

长裙竹荪 β -葡聚糖结构特征和溶液性质

王 喆, 殷军艺, 聂少平*

(南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室 南昌 330047)

摘要 β -葡聚糖具有多种生理活性和良好的生理功能。长裙竹荪含有较多的 β -葡聚糖, 目前对其结构与溶液性质缺少系统认识。本文从长裙竹荪中提取一种水溶性多糖(DIPP), 采用酸水解、红外光谱、甲基化处理、扫描电镜(SEM)、高效尺寸排阻色谱串联多角度激光散射仪(HPSEC-MALLS)和流变仪等技术对其理化性质、结构特征和溶液性质进行表征。结果表明, DIPP 重均分子质量为 2.8×10^6 u, 单糖组成仅检测到葡萄糖, 糖残基有 T-Glap (29.8%)、1,3-Glcp (42.6%) 和 1,3,6-Glcp (27.8%)。红外光谱显示 DIPP 具有 β 构型。DIPP 具有较高的特性黏度 ($[\eta]=1094.3$ mL/g), 而且 0.5% DIPP 溶液便表现出较高的黏度和凝胶性质。结论: DIPP 是一种在溶液中具有较高黏度的 β -葡聚糖, 研究结果可为其功能活性研究及产品开发提供参考。

关键词 长裙竹荪; β -葡聚糖; 结构; 溶液性质

文章编号 1009-7848(2023)03-0013-07 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.002

天然产物来源 β -葡聚糖具有良好的生理活性, 包括抗氧化、抗肿瘤、抗炎, 调节血糖以及调节免疫等^[1-3]。有文献报道, β -葡聚糖的活性与其结构有着紧密联系, 如低分子量的 β -葡聚糖具有良好的抗氧化和免疫活性^[4-5], 高分子、高黏性 β -葡聚糖在降胆固醇、血糖调节方面发挥重要作用^[6-7]。通过一定手段降解 β -葡聚糖或引入其它取代基团来改变其结构也会引起活性的改变^[8-9]。科学认识 β -葡聚糖结构特征, 对于其生理活性研究与应用具有重要意义。

长裙竹荪是一种名贵的食用菌, 多糖是其重要营养成分^[10]。长裙竹荪含有丰富的水溶性 β -1,3-葡聚糖^[11]。也有文献报道长裙竹荪多糖中还含有甘露糖、半乳糖以及少量的鼠李糖和葡萄糖醛酸^[12-13]。此外, 有研究发现, 长裙竹荪中葡萄糖的残基类型既有 β 构型, 也有 α 构型^[14]。这些研究结果的差异性, 导致人们对长裙竹荪多糖的结构产生困扰。本文从长裙竹荪中提取 β -葡聚糖, 分析其化学组成、结构特征和溶液性质, 以期为其活性研究, 以及后续相关功能性食品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

长裙竹荪, 贵州省赤水市。葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖醛酸、葡聚糖标准品 (M_w 2.0×10^6 u 和 2.5×10^4 u)、碘甲烷, 美国 Merck (Sigma-Aldrich) 公司; 葡萄糖醛酸标准品、葡聚糖标准品 (M_w 7.0×10^4 , 6.0×10^4 , 5.0×10^4 , 4.0×10^4 u 和 1.0×10^4 u)、考马斯亮蓝 G-250、牛血清蛋白、没食子酸、耐高温 α 淀粉酶、木瓜蛋白酶, 上海阿拉丁试剂有限公司; 木糖、甘露糖标准品, 百灵威科技有限公司; 葡聚糖标准品 (M_w 5.0×10^5 u), 北京欣经科生物技术有限公司; 浓硫酸, 国药集团化学试剂有限公司; 乙醇、乙酸、磷酸、甲醇、二甲亚砜等, 均为国产分析纯试剂。

1.2 试验仪器与设备

Dionex ICS 5000 离子色谱仪、Nicolet 5700 红外光谱仪、Varioskan Flash 多功能酶标仪, 美国 Thermo Scientific 公司; JSM-7610F 场发射扫描电镜带能谱仪, 日本 JEOL 公司; ARES-G2 流变仪, 美国 TA 公司; HPSEC-MALLS 色谱系统, 美国 WYATT 公司; E2695 液相系统, 美国 WATERS 公司; GC-MS7890/7000 QQQ, 美国 Agilent 科技有限公司; AL104 电子天平, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司; Rotavapor R-220 SE 旋转蒸发器, 瑞士 Buchi 公司; Milli-Q 超纯水仪, 美国 Millipore 公

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31871755)

第一作者: 王喆, 男, 硕士

通信作者: 聂少平 E-mail: spnie@ncu.edu.cn

司;12 L立式冷冻干燥机,美国 LABCONCO 公司。

1.3 长裙竹荪多糖的制备与纯化

1) 原料前处理 将长裙竹荪样品粉碎,以 1:8 的料液比于体积分数为 75%乙醇中浸泡 24 h,离心除去上清液,加入体积分数为 75%乙醇再次浸泡 24 h,收集沉淀,烘干,获得竹荪粉末。

2) 多糖制备 将上述乙醇浸泡后的长裙竹荪粉末,按照料液比 1:31 加入蒸馏水,75 °C 提取两次,每次 3.5 h,离心(4 800 r/min,10 min),收集上清液,减压真空浓缩,再缓慢加入体积分数为 95%乙醇至体系乙醇体积分数达 80%,于 4 °C 冰箱醇沉过夜。离心(4 800 r/min,5 min),沉淀加水复溶,旋蒸除去乙醇。采用 Sevag 法脱蛋白 3 次,离心(4 800 r/min,10 min),收集上清液。旋蒸浓缩除去残留的有机试剂,蒸馏水透析 3 d(透析袋截留分子质量 8 000~14 000 u),将透析液浓缩冻干,得到长裙竹荪多糖 (*D. indusiata* polysaccharide, DIP)。

3) 多糖纯化 配制质量浓度为 1 mg/mL 的竹荪多糖溶液,加入体积分数为 0.05%耐高温 α -淀粉酶,然后,溶液在 98 °C 下酶解 30 min,冷却至室温后加入 0.025%木瓜蛋白酶,于 60 °C 酶解 30 min。酶解结束后将溶液温度上升至 100 °C 保持 15 min 使酶失活。待溶液冷却,缓慢加入无水乙醇,不断搅拌至乙醇体积分数达 20%,4.0 °C 静置 12 h 过夜。离心(10 000 r/min,15 min)后沉淀加水复溶,旋蒸除乙醇,在 4.0 °C 冰箱透析(透析袋截留分子质量 8 000~14 000 u)2 d 后冻干。冻干后的多糖加水复溶(1.0 mg/mL),二次醇沉、透析、冻干后得到长裙竹荪纯化多糖 (*D. indusiata* purified polysaccharide, DIPP)。

1.4 化学组成测定

以葡萄糖为标准品,苯酚硫酸法测定中性糖含量^[15]。以牛血清蛋白为标准品,考马斯亮蓝法测定蛋白质含量^[16]。采用 AOAC 法 996.11,用 Megazyme 淀粉总量检测试剂盒测定淀粉含量。

1.5 单糖组成测定

取 5 mg 多糖样品于厚壁管,在冰浴条件下向其中加入 0.5 mL 12 mol/L 浓硫酸搅拌 5 min,继续加入 2.5 mL 蒸馏水,在 100 °C 下油浴 2 h 后移

入 50 mL 容量瓶中蒸馏水定容,稀释 5 倍后过 0.22 μ m 水系滤膜,使用 Dionex ICS 5000 离子色谱仪检测其单糖组成^[17]。

色谱条件:色谱柱:CarboPac™ PA20 分析柱(3 mm×150 mm,Dionex,CA)、CarboPac™ PA20 保护柱(3 mm×30 mm,Dionex,CA),柱温 30.0 °C。

1.6 傅里叶红外光谱测定

取多糖样品真空干燥,在干燥环境中与溴化钾粉末混合,研磨均匀,压片后采用傅里叶红外光谱仪在 400~4 000 cm^{-1} 范围扫描采集红外光谱信号。

1.7 高效尺寸排阻色谱串联多角度激光散射仪(HPSEC-MALLS)分析

多糖用流动相配成 1.0 mg/mL 多糖溶液,过 3 遍 0.22 μ m 滤膜,得到待测样品,采用 HPSEC-MALLS 分析。仪器色谱系统配有 E2695 分离单元,MALLS 多检测器联用系统(美国 Wyatt)配有十八角度激光光散射检测器(LS)、黏度检测器(DP)和示差检测器(RI)。

色谱条件:色谱柱:OHpak SB-G 保护柱(50 mm×6.0 mm I.D.,10 μ m)、OHpak SB-806 HQ(300 mm×8.0 mm I.D.,13 μ m)和 OHpak SB-804 HQ(300 mm×8.0 mm I.D.,10 μ m)(日本 Shodex Denko 公司)。流动相:0.1 mol/L NaNO_3 溶液(含 0.035% proclin 300)

1.8 甲基化与 GC-MS 测定

参考 Wang 等^[18]的甲基化方法,使用 GC-MS 7890/7000 QQQ 检测。

选用 SP™-2330 ms 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.2 μ m,美国 Merck Supelco)分析。其它条件:进样口温度 250 °C,不分流;升温程序:以 2 °C/min 速度,从 160 °C 升至 210 °C,再 5 °C/min 升温至 240 °C,保持 20 min;离子化模式:EI(70 kV);MS 扫描范围: m/z 35~400。

1.9 扫描电镜测定

取多糖样品配成 1 mg/mL 的多糖溶液,干燥后置铜台上喷金处理,使用 JSM-6701F 冷场发射扫描电镜观察表面形貌特征。

1.10 流变性质测定

取多糖样品用蒸馏水溶解,配成质量分数分别为 0.1%、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的多糖溶液,

使用 ARES-G2 流变仪测定表观黏度。在线性黏弹区内选取 5% 应变作为动态频率测量的应变值,在 Oscillatory Frequency 模式下测定多糖溶液黏弹性。

1.11 数据分析

数据采用 SPSS 软件进行 t 检验, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 理化性质

表 1 DIP 和 DIPP 得率和基本成分分析 ($n=3, \bar{x} \pm s$)

Table 1 Yield and chemical composition of DIP and DIPP ($n=3, \bar{x} \pm s$)

样品名称	得率 ^A /%	中性糖 ^B /%	蛋白质 ^B /%	淀粉 ^B /%	单糖组成/ ^B %			
					Gal	Glc	Man	GlcA
DIP	5.6 ± 0.1	70.0 ± 1.7 ^a	3.0 ± 0.3 ^a	25.1 ± 0.1 ^a	0.3 ± 0.0 ^a	55.0 ± 0.1 ^a	3.1 ± 0.1 ^a	2.7 ± 1.7 ^a
DIPP	1.4 ± 0.0	95.3 ± 0.7 ^b	1.8 ± 0.4 ^a	0.3 ± 0.1 ^b	— ^b	72.8 ± 0.5 ^b	— ^b	— ^b

注:—: 未检测到;^A: 得率(%)=多糖质量/干燥子实体质量×100;^B: 每个值为平均值±标准差,同一列不同小写字母间具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 红外光谱分析结果

图 1 是 DIPP 的红外光谱图,位于 3 394 cm^{-1} 和 2 924 cm^{-1} 附近的吸收峰分别是由 O-H 的伸缩振动和 C-H 的伸缩振动引起的^[19-20],这是多糖的特征吸收峰。1 633 cm^{-1} 处为结合水引起的吸收峰^[21]。1 430~1 200 cm^{-1} 范围的吸收峰是由 O-H 变角振动和 C-O 的伸缩振动引起的。1 076 cm^{-1} 处的吸收峰是吡喃环的伸缩振动引起的^[22],896 cm^{-1} 处的吸收峰表明 DIPP 的糖苷键存在 β 构型^[23]。上述结果表明,DIPP 是具有 β 构型的吡喃糖。

2.3 HPSEC-MALLS 分析结果

HPSEC-MALLS 是一种简单、有效的分析分子量和链构象参数的技术^[24]。图 2 表明 DIPP 是单一组分多糖,表 2 中 DIPP 的回收率为 43.5%,这可能是因为 DIPP 分子量大、黏度高,导致样品过滤时很多组分被截留。DIPP 的重均分子质量为 $2.8 \times 10^6 \text{ u}$,分子质量分布较窄($M_w / M_n = 1.5$)。在水溶液中,DIPP 特性黏度为 1 094.3 mL/g ,比已报道的红托竹荪多糖特性黏度($[\eta] = 1\ 350.0 \text{ mL/g}$)要小^[18],而高于棘托竹荪多糖($[\eta] = 10.9 \text{ mL/g}$)^[25]。综上所述,DIPP 是一种均一性良好的水溶性多糖,具有一定的黏性。

从长裙竹荪中提取的水溶性粗多糖得率为 5.6%,纯化后得到的组分得率较低,仅 1.4%。纯化后,长裙竹荪多糖 DIPP 的纯度(中性糖与单糖组成中 Glc 的含量)得到很大提升,蛋白质和淀粉含量显著下降。DIP 中的主要组分为 Glc,还含有少量的 Gal、Man 和 GlcA,纯化得到的 DIPP 中仅检测到 Glc,表明 DIPP 是一种葡聚糖。长裙竹荪多糖的单糖组成以葡萄糖为主,通过酶解醇沉的方法可以得到一种纯度较高的非淀粉葡聚糖。

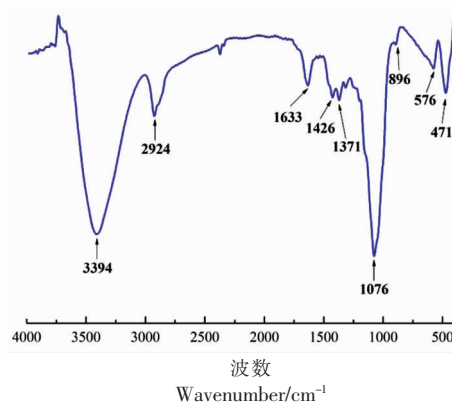


图 1 DIPP 的红外光谱图

Fig.1 FT-IR spectrum of DIPP

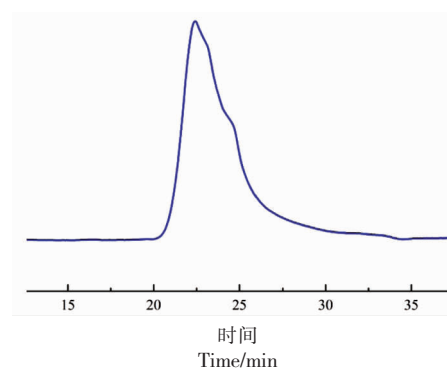


图 2 DIPP 尺寸排阻色谱图

Fig.2 Size exclusion chromatogram of DIPP

表2 DIPP的溶液性质
Table 2 Solution property of DIPP

回收率/%	$M_n/g \cdot mol^{-1}$	$M_w/g \cdot mol^{-1}$	多分散性系数	流体力学半径 (R_h)/nm	特性黏度 ($[\eta]$)/mL·g ⁻¹
43.5	2.8×10^6	1.9×10^6	1.5	76.7	1 094.3

2.4 甲基化分析结果

表3为DIPP的甲基化分析结果,糖残基类型为T-Glcp(29.8%),1,3-Glcp(42.6%)和1,3,6-Glcp(27.8%)(对应比例约为2:3:2)。这一比例与香菇多糖的相近^[26-27],也与已有的竹荪 β -葡聚糖的报道类似。在最早的关于竹荪葡聚糖的结构解析中得到的是具有(1→6)支链的(1→3)- β -D-葡聚糖,其糖残基Glcp-(1→、→3)-Glcp-(1→和→3,6)-Glcp-(1→的比值为1:1.54:0.99^[28]。Wang等^[29]也纯化得到此类型的竹荪 β -葡聚糖。除 β -葡聚糖外,Shi等^[25]还在棘托竹荪中得到以(1→6)为支链的 α -(1→4)-葡聚糖。

2.5 扫描电镜分析结果

图3是DIPP的表面形貌。液氮急速冷冻使得DIPP的多糖分子在溶液中的形态被固定,DIPP呈丝状线性分布。

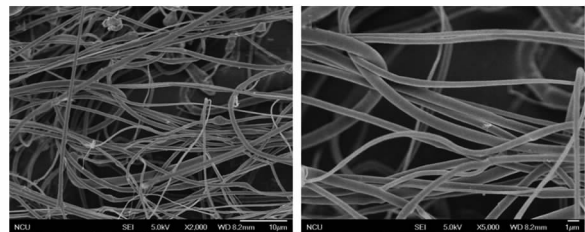
2.6 流变性质

图4显示不同浓度DIPP表观黏度和成胶性能测试结果。DIPP有剪切变稀的趋势,属于非牛顿流体。随着多糖浓度的增大,表观黏度也随之增强。与红托竹荪多糖相比^[18],在相同质量分数下(质量分数为0.5%),DIPP表观黏度要更大,而对

表3 DIPP糖苷键连接类型

Table 3 Linkage patterns analysis of DIPP

糖苷键类型	DIPP/%
T-Glcp	29.8
1,3-Glcp	42.6
1,3,6-Glcp	27.8



(a)放大2000倍

(b)放大5000倍

图3 DIPP的扫描电镜图

Fig.3 SEM of DIPP

比具有相似结构的香菇多糖,其表观黏度接近一致^[30]。DIPP质量分数为0.1%时,表现出溶胶性质[储能模量(G')与损耗模量(G'')曲线有交叉],在更高浓度下,DIPP的 G' 值始终大于 G'' ,表现出一定的成胶性能。

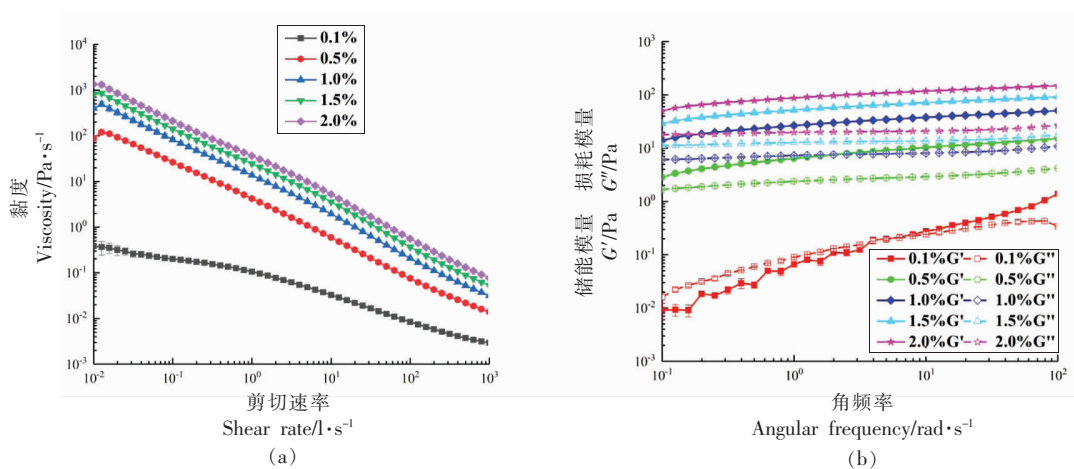


图4 浓度对DIPP表观黏度(a)和凝胶特性(b)的影响

Fig.4 Effect of concentration on apparent viscosity (a) and gel properties (b) of DIPP

3 讨论与结论

从竹荪中提取纯化所得水溶性多糖 DIPP 具有较高的分子质量, 主要糖残基类型为 T-Glap、1,3-Glcp 和 1,3,6-Glcp, 这与已报道的具有(1 \rightarrow 6)支链的(1 \rightarrow 3)- β -D-葡聚糖的糖残基类型一致。结合红外分析结果, 确定 DIPP 也是一种 β -葡聚糖。HPSEC-MALLS 测定表明, DIPP 的特性黏度较高 ($[\eta]=1.094.3 \text{ mL/g}$)。在对 DIPP 的流变性的测定时也发现其黏性较强, 具有弱凝胶性质, 这与其结构有关。有研究发现, 燕麦 β -葡聚糖分子质量的增大对应黏度也会增大^[31]。随着 β -葡聚糖分子质量的降低, 其黏度也随之降低^[32], 这表明在一定分子量范围, 分子量与黏度呈正相关, 凝胶强度与分子量的关系则相反, 分子量越小, 凝胶能力越强^[33-34]。高分子量可能是导致 DIPP 具有高黏性与弱凝胶性质的重要因素。此外, DIPP 的溶液性质也可能与其初级结构有关。1,3,6-Glcp 上存在支链位点, 带有支链的多糖链在水中与羟基作用, 形成分子间和分子内氢键, 使其具备对应的溶液性质, 其原理有待研究。

综上所述, DIPP 是一种 β -葡聚糖, 具有较高的黏度和一定的成胶性能。本研究结果为竹荪 β -葡聚糖的功能活性提供了物质结构基础, 也为竹荪多糖产品的开发和设计提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] BASHIR K M, CHOI J. Clinical and physiological perspectives of β -glucans: The past, present and future[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(9): 1906.
- [2] ZHU F M, DU B, XU B J. A critical review on production and industrial applications of beta-glucans[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 275-288.
- [3] DU B, LIN C Y, BIAN Z X, et al. An insight into anti-inflammatory effects of fungal beta-glucans[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 41(1): 49-59.
- [4] LEI N, WANG M, ZHANG L F, et al. Effects of low molecular weight yeast β -glucan on antioxidant and immunological activities in mice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(9): 21575-21590.
- [5] ISHIMOTO Y, ISHIBASHI K, YAMANAKA D, et al. Production of low-molecular weight soluble yeast β -glucan by an acid degradation method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 2269-2278.
- [6] DU B, MEENU M, LIU H Z, et al. A concise review on the molecular structure and function relationship of β -glucan [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(16): 4032.
- [7] WANG Y, HARDING S V, ECK P, et al. High-molecular-weight β -glucan decreases serum cholesterol differentially based on the CYP7A1 rs3808607 polymorphism in mildly hypercholesterolemic adults [J]. The Journal of Nutrition, 2016, 146(4): 720-727.
- [8] QIN Y Y, XIE J, XUE B, et al. Effect of acid and oxidative degradation on the structural, rheological, and physiological properties of oat β -glucan[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112(8): 106284.
- [9] ZHANG Q Y, XIE J, XUE B, et al. Effect of sulfated modification on rheological and physiological properties of oat β -glucan oligosaccharides prepared by acid or oxidative degradation[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103209.
- [10] 华洋林, 高擎, 唐健, 等. 不同产地竹荪营养成分的比较研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 418-420.
- [11] HUA Y L, GAO Q, TANG J, et al. Study on comparison of nutritional components in fruiting bodies of *Dictyophora indusiata* from different regions[J]. Science & Technology of Food Industry, 2011, 32(10): 418-420.
- [12] FU Y, LIN S, LU M, et al. Quantitative evaluation of ultrasound-assisted extraction of 1,3- β -glucans from *Dictyophora indusiata* using an improved fluorometric assay[J]. Polymers, 2019, 11(5): 864.
- [13] KANWAL S, JOSEPH T P, ALIYA S, et al. Attenuation of DSS induced colitis by *Dictyophora indusiata* polysaccharide (DIP) via modulation of gut microbiota and inflammatory related signaling pathways[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103641.
- [14] WU D T, ZHAO Y X, GUO H, et al. Physicochemical and biological properties of polysaccharides from *Dictyophora indusiata* prepared by different ex-

- traction techniques[J]. *Polymers*, 2021, 14(13): 2357.
- [14] 吴定涛, 巨瑶君, 陆静峰, 等. 糖谱法比较不同产地竹荪多糖结构特征[J]. *食品科学*, 2014, 35(13): 98–102.
- WU D T, JU Y J, LU J F, et al. Characterization and comparison of polysaccharides from *Dictyophora indusiata* using saccharide mapping[J]. *Food Science*, 2014, 35(13): 98–102.
- [15] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analytical Chemistry*, 1956, 28(3): 350–356.
- [16] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein–dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248–254.
- [17] WANG Y, ZHANG T, XIN Y, et al. Comprehensive evaluation of alkali–extracted polysaccharides from *Agrocybe cylindracea*: Comparison on structural characterization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 255: 117502.
- [18] WANG Y X, YIN J Y, HUANG X J, et al. Structural characteristics and rheological properties of high viscous glucan from fruit body of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105514.
- [19] CHEN J C, ZHANG X, HUO D, et al. Preliminary characterization, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of polysaccharides from *Mallotus furettianus* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 215: 307–315.
- [20] SU Y, LI L. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharide from four auriculariales[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115407.
- [21] DENG C, HU Z, FU H T, et al. Chemical analysis and antioxidant activity *in vitro* of a β -D-glucan isolated from *Dictyophora indusiata*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 51(1/2): 70–75.
- [22] XIAO H, CHEN C, LI C, et al. Physicochemical characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of selenized polysaccharides from *Sargassum pallidum*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 132: 308–315.
- [23] AHMAD A, ANJUM F M, ZAHOOR T, et al. Extraction and characterization of β -D-glucan from oat for industrial utilization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2010, 46(3): 304–309.
- [24] HE P, HE L, ZHANG A, et al. Structure and chain conformation of a neutral polysaccharide from sclerotia of *Polyporus umbellatus* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 155: 61–67.
- [25] SHI X, LI O, YIN J, et al. Structure identification of α -glucans from *Dictyophora echinovolvata* by methylation and 1D/2D NMR spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2019, 271: 338–344.
- [26] SAITÔ H, OHKI T, TAKASUKA N, et al. A ^{13}C -N.M.R.-Spectral study of a gel-forming, branched (1 \rightarrow 3)- β -D-glucan, (lentinan) from lentinus edodes, and its acid-degraded fractions. Structure, and dependence of conformation on the molecular weight [J]. *Carbohydrate Research*, 1977, 58(2): 293–305.
- [27] SAITÔ H, OHKI T, SASAKI T. A ^{13}C -nuclear magnetic resonance study of polysaccharide gels. Molecular architecture in the gels consisting of fungal, branched (1 \rightarrow 3)- β -D-glucans (lentinan and schizophyllan) as manifested by conformational changes induced by sodium hydroxide[J]. *Carbohydrate Research*, 1979, 74(1): 227–240.
- [28] HARA C, KIHNO T, UKAI S. A branched (1 \rightarrow 3)- β -D-glucan from a sodium carbonate extract of *Dictyophora indusiata* fisch[J]. *Carbohydrate Research*, 1983, 117: 201–213.
- [29] WANG J T, XU X J, ZHENG H, et al. Structural characterization, chain conformation, and morphology of a β -(1 \rightarrow 3)-D-glucan isolated from the fruiting body of *Dictyophora indusiata*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(13): 5918–5924.
- [30] XU X J, XU J, ZHANG Y Y, et al. Rheology of triple helical lentinan in solution: Steady shear viscosity and dynamic oscillatory behavior[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(5): 735–741.
- [31] KIM H J, WHITE P J. Impact of the molecular weight, viscosity, and solubility of β -glucan on *in vitro* oat starch digestibility[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(13): 3270–3277.
- [32] BYUN E, KIM J, SUNG N, et al. Effects of gamma irradiation on the physical and structural properties of β -glucan[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2008, 77(6): 781–786.

- [33] LI W, CUI S W, KAKUDA Y. Extraction, fractionation, structural and physical characterization of wheat β -D-glucans[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 63(3): 408–416.
- [34] LI W, CUI S W, WANG Q, et al. Studies of aggregation behaviours of cereal β -glucans in dilute aqueous solutions by light scattering: Part I. Structure effects[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 189–195.

Structural Characterization and Solution Properties of β -Glucan from *Dictyophora indusiata*

Wang Zhe, Yin Junyi, Nie Shaoping*

(Nanchang University, State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang 330047)

Abstract β -glucan has a variety of physiological activities and good physiological functions. *Dictyophora indusiata* (Vent. Pers.) Fisch. contains lots of β -glucan, while its structure and solution properties are not understood clearly. In this paper, a water-soluble polysaccharide (DIPP) was extracted from *D. indusiata*. The physicochemical properties, structure and solution properties of DIPP were characterized by acid hydrolysis, infrared spectrum, methylation, scanning electron microscope (SEM), high performance size exclusion chromatography multiangle laser light scattering (HPSEC-MALLS) and rheometer. The results showed that the weight average molecular mass of DIPP was 2.8×10^6 u, and only glucose was detected. The sugar residues were T-Glap (29.8%), 1,3-Glep (42.6%) and 1,3,6-Glep (27.8%). The infrared spectrum showed that DIPP contained β -configuration. In dilute solution, DIPP had high intrinsic viscosity ($[\eta]=1.094.3$ mL/g). The DIPP solution (0.5%) showed high viscosity and gel properties. In conclusion, DIPP is a β -glucan with high viscosity. The results of this study can provide structure basis for the polysaccharide functional activity research and product development.

Keywords *Dictyophora indusiata*; β -glucan; structure; solution property