



萌发期耐高温大豆种质资源筛选及耐热指标评价

郭小红¹, 韦清源¹, 汤复跃¹, 陈文杰¹, 梁江¹, 谢甫缙², 陈渊¹

(1. 广西壮族自治区农业科学院 经济作物研究所, 广西 南宁 530007; 2. 沈阳农业大学 大豆研究所, 辽宁 沈阳 110866)

摘要:为筛选萌发期耐高温大豆种质资源,建立高效便捷的耐热评价体系,本研究选用华南地区育成品种和广西壮族自治区积累的主要育种材料(共计1 124份)为研究对象,分别在25和38℃温度处理下测定大豆种子的发芽率,以38℃/25℃的相对发芽率评价了萌发期大豆种质资源的耐热性,探讨了籽粒的形态、比重、容重和品质性状与相对发芽率的相关性并筛选籽粒耐高温性的最适评价指标。结果表明:高温胁迫降低了大豆种质的发芽率,且不同品(系)的发芽率存在显著差异。根据38℃/25℃的相对发芽率的差异,筛选出78份强耐热种质资源,其中有3份种质资源的相对发芽率为100%,分别为都安青皮豆、南豆35和14夏G8-65。春大豆耐热种质占有率显著高于夏大豆;有色种皮品(系)中耐高温材料占有率高于黄色种皮种质。相关分析表明,大豆萌发期的耐热性与籽粒的粒型指数、表面积、百粒重和蛋白质含量呈极显著负相关,与容重和比重呈极显著正相关。逐步回归和通径分析表明,大豆种质萌发期的耐热性与粒型指数、百粒重、容重和比重的关系最为密切。大豆籽粒的容重和耐热性均与种子的粒型指数和比重极显著正相关,与百粒重极显著负相关,因此籽粒容重较适合作为大豆萌发期耐热性强弱的田间初步评价指标。

关键词:大豆;高温胁迫;资源评价;粒型指数;比重;容重

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Screening of High Temperature Tolerant Soybean Germplasms and Evaluation of Heat-tolerant Indexes During Germination Stage

GUO Xiao-hong¹, WEI Qing-yuan¹, TANG Fu-yue¹, CHEN Wen-jie¹, LIANG Jiang¹, XIE Fu-ti², CHEN Yuan¹

(1. Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2. Soybean Research Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to select the heat-tolerant soybean germplasms and establish efficient and convenient evaluation system during the germination stage. 1 124 varieties (lines) including the released cultivars in South China and main breeding germplasm of Guangxi were selected to test the seed germination rate at 25 and 38℃, respectively. Then we used the relative germination rate at 38℃/25℃ to evaluate the high-temperature tolerance of soybean at germination stage, discussed the correlation between the morphological traits, specific gravity, bulk density, quality traits of seeds and the relative germination rate, and select optimal index for seed heat tolerance screening. The germination rate of soybean decreased at high temperatures, and there was a significant difference in germination rate among different varieties. 78 high heat-tolerant germplasm were screened out by the relative germination rate, and three varieties including Du'anqingpidou, Nandou 35, and 14-Xia-G8-65 had a relative germination rate of 100%. Moreover, the percentage of heat-tolerant germplasm in spring soybean was significantly higher than that of summer soybean, and the percentage of heat-tolerant germplasm in non-yellow seed coats was higher than that of the yellow seed coat. Correlation analysis showed that the heat tolerance of soybean at the germination stage was negatively correlated with seed shape index, surface area, 100-seed weight, and protein content, but significantly positively correlated with bulk density and specific gravity. Stepwise regression and path analysis showed that the heat tolerance of soybean at the germination stage was closely related to the seed shape index, 100-seed weight, bulk density, and specific gravity. The bulk density of soybean seeds was positively correlated with seed shape index and specific gravity, and negatively correlated with 100-seed weight. Therefore, it was suggested that the bulk density could be used as the primary evaluation index for the heat-tolerant soybean germplasm.

Keywords: soybean; high temperature stress; germplasm evaluation; seed shape index; specific gravity; bulk density

高温是影响我国南方大豆生产较常见的逆境之一^[1]。高温胁迫下大豆叶片的解剖结构发生畸变,造成膜脂过氧化,从而降低了叶片的光合作用

能力,阻碍植株的生长^[2-3]。在开花期遇到高温时,花粉的活力及萌发率下降,严重时甚至花粉败育,这将显著降低大豆的结荚率^[4-5],难以保证大豆的

收稿日期:2022-02-27

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-CES30);广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科2019M24);广西自然科学基金(2019GXNSFBA185007)。

第一作者:郭小红(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事大豆遗传育种与栽培生理研究。E-mail:kabakebang@126.com。

通讯作者:陈渊(1971—),男,学士,研究员,主要从事大豆育种和栽培研究。E-mail:chenyuan500@126.com。

产量。萌发期是植物生长的起始阶段,同时也是易受环境影响的重要时期,其中温度是大豆种子萌发阶段的主要环境影响因子。有研究表明,土壤温度为25~35℃时是大豆种子萌发的最佳时机,胚轴的伸长速率会随着温度的升高而增加,在30℃时达到最大值,当温度高于37℃时,发芽率随温度的升高而显著下降,在40℃时种子停止萌发^[6-8]。在相同的高温环境下大豆种子发芽率存在品种(系)间的差异,说明种子萌发受遗传因素影响^[9]。Emerson和Minor^[10]对北美地区生育期组VIII、IX和X的289个品系进行室内高温筛选,发现48个品系在32和38℃两个温度下发芽率无显著差异,在大田研究的基础上综合筛选出4个萌发期强耐高温的大豆种质资源。宋晓昆等^[11]在萌发期进行38℃高温处理,发现大豆萌发期耐热性与籽粒蛋白含量成正比,而与脂肪含量和籽粒大小成反比。

中国南方地区以夏大豆生产为主,在播种期常遇高温胁迫,华南地区尤为显著。高温时大豆种子在土壤中易发生霉烂^[12-13],造成田间缺苗断垄,显著降低田间出苗率,或出现较多畸形苗。目前,生产上应对高温引起的田间缺苗问题,一般采取加大播种量、补种或育苗移栽的方式,但成本高,且建成的群体整齐度差,严重影响南方夏大豆的产量和品质。而通过对种质资源的评价,选育耐热性强的品种是应对高温胁迫的重要途径。有关大豆对高温逆境胁迫响应的研究报道较多,且多集中在生殖生长期高温对籽粒产量和品质影响的研究^[14-17],有关大豆种子萌发期耐高温及其与籽粒性状关系的研究尚鲜见报道。本研究旨在筛选萌发期耐高温大豆种质资源,评价高效便捷的耐热性鉴定指标,为大豆耐高温育种和高温胁迫相关研究提供基础材料,并确定田间简易无损的耐热性评价指标,为耐高温品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试种质主要为南方地区育成品(系),广西地方品种,以及本团队积累的重要育种中间材料,包括春大豆517份;夏大豆617份,共计1124份(附表1)。

1.2 试验设计

在2020年7月15日将所有供试材料同期播种于广西农业科学院明阳基地,成熟收获后先将植株放置于19℃空调室中,待所有品种收获完成且低温干燥后统一人工脱粒。

以华南地区主栽品种华春6号、桂春15号、华

夏9号和桂夏7号为材料,在智能人工气候箱中进行萌发试验,设置35,36,37,38和39℃共5个高温处理,以25℃处理为对照,50粒种子为1组,3次重复,确定最适胁迫温度。再将1124份大豆种质放置于25℃和最适胁迫温度的智能人工气候箱中进行萌发试验,50粒种子为1组,3次重复。

根据各大豆种质籽粒相对发芽率,采用相关分析法、逐步分析法和通径分析法分析籽粒萌发期耐热性与大豆籽粒主要性状的关系,筛选大豆种质籽粒耐热性的最适评价指标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 种子发芽率的测定 参照陈文杰等^[18]的方法,将干燥种子在75%的酒精中消毒5s,自然晾干,然后采用发芽盒纸上发芽法^[19]进行萌发试验。在第4天测定发芽率,胚根伸长达1cm以上即为发芽。

发芽率(%) = 第4天发芽种子数 / (种子总数 - 硬实粒) × 100

相对发芽率(%) = 高温处理的发芽率 / 25℃处理的发芽率 × 100

1.3.2 籽粒特征性状与品质测定 使用TPKZ-3考种仪测定大豆种子的粒型指数和籽粒表面积;利用分析天平称取各供试大豆品(系)的百粒重;参照刘文博^[20]的方法测定大豆种子的容重;使用排水法^[20]测定种子的比重;大豆种子的蛋白质和脂肪含量使用DA7200多功能近红外分析仪测定,每个大豆品(系)样品重复3次,计算其平均值。

1.4 数据分析

利用Excel 2007处理数据,使用SPSS 19.0软件进行多重比较和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 最适高温胁迫温度的确定

由表1可知,与25℃时的发芽率相比,各品种在35℃处理的发芽率稍有下降,但无显著差异。当温度超过35℃时,各品种的相对发芽率均明显降低,在39℃时降为0%。

在35℃时,4个品种之间的相对发芽率无显著差异。在36,37和38℃时,品种间的相对发芽率出现极显著水平差异,且表现为夏大豆的相对发芽率显著或极显著高于春大豆。与此同时,在38℃条件下,品种间的相对发芽率变异系数最大,因此萌发期耐高温大豆种质资源筛选试验的最适胁迫温度为38℃。

表 1 高温胁迫对华南地区主栽大豆品种相对发芽率的影响

Table 1 Effects of high temperature stress on the relative germination rate of main cultivars in South China 单位: %						
品种 Cultivar	温度 Temperature					平均 Average
	35 ℃	36 ℃	37 ℃	38 ℃	39 ℃	
华春 6 号 Huachun 6	96.53 aA	68.63 bB	42.34 bAB	23.29 bBC	0 aA	46.16 bB
桂春 15 号 Guichun 15	95.31 aA	71.78 bAB	40.62 bB	16.67 bC	0 aA	44.87 bB
华夏 9 号 Huaxia 9	97.06 aA	90.41 aA	62.64 aA	48.35 aA	0 aA	59.69 aA
桂夏 7 号 Guixia 7	97.24 aA	88.18 aAB	52.83 abAB	39.62 aAB	0 aA	55.57 aA

注:不同大小写字母分别表示在 $P\leq 1\%$ 和 $P\leq 5\%$ 水平差异极显著或显著。下同。
Note: Different capital and lowercase indicate extremly significant or significant difference at the $P\leq 1\%$ and $P\leq 5\%$ levels respectively. The same below.

2.2 大豆萌发期耐高温种质资源的筛选

根据种子萌发试验结果(附表 1),可将供试大豆种质资源分为 6 类,即强耐热、耐热、中度耐热、中度敏感、敏感和极度敏感。其中强耐高温种质资源有 78 份,占有种质的 6.94%;耐热种质 172 份,占 15.3%;中度耐热种质 197 份,占 17.53%;中度敏感种质 198 份,占 17.62%;敏感种质 228 份,占 20.28%;极度敏感的种质有 251 份,占有种质的 22.33%。

在 78 份强耐热种质中,根据种皮颜色划分,有 59 份黄色种皮品种(系)和 19 份非黄色种皮品种(系)。强耐热黄色种皮种质(59 份)占有黄色种皮资源(1 048 份)的 5.63%;强耐热非黄色种皮种质(19 份)占供试非黄色种皮品系(76 份)的 25.00%。

根据播期类型划分,有 48 份春大豆和 30 份夏大豆。强耐热春大豆品系(48 份)占有春大豆(517 份)的 9.28%;强耐热夏大豆(30 份)占有供试夏大豆(607 份)的 4.94%。在 38 ℃ 条件下,有 3 份种质资源的相对发芽率为 100%,分别为都安青

皮豆、南豆 35 和 14 夏 G8-65;在极度敏感的种质资源中有 98 份的相对发芽率为 0%,占极度敏感资源(251 份)的 36.04%。

2.3 大豆萌发期耐热指标评价

2.3.1 不同耐热类型大豆籽粒性状的比较 将萌发期不同耐热级别大豆品种间的籽粒形态性状、比重、容重和品质进行比较的结果如表 2 所示,随着耐热级别的降低,籽粒的粒型指数、表面积、百粒重均增加;比重和容重呈下降趋势;蛋白质含量呈升高趋势,脂肪含量变化无明显规律。

强耐热与耐热种质间的粒型指数无显著差异,但极显著小于中度敏感、敏感和极度敏感的种质。与强耐热种质相比,其他级别耐热种质的表面积和百粒重显著升高。与强耐热种质相比,中度敏感、敏感和极度敏感种质的比重和容重均显著下降。强耐热种质的蛋白质含量显著低于中度敏感、敏感和极度敏感种质,不同耐热级别种质间的脂肪含量无显著差异。

表 2 不同耐热类型大豆籽粒性状的比较

Table 2 Comparison on seed traits of different heat-tolerant grade soybean						
籽粒性状 Seed trait	耐热级别 Heat tolerance grades					
	强耐热 Highly heat-tolerant	耐热 Heat-tolerant	中度耐热 Moderate heat-tolerant	中度敏感 Moderately heat-tolerant	热敏感 Heat-sensitive	极度热敏感 Extremely heat-sensitive
粒型指数 Seed shape index	1.25 dD	1.26 cdCD	1.27 bcBC	1.28 bAB	1.28 abAB	1.29 aA
表面积 Surface area/mm ²	47.96 eD	49.90 dCD	51.62 cdBC	52.44 bcBC	53.89 abAB	55.35 aA
百粒重 100-seed weight/g	13.05 eE	14.20 dD	14.89 cCD	15.43 bcBC	15.95 abAB	16.30 aA
比重 Specific gravity/(g·mL ⁻¹)	1.17 aA	1.16 abA	1.16 bAB	1.14 cBC	1.14 cBC	1.14 cC
容重 Bulk density/(g·mL ⁻¹)	0.70 aA	0.69 bAB	0.69 bcBC	0.68 bcBC	0.68 cBC	0.68 cC
蛋白质含量 Protein content/%	43.84 cC	43.91 bcC	44.04 bcBC	44.32 abABC	44.57 aAB	44.75 aA
脂肪含量 Oil content/%	21.85 aA	21.95 aA	21.89 aA	21.80 aA	21.89 aA	21.89 aA

2.3.2 大豆籽粒性状与萌发期耐热性的相关分析

如表3所示,大豆相对发芽率(即萌发期的耐热性)与籽粒的粒型指数、表面积、百粒重和蛋白质含量呈极显著负相关,相关系数分别为:−0.258 1, −0.330 3, −0.322 4 和 −0.137 9;与容重和比重呈极显著正相关,相关系数分别为0.175 7 和0.198 3。

大豆籽粒性状间也存在相关性。籽粒的容重与粒型指数、比重、蛋白质含量呈极显著正相关,而与籽粒表面积、百粒重和脂肪含量呈极显著负相关。籽粒的比重与其形态性状无显著相关性,而与籽粒的脂肪含量呈显著负相关。大豆的蛋白质含量与脂肪含量呈极显著负相关。

表3 大豆籽粒性状与相对发芽率的相关分析
Table 3 Correlation analysis between seed traits and relative germination rate of soybean

籽粒性状 Seed trait	相对发芽率 Relative germination rate	粒型指数 Seed shape index	表面积 Surface area	百粒重 100-seed weight	容重 Bulk density	比重 Specific gravity	蛋白质含量 Protein content
粒型指数 Seed shape index	−0.2581 **						
表面积 Surface area	−0.3303 **	0.3854 **					
百粒重 100-seed weight	−0.3224 **	0.0523	0.6405 **				
容重 Bulk density	0.1757 **	0.1381 **	−0.1204 **	−0.3359 **			
比重 Specific gravity	0.1983 **	−0.0460	−0.0351	0.0223	0.1479 **		
蛋白质含量 Protein content	−0.1379 **	0.1572 **	0.2203 **	0.1901 **	0.0834 *	−0.0309	
脂肪含量 Oil content	0.0049	−0.0314	0.0680 *	0.0552	−0.0875 **	−0.0694 *	−0.4965 **

注: * 和 ** 分别表示在 $P\leq 5\%$ 和 $P\leq 1\%$ 水平差异显著或极显著相关。下同。
Note: * and ** represent significant or extremely significant correlation at 5% and 1% level respectively. The same below.

2.3.3 大豆籽粒性状与萌发期耐热性逐步分析

将大豆籽粒性状与相对发芽率进行逐步回归分析,表明籽粒的粒型指数、百粒重、比重和容重与大豆发芽率(即萌发期耐热性)的关系较密切(表4)。籽粒在38℃下的相对发芽率与粒型指数和百粒重呈极显著负相关,相关系数分别为−0.245 8 和

−0.328 0;与容重和比重极显著正相关,相关系数分别为0.198 2 和0.182 1。籽粒的容重与粒型指数和比重极显著正相关,而与百粒重极显著负相关。其逐步回归方程为: $Y = -107.403X_1$ (粒型指数) $-2.366X_3$ (百粒重) $+145.735X_4$ (容重) $+97.170X_5$ (比重) $+9.788$ 。

表4 大豆籽粒性状与相对发芽率的逐步回归分析
Table 4 Stepwise regression analysis between seed characteristics and relative germination rate of soybean

籽粒性状 Seed traits	相对发芽率 Relative germination rate	粒型指数 Seed shape index	百粒重 100-seed weight	容重 Bulk density
粒型指数 Seed shape index	−0.2458 **			
百粒重 100-seed weight	−0.3280 **	0.0513		
容重 Bulk density	0.1982 **	0.1276 **	−0.3289 **	
比重 Specific gravity	0.1821 **	−0.0459	0.0261	0.1496 **

2.3.4 大豆籽粒性状与萌发期耐热性通径分析

在大豆萌发期籽粒相关性状与相对发芽率逐步回归的基础上进行通径分析(表5),将逐步回归系数分解为直接相关系数和间接相关系数。通径分析表明,大豆籽粒相对发芽率即(萌发期耐热性)与

粒型指数和百粒重呈极显著直接负相关,其直接相关系数分别为−0.240 1 和 −0.277 8;而与比重和容重呈极显著直接正相关,其直接相关系数为0.128 9 和0.171 9。因此籽粒容重较适合作为大豆萌发期耐热性强弱的评价指标。

表 5 大豆萌发期耐热性密切相关籽粒性状与相对发芽率的通径分析

Table 5 Path analysis between closely related seed traits to heat tolerance and relative germination rate of soybean					
籽粒性状 Seed trait	直接相关系数 Direct correlation coefficient	间接相关系数 Indirect correlation coefficient			
		粒型指数 Seed shape index	百粒重 100-seed weight	比重 Specific gravity	容重 Bulk density
粒型指数 Seed shape index	-0.2401 **	-	-0.0142	-0.0079	0.0164
百粒重 100-seed weight	-0.2778 **	-0.0123	-	0.0045	-0.0424
比重 Specific gravity	0.1289 **	0.0110	-0.0072	-	0.0064
容重 Bulk density	0.1719 **	-0.0306	0.0914	0.0085	-

3 讨论

随着全球气候变暖,在作物生产中,高温将是未来气候的重要特征之一^[21]。对于南方地区的大豆生产,任何生长发育阶段均有可能遭遇高温胁迫,但不同生育时期对高温的耐受性不一致。研究表明,大豆出苗至成熟可以耐受 40 ℃ 以上高温^[15-17],而在种子萌发期,随着温度从 10 ℃ 增加到 30 ℃,下胚轴的伸长速率随着温度的升高而增加^[6-7],但无法耐受 40 ℃ 的温度。前期不同生育时期的耐高温胁迫温度筛选试验表明,大豆萌发期对温度最为敏感。热带和亚热带地区的夏大豆播种时期正处高温季节,易受高温的胁迫,严重影响种子田间发芽率,因此应注重南方大豆萌发期耐高温育种及大豆耐热性的相关研究。本研究对华南地区主栽品种进行高温处理,结果表明,当温度超过 35 ℃ 时,大豆种子的发芽率极显著下降,品种间差异显著,且在 39 ℃ 时停止萌发,所以确定 38 ℃ 为本研究的最适耐高温筛选温度,这与 Hatfield 和 Egli 的研究结果^[6] 基本一致。通过高温筛选的结果来看,在有色种皮大豆种质资源中,其耐高温能力普遍较强,推测籽粒耐高温性与种皮颜色有一定相关性。原因可能在于在种皮颜色形成过程中,大豆代谢产物类黄酮类物质广泛参与防御和抵抗胁迫等生理过程,如耐寒^[22]、抗大豆胞囊线虫^[23]、抗食心虫^[24]、以及对生态区域的适应性^[25] 等。另外,在有色大豆种皮中,含有丰富的花青素,它与类黄酮类物质有着相似的作用^[26],具有抗氧化、清除氧自由基的功能^[27-28]。在本研究中,春大豆中耐高温种质资源的比率高于夏大豆,原因可能是南方春播类型的大豆在籽粒形成的过程中常处于高温高湿环境,会造成种子的田间劣变^[29],与此同时,在春大豆收

获后,通常与夏大豆同时播种或秋播于本地进行加代繁殖,因此春大豆较夏大豆多进行了一代自然高温筛选。

在以往的研究中通常采用百粒重作为评价大豆籽粒大小的指标,但因为具有相同百粒重的不同品种其形态千差万别,因此在形态学上常利用粒长、粒宽和粒厚、以及其比值(长宽比、长厚比和宽厚比) 作为其形状指标进行区分^[30]。前人研究表明,中小型种子比大粒种子具有较高的田间出苗率,且出苗速率快^[31],根系发育迅速^[32],并且小粒大豆品种耐旱性比大粒品种更强^[33-34],同时更耐储藏^[19]。在本研究中,大豆萌发期耐热性与籽粒的百粒重呈负相关,与其粒型指数(长宽比)成反比。大豆的种子包括种皮、胚根和子叶,籽粒小的品系其种皮和胚根占整个种子的比例远高于大粒型品种,当种子萌发阶段遇到逆境时,大粒型品种的子叶更易受到损伤。在本研究高温处理下,可观察到大粒型品系的子叶损伤较为明显,表明相同遗传背景下,百粒重小且籽粒形态较圆的品种对萌发期高温的耐受能力更强。

关于大豆品质与高温之间的关系,前人研究热点主要是在大豆生长发育阶段高温胁迫对其成熟期籽粒蛋白质和脂肪含量变化的影响。研究表明,当大豆开花期遇到高温时,脂肪含量会显著增加;在鼓粒期受高温胁迫,大豆的脂肪含量极显著下降,而蛋白质含量极显著升高^[15]。在本研究中,相关性分析表明,大豆萌发期耐热性与籽粒蛋白质含量呈极显著负相关,而与脂肪含量相关性不显著,表明高蛋白大豆品种在萌发期耐受高温的能力相对较弱。

比重是指一定绝对体积种子的重量和同体积水的重量之比,容重则是单位容积内籽粒的质量。

容重的大小是由多方面因素决定的,比如籽粒的大小、形状、含水量、内部结构等。刘捷湘等^[35]研究了不同比重水稻种子的活力,发现随着种子比重的增大,其发芽率和活力指数均呈现上升趋势。Tupper等^[36]的研究表明,棉花种子的比重与出苗速率直接相关,且比重所起到的积极作用较种子形态更为重要。对于大豆来说,低比重且大粒型品种的田间出苗率和出苗速率最低^[37]。通常情况下,颗粒小、成熟饱满、结构紧密、含水量少的大豆种子容重比较大;反之,容重则较小。本研究结果表明,在高温状态萌发时,随着大豆种子容重的增加,其发芽率也逐渐升高,这与刘文博^[20]的研究结果一致。相关性分析表明,大豆萌发期的耐热性与容重、比重、百粒重和粒型指数密切相关。与此同时,萌发期的耐热性与容重和比重均正相关,与百粒重和粒型指数负相关。因此可以利用大豆种子的容重作为其萌发期忍受高温胁迫能力强弱的简易快速田间评价指标,即大豆种子容重越大,其萌发期耐高温能力越强。

4 结论

在 25℃和38℃纸上发芽法条件下,利用38℃/25℃相对发芽率对广西壮族自治区积累的1124份主要大豆种质材料进行萌发期耐热性鉴定,筛选出78份强耐热种质资源,其中的都安青皮豆、南豆35和14夏G8-65在38℃时的相对发芽率均为100%。大豆种质萌发期的耐热性与粒型指数、百粒重、容重和比重的关系紧密,且与容重和比重均极显著正相关,与粒型指数和百粒重极显著负相关,同时随着容重的增加,大豆萌发期耐受高温的能力也相应提升,因此建议采用籽粒容重作为大豆萌发期耐热性强弱的田间初步选育指标。

参考文献

[1] 郝兴宇,韩雪,居辉,等. 气候变化对大豆影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2697-2706. (HAO X Y, HAN X, JU H, et al. Research progress on the impact of climate change on soybeans[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2697-2706.)

[2] DJANAGUIRAMAN M, PRASAD P V V, BOYLE D L, et al. High temperature stress and soybean leaves: Leaf anatomy and photosynthesis[J]. Crop Science, 2011, 51(5): 2125-2131.

[3] DJANAGUIRAMAN M, PRASAD P V V, KHATIB A K. Ethylene perception inhibitor 1-MCP decreases oxidative damage of

leaves through enhanced antioxidant defense mechanisms in soybean plants grown under high temperature stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 71(2): 215-223.

[4] DJANAGUIRAMAN M, PRASAD P V V, BOYLE D L, et al. Soybean pollen anatomy, viability and pod set under high temperature stress [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2012, 199(3): 171-177.

[5] DJANAGUIRAMAN M, PRASAD P V V, SCHAPAUGH W T. High day or nighttime temperature alters leaf assimilation, reproductive success, and phosphatidic acid of pollen grain in soybean [J]. Crop Science, 2013, 53(4): 1594-1604.

[6] HATFIELD J L, EGLI D B. Effect of temperature on the rate of soybean hypocotyl elongation and field emergence [J]. Crop Science, 1974, 14: 423-426.

[7] ALM D M, STOLLER E W, WAX L M. An index model for predicting seed germination and emergence rates [J]. Weed Technology, 1993, 7: 560-569.

[8] WALLACE S U. Soybean seedling emergence at high temperatures [J]. Plant and Soil, 1988, 109: 139-140.

[9] 陈立君,郭强,刘迎雪,等. 不同温度对大豆种子萌发影响的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(10): 140-142. (CHEN L J, GUO Q, LIU Y X, et al. The effect of different temperature on soybean seed germination [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(10): 140-142.)

[10] EMERSON B N, MINOR H C. Response of soybeans to high temperature during germination [J]. Crop Science, 1979, 19: 553-556.

[11] 宋晓昆,胡燕金,闫龙,等. 持续高温对大豆品种萌发及幼苗生长的影响[J]. 河北农业科学, 2009, 13(4): 1-3. (SONG X K, HU Y J, YAN L, et al. Effects of sustained high temperature on the germination and seedling growth of soybean varieties [J]. Hebei Agricultural Sciences, 2009, 13(4): 1-3.)

[12] HOU F F, THSENG F S. Studies on the flooding tolerance of soybean seed: Varietal differences [J]. Euphytica, 1991, 57: 169-173.

[13] 王丽群. 春大豆种子田间劣变抗性的评价及抗性机理的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012: 25-32. (WANG L Q. Evaluation of field deterioration resistance of spring soybean seeds and research on resistance mechanism [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012: 25-32.)

[14] 汪明华,李佳佳,陆少奇,等. 大豆品种耐高温特性的评价方法及耐高温种质筛选与鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(4): 891-902. (WANG M H, LI J J, LU S Q, et al. Evaluation method of high temperature tolerance and screening and identification of high temperature tolerance soybean varieties [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(4): 891-902.)

[15] 靳路真,王洋,张伟,等. 大豆品种(系)耐热性鉴定及分级评价[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 77-87. (JIN L Z, WANG Y, ZHANG W, et al. Heat tolerance identification and classification evaluation of soybean varieties [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2016, 38(1): 77-87.)

[16] SALEM M A, KAKANI V G, KOTI S, et al. Pollen based screening of soybean genotypes for high temperatures [J]. Crop Science, 2007, 47: 219-231.

[17] SMITH J R, MENGISTU A, NELSON R L, et al. Identification of soybean accessions with high germinability in high temperature environments [J]. Crop Science, 2008, 48: 2279-2288.

[18] 陈文杰, 陈渊, 韦清源, 等. 南方大豆种质种子耐浸水能力鉴定与分析 [J]. 大豆科学, 2020, 39(2): 165-173. (CHEN W J, CHEN Y, WEI Q Y, et al. Seed-flooding tolerance identification and comparison of soybean germplasm resources in southern China [J]. Soybean Science, 2020, 39(2): 165-173.)

[19] 高华伟, 满强, 武猛, 等. 耐储藏大豆种质资源的筛选 [J]. 大豆科学, 2014, 33(1): 6-12. (GAO H W, MAN Q, WU M, et al. Selection of storage-resistant soybean germplasm resources [J]. Soybean Science, 2014, 33(1): 6-12.)

[20] 刘文博. 大豆籽粒容重与种子萌发的相关性研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 32-44. (LIU W B. Research on the correlation between soybean seed bulk density and seed germination [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 32-44.)

[21] PENG S B, HUANG J L, SHEEHY J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(27): 9971-9975.

[22] RODRIGUEZ T O, RODAS F R, OYOO M E, et al. Inverted repeat of chalcone synthase 3-pseudogene is associated with seed coat discoloration in soybean [J]. Crop Science, 2013, 53: 518-523.

[23] 李泽宇, 李肖白, 陈井生, 等. 大豆品种(系)抗大豆胞囊线虫 14 号生理小种的抗性鉴定研究 [J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 408-410. (LI Z Y, LI X B, CHEN J S, et al. Identification of resistance of soybean varieties (lines) to race 14 of soybean cyst nematode [J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 408-410.)

[24] 庄炳昌, 岳德荣, 王玉民, 等. 大豆不同品种次生代谢产物及相关酶类含量与抗食心虫的关系 [J]. 中国油料, 1992(3): 18-20. (ZHUANG B C, YUE D R, WANG Y M, et al. The relationship between the content of secondary metabolites and related enzymes of different soybean varieties and resistance to heartworm [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 1992(3): 18-20.)

[25] CAPUTI L, MALNOY M, GOREMYKIN V, et al. A genome-wide phylogenetic reconstruction of family 1 UDP-glycosyltransferases revealed the expansion of the family during the adaptation of plants to life on land [J]. The Plant Journal, 2012, 69: 1030-1042.

[26] KOVINICH N, SALEEM A, ARNASON J T, et al. Functional characterization of a UDP-glucose: Flavonoid 3-O-glucosyltransferase from the seed coat of black soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Phytochemistry, 2010, 71(12): 1253-1263.

[27] DIXON R A, STEELE C L. Flavonoids and isoflavonoids a gold mine for metabolic engineering [J]. Trends in Plant Science, 1999, 4(10): 394-400.

[28] HOSTETLER G L, RALSTON R A, SCHWARTZ S J. Flavones: Food sources, bioavailability, metabolism, and bioactivity [J]. Advances in Nutrition, 2017, 8(3): 423-435.

[29] 王芳, 王丽群, 田鑫, 等. 中国南方春大豆收获前后种子劣变的抗性研究 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2637-2647. (WANG F, WANG L Q, TIAN X, et al. Pre-harvest and post-harvest seed deterioration resistance of spring soybean germplasm in South China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2637-2647.)

[30] 牛远, 徐宇, 李广军, 等. 大豆籽粒大小和粒形的驯化研究 [J]. 大豆科学, 2012, 31(4): 522-528. (NIU Y, XU Y, LI G J, et al. Domestication of soybean seed size and shape [J]. Soybean Science, 2012, 31(4): 522-528.)

[31] HOPPER N W, OVERHOLT J R, MARTIN J R. Effect of cultivar, temperature and seed size on the germination and emergence of soybeans [J]. Annals of Botany, 1979, 44: 301-308.

[32] TYAGI S K, TRIPATHI R P. Effect of temperature on soybean germination [J]. Plant and Soil, 1983, 74: 273-280.

[33] 吕世霖, 程舜华. 大豆籽粒性状生态分布与遗传育种 [J]. 大豆科学, 1984, 3(3): 201-207. (LYU S L, CHENG S H. Ecological distribution and genetic breeding of soybean seed traits [J]. Soybean Science, 1984, 3(3): 201-207.)

[34] 刘学义. 大豆抗旱性评价方法探讨 [J]. 中国油料, 1986(4): 12-16. (LIU X Y. Discussion on evaluation methods of soybean drought resistance [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 1986(4): 12-16.)

[35] 刘捷湘. 水稻不育系种子比重分级对其种子活力和群体特性的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 10-16. (LIU J X. The effect of seed density classification of rice sterile lines on seed vigor and population characteristics [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014: 10-16.)

[36] TUPPER G R, KUNZE O R, WIKES L H. Physical characteristics of cotton seed related to seedling vigor and design parameters for seed selection [J]. Transactions of the Asae, 1971, 14: 890-893.

[37] DANIEL J H, GAMBLE E E. Field performance in soybean with seeds of differing size and density [J]. Crop Science, 1987, 27: 121-126.