

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.05.025

油茶饼粕综合利用研究进展

刘海, 郭少海*, 李慧*, 朱亚艳, 许杰, 王港, 魏莹莹
(贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 油茶饼粕是油茶提油后的副产物, 富含茶皂素、多糖、蛋白质、多酚等多种活性成分, 具有较高的应用价值, 是油茶籽油生产过程中产生的优质资源。随着我国油茶产业的迅速发展, 油茶饼粕产量持续激增, 油茶饼粕的合理化、高值化应用迫在眉睫。近年来, 油茶饼粕化学成分、提取工艺及综合利用方式等研究趋于深入, 油茶饼粕逐渐被应用于饲料、食品、医药、化工、肥料等相关领域, 特别是在功能食品和医药领域中具有较大的应用潜力。该文对油茶饼粕的化学成分、提取工艺以及利用方式等研究进展进行综述, 以期对油茶饼粕的持续深入研究及资源开发利用提供参考。

关键词: 油茶饼粕; 主要成分; 综合利用; 生物活性; 提取

Comprehensive Utilization of *Camellia oleifera* Seed Cake: A Review

LIU Hai, GUO Shaohai*, LI Hui*, ZHU Yayan, XU Jie, WANG Gang, WEI Yingying
(Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, Guizhou, China)

Abstract: The *Camellia oleifera* seed cake (CSC), a by-product after oil extraction from *C. oleifera* seed, is rich in active components including tea saponin, polysaccharides, protein, polyphenols. Therefore, its application value makes it a high-quality resource produced in the production of *C. oleifera* seed oil. The rapid development of the *C. oleifera* seed oil industry has brought a continuous surge in the output of CSC, promoting the rationalization and high-value application of CSC to be the concern. In recent years, the research on the extraction process, chemical composition, and comprehensive utilization of CSC has been deepened, and it has been gradually applied in fields related to feed, food, medicine, the chemical industry, and organic fertilizer, with an especially high application potential in the fields of functional food and medicine. The research progress of chemical composition, extraction process, and utilization methods of CSC were reviewed in this paper to provide a reference for further research and utilization of CSC.

Key words: *Camellia oleifera* seed cake; main component; comprehensive utilization; biological activity; extraction

引文格式:

刘海, 郭少海, 李慧, 等. 油茶饼粕综合利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 187-195.

LIU Hai, GUO Shaohai, LI Hui, et al. Comprehensive Utilization of *Camellia oleifera* Seed Cake: A Review[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 187-195.

油茶属于山茶科山茶属植物, 是我国特有的木本食用油料经济作物, 具有 2 300 多年的栽培和利用历史, 与油棕、橄榄和椰子并称为世界四大木本食用油料。油茶籽油富含不饱和脂肪酸, 是优质的食用木本粮油来源。近年来, 我国油茶产业得到了快速发展, 种

植面积已突破 467 万 hm^2 , 油茶籽产量约 400 万 t。根据《加快油茶产业发展三年行动方案(2023—2025 年)》的规划, 预计到 2025 年, 全国油茶种植面积达到 600 万公顷以上, 油茶籽油产能将达到 200 万 t。

油茶饼粕(*Camellia oleifera* seed cake, CSC)是指油

基金项目: 中央财政林业改革发展资金项目(贵[2022]TG01 号); 贵州省林业科研项目(黔林科合[2022]15 号、黔林科合[2022]09 号); 贵州特色林业产业科研项目(特林研 2020-15); 贵州省优秀青年科技人才培养计划专项资金资助项目(黔科合平台人才[2019]5643)

作者简介: 刘海(1988—), 男(汉), 助理研究员, 硕士研究生, 研究方向: 经济林加工与利用。

*通信作者: 郭少海(1968—), 男(汉), 正高级工程师, 研究方向: 经济林加工与利用; 李慧(1982—), 女(汉), 高级工程师, 研究方向: 经济林加工与利用, 林业勘察设计。

茶籽去壳(或部分去壳)后进行压榨或浸提制油后的加工剩余物,是油茶籽油加工过程中产生量最大的加工剩余物。随着我国油茶籽油产能不断提升,油茶饼粕产量也随之增加。目前,我国对油茶饼粕的规模化综合利用以粗加工为主,而高值化应用则停留在实验室阶段。随着油茶籽油制取工艺不断成熟,油茶产业链条不断延伸,油茶产品市场需求不断增多,油茶饼粕的综合利用程度逐渐成为影响油茶资源开发利用和降低生产成本的重要因素。本文对油茶饼粕综合利用的研究和加工现状进行综述,以期对油茶饼粕资源的进一步合理开发利用提供参考。

1 油茶饼粕主要成分

油茶饼粕的主要成分包括纤维素、木质素、蛋白质、多糖、多酚、茶皂素、生物碱、黄酮以及少量的残留油茶籽油等物质。其中,蛋白质占10%~15%,茶皂素占10%~15%,多糖占20%~40%,脂肪占6%~10%、粗纤维占15%~20%、粗灰分占6%、单宁占2%、咖啡碱占0.95%以及14%的水分^[1]。油茶饼粕富含多种生物活性物质,是油茶加工过程中产生的优质资源,具有极高的应用价值。

2 生物活性物质利用

2.1 蛋白质

油茶饼粕蛋白质含有16种氨基酸,7种人体必需氨基酸,赖氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸的占比较高,且氨基酸比例均衡。油茶饼粕蛋白主要由白蛋白、球蛋白、醇溶性蛋白组成,以白蛋白和球蛋白为主,占总蛋白含量的86.19%,水溶性良好,溶解度可达72.57%。油茶饼粕蛋白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,且呈现出浓度依赖性关系,并能螯合金属离子。油茶饼粕蛋白还有胆酸盐吸附能力和胆固醇酶抑制能力,可通过抑制胰脂肪酶活性,阻止脂肪水解,减少肠道脂肪吸收,从而起到降脂的效果^[2]。由此可见,油茶饼粕蛋白是一种优质的可食用功能性植物蛋白,在功能食品方面具有极高的开发价值,可作为蛋白质添加剂或动物蛋白替代品,制作功能食品、特医食品等。

蛋白质来源丰富,可再生,又具有良好的生物相容性和生物降解性,已被广泛应用于纳米颗粒的制作。与合成纳米材料相比,蛋白质独特的理化特性和生物学特性,使其溶解度更高、致敏性更低、反应表面更大、吸附能力更强且生物渗透率更快,在生物活性物质的包埋和传递方面更具有优势。白蛋白是油茶饼粕蛋白质的主要成分,在制备药物制剂方面具有巨大潜力。白蛋白是人体中最重要的蛋白质之一,发挥着转运多种生物活性物质的生理作用。以白蛋白作为药物的转

运载体,不但可以减少过敏反应,而且更具生物相容性、免疫原性和生物降解性。白蛋白含有多种不同的官能团,可通过多种机制将各种药物与白蛋白纳米颗粒结合(如离子或共价交联、聚电解质络合和自组装等)。白蛋白可结合大量的药物,具有更多的药物载量和种类。靶向性和药物释放可控制性更让白蛋白纳米颗粒在特异性递送药物方面得到了广泛的应用。Yu等^[3]将油茶饼粕蛋白作为叶黄素递送的纳米颗粒,提高了叶黄素的储存稳定性,在肠道消化中的生物可及性从26.8%提高到57.3%,在医药方面展示出极高潜在应用价值。而在肿瘤治疗方面,采用完全由油茶饼粕蛋白组成的纳米载体,可以明显降低肿瘤的间质液压力(interstitial fluid pressure, IFP)和固体应力,表现出良好的细胞摄取能力和细胞相容性,很大程度上克服了肿瘤微环境复杂、药物很难到达目的地的难题,呈现较好的抗肿瘤效率^[4]。

Pickering乳液是以超微固体颗粒作为乳化剂的乳液,将一种液体以细液滴(通常约0.1~10 μm)形式分散到另一种不混溶的液体中形成的系统,但两种不混溶液体间界面面积的增加,在热力学上通常是不稳定的,因此需要乳化剂进行稳定,而蛋白质作为天然的乳化剂,对Pickering乳液体系的稳定起到关键作用。油茶饼粕蛋白是一种自然折叠的蛋白质,具有良好的乳化能力,这源于其内部具有大量的疏水性氨基酸残基和较高的分子量,二级结构中β-折叠较多、α-螺旋较少、表面疏水性更高。Cui等^[5]采用油茶饼粕蛋白制作了Pickering乳液,使用6.5:3.5(体积比)的油水比和3%的蛋白质浓度制备了具有凝胶特性的稳定乳液,在极端环境下可有效保护表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)不发生化学降解,并能显著延迟EGCG的释放,肠道生物可利用性提高了30.8%。油茶饼粕蛋白能形成稳定的Pickering乳液,可能还取决于油茶饼粕蛋白中所含的天然油质蛋白。油茶油质蛋白具有界面活性和胶体稳定的双亲性,能在油滴的油水界面周围形成稳定层,作为亲脂性生物活性化合物的有效递送系统^[6]。

2.2 多肽

利用酶水解技术制备功能多肽是油茶饼粕高值化、生态化利用的重要方式。以油茶饼粕为原料制得的多肽具有抗氧化、降血脂、增强免疫力、预防高血压等功能。Zhu等^[7]在油茶饼粕酶水解液中分离得到Val-Val-Pro-Gln-Asn的活性多肽,可以非竞争性方式抑制血管紧张素I转换酶(angiotensin converting enzyme, ACE)活性,预防高血压,并具有良好的环境稳定性。而Zheng等^[8]分离得到的则是一种六肽(Gly-Tyr-Gly-Tyr-Asn-Tyr),可以通过短氢键与ACE的8个活性位点结合,从而抑制ACE活性。以油茶饼粕为原料也能制备具有抗糖尿病活性的多肽。Zhang等^[9]从油茶饼

酶解液中分离出了2种多肽,分别为 Leu-Leu-Val-Leu-Tyr-Tyr-Glu-Tyr 和 Leu-Leu Leu-Pro-Ser-Tyr-Ser-Glu-Phe,前者对 α -葡萄糖苷酶有非竞争性抑制,而后者则是表现出混合抑制机制,两者均具有较高的 α -葡萄糖苷酶抑制活性。

2.3 多糖

多糖对维持生命活动起着至关重要的作用,其和蛋白质、核酸、脂类是维持生命活动最基本的4类物质。植物多糖由于来源广泛且易得,日益受到关注。许多植物多糖具有多种生物活性,包括降血糖、降血脂、抗肿瘤、抗菌、抗病毒、抗辐射、免疫调节、保护肝脏等生理作用^[10]。当前,植物多糖已被广泛运用到医学和食品等大众生活领域。油茶饼粕中含有多种多糖类物质,含量可达20%~40%,且部分多糖物质具有特殊的生物活性。油茶饼粕多糖对 ABTS⁺自由基、DPPH 自由基、羟自由基均具有良好的清除作用,可加强酶促和

非酶促抗氧化防御系统,清除体内自由基,减少机体氧化损伤,提升抗氧化活性,缓解衰老引起的氧化应激,通过降低活性氧(reactive oxygen species, ROS)水平和维持线粒体膜电位(mitochondrial membrane potential, MMP)平衡来保护细胞免于凋亡,保护机体健康^[11]。油茶饼粕多糖的降血糖活性可能也是通过提高机体抗氧化酶活性,解除自由基对机体的损害来实现的。通过增强机体谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的活性,并降低丙二醛(malondialdehyde, MDA)的含量,从而缓解机体氧化应激,达到降血糖的作用^[12],这和茶叶多糖的降血糖机制相似^[13]。此外,油茶饼粕多糖还具有改善肠道代谢,提高肠道菌群多样性的功效^[14]。

油茶饼粕多糖的单糖组成、分子量和生物活性见表1。

表1 油茶饼粕多糖的单糖组成、分子量和生物活性

Table 1 Monosaccharide composition, molecular weight, and biological activity of polysaccharides in CSC

单糖组成	单糖(物质的量之比)	分子量/Da	生物活性	参考文献
甘露糖、葡萄糖、木糖	1.77:0.93:1.00	7.16×10 ⁶	降血糖	[12]
甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、木糖	5.27:1.21:0.16:1.00	2.00×10 ⁴	降血糖	[12]
半乳糖醛酸、葡萄糖、鼠李糖、半乳糖、甘露糖、阿拉伯糖	8.38:9.38:9.76:9.60:7.90:12.80	7.02×10 ⁴	改善肠道环境	[14]
半乳糖醛酸、葡萄糖、鼠李糖、半乳糖、甘露糖、阿拉伯糖	3.10:10.49:8.76:11.37:9.87:14.95	2.46×10 ⁶	改善肠道环境	[14]
木糖、葡萄糖醛酸、半乳糖胺、甘露糖	10.9:4.4:2.6:1.8	4.736×10 ³	降血糖	[15]
半乳糖、木糖	4.6:5.57	未知	降血脂	[16]
甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、木糖	1.00:16.82:19.80:103.46:41.90	8.26×10 ⁴	抗氧化	[17]
鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖	1.29:1.65:5.81:1.00:16.15:14.47	2.59×10 ⁴	防止氧化应激	[18]

从油茶饼粕中分离出的多糖会含有一些特殊的结构,如硫酸根、磷酸基团、吡喃结构等^[16-17]。这些结构会一定程度影响油茶饼粕多糖的功效,如分支寡糖链与多肽链共价相连所构成的糖蛋白,因其结构的特殊性,往往表现出更强的生物活性。Li等^[18]从油茶饼粕中分离出一种糖蛋白,蛋白质和碳水化合物含量分别为54.28%和45.29%,在体外表现出优异的自由基清除能力,并能显著增强小鼠组织中的SOD和GSH-Px活性,降低MDA和总巯基含量,在体内表现出良好的抗氧化活性。糖蛋白还可通过上调促凋亡蛋白Caspase-3和Bax表达,下调抗凋亡蛋白Bcl-2表达,诱导HepG2细胞周期阻滞并降低线粒体膜电位,从而对HepG2细胞的生长产生明显的抑制作用,抑制率可达92.1%,在体内抗癌方面也表现出了良好的效果。油茶饼粕多糖的生物活性与其结构特征(如单糖组成、分子大小、糖基连接类型、分支结构和构象特征)密切相关,

通过研究其结构与功效间的关系,有助于油茶饼粕多糖的开发应用。但由于油茶饼粕多糖由多个单糖组成,每个单糖残基又有多个连接位点,且构型分为 α 和 β 两种,使得糖苷键具有多种连接可能性,所形成的结构复杂多样。此外,油茶饼粕多糖还会与蛋白、多酚、皂苷等结合,形成高级结构更加复杂的大分子物质,从而导致其结构分析难度加大。因此,对油茶饼粕多糖的构效分析将是油茶饼粕多糖进一步深入研究的难点。

2.4 多酚

油茶饼粕中富含多酚类化合物。Hong等^[19]在3个品种油茶饼粕中共鉴定出了73种单体酚类物质。其中,总酚含量高达259.16 $\mu\text{g/g}$,游离态多酚为179.38 $\mu\text{g/g}$,结合5态酚为79.78 $\mu\text{g/g}$ 。游离态酚酸以香豆酸为主,含量高达131.37 $\mu\text{g/g}$,是油茶饼粕中多酚类化合物的主要成分,游离态的类黄酮(儿茶素、表儿茶素、表儿茶素没食子酸酯、槲皮素、柚皮素和山奈酚)

含量为0.40~53.64 $\mu\text{g/g}$ 。可见油茶饼粕中的多酚类化合物不仅含量高,且大多数以游离形式存在,但不同品种和采收期会存在差异^[20]。

从油茶饼中分离出的多酚类化合物具有多种生物活性。Xie 等^[20]发现油茶饼粕中的绿原酸、5,7-二甲氧基-4'-羟基黄酮和山奈酚-3-O-芸香糖苷具有良好的 ABTS⁺ 自由基清除能力和 FRAP 还原能力,能通过增强细胞活力、增强 SOD 活性、降低 MDA 和 ROS 含量、减少细胞凋亡、抑制 NF- κ B 信号通路的激活来减轻细胞的氧化损伤。而黎国庆等^[21]分离出的山奈酚-3-O-[2-O- β -D-半乳糖-6-O- α -L-鼠李糖]- β -D-葡萄糖苷和山奈酚-3-O-[2-O- β -D-木糖-6-O- α -L-鼠李糖]- β -D-葡萄糖,能抑制肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、一氧化氮(nitric oxide, NO)、诱导型一氧化氮

合酶(inducible nitric oxide synthase, iNOS)的表达释放,表现出良好的抗炎活性,这可能源于其良好的抗氧化能力。油茶饼粕中多酚类物质还具有抗菌、抗癌、降血压、降血脂等作用^[22]。油茶饼粕多酚类化合物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^[23]。

2.5 茶皂素

茶皂素又名茶皂苷、茶皂甙,是一类糖苷类化合物。茶皂素由亲水基(糖体)、疏水基(有机酸)和皂苷元组成,糖体主要含有葡萄糖醛酸、阿拉伯糖、木糖和半乳糖,有机酸主要有当归酸、醋酸等^[24],茶皂素结构的多样性主要由于皂苷元配基的不同,糖体、有机酸的连接方式和顺序的不同^[25]。茶皂素的分子结构见图1。

茶皂素由疏水性苷元和亲水性糖基残基组成,具

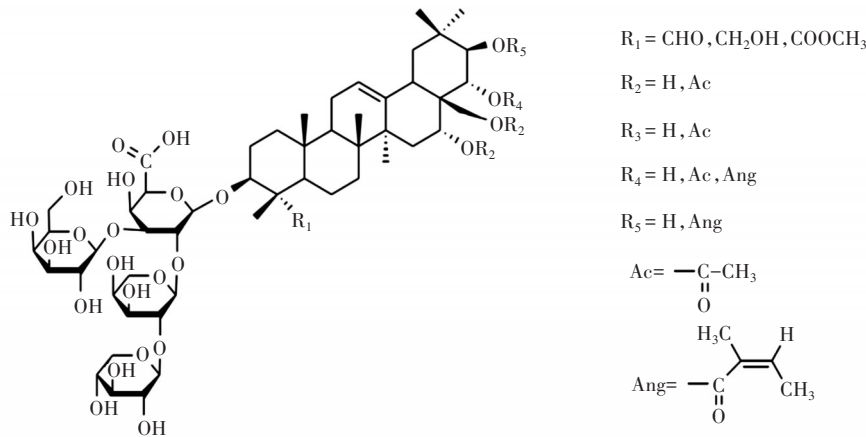


图1 茶皂素的分子结构

Fig.1 Molecular structure of tea saponin

有亲水性和亲油性,可明显降低溶液的表面张力,具有比较好的乳化、分散、湿润、发泡、稳泡、润湿、除污的作用,是一种良好的植物源天然非离子表面活性物质^[24]。与化学洗涤产品相比,茶皂素不仅去污能力强,还易降解,对环境友好,已被用于制作环保洗涤产品。因其优异的发泡性,茶皂素还被用于绿色环保的阻燃材料中, Qian 等^[26]采用油茶饼粕提取的茶皂素,与聚磷酸铵、戊二菊糖醇复合制作膨胀型阻燃涂料,经高温热处理后,茶皂素作为发泡剂能在低温下降解为水蒸气,而在高温下又能作为酸与聚磷酸铵发生脱氨反应,在基材表面释放氨和水,隔绝氧气,降低温度。同时茶皂素还可作为一种含碳材料,与聚磷酸铵和戊二菊糖醇协同作用,形成稳定性强、含碳量高的芳香环酯膨胀炭层,这个炭层不易被高温热解,可形成一层屏障,保护基材不被烧毁。将茶皂素制作膨胀型阻燃涂料,能显著提高材料的阻燃性。茶皂素由于其两亲性可以与细胞膜上胆固醇形成络合物,使细胞通透性增加,导致血红蛋白流失,产生溶血现象。因此,茶皂素常被作为清塘剂用于水产养殖。近几年研究发现,茶皂素对根结线虫、小

菜蛾幼虫、蚜虫成虫等具有良好的防治效果,而且作用方式多样,从油茶饼粕提取茶皂素作为天然植物源农药用于防治植物害虫,是油茶饼粕的有效利用方式之一^[27-29]。

从油茶饼粕中分离的茶皂素还具有多种生物活性,如抗癌、抗炎、抗菌、抗氧化、降血脂、降血糖、抑制透明质酸酶、抑制酒精吸收、调节胃肠道系统、保护神经等^[30]。随着茶皂素生物活性的发现,逐渐成为医药领域的研究热点,特别是其较强的抗癌活性。Wu 等^[31]采用 Huh-7、HepG2、Hela、A549 和 5 种典型肿瘤细胞系对从油茶饼中新发现的茶皂素单体进行细胞毒性和抗肿瘤性能评价,其半数有效量(medium effective dose, ED₅₀)值为 1.5~11.3 $\mu\text{mol/L}$ 时,与抗癌药物顺铂相当,具有较强的抗肿瘤活性。通过上调 Bax 蛋白表达和下调 Bcl-2 蛋白表达,调控癌细胞凋亡,抑制肿瘤生长^[32]。在食品工业中,茶皂素主要应用于食品乳化、营养物质递送、功能物质提取、糖化发酵、保鲜防腐等方面。此外,茶皂素还能增强植物对污染物吸收,实现污染土壤修复,还可以作为一种饲料的绿色添加剂,提升养殖生

产性能和质量。目前,茶皂素已被广泛应用于轻工、医药、农药、养殖、纺织、建材等领域,是油茶饼粕规模化、增值化综合利用的重要途径之一。

3 油茶饼粕活性物质提取

3.1 蛋白质提取

油茶饼粕蛋白等电点在 pH5 左右,此时溶解度最低,但在碱性条件下,溶解性随着 pH 值增加而提高,在 pH12 时其溶解度达到最大。因此,油茶饼粕蛋白提取一般采用碱溶酸沉的方法进行。林莉等^[33]采用碱溶酸沉法提取脱脂油茶饼中的蛋白质,料液比 1:20 (g/mL)、浸提时间 80.22 min、浸提温度 59.35 °C、pH8.29 工艺下蛋白质提取率为 65.21%。而经过淀粉酶和纤维素酶的处理后,蛋白质的提取率可以提高到 80.83%。这可能与酶处理能提高蛋白的溶解性和溶出率有关。不同的提取方法对油茶饼粕蛋白的提取效率影响很大,提取的蛋白质结构性质和功能特性也会有所不同。吕静等^[34]对不同方法提取的油茶饼粕蛋白质对比分析发现,超声波处理会使蛋白质的二级结构产生变化,使乳化性、起泡性得到提高,凝胶性也有所改善;酶处理得到的蛋白质则会有较好的乳化稳定性和起泡性,而碱溶酸沉处理得到的蛋白质起泡稳定性更好。

不同的原料也会对提取的蛋白性质形成影响,物理榨油过程,高压会使蛋白分子的二硫键断裂,结构展开,粒径变小,增加 α -螺旋,减少无规卷曲结构,疏水作用增加,从而增强乳化能力,且物理压榨处理的蛋白质还会表现出更好的抗氧化活性^[35]。对油茶饼粕原料进行处理,可以达到蛋白品质提升,理化特性改善的目的。有学者采用蒸汽爆破对油茶饼粕进行处理,改变油茶蛋白质的二级结构,降低 α -螺旋、无规卷曲、 β -转弯含量,明显提升油茶蛋白质的溶解度,改善发泡性和乳化性^[36]。而 Yu 等^[37]则采用化学方式改变油茶饼粕蛋白质的结构,以碱辅助磷酸化改善蛋白质的水溶性、油水界面吸附能力、乳化能力、起泡性和体外消化性等品质。通过物理和化学等方式提升油茶饼粕蛋白质的品质,可以实现油茶饼粕蛋白更广的用途。

3.2 多肽提取

活性多肽的制备方法主要有直接提取、生物发酵和酶水解等。油茶饼粕制备活性多肽主要采用酶水解的方式进行,但目标活性多肽分子量和氨基酸序列的不同,采用的水解酶种类和水解工艺会存在差异。利用油茶饼粕水解制备活性肽的酶制剂主要有碱性蛋白酶、中性蛋白酶、胰蛋白酶、木瓜蛋白酶等。有研究表明,用碱性蛋白酶水解后所得的多肽对 O_2^- 的清除能力、还原能力和抑制亚油酸过氧化的活性均较强,分别为 59.93%、0.621 和 53.19%,而经木瓜蛋白酶水解后得到的多肽则具有较强的清除 DPPH 自由基的能力,清除率为 46.89%,可以显著减轻活性氧对机体的损

害,增强机体的抗氧化能力^[38]。采用 6% 的碱性蛋白酶对底物浓度 17 mg/g 的油茶饼粕进行水解,pH 值为 8.5,温度 50 °C,作用 3.5 h,制备的活性多肽对 ACE 表现出明显的抑制作用,抑制率达到了 79.24%^[39],这可能因水解条件不同,水解的活性肽结构具有差异,表现出的生物活性有所不同。Feng 等^[40]比较了碱性蛋白酶、风味蛋白酶、木瓜蛋白酶、胰蛋白酶制备的油茶饼粕蛋白水解物的 α -葡萄糖苷酶抑制活性发现,碱性蛋白酶的水解物具有较高的 α -葡萄糖苷酶抑制活性,并认为其中的 3 种新型活性肽是抗糖尿病主要活性成分,具有功能食品的开发价值。综上,不同酶制剂及水解条件,对油茶饼粕多肽结构与活性有很大的影响。

3.3 多糖提取

油茶饼粕多糖的主要提取工艺包括溶剂提取法、微波辅助提取法、超声波辅助提取法以及酶提取法等。不同料液比、提取时间、提取温度均会影响多糖的提取率。水提醇沉法是油茶饼粕多糖提取的主要方法,料液比 1:25 (g/mL)、提取时间 78 min、提取温度 60 °C,多糖提取率为 11.29%^[41]。采用超声波和微波辅助提取,可提高多糖的提取率,在超声时间 10 min,料液比 1:20 (g/mL),浸提温度 60 °C,浸提时间 120 min 的条件下,多糖提取率为 16.76%^[42]。将热水浸提工艺与中性蛋白酶相结合,油茶饼粕多糖提取率可达到 18.5%^[43]。Gao 等^[44]研究了一种基于环氧乙烷-环氧丙烷共聚物和低共熔溶剂的热分离双水相系统提取和纯化油茶饼粕多糖,多糖的最大提取率为 152.37 mg/g。此外,不同的提取方法还会影响提取多糖的类型、结构及生物特性。

3.4 多酚提取

溶剂提取法是现代工业化生产中提取多酚类化合物最常用的方法,同时采用超声波、微波等方式加以辅助,可提高得率和总酚含量^[45],油茶饼粕多酚类化合物主要提取工艺如表 2 所示。

表 2 油茶饼粕多酚类化合物主要提取工艺
Table 2 Main extraction processes for polyphenols in CSC

提取方法	提取工艺	结果
溶剂萃取法 (乙醇浸提)	乙醇浓度 60% (体积比), 提取温度 80 °C, 提取时间 30 min, 料液比 1:20 (g/mL)	总酚提取率 1.34%, 含量 4.76%
溶剂萃取法 (丙酮浸提)	料液比 1:15 (g/mL), 提取液浓度 60%, 提取温度 50 °C, 提取时间 0.5 h	提取率 3.217%
超声波辅助 浸提法	乙醇浓度 73%, 料液比 1:15 (g/mL), 浸提时间 60 min, 浸提温度 90 °C	提取率 1.748%
微波辅助浸 提法	微波功率 600 W, 微波时间 5.5 min, 微波温度 63 °C, 乙醇体积分数 48%, 料液比 1:70 (g/mL)	提取得率 42.29 mg/g
生物酶辅助 浸提法	纤维素酶和果胶酶的比例为 1:2 (质量比), 料液比 1:23 (g/mL), 乙醇浓度 55% (体积比), 温度 50 °C, 时间 0.85 h, 超声波乙醇溶液浸提	提取得率 18.94 mg/g

采用乙醇水溶液对油茶饼粕多酚提取,提取率为1.34%,总酚含量4.76%,利用超声波辅助后,提取率和总酚含量分别增加到1.42%和4.89%。但有研究者发现,采用丙酮作为溶剂对油茶饼粕多酚的提取率要显著高于甲醇和乙醇,提取率高达3.217%,且主要表现在儿茶素、表儿茶素、芦丁和槲皮素的提取率差异上。与水、甲醇和乙醇溶剂相比,采用多元醇提取的总酚含量较高,特别是类黄酮含量差异较为明显,并具有较强的抗氧化活性^[46]。

微波是油茶饼粕多酚物质提取的常用辅助方法之一。作为能够从物料内部开始有选择性的加热方法,微波可使物料在提取过程中均匀受热,从而加速溶出提取物质,提高效率。采用微波对油茶饼粕多酚进行提取,实际提取量可达42.29 mg/g,提取的多酚表现出良好的抗氧化活性,对DPPH自由基、超氧阴离子自由基、羟自由基的最高清除率分别达到了83.76%、83.38%、34.96%^[47]。微波可使油茶饼粕中的细胞壁发生水解,增加酚类物质的溶出,释放结合态酚,提高总酚提取率。如采用700 W微波加热一段时间后,总酚含量增加34.45%,而ABTS⁺自由基清除率增加32.1%,多酚抗氧化活性的提高,可能与微波处理过程中加热引发的美拉德产物等极性(甲醇/水提取)抗氧化物质有关^[48]。可见微波处理方式有助于提高多酚的提取率和抗氧化能力。

3.5 茶皂素提取

油茶饼粕中茶皂素的提取方法主要有水提法和醇提法(甲醇、乙醇、正丙醇等),提取率可以达到95%以上。其中,乙醇具有提取效果好、毒性低、价格低且容易获得等特点,常被作为油茶饼粕提取茶皂素的主要提取剂。目前,采用乙醇作为提取剂的连续提取方法已被广泛应用于规模化生产中,此工艺提取后茶皂素残留低至1.79%,得率达到21.5%^[49]。采用水作为溶剂的茶皂素提取率可达85%,并能减少乙醇和甲醇用量,极大降低生产成本,被认为是一种绿色环保的低成本提取方式^[50]。利用超声波和微波等方式进行辅助,可提高茶皂素的提取率。张雪莉等^[51]采用超声波辅助,在20、50、35 kHz顺序交替超声模式下进行提取,茶皂素得率显著提高,达到22.79%。与传统方法相比,微波辅助可缩短提取时间,减少溶剂用量,提取率可提高14%^[52]。此外,采用超高压辅助提取工艺,也可明显提高茶皂素得率。近年来,低共熔溶剂被认为是一类新型的绿色和可持续溶剂,因其低成本、宽极性、高效性、生物降解性和环境友好性逐渐成为普通有机溶剂的通用替代品,被广泛应用于天然功能性生物活性物质的分离提取。Tang等^[53]以L-脯氨酸、甘油和蔗糖组成的低共熔溶剂提取油茶饼粕中的茶皂素,提取率可达23.22%,且茶皂素结构不会发生改变,这为油

茶饼粕中茶皂素分离提取提供了一种新方法,可极大提升茶皂素的提取效率,降低生产成本。

但当前油茶饼粕规模化生产提取的茶皂素纯度只有60%左右,不能完全满足茶皂素的大部分领域,特别是医药领域的应用要求,导致其经济价值低下。油茶饼粕中茶皂素的纯化方法包括重结晶法、萃取法、生物纯化法、沉淀法、吸附分离法和膜分离法等。其中,采用大孔吸附树脂吸附纯化茶皂素粗品是目前研究较多的一种方法,可将茶皂素纯化到95%左右。但吸附树脂吸附纯化生产成本较高,在生产过程中应用较少。张耀洲等^[54]采用乙醇提取-丙酮沉淀法对茶皂素进行提取分离,纯度85.17%,得率9.82%,为茶皂素规模化生产及纯化提供参考。顾姣等^[55]利用超滤膜法对茶皂素进行分离提纯,茶皂素透过率64.39%,纯度84.16%,使超滤膜法在茶皂素的生产应用中成为可能。

4 油茶饼粕的直接利用

油茶饼粕除了对其中的活性成分进行提取利用,还可对其进行简单处理后直接利用,如饲料、肥料、活性炭、清塘剂等。

4.1 饲料

将油茶饼粕作为饲料加工利用是油茶饼粕最早利用的有效途径之一。油茶饼粕中的营养成分和有益因子可显著提升动物的饲养效益,是动物饲料的优质资源。但油茶饼粕中含有溶血性的茶皂素,影响了油茶饼粕在饲料方面的应用。将油茶饼粕开发成饲料,需要对其进行脱毒,去除油茶饼粕中的茶皂素。较早的脱毒方式是采用浸提方式去除,虽可达到无毒理反应,但会造成油茶饼粕中营养物质损失。生物降解脱毒是利用菌株产生酶以降解油茶饼粕中茶皂素的方法,能有效保留油茶饼粕中的营养物质,但不同菌株对茶皂素的分解效率存在差异,茶皂素降解菌株及效果见表3。

表3 茶皂素降解菌株及效果

Table 3 Strains in degrading tea saponin and their effects

发酵菌种	发酵形式	结果/%
柠檬酸杆菌(<i>Citrobacter</i> sp.)	液态发酵	82.60
面包乳杆菌(<i>Lactobacillus crustorum</i>)	固体发酵	84.25*
黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)	固态发酵	93.96
施氏假单胞菌(<i>Pseudomonas stutzeri</i>)	液态发酵	66.92
铜绿假单胞菌(<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	液态发酵	71.95
桔青霉(<i>Penicillium citrinum</i>)	液态发酵	36.71
青霉(<i>Penicillium</i>)	液态发酵	83.11
嗜酸小球菌(<i>pediococcus acidilactici</i>)	固态发酵	68.42
枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)	固态发酵	72.18
地衣芽孢杆菌(<i>Bacillus licheniformis</i>)	液态发酵	90.00

注:*表示油茶粕的皂苷元含量,其余为茶皂素降解率。

黑曲霉、枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、地顶孢霉、酵母、乳酸菌等菌株能产生纤维素酶、蛋白酶、淀粉酶等多种酶系,从而降低油茶饼粕中的纤维素、单宁等物质,增加粗蛋白、氨基酸、麦角甾醇等营养物质,改善适口性和饲料风味,显著提升油茶饼粕的饲用价值^[56-57]。

4.2 有机肥

油茶饼粕有机肥的制作方式主要为固态堆肥发酵,这种方式生产成本低,容易推广。要实现油茶饼粕有机肥工业化生产,则必须实现人工接种发酵,研发高效发酵生产工艺,筛选适宜发酵生产菌株。采用毛霉、哈茨木霉和黑曲霉作为油茶饼粕发酵菌种,其发酵效果要优于自然发酵,可大幅度提升发酵后的有效氮、有效磷和有效钾。然而,油茶饼粕中含有一定量的茶皂素和单宁物质,会对发酵微生物造成不利影响。张晖等^[58]比较分析了油茶饼粕在土壤自然发酵过程中微生物群落组成变化,发现油茶饼粕在20%含量时显示出更好的微生物多样性,发酵过程中噬几丁质菌科、鞘脂单胞科、黄单胞菌科的相对丰度均较高。油茶饼粕有机肥发酵,通常会添加一定比例的油茶果壳和油茶籽壳,既能改善有机肥品质,又能实现油茶剩余物的全值利用,与羊粪、猪粪等农林废弃物混合发酵,则可增加油茶饼粕有机肥微生物多样性,提升有机肥的施用效果。将油茶饼粕制作成生物炭,结合有机肥施用,可以显著提高土壤呼吸速率,增强脲酶、转化酶、酸性磷酸酶活性,有效提升土壤矿质养分的有效性,提高土壤全碳、全氮、全磷含量和pH值,改良土壤结构^[59]。此外,还有学者将油茶饼粕作为容器育苗基质加以利用,提升了油茶饼粕有机肥的利用价值。

4.3 其他

油茶饼粕除上述应用之外,还被用于活性炭、食用菌生长基质等。董秀婷等^[60]采用磷酸浓度60%、活化温度500℃、活化时间120min的工艺制作油茶饼粕活性炭,所得活性炭收率为46.25%,亚甲基蓝吸附量为12.0 mL/0.1g。王海营等^[61]将油茶饼粕作为代料栽培平菇,优化配方为油茶饼粕16.1%、棉籽壳34.5%、木屑37.4%、糖1%、石膏粉1%,可提高平菇产量并节约成本。

5 结论与展望

油茶籽油富含不饱和脂肪酸,还含有茶皂素、茶多酚、多糖、角鲨烯、维生素E和黄酮类等生物活性物质,被誉为“液体黄金”,是世界卫生组织首推的健康类食用油。油茶籽油的营养成分和保健功效已逐渐被发掘,其营养价值也被认知认同。在油茶籽油营养价值被广泛接受的情况下,油茶产业得到了迅速发展。随着我国油茶籽油产能的迅速增加,油茶饼粕的产量也在不断激增,其存量之大,甚至成为影响我国油茶产业

持续健康发展的主要难题之一。传统的丢弃和焚烧等处理方式很难适应现在我国油茶产业的高质量发展要求,如何降低生物资源浪费,增加油茶加工剩余物综合利用率,提高油茶产品附加值,降低生产成本成为下一步油茶研究的重点方向。

油茶饼粕研究利用比油茶籽油起步晚,特别是油茶饼粕成分的挖掘和应用相对滞后,但随着油茶饼粕中的生物活性物质逐渐被披露,油茶饼粕的研究利用已逐渐成为当前研究的热点。虽然目前对油茶饼粕中的主要成分,如蛋白质、多糖、多酚、茶皂素、角鲨烯、维生素E等进行了一定的研究,但是研究重点主要偏向于成分提取、分离和部分功效特性的归纳和总结,研究深度不够,且相关的生产工艺还停留在实验室阶段,或生产成本较高,无法在规模化生产中应用。对于油茶饼粕的下一步研究,一方面要着重油茶饼粕的实际生产应用研究,不断开发和优化茶皂素、蛋白质、多糖等宏量成分的生产工艺,提高得率和产能,降低损耗和成本。结合当前豆粕减量替代行动和农林土壤改良修复实际,推动油茶饼粕动物蛋白饲料和有机肥的规模化生产技术提升,解决油茶饼粕存量利用的瓶颈问题;另一方面要提升油茶饼粕的应用价值。目前形成规模化生产的成分诸如茶皂素、蛋白质等的提取,其精细化程度不高,导致产品附加值低。油茶饼粕中具有丰富的生物活性成分,在食品加工、营养保健、医疗医药等领域具有极大应用潜力。提升油茶饼粕功能活性成分生产工艺的精细化程度,扩大应用覆盖面,有利于油茶产品加工附加值提升。此外,需对油茶饼粕中生物活性成分单体的结构鉴定、药理功效、量化识别等进行持续深入研究,为油茶饼粕的综合利用提供理论依据和方向指导。

参考文献:

- [1] 张鑫. 油茶粕多糖的制备、结构初探及与乳清蛋白相互作用的研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2022.
ZHANG Xin. Preparation, structure characterization and interaction with whey protein of *Camellia oleifera* cake polysaccharide[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.
- [2] 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[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(18): 108-115.
ZHU Jing, LÜ Jing, CHEN Long, et al. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of protein from *Camellia oleifera* seed-cake and evaluation of its functional activity[J]. Food Research and Development, 2023, 44(18): 108-115.
- [3] 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[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133032.
- [4] QIAN X P, SHEN T H, ZHANG X K, et al. Biologically active *Camellia oleifera* protein nanoparticles for improving the tumor micro-environment and drug delivery[J]. Biomaterials Science, 2020, 8(14): 3907-3915.

- [5] CUI C J, WEI Z Q, HONG Z B, et al. Preparation of water-in-oil Pickering emulsion stabilized by *Camellia oleifera* seed cake protein and its application as EGCG delivery system[J]. LWT - Food Science and Technology, 2023, 179: 114656.
- [6] HUANG Z W, WU X H, LAN X H, et al. *Camellia oleifera* oil body as a delivery system for curcumin: Encapsulation, physical, and *in vitro* digestion properties[J]. Food Biophysics, 2023, 18(4): 596-605.
- [7] ZHU Q N, XUE J W, WANG P, et al. Identification of a novel ACE inhibitory hexapeptide from *Camellia* seed cake and evaluation of its stability[J]. Foods, 2023, 12(3): 501.
- [8] ZHENG Y J, SHI P Q, LI Y, et al. A novel ACE-inhibitory hexapeptide from camellia glutelin-2 hydrolysates: Identification, characterization and stability profiles under different food processing conditions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111682.
- [9] ZHANG Y P, WU F H, HE Z P, et al. Optimization and molecular mechanism of novel α -glucosidase inhibitory peptides derived from *Camellia* seed cake through enzymatic hydrolysis[J]. Foods, 2023, 12(2): 393.
- [10] GONG H, GAN X N, LI Y Z, et al. Review on the genus *Polygonatum polysaccharides*: Extraction, purification, structural characteristics and bioactivities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 229: 909-930.
- [11] CHEN T, TANG M, ZHAO X R, et al. Antioxidant potential evaluation of polysaccharides from *Camellia oleifera* Abel *in vitro* and *in vivo*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 248: 125726.
- [12] 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[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125: 1075-1083.
- [13] GUO H, FU M X, WU D T, et al. Structural characteristics of crude polysaccharides from 12 selected Chinese teas, and their antioxidant and anti-diabetic activities[J]. Antioxidants, 2021, 10(10): 1562.
- [14] 金日生, 单琴, 袁传勋. 油茶籽粕多糖的结构表征及其对肠道菌群的影响[J]. 农产品加工, 2022(1): 7-13.
JIN Risheng, SHAN Qin, YUAN Chuanxun. Structural characterization of *Camellia* Seed meal polysaccharide and its effect on intestinal microflora[J]. Farm Products Processing, 2022(1): 7-13.
- [15] ZHANG S, LI X Z. Hypoglycemic activity *in vitro* of polysaccharides from *Camellia oleifera* Abel. seed cake[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 811-819.
- [16] 张宽朝, 文汉, 陶俊, 等. 油茶籽多糖 I 的分离纯化、单糖组分及降脂作用[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(3): 329-335.
ZHANG Chaokuan, WEN Han, TAO Jun, et al. Purification, components analysis and hypolipidemic activity of a polysaccharide from *Camellia oleifera* Abel. seeds(CPS I)[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(3): 329-335.
- [17] 郭玉华. 油茶籽粕多糖的分离纯化、理化特性及抗氧化活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
GUO Yuhua. Separation, purification, physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides separated from *Camellia oleifera* Abel seed cake[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [18] LI T T, WU C E, MENG X Y, et al. Structural characterization and antioxidant activity of a glycoprotein isolated from *Camellia oleifera* Abel seeds against D-galactose-induced oxidative stress in mice[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103594.
- [19] HONG C C, CHANG C, ZHANG H, et al. Identification and characterization of polyphenols in different varieties of *Camellia oleifera* seed cakes by UPLC-QTOF-MS[J]. Food Research International, 2019, 126: 108614.
- [20] XIE Y J, WANG Y, XIE J H, et al. *Camellia oleifera* seeds cake: Polyphenol profile and *in vitro* antioxidant activities as determined by different harvest periods[J]. Food Bioscience, 2023, 55: 103081.
- [21] 黎国庆, 许承婷, 王立欣, 等. 油茶籽中两个多酚化合物的提取分离及其抗炎活性研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 68-75.
LI Guoqing, XU Chengting, WANG Lixin, et al. Extraction and anti-inflammatory activities of two polyphenols from the cake of *Camellia oleifera* Abel[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition), 2018, 36(3): 68-75.
- [22] LUAN F, ZENG J S, YANG Y, et al. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel: A review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 75: 104242.
- [23] KIM J H, KIM J H, KIM M Y. Effect of extraction solvents on antioxidant and skin-whitening potentials of defatted *Camellia* seed cakes[J]. Journal of Applied and Natural Science, 2022, 14(2): 341-348.
- [24] 张欣欣. 茶籽粕中茶皂素的深加工及应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
ZHANG Xinxin. Study on deep processing and application of tea saponin in tea seed meal[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [25] 司喜艳. 油茶饼粕中茶皂素的提取、纯化及其应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
SI Xiyan. Study on extraction, purification and application of tea saponins from *Camellia* seed meal[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [26] QIAN W, LI X Z, ZHOU J, et al. High synergistic effects of natural-based tea saponin in intumescent flame-retardant coatings for enhancement of flame retardancy and pyrolysis performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 127: 408-418.
- [27] DOLMA S K, SHARMA E, GULATI A, et al. Insecticidal activities of tea saponin against diamondback moth, *Plutella xylostella* and aphid, *Aphis craccivora*[J]. Toxin Reviews, 2018, 37(1): 52-55.
- [28] WEN Y H, MEYER S L F, MACDONALD M H, et al. Nematotoxicity of *Paeonia* spp. extracts and *Camellia oleifera* tea seed cake and extracts to *Heterodera glycines* and *Meloidogyne incognita*[J]. Plant Disease, 2019, 103(9): 2191-2198.
- [29] CUI C J, YANG Y Q, ZHAO T Y, et al. Insecticidal activity and insecticidal mechanism of total saponins from *Camellia oleifera*[J]. Molecules, 2019, 24(24): 4518.
- [30] GUO N, TONG T T, REN N, et al. Saponins from seeds of Genus *Camellia*: Phytochemistry and bioactivity[J]. Phytochemistry, 2018, 149: 42-55.
- [31] WU Z L, TAN X F, ZHOU J Q, et al. Discovery of new triterpenoids extracted from *Camellia oleifera* seed cake and the molecular mechanism underlying their antitumor activity[J]. Antioxidants, 2022, 12(1): 7.
- [32] WANG D X, HUO R W, CUI C J, et al. Anticancer activity and mechanism of total saponins from the residual seed cake of *Camellia oleifera* Abel. in hepatoma-22 tumor-bearing mice[J]. Food & Function, 2019, 10(5): 2480-2490.
- [33] 林莉, 董玮, 林彩霞, 等. 脱脂油茶饼中蛋白质提取工艺[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(11): 59-66.
LIN Li, DONG Wei, LIN Caixia, et al. Extraction technology of protein from defatted *camellia*[J]. China Food Additives, 2021, 32(11): 59-66.
- [34] 吕静, 杨洁茹, 李坤, 等. 不同提取工艺对油茶籽粕蛋白质结构及功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 102-110.
LÜ Jing, YANG Jieru, LI Kun, et al. Effects of different extraction processes on the structure and functional properties of *Camellia* seeds protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 102-110.
- [35] YU W, ZHONG H Y, FANG X Z, et al. Physicochemical properties and antioxidant potential of protein isolate from *Camellia* cake (*Camellia oleifera* Abel.): Effect of different processing techniques on industrial scale[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 184:

- 114993.
- [36] ZHANG S Y, ZHENG L L, ZHENG X Y, et al. Effect of steam explosion treatments on the functional properties and structure of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) seed cake protein[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 189-197.
- [37] YU N X, WANG Y J, SHAO S X, et al. Functional properties of glutelin from *Camellia oleifera* seed cake: Improvement by alkali-assisted phosphorylation through changes in protein structure[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100438.
- [38] 龚吉军. 油茶粕多肽的制备及其生物活性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
GONG Jijun. The research on the preparation and bioactivities of peptide derived from *Camellia oleifera* Abel seed meal[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011.
- [39] YAO G L, HE W, WU Y G, et al. Purification of angiotensin-1-converting enzyme inhibitory peptides derived from *Camellia oleifera* Abel seed meal hydrolysate[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 7364213.
- [40] FENG J, MA Y L, SUN P, et al. Purification and characterisation of α -glucosidase inhibitory peptides from defatted camellia seed cake[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(1): 138-147.
- [41] 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[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(5): 1-6.
ZHANG Mengyu, WANG Jing, ZHANG Yingzhong, et al. Optimization of water extraction and alcohol precipitation method for preparation of *Camellia oleifera* cake polysaccharides by response surface analysis[J]. Forestry and Environmental Science, 2019, 35(5): 1-6.
- [42] 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[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(1): 167-170, 189.
GUO Yuhua, XU Yun, ZHANG Xueru, et al. Optimization of extraction process and structure analysis of polysaccharide extracted from *Camellia oleifera* seed cake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 167-170, 189.
- [43] 徐迪, 徐冰彦, 金日生. 正交试验法优化提取油茶籽饼粕多糖工艺[J]. 农产品加工, 2018(6): 37-39.
XU Di, XU Bingyan, JIN Risheng, et al. Optimization of extraction of polysaccharides from *Camellia* seed cake by orthogonal test methodology[J]. Farm Products Processing, 2018(6): 37-39.
- [44] GAO C, CAI C Y, LIU J J, et al. Extraction and preliminary purification of polysaccharides from *Camellia oleifera* Abel. seed cake using a thermoseparating aqueous two-phase system based on EOPO copolymer and deep eutectic solvents[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126164.
- [45] 杨婧蕾, 徐桂婵, 李敏玲, 等. 油茶多酚化合物主要活性成分及其提取工艺研究进展[J]. 云南化工, 2022, 49(4): 6-9.
YANG Jinglei, XU Guichan, LI Minling, et al. Research progress on the main active components and extraction technology of *Camellia* polyphenols[J]. Yunnan Chemical Technology, 2022, 49(4): 6-9.
- [46] TSAI C E, LIN L H. DPPH scavenging capacity of extracts from *Camellia* seed dregs using polyol compounds as solvents[J]. Heliyon, 2019, 5(8): e02315.
- [47] 孙晓波, 韦桂凤, 王小明, 等. Box-Behnken 模型优化油茶饼粕多酚提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(9): 109-117.
SUN Xiaobo, WEI Guifeng, WANG Xiaoming, et al. Optimization of the extraction process and antioxidant activity of polyphenols from *Camellia* seed cake using the box-behnken model[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9): 109-117.
- [48] 罗凡, 陈志吉, 蓝丽丽, 等. 加热对油茶籽油及饼粕总酚及其抗氧化能力的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(2): 61-68.
LUO Fan, CHEN Zhiji, LAN Lili, et al. Effects of heating on total phenols and their antioxidant activities in *Camellia oleifera* seed oil and the cake[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(2): 61-68.
- [49] 栗铭泽, 郭少海, 杜孟浩, 等. 油茶粕中茶皂素连续提取工艺的研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(1): 121-124.
LI Mingze, GUO Shaohai, DU Menghao, et al. Continuous extraction of tea saponin from oil-tea camellia seed meal[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(1): 121-124.
- [50] MA L, CHEN Y A, PENG S F, et al. Study on extraction of tea saponin from *Camellia oleifera* cake using water as extraction solvent[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(5): 1078-1080.
- [51] 张雪莉, 洪晨, 马海乐, 等. 多模式超声辅助提取茶皂素工艺条件研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 123-127.
ZHANG Xueli, HONG Chen, MA Haile, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction and characterization of tea saponin from *Camellia* oil seed cake[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 123-127.
- [52] HE J, WU Z Y, ZHANG S, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of tea saponin and its application on cleaning of historic silks[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2014, 17(5): 919-928.
- [53] 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[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128243.
- [54] 张耀洲, 谷清义, 陈琼. 乙醇提取-丙酮沉淀法提取分离茶皂素的工艺研究[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(6): 39-44.
ZHANG Yaozhou, GU Qingyi, CHEN Qiong. Study on ethanol extraction and acetone precipitation process of tea saponin[J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(6): 39-44.
- [55] 顾姣, 杨瑞金, 张文斌, 等. 超滤膜法提取水相中茶皂素的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 180-185.
GU Jiao, YANG Ruijin, ZHANG Wenbin, et al. Study on extraction of tea saponin by ultrafiltration from the aqueous phase[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(21): 180-185.
- [56] 毕雯雯. 地顶孢霉发酵油茶粕制备饲料的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
BI Luanluan. Study on feed preparation from *Camellia oleifera* meal fermentation by *Acremonium terricola*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.
- [57] YANG C L, CHEN Z F, WU Y L, et al. Nutrient and ruminal fermentation profiles of *Camellia* seed residues with fungal pretreatment[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2019, 32(3): 357-365.
- [58] 张晖, 吴雪辉, 董斌, 等. 不同比例油茶饼粕自然发酵过程中的养分变化及微生物群落比较[J]. 经济林研究, 2022, 40(2): 40-47.
ZHANG Hui, WU Xuehui, DONG Bin, et al. Comparison of nutrient changes and bacterial community during natural fermentation of *Camellia oleifera* oil-tea cake with different proportions[J]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(2): 40-47.
- [59] 张桃香, 郑钰钢, 陈辉. 不同温度生炭对油茶林红壤呼吸作用和酶活性的影响研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 96-102.
ZHANG Taoxiang, ZHENG Yuyin, CHEN Hui. Effects of biochar with different pyrolytic temperatures on the respiration and enzyme activities of red soil under oil tea forest[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 96-102.
- [60] 董秀婷, 荣文圣, 王秋敏. 油茶饼粕制备活性炭工艺研究[J]. 广东化工, 2017, 44(19): 4-5.
DONG Xiuting, RONG Wensheng, WANG Qiumin. Study on production of activated carbon from *Camellia* meal[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(19): 4-5.
- [61] 王海营, 何劲, 乔光, 等. 油茶饼粕代料栽培平菇混料配方的优化[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(2): 26-31.
WANG Haiying, HE Jin, QIAO Guang, et al. Optimization of mixture formulation of *Camellia oleifera* seed cake for cultivation of *Pleurotus ostreatus*[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2019, 38(2): 26-31.