DOI:10.12441/spyswjs.20230402001 [文章编号] 1673-1689(2025)07-0094-09

燕麦β-葡聚糖结构表征与溶液性质研究

张红利[1] 史雅凝[2] 缪 铭[1*]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 南京农业大学食品科技学院,江苏 南京 210095)

摘要:【目的】对燕麦β-葡聚糖(OBG)进行结构表征和溶液性质研究。**【方法】**采用热水提取和乙醇分级的方法制备了2种不同重均分子量(M_w)、数均分子量(M_n)、峰值分子量(M_p)的可溶性OBG。通过傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、核磁共振(NMR)、X-衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、高效尺寸排阻色谱串联多角度激光散射(HPSEC-MALLS)和流变仪等对其进行结构表征和溶液性质测定。**【结果】**OBG-1和OBG-2的M_w分别为80.73×10^4、8.05×10^4 g/mol,得率分别为(4.86±0.55)%、(3.32±0.31)%,纯度分别为(94.21±0.17)%、(90.43±0.34)%。2种OBG均是由β-D-吡喃葡萄糖通过β-(1,3)-糖苷键和β-(1,4)-糖苷键混合连接的纤维状葡聚糖。与OBG-2相比,OBG-1结构中含有更多的纤维三糖(DP3)和纤维四糖(DP4),且其表面较光滑;另外,OBG-1在水溶液中表现出高黏度和凝胶性能。**【结论】**与单一的检测方法相比,多种仪器联合使用验证OBG结构与溶液性质的方法更加可靠,为其活性研究和在生理功能方面的应用提供了参考。

关键词:燕麦;β-葡聚糖;结构;溶液性质

Structural and Solution Property Characterization of Oat β-Glucans

ZHANG Hongli[1] *SHI Yaning*[2] *MIAO Ming*[1*]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to characterize the structure and investigate the solution properties of oat β-glucan (OBG). [**Method**] Two soluble OBGs with different weigh-average molecular weights (M_w), number-average molar weights (M_n), and peak molecular weights (M_p) were prepared by hot water extraction and ethanol classification. The structures and solution properties were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), nuclear magnetic resonance (NMR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), high performance size exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering (HPSEC-MALLS), and rheology. [**Result**] OBG-1 and OBG-2 showed the M_w of 80.73×10^4 g/mol and 8.05×10^4 g/mol, the yields of (4.86±0.55)% and (3.32±0.31)%, and the purity of (94.21±0.17)% and (90.43±0.34)%, respectively. Both OBG-1 and OBG-2 were fibrous glucans composed of β-D-glucopyranose molecules linked by β-(1,3)-glycosidic and β-(1,4)-glycosidic bonds. OBG-1 contained more cellotriose and cellotetrose and had a smoother surface than OBG-2. In the aqueous solution, OBG-1 exhibited high viscosity and gel properties. [**Conclusion**] The method combining multiple instruments to characterize the structure and solution properties of OBG is more reliable than single characterization methods, providing a reference for the research on the activity and physiological functions of OBG.

Keywords: oat; β-glucan; structure; solution property

OBG是一种由β-D-吡喃葡萄糖通过β-(1,3)-糖苷键和β-(1,4)-糖苷键连接的高黏度线性同多

基金项目:国家"十四五"重点研发计划项目(2022YFF1100101)。

通信作者:缪铭(1980—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事碳水化合物研究。E-mail:miaoming@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2023-04-02 **修回日期:**2023-05-24

糖。它广泛存在于燕麦胚乳和糊粉层细胞壁中[1]，具有调节血糖、保护肠道、提升免疫力、抗癌等多种健康功效[2-7]。β-葡聚糖的生理活性与其相对分子质量密切相关，有研究表明，大分子OBG（50×10^4 g/mol）因具有较强的黏度效应，表现出平衡血糖、控制体质量、降低胆固醇的作用[8-9]；而小分子β-葡聚糖（4×10^4 g/mol）在预防小鼠动脉粥样硬化及缓解紫外线照射引起的皮肤光老化等方面的效果更显著[10-11]。因此，系统研究不同相对分子质量OBG的溶液性质，有助于阐明其溶液性质与生理活性之间的关系。

OBG的生理活性由其溶液性质决定，而多糖的溶液性质通常受多糖结构的影响。以往研究认为β-葡聚糖的溶液性质由DP3决定[12-13]，但近年来同质结构模型已被广泛认可，因此，确定β-（1，4）-糖苷键连接片段的具体长度和分布，有助于系统解析β-葡聚糖的精细结构。作者通过热水提取和乙醇分级法从燕麦中提取、分离了2种不同相对分子质量的OBG，并综合运用FT-IR、NMR、XRD、SEM、HPSEC-MALLS和流变仪等对其结构和溶液性质进行比较，以期为OBG的活性机制研究和在生理功能领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

燕麦：江苏梁丰食品集团有限公司；β-（1，3）-（1，4）-葡聚糖酶、耐热α-淀粉酶：德国默克公司；无水乙醇、氯化氢、氢氧化钠、碘化钾、碘：国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

离子色谱仪：ICS5000型，美国赛默飞世尔科技公司；FT-IR：IS10型，美国Nicolet公司；XRD：D2 PHASER型，德国Bruker AXS有限公司；NMR：AVANCE NEO型，德国布鲁克公司；水浴恒温振荡器：THZ-82型，常州国华电器有限公司；SEM：SU8100型，日本株式会社日立高新技术公司；旋转流变仪：DHR-3型，美国TA公司。

1.3 方法

1.3.1 OBG的制备

OBG的制备参考Karimi等[14]的方法并稍加修改。准确称取500 g颗粒大小均匀的燕麦，经粉碎机粉碎，加入10倍体积的蒸馏水，浸泡20 min。随后用蒸馏水洗涤3次，过80目筛，收集残渣，于40 ℃干燥12 h得到粗燕麦麸皮。称取200 g粗燕麦麸皮，加入10倍体积的乙醇溶液（体积分数为80%），在80 ℃条件下回流2 h，以6 000 r/min离心15 min，取沉淀于40 ℃烘干12 h得到精制燕麦麸皮。称取100 g精制燕麦麸皮，按料液比1 g∶10 mL加入蒸馏水，于80 ℃热水中提取1 h，离心后保留上清液。对残渣进行2次提取，合并2次上清液，加热至90 ℃，加入耐热α-淀粉酶（最终酶活力为5×10^{-3} U/mL），持续搅拌至碘液检测不变蓝（即淀粉完全水解）。将提取液冷却至室温，用2 mol/L的HCl调pH至4.5，离心后取上清液；随后用2 mol/L的NaOH调pH至7.0，将样品溶液浓缩至原体积的1/3。浓缩液透析3 d，加入无水乙醇至终体积分数为30%，于4 ℃静置12 h，离心收集沉淀，加水复溶后冷冻干燥，得到样品OBG-1。取第一次离心后的上清液，继续加入无水乙醇至终体积分数为50%，于4 ℃静置12 h，离心收集沉淀，加水复溶后冷冻干燥，得到样品OBG-2。

1.3.2 OBG得率

OBG得率是指在提取过程中得到的OBG质量与燕麦全粉质量的百分比，按式（1）计算。

$$Y=\frac{m_1}{m_2}\times100\% \quad (1)$$

式中：

Y——OBG得率，%；

m_1——OBG质量，g；

m_2——燕麦全粉质量，g。

1.3.3 OBG纯度的测定

采用双酶法对OBG纯度进行测定[15]。精确称取100 mg OBG样品，加入0.2 mL体积分数50%的乙醇溶液和4 mL磷酸钠缓冲液（20 mmol/L，pH 6.5），涡旋混匀，于沸水浴中加热3 min，期间每隔1 min搅拌一次。将样品于50 ℃孵育5 min，加入0.2 mL的地衣酶（10 U/mL），继续在50 ℃孵育1 h，每隔15 min搅拌一次。随后加入5 mL醋酸钠缓冲液（200 mmol/L，pH 4.0），搅拌后静置5 min，以1 000 r/min离心10 min。

分别取0.1 mL上清液置于3支试管中（编号1~3）。1号和2号试管各加入0.1 mL β-葡萄糖苷酶，3号试管加入0.1 mL醋酸钠缓冲液（50 mmol/L，pH 4.0）。所有试管均于50 ℃孵育

10 min，加入 3 mL GOPOD 试剂，继续于 50 ℃孵育 20 min，最后用紫外分光光度计测定 510 nm 处的吸光度。以蒸馏水作为空白对照，葡聚糖作为标准品对照，计算 OBG 纯度。

1.3.4 M_n、M_w、M_p的测定

准确称取 20 mg OBG 样品，用去离子水配制成 5 mg/mL 的溶液，经沸水助溶后用 0.22 μm 混合纤维素酯膜过滤，采用 HPSEC-MALLS 测定样品的 M_n、M_w 和 M_p。仪器配备 ShoDEx-OHpak SB-806M HQ（8 mm×300 mm×13 μm）和 ShoDEx-OHpak SB-803 M HQ 色谱柱（8 mm×300 mm×6 μm），进样量为 500 μL，流动相为体积分数 0.1% 的 $NaNO_3$ 溶液，流量为 1 mL/min，柱温为 25 ℃。

1.3.5 酶法分析多糖结构

β-葡聚糖的结构分析参考 Lin 等[16]的方法并稍加修改。准确称取 50 mg OBG 样品，用去离子水配制成 5 mg/mL 的溶液。于 50 ℃预热 10 min，加入 β-葡聚糖酶（酶活力 1 U/mL），在 50 ℃水浴中反应 48 h，反应结束后立即置于沸水浴中加热 5 min 以终止反应。将反应液用 0.22 μm 混合纤维素酯膜过滤，用离子色谱仪分析检测。色谱柱为 CarboPac™ PA200（3 mm×250 mm×1 mm），进样量为 20 μL。流动相 A 为 1 mol/L 的 NaAC 溶液，流动相 B 为 0.25 mol/L 的 NaOH 溶液，流量为 0.5 mL/min。洗脱程序为：0~40 min 时，流动相 A 的体积分数为 4%~40%；40~50 min 时，流动相 A 的体积分数为 4%。

1.3.6 FT-IR 分析

采用 FT-IR 对 OBG 进行结构鉴定，取适量样品粉末，置于 FT-IR 检测器上，光谱采集范围为 4 000~500 cm^{-1}，分辨率为 2 cm^{-1}，操作环境温度为 25 ℃。

1.3.7 ^{13}C-NMR 分析

参考 Liu 等[17]的方法并稍加修改。称取 50 mg OBG-1 和 50 mg OBG-2 样品，分别溶于 1.5 mL D_2O 中，以 8 000 r/min 离心 15 min，取上清液转移至核磁管中进行 ^{13}C-NMR 分析。共振频率为 150 MHz，扫描次数为 10 240 次。

1.3.8 XRD 分析

使用 XRD 在 Cu-Kα 辐射下分析样品。测定条件为铜靶，管流为 30 mA，管压为 30 kV，扫描速度 3（°）/min，扫描步长为 0.04°，扫描范围为 4~50°。扫描方式为连续扫描，重复 3 次。

1.3.9 SEM 分析

取适量 OBG-1 和 OBG-2 样品分别置于样品台上进行喷金处理，使用 SEM 观察样品表面形貌特征。工作条件为：加速电压 15 kV，放大倍率 3 000 倍，选取代表性区域进行摄影记录。

1.3.10 流体力学方程的建立

称取 3 g OBG-1 和 6 g OBG-2 分别溶于蒸馏水，配制成质量浓度分别为 40、60、80、100、120 mg/mL 的 OBG-1 溶液和质量浓度分别为 60、120、180、240、300 mg/mL 的 OBG-2 溶液，置于流变仪上测定不同质量浓度 OBG 的表观黏度。温度为 25 ℃，夹具为 40 mm 不锈钢平板，剪切速率为 1~100 s^{-1}。

1.3.11 黏弹性测定

称取 3 g OBG-1 和 6 g OBG-2 分别溶于蒸馏水，配制成质量浓度分别为 40、60、80、100、120 mg/mL 的 OBG-1 溶液和质量浓度分别为 60、120、180、240、300 mg/mL 的 OBG-2 溶液，置于流变仪上测定该葡聚糖胶体的黏弹性曲线，温度为 25 ℃，夹具为 40 mm 不锈钢平板，扫描范围为 0.01~500.00 rad/s。

1.3.12 特性黏度测定

用乌式黏度计在 25 ℃下测定了不同相对分子质量的 OBG 溶液在水中的特性黏度。由于动能可忽略不计，利用 Huggins 和 Kraemer 方程计算特性黏度。

1.4 数据统计与分析

每组试验至少重复 3 次，采用 Origin 2018 作图，利用 SPSS Statistics 25 软件对数据进行显著性分析，$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 OBG 的得率和纯度

经过热水提取与乙醇分级处理，成功获得了 2 种 β-葡聚糖组分，其得率和纯度见表 1。OBG-1 和 OBG-2 的得率分别为（4.86±0.55）%和（3.32±0.31）%，纯度分别为（94.21±0.17）%和（90.43±0.34）%。与燕麦麸皮相比，该处理工艺可有效降低燕麦麸皮中不溶性纤维素质量分数，使水溶性 β-葡聚糖得到富集。该提取工艺设备简单、操作便捷，可用于大批量工业化生产。

表1　OBG的得率和纯度

Table 1　Yield and purity of OBG　　单位：%

样品	纯度	得率
原料	9.85±0.36^{c}	
OBG-1	94.21±0.17^{a}	4.86±0.55^{a}
OBG-2	90.43±0.34^{b}	3.32±0.31^{b}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2　结构表征

2.2.1　OBG的M_n、M_w和M_p

OBG-1和OBG-2的M_w分别为80.73×10^4、8.05×10^4 g/mol，多分散性指数（即M_w/M_n）分别为1.24和1.11，见表2。多分散性指数表示多糖的相对分子质量分布，其值越接近1，表示多糖的相对分子质量分布越集中，样品纯度越高[18]。结果表明，OBG-1的相对分子质量较为分散，而OBG-2的相对分子质量分布则相对集中且均一，见图1。

表2　OBG的M_n、M_w、M_p和多分散指数

Table 2　M_n, M_w, M_p, and polydispersion index of OBG

样品	M_n/（×10^4 g/mol）	M_w/（×10^4 g/mol）	M_p/（×10^4 g/mol）	多分散性指数
OBG-1	65.10^{a}	80.73^{a}	85.67^{a}	1.24
OBG-2	6.29^{b}	8.05^{b}	8.28^{b}	1.11

注：同列不同小字母表示差异显著（P<0.05）。

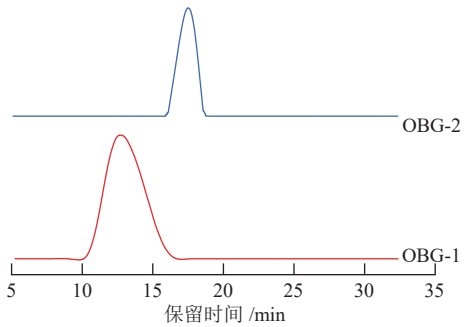


图1　OBG的M_w分布图

Fig. 1　M_w distribution of OBG

2.2.2　OBG的链长分布结构

β-(1,3)-(1,4)-葡聚糖酶能够专一性水解β-葡聚糖中的β-(1,3)-糖苷键，从而生成低聚寡糖。样品OBG-1和OBG-2的链长分布见表3。DP3和DP4是OBG的主要组成片段，总占比约为90%，DP3与DP4的比值为1.4，β-(1,4)-糖苷键和β-(1,3)-糖苷键的比值为2.3。相比于OBG-2，OBG-1中含有的DP3、DP4、DP5、DP6和DP9占比较高，均超过1%。研究表明，在同一种燕麦中，DP3与DP4的比值越高，即DP3的数量越多，溶解性越差；反之，DP4数量越多，其刚性越大，越倾向于呈现缔合状态[19]。

表3　OBG链长分布结果

Table 3　Chain length distribution of OBG　　单位：%

样品	DP3占比	DP4占比	DP5占比	DP6占比	DP7占比	DP8占比	DP9占比
OBG-1	52.72^{Aa}	37.65^{Ab}	4.09^{Ac}	2.23^{Ad}	0.60^{Af}	0.53^{Bg}	1.03^{Ae}
OBG-2	52.62^{Ba}	36.56^{Bb}	3.81^{Bc}	1.89^{Bd}	0.25^{Bf}	0.62^{Ae}	0.27^{Bf}

注：不同小字母表示同行差异显著（P<0.05）；不同大写字母表示同列差异显著（P<0.05）。

2.2.3　FT-IR结果

FT-IR是研究聚合物结构的常用手段，OBG的FT-IR结果见图2。3 300 cm^{-1}处的宽峰由O—H的伸缩振动引起，为糖类物质的特征吸收峰。在2 930 cm^{-1}处的峰是糖类中CH_3、CH_2和CH基团中C—H的伸缩振动引起的，由此可进一步验证该化合物为糖类物质。1 650 cm^{-1}处出现一个弱吸收峰，这是β-葡聚糖与表面吸附的水分子相互作用的结果，表明OBG中含有少量结晶水。1 040 cm^{-1}处的强吸收峰是吡喃糖的醚键和羟基的吸收峰。895 cm^{-1}处的吸收峰为C-1位的伸缩振动，即β-糖苷键的特征吸收峰[20-21]。综上所述，从燕麦中分离的2种多糖组分OBG-1和OBG-2的FT-IR特征性结果一致，可初步判定两者为同种物质。

2.2.4　^{13}C-NMR结果

OBG的^{13}C-NMR谱图见图3，可以看出2种

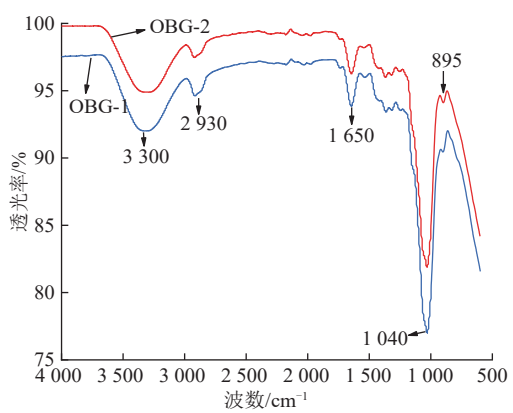


图2　OBG的FT-IR图

Fig. 2　FT-IR spectrum of OBG

OBG的化学位移没有明显差异。OBG中含有4种类型的葡萄糖残基，分别为前端接连β-(1,4)-葡萄糖残基的β-(1,4)-葡萄糖残基，后端连接β-(1,3)-葡萄糖残基的β-(1,4)-葡萄糖残基、β-(1,3)-葡萄糖残基、前端接连β-(1,3)-葡萄糖残基的β-(1,4)-葡萄糖残基，见图4。

结合OBG分子结构图分析^{13}C-NMR谱图，其特征信号峰见图3。在化学位移90~100处无信号峰，说明该样品中不含有α-葡萄糖的异头碳，表明提取物OBG中不含淀粉，同时也说明该分子端为还原端。在化学位移100以上的低场范围内，出现2组清晰的共振信号，分别由β-(1,3)-葡萄糖残基和β-(1,4)-葡萄糖残基的C-1位化学位移低场偏移所致，化学位移约为105，该结果与Dais等[22]的研究一致。其中3-*O*-取代残基上的C-2位到C-6位仅观察到1组尖锐的单共振峰，证实OBG中β-(1,3)-糖苷键是单独存在的[17,23]。在化学位移66以下区域，仅存在一类碳信号，表明这个C-6位未参与成键[24]。此外，根据C-3位(化学位移86.61)和C-4位(化学位移81.28)信号的积分值计算出β-(1,3)-糖苷键和β-(1,4)-糖苷键的比值为1∶2.4，与酶水解的结果一致[25-26]。结合FT-IR结果可推测：从燕麦中分离的2种OBG均为β-*D*-吡喃葡萄糖通过β-(1,3)-糖苷键和β-(1,4)-糖苷键混合连接形成的β-葡聚糖。

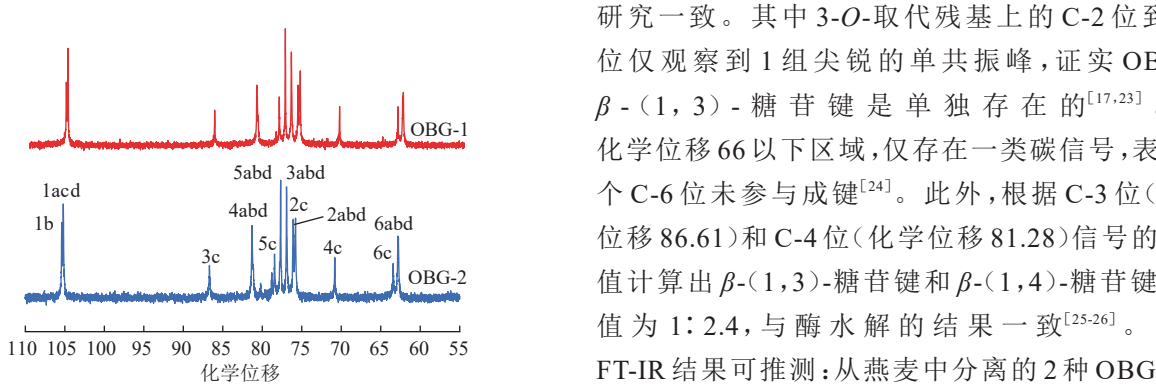


图3 OBG的^{13}C-NMR谱图

Fig. 3 ^{13}C-NMR spectra of OBG

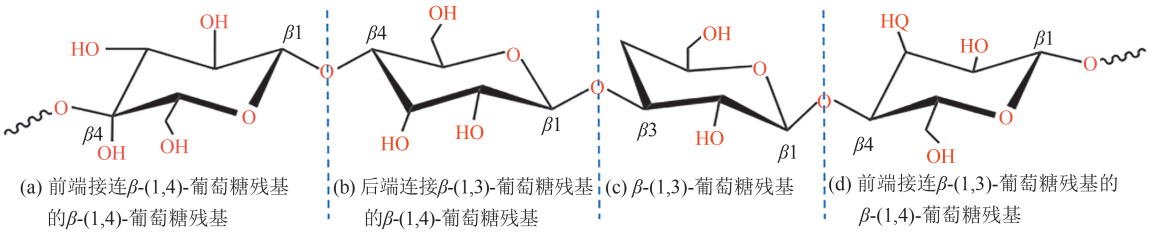


图4 OBG的葡萄糖残基

Fig. 4 Glucose residues of OBG

2.2.5 XRD结果

2种OBG的XRD谱图见图5。两者晶体特征衍射峰有所差异：OBG-1有一个较宽的结晶衍射峰，表明样品结晶部分存在多种晶形和晶格类型；OBG-2则表现为非晶态的弥散峰，说明小分子的OBG-2并没有形成结晶区，这与Lin等[16]的结论一致。OBG-1在2θ=13°只呈现一个衍射峰，这可能是由于大分子的OBG-1不易形成凝胶，但其能够形成大聚集体，导致大分子样品中存在微凝胶与大分子缠结现象[27-28]。此外，OBG-1的衍射峰相较于OBG-2更宽，进一步证实其内部存在多种晶格种类。2种OBG呈现不同的XRD结果是由样品相对分子质量、构象及自身结构决定的，这与大麦葡聚糖和地衣葡聚糖的结果一致[29-30]。

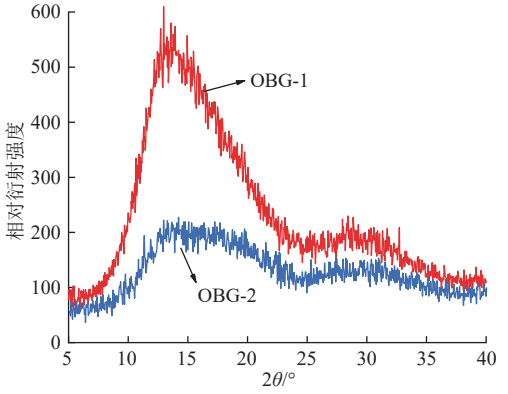
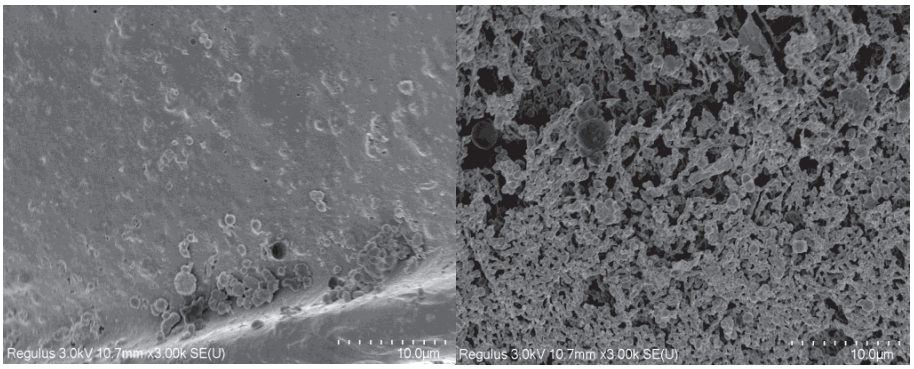


图5 OBG的XRD谱图

Fig. 5 XRD spectrum of OBG

2.2.6 SEM结果

SEM是观察材料表面特征的有效工具，OBG冻干后的表面形貌见图6。OBG-2表面呈现多孔



(a) OBG-1　　(b) OBG-2

图 6　OBG 的 SEM 结果（3 000×）

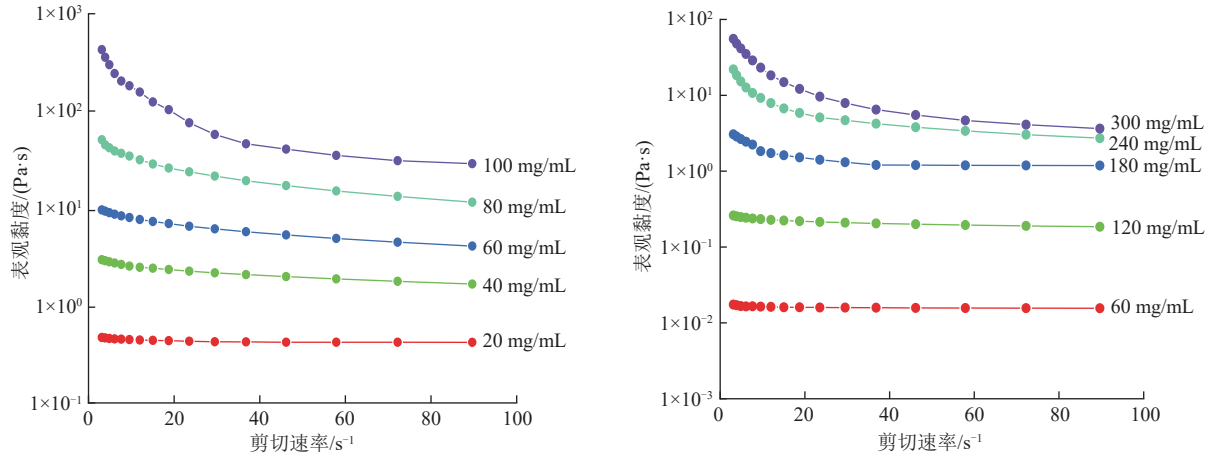
Fig. 6　SEM results of OBG (3 000×)

的不规则团簇状结构，这些团簇表面致密且无明显细孔。这种致密的微观结构表明小分子OBG-2中可能存在高强度的拓扑结构，进而导致分子间聚集；而这种致密的微孔结构有望产生更强的吸附能力和更好的持水性[31]。OBG-1表面较为粗糙，由许多圆形颗粒组成，这可能是大分子多糖间相互交联形成了更大尺寸聚集体的结果，该现象与XRD图中存在晶体衍射峰的结果一致[32]。

2.3　流变学性质分析

2.3.1　剪切速率对表观黏度的影响

分别配制由低到高5个质量浓度的OBG溶液，在剪切速率为0.1~90.0 s^{-1}时，利用动态流变仪测定其流动曲线，见图7。在该剪切速率范围内，2种OBG溶液的表观黏度均随质量浓度的升高而增大；不同质量浓度的β-葡聚糖溶液均表现出非牛顿流体的假塑性流体特征，即溶液的黏度随剪切速率的增加而减小，这是多糖溶液的典型特征，这对改善食品质地和口感具有重要作用[33-34]。这可能是由于随着剪切速率变大，剪切力作用增强，聚合物链在流动方向上逐渐对齐，导致分子链内与链间的相互作用力逐渐减弱，引发多糖分子链间解缠结，进而使溶液呈分散状态，表观呈现剪切稀化现象[35-36]。



(a) OBG-1　　(b) OBG-2

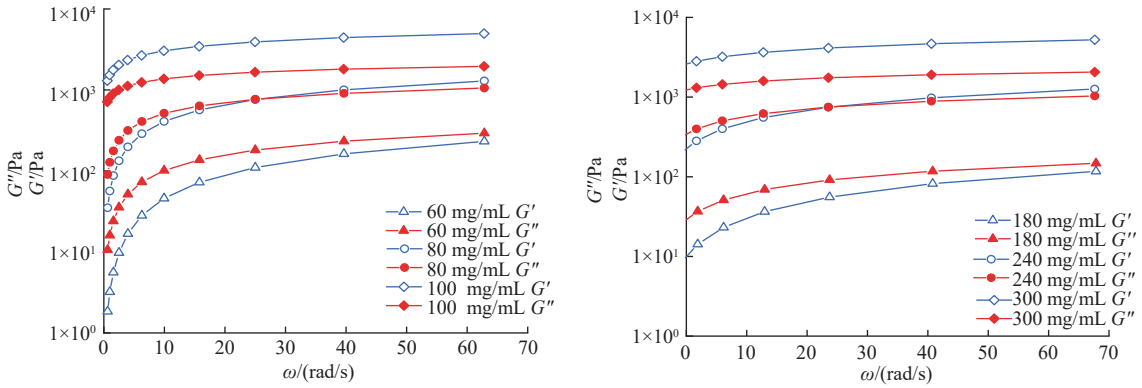
图 7　不同质量浓度OBG溶液的流动曲线

Fig. 7　Hydrodynamic curves of OBG solutions with different mass concentrations

2.3.2　凝胶黏弹性结果

在规定的角频率（ω）范围内（1×10^{-2}~1×10^{2} rad/s），储能模量（G'）远大于损耗模量（G''），且G'和G''基本不依赖于ω的变化，即G'和G''在该ω范围内相互平行，表明该样品形成了典型的凝胶体系[37]。为分析OBG凝胶特性，对不同质量浓度的OBD溶液进行频

率扫描，样品OBG的G'和G''随ω的变化趋势见图8。当OBG-1质量浓度为60 mg/mL时，该样品的G'和G''随ω变化的幅度较大，且G''始终大于G'，说明该质量浓度下样品溶液属于黏性溶液，无法形成凝胶。当OBG-1质量浓度为80 mg/mL时，G'和G''随ω增大而上升，并且在25 rad/s时，G'=G''（溶胶-凝胶转变点）；当ω大于25 rad/s时，样品呈现凝胶状态。这表明质量浓度为80 mg/mL虽然可以形成凝胶，但G'和G''仍随ω有微小波动。当OBG-1质量浓度为100 mg/mL，若ω大于20 rad/s，样品可形成典型的凝胶结构，即G'>G''且两者均不随ω变化。此外，OBG-2的溶胶-凝胶转变点为240 mg/mL，与樊蕊[38]的研究结果类似。综上，在给定质量浓度条件下，2种OBG均能形成凝胶。



(a) OBG-1　　(b) OBG-2

图8　OBG的G'和G''随ω的变化结果

Fig. 8　Variations in G' and G'' of OBG with ω

2.3.3　OBG特性黏度结果

多糖的特性黏度与其相对分子质量密切相关，不同质量浓度OBG的特性黏度曲线见图9。β-葡聚糖在达到一定质量浓度时会形成水溶胶，其特性黏度变化总体上随多糖质量浓度的增加呈指数增长趋势，这与大麦多糖的性质一致[39]。这可能是由于随着多糖质量浓度的增加，分子运动空间受限，导致分子自由度降低，进而使分子间与分子内的摩擦力和静电相互作用增强，使得多糖在超过特定质量浓度后保持较高的特性黏度[40]。

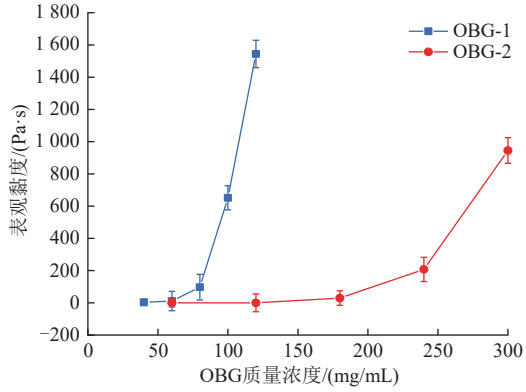


图9　OBG的特性黏度曲线

Fig. 9　Characteristic viscosity curve of OBG

结果表明，相对分子质量较大的OBG-1，在质量浓度较低（<80 mg/mL）时，特性黏度变化趋势较平缓；当质量浓度较高（>80 mg/mL）时，特性黏度迅速增加并呈指数增长，且在质量浓度为100 mg/mL时形成凝胶状结构。相对分子质量较小的OBG-2变化趋势与OBG-1相似，但其在质量浓度达到240 mg/mL时才会形成明显的凝胶。

3　结论

从燕麦中分离出的多糖OBG-1和OBG-2的M_w分别为80.73×10^4、8.05×10^4 g/mol，得率分别为（4.86±0.55）%和（3.32±0.31）%，纯度分别为（94.21±0.17）%和（90.43±0.34）%。结合酶水解、FT-IR、NMR和SEM的结果发现，2种OBG均是由β-D-吡喃葡萄糖通过β-（1，3）-糖苷键和β-（1，4）-糖苷键混合连接的纤维状葡聚糖；酶水解和SEM结果显示，OBG-1结构中含有更多的DP3和DP4结构单元且其表面较光滑，而OBG-2表面呈现多孔、不规则的团簇状结构；XRD谱图显示，OBG-1为晶体与非晶体的混合结构，而OBG-2结晶性较低，呈无定形结构。另外，与OBG-2相比，OBG-1在水溶液中表现出更高的黏度和更强的凝

胶性能。相较于单一的检测方法，多种仪器联用对OBG结构与溶液性质的验证结果更具可靠性。然而，由于天然多糖连接方式和结构的复杂性以及其在普通溶剂中有限的溶解度，限制了多糖的研究，因此，明确OBG的结构、溶液性质与生物活性之间的关系仍需开展进一步研究。

参考文献

[1] GRUNDY M M L, FARDET A, TOSH S M, et al. Processing of oat: the impact on oat's cholesterol lowering effect[J]. Food & Function, 2018, 9(3): 1328-1343.

[2] VENKATACHALAM G, ARUMUGAM S, DOBLE M. Industrial production and applications of *α*/*β* linear and branched glucans[J]. Indian Chemical Engineer, 2021, 63(5): 533-547.

[3] ZHENG Z M, HUANG Q L. New insight into the structure-dependent two-way immunomodulatory effects of water-soluble yeast *β*-glucan in macrophages[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119569.

[4] XIN Y J, JI H, CHO E, et al. Immune-enhancing effect of water-soluble beta-glucan derived from enzymatic hydrolysis of yeast glucan[J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2022, 30: 101256.

[5] BŁASZCZYK K, GAJEWSKA M, WILCZAK J, et al. Oral administration of oat beta-glucan preparations of different molecular weight results in regulation of genes connected with immune response in peripheral blood of rats with LPS-induced enteritis[J]. European Journal of Nutrition, 2019, 58(7): 2859-2873.

[6] HENRION M, FRANCEY C, LÊ K A, et al. Cereal *β*-glucans: the impact of processing and how it affects physiological responses[J]. Nutrients, 2019, 11(8): 1729.

[7] DU B, NIE S P, PENG F, et al. A narrative review on conformational structure characterization of natural polysaccharides[J]. Food Frontiers, 2022, 3(4): 631-640.

[8] KIVELÄ R, PITKÄNEN L, LAINE P, et al. Influence of homogenisation on the solution properties of oat *β*-glucan[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(6/7): 611-618.

[9] SMULDERS M J M, WIEL C C M, BROECK H C, et al. Oats in healthy gluten-free and regular diets: a perspective[J]. Food Research International, 2018, 110: 3-10.

[10] DONNELLY J P, BADDLEY J W, WANG H E. Antibiotic utilization for acute respiratory tract infections in US emergency departments[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2014, 58(3): 1451-1457.

[11] 翟春涛，卢向艳，金敏蓉，等. 一种中小分子量燕麦*β*-葡聚糖的制备方法和应用：CN109536546B[P]. 2021-03-19.

[12] LI S, HUANG Y, WANG S, et al. Determination of the triple helical chain conformation of *β*-glucan by facile and reliable triple-detector size exclusion chromatography[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2014, 118(3): 668-675.

[13] FLORCZUK A, ZAŁĘCKI M, ALJEWICZ M. The applicability of Calcofluor White (CWS) and Fluorescent Brightener (CFB) dyes for confocal laser microscopic analysis (CLSM) of various *β*-glucans in selected dairy products and water[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134508.

[14] KARIMI R, AZIZI M H, XU Q. Effect of different enzymatic extractions on molecular weight distribution, rheological and microstructural properties of barley bran *β*-glucan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 298-309.

[15] MAHESHWARI G, SOWRIRAJAN S, JOSEPH B. Extraction and isolation of *β*-glucan from grain sources: a review[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(7): 1535-1545.

[16] LIN H T, YEH A I, HO T D, et al. Molecular weight, chain length distribution and long-term retrogradation of cassava starch modified by amylomaltase[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108027.

[17] LIU J, ZHANG X M, ZHANG J S, et al. Research on extraction, structure characterization and immunostimulatory activity of cell wall polysaccharides from *Sparassis latifolia*[J]. Polymers, 2022, 14(3): 549.

[18] 黄超. 水溶性(1-3)(1-6)-*α*-*D*-葡聚糖的结构与性质研究[D]. 无锡：江南大学，2015.

[19] BENITO-ROMÁN Ó, ALONSO E, GAIROLA K, et al. Fixed-bed extraction of *β*-glucan from cereals by means of pressurized hot water[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2013, 82: 122-128.

[20] WIERCIGROCH E, SZAFRANIEC E, CZAMARA K, et al. Raman and infrared spectroscopy of carbohydrates: a review[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017, 185: 317-335.

[21] HUSSAIN P R, RATHER S A, SURADKAR P P. Structural characterization and evaluation of antioxidant, anticancer and hypoglycemic activity of radiation degraded oat (*Avena sativa*) *β*-glucan[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 144: 218-230.

[22] DAIS P, PERLIN A S. High-field, ^{13}C-N. M. R. spectroscopy of *β*-*D*-glucans, amylopectin, and glycogen[J]. Carbohydrate Research, 1982, 100(1): 103-116.

[23] COLLEONI-SIRGHIE M，FULTON D B，WHITE P J. Structural features of water soluble（1，3）（1，4）-β-*D*-glucans from high-β-glucan and traditional oat lines[J]. Carbohydrate Polymers，2003，54(2)：237-249.

[24] 申瑞玲. 燕麦β-葡聚糖的提取纯化及功能特性研究[D]. 无锡：江南大学，2005.

[25] ROUBROEKS J P，ANDERSSON R，MASTROMAURO D I，et al. Molecular weight，structure and shape of oat（1→3），（1→4）-β-*D*-glucan fractions obtained by enzymatic degradation with（1→4）-β-*D*-glucan 4-glucanohydrolase from *Trichoderma reesei*[J]. Carbohydrate Polymers，2001，46(3)：275-285.

[26] PÉREZ-QUIRCE S，LAZARIDOU A，BILIADERIS C G，et al. Effect of β-glucan molecular weight on rice flour dough rheology，quality parameters of breads and *in vitro* starch digestibility[J]. LWT-Food Science and Technology，2017，82：446-453.

[27] REN Y，ELLIS P R，ROSS-MURPHY S B，et al. Dilute and semi-dilute solution properties of（1→3），（1→4）-β-*D*-glucan，the endosperm cell wall polysaccharide of oats（*Avena sativa* L.）[J]. Carbohydrate Polymers，2003，53(4)：401-408.

[28] WU J，LI L L，WU X Y，et al. Characterization of oat（*Avena nuda* L.）β-glucan cryogelation process by low-field NMR[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2016，64(1)：310-319.

[29] ZHAO Y，ZHOU H M，HUANG Z H，et al. Different aggregation states of barley β-glucan molecules affects their solution behavior：a comparative analysis[J]. Food Hydrocolloids，2020，101：105543.

[30] BAI Y P，ZHOU H M，ZHU K R，et al. Effect of thermal processing on the molecular，structural，and antioxidant characteristics of highland barley β-glucan[J]. Carbohydrate Polymers，2021，271：118416.

[31] KARP S，WYRWISZ J，KUREK M A. Comparative analysis of the physical properties of o/w emulsions stabilised by cereal β-glucan and other stabilisers[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2019，132：236-243.

[32] GONG J N，WANG L，WU J Y，et al. The rheological and physicochemical properties of a novel thermosensitive hydrogel based on konjac glucomannan/gum tragacanth[J]. LWT-Journal of Food Science and Technology，2019，100：271-277.

[33] ZIELKE C，STRADNER A，NILSSON L. Characterization of cereal β-glucan extracts：conformation and structural aspects[J]. Food Hydrocolloids，2018，79：218-227.

[34] 汪海波，刘大川，谢笔钧. 燕麦中β-葡聚糖的提取及分离纯化工艺研究[J]. 食品科学，2004，25(5)：143-147.
WANG H B，LIU D C，XIE B J. Extraction and purification of β-（1→3）（1→4）*D*-glucan from oat[J]. Food Science，2004，25(5)：143-147.（in Chinese）

[35] 赵兰. 谷物β-葡聚糖凝胶的制备及其缓释特性[D]. 福州：福州大学，2017.

[36] 张田，于寒松. 燕麦和大麦β-葡聚糖的生理功能研究进展[J]. 粮食与油脂，2022，35(3)：22-24，29.
ZHANG T，YU H S. Research progress on physiological functions of oat and barley β-glucan[J]. Cereals & Oils，2022，35(3)：22-24，29.（in Chinese）

[37] NORONHA J C，ZURBAU A，WOLEVER T M S. The importance of molecular weight in determining the minimum dose of oat β-glucan required to reduce the glycaemic response in healthy subjects without diabetes：a systematic review and meta-regression analysis[J]. European Journal of Clinical Nutrition，2022，77(3)：308-315.

[38] 樊蕊. 燕麦β-葡聚糖复合凝胶制备技术及其凝胶机理研究[J]. 食品工业科技，2019，40(18)：35-40.
FAN R. Preparation technology of β-glucan composite gel and the analysis of gelation mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(18)：35-40.（in Chinese）

[39] BÖHM N，KULICKE W M. Rheological studies of barley（1→3）（1→4）-β-glucan in concentrated solution：mechanistic and kinetic investigation of the gel formation[J]. Carbohydrate Research，1999，315(3/4)：302-311.

[40] 汪立. 葫芦巴多糖理化性质及生物活性研究[D]. 淮安：淮阴工学院，2021.

（责任编辑：刘冬梅）