 702-710
- [14] 谢小玉, 张霞, 张兵, 等. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 476-485
- [15] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 等. 绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(3): 498-503
- [16] 张泽燕, 张耀文. 干旱胁迫下 21 份山西地方绿豆品种芽期抗旱性鉴定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2011, 12(6): 1010-1013
- [17] 张嘉楠, 昌小平, 郝晨阳, 等. 北方冬麦区小麦抗旱种质资源遗传多样性分析 [J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(3): 253-259
- [18] Wu J, Wang L, Li L, et al. De novo assembly of the common bean transcriptome using short reads for the discovery of drought responsive genes [J]. *PLoS One*, 2014, 10(9): 1-10
- [19] Guimarães C M, Stone L F, Del Peloso M J, et al. Common bean genotypes under water stress [J]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, 2011, 15(7): 649-656
- [20] White J W, Castillo J A. Relative effect of root and shoot genotypes and yield on common bean under drought stress [J]. *Crop Sci*, 1989, 29: 360-362
- [21] 吴金芝, 王志敏, 李友军, 等. 不同冬小麦品种旗叶叶绿素荧光特性及其对干旱胁迫的响应. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 699-706
- [22] Wang Y, Zhang L, Nafisah A, et al. Selection efficiencies for improving drought/salt tolerances and yield using introgression breeding in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Crop J*, 2013, 134-142
- [23] Assefa T, Wu J, Beebe S E, et al. Improving adaptation to drought stress in small red common bean: phenotypic differences and predicted genotypic effects on grain yield, yield components and harvest index [J]. *Euphytica*, 2015, 203: 477-489
- [24] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 等. 绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定 [J]. *作物学报*, 2015, 41(1): 145-153
- [25] 陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用 [J]. *浙江农业学报*, 2006, 18(1): 51-55
- [26] Wentworth M, Murchie E H, Gray J E, et al. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress; II. Acclimation of photosynthesis [J]. *J Exp Bot*, 2006, 57: 699-709
- [27] Ambachew D, Mekbib F, Asfaw A, et al. Trait associations in common bean genotypes grown under drought stress and field infestation by BSM bean fly [J]. *Crop J*, 2015, 4(3): 305-316