刘紫璇, 范蓓, 薛紫乾, 等. 大豆异黄酮生理功能与提取转化技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 474−484. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050119

LIU Zixuan, FAN Bei, XUE Ziqian, et al. Advances in Physiological Functions, Extraction and Conversion Technologies of Soybean Isoflavones[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 474−484. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050119

· 专题综述 ·

大豆异黄酮生理功能与提取转化技术研究进展

刘紫璇[1,2], 范　蓓[2], 薛紫乾[1,2], 杨　锐[2], 王凤忠[2], 李春梅[2,*], 刘贵巧[1,*]

（1.河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056038;
2.中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193）

摘　要: 大豆是我国重要的粮饲兼用作物，不仅是优质植物蛋白的主要来源，更富含具有雌激素样活性的大豆异黄酮等功能成分。本文系统综述了大豆异黄酮的结构及性质、生理功能、提取分析方法及糖苷转化方法的研究进展。文章比较了多种提取方法，最终指出有机溶剂浸提法最为常用，超声与微波法效率更高，超临界萃取适用于高活性成分富集；在分析方法方面，液相色谱法已成为异黄酮单体分析的主流技术。同时，本文系统整理了酸水解、碱水解和酶解法在糖苷转化中的应用，其中酶解法因条件温和、产物稳定性好，显示出良好的应用前景。最后指出当前研究存在单体生理功能机制不明确、绿色高效提取与转化技术不足等问题，并对未来深入研究生理机制、开发绿色制备工艺及高活性苷元功能性产品提出展望，为推进大豆资源的高值化利用提供理论依据。

关键词: 大豆异黄酮, 生理功能, 提取方法, 分析方法, 转化方法

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0474−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050119　　本文网刊:

Advances in Physiological Functions, Extraction and Conversion Technologies of Soybean Isoflavones

LIU Zixuan[1,2], FAN Bei[2], XUE Ziqian[1,2], YANG Rui[2], WANG Fengzhong[2], LI Chunmei[2,*], LIU Guiqiao[1,*]

（1.School of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2.Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China）

Abstract: Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), as an important dual-purpose crop for both food and feed in China, not only serves as a major source of high-quality plant protein, but also contains rich functional components, particularly estrogen-like isoflavones. This paper provides a systematic review of recent advances in the structure, properties, physiological functions, extraction and analysis methods, as well as glycoside conversion techniques of soybean isoflavones. The article compares various extraction methods and concludes that extraction using organic solvents is the most commonly used method, whilst ultrasonic and microwave methods are more efficient; Supercritical extraction is suitable for the enrichment of highly active compounds. Regarding analytical methods, liquid chromatography has become the main technique for analyzing isoflavone monomers. Additionally, this paper systematically summarizes the application of acid hydrolysis, alkaline hydrolysis, and enzymatic hydrolysis in glycoside conversion. Among these methods, enzymatic hydrolysis shows promising prospects due to its mild conditions and stable product quality. Finally, the paper points out the current research chal-

收稿日期: 2025−05−14

基金项目: 山东省重点研发计划（重大科技创新工程）（2023CXGC010717）; 国家现代农业产业技术体系建设专项（CARS-04）; 新疆现代农业产业技术体系（XJARS-04）。

作者简介: 刘紫璇（2000−）, 女, 硕士, 研究方向: 农产品质量与安全, E-mail: 2538268790@qq.com。

*** 通信作者:** 李春梅（1986−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品品质评价, E-mail: lichunmei@caas.cn。

刘贵巧（1969−）, 女, 硕士, 教授, 研究方向: 农产品质量与安全, E-mail: keli1966@sina.com。

lenges, including unclear physiological mechanisms of monomers and insufficient green, efficient extraction and conversion technologies. It proposes future directions for in-depth studies on physiological mechanisms, development of green preparation processes, and functional products rich in high-activity aglycones, thereby providing a theoretical basis for advancing the high-value utilization of soybean resources.

Key words: soybean isoflavones; physiological function; extraction method; analytical method; conversion method

大豆异黄酮是大豆（Glycine max（L.）Merr.）中一类重要的功能活性成分，与皂苷等同为大豆中典型的生物活性物质。该成分最早于 1931 年从大豆中分离获得。其分子结构中的苯环及羟基基团与内源性雌激素 17-β-雌二醇高度相似，可通过选择性结合雌激素受体发挥生物学效应，故常被称为植物雌激素[1]。大豆异黄酮主要分布在大豆的胚轴和子叶中，其中胚轴中异黄酮种类最多且含量丰富[2]。但由于子叶占大豆籽粒总重的 95% 以上，使其成为异黄酮的主要储存部位，这一物质基础也奠定了大豆异黄酮的研究与利用价值。

当前，大豆异黄酮凭借多样的生理活性成为功能性食品与医药领域的研究热点，相关研究与应用技术持续更新发展。临床研究已证实，大豆异黄酮可通过植物雌激素样作用有效缓解女性围绝经期综合征[3]，同时具备抗肿瘤、抗氧化、抗炎等多种生理功能[4]。在提取工艺方面，传统有机溶剂浸提法因成本低廉被广泛应用，而超声波辅助提取、微波辅助提取以及超临界 CO_2 萃取等新兴技术显著提升了提取效率[5−6]，其中乙醇-超声波辅助提取联用，已成为工业化生产的优选方案[7]，超声波产生的空化效应可增加大豆组织细胞壁的破坏速度，提高异黄酮的提取效率[8]。同时，针对糖苷型异黄酮生物利用度低的瓶颈，酸水解法、碱水解法和酶解法等技术可有效促进糖苷向活性苷元的定向转化，实现功能成分的生物可利用性。

为充分挖掘大豆异黄酮的应用潜力，系统梳理其研究进展具有重要的理论与实践意义。本文系统综述了大豆异黄酮的结构、性质、生理功能、分析提取方法以及糖苷转化方法的研究进展，以期为大豆异黄酮的深入利用提供理论依据。

1　大豆异黄酮的结构及性质

大豆中主要存在的异黄酮有 12 种，根据化学结构可分为游离型苷元（Aglycon）和结合型糖苷（Glucosides）两大类，其中游离型苷元包括染料木素（Genistein）、大豆苷元（Daidzein）和黄豆黄素（Glycitein）3 种，占异黄酮总量的 2%~3%，结合型糖苷主要包括葡萄糖苷、乙酰基葡萄糖苷、丙二酰基葡萄糖苷等，约占总量的 97%~98%[9]，因此，大豆中的异黄酮主要以糖苷形式存在。

从分子结构来看，与其他黄酮类化合物相比，大豆异黄酮的 A、B、C 环的共轭程度较小，因此一般为淡黄色或灰白色粉末，且在紫外荧光下响应较弱，但与某些金属离子形成络合物后荧光有所加强。在溶解性方面，苷元型异黄酮可溶于甲醇、乙醇、乙酸乙酯、乙醚等有机溶剂及稀碱中，一般难溶于水或不溶于水，糖苷型易溶于甲醇、乙醇、吡啶、乙酸乙酯及稀碱液中，难溶于苯、乙醚、氯仿、石油醚等有机溶剂，对水溶解度增强，可溶于热水。在旋光性方面，苷元型异黄酮不具有旋光性，而糖苷型由于引入了葡萄糖基而表现出旋光性。此外，异黄酮分子中的酚羟基使其呈弱酸性，可溶于碱性水溶液及吡啶，其中染料木素比大豆苷元多一个酚羟基，因此酸性更强[10−11]。各异黄酮单体的结构及其理化性质如表 1 所示。

2　大豆异黄酮的生理功能

已有研究表明，大豆异黄酮的生理活性主要来源于其苷元形式。大豆苷元和染料木素可直接通过被动扩散穿过细胞膜，在 Caco-2 细胞中的渗透性（7~15 倍）和细胞积累量（8.8 倍）均显著高于其葡萄糖苷形式，而糖苷型异黄酮需先水解去除糖基，转化为相应的苷元形式才能被机体吸收利用，因此，其生理活性具有间接性[10−12]。3 种苷元型异黄酮的具体生理功能作用如表 2 所示。

2.1　雌激素样活性

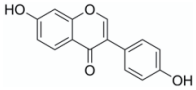
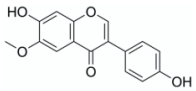
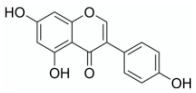
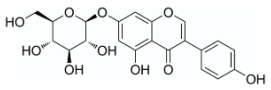
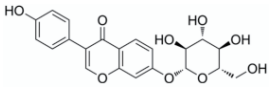
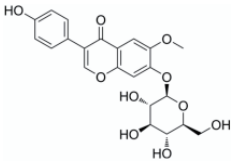
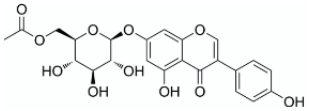
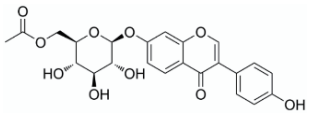
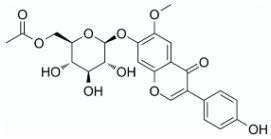
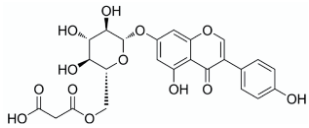
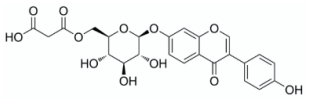
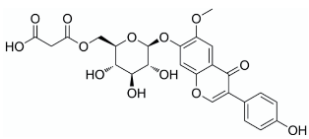
大豆异黄酮具有显著的雌激素样活性，可通过调控 NF-κB 信号通路表达来改善卵巢形态和激素紊乱[13−14]。刘鹿等[3] 临床研究表明，每日补充 60 mg 大豆异黄酮，干预 6 个月后，围绝经期女性血清雌二醇水平显著升高，促黄体生成素水平显著降低，提示其可能通过调控内分泌系统的性腺轴从而延缓卵巢分泌功能的减退。深入研究发现，大豆苷元经肠道微生物菌群代谢产生的 S-雌马酚是发挥雌激素样功能的关键活性物质[15]，S-雌马酚更易被肠道吸收且可呈游离形式穿过血脑屏障，因而比大豆异黄酮具有更高的生物活性[16]，其与雌激素受体结合亲和力显著高于大豆苷元（相同结合力下大豆苷元消耗量为雌马酚的 5 倍）[17−18]。动物实验证实，大豆苷元及其代谢产物 S-雌马酚可升高骨转换标志物水平，抑制去卵巢大鼠肝脏及下丘脑雌激素受体过度表达，激活 EGFR/MEK/ERK 及 PI3K/Akt 信号通路，改善钙吸收与转运，促进松质骨 H 型血管生成以及人成骨样 MG63 细胞增殖、分化及抗凋亡[19]，抑制软骨细胞基质降解[20] 与凋亡[21−23]，改善抑郁样行为[24−26]，从而缓解围绝经期不良症状。

2.2　抗肿瘤

大豆异黄酮的抗肿瘤作用主要由苷元型异黄酮介导，特别是染料木素和大豆苷元。Valachovicova 等[27] 通过比较苷元型和糖苷型异黄酮对高侵袭性乳腺癌细胞的作用，发现仅染料木素和大豆苷元能显

表 1 大豆异黄酮的化学结构及其理化性质

Table 1 Chemical structure, name and molecular formula of soy isoflavones

异黄酮	化学结构	CAS	化学式	分配系数lgP
大豆苷元(Daidzein)		486-66-8	$C_{15}H_{10}O_4$	2.78
黄豆黄素(Glycitein)		40957-83-3	$C_{16}H_{12}O_5$	2.57
染料木素(Genistein)		446-72-0	$C_{15}H_{10}O_5$	2.96
染料木苷(Genistin)		529-59-9	$C_{21}H_{20}O_{10}$	0.79
大豆苷(Daidzin)		552-66-9	$C_{21}H_{20}O_9$	0.45
黄豆黄苷(Glycitin)		40246-10-4	$C_{22}H_{22}O_{10}$	0.16
乙酰基染料木苷(6"-O-Acetyl-Genistin)		73566-30-0	$C_{23}H_{22}O_{11}$	2.59
乙酰基大豆苷(6"-O-Acetyl-Daidzi)		71385-83-6	$C_{23}H_{22}O_{10}$	2.31
乙酰基黄豆黄苷(6"-O-Acetyl-Glyciti)		134859-96-4	$C_{24}H_{24}O_{11}$	2.21
丙二酰基染料木苷(6"-O-Malonyl-Genistin)		51011-05-3	$C_{24}H_{22}O_{13}$	1.67
丙二酰基大豆苷(6"-O-Malonyl-Daidzin)		124590-31-4	$C_{24}H_{22}O_{12}$	1.59
丙二酰基黄豆黄苷(6"-O-Malonyl-Glycitin)		137705-39-6	$C_{25}H_{24}O_{13}$	1.48

著抑制 NF-κB 和 AP-1 转录因子活性,并降低 uPA 分泌,从而抑制乳腺癌细胞转移。染料木素的抗肿瘤机制具有多靶点特性,可通过调控 PTK/NF-κB/Akt/FAK-paxillin/MAPK 等信号通路调节乳腺癌、前列腺癌、肺癌、宫颈癌细胞的细胞周期和凋亡,并促进各种癌细胞系的 G2/M 和 G0/G1 细胞周期阻滞从而达到抗肿瘤效果[28−30]。同样,还可调节蛋白或蛋白酶,包括骨桥蛋白、α-平滑肌肌动蛋白、蛋白磷酸酶 2A、caspase-3、p38 丝裂原活化蛋白激酶(p38MAPK)的基因表达[31−32] 和蛋白水平以及酶活性抑制癌细胞的增殖,诱导细胞凋亡[33−35]。染料木素还可以分别抑制非小细胞肺癌中细胞质 Bcl-xL 分布以及 Bcl-xL 和 Beclin-1 的相互作用,增加凋亡和自噬来显著增强放射敏感性,促进电离辐射诱导的细胞死亡[36]。由此可见,苷元型异黄酮尤其是染料木素,通过多靶点、多通路的作用机制,在抑制癌细胞转移、调节细胞周期和诱导凋亡等方面展现出显著的抗肿瘤效果。

与染料木素相似,大豆苷元在抗肿瘤过程中亦具有多靶点调控特性。在乳腺癌方面,其可显著抑制肿瘤坏死因子-α 诱导的雌激素受体阴性 MCF10DCIS.

表 2　大豆异黄酮单体生理功能作用

Table 2　Physiological and functional roles of different soya isoflavone monomers

单体	活性	作用	参考文献
染料木素	抗乳腺癌细胞	通过影响细胞凋亡相关蛋白、EMT相关蛋白的表达抑制乳腺癌细胞MCF-7和MDA-MB-231的增殖与侵袭迁移能力，促进其凋亡，进而抑制肿瘤的发展	[49]
	抗宫颈癌细胞	调节FAK-paxillin和MAPK信号通路抑制宫颈癌HeLa细胞的迁移和侵袭，并呈剂量依赖性	[30]
	抗PC3前列腺癌细胞	增强caspase-3的基因表达、细胞内蛋白水平和酶活性来诱导细胞凋亡	[34]
	抗HT29结肠癌细胞	通过在不同的转录和蛋白质水平调节caspase-3和p38 MAPK途径来表现其对HT29结肠癌细胞的抗肿瘤特性	[35]
	抗肝癌细胞	抑制肝星状细胞（HSC）的活化，降低α平滑肌肌动蛋白（α-SMA）的表达和胶原基质的积累，以及血清丙氨酸转氨酶（ALT）和天冬氨酸转氨酶（AST）水平的升高	[32]
	抗肺癌细胞	分别抑制非小细胞肺癌（NSCLC）细胞中细胞质Bcl-xL分布以及Bcl-xL和Beclin-1的相互作用，通过增加凋亡和自噬来显著增强放射敏感性	[36]
大豆苷元	抗骨质疏松	可通过提高抗氧化参数和诱导成骨细胞分化显示出显著的抗骨质疏松的活性	[50]
		通过ER和NOS途径的参与以及ERK或PI3K信号转导途径的贡献促进成骨细胞的生成，还刺激破骨细胞从其单核祖细胞分化	[51]
	抗氧化	在氧化应激过程中通过EKR1/2和PKC/Nrf2途径上调HO-1和GCLC的表达	[43]
		染料木素至少部分通过灭活NF-κB和MAPK信号通路有效保护皮质神经元免受氧化应激	[44]
		染料木素与大豆苷元联用能够更有效地提高PC12细胞抗氧化系统活力	[45]
	抗炎	染料木素显著抑制D-GalN诱导的促炎细胞因子的产生，包括肿瘤坏死因子-α（TNF-α）和白细胞介素-1β（IL-1β），此外染料木素还能够维持氧化还原电位并加强细胞的抗氧化防御系统	[52]
	抗乳腺癌细胞	通过调节乳腺癌1号基因（*BRCA1*）表达量，协同增强多西紫杉类药物杀伤三阴性乳腺癌细胞，促进癌凋亡进而逆转其对化疗药的耐药性	[38]
		抑制TNF-α诱导的雌激素受体（ER）阴性MCF10DCIS.com人乳腺癌细胞的细胞迁移和侵袭	[37]
	抑制肺癌细胞	在体外和体内均有效抑制肺癌的增殖和NF-κB信号传导	[40]
	改善围绝经期症状	大豆苷元可以促进松质骨中H型血管的形成来缓解OVX诱导的骨质疏松症，这可能是激活EGFR、PI3K、Akt信号介导的	[40]
		大豆苷元通过以ER依赖性方式激活MEK/ERK和PI3K/Akt，促进人成骨样MG63细胞的增殖、分化和抗凋亡来刺激成骨	[41]
		通过PI3K/Akt激活，保护软骨细胞免受SNP诱导的基质降解和凋亡	[21]
		使骨转换标志物水平升高，如吡啶啉、I型胶原C-端肽、骨碱性磷酸酶和I型前胶原N-端前肽，股骨结构中脂肪细胞占据的表面积减少	[22]
		降低肝脏和下丘脑中雌激素受体的上调，下调降钙素基因相关肽水平	[15]
	改善甲状腺功能不足	在连续摄入大豆苷元6个月后，状腺功能低下女性的游离甲状腺适度降低	[53]
黄豆黄素	抗氧化	上调FOXO3/SOD2信号通路在HK-2肾近端小管细胞系中表现出抗氧化活性	[46]
	抗炎	抑制LPS诱导的pERK1/2、p-IκBα和p-p65表达水平	[47]
	抗胃癌细胞	显著降低AGS细胞线粒体跨膜电位（$\Delta\Psi$m），增加线粒体相关凋亡，并通过调节周期相关蛋白引起G0/G1细胞周期阻滞	[41]
	抗炎	显著降低NO、促炎细胞因子如白细胞介素-6（IL-6）和肿瘤坏死因子-α（TNF-α）的水平，以及RAW264.7细胞中的炎症指标，如环氧合酶2（COX-2）和诱导型一氧化氮合酶（iNOS）的蛋白水平	[48]

com 人乳腺癌细胞的迁移和侵袭能力[37]，并能通过上调乳腺癌 1 号基因表达量增强多西紫杉类药物对三阴性乳腺癌细胞的杀伤效果，有效逆转化疗耐药性[38]。在跨癌种协同治疗方面，大豆苷元与拓扑替康联用可增强拓扑替康对 Topo I 催化活性的抑制作用，通过诱导 DNA 损伤及 G2/M 期阻滞，显著提升对人乳腺癌 MCF7、肝癌 HepG2 和结肠癌 Caco2 细胞系三种癌细胞具有显著的协同抗肿瘤作用，其可通过诱导细胞通过线粒体的凋亡效应[39]。在肺癌方面，大豆苷元则通过抑制 NF-κB 信号通路显著抑制肺癌细胞增殖[40]。此外，黄豆黄素作为另一种苷元型异黄酮，可通过调节与活性氧相关的 MAPK/STAT3/NF-κB 信号通路诱导 AGS 胃癌细胞凋亡和 G0/G1 期细胞周期停滞，从而抑制人胃癌细胞的增殖[41]。综上，大豆苷元及黄豆黄素通过干预 DNA 损伤修复、关键信号通路及靶向细胞周期核心节点形成多维抗肿瘤机制，为开发基于异黄酮苷元结构的新型抗肿瘤策略提供了机制基础。

2.3　抗炎和抗氧化

大量研究表明，大豆异黄酮亦具有显著的抗炎和抗氧化活性。动物实验证实，大豆异黄酮能显著增加 SOD 和过氧化氢酶的活性，降低硫代巴比妥酸反应性物质（TBARS）水平，有效缓解氧化应激并抑制体脂积累和血浆 TG 升高[42]。不同苷元型异黄酮的作用机制存在特异性，其中染料木素通过激活 EKR1/2、PKC 和 Nrf2 信号通路，上调 HO-1 和 GCLC 的表达，同时灭活 NF-κB 和 MAPK 信号通路，实现对皮质神经元的氧化应激保护[43−44]；其还能显著抑制肿瘤坏死因子-α（TNF-α）和白细胞介素-1β（IL-1β）等促炎细胞因子释放，与大豆苷元联用可协同提高 PC12 细胞的抗氧化系统活力[45]。大豆苷元则在肝肾保护中作用突出，在 HK-2 肾近端小管细胞中通过上调

FOXO3 和 SOD2 信号通路缓解氧化应激损伤[46]; 在肝细胞方面, 能显著抑制 LPS 诱导的 pERK1/2、p-IκBα 和 p-p65 表达, 下调 Keap1 并上调 Nrf2 表达, 使活性氧减少 23.9%±7.8%, 并使 SOD 活性增加 88.4%±18.9%[47]。黄豆黄素的抗炎作用主要表现为显著降低 NO、白细胞介素-6 和肿瘤坏死因子-α 等炎症介质水平, 并抑制 RAW264.7 细胞中环氧合酶 2 和诱导型一氧化氮合酶的表达[48]。可见, 三种苷元型异黄酮通过互补性机制共同强化抗炎与抗氧化作用, 其中染料木素侧重神经保护与抗炎调控, 大豆苷元精于肝肾氧化应激缓解, 黄豆黄素专注于炎症介质抑制, 这种协同作用为代谢性炎症疾病的多靶点干预提供数据支撑。

3 大豆异黄酮的提取方法

3.1 有机溶剂浸提法

有机溶剂浸提法是大豆异黄酮提取的常用方法, 其原理是利用有机溶剂溶解固体样品中的目标成分。乙醇因其安全性和经济性已成为工业生产的首选溶剂[54]。Murphy 等[55] 系统比较乙腈、丙酮、甲醇和乙醇对五种不同大豆制品(大豆粉、豆腐、豆豉、组织化植物蛋白和大豆胚芽)中异黄酮的提取效果, 发现乙腈对大豆粉的提取效率最高(7.314 mmol/g), 其次为丙酮(7.293 mmol/g)、甲醇(7.232 mmol/g)和乙醇(6.704 mmol/g), 所有样品中大豆胚芽的异黄酮提取率最高, 为 47.812±1 mmol/g。尽管乙腈、丙酮和甲醇的提取效率较高, 但其毒性大、成本高且后续处理复杂, 限制了工业应用。Tran 等[56] 通过响应面法优化了乙醇提取工艺参数, 确定 80% 乙醇提取大豆异黄酮的最佳条件为温度 72.5 ℃, 提取时间 67.5 min, 料液比 26.5∶1(mL∶g), 提取率达到 1932.44 μg/g, 此提取方法环境污染低, 更具安全性以及节约成本, 因此利用价值更高。综合安全性、经济性与工业化可行性, 乙醇提取法仍为更具实际应用价值的优选工艺。

3.2 超声提取法

超声提取法是在有机溶剂浸提法的基础上, 利用不同的超声波振动击碎植物细胞壁, 加快植物细胞内有效成分与溶剂的接触面积, 实现快速且充分融合, 从而达到分离提取的目的。Luthria 等[57] 研究表明, 在相同溶剂提取下, 超声提取的大豆异黄酮得率为 4284.1 μg/g, 较传统有机溶剂浸提法(3011.5 μg/g)提高了 42.3%。周文红等[58] 通过单因素实验和正交试验确定超声提取大豆异黄酮的最佳工艺, 结果表明, 各因素对大豆异黄酮提取率影响大小的顺序为: 提取温度>提取时间>料液比>乙醇浓度; 在乙醇浓度为 80%、提取温度为 80 ℃、提取时间为 1.5 h、液料比为 35∶1(mL∶g)的工艺条件下, 大豆异黄酮的提取率达到最高, 为 10.88 mg/g。综上, 超声提取法通过空化效应强化细胞破壁与传质过程, 在提高大豆异黄酮提取效率、缩短提取时间方面显著优于传统有机溶剂浸提法, 且通过工艺参数优化可进一步提升提取率, 其高效、节能的特性使其在工业化连续生产中具备突出的应用优势。

3.3 微波提取法

微波提取法(Microwave-assisted Extraction, MAE)是利用交变电流产生的电磁场效应, 使分子产生极性交换运动, 促进细胞壁破裂和目标成分快速溶出[54]。Đurović等[59] 系统研究了微波提取参数(时间、温度和功率)对大豆粉中 6 种主要异黄酮单体的提取效率的影响, 研究发现, 当提取温度从 55 ℃ 升高到 75 ℃, 时间从 2 min 增加到 5 min, 或功率从 25 W 提高到 50 W 时, 异黄酮提取率均显著增加, 但当提取温度从 75 ℃ 升高到 85 ℃ 或时间从 5 min 增加到 10 min 时, 异黄酮提取率无显著差异, 当功率从 50 W 增加到 75 W 时, 异黄酮发生降解导致提取效率降低, 最终确定在 75 ℃, 微波功率 75 W 下辐射 5 min, 总异黄酮提取率最高, 达到 830 μg/g, 较传统有机溶剂浸提法(380 μg/g)提高 118%, 较超声提取法(480 μg/g)提高 73%。由此可见, 微波提取法通过电磁场效应加速分子运动与细胞壁破裂, 大豆异黄酮提取效率对温度、时间和功率存在显著的参数依赖性。在适宜范围内提升参数可显著提高大豆异黄酮提取率, 但超过临界值则可能因异黄酮降解而降低。相较于传统有机溶剂浸提法和超声提取法, 该方法在提取率和提取时间方面均有显著优势。

3.4 超临界 CO_2 萃取法

超临界萃取技术是一种新兴的绿色分离提取技术, 其原理是在超临界状态下, 将超临界流体与待分离的物质接触, 使其有选择性地把目标成分依次萃取出来。与传统溶剂浸提法相比, 具有萃取效率高、无溶剂残留、操作条件温和等优点, 有效保持了天然活性物质的特性。针对大豆异黄酮极性较强, 通常需要添加夹带剂以增强超临界 CO_2 的溶解性, 提高提取效率, 最为常用的夹带剂为乙醇。左玉帮[11] 系统优化了以甲醇与乙醇为夹带剂的超临界 CO_2 萃取工艺, 并对比分析其提取大豆异黄酮的效能差异。结果显示, 甲醇优势显著但工业应用受限, 以 80% 甲醇为夹带剂时, 总异黄酮提取量达 2458.8 μg/g, 显著高于 70% 乙醇(1828.4 μg/g); 然而乙醇体系虽提取量略低, 但兼具安全性、经济性及工艺兼容性(可直接用于食品级提取物制备)。Kao 等[60] 系统研究了有机溶剂浸提法(50% 乙醇)与超临界 CO_2 萃取法(以 70% 乙醇为夹带剂)在不同温度和压力条件下对大豆异黄酮成分的提取特性, 结果显示, 超临界 CO_2 萃取法在 60 ℃、35 MPa 条件下可实现总异黄酮含量最大化(3279±66.0 μg/g), 其中丙二酰葡萄糖苷(798±19.6 μg/g)与葡萄糖苷(1982±44.4 μg/g)的提取效率显著, 而 80 ℃、35 MPa 条件下则显著提升乙酰葡萄糖苷(396±15.7 μg/g)和苷元(274±6.6 μg/g)的产率。通过对比两种提取方法发现, 虽然超临界

CO_2 提取总异黄酮收率（3279 μg/g）低于有机溶剂浸提法（5010 μg/g），但其对乙酰葡萄糖苷和苷元的提取优势突出，适用于高活性苷元类成分的富集。但该方法的设备维护成本相对较高，还未大规模投入到异黄酮的实际提取生产中。

综上所述，目前针对大豆异黄酮的提取已开发出多种技术，部分方法已具备一定的工业应用潜力，其中有机溶剂浸提法以乙醇为代表，凭借安全性高、成本低的优势成为工业生产的基础方法，但提取效率相对有限；超声与微波提取法能显著提升提取效率并缩短时间，且工艺参数的可控性使其更适配工业化连续生产，是传统方法的高效升级方案；超临界 CO_2 萃取法作为绿色技术，虽总提取量可能不及有机溶剂法，却能实现对特定活性成分的高选择性富集，且具有无溶剂残留、操作条件温和的特点。实际应用中，需根据生产目标、成本预算、环保要求等因素综合权衡，选择适宜的提取方法。未来应聚焦多技术联用，以进一步提升提取效果和经济效益。不同提取方法汇总见表 3。

4　大豆异黄酮的分析方法

4.1　紫外分光光度法

紫外分光光度法（Ultraviolet and Visible Spectrophotometry，UV-Vis）是基于物质在特定波长下的特征吸收进行定量分析的方法。何恩铭等[66] 建立了豆渣提取物中大豆异黄酮的快速分析方法，以染料木素为标准品，在 260 nm 波长处测定，结果显示该方法在 1.31~11.79 μg/mL 范围内线性关系良好，R^2 为 0.9995，具有较好的定量可靠性。Migues 等[67] 进一步优化该技术，通过分析 6 种异黄酮单体在 200~400 nm 范围内的特征紫外光谱，结合内标法量化样品中的异黄酮含量，经配对 t 检验证实，其结果与高效液相色谱法无显著性差异。尽管 UV-Vis 法因异黄酮单体共轭结构相似性易受干扰，通常只能进行总量分析，但结合内标法后，该方法也能对不同单体进行定量。此方法在大豆制品异黄酮的快速筛查和质量控制中具有潜在应用前景。

4.2　高效液相色谱法

高效液相色谱法（High Performance Liquid Chromatography，HPLC）因其较高的选择性和灵敏度，已成为大豆异黄酮定量分析的主流方法。如表 4 所示，该方法常用 C_{18} 反相色谱柱作为分离柱，流动相中有机相以甲醇或乙腈为主，水相以甲酸水或乙酸水为主。在色谱分离过程中，大豆异黄酮各单体的洗脱顺序呈现明显规律，葡萄糖苷型异黄酮洗脱最快，随后依次为丙二酰基型、乙酰基型和苷元型异黄酮，每种苷元遵循大豆苷元、黄豆黄素和染料木素的顺序出峰[12]。于寒松等[68] 建立了 12 种大豆异黄酮的超高效液相色谱的定量分析方法，采用 SHIMADZU-GL Wonda Cract ODS2（5 μm，4.6 mm×250 mm）色谱柱，以 0.1% 乙酸乙腈-0.1% 乙酸水为流动相，方法在 1~100 μg/mL 范围内线性关系良好（R^2 为 0.9973~0.9997），为大豆异黄酮全谱系分析提供技术方案。

4.3　液相色谱-串联质谱法

近年来，液相色谱-串联质谱法（Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry，LC-MS/MS）因其高灵敏度和强特异性，在大豆异黄酮检测中

表 3　大豆异黄酮提取方法

Table 3　Comparison of soybean isoflavones extraction methods

提取方法	提取溶剂	提取条件	提取结果	文献参考
有机溶剂浸提法	53%乙腈	在10 mL乙腈、2 mL 0.1 mol/L HCl或2 mL水和额外的7 mL水中提取，室温下搅拌2 h	7.314 mmol/g	[55]
	53%丙酮	在10 mL丙酮、2 mL 0.1 mol/L HCl或2 mL水和额外的7 mL水中提取，室温下搅拌2 h	7.293 mmol/g	[55]
	53%甲醇	在10 mL甲醇、2 mL 0.1 mol/L HCl或2 mL水和额外的7 mL水中提取，室温下搅拌2 h	7.232 mmol/g	[55]
	53%乙醇	在10 mL乙醇、2 mL 0.1 mol/L HCl或2 mL水和额外的7 mL水中提取，室温下搅拌2 h	6.704 mmol/g	[55]
	80%乙醇	80%乙醇，提取温度72.5 ℃，提取时间67.5 min，料液比为1∶26.5（g∶mL）	1932.44 μg/g	[56]
	80%乙醇	温度70 ℃，料液比为1∶16（g∶mL），提取时间为3 h	44 μg/g	[61]
	60%乙醇	提取温度78.94 ℃，料液比为1∶20.85（g∶mL），提取2次，每次2 h	12.03 μg/g	[62]
	70%乙醇	提取时间40 min，料液比1∶20（g∶mL）	2.0505%	[7]
超声提取法	60%乙醇	料液比1∶30（g∶mL），超声功率300 W，超声时间30 min，超声温度40 ℃	3.89 mg/g	[8]
	80%乙醇	提取温度为80 ℃、提取时间为1.5 h、料液比1∶35（g∶mL），提取三次	10880 μg/g	[58]
	70%乙醇+5%二甲基亚砜	提取温度为100 ℃，提取时间为15 min，料液比1∶16（g∶mL）	4284.1 μg/g	[57]
微波辅助提取	85%甲醇	甲醇和0.1%盐酸组成的溶剂以85∶15的比例混合，体积为10 mL，辐射功率为75 W，持续5 min	830 μg/g	[59]
超临界CO_2萃取	80%甲醇	温度为40 ℃，压力为60 MPa，CO_2流量为10 L/h，时间为270 min	2458.8 μg/g	[11]
	70%乙醇	温度为60 ℃，压力为60 MPa，CO_2流量为10 L/h，时间为270 min	1828.4 μg/g	[11]
	70%甲醇	温度50 ℃，压力36 MPa	86.28 μg/g	[63]
	70%乙醇	压力35 MPa，温度60 ℃	3279 μg/g	[60]
	无水乙醇	萃取温度50 ℃，萃取压力30 MPa，夹带剂用量2.0 mL/g，萃取时间1 h	30.1 μg/g	[64]
	80%甲醇	萃取温度40 ℃，萃取压力50 MPa下，CO_2流速9.80 kg/h	1262.2 μg/g	[65]

表 4 大豆异黄酮分析方法

Table 4 Comparison of analytical methods for soybean isoflavones

分析方法	检测物质	分析柱	流动相	检测方法	文献参考
紫外分光光度计法	染料木素	–	–	260 nm处测定豆渣提取物中大豆异黄酮的含量	[66]
高效液相色谱法	大豆苷、大豆苷元、染料木苷	C_{18}反相色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5.0 μm)	甲醇+0.20%乙酸水溶液	柱温为30 ℃, 流速为0.3 mL/min, 检测波长为260 nm, 进样量为10 μL	[70]
	大豆苷、大豆苷元、染料木素、染料木苷	C_{18}反相色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5.0 μm)	乙腈+1%磷酸水溶液	柱温为30 ℃, 流速为0.5 mL/min, 检测波长为260 nm, 进样量为5 μL	[71]
	大豆苷、大豆苷元、黄豆黄苷、黄豆黄素、染料木苷、染料木素	Nucleodur C_{18} 5 μm(150×4.6 mm)	乙腈+0.1%甲酸水	柱温为35 ℃, 流速为1 mL/min, 检测波长为254 nm, 进样量为10 μL	[67]
	大豆苷、染料木苷、黄豆黄苷、丙二酰基大豆苷、丙二酰基染料木苷、丙二酰基黄豆黄苷、乙酰基大豆苷、乙酰基染料木苷、乙酰基黄豆黄苷、大豆苷元、染料木素、黄豆黄素	SHIMADZU-GL Wonda Cract ODS2(5 μm 4.6 mm×250 mm)	0.1%乙酸乙腈+0.1%乙酸水	柱温35 ℃, 流速为1.2 mL/min, 检测波长262 nm, 进样量20 μL	[68]
液相色谱-串联质谱法	大豆苷、大豆苷元、黄豆黄苷, 黄豆黄素、染料木苷、染料木素	Luna® 3 μm PFP 100 Å	乙腈+0.01%甲酸水溶液	质谱检测采用正离子多反应监测(MRM)模式, 流量为1.0 mL/min	[69]
	大豆苷元、染料木苷、染料木素	Kinetex C_{18}(50×2.10 mm i.d., 2.6 μm)	10%乙腈+90% 0.01%甲酸水溶液+5 mM甲酸铵混合物	ESI-MS在“多重反应监测”(MRM)模式, 柱温30 ℃, 流速为0.5 mL/min, 进样量5 μL	[72]

注: “–”表示无数据; 表5同。

亦得到应用(表 5)。研究表明, 采用 Luna®PFP 色谱柱替代传统 C_{18} 柱, 可显著提升高极性异黄酮单体的分离效率, 提高色谱峰信号强度并缩短分析时间, 该方法检出限可达 2.2~6.8 μg/L, 定量限为 7.4~22.8 μg/L[69], 为复杂基质中痕量异黄酮单体的精准定量提供了技术支撑。

综上所述, UV-Vis、HPLC 及 LC-MS/MS 是目前分析检测大豆异黄酮的主要方法, 其中 UV-Vis 基于特征吸收光谱, 具有操作快速、成本较低的优势, 适用于快速鉴别与总量分析, 但对单体的区分能力有限, HPLC 法选择性好, 可实现多种异黄酮单体的基线分离, LC-MS/MS 则通过选择母离子-子离子对的选择性监测, 具有高灵敏度和强特异性, 可有效克服基质干扰, 尤其适用于复杂基质样品中异黄酮的痕量检测。

5 大豆异黄酮糖苷转化方法

糖苷型异黄酮转化为苷元型异黄酮是大豆异黄酮实现生物活性和应用价值的关键步骤。目前, 大豆异黄酮的水解方法主要包括酸水解法、碱水解法和酶解法三大类, 不同糖苷转化方法的比较见表 5。

5.1 酸水解法

酸水解法是利用大豆异黄酮糖苷在酸性条件下的水解特性, 通过苷键质子化、断裂生成苷元。该方法通常采用盐酸、乙酸等无机酸或有机酸作为催化剂, 结合乙醇或甲醇等溶剂进行水解提取, 最终通过萃取获得苷元型异黄酮。该工艺水解大豆异黄酮糖苷水解率较高, 但其反应温度高, 强酸易腐蚀, 对设备要求高[79]。成乐琴等[73] 系统研究了乙酸催化异黄酮糖苷水解为苷元的工艺条件, 通过考察反应温度、时间和乙酸浓度等关键因素, 确定了最佳水解条件为反应温度 160 ℃, 水解时间 4 h, 乙酸浓度 2.0 mol/L, 此条件下糖苷水解率达 92.2%。于丽颖等[74] 通过优化复合有机酸催化体系, 实现大豆异黄酮糖苷向活性苷元的高效转化, 在 135 ℃ 反应温度、160 min 反应时间及苹果酸∶柠檬酸=4∶3 的复合酸配比下, 糖苷水解率达到 97%。相较于单一酸水解, 采用复合有机酸催化水解工艺更绿色环保, 可有效降低水解时间以及反应温度, 且水解产物可直接作为保健食品原料, 具有较高的应用价值。

5.2 碱水解法

碱水解法是通过碱性条件促使大豆异黄酮糖苷发生水解反应的重要方法。该方法主要经历两个转化阶段, 首先在温和碱性条件下, 共轭苷(丙二酰基和乙酰基糖苷)水解生成葡萄糖苷型异黄酮, 随后在更

表 5 大豆异黄酮糖苷转化方法的比较

Table 5 Comparison of methods for the conversion of soybean isoflavone glycosides

水解方法	酶类型	水解物质	水解条件	水解率	文献参考
酸水解法	–	大豆异黄酮糖苷	反应温度160 ℃, 水解时间为4 h时, 乙酸浓度为2.0 mol/L	92.2%	[73]
		大豆异黄酮糖苷	反应温度135 ℃, 反应时间为160 min, 复合酸配比(苹果酸∶柠檬酸)为4∶3	97%	[74]
碱水解法	–	酱油渣中大豆异黄酮糖苷	碱浓度1 mol/mL, 水解温度为55 ℃, 水解时间为120 min	34%	[75]

续表 5

水解方法	酶类型	水解物质	水解条件	水解率	文献参考
酶解法	真菌嗜热假单胞菌β-葡萄糖苷酶	大豆粉提取物	0.01 U/mL的酶在50 ℃加热4 h	45.9%±2.4%	[76]
		豆浆提取物	0.01 U/mL的酶在50 ℃加热4 h	43.5%±1.3%	[76]
		大豆胚提取物	0.01 U/mL的酶在50 ℃加热4 h	42.8%±1.8%	[76]
		大豆粉沉淀提取物	0.02 U/ml的酶在50 ℃加热4 h	40.9%±0.5%	[76]
		大豆粉上清液	0.02 U/ml的酶在50 ℃加热4 h	38.9%±0.4%	[76]
	杏仁β-葡萄糖苷酶	大豆粉提取物	0.01 U/mL的酶在37 ℃加热4 h	17.6%±1.1%	[76]
		豆浆提取物	0.01 U/mL的酶在37 ℃加热4 h	20.5%±0.5%	[76]
		大豆胚提取物	0.01 U/mL的酶在37 ℃加热4 h	15.4%±0.3%	[76]
		大豆粉沉淀提取物	0.02 U/mL的酶在37 ℃加热4 h，并通过煮沸5 min终止反应	21.1%±1.7%	[76]
		大豆粉上清液	0.02 U/ml的酶在37 ℃加热4 h，并通过煮沸5 min终止反应	19.8%±0.5%	[76]
	土曲霉β-葡萄糖苷酶	大豆粉提取物	在50 ℃的恒温控制培养箱中的McIlvaine缓冲液（pH5.0）中水解10 min。通过煮沸5 min终止反应	大豆苷元：95.8%，染料木素：86.7%，黄豆黄素：72.1%	[77]
	β-葡萄糖苷酶	大豆异黄酮糖苷（90%）	加酶量为10%（酶活性为100 U/g），反应时间6 h，反应温度48 ℃，pH为4.8	70.45%	[78]
	纤维素酶	大豆异黄酮糖苷（90%）	加酶量为10%（酶活性为3000 U/g），反应时间6 h，反应温度48 ℃，pH为4.8	49.84%	[78]
	β-半乳糖苷酶	大豆异黄酮糖苷（90%）	加酶量为10%（酶活性为10000 U/g），反应时间10 h，反应温度48 ℃，pH为4.8	8.18%	[78]

强碱性条件下，葡萄糖苷进一步水解生成具有更高生物活性的苷元形式。然而，碱性条件下得到的苷元型大豆异黄酮存在稳定性差、易降解、纯度偏低等问题。黎尔纳等[75]系统研究了不同水解工艺对酱油渣中大豆异黄酮糖苷的转化效率，发现对照组异黄酮苷元含量为 38.709 mg/g，单一碱水解组含量提升至 52.053 mg/g，水解率为 34%，先碱水解后酸水解组含量达到 67.314 mg/g，水解率显著提升至 74%，表明碱酸两步水解工艺在大豆异黄酮糖苷的水解率显著优于单一碱水解工艺，为优化酱油渣中异黄酮成分提取工艺提供了重要依据。

5.3　酶解法

酶法水解大豆异黄酮糖苷的反应条件较为温和，多在弱酸性缓冲溶液中进行，产物稳定性高，是目前大豆异黄酮糖苷水解最具发展前景的工艺。现有研究表明，β-葡萄糖苷酶、纤维素酶和糖化酶等均能有效催化糖苷水解[79]，其中 β-葡萄糖苷酶是目前酶解大豆糖苷中应用最广的酶，其在 45~65 ℃ 下能够发挥较好的活性，水解率显著高于纤维素酶和 β-半乳糖苷酶[78]。不同来源的 β-葡萄糖苷酶催化效率存在一定差异。Yang 等[76]比较了嗜热假单胞菌和杏仁来源的 β-葡萄糖苷酶对五种大豆制品的转化效果，发现真菌嗜热假单胞菌来源的酶催化效率更高，50 ℃ 处理 8 h 后仍保持 95% 以上活性，且不同大豆制品的酶解效果存在显著差异，其总异黄酮中异黄酮苷元含量的比较为：大豆粉提取物（45.9%±2.4%）>豆浆（43.5%±1.3%）>大豆胚提取物（42.8%±1.8%）>大豆粉沉淀物（40.9%±0.5%）>大豆粉上清液（38.9%±0.4%）。此外，Yan 等[77]从土曲霉中分离纯化的 β-葡萄糖苷酶在 pH5.0 和 65 ℃ 时活性最佳，对大豆苷元、染料木素和黄豆黄素的水解率分别达到 95.8%、86.7% 和 72.1%，且具有优异的胃蛋白酶/胰蛋白酶耐受性，进一步拓展了其应用场景。

综上所述，酸水解法、碱水解法和酶解法在大豆异黄酮糖苷转化中各具特点，其中酸水解法通过强酸催化实现高效水解，但存在高温强酸腐蚀设备、操作条件严苛等问题，复合有机酸体系可提升环保性，为工艺优化提供了新思路；碱水解法通过分步转化生成苷元，但其产物稳定性差，虽碱酸两步法可显著提升水解率，但仍需解决产物稳定性难题；酶解法凭借温和的反应条件、高产物稳定性及良好的选择性脱颖而出，尤其是 β-葡萄糖苷酶因催化效率高、耐受性强成为研究热点。未来应聚焦绿色催化剂开发、复合酶系协同作用机制研究，以及基于底物特性的精准酶解工艺设计，以实现大豆异黄酮糖苷的高效、可持续转化。

6　展望

大豆异黄酮作为一种重要的生物活性物质，在缓解女性围绝经期综合征、抗肿瘤、抗炎、抗氧化等方面表现出显著效果，医药价值巨大。但针对我国在大豆异黄酮生理功能方面的研究还不够深入，大豆异黄酮的提取方法及其在工业上的应用不够成熟，异黄酮糖苷向苷元的转化工艺过程繁琐仍不完善，严重制约了大豆异黄酮产业应用的健康发展。本人在总结前人研究的基础上，尝试给出如下可能的研究重点：深入探究大豆异黄酮各单体在雌激素受体亚型（ERα/ERβ）、肠道菌群代谢轴、胃肠道细胞、信号通路中的精准调控机制，系统解析其生物利用度规律，全面揭示大豆异黄酮各单体的生理功能作用机制及其体内利用度；构建绿色高效的提取技术体系，研发新型分离材料，优化超临界萃取技术参数，通过多技术协同联用提升大豆异黄酮提取效率，并建立大豆异

黄酮提取动力学模型，实现对大豆异黄酮提取过程的精确调控与效率优化；定性改造 β-葡萄糖苷酶底物结合口袋提升催化效率，筛选高活性肠道益生菌菌株，开发糖苷转化与绿色提取的耦合技术，满足高纯度大豆异黄酮苷元产业化需求。在此基础上，加强大豆异黄酮在功能性食品、保健品和药品等领域的应用研究，拓展其应用范围与价值。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 李玉, 黄照权. 异黄酮类植物雌激素防治乳腺癌的研究进展[J]. 广西医科大学学报, 2021, 38(9): 1819−1823. [LI Y, HUANG Z Q. Research progress of isoflavone phytoestrogens in prevention and treatment of breast cancer[J]. Journal of Guangxi Medical University, 2021, 38(9): 1819−1823.]

[2] 何继红, 郝霖雨, 朱高群. 大豆异黄酮检测方法研究进展[J]. 养殖与饲料, 2023, 22(6): 113−115. [HE J H, HAO L Y, ZHU G Q. Research progress on the detection methods of soy isoflavones [J]. Breeding and Feed, 2023, 22(6): 113−115.]

[3] 刘鹿, 吕春健, 张新胜, 等. 大豆异黄酮干预对围绝经期女性综合征及性激素水平的影响研究[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(11): 60−63. [LIU L, LÜ C J, ZHANG X S, et al. Study on the effect of soy isoflavone intervention on perimenopausal women's syndrome and sex hormone levels[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(11): 60−63.]

[4] 孟新静, 杨旭, 孟德尚, 等. 大豆次生代谢产物结构、生物活性及其作用机制研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 35−47. [MENG X J, YANG X, MENG D S, et al. Structures, biological activities and mechanisms of secondary metabolites from soybean[J]. Food Science, 2024, 45(20): 35−47.]

[5] 张月洁, 兰韬, 初侨, 等. 大豆异黄酮的制备技术与功能活性进展研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(17): 5964−5970. [ZHANG Y J, LAN T, CHU Q, et al. Progress in preparation technology and functional activity of soybean isoflavones[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(17): 5964−5970.]

[6] 郅轲轲, 刘子源, 张润东, 等. 大豆异黄酮功效及提取方法的研究进展[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(8): 43−44. [ZHI K K, LIU Z Y, ZHANG R D, et al. Research progress on the efficacy and extraction methods of soy isoflavones[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50(8): 43−44.]

[7] 李保利, 殷美丽, 吕会超, 等. 超声波辅助提取大豆异黄酮的条件研究与优化[J]. 山东化工, 2023, 52(23): 19−23,28. [LI B L, YIN M L, LÜ H C, et al. Study and optimization of extraction condition of soybean isoflavone by ultrasonic assisted method[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(23): 19−23,28.]

[8] 花娇娇, 刘琦, 耿晓桐, 等. Box-Behnken 响应面法优化豆粕大豆异黄酮提取工艺[J]. 中南农业科技, 2023, 44(10): 35−39. [HUA J J, LIU Q, GENG X T, et al. Optimization of the extraction process of soy isoflavones from soybean meal by box-behnken response surface methodology[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2023, 44(10): 35−39.]

[9] KŘÍŽOVÁ L, DADÁKOVÁ K, KAŠPAROVSKÁ J, et al. Isoflavones[J]. Molecules, 2019, 24(6): 1076.

[10] 闵嘉霖. 大豆异黄酮萃取的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. [MIN J L. Experimental study on soybean isoflavone extraction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.]

[11] 左玉帮. 从豆粕中提取大豆异黄酮的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. [ZUO Y B. Study on extraction of soy isoflavones from soybean meal[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.]

[12] JUNG Y S, SEONG H, HAN N S, et al. Bioaccessibility and bioavailability of soybean isoflavones: An *in vitro* study[J]. Food Reviews International, 2024, 40(8): 2129−2146.

[13] MITSUNAMI M, MÍNGUEZ-ALARCÓN L, FLORIO A A, et al. Intake of soy products and soy isoflavones in relation to ovarian reserve[J]. Fertility and Sterility, 2023, 119(6): 1017−1029.

[14] MA X, LI X, MA L, et al. Soy isoflavones alleviate polycystic ovary syndrome in rats by regulating NF-κB signaling pathway [J]. Bioengineered, 2021, 12(1): 7204−7212.

[15] CHOI B H, CHOI K, PARK S Y, et al. Fermented soybean powder containing S-equol alleviates the postmenopausal signs of ovariectomized rats[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(6): 1495−1505.

[16] ISHIWATA N, MELBY M K, MIZUNO S et al. New equol supplement for relieving menopausal symptoms: Randomized, placebo-controlled trial of Japanese women[J]. Menopause, 2009, 16(1): 141−148.

[17] 黄莎娜. 大豆苷元及其代谢产物雌马酚调节脂代谢机理探讨[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [HUANG S N. Effects of daidzein and its metaboliteeouol on lipid metabolism and its mechanism exploration[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]

[18] LECOMTE S, DEMAY F, FERRIÈRE F, et al. Phytochemicals targeting estrogen receptors: Beneficial rather than adverse effects?[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(7): 1381.

[19] JIN X, SUN J, YU B, et al. Daidzein stimulates osteogenesis facilitating proliferation, differentiation, and antiapoptosis in human osteoblast-like MG-63 cells via estrogen receptor–dependent MEK/ERK and PI3K/Akt activation[J]. Nutrition Research, 2017, 42: 20−30.

[20] JIA J, HE R, YAO Z, et al. Daidzein alleviates osteoporosis by promoting osteogenesis and angiogenesis coupling[J]. PeerJ, 2023, 11: e16121.

[21] HUANG L W, HUANG T C, HU Y C, et al. S-Equol protects chondrocytes against sodium nitroprusside-caused matrix loss and apoptosis through activating PI3K/Akt pathway[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(13): 7054.

[22] HARAHAP I A, KULIGOWSKI M, CIESLAK A, et al. Effect of tempeh and daidzein on calcium status, calcium transporters, and bone metabolism biomarkers in ovariectomized rats[J]. Nutrients, 2024, 16(5): 651.

[23] GE Y, WEI C, WANG W, et al. The resistant starch from sorghum regulates lipid metabolism in menopausal rats via equol. [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(8): e13295.

[24] 李正宙. 雌马酚对高糖高脂诱导的成骨细胞线粒体损伤的保护作用及机制研究[D]. 北京: 中国人民解放军陆军军医大学, 2024. [LI Z Z. Protective effect and mechanism of equol on mitochondrial damage induced by high glucose and high fat in osteoblasts[D]. Beijing: Army Medical University of Chinese People's Liberation Army, 2024.]

[25] 韦震, 高荣静, 张瑛毓, 等. 雌马酚对慢性束缚致抑郁小鼠模型的改善作用及机制研究[J]. 大豆科学, 2022, 41(1): 83−90. [WEI Z, GAO R J, ZHANG Y Y, et al. Protective effects of S-

equol on chronic restraint stress-induced depressive-like behavior in mice[J]. Soybean Science, 2022, 41(1): 83−90.]
[26] 任梓溢, 韦震, 姜宁, 等. 雌马酚对慢性睡眠干扰所致小鼠抑郁样行为的改善作用[J]. 大豆科学, 2022, 41(3): 323−329. [REN Z Y, WEI Z, JIANG N, et al. Protective effects of equol on depression-like behavior of mice induced by chronic sleep deprivation[J]. Soybean Science, 2022, 41(3): 323−329.]
[27] VALACHOVICOVA T, SLIVOVA V, BERGMAN H, et al. Soy isoflavones suppress invasiveness of breast cancer cells by the inhibition of NF-κB/AP-1-dependent and -independent pathways[J]. International Journal of Oncology, 2004, 25(5): 1389−1395.
[28] SZKUDELSKA K, NOGOWSKI L. Genistein —A dietary compound inducing hormonal and metabolic changes[J]. The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology, 2007, 105(1−5): 37−45.
[29] BANERJEE S, LI Y, WANG Z, et al. Multi-targeted therapy of cancer by genistein[J]. Cancer Letters, 2008, 269(2): 226−242.
[30] CHEN C, WANG Y, CHEN S, et al. Genistein inhibits migration and invasion of cervical cancer HeLa cells by regulating FAK-paxillin and MAPK signaling pathways[J]. Taiwanese Journal of Obstetrics and Gynecology, 2020, 59(3): 403−408.
[31] KHONGSTI K, DAS K B, DAS B. MAPK pathway and SIRT1 are involved in the down-regulation of secreted osteopontin expression by genistein in metastatic cancer cells[J]. Life Sciences, 2021, 265: 118787.
[32] GANAI A A, HUSAIN M. Genistein attenuates D-GalN induced liver fibrosis/chronic liver damage in rats by blocking the TGF-b/Smad signaling pathways[J]. Chemico-Biological Interactions, 2017, 261: 80−85.
[33] ZHAO Q, ZHAO M, PARRIS A B, et al. Genistein targets the cancerous inhibitor of PP2A to induce growth inhibition and apoptosis in breast cancer cells[J]. International Journal of Oncology, 2016, 49(3): 1203−1210.
[34] SHAFIEE G, SAIDIJAM M, TAYEBINIA H, et al. Beneficial effects of genistein in suppression of proliferation, inhibition of metastasis, and induction of apoptosis in PC3 prostate cancer cells[J]. Archives of Physiology and Biochemistry, 2022, 128(3): 694−702.
[35] SHAFIEE G, SAIDIJAM M, TAVILANI H, et al. Genistein induces apoptosis and inhibits proliferation of HT29 colon cancer cells[J]. International Journal of Molecular and Cellular Medicine, 2016, 5(3): 178−191.
[36] ZHANG Z, JIN F, LIAN X, et al. Genistein promotes ionizing radiation-induced cell death by reducing cytoplasmic Bcl-xL levels in non-small cell lung cancer[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 328.
[37] BAO C, NAMGUNG H, LEE J, et al. Daidzein suppresses tumor necrosis factor-α induced migration and invasion by inhibiting hedgehog/gli1 signaling in human breast cancer cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(17): 3759−3767.
[38] 金时, 耿健雄, 曹守波, 等. 大豆苷元增强多西紫杉醇体外杀伤三阴性乳腺癌作用研究[J]. 现代生物医学进展, 2019, 19(5): 842−845,867. [JIN S, GENG J X, CAO S B, et al. Effects of daidzein reverse docetaxel resistance by regulating the expression of BRCA1[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2019, 19(5): 842−845,867.]
[39] 郭建丽. PFTα/大豆苷元协同拓扑替康对乳腺癌抑制作用及机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. [GUO J L. Research on the synergistic inhibitory effects and mechanism of PFTα/daidzein combined with topotecan on breast cancer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.]
[40] GUO S, WANG Y, LI Y, et al. Daidzein-rich isoflavones aglycone inhibits lung cancer growth through inhibition of NF-κB signaling pathway[J]. Immunology Letters, 2020, 222: 67−72.
[41] ZANG Y Q, FENG Y Y, LUO Y H, et al. Glycitein induces reactive oxygen species-dependent apoptosis and G0/G1 cell cycle arrest through the MAPK/STAT3/NF-κB pathway in human gastric cancer cells[J]. Drug Development Research, 2019, 80(5): 573−584.
[42] YOON G A, PARK S. Antioxidant action of soy isoflavones on oxidative stress and antioxidant enzyme activities in exercised rats[J]. Nutrition Research and Practice, 2014, 8(6): 618−624.
[43] ZHAI X, LIN M, ZHANG F, et al. Dietary flavonoid genistein induces Nrf2 and phase II detoxification gene expression via ERKs and PKC pathways and protects against oxidative stress in Caco-2 cells[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2013, 57(2): 249−259.
[44] QIAN Y, CAO L, GUAN T, et al. Protection by genistein on cortical neurons against oxidative stress injury via inhibition of NF-kappaB, JNK and ERK signaling pathway[J]. Pharmaceutical Biology, 2015, 53(8): 1124−1132.
[45] 徐梦蕾, 高宇, 刘静波, 等. 基于抗氧化的大豆异黄酮对PC12细胞的神经保护作用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 332−336. [XU M L, GAO Y, LIU J B, et al. Neuroprotective effects of soy isoflavones on PC12 cells based on antioxidation [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 332−336.]
[46] LEE J, PARK S H. Daidzein has anti-oxidant activity in normal human kidney tubular HK-2 cells via FOXO3/SOD2 pathway [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2018, 6(9): 557−560.
[47] YU Z, YANG L, DENG S, et al. Daidzein ameliorates LPS-induced hepatocyte injury by inhibiting inflammation and oxidative stress.[J]. European Journal of Pharmacology, 2020, 885: 173399.
[48] TAN Y, ZHANG X, CHEANG W S. Isoflavones daidzin and daidzein inhibit lipopolysaccharide-induced inflammation in RAW264.7 macrophages[J]. Chinese Medicine, 2022, 17(1): 95.
[49] 易佩佩, 赵英琦, 丁吉雪, 等. 染料木黄酮对乳腺癌细胞增殖、凋亡、迁移和侵袭的影响[J]. 中南药学, 2021, 19(3): 460−465. [YI P P, ZHAO Y Q, DING J X, et al. Effect of genistein on the proliferation, apoptosis, migration and invasion of breast cancer cells[J]. Central South Pharmacy, 2021, 19(3): 460−465.]
[50] VENNA N K, LALHRUAITLUANGA H, CHALLA S. Cowpea isoflavones enhance the osteoblast differentiation and antioxidant capacity in synergy with vitamin D and β-carotene: A mechanistic *in vitro* study[J]. Nutrition and Health, 2023: 02601060231181606.
[51] CEPEDA S B, SANDOVAL M J, CRESCITELLI M C, et al. The isoflavone genistein enhances osteoblastogenesis: Signaling pathways involved[J]. Journal of Physiology and Biochemistry, 2020, 76(1): 99−110.
[52] GANAI A A, KHAN A A, MALIK Z A, et al. Genistein modulates the expression of NF-κB and MAPK (p-38 and ERK1/2), thereby attenuating d-galactosamine induced fulminant hepatic failure in Wistar rats[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2015, 283(2): 139−146.
[53] LIU Z, ZHANG D, LI G, et al. The 6-month effect of whole soy and purified isoflavones daidzein on thyroid function—A double-blind, randomized, placebo controlled trial among Chinese equol-producing postmenopausal women[J]. Phytotherapy Re-

search, 2021, 35(10): 5838−5846.
[54] 石文茜, 孔凡江, 刘宝辉, 等. 大豆异黄酮提取方法研究进展[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 610−616. [SHI W Q, KONG F J, LIU B H, et al. Research progress on extraction methods of soybean isoflavone[J]. Soybean Science, 2022, 41(5): 610−616.]
[55] MURPHY P A, BARUA K, HAUCK C C. Solvent extraction selection in the determination of isoflavones in soy foods[J]. Journal of Chromatography B, 2002, 777(1-2): 129−138.
[56] TRAN T N T, CHEW K W, BUI X V, et al. Optimization of isoflavones extraction from soybeans using full factorial design[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(9): e14078.
[57] LUTHRIA D, BISWAS R, NATARAJAN S. Comparison of extraction solvents and techniques used for the assay of isoflavones from soybean[J]. Food Chemistry, 2007, 105(1): 325−333.
[58] 周文红, 郭咪咪, 毕艳红, 等. 大豆豆脐中异黄酮的提取工艺优化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(2): 218−223. [ZHOU W H, GUO M M, BI Y H, et al. Optimization of extraction technology of isoflavones from soybean umbilicus[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(2): 218−223.]
[59] ĐUROVIĆ S, NIKOLIĆ B, PISINOV B, et al. Microwave irradiation as a powerful tool for isolating isoflavones from soybean flour[J]. Molecules, 2024, 29(19): 4685.
[60] KAO T H, CHIEN J T, CHEN B H. Extraction yield of isoflavones from soybean cake as affected by solvent and supercritical carbon dioxide[J]. Food Chemistry, 2008, 107(4): 1728−1736.
[61] 王丹. 脱脂豆粕中大豆异黄酮提取工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 52−55. [WANG D. Study on the extraction technology of isoflavones from defatted soybean meal[J]. Food Research and Development, 2017, 38(6): 52−55.]
[62] 阮洪生, 葛文中, 秦学功, 等. 响应面法优化豆粕中大豆异黄酮提取工艺的研究[J]. 粮食与食品工业, 2008(4): 19−23. [RUAN H S, GE W Z, QIN X G, et al. Investigation on extracting technology of soybean isoflavones from soybean residue by response surface analysis[J]. Cereal and Food Industry, 2008(4): 19−23.]
[63] ROSTAGNO M A, ARAÚJO J M A, SANDI D. Supercritical fluid extraction of isoflavones from soybean flour[J]. Food Chemistry, 2002, 78(1): 111−117.
[64] 潘利华, 罗建平. 豆粕中大豆异黄酮的超临界萃取工艺及性质研究[J]. 食品科学, 2008(9): 288−290. [PAN L H, LUO J P. Study on supercritical fluid extraction technology and characteristics of isoflavones from soy bean meal[J]. Food Science, 2008(9): 288−290.]
[65] ZUO Y B, ZENG A W, YUAN X G, et al. Extraction of soybean isoflavones from soybean meal with aqueous methanol modified supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 384−389.
[66] 何恩铭, 沈瑞池, 王伟, 等. 紫外分光光度法测定豆渣提取物中大豆异黄酮含量的研究[J]. 大豆科学, 2013, 32(6): 818−820,824. [HE E M, SHEN R C, WANG W, et al. Determination of isoflavones in extraction of soybean dregs using ultraviolet spectrophotometry[J]. Soybean Science, 2013, 32(6): 818−820,824.]
[67] MIGUES V H, DAVID J M, GOMES A F, et al. Determination of soybean isoflavone by HPLC/DAD and simple UV spectroscopic analysis: A comparative study[J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(2): 367−376.
[68] 于寒松, 陈今朝, 胡耀辉. 一次测定 12 种大豆异黄酮单体的 HPLC 方法优化及在豆制品检测中的应用[J]. 粮油加工, 2015(4): 24−28. [YU H S, CHEN J Z, HU Y H. HPLC method optimization for 12 kinds of soy isoflavones monomers determination and method application some soy products[J]. Grain Oil Processing (Electronic Edition), 2015(4): 24−28.]
[69] BUSTAMANTE-RANGEL M, DEL NOGAL SÁNCHEZ M, GARCÍA-GARCÍA S, et al. A new method based on dispersive solid phase microextraction with commercial MOFs coupled to LC-MS/MS for the determination of isoflavones in soy drinks[J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139861.
[70] 曹明舰, 余承佑, 武云龙, 等. 高效液相色谱法(HPLC)检测豆浆中大豆异黄酮含量的研究[J]. 公共卫生与预防医学, 2018, 29(1): 49−52. [CAO M J, YU C Y, WU Y L, et al. Detection of isoflavones in soybean milk by high-performance liquid chromatography (HPLC)[J]. Public Health and Preventive Medicine, 2018, 29(1): 49−52.]
[71] 靳颖. 超高效液相色谱法检测大豆异黄酮含量[J]. 现代食品, 2024, 30(3): 186−188,193. [JIN Y. Detection of soybean isoflavone content by ultra-high performance liquid chromatography[J]. Modern Food, 2024, 30(3): 186−188,193.]
[72] CAPRIOLI G, NAVARINI L, CORTESE M, et al. Quantification of isoflavones in coffee by using solid phase extraction (SPE) and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS)[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2016, 51(9): 698−703.
[73] 成乐琴, 于丽颖, 罗亚楠, 等. 乙酸催化大豆异黄酮糖苷水解苷元的工艺研究[J]. 食品工业, 2016, 37(11): 86−88. [CHENG L Q, YU L Y, LUO Y N, et al. Synthetic research of soybean isoflavone glycoside hydrolyzed into isoflavone aglucon by acetic acid catalysis[J]. The Food Industry, 2016, 37(11): 86−88.]
[74] 于丽颖, 罗亚楠, 郑凤梅. 复合有机酸催化大豆异黄酮糖苷水解成苷元的工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 35−37. [YU L Y, LUO Y N, ZHENG F M. Research on hydrolysis of soybean isoflavone glycosides catalyzed with complex organic acid[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(5): 35−37.]
[75] 黎尔纳, 肖秀群, 邓开野. 酱油渣中大豆异黄酮碱水法提取工艺研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(12): 63−67. [LI E N, XIAO X Q, DENG K Y. Research on extraction technique of lsoflavone from soy sauce residue by alkali hydrolysis[J]. China Condiment, 2013, 38(12): 63−67.]
[76] YANG S, WANG L, YAN Q, et al. Hydrolysis of soybean isoflavone glycosides by a thermostable *β*-glucosidase from *Paecilomyces thermophila*[J]. Food Chemistry, 2009, 115(4): 1247−1252.
[77] YAN F YING, XIA W, ZHANG X X, et al. Characterization of *β*-glucosidase from *Aspergillus terreus* and its application in the hydrolysis of soybean isoflavones[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2016, 17(6): 455−464.
[78] 周文红, 郭咪咪, 毕艳红, 等. 酶解制备苷元型大豆异黄酮[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 100−104. [ZHOU W H, GUO M M, BI Y H, et al. Preparation of aglycone soy isoflavones by ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis and its micronization[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(12): 100−104.]
[79] 周文红, 郭咪咪, 李秀娟, 等. 大豆异黄酮提取及其生物转化的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(5): 37−42. [ZHOU W H, GUO M M, LI X J, et al. Research progress of extraction and biotransformation of soybean isoflavones[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(5): 37−42.]