果 树 学 报 2025,42(12):2978-2993
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250441

苹果多酚类物质提取与应用研究进展

郭文荣,郭术垚,邵 静,包振龙,张冰冰,李增明,李粤渤*

(吉林省农业科学院·中国农业科技东北创新中心,长春 130000)

摘 要:苹果作为世界性重要果树,果实富含膳食纤维、维生素及矿物质,是健康饮食的重要组成部分。除基础营养成分外,苹果还蕴含丰富的植物次生代谢产物——苹果多酚。该类化合物主要分布于果皮与果肉中,因其显著的抗氧化活性,成为苹果发挥诸多健康功效的关键物质基础,相关研究与应用价值日益凸显。本文系统综述了苹果多酚的研究进展,重点聚焦于不同品种间多酚含量差异、主要组分的结构特征、主流提取方法,以及在医药保健、种质创新与育种、食品加工保鲜、化妆品开发及畜牧业等领域的产业化应用现状。最后对未来研究方向与发展前景进行了展望,旨在为苹果资源的高值化利用及关联产业创新提供理论支撑。

关键词:苹果多酚;提取方法;应用;前景展望

中图分类号:S661.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-9980(2025)12-2978-16

Research progress on the extraction and application of apple polyphenols

GUO Wenrong, GUO Shuyao, SHAO Jing, BAO Zhenlong, ZHANG Bingbing, LI Zengming, LI Yuebo*

(Jilin Academy of Agricultural Sciences/Northeast China Agricultural Science and Technology Innovation Center, Changchun 130000, Jilin, China)

Abstract: Apple (*Malus domestica* Borkh.) represents a globally significant fruit crop whose health benefits extend far beyond basic nutrition, largely attributable to its rich and diverse polyphenolic profile (APs). These secondary metabolites are mainly concentrated in the peel but are also present in the flesh, exhibiting potent biological activities, particularly remarkable antioxidant capacity. Considerable heterogeneity exists in the polyphenolic composition among apple cultivars, primarily determined by genetic factors. Heritage cultivars, such as Antonovka and Bramley's Seedling, consistently exhibit higher total polyphenol content (TPC)-often two to five times higher than widely cultivated commercial dessert apples such as Golden Delicious, Gala, and Fuji. Polyphenols are disproportionately concentrated in the peel, accounting for up to 70%−90% of total fruit phenolics. Red-skinned cultivars, such as Red Delicious and Idared, contain particularly high peel concentrations of flavonols, mainly quercetin glycosides, whereas cultivars like Granny Smith, Reinette, and Cripps Pink (Pink Lady®) often show higher flavan-3-ol levels in the flesh.The major classes of apple polyphenols include flavan-3-ols, flavonols, dihydrochalcones, phenolic acids, and anthocyanins. Flavan-3-ols, comprising monomers such as catechin and epicatechin as well as oligomers and polymers (procyanidins), are the most abundant class in many apples, especially Dabinett and Kingston Black. Flavonols are dominated by quercetin glycosides, predominantly located in the peel, with red-skinned cultivars generally exhibiting higher levels than yellow- or green-skinned types. Dihydrochalcones, unique to the *Malus* genus, are represented mainly by phloridzin (phloretin-2'-*O*-glucoside), often constituting a significant portion of the phenolic profile, particularly in the flesh and seeds. Chlorogenic acid (5-*O*-caffeoylquinic acid) is the principal phenolic acid, present in both peel and flesh, with high concentrations in cultivars such as Honeycrisp

收稿日期:2025-08-19 **接受日期**:2025-10-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1600503);吉林省现代农业产业技术体系建设示范项目(JLAR-2025-120208)

作者简介:郭文荣,女,研究实习员,硕士,研究方向苹果栽培与育种。E-mail:1463201671@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:30769748@qq.com

and Braeburn. Anthocyanins are present only in red-fleshed or red-skinned varieties, including the Redlove series and Pink Pearl, and are primarily composed of cyanidin-3-*O*-galactoside. Efficient, selective, and sustainable recovery of APs while preserving their structural integrity and bioactivity is crucial for both research and industrial applications. Conventional solvent extraction methods, using methanol, ethanol, acetone, or their aqueous mixtures, remain foundational, with optimization typically targeting solvent type and concentration, temperature, extraction time, solid-to-liquid ratio, and pH. Although maceration and Soxhlet extraction are widely employed, they are time consuming and solvent-intensive. Advanced non-conventional techniques, such as ultrasound-assisted extraction, microwave-assisted extraction, pressurized liquid or accelerated solvent extraction, supercritical fluid extraction, and enzyme-assisted extraction have been developed to improve the extraction efficiency, reduce solvent consumption, and minimize thermal degradation. Emerging green solvents, including natural deep eutectic solvents and ionic liquids, offer biodegradable, low-toxicity alternatives. Multi-parameter optimization strategies, such as response surface methodology, are widely applied to maximize yield, enhance recovery of target compounds, reduce co-extraction of undesired substances, and ensure scalability and stability of the extracts.The potent and multifaceted bioactivities of APs have promoted their integration into diverse sectors. In the nutraceutical and functional food industry, APs are incorporated into dietary supplements, fortified beverages, and health foods for their antioxidant, anti-inflammatory, cardiovascular-protective, anti-diabetic, anti-proliferative, and neuroprotective effects. In pharmaceuticals, they are investigated as lead compounds? or adjunct therapies for chronic diseases, leveraging multi-target mechanisms and favorable safety profiles, with purified isolates such as phloridzin receiving particular attention. Polyphenol profiles also serve as biochemical markers in horticulture and breeding for germplasm characterization and marker-assisted selection. Their antimicrobial properties enhance food safety and shelf-life, while in cosmetics, APs provide skin protection against photoaging and oxidative stress, inhibit melanogenesis, promote collagen synthesis, and support wound healing. Additionally, APs are explored as natural feed additives in animal husbandry, improving gut health, immunity, growth performance, oxidative stability of products, and potentially reducing methane emissions in ruminants. Other emerging applications include biomaterials, edible coatings, plant biostimulants, and green synthesis of nanoparticles. Despite these advances, there are still some challenges , including limited bioavailability, incomplete mechanistic understanding, potential synergistic effects, and the need for advanced delivery systems such as encapsulation and nanoparticles. Sustainable and integrated processing, clinical validation, regulatory harmonization, and the development of novel nutrient-dense cultivars are also crucial. Circular economy approaches, including valorization of pomace and peels, would further enhance economic and environmental benefits. Apple polyphenols represent a treasure trove of bioactive compounds with profound significance for human health and diverse industrial applications. Understanding the intricate interplay between genetic diversity, structural complexity, optimized recovery technologies, and targeted applications is fundamental. Interdisciplinary research bridging basic science, applied technology, and industrial needs is essential to overcome current challenges, unlock new opportunities, and fully harness the health-promoting and economic potential of this ubiquitous and valuable fruit.

Key words: Apple polyphenols; Extraction methods; Application; Prospective outlook

苹果（*Malus domestica* Borkh.）是属于蔷薇科（Rosaceae）苹果属（*Malus*）的落叶乔木，又称柰、林檎，其栽培起源可追溯至中亚地区，后沿丝绸之路传入中国，在我国已有2000多年的栽培历史[1]。苹果喜冷凉干燥、光照充足的气候条件，在中国温带及暖温带地区广泛种植，山东、陕西、甘肃、河南、河北等地

是主要产区。其中，山东苹果的品质和规模尤为突出[2]。根据最新统计，2023年我国苹果种植面积为192.85万hm^2，约占世界苹果总面积的41.76%；产量达4 960.17万t，约占世界苹果总产量的50.96%[3]。

苹果多酚是苹果在次生代谢过程中产生的一类重要功能性成分，是苹果所含多酚类物质的总称，主要包括类黄酮和酚酸[4]。得益于其显著的抗氧化、抗辐射、抗衰老及保湿特性，苹果多酚已被广泛应用于化妆品领域，常见于染发剂及护肤品等配方中[5]。同时，苹果多酚还能有效提升人体内源性自由基清除酶（如SOD、CAT、GSH-PX）的活力[6-7]，从而发挥延缓衰老的功效，因此在医疗保健领域具有重要应用价值[8]。在食品工业中，苹果多酚凭借其优异的消臭、保鲜、保香能力及防止维生素损失等作用，已成为一种高效的天然保鲜剂和品质改良剂[9]。因此，本文对苹果多酚的组成、提取方法及其开发利用现状进行了全面综述，以期为推动苹果产业的精深加工和高质量发展提供理论参考。

1 苹果代表性酚类化合物及结构

1.1 不同品种的苹果多酚含量

苹果富含多种益于健康的生物活性物质，其中多酚类物质占据主导地位。正是这些酚类物质赋予了苹果显著的抗氧化、抗炎、抗菌、抗肿瘤、降血脂、降血压以及调节血糖等多重生理功能特性。苹果中的多酚组分主要包括酚酸、类黄酮化合物（如黄烷醇、黄酮醇、二氢查耳酮、花色苷等）。酚酸主要包括咖啡酸、*p*-香豆酸、绿原酸及其衍生物（如咖啡酰奎宁酸）。类黄酮涵盖多种结构类型，如黄烷醇（儿茶素、表儿茶素）；原花青素（原花青素B1、B2、C1）；黄酮醇及其糖苷（槲皮素-3-半乳糖苷、槲皮素-3-葡萄糖苷、槲皮素-3-*O*-阿拉伯吡喃糖苷、槲皮素-3-*O*-鼠李糖苷、芦丁）；二氢查耳酮（根皮苷、根皮素-2'-*O*-木糖葡萄糖苷）；花色苷；其他（根皮素）。不同苹果品种间多酚的种类与含量存在差异（表1），这直接影响了其作为天然功能活性成分在食品工业中的应用

表1 苹果多酚的种类及含量

Table 1 Types and contents of apple polyphenols

种类 Type	多酚名称 Polyphenols name	苹果品种 Apple varieties	*w*（多酚） Polyphenols content/（mg·100 g^{-1}）	参考文献 References
酚酸 Phenolic acid	咖啡酸 Caffeic acid	未知 Unknown	1.50~296.00	[10]
	P-香豆酸 *P*-coumaric acid	未知 Unknown	0.40~26.00	
		伊达 Idared	0.56~1.98	[11]
		冠军 Šampion	0.74~2.60	
	咖啡酰奎宁酸 Caffeoylquinic acid	澳洲青苹 Granny Smith	24.68~24.90	[12]
		金冠 Golden Delicious	367.53~369.29	
		富士 Fuji	105.08~105.52	
		嘎拉 Gala	452.12~453.69	
	绿原酸 Chlorogenic acid	伊达 Idared	1.77	[13]
		伊兰 Elan	0.52	
		爱思特 Elstar	0.41	
		菲丝塔 Fiesta	1.10	
		富士 Fuji	16.15~23.89	[13-14]
		嘎拉 Gala	1.04	[13]
		葛洛斯特 Gloster	1.47	
		金冠 Golden Delicious	23.20~30.9	[13-14]
		澳洲青苹 Granny Smith	6.88~7.73	
		乔纳金 Jonagold	12.10~20.02	[14]
		乔纳麦 Jonamac	0.25	[13]
		麦金托什 McIntosh	1.52	
		门罗 Monroe	1.23	
		派洛特 Pilot	1.71	
		皮诺娃 Pinova	1.19	
		普力马 Prima	1.79	

表 1 （续） Table 1 (Continued)

种类 Type	多酚名称 Polyphenols name	苹果品种 Apple varieties	*w*（多酚） Polyphenols content/（mg·100 g^{-1}）	参考文献 References
		普丽西拉 Priscilla	0.65	
		罗马红 Red Rome	2.31	
		鲁宾 Rubin	0.53	
		红星 Starking Delicious	0.71	
		冠军 Šampion	2.74~9.28	[11]
类黄酮 Flavonoid	儿茶素 Catechin	伊达 Idared	0.27~2.32	[11，13]
		伊兰 Elan	0.38	[13]
		泰斯塔 Telstar	1.16	
		菲丝塔 Fiesta	0.60	
		富士 Fuji	0.88	
		嘎拉 Gala	0.50	
		葛洛斯特 Gloster	0.73	
		金冠 Golden Delicious	0.99	[14]
		澳洲青苹 Granny Smith	1.47	[13-14]
		乔纳麦 Jonamac	0.51	[13]
		麦金托什 McIntosh	0.66	
		门罗 Monroe	0.73	
		派洛特 Pilot	1.28	
		皮诺娃 Pinova	0.99	
		普力马 Prima	1.45	
		普丽西拉 Priscilla	0.76	
		罗马红 Red Rome	1.18	
		鲁宾 Rubin	0.46	
		红星 Starking Delicious	1.05	
		冠军 Šampion	0.17~1.20	[11]
	表儿茶素 Epicatechin	伊达 Idared	0.27~2.32	[11-13]
		伊兰 Elan	0.38	[13]
		泰斯塔 Telstar	1.16	
		菲丝塔 Fiesta	0.60	
		富士 Fuji	3.15~3.27	[13-14]
		嘎拉 Gala	0.50	[13]
		葛洛斯特 Gloster	0.57	[13]
		金冠 Golden Delicious	21.19~23.22	[13-14]
		澳洲青苹 Granny Smith	40.40~42.40	
		乔纳麦 Jonamac	0.38	[13]
		麦金托什 McIntosh	0.53	
		门罗 Monroe	0.71	
		派洛特 Pilot	1.08	
		皮诺娃 Pinova	0.86	
		普力马 Prima	1.28	
		普丽西拉 Priscilla	0.63	
		罗马红 Red Rome	1.11	
		鲁宾 Rubin	0.42	
		红星 Starking Delicious	1.06	
	原花青素 B2 Proanthocyanidin B2	伊达 Idared	3.88~6.85	[11]
		冠军 Šampion	5.32~10.58	
	原花青素 B1 Proanthocyanidin B1	伊达 Idared	0.64~2.11	[11]
		冠军 Šampion	1.21~2.17	

表1（续） Table 1 (Continued)

种类 Type	多酚名称 Polyphenols name	苹果品种 Apple varieties	w（多酚） Polyphenols content/（mg·100 g^{-1}）	参考文献 References
	原花青素C1 Proanthocyanidin C1	伊达 Idared	1.26~4.41	[11]
		冠军 Šampion	2.47~6.50	
	根皮素 phloretin	伊兰 Elan	0.13	[13]
		皇家嘎拉 Elstar	0.23	
		菲丝达 Fiesta	0.19	
		富士 Fuji	4.12~4.95	[13-14]
		嘎拉 Gala	0.13	[13]
		葛洛斯特 Gloster	0.28	
		金冠 Golden Delicious	4.13~4.97	[13-14]
		澳洲青苹 Granny Smith	0.22	[13]
		伊达 Idared	2.05~7.45	[11]
		乔纳金 Jonagold	2.19~3.08	[14]
		皮诺娃 Pinova	0.24	[13]
		红星 Starking Delicious	0.23~3.82	[11]
		冠军 Šampion	0.23~3.82	
	槲皮素-3-半乳糖苷 Quercetin - 3-galactoside	伊达 Idared	1.51~4.31	[11]
		冠军 Šampion	1.27~3.34	
	槲皮素-3-葡萄糖苷 Quercetin - 3-glucoside	伊达 Idared	0.16~0.39	[11]
		冠军 Šampion	0.28~0.56	
	黄烷-3-醇 Flavane-3-alcohol	未知 Unknown	462.20~2548	[10]
	双氢查尔酮 Dihydrochalcone	未知 Unknown	4.90~43.40	
	花色苷 Anthocyanin	未知 Unknown	1.00~55.10	
	芦丁 Rutin	澳洲青苹 Granny Smith	131.32~134.61	[12]
		富士 Fuji	150.67~152.64	
		嘎拉 Gala	38.81~39.58	
	根皮苷 Phlorizin	澳洲青苹 Granny Smith	92.95~94.11	[12]
		金冠 Golden Delicious	263.38~267.13	
		富士 Fuji	211.35~211.47	
		嘎拉 Gala	198.93~199.95	
	槲皮素-3-*O*-阿拉伯吡喃糖苷 Quercetin-3-*O*-arabinopyranoside	澳洲青苹 Granny Smith	111.15~114.00	[12]
		金冠 Golden Delicious	35.17~36.52	
		富士 Fuji	141.98~144.26	
		嘎拉 Gala	123.29~125.73	
	槲皮素-3-*O*-鼠李糖苷 Quercetin-3-*O*-rhamnoside	澳洲青苹 Granny Smith	124.32~126.56	[12]
		金冠 Golden Delicious	96.33~97.80	
		富士 Fuji	175.99~178.37	
		嘎拉 Gala	153.79~155.34	
	根皮素-2'-*O*-木糖葡萄糖苷 Aucubin-2'-*O*-xylotriglucose	澳洲青苹 Granny Smith	40.37~41.51	[12]
		金冠 Golden Delicious	36.19~36.53	
		嘎拉 Gala	60.93~61.76	

潜力。

1.2 苹果多酚类物质主要组分的分子结构

苹果中多酚类物质是一大类具有复杂分子结构的天然化合物，其核心特征是包含一个或多个酚环（苯环上直接连接羟基）[10]，具体结构如图1所示。苹果多酚复杂的分子结构共同决定了抗氧化、抗菌、风味（涩味、苦味、甜味）等多种生理功能和感官特性。

2 苹果多酚的提取方法

酚类化合物是苹果中一类重要的代谢产物，因

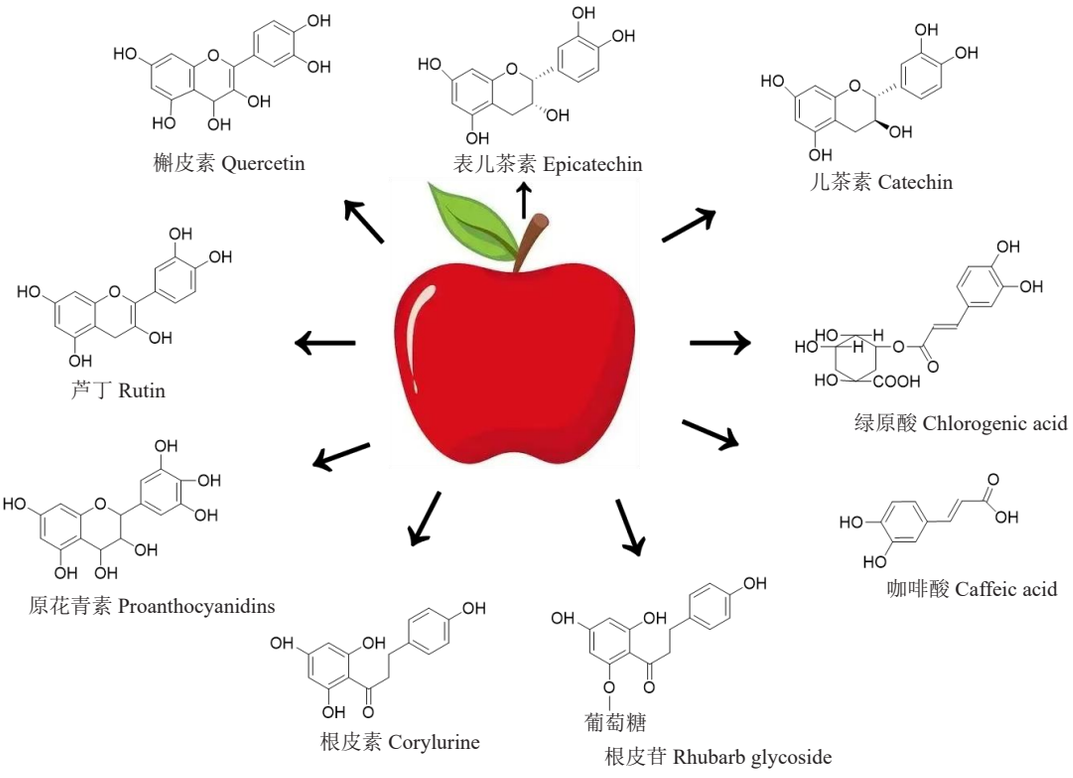

图 1　苹果中多酚组分的分子结构

Fig. 1　Molecular structure of polyphenols in apples

其在摄入后可能对健康存在促进效应而备受关注。在苹果代谢物的分析流程中，提取常被视为关键环节，理想的提取应在避免使用化学添加剂的前提下，实现目标代谢物的全面回收。鉴于不同苹果产品（如果汁、果泥、果干、鲜果）的特性差异，需采用相应的提取方法，常规提取方法主要分为液-液提取和液-固提取。此外，基于液-固提取原理衍生出多种非常规辅助技术，如超声波辅助提取、微波辅助提取、超临界 CO_2 流体萃取法、生物酶解提取法和高压辅助萃取法。

2.1　溶剂提取法

苹果多酚的酚羟基基团可通过氢键与蛋白质等大分子形成稳定结构。甲醇、乙醇、丙酮等亲水性有机溶剂能有效破坏此类氢键，可提高苹果多酚的提取率。例如，Park 等[15]在红宝石苹果皮多酚提取研究中发现，在温度 20 ℃、乙醇浓度 50%、提取 25~30 min 的条件下，可获得最高的提取率、总酚含量（total phenolic content，TPC）、总黄酮含量（total flavonoid content，TFC）以及 DPPH 自由基清除活性。在各类提取技术中，有机溶剂提取法因操作简便、成本较低、易于扩大生产且对目标成分具有良好选择性等优势，长期以来是实验室及中小规模生产苹果多酚中最常用和基础的核心技术。然而，该方法存在溶剂残留、环境影响以及共提杂质等问题，促使研究者不断探索环境友好型（如亚临界水、低共熔溶剂）、高效型（如高压辅助、酶辅助）或集成化提取与纯化等新工艺。

2.2　超声波辅助提取法

超声波辅助提取（ultrasound-assisted extraction，UAE）是通过将声波作用于苹果产品基质，利用空化效应等物理作用破坏植物细胞壁，从而促进酚类物质向提取介质中释放。Pollini 等[16]关于红富士苹果渣多酚提取的研究表明，采用乙醇、水体积比 50∶50 作为溶剂进行超声波辅助提取时，获得的总酚含量（w，后同）最高（1 062.92±59.80 μg·g^{-1}）；而加速溶剂提取（accelerated solvent extraction，ASE）在 40 ℃、乙醇、水体积比 30∶70 及 50%冲洗体积时，对花青素苷的回收效率最高。主要的酚类化合物浓度范围为 385.84~650.56 μg·g^{-1}。Withouck 等[17]研究了不同预处理方式（新鲜、烘箱干燥、冷冻干燥）对多酚提取率的影响。结果表明采用 60%乙酸甲酯溶剂对新鲜树皮样品进行超声波辅助提取时效果最优，提取物中

酚类化合物含量及抗氧化活性均最高。高效液相色谱（HPLC）分析进一步揭示花青素是树皮提取物中的主要多酚类物质。综上所述，超声波辅助提取具有效率高、耗时短、操作温度低、溶剂消耗少以及利于保护热敏性成分等显著优势，非常适用于实验室研究和中小规模生产。然而，该技术在工业化放大过程中面临设备成本高、能量分布均匀性控制难度大以及还需防范空化效应产生的自由基可能对多酚造成的氧化损伤等挑战。因此，在大规模工业生产中需综合权衡成本效益、设备可靠性及最终产品质量要求。总体而言，超声波辅助提取常被视为传统溶剂提取法的有效强化与升级，而非最终的精制步骤。

2.3 微波辅助提取法

相较于传统提取方法，微波辅助提取法（microwave-assisted extraction，MAE）因加热迅速、溶剂消耗低而被视为一种更具环保性的技术。该方法通常能获得更高的目标产物得率与纯度，并具有自动化程度高、废物产生少、重现性良好等优势。其核心机制在于微波能量通过分子与电磁场的相互作用直接传递至物料，使苹果组织快速受热崩解，从而促进溶剂对酚类物质的溶出。Casazza等[18]在惰性气氛保护下（旨在抑制多酚降解），采用微波辅助提取技术从苹果皮中提取多酚。研究表明，在150 ℃、以含水量32%（φ）的乙醇水溶液为提取溶剂、提取90 min的条件下，其总多酚含量为50.4±3.4 mg·g^{-1}（干基）、总黄酮含量为13.9±0.19 mg·g^{-1}，并表现出较高的抗氧化能力。此外，该过程产生的固体残渣污染物含量较低且热值较高，这不仅简化了废物处理流程，也提升了其在能源回收系统中的潜在利用价值。微波辅助提取特别适用于实验室快速筛选及对时效性与溶剂成本敏感的中小规模生产。然而，为优化提取效果并避免多酚氧化（如可添加抗坏血酸等保护剂），需针对苹果原料的具体特性（如品种、组织部位、干燥程度等）进行工艺参数的系统优化。

2.4 超临界CO_2流体萃取法

超临界流体萃取法（supercritical fluid extraction，SFE）以无毒、安全的二氧化碳（CO_2，临界温度约31 ℃）作为主要溶剂提取苹果中的酚类化合物。鉴于纯CO_2对非极性化合物的选择性偏好，在提取较高极性的酚类物质时存在局限性，因此，常添加有机共溶剂（如丙酮、乙醇、甲醇）以增强溶解能力。Ferrentino等[19]采用SFE技术萃取苹果籽油，在最佳工艺条件（压力24 MPa、温度40 ℃、CO_2流速1 L·h^{-1}、萃取140 min）下，油脂的得率及抗氧化活性与模型预测值的偏差均在5%以内。该油脂富含亚油酸（65.13±4.96 g·100 g^{-1}），其含量及氧化稳定性（21.4±1.2 h）均显著高于索氏提取法所得油脂（亚油酸含量48.03±3.85 g·100 g^{-1}，氧化稳定性12.1±1.1 h）。超临界CO_2萃取法具有绿色环保、安全性高、操作温度低（利于热敏性活性成分保护）以及产物纯度高等显著优势。然而，该技术也面临设备投资成本高昂、能耗相对较高以及对原料预处理要求严格等挑战。

2.5 生物酶解提取法

生物酶解提取法（enzyme-assisted extraction，EAE）利用特定酶（如果胶酶、纤维素酶等）选择性降解苹果细胞壁结构，从而释放多酚类物质。宋兆伟等[20]采用复合酶水解法提取富士苹果幼果（青果）中的多酚，确定其最优工艺条件为液料体积比11∶1、酸性蛋白酶添加量0.065%、果胶酶添加量0.12%、纤维素酶添加量0.08%、酶解温度65 ℃、酶解3 h。在此条件下，苹果多酚提取率为11.03±0.09 mg·g^{-1}。高义霞等[21]以花牛苹果幼果为原料，采用超声波辅助果胶酶法提取多酚，优化后的工艺参数为超声波功率100 W、71%乙醇、料液体积比1∶6、提取温度62 ℃，其多酚提取率为11.586 mg·g^{-1}。生物酶解提取法在苹果加工领域（特别是果汁生产、果胶及多酚提取）展现出显著优势，主要体现在提取效率高、产物质量佳（如澄清度高、风味保留好、营养成分损失少）以及环境友好等方面。然而，该方法的主要制约因素为酶制剂的成本较高以及工艺控制的复杂性。

2.6 高压辅助萃取法

高压辅助萃取法（high-pressure assisted extraction，HPAE）是一种利用高压（通常为100~1000 MPa）破坏生物材料细胞结构、加速溶剂渗透并促进目标成分溶出的物理提取技术。Da Silva等[22]采用该技术从苹果渣中提取多酚，确定其最优工艺参数为溶剂梯度程序（0~25 min：100%水；25~100 min：50%乙醇；100~160 min：100%乙醇）、静态萃取20 min以及提取温度80 ℃。研究证实，该溶剂梯度策略及工艺条件对于实现糠醛、绿原酸、黄酮类及PLD等目标分析物从基质向提取溶剂的高效传质至关重要，从而显著提高了提取产率并实现了定量提取。值得注意的是，此类溶剂梯度设计策略不仅适用于苹果渣

中的化合物提取，亦可扩展至其他天然产物及酚类物质的提取。高压辅助萃取法兼具提取效率高、操作温度低以及环境友好等特征，使其成为苹果高值化加工（尤其是热敏性成分提取）的理想技术。然而，高昂的设备成本仍是限制其广泛应用的主要因素。未来，随着高压设备成本的降低及连续化处理技术的进步，该技术有望在苹果功能性食品及高端果汁加工领域中占据更重要的地位。在实际应用中，可探索高压预处理与酶解工艺的协同效应（高压预处理可提升后续酶解效率），以进一步提升细胞破壁效率与目标成分溶出速率。

综上所述，不同多酚提取技术在效率、成本、环保性及产物质量上各有特点。多酚提取技术的发展将不再局限于单一技术的优化，而是趋向于多种技术的协同集成（如超声-微波协同、酶辅助-超临界联用），并深度融合人工智能以实现过程的精准控制。同时，其应用前景也将超越传统食品与保健品领域，向医药制剂、功能性化妆品及高附加值生物材料等精深方向拓展，最终推动整个产业向高效、绿色、高值化的目标迈进。

3　苹果多酚的应用

3.1　医疗方向

3.1.1　抗氧化、抗衰老　人体衰老及多种疾病的发生与活性氧自由基（ROS）的过量累积密切相关。苹果多酚作为一种强效的天然抗氧化剂，其核心价值在于有效清除活性氧，这不仅有助于延缓衰老进程，还表现出显著的抑制癌细胞增殖的活性[23]。在苹果多酚的抗氧化体系中，黄酮类化合物发挥着决定性作用，其卓越的抗氧化性[24]与抗炎性[25]已被大量研究证实。胃肠消化过程对苹果多酚组成及活性的影响至关重要。朱秀灵等[26]的体外模拟消化模型研究表明，在胃消化阶段，总酚含量随消化时间延长而升高；在肠消化阶段则呈现先升高后降低的趋势，但最终含量低于消化前水平。胃消化液主要含有绿原酸、表儿茶素、咖啡酸、儿茶素（含量依次递减）；而肠消化液中仅检测出绿原酸，表明胃肠消化导致主要酚类物质发生降解或转化。值得注意的是，消化过程显著提升了苹果多酚提取物对DPPH和ABTS自由基的清除能力、铁离子还原能力（FRAP）及氧自由基吸收能力（ORAC）。统计结果显示，总酚含量与DPPH、ABTS、ORAC法测定的抗氧化活性均高度相关，但与FRAP法的结果相关性较弱。该研究揭示了胃肠消化虽引起酚类物质含量变化，却能在一定程度上增强整体抗氧化能力，这对准确评估其生物可及性与实际功效具有指导意义。红肉苹果中多酚因其突出的生物活性受到广泛关注。齐娜等[27]研究发现，红肉苹果多酚的总还原力在浓度（ρ，后同）为0.80 mg·mL^{-1}时与维生素C（Vc）相当；在浓度为0.60 mg·mL^{-1}时对ABTS^{+}自由基的清除率高达94.11%；对Cu^{2+}/H_2O_2诱导的BSA蛋白氧化损伤具有显著保护作用。其抗癌潜力通过MTT试验证实，对HepG2、Hela、A549三种癌细胞的增殖均具明显抑制作用（IC_{50}值分别为0.687、0.405、0.635 mg·mL^{-1}），其中对Hela细胞的抑制率最高（65.19%）。机制研究（台盼蓝染色、AO/EB及DAPI荧光染色）进一步表明，多酚通过剂量依赖性方式诱导Hela细胞凋亡，并伴随线粒体膜电位降低和胞内ROS水平升高。该研究证实红肉苹果多酚是兼具强效抗氧化与诱导癌细胞凋亡活性的天然物质，具备开发为功能性食品基料的巨大潜力。对新疆红肉苹果多酚的组成与活性研究进一步证实了其价值。刘旻昊等[28]通过HPLC分析鉴定其纯化物含有10种单酚，其中绿原酸含量最高（123.15 μg·mL^{-1}），其次为槲皮苷（25.28 μg·mL^{-1}）和原花青素B2（21.96 μg·mL^{-1}）。体外抗氧化试验显示，该多酚提取物对DPPH自由基（0.1 mg·mL^{-1}时清除率93.99%）、羟基自由基（0.8 mg·mL^{-1}时清除率99%）及超氧阴离子（0.4 mg·mL^{-1}时清除率98%）均表现出卓越的清除能力，并对脂质过氧化具有显著的保护作用。

3.1.2　慢性疾病　苹果富含多种对人体健康至关重要的微量营养素（如铁、锌、维生素C、维生素E）及具有生理活性的酚类物质（如原花青素、苯三酚、5′-咖啡酰奎宁酸等）。这种独特的成分配比有助于缓解微量元素缺乏症，其富含的生物活性酚类物质在预防和辅助管理多种慢性疾病方面展现出潜力。苹果生物活性成分的疾病防治研究持续深入，Oyenihi等[29]系统综述了6种常见苹果品种的多酚含量差异，并重点评述了苹果中关键生物活性化合物在糖尿病、癌症及心血管疾病中的最新药理作用机制与进展。Zhao等[30]聚焦5个苹果品种（短枝富士、粉红佳人、金世纪、瑞阳、秦阳）的幼果，评估其多酚成分的抗氧化活性及对猪胰α-淀粉酶的抑制效应。研究证实，幼果多酚具有强效的抗氧化能力，并能以竞争

性抑制模式显著抑制α-淀粉酶活性。李锐等[31]研究了多源植物提取物复配增效作用，研究发现当以1.25 mg·mL^{-1}番石榴多糖、1.5 mg·mL^{-1}苹果多酚与1.5 mg·mL^{-1}山楂黄酮复配时，对α-淀粉酶和α-葡萄糖苷酶的体外协同抑制率分别高达88.5%和90.2%；而抑制胰脂肪酶的最佳复配组合为3 mg·mL^{-1}山楂黄酮、1 mg·mL^{-1}苹果多酚、9 mg·mL^{-1}番石榴多糖，抑制率达70.01%。这为开发复合型天然碳水化合物/脂肪代谢调节剂提供了试验依据。刘芳等[32]研究了苹果多酚提取物对溃疡性结肠炎（UC）的干预效果，结果表明，该提取物能显著缓解葡聚糖硫酸钠诱导的UC小鼠结肠缩短，降低脾脏指数，并有效调节结肠组织炎症因子平衡（下调促炎因子TNF-α，上调抑炎因子IL-10），同时增强紧密连接蛋白（Occludin，Claudin-1）的表达。这些发现为确立苹果多酚提取物作为缓解UC的潜在天然功能性配料提供了科学基础。此外。苹果加工副产物同样蕴含高价值活性物质，苹果渣中富含的表儿茶素被证实具有多靶点健康益处，在糖尿病、癌症、心血管疾病防治中发挥作用，以及具有潜在的神经保护和提升肌肉性能功能[33]，其作用机制不断被深入研究，如Álvarez-cilleros等[34]的体外研究揭示了表儿茶素在促进葡萄糖摄取和增强胰岛素信号通路方面的具体调控作用。

3.1.3 抗菌 苹果多酚的生物活性不仅局限于抗氧化作用，其显著的抗菌特性正日益受到关注。研究证实，从西班牙与比利时苹果渣中提取的多酚类物质表现出明确的抗菌活性[35]。为进一步阐明其作用机制，研究者运用网络药理学结合分子对接技术，深入探究苹果多酚对铜绿假单胞菌的抑制机制。结果表明，苹果多酚通过“多成分-多靶点-多通路”的协同作用模式，有效抑制铜绿假单胞菌的生长及其相关疾病的发生[36]。这为将苹果多酚开发为天然源抗菌剂或功能性食品防腐成分提供了重要的理论依据。目前，关于苹果多酚在抗菌应用的研究仍处于初级阶段，其具体作用机制尚不明确，且在实际生产中的应用效果仍有待系统评估与验证。

3.1.4 护肝 肝脏作为人体核心的代谢与解毒器官，承担着消化、生物合成、物质储存、毒素清除及免疫调节在内的多重关键生理功能[37]。然而，不良生活方式（如酗酒）、药物滥用、食品中化学添加剂的不当使用及潜在的食品安全风险，共同导致了肝损伤发病率持续攀升[38]。在此背景下，源于植物的天然活性成分因在肝损伤预防与干预方面的显著效果，已成为研究热点[39-41]。研究表明，红肉苹果中提取的类黄酮具有明确的肝脏保护活性，提示其在功能性保肝食品开发或作为医药领域辅助治疗/预防肝损伤的天然基料方面具有重要的应用潜力[42]。

3.1.5 口腔 口腔健康是全身健康的重要基石，维持平衡的口腔微生物群对预防牙齿疾病及多种全身性疾病至关重要。多酚类生物活性化合物凭借独特的酚类结构和抗氧化、抗菌及抗炎特性，在预防慢性/传染性疾病方面展现出显著潜力，并被视为维护口腔健康、防控口腔疾病的功能性成分[43]。苹果多酚在口腔健康维护中的作用机制与应用研究取得积极进展：郑虎哲等[44]构建了苹果多酚-壳寡糖微胶囊体系，主要致龋菌——变异链球菌的体外试验表明，该体系表现出显著的抑菌活性和强大的抗致龋能力，为开发新型防龋功能材料提供了技术路径。董波等[45]的研究进一步证实了苹果多酚对变形链球菌的抑制作用，表明其能有效抑制该菌生长，显著削弱其表面黏附能力（如对玻片的黏附）并降低产酸能力，这些作用共同干预了致龋的关键环节。大量研究已明确多酚类物质在龋齿防治[46]、牙周炎管理[47-49]、口臭控制[50-51]及口腔癌预防[52]等领域的积极作用。苹果多酚作为其中一类重要代表，在功能性口腔护理产品（如漱口水、牙膏、口含片）及防龋食品添加剂开发方面展现出广阔前景。

3.1.6 消毒 在供水系统中，饮用水消毒是保障水质安全的关键环节。目前，普遍采用的氯消毒技术存在明显局限性，在消毒过程中，其易与水体中的天然有机物反应，生成三卤甲烷（THMs）、卤乙酸（HAAs）等具有潜在健康风险的消毒副产物[53]。研究表明，苹果多酚等植物活性成分表现出一定的抑菌/杀菌活性。谢寒等[54]针对茶多酚、葡萄多酚及苹果多酚等3种常见植物多酚进行了消毒效果评价。结果显示，三者均具备显著的杀菌能力，表明其具有作为水厂替代性或辅助性消毒剂的应用潜力。

3.1.7 促排铅 当前，我国面临的环境污染及汽车尾气排放问题加剧了铅污染态势[55]。鉴于儿童特有的代谢特征，我国儿童群体中铅中毒的流行率处于较高水平[56]。为探究苹果多酚的促排铅功效，艾志录等[57]通过连续10 d腹腔注射乙酸铅溶液构建染铅小鼠模型，随后进行15 d的苹果多酚灌胃干预。研

究结果显示，与阳性对照组相比，苹果多酚干预染毒小鼠的血铅水平及股骨、肝脏组织中的铅蓄积量均显著降低，同时尿铅排泄量显著升高，证实苹果多酚在体内可有效促进铅的排出。

3.1.8　抗脱发　随着社会发展与生活节奏加快，生活压力增大导致脱发现象呈现年轻化趋势[58]。近年来研究发现，寡聚原花青素（oligomeric proanthocyanidins，OPCs）具有促进毛囊细胞增殖及诱导毛发生长的作用。Tenore等[59]首先评价了苹果多酚提取物的体外生物活性，探索其作为营养保健成分的潜力。进一步开展了一项临床试验，招募250名受试者连续2个月服用苹果多酚标准化提取物（AMS）。结果显示，受试者的头发生长量、毛发密度以及毛发角蛋白含量均显著提升。此项研究首次在体外证实了苹果原花青素B2对角蛋白生物合成的促进作用。此外，研究报道表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate，EGCG）可能通过选择性抑制5-α-还原酶活性，用于雄激素性脱发（androgenetic alopecia，AGA）的预防或治疗[60]。

3.1.9　肠道调节　肠道与其定植的微生物群落构成了一个紧密共生的微生态系统，在长期协同进化中对宿主健康发挥关键作用。植物多酚因具有潜在的调节肠道微生态稳态、减轻肠道炎症及上皮损伤、并诱导肠道菌群发生有益性转变的能力而备受关注，这为揭示宿主-微生物互作机制及多酚对肠道生态的调节作用提供了重要视角[61]。余雅婷等[62]利用体外模拟肠道发酵模型，评估了4种植物多酚对肠道菌群结构的调节效应。结果表明，茶多酚与苹果多酚对潜在有害菌的抑制作用更为显著，其中1.25 mg·mL^{-1}茶多酚或2.5 mg·mL^{-1}苹果多酚可显著抑制指示菌的生长。此外，在体外发酵体系中，茶多酚与苹果多酚表现出相对较高的抗氧化活性；经肠道微生物发酵代谢后，两者对DPPH自由基的清除能力分别提升了7.00%和7.69%。上述发现为基于植物多酚的益生元筛选及复合功能产品的开发提供了理论依据。Zhang等[63]在动物模型中进一步验证了苹果多酚的肠道保护作用。该研究预先让小鼠通过饮水摄入0.01%或0.05%的苹果多酚，持续8周，并于最后两周暴露于霉菌毒素棒曲霉素（Patulin）。通过组织病理学与生化指标评估了肠道组织状态，并同步分析了肠道微生物群组成、结肠内容物代谢组及肝脏代谢组的变化。结果显示，苹果多酚干预有效缓解了棒曲霉素诱导的小肠绒毛与隐窝结构损伤、黏液分泌减少、谷胱甘肽（GSH）水平下降、谷胱甘肽过氧化物酶（GPx）和超氧化物歧化酶（SOD）活性降低以及髓过氧化物酶（MPO）活性升高，证实了苹果多酚在预防食源性毒素所致肠道损伤方面具有显著潜力。

3.2　苹果育种方向

随着经济发展与生活水平的提升，消费者对水果的感官品质、营养价值及健康功效日益重视。除外观与口感特征外，其营养组分与功能性活性物质已成为关键的消费决策因素。苹果果实富含多酚、黄酮类化合物、绿原酸、*L*-抗坏血酸（维生素C）等生物活性成分，在抗氧化、预防心脑血管疾病及抗肿瘤等方面具有潜在功效[64]。这一需求推动了高活性成分苹果品种的选育研究。Mansoor等[65]在统一栽培条件下，对25个苹果品种的抗氧化潜力与多酚类物质含量进行了系统分析。结果表明，不同品种间总酚含量差异显著，含量范围为7.22~143.57 mg·100 g^{-1}；总黄酮含量为17.54~143.00 mg·100 g^{-1}。其中，儿茶素含量最高达2310±7.45 μg·g^{-1}。Malus Floribunda品种在特定酚类物质上表现突出：表儿茶素含量为1740±5.03 μg·g^{-1}，槲皮素含量为5110±493 μg·g^{-1}，橙皮素含量为2170±8.76 μg·g^{-1}。相关性分析显示，儿茶素（r=0.294 3）、表儿茶素（r=0.259 7）、槲皮素（r=0.399 5）、芹菜素（r=0.405 4）及橙皮素（r=0.332 9）等单体酚含量间存在显著关联性（P<0.05）。基于主成分分析（PCA）及其成分得分矩阵，清晰呈现了25个苹果品种的多酚组成分布特征，揭示了品种间抗氧化能力的显著差异。该研究为利用传统及现代育种策略选育高活性成分苹果新品种提供了重要参考。魏江彤等[66]通过综合评价8份苹果种质资源的外观品质和可溶性糖、苹果酸、酚类物质含量及抗氧化能力，确立了种质资源排序（L51＞C31＞LC54＞LC36＞P5＞L37＞L7＞ZN18），为苹果优异种质资源的筛选与利用奠定了基础。苹果的苦涩风味主要源于其体内的原花青素、儿茶素等物质。为降低果实的苦涩感，研究采用分子标记辅助选择策略，重点研究与原花青素合成（如*MdLAR1*、*MdANR*）、绿原酸合成（如*HCT*）以及根皮苷合成相关的关键基因。通过开发与低苦味、低涩感性状紧密连锁的DNA分子标记，实现在苗期对大量杂交后代进行高效筛选，从而大幅缩短育种周期，提高选育效率。

3.3 食品加工方向

苹果多酚作为一种天然生物活性物质，具有显著的抗氧化、消臭、保鲜、保香、护色及抑制维生素损失等多重功能特性，可有效延缓食品的品质劣变进程。因此，其在水产加工品、肉制品、烘焙食品（面包、糕点）、油脂及含油食品、清凉饮料等多种食品的加工制造中具有广阔的应用前景，能够显著提升产品品质并延长货架期。夏南等[67]系统评价了苹果多酚-蛋清复合物对鱼丸品质的影响。该研究将不同浓度苹果多酚（0%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.50%，以蛋清质量计）与蛋清复配后加入鱼丸，测定其凝胶强度、持水性、蒸煮损失率、感官评分，并分析贮藏期间菌落总数、pH、挥发性盐基氮（TVB-N）、硫代巴比妥酸反应物（TBARS）及质构特性的变化。结果表明，与未添加复合物的空白组相比，添加1.00%苹果多酚-蛋清复合物可显著提升鱼丸的凝胶强度与持水性（$P<0.05$），并降低蒸煮损失率。在贮藏过程中，该复合物能有效延缓TVB-N值和TBARS值的上升以及硬度的下降，抑制蛋白质降解、脂肪氧化及微生物增殖，从而显著提升鱼丸在贮藏期的品质稳定性。李新明等[68]探究了海藻酸钠/苹果多酚复合涂膜对鸡蛋保鲜效果的影响。该研究通过复合溶液涂膜浸泡处理鸡蛋，并在冷藏期间监测蛋黄指数、蛋白指数、失重率、蛋壳强度及气室直径等指标。结果显示，海藻酸钠/苹果多酚涂膜能显著抑制冷藏鸡蛋散黄率、气室直径及失重率的升高，同时有效延缓蛋黄指数、蛋白指数、蛋壳强度及哈氏单位（Haugh unit）的下降。这表明海藻酸钠/苹果多酚复合涂膜能协同发挥保鲜作用，有效维持鸡蛋在冷藏期间的品质。

3.4 化妆品方向

苹果多酚作为一类具有独特生理活性的天然产物，凭借其良好的收敛性和附着力，在维护胶原蛋白合成、抑制弹性蛋白酶活性以及改善皮肤弹性方面表现出显著效果，有助于减少皱纹生成并保持皮肤细腻。Opriş等[69]评估了添加酒精性苹果提取物的化妆品乳液的防晒性能（SPF）。研究首先测定了超声提取与回流提取所得提取物的总多酚含量、抗氧化活性及防晒效能，并采用中心复合设计对两种提取工艺进行了优化。结果显示，含10%~40%苹果提取物的化妆品乳液，其SPF值介于0.51~0.90之间。其中，采用50%乙醇为溶剂、回流提取60 min获得的提取物效能最佳，以其浓缩物制备的乳液SPF值最高可达0.90。该研究表明，苹果提取物因防晒保护特性，可作为化妆品配方中潜在的活性成分。Hyun等[70]系统评价了苹果叶片及其枝条提取物的抗氧化活性，包括DPPH、ABTS、DMPD自由基清除能力、亚硝酸盐清除能力、铁离子螯合能力、铜还原抗氧化能力（CUPRAC）、还原力、铁还原抗氧化能力（FRAP）等，并测定了总酚与总黄酮含量。同时，还通过人体角质形成细胞活力测定及人体皮肤初级刺激试验评估了其皮肤安全性。研究发现，枝条提取物相较于叶片提取物具有更强的抗氧化活性，其总酚与总黄酮含量更高。虽然在人体皮肤初级刺激试验中观察到轻微刺激反应，但在低于该试验浓度的条件下，提取物仍表现出充足的抗氧化能力。因此，在适当浓度下，苹果叶片及其枝条提取物具备作为化妆品天然原料的潜力。

3.5 畜牧业发展方向

苹果多酚凭借其优异的抗氧化、抗菌及保鲜特性，在畜牧业中展现出重要应用价值，尤其可作为绿色饲料添加剂。其核心作用体现在：1. 调控畜肉品质。苹果多酚能有效调节肌肉理化性质，改善脂肪酸与氨基酸组成，抑制脂质和蛋白质氧化，并促进肌纤维转化；其抗氧化活性以及对脂质代谢、肌纤维转化相关基因的调控，是调控畜肉品质的关键机制之一[71]。2. 延长产品货架期。在畜肉制品中添加苹果多酚，可显著抑制微生物生长，从而延长产品的保质期[72]。3. 维护动物健康。苹果多酚有助于改善动物口腔健康，降低口腔疾病发生率[73]。4. 提升饲料价值与瘤胃功能。利用苹果渣发酵饲料替代基础饲粮，可提高西门塔尔肉牛平均日增重、粗蛋白质消化率及瘤胃挥发性脂肪酸浓度，并显著提升纤维杆菌门（Fibrobacteres）、纤维杆菌属（*Fibrobacter*）和普雷沃氏菌属（*Prevotella*）等关键纤维分解菌的丰度[74]。Bartel等[75]研究表明，在泌乳奶牛饲粮中添加6%干苹果渣，其所含的维生素C可有效抑制瘤胃内氧化反应；同时，苹果多酚还能激活过氧化氢酶，增强机体自由基清除能力。然而，苹果多酚在畜牧业中的应用潜力尚未充分发掘，其作用机制缺乏深入阐明，实际应用效果仍需进一步验证。

4 苹果多酚的前景展望

苹果多酚作为一种来源广泛、生物活性多样的

天然植物提取物，在食品、保健品、化妆品及饲料工业中展现出巨大的应用潜力与发展前景。未来的研究方向与应用可重点关注以下方向：(1)精深加工与高值化利用。优化提取纯化工艺(如绿色溶剂萃取、膜分离、大孔树脂吸附等)仍是提升苹果多酚得率、纯度及降低生产成本的关键。同时，探索其在功能性食品(如抗氧化饮料、膳食补充剂)、天然防腐剂(应用于肉制品、油脂保鲜)以及高端化妆品原料(抗衰、防晒配方)中的精深加工技术，是实现其高附加值转化的核心路径。(2)作用机制与精准应用。进一步深入阐明苹果多酚调控肉品质(如肌纤维转化、脂质代谢基因表达)、抑制特定腐败微生物、调节肠道微生态(如促进纤维分解菌群)以及皮肤保护(光损伤防护、胶原维护)的具体分子机制。这将为在不同领域的精准化、标准化应用提供坚实的科学依据，并指导开发更具针对性的产品配方。(3)资源综合利用与可持续发展。苹果加工副产物(如果渣)是获取苹果多酚的重要廉价原料。加强苹果渣等废弃物的规模化、标准化处理与发酵/提取技术的研发，生产高品质的饲料添加剂或功能性成分，不仅可显著降低生产成本，更符合循环经济和农业可持续发展的理念，具有显著的经济效益与环境效益。(4)稳定性与递送系统创新。苹果多酚在加工、储存及体内环境中的稳定性是应用过程面临的挑战之一。开发新型微胶囊化、脂质体、纳米乳液等递送系统，提高其生物利用度、靶向性和稳定性，是拓展其在功能食品、医药保健品领域应用的关键技术突破点，实际效果有待进一步验证。(5)安全性评价与法规标准完善。随着应用范围的扩大，系统评估不同来源、不同纯度苹果多酚的长期食用/使用的安全性(特别是高剂量)，并推动建立完善的质量标准、检测方法及行业法规，对保障产品安全、规范市场发展、增强消费者信心至关重要。未来，苹果多酚的发展并非几个孤立方向简单叠加，而是一项各环节紧密衔接、相互驱动的系统性工程。为真正释放其应用潜力，需以可持续利用资源为基石，以精深加工技术为引擎，以机制研究的深度洞察为导航，并以递送技术的创新与安全法规的完善为双翼，共同构成一个协同发展的闭环。

综上所述，这五大方向环环相扣，构成了一个动态的、自我强化的创新体系。任何单一方向的突破都将惠及全局，而任一环节的滞后也会制约整体发展。未来，必须从系统思维的视角出发，推动各方向的交叉融合与协同演进，方能全面实现苹果多酚的巨大价值，将使苹果多酚的产业化应用迎来更为广阔的发展空间，为提升食品品质、促进动物健康、开发绿色日化产品及实现资源循环利用提供有力支撑。

参考文献 References：

[1] 张巍瀚 . 苹果群体遗传多样性和品质驯化与改良的基因组学研究[D]. 武汉：华中农业大学，2023.
ZHANG Weihan. Genomics analyses on the population diversity，quality domestication and improvement in apple[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2023.

[2] 张月妮 . 全球气候生态位视角下苹果在黄土高原地区的生境适宜性研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2024.
ZHANG Yueni. Research on the habitat suitability of apple in the loess plateau region from the perspective of global climate ecological niches[D]. Yangling：Northwest A & F University，2024.

[3] 孟照刚，李孟哲，胡成志，程少丽，李菁，程存刚 . 支撑苹果产业高质量发展创新的做法及建议[J]. 中国果树，2025(7)：112-116.
MENG Zhaogang，LI Mengzhe，HU Chengzhi，CHENG Shaoli，LI Jing，CHENG Cungang. Innovative practices and suggestions to support the high-quality development of the apple industry[J]. China Fruits，2025(7)：112-116.

[4] MIERCZAK K，GARUS-PAKOWSKA A. An overview of apple varieties and the importance of apple consumption in the prevention of non-communicable diseases-a narrative review[J]. Nutrients，2024，16(19)：3307.

[5] GOLIJAN PANTOVIĆ J，DOJČINOVIĆ B P，MILINČIĆ D D. Content of selected toxic elements in organic and conventional soybean seed[C]. The 3rd International UNIFood Conference，UNIFood2024 Conference，Belgrade，Belgrade，Serbia：Faculty of Agriculture，2024：153.

[6] 霍俊伟，郭文荣，乔锦莉，秦栋，刘红蕾，姚月英，张妍 . 白穗醋栗多酚鉴定及其抗氧化活性分析[J]. 食品科学，2023，44(8)：219-227.
HUO Junwei，GUO Wenrong，QIAO Jinli，QIN Dong，LIU Honglei，YAO Yueying，ZHANG Yan. Identification of polyphenols in white currant fruit and their antioxidant activity[J]. Food Science，2023，44(8)：219-227.

[7] 张妍 . 寒地蓝靛果提取物活性成分分析及其功能研究[Z]. 东北农业大学，2023-01-12.
ZHANG Yan. Analysis of Active components and functional research of indigo fruit extract from cold region[Z]. Northeast Agricultural University，2023-01-12.

[8] MECHCHATE H，EL ALLAM A，EL OMARI N，EL HACHLAFI N，ALI SHARIATI M，WILAIRATANA P，MUBARAK M S，

BOUYAHYA A. Vegetables and their bioactive compounds as anti-aging drugs[J]. Molecules，2022，27(7)：2316.

[9] LÓPEZ-FERNÁNDEZ O，BOHRER B M，MUNEKATA P E S，DOMÍNGUEZ R，PATEIRO M，LORENZO J M. Improving oxidative stability of foods with apple- derived polyphenols[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2022，21(1)：296-320.

[10] ZHANG Y，ZENG M，ZHANG X L，YU Q，ZENG W Y，YU B，GAN J L，ZHANG S W，JIANG X J. Does an apple a day keep away diseases Evidence and mechanism of action[J]. Food Science & Nutrition，2023，11(9)：4926-4947.

[11] DUDA-CHODAK A，TARKO T，TUSZYŃSKI T. Antioxidant activity of apples：An impact of maturity stage and fruit part[J]. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria，2011，10(4)：443-454.

[12] RAZOLA-DÍAZ M D C，AZNAR-RAMOS M J，GUERRA-HERNÁNDEZ E J，GARCÍA-VILLANOVA B，GÓMEZ-CARAVACA A M，VERARDO V. Establishment of a sonotrode ultrasound- assisted extraction of phenolic compounds from apple pomace[J]. Foods，2022，11(23)：3809.

[13] ŁATA B，TRAMPCZYNSKA A，PACZESNA J. Cultivar variation in apple peel and whole fruit phenolic composition[J]. Scientia Horticulturae，2009，121(2)：176-181.

[14] WONG S Y Y，GRANT I R，FRIEDMAN M，ELLIOTT C T，CHEN S T. Antibacterial activities of naturally occurring compounds against *Mycobacterium avium* subsp. *paratuberculosis*[J]. Applied and Environmental Microbiology，2008，74(19)：5986-5990.

[15] PARK N，CHO S D，CHANG M S，KIM G H. Optimization of the ultrasound-assisted extraction of flavonoids and the antioxidant activity of Ruby S apple peel using the response surface method[J]. Food Science and Biotechnology，2022，31(13)：1667-1678.

[16] POLLINI L，COSSIGNANI L，JUAN C，MAÑES J. Extraction of phenolic compounds from fresh apple pomace by different non-conventional techniques[J]. Molecules，2021，26(14)：4272.

[17] WITHOUCK H，BOEYKENS A，VANDEN BROUCKE M，MOREIRA M M，DELERUE-MATOS C，DE COOMAN L. Evaluation of the impact of pre-treatment and extraction conditions on the polyphenolic profile and antioxidant activity of Belgium apple wood[J]. European Food Research and Technology，2019，245(11)：2565-2578.

[18] CASAZZA A A，PETTINATO M，PEREGO P. Polyphenols from apple skins：A study on microwave-assisted extraction optimization and exhausted solid characterization[J]. Separation and Purification Technology，2020，240：116640.

[19] FERRENTINO G，GIAMPICCOLO S，MOROZOVA K，HAMAN N，SPILIMBERGO S，SCAMPICCHIO M. Supercritical fluid extraction of oils from apple seeds：Process optimization，chemical characterization and comparison with a conventional solvent extraction[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2020，64：102428.

[20] 宋兆伟，赵新红，崔瀚元，张宇微，张越，丁舒，陈晓明，陈颖 . 基于 Plackett-Burman 与 Box-Behnken 优化复合酶辅助水提富士幼果苹果多酚工艺[J/OL]. 保鲜与加工，2025：1-15. (2025-04-14). https：//link.cnki.net/urlid/12.1330.s.20250414.1413.002.
SONG Zhaowei，ZHAO Xinhong，CUI Hanyuan，ZHANG Yuwei，ZHANG Yue，DING Shu，CHEN Xiaoming，CHEN Ying. Optimization of complex enzyme-assisted aqueous extraction of polyphenols from young fuji apples based on plackett- burman and box-behnken[J/OL]. Storage and Process，2025：1-15. (2025-04-14). https：//link.cnki.net/urlid/12.1330.s.20250414.1413.002.

[21] 高义霞，呼丽萍 . 超声波辅助果胶酶法优化花牛苹果幼果多酚的工艺研究[J]. 安徽农业科学，2023，51(3)：163-166.
GAO Yixia，HU Liping. Process optimization for polyphenols from young fruits of Huaniu apple using ultrasonic-assisted pectinase method[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2023，51(3)：163-166.

[22] DA SILVA L C，VIGANÓ J，SANCHES V L，DE SOUZA MESQUITA L M，PIZANI R，ROSTAGNO M A. Simultaneous extraction and analysis of apple pomace by gradient pressurized liquid extraction coupled in-line with solid-phase extraction and on-line with HPLC[J]. Food Chemistry，2023，407：135117.

[23] 刘唱，薛博 . 苹果多酚及其抗氧化性研究进展[J]. 河南农业，2021(20)：23-24.
LIU Chang，XUE Bo. Research progress on apple polyphenols and their antioxidant properties[J]. Agriculture of Henan2021(20)：23-24.

[24] ASMA U，MOROZOVA K，FERRENTINO G，SCAMPICCHIO M. Apples and apple by-products：Antioxidant properties and food applications[J]. Antioxidants，2023，12(7)：1456.

[25] TSOUPRAS A，MORAN D，BYRNE T，RYAN J，BARRETT L，TRAAS C，ZABETAKIS I. Anti-inflammatory and anti-platelet properties of lipid bioactives from apple cider by-products[J]. Molecules，2021，26(10)：2869.

[26] 朱秀灵，叶精勤，盛伊健，孔雯瑾，陈廷然，傅锡鹏，戴清源 . 体外模拟消化对苹果多酚及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业，2020，46(8)：63-71.
ZHU Xiuling，YE Jingqin，SHENG Yijian，KONG Wenjin，CHEN Tingran，FU Xipeng，DAI Qingyuan. Effects of *in vitro* simulated digestion on apple polyphenols and their antioxidant activities[J]. Food and Fermentation Industries，2020，46(8)：63-71.

[27] 齐娜，雷佳蕾，邓红，穆韦彤，刘旻昊，孟永宏，郭玉蓉 . “红勋 1 号”红肉苹果多酚抗氧化与抗癌活性[J]. 安徽农业科学，2019，47(18)：167-170.
QI Na，LEI Jialei，DENG Hong，MU Weitong，LIU Minhao，MENG Yonghong，GUO Yurong. Antioxidation and anticancer activity of polyphenols from red-flesh apple of Hongxun No. 1[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2019，47(18)：167-170.

[28] 刘旻昊，齐娜，邓红，孟永宏，穆韦暄，郭玉蓉 . 新疆红肉苹果多酚的纯化、组成分析与抗氧化活性[J]. 食品工业科技，2019，40(12)：38-44.
LIU Minhao，QI Na，DENG Hong，MENG Yonghong，MU Weitong，GUO Yurong. Purification，composition analysis and its antioxidant activity of polyphenols from red-flesh apple of Xinjiang[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(12)：38-44.

[29] OYENIHI A B，BELAY Z A，MDITSHWA A，CALEB O J. “An apple a day keeps the doctor away”：The potentials of apple bioactive constituents for chronic disease prevention[J]. Journal of Food Science，2022，87(6)：2291-2309.

[30] ZHAO T，SUN L J，WANG Z C，NISAR T，GONG T，LI D，NIU P F，GUO Y R. The antioxidant property and α-amylase inhibition activity of young apple polyphenols are related with apple varieties[J]. LWT-Food Science and Technology，2019，111：252-259.

[31] 李锐，陈旭 . 苹果山楂番石榴提取物体外协同降糖降脂作用研究[J]. 农产品加工，2024(16)：6-10.
LI Rui，CHEN Xu. Study on synergistic hypoglycemic and lipid-lowering effects of apple，hawthorn and guava extracts *in vitro*[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing，2024(16)：6-10.

[32] 刘芳，王馨婧，李德明，崔源，李新莉 . 基于肠黏膜屏障和 NLRP3 炎症小体探讨苹果多酚提取物对溃疡性结肠炎小鼠的改善作用[J]. 营养学报，2020，42(5)：472-478.
LIU Fang，WANG Xinjing，LI Deming，CUI Yuan，LI Xinli. Apple polyphenols extract ameliorates dextran sodium sulfate induced ulcerative colitis in mice *via* protecting intestinal mucosal barrier and inhibiting activation of NLRP3 inflammasome[J]. Acta Nutrimenta Sinica，2020，42(5)：472-478.

[33] QU Z H，LIU A L，LI P H，LIU C W，XIAO W J，HUANG J N，LIU Z H，ZHANG S. Advances in physiological functions and mechanisms of (−)-epicatechin[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2021，61(2)：211-233.

[34] ÁLVAREZ-CILLEROS D，MARTÍN M Á，RAMOS S. (-)-epicatechin and the colonic 2，3-dihydroxybenzoic acid metabolite regulate glucose uptake，glucose production，and improve insulin signaling in renal NRK-52E cells[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2018，62(4)：1700470.

[35] ARRAIBI A A，LIBERAL Â，DIAS M I，ALVES M J，FERREIRA I C F R，BARROS L，BARREIRA J C M. Chemical and bioactive characterization of spanish and belgian apple pomace for its potential use as a novel dermocosmetic formulation[J]. Foods，2021，10(8)：1949.

[36] 郭世纪，何成洪，刘政，郭可心，王会 . 基于网络药理学和分子对接探讨苹果多酚对铜绿假单胞菌的抑制作用[J]. 食品与发酵工业，2025，51(11)：65-74.
GUO Shiji，HE Chenghong，LIU Zheng，GUO Kexin，WANG Hui. Inhibitory effect of apple polyphenols on *Pseudomonas aeruginosa* based on network pharmacology and molecular docking[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(11)：65-74.

[37] DI CIAULA A，CALAMITA G，SHANMUGAM H，KHALIL M，BONFRATE L，WANG D Q H，BAFFY G，PORTINCASA P. Mitochondria matter：Systemic aspects of nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD) and diagnostic assessment of liver function by stable isotope dynamic breath tests[J]. International Journal of Molecular Sciences，2021，22(14)：7702.

[38] ANDRADE R J，CHALASANI N，BJÖRNSSON E S，SUZUKI A，KULLAK-UBLICK G A，WATKINS P B，DEVARBHAVI H，MERZ M，LUCENA M I，KAPLOWITZ N，AITHAL G P. Drug-induced liver injury[J]. Nature Reviews Disease Primers，2019，5：58.

[39] AMZAR N，IQBAL M. The hepatoprotective effect of *Clidemia hirta* against carbon tetrachloride (CCl_4)- induced oxidative stress and hepatic damage in mice[J]. Journal of Environmental Pathology，Toxicology and Oncology，2017，36(4)：293-307.

[40] MADRIGAL- SANTILLÁN E，MADRIGAL- BUJAIDAR E，ÁLVAREZ- GONZÁLEZ I，SUMAYA- MARTÍNEZ M T，GUTIÉRREZ-SALINAS J，BAUTISTA M，MORALES-GONZÁLEZ Á，GARCÍA- LUNA Y GONZÁLEZ- RUBIO M，AGUILAR-FAISAL J L，MORALES- GONZÁLEZ J A. Review of natural products with hepatoprotective effects[J]. World Journal of Gastroenterology，2014，20(40)：14787-14804.

[41] SHAH M D，D’SOUZA U J A，IQBAL M. The potential protective effect of *Commelina nudiflora* L. against carbon tetrachloride (CCl_4)-induced hepatotoxicity in rats，mediated by suppression of oxidative stress and inflammation[J]. Environmental Health and Preventive Medicine，2017，22(1)：66.

[42] CHEN Y Z，WANG Y B，JIANG S H，XU J H，WANG B，SUN X H，ZHANG Y G. Red-fleshed apple flavonoid extract alleviates CCl_4-induced liver injury in mice[J]. Frontiers in Nutrition，2023，9：1098954.

[43] GUO Y Y，LI Z Q，CHEN F，CHAI Y J. Polyphenols in oral health：Homeostasis maintenance，disease prevention，and therapeutic applications[J]. Nutrients，2023，15(20)：4384.

[44] 郑虎哲，崔春兰，罗馨，SEOJIN K，SHINKYO C. 苹果多酚-壳寡糖微胶囊对变异链球菌生长及致龋相关活性影响的实验研究[J]. 食品科技，2020，45(9)：227-232.
ZHENG Huzhe，CUI Chunlan，LUO Xin，SEOJIN K，SHINKYO C. The *in vitro* anticariogenic and growth inhibition effects of apple polyphenols- chitooligosaccharides microcapsule against *Streptococcus mutans*[J]. Food Science and Technology，2020，45(9)：227-232.

[45] 董波，郭欢欢，崔刚，杨景云 . 苹果多酚作为微生态调节剂对窝沟致龋菌调节作用的研究[J]. 中国微生态学杂志，2013(12)：1383-1385.
DONG Bo，GUO Huanhuan，CUI Gang，YANG Jingyun. Study on the regulatory effect of apple polyphenols as microecological regulators on cariogenic bacteria in pits and fissures[J]. Chinese

Journal of Microecology，2013(12)：1383-1385.

[46] BEN LAGHA A，LEBEL G，GRENIER D. Tart cherry (*Prunus cerasus* L.) fractions inhibit biofilm formation and adherence properties of oral pathogens and enhance oral epithelial barrier function[J]. Phytotherapy Research，2020，34(4)：886-895.

[47] IVIGLIA G，TORRE E，CASSINELLI C，MORRA M. Functionalization with a polyphenol-rich pomace extract empowers a ceramic bone filler with *in vitro* antioxidant，anti-inflammatory，and pro-osteogenic properties[J]. Journal of Functional Biomaterials，2021，12(2)：31.

[48] VAILLANCOURT K，BEN LAGHA A，GRENIER D. Effects of a berry polyphenolic fraction on the pathogenic properties of *Porphyromonas gingivalis*[J]. Frontiers in Oral Health，2022，3：923663.

[49] ZDARILOVÁ A，RAJNOCHOVÁ SVOBODOVÁ A，CHYTILOVÁ K，SIMÁNEK V，ULRICHOVÁ J. Polyphenolic fraction of *Lonicera caerulea* L. fruits reduces oxidative stress and inflammatory markers induced by lipopolysaccharide in gingival fibroblasts[J]. Food and Chemical Toxicology，2010，48(6)：1555-1561.

[50] VELOSO D J，ABRÃO F，MARTINS C H G，BRONZATO J D，GOMES B P F A，HIGINO J S，SAMPAIO F C. Potential antibacterial and anti-halitosis activity of medicinal plants against oral bacteria[J]. Archives of Oral Biology，2020，110：104585.

[51] MORIN M P，BEDRAN T B L，FOURNIER-LARENTE J，HAAS B，AZELMAT J，GRENIER D. Green tea extract and its major constituent epigallocatechin-3-gallate inhibit growth and halitosis-related properties of *Solobacterium moorei*[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine，2015，15：48.

[52] CHANG Y C，CHEN P N，CHU S C，LIN C Y，KUO W H，HSIEH Y S. Black tea polyphenols reverse epithelial-to-mesenchymal transition and suppress cancer invasion and proteases in human oral cancer cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2012，60(34)：8395-8403.

[53] 蔡璇，魏源源，李然，刘燕，代瑞华，刘翔 . 饮用水化学消毒方法及其影响因素研究进展[J]. 卫生研究，2011，40(5)：660-663.
CAI Xuan，WEI Yuanyuan，LI Ran，LIU Yan，DAI Ruihua，LIU Xiang. Research progress on chemical disinfection methods of drinking water and their influencing factors[J]. Journal of Hygiene Research，2011，40(5)：660-663.

[54] 谢寒，冯萃敏，黄华，王晓彤，杨童童 . 3 种植物多酚消毒效果与消毒持续性研究[J]. 水处理技术，2015，41(8)：72-75.
XIE Han，FENG Cuimin，HUANG Hua，WANG Xiaotong，YANG Tongtong. Disinfection effect and disinfection persistence of three kinds of plant polyphenols[J]. Technology of Water Treatment，2015，41(8)：72-75.

[55] 雷琼，马文哲，王文光 . 我国蔬菜重金属铅污染研究进展与防治措施[J]. 农产品加工(学刊)，2012(9)：105-107.
LEI Qiong，MA Wenzhe，WANG Wenguang. The heavy metal lead pollution progress and control measures of the vegetables in China[J]. Academic Periodical of Farm Products Processin，2012(9)：105-107.

[56] 张茜，余洁，肖新华 . 中国妊娠期糖尿病母儿共同管理指南(2024 版)[J]. 中国研究型医院，2024，11(6)：11-31.
ZHANG Qian，YU Jie，XIAO Xinhua. Guidelines for the co-management of gestational diabetes mellitus in mothers and their offspring (2024 edition)[J]. Chinese Research Hospitals，2024，11(6)：11-31.

[57] 艾志录，王育红，塔西买买提•马合苏木，王娜，李建新 . 苹果多酚的促排铅功效研究[J]. 食品科学，2007，28(8)：468-470.
AI Zhilu，WANG Yuhong，，Taximaimaiti · Mahesumu，WANG Na，LI Jianxin. Study on effects of apple polyphenols on lead discharging in mice[J]. Food Science，2007，28(8)：468-470.

[58] 赛悟杰，梅尕来吉 . 藏药经典验方余甘子喷剂防治脂溢性脱发及育发的临床疗效[J]. 西藏医药，2025(3)：180-181.
SAI Wujie，MEI Galaiji. Clinical efficacy of the classic tbetan medicine formula phyllanthus emblica spray in the prevention and treatment of seborrheic alopecia and hair growth [J]. Xizang Medicine，2025(3)：180-181.

[59] TENORE G C，CARUSO D，BUONOMO G，D'AVINO M，SANTAMARIA R，IRACE C，PICCOLO M，MAISTO M，NOVELLINO E. Annurca apple nutraceutical formulation enhances keratin expression in a human model of skin and promotes hair growth and tropism in a randomized clinical trial[J]. Journal of Medicinal Food，2018，21(1)：90-103.

[60] SHEN Y L，LI X Q，PAN R R，YUE W，ZHANG L J，ZHANG H. Medicinal plants for the treatment of hair loss and the suggested mechanisms[J]. Current Pharmaceutical Design，2018，24(26)：3090-3100.

[61] HE Z Q，DENG N，ZHENG B S，GU Y J，CHEN J，LI T，LIU R H，YUAN L，LI W Z. Apple peel polyphenol alleviates antibiotic-induced intestinal dysbiosis by modulating tight junction proteins，the TLR4/NF-κB pathway and intestinal flora[J]. Food & Function，2023，14(14)：6678-6689.

[62] 余雅婷，赵亮，郝彦玲，翟征远 . 基于体外发酵模型研究 4 种植物多酚对肠道菌群的调节作用[J/OL]. 食品工业科技，2025：1-17. (2025-03-20). https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024110256.
YU Yating，ZHAO Liang，HAO Yanling，ZHAI Zhengyuan. Modulation of intestinal flora by plant polyphenols based on *in vitro* fermentation models[J/OL]. Science and Technology of Food Industry，2025：1-17. (2025-03-20). https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024110256.

[63] ZHANG T，CHANG M，HOU X H，YAN M，ZHANG S R，SONG W，SHENG Q L，YUAN Y H，YUE T L. Apple polyphenols prevent patulin-induced intestinal damage by modulating the gut microbiota and metabolism of the gut-liver axis[J]. Food Chemistry，2025，463：141049.

[64] LIU W J，CHEN Z J，JIANG S H，WANG Y C，FANG H C，ZHANG Z Y，CHEN X S，WANG N. Research progress on ge-

netic basis of fruit quality traits in apple (*Malus* × *domestica*)[J]. Frontiers in Plant Science，2022，13：918202.

[65] MANSOOR S，MIR J I，SHARMA M，MIR M A，MASOODI K Z，CHUNG Y S. Polyphenolic diversity and antioxidant potential of important apple (*Malus domestica* Borkh.) cultivars[J]. Plant Biotechnology Reports，2023，17(5)：653-663.

[66] 魏江彤，马志航，田旭东，李雪雯，张志军，李超，马锋旺 . 8 份苹果种质资源的果实品质评价[J/OL]. 果树学报，2025：1-24.(2025-03-13). https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20240584.
WEI Jiangtong，MA Zhihang，TIAN Xudong，LI Xuewen，ZHANG Zhijun，LI Chao，MA Fengwang. Fruit quality evaluation of eight apple germplasm resources[J/OL]. Journal of Fruit Science，2025：1- 24.(2025- 03- 13). https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20240584.

[67] 夏南，向晨曦，汪雅馨，孙鹤，郑小朵，张阳阳 . 苹果多酚-蛋清复合物对南湾鳙鱼丸品质及贮藏特性的影响[J]. 中国调味品，2024，49(12)：85-91.
XIA Nan，XIANG Chenxi，WANG Yaxin，SUN He，ZHENG Xiaoduo，ZHANG Yangyang. The effect of apple polyphenol-egg white complex on the quality and storage characteristics of nanwan bighead carp balls[J]. China Condiment，2024，49(12)：85-91.

[68] 李新明，高忠东 . 海藻酸钠-苹果多酚复合膜对冷藏鸡蛋的保鲜效果的研究[J]. 农产品加工，2022(10)：21-24.
LI Xinming，GAO Zhongdong. Research on the preservation effect of alginate-applenty polyphenol composite film on refrigerated eggs[J]. Farm Prduets Processing，2022(10)：21-24.

[69] OPRIŞ O，LUNG I，SORAN M L，STEGARESCU A，CESCO T，GHENDOV-MOSANU A，PODEA P，STURZA R. Efficient extraction of total polyphenols from apple and investigation of its SPF properties[J]. Molecules，2022，27(5)：1679.

[70] HYUN S B，BAE S，HYUN C G. Antioxidant activities of jeju wax apple (*Syzygium samarangense*) and safety of human keratinocytes and primary skin irritation test[J]. Cosmetics，2020，7(2)：39.

[71] 王雅宁，牛晓雨，邢媛媛，李大彪 . 多酚类化合物调控畜禽肉品质的研究进展[J]. 动物营养学报，2025，37(5)：2887-2899.
WANG Yaning，NIU Xiaoyu，XING Yuanyuan，LI Dabiao. Research progress on the regulation of meat quality of livestock and poultry by polyphenols[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2025，37(5)：2887-2899.

[72] 杜双甜，张志刚，车亮，席韬，程明霞，苟惠天 . 苹果多酚和壳聚糖对猪肉的保鲜效果研究[J]. 甘肃畜牧兽医，2021，51(8)：31-34.
DU Shuangtian，ZHANG Zhigang，CHE Liang，XI Tao，CHENG Mingxia，GOU Huitian. Study on the preservation effect of apple polyphenols and chitosan on pork[J]. Gansu Animal and Veterinary Sciences，2021，51(8)：31-34.

[73] 李其昌，张孟恩，刘俊达，张安国，徐超，王世琴 . 苹果渣的生物学功能及其在反刍动物生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志，2025，61(7)：62-69.
LI Qichang，ZHANG Meng’en，LIU Junda，ZHANG Anguo，XU Chao，WANG Shiqin. Research progress on the biological functions of apple pomace and its application in ruminant production[J]. Chinese Journal of Animal Science，2025，61(7)：62-69.

[74] 朱晋佳，陈梁，杨国杰，马志远，李飞，郭旭生，李福厚 . 发酵苹果渣全混合日粮对肉牛育肥性能和胃肠道细菌组成的影响[J]. 草业科学，2024，41(9)：2118-2132.
ZHU Jinjia，CHEN Liang，YANG Guojie，MA Zhiyuan，LI Fei，GUO Xusheng，LI Fuhou. Effects of fermented apple pomace based TMR on the performance and gastrointestinal bacteria community of beef cattle[J]. Pratacultural Science，2024，41(9)：2118-2132.

[75] BARTEL I，KOSZARSKA M，WYSOCKI K，KOZŁOWSKA M，SZUMACHER-STRABEL M，CIEŚLAK A，WYRWAŁ B，SZEJNER A，STRZAŁKOWSKA N，HORBAŃCZUK J O，ATANASOV A G，JÓŹWIK A. Effect of dried apple pomace (DAP) as a feed additive on antioxidant system in the rumen fluid[J]. International Journal of Molecular Sciences，2022，23(18)：10475.