

大豆分离蛋白-多糖-淀粉减盐凝胶体系的构建及性质表征

杨思琪, 张谦谦, 许英茹, 林志雄, 张 怡, 郑宝东, 曾红亮

Construction and Characterization of Soybean Isolate Protein-Polysaccharide-Starch Salt-reducing Gel System

YANG Siqi, ZHANG Qianqian, XU Yingru, LIN Zhixiong, ZHANG Yi, ZHENG Baodong, and ZENG Hongliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040377>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大豆分离蛋白-卡拉胶-黄原胶三元复合Pickering乳液的制备与特性分析

Preparation and Characterization of Pickering Emulsion of Soybean Protein Isolate-Carrageenan-Xanthan Terpolymer

食品工业科技. 2023, 44(15): 16-24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010181>

精制对魔芋葡甘聚糖及其与 κ -卡拉胶复配凝胶性质的影响

Effects of Refining on Konjac Glucomannan and Gel Properties of Its Blend with κ -Carrageenan

食品工业科技. 2022, 43(16): 81-89 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110184>

薯类淀粉与卡拉胶混凝体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Characteristics of the Mixed Systems of Tuber Starch and Carrageenan and Its Effect on the Gel Properties of Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2020, 41(2): 1-8,15 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.001>

不同浓度卡拉胶对汉麻分离蛋白凝胶性质及结构的影响

Effects of Different Concentrations of Carrageenan on the Gel Properties and Structure of Hemp Protein Isolate

食品工业科技. 2024, 45(12): 28-37 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050357>

黄原胶对大豆分离蛋白凝胶流变特性和微观结构的影响

Effects of Xanthan Gum on Rheological Properties and Microstructure of Soy Protein Isolate Gel

食品工业科技. 2022, 43(4): 65-72 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060103>

魔芋胶对大豆分离蛋白-肌原纤维蛋白复合凝胶结构及流变性质的影响

Effect of Konjac Gum on the Gel Structure and Rheological Properties of Myofibrillar Protein-Soy Protein Isolate Composite

食品工业科技. 2024, 45(16): 121-128 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100237>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨思琪, 张谦谦, 许英茹, 等. 大豆分离蛋白-多糖-淀粉减盐凝胶体系的构建及性质表征 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 44-51.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040377

YANG Siqi, ZHANG Qianqian, XU Yingru, et al. Construction and Characterization of Soybean Isolate Protein-Polysaccharide-Starch Salt-reducing Gel System[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 44-51. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040377

· 研究与探讨 ·

大豆分离蛋白-多糖-淀粉减盐凝胶体系的构建及性质表征

杨思琪^{1,2}, 张谦谦^{1,2}, 许英茹^{1,2}, 林志雄^{1,2}, 张 怡^{1,2,3}, 郑宝东^{1,2}, 曾红亮^{1,2,3,*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002;

2. 闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心, 福建福州 350002;

3. 农业农村部食用菌加工及综合利用技术集成科研基地, 福建福州 350002)

摘要: 本文分别以魔芋葡甘聚糖、卡拉胶和黄原胶构建基于大豆分离蛋白-多糖-木薯淀粉减盐凝胶。研究结果表明, 大豆分离蛋白-魔芋葡甘聚糖凝聚物和大豆分离蛋白-卡拉胶凝聚物对猪舌上的钠离子有较强的滞留能力, 有利于咸味感知。电子舌结果表明, 相较于卡拉胶和黄原胶, 大豆分离蛋白-魔芋葡甘聚糖-淀粉减盐凝胶体系 (ST+SPI-KGM+1.5% NaCl) 与 2% NaCl 淀粉凝胶 (ST+2% NaCl) 咸味最相似。在微观结构上 SPI-KGM 与淀粉发生交联后形成了连续的致密的网络结构, X 射线能量色散能谱表明钠离子在 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 呈现不均匀分布。相较于 2% NaCl 淀粉凝胶, 大豆分离蛋白-多糖-淀粉减盐凝胶持水能力和质构特性 (硬度、咀嚼性和内聚性) 均显著增加 ($P<0.05$), 其中 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 效果最优。利用大豆分离蛋白-多糖复合凝聚物富集 NaCl 来调控盐在食物基质中的不均匀分布, 能够实现减少 25% 盐含量而不降低咸味。本研究开发了一种具有不均匀盐分布的减盐凝胶体系, 同时保持其质地感知, 为降低淀粉基固态食品盐含量提供新的思路。

关键词: 减盐, 氯化钠, 淀粉基凝胶, 大豆分离蛋白, 魔芋葡甘聚糖, 卡拉胶, 黄原胶

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0044-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040377



本文网刊:

Construction and Characterization of Soybean Isolate Protein-Polysaccharide-Starch Salt-reducing Gel System

YANG Siqi^{1,2}, ZHANG Qianqian^{1,2}, XU Yingru^{1,2}, LIN Zhixiong^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2,3},

ZHENG Baodong^{1,2}, ZENG Hongliang^{1,2,3,*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Engineering Research Center of Fujian-Taiwan Special Marine Food Processing and Nutrition,

Ministry of Education, Fuzhou 350002, China;

3. Scientific Research Base of Edible Fungi Processing and Comprehensive Utilization of Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In this paper, salt-reducing gel based on soybean protein isolate-polysaccharide-cassava starch was constructed with konjac glucomannan, carrageenan and xanthan gum, respectively. The results showed that soy protein-Konjac glucomannan condensates and soy protein-carrageenan condensates had strong retention capacity for sodium ions on pig tongue, which was conducive to salty perception. Electron tongue analysis showed that compared with carrageenan and

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 十四五国家重点研发计划“食品制造与农产品物流科技支撑”重点专项项目 (2022YFD2101301); 2022 年度福州市海洋科创高地“揭榜挂帅”项目 (2022-ZD-017)。

作者简介: 杨思琪 (1998-), 女, 博士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: sqyang247@163.com。

* 通信作者: 曾红亮 (1986-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: zhlfst@fafu.edu.cn。

xanthan gum, the salt-reducing gel system of soy protein isolate-Konjac glucomannan-starch (ST+SPI-KGM+1.5% NaCl) and 2% NaCl starch gel (ST+2% NaCl) had the most similar saltiness. In microstructure, SPI-KGM and starch were cross-linked to form a continuous and dense network structure. X-ray energy dispersion spectroscopy showed that sodium ions in ST+SPI-KGM+1.5% NaCl presented an uneven distribution. Compared with 2% NaCl starch gel, the water holding capacity and texture properties (hardness, chewiness and cohesiveness) of soybean protein-polysaccharide-starch salt-reducing gel were significantly increased ($P<0.05$), among which ST+SPI-KGM+1.5% NaCl had the best effect. The concentration of NaCl by soybean isolate protein-polysaccharide complex condensates to regulate the uneven distribution of salt in the food substrate could reduce 25% salt content without reducing the saltiness. This study developed a salt reduction gel system with uneven salt distribution while maintaining its texture perception, providing a new idea for reducing the salt content of starch-based solid foods.

Key words: salt-reducing; NaCl; starch-based gel; soybean isolate protein; konjac glucomannan; carrageenan; xanthan gum

盐(主要成分为 NaCl)在食品中具有增味剂、结构调节剂和防腐剂等重要作用,可以优化产品的感官性能和质量^[1]。膳食盐摄入过量与血压升高以及中风和心血管疾病的风险增加直接相关,它是全球第二大疾病和死亡的饮食风险因素^[2]。世界卫生组织(WHO)建议将盐摄入量从 8~11 g/d(或每天 3000~4000 mg 钠)减少到 5 g/d(或每天 2000 mg 钠)^[3],但现实生活中平均每天的食盐摄入量在 9 至 12 g/d 之间^[4]。目前,在大多数发达国家,每日盐摄入量的 75% 来自加工食品,包括烘焙食品、酱汁和肉制品,而在中国,盐摄入量主要来自烹饪中添加的调味料,如酱油和豆豉^[5]。据估计,每天减少 5 g 盐可使全球中风发病率降低 23%,心血管疾病发病率降低 17%^[6]。因此,通过设计和生产低钠加工食品来减少目前的平均盐摄入量将对公众健康产生显著的有益影响,并且是降低全球疾病风险的最具成本效益的方法之一。

针对加工食品减盐的迫切需求,人们提出了几种有前景的策略,能够在保持食品中咸味可感知的同时减少钠含量。其中包括气味诱导的咸味增强、调整食品基质促进钠的释放、构建食品中钠的不均匀分布以及修饰盐的晶体结构^[7]。对于一些固体和半固体凝胶食品,例如面包、奶酪和香肠,可以通过控制食物基质中盐的不均匀空间分布和微观结构来实现减盐,但不影响味道和品质^[8]。多糖在加热时会表现出充分的凝胶化,形成多孔网络结构有助于盐分快速扩散,增加咸味感知^[9]。但单一多糖凝胶相较于蛋白质-多糖体系,其持水性较差,咀嚼后内部浆液释放量较少导致盐释放速率降低^[10]。此外,蛋白质-多糖凝胶网络表现出更高的机械强度,能够克服单一多糖或蛋白质凝胶性较差的缺点^[11]。Gao 等^[12]构建魔芋葡甘聚糖-低盐肌纤维蛋白-甜菜果胶低盐凝胶,基于分子间相互作用形成了连续、致密的三维复合凝胶网络,钠离子被有效地固定在紧密网络结构内,延长了其在口腔内的滞留时间,从而增强咸味感知。蛋白/多糖复合凝聚物的形成主要是由静电相互作用和熵增导致的反离子释放驱动的,而这两种驱动力都取决于 pH^[13]。本研究分别利用魔芋葡甘聚糖、卡拉

胶、黄原胶与大豆分离蛋白通过酸沉淀形成蛋白质-多糖复合凝聚物,再分别添加至木薯淀粉中形成凝胶,构建大豆分离蛋白-魔芋葡甘聚糖-淀粉减盐凝胶、大豆分离蛋白-卡拉胶-淀粉减盐凝胶(ST+SPI-CG+1.5% NaCl)、大豆分离蛋白-黄原胶-淀粉减盐凝胶(ST+SPI-XG+1.5% NaCl),测定了大豆分离蛋白-多糖复合凝聚物对钠离子滞留的能力和不同减盐凝胶体系的钠离子分布情况,并分析了不同减盐凝胶体系的微观结构、质构特性及持水能力促进钠离子释放的机制,旨在为降低凝胶食品中盐含量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆分离蛋白(食品级,纯度>99%) 临沂山松生物制品有限公司;卡拉胶(食品级,纯度>99%)、黄原胶(食品级,纯度>99%)、木薯淀粉(食品级,纯度>99%) 河南中辰生物有限公司;魔芋葡甘聚糖(食品级,纯度>99%) 湖北强森魔芋科技有限公司;磷酸二氢钾 分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;氯化钠、氯化钙、氯化钾、碳酸氢钾 分析纯,广东西陇化工股份有限公司;荧光素钠 分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;猪胃粘蛋白 分析纯,上海源叶生物有限公司。

L4-5K 台式低速离心机 湖南可成仪器设备有限公司;FTC 流变仪 英国 Mecmesin 公司;WSC-S 色差仪 上海申光仪器仪表有限公司;Ts2-FL 倒置荧光显微镜 北京长恒荣创科技有限公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器 河南省予华仪器有限公司;EYEL4 冷冻干燥机 上海爱朗仪器有限公司;iTongue 30 电子舌 浙江浙科仪器设备有限公司;Oxford Xplore 30 能谱仪 上海牛津仪器科技有限公司;蔡司 Sigma 300 扫描电子显微镜 德国卡尔蔡司公司;TSM-Pilot 质构分析仪 美国 FTC 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SPI-多糖凝聚物的制备 SPI-多糖复合凝聚物的制备方法参考李彦磊^[13]的方法,制备 1%(w/v) SPI 溶液,分别缓慢加入 0.25wt% 多糖(魔芋葡甘聚糖、卡拉胶、黄原胶),1.5%(w/v)NaCl,经 3000 r/min

磁力搅拌 1 h。用 1 mol/L HCl 调节 pH4, 制得 SPI-多糖复合凝聚物。

1.2.2 SPI-多糖复合凝聚物对钠的黏附保留测定 分别测定 SPI-魔芋葡甘聚糖复合凝聚物(SPI-KGM)、SPI-卡拉胶复合凝聚物(SPI-CG)和 SPI-黄原胶复合凝聚物(SPI-XG)对钠的黏附保留, 参考 Li 等^[7]的研究, 以去离子水为对照。猪舌取自刚被屠宰的猪并保存在-4 ℃ 冰上。猪舌的前侧面部分被切成 1 cm², 厚 1 mm 的截面。0.005%(w/v)荧光素钠与 SPI-多糖凝聚物溶液混合后滴在猪舌上, 然后将猪舌置于 45°角的载玻片上, 采用 6 mL/min 的流速用人工唾液进行冲洗, 在不同体积(0、1、2、3、5、10、15、20 mL)的人工唾液洗脱后, 采用荧光显微镜对猪舌进行荧光拍照, 比较荧光强度变化。人工唾液的配方为 CaCl₂(4 mmol/L)、KCl(10 mmol/L)、NaHCO₃(2 mmol/L)、NaCl(7 mmol/L)、KH₂PO₄(6.7 mmol/L)和猪胃粘蛋白(1.0%, w/v)。

1.2.3 大豆分离蛋白-多糖-淀粉减盐凝胶的制备 实验组分别将 15%(w/v)木薯淀粉分散到方法 1.2.1 的 SPI-魔芋葡甘聚糖复合凝聚物、SPI-卡拉胶复合凝聚物和 SPI-黄原胶复合凝聚物分散体系中, 搅拌均匀后, 在 90 ℃ 水浴中搅拌加热 15 min, 使其完全凝胶化分别生成 SPI-魔芋葡甘聚糖-淀粉减盐凝胶、SPI-卡拉胶-淀粉减盐凝胶和 SPI-黄原胶-淀粉减盐凝胶。对照组为 15%(w/v)木薯淀粉添加到 2%(w/v)盐溶液中, 90 ℃ 水浴加热 15 min 形成淀粉凝胶。

1.2.4 感官评价 感官评价参考 Wu 等^[14]方法并进行了修改。感官评价成员共 20 人, 男 10 人, 女 10 人, 评价前经过不同 NaCl 溶液浓度(0.06、0.12、0.18、0.27 和 0.35 g/100 mL)排序识别训练, 以适应标准溶液的评估尺度和强度。所有凝胶样品形状大小统一为边长 1.5 cm 正方体, 用三位数随机编码。使用表 1 中列出的 100 分标准对凝胶的质地、颜色、咸味接受度、口感和整体接受度进行评估。

1.2.5 电子舌分析 取 5 g 凝胶样品加入 35 mL 蒸馏水, 4000 r/min 均质离心 10 min, 取上清液利用电子舌测定咸味, 不同传感器设置电压参数为 S1 10 Hz, S2 10 Hz, S3 100 Hz, S4 1 Hz, S5 1 Hz, S6

10 Hz。

1.2.6 扫描电子显微镜观察微观结构 将凝胶在-80 ℃ 冰箱中冷冻 12 h 后进行真空冷冻干燥得到冻干凝胶。喷金处理后, 将样品固定在样品台上, 然后用扫描电子显微镜观察, 加速电压设为 5.0 kV^[15]。

1.2.7 钠元素分布情况 凝胶中钠元素分布采用 X 射线能量色散能谱分析^[16]。将凝胶样品快速冷冻后进行真空冷冻干燥, 将冻干样品切成 1 mm 厚的薄片, 采用能谱仪在 20 kV 加速电压下观察样品及元素分布。

1.2.8 颜色分析 凝胶的颜色分析使用色差仪分别测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.2.9 质构特性的测定 质构分析采用配有 2.5 cm 圆柱形探针的质构分析仪, 力量感应元量程 500 N, 形变百分比 50, 检测速度 60 mm/min, 起始力 0.75 N, 检测凝胶的硬度、弹性、咀嚼性和内聚性^[17]。

1.2.10 持水能力的测定 持水能力参考 Zhang 等^[17]的研究, 稍作修改。将 3 g 凝胶放入含有三层滤纸的塑料离心管中, 使用离心机 4000 r/min 离心 20 min, 根据公式计算凝胶持水率:

$$\text{持水率}(\%) = m_2/m_1 \times 100$$

式中: m_1 表示离心前凝胶的质量; m_2 表示离心后凝胶的质量。

1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次, 结果用平均值±标准差表示。采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重检验。 $P < 0.05$ 表示差异具有显著性。

2 结果与分析

2.1 大豆分离蛋白-多糖复合凝聚物对钠离子滞留能力影响

多糖在舌上的黏附能力对于钠离子在口腔中的感知是一个重要的因素^[18]。图 1 表明了 SPI-KGM、SPI-CG、SPI-XG 和水样品在离体猪舌上的荧光素钠的保留情况。以水处理作为对照, 猪舌上的荧光素钠经 1 mL 人工唾液清洗后, 荧光强度显著减少, 经 5 mL 人工唾液清洗后荧光信号基本消失。与对照组相比, SPI-KGM、SPI-CG 和 SPI-XG 均延长钠在猪

表 1 不同凝胶体系的感官评分标准

Table 1 Sensory score criteria of different gel systems

总分(100分)	质地(20分)	颜色(20分)	咸味接受度(20分)	口感(20分)	整体接受度(20分)
16~20	结构致密, 粘弹性好, 不黏手, 挤压后快速恢复, 表面无裂痕	白色, 有光泽	略咸, 但能够接受	口感较硬, 无颗粒感, 无异味	乐于接受
11~15	结构较为致密, 略有气泡, 有弹性, 略黏手, 挤压后较快恢复, 表面有裂痕	白色带微黄色, 有光泽	咸或淡, 但能够接受	口感较软, 略有颗粒感, 无异味	接受
6~10	多处出现不均匀气孔, 弹性较差, 挤压后无法恢复	黄色	部分特别咸但能够接受	口感很硬, 有颗粒感, 略有异味	基本接受
1~5	结构软糯, 不成形	深黄色	很咸很淡, 不能接受	口感软, 有颗粒感, 有明显异味	不能接受

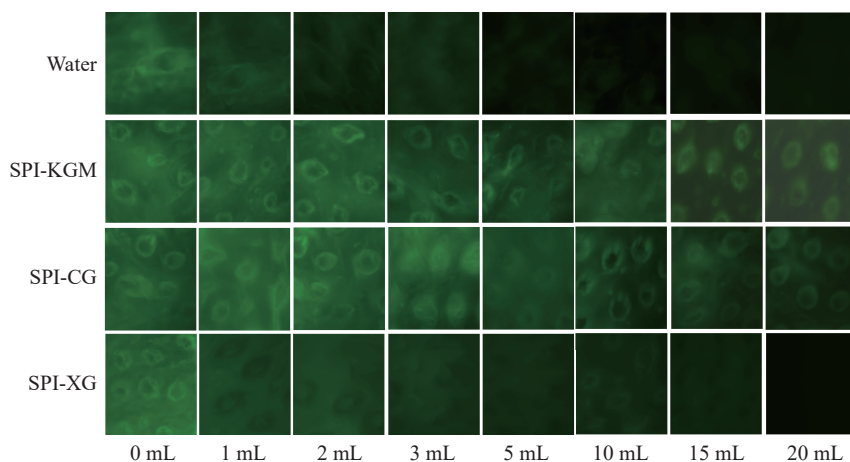


图 1 大豆分离蛋白-多糖复合凝聚物对钠离子滞留的能力影响

Fig.1 Effect of soybean isolate protein-polysaccharide complex condensate on the ability to retain sodium ions

舌上的保留时间,这可能是由于多糖的粘膜粘附特性有利于钠离子在舌上的滞留^[19]。然而,5~10 mL 人工唾液足以洗掉 SPI-XG 上的荧光。SPI-KGM 和 SPI-CG 样品保留时间最长,用 20 mL 人工唾液清洗后猪舌上的荧光素钠仍然可见。因此,SPI-KGM 和 SPI-CG 对猪舌的钠离子滞留能力更强,有利于咸味的感知。

2.2 感官评价

不同凝胶体系感官评价如图 2 所示,ST+2% NaCl 被认为是颜色评分最高的凝胶,但咸味接受度、质地、口感和整体接受度的分值均低于减盐凝胶,质地被认为较致密,富有弹性,挤压后较快恢复但有裂痕,整体接受度较低,品尝后略咸但是能接受,总分为 73.30 ± 2.08 分。添加 SPI-多糖提高了凝胶体系的质地,其中 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 质地评分最高,为 18.15 ± 0.73 分,结构更加致密,粘弹性好,不黏手,挤压后能够快速恢复且表面无裂痕。此外,相较于其他 SPI-多糖处理,减盐凝胶添加 SPI-KGM 处理后咸味接受度显著提高,这表明 SPI-KGM 有利于咸味的感知,咀嚼时未出现颗粒感,整体接受度被认为最高,总分为 82.75 ± 2.77 。

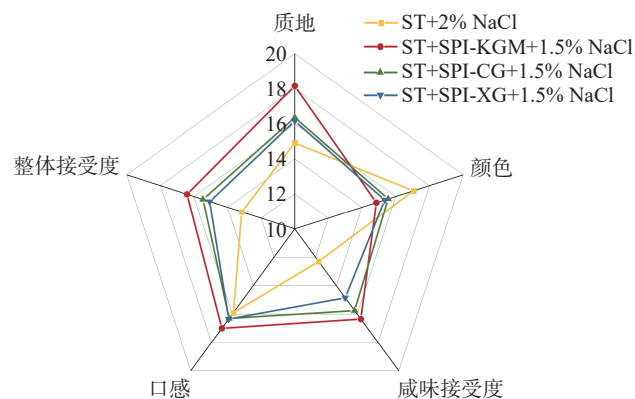


图 2 不同凝胶体系的感官评价

Fig.2 Sensory evaluation of different gel systems

2.3 电子舌分析

图 3 为 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl、ST+SPI-CG+1.5% NaCl、ST+SPI-XG+1.5% NaCl 和 ST+2% NaCl 样品的电子舌 PCA 结果分析图。PCA 图中位于相近位置的样品表现出相近的感官性质,样品位置距离越远,其味觉差异越大^[20]。如图 3 所示,ST+SPI-CG+1.5% NaCl 和 ST+SPI-XG+1.5% NaCl 与 ST+2% NaCl 样品在味觉方面表现出较大差异,这是因为 ST+SPI-XG+1.5% NaCl 和 ST+SPI-CG+1.5% NaCl 凝胶体系减少 25% 盐后咸味降低。ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 凝胶体系与 ST+2% NaCl 距离相近,说明 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 减盐凝胶体系的咸味感知与 ST+2% NaCl 相似,KGM 能够实现降低盐含量而不降低咸味。

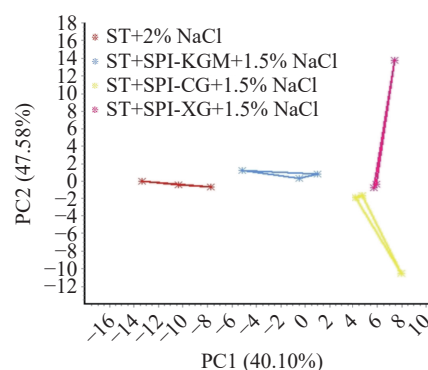


图 3 减盐凝胶体系的电子舌主成分分析

Fig.3 PCA of electron tongue of salt-reduced gel systems

2.4 微观结构

凝胶咸味感知的强弱与钠离子的释放量密切相关,食物在咀嚼过程中会持续释放钠离子,然而大部分钠离子是在不被感知的情况下被摄入。通过扫描电子显微镜观察添加和不添加蛋白质-多糖凝聚物的淀粉凝胶微观结构,如图 4 所示,淀粉凝胶体系仅形成了数个空洞,体系呈现连续的片状结构,但添加了蛋白质-多糖凝聚物的淀粉凝胶均形成了网络结构,这可能是由于淀粉与蛋白质-多糖凝聚物发生了交联,降低了淀粉颗粒的聚集,这与方媛等^[21]研究一

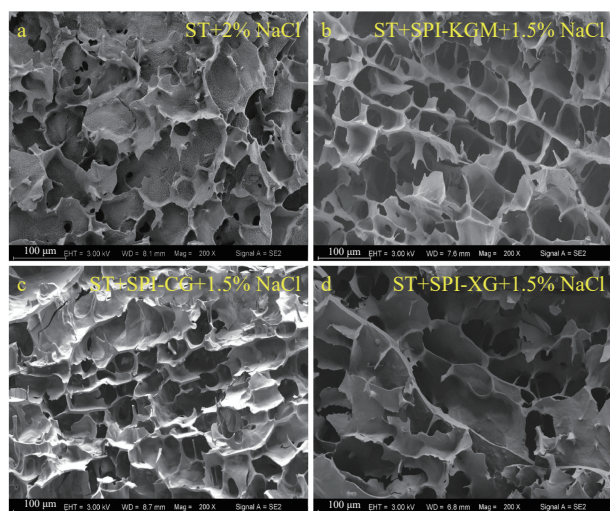


图4 不同凝胶体系的微观结构(200×)

Fig.4 Microstructure of different gel systems (200×)

致。相较于 SPI-CG 凝聚物和 SPI-XG 凝聚物, 淀粉凝胶中加入 SPI-KGM 凝聚物形成的凝胶网络更加连续和致密, 这种网络结构有助于钠离子的释放, 促进咸味感知^[22]。这一结果有效的解释了在电子舌 PCA 分析中 ST+KGM-SPI+1.5% NaCl 与 ST+2% NaCl 最接近, 能够实现减少 25% 盐含量而不降低咸味。

2.5 钠元素的分布

食盐在食物中的不同存在形式对咸味的感知产生影响, 作为减盐的有效手段之一, 优化 NaCl 在食物基质中空间位置, 可以提高 NaCl 在口腔中的溶解度和输送速度^[5]。由图 5 可知, 钠离子在淀粉基凝胶体系中呈现均匀分布, 而在蛋白质-多糖凝聚物淀粉基凝胶体系中均表现为不均匀分布, 钠离子沿着网络结构分布。与均匀分布引起的刺激相比, 口腔中的对比效应会增强来自高 NaCl 浓度层味觉感受器的整体反应, 食盐的不均匀分布可以较大程度地增加食盐与味蕾的接触面积, 增强咸味感知, 在不改变食品品质和感官特性的情况下降低 NaCl 的摄入量^[23]。

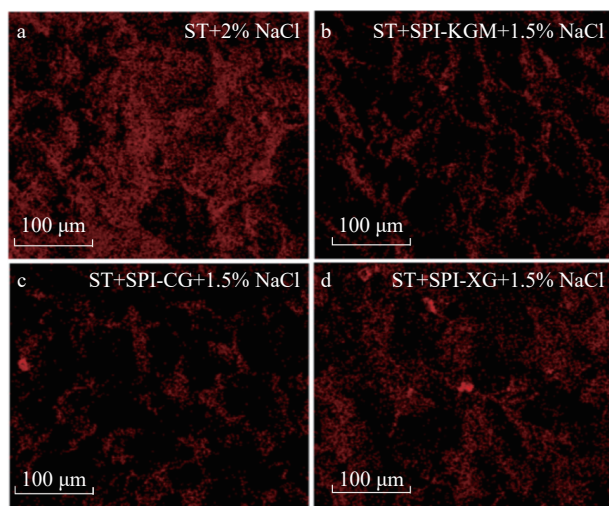


图5 钠元素在不同凝胶体系中的分布情况

Fig.5 Distribution of sodium in different gel systems

2.6 色泽分析

虽然有研究表明色泽不会影响凝胶特性^[24], 但对于消费者而言, 色泽是影响消费者可接受性的重要属性之一。不同减盐凝胶体系的色泽如图 6 所示。 L^* 值反映的是亮度, L^* 下降, 色泽变暗, a^* 值所反映的

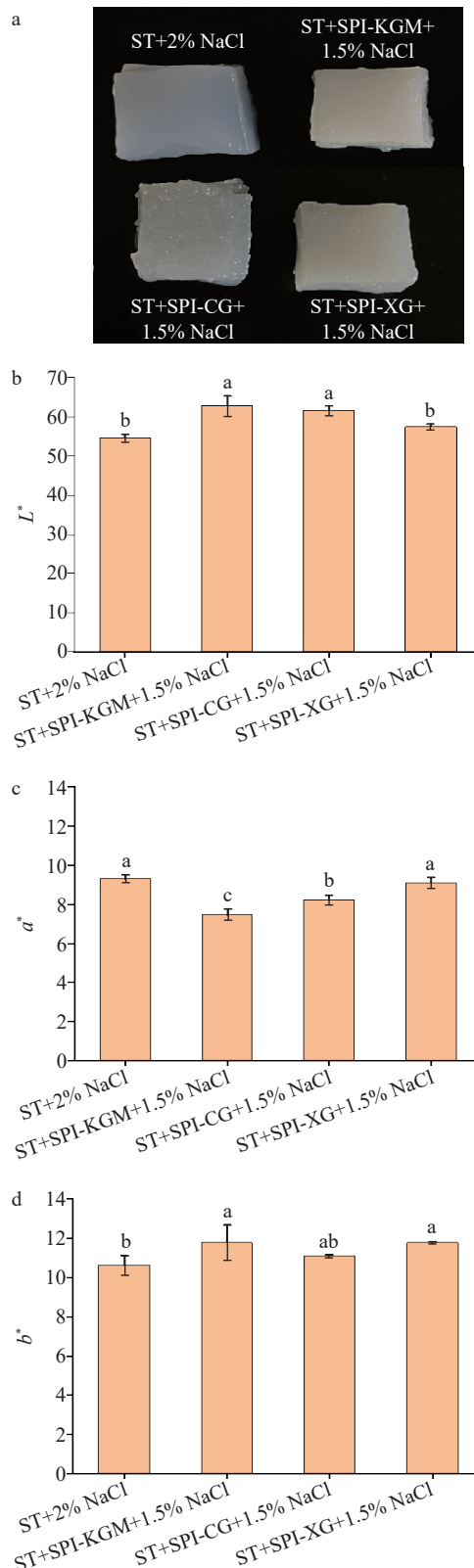


图6 不同凝胶体系的颜色分析

Fig.6 Color analysis of different gel systems

注: 图中不同小写字母表示差异显著 $P < 0.05$, 图 7、图 8 同。

是红绿度,负值越小,颜色越绿, b^* 反映的是蓝黄度,正值越大颜色越黄^[25]。与 ST+2% NaCl 样品相比,ST+SPI-KGM+1.5%NaCl 和 ST+SPI-CG+1.5%NaCl 的 L^* 值显著增加($P<0.05$),表明两组减盐凝胶体系的亮度更高。与 ST+2% NaCl 样品相比,ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 和 ST+SPI-XG+1.5% NaCl 的 b^* 值显著增加($P<0.05$),表明两组减盐凝胶体系的颜色偏黄。其中 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 组表现出的颜色为多黄绿而少红蓝,并有一定的光泽。这可能是由于加热凝胶化过程中温度提高会加快蛋白质的水解,产生更多的游离氨基,与淀粉和多糖的羰基化合物发生褐变反应使颜色加深^[26]。蛋白质和多糖之间的美拉德反应增强了偶联物的空间效应和分子亲和力,这种相互作用能够产生物理屏障影响钠离子在复杂体系中的分布,可以有效增强咸味^[10]。

2.7 质构特性

硬度、弹性、咀嚼性和内聚性等质构特征参数对食品质量至关重要,可以系统地反映亲水胶体的适口性、口感和吞咽性等特性^[27]。硬度表示压缩牙齿之间或顶部和舌头之间的食物所需的力^[28]。弹性代表凝胶被压缩然后弹回的能力^[29]。内聚性,即食物基质断裂前牙齿之间的压缩程度,与凝胶的内部强度和结构完整性有关^[30]。咀嚼性是指将凝胶爆裂至准备吞咽状态所需的能量^[28]。如图 7 所示,与 ST+2% NaCl 样品相比,ST+SPI-KGM+1.5% NaCl、ST+SPI-CG+1.5% NaCl、ST+SPI-XG+1.5% NaCl 的硬度、弹性、咀嚼性和内聚性显著提高($P<0.05$),这表明在低盐情况下添加 SPI-多糖复合凝聚物能够提高凝胶的质构特性,实现降低盐含量不降低凝胶品质。ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 的硬度和内聚性均显著高于其他组,分别为 10.68 ± 0.29 N、 0.72 ± 0.02 ,形成的连续的致密网络结构有利于提高质构特性,进而促进钠的释放,该结果与高珊珊^[31]研究趋势一致,KGM 使得小麦淀粉形成网络凝胶,有助于改善淀粉凝胶质构性。添加 SPI-XG 和 SPI-CG 凝聚物的淀粉凝胶质构特性指标较低。可能是卡拉胶在酸性条件处理后,易发生水解,黏度下降,凝胶能力降低;具有双螺旋结构的黄原胶经长时间热处理后,螺旋结构伸展为无序的卷曲链^[32]。

2.8 持水能力

持水能力是评价凝胶食品品质的重要参数之一,采用高速离心法测定离心前、后水分的损失以评估凝胶的持水能力,结果如图 8 所示。结果表明,ST+2% NaCl 样品凝胶持水性为 $51.02\%\pm0.56\%$,持水性相对较差。与 ST+2% NaCl 相比,ST+SPI-KGM+1.5% NaCl、ST+SPI-CG+1.5% NaCl、ST+SPI-XG+1.5% NaCl 的持水率分别提高了 11.48%、7.14% 和 2.65%($P<0.05$),这是由于 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 的凝胶形成了更致密均匀的结构,能够更好地

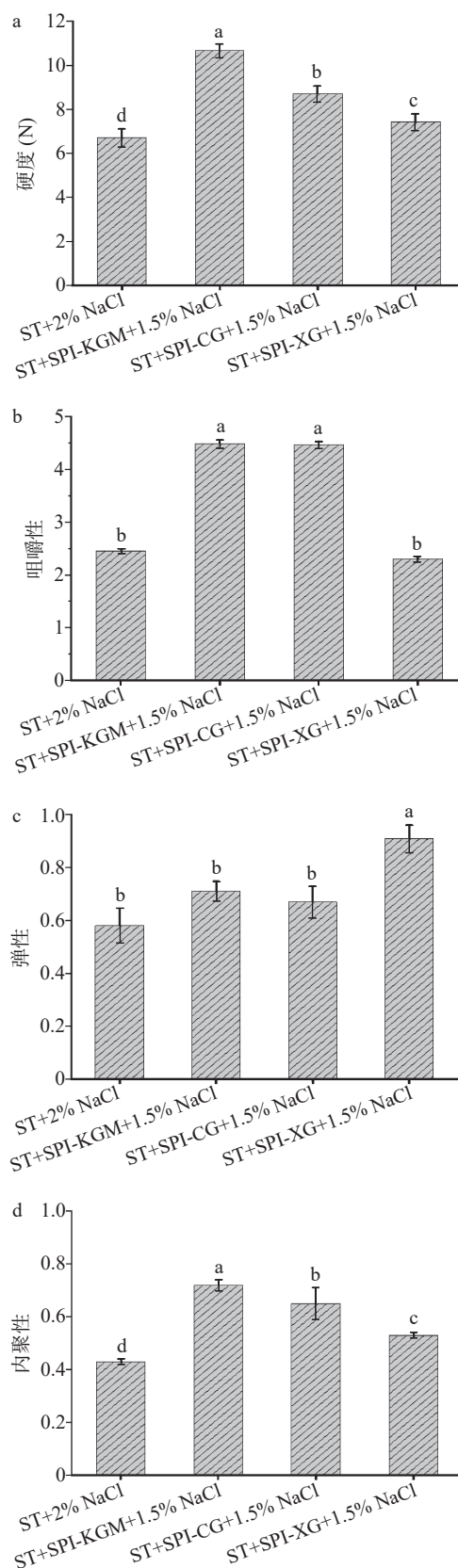


图 7 不同凝胶体系的质构特性

Fig.7 Texture properties of different gel systems

注: a: 硬度、b: 咀嚼性、c: 弹性、d: 内聚性。

保留水分^[33]。此外,体系中引入了具有亲水性基团的多糖填充了凝胶基质内部的孔隙结构,从而增强了与水分子的结合^[10]。减盐凝胶体系持水能力的增加有利于钠离子的释放,进而提高咸味的感知强度^[34]。

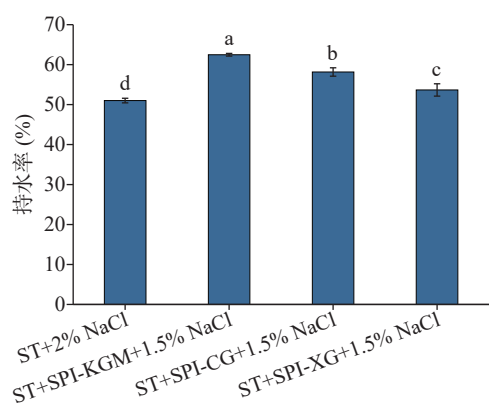


图 8 不同凝胶体系的持水能力

Fig.8 Water-holding capacity of different gel systems

3 结论

本研究分别构建了 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl、ST+SPI-CG+1.5% NaCl 和 ST+SPI-XG+1.5% NaCl 减盐凝胶,首先在猪舌上评估了 SPI-多糖凝聚物滞留钠能力,结果表明 SPI-KGM 凝聚物和 SPI-CG 凝聚物具有较强的钠滞留能力。对 SPI-多糖-淀粉减盐凝胶的微观结构、钠元素分布情况分析表明:与淀粉凝胶相比,SPI-多糖凝聚物的加入形成了网络结构,能够使钠不均匀的分布在凝胶中,这种结构有利于增强咸味感知。经电子舌 PCA 分析表明含有 1.5% NaCl 的 ST-SPI+KGM+1.5% NaCl 凝胶的味道与 2% NaCl 淀粉凝胶最接近。此外,与 2% NaCl 淀粉凝胶相比,减盐凝胶光泽度、持水能力、质构特性(硬度、弹性、咀嚼性和内聚性)均显著增加,其中 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 减盐凝胶效果最好。因此,综合分析得出 ST+SPI-KGM+1.5% NaCl 减盐凝胶能够实现减少 25% 盐含量而不降低咸味和凝胶品质。

© The Author(s) 2025. 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] GAO T, HUANG X, CHEN X, et al. Advances in flavor peptides with sodium-reducing ability: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 23: 9568–9584.
- [2] BANSAL V, MISHRA S K. Reduced-sodium cheeses: Implications of reducing sodium chloride on cheese quality and safety[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19 (2): 733–758.
- [3] LE B, YU B, AMIN M S, et al. Salt taste receptors and associated salty/salt taste-enhancing peptides: A comprehensive review of structure and function[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 657–666.
- [4] LAN H, CHEN L, WANG Y, et al. Effect of κ -carrageenan on saltiness perception and texture characteristic related to salt release in low-salt surimi[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126852.
- [5] SUN C, ZHOU X, HU Z, et al. Food and salt structure design

for salt reducing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102570.

[6] ABURTO N J, ZIOLKOVSKA A, HOOPER L, et al. Effect of lower sodium intake on health: Systematic review and meta-analyses[J]. Bmj-British Medical Journal, 2013, 346: 1326.

[7] LI Y L, WAN Z L, YANG X Q. Salt reduction in liquid/semi-solid foods based on the mucopenetration ability of gum arabic[J]. Food & Function, 2019, 10(7): 4090–4101.

[8] YANG S, ZHENG B, HUANG L, et al. Saltiness perception mechanism and salt reduction strategies in food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 148: 104521.

[9] BENJAMIN O, DAVIDOVICH-PINHAS M, SHPIGELMAN A, et al. Utilization of polysaccharides to modify salt release and texture of a fresh semi hard model cheese[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 95–106.

[10] LIU W M, MCCLEMENTS D J, JIN Z Y, et al. Design of colloid structure to realize gel salt reduction: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 65(12): 1–14.

[11] GUO J, LIU Y C, YANG X Q, et al. Fabrication of edible gellan gum/soy protein ionic-covalent entanglement gels with diverse mechanical and oral processing properties[J]. Food Research International, 2014, 62: 917–925.

[12] GAO Y, WANG S, LIU H, et al. Design and characterization of low salt myofibrillar protein-sugar beet pectin double-crosslinked gels pretreated by ultrasound and konjac glucomannan: Conformational and gelling properties[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108717.

[13] 李彦磊. 基于胶体结构构建的食品减盐策略及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. [LI Y L. Salt reduction strategy and mechanism in food system based on food hydrocolloids[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.]

[14] WU D, XIONG J, LI P, et al. Dual enhancement effects of different yeast extract on gel properties and saltiness perception of low-salt surimi gel from silver carp[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109925.

[15] WANG W, SHEN M, LIU S, et al. Gel properties and interactions of *Mesona blumes* polysaccharide-soy protein isolates mixed gel: The effect of salt addition[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 192: 193–201.

[16] 汪雪娇. 微波处理对鱼肉制品咸度感知的增强作用与减盐鱼糜的加工适应性[D], 无锡: 江南大学, 2021. [WANG X J. Saltiness perception enhancement of fish products by microwave treatment and processing adaptability in salt-reduced surimi[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[17] ZHANG X, PAN H, JIANG X, et al. Study on the mechanism of soy protein isolate to improve quality of reduced-salt hypophthalmichthys molitrix surimi gel: Focus on gel quality, protein structure, and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100878.

[18] COOK S L, BULL S P, METHVEN L, et al. Mucoadhesion: A food perspective[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 281–296.

[19] BONI F I, CURY B S F, FERREIRA N N, et al. Ionic cross-linking as a strategy to modulate the properties of oral mucoadhesive microparticles based on polysaccharide blends[J]. Pharmaceutics, 2021, 13(3): 407.

[20] 周雪莲. 基于 κ -卡拉胶的减盐技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020. [ZHOU X L. Salt reduction technology based on κ -carrageenan[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.]

[21] 方媛, 张碟, 魏凌峰, 等. 蛋白/多糖-淀粉复合性微凝胶的制

- 备、表征及性能研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(7): 224–230. [FANG Y, ZHANG D, WEI L F, et al. Preparation and properties of protein/polysaccharide-starch composite microgels[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(7): 224–230.]
- [22] WANG X, FENG T, XIA S. Saltiness perception related to salt release of surimi emulsified sausages: Modulation in texture and microstructure by polysaccharides[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(8): 3893–3902.
- [23] VINITHA K, SETHUPATHY P, MOSES J A, et al. Conventional and emerging approaches for reducing dietary intake of salt[J]. *Food Res Int*, 2022, 152: 110933.
- [24] NAGARAJAN M, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Characteristics and functional properties of gelatin from splendid squid (*Loligo formosana*) skin as affected by extraction temperatures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(2): 389–397.
- [25] 马相杰, 孟少华, 赵建生, 等. 蒸汽爆破对猪皮冻凝胶体系及其品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(17): 255–260. [MA X J, MENG S H, ZHAO J S, et al. Effect of steam blasting on frozen gel system and quality of pig skin[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(17): 255–260.]
- [26] 吴惠玲, 王志强, 韩春, 等. 影响美拉德反应的几种因素研究[J]. *现代食品科技*, 2010, 26(5): 441–444, 440. [WU H L, WANG Z Q, HAN C, et al. Factors affecting the maillard reaction[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2010, 26(5): 441–444, 440.]
- [27] WANG J, MA Q, CAI P, et al. On the investigation of composite cooling/heating set gel systems based on rice starch and curd-lan[J]. *Food Chemistry*, 2024, 438: 137960.
- [28] YUAN C, XU D, CUI B, et al. Gelation of κ -carrageenan/konjac glucomannan compound gel: Effect of cyclodextrins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 158–164.
- [29] TAO H T, GUO L, QIN Z, et al. Textural characteristics of mixed gels improved by structural recombination and the formation of hydrogen bonds between curd-lan and carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107678.
- [30] MIN C, MA W H, KUANG J W, et al. Textural properties, microstructure and digestibility of mungbean starch-flaxseed protein composite gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107482.
- [31] 高珊珊. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对小麦淀粉糊化和老化特性的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022. [GAO S S. Effects of deacetyl konjac glucomannan on gelatinization and retrogradation properties of wheat starch[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.]
- [32] 杨榕, 臧一字, 吴鹏, 等. 多糖类食品胶体的功能特性及其在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(5): 283–292. [YANG R, ZANG Y Y, WU P, et al. Research progress on functional properties of polysaccharide-based food colloids and their application in food processing[J]. *Food Science*, 2024, 45(5): 283–292.]
- [33] 王枫, 艾连中, 赖凤羲, 等. 小分子糖-罗望子多糖复合凝胶特性研究[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(4): 69–79. [WANG F, AI L Z, LAI F X, et al. Studies on the gelling properties of complex between small molecular sugars and tamarind seed[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(4): 69–79.]
- [34] LI Y, CHENG Q, GUO J, et al. Structuring meat analogs by citrus fiber with reduced salt intake[J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(8): 3204–3215.