

果胶的提取、生理功能及应用研究进展

Research progress on extraction, physiological function and application of pectin

费丛璇¹ 付美玲¹ 张迪¹ 李丹丹¹ 修建华²

FEI Congxuan¹ FU Meiling¹ ZHANG Di¹ LI Dandan¹ XIU Jianhua²

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 河北 石家庄 050000; 2. 河北省山楂加工技术创新中心, 河北 承德 067300)

(1. College of Food and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050000, China; 2. Hawthorn Processing Technology Innovation Center of Hebei Province, Chengde, Hebei 067300, China)

摘要:果胶是一种天然的多糖类聚合物,是高等植物细胞壁的重要组成部分,具有降低胆固醇、抗肿瘤、抗氧化、降血糖、利于肠道健康等生理功能,被广泛应用于食品、医药等领域。文章综述了近几年果胶提取方法及其优缺点,并对不同来源不同方法提取的果胶得率、半乳糖醛酸含量、酯化度进行比较分析,总结了果胶的生理功能及其在各个方面的应用现状,对其未来发展方向进行了展望。

关键词:果胶;提取;生理功能;应用

Abstract: Pectin is a kind of natural polysaccharide polymer, which is an important part of the cell wall of higher plants. It has physiological functions such as cholesterol-lowering, anti-tumor, anti-oxidation and hypoglycemic, and beneficial to intestinal health. In this review, pectin extraction methods and their advantages and disadvantages in recent years were summarized, and the yield, galacturonic acid content and esterification degree of pectin extracted from different sources and methods were compared and analyzed. The physiological function of pectin and its application in various aspects were also introduced, and the future development direction was prospected.

Keywords: pectin; extract; physiological function; application

果胶是一种复杂的结构多糖,主要分布在植物的细胞壁和胞间层,对相邻细胞的黏附有很大影响^[1]。天然果胶主要由同型半乳糖醛酸聚糖(homogalacturonan, HGA)、鼠李糖半乳糖醛酸聚糖 I(rhamnogalacturonan I, RG-I)和鼠李糖半乳糖醛酸聚糖 II(rhamnogalacturonan II, RG-II)3种结构域组成。目前从植物细胞壁中提取和分离果胶已有许多不同的方法,但仅以果胶得率的提高

为参考依据还不够全面,不同来源和不同提取方法可以得到不同理化性质及生理功能的果胶。

果胶因具有降低胆固醇、抗肿瘤、抗氧化、降血糖、利于肠道健康等生理功能近年来备受科技工作者的关注。然而目前国内对果胶在各方面的应用统计还不够全面,例如在食品的保鲜防腐,在废水的处理中的新型应用情况等还鲜有报道。文章拟对果胶的提取、生理功能及应用情况进行综述,并对不同来源,不同方法提取的果胶得率及其理化性质进行分析比较,以期为其深度开发与利用提供依据。

1 果胶的提取工艺

1.1 单一提取方法

1.1.1 酸提取法 酸提取法是利用热的酸性溶液水解细胞壁上许多复杂的交联网络,从而破坏细胞壁,促进酸扩散和果胶从植物基质中释放。余杰等^[2]采用硫酸从火龙果皮中提取果胶,得率为 2.6%。邹容^[3]利用复合酸(磷酸+亚硫酸)和单一酸(盐酸、硫酸、亚硫酸、磷酸、硝酸)分别提取西瓜皮中的果胶,发现与单一酸比较,复合酸的得率较高,且提取的西瓜果胶质量、色泽更好。Raji 等^[4]以柠檬酸为提取剂,在 pH 为 1 的条件下从甜瓜果皮中提取果胶,得率可达到 29.48%。酸提取法工艺流程简单,是工业上常用的果胶提取方法^[5]。无机酸和有机酸都可以用作酸性介质,无机酸相对有机酸较便宜,高温条件下不易分解,但过强的酸性会导致果胶结构被破坏^[6]。而有机酸酸度较低,不易引起果胶的降解。

1.1.2 碱提取法 碱性溶液中的羟基离子会导致细胞壁膨胀,破坏纤维素和其他多糖之间的分子间氢键,并水解有助于连接细胞壁多糖和木质素的酯键^[7]。水果中的果胶也可以用 pH 为 9~13 的碱溶液在 32~80℃ 的温度下连续搅拌提取。碱性环境有助于通过分解纤维素和半纤

作者简介:费丛璇,女,河北科技大学在读硕士研究生。

通信作者:李丹丹(1981—),女,河北科技大学副教授,博士。

E-mail: 81536487@qq.com

收稿日期:2023-07-24 **改回日期:**2023-12-19

纤维素的交联结构来释放果胶。王文霞等^[8]以马铃薯渣为原料,采用碱法提取马铃薯果胶多糖,得率达到 23.1%,高于酸提取法和酶提取法的。Cui 等^[9]在 pH 9~11 的条件下,用 NaOH 溶液提取的葡萄柚果胶得率为 17.9%~24.5%。相比之下,在 pH 1~3 的条件下 HCl 溶液提取的果胶得率略低,为 16.2%~21.3%。与酸提取法相比,碱提取法通过溶解聚合物网络释放果胶,尤其是半纤维素材料,吸附在纤维素微原纤维表面的果胶更容易被提取,从而提高了产量,碱提取法倾向于生成低甲氧基化果胶,同时保留中性糖侧链。但过量碱的使用,可能会造成果胶凝胶度下降。

1.1.3 酶提取法 酶通过水解纤维素或半纤维素来分解植物细胞壁,从而释放出在纤维素网络中的果胶。在果胶提取过程中最常用的酶是纤维素酶、原果胶酶、半纤维素酶和木聚糖酶,近几年复合酶的使用较多,复合酶提取法结合多种酶的优点,可更大限度发挥酶的作用。韦云伊等^[10]利用复合酶法提取木瓜果皮中果胶,采用木聚糖酶和纤维素酶两种酶组合,得率可达到 28.67%。王艳翠等^[11]利用复合酶法提取苹果渣果胶,采用纤维素酶、木聚糖酶和酸性蛋白酶 3 种酶组合,果胶得率达到了 40.66%,较传统的酸提取法(26.84%)提高了 51.49%。酶提取法的优点在于提取效率高,此方法不会腐蚀设备、可以节省能源,提取过程中几乎无逆反应,可精确控制酶用量,而且与单一酶相比,复合酶是更好的选择。其缺点在于缺少先进的技术支撑与标准化的操作,酶辅助法提取果胶依赖于酶的专一性和选择性。

1.2 联合提取方法

1.2.1 亚临界水萃取法 亚临界水萃取是一种简单快速且环保的水解方法,其以亚临界状态(100~374 °C, 0.10~22.00 MPa)的水作为溶剂。在亚临界水萃取中,萃取温度^[12]、萃取时间、萃取压力^[13]是决定果胶产量的主要因素。苗壮等^[14]采用亚临界水萃取法提取猕猴桃皮渣中的果胶,在萃取温度 137 °C、萃取时间 5 min 条件下,果胶得率达到 11.41%。Liew 等^[15]使用亚临界水以动态模式从柚皮中提取果胶,得率为 19.6%。Ma 等^[16]利用亚临界水萃取法对鲜向日葵籽果胶进行提取,在萃取压力 0.8 MPa、萃取温度 120 °C、萃取时间 20 min 条件下,果胶得率达到 7.17%。亚临界水萃取提取过程中无需任何预处理,缩短了提取时间,并减少了残留物的产生,提高了提取物的纯度,并且不需使用任何酸性或碱性溶液。但其工艺条件控制不当会导致果胶水解,设备的相对复杂性和高成本也阻碍了超临界水萃取在工业生产中的应用。

1.2.2 超声波辅助提取法 超声波辅助提取法通过超声来提高介质分子的移动速率和渗透能力,增强分子间的

相互作用,进而促使植物组织中的物质溶出。孟驾等^[17]利用超声波辅助酸法提取柚皮中的果胶,在超声时间 55 min、超声功率 320 W 条件下,果胶提取率达到 24.02%。李靛等^[18]采用超声波辅助酸法提取火龙果皮中的果胶,在超声波功率 180 W、超声温度 65 °C、提取时间 1.75 h 条件下,果胶提取率最高,达到 15.67%。Panwar 等^[19]采用超声波辅助酸法从柑橘果皮中提取果胶,在超声处理时间 24 min、振幅 37% 的条件下,得率达到 28.82%。相比于传统酸提取法,超声波辅助提取法缩短了提取时间,降低了能源消耗,使用更少的溶剂。但超声波提取的均匀性较差,因为超声波的强度随着距离发射器的距离增大而降低,可能会导致提取果胶的均匀性不一致。

1.2.3 微波辅助提取法 微波辅助提取法涉及非电离辐射,引起离子传导和偶极子旋转,这两种机制相互配合,使加热速度变快,热量加速传质,有助于瓦解复杂的果胶纤维素网络,从而促进果胶的溶解和释放。张燕等^[20]采用微波辅助法结合饱和硫酸铝提取马铃薯渣果胶,在微波时间 1.5 min、饱和硫酸铝用量 405 μL 条件下,得率达到 13.79%。张雪娇等^[21]利用微波辅助纤维素酶提取橙皮中的果胶,采用正交试验优化了工艺参数,果胶得率可达到 11.49%。Maran 等^[22]采用微波辅助酸法提取废弃西瓜皮中的果胶,利用响应面设计结合渴求函数法进行工艺优化,果胶最高得率达到 25.8%。与常规方法相比,微波辅助提取能提供更均匀的温度分布,在更短的时间内获得更高的果胶得率。然而,微波辐射穿透受设备的影响较大,且成本较高,难以实现大规模工业化生产。

1.2.4 超声—微波辅助提取法 超声—微波辅助提取法是一种新的果胶提取方法,可以减少果胶的降解,提高提取效率。黎英等^[23]采用超声—微波协同提取百香果干果皮中的果胶,得率可达到(12.14±0.06)%。与单独水提、超声、微波法的相比,超声—微波协同法提取的得率有较大幅度的提升。Xu 等^[24]采用超声波—微波辅助酸法从菠萝蜜中提取果胶,采用响应面法优化柠檬酸对果胶的超声微波双辅助提取,最佳条件下果胶的得率可达到 21.5%。超声诱导的空化现象破坏了果胶细胞壁,促进了果胶的传质,而微波辐照则均匀地提高了体系温度,加速了细胞壁破裂。这些作用的组合可以共同分解果胶、纤维素和半纤维素的复杂网络,促进果胶从细胞壁中释放。因此,超声—微波辅助提取可以在低温下快速高效地提取果胶,从而节省能源和降低成本。但由于设备限制,超声—微波辅助提取仍处于实验室阶段。

1.2.5 其他联合提取方法 除了超声、微波和超声—微波辅助提取外,其他新兴的联合技术也被用于水果中果胶的提取。联合提取法可以充分发挥各种提取方法的优

点,最大限度地弥补每种方法的缺点,从而获得最佳的提取效果。刘媛洁等^[25]采用酶法协同超声波辅助酸法提取柚子皮中果胶,在酶用量 1.7%、酶解时间 70 min、提取液 pH 2.0、超声功率 260 W 条件下果胶得率达到了(27.01±0.91)%,故采用酶法协同超声波辅助酸法能有效提高果胶得率。李晓娟等^[26]以籽用南瓜废弃果肉为原料,将超声法的“空化”作用与草酸铵法的“螯合”作用相结合,利用正交试验优化提取果胶工艺。在提取温度 80 ℃、草酸铵质量分数 0.8%、提取时间 60 min 时,果胶平均得率达到 6.09%。这些联合提取方法显著提高了果胶产量,并

在食品工业中显示出应用潜力。

不同来源、不同方法提取果胶的得率、半乳糖醛酸含量及酯化度见表 1。

由表 1 可知,果胶的得率与天然植物原料有着很大关系,商品果胶的主要来源多为果胶含量较高的苹果、柑橘、柚子等,其他天然植物原料根据提取方法的不同,果胶得率也有所差异,但可以明显看出,利用联合辅助方法提取的果胶得率比传统提取方法的显著提高,苹果渣的果胶得率可高达 40.66%。其中,木瓜果皮、苹果渣、猕猴桃皮、百香果果皮、南瓜中提取的果胶为高甲氧基果胶,

表 1 不同来源、不同方法提取果胶得率、半乳糖醛酸含量及酯化度

Table 1 Extraction yield, galacturonic acid content, and esterification degree of pectin from different sources and methods

来源	提取方法	得率/%	半乳糖醛酸含量/%	酯化度/%	参考文献
火龙果皮	酸提取法	2.60		28.34	[2]
	超声辅助提取法	15.67			[18]
西瓜皮	酸提取法	1.24	45.17		[3]
	微波辅助提取法	25.79			[22]
甜瓜皮	酸提取法	29.48	48.00	29.33	[4]
马铃薯渣	酸提取法	11.70			[8]
	碱提取法	23.10			
	酶提取法	6.00			
	微波辅助提取法	13.79			[20]
柚皮	酸提取法	16.20			[9]
	碱提取法	17.90			
	亚临界水萃取法	19.60			[15]
	超声辅助提取法	24.02			[17]
	酶法联合超声波辅助酸提取法	27.01			[25]
木瓜果皮	酶提取法	28.67		62.40	[10]
苹果渣	酸提取法	26.84	64.48	56.08	[11]
	酶提取法	40.66	57.39	89.41	
猕猴桃皮	亚临界水萃取法	11.41	68.17	57.83	[14]
	超声—微波辅助酸提取法	34.88	67.85	54.53	[25]
鲜向日葵籽	亚临界水萃取法	7.17	82.00	19.40	[16]
柑橘皮	酸提取法	18.93			[27]
	超声辅助提取法	28.82			[19]
橙皮	微波辅助提取法	11.49			[21]
百香果果皮	水提	8.24		61.62	[23]
	超声辅助提取法	9.01		63.21	
	微波辅助提取法	9.83		62.39	
	超声—微波辅助提取法	12.14		66.46	
菠萝蜜皮	酸提取法	13.80			[28]
	酶提取法	11.30			[29]
	超声—微波辅助提取法	21.50			[24]
南瓜	超声辅助草酸铵法	6.09		75.23	[26]

而火龙果皮、甜瓜皮、鲜向日葵籽中提取的果胶为低甲氧基果胶,其半乳糖醛酸含量为 45.17%~82.00%,不同提取方法得到的果胶半乳糖醛酸含量存在显著差别,推断是由于提取方法不同改变了果胶的结构,从而使半乳糖醛酸含量也发生变化。由表 1 也可看出,不少种类果皮中的果胶含量较高,由此可见,将废弃果皮利用起来提取果胶,既有效利用了资源降低成本,还可提高社会经济效益。

2 果胶的生理功能

2.1 降低胆固醇

人体中有两类胆固醇:一类是高密度脂蛋白胆固醇,对人体有好处;一类是低密度脂蛋白胆固醇,对人体有害,而果胶可以减少低密度脂蛋白胆固醇,但对高密度脂蛋白胆固醇没有任何影响。Chen 等^[30]研究发现,每日摄取 12~24 g 的果胶,能够使低密度脂蛋白胆固醇降低 13%。果胶的分子量和甲氧基化程度越高,脂肪的消化率就会相应下降。高甲氧基化果胶和中甲氧基化果胶能够使脂滴周围的水分和脂质被困在果胶形成的封闭结构内,从而增加在消化道内的凝胶黏性,抑制脂质和脂肪酶的扩散。而低甲氧基化果胶则与带有负电荷的脂滴相互排斥,使脂滴形成开放结构,有利于脂肪酶水解脂肪,从而降低胆固醇水平^[31]。

2.2 抗肿瘤

果胶作为一种天然产物,对肿瘤细胞有着预防和改善作用。一方面,果胶及其衍生物,特别是低相对分子质量改性果胶,能抑制细胞信息传导通路,改变细胞周期,诱导细胞凋亡,从而起到抗肿瘤作用。通过抑制同种细胞的聚集及异型细胞间的黏附,从而达到抗肿瘤转移的目的。De Freitas Pedrosa 等^[32]研究表明,从成熟木瓜的果肉中提取的果胶可抑制结直肠癌细胞增殖。另一方面,肿瘤细胞对化疗药物的抗性使得其治疗困难,通常用于肿瘤治疗的化疗药物会产生有害的副作用。果胶可与其他携带抗肿瘤药物的化合物结合使用,进而提高药物的生物利用度^[33]。果胶基质可以通过二价或多价阳离子进行交联,与带相反电荷的聚电解质发生凝聚,或与黏性聚合物、钙盐等混合进行涂层,有助于减少不必要的药物释放,调节药物释放速率,从而使化疗的副作用尽可能降低。

2.3 抗氧化

果胶具有出色的抗氧化能力,它可以通过抑制或清除生物体内的自由基生成,从而达到抗氧化的效果。一般通过两种广泛使用的体外化学测定(包括 ABTS⁺ 自由基和羟自由基清除)评估抗氧化能力。ABTS⁺ 自由基清除活性主要用于抗氧化剂,通过将氢原子转化为非自由基物种来提供氢原子的能力。羟自由基是活性氧自由基最多的,可导致细胞严重损伤,因此清除羟自由基对于保护生命系统至关重要。董银萍等^[34]研究发现,山楂果胶

能有效调节小鼠肝脏的抗氧化活性,并且这种效果与果胶的剂量存在明显的效应关系。李倩倩等^[35]则发现,番茄细胞壁中的不同类型果胶均具有一定的抗氧化活性,尤其是离子结合型果胶,其综合抗氧化活性尤为显著。Xu 等^[36]研究表明,苹果果胶的降解产物展现出了较好的抗氧化特性,这得益于其出色的供氢和供电子能力。这种特性可能与降解产物中含有的低聚半乳糖醛酸和糠醛等具有还原性的物质密切相关。此外,橘皮果胶^[37]、百香果皮果胶^[38]、秋葵果胶^[39]等也具有一定的抗氧化效果。这些研究表明,果胶具有一定的抗氧化活性,而且其抗氧化效果与果胶结构有一定关联。

2.4 降血糖

糖尿病是一种以内分泌代谢异常导致持续性高血糖为特征的疾病,已成为全球第三大生命威胁。长期的高血糖状态会引发自由基的大量产生,这些自由基会破坏胰岛细胞和胰腺组织中的关键生物大分子,进而加剧糖尿病的风险和进程。糖尿病在全球患病率为 8.3%,是导致残疾的一大病因^[40]。在超过 90% 的病例中,2 型糖尿病(T2DM)是糖尿病的主要类型,其特征是胰岛素抵抗,导致糖耐量受损和高血糖。而果胶具有治疗和预防 2 型糖尿病的潜力。Hamden 等^[41]研究发现,摄入发酵苹果果胶显著抑制了与高血糖症相关的关键酶的活性,使糖尿病大鼠血液中葡萄糖浓度降低 24%。Zhan 等^[42]发现,补充果胶可逆转动物体内和脂肪重量增加、血脂异常、高血糖等现象,从而降低血糖。因此,对于糖尿病的预防治疗,果胶具有极大潜力。

2.5 利于肠道健康

通过发酵降解植物来源的果胶,可提高肠道微生物群落的稳定性,从而改善肠道稳态。果胶能促进肠道中有益菌的增殖,比如双歧杆菌、乳酸杆菌等,加快有益菌的生长和代谢,减少有害菌数量。Ferreira 等^[43]通过胃肠动力学模型对柑橘果胶在胃、小肠和结肠中的消化降解过程进行了深入研究。结果显示,在胃和小肠中,果胶的分子量几乎保持不变,大约 88% 的果胶维持了其原始结构。然而,当进入结肠后,果胶被肠道微生物降解,这一过程不仅能促进肠道蠕动,还有助于营养的吸收。Jiang 等^[44]探讨了苹果果胶对饮食诱导肥胖大鼠模型中肠道微生物群的潜在影响。结果表明,苹果果胶具有调节肠道微生物群的作用,能够有效减轻代谢内毒素血症和炎症反应,进而抑制饮食诱导的肥胖大鼠的体重增加和脂肪堆积。因此,果胶具有促进肠道益生菌、抑制病原菌等功能,在维持肠道生态平衡中发挥着重要作用。

3 果胶的应用

3.1 在食品加工中的应用

果胶无臭味,口感黏滑,可在 20 倍的水中溶解成乳

白色的黏稠胶状液体。果胶以其优良的特性在食品中用作增稠剂、乳化剂、稳定剂及抗菌剂。刘少阳等^[45]将苹果果胶添加到面粉中,能够改善面团的柔韧性,满足食品的特殊需求,也可当作果酱、乳制品中的增稠剂和稳定剂等。李晓等^[46]从豆腐柴叶中提取低甲氧基果胶发现其具有较好的起泡能力和泡沫稳定性,可较好地用于食品体系的感官品质改善。张苒^[47]以乳酸提取法、木瓜蛋白酶提取法和 732 型阳离子交换树脂提取法分别从柠檬皮中提取果胶,为了探究这 3 种方法提取的果胶的特性和应用潜力,分别对果胶的理化性质、流变学特性、乳化特性进行了比较分析,并在酸性乳饮料中进行了应用测试。结果表明,通过 732 型阳离子交换树脂提取法获得的果胶展现出更为出色的稳定性,可作为一种新型的稳定剂应用于酸性乳饮料的生产中。因此,果胶在食品加工方面发挥着其优良的作用。

3.2 果胶在食品防腐保鲜方面的应用

果胶基膜和果胶涂层可较好地应用于食品保鲜防腐,是当前的研究热点所在。Jridi 等^[48]发现,血橙皮果胶/明胶复合薄膜比纯明胶薄膜具有更好的物理性能,可应用于奶酪包装中,同时该膜还具有较强的抗氧化活性,对革兰氏阳性和革兰氏阴性菌株具有一定的抗菌活性。Priyadarshi 等^[49]研究了葡萄籽提取物中的果胶对花生贮藏的影响,发现花生被涂上果胶涂层并贮藏 1 个月后显著降低了花生脂质氧化,这为坚果类食品的贮藏提供了较好的思路。Guo 等^[50]发现了果胶基薄膜作为肉类新鲜指标的新应用,加入果胶膜的显色剂显示了由粉红色(pH 为 3)到黄色(pH 为 10)的显著 pH 依赖性颜色变化,该颜色指示膜可被用作冰鲜牛肉的新鲜度指示。综上,可以推断果胶基薄膜和涂层在食品保鲜防腐方面具有良好的潜力。

3.3 果胶在药物运输中的应用

由于果胶是一种大分子膳食纤维,在人体内无法被胃蛋白酶、淀粉酶等消化酶分解,同时也不受结肠中肠道菌群的影响,这使得果胶可以作为一种较好的载体物质,将药物输送到需要的部位。淡新鑫^[51]以果胶—蔗糖凝胶为载药内核,低甲酯化果胶为覆膜材料,氯化钙和氯化锌分别作为交联剂,成功构建结肠靶向给药体系。Jung 等^[52]研究了以改性果胶为载体包埋吡哆美辛珠状水凝胶的性能,将其在模拟胃、肠消化环境后进行了体外释药试验,改性果胶有效地减少了吡哆美辛在胃、肠内的释放率,减少了其在消化道中转运的损失。Mendez 等^[53]研究了 3 种商业柑橘果胶样品和具有不同理化特性的酶改性西瓜皮果胶在两种果胶质量分数(2%和 4%)下生产气凝胶珠评估它们作为潜在的药物载体,获得的气凝胶颗粒具有高表面积和低堆积密度值,可作为良好的药物载体。这些研究都表明改性果胶给予了果胶更优的功能,使其

成为药物输送应用的有吸引力的载体,为实现药物的靶向用药提供支持。

3.4 果胶在废水处理中的应用

近年来,食品中重金属污染问题频繁曝光,引起了广泛关注。因此,重金属的去除成为了研究的热点。在众多去除方法中,吸附法因其经济高效、重金属去除效果好、易回收利用等优点而备受科研工作者的青睐,在实际应用中,吸附法已成为去除食品中重金属的主要手段。姚元勇等^[54]以果胶为原料,制备了一种新型吸附材料。通过分析半乳糖醛酸含量和其成分的酯化度,探讨其对污水中铜离子的吸附作用。发现经过碱化作用改性后的果胶可高效吸附污水中的铜离子。Arachchige 等^[55]对甘薯残渣衍生的果胶进行 HHP 辅助果胶酶修饰,发现改性红薯果胶的吸附性能远优于其他普通吸附剂,进而研究了其可能的吸附机理,发现其中的静电相互作用、电荷转移复合模式、微沉淀和孔隙率增强了对铅离子的吸附性。以上研究表明,果胶吸附重金属离子具有良好的应用前景,可深入研究并大范围应用于实际废水处理中。

4 总结与展望

从天然原料中提取果胶的方法有酸提、碱提、酶提、亚临界水提、微波和超声辅助提取、联合提取法等。每种方法果胶的产量、生态影响和生产成本均不同。果胶也被证明可以加快胆固醇代谢、抗肿瘤、抗氧化、降血糖、利于肠道健康等多种生理功能。作为一种天然多糖,广泛应用于食品加工、食品防腐保鲜、药物运输、废水处理等方面。基于以上总结,未来对果胶的研究可以从 3 个方面开展:① 探索绿色高效的果胶联合提取方法。不同的提取方法对果胶的得率及理化性质有着较大影响,联合提取法可作为首选方案。② 进一步提升果胶残渣等废弃物中的果胶利用水平。果蔬加工的副产物是果胶丰富的提取原料,合理利用这些副产物,可以得到更高的经济价值。③ 加强果胶改性技术的研究。果胶的结构影响着果胶的理化性质发生改变,从而产生不同的生理功能。利用合适的改性技术可更好地开发绿色健康新型果胶资源。

参考文献

- [1] WICKER L, KIM Y, KIM M, et al. Pectin as a bioactive polysaccharide: Extracting tailored function from less [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 42: 251-259.
- [2] 余杰, 王晓红, 刘丽, 等. 酸法提取火龙果果皮中果胶[J]. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2020, 36(5): 24-26.
YU J, WANG X H, LIU L, et al. Extraction of pectin from *Hylocereus undulatus* Britt peel by acid method [J]. *Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)*, 2020, 36(5): 24-26.
- [3] 邹荣. 西瓜皮果胶提取及其性质的研究[D]. 广州: 华南理工大

- 学, 2014: 11-27.
- ZOU R. Study on extraction and characterization of *Citrullus lanatus* peel pectin [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 11-27.
- [4] RAJI Z, KHODAIYAN F, REZAEI K, et al. Extraction optimization and physicochemical properties of pectin from melon peel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 98: 709-716.
- [5] 李琦, 廖柳月, 梁荣, 等. 果胶提取技术及对品质影响研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 205-211.
- LI Q, LIAO L Y, LIANG R, et al. Advances in pectin extraction technology and its effect on quality [J]. Food Research and Development, 2020, 41(7): 205-211.
- [6] 刘新新, 刘钟栋. 低酯果胶的提取与制备技术研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 278-284.
- LIU X X, LIU Z D. Research progress on extraction and preparation technology of low-ester pectin [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 278-284.
- [7] WANDEE Y, UTTAPAP D, MISCHNICK P. Yield and structural composition of pomelo peel pectins extracted under acidic and alkaline conditions [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 237-244.
- [8] 王文霞, 刘博, 陈瑞国, 等. 马铃薯渣碱法提取果胶的组成和乳化特性 [J]. 中国马铃薯, 2022, 36(2): 147-154.
- WANG W X, LIU B, CHEN R G, et al. Composition and emulsifying properties of pectin extracted from potato residue by alkaline method [J]. Chinese Potato Journal, 2022, 36(2): 147-154.
- [9] CUI J, REN W, ZHAO C, et al. The structure-property relationships of acid-and alkali-extracted grapefruit peel pectins [J]. Carbohydrate polymers, 2020, 229: 115524.
- [10] 韦云伊, 李敏敏, 杨媚媚, 等. 木瓜果皮中果胶的复合酶法提取工艺优化及产品性质分析 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 381-387.
- WEI Y Y, LI M M, YANG M M, et al. Optimization of extraction process of pectin from papaya peel by complex enzymes and analysis of product properties [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(2): 381-387.
- [11] 王艳翠, 卢韵朵, 史吉平, 等. 复合酶法提取苹果渣中的果胶及产品性质分析 [J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(5): 30-36.
- WANG Y C, LU Y D, SHI J P, et al. Extraction of pectin from apple pomace by complex enzymes and analysis of product properties [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(5): 30-36.
- [12] TEOH W H, MAMMUCARI R, VIEIRA DE MELO S A B, et al. Solubility and solubility modeling of polycyclic aromatic hydrocarbons in subcritical water [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(16): 5 806-5 814.
- [13] ADETUNJI L R, ADEKUNLE A, ORSAT V, et al. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 62: 239-250.
- [14] 苗壮, 樊明涛, 程拯良, 等. 响应面优化亚临界水提取猕猴桃皮渣中果胶及其品质分析 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(12): 288-294.
- MIAO Z, FAN M T, CHENG Z G, et al. Characterization and optimization of subcritical water extraction of pectin from kiwi pomace by response surface methodology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(12): 288-294.
- [15] LIEW S Q, TEOH W H, TAN C K, et al. Subcritical water extraction of low methoxylpectin from pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peels [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 128-135.
- [16] MA X M, JING J, WANG J B, et al. Extraction of low methoxyl pectin from fresh sunflower heads by subcritical water extraction [J]. ACS Omega, 2020, 5(25): 15 095-15 104.
- [17] 孟鸳, 卢小菊, 夏小慧. 响应面分析法优化超声波辅助提取柚皮果胶工艺的研究 [J]. 中国食品添加剂, 2017(2): 57-64.
- MENG Y, LU X J, XIA X H. Optimization of pectin extraction assisted by ultrasound from pomelo peel by response surface methodology [J]. China Food Additives, 2017(2): 57-64.
- [18] 李靓, 朱涵彬, 李长滨, 等. 响应面优化超声波法提取火龙果皮果胶的工艺研究 [J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 13-19.
- LI L, ZHU H B, LI C B, et al. Research on ultrasonic extraction process of pectin from *Hylocereus undulatus* Britt peel by response surface optimization [J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(5): 13-19.
- [19] PANWAR D, PANESAR P S, CHOPRA H K. Ultrasound-assisted extraction of pectin from *Citrus limetta* peels: Optimization, characterization, and its comparison with commercial pectin [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102231.
- [20] 张燕, 简荣超, 谭乾开, 等. 响应面法优化微波辅助提取马铃薯渣中果胶工艺 [J]. 食品工业, 2019, 40(6): 30-34.
- ZHANG Y, JIAN R C, TAN G K, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of pectin from potato pulp by response surface methodology [J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 30-34.
- [21] 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. Experimental study on microwave assisted enzymatic extraction of pectin from orange peel [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(2): 412-414, 418.
- [22] MARAN J P, SIVAKUMAR V, THIRUGNANASAMBANDHAM K, et al. Microwave assisted extraction of pectin from waste *Citrullus lanatus* fruit rinds [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101: 786-791.
- [23] 黎英, 刘夏蕾, 林娅新, 等. 超声-微波协同提取百香果皮果胶的工艺研究 [J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 386-393.
- LI Y, LIU X L, LIN Y X, et al. Ultrasonic-microwave synergistic extraction of pectin from the peel of *passiflora edulis* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(2): 386-393.

- [24] XU S Y, LIU J P, HUANG X, et al. Ultrasonic-microwave assisted extraction, characterization and biological activity of pectin from jackfruit peel[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 90: 577-582.
- [25] 刘媛洁, 张良, 胡欢平, 等. 酶法协同超声波辅助酸法提取柚子皮中果胶工艺条件优化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 114-119.
- LIU Y J, ZHANG L, HU H P, et al. Optimization on technology conditions of extracted pectin from shaddock peel by enzymatic method combined with ultrasonic assisted acid method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(4): 114-119.
- [26] 李晓娟, 唐彦武, 王珣, 等. 超声辅助草酸铵法提取南瓜果胶及其理化性质研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(8): 65-68.
- LI X J, TANG Y W, WANG X, et al. Ultrasonic-assisted extraction of pumpkin pectin by ammonium oxalate and its physicochemical properties[J]. *China Condiment*, 2021, 46(8): 65-68.
- [27] 李殿怡, 豆颜雨, 王艺会, 等. 酸水解法提取柑橘皮果胶的工艺优化[J]. *化学与生物工程*, 2019, 36(10): 51-54, 68.
- LI D Y, DOU Y Y, WANG Y H, et al. Optimization in acid hydrolysis process of pectin from citrus peel [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2019, 36(10): 51-54, 68.
- [28] 宋贤良, 张星启, 蔡纯, 等. 菠萝蜜皮果胶提醇沉工艺优化及其结构分析[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(4): 664-668.
- SONG X L, ZHANG X Q, CAI C, et al. Optimization of process of pectin by acid extraction and alcohol precipitation from jackfruit peel and structure analysis[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(4): 664-668.
- [29] 张星启, 宋贤良, 陈颖森, 等. 响应面优化菠萝蜜果皮果胶的酶法提取工艺[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(3): 89-93, 98.
- ZHANG X Q, SONG X L, CHEN Y S, et al. Optimization of enzymatic extraction process for pectin from jackfruit peel by response surface methodology [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(3): 89-93, 98.
- [30] CHEN Y, XU C F, HUANG R, et al. Butyrate from pectin fermentation inhibits intestinal cholesterol absorption and attenuates atherosclerosis in apolipoprotein E-deficient mice [J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2018, 56: 175-182.
- [31] ESPINAL-RUIZ M, RESTREPO-SÁNCHEZ L P, NARVÁEZ-CUENCA C E, et al. Impact of pectin properties on lipid digestion under simulated gastrointestinal conditions: Comparison of citrus and banana passion fruit (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*) pectins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 329-342.
- [32] DE FREITAS PEDROSA L, LOPES R G, FABI J P. The acid and neutral fractions of pectins isolated from ripe and overripe papayas differentially affect galectin-3 inhibition and colon cancer cell growth[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 2 681-2 690.
- [33] KHOTIMCHENKO M. Pectin polymers for colon-targeted antitumor drug delivery [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 158: 1 110-1 124.
- [34] 董银萍, 李拖平. 山楂果胶的抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2014, 35(3): 29-32.
- DONG Y P, LI T P. Antioxidant activity of hawthorn pectin[J]. *Food Science*, 2014, 35(3): 29-32.
- [35] 李倩倩, 李武笋, 桑伟娜, 等. 番茄果胶和半纤维素抗氧化活性分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 17-21.
- LI Q Q, LI W S, SANG W N, et al. Analysis of antioxidant activity of pectin and hemicellulose extracted from tomato fruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(2): 17-21.
- [36] XU F Z, ZHANG S K, WATERHOUSE G I N, et al. Yeast fermentation of apple and grape pomaces affects subsequent aqueous pectin extraction: Composition, structure, functional and antioxidant properties of pectins [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107945.
- [37] LIU N, YANG W N, LI X, et al. Comparison of characterization and antioxidant activity of different citrus peel pectins[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132683.
- [38] TENG H, HE Z G, LI X, et al. Chemical structure, antioxidant and anti-inflammatory activities of two novel pectin polysaccharides from purple passion fruit (*Passiflora edulia* Sims) peel[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1 264: 133309.
- [39] XIONG B Y, ZHANG W C, WU Z Y, et al. Preparation, characterization, antioxidant and anti-inflammatory activities of acid-soluble pectin from okra (*Abelmoschus esculentus* L.) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 181: 824-834.
- [40] HUANG C J, HSIEH H M, TU H P, et al. Generalized anxiety disorder in type 2 diabetes mellitus: prevalence and clinical characteristics [J]. *Brazilian Journal of Psychiatry*, 2020, 42: 621-629.
- [41] HAMDEN K, BOUJIBIHA M A, BEN ABDELJELIL N, et al. Inhibitory effect of fermented pectin on key metabolic enzymes associated with diabetes, obesity; and Liver-Kidney tissues toxicities[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2018, 16: 82-89.
- [42] ZHAN J, LIANG Y R, LIU D H, et al. Pectin reduces environmental pollutant-induced obesity in mice through regulating gut microbiota: A case study of p, p'-DDE [J]. *Environment International*, 2019, 130: 104861.
- [43] FERREIRA A, MORENO F J, CUEVA C, et al. Behaviour of citrus pectin during its gastrointestinal digestion and fermentation in a dynamic simulator (simgi®) [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 207: 382-390.
- [44] JIANG T T, GAO X J, WU C, et al. Apple-derived pectin modulates gut microbiota, improves gut barrier function, and attenuates metabolic endotoxemia in rats with diet-induced obesity [J]. *Nutrients*, 2016, 8(3): 126.
- [45] 刘少阳, 豆康宁, 卢培培, 等. 苹果果胶对面粉品质的影响研

- 究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(6): 38-40.
- LIU S Y, DOU K N, LU P P, et al. Study on the effect of apple pectin on flour quality[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(6): 38-40.
- [46] 李晓, 李静雯, 陈晔, 等. 豆腐柴叶低甲氧基果胶提取工艺优化及其加工特性和微观结构研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(13): 14-21.
- LI X, LI J W, CHEN Y, et al. Optimization of low-methoxy pectin extraction from *Premna microphylla* Turcz and study on its processing characteristics and microstructure properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 14-21.
- [47] 张蓓. 柠檬果皮胶的理化特性及其稳定酸性乳饮料的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 8-44.
- ZHANG R. Study on physicochemical properties of lemon peel pectin and its stability in acidic milbeverage [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 8-44.
- [48] JRIDI M, ABDELHEDI O, SALEM A, et al. Physicochemical, antioxidant and antibacterial properties of fish gelatin-based edible films enriched with orange peel pectin: Wrapping application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105688.
- [49] PRIYADARSHI R, RIAHI Z, RHIM J W. Antioxidant pectin/pullulan edible coating incorporated with *Vitis vinifera* grape seed extract for extending the shelf life of peanuts [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 183: 111740.
- [50] GUO Z L, GE X Z, LI W Z, et al. Active-intelligent film based on pectin from watermelon peel containing beetroot extract to monitor the freshness of packaged chilled beef [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106751.
- [51] 淡新鑫. 基于果胶凝胶超高压熔化现象的结肠靶向给药体系构建与优化[D]. 厦门: 厦门大学, 2020: 14-55.
- DAN X X. Construction and optimization of colon-specific drug delivery system based on ultra-high pressure melting of pectin gel [D]. Xiamen: Xiamen University, 2020: 14-55.
- [52] JUNG J, ARNOLD R D, WICKER L. Pectin and charge modified pectin hydrogel beads as a colon-targeted drug delivery carrier[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 104: 116-121.
- [53] MÉNDEZ D A, SCHROETER B, MARTÍNEZ-ABAD A, et al. Pectin-based aerogel particles for drug delivery: Effect of pectin composition on aerogel structure and release properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 306: 120604.
- [54] 姚元勇, 何来斌, 张萌, 等. 新型生物质果胶吸附材料的制备及水溶液中铜离子(II)吸附性能研究[J]. *化学试剂*, 2022, 44(3): 393-400.
- YAO Y Y, HE L B, ZHANG M, et al. Preparation of novel biomass pectin adsorption materials and its adsorption performance of copper (II) in aqueous solution[J]. *Chemical Reagents*, 2022, 44(3): 393-400.
- [55] ARACHCHIGE M P M, MU T, MA M. Effect of high hydrostatic pressure-assisted pectinase modification on the Pb²⁺ adsorption capacity of pectin isolated from sweet potato residue [J]. *Chemosphere*, 2021, 262: 128102.
-
- (上接第 148 页)
- [10] MCGEEHAN G M, UHL J. TNF- α in Human diseases[J]. *Current Pharmaceutical Design*, 1996, 2(6): 662-667.
- [11] MIMS B M, GRISHAM M B. Humanizing the mouse immune system to study splanchnic organ inflammation[J]. *The Journal of Physiology*, 2018, 596(17): 3 915-3 927.
- [12] CHEI S, OH H J, LEE K, et al. Dysfunction of B cell leading to failure of immunoglobulin response is ameliorated by dietary silk peptide in 14-month-old C57BL/6 mice[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 583186.
- [13] MORTAZAVI A, WILLIAMS B A, MCCUE K, et al. Mapping and quantifying mammalian transcriptomes by RNA-Seq [J]. *Nature Methods*, 2008, 5(7): 621-628.
- [14] PERTEA M, PERTEA G M, ANTONESCU C M, et al. StringTie enables improved reconstruction of a transcriptome from RNA-seq reads[J]. *Nature Biotechnology*, 2015, 33(3): 290.
- [15] HANAZONO K, NATSUGOE S, STEIN H J, et al. Distribution of p53 mutations in esophageal and gastric carcinomas and the relationship with p53 expression[J]. *Oncology Reports*, 2006, 15: 821-824.
- [16] ZUO Z W, ZHOU Z R, CHANG Y Z, et al. Ribonucleotide reductase M2 (RRM2): Regulation, function and targeting strategy in Human cancer[J]. *Genes & Diseases*, 2022, 11(1): 218-233.
- [17] WANG D, SUN H, LI X, et al. CCNB2 is a novel prognostic factor and a potential therapeutic target in low-grade glioma [J]. *Bioscience Reports*, 2022, 42(1): 1 939.
- [18] QI D, PENG M. Ferroptosis-mediated immune responses in cancer [J]. *Frontiers in Immunology*, 2023, 14: 1188365.
- [19] LI H H, CHOESANG T, BAO W L, et al. Decreasing TfR1 expression reverses anemia and hepcidin suppression in β -thalassemic mice[J]. *Blood*, 2017, 129(11): 1 514-1 526.
- [20] GONG Z, HE Y, MI X, et al. Complement and coagulation cascades pathway-related signature as a predictor of immunotherapy in metastatic urothelial cancer[J]. *Aging (Albany NY)*, 2023, 15(18): 9 479-9 498.
- [21] DISCIPIO R G, DAFFERN P J, SRIRAMARAO P, et al. Human polymorphonuclear leukocytes adhere to complement factor H through an interaction that involves alphaMbeta2 (CD11b/CD18) [J]. *Journal of Immunology*, 1998, 160(8): 4 057-4 066.
- [22] OMATSY M, NAKANISHI Y, IWANE K, et al. THBS1-producing tumor-infiltrating monocyte-like cells contribute to immunosuppression and metastasis in colorectal cancer[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5 534.