王瑞环, 田航, 贺婧雨, 等. 魔芋胶对复合植物蛋白素火腿品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 18−25. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040401

WANG Ruihuan, TIAN Hang, HE Jingyu, et al. Influence of Konjac Gum on the Quality of Composite Plant Protein Vegetarian Ham[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 18−25. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040401

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

魔芋胶对复合植物蛋白素火腿品质的影响

王瑞环[1], 田　航[1], 贺婧雨[1], 王娅晴[1], 王树敏[1], 薛柃燚[1], 罗登林[1,2,3], 韩四海[1,2,3,*]

（1.河南科技大学食品与生物工程学院, 河南洛阳 471023;
2.河南省食品原料工程技术研究中心, 河南洛阳 471023;
3.河南省食品绿色加工与质量安全控制国际联合实验室（河南科技大学）, 河南洛阳 471023）

摘　要: 本文旨在探讨魔芋胶在复合植物蛋白素火腿中的应用潜力。以魔芋胶、大豆拉丝蛋白、花生浓缩蛋白及谷朊粉为主要原料制备素火腿，对其水分分布、质构、蛋白质二级结构、蒸煮损失率、感官品质、色泽、微观结构等特性进行了系统研究，并分析了魔芋胶对复合植物蛋白凝胶体系动态流变学特性以及 Zeta 电位的影响。结果表明：魔芋胶添加水平为 1% 时，复合植物蛋白素火腿中不易流动水的比例较高（达到 97.54%）；蒸煮损失率比对照组降低 4.3%；硬度从 471.698±37.123 g 提升至 694.691±2.276 g，更适合口感；蛋白质二级结构更有序，*β*-折叠含量从 39.71%±7.61% 显著增至 43.70%±2.86%；火腿具有较好的色泽亮度及红度；微观网络结构更加均一致密；感官评价获得较高分值（90 分）。此外，在 1% 魔芋胶添加水平下，魔芋胶-复合植物蛋白凝胶体系具有最高的 G'值和最低的 G"值；Zeta 电位绝对值从 8.34±0.60 mV 增至最大值 13.78±0.31 mV，表明凝胶体系具有较好的稳定性。综上，魔芋胶的适量添加可显著改善复合植物蛋白素火腿的水分分布、质构与感官品质，有利于火腿产品在加工及储存过程中保持良好品质稳定性。

关键词: 魔芋胶, 复合植物蛋白, 素火腿, 动态流变学特性, 蛋白质二级结构
中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0018−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040401　　本文网刊:

Influence of Konjac Gum on the Quality of Composite Plant Protein Vegetarian Ham

WANG Ruihuan[1], TIAN Hang[1], HE Jingyu[1], WANG Yaqing[1], WANG Shumin[1], XUE Lingyi[1], LUO Denglin[1,2,3], HAN Sihai[1,2,3,*]

（1.College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2.Henan Engineering Research Center of Food Material, Luoyang 471023, China;
3.Henan International Joint Laboratory of Food Green Processing and Safety Control (Henan University of Science and Technology), Luoyang 471023, China）

Abstract: This paper aimed to explore the application potential of konjac gum in composite plant protein vegetarian ham sausage. The konjac gum, soy filiform protein, peanut protein concentrate and gluten were used as main raw materials to prepare vegetarian ham. A systematic study was conducted on its properties, including moisture distribution, texture, protein secondary structure, cooking loss rate, sensory quality, color, and microstructure. Additionally, the influence of konjac gum on the dynamic rheological properties and Zeta potential of the composite plant protein gel system was analyzed. The results demonstrated that when the addition level of konjac gum was 1%, the proportion of immobile water in

收稿日期: 2025−05−06
基金项目: 国家自然科学基金（32302075, 32202096）。
作者简介: 王瑞环（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与质量控制, E-mail: wrh177057@163.com。
*** 通信作者:** 韩四海（1971−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: hansihai@haust.edu.cn。

composite plant protein vegetarian ham sausage was higher (reaching 97.54%); the cooking loss rate was 4.3% lower than that of the control group; the hardness increased from 471.698±37.123 g to 694.691±2.276 g, which was more suitable for taste; the protein secondary structure was more ordered, and the content of β-sheet significantly increased from 39.71%±7.61% to 43.70%±2.86%; the ham had better color brightness and redness; the micro-network structure was more uniform and dense; and the sensory evaluation obtained a higher score (90 points). In addition, at the 1% konjac gum addition level, the konjac gum-composite plant protein gel system had the highest G' value and the lowest G" value; the absolute value of Zeta potential increased from 8.34±0.60 mV to the maximum value of 13.78±0.31 mV, indicating that the gel system had better stability. In conclusion, an appropriate addition of konjac gum could significantly improve the moisture distribution, texture and sensory quality of composite plant protein vegetarian ham sausage, which is conducive to maintaining good quality stability in the process of processing and storage.

Key words: konjac gum; composite plant protein; vegetarian ham; dynamic rheological properties; protein secondary structures

随着人们健康意识的提高以及对可持续食品的追求，植物蛋白食品作为传统动物蛋白食品的替代品，近年来已成为国内外消费者关注的热点。植物蛋白素火腿作为一种重要的植物蛋白制品，因其口感和外观与传统火腿相似，展现出广阔的市场发展前景。现有研究表明，魔芋胶在植物蛋白素火腿中已有应用，但产品在蒸煮过程中存在易碎、表面不光滑等问题[1−3]。这些问题一定程度上限制了植物蛋白素火腿的进一步推广。

魔芋胶（其主要成分魔芋葡甘聚糖）具有凝胶、水溶、增稠和乳化等特性，可通过与植物蛋白的交联作用促进大分子网络构建，同时降低产品脂肪含量并改善其稳定性[4−6]。胡小静等[7] 在研究过程中将大豆分离蛋白和魔芋胶按照 2∶3 的比例混合，所得的魔芋仿生鸡肉口感较好且与传统肉类具有相似的质地。王思琪等[8] 指出在植物蛋白产品当中加入魔芋胶能够促进蛋白间的结合，使产品有较高的持水性，提高产品的硬度。但目前有关魔芋胶对复合植物蛋白素火腿品质的影响尚鲜有报道。

为了深入探讨魔芋胶对复合植物蛋白素火腿品质的改善作用，本文以大豆拉丝蛋白、花生分离蛋白、谷朊粉等为主要原料，添加一定比例的魔芋胶制备复合植物蛋白素火腿，采用质构仪、低场核磁、扫描电镜、红外光谱、流变仪和 Zeta 电位等技术手段，对魔芋胶-复合植物蛋白素火腿的质构特性、水分分布、微观结构、蛋白质二级结构的变化等特性进行了分析，并采用流变仪和 Zeta 电位测定仪对魔芋胶-复合植物蛋白凝胶体系流变学特性及凝胶稳定性进行了表征。该研究以期丰富魔芋胶在复合植物蛋白素火腿加工中的应用理论，并为植物基食品（如素香肠、素肉丸）的品质改善提供科学依据。

1　材料与方法

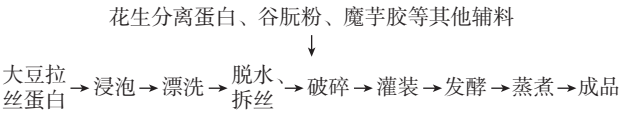
1.1　材料与仪器

大豆拉丝蛋白　百川生物科技股份有限公司；花生分离蛋白　禹王植物蛋白有限公司；谷朊粉　山东渠风食品科技有限公司；红薯淀粉　京山捷宇商贸有限公司；魔芋胶　河南万邦化工科技有限公司；TG 酶（酶活力 101.2 U/g）　中源生物科技有限公司。

SCIENTZ-10N 冷冻干燥机　新芝生物科技股份有限公司；TM3030Plus 台式扫描电镜　日立高新技术公司；Stable Micro Systems Ltd 食品物性分析仪　英国 SMS 公司；MINI20-015V-I 低场核磁共振成像分析仪　上海纽曼电子科技有限公司；Color I5 型色差计　美国 X-Rite 公司；TA DHR-2 食品流变仪　美国沃特斯公司；ERTEX-70 傅里叶变换中远红外光谱仪　BRUK-ER 公司；Rsd 电动灌肠机　合肥荣事达电子电器集团有限公司；XY-MW 卤素水分测定仪　常州市幸运电子设备有限公司；Zeta 电位分析仪　英国马尔文仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　工艺流程及操作要点



将称量好的大豆拉丝蛋白干基以 1∶6 的料水比，在 40 ℃ 条件下浸泡 20 min[9]，浸泡至无硬芯后进行脱水、拆丝（水分含量约为 55%）。将称量好的花生分离蛋白、谷朊粉等其他辅料与大豆拉丝蛋白湿基混合均匀后置于灌肠机内进行灌装（以肠衣容量的 2/3 为宜），随后置于发酵箱（37 ℃，30 min）反应后以 1600 W 功率下蒸煮 20 min。

1.2.2　实验设计　通过前期响应面优化试验确定复合植物蛋白素火腿的基础配方为：以经前处理（浸泡、漂洗、脱水、拆丝）后的 100 g 大豆拉丝蛋白湿基为准，水添加 10%，谷朊粉添加 6%，花生分离蛋白添加 6%，红薯淀粉添加 6%，油添加 4%，TG 酶添加 1%。在此配方基础上探究魔芋胶添加量对其品质特性的影响，添加量水平分别为：0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%。

1.2.3　成品检验方法

1.2.3.1　蒸煮损失率及持水性　将制备好的素火腿称重并记为 m_1，经蒸煮、冷却至室温后取出用滤纸擦干表面的浸出物，并称量蒸煮后的质量，记为 m_2，

蒸煮损失率计算公式如式(1)所示:

$$蒸煮损失率(\%)=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100 \quad 式（1）$$

素火腿持水性的测定参考李成等[10]的方法稍作修改:将制备好的素火腿切段,精确记录其质量为 W_1,随后放入底部置有脱脂棉的 50 mL 离心管内,放入离心机内在 5000 r/min 的转速下离心 30 min,离心后的素火腿质量记为 W_2。持水性计算公式如式(2)所示:

$$持水性(\%)=\frac{W_2}{W_1}\times 100 \quad 式（2）$$

1.2.3.2 质构分析 等待成品冷却后切成 3 cm 高、直径 2 cm 的圆柱状样品,使用食品物性分析仪选用 P36R 探头在质构分析(Texture profile analysis, TPA)模式下对样品进行质构特性测定,得到素火腿的硬度、弹性、咀嚼性和凝聚性。测试条件设置为:下降速度 4 mm/s,测试速度 2 mm/s,上升速度 2 mm/s,压缩比 40%,触发力为 5 g。

1.2.3.3 色差分析 使用色差仪对素火腿切面中心点进行测定,记录测定的 L^*、a^*、b^*值,取平均值进行分析。L^*值为明度系数,反映样品的白度和亮度,数值越大表明样品越明亮。a^*和 b^*值是彩度系数,二者共同决定样品的色调。a^*值为正时表示样品偏红,负值则表示偏绿,b^*值为正时表示样品偏黄,负值则表示偏蓝。

1.2.3.4 水分分布 根据衣春敏[11]的方法稍作修改,采用 Q-CPMG 序列进行测定。主要参数:主频率 SF21 MHz,采样频率 SW100 kHz,重复扫描次数 NS 为 8,回波个数 NECH 为 4000,回波时间 TE0.3 ms,TW4000 ms。

1.2.3.5 微观结构 将素火腿样品切成 1 cm 厚的薄片,置于冷冻干燥机中对样品进行 24 h 冷冻干燥,冻干后的样品切成 0.3 cm×0.3 cm×0.3 cm 的小方块置于密封袋内待观察。观察时将样品固定在导电胶带上进行喷金处理,厚度 5 nm。之后将样品放置于扫描电子显微镜下,放大 200 倍,寻找合适的图像并拍照。

1.2.3.6 流变学特性 动态流变学测定参考文献方法 [12] 稍作修改,具体如下:将冻干后的样品磨成粉末,过 100 目筛。以 20% 的比例分散在蒸馏水中,于磁力搅拌器上搅拌 1 h 后置于 4 ℃ 冰箱中过夜,将分散液装入流变仪平板(直径 40 mm)正下方,在 25℃ 下进行剪切试验,剪切速率范围为 0.1~100 Hz。

1.2.3.7 傅里叶变换红外光谱(FT-IR) 将研磨过筛后的样品与溴化钾(KBr)以 1∶100 的比例混合均匀,经研磨、压片后于傅里叶变换红外光谱仪在 0~4000 cm^{-1} 的波数范围内收集,扫描次数为 64,分辨率为 4 cm^{-1}。

1.2.3.8 Zeta 电位 为探究魔芋胶对素火腿复合植物蛋白凝胶稳定性的影响,对素火腿冻干粉复水凝胶的 Zeta 电位进行了分析。Zeta 电位测定方法参考文献方法 [13] 并稍作修改:将冻干过筛后的样品以 0.2% 的比例分散在去离子水中,置于磁力搅拌器上搅拌 30 min。采用电位分析仪对样品进行测试,测定折射率为 1.45,以去离子水作为连续相,设定其折射率为 1.33,测定温度为 25 ℃,平衡时间为 1.0 min。

1.2.3.9 感官评价 选取身体健康、无特殊食用癖好的同学 20 名,其中男女生各 10 名,参考蒋华彬[14]的方法对素火腿进行感官评价,感官评分表见表 1。

表 1 植物肉的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for plant meat

项目	标准要求	评分
色泽（10分）	色泽均一,有光泽	9~10
	色泽均一,有光泽,但光泽不足	5~8
	色泽发暗或有焦糊色	0~4
表观形态（10分）	表面光滑,结构密实,质地均匀	9~10
	表面较光滑,结构较密实,质地不均匀	5~8
	表面出现破裂,成型性较差	0~4
组织化度（40分）	具有明显的纤维结构,均匀一致,无层流(分层现象)	34~40
	具有纤维结构,均匀性较差,无层流(分层现象)	16~33
	纤维结构较弱,均匀性较差,拉丝较粗,有层流(分层现象)或气泡	0~15
口感（30分）	硬度适中,有嚼劲,弹性适宜	26~30
	稍硬,嚼劲较强,弹性较强	14~25
	较硬,嚼劲稍差,弹性稍有不足	0~13
风味（10分）	具有较好的香味和滋味,无焦糊味和异味	9~10
	具有植物肉的香味和滋味,基本无异味	5~8
	无香味,稍有异味	0~4

1.3 数据处理

所有样品测试均采用 3 个平行样进行实验,数据以平均值±标准偏差表示。用 SPSS 25 对数据进行 ANOVA 统计学分析,使用 $P<0.05$ 的最小显著性差异(LSD)和 Duncan、Walter Duncan 检验来评估对照组和处理组样本之间差异的显著性。利用 Origin 2018 绘图,通过 OMNIC 软件对蛋白质二级结构图谱进行处理,采用软件 PeakFit 计算样品蛋白质二级结构占比。

2 结果与分析

2.1 蒸煮损失率及持水性分析

魔芋胶的加入会使得大豆分离蛋白-肌原纤维蛋白复合蛋白的凝胶强度和持水性提升[15]。由表 2 可知,当魔芋胶添加量从 0% 增至 1% 时,素火腿的蒸煮损失率显著下降($P<0.05$),持水性相应提升;而当添加量超过 1.5% 后,蒸煮损失率呈现上升趋势,持水性则有所降低。对照组蒸煮损失率最高为 5.71%,持水性也最差。魔芋胶添加量为 1% 时,蒸煮损失率最低为 1.41%,与空白对照组相比降低 4.3%,持水性有所提升。其主要原因是,魔芋胶为非离子型亲水胶体,通过氢键形成不可逆的网络结构,将蛋白质包裹在其中,使得持水性上升[16]。若魔芋胶添加过量,则

会导致样品分子间作用力过强，使部分水分从组织间隙中被挤出，进而造成持水性下降，蒸煮损失率相应升高。MAJZOOBI 等[17] 在改善无肉香肠质量的研究中同样证实适量魔芋胶能显著降低产品的蒸煮损失率。

表 2　魔芋胶添加量变化对蒸煮损失率及持水性的影响
Table 2　Effects of the change of konjac gum addition amount on the cooking loss rate and water holding capacity

水平(%)	蒸煮损失率(%)	持水性(%)
0	5.71±0.78^{b}	95.64±0.29^{a}
0.5	2.43±0.81^{a}	96.76±0.12^{b}
1.0	1.41±1.66^{a}	97.90±0.19^{b}
1.5	2.09±1.64^{a}	97.79±0.54^{b}
2.0	2.20±1.23^{a}	97.01±1.56^{b}
2.5	2.69±1.62^{a}	95.14±0.20^{a}

注：同列数据标注不同的小写字母表示数据间具有差异性显著（P<0.05），表3~表4同。

2.2　TPA 分析

素火腿的硬度与咀嚼性随魔芋胶添加量的变化呈现特定规律（表 3）。当魔芋胶添加量由 0% 增至 1% 时，素火腿的硬度及咀嚼性均呈显著上升趋势（P<0.05）；随其添加量进一步增加至 2.0%，二者均出现不同程度的下降；而当添加量达到 2.5% 时，硬度与咀嚼性则再次呈现上升趋势。当魔芋胶添加量为 1% 时，其对素火腿的硬度具有显著影响（P<0.05），此时，素火腿的硬度处于适中水平，且咀嚼性较佳。当添加量增至 1.5% 时，素火腿的硬度、弹性及咀嚼性等质构指标与添加量为 1% 时相比，均无显著差异（P>0.05）。RUIZ-CAPILLAS 等[18] 将魔芋胶作为脂肪替代品加入到发酵干香肠中，研究发现，随着魔芋胶添加量的增多，香肠的硬度和咀嚼性均有所增大。位卫卫[19] 在研究中指出魔芋胶添加量的增多会占据其产品内部的空间，从而显著影响产品的特性；但过量添加则会导致产品内部的胶体过多，口感发黏，进而使得硬度和咀嚼性下降。

表 3　魔芋胶添加量对素火腿质构特性的影响
Table 3　Effect of konjac gum addition on the textural properties of plant-based ham

水平(%)	硬度(g)	弹性(mm)	咀嚼性(mJ)	凝聚性
0	471.698±37.123^{a}	0.661±0.031^{ab}	181.806±19.346^{a}	0.582±0.274^{ab}
0.5	624.067±3.264^{b}	0.650±0.054^{ab}	211.050±53.596^{ab}	0.514±0.058^{a}
1.0	694.691±2.276^{c}	0.682±0.070^{b}	273.994±41.658^{b}	0.576±0.030^{ab}
1.5	668.853±7.245^{c}	0.680±0.033^{b}	266.615±9.275^{b}	0.603±0.016^{b}
2.0	616.832±6.090^{b}	0.565±0.029^{a}	192.399±7.835^{a}	0.552±0.011^{ab}
2.5	767.106±15.702^{d}	0.592±0.039^{ab}	245.288±38.752^{ab}	0.537±0.042^{ab}

2.3　魔芋胶添加量的变化对植物火腿色泽的影响

产品色泽的变化会直接影响到产品的可接受性，是表征产品质量的重要指标之一。魔芋胶添加量对素火腿色泽的影响如表 4 所示。L^{*}、a^{*}和 b^{*}分别代表：亮度、红绿值和黄蓝值。林春芳[20] 在研究中指出，大米粉面团 a^{*}、b^{*}的变化可能与魔芋胶的亲水性有较大的联系。由色度对比可以看出，添加魔芋胶后会显著影响素火腿的 L^{*}（亮度）和 b^{*}（黄蓝值）。当魔芋胶添加量从 0% 增至 2.0% 时，素火腿的亮度和红绿值呈现出整体上升的趋势，但红绿值变化无显著差异（P>0.05），黄蓝值呈现出下降的趋势，产品整体色泽较好，光泽感较强。这是由于魔芋胶的加入改变了素火腿的内部网络结构，使切面更光滑，光线照射时镜面反射比例增加且更多光线可穿透表层并被内部网络结构规则反射，从而使素火腿的亮度提升，产品整体视觉感官较好[21−22]。

表 4　魔芋胶添加量对植物火腿色泽的影响
Table 4　Effect of konjac gum addition on the color of plant-based ham

水平(%)	L^{*}	a^{*}	b^{*}
0	54.73±3.08^{a}	5.48±0.47^{a}	26.39±3.71^{b}
0.5	55.17±1.33^{ab}	6.00±0.31^{a}	26.31±0.46^{ab}
1.0	55.56±2.38^{ab}	6.19±0.82^{a}	25.25±1.95^{ab}
1.5	55.78±2.20^{ab}	6.36±0.89^{a}	24.15±1.60^{ab}
2.0	56.69±2.31^{ab}	6.39±0.43^{a}	23.81±1.68^{ab}
2.5	58.35±0.81^{b}	6.63±0.56^{a}	21.87±2.30^{a}

2.4　水分分布分析

本研究利用低频核磁共振技术探究了素火腿中水分的分布和迁移，并以横向弛豫时间（T2）和质子信号幅度来评估水分的分布和迁移特征。T2 一般可分为 3 个部分：0.1~10 ms（T21）、10~100 ms（T22）和 100~10000 ms（T23），分别代表体系中的 3 种水状态，即结合水、不易流动水和自由水[22]。结合水是指与蛋白质紧密结合的水，不易流动水是指被保留在素火腿网络结构中的水，自由水是指能采用离心等处理后除去的水。如图 1A 所示，素火腿的水分分布包括 3 个明显的峰，表明素火腿中存在 3 种不同形式的水：T21（结合水 0.1~10 ms），T22（不易流动水 10~100 ms），T23（自由水 100~10000 ms）。与空白组相比，魔芋胶的加入使得火腿的 T21 向弛豫时间短的方向移动，T2 弛豫时间越早，表明素火腿体系中的水分和非水分成分的结合越紧密，水分的流动性也越弱[23]。

A21、A22、A23 分别代表样品中三种水分形态的占比。自由水减少与不易流动水增加（A23 降低及 A22 升高）是体系持水性提升的直接体现。本研究表明，魔芋胶添加量对水分存在形态的影响具有显著剂量依赖性。当添加量从 0% 增至 0.5% 时，A21 上升而 A22 下降。当魔芋胶添加量达 1% 时，大量水分被网络微孔物理包裹形成不易流动水，A22 达峰值（97.54%），体系持水性最优；当添加量超过 1.5% 时，A21 逐渐增加，说明魔芋胶与添加的水发生相互作用，使得素火腿中的结合水增多，水的流动性降低，素火腿的产品性质比较稳定。上述结果证实，魔芋胶通过分子间作用力与物料交联，促进体系融合形成致

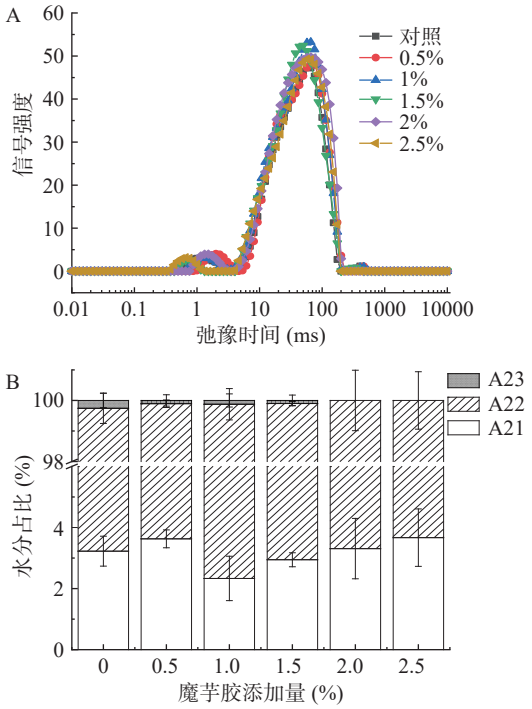


图 1 魔芋胶添加量对水分分布的影响

Fig.1 Effects of konjac gum addition amount on water distribution

密网络，优化孔隙分布以抑制水分子自由运动（A23 降低），从而增强素火腿持水性[24−25]。

2.5 微观结构分析

魔芋胶添加量对素火腿内部网络结构致密性存在显著调控作用，表现为随添加量增加，网络结构先致密化（孔隙减小）后松散化（孔隙增大）的变化规律（图 2）。对照组（魔芋胶添加量为 0%）呈现大量大小不均、分布密集且不规则的孔隙，聚集程度较低。添加魔芋胶后，其分子与体系中蛋白质等组分相互作用，显著改善网络结构致密性，但效果因添加量而异。当魔芋胶添加量为 1% 时，素火腿内部结构的孔洞最小且结构紧密。表明此时魔芋胶与素火腿复合植物蛋白体系的结合及协同作用最强，宏观上产品表面光滑、咀嚼性优良，感官评分较高，而添加量超过 1% 时，内部再次出现大量大小不一的密集孔隙，提示过量魔芋胶阻碍体系协同作用，网络结构无法包裹多余胶体，导致微观结构劣化。上述现象可能与魔芋胶的亲水特性相关：适量魔芋胶可填充拉丝蛋白间隙并通过水合作用促进物料融合，而过量添加则干扰疏水基团相互作用，破坏网络结构完整性，这与 Zhuang 等[26] 研究的魔芋胶对肌原纤维蛋白微观结构影响的结论一致。

2.6 流变学特性分析

为深入探究魔芋胶对素火腿复合植物蛋白的影响机制，对火腿冻干粉复水凝胶的流变学特性进行了表征。对素火腿进行冻干粉碎复水处理，能够充分展现魔芋胶对复合植物蛋白凝胶流变学特性的影响。图 3A、B 显示不同频率扫描下样品的储能模量（Storage modulus, G'）和损耗模量（Loss modulus, G"）。它们表示每个变形循环过程中的能量恢复与耗散情况，从而表征素火腿复合植物蛋白凝胶体系的弹性和粘性行为。在设定频率范围内，样品的 G'均大于 G"，这说明素火腿复合植物蛋白凝胶的弹性高于粘性呈现固体特征[27]；且随着频率的增加，G'和 G"都随之增加且没有交点，这表明该蛋白质与多糖复合体系呈现典型的频率依赖性公差曲线[28]。随着魔芋胶添加量的增多，魔芋胶-复合植物蛋白凝胶体系的弹性和硬度逐渐升高，其原因可能是魔芋胶催化的蛋白质分子之间共价交联的形成会增强凝胶的弹性和硬度，体系间形成了更完善的网络结构，表现为 G'在逐渐增大。此结论与吴伟都等[29] 研究的结论一致，即魔芋胶浓度升高可导致其溶液的 G'随之增大。当魔芋胶添加量为 1% 时，此时魔芋胶与内部网络结构充分交联，G'达到峰值，并且 G"值最低。当魔芋胶添加量超过 1% 时，G'值逐渐下降，G"值逐渐上升，表现为凝胶的硬度显著降低，脆性增加。分析其原因可能是由于过量的魔芋胶限制蛋白质分子的重新排列从而限制后续凝胶化过程中其他分子间相互作用反

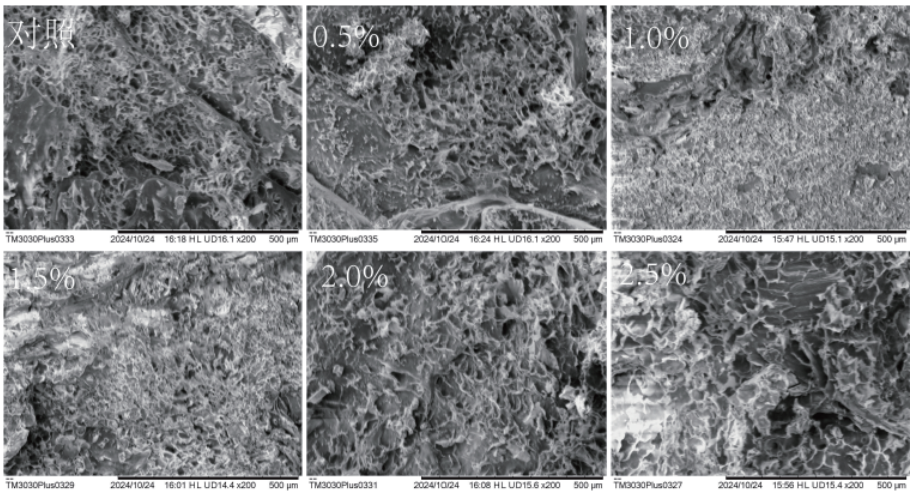


图 2 魔芋胶添加量对微观结构的影响

Fig.2 Effect of konjac gum addition amount on the microstructure

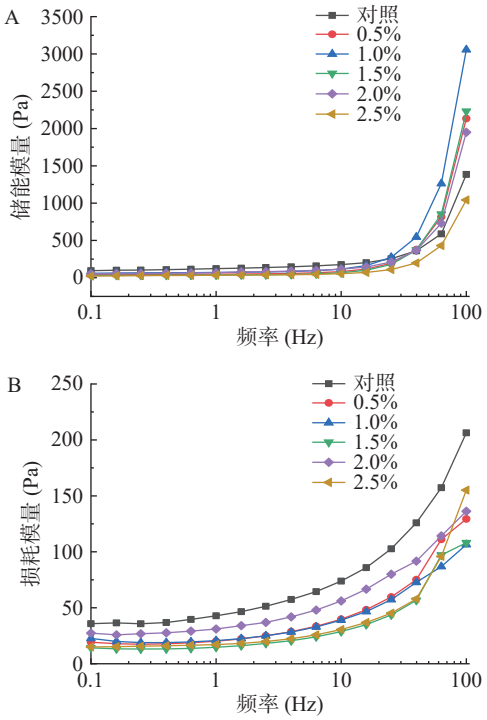


图 3　魔芋胶添加量对流变学特性的影响

Fig.3　Effect of konjac gum addition amount on the rheological properties

应位点的数量(例如疏水作用)，使得魔芋胶-复合植物蛋白凝胶体系在受到外力作用时难以发生弹性变形，从而导致 G'呈现出下降趋势。同时，过多的魔芋胶可能会吸收大量的水分，使得体系中的自由水分减少，影响了魔芋胶分子与水分子之间的相互作用，进而削弱了整个网络结构的弹性。这也与 Fu 等[30] 在大豆分离蛋白-多糖杂化乳液凝胶替代脂肪在植物肉中的应用研究结论一致。

2.7　FT-IR

魔芋胶添加量的变化引起了素火腿复合体系蛋白质二级结构的变化。由图 4 可以看出，当魔芋胶添加量从 0% 增至 1.5% 时，其复合体系二级结构中 β-折叠的占比明显上升；随其添加量增至 2.5% 时，β-折叠的占比则有所下降。分析其原因可能是魔芋胶作为一种亲水胶体、多糖，其添加量的增多使得魔芋胶分子与蛋白质分子之间形成更多的氢键、范德华力

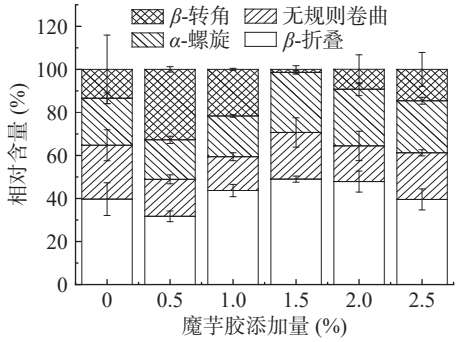


图 4　魔芋胶添加量对蛋白质二级结构的影响

Fig.4　Effects of konjac gum addition amount on the secondary structure of protein

等相互作用，这些分子间作用力使得蛋白质分子链重新排列，促使原有的其他构象(如无规则卷曲、α-螺旋)转变为有序的 β-折叠。钱海峰等[31] 在研究多糖对高燕麦面团的影响中同样证实了这一结论。当魔芋胶添加量从 1.5% 增至 2.0% 时，无规则卷曲、α-螺旋占比下降，β-转角占比明显升高。其原因在于，过量魔芋胶可通过吸收水分形成凝胶并附着于体系表面，从而破坏原有体系有序的网络结构。

2.8　Zeta 电位分析

Zeta 电位可以用来评价凝胶体系的稳定性，Zeta 电位绝对值越大，凝胶中的粒子间静电斥力就越强，越有利于凝胶体系的稳定[32]。由图 5 可以看出，与对照组相比，魔芋胶添加量的变化对样品的 Zeta 电位值产生了显著(P<0.05)的影响。这表明，魔芋胶的添加可对产品稳定性产生影响，且随着魔芋胶添加量的增加，样品体系 Zeta 电位绝对值呈现先升高后降低的变化趋势，该结果与杨振东等[33] 的研究一致，即随魔芋胶添加比例的增加，样品的 Zeta 电位绝对值呈先增大后减小的趋势。分析其原因为魔芋胶吸附在体系表面，导致 Zeta 电位的绝对值增大，蛋白表面的吸附位点有限，过量魔芋胶无法继续有效吸附，反而可能因分子间排斥导致电荷屏蔽，使 Zeta 电位绝对值减小。当魔芋胶添加量为 1% 时，Zeta 电位绝对值最大，为 13.78 mV，这表明该添加量下的素火腿稳定性相较于其他添加量为最高。

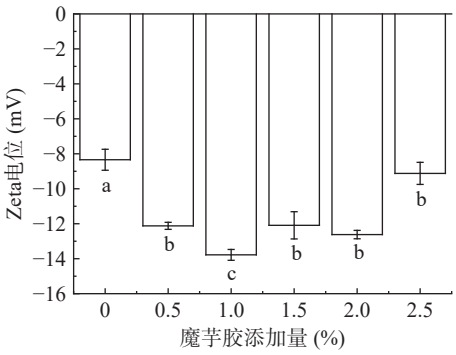


图 5　魔芋胶添加量对 Zeta 电位的影响

Fig.5　Effects of konjac gum addition amount on Zeta potential

注：图中不同小写字母表示差异显著 P<0.05。

2.9　感官评分分析

魔芋胶添加量的变化对素火腿感官评分的影响如图 6 所示，魔芋胶添加量为 0% 时，素火腿的感官评分值最低，质地不均匀，切面有明显分层，硬度较小，咀嚼性较差。与对照组相比，添加魔芋胶之后，素火腿的感官评分明显上升。当魔芋胶添加量小于 1% 时，随着魔芋胶添加量的增多，素火腿的感官评分呈现出上升的趋势，魔芋胶添加量为 1% 时，此时的素火腿感官评分值最高，此时的素火腿具有明显的光泽，表面光滑，内部质地均匀，纤维结构比较明显，软硬程度适中。当魔芋胶添加量超过 1% 时，此时的素火腿结构相对密实，纤维结构比较明显，但有分层

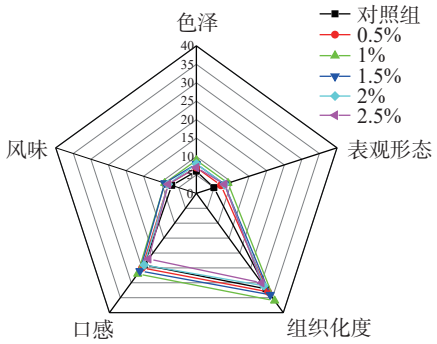


图 6 魔芋胶添加量变化对感官评分的影响

Fig.6 Effect of changes in konjac gum addition on sensory evaluation

现象，稍硬，嚼劲相对较差，素火腿的感官评分有所下降。

3 结论

本文以大豆拉丝蛋白、花生浓缩蛋白及谷朊粉为主要原料，制备了魔芋胶-复合蛋白素火腿，系统地探讨了魔芋胶对复合植物蛋白素火腿质构、水分分布及微观结构等特性的影响，并分析了魔芋胶-复合植物蛋白凝胶流变学特性及凝胶稳定性。结果表明，魔芋胶可以显著降低素火腿的蒸煮损失率，提升其持水性，同时增加硬度及感官评价分值。微观结构观察表明，魔芋胶的引入使素火腿微观网络结构更趋均一致密。FT-IR 分析显示，魔芋胶可以提高素火腿中 β-折叠结构占比，促使蛋白质二级结构更有序。流变学分析表明，随魔芋胶添加量增加，魔芋胶-复合植物蛋白凝胶体系的 G'值升高，G"值降低。Zeta 电位测定结果表明，魔芋胶能显著增大凝胶体系的 Zeta 电位绝对值，从而增强体系稳定性。魔芋胶作为一种天然、功能性的食品添加剂，在素火腿中的应用具有广阔的前景。未来的研究应进一步深入探讨魔芋胶与其他成分的相互作用，优化素火腿的配方和生产工艺，进而有望大幅度改善植物蛋白素火腿的整体品质以及延长其保质期，拓展其应用领域，为消费者提供更加安全、健康、美味的素火腿产品。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 王洪立, 陈家浩, 任伟, 等. 鸡腿菇素火腿肠的工艺研究[J]. 特种经济动植物, 2015, 18(7): 51−52. [WANG Hongli, CHEN Jiahao, REN Wei, et al. Study on the technology of *Coprinus comatus* sausage[J]. Special Economic Animal and Plant, 2015, 18(7): 51−52.]

[2] 张平安, 宋莲军, 张建威, 等. 腐竹碎料素火腿肠的研制[J]. 现代食品科技, 2011, 27(4): 412−414,422. [ZHANG P A, SONG L J, ZHANG J W, et al. Preparation of vegetarian ham sausage with broken beancurd sticks[J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(4): 412−414,422.]

[3] 杜童申, 刘悦, 王馨怡, 等. 基于主成分分析和响应曲面法的植物基肉丸配方优化[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 110−119. [DU Tongshen, LIU Yue, WANG Xinyi, et al. Optimization of plant-based meatball based on principal component analysis and response surface methodology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(7): 110−119.]

[4] TANG Wei, PAN Qin, HE Jianfei, et al. Plant-based meat: The influence on texture by protein-polysaccharide interactions and processing techniques[J]. Food Research International, 2025, 202: 115673.

[5] CHEN L, YU L, RAMMILE E, et al. Progress on the application of raw materials and ingredients in the processing of comminuted meat-analog products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 410−421.

[6] 耿雪晴, 李昆, 李晓毓, 等. 魔芋胶的保健功能及其在低脂肉制品中的应用[J]. 江苏调味副食品, 2018, 35(3): 28−30. [GENG Xueqing, LI Kun, LI Xiaoyu, et al. The healthy function of konjac gum and its application in low fat meat products[J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2018, 35(3): 28−30.]

[7] 胡小静, 耿家圣, 李绍平, 等. 魔芋仿生鸡肉的研制[J]. 食品工业科技, 2006, 27(8): 101−102,105. [HU X J, GENG J S, LI S P, et al. An imitated chicken meat from konjac[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 27(8): 101−102,105.]

[8] 王思淇, 张彤, 李天娇, 等. 植物蛋白基肉制品的制作工艺优化及品质分析[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(8): 113−120. [WANG Siqi, ZHANG Tong, LI Tianjiao, et al. Optimization of processing technology and quality analysis of plant protein-based meat products[J]. China Food Additives, 2024, 35(8): 113−120.]

[9] WANG Ruixue, LI Yingqiu, SUN Guijin, et al. Effects of rehydration time, temperature and ultrasound treatment on rehydration, quality and structure properties of low moisture texturized soybean protein[J]. Food Biophysics, 2023, 18(3): 411−420.

[10] 李成, 王丽岩. 杏鲍菇和巴沙鱼皮明胶替代脂肪对香肠品质特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2024, 46(3): 516−522. [LI Cheng, WANG Liyan. Effects of replacing fat with *Pleurotus eryngii* and basha fish gelatin on quality characteristics of sausage[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2024, 46(3): 516−522.]

[11] 衣春敏. 高胶凝性苦杏仁蛋白的酶法制备及其在火腿肠中的应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021. [YI Chunmin. Enzyme-aided preparation of high gumminess bitter almond kernel protein and its use in ham sausage making[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.]

[12] 岳莉娜, 彭雨露, 曹燕, 等. 魔芋胶对大米粉流变性能的影响[J]. 美食研究, 2019, 36(3): 70−73. [YUE Lina, PENG Yulu, CAO Yan, et al. Effect of konjac glucomannan on rheological properties of rice noodles[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2019, 36(3): 70−73.]

[13] 宁祎杰, 王琪, 祝妍, 等. 大豆分离蛋白/κ-卡拉胶复合体系相行为、结构特性和相互作用研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(22): 71−82. [NING Yijie, WANG Qi, ZHU Yan, et al. Phase behavior, structural characteristics and interaction of soy protein isolate/κ-carrageenan composite system[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(22): 71−82.]

[14] 蒋华彬. 小麦蛋白高水分挤压组织化特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. [JIANG Huabin. The properties of high moisture textured wheat protein[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.]

[15] 李鹏鹏. 多糖对肌纤维蛋白大豆蛋白混合凝胶的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [LI Pengpeng. Effects of polysaccharides on the gel properties of myofibrillar protein and soy protein compos-

ite[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.］
［16］ LI J X, YADAV M P, LI J L. Effect of different hydrocolloids on gluten proteins, starch and dough microstructure[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 85−90.
［17］ MAJZOOBI M, TALEBANFAR S, ESKANDARI M H, et al. Improving the quality of meat-free sausages using *κ*-carrageenan, konjac mannan and xanthan gum[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(5): 1269−1275.
［18］ RUIZ-CAPILLAS C, TRIKI M, HERRERO A M, et al. Konjac gel as pork backfat replacer in dry fermented sausages: Processing and quality characteristics[J]. Meat Science, 2012, 92(2): 144−150.
［19］ 位卫卫. 基于感官评价和质构特性的人造素肉饼研制[D]. 武汉：武汉轻工大学, 2023.［WEI Weiwei. Development of artificial vegetarian meat patty based on sensory evaluation and texture characteristics[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2023.］
［20］ 林春芳. 魔芋胶对米粉面团品质影响及应用的研究[D]. 福州：福建农林大学, 2024.［LIN Chunfang. Study on the effect and application of konjac gum on the quality of rice noodle dough[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.］
［21］ 王嘉楠, 康壮丽, 马亚萍, 等. 魔芋胶结合高静压处理对鸡胸肉糜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 279−284.［WANG Jianan, KANG Zhuangli, MA Yaping, et al. Effect of gum combination ultra high pressure treatment on the quality of chicken meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 279−284.］
［22］ 湛泽润. 大豆蛋白基“肥瘦相间”人造肉的制备研究[D]. 广州：华南理工大学, 2024.［ZHAN Zerun. Study on the preparation of soy protein-based "fat and thin" artificial meat[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.］
［23］ 秦志鹏, 韩四海, 李佩艳, 等. 阿拉伯木聚糖-甘薯淀粉复合体系理化特性表征[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 225−232.［QIN Zhipeng, HAN Sihai, LI Peiyan, et al. Characterization of physicochemical properties of arabinoxylan-sweet potato starch composite system[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 225−232.］
［24］ ULLAH I, HU Yang, YOU Juan, et al. Influence of okara dietary fiber with varying particle sizes on gelling properties, water state and microstructure of tofu gel[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 512−522.
［25］ 张帅. 魔芋胶和沙蒿胶对小麦面团特性的影响及其作用机制研究[D]. 重庆：西南大学, 2019.［ZHANG Shuai. Effects of konjac gum and *Artemisia sphaerocephala* Krasch. gum on the properties of wheat dough and its mechanism[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.］
［26］ ZHUANG Xinbo, JIANG Xiping, ZHOU Hengyue, et al. Insight into the mechanism of physicochemical influence by three polysaccharides on myofibrillar protein gelation[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115449.
［27］ OWCZARZ P, ORCZYKOWSKA M, RYŁ A, et al. The effects of sucrose on the sol-gel phase transition and viscoelastic properties of potato starch solutions[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 94−101.
［28］ HE Dan, LI Yue, WU Yinglong. Effects of konjac gum on physicochemical, rheological, textural properties, and *in vitro* digestibility of purple potato starch[J]. Starch-Stä rke, 2024, 76(9-10): 2300076.
［29］ 吴伟都, 姜建, 徐玲玲, 等. 魔芋胶溶液浓度对其流变学特性的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7403−7409.［WU Weidu, JIANG Jian, XU Lingling, et al. Effects of concentrations of konjac glucomannan solutions on their rheological properties[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(18): 7403−7409.］
［30］ FU Jun, ZHAN Zerun, DUAN Qingfei, et al. Application of soybean protein isolates-polysaccharides hybrid emulsion gels as alternative fats in fabricating plant-based meats with two-phase[J]. LWT, 2025, 218: 117524.
［31］ 钱海峰, 潘琪锋, 李言, 等. *β*-葡聚糖酶对高燕麦含量面团性质与蛋白结构的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 41−49,13.［QIAN Haifeng, PAN Qifeng, LI Yan, et al. Effect of *β*-glucanase on properties and protein structure of dough with a high oat flour content[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 41−49,13.］
［32］ 徐桂芝, 胡迪, 李玉锋, 等. 马铃薯淀粉对改性南极磷虾蛋白乳液凝胶制备和稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(6): 144−154.［XU Guizhi, HU Di, LI Yufeng, et al. Effect of potato starch on the preparation and stability of modified Antarctic krill protein emulsion gels[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(6): 144−154.］
［33］ 杨振东, 李文博, 程婕, 等. 亚麻籽胶-魔芋胶复合凝胶体系的制备及特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(2): 8−15.［YANG Zhendong, LI Wenbo, CHENG Jie, et al. Preparation and characteristics of flaxseed gum-konjac glucomannan system[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2024, 39(2): 8−15.］