



大豆品种籽粒的油脂组成综合评价

张艺龄, 师立松, 刘 方, 颜 硕, 张孟茜, 牛 宁, 赵 璇, 李占军

(石家庄市农林科学研究院, 河北 石家庄 050041)

摘 要: 为对大豆种质资源的油脂品质进行综合评价, 从中筛选出综合品质表现优异的大豆品种, 本研究以 173 份大豆种质为试验材料, 利用近红外光谱分析法结合气相色谱法对大豆的脂肪酸及粗脂肪含量进行测定, 利用主成分分析法和系统聚类分析法对 173 份大豆种质进行划分, 并建立大豆油脂品质综合评价的模型。结果表明: 参试大豆种质的品质性状间差异较大; 性状间相关性分析结果显示大豆饱和脂肪酸即棕榈酸和硬脂酸分别与油酸含量呈极显著负相关; 与多不饱和脂肪酸即亚油酸与亚麻酸均呈极显著正相关, 大豆粗脂肪含量与油酸、亚油酸相关性最大, 其中与油酸呈极显著正相关, 而与亚油酸呈极显著负相关。利用主成分分析法确立了 2 个主成分, 建立了大豆油脂品质综合评价的模型, 并评价出最优的大豆品种依次为多马卡-托里萨、中兴 1 号、冀豆 3 号、高丰 1 号和商豆 1201。最后利用系统聚类分析法将 173 份大豆种质划分为 5 个类群, 其中第Ⅲ类群表现较突出, 具体表现为棕榈酸含量最高, 油酸含量最低, 亚油酸和亚麻酸含量最高, 同时油脂品质的综合表现最好。本研究结果可为获得优良油脂品质的大豆品种提供理论依据。

关键词: 大豆; 种质资源; 脂肪酸; 粗脂肪; 油脂品质; 主成分分析; 聚类分析

Comprehensive Evaluation of Seeds Oil Composition of Soybean Varieties

ZHANG Yiling, SHI Lisong, LIU Fang, YAN Shuo, ZHANG Mengxi, NIU Ning, ZHAO Xuan, LI Zhanjun
(Shijiazhuang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050041, China)

Abstract: This study was to conduct a comprehensive evaluation of the oil quality of soybean germplasm resources and select excellent varieties. The fatty acid and crude fat content of 173 germplasm resources were measured by near infrared spectroscopy and gas chromatography. The 173 germplasm resources were divided according to principal component analysis and cluster analysis. A comprehensive evaluation model of soybean oil-quality was established. The results showed there were significant differences in these quality traits. Saturated fatty acid including palmitic acid and stearic acid contents had significant negative correlations with oleic acid, and had significant negative correlations with polyunsaturated fatty acid contents including linoleic acid and linolenic acid. The crude fat content had significant positive correlations with oleic acid content, and had significant negative correlations with linoleic acid content. Two principal components were selected by principal component analysis and the soybean oil quality evaluation model was constructed to select the best soybean varieties as follows: Duomaka-Tuolisa, Zhongxing 1, Jidou 3, Gaofeng 1, and Shangdou 1201. Finally cluster analysis of 173 soybean germplasm resources was divided into 5 groups, of which the third group with outstanding performance showed the highest content of palmitic acid, inoleic acid and linolenic acid; the lowest content of oleic acid and the best oil quality of soybean. The study will provide evidence for gaining soybean varieties with higher comprehensive oil quality.

Keywords: soybean; germplasm resources; fatty acid; crude fat; oil quality; principal component analysis; cluster analysis

大豆是重要的油料作物之一, 含有丰富的蛋白质及脂肪, 是世界重要的植物蛋白质和油脂来源。油分作为大豆籽粒重要的营养成分, 其含量占大豆种子的 18% ~ 25%, 主要供人类油脂消费使用^[14]。近些年随着耕地面积的逐渐减少, 我国自产大豆量也在减少, 国内大豆产油量和油脂品质已无法满足人们对食用大豆油的需求^[5]。因此在农业育种中, 收集和筛选优良油脂品质的大豆种质已成为解决这一问题的关键。

现阶段针对于大豆油脂的测定多基于近红外光谱分析法和索氏抽提法^[6-8], 该方法只局限于测定大豆粗脂肪含量的高低, 无法对大豆的油脂品质进行综合评价。有研究表明大豆的油脂主要以三酰甘油 (Triacylglycerol, TAG) 的形式存在^[9]。经过脂肪酸的从头合成后生成的含 12 ~ 18 个碳的大豆脂肪酸是其油脂合成的关键原料^[10-11]。大豆油脂的质量很大程度上依赖其脂肪酸的组分比例, 直接影响大豆的营养价值和油脂的稳定性^[12]。因此脂

收稿日期: 2023-10-22

基金项目: 石家庄市农林科学研究院市财政专项 (2022-09, 2023-24); 石家庄市科学技术研究与发展计划项目 (221490112A); 石家庄市农业科技项目 (23002); 河北省现代种业科技创新专项 (21326333D); 河北省大豆产业技术研究院。

第一作者: 张艺龄 (1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事大豆遗传育种与分子生物学研究。E-mail: zhang-yl15@tsinghua.org.cn。

通讯作者: 李占军 (1970—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事大豆遗传育种与分子生物学研究。E-mail: nkyilizhj@163.com。

肪酸作为油脂合成的重要原料,基于其组分的主成分分析法能够较为有效地对大豆油脂品质进行综合评价。

本研究利用近红外光谱分析仪结合气相色谱法对 173 份大豆种质的粗脂肪及脂肪酸组分进行测定。采用主成分分析法建立大豆油脂品质优劣评价模型。通过该模型的建立对大豆油脂品质进行综合评价,从中筛选并鉴定出优良油脂品质的大豆种质,为高品质油脂大豆的选育提供参考,同时也为挖掘大豆新的优异基因资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

173 份参试材料来源于北京、河南、江苏等 10 个省市区,少量品种来源于国外(表 1),均由石家庄市农林科学研究院提供。

表 1 参试大豆种质资源信息

来源	份数
Original source	Number of accessions
河北 Hebei	49
山西 Shanxi	25
北京 Beijing	24
河南 Henan	16
山东 Shandong	14
江苏 Jiangsu	11
辽宁 Liaoning	11
安徽 Anhui	11
国外 Foreign country	7
黑龙江 Heilongjiang	4
吉林 Jilin	1
合计 Total	173

1.2 试验设计

试验于 2021—2022 年在石家庄市农林科学研究院 27 军农场实验基地进行,试验地土壤理化性质为:pH6.8、有机质 20.7 g·kg⁻¹、全氮 1.06 g·kg⁻¹、速效磷 18.7 mg·kg⁻¹、速效钾 125 mg·kg⁻¹。按品种依次播种,行长 3 m,行距 50 cm,采用随机区组设计,试验重复 3 次。后期栽培管理需按照当地耕作

习惯进行,确保参试材料的正常生长。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 大豆籽粒粗脂肪含量 2021—2022 年成熟期收获大豆籽粒并进行充分晾晒。利用波通 DA7250 近红外品质分析仪测定大豆籽粒的粗脂肪含量,重复测定 3 次。

1.3.2 大豆籽粒脂肪酸组分含量 大豆籽粒脂肪酸的测定主要参照 Shantha 等^[13]的方法,具体方法如下:样品经研磨机粉碎后,过 60 目筛。称取适量试样移入到 15 mL 离心管中,依次加入 2 mL 0.5 mol·L⁻¹甲醇钠溶液、0.2 mL 2 mg·mL⁻¹十一碳酸甘油三酯内标溶液、4 mL 正己烷,涡旋混匀。50 ℃水浴萃取 35 min,每 10 min 颠倒混匀 1 次。室温静置 10 min,吸取上层溶液过 0.45 μm 针式有机滤头,置于进样瓶中待测定。

气相色谱分析条件为毛细管柱 HP-88,载气为氮气,载气流速为 3.0 mL·min⁻¹;进样口温度:270 ℃,分流比 100:1。升温程序:初始温度 100 ℃,保持 13 min。100~180 ℃,升温速率 10 ℃·min⁻¹,保持 6 min;180~200 ℃,升温速率 1 ℃·min⁻¹,保持 20 min;200~230 ℃,升温速率 4 ℃·min⁻¹,保持 20 min。检测器为 FID;温度 280 ℃,氢气 35 mL·min⁻¹,空气 350 mL·min⁻¹,尾吹气为氮气 30 mL·min⁻¹。色谱图结果按照峰面积归一化法进行计算。

1.4 数据分析

利用 Excel 2010 软件整理数据并进行变异分析,利用 SPSS Statistics 26 软件进行相关性分析、主成分分析及聚类分析。

2 结果与分析

2.1 大豆品质性状描述性统计

对两年中 173 份大豆种质资源中脂肪酸组分及粗脂肪含量分别进行描述性统计分析,结果如表 2 所示,大豆饱和脂肪酸中,棕榈酸含量最高,硬脂酸含量次之。在大豆所有脂肪酸中,棕榈酸的变异系数最小,2021 和 2022 年分别为 6.53% 和 6.20%。结果说明大豆脂肪酸组分中不同大豆种质的棕榈酸含量相对稳定。

表 2 173 份大豆种质资源品质性状变异

Table 2 Phenotypic variation of quality traits of 173 soybean germplasm resources

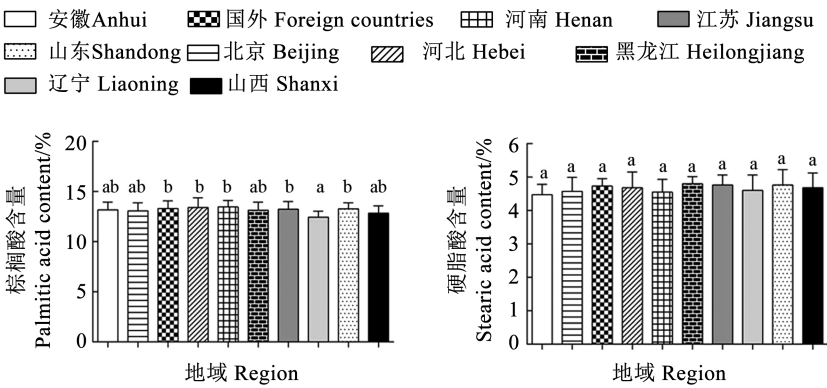
性状 Trait	年份 Year	最小值 Min. /%	最大值 Max. /%	均值 Mean/%	标准差 SD	变异系数 CV/%
棕榈酸	2021	11.26	16.85	12.72 nd	0.83	6.53
Palmitic acid	2022	11.14	15.43	13.18	0.82	6.20
硬脂酸	2021	3.73	5.00	4.30 nd	0.45	10.47
Stearic acid	2022	3.59	5.82	4.65	0.40	8.63
油酸	2021	11.40	37.80	25.98 nd	5.89	22.67
Oleic acid	2022	12.68	38.96	24.63	4.94	20.05
亚油酸	2021	33.05	56.86	49.01 nd	3.51	7.16
Linoleic acid	2022	37.44	58.94	50.42	3.86	7.66
亚麻酸	2021	4.21	11.53	7.75 nd	0.87	11.23
Linolenic acid	2022	4.76	10.17	7.11	0.96	13.60
粗脂肪	2021	16.83	23.79	20.13 nd	1.68	8.35
Crude fat	2022	16.37	24.05	20.08	1.70	8.48

注:nd代表在 $P < 0.05$ 水平下无显著性差异。
Note:nd indicates no significance at $P < 0.05$ level.

气相色谱法测定大豆脂肪酸组分的结果表明,大豆不饱和脂肪酸主要包括油酸、亚油酸和亚麻酸。其中油酸含量 2021 和 2022 年分别为 11.40% ~ 37.80%、12.68% ~ 38.96%,亚油酸含量 2021 和 2022 年分别为 33.05% ~ 56.86%、37.44% ~ 58.94%,亚麻酸含量 2021 和 2022 年分别为 4.21% ~ 11.53%、4.76% ~ 10.17%,同时两年中各脂肪酸组分间不存在显著性差异。大豆不饱和脂肪酸中以亚油酸含量最多,但是其变异幅度较小。在所有已测的大豆性状中,油酸的变异系数最大,2021 和 2022 年分别为 22.67% 和 20.05%。大豆粗脂肪含量变异也较为丰富,低粗脂肪含量 2021 和 2022 年分别为 16.83% 和 16.37%,高粗脂肪含量 2021 和 2022 年分别为 23.79% 和 24.05%。综上数据可知这 173

份大豆种质资源具有较丰富的遗传多样性,不同性状间有较大差异。

为了研究不同地域间大豆品种的脂肪酸组分含量以及粗脂肪含量的差异,以 2022 年测得的性状为基础,按照不同地域对大豆品质性状间分别进行了显著性分析,具体结果如图 1 所示:除大豆硬脂酸外,不同地域间的多种品质性状间存在一定显著性差异。在这 173 份大豆种质资源中,河南地区大豆平均棕榈酸含量最高为 13.46%,辽宁地区含量最低为 12.45%,但是其平均油酸含量最高为 29.59%。东北地区大豆品种的平均粗脂肪含量最高,黑龙江地区为 22.05%,辽宁地区为 21.35%;河南和江苏最低,分别为 18.55% 和 18.59%。



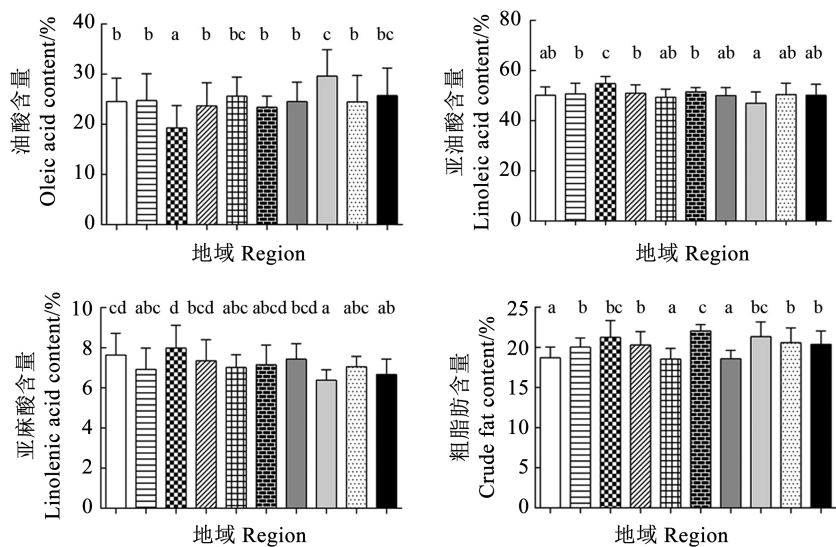


图1 不同地域间大豆品种的品质性状间的差异

Fig. 1 Differences between quality traits of soybean varieties in different regions

2.2 大豆种质资源品质性状的相关性分析

根据测定的大豆脂肪酸组分含量以及粗脂肪含量,对以上种质的品质性状进行相关性分析表明,两年分析结果较一致,不同性状相关性存在差异。棕榈酸与硬脂酸、亚油酸和亚麻酸呈极显著正相关,硬脂酸和棕榈酸分别与油酸呈极显著负相

关;大豆不饱和脂肪酸中油酸与亚油酸、亚麻酸呈极显著负相关;亚油酸与亚麻酸呈极显著正相关。大豆粗脂肪含量与油酸、亚油酸相关性最大,其中与油酸呈极显著正相关,而与亚油酸呈极显著负相关(表3)。结果说明提高大豆油脂含量与改善油脂品质并不矛盾。

表3 173份大豆种质资源品质性状两年间相关性分析

Table 3 Correlation of quality traits of 173 soybean germplasm resources in two years

2022 年	2021 年					
	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	粗脂肪 Crude fat
棕榈酸 Palmitic acid	1.000	0.220 **	-0.590 **	0.346 **	0.574 **	0.033
硬脂酸 Stearic acid	0.248 **	1.000	-0.214 **	0.069	0.095	-0.071
油酸 Oleic acid	-0.558 **	-0.202 **	1.000	-0.844 **	-0.761 **	0.308 **
亚油酸 Linoleic acid	0.335 **	0.074	-0.955 **	1.000	0.622 **	-0.311 **
亚麻酸 Linolenic acid	0.573 **	0.117	-0.766 **	0.600 **	1.000	0.031
粗脂肪 Crude fat	0.054	-0.040	0.214 **	-0.294 **	0.038	1.000

注: ** 代表在 $P < 0.01$ 水平下极显著差异。

Note: ** indicates significance at $P < 0.01$ level.

2.3 大豆品质性状的主成分分析

以2022年大豆品质性状数据为基础,利用主成分分析法对该173份大豆种质的脂肪酸组分以及粗脂肪含量进行分析,根据特征值大于1的标准提取了两个主成分,累计方差贡献率为69.441%。第一主成分的特征值为3.001,方差贡献率为50.010%,

其特征向量中最大值为亚油酸,其次为亚麻酸,说明第一主成分主要是与脂肪酸组分相关的性状;第二主成分的特征值为1.166,方差贡献率为19.431%,其特征向量中最大值为粗脂肪含量,为0.722。两主成分因子累计方差贡献率为69.441%(表4)。

表 4 173 份大豆种质资源品质性状的主成分分析

Table 4 Principal components analysis of quality traits of 173 soybean germplasm resources

性状 Trait	主成分 Principal component	
	1	2
棕榈酸 Palmitic acid	0.226	0.384
硬脂酸 Stearic acid	0.091	0.259
油酸 Oleic acid	-0.326	0.096
亚油酸 Linoleic acid	0.291	-0.279
亚麻酸 Linolenic acid	0.281	0.186
粗脂肪 Crude fat	-0.069	0.722
特征值 Eigenvalue	3.001	1.166
方差贡献率 Variance contribution rate/%	50.010	19.431
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	50.010	69.441

2.4 大豆种质资源油脂品质的综合评价

根据表 4 的数据可以得到两个主成分的得分公式: $F_1=0.226X_1+0.091X_2-0.326X_3+0.291X_4+0.281X_5-0.069X_6$; $F_2=0.384X_1+0.259X_2+$

$0.096X_3-0.279X_4+0.186X_5+0.722X_6$ 。

将各脂肪酸组分含量的标准值代入以上公式,分别计算 F_1 和 F_2 的值,结果显示: F_1 得分最高的的品种为国外大豆多马卡-托里萨,分值为 2.39,其次依次为冀豆 3 号、中特 1 号、皖华 518 和中黄 334; F_2 得分最高的品种为阜豆 4 号,分值为 2.59,其次依次为郑 92116、晋豆 39、辽豆 30 和科丰 14。

根据两个主成分的特征值计算 173 份大豆种质资源油脂的综合评价标准: $F=0.720 F_1+0.280 F_2$ 。 F 值越大,品质越优。根据表 5 数据可知:总得分 F 值最高的大豆品种为多马卡-托里萨,分值为 1.45,该品种两年中亚油酸含量最高,油酸含量最低;随后得分从高到低依次为中兴 1 号、冀豆 3 号、高丰 1 号和商豆 1201,这些品种的棕榈酸和硬脂酸含量较高,油酸含量相对较低;总得分 F 值最低的品种是徐豆 20,分值为 -1.88,该品系油酸含量相对较高,硬脂酸含量较低。以上结果说明大豆品种多马卡-托里萨的油脂品质综合表现最好。

表 5 极端油脂品质大豆品种的脂肪酸组分含量

Table 5 Content of fatty acid components of soybean varieties of extreme oil quality

单位: %

品种 Variety	年份 Year	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	粗脂肪 Crude fat
多马卡-托里萨	2021	15.12	4.97	11.40	56.86	10.23	20.79
Duomaka-Tuolisa	2022	14.14	5.08	12.68	58.94	9.16	20.91
中兴 1 号	2021	15.32	4.62	17.65	53.23	9.81	18.50
Zhongxing 1	2022	14.40	4.40	18.59	53.79	8.82	17.41
冀豆 3 号	2021	15.83	4.70	14.35	53.54	11.53	20.82
Jidou 3	2022	14.74	4.51	16.77	53.82	10.17	20.13
高丰 1 号	2021	15.03	4.83	17.55	54.22	9.21	21.78
Gaofeng 1	2022	13.05	4.83	18.90	55.53	7.69	21.53
商豆 1201	2021	14.97	4.80	20.55	52.32	8.45	20.12
Shangdou 1201	2022	13.91	4.97	21.23	53.00	6.88	19.56
徐豆 20	2021	12.26	3.92	35.80	42.27	5.67	19.88
Xudou 20	2022	12.19	3.85	35.21	43.03	5.72	19.54

2.5 大豆种质中油脂相关性状的系统聚类分析

利用欧式距离离差平方和法对 173 份大豆种质进行系统聚类分析的结果如图 2 所示,当欧氏距离为 8.1 时,可将以上大豆种质分为 5 大类群。第 I 类群包括 99 份种质,是所有种质中数量最大的类群,其主要表现为粗脂肪含量最低,其他性状表现中等;第 II 类群包括 41 份种质,其主要表现为硬脂

酸含量最低;第 III 类群仅包括 3 份种质,其表现为棕榈酸含量最高,油酸含量最低,亚油酸和亚麻酸含量最高,同时油脂品质的综合表现最好;第 IV 类群包括 5 份种质,其表现为硬脂酸和油酸含量最高,而亚油酸含量最低;第 V 类群包括 25 份种质,其表现为棕榈酸和亚麻酸含量最低,而粗脂肪含量最高。油脂品质的综合表现较差。

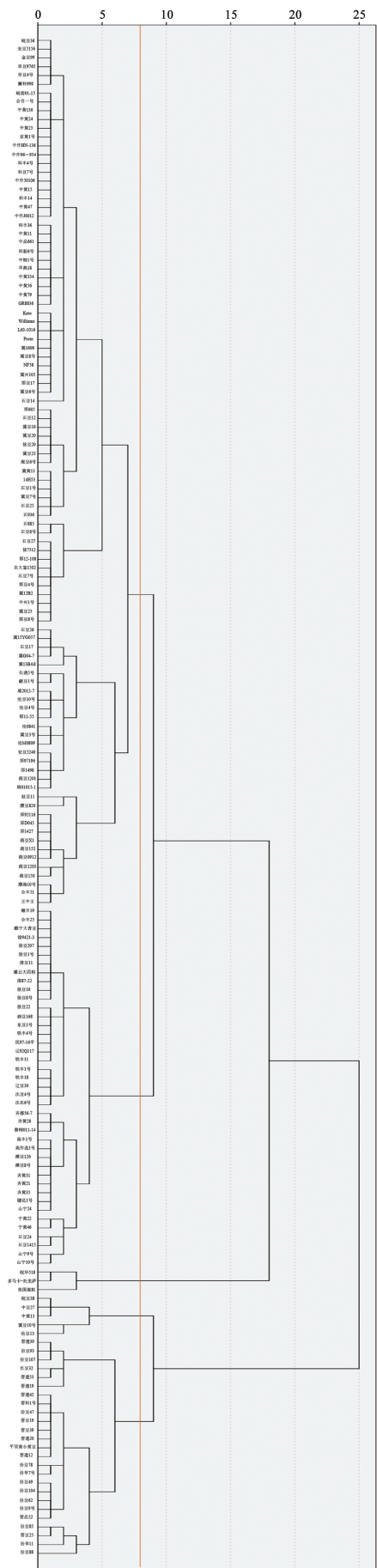


图 2 173 份大豆种质中油脂相关性状的系统聚类分析

Fig.2 Cluster graph of 173 soybean germplasm resources based on oil-related traits

3 讨论

大豆作为我国重要的粮油作物,是植物食用油的主要来源^[14]。在植物育种中对大豆种质资源进行油脂品质的综合鉴定和评价将有利于对大豆种质高效利用,为优良油脂品质的大豆品种的选育提供理论依据^[15-16]。现阶段对油脂品质评价主要依据的是利用近红外光谱技术所测定大豆粗脂肪含量的高低。由于影响大豆油脂品质的因素较多,而只测定其粗脂肪含量无法准确地对大豆的油脂品质进行综合评价。

本研究选取多脂肪酸组分作为影响大豆油脂合成的主要因素,首先分析了各脂肪酸组分与大豆粗脂肪含量的相关性。研究结果显示大豆饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸呈极显著正相关;与单不饱和脂肪酸即油酸呈极显著负相关。同时大豆粗脂肪含量与油酸含量呈极显著正相关。尽管大豆品质性状会受到地域的影响,但是本相关性的研究与前人的研究结果相一致^[17-18]。

为了对大豆油脂品质进行综合评价,本研究通过对 173 份大豆种质的油脂相关性状进行主成分分析,得到了 2 个主成分因子,分别是不饱和脂肪酸因子(油酸、亚油酸、亚麻酸)和粗脂肪因子,累计方差贡献率为 69.441%。近些年也有研究者对不同地域大豆的品质性状进行过分析及综合评价,但是其研究多基于农艺性状以及蛋白质和粗脂肪含量的综合表现,缺乏对大豆油脂品质评价方面的研究,这对于后续大豆油的生产加工具有一定指导意义^[19-21]。本研究选取评价大豆油脂品质的因子是脂肪酸组分以及粗脂肪含量,有研究表明基于脂肪酸组分主成分分析评价植物的油脂品质已成功应用于多种油料作物,例如油茶籽、芝麻、核桃^[22-24]等。同时在食用油生产方面,陈振超等^[25]分别对橄榄油、油茶籽油、茶叶籽油、香榧油、红松籽油和核桃油这 6 种木本油料作物的油脂品质进行综合评价时,也同样选取了脂肪酸组分为重要的影响因子。以上研究为基于脂肪酸组分主成分分析对大豆油脂品质进行综合评价的研究奠定了良好的基础。

4 结论

本研究通过对 173 份大豆种质进行脂肪酸组分和粗脂肪含量的测定,结果表明大豆饱和脂肪酸(棕榈酸和硬脂酸)分别与油酸含量呈极显著负相关;与多不饱和脂肪酸(亚油酸与亚麻酸)呈极显著正相关,大豆粗脂肪含量与油酸、亚油酸相关性最大,其中与油酸呈极显著正相关,而与亚油酸呈极显著负相关。利用主成分分析法确立了 2 个主成分因子用以评价大豆油脂品质的优良,其中多马卡-托里萨、中兴 1 号、冀豆 3 号、高丰 1 号和商豆 1201 综合表现最好。利用系统聚类分析法将 173 份大豆种质分为了 5 个类群,其中第Ⅲ类群表现较突出,具体表现为棕榈酸含量最高,油酸含量最低,亚油酸和亚麻酸含量最高,同时油脂品质的综合表现最好。

参考文献

[1] CHEN H, QIU S, GAN J, et al. New insights into the antioxidant activity and components in crude oat oil and soybean oil [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(1): 808-815.

[2] CLEMENTE T E, CAHOON E B. Soybean oil: Genetic approaches for modification of functionality and total content [J]. Plant Physiology, 2009, 151(3): 1030-1040.

[3] FARIAS A F F, DA CONCEIÇÃO M M, CAVALCANTI E H S, et al. Analysis of soybean biodiesel additive with different formulations of oils and fats [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 123(3): 2121-2127.

[4] JIA P, ZHANG M, HU L, et al. Green plasticizers derived from soybean oil for poly(vinyl chloride) as a renewable resource material [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, 33(3): 1080-1087.

[5] PAPADAKI A, KOPSAHELIS N, MALLOUCHOS A, et al. Bio-process development for the production of novel oleogels from soybean and microbial oils [J]. Food Research International, 2019, 126:108684.

[6] COSTA NETO P R, CARO M S B, MAZZUCO L M, et al. Quantification of soybean oil ethanolysis with ¹H NMR [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2004, 81(12): 1111-1114.

[7] BLANCO M, VILLARROYA I. NIR spectroscopy: A rapid-response analytical tool [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2002, 21(4):240-250.

[8] DASARI S R, GOUD V V. Effect of pre-treatment on solvents extraction and physico-chemical properties of castor seed oil[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6: 1-16.

[9] BEWLEY J D, BLACK M A. Seeds: physiology of development and germination [J]. Seed Science Research, 1994, 5 (2): 127-128.

[10] 郑德松. 油脂合成过程中甘油三磷酸脱氢酶基因及乙酰辅酶A羧化酶基因的克隆与鉴定[D]. 山东: 山东农业大学, 2012:12-18. (ZHENG D S. Cloning and identification of genes involved in triacylglycerol synthesis [D]. Shandong: Shandong Agricultural University, 2012:12-18.)

[11] HASLAM R P, SAYANOVA O, KIM H J, et al. Synthetic redesign of plant lipid metabolism [J]. Plant Journal, 2016, 87 (1): 76-86.

[12] AKOND M, LIU S, BONEY M, et al. Identification of quantitative trait loci (QTL) underlying protein, oil, and five major fatty acids' contents in soybean [J]. American Journal of Plant Sciences, 2014, 5(1): 158-167.

[13] SHANTHA N C, NAPOLITANO G E. Gas chromatography of fatty acids[J]. Journal of Chromatography A, 1992, 624(1-2):37-51.

[14] ESKANDARI M, COBER E R, RAJCAN I. Using the candidate gene approach for detecting genes underlying seed oil concentration and yield in soybean [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2003, 126: 1839-1850.

[15] 邱丽娟, 李英慧, 关荣霞, 等. 大豆核心种质和微核心种质的构建、验证与研究进展[J]. 作物学报, 2009, 35 (4): 571-579. (QIU L J, LI Y H, GUAN R X, et al. Establishment, representative testing and research progress of soybean core collection and mini core collection[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(4): 571-579.)

[16] 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. (ZHAO C S, WANG R Z, LI Y H, et al. Comprehensive analysis and evaluation of the phenotype and quality traits of Jiangxi soybean germplasm resources [J]. Soybean Science, 2019, 38 (5): 686-693.)

[17] 徐杰, 胡国华, 张大勇. 大豆种子脂肪酸组分的研究进展 [J]. 大豆科学, 2005, 24 (1): 61-66. (XU J, HU G H, ZHANG D Y. Study advance on fatty acid composition of soybean [J]. Soybean Science, 2005, 24(1): 61-66.)

[18] 胡明祥, 梁歧, 孟祥勋. 我国大豆品种脂肪酸组成的分析研究[J]. 吉林农业科学, 1985(4):1-6. (HU M X, LIANG Q, MENG X X. Analysis study on fatty acid composition of soybean in China[J]. Jilin Agricultural Science, 1985(4):1-6.)

[19] 侯慧娟. 大豆种质资源籽粒品质和农艺性状综合评价[D]. 山西: 山西农业大学, 2020:30-33. (HOU H J. Comprehensive evaluation of seed quality and agronomic characters of soybean germplasm resources[D]. Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2020:30-33.)

[20] 赵朝森, 王瑞珍, 赵现伟. 国外大豆种质资源农艺及品质性状分析与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22 (3): 665-673. (ZHAO C S, WANG R Z, ZHAO X W. Analysis and evaluation of agronomic and quality traits of soybean germplasm resources from abroad[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(3): 665-673.)

[21] 徐泽俊, 齐玉军, 邢兴华, 等. 黄淮海大豆种质农艺与品质性状分析及综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23 (2): 468-479. (XU Z J, QI Y J, XING X H, et al. Analysis and evaluation of agronomic and quality traits in soybean germplasms from Huang-Huai-Hai region [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(2): 468-479.)

[22] 王亚萍, 费学谦, 姚小华, 等. 不同产地油茶籽脂肪酸及甘油三酯的主成分分析和聚类分析[J]. 中国油脂, 2021, 46(9): 112-119. (WANG Y P, FEI X Q, YANG X H, et al. Principal component analysis and cluster analysis of fatty acids and triglycerides in oil-tea camellia seeds from different origins [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(9): 112-119.)

[23] 严圭, 李辉婕, 华之梦, 等. 基于主成分分析的芝麻品质综合评价[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42 (6): 1139-1150. (YAN G, LI H J, HUA Z M, et al. Comprehensive evaluation of quality of sesame based on principal component analysis[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42 (6): 1139-1150.)

[24] 耿树香, 宁德鲁, 贺娜, 等. 云南主栽核桃品种油脂及蛋白综合评价分析[J]. 食品科技, 2018, 43(2): 124-131. (GENG S X, NING D L, HE N, et al. Comprehensive evaluation and analysis on oil and protein of walnut cultivars in Yunnan[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(2): 124-131.)

[25] 陈振超, 倪张林, 莫润宏, 等. 7种木本油料油脂品质综合评价[J]. 中国油脂, 2018, 43(11): 80-85. (CHEN Z C, NI Z L, MO R H, et al. Comprehensive evaluation on quality of oils from seven kinds of woody oilcrops [J]. China Oils and Fats, 2018, 43(11): 80-85.)