

高油酸花生品种脂肪及脂肪酸积累动态分析

高伟¹, 吕登宇², 苗利娟², 石磊², 黄冰艳², 张毛宁², 房元瑾², 王娟², 齐飞艳², 董文召², 张新友^{2*}

(1. 河南省农业科学院经济作物研究所, 河南 郑州, 450002;
2. 河南省农业科学院河南省作物分子育种研究院, 河南 郑州, 450002)

摘要: 籽仁脂肪含量和脂肪酸组分是决定花生及其加工产品营养保健价值、加工特性与效率、耐储藏性以及市场竞争力的重要指标。为探寻高油酸花生籽仁发育过程中不同脂肪酸组分的积累规律, 在借鉴前人研究的基础上, 开发一种新的花生不同发育时期荚果和籽仁的取样技术, 测定了花生籽仁脂肪含量和脂肪酸组分的积累动态, 对同一品种脂肪酸组分间的相关性和基于脂肪组分的品种间的相关性进行了分析。结果表明: 脂肪含量和油酸含量随发育进程而逐渐升高, 硬脂酸含量的变化比较复杂, 其他脂肪酸含量呈现随发育进程下降、基本不变或先升高后下降的趋势; 在荚果发育的早期脂肪酸含量变化剧烈, 从果针入土 30 d 开始高油酸品种籽仁的脂肪酸组分主要是油酸, 普通品种主要是油酸和亚油酸; 油酸含量与棕榈酸含量呈高度负相关; 高油酸品种油酸含量与亚油酸含量呈显著负相关; 品种的亲缘关系越近, 基于脂肪酸的相关系数越大。

关键词: 花生; 含油量; 脂肪酸; 积累规律; 相关性

中图分类号: S565.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-9084(2023)03-0629-08

Dynamic analysis of fat and fatty acid accumulation in peanut varieties with high oleic acid

GAO Wei¹, LYU Deng-yu², MIAO Li-juan², SHI Lei², HUANG Bing-yan², ZHANG Mao-ning²,
FANG Yuan-jin², WANG Juan², QI Fei-yan², DONG Wen-zhao², ZHANG Xin-you^{2*}

(1. Industrial Crops Research Institute, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Academy of Crops Molecular Breeding, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The oil content and fatty acid composition of seed kernel are important indexes affecting the nutritional and health value, processing characteristics and efficiency, storage resistance and market competitiveness of peanut and its processed products. In order to explore the accumulation regularity of different fatty acid components during the development of peanut kernel, based on previous studies, a new sampling technology for pod and kernel at different development stages of peanut was developed to gauge the oil content and fatty acid content of peanut kernel at different peg penetration times, and analyze the correlation between fatty acid components and the correlation between varieties. The results showed that the content of oil and oleic acid increased gradually with the development process, the change of stearic acid content was complex, and the content of other fatty acids decreased with the development process, basically unchanged or increased first and then decreased. The fatty acid content changed dramatically in the early stage of pod development. From 30 days after podding, the fatty acid components of seed kernel of high oleic acid varieties were mainly oleic acid, and common varieties were mainly oleic acid and linoleic acid. Oleic acid content was highly negatively correlated with palmitic acid content. There was a significant negative correlation between oleic acid content and linoleic acid content in high oleic acid varieties, but there was no strong correlation between oleic acid content and linoleic acid content in common varieties. The closer the genetic relationship of varieties, the greater the correlation coefficient.

Key words: peanut; oil content; fatty acid; accumulation regularity; correlation

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-13); 河南省农业科学院自主创新基金(2021ZC18); 河南省中央引导地方科技发展专项(YDZX20214100004191); 河南省农业科学院基础性科研项目(2020JC05, 2021JC03)

作者简介: 高伟(1978-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事花生栽培育种研究, E-mail: gaowei706@126.com

* 通讯作者: 张新友(1963-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为花生遗传育种, E-mail: haasz@126.com

花生是我国重要的油料作物。在我国大宗油料作物中,花生单位土地面积的产油量居首位,相当于油菜的2倍,或者大豆的4倍。近几年来我国用于榨油的花生约占总产的52%,花生油年产量近300万吨,占国产植物油产量的四分之一以上,是我国食用植物油的重要来源^[1]。脂肪酸组成是影响花生及其加工产品营养保健价值、加工特性与效率、耐储性以及市场竞争力的关键品质性状。花生籽仁的脂肪酸以油酸、亚油酸、棕榈酸为主,这3种脂肪酸的含量是影响花生品质的重要因素^[2]。高油酸花生有降血脂及保护心脑血管和肝脏、控制血糖及体重、延缓衰老及增强脑认知能力等多重保健作用。油酸的氧化速率大约只有亚油酸的1/10,因此无论是高油酸种用花生、花生原料还是高油酸花生油、花生食品、花生生物柴油都表现出良好的氧化稳定性,有利于加工企业合理安排生产,减少乃至避免浪费^[3]。

花生是地上开花地下结实作物^[4],其荚果和籽仁是主要的产品器官,富含脂肪和蛋白质,是人类食用植物油和植物蛋白的重要来源。深入了解花生荚果和籽仁的生长发育规律,以及脂肪、蛋白质和脂肪酸的积累规律,对花生新品种选育具有重要意义。然而,花生地下结实的特性使得荚果和籽仁发育时期的确定非常困难,严重制约了相关研究的进展。花生荚果和籽仁不同发育时期的取样方法,前人多采用开花后天数或者果针入土天数标记果针^[5-9],或者目测荚果形状的方法^[10]。由于花生花期较长,从始花到花期结束历时30~50 d,即使同一天开花但不同节位的花朵也会因果针长度和入土时间等因素的不同导致荚果发育状态差异很大,从而产生较大的取样误差。本研究围绕上述问题,开发了一种高效、便捷、稳定的不同发育时期花生籽仁的取样新方法,并应用该方法研究了高油酸花生品种籽仁脂肪酸的积累特征、脂肪酸组分间和品种间的相关性,为选育不同脂肪酸含量的品种提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试花生材料为高油酸小果型品种豫花65号、豫花37号,高油酸大果型品种开农1715,普通小果型品种豫花22号,普通大果型品种豫花9326。

1.2 方法

1.2.1 田间种植和取样 所有材料均于2019年5月中旬种植在河南省农业科学院试验基地。采用

露地起垄种植,垄距80 cm,垄面宽50 cm,每垄种1行,株距25 cm,单粒播种。于花生开花下针盛期(每株花生侧枝第2、3节位出现5个左右未入土果针)集中标记已伸长2 cm以上果针;标记后统一培土;培土日期记为果针入土第1 d,以后每10 d取样一次,共取8次。取样时从标记果针中选择荚果发育正常、大小一致的花生籽仁保存备用。

1.2.2 粗脂肪和脂肪酸含量测定 供试品种不同发育时期取样的籽仁由农业农村部农产品质量监督检验测试中心(郑州)进行脂肪和脂肪酸组分检测。按照NY/T 1285-2007的方法测定粗脂肪含量,按照GB 5009.168-2016第三法测定油酸、亚油酸、棕榈酸、山萘酸、硬脂酸、花生酸、花生一烯酸和木焦油酸共8种脂肪酸含量(干基),以百分比表示,每样品重复3次。

1.2.3 数据分析 采用SPSS19.0皮尔森(Pearson)相关系数对粗脂肪、脂肪酸和品种间进行相关性分析,利用GenStat (VSN International Ltd.)进行性状方差分析。

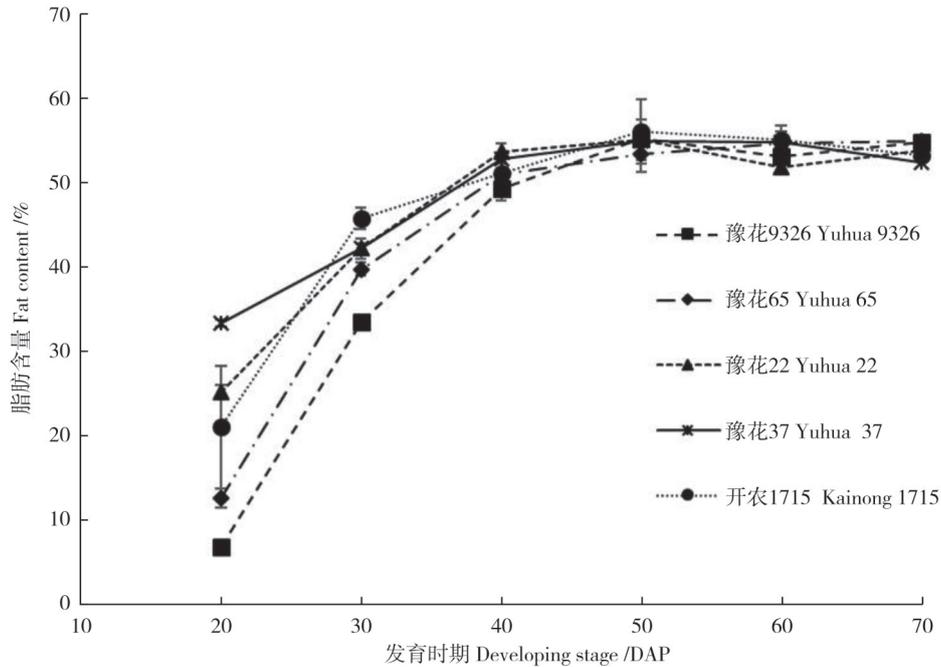
2 结果与分析

2.1 籽仁不同发育时期粗脂肪的积累动态

在果针入土10 d时,花生籽仁的粗脂肪含量低于国标的检测限。由图1可以看出,在果针入土20 d时,不同花生品种籽仁粗脂肪含量差异最大,豫花37号最高,为33.3%,其后依次为豫花22号、开农1715、豫花65号,豫花9326含量最低,仅为6.82%。高油酸品种豫花65号粗脂肪含量在整个发育期持续增加,而豫花37号和开农1715前期迅速增加,50 d时达到顶峰,60~70 d时有所下降。两个普通品种豫花9326和豫花22号的粗脂肪积累规律基本相同,都是果针入土20 d到50 d粗脂肪含量迅速增加,50 d时达到顶峰,60 d时略有下降,70 d时又增加,呈现出“S”形的变化曲线。不同品种的粗脂肪积累模式不同,普通品种的粗脂肪积累模式基本相同,高油酸品种的粗脂肪积累模式存在较大差异(图1)。

2.2 不同类型品种脂肪酸积累动态

在果针入土10 d时,豫花65号的油酸含量显著高于其他品种,从20 d开始,三个高油酸品种的油酸含量明显高于两个普通品种,所有参试品种的油酸含量随发育进程而升高,早期积累迅速,后期增加缓慢,积累规律大体一致,高油酸花生品种油酸积累速度快于普通品种,积累的峰值也显著高于普



注:横坐标为果针入土后天数(DAP)

Note: DAP: days after podding

图1 五个品种的脂肪含量积累动态

Fig. 1 Accumulation dynamics of fat content in five cultivars

通品种(图2A)。

亚油酸含量的变化(图2B),高油酸品种在果针入土10 d时含量最高,然后随发育进程而降低,50~70 d时品种间差异不明显,80 d时豫花37号和豫花65号亚油酸含量有一个明显的升高。两个普通品种的亚油酸含量基本保持不变,与高油酸品种形成明显差异。

棕榈酸含量在果针入土10 d时最高,豫花37号、豫花65号和开农1715三个高油酸品种10~40 d逐渐下降,40 d以后棕榈酸含量进入平台期,基本在5.5%~6.0%左右(图2C)。豫花22号和豫花9326在10~20 d棕榈酸含量迅速下降,此后下降明显变缓,两个品种的棕榈酸含量和变化趋势基本一致。

五个供试品种的山嵛酸含量变化规律基本一致,在果针入土10~20 d迅速增加,此后逐渐降低(图2D)。硬脂酸含量的变化较复杂,开农1715、豫花22号和豫花9326三个品种的硬脂酸含量有逐渐升高的趋势,而豫花37号和豫花65号保持相对不变(图2E)。

花生酸含量在果针入土10 d时品种间差异最大,两个普通品种显著高于三个高油酸品种(豫花37号花生酸含量低于检测限),20~80 d五个品种的花生酸含量基本一致且没有明显变化。花生一烯酸和木焦油酸含量在果针入土20 d达最大值,此后

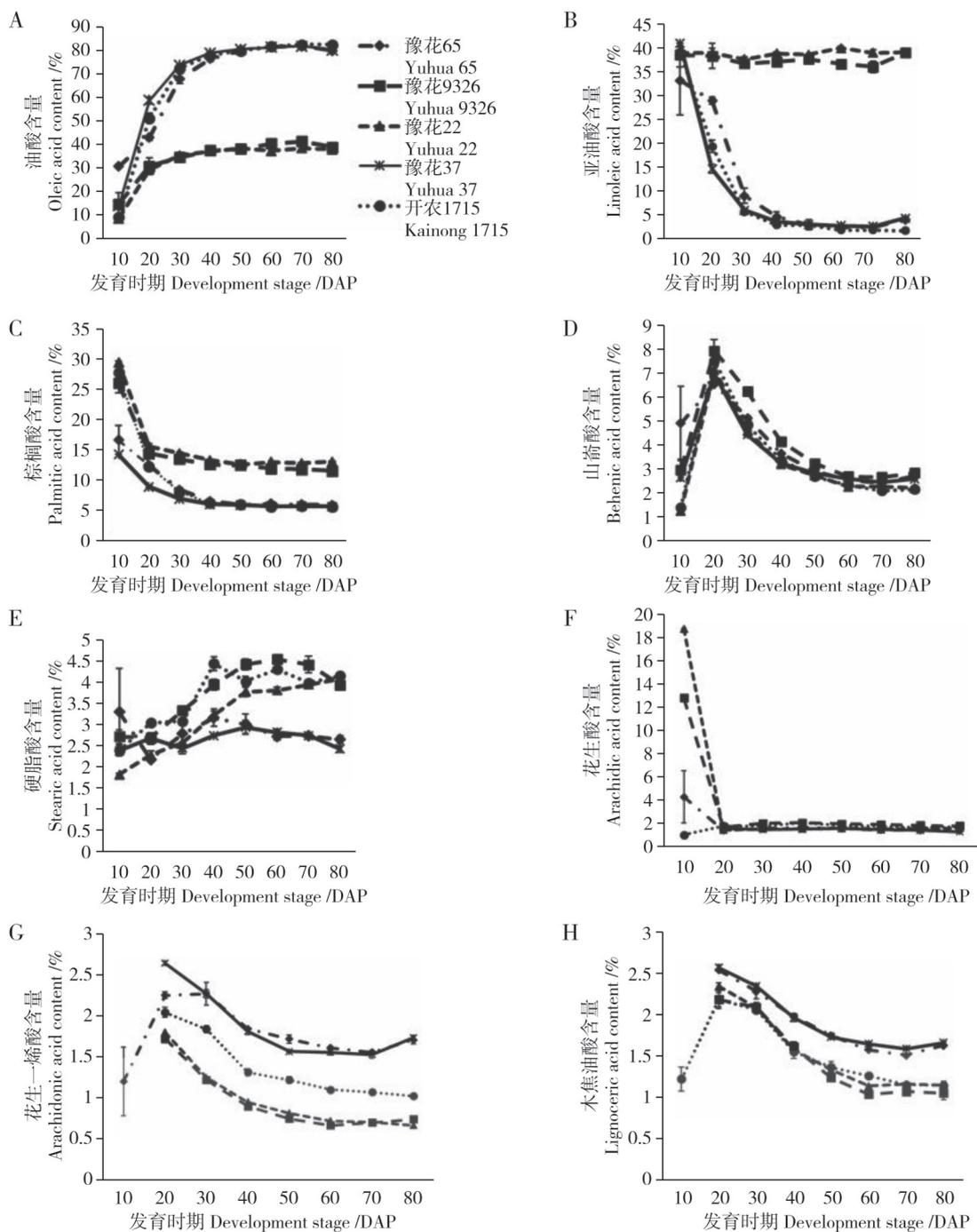
呈现出逐渐下降的趋势,高油酸品种的花生一烯酸含量高于普通品种(开农1715的木焦油酸含量与普通品种接近)。从整体上看,油酸和硬脂酸含量呈现增加的趋势,而亚油酸、棕榈酸、山嵛酸、花生酸、花生一烯酸和木焦油酸的含量呈现下降或先升高后下降的趋势。

2.3 不同发育时期脂肪酸的积累特征

由图3A可以看出,在果针入土10 d时,花生籽仁脂肪酸以亚油酸、棕榈酸、油酸和花生酸为主,且亚油酸含量最高,其后依次为棕榈酸、油酸和花生酸;在果针入土20 d时,脂肪酸主要是油酸、亚油酸、棕榈酸和山嵛酸,油酸含量最高,其后依次是亚油酸、棕榈酸、山嵛酸(图3B);从果针入土30 d开始到80 d,花生籽仁的脂肪酸含量模式则基本一致,高油酸品种油酸含量最高,其后依次为棕榈酸、亚油酸;普通花生品种脂肪酸以油酸和亚油酸为主,其后为棕榈酸,其他脂肪酸含量很低(图3C~H)。

2.4 基于脂肪酸组成的品种间相关性分析

以果针入土80 d的脂肪酸组分为指标,进行了品种间相关性分析(表1)。由表1可以看出,以脂肪酸组分为指标,三个高油酸品种之间呈极显著正相关。豫花37号与豫花65号、开农1715的相关系数分别为1,0.9991;豫花65号与开农1715的相关系数为0.9993。反映出三个高油酸品种之间



注:横坐标为果针入土后天数(DAP)

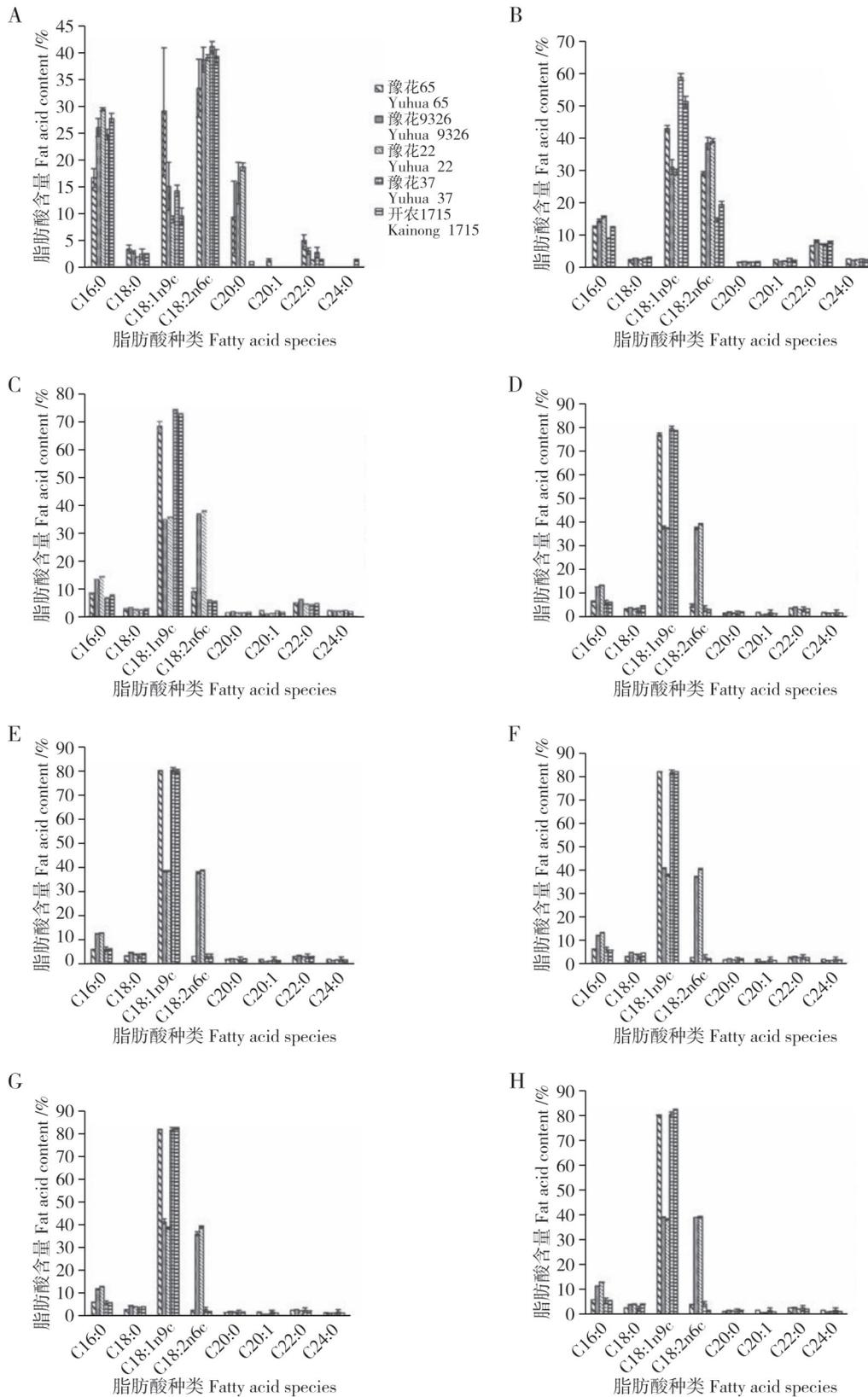
Note: DAP: days after podding

图2 五个品种的脂肪酸含量积累动态

Fig. 2 Accumulations dynamics of fatty acid content in five cultivars

的脂肪酸组成比较接近。豫花9326与豫花22号的相关系数为0.9991,反映了两个普通油酸含量品种的脂肪酸组成的相似性。三个高油酸品种与两个普通品种之间的相关系数为0.6263~0.6668,反映了普通油酸含量品种与高油酸品种之间的脂肪酸组成的总体差异较大。选育报告显示,三个高油酸品种共用一个亲本开选01-6,豫花37号与

豫花65号的亲本完全相同,分别由正反交组合的后代选育而成,豫花9326与豫花22号有一个共用亲本。品种间基于脂肪酸组分的相关系数反映出品种间真实的亲缘关系,品种的亲缘关系越近,相关系数越大,表明脂肪酸组分相关性分析可以作为品种或种质资源亲缘关系鉴定的方法之一(表1)。



注:A~H:10~80 d;C16:0:棕榈酸;C18:0:硬脂酸;C18:1n9c:油酸;C18:2n6c:亚油酸;C20:0:花生酸;C20:1:花生一烯酸;C22:0:山萘酸;C24:0:木焦油酸

Note: A-H: 10 d - 80 d; C16:0: Palmitic acid; C18:0: Stearic acid; C18:1n9c: Oleic acid; C18:2n6c: Linoleic acid; C20:0: Arachidic acid; C20:1: Arachidonic acid; C22:0: Behenic acid; C24:0: Lignoceric acid

图3 不同发育时期的脂肪酸含量

Fig. 3 Fatty acid content at different developmental stages

表1 五个花生品种的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of five peanut varieties

	豫花65 Yuhua 65	豫花9326 Yuhua 9326	豫花22 Yuhua 22	豫花37 Yuhua 37	开农1715 Kainong 1715
豫花65 Yuhua 65		0.6637	0.6478	1.0000**	0.9993**
豫花9326 Yuhua 9326			0.9991**	0.6668	0.6424
豫花22 Yuhua 22				0.6509	0.6263
豫花37 Yuhua 37					0.9991**

注/Note: **表示相关性分析时品种间达到0.01概率水平的显著差异 Significant difference at 0.01 level among the varieties

2.5 不同花生品种间脂肪酸组分含量的差异分析

对五个花生品种在果针入土80 d时的八种脂肪酸组分含量进行了差异显著性分析(表2)。高油酸品种的棕榈酸含量普遍低于普通油酸品种5~6个百分点;高油酸品种豫花37号和豫花65号的硬脂酸含量较低,但高油酸品种开农1715的硬脂酸含量较高,与普通品种差异不显著。高油酸品种的花生一烯酸含量显著高于普通品种;开农1715的木焦油酸含量显著低于另两个高油酸品种,与普通品种无显著差异;花生酸和山嵛酸的含量在品种间表现出显著差异。

2.6 五种主要脂肪酸组分间相关性分析

对五个品种籽仁不同发育时期的五种主要脂肪酸组分含量进行了相关性分析(表3)。就三个高油酸品种而言,油酸含量与棕榈酸、亚油酸均呈极显著负相关,亚油酸含量与棕榈酸均呈极显著正相关;开农1715的亚油酸含量与硬脂酸呈显著负相关,油酸含量与硬脂酸呈显著正相关,与另两个高油酸品种存在明显差异。两个普通品种豫花22号、豫花9326的油酸含量与棕榈酸均呈极显著负相关,与硬脂酸呈显著正相关。高油酸品种豫花65号的

山嵛酸含量与油酸呈显著负相关,与亚油酸呈显著正相关,而豫花37号和开农1715的山嵛酸含量与其它脂肪酸的相关性不显著;普通花生品种豫花22号的硬脂酸含量与棕榈酸呈显著负相关,与豫花9326不同。可以看出,不同品种间的脂肪酸组分相关性比较复杂,品种间存在明显差异。

3 讨论与结论

本研究借鉴了前人研究的标记花朵或者果针后分期取样的方法^[11-14],克服了前人根据开花后天数或者果针入土天数标记果针,但未严格选择开花节位和统一培土,导致取样获得的荚果或籽仁发育时期一致性差的缺点;同时,该方法集中在下针盛期标记果针,避免了标记花朵损伤子房或标记的花朵子房柄未伸长的情况,显著减少了工作量,提高了取样精确性和一致性。但考虑到不同花生品种果针入土后的发育进程并不完全与入土后的天数同步,大果品种的发育总天数一般长于小果品种^[15],在籽仁发育早期采用切片的方法,籽仁充实期采用籽仁硬度值、取样时含油量占成熟期最终含油量的比例、入土天数占总的成熟天数比例等参数,作为

表2 五个花生品种80DAP种子脂肪酸组分差异分析

Table 2 Analysis of fatty acid composition difference in 80DAP seeds of five peanut varieties

品种 Variety	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	花生酸 Arachidic acid	花生一烯酸 Arachidonic acid	山嵛酸 Behenic acid	木焦油酸 Lignoceric acid
开农1715 Kainong 1715	5.55a	4.13b	82.67d	1.70a	1.66d	1.02b	2.16a	1.14a
豫花37 Yuhua 37	5.58a	2.41a	80.50c	4.31b	1.25a	1.73c	2.58b	1.65b
豫花65 Yuhua 65	5.83a	2.63a	80.17c	4.01b	1.33b	1.70c	2.72bc	1.62b
豫花9326 Yuhua 9326	11.47b	3.91b	39.13b	39.10c	1.73e	0.74a	2.83c	1.05a
豫花22 Yuhua 22	12.97c	4.06b	38.20a	39.20c	1.54c	0.67a	2.21a	1.14a

表3 五个品种5种主要脂肪酸组分的相关性分析
Table 3 Correlation analysis of five major fatty acid components in five varieties

	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	山嵛酸 Behenic acid
豫花 65 Yuhua 65	棕榈酸 Palmitic acid	0.1107	-0.9939**	0.9788**	0.7491
	硬脂酸 Stearic acid		-0.0379	-0.0605	-0.2931
	油酸 Oleic acid			-0.9936**	-0.8039*
	亚油酸 Linoleic acid				0.8179*
	棕榈酸 Palmitic acid	-0.6901	-0.9778**	0.4222	-0.0377
豫花 9326 Yuhua 9326	硬脂酸 Stearic acid		0.8175*	-0.5357	-0.6442
	油酸 Oleic acid			-0.5154	-0.1516
	亚油酸 Linoleic acid				0.1053
	棕榈酸 Palmitic acid	-0.7605*	-0.9913**	-0.0291	-0.2591
	硬脂酸 Stearic acid		0.8068*	0.3491	-0.3777
豫花 22 Yuhua 22	油酸 Oleic acid			0.0039	0.1488
	亚油酸 Linoleic acid				-0.2922
	棕榈酸 Palmitic acid	-0.5365	-0.9863**	0.9894**	-0.0483
	硬脂酸 Stearic acid		0.5503	-0.5586	-0.0681
	油酸 Oleic acid			-0.9988**	-0.1140
豫花 37 Yuhua 37	亚油酸 Linoleic acid				0.0814
	棕榈酸 Palmitic acid	-0.8474*	-0.9929**	0.9866**	-0.0981
	硬脂酸 Stearic acid		0.8700*	-0.8701*	-0.2714
	油酸 Oleic acid			-0.9981**	-0.0155
	亚油酸 Linoleic acid				0.0438

注/Note: *和**分别代表差异在品种间达到0.05和0.01水平上的显著性 * and ** indicate significant differences among the varieties at 0.05 and 0.01 levels respectively

识别花生籽仁不同发育时期的辅助指标,可能可以更加精准地确定不同生育期品种籽仁发育进程。

籽仁脂肪含量是花生重要经济性状^[6],提高脂肪含量是花生育种的重要目标之一。本研究发现粗脂肪在籽仁发育前期积累较快,后期较缓慢,不同品种之间的积累模式存在一定差异,与前人研究结果一致^[17];普通花生品种粗脂肪的积累模式基本相同,呈现“S”形的积累曲线,与王允等研究结果

相同^[11];高油酸品种粗脂肪的积累模式与普通品种存在明显差异。黄冰艳等^[18]利用花生巢式群体研究发现,脂肪含量性状遗传复杂且受多基因调控,在不同杂交组合中脂肪含量的遗传模式不同,各种遗传效应的估计值也各不相同,主基因遗传力介于32%到80%之间。不同杂交组合中,控制脂肪含量的基因位点差异及其重组和分离方式不同。这些结果都表明通过常规育种手段大幅提高花生品种

含油量的复杂性。

不同品种油酸含量与棕榈酸均呈显著负相关;高油酸品种亚油酸与油酸呈显著负相关,与棕榈酸显著正相关;而普通品种油酸含量与棕榈酸和硬脂酸之间的相关在品种间具有较大差异,表明脂肪酸含量之间的相关性因品种油酸含量的不同而不同,这一结果还未见报道。

油酸是单不饱和脂肪酸,它能降低人体血液中有害的低密度胆固醇,保留有益的高密度胆固醇,有效减少心血管病的发生率。亚油酸是多不饱和脂肪酸,具有2个双键,在加工和储存过程中易氧化变质。棕榈酸和硬脂酸是饱和脂肪酸,人体摄入过多饱和脂肪酸会引起血清中总胆固醇升高,增加心血管病的发病率,不利于人体健康。因此培育油酸含量高、亚油酸和饱和脂肪酸含量低的优质品种是花生育种的重要目标^[2]。高油酸花生品种具有脂肪酸脱氢酶(FAD)基因的突变形式。该基因编码一种 Δ -12-去饱和酶,其催化在油酸上添加第二个双键以产生亚油酸。如果该酶失活,则油酸积聚在油体中,导致油酸含量超过80%,而亚油酸含量保持在2%~5%左右^[19]。本研究发现高油酸品种开农1715籽仁发育后期硬脂酸的含量与普通品种接近,远高于另外两个高油酸品种;高油酸花生的棕榈酸含量较普通花生降低5~6个百分点,表明花生的饱和脂肪酸棕榈酸和硬脂酸与其它脂肪酸的相关性变异具有多样性,为培育饱和脂肪酸含量进一步降低的高油酸品种提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 廖伯寿. 我国花生生产发展现状与潜力分析[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(2): 161-166. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2020115.
- [2] 李建国, 薛晓梦, 张照华, 等. 单粒花生主要脂肪酸含量近红外预测模型的建立及其应用[J]. 作物学报, 2019, 45(12): 1891-1898. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2019.94016.
- [3] 王传堂, 于树涛, 朱立贵. 中国高油酸花生[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021.
- [4] 胡冬秀, 刘浩, 洪彦彬, 等. 花生荚果发育过程中的microRNA鉴定与表达分析[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 613-625. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04144.
- [5] 陈四龙, 李玉荣, 徐桂真, 等. 不同高油花生品种(系)油分积累特性的模拟研究[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 142-149. DOI: 10.3321/j.issn: 0496-3490.2008.01.021.
- [6] 李晓丹, 曹应龙, 胡亚平, 等. 花生种子发育过程中脂肪酸积累模式研究[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(2): 157-162, 172. DOI: 10.3321/j.issn: 1007-9084.2009.02.009.
- [7] 李兰, 彭振英, 陈高, 等. 花生种子发育过程中脂肪酸积累规律的研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 173-177. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7091.2012.01.033.
- [8] Yin D M, Wang Y, Zhang X G, et al. *De novo* assembly of the peanut (*Arachis hypogaea* L.) seed transcriptome revealed candidate unigenes for oil accumulation pathways [J]. PLoS One, 2013, 8(9): e73767. DOI: 10.1371/journal.pone.0073767.
- [9] 张佳蕾, 顾学花, 杨传婷, 等. 不同品质类型花生籽仁脂肪酸积累规律研究[J]. 花生学报, 2016, 45(2): 33-37, 43. DOI: 10.14001/j.issn.1002-4093.2016.02.006.
- [10] 和小燕, 胡晓锋, 王允, 等. 花生籽仁不同发育时期的转录组测序分析[J]. 分子植物育种, 2016, 14(11): 2930-2943. DOI: 10.13271/j.mpb.014.002930.
- [11] 王允, 刘婷, 张建航, 等. 花生种子发育及萌发时期脂肪酸积累与降解模式[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(3): 366-371. DOI: 10.7505/j.issn.1007-9084.2017.03.011.
- [12] Liu H, Li H F, Gu J Z, et al. Identification of the candidate proteins related to oleic acid accumulation during peanut (*Arachis hypogaea* L.) seed development through comparative proteome analysis [J]. Int J Mol Sci, 2018, 19(4): 1235. DOI: 10.3390/ijms19041235.
- [13] Liu H, Gu J Z, Lu Q, et al. Transcriptomic analysis reveals the high-oleic acid feedback regulating the homologous gene expression of stearoyl-ACP desaturase 2 (SAD2) in peanuts [J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(12): 3091. DOI: 10.3390/ijms20123091.
- [14] Huai D X, Xue X M, Li Y, et al. Genome-wide identification of peanut KCS genes reveals that AhKCS1 and AhKCS28 are involved in regulating VLCFA contents in seeds [J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 406. DOI: 10.3389/fpls.2020.00406.
- [15] 张玉娇. 花生生育动态与模拟模型的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [16] 黄冰艳, 胡京枝, 张新友, 等. 花生种子脂肪含量的直接和母体遗传效应分析[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(4): 582-589. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2020226.
- [17] 迟晓元, 郝翠翠, 潘丽娟, 等. 不同花生品种脂肪酸组成及其积累规律的研究[J]. 花生学报, 2016, 45(3): 32-36. DOI: 10.14001/j.issn.1002-4093.2016.03.006.
- [18] 黄冰艳, 孙子淇, 刘华, 等. 花生巢式群体的脂肪含量遗传分析[J]. 作物学报, 2021, 47(6): 1100-1108. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04138.
- [19] Ojiewo C O, Janila P, Bhatnagar-Mathur P, et al. Advances in crop improvement and delivery research for nutritional quality and health benefits of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 29. DOI: 10.3389/fpls.2020.00029.

(责任编辑:郭学兰)