

中华包革耳粗多糖溶液的流变学特性影响因素

耿洁^{1#}, 孙浩雯^{1#}, 刘艳芳¹, 刘利平¹, 冯杰¹, 杨林雷², 陆青青²,
张劲松^{1*}

1 上海市农业科学院食用菌研究所 农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室 国家食用菌工程技术研究中心 国家食用菌加工技术研发分中心 上海市农业遗传育种重点实验室, 上海 201403

2 云南菌视界生物科技有限公司, 云南 昆明 651708

摘要: 本研究系统探究了温度、pH、盐离子及糖溶液对中华包革耳(金耳) *Naematelia sinensis* 粗多糖水提物(NAP-WE)流变学特性的影响。通过静态与动态流变学测试, 分析 NAP-WE 溶液在不同条件下的表观黏度、储能模量(G')和耗能模量(G'')的变化。研究发现, NAP-WE 呈剪切稀化行为, 不同温度、盐离子、pH、糖溶液均会改变其表观黏度和凝胶特性。在 4–60 °C 范围内, 随着温度升高, 6.0% NAP-WE 溶液的表观黏度稍有下降, 高频率区间呈现出的弱凝胶特性减弱, 但其仍未转变为流体状态; 酸性和碱性环境均会导致其表观黏度下降和弱凝胶特性减弱, 但稠度系数 k 值和流动行为指数 n 值变化幅度不大, 说明其在 pH 3–9 范围内具有较好的稳定性; Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 均降低其黏度与凝胶强度, 影响程度为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$; 4%–8% 的葡萄糖或蔗糖溶液均可降低其表观黏度, 蔗糖的作用更显著, 低浓度($\leq 4\%$)的糖溶液对其凝胶特性影响不显著, 仍呈现出弱凝胶特性。综上, NAP-WE 的流变行为显著地受环境因素影响, 其弱凝胶特性在低温、中性 pH、低离子及低糖浓度下最为稳定。本研究结果可为中华包革耳多糖在食品与医药领域的应用提供理论依据。

关键词: 中华包革耳多糖; 流变特性; 温度; pH; 盐离子; 糖溶液

[引用本文]

耿洁, 孙浩雯, 刘艳芳, 刘利平, 冯杰, 杨林雷, 陆青青, 张劲松, 2026. 中华包革耳粗多糖溶液的流变学特性影响因素. 菌物学报, 45(3): 250186

Geng J, Sun HW, Liu YF, Liu LP, Feng J, Yang LL, Lu QQ, Zhang JS, 2026. Factors affecting rheological behavior of *Naematelia sinensis* polysaccharide solution. Mycosystema, 45(3): 250186

资助项目: 云南省张劲松专家工作站(202305AF150084); 云南(昆明)张劲松药用真菌专家工作站(YSZJGZZ-2022043); 上海市农业科学院卓越团队建设计划(沪农科卓[2022]003)

This work was supported by the Yunnan Province ZHANG Jinsong Expert Workstation (202305AF150084), the Yunnan (Kunming) ZHANG Jinsong Expert Workstation of Medicinal Fungi (YSZJGZZ-2022043), and the Shanghai Academy of Agricultural Sciences Excellence Team Program ([2022]003).

*Corresponding author. E-mail: syja16@saas.sh.cn

#Co-first author

Received: 2025-06-17; Accepted: 2025-07-08

Factors affecting rheological behavior of *Naematelia sinensis* polysaccharide solution

GENG Jie^{1#}, SUN Haowen^{1#}, LIU Yanfang¹, LIU Liping¹, FENG Jie¹, YANG Linlei²,
LU Qingqing², ZHANG Jinsong^{1*}

¹ Key Laboratory of Edible Fungal Resources and Utilization (South), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R. China, National Engineering Research Center of Edible Fungi, National R&D Center for Edible Fungal Processing, Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding of Shanghai, Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China

² Yunnan Junshijie Biotechnology Co., Ltd., Kunming 651708, Yunnan, China

Abstract: The effects of temperature, pH, salt ions, and sugar solutions on the rheological properties of crude polysaccharide water extract (*Naematelia sinensis* polysaccharides-water extract, NAP-WE) from *Naematelia sinensis* were systematically investigated. Through static and dynamic rheological tests, changes in apparent viscosity, storage modulus (G'), and loss modulus (G'') of NAP-WE solutions under different conditions were analyzed. The results showed that NAP-WE exhibited shear-thinning behavior, and variations in temperature, salt ions, pH, and sugar solutions altered its apparent viscosity and gel characteristics. Within the 4–60 °C range, the apparent viscosity of 6.0% NAP-WE solution slightly decreased with rising temperature, and its weak-gel properties weakened in high-frequency regions, though it remained non-fluid. Acidic/alkaline environments reduced apparent viscosity and gel strength, but the consistency coefficient (k) and flow behavior index (n) showed minimal changes, confirming its stability within pH 3–9. Na^+ , K^+ , and Ca^{2+} all reduced viscosity and gel strength, with efficacy ranking $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$; excessive Na^+ over-shielded charges, altering polysaccharide chain aggregation and loosening the network structure. Glucose/sucrose solutions (4%–8%) decreased apparent viscosity, with sucrose exhibiting stronger effects. Low sugar concentrations ($\leq 4\%$) minimally impacted gel properties, preserving weak-gel characteristics. In summary, NAP-WE's rheological behavior is significantly regulated by environmental factors, and its weak-gel properties remain most stable under low temperature, neutral pH, low ion concentration, and low sugar content. The results provide a theoretical basis for applications of NAP-WE in food and pharmaceuticals.

Keywords: *Naematelia sinensis* polysaccharides; rheological properties; temperature; pH; salt ions; sugar solutions

中华包革耳(俗称金耳) *Naematelia sinensis* Zhu L. Yang & J.Y. Tang 隶属于担子菌门 Basidiomycota, 银耳纲 Tremellomycetes, 银耳目 Tremellales, 包革耳科 Naemateliaceae, 包革耳属 *Naematelia*, 过去一直认为该种的拉丁名称是 *Naematelia aurantialba* (Bandoni & M. Zang) Millanes & Wedin (Tang & Yang 2024), 是一种具有治疗气喘、祛痰、治疗气管炎、抗高血压、抗氧化和降血糖功能的食药真菌(戴玉成和杨祝良 2008; Wu *et al.* 2019; 杨林雷等 2020; 沈真辉等 2025)。研究表明, 中华包革耳富含多糖、蛋白质及多种矿物质和微量元素, 具有免疫调节、抗肿瘤和抗氧化等多种生物活性(杨林雷等

2021)。多糖是中华包革耳中的主要活性成分之一, 近年来中华包革耳多糖因其显著的生物活性如抗氧化、降血糖及降血脂等成为研究热点(孙涛等 2022; 刘利平等 2024; 张怡敏等 2024)。

流变学是研究物体在外力作用下的流动与变形规律的科学, 与高分子材料、生物医药、食品工程等领域密切相关。流变学特性是多糖类物质的重要加工特性, 多糖具有黏弹性, 是典型的黏弹性物质, 其流变学特性显著地影响其在食品、生物医药、化妆品等领域的应用(李艳琴 1997; 吴晓宁和熊耀康 2008; 冯冰等 2015; 刘诗琪等 2024)。在食品工业中, 多糖的流变学特性主要体现在增稠、凝胶、稳定作

用方面。黄原胶、瓜尔胶等多糖通过形成高黏度溶液实现增稠稳定功能,其剪切变稀的特性显著影响产品的加工性能与口感体验;而果胶、琼脂等多糖通过分子间作用力构建三维网络结构,赋予果冻、布丁等产品特定质构与形态稳定性(Budai *et al.* 2023)。在化妆品领域,多糖的流变学特性可提高产品稳定性和保湿性能,还能作为功能活性物质的载体发挥作用(Fan *et al.* 2022; Budai *et al.* 2023; Kalasariya *et al.* 2024)。多糖的流变学特性直接决定其加工适用性与功能稳定性。

在食品加工过程中,温度、pH、金属离子等因素都会影响多糖的流体特性(李秀秀等 2021; Wang *et al.* 2022)。研究表明,温度升高可破坏分子间氢键网络,导致黏度下降(马之原等 2021); pH 变化影响多糖链电离状态,改变分子构象(高春燕等 2009); 盐离子通过电荷屏蔽效应干扰静电作用(朱科学等 2017); 而糖类可能竞争水合位点,削弱多糖水化层(郝正祺 2018)。目前,中华包革耳多糖的相关研究主要集中于其提取工艺和生物活性的研究,对其流变行为的环境响应规律缺乏深入探讨,尤其在应用场景(如酸性饮料、含盐食品、热处理工艺)中,中华包革耳多糖溶液的黏弹性如何变化,仍然不清楚。因此本研究以中华包革耳菌株 JSJ-X9 的子实体为原料,通过热水提取-乙醇沉淀法制备粗多糖(NAP-WE),通过系统研究不同的温度、pH、盐离子及糖溶液对 NAP-WE 溶液静态流变学和动态流变学的影响,以期明确 NAP-WE 溶液的流变学特性,为中华包革耳多糖在功能性食品和生物材料中的开发利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 实验材料和试剂

中华包革耳 *Naematelia sinensis* JSJ-X9 子实体由云南菌视界生物科技有限公司提供。无水乙醇、氯化钠、氯化钾、氯化钙、氢氧化钠、盐酸、蔗糖、葡萄糖均购自上海国药集团化学试剂有限

公司。

1.1.2 仪器和设备

LDP-200 粉碎机(浙江永康市红太阳机电有限公司); RE-2000 旋转蒸发仪(上海亚荣仪器厂); HW24 型电热恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司); Alpha2-4 LDplus 冻干机(Christ 公司); MCR 302 流变仪(Anton Paar 公司)。

1.2 中华包革耳粗多糖的提取

将中华包革耳子实体置于 60 °C 烘箱中烘干 48 h,用粉碎机粉碎,过 40 目筛,收集粉末。称取 10 g 粉末置于烧杯中,按子实体粉末:蒸馏水为 1:70 (质量体积比, g:mL) 的料液比,置于水浴锅中 100 °C 水浴浸提 1 h, 11 900 r/min 离心 20 min, 去除沉淀收集上清液。采用旋转蒸发仪将上清液浓缩至原体积的一半,添加 3 倍体积的无水乙醇,4 °C 静置 12 h, 11 900 r/min 离心 15 min, 去除上清液,收集沉淀部分,加入蒸馏水,置于 100 °C 水浴锅中使残留乙醇挥发, -20 °C 静置 12 h, 真空冷冻干燥 48 h, 收集粗多糖,命名为 NAP-WE。

1.3 不同温度下中华包革耳多糖的流变学特性的测定

称取 NAP-WE, 加入蒸馏水配制成质量浓度分别为 6.0% (质量体积分数) 的中华包革耳多糖溶液,置于 15 mL 离心管中, 80 °C 水浴 30 min, 室温静置 12 h。

静态流变学测试: 仪器初始化后安装平板 PP50, 取 2 mL 6.0% (质量体积分数) 的中华包革耳多糖溶液置于测试台上, 设置测试间距为 0.5 mm, 温度分别设置为 4、10、25、40、60 °C, 剪切速率为 1-1 000/s, 测定表观黏度, 参照吴俐建立的 Power Law 方程对得到的表观黏度随剪切速率变化的曲线进行拟合分析(吴俐等 2023), 方程见公式(1)。

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

式中: η 是表观黏度(Pa·s); k 是稠度系数(Pa·sⁿ); $\dot{\gamma}$ 是剪切速率(s⁻¹); n 是流动行为指数,无量纲,表示液体偏离牛顿流体的程度。

动态流变学测试: 设置测试间距为 0.5 mm, 应变为 5% (在线性黏弹区范围内), 角频率为 0.1-50 rad/s, 温度为 25 °C, 测定储能模量(G')和耗能模量(G''), 分析黏弹性特征。

1.4 不同 pH 下中华包革耳多糖的流变学特性的测定

使用蒸馏水配制 0.1 mol/L HCl 溶液和 0.1 mol/L NaOH 溶液, 将水溶液的 pH 分别调至 3、5、7、9。称取 NAP-WE, 分别加入 pH 3、5、7、9 的溶液, 使多糖溶液终浓度为 6.0%, 置于 15 mL 离心管中, 80 °C 水浴 30 min, 室温静置 12 h。

静态流变学测试: 仪器初始化后安装平板 PP50, 取 2 mL 6.0% 的多糖溶液置于测试台上, 设置测试间距为 0.5 mm, 温度设置为 25 °C, 剪切速率为 1–1 000/s, 测定表观黏度, 并参照 1.3 使用 Power Law 方程对得到的表观黏度随剪切速率变化的曲线进行拟合分析。

动态流变学测试: 设置测试间距为 0.5 mm, 应变为 5% (在线性黏弹区范围内), 角频率为 0.1–50 rad/s, 温度为 25 °C, 测定储能模量(G')和耗能模量(G''), 分析黏弹性特征。

1.5 不同盐离子中华包革耳多糖流变学特性的测定

分别配制质量浓度为 1.0%、2.0%、4.0% (质量体积分数)的 NaCl 溶液, 0.5%、1.0%、2.0% (质量体积分数)的 KCl 溶液和 CaCl₂ 溶液, 充分溶解后静置备用。称取 NAP-WE, 分别加入蒸馏水、NaCl 溶液(1.0%、2.0%、4.0%)、KCl 溶液(0.5%、1.0%、2.0%)、CaCl₂ 溶液(0.5%、1.0%、2.0%), 使多糖溶液终浓度为 6.0%, 置于 5 mL 离心管中, 80 °C 水浴 30 min, 室温静置 12 h。

静态流变学测试: 仪器初始化后安装平板 PP50, 取 2 mL 6.0% 的多糖溶液置于测试台上, 设置测试间距为 0.5 mm, 温度设置为 25 °C, 剪切速率为 1–1 000/s, 测定表观黏度, 并参照 1.3 使用 Power Law 方程对得到的表观黏度随剪切速率变化的曲线进行拟合分析。

动态流变学测试: 设置测试间距为 0.5 mm, 应变为 5% (在线性黏弹区范围内), 角频率为 0.1–50 rad/s, 温度为 25 °C, 测定储能模量(G')和耗能模量(G''), 分析黏弹性特征。

1.6 葡萄糖和蔗糖溶液中中华包革耳多糖流变学特性的测定

分别配制质量浓度为 4.0%、8.0% 的葡萄糖

溶液和蔗糖溶液, 称取 NAP-WE, 分别加入 4.0%、8.0% 浓度的葡萄糖溶液和蔗糖溶液, 使多糖溶液终浓度为 6.0%, 置于 15 mL 离心管中, 80 °C 水浴 30 min, 室温静置 12 h。

静态流变学测试: 仪器初始化后安装平板 PP50, 取 2 mL 6.0% 的多糖溶液置于测试台上, 设置测试间距为 0.5 mm, 温度设置为 25 °C, 剪切速率为 1–1 000/s, 测定表观黏度, 并参照 1.3 使用 Power Law 方程对得到的表观黏度随剪切速率变化的曲线进行拟合分析。

动态流变学测试: 设置测试间距为 0.5 mm, 应变为 5% (在线性黏弹区范围内), 角频率为 0.1–50 rad/s, 温度为 25 °C, 测定储能模量(G')和耗能模量(G'')。

1.7 统计学处理

实验数据以平均值±标准差表示, 数据采用 Origin Pro 2024 和 GraphPad Prism 10.1.2 软件进行统计学分析与作图, 采用单因素方差分析比较各组间差异显著性, $P < 0.05$ 具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 温度对中华包革耳多糖流变学特性的影响

在 4–60 °C 的温度范围内, 6.0% NAP-WE 均为剪切变稀的非牛顿流体, 同一剪切速率下, 随着温度升高, 表观黏度下降(图 1A)。稠度系数 k 值随着温度升高而降低, 表明溶液的表观黏度下降; 流动行为指数 n 值随着温度升高而增大, 表明温度升高可以减弱溶液的假塑性, 减弱剪切稀化行为(表 1)。这可能是因为温度升高时, 多糖分子链的热运动增强, 分子间距离增大, 氢键、范德华力等弱相互作用被破坏, 削弱了分子间的缠结和交联, 导致表观黏度下降(Wang *et al.* 2024)。

6.0% NAP-WE 在 4、10、25、40、60 °C 和 0.545、0.958、1.27、9.18、37.7 rad/s 时出现凝胶点, 说明随着温度升高, 凝胶点后移, 弱凝胶特性减弱(图 1B)。这可能是因为高温加速分子链的解缠结速度, 超过缠结形成的速率, 导致多糖的网络结构耗散(Tosif *et al.* 2024)。

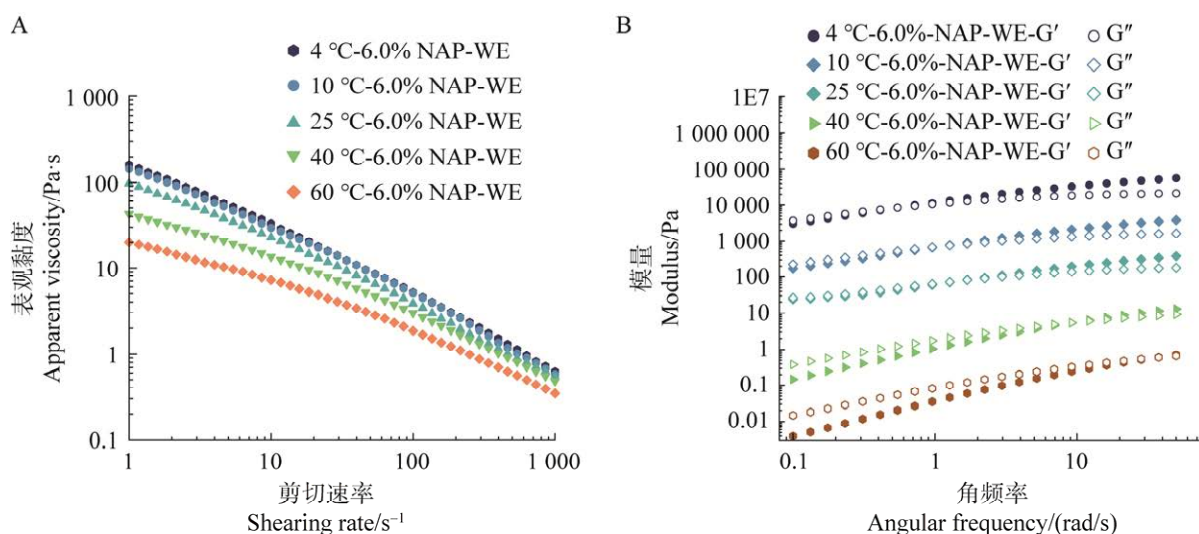


图 1 不同温度下中华包革耳多糖的表观黏度(A)和模量变化图(B)

Fig. 1 Graph of apparent viscosity (A) and modulus variation (B) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract (NAP-WE) at different temperatures.

表 1 不同温度下中华包革耳多糖的 Power law 方程拟合参数

Table 1 The Power law equation fitting parameters for *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different temperatures

溶液	温度	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution	Temperature/°C	Consistency coefficient $k/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	4	156.92	0.247	0.995 0
	10	133.30	0.273	0.990 2
	25	91.08	0.305	0.990 0
	40	44.37	0.400	0.990 1
	60	17.985	0.496	0.990 9

2.2 pH 对中华包革耳多糖流变学特性的影响

研究发现, pH 值的改变可以使聚合物分子的构象改变, 从而改变聚合物溶液的黏度(Rumpagaporn *et al.* 2012)。

溶液 pH 范围在 3–9 内, 6.0% NAP-WE 溶液的表观黏度变化幅度较小, 相较于 pH 7 时的表观黏度, pH 3、5、9 条件下均有所下降(图 2A), 说明 NAP-WE 在中性溶液环境中较为稳定, 酸性和碱性环境均会造成表观黏度的下降, 这可能与多糖的分解和分子结构的改变有关(Huang *et al.* 2018)。但 k 值和 n 值的总体变化幅度很小, 说明整体上表观黏度变化较小(表 2)。

6.0% NAP-WE 溶液在不同 pH 下模量不同, 溶液 pH 为 7 时, NAP-WE 在角频率为 0.30 rad/s 时出现凝胶点; 溶液 pH 为 3、5、9 和 NAP-WE 溶液角频率为 1.69、1.27、2.24 rad/s 时出现凝胶点(图 2B)。通过比较凝胶点出现的角频率值, 发

现与 pH 7 时相比, pH 3、5、9 时溶液的凝胶点后移, 说明酸性环境和碱性环境会导致溶液体系的弱凝胶特性减弱, 但中华包革耳多糖仍为弱凝胶, 未转变为流体状态, 说明其在 pH 3–9 范围内具有较好的稳定性。

2.3 盐离子对中华包革耳多糖流变学特性的影响

2.3.1 钠离子对 NAP-WE 的影响

盐离子的加入是导致溶液流变性变化的重要因素(Geng *et al.* 2022)。在 1.0%–4.0% 的 NaCl 溶液中 6.0% NAP-WE 均为剪切变稀的非牛顿流体, 且其表观黏度随 Na^+ 浓度的升高而降低(图 3A)。 k 值随 Na^+ 浓度的升高而大幅降低, 2.0% NaCl 浓度下, NAP-WE 溶液的 k 值降低至 47.08%, 与原溶液相比降低了 70.76%; 4.0% NaCl 浓度下, NAP-WE 溶液的 k 值降低至 39.23, 与原溶液相比降低了 76.25%, 表明 Na^+ 可以使溶液的黏稠程度减小; n 值随 Na^+ 浓度的升高而升

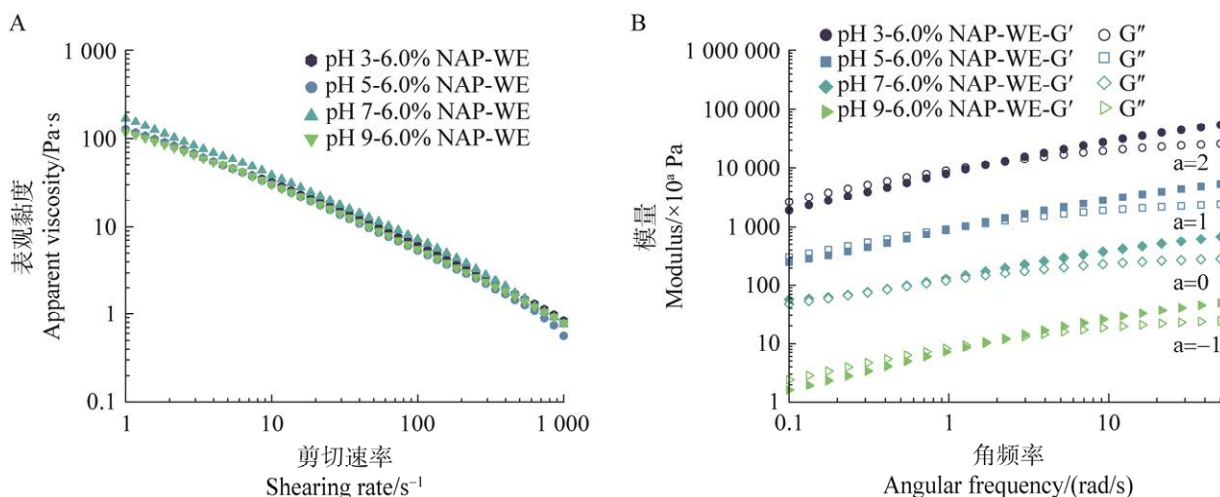


图 2 不同 pH 下中华包革耳多糖的表现黏度(A)和模量变化图(B)
Fig. 2 Apparent viscosity (A) and modulus change (B) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract under different pH.

表 2 不同 pH 下中华包革耳多糖的 Power law 方程拟合参数
Table 2 The Power law equation fitting parameters for *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different pH

溶液	pH	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution		Consistency coefficient $k/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	3	117.00	0.345	0.989 6
	5	122.32	0.306	0.991 0
	7	161.00	0.300	0.990 9
	9	116.24	0.332	0.991 8

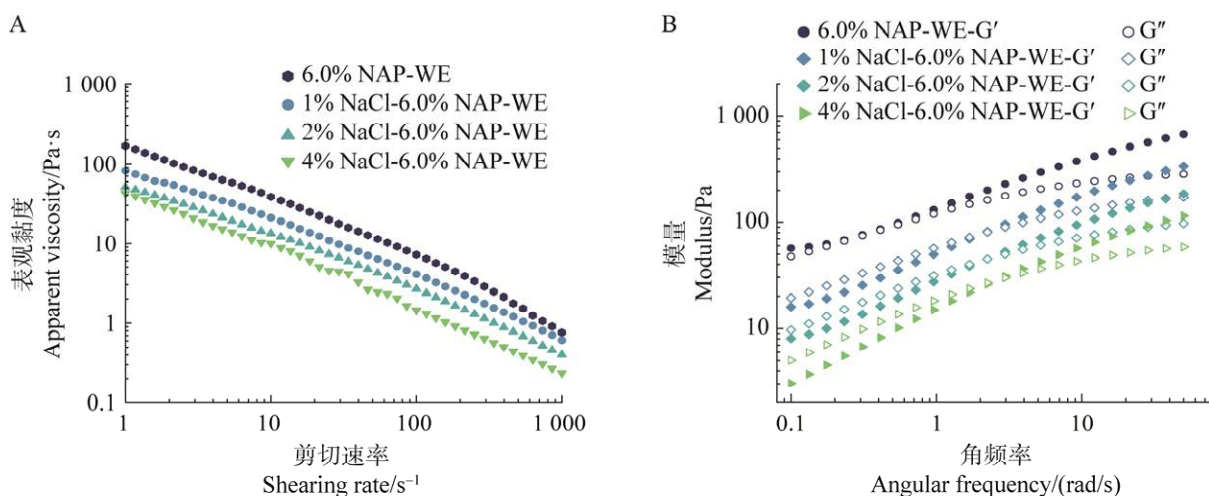


图 3 不同 NaCl 浓度下中华包革耳多糖的表现黏度(A)和模量变化图(B)
Fig. 3 Apparent viscosity (A) and modulus changes (B) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different NaCl concentrations.

高, 由 0.300 升高至 0.374, 表明 Na^+ 可以减弱溶液的假塑性, 减弱剪切稀化行为(表 3)。

6.0% NAP-WE 在 0.41 rad/s 左右出现凝胶点; 在 1.0% NaCl、2.0% NaCl、4.0% NaCl 溶液中的 NAP-WE 凝胶点均出现在 2.24 rad/s 左右,

说明 Na^+ 减弱了 NAP-WE 的弱凝胶特征(图 3B)。

2.3.2 钾离子对多糖流变学特性影响的分析

在 0.5%–2.0% 的 KCl 溶液中, NAP-WE 均为剪切变稀的非牛顿流体, 且其表现黏度随 K^+ 浓度的升高而降低(图 4A)。k 值随 K^+ 浓度的升

高而降低, 2.0% KCl 浓度下, NAP-WE 溶液的 k 值降低至 115.76, 与原溶液相比降低了 28.10%, 表明 K^+ 可以使溶液的黏稠程度减小, 但与 Na^+ 相比, K^+ 浓度对 NAP-WE 的影响较小; n 值随 K^+ 浓度的升高而升高, 由 0.300 升高至 0.319, 表明 K^+ 可以减弱溶液的假塑性, 但整体变化较小(表 4)。

6.0% NAP-WE 在角频率为 0.23 rad/s 时出现凝胶点, 在 0.5% KCl、1.0% KCl、2.0% KCl 溶液中 NAP-WE 出现凝胶点的角频率均出现在 1.27 rad/s 左右, 说明 K^+ 减弱了 NAP-WE 的弱凝

胶特征(图 4B)。

2.3.3 钙离子溶液对多糖流变学特性影响的分析

在 0.5%–2.0% 的 $CaCl_2$ 溶液中, NAP-WE 均为剪切变稀的非牛顿流体, 且其表观黏度随 Ca^{2+} 浓度的升高而降低(图 5A)。 k 值随 Ca^{2+} 浓度的升高而降低, 2.0% $CaCl_2$ 浓度下, NAP-WE 溶液的 k 值降低至 75.66, 与原溶液相比降低了 53.00%, 表明 Ca^{2+} 可以使溶液的黏稠程度减小, 其影响大于同浓度的 K^+ , 小于同浓度的 Na^+ ; n 值随 Ca^{2+} 浓度的升高而升高, 由 0.300 升高至 0.360, 表明 Ca^{2+} 可以减弱溶液的假塑性(表 5)。

表 3 不同 NaCl 浓度下中华包革耳多糖的 Power law 方程拟合参数

Table 3 Fit parameters of Power law equation for *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different NaCl concentrations

溶液	质量浓度	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution	Mass concentration/%	Consistency coefficient $k/Pa \cdot s^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	0	161.00	0.300	0.990 9
	1.0	82.98	0.334	0.995 2
	2.0	47.08	0.365	0.989 2
	4.0	39.23	0.374	0.986 9

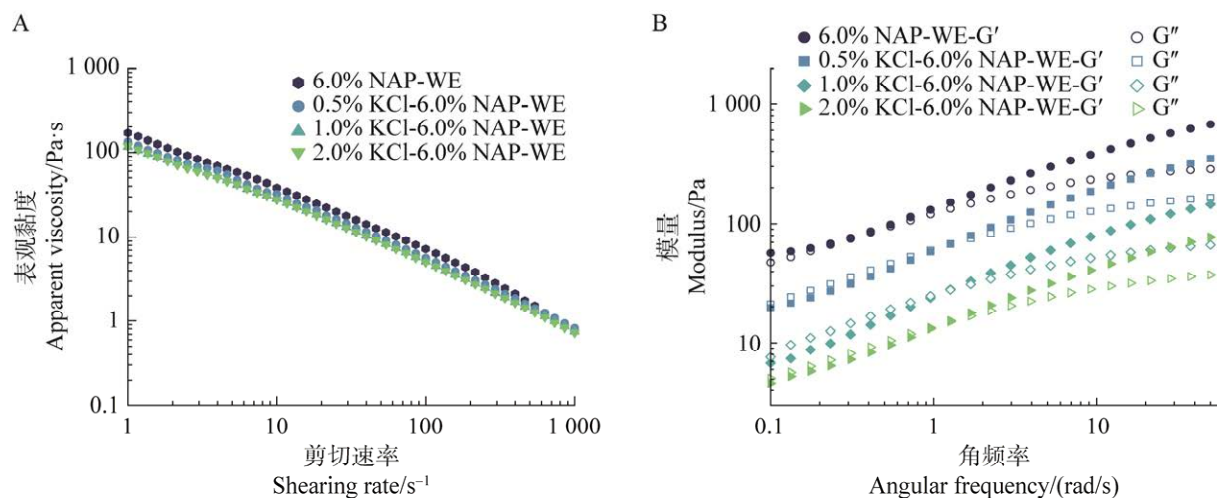


图 4 不同 KCl 浓度下中华包革耳多糖的表观黏度(A)和模量变化图(B)

Fig. 4 Apparent viscosity (A) and modulus changes (B) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different KCl concentrations.

表 4 不同 KCl 浓度下中华包革耳多糖的 Power law 方程拟合参数

Table 4 Fit parameters of Power law equation for *Naematelia sinensis* polysaccharides water extract at different KCl concentrations

溶液	质量浓度	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution	Mass concentration/%	Consistency coefficient $k/Pa \cdot s^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	0	161.00	0.300	0.990 9
	0.5	130.20	0.311	0.994 8
	1.0	116.82	0.312	0.995 4
	2.0	115.76	0.319	0.995 4

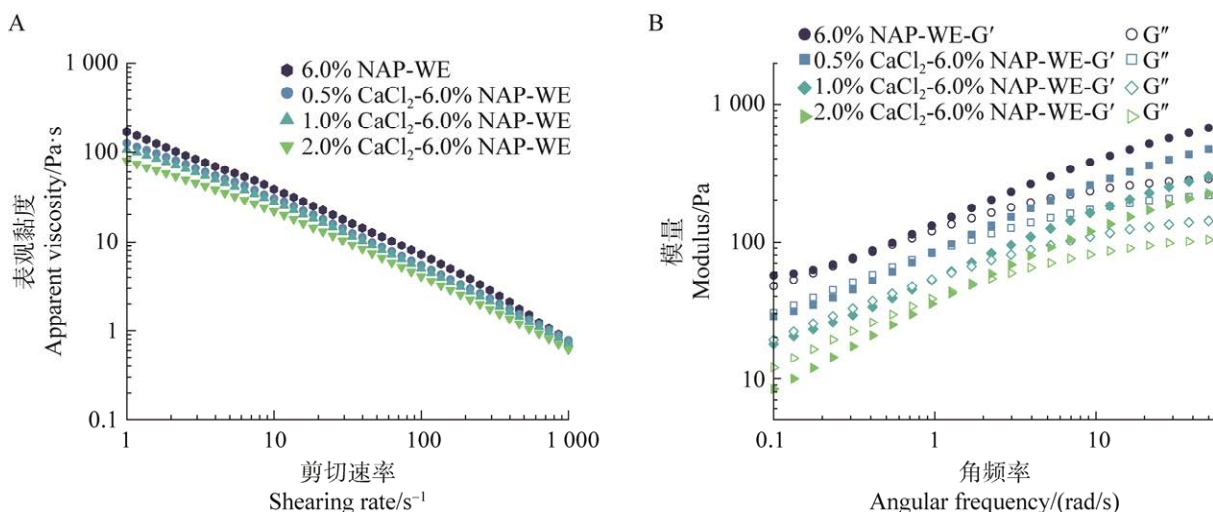


图 5 不同 CaCl₂ 浓度下中华包革耳多糖的表现黏度(A)和模量变化图(B)
 Fig. 5 Apparent viscosity (A) and modulus changes (A) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different CaCl₂ concentrations.

表 5 不同 CaCl₂ 浓度下中华包革耳多糖的 Power law 方程拟合参数

Table 5 Fit parameters of Power law equation for *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract at different CaCl₂ concentrations

溶液	质量浓度	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution	Mass concentration/%	Consistency coefficient $k/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	0	161.00	0.300	0.990 9
	0.5	120.80	0.320	0.992 7
	1.0	102.89	0.336	0.990 5
	2.0	75.66	0.360	0.987 5

6.0% NAP-WE 在角频率为 0.23 rad/s 时出现凝胶点, 在 0.5% CaCl₂、1.0% CaCl₂ 溶液中 NAP-WE 出现凝胶点的角频率均出现在 0.958 rad/s 左右, 说明 Ca²⁺ 减弱了 NAP-WE 的弱凝胶特征 (图 5B)。相较于同浓度的 Na⁺, Ca²⁺ 对 NAP-WE 弱凝胶特征的减弱效果较小。

综上所述, 同一浓度下的 3 种盐离子溶液中, K⁺ 对 NAP-WE 的影响最小, 其次是 Ca²⁺, Na⁺ 的影响较大, 推测是 NaCl 中的 Na⁺ 会中和多糖链上的负电荷 (如硫酸基或羧酸基), 减少分子间的静电排斥力, 因此过量 Na⁺ 会过度屏蔽电荷, 导致多糖链的聚集方式改变, 形成松散的网络结构, 减弱多糖凝胶特征 (Hao *et al.* 2018)。因此, 在食品加工过程中, 必须注意控制盐离子含量, 以保证适当的流变性能, 从而获得理想的产品。

2.4 糖溶液对中华包革耳多糖流变学特性的影响

2.4.1 葡萄糖溶液对多糖流变学特性影响的分析

在 4.0%–8.0% 的葡萄糖溶液中, 6.0% NAP-

WE 仍为剪切变稀的非牛顿流体 (图 6A)。由稠度系数 k 可知, NAP-WE 的 k 值在低于 4% 浓度范围内变化较小, 在 4%–8% 的浓度范围内由 160.61 降至 129.90, 说明 4% 以下质量浓度的葡萄糖溶液对 NAP-WE 的表现黏度影响较小, 4% 葡萄糖溶液以上的体系中其表现黏度有所下降 (表 6)。模量图显示 NAP-WE 的凝胶点逐渐后移, 角频率由 0.23 移至 0.958 rad/s, 8% 葡萄糖溶液的体系内后移至 1.27 rad/s (图 6B)。结果表明中华包革耳多糖在低于 4% 浓度的葡萄糖溶液中表现黏度变化较小, 凝胶特性较为稳定。

2.4.2 蔗糖溶液对多糖流变学特性影响的分析

在 4.0%–8.0% 的蔗糖溶液中 NAP-WE 的表现黏度有所下降 (图 7A)。NAP-WE 的 k 值由 160.61 降至 145.63, 又降至 71.40, 且下降幅度大于葡萄糖溶液体系, 说明蔗糖溶液更大程度上使其表现黏度降低 (表 7)。模量图显示 NAP-WE 的凝胶点逐渐后移, 角频率在 4% 质量浓度下已

由初始的 0.23 降至 1.27 rad/s, 8%质量浓度下角频率仍在 1.27%左右(图 7B)。结果表明中华包革耳多糖在低于 4%浓度的蔗糖溶液中表观黏度变

化仍较小, 凝胶特性较为稳定。

同一质量浓度的糖溶液体系中, 蔗糖溶液对 NAP-WE 的表观黏度及凝胶特性影响较葡萄糖

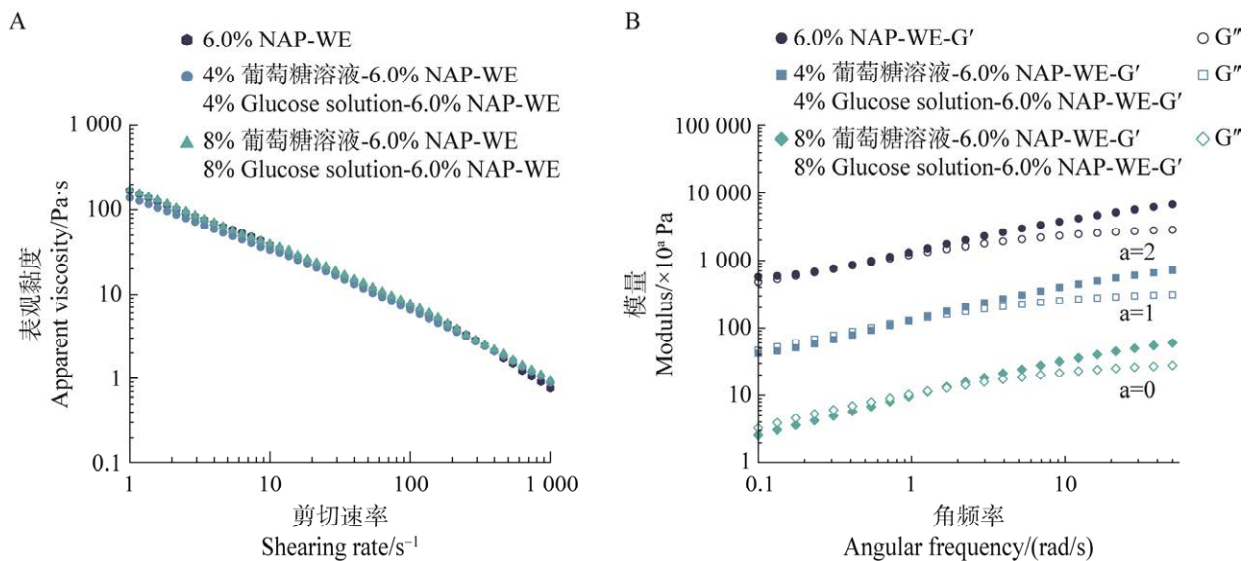


图 6 不同浓度葡萄糖溶液中中华包革耳多糖的表观黏度(A)和模量变化图(B)

Fig. 6 Graph of apparent viscosity (A) and modulus variation (B) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract in glucose solution with different concentrations.

表 6 不同浓度葡萄糖溶液中中华包革耳多糖的 Power law 方程拟合参数

Table 6 The Power law equation fitting parameters for *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract in glucose solution with different concentrations

溶液	溶液浓度	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution	Solution concentration/%	Consistency coefficient $k/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	0	161.00	0.300	0.990 9
	4	129.90	0.339	0.991 0
	8	160.61	0.315	0.991 0

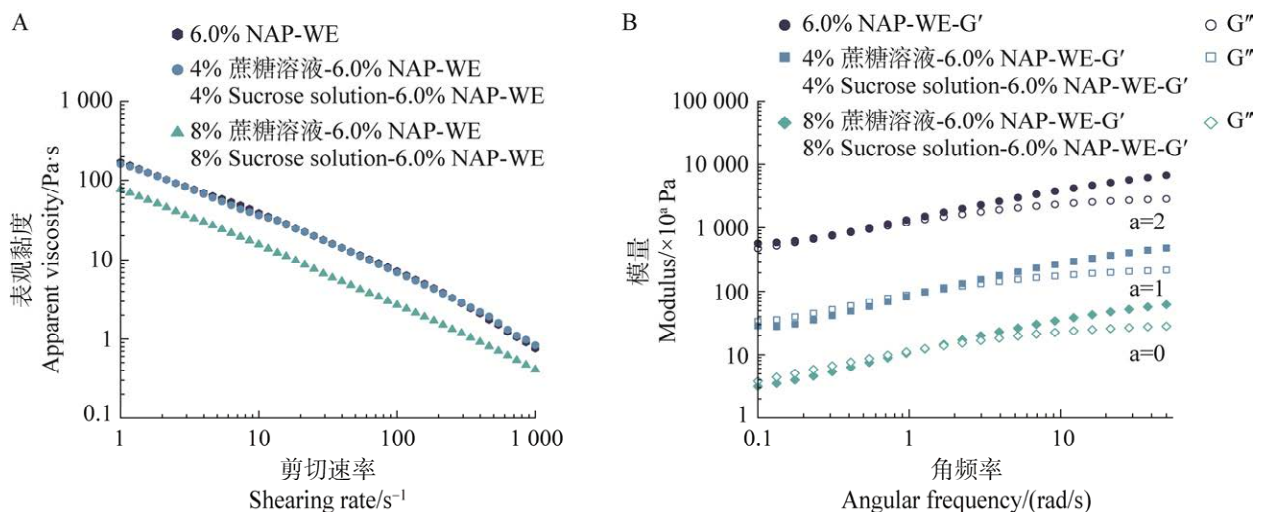


图 7 不同浓度蔗糖溶液中中华包革耳多糖的表观黏度(A)和模量变化图(B)

Fig. 7 Graph of apparent viscosity (A) and modulus variation (B) of *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract in sucrose solution with different concentrations.

表 7 不同浓度蔗糖溶液中中华包革耳多糖 Power law 方程拟合参数

Table 7 The Power law equation fitting parameters for *Naematelia sinensis* polysaccharide water extract in sucrose solution with different concentrations

溶液	溶液浓度	稠度系数	流动行为指数	相关系数
Solution	Solution concentration/%	Consistency coefficient $k/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	Flow behavior index n	Correlation coefficient R^2
NAP-WE	0	161.00	0.300	0.990 9
	4	145.63	0.324	0.988 6
	8	71.40	0.385	0.997 0

溶液显著, 但 6.0%质量浓度的中华包革耳多糖在 4%浓度以下的葡萄糖溶液和蔗糖溶液中的凝胶特性都较为稳定, 仍具有弱凝胶特征, 并未转变为流体状态。

3 讨论

本研究揭示了中华包革耳粗多糖(NAP-WE)流变学特性对外界因素的响应机制, 与其分子构象及相互作用变化密切相关。中华包革耳粗多糖溶液为非牛顿流体, 呈现剪切变稀特性, 有利于其较好地应用于流体性质的食品加工。研究 NAP-WE 流变学特性的影响因素发现, 不同温度、盐离子、pH、糖溶液均会改变其表观黏度和凝胶特性。

在 4–60 °C 范围内, 表观黏度随温度升高显著降低(4 °C 时 k 值为 156.92 Pa·sⁿ, 60 °C 时降至 17.99 Pa·sⁿ), 与于东梅 (2024) 发现中华包革耳多糖在高温下表观黏度降低的结果相一致。同时随着温度的增加, 流动行为指数 n 增大(0.247→0.496), 假塑性减弱; 动态测试显示凝胶点角频率从 0.545 rad/s (4 °C) 后移至 37.7 rad/s (60 °C), 表明高温破坏分子间氢键与缠结, 弱凝胶特性下降, 印证了高温对生物大分子网络结构的耗散作用。

pH 稳定性表明极端 pH 轻微降低黏度。但 NAP-WE 在宽 pH 范围(3–9)内保持弱凝胶状态, 显示出较好的稳定性, 这与菠萝蜜多糖在低 pH 值时黏度降低, 在 pH 4–10 区间表观黏度变化不大的结果相一致(马之原等 2021)。

盐离子影响结果表明, Na⁺、K⁺和 Ca²⁺均降低其黏度与凝胶强度, K⁺对 NAP-WE 的影响最小, 其次是 Ca²⁺, Na⁺的影响较大, 推测是过量 Na⁺会过度屏蔽电荷, 导致多糖链的聚集方式改

变, 该结果与天冬多糖在 Ca²⁺存在下表观黏度增加的结果相反(李梦钰等 2021), 可能是与多糖的来源以及多糖组成等理化性质不同有关, 盐离子对不同多糖影响不同, 提示在应用过程中, 必须注意盐离子添加量, 从而获得理想的产品。在糖溶液作用中, 蔗糖对黏度的抑制强于葡萄糖, 可能与羟基数量差异导致的竞争性氢键有关。高浓度糖分子争夺水分子并干扰多糖水化层, 但低浓度(≤4%)下 NAP-WE 凝胶特性仍稳定, 提示其在含糖食品体系中具备应用潜力。

本研究系统地研究了外界因素对 NAP-WE 的流变学特性的影响, 揭示其流变学规律为功能性食品配方优化奠定了技术基础, 助力中华包革耳多糖在功能性食品等领域的开发, 为中华包革耳深加工产业提供理论依据。

作者贡献

耿洁: 论文构思及撰写、实验; 孙浩雯: 论文撰写、实验; 刘艳芳: 实验设计、数据管理; 刘利平: 软件分析; 冯杰: 方法、数据管理; 杨林雷: 验证、数据管理; 陆青青: 调查研究; 张劲松: 论文整体设计和指导、编辑写作与审稿。

利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

[REFERENCES]

- Budai L, Budai M, Fülöpné Pápay ZE, Vilimi I, Antal I, 2023. Rheological considerations of pharmaceutical formulations: focus on viscoelasticity. *Gels*, 9(6): 469
- Dai YC, Yang ZL, 2008. A revised checklist of medicinal fungi in China. *Mycosystema*, 27(6): 801-824 (in Chinese)
- Fan ZP, Cheng P, Chu LX, Han J, 2022. Exploring the

- rheological and structural characteristics of novel pectin-salecan gels. *Polymers*, 14(21): 4619
- Feng B, Tang QJ, Ma LJ, 2015. Study of moisturizing efficacy of acidolysis products of *Tremella aurantialba* polysaccharides. *Detergent & Cosmetics*, 38(9): 19-21 (in Chinese)
- Gao CY, Lu YH, Tian CR, 2009. Rheological property of polysaccharides from Chinese wolfberry. *Food Science*, 30(21): 28-31 (in Chinese)
- Geng XQ, Liu CY, Wang LY, Jiang W, Liu XC, Zhu ZY, 2022. Rheological properties of polysaccharides from *Pholiota nameko* with different temperature extraction: concentration, pH, temperature, and saltion. *Journal of Food Science*, 87(8): 3632-3643
- Hao ZQ, 2018. Structural identification, rheological and gel characteristics, antioxidant and immunity activities of *Sparassis crispa* polysaccharides. MS Thesis, Shanxi Agricultural University, Taiyuan. 1-71 (in Chinese)
- Hao ZQ, Chen ZJ, Chang MC, Meng JL, Liu JY, Feng CP, 2018. Rheological properties and gel characteristics of polysaccharides from fruit-bodies of *Sparassis crispa*. *International Journal of Food Properties*, 21(1): 2283-2295
- Huang F, Liu Y, Zhang R, Dong L, Yi Y, Deng Y, Wei Z, Wang G, Zhang M, 2018. Chemical and rheological properties of polysaccharides from litchi pulp. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112: 968-975
- Kalasaraya HS, Maya-Ramírez CE, Cotas J, Pereira L, 2024. Cosmeceutical significance of seaweed: a focus on carbohydrates and peptides in skin applications. *Phycology*, 4(2): 276-313
- Li MY, Liu HP, Jia Q, Wu YR, 2021. Physicochemical properties and rheological properties of asparagi radix polysaccharide. *Food and Fermentation Industries*, 47(5): 48-56 (in Chinese)
- Li XX, Shang J, Yang X, Xue J, Guo YR, 2021. A review on thickening, gelling and emulsifying properties of polysaccharides. *Food Science*, 42(15): 300-308 (in Chinese)
- Li YQ, 1997. The study on the higher-nutrition health care drink of *Tremella aurantia* Schw. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 17(1): 42-45 (in Chinese)
- Liu LP, Liu YF, Sun HW, Feng J, Yang LL, Cao Y, Li RC, Zhang JS, 2024. Effects of cultivation time on structural characteristics and anti-inflammatory activity of polysaccharides from *Naematelia aurantialba*. *Acta Edulis Fungi*, 31(3): 42-50 (in Chinese)
- Liu SQ, Yao L, Li RC, Yang LL, Zhang YF, Cheng SJ, Cao CJ, 2024. Activity evaluation of polysaccharides from *Tremella aurantialba* and its application in cosmetics. *Flavor Fragrance Cosmetics*, 8(4): 93-99 (in Chinese)
- Ma ZY, Zhu KX, Wu GP, Zhang YJ, Tan LH, Wu G, Xu F, 2021. Rheological properties of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. pulp. *Science and Technology of Food Industry*, 42(23): 81-86 (in Chinese)
- Rumpagaporn P, Kaur A, Campanella OH, Patterson JA, Hamaker BR, 2012. Heat and pH stability of alkali-extractable corn arabinoxylan and its xylanase-hydrolyzate and their viscosity behavior. *Journal of Food Science*, 77(1): H23-30
- Shen ZH, Yang LL, Cao Y, Luo XY, Yang AX, Lu QQ, Zi LS, Li R, 2025. Identification markers for *Naematelia sinensis* strains based on genome resequencing. *Mycosystema*, 44(4): 240214 (in Chinese)
- Sun T, Jiang H, Wang YL, Wang SY, Peng WJ, Lei P, Wang R, Xu H, Li S, Sun DF, 2022. Research advances on *Naematelia aurantialba* polysaccharides. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 22(8): 386-397 (in Chinese)
- Tang JY, Yang ZL, 2024. Phylogeny and taxonomy of the *Naematelia aurantialba* complex in southwestern China. *Journal of Fungi*, 10(12): 845
- Tosif MM, Bains A, Sridhar K, Inbaraj BS, Ali N, Dikkala PK, Kumar A, Chawla P, Sharma M, 2024. Fabrication and characterization of taro (*Colocasia esculenta*)-mucilage-based nanohydrogel for shelf-life extension of fresh-cut apples. *Gels*, 10(2): 95
- Wang HL, Ke LJ, Ding YN, Rao PF, Xu TH, Han H, Zhou JW, Ding W, Shang XY, 2022. Effect of calcium ions on rheological properties and structure of *Lycium barbarum* L. polysaccharide and its gelation mechanism. *Food Hydrocolloids*, 122: 107079
- Wang S, Li D, Li G, Duan N, He C, Meng J, Cheng Y, Geng X, Hou L, Chang M, Xu LJ, 2024. Functional properties, rheological characteristics, simulated digestion, and fermentation by human fecal microbiota of polysaccharide from *Morchella importuna*. *Foods*, 13(13): 2148
- Wu F, Zhou LW, Yang ZL, Bau T, Li TH, Dai YC, 2019. Resource diversity of Chinese macrofungi: edible, medicinal and poisonous species. *Fungal Diversity*, 98: 1-76
- Wu L, Chen SH, Li YB, Lai PF, Xiao Z, Chen JS, 2023. Rheological properties of water extract and crude polysaccharide solution of *Auricularia auricula* and beverage development. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 38(10): 1163-1175 (in Chinese)
- Wu XN, Xiong YK, 2008. Study on processing technology of *Tremella* polysaccharide capsule. *Journal of Zhejiang Chinese Medical University*, 32(4): 520-522 (in Chinese)
- Yang LL, Li RC, Cao Y, Li MJ, Luo XY, Shen ZH, Lu QQ, 2021. Research progress on the pharmacology and health

- care effects of *Naematelia aurantialba* and its polysaccharides. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 29(3): 176-182 (in Chinese)
- Yang LL, Li RC, Cao Y, Li MJ, Luo XY, Yang XJ, Wen SF, Shen ZH, Lu QQ, Zi LS, 2020. Research on the scientific name and taxonomic status of "jin er". *Edible and Medicinal Mushrooms*, 28(4): 252-255, 276 (in Chinese)
- Yu DM, 2024. Sequential extraction, physicochemical properties and rheological properties of *Naematelia aurantialba* polysaccharides. MS Thesis, Shanxi Agricultural University, Taiyuan. 1-103 (in Chinese)
- Zhang YM, Li YM, Ren X, Pu JF, Gao JY, Zhu DZ, 2024. Nutritional value and development and utilization situation of *Naematelia aurantialba* polysaccharides. *Food Research and Development*, 45(19): 219-224 (in Chinese)
- Zhu KX, Zhao SF, Zhu HY, Tang B, He SZ, Tan LH, 2017. Rheological properties of polysaccharide isolated from *Ilex kudingcha* C.J. Tseng. *Science and Technology of Food Industry*, 38(22): 61-65 (in Chinese)
- [附中文参考文献]**
- 戴玉成, 杨祝良, 2008. 中国药用真菌名录及部分名称的修订. *菌物学报*, 27(6): 801-824
- 冯冰, 唐庆九, 马来记, 2015. 金耳多糖酸降解产物的保湿功效研究. *日用化学品科学*, 38(9): 19-21
- 高春燕, 卢跃红, 田呈瑞, 2009. 枸杞多糖流变学特性研究. *食品科学*, 30(21): 28-31
- 郝正祺, 2018. 绣球菌多糖结构鉴定、凝胶流变学特性及其抗氧化和免疫功能的研究. 山西农业大学硕士论文, 太原. 1-71
- 李梦钰, 刘会平, 贾琦, 吴亚茹, 2021. 天冬多糖理化性质和流变学特性研究. *食品与发酵工业*, 47(5): 48-56
- 李秀秀, 尚静, 杨曦, 薛佳, 郭玉蓉, 2021. 多糖的增稠、胶凝及乳化特性研究进展. *食品科学*, 42(15): 300-308
- 李艳琴, 1997. 金耳高级营养保健饮料的研究. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 17(1): 42-45
- 刘利平, 刘艳芳, 孙浩雯, 冯杰, 杨林雷, 曹瑶, 李荣春, 张劲松, 2024. 生长期对金耳多糖结构特征及抗炎活性的影响. *食用菌学报*, 31(3): 42-50
- 刘诗琪, 尧岚, 李荣春, 杨林雷, 张一帆, 程抒劫, 曹崇江, 2024. 金耳多糖的活性评价及其在化妆品中的应用. *香料香精化妆品*, 8(4): 93-99
- 马之原, 朱科学, 吴桂萍, 张彦军, 谭乐和, 吴刚, 徐飞, 2021. 菠萝蜜多糖流变学特性研究. *食品工业科技*, 42(23): 81-86
- 沈真辉, 杨林雷, 曹瑶, 罗祥英, 杨爱霞, 陆青青, 子灵山, 李荣, 2025. 基于基因组重测序开发中华包革耳(金耳菌)菌株的鉴别标记. *菌物学报*, 44(4): 240214
- 孙涛, 姜浩, 王燕玲, 王诗雨, 彭雯杰, 雷鹏, 王瑞, 徐虹, 李莎, 孙达锋, 2022. 金耳多糖的研究进展. *中国食品学报*, 22(8): 386-397
- 吴俐, 陈寿辉, 李怡彬, 赖谱富, 肖正, 陈君琛, 2023. 黑木耳水提物和粗多糖溶液的流变特性及饮料开发. *福建农业学报*, 38(10): 1163-1175
- 吴晓宁, 熊耀康, 2008. 金耳多糖胶囊成型工艺的研究. *浙江中医药大学学报*, 32(4): 520-522
- 杨林雷, 李荣春, 曹瑶, 李梦杰, 罗祥英, 沈真辉, 陆青青, 2021. 金耳及金耳多糖的药用保健功效及其机理研究进展. *食药用菌*, 29(3): 176-182
- 杨林雷, 李荣春, 曹瑶, 李梦杰, 罗祥英, 杨晓君, 闻绍峰, 沈真辉, 陆青青, 子灵山, 2020. 金耳的学名及分类地位考证. *食药用菌*, 28(4): 252-255, 276
- 于东梅, 2024. 金耳多糖的分级提取、理化性质与流变特性研究. 山西农业大学硕士论文, 太原. 1-103
- 张怡敏, 李颜秘, 任潇, 普建凤, 高洁莹, 朱大洲, 2024. 金耳多糖的营养价值及开发利用现状. *食品研究与开发*, 45(19): 219-224
- 朱科学, 赵书凡, 朱红英, 唐冰, 贺书珍, 谭乐和, 2017. 苦丁茶冬青多糖流变学特性研究. *食品工业科技*, 38(22): 61-65