DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250815003
**引用格式**: 廖贤军, 邓慧群, 周如鹞, 等. 基于非靶向代谢组学技术评估干燥方式及原料品种对广西油茶品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 65–74.
LIAO XJ, DENG HQ, ZHOU RK, *et al*. Evaluating the impact of drying methods and raw material cultivars on the quality of Guangxi oil tea based on untargeted metabolomics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 65–74. (in Chinese with English abstract).

# 基于非靶向代谢组学技术评估干燥方式及原料品种对广西油茶品质的影响

廖贤军[1], 邓慧群[1], 周如鹞[1], 秦燕芳[2], 刘助生[1*]
(1. 广西壮族自治区茶叶科学研究所, 桂林 541004; 2. 广西桂林农业学校, 桂林 541006)

**摘 要: 目的** 分析干燥方式及原料品种对广西油茶代谢物谱图的影响, 确定关键差异标志物。**方法** 结合非靶向代谢组学技术与多变量统计方法, 系统解析了冷冻真空干燥、微波真空干燥、微波干燥及提香机干燥 4 种工艺, 以及恭城群体种与龙胜群体种 2 种原料品种对广西油茶次级代谢物谱的影响。**结果** 冷冻真空干燥显著富集了脂质、酚类及糖类化合物, 而微波真空干燥则显著提升了有机酸和氨基酸类代谢物的含量。此外, 以恭城绿茶为原料的油茶呈现出更优的风味及营养品质, 其酚类、有机酸及萜类化合物含量显著高于龙胜绿茶。感官审评结果加以验证了代谢小分子对油茶风味品质的调控, 其中恭城绿茶结合冷冻真空干燥处理组的感官总分为 94.63, 为所有组间的最高得分。随后, 基于皮尔森相关性分析筛选出 18 种与风味属性显著正相关的标志物, 可作为油茶的重要品控指标。**结论** 本研究明确了冷冻真空干燥工艺与恭城绿茶原料在提升油茶品质方面的显著优势, 为广西油茶产业的标准化加工工艺制定、优质原料筛选及质量控制提供了关键科学依据。
**关键词:** 广西油茶; 干燥工艺; 品种; 代谢组学; 风味品质; 营养价值

## Evaluating the impact of drying methods and raw material cultivars on the quality of Guangxi oil tea based on untargeted metabolomics

LIAO Xian-Jun[1], DENG Hui-Qun[1], ZHOU Ru-Kun[1], QIN Yan-Fang[2], LIU Zhu-Sheng[1*]
(1. *Guangxi Research Institute of Tea Science*, *Guilin* 541004, *China*;
2. *Guilin Agricultural School of Guangxi*, *Guilin* 541006, *China*)

**ABSTRACT: Objective** To analyze the effects of drying methods and raw material cultivars on the metabolite profile of Guangxi oil tea, and identify key differential markers. **Methods** Untargeted metabolomics technology coupled with multivariate statistical methods was employed to systematically investigate the effects of 4 kinds of processing techniques, including freeze vacuum drying, microwave vacuum drying, microwave drying and

**收稿日期:** 2025-08-15
**基金项目:** 广西科技基地和人才专项(桂科 AD25069045); 广西基本科研业务稳定支持项目
**第一作者:** 廖贤军(1976—), 男, 硕士, 高级农业经济师, 主要研究方向为茶叶加工、民族茶饮。E-mail: LiaoXJ_GXTS@163.com
***通信作者:** 刘助生(1973—), 男, 硕士, 正高级农艺师, 主要研究方向为茶叶加工、民族茶饮。E-mail: glxlg0397@163.com

aroma-enhancing machine drying, as well as 2 kinds of raw material cultivars (Gongcheng and Longsheng group species) on the secondary metabolite profiles of Guangxi oil tea. **Results** Freeze vacuum drying significantly enriched lipids, phenolic and carbohydrate compounds, whereas microwave vacuum drying significantly increased the content of organic acids and amino acid metabolites. Furthermore, samples produced from the Gongcheng green tea exhibited superior flavor and nutritional quality, with their content of phenolic compounds, organic acids and terpenoids being significantly higher than that from the Longsheng green tea. Sensory evaluation results corroborated the regulatory role of small-molecule metabolites on the flavor quality of oil tea, and the treatment group using Gongcheng green tea combined with freeze vacuum drying achieved the highest overall sensory score of 94.63 among all groups. Subsequently, Pearson correlation analysis identified 18 kinds of marker metabolites significantly positively correlated with flavor attributes, which could serve as important quality control indicators for oil tea. **Conclusion** This study clarifies the significant advantages of the freeze vacuum drying technique and the Gongcheng green tea raw material in enhancing oil tea quality, which can provide key scientific evidence for establishing standardized processing techniques, selecting high-quality raw materials and implementing quality control within the Guangxi oil tea industry.

**KEY WORDS:** Guangxi oil tea; drying methods; cultivars; metabonomics; flavor quality; nutritive value

## 0 引 言

广西油茶是一种极具地方特色的传统食品，通常以茶叶作为主料，添加姜、蒜等辅料通过铁锅旺火捶制而成，在当地的饮食文化中占据重要地位[1]。油茶不仅具有独特的风味特征，还具有抗氧化、祛寒除湿、预防心血管疾病等多种潜在的健康功效[1]，这奠定了其广泛的消费基础，而这些特性与其茶叶等原材料中固有的代谢小分子密切相关[2]。传统的油茶炒制涉及多道工序，难以适应现代快节奏的生活方式。为满足消费者对产品便捷性的需求，可采用预炒制工艺实现油茶的即食化制备。在此过程中，干燥工艺作为关键控制点，直接影响油茶的最终品质。

大量研究证实，干燥过程对茶叶的风味特征及营养品质存在显著影响[3]。例如, DONG 等[4]的研究表明，喷雾干燥的高温短时处理特性会导致茶叶中的部分挥发性化合物(如香叶醇、橙花醇等)显著损失。相比之下，冷冻真空干燥在低温减压环境下能有效减少热敏性成分降解，从而更好地维持茶叶的营养基质与风味轮廓的完整性[5]。然而，当前针对干燥工艺调控油茶预炒制过程中风味活性物质与营养代谢小分子变化的研究仍十分匮乏。

在解析食品复杂基质中的风味及营养活性分子方面，代谢组学技术具备显著优势[6]，其能够全面地鉴定目标样品中的代谢物组成，尤其适用于揭示加工工艺对食品组分的影响。例如，姜希飞等[7]基于非靶向代谢组学技术，研究了不同干燥方式对沙棘果实代谢成分的影响，证实冷冻真空干燥处理能够促进类黄酮化合物在果实中的积累。由此可见，代谢组学方法能够有效阐明干燥工艺对食品基质代谢物轮廓的调控作用，因此将其应用于预炒制油茶的相关研究具有充分的合理性与可行性。此外，还可通过多变量统计分析辨识与油茶品质高度关联的关键代谢物，为油茶即食化制备的标准化生产提供理论依据。基于此，本研究拟采用非靶向代谢组学技术，系统解析微波干燥、提香机干燥、冷冻真空干燥及微波真空干燥 4 种主流干燥工艺对油茶风味与营养品质的调控效应。鉴于原料茶叶的品种基因型是代谢物类别与积累量的决定性因素[8]，本研究分别选取龙胜群体种和恭城群体种绿茶原料构建实验样本，以保证研究结论的广泛适用性。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

实验材料：于 2024 年 4 月 20 日，在桂林市当地茶园中分别采集恭城群体种和龙胜群体种茶树的三或四叶鲜叶，并在 4 h 内运至广西壮族自治区茶叶科学研究所按标准化绿茶工艺进行加工，以作为油茶制备的原材料。此外，用于油茶制备时的辅料，包括葱、姜、蒜，均购自于桂林市七星区汇东市场。

甲醇、乙腈、甲酸(质谱纯，美国赛默飞世尔科技公司)。

### 1.2 仪器与设备

ZDG-5 冷冻真空干燥机(广东永利机械设备有限公司)；VP-02A 微波真空实验机(上海锎泰微波设备制造有限公司)；YX-6CHZ-10B 烘焙提香机(安溪永兴机械有限公司)；G80F23CN2P-B5-R0 微波炉(广东格兰仕集团有限公司)；DW-HL580 超低温冰箱(中科美菱低温科技股份有限公司)；MS105DU 分析天平(精度 0.01 mg，瑞士梅特勒-托利多集团)；5424R 离心机(德国艾本德股份公司)；Ultim 3000 高效液相色谱仪、Orbitrap Exploris 480 四极杆-静电轨道阱质谱仪(美

国赛默飞世尔科技公司); HSS T3 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 3.5 μm)[沃特世科技(上海)有限公司]。

### 1.3　实验方法

油茶制备时, 称取 50 g 茶叶、50 g 姜、5 g 葱和 5 g 蒜(质量比为 10:10:1:1), 并用沸水浸泡干茶叶 10 min。随后, 在铁锅中加入 10 mL 的花生油把姜、葱、蒜混合炒香, 再将滤干后的茶叶加入锅中炒香炒干。完成后, 分别使用以下 4 种方式对油茶进行干燥: (1)冷冻真空干燥。炒制完成的油茶经超低温冰箱速冻后放入真空冷冻干燥机, 设定温度为–78 ℃, 并抽真空至 0 MPa, 运行时间 12 h。(2)微波真空干燥。将油茶置于微波真空干燥机中, 设定真空度为 99%, 温度设定为第一阶段 50 ℃, 运行 0.5 h; 第二阶段 55 ℃, 运行 0.5 h。(3)提香机干燥。将油茶装盘放入提香机干燥架, 设定温度 60 ℃, 运行 6 h。(4)微波炉干燥。将油茶摊放置于微波炉中, 运行 30 min 烘干。通过上述方法制取的油茶样本均放置于–80 ℃的超低温冰箱中保存, 并平行制备 5 份样本, 用于后续的非靶向代谢组学测定。

### 1.4　非靶向代谢组学测定

本研究的非靶向代谢组学检测工作委托科学指南针服务平台完成。

样品制备: 准确称取 200 mg 的样本, 置于 1.5 mL 的离心管中, 并加入 1000 μL 的提取液(甲醇:乙腈:超纯水=2:2:1, *V*:*V*:*V*)涡旋振荡 1 min; 超声 30 min。将离心管置于低温离心机中, 在 4 ℃、12000 r/min 的条件下离心 5 min。取上清液, 真空离心浓缩 4 h。加入 200 μL 50%甲醇水溶液, 涡旋振摇 40 s, 超声 10 min。取 200 μL 样本滤膜过滤, 置于 200 μL 内插管中进行检测。此外, 从每个实验样本中取等体积样本混匀作为质量控制(quality control, QC)样本。

仪器条件: 基于高效液相色谱仪串联配备热电喷雾离子源的四极杆-静电轨道阱质谱仪对提取液中的次级代谢物进行测定, 色谱柱采用 HSS T3 (4.6 mm×250 mm, 3.5 μm)。正离子模式下, 流动相 A 和 B 分别为: 超纯水(加入 0.1%的甲酸), 乙腈(加入 0.1%的甲酸)。负离子模式下, 超纯水作为流动相 A, 纯乙腈作为流动相 B。洗脱梯度均为: 0~0.5 min, 95% A; 0.5~5.5 min, 50% A; 5.5~10.5 min, 5% A; 10.5~12.0 min, 95% A。进样量为 1 μL, 流速 0.4 mL/min, 柱温 50 ℃。电喷雾离子源温度 350 ℃, 正、负离子模式下质谱电压分别为 3500 V、–2500 V, 扫描范围为 *m*/*z* 67~1000。

### 1.5　油茶感官审评

审评小组由 5 名持有高级评茶师证及以上资格的专业人员组成, 参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》对油茶样本的干粉香、汤色、香气、滋味和干粉色泽等 5 项感官属性进行定性描述和定量表征。

### 1.6　数据处理

原始数据采用代谢组学分析软件 Compound Discoverer 进行标准化处理, 具体步骤包括基线过滤、色谱峰识别与积分、保留时间校正及峰对齐。处理后获得包含保留时间、质荷比和峰强度信息的数据矩阵。代谢物鉴定主要参考以下数据库: mzCloud (https://www.mzcloud.org/)、HMDB (http://www.hmdb.ca/)、Thermo 等公共数据库以及科学指南针服务机构的自建数据库。最终, 获得经严格筛选和注释的数据矩阵, 用于后续分析。

SPSS 26 软件被用于不同处理组间代谢成分差异分析的单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)和 Student's *t* 检验, 使用 Metware 云平台进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)模型的建立, 皮尔森相关性系数的计算及热图可视化绘制, 代谢物的分类饼状图基于 Origin 2021 软件绘制。

## 2　结果与分析

### 2.1　油茶样本的次级代谢物鉴定结果

为全面解析油茶样本的次级代谢物谱图特征, 本研究基于高效液相色谱与四极杆-静电轨道阱质谱仪, 对 40 份样本(涵盖 4 种干燥工艺×2 个原料栽培品种×5 次生物学重复)进行非靶向代谢组学分析。通过整合正、负离子模式下的测定数据后, 构建包含 203 种代谢小分子及其响应强度的数据矩阵, 用于后续多元统计分析。

广西油茶的代谢组分涵盖 15 个化学类别(图 1), 其中酚类(19.6%)、有机酸类(15.7%)、脂质(12.7%)、类黄酮(9.3%)及氨基酸及其衍生物(8.3%)为主要优势组分, 累计占比达 65.6%。此外, 实验数据的稳定性与重现性通过 QC 进行系统性监控。如图 2 所示, 基于正、负离子模式下多次进样的 QC 样本总离子流色谱图重叠分析表明, 所有 QC 样本的保留时间和峰强度几乎吻合, 证实仪器分析过程具有高度稳定性, 有效保障了代谢组学数据的重现性与可靠性。

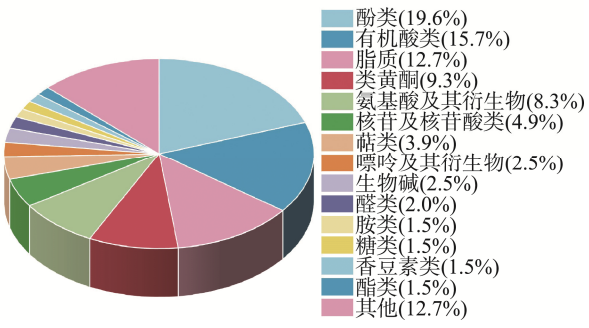
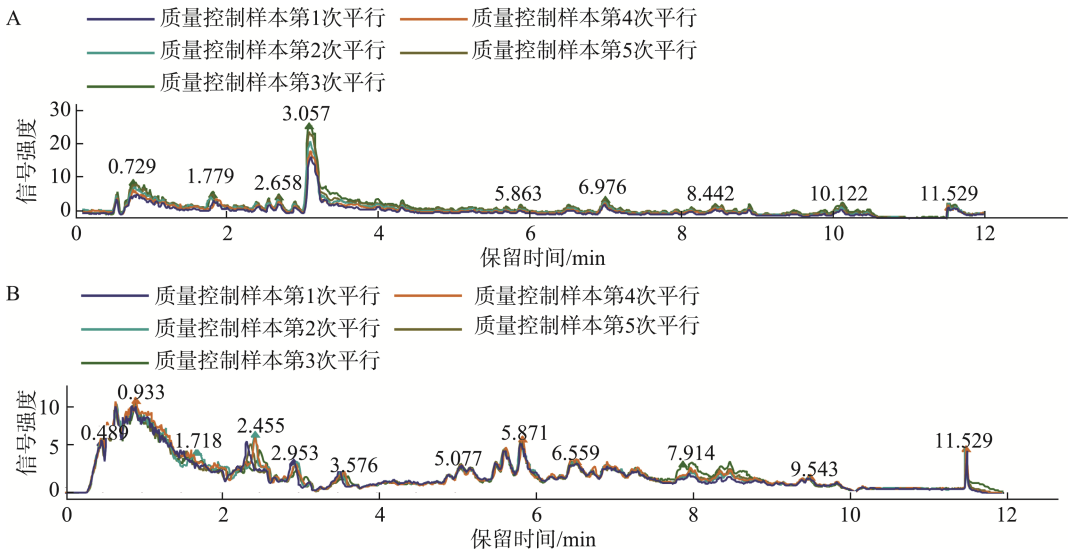



图 1　油茶样本中次级代谢物的分类饼状图(*n*=5)

Fig.1　Pie chart of the classification of secondary metabolites in oil tea (*n*=5)




注: A. 正离子模式; B. 负离子模式。

图 2 液相色谱-高分辨率质谱分析的油茶样本总离子流色谱图($n$=5)

Fig.2 Total ions chromatogram of oil tea samples by liquid chromatography high-resolution mass spectrometry ($n$=5)

## 2.2 不同干燥工艺油茶样本的代谢差异分析

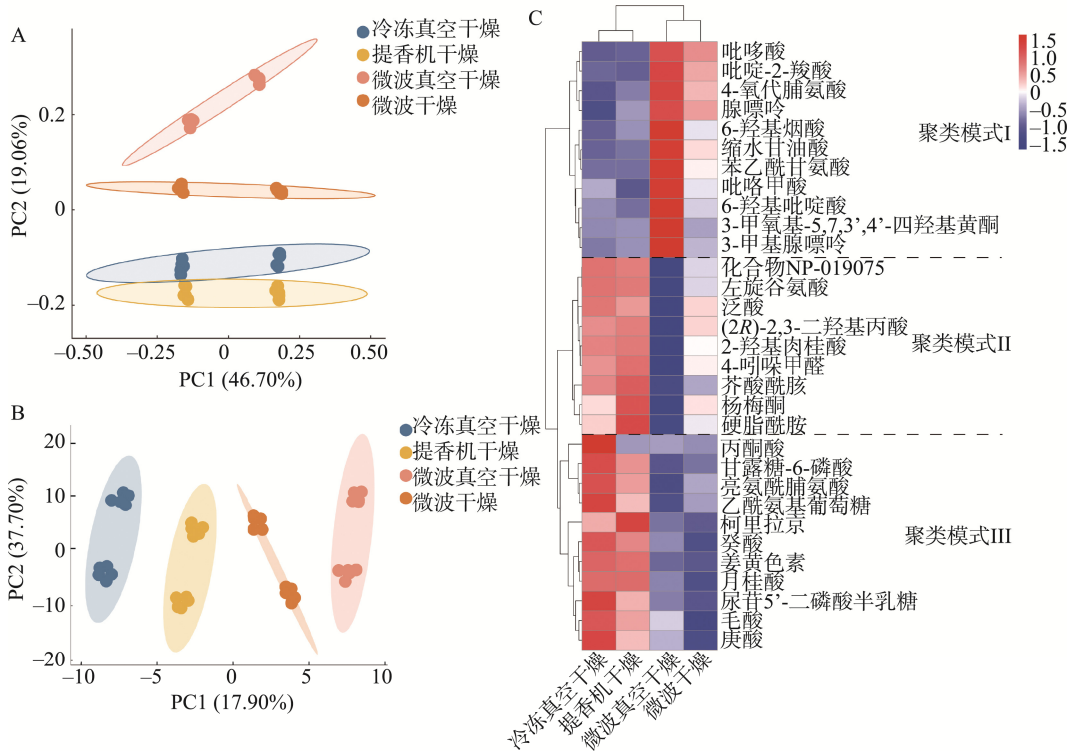
在统计学方法中, PCA 是一种解析复杂数据矩阵、揭示样本间关系的关键手段。为评估干燥方式对油茶次级代谢物的影响, 本研究构建了不同干燥方式油茶样本的 PCA 模型。如图 3A 所示, 得分图的横轴(PC1)和纵轴(PC2)分别解释了总变异的 46.70%和 19.06%。结果显示, 不同类型的样本沿 PC2 方向呈现明显的分离趋势, 表明 4 种干燥工艺导致油茶的代谢成分含量发生显著分化。值得注意的是, 提香机干燥样本位于 PC2 负向末端, 而微波真空干燥样本则位于 PC2 正向末端, 这表明二者之间的代谢差异最为显著。此外, 表 1 展示了对 PC1 与 PC2 方向分离具有关键贡献的成分。分析结果表明, 2-甲基苯甲酸、2-异丙基苹果酸等物质是推动样本在 PC1 方向上分离的主要驱动力, 而 4-吡哆酸与吡咯-2-羧酸等代谢物则主要贡献于样本在 PC2 方向上的区分。

为深入探究干燥方式对油茶次级代谢产物的具体影响, 进一步采用 OPLS-DA 模型筛选不同处理组间差异代谢物。如图 3B 所示, OPLS-DA 得分图与 PCA 结果类似, 清晰地呈现了不同样本在多变量特征下的分布模式。结果显示, 不同干燥类型的样本间存在显著分离趋势, 反映了干燥条件差异导致的代谢物含量分化。随后, 以 OPLS-DA 模型的变量投影重要度(variable importance in projection, VIP)作为筛选标准, 同时结合 ANOVA 计算的代谢物组间差异显著性, 共同筛选不同处理组间的差异代谢物。最终, 设定 VIP>1 且 $P$<0.01 为筛选阈值, 在 4 种干燥处理的油茶样本中共鉴定出 31 种差异代谢物。这些化合物分属 7 个类别, 其中有机酸数量最多(8 种), 其次为脂质(4 种)、氨基酸(3 种)、酚类(3 种)、糖类(3 种)、类黄酮(2 种)以及其他类(8 种)。

为更直观地呈现 31 种差异代谢物在 4 种干燥处理油茶样本中的分布特征, 本研究对代谢物数据矩阵的信号值进行了以 $\log_{10}$ 转换及 Z-score 标准化处理, 并通过热图进行可视化(图 3C)。分析结果表明, 31 种差异代谢物的含量分布可划分为 3 种聚类模式。具体而言, 微波真空干燥样本显著富集聚类模式I中的代谢物, 而聚类模式II和III的代谢物则主要在冷冻真空干燥样本中呈现相对较高含量。这一结果说明, 相较于其他干燥方式, 冷冻真空干燥处理更有效地维持了多数代谢物的含量水平, 这与其低温、低氧的加工特性相符。

### 2.2.1 微波真空干燥油茶的代谢物特征

聚类模式I中的差异代谢物主要包括多种有机酸类化合物(图 3C), 其在微波真空干燥样本中的含量显著高于其他组别(例如: 吡哆酸、6-羟基烟酸、6-羟基吡啶酸、6-羟基吡啶酸、吡啶-2-羧酸)。在油茶的复杂组分体系中, 有机酸是一类对风味特征和营养品质形成具有重要贡献的物质。例如, 6-羟基烟酸作为一种强效抗氧化剂, 有助于清除人体自由基, 从而增强机体免疫功能[9]。此外, 有机酸类物质可促进人体对矿物质的吸收, 其通过与油茶中的钙、铁等矿物质形成可溶性络合物, 提高这些矿物质在肠道内的溶解度, 进而提升其生物利用率[10]。同时, 聚类模式I还包含氨基酸类代谢物: 4-氧代脯氨酸和苯乙酰甘氨酸, 它们在微波真空干燥样本中同样呈现显著富集。4-氧代脯氨酸作为谷胱甘肽代谢途径的关键中间体, 与茶叶的风味及营养品质密切相关[11]。类似地, 苯乙酰甘氨酸不仅被发现有助于改善茶叶的香气品质, 还能作为必需氨基酸苯丙氨酸的补充来源, 并在神经递质合成过程中发挥生理作用[12]。综上, 微波真空干燥处理不仅可能改善油茶产品的风味特性, 还具有潜在的健康增益效应。




注: A. PCA 模型; B. OPLS-DA 模型; C. 差异代谢物的热图可视化。

图 3　不同干燥工艺油茶样本的代谢差异分析($n$=10)

Fig.3　Metabolic difference analysis of oil tea samples with different drying processes ($n$=10)

**表 1　PCA 中载荷最高的 5 种代谢物**

**Table 1　Top 5 kinds of metabolites with the highest loadings in PCA**

| 代谢物名称 | PC1 载荷 | 代谢物名称 | PC2 载荷 | 比对分组 |
|---|---|---|---|---|
| 2-甲基苯甲酸 | 6.86 | 4-吡哆酸 | 6.43 | |
| 2-异丙基苹果酸 | 6.81 | 吡咯-2-羧酸 | 5.74 | |
| 苹果酸 | 6.67 | 吡啶甲酸 | 5.73 | 不同干燥工艺油茶样本 |
| 山柰酚 | 6.61 | 金雀异黄素 | 5.60 | |
| 7-甲基黄嘌呤 | 6.58 | 6-羟基皮考啉酸 | 5.54 | |
| 3-羟基邻氨基苯甲酸 | 3.03 | 金雀异黄素 | 2.57 | |
| 麦芽酚 | 3.03 | 棕榈酰胺 | 2.49 | |
| 4-甲基邻苯二酚 | 3.03 | 油酰胺 | 2.29 | 真空冷冻干燥工艺下的品种对比 |
| 2,3-二羟基苯甲酸 | 3.03 | 异鼠李素 | 2.06 | |
| 茴香酸 | 3.03 | 石竹素氧化物 | 2.00 | |
| 腺嘌呤 | 3.36 | N-苯基-1-萘胺 | 2.54 | |
| 丁香酸 | 3.36 | *D*-甘露糖-6-磷酸 | 2.34 | |
| 抗倒酯 | 3.36 | 富马酸 | 2.34 | 微波真空干燥工艺下的品种对比 |
| 3-甲基腺嘌呤 | 3.35 | 芥酸酰胺 | 2.21 | |
| 12-氧代-植物二烯酸 | 3.35 | 腺苷 | 2.11 | |

2.2.2 冷冻真空干燥油茶的代谢物特征

除聚类模式I包含的11种代谢物外, 其余20种差异代谢物均归属于热图的聚类模式II或III。值得注意的是, 聚类模式II和III中富集的所有脂质(4 种)、酚类(3 种)和糖类(3种)均特异性存在于冷冻真空干燥样本中(图 3C)。

在脂质类代谢物中, 癸酸、庚酸、月桂酸及硬脂酰胺作为代表性成分, 其在冷冻真空干燥样本中的富集对油茶品质具有多方面提升作用。首先, 这些代谢物本身具有一定的挥发性, 可直接贡献于油茶的香气特征。例如, 庚酸呈现出淡雅的脂肪香气[13]。其次, 月桂酸可通过与醇类物质发生酯化反应, 生成具有花果香气的月桂酸酯类化合物, 该过程被证实能显著提升乌龙茶的香气品质[14]。在营养方面, 癸酸和月桂酸等中链脂肪酸在人体内可被快速吸收并转化为能量, 相对不易在体内积累形成脂肪, 可能对维持健康体重具有积极意义[15]。此外, 月桂酸还具有多种潜在的营养保健功能, 如降低动脉粥样硬化风险、清除自由基以及增强机体抗病能力等[16]。酚类代谢物是冷冻真空干燥样本中另一类显著富集的优势组分。其中, 2-羟基肉桂酸具有一定的挥发性, 可赋予油茶独特香气。研究表明, 在部分优质绿茶中, 2-羟基肉桂酸的相对含量较高, 与茶叶清新的植物香调形成相关[17]。在滋味方面, 2-羟基肉桂酸可能参与油茶滋味物质的平衡调节, 对提升其口感协调性与风味层次感具有潜在贡献[18]。同样值得关注的是, 在冷冻真空干燥样本中显著富集的酚类化合物柯里拉京和姜黄色素, 已被证实具有广泛的生物活性, 包括抗炎、抗菌及抗氧化等特性。SHENG 等[19]的研究表明, 柯里拉京能够抑制炎症相关细胞因子的表达, 提示其在预防和缓解炎症性疾病方面具有潜在价值。JANTAN 等[20]的实验则证实, 姜黄色素可通过调节多种细胞信号通路抑制肿瘤细胞生长, 并在改善心血管健康及预防神经退行性疾病方面展现出潜力。此外, 糖类及其衍生物在增强茶叶的醇厚感和饱满度和免疫系统的调节方面扮演着重要角色。例如, 乙酰氨基葡萄糖被报道具有一定的抗炎与免疫调节活性[21]。

## 2.3 不同栽培品种原料油茶样本的代谢差异分析

基于上述数据分析, 观察到同一干燥工艺下, 龙胜群体种与恭城群体种的样本呈现出相互分离的趋势。尽管这种分离模式仍在干燥方式的影响范围内, 但该现象亦表明原料茶鲜叶的栽培品种差异是影响油茶最终代谢物谱形成的另一重要因素。因此, 为深入解析栽培品种对油茶代谢物谱的影响, 本研究将聚焦于冷冻真空干燥与微波真空干燥这两种表现较优的工艺进行后续探讨。

首先, 通过构建 PCA 模型对不同品种油茶的代谢物谱数据进行降维处理, 以揭示其内在结构特征与品种间差异。如图 4A~4B 和表 1 所示, 无论采用何种干燥工艺, 龙胜群体种与恭城群体种样本在得分图上均表现出显著的分布差异, 这充分表明两个品种在代谢层面存在本质性差异。此外, 应用 OPLS-DA 模型计算各代谢物的 VIP, 并结合 Student's *t* 检验识别两组样本间的差异代谢物。同样设定 VIP>1 且 $P<0.01$ 为筛选阈值, 最终在冷冻真空干燥和微波真空干燥条件下分别鉴定出 29 种和 22 种差异代谢物。随后, 通过热图分析直观展示了这些差异代谢物在两个品种间的分布模式(图 4C~4D)。值得注意的是, 无论在哪种干燥工艺下, 绝大多数差异代谢物在恭城群体种样本中的表达水平均显著高于龙胜群体种。具体而言, 在冷冻真空干燥组中, 27 种差异代谢物在恭城群体种中显著富集; 在微波真空干燥组中, 20 种代谢物在恭城群体种中呈现相对高含量。鉴于次级代谢物的富集程度对油茶风味及营养品质具有决定性影响, 这一发现提示恭城群体种可能作为即食油茶加工的优选原料品种。通过对差异代谢物的深入分析发现, 在 2 种干燥工艺条件下, 共存有 19 种完全一致的共性差异成分, 其中包括: 9 种酚类化合物、6 种有机酸、2 种萜类化合物、1 种生物碱以及 1 种其他类化合物。

酚类化合物作为茶叶中一类重要的次生代谢产物, 对油茶的风味特征与营养品质均具有重要贡献。研究发现, 儿茶酚作为一种强效抗氧化剂, 能够有效抑制人体内脂质过氧化反应, 保护细胞膜完整性, 进而增强机体免疫功能与抵抗力[22]。此外, 丁子香酚在恭城群体种样本中含量丰富, 该化合物兼具抗菌、抗炎活性, 并可通过调节血脂与血糖水平降低心血管疾病发生风险[23]。值得关注的是, 除抗氧化酚类物质外, 恭城群体种样本中风味呈现酚类物质的含量亦相对较高。FANG 等[24]的研究表明, 香草醛是茶叶中的关键呈味活性化合物, 其含量富集可显著提升茶叶滋味的持久性及层次感。在有机酸类代谢物中, 茴香酸、6-甲氧基水杨酸及氢化肉桂酸可能赋予恭城群体种油茶独特的温润感、柔和性及余韵, 丰富其风味层次[25–26]。同时, 3-羟基-2-氨基苯甲酸作为色氨酸代谢的中间产物, 已被证实具有显著的抗氧化活性[27]。此外, 萜类与生物碱类化合物同样在油茶风味与营养品质形成中扮演重要角色[28–29], 其中阿江榄仁素、异油酸及 5-羟基吲哚等代谢物均在恭城群体种样本中呈现显著富集。

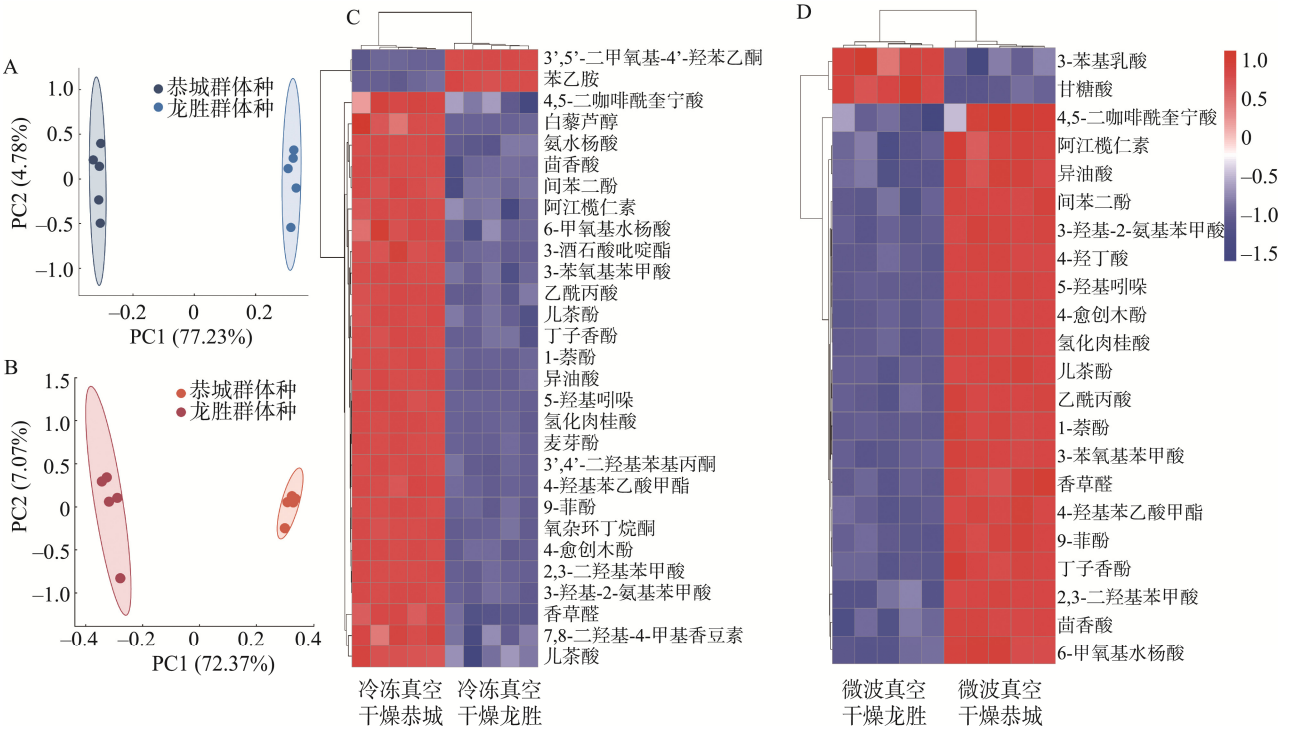
## 2.4 油茶样本的感官审评及风味标志物筛选

对 4 种干燥工艺处理的恭城群体种油茶样本进行感官审评(表 2), 结果显示感官总分由高至低依次为: 冷冻真空干燥(94.63)、微波真空干燥(93.40)、微波干燥(93.03)和提香机干燥(92.73)。其中, 冷冻真空干燥与微波真空干燥样本的感官品质更优, 具体表现为汤色黄绿、风味醇正。

上述结果与基于代谢物谱的分析结论高度一致，共同印证了冷冻真空干燥与微波真空干燥工艺在保留油茶优良品质方面的优势。

此外，进一步对比分析恭城群体种与龙胜群体种在 2 种优势干燥工艺下的感官评价结果(表 3)。结果表明，在微波真空干燥条件下，恭城群体种样本的干粉香、滋味、汤色、干粉色泽及总分 5 项感官评分均高于龙胜群体种样本，尤其在滋味醇厚度与协调性方面表现更为突出。对于冷冻真空干燥处理，尽管恭城群体种样本的香气评分略低于龙胜群体种样本，但其滋味醇厚度与协调性优势显著，且感官总分仍为所有受试样本中的最高值，这一感官特征与其在风味次级代谢物上的显著富集特征密切相关。

通过计算恭城群体种样本中 19 种特征性代谢物与各项感官评分的皮尔森相关系数(图 5)发现，除 3-羟基-2-氨基苯甲酸外，其余 18 种代谢物均与滋味属性评分呈显著正相关($P$<0.05)。基于此，该 18 种关键风味相关代谢物可作为即食化油茶制备时工艺优化与品质控制的重要生物标志物。




注：A. 真空冷冻干燥工艺下的 PCA 模型；B. 微波真空干燥工艺下的 PCA 模型；C. 冷冻干燥工艺下的差异代谢物可视化热图；D. 微波真空干燥下的差异代谢物可视化热图。

图 4　不同栽培品种原料油茶样本的代谢差异分析($n$=5)

Fig.4　Metabolic difference analysis of raw oil tea samples with different cultivated varieties ($n$=5)

**表 2　恭城群体种油茶在不同干燥方式下的感官评价描述及得分($n$=5)**

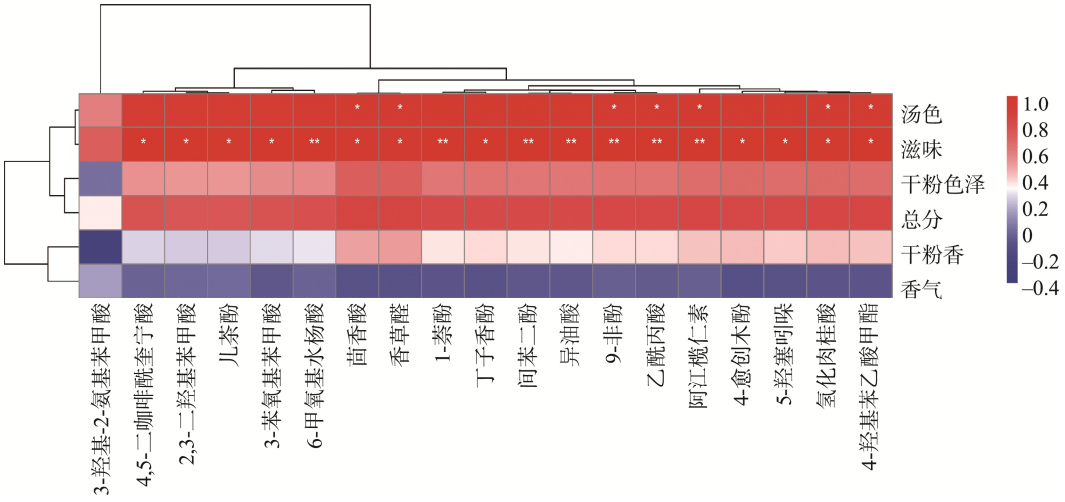
**Table 2　Sensory evaluation descriptions and scores of Gongcheng oil tea under different drying methods ($n$=5)**

| 感官属性 | 微波干燥 | | 微波真空干燥 | | 冷冻真空干燥 | | 提香机干燥 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 描述 | 得分 | 描述 | 得分 | 描述 | 得分 | 描述 | 得分 |
| 干粉香 | 醇正 | 93.50 | 豆香高锐 | 92.00 | 带烟熏 | 95.00 | 香低 | 92.50 |
| 汤色 | 绿黄 | 93.50 | 黄绿 | 94.00 | 黄绿 | 95.00 | 黄绿 | 94.00 |
| 香气 | 醇正 | 94.00 | 醇正 | 94.00 | 醇正 | 93.50 | 香低 | 92.00 |
| 滋味 | 尚醇正 | 92.00 | 醇正 | 94.00 | 醇正、鲜 | 95.00 | 醇和 | 93.00 |
| 干粉色泽 | 黄褐 | 92.00 | 黄褐 | 93.00 | 黄褐 | 95.00 | 黄褐 | 93.00 |
| 总分 | 93.03 | | 93.40 | | 94.63 | | 92.73 | |

**表 3 恭城群体种和龙胜群体种油茶的感官评价描述及得分对比(*n*=5)**

**Table 3 Sensory evaluation descriptions and scores comparison between Gongcheng and Longsheng samples (*n*=5)**

| 感官属性 | 微波真空干燥 | | | | 冷冻真空干燥 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 恭城群体种 | | 龙胜群体种 | | 恭城群体种 | | 龙胜群体种 | |
| | 描述 | 得分 | 描述 | 得分 | 描述 | 得分 | 描述 | 得分 |
| 干粉香 | 豆香高锐 | 92.00 | 豆香浓郁 | 91.50 | 带烟熏 | 95.00 | 醇正 | 94.50 |
| 汤色 | 黄绿 | 94.00 | 棕褐色 | 92.00 | 黄绿 | 95.00 | 绿黄 | 93.00 |
| 香气 | 醇正 | 94.00 | 豆香带烟香 | 93.00 | 醇正 | 93.50 | 姜香、醇正 | 94.50 |
| 滋味 | 醇正 | 94.00 | 尚醇 | 91.00 | 醇正、鲜 | 95.00 | 醇正、姜香浓 | 91.50 |
| 干粉色泽 | 黄褐 | 93.00 | 黄褐 | 92.00 | 黄褐 | 95.00 | 绿黄 | 94.00 |
| 总分 | 93.40 | | 91.83 | | 94.63 | | 93.40 | |




注: *和**分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$。

图 5 恭城群体种样本中 19 种特征性代谢物与各感官评分的皮尔森相关性热图(*n*=5)

Fig.5 Pearson correlation heatmap of 19 kinds of characteristic metabolites with various sensory scores in Gongcheng samples (*n*=5)

## 3 讨论与结论

本研究基于非靶向代谢组学技术，系统分析了 4 种干燥方式(冷冻真空干燥、提香机干燥、微波干燥、微波真空干燥)对不同茶树品种加工制成的油茶代谢成分的影响。结果表明，4 种干燥方式对油茶代谢物谱的形成产生了显著影响，进而导致其风味特征与营养价值发生分化。值得关注的是，冷冻真空干燥与微波真空干燥处理的油茶样本在保留特定功能成分方面表现出相对优势。具体而言，微波真空干燥样本中富含有机酸及氨基酸类小分子代谢物，例如，吡哆酸、吡啶-2-羧酸及 6-羟基烟酸等，推测其原因可能在于该工艺兼具快速热效应与真空环境的双重优势。瞬时高温可显著降低因长时间热暴露导致的氨基酸脱氨基反应风险及有机酸降解程度，且真空条件有效抑制了氧化降解反应，并减少了挥发性有机酸随水蒸气过度散失的损耗。陈健凯[30]的研究同样发现，微波真空干燥是杏鲍菇干燥的适宜方法，可有效保留其氨基酸含量，这与本研究观察到的对油茶氨基酸的保护效应具有一致性。另一方面，冷冻真空干燥工艺为热敏性、易氧化的代谢小分子提供了更为理想的保护条件，显著减少了脂质、酚类及糖衍生物等敏感物质的损失，包括：癸酸、庚酸、2-羟基肉桂酸和甘露糖-6-磷酸等。谭飚等[31]在研究干燥方式对龙眼多酚及抗氧化活性的影响时同样观察到，冷冻真空干燥能有效降低龙眼果肉在干燥过程中酚类成分及其抗氧化活性的损失，进一步佐证了该工艺对油茶风味及生物活性成分的保护潜力。

相比于龙胜群体种，恭城群体种样本在干燥过程中显著富集了多种具有营养与风味活性的代谢物，包括酚

类、有机酸、萜类及生物碱。因富含多种兼具生物活性与风味调控功能的小分子代谢物, 恭城群体种原料在油茶加工中呈现出显著优势。该品种无论在风味的丰富度、独特性, 还是营养品质的功能性方面, 均展现出作为优质加工原料品种的潜力, 在油茶产业中具有重要的应用价值, 值得进一步推广与深入研究。此外, 感官评价与代谢特征分析结果相互印证冷冻真空干燥处理的恭城群体种油茶样本风味品质表现最佳, 并基于皮尔森相关性分析鉴定出该样本中 18 种与滋味属性呈显著正相关的关键风味标志物。

总之, 本研究揭示了干燥工艺及茶树品种对油茶代谢物谱的调控作用, 为油茶预炒制的标准化生产、原料筛选及工艺优化提供了重要科学依据。未来研究可针对本研究所鉴定的关键代谢成分, 开展靶向代谢组学分析及其风味与营养功能评价, 以进一步明确其风味贡献机制与健康效应, 推动相关成果在产业化规模中的验证与应用。

## 参考文献


[1] 廖贤军. 不同茶叶原料制作油茶对比试验初探[J]. 南方园艺, 2024, 35(1): 57–60.
LIAO XJ. Comparative experiments on different tea leaf raw materials for making oil tea [J]. Southern Horticulture, 2024, 35(1): 57–60.

[2] 毛纯, 何季, 文雪峰, 等. 代谢组学在茶树生理生化代谢研究中的应用进展[J]. 茶叶科学, 2023, 43(5): 607–620.
MAO C, HE J, WEN XF, *et al*. Progress in the application of metabolomics in the study of physiological and biochemical metabolism of tea tree [J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(5): 607–620.

[3] WANG HJ, CHEN L, XU A, *et al*. Thermochemical reactions in tea drying shape the flavor of tea: A review [J]. Food Research International, 2024, 197: 115188.

[4] DONG AD, HOANG T, DO H, *et al*. Optimization of spray-drying process to manufacture green tea powder and its characters [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(12): 6566–6574.

[5] LEE J, HWANG YS, KANG IK, *et al*. Lipophilic pigments differentially respond to drying methods in tea (*Camellia sinensis* L.) leaves [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(1): 201–208.

[6] 冯月超, 张艺楷, 甄子怡, 等. 基于非靶向代谢组学的不同产地山楂品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(17): 148–158.
FENG YC, ZHANG YK, ZHEN ZY, *et al*. Quality analysis of *Crataegus pinnatifida* Bge. from different origins based on non-targeted metabolomics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(17): 148–158.

[7] 姜希飞, 刘永强, 刘瑜, 等. 3 种干燥方式下云南沙棘果实非靶向代谢组学分析[J]. 食品科技, 2025, 50(3): 67–76.
JIANG XF, LIU YQ, LIU Y, *et al*. Non targeted metabonomics analysis of *Hippophae rhamnoides* subsp. *yunnanensis* fruits under three drying methods [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(3): 67–76.

[8] HU Z, YAO XZ, CHEN HF, *et al*. Changes and dynamics of the main quality components in tea leaves of 4 tea cultivars during the shading process [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 333: 113242.

[9] KARL T, PABST R, HORSTEN S. Behavioral phenotyping of mice in pharmacological and toxicological research [J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2003, 55(1): 69–83.

[10] HAFEEZ A, MADER A, BOROOJENI FG, *et al*. Impact of thermal and organic acid treatment of feed on apparent ileal mineral absorption, tibial and liver mineral concentration, and tibia quality in broilers [J]. Poultry Science, 2014, 93(7): 1754–1763.

[11] WU ZL, HOU YQ, DAI ZL, *et al*. Metabolism, nutrition, and redox signaling of hydroxyproline [J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2019, 30(4): 674–682.

[12] LU C, ZHANG S, SONG W, *et al*. Efficient synthesis of *D*-phenylalanine from *L*-phenylalanine via a tri-enzymatic cascade pathway [J]. ChemCatChem, 2021, 13(13): 3165–3173.

[13] DENG BH, LI Y, YANG Y, *et al*. Advantages of UHT in retaining coconut milk aroma and insights into thermal changes of aroma compounds [J]. Food Research International, 2024, 194: 114937.

[14] ZHOU ZW, WU QY, YANG Y, *et al*. The dynamic change in fatty acids during the postharvest process of oolong tea production [J]. Molecules, 2022, 27(13): 4298.

[15] HUANG LL, GAO L, CHEN C. Role of medium-chain fatty acids in healthy metabolism: A clinical perspective [J]. Trends in Endocrinology & Metabolism, 2021, 32(6): 351–366.

[16] AKBARI B, BAGHAEI-YAZDI N, BAHMAIE M, *et al*. The role of plant-derived natural antioxidants in reduction of oxidative stress [J]. BioFactors, 2022, 48(3): 611–633.

[17] BUBOLA M, LUKIC I, RADEKA S, *et al*. Enhancement of Istrian Malvasia wine aroma and hydroxycinnamate composition by hand and mechanical leaf removal [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(2): 904–914.

[18] HE WJ, TIAN Y, LIU SX, *et al*. Comparison of phenolic composition and sensory quality among pear beverages made using *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii* [J]. Food Chemistry, 2023, 422: 136184.

[19] SHENG QS, HOU XN, WANG N, *et al*. Corilagin: A novel antivirulence strategy to alleviate *Streptococcus pneumoniae* infection by diminishing pneumolysin oligomers [J]. Molecules, 2022, 27(16): 5063.

[20] JANTAN I, HAQUE MA, ARSHAD L, *et al*. Dietary polyphenols suppress chronic inflammation by modulation of multiple inflammation-associated cell signaling pathways [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2021, 93: 108634.

[21] NIKOLAOU G, ZIBIS AH, FYLLOS AH, *et al*. Detection of O-linked-N-acetylglucosamine modification and its associated enzymes in human degenerated intervertebral discs [J]. Asian Spine Journal, 2017,

11(6): 863.

[22] HU Y, ZHANG QN, GARCIA-ROJAS D, *et al*. Increasing the antioxidant capacity of ceria nanoparticles with catechol-grafted poly (ethylene glycol) [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2022, 10(48): 10042–10053.

[23] ULANOWSKA M, OLAS B. Biological properties and prospects for the application of eugenol-A review [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(7): 3671.

[24] FANG X, LIU YN, XIAO JY, *et al*. GC-MS and LC-MS/MS metabolomics revealed dynamic changes of volatile and non-volatile compounds during withering process of black tea [J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135396.

[25] YUAN L, LI YJ, ZHENG LY, *et al*. Impact of organic acids on aroma release in light-flavor Baijiu: A focus on key aroma-active compounds [J]. Food Bioscience, 2025, 65: 106071.

[26] 李娜, 初众, 徐飞, 等. 香荚兰浸膏物性及挥发性成分分析[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(5): 136–143.
LI N, CHU Z, XU F, *et al*. Analysis of physical properties and volatile components in *Vanilla* extract [J]. Storage and Process, 2019, 19(5): 136–143.

[27] THOMAS SR, WITTING PK, STOCKER R. 3-hydroxyanthranilic acid is an efficient, cell-derived co-antioxidant for α-tocopherol, inhibiting human low density lipoprotein and plasma lipid peroxidation [J]. Journal of Biological Chemistry, 1996, 271(51): 32714–32721.

[28] FARAG MA, ELLMETWALLY F, ELGHANAM R, *et al*. Metabolomics in tea products; a compile of applications for enhancing agricultural traits and quality control analysis of *Camellia sinensis* [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134628.

[29] LI CX, LIN JQ, HU QC, *et al*. An integrated metabolomic and transcriptomic analysis reveals the dynamic changes of key metabolites and flavor formation over Tieguanyin oolong tea production [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100952.

[30] 陈健凯. 不同干燥方法对杏鲍菇结构及品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 221–228.
CHEN JK. Effects of different drying methods on the structure and quality of *Pleurotus eryngii* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 221–228.

[31] 谭飚, 彭思维, 李玮轩, 等. 不同干燥方式对龙眼多酚及抗氧化活性的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(3): 411–420.
TAN S, PENG SW, LI WX, *et al*. Effects of different drying methods on polyphenol profile and antioxidant activities in longan (*Ficus carica* Linn.) [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(3): 411–420.

(责任编辑：韩晓红 于梦娇)