赵越, 周魏, 朱少华, 等. 梨生物活性成分及其提取方法研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 26−39. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100276

ZHAO Yue, ZHOU Wei, ZHU Shaohua, et al. Research Progress on Bioactive Components and Extraction Methods of Pear (*Pyrus* spp.)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 26−39. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100276

·特邀主编专栏—果蔬基料制造:基础理论、新型加工、质量控制与智能制造(客座主编:徐贞贞、王永涛、李涛;产业顾问:李仁杰)·

梨生物活性成分及其提取方法研究进展

赵　越[1,2,3,4],周　魏[1],朱少华[3,5],高　幸[6],潘海波[1,2,4],王文骏[1,2,4],刘冠辰[1,2,3,4,*],刘东红[1,2,4]

(1.浙江大学生物系统工程与食品科学学院,浙江杭州 310058;
2.浙江大学长三角智慧绿洲创新中心,浙江嘉兴 314102;
3.浙江省云和雪梨浙农英才工作站,浙江丽水 323600;
4.浙江大学-云和雪梨产业联合研究中心,浙江丽水 323600;
5.云和县一清农产品专业合作社,浙江丽水 323600;
6.云和县白龙山街道办事处综合服务中心,浙江丽水 323600)

摘　要: 梨(*Pyrus* spp.)全产业链中产生的大量果皮、枝叶及未成熟落果等副产物富含高价值生物活性成分。现有研究表明,梨中的酚类、三萜类及熊果苷等活性物质呈现显著的"时空异质性",即在果皮、枝叶及未成熟果实中的富集度远高于成熟果肉,这明确了副产物作为提取原料的优势地位。在提取技术方面,虽然传统有机溶剂提取法技术成熟,但受限于溶剂残留与环境毒性。通过对溶剂法与新型辅助提取技术的对比发现,绿色高效提取技术有望突破传统溶剂法在传质效率与溶剂残留上的局限,是实现梨加工副产物高值化利用的关键途径,应根据原料物理特性和目标成分稳定性灵活选择提取策略。梨活性成分在美白化妆品及肠道健康食品领域极具开发潜力,但未来研究需重点突破多尺度工业化验证、基于人工智能的工艺多目标优化以及成分间协同效应的深入解析,以推动梨资源的高值化综合利用。

关键词: 梨,生物活性成分,时空差异,提取技术,绿色提取,高值化利用

中图分类号: TS255.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0026−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100276　　本文网刊:

Research Progress on Bioactive Components and Extraction Methods of Pear (*Pyrus* spp.)

ZHAO Yue[1,2,3,4], ZHOU Wei[1], ZHU Shaohua[3,5], GAO Xing[6], PAN Haibo[1,2,4], WANG Wenjun[1,2,4], LIU Guanchen[1,2,3,4,*], LIU Donghong[1,2,4]

(1.College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2.Innovation Center of Yangtze River Delta, Zhejiang University, Jiaxing 314102, China;
3.Zhejiang Yunhe Xueli Pear Zhejiang Agricultural Talents Workstation, Lishui 323600, China;
4.Zhejiang University-Yunhe Xueli Pear Industry Joint Research Center, Lishui 323600, China;
5.Yunhe County Yi Qing Agricultural Products Professional Cooperative, Lishui 323600, China;
6.Yunhe County Bailongshan Subdistrict Office Comprehensive Service Center, Lishui 323600, China)

Abstract: By-products generated throughout the entire pear (*Pyrus* spp.) industrial chain, including peels, branches, leaves, and unripe fruits, are abundant sources of high-value bioactive components. Current research indicates that bioactive compounds such as phenolics, triterpenoids, and arbutin exhibit significant "spatiotemporal heterogeneity", characterized by

收稿日期: 2025−10−27

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ24C200009);浙江省培养计划-浙农青年英才项目;国家自然科学基金区域创新发展联合重点基金(U24A20475)。

作者简介: 赵越(1992−),男,硕士,高级工程师,研究方向:农产品精深加工,E-mail:zhaoyue9497@zju.edu.cn。

*** 通信作者:** 刘冠辰(1988−),男,博士,研究员,研究方向:农产品精深加工,E-mail:gcliu@zju.edu.cn。

considerably higher concentrations in peels, branches, leaves, and unripe fruits compared to mature pulp. This distribution pattern underscores the superiority of these by-products as raw materials for extraction. Regarding extraction techniques, while traditional organic solvent extraction is well-established, its application is constrained by issues of solvent residues and environmental toxicity. A comparative analysis reveals that green, efficient extraction technologies offer a promising solution to overcome the limitations of traditional methods regarding mass transfer efficiency and solvent residues. These technologies represent a critical pathway for the valorization of pear processing by-products, provided that extraction strategies are flexibly selected based on the physical characteristics of the raw materials and the stability of the target components. Bioactive components from pears possess immense development potential in the fields of skin-whitening cosmetics and gut health-promoting foods. However, future research should prioritize multi-scale industrial validation, artificial intelligence-driven multi-objective process optimization, and the in-depth elucidation of synergistic interactions among components, aiming to advance the comprehensive, high-value utilization of pear resources.

Key words: pear; bioactive compounds; temporal and spatial variations; extraction techniques; green extraction; high-value utilization

梨（*Pyrus* spp.）是蔷薇科植物中重要的水果，在全球范围内广泛种植，具有重要的经济价值，在欧洲和亚洲已有超过五千年的种植历史[1]。梨具有镇咳、抗炎和利尿等作用，在中国作为传统民间药方已有2000 多年的历史[2]。根据地理起源，梨属植物可被分为东方梨和西方梨两大类，其中东方梨主要包括秋子梨（*Pyrus ussuriensis*）、白梨（*Pyrus bretschneideri*）、砂梨（*Pyrus pyrifolia*）等，西方梨主要为西洋梨（*Pyrus communis*）[3]。梨果实口感清甜，不仅富含维生素、矿物质和膳食纤维等基本营养素[4]，还含有多种糖类（如葡萄糖、果糖、山梨糖醇和蔗糖等）[5]，尤为重要的是，其生物活性成分，如抗氧化、抗炎、抗癌物质等[6−9]，赋予了梨在预防和治疗多种慢性疾病方面的巨大应用潜力。

随着人们对天然来源生物活性成分的兴趣日益浓厚，从植物中提取和利用这些化合物成为研究的热点[10]。梨作为一种重要的水果，其果实及加工废弃物中的生物活性成分的提取受到了广泛关注[11−14]，对其进行研究具有重要的科学和经济意义。梨在加工过程中会产生大量的副产物，如果皮、果渣等，这些副产物若能有效利用，不仅可以减少资源浪费，还能带来显著的经济效益。正是因为梨及其副产物中蕴含着具有强大功能活性的生物活性成分，并且市场对天然、健康的提取物需求日益增长，成本相对较低，才使得从梨及其副产物中提取生物活性成分成为一项具有吸引力的研究方向。现有研究已揭示梨具有多种功能活性，这主要归因于其含有多种酚类化合物、黄酮类、有机酸等关键活性成分。本文系统梳理梨中主要生物活性成分及其功效，进而重点分析其时空差异性规律，为原料的精准遴选提供依据。在此基础上，详细评述不同提取技术的优劣及其与原料特性的适配性，并基于提取物的功能，展望其在不同领域的应用前景。

1　梨中主要生物活性成分及功能

梨中含有多种生物活性成分，主要包括酚类化合物、三萜类化合物、类胡萝卜素、梨多糖等，具有抗氧化、抗炎、抗癌等作用[1,7−8,15−17]。图 1 展示了梨中主要生物活性成分及功效。



图 1　梨中主要生物活性成分及功效

Fig.1　Main active components in pears and their health benefits

梨活性物质的种类和浓度受多种因素影响，包括梨的种类、品种、成熟阶段、生长条件、储存方式以及果实的具体部位[18]。

1.1　酚类化合物

酚类化合物是梨中含量最多且功能最重要的生物活性成分类别之一，它们以黄酮类、酚酸类、单宁以及酚苷类等多种形式存在[9]，并对梨的抗氧化、抗炎等多种健康功效发挥着关键作用。

黄酮类化合物是梨中最重要的酚类活性成分之一，在梨果实中含量丰富，例如槲皮素、山奈酚、芦丁、儿茶素、表儿茶素和花青素等。这些黄酮类化合物赋予了梨显著的抗氧化和抗炎活性，并对心血管系统、消化系统和神经系统具有积极的健康作用。槲皮素在梨果肉和果皮中均有分布，研究表明其可通过抑制 NF-κB 通路，降低 TNF-α、IL-6 等促炎因子表

达，从而阻断炎症级联反应，为梨的抗炎功效提供机制支持[19]；芦丁同样存在于梨中，研究表明其可通过激活 SIRT1 通路增强内皮依赖性血管舒张从而改善血管功能[20]，也可在乙醇损伤的大鼠模型中通过提高 PGE2 水平来保护胃黏膜[21]；山奈酚在梨中也有发现，研究表明其可降低大鼠脑组织中 MDA 和 3-NT 水平，并抑制 Cleaved Caspase-3、TNF-α 和 IL-1β 表达，对神经系统具有保护作用[22]。

酚酸类化合物是梨中另一重要的酚类活性成分，包括绿原酸、咖啡酸和阿魏酸等。作为梨中含量最丰富的酚酸之一[6,23]，绿原酸凭借其卓越的抗氧化与抗炎活性，为抗肿瘤、调节糖脂代谢及心血管保护等功效提供了物质基础[24]。其作用机制包括：绿原酸可通过抑制 NF-κB、JAK 和 MAPK 通路，减缓 TNF-α、NO、COX-2、PGE2 和 ILs 等促炎因子的产生，减少炎症损伤；绿原酸可通过 Nrf2 通路同时提高多种关键的抗氧化因子，如 HO-1 和 NOQ-1，从而清除过量的细胞自由基；此外，绿原酸还可通过激活 AMPK 通路来调节和帮助维持脂质和葡萄糖的代谢稳态，调节葡萄糖释放和吸收以及脂质合成；通过靶向多种神经受体和通道（如 γ-氨基丁酸受体、钾通道和酸敏感离子通道）发挥神经调节作用，从而产生镇痛效果[24]。通过分子对接模拟，绿原酸和阿魏酸对 Nrf2、NF-κB 和 iNOS 等蛋白质具有强亲和力，表明具有潜在的保健作用[25]。

梨中还含有单宁和酚苷类化合物，如熊果苷和原花青素。熊果苷是梨中含量最多的酚类化合物，这表明其在梨的抗氧化和抗炎能力中可能发挥着重要作用[23,26]。从梨中提取的熊果苷，其作用得到了广泛研究和证实。Jiang 等[27] 研究发现，幼龄香梨提取物能抑制 B16 细胞中 TYR、TYR1 和 MITF 等黑色素相关蛋白的表达，且梨美白活性与梨果实中熊果苷含量显著正相关。熊果苷能够通过竞争性结合酪氨酸酶活性位点，阻断黑色素合成关键步骤，具有美白皮肤和预防皮肤色素异常的作用[28]。此外，熊果苷还可以抑制 TNF-α、IL-6 等促炎因子释放，减轻炎症反应[29]；通过激活胰岛素/IGF-1 通路，促进真皮成纤维细胞增殖，加速伤口愈合[30]；通过激活法尼醇 X 受体（FXR），调节胆汁酸稳态相关蛋白 BSEP、NTCP，减轻 α-萘异硫氰酸酯（ANIT）诱导的小鼠肝损伤[31]。原花青素赋予梨涩味，并具有抗氧化特性[2]。

1.2 三萜类化合物

三萜类化合物是梨中另一类重要的生物活性成分，具有抗炎和抗癌特性。梨果实中三萜总量高于苹果、楹楂等蔷薇科水果[32]。梨中的三萜类化合物主要包括熊果酸、齐墩果酸、白桦脂酸等，其中熊果酸是最主要的一种。梨提取的三萜类化合物（特别是熊果酸、齐墩果酸、白桦脂酸）的作用得到了研究和证实。熊果酸可增加小鼠下丘脑中的分子抗衰老生物标志物 SIRT1、SIRT6、PGC-1β 和 α-Klotho，从而减缓衰老；熊果酸与亮氨酸结合，可通过 mTOR 通路诱导刺激肌细胞分化和肌肉质量增加[33]。齐墩果酸可调节 FOXO/DAF-16 转录因子的核定位序列，并刺激了其下游靶基因 *sod-3*、*hsp-16.2* 和 *ctl-1* 的活性，从而可用于癌症、神经退行性、心血管和代谢性疾病的预防和治疗[33]。白桦脂酸可增强肿瘤细胞对放疗敏感性，降低 NF-κB 介导的耐药性[34]。这些研究表明，从梨中提取的三萜类化合物，尤其是熊果酸、齐墩果酸和白桦脂酸，具有广泛的生物活性。它们赋予了梨提取物的潜在健康价值，如抗氧化、抗炎、抗肿瘤等[35]，进一步扩展了梨作为一种功能性食品和健康来源的潜力。

1.3 梨多糖及膳食纤维

梨多糖具有良好的生物活性，如抗氧化、免疫调节、止咳和抗哮喘活性等[36−38]。库尔勒香梨多糖可显著提高巨噬细胞吞噬指数[39]；抑制细胞焦亡有关基因 *IL-1β*、*IL-18* 及蛋白 NLRP3、GSDMD 的表达，从而抑制细胞焦亡发挥抗炎作用[40]。黄梨渣多糖可提升小鼠的碳廓清能力；使小鼠受抑制的 DTH 反应恢复，对细胞免疫功能具有促进作用；提升小鼠血清中 TNF-α、IFN-γ、IL-4 三种细胞因子的分泌量，有助于杀伤和抑制肿瘤细胞、抑制病毒复制、调节多种造血细胞；显著增加小鼠肝脏、心脏和肾脏中 SOD、CAT、GSH-Px 活力，降低脂质过氧化物 MDA 水平，提高免疫抑制小鼠的抗氧化能力[41]。

此外，梨渣中富含的膳食纤维也是重要的功能成分。研究表明，梨渣中的可溶性膳食纤维可调节肠道菌群及其相关代谢产物，从而减轻高脂饮食带来的负面影响[42]。这些发现为梨渣在功能性代餐粉及肠道健康产品中的应用提供了理论依据。

1.4 类胡萝卜素

梨中含有多种类胡萝卜素，如叶黄素、玉米黄质和 β-胡萝卜素等。类胡萝卜素可与黄酮化合物复配发挥抗氧化协同作用。细胞层面，番茄红素与槲皮素复配物可通过 Nrf2/HO-1/NQO1 通路预防氧化应激，通过调控 SIRT1/NF-κB/Nox4 通路协同预防细胞内 ROS 累积，预防氧化应激与炎症反应；动物层面，通过 SIRT1/Nrf2/HO-1/NQO1 信号通路显著改善 D-半乳糖诱导的氧化应激 ICR 小鼠心脏和神经氧化损伤[43]。

类胡萝卜素是一类脂溶性色素，它们的存在有助于梨皮形成其特有的、通常是黄色或橙色的颜色特征。除了赋予颜色，类胡萝卜素还是一类重要的抗氧化剂，能够帮助梨果实抵抗氧化应激，对维持果实健康和品质具有积极意义[6,44]。光照可介导类胡萝卜素在梨皮中积累，从而导致其在果皮中的浓度高于果肉，且果实发育过程中的环境因素（如是否套袋）可以显著影响其含量[45]。

1.5 其他

梨还含有有机酸、氨基酸和维生素等其他生物

活性成分[1]。梨果实的有机酸主要包括苹果酸、柠檬酸、奎尼酸、草酸和莽草酸等五类。其中苹果酸的含量最高，赋予了梨特有的酸甜风味，并在一定程度上影响着果实的保鲜性。其次为柠檬酸，它也是重要的酸味来源。研究表明，梨的总酸含量与果实的发育期呈弱正相关[3]。有机酸不仅是风味物质，还可能参与果实的代谢过程，并对人体健康产生影响。梨中至少含有 17 种氨基酸，包括 7 种必需氨基酸和 10 种非必需氨基酸，其中天冬氨酸 Asp 和谷氨酸 Glu 含量最高，Asp 具有增强肝脏功能、消除疲劳和保护心脏的作用，Glu 具有健脑益智、保肝护肝的作用[46]。这些氨基酸作为蛋白质的组成单元，对于维持人体正常的生理功能至关重要，而梨中高含量和特定氨基酸的益处，也为梨的营养价值增添了亮点。此外，梨中还含有至少 20 种维生素，其中 β-烟酰胺单核苷酸（维生素 B_3）、乙酰萘酮（维生素 K_4）和泛酰巯基乙胺（维生素 B_5）的浓度在不同梨品种之间存在显著差异[47]。维生素作为重要的营养素，在人体代谢、免疫调节、抗氧化等方面扮演着不可或缺的角色。值得注意的是，这些不同类别的生物活性成分并非孤立存在，它们之间可能通过复杂的协同效应共同作用，从而赋予梨整体的健康益处[7]。

2　梨主要活性成分的品种及时空差异性

梨中生物活性成分的积累与分布受品种（基因型）、空间（组织部位）及时间（生长发育阶段）的复杂调控[2,26,48−49]。表 1 整理了目前已被报道的 54 种主要梨品种中总酚、总黄酮和总三萜含量。分析表明，活性成分不仅在品种间差异显著，更表现出明显的时空异质性。总体规律呈现为：营养器官（叶、枝）高于生殖器官（果实），未成熟果实高于成熟果实，果实外部组织（果皮）高于内部组织（果肉）。这种分布模式与植物次生代谢产物在防御紫外线、抵御病虫害等方面的生态学功能密切相关。

2.1　梨主要活性成分的品种差异性

基因型是决定梨活性成分谱系的基础因素。不同品种的梨的主要生物活性成分的组成与含量存在较大差异。Li 等[26] 对比了 8 种梨的酚类、黄酮和三萜类化合物，发现南果梨的齐墩果酸和熊果酸含量最

表 1　54 种主要梨品种中总酚含量、总黄酮含量和总三萜含量

Table 1　Total phenolic, flavonoid, and triterpenoid contents in 54 major pear varieties

大类	梨的种名	种植名	部位/生长阶段	总多酚含量	总黄酮含量	总三萜含量	参考文献
东方梨	*Pyrus ussuriensis* 秋子梨	Maxim	1年生茎	81.1±6.77 mg TAE/g DW	0.52±0.09 mg QE/g DW	−	[15]
			2年生茎	94.7±20.9 mg TAE/g DW	1.05±0.04 mg QE/g DW	−	[15]
			叶片	76.5±13.3 TAE/g DW	6.72±0.73 mg QE/g DW	−	[15]
		var. ovoidea Rehder	1年生茎	60.7±3.29 TAE/g DW	0.45±0.22 mg QE/g DW	−	[15]
			2年生茎	82.9±11.3 TAE/g DW	0.78±0.06 mg QE/g DW	−	[15]
			叶片	79.6±9.08 TAE/g DW	13.5±0.82 mg QE/g DW	−	[15]
			未成熟果实	41.5±2.14 TAE/g DW	0.30±0.12 mg QE/g DW	−	[15]
		Ingye	成熟果实	120.6±4.0 mg/100 g DW	−	−	[56]
		Cheong	成熟果实	161.2±2.5 mg/100 g DW	−	−	[56]
		Jianba	成熟果皮	1112.4 mg/kg FW	795.9 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	182.3 mg/kg FW	39.5 mg/kg FW	−	[56]
		Nanguo/南果梨	成熟果皮	1248.0 mg/kg FW	912.4 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	129.0 mg/kg FW	6.9 mg/kg FW、76.6 μg/100 g FW	178.1 μg/100 g FW	[49,56]
			未成熟果肉	−	259.0 μg/g FW	274.6 μg/g FW	[49]
		Jingbai	成熟果皮	1734.0 mg/kg FW	1122.7 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	28.5 mg/kg FW	2.3 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果实	10.34±0.23 mg/100 g FW	−	−	[57]
		Huagai	成熟果皮	636.2 mg/kg FW	483.0 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	73.4 mg/kg FW	7.7 mg/kg FW	−	[56]
		Daxiangshui	成熟果皮	363.0 mg/kg FW	206.8 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	51.0 mg/kg FW	4.6 mg/kg FW	−	[56]
		Anli	成熟果皮	1209.9 mg/kg FW	960.7 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	102.6 mg/kg FW	13.3 mg/kg FW	−	[56]
		Hongxiao	成熟果皮	736.0 mg/kg FW	572.6 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	72.7 mg/kg FW	7.4 mg/kg FW	−	[56]
		Xiaoxiangshui	成熟果皮	971.1 mg/kg FW	672.8 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	114.5 mg/kg FW	14.9 mg/kg FW	−	[56]
		Balixiang	成熟果皮	548.2 mg/kg FW	333.4 mg/kg FW	−	[56]
			成熟果肉	122.4 mg/kg FW	12.1 mg/kg FW	−	[56]
		40份样本	叶片	4.53~53.65 mg/g	−	−	[54]

续表 1

大类	梨的种名	种植名	部位/生长阶段	总多酚含量	总黄酮含量	总三萜含量	参考文献
西方梨	*Pyrus bretschneideri* 白梨	Laiyangchili	成熟果实	113.3±3.2 mg/100 g DW	–	–	[56]
		Yali	成熟果实	122.1±2.6 mg/100 g DW	–	–	[56]
			成熟果实	10.03±0.01 mg/100 g FW	–	–	[57]
		库尔勒香梨	未成熟果皮	21.32 mg/g DW	18.52 mg/g DW	–	[58]
			成熟果皮	9.96 mg/g DW	8.86 mg/g DW	–	[58]
			未成熟果肉	2.39 mg/g DW	7.43 mg/g DW、266.9 μg/g FW	227.5 μg/g FW	[49,58]
			成熟果肉	0.12 mg/g DW	1.05 mg/g DW、23.8 μg/100 g FW	15.7 μg/100 g FW	[49,58]
			未成熟石细胞区果肉	3.01 mg/g DW	7.93 mg/g DW	–	[58]
			成熟石细胞区果肉	0.37 mg/g DW	1.67 mg/g DW	–	[58]
			未成熟果核	27.41 mg/g DW	45.99 mg/g DW	–	[58]
			成熟果核	4.08 mg/g DW	3.48 mg/g DW	–	[58]
		砀山酥	成熟果肉	–	0.5 μg/g FW	22.8 μg/100 g FW	[49]
			未成熟果肉	–	63.5 μg/g FW	305.7 μg/g FW	[49]
		26份样本	叶片	8.08~41.21 mg/g	–	–	[54]
	Pyrus pyrifolia 砂梨	Chuhwang	未成熟果实	971.4±4.8 mg/100 g FW	279.0±8.7 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	110.0±2.4 mg/100 g DW	–	–	[56]
			成熟果实	38.7±2.3 mg/100 g FW	11.3±0.3 mg/100 g FW	–	[59]
		Hanareum	成熟果实	135.2±5.6 mg/100 g DW	–	–	[56]
		Hwangkeum	未成熟果实	976.4±1.9 mg/100 g FW	368.9±47.6 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	41.9±4.3 mg/100 g FW	7.8±0.5 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	6.38±0.19 mg/100 g FW	–	–	[57]
		Hwasan	未成熟果实	626.7±1.2 mg/100 g FW	227.7±5.0 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	12.5±1.4 mg/100 g FW	4.1±1.4 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	211.08±8.36 mg GAE/100 g DW	96.37±6.24 mg RE/100 g DW	–	[27]
		Imamuraaki	未成熟果实	614.9±16.7 mg/100 g FW	241.1±22.3 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	51.1±5.0 mg/100 g FW	10.2±0.4 mg/100 g FW	–	[59]
		Manpung	未成熟果实	570.1±31.6 mg/100 g FW	239.5±21.0 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	36.4±2.1 mg/100 g FW	9.7±0.7 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	145.2±7.3 mg/100 g DW	–	–	[56]
		Niitaka	成熟果实	189.60±3.92 mg GAE/100 g DW	78.81±5.31 mg RE/100 g DW	–	[27]
		Wonhwang	未成熟果实	723.6±0.7 mg/100 g FW	217.9±12.1 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	22.0±1.3 mg/100 g FW	6.4±1.0 mg/100 g FW	–	[59]
			未成熟果实	939.5±34.8 mg/100 g FW	182.5±4.7 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	100.5±4.2 mg/100 g DW	–	–	[56]
			成熟果实	20.1±1.4 mg/100 g FW	6.1±1.1 mg/100 g FW	–	[59]
			成熟果实	6.89±0.17 mg/100 g FW	–	–	[57]
		云和雪梨	成熟果实	1.35 mg/g FW	0.46 mg/g FW	–	[50]
		丰水梨	成熟果肉	–	39.5 μg/100 g	6.5 μg/100 g FW	[49]
			未成熟果肉	–	147.3 μg/g	297.4 μg/g FW	[49]
		KS	带皮成熟果肉	51.2~55.3 mg TAE/100 g FW	–	–	[60]
		24份样本	叶片	5.07~51.50 mg/g	–	–	[54]
	Pyrus communis 西洋梨	Abate Fetal	成熟果实	81.0±2.2 mg/100 g DW	–	–	[56]
		Ahmetova	成熟果肉	7.79±1.50 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	253.87±62.27 mg/kg FW	–	–	[61]
		Budaljača	成熟果肉	81.50±14.88 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	1066.28±62.27 mg/kg FW	–	–	[61]
		Carmen	成熟果实	330.33±7.35 mg/100 g FW	–	–	[62]
		Cascade	成熟果实	8.90±0.56 mg/100 g FW	–	–	[57]
		Conference	成熟果实	14.27±0.23 mg/100 g FW	–	–	[57]
		Deveci	成熟果实	1690.57±225.89 mg GAE/kg DW	–	–	[63]

续表 1

大类	梨的种名	种植名	部位/生长阶段	总多酚含量	总黄酮含量	总三萜含量	参考文献
		Dolokrahan	成熟果肉	52.48±15.89 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	787.8±74.02 mg/kg FW	–	–	[61]
		Etrusca	成熟果实	338.23±8.29 mg/100 g FW	–	–	[62]
		Hambarka	成熟果肉	32.87±22.71 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	489.2±368.2 mg/kg FW	–	–	[61]
		Jules d'Airolles	成熟果实	60.6±2.1 mg/100 g DW	–	–	[56]
		Kačmorka	成熟果肉	26.07±1.15 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	409±47.9 mg/kg FW	–	–	[61]
		Krakača	成熟果肉	50.57±21.1 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	1029±460.6 mg/kg FW	–	–	[61]
		Ljeskovača	成熟果肉	37.18±11.71 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	551.8±310.73 mg/kg FW	–	–	[61]
		Margarite	成熟果实	2337.31±392.59 mg GAE/kg DW	–	–	[63]
		Mellaçi	成熟果实	2428.22±885.09 mg GAE/kg DW	–	–	[63]
		Mellaki	成熟果实	2366.95±248.70 mg GAE/kg DW	–	–	[63]
		Président Drouard	成熟果肉	19.69±11.23 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	381.8±166.54 mg/kg FW	–	–	[61]
		Radana	成熟果肉	234.2±65.5 mg/100 g DW	4.1±1.5 mg/100 g DW	201.4±77.1 μg/g DW	[5]
			成熟果皮	917.6±181.7 mg/100 g DW	306.3±09.2 mg/100 g DW	3460.5±1255.9 μg/g DW	[5]
			叶片	5326.7±844.0 mg/100 g DW	2178.6±503.7 mg/100 g DW	3104.4±312.3 μg/g DW	[5]
			种子	978.5±329.9 mg/100 g DW	16.0±4.8 mg/100 g DW	736.2±139.4 μg/g DW	[5]
		Sarajka	成熟果肉	33.65±16.38 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	477.55±310.73 mg/kg FW	–	–	[61]
		Santa Maria	成熟果实	408.23±9.21 mg/100 g FW	–	–	[62]
		Takiša	成熟果肉	26.77±3.48 mg/kg FW	–	–	[61]
			成熟果皮	302.77±103.5 mg/kg FW	–	–	[61]
		Tosca	成熟果肉	37.2 μg/100 g FW	–	5.6 μg/100 g FW	[49]
		Williams	成熟果实	41.1~56.1 mg TAE/100 g FW	–	–	[64]
			成熟果实	58.4~64.5 mg TAE/100 g FW	–	–	[65]
			成熟果实	353.72±9.65 mg/100 g FW	–	–	[62]
		红茄梨	成熟果肉	–	26.3 μg/g FW	8.7 μg/100 g FW	[49]
			未成熟果肉	–	711.7 μg/g FW	193.0 μg/g FW	[49]
			成熟果实	42.79~119.14 mg GAE/100 g FW	–	–	[66]
野生梨	*Pyrus eleagnifolia*	Pall	叶片	20.497±0.055 mg GAE/g DW	36.520±1.833 mg CAE/g DW	–	[67]
			枝条	20.903±0.025 mg GAE/g DW	47.020±1.652 mg CAE/g DW	–	[67]
			未成熟果实	5.240±0.035 mg GAE/g DW	2.120±0.173 mg CAE/g DW	–	[67]
	Pyrus amygdaliformis	Vill	叶片	19.683±0.015 mg GAE/g DW	39.320±0.173 mg CAE/g DW	–	[67]
			枝条	14.497±0.025 mg GAE/g DW	21.120±0.520 mg CAE/g DW	–	[67]
			未成熟果实	4.717±0.012 mg GAE/g DW	4.920±0.300 mg CAE/g DW	–	[67]
	Pyrus anatolica	Browicz	叶片	20.497±0.055 mg GAE/g DW	36.520±1.833 mg CAE/g DW	–	[67]
			枝条	20.903±0.025 mg GAE/g DW	47.020±1.652 mg CAE/g DW	–	[67]
			未成熟果实	5.240±0.035 mg GAE/g DW	2.120±0.173 mg CAE/g DW	–	[67]

注：TAE：单宁酸当量；GAE：没食子酸当量；QE：槲皮素当量；CAE：儿茶素当量；DW：干重；FW：鲜重；–：无数据。

高，雪花梨的儿茶素和绿原酸含量最高，而砀山酥梨的熊果苷和总三萜含量最高。霍宏亮等[50]对比了 24 种梨的总酚、总黄酮、有机酸和矿物质，发现云和雪梨的 K、Na 和 P 元素含量最高，Zn 元素、奎尼酸和总酚含量排名靠前。维生素 B_3 在秋子梨中的显著含量高于白梨和砂梨[47]。活性物质含量的差异也导致了活性功能的差异。有研究对三种梨科植物 *P. communis* L.、*P. elaeagrifolia* Pall.、*P. pyrifolia* (Bum.) Nak.的叶片提取物进行了抗氧化性测试，*P. communis* L.显著高于另两种梨科植物[13]。而 *P. pyrifolia* (Bum.) Nak.的抗菌活性高于 *P. communis* L.[51]。

2.2　梨主要活性成分的时空差异性

生物活性成分的“时空差异性”是指其在不同植物器官（空间维度）及不同生长发育阶段（时间维度）

的动态变化规律。深入解析这一规律，对于梨加工副产物及农业废弃物的高值化利用具有重要的指导意义。

从时间维度看，梨树在自然状态下常出现“过量开花结果”现象，导致果实营养竞争、品质下降。传统农业通过人工疏除（疏花、疏幼果）调控产量，但摘除的未成熟果实通常被废弃，造成资源浪费[52]。未成熟梨果虽无法食用，但其熊果苷、齐墩果酸、熊果酸、绿原酸、芦丁、奎尼酸、表儿茶素以及总黄酮、总黄烷-3-醇和总三萜酸含量却远超成熟果实[25,49]。而随着果实成熟度的增加，这些生物活性成分也显著下降[1]。

从空间维度看，不同部位的生物活性成分也有很大差异，图 2 展示了梨不同部位主要生物活性成分的分布。多项研究表明，果皮中酚类化合物、黄酮类化合物和三萜类化合物的浓度高于果肉[2]。绿原酸在果皮中的含量高于果肉[6,23]，熊果苷通常在果皮中含量最高，其次是果核，最后是果肉[4]。梨皮中的抗氧化物含量是果肉的 6~20 倍[2]，因而梨皮提取物的抗氧化活性也显著高于果肉提取物[53]。此外，从梨树上修剪下来的枝条也是生物质的重要来源。在果园管理中，梨树的落叶或修剪的枝叶也被归为废弃物进行堆肥、填埋或焚烧。然而，这些废弃物中往往含有大量的生物活性成分，如熊果苷、异槲皮素 A 等[54]。

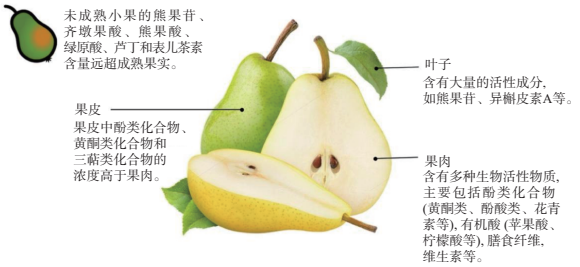


图 2 梨中主要生物活性成分的分布

Fig.2 Distribution of major active components in pears

从定量关系来看，梨树副产物中的活性成分含量具有显著优势。例如，Sasaki 等[55] 研究发现梨枝中的熊果苷含量最高 12.8 mg/g（干重），叶中最高约 12.1 mg/g（干重），果皮中最高约 5.70 mg/g（干重），果肉中平均约 0.26 mg/g（干重），茎中平均约 0.13 mg/g（干重），枝、叶和果皮中熊果苷的含量远高于茎和果肉。同时，梨皮与果柄、果核等作为梨汁加工过程中的副产物，其蕴含的生物量占加工水果的 40%~50%[11]。这些研究表明从榨汁后的皮渣或枝、叶等种植废弃物中提取梨生物活性成分具有显著的得率和成本优势，应优先用于提取[16]。探索从梨叶和其他非果实部位提取生物活性成分，可能为梨的全面利用开辟新的途径。

3 梨的生物活性成分提取方法

梨生物活性成分分布的时空差异性规律，为提取原料的选择提供了依据，而要进一步实现高效提取、保障提取物活性并推动其产业化，选择合适的提取技术更是关键。关于梨的生物活性成分提取方法已有不少研究。常用的方法包括溶剂提取法、天然低共熔溶剂提取法、超声辅助提取法、微波辅助提取法和酶辅助提取法等。其中，溶剂提取法是最基础且应用最广泛的方法。与此同时，一系列新型绿色提取技术，如天然低共熔溶剂提取法、超声辅助提取法、加压液体提取法、微波辅助提取法和酶辅助提取法等，也已成为研究热点。此外，对不同提取方法的比较研究与协同工艺的探索，为梨生物活性成分的提取和产业化应用提供了重要依据。下文将对这些方法分别进行详述。

3.1 溶剂提取法

溶剂提取法是最常使用的提取方法，其原理是基于生物活性成分在不同溶剂中的溶解度差异而进行提取[15]。常用的溶剂包括乙醇、甲醇、水、乙酸乙酯和己烷等[7]。溶剂提取可以通过浸渍、索氏提取或回流提取等方式进行[15]。

溶剂的选择主要依据“相似相溶”原理，并需兼顾提取效率与安全性。在实验室分析和成分鉴定中，甲醇因其较小的分子量和高极性，通常表现出比乙醇更高的提取效率，尤其是酸性甲醇体系更有利于酚类和黄酮类物质的回收[68]。使用甲醇从梨渣粉提取的总酚和总黄酮含量分别为 375.9~512.9 g GAE/100 g 干物质和 24.7~34.6 mg QE/100 g 干物质[69]，含有 1% 抗坏血酸的甲醇在 20 min 内从叶片中可提取高达 53.27 g GAE/kg 的总酚，含有 0.1% 盐酸的甲醇在 1 h 内可从果皮中提取 116.3~173.1 g GAE/kg 的总酚，从果肉中可提取 85.3~146.4 g GAE/kg 的总酚[5,68]；相比之下，使用 70% 乙醇提取 12 h 仅能获得 1.89~3.14 g GAE/kg 的总酚[9]，通过响应面法优化后的最佳提取条件（75% 乙醇，80 ℃，30 min）也仅能从果皮中获得 4.98 g GAE/kg 的总酚[70]。Patricia 等[71] 的研究表明，在正己烷、乙酸乙酯和甲醇中，使用甲醇提取的“Packham”和“Yali”果皮提取物均显示出最高的总酚和总黄酮含量。对砂梨（*Pyrus pyrifolia*）和西洋梨（*Pyrus communis*）果皮中总酚和总黄酮的提取中也发现了类似的结果[72]。然而，考虑到食品工业的安全性与法规限制，低毒性的乙醇是目前食品级原料生产的首选溶剂[12,73–74]。

提取工艺参数，包括固液比、原料预处理方式（如干燥、研磨、粒径）、提取时间、提取温度以及溶剂浓度等，对于梨提取物的性能指标至关重要，并显著影响提取产量和活性成分的得率。固液比（植物材料与溶剂的比例）是影响提取产量的关键因素。最佳比例能够确保有足够的溶剂溶解目标化合物，而不过度稀释。优化固液比对于最大化提取效率和最小化溶剂使用量至关重要。一旦达到最佳比例，进一步增加固液比并不能显著提高提取物的得率[75]。合适的固液比可在保证活性成分传质效率的同时不过度消

耗溶剂。原料的预处理方式，如干燥、研磨、粒径控制等也会影响提取效率[69]。通常，较小的粒径会由于表面积增加而导致更高的提取产量，但同时也会增加固液分离的难度。对提取时间、温度和溶剂浓度等提取参数的优化能够显著提升提取物的性能。例如：Kotsou 等[12] 优化了提取时间、温度和乙醇浓度等提取参数，野梨（*Pyrus spinosa*）提取物的抗氧化能力提升了 1622%~2356%，总多酚含量增加 345%，总黄酮含量增加 273%，抗坏血酸含量增加 653%。李启彭等[73] 通过正交试验优化提取三种昭通梨皮和梨肉中的黄酮，最佳提取工艺为乙醇体积分数为 70%，提取时间为 120 min，提取温度为 70 ℃，料液比为 1∶10，在最佳提取工艺条件下梨皮的黄酮得率为 0.6352%~0.6799%，梨肉的黄酮得率为 0.3528%~0.3597%。乔钰婕等[74] 通过响应面法优化了喀什冬梨果皮中三萜类物质的提取工艺，最佳提取条件为提取时间 51 min、液固比 42∶1（mL/g）、乙醇体积分数 73%。周凯等[76] 通过响应面法优化了库尔勒香梨带皮果肉中多糖的提取工艺，最佳提取条件为提取温度 70 ℃、提取时间 95 min、料液比 1∶60，此时提取率为 12.46%。

综上所述，溶剂提取法的效率并非单一因素决定，而是溶剂种类、固液比、温度、时间及原料预处理方式等多因素耦合的结果。尽管溶剂提取法设备简单、工艺成熟，但其在处理果皮等细胞壁致密的梨加工副产物时，往往面临渗透力不足、耗时过长以及大量使用有机溶剂带来的环保压力等挑战。因此，研究和发展更高效、更绿色的新型提取技术显得尤为重要和迫切。

3.2　天然低共熔溶剂提取法

天然低共熔溶剂（Natural deep eutectic solvents，NADES）是一类由天然组分（如糖、有机酸、氨基酸）组成的绿色溶剂。这些天然组分分别作为氢键供体和氢键受体，形成致密的氢键网络，显著降低了混合体系整体的晶格能，使得这些原本在室温下呈现固态的天然成分，能够以熔点远低于单一组分的稳定液态形式存在，形成独特的低共熔混合物，赋予了 NADES 作为绿色溶剂的物理化学基础[77]。NADES 的氢键网络结构能够与植物细胞壁中的纤维素和木质素发生竞争性氢键结合，导致细胞壁微观结构的溶胀与解构，从而打开传质通道；同时，NADES 分子能与含有羟基、羧基的生物活性成分形成稳定的超分子复合物，防止其氧化降解，从而在温和条件下高效提取目标成分[78]。由于 NADES 通常由天然存在于食品中的无毒物质组成，提取液无需去除溶剂即可直接用于食品，无需进行额外的纯化步骤[79]。当需要获得高纯度的提取成分时，也可通过特定吸附剂（如 amberlite XAD-16）进行吸附，用超纯水冲洗去除杂质，再用乙醇洗脱吸附在柱上的酚类化合物，以获得纯化的提取物[80]。

在多项实验中，NADES 的提取率高于传统有机溶剂，且能提升天然化合物的性能，如稳定性、抗氧化性等[81−84]。Lee 等[85] 使用氯化胆碱和戊二酸合成的 NADES，从秋子梨叶中提取的黄酮含量最高可达 171.326 μg/mL，这比使用水的对照组（105.926 μg/mL）提高了约 61.7%，显示出显著的增溶与提取优势。de Los Ángeles 等[86] 利用乳酸、葡萄糖和水组成的 NADES 配合超声辅助对梨罐头副产物中极性和低极性多酚的提取效果优于水或甲醇。任柯昱[11] 通过响应面法对超高压耦合低共熔溶剂提取法从雪花梨果渣中提取多酚的工艺进行了优化，最优提取条件为超高压压力 406 MPa、保压时间 8.4 min、氯化胆碱-乙二醇摩尔比 1∶3、DES 含水量 40%，雪花梨果渣多酚提取率为 4.75%±0.06%。

在应用 NADES 进行生物活性成分提取时，NADES 中氢键供体和氢键受体的化学性质、摩尔比、粘度、密度、pH 以及 NADES 中的氢键网络是影响多酚提取率的关键因素[87]。除了实验方法外，也有一些计算机模拟方法来确定最佳溶剂，如 COSMOtherm，它是一种基于真实溶剂似导体屏蔽模型（Conductor-like screening model for real solvents，COSMO-RS）的计算机模拟方法，可预测目标化合物在多种溶剂中的溶解度[88]。

3.3　超声波辅助提取法

超声波辅助提取法（Ultrasound-assisted extraction，UAE）利用超声波产生的机械效应，破坏梨较坚硬的细胞壁，促进溶剂渗透，从而提高提取效率并缩短提取时间[89]。与传统的溶剂提取法相比，UAE 通常更高效、更环保，因为它能减少溶剂的使用量和提取时间[90]。Belwal 等[91] 从红星梨（*Pyrus communis* 'Starkrimson'）果皮中提取花青素-3-半乳糖苷（Cy3-gal），使用 UAE 的 Cy3-gal 得率显著高于传统方法。Wang 等[89] 通过田口设计（Taguchi design）和完全随机两因素设计优化了常规溶剂提取和 UAE 对红安久梨（Red D'Anjou）皮的最佳提取条件，发现 UAE 可用乙醇替代常规溶剂提取使用的甲醇，且最佳提取温度比常规溶剂提取降低了 20 ℃。Cui 等[92] 研究发现使用 UAE 的梨（‘Huangli No.1’）幼果中熊果苷得率是传统方法的 2.7 倍。

超声时间、超声功率、溶剂浓度和超声温度是影响 UAE 率的关键因素。仵菲等[93] 通过响应面法优化了 UAE 对库尔勒香梨各部位中总多酚的提取，优化后的提取工艺为乙醇体积分数 70%，料液比 1∶15，提取时间 40 min，提取温度 40 ℃，在最优条件下库尔勒香梨果皮、果肉、核外果肉和果核总多酚的提取量分别为 17.060±0.400、0.532±0.053、0.530±0.032、6.100±0.200 mg/g·FW。

对于同一种生物活性成分，需要针对不同的提取原料开发针对性的提取工艺条件。Bulduk 等[94] 通过响应面法优化了 UAE 对西洋梨（*Pyrus Com-*

munis L.)叶片中熊果苷的提取,优化后的提取温度为 43.37 ℃,甲醇浓度为 56.81%,提取时间为 29.66 min,优化后的熊果苷提取率为 3.10%。Cui 等[92] 通过响应面法优化了 UAE 对梨('Huangli No.1')幼果中熊果苷的提取,优化后的乙醇浓度为 70%,固液比 1∶12,提取时间为 20 min,超声功率为 576 W,优化后的熊果苷提取率 5309.27±15.87 μg/g。马进等[95]、薛婧等[96]、李育博等[97] 分别通过响应面法优化了 UAE 对莱阳茌梨渣、黄果梨和野生南果梨去皮果肉的总黄酮提取,优化后的超声温度为 40~48 ℃、料液比为 1∶20~1∶47(g/mL),超声时间为 40~70 min,乙醇浓度为 56%~70%,超声功率为 400~640 W,优化后的总黄酮提取率为 0.266%~14.38%。王洁等[98] 和李文宇等[99] 分别通过响应面法优化了黄果梨带皮果肉和新疆香梨带皮果肉的多糖 UAEC 参数,优化后的超声温度为 48~55 ℃、料液比为 1∶4~1∶20(g/mL),超声时间为 23~53 min,乙醇浓度为 95%,超声功率为 450 W,优化后的梨多糖提取率为 3.45%~12.87%。

3.4 加压液体提取

加压液体提取(Pressurized liquid extraction,PLE)是一种高效的提取技术,利用高温高压条件下的溶剂快速提取固体或半固体样品中的目标化合物。相比传统提取方法,PLE 具有速度快、溶剂用量少、重复性好等优势[100]。加压液体提取已被用于从安梨(*Pyrus ussuriensis* 'Maxim')中提取三萜类化合物,最佳提取条件为提取压力 10 MPa,提取温度 85 ℃,提取时间 4 min,循环 3 次,乙醇浓度 55%,在此条件下,三萜类化合物的提取率为 0.862%。与热回流提取和微波辅助提取相比,PLE 显示出更高的三萜类化合物产量,并大大减少了溶剂使用量[101]。这表明,PLE 是一种很有前景的从梨中高效提取三萜类化合物的技术,与传统方法相比,它在产量方面可能具有优势,并可能减少时间和溶剂消耗。PLE 中较高的温度和压力可以提高三萜类化合物的溶解度和传质效率,从而提高提取效率。祝上宾[102] 通过响应面法优化了亚临界水对梨叶中 β-熊果苷的提取条件,优化后的最佳提取时间、温度、料液比分别为 52.23 min、201.18 ℃、1∶42.8,该条件下的熊果苷提取量为 15.12 mg/g,高于有机溶剂法的 12.3 mg/g,且具有更高的抗氧化活性。

PLE 的提取温度影响生物活性成分的溶解度和扩散速率。较高的温度可以提高提取速率,但也可能导致热不稳定化合物的降解[103]。因此,需要根据目标化合物确定最佳温度。Qu 等[101] 的研究表明,PLE 提取安梨三萜类化合物的过程中,温度是继循环次数之后的第二大影响因素。温度对提取效率与生物活性成分稳定性具有重要作用,最佳温度的确定需在溶解度提升与热降解风险之间建立动态平衡。

PLE 提取时长显著影响生物活性成分的回收率。为在保证处理效率的前提下实现得率最大化,需对提取时间进行系统优化。确定最佳提取时长对提升工艺效能与防止目标化合物降解具有关键意义。该过程随时间的推移将达到热力学平衡,超出临界时间点后,延长时间不仅无法显著提升得率,还可能引发活性物质的降解。

3.5 微波辅助提取法

微波辅助提取法(Microwave-assisted extraction,MAE)是利用微波能量直接加热溶剂和植物基质,加速生物活性成分的释放。MAE 由于其快速加热和细胞破坏作用,通常具有更快的提取速率和更高的提取产量[104]。Peng 等[105] 使用 MAE 进行安梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim)带皮果肉中酚类化合物的提取,并通过响应面法进行优化,优化后最佳的 MAE 工艺参数为:提取时间 124 s,微波功率 408 W,乙醇浓度 56%(v/v),溶剂/固体比 45∶1,提取率为 9.801 mg GAE/g 干物质,提取得到的酚类化合物主要是儿茶素、绿原酸、槲皮素糖苷和异鼠李素糖苷。彭飞等[106] 使用响应面法优化了 MAE 对安梨中总黄酮的提取,优化后的最佳工艺条件为提取时间 127 s、微波功率 424 W、乙醇浓度 58%、液料比 30∶1(mL/g),在此条件下总黄酮的得率为 6.51%。上述两项研究均证明 MAE 可高效提取安梨中的酚类和黄酮,但因目标成分不同,最佳参数存在微小差异。

3.6 酶辅助提取法

酶辅助提取法(Enzyme-assisted extraction,EAE)是利用酶(如纤维素酶和果胶酶)分解植物细胞壁,从而改善细胞内生物活性成分的释放。EAE 可能是一种更具选择性和更环保的方法,有可能提高特定化合物的提取产量[107]。然而,EAE 的一些缺陷,如较为昂贵的成本、无法完全破坏细胞基质、回收性较差、酶活损失等,限制了其大规模的工艺应用,因此该方法一般与其他提取技术联合使用[108]。段腊梅等[109] 通过响应面法优化了微波辅助酶法提取苹果梨渣多糖工艺,优化后的最佳提取条件为料液比 1∶14(g/mL)、纤维素酶添加量 2.5%、微波功率 560 W、微波时间 2 min,此条件下多糖提取率为 34.99 mg/mL。

3.7 不同提取方式的综合比较

目前已有一些研究同时比较了多种提取方法对于梨生物活性成分的提取效果。曲建辉[110] 横向比较了热回流法提取、MAE 和 PLE 对安梨去皮果肉中总三萜的提取效果,确定了 PLE 为最佳提取方法,工艺条件为萃取温度 85 ℃、萃取时间 4 min、循环次数 3 次、乙醇浓度 55%,总三萜提取率可达 8.62%。马佩佩[111] 横向比较了 UAE、MAE 以及 PLE 三种方法对库尔勒香梨带皮果肉中多糖的提取效果,并分别通过响应面法进行了优化。在最优条件下,UAE 的多糖得率为 5.03%,MAE 的多糖得率为 5.01%,PLE 的多糖得率为 5.37%。综合评价表明,单一提取技术难以兼顾所有指标,应根据原料物理特性与目标成分稳定性灵活选择超声、加压液体或天然低共熔溶剂等绿色提取策略。

表 2　提取方法综合对比分析

Table 2　Comparative analysis of extraction methods

提取方法	核心优势	主要局限性	适用场景	适宜提取的活性物质	推荐原料来源	工业应用潜力
溶剂提取法	操作简单、成本低	耗时、溶剂消耗大、效率低	实验室初步探索、对热不敏感成分	酚类、黄酮类、三萜类、梨多糖	果皮、梨渣、叶片、果肉	高，但存在环保问题
NADES	绿色环保，可设计性强	粘度较高，后续纯化步骤可能较复杂，成本较高	对特定极性的成分，追求“天然”“环保”标签的产品	黄酮类、多酚	叶片、果渣、果肉	中，是当前研究热点，但标准化不足
UAE	效率高，时间短，温度可控	规模放大时能量分布不均	对细胞壁结构完整的原料（如皮、渣）	花青素、熊果苷、多酚、黄酮、梨多糖	果皮、梨幼果、果肉、果核、梨渣	中高，已有中试设备
PLE	速度快、溶剂用量少、自动化程度高、重复性好	设备初期投资大；高温高压条件可能降解热敏性成分；对操作人员要求高	需要快速、高效获取目标成分的场景，尤其适合中试及小型工业化生产	三萜类、熊果苷	叶片、梨果	高，易于进行标准化流程控制，符合现代化生产对效率和环保的要求，是潜力巨大的升级技术
MAE	加热迅速、热效率高、选择性好，可大幅缩短提取时间	存在局部过热风险，可能导致成分变性；对极性溶剂依赖性强；放大时均匀加热是挑战	对热稳定性好的成分进行快速提取，实验室及中小规模应用	酚类、黄酮类	果肉	中，在特定成分的提取上优势明显，但大规模应用中的控温和均匀性问题限制了其潜力
EAE	条件温和、特异性强、绿色安全，能有效破坏植物细胞壁	酶成本高昂、反应时间较长、酶活易受环境（pH、温度）影响、后分离可能较复杂	用于处理细胞壁结构致密的原料，或与其他方法（如UAE, MAE）联用以提高效率	酚类、黄酮类、三萜类、梨多糖	果皮、梨渣、叶片、果肉	低，高昂的成本是主要限制因素；目前更适用于高附加值产品（如医药中间体）的生产，或作为其他提取法的预处理辅助手段

新型绿色提取技术在实验室规模表现优异，但要实现从实验室到工业化的跨越，仍需在能耗、成本与提取效率之间寻找平衡，并建立基于原料特性的多技术协同提取体系。表 2 总结了上述 6 种提取方法的优缺点、适用场景和工业应用潜力。如表 2 所示，不同的提取技术其技术成熟度与工业化应用潜力存在显著差异。传统溶剂提取法技术成熟度最高，设备通用性强，但其对有机溶剂的大量消耗制约了其可持续发展。UAE 和 PLE 目前处于中试向产业化过渡阶段，在效率与规模化之间取得了较好平衡，是当前最具应用前景的技术。而 NADES 和 EAE 等新型绿色技术则代表了绿色、精准的未来方向，但主要处于实验室研发阶段，其工业化应用仍受制于成本与标准化等瓶颈。

4　结论与展望

综上所述，梨含有丰富的生物活性成分，包括酚类化合物、三萜类化合物和类胡萝卜素等，这些化合物赋予了梨多种健康益处。不同品种和不同部位的梨，其生物活性成分的种类和含量存在显著差异。作为加工废弃物的皮渣和农业废弃物的枝叶中往往含有丰富的梨生物活性成分，是提取的优质原料。常用的梨生物活性成分提取方法，如溶剂提取法、超声辅助提取法、微波辅助提取法和酶辅助提取法，均可用于梨的生物活性成分提取。其中，溶剂提取法和超声辅助萃取法是较为常用的技术。提取效率受多种因素的影响，包括溶剂类型、固液比、提取温度和提取时间等。优化这些参数对于高效回收目标生物活性成分至关重要。

梨及其副产物中丰富的生物活性成分具有显著的生理功效，因而在大健康产业中展现出巨大的转化潜力。基于抗氧化与抗炎活性，梨叶及幼果提取物（富含熊果苷、绿原酸）是开发天然美白化妆品及抗衰老护肤品的理想原料；而梨渣中富含的膳食纤维与多糖，则可作为益生元应用于调节肠道健康的代餐食品中。

虽然梨生物活性成分已展现出了巨大的应用潜力和价值，但要实现从实验室研究到产业化应用的跨越，仍面临以下关键挑战：

首先，工业化放大的传递规律尚不明确。梨生物活性成分的绿色提取虽已形成包括天然低共熔溶剂、超声辅助提取、微波辅助提取等多条技术路线，但总体仍以实验室规模为主，对在中试或更大尺度上研究不足。已有研究表明葡萄藤中试提取物中的酚类成分谱与实验室提取结果存在差异[112]，然而在梨中还未有类似的报道。

其次，缺乏基于应用导向的系统性提取决策机制。提取方法的选择本质上是一个复杂的多目标决策过程，需在得率、成本、环保性及产品活性之间寻找平衡。例如，若以针对果皮等坚韧组织的提取效率最大化为首要目标，UAE 通常是优选方案；然而，若目标是开发高附加值的“清洁标签”功能食品或化妆品，环境效益和“天然”属性更为关键，此时 NADES 尽管成本较高且后处理复杂，但其“绿色天然”特质能带来更大的市场优势。此外，对于热敏性成分，PLE 需精确控制温度窗口，而 MAE 则需规避局部过热风险。面对如此复杂的变量权衡，传统的优化手段显示出局限性：已有研究仍以响应面法为主，仅考虑了 3~4 个关键因素对提取结果的影响，难以处理高维数据，而与人工智能等新兴技术相结合的研究明显不足。

最后，梨生物活性成分之间的相互作用关系与协同模式尚不完全明晰。目前多关注单一成分的活性评价，对梨生物活性成分之间（如绿原酸与熊果苷）的相互作用关系、协同模式及其在生理环境下的代谢机制（如肠道菌群-免疫轴调节作用）尚不完全明晰。

基于上述挑战，未来的研究可探究实验室规模、中试规模和生产规模等多尺度下的梨生物活性成分提取物的传递效率、过程控制、成分变化、成本效益等规律，为新型提取技术的工业化应用奠定基础；利用机器学习在处理高维数据方面的优势，同时优化得率、能耗、时间、环保性等多个目标函数，建立基于原料的品种、部位、水分、纤维含量等初始属性的提取策略选择模型，自动推荐提取技术路径及参数，实现精准提取；深入研究梨生物活性成分间的协同效应，而非单一成分的活性评价，如探究梨多酚与多糖复配后的增效机理，为开发功能更强、更精准的健康产品提供理论支撑。

© 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] SAMKARIA S, SHARMA R, SONI P, et al. A review on phytochemical potential and enormous nutraceutical benefits of Sand pear (*Pyrus pyrifolia* L.)[J]. Annals of Phytomedicine an International Journal, 2024, 13(1): 388−396.

[2] LI Xia, WANG Tingting, ZHOU Bin, et al. Chemical composition and antioxidant and anti-inflammatory potential of peels and flesh from 10 different pear varieties (*Pyrus* spp.)[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 531−538.

[3] WU Jingyi, FAN Jinbu, LI Qionghou, et al. Variation of organic acids in mature fruits of 193 pear (*Pyrus* spp.) cultivars[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 109: 104483.

[4] HONG S Y, LANSKY E, KANG S S, et al. A review of pears (*Pyrus* spp.), ancient functional food for modern times[J]. BMC Complementary Medicine and Therapies, 2021, 21(1): 219.

[5] KOLNIAK-OSTEK J. Chemical composition and antioxidant capacity of different anatomical parts of pear (*Pyrus communis* L.)[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 491−497.

[6] ÖZTÜRK A, DEMIRSOY L, DEMIRSOY H, et al. Phenolic compounds and chemical characteristics of pears (*Pyrus communis* L.)[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(3): 536−546.

[7] IBRAHIM R M, HAMMOUDI Z M. Phytochemistry and pharmacological activity of pear (*Pyrus communis* Linn): A review[J]. Plant Archives, 2020, 20(2): 7820−7828.

[8] KOLNIAK-OSTEK J, KŁOPOTOWSKA D, RUTKOWSKI K P, et al. Bioactive compounds and health-promoting properties of pear (*Pyrus communis* L.) fruits[J]. Molecules, 2020, 25(19): 4444.

[9] WANG Z N, BARROW C J, DUNSHEA F R, et al. A comparative investigation on phenolic composition, characterization and antioxidant potentials of five different Australian grown pear varieties[J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 151.

[10] SINGH S, VERMA R, SHARMA H. Exploring the therapeutic potential and bioactive compounds in *Pyrus* species[J]. Pharmacological Research - Modern Chinese Medicine, 2024, 10: 100342.

[11] 任柯昱. 雪花梨果渣多酚提取工艺优化及对肉鸡生长性能的影响[J]. 饲料工业, 2025, 46(7): 64−72. [REN Keyu. Optimization of polyphenols extraction from snow pear residue and its effect on growth performance of broilers[J]. Feed Industry, 2025, 46(7): 64−72.]

[12] KOTSOU K, PAPAGIANNOULA A, CHATZIMITAKOS T, et al. Optimization of extraction parameters to enhance the antioxidant properties of *Pyrus spinosa* fruit extract[J]. Beverages, 2024, 10(3): 56.

[13] ZBIGNIEW S, BEATA Ż, KAMIL J, et al. Antimicrobial and antiradical activity of extracts obtained from leaves of three species of the genus *Pyrus*[J]. Microbial Drug Resistance, 2014, 20(4): 337−343.

[14] DWIVEDI P, PRAKASH P. Evaluation of antioxidant activity of *Pyrus pyrifolia* fruit peel extracts using different extraction methods[J]. Chemical Science Transactions, 2014, 3(4): 1511−1515.

[15] UY N P, KU J, LEE D H, et al. Comparative assessment of phytochemical content and antioxidant activities in different parts of *Pyrus ussuriensis* cultivars[J]. Horticulturae, 2025, 11(2): 184.

[16] FERREIRA J, TKACZ K, TURKIEWICZ I P, et al. Exploring the bioactive properties and therapeutic benefits of pear pomace[J]. Antioxidants, 2024, 13(7): 784.

[17] PRAKASH O, CHAUHAN A, KUDACHIKAR V. Traditional uses, nutrition, phytochemistry and various pharmacological properties of Indian wild pear (Review)[J]. International Journal of Functional Nutrition, 2021, 2(4): 1−13.

[18] JI Yannan, ZHANG Nan, WANG Jinxiao, et al. Health benefits and bioactive compounds of pear and its products: A comprehensive review[J]. Food Science and Human Wellness, 2026, 15(4): 9250544.

[19] AL-KHAYRI J M, SAHANA G R, NAGELLA P, et al. Flavonoids as potential anti-inflammatory molecules: A review[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2901.

[20] DLUDLA P V, JOUBERT E, MULLER C J F, et al. Hyperglycemia-induced oxidative stress and heart disease-cardioprotective effects of rooibos flavonoids and phenylpyruvic acid-2-O-*β*-D-glucoside[J]. Nutrition & Metabolism, 2017, 14: 45.

[21] ABDELHAFEZ O H, SHADY N H, HISHAM M, et al. A comprehensive overview on the role of phytocompounds as gastroprotective agents[J]. Natural Product Communications, 2025, 20(4): 1934578X251329870.

[22] 张丽阳, 孙军, 陈迪. 山柰酚抑制脑缺血/再灌注大鼠的脑损伤、炎症、氧化应激和凋亡[J]. 中国组织化学与细胞化学杂志, 2022, 31(4): 381−386. [ZHANG Liyang, SUN Jun, CHEN Di. Kaempferol inhibits brain injury, inflammation, oxidation stress and apoptosis in the rats with cerebral ischemia/reperfusion[J]. Chinese Journal of Histochemistry and Cytochemistry, 2022, 31(4): 381−386.]

[23] LIN L Z, HARNLY J M. Phenolic compounds and chromatographic profiles of pear skins (*Pyrus* spp.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(19): 9094−9101.

[24] NGUYEN V, TAINE E G, MENG D H, et al. Chlorogenic acid: A systematic review on the biological functions, mechanistic actions, and therapeutic potentials[J]. Nutrients, 2024, 16(7): 924.

[25] BASIT A, MUEED A, LI M, et al. Phytochemicals of nutraceutical importance from different pear cultivars in the early stage of development[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102047.

[26] LI Xia, ZHANG Junying, GAO Wenyuan, et al. Chemical composition and anti-inflammatory and antioxidant activities of eight pear cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(35): 8738−8744.

[27] JIANG G H, NAM S H, YIM S H, et al. Changes in total phenolic and flavonoid content and antioxidative activities during

production of juice concentrate from Asian pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(1): 47−51.
[28] PEYROT C, DIDAK B, GUILLOTIN L, et al. Enzymatic synthesis of a series of thioglycosides: Analogs of arbutin with efficient antipigmentation properties[J]. European Journal of Organic Chemistry, 2021, 2021(27): 3812−3818.
[29] SAFARI H, ZABIHI E, POURAMIR M, et al. Decrease of intracellular ROS by arbutin is associated with apoptosis induction and downregulation of IL-1β and TNF-α in LNCaP; prostate cancer[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(9): e13360.
[30] POLOULIAKH N, LUDWIG V, MEGURO A, et al. Alpha-arbutin promotes wound healing by lowering ROS and upregulating insulin/IGF-1 pathway in human dermal fibroblast[J]. Frontiers in Physiology, 2020, 11: 586843.
[31] WU Peijie, QIAO Ling, YU Han, et al. Arbutin alleviates the liver injury of α-naphthylisothiocyanate-induced cholestasis through farnesoid X receptor activation[J]. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 2021, 9: 758632.
[32] WOJDYŁO A, NOWICKA P, TURKIEWICZ I P, et al. Comparison of bioactive compounds and health promoting properties of fruits and leaves of apple, pear and quince[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 20253.
[33] PROSHKINA E, PLYUSNIN S, BABAK T, et al. Terpenoids as potential geroprotectors[J]. Antioxidants, 2020, 9(6): 529.
[34] YADAV V R, PRASAD S, SUNG B, et al. Targeting inflammatory pathways by triterpenoids for prevention and treatment of cancer[J]. Toxins, 2010, 2(10): 2428−2466.
[35] NGUYEN H N, ULLEVIG S L, SHORT J D, et al. Ursolic acid and related analogues: Triterpenoids with broad health benefits [J]. Antioxidants, 2021, 10(8): 1161.
[36] ZHOU K, TAOERDAHONG H, BAI J, et al. Structural characterization and immunostimulatory activity of polysaccharides from *Pyrus sinkiangensis* Yu[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 444−451.
[37] TAOERDAHONG H, ZHOU K, YANG F, et al. Structure, immunostimulatory activity, and the effect of ameliorating airway inflammation of polysaccharides from *Pyrus sinkiangensis* Yu[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 195: 246−254.
[38] 任国瑞, 刘瑾, 赵紫玉, 等. 库尔勒香梨中性多糖结构及其抗氧化抗过敏性哮喘活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(5): 123−133. [REN Guorui, LIU Jin, ZHAO Ziyu, et al. Structure analysis of neutral polysaccharide from *Pyrus sinkiangensis* Yu. and its antioxidant and anti-allergic asthma activities[J]. China Food Additives, 2024, 35(5): 123−133.]
[39] 乌英, 李亚童, 聂昌宏, 等. 库尔勒香梨粗多糖的免疫调节作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1405−1411. [WU Ying, LI Yatong, NIE Changhong, et al. Immunoregulation effect of crude polysaccharides from Korla fragrant pear[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1405−1411.]
[40] 阿吉然姆·阿布拉, 古丽米拉·卡德尔, 任国瑞, 等. 库尔勒香梨多糖基于抑制焦亡关键蛋白 NLRP3、GSDMD 的表达发挥抗炎作用[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(4): 142−149. [ABULA Ajiranmu, KADEER Gulimila, REN Guorui, et al. *Pyrus sinkiangensis* Yu polysaccharide plays an anti-inflammatory role by inhibiting the expression of pyroptosis key proteins NLRP3 and GSDMD[J]. China Food Additives, 2023, 34(4): 142−149.]
[41] 李佳益. 黄梨渣多糖提取、分离纯化、结构鉴定及体内免疫活性研究[D]. 太原: 山西大学, 2019. [LI Jiayi. Extraction, purification, structural characterization and immune activity *in vivo* of yellow pear residue polysaccharides[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.]
[42] JI Yuehong, MAO Kemin, GAO Jie, et al. Pear pomace soluble dietary fiber ameliorates the negative effects of high-fat diet in mice by regulating the gut microbiota and associated metabolites[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1025511.
[43] 陈璇. 黄酮类化合物(槲皮素、木犀草素)与类胡萝卜素(番茄红素、叶黄素)协同抗氧化作用及分子机制[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [CHEN Xuan. Synergistic antioxidant effects and molecular mechanisms of flavonoids (quercetin, luteolin) and carotenoids (lycopene, lutein)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]
[44] SHARMA K, PASRICHA V, SATPATHY G, et al. Evaluation of phytochemical and antioxidant activity of raw *Pyrus communis* (L), an underexploited fruit[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2015, 3(5): 46−50.
[45] ZHANG Li, DU Wei, TU Junfan, et al. Light-mediated activation of *PpPSY* enhances β-carotene accumulation in pear fruit peel[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1542830.
[46] 刘振艳, 关宏, 朱金峰, 等. 不同品种鲜食梨的氨基酸组成特征及其营养评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3541−3548. [LIU Zhenyan, GUAN Hong, ZHU Jinfeng, et al. Amino acid composition characteristics and nutritional evaluation of different table *Pyrus* spp. varieties[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(11): 3541−3548.]
[47] ZHENG Pufan, ZHANG Mei, FANG Xin, et al. Analysis of the fruit quality of pear (*Pyrus* spp.) using widely targeted metabolomics[J]. Foods, 2022, 11(10): 1440.
[48] YIM S H, NAM S H. Physiochemical, nutritional and functional characterization of 10 different pear cultivars (*Pyrus* spp.)[J]. Journal of Applied Botany and Food Quality, 2016, 89: 73−81.
[49] 孙莉琼, 郝雯菁, 唐晓清, 等. UPLC-MS/MS 研究 36 个梨品种成熟果实中的特征性多酚和三萜酸类物质[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 206−214. [SUN Liqiong, HAO Wenjing, TANG Xiaoqing, et al. Analysis of characteristic polyphenols and triterpenic acids in ripe pears of 36 cultivars by UPLC-MS/MS[J]. Food Science, 2020, 41(22): 206−214.]
[50] 霍宏亮, 任伟春, 许伟华, 等. 云和雪梨主要营养素分析[J]. 中国南方果树, 2024, 53(6): 187−193. [HUO Hongliang, REN Weichun, XU Weihua, et al. Analysis of the primary nutrients in Yunhexueli(*Pyrus pyrifolia*)[J]. South China Fruits, 2024, 53(6): 187−193.]
[51] SROKA Z, ZGÓRKA G, ŻBIKOWSKA B, et al. High antimicrobial efficacy, antioxidant activity, and a novel approach to phytochemical analysis of bioactive polyphenols in extracts from leaves of *Pyrus communis* and *Pyrus pyrifolia* collected during one vegetative season[J]. Microbial Drug Resistance, 2019, 25(4): 582−593.
[52] SUN Liqiong, TAO Shutian, ZHANG Shaoling. Characterization and quantification of polyphenols and triterpenoids in thinned young fruits of ten pear varieties by UPLC-Q TRAP-MS/MS[J]. Molecules, 2019, 24(1): 159.
[53] LEE S H, CHO J Y, JEONG H Y, et al. Comparison of bioactive compound contents and *in vitro* and *ex vivo* antioxidative activities between peel and flesh of pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(1): 207−216.
[54] DONG Xingguang, ZHENG Yingchun, CAO Yufen, et al. Evaluation of phenolic composition and content of pear varieties in leaves from China[J]. Erwerbs-Obstbau, 2018, 60(4): 331−340.
[55] SASAKI C, ICHITANI M, KUNIMOTO K K, et al. Extraction of arbutin and its comparative content in branches, leaves, stems, and fruits of Japanese pear *Pyrus pyrifolia* cv. Kousui[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2014, 78(5): 874−877.
[56] WANG Xiaoqian, LIU Chunyan, WANG Qiang, et al. A comparative study on antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial

activities and chemical composition of *Pyrus ussuriensis* cultivars from northeastern China[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2021, 62(3): 477−491.
[57] 侯玉茹, 李文生, 王宝刚, 等. 不同品种梨果实贮藏期间抗氧化活性及品质分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 335−338. [HOU Yuru, LI Wensheng, WANG Baogang, et al. Study on antioxidant activity and quality of different pears during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(2): 335−338.]
[58] 仵菲, 蒲云峰, 雷晓钰, 等. 库尔勒香梨果实发育过程中酚类物质及抗氧化活性研究[J]. 果树学报, 2022, 39(4): 574−583. [WU Fei, PU Yunfeng, LEI Xiaoyu, et al. Phenolic compounds and antioxidant activity of Kuerlexiangli pear fruit during the growth period[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(4): 574−583.]
[59] CHO J Y, LEE S H, KIM E H, et al. Change in chemical constituents and free radical-scavenging activity during pear (*Pyrus pyrifolia*) cultivar fruit development[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2015, 79(2): 260−270.
[60] ARZANI K, KHOSHGHALB H, MALAKOUTI M J, et al. Polyphenoloxidase activity, polyphenol and ascorbic acid concentrations and internal browning in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.) fruit during storage in relation to time of harvest[J]. European Journal of Horticultural Science, 2009, 74(2): 61−65.
[61] AKAGIĆ A, ORAS A, GAŠI F, et al. A comparative study of ten pear (*Pyrus communis* L.) cultivars in relation to the content of sugars, organic acids, and polyphenol compounds[J]. Foods, 2022, 11(19): 3031.
[62] KIRCA L, KIRCA S, AYGÜN A. Organic acid, phenolic compound and antioxidant contents of fresh and dried fruits of pear (*Pyrus communis* L.) cultivars[J]. Erwerbs-Obstbau, 2023, 65(4): 677−691.
[63] COŞKUN T F, BAKKALBAŞI E. Physical, chemical and bioactive properties of four different pears (*Pyrus communis* L.) varieties grown in Turkey[J]. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2022, 27(2): 303−314.
[64] CARBONARO M, MATTERA M. Polyphenoloxidase activity and polyphenol levels in organically and conventionally grown peach (*Prunus persica* L., cv. Regina bianca) and pear (*Pyrus communis* L., cv. Williams)[J]. Food Chemistry, 2001, 72(4): 419−424.
[65] CARBONARO M, MATTERA M, NICOLI S, et al. Modulation of antioxidant compounds in organic vs conventional fruit (peach, *Prunus persica* L., and pear, *Pyrus communis* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(19): 5458−5462.
[66] UGURTAN Y K, ERCISLI S, CAM M, et al. Fruit weight, total phenolics, acidity and sugar content of edible wild pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) fruits[J]. Erwerbs-Obstbau, 2015, 57(4): 179−184.
[67] KAYHAN R, BULDUK I, KORCAN S E, et al. Flavonoids, phenolics and antioxidant evaluation of different parts of three wild *Pyrus* species from Turkey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2024, 94(4): 903−911.
[68] RIBEIRO J, SILVA V, IGREJAS G, et al. Phenolic compounds from *Pyrus communis* residues: Mechanisms of antibacterial action and therapeutic applications[J]. Antibiotics, 2025, 14(3): 280.
[69] FERREIRA J, TKACZ K, TURKIEWICZ I P, et al. Influence of particle size and extraction methods on phenolic content and biological activities of pear pomace[J]. Foods, 2023, 12(23): 4325.
[70] BENTOULLA T, KOTSOU K, KALOMPATSIOS D, et al. Investigation and enhancement of the antioxidant compound recovery of *Pyrus communis* peel[J]. Waste, 2024, 2(3): 1−15.
[71] PATRICIA V M, SAPUTRI F N. Phytochemical screening and determination of total phenolic and total flavonoid contents of pear peel extracts[J]. Farmasains: Jurnal Farmasi dan Ilmu Kesehatan, 2020, 4(2): 33−37.
[72] PATRICIA V M, SYAPUTRI F N, TUGON T D A, et al. Antioxidant properties of *Pyrus communis* and *Pyrus pyrifolia* peel extracts[J]. Borneo Journal of Pharmacy, 2020, 3(2): 64−70.
[73] 李启彭, 朱啟浪, 张福胜. 昭通梨中黄酮的提取工艺及含量测定[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(11): 1896−1897. [LI Qipeng, ZHU Qilang, ZHANG Fusheng. Extraction technology and content determination of flavonoids in Zhaotong pear[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2016, 57(11): 1896−1897.]
[74] 乔钰婕, 艾尔肯·图尔荪, 唐壮壮, 等. 响应面法优化喀什冬梨果皮三萜提取工艺[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(2): 146−151. [QIAO Yujie, TURSUN Erkin, TANG Zhuangzhuang, et al. Optimization of extraction process of triterpenoids from *Pyrus communis* Kashi peel by response surface methodology[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(2): 146−151.]
[75] SASAKI C, YOSHIDA Y, ASADA C, et al. Total utilization of Japanese pear tree prunings: Extraction of arbutin and production of bioethanol[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(2): 385−392.
[76] 周凯, 王磊, 海力茜·陶尔大洪. 库尔勒香梨多糖提取工艺优化研究[J]. 新疆医科大学学报, 2019, 42(4): 533−536. [ZHOU Kai, WANG Lei, HAILIQIAN Taoerdahong, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides in *Pyrus sinkiangensis* Yu[J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2019, 42(4): 533−536.]
[77] ALSAIDI R, THIEMANN T. Use of natural deep eutectic solvents (NADES) in food science and food processing[J]. Sustainability, 2025, 17(5): 2293.
[78] CUNHA S C, FERNANDES J O. Extraction techniques with deep eutectic solvents[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2018, 105: 225−239.
[79] MIŠAN A, NAĐPAL J, STUPAR A, et al. The perspectives of natural deep eutectic solvents in agri-food sector[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(15): 2564−2592.
[80] RODRÍGUEZ-JUAN E, RODRÍGUEZ-ROMERO C, FERNÁNDEZ-BOLAÑOS J, et al. Phenolic compounds from virgin olive oil obtained by natural deep eutectic solvent (NADES): Effect of the extraction and recovery conditions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(2): 552−561.
[81] LIU Wei, ZHANG Kangdi, QIN Yaqiong, et al. A simple and green ultrasonic-assisted liquid–liquid microextraction technique based on deep eutectic solvents for the HPLC analysis of sesamol in sesame oils[J]. Analytical Methods, 2017, 9(28): 4184−4189.
[82] DAI Y T, VERPOORTE R, CHOI Y H. Natural deep eutectic solvents providing enhanced stability of natural colorants from safflower (*Carthamus tinctorius*)[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 116−121.
[83] de LOS ÁNGELES F M, BOITEUX J, ESPINO M, et al. Natural deep eutectic solvents-mediated extractions: The way forward for sustainable analytical developments[J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1038: 1−10.
[84] BAKIRTZI C, TRIANTAFYLLIDOU K, MAKRIS D P. Novel lactic acid-based natural deep eutectic solvents: Efficiency in the ultrasound-assisted extraction of antioxidant polyphenols from common native Greek medicinal plants[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2016, 3(3): 120−127.
[85] LEE J W, PARK H Y, PARK J. Enhanced extraction efficiency of flavonoids from *Pyrus ussuriensis* leaves with deep eutectic solvents[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2798.
[86] de LOS ÁNGELES F M, ESPINO M, GOMEZ F J V, et al. Novel approaches mediated by tailor-made green solvents for the extraction of phenolic compounds from agro-food industrial by-

products[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 671−678.
[87] ZHOU M, FAKAYODE O A, LI H X. Green extraction of polyphenols via deep eutectic solvents and assisted technologies from agri-food by-products[J]. Molecules, 2023, 28(19): 6852.
[88] PANIĆ M, GUNJEVIĆ V, RADOŠEVIĆ K, et al. COSMOtherm as an effective tool for selection of deep eutectic solvents based ready-to-use extracts from graševina grape pomace[J]. Molecules, 2021, 26(16): 4722.
[89] WANG W J, JUNG J, TOMASINO E, et al. Optimization of solvent and ultrasound-assisted extraction for different anthocyanin rich fruit and their effects on anthocyanin compositions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 229−238.
[90] 李轲, 李鹏玉, 侯鹏飞, 等. 超声波技术在植物天然产物提取中的应用进展[J]. 粮油科学与工程, 2025, 39(2): 24−30. [LI Ke, LI Pengyu, HOU Pengfei, et al. Progress in the application of ultrasonic technology in the extraction of plant natural products[J]. Grain Oil Science and Engineering, 2025, 39(2): 24−30.]
[91] BELWAL T, HUANG H, LI L, et al. Optimization model for ultrasonic-assisted and scale-up extraction of anthocyanins from *Pyrus communis* 'Starkrimson' fruit peel[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124993.
[92] CUI Tingting, LI Junhao, LI Na, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of arbutin from pear fruitlets using response surface methodology[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(4): 3130−3139.
[93] 仵菲, 买里得尔·叶拉里, 白红进. 响应面法优化库尔勒香梨各部位总多酚提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 塔里木大学学报, 2022, 34(2): 16−23. [WU Fei, MAILIDEER·Yelali, BAI Hongjin. Optimization of extraction process and antioxidant activity of total polyphenols from various parts of Korla pear by response surface methodology[J]. Journal of Tarim University, 2022, 34(2): 16−23.]
[94] BULDUK İ, SAĞLAM I A. Optimization of ultrasound-assisted extraction of arbutin from *Pyrus communis* L. Leaves by response surface methodology[J]. Hacettepe Journal of Biology and Chemistry, 2015, 43(3): 167−178.
[95] 马进, 孙芬芳, 周霞, 等. 莱阳茌梨渣总黄酮的提取及其抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(22): 118−123. [MA Jin, SUN Fenfang, ZHOU Xia, et al. Study on the extraction and antioxidation of total flavonoids from Laiyang pear residue[J]. Food Research and Development, 2020, 41(22): 118−123.]
[96] 薛婧, 胡金丽, 宋洋波, 等. 黄果梨总黄酮提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(1): 92−96. [XUE Jing, HU Jinli, SONG Yangbo, et al. Study on extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Pyrus bretschneideri* Rehd[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(1): 92−96.]
[97] 李育博, 王勇, 郝晓亮, 等. 响应面法优化野生南果梨果肉中黄酮的提取工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(6): 87−89. [LI Yubo, WANG Yong, HAO Xiaoliang, et al. Study on the extraction technology of flavonoids from wild Nanguo pear pulp by response surface method[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(6): 87−89.]
[98] 王洁, 张小雪, 王珍珍, 等. 南果梨多糖提取工艺优化[J]. 山东化工, 2021, 50(7): 60−62,64. [WANG Jie, ZHANG Xiaoxue, WANG Zhenzhen, et al. Optimization of extraction of polysaccharides from Nanguo pear[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(7): 60−62,64.]
[99] 李文宇, 王茜, 沈静, 等. 超声波辅助提取新疆香梨多糖的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 136−142. [LI Wenyu, WANG Qian, SHEN Jing, et al. Study on ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from fragrant pears in Xinjiang[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 136−142.]
[100] BARP L, VIŠNJEVEC A M, MORET S. Pressurized liquid extraction: A powerful tool to implement extraction and purification of food contaminants[J]. Foods, 2023, 12(10): 2017.
[101] QU J H, DU B, PENG F, et al. Optimisation of triterpenoids extraction from Anli pears (*Pyrus ussuriensis* Maxim) by pressurised liquid extraction[J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2016, 8(1): 105−110.
[102] 祝上宾. 梨叶中 *β*-熊果苷的提取纯化及其磷脂复合物特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. [ZHU Shangbin. Extraction and purification of *β*-arbutin from pear leaves and study on the characteristics of its phospholipid complex[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]
[103] PITIPANAPONG J, CHITPRASERT S, GOTO M, et al. New approach for extraction of charantin from *Momordica charantia* with pressurized liquid extraction[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 52(3): 416−422.
[104] WANG Ningning, ZHU Hongguang, WANG Menghan, et al. Recent advancements in microwave-assisted extraction of flavonoids: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(3): 2083−2100.
[105] PENG Fei, CHENG Caihong, XIE Ying, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from "Anli" pear (*Pyrus ussuriensis* Maxim)[J]. Food Science and Technology Research, 2015, 21(3): 463−471.
[106] 彭飞, 杨越冬, 程才红, 等. 安梨总黄酮微波辅助提取工艺的优化及其成分初步分析[J]. 食品科技, 2015, 40(11): 196−203. [PENG Fei, YANG Yuedong, CHENG Caihong, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of total flavonoids from "An" pear (*Pyrus ussuriensis* Maxim) and components analysis[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(11): 196−203.]
[107] PURI M, SHARMA D, BARROW C J. Enzyme-assisted extraction of bioactives from plants[J]. Trends in Biotechnology, 2012, 30(1): 37−44.
[108] DAS S, NADAR S S, RATHOD V K. Integrated strategies for enzyme assisted extraction of bioactive molecules: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 899−917.
[109] 段腊梅, 吕长鑫. 响应面法优化苹果梨渣多糖提取工艺及脱蛋白脱色方法研究[C]//中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 西安: 中国食品科学技术学会, 2020: 229−230. [DUAN Lamei, LÜ Changxin. Optimization of polysaccharide extraction from apple pear pomace by response surface methodology and study on deproteinization and decolorization methods[C]//Abstract Collection of the 17th Annual Conference of the Chinese Institute of Food Science and Technology. Xi'an: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 229−230.]
[110] 曲建辉. 安梨中三萜类化合物的分离提取与成分分析[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2014. [QU Jianhui. Isolation, extraction, and composition analysis of triterpenoids in *Pyrus ussuriensis* Maxim[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2014.]
[111] 马佩佩. 库尔勒香梨多糖的提取、分离纯化及抗氧化性质研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2010. [MA Peipei. Study on extraction, purification and antioxidant properties of polysaccharide from Korla fragrant pear[D]. Shihezi: Shihezi University, 2010.]
[112] ESCOBAR-AVELLO D, MARDONES C, SAÉZ V, et al. Pilot-plant scale extraction of phenolic compounds from grape canes: Comprehensive characterization by LC-ESI-LTQ-Orbitrap-MS[J]. Food Research International, 2021, 143: 110265.