

云南、江西油茶饼粕的营养、活性成分含量及其抗氧化活性分析

张松淼¹, 高伟², 贺磊^{2*}, 陈省忠³, 郑文杰⁴, 张雪春¹, 王振兴^{1*}

1. 西南林业大学生物与食品工程学院/云南省高校大健康类森林资源开发利用工程研究中心, 云南昆明 650224; 2. 江西省林业科学院/油茶资源培育与利用江西省重点实验室, 江西南昌 330013; 3. 腾冲市高黎贡山生态茶业有限公司, 云南保山 679107; 4. 天津师范大学生命科学学院/食品农产品质量和溯源实验室, 天津 300387

摘要: 本研究以云南和江西 2 个产地的油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 饼粕为研究对象, 系统分析其基本营养、活性成分含量及抗氧化活性。结果表明: 2 个产地的油茶饼粕的营养组成存在显著差异, 江西油茶饼粕的水分 (8.57%)、灰分 (12.31%) 和总膳食纤维 (62.73 g/100 g) 含量较高; 而云南油茶饼粕的粗脂肪 (11.47%)、粗蛋白 (12.14%) 和氨基酸 (0.99 g/100 g) 含量显著更高。2 个产地的油茶饼粕均富含维生素 E、维生素 K₃、油酸及亚麻酸等有益成分, 且云南油茶饼粕的磷、硫、钾等矿物质含量更为丰富。在活性成分方面, 江西油茶饼粕的总酚 (3.29 µg/mg) 与总黄酮 (66.75 µg/mg) 含量较高, 而云南油茶饼粕的多糖 (48.32 µg/mg) 与茶皂素 (222.10 µg/mg) 含量更高。抗氧化活性分析表明, 江西油茶饼粕的 DPPH 自由基清除能力与铁还原能力 (FRAP) 更强, 而云南油茶饼粕的 ABTS 阳离子清除能力更优。综上, 云南油茶饼粕适合开发为高蛋白补充剂, 江西油茶饼粕则适用于高纤维饲料; 2 个产地的油茶饼粕均表现出良好的抗氧化活性, 具有开发为功能性产品的潜力。本研究为油茶饼粕的资源化高值利用提供理论依据。

关键词: 油茶饼粕; 产地; 营养成分; 活性成分; 抗氧化活性

中图分类号: TS229

文献标志码: A

Analysis of Nutritional Composition, Active Ingredient Content, Antioxidant Activity of *Camellia Oleifera* Seed Cake from Yunnan & Jiangxi

ZHANG Songmiao¹, GAO Wei², HE Lei^{2*}, CHEN Shengzhong³, ZHENG Wenjie⁴, ZHANG Xuechun¹, WANG Zhenxing^{1*}

1. College of Biological Science and Food Engineering, Southwest Forestry University / Forest Resources Exploitation and Utilization Engineering Research Center for Grand Health of Yunnan Provincial Universities, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Jiangxi Academy of Forestry / Jiangxi Provincial Key Laboratory of Cultivation and Utilization of Oil Tea Resources, Nanchang, Jiangxi, 330013, China; 3. Tengchong Gaoligong Mountain Ecological Tea Industry Co., Ltd, Baoshan, Yunnan 679107, China; 4. School of Life Sciences, Tianjin Normal University / Food and Agricultural Product Quality, Safety and Traceability Laboratory, Tianjin 300387, China

Abstract: This study systematically analyzed the nutritional composition, active ingredient content, and antioxidant activity of *Camellia oleifera* Abel. seed cake (COSC) from Yunnan and Jiangxi provinces. The results revealed significant differences in nutritional composition between the two regional samples. COSC from Jiangxi exhibited higher moisture (8.57%), ash (12.31%), and total dietary fiber content (62.73 g/100 g), whereas the Yunnan sample possessed higher levels of crude fat (11.47%), crude protein (12.14%), and total amino acids (0.99 g/100 g). Both samples were rich in beneficial compounds, including vitamin E, vitamin K₃, oleic acid, and linolenic acid. The Yunnan sample contained higher levels of mineral elements such as phosphorus, sulfur, and potassium. Regarding bioactive compounds,

收稿日期 2025-09-26; 接受日期 2025-11-17

基金项目 江西省林业局油茶专项项目 (No. YCYJZX[2023]332)。

作者简介 张松淼 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全。*通信作者 (Corresponding author): 贺磊 (HE Lei), E-mail: helei19842003@163.com; 王振兴 (WANG Zhenxing), E-mail: zhenxing_wang@swfu.edu.cn。

Jiangxi COSC showed higher total phenolic (3.29 $\mu\text{g}/\text{mg}$) and total flavonoid (66.75 $\mu\text{g}/\text{mg}$) content, while Yunnan COSC exhibited higher polysaccharide (48.32 $\mu\text{g}/\text{mg}$) and tea saponin (222.10 $\mu\text{g}/\text{mg}$) content. Antioxidant activity analysis indicated that Jiangxi COSC demonstrated stronger DPPH radical scavenging capacity and ferric reducing antioxidant power (FRAP), whereas Yunnan COSC showed superior ABTS cation radical scavenging activity. In summary, Yunnan COSC is suitable for developing high-protein supplements, while Jiangxi COSC is more appropriate for high-fiber feed applications. Both samples exhibited promising antioxidant activity, indicating potential for functional product development. This study would provide a theoretical foundation for the resource utilization and value-added applications of *C. oleifera* seed cake.

Keywords: *Camellia oleifera* seed cake; geographical origin; nutritional composition; active ingredients; antioxidant activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.024

油茶 (*Camellia oleifera* Abel), 广泛种植于云南、江西等南方地区^[1], 其中江西省是全国油茶中心产区之一, 其油茶种植面积和产量均居全国第二, 油茶林总面积达到 110.4 万 hm^2 ^[2], 仅次于湖南省; 而云南有 1000 多年的油茶栽培种植历史, 截至目前全省油茶种植面积超过 13.3 万 hm^2 ^[3]。油茶作为主要的农林经济作物, 主要用于榨取食用油, 油茶籽油具有降低血脂、改善脂代谢紊乱的作用^[4]。根据《加快油茶产业发展三年行动方案 (2023—2025 年)》, 到 2025 年, 全国油茶饼粕产能达到 80 万 t。这些油茶饼粕大部分被直接丢弃或加工为动物饲料, 造成资源浪费和环境污染^[5]。

研究表明, 油茶饼粕中除了含有少量油脂外, 还含有蛋白质、矿物质、多酚、茶皂素等多种活性成分, 具有较高的综合利用率^[6]。目前, 对于油茶饼粕的研究主要集中于单一成分的提取、分离及应用。例如, 陈佩云等^[7]研究表明, 油茶饼粕多酚提取物对红提具有良好的保鲜作用, 可延缓果实的色泽变化; 石浩等^[8]证明油茶饼粕多糖对酪氨酸酶具有抑制作用; 司喜艳^[9]发现油茶饼粕茶皂素具有较好的乳化特性, 还能有效延长戚风蛋糕的货架期。综上所述, 油茶饼粕含有大量的营养成分与功能活性物质, 有待于进一步研究开发。但是由于海拔、气候、土壤等环境因素, 不同产地的油茶饼粕在营养成分和活性物质含量存在差异, 但目前对不同产地油茶饼粕的对比研究报道较少。

基于此, 本研究以油茶主产区江西和云南两地的油茶饼粕为研究对象, 对其营养成分功能性活性物质含量及抗氧化活性进行差异分析。以期两地油茶饼粕的资源化利用奠定理论基础, 促

进油茶饼粕精深加工与利用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验材料 云南油茶粕由腾冲市高黎贡山生态茶业有限责任公司提供, 江西油茶饼粕由江西省林业科学院提供。

1.1.2 主要试剂 2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)铵盐、2,4,6-三(2-吡啶)-1,3,5-三嗪、1,1-二苯基-2-苦味基胍、硝酸铝等分析纯试剂及芦丁、没食子酸等标准品购自上海源叶生物科技有限公司; 福林酚和丙酮等分析纯购自上海麦克林生化科技股份有限公司; 水合茚三酮 (分析纯) 购自天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.1.3 仪器设备 Waters e2695 高效液相色谱仪 (美国 Waters 公司); Thermo Trace 1600 气相色谱仪 (美国 Thermo 公司); Multiskan FC 全波长酶标仪 [赛默飞世尔科技 (上海) 有限公司]; iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪 (美国 Thermo 公司)。

1.2 方法

1.2.1 营养成分测定 水分测定参照 GB 50093—2016; 灰分测定参照 GB 5009.4—2016; 脂肪含量测定参照 GB 5009.6—2016; 粗蛋白测定 GB 5009.5—2016。

1.2.2 总膳食纤维 (TDF) 测定 采用酶解法测定总膳食纤维^[10]。准确称取 2.0 g 样品于锥形瓶, 加入磷酸缓冲液, 先加入 α -淀粉酶, 在 95 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min; 冷却后调节 pH 至 7.5, 加入木瓜蛋白酶, 于 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中反应 30 min; 再调节 pH 至 4.5, 加入葡萄糖苷酶, 于 60 $^{\circ}\text{C}$ 下酶解 30 min。随后用乙醇沉淀并过滤, 残渣依次用乙醇和丙酮洗涤, 干燥后称重。并分别测定残渣中的蛋白质和灰分

质量,按以下公式计算其含量。

总膳食纤维含量=[(残渣质量—残渣灰分质量—残渣蛋白质质量)/样品质量]×100

1.2.3 氨基酸含量测定 参考 GB 5009.124—2016,并稍作修改。准确称取 2.0 g 粉碎样品置于水解管中,加入 10 mL 6 mol/L 盐酸溶液混匀。于 110 ℃下水解后,冷却至室温。将水解液过滤并定容至 50 mL。取适量上述滤液,用氨基酸分析仪测定氨基酸含量。按以下公式计算。

$$\text{氨基态氮含量}(\text{mg}/100\text{ g})=\frac{C\times V\times A}{V_t\times M}\times 0.1$$

式中, C 为由标准曲线查得的样品提取液氨基酸浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$; V 为样品提取液总体积, mL ; V_t 为用于测定的样品提取液总体积, mL ; M 为样品质量, g ; A 为稀释倍数。

1.2.4 脂肪酸组成测定 参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》,采用算水解法提取脂肪酸并使用外标法进行定量分析。气相色谱分析条件:色谱柱为 Thermo TR-FAME (100 mm×0.25 mm×0.20 μm),流速为 1.0 mL/min,进样体积为 1 μL ,进样口温度为 260 ℃;分流比为 10:1;检测器温度为 280 ℃。升温程序设定为:起始温度为 60 ℃,保持 5 min,以 10 ℃/min 升温到 160 ℃保持 2 min,再以 2 ℃/min 升温到 240 ℃,保持 15 min。

1.2.5 维生素的测定 采用高效液相色谱法 (HPLC) 测定维生素含量^[11-12]并稍作修改,具体样品前处理步骤如下:取适量样品,加入 0.1 g 脂肪酶及 10 mL pH 6.8 的磷酸缓冲溶液,于 38 ℃恒温孵育 2 h 后冷却至室温。随后依次使用 3、2、2 mL 无水乙醇进行萃取,收集上清液后,再分别以 4、3、2 mL 无水乙醇进行二次萃取,合并上清液。加入 5%氯化钠溶液,混匀,再加一定量的正己烷萃取,收集正己烷层,再次用正己烷进行二次萃取合并正己烷层,旋干,1 mL (氯仿:甲醇=1:4) 溶出,待测。HPLC 分析条件如下:色谱柱为 Nova Element TC18 小柱,流速为 1.0 mL/min,进样量为 10 μL ,柱温为 30 ℃,检测波长为 275 nm,流动相为 100%甲醇,运行 20 min。

1.2.6 矿物质含量的测定 参照 GB 5009.268—2025《食品中多元素的测定》第一法采用硝酸消解,电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定各矿物质元素含量。称取适量样品于聚四氟乙烯消解内罐,加硝酸浸泡过夜后,放入恒温干燥箱,

80 ℃保持 1~2 h,再 120 ℃保持 1~2 h,最后升至 160 ℃保持 4 h,自然冷却,后加热赶酸至近干,将消化液洗入 25 mL 容量瓶中,用 1%的硝酸溶液洗涤内罐和内盖 3 次,洗液合并至容量瓶中并定容,混匀备用。同时做试剂空白试验。采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定各元素含量。

1.2.7 活性成分测定 分别称取 10 g 油茶饼粕,加入 50 mL 的 80%乙醇,80 ℃超声 60 min 后,冷却至室温,以 8000 r/min 的转速离心 8 min,取上清液;继而向沉淀中加入 50 mL 80%乙醇溶液使其复溶,重复上述操作进行提取。2 次提取液混合后,−80 ℃储存,以备后续实验的使用。采用福林酚法^[13]测定总酚含量,结果以 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 表示。采用亚硝酸钠-硝酸铝法^[14]测定总黄酮含量,结果以 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 表示。采用分光光度法^[15]测定茶皂素含量,结果以 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 计算。采用苯酚-硫酸法^[16]测定总多糖含量,结果以 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 表示。

1.2.8 抗氧化活性分析 参照 XIAO 等^[17]的方法并稍作修改,计算 DPPH 自由基清除能力,结果以 IC_{50} 值表示 (mg/mL)。参考丁真真等^[18]的方法并稍作修改。计算 ABTS 阳离子自由基清除能力结果以 IC_{50} 值表示 (mg/mL)。采用 TPTZ 显色法测定^[19],并稍作修改。计算样品的铁还原能力,结果以 mg/g 表示。

1.3 数据处理

所有试验均设置 3 个独立重复,各测定步骤独立进行,数据以“均值±标准差”表示。使用 SPSS 27 软件进行统计分析,使用 Origin 2021 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 营养成分分析

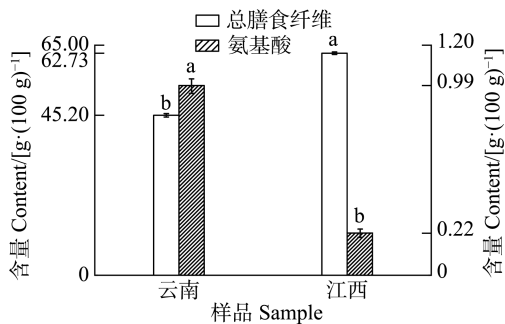
2.1.1 基本营养成分分析 2 个产地的油茶饼粕的基本营养成分含量如表 1 所示。云南油茶饼粕的水分含量 (5.80%) 显著低于江西 (8.57%) ($P<0.05$),较低的水分含量有助于提高饼粕的贮藏稳定性,并降低运输成本。江西油茶饼粕的灰分含量 (12.31%) 显著高于云南 (3.66%) ($P<0.05$),表明前者含有更为丰富的矿质元素。此外,云南油茶饼粕在粗脂肪 (11.47%) 和粗蛋白 (12.14%) 含量均显著高于江西 (分别为 6.38% 和 8.61%) ($P<0.05$),表明云南产地的油茶饼粕作为高营养价值原料更具开发潜力。

表 1 不同产地油茶饼粕的基本营养成分含量
Tab. 1 Content of basic nutrients in *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi %

产地 Origin	水分 Moisture	灰分 Ash	脂肪 Fat	粗蛋白 Total dietary fiber
云南	0.587±0.053 ^b	0.366±0.040 ^b	11.47±0.35 ^a	12.14±0.42 ^a
江西	0.857±0.030 ^a	1.231±0.090 ^a	6.38±0.52 ^b	8.61±0.73 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.1.2 总膳食纤维和氨基酸含量分析 如图 1 所示,江西油茶饼粕的总膳食纤维含量为 62.73 g/100 g,显著高于云南油茶饼粕的 45.20 g/100 g ($P<0.05$),且远高于李林波等^[20]报道的红花籽粕、葡萄籽粕和葵花籽粕的总膳食纤维含量(48.6~57.6 g/100 g)。云南油茶饼粕的氨基酸含量(0.99 g/100 g)显著高于江西(0.22 g/100 g) ($P<0.05$),这一趋势与粗蛋白含量的差异一致。综上所述,云南油茶饼粕更适合作为动物饲料的蛋白质补充来源,而江西油茶饼粕因其较高的膳食纤维含量,在开发高纤维饲料方面有良好潜力。



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).
图 1 不同产地油茶饼粕总膳食纤维和氨基酸含量
Fig. 1 Content of total dietary fiber and amino acid in *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi

表 3 不同产地油茶饼粕维生素含量
Tab. 3 Vitamin content of *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi $\mu\text{g/g}$

产地 Origin	维生素 A Vitamin A	维生素 D ₂ Vitamin D ₂	维生素 D ₃ Vitamin D ₃	维生素 E Vitamin E	维生素 K ₁ Vitamin K ₁	维生素 K ₃ Vitamin K ₃
云南	—	—	—	5.46±0.00 ^b	—	4.62±0.02 ^b
江西	—	—	—	5.85±0.00 ^a	—	7.55±0.09 ^a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); —表示无此项。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$); — indicates that there is no such item.

2.1.5 矿物质含量测定结果 本研究采用电感耦合等离子体质谱法系统测定油茶饼粕中 30 种矿物质元素的含量。由表 4 可知,2 个产地的油茶饼粕中

2.1.3 脂肪酸组成分析 如表 2 所示,2 个产地的油茶饼粕中共检出 9 中脂肪酸,其中饱和脂肪酸 4 种(羊油酸、羊脂酸、棕榈酸和硬脂酸),不饱和脂肪酸 5 种(油酸、亚油酸、 α -亚麻酸、花生油酸和神经酸)。江西与云南产地的油茶饼粕均含有丰富的油酸,其含量分别为 66.99 $\mu\text{g/g}$ 和 50.28 $\mu\text{g/g}$,在脂肪酸组成中占比均超过 70%,其次为棕榈酸和亚油酸。综上所述,2 个产地的油茶饼粕均富含不饱和脂肪酸,对降低心血管疾病风险和预防动脉粥样硬化具有积极作用^[21]。

表 2 不同产地油茶饼粕脂肪酸含量
Tab. 2 Fatty acid content of *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi $\mu\text{g/g}$

脂肪酸 Fatty acid	产地 Origin	
	云南 Yunnan	江西 Jiangxi
羊油酸 Caproic acid	1.49±0.00 ^b	2.31±0.10 ^a
羊脂酸 Caprylic acid	0.42±0.00 ^b	0.58±0.03 ^a
棕榈酸 Palmitic acid	11.66±0.53 ^a	6.92±0.28 ^b
硬脂酸 Stearic acid	0.63±0.02 ^b	0.88±0.03 ^a
油酸 Oleic acid	50.28±1.89 ^b	66.99±2.65 ^a
亚油酸 Linoleic acid	5.86±0.01 ^a	4.03±0.08 ^b
花生油酸 Arachidic acid	0.11±0.01 ^a	0.07±0.00 ^b
α -亚麻酸 α -Linolenic acid	0.11±0.01 ^b	0.16±0.03 ^b
神经酸 Nervonic acid	0.32±0.00 ^b	1.45±0.02 ^b

注:同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same row of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.1.4 维生素含量分析 由表 3 可知,江西与云南产地的油茶饼粕中均检出维生素 E 与维生素 K₃,且江西油茶饼粕的维生素 E (5.85 $\mu\text{g/g}$)和维生素 K₃ (7.55 $\mu\text{g/g}$)含量均显著高于云南($P<0.05$)。因此,油茶饼粕在增强免疫力和促进骨骼健康方面具备良好的开发潜力。

含量较高的矿物质元素为钾 (K, 4552.552 mg/kg)、磷 (P, 1260.448 mg/kg)、硫 (S, 1012.684 mg/kg)、镁 (Mg, 827.888 mg/kg)、钙 (Ca, 847.385 mg/kg)、

铝(Al, 385.386 mg/kg)、钠(Na, 105.418 mg/kg)、锰(Mn, 140.264 mg/kg)、镍(Ni, 70.226 mg/kg)和硅(Si, 50.188 mg/kg)。

从产地差异看，江西油茶饼粕的 K、Ca、Mg、Mn、Al 和 Ni 元素含量均显著高于云南 ($P<0.05$)，而云南油茶饼粕 S、P、Na 和 Si 含量更高。云南和江西的油茶饼粕均表现出“高钾低钠”的矿物质组成特征，其钾含量分别为 4540.81、4564.29 mg/kg，钠含量分别为 129.48、80.86 mg/kg。这一特性使其具有开发为功能性钾强化食品的潜力，尤其适用于高血压和肾脏疾病患者的膳食调控^[22]。

表 4 不同产地油茶饼粕矿物质元素平均含量
Tab. 4 Average content of mineral elements in *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi mg/kg

元素 Element	产地 Origin	
	云南 Yunnan	江西 Jiangxi
Mg	760.76±25.24 ^b	895.02±38.20 ^a
Ca	697.67±25.88 ^b	997.10±51.21 ^a
K	4540.81±17.00 ^b	4564.29±20.83 ^a
Na	129.48±4.78 ^a	80.86±1.80 ^b
Mn	95.56±0.14 ^b	184.97±8.11 ^a
S	1042.86±60.03 ^a	982.52±12.53 ^b
P	1340.98±1.86 ^a	1179.92±19.65 ^b
Al	262.09±6.00 ^b	508.68±19.83 ^a
Ni	62.33±0.91 ^b	78.12±3.07 ^a
Si	53.07±2.10 ^a	47.31±1.76 ^b

注：同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same row of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.2 活性成分分析

除基本营养成分外，油茶饼粕还富含多种生物活性物质，如多酚、黄酮、多糖和茶皂素等，这些成分与其抗氧化、抗菌等生理活性密切相关。如表 5 所示，2 个产地油茶饼粕的活性成分含量存在显著差异 ($P<0.05$)。江西油茶饼粕的总酚含量 (3.29 μg/mg) 和总黄酮含量 (66.75 μg/mg)，均显著高于云南 (总酚含量和总黄酮含量分别为 3.03 μg/mg、38.38 μg/mg)。相比之下，云南油茶饼粕的茶皂素和多糖含量更高，分别为 222.10、48.32 μg/mg，显著高于江西 (茶皂素和多糖含量分别为 148.02、22.60 μg/mg)。综上所述，江西油茶饼粕的总酚和总黄酮含量较高，而云南油茶饼粕则在茶皂素和多糖方面含量更高，表明产地环境对油茶饼粕活性成分组成有显著影响。

表 5 不同产地油茶饼粕活性成分含量
Tab. 5 Content of active components in *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi

产地 Origin	含量 Content/(μg·mg ⁻¹)			
	总酚 Total phenolic	总黄酮 Total flavonoid	茶皂素 Tea saponin	多糖 Polysaccharide
云南	3.03±0.18 ^b	38.38±0.00 ^b	222.10±0.06 ^a	48.32±0.92 ^a
江西	3.29±0.04 ^a	66.75±8.79 ^a	148.02±0.00 ^b	22.60±0.57 ^b

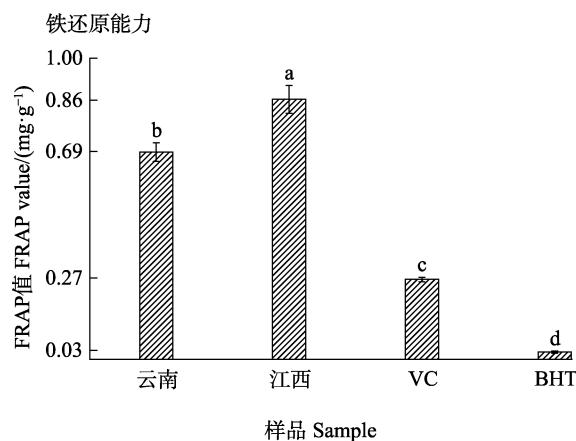
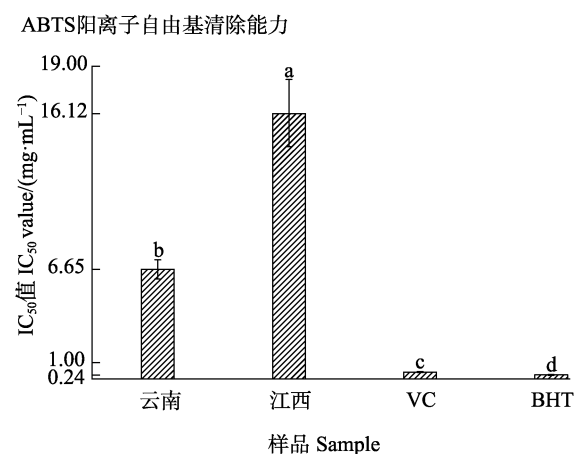
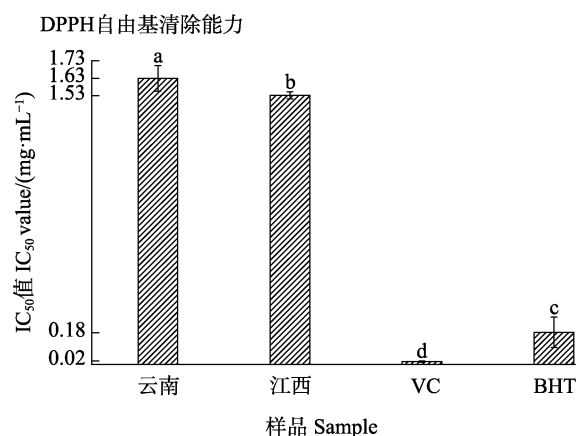
注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.3 抗氧化活性分析

由图 2 可知，云南、江西产地的油茶饼粕均表现出显著的抗氧化能力，其活性指标间存在显著差异 ($P<0.05$)。江西产地的油茶饼粕的 DPPH 自由基清除能力 (IC₅₀ 值较低) 和铁离子还原能力 (FRAP 值较高) 显著优于云南，而云南产地的油茶饼粕的 ABTS 阳离子自由基清除能力 (IC₅₀ 值较低) 更强。抗氧化活性的差异与 2 个产地油茶饼粕中活性成分的含量密切相关。江西油茶饼粕的总酚 (3.29 μg/mg) 和总黄酮 (66.75 μg/mg) 含量较高，可能与其通过提供氢原子或电子直接清除自由基，从而增强 DPPH 清除能力和铁还原活性；而云南油茶饼粕的多糖 (48.32 μg/mg) 和茶皂素 (222.10 μg/mg) 含量高，则可能通过螯合金属离子或调节氧化还原通路，进而提升 ABTS 阳离子自由基清除率有关。图 3 的相关性分析进一步表明，其活性成分与抗氧化指标间的特异性关联。综上所述，2 个产地的油茶饼粕均具有良好的氧化潜力，壳基于取活性成分特征开发为不同的天然抗氧化产品。江西油茶饼粕适于侧重自由基快速清除的应用，而云南油茶饼粕则在抑制脂质过氧化及金属离子介导的氧化反应方面更具优势。

2.4 相关性分析

为进一步探究油茶饼粕中主要活性成分(总酚、总黄酮、茶皂素及总多糖)与其抗氧化活性之间的内在关联，本研究相关性热图分析(图 3)结果表明，总酚和总黄酮含量与 DPPH 自由基清除能力呈高度正相关 ($r>0.90$)，而与 ABTS 阳离子自由基清除能力及铁还原能力 (FRAP) 呈显著负相关 ($P<0.05$)。茶皂素和多糖则与 DPPH 自由基及 ABTS 阳离子自由基清除能力均呈正相关，而与 FRAP 值呈负相关。上述结果说



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 2 不同产地油茶饼粕的抗氧化能力

Fig. 2 Antioxidant capacity of *C. oleifera* seed cake from Yunnan & Jiangxi

明, 不同活性成分可能通过不同机制参与抗氧化作用, 其中总酚和总黄酮在自由基直接清除方面贡献显著, 而茶皂素和多糖可能更多地参与金属离子螯合或氧化还原途径调节。因此, 油茶饼粕的整体抗氧化能力是其多种活性成分协同作用的结果。

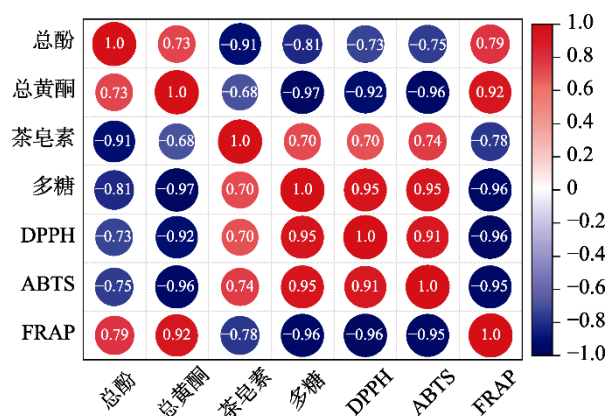


图 3 油茶饼粕活性成分与抗氧化指标的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between active components and antioxidant indicators in *C. oleifera* seed cake

3 讨论

油茶饼粕作为油茶籽加工的主要副产物, 富含多种营养成分和生物活性物质, 具有较高的资源利用潜力^[23-24]。本研究系统比较云南和江西两地油茶饼粕的营养成分组成、活性成分及抗氧化活性, 结果表明产地差异对其理化特性与功能价值具有显著影响 ($P < 0.05$)。

基本营养成分方面, 云南油茶饼粕的粗脂肪 (11.47%) 和粗蛋白 (12.14%) 含量均较高, 江西油茶饼粕的水分 (8.57%)、灰分 (12.31%) 和总膳食纤维 (62.73 g/100 g) 含量更高。这种差异可能与产地的气候条件、土壤类型及榨油工艺相关。例如, 云南地区较高的海拔和独特的水热条件可能促进油茶籽中脂肪和蛋白质积累; 江西油茶饼粕的灰分含量均较高, 反映了其矿物质元素 (如 K、Ca、Mg) 更为丰富, 这与当地土壤中矿物质元素含量均较高相关^[25-26]。此外, 总膳食纤维含量的显著差异可能与油茶品种和加工过程中的挤压强度有关, 挤压工艺可能导致蛋白质变形及纤维结构的改变^[27]。云南油茶饼粕的氨基酸 (0.99 g/100 g) 含量显著高于江西 (0.22 g/100 g), 进一步证明其作为优质蛋白源的潜力, 这与张武肖等^[28]提出的氨基酸对营养平衡的促进作用相一致。

活性成分方面, 江西油茶饼粕的总酚 (3.29 $\mu\text{g}/\text{mg}$) 和总黄酮 (66.75 $\mu\text{g}/\text{mg}$) 含量均较高, 而云南油茶饼粕在茶皂素 (222.10 $\mu\text{g}/\text{mg}$) 和多糖 (48.32 $\mu\text{g}/\text{mg}$) 方面更具优势。活性成分分布差异可能受生长环境调控: 多酚和黄酮类物质合成常受紫外线强度和温度影响^[25, 29], 江西亚

热带气候可能更利于其积累；云南高海拔地区低温条件可能促进多糖和茶皂素的生物合成^[24, 30]。抗氧化活性结果显示，江西油茶饼粕的 DPPH 自由基清除能力（IC₅₀ 较低）和铁还原能力（FRAP 值较高）更强，这与总酚、总黄酮含量呈正相关，符合多酚类物质通过氢原子转移机制发挥抗氧化作用的特性^[17, 19]。相反，云南油茶饼粕的 ABTS 阳离子清除能力更优，可能与其较高的多糖和茶皂素含量有关，这些成分可通过螯合金属离子或清除自由基途径增强抗氧化效果^[15, 31]。相关性分析进一步证实，总酚和总黄酮与 DPPH 活性呈高度正相关，而茶皂素和多糖与 ABTS 清除能力关联密切，表明不同活性成分对抗氧化途径的贡献具有特异性。

基于上述差异，云南油茶饼粕的高蛋白特性使其适合开发为功能性饲料或蛋白补充剂，江西油茶饼粕的高膳食纤维含量则更适用于高纤维饲料制备^[20, 32]。此外，2 个产地的油茶饼粕均富含维生素 E、K₃ 及不饱和脂肪酸（如油酸和亚油酸），这些成分具有调节血脂、抗炎和促进骨骼健康作用^[21, 33]，为其在功能性食品中的应用提供依据。活性成分方面，江西油茶饼粕的多酚和黄酮类物质可用于提取天然抗氧化剂，如陈佩云等^[7]发现油茶多酚对果蔬保鲜具有显著效果；而云南油茶饼粕的茶皂素和多糖则具备开发为抗菌杀虫剂或免疫调节剂的潜力，例如程洋欢等^[34]报道茶皂素对福寿螺（*Pomacea canaliculata*）具有强致死活性。值得注意的是，罗凡等^[29]研究表明加热处理可提升油茶饼粕的多酚含量和抗氧化能力，提示优化加工工艺可能进一步挖掘其价值。

4 结论

本研究系统比较云南、江西 2 个产地油茶饼粕的营养成分、活性物质含量与抗氧化活性。结果表明，产地差异显著影响油茶饼粕的理化特性及功能价值。云南油茶饼粕具有较低地水分含量（5.80%）、较高地粗脂肪（11.47%）、粗蛋白（12.14%）及氨基酸（0.99 g/100 g）含量，更适宜作为高蛋白饲料或功能性食品地原料；江西油茶饼粕则在灰分（12.31%）、总膳食纤维（62.73 g/100 g）、总酚（3.29 μg GAE/mg）及总黄酮（66.75 μg/mg）含量方面表现突出，适用于制备高纤维饲料或提取天然抗氧化剂。2 个产地油茶饼粕均富含维生素 E、维生素 K₃、不饱和脂

肪酸（如油酸和亚油酸），且具有高钾低钠的矿物质组成特征，符合健康食品的营养需求。

抗氧化活性分析显示，江西油茶饼粕的 DPPH 自由基清除能力及铁还原能力（FRAP）较强，与总酚及总黄酮含量呈正相关；云南油茶饼粕的 ABTS 阳离子自由基清除能力更优，与其较高的茶皂素（222.10 μg/mg）和多糖（48.32 μg/mg）含量密切相关。相关性分析进一步揭示活性成分对抗氧化途径的特异性贡献。

综上所述，云南、江西油茶饼粕因产地差异呈现互补的营养与功能特性，其高值化利用需结合地域特点进行针对性开发。本研究为油茶副产物的资源化分级利用提供科学依据，对推动其在饲料、食品及医药领域的应用具有积极意义。未来研究应关注活性成分的体内生物效价及产业化加工稳定性优化。

参考文献

- [1] 孙萌, 韦力云, 肖嘉乐, 王雨, 白加爽, 饶本强. 油茶饼粕中高纯度茶皂素的绿色提取[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2024, 37(3): 405-411.
SUN M, WEI L Y, XIAO J L, WANG Y, BAI J S, RAO B Q. Green extraction technology of high purity tea saponin from *Camellia oleifera* cake[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2024, 37(3): 405-411. (in Chinese)
- [2] 徐润飞. 江西：发展油茶产业助推乡村振兴[J]. 国土绿化, 2023(11): 62-65.
XU R F. Jiangxi: Developing the oil-tea *Camellia* industry to boost rural revitalization[J]. Territorial Afforestation, 2023 (11): 62-65. (in Chinese)
- [3] 杨卿, 王纬, 徐德兵. 云南省油茶产业现状浅析[J]. 林业建设, 2024, 42(5): 25-29.
YANG Q, WANG W, XU D B. Analysis on current situation of oil tea industry in Yunnan province[J]. Forestry Construction, 2024, 42(5): 25-29. (in Chinese)
- [4] 刘莉. 油茶籽油改善机体脂代谢紊乱的作用机制研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024.
LIU L. Study on the mechanism of the oil from the seed of *Camellia oleifera* in relieving the metabolism disorders of body lipid[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [5] 朱佳敏, 吴柳燕, 赵玉雪, 杨霞, 苏丽. 油茶饼粕制备生物有机肥的研发及在辣椒上的应用效果研究[J]. 贵州林业科技, 2025, 53(1): 55-62.
ZHU J M, WU L Y, ZHAO Y X, YANG X, SU L. Effect of

- bioorganic fertilizer with oil-tea cake on hot pepper[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2025, 53(1): 55-62. (in Chinese)
- [6] 田漫漫. 油茶饼粕中茶皂素、油茶多酚、油茶多糖连续提取纯化工艺及中试的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
TIAN M M. Study on continuous extraction, purification and pilot test of tea saponin, *Camellia* polyphenols, *Camellia oleifera* polysaccharides of the tea *Camellia*[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018. (in Chinese)
- [7] 陈佩云, 陈晓华, 孙伟峰, 朱涵予. 油茶饼粕多酚提取物对红提致病菌抑菌活性的研究[J]. 现代食品, 2022, 28(19): 195-199.
CHEN P Y, CHEN X H, SUN W F, ZHU H Y. Study on antibacterial activity of polyphenol from *Camellia oleifera* cake against pathogenic bacteria of red grape[J]. Modern Food, 2022, 28(19): 195-199. (in Chinese)
- [8] 石浩, 何小娥, 丁仁惠, 王文龙. 油茶饼粕多糖对酪氨酸酶活性抑制作用分析[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 213-217.
SHI H, HE X E, DING R H, WANG W L. Inhibitory effect of polysaccharide from tea cake on tyrosinase activity[J]. Food Industry, 2019, 40(10): 213-217. (in Chinese)
- [9] 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 X Y. Study on extraction, purification and application of tea saponins from *Camellia* seed meal[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [10] 徐瑞, 于安芬, 许文艳, 李瑞琴, 白滨, 陶海霞. 食品中总膳食纤维测定方法的优化[J]. 甘肃农业科技, 2017(12): 39-40.
XU R, YU A F, XU W Y, LI R Q, BAI B, TAO H X. Optimization of the determination method for total dietary fiber in foods[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2017(12): 39-40. (in Chinese)
- [11] 杜杰, 林春兰, 郑绣蓓, 刘昌树. 高效液相色谱法同时测定食用油中维生素 A 和维生素 E 的方法[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 258-263.
DU J, LIN C L, ZHENG X Q, LIU C S. Simultaneous determination method of vitamin A and E in edible oil by HPLC[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 258-263. (in Chinese)
- [12] 刘英, 曲媛, 崔秀明. 高效液相色谱法测定三七地上部分维生素含量[J]. 食品工业科技, 2015, 36(22): 49-53.
LIU Y, QU Y, CUI X M. Determination of vitamins in aerial part of *Panax notoginseng* by high performance liquid chromatography[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(22): 49-53. (in Chinese)
- [13] WANG Z, ZHAO C B, GUO Z Q, LI S Y, ZHU Z Z, GRIMIN, XIAO J. Fermentation of betaphycus gelatinum using lactobacillus brevis: growth of probiotics, total polyphenol content, polyphenol profile, and antioxidant capacity[J]. Foods, 2023, 12(18): 3352.
- [14] CHOI J, NOH E, LEE D, LEE Y, LEE K. Effect of roasting after sugar-soaking on the level of volatile compounds, total polyphenol, total fl-avonoid, and isoflavones in black soybean [*Glycine max* (L.) Merr.][J]. Food Science and Technology / Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2023, 185: 115109.
- [15] 杨静, 王菲菲, 刘梦琴. 分光光度法测定油茶产品中茶皂素含量[J]. 山东化工, 2022, 51(17): 101-104.
YANG J, WANG F F, LIU M Q. Spectrophotometric determination of tea saponin in *Camellia* products[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(17): 101-104. (in Chinese)
- [16] BIRHANIE Z M, XIAO A P, YANG D W, HUANG S, ZHANG C, ZHAO L N, LIU L L, LI J J, CHEN A G, TANG H J, CHANG L, PAN G, ZHNG G P, BISWASS A, DEY S, LI D F, DENG Y. Polysaccharides, total phenolic, and flavonoid content from different kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) genotypes and their antioxidants and antibacterial properties[J]. Plants, 2021, 10(9): 1751.
- [17] XIAO Y C, FU F H, WEI Y H, SHI S Y, SHAN Y. Online extraction-DPPH-HPLC-DAD-QTOF-MS system for efficient screening and identification of antioxidants from *Citrus aurantium* L. var. *amara* (Rutaceae): integrating sample preparation and antioxidants profiling[J]. Antioxidants, 2022, 11(5): 885.
- [18] 丁真真, 夏娜, 刘艳全, 张甜, 姜蕾, 王延昌, 张超. 不同干燥方式对 5 种无花果干营养成分、抗氧化活性和挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 292-302.
DING Z Z, XIA N, LIU Y Q, ZHANG T, JIANG L, WANG Y C, ZHANG C. Effects of different drying methods on nutritional composition, antioxidant activity, and volatile compounds of five kinds of dried figs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 292-302. (in Chinese)
- [19] SETHI S, JOSHI A, ARORA B, BHOWMIK A, SHARMA R R, KUMAR P. Significance of FRAP, DPPH, and CUPRAC assays for antioxidant activity determination in apple fruit extracts[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(3): 591-598.
- [20] 李林波, 孙扬, 丁娇娇, 娜孜拉, 聂存喜. 不同饼粕饲料的膳食纤维含量、理化特性、结构和体外发酵特性比较研究[J]. 饲料研究, 2023, 46(19): 87-92.
LI L B, SUN Y, DING J J, NA Z L, NIE C X. Comparative study of dietary fiber content, physical and chemical properties, structure and *in vitro* fermentation characteristics of different cake meal feeds[J]. Feed Research, 2023, 46(19): 87-92. (in Chinese)

- [21] 柴春山, 莫保儒, 蔡国军, 马驰, 薛睿, 李德丽, 林琳. 甘肃迭部野生西康扁桃种仁油理化性质及脂肪酸组成分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 98-105.
CHAI C S, MO B R, CAI G J, MA C, XUE R, LI D L, LIN L. Physicochemical properties and fatty acid compositions of kernel oil from wild shrub of *Amygdalus tangutica* in Diebu county, Gansu province[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(6): 98-105. (in Chinese)
- [22] 邱知, 谭明. 聚离子液体膜的制备及其在低钠高钾健康酱油中的应用[J]. 化工学报, 2024, 75(增刊1): 244-250.
QIU Z, TAN M. Preparation of polyionic liquid membrane and its application in low-sodium and high-potassium healthy soy sauce[J]. CIESC Journal, 2024, 75(Suppl. 1): 244-250. (in Chinese)
- [23] LIU D, WANG L. Prospects for effective valorization of *Camellia oleifera* seed cakes (COSC)s: extraction technologies, diverse bioactivity and potential applications[J]. European Food Research and Technology, 2025, 251(7): 1435-1451.
- [24] QIU C Y, CHEN Z H, HU F J, WU H L, WANG L, LIU M X, ZHOU K. Simultaneous extraction of oil, protein and polysaccharide from residual seed cake of *Camellia oleifera* Abel. using three phase partitioning[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 111805.
- [25] 辛江慧, 胡传双, 涂登云, 云虹, 关丽涛. 影响油茶籽油品质的因素分析[J]. 林产工业, 2024, 61(3): 22-29.
XIN J H, HU C S, TU D Y, YUN H, GUAN L T. Analysis of factors affecting the quality of *Camellia oleifera* seed oil[J]. China Forest Products Industry, 2024, 61(3): 22-29. (in Chinese)
- [26] 叶敏倩, 吴峰华, 芮鸿飞, 陈通, 刘飞泉. 不同产地油茶籽油主要特征组分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 222-226.
YE M Q, WU F H, RUI H F, CHEN T, LIU F Q. Comparative analysis of major characteristic components of tea seed oils (*Camellia oleifera* Abel.) from different geographic regions[J]. Food Science, 2020, 41(20): 222-226. (in Chinese)
- [27] ZHANG B, LIU G, YING D Y, SANGUANSRI L, AUGUSTIN M A. Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and *in vitro* protein digestibility of canola meal[J]. Food Research International, 2017, 100(Part 1): 658-664.
- [28] 张武肖, 江青青, 夏斯蕾, 田红艳, 刘飞, 杨文平, 於叶平, 杨志刚, 许志强, 诸永志, 王爱民. 氨基酸对水产动物肌肉品质影响的研究进展[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(6): 220-232.
ZHANG W X, JIANG Q Q, XIA S L, TIAN H Y, LIU F, YANG W P, YU Y P, YANG Z G, XU Z Q, ZHU Y Z, WANG A M. Research progress on the impact of amino acids on muscle quality in aquatic animals[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(6): 220-232. (in Chinese)
- [29] 罗凡, 陈志吉, 蓝丽丽, 杜孟浩, 王超. 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 F, CHEN Z J, LAN L L, DU M H, WANG C. 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. (in Chinese)
- [30] 李红钰. 不同产地太子参多糖特征分析及其对糖尿病模型鼠创面修复能力的评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
LI H Y. Characterization of pseudostellaria heterophylla polysaccharides from different geographical origins and evaluation of their wound healing effects in diabetic model rats[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. (in Chinese).
- [31] WANG J, ZHANG M Y, GOU Z Y, JIANG S Q, ZHANG Y Z, WANG M H, TANG X X, XU B H. The effect of *Camellia oleifera* cake polysaccharides on growth performance, carcass traits, meat quality, blood profile, and caecum microorganisms in yellow broilers[J]. Animals, 2020, 10(2): 266.
- [32] 黄鸿. 浅析油茶饼粕的应用价值及前景[J]. 农业科技创新, 2025(25): 26-28.
HUANG H. Applications and prospects of *Camellia oleifera* seed cake: a comprehensive analysis[J]. The Farmers Consultant, 2025(25): 26-28. (in Chinese)
- [33] ZHAN Y X, ZHA D D, LIN H R, MAO X X, YANG L Y, HUANG H D, HE Z N, ZHOU S, XU F, QIAN Y S, LIU Y. Protective role of vitamin k3 on SARS-CoV-2 structural protein-induced inflammation and cell death[J]. Pharmaceuticals, 2023, 16(8): 1101.
- [34] 程洋欢, 陈佩云, 吴胜斌, 李娜, 胡雨欣, 李敏瑶. 油茶饼粕中茶皂素的提取及其灭杀福寿螺效果的研究[J]. 食品安全导刊, 2025(8): 99-103, 110.
CHENG Y H, CHEN P Y, WU S B, LI N, HU Y X, LI M Y. Study on the extraction of tea saponin from *Camellia oleifera* Abel cake meal and its killing effect on *Pomacea canaliculata*[J]. China Food Safety Magazine, 2025(8): 99-103, 110. (in Chinese)