

116份藜麦种质资源萌发期 抗旱性综合评价

朱丽丽^{1,2}, 张发玉³, 安宁⁴, 陈志国^{1,5,6}

(1.中国科学院西北高原生物研究所,青海 西宁 810008; 2.中国科学院大学生命科学学院,北京 100049;

3.海西州农牧业技术推广服务中心,青海 德令哈 817099; 4.青海省农作物种子站,青海 西宁 810000;

5.中国科学院高原生物适应与进化重点实验室,青海 西宁 810008;

6.青海省作物分子育种重点实验室,青海 西宁 810008)

摘要:采用不同浓度的PEG-6000模拟干旱胁迫,对黑藜(黑粒)、青海红(红粒)、柴达木红(红粒)、雪藜(白粒)和青藜1号(白粒)等3个类型的116份藜麦品种进行干旱胁迫试验,确定藜麦萌发期适宜抗旱性鉴定的浓度,并对不同类型藜麦种质资源进行萌发期抗旱鉴定。以发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、芽长、根长、鲜质量和萌发耐旱指数等8个萌发期相关指标为依据,采用主成分分析法、隶属函数法和聚类分析法对参试藜麦种质的抗旱性进行综合评价及分类。结果表明:20%PEG-6000可以作为胁迫试验的适宜浓度;采用此浓度对116份不同来源的藜麦种质资源进行萌发期抗旱性鉴定和各指标值的测定,再结合主成分分析和隶属函数法计算不同藜麦品种的加权隶属函数值,并以此进行抗旱性强弱排序;通过聚类分析将参试材料分为3大类群,其中第2大类群第1亚类群(II₁)的29个藜麦品种抗旱性较好,可以作为后期抗旱品种培育的基础材料。

关键词:藜麦;种质资源;萌发期;抗旱指标;综合评价

中图分类号:S519;S338 **文献标志码:**A

Comprehensive evaluation of drought resistance of 116 quinoa germplasm resources during germination

ZHU Lili^{1,2}, ZHANG Fayu³, AN Ning⁴, CHEN Zhiguo^{1,5,6}

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China;

2. College of Life Sciences, Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China;

3. Haixi Farming and Animal Husbandry Technology Extension Service Center, Delingha, Qinghai 817099, China;

4. Qinghai Province Crop Seed Station, Xining, Qinghai 810000, China; 5. Key Laboratory of Plateau Biological

Adaptation and Evolution, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China;

6. Key Laboratory of Crop Molecular Breeding of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: Different concentrations of PEG-6000 were used to simulate drought stress on 116 quinoa, including Black quinoa (black grain), Qinghaihong (red grain), Qaidam red (red grain), Snow quinoa (white grain) and Qingli 1 (white grain) to determine the appropriate concentration for drought resistance identification during germination. Drought resistance of different types of quinoa germplasm resources during germination was identified. The drought resistance of quinoa cultivars was evaluated and classified by principal component analysis, membership function method and cluster analysis based on 8 indexes of germination stage, including germination rate, germination energy, germination index, vigor index, bud length, root length, fresh mass and drought tolerance index. The results showed that 20% PEG-6000 was the appropriate concentration for stress test. The drought resistance of 116 quinoa germplasm resources from different sources was identified by 20% PEG-6000 and the val-

ues of each index were determined. Then the weighted membership function values of different quinoa cultivars were calculated by principal component analysis and membership function method, and the drought resistance was ranked. The experimental materials were categorized into three groups using cluster analysis. Within the second group, the first subgroup (II₁) comprised 29 quinoa varieties exhibiting strong drought resistance. These varieties are recommended as basic materials for developing drought-resistant strains in subsequent breeding efforts.

Keywords: quinoa; germplasm resources; germination period; drought resistance index; comprehensive evaluation

干旱是最主要的气候灾害之一,其造成的农作物减产远大于其他逆境损失的总和,在所有非生物胁迫中占首位。我国是世界上干旱问题最严重的国家之一,干旱和半干旱地区耕地占全国耕地面积的比例高达 38%,干旱发生频率高,旱灾面积大,耕地沙漠化和水土流失严重,对农业生产及其可持续发展极为不利^[1-3]。因此,除开辟水源、发展节水灌溉、节水栽培等措施之外,筛选及培育优良的抗旱作物品种是节水增效的重要途径之一^[4]。

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.) 是苋科藜属一年生双子叶草本植物,原产于南美洲安第斯山脉,至今已有 5 000 多年的种植历史^[5]。因其种质资源多样和营养价值全面,被视为可以替代粮食的“超级谷物”,在解决未来粮食危机问题上具有较大潜力。藜麦遗传的多样性使其能够适应不同的种植环境,目前已被引种到多个国家和地区,我国是除原产国以外藜麦种植面积最大的国家之一^[6]。藜麦是一种典型的高原作物,具有耐低温、干旱、盐碱及贫瘠等特性^[7]。种子有白、黑、红、棕、灰色等多种类型,但生产中应用的主要为白、黑、红色。

柴达木盆地位于青海高原西北部,属于干旱半干旱荒漠区,是青海省主要农业耕作区,也是我国雨量最少、干旱最重的地区之一。但其独特的地理环境和气候条件恰是培植藜麦的天然沃土,自 2012 年引种藜麦成功后,该地区已成为青海乃至全国的高品质藜麦种植基地^[8-11]。我国对藜麦种质资源的引进和新品种选育研究起步较晚,引进的优良品种资源数量也较少^[7]。青海作为藜麦种植大省,选择抗逆性强、适应性好的自主品种非常重要,该地区藜麦抗逆品种的选育工作亟待加强。

种子萌发期是作物生长发育过程中对外界环境较为敏感的时期,也是作物群体建植和形成的重要阶段,逆境条件下种子萌发阶段的表现对作物的适应性具有决定作用^[12]。藜麦是一种新兴作物,目前对其萌发期抗逆性综合评价的研究相对较少。因此,基于青海高原的气候环境特点,本研究以 PEG-6000 模拟干旱胁迫,对 116 份藜麦种质资源萌发期耐旱性进行鉴定,以期筛选出抗旱能力较强

的藜麦种质,为藜麦种质创新和新品种培育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

为筛选藜麦萌发期抗旱性鉴定 PEG-6000 的最适浓度,设置 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 共 6 个浓度梯度,以蒸馏水为对照 (CK),对黑藜 (BQ)、红藜 (青海红 QHH)、白藜 (雪藜 SQ)、红藜 (柴达木红 QD-MR) 和白藜 (青藜 1 号 QL1) 共 5 个种质材料进行预试验,确定干旱胁迫的最适浓度。

以 116 份藜麦种质为材料 (表 1),挑选籽粒饱满、大小均一、无病虫害且无机械损伤的种子各 6 份,每份 50 粒,处理组和对照组各 3 份。将藜麦种子用 0.3% NaClO 消毒 10 min 后,再用蒸馏水反复冲洗 5 次,置于消过毒的发芽盒内。每个发芽盒铺放两张发芽纸,倒入 10 ml 预试验筛选的 PEG-6000 浓度干旱胁迫液 (20% 浓度),将发芽纸浸湿,3 次重复。标记好发芽盒,恒温培养。培养箱条件:光照 25℃ 16 h/黑暗 20℃ 8 h,湿度 70%。24 h 后开始记录种子萌发情况,每天适量补充相应浓度的胁迫溶液,以保证发芽床湿润,第 8 天结束试验。

1.2 测定指标及方法

(1) 萌发指标测定:发芽开始后,每天进行发芽种子数的调查 (由于藜麦吸水迅速,极易萌发,为统一观测标准,以胚根长 ≥ 2 mm 为萌发标准)^[13-15]。

发芽率 $GR(\%) = \frac{\text{第 8 天发芽种子数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\%$

发芽势 $GE(\%) = \frac{\text{第 3 天发芽种子数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\%$

发芽指数 $GI = \sum (Gt/Dt)$ (Gt 为时间 t 内的发芽数, Dt 为相应的发芽天数)

活力指数 $VI = S \times GI$ (S 为第 8 天正常幼苗平均鲜质量)

种子萌发耐旱指数 ($GDRI$) = 水分胁迫下种子萌发指数 (PIS) / 对照种子萌发指数 (PIC) ($PI = 1.0Rd_2 + 0.75Rd_4 + 0.5Rd_6 + 0.25Rd_8$, Rd_2 、 Rd_4 、 Rd_6 和 Rd_8 分别指第 2、4、6、8 天的种子发芽率)

表 1 品种名称和来源

Table 1 The name and origin of the varieties

编号 Number	品种名称 Variety name	来源 Origin
1~39	WL-1-1, WL-1-2, WL-2-1, WL-3-1, WL-3-2, WL-4-1, WL-4-2, WL-5-1, WL-5-2, WL-5-3, WL-5-4, WL-7-1, WL-7-2, WL-8-1, WL-8-2, WL-8-3, WL-9-1, WL-9-2, WL-11-1(1), WL-11-2(1), WL-12-1(1), WL-12-2(1), WL-11-1(2), WL-11-2(2), WL-12-1(2), WL-12-2(2), WL-12-3, WL-12-4, WL-13-1, WL-13-2, WL-13-3, WL-13-4, WL-14-1, WL-15-1, WL-16-1, WL-17-1, WL-17-2, WL-17-3, WL-17-4	青海乌兰三江沃土生态农业科技有限公司引进 Qinghai Ulan Sanjiang Wotu Ecological Agriculture Technology Co., Ltd. introduced
40~56	LD-5-1-2, LD-10, LD-11-2, LD-12B-1, LD-12B-2, LD-13-2, 2008-2, 2008-3, 2008-4, 2008-7, 2008-12, 藜麦 1 号(1-2) Quinoa 1(1-2), 藜麦 2 号(2-1) Quinoa 2(2-1), 藜麦 2 号(6A-2) Quinoa 2(6A-2), 藜麦 2 号(1-1) Quinoa 2(1-1), 藜麦 2 号(1-2) Quinoa 2(1-2), 藜麦 2 号(2-2) Quinoa 2(2-2)	中国科学院西北高原生物研究所系选品种 The selected species of Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences
57	JL-1	吉林永吉县大田系选 Field selection from Yongji County, Jilin Province
58~61	N6, N7, N8, N12	中国农业科学院引进 Chinese Academy of Agricultural Sciences introduced
62~63	XRD2-1, XRD-6-1	中国科学院西北高原生物研究所都兰香日德系选 Selected from the Duran Xiangride of Qinghai Province of Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences
64~66	YKS2-2, YKS4-1, YKS5-2	青海德令哈一棵树地区品种系选 Selection of cultivars in one tree area of Delingha, Qinghai Province
67~69	SJW7-2-1, SJW7-2-2, SJW7-6-1	青海香日德大田系选 Field selection of Xiangri De, Qinghai Province
70	格尔木-1-2 Ge'ermu-1-2	青海格尔木地区大田系选 Field selection in Golmud area of Qinghai Province
71	DL5-DL30 混选 DL5-DL30 mixed selection	中国科学院西北高原生物研究所青海都兰田间系选 Qinghai Dulan field selection of Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences
72~74	陇藜 3 号 Longli 3, 陇藜 2 号 Longli 2, 陇藜 1 号 Longli 1	甘肃省农业科学院引进 Gansu Academy of Agricultural Sciences introduced
75~78	青藜 3 号 Qingli 3, 青藜 1 号(1) Qingli 1(1), 青藜 2 号 Qingli 2, 青藜 1 号(2) Qingli 1(2)	青海省审定(认定)品种 Varieties approved (identified) by Qinghai Province
79~81	雪藜 Snow quinoa, 黑藜 Black quinoa, 大白藜 Chenopodium quinoa	青海德令哈系选稳定品种 Stable varieties were selected from Delingha line of Qinghai
82~109	DL-1-1, DL-1-2, DL-2-1, DL-2-2, DL-3-1, DL-4-1, DL-4-2, DL-5-1, DL-5-2, DL-5-3, DL-5-4, DL-6-1, DL-6-2, DL-6-3, DL-7-1, DL-7-2, DL-7-3, DL-7-4, DL-8-1, DL-8-2, DL-8-3, DL-8-4, DL-8-5, DL-8-6, DL-8-7, DL-9-1, DL-9-2, DL-9-3	山西稼琪香日德资源圃 Shanxi Jiaqi Xiangride Resource Park
110	XRD 高原锦禾 XRD plateau Jinhe	青海都兰香日德高原锦禾公司田块系选 Field selection of Highland Jinhe Company in Duran Xiangride, Qinghai Province
111~112	贡杂 8 号 Gongza 8, 贡杂 3 号 Gongza 3	西藏农牧学院引进 Xizang Agricultural and Animal Husbandry College introduced
113~114	634921-HX②, 634932-HX③	美国农工大学引进 American Agricultural and Industrial University introduced
115~116	DLH-2, DLH-1	青海德令哈大田系选 Field selection of Delingha, Qinghai Province

(2)种子萌发结束后,每个处理随机选取 5 株幼苗,用直尺测量幼苗长度,用电子分析天平称量幼苗鲜质量。分别计算根长、芽长和各部位的鲜质量,根长(RL)为根和芽接点处到最长根尖的长度;芽长(BL)为子叶与根之间的长度;鲜质量(FW)为种子的胚根和胚芽以及幼叶部分的质量,不包括种子生根发芽后脱落的种皮部分^[16]。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2003 进行数据处理与统计,SPSS 23.0 软件进行主成分分析,综合评价采用模糊数学隶属函数法,TBtools 1.6 软件进行聚类分析。为消除不同藜麦品种遗传背景差异,利用各指标的相对值进行综合评价和聚类分析。各指标相对值=(胁迫

处理的指标值/对照的指标值)×100%^[2, 17-20]。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000 溶液最佳胁迫浓度的筛选

由表 2 可知,不同颜色种皮的藜麦品种在 PEG-6000 浓度为 5%、10% 和 15% 时多数测定指标与 CK 差异不显著,其中 5% 和 10% 的 PEG-6000 还会对藜麦种子萌发产生轻微的促进作用。当 PEG-6000 浓度达到 20% 时,各项萌发指标值开始明显降低,并与 CK 产生显著差异;当 PEG-6000 浓度达到 25% 和 30% 时,藜麦种子萌发受到严重抑制。因此,本研究选择 20% 浓度 PEG-6000 作为抗旱性鉴定的最适浓度。

表 2 不同 PEG-6000 浓度下各类藜麦种子萌发指标

Table 2 Germination indexes of quinoa seeds under different PEG-6000 concentrations									
品种 Variety	PEG 浓度/% PEG concentration	GR/%	GE/%	GI	VI	BL/cm	RL/cm	FW/g	GDRl
黑藜 BQ	0(CK)	92.67a	89.33a	120.205ab	1.515a	2.24a	3.20b	0.0126a	1.000a
	5	87.33a	87.33a	111.346b	1.225b	2.26a	3.80a	0.0110b	0.939a
	10	96.00a	95.33a	128.263a	0.795c	1.62b	3.02b	0.0062c	1.051a
	15	92.00a	88.00a	114.521b	0.366d	1.04c	2.20c	0.0032d	0.983a
	20	64.00b	50.00b	54.338c	0.087e	0.48d	0.64d	0.0016e	0.592b
	25	18.00c	14.00c	16.827d	0.020f	0.38d	0.3de	0.0012ef	0.155c
	30	1.33d	1.33d	1.145e	0.000f	0.00e	0.00e	0.0000f	0.015d
青海红 QHH	0(CK)	95.33a	94.67a	118.607a	1.637b	2.34b	3.88b	0.0138a	1.000a
	5	91.33a	91.33a	123.449a	1.802a	2.92a	7.86a	0.0146a	0.966a
	10	95.33a	95.33a	127.218a	1.221c	2.26b	7.32a	0.0096b	1.009a
	15	79.33a	64.67b	80.831b	0.356d	1.26c	2.64c	0.0044c	0.756b
	20	36.00b	27.33c	30.560c	0.0367e	0.44d	0.66d	0.0012d	0.320c
	25	11.33c	11.33d	9.235d	0.013e	0.48d	0.44d	0.0014d	0.088d
	30	0.00c	0.00d	0.000d	0.000e	0.00e	0.00d	0.0000d	0.000d
雪藜 SQ	0(CK)	94.00a	91.33a	119.295a	1.169a	2.32a	3.10b	0.0098a	1.000a
	5	92.67a	92.67a	122.594a	0.956b	2.10b	3.58ab	0.0078b	1.005a
	10	96.00a	92.67a	122.652a	0.859c	1.66c	4.04a	0.0070b	1.016a
	15	77.33b	70.67b	78.096b	0.234d	0.84d	1.44c	0.0030c	0.782b
	20	23.33c	17.33c	24.508c	0.034e	0.52e	0.34d	0.0014d	0.217c
	25	6.00d	6.00d	5.654d	0.009e	0.46e	0.26d	0.0016d	0.063d
	30	0.00d	0.00e	0.000d	0.000e	0.00f	0.00d	0.0000e	0.000d
柴达木红 QDMR	0(CK)	81.33ab	78.67a	92.582a	1.167a	2.02a	2.34b	0.0126a	1.000a
	5	84.67a	81.33a	104.000a	1.206a	2.10a	3.86a	0.0116a	1.046a
	10	71.33bc	67.33b	77.604b	0.683b	1.78b	2.46b	0.0088b	0.856b
	15	67.33c	58.00b	72.779b	0.131c	0.70c	0.86c	0.0018c	0.760b
	20	22.67d	18.00c	21.463c	0.043cd	0.50d	0.42d	0.0020c	0.230c
	25	0.67e	0.00d	0.295d	0.000d	0.00e	0.00e	0.0000c	0.005d
	30	0.00e	0.00d	0.000d	0.000d	0.00e	0.00e	0.0000c	0.000d
青藜 1 号 QL1	0(CK)	87.33a	87.33a	101.013a	1.374a	2.40a	2.42a	0.0136a	1.000a
	5	87.33a	86.00a	103.458a	1.179b	1.80b	2.58a	0.0114b	1.003a
	10	85.33a	83.33a	97.629a	0.547c	1.44c	1.96b	0.0056c	0.985a
	15	82.67a	81.33a	90.949a	0.364d	0.88d	1.70b	0.0040c	0.944a
	20	22.67b	10.67b	12.113b	0.017e	0.44e	0.44c	0.0014d	0.167b
	25	6.00bc	2.67b	4.059b	0.006e	0.44e	0.34c	0.0014d	0.050b
	30	0.00c	0.00b	0.000b	0.000e	0.00f	0.00c	0.0000d	0.000b

注:同列不同小写字母表示不同干旱胁迫条件下的差异显著性($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters in the same column indicate the difference significance under different drought stress conditions ($P<0.05$).

2.2 藜麦种质资源萌发期相关指标分析

利用 20% PEG-6000 模拟干旱胁迫,对 116 份不同来源的藜麦种质资源进行萌发期抗旱性鉴定,统计分析 7 个与萌发相关的指标变异情况(表 3)。通过各指标变化率可以看出,干旱胁迫使藜麦萌发期的生长受到抑制,且不同指标受抑制程度存在差异。其中,活力指数受抑制程度最大,其相对值变异系数也最高,说明该指标易受干旱胁迫影响,可将其作为重要的抗旱性筛选指标。另外,各指标在正常条件下的变异系数为 5.18%~31.31%,而 20%浓度干旱胁迫下的变异系数为 48.98%~89.49%,比对照增加数倍,说明以 20%浓度 PEG-6000 进行抗旱性鉴定效果明显。

2.3 藜麦种质资源萌发期耐旱性主成分分析

对藜麦种质资源在干旱胁迫下的 8 个测定指标进行主成分分析(表 4)。根据特征根值大于 1 的原则,将 8 个测定指标提取为两个主成分(PC1 和 PC2),其贡献率分别为 56.238%和 36.381%,累积贡

献率为 92.619%,能够代表测定指标的绝大部分信息。PC1 中,相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数和相对活力指数的载荷值较高,可以反映不同类型藜麦种子的萌发状况。PC2 中,相对芽长、相对根长和相对鲜质量的载荷值较高,可以反映不同藜麦的生长状况。通过计算各指标的权重可知,相对活力指数在所有指标中权重最大,可以作为抗旱性评价的主要指标,这与前文分析结果一致。

2.4 藜麦种质资源萌发期抗旱性综合评价

在多指标评价体系中,各指标的重要程度存在较大差别。只依据主成分分析进行综合评价,并不能完全反映出各指标对评价结果的影响程度。因此,采用模糊数学隶属函数法,以 8 个指标相对值为依据并结合权重,对 116 份藜麦种质在 20%浓度 PEG-6000 干旱胁迫下的抗旱性进行综合评价和排序(表 5)。隶属值越高代表抗旱能力越强,参试的 116 份材料中,抗旱性最强的品种是 44 号(LD-12B-2),隶属值为 0.7696;最弱的品种是 87 号(DL-4-1),完全不能萌发。

表 3 藜麦种质资源萌发指标统计分析

Table 3 Statistical analysis of germination indexes of quinoa germplasm resources

处理 Treatment	项目 Item	GR/%	GE/%	GI	VI	BL/cm	RL/cm	FW/g
CK	最大值 Maximum value	100.00	100.00	135.89	2.82	4.24	11.00	0.021
	最小值 Minimum value	76.00	76.00	97.28	1.07	1.64	1.04	0.008
	平均值 Average value	95.94	95.84	128.50	1.93	2.73	5.57	0.015
	标准差 Standard deviation	4.98	4.97	7.86	0.39	0.52	1.75	0.003
	变异系数 CV/%	5.19	5.18	6.11	20.44	19.21	31.31	20.210
20% PEG-6000	最大值 Maximum value	98.67	98.00	122.84	0.74	1.98	10.62	0.014
	最小值 Minimum value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
	平均值 Average value	46.40	41.07	42.89	0.16	0.92	1.41	0.004
	标准差 Standard deviation	25.21	26.81	29.88	0.14	0.45	1.26	0.003
	变异系数 CV/%	54.33	65.27	69.66	89.38	48.98	89.49	68.380
变化率 Rate of change	平均值 Average value	-0.52	-0.57	-0.67	-0.92	-0.66	-0.75	-0.730
	变异系数 CV/%	9.47	11.60	10.40	3.37	1.55	1.86	2.380

注:变化率=(处理组数值-对照组数值)/对照组数值;“-”表示较对照减少。
Note: Rate of change = (value of treatment group - value of control group)/value of control group; “-” indicates a decrease compared with the control.

表 4 测定指标主成分分析及权重值

Table 4 Principal component analysis and weight value of indicators

项目 Item	特征向量 Eigenvector								特征值 Eigen value	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Accumulative contribution rate
	R_{GR}	R_{GE}	R_{GI}	R_{VI}	R_{BL}	R_{RL}	R_{FW}	$GDRI$			
主成分 1 PC1	0.972	0.964	0.976	0.799	0.135	0.260	0.046	0.972	4.499	56.238	56.238
主成分 2 PC2	-0.165	-0.238	-0.172	0.474	0.941	0.834	0.972	-0.215	2.910	36.381	92.619
权重 Weight	0.131	0.138	0.133	0.141	0.108	0.112	0.101	0.136			
排序 Rank	5	2	4	1	7	6	8	3			

注: R_{GR} :相对发芽率; R_{GE} :相对发芽势; R_{GI} :相对发芽指数; R_{VI} :相对活力指数; R_{BL} :相对芽长; R_{RL} :相对根长; R_{FW} :相对鲜质量。下同。
Note: R_{GR} : Relative germination rate; R_{GE} : Relative germination energy; R_{GI} : Relative germination index; R_{VI} : Relative vigor index; R_{BL} : Relative bud length; R_{RL} : Relative root length; R_{FW} : Relative fresh mass. The same below.

表 5 藜麦种质资源抗旱性综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of drought resistance of quinoa germplasm resources

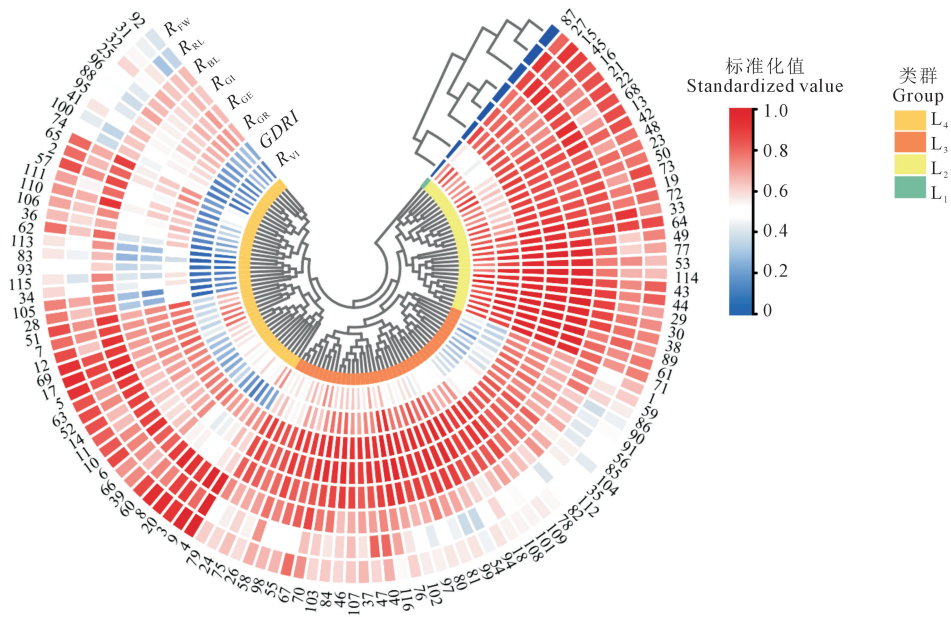
编号 Number	加权隶属函数值 Weight subordinate function value	排名 Rank	编号 Number	加权隶属函数值 Weight subordinate function value	排名 Rank	编号 Number	加权隶属函数值 Weight subordinate function value	排名 Rank
1	0.2325	86	40	0.5067	21	79	0.3526	63
2	0.2252	88	41	0.1135	108	80	0.4584	37
3	0.3067	73	42	0.5621	15	81	0.4871	25
4	0.4673	34	43	0.7574	2	82	0.2649	81
5	0.4741	30	44	0.7696	1	83	0.0640	115
6	0.3111	70	45	0.4774	29	84	0.4731	32
7	0.3253	65	46	0.4861	26	85	0.2141	92
8	0.3139	67	47	0.4692	33	86	0.2302	87
9	0.3993	54	48	0.4455	40	87	0.0000	116
10	0.2712	78	49	0.6256	13	88	0.1319	102
11	0.2705	79	50	0.4472	39	89	0.7081	6
12	0.3657	61	51	0.3607	62	90	0.2019	94
13	0.5393	18	52	0.3134	68	91	0.2394	85
14	0.2905	74	53	0.5817	14	92	0.1421	101
15	0.4858	27	54	0.4526	38	93	0.0714	114
16	0.3869	56	55	0.4039	52	94	0.4448	42
17	0.4395	45	56	0.2056	93	95	0.1187	107
18	0.3860	57	57	0.2177	90	96	0.1295	103
19	0.5279	19	58	0.3741	59	97	0.4454	41
20	0.3107	71	59	0.2210	89	98	0.4388	46
21	0.4136	49	60	0.2690	80	99	0.4611	36
22	0.4014	53	61	0.6658	8	100	0.0959	111
23	0.4892	24	62	0.1553	100	101	0.3873	55
24	0.3807	58	63	0.3182	66	102	0.4431	43
25	0.1691	95	64	0.6505	10	103	0.4817	28
26	0.3072	72	65	0.2452	84	104	0.2863	76
27	0.4738	31	66	0.2475	83	105	0.1246	105
28	0.1222	106	67	0.4346	47	106	0.1570	99
29	0.7392	4	68	0.4673	35	107	0.4412	44
30	0.7169	5	69	0.4295	48	108	0.3712	60
31	0.1654	97	70	0.4982	23	109	0.4089	51
32	0.1584	98	71	0.6347	12	110	0.2171	91
33	0.6780	7	72	0.5278	20	111	0.1675	96
34	0.1109	109	73	0.5047	22	112	0.2884	75
35	0.2560	82	74	0.0871	112	113	0.0812	113
36	0.1263	104	75	0.3381	64	114	0.6381	11
37	0.4123	50	76	0.5599	16	115	0.0984	110
38	0.7444	3	77	0.6639	9	116	0.5555	17
39	0.2847	77	78	0.3132	69			

2.5 藜麦种质资源抗旱性聚类分析

聚类分析结果显示(图 1),116 份材料主要可以聚为 3 大类群。其中,第 1 大类群(L₁)仅包含 87 号藜麦,其抗旱性最差,为干旱敏感型;第 2 大类群包含 2 个亚类群(L₂和 L₃),共 70 个品种,其中第 1 亚类群(L₂)的 29 个藜麦种质抗旱性较好,占总种质资源的 25%;第 3 大类群(L₄)包含 45 个品种,抗旱性相对较弱。

基于聚类分析的结果进一步对不同类群间藜麦种质资源萌发期耐旱性进行差异分析(表 6),可知藜麦种质资源的各项耐旱指标在不同类群间存

在显著差异。其中,Ⅱ₁的 29 个藜麦品种各指标表现都优于其他品种;Ⅱ₂各指标除根长以外,其他指标均仅次于Ⅱ₁的 29 个品种;第Ⅲ类群的各指标表现在类群间有较大波动,芽长和幼苗鲜质量表现较好,与抗旱性最好的 29 个品种无显著差异,活力指数与Ⅱ₂无显著差异,根长显著高于Ⅱ₂,其他指标表现最差。说明抗旱性较强的品种在干旱条件下各指标能够均衡发展,从而增强自身抗旱能力,而抗旱性弱的品种由于某些指标在干旱条件下被严重抑制而降低了自身抗旱能力,被抑制的指标越多,抗旱性越差。



注:L₁:第 1 大类群;L₂:第 2 大类群的第 1 亚类群;L₃:第 2 大类群的第 2 亚类群;L₄:第 3 大类群。

Note: L₁: The first group; L₂: The first subgroup of the second group; L₃: The second subgroup of the second group; L₄: The third group.

图 1 116 份藜麦种质资源及相关指标聚类

Fig.1 Clustering of 116 quinoa germplasm resources and related indicators

表 6 不同类群藜麦种质资源萌发期耐旱性差异比较

Table 6 Comparison of drought tolerance of different groups of quinoa germplasm resources at germination stage

类群 Group	数量 Number	$R_{GR}/\%$	$R_{GE}/\%$	$R_{CI}/\%$	$R_{VI}/\%$	$R_{BL}/\%$	$R_{RL}/\%$	$R_{FW}/\%$	$GDRI$	加权隶属函数值 Weight subordinate function value
I (L ₁)	1	0.00d	0.00d	0.00d	0.00c	0.00c	0.00d	0.00c	0.00d	0.0000d
II ₁ (L ₂)	29	71.06a	66.64a	56.29a	18.33a	45.45a	45.25a	36.35a	0.67a	0.5767a
II ₂ (L ₃)	41	61.06b	57.13b	41.25b	5.65b	22.44b	15.77c	13.66b	0.56b	0.3808b
III (L ₄)	45	23.51c	15.69c	12.41c	4.63b	39.73a	30.73b	34.07a	0.17c	0.2281c

注:同列不同小写字母表示不同类群间的差异显著性($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters in the same column indicate the significance of the difference between different groups ($P<0.05$).

3 讨论与结论

萌发期抗旱性评价是判定新品种抗旱性的重要手段^[21-22]。目前大多数研究方法采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫对作物种子进行萌发期抗旱性鉴定^[23-26]。张娟伟等^[18]、郝振帆等^[21]对粳稻和猪屎豆种质资源进行抗旱种质筛选,发现 15% PEG-6000 是其萌发期抗旱性鉴定的最适浓度;李玲等^[19]在豌豆种质资源萌发期抗旱性的研究中发现,22% PEG-6000 可以达到较好的筛选效果;张海平等^[2]在大豆种质资源的抗旱性测定中发现,16% PEG-6000 为最佳筛选浓度。本试验结果表明,20% PEG-6000 是评价藜麦萌发期抗旱性较适宜的浓度。

植物的抗旱性是多个因素共同控制的数量性

状,采用多指标多方法相结合的综合评价体系才能全面、准确、客观地反映不同种质的抗旱性能^[27]。发芽率、发芽势和发芽指数是种子能否萌发及萌发快慢最直接的表现,芽长和根长能够直观反映种苗转化情况,活力指数、幼苗鲜质量和萌发耐旱指数能综合反映种子萌发和生长的状况,以往的研究也表明,以上几个指标能够较好地表征藜麦萌发期的抗逆性^[12, 24, 28-30]。因此,本研究采用这 8 个指标对不同藜麦种质萌发特性进行调查,以期更准确、更全面地判断其抗旱能力强弱。此外,多数作物抗旱性评价工作采用等权重的方法,忽略了不同指标对干旱胁迫的敏感程度。本研究结合主成分分析和隶属函数法,充分考虑了各项指标的权重,对藜麦种质资源萌发期的抗旱性进行综合评价,从而消除了各指标因受干旱影响程度不同所带来的误差。

通过聚类分析,将 116 份藜麦种质资源聚为 3 大类群,其中第 2 大类群第 1 亚类群的 29 个品种抗旱性最好。

参考文献:

- [1] 杨秀丽, 宁东贤, 赵玉坤, 等. PEG 渗透胁迫条件下 26 份花生品种萌发期抗旱性评价[J]. 上海农业学报, 2021, 37(6): 35-42.
YANG X L, NING D X, ZHAO Y K, et al. Evaluation of 26 peanuts drought resistance under PEG osmotic treatment at germination stage[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2021, 37(6): 35-42.
- [2] 张海平, 张俊峰, 陈妍, 等. 大豆种质资源萌发期耐旱性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 130-138.
ZHANG H P, ZHANG J F, CHEN Y, et al. Identification and evaluation of soybean germplasm resources for drought tolerance during germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(1): 130-138.
- [3] 樊瑀, 董淑琦, 原向阳, 等. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6): 42-54.
FAN Y, DONG S Q, YUAN X Y, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(6): 42-54.
- [4] DING G H, LIU X L, MA D R, et al. Responses of weedy rice to drought stress at germination and seedling stages[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 316-317: 451-459.
- [5] 刘洋, 闫殿海, 张玉清, 等. 青海藜麦的发展现状与发展中存在的问题[J]. 青海农林科技, 2015, (4): 31-34.
LIU Y, YAN D H, ZHANG Y Q, et al. The current situation and problems in development of *Chenopodium quinoa* in Qinghai[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2015, (4): 31-34.
- [6] 刘洋, 闫殿海, 毛玉金, 等. 藜麦在青海的引种及适应性鉴定方法探讨[J]. 青海农林科技, 2016, (2): 61-63.
LIU Y, YAN D H, MAO Y J, et al. Introduction and investigate some methods for evaluating the adaptability of *Chenopodium quinoa* in Qinghai[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2016, (2): 61-63.
- [7] 王丽娜, 任翠梅, 王明泽, 等. 中国藜麦种质资源分布及研究现状[J]. 黑龙江农业科学, 2020, (12): 142-145.
WANG L N, REN C M, WANG M Z, et al. Distribution and research status of quinoa germplasm resources in China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020, (12): 142-145.
- [8] 温婷婷, 王紫文, 余迪, 等. 柴达木盆地藜麦气候品质评估[J]. 青海科技, 2020, 27(6): 47-50, 86.
WEN T T, WANG Z W, YU D, et al. Climate quality assessment of quinoa in Qaidam Basin[J]. Qinghai Science and Technology, 2020, 27(6): 47-50, 86.
- [9] 孙翠花, 陈志国. 青海高原气候条件与农作物高产分析[J]. 安徽农学通报, 2006, 12(6): 84-86.
SUN C H, CHEN Z G. Analysis of climatic conditions and high yield of crops in Qinghai Plateau[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2006, 12(6): 84-86.
- [10] 李红梅. 柴达木盆地气候变化对植被的影响分析[J]. 草业学报, 2018, 27(3): 13-23.
LI H M. Analysis on the impact of climate change on vegetation in the Qaidam Basin[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(3): 13-23.
- [11] 王发科, 祁贵明, 苟日多杰, 等. 柴达木盆地气候变化对生态环境的影响[J]. 青海环境, 2008, 18(2): 70-75.
WANG F K, QI G M, GOURI D J, et al. Impact of climate change on ecological environment in Qaidam Basin[J]. Journal of Qinghai Environment, 2008, 18(2): 70-75.
- [12] 王志恒, 黄思麒, 李成虎, 等. 13 种藜麦萌发期抗逆性综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 25-36.
WANG Z H, HUANG S Q, LI C H, et al. Comprehensive evaluation of stress resistance during germination of 13 quinoa species[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 25-36.
- [13] 姚庆, 秦培友, 苗吴翠, 等. PEG 模拟干旱胁迫下藜麦萌发期抗旱性评价[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(9): 1588-1596.
YAO Q, QIN P Y, MIAO H C, et al. Drought resistance evaluation of quinoa during germination under PEG simulated drought stress[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(9): 1588-1596.
- [14] 陈明君, 蒙柳贝, 李玥, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对藜麦种子萌发的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(11): 34-40.
CHEN M J, MENG L B, LI Y, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on seed germination of *Chenopodium quinoa*[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2021, 49(11): 34-40.
- [15] 张斌, 马德源, 范仲学, 等. PEG 胁迫下藜麦品种萌发期抗旱性鉴定[J]. 山东农业科学, 2018, 50(12): 30-34.
ZHANG B, MA D Y, FAN Z X, et al. Identification of drought tolerance in germination period of quinoa varieties under PEG stress[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(12): 30-34.
- [16] 温日宇, 刘建霞, 张珍华, 等. 干旱胁迫对不同藜麦种子萌发及生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2019, (1): 121-126.
WEN R Y, LIU J X, ZHANG Z H, et al. Effects of drought stress on germination and physiological characteristics of different quinoa seeds[J]. Crops, 2019, (1): 121-126.
- [17] 朱世杨, 张小玲, 刘庆, 等. PEG 模拟干旱胁迫下花椰菜种质资源萌发特性及抗旱性评价[J]. 核农学报, 2019, 33(9): 1833-1840.
ZHU S Y, ZHANG X L, LIU Q, et al. Germination characteristics and drought resistance of cauliflower germplasm resources under PEG simulated drought stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(9): 1833-1840.
- [18] 张娟伟, 石亚飞, 路旭平, 等. 种子萌发期梗稻种质资源耐旱性综合评价[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2093-2103.
ZHANG J W, SHI Y F, LU X P, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of japonica rice germplasm resources at seed germination stage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(11): 2093-2103.
- [19] 李玲, 沈宝宇, 张天静, 等. 豌豆种质资源芽期耐旱性评价及耐旱种质筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 778-785.
LI L, SHEN B Y, ZHANG T J, et al. Evaluation and screening of pea (*Pisum sativum*) germplasm resources for drought resistance during germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 778-785.
- [20] 刘翔, 左凯峰, 许伟, 等. PEG 6000 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜芽期及苗期抗旱指标筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 66-70, 83.
LIU X, ZUO K F, XU W, et al. Selecting drought resistance indexes of *Brassica napus* L. under PEG 6000 simulated drought stress at germination and seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 66-70, 83.
- [21] 郝振帆, 刘国道, 杨虎彪. 猪屎豆种质资源萌发期的耐旱性评价[J]. 热带作物学报, 2021, 42(10): 2789-2797.
HAO Z F, LIU G D, YANG H B. Evaluation of drought tolerance of

Crotalaria pallida in germination period[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(10): 2789-2797.

[22] 赵愉风,周清元,郜欢欢,等. 菜用豌豆品种资源萌发期耐旱性鉴定[J]. 核农学报, 2019, 33(1): 48-59.

ZHAO Y F, ZHOU Q Y, GAO H H, et al. Germplasm identification of drought tolerance of vegetable peas during seeds germination stage [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(1): 48-59.

[23] BASHA P O, SUDARSANAM G, REDDY M M S, et al. Effect of PEG induced water stress on germination and seedling development of tomato germplasm[J]. International Journal of Recent Scientific Research, 2015, 6(5): 4044-4049.

[24] BADR A, EL-SHAZLY H H, TARAWNEH R A, et al. Screening for drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) germplasm using germination and seedling traits under simulated drought conditions [J]. Plants, 2020, 9(5): 565.

[25] 陈卫国,张政,史雨刚,等. 211 份小麦种质资源抗旱性的评价[J]. 作物杂志, 2020,(4): 53-63.

CHEN W G, ZHANG Z, SHI Y G, et al. Drought-tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources[J]. Crops, 2020,(4): 53-63.

[26] 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.

TIAN Y S, XIE Z M, WU X D, et al. Identification of drought tolerance of rice germplasm during germination period [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 173-180.

[27] 汪灿,周棱波,张国兵,等. 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.

WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Identification and indices screening of drought resistance in job's tears germplasm resources at germination stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(5): 846-859.

[28] 张紫薇,庞春花,张永清,等. 等渗 NaCl 和 PEG 胁迫及复水处理对藜麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 作物杂志, 2017,(1): 119-126.

ZHANG Z W, PANG C H, ZHANG Y Q, et al. Effects of iso-osmotic NaCl and PEG stress and rewatering on seed germination and seedling growth of quinoa[J]. Crops, 2017,(1): 119-126.

[29] MUNIR H, BASRA S M A, CHEEMA M, et al. Phenotypic flexibility in exotic quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm for seedling vigor and viability[J]. Pakistan Journal of Agricultural Research, 2011, 48(4): 255-261.

[30] 王志恒,徐中伟,周吴艳,等. 藜麦种子萌发阶段响应干旱和盐胁迫变化的综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1033-1042.

WANG Z H, XU Z W, ZHOU W Y, et al. Comprehensive evaluation of quinoa seed responses to drought and salt stress during germination [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 1033-1042.

(上接第 13 页)

[23] 张祯勇,高明文,徐国伦,等. 基于 R 语言的 GGE 双标图在玉米品种区域试验中的应用[J].中国农学通报,2014,30(34):238-243.

ZHANG Z Y, GAO M W, XU G L, et al. Application of GGE-biplot based on R language in regional trial of maize varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(34): 238-243.

[24] 曹广才. 黄土高原食用豆类种植[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.

CAO G C. Planting of edible beans in Loess Plateau[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016.

[25] 王丽侠,程须珍,王素华. 绿豆种质资源、育种及遗传研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1519-1527.

WANG L X, CHENG X Z, WANG S H. Advances in research on genetic resources, breeding and genetics of mungbean (*Vigna radiata* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1519-1527.

[26] 张香粉,袁晓春,贾文华,等. 2016-2021 年河南省小麦品种审定和推广情况分析[J]. 种业导刊, 2022,(2): 3-5.

ZHANG X F, YUAN X C, JIA W H, et al. Analysis of wheat variety certification and promotion in Henan province from 2016 to 2021[J]. Journal of Seed Industry Guide, 2022,(2): 3-5.

[27] 邓伟,张新明. 中国水稻种业发展历程研究[J]. 中国种业, 2022,(11): 1-10.

DENG W, ZHANG X M. Research on the development history of rice seed industry in China[J]. China Seed Industry, 2022,(11): 1-10.

[28] 卢实,李穆,高婷婷,等. 1999-2018 年间国审玉米品种遗传产量增益及产量潜力分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(21): 1-7.

LU S, LI M, GAO T T, et al. National certified maize varieties during 1999-2018:analysis of genetic yield gain and yield potential[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(21): 1-7.

[29] 赵丽红,冯自力,魏锋,等. 2015-2019 年河南省棉花品种区域试验参试品种(系)抗枯萎黄萎病性评述[J]. 中国棉花, 2021, 48(5): 33-36.

ZHAO L H, FENG Z L, WEI F, et al. Review on the fusarium wilt and verticillium wilt resistance of cotton varieties in the regional test of Henan province from 2015 to 2019[J]. China Cotton, 2021, 48(5): 33-36.

[30] 张海斌,吴晓华,于美玲,等. 内蒙古区域试验小麦品种(系)籽粒产量 AMMI 模型分析[J]. 作物杂志, 2023,(3): 27-34.

ZHANG H B, WU X H, YU M L, et al. AMMI model analysis of grain yield of wheat varieties (lines) in Inner Mongolia regional trials [J]. Crops, 2023,(3): 27-34.

[31] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[32] Ю.Б.ЛОБАЧЕВ,陈忠良.矮秆基因 Rht1 在小麦育种中的应用[J]. 麦类作物学报, 1990,(6): 34-36.

Ю.Б.ЛОБАЧЕВ, CHEN Z L. Application of the dwarf gene Rht1 in wheat breeding[J]. Journal of Triticeae Crops, 1990,(6): 34-36.

[33] 邓景扬,纪凤高. 显性雄性不育核基因 Ta1 在小麦育种上的价值与主要利用途径[J]. 中国农业科学, 1983, 16(4): 6-11.

DENG J Y, JI F G. The value and utilization of the dominant gene Ta1 of male-sterility in wheat breeding [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1983, 16(4): 6-11.

[34] 张炯,严斌,高营,等. 蚕豆种质资源主要农艺性状遗传多样性分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(6): 1109-1114, 1118.

ZHANG J, YAN B, GAO Y, et al. Genetic diversity analysis of main agronomic traits of broad bean germplasm resources [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(6): 1109-1114, 1118.