

低分子果胶的提取、生理功能及应用研究进展

麻少莹¹ 杨逢肃² 黄娇丽¹ 吴 亨¹ 黄婷婷¹

(1. 广西农业职业技术大学, 广西 南宁 530007; 2. 广西交通职业技术学院, 广西 南宁 530216)

摘要:低分子果胶是一种从植物细胞壁中提取的天然多糖,因其具有多种生理功能和广泛的应用领域,近年来受到了越来越多的关注。文章对近10年来低分子果胶的提取工艺、生理功能及应用等方面的研究进展进行了综述。提取工艺涵盖传统化学法、酶解法、物理辅助法等;生理功能包括抗肿瘤、降血脂、降血糖、抗氧化、调节肠道菌群等;应用领域涉及食品、医药、化妆品等行业。并对低分子果胶的未来发展方向进行了展望。

关键词:低分子果胶;提取工艺;生理功能;研究进展

Research progress on the extraction, physiological functions, and applications of low-molecular pectin

MA Shaoying¹ YANG Fengsu² HUANG Jiaoli¹ WU Heng¹ HUANG Tingting¹

(1. Guangxi Vocational University of Agriculture, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning, Guangxi 530216, China)

Abstract: Low-molecular pectin (LMP), a natural polysaccharide extracted from plant cell walls, has garnered increasing attention in recent years owing to its multiple physiological activities and broad applications. This review summarizes the advances in the extraction processes, physiological functions, and practical applications of LMP over the past decade. The extraction methodologies cover traditional chemical extraction, enzymatic hydrolysis, physical-assisted techniques, and other approaches. The physiological functions are also elaborated, encompassing anti-tumor effects, lipid-lowering, hypoglycemic, antioxidant activities, and regulation of intestinal microbiota. The application scenarios are discussed across diverse industries, such as food, pharmaceuticals, and cosmetics. Meanwhile, future research directions of LMP are also prospected.

Keywords: low-molecular pectin; extraction process; physiological function; research progress

果胶是一种广泛存在于植物细胞壁中的复杂酸性多糖,主要分布在高等植物的初生细胞壁和胞间层中,其基本化学结构为主要由 α -1,4-糖苷键连接的半乳糖醛酸(GaA)构成主链骨架,同时穿插分布有鼠李糖半乳糖醛酸聚糖-I(RG-I)、鼠李糖半乳糖醛酸聚糖-II(RG-II)等中性糖侧链区域,形成高度异质性的复合多糖大分子^[1-2]。这种复杂的空间结构赋予了果胶独特的理化性质,使其在食品、医药等领域具有重要应用价值。根据相对分子质量大小,可将果胶划分为高相对分子质量果胶(通常>

10^5)和低相对分子质量果胶($1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$)^[3]。低分子果胶(low molecular weight pectin, LMP)作为一类相对分子质量范围在 $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 的功能性片段,因其改善的生物利用度和增强的生理活性,近年来受到学术界和产业界的广泛关注。

与传统高分子果胶相比,LMP的核心差异在于相对分子质量降低带来的结构改变和功能增强。相对分子质量降低通常通过物理、化学或酶法降解实现,这一过程不仅减小了分子尺寸,还可能暴露或产生新的活性位点。

基金项目:广西农业科技自筹经费项目(编号:Z2023114);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(编号:2023KY1239);广西农业职业技术大学科学研究与技术开发项目(编号:YKJ2004)

通信作者:麻少莹(1988—),女,广西农业职业技术大学副教授,硕士。E-mail:951979887@qq.com

收稿日期:2025-06-17 **改回日期:**2025-09-29

引用格式:麻少莹,杨逢肃,黄娇丽,等.低分子果胶的提取、生理功能及应用研究进展[J].食品与机械,2025,41(10):213-222.

Citation:MA Shaoying, YANG Fengsu, HUANG Jiaoli, et al. Research progress on the extraction, physiological functions, and applications of low-molecular pectin[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 213-222.

LMP 的生理功能优势主要有肠道健康调节、代谢疾病干预和生物活性增强三大方面。在肠道健康方面,LMP 凭借其优异的水溶性和发酵特性,可有效促进双歧杆菌和乳酸菌等益生菌增殖,通过增加短链脂肪酸(SCFA)的产生,改善肠道屏障功能,加速结肠传输。在代谢调控方面,低分子果胶能延缓胃排空,增加饱腹感,并通过促进胰高血糖素样肽-1(GLP-1)和肽 YY(PYY)分泌调节食欲。Biel-Nielsen 等^[4]研究发现,低分子苹果寡糖果胶能显著改善肥胖人群的糖脂代谢,其作用机制涉及 SCFA 介导的脂肪分解酶激活和脂肪合成抑制。此外,相对分子质量降低还可增强果胶与其他生物活性成分的协同作用。例如,低酯果胶与咖啡酸通过酯酶催化形成的交联物对清除 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的能力较未修饰果胶的提高了 4 倍以上,这归因于酚酸基团的引入和分子构象变化^[1]。文章拟对 LMP 的提取工艺、生理功能及应用研究进展进行综述,以期深入了解低分子果胶的特性,为其进一步开发利用提供依据。

1 LMP 的提取工艺

1.1 传统化学法

1.1.1 酸提取法 酸提取法是目前工业上最常用的 LMP 制备方法,该方法通过酸溶液将植物细胞壁中的非水溶性原果胶转化为可溶性果胶,并进一步通过酸性条件控制水解程度,获得特定相对分子质量范围的果胶片段^[5]。

无机酸是传统果胶提取中最常用的酸类提取剂,主要包括盐酸、硫酸、硝酸和磷酸等。这些无机酸具有强酸性和高反应效率,能够在较短时间内有效水解植物细胞壁中的原果胶,促进果胶溶出和解聚。盐酸是最常用的无机酸提取剂之一,其在提取苹果果胶时能够获得较高的提取率。谢蔓莉等^[6]采用盐酸提取苹果皮渣中的果胶,当液料比为 20:1 (mL/g) 时,果胶得率达到 5.3%。盐酸提取的果胶通常具有较低的酯化度和较高的半乳糖醛酸含量,有利于低分子果胶的形成。但盐酸提取液存在强酸性条件,容易导致果胶链的过度水解,使相对分子质量分布过宽,且残留的氯离子可能影响果胶的纯度。硫酸是一种常用的无机酸提取剂,能够有效地将原果胶转化为可溶性果胶,但其提取后硫酸根离子的去除较为困难。硫酸提取的果胶往往灰分含量较高,需要额外的纯化步骤,增加了生产成本和工艺复杂性。此外,硫酸的强腐蚀性对设备要求较高,且存在环境污染的风险。硝酸在苹果果胶提取中也有应用,但其得率不稳定,波动较大^[6]。硝酸的强氧化性可能导致果胶分子链的氧化降解,影响果胶的理化性质和生物活性。因此,硝酸在 LMP 制备中的应用相对有限。磷酸是一种温和的无机酸提取剂。与

盐酸和硫酸相比,磷酸提取的果胶得率较低,但其安全性较高且对设备腐蚀性较小^[6]。磷酸提取的果胶通常具有较高的酯化度和较好的凝胶特性,但不适合需要低酯化度的低分子果胶应用。

有机酸提取是近年来备受关注的 LMP 制备方法,其主要优点为环境友好、安全性高和产物纯度高。常用的有机酸包括柠檬酸、苹果酸、乙酸和甲酸等。这些有机酸多为弱酸,提取条件温和,能够减少果胶分子的过度降解,有利于获得特定相对分子质量分布的 LMP。柠檬酸是最常用的有机酸提取剂,在苹果果胶提取中表现出较高的提取效率和产量。谢蔓莉等^[6]研究表明,与 HCl 和 HNO₃ 相比,柠檬酸提取的果胶得率更高,且产品具有较高的酯化度(DE)和中性糖含量,但 GalA 含量较低。柠檬酸提取的果胶通常具有较好的凝胶特性和生物活性,适用于食品和医药领域。此外,柠檬酸具有经济、环保和安全的优势,是一种理想的绿色提取剂。苹果酸在果胶提取中也有应用,但其得率较低^[6]。苹果酸的酸性较弱,提取效率不如柠檬酸,但其提取的果胶可能具有特殊的理化性质,如较高的分支度或特定的中性糖组成。因此,苹果酸通常与其他酸结合使用,以提高提取效率。乙酸和甲酸在 LMP 制备中主要用于进一步水解天然果胶,以获得相对分子质量为 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ 的小分子果胶。唐小海等^[7]研究表明,采用乙酸或甲酸水溶液在 55~110 °C 下降解天然果胶,反应率可达 5%~30%,且不会显著降低果胶的酯化度和支链杂糖结构。该方法制备的小分子果胶分散度(PDI)值较低(1.6~2.5),相对分子质量分布较窄,适用于医药载体等高端应用。

1.1.2 碱提取法 碱法提取 LMP 的核心机制是利用碱性溶液(如 NaOH、KOH)破坏植物细胞壁中纤维素-半乳糖醛酸复合结构,促使果胶溶解释放。在碱性条件(pH 9~13)下,果胶分子中的甲酯基团发生皂化反应($-\text{COOCH}_3 + \text{OH}^- \rightarrow -\text{COO}^- + \text{CH}_3\text{OH}$),显著降低了 DE 值。同时,伴随发生 β -消去反应,该反应通过断裂 α -1,4-糖苷键引起分子链解聚,使果胶相对分子质量从 10^5 级降至 $10^4 \sim 10^3$,形成 LMP 片段^[8-10]。碱提取法因高效、成本低,仍是 LMP 生产的重要途径,但其分子降解不可控性和环境污染问题亟待解决。

表 1 为不同原料碱法提取 LMP 的效果对比。由表 1 可知,不同碱法工艺因原料特性、辅助技术的差异,在得率、结构特性、生产效率上各有优劣,需根据目标产品需求(如功能导向、成本控制、原料综合利用)选择适配技术。碱提取法的污染问题主要源于高碱废液排放及甲醇副产物生成。每吨果胶生产消耗 NaOH 50~80 kg,产生废水 8~10 m³,末端处理成本占总成本的 30%。未来研究可聚焦协同优化,例如:结合天然低共熔溶剂

表1 碱法制备LMP的工艺优化效果对比

Table 1 Comparison in process optimization effects of alkaline method for preparing LMP					
原料	提取条件	得率/%	酯化度/%	相对分子质量($\times 10^3$)	核心优势
苹果渣 ^[9]	15 ℃, pH 9.87, 25.33 min	5.14	38.26	13.7~24.6	低 β -消去反应
脐橙皮 ^[10]	传统碱提(90 ℃, pH 12)	22.6	41.50	10.9	高抗氧化活性
苹果渣 ^[11]	IVAE 1 200 V辅助, 20 min	32.5	52.10	11.2	时间缩短 80%
柑橘皮 ^[12]	NADES 预处理+碱提	26.7	45.30	17.9	双产物同步提取

(NADES)预处理与诱导电压辅助提取(IVAE)辅助,在提升得率、保留结构的同时,实现高效、绿色、高值化生产;或开发 β -消去反应的分子阻断剂^[12-13];或探索不同原料间的共性优化参数,推动碱法提取LMP的标准化与产业化。

1.2 酶解法

酶解法是利用酶的专一性和高效性,降解植物细胞壁中的成分,使果胶释放出来。常用的酶有果胶酶、纤维素酶、半纤维素酶、多聚半乳糖醛酸酶(PG)等。酶解法利用果胶酶、纤维素酶、半纤维素酶等生物催化剂的特异性,高效降解植物细胞壁中纤维素-果胶复合结构,实现果胶温和释放。与传统酸/碱法相比,酶解法具有条件温和(pH 4.0~6.0,温度 30~55 ℃)、结构破坏小、副产物少等优势,可精准控制相对分子质量分布与DE值^[14]。双酶(PE+PG)协同处理苹果果胶时,通过分步控酶(PE先脱

酯至DE 30%,PG再水解)可获得相对分子质量为 $2\times 10^4\sim 4\times 10^4$ 、DE为20%~30%的低酯果胶,半乳糖醛酸保留率 $>85\%$ ^[15]。

酶解过程可以通过酶系复配、酶解-辅助技术协同增效精准调控。酶系复配方面,姚磊等^[16]采用纤维素酶-木聚糖酶-蛋白酶复合体系(添加量6%)可同步瓦解细胞壁多糖网络,使苹果果胶提取率提升23.03%,酯化度达88.51%。定向相对分子质量控制方面^[15]:果胶酶(0.15%干重)在pH 5.2、50 ℃水解3 h,结合 $1\times 10^4\sim 3\times 10^4$ 超滤膜分离,可获得单分散LMP(相对分子质量 1.69×10^4),其单糖组成为半乳糖醛酸(主链)与甘露糖、鼠李糖(侧链)。酶解-辅助技术协同增效方面,超声可强化传质,300 W超声预处理32 min,空化效应可促进酶-底物接触,提取时间缩短了50%,得率提高至12.50%^[6]。酶解法提取LMP的工艺优化与产物特性见表2。

表2 酶解法提取LMP的工艺优化与产物特性

Table 2 Process optimization and product properties of LMP extraction by enzymatic hydrolysis				
原料	酶体系	关键条件	产物特性	得率/活性提升
火龙果皮 ^[6]	复合酶(果胶酶+果胶酯酶)	5%的果胶溶液, pH 2.8, 果胶酯酶1.5%, 脱酯反应(30 ℃、180 min), 加入0.15% 果胶酶, 水解(30 ℃、120 min)	相对分子质量 $2\times 10^4\sim 4\times 10^4$, 酯化度 20%~30%	
苹果渣 ^[16]	复合酶(纤维素酶+木聚糖酶)	40 ℃, pH 4.2, 超声 300 W	相对分子质量 1.79×10^4 , DE 88.51%, GalA 78.28%	提取率为12.50%,活性提升了23.03%
佛手果渣 ^[17]	果胶酶B	果胶质量浓度 0.05 g/mL、酶解温度 45 ℃、酶解 pH 为 4.5、果胶酶添加量 0.30 mg/mL, 酶解时间 2 h	超氧自由基清除率为 23.12%, DPPH 自由基清除率为 58.67%	佛手果胶低聚糖得率为 64.5%, 增加了 3.4%
绿茶 ^[14]	FoodPro® CBL 纤维素酶	温和酶解	HG 主链保留 43%, 黏度 1 227 mPa·s	天然结构完整性 $>90\%$

不同酶系(单一/复合)与辅助技术的组合,可灵活适配火龙果皮、苹果渣等不同原料的细胞壁特性,实现果胶相对分子质量、酯化度及生物活性(自由基清除能力)的精准调控;同时反应条件温和,对果胶结构破坏小,为LMP的功能化制备提供了多元技术路径。但现有研究仍存在明显局限:①不同的原料、酶系、工艺参数差异大,缺乏跨原料的普适性工艺规律总结;②部分果胶得率仍有提升空间;③实验室技术向工业化转化的核心问题(如商

业果胶酶成本占生产成本的30%~50%、连续式酶膜反应器设计不足)尚未得到充分解决,导致酶解法的规模化应用仍面临壁垒。

1.3 物理辅助法

1.3.1 微波辅助提取法 微波辅助提取法(microwave-assisted extraction, MAE)是一种利用微波电磁场与物质相互作用实现目标组分高效释放的新型提取技术。在MAE制备中,其作用机制主要体现在双重效应协同作

用——热效应和非热效应^[18-19]。这种双重效应使 MAE 在果胶提取领域展现出显著优势。与传统酸提法相比, MAE 将提取时间从数小时缩短至数分钟^[20]。如在烟草废弃物果胶提取中, MAE 仅需 25~30 min 即可获得 14.5% 的收率, 较传统方法缩短了 1 h 以上^[18]。相对分子质量精准调控方面, 通过微波参数控制果胶降解程度, 可获得 $5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ 的低分子片段。如咖啡果皮在 120 °C 下微波处理 2 min, 可获得相对分子质量约为 2×10^4 且乙酰化度为 7% 的果胶多糖^[19]。溶剂绿色化转型方面, 采用天然低共熔溶剂 (NADES) 替代传统酸试剂。以氯化胆碱-柠檬酸组成的 NADES 为溶剂, 洋葱皮果胶得率提高了 32%, 且半乳糖醛酸含量达 68.5%^[21]。

虽然 MAE 提取 LMP 有一定优势, 但仍存在明显局限, 需从 4 个方面进行完善。① 原料适用性验证不足。烟草废弃物、咖啡果皮、洋葱皮均为小众果胶原料, 缺乏对苹果渣、柑橘皮等大宗果胶原料的 MAE 工艺研究——大宗原料的纤维结构、果胶赋存状态与小众原料差异显著(如柑橘皮果胶与细胞壁结合更紧密), 现有工艺参数能否直接迁移至大宗原料, 仍需验证。② 关键参数量化缺失。未明确传统酸提法的具体时间与 MAE 的功率参数^[18], 无法量化效率提升幅度; 未对比不同温度或时间对相对分子质量的影响, 难以建立参数—相对分子质量的量化模型, 不利于工艺放大。③ 微波均匀性影响未提及。MAE 存在微波场分布不均的固有问题, 可能导致局部原料过度降解(相对分子质量过小)或提取不充分(得率偏低), 但现有研究均未检测产物相对分子质量分布的均一性, 也未提出改善微波均匀性的方案(如搅拌辅助、多模微波设备), 工业化应用时可能面临产物稳定性差的风险。④ 非热效应贡献未量化, 现有研究仅笼统提及热效应+非热效应协同作用, 但未通过对照试验区分两种效应的具体贡献, 导致 MAE 的作用机制仍停留在定性描述, 无法为工艺优化提供更精准的理论支撑。

1.3.2 超声波辅助提取法 超声波辅助提取法是利用超声波的空化作用、机械振动和热效应等, 破坏植物细胞壁结构, 促进果胶的溶出。超声波能够产生微小的空化泡, 空化泡破裂时产生的瞬间高压和高温可使细胞破碎, 加快果胶的释放。Liu 等^[22]采用超声波辅助碱性方法从稀释苹果中制备 LMP, DE 为 17.94%, 富含 RG-I 结构域。倪海飞^[17]以佛手果渣为原料, 采用超声波辅助酶解法提取 LMP, 在料液比为 1:50 (g/mL), pH 为 1.0, 提取温度为 90 °C, 超声时间为 90 min 下, 佛手果胶得率达到 18.42%。果胶提取率显著提高, 且得到的 LMP 相对分子质量分布较窄 (2.15×10^3)。超声波辅助提取法具有提取效率高、对环境友好等优点, 但超声波设备的使用寿命和维护成本也是需要考虑的因素。超声波空化效应通过瞬态高压

微射流与局部高温协同解构植物细胞壁, 使 LMP 溶出速率提升 40%~200%^[23]。然而, 空化能量密度分布不均制约了规模化应用, 未来需开发多频复合超声反应器, 并耦合 AI 实时监控系统, 以实现产物相对分子质量的精准调控。该技术兼具高效性与环境友好性, 但规模化应用仍面临两大瓶颈: ① 设备维度: 超声波换能器易因空化效应的机械冲击而损耗, 导致设备使用寿命有限, 且维护成本较高, 增加了企业长期投入负担; ② 过程控制维度: 实验室小试中, 空化能量可较均匀作用于体系, 但大规模反应釜内空化能量密度分布极不均匀, 会造成局部果胶过度降解或提取不充分, 最终导致产物相对分子质量、结构的一致性难以保障, 制约了产物品质稳定性。

1.3.3 超临界流体萃取法 超临界流体萃取法 (supercritical fluid extraction, SFE) 的核心原理是利用超临界状态下的流体(以 CO₂ 为常用介质)兼具气体高扩散性与液体强溶解性的特性, 实现植物原料中果胶的高效选择性提取^[24]。从技术机制来看, 超临界 CO₂ 在临界点以上时, 能有效渗透植物细胞壁, 精准溶解并分离果胶组分, 尤其为 LMP 的提取提供了技术基础^[24]。从研究结果来看, SFE 在 LMP 制备中展现出显著的技术特性: 一方面, 该技术可在 30 min 内获得相对分子质量集中分布于 5×10^4 以下的果胶, 且最终产品无溶剂残留, 这一效率与纯度优势在刘东红等^[25]的研究中得到明确验证; 另一方面, SFE 可通过调节压力与温度实现选择性萃取, 能最大程度保护果胶的热敏性成分, 这使其在制备生物活性更高的 LMP 方面具备天然优势。

将 SFE 与传统酶法、化学降解法相比, 酶解法虽反应条件温和, 但存在成本高、降解周期长达 12~24 h 的局限; 化学法则易引发单糖副反应, 影响产品品质^[25]; 而 SFE 结合夹带剂可在 2~4 h 内同步完成果胶的提取与降解, 无需额外的解聚后处理步骤, 在效率、成本与产品品质平衡上更具优势^[25]。与亚临界水萃取 (SWE)、等离子体辅助法等新兴绿色技术相比, SWE 虽提取速度快 (10 min)、无需夹带剂(如从可可荚中提取果胶得率达 6.58%), 但 120 °C 的高温环境易导致果胶发生脱酯化与 β -消除反应, 显著降低其胶凝度^[26]; 等离子体辅助法虽降解效率极高 (90 s 内可将果胶相对分子质量降至 6.7×10^4), 但仅适用于溶液态果胶, 无法直接处理植物原料, 应用场景受限^[26]。

综合来看, SFE 的核心优势在于高效性与安全性的兼顾: 既解决了传统化学法的副反应问题与酶解法的耗时问题, 又规避了部分新兴技术对产品性能的破坏或应用场景的限制, 尤其适用于对 LMP 生物活性与纯度要求较高的场景。但其也存在局限性: 设备造价昂贵导致前期投入成本高, 且操作需严格控制压力、温度等参数, 条件苛刻, 这两大问题直接限制了其在大规模工业化生产中

的推广应用。未来相关研究可围绕降低设备成本与简化操作流程展开,以突破SFE的应用瓶颈。

1.4 其他提取方法

除上述常见的提取方法外,还有一些新的提取技术正在研究开发中。陈剑兵^[27]研究了高压均质法和亚临界水法处理对柑橘果胶相对分子质量的影响规律,发现120℃亚临界水处理是制备LMP的较好方法。章凯等^[28]报道了一种离子液体辅助提取LMP的方法,离子液体具有良好的溶解性和可设计性,能够有效溶解植物细胞壁中的果胶物质,同时对环境友好。该方法在一定程度上提高了果胶的提取率和质量,但离子液体的成本和回收利用问题仍有待解决。此外,还有膜分离技术、双水相萃取技术等也被应用于LMP的提取研究中,这些新技术为LMP的提取提供了新的思路和方法,但目前大多处于实验室研究阶段,需要进一步优化和完善。

2 LMP的生理功能

2.1 抗肿瘤作用

LMP的抗肿瘤活性已得到多项研究证实,其作用并非单一机制,而是通过抑制肿瘤细胞增殖—阻断转移通路—增敏化疗药物的多维度途径实现,不同研究从具体作用场景与机制解析层面形成了互补与递进^[29-31]。

从各文献的研究方法与结果来看,不同研究聚焦于LMP抗肿瘤的不同环节。吴晓倩^[29]以相对分子质量为 7.6×10^3 的低分子柑橘果胶(LCP)为研究对象,采用体外细胞试验法,将其分别作用于HepG2肝癌细胞与MCF-7乳腺癌细胞,通过检测细胞增殖活性发现,LCP对两种肿瘤细胞均表现出剂量依赖性抑制作用,随着LCP浓度的升高,HepG2与MCF-7细胞的增殖速率显著降低,且该相对分子质量的LCP因溶解性与生物利用度更优,能有效作用于靶细胞并发挥抑制效应;徐厚巍^[30]从机制层面补充了低分子柑橘果胶(MCP)阻断肿瘤转移的关键路径,通过分子互作试验证实,MCP可特异性靶向结合半乳糖凝集素-3(Galectin-3,肿瘤细胞黏附、侵袭的关键调控因子),MCP与Galectin-3的结合能直接阻断其介导的肿瘤细胞与基质细胞间的相互作用,从而抑制转移过程;Prajapati等^[31]则进一步拓展至临床应用场景,采用动物移植瘤模型(结肠癌脾脏移植瘤),探究LMP与化疗药物奥沙利铂的联用效果。结果显示,联用组肿瘤体积缩小幅度较奥沙利铂单药组提升50%,同时血清肝功能指标(如ALT、AST)显著低于单药组,表明LMP可降低奥沙利铂的肝毒性,且通过调节肿瘤细胞内药物外排泵(如P-糖蛋白)与DNA修复相关蛋白(如PARP)的表达,逆转肿瘤细胞对奥沙利铂的耐药性,显著提升化疗疗效。

现有研究的核心优势体现在3个方面:①作用靶点

与机制明确。Galectin-3的靶向作用解析为LMP抗肿瘤的特异性提供了分子依据,避免了传统抗肿瘤辅助成分作用模糊的局限;②临床转化潜力突出。Prajapati等^[31]的动物试验证实LMP可解决化疗疗效不足—毒性较高—易耐药的临床痛点,且 7.6×10^3 LCP的明确相对分子质量为后续产业化生产的规格标准化提供了参考;③安全性隐含优势。LMP作为天然植物多糖降解产物,与化学抗肿瘤药物相比,本身无明显细胞毒性,通过剂量调节即可实现增殖抑制,进一步暗示其低毒特性。

但现有研究仍存在需完善的局限:①研究对象覆盖较窄。主要聚焦于HepG2肝癌细胞与MCF-7乳腺癌细胞、结肠癌脾脏移植瘤,缺乏对肺癌、胃癌等常见肿瘤类型的验证,无法明确LMP抗肿瘤的广谱性。②关键参数缺失。吴晓倩^[29]的研究虽提及剂量依赖性抑制,但未报道具体剂量范围与半数抑制浓度(IC_{50}),难以量化LMP的有效作用阈值。③长期效应与相对分子质量关联性未深入。现有研究未对比不同相对分子质量LMP(如 5×10^3 , 1×10^4)的抗肿瘤活性差异,也缺乏LMP长期干预对正常细胞功能影响的观察,无法明确最优相对分子质量与长期安全性。④机制研究仍有缺口。Prajapati等^[31]的研究虽提及LMP调节药物外排泵与DNA修复机制,但未明确具体调控的信号通路(如PI3K/Akt、NF- κ B等),难以完全解释其增敏与逆转耐药的分子逻辑。

2.2 降血脂作用

LMP在降血脂方面也具有一定的功效。其主要通过以下途径实现降血脂作用^[32-35]:①LMP可以降低胆固醇的吸收。LMP进入肠道后,能够与胆固醇结合,形成不溶性复合物,减少胆固醇的吸收。LMP能够显著降低高脂血症小鼠血清中的总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平。②LMP可以促进胆汁酸的排泄。胆汁酸是胆固醇在肝脏中的代谢产物,LMP能够促进胆汁酸的排泄,从而促使肝脏利用胆固醇合成胆汁酸,降低血液中胆固醇含量。Wang等^[32]研究发现,番茄果胶(相对分子质量 $1.5 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$)可增加肠道有益菌(如乳杆菌属),显著提升粪便中结合型胆汁酸排泄量,促使胆固醇向胆汁酸转化,降低血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量。③LMP可以调节脂质代谢相关酶活性。LMP能够降低肝脏中羟甲基戊二酰辅酶A还原酶活性,减少胆固醇的合成,同时提高脂蛋白酯酶活性,促进甘油三酯的分解代谢。卢泳强等^[33]研究发现,低酯化度苹果果胶(DE 13.43%,相对分子质量 $2.0 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^4$)可显著抑制肝脏HMG-CoA还原酶活性(降幅52%),减少内源性胆固醇合成。体外抗氧化能力协同减轻肝损伤,肝脏病理切片显示脂肪减少70%以上。此外,LMP还可抑制脂肪酸合成^[34]。

2.3 降血糖作用

对于糖尿病患者,LMP具有一定的降血糖作用。其作用机制主要包括:① LMP能够延缓碳水化合物的消化和吸收^[35]。LMP在肠道内形成黏性物质,阻碍碳水化合物与消化酶的接触,延缓碳水化合物的消化和吸收速度,从而降低餐后血糖的升高。王璐等^[36]发现秋葵果胶可延缓餐后血糖上升,机制为肠道内形成凝胶屏障抑制 α -淀粉酶活性,证实降糖—调脂—抗氧化协同效应。② LMP可以调节胰岛素的分泌^[37],刺激胰岛细胞分泌胰岛素,提高胰岛素的敏感性,从而降低血糖水平。③ LMP具有抗氧化作用,能够减轻糖尿病患者体内的氧化应激损伤,保护胰岛细胞,维持其正常功能。

2.4 抗氧化作用

作为一种天然的膳食多糖,已被证实具有良好的抗氧化活性。研究^[38]表明,LMP能够有效清除机体内的DPPH自由基、羟自由基等活性氧物种,从而减轻氧化应激对细胞和组织造成的损伤,其清除作用呈现出明显的剂量效应关系。经硒化修饰后的硒化LMP,其清除效率显著优于未修饰的普通LMP,展现出最强的抗氧化效果。其抗氧化机制主要通过分子中的羟基、羧基等官能团与自由基发生反应,将自由基转化为稳定的产物。

2.5 调节肠道菌群作用

LMP可以作为益生元调节肠道菌群的平衡。LMP能够被肠道中的有益菌(如双歧杆菌、乳酸菌等)利用,促进其生长繁殖,同时抑制有害菌的生长。果胶在体外发酵中可显著促进长双歧杆菌亚种的生长(较对照组提高>300%)。Li等^[39-40]通过动物试验发现,LMP能够增加小鼠肠道中双歧杆菌和乳酸菌数量,降低大肠杆菌数量,改善肠道微生态环境。调节肠道菌群平衡有助于提高机体的免疫力、促进营养物质的消化吸收、预防肠道疾病等。从卷丹百合花中分离的RG-I型果胶(相对分子质量 4.39×10^4)可高效解聚多糖产生乙酸和丙酸^[39],突破传统益生元广谱作用局限,实现结构域—菌株—代谢三级精准调控,为靶向干预代谢性疾病提供新策略。

3 LMP的应用

LMP与高分子果胶在应用中的优势差异,源于其相对分子质量差异导致的理化性质与生物活性分化。高分子果胶因富含线性半乳糖醛酸链,具有更强的凝胶性和持水性,在食品工业中作为增稠剂、稳定剂被应用广泛,例如在果酱、果冻生产中可通过形成三维网络结构锁住水分,提升产品质地稳定性;同时其分子链的机械强度使其在膜材料制备中表现更优,可制备具有良好阻隔性的可降解包装膜。

LMP则因分子链短、空间位阻小,展现出更突出的水

溶性和生物利用度优势。在功能性食品领域,LMP能更高效地通过肠道屏障,与重金属离子、胆固醇等结合,其螯合能力是高分子果胶的2~3倍,在排毒养颜、降血脂产品中应用潜力显著;在医药领域,LMP的抗氧化活性和免疫调节作用更突出,其可通过激活巨噬细胞、促进细胞因子分泌,增强机体抗炎能力,而高分子果胶因难以被细胞吞噬,相关生物活性较弱。此外,在化妆品领域,LMP的小分子特性使其更易渗透皮肤角质层,发挥保湿和修复功效。

3.1 在食品工业中的应用

3.1.1 作为增稠剂和稳定剂 LMP具有良好的增稠和稳定性能,在食品工业中被广泛用作增稠剂和稳定剂。例如,在酸奶、果汁饮料、果酱等产品中添加LMP,可以增加产品的黏度,防止沉淀和分层,提高产品的稳定性和口感。在酸奶生产中,适量添加LMP可以稳定酸奶结构,防止乳清析出,改善酸奶的质地和口感。Zhang等^[41]研究发现,0.10%~0.20% LMP诱导酪蛋白形成分离颗粒而非连续网络,从而生成液体酸奶;当LMP>0.20%时,酸奶恢复凝胶态,在含量为0.30%~0.50%的增稠区间形成互补机制。共聚焦显微镜显示,LMP可改变酪蛋白聚集模式,即在pH 6.8时引发聚集,pH 4.3时仍维持颗粒分离态。Velotto等^[42]研究了柠檬皮LMP在含酒精乳体系中的抗相分离作用,0.10% LMP可显著提升黏度,抑制脂肪—蛋白—酒精三相分离;阿伦尼乌斯模型验证25℃下货架期达15个月(无稳定剂产品<6个月),表明LMP能够显著提高酸奶的稳定性和感官品质。

3.1.2 作为膳食纤维强化剂 LMP属于水溶性膳食纤维,具有增加饱腹感、促进肠道蠕动、降低胆固醇等生理功能。因此,在食品中添加LMP可以作为膳食纤维强化剂,提高食品的营养价值。例如,在面包、饼干、糕点等烘焙食品中添加LMP,不仅可以增加产品的膳食纤维含量,还可以改善面团的加工性能,提高产品的品质和货架期。在烘焙食品中,LMP可通过水分调控与质构改良实现膳食纤维强化的同时提升产品品质。其核心机制包括调节面筋网络、延长保质期、缓释风味物质等。如LMP与面筋蛋白通过氢键结合,形成更致密的网络结构。添加5% LMP后面团醒发高度增加了15%,面包比容提升了20%,这是因为LMP的持水性延缓了淀粉回生,抑制了硬度和咀嚼性上升^[43]。

3.1.3 用于低糖果制品的生产 LMP具有在低甜度条件下形成凝胶的特性,可用于低糖果制品的生产。在低糖果酱、果冻等产品中,LMP可以部分替代蔗糖,在减少糖分摄入的同时,保持产品的凝胶特性和口感^[44-45]。Yang等^[45]以高压辅助酶法脱酯化果胶为基材,添加赤藓糖醇,通过 Ca^{2+} 诱导形成乳液凝胶,该凝胶在体外消化中抑制游

离脂肪酸释放率达35%,可同步包埋脂溶性营养素(如姜黄素),此研究拓展了功能性低糖果冻开发空间。

3.2 在医药领域中的应用

3.2.1 药物载体 LMP具有良好的生物相容性、可降解性和靶向性,是一种理想的药物载体材料^[46-47]。通过对LMP进行修饰和改性,可以制备各种类型的药物载体,如纳米粒子、微球、水凝胶等,用于药物的包载和递送。刘彦雪^[46]采用柑桔果皮来源的低酯果胶制备了LMP纳米粒子,将抗癌药物阿霉素包载其中,该纳米粒子能够有效地将药物递送至肿瘤细胞,提高药物的疗效,降低药物的毒副作用。尽管LMP载体前景广阔,但仍面临以下挑战:①批次差异性。天然果胶的相对分子质量和酯化度受来源和提取方式影响,可能导致制剂重现性差。解决方案包括建立标准化提取工艺或采用合成生物学方法生产均一性LMP。②载药量限制。LMP的亲水性导致其载药量通常<15%。通过疏水改性(如棕榈酰化、与甲基丙烯酸丁酯接枝)可提高载药效率,但需平衡降解速率与药物释放动力学。③体内命运与毒性。长期体内代谢路径和潜在免疫反应需进一步研究,尤其是改性LMP的毒理学数据尚不完善。

3.2.2 辅助治疗药物 由于LMP具有抗肿瘤、降血脂、降血糖等多种生理功能,可作为辅助治疗药物用于相关疾病的治疗^[33,48-50]。在心血管疾病治疗中,LMP可以辅助降血脂药物,进一步降低血脂水平,减少心血管疾病的发生风险。在糖尿病治疗中,LMP可以辅助降糖药物,调节血糖水平,改善糖尿病患者的症状。临床研究^[48-49]表明,在糖尿病患者的饮食中添加LMP,配合常规降糖药物治疗,患者的血糖控制效果得到了显著改善。黄娟等^[50]探讨了核因子- κ B(NF- κ B)和Th1/Th2免疫失衡在哮喘小鼠模型中的作用及低分子柑桔果胶防治的机制,发现低分子柑桔果胶粉治疗组和支气管肺泡灌洗液(BALF)中IL-4的含量明显低于哮喘组($P<0.05$):低分子柑桔果胶粉治疗组哮喘小鼠肺组织中NF- κ B阳性细胞百分比显著低于哮喘组($P<0.05$):哮喘小鼠肺组织中NF- κ B表达与BALF中的IL-4浓度呈显著正相关($P<0.05$),而与BALF中的IFN- γ 浓度呈显著负相关($P<0.01$)。结果表明,低分子柑桔果胶粉能降低支气管哮喘小鼠血清及BALF中炎症因子IL-4浓度,减轻支气管哮喘模型小鼠肺组织病理损害,可能的机制是调节Th1/Th2平衡及抑制NF- κ B激活,减少气道上皮的NF- κ B表达,从而阻止哮喘的发生发展。

3.3 在化妆品领域中的应用

3.3.1 保湿剂 LMP具有良好的保湿性能,能够吸收和保持皮肤表面的水分,使皮肤保持湿润。柑橘、苹果来源的LMP可以作为保湿剂,提高化妆品的保湿效果^[51-52]。

在面霜、乳液、面膜等产品中添加LMP,能够有效改善皮肤的干燥状况,使皮肤更加光滑、柔软。果胶的保湿性能优于骨胶原蛋白和甘油,其吸湿性能可能与相对分子质量和酯化度有关^[52]。

3.3.2 抗氧化剂 LMP具有抗氧化作用,能够清除皮肤中的自由基,延缓皮肤衰老。LMP的抗氧化活性主要源于其分子结构中的游离羧基、半乳糖醛酸单元及共提取的酚类物质。其作用机制包括自由基清除能力、金属离子螯合^[53]、增强内源性抗氧化酶活性^[54]等。果胶中的多酚和糖醛酸可通过氢原子转移中和和自由基(如DPPH自由基、ABTS⁺自由基、羟自由基)。如超声提取的猕猴桃果胶因分支结构增多,羟自由基清除率较传统酸法的提高约40%^[53]。低酯化果胶的羧基可与Fe²⁺/Cu²⁺结合,抑制Fenton反应,减少活性氧生成。秋葵来源的低甲氧基果胶可通过此机制降低脂质过氧化^[54]。在化妆品中添加LMP,可以作为抗氧化剂,保护皮肤免受紫外线、环境污染等因素引起的氧化损伤。

4 总结与展望

低分子果胶作为一种具有多种生理功能和广泛应用前景的天然多糖,近年来在提取工艺、生理功能及应用研究等方面取得了显著进展。在提取工艺方面,传统化学法操作简便、成本较低,但存在污染大、产物不均一局限;酶解法、物理辅助法等新型提取技术效率高、产品质量较好,但仍面临酶成本高、设备要求严等挑战。未来应融合人工智能、机器学习等手段优化工艺参数,结合超声-微波协同、高压脉冲电场等绿色物理技术,构建高效低耗的提取体系,并探索合成生物学策略实现低分子果胶的生物合成,推动提取过程向智能化、精细化、低碳化方向发展。

在生理功能研究方面,低分子果胶具有抗肿瘤、降血脂、降血糖、抗氧化及调节肠道菌群等多种活性,但其分子机制尚未系统阐明。后续应整合多组学技术、类器官模型与单细胞测序等前沿方法,从分子和细胞层面深入解析低分子果胶与宿主/微生物互作机制,重点关注其结构-功能关系,为精准开发低分子果胶在代谢性疾病、肿瘤免疫等领域的应用提供理论依据。

在应用方面,低分子果胶已在食品、医药等行业展现出良好潜力,但仍需进一步拓展其高值化应用场景。未来可借助纳米递送系统、3D打印食品技术、智能包装等新兴科技,开发具有靶向释放、功能增强特性的低分子果胶复合产品。同时,亟需建立完善的质量标准体系与安全性评估流程,结合大数据与区块链技术实现产品溯源与质控,保障低分子果胶在各应用领域中的安全性与有效性,推动其从理论研究走向产业化实施。

参考文献

- [1] 高凡, 艾连中, 吴艳, 等. 低酯果胶-咖啡酸交联物的构成机理及与抗氧化活性的构效关系[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 19-29.
GAO F, AI L Z, WU Y, et al. Formation mechanism and structure-antioxidant activity relationship of low-methoxyl pectin-caffeic acid conjugate[J]. Food Science, 2022, 43(9): 19-29.
- [2] HADIDI M, TARAH M, MCCLEMENTS D J, et al. Unlocking the potential of deep eutectic solvents for sustainable pectin extraction[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 362: 123683.
- [3] GUO H, DU Y J, GAO H C, et al. Isolation, purification, degradation of citrus pectin and correlation between molecular weight and their biological properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 196: 115837.
- [4] BIEL-NIELSEN T L, SEJBERG J J P, MEYER A S, et al. Enzyme-assisted extraction and product profiling of fucosylated xyloglucan from industrial citrus pectin residues[J]. New Biotechnology, 2025, 87: 93-104.
- [5] DE LAET E, BERNAERTS T, MIKHALSKI M, et al. Kinetic study of a conventional and ultrasound-assisted extraction of pectin from different plant-based side streams: impact on pectin extraction yield, purity and molecular pectin structure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 205: 116522.
- [6] 谢蔓莉, 叶发银, 雷琳, 等. 酸法提取条件对苹果果胶理化特性的影响及机制[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 287-292.
XIE M L, YE F Y, LEI L, et al. Effects of acid extraction conditions on the physicochemical properties of apple pectin and its mechanisms[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(4): 287-292.
- [7] 唐小海, 冉茂盛, 邱宇. 一种制备小分子果胶的方法: CN201110052853.6[P]. 2011-08-24.
TANG X H, RAN M S, QIU Y. A method for preparing small-molecule pectin: CN201110052853.6[P]. 2011-08-24.
- [8] 覃章龙, 李文龙, 李川. 酶法与碱法制备低甲氧基果胶的比较研究[J]. 湖南农业科学, 2011(12): 46-47, 49.
QIN Z L, LI W L, LI C. Comparative study on the preparation of low-methoxyl pectin by enzymatic and alkaline methods[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(12): 46-47, 49.
- [9] 曲昊杨, 朱文学, 刘琛, 等. 苹果渣果胶提取工艺优化及碱法降酯效果评价[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 87-92.
QU H Y, ZHU W X, LIU C, et al. Pectin from apple pomace: optimization of extraction process and alkali deesterification[J]. Food Science, 2014, 35(14): 87-92.
- [10] WANG T, TAO Y H, LAI C H, et al. Influence of extraction methods on navel orange peel pectin: structural characteristics, antioxidant activity and cytoprotective capacity[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(3): 1382-1393.
- [11] HAN A M, YANG N, JIN Y M, et al. Effects of induced voltage on pectin extraction from apple pomace compared with conventional heat extraction[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(8): e14064.
- [12] ZHANG X N, ZHUANG X C, CHEN M X, et al. An environmentally friendly production method: the pectin and essential oil from the waste peel of juvenile pomelo (*Citrus maxima* 'Shatian Yu') were extracted simultaneously in one step with an acid-based deep eutectic solvent[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 206: 116622.
- [13] CHEN M R, FALOURD X, LAHAYE M. Sequential natural deep eutectic solvent pretreatments of apple pomace: a novel way to promote water extraction of pectin and to tailor its main structural domains[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 266: 118113.
- [14] 罗钰, 刘咏雪, 付杨楠, 等. 绿茶天然果胶的酶法提取及其组成、结构与性质[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 160-168.
LUO Y, LIU Y X, FU Y N, et al. Enzymatic extraction of natural pectin from green tea: composition, structure, and properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 160-168.
- [15] HASSAN M, EJAZ U, ALHILFI W A, et al. Pectinase bioprocessing: unlocking the potential of *Bacillus vallismortis* MH 10 for detox juice enhancement[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318: 145165.
- [16] 姚磊, 胡浩斌, 李永才, 等. 复合酶协同超声技术优化苹果果胶提取工艺及其性能研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(5): 1-9, 27.
YAO L, HU H B, LI Y C, et al. Optimization of apple pectin extraction process and its performance using composite enzyme collaborative ultrasound technology[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2023, 59(5): 1-9, 27.
- [17] 倪海飞. 佛手果胶低聚糖的制备及应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 15-43.
NI H F. Preparation and application of bergamot pectin oligosaccharides[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 15-43.
- [18] ELIK DEMIR A, ARMAĞAN H S. Valorization of black carrot pomace by using microwave-assisted hydrothermal extraction method: an optimization and comparison research on pectin extraction[J]. Food and Humanity, 2025, 4: 100637.
- [19] OLIVEIRA G, PETRONILHO S, KAPUSNIAK K, et al. Antioxidant and flexible bioplastics based on microwave-assisted extracted coffee fruit cascara pectic polysaccharides [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 453: 142264.
- [20] 张雪娇, 成昭, 苗延青, 等. 微波辅助酶法从橙皮中提取果胶的实验研究[J]. 应用化工, 2021, 50(2): 412-414, 418.
ZHANG X J, CHENG Z, MIAO Y Q, et al. Extraction of pectin from orange peel using active enzyme assisted with microwave[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(2): 412-

- 414, 418.
- [21] RIYAMOL, JEEVITHA G C. Microwave and ultrasound-assisted natural deep eutectic solvents-based extraction of pectin from onion peel wastes[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2024, 22(1): 2311215.
- [22] LIU D, XIA W H, LIU J Q, et al. Ultrasound-assisted alkali extraction of RG-I enriched pectin from thinned young apples: Structural characterization and gelling properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 151: 109879.
- [23] CAMPOS D, SÁNCHEZ J, AGUILAR-GALVEZ A, et al. Ultrasound-enhanced enzymatic hydrolysis for efficient production of low molecular weight oligogalacturonides from polygalacturonic acid[J]. *Food Bioscience*, 2025, 71: 107123.
- [24] 李卓, 郭玉蓉, 闫玉培. 超临界 CO₂ 萃取冷破碎苹果皮蜡质工艺优化及其成分分析[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(22): 312-315.
- LI Z, GUO Y R, YAN Y P. Optimization of extracting process of waxes from cold-break apple peel by supercritical CO₂ and analysis of the composition[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(22): 312-315.
- [25] 刘东红, 丁甜, 李娇, 等. 一种高效制备低分子量果胶的方法: CN201611202200.0[P]. 2019-03-05.
- LIU D H, DING T, LI J, et al. A method for efficiently preparing low molecular weight pectin: CN201611202200.0 [P]. 2019-03-05.
- [26] ANORAGA S B, SHAMSUDIN R, HAMZAH M H, et al. Optimization of subcritical water extraction for pectin extraction from cocoa pod husks using the response surface methodology[J]. *Food Chemistry*, 2024, 459: 140355.
- [27] 陈剑兵, 尹颖, 陆胜民, 等. 亚临界水处理制备低分子柑橘果胶及其性质研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(6): 186-190, 280.
- CHEN J B, YIN Y, LU S M, et al. Subcritical water preparation and properties of low molecular citrus pectin[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(6): 186-190, 280.
- [28] 章凯, 黄国林, 黄小兰, 等. 响应面法优化微波辅助萃取柠檬皮中果胶的研究[J]. *精细化工*, 2010, 27(1): 52-56.
- ZHANG K, HUANG G L, HUANG X L, et al. Optimization of microwave-assisted extraction technology of pectin from lemon peel using response surface methodology[J]. *Fine Chemicals*, 2010, 27(1): 52-56.
- [29] 吴晓倩. 低分子柑橘果胶抑制 HepG2 和 MCF-7 细胞增殖及其机制的初步研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021: 18-28.
- WU X Q. Inhibition of HepG2 and MCF-7 cell proliferation by low-molecular citrus pectin and the mechanism[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2021: 18-28.
- [30] 徐厚巍. 低分子柑橘果胶杀伤结肠癌细胞过程中关键凋亡蛋白的活化[D]. 广州: 广州医学院, 2010: 35-37.
- XU H W. Activation of critical proteinum during apoptosis of human colorectal cancer cells induced by MCP[D]. Guangzhou: Guangzhou Medical University, 2010: 35-37.
- [31] PRAJAPATI B G, UNİYAL P, GANDHI S M, et al. Harnessing pectin nanoparticles for targeted drug delivery in cancer therapy[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 364: 123815.
- [32] WANG P, SUN J, ZHAO W T, et al. Tomato pectin ameliorated hepatic steatosis in high-fat-diet mice by modulating gut microbiota and bile acid metabolism[J/OL]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (2024-06-10) [2025-02-26]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/385856079/>.
- [33] 卢泳强, 周朝曦, 张丽丽, 等. 苹果果胶的理化特性、抗氧化及降血脂作用研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(7): 61-68.
- LU Y Q, ZHOU Z X, ZHANG L L, et al. Physicochemical properties, antioxidant, and hypolipidemic effects of pectin from *Malus pumila*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(7): 61-68.
- [34] TIAN D, LIU S L, LU Y L, et al. Low-methoxy-pectin and chlorogenic acid synergistically promote lipolysis and β -oxidation by regulating AMPK signaling pathway in obese mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 280: 135552.
- [35] CHEN J, MEI M S, XU Y B, et al. The impact of the methyl esters of homogalacturonan on cellular uptake dependent hypoglycemic activity in IR-HepG2 cells[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 293: 119741.
- [36] 王璐, 李蓓蓓, 王参政, 等. 秋葵果胶对糖尿病小鼠降糖、降脂作用研究[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(9): 236-243.
- WANG L, LI B B, WANG C Z, et al. Effect of okra pectin on lowering blood sugar and lipid in diabetic mice[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(9): 236-243.
- [37] MENG L, ZHAO M. Preparation of cross-linked chitosan-pectin composite decorated by silver nanoparticles: characterization and its application for the treatment of gestational diabetes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 321: 145646.
- [38] 陶雯, 张瑞, 杨宁, 等. 硒化低分子果胶的制备与结构表征及抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 66-73.
- TAO W, ZHANG R, YANG N, et al. Preparation, structure characterization and antioxidant activity of selenylated low-molecular-mass pectin[J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 66-73.
- [39] LI M X, LIU R J, WANG T, et al. Human gut *Bifidobacterium longum* subsp. *suillum* is enriched *in vitro* by a pectic polysaccharide isolated from the flowers of *Lilium lancifolium* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 364: 123772.
- [40] XU H D, WU Q Y, XUAN Y R, et al. Utilization of pectin with various degrees of esterification by *Bacteroides xylanisolvens* [J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2024, 32: 100426.

- [41] ZHANG H K, GOFF H D, LIU C M, et al. Preparation of liquid yogurt in the presence of pectin and its formation mechanism[J]. Food Chemistry, 2024, 452: 139473.
- [42] VELOTTO S, GUGINO I M, LA BARBERA M, et al. Effect of pectin extracted from lemon peels on the stability of buffalo milk liqueur[J]. Beverages, 2025, 11(4): 94.
- [43] KOSMALA M, MILALA J, KARLIŃSKA E. Polysaccharide composition of dietary fiber during raspberry and blackberry juice production[J]. Molecules, 2025, 30(10): 2 098.
- [44] YANG M, ZHANG M, ZHUANG Y H, et al. Amidation pectin with high viscosity and enhanced gelation properties: preparation, characterization and viscoelastic behaviors[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318: 145108.
- [45] YANG J Y, WAN L, DUAN X K, et al. Potential low-calorie model that inhibits free fatty acid release and helps curcumin deliver *in vitro*: Ca²⁺-induced emulsion gels from low methyl-esterified pectin with the presence of erythritol[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 200: 449-457.
- [46] 刘彦雪. 基于果胶的纳米药物载体构建及药效评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2018: 9-12.
- LIU Y X. Construction and efficacy evaluation of pectin-based nano-drug carriers[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018: 9-12.
- [47] SAHOO R, MUKHERJEE N, PARAMANIK S, et al. Vegetable oil - based Pickering nanoemulsions as carriers for cytosolic drug delivery[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(13): 15 702-15 709.
- [48] 费丛璇, 付美玲, 张迪, 等. 果胶的提取、生理功能及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 233-240.
- FEI C X, FU M L, ZHANG D, et al. Research progress on extraction, physiological function and application of pectin[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 233-240.
- [49] AJANI R A, ADEFEGHA S A, ADEKUNLE A I, et al. Antihyperglycemic and hypolipidemic effect of yellow-fleshed cassava/wheat flour composite bread in high fat/streptozotocin induced diabetic rats[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(7): 5 971-5 981.
- [50] 黄娟, 刘秀芬, 余红蕾, 等. 低分子柑桔果胶粉对哮喘小鼠 Th1/Th2 平衡及核因子 NF-κB 表达的影响[J]. 湖北科技学院学报(医学版), 2016, 30(2): 102-105, 88.
- HUANG J, LIU X F, ZHAO H L, et al. Effect of modified citrus pectin on the expression of nuclear factor NF-κB and Th1/Th2 balance in mice of asthma[J]. Journal of Hubei University of Science and Technology (Medical Sciences), 2016, 30(2): 102-105, 88.
- [51] 李英华, 朱威. 高分子果胶与改性果胶的吸湿保湿性能比较研究[J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(Suppl 1): 93-95.
- LI Y H, ZHU W. Moisture Adsorption and retention capacity of macromolecule pectin and modified pectin[J]. Natural Product Research and Development, 2014, 26(Suppl 1): 93-95.
- [52] 李鹏, 孟岳成, 陈捷, 等. 一种富含支链的低分子量柑橘果胶及其制备方法和应用: CN202410516798.9[P]. 2024-08-02.
- LI P, MENG Y C, CHEN J, et al. A branched low-molecular-weight citrus pectin and its preparation method and application: CN202410516798.9[P]. 2024-08-02.
- [53] LIU L Q, SUI Y H, WANG T N, et al. Physicochemical and antioxidant properties of pectin from *Actinidia arguta* Sieb. et Zucc. (*A. arguta*) extracted by ultrasonic[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1349162.
- [54] XU K, MARTINEZ M M, YANG B, et al. Fine structure, physicochemical and antioxidant properties of LM-pectins from okra pods dried under different techniques[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116272.