中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):133-143
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2026021

112份国内外大豆种质资源品质综合评价

张亚奇[1],伊六喜[1*],董宇恒[2],李强[2]
(1.内蒙古农业大学农学院,内蒙古 呼和浩特,010018;
2.内蒙古自治区农牧业科学院,内蒙古 呼和浩特,010031)

摘要:为准确评价现有大豆种质资源的品质特征,挖掘优异种质资源,促进种质资源创新及品质遗传改良,本研究以112份大豆种质资源为材料,对其在3个环境下的26个品质性状进行描述性统计分析、方差分析、相关性分析及主成分分析。结果表明,26个品质性状的变异系数为3.21%~18.25%,籽粒含油率为17%~26.33%,籽粒蛋白质含量28.10%~46.67%;籽粒含油率与蛋白质相关性状均呈极显著负相关。通过品质综合评价及聚类分析,绥农76的综合得分最高;112份材料分为5类,第一类群为高蛋白类群(含绥农76、农庆豆13、东农56等6份材料),第二类群为高油类群(含长密豆30、19-201等5份材料)。本研究筛选出综合性状优良的资源绥农76,并构建了高蛋白、高油特异性种质类群,可为大豆品质育种提供明确的亲本材料。

关键词:大豆;种质资源;品质性状;主成分分析;聚类分析;综合评价;遗传多样性
中图分类号:S565.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-9084(2026)05-0133-11

OSID

Comprehensive quality assessment of 112 domestic and overseas soybean germplasm resources

ZHANG Ya-qi[1], YI Liu-xi[1*], DONG Yu-heng[2], LI Qiang[2]
(1. *Institute of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*; 2. *Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot* 010031, *China*)

Abstract: Improving seed quality remains a major objective in soybean breeding, yet the effective use of diverse germplasm resources is constrained by insufficient phenotypic characterization. In this article, 112 soybean germplasm accessions were evaluated for 26 quality-related traits across 3 environments to define their variation patterns, trait associations, and elite quality donors. Across environments, the 26 traits showed substantial phenotypic variation, with coefficients of variation ranging from 3.21% to 18.25%. Seed oil content ranged from 17.00% to 26.33%, whereas seed protein content varied from 28.10% to 46.67%. Oil content was significantly negatively correlated with all protein-related traits, highlighting the persistent trade-off between these major seed quality attributes. Integrative evaluation based on multivariate analysis identified Suinong 76 as the top-performing accession for overall quality. Cluster analysis resolved the 112 accessions into 5 groups, including a high-protein group containing Suinong 76, Nongqingdou 13, and Dongnong 56, and a high-oil group containing Changmidou 30 and 19-201. Together, these results establish a phenotypic framework for soybean quality germplasm evaluation, identify Suinong 76 as an elite donor with superior overall performance, and define high-protein and high-oil germplasm groups for soybean quality improvement.

Key words: soybean; germplasm resources; quality traits; principal component analysis; cluster analysis; comprehensive evaluation; genetic diversity

收稿日期:2026-01-27
基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2025KJHZ0012);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR231513,BR251304);内蒙古自治区科技创新重大示范工程"揭榜挂帅"项目(2023JBGS0006);内蒙古自治区育种联合攻关项目(YZ2023005);内蒙古自治区科右前旗现代农业产业园新型研发平台培育项目(2026XXYF03)
作者简介:张亚奇(1995-),女,硕士研究生,主要从事大豆种质资源鉴定,E-mail: z18004783560@163.com
* 通讯作者:伊六喜(1985-),男,副教授,博士,主要从事亚麻品质遗传改良研究,E-mail: yiliuxivip@163.com

大豆(*Glycine max*(L.)Merr.),豆科、蝶形花亚科、大豆属,自花授粉的一年生草本植物[1],是世界上重要的粮食作物、油料作物和饲料作物[2,3]。大豆籽粒中含有油脂、蛋白质、多种氨基酸以及其他有益于人类健康的活性物质,如维生素、卵磷脂等,是唯一可以和肉蛋奶相提并论的植物性食物[4]。大豆饼粕可以作为动物饲料,对动物的生长发育具有积极作用[5]。除此之外,大豆在食品、饲料、工业及医药等领域均有广泛应用[6-8]。作为高脂肪、高蛋白质的粮饲兼用型作物,大豆在维持国计民生方面有重要作用,在国内外经济贸易中也占有重要地位[9]。然而,我国大豆主要依赖进口,缺乏优质高产的品种,因此,加强培育优质高产的大豆品种对我国大豆产业发展及粮食安全至关重要。

种质资源是植物育种的基本材料,是支撑农业科技原始创新和作物育种的基础[10]。为充分挖掘和利用种质资源,不仅需要系统地收集与保护,还需对其表型和基因型进行系统科学的评价。我国是大豆的起源地,拥有丰富的种质资源[11]。目前中国农业科学院作物科学研究所保存的栽培大豆种质资源有2.5万余份、野生大豆种质资源6000余份,是世界保存种质资源最丰富的科研机构[12]。前人对大豆种质资源的品质进行了相关研究,许文静等[13]对765份大豆种质资源蛋白质含量和脂肪酸各组分进行测定发现,油酸的变异系数最大(18%),亚油酸变异系数最小(6%),表明其测定的种质资源之间存在差异,具有丰富的遗传类型。赵朝森等[14]对江西的431份大豆种质资源的表型和品质性状进行综合分析和评价后,筛选出3份蛋白质含量超过52%的高蛋白资源。邱红梅等[15]对240份国内外高纬度地区种质资源的蛋白质含量和氨基酸进行了表型鉴定等,结果表明,国内种质资源的蛋白质和氨基酸组分相较于国外遗传多样性指数更高,遗传变异更丰富。

随着我国国民生活水平的提高,人们对蛋白质和油脂的需求量不断提高,我国大豆消费量迅速增长,年需求量已超过一亿吨,占世界大豆总消费量的30%以上[16]。相比于国外大豆,我国的大豆品质相对较差,缺乏优质的大豆品种。目前,我国对现有大豆种质资源鉴定、利用和创新等方面研究相对不足,缺乏用于选育高油、高蛋白优质品种的骨干亲本,导致大豆品质育种进展缓慢。因此,对大豆种质资源进行品质综合评价,筛选优异种质资源,对种质资源开发利用及大豆新品种选育均具有积极意义。本研究以112份大豆种质资源为试验材料,测定不同环境下大豆的营养品质性状并对其进行综合评价,筛选综合品质优良的大豆种质资源,为大豆品质遗传改良及新品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及试验地概况

所用国内外大豆种质资源材料共计112份,由赤峰市农牧科学院提供。具体材料名称、编号见附表1(首页OSID二维码)。112份大豆种质材料2024年种植于内蒙古赤峰市农牧科学院试验地(后简称赤峰)、呼和浩特市赛罕区内蒙古农业大学科技园区(后简称呼市)和呼和浩特土默特左旗内蒙古农业大学科技园区(后简称土左)3个地区。赤峰市农牧科学院试验地位于内蒙古自治区东部,地理位置为东经118°89′,北纬42°30′,2024年年平均温度9℃,总降雨量461.7 mm;呼和浩特市赛罕区内蒙古农业大学科技园区位于内蒙古自治区中部,地理位置为东经111°73′,北纬40°82′,2024年年平均温度8.5℃,总降雨量675.1 mm;呼和浩特土默特左旗内蒙古农业大学科技园区位于内蒙古自治区中部,地理位置为东经111°39′,北纬40°69′,2024年年平均温度8.5℃,总降雨量292.5 mm。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,3次重复。每个材料种植2行,行长1.5 m,行距为50 cm,株距为10 cm,种植密度约2.0×10^5/hm^2,小区面积为1.5 m^2。播种前对试验用地施用底肥,生长期内按照一般大田管理。

1.3 大豆品质指标测定方法

大豆全区整株收获,自然阴干后脱粒,去除变质、破损豆粒和杂质后,利用近红外分析仪(波通公司DA7250)[17]测定相关品质指标,包括含油率、脂肪酸各组分含量、粗蛋白含量、水溶蛋白含量、8个必需氨基酸(即赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸)含量、10个非必需氨基酸(甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸、丝氨酸、半胱氨酸、天(门)冬氨酸、谷氨酸、精氨酸、组氨酸)含量。每份材料重复测定3次,将3次测定结果的平均值作为每个性状的表型值。使用近红外分析仪测定品质指标时,需开机预热30 min以上,并使用标准样品重复装样测定2次,若两次结果相对偏差>5%,则对仪器进行校准后再测定。

1.4 表型数据统计与分析方法

使用Microsoft Excel 2016整理统计数据,使用SPSS 26.0进行描述性统计分析、方差分析、相关性分析及主成分分析;使用Origin 2021进行绘图。

对26个性状的数据进行标准化后进行主成分分析及综合评价,数据标准化公式如下:

$$\mu(X_i) = \frac{X_i - X_{i\,min}}{X_{i\,max} - X_{i\,min}}$$

式中,$\mu(X_i)$表示材料的第i个性状的标准化数值,X_i为材料性状的测定值,$X_{i\,min}$和$X_{i\,max}$分别为材料第i个性状的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 大豆品质性状统计与分析

2.1.1 油分相关性状统计与分析 对112份大豆种质资源在3个不同环境的6个与油分相关品质性状进行遗传变异分析(表1),结果表明,3个环境下,所有材料的含油率在17.00%至26.33%之间,含油率均值土左旗地区最高,为23.29%,且变异系数最小,为4.63%;油酸含量均值土左旗地区最高,为34.45%,赤峰地区变异系数最小,为8.82%;亚油酸含量均值呼市地区最高,为47.59%,赤峰地区变异系数最小,为5.95%;亚麻酸含量均值呼市地区最高,为8.51%,赤峰地区变异系数最小,为12.43%;硬脂酸含量均值土左旗最高,为3.69%,赤峰地区变异系数最小,为6.88%;棕榈酸含量均值赤峰地区最高,为9.79%,且变异系数最小,为4.39%。与油分相关的6个品质性状中,亚麻酸的变异系数最高,分别是12.43%、18.25%和16.27%。

2.1.2 蛋白质相关性状统计与分析 对112份大豆种质资源在3个不同环境下的2个与蛋白质相关品质性状进行遗传变异分析(表2),结果表明,3个环境下的粗蛋白含量在28.10%~46.67%之间,粗蛋白和水溶蛋白含量的均值呼市地区最高,分别为42.20%和32.60%,且变异系数均最小,为4.85%和6.51%。与蛋白质相关的2个品质性状中,水溶蛋白的变异系数相对较高,分别是7.58%、6.51%和8.55%。

2.1.3 必需氨基酸含量统计与分析 对112份大豆种质资源在3个不同环境下的8个必需氨基酸含量进行遗传变异分析(表3),结果表明,3个环境下的赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、亮氨酸和缬氨酸含量均值均以呼市地区为最高,分别为2.62%、0.40%、2.06%、0.58%、1.54%、3.08%和2.05%,且变异系数都最小,分别为3.65%、4.57%、4.21%、3.77%、3.36%、4.04%和3.82%;异亮氨酸含量均值赤峰地区的最高,为3.69%,变异系数最

表1 3个环境下112份大豆种质资源油脂及脂肪酸含量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of oil and fatty acid content of 112 soybean germplasm in 3 environments /%

性状 Trait	环境 Environment	极小值 Min	极大值 Max	变幅 Range	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
含油率 Oil content	CF	17.42	23.50	6.08	20.88	1.10	5.29
	HS	17.00	22.82	5.82	19.68	1.16	5.91
	TZ	19.65	26.33	6.68	23.29	1.08	4.63
油酸 Oleic acid	CF	23.86	37.32	13.46	30.95	2.73	8.82
	HS	21.43	38.97	17.54	31.24	3.41	10.92
	TZ	27.66	42.65	14.99	34.45	3.23	9.39
亚油酸 Linoleic acid	CF	38.92	51.91	12.99	44.83	2.67	5.95
	HS	36.70	57.11	20.41	47.59	3.79	7.97
	TZ	31.24	50.63	19.39	43.13	3.35	7.78
亚麻酸 Linolenic acid	CF	4.42	9.22	4.80	7.13	0.89	12.43
	HS	4.43	16.60	12.17	8.51	1.55	18.25
	TZ	5.48	15.50	10.02	8.36	1.36	16.27
硬脂酸 Stearic acid	CF	2.98	4.78	1.80	3.69	0.25	6.88
	HS	2.63	4.27	1.64	3.32	0.30	8.99
	TZ	2.87	4.44	1.57	3.52	0.27	7.77
棕榈酸 Palmitic acid	CF	8.59	10.88	2.29	9.79	0.43	4.39
	HS	8.02	11.27	3.25	9.64	0.71	7.41
	TZ	7.80	11.85	4.05	9.65	0.63	6.48

注:CF:赤峰;HS:呼和浩特;TZ:土左;下同

Note: CF: Chifeng; HS: Hohhot; TZ: Tuzuo; Same as below

表2 3个环境下112份大豆种质资源蛋白质含量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of protein of 112 soybean germplasm resources in 3 environments /%

性状 Trait	环境 Environment	极小值 Min	极大值 Max	变幅 Range	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
粗蛋白 Crude protein	CF	34.54	46.54	12.00	39.81	2.14	5.38
	HS	36.83	46.67	9.84	42.20	2.05	4.85
	TZ	28.10	39.04	10.94	33.93	2.01	5.91
水溶蛋白 Water soluble protein	CF	24.81	36.31	11.50	29.80	2.26	7.58
	HS	25.38	38.27	12.89	32.60	2.12	6.51
	TZ	19.30	30.50	11.20	24.49	2.09	8.55

表3 3个环境下112份大豆种质资源必需氨基酸含量描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of essential amino acid of 112 soybean germplasm resources in 3 environments /%

性状 Trait	环境 Environment	极小值 Min	极大值 Max	变幅 Range	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
赖氨酸 Lysine	CF	2.30	2.87	0.57	2.56	0.11	4.39
	HS	2.39	2.87	0.48	2.62	0.10	3.65
	TZ	2.01	2.51	0.50	2.24	0.10	4.28
色氨酸 Tryptophan	CF	0.34	0.44	0.10	0.39	0.02	5.24
	HS	0.35	0.45	0.10	0.40	0.02	4.57
	TZ	0.31	0.44	0.13	0.38	0.02	5.38
苯丙氨酸 Phenylalanine	CF	1.79	2.31	0.52	2.04	0.10	4.82
	HS	1.84	2.28	0.44	2.06	0.09	4.21
	TZ	1.47	1.94	0.47	1.70	0.08	4.85
蛋氨酸 Methionine	CF	0.50	0.62	0.12	0.55	0.03	4.78
	HS	0.49	0.63	0.14	0.58	0.02	3.77
	TZ	0.45	0.58	0.13	0.52	0.03	5.10
苏氨酸 Threonine	CF	1.36	1.67	0.31	1.50	0.06	4.21
	HS	1.40	1.67	0.27	1.54	0.05	3.36
	TZ	1.19	1.46	0.27	1.33	0.05	3.95
异亮氨酸 Isoleucine	CF	1.73	2.15	0.42	1.92	0.08	4.31
	HS	1.75	2.07	0.32	1.91	0.07	3.85
	TZ	1.49	1.85	0.36	1.63	0.07	4.23
亮氨酸 Leucine	CF	2.66	3.40	0.74	3.00	0.14	4.75
	HS	2.76	3.39	0.63	3.08	0.12	4.04
	TZ	2.25	2.93	0.68	2.56	0.12	4.80
缬氨酸 Valine	CF	1.82	2.28	0.46	2.02	0.09	4.25
	HS	1.87	2.28	0.41	2.05	0.08	3.82
	TZ	1.56	1.95	0.39	1.73	0.08	4.59

小的是呼市地区,为3.85%。8个必需氨基酸含量中,色氨酸的变异系数最高,分别是5.24%、4.57%和5.38%。

2.1.4 非必需氨基酸的统计与分析 对112份大豆种质资源在3个不同环境的10个非必需氨基酸含量进行遗传变异分析(表4),结果表明,3个环境下的甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸、丝氨酸、半胱氨酸、天(门)冬氨酸、谷氨酸和精氨酸含量均值均以呼市地区为最高,分别为1.72%、1.72%、1.87%、1.43%、1.76%、0.60%、4.60%、7.18%和2.94%,且变异系数都最小,分别为3.61%、3.21%、4.07%、3.37%、4.33%、5.16%、4.35%、5.04%和5.98%;组氨酸含量均值赤峰地区最高,为1.07%,变异系数呼市地区最小,为3.836%。10个非必需氨基酸含量中,精氨酸的变异系数最高,分别是6.64%、5.98%和7.08%。

2.2 大豆主要品质性状遗传规律分析

对112份大豆种质资源在3个不同环境下的含

表4 3个环境下112份大豆种质资源非必需氨基酸描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of non-essential amino acids of 112 soybean germplasm in 3 environments /%

性状 Trait	环境 Environment	极小值 Min	极大值 Max	变幅 Range	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
甘氨酸 Glycine	CF	1.51	1.91	0.40	1.67	0.08	4.78
	HS	1.59	1.88	0.29	1.72	0.06	3.61
	TZ	1.31	1.65	0.34	1.48	0.06	4.31
丙氨酸 Alanine	CF	1.52	1.88	0.36	1.69	0.07	4.09
	HS	1.57	1.86	0.29	1.72	0.06	3.21
	TZ	1.35	1.65	0.30	1.50	0.06	3.83
脯氨酸 Proline	CF	1.65	2.17	0.52	1.86	0.10	5.25
	HS	1.69	2.05	0.36	1.87	0.08	4.07
	TZ	1.42	1.78	0.36	1.59	0.08	4.73
酪氨酸 Tyrosine	CF	1.26	1.55	0.29	1.39	0.06	4.24
	HS	1.29	1.55	0.26	1.43	0.05	3.37
	TZ	1.13	1.37	0.24	1.23	0.04	3.49
丝氨酸 Serine	CF	1.47	1.95	0.48	1.69	0.10	5.69
	HS	1.53	1.92	0.39	1.76	0.08	4.33
	TZ	1.29	1.67	0.38	1.48	0.08	5.11
半胱氨酸 Cysteine	CF	0.52	0.70	0.18	0.59	0.03	5.82
	HS	0.52	0.70	0.18	0.60	0.03	5.16
	TZ	0.47	0.63	0.16	0.56	0.03	6.14
天(门)冬氨酸 Aspartic acid	CF	3.93	5.14	1.21	4.47	0.25	5.54
	HS	4.07	5.07	1.00	4.60	0.20	4.35
	TZ	3.32	4.32	1.00	3.82	0.20	5.17
谷氨酸 Glutamate	CF	6.09	8.11	2.02	6.97	0.40	5.78
	HS	6.16	8.05	1.89	7.18	0.36	5.04
	TZ	4.83	6.74	1.91	5.73	0.36	6.21
精氨酸 Arginine	CF	2.46	3.45	0.99	2.89	0.19	6.64
	HS	2.48	3.36	0.88	2.94	0.18	5.98
	TZ	1.84	2.73	0.89	2.27	0.16	7.07
组氨酸 Histidine	CF	0.94	1.21	0.27	1.07	0.05	4.93
	HS	0.94	1.16	0.22	1.06	0.04	3.84
	TZ	0.81	1.01	0.20	0.90	0.04	4.52

油率和粗蛋白含量进行方差分析,结果表明,含油率和粗蛋白含量在基因型间、环境间和基因型与环境间互作均存在极显著差异,说明大豆籽粒含油率和粗蛋白含量受三者共同的调控;其中环境的平方和最大,远高于基因型和基因型与环境互作的平方和,基因型的平方和又高于基因型与环境互作的平方和,说明大豆籽粒含油率和粗蛋白含量受环境的影响最大,基因型次之,基因型与环境互作影响最小。

2.3 大豆品质性状相关性分析

对112份大豆种质资源的品质性状进行相关性分析(表5),其中必需氨基酸为8个必需氨基酸含量均值的总和,非必需氨基酸为10个非必需氨基酸含量均值的总和。大豆籽粒含油率与硬脂酸含量呈显著负相关,相关系数为-0.234,与粗蛋白、水溶蛋白、必需氨基酸和非必需氨基酸含量呈极显著负相关,相关系数分别为-0.693、-0.378、-0.611、-0.650;油酸含量与亚油酸、棕榈酸、粗蛋白、水溶蛋白、必需氨基酸、非必需氨基酸含量均呈极显著负相关,相关系数分别为-0.830、-0.379、-0.293、-0.369、-0.312、-0.292;亚油酸含量与亚麻酸含量呈极显著负相关,相关系数为-0.253,与粗蛋白、水溶蛋白、必需氨基酸、非必需氨基酸含量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.383、0.453、0.386、0.360;亚麻酸含量与粗蛋白、必需氨基酸、非必需氨基酸含量均呈显著负相关,相关系数分别为-0.213、-0.220、-0.209,与水溶蛋白呈极显著负相关,相关系数为-0.283;硬脂酸含量与棕榈酸含量呈极显著正相关,相关系数为0.340;粗蛋白含量与

表5 112份大豆种质资源品质相关性状相关性分析

Table 5 Correlation analysis of quality-related traits for 112 soybean germplasm resources

性状 Trait	含油率 Oil content	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	硬脂酸 Stearic acid	棕榈酸 Palmitic acid	粗蛋白 Crude protein	水溶蛋白 Water soluble protein	必需氨基酸 Essential amino acid	非必需氨基酸 Nonessential amino acid
含油率	1									
油酸	0.132	1								
亚油酸	−0.084	−0.830**	1							
亚麻酸	−0.149	−0.040	−0.253**	1						
硬脂酸	−0.234*	−0.059	−0.147	−0.179	1					
棕榈酸	−0.133	−0.379**	0.168	0.042	0.340**	1				
粗蛋白	−0.693**	−0.293**	0.383**	−0.213*	0.123	0.114	1			
水溶蛋白	−0.378**	−0.369**	0.453**	−0.283**	0.119	0.081	0.892**	1		
必需氨基酸	−0.611**	−0.312**	0.386**	−0.220*	0.117	0.107	0.969**	0.904**	1	
非必需氨基酸	−0.650**	−0.292**	0.360**	−0.209*	0.154	0.129	0.972**	0.884**	0.993**	1

注:*在0.05水平上显著相关;**在0.01水平上显著相关

Note: * significantly correlated at the 0.05 level; ** significantly correlated at the 0.01 level

水溶蛋白、必需氨基酸、非必需氨基酸含量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.892、0.969、0.972;水溶蛋白含量与必需氨基酸、非必需氨基酸含量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.904、0.884;必需氨基酸含量与非必需氨基酸含量呈极显著正相关,相关系数为0.993。

2.4 主成分分析及综合评价

为了能更充分反映各因素中起主导作用的综合指标,对供试大豆在3个环境的26个品质性状表型数据的均值进行主成分分析,根据特征值大于1且累计贡献百分率大于85%的原则确定主成分。将112份大豆种质材料品质相关表型数据标准化处理后进行主成分分析(表6、表7),结果表明:前4个主成分的累计贡献率达89.360%,说明这4个主成分包含绝大部分信息,可代表89.360%的变异信息。主成分1的特征值为18.388,方差贡献率为70.721%,说明主成分1在分析评价中起主导作用,其中以粗蛋白、水溶蛋白和多个氨基酸含量的载荷值较高,对主成分1有正向影响;第2主成分的特征值为1.856,贡献率为7.137%,亚油酸含量的载荷值较高,对主成分2有正向影响;第3主成分贡献率为6.156%,蛋氨酸含量和含油率的载荷值较高;第4主成分贡献率为5.346%,硬脂酸和棕榈酸含量的载荷值较高。综上可知,粗蛋白、水溶蛋白、氨基酸、含油率、亚油酸、硬脂酸、棕榈酸等是评价大豆籽粒品质的重要指标。

根据表7的数据顺序可以得到4个主成分的得分公式:

$$F_{Ⅰ} = -0.714X_1-0.19X_2 + 0.252X_3-0.118X_4 + 0.095X_5 + 0.036X_6 + 0.97X_7 + 0.848X_8 + 0.974X_9 + 0.318X_{10} + 0.968X_{11} + 0.821X_{12} + 0.951X_{13} + 0.937X_{14} + 0.978X_{15} + 0.976X_{16} + 0.966X_{17} + 0.969X_{18} + 0.925X_{19} + 0.942X_{20} + 0.897X_{21} + 0.742X_{22} + 0.974X_{23} + 0.977X_{24} + 0.980X_{25} + 0.972X_{26} \quad (1)$$

$$F_{Ⅱ} = 0.099X_1-0.922X_2 + 0.870X_3 + 0.045X_4-0.201X_5 + 0.396X_6 + 0.122X_7 + 0.238X_8 + 0.171X_9 + 0.190X_{10} + 0.119X_{11} + 0.046X_{12} + 0.114X_{13} + 0.139X_{14} + 0.143X_{15} + 0.112X_{16} + 0.129X_{17} + 0.154X_{18} + 0.169X_{19} + 0.219X_{20} + 0.245X_{21} + 0.17X_{22} + 0.109X_{23} + 0.069X_{24} + 0.04X_{25} + 0.03X_{26} \quad (2)$$

$$F_{Ⅲ} = 0.456X_1 + 0.048X_2 + 0.22X_3-0.8X_4 + 0.16X_5-0.129X_6 + 0.069X_7 + 0.299X_8 + 0.044X_9 + 0.732X_{10} + 0.127X_{11} + 0.311X_{12} + 0.168X_{13} + 0.164X_{14} + 0.119X_{15} + 0.073X_{16} + 0.121X_{17} + 0.108X_{18}-0.002X_{19} + 0.047X_{20} + 0.22X_{21} + 0.102X_{22} + 0.146X_{23} + 0.136X_{24} + 0.048X_{25} + 0.125X_{26} \quad (3)$$

$$F_{Ⅳ} = -0.249X_1-0.146X_2-0.093X_3-0.082X_4 + 0.821X_5 + 0.755X_6 + 0.061X_7-0.015X_8 + 0.041X_9-0.005X_{10} + 0.026X_{11} + 0.214X_{12} + 0.096X_{13}-0.044X_{14} + 0.037X_{15} + 0.004X_{16} + 0.085X_{17} + 0.093X_{18} + 0.166X_{19}-0.032X_{20} + 0.146X_{21} + 0.394X_{22} + 0.077X_{23} + 0.022X_{24} + 0.098X_{25} + 0.033X_{26} \quad (4)$$

将各营养品质指标含量的标准值代入以上公式,分别计算$F_{Ⅰ}$、$F_{Ⅱ}$、$F_{Ⅲ}$和$F_{Ⅳ}$的值,再根据四个主成分的方差贡献率计算出各自的权重后得到总得分F的计算公式:$F= 0.791F_{Ⅰ} + 0.080F_{Ⅱ} + 0.069F_{Ⅲ} +$

表6 主成分特征值与方差贡献率

Table 6 Principal component eigenvalues and variance contributions

主成分 PC	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate (VCR)	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate (CVR)
1	18.388	70.721	70.721
2	1.856	7.137	77.858
3	1.601	6.156	84.014
4	1.390	5.346	89.360

表7 主成分载荷矩阵

Table 7 Principal component loading matrix

序号 Number	性状 Trait	主成分PC PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
1	含油率 Oil content	−0.714	0.099	0.456	−0.249
2	油酸 Oleic acid	−0.190	−0.922	0.048	−0.146
3	亚油酸 Linoleic acid	0.252	0.870	0.220	−0.093
4	亚麻酸 Linolenic acid	−0.118	0.045	−0.800	−0.082
5	硬脂酸 Stearic acid	0.095	−0.201	0.160	0.821
6	棕榈酸 Palmitic acid	0.036	0.396	−0.129	0.755
7	粗蛋白 Crude protein	0.970	0.122	0.069	0.061
8	水溶蛋白 Water soluble protein	0.848	0.238	0.299	−0.015
9	赖氨酸 Lysine	0.974	0.171	0.044	0.041
10	色氨酸 Tryptophan	0.318	0.190	0.732	−0.005
11	苯丙氨酸 Phenylalanine	0.968	0.119	0.127	−0.026
12	蛋氨酸 Methionine	0.821	0.046	0.311	0.214
13	苏氨酸 Threonine	0.951	0.114	0.168	0.096
14	异亮氨酸 Isoleucine	0.937	0.139	0.164	−0.044
15	亮氨酸 Leucine	0.978	0.143	0.119	0.037
16	缬氨酸 Valine	0.976	0.112	0.073	0.004
17	甘氨酸 Glycine	0.966	0.129	0.121	0.085
18	丙氨酸 Alanine	0.969	0.154	0.108	0.093
19	脯氨酸 Proline	0.925	0.169	−0.002	0.166
20	酪氨酸 Tyrosine	0.942	0.219	0.047	−0.032
21	丝氨酸 Serine	0.897	0.245	0.220	0.146
22	半胱氨酸 Cysteine	0.742	0.170	0.102	0.394
23	天(门)冬氨酸 Aspartic acid	0.974	0.109	0.146	0.077
24	谷氨酸 Glutamate	0.977	0.069	0.136	0.022
25	精氨酸 Arginine	0.980	0.040	0.048	0.098
26	组氨酸 Histidine	0.972	0.030	0.125	0.033

0.060$F_{Ⅳ}$,将此作为112份大豆种质资源营养品质的综合评价标准,计算后进行由高到低排序,排名前二十的结果如表8所示。排名第一的资源为HF154/绥农76,说明该材料在3个地区的综合表现优异,其次是HF26/18-5-16(B86)、HF48/(PI603900/AD14)、HF175/东农56、HF141/东豆70。

2.5 大豆种质资源材料聚类分析

将112份大豆种质资源在3个地区的均值进行聚类分析,在欧氏距离为7.5时,共划分为5个类群(图1),5个类群26性状特征见表9。

第一类群包括HF207/农庆豆13、HF175/东农56、HF141/东豆70、HF154/绥农76、HF48/(PI603900/AD14)、HF26/18-5-16(B86)共6份大豆种质资源材料,综合排名都位于前六。与其他类群相比,该类群的粗蛋白、水溶蛋白、8个必需氨基酸和10个非必需氨基酸的含量高,综合可知,此类群的蛋白质及氨基酸相关指标含量较高且较稳定,属于高蛋白材料,在北方地区培育高蛋白大豆品种时

表8 112份大豆种质资源综合得分与排名

Table 8 Comprehensive scores and rankings of 112 soybean germplasm resources

编号 Serial number	综合得分 Aggregate score	综合排名 Overall ranking	编号 Serial number	综合得分 Aggregate score	综合排名 Overall ranking
HF154	14.501	1	HF64	10.559	11
HF26	14.000	2	HF80	10.480	12
HF48	13.985	3	HF46	10.420	13
HF175	12.896	4	HF27	10.204	14
HF141	12.492	5	HF86	10.122	15
HF207	12.146	6	HF130	10.084	16
HF52	10.881	7	HF112	9.761	17
HF201	10.854	8	HF53	9.760	18
HF148	10.756	9	HF168	9.699	19
HF127	10.601	10	HF68	8.973	20

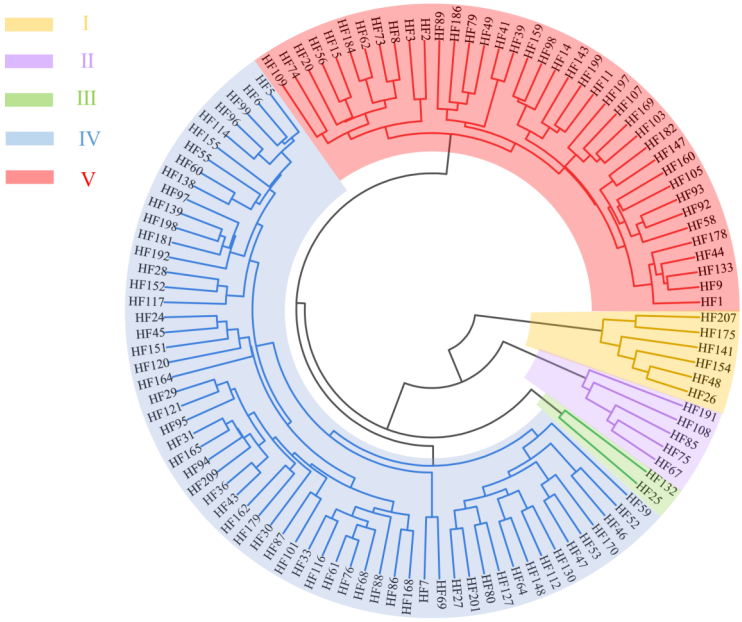


图1 112份大豆种质资源聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of 112 soybean germplasm resources

可以加以利用。第二类群包括HF191/长密豆30、HF108/19-201、HF85/沈农18、HF75/铁豆62、HF67/吉农2011B-118共5份大豆种质资源材料,综合排名处于106至112之间,该类群具有含油率高,粗蛋白、水溶蛋白、7个必需氨基酸、10个非必需氨基酸以及硬脂酸含量低的特点,因此该类可称为高油材料,在筛选高油基因时可在该类群中选择含油率高的极端材料。第三类群包括HF132/17-M03、HF25/18-10-57共2份大豆种质资源材料,该类群具有亚油酸、亚麻酸和棕榈酸含量高,含油率、油酸和色氨酸含量低的特点,因此该类可称为低油材料。第四类群包括HF7/19-215、HF62/东豆641、HF164/吉育611、HF151/吉小粒豆7号、HF117/吉密豆3号、HF69/赤豆204、HF59/新大豆22号等共60份大豆种质资源材料,该类群没有明显的优缺点,综合性能好,适应能力强,可作为亲本候选材料。第五类群包括HF2/19-314、HF20/L19-9-18等39份大豆种质资源材料,该类群具有油酸含量高,亚油酸和棕榈酸含量低的特点,因此该类可称为高油酸材料。

3 讨论

大豆是全球最重要的农作物之一,在农牧业及工业生产中用途广泛。大豆的品质决定了大豆的市场价值及用途,因此,提升大豆品质一直是大豆遗传改良的重要内容之一。大豆籽粒中的蛋白质和油脂含量是衡量大豆品质的主要指标,不同品种的大豆蛋白质和油脂含量差异巨大,相关研究表

表9 112份大豆种质资源不同类群性状特征

Table 9 Characteristics of different clusters in 112 soybean germplasm resources /%

性状 Trait	类群 Cluster				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
含油率 Oil content	19.99	23.03	19.36	21.08	21.67
油酸 Oleic acid	31.35	31.13	27.33	31.58	33.70
亚油酸 Linoleic acid	47.22	46.26	48.28	45.69	43.79
亚麻酸 Linolenic acid	7.15	7.94	9.86	7.88	8.24
硬脂酸 Stearic acid	3.54	3.43	3.50	3.53	3.48
棕榈酸 Palmitic acid	9.75	9.67	10.12	9.72	9.63
粗蛋白 Crude protein	42.59	34.94	39.24	39.35	37.41
水溶蛋白 Water soluble protein	32.39	26.13	28.09	29.71	27.69
赖氨酸 Lysine	2.66	2.30	2.51	2.51	2.41
色氨酸 Tryptophan	0.41	0.39	0.35	0.40	0.38
苯丙氨酸 Phenylalanine	2.09	1.78	1.92	1.96	1.87
蛋氨酸 Methionine	0.60	0.52	0.53	0.56	0.54
苏氨酸 Threonine	1.56	1.36	1.44	1.48	1.43
异亮氨酸 Isoleucine	1.95	1.71	1.81	1.85	1.78
亮氨酸 Leucine	3.13	2.66	2.88	2.93	2.79
缬氨酸 Valine	2.09	1.80	1.94	1.96	1.89
甘氨酸 Glycine	1.76	1.51	1.62	1.65	1.58
丙氨酸 Alanine	1.75	1.53	1.64	1.66	1.59
脯氨酸 Proline	1.92	1.64	1.81	1.80	1.73
酪氨酸 Tyrosine	1.44	1.27	1.37	1.37	1.32
丝氨酸 Serine	1.80	1.51	1.67	1.68	1.59
半胱氨酸 Cysteine	0.64	0.54	0.59	0.59	0.57
天(门)冬氨酸 Aspartic acid	4.72	3.92	4.29	4.37	4.16
谷氨酸 Glutamate	7.35	5.99	6.59	6.76	6.40
精氨酸 Arginine	3.02	2.39	2.74	2.76	2.60
组氨酸 Histidine	1.09	0.93	1.00	1.02	0.98

明,大豆蛋白质和油脂含量受基因型和环境因素的影响。聂波涛等[18]对334份北方春大豆种质资源的主要品质性状进行变异分析,结果显示蛋白质和油分的变异系数分别为4.15%、3.97%。赵朝森等[19]对1897份大豆种质资源粗蛋白和粗脂肪含量的研究结果表明,粗蛋白含量的变异系数为4.16%,粗脂肪含量的变异系数为9.33%。孙浩月等[20]对160份国内外不同地区大豆材料的多样性分析表明,粗蛋白和粗脂肪含量的变异系数分别为3.70%和3.00%。本研究对112份大豆种质材料在3个环境下的品质性状进行表型分析,结果表明所有品质性状的变异系数存在差异,变异系数在3.21%~18.25%之间,大豆籽粒含油率的变异系数在4.63%至5.91%之间,粗蛋白含量的变异系数在4.85%至5.91%之间,这与前人研究结果基本一致。区别于前人的研究,本研究侧重于相同大豆种质在不同环境下品质性状的变化规律。方差分析结果显示大豆蛋白质和脂肪含量相关性状由环境、基因型和基因型与环境互作共同控制[21]。本研究中参试材料的蛋白质和油脂含量变异较大,遗传多样性丰富,合理利用特异性种质资源,对大豆品质的遗传改良具有重要意义。

大豆籽粒中的主要贮藏物质是蛋白质和油脂,但二者之间关系早在上世纪50年代时就被证明是高度负相关[22]。本研究通过112份大豆种质材料进行相关性分析和综合评价的结果表明,蛋白质含量与含油率呈极显著负相关,综合评价结果也表明综合排名越高,蛋白质及氨基酸含量越高,但油脂含量越低,与前人研究结果一致。聂波涛等[18]对334份北方大豆种质资源进行相关性分析的结果和本研究结果相同,蛋白质含量与油脂含量之间呈极显著负相关。有学者认为,大豆蛋白质和油脂合成存在底物竞争,例如在控制蛋白质基因表达时,油脂含量或其他贮藏物质含量相应增加[23,24],因此大豆

籽粒中蛋白质含量和油脂含量呈负相关关系。Manan 等[25]研究表明,调控基因影响大豆蛋白质和油脂合成的比例,研究人员将大豆 *LEC 2* 同源物 *GmLEC 2a* 靶向大豆种子蛋白质代谢基因,调控氨基酸代谢和贮藏蛋白合成的酶,致使大豆毛状根的碳通量更多地转向脂类生物合成,蛋白质生物合成减少。目前,大豆蛋白质与油脂合成的调控研究主要以合成途径中关键酶及一些转录因子为主,如 FAD、DGTA 等关键酶基因[26,27]。然而,仍有大量蛋白质与油脂含量相关的位点未进行功能验证,这限制了相关合成代谢网络的进一步完善。因此,实现蛋白质与油脂含量协同改良、培育“双高”大豆品种的关键,在于如何打破二者间的负相关性。

112 份大豆种质资源综合评价排名前三的为 HF154/绥农 76、HF26/18-5-16(B86)、HF48/(PI603900/AD14),平均粗蛋白含量分别为 43.33%、43.46%、42.44%,含油率分别为 18.91%、19.26%、20.07%;排名倒三的为 HF191/长密豆 30、HF108/19-201、HF67/吉农 2011B-118,平均粗蛋白含量分别为 33.77%、34.68%、35.13%,含油率分别为 23.77%、22.48%、24.22%。综合排名第一的 HF154/绥农 76 作为高蛋白品种,可作为专品种订单种植,市场前景广阔。另外绥农 76 的综合性状优良,已被用作亲本,成功选育出绥农 88。在欧氏距离为 7.5 时,112 份大豆种质资源被划分为 5 类,第一类群属于高蛋白材料,第二类群属于高油材料。本研究对 112 份大豆种质资源 26 个营养品质性状进行了评价,有助于了解各种质材料的品质特性,为大豆种质资源利用与创新以及新品种选育奠定理论基础。高蛋白材料 HF154/绥农 76 等,高油材料 HF48/(PI603900/AD14)等这些优异种质资源为北方生态区大豆品质育种提供了关键亲本,可通过育种技术将高蛋白或高油性状与当地特有品种相结合,培育出高产优质的新品种。大豆蛋白质与油脂含量受基因与环境的共同影响,本研究只针对涉及的 112 份大豆种质资源在 3 个环境下的品质表现,测定分析后所得结论有一定的局限性。

4 结论

本研究对 112 份大豆种质材料在 3 个环境下的品质性状进行分析,结果表明,26 个品质性状的变异系数在 3.21%~18.25%之间,大豆籽粒含油率在 17.00%~26.33%之间,大豆籽粒蛋白质含量在 28.10%~46.67%之间;大豆籽粒含油率与蛋白质相关性状均呈极显著负相关。通过对 112 份大豆种质的品质进行综合评价,HF154/绥农 76 的综合品质最优,其次是 HF26/18-5-16(B86)、HF48/(PI603900/AD14)、HF175/东农 56、HF141/东豆 70;聚类分析结果将 112 份大豆种质资源分为 5 类,第一类群为高蛋白材料,包括 HF207/农庆豆 13、HF175/东农 56、HF141/东豆 70、HF154/绥农 76、HF48/(PI603900/AD14)、HF26/18-5-16(B86)共 6 份大豆种质资源材料,可作为蛋白加工专用品种;第二类群为高油类群,包括 HF191/长密豆 30、HF108/19-201、HF85/沈农 18、HF75/铁豆 62、HF67/吉农 2011B-118 共 5 份大豆种质资源材料,可作为油用专用品种;第三类群包括 2 份材料;第四类群包括 60 份材料;第五类群包括 39 份材料。但要充分利用这批大豆种质资源,还需对目标性状进行深入研究。

附表 请见网络版:1)本刊网站 http://www.jouroilcrops.cn/;2)中国知网 http://www.cnki.net/。

参考文献:

[1] Dong Y S, Zhao L M, Liu B, et al. The genetic diversity of cultivated soybean grown in China[J]. Theor Appl Genet, 2004, 108(5): 931-936. DOI:10.1007/s00122-003-1503-x

[2] Mazkirat S, Bulatova K, Didorenko S, et al. Pod dehiscence in soybean: genome wide association study and genomic prediction[J]. Plants, 2025, 14(22): 3505. DOI:10.3390/plants14223505.

[3] Zhao X C, Zhang Y, Wang J, et al. GWAS and WGCNA analysis uncover candidate genes associated with oil content in soybean[J]. Plants, 2024, 13(10): 1351. DOI:10.3390/plants13101351.

[4] 沈艾彬, 韩劲, 周桂梅, 等.大豆营养成分和功效简述[J]. 现代农村科技, 2025, (12)133-134. DOI:10.3969/j.issn.1674-5329.2025.12.086

[5] Tao B Y, Wang Z, Zhang C X, et al. Better intestine health in fast-growing bullfrogs (*Lithobates catesbeianus*) fed a soybean meal-based diet than slow-growing bullfrogs[J]. Aquac Res, 2022, 53(13): 4847-4857. DOI:10.1111/are.15978.

[6] 李傲辰.大豆的主要营养成分及营养价值研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(23): 213-214, 218. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2020.23.084.

[7] 石贵阳, 阚冲, 陈竹, 等.西南地区大豆品种的蛋白质营养价值评价[J]. 种子, 2021, 40(7): 26-32.

[8] Moser B R, Haas M J, Winkler J K, et al. Evaluation of

partially hydrogenated methyl esters of soybean oil as biodiesel[J]. Euro J Lipid Sci & Tech, 2007, 109(1): 17-24. DOI:10.1002/ejlt.200600215.

[9] 曹彦蕾. 我国大豆产业发展和育种研究现状启示[J]. 黑龙江农业科学, 2025(1): 86-93.

[10] 胡龙龙, 王肖肖, 洪玮, 等. 浙江地方大豆种质资源多样性分析与综合评价[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(4): 861-872. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2024286.

[11] Li Y, Qin C, Wang L, et al.Genome-wide signatures of the geographic expansion and breeding of soybean[J]. Science China (Life Sciences),2023,66(2):350-365.

[12] 王小翠, 赵朝森, 彭任文, 等. 不同来源大豆种质资源产量与品质性状评价[J]. 江西农业学报, 2023, 35(6): 16-23.

[13] 许文静, 张威, 黎松松, 等. 765份大豆种质资源蛋白质和脂肪酸组分分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(6): 78-81. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.06.012.

[14] 赵朝森, 王瑞珍, 李英慧, 等. 江西大豆种质资源表型及品质性状综合分析与评价[J]. 大豆科学, 2019, 38(5): 686-693. DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2019.05.0686.

[15] 邱红梅, 杨春明, 高淑芹, 等. 高纬度地区大豆蛋白含量及氨基酸组分表型鉴定与聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6): 1202-1208. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.2014.06.006.

[16] 刘梅芳, 樊琦. 中国大豆消费、生产和进口现状及存在的问题[J]. 粮食科技与经济, 2021, 46(6): 28-35.

[17] Shi D, Hang J Y, Neufeld J, et al. Estimation of crude protein and amino acid contents in whole, ground and defatted ground soybeans by different types of near-infrared (NIR) reflectance spectroscopy[J]. J Food Compos Anal, 2022, 111: 104601. DOI:10.1016/j.jfca.2022.104601.

[18] 聂波涛, 刘德泉, 陈健, 等. 北方春大豆品种农艺和品质性状分析与综合评价[J]. 作物学报, 2024, 50(9): 2248-2266. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.44004.

[19] 赵朝森, 赵现伟, 郭兵福, 等. 江西秋播不同来源大豆品质性状鉴定及优异种质筛选[J]. 大豆科学, 2022, 41(4): 413-419.

[20] 孙浩月, 韩冬伟, 张笛, 等. 160份大豆种质资源鉴定评价及表型多样性分析[J]. 种子, 2025, 44(2): 124-132.

[21] 吴子佶, 林琴, 孙亚伟, 等. 高油大豆品种营养品质的基因型与环境互作分析[J]. 大豆科学, 2026, 45(1): 47-61.

[22] 陈锦清. 作物种子中PEPCase活性及其对蛋白质/油脂含量比率的调控作用[C]. 北京: 第一届亚洲植物染色体学术讨论会, 2001:460-466.

[23] 刘虹洁, 王金星, 刘昭军, 等. 大豆种子蛋白和油脂含量调控的研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 791-800. DOI: 10.11926/jtsb.4716.

[24] Ruuska S A, Girke T, Benning C, et al. Contrapuntal networks of gene expression during *Arabidopsis* seed filling[J]. Plant Cell, 2002, 14(6): 1191-1206. DOI: 10.1105/tpc.000877.

[25] Manan S, Ahmad M Z, Zhang G Y, et al. Soybean *LEC2* regulates subsets of genes involved in controlling the biosynthesis and catabolism of seed storage substances and seed development[J]. Front Plant Sci, 2017, 8: 1604. DOI:10.3389/fpls.2017.01604.

[26] Derbyshire M C, Marsh J, Tirnaz S, et al. Diversity of fatty acid biosynthesis genes across the soybean pangenome[J]. Plant Genome, 2023, 16(2): e20334. DOI: 10.1002/tpg2.20334.

[27] Torabi S, Sukumaran A, Dhaubhadel S, et al. Effects of type I Diacylglycerol O-acyltransferase (*DGAT1*) genes on soybean (*Glycine max* L.) seed composition[J]. Sci Rep, 2021, 11: 2556. DOI: 10.1038/s41598-021-82131-5.

(责任编辑:郭学兰)