

# 不同颜色芝麻营养品质性状遗传变异分析

罗自舒, 王志坚, 周王易, Senouwa Segla Koffi Dossou,

周 蓉, 张艳欣, 黎冬华, 游 均, 王林海

(农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室/中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062)

**摘要:** 为分析不同颜色芝麻间的品质差异特征, 本研究对 157 份包含白、黄、褐、黑不同种皮颜色的芝麻种质资源, 在武汉和驻马店两个环境下的 13 个营养品质性状进行测定分析。结果表明: 157 份芝麻种质平均含油量为 52.96%, 油酸、亚油酸、芝麻素、芝麻林素、菜油甾醇、 $\beta$ -谷甾醇的平均含量分别为 40.65%、44.32%、2.67 mg/g、1.61 mg/g、1.22 mg/g、2.96 mg/g。平均含油量随着芝麻种皮颜色加深逐渐降低; 总甾醇含量在黑芝麻中最高; 芝麻素和芝麻林素在白芝麻中含量最高, 在黑芝麻中含量最低; 黄芝麻油酸含量最高, 褐芝麻亚油酸含量最高。黑芝麻含油量、油酸含量、芝麻素和芝麻林素含量显著低于白芝麻, 硬脂酸、亚油酸、花生酸、菜油甾醇和  $\beta$ -谷甾醇含量在不同颜色芝麻中无显著差异。13 个营养品质性状中,  $\beta$ -谷甾醇与豆甾醇,  $\Delta^5$ -燕麦甾醇与豆甾醇, 芝麻素与芝麻林素, 芝麻素与含油量, 芝麻林素与菜油甾醇间呈极显著正相关, 油酸和亚油酸间呈极显著负相关; 黑芝麻  $\Delta^5$ -燕麦甾醇与豆甾醇、芝麻素与芝麻林素间的相关系数高于其他颜色芝麻。聚类分析可将 157 份芝麻材料分为 4 个亚群, 第 I 和第 II 亚群分别以褐黑色和黄白色芝麻为主, 第 III 亚群包含高芝麻素材料, 第 IV 亚群包含高亚油酸材料和高含油量材料。本研究探明了不同颜色芝麻间的品质差异特性, 为芝麻种质资源的利用和遗传改良提供了参考和优异种质。

**关键词:** 芝麻; 种皮颜色; 营养品质; 含量变异

## Genetic Variation Analysis of Nutritional Quality Traits in Sesame with Different Seed Coat Colors

LUO Zi-shu, WANG Zhi-jian, ZHOU Wang-yi, DOSSOU Senouwa Segla Koffi, ZHOU Rong,

ZHANG Yan-xin, LI Dong-hua, YOU Jun, WANG Lin-hai

(Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Oil crops research institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062)

**Abstract:** In order to analyze the quality characteristics of sesame seed with different colors, 13 nutritional quality traits of 157 sesame germplasm resources with different seed coat colors (white, yellow, brown, and black) were tested and analyzed in Wuhan and Zhumadian. The results showed that average oil content of 157 sesame germplasm was 52.96%, and the average contents of oleic acid, linoleic acid, sesamin, sesamol, campesterol, and  $\beta$ -sitosterol were 40.65%, 44.32%, 2.67 mg/g, 1.61 mg/g, 1.22 mg/g and 2.96 mg/g, respectively. The average oil content decreased gradually with the deepening of seed coat color. The total sterol content was the highest in black sesame. The content of sesamin and sesamol was the highest in white sesame and the lowest in black sesame. Oleic acid content of yellow sesame and linoleic acid content of brown sesame were the highest. Oil content, oleic acid content, sesamin and sesamol content of black sesame were significantly lower than those in white sesame, but no significant differences in contents of stearic acid, linoleic acid,

收稿日期: 2022-09-19 修回日期: 2022-11-22 网络出版日期: 2022-12-15

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220919001>

第一作者研究方向为芝麻品质改良, E-mail: luozishu22@163.com

通信作者: 王林海, 研究方向为芝麻优异基因发掘与品质改良, E-mail: wanglinhai@caas.cn

游 均, 研究方向为芝麻次生代谢与品质形成调控, E-mail: junyou@caas.cn

**基金项目:** 湖北省重点研发项目(2020BBA045, 2020BHB028); 湖北省农业科技创新项目(2021-620-000-001-035); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-14)

**Foundation projects:** The Key Research Projects of Hubei Province (2020BBA045, 2020BHB028); The Agricultural Science and Technology Innovation Project of Hubei Province (2021-620-000-001-035); The Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-14)

arachidic acid, campesterol and  $\beta$ -sitosterol in sesame seeds with different colors were observed. Among the 13 nutritional quality traits, there were significant positive correlations between  $\beta$ -sitosterol and stigmasterol,  $\Delta$ 5-avenasterol and stigmasterol, sesamin and sesamol, sesamin and oil content, sesamol and campesterol, and significant negative correlations between oleic acid and linoleic acid. The correlation coefficients between  $\Delta$ 5-avenasterol and stigmasterol, sesamin and sesamol were higher in black sesame than in sesame with other colors. The 157 sesame genotypes were divided into four subgroups by cluster analysis. The first and second subgroups were mainly brown black and yellow white sesame, respectively. The third subgroup contained high sesame materials, and the fourth subgroup contained high linoleic acid materials and high oil content materials. Collectively, this study explored the quality characteristics of sesame seed with different colors, which provided reference and excellent germplasm for utilization and genetic improvement of sesame germplasm resources.

**Key words:** sesame; seed coat color; nutritional quality; content variation

芝麻(*Sesamum indicum* L.)属胡麻科胡麻属,是古老的油料作物之一,主要种植在亚洲、非洲的热带和亚热带地区。我国是芝麻主要生产和消费国,河南、湖北、安徽、江西是芝麻主要种植地区,种植面积和总产占据全国的75%以上,其中江西省以黑芝麻为主,河南省以白芝麻为主,湖北、安徽兼种白芝麻和黑芝麻。白芝麻主栽品种籽粒的平均含油量为55%左右,被誉为“油料皇后”<sup>[1-2]</sup>,可用于榨油或直接食用,也可作香料、医药和化工原料,具有广泛的用途<sup>[3]</sup>。

芝麻的多种用途与其特异营养品质密不可分。芝麻不仅富含不饱和脂肪酸和蛋白质,且富含木脂素类抗氧化成分,尤其是芝麻素和芝麻林素含量丰富,大量药理研究表明其具有抗衰老、增强免疫、抑制诱发癌症、促进肝脏解毒、防止中风、预防心血管疾病等功能<sup>[4-6]</sup>。此外,芝麻还富含植物甾醇,具有降低胆固醇、抗氧化、消炎退热及抗癌等功能<sup>[7-8]</sup>。据报道,芝麻中植物甾醇含量与油菜相当,在双子叶作物中居前列<sup>[9]</sup>。

芝麻种皮颜色丰富多样,从白色到黑色呈连续性变异<sup>[10]</sup>。生产上以白芝麻和黑芝麻为主,此外还有黄芝麻、褐芝麻等。在我国,不同颜色的芝麻用途有一定差异,白芝麻主要用于榨油和部分食品原料,黑芝麻多用于生产芝麻糊、芝麻粉等食品,且被收入《中国药典》。研究发现不同颜色的芝麻所含营养物质不完全相同。汪学德等<sup>[11]</sup>研究发现白芝麻因其脂肪、抗氧化物质含量高,草酸、灰分含量低而优于黑芝麻。黄晓荣<sup>[12]</sup>研究发现黑芝麻中棕榈酸与硬脂酸含量显著高于白芝麻,而油酸和花生酸显著低于白芝麻。贾斌等<sup>[13]</sup>研究发现不同种皮颜色芝麻品质指标有很大差异,其中白芝麻中芝麻素和芝麻林素含量均显著高于黑芝麻,而黑芝麻中异

亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸含量显著高于白芝麻。

然而,目前对不同颜色芝麻营养品质的比较分析还较少,主要集中在对黑、白芝麻的分析上,对其他颜色如黄色、褐色等芝麻关注不多,且分析主要集中在含油量、脂肪酸和木脂素含量等方面,对甾醇含量未进行检测;同时,因试验设计限制,缺乏对不同环境下品质性状变异分析,限制了相关结果的应用。本研究针对上述问题,从国家芝麻种质资源库丰富的材料中,选择数量相当的白、黄、褐、黑芝麻,在不同环境中种植,测定分析其营养品质指标变异特征,揭示不同颜色芝麻的营养差异,为芝麻多元化利用提供理论依据和优异材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用157份芝麻材料由中国农业科学院油料作物研究所芝麻与特色油料遗传育种创新团队及国家芝麻种质资源中期库(武汉)提供(表1),包括40份白色芝麻,37份黄色芝麻,40份褐色芝麻和40份黑色芝麻。

### 1.2 试验方法

2019年种植于驻马店和武汉两个环境,3次重复,每份材料每个重复种植30株,随机区组设计。在小区正常成熟后人工收获,自然晾晒后脱粒。不同环境下每份材料3个重复等量混合后用于品质测定分析。

参照行标《NY/T 1285—2007 油料种籽含油量的测定 残余法》进行含油量测定。参照Li等<sup>[14]</sup>的方法提取脂肪酸,稍有改进,具体为使用10~20 mg芝麻种子,再用气相色谱仪进行色谱分析和测定。

表 1 157 份芝麻材料信息表

Table 1 Annexed table Information sheet of 157 sesame materials

编号 Code	种皮颜色 Seed color	名称 Name	品种类型 Variety type	编号 Code	种皮颜色 Seed color	名称 Name	品种类型 Variety type
1	白	芝麻	地方品种	47	黄	铁青芝麻	地方品种
2	白	白银芝麻	地方品种	48	黄	芝麻	地方品种
3	白	驻芝 1 号	育成品种	49	黄	芝麻	地方品种
4	白	黑芝麻	地方品种	50	黄	茄芝麻	地方品种
5	白	白芝麻	地方品种	51	黄	紫花芝麻	地方品种
6	白	对角芝麻	地方品种	52	黄	芝麻	地方品种
7	白	786	育成品种	53	黄	得垒垒	地方品种
8	白	乌脚粘	地方品种	54	黄	湖口芝麻	地方品种
9	白	中芝 5 号	育成品种	55	黄	黄芝麻	地方品种
10	白	芝麻	地方品种	56	黄	VIR 136	地方品种
11	白	八棱芝麻	地方品种	57	黄	VIR 146	地方品种
12	白	褐芝麻	地方品种	58	黄	VIR 202	地方品种
13	白	白芝麻	地方品种	59	黄	VIR 207	地方品种
14	白	白芝麻	地方品种	60	黄	Oro short-<2>	国外芝麻
15	白	芝麻	地方品种	61	黄	301(3)	国外芝麻
16	白	叶叶 3	地方品种	62	黄	Suke No 5-<1>	国外芝麻
17	白	芝麻	地方品种	63	黄	儒城	国外芝麻
18	白	白芝麻	地方品种	64	黄	91-2299	国外芝麻
19	白	五撮连	地方品种	65	黄	Boder Racet <sup>②</sup>	国外芝麻
20	白	黑芝麻	地方品种	66	黄	EC - 342782	国外芝麻
21	白	芝麻	地方品种	67	黄	EC - 350643	国外芝麻
22	白	转珠联一 1	地方品种	68	黄	Calinda	国外芝麻
23	白	中芝 8 号	育成品种	69	黄	紫花叶二 3	地方品种
24	白	四方芝麻	地方品种	70	黄	芝麻	地方品种
25	白	芝麻	地方品种	71	黄	四棱糙	地方品种
26	白	黑芝麻	地方品种	72	黄	白糙	地方品种
27	白	张店白	地方品种	73	黄	红芝麻	地方品种
28	白	独山黑	地方品种	74	黄	分杈芝麻	地方品种
29	白	多枝麻	地方品种	75	黄	芝麻	地方品种
30	白	六角白芝麻	地方品种	76	黄	Margo short	国外芝麻
31	白	芝麻	地方品种	77	黄	SE101V	地方品种
32	白	芝麻	地方品种	78	褐	褐芝麻	地方品种
33	白	白芝麻	地方品种	79	褐	柳条青	地方品种
34	白	半汤芝麻	地方品种	80	褐	芝麻	地方品种
35	白	白芝麻	地方品种	81	褐	黄芝麻	地方品种
36	白	油芝麻	地方品种	82	褐	小籽黄	地方品种
37	白	霸王鞭	地方品种	83	褐	歪嘴红	地方品种
38	白	芝麻	地方品种	84	褐	红洋芝麻	地方品种
39	白	大演黑	地方品种	85	褐	地壳黄	地方品种
40	白	花芝麻	地方品种	86	褐	芝麻	地方品种
41	黄	八股杈	地方品种	87	褐	芝麻	地方品种
42	黄	和尚帽	地方品种	88	褐	芝麻	地方品种
43	黄	观音麻	地方品种	89	褐	芝麻	地方品种
44	黄	芝麻	地方品种	90	褐	芝麻	地方品种
45	黄	芝麻	地方品种	91	褐	蝗芝麻	地方品种
46	黄	黄芝麻	地方品种	92	褐	河南一号	育成品种

表1(续)

编号 Code	种皮颜色 Seed color	名称 Name	品种类型 Variety type	编号 Code	种皮颜色 Seed color	名称 Name	品种类型 Variety type
93	褐	火麻	地方品种	126	黑	乌鸦黑	地方品种
94	褐	霸王鞭	地方品种	127	黑	海会黑芝麻	地方品种
95	褐	黄芝麻	地方品种	128	黑	黑芝麻	地方品种
96	褐	麻芝麻	地方品种	129	黑	颖上芝麻六号	地方品种
97	褐	褐芝麻	地方品种	130	黑	黑芝麻	地方品种
98	褐	芝麻	地方品种	131	黑	白芝麻	地方品种
99	褐	3根枪	地方品种	132	黑	千层塔	地方品种
100	褐	二郎花芝麻	地方品种	133	黑	多蒴果芝麻	地方品种
101	褐	黄池芝麻	地方品种	134	黑	大头棒	地方品种
102	褐	芝麻	地方品种	135	黑	尚宁矮芝麻	地方品种
103	褐	芝麻	地方品种	136	黑	矮脚金黄麻	地方品种
104	褐	红芝麻	地方品种	137	黑	雒荣串麻	地方品种
105	褐	黑芝麻	地方品种	138	黑	城厢黑芝麻	地方品种
106	褐	芝麻	地方品种	139	黑	黑芝麻	地方品种
107	褐	发芝麻	地方品种	140	黑	含光缠身四棱	地方品种
108	褐	芝麻	地方品种	141	黑	黑芝麻	地方品种
109	褐	白芝麻	地方品种	142	黑	岱山黑芝麻	地方品种
110	褐	球黑麻选3	地方品种	143	黑	黑芝麻	地方品种
111	褐	黑芝麻	地方品种	144	黑	黑芝麻	地方品种
112	褐	老红芝麻	地方品种	145	黑	黑芝麻	地方品种
113	褐	叶二3	地方品种	146	黑	SINYA DANA-3	国外芝麻
114	褐	芝麻	地方品种	147	黑	EC-355666	国外芝麻
115	褐	黑芝麻	地方品种	148	黑	VDM10D	地方品种
116	褐	芝麻	地方品种	149	黑	VDM40D	地方品种
117	褐	芝麻	地方品种	150	黑	VIR 741	地方品种
118	黑	炭麻	地方品种	151	黑	H98	育成品种
119	黑	芝麻	地方品种	152	黑	冀芝1号	育成品种
120	黑	忆芝麻	地方品种	153	黑	黑芝麻	地方品种
121	黑	紧口黑芝麻	地方品种	154	黑	油芝麻	地方品种
122	黑	芝麻	地方品种	155	黑	黑芝麻	地方品种
123	黑	芝麻	地方品种	156	黑	METHILA	国外芝麻
124	黑	木镇白	地方品种	157	黑	me den	地方品种
125	黑	黑芝麻	地方品种				

参照国标《GB/T 25223-2010 动植物油脂甾醇组成和甾醇总量的测定 气相色谱法》对甾醇含量进行测定。

参照国标《NY/T 1595-2008 芝麻中芝麻素含量的测定 高效液相色谱法》对芝麻素和芝麻林素含量进行测定。

上述含油量、脂肪酸、甾醇、芝麻素、芝麻林素等品质指标,所有样品测定2次,当两次数据相差超过10%以上时进行复测。

### 1.3 统计分析

采用Excel、SPSS软件进行数据统计分析和方差分析。用GraphPad Prism 8进行芝麻品质性状比

较的图形绘制。相关性分析在R软件(4.1.0版)([www.R-project.org](http://www.R-project.org))中进行。最后,使用在线工具MetaboAnalyst 5.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/MetaboAnalyst>)进行聚类热图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 芝麻中主要营养品质性状遗传变异分析

157份芝麻种质资源在武汉和驻马店两个环境下平均含油量为52.96%(表2),变幅为43.41%~58.48%,变异系数为5.65%。芝麻脂肪酸主要由油酸、亚油酸、亚麻酸、棕榈酸、硬脂酸和花生酸组成,其中不饱和脂肪酸(油酸、亚油酸、亚麻酸)含量变

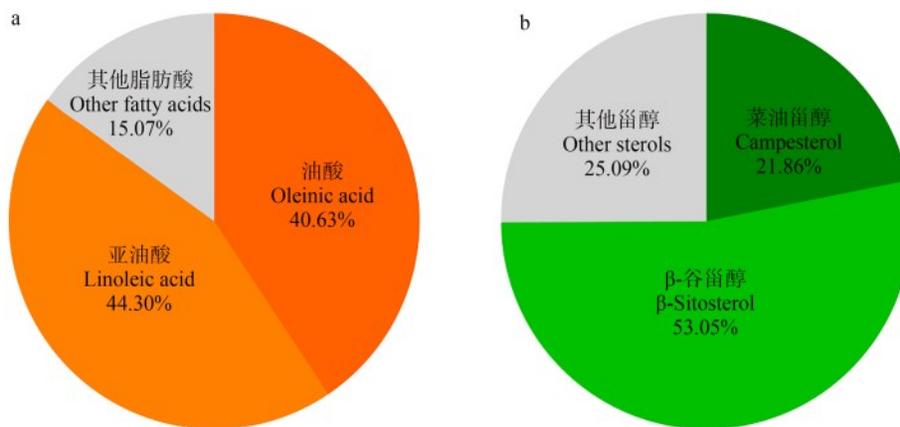
化在 82.69%~88.30%;油酸与亚油酸总比例平均占芝麻中总脂肪酸的 80% 左右,是主要的不饱和脂肪酸(图 1a)。油酸平均含量为 40.65%,变幅为 32.86%~48.41%,亚油酸平均含量为 44.32%,变幅为 37.69%~52.26%,变异系数分别为 6.17% 和 5.30%。油酸和

亚油酸在不同芝麻种质资源中相对比较稳定,硬脂酸和花生酸则具有更大的变异。从两个环境的平均值看,编号 31 的含油量最高,达到 58.48%;编号 21 的不饱和脂肪酸含量最高,达到 88.30%。

表 2 157 份芝麻资源主要营养品质性状的变异特征

Table 2 Variation analysis of the main nutritional quality traits in 157 sesame accessions

品质指标 Quality index	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	变异系数(%) CV
含油量(%) Oil content	58.48	43.41	52.96±2.99	5.65
油酸(%) Oleic acid	48.41	32.86	40.65±2.51	6.17
亚油酸(%) Linoleic acid	52.26	37.69	44.32±2.35	5.30
亚麻酸(%) Linolenic acid	0.49	0.17	0.34±0.04	11.76
棕榈酸(%) Palmitic acid	12.03	7.37	9.27±0.74	7.98
硬脂酸(%) Stearic acid	6.52	2.11	5.01±0.61	12.18
花生酸(%) Arachidic acid	0.65	0.24	0.46±0.09	19.57
芝麻素(mg/g) Sesamin	7.34	0.49	2.67±1.20	44.94
芝麻林素(mg/g) Sesamol	2.67	0.03	1.61±0.45	27.95
菜油甾醇(mg/g) Campesterol	2.64	0.51	1.22±0.39	31.97
豆甾醇(mg/g) Stigmasterol	1.49	0.53	0.90±0.20	22.22
β-谷甾醇(mg/g) β-sitosterol	4.38	1.97	2.96±0.41	13.85
Δ5-燕麦甾醇(mg/g) Δ5-Avenasterol	0.93	0.15	0.50±0.15	30.00



a: 油酸、亚油酸占总脂肪酸的比例; b: 菜油甾醇、β-谷甾醇占总甾醇的比例

a: Proportion of oleic acid and linoleic acid in total fatty acids; b: Proportion of campesterol and β-sitosterol in total sterols

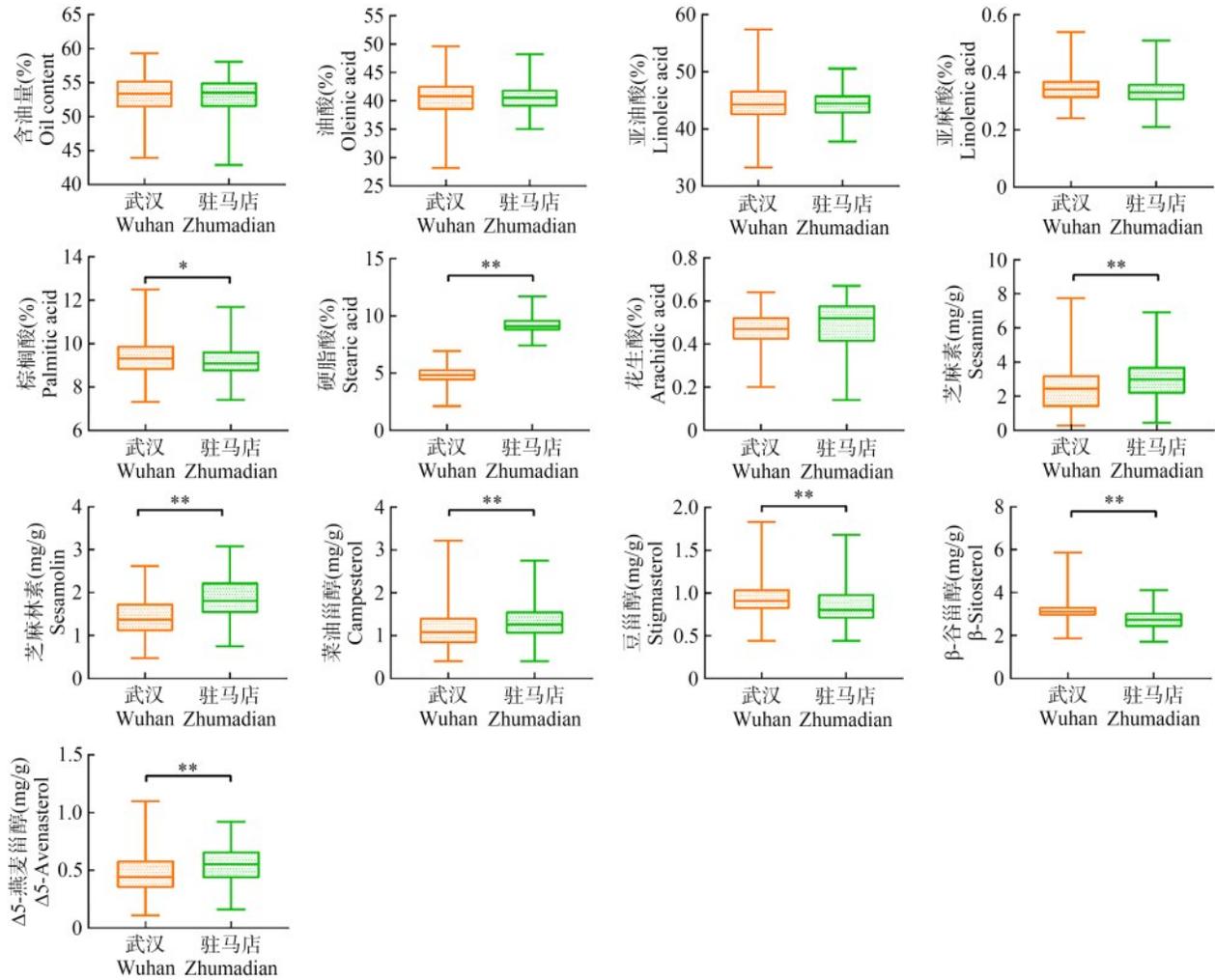
图 1 芝麻种子脂肪酸和植物甾醇构成比例

Fig.1 Composition ratio of fatty acid and phytosterol in sesame seed

微量功能性成分植物甾醇和木脂素等在芝麻种质中存在广泛变异。植物甾醇总含量变化在 4.03~8.99 mg/g,主要由菜油甾醇、豆甾醇、Δ5-燕麦甾醇、β-谷甾醇等 4 种成分组成,其中菜油甾醇和 β-谷甾醇含量相对较高,合计占芝麻中总甾醇的 74.91%(图 1b),平均分别为 1.22 mg/g 和 2.96 mg/g。木脂素总含量变化在 1.32~9.61 mg/g,主要由芝麻素和芝麻林素组成,其中芝麻素平均含量为 2.67 mg/g,变幅为 0.49~7.34 mg/g,变异系数为 44.94%;芝麻林素平均含量

为 1.61 mg/g,变幅为 0.03~2.67 mg/g,变异系数为 27.95%。在这些材料中,编号 120 的忆芝麻总甾醇含量最高,达到 8.99 mg/g;编号 114 的芝麻木脂素(芝麻素与芝麻林素相加之和)含量最高,达到 9.61 mg/g。

在两个环境间,不同品质性状存在一定差异(图 2)。其中,驻马店环境下硬脂酸、菜油甾醇、Δ5-燕麦甾醇、芝麻素和芝麻林素含量极显著高于武汉环境,而棕榈酸、豆甾醇、β-谷甾醇含量显著或极显著低于武汉环境(图 2)。



\*\*、\* : 分别表示在  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  水平下差异

\*\*、\* : Indicate significant difference at  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$  levels, respectively

图2 不同环境下芝麻品质性状比较

Fig.2 Comparison of sesame quality traits in different environments

## 2.2 不同颜色芝麻营养品质性状差异分析

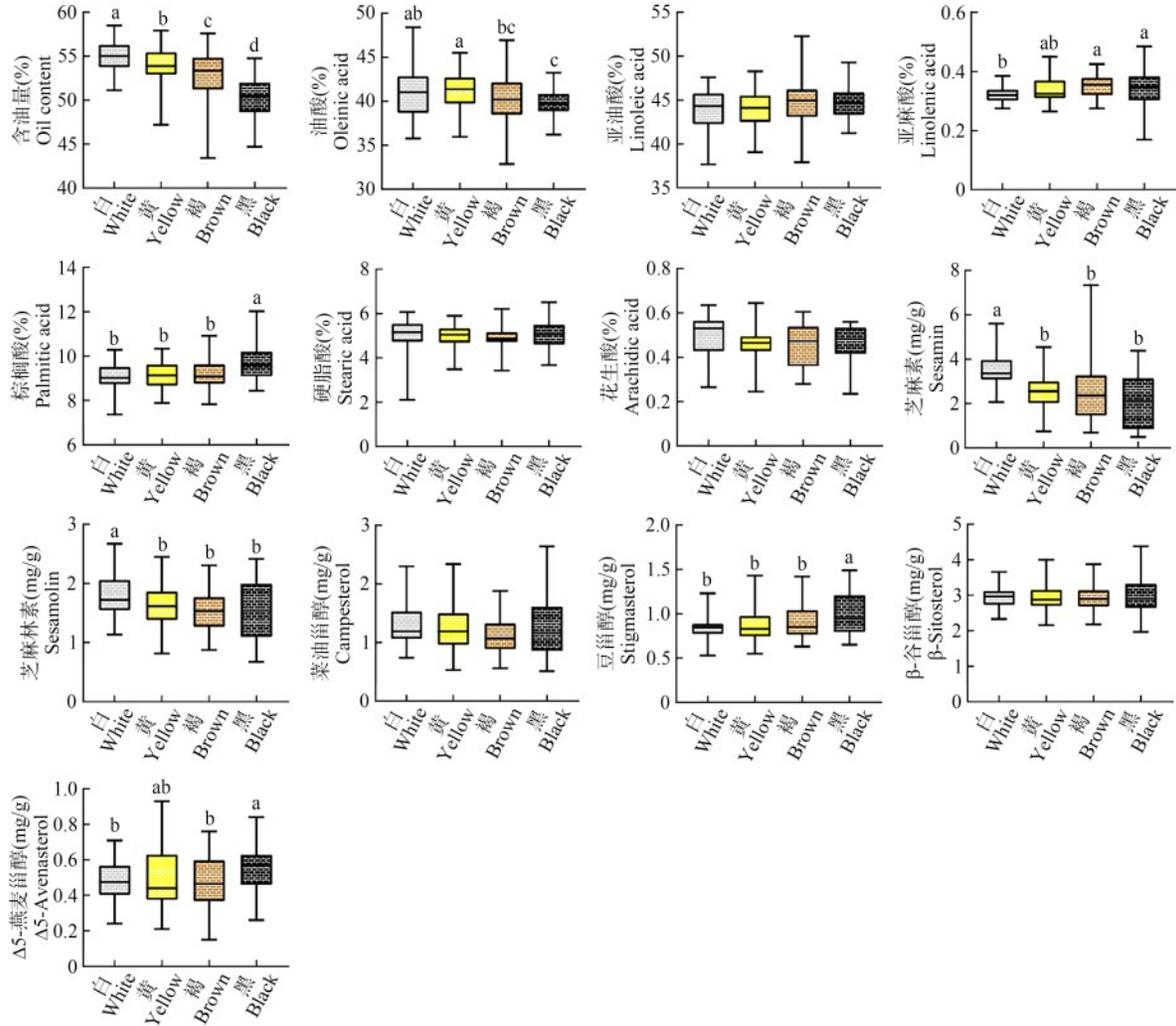
将 157 份芝麻按种皮颜色分组比较发现, 棕榈酸、油酸、亚麻酸、含油量、豆甾醇、 $\Delta 5$ -燕麦甾醇、芝麻素和芝麻林素含量在不同颜色芝麻间存在不同程度显著差异(图 3)。其中, 黑芝麻中含油量、油酸、芝麻素和芝麻林素含量均显著低于白芝麻, 但豆甾醇、 $\Delta 5$ -燕麦甾醇、亚麻酸、棕榈酸等含量均显著高于白芝麻。在含油量方面, 表现出随着芝麻颜色加深逐渐降低, 即白色芝麻 > 黄色芝麻 > 褐色芝麻 > 黑色芝麻, 油酸含量也表现出浅色芝麻高于深色芝麻的趋势。而硬脂酸、亚油酸、花生酸、菜油甾醇和  $\beta$ -谷甾醇的含量在不同颜色芝麻材料中无显著差异。从变异系数上看, 含油量、芝麻素和芝麻林素含量的变异系数在白芝麻中最小, 在黑芝麻中最大。综合以上结果说明, 与其他颜色芝麻相比, 白

芝麻的含油量、芝麻素和芝麻林素含量较高, 且变异较小。

## 2.3 芝麻品质性状间相关性分析

计算 157 份芝麻各个品质性状的相关系数, 结果如图 4 所示,  $\beta$ -谷甾醇与豆甾醇,  $\Delta 5$ -燕麦甾醇与豆甾醇, 芝麻素与芝麻林素, 芝麻素与含油量, 芝麻林素与菜油甾醇间, 均存在极显著正相关关系。特别是芝麻林素与菜油甾醇间相关系数达 0.85;  $\beta$ -谷甾醇与豆甾醇相关系数达 0.69。油酸和亚油酸间呈极显著负相关, 相关系数为 -0.92。

进一步对各品质指标在不同颜色芝麻中的相关性进行分析发现, 白色、黄色、褐色、黑色芝麻中部分品质性状相关性表现一致, 但相关强弱程度不同(图 5)。如白芝麻中芝麻林素与菜油甾醇, 褐色芝麻中  $\beta$ -谷甾醇与豆甾醇, 黑芝麻中  $\Delta 5$ -燕麦甾醇与

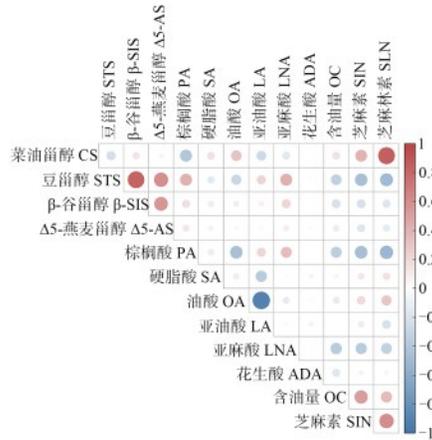


a, b, c, d 表示不同颜色芝麻之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

a, b, c, d indicate that there are significant differences between sesame seeds with different colors ( $P < 0.05$ )

图3 不同颜色芝麻品质性状比较

Fig.3 Comparison of quality traits of sesame seed with different colors



CS: 菜油甾醇; STS: 豆甾醇;  $\beta$ -SIS:  $\beta$ -谷甾醇;  $\Delta$ 5-AS:  $\Delta$ 5-燕麦甾醇; PA: 棕榈酸; SA: 硬脂酸; OA: 油酸; LA: 亚油酸; LNA: 亚麻酸; ADA: 花生酸; OC: 含油量; SIN: 芝麻素; SLN: 芝麻林素; 下同

CS: Campesterol; STS: Stigmasterol;  $\beta$ -SIS:  $\beta$ -Sitosterol;  $\Delta$ 5-AS:  $\Delta$ 5-Avenasterol; PA: Palmitic acid; SA: Stearic acid; OA: Oleic acid; LA: Linoleic acid; LNA: Linolenic acid; ADA: Arachidic acid; OC: Oil content; SIN: Sesamin; SLN: Sesamol; The same as below

图4 芝麻品质性状相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of sesame quality traits

豆甾醇、芝麻素与芝麻林素含量与其他颜色芝麻相比具有更高的相关系数。如图5所示,也有部分品质性状间的相关性在不同颜色芝麻中表现不一致。如白芝麻中含油量与油酸含量呈极显著负相关,与亚油酸含量呈极显著正相关。但黄色、褐色、黑色芝麻中,含油量与油酸、亚油酸含量无显著相关性。

棕榈酸与亚麻酸含量在褐芝麻和黑芝麻中呈极显著和显著正相关,但在白芝麻和黄芝麻中相关性不显著。白芝麻和褐芝麻中菜油甾醇与 $\Delta 5$ -燕麦甾醇含量呈显著正相关,但在另外2种颜色芝麻中无显著相关性。

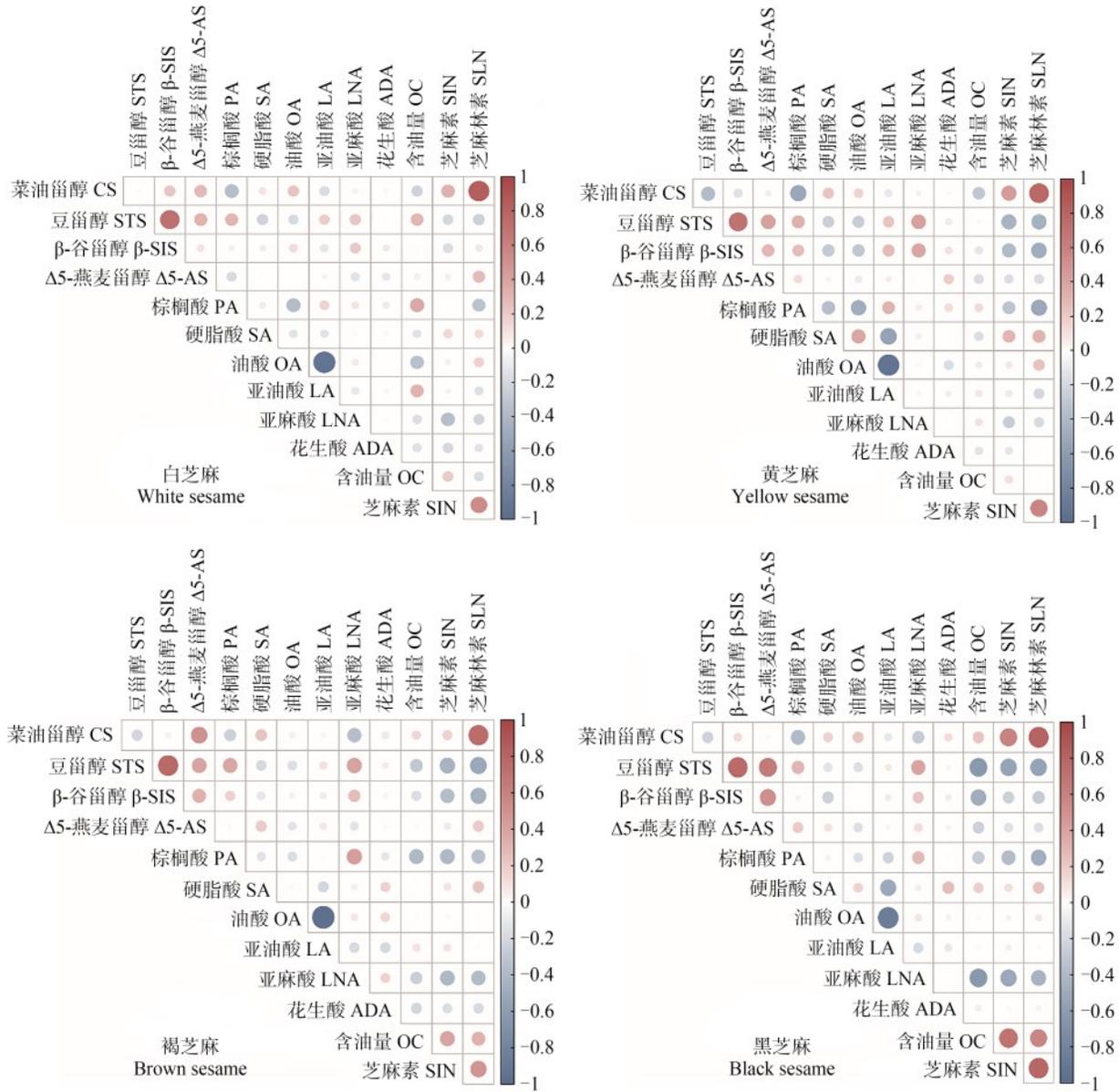


图5 不同颜色芝麻品质性状相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of quality traits of sesame seed with different colors

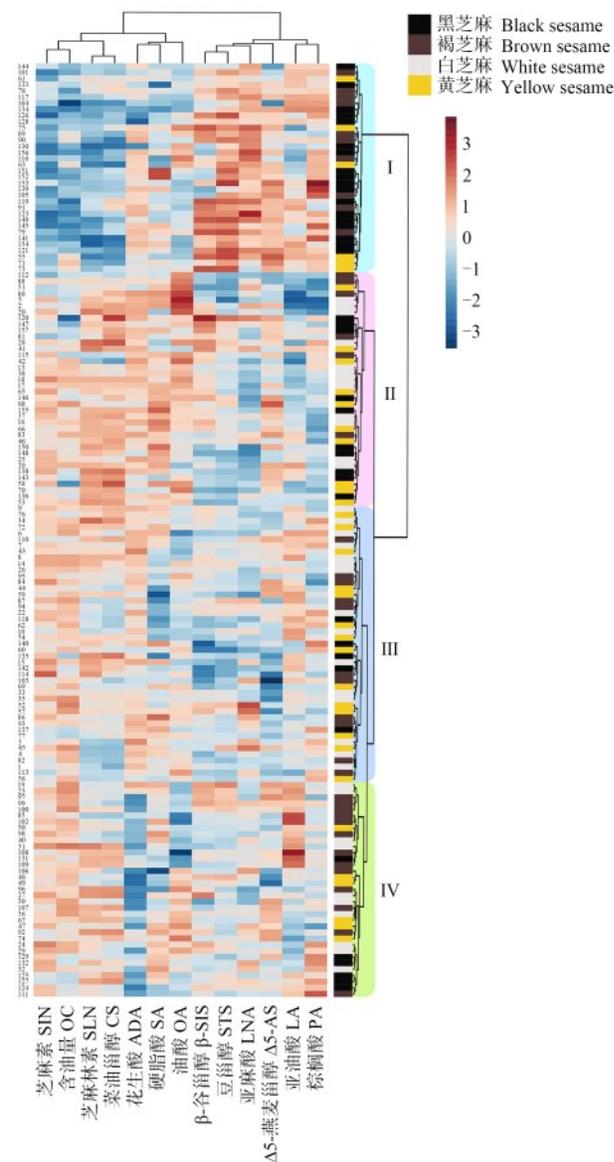
2.4 聚类分析

对标准化处理后的13个品质性状数据进行聚类分析,可将157个材料分为4个亚群(图6)。第I亚群主要由褐色和黑色芝麻组成,多数具有较高的棕榈酸、 $\Delta 5$ -燕麦甾醇、亚麻酸、豆甾醇、 $\beta$ -谷甾醇含量;第II亚群主要以白芝麻、黄芝麻居多,多数具有较高

的油酸、硬脂酸、花生酸、菜油甾醇、芝麻林素含量;第III亚群包含了最高的芝麻素含量材料,第IV亚群包含了最高的亚油酸含量和较高的含油量材料。

品质指标聚类的结果显示,豆甾醇、 $\beta$ -谷甾醇、 $\Delta 5$ -燕麦甾醇、棕榈酸、亚油酸、亚麻酸等聚在一起;油酸、硬脂酸、花生酸等聚在一起;菜油甾醇、含油

量、芝麻素、芝麻林素等聚在一起。与前文相关性分析结果基本一致。



纵向聚类反映样品间的关系, 横向聚类来反映品质性状间的关系, 热图颜色的深浅反映样品中相应成分含量的高低  
Vertical clustering reflects the relationship between samples, horizontal clustering reflects the relationship between quality traits and the color depth of heat map reflects the content of corresponding components in samples

图6 芝麻种质资源品质性状的聚类分析

Fig.6 Cluster analysis of quality traits of sesame germplasm resources

### 3 讨论

芝麻的多种用途与其特异营养品质密不可分, 不同颜色的芝麻营养品质可能存在差异, 但目前对芝麻营养品质的分析主要集中在对黑、白芝麻的比较上, 对其他颜色如黄色、褐色关注不多。贾斌

等<sup>[13]</sup>研究得到白芝麻的含油量、芝麻素、芝麻林素含量显著高于黑芝麻, 但黑芝麻中芝麻素和芝麻林素含量的变异系数均高于白芝麻; Tashiro 等<sup>[15]</sup>研究认为白色芝麻的含油量显著高于黑色芝麻; 回瑞华等<sup>[16]</sup>研究得出黑芝麻中棕榈酸、亚油酸含量高于白芝麻。本研究为提高数据分析的准确性, 选择数量相当的4种不同颜色芝麻(40份白色芝麻, 37份黄色芝麻, 40份褐色芝麻和40份黑色芝麻), 对其13个品质指标分析发现, 含油量随着芝麻颜色加深逐渐降低; 总甾醇含量在黑色芝麻中最高; 芝麻素和芝麻林素在白芝麻中含量最高, 在黑芝麻中含量最低, 但两者的相关性在黑芝麻中最高; 油酸在黄芝麻中含量最高, 亚油酸在褐芝麻中含量最高。这些结果较为系统地揭示了不同颜色芝麻的营养品质差异, 为针对性的开发利用不同颜色芝麻提供了理论依据。

环境与基因型间的互作, 影响着表型的变异。对芝麻品质性状的科学分析需要考虑环境影响因素, 但目前多关于对不同产地芝麻群体间品质差异的研究<sup>[17-18]</sup>, 针对同一芝麻群体在不同环境下品质指标的变异分析还比较少。高锦鸿等<sup>[19]</sup>探究了不同产地和籽粒外观对木酚素的影响, 得出芝麻素和芝麻林素含量随产地纬度的升高而增加, 芝麻素含量随着种皮颜色变深而降低。也有学者探究了不同种植年份对芝麻品质指标的影响, 发现脂肪酸与油的含量在不同年份间差异显著, 而硬脂酸、亚油酸和花生酸含量在不同种植年份间差异较小<sup>[20]</sup>。本研究将芝麻种植于驻马店和武汉两个环境, 其中驻马店环境下硬脂酸、菜油甾醇、 $\Delta 5$ -燕麦甾醇、芝麻素和芝麻林素含量极显著高于武汉环境, 而棕榈酸、豆甾醇、 $\beta$ -谷甾醇含量显著或极显著低于武汉环境, 不饱和脂肪酸含量与含油量在两个环境下无显著差异, 说明受环境影响小, 比较稳定。在157份材料中, 21号、31号、114号、120号在两个环境中品质性状稳定, 分别表现为高不饱和脂肪酸、高含油量、高木脂素和高甾醇芝麻种质, 可作为优良品质性状的供体亲本, 用于高产育成品种特定或多个品质性状的改良。

植物甾醇是植物为满足自身生长发育而产生的一种重要的次生代谢物, 不仅参与植物的各种生命活动, 对人类也具有多种生理功效, 如降低胆固醇、抗癌、抗氧化、抗炎等, 因而受到越来越多的关注。研究发现, 不同作物中植物甾醇的含量不同, 葵花籽油中总甾醇含量平均为3.20 mg/g<sup>[21]</sup>, 紫苏中

为0.97 mg/g<sup>[22]</sup>,橄榄油中为1.82 mg/g<sup>[23]</sup>,苹果籽油中总甾醇含量为3.85 mg/g<sup>[24]</sup>,大豆油中为2.32 mg/g<sup>[25]</sup>,菜籽油中为5.70 mg/g<sup>[26]</sup>,花生油中为2.45 mg/g<sup>[9]</sup>。目前已有的研究主要是基于多种作物的比较分析,针对芝麻种质资源植物甾醇含量的研究还比较少。Crew等<sup>[27]</sup>在芝麻油中检测到4种植物甾醇,分别是菜油甾醇、豆甾醇、 $\Delta^5$ -燕麦甾醇、 $\beta$ -谷甾醇,总含量范围为3.24~7.98 mg/g,平均值为5.31 mg/g;Liu等<sup>[28]</sup>则在芝麻油中检测到菜籽甾醇、菜油甾醇、豆甾醇和 $\beta$ -谷甾醇,总甾醇平均含量为1.26 mg/g;马素换<sup>[8]</sup>在芝麻油中共检测到3种植物甾醇:菜油甾醇、豆甾醇和 $\beta$ -谷甾醇,总甾醇平均含量为2.49 mg/g,菜籽甾醇未测出。本研究结果显示,芝麻中植物甾醇主要由菜油甾醇、豆甾醇、 $\Delta^5$ -燕麦甾醇、 $\beta$ -谷甾醇等4种成分组成,总含量变化在4.03~8.99 mg/g,平均含量为5.59 mg/g,高于Liu等<sup>[28]</sup>和马素换<sup>[8]</sup>的报道。总体上看,芝麻油中植物甾醇平均含量相对较高,在几种主要油料作物中仅次于油菜,且具有广泛的变异,可作为补充甾醇的重要食用油源,因而具有较好的研究和开发价值。

#### 参考文献

- [1] 宫慧慧,赵逢涛,裴伟,孟庆华.芝麻种质资源及相关分子生物学研究进展.植物遗传资源学报,2016,17(3):517-522  
Gong H H, Zhao F T, Pei W, Meng Q H. Advances in sesame (*Sesamum indicum* L.) germplasm resources and molecular biology research. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(3):517-522
- [2] 孙建,乐美旺,何才和,颜廷献,饶月亮,颜小文,周红英.中国主要黑芝麻品种的遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2015,16(2):269-276  
Sun J, Le M W, He C H, Yan T X, Rao Y L, Yan X W, Zhou H Y. Analysis of genetic diversity of main black sesame cultivars released in China. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(2):269-276
- [3] 李娜.芝麻的营养成分与食疗保健作用.中国食物与营养,2008(5):55-57  
Li N. Nutritional components of sesame and its role in dietotherapy and health care. Food and Nutrition in China, 2008(5): 55-57
- [4] 胡闽闽,秦虹.芝麻木脂素调节脂代谢作用机制的研究进展.卫生研究,2021,50(5):859-863, 867  
Hu M M, Qin H. Research progress on the mechanism of sesame lignans regulating lipid metabolism. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(5): 859-863, 867
- [5] Matsumura Y, Kita S, Ohgushi R, Okui T. Effects of sesamin on altered vascular reactivity in aortic rings of deoxycorticosterone acetate-salt-induced hypertensive rat effects of sesamin on altered vascular reactivity in aortic rings of deoxycorticosterone acetate-salt-induced hypertensive rat. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 2000, 23(9): 1041-1045
- [6] 沈旭丽.芝麻的营养成分及保健价值.中国食物与营养,2006(7):51-52  
Sheng X L. Nutritional components and health value of sesame. Food and Nutrition in China, 2006(7):51-52
- [7] Abidi S L. Chromatographic analysis of plant sterols in foods and vegetable oils. Journal of Chromatography A, 2001, 935(1-2): 173-201
- [8] 马素换.芝麻植物甾醇提取与氧化特性的研究.郑州:河南工业大学,2015  
Ma S H. The studies on extration and oxidation characteristics of sesame plant sterols. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015
- [9] 韩军花,杨月欣,冯妹元,王国栋.中国常见植物食物中植物甾醇的含量和居民摄入量初估.卫生研究,2007,36(3): 301-305  
Han J H, Yang Y X, Feng M Y, Wang G D. The analysis of phytosterol contents in chinese plant food and primary estimation of its intake of people. Journal of Hygiene Research, 2007, 36(3): 301-305
- [10] 朱晓冬.芝麻高密度遗传图谱构建和种皮颜色QTL分析.北京:中国农业科学院,2016  
Zhu X D. Highdensity genetic linkage map construction and QTL mapping of seed coat color in sesame (*Sesamum indicum* L.). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016
- [11] 汪学德,崔英德,刘兵戈,马素换.芝麻各成分相关性分析.中国油脂,2015,40(11):99-103  
Wang X D, Cui Y D, Liu B G, Ma S H. Determination and correlation analysis of fatty acid composition of sesame seed. China Oils and Fats, 2015, 40(11): 99-103
- [12] 黄晓荣.基于代谢组学的黑芝麻黑花生营养成分挖掘与识别研究.北京:中国农业科学院,2017  
Huang X R. Study on the nutritional components of black sesame and black peanut based on metabolomics. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017
- [13] 贾斌,王允,尹海燕,尚兵,潘向磊,王会锋,李淑芳,刘冬梅,魏红,冯书惠.黑、白芝麻营养成分及品质的差异分析.河南农业科学,2020,49(5):69-74  
Jia B, Wang Y, Yin H Y, Shang B, Pan X L, Wang H F, Li S F, Liu D M, Wei H, Feng S H. Differential analysis of nutritional and quality components of black and white sesame. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(5): 69-74
- [14] Li Y, Beisson F, Pollard M, Ohlrogge J. Oil content of Arabidopsis seeds: The influence of seed anatomy, light and plant-to-plant variation. Phytochemistry, 2006, 67(9): 904-915
- [15] Tashiro T, Fukuda Y, Osawa T, Namiki M. Oil and minor components of sesame (*Sesamum indicum* L.) strains. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1990, 67(8): 508-511
- [16] 回瑞华,侯冬岩,李铁纯,刘晓媛,徐艳飞.黑芝麻和白芝麻中脂肪酸组成的比较.食品科学,2009(18):2

- Hui R H, Hou D Y, Li T C, Liu X Y, Xu Y F. Comparison of fatty acid composition of black sesame and white sesame seeds. *Food Science*, 2009(18): 2
- [17] 杨雅新, 宿时, 钱志伟, 李若昀, 刘欣. 芝麻产地及品种对油脂 TAG 组成特征影响的研究. *河南农业*, 2022(6): 43-46  
Yang Y X, Su S, Qian Z W, Li R Y, Liu X. Study on the influence of sesame origin and variety on the TAG composition characteristics of oil. *Agriculture of Henan*, 2022(6): 43-46
- [18] Ahmed I A M, AlJuhaimi F, Özcan M M, Ghafoor K, Şimşek Ş, Babiker E E, Osman M A, Gassem M A, Salih H A A. Evaluation of chemical properties, amino acid contents and fatty acid compositions of sesame seed provided from different locations. *Journal of Oleo Science*, 2020, 69(8): 795-800
- [19] 高锦鸿, 梅鸿猷, 刘艳阳, 杜振伟, 汪学德, 郑永战. 产地及籽粒外观品质对芝麻木酚素含量的影响. *华北农学报*, 2015(2): 191-197  
Gao J H, Mei H X, Liu Y Y, Du Z W, Wang X D, Zheng Y Z. Effects of producing area and appearance quality on lignan contents of sesame seeds. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015(2): 191-197
- [20] Were B A, Onkware A O, Gudu S, Welander M, Carlsson A S. Seed oil content and fatty acid composition in East African sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions evaluated over 3 years. *Field Crops Research*, 2006, 97(2-3): 254-260
- [21] Gotor A A, Farkas E, Berger M, Labalette F, Centis S, Daydé J, Calmon A. Determination of tocopherols and phytosterols in sunflower seeds by NIR spectrometry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2007, 109(5): 525-530
- [22] Kim T J, Park J G, Kim H Y, Ha S H, Lee B, Park S U, Seo W D, Kim J K. Metabolite profiling and chemometric study for the discrimination analyses of geographic origin of perilla (*Perilla frutescens*) and sesame (*Sesamum indicum*) seeds. *Foods (Basel)*, 2020, 9(8): 989
- [23] Demirag O, Konuskan D B. Quality properties, fatty acid and sterol compositions of east mediterranean region olive oils. *Journal of Oleo Science*, 2021, 70(1): 51-58
- [24] 赵雁武, 邓红, 仇农学. 苹果籽油中脂肪酸及植物甾醇成分分析. *中国油脂*, 2012, 37(4): 81-83  
Zhao Y W, Deng H, Qiu N X. Fatty acid and phytosterols composition analysis of apple seed oil. *China Oils and Fats*, 2012, 37(4): 81-83
- [25] 李万林, 钟姣姣, 冯巩, 李波, 赵红红, 刘彩芬, 李睿, 刘欢. 大豆油中植物甾醇提取工艺及抗氧化活性研究. *大豆科学*, 2014, 33(5): 731-734  
Li W L, Zhong J J, Feng G, Li B, Zhao H H, Liu C F, Li R, Liu H. Extraction process and antioxidative activity of phytosterol in soybean oil. *Soybean Science*, 2014, 33(5): 731-734
- [26] 冯妹元, 韩军花, 刘成梅, 杨月欣. 常见精练油中植物甾醇测定方法的建立及含量分析. *中国食品卫生杂志*, 2006, 18(3): 197-201  
Feng M Y, Han J H, Liu C M, Yang Y X. The establishment of phytosterols determination in plant oils and the analyze of phytosterols content in edible oil. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2006, 18(3): 197-201
- [27] Crews C, Hough P, Brereton P, Godward J, Lees M, Guiet S, Winkelmann W. Quantitation of the main constituents of some authentic sesame seed oils of different origin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(17): 6266-6270
- [28] Liu S S, Hu H Y, Yu Y P, Zhao J H, Liu L C, Zhao S S, Xie J H, Li C, Shen M Y. Simultaneous determination of tocopherols, phytosterols, and squalene in vegetable oils by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Food Analytical Methods*, 2021, 14(8): 1567-1576