

苹果籽油品质性状及其提取方式和功能活性研究进展

苟丽娜, 曾朝珍, 康三江

(甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 随着食品工业对水果加工废弃物及副产物高值化利用的关注, 苹果籽油作为一种以不饱和脂肪酸为主的高价值植物油脂, 同时富含维生素 E、多酚及植物甾醇等活性成分, 具有抗氧化、抑菌、降脂、抗动脉粥样硬化、抗癌抗肿瘤等多种生物活性, 在功能性食品、化妆品及医药行业产品开发中展现出重要价值。文章从苹果籽油的理化特性、营养成分、提取工艺、苹果籽油品质的影响因素及生物活性等方面进行综述, 以期苹果籽油资源的高值化利用提供理论依据。

关键词: 苹果籽油; 脂肪酸组成; 营养; 生物活性; 高值化利用

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)11-0987-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.11.002

Research Progress on the Quality Characteristics, Extraction Methods and Functional Activities of Apple Seed Oil

GOU Lina, ZENG Chaozhen, KANG Sanjiang

(Agricultural Products Storage and Processing Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: With the increasing attention paid by the food industry to the high-value utilization of fruit processing waste and by-products, apple seed oil, as a high-value plant oil rich in unsaturated fatty acids, is also abundant in active components such as vitamin E, polyphenols and phytosterols. It exhibits multiple biological activities including antioxidation, antibacterial, lipid-lowering, anti-atherosclerosis, anti-cancer and anti-tumor effects, and has shown significant value in the development of functional foods, cosmetics and pharmaceutical products. This paper reviews the physicochemical properties, nutritional components, extraction techniques, factors influencing the quality of apple seed oil, and its biological activities, aiming to provide a theoretical basis for the high-value utilization of apple seed oil resources.

Key words: Apple seed oil; Fatty acid composition; Nutrition; Biological activity; High-value utilization

苹果是蔷薇科最重要的水果作物之一, 在温带地区广泛种植, 数据显示, 2023 年中国苹果总产量 4 960.17 万 t, 居世界第一, 占世界总产量的近一半。相比之下, 其他主要生产国如美国、土耳其和波兰的年产量不高, 为 420 万 ~ 450 万 t/a^[1]。约 70% 的苹果以新鲜水果的形式销售, 而 25% ~ 30% 的水果被加工成果汁或浓缩果汁、苹果酒、果泥、果酱和干制品^[2]。苹果榨汁后产生的副产物即苹果渣一般作废弃物处理, 占水果初始量的 20% ~ 35%, 果渣由 94.5% 的果肉和皮、4.1% 的种

子和 1.1% 的果梗组成^[3]。果渣是果胶、蛋白质、酶、脂肪酸、有机酸、维生素、矿物质、芳香化合物和纤维的有价值的来源, 却未被有效利用。

苹果籽富含丰富的脂类、蛋白质和结构多样的植物化学物质, 是一种潜在的功能性食品^[2,4]。苹果籽油是一种含有大量对人体健康至关重要的 omega-6 和 omega-3 族多不饱和脂肪酸以及 omega-9 族单不饱和脂肪酸的高营养价值油脂^[5-7], 这些脂肪酸对循环系统的功能, 细胞膜的结构和炎症反应的调节具有有益的影响^[8], 同时富含维生素 E、

收稿日期: 2025-09-22; 修订日期: 2025-10-20

基金项目: 甘肃省科技重大专项(22ZD6NA045); 国家苹果产业技术体系(CARS-27-2025)。

作者简介: 苟丽娜(1990—), 女, 甘肃白银人, 研究实习员, 硕士, 研究方向为农产品贮藏与加工。Email: goulina189@163.com。

通信作者: 康三江(1977—), 男, 甘肃陇西人, 研究员, 研究方向为农产品贮藏与加工。Email: kang58503@163.com。

多酚及植物甾醇等活性成分^[7,9]。近年来大量的研究集中在利用水果和蔬菜加工副产品, 营养保健品的发展和对功能性食品的需求刺激了人们对植物种子作为功能性食品的兴趣, 葡萄籽油、油茶籽油、沙棘籽油等种子油脂受到越来越多关注^[10-12], 然而, 关于苹果籽油的文献有限。为此, 我们在前人研究的基础上, 对苹果籽油品质性状、营养成分、提取方式、影响苹果籽油品质的因素以及生物活性等研究进展进行综述, 旨在为苹果籽油产品开发及苹果渣高值化利用路径的深入研究提供理论参考。

1 苹果籽油品质性状研究

1.1 苹果籽及苹果籽油理化性质

苹果籽是蛋白质、纤维、脂肪和灰分的良好来源。苹果每果含籽 4~10 粒, 籽仁率 67.7%^[7], 苹果籽占苹果鲜重约 0.7%, 占总苹果渣重的 4%~5%^[13]。苹果籽碳水化合物主要由半乳糖醛酸(49%~64%)、阿拉伯糖(14%~23%)和半乳糖(6%~15%)组成, 具有少量的鼠李糖、木糖和葡萄糖^[14]。苹果籽蛋白质含量为 38.85%~49.55%^[15-16], 其中含硫氨基酸相对丰富, 除酪氨酸外, 在所有必需氨基酸中, 甘氨酸的百分比最高, 其次是精氨酸、天冬酰胺、谷氨酸和亮氨酸^[4]。苹果籽是水溶性维生素 C (42.9~54.0 μg/g FW) 和 B6 (吡哆醇) 以及脂溶性维生素 E 的极好来源^[17]。苹果籽中富含钙、磷、铁、锌、铜、锰等矿物质与微量元素, 其中钙含量可达 2.7 mg/kg, 磷含量为 7.2 mg/kg^[17]。植物化学物质是水果和蔬菜中的次生代谢产物, 有助于增强其抗氧化活性, 苹果籽中含有生育酚、多酚和植物甾醇等多种植物化学物质。

苹果籽油脂含量一般在 12%~34%, 呈淡黄色透明状, 常温下呈液态, 低温下会凝固, 折射指数(20 ℃)为 1.473 4, 比重(d_4^{20})0.921 9 g/cm³, 酸价 4.036~4.323 mg KOH/g, 皂化值 179.01~197.25 mg KOH/g, 碘值 94.14~129.3 g I₂/100 g^[4, 17-18], 其较高的碘值表明其属于半干性油类。苹果籽精炼油的货架寿命为 130 d, 粗油的货架寿命为 220 d^[19]。刘少阳等^[20]利用压榨法得到苹果籽油, 经毒理学实验表明, 苹果籽油的 LD₅₀>20.0 g/kg BW, 属无毒级, 且无致突变作用, 30 d 经口摄入对脏

器绝对质量和脏体比均无显著影响, 苹果籽油具有较高的食用安全性。

1.2 苹果籽油脂脂肪酸组成及含量研究

苹果籽油的脂肪酸组成直接影响其营养价值和稳定性, 苹果种子中发现的总脂肪酸为 79.34%, 饱和脂肪酸占比 70.60%~90.30%, 其中单饱和脂肪酸为 26.90%, 多饱和脂肪酸为 58.30%, 另外, 饱和脂肪酸仅占比 8.74%~13.94%^[21-22]。葛含静^[23]测定陕西富士苹果籽油中存在 9 种脂肪酸, 包括棕榈酸(C16:0)6.08%~6.91%、硬脂酸(C18:0)1.75%~1.93%、油酸(C18:1)37.48%~39.98%、亚油酸(C18:2)46.56%~51.40%、亚麻酸(C18:3)0.30%~0.42%、花生酸(C20:0)1.42%~1.64%、花生一烯酸(C20:1)0.45%~0.78%、棕榈一烯酸(C16:1)0.05%~0.12%、山嵛酸(C22:0)0.40%~0.45%, 其中饱和脂肪酸含量为 87.50%~90.05%。Rodriguez 等^[24]在来自西班牙北部的苹果籽油中检测到 9 种脂肪酸, 包括棕榈酸(C16:0)、棕榈油酸(C16:1)、硬脂酸(C18:0)、油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)、α-亚麻酸(C18:3)、花生酸(C20:0)、花生一烯酸(C20:1)和山嵛酸(C22:0)。其中亚油酸(53.7%~57.0%)是主要脂肪酸, 其次是油酸(32.5%~34.5%)。棕榈酸(7.1%~7.6%)是饱和脂肪酸中的主要成分, 其次是硬脂酸。Rui 等^[21]研究山东烟台的红富士苹果籽, 其苹果籽油的 GC-MS 图谱显示存在 11 种脂肪酸, 如表 1 所示, 苹果籽油中总不饱和脂肪酸占比显著高于大豆油和菜籽油, 并且高于茶籽油、梨籽油两种其他籽油产品, 而饱和脂肪酸占比低至 9.50%, 略高于菜籽油(6.30%), 但低于大豆油(16.20%)^[4, 25-27]。

1.3 苹果籽油功能性营养成分研究

苹果籽油呈淡黄色源于其含有类胡萝卜素(0.95~15.80 mg/kg), Matthias 等^[28]测定出了全反式紫黄质、9-顺式紫黄质、全反式叶黄素、全反式玉米黄质、全反式-β-隐黄质、全反式-β-胡萝卜素和9-顺式-β-胡萝卜素, 其中以全反式紫黄质和9-顺式紫黄质为主, 占苹果籽油中总类胡萝卜素的 15%~34%。生育酚是最重要的天然抗氧化剂, 可保护多不饱和脂肪酸免受脂质过氧化作用^[24, 29], 苹果籽油中维生素 E 含量为 191.05~

表 1 苹果籽油脂肪酸组成及与其他植物油及籽油脂肪酸组成 %

脂肪酸	苹果籽油	大豆油	菜籽油	茶叶籽油	梨籽油
亚油酸(C18:2)	44.52~51.40	51.99~55.92	16.34~21.54	0.08	56.80
油酸(C18:1)	36.92~39.69	19.08~25.19	45.33~56.57	83.19	20.28
棕榈酸(C16:0)	6.43~7.15	10.43~11.52	3.91~4.65	11.92	6.39
硬脂酸(C18:0)	1.75~2.37	3.81~4.85	1.73~1.94	2.95	1.75
花生酸(C20:0)	1.31~1.54	0.34~0.45	0.63~0.75	0.07	1.25
棕榈一烯酸(C16:1)	0.05~0.06	0.07~0.10	0.20~0.23	0.24	0.12
亚麻酸(C18:3)	0.30~0.60	5.21~10.45	8.44~8.72	0.45	0.32
花生一烯酸(C20:1)	0.39~0.56	0.17~0.25	1.92~5.87	0.86	0.28
花生二烯酸(C20:2)	0.04	0.03~0.05	0.11~0.25		0.05
山嵛酸(C22:0)	0.27~0.40	0.34~0.51	0.40~0.46		0.24
木蜡酸(C24:0)	0.09	0.11~0.21	0.16~0.27		0.11

379.08 mg/100 g^[30], 存在 α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚和 δ -生育酚 4 种同系物, 其中 β -生育酚含量最高(795.0 mg/kg), 其次是 α -生育酚(439.0 mg/kg), γ -生育酚(26.4 mg/kg)和 δ -生育酚(19.9 mg/kg)作为次要成分存在^[24], 高浓度的 β -生育酚被认为是苹果籽油的特征。此外, Pieszka 等^[31]证实苹果籽油中还有微量的 α -生育三烯酚(12.1 mg/kg)和 γ -生育三烯酚(30.5 mg/kg)。Mateja 等^[32]证实苹果种子含 23 种酚类化合物, 分为 6 个酚类基团, 即羟基肉桂酸类、黄酮类、黄烷醇类、黄酮醇类和二氢查耳酮类。苹果籽中酚类化合物中含量最丰富的根皮苷(Phloridzin), 是一种查耳酮衍生物, 超临界二氧化碳萃取苹果籽油中含量为(2.96 ± 0.046) $\mu\text{g/g}$ 种子, 索氏提取物中为 (1.56 ± 0.026) $\mu\text{g/g}$ 种子^[33]。根皮苷是一种植物抗毒素, 可抑制脂质过氧化^[34], 其通过抑制钠连接的葡萄糖转运蛋白 GLUT2 来限制肠道糖吸收^[35]。多项研究显示根皮苷在治疗肥胖、2 型糖尿病和应激性高血糖中的有效性^[36]。苹果种子中含量第二丰富的是黄烷醇, 主要为原花青素, 其次为儿茶素, 它们的含量不超过 400 $\mu\text{g/g}$, 比根皮苷低 15 ~ 25 倍; 羟基肉桂酸和黄酮类化合物的含量均未超过 55 $\mu\text{g/g}$ 。羟基肉桂酸类中主要酚类成分为新绿原酸, 黄酮类中主要酚类成分为芹菜素己糖苷。另外黄酮醇包括槲皮素和山奈酚苷, 其含量不超过 10 $\mu\text{g/g}$ 。多项研究中植物甾醇表现出降低血液胆固醇的能力, 可降低心血管疾病的风险, 并具有抗炎, 抗菌, 抗溃疡和抗肿瘤活性^[17]。赵雁武等^[37]测定苹果籽油中植物甾醇含量 3.847 g/kg, 包括 β -谷甾醇, 豆甾醇和菜油甾醇。Górnaś 等^[38]在苹果籽油中鉴

定出了 β -谷甾醇、环阿屯醇、菜油甾醇、豆甾醇、燕麦甾醇和 Δ^7 -豆甾醇等 6 种植物甾醇。

2 苹果籽油的提取方法

2.1 物理压榨法

低温冷榨技术能最大限度保留维生素 E、多酚等活性成分, 但出油率较低(约 10% ~ 15%)。张旋等^[39]采用液压压榨苹果籽的出油率(15.35%)显著高于螺旋压榨(10.10%), 且液压压榨所得的苹果籽油酸价、过氧化值较低, 色度低, 品质高。刘少阳等^[20]以螺旋压榨机制备苹果籽油, 出油率为 14.23%。

2.2 传统溶剂提取法(索氏抽提法)

溶剂抽提法可适用于大规模生产, 但溶剂残留可能影响油脂品质且对热敏性成分的破坏较大。蔡珺等^[40]采用有机溶剂法提取红富士苹果籽油得率可达到 26.86%, 最佳的提取条件是: 料液比 1 : 20 (g : mL), 提取时间 2.5 h, 提取温度为 45 $^{\circ}\text{C}$ 。Ferrentino 等^[33]用索氏提取的苹果籽油产率为 (22.5 ± 2.5)%(W/W)高于超临界 CO₂ 萃取法(20.5 ± 1.5)%(W/W)。但是, 索氏提取法所得苹果籽油的亚麻酸含量(490.3 ± 38.5)g/kg显著低于超临界 CO₂ 萃取法(637.6 ± 49.6)g/kg。

2.3 超临界CO₂萃取法

超临界 CO₂ 萃取法的优势在于无溶剂残留, 选择性强, 对热敏性物质的破坏极小。龚金炎等^[41]在 25 MPa、50 $^{\circ}\text{C}$ 、25 L/h、3 h 条件下超临界流体萃取苹果籽油得率为 28.1%。Ferrentino 等^[33]在超临界 CO₂ 萃取苹果籽油中未检测到苦杏仁苷, 而在索氏提取的苹果籽油中含 (0.005 ± 0.001) $\mu\text{g/g}$ 。Alessandra 等^[42]采用超声波辅助提取苹果籽油中

也检测到苦杏仁苷, 研究结果表明超临界流体萃取的苹果籽油具有高生物活性且不含抗营养物质。然而, 设备投资大、生产成本及能耗高、生产能力有限等问题限制了该技术工业化应用。

2.4 亚临界流体萃取法

与超临界 CO₂ 萃取相比, 亚临界流体萃取安全高效、设备成本低, 温和的温度和压力有利于生物活性成分的保留和脂质氧化的减少, 保证了油脂质量和生产率, 并实现了工业化^[43]。徐瑶^[44]采用亚临界法萃取苹果籽油, 以正己烷作为夹带剂, 萃取温度 40 ℃, 原料粒度 40 目, 萃取时间 60 min 的条件下, 苹果籽油得率为 19.36%, 获得苹果籽油中不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上, 亚油酸含量占比 53%。

2.5 超声波提取法

超声波提取法可将提取时间缩短至 20 ~ 40 min, 能耗仅为传统方法的 1/3, 提取成分保留完整, 能够单独使用或与溶剂联用增强萃取效果。Alessandra 等^[42]研究表明, 溶剂(正己烷): 样品 = 15 : 1, 功率 56 W (64% 振幅), 提取时间 30 min, 温度 30 ℃ 条件下, 超声波辅助提取苹果籽油提取率为 $(19.10 \pm 1.50)\%$, 与超临界流体得率 $(19.30 \pm 2.10)\%$ 、索氏提取得率 $(17.20 \pm 2.30)\%$ 比较, 超声波辅助处理时间显著短于其他两种方法。

2.6 水酶法

水酶法无化学溶剂残留, 对环境友好, 成分保留率高, 可同步回收蛋白质等副产物, 但该方法存在酶活性不稳定、酶制剂成本较高等局限, 目前多处于实验室研究阶段。于修焯等^[45]优化后的工艺条件为: 苹果籽破碎度 ≤ 0.6 mm、加水比 1 : 8、酶添加量 0.8% (纤维素酶与蛋白酶 1 : 1)、酶处理时间 8 h, 苹果籽油出油率达 21.44%。

2.7 复合法

复合法结合两种或多种提取技术以优化效果。任俊等^[46]用微波加热 3 min, 料液比 1 : 24, 微波加热温度 50 ℃, 在此条件下, 苹果籽油的得率为 23.51%, 高于单一采用索氏抽提法的提取率 21.41%, 用微波辅助溶剂萃取, 可大大缩短提取时间进而降低成本。毕艳红等^[18]使用超声波辅助酶法, 复合蛋白酶添加量 1.5%、超声波频率 28 kHz、超声时间 20 min、酶解时间 6.38 h, 苹果籽

的出油率可提升至 31.03%。复合法在提高效率的同时, 需平衡成本与成分保留, 是未来工业化的重要方向。

3 不同因素对苹果籽及其油品质的影响

3.1 品种对苹果籽及其油脂品质的影响

苹果籽油的品质受原料品种差异显著影响。徐颖等^[47]测定 7 个品种苹果中密脆籽的总酚含量最高, 为 17.44 mg GAE/g, 显著高于其他品种, 其他品种总酚含量由高到低依次为红盖露、富士、红星、秦冠、秦阳, 而黄元帅最低, 为 5.74 mg GAE/g, 仅为密脆籽总酚含量的 1/3。另一项研究中, Xu 等^[13]测定陕西杨凌的同一苹果园中采收的嘎拉、红星、蜜脆、红富士、秦冠、金冠、沁阳 7 种不同品种苹果种子中的主要酚类化合物—根皮苷的含量为 240.45 ~ 864.42 mg/100 g DW, 总酚含量范围为 5.74 ~ 17.44 mg GAE/g DW。种子中的抗氧化活性变化为 220.52 ~ 708.02 IM TE/g FW。结果表明, 在相同的地理、气候、栽培条件和果实的特定部位下, 且均在完全成熟时收获, 不同品种的苹果种子多酚含量和抗氧化活性存在显著差异。

3.2 种植条件及气象因子对苹果籽及其油品质的影响

种植条件(土壤、海拔)和气象因子(温度、光照、降水)通过影响苹果生长及籽粒发育间接作用于籽油品质^[30]。Mateja 等^[32]从阿塞拜疆、俄罗斯、塞尔维亚和斯洛文尼亚 4 个不同地点的果园收获苹果, 来自俄罗斯的苹果种子中酚类物质的总含量最高 (6.22 mg/g), 其次是塞尔维亚 (5.91 mg/g)、斯洛文尼亚 (5.31 mg/g) 和阿塞拜疆 (4.24 mg/g)。苹果籽中酚类物质和生氰糖苷都对环境条件有反应, 主要是温度、降水和海拔。来自阿塞拜疆的苹果种子, 在高温和低年降水量条件下, 生氰糖苷含量 (2.2 mg/g) 最高, 而来自俄罗斯的苹果种子, 在高海拔和低温条件下, 酚类化合物 (6.2 mg/g) 含量最高。

3.3 提取方式对苹果籽油品质的影响

提取工艺直接影响植物油脂的理化性质、脂肪酸的含量与活性成分保留。Ferrentino 等^[33]研究表明, 在 24 MPa、40 ℃、1 L/h 条件下超临界流体萃取(SFE)苹果籽油 140 min 后, 与索氏提取法相

比,脂肪酸(g/100 g油)含量是亚油酸(SFE: 63.76; 索氏提取法: 49.03)、油酸(SFE: 34.84; 索氏提取法: 24.15)、棕榈酸(SFE: 13.39; 索氏提取法: 6.24)、硬脂酸(SFE: 7.69; 索氏提取法: 2.97)、亚麻酸(SFE: 1.61; 索氏提取法: 1.87)和花生酸(SFE: 2.04; 索氏提取法: 1.22)。SFE提取的油氧化稳定性 $[(21.4 \pm 1.2)\text{h}]$ 高于索氏提取法 $[(12.1 \pm 1.1)\text{h}]$ 。刘雪梅^[49]研究结果与之相似,超临界CO₂萃取法所得苹果籽油不饱和度最高,其中饱和脂肪酸含量以有机溶剂法最高,超临界CO₂萃取法最低。

4 苹果籽油的生物活性

4.1 抗氧化性

苹果籽及其油脂表现出良好的抗氧化活性主要来源于其高级酚类化合物和黄酮类化合物的存在。Xu等^[13]对中国西部7个品种苹果的种子、果皮和果肉的体外抗氧化测定研究表明,种子提取物显示出最高的抗氧化活,种子提取物的ABTS值为 $(220.52 \pm 10.44) \sim (708.02 \pm 18.67) \mu\text{M TE/g FW}$,其由大到小依次为蜜脆、富士、红星、秦冠、大风嘎拉、沁阳、金冠。与其他典型抗氧化剂相比,种子多酚表现出很强的浓度抑制效应,随着浓度的增加,抑制作用迅速增强。Walia等^[22]研究表明,苹果籽油具备良好的抗氧化能力,DPPH法证实,25、50、75、100 $\mu\text{g/mL}$ 的苹果籽油的抑制率分别为38.12%、60.34%、71.23%、88.74%。刘雪梅^[48]以不同剂量的苹果籽油灌胃给药亚急性衰老小鼠模型后,均能降低血清、肝脏中的丙二醛含量,提高超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶的活性,显著提高亚急性衰老小鼠的抗氧化能力。

4.2 抑菌活性

苹果籽油表现出良好的抗微生物活性,对大肠杆菌、沙门氏菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、假丝酵母属、酿酒酵母、黄曲霉、桔青霉、毛霉属及根霉属均有抑制作用,研究表明苹果籽油对细菌几乎完全有抑制作用,霉菌对苹果籽油的敏感性低于酵母菌,苹果籽油的最小抑制浓度范围为0.3~0.6 mg/mL,而橄榄籽油的抗菌活性低于葡萄籽油和苹果籽油^[15]。刘海霞^[49]测定苹果籽油甾醇对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌有较强

的抑菌性,对蜡样芽孢杆菌和大肠杆菌有抑菌作用,对黑曲霉没有抑菌性。

4.3 抗肿瘤活性及其他生物活性

Walia等^[22]指出苹果籽油可以抑制癌细胞的生长,在体外测试中,不同浓度的苹果籽油对中国仓鼠(CHOK 1)、人肺癌(A549)和人宫颈癌(Si-Ha)细胞的均有明显的抑制作用,对照品(浓度为1 $\mu\text{g/g}$ 的长春碱)对CHOK 1的细胞毒性最高(90%),而苹果籽油在72 h内的细胞毒性为88.6%。苹果籽油中多酚化合物对2型糖尿病、肥胖症、心血管疾病的管管理有积极作用,并通过保护免受氧化损伤诱导人类肝癌细胞凋亡^[13,33]。动物实验表明,苹果籽油可显著降低血清总胆固醇和低密度脂蛋白同时提高超氧化物歧化酶活性,减少氧化应激对心脏的损伤,具有降血脂与护心作用,可降低冠心病风险^[15,50]。此外,其甲醇提取物对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制率分别达86.6%和72.6%,提示其具有潜在抗糖尿病和抗肥胖功能^[51]。

5 结语

提升果蔬加工副产物和废弃物附加值是食品加工业的最新发展趋势,苹果籽油作为一种源自废弃果渣的高价值油脂,富含不饱和脂肪酸、生育酚、多酚及植物甾醇等活性物质,展现出优良的抗氧化、抑菌、抗肿瘤及潜在降血脂活性等功能,综合开发潜力巨大。然而,其当前发展受限于提取工艺成本高、油脂易氧化及产品转化不足等瓶颈。推动亚临界萃取等高效提取技术的规模化应用,以平衡效率、成本与活性保留。依据其明确的抗氧化、抑菌功能,精准设计功能食品、保健油脂、功效性护肤品等高附加值产品。同时,需建立原料品质标准与安全规范,最终构建起从苹果渣到高端产品的完整产业链。

参考文献:

- [1] LYU F, LUIZ S F, ZAEREDO D P R, et al. Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review[J]. Processes, 2020, 8(39), 319.
- [2] MONTANES F, CATCHPOLE O J, TALLON S, et al. Extraction of apple seed oil by supercritical carbon dioxide at pressures up to 1300 bar[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2018, 141: 128-136.
- [3] CANDRAWINATA V I, GOLDING J B, ROACH P D, et

- al. Optimisation of the phenolic content and antioxidant activity of apple pomace aqueous extracts[J]. *CyTA Journal of Food*, 2015, 13(2): 293–299.
- [4] SARITA ROY, TANMAY SARKAR, VIJAY JAGDISH UPADHYE, et al. Comprehensive Review on Fruit Seeds: Nutritional, Phytochemical, Nanotechnology, Toxicity, Food Biochemistry, and Biotechnology Perspective[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2024, 196: 4472–4643.
- [5] 王富刚, 莫耀兴. 不同品种苹果籽油脂肪酸组成[J]. *食品工业*, 2020, 41(12): 329–331.
- [6] FIDELIS M, DE MOURT C, KABBAS T, et al. Fruit seeds as sources of bioactive compounds: sustainable production of high value-added ingredients from by-products within circular economy[J]. *Molecules*, 2019, 24(21), 3854.
- [7] JAKSIC F M, IZAREVIC K, SEGAN S, et al. Assessing the fatty acid, carotenoid, and tocopherol compositions of seeds from apple cultivars (*Malus domestica* Borkh.) grown in Norway[J]. *Foods*, 2021, 10(8), 1956.
- [8] KANDEMIR K, PISKIN E, XIAO J, et al. Fruit juice industry wastes as a source of bioactives[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(23): 6805–6832.
- [9] 李志西. 苹果渣资源化利用研究与实践[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [10] 林 童, 卢贞希, 刘改霞, 等. 葡萄籽油的脂肪酸组成、抗氧化活性及其在可食性口红中的应用[J]. *中国油脂*, 2021, 46(3): 118–121.
- [11] 陈 宇, 杨纪元, 邱之阳, 等. 不同加工方式的油茶籽油对变应性接触性皮炎的抗炎效果[J]. *中国油脂*, 2024, 49(7): 61–67.
- [12] 刘美静, 魏晓博, 余君伟, 等. 沙棘籽油的超临界 CO₂ 提取及抗氧化活性研究[J]. *中国粮油学报*, 2025, 40(1): 156–161.
- [13] XU Y, FAN M, RAN J, et al. Variation in phenolic compounds and antioxidant activity in apple seeds of seven cultivars[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2016, 23(13): 379–388.
- [14] BHUSHAN S, KALIA K, SHARMA M, et al. Processing of apple pomace for bioactive molecules[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2008, 28(4): 285–296.
- [15] HONG L T, PING Z, KAI X L. Analysis of components and study on antioxidant and antimicrobial activities of oil in apple seeds[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, June 2010, 61(4): 395–403.
- [16] 洪庆慈, 汪海峰, 杨晓蓉, 等. 苹果籽营养成分测定[J]. *食品科学*, 2004(7): 148–151.
- [17] MANOJ K, MRUNAL D, BARBHAI A, et al. Apple (*Malus domestica* Borkh.) seed: A review on health promoting bioactivities and its application as functional food ingredient [J]. *Food Bioscience*, 2022, 50: 2051–2066.
- [18] 毕艳红, 王朝宇, 陈晓明, 等. 超声波辅助酶法提取苹果籽油工艺优化及其脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2014, 39(10): 19–23.
- [19] 于修焯. 苹果籽及苹果籽油特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [20] 刘少阳, 丁秀玲. 压榨法制备苹果籽油及其毒理学[J]. *食品工业*, 2021, 42(1): 339–342.
- [21] RUI Y K, WANG W Y, FAZANA R, et al. Fatty acids composition of apple and pear seed oils[J]. *International Journal of Food Properties*, 2009, 12(4): 774–779.
- [22] WALIA M, RAWAT K, BHUSHAN S, et al. Fatty acid composition, physicochemical properties, antioxidant and cytotoxic activity of apple seed oil obtained from apple pomace[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(5): 929–934.
- [23] 葛含静. 苹果籽油提取、理化性质测定以及脂肪酸分析研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2006.
- [24] RODRIGUEZ M R, SUAREZ V B. Characterization of apple seeds and their oils from the cider-making industry[J]. *European Food Research and Technology*, 2018, 244: 1821–1827.
- [25] 杨继红, 李元瑞, 蒋 晶. 苹果籽油的超临界 CO₂ 萃取及脂肪酸含量分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007(3): 195–199.
- [26] 吕世懂, 张慧君, 杨学芳, 等. 基于脂肪酸组成结合主成分分析识别不同比例大豆油和菜籽油调配的调和油[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(2): 140–148.
- [27] 刘 颖, 刘晓谦, 梁曜华, 等. 11 种植物油的脂肪酸组成与抗氧化活性比较[J]. *中国油脂*, 2020, 45(10): 52–56; 61.
- [28] MATTHIAS F, SANDRA B, DIETMAR R, et al. Identification and quantitation of carotenoids and tocopherols in seed oils recovered from different rosaceae species [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, Food Chem.* 2012, 60(43): 10733–10742.
- [29] MADRERA R R, VALLES S B. Characterization of apple seeds and their oils from the cider-making industry[J]. *European Food Research and Technology*, 2018, 244:

- 1821–1827.
- [30] PAWEL G. Unique variability of tocopherol composition in various seed oils recovered from by-products of apple industry: Rapid and simple determination of all four homologues (α , β , γ and δ) by RP-HPLC/FLD [J]. Food Chemistry, 2015, 172 : 129–134.
- [31] PIESZKA M, MIGDAL W, GASIOR R, et al. Native oils from apple, blackcurrant, raspberry, and strawberry seeds as a source of polyenoic fatty acids, tocopherols, and phytosterols: A health implication [J]. Journal of Chemistry, 2015, 2015: 659541.
- [32] MATEJA S, FRANCI S, ROBERT V, et al. Cyanogenic glycosides and phenolics in apple seeds and their changes during long term storage [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 255:30–36.
- [33] FERRENTINO G, GIAMPICCOLO S, MOROZOVA K, et al. Supercritical fluid extraction of oils from apple seeds: Process optimization, chemical characterization and comparison with a conventional solvent extraction [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 64: 102428.
- [34] DUGEDE B T, GUYOT S, PAULIN J P, et al. Dihydrochalcones: implication in resistance to oxidative stress and bioactivities against advanced glycation end-product and vasoconstriction [J]. Phytochemistry, 2010, 71: 443–452.
- [35] MANZANO S, WILLIAMSON G. Polyphenols and phenolic acids from strawberry and apple decrease glucose uptake and transport by human intestinal Caco-2 cells [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2010, 54 (12): 1773–1780.
- [36] NAJAFIAN M, JAHROMI M Z, NOWROZNEIHAD M J, et al. Phloridzin reduces blood glucose levels and improves lipids metabolism in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Molecular Biology Reports, 2012, 39 (15): 5299–5306.
- [37] 赵雁武, 邓红, 仇农学. 苹果籽油中脂肪酸及植物甾醇成分分析 [J]. 中国油脂, 2012, 37(4): 81–83.
- [38] GÓRNAŚ P, RUDZIŃSKA M, SEGLINA D. Lipophilic composition of eleven appleseed oils: A promising source of unconventional oil from industry by-products [J]. Industrial Crops and Products, 2014, 60: 86–91.
- [39] 张旋, 吕名蕊, 孟佳, 等. 螺旋压榨和液压压榨对苹果籽油品质的影响 [J]. 粮食与食品工业, 2016, 23(2): 40–41; 45.
- [40] 蔡珺, 曹晓玲, 刘广辉. 苹果籽油的提取工艺研究 [J]. 现代食品, 2023, 29(12): 79–81.
- [41] 龚金炎, 潘惠慧, 傅艺杰, 等. 超临界 CO₂ 萃取苹果籽油的工艺研究 [J]. 中国粮油学报, 2008(2): 174–177.
- [42] ALESSANDRA G, GIOVANNA F, LUCREZIA A, et al. Ultrasound assisted extraction of oils from apple seeds: A comparative study with supercritical fluid and conventional solvent extraction [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2023, 86: 103370.
- [43] 朱新亮, 淦菁, 刘运革, 等. 亚临界萃取技术在食用油及农产品加工中的应用 [J]. 粮油与饲料科技, 2020(4): 15–19.
- [44] 徐瑶. 苹果籽油的亚临界流体萃取 [J]. 农产品加工, 2021(19): 14–16.
- [45] 于修烛, 张莉, 杜双奎, 等. 复合酶法提取苹果籽油工艺研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007(5): 189–193; 198.
- [46] 任俊, 卢金珍. 微波辅助提取苹果籽油的工艺研究 [J]. 中国食物与营养, 2012, 18(5): 55–57.
- [47] 徐颖, 樊明涛, 冉军舰, 等. 不同品种苹果籽总酚含量与抗氧化相关性研究 [J]. 食品科学, 2015, 36(1): 79–83.
- [48] 刘雪梅. 苹果籽油的提取及抗氧化性研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [49] 刘海霞. 苹果籽油甾醇的分离、提取及其功能性评价 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2009.
- [50] 赵雁武, 仇农学, 高霞, 等. 苹果籽油对实验性高脂血症大鼠的防治作用 [J]. 第四军医大学学报, 2008(6): 556–558.
- [51] MANZOOR M, SINGH J, GANI A. Characterization of apple (*Malus domestica*) seed flour for its structural and nutraceutical potential [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151, 112138.