

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.02.010

董越, 谢枫, 肖建辉. 黑木耳粉对黑米凝胶物化特性及结构的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 83-91.

DONG Y, XIE F, XIAO J H. Effect of *auricularia auricular-judae* powder on the physicochemical properties and structure of black rice gel[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 83-91.

黑木耳粉对黑米凝胶物化特性及结构的影响

董越^{1,2}, 谢枫¹, 肖建辉²✉

(1. 江西省农业科学院 园艺研究所, 江西 南昌 330200;

2. 江西农业大学 食品科学与工程学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 为了改善黑米的加工性能, 以黑米粉为原料, 通过添加不同量的黑木耳粉 (5.0%、10.0%、15.0%、20%), 考察其对黑米粉糊化特性、热力学特性及其形成黑米凝胶的流变特性、质构特性以及微观结构的影响。添加黑木耳粉可以显著提高黑米的粘度并促进冷却过程中的凝胶化, 其中添加量为 20% 的黑木耳粉效果最好。添加黑木耳粉会抑制黑米凝胶内水分的流动, 使硬度及弹性显著增大, 糊化焓从 3.01 J/g 增加到 5.94 J/g, 羟基伸缩振动峰从 3 390 cm^{-1} 降低到 3 374 cm^{-1} , 黑木耳粉可以提高黑米凝胶结构的稳定性。扫描电镜结果显示, 添加黑木耳粉的黑米凝胶孔洞明显小于纯黑米凝胶, 且孔洞周围的基质层较厚, 进一步解释了黑木耳粉对改善黑米凝胶结构效果的机制。综上所述, 添加黑木耳粉对黑米凝胶物化特性和结构影响显著。

关键词: 黑米; 黑木耳粉; 物化特性; 凝胶结构

中图分类号: TS213 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)02-0083-09

网络首发时间: 2024-02-26 18:19:41

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240226.1351.008>

Effect of *Auricularia auricular-judae* Powder on the Physicochemical Properties and Structure of Black Rice Gel

DONG Yue^{1,2}, XIE Feng¹, XIAO Jian-hui²✉

(1. Institute of Horticultural, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200, China;

2. School of Food Science and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: In order to improve the processing performance of black rice, black rice flour was used as raw material and different amounts of black fungus powder (5.0%, 10.0%, 15.0%, 20%) were added to investigate its effect on the gelatinization and thermodynamic properties of black rice flour. The influence of rheological properties, textural properties and microstructure on its corresponding black rice gel was also studied. Adding *Auricularia auricular-judae* powder can significantly improve the viscosity of black rice and

收稿日期: 2023-08-02

基金项目: 江西省现代农业产业技术体系建设专项 (JXARS-19-4)

Supported by: Earmarked Fund for Jiangxi Agriculture Research System (No. JXARS-19-4)

作者简介: 董越, 女, 1995 年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为粮油加工。E-mail: 495434143@qq.com

通讯作者: 肖建辉, 男, 1983 年出生, 博士, 教授, 研究方向为农产品精深加工。E-mail: xiaojh666666@126.com

promote the gelation of black rice during cooling, among which adding 20% *Auricularia auricular-judae* powder had the best effect. The addition of *Auricularia auricular-judae* powder can inhibit the flow of water in black rice gel, and increase the hardness and elasticity of black rice gel significantly. The gelatinization enthalpy of black rice gel increased from 3.01 J/g to 5.94 J/g, and the hydroxyl stretching vibration peak of black rice gel decreased from 3 390 cm^{-1} to 3 374 cm^{-1} . The stability of black rice gel structure was improved by adding *Auricularia auricular-judae* powder. The SEM results showed that the pores of black rice gel supplemented with *Auricularia auricular-judae* powder were significantly smaller than that of pure black rice gel, and the matrix layer around the pores was thicker, which further explained the mechanism of *Auricularia auricular-judae* powder on improving the structure of black rice gel. In conclusion, the effect of *Auricularia auricular-judae* powder on the physicochemical properties and structure of black rice gel was significant.

Key words: black rice; *Auricularia auricular-judae* powder; physicochemical properties; gel structure

黑米不仅富含人体所必需的氨基酸、维生素以及丰富的矿质元素,更含有大米中所缺乏的花青苷、膳食纤维等成分^[1],在食品、药品等领域具有广阔的发展前景。但长期以来,黑米的加工利用方式比较单一,且黑米外部种皮层含有粗纤维和果胶,经过糊化后形成的凝胶相较于其他淀粉凝胶口感粗糙、弹性较差^[2],而凝胶特性对淀粉类凝胶食品的加工及食用性等较大的影响。为了改善黑米的加工性能,在实际加工生产中通常会对其进行粉碎,并选用适宜的食品添加剂与其复配用于提高其蒸煮特性与感官品质。陈剑春等^[3]发现 β -葡聚糖等不同食品胶体添加剂可以改善黑米粉复配体系的凝胶结构;靳凤芳等^[4]研究发现添加绿豆淀粉、马铃薯淀粉等均可以改善黑米凝胶的品质,其中绿豆淀粉的改善效果最佳。

黑木耳作为一种纯天然食品,富含酚类、类黄酮、糖蛋白、多糖和维生素等生物活性化合物^[5]。黑木耳中的粗纤维含量较高,吸水性较强,具有良好的凝胶特性及增稠稳定性^[6]。李妍等^[7]发现添加木耳多糖的玉米淀粉表现出更优越的弹性,增强了玉米淀粉的凝胶网络结构。王丹等^[8]发现黑木耳粉中的多糖可以改善面筋蛋白的网络结构,增加对淀粉颗粒的包裹能力。如能将黑木耳粉有效地与黑米粉相结合,不仅能强化其营养价值,也可能改善其凝胶特性和食用品质。

基于此,本研究将不同比例黑木耳粉与黑米粉进行复配,考察黑木耳粉对黑米粉糊化特性、

热力学特性及其形成黑米凝胶的动态流变特性、质构特性以及微观结构的影响,为扩大黑木耳粉在米面制品中的使用范围,以及开发黑木耳粉和黑米作为功能性系列产品提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑木耳(蛋白质含量 12.1%、脂肪含量 1.5%、总糖含量 65.6%):河北昊德盟农副产品有限公司;黑米粉:宁波江北五桥粮油有限责任公司;其余试剂购自西陇科技股份有限公司。

EVO-25 扫描电子显微镜:德国卡尔蔡司公司;Y37 电子式糊化粘度仪:土耳其 YUCEBAS 公司;DHR-2 型 Discovery 流变仪:美国 TA 公司;Burker D2 PHASER X 射线衍射仪:德国布鲁克;TX-XT 质构仪:英国 SMS 公司;DSC 214Polyma 差示扫描量热仪:德国 NETZSCH 公司;FTIR7000 傅里叶变换红外光谱仪:美国瓦里安公司;MicroMR-25 核磁共振成像分析仪:上海纽迈电子科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备

选取外观均匀、无异味的黑木耳干燥至恒重,粉碎后过 120 目筛,黑米粉过 120 目筛。配制黑木耳粉-黑米粉混合粉,其中黑木耳粉的添加量分别为黑米粉的 5%、10%、15%和 20%。

1.2.2 黑木耳粉对黑米粉糊化特性的影响测定

称取 35 g 样品,加入 450 mL 蒸馏水混合均匀后置入粘度仪中进行测试。测试速度保持 75 r/min

转速, 初始温度 30 °C, 升温速率 1.5 °C/min, 升温至 95 °C 保持 15 min, 以 1.5 °C/min 速率降至 50 °C 并保持 1 min。糊化参数由软件自动计算, 包括峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值及回复值。

1.2.3 黑木耳粉对黑米凝胶水分分布的影响测定

称取 5 g 样品加入 20 mL 蒸馏水配制成悬浮液后 85 °C 水浴 20 min。取 3 g 糊化样品置于带螺旋盖的透明玻璃瓶中, 在 4 °C 条件下储藏 24 h 制备成凝胶样品进行测试。低场核磁共振 (LF-NMR) 分析仪测试参数如下: 温度 32 °C, 回波时间 0.15 ms, 回波 5 000 次, 重复扫描 64 次, 90°脉冲 7 μs 和 180°脉冲 14 μs。采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 序列获取 CPMG 弛豫衰减曲线, 经单乘指数反演获得平均弛豫时间 T_2 , 多乘指数反演获得弛豫时间 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 。

1.2.4 黑木耳粉对黑米粉热特性的影响测定

称取 3 mg 样品和 6 μL 去离子水进行混合, 密封压盖后在 4 °C 平衡 12 h 测定热特性。差示扫描量热分析仪 (DSC) 测试参数如下: 升温范围 25~100 °C, 升温速率 10 °C/min。使用 Proten Analysis 软件对 DSC 曲线进行分析, 得到吸热峰的起始温度 (T_o)、峰值温度 (T_p)、终值温度 (T_c) 以及糊化焓 (ΔH)。

1.2.5 黑木耳粉对黑米凝胶质构特性的影响测定

将 1.2.3 中的凝胶样品制备成直径为 3 cm、高 10 mm 的圆柱测定质构特性。质构分析 (TPA) 仪测试参数如下: P/36R 探头, 下降速度 1 mm/s, 测试速度 1 mm/s, 返回速度 1 mm/s, 停留时间 5 s, 压缩比 50%, 触及力 5 g。

1.2.6 黑木耳粉对黑米凝胶流变特性的影响测定

取 1 g 样品加入 5 g 蒸馏水, 混合均匀后转入流变仪 PP-40 平板上测定。测试样品表面附上少量硅油以减少水分蒸发, 间隙设置为 1.0 mm。温度为 25~100 °C 和 100~25 °C 范围内, 以 5 °C/min 的速率依次加热和冷却。随后样品在 25 °C 下等温扫描 3 h, 扫描范围为 0.1~10 rad/s。振荡的最大应变和频率分别为 1% 和 1 Hz, 所有测试均在线性粘弹性区域范围内。

1.2.7 黑木耳粉对黑米粉凝胶晶体结构的影响测定

将 1.2.3 中制备的凝胶样品在 -80 °C 环境下

放置 48 h 后, 取出样品于 0.1 mbar、-50 °C 的条件下冷冻干燥 48 h 制备成冻干样品。X-射线衍射 (XRD) 仪测试参数如下: 扫描电压 30 kv, 电流 10 mA, 波长 0.154 nm, 衍射角 (2θ) 4~40°, 速度 2°/min, 温度 21 °C。

1.2.8 黑木耳粉对黑米粉凝胶分子有序度的影响测定

将 1.2.7 中制备的冻干样品用傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 仪测定。在 21 °C 的条件下, 冻干样品与溴化钾按照 1 : 20 混合后研磨压片在 400 cm^{-1} 至 4 000 cm^{-1} 的区域内扫描测量。

1.2.9 黑木耳粉对黑米凝胶微观结构影响测定

将 1.2.7 中制备的冻干样品制备成 3 mm 厚的薄片, 用双面导电胶带固定在样品架上并用溅射涂布机涂金。扫描电子显微镜 (SEM) 测试参数如下: 加速电压 10 kv, 放大倍数 100 倍。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 22 软件对本实验数据进行处理, 所得结果以平均值±标准差表示, 用 origin9 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 黑木耳粉对黑米粉糊化特性的影响

糊化过程中黑米粉内淀粉颗粒在水中受热之后吸水膨胀破裂, 加热期间伴随着分子内及分子间氢键断裂, 部分黑米淀粉分子溶出, 导致整个体系的黏度迅速升高^[9]。由表 1 可知, 随着黑木耳粉添加量增大, 黑米粉的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度均显著升高 ($P<0.05$)。当黑木耳粉添加量从 0% 增加到 20% 时, 黑米粉的峰值黏度从 1 090.67 cP 增加到 2 687.33 cP, 这可能是因为黑木耳粉分散在水中具有黏性。同时在糊化过程中, 不断溶出的多糖分子与黑米淀粉相互争夺水分, 两者分子相互结合使分子之间氢键作用增强, 从而增加了整个体系的黏度^[10]。

随着黑木耳粉添加量增大, 黑米粉的崩解值从 704.00 cP 显著增加到 1 583.33 cP, 崩解值的增加表明两者之间存在一定的相互作用, 王丹等认为黑木耳粉在吸水后黏度增大, 促进淀粉颗粒均匀分散, 增加其膨胀体积从而增强崩解值^[8]。回

生值反映了谷值黏度和最终黏度的差值,这主要是由于直链淀粉的重排造成的^[11]。当黑木耳粉添加量为 5% 时,黑米粉的回生值略有增加但无显著差异,而黑木耳粉添加量高于 5% 时,回生值显著增加 ($P<0.05$),说明黑木耳粉对黑米粉的凝胶化有促进作用。结果表明,黑木耳粉可以显著提高黑米粉的糊化粘度并促进冷却过程中黑米粉的凝胶化。

2.2 黑木耳粉对黑米凝胶水分分布的影响

由图 1A 可见,黑木耳粉-黑米凝胶的弛豫时间 (T_2) 随着黑木耳粉添加量增大而显著降低, T_2 从 51.20 ms 下降到 27.59 ms。 T_2 的大小与样品中的水分子的流动性强弱呈反比, T_2 越小则水分的流动性越弱^[12],表明黑木耳粉可以限制黑米凝胶内水分子的自由运动。产生这种现象的原因可能是黑木耳多糖具有良好的胶凝能力和亲水性,可以减缓水分子的运动,从而降低黑米凝胶的 T_2 。

弛豫时间谱如图 1B 所示,图谱中存在三种峰代表不同迁移率的水分子。第一个峰 T_{21} 代表了

凝胶体系中主要以共价键形式结合的紧密结合水,流动性差;第二个峰 T_{22} 为弱结合水;第三个峰 T_{23} 代表了自由水。对弛豫时间图谱进行积分,可以得到三个峰的峰面积 (A_2)。三个峰的峰面积表示为 A_{21} , A_{22} 和 A_{23} 。随着黑木耳粉添加量增大,黑米凝胶的三个峰值整体上逐渐向左发生偏移。结合表 2 的多乘指数反演参数, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 对应的范围分别为 6.14~3.51 ms、86.98~43.29 ms 和 3 274.55~305.38 ms。随着黑木耳粉添加量增大,黑米凝胶的 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 值均显著下降 ($P<0.05$),可能是由于黑木耳多糖与黑米淀粉交联形成的有序结构能够锁住水分子,减缓水分流动性。当黑木耳粉的添加量从 0% 增加到 20%,黑米凝胶的 $A_{21}\%$ 值显著增加, $A_{22}\%$ 和 $A_{23}\%$ 值显著降低 ($P<0.05$)。这说明黑木耳多糖与黑米淀粉分子存在静电相互作用,分子间的氢键作用力变强,黑米凝胶中自由水和多层水逐渐转化为结合水。这与 Chen 等报道的普鲁兰多糖对淀粉水分迁移的结果相一致^[13],表明黑木耳粉能增强黑米凝胶的持水能力。

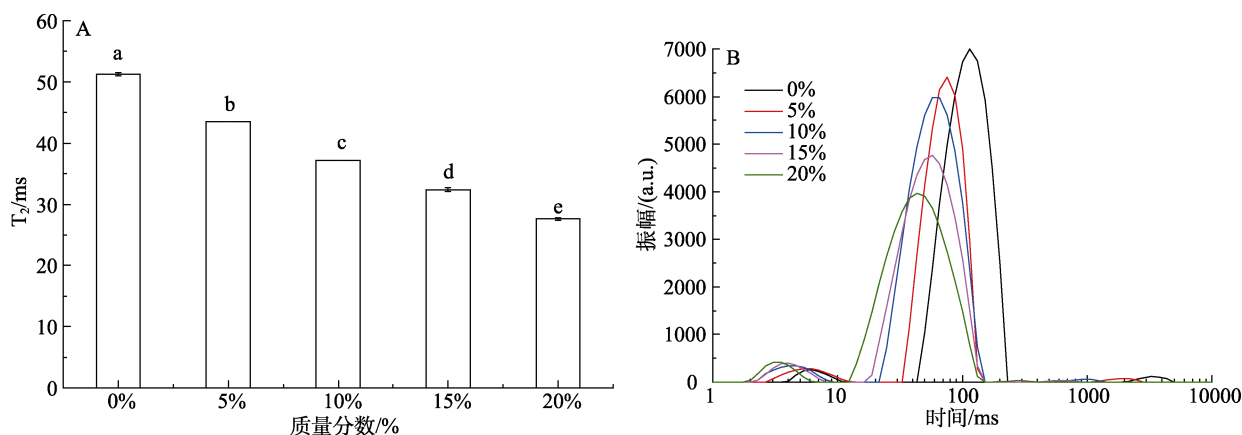
表 1 黑木耳粉对黑米粉糊化特性的影响

Table 1 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on pasting properties of black rice powder

黑木耳粉添加量/%	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	最终黏度/cP	崩解值/cP	回生值/cP
0	1 090.67±1.12 ^c	386.67±10.37 ^c	942.33±24.90 ^c	704.00±11.86 ^c	555.67±16.05 ^d
5	1 616.67±5.48 ^d	556.67±2.64 ^d	1 117.00±2.00 ^d	1 060.67±5.17 ^d	560.00±5.19 ^d
10	1 866.00±30.85 ^c	650.33±17.02 ^c	1 425.67±12.71 ^c	1 215.67±14.50 ^c	775.33±18.76 ^c
15	2 249.67±17.90 ^b	798.67±19.77 ^b	1 766.67±13.48 ^b	1 451.00±14.52 ^b	968.00±19.85 ^b
20	2 687.33±9.91 ^a	1 104.00±4.04 ^a	2 393.33±14.62 ^a	1 583.33±14.90 ^a	1 289.33±17.45 ^a

注:表中数值为平均值±标准偏差,同一列中不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$),a 代表最大值,测试取 3 次平均值。下同。

Note: The values in the table are the means ± standard deviation. Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). Letter a represents the maximum value. All tests were performed at three replicates. Same as below.



注: A: 弛豫时间; B: 多乘指数反演图谱。

Note: A: relaxation time; B: multiple exponent inversion spectrum.

图 1 黑木耳粉对黑米凝胶水分分布的影响

Fig.1 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on multiple exponent inversion parameters of black rice gels

表 2 黑木耳粉对黑米凝胶水分分布的影响

Table 2 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on multiple exponent inversion parameters of black rice gels

黑木耳粉添加量/%	T ₂ /ms			A ₂ /%		
	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃
0	7.06±0.00 ^a	114.98±0.00 ^a	3 274.55±0.00 ^a	2.47±0.03 ^c	96.26±0.03 ^a	1.27±0.03 ^a
5	6.14±0.00 ^a	75.65±0.00 ^a	1 873.82±0.00 ^a	3.00±0.00 ^b	95.87±0.07 ^b	1.13±0.07 ^{ab}
10	4.64±0.00 ^a	65.79±0.00 ^a	932.60±0.00 ^a	4.33±0.03 ^a	94.64±0.03 ^c	1.03±0.03 ^b
15	4.04±0.00 ^a	57.22±0.00 ^a	615.59±0.00 ^a	4.53±0.09 ^a	94.63±0.09 ^c	0.84±0.06 ^c
20	3.51±0.00 ^a	43.29±0.00 ^a	305.38±0.00 ^a	4.93±0.28 ^a	94.56±0.27 ^c	0.51±0.03 ^d

2.3 黑木耳粉对黑米粉热特性的影响

由表 3 可见，添加黑木耳粉实验组的初始温度、峰值温度和最终温度显著高于纯黑米粉，与纯黑米粉相比，增加 20%黑木耳粉的实验组峰值温度由 63.40 °C 提高至 67.56 °C。Li 等研究发现添加多糖能提高淀粉的糊化温度^[14]，可能因为黑木耳多糖包裹在黑米淀粉颗粒表面形成外层膜，使其耐热性变强。同时多糖和淀粉之间的氢键相互作用阻碍水分进入内部的结晶区域，导致其初始温度、峰值温度和最终温度升高。此外，表 3 显示当黑木耳粉添加量从 0%增加到 20%时，糊化焓从 3.01 J/g 增加到 5.94 J/g。这主要是因为一方面黑木耳多糖限制了淀粉链的迁移，另一方面可能是由于淀粉体系中黑木耳粉质量分数较高，结合水分布中实验结果可能是黑木耳多糖阻碍了自由水与淀粉分子的接触。多糖提高了黑米淀粉结构的热稳定性，使黑米淀粉发生溶胀吸水需要

吸收更多的热量，因此糊化需要更多的热能。说明黑木耳粉可以延长黑米粉的糊化过程和增大黑米粉糊化焓。

2.4 黑木耳粉对黑米凝胶质构特性的影响

由表 4 可见，添加黑木耳粉显著增大了黑米凝胶的硬度，从 992.32 g 显著上升至 3 060.91 g。这是因为在凝胶制备过程中，黑木耳粉较强的水合能力和胶凝性，降低了黑米凝胶中的自由水，同时黑木耳多糖与黑米淀粉相互作用增强了凝胶网络结构，从而使黑米凝胶硬度增大。徐艺彩认为加入黑木耳胶质会与淀粉竞争水分，导致黏度上升^[15]。说明凝胶硬度和凝胶强度的增加不仅是由于直链淀粉和支链淀粉的重排^[12]，同时也是黑木耳粉和黑米粉相互作用的结果。黑米凝胶的咀嚼性，内聚性和弹性的变化也有增大的趋势，而随着黑木耳粉添加量增大，黑米凝胶的粘性由 195.66 g.s 显著降低至 109.38 g.s (*P*<0.05)，表明

表 3 黑木耳粉对黑米粉热特性的影响

Table 3 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on gelatinization temperature and gelatinization enthalpy of black rice powder

黑木耳粉添加量/%	T ₀ /°C	T _p /°C	T _c /°C	ΔH _g /(J/g)
0	58.60±0.21 ^c	63.40±0.27 ^c	68.33±0.12 ^c	3.01±0.04 ^c
5	59.80±0.13 ^d	64.90±0.06 ^d	70.70±0.11 ^d	3.55±0.15 ^d
10	61.30±0.26 ^c	65.93±0.15 ^c	71.80±0.10 ^c	4.49±0.12 ^c
15	62.40±0.25 ^b	66.40±0.20 ^b	74.30±0.15 ^b	5.35±0.09 ^b
20	63.90±0.10 ^a	67.56±0.15 ^a	76.23±0.09 ^a	5.94±0.16 ^a

表 4 黑木耳粉对黑米凝胶质构特性的影响

Table 4 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on TPA of black rice gels

黑木耳粉添加量/%	硬度/g	粘性/(g.s)	咀嚼性	内聚力	弹性
0	992.32±52.13 ^c	195.66±11.29 ^a	468.87±12.57 ^c	0.63±0.06 ^c	0.75±0.03 ^c
5	1 081.65±13.44 ^d	158.28±12.61 ^b	578.25±20.17 ^d	0.66±0.02 ^{bc}	0.81±0.01 ^b
10	1 155.59±21.75 ^c	132.30±19.40 ^c	709.76±21.79 ^c	0.74±0.00 ^{bc}	0.83±0.00 ^{ab}
15	1 210.13±58.73 ^b	121.46±28.97 ^d	786.71±37.74 ^b	0.77±0.02 ^{ab}	0.84±0.01 ^{ab}
20	1 699.69±42.37 ^a	109.38±37.26 ^c	1 170.77±41.32 ^a	0.84±0.03 ^a	0.87±0.01 ^a

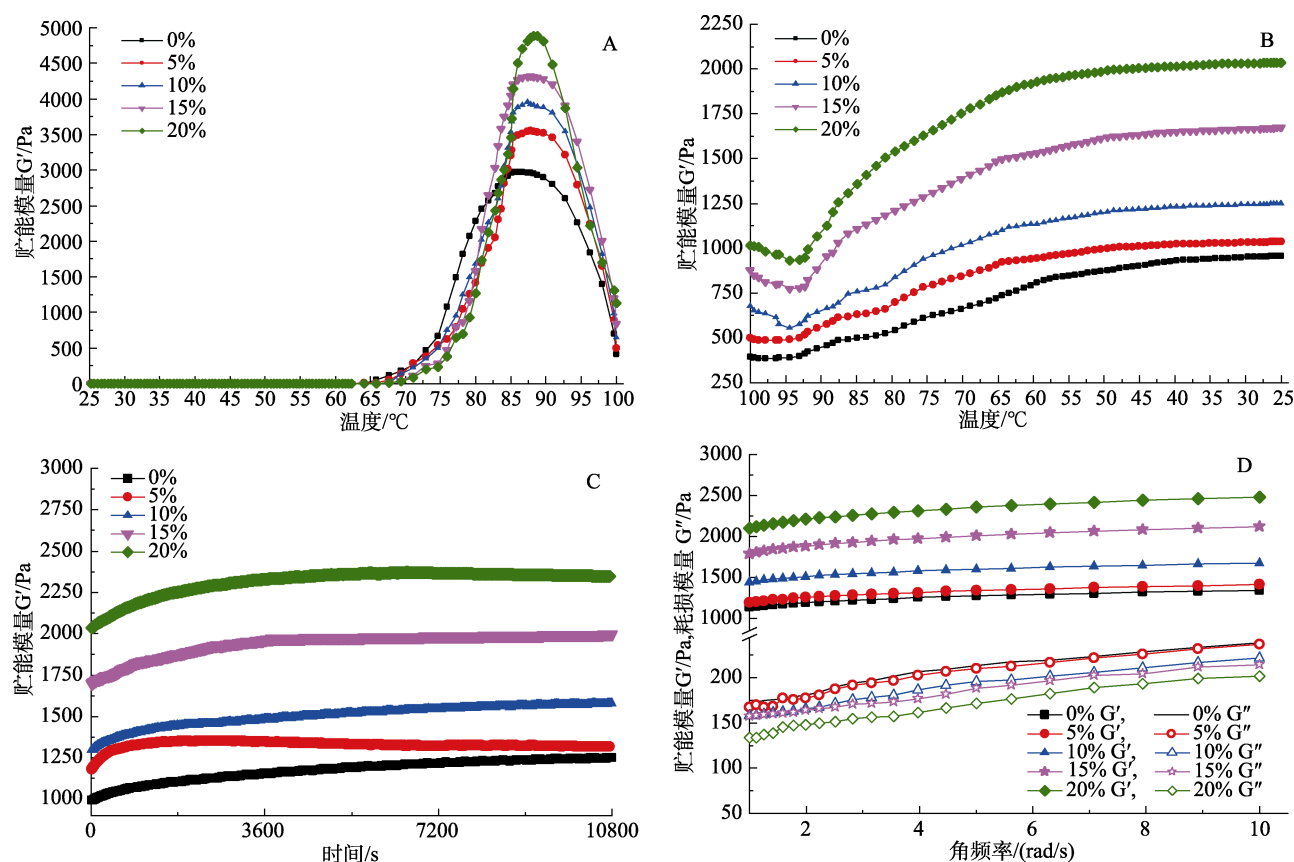
添加了黑木耳粉的黑米凝胶的结构相较于纯黑米凝胶更为紧密稳定。综上, TPA 实验结果与糊化特性中最终黏度结果一致, 表明黑木耳粉可以改善黑米凝胶的凝胶性能。

2.5 黑木耳粉对黑米凝胶流变特性的影响

样品升温过程的流变如图 2A 所示, 此过程可以模拟黑米粉糊化过程。所有样品的储能模量 (G') 均较小, 当达到一定温度时, G' 迅速上升到最大值, 随后在继续升温过程中下降。类似的流变现象也被 Xiao 等研究发现^[16]。这可能是因为加热过程中打乱了黑米淀粉颗粒的有序结构, 颗粒吸水膨胀, 弹性上升, 使其具有固态性质导致 G' 增大。在持续的加热和剪切力作用下, 加速了膨胀的淀粉颗粒的破坏, 形成体系连续相的淀粉糊, 从而降低 G' 。黑木耳粉在黑米粉受热糊化时具有较大的黏性和亲水性, 能够减弱水分和直链淀粉的流动性, 同时黑木耳多糖包裹住黑米淀粉阻止淀粉颗粒的进一步破裂, 两者相互聚集缠

绕使 G' 增大。随着黑木耳粉添加量增大, G' 的峰值顶点出现时间逐渐右移, 这与热特性结果一致。样品降温过程的流变如图 2B 所示。 G' 从上一升温阶段的下降趋势延续一段时间, 在冷却到一定温度后, G' 开始上升, 并在一定温度之后 G' 上升趋势逐渐平缓。随着黑木耳粉添加量增大, G' 的上升趋势变大, 这与糊化特性研究结果一致。这可能是黑木耳多糖本身具有黏性, 会在溶液中与淀粉分子发生交联作用, 形成氢键加强凝胶网络结构, 并且黑木耳粉限制了水分的迁移, 导致样品整体的 G' 增大。

样品在加热和冷却温度斜坡后, 25 °C 条件下恒温时间扫描 3 h 的弹性模量的变化如图 2C 所示。 G' 随着黑木耳粉添加量增大而逐渐增加, 在一定的时间后趋于稳定。这是因为更多直链淀粉在恒温过程中和黑木耳多糖发生纠缠, 增加贮藏过程中黑米凝胶的强度。图 2D 为 25 °C 条件下样品的 G' 和损耗模量 (G'') 随角频率的变化关系。



注: A: 升温过程; B: 降温过程; C: 时间扫描; D: 频率扫描。

Note: A: heating process; B: cooling process; C: time scanning; D: frequency scanning.

图 2 黑木耳粉对黑米凝胶的流变特性的影响

Fig.2 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on rheological properties of black rice gels

所有样品的 G' 和 G'' 均随着角频率的增大而增大, 且 G' 远大于 G'' , 表明黑木耳粉与黑米粉的复配凝胶属于凝胶动态流变学体系, Ma 也有类似的研究结果^[17]。黑米凝胶的 G' 均随着黑木耳粉添加量增大而增大, 而 G'' 的结果呈现反比, 这一结果与 TPA 中结果一致。这是由于黑木耳多糖与黑米淀粉颗粒通过静电相互作用^[18], 增强了凝胶网络结构, 导致弹性增加而黏性下降, 凝胶结构由疏松粘滞转变成紧致而富有弹性。结果表明, 黑木耳粉可以改善黑米凝胶的流变性能。

2.6 黑木耳粉对黑米凝胶分子结构的影响

由图 3 可见, 所有样品在 3410 cm^{-1} 和 2924 cm^{-1} 有强吸收峰, 这主要是由于 C—H 的振动和 O—H 的伸缩振动引起的。在 2928 cm^{-1} 附近为 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}$ 的伸缩振动吸收峰。与对照组相比, 添加黑木耳粉的黑米凝胶样品的羟基伸缩振动峰向低波数移动, 从 3390 cm^{-1} 降低到 3374 cm^{-1} , 这充分地证明复配体系中黑木耳粉与黑米淀粉分子间的氢键作用得到了增强。此外对于相容性好的两种聚合物复配后的红外图谱的峰形和谱带频率往往会与单聚合物存在差异, 加入黑木耳粉引起了羟基伸缩振动吸收峰 ($3100\sim3600\text{ cm}^{-1}$)、 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}$ 对称和反对称伸缩振动吸收峰 (2928 cm^{-1} 附近)、水分子弯曲振动吸收峰 (1643 cm^{-1} 附近) 及多糖指纹识别区 ($750\sim1200\text{ cm}^{-1}$) 中一些吸收峰的峰形、峰强度或谱带频率的不同变化。说明黑木耳多糖与黑米粉两者间具有较好的相容性, 黑木耳粉有助于黑米

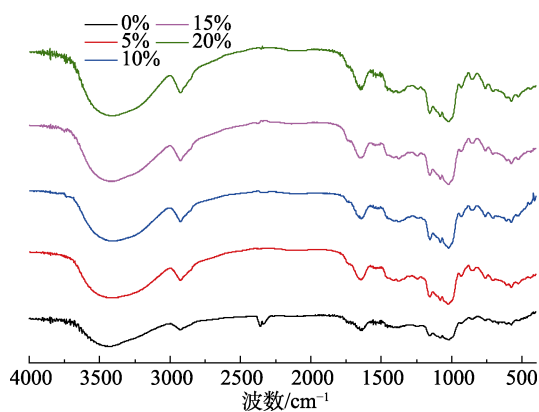


图 3 不同添加量黑木耳粉的黑米凝胶 FTIR 光谱分析
Fig.3 FTIR spectra of black rice gels with different amounts of *Auricularia auricular-judae* powder

凝胶形成更有序的结构。

此外, 1728 cm^{-1} 处的吸收峰是由于黑米凝胶中 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动引起的, 这说明黑木耳多糖可能是酸性多糖。 1603 cm^{-1} 和 1413 cm^{-1} 处的吸收峰是由 COO^- 的对称和非对称运动引起, 1257 cm^{-1} 和 1045 cm^{-1} 处的吸收峰分别是由 C—H 键的变角振动和 C—O—C 的拉伸振动引起的。黑木耳粉可以提高黑米凝胶的持水能力, 从而导致条带的增强, 这与 LF-NMR 的结果一致。与单独的黑米凝胶相比, 添加了黑木耳粉的黑米凝胶的红外光谱没有发现新的峰, 说明黑木耳粉和黑米粉之间没有形成共价键, 两者不存在共价相互作用。

2.7 黑木耳粉对黑米凝胶晶体结构的影响

结晶的含量和大小决定了衍射峰的高度和宽度, 峰越高、越窄, 表明着样品结晶含量越多、结晶区域越完整, 凝胶程度越强。由图 4 可见, 添加黑木耳粉的样品峰强有所增加, 但随着黑木耳粉质量分数的增加, 峰值强度变化不大, 峰的形状保持不变, 说明黑木耳粉可能不会直接影响黑米粉的晶体结构。

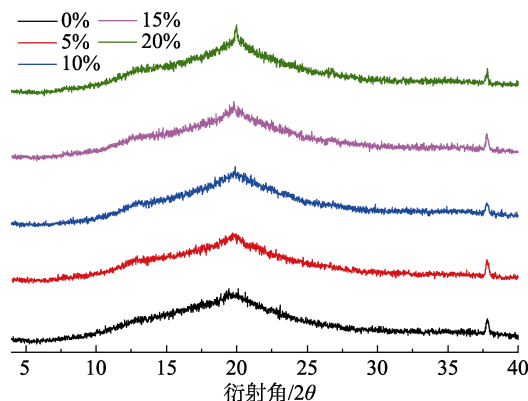


图 4 不同添加量黑木耳粉的黑米凝胶 XRD 谱图
Fig.4 XRD patterns of black rice gels with different amounts of *Auricularia auricular-judae* powder

2.8 黑木耳粉对黑米凝胶微观结构影响

由图 5 可见, 所有样品的微观结构均呈现网络状, 且孔洞周围有许多类似纤维的片状结构。纯黑米凝胶孔洞较大, 且孔洞周围的片层结构较薄。添加黑木耳粉的黑米凝胶的孔洞明显小于纯黑米凝胶, 且孔洞周围的基质层较厚。与空白组相比, 添加黑木耳粉可以使黑米凝胶的网络结构更加紧密有序, XRD 和 FT-IR 实验结果也表明了一点。这

种现象是由于黑米中直链淀粉重排形成凝胶网络,黑木耳多糖与黑米淀粉分子相互作用,促进黑米凝胶形成更有序的凝胶结构。结合 LF-NMR 实验结果,可能黑木耳粉通过降低黑米凝胶的水迁移率,

促进黑米凝胶形成更稳定的微观结构。黑木耳粉复配会降低黑米凝胶系统中水的流动性,从而产生更小,更紧凑的多孔结构^[19]。结果表明,黑木耳粉可以帮助黑米凝胶形成更好更有序的微观结构。

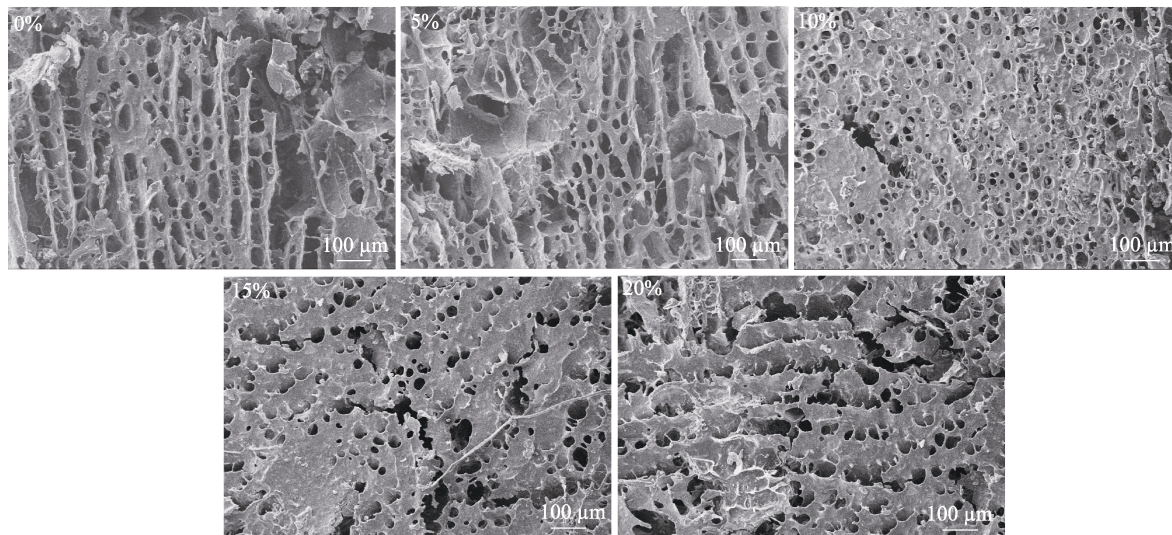


图 5 黑木耳粉对黑米凝胶微观结构的影响

Fig.5 Effect of *Auricularia auricular-judae* powder on microstructure of black rice gels

3 结论

添加黑木耳粉对黑米的糊化特性、凝胶质构特性、动态流变特性以及微观结构具有显著影响。添加黑木耳粉后黑米粉的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度均显著升高且促进了冷却过程中黑米的凝胶化。黑木耳粉会抑制黑米凝胶内水分的流动,增强黑米凝胶的持水能力。加入黑木耳粉后,黑米凝胶的硬度及弹性显著增大,增加了贮藏过程中黑米凝胶的强度并提高黑米凝胶结构的稳定性。添加黑木耳粉的黑米凝胶的孔洞明显小于纯黑米凝胶,且孔洞周围的基质层较厚,可以帮助黑米凝胶形成更好更有序的微观凝胶网络结构,改善黑米的凝胶特性。本研究为黑木耳粉在淀粉凝胶制品中的应用提供了理论指导,为黑米凝胶的品质提升提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] QIU T, SUN Y, WANG X, et al. Drum drying-and extrusion-black rice anthocyanins exert anti-inflammatory effects via suppression of the NF- κ B/MAPKs signaling pathways in LPS-induced RAW 264.7 cells[J]. Food Bioscience, 2020, 41(2): 100841.
- [2] 刘妍, 孙圣麟, 洪雁, 等. 不同米淀粉精细结构对其回生特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023: 1-11.

- LIU Y, SUN S L, HONG Y, et al. Effects of different fine structure of rice starch on its regenerative characteristics[J]. Journal of Grain and Oils, 2023 1-11.
- [3] 陈宁春, 韦剑思, 谢洁. 食品胶体添加对黑米全粉凝胶特性的影响[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(2): 101-107.
- CHEN N C, WEI J S, XIE J. Effect of food colloid addition on gel properties of black rice powder[J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 101-107.
- [4] 靳凤芳, 牛丽亚, 曾子聪, 等. 不同种类淀粉与黑米粉复配体系的理化性质和分子结构特性研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 106-115.
- JIN F F, NIU L Y, ZENG Z C, et al. Study on the physicochemical properties and molecular structure of different kinds of starch and black rice flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 106-115.
- [5] GONZAGA M L C, THIAGO M F M, LUCIANA M R, et al. Agaricus brasiliensis mushroom betaglucans solutions: Physicochemical properties and griseofulvin solubilization by self-assembly micro-nano particles formation[J]. Bioactive Carbohydrates & Dietary Fibre, 2014, 4(2): 144-154.
- [6] 韦剑思, 林莹. 黑米营养和部分功能成分特性及综合应用研究进展[J]. 广西农学报, 2022, 37(6): 86-94.
- WEI J S, LIN Y. Research progress of nutritional and functional components of black rice and their comprehensive application[J]. Journal of Guangxi Agricultural Sciences, 2022, 37(6): 86-94.
- [7] 李妍, 吴天昊, 吴玉柱, 等. 玉木耳多糖对玉米淀粉回生及消

- 化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 78-90.
- LI Y, WU T H, WU Y Z, et al. Effects of auricularia auriculata polysaccharides on retrogenesis and digestion of corn starch[J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 21(8): 78-90.
- [8] 王丹, 郑惠华, 纪阳, 等. 木耳粉对面团流变学特性及面条品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 43-50.
- WANG D, ZHENG H H, JI Y. Effect of fungus flour on rheological properties of dough and quality of noodles[J]. Food Science, 2019, 40(21): 43-50.
- [9] 冯文娟, 马森, 孙冰华, 等. 粒度对黑米粉及其淀粉特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 1-8.
- FENG W J, MA S, SUN B H, et al. Effect of grain size on characteristics of black rice flour and starch[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 1-8.
- [10] ZHANG B, BAI B, PAN Y, et al. Effects of pectin with different molecular weight on gelatinization behavior, textural properties, retrogradation and in vitro digestibility of corn starch[J]. Food Chemistry, 2018, 264(30): 58-63.
- [11] 赵天天, 赵丹, 马小涵, 等. 菊糖对面团流变学特性及面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(7): 7.
- ZHAO T T, ZHAO D, MA X H, et al. Effects of inulin on dough rheology and bread quality[J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 43(7): 7.
- [12] LUO Y, NIU L, LI D, et al. Synergistic effects of plant protein hydrolysates and xanthan gum on the short- and long-term retrogradation of rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 144.
- [13] CHEN L, TIAN Y, TONG Q, et al. Effect of pullulan on the water distribution, microstructure and textural properties of rice starch gels during cold storage[J]. Food Chemistry, 2016, 214: 702-709.
- [14] LI Q Q, WANG Y S, CHEN H H, et al. Retardant effect of sodium alginate on the retrogradation properties of normal cornstarch and anti-retrogradation mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69(8): 1-9.
- [15] 徐艺彩, 熊柳, 孙庆杰. 黑木耳胶质对豌豆淀粉黏度和质构性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(10): 6-9.
- XU Y C, XIONG L, SUN Q J. Effects of black fungus gum on viscosity and texture properties of pea starch[J]. Journal of Cereals and Oils, 2013, 28(10): 6-9.
- [16] XIAO J, ZHONG Q. Suppression of retrogradation of gelatinized rice starch by anti-listerial grass carp protein hydrolysate[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72(11): 338-345.
- [17] MA F, ZHANG Y, WEN Y, et al. Emulsification properties of polysaccharides from Dioscorea opposita Thunb[J]. Food Chemistry, 2017, 221(15): 919-925.
- [18] 张雨, 张康逸, 张国治. 淀粉老化过程机理及淀粉抗老化剂应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 316-321.
- ZHANG Y, ZHANG K Y, ZHANG G Z. Research progress of starch aging process mechanism and application of starch anti-aging agents[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 316-321.
- [19] 肖昕, 宋贤良, 陈奕, 等. 黑米淀粉理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 42-45.
- XIAO X, SONG X L, CHEN Y, et al. Analysis of physicochemical properties of black rice starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 42-45. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。