

油茶果采后不同处理种仁代谢组学分析

龙雪燕¹, 闫道良¹, 郭春喜², 李万春¹, 胡玉玲³, 郑炳松¹

(1. 浙江农林大学 浙江省森林芳香植物康养功能研究重点实验室, 杭州 311300; 2. 铜仁学院 贵州省梵净山地区生物多样性保护与利用重点实验室, 贵州 铜仁 554300; 3. 湖南应用技术学院 农林科技学院, 湖南 常德 415000)

摘要:旨在寻找油茶果最佳采后处理方式, 为其后续研究奠定基础, 采用液相色谱-质谱联用法(LC-MS/MS)对油茶果采后不同处理[不处理(F8)、堆沤处理(FC)、去壳摊晒(NS)、带壳摊晒(WS)]10、30 d种仁代谢物进行测定, 并用相关软件对代谢产物进行分析。结果表明: 鉴定出1 107种特征代谢物, 其中正离子模式和负离子模式下鉴定的代谢物数量分别为763种和344种, 代谢物主要为脂类和类脂分子(277种), 苯丙烷类和聚酮类(193种), 有机酸及其衍生物(172种), 类苯(97种), 有机杂环化合物(94种), 有机氧化合物(84种), 核苷、核苷酸和类似物(33种); 通过比较差异代谢物不饱和脂肪酸发现, 去壳摊晒处理30 d(NS2) vs 10 d(NS1)比较组中检测到亚油酸、顺式-9-十六碳烯酸、8(9)-环氧-5Z, 11Z, 14Z-二十碳三烯酸、亚麻酸、蓖麻油酸、9, 10-环氧十八碳烯酸共6种不饱和脂肪酸, 且都表达上调; 对差异代谢物进行富集分析发现, 主要参与的代谢途径有苯丙氨酸代谢、类黄酮生物合成、甘油磷脂代谢、甘油酯代谢、玉米素生物合成、植物次生代谢产物的生物合成、谷胱甘肽代谢、氨基酸的生物合成、次生代谢产物的生物合成。综上, 油茶果采后最佳处理方式去壳摊晒30 d。

关键词:油茶果; 种仁; 采后处理; 代谢组学

中图分类号: TS222; Q591.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)08-0056-08

Metabolomics analysis of kernels of *Camellia oleifera* fruit treated with different methods after harvestLONG Xueyan¹, YAN Daoliang¹, GUO Chunxi², LI Wanchun¹, HU Yuling³, ZHENG Bingsong¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forest Aromatic Plants - based Healthcare Function, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. Key Laboratory of Biodiversity Protection and Utilization in Fanjingshan Area of Guizhou Province, Tongren University, Tongren 554300, Guizhou, China; 3. College of Agriculture and Forestry Science and Technology, Hunan Applied Technology University, Changde 415000, Hunan, China)

Abstract: In order to find the optimal postharvest treatment of *Camellia oleifera* fruit, and lay the foundation for subsequent research, liquid chromatography - tandem mass spectrometry (LC - MS/MS) was used to determine the metabolites of the kernels of different postharvest treatments of *Camellia oleifera*

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2024-04-09

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(22A0714); 湖南省“十四五”应用特色学科(林学)(湘教通[2022]351); 湖南应用技术学院高层次人才启动项目(2023HYBS01); 常德市经济林生态过程调控与高值化利用工程技术研究中心; 贵州省科技厅平台项目(黔科合平台人才[2020]2003)

作者简介: 龙雪燕(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为经济林木发育与栽培生理(E-mail)2363078950@qq.com。

通信作者: 胡玉玲, 教授, 博士(E-mail)huyulin@126.com; 郑炳松, 教授, 博士(E-mail)bszheng@zafu.edu.cn。

fruit [without treatment (F8), composting treatment(FC), sun dried without shell (NS), and sun dried with shell (WS)] for 10 d and 30 d, and relevant software was used to analyze the metabolites. The results showed that a total of 1 107 characteristic metabolites were identified, with 763 and 344 metabolites identified in the positive and negative ion modes, respectively. The main metabolites were lipids and lipid - like molecules (277 kinds), phenylpropanoids and

polyketides (193 kinds), organic acids and derivatives (172 kinds), benzenoids (97 kinds), organoheterocyclic compounds (94 kinds), organic oxygen compounds (84 kinds), nucleosides, nucleotides and analogues (33 kinds). By comparison of the unsaturated fatty acid of differential metabolites, six unsaturated fatty acids, namely linoleic acid, *cis*-9-hexadecenoic acid, 8(9)-epoxy-5Z, 11Z, 14Z-eicosatrienoic acid, linolenic acid, ricinolic acid, 9,10-epoxy-octadecenoic acid, were detected in 30 d (NS2) and 10 d (NS1) of the sun dried without shell treatment, and their expressions were up-regulated. The enrichment analysis of differential metabolites results showed that the main metabolic pathways included phenylalanine metabolism, flavonoid biosynthesis, glycerol phospholipid metabolism, glycerol ester metabolism, zeatin biosynthesis, plant secondary metabolites biosynthesis, glutathione metabolism, amino acid biosynthesis, and secondary metabolites biosynthesis. Overall, the best postharvest treatment of *Camellia oleifera* fruit is sun dried without shell treatment for 30 d.

Key words: *Camellia oleifera* fruit; kernel; postharvest treatment; metabolomics

油茶(*Camellia oleifera* Abel.)是我国特有的木本油料作物,也是我国林业建设的特有经济树种。油茶鲜果中富含黄酮类、茶皂素、多酚类和多糖等物质,油茶籽油中富含不饱和脂肪酸,因此油茶具有较高的经济价值^[1]。油茶果采后不同的处理方式对油茶籽含油率和油茶籽油品质都有不同的影响。研究表明,将采摘的油茶果直接晒干,油茶籽含油率最高,且油茶籽油品质最好^[2];也有研究认为,油茶果采后堆沤摊晒处理能提高油茶籽含油率,且对油茶籽油品质无显著影响^[3],然而有研究者认为堆沤处理会使油茶籽含油率降低^[4-5];还有研究者认为油茶果成熟采后及时进行脱粒其出油率较高^[6]。可见,对于油茶果采后处理方法并没有统一的标准,得出的结论也不一致,因此需要从其他方面进一步论证,以获得最佳采后处理方式。

代谢组学是一门对特定条件下生物体内所有内源性小分子代谢物进行全面定性和定量分析的新兴学科,通常适用于分子质量低于1 500 Da的小分子物质,这些小分子物质主要参与维持植物生长以及功能所必需的脂肪酸、有机酸、氨基酸、碳水化合物等有机物质的代谢反应^[7-9]。通过多元统计学与液相色谱-质谱联用技术可以更加直观地看到植物生长过程中代谢物的变化^[10-12],因此可利用代谢组学技术研究油茶果采后不同处理对油茶籽含油率和油脂品质的影响。目前关于代谢组学在油茶代谢物方面的研究有探究光照对油茶鲜果后熟过程中代谢物的影响^[13],不同品种油茶籽代谢物的比较分析及对其油脂品质的影响^[14],不同发育时期^[15]以及分化

后期^[16]的油茶花芽代谢组学差异分析,而有关采后处理方式对油茶种仁代谢物的影响未见报道。因此,本实验从代谢组学角度研究油茶果采后不同处理方式(堆沤、去壳摊晒、带壳摊晒)对油茶种仁代谢物的影响,旨在寻找油茶果最佳采后处理方式,为油茶果采后处理提供参考及为后续研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

成熟期湘林210油茶鲜果100 kg,2020年10月20日采集于贵州省松桃县盘兴镇油茶基地,外表成熟一致,大小相近。

甲醇、乙腈,色谱级,美国霍尼韦尔国际公司;甲酸,色谱级,上海希格玛高技术有限公司;ExionLC超高效液相色谱仪、TripleTOF 5600高分辨质谱仪,上海爱博才思分析仪器贸易有限公司;Heraeus Fresco17离心机,赛默飞世尔科技公司;BSA124S-CW天平,赛多利斯(上海)贸易有限公司;明澈D24 UV纯水仪,彤迪科学仪器(上海)有限公司;Acquity UPLC HSS T3色谱柱(2.1 mm×100 mm,1.8 μm),济南赛畅科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理

将油茶鲜果分别进行堆沤、去壳摊晒和带壳摊晒处理,每个处理设置3个重复,处理10 d时每个处理随机选取15个种仁,用剪刀剪碎,取150 mg左右用锡纸包好放在液氮中保存待测,分别记为FC1、NS1、WS1;处理30 d时再次取样,取样方法同上,分别记为FC2、NS2、WS2。以不处理的油茶鲜果为对

照(F8)。

1.2.2 代谢物的提取

称取 100 mg 样品进行液氮研磨,随后向样品中加入 120 μL 50% 甲醇溶液,充分振荡混匀,常温静置 10 min,过滤,将滤液放于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下过夜以沉淀样品中的蛋白质,然后于 $4\ 000\times g$ 、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 离心 20 min,上清液即为代谢物溶液。分别取一定量所有样品处理后的上清液,用质谱级水稀释,每个样品各取 10 μL 稀释液混合成 QC 样品。

1.2.3 代谢物的测定

采用液相色谱-质谱联用法(LC-MS/MS)对油茶果采后不同处理种仁代谢物进行测定。

LC 条件:A 相为水(0.1% 甲酸);B 相为乙腈(1% 甲酸);洗脱梯度为 0~0.5 min 5% B,0.5~7 min 5%~100% B,7~8 min 100% B,8~8.1 min 100%~5% B,8.1~10 min 5% B;流速 0.4 mL/min;柱温箱温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$;进样量 5 μL 。

MS 条件:多反应监测(MRM)模式;离子源遮蔽气压 2.041 4 Arb,辅助气和鞘气压力均为 4.082 8 Arb,温度 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$;正离子模式电压 5 000 V,负离子

模式电压 $-4\ 500\text{ V}$ 。

1.2.4 数据分析

原始数据利用 ProteoWiZard 的 MSConvert 软件转换成 mzXML 的可读数据格式,然后分别利用 XCMS 和 CAMERA 软件对质谱峰进行提取质控和加和离子注释,在人类代谢组数据库(HMDB)、京都基因和基因组百科全书(KEGG)对鉴定的代谢物进行功能和分类注释。用 MetaX 软件对数据进行对数转化及标准化处理,接着对代谢物进行主成分分析(PCA),并根据组间变化的显著性筛选得到差异代谢物,使用 KEGG 对差异代谢物进行通路分析,得到代谢通路的富集结果。

2 结果与讨论

2.1 油茶果采后不同处理种仁代谢物概况

采用 LC-MS/MS 分析不同模式下油茶果采后不同处理(不处理、堆沤、去壳摊晒和带壳摊晒)种仁代谢产物组成以及潜在代谢物变化。图 1 为正离子模式和负离子模式下所有样品代谢物和 QC 样本代谢物校准总离子色谱图。

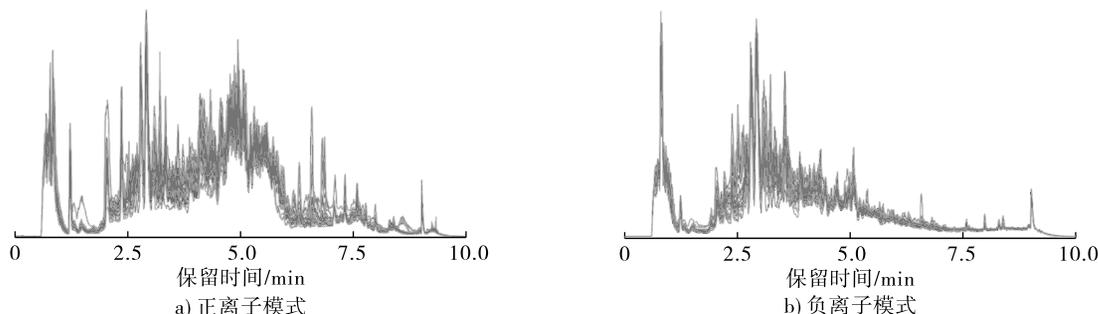


图 1 正、负离子模式下所有油茶种仁样品的总离子色谱图

从图 1 可看出,代谢物峰重叠良好,说明仪器稳定性好,测试结果可靠,可以用于后续分析。表 1 为代谢物注释的统计结果。

表 1 代谢物注释的统计结果

模式	离子特征	MS2	HMDB	KEGG	带注释代谢物
正离子	12 712	763	6 646	5 473	7 670
负离子	4 659	344	1 982	1 537	2 360

从表 1 可看出,正、负离子模式下共有 17 371 个离子特征,从中鉴定 10 030 个带注释的代谢物,使用内部代谢物片段谱库(MS2)验证代谢物,鉴定了 1 107 种代谢物。

2.2 油茶果采后不同处理种仁代谢物鉴定

研究发现,油茶果采后经过一段时间的合理贮藏,油茶种仁逐渐成熟,干物质、粗脂肪和茶皂素含量增加,而水分、蛋白质、氨基酸、粗纤维含量呈降低

趋势^[17-18]。表 2 为油茶果采后不同处理种仁代谢物种类及数量鉴定结果。

表 2 代谢物种类及数量

种类	数量	种类	数量
生物碱和衍生物	4	有机氮化合物	13
类苯	97	有机氧化合物	84
均质非金属化合物	1	有机杂环化合物	94
碳氢化合物	2	有机氮化合物	1
木脂素、新木脂素及相关化合物	6	有机氧化合物	9
脂类和类脂分子	277	有机硫化合物	3
核苷、核苷酸和类似物	33	苯丙烷类和聚酮类	193
有机酸及其衍生物	172	未知	118

由表 2 可知,在正离子和负离子模式下共鉴定出 16 类代谢物,主要为脂类和类脂分子(277 种),苯丙烷类和聚酮类(193 种),有机酸及其衍生物(172 种),类苯(97 种),有机杂环化合物(94 种),

有机氧化物(84种),核苷、核苷酸和类似物(33种),油茶种仁中的这些物质主要与其油脂的含量和品质有关^[19]。

2.3 油茶果采后不同处理种仁代谢物 PCA

PCA是一种无监督的多元数据分析方法,该方法是对原始数据进行重新线性组合,从中提取变量,使其尽可能多地囊括原有数据信息,常用于多维数据聚类趋势的综合分析,也是最早用于代谢组学研究的方法之一^[20-21]。对每个油茶种仁样本(正离子模式和负离子模式检测结果合并)的代谢物进行PCA,结果见图2。由图2可知,样品两两之间差异明显。

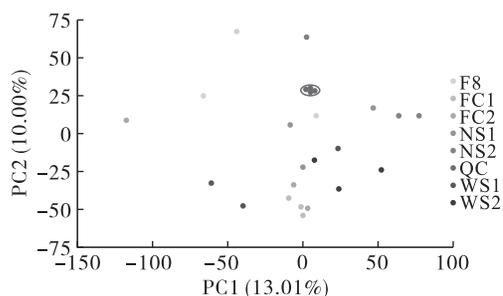


图2 正、负离子模式下油茶果采后不同处理种仁代谢物的PCA得分图

2.4 差异代谢物分析

通过火山图观察两个样品之间代谢物表达水平的差异(见图3),差异代谢物以差异倍数 ≥ 2 和差异倍数 ≤ 0.5 以及 $p \leq 0.5$ 作为筛选标准^[22]。差异显著代谢物统计见表3。

如表3和图3所示,比较组FC1 vs F8、FC1 vs NS1、FC2 vs FC1、FC2 vs NS1、FC2 vs NS2、NS1 vs F8、NS2 vs NS1、WS1 vs F8、WS1 vs NS1、WS2 vs NS1、WS2 vs NS2、WS2 vs WS1在正、负离子模式下差异表达显著的代谢物总数分别为637、570、261、529、908、628、415、512、286、291、532、498,其中比较

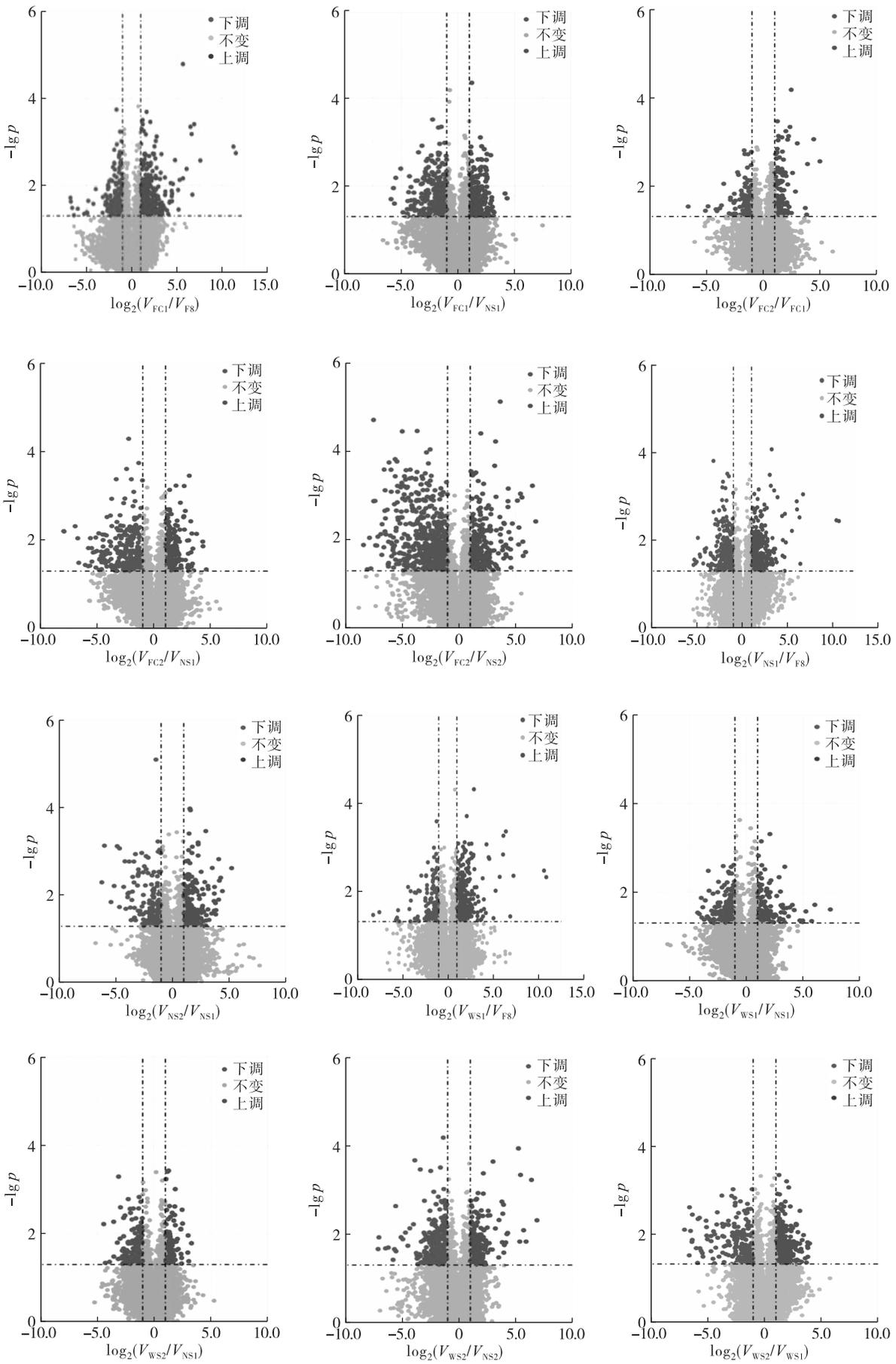
组FC1 vs F8(负离子模式128,正离子模式277)、NS1 vs F8(负离子模式121,正离子模式218)、WS1 vs F8(负离子模式107,正离子模式229)在正、负离子模式下表达上调的差异代谢物较多。

油茶籽油主要含油酸、亚油酸和亚麻酸等不饱和脂肪酸^[23],其不饱和脂肪酸含量越高,品质相对越好^[24]。本实验主要关注油茶果采后不同处理种仁两两之间差异代谢物不饱和脂肪酸含量。正、负离子模式下油茶果采后不同处理种仁差异不饱和脂肪酸分别见表4和表5。

由表4、表5可看出,两种离子模式下,FC2 vs NS2中的差异不饱和脂肪酸数量最多,都表达下调,负离子模式下WS1 vs NS1以及两种离子模式下WS2 vs NS2中的差异不饱和脂肪酸都表达下调,而仅负离子模式下FC1 vs F8中亚麻酸表达上调,说明堆沤处理、带壳摊晒和不处理均不利于油茶果采后油脂积累。油茶果刚采收时,水分含量较高,随着堆沤时间延长,油茶果长时间在高湿度环境下呼吸作用增强,加大了干物质的生理消耗,从而使油茶籽含油率下降^[4],带壳摊晒亦是如此。负离子模式下NS1 vs F8中检测到亚麻酸、蓖麻油酸表达上调,两种离子模式下NS2 vs NS1中检测到亚油酸、顺式-9-十六碳烯酸、8(9)-环氧-5Z,11Z,14Z-二十碳三烯酸、亚麻酸、蓖麻油酸、9,10-环氧十八碳烯酸共6种不饱和脂肪酸,且都表达上调,可见去壳摊晒处理有利于油脂积累,有研究表明油茶籽去壳存放比带壳存放出油率高^[25],这和本实验研究结果一致。而且,油茶籽存储在低湿度环境下,能较好地延缓可溶性蛋白的消耗,油脂的酸值和过氧化值上升较慢,并且能较好地保持 β -谷甾醇的含量^[26],从而提高油茶籽油品质。以上分析说明,去壳摊晒30 d有利于油茶种仁的油脂积累。

表3 差异显著代谢物统计

比较组	正离子模式		负离子模式		总差异显著代谢物
	下调差异显著代谢物	上调差异显著代谢物	下调差异显著代谢物	上调差异显著代谢物	
FC1 vs F8	170	277	62	128	637
FC1 vs NS1	195	179	111	85	570
FC2 vs FC1	85	95	41	40	261
FC2 vs NS1	199	139	98	93	529
FC2 vs NS2	400	214	187	107	908
NS1 vs F8	194	218	95	121	628
NS2 vs NS1	124	161	59	71	415
WS1 vs F8	122	229	54	107	512
WS1 vs NS1	105	92	61	28	286
WS2 vs NS1	103	102	47	39	291
WS2 vs NS2	222	157	83	70	532
WS2 vs WS1	171	208	42	77	498



注:V为某代谢物定量值,如 V_{FC1} 表示样品FC1的某代谢物定量值

图3 差异代谢物火山图

表4 正离子模式下油茶果采后不同处理种仁差异不饱和脂肪酸

比较组	差异代谢物 ID	差异代谢物	F_c	p	调控类型
FC1 vs F8	M321T446	8(9)-环氧-5Z,11Z,14Z-二十碳三烯酸	0.45	0.048 5	下调
FC2 vs NS2	M255T416	顺式-9-十六碳烯酸	0.08	0.022 7	下调
	M277T410	十六碳烯酸	0.01	0.013 2	下调
	M297T425	9,10-环氧十八碳烯酸	0.01	0.033 1	下调
	M281T479	亚油酸	0.12	0.001 2	下调
WS2 vs NS2	M277T410	十六碳烯酸	0.01	0.020 1	下调
NS2 vs NS1	M281T479	亚油酸	7.26	0.004 9	上调
	M255T416	顺式-9-十六碳烯酸	17.75	0.004 5	上调
	M321T446	8(9)-环氧-5Z,11Z,14Z-二十碳三烯酸	5.93	0.024 8	上调

注: F_c 为两比较组定量的比值, $\log_2 F_c > 1$ 表示表达上调, $\log_2 F_c \leq 1$ 表示表达下调; $p < 0.05$ 表示油茶果采后不同处理种仁代谢物间具有显著性差异。下同

表5 负离子模式下油茶果采后不同处理种仁差异不饱和脂肪酸

比较组	差异代谢物 ID	差异代谢物	FC	p	调控类型
FC1 vs F8	M277T459	亚麻酸	4.48	0.035 6	上调
FC2 vs NS2	M277T459	亚麻酸	0.05	0.001 1	下调
	M279T479	亚油酸	0.03	0.001 2	下调
	M281T504	油酸	0.05	0.000 4	下调
	M297T447	蓖麻油酸	0.11	0.005 2	下调
	M295T425	9,10-环氧十八碳烯酸	0.02	0.008 0	下调
WS2 vs NS2	M295T425	9,10-环氧十八碳烯酸	0.08	0.035 8	下调
WS1 vs NS1	M297T409	蓖麻油酸	0.27	0.021 8	下调
NS1 vs F8	M277T459	亚麻酸	21.31	0.022 4	上调
	M297T409	蓖麻油酸	6.64	0.013 2	上调
NS2 vs NS1	M277T459	亚麻酸	5.82	0.033 7	上调
	M297T409	蓖麻油酸	6.17	0.019 0	上调
	M295T425	9,10-环氧十八碳烯酸	14.23	0.026 7	上调

2.5 差异代谢产物功能注释和富集分析

为了更好地阐明油茶果采后不同处理种仁差异代谢物的生物学功能,将代谢物与 MetaboAnalyst 网站中的 Pathway analysis 进行分析。表6为油茶果采后不同处理种仁差异代谢物的重要通路。

由表6可看出,不同处理差异代谢产物涉及19种代谢通路,主要有苯丙氨酸代谢、类黄酮生物合成、甘油磷脂代谢、甘油酯代谢、玉米素生物合成、植

物次生代谢产物的生物合成、谷胱甘肽代谢、氨基酸的生物合成、次生代谢产物的生物合成。油茶果采后不同处理方式对油茶籽油的代谢和生物合成影响较大。其中在FC2 vs NS2中差异代谢物显著富集的代谢通路最多,有植物次生代谢产物的生物合成、植物激素的生物合成、氨基酸的生物合成、甘油磷脂代谢、甘油酯代谢、不饱和脂肪酸的生物合成。

表6 油茶果采后不同处理种仁差异代谢物重要通路

比较组	代谢通路	差异代谢物	所有代谢物	p	错误发现率
FC1 vs F8	类黄酮生物合成	4	68	0.000 0	0.000 3
	甘油磷脂代谢	2	52	0.001 9	0.021 0
FC1 vs NS1	代谢途径	14	1 681	0.016 5	0.024 3
FC2 vs FC1	甘油酯代谢	1	35	0.001 6	0.008 0
	甘油磷脂代谢	1	52	0.003 6	0.009 5
	玉米素生物合成	1	39	0.002 0	0.008 0

续表 6

比较组	代谢通路	差异代谢物	所有代谢物	<i>p</i>	错误发现率
FC2 vs NS1	色氨酸代谢	2	81	0.004 1	0.012 6
	淀粉和蔗糖代谢	2	37	0.000 4	0.002 8
	甘油磷脂代谢	3	52	0.000 0	0.001 2
	甘油酯代谢	3	35	0.000 3	0.002 8
	玉米素生物合成	2	39	0.000 5	0.002 8
NS1 vs F8	次生代谢产物的生物合成	5	1 086	0.561 0	0.561 0
	玉米素生物合成	6	39	0.000 0	0.000 0
	嘧啶代谢	4	68	0.000 4	0.006 4
NS2 vs NS1	苯丙氨酸代谢	3	72	0.000 1	0.001 3
	亚油酸代谢	2	28	0.000 1	0.001 3
	谷胱甘肽代谢	2	38	0.000 3	0.002 3
WS1 vs F8	类黄酮生物合成	2	68	0.000 8	0.005 7
	乙醛酸盐和二羧酸盐代谢	2	61	0.000 6	0.005 7
	植物次生代谢产物的生物合成	2	141	0.006 3	0.012 6
	谷胱甘肽代谢	2	38	0.000 1	0.003 0
WS1 vs NS1	苯丙氨酸代谢	2	72	0.000 7	0.004 0
	类黄酮生物合成	2	68	0.000 6	0.004 0
	维生素 B6 代谢	2	28	0.000 0	0.000 7
WS2 vs NS1	苯丙氨酸代谢	2	72	0.001 9	0.007 7
	次生代谢产物的生物合成	7	1 086	0.020 8	0.025 0
WS2 vs NS2	苯丙氨酸代谢	4	72	0.000 0	0.000 2
	苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸的生物合成	3	35	0.000 0	0.000 2
	植物次生代谢产物的生物合成	3	141	0.003 5	0.009 2
	氨基酸的生物合成	3	127	0.002 4	0.008 0
	谷胱甘肽代谢	3	38	0.000 0	0.000 2
WS2 vs WS1	类黄酮生物合成	2	63	0.000 3	0.002 9
FC2 vs NS2	植物次生代谢产物的生物合成	9	141	0.000 0	0.000 0
	植物激素的生物合成	3	68	0.004 5	0.017 7
	氨基酸的生物合成	4	127	0.008 3	0.022 7
	甘油磷脂代谢	6	52	0.000 0	0.000 0
	甘油酯代谢	4	35	0.000 0	0.000 4
	不饱和脂肪酸的生物合成	3	54	0.001 9	0.013 0

注:*p* < 0.05 表示该代谢通路作为一个整体在统计学上具有显著性差异

3 结论

本研究采用 LC-MS/MS 对油茶果采后不同处理种仁代谢物进行鉴定,使用内部代谢物片段谱库验证代谢物,共鉴定出 1 107 种、16 类代谢物,主要有脂类和类脂分子,苯丙烷类和聚酮类,有机酸及其衍生物,类苯,有机杂环化合物,有机氧化合物,核苷、核苷酸和类似物。比较组去壳摊晒处理 30 d

(NS2) vs 10 d(NS1) 比较组中检测到亚油酸、顺式-9-十六碳烯酸、8(9)-环氧-5Z,11Z,14Z-二十碳三烯酸、亚麻酸、蓖麻油酸、9,10-环氧十八碳烯酸共 6 种不饱和脂肪酸,且都表达上调。不同处理差异代谢产物涉及 19 种代谢通路,主要有苯丙氨酸代谢、类黄酮生物合成、甘油磷脂代谢、甘油酯代谢、玉米素生物合成、植物次生代谢产物的生物合

成、谷胱甘肽代谢、氨基酸的生物合成、次生代谢产物的生物合成。堆沤处理、带壳摊晒和不处理均不利于油茶果采后油脂积累。为防止油茶果采后油脂劣变,应避免采用堆沤处理,且当遇到阴雨天气时应低温烘干,油茶果采后去壳摊晒处理 30 d 有利于油脂的积累和油脂品质的提高。

参考文献:

- [1] 庄瑞林. 中国油茶[M]. 2版. 北京:中国林业出版社, 2008: 3-4.
- [2] 王亚萍, 费学谦, 王开良, 等. 油茶果采后处理方式对油茶籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(9): 14-16.
- [3] 马力, 钟海雁, 陈永忠, 等. 油茶果采后处理对油茶籽内在品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(12): 73-76.
- [4] 梁文斌, 谭益民, 余祥威, 等. 催裂剂对油茶果采后生理效应与品质的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8): 72-77.
- [5] 胡春水, 王金元, 熊芳芳. 提高采后油茶果出油率的研究[J]. 浙江林学院学报, 1999, 16(4): 64-68.
- [6] 黄佳聪, 阚欢, 万晓军, 等. 腾冲红花油茶果实成熟度及堆沤处理对油产量及其品质的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(5): 612-615.
- [7] ZHANG Y, NIE H, YAN X. Metabolomic analysis provides new insights into the heat-hardening response of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) to high temperature stress [J/OL]. *Sci Total Environ*, 2023, 857 (Pt 2): 159430 [2023-03-24]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159430>.
- [8] XIA Y, YU J, MIAO W, et al. A UPLC-Q-TOF-MS-based metabolomics approach for the evaluation of fermented mare's milk to koumiss [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 320: 126619 [2023-03-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126619>.
- [9] 叶红莲. 基于代谢组学探索覆盖对油茶果实产量和品质的影响机制研究[D]. 北京:北京林业大学, 2021.
- [10] PEREIRA V, PONTES M, CÂMARA J S, et al. Simultaneous analysis of free amino acids and biogenic amines in honey and wine samples using in loop orthophthalaldehyde derivatization procedure [J]. *J Chromatogr A*, 2008, 1189(1/2): 435-443.
- [11] ZENG F, OU J, HUANG Y, et al. Determination of 21 free amino acids in fruit juices by HPLC using a modification of the 6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AQC) method[J]. *Food Anal Meth*, 2015, 8(2): 428-437.
- [12] MIYOSHI Y, KOGA R, OYAMA T, et al. HPLC analysis of naturally occurring free D-amino acids in mammals [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2012, 69: 42-49.
- [13] 范兴, 卢燕燕, 吴建文. 基于代谢组学分析光照对油茶鲜果后熟过程代谢物的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 40-50.
- [14] 贾效成, 刘艳菊, 徐玉芬, 等. 海南油茶与普通油茶成熟籽粒代谢组学分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(24): 8255-8263.
- [15] WU L L, WANG Y J, GUO P R, et al. Metabonomic and transcriptomic analyses of *Camellia oleifera* flower buds treated with low-temperature stress during the flowering stage[J/OL]. *Ind Crops Prod*, 2022, 189: 115874 [2023-03-24]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115874>.
- [16] 黄润生, 廖柏勇, 薛彬娥, 等. 油茶花芽不同发育时期代谢物差异分析[C]//第十九届中国作物学会学术年会论文摘要集. 武汉:中国作物学会, 2020: 250.
- [17] 彭阳生, 奚如春. 油茶栽培及茶籽油制取[M]. 北京:金盾出版社, 2006.
- [18] 师江, 刘兴勇. 基于营养成分的变化确定油茶最佳采摘期[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 71-74.
- [19] 彭真汾, 叶清华, 王威, 等. 普通橄榄和清橄榄果实游离氨基酸差异成分与谷氨酰胺代谢[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 229-236.
- [20] GREEN H S, LI X, DE PRA M, et al. A rapid method for the detection of extra virgin olive oil adulteration using UHPLC-CAD profiling of triacylglycerols and PCA [J/OL]. *Food Contr*, 2020, 107: 106773 [2023-03-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106773>.
- [21] SHAO C Y, ZHANG C Y, LV Z D, et al. Pre- and post-harvest exposure to stress influence quality-related metabolites in fresh tea leaves (*Camellia sinensis*) [J/OL]. *Sci Horti - Amsterdam*, 2021, 281: 109984 [2023-03-24]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109984>.
- [22] 蔡莹莹, 陈星星, 谷风林, 等. 不同加工阶段香草兰豆荚的广泛靶向代谢组学研究[J]. 热带作物学报, 2019, 40(7): 1325-1335.
- [23] 向婷婷, 孔庆博, 郑倩, 等. 野生油茶资源与引进品种的经济性状及脂肪酸组成对比分析[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 253-260.
- [24] 向婷婷, 郑倩, 汪秋风, 等. 四川雅安野生油茶经济性状及脂肪酸组成[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 98-103.
- [25] 龙雪燕, 欧阳文英, 杨松, 等. 不同采摘时间及采后不同处理对茶果相关指标影响[J]. 四川林业科技, 2021, 42(1): 96-101.
- [26] 刘海, 王进, 许杰, 等. 油茶籽油挥发性风味物质研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(1): 42-47.