

云南 7 个澳洲坚果主栽品种果仁脂肪酸组分和含量分析¹

段敏仙, 张碧蓉, 杨帆, 李雪佳, 史文斌, 闫素云, 唐少平, 赵俊, 周先艳*

(云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000)

摘要: 【目的】明确云南 7 个澳洲坚果主栽品种果仁脂肪酸的组成差异, 筛选富含特定脂肪酸的澳洲坚果品种。【方法】以云南 7 个澳洲坚果品种 (A16、816、广 11、HAES344、HAES660、桂热 1 号和昌宁 1 号) 为试材, 利用液相色谱-质谱 (LC-MS) 联用技术检测单位鲜质量果仁脂肪酸组成和含量, 用单因素方差分析 (ANOVA)、主成分分析 (PCA) 和偏最小二乘法判别分析 (PLS-DA) 进行综合分析评价。

【结果】7 个澳洲坚果品种的果仁均检测出 41 种脂肪酸, 其中饱和脂肪酸 (SFA) 13 种, 单不饱和脂肪酸 (MUFA) 18 种, 多不饱和脂肪酸 (PUFA) 10 种。脂肪酸含量方面, 7 个品种果仁的 SFA 含量范围为 43 726.20~102 759.74 ng·g⁻¹, MUFA 含量范围为 53 590.74~343 559.73 ng·g⁻¹, PUFA 含量范围为 8 733.66~53 692.72 ng·g⁻¹; 其中广 11 的 SFA、MUFA、PUFA 含量均最高, 其次是 HAES660, 桂热 1 号最低。进一步分析不同品种澳洲坚果果仁各类脂肪酸含量表明, 广 11 的棕榈酸、棕榈油酸、油酸、异油酸和亚油酸含量显著高于其他品种, HAES660 的硬脂酸显著高于其他品种, 广 11 和 HAES660 的 α -亚麻酸显著高于其他品种, 桂热 1 号和 HAES344 的二十碳五烯酸 (EPA) 显著高于其他品种。通过 PCA 分析, 广 11 和 HAES660 与其他品种明显分开; PLS-DA 分析以 VIP>1.5 筛选到癸酸、花生四烯酸和二十二碳六烯酸 (DHA) 为特征差异代谢物, 癸酸和 DHA 含量最高的品种是 816, 花生四烯酸含量最高的是桂热 1 号。【结论】云南 7 个澳洲坚果品种均检测出 41 种脂肪酸, 广 11 脂肪酸含量最高, 其次是 HAES660。棕榈酸、棕榈油酸、油酸、异油酸和亚油酸含量最高的品种是广 11, 硬脂酸和 α -亚麻酸含量最高的是 HAES660, 癸酸和 DHA 含量最高的是 816, 花生四烯酸和 EPA 含量最高的是桂热 1 号。

关键词: 澳洲坚果; 果仁; 脂肪酸; 分析方法

中图分类号: S664 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2025)04-0001-08

Analysis of fatty acid composition and concentration in the kernel of seven main macadamia cultivars from Yunnan

DUAN Minxian, ZHANG Birong, YANG Fan, LI Xuejia, SHI Wenbin, YAN Suyun, TANG Shaoping, ZHAO Jun, ZHOU Xianyan*

(*Institute of Tropical and Subtropical Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yunnan 678000, Baoshan, China*)

Abstract: 【Objective】Fatty acids are one of the main trait indicators to evaluate the fruit

收稿日期: 2024-09-11 接受日期: 2025-01-19

基金项目: 云南省科技人才与平台计划 (202105AD160049); 云南省创新引导与科技型企业培育计划 (202304BT090028-1-3); 德宏州英才兴边计划 (2022RC010, 2022RC015)

作者简介: 段敏仙, 女, 助理研究员, 本科, 研究方向为果实采前和采后生理品质研究。E-mail: 1052891298@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: lyfzhouxianyan@163.com

quality of macadamia germplasm resources, and also essential nutrients for human health. With the consumers becoming more concerned with healthy foods, large amounts of nutrition-related data are needed to screen excellent nut germplasms. Yunnan is the main producing area of macadamia nuts. This study aims to investigate the differences in fatty acid composition among seven main varieties in Yunnan and screen macadamia nut varieties rich in specific fatty acids.

【Methods】 Seven macadamia varieties (A16, 816, Guang 11, HAES344, HAES660, Guire 1 and Changning 1) from the macadamia planting base of the Institute of Tropical and Subtropical Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences (located in Baoshan city, Yunnan province) were selected as the test materials. Sample collection was carried out by using diagonal method, and 10 plants with the same vigorous and no pests and diseases were randomly selected at the maturity stage. A total of 60 macadamia nuts were collected at the low, medium, high, inside, and outside positions of canopy, and randomly divided into three groups with 20 fruit in each group. The fresh green peel was shelled, the kernel was immediately frozen and ground with liquid nitrogen, and then stored at $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ for later use. The composition and content of fatty acids in the unit fresh weight kernel were detected by liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) with 50 fatty acid standards and five stable isotope labeled standards, and one-way analysis of variance (ANOVA), principal component analysis (PCA), and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) were used for comprehensive analysis and evaluation. **【Results】** A total of 41 fatty acids were detected in the kernels of seven macadamia varieties in Yunnan, including 13 saturated fatty acids (SFA), 18 monounsaturated fatty acids (MUFAs), and 10 polyunsaturated fatty acids (PUFAs). In terms of fatty acid content, the SFA content of the seven varieties ranged from 43726.20 to 102759.74 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, the MUFA content from 53590.74 to 343559.73 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and the PUFA content from 8733.66 to 53692.72 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. Among them, Guang 11 had the highest content of SFA, MUFA, and PUFA, followed by HAES660, and Guire 1 had the lowest values. A further analysis of the contents of various fatty acids in different varieties of macadamia nuts showed that hexadecanoic acid, palmitoleic acid, octadecanoic acid, oleic acid, cis-vaccenic acid, and linoleic acid were the main components of 41 fatty acids, among which hexadecanoic acid content ranged from 20218.83 to 56261.30 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, palmitoleic acid content from 10360.40 to 125929.28 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, octadecanoic acid content from 13438.66 to 42448.98 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, oleic acid content from 18969.29 to 96976.32 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, cis-vaccenic acid content from 18741.46 to 95181.99 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and linoleic acid content from 7435.72 to 51326.26 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. The contents of hexadecanoic acid, palmitoleic acid, oleic acid, cis-vaccenic acid and linoleic acid were the highest in Guang 11; the content of octadecanoic acid was the highest in HAES660, and the contents of hexadecanoic acid, palmitoleic acid, oleic acid, cis-vaccenic acid and linoleic acid in HAES660 were second following Guang 11, which were 42381.88, 46840.31, 52791.16, 52310.95, and 19096.30 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The α -linolenic acid of Guang 11 and HAES660 was significantly higher than that of other varieties, which was 1619.06 and 1777.21 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Eicosapentaenoic acid (EPA) was highly correlated with human health, and the highest content was found in Guire 1, followed

by HAES344, which was 6.26 and 4.77 ng·g⁻¹, respectively. PCA analysis showed that the first principal component PC1 and the second principal component PC2 contained 55.5% and 18.5% of the original information, respectively, and Guang 11 and HAES660 were clearly separated from other varieties. A total of 16 characteristic fatty acids were screened by PLS-DA analysis using VIP > 1 as the screening criterion. including decanoic acid, octadecanoic acid, tridecanoic acid, dodecanoic acid, pentadecanoic acid, myristelaidic acid, petroselaidic acid, trans-10-heptadecenoic acid, trans-10-pentadecenoic acid, cis-4,7,10,13,16,19-docosahexaenoic acid (DHA), cis-5,8,11,14,17-eicosapentaenoic acid (EPA), linoelaidic acid, cis-13,16-docosadienoic acid, cis-11,14,17-eicosatrienoic acid, arachidonic acid, and γ -linolenic acid. Three characteristic fatty acids were screened by VIP > 1.5, which were decanoic acid, arachidonic acid, and DHA, and the contents of decanoic acid and DHA in cultivar 816 were the highest, which were 54.63 and 120.79 ng·g⁻¹, respectively. Guire 1 had the highest content of arachidonic acid (148.76 ng·g⁻¹). 【Conclusion】 A total of 41 fatty acids were detected in all seven macadamia varieties in Yunnan, with Guang 11 having the highest content of fatty acids, followed by HAES660. Guang 11 had the highest contents of hexadecanoic acid, palmitoleic acid, oleic acid, cis-vaccenic acid, and linoleic acid; HAES660 exhibited the highest content of octadecanoic acid and α -linolenic acid; 816 had the highest content of decanoic acid and DHA; and Guire 1 displayed the highest content of arachidonic acid and EPA.

Key words: Macadamia nuts; Kernel; Fatty acid; Analytical methods

澳洲坚果 (*Macadamia spp*) 又称夏威夷果, 为山龙眼科 (*Proteaceae*) 澳洲坚果属 (*Macadamia F. Muell*) 多年生常绿乔木果树^[1-2]。中国自 1910 年引进, 目前在云南、广西、广东、贵州等省份作为主要经济作物被广泛种植。据国际坚果与干果理事会 (简 INC) 不完全统计, 世界澳洲坚果种植面积为 54.27 万 hm², 中国种植面积 33.64 万 hm², 约占全球种植面积的 62%。其中, 云南澳洲坚果面积达 27.57 万 hm², 占世界的近 50%和全国的 80%。澳洲坚果仁富含脂肪酸、蛋白质、矿质元素等多种营养成分。据国内外相关研究发现, 澳洲坚果仁主要的营养成分是脂肪酸, 占干物质的 78.52%, 脂肪酸是由碳、氢、氧三种元素组成的一类化合物, 根据碳氢链饱和与不饱和可分为 3 类: 饱和脂肪酸 (SFA)、单不饱和脂肪酸 (MUFA) 和多不饱和脂肪酸 (PUFA)。研究表明长期摄入富含不饱和脂肪酸的油脂, 可以显著降低血浆中低密度脂蛋白、总脂蛋白浓度和患心血管疾病的风险^[3-4]。

不同品种澳洲坚果果仁的脂肪酸丰富^[5]。宋海云等^[6]对广西 3 个澳洲坚果主栽品种 (桂热 1 号、OC、695) 果仁的脂肪酸组分进行分析, 发现果仁均含有 18 种脂肪酸并且含有人体必需脂肪酸, 其中单不饱和脂肪酸的含量最高; 杜丽清等^[7]分析了广东湛江地区的 8 个澳洲坚果品种 (800、333、788、246、Own wenture、Winks、Own choice、H20), 结果表明, 果仁中粗脂肪含量高达 70%以上, 含有肉豆蔻酸、棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、花生油酸和花生酸等 8 种脂肪酸, 所含脂肪酸种类以不饱和脂肪酸居多, 其比例高达 82.96%。杨为海等^[8]研究了广东省湛江市 28 份澳洲坚果种质 (H2、OC、

HAES246、HAES344、HAES695、HAES783、HAES788 等），发现果仁主要含有 8 种脂肪酸，包括 3 种不饱和脂肪酸（油酸、棕榈油酸和二十碳烯酸）和 5 种饱和脂肪酸（棕榈酸、硬脂酸、花生酸、肉豆蔻酸、二十一烷酸）。康专苗等^[9]研究了贵州 5 种（Own Choice、HAES788、HAES695、Hinde、HAES344）澳洲坚果，共检测出脂肪酸 16 种，其中有 7 种不饱和脂肪酸，总含量为 85.89%，不饱和脂肪酸含量最高的是油酸，其次是棕榈油酸。由此可见，不同品种、不同地区澳洲坚果果仁脂肪酸种类和含量有所差异。

澳洲坚果作为一种营养健康食品在全世界广受消费者青睐。早期云南种植的澳洲坚果品种繁多，后经适应性改良，选出 A4、A16、HAES660、HAES788 等一系列优质品种，其中 A16、816、广 11、HAES344、HAES660、桂热 1 号、昌宁 1 号 7 个品种在云南的种植面积较大，且这 7 个品种的果仁脂肪酸还未进行系统研究，因此笔者在本研究中利用 LC-MS 结合单因素方差分析、PCA 和 PLS-DA 对单位鲜质量澳洲坚果果仁的脂肪酸进行研究，为选择富含优质特定脂肪酸的品种提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料

A16、816、广 11、HAES344、HAES660、桂热 1 号、昌宁 1 号均采自位于云南省保山市的云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所澳洲坚果种植基地（25°4' N，99°11' E，海拔 799 m），树龄为 11 年。样品的收集采用对角线法^[9]，在成熟期随机选取 10 株生长势相同且无病虫害的植株，在其冠层下、中、高、内、外采集 60 个澳洲坚果，随机分成 3 组，每组 20 个果实，随后带回实验室取样。将新鲜的青皮果脱壳取果仁立即用液氮速冻后贮藏于-80 °C 备用。

1.1.2 仪器与试剂

仪器：AB SciexQTRAP® 6500+质谱仪、AB SciexExionLC TMAD 液相色谱。

试剂：50 种脂肪酸标准品和 5 种稳定同位素标记标准品购自上海甄准生物科技有限公司；异丙醇、乙腈、甲酸（LC-MS，Thermo-Fisher，美国），超纯水 Mill-Q（Millipore，美国）。

1.2 方法

1.2.1 标准品准备

准确称取 50 种脂肪酸标准品，制备浓度为 2000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 混标线性母液，甲醇稀释线性母液得到系列浓度分别为 40000、20000、10000、4000、2000、1000、400、200、100、40、20、10 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的工作液。配制一定浓度的 Decanoicacid-d19、Myristicacid-d2、Octadecanoicacid-d35、Eicosanoicacid-d39 和 Lignocericacid-d4 溶液，混匀得到内标溶液（IS）。线性、内标和质控的母液及工作溶液均保存于-20 °C 冰箱，50 种标准品和 5 种内标的质谱检测参数见下表。

表 1 脂肪酸的参数列表

Table 1 List of fatty acid parameters

NO.	Component name	缩写 Abbreviation	中文名称 Chinese name	Q1	Q3	RT/min	DP	CE
1	Caprylic acid	C8: 0	辛酸	143.0	143.0	3.50	-40	-10
2	Decanoic acid	C10: 0	癸酸	171.1	171.1	4.17	-85	-10
3	Hendecanoic acid	C11: 0	十一烷酸	185.1	185.1	4.61	-75	-10
4	Dodecanoic acid	C12: 0	十二烷酸	199.1	199.1	5.11	-90	-12
5	Tridecanoic acid	C13: 0	十三烷酸	213.1	213.1	5.65	-85	-12
6	Tetradecanoic acid	C14: 0	十四烷酸/肉豆蔻酸	227.1	227.1	6.23	-70	-16
7	Myristoleic acid	C14: 1	十四碳烯酸 (顺-9) /肉豆蔻烯酸	225.1	225.1	5.32	-85	-13
8	Myristelaidic acid	C14: 1T	十四碳烯酸 (反-9) /反式肉豆蔻烯酸	225.2	225.2	5.47	-90	-13
9	Pentadecanoic acid	C15: 0	十五烷酸	241.1	241.1	6.82	-85	-10
10	<i>cis</i> -10-Pentadecenoic acid	C15: 1	十五碳烯酸 (顺-10)	239.0	239.0	5.84	-80	-14
11	<i>trans</i> -10-Pentadecenoic acid	C15: 1T	十五碳烯酸 (反-10)	239.1	239.1	6.00	-90	-13
12	Hexadecanoic acid	C16: 0	十六烷酸/棕榈酸	255.1	255.1	7.40	-90	-15
13	Palmitoleic acid	C16: 1	十六碳烯酸 (顺-9) /棕榈油酸	253.2	253.2	6.39	-85	-16
14	Palmitelaidic acid	C16: 1T	十六碳烯酸 (反-9) /反棕榈油酸	253.1	253.1	6.55	-85	-13
15	Heptadecanoic acid	C17: 0	十七烷酸/珠光脂酸	269.1	269.1	7.96	-85	-14
16	<i>cis</i> -10-Heptadecenoic acid	C17: 1	十七碳烯酸 (顺-10)	267.1	267.1	6.94	-80	-15
17	<i>trans</i> -10-Heptadecenoic acid	C17: 1T	十七碳烯酸 (反-10)	267.2	267.2	7.12	-90	-18
18	Octadecanoic acid	C18: 0	十八烷酸/硬脂酸	283.1	283.1	8.49	-85	-16
19	Petroselinic acid	C18: 1(n-12)	十八碳烯酸 (顺-6) /岩芹酸	281.1	263.1	7.66	-90	-25
20	Oleic acid	C18: 1(n-9)	十八碳烯酸 (顺-9) /油酸	281.2	281.2	7.51	-85	-15
21	<i>cis</i> -Vaccenic acid	C18: 1(n-7)	十八碳烯酸 (顺-11) /异油酸	281.1	281.1	7.51	-80	-15
22	Petroselaidic acid	C18: 1(n-12)T	十八碳烯酸 (反-6) /反式岩芹酸	281.2	281.2	7.83	-80	-15
23	Elaidic acid	C18: 1(n-9)T	十八碳烯酸 (反-9) /反油酸	281.1	281.1	7.67	-80	-15
24	<i>trans</i> -Vaccenic acid	C18: 1(n-7)T	十八碳烯酸 (反-11) /反异油酸	281.1	281.1	7.67	-80	-15
25	Linoleic acid	C18: 2(n-6)	十八碳二烯酸 (顺-9,12) /亚油酸	279.1	279.1	6.66	-85	-15

26	Linoelaidic acid	C18: 2(n-6)T	十八碳二烯酸 (反-9,12) /反亚油酸	279.2	279.2	6.95	-90	-15
27	<i>trans</i> -7-Nonadecenoic acid	C19: 1(n-12)T	十九碳烯酸 (反-7)	295.2	295.2	8.31	-85	-15
28	<i>trans</i> -10-Nonadecenoic acid	C19: 1(n-9)T	十九碳烯酸 (反-10)	295.3	295.3	8.20	-90	-15
29	Arachidic acid	C20: 0	二十烷酸/花生酸	311.2	311.2	9.36	-35	-15
30	gamma-Linolenic acid	C18: 3(n-6)	十八碳三烯酸 (顺-6,9,12) /γ-亚麻酸	277.1	277.1	6.03	-75	-10
31	<i>cis</i> -11-Eicosenoic acid	C20: 1	二十碳烯酸 (顺-11)	309.2	309.2	8.51	-85	-15
32	<i>trans</i> -11-Eicosenoic acid	C20: 1T	二十碳烯酸 (反-11)	309.3	309.3	8.68	-85	-15
33	alpha-Linolenic acid	C18: 3(n-3)	十八碳三烯酸 (顺-9,12,15) /α-亚麻酸	277.1	277.1	5.93	-60	-13
34	Heneicosanoic acid	C21: 0	二十一烷酸	325.3	325.3	9.76	-80	-15
35	<i>cis</i> -11,14-Eicosadienoic acid	C20: 2	二十碳二烯酸 (顺-11,14)	307.2	307.2	7.69	-85	-15
36	Docosanoic acid	C22: 0	二十二烷酸/山俞酸	339.2	339.2	10.21	-85	-17
37	homo-gamma-Linolenic acid	C20: 3(n-6)	二十碳三烯酸 (顺-8,11,14) /HOMO-γ-亚麻酸	305.1	261.2	6.96	-90	-22
38	Erucic acid	C22: 1	二十二碳烯酸 (顺-13) /芥酸	337.3	337.3	9.34	-85	-16
39	Brassicic acid	C22: 1T	二十二碳烯酸 (反-13) /巴椎酸	337.2	337.2	9.54	-85	-15
40	<i>cis</i> -11,14,17-Eicosatrienoic acid	C20: 3(n-3)	二十碳三烯酸 (顺-11,14,17)	305.2	305.2	6.90	-80	-12
41	Arachidonic acid	C20: 4	二十碳四烯酸 (顺-5,8,11,14) /花生四烯酸	303.1	259.2	6.42	-85	-17
42	Tricosanoic acid	C23: 0	二十三烷酸	353.3	353.3	10.54	-85	-15
43	<i>cis</i> -13,16-Docosadienoic acid	C22: 2	二十二碳二烯酸 (顺-13,16)	335.2	335.2	8.65	-85	-15
44	<i>cis</i> -5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic acid	C20: 5	二十碳五烯酸 (顺-5,8,11,14,17) /EPA	301.2	257.1	5.77	-80	-16
45	<i>cis</i> -7,10,13,16-Docosic acidtraenoic acid	C22: 4	二十二碳四烯酸 (顺-7,10,13,16)	331.2	287.2	7.29	-80	-20
46	<i>cis</i> -7,10,13,16,19-Docosapentaenoic acid	C22: 5(n-3)	二十二碳五烯酸 (顺-7,10,13,16,19) /DPA	329.2	285.2	6.59	-80	-18
47	<i>cis</i> -4,7,10,13,16-Docosapentaenoic acid	C22: 5(n-6)	二十二碳五烯酸 (顺-4,7,10,13,16)	329.3	285.3	6.91	-80	-16
48	Tetracosanoic acid	C24: 0	二十四烷酸/木蜡酸	367.3	367.3	10.86	-90	-15
49	Nervonic acid	C24: 1	二十四碳烯酸 (顺-15) /神经酸	365.3	365.3	10.08	-85	-17
50	<i>cis</i> -4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic acid	C22: 6	二十二碳六烯酸 (顺-4,7,10,13,16,19) /DHA	327.2	327.2	6.21	-85	-9
51	Decanoic acid-d19	C ₁₀ D ₁₉ O ₂	氘代十烷酸/十酸-d19	190.2	190.2	4.11	-40	-12
52	Myristic acid-d2	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	肉豆蔻酸/十四烷酸-d2	229.1	229.1	6.20	-65	-12
53	Octadecanoic acid-d35	C ₁₈ H ₃₄ O ₄	十八烷二酸-d35	318.5	318.5	8.32	-80	-15

54	Eicosanoic acid-d39	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	花生酸-d39	350.5	350.5	9.26	-80	-17
55	Lignoceric acid-d4	C ₂₄ H ₄₈ O ₂	木蜡酸-d4	371.3	371.3	10.84	-85	-17

注：Q1 为母离子，Q3 为子离子，RT 为保留时间，DP 为去簇电压，CE 为碰撞电压。

Note: Q1 is the parent ion, Q3 is the daughter ion, RT is the retention time, DP is the declustering voltage, and CE is the collision voltage.

1.2.2 代谢物提取

取 100 μL 样本，加入混合内标溶液的 300 μL （异丙醇：乙腈=1：1），混匀，12000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min，取上清进行 LC-MS 分析。

1.2.3 色谱、质谱方法

色谱柱：Waters ACQUITY UPLC BEH C18（2.1 \times 100 mm，1.7 μm ）。

流动相：A 相：0.05%甲酸水溶液；B 相：50%异丙醇乙腈。

柱温：50 $^{\circ}\text{C}$

进样量：2 μL

流速：0.3 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$

色谱梯度如下表所示：

表 2 色谱梯度洗脱表

Table 2 Chromatographic gradient elution table

时间/min	A/%	B/%
0.0	70	30
1.0	70	30
2.0	35	65
11.0	0	100
13.5	0	100
14.0	70	30
15.0	70	30

质谱条件：电喷雾电离源（ESI），负离子电离模式。离子源温度 550 $^{\circ}\text{C}$ ，离子源压-4500 V，气帘气 35 psi，雾化气和辅助气均为 60 psi。采用多反应监测（MRM）进行扫描。

1.2.3 数据处理

采用 Excel 2019 对数据进行整理，SPSS26 软件进行单因素分析脂肪酸含量；SIMCA14.1 软件进行 PCA 分析和 PLS-DA 分析，计算预测变量重要性投影（variable importance in projection, VIP），以 $\text{VIP}\geq 1$ 和 $\text{VIP}\geq 1.5$ 为条件筛选差异脂肪酸成分；结果提取和可视化作图。所有数据均为 3 个生物学重复的平均值和标准误差。

2 结果与分析

2.1 云南 7 个澳洲坚果品种果仁 SFA、MUFA 和 PUFA 分析

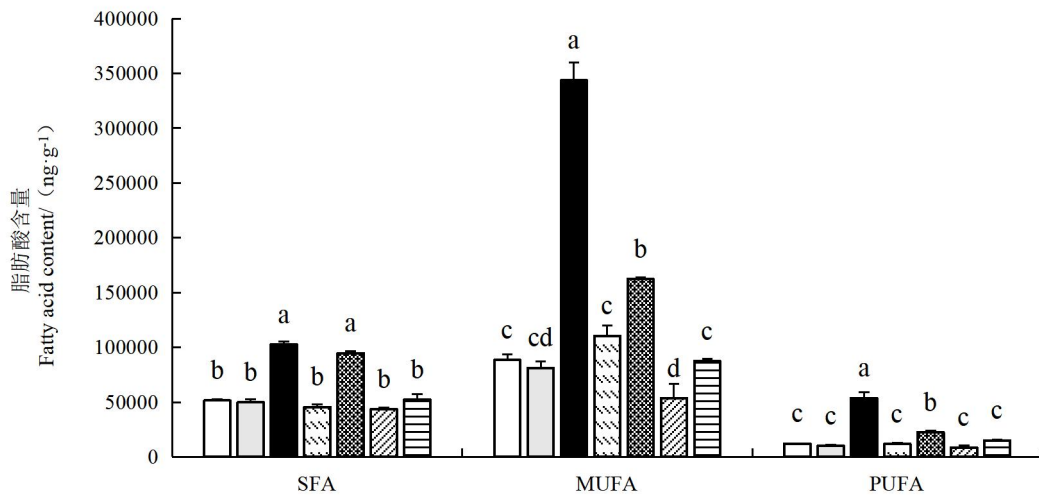
云南 7 个品种澳洲坚果果仁的 SFA、MUFA 和 PUFA 检测结果由表 3 和图 1，SFA 占总脂肪酸含量的 29.32%，7 个品种的 SFA 含量范围为 43 726.20~102 759.74 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，变异系数为 39.36%，广 11 和 HAES660 的含量最高，二者显著高于其余 5 个品种。MUFA 占总脂肪酸含量最高，为 61.71%，7 个品种的含量范围为 53 590.74~343 559.73 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，变异系数为 74.71%，广 11 的 MUFA 含量显著高于 HAES660，HAES660 显著高于 A16、816、HAES344 和昌宁 1 号，A16、HAES344 和昌宁 1 号显著高于桂热 1 号。PUFA 占总脂肪酸含量最低，为 8.97%，7 个品种的含量范围为 8 733.66~53 692.72 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，变异系数为 82.26%，广 11 显著高于 HAES660，HAES660 显著高于另外 5 个品种。

表 3 云南 7 个澳洲坚果品种果仁中的 SFA、MUFA、PUFA 变异情况

Table 3 Variation of SFA, MUFA and PUFA in kernels of seven macadamia cultivars in

Yunnan			
指标 Index	SFA/ (ng·g ⁻¹)	MUFA/ (ng·g ⁻¹)	PUFA/ (ng·g ⁻¹)
最大值 Max.	102 759.74	343 559.73	53 692.72
最小值 Min.	43 726.20	53 590.74	8 733.66
平均值 Mean	62 937.38	132 450.16	19 259.42
标准差 SD	24 772.80	98 949.80	15 842.38
变异系数 CV/%	39.36	74.71	82.26

□ A16 □ 816 ■ 广 11 Guang 11 ▨ HAES344 ▩ HAES660 ▤ 桂热1号 Guire 1 ▦ 昌宁1号 Changning 1



分析不同品种同一脂肪酸类型之间的差异。图中误差线代表 3 个生物学重复的 SE 值，不同小写字母表示不同品种同一脂肪酸类型显著差异 ($p < 0.05$)。下同。

Analyze the differences between different varieties of the same fatty acid type. The error bars in the figure represent the SE values of the three biological replicates, different small letters indicate significant differences in the same fatty acid type in different varieties ($p < 0.05$). The same below.

图 1 云南 7 个澳洲坚果品种果仁中的 SFA、MUFA、PUFA 含量分析

Fig. 1 Analysis of SFA, MUFA and PUFA in the kernels of seven macadamia cultivars in Yunnan

2.2 云南 7 个澳洲坚果品种果仁脂肪酸种类和含量分析

云南 7 个品种的澳洲坚果果仁脂肪酸组分检测结果见表 4。7 个澳洲坚果品种的果仁中均检出了 41 种脂肪酸，其中 SFA 13 种，MUFA 18 种，PUFA 10 种。41 种脂肪酸中以棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、异油酸和亚油酸含量为主，广 11 的棕榈酸、棕榈油酸、油酸、异油酸和亚油酸含量最高，分别为 56 261.30、125 929.28、96 976.32、95 181.99 和 51 326.26 ng·g⁻¹，HAES660 的硬脂酸含量最高，为 42 448.98 ng·g⁻¹，HAES660 的棕榈酸、棕榈油酸、油酸、异油酸和亚油酸含量仅次于广 11，分别为 42 381.88、46 840.31、52 791.16、52 310.95 和 19 096.30 ng·g⁻¹。7 个品种的棕榈酸含量范围为 20 218.83~56 261.30 ng·g⁻¹，广 11 显著高于 HAES660，HAES660 显著高于另外 5 个品种，A16 和 816 显著高于桂热 1 号。

棕榈油酸含量范围为 10 360.40~125 929.28 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，广 11 显著高于 HAES660，HAES660 显著高于 A16、816、桂热 1 号和昌宁 1 号，但与 HAES344 无显著性差异。硬脂酸含量范围为 13 438.66~42 448.98 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，HAES660 显著高于广 11，广 11 显著高于 A16、816、HAES344 和桂热 1 号。油酸含量范围为 18 969.29~96 976.32 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，广 11 显著高于 HAES660，HAES660 显著高于 A16、816、HAES344、桂热 1 号和昌宁 1 号，A16、HAES344 和昌宁 1 号显著高于桂热 1 号。异油酸含量范围为 18 741.46~95 181.99 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，广 11 显著高于 HAES660，HAES660 显著高于 A16、816、桂热 1 号和昌宁 1 号，A16、816 显著高于桂热 1 号。亚油酸含量范围为 7 435.72~51 326.26 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，广 11 显著高于 HAES660，HAES660 显著高于 A16、816、HAES344 和桂热 1 号。 α -亚麻酸是人体必需的脂肪酸，广 11 和 HAES660 的含量较高，分别为 1 619.06 和 1 777.21 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ，二者显著高于其余品种。与人体健康高度相关的多不饱和脂肪酸主要有二十碳五烯酸（EPA）和二十二碳六烯酸（DHA），7 个品种中桂热 1 号的 EPA 含量最高，其次是 HAES344，二者含量分别为 6.26 和 4.77 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ；DHA 含量最高的品种是 816，其次是 HAES660，二者含量分别为 120.79 和 109.29 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

表 4 云南 7 个澳洲坚果品种果仁脂肪酸种类及含量分析

Table 4 Analysis of fatty acid type and content of kernels in seven macadamia nut cultivars in Yunnan

物质 Compounds	(ng·g ⁻¹)						
	A16	816	广 11 Guang 11	HAES344	HAES660	桂热 1 号 Guire 1	昌宁 1 号 Changning 1
癸酸 Decanoic acid	10.28±0.00 d	54.63±3.98 a	47.38±4.91 a	33.69±0.55 b	23.95±0.08 c	10.28±0.00 d	10.28±0.00 d
十二烷酸 Dodecanoic acid	1 212.61±230.25 ab	1 247.38±240.69 ab	1 153.31±116.01 ab	786.32±5.17 b	1 581.82±152.98 a	968.85±32.53 b	1 233.06±231.87 ab
十三烷酸 Tridecanoic acid	27.17±0.78 b	14.56±4.45 c	10.11±0.00 c	27.61±0.43 b	35.99±4.98 a	10.11±0.00 c	24.54±1.77 b
肉豆蔻酸 Tetradecanoic acid	1 446.07±0.56 cd	1 232.82±3.47 d	5 737.43±328.52 a	1 923.64±4.93 c	3 685.93±235.53 b	1 742±310.81 cd	1 403.12±151.55 cd
肉豆蔻烯酸 Myristoleic acid	55.4±0.15 bc	35.56±12.03 cd	299.05±13.75 a	36.83±1.00 cd	60.11±2.28 b	33.3±1.47 cd	28.93±3.59 d
反式肉豆蔻烯酸 Myristelaidic acid	74.34±4.44 b	32.02±7.84 cd	10.12±0.00 e	44.06±3.16 c	91.62±3.39 a	30.35±3.15 d	32.61±2.45 cd
十五烷酸 Pentadecanoic acid	126.99±0.33 d	74.78±11.81 e	204.40±1.62 b	117.88±4.77 d	246.81±23.33 a	163.14±13.98 c	95.17±0.85 de
十五碳烯酸 (顺-10) <i>cis</i> -10-Pentadecenoic acid	19.42±0.57 c	12.18±1.21 e	39.87±0.61 a	18.51±2.07 cd	28.76±3.61 b	13.45±1.81 de	11.67±0.84 e
十五碳烯酸 (反-10) <i>trans</i> -10-Pentadecenoic acid	60.51±1.19 b	13.73±3.08 c	48.92±6.48 b	21.58±1.54 c	88.96±11.66 a	29.72±5.47 c	29.64±2.65 c
棕榈酸 Hexadecanoic acid	28 649.99±1 202.04 c	27 109.59±2 112.36 c	56 261.30±1 513.06 a	26 342.82±2 096.07 cd	42 381.88±1 461.14 b	20 218.83±12.51 d	26 283.79±3 567.40 cd
棕榈油酸 Palmitoleic acid	16 658.62±1 481.64 cd	19 724.58±2 706.95 cd	125 929.28±13 927.05 a	30 106.15±4 386.87 bc	46 840.31±2 946.43 b	10 360.40±1 437.91 d	12 089.93±2 075.25 cd
反棕榈油酸 Palmitelaidic acid	789.18±60.32 c	188.27±4.92 e	1 325.16±103.28 b	546.62±49.78 d	1 689.51±66.51 a	494.64±50.91 d	533.77±15.15 d
十七烷酸 Heptadecanoic acid	115.77±6.87 b	87.16±4.30 b	233.76±36.40 a	108.79±5.73 b	241.18±15.43 a	118.52±11.94 b	104.29±10.02 b
十七碳烯酸 (顺-10) <i>cis</i> -10-Heptadecenoic acid	298.11±36.85 cd	217.94±17.62 cd	1 117.63±141.81 a	409.89±54.87 bc	551.47±78.91 b	152.47±6.32 d	237.03±4.95 cd
十七碳烯酸 (反-10) <i>trans</i> -10-Heptadecenoic acid	44.26±1.99 c	32.04±5.37 d	47.16±5.65 c	41.08±3.78 cd	91.12±1.94 a	60.03±0.91 b	31.97±2.33 d

硬脂酸 Octadecanoic acid	16 245.25±883.10 cd	16 959.95±1 480.27 cd	23 326.91±2 494.68 b	13 438.66±698.57 d	42 448.98±2 312.94 a	17 199.34±1 137.14 cd	20 725.03±1 631.45 bc
油酸 Oleic acid	32 970.85±2 731.74 c	27 306.95±2 738.70 cd	96 976.32±1 835.90 a	33 530.17±1 167.68 c	52 791.16±1 737.71 b	18 969.29±5 761.27 d	35 142.04±1 344.22 c
异油酸 <i>cis</i> -Vaccenic acid	32 354.17±2 166.02 c	30 203.13±122.71 c	95 181.99±2 435.18 a	39 342.41±4729.23 c	52 310.95±2 691.02 b	18 741.46±5 771.69 d	34 545.18±1 579.80 c
反油酸 Elaidic acid	1 011.46±59.43 bc	881.41±45.36 c	1 825.09±266.74 a	1 417.01±205.27 ab	1 628.47±131.25 a	1 078.74±184.05 bc	1 069.14±2.81 bc
反异油酸 <i>trans</i> -Vaccenic acid	974.06±42.14 b	711.31±2.12 b	1 879.45±128.38 a	1 473.51±200.32 a	1 558.48±226.63 a	1 021.30±168.20 b	1 006.50±38.08 b
亚油酸 Linoleic acid	10 890.61±86.01 c	9 460.26±652.48 c	51 326.26±5 139.99 a	9 934.49±741.87 c	19 096.30±792.64 b	7 435.72±1 590.47 c	13 550.38±341.44 bc
反亚油酸 Linoelaidic acid	478.78±83.43 cd	298.49±35.09 d	33.67±0.00 e	1 097.43±123.64 a	849.38±142.10 b	50.51±9.72 e	628.73±37.20 bc
十九碳烯酸（反-10） <i>trans</i> -10-Nonadecenoic acid	47.77±3.05 c	32.73±0.75 c	198.35±2.93 a	47.08±6.72 c	100.21±12.03 b	43.53±18.90 c	29.61±0.10 c
花生酸 Arachidic acid	2 415.81±74.81 b	1 944.76±221.83 b	7 332.18±516.37 a	1 808.49±175.52 b	2 743.79±310.25 b	2 356.44±691.80 b	1 566.27±328.74 b
γ -亚麻酸 Gamma-Linolenic acid	391.39±82.70 ab	149.23±12.22 c	253.19±6.54 bc	220.16±9.09 c	452.55±49.99 a	213.45±28.58 c	285.91±65.80 bc
二十碳烯酸（顺-11） <i>cis</i> -11-Eicosenoic acid	2 003.56±93.75 b	1 227.59±106.48 b	12 862.89±1 992.54 a	1 859.97±9.65 b	2 775.13±282.60 b	1 915.19±602.54 b	1 380.47±82.31 b
二十碳烯酸（反-11） <i>trans</i> -11-Eicosenoic acid	114.14±0.94 c	76.79±5.45 c	368.49±42.72 a	221.20±21.00 b	201.02±35.36 b	100.22±20.59 c	115.45±5.45 c
α -亚麻酸 alpha-Linolenic acid	290.38±40.64 c	198.92±25.33 c	1 619.06±9.40 a	356.34±22.94 c	1 777.21±150.12 a	651.58±172.84 b	406.37±7.35 bc
二十一烷酸 Heneicosanoic acid	57.06±2.66 c	116.29±1.09 b	453.04±19.47 a	51.67±0.59 cd	46.44±3.88 cd	26.46±6.96 d	26.37±3.46 d
二十碳二烯酸（顺-11,14） <i>cis</i> -11,14-Eicosadienoic acid	50.22±6.29 c	42.79±2.56 c	225.03±41.42 a	43.58±2.94 c	109.21±18.73 b	27.05±0.44 c	48.68±2.16 c
山俞酸 Docosanoic acid	629.20±42.28 b	466.76±79.37 b	2 006.94±375.86 a	507.27±54.31 b	656.97±40.76 b	524.13±2.71 b	503.20±58.62 b
芥酸 Erucic acid	845.88±61.77 b	495.94±112.81 b	5 079.06±819.56 a	1 246.11±53.36 b	1 401.54±110.12 b	460.11±60.07 b	1 006.89±120.31 b
二十碳三烯酸（顺-11,14,17） <i>cis</i> -11,14,17-Eicosatrienoic acid	7.44±1.42 b	5.85±0.93 b	19.14±5.40 b	13.81±2.81 b	54.97±7.61 a	41.36±6.82 a	14.94±2.79 b

花生四烯酸 Arachidonic acid	67.63±0.22 bc	55.47±1.66 c	70.70±4.63 bc	78.96±1.54 b	61.87±6.41 bc	148.76±8.26 a	60.17±10.11 bc
二十三烷酸 Tricosanoic acid	75.27±9.47 b	78.90±8.52 b	986.84±255.65 a	79.64±1.16 b	113.87±13.30 b	50.73±7.63 b	72.57±8.40 b
二十二碳二烯酸（顺-13,16） <i>cis</i> -13,16-Docosadienoic acid	47.98±6.43 cd	15.93±5.78 d	139.72±23.38 a	138.03±16.42 a	116.82±22.81 ab	69.07±13.96 bc	102.35±6.43 ab
二十碳五烯酸/EPA <i>cis</i> -5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic acid	1.75±0.59 b	1.16±0.00 b	1.70±0.54 b	4.77±1.37 a	1.55±0.39 b	6.26±1.82 a	1.16±0.00 b
木蜡酸 Tetracosanoic acid	501.48±45.07 b	437.71±36.88 b	5 006.14±547.42 a	387.21±6.08 b	555.05±60.33 b	337.37±14.83 b	313.52±16.61 b
神经酸 Nervonic acid	16.39±1.87 bc	10.46±0.13 cd	258.84±8.34 a	15.03±0.47 cd	27.38±1.54 b	4.04±0.00 d	19.95±4.41 bc
二十二碳六烯酸/DHA <i>cis</i> -4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic acid	26.36±5.31 c	120.79±10.72 a	4.23±0.00 c	99.66±9.94 ab	109.29±16.01 ab	89.91±19.62 ab	73.07±0.97 b
反式岩芹酸 Petroselaic acid	91.47±9.07 bcd	67.75±0.85 d	112.04±12.89 abc	134.70±8.13 a	125.95±13.85 a	82.50±6.52 cd	115.83±10.83 ab

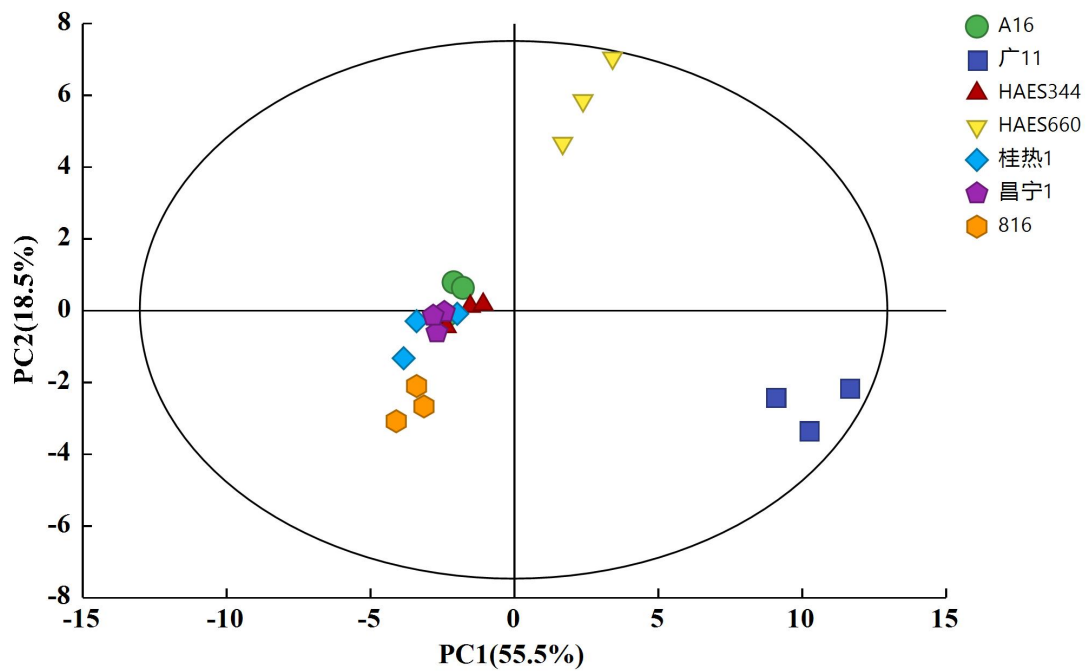
注：同行不同小写字母表示显著差异 ($p < 0.05$)。

Note: Different small letters in peers indicate significant differences ($p < 0.05$).

2.3 云南 7 个澳洲坚果品种果仁脂肪酸 PCA 和 PLS-DA 分析

为了更好地了解云南 7 个品种澳洲坚果果仁脂肪酸组成的差异，对脂肪酸数据进行了 PCA 分析（图 2）。第一主成分 PC1、第二主成分 PC2 分别包含了原来信息量的 55.5%和 18.5%。从 PC1 方向上，广 11 和 HAES660 与其他 5 个品种明显分离，A16、桂热 1 号、昌宁 1 号、HAES344 和 816 分布较集中，HAES660 和广 11 位于正轴，而 HAES344、816、桂热 1 号、昌宁 1 号和 A16 位于负轴；从 PC2 方向上，HAES660 与 816、广 11 明显分离，A16、HAES344、昌宁 1 号、桂热 1 号没有分离。

为了进一步分析不同脂肪酸对区分 7 个澳洲坚果品种的贡献率，对 7 个品种的 41 种脂肪酸进行 PLS-DA 分析发现，根据 $VIP > 1$ 作为筛选标准共筛选到 16 种特征脂肪酸（表 5），其中有 5 种饱和脂肪酸，分别为癸酸、硬脂酸、十三烷酸、十二烷酸、十五烷酸；4 种单不饱和脂肪酸，分别为反式肉豆蔻烯酸、反式岩芹酸、十七碳烯酸（反-10）和十五碳烯酸（反-10）；7 种多不饱和脂肪酸，分别为 DHA、EPA、反亚油酸、二十二碳二烯酸（顺-13,16）、二十碳三烯酸（顺-11,14,17）、花生四烯酸和 γ -亚麻酸。



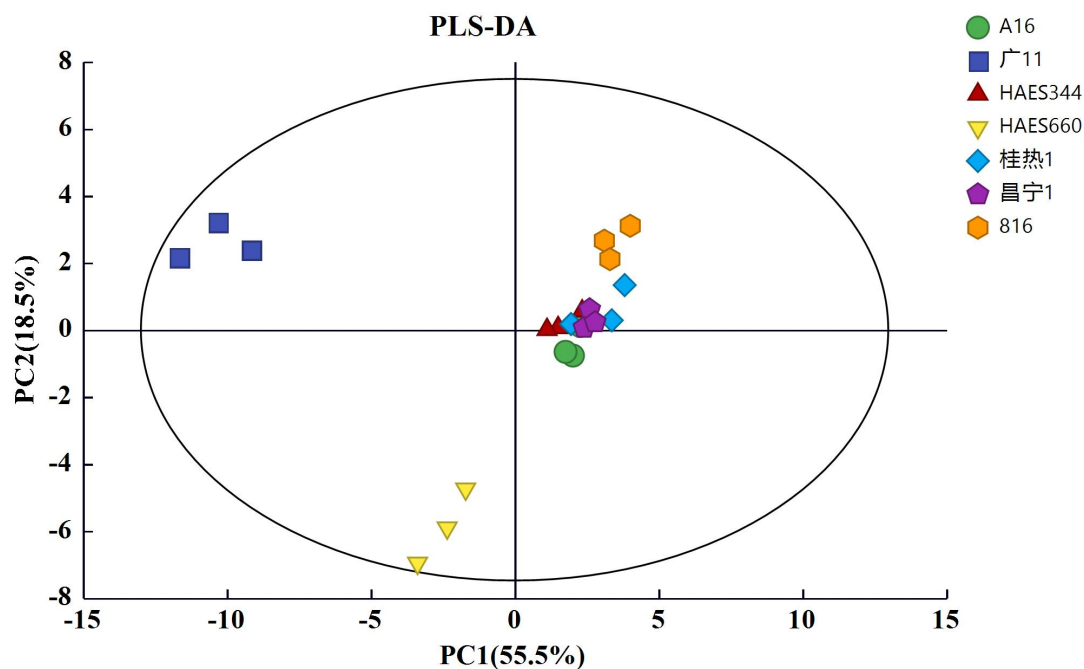


图2 云南7个澳洲坚果品种果仁脂肪酸含量PCA和PLS-DA分析
Fig. 2 PCA and PLS-DA analysis of fatty acid content in seven macadamia nut cultivars in Yunnan

表5 PLS-DA分析云南7个澳洲坚果品种果仁脂肪酸差异
Table 5 PLS-DA analysis of fatty acids in the kernel of seven macadamia cultivars from Yunnan Province

物质 Compounds	编号 ID	解释度 VIP	物质 Compounds	编号 ID	解释度 VIP
癸酸 Decanoic acid	M1	1.89	反式岩芹酸 Petroselaic acid	M9	1.30
二十二碳六烯酸 (DHA)	M2	1.62	硬脂酸 Octadecanoic acid	M10	1.27
花生四烯酸 Arachidonic acid	M3	1.54	γ -亚麻酸 Gamma-Linolenic acid	M11	1.18
反式肉豆蔻烯酸 Myristelaic acid	M4	1.45	十七碳烯酸 (反-10) <i>trans</i> -10-Heptadecenoic acid	M12	1.16
二十碳五烯酸 (EPA)	M5	1.43	十五碳烯酸 (反-10) <i>trans</i> -10-Pentadecenoic acid	M13	1.14
反亚油酸 Linoelaidic acid	M6	1.37	十三烷酸 Tridecanoic acid	M14	1.14
二十二碳二烯酸 (顺-13,16) <i>cis</i> -13,16-Docosadienoic acid	M7	1.33	十二烷酸 Dodecanoic acid	M15	1.11
二十碳三烯酸 (顺-11,14,17) <i>cis</i> -11,14,17-Eicosatrienoic acid	M8	1.31	十五烷酸 Pentadecanoic acid	M16	1.07

以VIP大于1.5作为筛选标准共筛选到3种特征脂肪酸(图3),分别为癸酸、DHA、花生四烯酸。品种816的癸酸含量最高,其次是广11,二者含量分别为54.63和47.38 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 816和广11的癸酸含量显著高于HAES344, HAES344显著高于HAES660, HAES660显著高于A16、桂热1号和昌宁1号。DHA含量最高的品种也是816,为120.79

ng·g⁻¹, 含量高于 HAES344、HAES660 和桂热 1 号, 且显著高于昌宁 1 号, 昌宁 1 号显著高于 A16 和广 11。桂热 1 号的花生四烯酸含量最高, 为 148.76 ng·g⁻¹, 显著高于另外 6 个品种, HAES344 显著高于 816, A16、广 11、HAES344、HAES660 和昌宁 1 号之间无显著性差异。

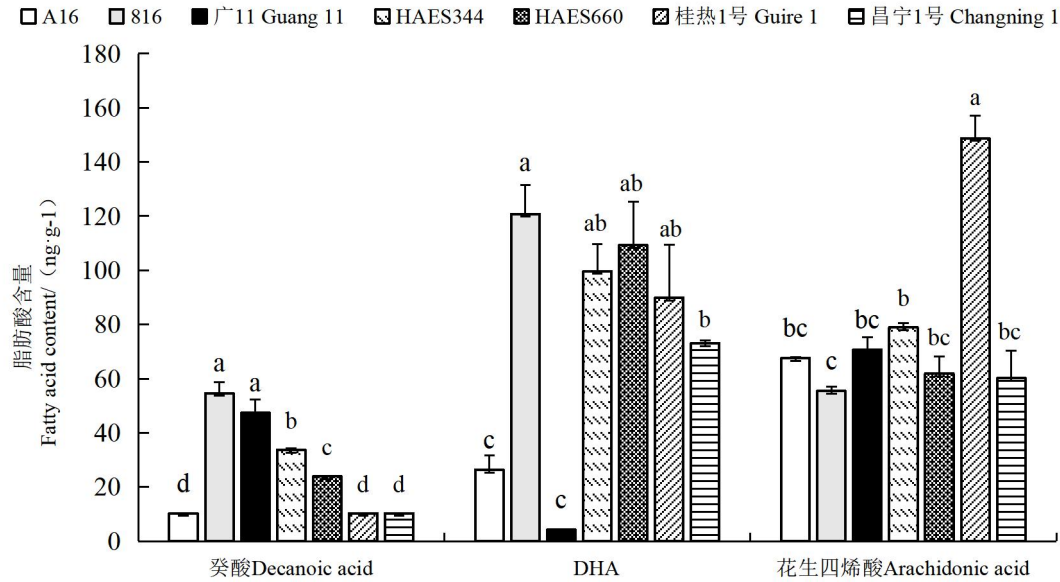


图 3 云南 7 个澳洲坚果品种果仁癸酸、DHA、花生四烯酸分析

Fig. 3 Analysis of decanoic acid, DHA and arachidonic acid concentrations in the kernel of 7 macadamia cultivars from Yunnan

3 讨论

云南 7 个澳洲坚果主栽品种中均检测出 41 种脂肪酸, 其中 SFA 13 种, 占总脂肪酸的 29.32%; MUFA 18 种, 占总脂肪酸的 61.71%; PUFA 10 种, 占总脂肪酸的 8.97%; 说明不饱和脂肪酸是澳洲坚果果仁脂肪酸的主要成分。这与康专苗等^[10]、张国昌等^[11]、Shuai 等^[12]、O'hare 等^[13]研究澳洲坚果果实品质 MUFA 含量最高, 其次是 SFA, PUFA 含量最低的结果一致。贺鹏等^[14]研究广西澳洲坚果脂肪酸结果含有 SFA 11 种、MUFA 4 种和 PUFA 3 种; Shuai 等^[15]研究云南澳洲坚果脂肪酸含有 SFA 6 种、MUFA 4 种和 PUFA 2 种; 梁燕理等^[16]研究广西澳洲坚果脂肪酸含有 SFA 8 种、MUFA 4 种和 PUFA 3 种, 笔者在本研究中均检测出了以上文献报道的脂肪酸, 种类多于文献报道的脂肪酸种类。脂肪酸在生物体内起着关键作用, 它是构成生物膜的各种功能脂质分子的重要组成部分, 是机体最重要的能量供应物质之一, 在疾病发病机制等研究领域意义重大^[17]。不饱和脂肪酸只会杀死癌细胞并降低癌细胞转移能力, 对正常细胞没有不利影响^[18]。研究表明, 澳洲坚果的单不饱和脂肪酸含量在所有坚果中排名第一, 不仅可以降低低密度脂蛋白胆固醇水平和心血管疾病的风险, 还显著降低糖尿病患者的收缩压和舒张压, 控制血压, 抑制炎症。有文献报道, 每周食用 5 次坚果可减少 50% 的心血管疾病风险, 而每周食用 1~4 次则可减少 25% 的风险^[3]。多不

饱和脂肪酸含量是评价食用油营养水平的重要依据，具有抗血栓和抗动脉粥样硬化的特性，能够预防动脉高血压、胰岛素耐受性、糖尿病、肾病等。

从脂肪酸含量上看，41种脂肪酸中以棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、异油酸和亚油酸为主，这与文献报道的澳洲坚果中脂肪酸组成结果是相似的^[19-21]。在云南7个澳洲坚果品种中，广11的总脂肪酸含量最高，棕榈酸、棕榈油酸、油酸、异油酸和亚油酸含量显著高于其他品种，HAES660的脂肪酸含量仅次于广11，棕榈酸、棕榈油酸、油酸和异油酸显著高于其他5个品种，这与Goodarzi等^[22]和帅希祥^[23]的研究结果相似。棕榈油酸属于 Ω -7脂肪酸可用于减少炎症，预防糖尿病和心血管疾病^[24]。广11的棕榈油酸是其余品种的2.69~12.15倍，可作为广11区别于其他6个品种的特征脂肪酸。油酸在代谢过程中具有降低血压、预防动脉粥样硬化、燃烧脂肪和对抗感染等多种功效^[25]。在本研究中，广11的油酸是其余品种的1.84~5.11倍。多不饱和脂肪酸中亚油酸和 α -亚麻酸含量较高，广11的亚油酸是其他6个品种的2.69~6.90倍，广11和HAES660的 α -亚麻酸含量差异不大，是其余5个品种的2.48~8.93倍；亚油酸和 α -亚麻酸是人体必需的2种脂肪酸，适量的摄入亚油酸和亚麻酸具有降低血液胆固醇含量、健脑益智、改善视力等功效^[21, 26]。在PLS-DA模型分析下，从VIP>1.5筛选出癸酸、DHA和花生四烯酸，说明这3种脂肪酸是7个品种的主要差异代谢物，品种816的癸酸和DHA含量最高，桂热1号的花生四烯酸和EPA含量最高。DHA对儿童神经发育至关重要，且DHA和EPA有助于改善儿童精神障碍和双相情感障碍症状^[17]。澳洲坚果种仁脂肪酸含量的显著性差异对于人们选择富含特定脂肪酸的品种具有重要利用价值。

主成分分析是一个采用少量综合指标来代替原来多个指标大部分信息的一种降维的分析方法，剔除不重要的部分，保留重要信息，在对樟树^[27]、相思^[28]等树种的研究中已经取得了较好的效果^[10]。笔者在本研究中使用PCA提取了原变量74%的信息，并采用主成分得分图分析各个主成分和品种间关系，PC1与广11和HAES660的呈正相关，与A16、HAES344、昌宁一号、桂热一号和816呈负相关。A16、HAES344、昌宁一号、桂热一号和816脂肪酸组分的相似性高。在PLS-DA模型分析下，从VIP>1.5筛选出癸酸、DHA和花生四烯酸，说明这3种脂肪酸是7个品种的主要差异代谢物。

4 结论

澳洲坚果是不饱和脂肪酸的良好来源，云南7个澳洲坚果品种的果仁均检测出41种脂肪酸，主要是棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、异油酸和亚油酸。广11的脂肪酸含量最高，其次是HAES660，可作为高脂肪酸含量品种；棕榈酸、棕榈油酸、油酸、异油酸和亚油酸含量最高的品种是广11，硬脂酸和 α -亚麻酸含量最高的是HAES660，癸酸和DHA含量最高的是816，花生四烯酸和EPA含量最高的是桂热1号。

参考文献 References:

- [1] SHABALALA M, TOUCHER M, CLULOW A. The macadamia bloom-what are the hydrological

implications?[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: 110628.

[2] 杨帆, 付小猛, 陶亮, 杨虹霞, 唐少平, 周先艳, 董美超, 周东果. 澳洲坚果起源、育种及种质资源研究现状[J]. *中国果树*, 2023(11): 1-7.

YANG Fan, FU Xiaomeng, TAO Liang, YANG Hongxia, TANG Shaoping, ZHOU Xianyan, DONG Meichao, ZHOU Dongguo. *Macadamia* spp. origin, variety breeding and germplasm resources research present situation[J]. *China Fruits*, 2023(11): 1-7.

[3] KRIS-ETHERTON P M, PEARSON T A, WAN Y, HARGROVE R L, MORIARTY K, FISHELL V, ETHERTON T D. High-monounsaturated fatty acid diets lower both plasma cholesterol and triacylglycerol concentrations[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1999, 70(6): 1009-1015.

[4] CURB J D, WERGOWSKA G, DOBBS J C, ABBOTT R D, HUANG B. Serum lipid effects of a high-monounsaturated fat diet based on macadamia nuts[J]. *Archives of Internal Medicine*, 2000, 160(8): 1154-1158.

[5] 康专苗, 王代谷, 张燕, 何凤平, 朱文华, 李向勇, 刘凡值. 贵州 5 种澳洲坚果果实品质分析[J]. *农业研究与应用*, 2021, 34(4): 17-24.

KANG Zhuanniao, WANG Daigu, ZHANG Yan, HE Fengping, ZHU Wenhua, LI Xiangyong, LIU Fanzhi. Quality analysis of five macadamia varieties in Guizhou[J]. *Agricultural Research and Application*, 2021, 34(4): 17-24.

[6] 宋海云, 张涛, 王文林, 郑树芳, 何铄扬, 杜鸿平, 覃振师, 贺鹏. 澳洲坚果果仁脂肪酸分析及评价[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(21): 128-136.

SONG Haiyun, ZHANG Tao, WANG Wenlin, ZHENG Shufang, HE Xianyang, DU Hongping, QIN Zhenshi, HE Peng. Analysis and evaluation of fatty acids in macadamia kernels[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(21): 128-136.

[7] 杜丽清, 曾辉, 邹明宏, 陆超忠, 罗炼芳. 澳洲坚果果仁中粗脂肪与脂肪酸含量的变异分析[J]. *经济林研究*, 2009, 27(4): 92-95.

DU Liqing, ZENG Hui, ZOU Minghong, LU Chaozhong, LUO Lianfang. Variation analysis of crude fat and fatty acid contents in macadamia kernel[J]. *Non-wood Forest Research*, 2009, 27(4): 92-95.

[8] 杨为海, 张明楷, 邹明宏, 曾辉, 张汉周, 陆超忠. 澳洲坚果不同种质果仁粗脂肪及脂肪酸成分的研究[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(7): 1297-1302.

YANG Weihai, ZHANG Mingkai, ZOU Minghong, ZENG Hui, ZHANG Hanzhou, LU Chaozhong. Crude fat and fatty acid composition of various macadamia germplasms kernel[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(7): 1297-1302.

[9] LI Q, YIN R, ZHANG Q R, WANG X P, HU X J, GAO Z D, DUAN Z M. Chemometrics analysis on the content of fatty acid compositions in different walnut (*Juglans regia* L.) varieties[J]. *European Food Research and Technology*, 2017, 243(12): 2235-2242.

[10] 康专苗, 郭广正, 王代谷, 何凤平, 王文林, 曾辉, 涂行浩. 石漠化地区澳洲坚果果实品质及产量的综合评价[J]. *经济林研究*, 2024, 42(1): 67-76.

KANG Zhuanniao, GUO Guangzheng, WANG Daigu, HE Fengping, WANG Wenlin, ZENG Hui, TU Xinghao. Comprehensive evaluation of fruit quality and yield of macadamia nuts in rocky desertification areas[J]. *Non-wood Forest Research*, 2024, 42(1): 67-76.

[11] 张国昌, 周启武, 黄飞燕, 万晓丽, 马引娟, 刘世平, 李秀君, 铁学江, 黄绍琨, 石定宏, 何家梅. 临沧市 8 个主栽澳洲坚果品种的果仁品质分析与综合评价[J]. *西部林业科学*, 2023, 52(1): 69-76.

ZHANG Guochang, ZHOU Qiwu, HUANG Feiyan, WAN Xiaoli, MA Yinjuan, LIU Shiping, LI Xiujun,

TIE Xuejiang, HUANG Shaokun, SHI Dinghong, HE Jiamei. Analysis and comprehensive evaluation of fruit quality of eight main macadamia cultivars in Lincang[J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(1): 69-76.

[12] SHUAI X X, DAI T T, CHEN M S, LIU C M, RUAN R, LIU Y H, CHEN J. Characterization of lipid compositions, minor components and antioxidant capacities in macadamia (*Macadamia integrifolia*) oil from four major areas in China[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102009.

[13] O'HARE T J, TRIEU H H, TOPP B, RUSSELL D, PUN S, TORRISI C, LIU D N. Assessing fatty acid profiles of macadamia nuts[J]. HortScience, 2019, 54(4): 633-637.

[14] 贺鹏, 张涛, 宋海云, 谭秋锦, 郑树芳, 覃振师, 黄锡云, 汤秀华, 王文林. 广西澳洲坚果果实品质分析与综合评价[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 242-251.

HE Peng, ZHANG Tao, SONG Haiyun, TAN Qiuji, ZHENG Shufang, QIN Zhenshi, HUANG Xiyun, TANG Xiuhua, WANG Wenlin. Quality analysis and comprehensive evaluation of the fruit of *Macadamia integrifolia* grown in Guangxi Province[J]. Food Science, 2021, 42(24): 242-251.

[15] SHUAI X X, DAI T T, CHEN M S, LIANG R H, DU L Q, CHEN J, LIU C M. Comparative study on the extraction of macadamia (*Macadamia integrifolia*) oil using different processing methods[J]. LWT, 2022, 154: 112614.

[16] 梁燕理, 杨湘良, 韦素梅, 李炜, 黄文. 澳洲坚果油脂脂肪酸组成及氧化稳定性分析[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(5): 33-36.

LIANG Yanli, YANG Xiangliang, WEI Sumei, LI Wei, HUANG Wen. Fatty acid composition and oxidative stability of macadamia oil[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(5): 33-36.

[17] SUBRAMANIAM S, FAHY E, GUPTA S, SUD M, BYRNES R W, COTTER D, DINASARAPU A R, MAURYA M R. Bioinformatics and systems biology of the lipidome[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(10): 6452-6490.

[18] 赵锦波, 李春颖, 赵柏辉, 邱玮臻. 澳洲坚果营养功能文献综述[J]. 中国食品工业, 2023(24): 69-73.

ZHAO Jinbo, LI Chunying, ZHAO Baihui, QIU Weizhen. A literature review on the nutritional function of macadamias[J]. China Food Industry, 2023(24): 69-73.

[19] AQUINO-BOLAÑOS E N, MAPEL-VELAZCO L, MARTÍN-DEL-CAMPO S T, CHÁVEZ-SERVIA J L, MARTÍNEZ A J, VERDALET-GUZMÁN I. Fatty acids profile of oil from nine varieties of macadamia nut[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(6): 1262-1269.

[20] 赵大宣, 赵静, 秦斌华, 邱文武, 覃振师, 郑树芳, 魏长宾, 韦持章, 肖淑英, 王文林. GC-MS 分析澳洲坚果脂肪酸组分[J]. 农业研究与应用, 2013, 26(1): 20-22.

ZHAO Daxuan, ZHAO Jing, QIN Binhua, QIU Wenwu, QIN Zhenshi, ZHENG Shufang, WEI Changbin, WEI Chizhang, XIAO Shuying, WANG Wenlin. Analysis of fatty acids in macadamia nut by GC-MS[J]. Agricultural Research and Application, 2013, 26(1): 20-22.

[21] 张明霞, 庞建光, 蔡冬梅, 王秀梅, 金玉美, 高贤良. 坚果油脂的超声提取工艺优化及其脂肪酸分析[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 142-145.

ZHANG Mingxia, PANG Jianguang, CAI Dongmei, WANG Xiumei, JIN Yumei, GAO Xianliang. Optimisation of ultrasound-assisted extraction of nut oils and analysis of its fatty acid profile[J]. The Food Industry, 2021, 42(6): 142-145.

- [22] GOODARZI H, HASSANI D, POURHOSSEINI L, KALANTARI S, LASHGARI A. Total lipid and fatty acids components of some Persian walnut (*Juglans regia*) cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 321: 112252.
- [23] 帅希祥. 澳洲坚果油组成、营养及其油凝胶体系构建和应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- SHUAI Xixiang. Composition and nutrition of macadamia oil and construction of oleogel system and its application[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [24] 涂行浩, 杜丽清, 魏芳, 马会芳, 吕昕, 谢亚, 陈洪. 澳洲坚果中棕榈油酸理化性质及功效研究进展[J]. *农业研究与应用*, 2021, 34(4): 35-43.
- TU Xinghao, DU Liqing, WEI Fang, MA Huifang, LÜ Xin, XIE Ya, CHEN Hong. Research progress on physicochemical properties and efficacy of palmitoleic acid in macadamia[J]. *Agricultural Research and Application*, 2021, 34(4): 35-43.
- [25] 张翔, 刘锦宜, 黄雪松. 坚果的主要生物活性成分及其保健作用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(7): 2606-2614.
- ZHANG Xiang, LIU Jinyi, HUANG Xuesong. Bioactive components of nuts and their health effects[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(7): 2606-2614.
- [26] 安振. 红外光谱法分析食用油脂脂肪酸组成[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
- AN Zhen. Analysis of fatty acid composition in edible oils using infrared spectroscopy[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.
- [27] 陈天笑, 白小刚, 何茜, 胡冰, 曾炳山, 陆钊华. 缺氮胁迫下不同黑木相思基因型综合评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(10): 47-59.
- CHEN Tianxiao, BAI Xiaogang, HE Qian, HU Bing, ZENG Bingshan, LU Zhaohua. Comprehensive evaluation in different genotypes of *Acacia melanoxylon* under nitrogen deficiency stress[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(10): 47-59.
- [28] 陈文星, 杨琳懿, 唐军荣, 李启少, 李建运, 宋钰. 10个新樟属植物叶片表型性状多样性分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(12): 83-93.
- CHEN Wenxing, YANG Linyi, TANG Junrong, LI Qishao, LI Jianyun, SONG Yu. Analysis of the diversity on leaf phenotypic traits of 10 *Neocinnamomum* genus[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(12): 83-93.