

文章编号:1000-8551(2019)01-0048-12

菜用豌豆品种资源萌发期耐旱性鉴定

赵愉风 周清元 郜欢欢 叶 桑 王 倩 程 闯 郭彦军 崔 翠*

(西南大学农学与生物科技学院,重庆 400715)

摘要:为研究菜用豌豆种子萌发期的耐旱性,本试验以31份菜用豌豆品种资源为试验材料,通过2.5% PEG溶液模拟干旱胁迫处理萌发期豌豆种子,统计种子发芽势和发芽率,测定鲜重、干重、根长、芽长等指标,并采用相关性分析、主成分分析、聚类分析、灰色关联度分析及逐步回归分析等方法相结合,对31份菜用豌豆品种资源进行萌发期耐旱性鉴定及耐旱指标筛选。结果表明,2.5% PEG-6000模拟干旱胁迫对菜用豌豆种质资源萌发期各测定指标均有极显著影响;根据综合抗旱系数值(CDC值)、耐旱性度量值(D值)、加权关联度(WDC值)大小对供试种质进行排序,其中耐旱性最强的4个品种依次为16110、16055、16140、16107;耐旱性最弱的3个品种依次为16106、16175、16177。通过聚类分析,在欧氏距离 $D^2=8.5$ 处将31份豌豆品种资源划分为4种类型:第Ⅰ类包括16054、16142等20个品种;第Ⅱ类包括16140、16079和160553个品种;第Ⅲ类包括16175、16104等6个品种;第Ⅳ类包括16110和161072个品种。逐步回归分析表明,与D值密切相关的指标为发芽指数、活力指数、发芽势、根长,这些可作为豌豆种质资源萌发期耐旱性鉴定综合选择指标。本试验结果为进一步研究菜用豌豆萌发期耐旱性机理及干旱调控缓解机制提供了理论参考,也为菜用豌豆耐旱品种选育及其推广应用奠定了基础。

关键词:菜用豌豆;萌发期;耐旱指标;耐旱性鉴定

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.01.0048

豌豆(*Pisum sativum*)为豆科(Leguminosae)豌豆属(*Pisum*)一年生藤本作物,是世界上第四大食用豆类作物^[1]。我国干豌豆栽培面积和总产量分别占全世界的15.2%和13.8%,青豌豆分别占全世界的23.1%和30.4%,在世界豌豆生产中占有十分重要的地位^[2]。史料记载豌豆起源于西亚和地中海沿岸,我国豌豆的栽培历史可追溯到2000多年前^[3]。豌豆各部位包括豌豆苗、豌豆尖、豌豆荚、青豌豆、干豌豆,从发芽到生长,从开花到成熟,均可食用,且豌豆营养价值丰富、用途广泛、适应性强,可用作主要旱区轮作倒茬作物;此外,豌豆种植过程中能进行生物固氮,提高土壤肥力,也是良好的绿肥作物^[4]。然而豌豆生长过程中易受到干旱胁迫的影响,表现为植株高度降低,鲜重、干重、叶面积、叶片数下降,根系生长受到抑制等^[4-5]。我国52.5%的豌豆生产区为山区或干旱、半干旱地区^[6],水资源短缺严重影响了豌豆的产量和品

质^[7]。因此筛选适宜的抗(耐)旱豌豆种质资源对豌豆栽培生产具有重要意义。

种子萌发是作物生活史的重要部分,该阶段与幼苗成活率、营养器官生长及籽实产量密切相关^[8]。种子萌发始于静止的干燥种子吸收水分,待胚根突破种皮,种子即萌发完成^[9]。种子发芽受到水分、温度、光照等环境因素影响^[10],若豌豆种子萌发过程中出现水资源短缺会导致萌发时间延长,出苗率降低,使幼苗瘦弱,生长后期严重缺水甚至会导致幼苗体内物质代谢紊乱,生长缓慢甚至死亡,严重影响豌豆苗、豌豆尖、豌豆荚及青豌豆的产量和品质^[10]。前人研究主要集中在干旱胁迫对豌豆的农艺性状指标和生理生态响应方面^[9-13],对豌豆种子萌发期耐干旱种质资源的筛选报道并不常见。

本试验对不同主产区收集到的菜用豌豆品种资源进行种子萌发期的耐旱性研究,利用PEG-6000模拟

收稿日期:2017-12-15 接受日期:2018-04-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB1388061),重庆市科委社会民生创新项目(cstc2015shmszx80026)

作者简介:赵愉风,女,主要从事作物栽培生态研究。E-mail:1483883625@qq.com

*通讯作者:崔翠,女,副教授,主要从事作物栽培及逆境生理生态研究。E-mail:cui-greeny@163.com

干旱环境,调查种子在萌发期部分性状并根据综合抗旱系数值(CDC 值)、耐旱性度量值(D 值)、加权关联度(WDC 值)大小对供试种质进行排序,通过相关性分析、主成分分析、聚类分析、灰色关联度分析和逐步回归分析等方法相结合对其耐旱能力进行综合评价,研究豌豆种质在萌发过程中的室内耐旱性鉴定方法和主要参考指标,以期筛选出耐旱性强的品种(系),为耐旱性品种(系)选育和生产中品种优化布局提供一

定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

选择不同豌豆生产区域主要种植的 31 份豌豆品种(系)为试验材料(表 1),由西南大学农学与生物科技学院提供,于 2017 年 3-5 月进行发芽试验。

表 1 参试品种(系)

Table 1 Tested varieties (line)

编号 Code	品种(系)名称 Cultivars (lines) name	编号 Code	品种(系)名称 Cultivars (lines) name
16023	青豌豆 Green Pea	16138	无须豆尖 1 号 No-tendrils sprouts 1
16039	苏碗 1 号 Suwan 1	16139	成碗 7 号 Chengwan 7
16040	苏碗 2 号 Suwan 2	16140	成碗 8 号 Chengwan 8
16051	特选 11 号 Texuan 11	16141	818 荷兰豆 818 sweet broad pea
16054	翠珍甜豌豆 Cuizhen sweet pea	16142	黑眉豌豆 Heimei pea
16055	高级甜脆食荚豆 Sweet crispy pods	16144	朱砂红 Grey pea
16078	苏碗 2 号 Suwan 2	16146	无须豆尖 No-tendrils sprouts
16079	奇珍 76 Qizhen 76	16147	604
16094	中碗 9 号 Zhongwan 9	16158	黑眼豌豆 Black-eyed pea
16095	中碗 10 号 Zhongwan 10	16170	浙碗 1 号 Zhewan 1
16096	中碗 4 号 Zhongwan 4	16173	Sweet broad pea
16104	奥珍 Aozhen	16174	UY039
16105	永盛珍宝 Yongshengzhenbao	16175	UY099
16106	地方品种 1 Local variety 1	16107	地方品种 2 Local variety 2
16177	地方品种 2 甜脆双荚荷兰豆 Sweet crisp double pods Dutch bean	16110	台湾长寿仁豌豆 Taiwan Longevity kernel pea
16178	麦豆 Safflower pea		

1.2 适宜 PEG 浓度的筛选及试验设计

选取遗传背景不同的 3 份豌豆种子材料 16158、16141、16106,分别用 0(CK)、1.0%、2.5%、5.0%、7.5%、10.0% 6 个不同梯度浓度(w/w)的 PEG-6000 溶液进行处理。每品种选取 360 粒大小一致的种子,分别用 75% 乙醇溶液消毒 1~2 min,清水冲洗干净后,将种子置于培养皿中(每皿 20 粒),并加入适量清水置于 25℃ RXZ 智能型人工气候箱(宁波江南仪器厂)进行 24 h 吸胀作用,取出后将种子重新摆放在铺有双层滤纸并分别加入 20 mL 不同浓度 PEG-6000 溶液的培养皿中进行干旱胁迫处理,每处理设 3 次重复,对照组则加蒸馏水代替 PEG 溶液。培养皿放在光照培养箱中进行发芽试验,温度为 25℃,光周期为光照 16 h/黑暗 8 h,3 d 后统计发芽势,7 d 后统计发芽率,根据种子萌发比例及萌发后生长

情况筛选适宜的干旱胁迫处理浓度。

1.3 模拟干旱胁迫处理及其性状调查分析

选用 31 份豌豆种质(表 1),按照浓度筛选时的方法和培养条件,以 1.2 中筛选得到的 PEG-6000 浓度作为胁迫浓度,每处理设 3 次重复。处理 60 h 后计算种子吸水率(seed water absorption ratio, WAR);每天调查种子发芽数,3 d 后统计发芽势,7 d 后统计发芽率,并每皿选取 10 颗籽粒测量其鲜重(fresh weight)、干重(dry weight)、根长(root length, RL)、芽长(buds length, BL)等性状,计算发芽势(germination energy, GE)、发芽率(germination rate, GR)、发芽指数(germination index, GI)、根冠比(root/shoot ratio, RSR)、活力指数(vitality index, VI)及物质贮藏转运率(storage material transfer rate, STR)等指标。计算方法如下:

种子吸水率(WAR)=(种子吸水 60 h 后重量-种子吸水前重量)/种子吸水前重量×100% (1)

发芽指数(GI)= $\sum G_t/D_t$ (2)

式中, G_t 为第 t 天的发芽数, D_t 为相应时间的发芽天数。

活力指数(VI)=GI×胚根干重 (3)

根冠比(RSR)=(根鲜重/芽鲜重)×100% (4)

总鲜重(total fresh weight,TFW)=根鲜重+芽鲜重+籽粒鲜重 (5)

贮藏物质运转率(STR)=(芽干重+根干重)/(芽干重+根干重+籽粒干重)×100% (6)

1.4 评价方法及数据统计分析

参考闫峰等^[14]、罗俊杰等^[15-16]、王兰芬等^[17]、汪灿等^[18-20]的方法,以豌豆各品种 10 个指标的测量值作为基础数据,对各性状测量值求平均后进行差异显著性分析,按照公式(7)、(8)分别计算单项耐旱系数(drought tolerance coefficient, DC)和综合抗旱系数(comprehensive drought tolerance coefficient, CDC):

$$DC = \frac{X_{ij}}{CK_{ij}} \quad (i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n) \quad (7)$$

$$CDC = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m DC \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (8)$$

式中, X_{ij} 、 CK_{ij} 分别代表第 i 个指标第 j 个品种的干旱胁迫处理和 CK 测定值。

按公式(9)、(10)分别计算因子权重系数(ω_i)和各指标的隶属函数值 $[u(X_{ij})]$:

$$\omega_i = P_i \div \sum_{i=1}^m P_i \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (9)$$

$$u(X_{ij}) = (X_i - X_{ijmin}) / (X_{ijmax} - X_{ijmin}) \quad (i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n) \quad (10)$$

式中, P_i 代表第 i 个指标的综合贡献率; X_{ijmin} 、 X_{ijmax} 分别代表第 i 个指标下第 j 个品种的 DC 值的最小值和最大值。

按公式(11)计算耐旱性度量值(drought tolerance evaluation value, D):

$$D = \sum_{i=1}^k [U(X_i) \times (\frac{P_i}{\sum_{i=1}^k P_i})] \quad (i=1,2,3,\dots,k) \quad (11)$$

式中, $U(X_i)$ 为各主成分得分值; k 为主成分分析中综合因子个数。

按公式(12)、(13)计算关联系数(ξ_i)和等权关联

度(γ_i):

$$\xi_i = \frac{\min_{\Delta_{ij}} + p \max_{\Delta_{ij}}}{\Delta_{ij} + p \max_{\Delta_{ij}}} \quad (i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n) \quad (12)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_i \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (13)$$

式中, Δ_{ij} 代表品种最优性状与第 i 个指标第 j 个品种(系)的绝对差值; $\min_{\Delta_{ij}}$ 和 $\max_{\Delta_{ij}}$ 分别代表最小二级绝对差值和最大二级绝对差值; p 为分辨系数($p=0.5$)。

按公式(14)、(15)分别计算各指标权重系数 $[\omega_i(\gamma)]$ 和加权关联度(weight drought tolerance coefficient, WDC):

$$\omega_i(\gamma) = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^m \gamma_i} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (14)$$

$$WDC = \sum_{i=1}^m [DC \times (\frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i})] \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (15)$$

以 DC 值为比较序列,分别以 D 值和 WDC 值为参考序列进行灰色关联度分析,获得各指标 DC 值与 D 值之间的关联度(γ_D)及 DC 值与 WDC 值之间的关联度(γ_{WDC})。

根据供试豌豆各品种(系)的 D 值,以加权配对算术平均法和欧氏距离进行聚类分析,并划分出各品种的耐旱等级,分别对 D 值、CDC 值和 WDC 值逐步回归分析各指标 DC 值,获得回归方程。采用 Microsoft Excel 2010、IBM SPSS 19.0 和 SPSS 24.0 统计软件对数据进行整理和分析。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000 适宜浓度的筛选

由表 2 可知,3 份豌豆品种(系)在不同 PEG-6000 浓度处理条件下,根长均受到不同程度的抑制。在 0(CK)、1.0%、2.5%、5.0%、7.5% 和 10.0% 浓度下,3 份豌豆品种(系)根长均值分别为 4.38、3.63、2.92、2.52、2.00、1.74 cm,各处理组根长较 CK 分别下降了 17.12%、33.33%、42.47%、54.33% 和 60.27%。根长在 2.5%PEG-6000 处理下,与 CK 差异显著,在 1.0%~2.5%PEG 间豌豆根长下降幅度最大。同时随着 PEG-6000 浓度的增加,在 5.0%时,16106 根长受到严重抑制。综上,将 2.5%PEG-6000 作为菜

表 2 不同浓度的 PEG-6000 胁迫处理对豌豆萌发期根长的影响

Table 2 Effects of different concentrations of PEG-6000 stress on root length during pea germination stage /cm

编号 Code	浓度 Concentration/%					
	0(CK)	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0
16106	0.24±0.08a	0.18±0.07ab	0.04±0.07b	0b	0b	0b
16158	7.61±0.01a	5.99±0.09b	4.12±0.01c	3.50±0.07cd	2.86±0.08de	2.68±0.07e
16141	5.30±0.08a	4.74±0.07b	4.58±0.08b	4.05±0.09c	3.14±0.09d	2.53±0.09e

注:不同小写字母表示同一品种在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different small letters in the same varieties mean significantly difference at 0.05 level.

用豌豆耐旱品种资源筛选的浓度。

2.2 豌豆萌发期指标分析

由表 3 可知,CK 和 PEG-6000 处理 31 个品种间差异均达到极显著水平;各性状变异系数分别介于 19.30%~95.27%和 20.34%~99.63%,其中芽长变异系数最大(95.27%和 99.63%),总鲜重变异系数最小(19.30%和 20.34%),按变异系数从大到小排序,CK

豌豆各性状依次为芽长>活力指数>物质储藏转运率>根冠比>根长>发芽势>发芽指数>发芽率>种子吸水率>总鲜重,PEG 处理各性状依次为芽长>根冠比>活力指数>物质储藏转运率>根长>发芽势>发芽指数>发芽率>种子吸水率>总鲜重。综上所述,31 份豌豆材料在种子萌发过程中各相关性状均存在者广泛的遗传基础,在其中进行耐旱性筛选是有效的。

表 3 豌豆种子萌发相关指标分析

Table 3 Analysis on indexes related to pea seed germination

指标 Index	对照 CK				PEG 处理 PEG treatment			
	平均值±标准差 Average±SD	最大值 Max	最小值 Min	变异系数 CV/%	平均值±标准差 Average±SD	最大值 Max	最小值 Min	变异系数 CV/%
发芽势 GE/%	61.72±27.55**	100	6.67	44.64	61.83±31.71**	100	0	51.29
发芽率 GR/%	70.97±26.67**	100	13.33	37.58	68.82±30.84**	100	0	44.82
发芽指数 GI	13.75±5.99**	23.89	2.19	43.58	13.47±6.84**	23.39	0	50.77
活力指数 VI	1.03±0.93**	5.11	0	90.11	0.88±0.74**	30.64	0	83.29
根长 RL/cm	2.82±1.70**	7.61	0.10	60.34	2.54±1.67**	6.74	0	65.58
芽长 BL/cm	0.90±0.86**	4.44	0	95.27	0.51±0.51**	1.80	0	99.63
根冠比 RSR	195.38±119.39**	649.28	0	61.10	281.35±236.52**	966.67	0	84.07
种子吸水率 WAR	5.75±1.34**	9.29	3.71	23.32	5.54±1.41**	10.05	3.17	25.48
总鲜重 TFW/g	7.32±1.41**	10.67	4.74	19.30	6.81±1.39**	101.08	4.36	20.34
物质贮藏转运率 STR/%	5.16±3.80**	18.93	0	73.70	3.75±3.01**	13.75	0	80.18

注:**表示各性状在品种间在 0.01 水平差异极显著。

Note: ** indicate significant difference at 0.01 level among varieties.

2.3 单项指标分析

分别对各性状的耐旱系数(DC)进行分析(表 4),结果显示,各性状指标的 DC 值变异系数介于 5.62%~78.60%之间,其中芽长的变异系数最大,达到 78.60%,种子吸水率和总鲜重变异系数较小,分别为 5.62%和 7.60%,说明 PEG-6000 胁迫处理后芽长受到的影响较大,而种子吸水率和贮藏物质转运率变化较小;从各性状 DC 值变异系数来看,芽长(78.60%)、

根冠比(76.16%)、活力指数(61.15%)、贮藏物质转运率(52.33%)和根长(40.02%)在品种间变异幅度较大,可以作为种子萌发期耐旱资源筛选指标。从芽长 DC 值来看,大于平均值的品种(系)有 15 个,其中 16104、16078、16107、16110、16139 和 16040 6 个品种(系)的 DC 值均大于 1,说明模拟干旱胁迫条件下,这些种质芽长并没有受到影响,反而具有一定的促进作用;31 份豌豆根冠比 DC 值平均值为 1.55,其中

16147、16023、16140、16055、16105 的 DC 值较大,均大于 3.0;活力指数 DC 值总体均值为 0.77,大于均值的豌豆种质有 14 份,按照其大小排名前 5 的分别为 16110、16107、16079、16040 和 16078;按贮藏物质转运率 DC 值大小排序,排名靠前的品种主要为 16110、16107、16141 和 16040;按根长 DC 值进行排序,16110、

16141、16107、16146、16040 和 16170 排名靠前。从各单项指标来看,不同材料在不同的单项指标中表现不同,通过单项指标对 31 份种质进行耐旱性筛选结果也不相同,因此仅通过单项指标对豌豆种质萌发期耐旱性筛选存在着局限性。

表 4 豌豆种质各指标的耐旱系数(DC)

Table 4 Drought-tolerance coefficients of parameter during seeds germination for pea germplasm

编号 Code	发芽指 数 GI	活力指 数 VI	发芽势 GE	发芽率 GR	根长 RL	贮藏物质 转运率 STR	总鲜重 TFW	根冠比 RSR	种子吸水率 WAR	芽长 BL
16158	1.00	0.58	1.00	1.04	0.62	0.63	0.84	0.78	1.02	0.53
16094	0.95	1.08	0.89	0.90	0.80	0.71	0.93	0.86	0.96	0.75
16141	1.13	0.75	1.08	1.04	1.69	1.15	0.83	0.98	0.84	0.68
16139	0.95	0.90	1.04	1.00	1.01	0.96	1.02	0.98	1.00	1.07
16110	1.46	2.47	1.65	1.43	1.78	1.78	1.08	0.65	1.08	1.10
16140	1.18	1.02	1.20	1.09	0.95	0.62	1.03	3.53	0.94	0.47
16107	1.21	1.57	1.24	1.23	1.31	1.34	0.98	0.79	1.01	1.25
16175	0.37	0.00	0.25	0.50	0.60	0.00	0.90	0.00	0.95	0.00
16055	0.81	0.91	0.70	0.90	0.90	0.98	1.06	4.79	1.05	0.34
16040	1.00	1.17	1.04	1.04	1.18	1.13	0.92	0.84	0.92	1.01
16096	0.52	0.28	0.60	0.62	0.44	0.41	0.90	1.06	0.98	0.25
16173	1.13	0.88	1.12	1.12	0.85	0.56	0.94	1.77	0.98	0.33
16095	0.98	1.02	1.00	0.95	0.94	0.72	0.89	1.89	0.92	0.55
16170	0.57	0.44	0.60	0.50	1.05	0.59	1.07	1.94	1.00	0.80
16178	0.94	0.74	1.14	0.96	0.82	0.82	0.96	0.74	0.96	0.96
16174	0.88	0.64	1.00	0.89	0.81	0.52	0.96	2.68	0.95	0.24
16079	1.24	1.20	1.06	1.25	0.93	0.63	0.96	2.42	1.00	0.27
16039	0.77	0.54	0.96	0.86	0.65	0.51	0.89	2.49	1.01	0.26
16177	0.60	0.20	0.60	0.57	0.39	0.26	0.84	0.00	0.90	0.00
16054	0.97	0.73	1.00	0.93	0.81	0.59	0.94	1.21	1.01	0.63
16146	1.03	0.93	1.00	0.96	1.26	0.94	0.91	1.71	0.99	0.76
16105	0.63	0.30	0.63	0.65	0.48	0.29	0.97	3.28	0.99	0.18
16142	1.01	0.71	1.15	1.14	0.74	0.68	0.91	1.17	0.95	0.75
16104	0.41	0.25	0.25	0.50	0.81	0.81	0.89	1.27	0.88	2.00
16023	0.89	0.77	0.87	0.88	0.99	0.60	0.90	3.44	0.94	0.24
16051	0.80	0.48	0.70	1.00	0.42	0.36	0.91	0.00	1.01	0.00
16078	1.07	1.09	0.95	0.93	0.80	0.81	0.85	1.42	0.94	1.51
16138	1.04	0.88	1.33	0.92	0.70	0.70	0.90	1.51	0.89	0.61
16147	1.12	0.64	1.04	1.04	0.71	0.38	0.84	3.19	0.97	0.10
16144	1.11	0.76	1.20	1.14	0.85	0.68	0.86	0.78	0.94	0.65
16106	0.25	0.09	0.00	0.33	0.21	0.11	1.05	0.00	0.86	0.17
平均值 Ave rage value	0.90	0.77	0.91	0.91	0.85	0.69	0.93	1.55	0.96	0.59
变异系数 CV/%	30.77	61.15	37.21	27.29	40.02	52.33	7.60	76.16	5.62	78.60

由表 5 可知,豌豆各指标(除根冠比)都与其他至少一个指标呈显著或极显著相关,表明各指标之间具有一定程度的相关性。其中发芽势与发芽率、发芽指数、活力指数、根长、芽长、物质贮藏转运率呈极显著正相关,相关系数介于 0.554~0.921 之间,相关程度较高;物质贮藏转运率与总鲜重呈显著相关,相关系数为 0.387;总鲜重与活力指数、种子吸水率呈极显著正相关,相关系数分别为 0.570、0.579;种子吸水率与活力

指数呈显著正相关,相关系数是 0.385,说明种子活力越强,其吸水保水能力越好,可进一步使鲜重增加。根冠比是由根长和芽长 2 个单一性状组成的复合性状,结果显示根冠比与 2 个单一性状之间并没有显著相关性,说明不同材料在受到胁迫时没有表现出相同的变化趋势。以上结果表明,干旱胁迫影响根的生长发育,从而影响豌豆种子发芽(发芽势、发芽率、发芽指数)、活力指数、地上部生长(芽长)和物质贮藏转运。

表 5 豌豆种质各指标耐旱系数(DC)的相关性

Table 5 Correlations of drought-tolerance coefficients between parameters during germination of pea germplasm

指标 Index	发芽势 GE	发芽率 GR	发芽指 数 GI	活力指 数 VI	根长 RL	芽长 BL	根冠比 RSR	种子吸水 率 WAR	总鲜重 TFW	物质贮藏 转运率 STR
发芽势 GE	1									
发芽率 GR	0.864**	1								
发芽指数 GI	0.921**	0.957**	1							
活力指数 VI	0.766**	0.824**	0.823**	1						
根长 RL	0.602**	0.617**	0.653**	0.686**	1					
芽长 BL	0.554**	0.504**	0.569**	0.618**	0.612**	1				
根冠比 RSR	0.103	0.172	0.183	0.175	0.155	-0.151	1			
种子吸水率 WAR	0.237	0.306	0.210	0.385*	0.055	0.050	0.152	1		
总鲜重 TFW	0.086	0.081	0.025	0.570**	0.204	0.158	0.219	0.579**	1	
物质贮藏转运率 STR	0.676**	0.668**	0.670**	0.826**	0.835**	0.739**	0.109	0.254	0.387*	1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。下同。

Note: * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as following.

参照连续变数的次数分布统计方法^[21],以组距为 0.2 将各性状耐旱系数作次数分布表(表 6)。结果表明同一区间内的各指标 DC 值分布次数和频率相差较大。0.6<DC≤1.2 范围内,各指标分布较集中,发芽指数、活力指数、发芽势、发芽率、根长、贮藏物质转运率、总鲜重、根冠比、种子吸水率和芽长的分布频率分别为 74%、61%、74%、74%、68%、54%、100%、35%、100%、39%;1.2<DC≤2.0 时,发芽指数、活力指数、发芽势、发芽率、根长、贮藏物质转运率、根冠比、芽长的分布频率分别为 9%、3%、9%、9%、12%、6%、24%、9%,说明这些指标对干旱胁迫的反应灵敏;DC>2.0 时根冠比的分布频率为 26%,表明干旱胁迫对多数品种的根冠比影响较大。各指标对干旱胁迫反应的敏感性从小到大依次为芽长、贮藏物质转运率、活力指数、种子吸水率、根长、发芽率、发芽势和发芽指数、根冠比、总鲜重。不同性状对干旱胁迫的响应程度存在差异,同一品种(系)不同指标间耐旱系数也不完全一致。次数分布和单一指标(DC 值分析)均表明,豌豆耐旱性种质资源筛选鉴定需要通过多个指标进行综合评

价,才有可能避免片面性。

2.4 萌发期主成分分析

参照唐启义^[22]数据处理系统进行主因子分析,其中,因子个数的选取遵循两条原则:一是累积贡献率要占总贡献率的 80%以上;二是特征值要大于等于 1。由表 7 可知,各因子特征值中前 3 个因子的贡献率分别为 52.423%、15.717% 和 13.344%,累计贡献率达 81.483%,其特征根 $\lambda > 1.334$ 。其中,主成分 1(F1)在发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数和物质贮藏转运率有较高载荷量,载荷量分别为 0.888、0.896、0.913、0.948、0.888,这 5 个指标反映了豌豆种子萌发期的萌发状况。主成分 2(F2)在根冠比和种子吸水率上载荷量较大,分别为 0.656、0.641,这 2 个指标反映了豌豆的生长积累状况。主成分 3(F3)在总鲜重上载荷量最大,为 0.783,其反映了豌豆的生长状况。

2.5 菜用豌豆种质资源耐旱性综合评价

由表 8 可知,供试种质综合耐旱系数(CDC 值)介于 0.307~1.449 之间,平均值为 0.909,标准差为 0.248,变异系数为 27.308%。根据 CDC 值大小对供

表6 供试豌豆种质各指标耐旱系数的频次分布

Table 6 Different distributions of drought-tolerance coefficients of all indices in tested pea germplasms

指标 Index	0≤DC ≤0.2		0.2< DC≤0.4		0.4< DC≤0.6		0.6< DC≤0.8		0.8< DC≤1.0		1.0< DC≤1.2		1.2< DC≤1.4		1.4< DC≤1.6		1.6< DC≤1.8		1.80< DC≤2.0		DC>2.0	
	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
	发芽指数 GI	0	0	2	6	3	10	3	10	9	29	11	35	2	6	1	3	0	0	0	0	0
活力指数 VI	3	10	3	10	4	13	8	26	5	16	6	19	0	0	1	3	0	0	0	0	1	3
发芽势 GE	1	3	2	6	2	6	4	13	8	26	11	35	2	6	0	0	1	3	0	0	0	0
发芽率 GR	0	0	1	3	4	13	2	6	13	42	8	26	2	6	1	3	0	0	0	0	0	0
根长 RL	0	0	2	6	4	13	7	23	11	35	3	10	2	6	0	0	2	6	0	0	0	0
贮藏物质转 运率 STR	2	6	4	13	6	19	9	29	6	19	2	6	1	3	0	0	1	3	0	0	0	0
总鲜重 TFW	0	0	0	0	0	0	0	0	25	81	6	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
根冠比 RSR	4	13	0	0	0	0	5	16	4	13	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	8	26
种子吸水 率 WAR	0	0	0	0	0	0	0	0	22	71	9	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
芽长 BL	6	19	7	23	4	13	8	26	1	3	3	10	1	3	1	3	0	0	1	3	0	0

注:T:次数;F:频率。

Note:T:Time. F:Frequency.

表7 供试豌豆种质各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 7 Eigenvectors and contribution rates of principal components of all indices in tested pea germplasms

指标 Index	因子 Factor									
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
发芽势 GE	0.888	0.058	-0.352	-0.019	-0.056	0.133	0.178	-0.177	0.006	0.026
发芽率 GR	0.896	0.117	-0.348	-0.107	-0.016	0.080	-0.012	0.171	-0.112	0.051
发芽指数 GI	0.913	0.064	-0.359	0.019	-0.060	0.100	0.010	0.079	0.069	-0.090
活力指数 VI	0.948	0.027	0.104	-0.083	-0.088	0.063	-0.238	-0.065	0.102	0.032
根长 RL	0.830	-0.209	0.196	0.202	-0.142	-0.388	0.097	0.058	0.072	0.019
芽长 BL	0.447	-0.640	0.427	0.130	0.365	0.225	0.057	0.050	0.042	0.010
根冠比 RSR	0.137	0.656	0.020	0.724	0.159	0.034	-0.027	-0.006	-0.008	0.006
种子吸水率 WAR	0.423	0.641	0.185	-0.433	0.406	-0.145	0.033	-0.006	0.023	-0.006
总鲜重 TFW	0.212	0.432	0.783	-0.095	-0.325	0.182	0.074	0.034	-0.014	-0.006
物质贮藏转运率 STR	0.888	-0.263	0.285	0.059	0.036	-0.114	-0.070	-0.092	-0.169	-0.040
特征值 Eigenvectors	5.242	1.572	1.334	0.800	0.465	0.308	0.113	0.087	0.064	0.015
贡献率 Contribution rates/%	52.423	15.717	13.344	8.005	4.652	3.078	1.132	0.865	0.640	0.145
累计贡献率 Total contribution rates/%	52.423	68.139	81.483	89.488	94.140	97.217	98.349	99.214	99.855	100

试种质进行耐旱性排序,耐旱性最强的4个品种依次为16110、16055、16140、16107;耐旱性最弱的3个品种依次为16106、16175、16177,其余种质介于两者之间。耐旱性度量值(D值)介于2.359~11.147之间,平均值为6.603,标准差为1.779,变异系数为29.346%。根据D值大小对供试种质进行耐旱性排序,耐旱性最强的4个品种依次为16110、16107、16055、16140,耐旱

性最弱的3个品种依次为16106、16175、16177。WDC值大小为0.307~1.441,平均值为0.915,标准差为0.250,变异系数27.342%。基于加权关联度(WDC值)大小进行耐旱性排序,结果显示,耐旱性最强的4个品种依次为16110、16055、16140和16107;耐旱性最弱的3个品种依次为16106、16175和16177。D值、CDC值、WDC值对供试品种耐旱性评价结果基本吻

合,将3种排序顺序相加,进行综合排序,耐旱性最强的4个品种依次为16110、16055、16107、16140,耐旱性最弱的3个品种依次为16106、16175和16177。

表8 供试豌豆品种(系)耐旱性评价的DC值、WDC值、D值的综合排序
Table 8 Comprehensive ranking of DC value, WDC value and D value of drought tolerance evaluation in tested pea germplasms

编号 Code	CDC 值 CDC value	排序 Rank	D 值 D value	排序 Rank	WDC 值 WDC value	排序 Rank	综合排序 Comprehensive rank
16158	0.803	26	5.352	24	0.804	26	25
16094	0.881	21	5.956	21	0.881	22	23
16141	1.017	10	6.504	11	1.017	11	11
16139	0.992	12	7.115	6	0.992	13	10
16110	1.449	1	11.147	1	1.441	1	1
16140	1.201	3	7.943	4	1.221	3	4
16107	1.192	4	8.451	2	1.187	4	3
16175	0.357	30	2.587	30	0.358	30	30
16055	1.245	2	8.394	3	1.273	2	2
16040	1.024	9	6.822	8	1.022	10	8
16096	0.606	27	3.962	28	0.612	27	28
16173	0.967	14	6.659	9	0.975	14	14
16095	0.987	13	6.300	12	0.995	12	13
16170	0.856	23	6.088	17	0.865	23	22
16178	0.904	18	6.190	15	0.903	19	17
16174	0.957	15	6.278	13	0.973	15	15
16079	1.096	5	7.579	5	1.108	5	5
16039	0.894	20	5.717	23	0.908	18	21
16177	0.436	29	2.746	29	0.436	29	29
16054	0.880	22	6.073	18	0.884	21	20
16146	1.048	7	7.041	7	1.053	7	6
16105	0.838	24	5.306	25	0.860	24	24
16142	0.920	17	6.048	19	0.924	17	18
16104	0.807	25	4.287	27	0.808	25	26
16023	1.053	6	6.528	10	1.072	6	7
16051	0.568	28	4.344	26	0.567	28	27
16078	1.037	8	6.197	14	1.038	8	9
16138	0.948	16	5.957	20	0.954	16	16
16147	1.003	11	6.149	16	1.023	9	12
16144	0.897	19	5.861	22	0.898	20	19
16106	0.307	31	2.359	31	0.307	31	31
平均值 Average value	0.909		6.063		0.915		
标准差 SE	0.248		1.799		0.250		
变异系数 CV/%	27.308		29.346		27.342		

2.6 灰色关联度分析

由表9可知,在干旱胁迫下,等权关联度(γ_D)反映各指标DC值与D值的密切程度,其值介于0.5022~0.5516之间,从大到小依次为根冠比、种子吸水率、总鲜重、发芽率、发芽指数、发芽势、根长、活力指数、物

质贮藏转运率和芽长。灰色加权关联度(γ_{WDC})反映各指标DC值与WDC值的密切程度,其值介于0.7324~0.9375之间,从大到小依次为发芽指数、发芽率、发芽势、总鲜重、种子吸水率、根长、活力指数、贮藏物质转运率、芽长和根冠比。

表9 供试豌豆种质各指标DC值与D值和WDC值的关联度及各指标权重
Table 9 Correlation degree between DC value of all indices and D value together with WDC value and indices weight in tested pea germplasms

指标 Index	等权关联度 γ_D	排序 Rank	权重系数 ω_i	加权关联度 γ_{WDC}	排序 Rank
发芽指数 GI	0.5158	5	0.0998	0.9375	1
活力指数 VI	0.5070	8	0.0980	0.8768	7
发芽势 GE	0.5156	6	0.0997	0.9231	3
发芽率 GR	0.5168	4	0.1000	0.9362	2
根长 RL	0.5131	7	0.0992	0.9087	6
贮藏物质转运率 STR	0.5042	9	0.0975	0.8700	8
总鲜重 TFW	0.5213	3	0.1008	0.9171	4
根冠比 RSR	0.5516	1	0.1067	0.7324	10
种子吸水率 WAR	0.5227	2	0.1011	0.9165	5
芽长 BL	0.5022	10	0.0971	0.8152	9

2.7 聚类分析及耐旱级别的划分

以加权配对算术平均法进行聚类分析,在欧氏距离 $D^2=8.5$ 处,可以将31份供试豌豆品种(系)分为4类群(图1)。第I类群包含16054、16142等20份材料,占总数64.52%;第II类群为包含16140、16079和16055共3份材料,占总数的9.68%;第III类群包含16175、16177、16106、16096、16051和16104共6份材料,占总数的19.35%;第IV类群包含16110和16107共2份材料。统计4个类群各耐性评价单项指标、D值、CDC值和WDC值(表10),结果表明,第I类材料除芽长外其他各指标数据在4个类群中最低,说明第I类群萌发期对于干旱胁迫极敏感;第II类群的D值、CDC值、WDC值高于第III类群和第I类群,可以归类为较耐旱材料;第IV类群2份材料除根冠比外其余9个单项指标和3个综合指标均最大,因此可以将该类群归类为耐旱性强材料。综上,4个类群耐旱性从强到弱依次为第IV类群>第II类群>第III类群>第I类群。

2.8 逐步回归分析

分别以D值、CDC值和WDC值为参考序列,对供试豌豆品种(系)各指标DC值进行逐步回归分析,得出3个逐步回归方程(表11),通过F检验3个方程都达到极显著水平,说明3个方程拟合度好,预测精度较

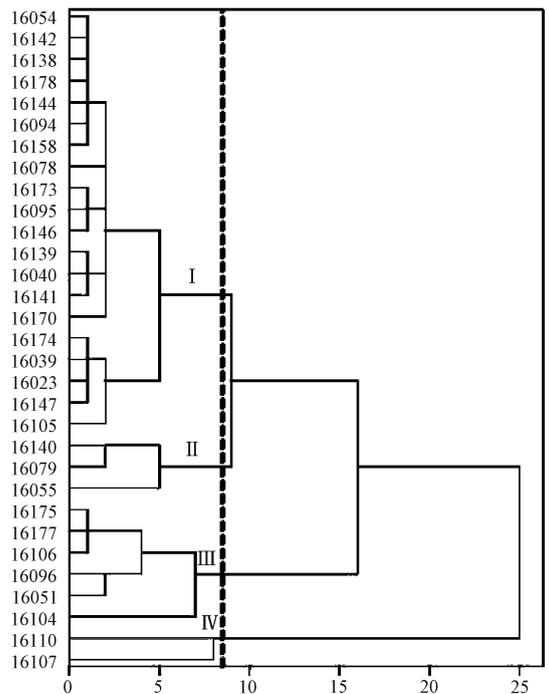


图1 基于D值的供试豌豆种质资源(抗)耐旱性聚类图

Fig.1 Cluster map of drought tolerance of pea germplasm based on D value

表 11 供试豌豆种质抗旱性模型预测

Table 11 Prediction of drought resistance model for tested pea germplasms

因变量 Dependent variable	多元逐步回归方程 Multiple stepwise regression equation	相关系数 R	F 值 F value	P 值 P value
综合抗旱系数 CDC	$Y=0.316+0.308X_1+0.168X_2+0.216X_5$	0.870	32.191**	0.000 1
加权关联度 WDC	$Y=0.318+0.321X_1+0.161X_2+0.212X_5$	0.855	32.191**	0.000 1
耐旱性度量 D	$Y=2.380+2.088X_2+1.011X_3+1.335X_5$	0.917	53.883**	0.000 1

注: X_1 : 发芽指数; X_2 : 活力指数; X_3 : 发芽势; X_4 : 发芽率; X_5 : 根长。

Note: X_1 : Germination index. X_2 : Vigor index. X_3 : Germination energy. X_4 : Germination rate. X_5 : Root length.

表 10 供试豌豆种质抗性评价指标的分级

Table 10 Grading evaluation of index about drought resistance of pea germplasm

指标 Index	DC 值 DC value			
	I	II	III	IV
发芽势 GE	0.40	0.93	1.05	1.65
发芽率 GR	0.59	0.95	0.99	1.43
发芽指数 GI	0.49	0.94	1.01	1.46
活力指数 VI	0.22	0.75	0.89	2.47
根长 RL	0.48	0.80	0.96	1.78
芽长 BL	0.40	0.26	0.80	1.10
根冠比 RSR	0.39	3.23	1.21	0.65
种子吸水率 WAR	0.93	0.98	0.96	1.08
总鲜重 TFW	0.92	0.95	0.92	1.08
物质贮藏转运率 STR	0.33	0.57	0.81	1.78
综合抗旱系数 CDC	0.52	1.04	0.96	1.45
耐旱性度量 D	0.52	1.05	0.96	1.44
加权关联度 WDC	3.38	6.74	6.41	11.15

高,可用这 3 个方程进行菜用豌豆品种萌发期抗(耐)旱性评价。此外,由逐步回归方程可知,在豌豆种质资源萌发期抗(耐)旱性鉴定中,选择性地将与 D 值密切相关的指标,如发芽指数、活力指数、发芽势、根长进行测定,可有效鉴定豌豆种质资源的耐旱性,从而使鉴定工作简化,提高工作效率。

3 讨论

农作物抗逆性鉴定按照生育时期可分为萌发期鉴定、苗期鉴定和成株期鉴定^[23]。萌发期是作物群体数量建成的关键时期,具有便于操作、周期短、效率高、易受环境影响等特点^[24]。豌豆在种子播种后,干旱胁迫会导致其出苗率降低、出苗时间延长、生长发育受阻^[25]。

目前,诸多研究者针对作物萌发期进行了抗(耐)

旱性鉴定的研究,不同研究所采用的筛选鉴定指标都有所不同,最终筛选出来的耐旱性指标也存在差异。如陈学珍等^[26]对 20 个大豆品种芽期耐旱性研究发现,在发芽势和发芽率均高的情况下,二者可作为耐旱性鉴定的指标。刘学义等^[27]在大豆成苗期根毛与耐旱性的关系研究中发现胚根的长短与耐旱性密切相关,耐旱品种的胚根比其他类型的品种长。王利彬等^[28]在大豆种质资源芽期耐旱性鉴定中发现干旱胁迫下胚根和下胚轴的生长状况可作为评价大豆芽期耐旱性的生理指标。陈新等^[29]研究表明,植物抗(耐)旱性与萌发期种子活力指数具有一定的相关性,萌发期种子活力指数可以作为抗(耐)旱性鉴定的重要指标。Bewley^[30]研究认为贮藏物质转运率在在一定程度上可能决定了幼苗生长状况。本试验最终筛选出发芽势、发芽率、活力指数、活力指数、根长作为豌豆萌发期的优先耐旱性评价指标。

植物的耐旱性受遗传因子和环境共同控制,采取单项指标进行耐旱性评价的有效性和准确性较低,因此,同时观测多个指标,进行综合分析后对试验材料进行耐旱性评价很有必要^[31]。本研究通过主成分分析法、隶属函数法得到抗(耐)旱性度量值(D 值),其能够综合各指标间的相互关系且避免了单一指标存在的片面性,可较准确地评价豌豆的抗(耐)旱性^[32]。灰色关联度分析作为衡量因素间关联程度的一种方法,显示了各指标的重要性^[33]。本研究以各指标 DC 值为比较序列,D 值和 WDC 值为参考序列,结果显示各指标分析在 D 值和 WDC 值间有较强的一致性,与朱宗河等^[34]和谢小玉等^[35]对油菜的研究结果一致。聚类分析是通过应用变量的数值特征变化从而对研究对象进行分类的统计方法,具有一定的可靠性^[36]。本试验以 D 值、CDC 值和 WDC 值为依据进行各种(系)分类,在综合耐旱评价的基础上,将 31 份豌豆种质材料分为 4 类,这与薏苡^[18-20]、胡麻^[37]、小麦^[38]等作物的耐旱性鉴定结果一致。本研究结果为今后菜用豌豆萌发期抗旱性鉴定提供了理论依据,也为耐旱豌豆品种

的选育、优化布局与推广应用提供了一定的理论参考。

4 结论

本研究结果表明,31份豌豆品种资源在未干旱处理下,种子萌发相关性状指标变异系数介于19.30%~95.27%;而在模拟干旱处理下各指标变异系数介于20.34%~99.63%之间。各性状在品种间均存在着显著差异,表明31份豌豆材料具有广泛的遗传基础。通过单项指标DC值分析,每个单项指标筛选出耐旱性种质不同,表明单项指标筛选具有一定的局限性;根据综合抗旱系数值(CDC值)、耐旱性度量值(D值)、加权关联度(WDC值)大小对供试种质进行排序,其中耐旱最强的4个品种依次为16110、16055、16140和16107;耐旱性最弱的3个品种依次为16106、16175和16177。聚类分析将31份豌豆品种资源划分为4个类群。逐步回归分析表明,与D值密切相关的指标为发芽指数、活力指数、发芽势、根长,这些可作为豌豆种质资源萌发期耐旱性鉴定综合选择指标。本研究结果为菜用豌豆耐旱机理、干旱调控缓解机制、菜用豌豆耐旱品种培育及其推广等研究奠定了一定的理论。

参考文献:

- [1] Rice E L. Allelopathy (2nd Ed) [M]. New York: Academic Press Inc., 1984: 309-315
- [2] 张维. 干旱胁迫及氮素形态对豌豆生长及共生固氮性能的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014
- [3] 张红萍, 牛俊义, 轩春香, 王军强, 白全琴, 付凯红. 干旱胁迫及复水对豌豆叶片脯氨酸和丙二醛含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(5):50-54
- [4] 宗绪晓. 豌豆生产技术[M]. 北京:北京教育出版社, 2016:1-2
- [5] 王延鹏. 植物间化感作用研究概况[J]. 山东林业科技, 2008(3):84-88
- [6] 郑敏娜, 李荫藩, 梁秀芝, 薛龙飞, 张小娟. 水分胁迫对豌豆种子萌发和幼苗生长发育的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(3):212-216
- [7] 闫志利, 轩春香, 牛俊义, 席玲玲, 刘建华, 赵天武. 干旱胁迫及复水对豌豆根系内源激素含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2):297-301
- [8] 郑勇. 缙云山阔叶木本植物种子及幼苗生长特性研究[D]. 重庆:西南大学, 2010
- [9] 陈凤娟, 胡丽涛, 刘国华. 干旱胁迫对豌豆幼苗生理生化指标的影响[J]. 现代农技, 2011(12):111-114
- [10] Osman H S. Enhancing antioxidant-yield relationship of pea plant under drought at different growth stages by exogenously applied glycine betaine and prolin [J]. Annals of Agricultural Sciences, 2015, 60(2):389-402
- [11] Jin J, Lauricella D, Armstrong R, Sale P, Tang C. Phosphorus application and elevated CO₂ enhance drought tolerance in field pea

- grown in a phosphorus-deficient vertisol [J]. Annals of Botany, 2015, 116(6):975
- [12] Bewley J D, Black M. Seeds: Physiology of Development and Germination[M]. New York: Plenum Press, 1994: 199-257
- [13] Gul B, Weber D J. Effect of salinity, light, and temperature on germination in *Allenrolfea occidentalis* [J]. Canadian Journal of Botany, 1999(77):240-246
- [14] 闫锋, 崔秀辉, 李清泉, 王成, 曾玲玲, 刘峰, 马波, 袁明. 绿豆品种的灰色关联度分析及综合评价[J]. 中国种业, 2011(S2): 31-33
- [15] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1259-1273
- [16] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻. 主要胡麻品种抗旱相关指标分析及综合评价[J]. 核农学报, 2014, 28(11):2115-2125
- [17] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 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
- [18] 汪灿, 周峻波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15):2872-2887
- [19] 汪灿, 周峻波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5):846-859
- [20] 汪灿, 周峻波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2017, 43(9):1381-1394
- [21] 汪灿, 周峻波, 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[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8):1388-1402
- [22] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析 & 数据挖掘[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2010:784-789
- [23] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 张姣, 陈冰嫻, 许文娟, 黄瑞冬. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1233-1246
- [24] 徐宁, 陈冰嫻, 王明海, 包淑英, 王桂芳, 郭中校. 绿豆品种资源萌发期耐碱性鉴定[J]. 作物学报, 2017, 43(1):112-121
- [25] 曾彦军, 王彦荣, 保平, 塔拉腾, 苏勒德. 几种生态因子对红砂和霸王种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2005(5):24-31
- [26] 陈学珍, 谢皓, 郝丹丹, 吴伟, 百宝良, 于同泉, 路苹. 干旱胁迫下20个大豆品种芽期抗旱性鉴定初报[J]. 北京农学院学报, 2005, 20(3): 54-56
- [27] 刘学义, 任冬莲, 李晋明, 曹雄. 大豆成苗期根毛与抗旱性的关系研究[J]. 山西农业科学, 1996, 24(1): 27-30
- [28] 王利彬, 刘丽君, 裴宇峰, 董守坤, 孙聪姝, 祖伟, 阮英慧. 大豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1):36-4
- [29] 陈新, 宋高原, 张宗文, 吴斌. PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6):1188-1195
- [30] Bewley J D, Seed germination and dormancy[J]. Plant Cell, 1997, 9(7):1055-1066
- [31] 刘海刚, 段曰汤, 沙毓沧, 袁理春, 陈艺齐, 杨子祥. PEG-6000

- 处理对火龙果种子萌发的影响[J]. 江西农业学报, 2010, 22(11):50-52
- [32] 刘光辉, 陈全家, 吴鹏昊, 曲延英, 高文伟, 杨军善, 杜荣光. 棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(1):53-62
- [33] 徐萍. 腹腔镜胆囊切除术住院费用的灰色关联分析[J]. 中国卫生统计, 2011, 28(5):596-598
- [34] 朱宗河, 郑文寅, 张学坤. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9):1775-1787
- [35] 谢小玉, 张霞, 张兵. 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
- [36] 徐宁, 王明海, 包淑英, 王桂芳, 郭中校. 18份绿豆品种资源苗期耐旱性鉴定[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(6):17-20
- [37] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15):3076-3087
- [38] 李国瑞, 马宏亮, 胡雯媚, 汤永禄, 荣晓椒, 樊高琼. 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

Germplasm Identification of Drought Tolerance of Vegetable Peas During Seeds Germination Stage

ZHAO Yufeng ZHOU Qingyuan GAO Huanhuan YE Sang WANG Qian CHENG Chuang
GUO Yanjun CUI Cui*

(College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: In order to study the drought tolerance of vegetable pea seeds during germination period, 31 vegetable pea varieties were used as experimental materials and were treated with 2.5% PEG-6000 solution to simulate drought stress. The seed germination energy (GE) and germination rate (GR) were counted, and fresh weight (FW), dry weight (DW), root length (RL), buds length (BL) and storage material transfer rate (STR) were measured. Then, correlation analysis, principal component analysis, cluster analysis, grey correlation analysis and stepwise regression analysis were used to identify drought tolerance and screen drought tolerance index of 31 vegetable pea varieties during seeds germination stage. The results showed that 2.5% PEG had significant effect on indexes measured during germination of vegetable pea. The germplasm were sorted according to the comprehensive drought resistance coefficient value (CDC), drought tolerance evaluation value (D) and weighted drought tolerance coefficient value (WDC). As a result, there were 4 varieties including 16110, 16055, 16140 and 16107 showed stronger drought tolerance while 3 varieties including 16106, 16175 and 16177 showed drought sensitivity. By cluster analysis, 31 pea germplasm can be divided into 4 group at Euclidean distance $D^2 = 8.5$, in which the first group includes 20 varieties such as 16054, 16142, 16138 and so on, the second group includes 16140, 16079 and 16055, the third group contains 6 varieties, such as 16175, 16104 and etc, and the fourth group contains 16110 and 16107. Also, stepwise regression analysis showed that the indexes closely related to D value were germination index, vigor index, germination potential and root length, which could be used as indicators of drought tolerance of pea germplasm resources during germination period. The results provide a theoretical reference for further study on drought tolerance mechanism and drought mitigation mechanism of vegetable pea during germination, and laid a foundation for breeding and popularizing the drought-tolerant varieties of vegetable pea.

Keywords: vegetable pea, germination stage, drought tolerance index, drought tolerance identification