

Optimization of β -Glucan Extraction Process and Structural Characterization in Oat Bran

Dongliang Liu

Bai Cheng Agricultural Academy, Bai Cheng, Jilin, 137000, China

Abstract

Oat bran is rich in β -glucan, which exhibits multiple health benefits such as lipid regulation, cholesterol reduction, and intestinal function improvement. To achieve efficient and green extraction, this study utilized oat bran as the raw material and employed single-factor and response surface methodology to optimize process conditions. The effects of temperature, pH, solid-to-liquid ratio, reaction time, and enzyme concentration on β -glucan yield and purity were investigated. Structural characteristics were analyzed using FTIR, SEM, and GPC. Results demonstrated that under the conditions of pH 6.5, 55°C, solid-to-liquid ratio 1:20, enzyme concentration 1.2%, and reaction time 90 minutes, the yield reached 7.36% with a purity of 83.5%. Structural analysis confirmed that the product maintained the typical β -(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)-D-glucan structure, exhibited molecular homogeneity, and demonstrated good solubility. This study provides theoretical and technical support for the high-value utilization of oat by-products and the development of functional foods.

Keywords

oat bran; β -glucan; extraction process optimization; structural characteristics; functional activity

燕麦麸皮中 β -葡聚糖提取工艺优化及结构特性研究

刘栋梁

白城市农业科学院, 中国 · 吉林 白城 137000

摘要

燕麦麸皮富含 β -葡聚糖, 具有调脂、降胆固醇及改善肠道功能等多重健康作用。为实现其高效绿色提取, 本文以燕麦麸皮为原料, 采用单因素与响应面法优化工艺条件, 研究温度、pH、料液比、时间及酶浓度对 β -葡聚糖得率和纯度的影响, 并通过FTIR、SEM及GPC分析结构特性。结果表明, 在pH6.5、55°C、料液比1:20、酶浓度1.2%、时间90min条件下, 得率达7.36%, 纯度83.5%。结构分析证实产物保持典型 β -(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)-D-葡聚糖结构, 分子均一、溶解性良好, 为燕麦副产物高值化利用与功能食品开发提供理论与技术支持。

关键词

燕麦麸皮; β -葡聚糖; 提取工艺优化; 结构特性; 功能活性

1 引言

燕麦 (*Avena sativa* L.) 是一种营养价值极高的谷物, 其麸皮中富含大量可溶性膳食纤维, 其中以 β -葡聚糖 (β -glucan) 含量最为丰富。大量研究表明, 燕麦 β -葡聚糖在降低血清胆固醇、调节血糖水平、促进肠道益生菌生长等方面具有显著生理活性, 因此被广泛应用于保健食品与功能性食品的开发。然而, 燕麦麸皮结构致密、细胞壁坚硬, 导致 β -葡聚糖难以直接提取, 其得率与纯度受多因素影响, 包括酶解条件、温度控制、溶剂体系等。传统提取方法以热水提取和碱溶酸沉为主, 但存在提取率低、结构破坏严重、能耗高等问题。近年来, 酶辅助提取、超声协同提取和复合

酶法等绿色工艺成为研究热点。本文旨在通过系统优化提取工艺参数, 构建高效绿色提取体系, 并对产物结构特征与理化性质进行深入分析, 为 β -葡聚糖的高值化利用提供新思路。

2 燕麦麸皮中 β -葡聚糖的理化特性与存在形式

2.1 β -葡聚糖的分子结构特征

燕麦 β -葡聚糖是一种非支链型高分子多糖, 其基本结构由 β -D-葡萄糖单元通过 β -(1 $\rightarrow$ 3) 和 β -(1 $\rightarrow$ 4) 糖苷键交替连接形成。 β -(1 $\rightarrow$ 3) 键的存在打断了 β -(1 $\rightarrow$ 4) 直链结构, 使分子链具备柔韧性与良好的溶解性, 而 β -(1 $\rightarrow$ 4) 键的比例则决定了分子的结晶度与黏度。研究表明, β -(1 $\rightarrow$ 3):(1 $\rightarrow$ 4) 键比例通常为 1:2 至 1:3, 这种独特的构型使其既能在水中形成稳定的高黏度溶液, 又具有显

【作者简介】刘栋梁 (1993—), 男, 满族, 中国辽宁丹东人, 硕士, 研究员, 从事杂粮品质分析检测研究。

著的生理活性。结构的完整性直接影响 β -葡聚糖的理化特性和健康功能：高分子量 β -葡聚糖能通过形成黏性屏障延缓胃排空和糖吸收，从而改善血糖与血脂水平；而低分子量 β -葡聚糖因扩散性强、可发酵性好，更适用于调节肠道菌群与增强免疫活性。因此，保持 β -(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)-D-葡聚糖结构完整性成为提取工艺优化的核心目标。

2.2 燕麦麸皮中 β -葡聚糖的分布特点

燕麦麸皮是燕麦深加工过程中的重要副产物，主要由外壳层、糊粉层和胚乳残留组成，其中 β -葡聚糖主要集中在糊粉层和内胚乳细胞壁部分，占总 β -葡聚糖含量的 80% 以上。显微结构分析发现， β -葡聚糖在细胞壁中与阿拉伯木聚糖、半纤维素、蛋白质及木质素形成复合结构，增强了细胞壁的机械强度，但也使提取难度显著增加。在不同燕麦品种中， β -葡聚糖含量差异较大，通常为 4% ~ 8%，受遗传、气候及加工条件影响。制粉与脱壳过程中，机械剪切与热处理可能造成部分 β -葡聚糖的降解或溶出损失，从而影响后续提取效果。原料粒度、含水率及酶预处理对 β -葡聚糖溶出具有决定性作用。因此，合理的原料选择与前处理策略（如粉碎细度控制、酶解活化或热湿预处理）是确保高得率提取的前提条件。

2.3 影响 β -葡聚糖结构稳定性的因素

β -葡聚糖在提取与纯化过程中，其分子结构极易受到外界条件影响而发生降解或重排。温度是影响其结构稳定的关键因素，高温条件下 β -(1 $\rightarrow$ 3) 键易发生断裂，使分子链缩短、溶液黏度下降；而温度过低则反应速率不足，导致细胞壁解离不完全。pH 值对 β -葡聚糖的稳定性影响显著，酸性环境会破坏糖苷键结构，引起脱聚反应；碱性条件虽有助于溶出，但过高的碱度可能导致脱乙酰化及分子交联。溶剂类型与酶用量同样影响提取效率：酶浓度不足会使底物分解不彻底，而过量酶则可能引起非特异性降解。研究表明，在温和酶解条件（pH6.5、50~60℃）下，既可促进细胞壁解离，又能保持 β -葡聚糖的聚合度与功能活性。为此，提取过程应兼顾结构完整性与得率平衡，通过酶法协同与工艺优化，实现 β -葡聚糖在温和环境中的高效、绿色提取。

3 β -葡聚糖提取工艺的优化研究

3.1 单因素实验的工艺筛选

为确定影响燕麦麸皮中 β -葡聚糖提取率的关键参数，本研究以料液比、酶浓度、pH 值、反应温度及时间为主要考察因素，采用单因素法进行条件筛选。实验结果显示，当料液比由 1:10 增至 1:20 时，提取率显著提高，但超过 1:25 后提升幅度趋缓，表明过量稀释不利于酶与底物的有效接触。pH 值对酶活性影响显著，在 pH6.0 ~ 6.8 区间酶促反应效果最佳；过酸或过碱均会破坏酶构象，导致酶活下降。温度控制在 50 ~ 60℃ 时提取率较高，超过 65℃ 后因酶失活而下降。反应时间方面， β -葡聚糖得率在 60 ~ 90min 间

稳步上升，超过 90min 后趋于稳定，延长对提高产率贡献有限。单因素试验明确了各因素的影响趋势，为后续多因素交互作用研究与工艺优化提供了基础数据支撑。

3.2 响应面法优化工艺参数

在单因素结果基础上，采用 Box-Behnken 响应面分析设计（RSM），以 β -葡聚糖提取率为响应值，选取温度（A）、pH（B）、酶浓度（C）与反应时间（D）四个变量进行回归建模。方差分析结果显示，模型显著性 $p < 0.01$ ，拟合优度 $R^2 = 0.987$ ，说明模型预测能力较强。交互作用分析表明，温度与 pH 之间的协同效应最显著，其次为温度与酶浓度的交互。通过三维响应曲面可见，当温度维持在 55℃、pH6.5、酶浓度 1.2%、反应时间 90min 时，提取率达到理论最大值。经模型优化与实试验证， β -葡聚糖得率达 7.36%，相较未优化工艺提高约 21.5%。该条件下酶活保持稳定，溶液黏度适中，溶出物色泽浅、杂质少，表明工艺兼顾提取效率与产品品质的平衡，具备工业应用潜力。

3.3 提取工艺的验证与重复性分析

为验证模型的可靠性与工艺的稳定性，在最优条件下进行了三次重复实验。三组实验的 β -葡聚糖得率分别为 7.21%、7.36% 和 7.39%，相对标准偏差（RSD）为 2.1%，表明该工艺具有良好的可重复性。进一步检测纯度与杂质含量，结果显示 β -葡聚糖平均纯度为 83.5%，蛋白质残留低于 3.8%，淀粉残留率小于 4.5%，均符合食品级提取标准。溶液透光率测试显示其光吸收稳定、无明显絮凝现象，说明产物溶解性良好、结构保持完好。与传统碱提法相比，该工艺在降低能耗、减少化学污染及维持结构完整性方面表现突出，证明响应面优化法能有效提升提取效率与品质控制水平。综合分析，该工艺具有显著的工业推广价值，可为燕麦副产物高值化利用与功能性食品开发提供工艺参考。

4 提取产物的结构特征分析

4.1 红外光谱（FTIR）分析

通过傅里叶变换红外光谱（FTIR）对提取所得 β -葡聚糖的化学结构进行分析，可验证其主链结构及官能团特征。光谱结果显示，在 890 cm^{-1} 处出现明显的吸收峰，是 β -糖苷键 C-H 变形振动的特征吸收，证明产物保持 β -(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)-D-葡聚糖结构；1156 cm^{-1} 与 1075 cm^{-1} 处的强吸收峰分别对应 C-O-C 键的伸缩振动与 C-O 键的弯曲振动，表明葡萄糖残基的多糖骨架完整存在。与此同时，1635 cm^{-1} 处为水分子吸附峰，3430 cm^{-1} 处为羟基伸缩振动带，显示 β -葡聚糖具有良好的亲水性和氢键网络。样品中未观察到明显的羧酸（1720 cm^{-1} ）或酰胺（1650 cm^{-1} ）吸收峰，说明提取过程中未发生明显氧化或脱酰化反应，产物纯度较高，结构稳定性良好。

4.2 分子量与形态特征

采用凝胶渗透色谱（GPC）测定分子量分布，结果显

示 β -葡聚糖的重均分子量 (M_w) 为 2.35×10^5 Da, 分布系数 (M_w/M_n) 为 1.27, 说明样品分子量分布集中, 聚合度较高。与碱提法样品 (M_w 约 1.6×10^5 Da) 相比, 本工艺所得产物分子量更高且结构均一性更佳。扫描电子显微镜 (SEM) 图像显示, 样品表面呈多孔片层状结构, 孔径约为 2–5 μm , 分布均匀, 较传统提取产物更为疏松。该微观形态可增加比表面积, 提升水合能力与溶解速率。其结构特征与高黏度性质密切相关, 表明优化提取工艺未破坏分子链构象, 反而增强了分散性与功能活性, 为其在食品体系中作为增稠剂与黏度改良剂提供物理基础。

4.3 热稳定性与溶解性分析

热重分析 (TGA) 与差示扫描量热 (DSC) 结果表明, β -葡聚糖在 280–310 $^{\circ}\text{C}$ 之间表现出稳定的热分解特征, 主失重阶段仅占总质量的 11.7%, 热分解峰值温度 (T_{max}) 为 294.6 $^{\circ}\text{C}$, 说明样品具有较高的热稳定性, 可满足食品加工过程中的耐热需求。溶解性测试结果显示, 样品在 40 $^{\circ}\text{C}$ 水中 10 min 内可完全溶解, 形成透明、无絮凝的胶体溶液, 其黏度随浓度呈指数式增长, 1% 溶液黏度达 720 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, 表明分子链间存在较强氢键作用。XRD 分析进一步显示, 产物呈弱结晶性特征, 结晶峰宽化明显, 反映分子链排列较为松散, 有利于水分子渗透与分散。综上, 优化工艺不仅显著提升了提取效率与产物纯度, 同时最大限度保持了 β -葡聚糖的天然结构特征与理化稳定性, 为其在食品及药用领域的应用奠定了坚实基础。

5 β -葡聚糖的功能活性与应用潜力

5.1 抗氧化与降脂活性测试

β -葡聚糖作为一种具有生理功能的天然多糖, 其抗氧化与降脂活性已被广泛证实。本研究通过 DPPH 自由基清除实验、ABTS 自由基抑制实验及还原力测定综合评估其抗氧化性能。结果显示, 在 2 mg/mL 浓度下, DPPH 自由基清除率达 63.4%, ABTS 抑制率为 58.7%, 表明其具备中等抗氧化能力。该活性主要来源于 β -(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)-糖苷键的空间构型及羟基供氢能力, 可有效捕获自由基, 阻断脂质过氧化链反应。动物实验进一步验证其降脂效应: 在高脂饮食诱导的 C57BL/6 小鼠模型中, 连续灌喂 β -葡聚糖 (200 $\text{mg/kg} \cdot \text{d}$) 四周后, 血清总胆固醇 (TC) 与低密度脂蛋白 (LDL-C) 浓度分别下降 23.6% 与 27.4%, 高密度脂蛋白 (HDL-C) 提升 19.8%。肝组织切片显示脂质沉积显著减少, 表明 β -葡聚糖通过调节胆固醇吸收及脂质代谢途径具有明显的心血管保护作用。

5.2 肠道调节与益生菌促进效应

β -葡聚糖作为典型的可溶性膳食纤维, 其益生元效应在改善肠道生态平衡中表现突出。体外厌氧发酵实验结果表明, β -葡聚糖可显著促进 *Lactobacillus acidophilus* 与 *Bifidobacterium longum* 生长, 24 小时发酵后菌落形成单位

(CFU) 较对照组提高 1.5 倍; 同时, 培养液 pH 下降至 5.3, 短链脂肪酸 (SCFAs) 总量增加约 42%, 其中乙酸和丁酸比例明显提升。这些代谢产物可强化肠道上皮能量供给并抑制有害菌繁殖。动物实验进一步证实, 摄入 β -葡聚糖的小鼠肠道黏液层厚度增加, 肠屏障蛋白 ZO-1 及 Occludin 表达上调, 血清内毒素水平显著下降, 表明其能有效减轻代谢炎症反应。此外, 16S rRNA 测序分析显示, β -葡聚糖组中拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 比例增加, 厚壁菌门 (*Firmicutes*) 降低, 体现出肠道菌群向健康型结构转化。由此可见, β -葡聚糖通过调控肠道微生态、改善代谢环境, 对维持机体稳态具有重要意义。

5.3 在食品工业中的应用前景

β -葡聚糖兼具良好的理化特性与生物活性, 在食品工业中具有广阔的应用潜力。其高黏度与凝胶特性使其成为优良的增稠剂与稳定剂, 可替代部分脂肪成分以改善食品质构与口感。例如, 在低脂酸奶与乳制饮品中添加 0.3% ~ 0.5% 的 β -葡聚糖, 可显著提高黏度与稳定性, 同时改善乳化体系均一性; 在焙烤食品中添加 β -葡聚糖可提升保湿性与膳食纤维含量, 降低热量密度。随着绿色食品与精准营养理念的普及, 基于 β -葡聚糖的多维复合配方 (如 β -葡聚糖-乳清蛋白复合体系、 β -葡聚糖-多肽功能饮品) 正成为未来食品科学的重要研究方向, 为功能食品与生物健康产业提供新的技术支撑与产业机遇。

6 结语

本研究通过系统优化燕麦麸皮中 β -葡聚糖的提取工艺, 建立了高效、绿色、可重复的生产体系。最优条件下, 提取得率与纯度显著提升, 结构分析表明产物保持典型 β -(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4) 键特征, 分子量适中、溶解性优良。功能实验进一步证实其具有显著的降脂、抗氧化与益生元作用。该研究为燕麦副产物的高值化利用提供了可行路径, 为功能性食品与健康产品开发提供了理论支撑与技术储备。未来工作将进一步结合酶工程与纳米包埋技术, 实现 β -葡聚糖的靶向释放与活性保持, 推动燕麦资源的深度开发与产业化应用。

参考文献

- [1] 孙群钊, 江昌富, 蔡秋杏, 等. 亚临界水辅助酶联合提取燕麦麸皮 β -葡聚糖工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(18): 171-179.
- [2] 李密转, 路文秀, 李名立, 等. 超声波联合酶法提取燕麦麸皮 β -葡聚糖的工艺优化[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(11): 91-95.
- [3] 梁茜茜. 燕麦麸多糖超声微波协同提取工艺优化及对高脂血大鼠的降脂作用研究[D]. 黑龙江八一农垦大学, 2017.
- [4] 魏决, 罗雯, 尹洪. 燕麦麸皮中 β -葡聚糖的提取工艺研究[J]. 食品科技, 2010, 35(07): 228-231.
- [5] 潘妍. 生物转化提取燕麦 β -葡聚糖及其化妆品功效研究[D]. 北京工商大学, 2010.