邹光铭, 郭亦佳, 崔林晔, 等. 电子束辐照预处理核桃青皮对其多糖性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 165−176. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040055

ZOU Guangming, GUO Yijia, CUI Linye, et al. Effect of Electron Beam Irradiation Pretreatment of Walnut Green Husk on the Properties of Its Polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 165−176. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040055

· 研究与探讨 ·

电子束辐照预处理核桃青皮对其多糖性质的影响

邹光铭[1], 郭亦佳[1], 崔林晔[1], 白俊青[2], 沈荷玉[1], 罗安伟[1,*]

（1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;
2.杨凌核盛辐照技术有限公司, 陕西杨凌 712100）

摘　要: 为促进核桃青皮的高值化利用，并为核桃青皮在乳化剂、起泡剂和抗氧化剂方向的应用提供理论依据，本研究用不同剂量的电子束辐照（EBI）（0、5、10、25、50 kGy）对核桃青皮进行预处理，并分析其碱提多糖的结构特性、理化性质及功能活性的变化。结果表明，与未处理的核桃青皮多糖相比，低剂量 EBI（5 kGy）处理获得的核桃青皮多糖表现出最高的木糖摩尔比（16.31%）、分子量（80.43±2.37 kDa）、粒径（145.99±4.64 nm）、持水和持油能力（40.61 g/g，83.08 g/g）。中等剂量（10 和 25 kGy）处理的核桃青皮多糖具有较高的糖醛酸含量（35.69%±0.14%，36.02%±0.37%）、优异的热稳定性（熔点分别为 84.87 ℃ 和 86.63 ℃）、乳化能力（乳化性能指数：14.41 m^2/g 和 13.64 m^2/g）及 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除能力（10 kGy 时清除率分别为 77.00% 和 85.47%）。高剂量 EBI（50 kGy）处理的核桃青皮多糖具有最高的起泡能力（56.67%），但其他功能活性有所下降。综合考虑核桃青皮多糖的性质，本研究认为 10 kG 为最佳辐照剂量。

关键词: 核桃青皮, 电子束辐照, 多糖, 结构特性, 理化性质, 功能活性

中图分类号: TS209　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0165−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040055　　本文网刊:

Effect of Electron Beam Irradiation Pretreatment of Walnut Green Husk on the Properties of Its Polysaccharides

ZOU Guangming[1], GUO Yijia[1], CUI Linye[1], BAI Junqing[2], SHEN Heyu[1], LUO Anwei[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2.Yangling Hesheng Irradiation Technologies Co., Ltd., Yangling 712100, China）

Abstract: In order to promote the high-value utilization of walnut green husk and provide a theoretical basis for its application as emulsifiers, foaming agents, and antioxidants, this study employed electron beam irradiation (EBI) at various doses (0, 5, 10, 25, and 50 kGy) to pretreat walnut green husk. The structural characteristics, physicochemical properties, and functional activities of the alkali-extracted polysaccharides were analyzed and compared following treatment. The results demonstrated that, compared to untreated walnut green husk polysaccharides, those subjected to low-dose EBI (5 kGy) exhibited the highest molar ratio of xylose (16.31%), molecular weight (80.43±2.37 kDa), particle size (145.99±4.64 nm), and water/oil retention capacity (40.61 g/g, 83.08 g/g). Polysaccharides from walnut green husk treated with moderate doses (10 and 25 kGy) showed significantly enhanced uronic acid content (35.69%±0.14%, 36.02%±0.37%), exceptional thermal stability (melting points of 84.87 ℃ and 86.63 ℃), emulsion activity (emulsification index: 14.41 m^2/g and 13.64 m^2/g), and $ABTS^+$/DPPH free radical scavenging capacities (scavenging rates of 77.00% and 85.47% at 10 kGy, respectively). High-dose EBI (50 kGy) treatment of walnut green husk polysaccharides resulted in the highest foaming

收稿日期: 2025−04−07

基金项目: 中国国家重点研发计划项目（2019YFD1002404）。

作者简介: 邹光铭（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: xnzouguangming@163.com。

*** 通信作者:** 罗安伟（1971−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: luoanwei@nwsuaf.edu.cn。

ability (56.67%), though other functional activities were somewhat reduced. Considering the properties of walnut green husk polysaccharides, this study concludes that 10 kGy is the optimal irradiation dose.

Key words: walnut green husk; electron beam irradiation; polysaccharides; structural characteristics; physicochemical properties; functional activities

核桃(*Juglans regia* L.)因其较高的营养价值和健康益处成为世界上最受欢迎和广泛种植的四大坚果之一[1]。而核桃果实收获后,其最外层的绿色果皮,亦称为核桃青皮(GWH),占新鲜核桃质量的50%~60%,通常作为农业废弃物被丢弃[2]。目前,我国核桃产量居世界首位,因此为推动核桃产业的可持续发展,GWH 的高值化利用问题亟待解决[3]。近年来,许多研究人员致力于研究 GWH 中的生物活性化合物,包括多糖[4]、多酚[5]、黄酮[6]、三萜类化合物[7]和醌类化合物[8],旨在为 GWH 的开发和利用提供新的策略。多糖是 GWH 中主要的生物活性化合物[9],表现出多种优异的生物活性,如抗氧化[10]、抗炎[11]、免疫调节[12] 以及肠道菌群调节[13],而有关于其持水、持油、起泡和乳化性质等加工特性的研究较少。此外,提取方法会显著影响植物多糖的生物活性和加工特性。因此,探索核桃青皮多糖的高效提取方法对其在功能性食品、健康产品和制药行业中的应用具有重要意义。

传统的植物多糖提取方法包括使用热水、酸、碱、盐等溶剂进行提取,这些方法存在高温、耗时、溶剂浪费和能耗高等缺点[14]。随着微波[15]、超声波[16]、高静压[17] 和蒸汽爆破[18] 等新型提取技术的深入研究,发现不同的提取技术对多糖的结构特征,包括化学组成、分子量和糖链构象等方面有显著影响,从而显著提高多糖的得率和功能活性[19]。因此,绿色辅助技术在植物活性多糖提取中的应用受到了越来越多的关注。电子束辐照(EBI)作为一种非热处理技术,因其高效、低能耗、低成本且无化学残留的特点,已广泛应用于植物活性成分的提取和改性[20]。近年来,EBI 在多糖提取领域的研究不断深入,有研究表明 EBI 能够作用于荷叶、黄精、白芷和金丝绞瓜皮等植物组织[21−24],破坏植物细胞壁的纤维素、半纤维素和木质素结构,削弱细胞壁对多糖的束缚,从而促进多糖的释放。尽管 EBI 在多糖提取研究中已取得一定成果,但仍存在诸多不足。现有的研究多聚焦于 EBI 对单一植物多糖得率的影响,缺乏对多糖理化性质、结构特性及功能活性的系统性研究。不同植物来源的多糖结构复杂多样,EBI 处理后 GWH 多糖结构变化如何影响其理化性质和功能活性还未被深入研究。此外,EBI 预处理过程中可能存在的多糖降解和改性等问题尚未得到充分探讨。

因此,本研究旨在阐明不同剂量(0、5、10、25 和 50 kGy)EBI 预处理对核桃青皮多糖的结构特性(功能基团、晶体结构和表面微观结构)、理化性质(化学组成、单糖组成、分子量、热性能、持水能力、持油能力)及功能特性(起泡性、流变特性、乳化能力和抗氧化活性)的影响。研究结果可以为核桃青皮多糖的高值化利用及 EBI 预处理在植物多糖中的潜在应用提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜核桃青皮　中国陕西省西安雨润水果批发市场,经自然晾晒干燥至含水率约为 10% 后研磨过 60 目筛;甘露糖(Man)、核糖(Rib)、鼠李糖(Rha)、葡萄糖醛酸(GlcA)、半乳糖醛酸(GalA)、葡萄糖(Glu)、半乳糖(Gal)、木糖(Xyl)、阿拉伯糖(Ara)、岩藻糖(Fuc)　HPLC 色谱级 98%,美国 Sigma-Aldrich 公司。

D2-10 MeV/20 kV 型高能直线电子加速器　杨凌核盛辐照技术有限公司;折光指数检测器、Q2000 型差示扫描量热仪、DHR-1 型旋转流变仪　美国 Waters;ZEN3600 型纳米激光粒度仪　英国 Malvern 公司;Vertex 70 型傅里叶变换红外光谱仪、D8 Advance 型 X 射线衍射仪　德国 Bruker 公司;Nano SEM-450 型扫描电子显微镜　美国 FEI 公司;IX73 型智能电动倒置荧光显微镜　日本 OLYMPUS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 EBI 预处理　新鲜 GWH 经自然晾晒干燥至含水率约为 10% 后研磨过 60 目筛备用。干燥后的 GWH 粉末在室温下用无水乙醇浸泡 24 h,重复三次,以去除色素和脂质。处理后的残渣在 55 ℃ 下干燥,置于干燥器中备用。随后,将所有密封在聚乙烯塑料袋中的 GWH 粉末在高能直线电子加速器中进行辐照,设定辐照剂量分别为 0、5、10、25、50 kGy,采用重铬酸银剂量计跟踪实际辐照吸收剂量,各样品的实际吸收剂量依次为 0、5.1、10.1、25、50.2 kGy,均处于辐照设备标示的±10% 剂量误差范围内。

1.2.2 多糖碱提取　根据 Chen 等[25] 的方法进行辐照 GWH 多糖的碱提取。25 g 经 EBI 预处理的 GWH 粉末,加入 500 mL 的 2% NaOH 溶液(w/v),在 50 ℃ 水浴下提取 2 h,重复两次,并合并提取液。提取完成后,调整溶液的 pH 至中性,然后 6000 r/min 转速离心 10 min。上清液通过 Sevag 试剂去除蛋白质。所得溶液与无水乙醇以 1∶3(v/v)的比例混匀,在 4 ℃ 下过夜沉淀,然后继续在蒸馏水中透析 48 h(使用分子量截断为 3.5 kDa 的透析袋)后冷冻干燥,得到多糖。通过 EBI 预处理 GWH 所得的多糖样品,根据辐照剂量大小分别命名为 NGP、EGP-5、EGP-10、EGP-25 和 EGP-50。多糖的得率通过公式(1)计

算得到：

$$得率(\%) = \frac{W_1}{W} \times 100 \quad 式（1）$$

式中，W_1 为粗提取 GWH 多糖的干重，W 为核桃青皮粉末的干重。

1.2.3　GWH 多糖的理化性质

1.2.3.1　化学组成分析　NGP 和 EGP 的总糖含量通过苯酚硫酸法测定[4]。取适量 GWH 多糖样品溶解于适量的蒸馏水中（0.04 mg/mL），取 2 mL 多糖溶液，然后按照 1∶5 的比例加入 6% 的苯酚溶液和浓硫酸 6 mL，于 30 ℃ 水浴中反应 0.5 h，结束后冷却至室温，在 490 nm 的波长下进行吸光度测定，根据葡萄糖含量的标准曲线（y=0.0046x+0.0891，R^2=0.9918）计算含量。

多糖的糖醛酸含量通过 m-羟基二苯基法测定[26]。取适量 GWH 多糖样品溶解于适量的蒸馏水中（0.04 mg/mL），取 0.5 mL 多糖溶液，加入蒸馏水补至 1 mL，置于冰水浴中预冷 3 min，然后加入 5 mL 四硼酸钠-硫酸溶液，漩涡振荡器振荡 2 min 后，于沸水浴中加热 5 min，立即冷却至室温，加入 100 μL 间羟基联苯溶液，振荡摇匀 5 min，静置 30 min，于 520 nm 波长处测定吸光值。根据葡萄糖醛酸含量的标准曲线（y=0.0104x+0.1567，R^2=0.9995）计算含量。

蛋白质含量通过考马斯亮蓝 G-250 法测定[27]。取适量 GWH 多糖样品溶解于适量的蒸馏水中（0.04 mg/mL），取 1 mL 多糖溶液，加入 5 mL 考马斯亮蓝溶液，摇匀并静置 2 min 左右后，用比色皿测定 595 nm 处的吸光度，根据蛋白质含量的标准曲线（y=0.0033x+0.6839，R^2=0.9907）计算含量。

1.2.3.2　单糖组成测定　NGP 和 EGP 的单糖组成通过 Han 等[24] 的方法进行测定。取每个 GWH 多糖样品 5 mg，分别与 5 mL 浓度为 3 mol/L 的三氟乙酸（TFA）在密封安瓿瓶中混合，置于 95 ℃ 的恒温水浴中水解 12 h。水解完成后，使用氮气吹干，然后加入 300 μL 蒸馏水。将 100 μL 的标准糖样品（SD）与 100 μL 的多糖水解液分别加入瓶中，加入 100 μL 0.5 mol/L PMP（甲醇配制）和 100 μL 0.3 mol/L NaOH，在 70 ℃ 的水浴中避光反应 1 h。反应后，加入 100 μL 0.3 mol/L HCl 终止反应。接着，加入 700 μL 氯仿进行萃取，重复三次，去除残留的 PMP。然后以 14000 r/min 的速度离心 10 min，最后通过高效液相色谱（色谱柱 C_{18} 柱，250 mm×4.6 mm，粒度 5 μm；流动相 A：100 mmol 磷酸钠缓冲液 pH6.7；流动相 B：乙腈；检测波长：250 nm；柱温 30 ℃；流速 1 mL/min；进样量 5 μL）进行分析。之后使用氯仿萃取，去除多余的 PMP，8000 r/min 离心后收集水层。提取过程重复三次。最后，使用 0.25 μm 纤维素膜过滤器过滤水相，进行 HPLC 分析。使用 Shimadzu LC-2010A HPLC 系统，配备紫外检测器和自动进样器，分析样品的单糖组成。

1.2.3.3　分子量测定　NGP 和 EGP 的分子量参考 Zhang 等[28] 的凝胶渗透色谱法进行分析，配备 TSK gel 5000 PWXL 柱（7.8×300 mm）。使用氯化钠/磷酸盐缓冲溶液（0.2 mol/L）作为洗脱溶液，在折光指数检测器上进行检测，温度设定为 30 ℃，流速为 0.5 mL/min。取 GWH 多糖样品 6 mg 分散在 3 mL 洗脱溶液中，混合物通过 0.22 μm 滤膜过滤。用不同分子量（10000、40000、70000、100000 和 200000 Da）的葡聚糖标准品绘制校准曲线（lg Mw=−0.2864t+10.063，t 代表保留时间，R^2=0.996）。

1.2.3.4　热性能分析　NGP 和 EGP 样品在氮气保护下以 10 ℃/min 的速率，从 20 ℃ 加热至 400 ℃。NGP 和 EGP 样品的热特性通过差示扫描量热仪进行测定。通过 Universal Analysis 2000 软件计算 NGP 和 EGP 的熔化温度（Tm）、降解温度（Td）、熔化焓（ΔHm）和降解焓（ΔHd）。

1.2.3.5　持水能力（WHC）和持油能力（OHC）测定　WHC 和 OHC 的测定方法参考 Chen 等[29] 的方法进行。将 100 mg 的 NGP 和 EGP 样品（W_0）与 10 mL 蒸馏水或菜籽油混合。离心（4 ℃，5000 r/min，20 min）后，称量残渣（W_1）质量。NGP 和 EGP 的 WHC/OHC 计算公式如下：

$$WHC/OHC(g/g) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad 式（2）$$

式中，W_0 为 NGP 和 EGP 的初始质量；W_1 为 NGP 和 EGP 在离心后残渣质量。

1.2.4　GWH 多糖的结构特性

1.2.4.1　粒径测定　NGP 和 EGP 溶液（1 mg/mL）的平均粒径通过纳米激光粒度仪进行测定。取 2 mL 多糖溶液加入粒径专用比色皿中，置于纳米激光粒度仪中检测。强度检测角度为 90°，水折射率为 1.33。

1.2.4.2　傅里叶红外光谱（FT-IR）分析　将 NGP 和 EGP 样品（2 mg）分别与干燥的 KBr 粉末（150 mg）混合研磨，压制成片。取 150 mg KBr 粉末压制成片，作为空白对照。将样品置于傅里叶红外光谱仪中，在 4000~500 cm^{-1} 的范围内对样品进行扫描。

1.2.4.3　X 射线衍射（XRD）分析　NGP 和 EGP 的非晶或晶体结构通过 X 射线衍射仪进行分析。分别称取 20 mg 不同辐照剂量 GWH 多糖样品放入样品池，将表面压平，然后放入 X 射线衍射仪中检测。XRD 光谱在 5°~50° 范围内记录。根据 XRD 图分析 GWH 多糖的晶体结构。

1.2.4.4　扫描电子显微镜（SEM）观察　GWH、NGP 和 EGP 粉末的表面形态通过扫描电子显微镜进行观察。将干燥的 GWH、NGP 和 EGP 粉末样品放置在用导电碳带固定的铝板上，然后进行金粉喷溅处理，之后使用扫描电子显微镜观察。

1.2.5　GWH 多糖的功能特性

1.2.5.1　起泡性　NGP 和 EGP 的泡沫特性通过参考

文献中的方法[30] 进行评估, 并略微修改。将 10 mL 的 NGP 和 EGP 溶液(1%, w/v)在 10000 r/min 下均质化 2 min 以诱发泡沫。记录初始泡沫体积(t=0)和 10 min 后的最终泡沫体积(t=10 min)。起泡能力(FC)和泡沫稳定性(FS)根据以下公式(3)和(4)计算:

$$FC(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

$$FS(\%) = \frac{V_2 - V_0}{V_1 - V_0} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

式中, V_0 为 NGP 和 EGP 溶液的初始体积; V_1 和 V_2 分别为 NGP 和 EGP 溶液在均质化后 0 min 和 10 min 的体积。

1.2.5.2 流变特性 将 NGP 和 EGP 溶液(2%, w/v)置于平行钢板(直径 40 mm, 间隙 1.0 mm)上, 通过 Dou 等[14] 的方法, 使用旋转流变仪测定溶液的表观黏度。剪切速率范围为 0.01~100 s^{-1}, 在 25 ℃下进行。通过在 0.01% 恒定应变下, 进行从 1 到 100 rad/s 的振荡频率扫描, 测定 NGP 和 EGP 溶液的储能模量(G')和损耗模量(G")。流变学参数通过幂律模型方程(5)计算:

$$\eta = k(\gamma)^n \quad \text{式(5)}$$

式中, η 为表观黏度; k 为一致性指数(Pa·s^n); γ 为剪切速率(s^{-1}); n 为流动行为指数。

1.2.5.3 乳化性能 a.乳化活性和稳定性: 将 150 mg 的 NGP 和 EGP 样品分别溶解在 15 mL 蒸馏水中, 并加入 5 mL 菜籽油。将上述混合物在 10000 r/min 下均质 5 min, 以制备 NGP 和 EGP 乳液。每个 NGP 和 EGP 样品的乳化活性(EAI)和乳化稳定性(ESI)根据 Sun 等[31] 的方法计算。乳化活性指数(EAI)计算公式如下:

$$EAI = (2 \times 2.303 \times A_{0\ min} \times DF) / [L \times (1 - \varphi) \times \rho] \quad \text{式(6)}$$

式中, $A_{0\ min}$ 表示新鲜乳剂稀释的吸光度, DF 表示稀释系数(100), L 表示比色皿的路径长度(1 cm), φ 表示分散相的分数(0.25), ρ 表示多糖溶液的质量浓度(10000 g/m^3)。

乳化稳定性指数(ESI)计算公式如下:

$$ESI = (A_{0\ min} \times 10) / (A_{0\ min} - A_{10\ min}) \quad \text{式(7)}$$

式中, $A_{0\ min}$ 和 $A_{10\ min}$ 分别表示乳剂稀释 0 min 和 10 min 时的吸光度。

b.乳液颗粒的微观结构: NGP 和 EGP 乳液的界面形态通过智能电动倒置荧光显微镜进行观察。将制备好的 NGP 和 EGP 乳液滴加在载玻片上, 盖上盖玻片, 擦去溢出部分, 置于智能电动倒置荧光显微镜下观察乳液颗粒的微观结构。

c.乳液的流变学测定: NGP 和 EGP 乳液的流变学特性根据 1.2.5.2 方法进行测定。

1.2.5.4 抗氧化活性 NGP 和 EGP 的 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除活性根据之前研究中的方法[7] 进行测定。

$ABTS^+$自由基清除率: 取不同辐照剂量的 GWH 多糖, 加入蒸馏水制备成 0.1 mg/mL 的溶液。将 1 mL 样品溶液加入 1 mL ABTS 工作液中, 室温(25 ℃)孵育 30 min。取上述反应溶液在 734 nm 处测定吸光值。阳性对照组用抗坏血酸替代样品溶液。清除率按以下公式计算:

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_s}{A_c}\right) \times 100 \quad \text{式(8)}$$

式中, A_s: 样品吸光度; A_c: 空白对照吸光度。

DPPH 自由基清除率: 取不同辐照剂量的 GWH 多糖, 加入蒸馏水制备成 0.1 mg/mL 的溶液。将 1 mL 样品溶液与 2 mL 新鲜 DPPH 溶液在试管中混合, 避光静置 30 min 后室温(25 ℃)离心(8000 r/min, 5 min), 取上述反应溶液, 在 517 nm 处测定吸光值。阳性对照组用抗坏血酸替代样品溶液。

$$DPPH\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_s}{A_c}\right) \times 100 \quad \text{式(9)}$$

式中, A_s: 样品吸光度; A_c: 空白对照吸光度。

1.3 数据处理

上述所有实验均重复 3 次, 数据值均用平均值±标准误差表示。使用 SPSS 软件 20.0 和单因素方差分析(ANOVA)进行显著性差异检验(P<0.05)。使用 Origin 2018 进行数据拟合和绘制图表。

2 结果与分析

2.1 理化性质

2.1.1 化学组成 NGP 和 EGP 的得率和化学成分分析如表 1 所示。使用碱提取法提取 NGP 的得率为 8.14%。而在 5、10、25 和 50 kGy 辐照剂量下, 相较于 NGP, EGP 的提取得率分别提升了 11.70%、

表 1 不同 EBI 剂量对 GWH 多糖的化学组成的影响

Table 1 Effect of different EBI doses on the chemical composition of GWH polysaccharides

样品	NGP	EGP-5	EGP-10	EGP-25	EGP-50
得率(%)	8.14±0.35^d	9.1±0.26^c	9.47±0.35^c	10.03±0.15^b	10.60±0.10^a
总糖(%)	65.84±0.32^a	65.08±0.08^b	60.75±0.40^d	60.39±0.19^d	63.62±0.18^c
糖醛酸(%)	30.11±1.07^c	30.89±0.59^c	35.69±0.14^a	36.02±0.37^a	33.35±0.91^b
蛋白质(%)	6.33±0.72^c	3.66±0.45^e	4.62±0.35^d	7.73±0.12^b	8.57±0.12^a

注: 同行不同字母表示组间差异显著(P<0.05), n=3, 表2、表4、表6同。

16.33%、23.22% 和 30.22%。经 EBI 预处理后，EGP 多糖的总糖含量下降，但糖醛酸含量随辐照剂量的升高出现先上升后下降的趋势，并在 25 kGy 下达到最高值。此外，蛋白质含量在不同 EBI 剂量处理下呈现差异，EGP-5(3.66%)和 EGP-10(4.62%)显著低于 NGP(6.33%)(P<0.05)，而 EGP-25(7.73%)和 EGP-50(8.57%)则显著高于 NGP(P<0.05)。这些数据清晰表明，EBI 预处理对 GWH 多糖的纯度具有多维度的影响。如温晓梅等[32]研究者所述，电子束辐照(EBI)的高能量作用可导致植物细胞壁结构的显著破坏，这种破坏使得碱性提取溶剂能够更加顺畅地渗透进入植物细胞内部，从而显著增强了多糖、蛋白质与提取溶剂之间的相互作用。然而，电子束辐照剂量的差异对化学成分与提取溶剂之间相互作用的强度产生了显著影响。具体而言，不同剂量的电子束辐照会导致多糖和蛋白质结构发生不同程度的聚集、降解以及再聚集现象，从而影响多糖的化学成分组成。糖醛酸是多糖结构中的关键部分，其含量变化显著影响多糖的理化性质和功能活性。低中剂量(5、10 和 25 kGy)EBI 可以有效提升多糖中糖醛酸的含量，而高剂量(50 kGy)EBI 能够产生高能电子进一步打破原料分子结构，可能会引发分子间交联反应，致使大分子结构不稳定，从而破坏糖醛酸结构并降低其含量。对于蛋白质而言，低剂量(5 和 10 kGy)EBI 可能导致蛋白质降解[33]，而较高剂量(25 和 50 kGy)EBI 能够促使碱性环境中氢桥和酰胺键断裂，从而释放蛋白质[14,34]。Shen 等[35]的研究同样表明 EBI 预处理分心木虽然能够提高其粗多糖的得率和糖醛酸含量，但会导致多糖纯度降低。然而，Han 等[24]的研究结果表明，对金丝绞瓜皮进行 25、50 和 75 kGy 的 EBI 预处理时，不仅可以提升粗多糖的得率，还能提高其纯度。这些研究结果表明，EBI 预处理不同植物原料对多糖性质的影响具有特异性。

2.1.2　单糖组成　NGP 和 EGP 的单糖组成如图 1 和表 2 所示。结果表明，降解后的 NGP 和 EGP 都包含六种主要的单糖成分(鼠李糖(Rha)、半乳糖醛酸(GalA)、葡萄糖(Glu)、半乳糖(Gal)、木糖(Xyl)和阿拉伯糖(Ara))。与 NGP 相比，EGP 中 Rha、GalA、Ara 和 Xyl 的摩尔比显著增加(P<0.05)，而 Glu 的摩尔比显著下降(P<0.05)。在 50 kGy 的辐照剂量下，Rha 达到最高摩尔比(11.56%)；在 25 kGy 的辐照剂量下，GalA 的最高摩尔比(31.39%)出现；在 50 kGy 的辐照剂量下，Ara 的最高摩尔比(21.36%)出现；而在 25 kGy 的辐照剂量下，Glu 的最低摩尔比(17.86%)出现，这表明 EBI 剂量显著影响单糖的种类和比例。5 kGy 辐照剂量下 EGP 中 Xyl 摩尔比(16.31%)远高于 NGP 中的 2.33%，增加了六倍。先前的研究表明，木质素与半纤维素中醛基残基之间的酯连接在植物材料的纤维壁构建中起着重要作用[18]，而 Xyl 可以来源于半纤维素组分[30]。因此，EBI 预处理可能破坏酯链并分解木聚糖，从而释放出 Xyl 和 GalA，导致 EGP 中 Xyl 和 GalA 的摩尔比增加。这些结果也表明，EBI 预处理能够破坏细胞壁，提取出通过单纯碱提取无法获得的多糖。

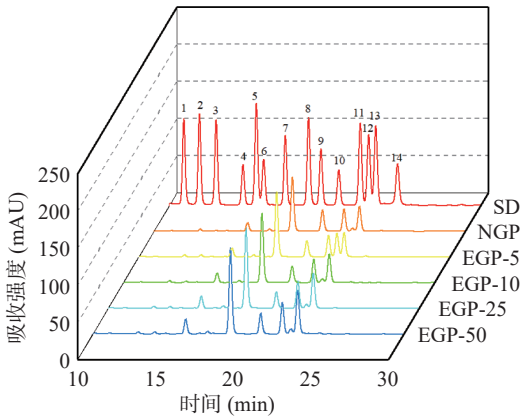


图 1　EBI 预处理对 GWH 多糖单糖组成的影响

Fig.1　Effect of EBI pretreatment on the monosaccharide composition of GWH polysaccharides

2.1.3　分子量　分子量是影响多糖生物活性的重要决定性因素之一[36]。如表 3 所示，NGP 和 EGP 的分子量依次为：EGP-5(80.43 kDa)>EGP-10(67.44 kDa)>EGP-25(65.25 kDa)>EGP-50(48.50 kDa)>NGP(38.94 kDa)。所以低剂量的电子束辐照预处理可能会破坏核桃青皮(GWH)细胞壁结构，从而促进高分子量多糖的溶出。而高分子量的多糖由于能够形成空间结构，因此通常具有更好的生物活性[2]。高剂量的电子束辐照预处理则有助于进一步促进碱提取，有效地断裂糖苷键并导致聚合物链的随机断裂，从而获得低分子量的多糖[14,37]。低分子量的多糖由于其高溶解性和低黏度，更容易跨越细胞膜屏障并进入体内[38−39]。单一的碱提取过程可能只能获得低分子量

表 2　不同 EBI 剂量对 GWH 多糖的单糖组成(摩尔比)的影响

Table 2　Effect of different EBI doses on the monosaccharide composition (molar ratio) of GWH polysaccharides

单糖组成(摩尔比，%)	NGP	EGP-5	EGP-10	EGP-25	EGP-50
鼠李糖	9.41±0.13^{b}	8.56±0.03^{c}	9.82±0.16^{b}	10.96±0.25^{a}	11.56±0.31^{a}
半乳糖醛酸	25.89±0.19^{b}	27.38±0.33^{b}	31.15±0.20^{a}	31.39±0.43^{a}	28.93±0.35^{b}
葡萄糖	27.20±0.17^{a}	18.48±0.08^{c}	20.38±0.21^{b}	17.86±0.15^{c}	18.96±0.07^{c}
半乳糖	12.51±0.03^{a}	10.60±0.01^{b}	12.42±0.18^{a}	12.48±0.41^{a}	12.25±0.21^{a}
木糖	2.33±0.06^{d}	16.31±0.01^{a}	2.69±0.02^{c}	2.67±0.02^{c}	2.83±0.04^{b}
阿拉伯糖	17.25±0.24^{b}	14.66±0.17^{c}	18.78±0.34^{a}	19.90±0.11^{a}	21.36±0.31^{a}

表 3 不同 EBI 剂量对 GWH 多糖的分子量的影响

Table 3 Effect of different EBI doses on the molecular weight of GWH polysaccharides

样品	分子量(kDa)
NGP	38.94±1.67^{d}
EGP-5	80.43±2.37^{a}
EGP-10	67.44±1.58^{b}
EGP-25	65.25±1.39^{b}
EGP-50	48.50±1.96^{c}

注: 同列不同字母表示组间差异显著(P<0.05), n=3, 表5同。

的多糖, 但如果分子量过低, 多糖的生物活性基团数量也会减少, 无法形成有效的空间结构。因此, 电子束辐照预处理可能成为制备适当分子量核桃青皮多糖的大规模生产方法。

2.1.4 热性能 通过差示扫描量热法(DSC)分析了 EBI 预处理的 GWH 多糖的热性质, 如图 2 和表 4 所示。所有多糖样品在 20~400 ℃ 的温度范围内均呈现出较宽的吸热峰和放热峰。第一个宽吸热峰可能是由于水分的蒸发, 而第二个放热峰则与多糖的热分解有关[24,40]。对于第一个宽吸热峰, NGP 和 EGP 的熔点(Tm)按顺序为: EGP-25(86.63 ℃)>EGP-10(84.87 ℃)>EGP-50(81.22 ℃)>NGP(80.78 ℃)>EGP-5(74.40 ℃), 而它们的熔融焓(ΔHm)按顺序为: EGP-25(380.97 J/g)>EGP-50(355.53 J/g)>EGP-10(353.34 J/g)>EGP-5(303.01 J/g)>NGP(277.92 J/g)。因此, 25 kGy 处理的多糖样品不易发生水分蒸发。对于第二个放热峰, 所有多糖样品的分解温度(Td)差异不显著, 而其分解焓(ΔHd)按顺序为: EGP-10(36.66 J/g)>EGP-25(35.65 J/g)>EGP-50(18.56 J/g)>EGP-5(15.46 J/g)>NGP(14.13 J/g)。与天然多糖相比, EBI 预处理的多糖热稳定性有所提高, 特别是在 10 和 25 kGy 剂量下。

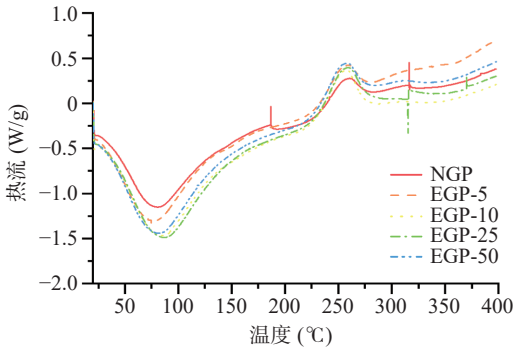


图 2 EBI 预处理对 GWH 多糖热性能的影响

Fig.2 Effect of EBI pretreatment on the thermal properties of GWH polysaccharides

2.1.5 持水能力(WHC)和持油能力(OHC) 具有优异持水能力(WHC)和持油能力(OHC)的多糖可以防止水分/油脂的流失, 从而提高食品的稳定性[41]。NGP 和 EGP 的 WHC 和 OHC 如图 3 所示。随着 EBI 剂量的增加, 所有 GWH 多糖的 WHC 和 OHC 先增加然后下降。与 NGP 的 WHC(34.10 g/g)和 OHC(60.73 g/g)相比, 5 kGy 处理的 EGP 的 WHC 和 OHC 分别达到最大值, 分别为 40.61 g/g(增加了 18.9%)和 83.08 g/g(增加了 36.80%)。这些结果可能与低剂量的 EBI 预处理导致 GWH 多糖形成多孔的层状结构及其较高的分子量有关, 这为水分和油脂分子提供了更多的吸附位点[42−43]。

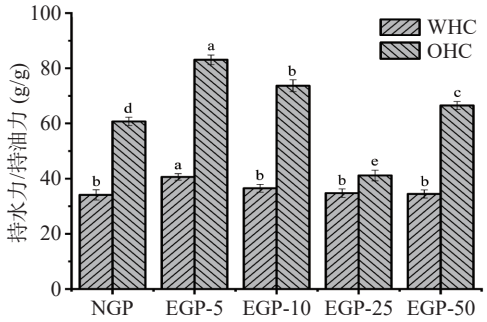


图 3 EBI 预处理对 GWH 多糖 WHC 和 OHC 的影响

Fig.3 Effect of EBI pretreatment on the WHC and OHC of GWH polysaccharides

注: 不同字母表示组间差异显著(P<0.05), n=3, 图 8、图 10、图 12 同。

2.2 结构分析

2.2.1 粒径分析 NGP 和 EGP 的粒径分布及平均粒径如图 4 和表 5 所示。5 和 10 kGy 的电子束辐照预处理增加了 GWH 多糖的平均粒径, 但也导致了更不均匀的粒径分布, 这可能与其较高的分子量有关。然而, 与 NGP 样品相比, 具有较高分子量的 EGP-25 和 EGP-50 样品的粒径较小。造成这一现象的原因可能是 25 kGy 和 50 kGy 辐照预处理核桃青皮会导致多糖分子的亲水性改变, 使得其在溶剂中的溶解度和水合作用发生变化, 促使多糖大分子结构交联得更为紧密和稳定, 在溶液中以更小的颗粒形式分散, 从而呈现出粒径变小的结果。

表 4 不同 EBI 剂量对 GWH 多糖热性能的影响

Table 4 Effect of different EBI doses on the thermal properties of GWH polysaccharides

参数	NGP	EGP-5	EGP-10	EGP-25	EGP-50
Tm (℃)	80.78±1.13^{b}	74.40±0.92^{c}	84.87±0.23^{a}	86.63±1.46^{a}	81.22±0.98^{b}
ΔHm(J/g)	277.92±3.41^{d}	303.01±2.19^{c}	353.34±1.76^{b}	380.97±3.46^{a}	355.53±3.23^{b}
Td(℃)	260.82±1.41^{a}	257.73±0.78^{b}	258.06±0.58^{b}	259.13±2.13^{ab}	258.72±1.13^{ab}
ΔHd (J/g)	14.13±1.43^{c}	15.46±0.78^{c}	36.66±0.66^{a}	35.65±1.81^{a}	18.56±0.15^{b}

注: Tm(℃): 熔化温度; Td(℃): 降解温度; ΔHm(J/g): 熔化焓; ΔHd(J/g): 分解焓。

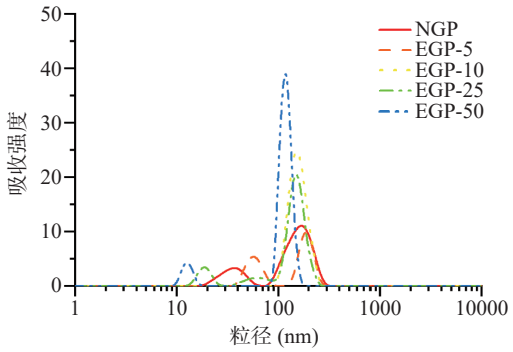


图 4　EBI 预处理对 GWH 多糖粒径的影响

Fig.4　Effect of EBI pretreatment on the particle size of GWH polysaccharides

表 5　不同 EBI 剂量对 GWH 多糖粒径的影响

Table 5　Effect of different EBI doses on the particle size of GWH polysaccharides

样品	粒径(nm)
NGP	135.69±3.95^{b}
EGP-5	145.99±4.64^{a}
EGP-10	143.20±2.26^{ab}
EGP-25	123.65±5.36^{c}
EGP-50	111.00±3.35^{d}

2.2.2　FT-IR　不同 EBI 剂量下 GWH 多糖的 FT-IR 光谱如图 5 所示。在 3431 cm^{-1} 处出现强烈而宽广的吸收峰，可能代表多糖的 O-H 伸缩振动，而在 2835 cm^{-1} 处的弱吸收峰可能是由于 C-H 伸缩和弯曲振动所致[44]。在 1616 cm^{-1} 处的强吸收峰可能对应于 COO^{-}去质子化的羧基[14]。所有 GWH 多糖在 1735 cm^{-1} 处没有吸收峰，表明多糖不含有羰基。约在 1419 cm^{-1} 处的吸收峰与糖环中的 C-H 弯曲振动有关[45]。1103 cm^{-1} 和 1016 cm^{-1} 处的强峰可能分别是由于吡喃环中 C-O 和 C-O-C 的伸缩振动[46]。约在 954 cm^{-1} 和 835 cm^{-1} 处的吸收峰可能分别代表 GWH 多糖中的 β 型和 α 型糖苷键[47]。结果表明，NGP 和 EGP 具有相似的 FTIR 光谱特征，表明 EBI 预处理对 NGP 功能基团状态没有显著影响。

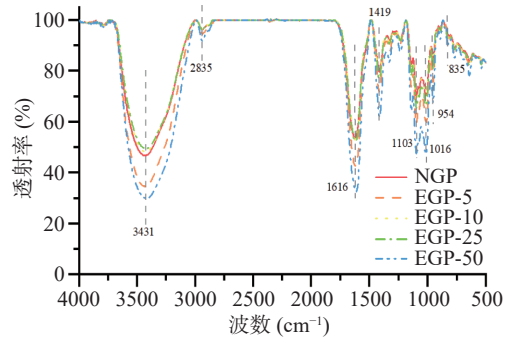


图 5　EBI 预处理对 GWH 多糖 FT-IR 的影响

Fig.5　Effect of EBI pretreatment on the FT-IR of GWH polysaccharides

2.2.3　XRD 分析　XRD 可以分析 GWH 多糖的非晶或结晶结构。如图 6 所示，所有 NGP 和 EGP 样品在 2θ≈22°处均呈现出一个钝化的单一面包状峰，表明所有 GWH 多糖为半结晶性物质[47]。所有 EGP 样品的衍射峰相比 NGP 样品变得更窄，这可能是由于多糖结晶度的增加。结果表明，EBI 预处理可能通过断裂支链和增强分子间力来提高多糖的结晶度。

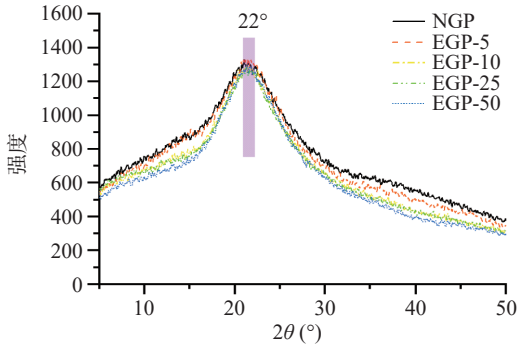


图 6　EBI 预处理对 GWH 多糖晶体结构的影响

Fig.6　Effect of EBI pretreatment on the crystal structure of GWH polysaccharides

2.2.4　扫描电子显微镜　通过 SEM 观察了不同 EBI 剂量下 GWH 粉末和多糖的表面结构特征。如图 7 所示，天然 GWH 粉末的表面结构呈现出相对整齐和规则的形态，而辐照 GWH 粉末的表面结构则变得破碎且粗糙，伴随着不规则的形状、孔洞和裂纹。此外，随着 EBI 剂量的增加，结构损伤的程度变得更加

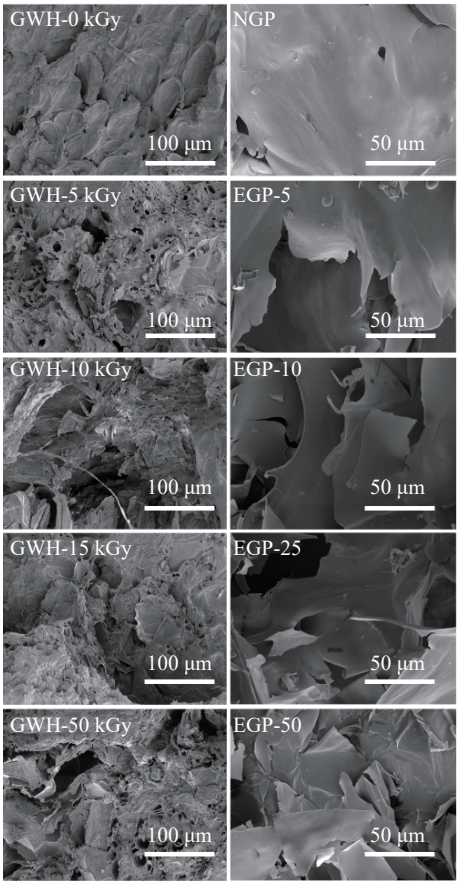


图 7　EBI 预处理对 GWH 多糖微观结构的影响

Fig.7　Effect of EBI pretreatment on the microstructure of GWH polysaccharides

明显。这一现象表明, EBI 可能破坏 GWH 粉末的细胞壁结构, 从而增加原料的孔隙率, 提高碱性提取溶剂的渗透性, 进而提高多糖的提取率[7,24]。此外, 对于多糖而言, NGP 的表面结构相对紧凑和平整, 表面有少量孔洞, 而 EGP 的表面结构则呈现出卷曲和收缩的形态, 伴有大量的孔洞和碎片。这些现象表明, 高能和高穿透性的 EBI 预处理能够破坏多糖的形态, 使其发生分解变形, 导致大分子多糖降解为小分子多糖。

2.3 功能特性

2.3.1 起泡性 起泡能力(FC)是指多糖通过在气-水界面上吸附, 降低表面张力, 形成吸附层, 从而促进气体扩散到食品基质中的能力[48]。泡沫稳定性(FS)是指多糖能够形成具有良好界面流变特性的厚吸附层, 延缓薄膜破裂, 从而提供稳定性的能力[49]。图 8 显示了 NGP 和 EGP 的 FC 和 FS。随着电子束辐照剂量的增加, 所有 GWH 多糖的 FC 先下降后上升, 而所有 GWH 多糖的 FS 则呈现出非剂量依赖性的增加。与 NGP 的 FC(50.12%)和 FS(66.67%)相比, EGP 在 50 kGy 时的 FC 和在 25 kGy 时的 FS 分别达到了最大值, 分别为 56.67%(增加了 13.34%)和 96.67%(增加了 45.00%)。结果表明, 高剂量的电子束辐照预处理能够提高多糖的气-液界面吸附能力, 从而实现相对稳定的气泡。

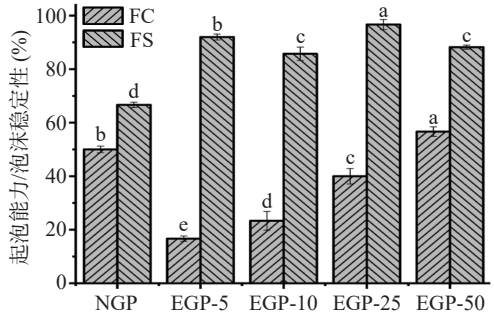


图 8 EBI 预处理对 GWH 多糖 FC 和 FS 的影响

Fig.8 Effect of EBI pretreatment on the FC and FS of GWH polysaccharides

2.3.2 流变特性 NGP 和 EGP 在剪切速率范围 0.01~100 s^{-1} 内的稳态流动曲线如图 9A 所示。所有 GWH 多糖样品的表观黏度随着剪切速率的增加迅速下降, 表明所有 GWH 多糖溶液表现为非牛顿型假塑性流体[50]。NGP 和 EGP 的稳态流动曲线进一步通过幂律模型进行了良好拟合, 流变学参数已总结在表 6 中。所有模型的 R^2 值大于 0.95, 表示数据的拟合效果良好。一致性指数(K_p)值与表观黏度呈正相关[24]。一致性指数(K_p)值按顺序依次为: EGP-5>EGP-10>EGP-25>EGP-50>NGP。该结果可能是由于低剂量(5 kGy)EBI 预处理获得的 GWH 多糖具有较高的分子量、较长的柔性链、分子间缠结以及聚合物链间的相互作用, 从而导致更高的黏度[51]。Sun 等[31] 报告称, 具有高黏度的多糖具有更好的结合脂质、胆固醇和胆汁酸的能力。流动行为指数(N_p)值可用于判断多糖体系是否为假塑性流体。可以看出, 所有 GWH 多糖溶液的 N_p 值均小于 1.0, 表现出典型的假塑性行为。此外, N_p 值按顺序为: EGP-5>EGP-10>NGP>EGP-25>EGP-50, 表明在高 EBI 剂量下, GWH 多糖的假塑性较高, 而低剂量则相反。多糖的优良假塑性有利于食品生产中的泵送、液体填充、咀嚼和吞咽, 这表明 EGP 在饮料等流体食品的加工和消费中具有潜在的应用价值[51]。

使用振荡测量法评估了 NGP 和 EGP 的粘弹性特性。如图 9B~F 所示, NGP 和 EGP 体系的储能模量(G')和损耗模量(G")值随着角频率的增加而增

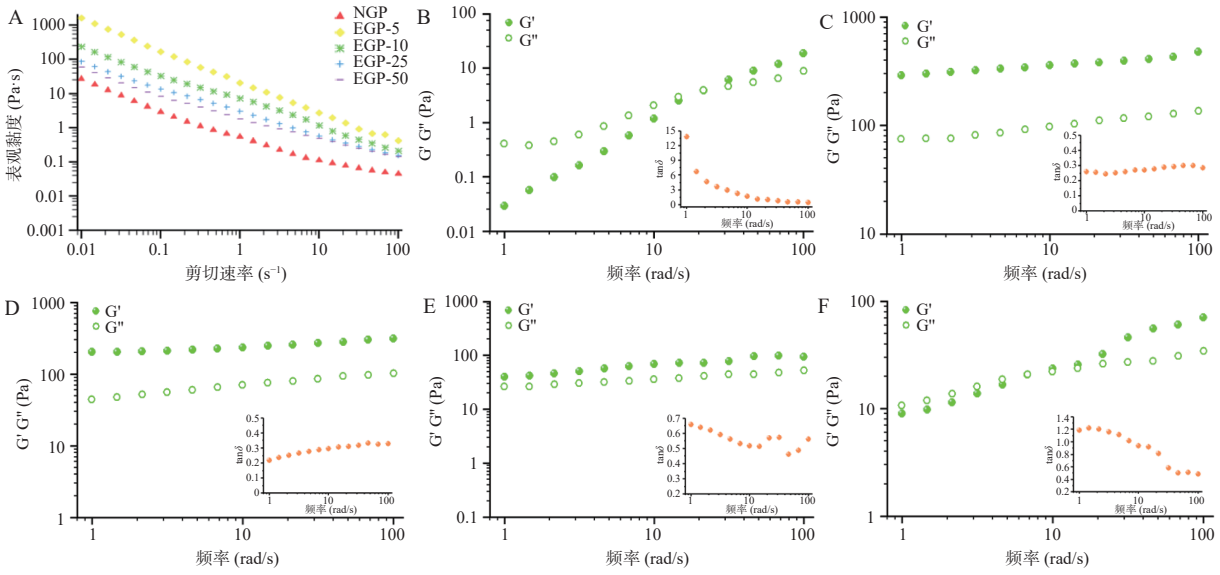


图 9 EBI 预处理对 GWH 多糖的表观黏度、储能模量(G')、损耗模量(G")和 tanδ 曲线的影响

Fig.9 Effect of EBI pretreatment on the apparent viscosity of GWH polysaccharides, and the storage modulus (G'), loss modulus (G"), and tanδ curves

注: (A)表观黏度, (B)NGP、(C)EGP-5、(D)EGP-10、(E)EGP-25 和(F)EGP-50 的储能模量(G')、损耗模量(G")和 tanδ 曲线。

表 6　不同 EBI 剂量对 GWH 多糖流变学参数的影响

Table 6　Effect of different EBI doses on the rheological parameters of GWH polysaccharides

参数	NGP	EGP-5	EGP-10	EGP-25	EGP-50
K_p(Pa·s^n)	0.65±0.39^e	22.46±4.25^a	6.57±0.94^b	3.02±0.53^c	2.13±0.76^d
N_p	0.70±0.14^b	0.90±0.04^a	0.75±0.03^b	0.69±0.04^b	0.64±0.09^b
R_p^2	0.95	0.99	0.99	0.98	0.96
K_e(Pa·s^n)	3.13±0.05^a	2.89±0.03^b	1.67±0.03^c	0.26±0.01^e	0.57±0.01^d
n_e	0.82±0.00^c	0.87±0.00^a	0.84±0.00^b	0.74±0.01^e	0.78±0.01^d
R_e^2	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

注：K_p(Pa·s^n)：GWH多糖的稠度指数；N_p：GWH多糖的流动行为指数；R_p^2：GWH多糖幂律模型的决定系数；K_e(Pa·s^n)：GWH多糖乳液的稠度指数；n_e：GWH多糖乳液的流动行为指数；R_e^2：GWH多糖乳液幂律模型的决定系数。

加。对于 EGP-5、EGP-10 和 EGP-25，G'值始终高于 G"值。对于 NGP 和 EGP-50，随着角频率的增加，G'值逐渐超过 G"值。相位角(tanδ)是评估粘弹性行为的关键指标，表示为 G"值与 G'值的比值[52]。当多糖体系的 tanδ 值小于 1 时，体系主要表现出弹性特性，否则表现出粘性特性。系统的 tanδ 值约为 1 时，表示为弱凝胶；当 tanδ 值约为 0.01 时，表示为真实凝胶。NGP 样品 tanδ 值超过 1，主要表现为粘性特性，无法形成凝胶。而 EGP 样品 tanδ 值均变小，尤其是 EGP-5 和 EGP-10 的 tanδ 值约为 0.2~0.3，表明主要表现为弹性特性，具有弱凝胶能力。结果可能是由于低剂量(5 kGy 和 10 kGy)EBI 预处理增强了 GWH 多糖糖链之间的氢键和网络结构，而高剂量 EBI 预处理则减弱了这些效应[53]。

2.3.3　乳化性能　多糖因其丰富的来源、高生物相容性和稳定的化学结构，广泛应用于天然乳化剂[54]。图 10 展示了 EBI 预处理对 NGP 和 EGP 乳化特性的影响。乳化活性指数(EAI)和稳定性指数(ESI)的结果表明，除 EGP-5 外，所有 EGP 样品的 EAI 和 ESI 均高于 NGP 样品(11.88 m^2/g 和 1165 min)(图 10A)。

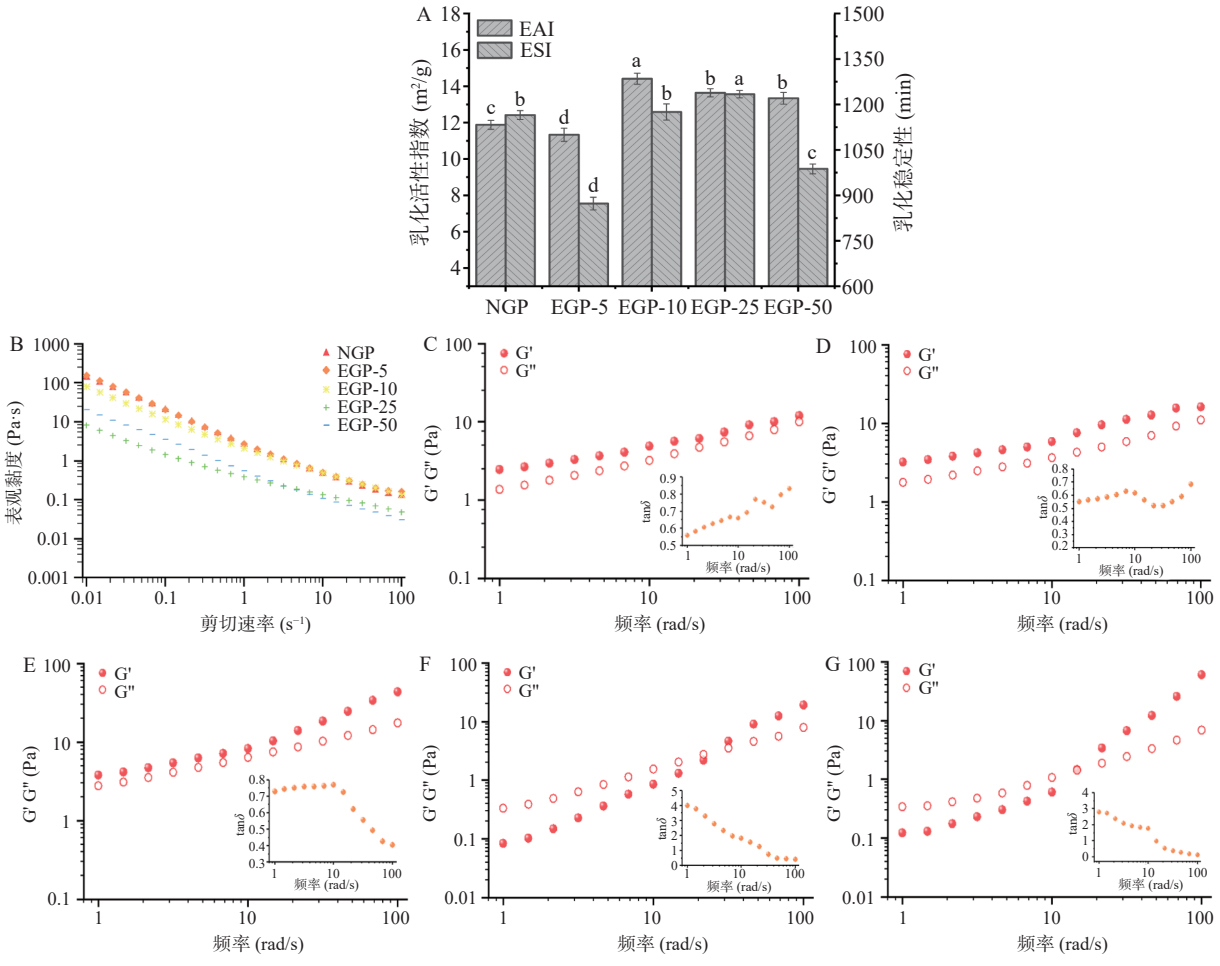


图 10　EBI 预处理对 GWH 多糖乳化性能的影响

Fig.10　Effect of EBI pretreatment on emulsifying property of GWH polysaccharides

注：(A)NGP 和 EGP 乳液的乳化活性(EAI)和乳化稳定性(ESI)指数，(B)乳液的表观黏度，NGP(C)、EGP-5(D)、EGP-10(E)、EGP-25(F)和 EGP-50(G)乳液的 G'、G"和 tanδ 曲线。

其中 10 kGy 和 25 kGy 的 EAI 值(14.41 m^2/g 和 13.64 m^2/g)相较于 NGP 而言显著增加(P<0.05)。此外,EGP 的 ESI 在 25 kGy(增加了 5.91%)时达到最大值。结果表明,EBI 预处理可能暴露多糖结构的内部位点,增加表面疏水性,从而在油水界面上强烈吸附大分子和/或形成外层,有助于形成稳定的乳液[55]。EGP 在 5 kGy 时乳化活性指数和稳定性指数最低的可能原因是蛋白质含量较低且分子量较高[19]。

研究了 EBI 预处理对乳液滴径的影响,乳液的光学显微照片如图 11 所示。NGP 和 EGP-5 乳液呈现出较大且分布不均的液滴,表明乳液不稳定。相反,EGP 乳液在 10~50 kGy 处理后滴径变小,分布更加均匀,尤其是在 10 kGy 时。结果表明,EBI 预处理能够显著(P<0.05)提高多糖乳液的乳化活性,并增强多糖作为天然乳化剂的应用价值。

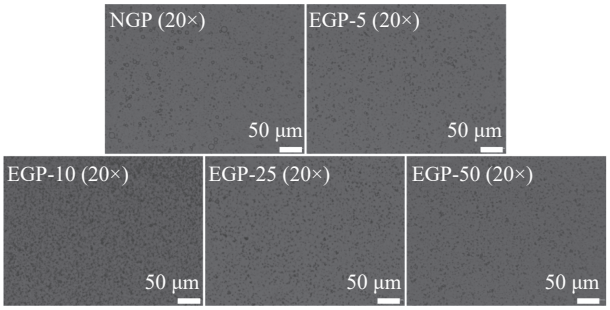


图 11 EBI 预处理对 NGP 和 EGP 乳液颗粒微观结构的影响

Fig.11 Effect of EBI pretreatment on microstructure of NGP and EGP emulsion particles

为了进一步探讨 GWH 多糖的乳化性能,测定了其乳液的流变性能(图 10B~G)。所有 GWH 乳液都表现出明显的“剪切稀化”特征曲线。通常,更好的乳液稳定性伴随着较高的黏度[56]。但黏度高对乳液来说不利于应用,而 EBI 预处理不仅能够提高 GWH 多糖乳液的稳定性,还能降低乳液的黏度,从而改善乳液的流动性。此外,从相位角(tanδ)来看,可以发现低 EBI 剂量(5 和 10 kGy)处理的 NGP 和 EGP 乳液表现出弹性特性,而高 EBI 剂量(25 和 50 kGy)处理的 EGP 乳液则表现出粘性特性。

2.3.4 抗氧化活性 植物多糖由于其特定的化学组成和结构,具有优异的抗氧化活性,可以成为潜在的天然抗氧化剂来源[57]。通过 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除能力实验来评估植物多糖的抗氧化活性[50]。如图 12A 和图 12B 所示,EBI 预处理对 GWH 多糖的 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除活性有积极影响。在 0.1 mg/mL 浓度下所有 EGP 样品的 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除活性均高于 NGP 样品。特别是,EGP 的 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除活性在 10 kGy 时达到最大值(分别为 77.00% 和 85.47%),比 NGP 分别增加了 77.33% 和 16.11%。一方面,抗氧化活性的增强可能归因于 EBI 预处理破坏了 GWH 多糖的分子间和分子内的作用力,导致表面结构松散,暴露出更

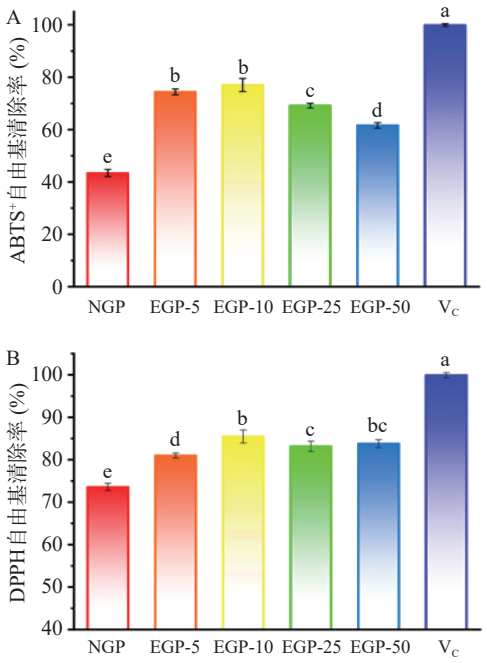


图 12 EBI 预处理对 NGP 和 EGP 抗氧化活性的影响

Fig.12 Effect of EBI pretreatment on the antioxidant activities of NGP and EGP

注:(A)$ABTS^+$自由基清除率,(B)DPPH 自由基清除率。

多的还原性羟基末端[58]。另一方面,EBI 预处理还可能通过调节分子量、糖醛酸含量和阿拉伯糖含量来增强 GWH 多糖的抗氧化活性[18,42]。

3 结论

本研究利用电子束辐照(EBI)技术对核桃青皮进行预处理,系统分析了不同剂量 EBI 处理对核桃青皮多糖的结构特性、理化性质和功能特性的影响。研究结果表明,EBI 预处理可以有效提高核桃青皮多糖的得率、糖醛酸含量、鼠李糖/半乳糖醛酸/阿拉伯糖/木糖的摩尔比、热稳定性、水/油保持能力、起泡能力/稳定性、黏度、乳化活性/稳定性及 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除活性。这些理化性质和功能活性的变化主要归因于低剂量 EBI(5 kGy)引起的核桃青皮细胞壁结构破坏,促进了碱性提取溶剂的渗透并加速了高分子量多糖的溶解。随着辐照剂量的增加,中剂量 EBI(10 和 25 kGy)进一步破坏了糖苷键及分子内/分子间氢键,导致大分子多糖降解为具有较好功能活性的中分子量多糖。然而,高剂量 EBI(≥25 kGy)则可能严重破坏核桃青皮多糖的结构,削弱了其部分功能活性。因此,选择适当的 EBI 剂量对于获得高得率且具有优异功能活性的核桃青皮多糖至关重要。综合考虑核桃青皮多糖的乳化活性和抗氧化活性,本研究认为 10 kGy 为最佳辐照剂量。本研究深入探讨了 EBI 预处理对核桃青皮多糖的多维度影响,为核桃青皮的高值化利用及 EBI 技术在植物多糖领域的应用提供了新的理论依据和思路。未来研究可进一步优化 EBI 预处理工艺参数,探讨多糖结构与生物活性之间的内在关系,并拓展其在食品加工中的应用。

© 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] ZHAN Y, MA M, CHEN Z, et al. A review on extracts, chemical composition and product development of walnut diaphragma juglandis fructus[J]. Foods, 2023, 12(18): 3379.

[2] WANG Z, ZHOU X, SHU Z, et al. Regulation strategy, bioactivity, and physical property of plant and microbial polysaccharides based on molecular weight[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125360.

[3] 张荣, 陶亮. 中国核桃生产和贸易现状分析[J]. 中国果树, 2025(1): 147−152. [ZHANG R, TAO L. Analysis of the production and trade status of walnut in China[J]. China Fruits, 2025(1): 147−152.]

[4] HE N, ZHAI X, ZHANG X, et al. Extraction, purification and characterization of water-soluble polysaccharides from green walnut husk with anti-oxidant and anti-proliferative capacities[J]. Process Biochemistry, 2020, 88: 170−179.

[5] XIA S, YU H, QIU Y, et al. A novel curdlan/methyl cellulose/walnut green husk polyphenol edible composite film for walnut packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129505.

[6] LI X, ZHANG Y, ZHANG W, et al. Ulrtrasonic extraction of flavonoid from walnut green husk[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 508: 012147.

[7] SHEN H, HOU Y, XI M, et al. Electron beam irradiation enhanced extraction and antioxidant activity of active compounds in green walnut husk[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131520.

[8] CAI Y, ZOU G, XI M, et al. Juglone inhibits listeria monocytogenes ATCC 19115 by targeting cell membrane and protein[J]. Foods, 2022, 11(17): 2558.

[9] BAREKAT S, NASIRPOUR A, KERAMAT J, et al. Phytochemical composition, antimicrobial, anticancer properties, and antioxidant potential of green husk from several walnut varieties (*Juglans regia* L.)[J]. Antioxidants, 2022, 12(1): 52.

[10] ZHOU S, HUANG G. Extraction, purification and antioxidant activity of *Juglans regia* shell polysaccharide[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 75.

[11] WANG G, YANG X, WANG J, et al. Walnut green husk polysaccharides prevent obesity, chronic inflammatory responses, nonalcoholic fatty liver disease and colonic tissue damage in high-fat diet fed rats[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 879−898.

[12] WANG G, YAN X, YANG X, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of an acidic polysaccharide from walnut green husk[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 110: 105877.

[13] WANG G, ZHANG Y, ZHANG R, et al. The protective effects of walnut green husk polysaccharide on liver injury, vascular endothelial dysfunction and disorder of gut microbiota in high fructose-induced mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 92−106.

[14] DOU Z M, CHEN C, HUANG Q, et al. Comparative study on the effect of extraction solvent on the physicochemical properties and bioactivity of blackberry fruit polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1548−1559.

[15] HASHEMIFESHARAKI R, XANTHAKIS E, ALTINTAS Z, et al. Microwave-assisted extraction of polysaccharides from the marshmallow roots: Optimization, purification, structure, and bioactivity[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240: 116301.

[16] HU X, XU F, LI J, et al. Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from coix seeds: Optimization, purification, and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131636.

[17] BOJORGES H, MARTÍNEZ-ABAD A, MARTÍNEZ-SANZ M, et al. Structural and functional properties of alginate obtained by means of high hydrostatic pressure-assisted extraction[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120175.

[18] YI J, LI X, WANG S, et al. Steam explosion pretreatment of achyranthis bidentatae radix: Modified polysaccharide and its antioxidant activities[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131746.

[19] OLAWUYI I F, KIM S R, HAHN D, et al. Influences of combined enzyme-ultrasonic extraction on the physicochemical characteristics and properties of okra polysaccharides[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105396.

[20] LI T, WANG L, CHEN Z, et al. Electron beam irradiation induced aggregation behaviour, structural and functional properties changes of rice proteins and hydrolysates[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105192.

[21] 孟令旺. 荷叶药用成分提取及其电子束辐射效应研究[D]. 咸宁：湖北科技学院, 2022: 14. [MENG L W. Extraction of medicinal components from lotus leaves and its effects under electron beam irradiation[D]. Xianning: Hubei University of Science and Technology, 2022: 14.]

[22] 徐攀, 贾鑫, 高鹏, 等. 基于正交偏最小二乘判别分析电子束辐照对黄精抗氧化活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 274−282. [XU P, JIA X, GAO P, et al. Analysis of the effect of electron beam irradiation on antioxidant activity of polygonati rhizoma based on orthogonal partial least squares-discriminant[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 274−282.]

[23] 周鑫, 舒晓燕, 李鑫奎, 等. 白芷粗多糖的提取工艺优化及辐照对其含量和活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(21): 8508−8516. [ZHOU X, SHU X Y, LI X K, et al. Optimization of extraction technology of crude polysaccharides from *Angelica dahurica* and effects of irradiation on its content and activity[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(21): 8508−8516.]

[24] HAN H, LUO Y, BAI J, et al. Electron beam irradiation pretreatment for efficient extraction of pectin from *Spaghetti squash* peel: Structural, functional, and biological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109451.

[25] CHEN S, QIN L, XIE L, et al. Physicochemical characterization, rheological and antioxidant properties of three alkali-extracted polysaccharides from mung bean skin[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107867.

[26] BLUMENKRANTZ N, ASBOE-HANSEN G. New method for quantitative determination of uronic acids[J]. Analytical Biochemistry, 1973, 54(2): 484−489.

[27] SERRA S, MORGANTE L, DI PERRI R. Determination of proteins with the Coomassie brilliant blue G 250 method. IV. Use with cerebrospinal fluid proteins and comparative analysis with the biuret and Lowry methods[J]. Bollettino Della Societa Italiana Di Biologia Sperimentale, 1980, 56(5): 463−467.

[28] ZHANG F, ZHANG L, CHEN J, et al. Systematic evaluation of a series of pectic polysaccharides extracted from apple pomace by regulation of subcritical water conditions[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130833.

［29］ CHEN R, LUO S, WANG C, et al. Effects of ultra-high pressure enzyme extraction on characteristics and functional properties of red pitaya（*Hylocereus polyrhizus*）peel pectic polysaccharides［J］. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107016.
［30］ CHEN X, WANG Z, KAN J. Polysaccharides from ginger stems and leaves: effects of dual and triple frequency ultrasound assisted extraction on structural characteristics and biological activities［J］. Food Bioscience, 2021, 42: 101166.
［31］ SUN Y, YANG K, ZHANG X, et al. *In vitro* binding capacities, physicochemical properties and structural characteristics of polysaccharides fractionated from *Passiflora edulis* peel［J］. Food Bioscience, 2022, 50: 102016.
［32］ 温晓梅, 蓝碧锋, 吴俊师, 等. 辐照对柠檬酸法提取柚皮果胶特性的影响［J］. 中国食品添加剂, 2025, 36(4): 21−27. ［WEN X M, LAN B F, WU J S, et al. Effects of radiation on the properties of pectin extracted from pomelo peel using citric acid method［J］. China Food Additives, 2025, 36(4): 21−27.］
［33］ 顾可飞, 陈志军. 电子束辐照对氨基酸与蛋白质结构的影响［J］. 辐射研究与辐射工艺学报, 2019, 37(2): 35−42. ［GU K F, CHEN Z J. Influence of electron-beam irradiation on amino acids and protein structure［J］. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2019, 37(2): 35−42.］
［34］ KOU R, ZUO G, LIU J, et al. Structural properties and hypoglycaemic activity of polysaccharides extracted from the fruits of *Lycium barbarum* L. using various extraction media［J］. Industrial Crops and Products, 2022, 188: 115725.
［35］ SHEN H Y, WANG R L, BAI J Q, et al. Utilization of electron beam irradiation pretreatment for the extraction of pectic polysaccharides from *Diaphragma juglandis* Fructus: Structural, physicochemical, and functional properties, international［J］. Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279(2): 135198.
［36］ WU J, WANG H, LIU Y, et al. Effect of ultrasonic irradiation on the physicochemical and structural properties of *Laminaria japonica* polysaccharides and their performance in biological activities［J］. Molecules, 2022, 28(1): 8.
［37］ YIN C, SHI D, CHEN Z, et al. Comparative analysis of physicochemical characteristics and *in vitro* biological activities of polysaccharides from *γ*-irradiated and nonirradiated *Schizophyllum commune*［J］. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 197: 110177.
［38］ LI N, WANG C, GEORGIEV M I, et al. Advances in dietary polysaccharides as anticancer agents: Structure-activity relationship［J］. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 360−377.
［39］ LIU T, REN Q, WANG S, et al. Chemical modification of polysaccharides: A review of synthetic approaches, biological activity and the structure–activity relationship［J］. Molecules, 2023, 28(16): 6073.
［40］ FAUSTINO M, PEREIRA C F, DURÃO J, et al. Effect of drying technology in *Saccharomyces cerevisiae* mannans: Structural, physicochemical, and functional properties［J］. Food Chemistry, 2023, 412: 135545.
［41］ XU F, ZHANG S, ZHOU T, et al. Green approaches for dietary fibre-rich polysaccharide production from the cooking liquid of adzuki beans: enzymatic extraction combined with ultrasonic or high-pressure homogenisation［J］. Food Hydrocolloids, 2022, 130: 107679.
［42］ BAI C, CHEN R, TAN L, et al. Effects of multi-frequency ultrasonic on the physicochemical properties and bioactivities of polysaccharides from different parts of ginseng［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 896−910.
［43］ LI W, ZHANG Y, SANG L, et al. Effects of different extraction techniques on the structural, physicochemical, and bioactivity properties of heteropolysaccharides from platycodon grandiflorum roots［J］. Process Biochemistry, 2023, 127: 33−43.
［44］ ZHU M, HUANG R, WEN P, et al. Structural characterization and immunological activity of pectin polysaccharide from kiwano（*Cucumis metuliferus*）peels［J］. Carbohydrate Polymers, 2021, 254: 117371.
［45］ ARAB K, GHANBARZADEH B, AYASEH A, et al. Extraction, purification, physicochemical properties and antioxidant activity of a new polysaccharide from *Ocimum album* L. seed［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 180: 643−653.
［46］ YE G, LI J, ZHANG J, et al. Structural characterization and antitumor activity of a polysaccharide from *Dendrobium wardianum*［J］. Carbohydrate Polymers, 2021, 269: 118253.
［47］ LIU G, KAMILIJIANG M, ABUDUWAILI A, et al. Isolation, structure elucidation, and biological activity of polysaccharides from *Saussurea involucrata*［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 154−166.
［48］ CHEN X, ZHAO Y, ZHAO Y, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on the characteristics of a tea polysaccharide conjugate aqueous solution［J］. Industrial Crops and Products, 2021, 171: 113859.
［49］ NARSIMHAN G, XIANG N. Role of proteins on formation, drainage, and stability of liquid food foams［J］. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9(1): 45−63.
［50］ HOU Z, CHEN S, YE X. High pressure processing accelarated the release of RG-I pectic polysaccharides from citrus peel［J］. Carbohydrate Polymers, 2021, 263: 118005.
［51］ WANG Y X, ZHANG T, YIN J Y, et al. Structural characterization and rheological properties of an alkali-extracted *β*-glucan from *Hypsizygus marmoreus*［J］. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107475.
［52］ ARAB K, GHANBARZADEH B, KARIMI S, et al. Gelling and rheological properties of a polysaccharide extracted from *Ocimum album* L. seed［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125603.
［53］ JIAO X, LI F, ZHAO J, et al. Structural diversity and physicochemical properties of polysaccharides isolated from pumpkin（*Cucurbita moschata*）by different methods［J］. Food Research International, 2023, 163: 112157.
［54］ HUANG Z, ZONG M H, LOU W Y. Effect of acetylation modification on the emulsifying and antioxidant properties of polysaccharide from *Millettia speciosa* Champ［J］. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107217.
［55］ PORFIRI M C, VACCARO J, STORTZ C A, et al. Insoluble soybean polysaccharides: Obtaining and evaluation of their O/W emulsifying properties［J］. Food Hydrocolloids, 2017, 73: 262−273.
［56］ HOU F, YANG S, MA X, et al. Characterization of physicochemical properties of oil-in-water emulsions stabilized by *Tremella fuciformis* polysaccharides［J］. Foods, 2022, 11(19): 3020.
［57］ WAN C, JIANG H, TANG M T, et al. Purification, physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from *Sargassum fusiforme* by hydrogen peroxide/ascorbic acid-assisted extraction［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 223: 490−499.
［58］ WANG K, GUO J, CHENG J, et al. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharide from spent lentinus edodes substrate: Process optimization, precipitation, structural characterization and antioxidant activity［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 1038−1045.