

任多多, 江伟, 孙印石, 等. 果胶的分类、功能及其在食品工业中应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 438–446. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020069

REN Duoduo, JIANG Wei, SUN Yinshi, et al. Research Progress on the Classification, Function and Application of Pectin in Food Industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 438–446. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020069

· 专题综述 ·

果胶的分类、功能及其在食品工业中应用的研究进展

任多多^{1,2}, 江 伟³, 孙印石^{1,2}, 陈建波¹, 华 梅¹, 李珊珊^{1,4,*}

(1. 中国农业科学院特产研究所, 吉林长春 130112;

2. 吉林农业大学中药材学院, 吉林长春 130118;

3. 山东省威海市文登区农业农村局, 山东威海 264400;

4. 吉林农业科技学院生物与制药工程学院, 吉林吉林 132101)

摘 要: 果胶是一类结构复杂的天然多糖, 是高等植物细胞壁的重要组成部分。根据其单糖组成及分子结构的差异, 可分为同型半乳糖醛酸聚糖、I 型鼠李半乳糖醛酸聚糖、II 型鼠李半乳糖醛酸聚糖、木糖半乳糖醛酸聚糖等类型。果胶结构复杂, 生物活性多样, 如免疫调节作用、抗肿瘤、抗氧化、降血糖、改善胃肠道功能等。一些特定来源的果胶可作为天然的多功能型食品添加剂, 被用作凝胶剂、增稠剂、乳化剂、稳定剂等, 在食品工业领域得到了广泛的应用并具有良好的发展前景。这些果胶各自不同的理化性质和结构特征, 决定了它们可应用在食品工业中的不同领域。本文从果胶的分类及结构特征、来源、功效、在食品工业中的应用等方面介绍了果胶的最新研究进展, 以期对果胶的进一步开发和利用提供理论参考。

关键词: 果胶, 结构, 功效, 食品, 应用

中图分类号: Q539⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)03-0438-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020069

本文网刊:



Research Progress on the Classification, Function and Application of Pectin in Food Industry

REN Duoduo^{1,2}, JIANG Wei³, SUN Yinshi^{1,2}, CHEN Jianbo¹, HUA Mei¹, LI Shanshan^{1,4,*}

(1. Institute of Special Animal and Plant Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130112, China;

2. College of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

3. Agriculture and Rural Bureau of Wendeng District, Weihai City, Shandong Province, Weihai 264400, China;

4. Institute of Biological and Pharmaceutical Engineering, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China)

Abstract: Pectin is a kind of natural polysaccharide with complex structure and an important part of the cell wall of higher plants. According to the difference of its monosaccharide composition and molecular structure, pectin can be divided into Homogalacturonan, type I Rhamngalacturonan, type II Rhamngalacturonan, Xylogalacturonan and other types. Pectin has a complex structure and diverse biological activities, such as immune regulation, anti-tumor, anti-oxidation, hypoglycemic, and improving gastrointestinal function. Some specific sources of pectin can be used as natural multifunctional food additives, used as gelling agents, thickeners, emulsifiers, stabilizers, etc., and have been widely used in the food industry and have good development prospects. The different physical and chemical properties and structural characteristics of these

收稿日期: 2021-02-09

基金项目: 吉林省科技发展规划项目 (20190304015YY); 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-2016-ISAPS); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (125161034-2021-017, 1610342020002)。

作者简介: 任多多 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 多糖对肠道微生态的影响, E-mail: renduoduo611@163.com。

* 通信作者: 李珊珊 (1984-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 植物多糖的结构与肠道菌群的相互作用, E-mail: lishanshan@caas.cn。

pectins determine that they can be used in different fields in the food industry. This article introduces the latest research progress of pectin in terms of its classification, structural characteristics, source, efficacy, and application in the food industry, in order to provide a theoretical reference for the further development and utilization of pectin.

Key words: pectin; structure; function; food; application

果胶是一种结构复杂的天然植物多糖,由 C、H、O 3 种元素组成,分子式为 $(C_6H_{10}O_6)_n$ 。天然果胶类物质以原果胶、果胶、果胶酸的形态广泛存在于植物的根、茎、叶、果实中,是高等植物细胞壁的重要组成部分,它与纤维素、半纤维素共同构成植物细胞初生壁和胞间层^[1]。1825 年,法国药剂师 Braconnot 首次从蔬菜中分离得到果胶^[2],自此开始了对果胶的认识和探究。现在果胶常用作稳定剂、乳化剂、增稠剂、起泡剂和凝胶剂而广泛应用于食品行业。此外,果胶在改善肠道健康、吸附重金属离子、抗肿瘤、抗炎、抗氧化、降血糖等方面的作用均有报道^[3-8]。本文综述了果胶的分类及结构特征、来源、功效、在食品工业中的应用及展望,以期为进一步拓展果胶来源、开发和实际生产应用提供参考。

1 果胶的分类及结构特征

果胶是一种天然高分子多糖,存在于植物的初生细胞壁和胞间层,相对分子质量介于 20~400 kDa 之间,不同提取原料和工艺得到的果胶其相对分子质量差异较大,并具有高度的结构多样性^[9-10]。根据酯化程度的(羟基酯化的百分数)不同,可分为高酯果胶和低酯果胶。一般将酯化度大于 50% 的果胶被称为高酯果胶(High methoxyl pectin, HMP),低于 50% 的称为低酯果胶(Low methoxyl pectin, LMP)^[11-12]。酯化度的大小与果胶的乳化性、凝胶性等性能有着紧密的联系。果胶主要是一类以 D-半乳糖醛酸(Galacturonic acid, GalA)以 α -1,4-糖苷键连接组成的酸性杂多糖,根据其分子主链和支链结构的不同,将其分为 4 种类型即同型半乳糖醛酸聚糖(Homogalacturonan, HG)、I 型鼠李半乳糖醛酸聚糖(type I Rhamngalacturonan, RG-I)、II 型鼠李半乳糖醛酸聚糖(type II Rhamngalacturonan, RG-II)和木糖半乳糖醛酸聚糖(Xylogalacturonan, XG)^[13]。果胶分子结构域连接方式目前受到较多学者认可的是平滑区和毛发区模型^[14],即认为平滑的主链含有 HG 结构,它们和毛发区的侧链如 RG-I、RG-II 等相连构成了果胶分子。其中, HG 和 RG-I 型果胶在自然界中含量最为丰富。HG 是细胞壁中主要的果胶类型之一, GalA 含量高于 65%^[15],以 α -1,4-GalA 重复单位为主链, O-2 和 O-3 常被乙酰化, C-6 位羧基常出现不同程度的甲酯化。RG-I 型果胶是一种具有分支结构的果胶结构域单元,由 $[-1,2-\alpha\text{-Rha-1,4-}\alpha\text{-GalA-}]_n$ 二糖重复单位构成主链, GalA 的 O-2 和 O-3 位可以被乙酰化,不同来源的 RG-I 型果胶乙酰化程度有所不同^[16]。RG-II 型果胶通常由 12 种单糖组成,主链由 α -1,4-GalA 连接构成, GalA 的 O-2 或 O-3 位可

以被取代,部分 GalA 的 C-6 位常被甲酯化; RG-II 常与 HG 的骨架相连,主链一致,但是具有多糖聚合物侧链,结构模式不固定^[14, 16-17]。RG-II 含有高度保守序列,被认为是植物细胞壁中分布最广泛的、也是最复杂的结构域单元^[14]。

2 果胶的来源

目前国内规模较大的果胶生产厂家主要以柑橘和苹果渣为原料,此外也有以向日葵盘、甜菜粕、甘薯渣、西瓜皮等为原料进行商业化果胶生产。

2.1 柑橘果胶

我国是柑橘生产大国,有着较为丰富的橘皮资源。橘皮果胶也是我国市场上最常见的果胶之一。柑橘果胶(Citrus pectin, CP)是从柑、橘、柠檬、橙子和柚子等栽培类型水果的果皮中提取的一种多糖复合物。柑橘果皮中约含 20%~30% 的果胶^[18-19],其乳化特性受结构因素的影响较大,如直链区区长、酯化度高、乙酰基等疏水性基团含量低,会导致乳化特性较差,这时可通过酶法、乙酰化反应和热处理等手段,对果胶进行结构改性,从而增加疏水性基团的数量、降低分子量以提高乳化活性^[20]。Wang 等^[21]研究发现超声波辅助提取的柑橘果胶比未处理的果胶具有更好的乳化能力与乳化稳定性。另外,柠檬皮也是优质的果胶来源之一,其果胶的含量高达 30%,具有很好的凝胶性、增稠性和乳化性^[22]。柠檬和橙子果胶有理想的黏度和蛋白质稳定性表现,可以为食物提供良好的口感^[23]。

2.2 苹果果胶

苹果果胶(Apple pectin, AP)是从苹果渣中提取的高分子多糖类物质。苹果果胶是一种常见的天然食品添加剂,具有良好的凝胶性、稳定性、增稠性和乳化性等^[24]。朱晓红等^[25]研究发现苹果渣中含有 15%~18% 的果胶。王欣等^[26-27]经过优化工艺后发现提取的苹果果胶其凝胶特性和粘度特性都适合作为凝胶剂,进一步研究发现,温度和原料对果胶的理化性质具有很大的影响,如吸热性能受萃取温度的影响,而放热性能仅受其成分和原料的影响。马丽苹等^[28]研究发现苹果果胶经酸碱改性和热改性后会含有丰富的脱水半乳糖醛酸,有助于提高果胶的抗氧化活性,这可能与半乳糖醛酸含量的提高有关。

2.3 葵盘果胶

葵盘果胶(Sunflower head pectin, SFHP)是从向日葵葵盘中提取得到的一种天然果胶。向日葵盘中的果胶含量为 15%~25%^[29]。王泽盛等^[30]通过研究得出向日葵盘果胶在最佳沉淀工艺条件下,果胶纯度

可达到81.65%。研究报道向日葵盘果胶的分子质量高于柑橘果胶,均一性优于柑橘果胶^[31]。马雪梅等^[32]发现向日葵果胶具有良好的凝胶性和适用性,其凝胶化不需要添加糖类,可广泛应用于低糖食品中。

2.4 甜菜果胶

甜菜果胶(Beet pectin, BP)是从甜菜粕中提取出来的酸性阴离子多糖。甜菜制糖后的副产品甜菜粕可回收利用作为提取果胶的原料^[33],其中果胶含量占甜菜粕干基的15%~30%^[34]。甜菜果胶具有良好的乳化活性和凝胶特性,同时具有较强的生物相容性、稳定性、可降解性和无毒性等特质。陈浩等^[35]研究发现甜菜果胶分子量和表观黏度比柑橘果胶要小,但是甜菜果胶的热稳定性要优于柑橘果胶。甜菜果胶分子质量较小,乙酰基含量较高,对凝胶性质具有很好的调控作用^[33,36]。

2.5 甘薯果胶

甘薯果胶(Sweet potato pectin, SWP)是从甘薯渣中提取出来的一种酸性杂多糖。甘薯是世界上重要的粮食作物,目前我国甘薯的栽培面积和总产量均居世界前列,在工业化生产过程中会产生大量的甘薯渣,即甘薯淀粉加工后的副产物。甘薯渣中含有20%~30%的果胶类物质^[37]。研究发现酸提取法可提高果胶得率,在食品乳状液体系中被广泛用作稳定剂^[38]。甘薯果胶经过高静水压力或果胶酶处理后,乳化性能得到显著改善,在食品加工中具有广阔的应用前景^[39]。

2.6 西瓜果胶

西瓜果胶(Watermelon pectin, WP)是从西瓜皮中提取得到的高分子多糖类物质。西瓜皮往往不被人们直接食用,通常被丢弃成为垃圾,造成资源浪费,同时也给环境保护带来了压力。顾焰波等^[40]采用离子交换法对西瓜皮中果胶进行提取,果胶含量为7%~13%。龚殿婷等^[41]对比了多种西瓜皮果胶提取方法,发现酸水解法和微波辅助提取法工艺简单易控制,成本低,果胶的得率和纯度高,在生产中可被广泛使用。叶华等^[42]以西瓜皮为原料,采用微波辅助法结合碱法脱脂提取西瓜皮果胶,可直接制备得到西瓜

皮低酯果胶。

2.7 其它果胶

姜燕等^[43]采用超声波辅助法进行百香果皮果胶的提取,工艺优化后果胶提取率为17%~24%,提取的果胶可作为面包改良剂改善面包的感官特性。冯媛媛^[44]以薛荔籽为原材料,通过水提-乙醇法对果胶进行了提取,提取率为9%~11%,纯度较高,果胶表观品质较好。台建祥等^[45]采用酶法提取菠萝蜜皮中的果胶,并通过正交法优化的提取工艺,果胶提取率为8%~14%。顾焰波等^[46]通过离子交换法提取木瓜皮中果胶,提取率为6%~18%。李楚楚等^[47]以柿子渣为研究对象,采用酸性电解水为提取溶剂,优化工艺后得到果胶提取率为5%~6%。另外研究显示一些水果废弃物,例如石榴皮渣^[48]、葡萄渣^[49]、香蕉皮^[50]、芒果皮^[51]、仙人掌果皮^[52]、无花果皮^[53]等也可作为提取果胶的原料。表1总结了部分果胶原料、提取工艺与果胶的提取率。

3 果胶的功效

3.1 免疫作用

许多研究表明果胶能够在体外激活补体或增强中性粒细胞、巨噬细胞和淋巴细胞的活性,是具有免疫调节作用的生理活性物质^[54]。人参果胶对人单核细胞THP-1分泌细胞因子IL-8及对小鼠脾细胞分泌IL-2均具有明显的双向调节作用,即低浓度的人参果胶可以促进免疫细胞因子的分泌,而高浓度的人参果胶呈现出抑制作用^[55]。红参果胶能够增强T细胞的免疫功能,并抑制髓源性细胞的活性^[56]。研究发现新疆芡实果胶多糖可以提高细胞增殖活性与吞噬能力,有效刺激细胞释放TNF- α 、IL-1 β 等细胞因子,具有较强的免疫活性^[57]。

其它果胶,如柑橘果胶、苹果果胶等,也对机体具有免疫调节作用^[54,58]。因此,果胶可通过调节免疫细胞因子的分泌,在特异性免疫和非特异性免疫中发挥作用,从而使机体维持相对稳定的生理功能。

3.2 抗肿瘤

果胶可与其它药物结合或单独发挥抗肿瘤功

表1 部分果胶原料、提取工艺与果胶提取率

Table 1 Some materials, extraction process and extraction rate of pectin

原料	提取工艺	果胶提取率(%)	参考文献
柑橘皮	酸提取法、酶提取法、超声波法、微波辅助法等	20~30	[18-19]
苹果渣	酸提取法	15~18	[25]
向日葵盘	酸提取法	15~25	[29]
甜菜粕	酸提取法、微波辅助法	15~30	[34]
甘薯渣	酸提取法、微波辅助法、微生物发酵法	20~30	[37]
西瓜皮	酸提取法、微波辅助法	7~13	[40]
百香果皮	超声波辅助法	17~24	[43]
薛荔籽	水提-乙醇法	9~11	[44]
菠萝蜜皮	酶法	8~14	[45]
木瓜皮	离子交换法	6~18	[46]
柿子渣	酸提取法	5~6	[47]

效。果胶阿霉素复合物能够有效抑制人源性肿瘤细胞的生长,并明显延长腹水癌小鼠的生存期^[59]。研究表明果胶阿霉素大分子前药纳米传递体系对肝癌细胞的增殖具有明显抑制作用,呈现出剂量和时间依赖性关系^[60]。苹果果胶能够抑制乳腺癌细胞在体外的增殖,诱导 4T1 乳腺癌细胞发生凋亡,继而来延缓癌症进程^[61]。Fan 等^[62]报道人参果胶能够在一定程度上能够抑制癌细胞的迁移,这可能是果胶中的 HG 和 RG-I 结构域协调作用的结果。热处理后的向日葵盘果胶能够诱导结肠癌 CT26 细胞凋亡,对 CT26 肿瘤生长有抑制作用^[63]。改性柑橘果胶经过体内外实验发现其主要通过下调半乳糖凝集素-3,对膀胱癌细胞的生长、增殖和存活产生显著的抑制作用,从而在癌症治疗和预防中起着重要作用^[64]。因此,部分果胶经过改性后具有良好的抗肿瘤活性。

3.3 抗氧化

果胶可以通过抑制或清除生物体内自由基的产生,达到抗氧化的作用。山楂果胶具有较强的抗氧化及清除自由基的活性功能,能有效调节小鼠肝脏抗氧化活性,且呈剂量效应关系^[65]。研究报道番茄细胞壁中不同类型果胶均具有一定的抗氧化活性^[66]。苹果果胶降解物是一种兼具供氢、供电子能力较强的抗氧化物质,这可能与降解物中含有的低聚半乳糖醛酸、糠醛等还原性物质有关^[67]。不同提取工艺方式对果胶的抗氧化活性具有不同的影响。研究采用超声辅助法、酸提法和碱提法提取豆腐柴叶果胶,发现这三种方法提取的果胶均具有一定的抗氧化活性,但碱提法活性更强^[68]。此外,橘皮果胶^[69]、甘薯果胶^[70]、菊芋果胶^[71]等也具有一定的抗氧化活性。

3.4 降血糖

许多植物果胶具有降血糖的功能。研究发现含有 HG 和 RG-I 型结构域的人参果胶在小鼠体内具有明显的降血糖活性^[72]。短枝六道木叶果胶及其水提物可明显降低糖尿病小鼠空腹血糖值,促进胰岛素分泌,增加高血糖小鼠对外源葡萄糖耐受力,促进血糖代谢功能的作用^[73]。Liu 等^[74]研究了柑橘果胶对 II 型糖尿病大鼠的抗糖尿病作用,结果发现,注射柑橘果胶 4 周后,动物血糖水平下降,其抗糖尿病作用是通过调节 PI3K/Akt 信号通路实现的。Makarova 等^[75]报道苹果果胶可以作为一种健康的天然产物来降低餐后血糖,改善糖尿病患者的健康。

3.5 对胃肠道健康的影响

果胶可以通过调节代谢产物短链脂肪酸(SCFAs)的生成来维持肠道的健康。常见的 SCFAs 包括(乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸)对调节机体代谢起着重要作用^[76-77]。Alvaro 等^[78]在研究柑橘果胶的模拟消化和发酵行为时发现,该果胶能够促进 SCFAs 含量明显增加,这是由果胶的直接发酵及细菌间的交互共生作用影响的。唐艳等^[79]研究水提薛荔籽果胶对去势雌性大鼠肠道健康的影响,发现果胶

能明显升高盲肠内容物 SCFAs 的浓度,同时降低游离氨浓度,改善去势雌性大鼠肠道的健康。

果胶是许多膳食纤维的组成成分,具有很好的改善胃肠道健康的作用。膳食补充果胶可以调节一系列与肥胖有关的生理参数,从而有效地减少肥胖,并可能是通过调节胃肠功能发挥该作用^[80]。毛湘冰等^[81]发现往断奶大鼠的饲料中添加苹果果胶寡糖,可以改善断奶大鼠的生长性能,而这可能源于其改善了空肠黏膜形态、肠道菌群的组成和结构。吴莎极^[82]研究发现,改性后的佛手皮渣果胶吸收镉的能力增强,能在胃肠道内完成对镉的吸附,减少镉在肠道内的吸收,并以粪便的形式排出体外,有效预防和缓解镉引起的肝肾损伤,提示果胶或可用于缓解重金属在体内的累积。果胶还可增加消化液的黏稠程度,延长食物在人体内的消化时间^[34]。果胶的黏性可使其在肠道内大量吸收水分,使粪便保持柔软状态,进而促进排便,也可明显缩短食物在结肠的传输时间、改善便秘症状^[83]。果胶可作为功能性纤维改善仔猪的肠道健康,当仔猪发生腹泻时,饲喂果胶可以缓解仔猪的腹泻状态^[84]。Alvaro 等^[78]利用动态胃肠道模拟器检测柑橘果胶在胃、小肠、结肠中的消化过程,发现经过上消化道(胃和小肠)后果胶分子量变化很小,约 88% 的柑橘果胶保持完整,而主要在结肠中被肠道菌群利用和分解。以上研究表明,果胶类化学物质,或可通过调节胃肠道功能达到改善肥胖、促进生长、缓解重金属累积、促进营养物质吸收等功能,而这些功能又与肠道菌群密切相关。

果胶对肠道菌群具有明显的调节与改善作用。可溶性膳食纤维果胶可以调节肥胖大鼠的肠道菌群结构,缓解肥胖引起的系统性炎症反应和肠道局部炎症反应^[85]。植物中果胶的发酵降解可以增加肠道菌群的稳定性,并改善肠道的内环境。果胶可通过促进有益菌的生长,抑制有害菌的增殖,来维持肠道的稳态^[84]。粪菌移植联合果胶治疗可以增加小鼠的有益菌群、抑制有害菌群起到调节菌群的积极作用^[86]。果胶对肠道中盲肠内容物有益菌(双歧杆菌、乳酸杆菌)数量减少、有害菌(大肠杆菌)数量增加有一定的缓解作用,还可明显促进双歧杆菌增殖,加速益生菌的生长和代谢^[87]。

因此,果胶可通过调节代谢产物短链脂肪酸的生成、调节胃肠功能、调节肠道菌群的组成和结构等发挥其在改善胃肠道、保护胃肠道健康方面的作用。

4 果胶在食品工业中的应用

近年来,食品添加剂在食品工业发展过程中发挥着重要的推进作用。果胶作为一种天然食品添加剂,通常被用作凝胶剂、增稠剂、乳化剂、稳定剂等,对食品的品质形成发挥着不可或缺的作用^[88],具有广阔的开发前景。

4.1 不同来源果胶在食品工业中的应用

不同来源的果胶,因其理化性质不同可应用在

表2 部分果胶作为食品添加剂的基本性质及其应用

Table 2 The basic properties and application scenarios of some pectins as food additives

原料	基本性质	食品名称
柑橘果胶	增稠剂 ^[89] ;	果酱、冰淇淋、果肉型饮料及焙烤食品
苹果果胶	组织成型剂 ^[90] ; 凝胶剂、增稠剂、稳定剂 ^[91] ;	果酱、果冻、乳制品、特需食品
甜菜果胶	乳化剂、稳定剂 ^[37] ; 凝胶剂 ^[36]	饮料、乳制品、凝胶食品
甘薯果胶	增稠剂、稳定剂 ^[92]	饮料、乳制品
豆腐柴果胶	乳化剂、稳定剂、起泡剂 ^[93]	饮料、乳制品、焙烤食品
向日葵果胶	增稠剂、凝胶剂、稳定剂 ^[94]	果汁饮料、酸奶
铁皮石斛果胶	增稠剂、乳化剂、稳定剂 ^[95]	果酱、饮料、乳制品、食品夹心料

食品工业中的不同领域。研究报道柑橘果胶溶液的黏度随剪切速率的增加而逐渐降低,可用作食品增稠剂,应用于果酱、冰淇淋、果肉型饮料及焙烤食品中^[89]。苹果果胶可添加到面粉中,提高面团韧性,从而满足产品的特需要求^[90],也可以作为果酱和果冻中的凝胶剂、乳制品和奶品中的增稠剂、食品加工中的稳定剂等^[91]。甜菜果胶分子量低,乙酰化程度高,具有良好的乳化性能和稳定性,可作为酸性乳饮料等的乳化剂,且能够使凝胶的网络结构更加致密和紧凑,为甜菜果胶-玉米淀粉凝胶在食品工业中的应用提供了理论基础^[33, 36]。研究报道酸法制备的甘薯果胶^[92]具有较强的乳化能力和乳化稳定性,已作为增稠剂和稳定剂应用于食品中。豆腐柴叶果胶,具有较好的乳化稳定性和泡沫稳定性,在食品工业中可作为乳化剂、稳定剂和起泡剂^[93]。向日葵果胶可作为一种天然提取的稳定剂、增稠剂应用于酸奶中,改善酸奶的结构状态和感官风味^[94]。

4.2 改性果胶在食品工业中的应用

不同修饰改性处理方式对果胶的性能也有不同的影响。研究报道以鲜铁皮石斛为原料提取果胶^[95],发现未改性和弱改性的果胶黏度较高,适宜作为增稠剂应用于制作果酱;超声波改性后的铁皮石斛果胶乳液的乳化性增强,可作为乳化剂应用于乳制品中;酶改性后的铁皮石斛果胶分散体系更稳定,可作为乳化剂和稳定剂用于饮料、果酱加工和食品夹心料等产品中。

4.3 酯化度对果胶应用的影响

果胶的酯化度通常因原料的多样性和提取工艺的不同而不同。酯化度的大小与果胶的乳化性、凝胶性等性能有着紧密的联系。高酯果胶可用作增稠剂、凝胶剂、稳定剂和乳化剂,用于制造果冻、果酱、酸奶以及果汁饮料、蛋黄、酱等,主要用于生产高糖分高热量的食品。柑橘皮和苹果渣则常用于商业化高酯果胶的生产^[12]。而低酯果胶在食品加工中常用来加工低糖低热量的功能性保健食品,可用于糖果的糖衣、果肉型饮料、烘烤食品等的制作^[24]。目前,低酯果胶一般都是由温和的酸或碱处理高酯果胶转变而来^[96]。向日葵盘、西瓜皮是天然低酯果胶的来源之一^[97]。

因此,不同原料提取的果胶的结构、功能特性不同,在食品中的应用也不同。表2中列出了部分果胶作为食品添加剂的基本性质。

5 展望

我国果胶资源丰富,原材料容易获得,成本低廉,且多为食品工业再生资源(如柑橘皮、苹果渣、向日葵盘、甜菜粕、甘薯渣、西瓜皮等),对果胶的充分利用和有效开发,具有显著的经济效益和社会效益,也符合绿色、可持续发展的产业需求。柑橘皮和苹果渣不仅来源广泛,而且果胶提取率较高,因此常作为提取果胶的原料。另外,目前果胶的提取工艺较多,采用不同的提取方法,果胶的提取率和提取纯度不同,因此,选择最优提取工艺也将成为未来果胶在食品工业中的应用所需关注的重点。

果胶作为一种天然植物多糖,产业前景广阔,生物活性与功能多样,可广泛应用于食品工业中,具有不可替代的功能特性。作为食品添加剂,除单独应用外,还可与其他天然的或合成的聚合物混合使用以改善果胶性能,也可通过物理、化学修饰,让果胶更好地应用于食品中。不同原料提取的果胶的特性不同,在食品中的应用也不同,对食品的颜色、香气、口味等会产生不同的效果。因此,如何更好的对果胶产品加以改造,满足人们对健康食品的需求,是该领域今后的一个研究重点。

关于果胶的研究报道已有很多,但现阶段对于果胶的许多有益活性的作用机制、作用靶点的研究仍不够深入和彻底,许多作用机制尚不明确,有待进一步探讨。随着科学技术的发展,科研工作者对果胶认识的不断加深,对果胶构象、组成、结构及构效关系研究的不断深入,必定能够促进果胶这一类生物大分子的进一步创新、开发和利用,使果胶应用于更多新领域,为人类健康作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 祝儒刚,侯玉婷,孙艳娟.果胶及其寡糖的性质和功能研究进展[J].辽宁大学学报(自然科学版),2017,44(4):342-350.
- [2] ZHU R G, HOU Y T, SUN Y D. Research progress on properties and functions of pectin and its oligosaccharides[J]. Journal of Liaoning University(Natural Science Edition), 2017, 44(4): 342-350.
- [2] ELLEN G M, NIGEL J B, KEITH W W, et al. Pectin-An

- emerging new bioactive food polysaccharide[J]. *Trend in Food Science & Technology*, 2012, 24(2): 64–73.
- [3] WU J J, XU Y B, SU J, et al. Roles of gut microbiota and metabolites in a homogalacturonan-type pectic polysaccharide from *Ficus pumila* Linn. fruits mediated amelioration of obesity[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 248: 116780.
- [4] 李鹏琳. 果胶的酯化度和分子量对 Pb^{2+} 吸附性能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [LI P L. The effect of degree of esterification and molecular weight of pectins on the adsorption of Pb^{2+} [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.]
- [5] ZHANG S L, MAO Y Q, ZHANG Z Y, et al. Pectin supplement significantly enhanced the anti-PD-1 efficacy in tumor-bearing mice humanized with gut microbiota from patients with colorectal cancer[J]. *Theranostics*, 2021, 11(9): 4155–4170.
- [6] TAN H, CHEN W, LIU Q, et al. Pectin oligosaccharides ameliorate colon cancer by regulating oxidative stress and inflammation-activated signaling pathways[J]. *Frontiers in Immunology*, 2018, 9: 1504.
- [7] 张阳, 王文君, 谭妙英, 等. 不同提取方法对南酸枣果胶多糖理化性质及抗氧化作用的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(23): 21–26. [ZHANG Y, WANG W J, TAN M Y, et al. Effects of different extraction methods on the physicochemical properties and antioxidant activities of pectic polysaccharides from *Chorospondias axillaris* fruit[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(23): 21–26.]
- [8] 周晓欢. 知母多糖的分离纯化与结构分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2019. [ZHOU X H. Purification and structural analysis of polysaccharide from *Rhizoma Anemarrhenae*[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.]
- [9] 许馨予, 毛小雨, 杨鹤雉, 等. 天然植物果胶的提取及其在食品工业中的应用现状[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(8): 115–122. [XU X Y, MAO X Y, YANG H J, et al. Extraction of natural plant pectin and its application in food industry[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(8): 115–122.]
- [10] FISSORE E N, ROJAS A M, GERSCHENSON L N. Rheological performance of pectin-enriched products isolated from red beet (*Beta vulgaris* L. var. conditiva) through alkaline and enzymatic treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 26(1): 249–260.
- [11] COLODEL C, VRIESMANN L C, TEOFILO R F, et al. Extraction of pectin from ponkan (*Citrus reticulata* blanco cv. ponkan) peel: Optimization and structural characterization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117: 385–391.
- [12] 陈芳, 张悦. 果胶作为生物活性成分包埋载体研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 220–224. [CHEN F, ZHANG Y. Advances of pectin as embedded carrier with biological active ingredients[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 220–224.]
- [13] CHEN J, LIU W, LIU C M, et al. Pectin modifications: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(12): 1684–1698.
- [14] 易建勇, 毕金峰, 刘璇, 等. 果胶结构域精细结构研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 292–299. [YI J Y, BI J F, LIU X, et al. A review: Domain fine structure of pectic polysaccharides[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 292–299.]
- [15] 李珊珊, 祁玉丽, 华梅, 等. 北五味子多糖的分离纯化及抗氧化活性研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(4): 233–237. [LI S S, QI Y L, HUA M, et al. Study on purification and antioxidant activity of polysaccharide from *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(4): 233–237.]
- [16] 英欣. 红参多糖的分离纯化及结构分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2018. [YING X. Purification and structural analysis of polysaccharides from Red Ginseng[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2018.]
- [17] OVODOV Y S. Current views on pectin substances[J]. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2009, 35(3): 269–284.
- [18] 叶群丽, 赵玉强, 李小梅, 等. 柑橘皮中果胶提取工艺研究进展[J]. *云南化工*, 2019, 46(8): 59–61. [YE Q L, ZHAO Y Q, LI X M, et al. Research progress of extracting pectin from orange peel[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2019, 46(8): 59–61.]
- [19] CHAN S Y, CHOO W S, YOUNG D J, et al. Pectin as a rheology modifier: Origin, structure, commercial production and rheology[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 161: 118–139.
- [20] 杨金妹, 木泰华, 马梦梅. 果胶结构、提取方法及乳化特性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(14): 315–322. [YANG J S, MU T H, MA M M. Research progress in structure, extraction methods and emulsifying properties of pectin[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(14): 315–322.]
- [21] WANG C, QIU W Y, CHEN T T, et al. Effects of structural and conformational characteristics of citrus pectin on its functional properties[J]. *Food Chemistry*, 2020, 339: 128064–128064.
- [22] 容欧, 刘珊. 柠檬精深加工研究现状[J]. *现代食品*, 2019(4): 5–11. [RONG O, LIU S. Research status of lemon deep processing[J]. *Modern Food*, 2019(4): 5–11.]
- [23] 刘佳, 张书文, 宋广巍, 等. 五种不同来源果胶类多糖的提取及其蛋白质稳定性测定[J]. *中国食品添加剂*, 2016(5): 157–163. [LIU J, ZHANG S W, SONG G W, et al. Extraction of polysaccharides from five kinds of different sources and research of protein stability[J]. *China Food Additives*, 2016(5): 157–163.]
- [24] WANG M, HUANG B, FAN C, et al. Characterization and functional properties of mango peel pectin extracted by ultrasound assisted citric acid[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 91: 794–803.
- [25] 朱晓红, 于颖. 从苹果渣中提取果胶工艺条件的研究[J]. *粮油加工*, 2010(6): 136–138. [ZHU X H, YU Y. Study on technological conditions of extracting pectin from apple pomace[J]. *Cereals and Oils Processing*, 2010(6): 136–138.]
- [26] 王欣. 亚临界水法提取果渣果胶及其品质研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014. [WANG X. A study on extraction and characterization of pectin obtained by subcritical water from pomace[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2014.]
- [27] WANG X, CHEN Q, LU X. Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 38: 129–137.
- [28] 马丽苹, 焦鲲鹏, 罗磊, 等. 改性苹果果胶性质及抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 121–128. [MA L P, JIAO K P,

- LUO L, et al. Characterization and antioxidant activity of modified apple pectin[J]. Food Science, 2017, 38(23): 121-128.]
- [29] MUTHUSAMY S, MANICKAM L P, MURUGESAN V, et al. Pectin extraction from *Helianthus annuus* (sunflower) heads using RSM and ANN modelling by a genetic algorithm approach[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 124: 750-758.]
- [30] 王泽盛, 张磊. 向日葵盘提取低酯果胶沉淀工艺的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2011, 47(1): 74-76. [WANG Z S, ZHANG L. Study on precipitation conditions of extracting low-methoxyl pectin from sunflower head[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 2011, 47(1): 74-76.]
- [31] 王琨, 华霄, 杨瑞金, 等. 正交试验优化向日葵盘果胶的提取和基本分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 1-5. [WANG K, HUA X, YANG R J, et al. Optimization by orthogonal array design of sunflower head pectin extraction and characterization[J]. *Food Science*, 2013, 34(14): 1-5.]
- [32] 马雪梅, 徐霞, 周娅静, 等. 响应曲面法优化酶法提取向日葵盘果胶工艺的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2015(10): 117-122. [MA X M, XU X, ZHOU Y J, et al. Enzyme-assisted extraction of pectin from sunflower heads and optimization by response surface method[J]. *China Food Additives*, 2015(10): 117-122.]
- [33] 陈浩, 张凯华, 刘世永, 等. 甜菜果胶乳化活性及稳定性[J]. *食品科学*, 2018, 39(1): 65-72. [CHEN H, ZHANG K H, LIU S Y, et al. Emulsifying activity and stability of sugar beet pectin[J]. *Food Science*, 2018, 39(1): 65-72.]
- [34] 刘英, 邱逸凡, 许希贤. 果胶研究和应用进展[J]. *现代食品*, 2019(24): 17-20. [LIU Y, QIU Y F, XU X X. Research and applications of pectin[J]. *Modern Food*, 2019(24): 17-20.]
- [35] 陈浩, 张凯华, 邱爽, 等. 甜菜果胶理化性质及加工适用性质研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(20): 295-299, 311. [CHEN H, ZHAN K H, QIU S, et al. Study on the physicochemical and processing properties of sugar beet pectin[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(20): 295-299, 311.]
- [36] 肖志刚, 张权峰, 陈革, 等. 甜菜果胶对淀粉凝胶调控形成机制的研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 283-288. [XIAO Z G, ZHANG Q F, CHEN G, et al. Study on the regulation mechanism of sugar beet pectin on starch gel[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(10): 283-288.]
- [37] 魏海香, 梁宝东. 甘薯果胶酸提取工艺的研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(4): 131-135. [WEI H X, LIANG B D. Study on acid extration technology of pectin from sweetpotato pomace[J]. *Food Science*, 2009, 30(4): 131-135.]
- [38] HAMIDON N H, ABANG Z D N, MOHD J Y M. Optimization of pectin extraction from sweet potato peels using citric acid and its emulsifying properties[J]. *Recent Patents on Food Nutrition & Agriculture*, 2020, 11(3): 202-210.]
- [39] MELANI P M A, TAIHUA M M, MENG M A. Structural, physicochemical and emulsifying properties of sweet potato pectin treated by high hydrostatic pressure and/or pectinase: A comparative study[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(13): 4911-4920.]
- [40] 顾焰波, 刘显明, 江冰. 离子交换法提取西瓜皮果胶动力学分析优化设计[J]. *食品工业*, 2020, 41(7): 53-56. [GU Y B, LIU X M, JIANG B. Kinetic analysis and optimum design of extracting pectin from watermelon peel by ion exchange[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(7): 53-56.]
- [41] 龚殿婷, 郭晓蒙, 王晓宁. 从西瓜皮中提取果胶的研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(2): 355-357. [GONG D T, GUO X M, WANG X N. Research progress of extracting pectin from watermelon peel[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(2): 355-357.]
- [42] 叶华, 徐大山. 微波辅助制备西瓜皮低酯果胶工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(6): 267-269. [YE H, XU D S. Study on extracting low-methoxyl pectin from watermelon peels by microwave[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(6): 267-269.]
- [43] 姜燕, 周敏, 米热依, 等. 百香果皮果胶提取工艺及其对面团和面包品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 102-107. [JIANG Y, ZHOU M, MI R Y, et al. Extraction of pectin from passion fruit peel and its effect on the dough and bread qualities[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(3): 102-107.]
- [44] 冯媛媛. 薛荔籽果胶理化性质及其功能特性的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010. [FENG Y Y. Studies on the physicochemical properties and physiological functions of *Focus Pumila* L. seeds pectin[D]. Chongqing: Southwest University, 2010.]
- [45] 台建祥, 范鸿雁, 薛慧等. 菠萝蜜果皮果胶提取工艺的优化[J]. *食品科技*, 2014, 39(1): 236-239. [TAI J X, FAN H Y, XUE H, et al. The optimum extraction process of pectin from jackfruit peel[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(1): 236-239.]
- [46] 顾焰波, 刘显明, 嵇倩, 等. 离子交换法提取木瓜皮果胶工艺研究[J]. *食品工业*, 2013, 34(12): 19-21. [GU Y B, LIU X M, ZHOU Q, et al. Study on the extraction of pectin from papaya peel with the method of ion-exchange[J]. *The Food Industry*, 2013, 34(12): 19-21.]
- [47] 李楚楚, 赵丹丹, 韩雪, 等. 利用酸性电解水提取柿子渣中果胶及其工艺优化[J]. *食品科技*, 2019, 44(1): 274-280. [LI C C, ZHAO D D, HAN X, et al. Optimization on extraction of pectin from persimmon residue with acidic electrolyzed water[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(1): 274-280.]
- [48] PEREIRA P H, OLIVEIRA T I, ROSA M F, et al. Pectin extraction from pomegranate peels with citric acid[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 88: 373-379.]
- [49] MINJARES-FUENTES R, FEMENIA A, GARAU M C, et al. Ultrasound-assisted extraction of pectins from grape pomace using citric acid: A response surface methodology approach[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 106: 179-189.]
- [50] OLIVEIRA T I S, ROSA M F, CAVALCANTE F L, et al. Optimization of pectin extraction from banana peels with citric acid by using response surface methodology[J]. *Food Chemistry*, 2016, 198: 113-118.]
- [51] OLIVEIRA A D, PAULA D D, DE OLIVEIRA E B, et al. Optimization of pectin extraction from Ubá mango peel through surface response methodology[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 113: 395-402.]
- [52] JAQUELINNE M, DRCLAUDIA M, DRJAVIER I, et al.

- Extraction and characterization of pectin from the fruit peel of opuntia robusta[J]. *Chemistry Select*, 2020, 5(37): 11446–11452.
- [53] GHARIBZAHEDI SMT, SMITH B, GUO Y. Pectin extraction from common fig skin by different methods: The physicochemical, rheological, functional, and structural evaluations[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 136: 275–283.
- [54] ZAITSEVA O, KHUDYAKOV A, SERGUSHKINA M, et al. Pectins as a universal medicine[J]. *Fitoterapia*, 2020, 146: 104676.
- [55] 田美红, 张海波, 张英成. 人参果胶 SB 对免疫细胞因子分泌的双向调节作用[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2011, 43(4): 128–131. [TIAN M H, ZHANG H B, ZHANG Y C. The bidirectional regulation role of *Panax ginseng* pectin SB on the production of cytokines[J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 43(4): 128–131.]
- [56] JEON C, KANG S, PARK S, et al. T cell stimulatory effects of korean red ginseng through modulation of myeloid-derived suppressor cells[J]. *Journal of Ginseng Research*, 2011, 35(4): 462–470.
- [57] 王伟, 布丽根·加冷别克, 陈恺, 等. 新疆芜菁果胶多糖组成分析及免疫活性评价[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(24): 62–67. [WANG W, BULIGENJIBK, CHEN K, et al. Composition analysis and immunoactivity evaluation of pectic polysaccharide from *Brassica rapa* L. in xinjiang uygur autonomous region[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(24): 62–67.]
- [58] TAN H Z, NIE S P. Functional hydrocolloids, gut microbiota and health: Picking food additives for personalized nutrition[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2021, 45(4): fuaa065.
- [59] 张雪梅, 唐小海, 张光祥, 等. 果胶阿霉素的抗肿瘤活性研究[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(6): 905–910. [ZHANG X M, TANG X H, ZHANG G X, et al. Study on anti-tumor activity of pectin-adriamycin conjugate[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 2016, 39(6): 905–910.]
- [60] 李志平, 陈波, 蒋明超, 等. 果胶阿霉素大分子前药纳米传递体系的体外抗肿瘤作用评价[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(2): 13–18. [LI Z P, CHEN B, JIANG M C, et al. *In vitro* performance evaluation of pdc macromolecular pro-drug based nanoparticles delivery system[J]. *Journal of University of South China(Science and Technology)*, 2018, 32(2): 13–18.]
- [61] DELPHI L, SEPEHRI H. Apple pectin: A natural source for cancer suppression in 4T1 breast cancer cells *in vitro* and express p53 in mouse bearing 4T1 cancer tumors, *in vivo*[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2016, 84: 637–644.
- [62] FAN Y, CHENG H, LI S, et al. Relationship of the inhibition of cell migration with the structure of ginseng pectic polysaccharides[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 81(2): 340–347.
- [63] GUAN Y, ZHANG Z Y, YU X Y, et al. Components of heat-treated *Helianthus annuus* L. pectin inhibit tumor growth and promote immunity in a mouse CT26 tumor model[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 48: 190–199.
- [64] FANG T, LIU D D, NING H M, et al. Modified citrus pectin inhibited bladder tumor growth through downregulation of galectin-3[J]. *Acta Pharmacologica Sinica*, 2018, 39(12): 1885–1893.
- [65] 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 haw pectin *in vitro* and *in vivo*[J]. *Food Science*, 2014, 35(3): 29–32.]
- [66] 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.]
- [67] 魏强华, 何秀婷, 姚勇芳, 等. 酸热法降解苹果果胶工艺及其抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2016(8): 91–96. [WEI Q H, HE X T, YAO Y F, et al. Study on degradation process of apple pectin and antioxidant activity of degradation product[J]. *China Food Additives*, 2016(8): 91–96.]
- [68] 石仕慧, 冀晓龙, 李秀中, 等. 三种方法提取豆腐柴叶果胶抗氧化性比较研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(1): 65–68. [SHI J H, JI X L, LI X Z, et al. Comparison of antioxidant activity of pectin extracted from premna microphylla leaves by three methods[J]. *The Food Industry*, 2017, 38(1): 65–68.]
- [69] CHEN R, JIN C G, TONG Z G, et al. Optimization extraction, characterization and antioxidant activities of pectic polysaccharide from tangerine peels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 136: 187–197.
- [70] OGUTU F, MU T. Ultrasonic degradation of sweet potato pectin and its antioxidant activity[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 726–734.
- [71] LIU S, SHI X, XU L, et al. Optimization of pectin extraction and antioxidant activities from Jerusalem artichoke[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(2): 372–381.
- [72] JIAO L L, ZHANG X Y, WANG M Z, et al. Chemical and antihyperglycemic activity changes of ginseng pectin induced by heat processing[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 114: 567–573.
- [73] 张颜. 短枝六道木叶果胶理化性质研究及生理活性初探[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013. [ZHANG Y. Preliminary studies on the physico-chemical properties and physiological activity of *Abelia englerina* leaf pectin[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2013.]
- [74] LIU Y, DONG M, YANG Z, et al. Anti-diabetic effect of citrus pectin in diabetic rats and potential mechanism via PI3K/Akt signaling pathway[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 89: 484–488.
- [75] MAKAROVA E, GORNAS P, KONRADE I, et al. Acute anti-hyperglycaemic effects of an unripe apple preparation containing phlorizin in healthy volunteers: A preliminary study[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(3): 560–8.
- [76] 朱晓振, 张菡菡, 孟现尧, 等. 短链脂肪酸改善 2 型糖尿病小鼠胰岛素抵抗和胰腺损伤[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 1–7. [ZHU X Z, ZHANG H H, MENG X Y, et al. Short-chain fatty acids reduced insulin resistance and pancreatic damage in type 2 diabetic mice[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 1–7.]
- [77] LI W, ZHANG K, YANG H. Pectin alleviates high fat (lard) diet-induced nonalcoholic fatty liver disease in mice: Possible role of

- short-chain fatty acids and gut microbiota regulated by pectin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(30): 8015–8025.
- [78] ALVARO F, JAVIER M, CAROLINA 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.
- [79] 唐艳, 桂余, 任文瑾, 等. 水提薛荔籽果胶对去势雌性大鼠肠道健康的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(21): 347–351, 356. [TANG Y, GUI Y, REN W J, et al. Effect of water-based extraction of pectin from *Ficus pumila* L. seeds on bowel health in ovariectomized rats[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(21): 347–351, 356.]
- [80] 陈俊良. 不同果胶对肥胖小鼠生理参数和肠道微生物的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2018. [CHEN J L. Effect of different pectin on gut microbiota and selected physiological parameters in obese mice[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018.]
- [81] 毛湘冰, 冯小花, 陈代文, 等. 饲料添加苹果果胶寡糖对断奶大鼠生长性能、抗氧化能力和肠道健康的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(9): 2872–2877. [MAO X B, FENG X H, CHEN D W, et al. Effect of dietary apple pectic oligosaccharide supplementation on growth performance, antioxidant capacity and intestinal health of weaned rats[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(9): 2872–2877.]
- [82] 吴莎极. 佛手皮渣果胶提取、改性及其镉吸附能力的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [WU S J. The extraction and modification of finger citron peel pectin and its cadmium adsorption capacity[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
- [83] 徐琳, 虞文魁, 姜军, 等. 水溶性膳食纤维治疗慢传输型便秘的临床疗效[J]. *中华医学杂志*, 2014, 94(48): 3813–3816. [XU L, YU W K, JIANG J, et al. Clinical benefits after soluble dietary fiber supplementation: A randomized clinical trial in adults with slow-transit constipation[J]. *National Medical Journal of China*, 2014, 94(48): 3813–3816.]
- [84] 孙丹彤, 罗静如, JUEGEN S, 等. 果胶对仔猪肠道健康的促进作用[J]. *国外畜牧学(猪与禽)*, 2019, 39(12): 66–67. [SUN D T, LUO J R, JURGEN S, et al. Piglet gut health promoted by pectin[J]. *Animal Science Abroad(Pigs and Poultry)*, 2019, 39(12): 66–67.]
- [85] 姜婷婷. 可溶性膳食纤维果胶对饮食诱导肥胖大鼠代谢与肠屏障的保护作用及机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2016. [JIANG T T. The effects and mechanisms of soluble dietary fiber, apple-derived pectin, on metabolism and gut barrier function in rats with diet-induced obesity[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.]
- [86] 胡庆. 粪菌移植及粪菌移植联合果胶治疗对DSS诱导结肠炎小鼠的影响及其机制研究[D]. 泸州: 西南医科大学, 2018. [HU Q. Effects of fecal microbiota transplantation combine with pectin on DSS-induced colitis mice and it's possible mechanism[D]. Luzhou: Southwest medical University, 2018.]
- [87] DE OLIVEIRA S P A, DO NASCIMENTO H M A, SAM-PAIO K B, et al. A review on bioactive compounds of beet (*Beta vulgaris* L. subsp. vulgaris) with special emphasis on their beneficial effects on gut microbiota and gastrointestinal health[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(12): 2022–2033.
- [88] 刘丽平, 张淑华, 及雪敏. 果胶的提取及应用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(8): 30–34. [LIU L P, ZHANG S H, JI X M. Research progress on extraction and application of pectin[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(8): 30–34.]
- [89] 支梓鉴, 邹明明, 李珊, 等. 柑橘果肉果胶的流变和结构特性[J]. *高等学校化学学报*, 2016, 37(6): 1175–1181. [ZHI Z J, ZOU M M, LI S, et al. Rheological and structural characterization of pectin polysaccharides from citrus pulp[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2016, 37(6): 1175–1181.]
- [90] 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.]
- [91] 杨本华, 要晓丽. 苹果果胶提取工艺研究[J]. *山东化工*, 2015, 44(22): 45–46, 51. [YANG B H, YAO X L. Study on extraction technology of pectin from apple[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2015, 44(22): 45–46, 51.]
- [92] 梅新. 甘薯膳食纤维、果胶制备及物化特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. [MEI X. Characterization of dietary fiber and pectin extraction from sweet potato[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.]
- [93] 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 propert[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 14–21.]
- [94] 刘新新, 杨永霞, 刘钟栋. 向日葵酯果胶对搅拌型酸奶品质特性的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(1): 106–112. [LIU X X, YANG Y X, LIU Z D. Effect of sunflower low methoxyl pectin on the quality of stirred yogurt[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(1): 106–112.]
- [95] 徐伟琴, 莫立丹, 刘生, 等. 鲜石斛果胶提取、结构改造及其物理特性研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(5): 261–268. [XU W Q, MO L D, LIU S, et al. Extraction, structural modification and physical properties of fresh dendrobium pectin[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(5): 261–268.]
- [96] 彭晓夏. 向日葵盘果胶的分析及果胶甲酯化方法的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015. [PENG X X. Study on pectin from sunflower head and the methyl-esterification of pectin[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015.]
- [97] 张梦珊. 低聚向日葵盘果胶的制备与分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2015. [ZHANG M S. Preparation and structure analysis of low molecular weight pectin of sunflower heads[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015.]