

超声处理对葡萄细胞壁果胶组分的影响

杨亦雯, 李大婧, 包怡红, 聂梅梅, 刘春菊, 刘春泉, 肖亚冬, 牛丽影, 吴海虹

Effect of Ultrasonic Treatment on *Vitis vinifera* L. Cell Wall Pectin Components

YANG Yiwen, LI Dajing, BAO Yihong, NIE Meimei, LIU Chunju, LIU Chunquan, XIAO Yadong, NIU Liying, and WU Haihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020249>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

保加利亚乳杆菌细胞壁蛋白酶基因克隆及结构分析

Gene Cloning and Structural Analysis of Cell Wall Proteinase from *Lactobacillus bulgaricus*

食品工业科技. 2019, 40(20): 107-111, 119 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.20.018>

水杨酸处理对库尔勒香梨果实贮藏期细胞壁组分和水解酶活性变化的影响

Effects of salicylic acid treatment on the variations of cell wall components and hydrolase activity of Korla fragrant pear during the storage stage

食品工业科技. 2017(09): 309-313 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.051>

超声辅助提取鲢皮胶原蛋白工艺优化及结构特征分析

Optimization of Ultrasound-assisted Extraction and Structural Characteristics Analysis of Collagen from Chinese Giant Salamander(*Andrias davidianus*) Skin

食品工业科技. 2021, 42(22): 160-168 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020154>

超高压处理对鲜切马铃薯质地及细胞壁多糖含量的影响

Effect of Ultra High Pressure Treatment on the Texture and Cell Wall Polysaccharide Content of Fresh-cut Potato

食品工业科技. 2020, 41(2): 258-266 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.041>

硫化氢熏蒸对无核白葡萄采后细胞壁及病害的影响

Effect of Hydrogen Sulfide Fumigation on Cell Wall and Disease of Postharvest Thompson Seedless Grape

食品工业科技. 2020, 41(13): 277-283 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.044>

1-甲基环丙烯和不同贮藏温度对油桃果实硬度与细胞壁果胶的影响

Effects of 1-Methylcyclopropene and Different Ambient Temperature on Firmness and Cell Wall Pectin in Postharvest Nectarine

食品工业科技. 2021, 42(7): 317-323 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050347>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨亦雯, 李大婧, 包怡红, 等. 超声处理对葡萄细胞壁果胶组分的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 92–101. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020249

YANG Yiwen, LI Dajing, BAO Yihong, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on *Vitis vinifera* L. Cell Wall Pectin Components[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 92–101. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020249

· 研究与探讨 ·

超声处理对葡萄细胞壁果胶组分的影响

杨亦雯^{1,2}, 李大婧^{2,*}, 包怡红^{1,*}, 聂梅梅², 刘春菊², 刘春泉², 肖亚冬², 牛丽影², 吴海虹²

(1. 东北林业大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 为明确超声处理下葡萄细胞壁中不同果胶组分含量及结构变化, 本研究采用不同超声时间和超声功率对葡萄进行处理, 通过咔唑硫酸法、PMP 柱前衍生化法、高效液相凝胶色谱分析、扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱分析和圆二色谱分析等手段分析了葡萄细胞壁中果胶组分含量、单糖组成及结构变化。结果表明, 新鲜葡萄细胞壁果胶中碱溶性果胶含量最高, 为 27.41 mg/g AIR, 螯合型果胶含量最低, 为 8.25 mg/g AIR; 不同超声处理后总果胶含量呈下降趋势, 其中水溶性果胶含量增加, 螯合型和碱溶性果胶含量降低。果胶单糖共检测到 6 种, 不同果胶组分单糖组成不同, 水溶性果胶中半乳糖和阿拉伯糖含量较高, 螯合型果胶中葡萄糖醛酸含量最多, 而碱溶性果胶中含量最高的为鼠李糖; 超声处理后果胶组分单糖组成不变, 但含量均发生降低; 超声作用未改变果胶主链结构, 但其线性结构和支链程度均发生变化。随着超声处理时间和功率的增加, 不同果胶的分子量整体均呈下降趋势, 并且在微观结构上呈现更加松散形态。此外, 超声作用对果胶组分特征官能团影响较小, 但对螯合型果胶和碱溶性果胶分子的结构和链构象产生作用, 使其最大响应值发生移动, 并且超声功率作用影响更大。超声作用可使葡萄细胞壁中果胶含量及单糖含量降低, 并影响果胶分子线性结构和分子链构象。该结果可为进一步研究超声处理下葡萄干制品品质变化提供理论依据。

关键词: 超声波, 葡萄细胞壁果胶, 含量变化, 结构分析

中图分类号: TS255.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0092-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020249



本文网刊:

Effect of Ultrasonic Treatment on *Vitis vinifera* L. Cell Wall Pectin Components

YANG Yiwen^{1,2}, LI Dajing^{2,*}, BAO Yihong^{1,*}, NIE Meimei², LIU Chunju², LIU Chunquan²,
XIAO Yadong², NIU Liying², WU Haihong²

(1. College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Institute of Agro-Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to clarify the content and structural changes of different pectin fractions in grape cell walls under ultrasonic treatment, the grapes were treated with different ultrasonic time and ultrasonic power in this study, and the content of pectin fractions, composition of monosaccharides and structural changes of grape cell walls were analyzed by means of carbazole sulfuric acid method, PMP pre-column derivatization, high-performance liquid gel chromatography, scanning electron microscopy, Fourier transform infrared spectroscopy and circular dichroism. Results showed that the highest and the lowest contents in fresh grape cell walls were alkali-soluble pectin (NSP) and chelate pectin (CSP), respectively, and they were 27.41 mg/g AIR and 8.25 mg/g AIR. The total pectin decreased after ultrasonic treatments, in which the water-soluble pectin (WSP) increased and the CSP and NSP decreased. A total of six monosaccharides were

收稿日期: 2023-02-23

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)重点项目(BE2020338)。

作者简介: 杨亦雯(1998-),女,硕士,研究方向:农产品加工与贮藏,E-mail: 326654495@qq.com。

* 通信作者: 李大婧(1976-),女,博士,研究员,研究方向:果蔬加工与副产物综合利用,E-mail: lidajing@163.com。

包怡红(1970-),女,博士,教授,研究方向:森林食品开发利用,E-mail: baoyihong@163.com。

detected in three pectins, and the monosaccharides of different pectin were not the same. The galactose and arabinose were high in WSP, the glucuronic acid was the most abundant of CSP and the rhamnose were the highest in NSP. After ultrasonic treatment, the contents of monosaccharides decreased, while the composition did not change, and the main chain structure of pectin was no change, but the linear structure and the degree of branch chain were changed. With the increase of ultrasonic times and powers, the molecular weight of different pectins declined gradually. And in the microstructure showed a more loose morphology. In addition, ultrasonic treatment had an effect on the structure and chain conformation of CSP and NSP, which made their maximum response values shift, and the effect of ultrasonic power was more significant. In conclusion, ultrasonic treatment could reduce the pectin and monosaccharide contents in grape cell walls, and affect the molecular linear structure and molecular chain conformation of pectin. These results can provide theoretical basis for the quality change of grape products under ultrasonic treatment.

Key words: ultrasonic treatment; grape pectin; changes of content; structural analysis

葡萄(*Vitis vinifera* L.)富含糖类、酚类、有机酸及多种矿物质等,成熟的鲜葡萄中糖含量高达 10%~30%,多酚类物质含量约为 316.3~1141.3 mg GAE/100 g DW^[1]。研究表明,葡萄中的酚类物质对肥胖、癌症和心血管等慢性疾病具有一定的预防作用^[2]。近年来,葡萄脆粒作为一种新型休闲食品受到消费者欢迎。然而,葡萄因糖含量高,干燥后更易形成果干类产品,这也是传统葡萄干制品多为葡萄干的重要原因。干燥前对果蔬进行超声波预处理不仅可提高其干燥速率,而且能够改善最终产品品质^[3-4]。

超声波作为一种常用的预处理方式,在果蔬加工中具有广泛应用。当果蔬物料处于超声波压力场内时,因空化气泡的形成、增长和剧烈破裂及由此引发的一系列理化效应,其中的细胞壁多糖物质会发生相应变化。细胞壁作为支撑果蔬细胞骨架和质地的主要成分,其中的大分子物质通过离子键或非离子键相互作用形成具有一定刚性的网状结构^[5]。细胞壁多糖中的果胶因其复杂结构在加工中非常敏感,其分子降解会破坏细胞三维网状结构,降低相邻细胞间交联强度,改变产品质地^[6-7]。一般果胶有三种键态,即水溶性果胶(WSP)、反式环己烷 1、2-二胺四乙酸(CDTA)可溶性果胶(CSP)和碳酸钠可溶性果胶(NSP),WSP 为通过非共价键或非离子键与其他细胞壁多糖松散结合的果胶,CSP 通过离子键与细胞壁交联,而 NSP 一般指通过共价键与细胞壁多糖交联的果胶组分。典型的果胶分子链中均具有多聚半乳糖醛酸聚糖(HG)、鼠李半乳糖醛酸聚糖 I 型(RG-I)和鼠李半乳糖醛酸聚糖 II 型(R-II)三个主要部分^[8]。果胶分子结构特征包括分子量、中性糖组分及含量、分子线性(或支链数量)、甲基和乙酰基含量及酯基分布情况等。果蔬在预处理和干燥等加工过程均会对上述果胶分子特征产生作用进而改变其分子自身特性,从而影响果蔬制品品质。Divyani 等^[9]应用超声波辅助提取柑橘中的果胶,发现超声波作用改善了果胶的理化特性。Zhang 等^[10]研究表明,超声处理显著降低了苹果果胶的重均分子量,但未改变该果胶的一级结构。Huang 等^[11]发现超声处理后的苹果脆片中水溶性果胶增加而原果胶含量减少,最终影

响产品品质。Yu 等^[12]研究表明不同品种苹果干中果胶含量和结构的变化不仅影响干制品品质,对其色泽也会产生影响。张钟元等^[13]发现真空微波干燥过程中细胞壁果胶酯化度和水溶性果胶含量的变化会影响南瓜脆片脆度和多孔结构的形成。

如上所述,超声处理和干燥过程能够改变果蔬细胞壁果胶多糖特性,进而影响果蔬干制品品质。然而,关于葡萄中果胶组分在超声作用下的变化趋势还不明确。因此,本研究采用不同超声时间和超声功率对葡萄进行预处理,通过咔唑硫酸法、PMP 柱前衍生化法、高效液相色谱分析、扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱分析和圆二色谱分析等手段分析其中细胞壁果胶组分含量、单糖组成及含量、分子量及结构变化,研究不同超声时间和超声功率对葡萄细胞壁果胶特性的影响,为进一步探讨葡萄干制品品质变化提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜葡萄 品种:夏黑,购于南京市孝陵卫集贸市场(夏季 7~9 月份),果实完整、成熟度及大小一致;无水乙醇、丙酮、氢氧化钠、盐酸、硫酸、氯仿、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、碳酸钠 分析级,西陇化工股份有限公司;甲醇、乙腈 色谱级,国药集团化学试剂有限公司;1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)、单糖(鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、果糖、葡萄糖、半乳糖)标准品 上海源叶生物科技有限公司;1,2-环己二胺四乙酸(CDTA) 麦克林公司。

BSA-423S 型电子天平 上海精密仪器仪表有限公司;HZQ-F100 型全温度振荡培养箱 太仓市华美生化仪器厂;FD-1A-50 型真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司;KQ-S1000VDE 型三频数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;UV-6300 型紫外分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;1200 型高效液相色谱仪 美国安捷伦科技有限公司;EVO-LS10 型扫描电子显微镜 德国卡尔蔡司股份公司;Nicolet iS50 型傅里叶红外光谱仪 美国 Thermo Fisher Scientific 有限公司;Jasco-810 型圆二色谱仪 日本 Jasco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同超声预处理方式 预实验研究发现, 低于 80 °C 的温度变化对葡萄中细胞壁果胶组分影响较小, 因此本实验中固定温度 55 °C, 以不同超声功率和超声时间开展葡萄细胞壁果胶组分变化的研究, 具体超声参数如下:

不同超声处理时间: 超声频率 45 kHz、功率 900 W, 对称取相应质量的葡萄分别进行 20、30、40 和 50 min 的超声处理;

不同超声处理功率: 超声频率 45 kHz、时间 30 min, 对称取相应质量的葡萄分别在 700、800、900 和 1000 W 功率下进行超声处理。

以上超声处理样品均同时以未处理的葡萄样品作为对照。

1.2.2 葡萄细胞壁醇不溶物性物质(AIR)提取 细胞壁醇不溶物质的提取参考文献 [14] 并稍作修改。称取超声处理后葡萄样品 100 g, 剪碎研磨后加入 300 mL 95% 乙醇, 均质 10 min 后过滤, 随后向滤渣中加入 200 mL 95% 乙醇, 均质 10 min 后过滤, 再向滤渣中加入 200 mL 丙酮, 置于培养箱中振荡(37 °C, 150 r/min)处理 5 min 后过滤, 收集滤渣于 40 °C 干燥箱中干燥 16 h, 获得干燥的乙醇不溶物(AIR), 置于干燥器中待进一步分析使用。

1.2.3 不同果胶组分的提取 3 种果胶组分的提取参考文献 [15-16] 中的方法。具体为: 准确称取 1.000 g AIR 溶解于 200 mL 沸水中, 混合 10 min 后冷却过滤, 将滤液透析 72 h, 冷冻干燥获得 WSP 组分。滤渣待进一步使用。

将 WSP 滤渣溶解于 200 mL 0.05 mol/L CDTA (含 0.1 mol/L 醋酸钠, pH6.5) 溶液中, 于 28 °C 下振荡后过滤, 将滤液经过 3500 kDa 透析袋透析 72 h, 冷冻干燥获得 CSP 组分, 滤渣待进一步使用。

将 CSP 残渣溶解于 200 mL 0.05 mol/L 碳酸钠(0.02 mol/L 硼氢化钠)溶液中, 在 4 °C 条件下静置提取 16 h 后于 28 °C 水浴振荡器中振荡 6 h 后过滤。将滤液透析 72 h, 最后冷冻干燥获得 NSP 组分。

1.2.4 果胶中半乳糖醛酸与单糖含量测定 果胶半乳糖醛酸含量测定采用咔唑硫酸法^[17], 本实验中获得半乳糖醛酸含量标曲为 $y=0.0059x+0.0494$ ($R^2=0.994$)。

采用 PMP 柱前衍生法测定不同果胶中的单糖含量, 具体参考武忠伟等^[18]的方法。以水溶性果胶为例, 步骤为: 准确称取 10 mg WSP 干燥样品, 用蒸馏水配成 10 mg/mL 溶液, 取 100 μ L 与 100 μ L 4 mol/L 三氟乙酸(TFA)混匀并充氮封管, 在 110 °C 条件下水解 4 h; 冷却后加入适量甲醇并减压蒸干获得水解物。然后将水解物溶于 100 μ L 蒸馏水中, 加入 100 μ L 5 mol/L PMP(1-苯基-3-甲基-5-吡唑酮)甲醇溶液和 100 μ L 0.6 mol/L 氢氧化钠溶液, 混合均匀, 于 70 °C

水浴锅中反应 100 min, 冷却至室温加入盐酸(0.45 mL 0.3 mol/L)于 50 °C 减压蒸干, 加入 1 mL 蒸馏水溶解, 并加入 2 mL 氯仿混合, 充分摇晃, 待其分层后收集水层; 以上过程重复三次。最后采用 0.45 μ m 水系膜过滤待测。

色谱条件为: Agilent 1100 高效液相色谱仪; RP-C₁₈ 柱(4.6 \times 250 mm, 5 μ m); 柱温 30 °C; 流动相比比例 83:17(v/v)的 0.1 mol/L PBS(pH6.7)和乙腈; 流速 1.0 mL/min; 检测波长 245 nm。

获得的单糖标准曲线分别为: 鼠李糖: $y=7014.7x-123.98$ ($R^2=0.9978$), 阿拉伯糖: $y=7712.9x-59.594$ ($R^2=0.9999$), 半乳糖: $y=8420.5x-512.93$ ($R^2=0.9993$), 葡萄糖: $y=8384.2x-1052$ ($R^2=0.9987$), 葡萄糖醛酸: $y=7453.4x-104.39$ ($R^2=0.9994$), 甘露糖: $y=8289.2x+7.0$ ($R^2=0.9995$)。

1.2.5 果胶分子量测定 采用高效液相凝胶渗透色谱法^[19]分析 3 种果胶组分的分子量。称取干燥后的果胶样品 3.0 mg, 用 0.01 mol/L 磷酸盐缓冲液将其配制为 3 mg/mL 的果胶溶液。液相色谱条件: 色谱柱 ts1-gel G3000SWXL, RID 示差检测器, 柱温 25 °C, 流动相为含 0.1 mol/L Na₂SO₄ 的 0.01 mol/L 磷酸盐(pH=6.8)溶液, 流速 0.4 mL/min, 进样量 20 μ L。根据标准曲线($\lg M_w=-0.2419x+9.6895$, x 为出峰时间, R^2 为 0.99)计算 3 种果胶的分子量。

1.2.6 扫描电子显微镜观察 采用扫描电子显微镜观测不同果胶组分颗粒的微观形貌结构。将少量果胶粉末粘在样品座的胶带上, 在仪器内进行真空镀膜以及喷镀电导层, 在 10 kV 电压下放大 50 倍对果胶的微观形貌进行观察。

1.2.7 傅里叶红外光谱分析 采用 Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪对干燥的不同果胶组分粉末进行红外光谱扫描分析其结构特征, 扫描范围为 500~4000 cm^{-1} 。每次扫描均用空气光谱进行背景校正, 每次测定结束时需使用 75% 甲醇擦拭晶体。

1.2.8 圆二色谱分析 圆二色谱分析方法参考文献 [20]。具体参数为: 波长 190~260 nm, 扫描速度 50 nm/min, 反应时间 4 s。

1.3 数据处理

以上每组实验均重复测定 3 次, 结果以平均值 \pm 标准差表示。分别采用 Origin 9.0 软件作图, 采用 SPSS 25.0 软件进行双变量相关性分析和方差分析, Duncan 检验法进行显著性分析(显著水平 $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同超声处理对葡萄细胞壁果胶含量的影响

半乳糖醛酸(GalA)为果胶多糖的线性主链, 是其最主要的成分, 一般以半乳糖醛酸含量(mg/g AIR)表示果胶含量。不同超声时间和超声功率下葡萄细胞壁果胶含量的变化如图 1 所示, 新鲜葡萄果

胶组分中 NSP 含量占比最高, 为 27.41 mg/g AIR。不同超声时间处理后葡萄中果胶组分发生显著变化 ($P<0.05$)。随着超声处理时间的延长, 总果胶含量呈下降趋势; WSP 含量先上升后下降; CSP 含量逐渐降低, 30、40 和 50 min 处理之间无显著性差异 ($P>0.05$);

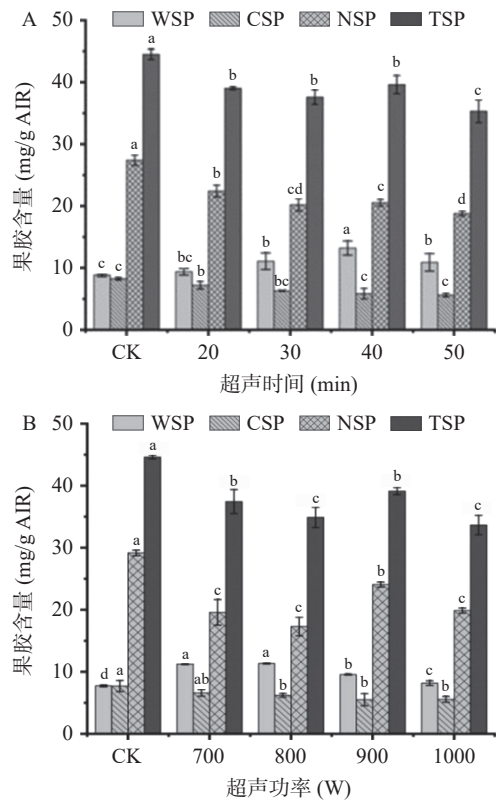


图 1 不同超声时间和超声功率下葡萄细胞壁果胶含量变化

Fig.1 Changes of pectin in grape cell wall at different ultrasonic times and ultrasonic powers

注: CK 为超声处理前样品, WSP 为水溶性果胶, CSP 为整合型果胶, NSP 为碱溶性果胶, TSP 为总果胶; 相同柱形图不同字母表示各处理之间在 $P=0.05$ 水平有显著性差异, 相同字母表示无显著性差异。

NSP 含量与 CSP 具有相同变化趋势; 不同超声功率处理后葡萄中果胶组分同样发生显著变化 ($P<0.05$)。随着超声处理功率的增强, 总果胶含量呈下降趋势; WSP 含量先上升后下降; CSP 含量逐渐降低; NSP 含量先下降后上升。超声处理 900 W 时, WSP 含量下降, NSP 含量增加。原因可能是此条件下果胶组分中形成了特殊的(碳酸钠可溶)酯键^[21], 使水溶性果胶向不溶性果胶转化。综上可知, 超声处理时间和超声功率能够使 CSP 和 NSP 含量降低, WSP 含量增加。这是因为果胶组分中通过离子键和共价键与细胞壁多糖连接的部分在超声处理过程中向松散连接的组分转化^[21]。预处理后 WSP 含量的增多是造成原料质地变软的主要原因。因此, 考虑到超声作用下总果胶与不同组分含量变化和葡萄原料质地特性, 选择超声时间 30 min、超声功率 900 W 更能维持葡萄原料及干燥加工后产品品质。

2.2 不同超声处理对葡萄细胞壁果胶单糖含量的影响

2.2.1 不同超声处理对葡萄细胞壁果胶单糖含量的影响 果胶及其降解产物的单糖组成及含量可用来预测果胶溶液链构象的变化^[22]。表 1 为不同超声时间处理后葡萄中细胞壁不同果胶组分单糖组成及含量。由表可知, 未经超声处理葡萄三种果胶中均含有鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖和阿拉伯糖, 且不同果胶主要单糖组成和含量不同; 其中 WSP 中半乳糖和阿拉伯糖含量较高, CSP 中葡萄糖醛酸含量最多, 而 NSP 中鼠李糖含量最高。除上述 4 种中性糖外, WSP 中还包括甘露糖和葡萄糖, 其中葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖含量占总含量的 85% 以上; NSP 中也含有葡萄糖, 且鼠李糖、葡萄糖和半乳糖 3 种糖含量占总含量的 86% 左右。

经过不同超声时间处理后, 果胶组分中的单糖种类无变化, 但含量发生不同程度变化。随着超声处

表 1 不同超声时间葡萄细胞壁果胶中性糖组分及含量(mg/g AIR)

Table 1 Composition and content of pectin neutral sugar in grape cell wall at different ultrasonic time (mg/g AIR)

样品	超声时间(min)	甘露糖(Man)	鼠李糖(Rha)	葡萄糖醛酸(GluA)	葡萄糖(Glu)	半乳糖(Gal)	阿拉伯糖(Ara)	糖比率1	糖比率2	糖比率3
WSP	CK	0.12±0.02 ^a	0.22±0.03 ^d	0.43±0.11 ^b	0.48±0.03 ^a	2.10±0.11 ^a	1.82±0.20 ^a	2.13	0.025	17.82
	20	0.11±0.03 ^{ab}	0.14±0.05 ^e	0.16±0.00 ^c	0.34±0.01 ^c	1.82±0.05 ^b	1.52±0.12 ^b	2.69	0.015	16.71
	30	0.12±0.06 ^a	0.26±0.06 ^b	0.64±0.18 ^a	0.49±0.04 ^a	1.62±0.08 ^c	1.36±0.04 ^c	3.42	0.023	11.46
	40	0.09±0.02 ^b	0.24±0.15 ^c	0.41±0.12 ^b	0.36±0.03 ^b	1.55±0.01 ^d	1.13±0.03 ^d	4.52	0.018	11.17
	50	0.09±0.00 ^b	0.36±0.01 ^a	0.41±0.03 ^b	0.35±0.00 ^c	1.42±0.46 ^e	1.02±0.08 ^e	3.89	0.032	6.78
CSP	CK	/	0.09±0.03 ^d	0.75±0.09 ^a	/	0.25±0.05 ^c	0.43±0.12 ^a	10.71	0.010	7.56
	20	/	0.15±0.01 ^b	0.56±0.43 ^b	/	0.35±0.01 ^a	0.39±0.01 ^b	8.10	0.020	4.93
	30	/	0.17±0.00 ^a	0.50±0.11 ^{bc}	/	0.32±0.02 ^b	0.37±0.01 ^c	7.34	0.027	4.06
	40	/	0.13±0.02 ^c	0.46±0.00 ^c	/	0.24±0.06 ^c	0.21±0.03 ^d	10.10	0.022	3.46
	50	/	0.10±0.01 ^d	0.47±0.03 ^c	/	0.22±0.00 ^d	0.19±0.12 ^e	11.02	0.017	4.10
NSP	CK	/	0.62±0.01 ^a	0.24±0.07 ^a	0.25±0.00 ^a	0.18±0.02 ^{ab}	0.28±0.06 ^c	25.38	0.023	0.58
	20	/	0.54±0.01 ^b	0.17±0.09 ^b	0.23±0.18 ^b	0.13±0.01 ^b	0.18±0.07 ^d	26.38	0.024	0.57
	30	/	0.50±0.02 ^d	0.13±0.03 ^{bc}	0.24±0.02 ^{ab}	0.17±0.02 ^c	0.32±0.02 ^a	20.41	0.025	1.34
	40	/	0.52±0.00 ^c	0.22±0.02 ^c	0.19±0.00 ^c	0.18±0.02 ^{ab}	0.29±0.03 ^{bc}	20.76	0.025	0.90
	50	/	0.49±0.01 ^d	0.10±0.01 ^c	0.18±0.04 ^c	0.19±0.14 ^a	0.30±0.02 ^b	19.17	0.026	1.00

注: 不同果胶组分同列中不同字母表示具有显著差异 ($P<0.05$), 糖比率1为 GalA/(Fuc+Rha+Ara+Gal+Xyl), 糖比率2为 Rha/GalA, 糖比率3为 (Ara+Gal)/Rha; /代表未检出; 表2同。

理时间的延长, WSP 中鼠李糖含量增加, 其余糖含量均呈下降趋势, 鼠李糖含量增加了 63%, 半乳糖含量由 2.10 mg/g AIR 下降至 1.42 mg/g AIR, 阿拉伯糖含量由 1.82 mg/g AIR 下降至 1.02 mg/g AIR; CSP 中鼠李糖和半乳糖含量先增加后减少, 葡萄糖醛酸和阿拉伯糖呈下降趋势, 其中葡萄糖醛酸含量下降了 12% 左右; NSP 中半乳糖和阿拉伯糖先降低后增加, 鼠李糖、葡萄糖醛酸和葡萄糖呈下降趋势, 其中鼠李糖含量下降了 21% 左右。进一步说明水不溶性果胶在一定超声时间作用下会向水溶性果胶转化, 从而增加了其中单糖含量。

不同超声功率处理后葡萄中细胞壁不同果胶单糖组成及含量变化如表 2 所示。由表 2 可知, 不同超声功率处理后 3 种果胶组分的单糖种类无变化, 含量整体呈下降趋势。与超声处理时间变化不同, 随着超声功率的增加, WSP 中鼠李糖含量呈下降趋势, 降低了 33% 左右; CSP 中鼠李糖含量在超声 1000 W 时显著增加 ($P<0.05$), 由 0.06 mg/g AIR 升高至 0.13 mg/g AIR; NSP 中半乳糖和阿拉伯糖含量降低, 鼠李糖含量在超声处理 1000 W 时显著降低 ($P<0.05$), 降低了 72%。以上结果表明高功率超声作用更能使果胶分子链侧链结构发生变化。

2.2.2 不同超声处理对葡萄细胞壁果胶组分糖比率的影响 通过 3 种糖比率的计算可获得果胶多糖的相关结构信息, 糖比率 1 表示果胶组分的线性关系, 与果胶的同型半乳糖醛酸(HG)结构域有关; 糖比率 2 表示鼠李糖半乳糖聚糖 I 型和 II 型(RG)部分占果胶多糖的比例; 糖比率 3 表示鼠李糖半乳糖醛酸聚糖 I 型(RG-I)部分的支链程度^[23]。由表 1 和表 2 可知, 在 WSP 中糖比率 3 最高, 说明葡萄中水溶性果胶多以 RG 链结构存在, 且支链程度较高; 在 NSP 中糖比率 1 最高, 是三个组分中线性程度最高的, 其结构域应以 HG 为主; 而在 CSP 中, 其糖比率 1 高于

WSP, 糖比率 3 较 WSP 低, 故 CSP 线性程度较 WSP 高, 支链程度较 NSP 高。

如表 1 所示, 随着超声时间的增加, 三种果胶组分糖比率 2 变化不明显, 表明果胶主链结构未改变; WSP 的糖比率 1 逐渐增大、NSP 的糖比率 1 逐渐减小, 说明二者的半乳糖醛酸含量为前者增多、后者逐渐减少, 与 2.1 中果胶含量变化一致; 糖比率 3 呈现显著下降的趋势, 说明果胶侧链中性糖与主链分离, 发生断裂。由表 2 可知, 与表 1 中糖比率变化趋势相似, 随着超声功率的增加, WSP 的糖比率 1 呈现增大的趋势; CSP 的糖比率 1 逐渐增大, 糖比率 3 逐渐减少; NSP 中糖比率 1 先减少后增大, 糖比率 3 逐渐减少。由此可知, 不同超声处理均会对 3 种果胶产生影响, 导致其结构域发生一定变化。

2.3 不同超声处理对葡萄细胞壁果胶组分分子量的影响

分子量是果胶结构特性之一, 与其性质相关。不同超声处理后葡萄细胞壁多糖三种果胶组分的分子量分布如图 2 所示。由图可知, 三种果胶组分具有相似的尺寸排阻色谱图, 每种果胶包含 2~3 个大分子聚合物, 其中最高峰对应高分子量果胶聚合物。因样品处理批次不同, 不同超声功率处理后果胶组分的色谱图与不同超声时间处理后的有些偏差, 但对结果分析无影响。不同超声时间和超声功率处理后, 三种果胶组分的出峰时间基本无变化, 说明从色谱图出峰时间无法区分果胶分子量的明显变化。

经计算, 不同超声时间和超声功率处理后 3 种果胶组分分子量如表 3 所示。由表可知, 超声处理前 3 种果胶分子量大小顺序为 NSP>CSP>WSP。不同超声时间处理后葡萄中不同果胶分子量发生了显著变化 ($P<0.05$), 随着超声处理时间的增加, 不同果胶的分子量整体均呈下降趋势, 其中 WSP 与 CSP 分子量变化趋势相同, 均先减小, 在超声处理 40 min

表 2 不同超声功率葡萄细胞壁果胶中性糖组分及含量(mg/g AIR)

Table 2 Composition and content of pectin neutral sugar in grape cell wall at different ultrasonic power (mg/gAIR)

样品	超声功率(W)	甘露糖(Man)	鼠李糖(Rha)	葡萄糖醛酸(GluA)	葡萄糖(Glu)	半乳糖(Gal)	阿拉伯糖(Ara)	糖比率1	糖比率2	糖比率3
WSP	CK	0.49±0.06 ^{ab}	0.12±0.04 ^a	0.33±0.04 ^a	0.36±0.00 ^a	1.26±0.11 ^a	0.78±0.08 ^a	3.58	0.015	17.00
	700	0.47±0.21 ^{ab}	0.11±0.05 ^{ab}	0.18±0.02 ^d	0.33±0.01 ^b	0.83±0.19 ^b	0.74±0.08 ^b	6.70	0.009	14.27
	800	0.43±0.19 ^{ab}	0.10±0.02 ^b	0.26±0.05 ^c	0.31±0.07 ^{cd}	0.65±0.09 ^c	0.68±0.10 ^c	7.95	0.008	13.30
	900	0.31±0.01 ^b	0.07±0.00 ^c	0.30±0.06 ^b	0.31±0.03 ^d	0.49±0.05 ^e	0.43±0.22 ^c	9.66	0.007	13.14
	1000	0.51±0.12 ^a	0.08±0.00 ^c	0.33±0.15 ^a	0.32±0.02 ^{bc}	0.57±0.18 ^d	0.45±0.44 ^d	7.42	0.009	12.75
CSP	CK	/	0.06±0.01 ^c	0.32±0.15 ^c	/	0.24±0.03 ^a	0.30±0.05 ^a	12.83	0.008	9.00
	700	/	0.08±0.00 ^b	0.36±0.15 ^a	/	0.23±0.06 ^a	0.24±0.03 ^b	12.02	0.012	5.88
	800	/	0.06±0.03 ^c	0.24±0.01 ^c	/	0.20±0.04 ^b	0.15±0.00 ^d	15.17	0.010	5.83
	900	/	0.06±0.07 ^c	0.33±0.06 ^b	/	0.16±0.01 ^d	0.18±0.00 ^c	13.78	0.010	5.66
	1000	/	0.13±0.01 ^a	0.26±0.06 ^d	/	0.18±0.02 ^c	0.15±0.04 ^d	12.11	0.023	2.53
NSP	CK	/	0.60±0.08 ^{ab}	0.18±0.15 ^b	0.29±0.01 ^b	0.30±0.07 ^a	0.59±0.07 ^a	19.58	0.034	1.48
	700	/	0.53±0.07 ^b	0.14±0.10 ^c	0.27±0.02 ^c	0.24±0.04 ^b	0.54±0.13 ^b	14.95	0.027	1.47
	800	/	0.64±0.03 ^a	0.06±0.00 ^d	0.26±0.00 ^c	0.20±0.01 ^c	0.53±0.03 ^b	12.64	0.036	1.14
	900	/	0.62±0.03 ^{ab}	0.05±0.00 ^c	0.23±0.18 ^d	0.16±0.02 ^c	0.41±0.02 ^d	20.23	0.044	0.92
	1000	/	0.17±0.01 ^c	0.21±0.18 ^a	0.35±0.00 ^a	0.19±0.00 ^d	0.44±0.03 ^c	24.85	0.008	0.90

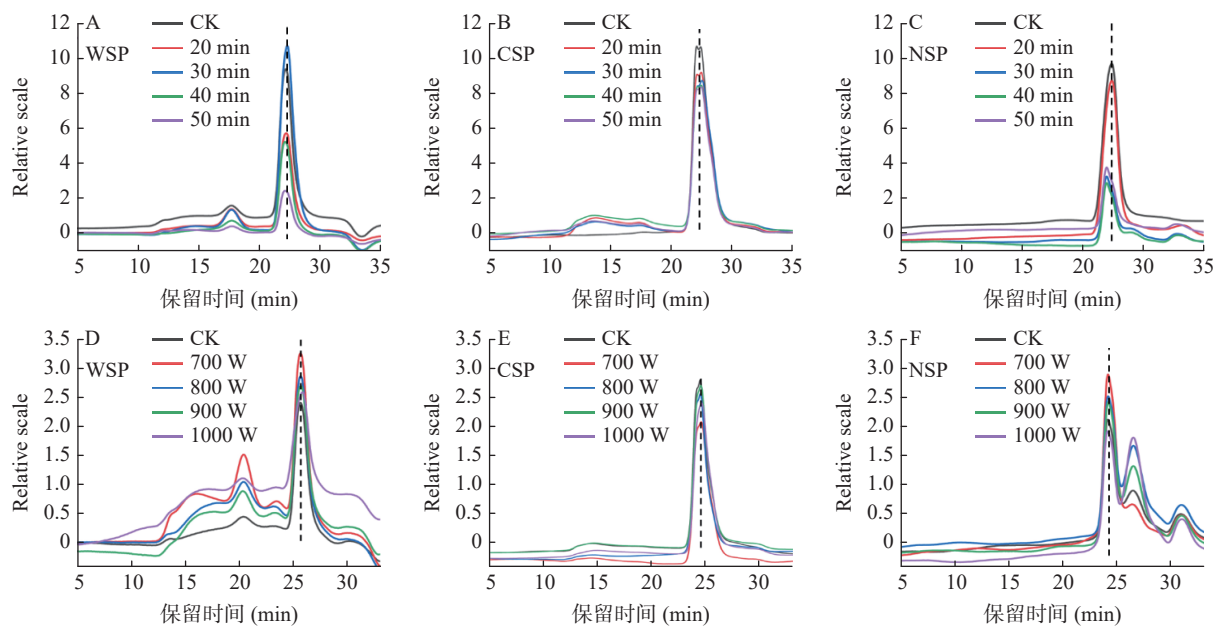


图 2 不同超声时间和超声功率处理后三种果胶分子量分布

Fig.2 Molecular weight distribution of pectin with different ultrasonic time and ultrasonic power

表 3 不同超声时间和超声功率处理后 3 种果胶的
组分重均分子量

Table 3 Weight average molecular weight of three kinds of pectin under different ultrasonic time and ultrasonic power		重均分子量 M_w (Da)		
超声处理		水溶性果胶 (WSP)	螯合型果胶 (CSP)	碱溶性果胶 (NSP)
时间(min)	CK	3100±3.99 ^a	3321±5.95 ^a	3559±9.38 ^a
	20	3025±25.70 ^b	3199±8.22 ^b	3544±3.02 ^b
	30	2854±3.31 ^d	3093±8.49 ^c	3529±1.96 ^c
	40	3039±1.69 ^b	3174±3.68 ^b	3517±1.13 ^d
	50	2997±6.68 ^c	3167±5.29 ^b	3515±1.96 ^d
功率(W)	CK	3037±2.59 ^a	3261±7.27 ^a	3420±2.91 ^a
	700	3027±4.46 ^{ab}	3179±13.9 ^b	3388±13.20 ^b
	800	2993±29.60 ^b	2740±5.50 ^d	3377±13.20 ^b
	900	2926±30.20 ^c	3145±1.48 ^b	3355±12.20 ^c
	1000	2760±12.20 ^d	3102±1.01 ^c	3343±1.86 ^c

注: 同一超声因素同列不同字母表示在各处理之间具有显著性差异($P<0.05$)。

时略微增加; NSP 分子量逐渐减少, 在超声处理 30 min 后无显著性差异($P>0.05$)。不同超声功率处理后不同果胶分子量同样发生显著变化($P<0.05$); 随着超声功率的增加 WSP 与 NSP 分子量变化趋势相同, 均逐渐较少; CSP 分子量先降低后增加, 功率 900 W 后又逐渐下降。综上, 超声处理下葡萄细胞壁多糖中的 3 种果胶分子量有降低, 说明超声作用可使果胶分子发生解聚。

2.4 不同超声处理下葡萄细胞壁果胶微观结构

扫面电镜(SEM)观察不同超声时间和超声功率处理后三种果胶的表观形貌, 以进一步从微观角度了解超声对葡萄果胶组分的作用。本部分仅选择了 2 个超声时间和超声功率以验证不同果胶组分微观结构是否发生变化。

不同超声时间处理后果胶的微观结构如图 3 和图 4 所示, 可知不同超声时间和超声功率处理对葡萄细胞壁果胶微观形态具有较大影响, 并且不同果胶组分在不同处理下呈现明显不同的微观结构。超声处理前 WSP 呈现致密性、整体性, 局部出现枝状结构; CSP 呈树杈状分枝和小片状结构, 且相互叠加缠绕; NSP 表现出线状和大片状结构, 线状结构相互缠绕, 片状结构有卷曲样。如图 3 所示, 随着超声时间的增加, 3 种果胶微观形态发生了明显变化, WSP 出现颗粒状和片状卷曲样结构, CSP 观察不到明显的分枝结构、出现相互连接的片状结构, NSP 中线状结构消失、呈大片状结构, 质地致密伴有孔洞裂纹。

因不同超声时间处理时采用的超声功率为 800 W, 故 800 W 时果胶组分的微观结构与超声处理 30 min 时为同一组图。由图 4 可知, 随着超声功率的增加, 不同果胶组分呈现出与超声时间变化不同的结构; 超声功率 1000 W 时, WSP 出现明显的线状和片状结构, 并相互交叉在一起; CSP 中大片状结构增多, 树杈状分枝结构变少; NSP 由大片状结构变为很小的片状、甚至颗粒状结构。原因可能是超声波产生多种效应导致果胶结构中糖苷键的断裂。

2.5 不同超声处理对三种果胶组分官能团的影响

采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)可对果胶多糖的主要官能团进行分析。不同超声条件处理下葡萄细胞壁果胶组分的红外光谱如图 5 所示。在 3 种果胶组分的红外光谱中, 均观察到 3200 与 3400 cm^{-1} 之间强而宽的峰, 代表了果胶分子内-OH 的伸缩振动^[24]; 2920~2940 cm^{-1} 处的峰是由于 C-H 基团(CH、CH₂ 和 CH₃ 等) 的拉伸和弯曲振动引起, 1010~1020 cm^{-1} 处的峰可能与果胶中的单糖有关。WSP 和 CSP 的光谱中, 在 1740 和 1600 cm^{-1} 处观察到果胶中酯化羧基及游离羧基的峰^[25-26], 这可能是由于果

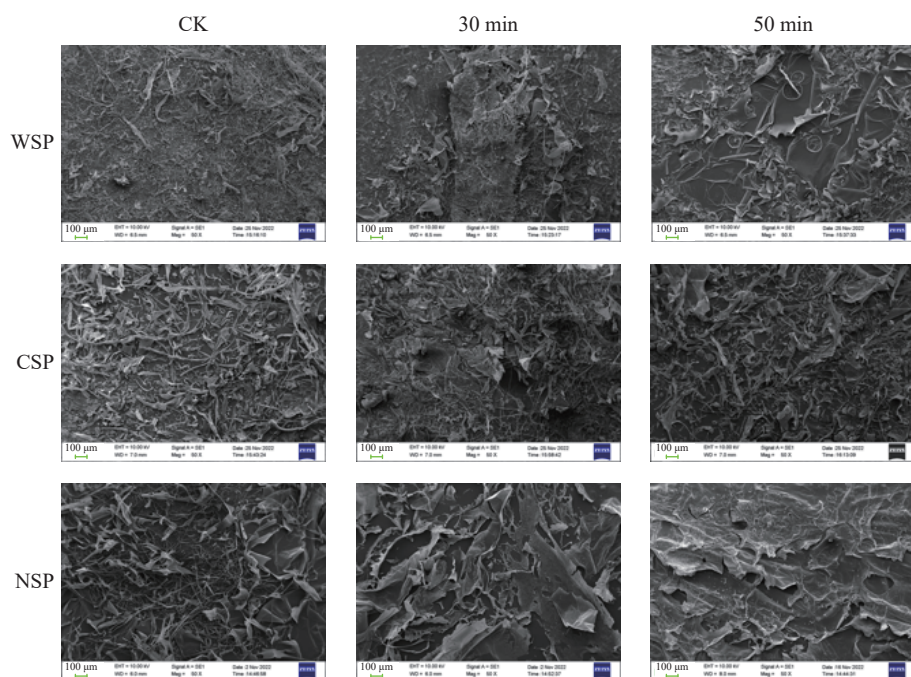


图3 不同超声时间处理后三种果胶组分微观结构

Fig.3 SEM of three kinds of grape pectin under different ultrasonic time

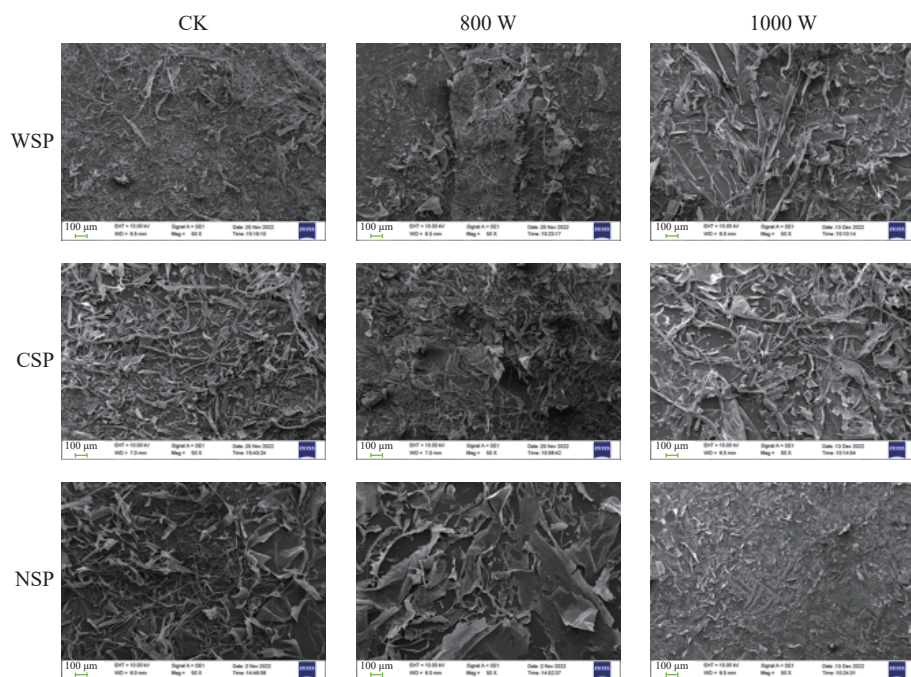


图4 不同超声功率处理后三种果胶组分微观结构

Fig.4 SEM of three kinds of grape pectin under different ultrasonic power

胶羧基和酯基中 $C=O$ 的伸缩振动。WSP 和 CSP 光谱中这两个峰的强度存在差别, 归因于两者酯化度的不同。在 NSP 的红外光谱出现了游离羧基相关的峰, 而未观察到酯化羧基的峰。不同超声时间和超声功率处理后, 三种果胶的红外光谱图基本无差异, 说明超声处理对 WSP、CSP 和 NSP 的主要官能团结构无显著影响。

2.6 不同超声处理对葡萄细胞壁果胶组分分子链构象的影响

圆二色谱可对含有糖醛酸、羧基团和酰胺发

色团的多糖构象转变进行直观分析。研究表明, 果胶分子链上的羧基(COO^-)基团 $n-\pi^*$ 会发生迁移, 其在圆二色谱波长 210 nm 附近会有积极响应。这是因为羧基发色团的光学活性可能受到分子内和分子间相互作用的影响^[27-28]。不同超声时间处理后葡萄细胞壁 3 种果胶组分的圆二色谱如图 6 所示。WSP 在 210~211 nm 处有明显的倒峰, 在 230~245 nm 范围内有正响应值, 表明水溶性果胶有典型的圆二光谱特征; 不同超声时间处理后 WSP 分子链构象基本无变化, 不同超声功率处理后其正吸收峰有左移。

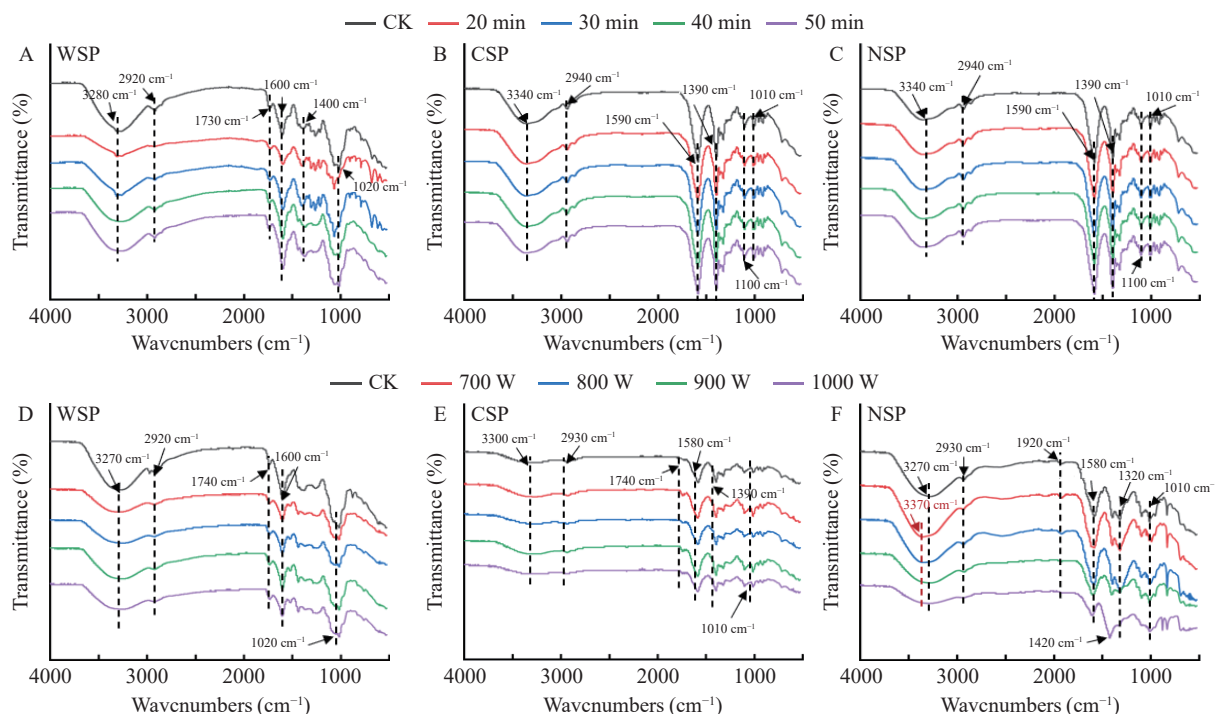


图 5 不同超声时间和超声功率处理后三种果胶组分 FTIR 图

Fig.5 FTIR spectra of three kinds pectin under different ultrasonic time and ultrasonic power

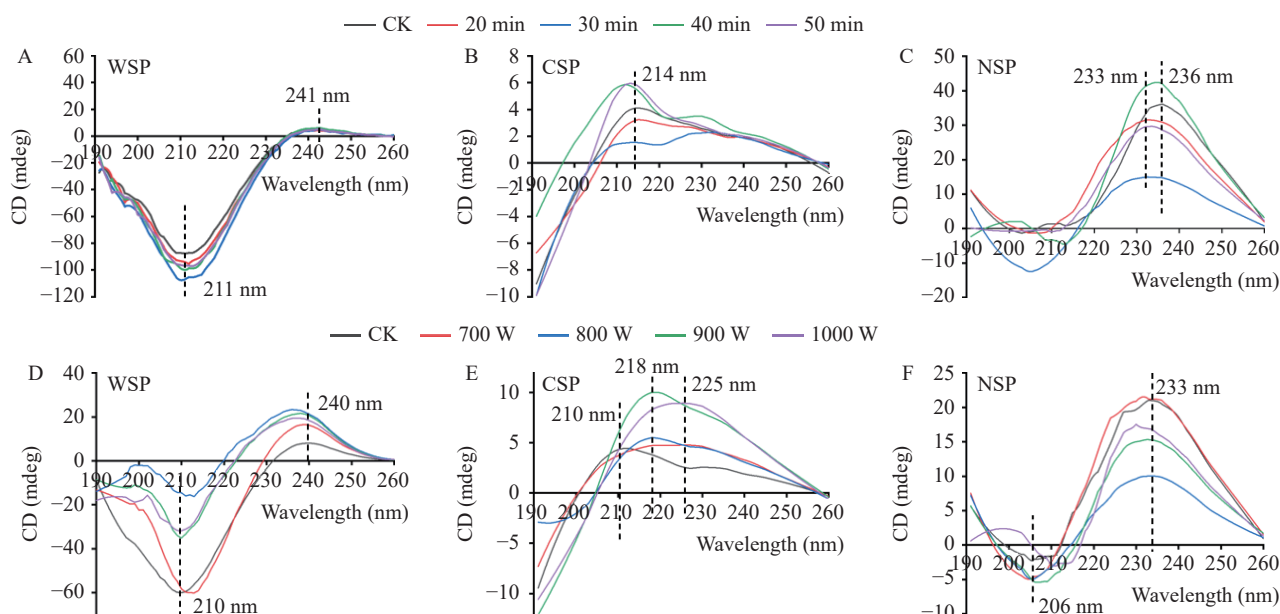


图 6 不同超声时间和超声功率处理后三种果胶组分圆二色谱图

Fig.6 CD of three kinds pectin under different ultrasonic time and ultrasonic power

CSP 的谱图中仅表现出在 210~220 nm 范围内的正响应, 与 WSP 相同, 不同超声功率处理后 CSP 最高响应值发生显著变化, 出现 10~15 nm 的右移, 可能是超声功率使其分子链构象发生变化。NSP 圆二色谱图与 WSP 相反, 在 210 nm 处吸收不明显, 但在 230~240 nm 范围内有积极响应, 且随着超声时间和超声功率的增加, NSP 的最高响应逐渐向左移动, 说明超声处理对其分子链构象产生影响。

3 讨论与结论

新鲜葡萄细胞壁果胶中 NSP 含量占比最高, CSP 含量最低, 这与 Wang 等^[29]报道的无籽葡萄中

细胞壁组分含量结果一致。超声处理后, 葡萄细胞壁中总果胶含量呈下降趋势, 三种果胶组分均发生显著变化 ($P < 0.05$); 与超声处理前样品相比, 超声处理使 WSP 含量增加, CSP 和 NSP 含量降低。郭怡廷等^[21]发现超声协同热处理下胡萝卜细胞壁果胶组分有相同变化趋势。原因可能是超声作用下果胶组分中的离子键和共价键与其他胞壁多糖连接的部分向松散连接的组分转化, 即 CSP 和 NSP 转化为 WSP。WSP 含量的增加会使葡萄质地软化, 但当超声功率 900 W 时, WSP 含量降低, 该功率条件下果胶组分中能够形成特殊的(碳酸钠可溶)酯键^[21], 使水溶性果胶向不溶

性果胶转化,阻止了原料的进一步软化。

不同超声时间和超声功率处理后葡萄细胞壁果胶组分的单糖组成无变化,但各单糖含量有显著差异($P<0.05$)。随着超声时间的延长和超声功率的增加,与分子链结构有关糖的变化与上述果胶含量变化具有相关性。糖比率的变化进一步说明超声处理对葡萄细胞壁果胶的主链结构无影响,但显著改变了分子侧链和支链程度。

不同超声处理后葡萄细胞壁果胶组分分子量整体呈下降趋势,这与 Zhang 等^[30]、Bagherian 等^[31]采用超声处理柑橘果胶和葡萄柚果胶中的结果一致。超声波的机械效应能够破坏果胶结构交联和基质重组,从而使其表面更光滑。不同超声时间和功率处理后使葡萄细胞壁中 3 种果胶在形貌上呈现出更加松散形态,且表面相对光滑。Divyani 等^[9]发现柑橘果胶经超声处理后其结构也由原来的粗糙浑浊变得紧密光滑。

傅里叶变换红外光谱结果表明,超声时间和功率的变化对 3 种果胶组分的特征官能团影响较小。3 种果胶均具有典型的圆二光谱特征,不同超声时间使 NSP 最高响应值向左移动,而不同超声功率作用 3 种果胶吸收峰均发生显著变化,说明超声处理使果胶的分子链构象产生变化。仇雯漪等^[22]发现超声波的空化作用能够破坏果胶分子间和分子内的氢键,从而使其分子链构象从刚性半柔顺链到柔顺链转变。

综上,本研究发现超声作用能够显著降低总果胶含量及不同果胶组分单糖含量,并且不同结构的果胶组分变化不同,结构紧密的葡萄细胞壁水不溶性果胶可向水溶性果胶转化。不同超声处理后 3 种果胶组分在微观层面可观察到明显差异,在结构层面仅发现超声功率作用更可能使 CSP 和 NSP 分子链构象发生变化。该结果可为超声作用下葡萄果胶的变化研究提供参考。另外,果胶结构复杂,仅采用傅里叶红外光谱及圆二色谱技术较难对其分子链结构及具体变化进行详细分析。因此,在后续研究中,作者应进一步从微观角度和结构层面分析超声处理对葡萄细胞壁 3 种果胶组分作用,通过与化学及分子模拟等手段结合,研究超声对果胶分子链构象及侧链、支链变化的影响,同时分析超声处理后葡萄干制品品质变化,进而探讨果胶组分变化与葡萄干制品品质形成的关系,以期为葡萄加工产品的研发提供理论指导和研究思路。

参考文献

- [1] ARNOUS A, MEYER A S. Comparison of methods for compositional characterization of grape (*Vitis vinifera* L.) and apple (*Malus domestica*) skins[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2008, 86(2): 79–86.
- [2] RAMCHANDANI A G, CHETTIYAR R S, PAKHALE S S. Evaluation of antioxidant and anti-initiating activities of crude polyphenolic extracts from seedless and seeded Indian grapes[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(1): 298–305.

- [3] 王凤昭,吕健,毕金峰,等.去皮方式对黄桃渗透脱水组合干燥特性及理化品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 121–129. [WANG F Z, LÜ J, BI J F, et al. Effect of peeling methods on drying characteristics and physico-chemical properties of yellow peach prepared by combined osmotic dehydration and drying[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 121–129.]
- [4] LIU W C, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of chitosan coating on freeze-drying of blueberry enhanced by ultrasound pre-treatment in sodium bicarbonate medium[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 181: 631–643.
- [5] MCCANN M C, ROBERTS K. Architecture of the primary cell wall[J]. *The Cytoskeletal Basis of Plant Growth & Form*, 1991, 1 94: 109–129.
- [6] SILA D N, VAN B S, DUVETTER T, et al. Pectins in processed fruits and vegetables: Part II —structure-function relationships[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2009, 8(2): 86–104.
- [7] XIAO M, YI J Y, BI J F, et al. Modification of cell wall polysaccharides during drying process affects texture properties of apple chips[J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 2018: 1–11.
- [8] BUERGY A, ROLLAND-SABATÉ A, LECA A, et al. Pectin degradation accounts for apple tissue fragmentation during thermomechanical-mediated puree production[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106885.
- [9] DIVYANI P, PARMJIT S P, HARISH K C. Ultrasound-assisted extraction of pectin from Citrus limetta peels: Optimization, characterization, and its comparison with commercial pectin[J]. *Food Bioscience*, 2022, 51: 102231.
- [10] ZHANG L, YE X, DING T, et al. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1): 222–231.
- [11] HUANG L L, ZHANG M, WANG L P, et al. Influence of combination drying methods on composition, texture, aroma and microstructure of apple slices[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 47(1): 183–188.
- [12] YU Q T, LI X, HU J X, et al. The effect of three pectin fractions variation on the browning of different dried apple products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134: 108052.
- [13] 张钟元,聂梅梅,肖亚冬,等.真空微波干燥过程中南瓜果胶性质变化与质构的关系[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(1): 134–141. [ZHANG Z Y, NIE M M, XIAO Y D, et al. Relationship between pectin properties and texture of pumpkin during vacuum microwave drying[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(1): 134–141.]
- [14] CARRILLO C, BUVE C, PANOZZO A, et al. Role of structural barriers in the *in vitro* bioaccessibility of anthocyanins in comparison with carotenoids[J]. *Food chemistry*, 2017, 227: 271–279.
- [15] MCFEETER R F, ARMSTRONG S A. Measurement of pectin methylation in plant cell walls[J]. *Analytical Biochemistry*, 1984, 139(1): 212–217.
- [16] WILLEMSSEN K L D D, PANOZZO A, MOELANTS K, et al. Physico-chemical and viscoelastic properties of high pressure homogenized lemon peel fiber fraction suspensions obtained after sequential pectin extraction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 72: 358–371.
- [17] RICHARDSON S J, BAIANU I C, STEINBERG M P. Relation between oxygen - 17 NMR and rheological characteristics of wheat flour suspensions[J]. *Journal of Food Science*, 1985, 50(4):

1148–1151.

[18] 武忠伟, 张明霞, 陆隽雯, 等. 超滤分离蝙蝠蛾拟青霉胞外多糖工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2015(12): 115–121. [WU Z W, ZHANG M X, LU J W, et al. Process optimization of exopolysaccharides from the fermentation broth of *Paecilomyces hepiali* by ultrafiltration[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015(12): 115–121.]

[19] WANG M C, JIANG C X, MA L P, et al. Preparation, preliminary characterization and immunostimulatory activity of polysaccharide fractions from the peduncles of *Hovenia dulcis*[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(1): 41–47.

[20] LI J W, YANG X R, LI X, et al. Okra polysaccharides/gelatin complex coacervate as pH-responsive and intestine-targeting delivery protects isoquercetin bioactivity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 159: 487–496.

[21] 郭怡廷. 胡萝卜片声-热协同杀青及其作用机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021. [GUO Y T. Study of thermosonication blanching treatment on carrot slices and its potential mechanisms [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.]

[22] 仇雯漪. 超声作用过程中超声强度对果胶溶液构象的变化、机理及对功能特性的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2019. [QIU W Y. effect of ultrasound intensity on the changes in solution conformations, mechanism and functional properties of pectin during ultrasonic processing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.]

[23] 梁泳伦. 蒸汽爆破联合超声提取西番莲果皮果胶及其性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2020. [LIANG Y L. Pectin extraction from passion fruit peel by combining steam explosion with ultrasonic treatment and its properties characterization[D]. Haikou: Hainan University, 2020.]

[24] SENGKHAMPARN N, BAKX E J, VERHOEF R, et al. Okra pectin contains an unusual substitution of its rhamnosyl

residues with acetyl and alpha-linked galactosyl groups[J]. *Carbohydrate Research*, 2009, 344(14): 1842–1851.

[25] KONG L S, YU L, FENG T, et al. Physicochemical characterization of the polysaccharide from *Bletilla striata*: Effect of drying method[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125: 1–8.

[26] 张婷. 山楂果胶改性、结构表征及抗氧化和益生活性研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2022. [ZHANG T. Modification, structural characterization and antioxidant and probiotic activities of hawthorn pectin[D]. Jinan: Shandong Agriculture University, 2022.]

[27] XU X, ZHANG L, YAGOUR E G, et al. Effects of ultrasound, freeze-thaw pretreatments and drying methods on structure and functional properties of pectin during the processing of okra[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106965.

[28] MA X B, ZHANG L F, WANG W J, et al. Synergistic effect and mechanisms of combining ultrasound and pectinase on pectin hydrolysis[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(7): 1249–1257.

[29] WANG J, MUJUMDAR A S, DENG L Z, et al. High-humidity hot air impingement blanching alters texture, cell-wall polysaccharides, water status and distribution of seedless grape[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 194: 9–17.

[30] ZHANG L F, YE X Q, XUE S J, et al. Effect of high-intensity ultrasound on the physicochemical properties and nanostructure of citrus pectin[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(8): 2028–2036.

[31] BAGHERIAN H, ASHTIANI F Z, FOULADITAJAR A, et al. Comparisons between conventional, microwave-and ultrasound-assisted methods for extraction of pectin from grapefruit[J]. *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*, 2011, 50(11–12): 1237–1243.