面向吞咽障碍人群的低盐鸡肉糜凝胶流变学调控及品质特性比较

林晓梅[1*]，曾健豪[1]，黄小明[1]，王飞生[1]，宋明月[2]，阚启鑫[2*]
（1.清远职业技术学院旅游家政与艺术学院，广东清远 510500）
（2.华南农业大学食品学院，广东省功能食品活性物重点实验室，广东广州 510642）

摘要：随着居民健康意识提升和人口老龄化加剧，低盐化和易吞咽化已成为肉制品开发的重要方向。为解决低盐鸡肉糜凝胶质地不适宜吞咽等问题，本研究以清远鸡胸肉为基质，系统探究了不同添加量羧甲基纤维素钠（Sodium Carboxymethyl Cellulose，CMC）对低盐鸡肉糜凝胶体系易吞咽特性的调控机制。结果表明，CMC 可显著降低鸡肉糜凝胶蒸煮损失率，最低仅为 0.68%，并且使得储能模量和表观黏度整体降低，其中 3 wt.% CMC 组 G'由对照组的 4.73×10^3 Pa 降至 1.01×10^3 Pa，降幅为 78.65%。质构结果显示，3 wt.% CMC 组硬度和咀嚼性最低，分别为 41.51 g 和 6.28。差示扫描量热结果显示，1 wt.%和 2 wt.% CMC 组吸热峰热流绝对值分别增至 149.65 mW 和 159.71 mW，表明适量 CMC 可增强体系热稳定性。微观结构和刀叉结果表明，3 wt.% CMC 组形成较明显的条状纤维支撑网络，叉压后不易流散，具有较好的食团稳定性，接近 IDDSI 6 级软质及一口量食品的部分关键特征。傅里叶红外结果显示，适量 CMC 促进肌原纤维蛋白由 *β*-折叠向无规则卷曲转变，柔性构象增加。综上，在 1.0 wt.% NaCl 的固定低盐条件下，3 wt.% CMC 在柔软性、低口腔加工阻力和食团支撑性之间表现出较好的平衡，可为低盐易吞咽鸡肉糜制品开发提供理论基础。

关键词：低盐鸡肉糜凝胶；易吞咽；羧甲基纤维素钠；流变特性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.1026

Comparison of Rheological Regulation and Quality Characteristics of Low-Salt Chicken Paste Gels for Individuals with Dysphagia

LIN Xiaomei[1*], ZENG Jianhao[1], HUANG Xiaoming[1], WANG Feisheng[1], SONG Mingyue[2], KAN Qixin[2*]
(1.School of Tourism, Home Economics and Art, Qingyuan Polytechnic, Qingyuan 510500, China) (2.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangdong Key Laboratory of Functional Food Active Substances, Guangzhou 510642, China)

Abstract: With increasing health awareness and population aging, the development of low-salt and easy-to-swallow meat products has attracted growing attention. To address the unsuitable swallowing characteristics of low-salt chicken paste gels, Qingyuan chicken breast was used as the matrix to systematically investigate the effects of different addition levels of sodium carboxymethyl cellulose (CMC) on the swallowability and structural properties of low-salt chicken paste gels. The results showed that CMC significantly reduced the cooking loss of the gels, with the lowest value reaching 0.68%, and generally decreased both the storage modulus and apparent viscosity. In particular, the storage modulus (G') of the 3 wt.% CMC group decreased from 4.73×10^3 Pa in the control group to 1.01×10^3 Pa, representing a reduction of 78.65%. Texture profile analysis showed that the 3 wt.% CMC group exhibited the lowest hardness and chewiness, with values of 41.51 g and 6.28, respectively. Differential scanning calorimetry revealed that the absolute heat-flow values of the endothermic peaks in the 1 wt.% and 2 wt.% CMC groups increased to 149.65 and 159.71 mW, respectively, indicating that an appropriate amount of CMC enhanced the thermal stability of the gel system. Microstructural observations and fork-pressure tests demonstrated that the 3 wt.% CMC group formed a pronounced strip-like fibrous supporting network, resisted excessive dispersion after fork compression, and exhibited favorable bolus stability, approaching some key characteristics of IDDSI Level 6 Soft & Bite-Sized food. Fourier-transform infrared spectroscopy further indicated that an appropriate amount of

收稿日期：2026-07-10；修回日期：2026-08-23；接受日期：2026-08-24

基金项目：2021 年广东省教育科学规划课题（2021GXJK571）；2024 年广东省学习型社会建设（继续教育）质量提升工程项目（JXJYGC2024A015）；广东省功能食品活性物重点实验室（2018B030322010）

通讯作者：林晓梅（1985-），女，学士，讲师，研究方向：营养烹饪及教育，E-mail：409059760@qq.com；共同通讯作者：阚启鑫（1995-），男，博士，助理研究员，研究方向：食品风味化学，E-mail：1549331130@qq.com

CMC promoted the transition of myofibrillar proteins from *β*-sheet structures to random coils, thereby increasing conformational flexibility. Overall, under the fixed low-salt condition of 1.0 wt.% NaCl, the addition of 3 wt.% CMC provided a favorable balance among softness, low oral processing resistance, and bolus structural integrity. These findings provide a theoretical basis for the development of low-salt, easy-to-swallow chicken paste products.

Key words: Low-salt chicken paste; swallowability; CMC; rheological properties

随着居民健康意识提升和人口老龄化加剧，低盐化和易吞咽化已成为肉制品开发的重要方向。氯化钠是肉糜制品中重要的功能性配料，能够提高体系离子强度，促进肌原纤维蛋白溶出、展开和热诱导交联，从而改善肉糜的保水性和质构特性[1]。但长期高盐摄入与高血压及心血管疾病风险密切相关，降低肉制品盐含量已成为食品工业的重要趋势[2]。同时，老年人及吞咽功能减弱人群对食品质地也有特殊要求，食品应具有柔软、湿润、易成团且不易流散的特性，以降低咀嚼负担和误吸风险[3]。因此，开发兼具低盐和易吞咽特性的肉糜凝胶食品具有现实意义。

清远鸡作为广东特色地方鸡种，蛋白质含量较高、脂肪含量相对较低，具有较高的消费认可度和产业价值，是开发适老化高蛋白食品的良好原料[4]。但在低盐条件下，肌原纤维蛋白溶解和交联能力下降，热诱导凝胶网络容易变得疏松，进而导致蒸煮损失增加、持水性下降和质构劣化。对于易吞咽食品而言，若鸡肉糜凝胶过硬、干散或食团稳定性不足，均不利于口腔加工和咽部输送。因此，在低盐条件下改善鸡肉糜凝胶结构，是低盐易吞咽肉制品开发中的关键问题。羧甲基纤维素钠（Sodium Carboxymethyl Cellulose，CMC）是一种典型的阴离子型水溶性纤维素衍生物，分子中含有羟基和羧甲基，具有良好的吸水、增稠、稳定和流变调控能力。在肉制品中，CMC 可通过水合作用固定水分，通过分子缠结和静电作用影响蛋白网络结构，从而改善体系的保水性、质构和稳定性。已有研究表明，CMC 能够改变乳化香肠模型体系的流变行为和凝胶硬度[5]，也可用于牛肉饼等吞咽障碍食品的质构改良[6]。近期研究还发现，CMC 可调控肌原纤维蛋白的热聚集行为[7]，为其在易吞咽肉蛋白食品中的应用提供了依据。

现有研究多集中于乳化香肠、牛肉饼或肌原纤维蛋白模型体系，关于 CMC 添加量如何影响低盐鸡肉糜凝胶的结构、流变、水分分布及易吞咽特性仍缺乏系统研究。基于此，本研究以清远鸡鸡胸肉为原料，构建不同 CMC 添加量（0 wt.%、1 wt.%、2 wt.%、3 wt.%和 4 wt.%）的低盐鸡肉糜凝胶体系，分析其蒸煮损失、质构、流变、水分分布、热稳定性、微观结构和蛋白二级结构变化，并结合国际吞咽障碍膳食标准化行动委员会（International Dysphagia Diet Standardisation Initiative，IDDSI）框架评价其易吞咽特性，以期为低盐、低咀嚼负担的鸡肉糜制品开发提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

清远鸡，购于清远市莲塘农贸市场，鸡种日龄均为 180 天左右，胴体质量约为 1 kg，当天宰杀后取鸡胸肉部分冷链运输至实验室；羧甲基纤维素、氯化钠（食品级），上海源叶生物科技有限公司；其他所用试剂均为国产分析纯。

BSA224S 型电子天平，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；MesoMR23-060H-I 型核磁成像分析仪，上海纽迈电子科技有限公司；MJ-JC14B 型食品级绞肉机，美的集团股份有限公司；Sorvall ST 16R 型高速冷冻离心机，赛默飞世尔科技公司（美国）；MARS 40 型旋转流变仪，赛默飞世尔科技公司（德国）；TA.GEL 型质构仪，上海保圣实业发展有限公司；DSC-60 Plus 型差示扫描量热仪，日本岛津公司；SCIENTZ-10N 型真空冷冻干燥机，宁波新芝生物科技股份有限公司；EVO MA 15 型扫描电子显微镜，卡尔蔡司公司（德国）；Nicolet iS20 型傅里叶变换红外光谱仪，赛默飞世尔科技公司（美国）。

1.2 实验方法

1.2.1 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶制备

参考高廷轩等[8]的方法并略作修改，制备添加不同添加量 CMC 的低盐鸡肉糜凝胶。为了排除蛋白质浓度、盐

离子强度及总质量变化对凝胶体系的干扰，本实验采用等量替代水分法制备低盐鸡肉糜凝胶。准确称取剔除脂肪和筋膜的清远鸡胸肉，固定比例为 50 wt.%，切块后加入固定比例的食盐（1 wt.%），并分别加入 0 wt.%、1 wt.%、2 wt.%、3 wt.%和 4 wt.%的 CMC，相应扣减蒸馏水用量（分别为 49.0 wt.%、48.0 wt.%、47.0 wt.%、46.0 wt.%、45.0 wt.%），使各组总质量保持一致（100 wt.%），保证了各处理组中鸡肉蛋白质总量及离子强度一致。使用绞肉机高速 60 s 绞碎呈均匀粘稠状备用。准确称取鸡肉糜 20 g 放入 50 mL 离心管中，5 000 r min^{-1} 离心 10 min 除去气泡，然后放入 100 ℃沸水浴中 15 min，完成后立即置于冰水混合物中冷却，4 ℃放置备用。

1.2.2 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶水分蒸煮损失测定

参考 Niu 等[9]的方法。蒸煮之前称取鸡肉糜样品质量，记为 m_0，蒸煮之后迅速将其置于冰水浴中静置 15 min，在室温下达到平衡后，取出鸡肉糜凝胶样品，用滤纸擦去表面多余水分，再次称量，记为 m_1。按如下公式计算蒸煮损失率，记为 L：

$$L=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中:

L——蒸煮损失率，%

m_0——蒸煮前鸡肉糜样品的质量，g

m_1—— 蒸煮后鸡肉糜凝胶的质量，g。

1.2.3 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶流变学特性测定

采用旋转流变仪测定不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶的流变学特性。测试时选用直径为 20 mm 的光滑平板夹具（P20Ti-0117084），测试温度设定为 25 ℃，平板间隙为 1.0 mm。应变扫描测试在固定频率 1 Hz 条件下进行，应变范围设定为 0.1%~300%，记录储能模量（G'）和损耗模量（G''）随应变变化的情况。各组样品在低应变范围内均出现相对稳定的黏弹性平台，G'为各样品在线性黏弹区内 0.1%应变处的测定值。稳态黏度测试在剪切速率 0.1~100 s^{-1} 范围内进行，总测试时间为 5 min，记录样品表观黏度随剪切速率变化的曲线。

1.2.4 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶全质构测定

参考 Chai 等[7]的方法，并进行适当调整。对不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶样品进行全质构分析（Texture Profile Analysis，TPA）。将冷藏后的凝胶样品切割成边长约 1.5 cm 的立方体，置于质构仪测试平台中央，采用 P/36R 圆柱形探头进行两次压缩测试。测试参数设定为：测试前速度 2.0 mm s^{-1}，测试速度 1.0 mm s^{-1}，测试后速度 2.0 mm s^{-1}，压缩形变量为样品高度的 50%，两次压缩间隔时间为 5 s。记录硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和回复性等质构指标。每组样品平行测定 3 次，结果取平均值。

1.2.5 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶差示扫描量热分析

参考 Gong 等[10]的方法并稍作调整，采用差示扫描量热仪，通过差示扫描量热法（Differential Scanning Calorimetry，DSC）分析样品的热特性。准确称取 5~10 mg 凝胶样品置于标准铝坩埚中，密封后放入仪器样品池，以空铝坩埚作为参比。测试在氮气保护条件下进行，氮气流速设定为 50 mL min^{-1}。升温程序设置为：初始温度 20 ℃，终止温度 150 ℃，升温速率 10 ℃ min^{-1}。记录样品在升温过程中的热流变化曲线。

1.2.6 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶水分分布测定

参考 Wei 等[11]的方法并进行适当调整，采用低场核磁共振成像分析仪测定不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶样品的横向弛豫时间（T_2），以表征样品中水分的分布状态。准确称取约 2 g 凝胶样品，置于核磁管中，并放入直径为 15 mm 的圆形玻璃管内进行测试。测试采用 CPMG 序列，测定温度设定为（25.00±0.01）℃，质子共振频率为 18 MHz，扫描次数为 32 次，回波数为 12 000，重复时间间隔为 110 ms。

1.2.7 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶 IDDSI 测定

参考 Shi 等[12]的方法，按照 IDDSI 框架对鸡肉糜凝胶进行勺子以及叉子实验测试。勺倾斜测试中，将适量样品置于勺面，缓慢倾斜勺体，记录样品能否借助自身重力整体滑落、勺面残留程度以及是否出现液体析出。叉压测试中，使用餐叉对样品施加足以使拇指指甲变白的压力，观察样品能否被轻易压碎、受压后的变形程度以及压碎后是否出现明显稀散、碎裂或液体分离。

1.2.8 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶微观结构测定

采用扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscopy，SEM）观察低盐鸡肉糜凝胶微观结构。取适量低盐鸡肉糜凝胶样品，经冷冻干燥处理后，将样品沿自然断裂面切取适宜大小的块状样品，并固定于导电胶上。随后对样品断裂面进行喷金处理，以提高其导电性。处理后的样品置于扫描电子显微镜下观察，在加速电压 5 kV 条件下采集凝胶微观结构图像。

1.2.9 不同添加量 CMC 低盐鸡肉糜凝胶傅里叶变换红外光谱分析

参考张涛等[13]的方法，略作修改。采用傅里叶变换红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectroscopy，FTIR）分析样品的分子相互作用及蛋白质二级结构。将制备好的低盐鸡肉糜凝胶样品冷冻干燥后研磨成粉末，取 1 mg 左右样品，加入溴化钾粉末研磨后压片，置于红外光谱仪测试台上进行扫描。扫描波数范围为 4 000~400 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数为 64 次。样品数据采集后使用 Peakfit 4.12 软件对图谱进行分析。

1.2.10 数据分析

使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析，并采用 Tukey 法进行组间差异显著性分析（P<0.05）。如无特殊说明，每个实验重复 3 次平行，数据以均值±标准差（means±SD）表示。图均使用 Origin 2023 作图。

2 结果与分析

2.1 蒸煮损失率

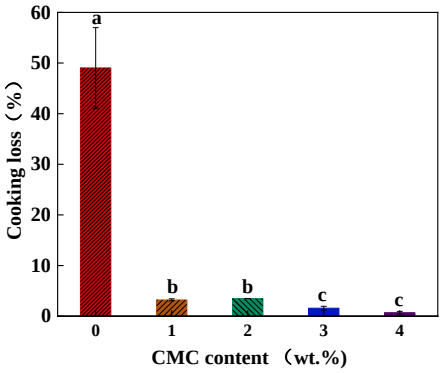


图 1 不同添加量 CMC 对于鸡肉糜蒸煮损失率的影响

Fig.1 Effects of Different CMC Concentrations on Cooking Loss Rates of low-salt Chicken Paste

注：不同字母表示不同样品间具有显著差异，P<0.05。

如图所示，不同浓度 CMC 对低盐鸡肉糜凝胶的蒸煮损失率具有显著影响（P<0.05）。对照组蒸煮损失率最高，为 49.03%，显著高于所有 CMC 添加组。添加 CMC 后，蒸煮损失率大幅下降，其中 1 wt.%和 2 wt.% CMC 处理组之间无显著差异（P>0.05），但均显著低于对照组；当 CMC 添加量进一步提高至 3 wt.%和 4 wt.%时，蒸煮损失率继续降低，并达到最低水平，仅为 1.57%与 0.68%，表明 CMC 能够有效提高鸡肉糜凝胶体系的持水能力。Pematilleke 等[14]相关研究表明，添加 1 wt.%的 CMC 同样能降低牛肉肉糜的蒸煮损失率。CMC 分子中大量羧甲基和羟基基团具有强亲水性，通过氢键作用与体系中的水分子结合，减少在加热过程中自由水向体系外迁移；另外，CMC 作为高分子增稠剂，可增加肉糜体系黏度，并与肌原纤维蛋白形成更加稳定的复合网络结构，从而增强凝胶对水分的包埋和固定能力[15]。3 wt.%和 4 wt.% CMC 处理组蒸煮损失率最低且无显著差异（P>0.05），说明当 CMC 添加量达到一定水平后，其保水作用趋于饱合。

2.2 流变特性分析

由图 2a 可知，不同处理组在低剪切应变范围内均表现出 G'高于 G''的特征，说明低盐鸡肉糜体系形成了以弹性行为为主的凝胶网络。在应变扫描初始阶段，各处理组 G'均呈现相对稳定的平台，表明样品处于线性黏弹区，此时凝胶内部网络结构未受到明显破坏。随着应变进一步增加，G'和 G''开始明显下降，说明样品超出线性黏弹区，凝胶网络在较大形变作用下逐渐发生破坏。图 2b 选取各处理组在线性黏弹区内 0.1%应变处的 G'进行统计比较，以避免凝胶结构破坏对组间分析的干扰。与对照组相比，CMC 添加组的 G'整体降低，说明 CMC 削弱了低盐鸡肉糜凝胶的刚性结构，使得整个体系更为柔软。由图 2b 可进一步看出，对照组 G'为 4.73×10^3 Pa，添加 1 wt.% CMC

后降至约 3.67×10^3 Pa，较对照组降低约 22.41%；当 CMC 添加量增加至 2 wt.%和 3 wt.%时，G′分别降至 1.55×10^3 Pa 和 1.01×10^3 Pa，较对照组分别降低 67.23%和 78.65%，其中 3 wt.% CMC 组最低，4 wt.% CMC 组 *G′* 略回升至 1.39×10^3 Pa，但仍显著低于对照组和 1 wt.% CMC 组，这可能与高浓度 CMC 分子链缠结增强并形成一定多糖连续相有关。上述变化可能与 CMC 对肌原纤维蛋白凝胶网络的稀释、填充及相互作用调控有关。CMC 分子具有较强亲水性和增稠特性，可吸附并固定体系中部分水分，同时嵌入蛋白凝胶网络，减少肌原纤维蛋白分子间的直接接触和过度交联，从而降低凝胶的弹性模量。已有研究表明，CMC 添加量超过一定水平后可降低肉糜体系的储能模量和硬度，并可能阻碍连续蛋白基质的形成[16]，这与本研究中 CMC 添加后低盐鸡肉糜 G′显著下降的变化趋势相符。此外，CMC 作为水溶性纤维素衍生物，具有较好的亲水性、黏度调节和稳定作用，这也是其能够改变肉糜体系流变行为的重要原因[17]。

由图 2c 可知，各组样品表观黏度均随剪切速率升高而快速下降，表现出典型的剪切变稀特征，说明低盐鸡肉糜凝胶属于假塑性非牛顿体系。在低剪切速率下，对照组表观黏度最高，约为 10^5 Pa s 数量级；随着剪切速率升至 100 s^{-1}，各组黏度均降至 10^0~10^1 Pa s 范围，说明体系在剪切作用下内部结构发生部分解离。CMC 添加组在整个剪切速率范围内的表观黏度均低于对照组，尤其 2 wt.%~4 wt.%组下降更明显，表明 CMC 处理降低了体系在外力作用下的流动阻力。CMC 进入蛋白网络后，可能降低肌原纤维蛋白之间的有效接触和交联程度，使形成的凝胶网络更柔软、更易在剪切作用下解体；由此产生的网络弱化效应可能大于 CMC 自身的增稠作用，最终表现为复合凝胶表观黏度下降。对于易吞咽食品而言，适度降低弹性模量并保持剪切变稀行为，有利于食团在口腔加工和咽部输送过程中发生形变，从而降低吞咽阻力[18]。综合来看，3 wt.% CMC 处理组 G′最低、表观黏度较低，表现出较好的柔软化和易吞咽调控潜力。

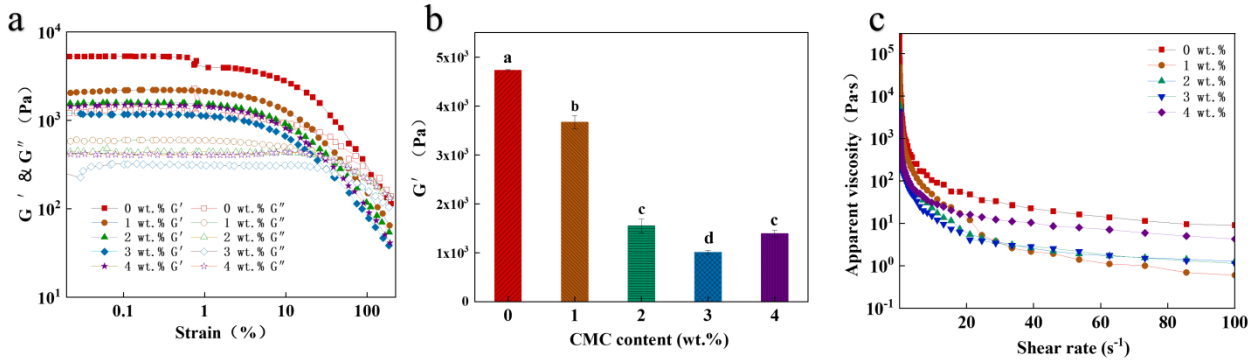


图 2 不同 CMC 添加量对低盐鸡肉糜凝胶流变特性的影响

Fig.2 Effects of CMC content on the rheological properties of low-salt Chicken Paste

注：a: 应变扫描，b: 线性黏弹区内 0.1%应变处的储能模量，c: 表观黏度；不同字母表示不同样品间具有显著差异，*P*<0.05。

2.3 TPA 分析

表 1 不同 CMC 添加量对低盐鸡肉糜凝胶质构特性的影响

Table 1 Effects of CMC concentration on the texture properties of Low-Salt Chicken Paste

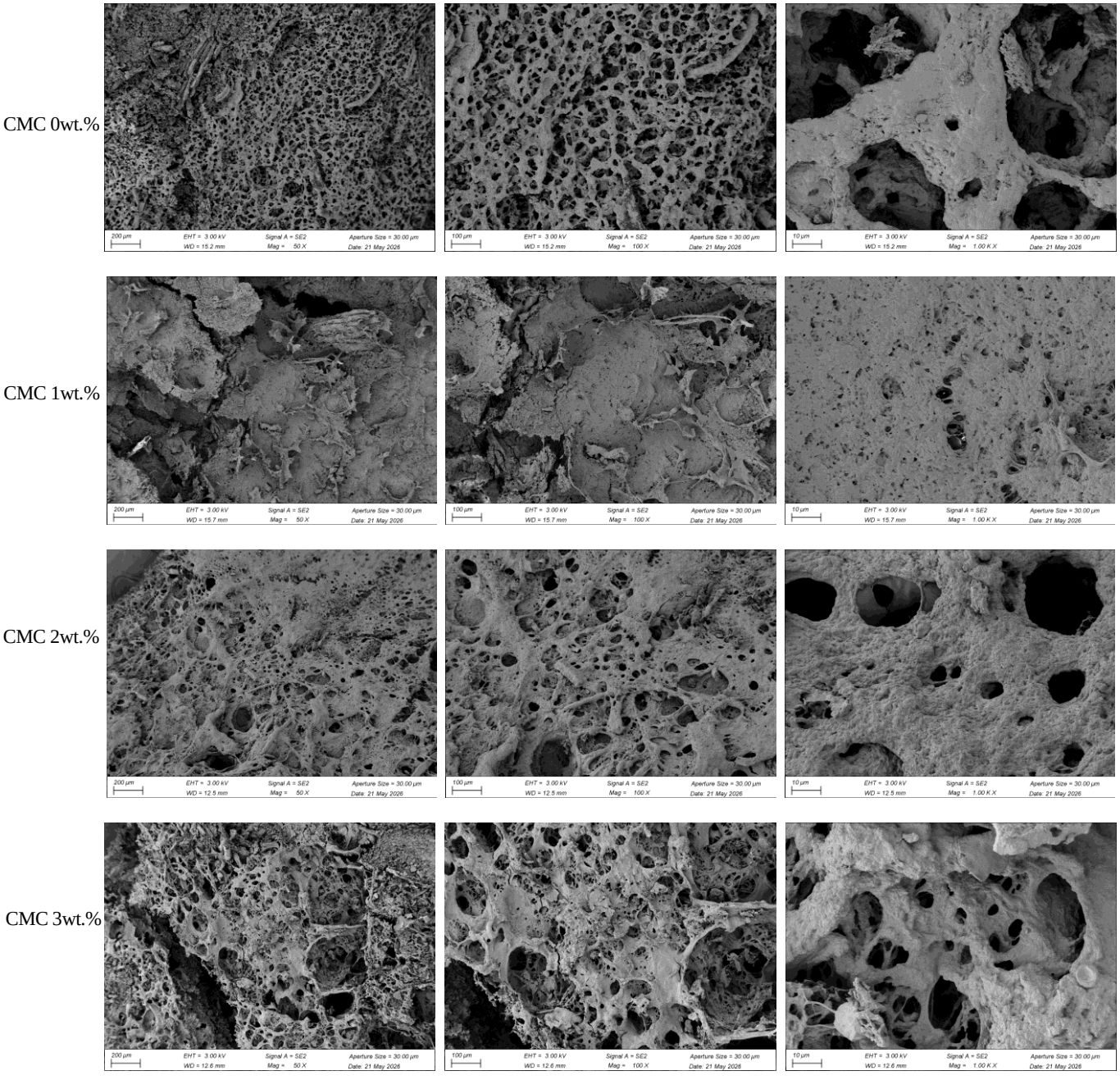
添加量/(wt.%)	硬度/g	弹性	咀嚼性	内聚性	回复性
0	49.04±8.93^b	0.55±0.01^a	10.97±2.03^{ab}	0.41±0.01^a	0.08±0.00^b
1	78.23±0.83^a	0.57±0.06^a	17.07±2.86^a	0.38±0.02^a	0.08±0.00^b
2	62.37±2.67^{ab}	0.61±0.09^a	14.73±2.67^{ab}	0.39±0.03^a	0.77±0.11^a
3	41.51±7.54^b	0.47±0.03^a	6.28±1.90^b	0.32±0.02^a	0.17±0.14^b
4	41.60±3.91^b	0.54±0.08^a	8.89±1.92^{ab}	0.40±0.07^a	0.14±0.09^b

注：不同字母表示不同样品间具有显著差异，*P*<0.05。

由表 1 可知，随着 CMC 添加量增加，凝胶硬度和咀嚼性整体呈先升高后降低的变化趋势。对照组硬度为 49.04 g，添加 1 wt.% CMC 后显著升高至 78.23 g，咀嚼性也由 10.97 升至 17.07，说明低浓度 CMC 能够增强低盐鸡肉糜凝胶的结构支撑性。这可能是由于 CMC 具有较强的吸水膨胀和增稠作用，在较低添加水平下可填充于肌原纤维蛋白凝胶网络中，促进水分固定并提高体系黏结程度，从而使凝胶结构更加致密，表现为硬度和咀嚼性升

高。当 CMC 添加量继续增加时，凝胶硬度和咀嚼性开始下降。2 wt.% CMC 组硬度和咀嚼性分别为 62.37 g 和 14.73，仍高于对照组；而 3 wt.%和 4 wt.% CMC 组硬度分别降至 41.51 g 和 41.60 g，咀嚼性分别降至 6.28 和 8.89，均低于对照组。这表明较高浓度 CMC 并未继续增强凝胶强度，反而使体系向柔软、低咀嚼阻力方向转变。对于老年人或吞咽功能减弱人群而言，较低的咀嚼性有助于食团形成和咽部输送，是评价易吞咽肉糜凝胶的重要指标[6]。其原因可能是过量 CMC 吸水膨胀后占据蛋白凝胶网络空间，降低肌原纤维蛋白之间的直接接触和交联程度，并可能造成蛋白相与多糖相分布不均，从而削弱连续蛋白网络结构，导致硬度和咀嚼性下降。类似研究表明，CMC 及其他水胶体能够显著调控肉制品质构，并使肉制品向软质、易咀嚼方向转变[14]。弹性和内聚性在各组间差异不显著，说明 CMC 虽然改变了凝胶的强弱和咀嚼阻力，但并未显著破坏样品的基本成团性。

2.4 SEM 分析



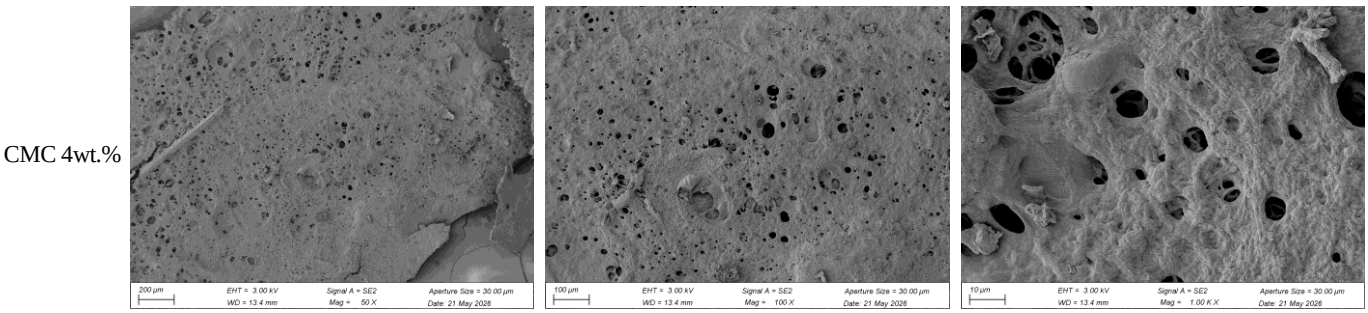


图 3 不同 CMC 添加量对低盐鸡肉糜凝胶微观结构的影响

Fig.3 Effects of CMC concentration on the microstructure of Low-Salt Chicken Paste

由图 3 可知，CMC 添加量明显改变了低盐鸡肉糜凝胶的微观网络形态。对照组结构较为疏松，孔洞分布不均，条状纤维骨架不明显，说明低盐条件下肌原纤维蛋白溶出和热诱导交联不足，凝胶网络连续性较差，这与 Cao 等[19]所报道的蛋白网络微观结构相似。添加 1 wt.% CMC 后，体系中可见局部片状压实和纤维束化结构，这可能使凝胶初始抗压能力增强，因此其硬度和咀嚼性最高。然而，该组条状纤维网络连续性不足，受压后容易发生局部崩解，与 IDDSI 叉压测试中 1 wt.% CMC 组压后略显稀散的现象相一致。当 CMC 添加量增加至 2 wt.%~3 wt.% 时，凝胶中条状纤维结构逐渐清晰，并形成较连续的多孔支撑网络。适量 CMC 可能改变肌原纤维蛋白聚集及蛋白—多糖网络的空间排列，使干燥后样品呈现出较明显的连接结构，但不能仅据此确定其在含水状态下形成了连续纤维化骨架[20]。尤其 3 wt.% CMC 组呈现较明显的纤维状连接结构，同时其硬度和咀嚼性降至最低，说明该组既具有较低口腔加工阻力，又能维持一定食团支撑性。4 wt.% CMC 组结构进一步趋于致密，孔隙减少，局部表面较平滑，说明过量 CMC 可能填充蛋白网络空隙并形成较强的多糖-蛋白复合相。

2.5 IDDSI 分析

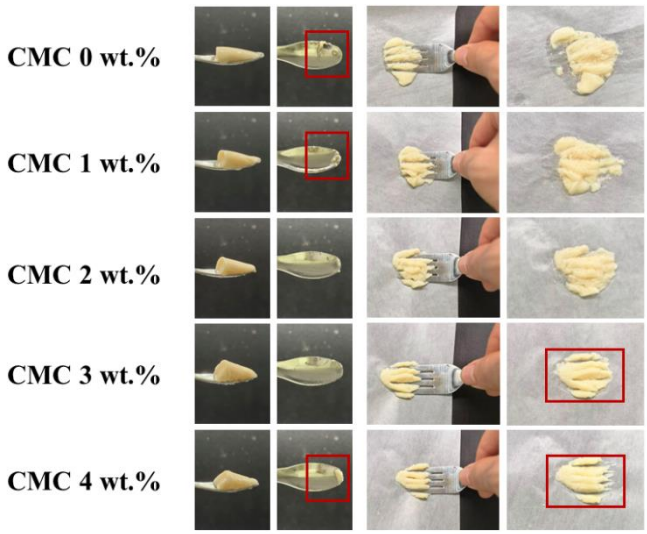


图 4 不同 CMC 添加量低盐鸡肉糜凝胶勺叉实验

Fig.4 Effects of CMC concentration on the swallowing suitability of Low-Salt Chicken Paste

由图 4 可知，不同 CMC 添加量低盐鸡肉糜凝胶在勺倾斜测试和叉压测试中表现出不同的食团成型性、黏附性和受压变形特征。勺倾斜测试结果显示，对照组、1 wt.% CMC 组和 4 wt.% CMC 组在勺面上均可观察到一定残留，说明这些样品存在不同程度的黏附性。在 SEM 结果中，已发现其结构过于紧密，这可能是其黏附残留的原因。对于易吞咽食品而言，过高黏附性可能增加口腔或咽部残留，不利于吞咽安全[21]；而 2 wt.%和 3 wt.% CMC 组勺面残留较少，表明其黏附性相对适中，更有利于食团顺利离勺和口腔输送[22]。叉压测试结果显示，1 wt.% CMC 组虽然 TPA 硬度和咀嚼性最高，分别达到 78.23 g 和 17.07，但经叉压后样品呈现一定稀散状态，说明其初始抗压强度较高，但结构被破坏后食团支撑性不足，可能不利于形成稳定、连续的吞咽食团。2 wt.% CMC 组压碎后未

出现明显稀散现象，同时其回复性显著高于其他组，达到 0.77，说明该处理下凝胶受压后具有较好的结构恢复能力和食团稳定性。3 wt.%和 4 wt.% CMC 组在叉压后仍能保持较清晰的条状或团块结构，支撑性较好，与 Ren 等[20]制备的大米淀粉—大豆蛋白复合凝胶，纯大米淀粉凝胶和纯大豆蛋白凝胶相似，可被归为 IDDSI 6 级。说明较高浓度 CMC 有助于增强压碎后食团的整体性，减少食团过度流散或破碎的风险。从防呛吸角度看，易吞咽肉糜凝胶既不能过难咀嚼，也不能在压碎后过稀或过度分散。过硬样品会增加口腔加工负担，而过稀或内聚性不足的食团则可能在吞咽前发生分散或提前流入咽部，从而增加误吸风险。结合 TPA 结果，3 wt.% CMC 组硬度和咀嚼性最低，分别为 41.51 g 和 6.28，说明其口腔加工阻力较小；同时从叉压图像看，该组压碎后仍具有较好的支撑性，未表现出明显稀散状态。因此，从本研究所采用的勺倾斜、叉压变形和食团完整性等判据来看，2 wt.%和 3 wt.% CMC 组较其他处理组更接近 IDDSI 6 级软质及一口量食品的部分关键特征，其中 3 wt.% CMC 组在低咀嚼负担、适度黏附性和食团支撑性之间表现出更好的综合平衡。

2.6 DSC 分析

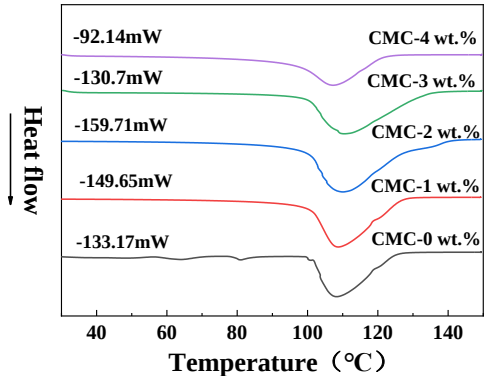


图 5 CMC 添加量对低盐鸡肉糜凝胶热稳定性的影响

Fig.5 Effects of CMC concentration on the thermal stability of Low-Salt Chicken Paste

如图 5 所示，各处理组在约 100~120 ℃范围内均出现明显吸热峰，说明样品在升温过程中发生了水分迁移、蛋白质热变性以及凝胶网络结构进一步破坏或重排[23]。峰值热流反映样品在吸热峰温度附近的瞬时吸热速率，在测试程序一致的条件下，峰值热流和峰形的相对变化可用于比较不同处理组在升温过程中的吸热响应。对照组吸热峰热流率为-133.17 mW，添加 CMC 后，1 wt.%和 2 wt.% CMC 组吸热峰强度分别增加至-149.65 mW 和-159.71 mW，表现出更高的吸热响应，说明适量 CMC 能够增强鸡肉糜凝胶体系的热稳定性。相关研究表明，CMC 可提高肌原纤维蛋白体系的稳定性，其作用与 CMC 结构和电荷密度密切相关[24]；纤维素纳米纤维也可改善鸡肉盐溶蛋白或肌原纤维蛋白凝胶的功能特性，使凝胶网络更加均一和稳定[25]。因此，1~2 wt.% CMC 添加后吸热峰增强，结合其较高的凝胶硬度、咀嚼性及水分束缚能力，表明适量 CMC 可能通过水合作用和蛋白—多糖相互作用增强凝胶网络，使体系在升温过程中表现出更强的吸热响应和较高的相对热稳定性。当 CMC 添加量进一步升高至 3 wt.%和 4 wt.%时，吸热峰热流率绝对值分别下降至 130.70 mW 和 92.14 mW，尤其 4 wt.% CMC 组吸热峰明显减弱，说明过量 CMC 并未继续提高凝胶热稳定性，已有研究指出，多糖对肌原纤维蛋白凝胶的调控具有浓度依赖性，不同多糖可通过水合膨胀、填充或相分离行为改变蛋白凝胶结构[26]。该变化说明 CMC 对凝胶热响应的影响具有明显的浓度依赖性。过量 CMC 吸水膨胀后可能在体系中形成局部多糖富集相，占据蛋白凝胶网络空间，降低肌原纤维蛋白之间的有效接触和交联程度，使蛋白相与多糖相分布不均。

2.7 水分分布分析

由图6a所示，低盐鸡肉糜凝胶呈现典型的三峰分布，并且不同的CMC添加量明显改变了水分的弛豫时间分布。一般而言，T_2 弛豫时间越短，说明水分与蛋白或多糖网络结合越紧密，流动性越低；T_2 弛豫时间越长，则表明水分自由度较高，更容易在加热或外力作用下迁移[27]。各处理组均在 100~200 ms 附近出现主要峰，说明低盐鸡肉糜凝胶中的水分主要以不易流动水形式存在。与对照组相比，添加 1 wt.% CMC 后主峰强度升高且峰位相对集中，表明适量 CMC 能够增强凝胶网络对水分的束缚能力。CMC 分子中含有大量亲水性基团，可通过氢键作用结合水

分，并填充于肌原纤维蛋白凝胶网络中，从而限制水分迁移。由图 6b 可进一步看出，对照组 T_{22} 比例为 62.74%，T_{23} 比例为 36.29%；添加 1 wt.% CMC 后，T_{22} 比例升高至 72.52%，而 T_{23} 比例下降至 26.80%，说明 1 wt.% CMC 促进了自由水向不易流动水转化，提高了凝胶体系的水分固定能力。类似研究表明，纤维素类物质可促进低盐鱼糜凝胶形成更有序、致密的网络结构，并通过低场核磁结果证实其可减少自由水释放、促进自由水向不易流动水转化[28]。当 CMC 添加量增加至 2 wt.%和 3 wt.%时，T_{22} 比例仍维持在较高水平，说明中等添加量 CMC 能够通过水合作用和网络填充作用限制水分迁移，使凝胶内部大部分水分维持在不易流动状态。Wu 等[29]在草鱼鱼糜凝胶中发现，魔芋葡甘聚糖可显著改变凝胶的微观结构和水分分布；当魔芋葡甘聚糖分子量降低时，不易流动水比例下降，而流动水比例升高，说明多糖对蛋白凝胶水分固定和网络结构的调控具有条件依赖性。4 wt.% CMC 组 T_{23} 比例显著升高，表明过量 CMC 可能导致多糖相富集或蛋白-多糖网络结构不均一，使部分水分从凝胶网络中释放出来。表明在蒸煮后仍保留于凝胶内部的水分中，高流动性水分所占比例增加，即部分水分由不易流动状态向迁移性较高的状态转变。该结果反映的是凝胶内部剩余水分束缚程度降低，而非水分已经从凝胶中宏观析出。

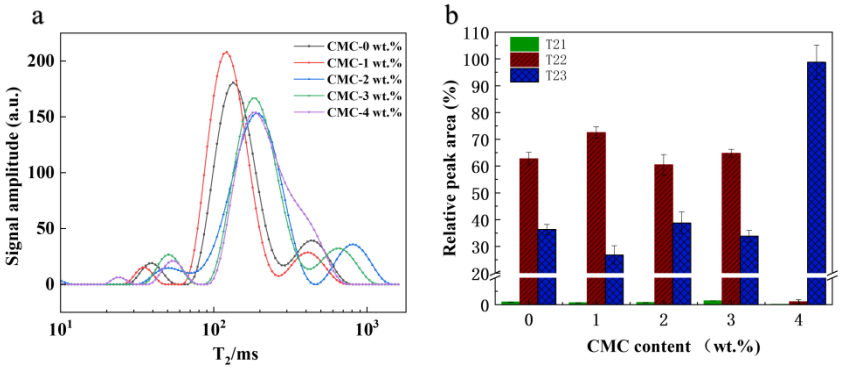


图 6 CMC 添加量对低盐鸡肉糜凝胶水分分布的影响

Fig.6 Effects of CMC concentration on water distribution in Low-Salt Chicken Paste

注：a：横向弛豫时间分布曲线；b：不同水分组分比例。

2.8 傅里叶红外分析

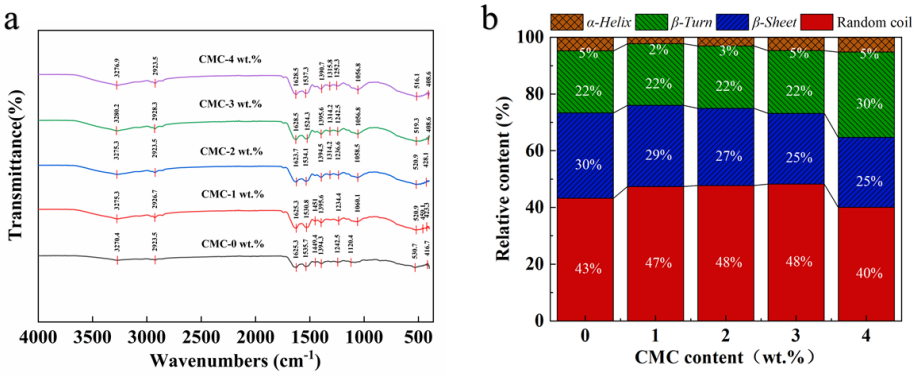


图 7 CMC 添加量对低盐鸡肉糜凝胶傅里叶变换红外光谱及蛋白质二级结构的影响

Fig.7 Effects of CMC addition level on the FTIR spectra and protein secondary structures of low-salt chicken paste gels

注：a：傅里叶变换红外光谱；b：蛋白质二级结构相对含量。

由图 7a 可知，不同 CMC 添加量低盐鸡肉糜凝胶的红外光谱整体峰型相似，未出现新的特征吸收峰，说明 CMC 加入后并未与肌原纤维蛋白形成新的共价结构，其作用主要来源于氢键、静电作用及分子间相互作用[13]。各组样品在 3 270~3 290 cm^{-1} 附近均出现宽吸收峰，主要与 O—H 伸缩振动和 N—H 伸缩振动有关。与对照组相比，CMC 添加组该区域峰位和峰强发生一定变化，说明 CMC 分子中的羟基和羧甲基可能与蛋白分子或水分子形成氢键，从而改变体系中水分结合状态和蛋白分子周围的氢键环境。在 1 600~1 700 cm^{-1} 酰胺I带区域，峰形变化较为明显，该区域主要来源于蛋白肽键 C=O 伸缩振动，常用于分析蛋白二级结构变化。由图 7b 可知，CMC 添加显著改变了低盐鸡肉糜凝胶蛋白二级结构组成。与对照组相比，1 wt.%~3 wt.% CMC 组无规卷曲含量由 43.23%升高至

48.24%，而 β-折叠含量由 30.09%逐渐下降至 24.97%，说明适量 CMC 促进了肌原纤维蛋白分子展开和构象重排，使蛋白结构由相对有序聚集状态向更柔性的无规结构转变。Chai 等[7]关于 CMC 与肌原纤维蛋白的研究表明，CMC 可调控肌原纤维蛋白的热聚集行为，并用于构建适合吞咽障碍食品的质构调控体系，这与本研究中 CMC 诱导蛋白构象柔性化的结果具有一致性。3 wt.% CMC 组无规卷曲比例最高、β-折叠比例最低，表明该处理下蛋白网络柔性增强、有序聚集程度降低，这与其 TPA 中较低硬度和咀嚼性以及 SEM 中较明显条状纤维支撑网络的结果相一致。类似地，低盐肌原纤维蛋白凝胶研究也指出，多糖可通过影响加热过程中的蛋白聚集行为和构象变化，改善凝胶网络与水分保持能力[30]。当 CMC 添加量增加至 4 wt.%时，无规卷曲下降至 40.05%，β-转角升高至 30.09%，说明过量 CMC 可能诱导蛋白-多糖复合网络进一步重排。高浓度 CMC 吸水膨胀后可能填充蛋白网络空隙并限制蛋白链段运动，使体系由柔性纤维网络向更致密的蛋白-多糖复合结构转变。

3 结论

本研究表明 CMC 能够有效调控低盐鸡肉糜凝胶的形成过程，在质构、流变、微观结构及易吞咽特性等方面都呈现了浓度相关性。1~2 wt.% CMC 主要增强凝胶结构，使硬度和咀嚼性升高；随着 CMC 添加量进一步增加，凝胶硬度和咀嚼性下降，体系逐渐向柔软、易变形方向转变。CMC 的调控作用主要与其亲水性、增稠作用及对肌原纤维蛋白聚集行为的影响有关。适量 CMC 可促进蛋白-多糖复合网络形成，改善水分分布和凝胶结构，使凝胶同时具有较低口腔加工阻力和较好的食团支撑性。SEM 和 IDDSI 结果表明，3 wt.% CMC 组形成较明显的条状纤维支撑网络，叉压后不易流散，该组表现出接近 IDDSI 6 级软质及一口量食品的部分关键特征，同时硬度和咀嚼性较低，在柔软性、低口腔加工阻力和食团支撑性之间表现出较好的综合平衡。由于本研究未设置常规盐浓度阳性对照，现有结果尚不能证明 CMC 能够使低盐鸡肉糜凝胶恢复至常规盐产品的品质水平。后续研究可进一步设置 2.0%~2.5% NaCl 对照组，对 CMC 的减盐补偿效果进行进一步验证。综合各项结果，在本研究 1.0 wt.% NaCl 的固定低盐条件下，3 wt.% CMC 具有开发为柔软、低咀嚼负担且具有一定防呛吸的低盐鸡肉糜凝胶制品的潜力，该结果为低盐肉糜凝胶的质构调控提供了理论依据，对推动低盐健康肉制品和适老化食品开发具有一定应用价值。

参考文献

[1] YU C, CHEN L, OUYANG K, et al. Effect of partial substitution of NaCl by KCl on aggregation behavior and gel properties of beef myosin [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140178.

[2] INGUGLIA E S, ZHANG Z, TIWARI B K, et al. Salt reduction strategies in processed meat products-A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 59: 70-78.

[3] LIU X, FENG Y, LI R, et al. Comprehensive review of dysphagia and technological advances in dysphagia food [J]. Food Research International, 2025, 199: 115354.

[4] 黄志伟,唐汉清.加强地理标志品牌建设，助推清远鸡产业高质量发展的路径探索[J].优质农产品,2025,6:76-78.

[5] GIBIS M, SCHUH V, ALLARD K, et al. Influence of molecular weight and degree of substitution of various carboxymethyl celluloses on unheated and heated emulsion-type sausage models [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 159: 76-85.

[6] PEMATILLEKE N, KAUR M, ADHIKARI B, et al. Investigation of the effects of addition of carboxy methyl cellulose (CMC) and tapioca starch (TS) on the beef patties targeted to the needs of people with dysphagia: A mixture design approach [J]. Meat Science, 2022, 191: 108868.

[7] CHAI J, XU X, ZHAO X. Carboxymethyl cellulose with different charge density regulates the thermal aggregation behavior of myofibrillar protein to tailor dysphagia diet [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 328: 147717.

[8] 高廷轩,邓绍林,赵雪,等.多糖协同超声波处理对低盐鸡肉糜凝胶特性的影响[J].食品科学,2021,42(19):148-156.

[9] NIU H, XIA X, WANG C, et al. Thermal stability and gel quality of myofibrillar protein as affected by soy protein isolates subjected to an acidic pH and mild heating [J]. Food Chemistry, 2018, 242: 188-195.

[10] GONG S, WANG D, TAO S, et al. Facile encapsulation of thymol within deamidated zein nanoparticles for enhanced stability and antibacterial properties [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 626: 126940.

[11] WEI Q-J, ZHANG W-W, WANG J-J, et al. Effect of κ-carrageenan on the quality of crayfish surimi gels [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101497.

[12] SHI Y, WANG B, XU Y, et al. Surimi soft gels for individuals with dysphagia were produced by enzymatic hydrolysis: Investigating the impact on the protein structure and its correlation with gel characteristics [J]. Food Research International, 2025, 220: 117078.

[13] 张涛,王缓,谢宏凯,等.麦麸多糖-金线鱼糜复合凝胶形成及结构[J].中国农业科学,2025,58(5):1004-1016.

[14] PEMATILLEKE N, KAUR M, RAI WAI C T, et al. Effect of the addition of hydrocolloids on beef texture: Targeted to the needs of people with dysphagia [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106413.

[15] YANG Y, ZHANG X, WANG Y, et al. Exploring the mechanisms of thermal aggregation resistance egg white: CMC concentration-mediated modification of protein structure and formation of microgel particles [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 165: 111262.

[16] ZHAO Y, DENG P, MA R, et al. The inhibition potentiality of sodium carboxymethyl cellulose on PhIP, Harman, and Norharman formation of fried beef patties at low NaCl level [J]. Meat Science, 2025, 225: 109814.

[17] HOU J, JIANG Z, WANG J, et al. Micronutrient supplemented dysphagia food: Rheology and *β*-carotene delivery of 3D printing egg yolk-carboxymethyl cellulose emulsion gels [J]. Food Research International, 2025, 208: 116213.

[18] WANG X, RONG L, SHEN M, et al. Rheology, Texture and Swallowing Characteristics of a Texture-Modified Dysphagia Food Prepared Using Common Supplementary Materials [J]. Food, 2023, 12(12):2287.

[19] CAO H, LI H, LI C, et al. Investigating the effect of carboxymethyl chitosan on the gel properties of chicken myofibrillar protein and its ability to adsorb flavor compounds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 322: 146702.

[20] LI S, LIN S, JIANG P, et al. The interaction mechanism of different ionic polysaccharides with myofibrillar protein and its contribution to the heat-induced gels [J]. Food Frontiers, 2024, 5(4): 1613-1628.

[21] PARK J-W, LEE S, YOO B, et al. Effects of texture properties of semi-solid food on the sensory test for pharyngeal swallowing effort in the older adults [J]. BMC Geriatrics, 2020, 20(1): 493.

[22] REN S, ZHANG G, WANG Z, et al. Potentially texture-modified food for dysphagia: Gelling, rheological, and water fixation properties of rice starch–soybean protein composite gels in various ratios [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110025.

[23] LI K, WANG L-M, CUI B-B, et al. Effect of vegetable oils on the thermal gel properties of PSE-like chicken breast meat protein isolate-based emulsion gels [J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138904.

[24] CHAI J, TAO Y, ZHAO X, et al. Insights into carboxymethyl cellulose enhances the stability of myofibrillar protein aqueous solution modulated by charge density [J]. Food Research International, 2025, 217: 116815.

[25] ZHANG X, WANG W, WANG Y, et al. Effects of nanofiber cellulose on functional properties of heat-induced chicken salt-soluble meat protein gel enhanced with microbial transglutaminase [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 1-8.

[26] ZHUANG X, JIANG X, ZHOU H, et al. Insight into the mechanism of physicochemical influence by three polysaccharides on myofibrillar protein gelation [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115449.

[27] SHAO J-H, DENG Y-M, JIA N, et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 308-314.

[28] ZHANG C, CHEN L, LU M, et al. Effect of cellulose on gel properties of heat-induced low-salt surimi gels: Physicochemical characteristics, water distribution and microstructure [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100820.

[29] WU W, QUE F, LI X, et al. Effects of Enzymatic Konjac Glucomannan Hydrolysates on Textural Properties, Microstructure, and Water Distribution of Grass Carp Surimi Gels [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022, 11(5):750.

[30] YUAN D, LI C, ZHANG J, et al. Abelmoschus manihot gum improves the water retention capacity of low-salt myofibrillar protein gels: Perspective on aggregation behaviour and conformational changes during heating [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 137483.