

双翅六道木嫩叶果胶超声波辅助酶法 提取及结构表征

毛琪琪¹ 罗 扬² 王姜林¹ 罗 洁¹ 范贤康¹ 刘成国¹ 周 辉¹

(1. 湖南农业大学食品科技学院, 湖南 长沙 410128; 2. 长沙市农产品质量监测中心, 湖南 长沙 410003)

摘要: [目的] 明确双翅六道木嫩叶中果胶的理化性质、微观结构、单糖组成、相对分子质量及结构特征。[方法] 采用超声波辅助纤维素酶法提取双翅六道木嫩叶果胶, 扫描电镜下观察其微观结构, 利用高效液相色谱法测定其单糖组成, 通过多糖水解衍生化测定其相对分子质量, 并利用红外光谱法推测其可能的结构。[结果] 双翅六道木嫩叶果胶得率为 23.38%, 其酯化度为 1.17%、半乳糖醛酸含量为 72.16%, 该果胶呈片状且含有裂痕, 其单糖主要由半乳糖醛酸、葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖、鼠李糖、甘露糖和木糖等组成, 重均分子量(Mw)和数均分子量(Mn)分别为 7.069×10^5 , 3.434×10^5 , Mw/Mn 为 2.06, 并具有典型的果胶吸收光谱特征。[结论] 超声波辅助酶法提取的双翅六道木嫩叶果胶是一种结构线性度较低, 以含有较短侧链的 RG-I 型结构为主的符合商业要求的果胶。

关键词: 双翅六道木; 超声波辅助酶法; 果胶; 理化性质; 表征分析

Ultrasound-assisted enzymatic extraction and structural characterization of pectin from the tender leaves of *Abelia macrotera*

MAO Qiqi¹ LUO Yang² WANG Jianglin¹ LUO Jie¹ FAN Xiankang¹ LIU Chengguo¹ ZHOU Hui¹

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Agricultural Product Quality Monitoring Center of Changsha, Changsha, Hunan 410003, China)

Abstract: [Objective] To clarify the physicochemical properties, microscopic structure, monosaccharide composition, relative molecular mass, and structural characteristics of pectin in the tender leaves of *Abelia macrotera*. [Methods] Pectin from the tender leaves of *Abelia macrotera* was extracted by ultrasound-assisted cellulase method. The microscopic structure was observed under scanning electron microscope. The monosaccharide composition was determined by high performance liquid chromatography. The relative molecular mass was determined by polysaccharide hydrolysis derivatization. The possible structure was inferred by infrared spectroscopy. [Results] The yield of pectin from the tender leaves of *Abelia macrotera* is 23.38%, the esterification degree was 1.17%, and the galacturonic acid content was 72.16%. The pectin is in the form of flakes with cracks. The monosaccharides mainly consist of galacturonic acid, glucose, arabinose, galactose, rhamnose, mannose and xylose. The weight average molecular weight (Mw) and number average molecular weight (Mn) are 7.069×10^5 and 3.434×10^5 , respectively, with an Mw/Mn of 2.06. It has typical spectrum characteristics of pectin absorption. [Conclusion] The pectin extracted from the tender leaves of *Abelia macrotera* by ultrasound-assisted enzyme method has a low linear structure and is mainly composed of RG-I type structure containing shorter side chains, which meets the commercial requirements.

Keywords: *Abelia macrotera*; ultrasonic-assisted enzyme method; pectin; physical and chemical property; characterization analysis

基金项目: 湖南省重点研发项目(编号: 2023NK2040)

通信作者: 周辉(1980—), 男, 湖南农业大学教授, 博士。E-mail: paradise917@163.com

收稿日期: 2024-11-18 改回日期: 2025-04-11

引用格式: 毛琪琪, 罗扬, 王姜林, 等. 双翅六道木嫩叶果胶超声波辅助酶法提取及结构表征[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 18-23.

Citation: MAO Qiqi, LUO Yang, WANG Jianglin, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction and structural characterization of pectin from the tender leaves of *Abelia macrotera*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 18-23.

双翅六道木(*Abelia macrotera*)为忍冬科植物六道木属落叶灌木,主产于陕西、湖南和湖北等地^[1],可用其嫩叶加工制备特色食品——神仙豆腐^[2]。双翅六道木具有抗氧化、抗炎等功能^[3],其叶片富含果胶(含量为10%~40%)、植物蛋白等营养成分^[4]。

果胶是一种主要由D-半乳糖醛酸通过 α -1,4-糖苷键连接组成的酸性杂多糖^[5],同时含有L-鼠李糖、D-半乳糖、D-阿拉伯糖等多种单糖^[6-7];根据其酯化度可分为高酯果胶(HMP,DE>50%)和低酯果胶(LMP,DE≤50%)^[8]。目前,商品果胶主要原料为柑橘皮和苹果渣^[9],随着果胶需求量的增加,其他植物果胶原料备受关注。双翅六道木叶中含有大量的果胶,可作为果胶的良好提取来源^[10]。常见的果胶提取方法主要有水提醇沉法、酸解法、酶法等。与传统提取方法相比,超声波辅助酶法具有提取效率高、操作简便、环保节能等优点,在植物果胶提取中展现出巨大的应用潜力^[11]。

目前,有关双翅六道木果胶的研究集中在提取方法对其果胶提取率的影响以及不同方法提取的果胶的抗氧化性研究方面,尚未有以超声波辅助纤维素酶法提取果胶的报道,且有关双翅六道木果胶的理化性质、光谱学性质、单糖组成、相对分子质量、微观结构等的研究较少。试验拟利用超声波辅助纤维素酶法提取双翅六道木嫩叶果胶,并对其理化性质进行表征,旨在为该果胶的开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

双翅六道木嫩叶:2023年3月下旬采自湖南省隆回县金石桥镇;

一水合草酸铵:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

溴化钾:光谱纯,国药集团化学试剂有限公司;

纤维素酶:400 U/mg,上海源叶生物科技有限公司;

半乳糖醛酸:标准品,上海源叶生物科技有限公司;

吡啶:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.1.2 主要仪器与设备

超声波细胞破碎仪:SCIENTZ-IIID型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

冷冻离心机:TGL-16M型,湘仪离心机仪器有限公司;

恒温磁力搅拌器:DF-101S型,郑州市亚荣仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:LGJ-25E型,四环福瑞科仪科技发展有限公司(北京)有限公司;

酶标仪:BioTek型,美国伯腾仪器有限公司;

pH计:PHS-3C型,上海仪电科仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:IRAffinity⁻¹型,日本岛津公司;

扫描电镜:Sigma 300型,德国卡尔·蔡司股份公司;

旋转流变仪:Kinexus pro⁺型,英国马尔文帕纳仪器有限公司;

高效液相色谱仪:Agilent 1100型,安捷伦科技(中国)有限公司;

气质联用仪:8860 5977b型,安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 双翅六道木果胶的制备 参照刘昕等^[12]的方法,按式(1)计算果胶得率。

$$Y = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y——果胶得率,%;

m_1 ——双翅六道木果胶质量,g;

m_2 ——双翅六道木叶粉质量,g。

1.2.2 基本理化指标测定

(1) 水分含量:参照GB 5009.3—2016。

(2) 酸不溶性灰分:参照GB 25533—2010。

(3) 蛋白含量:采用考马斯亮蓝法^[13]。

(4) pH值:采用pH计直接测定^[14]。

(5) 酯化度:采用滴定法^[15]。

(6) 半乳糖醛酸含量:采用硫酸咔唑比色法^[16]。

1.2.3 扫描电镜观察 取适量干燥的果胶粉末置于导电胶样品处理片中,喷金后使用SEM观察果胶微观形态并拍照,加速电压5 kV,放大倍数分别为300, 500, 1 000倍^[17]。

1.2.4 单糖组成分析 参照Gao等^[18]的方法并修改。取10~20 mg果胶粉末,加入5 mL 2 mol/L的三氟乙酸水溶液,充N₂,110℃水解2 h;冷却,加入甲醇,用N₂吹干,重复操作2次,残渣中加入适量0.3 mol/L的NaOH溶液充分溶解,得多糖水解液;加入1-苯基-3-甲基-5-吡啶酮(PMP)—甲醇溶液,漩涡混匀,70℃水浴2 h;冷却,加入盐酸和氯仿萃取2次,过滤水相后进行HPLC分析。

色谱条件:色谱柱为C₁₈柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相A为100 mmol/L磷酸钠缓冲液(pH 6.7);流动相B为乙腈;检测波长250 nm;柱温30℃;流速1 mL/min;进样量5 μL。

1.2.5 相对分子质量测定 称取10 mg果胶,加入4 mL三氟乙酸,110℃水解6 h,旋蒸除去三氟乙酸。衍生化处理:向样品瓶中加入3 mL吡啶,加热至80℃,加入100 μL N-甲基-N-(三甲基硅烷基)三氟乙酰胺,80℃水浴1 h。将

样品冷却至室温,过 0.43 μm 滤膜。进样条件:将 0.2 μL 样品注入高效液相色谱仪,进样口温度为 280 $^{\circ}\text{C}$,使用示差折光检测器进行检测,基于标准品相对分子质量与出峰保留时间工作曲线,并使用 NIST 谱库比对结果,通过 Cirrus GPC Version 3.4.1 软件计算重均分子量(Mw)和数均分子量(Mn)。

1.2.6 傅里叶红外光谱扫描 取少量果胶粉,加入 KBr 充分研磨混合后,压片制样,利用傅里叶红外光谱仪于 400~4 000 cm^{-1} 范围内扫描样品,记录光谱图^[19]。

1.3 数据处理

利用 Excel 2016 软件进行数据统计分析,结果以均值±标准误差表示;使用 Origin 2022 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 双翅六道木果胶得率及理化性质

采用超声波辅助纤维素酶法进行果胶提取,得率为 23.38%,高于单独采用超声波法提取的^[20],可能是因为纤维素酶可降解细胞壁中的纤维素和半纤维素,促进果胶释放。由表 1 可知,超声波辅助酶法提取的双翅六道木果胶水分含量为 10.52%,酸不溶性灰分含量为 0.94%,二者均符合 GB 25533—2010 的要求。其蛋白含量为 1.10%,较低,可能是因为纤维素酶具有选择性,主要作用于纤维素和半纤维素的水解,而对蛋白质的降解作用较少,造成少量蛋白残留。果胶分子中的半乳糖醛酸残基中含有羧基,这些羧基在水中部分解离,释放出氢离子,从而使溶液呈弱酸性(pH 值为 5.03)。

果胶酯化度是影响果胶凝胶速度和凝胶时间的重要因素^[21]。双翅六道木果胶酯化度为 1.17%,属于低酯果胶,可能是提取过程中发生了去酯化反应,使得果胶的酯化基团被水解,酯化度降低。低酯果胶分子上带的 COO^- 相对较多,分子间的排斥力较大,难以形成结合区,但可以通过与 Ca^{2+} 的联合形成“蛋盒模型”,从而形成凝胶^[22];也可以利用单价阳离子诱导低酯果胶胶凝^[23]。果胶主要由 α -1,4-糖苷键连接组成的半乳糖醛酸组成,一般用半乳糖醛酸含量表征其纯度,双翅六道木果胶中半乳糖醛酸含量为 72.16%>65%,纯度较高,符合 GB 25533—2010 的要求。

表 1 双翅六道木果胶的化学成分

Table 1 Chemical composition of pectin extracted from *Abelia macrotera*

指标	单位	数值	GB 25533—2010	
			低酯果胶	高酯果胶
水分含量	%	10.52±0.07	≤12	≤12
酸不溶性灰分	%	0.94±0.02	≤1	≤1
蛋白含量	%	1.10±0.08		
pH 值		5.03±0.03		
酯化度	%	1.17±0.01	≤50	≥50
半乳糖醛酸含量	%	72.16±1.07	≥65	≥65

2.2 形态结构

由图 1 可知,双翅六道木果胶微观结构为不规则的片状并带有裂痕,略微凸起边缘不整齐,带有微卷结构,可能是由于超声及纤维素酶处理导致果胶的内部结构发生破裂,从而出现孔隙结构,与胡予等^[17]的结果类似。

2.3 单糖组成

由表 2 可知,果胶中 D-半乳糖醛酸(GalA)含量最高,摩尔比为 35.04%,其次为 D-葡萄糖(Glc)、L-阿拉伯糖(Ara)、D-半乳糖(Gal)、L-鼠李糖(Rha)、D-甘露糖(Man)、D-木糖(Xyl)和 D-氨基葡萄糖(GlcN),而 L-古洛糖醛酸(GulA)、D-核糖(Rib)、D-葡萄糖醛酸(GlcA)和 L-岩藻糖(Fuc)含量较少。Ara、Gal、Rha 以及 Man 为果胶侧链(RG-I)的主要构成部分,而 Glc 含量较高可能是纤维素酶对细胞壁的降解所致^[12],也可能是来自可溶性糖或非果胶多糖的残留^[24]。

果胶的分子结构主要由均聚半乳糖醛酸(HG)、鼠李糖半乳糖醛酸 I 型(RG-I)和鼠李糖半乳糖醛酸 II 型(RG-II)3 个区域构成,通过计算单糖比例可反映多糖分子结构包括支链上的差异^[25]。若 Rha/GalA 为 0.05~1.00,则果胶的结构主要为 RG-I 型;若 Rha/GalA<0.05,果胶结构组成主要以 HG 和 RG-II 型为主。综上,双翅六道木果胶的 Rha/GalA 为 0.16,结构以 RG-I 型为主。RG-I 型果胶的 Ara 侧链的缠结可促进果胶链之间的相互作用,并辅助形成稳定的网络结构,增加果胶的凝胶能力^[26],因此,双翅六道木果胶具有开发复配 RG-I 型果胶凝胶递送体系的潜

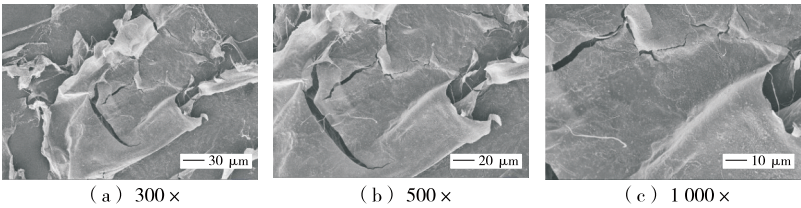


图 1 双翅六道木果胶的扫描电子显微镜图

Figure 1 Scanning electron microscope (SEM) image of pectin extracted from *Abelia macrotera*

力。 $(\text{Ara}+\text{Gal})/\text{Rha}$ 可用来表征RG-I型结构中侧链长度,比值越大,侧链越长^[27]; $\text{GalA}/(\text{Rha}+\text{Ara}+\text{Gal})$ 代表果胶分子的线性水平,比值越大,线性度越高。双翅六道木果胶的 $(\text{Ara}+\text{Gal})/\text{Rha}$ 为3.62,说明该果胶有一定的毛发区和侧链; $\text{GalA}/(\text{Rha}+\text{Ara}+\text{Gal})$ 为1.35,低于冯爽等^[28]的结果。

表2 双翅六道木果胶的单糖组成

Table 2 Monosaccharide composition of pectin extracted from *Abelia macrotera*

单糖	标准糖保留时间/min	双翅六道木果胶		
		保留时间/min	单糖含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	摩尔百分比/%
GulA	14.38	14.39	0.528	0.40
Man	16.53	16.58	5.775	4.72
GlcN	18.33	18.36	1.592	1.09
Rib	19.14	19.24	0.196	0.19
Rha	19.69	19.73	6.258	5.62
GlcA	21.19	21.20	0.705	0.54
GalA	22.65	22.66	46.166	35.04
Glc	24.47	24.47	34.843	28.50
Gal	25.73	25.67	10.896	8.91
Xyl	26.22	26.17	2.768	2.72
Ara	26.64	26.58	11.656	11.44
Fuc	27.93	27.89	0.922	0.83

2.4 重均分子量(Mw)和数均分子量(Mn)

由图2可知,该果胶主要由2个组分组成,组分I的Mw和Mn分别为 7.069×10^5 和 3.434×10^5 ,多分散系数(PDI, Mw/Mn)为2.06,表明组分I的相对分子质量分布较宽,为高相对分子质量组分;组分II的Mw和Mn分别为1 392,1 351,PDI为1.03,表明该组分的相对分子质量分布较窄。结合相对分子质量数值来看,组分II可能为超声处理中断裂的短链物质。高相对分子质量果胶具有良好的胶凝性、优异的持水性、增强的机械强度、良好的乳化和稳定作用以及较高的Zeta电位,为开发新型功能食品和生物材料的理想选择^[29-30]。

2.5 傅里叶红外光谱表征

由图3可知,双翅六道木果胶在 $3\,417\text{ cm}^{-1}$ 处有吸收峰,可能是分子间或分子内氢键引起的O—H伸缩振动; $2\,928\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰可能是由果胶中C—H伸缩振动引起,包括C—H、C—H₂、C—H₃的拉伸和弯曲振动^[24]; $1\,642\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰可能是由果胶中游离羧酸盐($-\text{COO}^-$)不对称的伸缩振动形成的,该特征峰的出现进一步说明样品为果胶物质; $1\,700\sim 1\,800\text{ cm}^{-1}$ 处未出现酯化羧基的吸收峰,可能是其酯化度较低造成的^[31]。例如

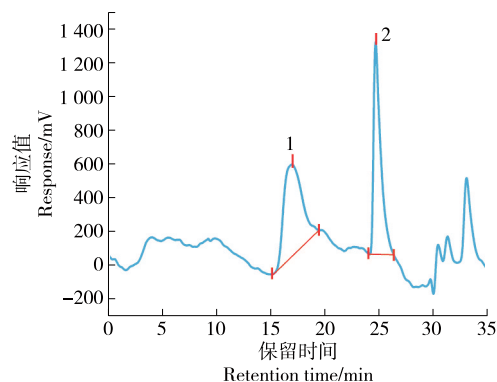


图2 双翅六道木果胶的相对分子质量分布图

Figure 2 Molecular weight distribution of pectin extracted from *Abelia macrotera*

利用FTIR法测定当归果胶酯化度,结果显示酯化度越低, $1\,730\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰越小,越趋于直线^[32]。 $1\,400\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰为—COOH的C—O伸缩振动, $1\,276\text{ cm}^{-1}$ 处微弱吸收峰为C—O—C键的伸缩振动,表明该果胶中存在糖醛酸; $1\,065\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰为吡喃环的C—O键伸缩振动,说明该果胶为吡喃环结构。

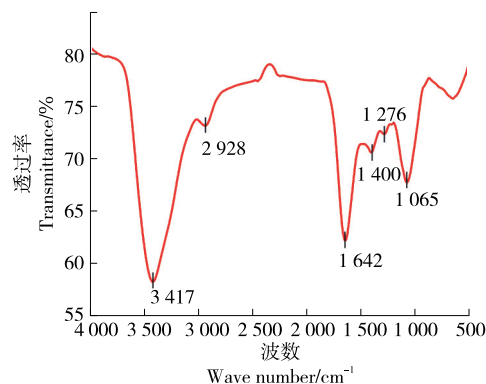


图3 双翅六道木果胶的傅里叶红外光谱图

Figure 3 Fourier infrared spectrum of pectin extracted from *Abelia macrotera*

3 结论

采用超声波辅助纤维素酶法提取双翅六道木嫩叶果胶,得率为23.38%;其水分含量、酸不溶性灰分、蛋白质含量、半乳糖醛酸含量均符合GB 25533—2010的要求;该果胶水溶液呈弱酸性,酯化度为1.17%,属于低酯果胶。此外,该果胶呈片状,并分布着丰富的孔隙。双翅六道木果胶中半乳糖醛酸含量较高,主要单糖组成为D-葡萄糖、L-阿拉伯糖、D-半乳糖、L-鼠李糖、D-甘露糖、D-木糖和D-氨基葡萄糖;其结构线性度较低,以含有较短侧链的鼠李糖半乳糖醛酸I型为主要结构。双翅六道木果胶为较均一的高相对分子质量果胶,具有典型的果胶吸收峰。综上,

双翅六道木嫩叶可以作为商业低酯果胶的良好来源,后续可进一步探索其精细结构和凝胶特性。

参考文献

- [1] 郭增军. 一种短枝六道木叶多糖及其提取方法: CN106589150 A[P]. 2016-12-01.
GUO Z J. A polysaccharide from leaves of *Abelia engleriana* and its extraction method: CN106589150A[P]. 2016-12-01.
- [2] 闵清. 乡村振兴视野下非物质文化遗产活态传承与发展: 以鄂西北非遗“神仙叶凉粉制作技艺”为例[J]. 湖北工业职业技术学院学报, 2020, 33(3): 45-49.
MIN Q. Living inheritance and development of intangible cultural heritage in perspective of rural revitalization-case study of Shenxian leaf jelly production skill in northwest Hubei[J]. Journal of Hubei Industrial Polytechnic, 2020, 33(3): 45-49.
- [3] 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: 32-25.
ZHANG Y. Preliminary studies on the physico-chemical properties and physiological activity of *Abella engleriana* leaf pectin[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2013: 32-35.
- [4] 段旭昌, 常飞, 杨雪果, 等. 短枝六道木嫩叶营养成分与凝胶提取物特性及抗氧化性研究[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 103-107.
DUAN X C, CHANG F, YANG X G, et al. Nutritional components of *Abelia engleriana* tender leaves and characteristics and antioxidant activity of their polysaccharide gel extracts[J]. Food Science, 2014, 35(13): 103-107.
- [5] 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.
- [6] WICKER L, KIM Y, KIM M J, et al. Pectin as a bioactive polysaccharide-extracting tailored function from less[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 251-259.
- [7] WANG X, CHEN C, WANG Y, et al. Structure and properties of pectins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 1 124-1 137.
- [8] YAN J K, WANG C, QIU W Y, et al. Ultrasonic treatment at different pH values affects the macromolecular, structural, and rheological characteristics of citrus pectin[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128216.
- [9] 田媛, 陈月圆, 赵武奇, 等. 豆腐柴叶果胶提取工艺优化[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 203-211.
TIAN Y, CHEN Y Y, ZHAO W Q, et al. Optimization of the extraction process of pectin from *Premna microphylla* turcz leaf [J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2024, 37(2): 203-211.
- [10] 李洪亮, 杨念, 向龙超, 等. 不同提取方法对武当山地区二翅六道木叶果胶抗氧化性的影响[J]. 湖北医药学院学报, 2015, 34(6): 552-555.
LI H L, YANG N, XIANG L C, et al. Influence of different extracted methods on anti-oxidative activity of pectin extracting from *abelia macrotera* leaves of Wudang Mountain area[J]. Journal of Hubei University of Medicine, 2015, 34(6): 552-555.
- [11] 马丽媛, 黄雪莹, 尚尔坤, 等. 超声辅助酶法提取玉米皮中多糖及其抗氧化性测定[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 186-192, 202.
MA L Y, HUANG X Y, SHANG E K, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from corn bran and determination of their antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 186-192, 202.
- [12] 刘昕, 张驰, 薛艾莲, 等. 超声—酶法提取的豆腐柴低酯果胶理化性质及结构表征[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 108-115.
LIU X, ZHANG C, XUE A L, et al. Physicochemical properties and structure characterization of low-methoxy pectin from *Premna microphylla* turcz extracted by ultrasound-enzyme treatment[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(8): 108-115.
- [13] PATIENCE N A, SCHIEPPATI D, BOFFITO D C. Continuous and pulsed ultrasound pectin extraction from navel orange peels[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105480.
- [14] 张攀, 陈信, 熊双丽, 等. 不同预处理对豆腐柴叶果胶理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 82-86, 91.
ZHANG P, CHEN X, XIONG S L, et al. Effects of different pretreatments on physicochemical properties of pectin from *Premna microphylla* turcz leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 82-86, 91.
- [15] 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.
- [16] 让凤菊, 刘伟, 张慧敏, 等. 吊干杏果胶提取工艺优化及理化性质分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(9): 88-93.
RANG F J, LIU W, ZHANG H M, et al. Optimization of extraction technology of pectin from *Prunus armeniaca* L.cv. Diaogan and analysis of its physicochemical properties[J]. China Condiment, 2023, 48(9): 88-93.
- [17] 胡予, 张攀, 陈信, 等. 不同月份豆腐柴叶果胶理化性质差异研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 38-43, 49.
HU Y, ZHANG P, CHEN X, et al. Study on the difference of the physicochemical properties of pectin from *Premna microphylla* turcz leaves in different months[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 38-43, 49.

- [18] GAO R P, YE F Y, WANG Y L, et al. The spatial-temporal working pattern of cold ultrasound treatment in improving the sensory, nutritional and safe quality of unpasteurized raw tomato juice[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 56: 240-253.
- [19] PENG X Y, MU T H, ZHANG M, et al. Effects of pH and high hydrostatic pressure on the structural and rheological properties of sugar beet pectin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 161-169.
- [20] 牛睿, 方欢乐, 韩慧恩, 等. 不同提取方法对二翅六道木嫩叶凝胶提取率的研究[J]. *食品安全导刊*, 2021(25): 111-112.
- NIU R, FANG H L, HAN H E, et al. Effects of different extraction methods on the extraction yield of gel from young leaves of *Abelia macrotera*[J]. *China Food Safety Magazine*, 2021(25): 111-112.
- [21] URIAS-ORONA V, RASCÓN-CHU A, LIZARDI-MENDOZA J, et al. A novel pectin material: extraction, characterization and gelling properties[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2010, 11(10): 3 686-3 695.
- [22] JIANG Y, DU J H, ZHANG L G, et al. Properties of pectin extracted from fermented and steeped hawthorn wine pomace: a comparison[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 197: 174-182.
- [23] PAN M K, ZHOU F F, LIU Y, et al. Na⁺-induced gelation of a low-methoxyl pectin extracted from *Premna microphylla* turcz [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106153.
- [24] 李阳, 吴正斯, 蔡贤宝, 等. 超声波辅助提取柑橘幼果中果胶的工艺优化及其理化性质研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(10): 219-227.
- LI Y, WU Z S, CAI X B, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of pectin from young citrus fruits and its physical and chemical properties[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(10): 219-227.
- [25] 洪亚男. 豆腐柴叶果胶的提取及其理化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018: 36-37.
- HONG Y N. Extraction and characterization of pectin from *Premna microphylla* turcz leaves[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018: 36-37.
- [26] 郑家琪. 柑橘源 RG-I型果胶凝胶机理及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 26-27.
- ZHENG J Q. Gelling mechanism and application of citrus RG-I pectin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 26-27.
- [27] 潘康, 徐裕茹, 沈伟康, 等. 3种溶剂提取栀子壳果胶理化特性比较[J]. *浙江农业科学*, 2024, 65(6): 1 482-1 487.
- PAN K, XU Y R, SHEN W K, et al. Comparison of physicochemical properties of gardenia shell pectin extracted by three solutions[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(6): 1 482-1 487.
- [28] 冯爽, 李祖迪, 岳伟, 等. 番茄皮渣果胶结构表征与流变学特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(24): 51-57.
- FENG S, LI Z D, YUE W, et al. Study on structural and rheological properties of pectin from tomato pomace[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(24): 51-57.
- [29] MA Y C, BI J F, FENG S H, et al. Higher molecular weight pectin inhibits ice crystal growth and its effect on the microstructural and physical properties of pectin cryogels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 340: 122312.
- [30] XIANG T T, YANG R W, LI L Q, et al. Research progress and application of pectin: a review[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(11): 6 985-7 007.
- [31] 李泽林, 沈晋如, 方敏瑞, 等. 超声辅助酶法提取山荆子果胶工艺优化及其红外光谱特征[J]. *中国调味品*, 2023, 48(2): 20-25.
- LI Z L, SHEN J R, FANG M R, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of pectin from *Malus baccata* (L.) borkh. and its infrared spectra characteristics[J]. *China Condiment*, 2023, 48(2): 20-25.
- [32] 孙元琳, 崔武卫, 顾小红, 等. 傅里叶变换红外光谱法测定当归果胶多糖的酯化度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 682-685.
- SUN Y L, CUI W W, GU X H, et al. Determination of degree of esterification in pectic polysaccharides from *Angelica sinensis* (oliv.) Diels by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 682-685.