北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

芍药科植物种子营养成分与生物活性成分研究进展

于晓南 吕晓龙 王宇暄 宋焕芝 李刚

Research progress of nutritional components and bioactive components in Paeoniaceae plant seeds

Yu Xiaonan, L ü Xiaolong, Wang Yuxuan, Song Huanzhi, Li Gang

引用本文:
于晓南, 吕晓龙, 王宇暄, 宋焕芝, 李刚. 芍药科植物种子营养成分与生物活性成分研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250323
Yu Xiaonan, L ü Xiaolong, Wang Yuxuan, Song Huanzhi, Li Gang. Research progress of nutritional components and bioactive components in Paeoniaceae plant seeds[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250323

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250323

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

红松种实性状及营养成分动态变化分析
Dynamic changes in seed, cone traits and nutritional components of *Pinus koraiensis*
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 67–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220148

基于高光谱数据的互花米草营养成分反演
Inversion of nutrient components of *Spartina alterniflora* based on hyperspectral data
北京林业大学学报, 2020, 42(9): 92–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200008

苦水玫瑰中49项营养及活性成分指标分析与评价
Analysis and evaluation of 49 nutritional and active component indexes of Kushui rose (*Rosa setate* × *R. rugosa*)
北京林业大学学报, 2023, 45(2): 120–128. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220444

沙棘果实中主要活性成分质量分布
A review on mass distribution of active components from *Hippophae rhamnoides* fruits
北京林业大学学报, 2021, 43(1): 144–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200236

栓皮栎种子贮藏物质和内源激素对萌发成苗的影响
Effects of storage substances and endogenous hormones on seed germination and seedling formation of *Quercus variabilis*
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 19–26. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220207

不同成分脱除对欧洲赤松褐腐初期降解机制的影响
Effects of different component removals on initial degradation mechanism of brown rot in *Pinus sylvestris*
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 156–165. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250015

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250323

芍药科植物种子营养成分与生物活性成分研究进展

于晓南[1,2]　吕晓龙[1,2]　王宇暄[1,2]　宋焕芝[3]　李　刚[4]

（1. 北京林业大学园林学院，北京 100083；2. 花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室，国家花卉工程技术研究中心，城乡生态环境北京实验室，北京林业大学，北京 100083；3. 北京市南水北调团城湖管理处，北京 100089；4. 亳州职业技术学院，安徽中药材种植联合研究中心，安徽 亳州 236800）

摘要:芍药科植物兼具观赏、药用和经济价值于一身，其种子资源蕴含着巨大的开发潜力，在食品、医药和化妆品等领域展现出广阔的应用前景。本文系统总结了芍药科植物种子的营养成分与生物活性成分特征、影响因素以及未来开发利用前景。在营养成分方面，芍药科植物种子富含不饱和脂肪酸、蛋白质、碳水化合物、矿质元素及维生素等，其中不饱和脂肪酸占比较高，脂肪酸比例符合健康膳食标准，为优质健康营养来源。在生物活性成分方面，种子含有总酚、黄酮、芪类化合物、单萜类（如芍药苷）等，这些成分具备抗氧化、抗炎、抑菌、抗肿瘤等多种药理活性，为相关产业提供了重要原料支撑。此外，种子成分含量与地理环境（如海拔、温度、降雨量）、栽培模式（如避雨栽培、限根栽培、遮光处理）及加工预处理条件密切相关，合理调控这些因素可有效提升种子品质。在未来开发利用中，芍药科植物种子在油脂加工领域可拓展油料产业，榨油副产物籽饼粕可用于开发饲料、食用菌培养基及有机肥，种子中的活性物质则能为医药与化妆品产业提供原料，形成全产业链梯级开发模式。本综述将为芍药科植物种子的高值化利用提供理论依据，对推动其资源从“单一观赏”向“药食同源”“多元利用”转型具有实际意义。

关键词：芍药科；种子；营养成分；生物活性成分；代谢机制；药食同源；多元利用

中图分类号：S681；S682　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000−1522(2026)01−0001−11

引文格式：于晓南，吕晓龙，王宇暄，等. 芍药科植物种子营养成分与生物活性成分研究进展［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：1−11. Yu Xiaonan, Lü Xiaolong, Wang Yuxuan, et al. Research progress of nutritional components and bioactive components in Paeoniaceae plant seeds［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 1−11.

Research progress of nutritional components and bioactive components in Paeoniaceae plant seeds

Yu Xiaonan[1,2]　Lü Xiaolong[1,2]　Wang Yuxuan[1,2]　Song Huanzhi[3]　Li Gang[4]

(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding, National Engineering Research Center for Floriculture, Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Beijing South-to-North Water Transfer Tuan Cheng Lake Management Office, Beijing 100089, China;
4. Joint Research Center for Chinese Herbal Medicine of Anhui of IHM, Bozhou Vocational and Technical College, Bozhou 236800, Anhui, China)

Abstract: Paeoniaceae plants possess ornamental, medicinal, and economic value, with their seed resources holding immense development potential and demonstrating broad application prospects in food, pharmaceuticals, cosmetics, and other fields. This paper systematically summarizes the nutritional

收稿日期: 2025−08−24　**修回日期:** 2025−10−09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目（32071817），安徽省高校自然科学研究项目（2023AH053222），安徽省中药材种植联合研究中心项目（yjzx2023010）。

作者简介: 于晓南，教授，博士生导师。主要研究方向：观赏植物资源与育种研究。Email: yuxiaonan626@126.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

components and bioactive components of Paeoniaceae plant seeds, the factors influencing them, and their future development and utilization prospects. Nutritionally, these seeds are rich in unsaturated fatty acids, proteins, carbohydrates, minerals and vitamins. Notably, they contain a high proportion of unsaturated fatty acids with a fatty acid profile meeting healthy dietary standards, making them an excellent source of wholesome nutrition. Regarding bioactive components, the seeds contain various substances including total phenols, flavonoids, iridoids and monoterpenes (e.g., paeoniflorin). These compounds exhibit multiple pharmacological activities such as antioxidant, anti-inflammatory, antibacterial, and antitumor effects, providing crucial raw material support for related industries. Research indicates that seed composition is closely linked to geographical conditions (e.g., altitude, temperature, rainfall), cultivation methods (e.g., rain-protected cultivation, root-restricted cultivation, shading treatments), and processing pretreatment conditions. Rational regulation of these factors can effectively enhance seed quality. In terms of utilization, Paeoniaceae plant seeds can expand the oilseed industry through oil processing. Oil-extraction byproducts like seed cake meal can be developed into feed, edible fungus culture media, and organic fertilizers. Meanwhile, the active compounds within the seeds provide raw materials for the pharmaceutical and cosmetics industries, forming a comprehensive, tiered development model across the entire industrial chain. This study provides a theoretical foundation for the high-value utilization of Paeoniaceae plant seeds, holding significant importance for advancing the transformation of these resources from solely ornamental purposes toward “medicinal and edible dual-purpose” and “multifunctional utilization”.

Key words: Paeoniaceae; seeds; nutritional components; bioactive components; metabolic mechanisms; medicinal and edible dual-purpose; multifunctional utilization

芍药科(Paeoniaceae)为单属科，仅包含芍药属(*Paeonia*)1 个属。该属进一步划分为牡丹组(Sect. *Moutan*)、芍药组（Sect. *Paeonia*）和北美芍药组(Sect. *Onaepia*)。中国传统名花牡丹与芍药，即分别隶属于牡丹组和芍药组，拥有丰富的野生资源和品种资源[1]。近年来，随着“药食同源”理念的日益普及，芍药科植物因富含多糖、单萜类、类黄酮、多酚等代谢物质，在这一新兴领域内展现出巨大应用潜力[2−3]。

先前研究多集中于牡丹根皮(丹皮)，芍药(白芍、赤芍)根部。白芍根中含有较多的芍药苷、芍药内酯苷、没食子酰芍药苷等物质[4]，牡丹根皮中则富含丹皮酚、没食子酸、没食子酰基葡萄糖[5]；通过改善提取时间、提取次数、加水量，牡丹根皮中丹皮酚和芍药苷等物质提取效率有效提高[6]。而近年来，芍药科植物种子的应用价值逐渐受到关注。研究发现：芍药科种子含有丰富的黄酮、苯甲酸、芍药苷、芪类物质及多酚等生物活性成分[7]，这些成分不仅具有重要药用价值，在营养保健和化妆品领域亦表现出巨大潜力[8]。同时，芍药科植物种子还富含蛋白质、多糖、维生素、脂肪酸等营养成分，其中牡丹籽油的不饱和脂肪酸含量超 90%，是优质的健康食用油之一，对这些营养物质的开发利用将更好地服务于人类生活[9−10]。

本文通过对芍药科植物种子营养成分以及生物活性成分进行总结，丰富了芍药科植物资源的研究维度，完善了相关研究体系。同时，明确环境及栽培因素对种子成分的影响，能为实际生产中定向培育优质种子，优化栽培管理与加工工艺提供科学依据，指导产业实践。对芍药科种子多领域开发前景的探索，打破了芍药属植物“单一观赏”的传统定位，为推动其向“药食同源”“多元利用”的全产业链转型奠定了重要基础，可提升资源利用效率，为油脂、饲料、医药等相关产业提供发展支撑，助力实现资源经济价值最大化。

1 芍药科植物种子的营养成分

营养物质是人们日常生活不可或缺的基本需求，是维持人体健康、促进生长发育的关键因素[11]。人们从不同植物中获取多样化的营养成分，这些营养物质不仅为人类提供了丰富的能量，还能帮助抵御疾病、延缓衰老、维持生理平衡[12]。

1.1 脂肪酸组成与营养价值

脂肪酸是一类由碳链构成的羧酸化合物，一端为甲基，另一端为羧基，作为人体必需的营养物质，参与体内新陈代谢，在调节血脂，维护心血管健康，抗炎及抑制肿瘤等方面发挥着关键作用[13]。

王浩[14]发现 71 个牡丹栽培品种种子脂肪酸含量丰富，其中 α-亚麻酸(28.02% ~ 53.02%)、亚油酸(19.24% ~ 37.74%)和油酸(16.21% ~ 29.82%)的含量尤为突出。α-亚麻酸可降低动脉硬化发生率，对高

血脂症具有预防和治疗作用[15]；亚油酸能缓解类风湿关节炎引发的炎性反应[16]；油酸则被证实具有抗肿瘤活性[17]。值得注意的是，亚油酸和 α-亚麻酸作为人体必需的脂肪酸，无法由人体自身合成，必须通过饮食摄入（如亚麻籽[18]、鱼类[19]、桃仁[20]等），每日规律摄入可降低心血管疾病风险，改善整体健康状态。野生牡丹种子中 α-亚麻酸含量达 40.45% ~ 47.68%，远超橄榄油、大豆油等常见食用油脂[21−22]；野生芍药种子的 α-亚麻酸含量显著高于大豆油，亚油酸含量亦高于茶花油等[23]；部分芍药品种（‘红色哈恩伯特’‘仙女’‘粉珠盘’‘墨子岭’）的种子中 α-亚麻酸含量超过 300 mg/g[24]，这进一步凸显了芍药科植物的健康价值。

脂肪酸中（*n*−6）/（*n*−3）的比例对人体健康至关重要，推荐的膳食比例应低于 5∶1，若日常摄入比例过高，可能诱发心血管疾病、自身免疫性疾病及炎症相关疾病[25−26]。芍药科籽油的（*n*−6）/（*n*−3）比值极低，其中芍药为 0.3 ~ 1.0[27]，牡丹为 0.32 ~ 2.76[28]，不仅远优于推荐标准，也显著优于花生油、橄榄油等常见食用油[29−30]，这一特性赋予芍药科种子独特的保健功效。

1.2　碳水化合物与蛋白质

碳水化合物是饮食中最主要的能量来源，按聚合程度可分为单糖、双糖和多糖[31]。其核心作用是为细胞供能，在食物总能量摄入中占主导地位[32]。不同种类和品种芍药科植物种子的碳水化合物含量差异明显。张彤[21]对野生牡丹籽油检测发现，紫牡丹（*Paeonia delavayi*）、狭叶牡丹（*P. potaninii*）、大花黄牡丹（*P. ludlowii*）及黄牡丹（*P. lutea*）的可溶性糖含量均高于油用牡丹栽培品种‘凤丹’（*P. ostii*），其中紫牡丹的可溶性糖含量最高，达 87.06 mg/g。另有研究[33]表明，杭芍（*P. lactiflora*）种子中的淀粉和可溶性糖含量均显著高于紫斑牡丹（*P. rockii*）和‘凤丹’，糖分积累优势突出。

蛋白质由 20 种氨基酸通过肽键连接而成，是动植物组织的基本组成成分，能提供氮、碳氢化合物骨架和硫等生物体必需成分，且无法被碳水化合物、脂质等其他营养元素替代，是极为重要的营养成分[34]。紫牡丹、黄牡丹以及矮牡丹（*P. suffruticosa* var. *spontanea*）籽油中可溶性蛋白含量均高于油用牡丹‘凤丹’，说明野生牡丹种子可作为籽油的优质材料[21]。

1.3　矿质元素与维生素

矿物质是人体必需的营养素，无法在体内合成，需通过饮食持续摄入。虽然其在体内含量低微，却广泛参与多项代谢活动[35]。比如，钙是骨骼和牙齿的重要成分，参与人体多项生命活动[36−37]；铁是血红蛋白的重要组成成分，负责血液中氧气的输送与交换[36]。研究发现，牡丹籽油的钙含量达 153.61 mg/kg，高于豆油（151.00 mg/kg）[38]、核桃油（58.99 ~ 65.27 mg/kg）[39]等常用植物油，且汞、铬等重金属含量均低于国家标准（GB/T 5009—2003）中关于油脂内重金属的限值（0.02 mg/kg）[36]。马广莹等[40]发现，芍药籽油的钙和镁含量较高，保健功能突出。牡丹籽油（54.82 mg/kg）中铁含量要高于芍药籽油（9.20 mg/kg）[36,40]。不同芍药科植物种子中各矿物质含量详见表 1。

表 1　芍药科植物籽油中矿物质含量

Tab. 1　Mineral contents in seed oil of Paeoniaceae plants

元素	牡丹籽油/（mg·kg^{-1}）	芍药籽油/（mg·kg^{-1}）
Na	147.30	
Mg	18.62	400.00
K	31.24	
Ca	153.61	852.00
Fe	54.82	9.20
Mn	0.15	
Cu	0.82	
Zn	0.53	22.80
As	0.001 3	
Cd	0.001 7	
Hg	0.000 4	
Pb	0.013 2	
Se	0.001 4	

注：数据来源于文献 [36, 40]。

维生素是维持生命活动必需的微量低分子有机化合物，在植物中广泛分布[41]。其中，维生素 E 能清除自由基，护肤养颜，抑制衰老，对心脑血管疾病、肿瘤、糖尿病等具有一定的调节和防治作用[42]。植物甾醇能够预防和治疗冠心动脉粥状硬化，促进胆固醇的降解代谢[43]；角鲨烯能够促进心血管健康，抗肿瘤等[44]。

芍药科植物的籽油中富含维生素 E、谷甾醇和角鲨烯。其中，牡丹籽油中维生素 E 含量为 0.56 ~ 0.99 mg/g，且以 γ-生育酚为主要存在形式，而芍药籽油中维生素 E 含量为 0.88 mg/g[45]。牡丹种子中含有 23 种植物甾醇，总含量达 4 336.99 ~ 6 770.29 mg/kg，远高于野生橄榄油（2 068.20 mg/kg）、核桃油（891.80 mg/kg）和花生油（1 350.00 mg/kg）[46]，彰显其独特的营养优势。

2　芍药科植物种子的生物活性物质

植物次生代谢产物中的生物活性物质，如酚类、萜类、生物碱等，在植物竞争防御过程中起关键作用，

不仅具有较高的营养价值，还因显著的药理活性，在预防心血管疾病、癌症、糖尿病等慢性疾病方面潜力巨大[47−48]。

2.1 多酚化合物

酚类化合物是一类结构多样、功能广泛的植物次生代谢产物，在自然界数量最多，分布范围最广。研究[49]发现，酚类化合物可以通过清除自由基来改善衰老，同时能防止氧化损伤相关疾病的发生。芍药栽培品种总酚含量为 6.89 ~ 25.78 mg/g（总酚含量以没食子酸当量计，下同）[24]；野生芍药种子中总酚含量最高达 41.055 0 mg/g，显著高于芝麻籽油（26.00 mg/g）[24]；顾思逸[50]发现‘凤丹’种皮中总酚含量（105.5 ~ 164.8 mg/g）高于种仁（2.9 ~ 6.7 mg/g）。

芍药科植物种子富含多种酚酸类物质，酚酸主要分为两个亚组：羟基苯甲酸和羟基肉桂酸，比较常见的羟基肉桂酸有绿原酸（咖啡酸和奎宁酸的复合形式）、阿魏酸、咖啡酸、对香豆酸和没食子酸[51]。苯甲酸天然存在于植物和水果中，广泛用作食品、化妆品、卫生用品以及口服、胃肠外和局部用药中的抗菌和抗真菌防腐剂[52]。野生芍药属植物种子中苯甲酸含量（0.108 0 ~ 8.487 5 mg/g）最丰富，滇牡丹含量最高（8.487 5 mg/g）[23,53]。Yan 等[24]发现芍药栽培品种酚酸中没食子酸含量最高，其次是苯甲酸。芍药科植物种子中还检测到丁香酸、水杨酸和对香豆酸，但含量相对较低[23]。此外，芍药属植物籽油中含有丰富的苯甲酸（3.5 ~ 7.5 mg/kg）和芥子酸（1.7 ~ 5.2 mg/kg）[54]。

芍药科植物种子中富含具有重要美容价值的咖啡酸（芍药种子 0.38 ~ 0.47 mg/g，牡丹种子 0.052 3 ~ 0.204 3 mg/g），其强大的抗氧化活性和促进胶原蛋白生成的特性使其在抗衰老化妆品领域展现出巨大应用潜力[55]。研究[24,56]发现，‘凤丹’牡丹种子的绿原酸含量尤为突出（0.189 8 ~ 0.531 5 mg/g），而普通芍药种子仅含少量绿原酸。这些发现为开发基于芍药科植物活性成分的化妆品原料提供了重要科学依据。

2.2 类黄酮

类黄酮广泛存在于水果、蔬菜、谷物等人们的饮食中，是含量最丰富、分布最广泛的次生代谢物之一，具有抗氧化、抗炎、抗突变和抗癌特性[57]。芍药栽培品种总类黄酮的含量为 6.37 ~ 30.61 mg/g（类黄酮含量以芦丁当量计，下同）[24]，野生芍药种子含量 3.825 2 ~ 17.073 7mg/g，其中拟草芍药（*P. obovata* ssp. *obovata*）含量最高[23]。张彤[21]研究发现，野生牡丹籽油中富含类黄酮，其中紫斑牡丹、大花黄牡丹、狭叶牡丹中单体类黄酮含量突出。

具体来说，芍药科植物种子富含多种具有重要生物活性的类黄酮化合物，主要包括黄酮醇类、黄酮类和黄烷醇类 3 大类。这些成分不仅在不同芍药科植物品种间呈现显著含量差异，还具有多样化的生理功能，这为其药用价值的开发提供了科学依据。

黄酮醇类在芍药科植物种子中以芦丁和山柰酚为主。芍药中芦丁含量为 0 ~ 0.91 mg/g[24,53]，具有抗菌、抗胃溃疡、预防白血病及改善肥胖等功效[58]；山柰酚则表现出明显的种间差异，野生牡丹种子（0.090 7 ~ 0.366 4 mg/g）与芍药种子（0 ~ 0.20 mg/g）中含量相当，部分野生牡丹中却几乎检测不到该成分[24,53,56]。

黄酮类作为植物重要的次生代谢产物，不仅能保护植物免受紫外辐射，吸引昆虫授粉，更因在果蔬中大量存在而发挥重要的抗氧化作用[59]。芍药科种子中的黄酮类物质以木犀草素为主，狭叶牡丹的木犀草素含量最高（0.143 3 mg/g），而黄牡丹、大花黄牡丹中未检测到该成分[53,56]。

黄烷醇类中，儿茶素含量最为丰富，具有抗癌、抗肥胖、抗糖尿病、保护心血管、抗感染、护肝及保护神经等多重功效[60]。牡丹种子中（+）−儿茶素和（−）−表儿茶素的含量分别为 0.297 5 ~ 1.654 0 mg/g 和 0.021 2 ~ 0.284 8 mg/g，其中四川牡丹（*P. decomposita*）的（+）−儿茶素含量最高，狭叶牡丹的（−）−表儿茶素含量最高[53,56]。在栽培芍药中，（+）−儿茶素和（−）−表儿茶素的含量分别为 0 ~ 1.37 mg/g 和 0 ~ 4.17 mg/g，栽培品种‘仙女’的（+）−儿茶素含量最高，‘黑海波涛’的（−）−表儿茶素含量最高[24]。

2.3 芪类化合物

芍药科植物种子富含具有重要生物活性的芪类化合物，以白藜芦醇及其多聚体（如 Sufiruticosol A、B 和 Gnetin H 等三聚体）为主，这些物质占芪类化合物总量的 80% 以上[61−62]。白藜芦醇具有良好的抗氧化能力，能够有效减少氧化应激造成的损伤[63]，还具有较强的抗炎作用，抑制慢性炎症[64]。芍药种子中芪类化合物含量（20.79 ~ 88.07 mg/g）与牡丹（25.24 ~ 60.45 mg/g）[27,62,65]种子含量相当。研究发现，种子逐渐成熟并且种皮颜色发生变化时，会发生芪类化合物的大量积累，这可能是为了保护种子免受外部病原体或害虫的侵害[66]。在生产加工过程中芍药科植物种皮经常被扔掉，研究表明芍药属种皮中含有一定的芪类物质（质量分数能超过 16.7%），将其中的芪类化合物质提取并进行利用能有效避免浪费，这为开发新型功能性成分提供了重要资源[27,65]。

2.4 单萜苷类

单萜苷类是一类具有“笼状”骨架的物质，具有

抗炎、免疫调节、抗肿瘤、减少神经元损伤、治疗心血管疾病等多种作用[4]。芍药苷作为最重要的单萜苷类物质，在抗氧化、抗惊厥、抗血栓形成、认知增强、学习障碍改善及神经保护等方面的作用已得到广泛证实[67−68]。

芍药科植物种子中单萜苷类物质的含量因种类、部位等存在差异。牡丹籽油中单萜苷含量为 36.26～103.1 mg/kg，其中芍药苷占比最高（67.3%～88.0%）[54]。野生芍药种子（3.105 5～27.569 2 mg/g ）与牡丹种子（6.14～28.48 mg/g）中芍药苷含量相似[23,69]。值得注意的是，芍药种皮中的芍药苷占比 15.45%～20.20%，表明其种皮也可以用来提取芍药苷[70]。

此外，氧化芍药苷、芍药内酯苷等其他单萜苷类的含量也呈现出显著差异。He 等[69]检测发现，牡丹种子中氧化芍药苷含量较低（0～0.67 mg/g），而芍药内酯苷含量范围变化较大（0.09～6.77 mg/g）。杨勇[27]发现多花芍药（*P. emodi*）和川赤芍的芍药内酯苷含量较高，分别为 6.77 mg/g 和 9.64 mg/g，芍药（*P. lactiflora*）中氧化芍药苷含量较高。芍药栽培品种中芍药内酯苷和氧化芍药苷含量低于野生种，分别为 0～4.57 mg/g 和 0～0.98 mg/g[24]。

3　环境、栽培因素以及预处理对种子成分的影响

芍药科植物种子的营养成分与生物活性成分的积累主要受地理环境和栽培因素的协同调控。环境差异（纬度、海拔、气候等）与栽培措施（种植模式、管理技术等）通过影响植物代谢途径，显著影响种子中脂肪酸、酚类、萜类等成分的含量与组成比例。深入解析这些调控机制，对实现优质品种定向培育和优化加工工艺具有重要指导意义。

3.1　地理环境影响

地理环境差异对芍药科植物种子具有决定性影响，主要作用于脂肪酸组成和酚类物质含量等方面。营养成分以及活性物质含量与纬度、经度、海拔、降水及年平均温度等环境因子存在显著相关性。例如：在甘肃兰州的‘凤丹’牡丹和紫斑牡丹籽油中，油酸含量高于亚油酸；而山东菏泽和安徽亳州的籽油则呈现亚油酸含量更高的特征[46]。两地的差异与环境因素密切相关，随着海拔升高，年降雨量减少，年均温降低，油酸含量显著增加，亚油酸含量降低。此外，不同栽培地区的凤丹总酚含量存在差异，以安徽铜陵地区的凤丹总酚含量最高（25.174 8 mg/g）[56]。

在其他生物活性成分方面：高海拔、低降雨量及低年平均温度的环境条件会使牡丹籽油中角鲨烯含量升高，其中兰州地区的紫斑牡丹角鲨烯含量最高（228.88 mg/kg）；β-谷甾醇含量与经度呈正相关；Δ5-燕麦甾醇含量则在低海拔、高经度、高降雨量及高年平均温度的环境中更高[56]。

3.2　栽培模式与加工预处理的影响

栽培模式对芍药科植物种子的营养成分和生物活性成分具有显著调控作用。其中，避雨栽培和限根栽培能有效提升牡丹种子的出油率，特别是全生长季避雨，开花期避雨以及穴式限根栽培能显著提高亚麻酸含量[71]。限根栽培可增加钙和镁的积累，避雨栽培能提升氨基酸及维生素 E 含量，且结果期避雨栽培对甾醇含量的提升效果显著[71]。遮光处理对种子营养成分亦存在显著影响。研究[72]表明，轻度遮光条件下，种子体积与贮藏物质的积累量在快速生长期无显著变化，而在缓慢生长期及成熟期显著升高；重度遮光则不利于营养成分的积累。此外，在栽培方式方面，林下间作相较于其他模式可显著提升种子含油量与亚油酸含量，而高海拔栽培能有效提高种子中 α-亚麻酸的含量[73]。

加工预处理条件同样也会影响种子成分品质。研究发现，高温预处理会导致牡丹籽油中维生素 E、植物甾醇及角鲨烯含量下降，维生素 E 作为脂溶性维生素，植物甾醇和 角鲨烯作为易氧化物质，在高温环境下更易发生氧化降解[74]。这些发现为优化芍药科植物种子的栽培管理和加工工艺提供了重要依据。

4　芍药科植物种子综合开发利用前景

芍药科植物种子因营养丰富、活性物质多样且资源充足，在多领域具有广阔前景。从油脂加工拓展木本油料产业，到籽饼粕用于饲料、菌培及有机肥，再到提取活性物质支撑医药与化妆品产业，其全产业链梯级开发模式正形成，既能提升资源效率，又可推动产业绿色可持续发展，助力农业经济与生态保护协同发展。

4.1　油脂加工：油料产业的拓展方向

在品质层面，牡丹籽油含有极高含量的 α-亚麻酸，可预防高血脂[25−26]。更关键的是，芍药科植物籽油（n−6）/（n−3）脂肪酸比例极低，远优于国际推荐标准（ 小于 5∶1），是理想的功能性油脂来源。从资源潜力看，牡丹多个栽培品种（如‘小桃红’出油率 28.25%）[16]和野生种（杨山牡丹[21]、紫斑牡丹[46]）出油率表现优异，35 个牡丹品种[14]出油率超过传统油用品种‘凤丹’。此外，栽培芍药种子出油率达 18.74%～26.68%，其中‘杭芍’[24]出油率最高，而野生芍药中的白花芍药[23]更是高达 33.09%，这为油料产业发展提供了丰富的原料选择。

在加工层面，可结合环境调控提升油脂品质，如高海拔种植增加油酸含量[46]。同时，除了食用功效，牡丹籽油还有其他的功能。研究[21]发现，野生牡丹籽油对金黄色葡萄球菌和阴沟肠杆菌具有明显的抑制作用。在化妆品方面，将牡丹花精油与牡丹籽油混合之后，具有较好的抑菌能力，抗紫外线能力[75]。此外，牡丹籽油还具备降血脂、免疫调节、血糖控制及神经保护等多重生理活性[76]，其抗氧化以及抑菌特性赋予了其保鲜剂、防腐剂的功能[77]，可延伸至功能性食品、保健品领域，推动木本油料产业从‘单一食用’向‘多元化利用’转型，为产业可持续发展提供新路径。

4.2 籽饼粕综合利用：饲料、食用菌培养基与有机肥的开发

当前，芍药科植物种子主要用于榨取籽油，而榨油后产生的籽饼粕和种皮多被废弃，然而这类副产物具有较高的综合利用价值。从环保肥料角度看，芍药科籽饼粕和种皮因富含粗纤维（籽饼粕中 5.85%～6.33%，种皮中 43.17%～45.35%[78]），可借鉴玉米秸秆（粗纤维 36.5%～37.6%）、甘蔗渣（粗纤维 41.8%～45.3%）等材料的应用模式，开发为新型纳米肥料[78]。此类肥料能显著减少用量并保持效率，且易被植物根系和叶片吸收，具备良好的环保属性[79]。

在动物饲料领域，芍药科籽饼粕和种皮的粗纤维可促进牲畜肠胃发育及脂质代谢，添加一定比例的牡丹籽饼还能提高纤维和淀粉分解菌的活性[80]。芍药科种皮中粗灰分含量（3.65%～5.41%）要高于籽粕（2.40%～3.40%）[79]，粗灰分中富含钙、磷、钾、镁等矿物质，可以应用于动物饲料[81]，对动物生长发育、骨骼形成及生理代谢至关重要。作为非粮蛋白源，芍药科籽饼粕粗蛋白含量为 22.79%～29.68%[70,78]，契合家禽饲料需求（22.7%±0.7%）[81]。发酵后蛋白含量显著提升，以 50%～75% 比例替代豆粕时，可提高草鱼抗氧化能力，改善其脂质水平并降低肠道致病菌活性[82]。牡丹籽饼粕中粗多糖含量达 7.67%，满足优质饲料含糖量（＞6%）标准[83]。糖类在青贮的过程中可抑制有害菌（梭状芽孢杆菌等），含糖量较低则会导致微生物过度繁殖，导致蛋白质腐败[84]。此外，适当增加糖水平可提升白鲫的生长性能[85]。此外，芍药科籽饼粕中钙（4.88%）、磷（2.64%）含量显著高于大豆饼、棉籽饼和菜籽饼[86]，锌含量亦远高于同类饼粕，铁含量为豆粕的 3.5 倍[83]。这些元素对动物骨骼发育、血红蛋白合成及营养运输等具有重要作用，这进一步凸显了芍药科籽饼粕作为优质饲料的潜力。

在酿造与食用菌培养方面，牡丹籽粕因富含蛋白质和淀粉，是酿造酱油的优质原料：与豆粕按 3∶7 混合，在 13.5% 盐水浓度下发酵 15 d，酱油氨基态氮含量最高，风味品质最佳[87]；与糖按 1∶11 比例混合，添加 0.4 g/L 酒曲并在 30 ℃ 下发酵 72 h，可制得风味独特，酒精度仅 1.04% 的牡丹籽粕酒[88]。牡丹籽粕还能发酵为酱，相较于传统黄豆酱，牡丹籽粕发酵后风味更加浓郁，且还原糖和总黄酮含量更高[89]。在食用菌培养中，以 3% 牡丹籽粕替代 5% 麦麸可显著提高平菇生长速率，以 1% 牡丹籽粕替代部分麦麸则能增加平菇子实体多糖含量[90]，这为食用菌培养基质提供了新型选择。不同芍药科植物种子中籽饼中各活性物质含量详见表 2。

4.3 活性物质提取：医药、化妆品产业的林业原料支撑

芍药科植物种子是提取芦丁、芍药苷等活性物质的重要资源，为医药及化妆品产业提供了优质的林业原料支撑。芦丁作为一种类黄酮，在疾病治疗方面有着较高的价值[58]，在芦丁提取方面，芍药科植物种子展现出显著优势。葡萄和荞麦是目前芦丁的主要来源，而芍药科植物种子中芦丁含量与葡萄相近，且远高于普通荞麦壳[58]，这使其成为极具潜力的芦丁提取原料。此外，牡丹籽粕中亦含有可利用的芍药苷、芍药内酯苷、单萜苷等活性成分。秦爱霞[91]、王凤琴[92]等研究发现，牡丹籽粕中含有一定量的芍药苷及芍药内酯苷，这类副产物可作为动物饲料[82,91]，且可通过提取实现高值化利用。研究[92]表明，牡丹籽粕的单萜苷提取物能显著抑制肝癌 HepG2 细胞的存活率，并对其侵袭和克隆能力具有抑制作用，对肝癌治疗有着重要的意义。

表 2 芍药科植物种子籽饼中各活性物质含量

Tab. 2 Contents of active substances in seed cakes of Paeoniaceae plants

物种	部位	粗多糖含量/%	粗纤维含量/%	粗灰分含量/%	粗蛋白含量/%
牡丹	籽饼	7.67	5.85～5.98	2.40～3.40	27.18～29.68
	籽壳		43.17～45.35	4.21～5.41	3.65～4.67
芍药	籽饼		6.33	2.84	22.79～28.14
	籽壳		44.57	3.65	1.86～4.37

注：数据来源于文献 [70，78−79，83]。

5 展　　望

芍药科植物种子资源的研究与开发虽已取得阶段性进展，但其潜力挖掘与产业转化仍存在广阔的拓展空间，未来可围绕以下方向进一步深化探索，推动该领域研究与应用迈向更高水平。

在基础研究层面，需聚焦芍药科植物种子关键成分的代谢调控机制。当前虽明确了环境与栽培因素对芍药科植物种子成分的影响，但不饱和脂肪酸、芍药苷、芪类化合物等核心物质的合成通路，关键调控基因及分子调控网络尚未完全解析。未来可结合基因组学、转录组学与代谢组学等多组学技术，挖掘营养与生物活性物质积累相关基因，阐明环境信号（如海拔、温度）与基因的互作机制，为通过基因编辑、分子标记辅助育种等手段定向培育“高营养”“高活性”的芍药科植物专用品种提供精准靶点，从源头提升种子品质。

在技术创新层面，需突破活性成分高效提取与副产物全值利用的技术瓶颈。现有提取技术多针对单一成分（如油脂或芍药苷），存在提取效率低、溶剂残留、副产物浪费等问题。未来可研发绿色高效的复合提取技术，实现油脂与活性物质的同步提取；同时针对籽饼粕、种皮等副产物，开发分级利用工艺，构建“零废弃”的资源循环利用模式，最大化提升资源利用率与经济附加值。

在产业化应用层面，需推动产品多元化开发与市场验证。当前种子开发多集中于基础食用油与简单饲料，高附加值的功能性产品仍处于研发阶段。未来需加强产学研合作，结合消费者需求开发个性化产品，同时开展长期安全性评估与临床功效验证，建立种子成分的品质标准与检测体系，规范市场秩序，提升产品公信力，推动芍药科植物种子从“资源优势”转化为“产业优势”。

在区域适配性研究层面，需强化不同生态区的栽培技术优化。当前研究已发现高海拔栽培、避雨栽培等模式的优势，但不同气候带的栽培技术体系尚未建立。未来可针对不同生态区域的环境特点，研发适应性栽培方案，形成“区域定制化”的栽培技术规程，确保种子品质稳定，推动芍药科植物种子在全国范围内的规模化、标准化种植，为其产业发展提供稳定的原料供给。

综上，未来通过基础研究的深化、技术工艺的创新与产业应用的拓展，芍药科植物种子有望从“小众资源”成长为支撑油料、生物医药、绿色农业等产业的重要战略资源，为保障粮食安全、推动健康中国建设与生态经济协同发展贡献力量。

参　考　文　献

[1] Zhang Y, Liu P, Gao J, et al. *Paeonia veitchii* seeds as a promising high potential by-product: proximate composition, phytochemical components, bioactivity evaluation and potential applications[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 125: 248−260.

[2] Li J, Ren S, Li M, et al. Paeoniflorin protects against dextran sulfate sodium (DSS)-induced colitis in mice through inhibition of inflammation and eosinophil infiltration[J]. International Immunopharmacology, 2021, 97: 107667.

[3] Yan B, Shen M, Fang J, et al. Advancement in the chemical analysis of Paeoniae Radix (Shaoyao)[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2018, 160: 276−288.

[4] 金林, 赵万顺, 郭巧生, 等. 芍药根化学成分分布及加工工艺研究 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(10): 1953−1959.
Jin L, Zhao W S, Guo Q S, et al. Study on chemical components distribution in Paeoniae Radix Alba and its processing methods[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(10): 1953−1959.

[5] 朱荣清, 田春芳, 兰晓燕, 等. 牡丹皮药材、药渣以及药渣堆肥化学成分和营养成分差异研究 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(23): 6361−6370.
Zhu R Q, Tian C F, Lan X Y, et al. Chemical and nutrient differences between medicinal material, residues, and residue compost of moutan cortex[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(23): 6361−6370.

[6] 周芳, 牛壮伟, 袁继承, 等. 牡丹皮提取工艺优化 [J]. 中国药业, 2025, 34(3): 49−52.
Zhou F, Niu Z W, Yuan J C, et al. Optimization of extraction process of moutan cortex[J]. China Pharmaceuticals, 2025, 34(3): 49−52.

[7] Li P, Shen J, Wang Z, et al. Genus *Paeonia*: a comprehensive review on traditional uses, phytochemistry, pharmacological activities, clinical application and toxicology[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 269: 113708.

[8] 董振兴, 彭代银, 宣自华, 等. 牡丹籽油降血脂、降血糖作用的实验研究 [J]. 安徽医药, 2013, 17(8): 1286−1289.
Dong Z X, Peng D Y, Xuan Z H, et al. Experimental study on hypolipidemic and hypoglycemic effects of peony seed oil[J]. Anhui Medical and Pharmaceutical Journal, 2013, 17(8): 1286−1289.

[9] Zhang K L, Yao L J, Zhang Y, et al. A review of the seed biology of *Paeonia* species (Paeoniaceae), with particular reference to dormancy and germination[J]. Planta, 2019, 249(2): 291−303.

[10] Rudaya O A, Chesnokov N N, Kirina I B, et al. The research of seed reproduction peculiarities of wild-growing *Paeonia* L. genus and perspectives of using peony seeds in food-processing industry[C]//Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. London: IOP Publishing, 2021.

[11] 吕宜娜, 张福利. 食品营养与食品安全检测相结合的应用价值与方法探究 [J]. 现代食品, 2024, 30(22): 50−52.

Lü Y N, Zhang F L. Exploration of the application value and methods of combining food nutrition and food safety testing[J]. Modern Food, 2024, 30(22): 50−52.

[12] Wang L, Zhu X, Liu H, et al. Medicine and food homology substances: a review of bioactive ingredients, pharmacological effects and applications[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141111.

[13] Rustan A C, Drevon C A. Fatty acids: structures and properties[J]. Encyclopedia of Life Sciences, 2005, 1: 1−7.

[14] 王浩. 牡丹油用品种筛选及籽油功能评价分析 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2023.
Wang H. Screening of oil-use cultivars of tree peony and functional evaluation of seed oil[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2023.

[15] Egert S, Kannenberg F, Somoza V, et al. Dietary α-linolenic acid, EPA, and DHA have differential effects on LDL fatty acid composition but similar effects on serum lipid profiles in normolipidemic humans[J]. The Journal of Nutrition, 2009, 139(5): 861−868.

[16] 胡丹东, 崔玉娟, 张继. 亚油酸通过调节 TLR4/NF-κB 信号通路减轻大鼠类风湿关节炎 [J]. 中国药理学通报, 2021, 37(9): 1213−1218.
Hu D D, Cui Y J, Zhang J. Linoleic acid ameliorates inflammation in rheumatoid arthritis rats via regulation of TLR4/NF-κB signaling pathway[J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2021, 37(9): 1213−1218.

[17] Palomer X, Pizarro-Delgado J, Barroso E, et al. Palmitic and oleic acid: the yin and yang of fatty acids in type 2 diabetes mellitus[J]. Trends in Endocrinology & Metabolism, 2018, 29(3): 178−190.

[18] Parellada M, Llorente C, Calvo R, et al. Randomized trial of omega-3 for autism spectrum disorders: effect on cell membrane composition and behavior[J]. European Neuropsychopharmacology, 2017, 27(12): 1319−1330.

[19] Liu R, Chen L, Wang Y, et al. High ratio of ω-3/ω-6 polyunsaturated fatty acids targets mTORC1 to prevent high-fat diet-induced metabolic syndrome and mitochondrial dysfunction in mice[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2020, 79: 108330.

[20] Simopoulos A P. N-3 fatty acids and human health: defining strategies for public policy[J]. Lipids, 2001, 36(S1): S83−S89.

[21] 张彤. 九种野生牡丹种子和籽油化学成分及其生物活性研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022.
Zhang T. Study on the chemical constituents and biological activities in seeds and seed oils from nine wild peony species[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022.

[22] Xie Y, Yan Z, Niu Z, et al. Yield, oil content, and fatty acid profile of flax (*Linum usitatissimum* L.) as affected by phosphorus rate and seeding rate[J]. Industrial Crops & Products, 2020, 145: 112087.

[23] 闫振国. 中国野生芍药种质资源调查与评价研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Yan Z G. Inevestigation and evaluation of herbaceous peony (*Paeonia* Section *Paeonia*) germplasm resource in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[24] Yan Z G, Li M C, Xie L H, et al. A systematic comparison of 17 cultivated herbaceous peony seed based on phytochemicals and antioxidant activity[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(10): 1919−1932.

[25] Li S S, Wang L S, Shu Q Y, et al. Fatty acid composition of developing tree peony (*Paeonia* section *Moutan* DC.) seeds and transcriptome analysis during seed development[J]. BMC genomics, 2015, 16(1): 208.

[26] Chang M, Wang Z, Zhang T, et al. Characterization of fatty acids, triacylglycerols, phytosterols and tocopherols in peony seed oil from five different major areas in China[J]. Food Research International, 2020, 137: 109416.

[27] 杨勇. 中国野生芍药表型多样性分析及种子和根的利用潜力研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Yang Y. Research on phenotypic diversity of Chinese wild herbaceous peonies and utilization potential of their seeds and roots[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[28] Zhang X X, Zhang Y L, Niu L X, et al. Chemometric classification of different tree peony species native to China based on the assessment of major fatty acids of seed oil and phenotypic characteristics of the seeds[J]. Chemistry & Biodiversity, 2017, 14(1): e1600111.

[29] Yu S, Du S, Yuan J, et al. Fatty acid profile in the seeds and seed tissues of *Paeonia* L. species as new oil plant resources[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 26944.

[30] Carvalho I S, Miranda I, Pereira H. Evaluation of oil composition of some crops suitable for human nutrition[J]. Industrial Crops and Products, 2006, 24(1): 75−78.

[31] Cummings J H, Roberfroid M B, Andersson H, et al. A new look at dietary carbohydrate: chemistry, physiology and health[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1997, 51(7): 417−423.

[32] Campos V, Tappy L, Bally L, et al. Importance of carbohydrate quality: what does it mean and how to measure it?[J]. The Journal of Nutrition, 2022, 152(5): 1200−1206.

[33] Ren X, Shi Y, Xue Y, et al. Seed proteomic profiles of three paeonia varieties and evaluation of peony seed protein as a food product[J]. BioMed Research International, 2020, 18(1): 5271296.

[34] Wu G. Dietary protein intake and human health[J]. Food & Function, 2016, 7(3): 1251−1265.

[35] 赵雪梅. 农产品中维生素、矿物质和脂肪酸的营养品质评价方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
Zhao X M. Study on evaluation method of nutritional quality of vitamins, minerals and fatty acids in agricultural products[D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2022.

[36] 贾玉良. 牡丹籽油提取工艺优化及其微胶囊化技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
Jia Y L. Extracation process optimization andmicroencapsulation of peony seed oil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.

[37] 江洪涛, 马斌, 毕娜, 等. 林芝手掌参营养成分分析与评价 [J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22): 135−140.

Jiang H T, Ma B, Bi N, et al. Composition analysis and quality evaluation of nutritional components of *Gymnadenia conopsea* (L.) R. Br. from Linzhi[J]. Food Research and Development, 2018, 39(22): 135−140.

[38] 孙建民, 范宏, 崔萌, 等. 黄豆油中 8 种金属元素的测定与分析 [J]. 微量元素与健康研究, 2007(3): 33−34.
Sun J M, Fan H, Cui M, et al. Determination of eight metal elements in soyabean oil[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2007(3): 33−34.

[39] 耿鹏飞, 彭吟雪, 胡传荣, 等. 八大核桃产地的核桃理化性质及油脂特性对比研究 [J]. 中国油脂, 2018, 43(9): 116−120.
Geng P F, Peng Y X, Hu C R, et al. Comparison of physicochemical properties and oil characteristics of walnuts from eight regions[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(9): 116−120.

[40] 马广莹, 史小华, 邹清成, 等. 芍药籽油理化性质测定及与牡丹籽油比较分析 [J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 130−134,140.
Ma G Y, Shi X H, Zou Q C, et al. Characters determination of herbaceous oil physicochemical property and comparative analysis of peony seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(3): 130−134,140.

[41] Asensi-Fabado M A, Munné-Bosch S. Vitamins in plants: occurrence, biosynthesis and antioxidant function[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(10): 582−592.

[42] 臧雪冰, 胡怡秀, 刘秀英, 等. 天然维生素 E 延缓衰老作用的实验研究 [J]. 实用预防医学, 2002, 1(1): 32−33.
Zang X B, Hu Y X, Liu X Y, et al. Experimental study on anti-aging effects of natural vitamin E[J]. Practical Preventive Medicine, 2002, 1(1): 32−33.

[43] 朱献标, 翟文婷, 董秀勋, 等. 牡丹籽油化学成分及功能研究进展 [J]. 中国油脂, 2014, 39(1): 88−91.
Zhu X B, Zhai W T, Dong X X, et al. Progress on chemical composition and function of peony seed oil[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(1): 88−91.

[44] 杨春英, 刘学铭, 陈智毅, 等. 气相色谱−质谱联用法测定 14 种食用植物油中的植物甾醇 [J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2): 123−128.
Yang C Y, Liu X M, Chen Z Y, et al. Determination of phytosterols of fourteen edible vegetable oils by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(2): 123−128.

[45] 毛程鑫, 李桂华, 李普选, 等. 牡丹籽油的脂肪酸组成及理化特性分析 [J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 142−146.
Mao C X, Li G H, Li P X, et al. Analysis of triglycerides composition structure and physicochemical properties of peony seed oil[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 142−146.

[46] 王灵芝. 不同产地和品种牡丹籽油的理化特性分析 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2023.
Wang L Z. Analysis of physical and chemical properties of peony seed oil from different producing areas and varieties[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2023.

[47] Guaadaoui A, Benaicha S, Elmajdoub N, et al. What is a bioactive compound? A combined definition for a preliminary consensus[J]. International Journal of Nutrition and Food Sciences, 2014, 3(3): 174−179.

[48] Saadony E T M, Yang T, Saad M A, et al. Chemistry, bioavailability, bioactivity, nutritional aspects and human health benefits of polyphenols: a comprehensive review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277(P3): 134223.

[49] Haminiuk C W I, Maciel G M, Plata-Oviedo M S V, et al. Phenolic compounds in fruits: an overview[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(10): 2023−2044.

[50] 顾思逸. 陕西‘凤丹’牡丹种子成分分析及活性评价 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
Gu S Y. Component analysis and actively evaluation of *Paeonia ostii* seeds in Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[51] Kumar N, Goel N. Phenolic acids: natural versatile molecules with promising therapeutic applications[J]. Biotechnology Reports, 2019, 24: e00370.

[52] del Olmo A , Calzada J, Nuñez M. Benzoic acid and its derivatives as naturally occurring compounds in foods and as additives: uses, exposure, and controversy[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(14): 3084−3103.

[53] Zhang X X, Shi Q Q, Ji D, et al. Determination of the phenolic content, profile, and antioxidant activity of seeds from nine tree peony (*Paeonia* section *Moutan* DC.) species native to China[J]. Food Research International, 2017, 97: 141−148.

[54] Wang X, Li C, Contreras M M, et al. Integrated profiling of fatty acids, sterols and phenolic compounds in tree and herbaceous peony seed oils: marker screening for new resources of vegetable oil[J]. Foods, 2020, 9(6): 770.

[55] Magnani C, Isaac V L B, Correa M A, et al. Caffeic acid: a review of its potential use in medications and cosmetics[J]. Analytical Methods, 2014, 6(10): 3203−3210.

[56] Zhang X X, Zhang G, Jin M, et al. Variation in phenolic content, profile, and antioxidant activity of seeds among different *Paeonia ostii* cultivated populations in China[J]. Chemistry & Biodiversity, 2018, 15(5): e1800093.

[57] Panche A N, Diwan A D, Chandra S R. Flavonoids: an overview[J]. Journal of Nutritional Science, 2016, 5: e47.

[58] Frutos M J, Rincón-Frutos L, Valero-Cases E, et al. Nonvitamin and nonmineral nutritional supplements[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2019.

[59] Verma A K, Pratap R. The biological potential of flavones[J]. Natural Product Reports, 2010, 27(11): 1571−1593.

[60] Isemura M. Catechin in human health and disease[J]. Molecules, 2019, 24(3): 528.

[61] 李雅洁. 紫斑牡丹种子白藜芦醇生物合成机制解析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
Li Y J. Mechanism analysis of resveratrol biosynthesis inseeds of *Paeonia rockii*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[62] He C N, Peng Y, Wu Q L, et al. Simultaneous determination of

ten stilbenes in the seeds of *Paeonia* species using HPLC-DAD[J]. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies, 2013, 36(12): 1708−1724.

[63] 李一凡. 利用 UV-C 处理研究玫瑰香葡萄中白藜芦醇及衍生物变化规律 [D]. 天津: 天津商业大学, 2017.
Li Y F. Research of the change rule of the content of resveratrol and Its derivatives in muscat grape under UV-CIrradiation[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2017.

[64] 李先宽, 李赫宇, 李帅, 等. 白藜芦醇研究进展 [J]. 中草药, 2016, 47(14): 2568−2578.
Li X K, Li H Y, Li S, et al. Advances in study on resveratrol[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(14): 2568−2578.

[65] Wang W, Liu Z, Kong F, et al. Quantitative analysis of resveratrol derivatives in the seed coats of tree peonies and their hypoglycemic activities in vitro/vivo[J]. Food & Function, 2022, 13(2): 846−856.

[66] 何春年, 毕武, 申洁, 等. 牡丹和芍药种皮、种仁及种皮提取物中 10 种芪类成分含量及抗氧化测定 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(6): 1081−1086.
He C N, Bi W, Shen J, et al. Determination of ten stilbenes and their antioxidant activity of peony seed coat, seed kernel and seed coat extracts[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(6): 1081−1086.

[67] Wang Q S, Gao T, Cui Y L, et al. Comparative studies of paeoniflorin and albiflorin from *Paeonia lactiflora* on anti-inflammatory activities[J]. Pharmaceutical Biology, 2014, 52(9): 1189−1195.

[68] Liang X, Wang Y Z, Liu J, et al. Effects of paeoniflorin on the cerebral infarction, behavioral and cognitive impairments at the chronic stage of transient middle cerebral artery occlusion in rats[J]. Life Sciences, 2005, 78(4): 413−420.

[69] He C, Peng Y, Xiao W, et al. Determination of chemical variability of phenolic and monoterpene glycosides in the seeds of *Paeonia* species using HPLC and profiling analysis[J]. Food Chemistry, 2013, 138(4): 2108−2114.

[70] Nie R, Zhang Y, Jin Q, et al. Identification and characterisation of bioactive compounds from the seed kernels and hulls of *Paeonia lactiflora* Pall by UPLC-QTOF-MS[J]. Food Research International, 2021, 139: 109916.

[71] 张加强, 朱开元, 周江华, 等. 不同栽培模式对‘凤丹’牡丹籽油品质的影响 [J]. 浙江林业科技, 2023, 43(3): 55−61.
Zhang J Q, Zhu K Y, Zhou J H, et al. Effect of different cultivation patterns on quality of *Paeonia suffruticosa* ‘Fengdan’ seed oil[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2023, 43(3): 55−61.

[72] Han C J, Wang Q, Zhang H B, et al. Seed development and nutrient accumulation as affected by light shading in oilseed peony (*Paeonia ostii* ‘Feng Dan’)[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 251: 25−31.

[73] Zhang T, Zhang Z, Qiao Q, et al. Effect of cultivation methods on seed yield traits, oil yield, and fatty acid compositions of cultivated *Paeonia ostii*[J]. HortScience, 2021, 56(12): 1505−1512.

[74] 宋媛媛. 乙醇辅助水酶法提取牡丹籽油工艺研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2018.
Song Y Y. Ethanol-assisted aqueous enzymatic extraction of peony seed oil[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.

[75] 姜宇. 化妆品用牡丹花精油和籽油的制备工艺及其功效研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
Jiang Y. Study on preparation process and eficacy of tree peony essential oil and seed oil for cosmetics[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.

[76] Deng R, Gao J, Yi J, et al. Could peony seeds oil become a high-quality edible vegetable oil? The nutritional and phytochemistry profiles, extraction, health benefits, safety and value-added-products[J]. Food Research International, 2022, 156: 111200.

[77] 夏振平, 刘旭富. 油用牡丹籽油提取工艺和保鲜效果 [J]. 食品工业, 2019, 40(6): 101−104.
Xia Z P, Liu X F. Extraction technology and preservation effect of seed oil of peony[J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 101−104.

[78] Skrzypczak D, Izydorczyk G, Taf R, et al. Cellulose-based fertilizers for sustainable agriculture: effective methods for increasing crop yield and soil health[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 205: 117500.

[79] 邓瑞雪, 杨晓, 屈春笑, 等. 3 种芍药属植物种子不同部位成分分析 [J]. 食品科学, 2019, 40(8): 141−148.
Deng R X, Yang X, Qu C X, et al. Chemical compositions in different parts of the seeds of three *Paeonia* species[J]. Food Science, 2019, 40(8): 141−148.

[80] 许腾, 亢守亭, 孙国涛, 等. 牡丹籽饼对生长育肥猪生长性能、消化性能及屠宰性能的影响 [J]. 畜牧与饲料科学, 2017, 38(9): 23−26.
Xu T, Kang S T, Sun G T, et al. Effects of dietary supplementation of peony seed cake on growth, digestion and slaughter performance of growing-finishing pigs[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2017, 38(9): 23−26.

[81] Jia Z, Zhou J, Yang M, et al. Preparation and evaluation of certified reference materials for crude protein, crude fat, and crude ash in feed[J]. Microchemical Journal, 2023, 191: 108854.

[82] 赵伟芳. 牡丹籽油/粕和芍药苷在草鱼配合饲料中的应用研究 [D]. 新乡: 河南师范大学, 2023.
Zhao W F. Study on the application of peony seed oil / meal and paeoniflorin in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) compound feed[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2023.

[83] 昝丽霞, 陈君红, 韩豪, 等. 油用牡丹籽粕营养成分分析研究 [J]. 粮食与油脂, 2019, 32(9): 45−47.
Jiu L X, Chen J H, Han H, et al. Analysis of nutrient compositions of peony seed meal[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(9): 45−47.

[84] 杨秋. 影响青贮饲料品质因素分析 [J]. 中国畜禽种业, 2020, 16(3): 74.
Yang Q. Analysis of factors affecting silage quality[J]. The Chinese Livestock and Poultry Breeding, 2020, 16(3): 74.

[85] 罗琳, 刘顺, 欧自磊, 等. 饲料中不同水平糖对白鲫生长、抗氧化能力及肌肉成分的影响 [J]. 饲料研究, 2021, 44(1): 55−59.

Luo L, Liu S, Ou Z L, et al. Effect of carbohydrate level in feed on growth, antioxidant capacity and muscle composition of crucian carp[J]. Feed Research, 2021, 44(1): 55−59.

[86] 戴玉, 许腾, 初汉平, 等. 牡丹籽饼营养成分分析 [J]. 饲料研究, 2019, 42(7): 54−57.
Dai Y, Xu T, Chu H P, et al. Analysis on nutritional components in peony seed cake[J]. Feed Research, 2019, 42(7): 54−57.

[87] 赵贵红, 王波, 李敏, 等. 牡丹籽粕酿造酱油发酵工艺研究 [J]. 中国果菜, 2022, 42(1): 38−41,47.
Zhao G H, Wang B, Li M, et al. Study on fermentation technology of soy sauce with peony seed meal[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(1): 38−41,47.

[88] 宋王婷, 昝丽霞, 索艳敏, 等. 牡丹籽粕发酵酒工艺优化研究 [J]. 粮食与饲料工业, 2018(12): 28−31.
Song W T, Jiu L X, Suo Y M, et al. Process optimization of peony seed meal fermented wine[J]. Cereal & Feed Industry, 2018(12): 28−31.

[89] 付玮琦, 李西西, 任佳敏, 等. 牡丹籽粕的添加对发酵豆酱理化性质的影响 [J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 13−17.
Fu W Q, Li X X, Ren J M, et al. Effect of addition of peony seed meal on physiochemical properties of fermented soybean paste[J]. China Condiment, 2024, 49(1): 13−17.

[90] 黄春燕, 宫志远, 弓志青, 等. 牡丹籽粕不同添加量对平菇栽培的影响 [J]. 中国食用菌, 2018, 37(2): 26−29.
Huang C T, Gong Z Y, Gong Z Q, et al. Effects of different adding amount of peony seed dreg on *Pleurotus ostreatus* cultivation[J]. Edible Fungi of China, 2018, 37(2): 26−29.

[91] 秦爱霞. 牡丹籽粕中芍药苷类成分的分析及大孔吸附树脂提取工艺研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
Qin A X. Researches on the composition, determination and macroporous adsorption resin extraction of paeoniflorins in seed cakes of peony[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014.

[92] 王凤琴. 牡丹籽粕单萜苷的提取纯化鉴定及对 HepG2 细胞抑制作用研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
Wang F Q. Extraction, purification, identification and inhibitory effect on HepG2 cells of monoterpene glycosides from *Paeonia suffruticosa* seed meal[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　戴思兰）