杨筱含, 毛可敏, 孙婧文, 等. 蒸汽爆破预处理对柑橘皮果胶结构和乳化稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 114−121. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030195

YANG Xiaohan, MAO Kemin, SUN Jingwen, et al. Effect of Steam Explosion Pretreatment on Citrus Peel Pectin Structure and Emulsification Stability[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 114−121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030195

· 研究与探讨 ·

蒸汽爆破预处理对柑橘皮果胶结构和乳化稳定性的影响

杨筱含, 毛可敏, 孙婧文, 梁紫鑫, 田桂芳*, 桑亚新*

（河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071000）

摘　要: 为了研究蒸汽爆破（Steam explosion，SE）预处理对柑橘皮果胶（Citrus peel pectin，CP）结构和乳化稳定性的影响，本研究采用 SE（0.3 MPa、0.45 MPa，3 min）技术处理柑橘皮后提取果胶，并制备了水包油（O/W）乳液。采用高效液相色谱、傅里叶红外光谱和核磁共振波谱等方法对 CP 的结构特征进行表征，采用界面张力仪、激光粒度仪和激光共聚焦显微镜等方法对 CP 的乳化稳定性进行表征。结果表明 SE 预处理破坏了柑橘皮的组织结构，有利于果胶的释放和溶出，SE-0.3 MPa 处理后的 CP 得率显著增加（$P<0.05$），由未经预处理时的 7.59% 增至 21.17%；SE 预处理降低了 CP 的分子量，由未经预处理时的 318.41 kDa 分别降至 114.22 kDa（0.3 MPa）和 48.26 kDa（0.45 MPa），有利于 CP 在 O/W 乳液界面的吸附；SE-0.3 MPa 处理后的 CP 稳定的乳液粒径显著降低（$P<0.05$），由未经预处理时的 9.31 μm 降至 5.43 μm，且在 25 ℃ 下储存 21 d 后，乳液无显著乳析和分层现象，粒径大小无显著增加。该研究为 SE 技术在柑橘副产物的综合利用提供了理论参考。

关键词: 蒸汽爆破技术, 果胶, 结构变化, 乳化稳定性

中图分类号: TS252.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0114−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030195　　本文网刊:

Effect of Steam Explosion Pretreatment on Citrus Peel Pectin Structure and Emulsification Stability

YANG Xiaohan，MAO Kemin，SUN Jingwen，LIANG Zixin，TIAN Guifang*，SANG Yaxin*

（College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China）

Abstract: In order to investigate the effects of steam explosion (SE) pretreatment on the structure and emulsification stability of citrus peel pectin (CP), different pressures (0.3 MPa and 0.45 MPa, 3 min) were applied to treat citrus peels. The structural characteristics of CP were analyzed by high-performance liquid chromatography (HPLC), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), and nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR). Meanwhile, emulsification stability of CP were assessed through surface interface tensiometer, laser particle sizer and confocal laser scanning microscopy (CLSM). The results revealed that the extraction yield of CP was significantly increased ($P<0.05$) after SE-0.3 MPa treatment from 7.59% to 21.17%. Moreover, molecular weight (Mw) of CP was reduced from 318.41 kDa to 114.22 kDa (0.3 MPa) and 48.26 kDa (0.45 MPa), respectively. Additionally, emulsion droplet size was significantly decreased ($P<0.05$) from 9.31 μm to 5.43 μm after SE-0.3 MPa treatment. No significant creaming, phase separation and increase of droplet size were observed in emulsion after storage at 25 ℃ for 21 days. This study provides a theoretical reference for the application of SE technology in the comprehensive utilization of citrus by-products.

Key words: steam explosion; pectin; structural change; emulsification stability

收稿日期: 2025−03−17

基金项目: 国家自然科学基金（31901656）。

作者简介: 杨筱含（1997−）, 女, 博士研究生, 研究方向: 农产品再利用与乳品加工, E-mail: yxh1269824882@163.com。

*** 通信作者:** 田桂芳（1986−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果品加工与营养健康, E-mail: fengxinzi.812@163.com。

桑亚新（1973−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: sangyaxin@sina.com。

柑橘是世界第一大类水果。据统计，在实际种植和生产加工中，柑橘副产物在全球范围内的年产量可达 5400 万吨[1]，且通常被作为废弃物直接填埋或丢弃，只有少部分被用作动物饲料或再提取[2]。柑橘副产物中含有多种功能成分，包括多糖类（如果胶）、精油和多甲氧基黄酮等，其中，果胶约占柑橘皮干重的 15%~30%。因此，将柑橘副产物作为果胶的提取原料，不仅可以减少环境污染和资源浪费，还提高了其附加值。作为天然的膳食成分，果胶因具备安全、成本低、来源广泛等特点，在食品领域的应用十分广泛。果胶是一种具有负电荷的复杂多糖，其结构主要包括同型半乳糖醛酸（Homogalacturonan, HG）、鼠李糖半乳糖醛酸Ⅰ（Rhamnogalacturonan I, RG-Ⅰ）和鼠李糖半乳糖醛酸Ⅱ（Rhamnogalacturonan II, RG-Ⅱ）三个部分[3]。果胶分子因同时包含亲水端和疏水端而能在水-油界面形成稳定的水化层，因此常被用作乳化剂[4]。但天然柑橘果胶具有结构复杂、分子量大、分布不均匀等特点，直接影响了其乳化稳定性。

蒸汽爆破（Steam explosion, SE）是一种预处理技术，能以相对较低的成本提取和降解生物聚合物[5]。在 SE 过程中，生物质被暴露在高压饱和蒸汽中，瞬时减压爆破可破坏生物质微观结构[6]，从而释放功能成分。经过 SE 预处理的石榴皮由平滑、平整变得粗糙且有纹路，提高了石榴皮中总酚的提取量[7]；SE 预处理破坏了椰子中果皮的密集结构，提高了椰子中果皮的纤维得率[8]；SE 预处理显著影响了黑青稞的膨化度和糊化度，提高了黑青稞粉中游离多酚的含量[9]。然而，目前关于 SE 技术对果胶结构及其乳化稳定性的研究有限。

因此，本研究采用 SE 技术对柑橘皮进行预处理，用酸提醇沉淀法提取果胶，再用果胶溶液作水相，用混合油（香柠檬油+中链甘油三酯）为油相，制得一种水包油（O/W）型的乳液体系。然后，通过分析 SE 对柑橘皮果胶（Citrus peel pectin, CP）结构、物化特性以及乳化稳定性的影响，为 SE 技术在食品领域的应用提供参考，为柑橘副产物的再利用提供借鉴。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

柑橘皮（红橘）　中国重庆的一个果园（2022 年 1 月采摘，烘干后于常温通风处储存）；香柠檬油、中链甘油三酯（MCT）　上海源叶生物科技有限公司；单糖标准品（GalA，半乳糖醛酸；Ara，阿拉伯糖；Gal，半乳糖；Rha，鼠李糖；Glu，葡萄糖；Xyl，木糖；Man，甘露糖）　美国 Sigma-Aldrich 公司；尼罗红　上海麦克林生化科技有限公司；其他物质和试剂均为分析纯。

QB-300 蒸汽爆破装置　苏州清正生态科技有限公司；SN-MS-H280D 磁力搅拌器　上海尚普仪器设备有限公司；LC-2010C HT 高效液相色谱仪（HPLC）　日本岛津公司；Agilent PL-GPC50 凝胶渗透色谱仪（GPC）　美国安捷伦科技有限公司；Nicolet iS20 傅里叶红外光谱仪（FT-IR）　美国赛默飞世尔科技公司；AVANCE NEO 600M 核磁共振波谱仪（NMR）　德国布鲁克公司；Dimension Icon 原子力显微镜（AFM）　德国布鲁克公司；Zsizer Nano ZS ZEN3600 纳米粒度和 Zeta 电位仪　英国马尔文仪器有限公司；MCR 302流变仪　奥地利安东帕公司；IKA-T25 均质机　德国艾卡公司；Scientz-15 高压均质机　宁波新芝生物科技股份有限公司；LSM 900 激光共聚焦显微镜（CLSM）　德国卡尔-蔡司公司；DCAT 21 界面张力仪　德国 DataPhysics 公司；S3500 激光粒度分析仪　美国麦奇克仪器有限公司；JS94K 微电泳仪　上海中晨数字技术设备有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　蒸汽爆破预处理和果胶提取　将热风烘干后的柑橘皮（水分含量约为 16%）置于 SE 装置的不锈钢反应釜中，分别在 0.3 MPa 和 0.45 MPa 的压力下处理 3 min（图 1）[10]。

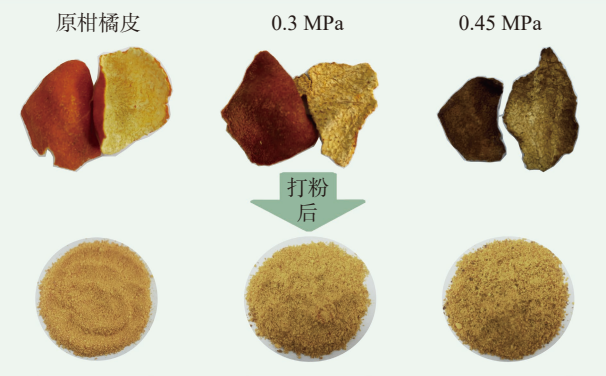


图 1　不同蒸汽爆破预处理条件下的柑橘皮

Fig.1　Citrus peels under different SE pretreatment conditions

将 SE 处理前后的柑橘皮打碎后得柑橘皮粉（图 1），加入 20 倍的去离子水，用 HCl 将 pH 调成 2.0。然后在 80 ℃ 的温度下，采用磁力搅拌器以 1200 r/min 的转速不断搅拌提取 2 h。将搅拌后的样本置于冰水中迅速冷却，随后采用 8 层纱布过滤得上清。用 95% 的乙醇以 1∶3（V/V）的比例沉淀上清 12 h。最后，将沉淀通过 400 目滤袋过滤，并在 50 ℃ 下干燥 6 h，将未经预处理的果胶命名为 CP-Con，经 SE 预处理的果胶命名为 CP-0.3 和 CP-0.45，并测定果胶得率[11]，计算公式如下：

$$果胶得率(\%)=\frac{M_1}{M_2}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中，M_1 为果胶质量（g），M_2 为柑橘皮粉质量（g）。

1.2.2　果胶的结构特征

1.2.2.1　分子量测定　采用 GPC 测定果胶的相对分子质量（Mw）[12]。测试条件：洗脱液为 $NaNO_3$ 溶液，0.1 mol/L，流速为 1 mL/min，温度保持在 30 ℃。使用 PEO 和 PEG 进行校准，Agilent GPC 软件用于数据处理。

1.2.2.2 酯化度测定 果胶的酯化度(Degree of esterification, DE)采用滴定法测定[13]。将几滴酚酞滴入 10 mg/mL 的果胶溶液中。然后, 向果胶溶液中滴入 0.01 mol/L 的 NaOH, 直到出现粉红色(V_1)为止。然后在溶液中加入 0.01 mol/L NaOH 溶液 10 mL, 搅拌 15 min, 再加入 0.01 mol/L HCl 溶液 10 mL, 以中和 0.01 mol/L 的 NaOH 溶液。最后, 使用 0.01 mol/L NaOH 继续对溶液进行滴定, 直至溶液再次呈现粉红色(V_2), DE 计算公式如下:

$$DE(\%) = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.2.3 单糖组成和 GalA 含量 采用 HPLC 检测果胶的单糖组成和 GalA 含量[14]。10 mg 果胶添加至 4 mL 三氟乙酸(2 mol/L), 在高压灭菌锅中, 121 ℃ 下水解 2 h, 于 60 ℃ 负压蒸发至干燥后, 溶于 0.4 mL 的 NaOH(0.5 mol/L)和 1 mL 的 PMP 甲醇溶液(0.5 mol/L)中。混合物在 70 ℃ 下反应 1 h, 冷却后用 0.4 mL 的 HCl(0.5 mol/L)中和。最后, 用 1 mL 三氯甲烷萃取得到溶液, 重复两次以去除 PMP, 检测前用 0.22 μm 滤膜过滤。

单糖组成检测条件: Waters Symmetry C_{18} 色谱柱(250 mm×4.6 mm); 流动相 A 为磷酸二氢钾(0.1 mol/L, pH6.85), 流动相 B 为乙腈。梯度洗脱条件: 0~22 min, 乙腈 18%; 22~30 min, 乙腈 18%~40%; 30~32 min, 乙腈 40%; 32~35 min, 乙腈 40%~18%; 紫外检测波长 250 nm, 流速 1.0 mL/min, 温度保持在 25 ℃。GalA 测试条件: CAPCELLPAK C_{18} MG Ⅱ 型色谱柱(250 mm×4.6 mm); 流动相为 0.5% 磷酸盐缓冲溶液(pH2.3), 紫外检测波长为 210 nm, 流速为 0.6 mL/min, 温度保持在 30 ℃。

1.2.2.4 FT-IR 光谱测定 采用 FT-IR 光谱仪测定果胶的特征吸收峰[15]。测试条件为: 扫描次数为 32 次, 分辨率为 4 s^{-1}, 扫描范围为 650~4000 cm^{-1}。

1.2.2.5 ^{1}H NMR 波谱测定 采用 NMR 波谱仪以进一步测定果胶的特征吸收峰[16]。将 5 mg 果胶溶于 1 mL 的 D_2O(99.96%)中, 在室温下采集果胶 ^{1}H NMR 谱图, 扫描次数 256 次, 频率为 600 MHz。

1.2.3 果胶的物化特性

1.2.3.1 粒径和 Zeta 电位测定 采用纳米粒度和 Zeta 电位仪测定果胶粒径的纳米粒度及 Zeta 电位[15]。用去离子水将果胶溶液稀释至适宜浓度后再进行实验。采用 Zsizer 软件对数据进行分析。

1.2.3.2 AFM 图像 采用 AFM 观察果胶分子的微观形貌, 设置为轻敲模式[17]。果胶浓度为 10 μg/mL, 探头为氮化硅悬臂梁(SCANASYST-AIR), 谐振频率为 70 kHz, 弹簧常数为 0.4 N/m。使用 XEI 设备对图像进行分析。

1.2.3.3 黏度的测定 采用配备有同心圆筒(圆柱长度=40 mm; 圆柱直径=27 mm)的流变仪测定果胶黏度[18]。将 20 mL 的果胶置于内筒, 允许其稳定 3 min。黏度测试在 25 ℃ 下进行, 剪切速率范围为 0~100 s^{-1}。

1.2.4 O/W 乳液制备 首先, 采用均质机将油相(10 g/100 g, w/w, 香柠檬油∶MCT=1∶1)和果胶溶液(1 g/100 g, w/w)混合, 形成初始乳液。然后, 在 60 MPa 下使用高压均质机对初级乳液进行处理, 循环 3 次, 得到最终乳液[1], 将未经预处理的果胶稳定的乳液命名为 E-Con, 经 SE 处理后的果胶稳定的乳液命名为 E-0.3 和 E-0.45。

1.2.5 乳化稳定性

1.2.5.1 界面张力的测定 利用界面张力仪对所得果胶溶液与油相的界面张力进行检测。油的密度为 0.877 g/mL, 果胶溶液(1 g/100 g, w/w)的密度为 1.012 g/mL[19]。

1.2.5.2 CLSM 测定 将鲜乳液与尼罗红(50∶1, v/v)混合后静置 1 min, 通过 CLSM 对乳液的液滴表观进行可视化[20]。使用 40×物镜采集图像。

1.2.5.3 粒径和 Zeta 电位 使用激光粒度仪检测鲜乳液和静置 21 d 后的乳液粒径。乳液的体积平均粒径($D_{4,3}$)表示如下:

$$D_{4,3} = \sum_i n_i d_i^4 / \sum_i n_i d_i^3 \quad \text{式(3)}$$

式中, n_i 为滴数, d_i 为液滴粒径。

鲜乳液滴的 Zeta 电位通过用微电泳仪测定。先用去离子水稀释乳液 200 倍后, 做 pH 校正, 再进行测试。通过 Henry 方程计算 Zeta 电位[21]。

1.2.5.4 静置稳定性 将鲜乳液置于 10 mL 的摇菌管中于 25 ℃ 静置 21 d, 以观察乳液的长期储存稳定性。静置期间, 拍照观察乳液的分层和乳析情况[22]。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次, 以平均值±标准差表示。使用 IBM SSPS Statistics 26.0 软件进行数据统计分析, 采用 Duncan's multiple range test 进行方差分析(ANOVA)后的多重比较(P<0.05)。采用 Origin 2023 软件进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 柑橘皮果胶的得率分析

果胶位于植物的细胞壁中, 与纤维素和半纤维素紧密结合, 这直接影响了实际生产中果胶的得率[2]。如图 2 所示, 原始柑橘皮果胶(CP-Con)得率为 7.59%, 在 0.3 MPa 的 SE 处理下(CP-0.3), 果胶的得率提高到 21.17%, 这可能是因为在 SE 处理过程中, 柑橘皮经过瞬时的爆破, 使其原有的紧密结构变得疏松多孔, 增加了柑橘皮的表面积, 使得果胶在提取过程中更易溶出。同先前报道的文献类似[23], SE 预处理提高了茯苓(*Poria cocos*)皮中可溶性膳食纤维的得率。然而, 当 SE 压力增加至 0.45 MPa 时(CP-0.45), 果胶的得率降至 13.08%, 这是因为较高

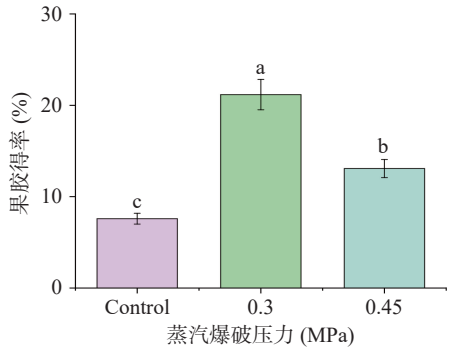


图 2　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的得率

Fig.2　Yield of pectin under different SE pretreatment conditions

注：图中不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$；图 4 同。

的 SE 压力伴随着高温，使柑橘皮碳化，果胶开始降解[24]。

2.2　蒸汽爆破预处理对果胶结构的影响

2.2.1　果胶的分子量分析　果胶的 Mw 是影响其乳化稳定性的关键因素。由表 1 可见，随着 SE 压力的增加，果胶分子量逐渐降低：CP-Con（318.41 kDa）>CP-0.3（114.22 kDa）>CP-0.45（48.26 kDa），这主要归因于 SE 处理过程中的热降解和瞬时减压，使得果胶分子链发生断裂，且 SE 压力越大分子链断裂越严重。此外，经 SE 处理后的果胶多分散性指标（Mw/Mn）逐步降低：CP-Con（6.37）>CP-0.3（5.66）>CP-0.45（5.60），表明果胶具有了良好的均一性。这说明 SE 预处理可以提高果胶的得率和均一性，可用于实际生产。

表 1　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的分子量、多分散性指数和酯化度

Table 1　Mw, polydispersity index and DE of pectin under different SE pretreatment conditions

蒸汽爆破压力（MPa）	Control	0.3	0.45
分子量（kDa）	318.41	114.22	48.26
多分散性指数（Mw/Mn）	6.37	5.66	5.60
酯化度（%）	70.65±1.31^{a}	68.40±1.97^{a}	61.17±2.07^{b}

注：同行不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），数据表示为平均值±标准差；表2同。

2.2.2　果胶的酯化度分析　DE 用于表示果胶分子中 GalA 的 C-6 位上的羧基（-COOH）被甲基化（-$COOCH_3$）的程度。市面上，通常采用碱法脱酯和酸法脱酯来获得 DE 较低的果胶[25]。高含量的甲酯基会抑制果胶分子内部的聚集，从而抑制果胶分子在 O/W 界面的吸附，低含量的甲酯基将减少果胶分子间的阻碍，形成更灵活的果胶链，有助于果胶在 O/W 界面形成厚的果胶层[26−27]。如表 1 所示，原始柑橘皮中提取的果胶 DE 为 70.65%。在 0.3 MPa 下，DE 降至 68.40% 但无显著差异，当 SE 压力增至 0.45 MPa 时，DE 显著降至 61.17%（$P<0.05$），表明 SE 是一种绿色的、对果胶具有降酯效果的技术。

2.2.3　果胶的单糖组成和 GalA 含量分析　果胶的单糖组成和 GalA 含量与其结构特征密切相关，果胶的乳化稳定性也依赖于主链的长度和侧链的分支情况[28]。表 2 显示，柑橘皮中提取的果胶主要由 GalA、Ara、Gal、Rha、Xyl、Glu 和 Man 组成，且在 SE 预处理后组成没有发生改变。其中，GalA 的占比最大，Ara 次之。GalA/（Ara+Gal+Rha+Xyl）表示果胶分子的线性程度，数值越大表示线性程度越大。在 0.3 MPa 的 SE 处理之后，果胶的 GalA/（Ara+Gal+Rha+Xyl）显著降低（0.56 降至 0.056）（$P<0.05$），这说明果胶的主链发生大幅度断裂。在 0.45 MPa 下，果胶的 GalA/（Ara+Gal+Rha+Xyl）又增至 0.35，这说明随着 SE 压力的增加果胶分子的主链和侧链同时发生断裂[28]。Rha/GalA 表现出与 GalA/（Ara+Gal+Rha+Xyl）相似的变化趋势，进一步表现出果胶主链和侧链在较低的 SE 处理压力（0.3 MPa）下发生断裂，并随着 SE 压力（0.45 MPa）的增加而出现不同程度的断裂。

表 2　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的单糖组成和半乳糖醛酸含量

Table 2　Monosaccharide composition and galacturonic acid of pectin under different SE pretreatment conditions

蒸汽爆破压力（MPa）	Control	0.3	0.45
GalA（mol %）	34.62±1.42^{a}	34.70±1.51^{a}	22.92±0.91^{b}
Ara（mol %）	22.26±0.11^{c}	39.71±0.82^{a}	24.45±0.35^{b}
Gal（mol %）	21.01±0.21^{b}	16.97±0.45^{c}	22.15±0.55^{a}
Rha（mol %）	16.61±0.26^{a}	4.18±0.13^{b}	17.39±0.69^{a}
Glu（mol %）	13.89±0.51^{b}	2.52±0.15^{c}	21.89±1.49^{a}
Xyl（mol %）	1.69±0.07^{a}	0.92±0.04^{b}	1.04±0.07^{b}
Man（mol %）	1.69±0.02^{c}	2.48±0.08^{a}	2.35±0.02^{b}
GalA/（Ara+Gal+Rha+Xyl）	0.56±0.03^{a}	0.056±0.04^{c}	0.35±0.02^{b}
Rha/GalA	0.48±0.03^{b}	0.12±0.01^{c}	0.76±0.03^{a}

注：GalA，半乳糖醛酸；Ara，阿拉伯糖；Gal，半乳糖；Rha，鼠李糖；Glu，葡萄糖；Xyl，木糖；Man，甘露糖；GalA/（Ara+Gal+Rha+Xyl）表示果胶的线性程度，Rha/GalA表示果胶支链的分支程度。

2.2.4　果胶的 FT-IR 和 NMR 分析　果胶在不同 SE 条件下的特征峰采用 FT-IR 光谱分析。如图 3A 所示，在 3309 cm^{-1} 的吸收峰代表 CH_2、CH_3 中 C-H 的伸缩振动[28]；2927 cm^{-1} 吸收峰代表 O-H 伸缩振动；1731 cm^{-1} 和 1607 cm^{-1} 的吸收峰归因于酯羰基（C=O）的伸缩振动和羧酸基（COO-R）的伸缩振动[29]；在 0.45 MPa 处理下，1731 cm^{-1} 处吸收峰强度下降，1607 cm^{-1} 处强度上升，表明果胶脱酯化，与酯化度结果相符；1230 cm^{-1} 和 1017 cm^{-1} 的吸收峰则分别代表吡喃糖环中醚键（C-O-C）和羟基（O-H）的伸缩振动[30]，吸收峰值在 CP-0.45 中的减弱表明果胶发生降解，此前也有文献表明，高静水压处理也会引起果胶的降解[31]。在 920 cm^{-1} 的吸收峰与果胶分子中 β-糖苷键的作用有关[32]。此外，SE 预处理前后果胶没有出现新的吸收峰，这说明果胶在 SE 处理过程中只发生了物理断裂。

为了进一步观察 SE 预处理对果胶结构的影响，图 3B 展示了所有果胶的 NMR 波谱图。4.69 ppm

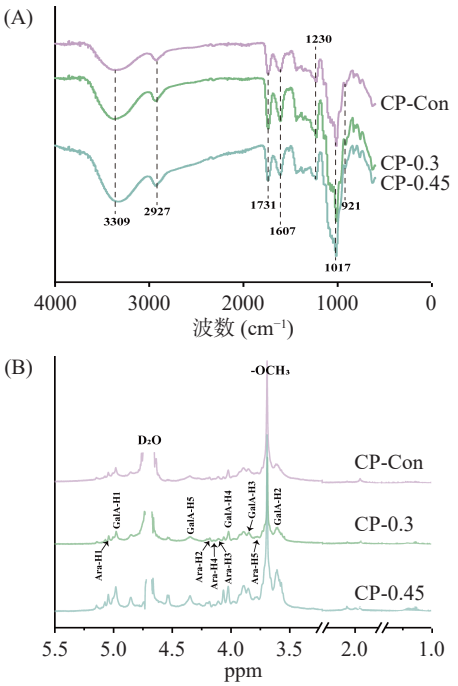


图 3　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的 FT-IR(A)和 NMR(B)图谱

Fig.3　FT-IR (A) and NMR (B) spectra of pectin under different SE pretreatment conditions

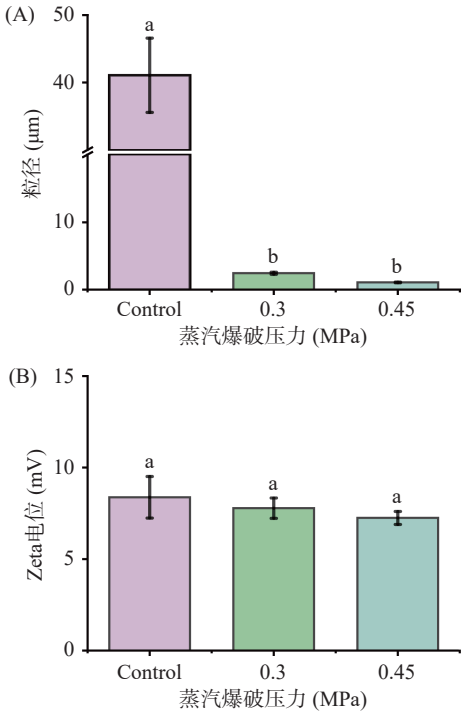


图 4　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的粒径(A)和 Zeta 电位绝对值(B)

Fig.4　Particle size (A) and Zeta potential absolute value (B) of pectin under different SE pretreatment conditions

处信号峰为溶剂信号(D_2O)[33]; 4.97、3.61、3.89、4.02 和 4.44 ppm 附近信号峰分别来自 GalA-H1、GalA-H2、GalA-H3、GalA-H4 和 GalA-H5[34]; 5.04、4.19、4.10、4.15 和 3.81 ppm 附近的信号峰分别来自 Ara-H1、Ara-H2、Ara-H3、Ara-H4 和 Ara-H5[16]。此外, 3.69 ppm 处信号峰归因于酯化 GalA 上的-OCH_3[34]。NMR 结果进一步表明, GalA 和 Ara 是本研究所提取果胶的主要成分, 这与单糖组成的结果一致。

2.3　蒸汽爆破预处理对果胶物化特性的影响

2.3.1　果胶的粒径和 Zeta 电位分析　图 4A 显示果胶粒径随 SE 压力增大而减小, 其变化趋势与 Mw 相同, 进一步说明了 SE 预处理可以使果胶分子链发生断裂, 降低果胶 Mw, 使果胶分子结构发生改变。果胶分子的 Zeta 电位主要影响乳液体系的静电相互作用, 较高的 Zeta 电位绝对值有利于乳液稳定。如图 4B 显示, 所有果胶的 Zeta 电位均为负值, 这是因为果胶是一种阴离子多糖, GalA 上的羧基发生电离(-COO^-)使其带附负电[35]。此外, 所有果胶的 Zeta 电位绝对值均小于 10 mV, 且样本间无显著差异, 这说明了本研究中果胶稳定的乳液稳定性主要与空间相互作用相关, 而不是静电相互作用。

2.3.2　果胶的 AFM 分析　为了更直观地观察果胶的微观结构, 图 5 展示了 SE 前后果胶的 AFM 形貌

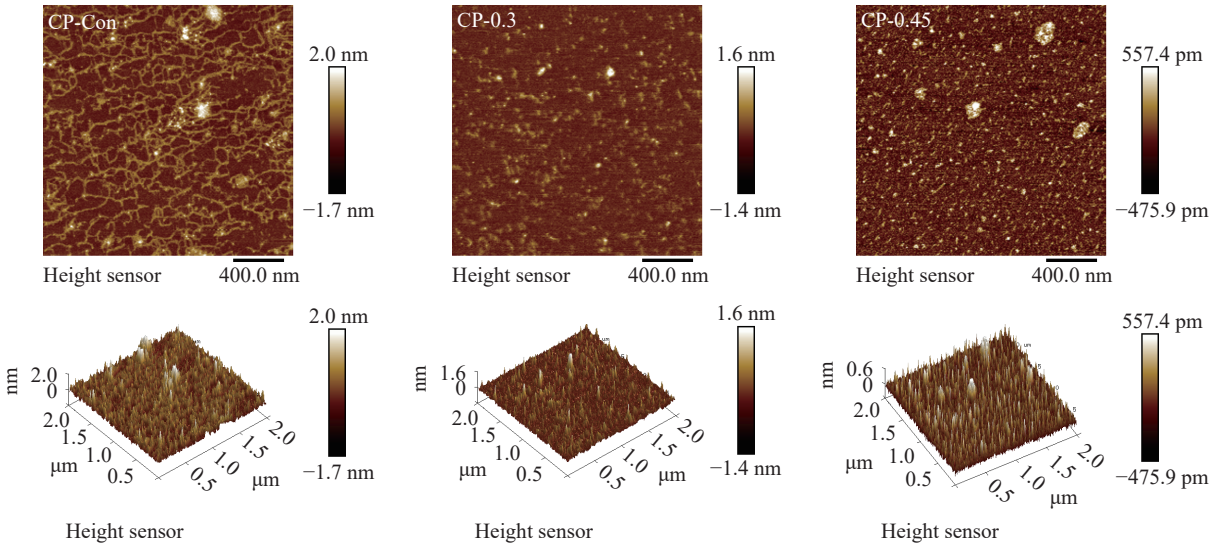


图 5　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的 AFM 图像

Fig.5　AFM images of pectin under different SE pretreatment conditions

图。与 CP-Con 相比，CP-0.3 分子开始聚集，呈现为球状，驼峰高度为 1.6 nm。CP-0.45 的驼峰高度为 557.4 pm，说明果胶分子链发生了进一步断裂，与分子量和粒径的结果一致。

2.3.3　果胶的黏度分析　果胶溶液的黏度直接决定了乳液体系的黏度，较高的体系黏度可以抑制乳液液滴聚集，但黏度过高则不利于乳液制备过程中果胶分子在 O/W 界面的吸附[36]。图 6 所示为 SE 预处理前后果胶的流变行为结果，果胶全部呈现剪切变稀的特点。随着 SE 处理压力的增加，果胶的黏度逐渐降低，这主要与果胶的 Mw 和粒径大小有关，与之前的研究结果类似[31]。正如 AFM 结果所示（图 5），高 Mw 的 CP-Con 具有明显的网状结构，使得果胶溶液具有高黏度的特点，SE 预处理后的果胶 Mw 降低（CP-0.3、CP-0.45），无明显的网状结构，因此果胶溶液的黏度降低。

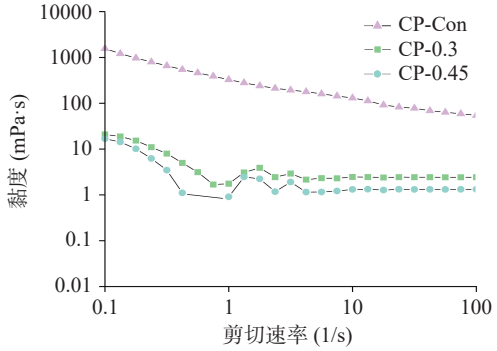


图 6　不同蒸汽爆破预处理条件下果胶的黏度

Fig.6　Viscosity of pectin under different SE pretreatment conditions

2.4　蒸汽爆破预处理对果胶乳化稳定性的影响

2.4.1　乳液界面张力分析　乳液体系的稳定机理主要与界面相关。因此，评价乳液的稳定性时，界面张力是其中一个重要的参照因素。如图 7 所示，与 E-Con 相比，E-0.3 和 E-0.45 的界面张力减小，这可能归因于小 Mw 的果胶可以快速地吸附在 O/W 界面，形成稳定的吸附层，从而降低界面张力。有关研究显示，低界面张力对乳液的稳定性更有帮助[19]。以上结果初步证明 SE 预处理可能会影响果胶的乳化稳定性。

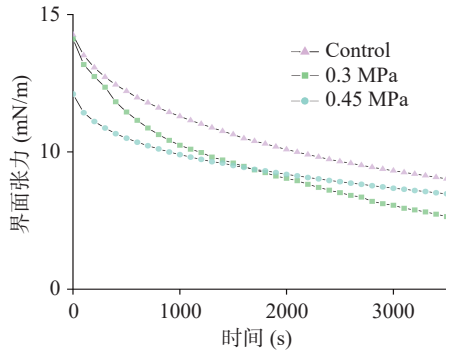


图 7　果胶稳定乳液的界面张力

Fig.7　Interfacial tension of pectin-stabilized emulsions

2.4.2　乳液粒径分析　以 CLSM 直观观察鲜乳液中的液滴大小及聚集程度。同时，激光粒度仪用于鲜乳液粒径的检测。如图 8 和图 9A 所示，E-Con 的液滴有明显的聚集行为，粒径大小为 9.31 μm，这可能是因为较高的体系黏度（图 6）不利于液滴的分散[36]。与 E-Con 相比，E-0.3 和 E-0.45 呈现更加均匀的液滴分布（图 8），粒径分别降低至 5.43 μm 和 5.51 μm（图 9A，鲜乳液），这主要归因于 SE 预处理后 CP-0.3 和 CP-0.45 具有较低的体系黏度，以及较小且均匀的分子结构，乳液制备过程中可以更快地吸附于水油界面层，形成厚且致密的果胶层，从而使乳液的稳定性得到提高，与之前的研究结果一致[36]。

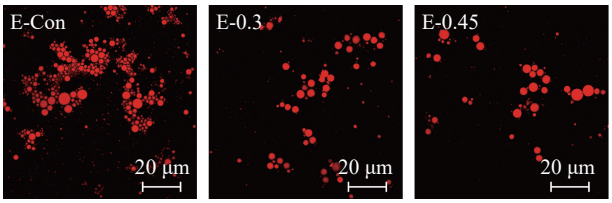


图 8　果胶稳定鲜乳液的 CLSM 图像

Fig.8　CLSM images of pectin-stabilized fresh emulsions

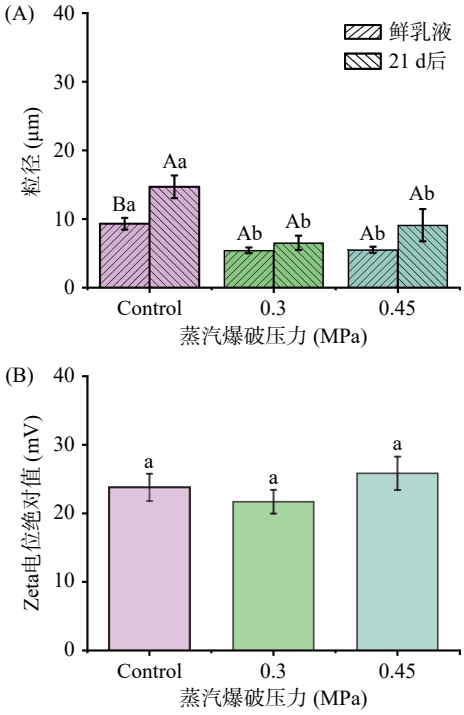


图 9　果胶稳定的鲜乳液及静置 21 d 后乳液的粒径（A）和鲜乳液的 Zeta 电位绝对值（B）

Fig.9　Emulsification stability of pectin-stabilized emulsions droplet size of fresh and 21-day stored emulsions (A) and Zeta potential absolute value of fresh emulsions (B)

注：小写字母表示不同处理条件下的显著性差异，大写字母表示同一处理条件下的显著性差异（P<0.05）。

2.4.3　乳液 Zeta 电位分析　静电斥力是乳液抗凝聚稳定性的因素之一，因此采用微电泳仪测定了鲜乳液的 Zeta 电位[35]。E-Con、E-0.3 和 E-0.45 的 Zeta 电位绝对值分别为 23.79、21.69 以及 25.84 mV，如图 9B 所示，结果显示没有显著性差异，这进一步表

明本研究中乳液稳定的主要因素是空间位阻作用而非静电相互作用。

2.4.4 乳液静置稳定性分析 静置稳定性可以直观地反映乳液在实际贮存条件下的变化，图 10 展示了在 25 ℃ 下储存 21 d 后所有乳液的照片，所有乳液无明显的乳析和分层现象。与此同时，采用激光粒度仪测定静置 21 d 后乳液粒径的大小。如图 9A 所示，在静置 21 d 后，E-Con 的粒径由鲜乳液时的 9.31 μm 显著增加至 14.69 μm（P<0.05），这主要是较大的界面张力和乳液粒径所导致的，E-0.3 和 E-0.45 的粒径在静置 21d 后没有显著变化，说明小粒径乳液在长期储存中有助于维持其稳定性。

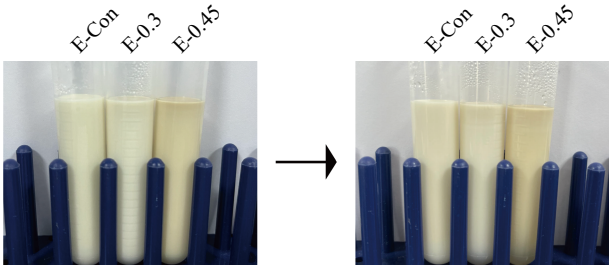


图 10 果胶稳定的鲜乳液和静置 21 d 后乳液的图片

Fig.10 Picture of pectin-stabilized fresh emulsion and after standing for 21 days

3 结论

本研究发现，SE 预处理可以通过破坏柑橘皮的结构，显著提高柑橘皮果胶的得率，从而提高柑橘副产物作为果胶提取原料的附加值。通过观察果胶的结构特征发现，SE 处理过程中的瞬时爆破显著破坏了果胶的分子链，使果胶 Mw 降低，且分布更为均匀，更有利于实际应用。此外，采用滴定法和 FITR 观察果胶的 DE 发现，SE 处理可以降低果胶的 DE，说明 SE 是一种绿色的、可获得低 DE 果胶的预处理技术。经 0.3 MPa 处理后，果胶稳定的乳液粒径显著降低，使得乳液获得了更好的空间稳定性，且在 25 ℃ 下储存 21 d 后，乳液粒径无显著性增加，乳液无明显的乳析和分层现象。综上，本研究为柑橘副产物的再利用以及 SE 技术在食品加工领域的应用提供了借鉴。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] YANG X H, MAO K M, SANG Y X, et al. Citrus derived Pickering emulsion stabilized by insoluble citrus dietary fiber modified by ultra-high pressure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 184: 115112.

[2] 林彦萍, 任源, 王晓娥, 等. 农业生物质废弃物转化功能材料的研究进展[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4332−4351. [LIN Y P, REN Y, WANG X E, et al. Research progress on functional materials for agricultural biomass waste conversion[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4332−4351.]

[3] ZHANG S K, WATERHOUSE G, DU Y Y, et al. Structural, rheological and emulsifying properties of RG-I enriched pectins from sweet and sour cherry pomaces[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108442.

[4] 张士凯, 何子杨, 秦伟帅, 等. 欧李果胶理化特性及乳化性质[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 15−21. [ZHANG S K, HE Z Y, QIN W S, et al. Physicochemical properties and emulsifying properties of *Prunus humilis* pectin[J]. Food Science, 2021, 42(20): 15−21.]

[5] ZHENG P Y, DAI W Z, TAN B K, et al. Combination of steam explosion pretreatment and mixture design optimization as a strategy to enhance the antioxidant activity of crude polysaccharides isolated from edible mushrooms[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 200: 116215.

[6] 李素芬, 田心怡. 蒸汽爆破对不同品种米糠可溶性膳食纤维结构及特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 110−117. [LI S F, TIAN X Y. Effects of steam explosion on the structure and properties of soluble dietary fiber in different varieties of rice bran[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(10): 110−117.]

[7] WANG Q, YUAN T L, ZHU X H, et al. The phenolics, antioxidant activity and *in vitro* digestion of pomegranate (*Punica granatum* L.) peels: An investigation of steam explosion pre-treatment[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1161970.

[8] INSEEMEESAK B, AREEPRASERT C. Fiber extraction and energy recovery from *Cocos nucifera* Linn mesocarp residues employing steam explosion and anaerobic digestion[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 147: 112180.

[9] 王洁, 曾志龙, 王豪缘, 等. 蒸汽爆破对黑青稞营养成分释放及消化性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 222−230. [WANG Jie, ZENG Zhilong, WANG Haoyuan, et al. Effect of steam explosion on the release of nutrients and digestibility of black barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 222−230.]

[10] 陈爽, 刘利平, 冯杰, 等. 蒸汽爆破预处理对猴头菇子实体残渣粗多糖理化性质及调节肠道菌群作用的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 61−69. [CHEN Shuang, LIU Liping, FENG Jie, et al. Effects of steam explosion pretreatment on the physicochemical properties and regulating intestinal flora of polysaccharides from *Hericium erinaceus* fruit body residues[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 61−69.]

[11] LIN Xue, LIU Yuezhe, WANG Ruimin, et al. Extraction of pectins from renewable grapefruit (*Citrus paradisi*) peels using deep eutectic solvents and analysis of their structural and physicochemical properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127785.

[12] TRAN N T K, NGUYEN V B, van TRAN T, et al. Microwave-assisted extraction of pectin from jackfruit rags: Optimization, physicochemical properties and antibacterial activities[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135807.

[13] QI Tingting, REN Jingnan, LI Xiao, et al. Structural characteristics and gel properties of pectin from *Citrus* physiological premature fruit drop[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 309: 120682.

[14] EICHHÖFER H, BINDEREIF B, KARBSTEIN H P, et al. Influence of Arabinan fine structure, galacturonan backbone length, and degree of esterification on the emulsifying properties of acid-extracted sugar beet pectins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(4): 2105−2112.

［15］ WANG Wenjun, FENG Yiming, CHEN Weijun, et al. *Citrus* pectin modified by microfluidization and ultrasonication: Improved emulsifying and encapsulation properties[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105322.
［16］ WANG Fengzhao, BI Jinfeng, XIE Jin, et al. Osmotic dehydration with different agents induced pectin diversity: Physicochemical and structural properties of pectin from instant controlled pressure drop dried peach chips[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110516.
［17］ WU Yilan, LEI Chan, LI Jing, et al. Improvement of O/W emulsion performance by adjusting the interaction between gelatin and bacterial cellulose nanofibrils[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 276: 118806.
［18］ XUE Xiuheng, DONG Jinhua, HE Haiyong, et al. Emulsification and stabilization of diacylglycerol-in-water Pickering emulsions stabilized by ultrafine grinding oat bran insoluble fiber-gelatinized starch hybrid granules[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106322.
［19］ JIA Yangyang, KHALIFA I, DANG Meizhu, et al. Confirmation and understanding the potential emulsifying characterization of persimmon pectin: From structural to diverse rheological aspects[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107738.
［20］ ALAVI F, CHEN L Y. Complexation of nanofibrillated egg white protein and low methoxy pectin improves microstructure, stability, and rheology of oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107262.
［21］ LI Hongjuan, QIU Xiaobao, REN Chuan, et al. Effect of the whey protein isolate-pectin bilayer emulsion system on the textural properties and oil release characteristics of room-temperature stored processed cheese[J]. LWT, 2024, 203: 116403.
［22］ XU Cong, GUO Jiahui, CHANG Baoyue, et al. Study on encapsulation of *Lactobacillus plantarum* 23-1 in W/O/W emulsion stabilized by pectin and zein particle complex[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279(Pt 3): 135346.
［23］ WANG Tianlin, XIAO Zhongshan, LI Tiange, et al. Improving the quality of soluble dietary fiber from *Poria cocos* peel residue following steam explosion[J]. Food Chemistry, 2023, 19: 100829.
［24］ RYDEN P, GAUTIER A, WELLNER N, et al. Changes in the composition of the main polysaccharide groups of oil seed rape straw following steam explosion and saccharification[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 61: 121−130.
［25］ 杨旭东, 郭绰, 袁凯, 等. 低酯果胶胶凝特性研究进展及应用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 299−308. ［YANG X D, GUO C, YUAN K, et al. Research progress and application of low-ester pectin gelation properties[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(6): 299−308.］
［26］ WANG H, FEI S Y, WANG Y F, et al. Comparative study on the self-assembly of pectin and alginate molecules regulated by calcium ions investigated by atomic force microscopy[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 231: 115673.
［27］ LIU Y H, WENG P F, LIU Y N, et al. Citrus pectin research advances: Derived as a biomaterial in the construction and applications of micro/nano-delivery systems[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107910.
［28］ HU Weiwei, CHEN Shiguo, WU Dongmei, et al. Manosonication assisted extraction and characterization of pectin from different *Citrus* peel wastes[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 106952.
［29］ CUI J F, REN W B, ZHAO C. Y, et al. The structure-property relationships of acid- and alkali-extracted grapefruit peel pectins [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115524.
［30］ DRANCA F, VARGAS M, OROIAN M. Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* 'Fălticeni' apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105383.
［31］ XIE Fan, ZHANG Wei, LAN Xiaohong, et al. Effects of high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing on characteristics of potato peel waste pectin[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 474−482.
［32］ QIU Zhichang, LI Lingyu, ZHU Wenqing, et al. Pectins rich in RG-I and galactose extracted from garlic pomace: Physicochemical, structural, emulsifying and antioxidant properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109559.
［33］ DUAN Xingke, ZHU Yu, SHU Congying, et al. Extraction of pectin from Satsuma mandarin peel: A comparison of high hydrostatic pressure and conventional extractions in different acids[J]. Molecules, 2022, 27(12): 3747.
［34］ LI Ruoxuan, FAN Hekai, LI Bowen, et al. Comparison on emulsifying and emulgelling properties of low methoxyl pectin with varied degree of methoxylation from different de-esterification methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263: 130432.
［35］ LIU Ying, QU Wenjuan, LIU Yuxuan, et al. Chemical, structural and functional properties of pectin from tomato pulp under different peeling methods[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134373.
［36］ HUMEREZ-FLORES J N, VERKEMPINCK S H E, van LOEY A M, et al. Targeted modifications of *Citrus* pectin to improve interfacial properties and the impact on emulsion stability[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107841.