

8种龙眼核油脂的组成分析及抗氧化活性比较

肖凯琳¹, 邓春浓¹, 谢思玲¹, 刘祎帆¹, 肖更生¹, 王琴^{1,2}, 徐玉娟¹, 谢曦^{1*}

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

(2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 广东茂名 525000)

摘要: 龙眼核占果实质量的17%,但在龙眼加工或鲜食时龙眼核大多被丢弃,没有得到综合利用。为了明确不同品种龙眼核油脂的组成特征及其抗氧化、抗菌活性,开发利用龙眼核油脂,提高其利用率,本研究选取石硪、储良、大广眼、水涨龙眼、凤梨穗、双仔木、福眼、泰国龙眼8个品种的龙眼核,提取油脂并开展分析。采用气相色谱法分析不同品种龙眼核油脂的脂肪酸组成,通过薄层色谱法分离油脂中的甘油三酯、甘油二酯、磷脂等结构酯,再对各结构酯进行脂肪酸成分分析,同时检测油脂的DPPH自由基清除能力和抑菌活性,并分析脂肪酸组成与生物活性的相关性。结果表明,8种龙眼核油脂均含6种饱和脂肪酸和5种不饱和脂肪酸,不饱和脂肪酸占比为55.74%~81.44%,其中福眼、储良、大广眼在脂肪酸总量与不饱和脂肪酸含量方面优势突出。在结构酯中,甘油三酯的脂肪酸种类最为丰富,整体含量表现为水涨>福眼>其余品种。水涨龙眼油脂的抗氧化活性与抑制金黄色葡萄球菌活性最优,分别为其他品种的1.88倍和63.67倍。相关性分析表明,脂肪酸(C16:0、C18:1-9、C18:2、C18:3)与抗氧化活性呈显著正相关。结果表明,不同品种龙眼核油脂均富含不饱和脂肪酸,其中福眼、储良、大广眼为脂肪酸组成的优势品种,水涨龙眼油脂在抗氧化和抑菌活性方面表现最佳,C16:0、C18:1-9、C18:2、C18:3等脂肪酸是其生物活性的重要贡献因子。研究结果为龙眼核油脂的功能性开发利用及优良品种筛选提供了理论依据。

关键词: 龙眼核油脂; 脂肪酸组成分析; 生物活性; 相关性分析

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0580

Composition Analysis and Biological Activity of 8 Kinds of Longan Seed Oil

XIAO Kailin¹, DENG Chunnong¹, XIE Siling¹, LIU Huifan¹, XIAO Gengsheng¹, WANG Qin^{1,2}, XU Yujuan¹, XIE Xi^{1*}

(1.College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Gangzhou 510225, China)

(2.Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming 525000, China)

Abstract: Longan seeds account for 17% of the fruit weight, but most longan seeds are discarded during longan processing or fresh consumption, and comprehensive utilization is not achieved. To clarify the compositional characteristics, antioxidant and antibacterial activities of longan seed oils from different varieties, develop and utilize longan seed oils, and improve their utilization rate, longan seeds of eight varieties, namely Shixia, Chuliang, Daguangyan, Shuizhang, Fenglisui, Shuangzimu, Fuyan and Thai longan, are selected, and their oils are extracted and analyzed. The fatty acid compositions of longan seed oils from different varieties are analyzed by gas chromatography. Structural lipids including triglycerides, diglycerides and phospholipids in the oils are separated by thin-layer chromatography, and fatty acid compositions of each structural lipid are further determined. Meanwhile, DPPH radical scavenging capacity and antibacterial activity of the oils are detected, and the correlation between fatty acid compositions and biological activities is analyzed. The results show that six saturated fatty acids and five unsaturated fatty acids are detected in all eight longan seed oils, with the unsaturated fatty acid proportion ranging from 55.74% to 81.44%. Fuyan, Chuliang and Daguangyan exhibit outstanding advantages in total fatty acid content and unsaturated fatty acid content. Among structural lipids, triglycerides possess the most abundant fatty acid species, and the overall content is ranked as Shuizhang > Fuyan > other varieties. The antioxidant activity and inhibitory activity against *Staphylococcus aureus* of Shuizhang longan oil are the optimal, which are 1.88 times and

收稿日期: 2026-04-14; 修回日期: 2026-06-28; 接受日期: 2026-06-29

基金项目: 广东省科技计划项目(2021B07070100004; 2023B02025001); 广州市科技计划项目(2024A04J5000)

作者简介: 肖凯琳(2003-),女,硕士,研究方向:果蔬加工, E-mail: 17620186928@163.com; 共同第一作者: 邓春浓(2001-),女,硕士,研究方向:食品生物技术, E-mail: 2111496517@qq.com

通讯作者: 谢曦(1988-),女,博士,副教授,研究方向:生物技术, E-mail: xixie31@hotmail.com

63.67 times those of other varieties, respectively. Correlation analysis indicates that fatty acids (C16:0, C18:1-9, C18:2, C18:3) are significantly positively correlated with antioxidant activity. It is demonstrated that longan seed oils of different varieties are rich in unsaturated fatty acids. Fuyan, Chuliang and Daguangyan are superior varieties in fatty acid composition, and Shuizhang longan oil shows the best performance in antioxidant and antibacterial activities. Fatty acids such as C16:0, C18:1-9, C18:2 and C18:3 are important contributors to their biological activities. The findings provide a theoretical basis for the functional development and utilization of longan seed oils and the screening of excellent varieties.

Key words: longan seed oil; fatty acid composition analysis; biological activity; correlation anal

龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.) 隶属于无患子科, 为亚热带地区典型的常绿乔木树种。龙眼果实的外果皮呈现典型的革质化特征, 质地坚韧且结构紧密, 属于不开裂型果皮; 外果皮内侧包裹着一层富含水分与营养物质的假种皮, 是龙眼果实中主要的食用部分, 假种皮中央嵌生有 1 枚深棕色的大型种子^[1]。龙眼在中国和东南亚地区广泛种植, 因其风味细腻、味道甜美而具有较高的商业价值^[2]。龙眼果肉含有糖类、维生素、蛋白质、氨基酸和矿物元素等人体所需的营养物质。龙眼既能直接鲜食, 也能加工成各类产品, 例如糖水龙眼罐头或龙眼干^[3]。龙眼核作为龙眼加工副产物多被丢弃^[4], 其深加工与高值化利用研究存在空白。植物籽油生物活性成分丰富、成本低, 前景广, 可为龙眼核高值化转化提供可行路径。龙眼核占果实质量的 17%, 含有丰富的淀粉、还原糖、粗纤维、蛋白质、脂肪等化学物质, 有研究表明龙眼核油中含有黄酮、多糖类物质、色素类物质、生物碱类及多酚类活性物质^[5], 在临床药理上具有止血止痛、抗菌消炎、降糖降脂及抗氧化、抗肿瘤的药用价值^[6,7]。龙眼核的脂质含量在 2.47% 左右, 不仅含量多, 种类也丰富^[8-10]。因此, 开展龙眼核油脂的相关研究具有现实意义。

目前有关龙眼核油脂的报道多为针对某一品种的龙眼核油脂, 对比分析多个品种龙眼核油脂脂肪酸的研究较少, 早期的研究表明, 不同品种的龙眼在总酚、水溶性糖和抗氧化剂的存在方面存在明显的差异^[11]。葛宇飞等^[12] 采选福建龙田龙眼, 对龙眼核油脂的理化性质测定结果表明, 龙眼核油脂的不饱和程度高, 其中含有总相对质量分数达 42.77% 的不饱和脂肪酸, 以对人体为必需脂肪酸的亚油酸为主, 营养价值高。本研究以 8 种的常见龙眼核为原料, 提取龙眼核油脂, 分析其脂肪酸组成、不同脂质的脂肪酸分布, 探究 8 种龙眼核油脂的生物活性异同, 包括抗氧化活性和抑菌活性, 为龙眼核油脂的开发利用及进一步提高龙眼资源的利用率提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料、试剂及仪器

1.1.1 实验材料

8 种 (石硖、储良、大广眼、水涨龙眼、凤梨穗、双孖木、福眼、泰国龙眼) 龙眼果核。

1.1.2 实验试剂

三氯甲烷、丙酮、乙醚、乙酸、浓硫酸、正己烷 (均为分析纯), 广州化学试剂厂; 正己烷、6-二叔丁基对甲酚 (均为色谱纯), 上海麦克林生化科技股份有限公司; 甲醇、异丙醇、乙腈 (均为分析纯), 天津市百世化工有限公司; 十七碳酸 (纯度 98%), 上海麦克林生化科技股份有限公司, 37 种脂肪酸甲酯混标, 美国 Supelco (色谱科) 公司; 樱草灵 (纯度 ≥ 95%), 上海易恩化学技术有限公司; 高纯氮, 英德市西洲气体有限公司。

1.1.3 实验仪器

2500C 高速多功能粉碎机, 永康市铂欧五金制品有限公司; ND300-1 氮气吹扫仪, 杭州瑞诚仪器有限公司; TD5A-WS 低速台式离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; HH-4 恒温水浴锅, 常州澳华仪器有限公司; LHS-80 恒温培养箱, 济南创日新仪器设备有限公司; LDZF-75L-I 立式高压蒸汽灭菌锅, 上海申安医疗器械厂。LDZF-75L 灭菌锅, 上海申安医疗器械厂; UV1800-756 紫外分光光度计, 上海菁华科技仪器有限公司; Agilent8890 气相色谱分析仪, 安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 制备龙眼核粉

收集八个不同品种 (石硖、储良、大广眼、水涨龙眼、凤梨穗、双孖木、福眼、泰国龙眼) 的龙眼核, 并确

保样本的多样性和代表性,在清洗之后于烘箱中烘干 24 h,粉碎后过 40 目筛,得到龙眼核粉备用。

1.2.2 分离提取龙眼核油脂

利用氯仿有机溶剂对脂质的溶解作用,从龙眼核中提取油脂样品。在洁净试管中加入 0.01 wt.% 2,6-二叔丁基对甲酚(BHT)与 1 000 μL 异丙醇溶液,在通风橱 75 $^{\circ}\text{C}$ 干热 2 min;称 1 g 龙眼果核粉放入试管,75 $^{\circ}\text{C}$ 干热 15 min 后取出降温;用旋涡混合器均质;接着加入 1 000 μL 氯仿溶液、1 000 μL 甲醇溶液及 800 μL 去离子水,再次均质,再加入 1 000 μL 氯仿溶液和 1 000 μL 去离子水,均质后 2 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取下层液体至新试管;在新试管中加入 500 μL 的 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液,均质离心后取上层液体;继续加入 1 000 μL 去离子水,均质离心后取上层液体;剩余样液氮吹至固体,加 1 000 μL 氯仿溶液溶解并转移到 1.5 mL 样品瓶,于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 低温冰箱暂存。

1.2.3 色谱法脂肪酸组成测定

1.2.3.1 气相色谱法

提取得到的龙眼核油脂样品通过转甲基化后,转化为脂肪酸甲酯,采用现代气相色谱技术(Gas Chromatography, GC),对其进行气相色谱成分分析实验^[13]。

1.2.3.2 薄层层析色谱法

为分析龙眼籽油脂脂肪酸谱,先以薄层色谱法(TLC)分离提取的脂质^[14],中性脂质用正己烷:乙醚:乙酸比例为 70:30:1 的展开剂分离样液中的脂质。分离结束后,用 0.005 wt.% 的樱草灵丙酮溶液喷洒层析板表面,再用凝胶成像机对薄层色谱板成像,将显示出的条带用刮刀收集到洁净试管,最后用 1.2.3.1 方法对收集的粉末进行气相色谱法脂肪酸成分分析。

1.2.4 生物活性测定

1.2.4.1 抗氧化活性测定

对提取得到的龙眼核油脂样品采用 DPPH 法^[15]进行体外抗氧化活性实验。按实验体系分为测定管、对照管、空白管三组,加样后避光室温反应 30 min,于 517 nm 处测定读取各吸光值 A。并由公式(1)计算 DPPH 自由基清除率:

$$R = \frac{A_2 - (A_1 - A'_1)}{A_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

R——DPPH 自由基清除率, %;

A_1 ——测定管吸光值, Abs;

A'_1 ——对照管吸光值, Abs;

A_2 ——空白管吸光值, Abs。

1.2.4.2 抑菌活性试验

参考纸片扩散法^[16,17],用提取的龙眼核油脂对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、李斯特菌、大肠杆菌和酵母菌五种菌种进行抑菌生物活性实验,测定不同品种龙眼核油脂对不同菌种的抑菌效果,观察测量抑菌圈直径(mm)。配置培养基,分别培养五种菌种,酵母菌于 30 $^{\circ}\text{C}$ 、其余四种菌于 35~37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温摇床培养。培养后得到五种菌悬液,配制成 600 nm 处吸光值为 0.3 的菌悬液。移取 100 μL 菌悬液涂布到平板培养基上,在无菌滤纸片上分别滴加 10 μL 不同品种龙眼核油脂样液,空白对照组滴加 10 μL 氯仿溶液,置于对应培养温度的恒温培养箱中培养 12~18 h,观察测量抑菌圈直径(mm)。

1.3 数据处理方法

样品数据使用 Excel 2019 软件统计整理;采用 SPSS 17.0 软件处理实验数据,结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差,当 $P < 0.05$ 说明数据具有显著性差异;采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果和分析

2.1 色谱法脂肪酸组成分析

2.1.1 气相色谱法分析龙眼核脂肪酸组成

提取得到的龙眼核油脂样品经过气相色谱分析得到各组成脂肪酸数据,通过 37 种脂肪酸混标的保留时间进行比较,确定脂肪酸种类,各脂肪酸的量是利用内标物十七碳酸与待测脂肪酸的峰面积比值计算得出^[18],其分析结果如图 1 所示。

8 种龙眼核油脂均含有 11 种脂肪酸,主要成分为 C18:1-9 油酸、C16:0 棕榈酸、C18:3n-3 亚麻酸、C18:2 亚油酸,这四种成分合计占总脂肪酸的 73.74%~99.98%。其中包含 6 种饱和脂肪酸与 5 种不饱和脂肪酸,不饱和脂肪酸占比为 55.74%~81.44%,整体以油酸、亚麻酸为优势组分,亚油酸、花生四烯酸等含量次之。

不同品种间脂肪酸含量差异显著:饱和脂肪酸中,福眼、大广眼的棕榈酸含量最高,石硖最低;大广眼的硬脂酸含量高于其他品种。不饱和脂肪酸方面,福眼的总不饱和脂肪酸、油酸以及亚油酸与亚麻酸总量均居首位,凤梨穗、大广眼次之,石硖含量最低。

对比分析不同品种龙眼核油脂中不同种类脂肪酸含量可以发现,不饱和脂肪酸在总脂肪酸含量中占比高,以油酸为主,亚麻酸、亚油酸次之,说明不饱和脂肪酸是龙眼核脂肪酸的重要成分,姜波等^[19]在研究中发现九种植物油的不饱和脂肪酸总量占比普遍大于 50%,童汉清等^[20]在茂名龙眼核油脂中检测出油酸含量占比为 42.07%,表明龙眼核脂肪酸组成符合植物油脂组成普遍规律。其中,福眼、储良龙眼和大广眼核油脂的脂肪酸总量及不饱和脂肪酸含量,比其他品种龙眼核油脂更高。

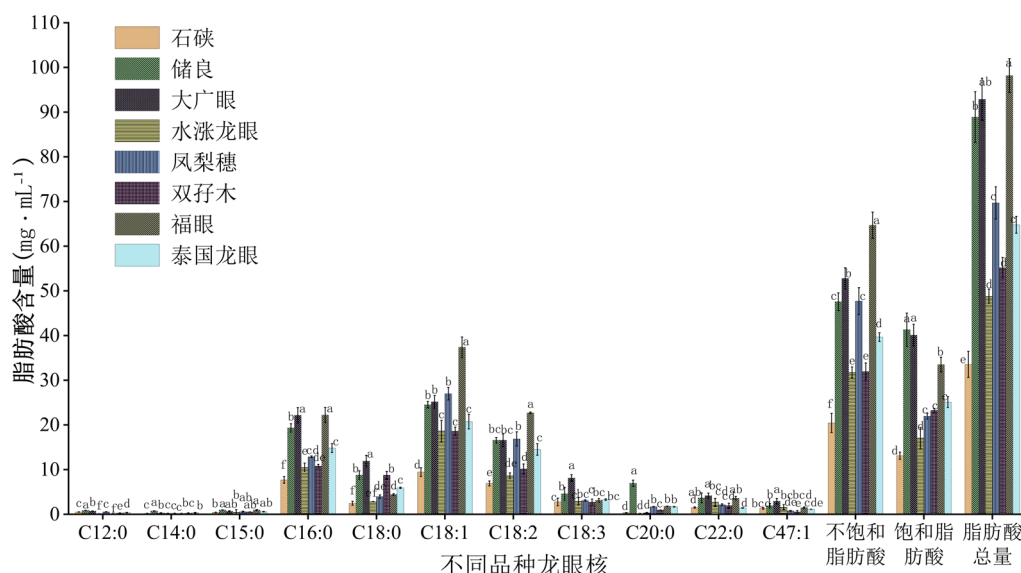


图 1 8 种龙眼核油脂的脂肪酸组成及含量

Fig.1 Fatty acid composition and content of 8 types of longan kernel oils

注: 图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异未达到显著水平 ($P > 0.05$)。下同。

2.1.2 薄层层析色谱法分离龙眼核结构酯

薄层层析分离的结构酯经气相色谱分析 (图 2) 可知: 上层甘油三酯、中层甘油二酯、下层磷脂^[21]的脂肪酸组成与含量差异显著。各品种龙眼的主要结构酯为甘油三酯 (含有 11 种脂肪酸), 水涨龙眼核油脂脂肪酸总量最高 ($P < 0.05$), 达 $114.06 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 福眼次之 ($108.78 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)。其中, 福眼龙眼核的油酸 (C18:1-9) 含量最高 ($P < 0.05$), 为 $32.85 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。甘油二酯层含 8 种脂肪酸, 总量低于甘油三酯层, 水涨龙眼核 ($16.50 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 和福眼龙眼核 ($16.46 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 显著高于其他品种 ($P < 0.05$), 以棕榈酸为主 (占比最高达 39.65%)。磷脂层含 9 种脂肪酸, 总量亦低于甘油三酯层, 水涨总量最高 ($17.86 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, $P < 0.05$), 以花生四烯酸为主, 不饱和脂肪酸占比达 69.42%。三层结构酯脂肪酸组成差异为: 甘油三酯 (11 种) > 磷脂 (9 种) > 甘油二酯 (8 种), 品种不影响组成种类; 总量上甘油三酯远高于其他两层, 各层均表现为水涨最高、福眼次之 ($P < 0.05$)。

田雨等^[22]对沙棘籽油的甘油三酯组成进行分析, 发现其含 14 种脂肪酸且亚油酸含量较高。段倍倍等^[23]等在油茶籽油基甘油二酯中的 14 种脂肪酸组成分析中同样观察到亚油酸高含量特征。季怀锐等^[24]在芝麻油磷脂中分析得出具有 6 种脂肪酸, 其中棕榈酸的含量最多, 对比可知, 龙眼核油脂结构酯的脂肪酸种类与沙棘籽油、油茶籽油存在差异 (甘油三酯层脂肪酸种类少于沙棘籽油), 但其亚油酸、棕榈酸等核心脂肪酸富集特征与其他植物油

脂相近，符合植物油脂普遍规律，表明其脂肪酸功能特性具备与传统油料相当的开发潜力。水涨和福眼为高脂肪酸含量优选品种：福眼甘油三酯层适于制备高油酸产品，水涨磷脂层适于富集高不饱和脂肪酸，二者甘油二酯层均适合获取棕榈酸。

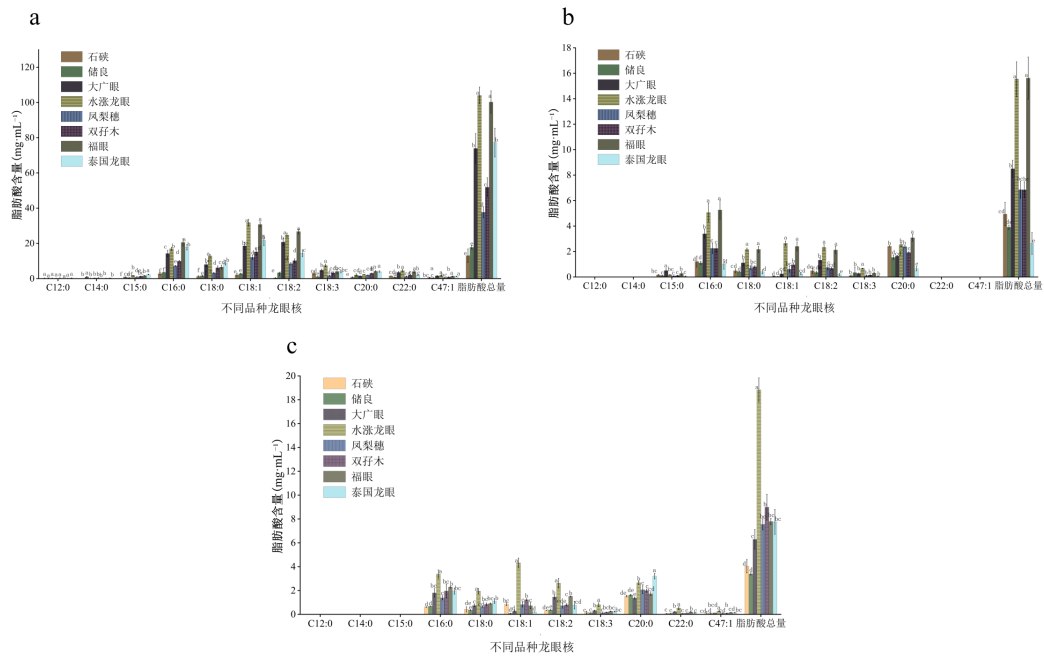


图 2 不同品种龙眼核油脂薄层层析脂肪酸组成及含量

Fig.2 Fatty acid composition and content of different varieties of longan kernel oil by thin-layer chromatography

注：a.甘油三酯层；b.甘油二酯层；c.磷脂层。

2.2 生物活性分析

2.2.1 8 种龙眼核油脂的抗氧化活性

DPPH 自由基清除率测定显示，8 倍稀释下各品种龙眼核油脂抗氧化活性如图 3。各品种对 DPPH 自由基清除率为 54.31%~101.92%，水涨龙眼、大广眼核和泰国龙眼核油脂清除率更佳 ($P<0.05$)，分别为 101.92%、101.20% 和 92.80%，储良龙眼最低。

童汉清等^[20]选用茂名龙眼，发现龙眼核油有明显抗氧化活性；葛宇飞^[12]等选用福建龙田龙眼提取油脂，发现其对 DPPH 自由基清除效果好、抗氧化活性高。结合 8 个品种龙眼核油脂实验结果，表明其有良好抗氧化活性且存在品种差异，水涨龙眼、大广眼核和泰国龙眼核三种核油抗氧化活性较高。此外，龙眼核油脂^[6]有降血糖、止血止痛、抗炎等药用价值，在未来保健食品等领域具有较大开发潜力^[12]。

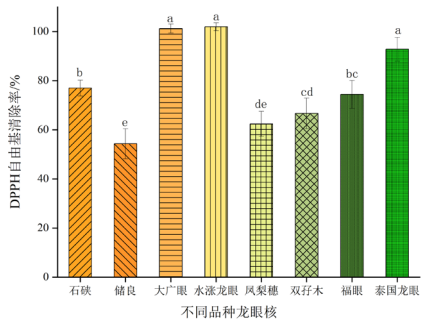


图 3 在 8 倍数稀释下各品种龙眼核油脂的 DPPH 自由基清除率

Fig.3 DPPH radical scavenging rate of longan kernel oil of various varieties at 8-fold dilution

2.2.2 8 种龙眼核油脂的抑菌活性

不同品种龙眼核油脂及空白实验组对 5 种常见菌种抑菌活性试验结果如表 1 所示。对比 5 种常见菌种抑菌圈，龙眼核油脂对金黄色葡萄球菌抑菌效果最显著，其中水涨龙眼核油脂抑菌圈平均直径最大，为 3.82 mm，抑菌活性较为显著 ($P<0.05$)，大广眼核油脂次之，凤梨穗龙眼核油脂抑菌圈最小、效果最弱。对于枯草芽孢杆菌，龙眼核油脂抑菌效果仅次于金黄色葡萄球菌，大广眼核油脂抑菌圈平均直径最大，为 2.07 mm，具有较为显著的抑菌效果 ($P<0.05$)，福眼核油脂次之。相对而言，龙眼核油脂对李斯特菌抑菌效果不明显，对酵母菌整体抑菌效果较好，其中凤梨穗龙眼核油脂对酵母菌抑菌圈平均直径最大、效果较为显著 ($P<0.05$)，大广眼核油脂无抑菌圈。此外，龙眼核油脂对大肠杆菌抑菌效果并不明显。

近年来对植物油脂研究发现其有抑菌作用^[25]，如周凯等^[26]测定龙眼核萃取物体外抑菌活性，氯仿萃取物对金黄色葡萄球菌抑菌效果良好；龙眼核油脂也可对果蔬抗菌防止腐烂等方面做出贡献^[27]，Tseng 等^[28]研究表明龙眼核不同萃取组分均具有广谱抗菌活性，可有效抑制食源性及果蔬腐败微生物，具备开发为天然食品防腐保鲜剂的应用潜力。现有研究表明，植物精油抑菌机制为凭借疏水性与微生物细胞膜相互作用，破坏其结构完整性，使细胞膜流动性增强、通透性升高，引发细胞内小分子物质外泄；同时，精油活性成分通过抑制酶活性或破坏酶空间构象损伤微生物酶系统，干扰细胞正常代谢，最终导致细胞死亡^[29,30]。这种抑菌机制具多靶标特性，核心成因是植物精油含复杂化学成分，活性成分通过协同或分工作用于微生物不同靶点^[31]。

综上所述，龙眼核油脂除对大肠杆菌无明显抑菌作用外，对另外四种常见菌种均有不同强度的抑制作用，对金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌的抑菌效果明显强于对李斯特菌和酵母菌的抑菌作用。

表 1 不同品种龙眼核油脂对 5 种常见菌种的抑菌圈平均直径 (mm)

Table 1 The average diameter of the inhibition zone (mm) of different varieties of longan kernel oil against five common bacterial strains

龙眼核油脂 品种	供试菌种				
	金黄色葡萄球菌	枯草芽孢杆菌	李斯特菌	大肠杆菌	酵母菌
石硖	1.03±0.52 ^{bc}	1.1±0.54 ^{abc}	0.16±0.27 ^c	—	0.21±0.19 ^{bc}
储良	0.19±0.19 ^{cd}	0.79±0.61 ^{bc}	0.33±0.31 ^c	0.33±0.50 ^c	0.47±0.29 ^{ab}
大广眼	3.58±0.59 ^a	2.07±0.72 ^a	0.01±0.02 ^c	—	—
水涨龙眼	3.82±0.46 ^a	1.03±0.34 ^{abc}	0.11±0.10 ^c	—	0.27±0.18 ^{bc}
凤梨穗	0.06±0.10 ^d	1.27±0.64 ^{abc}	0.08±0.14 ^c	—	0.86±0.28 ^a
双 木	1.23±0.64 ^b	0.77±0.24 ^{bc}	—	—	0.55±0.27 ^{ab}
福眼	0.64±0.56 ^{bcd}	1.58±0.84 ^{ab}	0.02±0.04 ^c	—	0.26±0.25 ^{bc}
泰国龙眼	0.40±0.37 ^{bcd}	0.36±0.13 ^c	—	—	0.26±0.23 ^{bc}

注：表中“—”均表示为没有抑菌圈。同列中平均抑菌圈直径后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)，相同字母表示差异未达到显著水平 ($P>0.05$)。下表同。

表 2 中空白实验组为龙眼核油脂的溶剂三氯甲烷，它对 5 种常见菌种均有一定的抑菌效果。其中对大肠杆菌具有最大抑菌圈平均直径，为 9.75 mm。表 2 中不同品种龙眼核油脂对 5 种常见菌种的抑菌圈平均直径，已相应减去空白实验组的抑菌圈平均值。

表 2 空白实验组对 5 种常见菌种的抑菌圈平均直径 (mm)

Table 2 The average diameter of the inhibition zone of the blank experimental group against 5 common bacterial strains (mm)

空白实验组	供试菌种				
	金黄色葡萄球菌	枯草芽孢杆菌	李斯特菌	大肠杆菌	酵母菌
三氯甲烷	7.04±0.13 ^c	6.96±0.22 ^c	8.79±0.45 ^b	9.75±0.61 ^a	8.24±0.32 ^b

2.3 不同品种龙眼核脂肪酸组成、含量与生物活性相关性分析

2.3.1 8 个品种龙眼核油脂与结构酯脂肪酸含量相关性分析

经薄层层析分离，龙眼核油脂形成三层有不同脂肪酸组成及含量特征的结构酯。由图 4 可知，不同品种龙眼核的三层结构酯中，C16:0、C18:1-9、C18:2 及 C18:3n-3 四种脂肪酸含量差异显著，水涨龙眼与福眼核油脂中这

些脂肪酸总含量显著高于其他品种。具体来说,所有供试品种龙眼核油脂中,甘油三酯层(TAG)的四种脂肪酸含量整体较高,TAG-C16:0与TAG-C18:1-9含量占比更高;甘油二酯层(DAG)中,C16:0脂肪酸在各品种中含量较高,水涨龙眼与福眼含量最高,DAG-C18:1-9与DAG-C18:3n-3含量分别在储良龙眼与泰国龙眼核油脂中最低;磷脂层(PL)中,除石硌、储良外,其他品种C16:0脂肪酸含量较高,水涨龙眼核油脂中含量最高,同时PL-C18:1-9与PL-C18:3n-3含量在水涨龙眼核油脂中也相对较高。

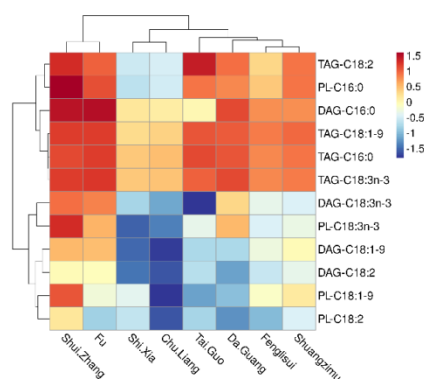


图4 不同品种龙眼核油脂与结构酯脂肪酸总量相关性分析热图

Fig.4 Heat map of correlation analysis between the total amount of oil and structural ester fatty acids in different varieties of longan seeds

注: 图中 Shui Zhang 为水涨龙眼, Fu 为福眼, Shi Xia 为石硌, Chu Liang 为储良, Tai Guo 为泰国龙眼, Da Guang 为大广眼, Fenglisui 为凤梨穗, Shuangzimu 为双籽木。

2.3.2 8种龙眼核油脂脂肪酸含量与生物活性相关性分析

对不同品种龙眼核油脂抗氧化活性与脂肪酸含量作相关性分析,如图5,不同脂肪酸间有显著差异。除C16:0、C18:1-9、C18:2和C18:3n-3外,其他脂肪酸呈明显负相关,而C16:0、C18:1-9和C18:3n-3与其他脂肪酸呈极为显著正相关。其中,水涨龙眼、福眼、凤梨穗和双籽木在不饱和脂肪酸C18:1-9上正相关性最强,其龙眼核油脂的DPPH自由基清除率较好。这表明,龙眼核油脂中C16:0、C18:1-9、C18:2和C18:3n-3,尤其是不饱和脂肪酸C18:1-9含量高,与良好的抗氧化效果有很强正相关性。

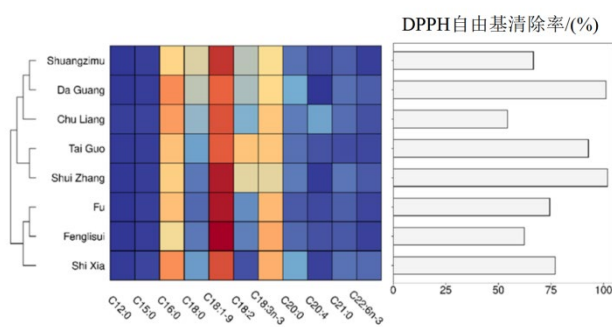


图5 脂肪酸组成及含量与抗氧化活性相关性分析热图

Fig.5 Heat map of correlation analysis between fatty acid composition and content and antioxidant activity

注: 图中 Shuangzimu 为双籽木, Da Guang 为大广眼, Chu Liang 为储良, Tai Guo 为泰国龙眼, Shui Zhang 为水涨龙眼, Fu 为福眼, Fenglisui 为凤梨穗, Shi Xia 为石硌。

对不同品种龙眼核油脂对五种菌种抑菌活性与脂肪酸含量作相关性分析,如图6所示,不同脂肪酸间有显著差异。和抗氧化活性相关性分析类似,C16:0、C18:1-9、C18:2和C18:3n-3与其他脂肪酸相比呈显著正相关。在对金黄色葡萄球菌的抑菌活性中,水涨龙眼不饱和脂肪酸C18:1-9相关性最强,抑菌效果最佳,福眼、凤梨穗龙眼核油脂的C18:1-9也有一定正相关性。

据此认为,龙眼核油脂脂肪酸组成及含量与抗氧化、抑菌效果有一定相关性,当脂肪酸中C16:0、C18:1-9、C18:2和C18:3n-3含量较高时,龙眼核油脂的抗氧化、抑菌效果良好,有开发为食用油、保健食品的巨大潜力和

广阔市场^[26]。

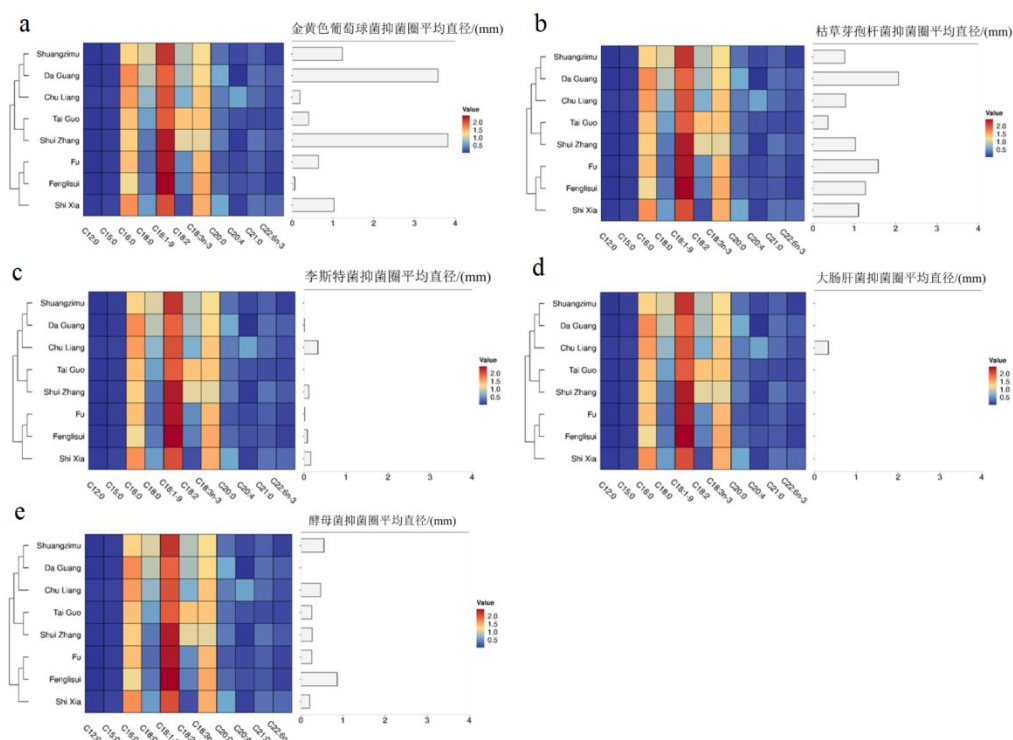


图6 脂肪酸组成及含量与5种常见菌种抑菌活性相关性分析热图

Fig.6 Heat map of Correlation Analysis between Fatty Acid Composition and Content and Antibacterial Activity of five Common Strains

注: a.金黄色葡萄球菌; b.枯草芽孢杆菌; c.李斯特菌; d.大肠杆菌; e.酵母菌。图中 Shuangzimu 为双籽木, Da Guang 为大广眼, Chu Liang 为储良, Tai Guo 为泰国龙眼, Shui Zhang 为水涨龙眼, Fu 为福眼, Fenglisui 为凤梨穗, Shi Xia 为石硖。

3 结论

本研究通过对8种龙眼核油脂的系统分析,明确了其脂肪酸组成以不饱和脂肪酸为主,尤其以油酸、亚油酸和亚麻酸含量较高,不饱和脂肪酸占比达55.74%~81.44%。不同品种间脂肪酸含量存在差异,其中福眼、储良和大广眼品种的综合表现较优。薄层色谱分析进一步揭示甘油三酯、甘油二酯和磷脂层的脂肪酸组成差异,其中甘油三酯层为主要成分,油酸含量与生物活性呈显著正相关。抗氧化与抑菌实验表明,龙眼核油脂具有显著的DPPH自由基清除能力及对金黄色葡萄球菌等的抑制作用,尤其以水涨龙眼品种效果突出。龙眼核油脂因其高不饱和脂肪酸含量和良好的生物活性,在功能性食品、保健品和天然护肤品等领域具有广阔开发潜力。本研究结果为龙眼核油脂的功能性开发利用及优良品种筛选提供了理论依据。

参考文献

- [1] YANG B, JIANG Y, SHI J, et al. Extraction and pharmacological properties of bioactive compounds from longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit—A review [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1837-1842.
- [2] HSIEH M C, SHEN Y J, KUO Y H, et al. Antioxidative activity and active components of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) flower extracts [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(16): 7010-7016.
- [3] RANGKADILOK N, WORASUTTAYANGKURN L, BENNETT R N, et al. Identification and quantification of polyphenolic compounds in longan (*Euphoria longana* Lam.) fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1387-1392.
- [4] 邱松山,李颖,姜翠翠,等.龙眼加工废弃物的综合利用探讨[J].甘肃农业科技,2016,5:59-64.
- [5] 蔡文韬,陈秋苑,袁学文.龙眼核精油提取技术及成分分析的研究进展[C]//广东食品学会“健康食品与功能性食品配料”学术研讨会暨2017年广东省食品学会年会论文集.2017:47-50.

- [6] 梅徐,俞晓敏,庞亚飞等.龙眼核药用价值概述[J].中国民间疗法,2019,27(13):104-105.
- [7] 文良娟,李英军,毛慧君,等.龙眼核的营养成分及其活性物质的抗氧化性能研究[J].食品科学,2010,31(1):243-246.
- [8] 肖更生,黄儒强,曾庆孝,等.龙眼核的营养成分[J].食品科技,2004,1:93-94.
- [9] YANG E, HAN Y, SIM K. Characterisation of nutritional, physiochemical, and mineral compositions of aril and seed of longan fruit (*Dimocarpus longan* L.) [J]. International Food Research Journal, 2021, 28(1): 91-101.
- [10] LIU B, XU Y, REN L X, et al. Antioxidant active ingredients from the seeds of *Dimocarpus longan* Lour. [J]. Fitoterapia, 2026, 189: 107043.
- [11] WANG J, GUO D, HAN D, et al. A comprehensive insight into the metabolic landscape of fruit pulp, peel, and seed in two longan (*Dimocarpus longan* Lour.) varieties [J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1527-1539.
- [12] 葛宇飞,朱冰瑶,方晶晶,等.龙眼核油脂成分及其抗氧化活性分析[J].中国粮油学报,2020,35(10):91-95.
- [13] KUMAR M, SHUBHASHIS D, KUMARJ. GC-MS-Based Analysis of Methanol: Chloroform-extracted Fatty Acids from Plant Tissues [J]. Bio-protocol, 2018, 8(18): e3014.
- [14] XIE X, GUO Z, MO Q, et al. Distribution of long-chain polyunsaturated fatty acids and the effects of molasses on DHA production in *Thraustochytrium* sp. 26185 [J]. Algal Research, 2025, 86: 103891.
- [15] CHRISTODOULEAS C, FOTAKIS C, NIKOKAVOURA A, et al. Modified DPPH and ABTS Assays to Assess the Antioxidant Profile of Untreated Oils [J]. Food Anal Method, 2015, 8(5): 1294-1302.
- [16] WEBBER D, MEGHAN A, CAREY-ANN D. Stop waiting for tomorrow: Disk diffusion performed on early growth is an accurate method for antimicrobial susceptibility testing with reduced turnaround time [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2022, 60(5): e03007-20.
- [17] CAO Y, ZHU J C, LIANG B S, et al. Assessment of lefamulin 20 µg disk versus broth microdilution when tested against common respiratory pathogens [J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2024, 64(6): 107366.
- [18] 胡昆,张成龙,王迪,等.气相色谱及其质谱联用技术定量检测脂肪酸的研究进展[J].中国人民公安大学学报(自然科学版),2023,29(1):46-54.
- [19] 姜波,胡文忠,刘长建,等.九种植物油中脂肪酸成分的比较研究[J].食品工业科技,2015,36(8):108-113+118.
- [20] 童汉清,顾京君,刘秋鹏.龙眼核油的超临界 CO₂ 萃取及其抗氧化性研究[J].食品科技,2012,37(2):261-264+268.
- [21] ZHAO X, QIU X. Analysis of the biosynthetic process of fatty acids in *Thraustochytrium* [J]. Biochimie, 2018, 144: 108-114.
- [22] 田雨,任广羚,王淑雅,等.沙棘籽油的提取优化及其脂肪酸和甘油三酯组成的分析[J].食品与发酵工业,2025,51(24):129-136.
- [23] 段倍倍,陈和盛,刘多智,等.油茶籽油基甘油二酯油的生物活性成分及抗氧化活性研究[J].中国调味品,2025,50(10):196-201.
- [24] 季怀锐,刘玉兰,汪学德,等.芝麻油磷脂组分及脂肪酸组成分析[J].农业机械,2012,15:34-37.
- [25] 邵慧珊,朱丽云,陈俞苒,等.植物精油及其单体成分对水果腐败菌的抑菌活性及作用机理研究进展[J].保鲜与加工,2022,22(9):89-96.
- [26] 周凯,胡卓炎,周沫霖,等.龙眼核提取物的体外抗氧化及抑菌活性研究[J].食品与机械,2015,31(4):167-171.
- [27] ZHU X, WANG H, SUN J, et al. Pericarp and seed of litchi and longan fruits: constituent, extraction, bioactive activity, and potential utilization [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2019, 20(6): 503-512.
- [28] TSENG H, WU W, HUANG H, et al. Antimicrobial activities of various fractions of longan (*Dimocarpus longan* Lour. Fen Ke) seed extract [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2014, 65(5): 589-593.
- [29] CARSON C, MEE B, RILEY T. Mechanism of action of *Melaleuca alternifolia* (tea tree) oil on *Staphylococcus aureus* determined by time-kill, lysis, leakage, and salt tolerance assays and electron microscopy [J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2002, 46(6): 1914-1920.
- [30] LV F, LIANG H, YUAN Q, et al. In vitro antimicrobial effects and mechanism of action of selected plant essential oil combinations against four food-related microorganisms [J]. Food Research International, 2011, 44(9): 3057-3064.
- [31] SOULAIMANI B. Comprehensive review of the combined antimicrobial activity of essential oil mixtures and synergism with conventional antimicrobials [J]. Natural Product Communications, 2025, 20(3): 1934578X251328241.