

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2022)02-0147-08

贮藏加工

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.02.007

马铃薯渣碱法提取果胶的组成和乳化特性

王文霞*, 刘 博, 陈瑞国, 王慧敏, 王中双

(齐齐哈尔大学食品与生物工程学院/黑龙江省果蔬杂粮饮品工程技术研究中心/黑龙江省普通高校农产品加工重点实验室,
黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要: 以马铃薯渣为原料, 采用低温短时稀碱法提取马铃薯果胶多糖(Alkali extraction of potato pectin, APP), 对所得APP组成进行表征和评价其乳化特性。结果表明, APP提取率为10.92%, 不含有甲酯化部分, 乙酰化度为3.43%。单糖组成分析表明, APP主要由半乳糖、半乳糖醛酸、阿拉伯糖和鼠李糖组成。APP主要由支化的RG-I结构域组成, 且其半乳糖侧链含量高于阿拉伯聚糖侧链。分子质量分析结果表明, APP有2个组分, 分子量分别为1 358.4和67.5 kD。红外分析结果表明, APP具有明显的果胶类物质特征官能团; SEM扫描成像显示APP固体表面呈片状结构, 且表面平滑紧实。APP具有较好的乳化性和稳定性, 可能用作功能性食品配料。

关键词: 马铃薯; 果胶; 碱法提取; 组成特征; 乳化特性

Composition and Emulsification Properties of Pectic Polysaccharide Extracted from Potato Pulp by Alkali Extraction

WANG Wenxia*, LIU Bo, CHEN Ruiguo, WANG Huimin, WANG Zhongshuang

(College of Food and Biology Engineering, Qiqihar University/Engineering Technology Research Center on Vegetable and
Grain Beverage, Heilongjiang Province/Key Laboratory of Processing Agricultural Products of Heilongjiang Province,
Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: Pectin from potato pulp was extracted by low-temperature and short-time dilute alkali method, and composition of the obtained alkali extraction of potato pectin (APP) was characterized and its emulsifying properties were evaluated. The results showed that the yield of APP was 10.92%, with degree of methylation of 0% and degree of acetylation of 3.43%. The monosaccharide composition analysis showed that APP was mainly composed of galactose, galacturonic acid, arabinose and rhamnose. APP mainly had a branched RG-I domain, and the content of galactomannan side chain was higher than arabinoglycan side chain. The molecular weight (MW) distribution showed that APP had two main MW populations of 1 358.4 and 67.5 kD. Fourier transform infrared spectroscopy showed that APP had typical functional groups of pectin. Scanning electron microscope (SEM) image showed that the solid surface of APP was sheet-like structured, smooth and compact. APP has good emulsification and stability, therefore it may be used as functional

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 黑龙江省高校基本科研业务费科研项目(YSTSXK201814); 齐齐哈尔市科学技术计划项目(NYGG-201618); 2020年大学生创新创业训练计划项目(202010232275)。

作者简介: 王文霞(1963-), 女, 教授, 研究方向为农产品精深加工。

*通信作者(Corresponding author): 王文霞, E-mail: wwwang1127@163.com。

food ingredients.

Key Words: potato; pectin; alkali extraction; composition; emulsification

果胶是一种广泛分布于高等植物细胞壁中的复杂酸性多糖, 主要由D-半乳糖醛酸(Galacturonic acid, GalA)和鼠李糖(Rhamnose, Rha)、阿拉伯糖(Arabinose, Ara)、半乳糖(Galactose, Gal)、D木糖(Xylose, Xyl)等单糖组成^[1]。果胶分子的主链由D-半乳糖醛酸单元通过(1-4)糖苷键连接而成, 侧链上有半乳聚糖、阿拉伯聚糖、阿拉伯半乳聚糖等中性糖^[2]。此外, GalA残基在C-6位点部分发生甲基酯化, 在O-2和O-3位点发生乙酰酯化O-3^[3]。果胶通常由线性同型半乳糖醛酸聚糖(HG)、高度支化的鼠李半乳糖醛酸聚糖I(RG-I)、鼠李半乳糖醛酸聚糖II(RG-II)结构域构成^[4]。商品柑橘和苹果果胶主要由HG结构域组成, 通常采用高温强酸方法提取, RG-I含量较低, GalA一般高于65%, 常被用作食品加工中的胶凝剂和增稠剂。RG-I型果胶是指主要以RG-I结构域组成的果胶, 马铃薯、黄秋葵、胡萝卜等含有的果胶主要是RG-I型果胶^[5]。传统的高温强酸提取条件会破坏RG-I结构域, 而采用温和的提取方法可保留较多RG-I结构域^[6]。富含RG-I结构的果胶因其富含半乳聚糖侧链和乙酰基链结构特性, 使其具有肠道益生性、抗癌等功能活性^[7], 成为潜在的生物活性分子来源; 同时, 不同来源的RG-I型果胶的胶凝特性^[8,9]和乳化性及稳定性^[10]研究也备受关注, 并研究其定向提取和功能性胶体的开发。果胶的组成和精细结构及理化性质取决于果胶的来源、提取方法及条件等因素^[11]。酸法、酶法和碱法是最常见的果胶提取方法。目前, 国内主要采用酸法提取制备商品苹果、柑橘类果胶, 其会导致大部分RG-I结构域的主链半乳糖醛酸-鼠李糖键的断裂和中性糖侧链的降解^[12], 以提高商品果胶的凝胶特性。酶法可制备富含RG-I结构域的果胶多糖, 且可减少废酸或废碱溶液的排放, 但比酸法耗时长^[13,14]。碱法提取常被用于制备RG-I型果胶。在碱性条件下, 果胶多糖的HG结构会通过 β -消除作用而水解, 而果胶中的

中性糖侧链被保留, 从而使RG-I结构域占比更高。

马铃薯渣是马铃薯淀粉加工业的副产物, 目前其主要作为动物饲料成分。马铃薯渣富含非淀粉多糖, 其中果胶是细胞壁的主要多糖^[15]。由于马铃薯渣具有较高的果胶含量, 因此是一种潜在的丰富果胶新资源。马铃薯果胶具有RG-I结构域高占比和HG结构域低占比的独特结构特征^[2]。近年来, 先后开展了采用高温碱性法(0.5~2.0 mol/L NaOH, 60~80℃, 3~24 h)提取马铃薯RG-I型果胶及其性质的研究^[13,16,17]。但是, 有关较温和的低温短时稀碱法提取马铃薯果胶结构及性质的研究还未见报道。

本研究以马铃薯渣为原料, 采用低温短时稀碱法提取马铃薯果胶(Alkali extraction of potato pectin, APP), 对所得果胶组成及乳化性质进行表征, 以为马铃薯渣果胶的开发及利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

湿马铃薯渣(北大荒马铃薯产业有限公司), Suhong AA Plus 2X耐高温 α -淀粉酶(95℃, 酶活力40 000 U/g)(丹麦诺维信公司), Alcalase 2.4 L FG水解蛋白酶(酶活力102 511 U/g)(丹麦诺维信公司), 其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

BS124S分析天平(北京赛多利斯仪器系统有限公司), TDL-5-A型台式离心机(上海安亭科学仪器厂), 30K中空纤维膜(天津膜天膜有限公司), UF型超滤装置(河北省华泰净化技术工程公司), PB-10酸度计(北京赛多利斯仪器系统有限公司), PRIMAIDE高效液相色谱仪(日本日立公司), Alpha 2-4 LSCbasic型冷冻干燥机(德国CHRIST公司), 1H NMR Varian-Inova 600 MHz超导核磁共振仪(美国布鲁克公司), Tescan Mira LMS扫描电子显微镜[泰思肯(中国)有限公司], PANDA plus2000超高

压均质机(意大利Niro公司), BT-9300ST激光粒度分布仪(丹东百特仪器公司), Spectrum One 傅里叶变换红外光谱仪(美国PE公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 马铃薯果胶提取

工艺流程^[18]:

湿马铃薯渣→晾晒风干→粉碎(过80目筛)→脱淀粉、蛋白质→薯渣I→0.4%盐酸预处理→薯渣II→碱法提取果胶→过滤→调pH 2.8, 静置, 离心→上清液→超滤纯化→浓缩液→乙醇沉淀→过滤→冷冻干燥→成品。

操作要点^[18]:

(1)脱淀粉、蛋白质: 称取干燥过筛的200 g马铃薯渣加到8 L水中(固液比为1:40), 搅拌均匀, 用HCl溶液调节体系pH 6.0。加入5%(对干马铃薯渣)耐高温 α -淀粉酶, 95℃, 搅拌3 h。趁热过滤, 弃掉滤液, 将滤渣用75℃热水反复洗涤3次。将所得滤渣再加入8 L水, 调节溶液pH至8.0, 加入5%(对马铃薯渣)的碱性蛋白酶, 55℃酶解2 h。100℃水浴加热10 min, 灭酶; 然后趁热过滤。滤渣经55℃热水洗涤3次, 晾晒风干得薯渣I。

(2)0.4%盐酸预处理: 称取200 g薯渣I, 按照料液比1:30, 加入0.4%(v/v)盐酸溶液, 混合均匀, 在室温下搅拌60 min, 用400目滤布过滤, 得薯渣II。

(3)碱法提取果胶: 将薯渣II按照料液比1:30加入0.15 mol/L NaOH溶液, 混合均匀, 在32℃搅拌提取30 min。用400目滤布过滤得滤液, 滤渣用1 L纯水洗涤2次, 洗涤液与滤液合并, 得果胶提取液。

(4)调pH 2.8, 离心: 调节滤液pH 2.8, 静置2 h。4 000 r/min, 离心15 min, 收集上清液。

(5)超滤: 采用30 kDa的中空纤维膜, 在0.1 MPa、室温下, 对上清液进行超滤纯化处理。对浓缩液采用超纯水洗涤, 原液与浓缩液的浓缩比为5, 最终超滤浓缩液的电导率小于500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

(6)乙醇沉淀: 浓缩液与乙醇体积比按1:4进行乙醇沉淀果胶, 静置12 h, 果胶析出, 采用300目的滤布过滤, 得到粗果胶。

(7)干燥: 粗果胶采用冷冻干燥, 得到碱法马铃薯果胶多糖(APP)。

(8)得率计算: 根据所得果胶物料重量比薯渣I重量得到提取得率。

$$\text{马铃薯果胶得率}(\%) = \frac{\text{马铃薯果胶干重}(\text{g})}{\text{薯渣I干重}(\text{g})} \times 100$$

1.3.2 马铃薯果胶的理化性质研究

(1)马铃薯果胶的灰分、水分及蛋白质含量测定: 采用灼烧法^[19]测定果胶多糖中灰分含量。采用干燥法^[20]测定水分含量。采用杜马斯燃烧法^[21]测定蛋白质含量。

(2)果胶的甲酯化度和乙酰化度检测: 采用核磁共振方法测定果胶甲酯化度(Degree of methylation, DM)和乙酰化度(Degree of acetylation, DA)^[17]。

(3)马铃薯果胶分子量的测定: 采用尺寸排除色谱法测定果胶分子量^[18]。色谱条件为: Ultrahydrogel™ Linear, 300 mm × 7.8 mm水相凝胶柱, 柱温40℃, 示差检测器, 检测器温度40℃。以T20、T50、T100、T200、T1000、T2000作为标准品, 浓度为2 mg/mL, 进样量20 μL , 洗脱液为0.02 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.4), 流速0.5 mL/min。以保留时间tR为横坐标, LgMw为纵坐标, 绘制标准曲线。果胶样品同标准品浓度配制, 过0.45 μm 滤膜。据图谱中所得保留时间, 通过上述回归方程计算果胶多糖相对分子量。

(4)果胶中中性单糖和酸性单糖含量的测定: 采用PMP衍生化-高效液相色谱法^[18], 测定果胶中中性单糖和酸性单糖的含量。

(5)傅里叶变换红外光谱(FT-IR)测定: 取少量APP样品, 采用KBr压片, 利用傅里叶红外光谱仪进行测试, 测试波数范围为400~4 000 cm^{-1} 。

(6)扫描电子显微镜(SEM)分析: 将APP研磨成细粉, 把制备好的样品进行喷金处理, 然后将其置于场发射SEM中以观察果胶微观结构。

1.3.3 马铃薯果胶乳化特性分析

(1)乳状液的制备: 分别配置浓度0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%果胶溶液, 将其与固定量玉米油混合, 配置为10%油相体积分数的混合液, 在高速剪切机上以16 000 r/min的速度

剪切 3 min, 制成初乳液, 随后将初乳液在高压均质机上以 50 Mpa 的均质压力均质 3 min, 形成最终乳液, 测定乳状液粒径分布, 来评估乳状液的乳化活性。制成的乳状液在 4℃ 下储存, 24 和 168 h 后取样测定乳状液粒径分布, 来评估乳状液的稳定性。

(2) 乳状液粒径分布的测定: 利用 BT-9300ST 激光粒度分布仪测定果胶乳液粒度分布情况, 并记录体积分数平均粒径(D4,3)。测定参数为散射角度 90°, 激光波长 633 nm, 温度 25℃, 颗粒折射率 1.596, 颗粒吸收率 0.001; 分散剂为水, 分散剂折射率 1.333。

1.3.4 统计分析

所有试验重复做 3 次, 结果用平均值 ± 标准差

形式表示。使用 Origin 2019b 进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 马铃薯果胶的提取率及组成

碱法提取马铃薯果胶得率为 10.92%, 所得果胶呈深棕色粉状固体, 质地较脆, 这与冷冻干燥提取法有关。蛋白质含量为 6.21%, 略高于同类型研究报道, 这与碱性环境下提取使蛋白质更大程度保留有关。灰分含量为 3.75%, 符合添加剂类食品安全生产标准, DM 为 0, DA 为 3.43%, 这是由于碱性环境下提取发生了皂化反应产生的(表 1)。

表 1 稀碱法提取马铃薯果胶多糖得率和化学组成

Table 1 Yield and chemical composition of potato pectin polysaccharide extracted by dilute alkali method

指标 Index	得率(%) Yield	蛋白质(%, 湿基 w/w) Protein (Wet basis, w/w)	灰分(%, 湿基 w/w) Ash (Wet basis, w/w)	甲酯化度(%) DM	乙酰化度(%) DA
APP	10.92 ± 0.28	6.21 ± 1.4	3.75 ± 0.26	0	3.43

2.2 果胶多糖分子量的分布

采用高效凝胶尺寸排阻色谱法测定 APP 的分子量分布, 根据标准品在色谱柱上的保留时间及分子量对数得到线性回归方程 ($\lg Mw = 14.109 -$

$0.546 3x$, $R^2 = 0.940 3$)。马铃薯果胶的分子量分布如表 2 所示。APP 示差折光检测曲线上有两个组分峰, 峰 1 和峰 2 的重均分子量(M_w)分别为 1 358.4 和 67.5 kD, 峰 2 组分比例高于峰 1 组分。

表 2 马铃薯果胶的分子量分布

Table 2 Molecular weight distribution of potato pectin

样品 Sample	峰号 Peak number	保留时间(min) Retention time	重均分子量(kD) M_w
APP	峰 1	14.600	1 358.4 ± 26.11
	峰 2	16.907	67.5 ± 6.96

2.3 果胶中中性单糖和酸性单糖测定

APP 单糖组成主要由半乳糖(451.95 mg/g)、半乳糖醛酸(144.13 mg/g)、阿拉伯糖(138.06 mg/g)和鼠李糖(94.89 mg/g)组成, 同时还含有少量的木糖(27.45 mg/g)和葡萄糖(29.15 mg/g)及葡萄糖醛酸

(7.25 mg/g)(表 3)。半乳糖、鼠李糖和阿拉伯糖是果胶中最原始的糖成分。与其他单糖相比, 葡萄糖和木糖在提取的果胶多糖中的比例较低。葡萄糖主要来自于马铃薯渣残留的淀粉。而半纤维素多糖, 如木葡聚糖、异甘露聚糖和异木聚糖, 是木糖的可

能来源。

2.4 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)测定

APP的FT-IR谱图如图1所示。马铃薯果胶在400~4 000 cm^{-1} 具有果胶类化合物的特征吸收峰。在3 436 cm^{-1} 左右处发现了强而宽的峰,这可归因于多糖分子内O-H的伸缩振动;在2 935 cm^{-1} 左右处的吸收峰代表甲基($-\text{CH}_3$)和次甲基($-\text{CH}_2$)的C-H伸缩振动;1 741 cm^{-1} 左右的伸缩振动是由C=O共振产生,为醛基或乙酰基;在1 618 cm^{-1} 左右出现羧基的非对称共振与1 418和1 334 cm^{-1} 的 $-\text{COO}-$

对称共振,共同构成了果胶中糖醛酸的特征结构。对于马铃薯果胶,在1 741 cm^{-1} 处的吸收面积要弱于1 618 cm^{-1} 处的吸收面积,这表明他们是低甲氧基果胶。1 236 cm^{-1} 为果胶酯化的羧基上C=O的吸收峰,1 078 cm^{-1} 左右处的强吸收峰是糖苷键的C-O-C的非对称振动峰,为吡喃型糖的特征吸收峰。在891~952 cm^{-1} 的吸收峰表明有 β -型糖苷键;在750~831 cm^{-1} 的吸收峰表明有 α -型糖苷键。马铃薯果胶红外光谱图表明,APP具有多糖特征吸收峰。

表3 APP的单糖组成
Table 3 Monosaccharide composition of APP

单糖组成(mg/g) Composition of monosaccharide							Gal/Rha (mol/mol)	Gal/Ara (mol/mol)	Rha/GalA (mol/mol)
Rha	GlcA	GalA	Glc	Gal	Ara	Xyl			
94.89	7.25	144.13	29.15	451.95	138.06	27.45	2.73	4.76	0.66

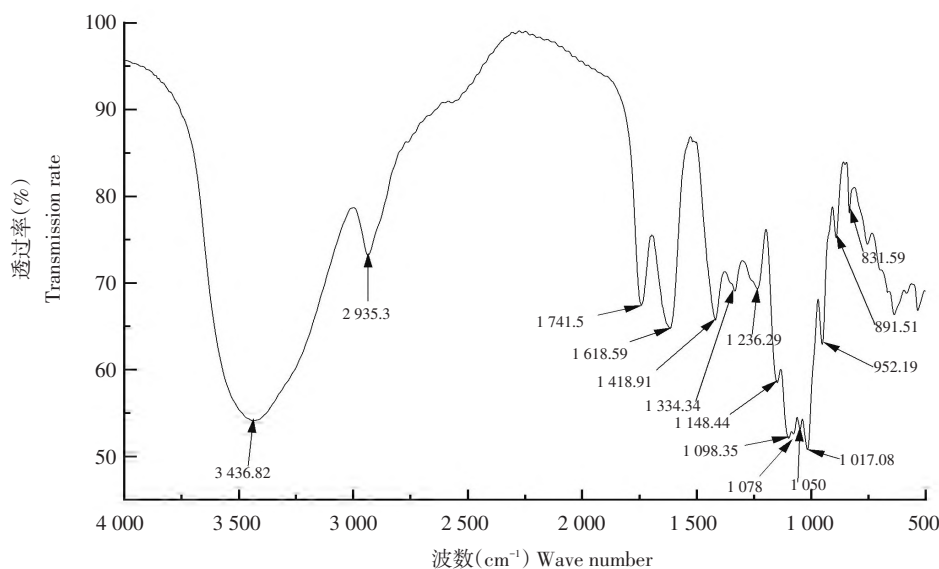


图1 马铃薯果胶红外光谱图
Figure 1 FT-IR spectra of potato pectin

2.5 扫描电子显微镜(SEM)分析

马铃薯果胶冻干样品的微观结构如图2所示。通过SEM研究APP表面形态显示,APP的表面呈片状结构,且表面平滑紧实。这与碱性环境提取及超滤浓缩制备果胶有关,不同提取方法对果胶

分子微观结构影响较大。

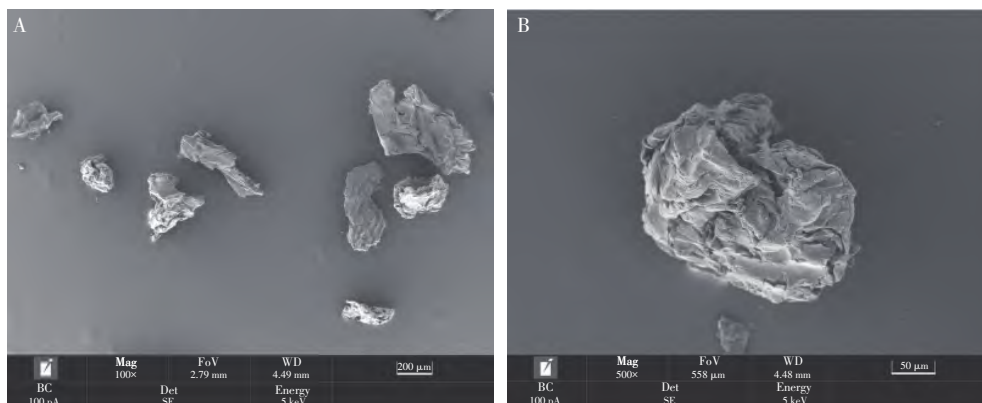
2.6 APP乳化特性分析

碱法马铃薯果胶乳化特性分析见图3。乳化活性随着果胶浓度的增加而减小。当果胶浓度高于2.0%时,D4,3值几乎不受APP浓度的影响,其乳

液粒径保持在1.473~1.693 μm 。说明APP具有较好的乳化活性。

随着贮存时间的延长, 果胶浓度小于1%的乳状液粒径变化较为明显; 果胶浓度为1%时, 乳

液粒径从0 h的3.576 μm 上升至168 h的5.231 μm 。当果胶浓度大于1.5%, 乳液粒径随贮存时间的延长无显著变化, 说明APP浓度大于1.5%, 乳液稳定性较好。



注: A-放大100倍, B-放大500倍。

Note: A-100 times magnification, and B-500 times magnification.

图2 马铃薯果胶的扫描电镜图

Figure 2 Scanning electron microscope images of potato pectin

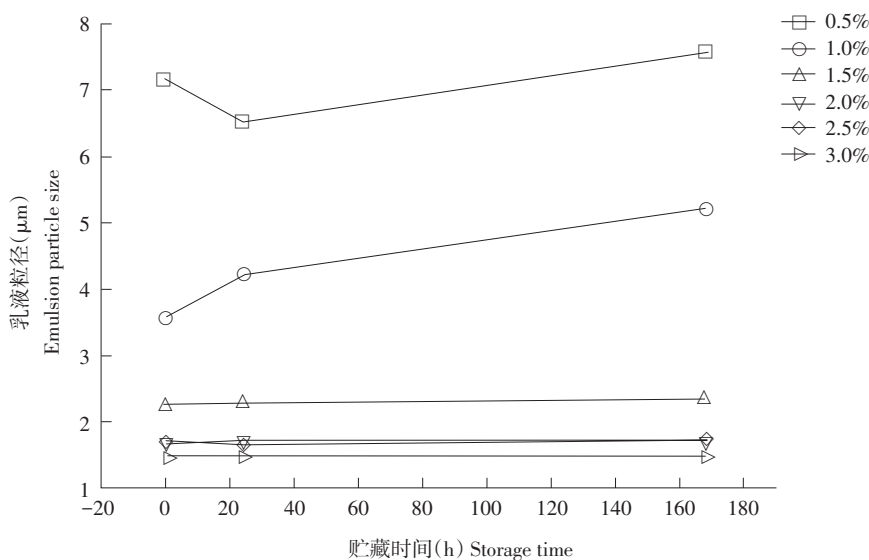


图3 APP乳液乳化粒径变化曲线

Figure 3 APP emulsion particle size change curve

3 讨论

以马铃薯渣为原料, 采用了低温短时稀碱法提取马铃薯果胶。果胶的得率为10.92%, 不含有

甲酯化部分, 乙酰化度为3.43%, 蛋白质含量为6.21%, 灰分含量为3.75%, 符合国家食品安全标准。

顺序酸碱法提取马铃薯果胶中酸法提取率为

1.2%(表中未列出), 对照直接碱法提取马铃薯果胶醇沉时没有果胶析出, 故选用酸处理后碱法提取马铃薯果胶。原因为初始用酸处理, 可以更好地破坏细胞壁结构, 有利于果胶的碱法溶解^[22]。试验中, 室温稀碱法提取马铃薯果胶, 条件较温和, 能够更好地释放完整的RG-I果胶^[13]。碱法提取具有更高的蛋白质含量(6.21%), 推测是因为蛋白质具有更好的碱性环境适应性, 碱法果胶的灰分含量为3.75%, 符合国家食品添加剂使用安全标准中的要求。但碱法提取的马铃薯果胶在甲酯化程度测量的核磁共振实验中未检出, 乙酰化程度也仅有3.43%, 这可能是因为碱性环境下提取果胶时发生了皂化反应, 使得最终的提取结果几乎不含甲氧基, 这与文献报道基本一致^[17]。

单糖组成分析表明, 主要由半乳糖(451.95 mg/g)、半乳糖醛酸(144.13 mg/g)、阿拉伯糖(138.06 mg/g)和鼠李糖(94.89 mg/g)组成。马铃薯果胶主要由支化的RG-I结构域组成, 且其半乳糖侧链含量高于阿拉伯糖侧链。碱法马铃薯果胶的中性糖含量高于酸性糖含量, 因为在碱性和中性条件下中性糖侧链完整, 没有降解^[23]。APP中半乳糖和GalA是所有马铃薯果胶的主要成分, 且半乳糖含量高于GalA含量。而苹果果胶和甜菜果胶的GalA含量均在50%以上^[22]。HG结构域的主要成分为GalA, 而RG-I结构域主链由Rha和GalA交替连接构成, Rha/GalA的摩尔比值常用来反映RG-I结构的多少, 以RG-I结构为主的果胶多糖Rha/GalA值在0.05~1, 比值越接近1则果胶多糖组分中RG-I结构占比越多, HG结构越少^[17]。APP的Rha/GalA比值为0.66, 比值较大, 表明APP以RG-I结构域为主。但这一比值低于文献报道的马铃薯果胶(0.81)^[17], 这是由于高温较强的碱法提取过程中HG结构域因 β -消除作用被大量水解^[13], 导致HG结构域占比下降; 而本研究采用的低温短时弱碱法对HG结构域水解较弱, 致使APP的Rha/GalA比值略低。半乳糖和阿拉伯糖是RG-I结构域侧链, APP的Gal/Ara比值为4.76, 低于文献中报告值(6.6)^[13]。较高Gal/Ara比值证实了马铃薯果胶的半乳糖侧链高于阿拉伯糖侧链^[24]。此外, APP的

Gal/Rha比值为2.73, 高Gal/Rha比值表明马铃薯果胶多糖具有高度分支, 且存在短的RG-I主链结构^[13]。

分子量分析结果表明, APP有分子量分别为1 358.4和67.5 kD的2个组分。这些结果表明, 在NaOH溶液中果胶多糖HG有一定的降解率。这与文献报道一致^[16,25]。高分子量组分可能是具有与RG-II交联和高比例HG的RG-I, 而低分子量组分是具有小比例HG的RG-I组分^[13]。

红外分析结果表明, APP具有明显的果胶类物质特征官能团; 用SEM扫描成像显示固体表面呈片状结构。APP看起来非常坚硬, 说明果胶分子间存在强的作用力。这与文献报道相似^[26]。

乳化性能结果表明, 碱法马铃薯果胶具有良好的乳化性, 这一数据与大豆可溶性多糖乳液粒径(1.50 μm)接近^[27], 并且乳化能力随果胶添加量增加而增大, APP浓度大于1.5%乳液稳定性较好。APP的乳化活性可能是由于蛋白质部分(6.21%)所致^[28]。虽然大量的中性糖侧链会阻碍乳化过程, 但其可以通过在油滴上形成厚厚的水合层, 从而改善APP的乳液稳定性, 防止油颗粒聚集^[25]。

较温和的低温短时稀碱法提取马铃薯果胶由支化的RG-I结构域组成, 且具有较好的乳化性能, 有可能成为食品加工业中具有生理活性的乳化剂。

[参 考 文 献]

- [1] Wang C H, Chang K C. Beet pulp and isolated pectin physicochemical properties as related to freezing [J]. Journal of Food Science, 1994, 59(6): 1153-1154.
- [2] Mohnen D. Pectin structure and biosynthesis [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2008, 11(3): 266-277.
- [3] Morris G A, Ralet M C, Bonnin E, *et al.* Physical characterisation of the rhamnogalacturonan and homogalacturonan fractions of sugar beet (*Beta vulgaris*) pectin [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(4): 1161-1167.
- [4] 谢明勇, 李精, 聂少平. 果胶研究与应用进展 [J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 1-14.

- [5] Maric M, Grassino A N, Zhu Z, *et al.* An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2018, 76(3): 28–37.
- [6] Mao G, Wu D, Wei C, *et al.* Reconsidering conventional and innovative methods for pectin extraction from fruit and vegetable waste: targeting rhamnogalacturonan I [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2019, 94(11): 65–78.
- [7] Wu D, Zheng J, Mao G, *et al.* Rethinking the impact of RG-I mainly from fruits and vegetables on dietary health [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 60(17): 2936–2960.
- [8] Mikshina P V, Makshakova O N, Petrova A A, *et al.* Gelation of rhamnogalacturonan I is based on galactan side chain interaction and does not involve chemical modifications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 171(5): 143–151.
- [9] Ognyanov M, Remoroza C, Schols H A, *et al.* Structural, rheological and functional properties of galactose-rich pectic polysaccharide fraction from leek [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115549.
- [10] Pi F, Liu Z, Guo X, *et al.* Chicory root pulp pectin as an emulsifier as compared to sugar beet pectin. Part 1: influence of structure, concentration, counterion concentration [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89(1): 792–801.
- [11] Liu Z, Pi F, Guo X, *et al.* Characterization of the structural and emulsifying properties of sugar beet pectins obtained by sequential extraction [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 88(9): 31–42.
- [12] Willats W, Knox P, Mikkelsen J D. Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2006, 17(3): 97–104.
- [13] Khodaei N, Karboune S. Extraction and structural characterisation of rhamnogalacturonan I-type pectic polysaccharides from potato cell wall [J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1): 617–623.
- [14] Khodaei N, Karboune S. Enzymatic extraction of galactan-rich rhamnogalacturonan I from potato cell wall by-product [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 57(1): 207–216.
- [15] 曾凡遼, 周添红, 刘刚. 马铃薯淀粉加工副产物资源化利用研究进展 [J]. *农业工程技术: 农产品加工*, 2013(11): 33–37.
- [16] Khodaei N, Karboune S, Orsat V. Microwave-assisted alkaline extraction of galactan-rich rhamnogalacturonan I from potato cell wall by-product [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190(5): 495–505.
- [17] 孙玮璇, 田金虎, 陈健乐, 等. 提取方法对马铃薯渣果胶多糖组成及分子链构象的影响 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(7): 216–224.
- [18] 王文霞, 张显斌, 张慧君, 等. 不同提取方法对马铃薯果胶多糖组成特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 150–156.
- [19] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.4—2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 王铁良, 魏亮亮, 刘冰杰, 等. 杜马斯燃烧法测定大豆水溶性蛋白含量的方法研究 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(1): 127–131.
- [22] Methacanon P, Krongsin J, Gamonpilas C. Pomelo (*Citrus maxima*) pectin: effects of extraction parameters and its properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35(3): 383–391.
- [23] Zykwincka A, Rondeau-Mouro C, Garnier C, *et al.* Alkaline extractability of pectic arabinan and galactan and their mobility in sugar beet and potato cell walls [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 65(4): 510–520.
- [24] Øbro J, Harholt J, Scheller H V, *et al.* Rhamnogalacturonan I in *Solanum tuberosum* tubers contains complex arabinogalactan structures [J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(10): 1429–1438.
- [25] Funami T, Nakauma M, Ishihara S, *et al.* Structural modifications of sugar beet pectin and the relationship of structure to functionality [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(2): 221–229.
- [26] Yang J S, Mu T H, Ma M M. Extraction, structure, and emulsifying properties of pectin from potato pulp [J]. *Food Chemistry*, 2018, 244: 197–205.
- [27] Nakauma M, Funami T, Noda S, *et al.* Comparison of sugar beet pectin, soybean soluble polysaccharide, and gum arabic as food emulsifiers. 1. Effect of concentration, pH, and salts on the emulsifying properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(7): 1254–1267.
- [28] Leroux J, Langendorff V, Schick G, *et al.* Emulsion stabilizing properties of pectin [J]. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17(4): 455–462.