

加工方式调控黄精多糖结构与功能活性的比较

程梦然^{1,2}, 杨 德^{1,3}, 卢 琪^{1,3}, 郭 鹏^{1,3}, 康 珏^{1,2}, 王 秩^{1,3},
王 琼^{1,3}, 彭帮柱^{2*}, 薛淑静^{1,3*}

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 武汉 430064; 2. 华中农业大学食品科学技术学院, 武汉 430070;
3. 特色农产品资源挖掘与高质利用湖北省重点实验室, 武汉 430064)

摘 要: 为探究不同加工方式对黄精多糖结构与功能活性的影响, 该研究以新鲜黄精为原料, 采用蒸制和发酵 2 种代表性工艺加工, 制备新鲜黄精多糖 (fresh *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, FPP)、三蒸三制黄精多糖 (triple-processed *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, PPP) 及三蒸三制后发酵黄精多糖 (fermented *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, FMP), 综合运用高效凝胶渗透色谱、高效液相色谱、傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜及原子力显微镜等技术, 系统比较三者的理化性质、结构特征与功能活性差异。结果表明: 1) 三蒸三制处理改变了黄精多糖的三螺旋结构与单糖组成, 分子量增大, 糖醛酸含量显著增加 17.97%; 发酵进一步调整了单糖组成比例, 提高 Zeta 电位绝对值至 24.70 mV, 并使粒径分布更均匀 (多分散指数 PDI=0.104)。2) 扫描电子显微镜图像显示 FPP 表面呈光滑片状薄膜, PPP 表面呈规则排列的突触状结构, FMP 形成了独特的多孔形貌; 原子力显微镜图像显示 FPP 的蠕虫状链转化为 PPP、FMP 的球状链, 最高高度呈现先增加后降低的趋势。3) PPP 表现出最强的 2,2'-联苯基-1-苦基肼基 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH) 清除能力, 0.5 mg/mL 的 FMP 对 2,2'-联氮双 (3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐 (2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS) 清除率与 PPP 相当; FMP 和 PPP 对 α -淀粉酶的抑制率强于 FPP, 且 FMP 对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果最佳 (0.5 mg/mL 的 FMP 抑制率为 87.55%)。该研究为黄精精准化、高值化产业应用提供了理论依据。

关键词: 黄精多糖; 三蒸三制; 发酵; 结构表征; 抗氧化活性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202512252

中图分类号: TS201

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0356-10

程梦然, 杨德, 卢琪, 等. 加工方式调控黄精多糖结构与功能活性的比较[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 356-365. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202512252 <http://www.tcsae.org>
CHENG Mengran, YANG De, LU Qi, et al. Comparative on the effects of processing methods on the structure and functional activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 356-365. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202512252 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

黄精 (*Polygonatum sibiricum*) 是传统中医药中重要的药食同源植物之一, 具有补气养阴、润肺健脾、养肾等功效, 已被国家卫生健康委员会正式批准纳入既是食品又是药品的物品名单, 可用于膳食补充剂^[1]。多糖作为黄精的主要活性成分之一, 具有免疫调节、抗氧化、抗炎、抗糖尿病、抗抑郁及抗骨质疏松等多种生物活性^[2]。

新鲜黄精对咽喉具有一定的刺激性, 通常需要经过蒸制或其他方式加工后食用。传统“九蒸九制”工艺为历代首选^[3]。而现有研究表明, 黄精经三蒸三制处理后多糖含量已趋于稳定, 与九蒸九制黄精含量相近^[3], 且糖醛酸含量也达到峰值^[4]。在三蒸三制过程中, 热处理

不仅改变多糖含量, 也使多糖的结构发生变化, 如提高半乳糖和糖醛酸的含量、分子量增大等变化^[5], 这些结构变化 (如单糖组成、分子量、构象、官能团和糖苷键类型等) 与其生物活性密切相关^[6]。因此, 通过加工调控多糖结构是提升其功能的关键。近年来, 微生物发酵是一种提升植物多糖生物活性的有效方法。例如, 乳酸菌发酵可改变铁皮石斛多糖的微观形态并增强其抗氧化活性; 利用柠檬乳杆菌对香菇进行发酵, 可改变其多糖的单糖组成, 进而增强其免疫调节活性^[7]。

目前, 对于黄精的研究多集中于化学成分与功能活性, 尚缺乏系统比较不同加工方式对多糖结构及活性影响的研究。鉴于多糖结构决定其功能, 本研究拟从新鲜黄精、三蒸三制及三蒸三制后发酵的黄精中提取多糖, 采用高效凝胶渗透色谱 (high performance gel permeation chromatography, HPGPC) 测定多糖分子量分布, 通过高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 分析其单糖组成, 利用傅里叶变换红外光谱解析官能团与结构特征, 并测定体外抗氧化活性和降血糖活性, 比较三者的理化性质、结构特征与功能活性差异, 以期黄精精准化、高值化产业应用提供理论依据。

收稿日期: 2025-12-29 修订日期: 2026-05-29

基金项目: 湖北省中央引进地方科技发展专项 (2024EIA04); 湖北省农业科技服务战略支点建设项目 (2026nkyzld35)

作者简介: 程梦然, 研究方向为农产品加工与利用。

Email: 2959124310@qq.com

*通信作者: 彭帮柱, 博士, 教授, 研究方向为农产品精深加工与品质安全控制。Email: bzpeng@mail.hzau.edu.cn; 薛淑静, 博士, 副研究员, 研究方向为农产品加工。Email: 37802227@qq.com

1 材料与方法

1.1 原料及预处理

新鲜与三蒸三制黄精（鸡头黄精，湖北神芝农业科技发展有限公司）经冷冻干燥处理后，粉碎过 0.425 mm 筛备用。三蒸三制工艺为：85 °C 蒸制 12 h，60 °C 烘至表面干燥，连续重复该操作 3 次。取三蒸三制黄精粉末，按 1:25 (g/mL) 料液比加水后，按其体积分数 5% 接种复合乳酸菌 SABL 菌群（双歧杆菌（*Bifidobacterium lactis*）、嗜酸乳杆菌（*Lactobacillus acidophilus*）、保加利亚乳杆菌（*Lactobacillus bulgaricus*）、嗜热链球菌（*Streptococcus thermophilus*），简称 SABL 菌群），实验室保藏，活菌数 $\geq 1 \times 10^9$ CFU/mL，于 37 °C、发酵 48 h（pH 降至 3.1 左右并保持稳定）。发酵液经灭活、离心后取上清液，即得黄精发酵液，-20 °C 保存。

1.2 材料与试剂

大孔吸附树脂 AB-8、普通型透析袋（3 500 Da），上海源叶生物科技有限公司；单糖标准品（葡萄糖、半乳糖、甘露糖等），美国 Sigma-Aldrich 公司；三氯乙酸（分析纯），上海麦克林生化科技有限公司；其他试剂如无水乙醇、苯酚、浓硫酸等均为分析纯，购自国药集团化学试剂有限公司。

1.3 仪器与设备

纳米激光粒度 Zeta 电位仪（Nano Brook 90Plus PALS），美国布鲁克海文仪器公司；全波长酶标仪（Multiskan SkyHigh），美国 Thermo Fisher Scientific 公司；紫外分光光度计（UV-1800），上海美谱达仪器有限公司；高效液相色谱系统（LC-20AR），日本岛津公司；傅里叶变换红外光谱仪（Spectrum Two），美国 PerkinElmer 公司；热重分析仪（STA 449F5），德国 NETZSCH 公司；扫描电子显微镜（GeminiSEM 300），德国 ZEISS 公司；原子力显微镜（Dimension Icon），德国 Bruker 公司；X 射线衍射仪（SmartLab SE），日本 Rigaku 公司。

1.4 黄精多糖的提取

新鲜黄精与三蒸三制黄精样品按料液比 1:10 (g:mL) 加入去离子水，85 °C、200 W 功率超声提取 1.5 h，重复提取 2 次，合并 2 次提取所得滤液，真空浓缩后加入 4 倍体积无水乙醇，于 4 °C 条件下静置 12 h 以沉淀多糖。三蒸三制黄精发酵液采用与上述相同的浓缩及醇沉工艺进行多糖沉淀。收集上述各醇沉体系中的沉淀，经离心分离后依次进行除蛋白（三氯乙酸法）^[8]，脱色处理（AB-8 大孔树脂吸附）^[9]，采用 3 500 Da 透析袋透析 48 h。将纯化后的多糖溶液进行冷冻干燥，分别得到新鲜黄精多糖（fresh *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, FPP）、三蒸三制黄精多糖（triple-processed *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, PPP）及其发酵后黄精多糖（fermented *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, FMP）。

1.5 黄精多糖的理化性质测定

1.5.1 黄精多糖的化学组成测定

多糖含量以葡萄糖为标准品，采用苯酚-硫酸法测定^[10]；糖醛酸含量以半乳糖醛酸为标准品，采用间羟基联苯法测定^[11]；果糖使用间苯二酚法测定^[12]；蛋白质含量以牛血清白蛋白为标准品，采用考马斯亮蓝法测定^[13]；

还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[14]；淀粉含量采用碘试剂法测定。

1.5.2 平均粒径、Zeta 电位、多分散指数（polydispersity index, PDI）测定

配制浓度为 0.5 mg/mL 的多糖溶液，在室温条件下，使用纳米激光粒度 Zeta 电位仪测定样品的粒径、Zeta 电位及 PDI^[15]。

1.5.3 分子量测定

采用高效凝胶渗透色谱法测定分子量^[16]。色谱条件：TSK-GEL GMPWXL 色谱柱（7.8 mm × 300 mm），柱温 35 °C，流动相为超纯水，流速 0.6 mL/min。以葡聚糖为标准品绘制标准曲线。

1.6 黄精多糖的结构表征

1.6.1 黄精多糖的单糖组成测定

采用 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮（1-Phenyl-3-methyl-5-pyrazolone, PMP）衍生化-高效液相色谱法测定多糖的单糖组成^[17]。取葡萄糖、半乳糖等 10 种单糖标准品，分别配制质量浓度为 2 mg/mL 的单标溶液，同时制备各组份浓度均为 2 mg/mL 的混合标准溶液；另取 5 mg 多糖样品，经 2 mol/L 三氟乙酸于 120 °C 水解 2 h 后，通过减压蒸干和甲醇共沸去除残余酸。随后，取 40 μ L 上述标准溶液或多糖样品，依次加入 600 μ L 0.3 mol/L NaOH 溶液与 600 μ L 0.5 mol/L PMP 甲醇溶液，于 70 °C 水浴中衍生化反应 30 min。反应结束后，用盐酸中和，并经氯仿萃取 3 次，水相经 0.22 μ m 滤膜过滤后待进样。

色谱分析在岛津 LC-20AR 系统（配备 SPD-20A 紫外检测器）上进行，使用 Uranus 5u C18 色谱柱（4.6 mm × 250 mm，5 μ m），柱温 30 °C。以乙腈（A）和 0.02 mol/L 乙酸铵溶液（B）为流动相进行梯度洗脱：16% A，0~5 min；16%~19% A，5~17 min；19%~22% A，17~30 min；22%~16% A，30~35 min；16% A，35~50 min，流速 1.0 mL/min，进样量 20 μ L，检测波长 254 nm。

1.6.2 刚果红试验

将 1 mg/mL 多糖溶液与 80 μ mol/L 刚果红溶液等体积混合，依次加入不同浓度的 NaOH 溶液，使体系中 NaOH 的终浓度在 0~0.5 mol/L。以去离子水替代多糖溶液作为空白对照组，在 400~600 nm 波长范围内进行紫外光谱扫描，测定各体系的最大吸收波长，以判断多糖的三螺旋结构^[18]。

1.6.3 紫外-可见光光谱扫描

配制 0.2 mg/mL 的多糖样品溶液，使用紫外-可见分光光度计在 200~500 nm 波长范围内扫描，获得紫外吸收光谱。分别通过分析 260 和 280 nm 处的吸收峰，评估样品中核酸及蛋白质类杂质的残留情况^[19]。

1.6.4 傅里叶变换红外光谱扫描

将干燥多糖样品与溴化钾（KBr）按质量比 1:100 混合并压缩成片状。使用傅里叶变换红外光谱仪在 4 000~400 cm^{-1} 波数范围内进行扫描并记录特征吸收峰^[19]。

1.6.5 X 射线衍射（X-ray diffraction, XRD）测定

采用 X 射线衍射仪对多糖样品晶体结构进行测定。测试条件为：铜靶，工作电压 40 kV，电流 40 mA，温度 25 °C，扫描范围 5°~80°，扫描速度 5°/min^[18]。

1.6.6 热重分析 (thermogravimetric analysis, TG)

采用热重分析仪对多糖样品进行热稳定性分析。在氮气气氛 (流速为 20.0 mL/min) 下, 将样品从 30 ℃ 以 20 ℃/min 的升温速率加热至 700 ℃, 实时记录样品质量随温度的变化曲线^[1]。

1.7 黄精多糖微观结构测定

1.7.1 扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 观察

将干燥多糖样品均匀粘附于导电胶上并固定于样品台, 进行喷金处理后, 置于扫描电子显微镜下观察。显微镜在 3 kV 的加速电压下工作, 于不同放大倍数下选取代表性视野采集图像。

1.7.2 原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 观察

采用原子力显微镜对多糖样品表面形貌进行测定。将 FPP、PPP 及 FMP 配制成 10 μg/mL 水溶液, 取 50 μL 滴加于云母片表面, 室温氮气干燥后, 扫描分析样品微观形貌特征。

1.8 黄精多糖体外抗氧化能力测定

1.8.1 2,2-联苯基-1-苦基肼基 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH•) 清除率测定

将 0.3 mL 不同浓度 (0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL) 的多糖样品与等体积 0.2 mmol/L DPPH-乙醇溶液混合, 室温避光反应 30 min 后, 于 517 nm 测定吸光度。以 VC 为阳性对照^[20]。清除率计算式如下:

$$S_1 = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100\% \tag{1}$$

式中 A_0 、 A_1 和 A_2 分别为 DPPH•溶液、样品反应液和样品本底的吸光度; S_1 为 DPPH•清除率。

1.8.2 2,2'-联氮双 (3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐 (Diammonium 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate), ABTS+•) 清除率测定

将 ABTS+•溶液 (7mM) 与过硫酸钾溶液 (2.45 mM) 等体积混合, 并在暗处反应 16 h 生成 ABTS+•工作液。然后用磷酸缓冲溶液 (PBS) 稀释工作液, 使其在 734 nm 处的吸光度为 (0.70 ± 0.05)。取 200 μL 稀释后的 ABTS+•工作液与 100 μL 不同浓度 (0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL) 的多糖样品混合, 室温下暗反应 6 min 后, 在 734 nm 处测吸光度。以 VC 为对照^[20]。清

除率计算如下:

$$S_2 = [1 - (A_4 - A_5) / A_3] \times 100\% \tag{2}$$

式中 A_3 、 A_4 和 A_5 分别为 ABTS+•溶液、样品反应液和样品本底的吸光度; S_2 为 ABTS+•清除率。

1.9 黄精多糖体外降血糖活性试验

1.9.1 α-葡萄糖苷酶抑制率的测定

将黄精多糖溶液 (0.2、0.4、0.6、0.8、1 mg/mL) 与 α-葡萄糖苷酶 (0.5 U/mL, pH 6.8 PBS) 混合, 37 ℃ 孵育 15 min。加入对硝基苯基-α-D-葡萄糖吡喃糖苷底物 (PNPG) (2.5 mmol/L) 反应 10 min 后, 加入 Na₂CO₃ 溶液终止。冷却稀释后在 405 nm 处测吸光度, 以阿卡波糖为阳性对照计算抑制率^[21]。计算式如下:

$$M_1 = [1 - (A_7 - A_8) / A_6] \times 100\% \tag{3}$$

式中 A_6 是 α-葡萄糖苷酶试剂与 PBS 混合后的吸光度。 A_7 是样品与 α-葡萄糖苷酶试剂混合后的吸光度, A_8 是样品与 PBS 混合后的吸光度; M_1 为 α-葡萄糖苷酶抑制率。

1.9.2 α-淀粉酶抑制率的测定

将黄精多糖溶液 (0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL) 与 α-淀粉酶 (0.5 U/mL, pH 6.8 PBS) 等体积混合, 37 ℃ 孵育 10 min。加入 1% 可溶性淀粉反应 5 min 后, 用 3,5-二硝基水杨酸 (3,5-Dinitrosalicylic acid, DNS) 试剂沸水浴显色 10 min。冷却稀释后在 540 nm 处测吸光度, 以阿卡波糖为阳性对照计算抑制率^[21]。计算式如下:

$$M_2 = [1 - (A_{10} - A_{11}) / A_9] \times 100\% \tag{4}$$

式中 A_9 是 α-淀粉酶试剂与 PBS 混合后的吸光度。 A_{10} 是样品与 α-淀粉酶试剂混合后的吸光度, A_{11} 是样品与 PBS 混合后的吸光度; M_2 为 α-淀粉酶抑制率。

1.10 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 26.0 和 Origin 2024 等软件进行统计分析与作图。数据均采用单因素方差分析法, $P < 0.05$ 表示存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同加工方式对黄精多糖理化性质的影响

2.1.1 化学组成分析

不同加工方式的黄精所提取出的多糖其化学成分存在显著差异, 如表 1 所示。

表 1 黄精多糖的化学组成

Table 1 Chemical compositions of <i>Polygonatum sibiricum</i> polysaccharide						%
样品 Samples	多糖 Polysaccharide	糖醛酸 Uronic acid	果糖 Fructose	还原糖 Reducing sugar	蛋白质 Protein	淀粉 Starch
FPP	55.83±0.99b	0c	13.42±0.25a	8.79±0.04c	0c	0.02±0.02c
PPP	49.46±0.04c	17.97±0.30a	7.06±0.11b	13.83±0.06a	3.64±0.13a	1.42±0.03a
FMP	61.66±1.08a	17.02±0.23b	5.26±0.24c	11.46±0.05b	2.69±0.22b	0.86±0.02b

注: 同一列不同字母代表显著性差异 ($P < 0.05$)。表中 FPP 为新鲜黄精多糖, PPP 为三蒸三制黄精多糖, FMP 为三蒸三制后发酵黄精多糖, 下同。
Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$). In the table, FPP refers to fresh *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, PPP refers to triple-processed *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, and FMP refers to the polysaccharides obtained from fermenting the triple-processed *Polygonatum sibiricum*. The same applies below.

FMP 的多糖含量显著高于其他两者 ($P < 0.05$), 其原因在于发酵过程中的微生物代谢及其酶系的作用破坏了植物细胞壁结构, 促进胞内多糖溶出, 从而提高了多糖得率^[22]。FPP 的多糖含量显著大于 PPP 的多糖含量 ($P < 0.05$), 这一结果与 BIAN 等^[23]的研究一致, 其原因可能是高温导致黄精多糖水解为单糖和低聚糖, 故新

鲜黄精经过三蒸三制后多糖含量下降。而 FPP 中果糖含量显著大于其他两者 ($P < 0.05$), 蒸制后果糖含量降低这与丁锐^[24]研究结果一致, 可能是因为蒸制过程中果糖作为还原糖与氨基酸的美拉德反应被消耗。PPP 中糖醛酸含量显著大于其他 2 种多糖 ($P < 0.05$), 黄精蒸制后糖醛酸含量增加, 和 YAO 等^[5]的研究结果一致。FPP 中

未检测出糖醛酸，与 LI 等^[25]对鸡头黄精的研究结论一致。FMP 中糖醛酸含量降低，可能是因为发酵菌株的代谢消耗，研究表明，乳酸菌可通过特定途径将半乳糖醛酸发酵转化为乳酸和乙酸等产物^[26]。而 3 种多糖中蛋白质含量在 0~3.64% 范围内，表明样品纯度较高，蛋白质去除较干净。

2.1.2 平均粒径、Zeta 电位、多分散指数（PDI）分析

粒径和 Zeta 电位分析在一定程度上可以表征多糖的分散性和稳定性，PDI 是评价颗粒分布均匀性的关键指标，较低 PDI 值可反映加工后的多糖更为均一^[15]。从表 2 得出，FMP 平均粒径显著大于 FPP 和 PPP（ $P<0.05$ ），但其 PDI 值最低，显示出最均匀的粒径分布。

表 2 黄精多糖平均粒径、Zeta 电位、多分散指数
Table 2 Particle size, Zeta potential, and polydispersity index(PDI) of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide

样品 Samples	平均粒径 Average particle size/nm	Zeta 电位 Zeta potential/mV	PDI
FPP	198.89±3.84b	-1.74±0.04a	0.235±0.007a
PPP	202.46±1.30b	-18.07±4.23b	0.162±0.005b
FMP	218.81±1.58a	-24.70±0.26c	0.104±0.024c

Zeta 电位分析显示，3 种多糖均带负电，Zeta 电位绝对值呈现递增趋势，其中 FMP 的电位绝对值显著大于其他 2 种多糖（ $P<0.05$ ），表明 FMP 在溶解时具有更高的分子间力和更高的稳定性^[27]，这可能是因为发酵促进多糖的解离，暴露出更多带电基团，从而提高颗粒表面电荷密度^[7]。

2.1.3 分子量分布分析

表 3 展示了 3 种黄精多糖样品的分子量分布情况。经过三蒸三制处理后，黄精多糖分子量增大，这可能是由于黄精多糖在反复高温过程中发生聚集^[25]。而经发酵处理后，黄精多糖分子量又进一步升高，可能是菌株分泌的糖基转移酶通过糖苷键连接形成更长链的黄精多糖结构，或者降解黄精多糖的小分子片段，通过氧化交联或酶促重组形成更大分子量的聚合物^[22]。

表 3 黄精多糖的分子量分布

Table 3 *Polygonatum sibiricum* polysaccharide molecular weight distribution

样品 Samples	保留时间 Retention time/min	分子量 Molecular weight/Da	峰面积占比 Peak area ratio/%
FPP	14.041	4.38×10^4	57.17
	18.205	4.62×10^2	25.61
	9.825	4.41×10^6	11.13
	11.080	1.12×10^6	6.09
PPP	10.673	1.74×10^6	62.94
	15.998	5.16×10^3	28.95
	11.744	5.40×10^5	8.11
FMP	9.859	4.25×10^6	64.51
	15.924	5.59×10^3	28.62
	11.356	8.26×10^5	6.87

2.2 加工方式对黄精多糖结构的影响

2.2.1 黄精多糖的单糖组成分析

单糖组成分析是评估多糖结构特征的关键环节，单糖的种类与比例直接影响糖苷键类型、连接方式和空间构象，进而决定其生物活性^[28]。

不同处理方式显著改变了黄精多糖的单糖组成。如

表 4 所示，FPP 主要由甘露糖、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖 4 种单糖构成，其中甘露糖是主要组分，这一结果与 ZHAO 等^[17]研究结果一致。然而，当使用稀酸水解和高效液相色谱-示差折光检测法测定时，果糖被检测为主要组分^[17]，这种差异可能是果糖在强酸水解和衍生化过程中容易发生转化或降解。

经蒸制处理后，PPP 和 FMP 的单糖种类增至 6 种，除上述组分外，新增了鼠李糖和半乳糖醛酸，且蒸制后主要单糖转变为半乳糖为主。单糖组成的动态变化可能是由糖苷键的分解引起的^[25]，三蒸三制过程中多糖结构可能被破坏。

经过进一步发酵后，黄精多糖的单糖摩尔比发生微量调整，该结果与 YANG 等^[29]和 WAN 等^[30]的研究结果一致，微生物发酵仅改变黄精、胡萝卜中多糖的单糖摩尔比，而未改变其单糖种类。研究表明，乳酸菌可通过代谢活动分解原始多糖，消耗部分单糖以供自身生长，并从部分单糖或寡糖中重新合成新多糖^[31]。综上所述，三蒸三制处理改变了黄精多糖的单糖组成与结构，发酵则可进一步调整其单糖组成比例。

表 4 单糖组成摩尔百分比

Table 4 Monosaccharide composition molar ratio %

样品 Samples	半乳糖 Galactose	鼠李糖 Rhamnose	葡萄糖 Glucose	半乳糖醛酸 Galacturonic acid	阿拉伯糖 Arabinose	甘露糖 Mannose
FPP	7.49	—	11.54	—	4.04	76.93
PPP	72.91	8.26	6.00	6.86	3.03	2.94
FMP	71.81	7.88	7.67	5.86	3.52	3.27

注：“—”表示未检测出。

Note: “—” indicates not detected.

2.2.2 刚果红试验、紫外-可见光光谱、傅里叶变换红外光谱、X 射线衍射光谱分析

3 种黄精多糖刚果红试验结果如图 1a 所示。在 NaOH 浓度 0~0.5 mol/L 范围内，FPP 与刚果红复合物的最大吸收波长出现显著红移，且明显高于刚果红本体溶液，表明 FPP 具有典型的三螺旋构象。相比之下，PPP 和 FMP 在较高碱浓度下没有最大吸收波长值，说明两者可能不存在典型的刚性三螺旋结构。上述结果表明，蒸制与发酵处理可能引起原有螺旋结构的松散或解旋，从而破坏其三螺旋特征。

3 种黄精多糖的紫外-可见光光谱图如图 1b 所示，3 种样品在 260 和 280 nm 处均未出现明显吸收峰，表明多糖样品纯度较高，核酸和蛋白质等杂质含量极低，符合后续结构及活性分析的要求。

3 种黄精多糖的红外光谱图如图 1c 所示，样品在关键特征吸收峰上表现出一致性。3 333.4 cm^{-1} 附近出现的宽峰与羟基（-OH）基团的伸缩振动有关^[32]。约 2 925.3 cm^{-1} 处的吸收峰对应 C-H 键的不对称伸缩振动。这 2 个吸收峰是多糖结构的典型特征^[33]。在 1 730 cm^{-1} 附近出现的吸收带可归因于羰基（C=O）的伸缩振动，表明可能存在酯键或羧酸基团^[34]。此外，1 657 cm^{-1} 和 1 246 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应于 C=C 双键的伸缩振动和 C-H 键的弯曲振动，表明样品中存在糖醛酸结构。在 1 015~1 020 cm^{-1} 范围内出现的吸收峰为 C-O-C 键的伸缩振动，是糖苷键的特征信号，表明样品中存在吡喃糖环构型。在 831 cm^{-1} 附近出现的弱吸收峰，表明样品中

存在少量 α -吡喃糖苷键。综上, 不同方式处理的黄精其多糖具有相似的特征官能团。

X 射线衍射是分析聚合物晶体结构的常用方法, 黄精多糖的 XRD 图谱如图 1d 所示。3 种黄精多糖均在

$2\theta \sim 20^\circ$ 附近处出现了 1 个较宽的弥散衍射峰, 为黄精多糖的特征衍射峰, 表明其主要为非晶态或半结晶态结构。综上, 新鲜黄精经过三蒸三制蒸制处理及其微生物发酵, 均未对黄精多糖的结晶状态产生显著影响。

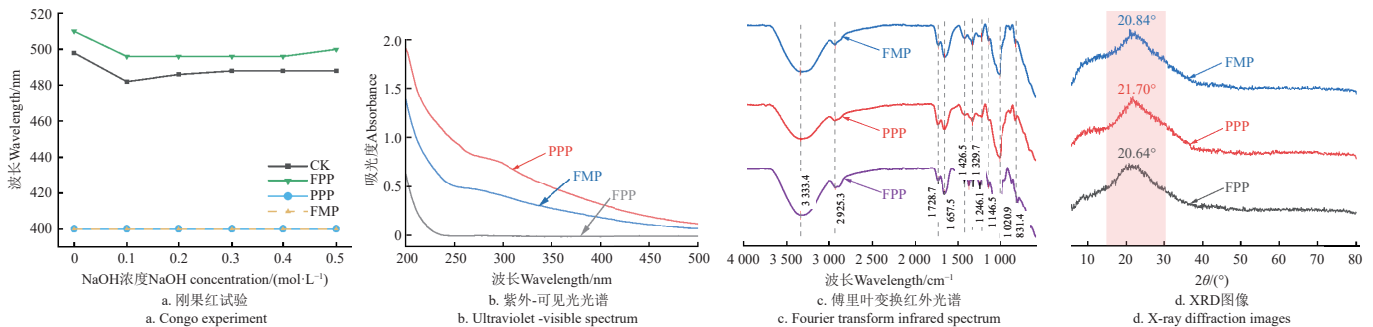


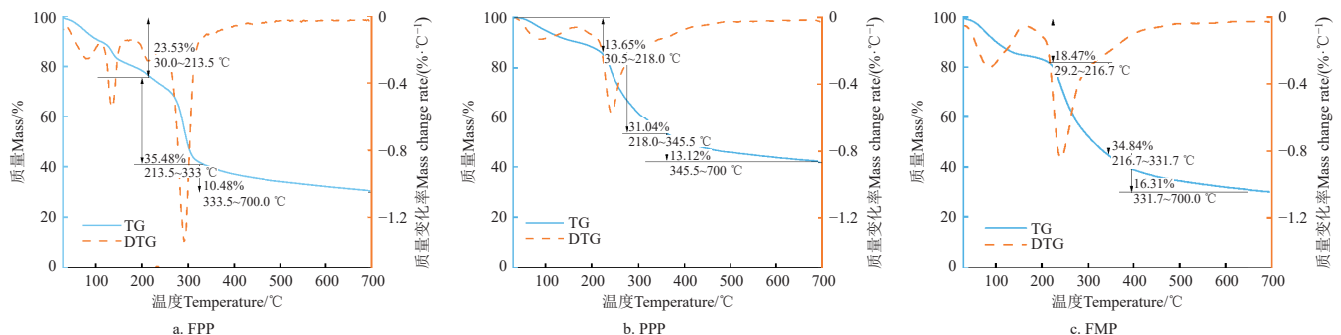
图 1 黄精多糖的表征

Fig.1 Characterization of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides

2.2.3 热重分析结果

黄精多糖热重分析结果如图 2 所示。3 种多糖在 $30.0 \sim 700.0^\circ\text{C}$ 范围内均出现明显热分解, 热分解过程可分为 3 个阶段。第 1 阶段, FPP、PPP、FMP 三者的失重温度范围在 $30.0 \sim 220.0^\circ\text{C}$ 附近, 主要是自由水和束缚水的损失^[35], 质量损失为 23.53%、13.65%、18.47%, 结果表明 FPP 具有更强的亲水性与保水能力。第 2 阶段出现在 $220.0 \sim 340.0^\circ\text{C}$ 附近, 对应糖苷键断裂及多糖主链

降解过程^[36], 质量损失分别为 35.48%、31.04%、34.84%。第 3 阶段, 质量损失出现在 $340.0 \sim 700.0^\circ\text{C}$ 附近, 质量损失为 10.48%、13.12%、16.31%, 表明样品基本完全碳化, 残留有机物含量极低^[35]。最终, FPP、PPP、FMP 的质量保留率分别为 30.54%、42.22% 和 30.27%。结合每个阶段的质量损失率和最终的质量保留率, 推测 PPP 的热稳定性可能在一定程度上优于 FPP 和 FMP, 同时表明 3 种多糖都具有良好的热稳定性。



注: TG 为热重分析曲线, 反映样品质量随温度的变化; DTG 为微分热重分析曲线, 反映样品质量变化速率随温度的变化。

Note: TG represents the thermogravimetric analysis curve, showing the change of sample mass with temperature; DTG represents the derivative thermogravimetric analysis curve, showing the rate of mass change with temperature.

图 2 黄精多糖热重分析

Fig.2 *Polygonatum sibiricum* polysaccharide thermogravimetric analysis

2.3 加工方式对黄精多糖微观结构的影响

2.3.1 扫描电子显微镜分析

使用扫描电子显微镜 (SEM) 研究 3 种黄精多糖的表面形貌, 其结果如图 3 所示。FPP 表面呈光滑的片状薄膜, 保持了良好的完整性, 边缘有褶皱; PPP 表面呈规则排列的突触状结构, 可能是多糖分子有序聚集形成的特定形貌, 这种独特的结构可能赋予其用于药物递送和封装的特性^[37], 与此同时 PPP 由圆柱状组成树枝结构形态, 也表明了其存在分子间作用力且分子间易交叉粘连^[38], 而 FMP 呈光滑的表面, 微孔分散分布, 可能由于多糖分子间的排斥力大于吸引力所致, 据报道, 多孔表面形态会增加多糖有效结构域的暴露风险, 从而影响生物活性^[39]。

以上结果表明, 3 种多糖的微观形貌存在较为明显

的差异, 这与它们在样品纯化制备方式、分子量大小、空间结构和分支度的差异等密切相关, 这种差异可能导致多糖生物活性的不同。

2.3.2 原子力显微镜分析

如图 4 所示, 3 种黄精多糖的二维图像和三维图像揭示了多糖在云母基板表面的链形态和高度特征。结果显示, FPP 呈现出蠕虫状的链形态, 均匀分布且未发生聚集或簇状, 这一现象与 LI 等^[40]对新鲜黄精的研究结果一致。

与 FPP 的蠕虫状链相比, PPP 和 FMP 的图像中显示出分布较为均匀的球状结构, 表明它们有很多分支且相互缠绕在一起形成聚集体, 聚集现象的存在可能是由于羟基提供了强烈的分子内和分子间相互作用^[41]。FPP、PPP 和 FMP 的最高高度呈现先增加后降低的趋势 (1.6、

10.0、3.8 nm)，可能是因为黄精经过三蒸三制后，多糖分支聚集在一起导致了高度的增加，而发酵过程可能进一步改变了多糖的分子构象、聚集状态和表面沉积行为，但三者都明显高于单链多糖的典型高度（0.1~1.0 nm）^[42]。

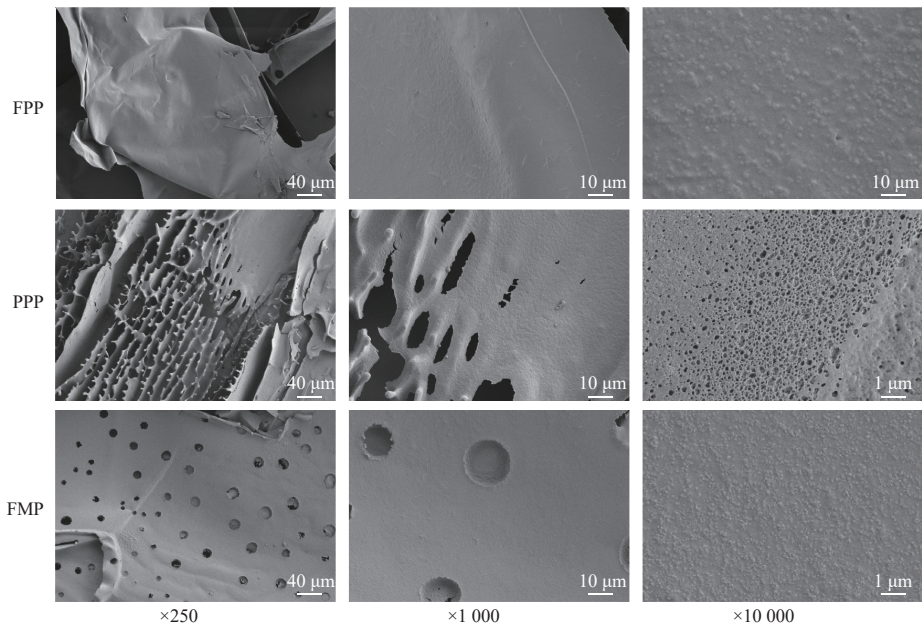


图 3 黄精多糖扫描电子显微镜图像
Fig.3 Scanning electron microscope image of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides

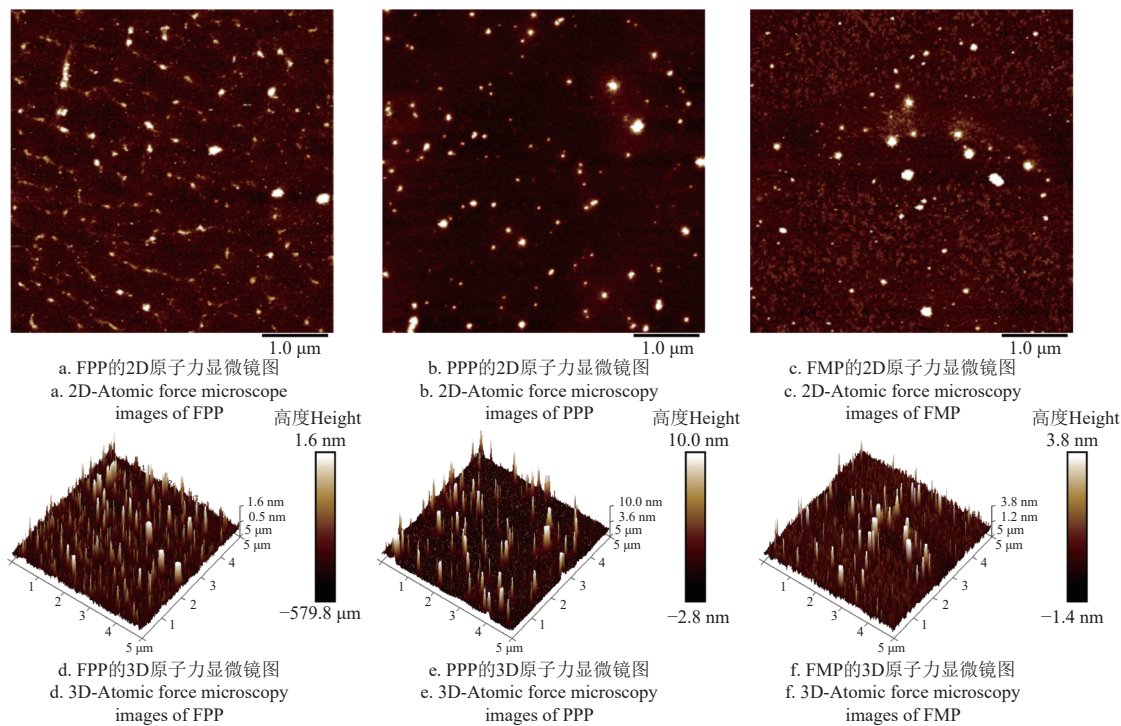
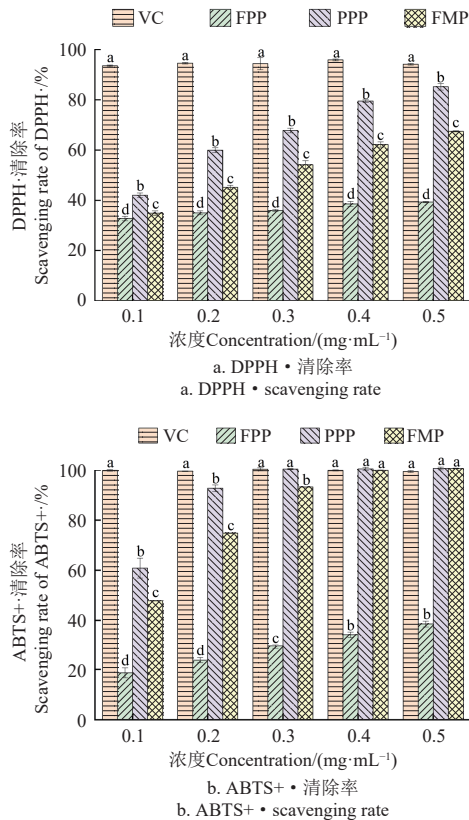


图 4 黄精多糖原子力显微镜图像
Fig.4 Atomic force microscope image of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides

2.4 黄精多糖的体外抗氧化活性分析

体外模拟测定自由基清除能力是评价和筛选抗氧化剂的常用方法^[43]。如图 5a 所示，在 0.1~0.5 mg/mL 的浓度范围内，PPP 表现出最强的清除活性，FMP 的清除活性次之，而 FPP 的清除能力最弱。这表明，新鲜黄精经三蒸三制后抗氧化能力显著提升，而随后的发酵工艺导致 FMP 活性较 PPP 有所下降。这种活性差异主要归因于多糖中糖醛酸含量的变化，糖醛酸能够增强多糖的

供氢能力，其含量越高，抗氧化活性通常也越强^[44]。
3 种黄精多糖样品的 ABTS+·自由基清除能力如图 5b 所示。随着多糖浓度的增加，所有样品清除能力也呈现剂量依赖性增加。在 0.5 mg/mL 浓度下，PPP 和 FMP 的清除率均高达约 99%，而 FPP 仅为 31%。这种活性差异可能与单糖组成有关。有研究表明，高含量的葡萄糖和半乳糖残基能够通过提供氢原子来有效中和自由基，从而提高抗氧化活性^[45]。



注：柱上方标注的不同小写字母表示同一浓度下不同样品间的差异显著 ($P < 0.05$)；相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among different samples at the same concentration ($P < 0.05$); the same lowercase letters indicate no significant differences ($P > 0.05$). The same applies below.

图5 黄精多糖的抗氧化活性

Fig.5 Antioxidant activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide

2.5 黄精多糖的体外降血糖活性分析

α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶可催化肠道中的淀粉水解为葡萄糖，从而升高血糖，阿卡波糖可通过抑制这2种酶活性达到降低血糖疗效^[46]。黄精多糖在 0.2~1.0 mg/mL 浓度范围内，FMP 呈现出最高的 α -葡萄糖苷酶抑制率 (图 6a)，在 1.0 mg/mL 浓度下达到 87.55%。同时抑制 α -淀粉酶活性有助于限制淀粉的消化，从而缓解体内葡萄糖含量的增加^[21]，1.0 mg/mL 黄精多糖，PPP 和 FMP 的 α -淀粉酶抑制率无显著差异，且均显著高于 FPP ($P < 0.05$)。PPP 和 FMP 的单糖组成更为丰富，其复杂的结构特征可能与其生物活性有关^[47]。体外酶抑制试验仅为初步筛选手段，后续需通过细胞或动物试验进一步验证其体内降血糖效果。

3 结论

1) 协同蒸制与发酵加工方法可调控黄精多糖结构并提升其理化性质，其中三蒸三制后发酵黄精多糖 (fermented *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, FMP) 表现出最优的理化特性，其多糖含量为 61.66%，糖醛酸含量达 17.02%，Zeta 电位为 -24.70 mV，粒径分布均匀 (多分散指数 PDI=0.104)。

2) 不同加工方法对黄精多糖结构及形貌有显著影响：三蒸三制破坏了黄精多糖的三螺旋结构且分子量增大，

发酵进一步调整了单糖组成比例；扫描电子显微镜图像显示新鲜黄精多糖 (fresh *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, FPP) 表面呈光滑片状薄膜，三蒸三制黄精多糖 (processed *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, PPP) 表面呈规则排列的突触状结构，FMP 形成独特多孔形貌，原子力显微镜图像显示 FPP 的蠕虫状链转化为 PPP、FMP 的球状链，最高高度呈先增加后降低趋势。

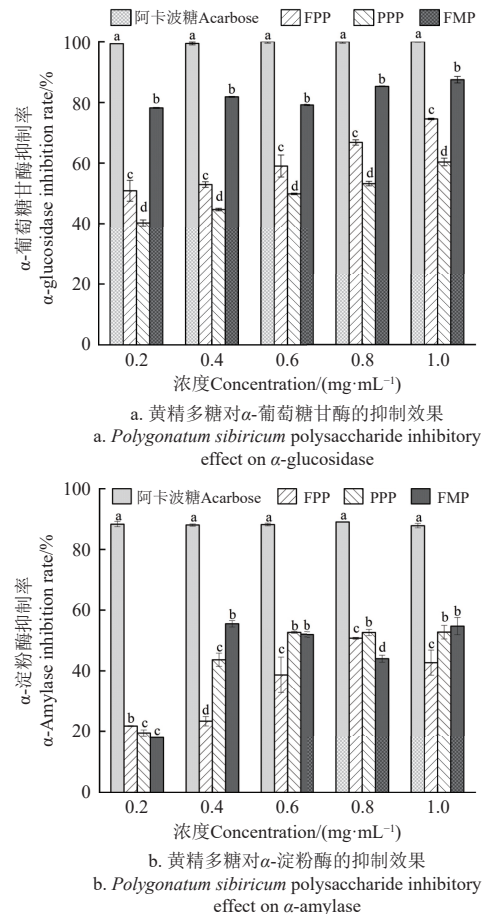


图6 黄精多糖的降血糖活性

Fig.6 Antihypoglycemic activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide

3) PPP 表现出最强的 2,2-联苯基-1-苦基肼基 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH) 清除能力，0.5 mg/mL 的 FMP 对 2,2'-联氮双 (3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐 (Diammonium 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate), ABTS⁺) 清除率与 PPP 相当且显著优于 FPP ($P < 0.05$)；FMP、PPP 对 α -淀粉酶的抑制能力均强于 FPP，且 FMP 对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果最佳。未来将优化黄精发酵技术并多维评价功能活性，以推动黄精产业发展。

[参考文献]

- XIAN J, CHEN Q, ZHANG C, et al. *Polygonati rhizoma* polysaccharides relieve exercise-induced fatigue by regulating gut microbiota[J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 107: 105658.
- HU Y, TANG Y, ZHANG Z, et al. Recent advances in polysaccharides from the genus *Polygonatum*: Isolation,

- structures, bioactivities, and application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108634.
- [3] SU L L, LI X, GUO Z J, et al. Effects of different steaming times on the composition, structure and immune activity of *Polygonatum* polysaccharide[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 310: 116351.
- [4] 张帆. 九蒸九制过程中黄精感官品质形成规律及主要活性物质变化研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022: 40-41.
ZHANG Fan. Study on the Formation Regularity of Sensory Quality and Changes of Main Active Substances of *Polygonatum* during Nine-steam-nine-bask Processing Preparation[D]. Nanning: Guangxi University, 2022: 40-41. (in Chinese with English abstract)
- [5] YAO X, ZHANG Y, ZHANG B, et al. The structure change of polygonatum polysaccharide and the protect effect of *Polygonatum crtonema* Hua extracts and polysaccharide on cisplatin-induced AKI mice during nine-steam-nine-bask processing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 277: 132290.
- [6] CHENG Y, TIAN S, CHEN Y, et al. Structural characterization and in vitro fermentation properties of polysaccharides from *Polygonatum cyrtoneuma*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 258: 128877.
- [7] WANG R, XIE S, LI F, et al. Evaluation of probiotic properties of lactic acid bacteria and physicochemical characteristics of fermented jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) polysaccharides[J]. *Food Bioscience*, 2025, 71: 107367.
- [8] SHI L. Bioactivities, isolation and purification methods of polysaccharides from natural products: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 37-48.
- [9] YANG Y, LIANG Q, ZHANG B, et al. Adsorption and desorption characteristics of flavonoids from white tea using macroporous adsorption resin[J]. *Journal of Chromatography A*, 2024, 1715: 464621.
- [10] GENG J, LUO Y, LIU L, et al. Effect of extraction methods on *Lyophyllum decastes* crude polysaccharides for modifying wheat starch pasting, rheology, and in vitro digestibility[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2026, 335: 149328.
- [11] ZHANG W, XIANG Q, ZHAO J, et al. Purification, structural elucidation and physicochemical properties of a polysaccharide from *Abelmoschus esculentus* L (okra) flowers[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 155: 740-750.
- [12] ZHENG M, TIAN X, LI Z, et al. Effects of ultra-high pressure assisted extraction on the structure, antioxidant and hypolipidemic activities of *Porphyra haitanensis* polysaccharides[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137856.
- [13] 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): 248-254.
- [14] CHEN G, JIANG N, ZHENG J, et al. Structural characterization and anti-inflammatory activity of polysaccharides from *Astragalus membranaceus*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 241: 124386.
- [15] GAN M, WU J C, GU Q, et al. Physicochemical, structural and functional properties of polysaccharides extracted from dried longan with different pretreatments: A comparison study[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 147: 108021.
- [16] SEO H P, SON C W, CHUNG C H, et al. Production of high molecular weight pullulan by *Aureobasidium pullulans* HP-2001 with soybean pomace as a nitrogen source[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 293-299.
- [17] ZHAO P, LI X, WANG Y, et al. Characterisation and saccharide mapping of polysaccharides from four common *Polygonatum* spp.[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 233: 115836.
- [18] DONG K, WANG J, TANG F, et al. A polysaccharide with a triple helix structure from *Agaricus bisporus*: Characterization and anti-colon cancer activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 281: 136521.
- [19] ZHOU B, JIANG J, HUO Y, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of *Chlorella* polysaccharide[J]. *Algal Research*, 2025, 89: 104077.
- [20] HOU S, TAN M, CHANG S, et al. Effects of different processing (Paozhi) on structural characterization and antioxidant activities of polysaccharides from *Cistanche deserticola*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 245: 125507.
- [21] YANG J, ZHENG B, ZHANG X, et al. Effects of extraction technique on structural characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Aralia elata* (Miq.) seem shoots[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2026, 335: 149405.
- [22] 班世栋, 宗春阳, 王晓丹, 等. 植物乳植杆菌发酵多花黄精提高多糖产量工艺优化及其体外益生元活性[J]. *食品工业科技*, 2026, 47(5): 269-280.
BAN Shidong, ZONG Chunyang, WANG Xiaodan, et al. Polysaccharide production optimization of *Polygonatum cyrtoneuma* Hua fermented by *Lactiplantibacillus plantarum* and its prebiotic activity in vitro[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2026, 47(5): 269-280. (in Chinese with English abstract)
- [23] BIAN Z, LI C, PENG D, et al. Use of steaming process to improve biochemical activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides against D-galactose-induced memory impairment in mice[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(19): 11220.
- [24] 丁锐. 多花黄精九蒸九晒增强抗溃疡性结肠炎的物质基础和作用机制研究[D]. 杭州: 浙江中医药大学, 2024: 51-52.
DING Rui. Study on the Material Basis and Mechanism of *Polygonatum cyrtoneuma* Hua by Nine-time Repeat of the Steaming and Sun-drying to Enhance the Effect of Anti Ulcerative Colitis[D]. Hangzhou: Zhejiang Chinese Medical University, 2024: 51-52. (in Chinese with English abstract)
- [25] LI Q, ZENG J, GONG P, et al. Effect of steaming process on the structural characteristics and antioxidant activities of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* rhizomes[J]. *Glycoconjugate Journal*, 2021, 38(5): 561-572.
- [26] Valk L C, Luttik M a H, De Ram C, et al. A Novel D-Galacturonate Fermentation Pathway in *Lactobacillus suebicus* Links Initial Reactions of the Galacturonate-Isomerase Route With the Phosphoketolase Pathway[J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 3027.

- [27] ZHONG H, XU J, WANG L, et al. Preparation, physicochemical characterization, stability, and in vitro digestion kinetics of polysaccharide-coated cyanidin-3-O-glucoside-loaded liposomes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 318: 145329.
- [28] WEN J, HUANG R, LI S, et al. Polysaccharides from sea buckthorn — Ultrasound-assisted enzymatic extraction, purification, structural characterization, and antioxidant activity analysis[J]. *Food Chemistry: X*, 2025, 26: 102265.
- [29] YANG J J, ZHANG X, DAI J F, et al. Effect of fermentation modification on the physicochemical characteristics and anti-aging related activities of *Polygonatum kingianum* polysaccharides[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 235: 123661.
- [30] WAN Y J, HONG T, SHI H F, et al. Probiotic fermentation modifies the structures of pectic polysaccharides from carrot pulp[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 251: 117116.
- [31] ZHANG P, ZHANG H, WU M, et al. Physicochemical properties, antioxidant and cardioprotective activities of polysaccharides from fermented *Polygonatum kingianum* with *Lactobacillus species*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 216: 118699.
- [32] 潘磊, 章子豪, 张凡, 等. 龙眼多糖的结构表征及体内消化过程[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(21): 308-314.
PAN Lei, ZHANG Zihao, ZHANG Fan, et al. Structural characterization and *in vivo* digestive distribution of longan polysaccharide[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(21): 308-314. (in Chinese with English abstract)
- [33] GAO H, WEN J J, HU J L, et al. Polysaccharide from fermented *Momordica charantia* L. with *Lactobacillus plantarum* NCU116 ameliorates type 2 diabetes in rats[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 201: 624-633.
- [34] SONG F, NING F, FENG Y, et al. The polysaccharides from blackened jujube with ultrasonic assistance extraction: Optimization of extraction conditions, antioxidant activity and structural analysis[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2024, 213: 117077.
- [35] SUN Y, LI C, YAN L, et al. Polysaccharide from *Ganoderma lucidum*-fermented wheat pericarp: Purification, structural features, and lipid-lowering mechanisms[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2026, 373: 124623.
- [36] ABDIN M, ALNADARI F, EL-MASRY H G, et al. Structure characterization and rheological properties of novel polysaccharides extracted from mango seed kernel, and their effects on immunomodulation and human gut microbiota[J]. *Food Chemistry*, 2025, 479: 143841.
- [37] ZHANG X, BI C, SHI H, et al. Structural studies of a mannoglucan from *Cremastra appendiculata* (Orchidaceae) by chemical and enzymatic methods[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118524.
- [38] HU L, LIU R, WU T, et al. Structural properties of homogeneous polysaccharide fraction released from wheat germ by hydrothermal treatment[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 240: 116238.
- [39] BAI Y, HUANG F, ZHANG R, et al. Longan pulp polysaccharides relieve intestinal injury *in vivo* and *in vitro* by promoting tight junction expression[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115475.
- [40] LI Y L, LIU L, HUANG X C, et al. Probiotic fermentation of *Polygonatum* plant polysaccharides converting fructans to glucans with enhanced anti-obesity activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 320: 145871.
- [41] SHEN S G, JIA S R, WU Y K, et al. Effect of culture conditions on the physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides from *Nostoc flagelliforme*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 198: 426-433.
- [42] CHENG Y, HE S, WEI Z, et al. Structural characterizations and anti-aging activities of a homogeneous polysaccharide derived from Coix seed-lactic acid bacteria fermentation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 330: 147879.
- [43] 林平冬, 向韩, 岳稳, 等. 栀子多糖的提取纯化及其体外抗氧化活性研究[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(3): 309-317.
LIN Pingdong, XIANG Han, YUE Wen, et al. Extraction and purification of polysaccharides from *Gardenia jasminoides* Ellis and their antioxidant activity *in vitro*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(3): 309-317. (in Chinese with English abstract)
- [44] 王川林, 刘浩文, 刘嘉轩, 等. 栅藻多糖的纯化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. *饲料研究*, 2025, 48(13): 73-79.
WANG Chuanlin, LIU Haowen, LIU Jiaxuan, et al. Study on purification, structural characterization, and antioxidant activity of *Scenedesmus* polysaccharides[J]. *Feed Research*, 2025, 48(13): 73-79. (in Chinese with English abstract)
- [45] ZHANG K X, ZHOU Z Y, YU S, et al. Polysaccharides from *Oplopanax elatus* adventitious root residues: Purification, antioxidant properties, and probiotic growth promotion[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 237: 122236.
- [46] 何若彤, 李梦璐, 阳策瑶, 等. 低共熔溶剂提取金银花多酚的工艺优化及其活性分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(17): 339-348.
HE Ruotong, LI Menglu, YANG Ceyao, et al. Process optimization of polyphenols extracted from *Lonicera japonica* Thunb. by deep eutectic solvents and analysis of biological activity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(17): 339-348. (in Chinese with English abstract)
- [47] 宋鸿杰, 高琦洲, 闫新旭, 等. 九蒸九制黄精多糖的结构表征及降血糖活性分析[J]. *食品科学*, 2025, 46(15): 47-59.
SONG Hongjie, GAO Qizhou, YAN Xinxu, et al. Structural characterization and hypoglycemic activity of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* subjected to nine steaming-drying cycles[J]. *Food Science*, 2025, 46(15): 47-59. (in Chinese with English abstract)

Comparative on the effects of processing methods on the structure and functional activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides

CHENG Mengran^{1,2}, YANG De^{1,3}, LU Qi^{1,3}, GUO Peng^{1,3}, KANG Jue^{1,2}, WANG Zhi^{1,3},
WANG Qiong^{1,3}, PENG Bangzhu^{2*}, XUE Shujing^{1,3*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology Research, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Key Laboratory of Characteristic Resources and Utilization, Wuhan 430064, China)

Abstract: Conventional processing cannot fully modulate multiple biological activities of bioactive *Polygonatum sibiricum* polysaccharides using structural modifications and complex conformational transformations. The present study aims to clarify the different effects of steaming and fermentation—two representative processing techniques, including dynamic structural evolution of the medicinally valuable polysaccharides and the subsequent precise regulation of their bioactivities. Polysaccharides were extracted and then purified from fresh *Polygonatum sibiricum*, conventionally three-times-steamed *Polygonatum sibiricum*, and steamed-then-fermented *Polygonatum sibiricum*. The polysaccharide samples were designated as FPP, PPP, and FMP, respectively. An analytical platform was also employed: high-performance gel permeation chromatography (HPGPC) was used to determine molecular weight distributions; high-performance liquid chromatography (HPLC) with pre-column derivatization was used to quantify monosaccharide composition; Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) was used to identify characteristic functional groups and conformational transitions. Zeta potential and dynamic light scattering analysis were used to assess colloidal stability and particle size uniformity, while scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) were used to visualize morphological and nanostructure transformations, respectively. Antioxidant and hypoglycemic activities were evaluated through in vitro assays. Specifically, the 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) radical scavenging capacities were determined with α -amylase and α -glucosidase inhibitory kinetics. Steaming was used to alter the structural integrity of the polysaccharides, disrupt their native triple-helix conformation, modify the monosaccharide profile, shift molecular weight distribution toward higher ranges, and dramatically increase uronic acid content. Subsequently, fermentation acted as the precise biological modification, further fine-tuning monosaccharide compositional ratios using microbial enzymatic hydrolysis. Biotransformation raised the absolute Zeta potential, electrostatic repulsion and colloidal stability, and particle size distribution, indicating the remarkable homogeneity. These conformations were visually captured by microstructural observations. In SEM imagery, morphological transitions were observed: FPP displayed a smooth, continuous sheet-like film; Steaming induced regularly arranged, protrusive structures; Fermentation generated a porous network morphology, thereby increasing structural porosity and specific surface area. According to these morphological shifts in AFM images, nanoscale transformations occurred from flexible, worm-like chains of FPP to compact, spherical chains in both PPP and FMP. The average chain height increased markedly after steaming and then decreased after fermentation. Functionally, these structural modifications were closely correlated with enhanced bioactivities. In antioxidant evaluations, PPP exhibited the most potent DPPH radical scavenging capacity. Meanwhile, FMP presented robust ABTS radical scavenging activity compared with the PPP. In hypoglycemic potential, both PPP and FMP were more effectively inhibited α -amylase than native FPP. Crucially, FMP shared the optimal inhibitory effect against α -glucosidase among all tested samples. Steaming and fermentation served as effective strategies to modulate the chemical structure, spatial conformation, and microscopic morphology of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides, thereby enhancing their antioxidant and hypoglycemic activities. The processing-induced structural modifications showed a strong correlation between specific structural features and physiological functions in plant polysaccharides. Consequently, this finding can also provide a solid theoretical foundation and practical guidance for the precise, high-value industrial application of *Polygonatum sibiricum* resources in the functional food using traditional Chinese medicine processing.

Keywords: *Polygonatum sibiricum* polysaccharide; triple steaming and processing; fermentation; structural characterization; antioxidant activity