

绿豆种质资源抗旱性鉴定评价

王兰芬¹, 武晶¹, 彭琳², 季良², 王述民¹

(¹ 中国农业科学院作物科学研究所 / 农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程, 北京 100081;

² 新疆农业科学院粮食作物研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 培育抗旱品种是应对全球气候干旱最经济、有效的途径之一, 而抗旱种质的鉴定与筛选是其前提和基础。本研究以 303 份绿豆种质资源为材料, 在新疆奇台县自然条件下, 于 2017 年、2018 年连续 2 年开展绿豆种质抗旱性研究。通过考察不同种质单株产量、单株荚数、单株粒数、单株生物量、株高等指标, 计算各指标在早胁迫与灌水条件下的比值, 运用相关性分析确定抗旱指标; 采用抗旱系数、隶属函数和抗旱指数法, 评价绿豆的抗旱性; 比较 3 种评价结果, 选择最适宜的评价方法, 进而筛选抗旱种质。结果表明, 抗旱系数与单株荚数、单株粒数、单株生物量、小区产量在早胁迫与灌水条件下的比值呈极显著正相关, 从而遴选这 4 项指标作为绿豆抗旱性鉴定的评价指标; 抗旱系数、隶属函数和抗旱指数三者呈极显著的正相关, 3 种评价方法抗旱分级结果一致性较高, 但抗旱指数法筛选的高抗、抗旱资源在早胁迫和灌水条件下平均单株产量高于通过其他 2 种方法筛选的相应级别的平均单株产量, 故认为抗旱指数法更适宜于自然条件下大规模的绿豆抗旱性鉴定; 2 年抗旱指数评价结果一致的种质 103 份, 其中, 高抗种质 9 份、抗旱种质 11 份、中抗种质 61 份、敏感种质 8 份和 14 份极敏感种质。本研究为绿豆种质抗旱性研究提供理论指导和信息支撑。

关键词: 绿豆; 抗旱性; 相关性分析; 隶属函数

Evaluation for Drought-tolerance Germplasm Resource in Mungbean

WANG Lan-fen¹, WU Jing¹, PENG Lin², JI Liang², WANG Shu-min¹

(¹ Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement, Beijing 100081; ² Institute of Food Crop, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091)

Abstract: Breeding for drought-tolerance varieties is one of the most cost-effective ways to meet global climate drought, and identification of the drought-tolerance germplasms is of importance in breeding. In this study, 303 mungbean accessions were tested for drought tolerance under the different irrigation conditions in Qitai, Xinjiang in 2017 and 2018. Nine parameters were investigated, for instance yield per plant, pod number per plant, seed number per plant and biomass per plant. The ratios of all parameters between drought and irrigation condition were calculated. The drought tolerance indicators were determined by correlation analysis, and mungbean germplasm for drought-tolerance were evaluated by drought tolerance coefficient, subordinative function analysis and drought tolerance index. Based on the identified suitable evaluation method, we conducted the screening for drought-tolerance germplasm. The significant positive correlations on drought tolerant coefficient were observed between drought and irrigation conditions for pod number per plant, seed number per plant, biomass per plant and yield plot. The four indices were recommended for drought tolerance identification in mungbean. The correlations were significant among parameter values of three evaluation methods with a very

收稿日期: 2019-01-29 修回日期: 2019-02-18 网络出版日期: 2019-03-13

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190129001>

第一作者研究方向为食用豆种质资源保存与鉴定, E-mail: wanglanfen@caas.cn

通信作者: 王述民, 研究方向为食用豆种质资源保存与鉴定, E-mail: wangshumin@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (31671758); 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-08); 中国农业科学院科技创新工程项目; 国家农作物种质资源共享服务平台 (NICGR2018-006); 农作物种质资源保护与利用专项 (NWB036-07)

Foundation project: Natural Science Foundation of China Program (31671758), China Agriculture Research System (CARS-08), the Agricultural Science and Technology Innovation Program of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Infrastructure for Crop Germplasm Resources (NICGR2018-006), Protection and Utilization for Crop Germplasm Resources (NWB036-07)

high consistency. The drought tolerance germplasm resources, which were identified by the drought tolerance index, exhibited higher average yield per plant than by the two other methods under different water regimes. This results implied that the drought tolerance index was optimal to screen a large number of germplasm resources of mungbean at natural condition. 103 accessions, which showed identical results in 2017 and 2018, were finally identified. That included 9 varieties with high tolerance, 11 with tolerance, 61 with moderate tolerance, 8 with susceptibility, and 14 with high susceptibility. This results will provide theoretical guidance and basic information for future study on drought tolerance of mungbean.

Key words: mungbean; drought tolerance; correlation analysis; subordinative function analysis

绿豆 (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) 属于豆科 (Leguminosae), 蝶形花亚科 (Papilionoideae), 豇豆属 (*Vigna Savi*), 是最主要的食用豆类栽培种之一。绿豆富含蛋白质和抗氧化物质, 对平衡膳食起到重要的作用, 同时是糖尿病患者的食疗性食物^[1]。绿豆因具有耐旱、生育期短、固氮、适宜与其他作物间作套种等优点, 在世界各地尤其是东南亚各国被广泛种植和消费。在中国, 绿豆主要集中在黄、淮河流域, 长江中下游及东北、华北等地区, 其中, 内蒙古和吉林两省的栽培面积最大, 产量最高, 占全国绿豆总产的 42.2%^[2]。绿豆因其属于小宗作物, 且具有耐旱特性, 多被种植在缺少灌溉条件的干旱、半干旱地区。

随着全球气候的变化, 干旱已成为一种世界性灾害, 因干旱引起的粮食减产超过其他逆境因素的总和^[3]。1989-1998 年干旱造成的灾害占所有气象灾害的 50%, 1999-2005 年达 60% 以上, 2006-2010 年因干旱造成作物绝收面积急剧增加, 旱灾已成为我国的第一大自然灾害^[4]。2009 年发生在我国绿豆主产区内蒙古和吉林的干旱, 导致绿豆减产超过 40%^[2]。

作物抗旱性属于多基因遗传控制的复杂数量性状, 受环境条件影响较大。长期以来, 中国学者已在普通菜豆^[5-9]、小麦^[10-11]、水稻^[12]、玉米^[13]、大豆^[14-15]、芝麻^[16]、高粱^[17]、薏苡^[18]、谷子^[19]等多种作物上开展抗旱性研究。绿豆自 20 世纪 80 年代末开始了抗旱性研究^[20-25], 近几年本课题组针对绿豆芽期^[26]、苗期^[27]展开了抗旱性研究, 同时在温室内采用 21 份绿豆种质资源进行了小规模成株期抗旱性鉴定^[28]。在此基础上, 2017 年、2018 年本课题组连续 2 年在新疆奇台县自然条件下, 采用抗旱系数、隶属函数和抗旱指数法评价了部分绿豆资源的抗旱性, 旨在筛选出抗性表现一致的绿豆抗旱种质资源, 并为绿豆种质资源抗旱研究提供理论指导和信息支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

303 份材料中 244 份是在“七五”、“八五”对我国保存的绿豆种质进行初步抗旱鉴定的基础上筛选获得的, 由中国农业科学院作物科学研究所程须珍研究员提供; 59 份是近年来国家食用豆产业技术体系新育成的品种(系)及当地大面积推广的地方品种, 由中国农业科学院作物科学研究所王丽侠博士、河北省农林科学院粮油作物研究所刘长友博士、辽宁省农业科学院作物所薛仁凤博士、江苏省农业科学院蔬菜研究所袁星星博士、山西省农业科学院作物科学研究所张泽燕和陕西省榆林市农业科学院王斌研究员提供。材料主要来源于中国 14 个省(市、自治区), 其中, 山西 66 份、内蒙古 40 份、吉林 37 份、山东 36 份、北京 30 份、河北 18 份、陕西 14 份、辽宁 6 份、河南 10 份、安徽 6 份、湖北 5 份、黑龙江 5 份、江苏 3 份和四川 1 份, 另外, 亚洲蔬菜研究与发展中心 15 份、澳大利亚 8 份、菲律宾 2 份和印度 1 份。

1.2 试验设计

试验于 2017 年、2018 年在新疆农科院粮食作物研究所奇台试验站 (43° 59' 57" N, 89° 45' 23" E, 海拔 822 m) 大田自然条件下进行, 土质壤土, 前茬大豆, 播种前每 667 m² 施磷酸二铵 15 kg、尿素 5 kg 并覆盖地膜。试验设干旱胁迫处理和灌水对照。处理和对照均为完全随机区组排列, 行长 2.1 m, 行距 50 cm, 穴距 15 cm, 5 月 6 日播种, 每穴播 2 粒, 5 月 10 日浇出苗水。2017 年 2 次重复, 旱处理在开花期浇水一次 (300 t/hm²)。2018 年 3 次重复, 出苗后旱处理不浇水, 对照在开花期、结荚期和鼓荚期各浇水 1 次。绿豆生育期间 2017 年 5-9 月份月降水量分别是 27.3 mm、46 mm、3.2 mm、13.9 mm 和 2.1 mm, 合计 92.5 mm, 2018 年 5-9 月份月降水量分别是 39.5 mm、9.3 mm、11.9 mm、61 mm 和 33.7 mm, 合计 155.4 mm。

1.3 农艺性状调查

参考《绿豆种质资源描述规范和数据标准》^[29], 每行材料选 5 株, 分别调查株高、分枝数、单株荚数、单荚粒数、百粒重、单株产量、单株生物量和单株粒数等性状, 并计算平均值; 小区产量为每行全部植株产量。

1.4 统计分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件统计分析数据。

1.5 抗旱性评价

分别采用抗旱系数、抗旱指数和隶属函数综合评价方法评价抗旱性。

抗旱系数^[30] (drought tolerance coefficient):
 $DC = Y_D / Y_W$

抗旱指数^[31] (drought tolerance index):
 $DI = DC \times Y_D / Y_{AD}$

式中, Y_D 、 Y_W 分别为干旱胁迫、正常灌水的单株产量, Y_{AD} 为全部供试材料干旱胁迫条件下的单株产量平均值。

隶属函数综合评价^[32] 是对绿豆种质成株期抗旱性的评价, 若所用指标与抗旱性呈正相关, $U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$, 反之, $U(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$, $X_i = \sum U(X_{ij}) / n$ 。式中, X_{ij} 为某一材料某指标的实测值, X_{jmax} 为该指标的最大值, X_{jmin} 为该指标的最小值。 $U(X_{ij})$ 为 i 材料 j 性状的隶属值。 X_i 为 i 材料的平均隶属值, n 为测定指标数, X_i 值越大, 表明该材料抗旱性越强。

参考平均值 - 标准差的逐级分级法^[33], 将绿豆成株期抗旱性分为 5 个等级。1 级为高抗 (HT, high tolerance); 2 级为抗 (T, tolerance); 3 级为中抗 (MT, moderate tolerance); 4 级为敏感 (S, susceptibility); 5 级为极敏感 (HS, high susceptibility)。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件下绿豆种质农艺性状变异

从旱胁迫与灌水条件下绿豆种质农艺性状的变化可以看出 (表 1), 除旱胁迫百粒重略大于对照之外, 其余各项指标平均值均小于灌水。2018 年旱胁迫下各性状值的下降幅度大于 2017 年, 说明 2018 年旱胁迫程度更强。2018 年单荚粒数下降较小, 其余 7 项指标的下降幅度均大于 53%, 其中下降幅度最大的是单株粒数, 为 74.56%, 其余 6 项指标的下降幅度由高到低依次为单株产量、小区产量、单株荚数、单株生物量、分枝数和株高。2017 年下降幅

度最大的是单株粒数 (59.27%), 其次是单株产量 (55.76%) 和小区产量 (50.20%), 其余各项下降幅度介于 8.26%~33.08% 之间。旱胁迫条件下, 2018 年各性状的变异系数变幅 15.52%~87.45%, 平均为 39.14%, 2017 年变异系数变幅 12.25%~46.30%, 平均为 33.84%; 在灌水条件下, 2018 年各性状的变异系数变幅为 11.36%~58.59%, 平均为 31.45%, 2017 年变异系数变幅为 11.71%~40.51%, 平均为 30.71%。

2.2 不同水分条件下农艺性状的相关分析

相关性分析显示 (表 2), 旱胁迫和灌水条件下, 2018 年单株产量与株高、分枝数、单株荚数、单荚粒数、单株粒数、单株生物量、小区产量皆呈极显著正相关, 与单株粒数的相关系数最大, 分别为 0.918 和 0.844, 其次为与单株生物量的相关系数 (0.801、0.656) 和小区产量的相关系数 (0.694、0.834), 与百粒重相关性小。抗旱系数与相对株高、相对分枝数、相对单株荚数、相对单荚粒数、相对单株粒数、相对单株生物量、相对小区产量也呈极显著正相关, 相关系数由大到小依次为单株粒数 (0.922)、单株生物量 (0.718)、小区产量 (0.666)、单株荚数 (0.611)、株高 (0.341)、分枝数 (0.313) 和单荚粒数 (0.179), 与相对百粒重相关性差。2017 年抗旱系数与相对小区产量、相对单株粒数和单株荚数 (比值) 也呈极显著的正相关, 而且相关系数较大。综合 2 年的结果, 认为抗旱系数及相对单株粒数、单株生物量、小区产量和单株荚数可作为绿豆成株期抗旱性鉴定的指标。

2.3 绿豆种质抗旱性评价

分别采用抗旱系数、隶属函数平均值和抗旱指数评价方法, 利用样本均值 - 标准差分类法^[27] (分级标准见表 3), 将 303 份绿豆种质分为 5 级 (表 4)。3 种评价方法划分的各级数目相差不大, 中抗种质较多, 占 40.00% 以上。2018 年依据抗旱系数法, 筛选获得高抗、抗、中抗、敏感和极敏感种质份数分别为 50、48、122、37 和 57, 占总数的 16.50%、15.84%、40.26%、12.21% 和 18.81%; 隶属函数法 5 级种质份数分别为 47、42、132、36 和 46, 占总数的 15.51%、13.86%、43.56%、11.88% 和 15.18%; 抗旱指数法各级种质份数分别为 44、43、136、35 和 45, 占总数的 14.52%、14.19%、44.88%、11.55%、14.85%。2017 年抗旱系数法、隶属函数法和抗旱指数法, 高抗种质份数分别为 46、46 和 44, 占总数的 15.18%、15.18%、14.52%; 抗旱种质数目分别为

表 1 不同水分条件下供试材料的性状比较

Table 1 Comparison of tested accessions traits under different water regimes

试验年份	处理	统计参数	株高 (cm)	分枝数	单株荚数	单荚粒数	单株粒数	百粒重 (g)	单株产量 (g)	单株生物量 (g)	小区产量 (g)
Test year	Treatment	Statistical parameter	Plant height	No. of branch	Pods per plant	Grains per pod	Grains per plant	100-grain weight	Yield per plant	Biomass per plant	Yield per plot
2018	干旱	均值	22.90	0.96	9.02	9.16	72.10	6.93	5.03	20.57	83.67
		标准差	6.71	0.84	3.52	1.42	33.33	1.11	2.01	6.71	38.73
		变异系数 (%)	29.31	87.45	38.98	15.52	46.23	15.94	39.88	32.62	46.29
	灌水	均值	49.19	2.50	24.99	10.87	283.42	5.84	15.92	55.55	248.48
		标准差	13.26	1.47	10.74	1.23	109.21	1.04	5.07	15.84	65.97
		变异系数 (%)	26.96	58.59	42.97	11.36	38.53	17.74	31.83	28.52	26.55
2017	干旱较	均值	26.29 ↓	1.55 ↓	15.97 ↓	1.71 ↓	211.31 ↓	1.10 ↑	10.89 ↓	34.98 ↓	164.81 ↓
		百分比 (%)	-53.44	-61.88	-63.91	-15.73	-74.56	18.85	-68.40	-62.97	-66.33
		变异系数 (%)	2.36 ↑	28.87 ↑	3.98 ↓	4.17 ↑	7.7 ↑	1.8 ↓	8.05 ↑	4.1 ↑	19.74 ↑
	灌水	均值	50.40	1.88	16.43	10.59	98.60	5.75	5.45	—	129.65
		标准差	9.92	0.87	7.24	1.30	45.65	0.91	2.34	—	56.63
		变异系数 (%)	19.67	46.14	44.06	12.25	46.30	15.78	42.83	—	43.68
2017	灌水	均值	64.48	2.06	24.56	11.54	242.10	5.21	12.32	—	260.36
		标准差	17.43	0.78	9.20	1.35	98.08	0.92	4.77	—	89.69
		变异系数 (%)	27.03	38.15	37.46	11.71	40.51	17.68	38.70	—	34.45
	干旱较	均值	14.07 ↓	0.18 ↓	8.12 ↓	0.95 ↓	106.93 ↓	0.53 ↑	6.87 ↓	—	130.71 ↓
		百分比 (%)	-21.83	-8.70	-33.08	-8.26	-59.27	10.25	-55.76	—	-50.20
		变异系数 (%)	7.36 ↓	7.99 ↑	6.60 ↑	0.54 ↑	5.14 ↑	1.90 ↓	4.13 ↑	—	9.23 ↑

↑ ↓ 分别表示干旱较对照性状增加或减少; — 表示无数据, 下同

↑ ↓ shows the value of characters increase or decrease under drought and irrigation conditions, — : no data, the same as below

表 2 不同水分条件下各性状(比值)与单株产量(比值)的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between yield per plant (ratio) and agronomic traits (ratio) under different water regimes

试验年份	处理	株高	分枝数	单株荚数	单荚粒数	单株粒数	百粒重	单株生物量	小区产量
Test year	Treatment	Plant height	No. of branch	Pods per plant	Grains per pod	Grains per plant	100-grain weight	Biomass per plant	Yield per plot
2018	干旱	0.568**	0.432**	0.635**	0.317**	0.918**	0.054	0.801**	0.694**
	灌水	0.386**	0.167**	0.477**	0.157**	0.844**	-0.068	0.656**	0.834**
	旱与水下各值之比	0.341**	0.313**	0.611**	0.179**	0.922**	-0.017	0.718**	0.666**
2017	干旱	-0.058	0.304**	0.712**	0.333**	0.912**	-0.075	—	0.928**
	灌水	-0.317**	0.419**	0.608**	0.029	0.863**	0.103	—	0.821**
	旱与水下各值之比	0.325**	0.199**	0.486**	0.236**	0.949**	-0.189**	—	0.814**

* 和 ** 分别表示干旱和灌水条件下各性状在 0.05 和 0.01 水平上差异显著

*, ** indicate traits measured under drought and irrigation significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

表 3 不同评价方法划分的抗旱类型及分类标准

Table 3 The types and classification standards according to different evaluation methods

试验年份 Test year	评价方法 Evaluation methods	高抗 HT	抗 T	中抗 MT	敏感 S	极敏感 HS
2018	抗旱系数	DC ≥ 0.43	0.37 ≤ DC < 0.43	0.27 ≤ DC < 0.37	0.23 ≤ DC < 0.27	DC < 0.23
	隶属函数	Xi ≥ 0.52	0.45 ≤ Xi < 0.52	0.29 ≤ Xi < 0.45	0.23 ≤ Xi < 0.29	Xi < 0.23
	抗旱指数	DI ≥ 0.51	0.41 ≤ DI < 0.51	0.23 ≤ DI < 0.41	0.18 ≤ DI < 0.23	DI < 0.18
2017	抗旱系数	DC ≥ 0.59	0.52 ≤ DC < 0.59	0.38 ≤ DC < 0.52	0.32 ≤ DC < 0.38	DC < 0.32
	隶属函数	Xi ≥ 0.49	0.42 ≤ Xi < 0.49	0.29 ≤ Xi < 0.42	0.24 ≤ Xi < 0.29	Xi < 0.24
	抗旱指数	DI ≥ 0.73	0.59 ≤ DI < 0.73	0.32 ≤ DI < 0.59	0.22 ≤ DI < 0.32	DI < 0.22

HT: highly tolerant, T: tolerant, MT: moderately tolerant, S: susceptible, HS: highly sensitive. The same as below

表 4 抗旱性鉴定结果

Table 4 Drought tolerance evaluation results

评价方法 Evaluation methods	2018 年 In 2018					2017 年 In 2017				
	高抗 HT	抗 T	中抗 MT	敏感 S	极敏感 HS	高抗 HT	抗 T	中抗 MT	敏感 S	极敏感 HS
抗旱系数 DC	50	48	122	37	57	46	41	134	37	45
隶属函数 SFA	47	42	132	36	46	46	47	126	39	45
抗旱指数 DI	44	43	136	35	45	44	51	122	42	44

DC: drought tolerance coefficient, SFA: Subordinative function analysis, DI: drought tolerance index, the same as below

41、47 和 51, 占总数的 13.53%、15.51%、16.83%; 中抗种质份数为 134、126 和 122, 占总数的 44.22%、41.58%、40.26%; 敏感种质为 37、39 和 42, 占总数的 12.21%、12.87%、13.85%; 极敏感种质数目为 45、45 和 44, 占总数的 14.85%、14.85%、14.52%。按照抗旱指数法, 综合 2017 年、2018 年评价结果, 完全一致的有 103 份, 占总数的 33.99%。高抗、

抗、中抗、敏感和极敏感种质数目分别为 9、11、61、8 和 14。高抗旱种质包括绿豆(C0000062)、冀绿 2 号、9002-328、9002-334、河南黑绿豆、冀绿 9 号、郑 03-94、潍绿 2116 和苏绿 2 号。抗旱种质包括绿豆(C0000446、C0000551)、鹦哥绿豆、小大绿豆、8901-2113、保 9815-36、晋绿豆 3 号、中绿 5 号、冀绿 0816、科绿 1 号和潍绿 9 号。2017 年、2018 年

分别表现高抗或抗旱的资源 13 份,分别为绿豆 (C0000060、C0000067、C0000071、C0000942 和 C0004865)、9002-340、安 05-4、保绿 201012-7、短棒子、冀绿 8 号、南阳绿豆、小绿豆和中绿 8 号。

2.4 抗旱性评价方法的比较

对 3 种抗旱性评价指标的参数值进行相关性分析,结果显示两两之间呈极显著正相关,抗旱系数与隶属函数的相关性最高 ($r_{18}=0.936$, $r_{17}=0.943$, $P<0.01$), 2018 年抗旱指数与抗旱系数的相关系数大于抗旱指数与隶属函数的相关系数 (0.876、0.808), 2017 年抗旱指数与抗旱系数的相关系数略小于抗旱指数与隶属函数 (0.768、0.774)。三者相关性极高,适宜作为绿豆抗旱鉴定评价方法。

比较 3 种评价结果,2018 年 150 份种质 (49.5%) 被划分在同一级别,高抗、抗、中抗、敏感和极敏感种质数目分别为 25、11、75、9 和 30; 2017 年 132 份种质 (43.56%) 的抗旱级别相同,由高抗到极敏感种质数目依次为 23、7、64、9 和 29。其中,有 3 份种质在 2 年的分析结果完全一致,同时被 3 种评价方法划分为极抗旱种质,9002-334 (C0005149)、潍绿 2116 和冀绿 9 号 (C0006385)。3 种评价方法两两比较 (图 1), 同级率所占的比例最大,介于 54.13%~73.93%, 平均 62.43%; 邻级率次之,所占比例平均为 32.07%; 跨 1 级率平均仅为 5.34%, 跨 2 级率所占比例最小,平均只占 0.33%, 说明这 3 种抗旱性评价方法的一致性较好。

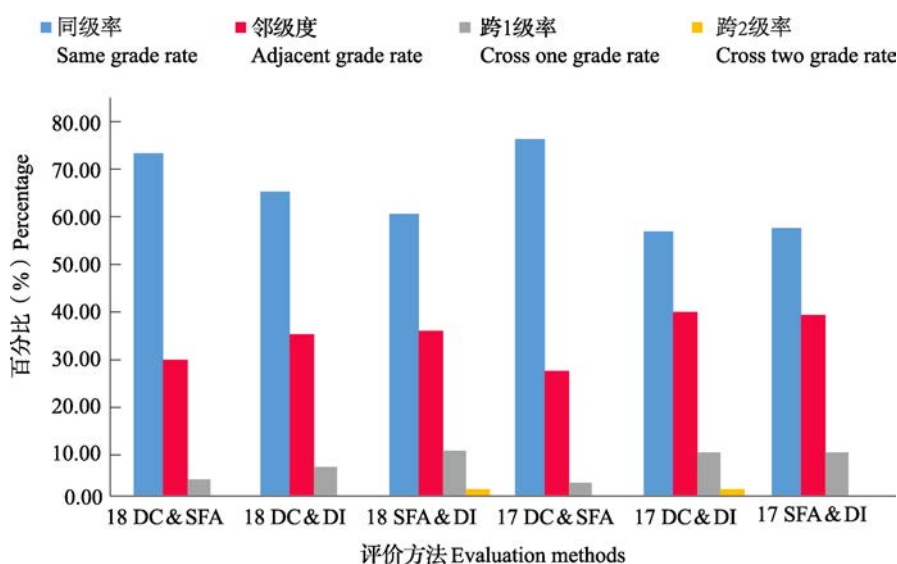


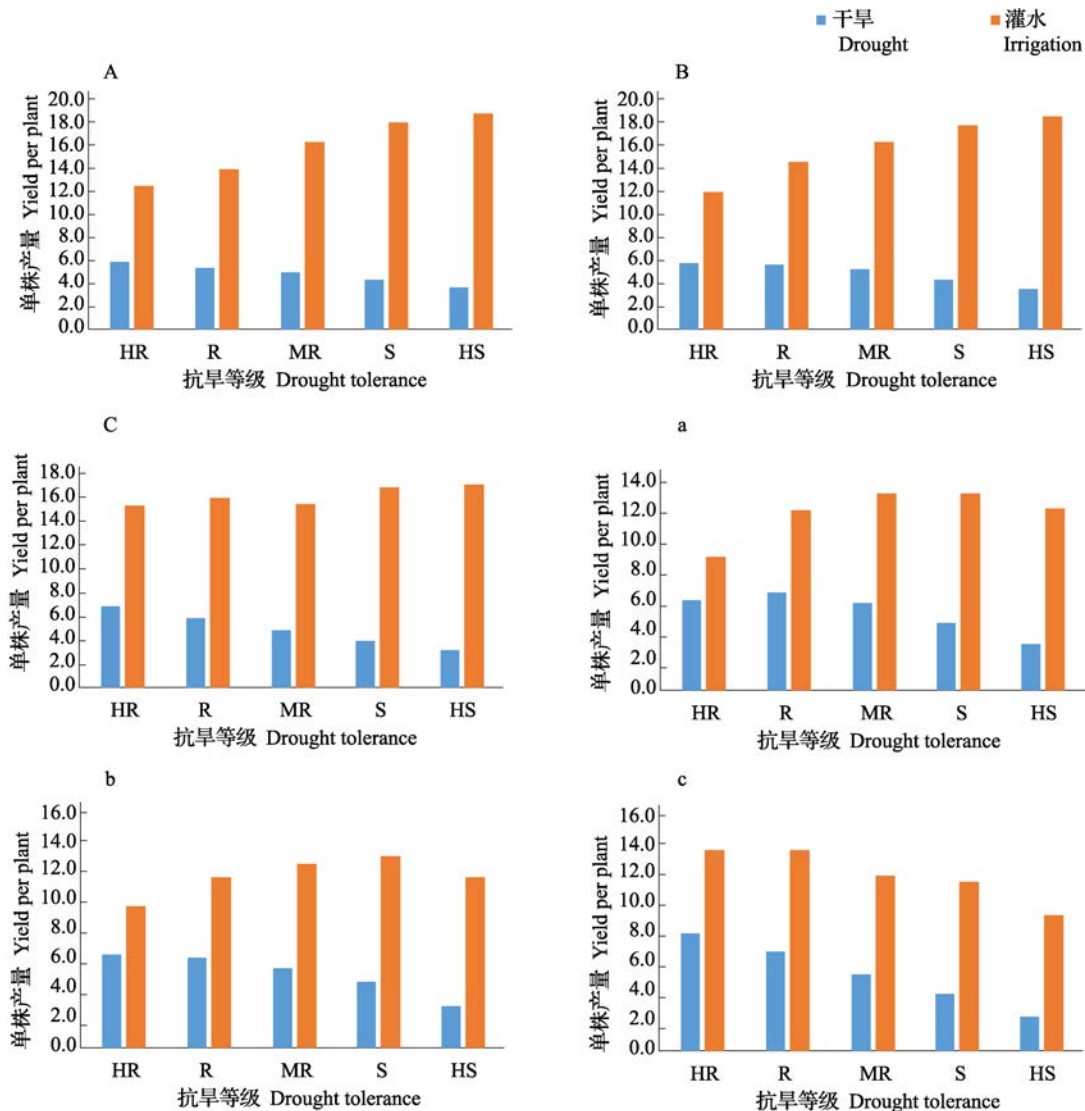
图 1 3 种抗旱评价方法的比较

Fig.1 The comparison among three drought tolerance evaluation methods

2.5 不同抗旱级别绿豆种质的平均单株产量

依据 3 种抗旱评价的分级结果,计算每级种质在旱胁迫和灌水条件下的平均单株产量,结果见图 2。旱胁迫的平均单株产量总体趋势是抗旱级别越高平均单株产量越高,排列顺序为高抗 > 抗 > 中抗 > 敏感 > 极敏感,只有 2017 年抗旱系数法鉴定的高抗种质平均单株产量低于抗旱种质的平均单株产量。灌水条件下抗旱系数和隶属函数法各级平均单株产量排列顺序与旱胁迫正好相反,抗旱级别越高平均单株产量越低,即高抗 < 抗 < 中抗 < 敏感 < 极敏感,只有 2017 年的极敏感种质平均单产不是最高; 2018 年抗旱指数法筛选的高抗、抗旱和中抗种质平均单株产量相差不大,略低于敏感、极敏感平均单株产量,2017 年抗旱指数法划分的高抗、抗旱种质

在灌水条件下平均单株产量基本一致,远高于其他 3 个级别。2018 年按抗旱指数法划分的高抗种质旱、水条件下的平均单株产量分别为 7.0 g 和 15.3 g, 高于按抗旱系数划分的 6.0 g 和 12.4 g 以及按隶属函数划分的 5.8 g 和 12.1 g; 抗旱种质的旱、水条件下的平均单株产量分别为 6.0 g 和 16.0 g, 高于抗旱系数的 5.5 g 和 14.0 g 及隶属函数的 5.6 g 和 14.5 g。2017 年按抗旱指数划分的高抗种质在旱、水条件下的平均单株产量分别为 8.2 g 和 13.9 g, 高于抗旱系数的 6.1 g 和 9.0 g 以及隶属函数的 6.6 g 和 10.0 g; 抗旱种质的平均单株产量分别为 6.9 g 和 14.0 g, 高于抗旱系数的 6.6 g 和 12.1 g 及隶属函数的 6.4 g 和 12.0 g, 说明抗旱指数筛选的抗旱种质不但抗旱而且丰产。



A、a: 基于抗旱系数的分级结果; B、b: 基于隶属函数值的分级结果; C、c: 基于抗旱指数的分级结果;

A、B、C 和 a、b、c 分别为 2018 和 2017 年结果

A, a: grade result based on DC, B, b: grade result based on SFA, C, c: grade result based on DI,

A, B, C and a, b, c were results in 2018 and 2017

图 2 不同抗旱级别的种质在不同水分条件下的平均单株产量

Fig.2 Average yield per plant of different drought grades germplasm under different water regimes

3 讨论

3.1 绿豆抗旱性评价方法的遴选

抗旱性是复杂的多基因控制的数量性状,因此,在抗旱性鉴定评价中,最重要的是选择适合的抗旱指标和评价方法。作物全生育期抗旱性,产量是最直接、最重要的检测指标。本文筛选了与抗旱系数呈极显著相关的单株荚数、单株粒数、单株生物量 and 小区产量等性状,在旱胁迫与灌水条件下的比值及抗旱系数作为抗旱性鉴定的综合指标,通过隶属函数值法进行抗旱性鉴定评价。相关性分析显示,抗旱系数、隶属函数和抗旱指数呈

极显著的正相关,隶属函数与抗旱系数的相关系数 $r \geq 0.936$ 。抗旱指数与抗旱系数、隶属函数的相关系数 $r \geq 0.774$ 。与李龙等^[11]、祁旭升等^[14]、王兰芬等^[28]的研究结果相似。3 种评价结果同级率大于或等于 43.56%,隶属函数评价结果与抗旱系数、抗旱指数评价结果同级率分别大于 70.63%、55.12%,高于我们之前的研究结果 (38.10%)^[28],平均邻级率为 32.07%,平均跨 1 级率为 5.34%,平均跨 2 级率仅为 0.33%,说明 3 种评价结果的一致性较高。2018 年、2017 年抗旱系数与抗旱指数的同级率分别为 62.71% 和 54.13%,与祁旭升等^[14]的 49.4% 相似。在旱胁迫条件下,抗旱级别越高

的平均单株产量越高,说明3种评价方法是可靠的;灌水条件下,抗旱系数和隶属函数法,抗旱级别越高的平均单株产量越低;而依据抗旱指数法,2018年中抗以上的平均单株产量略低于敏感的,2017年中抗以上平均单株产量高于敏感的,说明抗旱指数法筛选的抗旱种质兼顾了丰产性。抗旱指数法划分的高抗种质和抗旱种质在旱胁迫、灌水条件下的平均单株产量都高于其他两种方法划分的相应级别的平均单株产量,说明抗旱指数法鉴定的抗旱种质优于其他两个方法鉴定的抗旱种质。因此,认为在自然条件下对绿豆种质资源进行大规模抗旱鉴定时,建议采用评价效果好、效率高的抗旱指数法。

3.2 抗旱绿豆种质与来源地的分析

303份绿豆种质,主要来源于中国14个省(市、自治区)。依据抗旱指数评价法将不同来源的种质划分为5个抗旱级别(表5)。2018年遴选出的中抗及以上抗旱种质224份,山西、山东、内蒙古、北京、吉林、河北的种质数目较多,分别为60、29、22、22、18和17,占参试种质总数的19.80%、9.57%、7.26%、7.26%、5.94%和5.61%;2017年中抗及以上抗旱种质219份,排名前6的依然是山西、山东、内蒙古、吉林、

北京和河北,与2018年不同的是吉林和北京的名次互换,分别占总数的13.20%、10.89%、9.57%、8.25%、7.92%和5.28%。这一结果与种质所在地区的气候条件和育种力量相吻合。中国西北地区,由于长期干旱缺水、经过长期的自然选择和人工选择,选出相对抗旱的绿豆种质。中国改革开放40年来各地开展了杂交选育工作,培育了一系列的绿豆品种、品系。由山东省潍坊市农业科学研究院通过杂交选育的潍绿系列,如潍绿1号、潍绿4号、潍绿5号、潍绿8号、潍绿9号、潍绿12号、潍绿2116、9002-328和9002-334和潍绿2118等20份抗旱性表现很好,尤其是9002-328、9002-334和潍绿2116连续2年抗旱鉴定都为高抗;由中国农业科学院作物科学研究所选育的中绿3号、中绿5号、中绿7号、中绿8号、中绿9号和中绿10号的抗旱性也较好;由河北省农林科学院粮油作物研究所、保定市农业科学研究所选育的冀绿2号、冀绿8号、冀绿9号、冀绿8号和冀绿11号等16个品种、品系的抗旱性较好,其中的冀绿2号、冀绿9号连续2年表现为高抗。今后一方面应加大种质资源的收集力度,通过抗旱鉴定筛选出抗旱资源,另一方面应用已鉴定出的抗旱种质加大育种力度培育出抗旱高产的绿豆资源。

表5 不同来源种质的抗旱鉴定结果

Table 5 Drought tolerance evaluation results of different origin germplasm

来源 Origin	2018年 In 2018					2017年 In 2017				
	高抗	抗	中抗	敏感	极敏感	高抗	抗	中抗	敏感	极敏感
	HT	T	MT	S	HS	HT	T	MT	S	HS
中国山西 Shanxi, China	17	16	27	2	4	3	11	26	12	14
中国内蒙古 Inner Mongolia, China	2	3	17	10	8	2	4	23	4	7
中国吉林 Jilin, China	2	1	15	6	13	3	2	20	8	4
中国山东 Shandong, China	6	6	17	3	4	8	8	17	2	1
中国北京 Beijing, China	5	6	11	4	4	8	5	11	2	4
中国河北 Hebei, China	4	3	10	1		8	7	1	1	1
中国陕西 Shaanxi, China	2	5	5	1	1	2	1	9	1	1
中国河南 Henan, China	2	2	4		2	6	1	2	1	
中国辽宁 Liaoning, China	1		2	2	1			3	2	1
中国安徽 Anhui, China	1	1	2	1	1	1	2		1	2
中国湖北 Hubei, China			4		1	1		3	1	
中国黑龙江 Heilongjiang, China			2	1	2	1		3	1	
中国江苏 Jiangsu, China	2		1			1		1		1
中国四川 Sichuan, China			1				1			
澳大利亚 Australia		1	4	2	1			2	2	4
亚蔬中心 ARC-AVRDC			12	2	1	2	4	5	1	3
菲律宾 the Philippines			1		1		1			1
印度 India			1							1

参考文献

- [1] Yao Y, Chen F, Wang M, Wang J S, Ren G X. Antidiabetic activity of mungbean extracts in diabetic KK-Ay mice. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(19): 8869-8873
- [2] 刘慧. 我国绿豆生产现状和发展前景. *农业展望*, 2012, 8(6): 36-39
Liu H. Current situation and development prospect of mungbean production in China. *Agricultural Outlook*, 2012, 8(6): 36-39
- [3] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性-I. 抗逆性的一般概念和植物的抗涝性. *植物生理学通讯*, 1983(3): 24-29
Tang Z C. Response and adaptability of plants to water stress-I. General concept of stress resistance and waterlogging resistance of plants. *Plant Physiology Comucations*, 1983(3): 24-29
- [4] 冯金社, 吴建安. 我国旱灾形势和减轻旱灾风险的主要对策. *灾害学*, 2008, 23(2): 34-36
Feng J S, Wu J A. Drought situation and the main measures to reduce the risk of drought in China. *Disaster Science*, 2008, 23(2): 34-36
- [5] 李龙, 王兰芬, 武晶, 王述民. 普通菜豆种质资源芽期抗旱性鉴定. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(4): 600-605
Li L, Wang L F, Wu J, Wang S M. Drought resistance identification of common bean germplasm resources at bud stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(4): 600-605
- [6] 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 R L, Wang S M. Physiological characteristics of drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(4): 702-710
- [7] 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(6): 963-971
Li L, Wang L F, Wu J, Jing R 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
- [8] Wu J, Wang L F, Wang S M. Comprehensive analysis and discovery of drought related NAC transcription factors in common bean. *BMC Plant Biology*, 2016, 16: 193
- [9] Wu J, Chen J B, Wang L F, Wang S M. Genome-wide investigation of WRKY transcription factors involved in terminal drought stress response in common bean. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 380
- [10] 景蕊莲, 胡荣海, 张灿军, 朱志华, 昌小平, 王娟玲. 小麦抗旱性鉴定评价技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-5
Jing R L, Hu R H, Zhang C J, Zhu Z H, Chang X P, Wang J L. Technical specification of identification and evaluation for drought resistance in wheat. Beijing: China Standards Press, 2008: 1-5
- [11] 李龙, 毛新国, 王景一, 昌小平, 柳玉平, 景蕊莲. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价. *作物学报*, 2018, 44(7): 988-999
Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Liu Y P, Jing R L. Drought tolerance evaluation of wheat germplasm resources. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(7): 988-999
- [12] 安永平, 强爱玲, 张媛媛, 张文银, 曹桂兰, 韩龙植. 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究. *植物遗传资源学报*, 2006, 7(4): 421-426
An Y P, Qiang A L, Zhang Y Y, Zhang W Y, Cao G L, Han L Z. Study on characteristics of germination and drought-resistance index by osmotic stress in rice. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(4): 421-426
- [13] 徐蕊, 王启柏, 张春庆, 吴承来. 玉米自交系抗旱性评价指标体系的建立. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 72-84
Xu R, Wang Q B, Zhang C Q, Wu C L. Drought-resistance evaluation system of maize inbred. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42:(1) 72-84
- [14] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 王兴荣, 苟作旺, 常汝镇, 邱丽娟. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究. *作物学报*, 2012, 38(4): 665-674
Qi X S, Liu Z X, Guan R X, Wang X R, Gou Z W, Chang R Z, Qiu L J. Comparison of evaluation methods for drought resistance at soybean adult stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 665-674
- [15] 崔杰印, 武婷婷, 宋雯雯, 贾鸿昌, 吴纪安, 韩天富. 黑龙江中上游地区早熟野生大豆种质资源的抗旱性鉴定. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(6): 1073-1082
Cui J Y, Wu T T, Song W W, Jia H C, Wu J A, Han T F. Drought tolerance evaluation of the early-maturing annual wild soybeans from the upper and middle reaches of Heilongjiang River. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(6): 1073-1082
- [16] 刘文萍, 吕伟, 黎冬华, 任果香, 张艳欣, 文飞, 韩俊梅, 张秀荣. 芝麻种质资源成株期抗旱性关联分析. *中国农业科学*, 2017, 50(4): 625-639
Liu W P, Lv W, Li D H, Ren G X, Zhang Y X, Wen F, Han J M, Zhang X R. Drought resistance of sesame germplasm resources and association analysis at adult stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(4): 625-639
- [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, Gao 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] 汪灿, 周棱波, 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. *作物学报*, 2017, 43(9): 1381-1394
Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification and indices screening of drought resistance at adult plant stage in Job's tears germplasm resources. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(9): 1381-1394
- [19] 张文英, 智慧, 柳斌辉, 彭海成, 李伟, 王永芳, 李海权, 栗雨勤, 刁现民. 谷子全生育期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(5): 560-565
Zhang W Y, Zhi H, Liu B H, Peng H C, Li W, Wang Y F, Li H Q, Li Y Q, Diao X M. Indexes screening for drought resistance test of foxtail millet. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(5): 560-565
- [20] 王述民. 绿豆抗旱鉴定方法和指标. *作物品种资源*, 1989(2): 27-28
Wang S M. Method and index of identification for mungbean drought resistance. *Crop Genetic Resources*, 1989(2): 27-28
- [21] 郭中校, 张连学, 王明海, 徐宁, 包淑英, 王桂芳, 徐仲伟. 绿豆品种抗旱性早期鉴定方法研究. *西北农林科技大学学报: 自*

- 然科学版, 2012, 40(7): 77-84
Guo Z X, Zhang L X, Wang M H, Xu N, Bao S Y, Wang G F, Xu Z W. Study on early identification method of drought to tolerance of mungbean cultivar. Journal Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(7): 77-84
- [22] 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. 植物遗传资源学报, 2011, 12(6): 1010-1013
Zhang Z Y, Zhang Y W. Drought resistance evaluation of 21 local landraces of mung bean from Shanxi province in budding stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(6): 1010-1013
- [23] 赵雪英, 张泽燕, 朱慧珺, 闫虎斌, 张春明. 绿豆全生育期抗旱性鉴定及形态指标研究. 华北农学报, 2017, 32(S): 180-184
Zhao X Y, Zhang Z Y, Zhu H J, Yan H B, Zhang C M. Analysis of drought resistance and morphological index of the whole growth of mung bean. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(S): 180-184
- [24] Liu C Y, Wu J, Wang L F, Fan B J, Cao Z M, Su Q Z, Zhang Z X, Wang Y, Tian J, Wang S M. Quantitative trait locus mapping under irrigated and drought treatments based on a novel genetic linkage map in mungbean (*Vigna radiata* L.). Theoretical and Applied Genetics, 2017, 130(11): 2375-2393
- [25] Wang L F, Zhu J F, Li X M, Wang S M, Wu J. Salt and drought stress and ABA responses related to bZIP genes from *V. radiata* and *V. angularis*. Gene, 2018, 651: 152-160
- [26] 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. 植物遗传资源学报, 2014, 15(3): 498-503
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at germination stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(3): 498-503
- [27] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源苗期抗旱性鉴定. 作物学报, 2015, 41(1): 145-153
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at seedling stage. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 145-153
- [28] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定. 作物学报, 2015, 41(8): 1287-1294
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Identification of mungbean germplasm resources resistant to drought at adult stage. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(8): 1287-1294
- [29] 程须珍, 王素华, 王丽侠. 绿豆种质资源描述规范和数据. 北京: 中国农业出版社, 2006: 48-58
Cheng X Z, Wang S H, Wang L X. Descriptors and data standard for mungbean. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 48-58
- [30] 黎裕. 作物抗旱性鉴定方法与指标. 干旱地区农业研究, 1993, 11(1): 91-99
Li Y. The methods and indices of identification drought resistance on crops. Agriculture Research Arid Areas, 1993, 11(1): 91-99
- [31] 兰巨生, 胡福顺, 张景瑞. 作物抗旱指数的概念和统计方法. 华北农学报, 1990, 5(2): 20-25
Lan J S, Hu F S, Zhang J R. The concept and statistical method of drought-resistance index in crops. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1990, 5(2): 20-25
- [32] Clarke J M. Relationship of excised-leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environments. Canadian Journal of Plant Science, 1989, 69: 1075-1081
- [33] 路贵和, 戴景瑞, 张书奎, 李文明, 陈绍江, 鄂立柱, 张义荣. 不同干旱胁迫条件下我国玉米骨干自交系的抗旱性比较研究. 作物学报, 2005, 31(10): 1284-1288
Lu G H, Dai J R, Zhang S K, Li W M, Chen S J, E L Z, Zhang Y R. Drought resistance of elite maize inbred lines in different water stress. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(10): 1284-1288