

薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选

汪 灿^{1,2}, 周棱波^{1,2}, 张国兵^{1,2}, 张立异¹, 徐 燕¹,
高 旭¹, 姜 讷¹, 邵明波^{1,2}

(¹贵州省农业科学院旱粮研究所, 贵阳 550006; ²贵州梁丰农业科技有限公司, 贵阳 550006)

摘要: 干旱是影响薏苡生产的主要因素之一, 鉴定薏苡种质资源的抗旱性, 筛选抗旱指标, 培育抗旱品种, 对薏苡产业的发展具有重要意义。本研究首先以抗旱性不同的 6 份薏苡种质为材料, 通过调查 5 个不同浓度的 PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫下的发芽率, 确定了薏苡萌发期模拟干旱胁迫的最适 PEG-6000 水溶液渗透势为 -0.1 MPa。然后以 -0.1 MPa 的 PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫, 探讨 50 份薏苡种质发芽势、发芽率、萌发指数、芽长、芽粗、芽鲜重、芽干重、根长、根粗、根鲜重和根干重的变化, 利用综合评价法对 50 份薏苡种质进行萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选。结果表明, 干旱胁迫对薏苡萌发期各指标均有极显著影响。筛选出萌发期抗旱性强的薏苡种质分别为 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1, 可为薏苡抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料。芽长、芽干重、根长、根鲜重和根干重可作为薏苡种质资源萌发期简单、直观的抗旱性评价指标。

关键词: 薏苡; 萌发期; 抗旱性; 抗旱指标; 综合评价

Identification and Indices Screening of Drought Resistance in Job's Tears Germplasm Resources at Germination Stage

WANG Can^{1,2}, ZHOU Ling-bo^{1,2}, ZHANG Guo-bing^{1,2}, ZHANG Li-yi¹,
XU Yan¹, GAO Xu¹, JIANG Ne¹, SHAO Ming-bo^{1,2}

(¹ Institute of Upland Food Crops, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006;

² Guizhou Liangfeng Agricultural Science and Technology
Co., LTD, Guiyang 550006)

Abstract: Drought is one of the important problems for Job's tears production. Identification, indices screening, and cultivar breeding of drought resistance in Job's tears germplasm resources are important for Job's tears industrial development. The germination rates of 6 Job's tears germplasms with different drought resistance were tested under 5 different concentrations of PEG-6000 water solution to determine the optimal osmotic potential of PEG-6000 water solution simulated drought stress at germination stage. The results showed that -0.1 MPa was the optimum osmotic potential of PEG-6000 water solution simulated drought stress at germination stage for Job's tears germplasm resources. The changes of germination energy, germination rate, germination index, bud length, bud diameter, bud fresh weight, bud dry weight, root length, root diameter, root fresh weight, and root dry weight of 50 Job's tears germplasms were investigated under -0.1 MPa PEG-6000 water solution simulated drought stress to identify the drought resistance and screen the drought resistance indices of Job's tears germplasm resources by comprehensive evaluation method at germination stage. The results showed that drought stress had significant effects on all indices of Job's tears at germination stage. yy18-1, yy14-3 and yy13-1 were identified as drought resistance Job's tears germplasms at germination stage, which could be provide basis materials for the researches on cultivar breeding, mechanism, and

收稿日期: 2017-01-14 修回日期: 2017-03-02 网络出版日期: 2017-08-21

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20170821.0951.002.html>

基金项目: 贵州省农业攻关计划项目(黔科合机农字[2013]4025号); 贵州省农业动植物育种专项资金项目(黔农育专字[2012]023号)

第一作者研究方向为作物育种、栽培及成果推广转化。E-mail: wangc.1989@163.com

通信作者: 邵明波, 研究方向为作物育种、栽培及成果推广转化。E-mail: 563189433@qq.com

regulation and alleviation mechanism of drought resistance in Job's tears. The bud length, bud dry weight, root length, root fresh weight, and root dry weight could be used as the simple and intuitive identification indices of drought resistance in Job's tears germplasm resources at germination stage.

Key words: Job's tears; germination stage; drought resistance; drought resistance indices; comprehensive evaluation

薏苡 (*Coix lacryma-jobi* L.) 是禾本科 (Gramineae) 薏苡属 (*Coix* Endl.) 一年生草本植物, 又名六谷子、珍珠米、药玉米、水玉米、晚念珠等, 药食兼用, 具有丰富的营养价值和医药价值^[1-2]。薏苡主要食用和药用部位为种仁, 是一种蛋白质含量高、脂肪和糖含量适中的绿色食品, 被誉为“禾本科植物营养之王”, 具有清热解毒、健脾利湿、除脾止泻和防癌等功效^[3]。薏苡是贵州的主要特色杂粮作物之一, 在贵州省种植业结构调整和产业发展中具有不可替代的作用, 目前, 贵州省薏苡种植面积及产量均位居全国第一^[4]。随着全球气候的变暖和生态平衡的破坏, 干旱已成为全世界农业生产中面临的主要问题之一^[5]。虽然贵州省降雨量丰富, 但由于雨量分布不均, 加上喀斯特山区的土壤保水能力较差, 导致薏苡在生产上容易发生春旱和伏旱。因此, 对薏苡种质资源进行萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选, 对薏苡抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究具有重要意义。

作物抗旱性鉴定及抗旱指标筛选需要对不同生育时期的不同指标进行综合评价^[6]。因此, 筛选简单有效的抗旱性指标和选择适宜的抗旱性评价方法是作物抗旱性综合鉴定的关键技术^[7-8]。长期以来, 关于作物抗旱性鉴定及抗旱指标筛选的研究已有不少报道。PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫具有稳定性强、重复性好和操作简单等优点而在小麦^[9]、水稻^[10]、绿豆^[11]、谷子^[12]、燕麦^[13]等作物萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选上被广泛应用。目前, 关于薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选的研究鲜见报道, 仅有的是陈宁等^[14]对 9 份薏苡种质进行了萌发期抗旱性能的初步探索。然而, 基于较小样本单一指标的作物抗旱性评价存在一定的局限性。因此, 本研究在前期试验的基础上, 首先以抗旱性不同的 6 份薏苡种质为材料, 通过设置 5 个不同渗透势的 PEG-6000 水溶液进行萌发期模拟干旱胁迫, 以确定薏苡萌发期模拟干旱胁迫的最适 PEG-6000 水溶液渗透势。然后以最适渗透势的 PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫, 利用综合评价法对 50

份薏苡种质的发芽势、发芽率、萌发指数、芽长、芽粗、芽鲜重、芽干重、根长、根粗、根鲜重和根干重进行鉴定与评价, 从而筛选出萌发期抗旱性强的薏苡种质以及易测定的与薏苡种质抗旱性密切相关的指标, 以期对薏苡抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料, 更好地为我国薏苡产业的发展提供服务。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试薏苡种质共计 50 份, 其中野生种 3 份、国审品种 2 份、黔薏苡 1 号选系 3 份、黔薏苡 2 号选系 3 份、云南地方品种 3 份、广西地方品种 5 份、四川地方品种 3 份、贵州盘县地方品种 10 份、贵州晴隆地方品种 5 份、贵州兴仁地方品种 5 份、贵州正安地方品种 4 份、贵州安龙地方品种 4 份, 详见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 萌发期模拟干旱胁迫最适渗透势的确定

以抗旱性不同的 6 份薏苡种质为材料, 设置浓度分别为 0、50、80、100 和 120 g/L 的 PEG-6000 水溶液, 其渗透势分别为 0、-0.05、-0.1、-0.15 和 -0.2 MPa。从每份薏苡种质中挑选 50 粒大小均匀一致、饱满的种子, 用 0.1% 的 HgCl₂ 消毒 8 min 后用蒸馏水冲洗 5 次, 用滤纸吸干后, 分别用不同渗透势的 PEG-6000 水溶液浸种 24 h, 然后摆放在 24 cm × 24 cm × 12 cm 并铺有 3 层滤纸的发芽盒中, 种子间距离为粒长的 1.5 倍。在发芽盒中分别加入 15 mL 不同渗透势的 PEG-6000 水溶液, 重复 3 次, 将发芽盒置于 RXZ-1000B 型人工气候箱, 设置昼/夜温度为 28℃/25℃, 湿度为 85%, 光照/黑暗时间为 12 h/12 h, 光照强度为 340 μmol/m² · s, 连续培养 10 d, 每 2 d 补充适量蒸馏水, 以保持渗透势不变。

1.2.2 萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选 依照上述培养方法, 以 50 份薏苡种质为材料, 以最适渗透势的 PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫, 以蒸馏水进行相同处理为对照, 3 次重复。

表1 50份薏苡种质信息

Table 1 The information of 50 Job's tears germplasms

编号 Num- ber	名称 Name	来源 Origin	编号 Num- ber	名称 Name	来源 Origin	编号 Num- ber	名称 Name	来源 Origin
YG01	yy13-1	野生种	YG18	yy07-5	贵州盘县地方品种	YG35	yy03-2	贵州晴隆地方品种
YG02	yy13-2	野生种	YG19	yy11-2	广西地方品种	YG36	yy03-8	贵州晴隆地方品种
YG03	yy13-3	野生种	YG20	yy07-1	贵州盘县地方品种	YG37	yy14-3	四川地方品种
YG04	梁丰薏 16-2	黔薏苡 2 号选系	YG21	黔薏苡 2 号	国审品种	YG38	yy14-10	四川地方品种
YG05	黔薏苡 1 号	国审品种	YG22	yy11-8	广西地方品种	YG39	yy03-7	贵州晴隆地方品种
YG06	黔薏苡 16-1	黔薏苡 1 号选系	YG23	yy08-9	贵州安龙地方品种	YG40	yy14-7	四川地方品种
YG07	梁丰薏 16-1	黔薏苡 1 号选系	YG24	yy18-2	贵州兴仁地方品种	YG41	yy07-7	贵州盘县地方品种
YG08	黔薏苡 16-2	黔薏苡 2 号选系	YG25	yy07-4	贵州盘县地方品种	YG42	yy06-1	贵州兴仁地方品种
YG09	梁丰薏 14-1	黔薏苡 1 号选系	YG26	yy03-4	贵州晴隆地方品种	YG43	yy07-10	贵州盘县地方品种
YG10	梁丰薏 14-2	黔薏苡 2 号选系	YG27	yy18-1	贵州兴仁地方品种	YG44	yy12-3	贵州正安地方品种
YG11	yy07-8	贵州盘县地方品种	YG28	yy12-2	贵州正安地方品种	YG45	yy04-6	云南地方品种
YG12	yy12-1	贵州正安地方品种	YG29	yy14-5	广西地方品种	YG46	yy19-8	贵州安龙地方品种
YG13	yy04-2	云南地方品种	YG30	yy08-4	贵州安龙地方品种	YG47	yy18-4	贵州兴仁地方品种
YG14	yy07-2	贵州盘县地方品种	YG31	yy14-2	广西地方品种	YG48	yy08-5	贵州安龙地方品种
YG15	yy04-7	云南地方品种	YG32	yy16-3	贵州兴仁地方品种	YG49	yy07-9	贵州盘县地方品种
YG16	yy07-3	贵州盘县地方品种	YG33	yy07-6	贵州盘县地方品种	YG50	yy12-7	贵州正安地方品种
YG17	yy03-6	贵州晴隆地方品种	YG34	yy14-6	广西地方品种			

1.3 测定指标与方法

以突破胚根 1 mm 为发芽标准, 分别在第 2、4、6 和 8 天调查发芽数, 计算发芽势 (GE, germination energy)、发芽率 (GR, germination rate) 和萌发指数 (GI, germination index)。

发芽势 = 第 4 天发芽种子数 / 供试种子数 × 100%。

发芽率 = 第 8 天发芽种子数 / 供试种子数 × 100%。

萌发指数 = (1.00)GR₂ + (0.75)GR₄ + (0.50)GR₆ + (0.25)GR₈, 式中, GR₂、GR₄、GR₆ 和 GR₈ 分别为第 2、4、6 和 8 天的发芽率。

在第 10 天, 从各重复随机取出薏苡芽苗 5 株, 将根系剪下与芽苗分开, 测定芽长 (BL, bud length)、芽粗 (BD, bud diameter)、芽鲜重 (BFW, bud fresh weight)、芽干重 (BDW, bud dry weight)、根长 (RL, root length)、根粗 (RD, root diameter)、根鲜重 (RFW, root fresh weight)、根干重 (RDW, root dry weight)。

1.4 数据统计分析

用 Microsoft Excel 2013 整理数据, 用 SPSS 19 进行统计分析。参考罗俊杰等^[15]的方法, 各指标平均

值的差异显著性采用配对处理 *t* 检验法进行检测, 分别按公式 (1) 和 (2) 计算单项抗旱系数 (DC, drought resistance coefficient) 和综合抗旱系数 (CDC, comprehensive drought resistance coefficient), 式中, T_i 和 CK_i 分别表示干旱胁迫和对照处理的指标测定值。

$$DC = \frac{T_i}{CK_i} \quad (1)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC \quad (2)$$

针对各指标 DC 值, 进行简单相关分析、连续变数次数分布统计分析和主成分分析, 分别按公式 (3)、(4) 和 (5) 计算因子权重系数 (ω_i)、各种质各综合指标的隶属函数值 [$\mu(x_i)$] 和抗旱性度量值 (D, drought resistance comprehensive evaluation value), 式中 C_i 为第 *i* 个综合指标贡献率, 表示第 *i* 个指标在所有指标中的重要程度, x_i 、 $x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别表示第 *i* 个综合指标及第 *i* 个综合指标的最大值和最小值。

$$\omega_i = C_i \div \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

$$\mu(x_i) = \frac{x_i - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (4)$$

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x_i) \times (C_i \div \sum_{i=1}^n C_i)] \quad (5)$$

以各指标 DC 值为比较序列, D 值为参考序列进行灰色关联度分析, 获得各指标 DC 值与 D 值间的关联度 (γ_D), 分别按公式(6)和(7)计算各指标权重系数 [$\omega_{i(\gamma)}$] 和加权抗旱系数 (WDC, weight drought resistance coefficient), 式中 γ_i 为各指标关联度。

$$\omega_{i(\gamma)} = \gamma_i \div \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (6)$$

$$WDC = \sum_{i=1}^n [DC \times (\gamma_i \div \sum_{i=1}^n \gamma_i)] \quad (7)$$

以各指标 DC 值为比较序列, WDC 值为参考序列进行灰色关联度分析, 获得各指标 DC 值与 WDC 值间的关联度 (γ_{WDC})。最后基于供试薏苡种质 D 值, 采用加权配对算术平均法 (WPGMA, weighted pair group method average) 和欧氏距离进行聚类分

析, 划分抗旱级别, 并分别以 D 值、CDC 值和 WDC 值为参考序列, 对各指标 DC 值进行逐步回归分析, 获得回归方程。

2 结果与分析

2.1 萌发期模拟干旱胁迫最适渗透势的确定

从表 2 可知, 当渗透势大于 -0.1 MPa 时, yy18-1、yy03-8 和 yy16-3 的发芽率与对照相比, 差异不显著, 不能区分薏苡萌发期的抗旱性。当渗透势低于 -0.1 MPa 时, yy16-3、yy06-1、yy19-8 和 yy12-7 的发芽率较低。由此可见, 渗透势低于 -0.1 MPa 的 PEG-6000 水溶液对薏苡种子萌发抑制作用过大, 虽然可以鉴定出高抗旱型种质, 但很容易遗漏综合性状良好的种质。当渗透势为 -0.1 MPa 时, 6 份薏苡种子的发芽率与对照相比, 差异显著, 且不同抗旱级别的种质间区分明显。因此, 确定薏苡萌发期模拟干旱胁迫的最适 PEG-6000 水溶液渗透势为 -0.1 MPa。

表 2 不同渗透势 PEG-6000 水溶液对薏苡种子发芽率的影响

Table 2 Effects of different osmotic potential of PEG-6000 water solution on the germination rates in Job's tears seeds

渗透势 (MPa) Osmotic potential	发芽率 (%) Germination rate					
	yy18-1	yy03-8	yy16-3	yy06-1	yy19-8	yy12-7
0	92.45a	90.90a	88.40a	88.70a	82.96a	82.31a
-0.05	85.02ab	82.10ab	74.03ab	68.17b	46.91b	45.72b
-0.1	73.04b	72.63b	59.22b	53.59c	31.62c	31.08c
-0.15	55.75c	56.27c	26.08c	20.72d	11.69d	11.40d
-0.2	33.47d	31.53d	15.73c	11.56e	8.84d	7.66d

同列中不同小写字母表示 0.05 水平差异显著

The different small letters in same column mean significant difference at 0.05 probability level

2.2 供试种质的代表性及其指标测定值分析

从表 3 可知, 种质间变异系数介于 $6.0\% \sim 74.1\%$ 之间, 说明本试验所选薏苡种质类型较丰富, 具有较好的代表性, 旱胁迫处理效果好, 所选指标对干旱胁迫反应较敏感。此外, 供试种质各指标在干旱胁迫和对照处理下的测定值相关系数介于 $0.204 \sim 0.903$ 之间, 这进一步说明各指标对干旱胁迫反应的敏感性存在差异, 直接采用各指标测定值很难鉴定供试种质的抗旱性。

2.3 单项指标分析

与对照处理相比, 供试种质在干旱胁迫处理后,

各指标均发生不同程度变化(表 4)。同一指标各种质的 DC 值存在明显差异, 变异系数介于 $16.4\% \sim 42.4\%$ 之间, 但不同种质间 DC 值所反映的抗旱性不同, 且同一种质各指标的 DC 值差异较大, 说明各指标对干旱胁迫反应的敏感性不同。

相关分析表明(表 5), 各指标都至少与一个其他指标呈显著或极显著相关, 说明各指标间存在一定程度的相关性。其中, 萌发指数与发芽势和发芽率的相关系数高达 0.971 和 0.908 , 发芽势与发芽率的相关系数高达 0.859 。

表3 干旱胁迫和对照条件下供试薏苡种质各指标测定值及其均值差异分析
Table 3 Measured values of all indices in tested Job's tears germplasms under drought stress and control and its mean variance analysis

编号 Number	发芽势(%)		发芽率(%)		萌发指数		芽长(cm)		芽粗(mm)		芽鲜重(g)		芽干重(g)		根长(cm)		根粗(mm)		根鲜重(g)		根干重(g)	
	GE		GR		GI		BL		BD		BFW		BDW		RL		RD		RFW		RDW	
	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T
YG01	57.65	46.55	93.37	62.67	0.93	0.74	11.29	9.68	6.81	5.38	2.27	1.87	0.34	0.29	2.76	2.27	5.36	4.60	0.52	0.43	0.21	0.16
YG02	62.21	31.19	90.83	56.77	1.02	0.53	10.16	8.52	7.53	6.27	1.94	1.19	0.29	0.19	2.56	1.71	5.92	4.29	0.42	0.21	0.14	0.08
YG03	59.45	36.15	86.80	65.80	0.96	0.62	10.80	7.20	6.97	5.88	1.74	1.04	0.25	0.20	2.44	1.43	5.48	3.50	0.38	0.19	0.10	0.04
YG04	58.15	36.29	84.90	54.43	0.94	0.59	9.80	5.45	5.47	4.26	1.68	0.64	0.20	0.09	1.88	0.88	4.30	2.56	0.27	0.13	0.05	0.01
YG05	63.72	43.33	93.03	65.00	1.03	0.70	9.52	6.74	5.20	2.73	1.09	0.53	0.15	0.11	1.96	1.26	4.09	1.51	0.25	0.10	0.06	0.04
YG06	67.52	34.98	81.70	52.47	1.05	0.57	9.03	5.49	3.65	1.06	1.23	0.45	0.18	0.07	1.36	0.92	2.87	1.50	0.24	0.10	0.03	0.01
YG07	80.66	30.96	97.60	46.43	1.25	0.50	10.47	5.20	4.40	1.83	1.44	0.46	0.23	0.09	1.47	0.83	3.46	2.63	0.22	0.10	0.03	0.02
YG08	76.31	33.56	92.33	50.33	1.18	0.55	9.47	5.53	2.18	0.59	1.12	0.41	0.09	0.05	1.23	0.77	1.72	0.74	0.21	0.12	0.04	0.02
YG09	71.68	34.38	86.73	51.57	1.11	0.56	7.24	5.50	4.90	1.26	0.63	0.43	0.09	0.05	1.04	0.72	3.85	1.79	0.12	0.07	0.01	0.01
YG10	70.11	41.60	84.83	62.40	1.09	0.68	9.99	6.41	2.12	0.67	1.43	0.49	0.12	0.06	1.90	0.88	1.72	0.39	0.21	0.10	0.04	0.02
YG11	61.78	43.68	82.17	58.53	0.98	0.69	9.72	5.57	4.17	1.21	1.43	0.50	0.21	0.16	1.49	0.62	3.39	0.71	0.27	0.11	0.03	0.01
YG12	62.98	49.45	83.77	66.27	0.98	0.78	10.96	7.82	4.53	1.68	1.65	0.69	0.17	0.07	2.16	0.96	3.69	2.59	0.29	0.15	0.04	0.02
YG13	72.06	52.86	95.83	70.83	1.14	0.84	8.82	5.92	3.07	1.74	1.21	0.59	0.12	0.10	1.58	0.72	2.50	1.23	0.23	0.18	0.06	0.03
YG14	64.69	48.86	86.03	65.47	1.02	0.77	9.67	7.58	6.67	5.54	1.44	0.71	0.17	0.11	1.53	1.31	5.43	4.96	0.19	0.12	0.05	0.02
YG15	62.76	41.87	83.47	56.10	0.99	0.66	9.09	5.82	6.30	4.12	1.30	0.45	0.14	0.04	1.44	0.83	5.13	4.01	0.25	0.08	0.03	0.01
YG16	58.22	23.96	77.43	32.10	0.92	0.38	10.06	5.88	4.07	3.03	1.67	0.49	0.17	0.04	2.07	0.71	3.31	2.08	0.38	0.09	0.04	0.02
YG17	60.48	31.37	80.43	42.03	0.96	0.50	8.91	5.67	3.23	1.60	1.29	0.47	0.16	0.04	1.86	1.50	2.63	1.08	0.34	0.11	0.05	0.04
YG18	61.78	45.40	82.17	60.83	0.98	0.72	8.86	5.89	3.53	2.23	1.24	0.45	0.18	0.08	1.60	1.42	2.88	1.63	0.28	0.09	0.03	0.02
YG19	55.76	28.09	74.17	40.17	0.88	0.45	9.84	5.82	5.37	4.60	1.40	0.43	0.11	0.08	1.62	1.20	4.37	3.19	0.31	0.09	0.06	0.03
YG20	60.07	21.96	87.70	31.40	0.97	0.35	8.79	6.96	3.95	1.62	1.45	0.57	0.15	0.04	1.69	1.11	3.22	1.77	0.36	0.08	0.03	0.02
YG21	62.53	26.15	91.30	37.40	1.01	0.42	9.67	8.49	3.57	2.32	1.66	0.86	0.11	0.05	1.51	1.26	2.90	1.64	0.39	0.15	0.09	0.08
YG22	56.51	26.15	82.50	37.40	0.91	0.42	10.13	6.47	1.93	1.15	1.74	0.51	0.18	0.09	1.90	1.09	1.57	0.53	0.41	0.29	0.05	0.03
YG23	60.53	40.86	88.37	58.43	0.98	0.66	9.36	6.59	1.75	0.46	1.72	0.61	0.20	0.08	1.66	0.98	0.99	0.14	0.33	0.13	0.03	0.03
YG24	63.13	49.77	92.17	71.17	1.02	0.80	9.84	5.62	2.17	0.40	1.47	0.47	0.18	0.10	1.80	0.96	1.22	0.28	0.29	0.06	0.05	0.03
YG25	61.99	45.99	90.50	65.77	1.01	0.74	10.34	6.69	2.68	1.22	1.67	0.58	0.15	0.07	1.73	0.92	1.52	0.85	0.23	0.09	0.09	0.04
YG26	61.89	38.14	90.37	54.53	0.97	0.61	8.16	6.22	5.25	3.17	1.25	0.50	0.13	0.09	1.63	1.50	2.97	1.81	0.21	0.10	0.09	0.05
YG27	45.51	44.21	93.77	74.04	0.95	0.86	8.50	8.27	5.95	5.38	1.49	1.30	0.20	0.18	2.20	2.09	3.36	3.05	0.33	0.29	0.02	0.02
YG28	55.89	31.69	81.60	45.63	0.91	0.51	9.67	7.08	3.57	3.07	1.53	0.59	0.24	0.19	1.64	1.13	2.02	0.68	0.23	0.08	0.07	0.04
YG29	54.98	35.05	84.67	50.47	0.89	0.56	8.39	5.52	2.65	1.45	1.25	0.41	0.09	0.03	1.64	0.91	1.50	0.62	0.20	0.08	0.07	0.02
YG30	50.41	22.34	77.63	32.17	0.82	0.36	9.53	6.64	3.37	1.29	1.44	0.59	0.17	0.10	1.56	0.99	1.90	0.86	0.24	0.06	0.10	0.05
YG31	51.19	23.80	78.83	34.27	0.84	0.38	9.21	5.38	4.30	2.13	1.21	0.43	0.13	0.11	1.46	0.53	2.43	1.23	0.23	0.06	0.04	0.03
YG32	60.32	40.20	88.07	57.89	0.97	0.65	9.08	6.90	4.02	2.79	1.24	0.51	0.19	0.13	1.19	0.78	2.80	2.13	0.18	0.11	0.11	0.06

表 3(续)

编号 Number	发芽势(%)		发芽率(%)		萌发指数		芽长(cm)		芽粗(mm)		芽鲜重(g)		芽干重(g)		根长(cm)		根粗(mm)		根鲜重(g)		根干重(g)			
	CK	T																						
YG33	56.71	41.81	82.80	53.93	0.92	0.66	9.88	5.99	3.43	2.88	1.28	0.47	0.20	0.15	1.96	1.22	2.39	1.43	0.23	0.08	0.06	0.02	0.06	0.02
YG34	60.25	44.91	87.97	57.93	0.97	0.71	9.33	6.97	5.92	2.13	1.12	0.54	0.19	0.12	2.00	0.72	4.12	3.16	0.19	0.05	0.07	0.02	0.07	0.02
YG35	58.29	48.17	85.10	62.13	0.94	0.76	9.26	6.76	7.27	2.08	1.38	0.46	0.17	0.10	1.99	0.69	5.06	4.08	0.15	0.06	0.06	0.03	0.06	0.03
YG36	62.97	55.99	91.93	72.22	1.02	0.88	8.83	7.57	7.93	2.78	1.49	0.57	0.22	0.12	1.59	1.23	5.53	4.65	0.19	0.08	0.09	0.05	0.09	0.05
YG37	61.37	53.39	89.60	68.87	0.99	0.84	8.72	7.60	6.72	5.93	1.12	0.91	0.22	0.19	1.50	1.27	4.68	4.23	0.19	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07
YG38	54.11	48.60	81.60	62.70	0.95	0.76	9.06	6.46	5.95	5.19	0.91	0.40	0.26	0.20	1.41	0.90	4.15	2.80	0.13	0.05	0.10	0.10	0.03	0.03
YG39	64.23	51.42	84.20	57.03	0.78	0.70	9.18	6.02	3.60	1.48	1.57	0.44	0.20	0.09	1.62	0.66	2.51	1.16	0.33	0.06	0.11	0.02	0.11	0.02
YG40	59.64	54.60	91.83	70.43	1.04	0.83	8.88	7.24	2.65	0.29	1.23	0.56	0.14	0.06	1.57	1.01	1.85	0.68	0.25	0.10	0.05	0.02	0.02	0.02
YG41	61.99	38.82	90.50	53.57	1.01	0.59	9.71	6.24	4.45	2.66	1.17	0.44	0.15	0.13	1.29	0.91	3.10	1.92	0.21	0.05	0.02	0.01	0.02	0.01
YG42	61.23	37.64	89.40	51.94	0.99	0.60	9.57	7.30	2.27	1.80	1.59	0.80	0.26	0.19	1.89	1.27	2.01	1.48	0.24	0.13	0.09	0.04	0.09	0.04
YG43	62.90	47.27	91.83	65.23	1.02	0.75	8.70	6.74	1.77	0.33	1.37	0.50	0.14	0.07	1.91	1.08	1.57	0.93	0.17	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03
YG44	63.95	34.43	84.17	64.23	1.03	0.74	9.63	5.30	4.17	1.27	1.49	0.33	0.24	0.14	1.52	0.78	3.69	2.35	0.27	0.06	0.10	0.05	0.10	0.05
YG45	60.55	40.19	88.40	55.47	0.98	0.64	10.51	6.61	2.70	1.27	1.48	0.45	0.11	0.05	1.96	1.02	2.39	1.08	0.15	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04
YG46	57.69	24.12	84.23	33.29	0.93	0.38	10.20	4.63	3.80	1.59	1.23	0.28	0.18	0.04	2.38	1.02	3.37	1.34	0.26	0.07	0.07	0.02	0.07	0.02
YG47	59.86	36.76	87.40	65.07	0.97	0.62	9.63	6.57	3.17	1.65	1.62	0.54	0.20	0.14	1.89	0.71	2.81	2.02	0.16	0.08	0.06	0.04	0.06	0.04
YG48	53.84	19.06	78.60	33.73	0.87	0.32	10.06	6.21	7.20	4.51	1.58	0.46	0.21	0.16	1.68	0.71	6.38	4.45	0.23	0.06	0.09	0.03	0.09	0.03
YG49	61.51	29.89	89.80	52.90	0.99	0.51	11.11	7.56	8.35	7.40	1.93	0.65	0.16	0.10	1.84	1.16	7.40	4.42	0.26	0.11	0.08	0.06	0.08	0.06
YG50	56.80	18.12	82.93	32.08	0.92	0.31	10.10	4.10	5.67	1.58	1.07	0.22	0.22	0.05	2.57	1.02	5.02	1.56	0.34	0.09	0.10	0.02	0.10	0.02
平均值	61.02	38.12	86.55	54.47	0.98	0.62	9.53	6.49	4.45	2.58	1.42	0.58	0.18	0.10	1.76	1.05	3.37	2.09	0.26	0.11	0.06	0.03	0.06	0.03
Average	9.9	26.1	6.0	22.7	8.5	25.2	8.1	16.2	40.1	69.5	19.7	47.0	29.2	53.3	20.5	33.2	43.9	65.0	32.0	62.7	54.8	74.1	54.8	74.1
变异系数(%)	9.9	26.1	6.0	22.7	8.5	25.2	8.1	16.2	40.1	69.5	19.7	47.0	29.2	53.3	20.5	33.2	43.9	65.0	32.0	62.7	54.8	74.1	54.8	74.1
CV	1.483	1.484	1.484	1.484	0.022	0.022	0.166	0.166	0.155	0.155	0.035	0.035	0.005	0.005	0.049	0.049	0.090	0.090	0.009	0.009	0.003	0.003	0.003	0.003
t 测验值	15.44**	21.62**	21.62**	21.62**	16.90**	16.90**	18.36**	18.36**	12.07**	12.07**	23.90**	23.90**	15.33**	15.33**	14.40**	14.40**	14.30**	14.30**	16.87**	16.87**	10.60**	10.60**	10.60**	10.60**
t - test value	15.44**	21.62**	21.62**	21.62**	16.90**	16.90**	18.36**	18.36**	12.07**	12.07**	23.90**	23.90**	15.33**	15.33**	14.40**	14.40**	14.30**	14.30**	16.87**	16.87**	10.60**	10.60**	10.60**	10.60**
P 值 P value	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
相关系数 r	0.216	0.543	0.543	0.543	0.302	0.302	0.204	0.204	0.812	0.812	0.604	0.604	0.802	0.802	0.518	0.518	0.903	0.903	0.676	0.676	0.816	0.816	0.816	0.816

CK:对照处理;T:干旱胁迫处理; ** 表示 0.01 水平差异显著

CK: Control treatments, T: Drought stress treatments, ** is significant difference at 0.01 probability level

表4 供试薏苡种质各指标的抗旱系数

Table 4 Drought resistance coefficients of all indices in tested Job's tears germplasms

编号 Number	发芽势 GE	发芽率 GR	萌发指数 GI	芽长 BL	芽粗 BD	芽鲜重 BFW	芽干重 BDW	根长 RL	根粗 RD	根鲜重 RFW	根干重 RDW
YG01	0.807	0.671	0.797	0.857	0.790	0.821	0.845	0.823	0.859	0.818	0.770
YG02	0.501	0.625	0.523	0.839	0.832	0.612	0.658	0.670	0.725	0.496	0.543
YG03	0.608	0.758	0.642	0.667	0.844	0.599	0.772	0.586	0.639	0.488	0.413
YG04	0.624	0.641	0.628	0.556	0.779	0.382	0.441	0.467	0.595	0.489	0.259
YG05	0.680	0.699	0.684	0.708	0.526	0.489	0.688	0.642	0.369	0.417	0.653
YG06	0.518	0.642	0.542	0.608	0.291	0.366	0.399	0.680	0.522	0.422	0.419
YG07	0.384	0.476	0.402	0.497	0.416	0.318	0.394	0.568	0.760	0.470	0.653
YG08	0.440	0.545	0.460	0.584	0.272	0.370	0.531	0.622	0.428	0.579	0.679
YG09	0.480	0.595	0.502	0.759	0.256	0.683	0.580	0.686	0.464	0.641	0.545
YG10	0.593	0.736	0.621	0.642	0.318	0.344	0.469	0.462	0.223	0.451	0.417
YG11	0.707	0.712	0.708	0.573	0.290	0.348	0.729	0.418	0.210	0.388	0.469
YG12	0.785	0.791	0.797	0.714	0.369	0.419	0.429	0.443	0.703	0.512	0.440
YG13	0.734	0.739	0.735	0.671	0.567	0.488	0.834	0.458	0.491	0.751	0.397
YG14	0.755	0.761	0.756	0.784	0.830	0.490	0.611	0.855	0.913	0.638	0.438
YG15	0.667	0.672	0.668	0.641	0.654	0.343	0.282	0.577	0.782	0.309	0.362
YG16	0.411	0.415	0.412	0.585	0.744	0.294	0.250	0.344	0.629	0.243	0.629
YG17	0.519	0.523	0.520	0.636	0.495	0.361	0.234	0.808	0.408	0.318	0.673
YG18	0.735	0.740	0.736	0.665	0.630	0.367	0.453	0.889	0.567	0.304	0.511
YG19	0.504	0.542	0.512	0.591	0.857	0.307	0.678	0.740	0.730	0.290	0.500
YG20	0.366	0.358	0.364	0.791	0.411	0.396	0.249	0.658	0.549	0.228	0.538
YG21	0.418	0.410	0.416	0.878	0.649	0.517	0.399	0.831	0.564	0.389	0.856
YG22	0.463	0.453	0.461	0.638	0.594	0.292	0.530	0.573	0.338	0.694	0.743
YG23	0.675	0.661	0.672	0.704	0.263	0.353	0.402	0.591	0.142	0.392	0.989
YG24	0.788	0.772	0.785	0.571	0.185	0.316	0.553	0.531	0.226	0.217	0.579
YG25	0.742	0.727	0.731	0.647	0.453	0.350	0.492	0.532	0.557	0.390	0.395
YG26	0.616	0.603	0.629	0.763	0.603	0.397	0.702	0.918	0.610	0.460	0.592
YG27	0.971	0.790	0.904	0.973	0.905	0.878	0.902	0.952	0.906	0.856	0.774
YG28	0.567	0.559	0.560	0.732	0.862	0.383	0.810	0.689	0.338	0.323	0.488
YG29	0.637	0.596	0.635	0.658	0.545	0.326	0.324	0.554	0.411	0.413	0.252
YG30	0.443	0.414	0.436	0.697	0.383	0.410	0.578	0.636	0.449	0.273	0.519
YG31	0.465	0.435	0.458	0.584	0.495	0.356	0.795	0.366	0.504	0.258	0.722
YG32	0.666	0.657	0.664	0.760	0.695	0.414	0.687	0.654	0.760	0.570	0.483
YG33	0.737	0.651	0.718	0.606	0.837	0.369	0.758	0.625	0.598	0.361	0.321
YG34	0.745	0.659	0.726	0.746	0.359	0.480	0.614	0.361	0.766	0.253	0.296
YG35	0.826	0.730	0.805	0.730	0.286	0.335	0.592	0.346	0.806	0.408	0.464
YG36	0.889	0.786	0.866	0.857	0.350	0.381	0.560	0.776	0.841	0.407	0.626
YG37	0.870	0.769	0.847	0.871	0.883	0.805	0.862	0.849	0.904	0.747	0.879
YG38	0.898	0.768	0.807	0.713	0.873	0.442	0.764	0.638	0.675	0.426	0.342
YG39	0.801	0.677	0.892	0.656	0.411	0.277	0.452	0.404	0.462	0.180	0.178
YG40	0.915	0.767	0.798	0.816	0.110	0.457	0.421	0.645	0.367	0.398	0.433
YG41	0.626	0.592	0.579	0.643	0.597	0.380	0.905	0.707	0.620	0.235	0.401
YG42	0.615	0.581	0.607	0.763	0.792	0.502	0.742	0.671	0.736	0.533	0.416
YG43	0.752	0.710	0.742	0.775	0.184	0.365	0.494	0.564	0.595	0.363	0.692
YG44	0.538	0.763	0.719	0.550	0.304	0.222	0.601	0.511	0.637	0.226	0.478
YG45	0.664	0.627	0.656	0.629	0.472	0.303	0.428	0.523	0.449	0.385	0.774
YG46	0.418	0.395	0.413	0.454	0.419	0.229	0.214	0.430	0.398	0.270	0.250
YG47	0.614	0.744	0.644	0.682	0.521	0.335	0.686	0.376	0.720	0.499	0.744
YG48	0.354	0.429	0.371	0.618	0.627	0.294	0.735	0.424	0.698	0.237	0.315
YG49	0.486	0.589	0.509	0.680	0.886	0.335	0.633	0.627	0.597	0.421	0.668
YG50	0.319	0.387	0.334	0.406	0.279	0.208	0.217	0.397	0.310	0.256	0.235
平均值 Average	0.627	0.627	0.628	0.683	0.540	0.410	0.568	0.602	0.571	0.422	0.524
变异系数 (%) CV	26.3	20.4	24.3	16.4	42.4	35.0	33.8	26.7	34.0	38.7	35.3

表 5 供试薏苡种质各指标抗旱系数的相关性

Table 5 Correlations of drought resistance coefficients of all indices in tested Job's tears germplasms

指标 Indices	发芽势 GE	发芽率 GR	萌发指数 GI	芽长 BL	芽粗 BD	芽鲜重 BFW	芽干重 BDW	根长 RL	根粗 RD	根鲜重 RFW
发芽率 GR	0.859 **									
萌发指数 GI	0.971 **	0.908 **								
芽长 BL	0.508 **	0.355 *	0.450 **							
芽粗 BD	0.054	-0.008	0.022	0.274						
芽鲜重 BFW	0.405 **	0.322 *	0.352 *	0.755 **	0.405 **					
芽干重 BDW	0.367 **	0.367 **	0.357 *	0.384 **	0.466 **	0.522 **				
根长 RL	0.213	0.135	0.164	0.592 **	0.406 **	0.556 **	0.249			
根粗 RD	0.276	0.231	0.277	0.454 **	0.513 **	0.444 **	0.350 *	0.299 *		
根鲜重 RFW	0.332 *	0.348 *	0.303 *	0.500 **	0.336 *	0.720 **	0.418 **	0.401 **	0.340 *	
根干重 RDW	0.006	-0.017	-0.017	0.399 **	0.037	0.337 *	0.136	0.378 **	0.032	0.357 *

* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著相关

* and ** are significant correlation at 0.05 and 0.01 probability level, respectively

此外,同一区间各指标 DC 值分布次数和频率相差较大(表 6)。DC > 0.6 的发芽势、发芽率、萌发指数、芽长、芽粗、芽鲜重、芽干重、根长、根粗、根鲜重和根干重的分布频率分别为 60%、62%、62%、78%、40%、10%、46%、50%、44%、14% 和 34%,说

明各指标对干旱胁迫反应的敏感程度依次为芽鲜重、根鲜重、根干重、芽粗、根粗、芽干重、根长、发芽势、发芽率、萌发指数和芽长。因此,直接采用这些指标会由于指标间信息的叠加,很难准确、客观地评价各种质的抗旱性,从而影响抗旱性鉴定结果。

表 6 供试薏苡种质各指标抗旱系数在不同区间的分布

Table 6 Different distributions of drought resistance coefficients of all indices in tested Job's tears germplasms

指标 Indices	0 < DC ≤ 0.2		0.2 < DC ≤ 0.4		0.4 < DC ≤ 0.6		0.6 < DC ≤ 0.8		0.8 < DC < 1	
	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)
	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency
发芽势 GE	0	0	4	8	16	32	22	44	8	16
发芽率 GR	0	0	3	6	16	32	31	62	0	0
萌发指数 GI	0	0	3	6	16	32	25	50	6	12
芽长 BL	0	0	0	0	11	22	32	64	7	14
芽粗 BD	3	6	13	26	14	28	10	20	10	20
芽鲜重 BFW	0	0	33	66	12	24	2	4	3	6
芽干重 BDW	0	0	10	20	17	34	17	34	6	12
根长 RL	0	0	6	12	19	38	17	34	8	16
根粗 RD	1	2	9	18	18	36	16	32	6	12
根鲜重 RFW	1	2	24	48	18	36	5	10	2	4
根干重 RDW	1	2	11	22	21	42	14	28	3	6

2.4 主成分分析

各因子特征值中前 6 个因子的累计贡献率达 90.79%,其特征根 $\lambda > 0.528$ (表 7)。因此,提取前 6 个因子,将具有同等效果的指标归为一类,可将原来各单项指标转换成 6 个新的相互独立的综合指标(分别用

F1、F2、F3、F4、F5 和 F6 表示)。F1 在芽长和芽鲜重上具有较高载荷量,F2 在发芽势、发芽率和萌发指数上具有较高载荷量,F3 在芽粗上具有较高载荷量,F4 在芽干重上具有较高载荷量,F5 在根长、根粗和根鲜重上具有较高载荷量,F6 在根干重上具有较高载荷量。

表 7 供试薏苡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 Job's tears germplasms

指标 Indices	因子载荷 Factor loading					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
发芽势 GE	0.342	-0.421	0.038	-0.096	0.092	0.012
发芽率 GR	0.309	-0.452	0.026	0.062	0.036	-0.003
萌发指数 GI	0.329	-0.458	0.020	-0.074	0.074	0.059
芽长 BL	0.369	0.127	0.207	-0.296	-0.046	0.072
芽粗 BD	0.207	0.339	-0.528	0.007	0.281	-0.036
芽鲜重 BFW	0.378	0.214	0.080	0.095	-0.210	-0.279
芽干重 BDW	0.295	0.063	-0.283	0.610	0.379	0.239
根长 RL	0.271	0.303	0.174	-0.439	0.496	-0.320
根粗 RD	0.266	0.140	-0.433	-0.377	-0.476	0.470
根鲜重 RFW	0.325	0.173	0.122	0.386	-0.488	-0.407
根干重 RDW	0.144	0.296	0.598	0.168	0.072	0.606
特征根 Characteristic root	4.756	2.138	1.245	0.742	0.577	0.528
贡献率(%) Contribution rate	43.24	19.44	11.32	6.75	5.25	4.80
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	43.24	62.68	73.99	80.74	85.99	90.79
因子权重 Factor weight	0.476	0.214	0.125	0.074	0.058	0.053

2.5 供试种质的综合抗旱性评价

供试种质 CDC 值和 WDC 值均介于 0.304 ~ 0.892 之间, 平均值均为 0.564, 变异系数均为 18.4%, 根据 CDC 值和 WDC 值的大小对供试种质进行抗旱性排序, 其结果基本相同(表 8)。其中, 抗旱性强的种质有 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1, 抗旱性弱的种质有 yy19-8 和 yy12-7, 其余种质介于两者之间。

此外, 供试种质 D 值介于 0.204 ~ 0.745 之间, 平均值为 0.442, 变异系数为 23.4%, 根据 D 值的大小对供试种质进行抗旱性排序, 得到抗旱性强的种质有 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1, 抗旱性弱的种质有 yy19-8 和 yy12-7, 其余种质介于两者之间(表 8)。这与基于 CDC 值和 WDC 值的供试种质的抗旱性鉴定结果基本一致。

表 8 供试薏苡种质抗旱性评价的 D 值、CDC 值及 WDC 值

Table 8 D value, CDC value, and WDC value of drought resistance evaluation in tested Job's tears germplasms

编号 Number	隶属函数 Subordinate function value						CDC 值 CDC value	排序 Rank	D 值 D value	排序 Rank	WDC 值 WDC value	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6						
YG01	0.840	0.728	0.442	0.592	0.202	0.383	0.805	3	0.687	3	0.806	3
YG02	0.556	0.781	0.270	0.412	0.325	0.405	0.639	7	0.537	5	0.638	7
YG03	0.557	0.520	0.126	0.679	0.447	0.292	0.638	8	0.484	17	0.637	9
YG04	0.379	0.405	0.082	0.497	0.231	0.150	0.533	31	0.336	45	0.532	32
YG05	0.499	0.443	0.546	0.645	0.678	0.427	0.596	16	0.510	9	0.596	16
YG06	0.336	0.461	0.471	0.327	0.326	0.196	0.492	40	0.371	38	0.493	40
YG07	0.258	0.726	0.386	0.454	0.053	0.653	0.485	43	0.398	33	0.486	42
YG08	0.322	0.644	0.630	0.714	0.270	0.347	0.501	37	0.457	21	0.502	37
YG09	0.481	0.682	0.647	0.625	0.114	0.000	0.563	25	0.509	10	0.564	25
YG10	0.338	0.261	0.540	0.676	0.406	0.134	0.480	44	0.365	40	0.479	44
YG11	0.366	0.173	0.483	0.921	0.617	0.366	0.505	34	0.395	34	0.505	35
YG12	0.510	0.177	0.397	0.373	0.000	0.480	0.582	18	0.383	36	0.583	18
YG13	0.563	0.338	0.286	1.000	0.216	0.151	0.624	12	0.471	19	0.624	12
YG14	0.684	0.531	0.190	0.173	0.338	0.285	0.712	4	0.510	8	0.712	4

表 8(续)

编号 Number	隶属函数 Subordinate function value						CDC 值 CDC value	排序 Rank	D 值 D value	排序 Rank	WDC 值 WDC value	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6						
YG15	0.399	0.371	0.189	0.027	0.251	0.478	0.542	29	0.335	46	0.541	29
YG16	0.192	0.699	0.276	0.339	0.178	0.817	0.451	47	0.354	43	0.450	47
YG17	0.314	0.648	0.643	0.120	0.614	0.310	0.500	38	0.429	29	0.500	38
YG18	0.495	0.391	0.410	0.065	0.824	0.337	0.600	13	0.441	27	0.600	13
YG19	0.384	0.701	0.092	0.347	0.742	0.636	0.568	23	0.446	25	0.569	24
YG20	0.244	0.811	0.533	0.000	0.319	0.449	0.446	48	0.399	32	0.447	48
YG21	0.431	1.000	0.679	0.124	0.493	0.556	0.575	19	0.571	4	0.576	20
YG22	0.336	0.760	0.582	0.817	0.337	0.327	0.525	33	0.493	15	0.525	33
YG23	0.388	0.404	1.000	0.597	0.648	0.645	0.531	32	0.512	7	0.532	31
YG24	0.364	0.066	0.638	0.585	0.777	0.529	0.502	36	0.384	35	0.503	36
YG25	0.432	0.233	0.342	0.391	0.378	0.399	0.547	27	0.370	39	0.547	28
YG26	0.531	0.652	0.436	0.298	0.754	0.401	0.627	11	0.534	6	0.628	11
YG27	1.000	0.661	0.451	0.454	0.343	0.330	0.892	1	0.745	1	0.892	1
YG28	0.431	0.638	0.263	0.614	1.000	0.358	0.574	21	0.497	12	0.573	21
YG29	0.336	0.358	0.321	0.290	0.370	0.024	0.487	42	0.321	47	0.486	43
YG30	0.290	0.699	0.463	0.419	0.547	0.444	0.476	45	0.432	28	0.478	45
YG31	0.274	0.648	0.357	0.872	0.509	0.996	0.494	39	0.461	20	0.496	39
YG32	0.555	0.541	0.241	0.442	0.325	0.469	0.637	9	0.487	16	0.638	8
YG33	0.477	0.389	0.043	0.518	0.737	0.382	0.598	14	0.417	30	0.598	14
YG34	0.453	0.230	0.195	0.346	0.140	0.678	0.546	28	0.359	42	0.547	27
YG35	0.489	0.136	0.322	0.426	0.034	0.870	0.575	20	0.382	37	0.577	19
YG36	0.641	0.266	0.527	0.020	0.419	0.781	0.667	6	0.495	14	0.669	5
YG37	0.893	0.675	0.450	0.531	0.344	0.601	0.844	2	0.717	2	0.845	2
YG38	0.614	0.293	0.076	0.437	0.658	0.395	0.668	5	0.456	22	0.667	6
YG39	0.363	0.000	0.226	0.261	0.513	0.403	0.490	41	0.271	48	0.491	41
YG40	0.514	0.107	0.713	0.230	0.426	0.175	0.557	26	0.407	31	0.558	26
YG41	0.433	0.516	0.146	0.513	0.865	0.589	0.571	22	0.454	23	0.572	22
YG42	0.545	0.654	0.157	0.468	0.390	0.350	0.633	10	0.495	13	0.632	10
YG43	0.474	0.280	0.667	0.311	0.320	0.787	0.567	24	0.452	24	0.569	23
YG44	0.336	0.221	0.312	0.455	0.500	0.810	0.504	35	0.352	44	0.507	34
YG45	0.374	0.418	0.601	0.500	0.457	0.722	0.537	30	0.444	26	0.538	30
YG46	0.078	0.503	0.262	0.365	0.263	0.159	0.354	49	0.228	49	0.353	49
YG47	0.471	0.419	0.389	0.740	0.166	1.000	0.597	15	0.480	18	0.598	15
YG48	0.237	0.689	0.000	0.565	0.396	0.691	0.464	46	0.362	41	0.465	46
YG49	0.417	0.725	0.277	0.533	0.599	0.658	0.585	17	0.498	11	0.584	17
YG50	0.000	0.513	0.314	0.476	0.245	0.105	0.304	50	0.204	50	0.304	50
平均值	—	—	—	—	—	—	0.564	—	0.442	—	0.564	—
Average 变异系数(%)	—	—	—	—	—	—	18.4	—	23.4	—	18.4	—
CV												

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 和 μ_6 分别表示 6 个因子的隶属函数值

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$, and μ_6 are subordinate function values of six factors, respectively

2.6 灰色关联度分析

各指标 DC 值与 D 值间的关联度大小依次为芽鲜重、芽长、根干重、根长、根鲜重、芽干重、芽粗、根粗、发芽势、萌发指数、发芽率(表 9),反映了各指标 DC 值与 D 值的密切程度,这与各指标对干旱胁迫

反应的敏感性基本吻合。此外,各指标 DC 值与 WDC 值间的关联度大小依次为芽鲜重、芽长、根鲜重、芽干重、根长、根粗、发芽势、萌发指数、发芽率、芽粗、根干重(表 9),这与各指标 DC 值与 D 值的密切程度基本吻合。

表 9 供试薏苡种质各指标 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 Job's tears germplasms

指标	关联度	排序	权重系数	关联度	排序
Indices	γ_D	Rank	Weight	γ_{WDC}	Rank
发芽势 GE	0.662	9	0.084	0.700	7
发芽率 GR	0.646	11	0.082	0.686	9
萌发指数 GI	0.653	10	0.083	0.687	8
芽长 BL	0.776	2	0.098	0.761	2
芽粗 BD	0.701	7	0.089	0.685	10
芽鲜重 BFW	0.792	1	0.100	0.769	1
芽干重 BDW	0.732	6	0.093	0.724	4
根长 RL	0.752	4	0.095	0.712	5
根粗 RD	0.677	8	0.086	0.708	6
根鲜重 RFW	0.744	5	0.094	0.747	3
根干重 RDW	0.754	3	0.096	0.673	11

2.7 聚类分析及抗旱级别的划分

在欧氏距离为 10 处将 50 份供试种质分为 5 类(图 1)。其中第 I 类为高度抗旱型种质,有 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1 共 3 份,占总数的 6%;第 II 类为抗旱型种质,共 15 份,占总数的 30%;第 III 类为中等抗旱型种质,共 16 份,占总数的 32%;第 IV 类为不抗旱型种质,共 14 份,占总数的 28%;第 V 类为高度不抗旱型种质,有 yy19-8 和 yy12-7 共 2 份,占总数的 4%。

根据供试种质的抗旱性聚类分析及抗旱级别划分结果,对供试种质抗旱性评价指标进行分级统计,结果表明(表 10),除发芽势、发芽率、萌发指数和根粗外,其余指标的隶属函数值、CDC 值、D 值和 WDC 值均随抗旱级别的升高而增大。此外,CDC 值、D 值和 WDC 值在不同抗旱级别上的差异较大,可为其他薏苡种质抗旱级别的划分提供依据。

2.8 抗旱指标的筛选

分别以 D 值、CDC 值和 WDC 值为参考序列,对供试种质各指标 DC 值进行逐步回归分析,得到的 3 个回归方程的决定系数 $R^2 \approx 1$, F 检验均达极显著水平(表 11)。说明回归方程最优,模型拟合度好,预测精度高,用这 3 个方程进行薏苡种质资源萌发期抗旱性评价的效果好。根据 D 值与各指标 DC 值的回归方程可知(表 11),在薏苡种质资源萌发期抗旱性评价中,有针对性地测定与 D 值密切相关

的指标,如芽长、芽干重、根长、根鲜重和根干重,可有效鉴定薏苡种质资源的抗旱性,从而使鉴定工作简化。

3 讨论

3.1 薏苡种质资源萌发期模拟干旱胁迫最适渗透势的确定

作物种子萌发过程中,只有在充足的水分条件下才能进行各种生理生化活动,进而萌发^[16]。水分亏缺严重影响作物种子的发芽率^[17]。因此,作物萌发期抗旱性鉴定是全生育期抗旱性鉴定的重要环节^[18]。目前,人工模拟干旱胁迫作为重要手段在作物抗旱性研究中被普遍采用,其中,PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫法因 PEG-6000 溶于水后既能使作物处于类似干旱的水分胁迫中,又因分子量大,不能穿越细胞壁进入细胞质,不会引起质壁分离伤害作物,常作为作物萌发期抗旱性鉴定的理想方法^[19]。本研究通过设定 5 个不同渗透势的 PEG-6000 水溶液,探讨干旱胁迫对抗旱性不同的 6 份薏苡种子发芽率的影响。结果表明,当渗透势大于 -0.1 MPa 时,不能区分薏苡萌发期的抗旱性;当渗透势低于 -0.1 MPa 时,对薏苡种子萌发抑制作用过大,这与陈宁等^[14]的研究结果一致。因此,确定薏苡萌发期模拟干旱胁迫的最适 PEG-6000 水溶液渗透势为 -0.1 MPa。

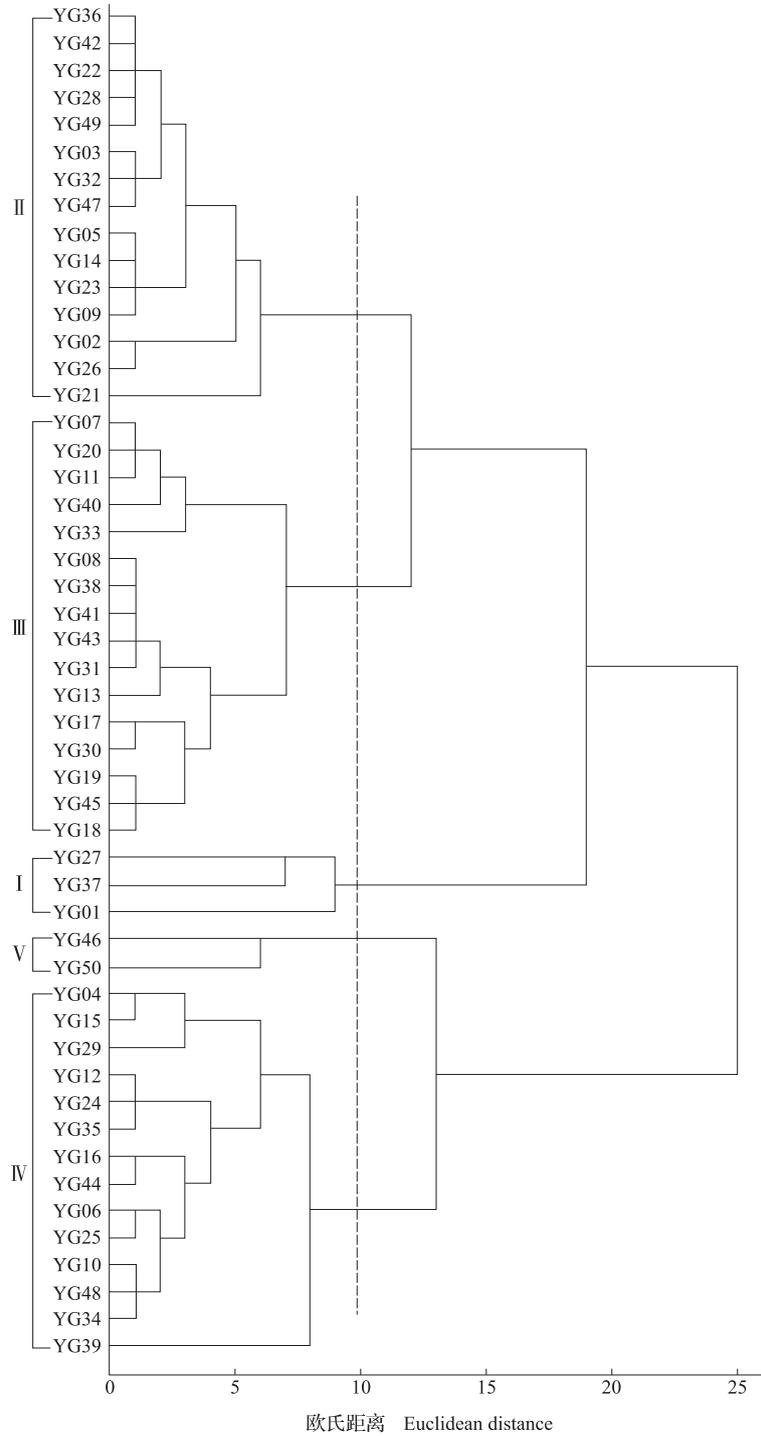


图1 基于 D 值的供试薏苡种质抗旱性系统聚类图

Fig.1 Fuzzy clustering dendrogram of drought resistance in tested Job's tears germplasms based on D value

3.2 薏苡种质资源萌发期抗旱性评价方法的选择

评价作物的抗旱性不仅需要选择合适的评价指标,而且要有适宜的评价方法^[20-21]。目前,多方法多指标相结合的手段在作物抗旱性评价工作中被普遍采用^[22]。在作物抗旱性评价工作中,大多数采用等权重的方法,却忽视了各指标对于干旱胁迫反应的敏感程度^[23-24]。本研究采用 D 值、CDC 值和 WDC

值等综合评价指标,结合单项指标抗旱系数、相关分析、频次分析、主成分分析、灰色关联度分析、隶属函数分析、聚类分析及逐步回归分析,对薏苡种质资源的抗旱性进行综合评价,消除因各指标单位不同带来的影响,同时结合指标变异系数来确定各指标在抗旱性评价工作中的重要程度。本研究中以 D 值为主要评价指标,以 CDC 值和 WDC 值作为辅助评

表 10 供试薏苡种质抗旱性评价指标的分级

Table 10 Classification of drought resistance evaluation indices in Job's tears germplasms

指标 Indices	隶属函数 Subordinate function value				
	I	II	III	IV	V
发芽势 GE	0.864	0.434	0.458	0.500	0.076
发芽率 GR	0.889	0.633	0.559	0.699	0.076
萌发指数 GI	0.905	0.482	0.470	0.583	0.069
芽长 BL	0.873	0.603	0.439	0.408	0.043
芽粗 BD	0.943	0.659	0.482	0.430	0.301
芽鲜重 BFW	0.936	0.365	0.253	0.196	0.016
芽干重 BDW	0.949	0.603	0.527	0.376	0.003
根长 RL	0.873	0.547	0.448	0.214	0.115
根粗 RD	0.969	0.573	0.497	0.559	0.275
根鲜重 RFW	0.928	0.461	0.291	0.236	0.123
根干重 RDW	0.777	0.537	0.445	0.263	0.079
CDC 值 CDC value	0.847	0.607	0.544	0.514	0.329
D 值 D value	0.716	0.507	0.435	0.353	0.216
WDC 值 WDC value	0.847	0.607	0.544	0.514	0.329

I、II、III、IV、V 表示不同抗旱级别

I, II, III, IV, and V represent different drought resistance level

表 11 供试薏苡种质抗旱性模型预测

Table 11 Model predict of drought resistance in Job's tears germplasms

因变量 Dependent variable	多元逐步回归方程 Multiple stepwise regression equation	决定系数 R^2	F 值 F value	P 值 P value	统计量 Statistic
D 值 D value	$y = -0.08 + 0.21x_4 + 0.19x_7 + 0.16x_8 + 0.13x_{10} + 0.23x_{11}$	0.993	576.30**	0.0001	1.38
CDC 值 CDC value	$y = -0.04 + 0.26x_1 + 0.08x_5 + 0.11x_7 + 0.13x_8 + 0.12x_9 + 0.14x_{10} + 0.10x_{11}$	0.992	392.35**	0.0001	1.88
WDC 值 WDC value	$y = -0.04 + 0.25x_1 + 0.07x_5 + 0.12x_7 + 0.13x_8 + 0.12x_9 + 0.14x_{10} + 0.10x_{11}$	0.993	398.90**	0.0001	1.89

x_1 : 发芽势; x_4 : 芽长; x_5 : 芽粗; x_7 : 芽干重; x_8 : 根长; x_9 : 根粗; x_{10} : 根鲜重; x_{11} : 根干重; ** 表示 0.01 水平显著相关

x_1 : Germination energy, x_4 : Bud length, x_5 : Bud diameter, x_7 : Bud dry weight, x_8 : Root length, x_9 : Root diameter, x_{10} : Root fresh weight, x_{11} : Root dry weight, ** is significant correlation at 0.01 probability level

价指标的评价方法,既考虑了各指标的重要性,又考虑到各指标间的相互关系,评价结果客观、可靠。

3.3 薏苡种质资源萌发期抗旱性的鉴定

作物抗旱性鉴定的最终落脚点是要划分供试种质的抗旱等级,以此来评价其抗旱能力^[25-26]。目前,关于薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定的研究还未见报道。在本研究中,采用 D 值、CDC 值和 WDC 值对供试薏苡种质进行抗旱性排序,其抗旱性强的种质有 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1,抗旱性弱的种质有 yy19-8 和 yy12-7,结果基本一致。此外,针对 D 值,在欧氏距离为 10 处将 50 份供试薏苡种质分为 5 类,其中第 I 类为高度抗旱型种质,有 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1 共 3 份,占总数的 6%;第 II 类为抗旱型种质,共 15 份,占总数的 30%;第 III 类为中等抗旱型种质,共 16 份,占总数的 32%;第 IV 类为不抗旱型种质,共 14 份,占总数的 28%;第 V 类为高度不抗旱型种质,有 yy19-8 和 yy12-7 共 2 份,占总数的 4%。因此,本研究筛选出萌发期抗旱性强的薏苡种质分别为 yy18-1、yy14-3 和 yy13-1,可为

薏苡抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料。

3.4 薏苡种质资源萌发期抗旱指标的筛选

作物的抗旱性是复杂的数量性状,是多种机制、众多因素共同作用的结果,最终通过不同指标的一系列变化在不同生育时期表现出来^[25]。因此,选择合理的指标是作物抗旱性鉴定的关键。目前,国内外学者在作物萌发期抗旱指标筛选方面开展了大量的研究工作^[27-28],并针对不同的作物筛选出了不同的抗旱指标。然而,在薏苡方面的研究还未见报道。本研究选取与薏苡种质萌发期抗旱性相关的 11 个关键指标,将其结合起来,从不同层面进行分析。其结果显示各指标受干旱胁迫影响的程度有所不同,且各指标间存在一定程度的相关性。因此,直接利用这些指标很难客观、准确地评价各种种的抗旱性,从而影响抗旱鉴定结果。通过主成分分析,将原来 11 个单项指标转换成 6 个新的相互独立的综合指标,使评价工作简化。通过灰色关联度分析,得到各指标与 D 值的密切程度依次为芽鲜重、芽长、根干

重、根长、根鲜重、芽干重、芽粗、根粗、发芽势、萌发指数、发芽率,这与各指标对干旱胁迫反应的敏感性及各指标与 WDC 值的密切程度基本吻合,从而增强了评价工作的准确性和全面性。通过逐步回归分析,得到与 D 值密切相关的指标有芽长、芽干重、根长、根鲜重和根干重。因此,在薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定中,有选择性地测定与 D 值密切相关的指标,如芽长、芽干重、根长、根鲜重和根干重,可有效鉴定薏苡种质资源的抗旱性,从而使鉴定工作简化。

参考文献

- [1] 蒙秋伊,刘鹏飞,张志勇. 薏苡种质资源及育种研究进展[J]. 贵州农业科学,2013,41(5):33-37
- [2] 刘荣,申刚,罗晓青,等. 薏苡遗传育种研究进展[J]. 河南农业科学,2015,44(3):1-4
- [3] 王颖,赵兴娥,王微,等. 薏苡不同部位营养成分分析及评价[J]. 食品科学,2013,34(5):255-259
- [4] 章洁琼,朱怡. 贵州薏苡产业发展的现状及对策[J]. 贵州农业科学,2015,43(4):217-219
- [5] 成福云. 干旱灾害对 21 世纪初我国农业发展的影响探讨[J]. 水利发展研究,2002,2(10):31-33
- [6] 张木清,陈如凯. 作物抗旱分子生理与遗传改良[M]. 北京:科学出版社,2005:22-23
- [7] 龚明. 作物抗旱性鉴定方法与指标及其综合评价[J]. 云南农业大学学报,1989,4(1):73-81
- [8] 黎裕. 作物抗旱性鉴定方法与指标[J]. 干旱地区农业研究,1993,11(1):91-99
- [9] 景蕊莲,吕小平. 用渗透胁迫鉴定小麦种子萌发期抗旱性的方法分析[J]. 植物遗传资源学报,2003,4(4):292-296
- [10] 安永平,强爱玲,张媛媛,等. 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究[J]. 植物遗传资源学报,2006,7(4):421-426
- [11] 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
- [12] 秦岭,杨延兵,管延安,等. 不同生态区主要育成谷子品种芽期耐旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(1):146-151
- [13] 陈新,宋高原,张宗文,等. 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
- [14] 陈宁,钱晓刚. 几种薏苡种质材料萌芽期的抗旱性能初步研究[J]. 种子,2013,32(4):90-92
- [15] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,等. 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] 李国瑞,马宏亮,胡雯媚,等. 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
- [17] 田又升,谢宗铭,吴向东,等. 水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(4):173-180
- [18] 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
- [19] 张彦军,苟作旺,王兴荣,等. 胡麻种质萌发期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2015,16(3):520-527
- [20] Cabuslay G S, Ito O, Alejar A A. Physiological evaluation of responses of rice (*Oryza sativa* L.) to water deficit [J]. Plant Sci, 2002,163:815-827
- [21] 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
- [22] 鲁守平,孙群,洪露,等. 不同种源地乌拉尔甘草发芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2007,8(2):189-194
- [23] 王利彬,刘丽君,裴宇峰,等. 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):36-43
- [24] 朱学海,宋燕春,赵治海,等. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究[J]. 植物遗传资源学报,2008,9(1):62-67
- [25] 祁旭升,王兴荣,许军,等. 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
- [26] 孙军伟,冀天会,杨子光,等. 玉米萌芽期抗旱性鉴定研究[J]. 中国农学通报,2009,25(3):104-107
- [27] 彭去回,钱晓刚. 14 个荞麦种质材料萌芽期的抗旱性能初步研究[J]. 山地农业生物学报,2011,30(6):483-486,546
- [28] 王艺陶,周宇飞,李丰先,等. 基于主成分和 SOM 聚类分析的高粱品种萌发期抗旱性鉴定与分类[J]. 作物学报,2014,40(1):110-121

(上接第 845 页)

参考文献

- [1] 刘忠堂. 再谈我国大豆发展问题[J]. 大豆科技,2012,6(4):4-6
- [2] 任红玉,沈能展,张兴文,等. 北方春大豆生育期性状在不同播季及生态区的反应[J]. 中国油料作物学报,2004(1):43-47
- [3] Ullah K, Khan S J, Muhammad S. Genotypic and phenotypic variability, heritability and genetic diversity for yield components in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) germplasm[J]. African J Agric Res, 2011,6(23):5204-5207
- [4] 文自翔,赵团结,盖钧镒,等. 中国栽培及野生大豆的遗传多样性、地理分化和演化关系研究[J]. 科学通报,2009,54(21):3301-3310
- [5] 熊冬金,赵团结,盖钧镒. 中国大豆育成品种亲本分析[J]. 中国农业科学,2008,41(9):2589-2598
- [6] 熊冬金,赵团结,盖钧镒. 1923-2005 年中国大豆育成品种的核心祖先亲本分析[J]. 大豆科学,2007,26(5):642-647
- [7] 张军,赵团结,盖钧镒. 中国东北大豆育成品种遗传多样性和群体遗传结构分析[J]. 作物学报,2008,34(9):1529-1536
- [8] 傅蒙蒙,王燕平,盖钧镒,等. 东北春大豆熟期组的划分与地理分布[J]. 大豆科学,2016(2):181-192
- [9] 傅蒙蒙,王燕平,盖钧镒,等. 东北大豆种质资源生育期性状的生态特征[J]. 大豆科学,2016(4):542-549
- [10] 王玉莲,任海洋,杜维广. 发挥牡丹江地区生态优势促进高蛋白大豆生产[J]. 大豆科技,2010(2):50-51
- [11] 王彬如. 东北地区(包括内蒙)春大豆品种区划[J]. 黑龙江农业科学,1991(5):3-4
- [12] Fehr W R, Caviness C E, Burmood D T, et al. Development description of soybean, *Glycine max* (L.) Merr. [J]. Crop Sci, 1971, 11:929-931
- [13] 邱丽娟,常汝镇. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006
- [14] 孙加梅,王雪梅,王东健,等. 谷子遗传多样性研究进展[J]. 山东农业科学,2013,45(3):33-37
- [15] 胡标林,万勇,李霞,等. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报,2012,38(5):829-839
- [16] 王海岗,贾冠清,智慧,等. 谷子核心种质资源表型遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报,2016,42(1):19-30
- [17] 王海岗,陈凌,王君杰,等. 20 份山西糜子种质资源抗旱性综合评价[J]. 中国农学通报,2014,30(36):115-119
- [18] 陈碧云,许鲲,高桂珍,等. 中国白菜型油菜种质多样性分析[J]. 中国油料作物学报,2012,34(1):25-32
- [19] 寿惠霞,朱文英,朱丹华,等. 浙江省春、夏大豆地方品种资源的遗传分析和主成分分析[J]. 浙江农业学报,1993,5(1):31-37
- [20] 胡建斌,马双武,简在海,等. 中国甜瓜种质资源形态性状遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(4):612-619
- [21] 聂石辉,彭琳,王仙,等. 鹰嘴豆种质资源农艺性状遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2015,16(1):64-70
- [22] 乔玲,陈红霖,王丽侠,等. 国外绿豆种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2015,16(5):986-993