



油茶加工剩余物高值化综合利用研究进展

张静¹, 张舒怡¹, 周妙¹, 刘力恒², 林剑飞¹, 贺璐¹, 张骥¹, 范国荣¹, 彭大勇¹, 陈尚钊^{1*}

1. 江西农业大学林学院, 国家林业草原木本香料(华东)工程技术研究中心, 江西乡土树种良种选育与高效利用江西省重点实验室, 南昌 330045

2. 新余学院新能源科学与工程学院, 新余 338004

* 联系人, E-mail: csxing@jxau.edu.cn

收稿日期: 2025-07-27; 接受日期: 2025-10-27; 网络版发表日期: 2025-11-04

中央引导地方科技发展专项资金(批准号: 20241ZDF02086)、江西省重点研发计划(批准号: 20233BBF64006)、江西省林业局油茶专项(批准号: YCYJZX(2023)321)、江西省林业局科技创新项目(批准号: 创新专项[2024]3号)和江西省自然科学基金(批准号: 20242BAB25387)资助

摘要 油茶(*Camellia oleifera*)作为我国特色木本油料资源, 其加工剩余物(果壳、饼粕、枝叶)的资源化利用对生物质精炼与循环经济发展具有重要意义. 油茶加工剩余物中富含木质纤维及油茶皂素、蛋白、多糖、多酚等活性组分, 但因多组分交互作用显著、提取分离效率低, 传统技术难以实现全质转化. 本文按照油茶加工剩余物的分类体系归纳现有活性成分提取分离技术及衍生产品的研究进展, 综述了油茶皂素、蛋白质、多酚、多糖等天然产物的结构特征、提取工艺、加工技术及其产品应用, 深入剖析油茶加工剩余物高值化综合利用面临的挑战, 提出了针对性解决策略及未来发展方向, 以期拓宽油茶副产物深加工利用途径, 带动油茶种植、采收、加工全产业链可持续发展提供理论指导.

关键词 油茶果壳, 油茶饼粕, 提取分离技术, 高值化应用, 应用前景

油茶(*Camellia oleifera*), 是山茶科山茶属的一种常绿小乔木或灌木, 也是我国特有的木本油料作物^[1], 其果实提取出的茶油含有角鲨烯、植物甾醇、多酚等多种活性物质^[2], 具有极高的价值. 然而, 在茶油加工过程中的剩余物, 如油茶果壳、油茶籽粕、油茶枝叶等, 目前尚未得到充分利用. 近年来, 党中央、国务院高度重视油茶产业发展, 国家林业和草原局、国家发展和改革委员会、财政部联合出台《加快油茶产业发展三年行动方案(2023—2025年)》(林改发〔2022〕130号)等一系列政策文件, 大力推动油茶产业发展.

2025年, 全国油茶种植面积计划达到9000万亩, 但油茶加工剩余物综合利用率不足30%^[3,4]. 这些加工剩余物中普遍含有木质纤维素、油茶皂素、油茶蛋白、多糖、多酚等高附加值成分, 例如, 油茶皂素具有良好的表面活性和多种药理活性, 多酚类物质是重要的天然抗氧化剂, 油茶蛋白则具有较高的营养价值. 目前常见的提取技术普遍存在效率、环保和成本制约问题, 技术瓶颈和产业规模推高工艺成本与能耗. 所以油茶加工剩余物受限于分离提取技术单一和产业链纵向延伸的缺陷, 当前多被用于植物堆肥、动物饲料、燃料

引用格式: 张静, 张舒怡, 周妙, 等. 油茶加工剩余物高值化综合利用研究进展. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 2250–2267

Zhang J, Zhang S Y, Zhou M, et al. Research progress on high-value utilization of *Camellia oleifera* processing residues (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 2250–2267, doi: 10.1360/SSV-2025-0235

等方面,造成生物质资源未得到有效配置与增值转化.因此,拓宽研究油茶加工剩余物的高值化利用途径,革新企业技术,助力行业升级,带动油茶全产业链可持续发展,是油茶行业加工利用的“最后一环”,亦是这场田间地头产业革命的终极目标.油茶加工副产物的高值化利用是实现农业废弃物“减碳增汇”的关键切入点.通过技术创新与政策引导,可将其转化为生物能源和功能材料助力“双碳”目标的阶段性实现.此类研究不仅为油茶产业增值提供技术支撑,更为农林废弃物高值化资源化利用树立了可复制的范式.

1 油茶加工剩余物分类与理化特性

油茶果实由油茶籽和油茶果壳两部分组成,其中油茶籽又由种皮和果仁两部分组成,籽仁(干基)含油量为39.6%~65.3%,而果壳中的含油量较少,故在压榨过程中会进行脱壳预处理^[5].在油茶加工过程中,根据最终呈现形态,加工剩余物可以分为油茶果壳、油茶饼粕(饼为油茶籽压榨得油后的圆形块状物,粕为油茶饼被有机溶剂浸提二次提油后的剩余物)、油茶枝叶三类.

1.1 油茶果壳

油茶果壳由外果壳、中果壳和内果壳组成,各层均具有显著的多孔结构.其主要化学组成为木质素、半纤维素和纤维素,除此之外,还有少量油茶皂素与单宁,但其木质纤维的组成特征与典型木材材料存在明显差异^[6].常见农林生物质中通常以纤维素(35%~50%)和半纤维素(25%~35%)为主要组分,而油茶果壳中木质素与半纤维素含量显著高于纤维素(表1),这意味着它的木质化程度较高^[7].木质素在薄壁组织细胞壁中与多糖呈交替分布,而在厚壁组织细胞中,半纤维素主要存在于次生壁S2层,木质素主要分布在复合胞间层,纤维素则主要存在于次生壁S3层^[8].这种复杂的细胞壁结构和非均一的成分分布,为油茶果壳的梯级利用提供了基础理解,也对其后续的提取和转化过程提出了挑战.油茶果壳中的木质纤维素是制备生物质材料、生物燃料和平台化合物的潜在原料^[9].

1.2 油茶饼粕

油茶籽粕是油茶籽榨油后的固体残渣,是油茶加

表 1 油茶壳中主要化合物含量

Table 1 The content of main compounds in *Camellia oleifera* shells

成分	物质	含量(%)
木质纤维	纤维素	13.9~21.0
	半纤维素	23.5~31.6
	木质素	30.1~36.2
活性提取物	皂苷	2.8~5.0
	黄酮	16.1~20.9

工剩余物中产量最大、活性成分含量相对集中的部分.饼粕主要成分有纤维素、蛋白质、多糖、多酚、油茶皂素等,其中蛋白质含量占10%~15%,油茶皂素占10%~15%,多糖占20%~40%^[10].

油茶皂素是油茶籽粕中最具代表性的高附加值成分之一,属于五环三萜类化合物,其相对分子质量为1200左右,属于大分子化合物,广泛存在于油茶、山茶等山茶科植物中.油茶皂素由有机酸、疏水性萆元和亲水性糖基组成,使得油茶皂素具有发泡、乳化、分散等多种表面活性.油茶皂素在体内、外均有较好的抗氧化活性.在体外抗氧化实验中,油茶皂素对羟基有明显的清除作用,粗品油茶皂素(纯度为24%)对于ABTS自由基的清除率为46.32%,高纯度油茶皂素(纯度为80%)对于ABTS自由基的清除率为75.71%^[11],清除率的显著差异直接证实,随着油茶皂素纯度的提高,其分子中具有抗氧化活性的有效官能团(萆元上的酚羟基等)密度相应增加,从而导致了更强的自由基清除能力.油茶皂素还具有降血压、降血脂、溶血、抗癌、抑菌、消炎等作用,已广泛应用于食品、医药、农业、日用化工等多个领域.然而,油茶籽粕成分复杂,且活性成分常与木质纤维素等大分子物质紧密结合,这给其高效提取和纯化带来了技术难题.

油茶蛋白是油茶籽粕中的另一重要成分,可作为植物蛋白资源进行开发利用.油茶饼粕中多数蛋白具有良好的水溶性,比如白蛋白和谷蛋白.油茶饼粕蛋白还具有较强的抗氧化活性,对羟自由基、DPPH自由基均有较明显的清除作用,蛋白水解液的DPPH自由基清除率最高值达59%,且呈现出浓度依赖性关系,还能螯合金属离子.饼粕植物蛋白作为良好的蛋白质原料,在生活中可应用于蛋白质添加剂或者动物蛋白替代品.

此外,油茶籽粕中还含有一定量的残余油脂、多糖和多酚等成分.其中,多糖类物质部分具有特殊的

生物活性,由多个单糖组成,比如鼠李糖、木糖、甘露糖、葡萄糖等,但每个单糖又有多个连接位点,苷糖键的位置存在多种,导致最后形成的结构不同.同时,多糖还会存在一些特殊的硫酸根、磷酸基团、吡喃等结构.在此基础上,各侧链通过非共价键相互结合作用,使得茶籽多糖结构更为复杂.对于多糖而言,经过实验得到证实的功能则少之又少,且主要集中在促进生长和抗氧化两方面^[12].朱良等人^[13]在生长猪日粮中添加茶籽多糖,多糖能够提高肠道中消化酶的活性,促进营养物质的消化吸收和代谢,促进蛋白质的合成,有利于改善生长猪的生长性能.在抗氧化方面,有研究发现多糖的存在减弱了羟基自由基对DNA的氧化损伤程度,从而具有抗氧化作用^[14].

多酚类化合物是一类广泛存在于植物中的天然有机化合物,在油茶饼粕中主要是没食子酸、儿茶素、表儿茶素、槲皮素、3,4-二羟基苯乙酸和山茶甙等化合物.多酚类化合物对ABTS自由基清除能力较为明显,抗氧化活性高.多酚类物质还具有抗菌、抗癌等作用,还可以有效抑制酪氨酸酶和黑色素合成,可作为美白护肤产品的有效成分进行开发^[10].叶洲辰等人^[15]利用茶饼提取物来测定FRAP还原能力,反应体系中样品溶液体积在0~500 μL 内还原能力显著提升.黄酮类化合物可以调控核心微生物菌群的数量特征及结构组成,介导与肠道上皮细胞和黏液屏障相关的肠道菌群等或其代谢产物,以此来优化肠道屏障保护^[16].

1.3 油茶枝叶

在油茶生长过程中,通过光合作用在叶部位为油茶生长提供能量和碳水化合物,同时又以蒸腾作用将根部吸收的矿质营养运输到地上^[17].油茶枝叶不仅含有脂肪、蛋白质、糖类、氨基酸、叶绿素等成分,还含有丰富的油茶皂素、多酚等活性成分.这些成分的存在使得油茶加工剩余物成为一个潜在的“生物利用”平台,通过分离提取不同的组分,可以实现多产品的协同生产,最大化其利用价值.

总体而言,油茶果壳、油茶籽粕和油茶枝叶作为油茶加工的主要剩余物,其丰富的木质纤维素和多种天然活性成分使其具备了高值化利用的巨大潜力.深入研究其详细的化学组成、结构特征以及不同成分的赋存状态,是开发高效、环保利用技术的先决条件.

2 主要活性成分的提取分离技术研究进展

油茶加工剩余物中除了木质纤维素外,还含有多天然活性物质,例如,油茶蛋白、油茶皂素、多糖、多酚等天然活性成分,具有抗氧化、抗菌、抑菌、抗癌、溶血、消炎等作用.近年来,随着绿色化学和生物物质新质生产理念深入人心,油茶加工剩余物的提取、纯化及产品开发技术取得了卓越的进展.

从油茶加工剩余物中提取油茶皂素、油茶蛋白、多糖、多酚等天然活性成分是实现其高值化利用的关键步骤.传统的提取方法,如水提法、有机溶剂萃取法、加热回流法等,通常存在提取效率低、提取时间长、能耗高、溶剂消耗大、环境污染风险高、选择性差、易破坏热敏性成分等问题.为了克服这些缺点,研究人员开发了多种新型提取分离技术,为油茶加工剩余物的高值化利用提供了新的可能.

2.1 油茶皂素的提取分离技术研究进展

油茶皂素是一种齐墩果烷型五环三萜皂苷,由皂苷元、糖体和有机酸三部分组成,其中糖基多携带游离羟基,末端糖可能连接羧基,形成两性亲性结构^[18-20],化学结构式见图1^[21].但其分子基团在不同品种间差异较大,甚至同一品种由于环境的变化也会产生差异.因此,它不同于其他稳定性化合物,难以通过常规的萃取、结晶、层析等单一手段得到高纯度油茶皂素.

目前,油茶皂素的提取和纯化方法可简单分为三类:物理法、化学法、物理化学法.随着油茶皂素产业的迅猛发展,其提取技术也在不断改进、发展和完善,主要的油茶皂素提取技术包括完全水提法、有机溶剂法、水提醇沉法、闪式提取法、微波辅助提取法、超声波辅助提取法和超临界萃取法^[22].常见的提纯方法有化学沉淀法、重结晶法、双水相萃取法、大孔树脂纯化法及膜分离法.每种方法都有其独特的优势和局限性,如表2所示.

油茶皂素作为油茶粕中的重要提取物,其提纯技术层层递进.最常用的方法是利用油茶皂素的水溶性使用完全水提法提取油茶皂素,该操作简单、成本低、可操作性强.但该方法面临提取率低、纯度低、杂质共溶、长时间高温导致皂苷变性等问题.这些局限性促使研究者转向利用油茶皂素在特定极性溶剂中溶解度和选择性更高的特性,发展出有机溶剂提取法.

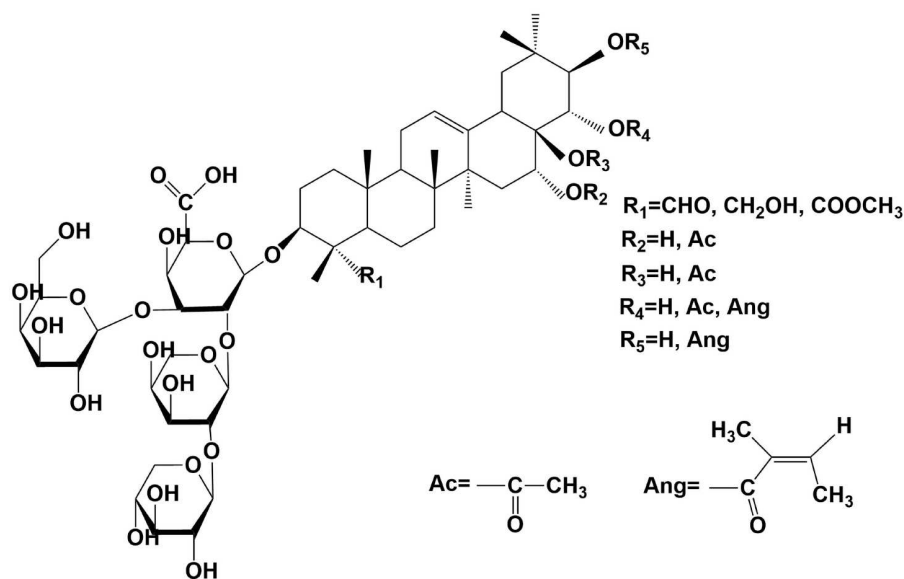


图 1 油茶皂素分子结构式

Figure 1 Molecular structural formula of tea saponin

采用乙醇、正丙醇等溶剂后,提取率显著提升至15%~25%,纯度达到50%~65%。然而,有机溶剂法引入了新的瓶颈:有机溶剂成本高昂,存在毒性残留风险,且对色素、黄酮等极性相近杂质的分离选择性仍显不足。

为解决有机溶剂效率与环保问题,物理辅助提取技术作为重要分支迅速发展起来。这类技术通过外部能量精准作用,破坏原料细胞结构并强化传质过程。例如,超声波辅助提取法,依靠空化效应产生局部高压、高温和强烈剪切力,强力破碎油茶粕细胞壁,显著缩短提取时间至数十分钟,并在乙醇体系中提高得率20%~30%;微波辅助提取法则利用微波能被极性分子吸收引发内加热,使细胞内部迅速升温汽化并冲破细胞壁,将提取时间压缩至几分钟;超高压辅助提取法在常温高压下不可逆损伤细胞结构,最大程度保护热敏成分,但设备昂贵且规模化困难。这些物理辅助技术虽大幅提升效率,却未能根本解决溶剂依赖性和选择性分离的挑战。

针对有机溶剂的环保与选择性瓶颈,溶剂与分离体系创新成为另一条突破路径。闪式提取法结合高速机械剪切与溶剂渗透,在极短时间内粉碎物料并释放成分,效率高且溶剂用量少,但对纤维含量高的油茶粕适用性受限。低共熔溶剂法通过设计氢键受体与供

体的组合,形成可调节极性、低毒、不易燃的绿色溶剂体系,在选择性溶解皂苷方面展现出潜力,但其高黏度影响传质,且回收技术尚未成熟制约了工业化。双水相萃取法则利用聚合物-盐或醇-盐体系形成两相,使亲水的油茶皂素选择性分配至醇相,纯度可达70%以上,但引入的盐或聚合物增加了后续分离负担。超临界 CO_2 萃取法虽具有绿色、温和的优势,却因高压设备的高成本使其难以大规模应用于皂素提取。

在获得粗品提取物后,以获得高纯度油茶皂素为目标的纯化技术逐步丰富。大孔吸附树脂法凭借其高比表面积和可调控的表面化学性质,成为目前工业化制备高纯度油茶皂素的核心手段之一。其中,AB-8型树脂凭借自身良好的吸附效果成为该工艺的代表,通过动态吸附与乙醇梯度洗脱,可高效捕获并释放皂素分子。然而,要获得纯度大于95%的极高纯度皂素或分离单体,仍需集成分离分析数种工艺。例如,“膜分离-树脂吸附”串联技术:先通过超滤去除大分子蛋白与多糖,再经纳滤脱盐浓缩,最后利用树脂吸附精制,可将纯度稳定提升至90%以上,同时降低溶剂消耗40%。Zhao等人^[23]将AB-8型大孔树脂和Sephadex G-15葡萄糖凝胶色谱相结合,当样品的上样量为1 BV,上样溶液为25 mg/mL、溶液pH为5、洗脱体积为4 BV,流速为3 BV/h,洗脱液乙醇浓度为95%,洗脱液pH为9时,得

表 2 油茶皂素的主要提取和纯化方法^{a)}
Table 2 The main extraction and purification methods of tea saponin^{a)}

提取方法	特点	提取条件	得率(%)	纯度(%)
完全水提法	生产工艺简单安全, 缺点是产品纯度低、颜色深、效果差	80℃、6 h、pH为9、液料比(1:11, w/v) ^[25]	95.50	—
有机溶剂法	得率和纯度较高, 工艺成熟, 成本适中, 缺点是对生产安全与环保要求较高, 且存在溶剂残留问题	乙醇(75%, v/v)、75℃、75 min料液比(1:13, w/v) ^[26]	10.32	—
		正丁醇(90%, v/v)、75℃、90 min、液料比(1:1.79, w/v)、提取3次 ^[27]	5.09	47.15
		甲醇(80%, v/v)、55℃、150 min ^[28]	11.61	39.56
闪式提取法	提取时间短、提取效率高、操作简便	乙醇(78%, v/v)、25℃、40 s、料液比(1:20, w/v) ^[29]	21.09	—
低共熔溶剂法	提取物抗氧化活性显著高于传统乙醇提取物	癸酸-壬酸(摩尔比3:1)、50℃、20 min、料液比(1:4, w/v) ^[30]	13.60	—
		L-脯氨酸、甘油和蔗糖(摩尔比4:10:1) ^[31]	23.22	—
微波辅助提取法	耗时短, 试剂消耗少, 浸提得率高, 但对设备要求过高且前期投入过高	乙醇(90%, v/v)、功率539 W、7 min、料液比(1:50, w/v) ^[32]	18.56	—
超声波辅助提取法	降低能耗、提高提取率、缩短提取时间	乙醇(80%, v/v)、功率400 W、40 min、50℃、料液比(1:8, w/v) ^[33]	13.27	—
超高压法	设备自动化程度高、提取时间短	提取压力308 MPa、8.5 min、乙醇(65%, v/v)、料液比(1:20, w/v) ^[34]	19.87	—
超临界萃取法	萃取能力强, 效率高, 纯度高, 缺点是需要高压密闭的条件下操作, 萃取条件苛刻	乙醇(65%, v/v)、25 MPa、3 h、50℃、CO ₂ 流量25~30 L/h ^[35]	15.23	78.65
膜分离法	分离效果好、耗能低、清洁无污染, 缺点是膜通透量下降严重, 生产成本低	膜孔径8000 Da、油茶皂素质量浓度为10 g/L、膜压力为4 bar ^[36]	—	96.31
两级泡沫分馏法	产量高、成本低、无污染	第一阶段: pH为2.06、65℃、表层气流速为150 mL/min 第二阶段: 30℃、表层气流速为200 mL/min ^[37]	80.10	—
双水相萃取法	分相时间短, 界面张力小, 缺点在于操作繁琐, 有机溶剂对环境危害较大	正丙醇(9%, w/w)、硫酸铵(11%, w/w)、20℃ ^[38]	—	83.72
大孔树脂纯化法	物化稳定性高、吸附选择性好、工艺简单, 缺点是树脂损耗大、生产成本低	D-101型、乙醇(70%, v/v)、上样浓度为10 mg/mL、上样流速4 BV/h、洗脱流速3 BV/h ^[39]	72.04	97.70

a) “—”表示未见报道

到的油茶皂素纯度高达82.5%。常见提取方法中, 也会使用膜分离法, 但由于膜通透量下降严重, 生产成本低的问题, 导致该方法存在很大的局限性, 研究较少。周昊等人^[24]采用陶瓷膜与大孔树脂吸附联用技术, 分离纯化油茶饼粕提取液中的油茶皂素, 得到的产品纯度高, 色泽好, 总油茶皂素质量分数大于95%。这些方法为油皂素的高效绿色提取纯化作出了巨大贡献。

2.2 油茶蛋白的提取技术研究进展

油茶粕是茶油加工过程中产生的副产物, 含10%~20%优质蛋白, 但目前利用率较低。提取技术需兼顾纯度、成本、效率与环保。目前普遍使用的方法包括碱溶酸沉法、酶辅助法及超声辅助法, 这三类技术在不同发展阶段各有突破, 并存在不同局限性。碱溶酸沉法是利用蛋白质在碱性溶液中溶解度较大, 在酸性

溶液中易沉淀的特性进行提取, 通常在植物蛋白提取中使用。林莉等人^[40]采用该方法提取脱脂油茶饼中的蛋白质, 在料液比1:20、浸提时间80.22 min、浸提温度为59.35℃、pH为8.29工艺下, 蛋白质提取率为65.21%。杨晓莉等人^[41]优化该工艺, 确定料液比1:10、碱提pH为8.0时, 蛋白质提取率为75.8%, 并通过控制酸沉pH为4.5, 可得到高纯度11S球蛋白; 丁丹华等人^[42]利用该法, 在料液比1:25、pH为10、浸提时间80 min、浸提温度45℃的实验条件下, 得到油茶籽粕蛋白提取率为57.8%。相较于化学法, 环境友好的生物酶法提供了另一种思路, 以解决碱溶酸沉法可能存在的化学试剂残留问题。酶法提取是通过酶解作用破坏油茶籽或油茶粕的细胞壁结构、降解抗营养因子(如皂素, 纤维素等), 从而提高蛋白溶出率和功能特性的技术。该方法具有条件温和、专一性强、环境友好等优势, 已成

为油茶蛋白提取的研究热点之一. 吴建宝等人^[43]利用水酶法提取油茶粕蛋白, 在料液比1:5, 酶解pH为8、加酶量1.5%、酶解时间4 h、反应温度60℃条件下进行验证实验, 测得油茶籽蛋白得率为82.28%; 为了提高效率, 超声辅助法利用自身空化效应、机械振动等特性, 破坏油茶籽细胞结构. 该方法的特性弥补了传统工艺提取周期长、提取率低的短板, 为油茶蛋白提取多元化提供新方向. 朱静等人^[44]通过超声辅助酶解工艺提取油茶粕粗蛋白, 发现当淀粉酶和纤维素酶添加量分别为2.5%和0.9%、酶解时间150 min、酶解pH为4.5、酶解温度50℃, 超声功率350 W, 超声时间60 min的条件下, 蛋白质的提取率最高, 可达83.3%.

2.3 多糖的提取技术研究进展

油茶饼粕中含20%~30%多糖类化合物, 目前证实主要由甘露糖、鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖和木糖等组成^[45]. 研究表明, 油茶多糖具有抗氧化^[46]、降血糖^[47]、抗肿瘤^[48]、抗凝血、提高免疫活性^[49]等多种生物学功能. 植物多糖主要通过其结构特征和多种生物作用机制实现抗氧化作用, 即多糖分子中的羟基、醛基等活性基团可直接与自由基反应, 从而有效清除自由基, 抑制氧化反应或螯合金属离子(如Fe²⁺)来抑制脂质过氧化, 从而发挥综合抗氧化作用. 在油茶不同部位多糖的得率和抗氧化活性不同, Feng等人^[50]发现油茶花、叶、籽饼和果壳中, 多糖得率分别为9.32%, 7.57%, 8.69%和7.25%, 且油茶花的抗氧化活性最强.

常见提取油茶多糖的方法有热水提取法、有机溶剂浸提法、水提醇沉法、水酶法、微波辅助提取法, 如表3所示. 传统提取技术始于热水浸提法, 该方法利用水分子的极性溶解多糖, 在高温条件下破坏细胞壁. 然而, 其核心在于高温导致多糖β-糖苷键断裂而活性

降低, 且致密的纤维素-半纤维素细胞壁结构阻碍多糖溶出, 得率普遍低于10%. 为减少热降解并提升选择性, 有机溶剂提取法被引入. 乙醇水溶液通过降低溶剂介电常数, 削弱多糖与蛋白质的氢键作用, 从而减少杂质共溶, 但该法对脂溶性细胞壁成分(如木质素)穿透力不足, 且溶剂消耗量大. 为了提高溶剂选择性, Feng等人^[51]合成氯化胆碱:丙酸:1,3-丁二醇的三元DES体系, 使油茶壳多糖提取率较热水法提高50%, 蛋白质残留降低70.4%, 同时提升多糖抗氧化活性和降血糖活性.

2.4 多酚的提取技术研究进展

油茶加工剩余物, 特别是果壳和籽粕, 富含多酚类化合物^[57]. 多酚是重要的天然抗氧化剂, 也是植物界中分布最广的天然产物之一, 具有显著的抗氧化、抗炎和抗菌等多种生物活性^[58-61]. 多酚作为植物中广泛存在的次级代谢产物, 基于核心骨架的苯环数量、连接方式及官能团特征, 多酚可简单分为酚酸类、黄酮类、芪类、木脂素及单宁类五类^[62-64]. 其中, 黄酮类化合物主要是以2-苯基色原酮为基本母核的一类化合物, 以C₆-C₃-C₆为基本骨架, 油茶中富含的槲皮素、花青素、山柰酚均属于此类物质.

多酚的提取方法多样(表4), 通常采用溶剂提取法, 但传统提取方法存在环境污染和效率低的问题^[65-67]. 为了弥补传统技术的不足, 超临界流体萃取、超声波辅助提取、微波辅助提取、加压液体提取、脉冲电场辅助提取等绿色提取技术在多酚提取中得到广泛应用. 这些技术通过减少有机溶剂用量、缩短提取时间和降低能耗, 显著提高了提取效率和环保性. 例如, 超临界萃取法使用超临界二氧化碳作为溶剂, 兼具气液性质, 适合提取热敏性多酚^[68]. Jensch等人^[69]在可可豆壳多酚提取中使用了加压两相萃取技术, 高压高温

表 3 油茶多糖的主要提取方法
Table 3 The main extraction methods of *Camellia oleifera* polysaccharides

提取方法	特点	提取条件	得率(%)
热水提取法	操作简单、成本低、提取率低、耗时长	150 min、85℃、料液比(1:32, w/v) ^[52]	10.49
有机溶剂浸提法	溶剂消耗量大、易残留有机溶剂	乙醇(60%, v/v)、55℃、2 h、料液比(1:11, w/v) ^[53]	7.43
水提醇沉法	能有效分离多糖, 但部分小分子多糖可能损失	78 min、60℃、料液比(1:25, w/v)、水醇比(1:2) ^[54]	11.29
低共熔溶剂法	提取率高, 缺点在于溶剂回收困难、成本较高	DES含水量(33.33%)、55 min、70℃ ^[51]	15.03
超声波辅助提取法	空化效应加速细胞破裂、时间短、提取率高	超声10 min、浸提120 min、60℃、料液比(1:20, w/v) ^[55]	16.76
微波辅助提取法	效率高, 但控温要求严格, 过热易导致焦化	微波功率600 W、9 min、料液比(1:6, w/v) ^[56]	16.00

表 4 油茶多酚的主要提取方法

Table 4 The main extraction methods of *Camellia oleifera* polyphenols

提取方法	特点	物质	提取条件	得率(%)
溶剂提取法	操作简单, 成本低, 适用于热敏性多酚	油茶壳原花青素	乙醇(43%, v/v)、13 min、料液比(1:50, bm/v) ^[75]	5.58
超声波辅助提取法	提取时间短, 但功率过高可能降解黄酮苷	油茶籽壳总黄酮	乙醇(40%, v/v)、超声波功率480 W、65℃、料液比(1:30, bm/v)、30 min ^[76]	5.02
微波辅助提取法	提取率高, 但控温要求严格	油茶花总黄酮	乙醇(70%, v/v)、微波功率500 W、料液比(1:25, m/v)、4 min ^[77]	2.58
低共熔溶剂法	绿色环保、选择性强, 但溶剂黏度高传质慢	油茶壳原花青素	80%氯化胆碱-柠檬酸(1:1)、料液比1:25、80℃、40 min ^[78]	5.26

增强溶剂溶解能力, 实现了100%的提取率, 证明了加压液体提取技术在多酚提取中的潜力. Lu等人^[70]研究了从厚朴残渣中提取木脂素类化合物的深共晶溶剂(DES)技术, 发现氯化胆碱基DES在优化条件下可实现39.18 mg/g的木脂素提取率, 且提取物具有优异的抗氧化和抗菌活性. 这种技术可为油茶剩余物中多酚的提取提供借鉴. Koina等人^[71]在茶类多酚提取中对比了超声辅助提取、微波辅助提取和回流提取法, 发现前两者在提取效率和溶剂使用量上优于传统回流法, 尤其适合提取茶类中的儿茶素、没食子酸和黄酮类化合物. 谢水香等人^[72]将原料超声处理60 min后, 多酚提取可达14.01%. 在此基础上, 每克油茶枝叶中加入0.80 g β -环糊精, 可使多酚提取率提升至22.92%. 杨飞等人^[73]在超声功率为468 W条件下超声时间40 min, 此时油茶壳多酚的得率为63.35 mg/g. 此外, 脉冲电场作为一种新兴的提取技术, 近年来在食品加工领域得到了广泛关注. 该技术通过在溶液中两个电极之间施加短暂的高压电场, 使细胞膜发生电穿孔, 从而促进细胞内容物的释放, 该过程能够在极短时间内完成, 且能耗较低, 特别适合于热敏性物质的提取, 但其在工业规模上的推广仍面临设备成本较高的挑战. 该技术已被用于从葡萄酒酿造过程中产生的副产品(如葡萄渣、葡萄芽等)中提取多酚类物质^[74]. 油茶果壳和籽粕中的多酚提取可借鉴这些技术, 通过优化溶剂种类、提取时间和温度等参数, 提高多酚的得率和活性.

3 油茶加工剩余物高值化衍生产品的研发与应用

油茶在榨取茶油后, 主要产生两类固体剩余物, 即油茶果壳和油茶饼粕. 油茶果壳主要由木质纤维素构

成, 包括纤维素、半纤维素和木质素, 结构坚固, 是制备生物质材料的理想原料. 而油茶粕成分更为复杂, 富含多种生物活性物质, 主要包括油茶皂素、粗蛋白、多糖、多酚以及残余油脂等. 这些组分的多样性为油茶加工剩余物的梯级与高值化利用提供了坚实的物质基础.

在油茶榨油过程中, 加工剩余物普遍被丢弃, 燃烧或是用作堆肥, 这不仅造成资源的浪费, 也对环境构成潜在压力. 针对这一现状, 亟需通过定向转化技术将油茶果壳、籽粕和油茶枝叶等剩余物升级为生物炭材料、活性提取物及复合材料, 实现全组分的资源化利用. 如图2和图3所示, 油茶加工剩余物可转化为各种高附加值衍生产品.

3.1 木质纤维素基生物材料及其应用

油茶果壳因其高木质纤维素含量和坚硬多孔的结构, 在材料化领域展现出巨大潜力. 由于木质纤维素生物质是一种丰富的可再生资源, 因此将其转化为高附加值化学品及功能材料是实现持续发展的重要手段. 当前, 针对油茶壳的高值化利用主要集中在功能性碳材料和木质纤维素复合材料两大方向.

将油茶壳通过热解技术转化为生物炭, 是实现其资源化利用的有效途径. 生物炭是由农林加工剩余物及畜牧业有机废料经热解反应转化制备而成的一种多孔性固体炭材料, 其显著特征在于高含碳量与少量无机盐的复合结构. 该材料不仅具有制备成本经济性、理化性质稳定性等优势, 更因其丰富的表面官能团和优异的离子交换特性而备受关注. 现有技术多对生物炭材料进行改性处理, 以便提高其吸附性能^[79-81]. 为了提高比表面积和总孔容, 浦丽伟等人^[82]利用 K_2CO_3 /空气法对油茶果壳进行协同活化, BET比表面



图 2 油茶加工剩余物高值化衍生产品

Figure 2 High-value derivative products of *Camellia oleifera* processing residues

图 3 油茶加工剩余物未来发展方向

Figure 3 Future development direction of *Camellia oleifera* processing residues

积为 $1080.94 \text{ m}^2/\text{g}$, 亚甲基蓝吸附值为 441.62 mg/g . 为了形成更多的吸附位点活化, 梁文斌等人^[83]利用磷酸与原料发生交联作用, 活性炭脱水、脱羧、脱甲基反应剧烈, 但仍保留少量含氧官能团, 且活化后的活性炭石墨化程度提高, 存在石墨微晶, 比表面积 $1872 \text{ m}^2/\text{g}$, 碘吸附值为 1694 mg/g . 除了传统的活化方法外, You等人^[84]使用 ZnCl_2 为活化剂, 制备的活性炭

BET比表面积为 $1244.46 \text{ m}^2/\text{g}$, 碘吸附值为 5623.94 mg/g , 同时由于 ZnCl_2 溶解半纤维素从而对低聚糖和单体糖具有高度选择性, 该研究也生产了主聚合度(DP)为2~5的低聚木糖. 油茶壳活性炭因其发达的孔隙结构、巨大的比表面积和丰富的表面官能团, 在吸附材料方面展现出卓越性能. Zeng等人^[85]利用油茶果壳活性炭从废料稀溶液中回收钪离子, 其吸附容

量为35.41 mg/g, 对稀土工业的发展有重要意义. Quan等人^[86]用油茶饼制备活性炭, 利用 Na_2CO_3 进行活化, 此时对镍离子去除率达到95.7%. Yi等人^[87]利用油茶壳基活性炭从水溶液中去除铀离子, 通过准一级和二级动力学模型, 证明Langmuir模型对铀离子吸附过程描述最好, 最大吸附容量为78.93 mg/g, 表明它在水溶液中去除或回收铀离子方面具有广阔的应用前景. 然而, 该路径的经济性高度依赖于活化过程的能耗成本与最终产品的性能与市场定位. 若采用物理活化法, 其成本主要来自能量消耗; 若采用化学活化法(如使用 KOH 和 H_3PO_4), 则面临化学试剂回收难、二次污染治理的成本问题. 目前, 生产用于常规水处理的活性炭, 其利润空间会受到煤质活性炭的激烈挤压. 因此, 通过精准调控活化工序, 定向制备用于超级电容器电极或黄金提取等领域的高性能专用活性炭, 是提升该路径经济可行性与核心竞争力的关键.

鉴于茶果壳衍生的碳材料同时具备良好的导电性能与独特的多孔结构, 其在电化学储能领域展现出广阔的应用前景. 为进一步降低电化学储能装置的成本, 并改善充放电过程中循环稳定性欠佳的现状, 可充分利用生物质碳材料所具有的多孔特性, 以构建更为高效的电荷转移通道; 因此, 多孔结构的碳材料在电池相关领域受到了广泛的关注与应用. 赵吉晓等人^[88]制备的碳材料在电流密度为1 A/g时, TPC-3-700的质量比电容能够达到382.1 F/g, 同时该电极在经过5000次恒电流充放电循环后电容量仍能保持87.2%, 展现出优良的循环稳定性. Guan等人^[89]将油茶壳粉用酚醛树脂预浸渍, 然后 KOH 活化, 经改性后的油茶壳活性炭表现出碳微球的微观形态和三维网络孔, 具有优越的比表面积($3037.68 \text{ m}^2/\text{g}$)、高比电容(375.9 F/g)、和良好的倍率特性(电容保持率为49.3%), 在充电和放电时均很稳定.

木塑复合材料(WPC)是一种以热塑性聚合物为基体, 以亲水性木质纤维为填充材料, 经熔融共混加工制成的新型环保复合材料. 木塑复合材料以其环保、耐腐蚀、可塑性强等优势, 成为资源循环利用的重要方向. 油茶产业在我国南方广泛分布, 其加工过程产生大量油茶壳、油茶蒲等剩余物(年产量超450万吨). 这些富含木质纤维的资源若处理不当易造成资源浪费, 将其转化为WPC的高值填充材料, 兼具资源化与环保双重效益. 近几年的研究多集中于用聚烯烃和聚氯乙烯对

生物质材料进行复合. 黄志祥等人^[90]研究了油茶壳粉/杨木/HDPE复合体系, 探究了不同质量油茶果壳替代杨木对木塑复合材料性能的影响, 当替代量为1/6时, WPC的弯曲强度和拉伸强度最大, 分别较纯杨木/HDPE复合材料提高了5.39%和3.67%, 证明用油茶果壳部分替代杨木制备WPC, 既能保证抗弯强度, 还能增强复合材料的冲击韧性. 刘翔宇等人^[91]用油茶果壳和聚丙烯、高密度聚乙烯、低密度聚乙烯、线性低密度聚乙烯为原料, 采用模压成型的方法制备了高填充油茶果壳基木塑复合材料, 并测试各项强度性能. 研究发现, 当添加高密度聚乙烯时, 复合材料的弯曲强度最大为34.40 MPa, 拉伸强度最大为18.20 MPa, 力学性能较优. 当前研究多聚焦于复合材料的强度研究, 会有更多专家学者尝试赋予复合材料一定的耐老化性, 或添加阻燃剂提升其阻燃等级.

近年来, 由于化学燃料的大量消耗, 生物柴油凭借着环保性和可再生性逐渐出现在人们的生活中. 生物质是一个可再生能源, 使用农林业的木质纤维生产或协助生产生物燃料油有巨大的潜力和前景. Shakir等人^[92]将高含碳量的棕榈仁壳作为催化剂, 验证其对于不同生物质原料酯交换工艺所产生的生物柴油量的影响, 提高生物柴油的生产效率, 其中玉米的生物油产量最高, 可达94.92%. Endut等人^[93]将椰子壳在422℃下炭化4 h, 100℃条件下磺化15 h, 生产柴油得率为88.03%. Yang等人^[94]以油茶壳为碳源经磺化处理得油茶壳生物炭, 该生物炭催化剂的酸密度为2.86 mmol/g, 比表面积为 $2.67 \text{ m}^2/\text{g}$, 具有较高的催化活性. 由此可见, 使用果壳作为催化剂, 在未来酯化反应中提升生物柴油产量与效率方面具有巨大的发展潜力.

3.2 油茶皂素基衍生产品及其应用

油茶皂素是油茶籽粕中最具开发潜力的成分之一, 属于五环三萜类化合物, 因其独特的表面活性和多种生物活性而广泛应用于农业、林业、畜牧养殖业、工业、日化业等多个领域. 油茶皂素在化妆品和个人护理产品中展现出巨大的应用潜力, 研究表明, 油茶皂素可以作为天然乳化剂和发泡剂, 替代洗发水、洁面乳等产品中的化学合成表面活性剂, 其产品刺激性低、生物降解性好. 研究表明, 油茶皂素能够以低表面活性剂与油的比例($\text{SOR} < 0.1$)产生纳米级液滴(d_{32}

<200 nm). 在大多数条件下, 油茶皂素的表现与皂树提取物及吐温80相似或更好, 证明油茶皂素是有效的植物基表面活性剂, 可用于商业产品^[95].

此外, 其抗氧化和清除自由基的能力, 使其可被用于开发抗衰老、抗炎舒缓等功能的护肤品, 为解决各类皮肤问题提供了天然、温和的解决方案. 在高端应用方面, 研究表明, 提取的油茶皂素具有优异的起泡性和泡沫稳定性, 并能形成稳定的纳米乳液, 适用于高附加值食品或药物传递系统^[96]. 药理学研究揭示了油茶皂素具有抗肿瘤、抗菌、抗炎、心血管保护、神经保护以及降血糖、降血脂等多种生物活性, 这使得油茶皂素在医药和保健品领域具有巨大的开发潜力, 可用于开发抗癌药物、抗菌剂、降血脂药物等^[97]. 然而, 若将油茶皂素纯化至医药级别, 用于医药或高端化妆品, 目前仍面临显著的经济性瓶颈. 其主要成本来源于复杂的多步纯化工艺(如大孔树脂吸附、双水相萃取法、半制备柱液相色谱法等), 这些过程操作繁琐、制备精细、耗时长、无法实现工业化生产.

此外, 油茶皂素具有显著的杀虫、抑菌活性, 使其成为开发环保型生物农药的理想原料. 研究证实, 油茶皂素对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、玉米纹枯病菌等多种植物病原菌和害虫表现出强烈的抑制作用. 其作用机理复杂, 包括破坏细胞膜的通透性、抑制病原菌生物膜形成以及抑制关键代谢酶的活性等. Yu等人^[98]通过研究高纯度茶皂素对细胞膜、菌丝和生物膜的影响, 探讨其对真菌的抑制机制, 证明其对白色念珠菌的最低抑制浓度为0.078 mg/mL, 可破坏细胞膜结构, 导致细胞内容物外泄, 抑制菌丝体生长, 降低细胞黏附和聚集, 有效抑制白色念珠菌生物膜的形成, 可作为天然抗真菌剂的有效来源, 并为其在食品安全领域的应用提供指导. 随着技术和产品的更新迭代, 传统农药已无法满足市场需求, 油茶皂素由于其具备两亲性, 且有别于传统化学表面活性剂, 凭借着生物可降解、无毒、保留农药特性等优点, 创新作为纳米载体颗粒的核心组成部分, 实现传统农药靶向递送和控制释放行为. Huang等人^[99]使用油茶皂素作为表活剂, 接枝亲水农药及玉米蛋白, 制备的茶皂素基纳米载体颗粒仅使用五分之一的农药即可达到原剂量农药的杀虫抑菌效果. 在其他研究杀虫实验中, 油茶皂素处理小菜蛾幼虫后导致其生长速率降低、饲料消耗减少、蛹产量减少、蛹重降低、化蛹百分比降低、成虫出现百分

比减慢和繁殖力降低, 表明油茶皂素成为了一种潜在的新型杀虫剂^[100]. 在农业实践中, 油茶皂素已被成功应用于防治福寿螺, 不仅杀螺效果显著, 且对水稻生长安全, 是一种环境友好型选择. 麻程军等人^[101]田间试验结果表明, 油茶皂素对福寿螺的田间防效良好, 在有效成分为2.03, 2.25和2.48 kg/hm²条件下, 其防效无显著差异, 从成本考虑, 可选择2.03 kg/hm²作为茶皂素防控福寿螺的田间使用剂量.

3.3 蛋白质、多糖、多酚应用材料及其应用

油茶粕是优质的植物蛋白源, 其蛋白质含量高, 氨基酸组成均衡, 富含赖氨酸. 根据Osborne分类法, 可将其基本分成清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶谷蛋白(油茶中含量较低). 研究表明, 油茶粕蛋白具有良好的乳化性、起泡性、凝胶性和吸油性等功能特性. 这些特性使其在食品工业中具有作为乳化剂、稳定剂、营养强化剂的潜力. 研究表明, 油茶籽饼中的提取蛋白质在保水性、起泡能力和乳化性能方面表现出与传统植物蛋白(如大豆蛋白)相当的优异功能特性^[102]. 例如, 油茶籽饼蛋白已经有效地用作Pickering乳液中的稳定剂, 用于包封和递送生物活性化合物, 在食品工业有作为高功能性蛋白质成分的潜力^[103]. Yu等人^[102]利用油茶籽饼蛋白通过自组装机制包封叶黄素, 递送纳米颗粒, 包封率达到43.82%, 载量为5.89%, 表明油茶籽饼蛋白作为载体的潜力.

植物蛋白可作为食品配料, 用于改善食品的营养和功能特性. 油茶籽粕蛋白可开发成蛋白粉、植物肉、烘焙食品添加剂等, 满足市场对植物基食品日益增长的需求, 以提高营养和功能特性. 油茶籽蛋白可以加入面包、松饼和饼干等烘焙食品中, 以改善质地和蛋白质含量, 同时可用于开发植物性乳制品替代品, 例如非植物性乳制品、乳制品奶油、牛奶和酸奶. 油茶籽蛋白具有抑菌、抗氧化、降血脂的作用. 赵盈盈^[104]利用油茶粕饼发酵制备蛋白饲料, 发酵后粗蛋白含量高达32.7%, 同时粗纤维素的含量显著降低, 得到优质且环保的蛋白饲料.

油茶加工剩余物中的多酚类化合物是天然的抗氧化剂和抗炎剂, 主要包括以槲皮素、山柰酚为代表的黄酮醇类, 以表儿茶素为主的黄烷醇(儿茶素)类, 以及没食子酸、咖啡酸等酚酸. 同时多酚具有降血压降血糖等功效, 这些特性使其在食品、化妆品和医药领域

具有广泛应用。油茶粕中含有的多糖和多酚是开发功能性、可生物降解食品包装材料的宝贵资源。多酚(如茶多酚)具有天然的抗氧化和抗菌活性, 多糖(如纤维素、半纤维素等)可作为成膜基质。蒋海明^[105]创新性直接利用油茶粕提取液(富含多糖和多酚)与普鲁兰多糖、明胶等进行复配, 成功制备了具有保鲜功能的复合膜, 验证了油茶粕在功能性包装膜领域的可行性。此外, 黄酮类化合物还通过抑制特定信号通路(如NF- κ B)的激活, 减少促炎介质的释放, 从而显著增强免疫调节能力, 增强肠道屏障功能, 为肠道微生态健康提供更有力保障^[16]。多糖的免疫调节和保湿功能使其适合用于保健品、化妆品或药物传递系统。通过微纳米封装技术, 可提高多酚和多糖的稳定性和生物利用度, 拓展其在高端市场的应用。这些成分的协同作用, 共同赋予了油茶粕优异的抗氧化、抗菌和保健潜力。无论是油茶蛋白, 亦或是多酚多糖, 其主要挑战在于, 为保持生物活性而不得不采用的温和提取工艺(如低温、酶法、绿色溶剂), 从而导致较低提取效率和较高生产成本。

4 高值化综合利用面临的挑战及前瞻策略

油茶加工剩余物的高值化综合利用对于提升整个油茶产业的经济效益与环境效益至关重要。然而, 当前该领域的发展仍面临一系列严峻挑战, 亟需厘清问题本质并探寻突破路径。

4.1 农林废弃物资源化体系不完善与系统性策略构建

当前我国农林资源化利用普遍面临低效率、低值化、高收集成本等痛点, 油茶加工剩余物作为典型代表, 其问题更为突出。果壳常被直接焚烧, 饼粕提取皂素后的蛋白资源多被废弃或仅作堆肥, 资源浪费严重。其深层原因在于, 分散的剩余物收集运输成本高昂, 且转化产品未能与下游消费市场形成有效的价值链接, 导致资源转化效率不高, 难以充分发挥其潜在价值。

针对性的策略在于构建从收集到高值化产品的全链条体系。未来, 需在油茶主产区建立专业化的收集、预处理与储运中心, 以降低原料集散成本。更为关键的是, 必须以市场需求为导向, 驱动高值化产品的研发。如果壳需从焚烧燃料转向开发生物炭等高附加值材

料; 饼粕残渣需从堆肥原料转向提炼蛋白肽、功能性多糖等医药保健基料, 使其经济价值得以彰显, 从而形成“市场拉动产业, 产业消化剩余物”的良性循环。

4.2 油茶产业链精深加工程度不足与纵向延伸策略

油茶加工剩余物的产业链条较小, 缺乏从原料处理到高附加值产品生产的完整产业体系。下游相关的精深加工企业数量少、规模小, 对油茶剩余物的消化能力有限, 无法形成规模化的资源循环利用格局。油茶产业要想迈向万亿规模, 仅依赖茶油难以突破利润天花板。茶油毛利润仅30%, 且面临大宗油脂市场价格挤压。油茶加工剩余物高值化利用才是撬动产业增值的核心杠杆。当前初加工技术粗放, 压榨残油率普遍高于10%, 同时高温工艺导致维生素E等活性物质损失严重; 更关键的是, 剩余物衍生高值产品开发严重滞后, 制约产业链纵向延伸。根据油茶自身特征, 当前可定向转化为高附加值产品的方向包括医药健康领域、日化美容领域、工业材料领域和新兴消费领域。无论是利用茶枯饼作生物农药, 油茶果壳做生物炭材料, 亦或是用高纯度油茶皂素做医药原料, 都能促进全产业链的发展。然而, 当前产业仍困于初级加工阶段, 精深加工产值占比不足20%, 难以释放油茶资源的经济潜能。

破解此困境的核心策略是推动产业链从“初加工”向“精深加工”与“全资源利用”转型。产业突破不能仅依赖于茶油, 必须依靠剩余物高值化这一核心杠杆。具体而言, 应着力发展基于油茶剩余物的生物农药、日化美容原料、医药健康产品及工业材料, 将茶枯饼、果壳等全面转化为高附加值商品。例如, 大连理工大学刘田教授团队^[99]开发的多功能纳米农药, 实现抗菌杀虫双效协同作用, 为产业链延伸提供了明确的技术路径与高值化方向。

4.3 绿色提取与全组分利用技术瓶颈与全组分利用工艺创新

尽管技术不断进步, 活性成分提取的核心矛盾仍旧是“绿色、高纯、连续、联产”四者难以兼得。油茶加工剩余物富含油茶皂素、多糖、多酚、蛋白等活性成分, 但各组分间存在复杂的互作关系, 例如, 油茶皂素和油茶蛋白在提取中复合沉淀、木质素和半纤维素

网络交联格式难以分离, 导致传统单一提取技术的效率与活性成分的保留难以协同, 成为高值化利用的主要阻碍。

以油茶皂素为例, 自身分子结构复杂, 不同品种之间分子基团差异较大, 甚至同一品种因生长环境的不同都会产生结构差异, 故其在加工过程中有别于其他稳定性化合物。从茶粕中提取油茶皂素常用溶剂萃取法, 再经两级沉淀、双水相萃取、膜分离或是大孔树脂吸附多步纯化, 才能获得纯度大于80%的油茶皂素。在此过程中, 有机溶剂残留风险大、透析膜成本高、双水相萃取步骤较为复杂, 无法实现工业化生产。于蛋白质、多糖、多酚而言, 现有醇提、水提、超声、超临界CO₂萃取等手段对目标产物与杂质分离系数低, 蛋白易变性、多酚易氧化、多糖黏度高, 导致产物纯度不足90%, 难以满足医药级需求。故油茶行业全组分梯度利用工艺的缺乏, 导致综合利用率低, 反向制约产业化发展, 无法充分释放油茶这一绿色宝藏的经济与

生态价值。

应对此挑战, 必须转向绿色高效的联产技术与全组分梯度利用工艺的创新。未来的技术发展应聚焦于能够同步分离多种组分的耦合工艺。江西农业大学陈尚研教授团队^[106]在双水相萃取纯化油茶皂素技术上的探索, 湖南省林科院李昌珠研究员^[107~109]油茶皂素及油茶果壳制备复合薄膜的多方位应用, 标志着从单一提取向多组分联产和生物炼制模式转变的正确方向。通过模拟此类集成化工艺, 构建“提取皂素-制备蛋白/多糖-残渣材料化/肥料化”的梯度利用技术链条, 方能真正实现油茶剩余物的“吃干榨尽”, 突破综合利用率低的产业化瓶颈。

因此, 油茶加工剩余物的未来图景不再是“废弃物”而是“生物炼制平台”, 在今后研究中应该聚焦于多组分定向转化技术集成, 开发医药级活性成分、生物基材料及绿色化学品等高附加值衍生品, 以技术革新驱动万亿产业目标实现。

参考文献

- Shi T, Wu G C, Jin Q Z, et al. *Camellia* oil authentication: a comparative analysis and recent analytical techniques developed for its assessment. A review. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 97: 88–99
- Xiao X, He L, Chen Y, et al. Anti-inflammatory and antioxidative effects of *Camellia oleifera* Abel components. *Future Med Chem*, 2017, 9: 2069–2079
- Zhang Y M. Accelerating the development of the *Camellia oleifera* industry: a three-year action plan issued (in Chinese). *Land Green*, 2023, 1: 42 [张亚敏. 加快油茶产业发展三年行动方案印发. 国土绿化, 2023, 1: 42]
- Hou J W, Xing C F, Yang L L, et al. Comparison of physicochemical properties of *Camellia oleifera* shell biochar prepared under different carbonization conditions (in Chinese). *Chin J Soil Sci*, 2024, 55: 383–390 [侯建伟, 邢存芳, 杨莉琳, 等. 不同炭化条件制备油茶果壳生物炭的理化性质比较研究. 土壤通报, 2024, 55: 383–390]
- Long L L, Xue Y L, Zhang D, et al. Investigation on main characteristic composition of *Camellia oleifera* seed oil (in Chinese). *China Oils Fats*, 2012, 37, 78–81 [龙伶俐, 薛雅琳, 张东, 等. 油茶籽油主要特征成分的研究分析. 中国油脂, 2012, 37: 78–81]
- Wang L L, Liu X L, Chen G D, et al. Research status and prospect of high-value utilization *Camellia oleifera* oil processing residues (in Chinese). *China For Prod Ind*, 2025, 62: 89–94 [王浏浏, 刘晓玲, 陈桂丹, 等. 油茶加工剩余物高值化利用研究现状与展望. 林产工业, 2025, 62: 89–94]
- Liu X D, Wu Y Y, Gao Y, et al. Valorization of *Camellia oleifera* oil processing byproducts to value-added chemicals and biobased materials: a critical review. *Green Energy Environ*, 2024, 9: 28–53
- Huang J W, Lin X Y, Zhang W W, et al. Cell wall composition of *Camellia oleifera* Abel. shell: new insights into its composition distribution and ultrastructure. *Holzforchung*, 2024, 78: 317–328
- Xia M L, Wang Y P, Zhang S M, et al. Research progress on comprehensive utilization of *Camellia oleifera* Abel shell (in Chinese). *Biomass Chem Eng*, 2021, 55: 26–38 [夏美玲, 王允圃, 张淑梅, 等. 油茶壳综合利用研究进展. 生物质化学工程, 2021, 55: 26–38]
- Liu H, Guo S H, Li H, et al. Comprehensive utilization of *Camellia oleifera* seed cake: a review (in Chinese). *Food Res Dev*, 2025, 46: 187–195 [刘海, 郭少海, 李慧, 等. 油茶饼粕综合利用研究进展. 食品研究与开发, 2025, 46: 187–195]
- Yin R Y, Yang J Y, Wang Y T, et al. Study on the adsorption and purification characteristics and antioxidant activity of tea saponins by

- macroporous adsorption resin (in Chinese). *Ion Exch Adsorpt*, 2024, 40: 255–263 [尹任焰, 杨佳瑶, 王艺潼, 等. 大孔吸附树脂对茶皂素的吸附纯化特性及抗氧化活性研究. *离子交换与吸附*, 2024, 40: 255–263]
- 12 Wang M L, Fang W P, Li X H. Research progress in isolation, purification, physio-chemical properties and bioactivities of tea seed polysaccharides (in Chinese). *Food Sci*, 2014, 35: 280–285 [王明乐, 房婉萍, 黎星辉. 茶籽多糖的提纯、理化特征和生物活性研究进展. *食品科学*, 2014, 35: 280–285]
- 13 Zhu L, Zhang S R, He X, et al. Effects of water-soluble extracts from *Camellia oleifera* seed on growth performance and antioxidant capability in growing pigs (in Chinese). *Feed Ind*, 2010, 31: 32–34 [朱良, 张石蕊, 贺喜, 等. 茶籽提取物对生长猪生长性能及抗氧化能力的影响. *饲料工业*, 2010, 31: 32–34]
- 14 Chen G B, Sun P D, Ning Q, et al. Antioxidant activity and protective effects on oxidative DNA damage of polysaccharides from the seed of *Camellia oleifera* Abel (in Chinese). *Nat Prod Res Dev*, 2016, 28: 949–954 [陈桂冰, 孙培冬, 宁奇, 等. 茶籽多糖抗氧化性及其对DNA氧化损伤的保护作用. *天然产物研究与开发*, 2016, 28: 949–954]
- 15 Ye Z C, Wu Y G, Yu J, et al. Total polyphenols contents and antioxidant activities of the cakes of *Camellia oleifera* Abel (in Chinese). *Mol Plant Breed*, 2017, 15: 3682–3693 [叶洲辰, 吴友根, 于靖, 等. 油茶饼提取物的抗氧化活性研究及酚类化合物含量的测定. *分子植物育种*, 2017, 15: 3682–3693]
- 16 Wang Y S, Liu W J. Mechanisms of plant-derived flavonoids mediating microbial protection of the intestinal barrier (in Chinese). *Acta Vet Zootech Sin*, 2025, 1–17 [王雨珊, 刘旺景. 植物源性黄酮类化合物介导微生物保护肠道屏障的机制. *畜牧兽医学报*, 2025, 1–17]
- 17 Yang Y Z, Liu X, Tan C B. Research progress on comprehensive utilization of *Camellia oleifera* leaf (in Chinese). *Grain Sci Technol Econ*, 2020, 45: 144–146 [杨友志, 刘想, 谭传波. 油茶叶综合利用研究进展. *粮食科技与经济*, 2020, 45: 144–146]
- 18 Abdurrahman M, Kamal M S, Ramadhan R, et al. Ecofriendly natural surfactants in the oil and gas industry: a comprehensive review. *ACS Omega*, 2023, 8: 41004–41021
- 19 Zhao P, Gao D F, Xu M, et al. Triterpenoid saponins from the genus *Camellia*. *Chem Biodivers*, 2011, 8: 1931–1942
- 20 Xia H L, Chi X Y, Yan Z J, et al. Enhancing plant uptake of polychlorinated biphenyls and cadmium using tea saponin. *Bioresour Technol*, 2009, 100: 4649–4653
- 21 Ye Y, Zhan X X, Zhu B R, et al. Progress in extraction, purification, and activities of tea saponins (in Chinese). *J Fujian Univ Technol*, 2025, 23: 205–211 [叶勇, 占心霞, 朱伯荣, 等. 茶皂素的提取、纯化及其活性研究进展. *福建理工大学学报*, 2025, 23: 205–211]
- 22 Aarabi A, Mizani M, Honarvar M, et al. Extraction of ferulic acid from sugar beet pulp by alkaline hydrolysis and organic solvent methods. *Food Measure*, 2016, 10: 42–47
- 23 Zhao Y, Su R Q, Zhang W T, et al. Antibacterial activity of tea saponin from *Camellia oleifera* shell by novel extraction method. *Ind Crops Prod*, 2020, 153: 112604
- 24 Zhou H, Wang C Z, Chen H X, et al. Study on the combined technology of membrane separation and macroporous resin for tea saponin from *Camellia oleifera* (in Chinese). *Chem Ind For Prod*, 2012, 32: 65–70 [周昊, 王成章, 陈虹霞, 等. 油茶中茶皂素的膜分离-大孔树脂联用技术的研究. *林产化学与工业*, 2012, 32: 65–70]
- 25 Ma L, Chen Y Z, Peng S F, et al. Extraction of tea saponin from *Camellia oleifera* cake using water as solvent (in Chinese). *J Hunan Agric Univ (Nat Sci)*, 2013, 39: 91–93 [马力, 陈永忠, 彭邵锋, 等. 利用水作溶剂提取油茶粕中茶皂素的工艺研究. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 39: 91–93]
- 26 Guo Y S, Wu J, Gu Z, et al. Optimization of tea saponin extraction from *Camellia oleifera* shell by response surface methodology (in Chinese). *Food Ind*, 2023, 44: 46–50 [郭永生, 吴静, 顾震, 等. 响应面法优化提取油茶果壳中茶皂素. *食品工业*, 2023, 44: 46–50]
- 27 Gu Z W, Yao L, Li D, et al. Simultaneous extracting tea seed oil and tea saponin by hydrous N-butanol (in Chinese). *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2021, 36: 79–83 [谷政伟, 姚磊, 李丹, 等. 含水正丁醇同步提取茶叶籽油和茶皂素工艺. *中国粮油学报*, 2021, 36: 79–83]
- 28 Zhang F, Liu L H, Yang Y, et al. Study on the technology of extracting tea saponin from *Camellia* cakes with methanol (in Chinese). *Guangdong Chem*, 2021, 48: 4–8 [张飞, 刘良鸿, 杨阳, 等. 甲醇提取茶饼中茶皂素的工艺研究. *广东化工*, 2021, 48: 4–8]
- 29 Zhu X Y, Lin H M, Chen X, et al. Optimization of homogenate extraction of theasaponin from *Camellia oleifera* Abel. meal (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2011, 27: 402–406 [朱兴一, 林海敏, 陈秀, 等. 闪式提取油茶枯饼中茶皂素的工艺优化. *农业工程学报*, 2011, 27: 402–406]
- 30 Kan Y D, Wang Y J, Zhu X, et al. Extraction of tea saponin from *Camellia* seed meal using hydrophilic-hydrophobic switchable deep eutectic solvent (in Chinese). *China Oils Fats*, 2025, 50: 102–106 [阚雨东, 王亚杰, 祝欣, 等. 亲-疏水可切换低共熔溶剂提取油茶籽饼中茶皂素研

- 究. 中国油脂, 2025, 50: 102–106]
- 31 Tang Y Y, He X M, Sun J, et al. Comprehensive evaluation on tailor-made deep eutectic solvents (DESs) in extracting tea saponins from seed pomace of *Camellia oleifera* Abel. *Food Chem*, 2021, 342: 128243
 - 32 Liang D, Xiao W J. Study on microwave-assisted extraction technology of tea seed saponin (in Chinese). In: Proceedings of 2011 Annual Conference of Hunan Tea Society. Changsha: Hunan Tea Science Society, 2011. 161–166 [梁丹, 肖文军. 微波辅助提取茶籽皂苷工艺技术研究. 见: 湖南省茶叶学会2011年学术年会论文集, 长沙: 湖南省茶叶学会, 2011. 161–166]
 - 33 Du Z X, Zhang C J, Wan D J. Optimization of ultrasound-assisted ethanol extraction of tea saponin (in Chinese). *Chem Bioeng*, 2015, 32: 56–59 [杜志欣, 张崇坚, 万端极. 超声波辅助乙醇法提取茶皂素工艺优化. 化学与生物工程, 2015, 32: 56–59]
 - 34 Yang X H, Guo J. Study on extraction of tea saponin from *Camellia oleifera* seed meal by ultrahigh pressure (in Chinese). *Cereals Oils*, 2023, 36: 106–109 [杨孝辉, 郭君. 超高压法提取油茶籽粕中茶皂素的工艺研究. 粮食与油脂, 2023, 36: 106–109]
 - 35 Lyu X L, Li Z J. Study on CO₂ supercritical extraction of *Camellia saponin* (in Chinese). *Food Ferment Ind*, 2005, 1: 23–26 [吕晓玲 李肇奖. CO₂超临界萃取油茶皂苷的研究. 食品与发酵工业, 2005, 1: 23–26]
 - 36 Jia L L, Li H Y, Deng Z Y, et al. Extraction, purification and surface activity of tea saponin (in Chinese). *Nat Prod Res Dev*, 2025, 37: 1289–1297 [贾林林, 李洪安, 邓泽元, 等. 茶皂素的提取、纯化及其表面活性研究. 天然产物研究与开发, 2025, 37: 1289–1297]
 - 37 Yan J, Wu Z L, Zhao Y L, et al. Separation of tea saponin by two-stage foam fractionation. *Sep Purif Technol*, 2011, 80: 300–305
 - 38 Zhu L, Wang S, Wan F, et al. Quantitative analysis of *Camellia oleifera* seed saponins and aqueous two-phase extraction and separation. *Molecules*, 2023, 28: 2132
 - 39 Li G W, Gong Z H, Duan Y F, et al. Separation and purification of tea saponin in tea seed cake by macroporous resin (in Chinese). *J Food Saf Qual*, 2018, 9: 256–264 [李国武, 龚志华, 段一凡, 等. 大孔吸附树脂分离纯化茶籽饼粕中的茶皂素研究. 食品安全质量检测学报, 2018, 9: 256–264]
 - 40 Lin L, Dong W, Lin C X, et al. Extraction technology of protein from defatted *Camellia* (in Chinese). *China Food Addit*, 2021, 32: 59–66 [林莉, 董玮, 林彩霞, 等. 脱脂油茶饼中蛋白质提取工艺. 中国食品添加剂, 2021, 32: 59–66]
 - 41 Yang X L, Zhou J S, Shang W, et al. Effect of component migration during the extraction process on functional properties of seed storage proteins from *Camellia oleifera* Abel (in Chinese). *Food Sci*, 2024, 45: 91–99 [杨晓莉, 周际松, 尚伟, 等. 油茶储藏蛋白提取过程组分迁移对其功能特性的影响. 食品科学, 2024, 45: 91–99]
 - 42 Ding D H, Peng G H, Xia H, et al. Extraction technology of protein from *Camellia* seed meal (in Chinese). *Food Sci*, 2010, 31: 102–105 [丁丹华, 彭光华, 夏辉, 等. 油茶籽粕蛋白提取工艺研究. 食品科学, 2010, 31: 102–105]
 - 43 Wu J B, Zhou L, Hu C R, et al. Aqueous enzymatic extraction of *Camellia oleifera* seed oil and protein simultaneously (in Chinese). *Cereals Oils*, 2015, 28: 58–61 [吴建宝, 周力, 胡传荣, 等. 水酶法同时提取油茶籽油及蛋白研究. 粮食与油脂, 2015, 28: 58–61]
 - 44 Zhu J, Lv J, Chen L, et al. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of protein from *Camellia oleifera* seed-cake and evaluation of its functional activity (in Chinese). *Food Res Dev*, 2023, 44: 108–115 [朱静, 吕静, 陈龙, 等. 超声波辅助酶法提取油茶粕蛋白工艺优化及其功能活性. 食品研究与开发, 2023, 44: 108–115]
 - 45 Duan L P, Miao L K, Sun W W, et al. Research progress on extraction and biological activity of *Camellia oleifera* polysaccharide (in Chinese). *Cereals Oils*, 2020, 33: 26–28 [段丽萍, 苗丽坤, 孙炜炜, 等. 油茶多糖的提取及生物活性研究进展. 粮食与油脂, 2020, 33: 26–28]
 - 46 Feng S L, Cheng H R, Fu L, et al. Ultrasonic-assisted extraction and antioxidant activities of polysaccharides from *Camellia oleifera* leaves. *Int J Biol Macromol*, 2014, 68: 7–12
 - 47 Jin R S, Guo Y H, Xu B Y, et al. Physicochemical properties of polysaccharides separated from *Camellia oleifera* Abel seed cake and its hypoglycemic activity on streptozotocin-induced diabetic mice. *Int J Biol Macromol*, 2018, 125: 1075–1083
 - 48 Jin X C, Ning Y. Antioxidant and antitumor activities of the polysaccharide from seed cake of *Camellia oleifera* Abel. *Int J Biol Macromol*, 2012, 51: 364–368
 - 49 Wang Y F, Liu Y Y, Mao F F, et al. Purification, characterization and biological activities *in vitro* of polysaccharides extracted from tea seeds. *Int J Biol Macromol*, 2013, 62: 508–513
 - 50 Feng S, Tang M, Jiang Z, et al. Optimization of extraction process, structure characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from different parts of *Camellia oleifera* Abel. *Foods*, 2022, 11: 3185
 - 51 Feng S L, Zhang J, Luo X, et al. Green extraction of polysaccharides from *Camellia oleifera* fruit shell using tailor-made deep eutectic solvents. *Int J Biol Macromol*, 2023, 253: 127286

- 52 Li J J, Luo S Y, Ding C B, et al. Extraction optimization and antioxidant ability of polysaccharides from *Camellia oleifera* fruit shells (in Chinese). *J Cent China Norm Univ (Nat Sci)*, 2020, 54: 230–236 [李佳佳, 罗思源, 丁春邦, 等. 油茶蒲多糖的提取工艺优化及其抗氧化活性. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54: 230–236]
- 53 Ye Z, He D P, Luo Z, et al. Optimization of extraction process of tea polysaccharide from *Camellia* seed meal (in Chinese). *Food Sci Technol*, 2015, 40: 250–255 [叶展, 何东平, 罗质, 等. 油茶籽粕中多糖提取工艺的优化研究. 食品科技, 2015, 40: 250–255]
- 54 Zhang M Y, Wang J, Zhang Y Z, et al. Optimization of water extraction and alcohol precipitation method for preparation *Camellia oleifera* of cake polysaccharides by response surface analysis (in Chinese). *For Environ Sci*, 2019, 35: 1–6 [张盟雨, 王静, 张应中, 等. 水提醇沉法提取油茶饼粕多糖的响应面优化. 林业与环境科学, 2019, 35: 1–6]
- 55 Guo Y H, Xu Y, Zhang X R, et al. Optimization of extraction process and structure analysis of polysaccharide extracted from *Camellia oleifera* seed cake (in Chinese). *J Anhui Agric Sci*, 2019, 47: 167–170 [郭玉华, 徐云, 张雪茹, 等. 油茶籽饼粕多糖的提取工艺优化及结构鉴定. 安徽农业科学, 2019, 47: 167–170]
- 56 Wang J, Zhou J P. Microwave-assisted extraction and purification of *Camellia* polysaccharides (in Chinese). *China Oils Fats*, 2009, 34: 50–53 [王瑾, 周建平. 油茶籽多糖微波辅助提取及纯化. 中国油脂, 2009, 34: 50–53]
- 57 Yang J H, Zhou J P, Hu Y C. Analysis of chemical composition and observation of scanning electron microscopy on *camellia* testa (in Chinese). *J Hunan Agric Univ*, 2013, 39: 554–558 [杨俊换, 周建平, 胡尧超. 油茶籽壳的化学成分分析与扫描电镜观察. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39: 554–558]
- 58 Cai P F, Luo Y Y, He X C. Optimization of the extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Cymbidium holostegius* (in Chinese). *Feed Res*, 2023, 46: 86–89 [蔡攀峰, 罗媛媛, 何席呈. 全缘金粟兰总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性研究. 饲料研究, 2023, 46: 86–89]
- 59 Wang X, Li F, Huang L H. The protective effect and mechanism of total flavonoids from *Camellia oleifera* seed shells on oxidative stress in hepatocytes induced by aflatoxin B1 (in Chinese). *Jiangsu Agric Sci*, 2016, 44: 308–311 [汪秀, 李菲, 黄利辉. 油茶籽壳总黄酮对黄曲霉毒素B1致肝细胞氧化应激的保护作用及机制. 江苏农业科学, 2016, 44: 308–311]
- 60 Peng L. *Camellia* shell flavonoids on antioxidant activities of edible oils (in Chinese). *Food Res Dev*, 2012, 33: 201–204 [彭玲. 油茶壳总黄酮对食用油脂抗氧化性研究. 食品研究与开发, 2012, 33: 201–204]
- 61 Câmara J S, Albuquerque B R, Aguiar J, et al. Food bioactive compounds and emerging techniques for their extraction: polyphenols as a case study. *Foods*, 2021, 10: 37
- 62 Alara O R, Abdurahman N H, Ukaegbu C I. Extraction of phenolic compounds: a review. *Curr Res Food Sci*, 2021, 4: 200–214
- 63 Albuquerque B R, Heleno S A, Oliveira M B P P, et al. Phenolic compounds: current industrial applications, limitations and future challenges. *Food Funct*, 2021, 12: 14–29
- 64 Vicente-Zurdo D, Gómez-Mejía E, Morante-Zarero S, et al. Analytical strategies for green extraction, characterization, and bioactive evaluation of polyphenols, tocopherols, carotenoids, and fatty acids in agri-food bio-residues. *Molecules*, 2025, 30: 1326
- 65 Xie M Y, Chen Y. The research progress of microwave-assisted extracting technology (in Chinese). *J Food Sci Biotechnol*, 2006, 1: 105–114 [谢明勇, 陈奕. 微波辅助萃取技术研究进展. 食品与生物技术学报, 2006, 1: 105–114]
- 66 Cui Z W. The prospect of new application microwave technology in food engineering (in Chinese). *Pack Food Mach*, 2003, 4: 1–4 [崔政伟. 微波技术在食品工程中的新应用展望. 包装与食品机械, 2003, 4: 1–4]
- 67 Fu R J, Feng Y. Advance in the pharmacological research on matrine (in Chinese). *China J Chin Mater Med*, 2003, 9: 14–17 [傅荣杰, 冯怡. 微波萃取技术在中药及天然产物提取中的应用. 中国中药杂志, 2003, 9: 14–17]
- 68 Ruan C, Xiao X H, Li G K. Progress of extraction, separation and purification techniques for effective components in natural products (in Chinese). *Chem Reagents*, 2014, 36: 193–200 [阮冲, 肖小华, 李攻科. 天然产物有效成分提取分离制备方法研究进展. 化学试剂, 2014, 36: 193–200]
- 69 Jensch C, Schmidt A, Strube J. Versatile green processing for recovery of phenolic compounds from natural product extracts towards bioeconomy and cascade utilization for waste valorization on the example of cocoa bean shell (CBS). *Sustainability*, 2022, 14: 3126
- 70 Lu Y, Tang H S, Chen F, et al. Extraction and biological activity of lignanoids from *Magnolia officinalis* Rehder & E.H.Wilson residual waste biomass using deep eutectic solvents. *Molecules*, 2024, 29: 2352
- 71 Koina I M, Sarigiannis Y, Hapeshi E. Green extraction techniques for the determination of active ingredients in tea: current state, challenges, and future perspectives. *Separations*, 2023, 10: 121

- 72 Xie S X, Lei C Y. Study on the extraction of polyphenols from *Camellia oleifera* leaves and its inhibitory effect on common plant pathogenic fungi (in Chinese). *Nat Prod Res Dev*, 2023, 35: 1562–1568 [谢水香, 雷彩燕. 油茶叶多酚的提取及其对常见植物病原真菌抑制作用研究. 天然产物研究与开发, 2023, 35: 1562–1568]
- 73 Yang F, Xu Y H, Wang H M, et al. Ultrasound assisted extraction of polyphenols from *Camellia oleifera* shells and its antioxidant activity (in Chinese). *Feed Res*, 2025, 48: 105–110 [杨飞, 许永辉, 王浩名, 等. 超声波辅助提取油茶壳多酚及其抗氧化活性. 饲料研究, 2025, 48: 105–110]
- 74 Moro K I B, Bender A B B, da Silva L P, et al. Green extraction methods and microencapsulation technologies of phenolic compounds from grape pomace: a review. *Food Bioprocess Technol*, 2021, 14: 1407–1431
- 75 Liu C Y, Wu X H. Study on extraction of proanthocyanidins from *Camellia oleifera* shell and inhibition of α -amylase activity (in Chinese). *China Condiment*, 2021, 46: 158–163 [刘承毅, 吴雪辉. 油茶果壳原花青素的提取及抑制 α -淀粉酶活性的研究. 中国调味品, 2021, 46: 158–163]
- 76 Yang T H, Yu X Z, Cai X B, et al. Research on total flavonoids extracted from *Camellia oleifera* seed shell by ultrasonic and its antioxidant ability in lard (in Chinese). *Sci Technol Cereals Oils Foods*, 2012, 20: 26–29 [杨彤晖, 于修烛, 蔡学标, 等. 超声波辅助提取油茶籽壳总黄酮及对猪油抗氧化能力研究. 粮油食品科技, 2012, 20: 26–29]
- 77 Zhang C, Lu S H, Sun X N, et al. Microwave-assisted extraction and purification of total flavonoids from *Camellia oleifera* flowers and their antioxidant activity (in Chinese). *Food Sci Technol*, 2025, 50: 238–243 [张晨, 卢思含, 孙晓娜, 等. 微波辅助油茶花总黄酮萃取、纯化及抗氧化活性研究. 食品科技, 2025, 50: 238–243]
- 78 Hou Q L, Fan L M. Optimization of extraction of procyanidins from oil-tea *Camellia* seed shell with deep eutectic solvents (in Chinese). *China Oils Fats*, 2023, 48: 129–132 [侯黔灵, 范丽美. 低共熔溶剂提取油茶籽壳中原花青素的工艺优化. 中国油脂, 2023, 48: 129–132]
- 79 Wang Z L, Hu C S, Tu D Y, et al. Preparation and adsorption properties of activated carbon from *Camellia oleifera* shell (in Chinese). *J For Eng*, 2020, 5: 96–102 [王姿轮, 胡传双, 涂登云, 等. 油茶果壳活性炭的制备及其吸附性. 林业工程学报, 2020, 5: 96–102]
- 80 Zhang L, An J H, Xu S Q, et al. Preparation of activated carbon and xylose using *Camellia oleifera* shell as a feedstock (in Chinese). *J For Eng*, 2018, 3: 81–86 [章磊, 安佳欢, 徐思泉, 等. 油茶壳原料制备木糖和高品质活性炭的研究. 林业工程学报, 2018, 3: 81–86]
- 81 Jiang Y T, Chen S W, Zhuang X W, et al. Preparation of activated carbon from oil *Camellia* nutshell by phosphoric acid activation using microwave heating (in Chinese). *Biomass Chem Eng*, 2011, 45: 34–36 [蒋应梯, 陈顺伟, 庄晓伟, 等. 油茶壳用微波加热磷酸法制活性炭. 生物质化学工程, 2011, 45: 34–36]
- 82 Pu L W, Mo L H, Hu Y, et al. Preparation and characterization of activated carbon from *Camellia oleifera* shell by K_2CO_3 activation (in Chinese). *Chem Ind For Prod*, 2024, 44: 87–93 [浦丽伟, 莫立焕, 胡莹, 等. K_2CO_3 活化法油茶果壳活性炭的制备及表征. 林产化学与工业, 2024, 44: 87–93]
- 83 Liang W B, Chen C, Fan F Y. Preparation of high specific surface area activated carbon from *Camellia oleifera* shell activated by phosphoric acid (in Chinese). *China For Prod Ind*, 2023, 60: 26–32 [梁文斌, 陈成, 范方宇. 磷酸活化油茶壳制备高比表面积活性炭. 林产工业, 2023, 60: 26–32]
- 84 You Y Z, Zhang X K, Li P F, et al. Co-production of xylooligosaccharides and activated carbons from *Camellia oleifera* shell treated by the catalysis and activation of zinc chloride. *Bioresour Technol*, 2020, 306: 123131
- 85 Zeng B, Zeng X R, Hu L H, et al. Activated carbon from *Camellia oleifera* shells for adsorption of Y(iii): experimental and DFT studies. *RSC Adv*, 2024, 14: 4252–4263
- 86 Quan C, Wang W D, Su J Z, et al. Characteristics of activated carbon derived from *Camellia oleifera* cake for nickel ions adsorption. *Biomass Bioenergy*, 2023, 171: 106748
- 87 Yi Z J, Liu J, Zeng R Y, et al. Removal of uranium(VI) from aqueous solution by *Camellia oleifera* shell-based activated carbon: adsorption equilibrium, kinetics, and thermodynamics. *Water Sci Technol*, 2020, 82: 2592–2602
- 88 Zhao J X, Wang W, Jiao Z F, et al. Preparation of *Camellia oleifera* peel-derived carbon materials and their application in supercapacitors (in Chinese). *Mod Chem Ind*, 2024, 44: 118–124 [赵吉晓, 王雯, 焦志锋, 等. 油茶果皮基碳材料的制备及其在超级电容器中的应用研究. 现代化工, 2024, 44: 118–124]
- 89 Guan M J, Wang G N, Yong C, et al. A novel composite hard carbon from waste *Camellia oleifera* shell modified by phenol-formaldehyde resin for supercapacitor electrode with high specific capacitance. *Diamond Relat Mater*, 2023, 138: 110248
- 90 Huang Z X, Hu C S, Tu D Y, et al. Preparation and properties study of tea *Camellia* shell/poplar wood/hdpe composites (in Chinese). *China For*

- Prod Ind, 2023, 60: 1–8 [黄志祥, 胡传双, 涂登云, 等. 油茶果壳/杨木/HDPE复合材料的制备及性能研究. 林产工业, 2023, 60: 1–8]
- 91 Liu X Y, Yang Y F, Xu D C, et al. Preparation and mechanical properties of wood-plastic composite materials of high-filled *Camellia oleifera* shells (in Chinese). Eng Plast Appl, 2024, 52: 1–7 [刘翔宇, 杨逸飞, 徐道春, 等. 高填充油茶果壳基木塑复合材料的制备及力学性能. 工程塑料应用, 2024, 52: 1–7]
- 92 Shakir M A, Ahmad M I, Mansur F Z, et al. Biomass to biofuel: palm kernel shells as catalyst supports for enhanced biodiesel production. Biofuels Bioprod Bioref, 2024, 18: 2038–2052
- 93 Endut A, Abdullah S H Y S, Hanapi N H M, et al. Optimization of biodiesel production by solid acid catalyst derived from coconut shell via response surface methodology. Int Biodeterior Biodegrad, 2017, 124: 250–257
- 94 Yang Z, Wang Y, Wu X, et al. Efficient preparation of biodiesel using sulfonated *Camellia oleifera* shell biochar as a catalyst. Molecules, 2024, 29: 2752
- 95 Zhu Z B, Wen Y, Yi J H, et al. Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: tea saponin, Quillaja saponin, and Tween 80. J Colloid Interface Sci, 2019, 536: 80–87
- 96 Yu X J, Zhao Z M, Yan X L, et al. Extraction optimization of tea saponins from *Camellia oleifera* seed meal with deep eutectic solvents: composition identification and properties evaluation. Food Chem, 2023, 427: 136681
- 97 Yang G L, Qi Z W, Shan S J, et al. Advances in separation, biological properties, and structure-activity relationship of triterpenoids derived from *Camellia oleifera* Abel. J Agric Food Chem, 2024, 72: 4574–4586
- 98 Yu Z L, Wu X H, He J H. Study on the antifungal activity and mechanism of tea saponin from *Camellia oleifera* cake. Eur Food Res Technol, 2022, 248: 783–795
- 99 Huang D D, Qi H T, Liu H, et al. Two birds with one stone: eco-friendly nano-formulation endows a commercial fungicide with excellent insecticidal activity. Adv Funct Mater, 2025, doi: 10.1002/adfm.202420401
- 100 Cai H J, Bai Y, Wei H, et al. Effects of tea saponin on growth and development, nutritional indicators, and hormone titers in diamondback moths feeding on different host plant species. Pesticide Biochem Physiol, 2016, 131: 53–59
- 101 Ma C J, Wang R, Liu B, et al. Molluscicidal activity of tea saponin to pomacea canaliculata and its safety evaluation against three aquatic organisms (in Chinese). Chin J Pestic Sci, 2021, 23: 139–145 [麻程军, 王瑞, 刘彬, 等. 茶皂素杀螺活性及对3种水生生物的安全性. 农药学报, 2021, 23: 139–145]
- 102 Yu N X, Shao S X, Huan W W, et al. Preparation of novel self-assembled albumin nanoparticles from *Camellia* seed cake waste for lutein delivery. Food Chem, 2022, 389: 133032
- 103 Cui C, Wei Z, Hong Z, et al. Preparation of water-in-oil Pickering emulsion stabilized by *Camellia oleifera* seed cake protein and its application as EGCG delivery system. LWT, 2023, 179: 114656
- 104 Zhao Y Y. Study on optimization of the process of preparing protein feed by fermentation of *Camellia oleifera* cake (in Chinese). Feed Res, 2022, 45: 84–87 [赵盈盈. 油茶枯饼发酵制备蛋白饲料工艺优化研究. 饲料研究, 2022, 45: 84–87]
- 105 Jiang H M. Study on the development of fresh-keeping film of *Camellia oleifera* oil-tea meal (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017 [蒋海明. 油茶粕食品保鲜膜开发的研究, 硕士学位论文. 长沙: 中南林业科技大学, 2017]
- 106 Zhu L F, Wang S, Wan F, et al. Quantitative analysis of *Camellia oleifera* seed saponins and aqueous two-phase extraction and separation. Molecules, 2023, 28: 2132
- 107 Dong C, Yi Y J, Liu S S, et al. Application of *Camellia* saponin in the preservation of bananas (in Chinese). Sci Technol Food Ind, 2022, 43: 307–313 [董晨, 易有金, 刘思思, 等. 油茶皂素在香蕉保鲜中的应用. 食品工业科技, 2022, 43: 307–313]
- 108 Chen B J, Liu R K, Xiao Z H, et al. Research progress on preparation of lignin nanoparticles and application of their composite films in food packaging (in Chinese). Mod Chem Ind, 2024, 44: 22–26 [陈炳洁, 刘汝宽, 肖志红, 等. 木质素纳米颗粒的制备及其复合薄膜在食品包装中的应用研究进展. 现代化工, 2024, 44: 22–26]
- 109 Wu Y Y, Xie M Y, Qiu Z Y, et al. Preparation and properties of *Camellia oleifera* shell lignin nanoparticles/chitosan composite film (in Chinese). Biomass Chem Eng, 2024, 58: 14–22 [吴怡颖, 解明显, 邱展英, 等. 油茶果壳木质素纳米颗粒/壳聚糖复合膜的制备及性能研究. 生物质化学工程, 2024, 58: 14–22]

Research progress on high-value utilization of *Camellia oleifera* processing residues

ZHANG Jing¹, ZHANG ShuYi¹, ZHOU Miao¹, LIU LiHeng², LIN JianFei¹, HE Lu¹, ZHANG Ji¹,
FAN GuoRong¹, PENG DaYong¹ & CHEN ShangXing^{1*}

¹ National Engineering Research Center for Woody Spices (East China), Jiangxi Provincial Key Laboratory of Native Tree Species Breeding and Efficient Utilization, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

² School of New Energy Science and Engineering, Xinyu University, Xinyu 338004, China

* Corresponding author; E-mail: csxing@jxau.edu.cn

Camellia oleifera, as a characteristic woody oil resource in China, has significant implications for the development of biomass refining and circular economy through the resource utilization of its processing residues (fruit shells, cake meal, branches and leaves). These residues are rich in lignocellulose and active components such as saponins, proteins, polysaccharides, and polyphenols. However, due to the significant interaction among multiple components and low extraction and separation efficiency, traditional technologies are difficult to achieve full quality transformation. This paper summarizes the current research progress on the extraction and separation technologies of active components and derivative products of *Camellia oleifera* processing residues based on their classification system. It reviews the structural characteristics, extraction processes, processing technologies, and product applications of natural products such as saponins, proteins, polyphenols, and polysaccharides. It also deeply analyzes the challenges faced in the high-value utilization of *Camellia oleifera* processing residues and proposes targeted solutions and future development directions, with the aim of providing theoretical guidance for expanding the deep processing and utilization of *Camellia oleifera* by-products and promoting the sustainable development of the entire industry chain from planting, harvesting to processing.

***Camellia oleifera* fruit shells, *Camellia oleifera* cake meal, extraction and separation technology, high-value application, application prospects**

doi: [10.1360/SSV-2025-0235](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0235)