

杜仲籽油化学组成与检测技术研究进展

张 瑜^{1,2}, 杨瑞楠^{1,2}, 王 晓^{1,2}, 张良晓^{1,3,4*}, 李培武^{1,3,4,5}

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062; 2. 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 武汉 430062; 3. 农业农村部油料产品质量安全风险评估实验室(武汉), 武汉 430062; 4. 农业农村部油料及制品质量监督检验测试中心, 武汉 430062)

摘 要: 杜仲籽是我国新型食用植物油原料, 含有 α -亚麻酸和生育酚, 维生素 B 和桃叶珊瑚苷等丰富的营养成分, 在食品、药品行业有很高的利用价值和发展空间, 因此受到广泛关注。本文查阅了国内外杜仲籽油化学组成分析、营养功能评价的研究和综述论文, 总结了杜仲籽油理化指标、脂肪酸组成、植物甾醇、生育酚等和杜仲籽油粕特异成分组成及其检测方法的研究进展, 为杜仲籽油及其副产物的进一步开发应用提供参考。

关键词: 杜仲籽油; 化学成分; 检测方法

Advances in chemical composition and related analytical technologies of *Eucommia ulmoides* seeds oil

ZHANG Yu^{1,2}, YANG Rui-Nan^{1,2}, WANG Xiao^{1,2}, ZHANG Liang-Xiao^{1,3,4*}, LI Pei-Wu^{1,3,4,5}

(1. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Wuhan 430062, China; 2. Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 3. Quality Inspection and Test Center for Oilseeds Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 4. Laboratory of Risk Assessment for Oilseeds Products (Wuhan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China)

ABSTRACT: *Eucommia ulmoides* seed is a new material of edible vegetable oil in China, which contains rich nutritional functional ingredients such as alpha linolenic acid, tocopherol, vitamin B and peach glucoside. It has high utilization value and development space in the food and pharmaceutical industries, so it is widely accepted attention. This paper checked the research and review papers on the chemical composition analysis and nutritional function evaluation of *Eucommia ulmoides* seed oil at home and abroad, summarized the research progress of *Eucommia ulmoides* seed oil physicochemical indexes, fatty acid composition, phytosterol, tocopherol, and specific components of *Eucommia ulmoides* seed oil meal and their detection methods, so as to provide a reference for the further development and application of *Eucommia* seed oil and its by-products.

KEY WORDS: *Eucommia ulmoides* seeds oil; chemical composition; analytical method

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFC1601700)、国家自然科学基金委面上项目(31871886)、国家农产品质量安全风险评估重大项目(GJFP2019003)、国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-12)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFC1601700), National Natural Science Foundation of China (31871886), the National Key Project for Agro-Product Quality & Safety Risk Assessment (GJFP2019003), and the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-12)

***通讯作者:** 张良晓, 博士, 副研究员, 主要研究方向为油料特异品质检测与真实性鉴别技术研究。E-mail: zhanglx@caas.cn

***Corresponding author:** ZHANG Liang-Xiao, Ph.D, Associate Professor, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China. E-mail: zhanglx@caas.cn

1 引言

杜仲属于温带胶源树种,具有很高的食用和药用价值,含有桃叶珊瑚甙、绿原酸、多聚环烯醚萜甙等药用成分^[1]。杜仲籽蛋白质和油脂含量较高,是潜在的具有巨大经济价值的蛋白质和油脂资源。杜仲籽含有粗脂肪、粗蛋白、粗纤维、粗淀粉的含量分别为 40.63%、23.59%、13.25%、9.82%^[2]。杜仲籽油中 α -亚麻酸的相对含量高达 66%,是多不饱和脂肪酸的良好来源^[2]。同时含有铁、锌、铜等微量元素和钠、镁等常量元素^[3]。辛欣等^[4]曾对杜仲籽油做毒理学验证,实验证明杜仲籽油属无毒级食用油,无遗传毒性作用,病理学检验未见异常,初步验证了杜仲籽油的可食用性。

王宏涛等^[5]探讨了杜仲籽油对大鼠血脂水平的调节作用,实验结果显示低剂量 50 mg/kg 和中剂量 250 mg/kg 杜仲油软胶囊能显著改善大鼠血清中总胆固醇和甘油三酯的含量,其中降甘油三酯的效果更显著,具有较强的医疗保健功能,而且对增强记忆、镇痛、抗疲劳、抗衰老、抗肿瘤、调节免疫功能等都具有明显效果,尤其是独特的双向调节免疫功能对维护人体的健康起到至关重要的作用^[6]。

本文对杜仲籽油理化性质、化学组成和杜仲籽油粕特异成分及其检测技术研究进展进行了综述,以期对杜仲籽油及加工副产品研究和开发利用提供参考。

2 杜仲籽油的理化性质和化学成分

2.1 理化性质

食用油的理化指标主要包括折射率、相对密度、酸价、过氧化值、碘价和皂化价等。Shi 等^[3]对 6 个不同产地杜仲籽油品质参数检测,结果如表 1 所示^[3]。折射率是评价食用油品质的一项重要指标。在 25℃时杜仲籽油的折射率为 1.476~1.488。杜仲籽油的酸价的大小与很多因素有关,包括原料杜仲籽油的品种、制取杜仲籽油的工艺、运输和贮藏的条件等。研究发现杜仲籽油的酸价为 0.87~1.32 mg/g。过氧化值表示油脂和脂肪酸被氧化程度的评价指标,可以衡量油脂的酸败程度。通过测定其过氧化值来判断其质量和变质的程度,杜仲籽油的过氧化值为 1.65~2.10 mmol/kg,表明其具有较好的贮存稳定性和较高的可食性。碘价反映油脂不饱和程度,可作为食用油是否掺假判别指标。杜仲

籽油的碘价为 185.29~191.61 g/100 g。在高温条件下易发生氧化反应,碱性条件下易发生双键位置及构型的异构化反应,形成共轭多烯酸^[1],应避免高温烹饪,储藏过程中应低温、避光保存。

2.2 杜仲籽油化学成分

2.2.1 脂肪酸

杜仲籽油是富含多不饱和脂肪酸的植物油之一,含有多多种必需脂肪酸,其中 α -亚麻酸的含量最高。舒象满等^[7]采用气质的方法分析了杜仲籽油的脂肪酸组成,主要包括 α -亚麻酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸等。赵德义等^[8]利用气相色谱法对杜仲籽油和紫苏籽油脂肪酸组成进行了对比,结果表明杜仲籽油和紫苏籽油的脂肪酸组成相似,其中杜仲籽油中 α -亚麻酸占 62.95%,紫苏籽油中 α -亚麻酸占 61.20%。董娟娥^[9]等研究发现杜仲籽油多不饱和脂肪酸主要为 α -亚麻酸(56.5%)和亚油酸(12.6%)。Zhang 等^[10]测定杜仲籽油中含有 α -亚麻酸(56.51%)、油酸(18:1 n-9c, 15.80%)、亚油酸(12.66%)、棕榈酸(9.82%)、硬脂酸(2.59%)、棕榈油酸(1.06%)、油酸(18:1 n-7c, 1.06%)等 15 种脂肪酸。Du 等^[11]对来自我国 13 个地区 240 份杜仲籽油样品的脂肪酸组成进行分析,结果显示 α -亚麻酸(56.68%~60.70%)、油酸(16.31%~17.80%)、亚油酸(11.02%~13.32%)是杜仲籽油的主要脂肪酸。杜仲籽油富含多不饱和脂肪酸 α -亚麻酸,其含量与紫苏籽油与亚麻籽油相似^[12]。 α -亚麻酸是人体的必需脂肪酸,是体内各组织生物膜的结构材料,也是合成人体系列前列腺素的前体^[13],具有预防心脑血管病,降血脂,降血压,抑制癌症的发生和转移,抑制过敏反应和抗炎作用,抑制衰老,增强智力,保护智力等功效,是维持人体健康必需的营养物质^[14]。

2.2.2 植物甾醇

植物甾醇是一类重要的天然活性物质,是油脂种重要的抗氧化成分^[15],已被确认具有抗炎、退热、抗癌和阻碍胆固醇吸收等多种生理功能^[16]。杜仲籽油中总甾醇含量为 4032.38~5169.57 mg/kg,主要包括 β -谷甾醇和菜油甾醇,其中 β -谷甾醇是杜仲籽油中含量最高的植物甾醇,含量为 3591.49~4646.19 mg/kg^[3]。研究表明,植物甾醇具有一定的抗氧化作用,在避光的条件下其抗氧化作用具有一定的阈值,而在避光条件下,随着甾醇含量的增大,抗氧化作用增大,当其添加量达到一定程度时,抗氧化作用不再随着浓度的增大而增大,植物甾醇酯可阻止非酒精性脂肪性肝病^[17]。

表 1 杜仲籽油的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of *Eucommia ulmoides* seed oil

指标	折射率 (25 °C)	相对密度 (20 °C/水)	酸价 (KOH)/(mg/g)	过氧化值 (mmol/kg)	碘价 (g/100 g)	皂化值 (KOH)/(mg/g)
	1.476~1.488	0.9308~0.9317	0.87~1.32	1.65~2.10	185.29~191.61	189.32~193.3

2.2.3 生育酚

生育酚是天然脂溶性抗氧化剂维生素 E 的重要组成部分, 可以促进雌性激素的分泌, 广泛存在于各种植物油中。植物甾醇在食品、医药、化妆品等工业中都有广泛的应用^[18]。杜仲籽油生育酚总含量为 1078.33~1424.44 mg/kg^[3], 主要包括有 α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚、 δ -生育酚、 α -生育三烯醇、 β -生育三烯醇、 γ -生育三烯醇、 δ -生育三烯醇。 α -生育酚是一种植物中重要的内源生育酚, 具有较好的抗氧化作用。加强对油脂加热条件下的生育酚转化机制、降解机理和抗氧化研究, 可以充分发挥其营养健康功能^[19]。

2.3.3 其他微量成分

杜仲籽油含有铁(19.60~63.41 $\mu\text{g/g}$)、锌(22.69~30.48 $\mu\text{g/g}$)、铜(10.11~21.82 $\mu\text{g/g}$)等微量元素和钠(200.17~264.68 $\mu\text{g/g}$)、镁(28.17~63.41 $\mu\text{g/g}$)等常量元素^[3]。杜仲籽油粕包括钾、钠、钙、镁、磷、铁、锌、铜和硒等, 其中钾的含量最高, 为 11.2 g/kg。钙为 4.2 g/kg, 其含量是牛奶的 4 倍, 是大豆的 2.2 倍^[20]。

2.3 杜仲籽油粕特异成分

2.3.1 B 族维生素

杜仲籽油粕中含有 B 族维生素, 其中维生素 B₁ 的含量约为 6.0 mg/kg, 相当于燕麦片中维生素 B₁ 的含量, 维生素 B₂ 的含量为 3.18 mg/kg, 相当于鸡蛋, 比牛奶和大豆中的维生素 B₂ 的含量高^[21]。维生素 B₁ 和 B₂ 都是水溶性维生素, 人体缺乏维生素 B₁ 和 B₂, 会导致代谢紊乱引发多种疾病^[22]。因此, 加强杜仲籽油粕中 B 族维生素提取利用对提高加工附加值具有重要意义。

2.3.2 其他活性成分

作为药用植物杜仲的果实, 杜仲籽榨油副产品饼粕含有丰富的活性成分。李冉等^[1]则利用液相色谱串联质谱法可以同时检测杜仲中绿原酸、桃叶珊瑚苷、京尼平苷、京尼平苷酸这四种目标化合物的含量, 分别为 25.986、20.552、0.205、6.913 ng/mg。马蓁等^[21]杜仲籽油粕中桃叶珊瑚苷、总黄酮、绿原酸的含量分别为 137.6、0.61 和 1.00 g/kg。桃叶珊瑚苷是一种重要的生物活性物质, 是杜仲的生物活性成分之一, 具有清湿热、利小便、镇痛、降压、保肝护肝、抗肿瘤等作用。它能促进干细胞再生, 明显抑制乙型肝炎病毒 DNA 的复制, 其苷元及有效多聚体是一种抗菌素, 具有舒张血管的作用^[23], 对脂多糖诱导的血管内皮细胞炎症损伤具有保护作用^[24]。绿原酸作为一种天然酚类产物, 由于其抗氧化活性和金属螯合性能在除重金属(如镉)毒性方面具有重要作用^[25]。绿原酸可以清除体内的自由基, 具有较强的抗氧化作用, 具有抗菌抗病毒、抑制肿瘤的作用^[26], 可以调节糖、脂的代谢, 在养猪, 家禽, 渔业等这些养殖产业中具有很高的利用价值^[27]。京尼平苷是一种环烯醚萜葡萄糖苷, 对治疗消化系统、心血管系统、中枢神经系统疾病有显著作用, 可以改变胆汁成分, 对于阻止胆固醇结石的形成有一定作用^[28], 对对高饮食和链脲

佐菌素所致糖尿病认知障碍具有药理作用^[29]。根据杜仲籽油加工副产物饼粕中特异成分开发新产品, 改善加工工艺提高特异成分在杜仲籽油中的保留, 提高产品质量是今后研究的重点。

3 杜仲籽油中重要成分的检测方法

3.1 杜仲籽油脂肪酸组成检测

脂肪酸是杜仲籽油中最重要的一类物质, 不饱和脂肪酸的含量很高, 尤其是 α -亚麻酸, 此类不饱和脂肪酸人体内不能合成, 必须从膳食中获取, 因此杜仲籽油可以作为 α -亚麻酸的重要食物来源。传统上检测脂肪酸的方法主要有气相色谱法、气相质谱联用法、液相色谱法、液相色谱质谱联用技术等方法^[30]。杜仲籽油中脂肪酸组成一般采用甲酯化后进行气相色谱分析。章平平等^[31]采用直接酯化气相色谱-质谱法对 10 个产地杜仲籽脂肪酸组成进行分析, 测定了 6 种主要脂肪酸含量, 表明亚麻酸含量在 55.21%~61.49%。Zhang 等^[10]挖掘出脂肪酸甲酯质谱裂解规律, 利用特征离子建立了一种无需标准自动鉴定植物油中脂肪酸的方法, 测定杜仲籽油中 16 种脂肪酸, α -亚麻酸含量 56.51%。

近年来, Zhang 等^[32]采用 4 种特征离子建立了选择性离子扫描气相色谱质谱测定食用植物油中脂肪酸组成方法, 该方法可以实现食用油中 28 种以上脂肪酸定量检测, 可实现杜仲籽油中脂肪酸高灵敏检测。为了克服气相色谱法检测脂肪酸组成前处理过程复杂的不足, 牛倩倩^[33]建立了高效液相色谱-蒸发光散射检测法和高效液相色谱-激光诱导荧光检测法, 其中高效液相色谱-激光诱导荧光检测法实现了脂肪酸的良好分离, 最低检测限达到 10^{-8} mol/L。杨登辉等^[34]运用核磁共振氢谱法测定脂肪酸, 利用 ¹H NMR 谱图中不同共振峰与脂肪酸中氢核间的对应关系, 建立油脂脂肪酸质量分数的 ¹H NMR 测定方法, 结果表明此技术可代替气相色谱法用于脂肪酸组成的快速测定。

3.2 杜仲果仁含油量的测定

杜仲果仁含油量是杜仲籽油生产中原料的重要品质指标。传统测定含油量的方法是萃取抽提技术, 索氏提取法是从固体物质中萃取化合物的一种方法, 可用于杜仲籽油含油量的测定。曾有研究利用响应面优化工艺条件最终得出, 杜仲籽油的提取率在最佳的工艺条件下为 28.1%。但是此方法存在有机溶剂残留的问题, 且提取温度高, 提取时间久, 杜仲籽油中含有丰富的不饱和脂肪酸, 高温条件下容易被氧化, 会对杜仲籽油的品质造成影响^[35]。超临界萃取技术被广泛应用, 三酰基甘油酯在超临界二氧化碳中的溶解度较低, 可以通过添加乙醇等夹带剂的方法来提提高得油率^[36]。由于其萃取温度较低, 能够很好地保留提取物中的活性成分^[37], 将萃取和分离合而为一, 不仅提高了萃取效率, 降低能耗并且提高了生产效率, 在工业化的生

产中能够降低成本。20 世纪 70 年代, 国际许多学者就提出采用酶法提取植物油脂的方法, 同样可以用于杜仲籽油中含油量的测定。利用酶解法提取杜仲籽油所用到的酶的种类主要有植物水解酶、中性蛋白酶、碱性蛋白酶, 碱性蛋白酶效果最佳^[38]。与非酶法相比, 酶法的提取率较高且提取的油脂质量较好, 反应条件温和不会损害油脂中的活性成分^[39]。另外还可以使用近红外测定杜仲籽油的含油量, 刘培^[40]基于近红外光谱技术原理, 建立了含油量参数的分析模型。此方法简便快捷, 但是需要对仪器进行繁琐的校准工作。核磁共振技术在含油量测定中应用也很广泛, 肖新生等^[41]对不同型号的核磁共振仪在测定含油量中进行了对比, 比较了各仪器的优缺点。利用核磁共振技术测定含油量不但测量速度快, 而且原料不必干燥和称重, 避免了化学药物对工作人员的危害和对环境的污染。Wang 等^[42]利用动态高压微流化法对杜仲油 O/W 纳米乳进行了表征。

3.3 杜仲籽油中植物甾醇的检测

植物甾醇是植物中一种具有多重生理功能的活性成分, 具有降低血脂和胆固醇、消炎退热、抗肿瘤等生理功效^[43]。随着植物甾醇被广泛应用, 它的定性定量的检测就显得极为重要。传统检测植物甾醇总量测定的方法有重量法、酶法、可见光比色法、薄层层析法^[44]。近年来, 应用色谱分析对植物甾醇进行定性定量的分析, 如薄层色谱法、紫外高效液相色谱法、气相色谱法和气相色谱-质谱法。Shi 等^[3]采用硅烷化衍生和气相色谱-质谱联用法检测杜仲籽油中菜油甾醇和 β -谷甾醇的含量。近年来, Xu 等^[45,46]采用硅烷化衍生、固相萃取和全二维气相色谱飞行时间质谱建立了食用植物油中甾醇组成检测技术, 可实现植物油中 31 种甾醇和三萜醇的定量分析。最近开发出一种创新的植物甾醇衍生化方法来改进植物甾醇的高效液相色谱法, 采用的是二极管阵列检测器, 另外一种方法是电喷雾电离源的质谱检测^[47], 可用于杜仲果中更多种类甾醇的准确测定。

4 结语与展望

杜仲籽油的 α -亚麻酸的含量较高, 可作为多不饱和脂肪酸的营养源, 还含有植物甾醇、生育酚、微量元素等重要的营养成分。有报道杜仲果仁中含有绿原酸、桃叶珊瑚苷、京尼平苷和京尼平苷酸等特异营养功能成分, 其中绿原酸的含量最高为 25.986 ng/mg^[48]。因此, 开展检测技术研究发掘杜仲籽油中特异性营养功能成分, 并有针对性开发新型高附加值的特色食用油, 成为重要研究方向, 对杜仲籽油深度开发利用和市场推广具有重要的意义。

参考文献

- [1] 李冉, 齐芪, 李赞, 等. HPLC-MS/MS 检测杜仲中绿原酸等 4 种活性成分的分析方法[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(6): 123-129.
- [2] 朱莉伟, 陈素文, 蒋建新, 等. 杜仲种仁化学成分研究[J]. 中国野生植物资源, 2005, (2): 41-42, 45.
- [3] Shi LK, Chang M, Wang XG, et al. Physicochemical property, chemical composition and free radical scavenging capacity of cold pressed kernel oils obtained from different *Eucommia ulmoides* Oliver cultivars [J]. Ind Crop Prod, 2018, 124: 912-918.
- [4] 辛欣, 范青生, 罗眼科, 等. 杜仲籽油可食用性研究[J]. 中国油脂, 2007, (4): 15-19.
- [5] Xin X, Fan QS, Luo YK, et al. Study on edibility of *Eucommia ulmoides* Oliver seed oil [J]. China Oil Fat, 2007, (4): 15-19.
- [6] 王宏涛, 卫聪, 苏鹏, 等. 杜仲油软胶囊对模型大鼠血脂水平的调节作用[J]. 中国药业, 2019, 28(16): 20-22.
- [7] Wang HT, Wei C, Su P, et al. Effect of *Eucommia ulmoides* oil soft capsule on regulating the level of blood lipid in model rats [J]. China Pharm, 2019, 28(16): 20-22.
- [8] Xiang ZG, Li XH. Antioxidant activity *in vitro* of seed oil from *Eucommia ulmoides* oliver key fruits [J]. Food Sci, 2011, 32: 133-136.
- [9] 舒象满, 李加兴, 王小勇, 等. 杜仲籽油亚临界萃取工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2015, 40(6): 15-18.
- [10] Shu XM, Li JX, Wang XY, et al. Optimization of subcritical extraction of *Eucommia ulmoides* seed oil and its fatty acid composition analysis [J]. China Oil Fat, 2015, 40(6): 15-18.
- [11] 赵德义, 徐爱遐, 张博勇, 等. 杜仲籽油与紫苏籽油脂肪酸组成的比较研究[J]. 西北植物学报, 2005, (1): 191-193.
- [12] Zhao DY, Xu AX, Zhang BY, et al. Comparison of fatty acid component between *Eucommia Ulmoides* seed oil and *Perilla Frutescens* seed oil [J]. Acta Botan Boreali-Occid Sin, 2005, (1): 191-193.
- [13] 董娟娥, 马柏林, 张康健, 等. 杜仲籽油中 α -亚麻酸的含量及其生理功能[J]. 西北林学院学报, 2002, (2): 73-75.
- [14] Dong JE, Ma BL, Zhang KJ, et al. Contents and active function of α -linolenic in *Eucommia ulmoides* seed oil [J]. J Northwest Forestry Univ, 2002, (2): 73-75.
- [15] Zhang LX, Ji XY, Tan BB, et al. Identification of the composition of fatty acids in *Eucommia ulmoides* seed oil by fraction chain length and mass spectrometry [J]. Food Chem, 2009, 121(3): 815-819.
- [16] Du QX, Wang L, Liu PF, et al. Fatty acids variation in seed of *Eucommia ulmoides* populations collected from different regions in China [J]. Forests, 2018, 9: 505.
- [17] Sun XM, Zhang LX, Li PW, et al. Fatty acid profiles based adulteration detection for flaxseed oil by gas chromatography mass spectrometry [J]. LWT Food Sci Technol, 2015, 63: 430-436.
- [18] 陶国琴, 李晨. α -亚麻酸的保健功效及应用[J]. 食品科学, 2000, (12): 140-143.
- [19] Tao GQ, Li C. The health benefits and application of α -linolenic acid [J]. Food Sci, 2000, (12): 140-143.
- [20] 李冀新, 张超, 罗小玲. α -亚麻酸研究进展[J]. 粮食与油脂, 2006, (2): 10-12.
- [21] Li JX, Zhang C, Luo XL. Research advances of α -linolenic acid [J]. Cere Oil, 2006, (2): 10-12.
- [22] Demonty I, Ras RT, Vander-Knap HC, et al. Continuous dose-response

- relationship of the LDL-cholesterol-lowering effect of phytosterol intake [J]. *J Nutr*, 2009, 139(2): 205–207.
- [16] Choudhary SP, Tran LS. Phytosterols: Perspectives in human nutrition and clinical therapy [J]. *Curr Med Chem*, 2011, 18(29): 4557–4567.
- [17] Song LH, Li YT, Qu D, *et al.* The regulatory effects of phytosterol esters (PSEs) on gut flora and faecal metabolites in rats with NAFLD [J]. *Food Funct*, 2020, 11: 977–991.
- [18] 刘军海, 裘爱泳, 张海晖. 植物甾醇酯和植物甾烷醇酯制取及应用[J]. *粮食与油脂*, 2004, (1): 41–43.
Liu JH, Qiu AY, Zhang HH. Preparation and application of phytosterol and phytostanol esters [J]. *Cere Oil*, 2004, (1): 41–43.
- [19] 周洋, 杨文婧, 操丽丽, 等. 生育酚抑制油脂氧化机制研究进展[J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 32–38.
Zhou Y, Yang WJ, Cao LL, *et al.* Progress in mechanism of tocopherol inhibiting oil oxidation [J]. *China Oil Fat*, 2018, 43(8): 32–38.
- [20] Soba D, Müller M, Aranjuelo I, *et al.* Vitamin E in legume nodules: Occurrence and antioxidant function [J]. *Phytochemistry*, 2020, 172: 112261.
- [21] 马蓁, 谢马辉, 蔡雪刁, 等. 杜仲籽油粕营养成分研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44: 206–210.
Ma F, Xie MH, Cai XD, *et al.* Nutritional constituents in oil meal of *Eucommia ulmoides* seed [J]. *J Northwest AF Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 44: 206–210.
- [22] 熊善柏, 董汉萍, 赵思明, 等. 稻米加工与维生素损失[J]. *粮食与油脂*, 2001, (5): 1–3.
Xiong SB, Dong HP, Zhao SM, *et al.* Rice processing and vitamin loss [J]. *Cereal Oil*, 2001, (5): 1–3.
- [23] 张冬璇, 王家龙, 瞿晶田. 桃叶珊瑚苷舒张血管作用机制研究[J]. *吉林中医药*, 2020, 40(2): 227–229.
Zhang DX, Wang JL, Qu JT. Study on the mechanism of vasodilation of aucubin [J]. *Jilin J Tradit Chin Med*, 2020, 40(2): 227–229.
- [24] 朱振家, 钱之玉, 陆莉华, 等. 梔子提取物京尼平苷和西红花苷利胆作用的研究[J]. *中草药*, 1999, (11): 841–843.
Zhu ZJ, Qian ZY, Lu LH, *et al.* Studies of geniposide and crocins from cape jasmine (*Gardenia Jasminoides*) on the biliary secretion in rat [J]. *Chin Tradit Herbal Drug*, 1999, (11): 841–843.
- [25] Yao CY, Ding YX, Li PF, *et al.* Effects of chlorogenic acid on the binding process of cadmium with bovine serum albumin: A multi-spectroscopic and docking study [J]. *J Mol Struct*, 2020, 1204(C).
- [26] 韦良开, 李瑞, 陈凤鸣, 等. 绿原酸的生物学功能及在养殖业中应用研究[J]. *饲料工业*, 2019, 40(1): 22–26.
Wei LK, Li R, Chen FM, *et al.* Research and application of chlorogenic acid substances biological function in animal production [J]. *Feed Ind*, 2019, 40(1): 22–26.
- [27] 沈晓飞, 王祎. 桃叶珊瑚苷对脂多糖诱导的血管内皮细胞炎症损伤的保护作用[J]. *华西药理学杂志*, 2019, 34(5): 458–462.
Shen XF, Wang Y. Protective effect of aucubin against lipopolysaccharide-induced human umbilical vein endothelial cells injury [J]. *West China J Pharm Sci*, 2019, 34(5): 458–462.
- [28] Liu SN, Zheng ML, Li YX, *et al.* The protective effect of *Geniposide* on diabetic cognitive impairment through BTK/TLR4/NF- κ B pathway [J]. *Psychopharmacology*, 2020, 237: 465–477.
- [29] 田硕, 刘建学, 韩四海, 等. 食用植物油中脂肪酸检测方法研究进展[J]. *农产品加工(学刊)*, 2013, (17): 49–51.
Tian S, Liu JX, Han SH, *et al.* Research advance of oil fatty acid of edible vegetable detection methods [J]. *Acad Period Farm Prod Proc*, 2013, (17): 49–51.
- [30] 邓莉, 何静仁, 何毅, 等. 气相色谱-质谱联用法测定植物油中脂肪酸组成[J]. *中国调味品*, 2019, 44(6): 157–159, 167.
Deng L, He JR, He Y, *et al.* Determination of fatty acid composition in vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chin Cond*, 2019, 44(6): 157–159, 167.
- [31] 章平平, 唐传球. 直接酯化耦合 GC-MS 快速分析不同产地杜仲籽的脂肪酸组成及亚麻酸含量[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(11): 53–55.
Zhang PP, Tang CQ. GC-MS analysis of fatty acids composition and α -linolenic acid content of eucommialmodies seeds from different growing areas with a direct methyl-ester method [J]. *Grain Oil*, 2016, 29(11): 53–55.
- [32] Zhang LX, Li PW, Sun XM, *et al.* Untargeted fatty acid profiles based on the selected ion monitoring mode [J]. *Anal Chim Acta*, 2014, 839: 44–50.
- [33] 牛倩倩. 植物油中脂肪酸检测新方法的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
Niu QQ. New methods of detection for fatty acids in vegetable oil [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.
- [34] 杨登辉, 王鹤达, 江秀明, 等. 核磁共振质谱法测定食用油中的脂肪酸含量[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 13–17.
Yang DH, Wang HD, Jiang XM, *et al.* Determination of Fatty acid contents in edible oils by 1H nuclear magnetic resonance technology [J]. *J Henan Univ Tech (Nat Sci Ed)*, 2019, 40(5): 13–17.
- [35] 朱振宝, 刘旷, 易建华, 等. 3 种不同方法提取大扁杏仁油脂性质比较[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(2): 57–60.
Zhu ZB, Liu K, Yi JH, *et al.* Comparative research on the properties of three different extraction methods of almonds oil from prunus armeniaca lin [J]. *J Chin Cere Oil Ass*, 2015, 30(2): 57–60.
- [36] Teixeira GL, Ghazani SM, Corazza ML, *et al.* Assessment of subcritical propane, supercritical CO₂ and Soxhlet extraction of oil from sapucaia (*Lecythispisonis*) nuts [J]. *J Supercrit Flu*, 2018, 133: 122–132.
- [37] 王小媛, 马宝晨, 纵伟. 不同提取方法对杜仲籽油质量的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 119–124.
Wang XY, Ma BC, Zong W. Effects of different extraction methods on the quality of *Eucommia ulmoides* fruit oil [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2019, 40(23): 119–124.
- [38] 谢鑫, 杨青, 万莹, 等. 杜仲籽油的水酶法提取工艺研究[J]. *食品科技*, 2012, 37(6): 205–208.
Xie X, Yang Q, Wan Y, *et al.* Extraction of eucommia seed oil with aqueous enzymatic [J]. *Food Sci Technol*, 2012, 37(6): 205–208.
- [39] 王瑛瑶. 水酶法从花生中提取油与水解蛋白的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
Wang YY. Investigation of aqueous enzymatic extracting of peanut oil and protein hydrolysates [D]. Wuxi: Jiangnan Univeristy, 2005.
- [40] 刘培. 油菜品质多参数近红外检测技术的建立与应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
Liu P. Determination of quality parameters in intact rapeseed by portable NIRS analyzer [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [41] 肖新生, 杨交如, 唐满生, 等. 核磁共振技术在食用油脂分析中的应用

- 研究进展[J]. 中国油脂, 2018, 43(12): 134–139.
- Xiao XS, Yang JR, Tang MS, *et al.* Advance in the application of NMR technology in edible oil analysis [J]. *China Oil Fat*, 2018, 43(12): 134–139.
- [42] Wang SS, Wang XY, Liu MP, *et al.* Preparation and characterization of *Eucommia ulmoides* seed oil O/W nanoemulsion by dynamic high-pressure microfluidization [J]. *LWT*, 2020, 121(C).
- [43] Robert A, Moreau BD, Whitaker KB, *et al.* Phytosterols, and their conjugates in food: Structural diversity, quantitative analysis and health – promoting uses [J]. *Prog Lipid Res*, 2010, 101: 1471–1476.
- [44] 石馨, 魏雪冬, 刘波, 等. 植物甾醇的应用及检测方法研究进展[J]. 中国乳业, 2014, (6): 59–61.
- Shi X, Wei XD, Liu B, *et al.* Advancements of study on application and detection of plant sterol [J]. *Chin Dairy Ind*, 2014, (6): 59–61.
- [45] Xu BC, Zhang LX, Ma F, *et al.* Determination of free steroidal compounds in vegetable oils by comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time-of-flight mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2018, 245: 415–425.
- [46] Xu BC, Li PW, Ma F, *et al.* Detection of virgin coconut oil adulteration with animal fats using quantitative cholesterol by GC-TOF/MS analysis [J]. *Food Chem*, 2015, 178: 128–135.
- [47] Franks KN, Giovanni C, Massimo R, *et al.* Development of an innovative phytosterol derivatization method to improve the HPLC-DAD analysis and the ESI-MS detection of plant sterols/stanols [J]. *Food Res Int*, 2020, 131: 131.
- [48] 杨小梅, 高平平, 刘建斌, 等. HPLC 法测定杜仲仁中桃叶珊瑚苷的含量[J]. 中草药, 2003, 34(10): U007–U009.
- Yang XM, Shang PP, Liu JB, *et al.* Detection of aucubin in *Eucommia ulmoides* seed by HPLC [J]. *Chin Trad Herb Drug*, 2003, 34(10): U007–U009.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



张 瑜, 硕士, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 15110662878@163.com



张良晓, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为油料产品特异品质检测与真实性鉴别。

E-mail: liangxiao_zhang@hotmail.com