

不同NaOH添加量条件下可得然胶-魔芋胶共混体系流变及凝胶性质的变化

卢家毅^{1,2}, 刘永柱², 钟文婧¹, 朱梓焱¹, 郑桂芬¹, 朱建华^{1,3*}

(1. 韶关学院食品学院, 广东韶关512005) (2. 华南农业大学国家植物航天育种工程技术研究中心, 广东广州 510642) (3. 韶关学院广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室, 广东韶关 512005)

摘要: 为优化素鲍鱼制品的制备工艺和配方, 该研究采用流变学、质构分析及扫描电镜等技术, 系统探究了不同 NaOH 添加量对可得然胶-魔芋胶共混体系流变及凝胶性质的影响。结果表明, 在低质量分数 (0.10%~0.20%) NaOH 条件下, 共混体系中多糖分子间氢键作用增强, 从而显著提高了共混凝胶的黏弹性模量、凝胶化速率、硬度及弹性, 同时析水率显著降低。与对照组相比, 添加 0.10% NaOH 的可得然胶-魔芋胶共混溶液体系的流动指数从 0.52 降至 0.19; 在溶胶-凝胶转变过程中, 降温初始和降温结束时的弹性模量分别增加了 11.61% 和 15.23%。此外, 平均凝胶速率和最大凝胶化速率分别提升了 16.01% 和 8.53%, 凝胶硬度和弹性值分别显著提高了 44.87% 和 96.97%, 而析水率降低了 10.70%, 结合水含量则增加了 8.70%。当 NaOH 质量分数超过 0.30% 时, 共混体系的凝胶质构及黏弹性性质均从峰值开始下降, 凝胶微观结构也呈现松散化趋势。综上所述, 适量添加 NaOH 能够有效强化可得然胶-魔芋胶共混体系的凝胶网络结构, 可为优化素鲍鱼的制备工艺和配方提供理论参考。

关键词: 可得然胶; 魔芋胶; 共混体系; 溶胶-凝胶转变; 流变; 凝胶性质

文章编号: 1673-9078(2025)04-54-62

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0118

The Changes on the Rheology and Gel Properties of Curdlan-Konjac Gum Blends with Different NaOH Addition

LU Jiayi^{1,2}, LIU Yongzhu², ZHONG Wenjing¹, ZHU Ziyang¹, ZHENG Guifen¹, ZHU Jianhua^{1,3*}

(1. Henry FoK School of Food Science and Technology, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)
(2. National Engineering Research Center of Plant Space Breeding, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)
(3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)

Abstract: In order to improve the preparation process and formula of plant-based abalone products, the changes on the rheology and gel properties of curdlan-konjac gum blends with different NaOH addition were investigated with rheology, texture, and SEM methods et al. As results showed that the addition of relatively low concentrations of NaOH (0.10%~0.20%)

引文格式:

卢家毅, 刘永柱, 钟文婧, 等. 不同NaOH添加量条件下可得然胶-魔芋胶共混体系流变及凝胶性质的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(4): 54-62.

LU Jiayi, LIU Yongzhu, ZHONG Wenjing, et al. The changes on the rheology and gel properties of curdlan-konjac gum blends with different NaOH addition [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 54-62.

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2022A1515010772)

作者简介: 卢家毅 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 稻米淀粉等食品多糖结构与功能及稻米高值化研究, E-mail: jiaiyilu1616@163.com

通讯作者: 朱建华 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品高分子体系结构与功能研究, E-mail: jhuazh@163.com

significantly improved the viscoelastic modulus, gelation rate, hardness, and elasticity of the blend gels, while markedly reducing syneresis. These enhancements were primarily attributed to the strengthened hydrogen bonding between polymer molecules within the gel matrix. Specifically, the flow index of the curdlan-konjac gum blend solution with 0.10% NaOH decreased from 0.52 to 0.19. During the sol-gel transition, the elastic modulus increased by 11.61% and 15.23% at the initial and final stages of cooling, respectively. Additionally, the average gelation speed and maximum instantaneous gelation rate rose by 16.01% and 8.53%, respectively, while the hardness and elasticity of the blend gels increased by 44.87% and 96.97%. Concurrently, syneresis decreased by 10.70%, and the binding water content improved by 8.70%. However, when NaOH concentrations exceeded 0.30%, the gel texture and viscoelastic properties deteriorated, and the microstructure exhibited a loosening trend. In conclusion, the incorporation of an optimal amount of NaOH can significantly enhance the gel network structure of curdlan-konjac gum blends, offering valuable insights for optimizing the production and formulation of plant-based abalone products.

Key words: curdlan; konjac gum; blends; sol-gel transition; rheology; gel properties

植物基仿肉制品是一种以食品高分子（如多糖或蛋白质）为主要原料，通过特定加工工艺制成的新型食品，其在外观和口感上高度模拟天然肉类产品^[1,2]。目前，植物基仿肉制品不仅涵盖对猪肉、牛肉、羊肉等红肉的模拟，还延伸至海鲜类仿生食品（如素鲍鱼、仿生鱼翅等），这些产品因其巨大的市场需求而成为研究热点^[3,4]。其中，热不可逆凝胶类仿生海鲜食品因其优异的热稳定性，能够在烹饪过程中保持形状和质地，深受市场欢迎^[5]。这类产品主要通过植物基高分子组分在溶胶-凝胶工艺条件下成型制备，其成型特性及质构性质主要受溶胶-凝胶转变过程中流变性质演化的影响^[6-8]。在食品工业生产中，通过异质多糖类高分子共混，可以显著提升食品高分子体系的性能、降低成本并赋予材料新的特性，进而通过温度场调控实现溶胶-凝胶转变，最终获得具有特定微观结构和力学性能的仿生海鲜制品^[9-12]。

素鲍鱼作为一类典型的热不可逆凝胶类仿生海鲜食品，通常以多糖类亲水胶体为主要成型基质。其成品外观鲜黄、色泽亮丽，口感爽滑且富有弹性，深受消费者青睐。在食品工业中，制备热不可逆凝胶类素鲍鱼制品的核心工艺流程通常包括在共溶质场中进行异质多糖共混，其中常用的原料包括可得然胶、魔芋胶及改性淀粉等。此外，适量添加花生油和碱有助于异质多糖胶基坯料的均匀混合和注模成型。然而，目前该领域的研究多集中于胶基多糖共混体系性能的解析^[13,14]，而从工艺制备角度探讨共溶质加工助剂（如NaOH）对共混胶基体系溶胶-凝胶转变过程中流变及凝胶性质变化趋势及成因的

研究较为匮乏。本文以可得然胶-魔芋胶共混体系为素鲍鱼胶基的主要原料，系统研究了NaOH添加对胶基溶胶-凝胶转变过程中流变性质、质构特性、析水行为及微观结构的影响，并对其成因进行了深入分析，以期对素鲍鱼的溶胶-凝胶制备成型及配方优化提供理论参考和实践指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器设备

可得然胶（食品级），江苏一鸣生物股份有限公司；魔芋胶（食品级），湖北强森魔芋科技有限公司；NaOH，分析纯。

MCR302e 旋转流变仪，奥地利 Anton Paar 公司；TMS-Pro 型质构仪，美国 FTC 公司；FTIR-8400S 傅里叶变换红外光谱仪，日本岛津公司；TM3030 型台式扫描电子显微镜，Hitachi 公司；MesoMR23-040V-I I 低场核磁共振分析仪，苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 可得然胶-魔芋胶溶液共混体系的制备

按质量比例为 3:2 称取适量可得然胶、魔芋胶分散于盛放蒸馏水的离心管中，并添加相应质量分数 NaOH（0.00%、0.10%、0.20%、0.30% 及 0.50%，本实验原料浓度均为质量分数，下同），同时每个样品均加入花生油 0.50%，室温下于滚轴混合器分散均匀 4 h，然后移入 35 °C 恒温水浴锅中恒温振荡 1 h 备用，制备获得总胶质量分数为 6.00% 的可得

然胶-魔芋胶共混溶液体系。

1.2.2 静态流变学性质测定及拟合

剪切速率从 0.01 s^{-1} 增加到 100 s^{-1} ，记录添加不同 NaOH 质量分数条件下可得然胶-魔芋胶共混溶液体系的稳态剪切黏度随剪切速率的变化曲线，测定温度为 $35\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，并用 *Power-Law* 模型方程 (1) 对剪切黏度与剪切速率之间的关系进行拟合^[15]。

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

式中：

η ——剪切黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率， s^{-1} ；

K' ——稠度系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ；

n ——流动指数，无量纲。

1.2.3 动态黏弹流变学性质测试

将于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温 30 min 后的 1 mL 可得然胶-魔芋胶多糖共混溶液样品，快速转移到流变仪，夹具采用直径为 45 mm 平行板，狭缝设置为 1 mm ，温度预设设为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，上样后快速涂覆一层轻质硅油以抑制水分蒸发。小振幅应变扫描考察体系黏弹性质的测试过程受控于应变为 0.50% 的线性黏弹区范围。测试先后流程如下：以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 自 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，随后恒温 30 min 后以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降温至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，测试过程频率设置为 6.28 rad/s 。记录 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降温至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程 G' 、 G'' 及损耗系数 ($\tan\delta$)，用于模拟评估素鲍鱼制备冷却工序可得然胶-魔芋胶溶液共混体系溶胶-凝胶转变过程特征。

1.2.4 共混体系凝胶结构形成速度分析

降温阶段共混体系溶胶-凝胶转变过程凝胶化速度主要参考 Kastner 等^[16]及 Fu 等^[17]的方法进行表征。

1.2.5 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶制备

添加不同量 NaOH 的可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶制备的基础配方同 1.2.1，经斩拌和注模蒸制处理后进行热处理，热处理温控程序同 1.2.3，热处理后获得的素鲍鱼凝胶胶基用冰水喷淋，冷却降温至制品中心温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后，将制品放入速冻库中储存备用，冷冻复温后的素鲍鱼制品用于质构、析水、扫描电镜、低场核磁及傅里叶红外性质测定。

1.2.6 质构性质测定

脱模复温后用于质构分析的素鲍鱼凝胶胶基制

品切成方体丁粒，尺寸 $L*W*H$ 为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 。采用 P/36R 圆柱形探头开展样品 TPA 质构性质分析，测前、测中及测后探头运行速度依次设置为 1.0 、 0.5 及 1.0 mm/s ，最大压缩比例及触发力依次设为 70% 及 0.10 N 。

1.2.7 析水性质分析

析水率的测定参考 Lee 等^[18]的方法稍作修改，按如下式 (2) 计算：

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

W ——析水率， $\%$ ；

W_1 ——可得然胶-魔芋胶溶胶-凝胶热成形后制备的素鲍鱼凝胶胶基质量， g ；

W_2 ——素鲍鱼凝胶胶基经冷冻-解冻处理后去除所析出水分后的凝胶质量， g 。

1.2.8 扫描电镜分析

将素鲍鱼凝胶胶基切成边长为 10 mm 的小立方体形状，随后置于超低温冰箱冻结后，移入冻干机冻干后密封保存备用。在低真空模式 15 kV 加速电压下采用扫描电镜观察凝胶横切断面微观结构。

1.2.9 低场核磁分析

低场核磁分析水分分布主要参考张昊伟等^[19]的方法。将素鲍鱼凝胶胶基切成 2 cm 放入核磁管中，选择 40 mm 探头，采样频率及质子共振率依次设定为 200 kHz 和 21 MHz ，等待时间 TW 设置为 6000 ms ，重复扫描次数设置为 4 次，获得指数衰减图形后使用 MultiExpInv Analysis Software 分析并进行反演形成弛豫图谱。

1.2.10 傅里叶红外分析

测试前将素鲍鱼凝胶胶基烘干至恒重，采用常规溴化钾压片法制备样品，扫描波数及分辨率依次设置为 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 及 0.5 cm^{-1} 以分析受测样品红外光谱。

1.2.11 数据分析与绘图

实验测定数据结果采用 Origin 9.0 进行绘图及 SPSS 21.0 开展统计分析，涉及稳态剪切流变曲线拟合及凝胶化速率拟合过程均采用最小二乘法进行拟合，实验重复次数均为 3 次。

2 结果与分析

2.1 NaOH添加对可得然胶-魔芋胶溶液共混体系静态流变性质的影响

由图 1 可知可得然胶-魔芋胶共混溶液的 η 随 $\dot{\gamma}$ 增加均呈显著降低趋势，显示出典型非牛顿流体的剪切变稀特征。溶液共混体系 η 与 $\dot{\gamma}$ 的依赖关系的 *Power-Law* 模型拟合结果（表 1）显示 R^2 值均大于 0.98，可知此异质多糖共混体系的稳态剪切曲线都能利用该模型进行较好地拟合。由表 1 可知共混体系的流动指数 n 均远小于 1，且 n 值随 NaOH 添加量增加呈先降低后增加趋势，稠度系数 K' 值随溶液中 NaOH 添加量的升高先增加后降低，说明与对照样相比添加低质量分数 NaOH（0.10%~0.20%）的共混体系黏稠度增加及剪切变稀性质更明显，而高质量分数（0.30%~0.50%）NaOH 添加降低了溶液共混体系的黏稠度并增加了流动性。Yan 等^[20]在研究可得然胶流变性质时发现添加了 0.20 mol/L NaOH 的可得然胶溶液体系的比添加 0.10、0.50 及 1.00 mol/L NaOH 体系相对而言具有更显著的剪切变稀和假性塑性行为，并归因于系可得然胶分子内及分子间氢键的断裂引起，这一碱添加量对可得然胶溶液静态流变性质的改变趋势与本研究结果类似。庄远红等^[21]研究 pH 值对魔芋胶/卡拉胶复配体系时发现了在 pH 值 4.0~9.0 范围，类似随加减量提高，异质多糖共混体系黏度呈先增大后减小现象，加碱量最高条件下的黏度值相对峰值而言降低了约 18.00%，并认为是共混体系碱性增强导致多糖分子携带电荷量发生改变进而不利于卡拉胶大分子的相互缠结引起。综上，可得然胶-魔芋胶共混溶液体系为典型假塑性流体且其剪切变稀程度受到加碱量的影响。

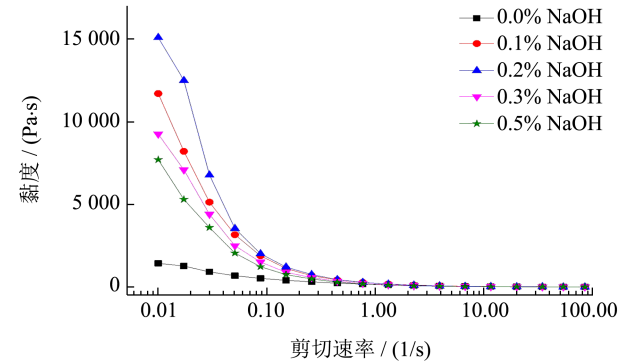


图 1 可得然胶-魔芋胶溶液共混体系黏度 (η) 随剪切速率 ($\dot{\gamma}$) 变化的 *Power law* 模型拟合曲线

Fig.1 The fitting cures of of Curdlan-Konjac gum blends solution with the *Power Law*

表 1 可得然胶-魔芋胶溶液共混体系 η 随 $\dot{\gamma}$ 变化
*Power Law*拟合参数

Table 1 The fitting parameters of Curdlan-Konjac gum blends with the <i>Power Law</i>			
NaOH 质量分数/%	$K'/(Pa \cdot s^n)$	$n (-)$	R^2
0.00	162.71	0.52	0.99
0.10	287.34	0.19	1.00
0.20	358.01	0.17	0.98
0.30	260.79	0.20	0.99
0.50	197.41	0.22	1.00

2.2 NaOH添加对可得然胶-魔芋胶溶液共混体系溶胶-凝胶转变过程流变性质的影响

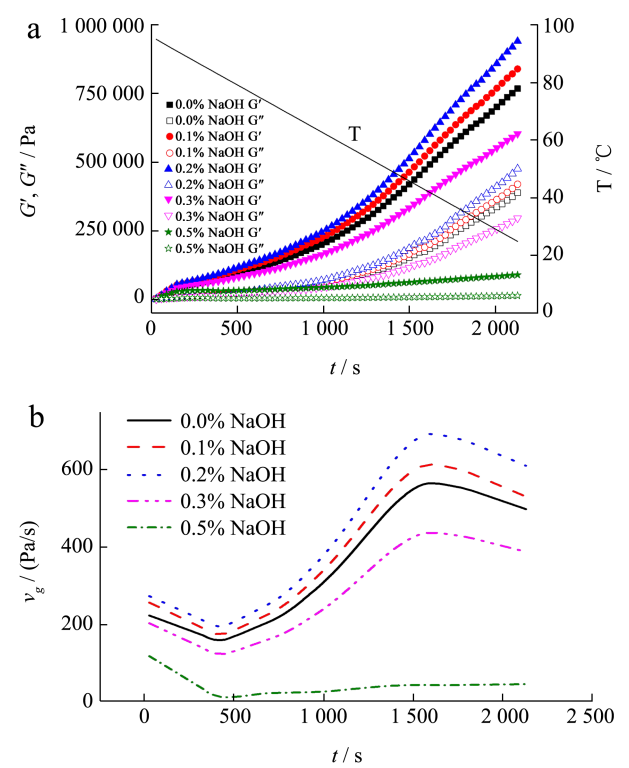


图 2 可得然胶-魔芋胶多糖共混体系溶胶-凝胶转变过程 G' 、 G'' (a) 及凝胶化速率 (b) 随 t 变化曲线
Fig.2 G' 、 G'' (a) and v_g (b) versus t cures of Curdlan-Konjac gum blends during sol-gel transition

由图 2a 可知，碱含量位于 0.00%~0.20% 时可得然胶-魔芋胶溶液共混体系降温过程的 G' 、 $G'' \sim t$ 演变趋势呈弱“S”型。类似的 G' 、 $G'' \sim t$ 演变趋势也存在于明胶-变性淀粉共混体系降温过程溶胶-凝胶转变阶段，因其在共混体系凝胶形成诱导期、快速指数增长长期及对数缓慢增长长期分别由具冷致凝胶性质的明胶成分主导，且存在明显的多个转折点温度，致使 G' 、 $G'' \sim t$ 曲线“S”形特征更加明显^[22]。当 NaOH 含量高于 0.30% 时， G' 、 G'' 随 t 变化曲

线“S”型特征相对不明显, 0~400 s (约 95~85 ℃) 阶段, G' 、 G'' 值均呈增加趋势, 图 2b 显示凝胶化速率呈衰减趋势, 随后 v_g 达到最小值, 此后凝胶化速率逐渐增加至峰值 (v_{gmax}), 最后凝胶化速率重新下降, 表明碱的存在可以改变可得然胶-魔芋胶异质多糖胶基共混体系降温阶段的凝胶化进程, 主要原因可能为弱碱性条件利于魔芋胶形成不可逆凝胶的强化协同效应所致。

由表 2 可知, 与对照相比, 添加 0.10% NaOH 后, 可得然胶-魔芋胶共混体系溶胶-凝胶转变过程特征弹性模量值均有显著提高, 其中 G'_i 及 G'_f 增幅依次达到 11.61% 及 15.23%; 伴随 SDR_a 及 v_{max} 增幅分别达 16.01% 及 8.53%, 进一步增加 NaOH 条件量至 0.20% 后, 黏弹性模量及凝胶化速度参数进一步呈增加趋势, 主要原因是适量碱的存在下促进了魔芋胶凝胶的形成, 从而巩固了共混凝胶结构。但当加碱量超过 0.20% 后, 模型胶基的凝胶化程度显著被降低, 且随加碱量的进一步提高此趋势被加剧, 表明过量碱的存在弱化了共混凝胶形成三维网络结构, 主要原因可能是高 pH 值条件下影响到可得然胶和魔芋胶分子之间的缠结所致。

Tada 等^[23]在 30 ℃ 条件下研究碱添加量对质量分数为 10.00% 的可得然胶水体分子缔合结构和黏弹性的影响时发现了类似现象, 在较低的 NaOH 浓度系统 (0.01、0.02 mol/L) 中, 黏弹模量几乎不依赖于角频率, 而较高 NaOH 浓度 (0.10 mol/L) 系统中, 而黏弹模量明显依赖于角频率, 亦表明低碱条件下利于可得然胶多糖凝胶的形成, 并认为是在稀碱溶液中可得然胶分子的缔合度随着碱浓度的降低而增加所致, 进而提高了凝胶的结构强度。整体而言, NaOH 添加量的改变可以调节可得然胶-魔芋胶溶液共混体系溶胶-凝胶转变过程的流变学性质。

2.3 NaOH添加对可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶质构性质的影响

食品质构属性源于食品结构的物理特性, 主要为与食品变形及流动等性质有关的力学性质, 受食品成分、微观结构等因素影响。素鲍鱼胶基共混凝胶质构性质主要决定于多糖种类和添加量, 以及共溶质加工助剂类型及添加量等条件的影响, 是素鲍鱼制品的重要性质。

表 2 可得然胶-魔芋胶溶液共混体系溶胶-凝胶转变过程流变学特征参数

Table 2 Rheological characteristic parameters of Curdlan-Konjac gum blends during sol-gel transition						
NaOH 质量分数/%	G'_i /Pa	G'_f /Pa	SDR_a (Pa/s)	v_{max} (Pa/s)	t_c /s	G'_{ic} /Pa
0.00	14 480.36	728 650.32	338.01	562.45	1 610.35	536 308.01
0.10	16 161.52	839 653.52	392.14	610.48	1 619.65	541 768.22
0.20	18 821.68	940 800.69	441.10	689.59	1 589.69	579 180.65
0.30	12 515.69	603 282.57	281.32	435.56	1 650.58	402 926.63
0.50	12 122.71	88 928.39	36.57	43.16	1 559.83	64 138.04

注: G'_i 及 G'_f 依次为降温初始及结束时弹性模量; SDR_a 为平均凝胶化速度; v_{max} 为最大凝胶化速率; t_c 及 G'_{ic} 为凝胶速度最大值处时间点及弹性模量。

表 3 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶质构性质

Table 3 Textural parameters of plant-based abalone gels preparation with Curdlan-Konjac gum blends				
NaOH 质量分数/%	硬度/N	粘附性/(N·mm)	内聚性 (-)	弹性 (-)
0.00	12.19 ± 0.96 ^a	3.05 ± 0.12 ^a	0.49 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.02 ^a
0.10	17.66 ± 0.44 ^b	2.57 ± 0.12 ^b	0.41 ± 0.05 ^a	0.65 ± 0.02 ^b
0.20	24.16 ± 1.78 ^c	1.56 ± 0.14 ^c	0.33 ± 0.04 ^b	0.80 ± 0.02 ^c
0.30	19.80 ± 1.09 ^b	0.58 ± 0.04 ^d	0.23 ± 0.04 ^c	0.57 ± 0.02 ^b
0.50	15.78 ± 0.65 ^b	0.18 ± 0.05 ^c	0.15 ± 0.05 ^c	0.27 ± 0.05 ^a

注: 不同字母表示质构性质相应指标之间的差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 3 可知随 NaOH 添加量提高, 素鲍鱼凝胶胶基硬度和弹性值均呈先升高后降低趋势, 但高碱质量分数存在时可能因发生碱诱导多糖链发生降解及解缠结而使凝胶结构松散化, 从而导致硬度和弹性值下降, 此与流变学的特征参数受影响趋势结果一致。随着碱添加量进一步增加, 粘附性及内聚性两类参数均可观察到呈现显著降低趋势 ($P<0.05$), 表明可得然胶-魔芋胶共混凝胶基凝胶结构在高碱含量条件下内部结合键被降低。Ye 等^[24]在研究可得然胶-魔芋胶共混体系质构性质时发现, 与对照相比, 碱性条件下 (pH 值 10.58) 共混体系凝胶的硬度及弹性值也获得显著提高, 并认为是适度碱性条件下共混体系产生了“增粘效果”所致。上述结果表明低量 NaOH 会增加共混凝胶的硬度和弹性值并有利于可得然胶-魔芋胶胶基共混凝胶结构的形成。

2.4 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶析水性质分析

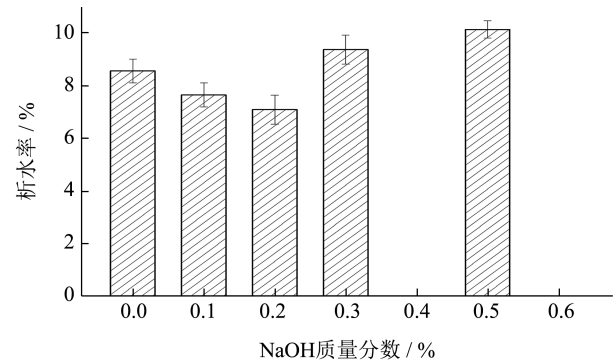


图 3 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶析水性质图
Fig.3 Syneresis rate of plant-based abalone gels preparation with Curdlan-Konjac gum blends

图 3 显示随着加碱量提高, 可观察到析水率呈先降低后升高演变趋势。与对照样相比, 添加 0.10% NaOH 样品的析水率降幅达 10.73%, 进一步提高 NaOH 质量分数至 0.20%, 共混凝胶基凝胶的析水率值达最小值 7.07%, 比对照组降低幅度达 17.24%, 但随 NaOH 添加量的增加, 析水率得到显著提高 ($P<0.05$)。低 NaOH 添加量共混凝胶基凝胶析水性的增加表明, 相对低质量分数的 NaOH 可能会在降温过程中魔芋胶和可得然胶间相互作用并形成更密实三维网络结构, 进而促进吸收三维凝胶网络中自由水。异质多糖 (蛋白) 高分子共混体系凝胶网络结构的强化常伴随析水性质的降低, 研究人员在可得然胶-冷胶及可得然胶-肌原纤维蛋白体系中也

发现了相似现象^[25,26]。但较高质量分数 NaOH 的液化作用有可能使可得然胶和魔芋胶多糖链中水结合位点数量降低, 从而削弱了多糖分子链和水分子间结合能力, 最终导致析水率上升。因此, 添加碱可以改变可得然胶-魔芋胶共混体系凝胶的水分保留能力。

2.5 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶扫描电镜分析

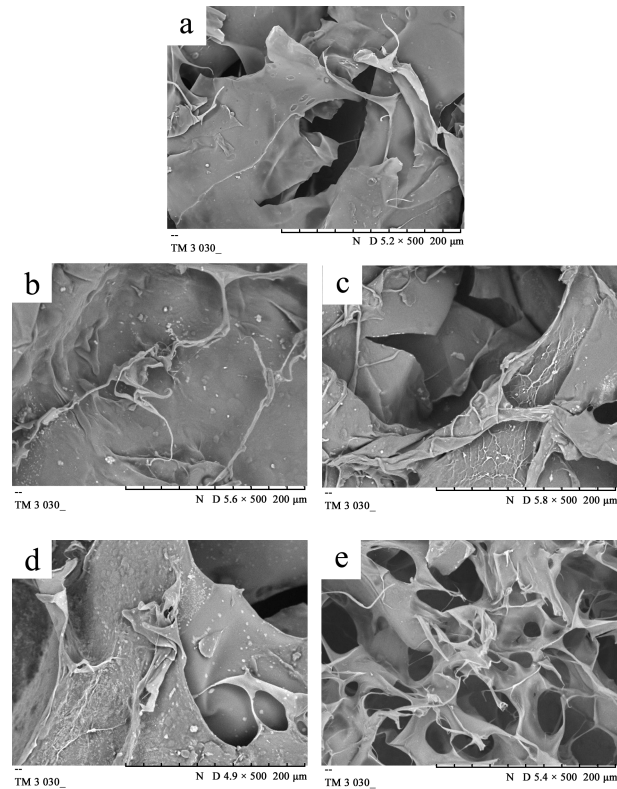


图 4 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶扫描电镜图
Fig.4 SEM images of plant-based abalone gels preparation with Curdlan-Konjac gum blends

注: a 为对照样, b、c、d 及 e 依次为添加质量分数 0.10%、0.20%、0.30% 及 0.50% NaOH 的样品。

与对照样相比, 低质量分数 NaOH 添加条件下共混凝胶基质愈发细密化, 断面区域更加平整, 共混凝胶基质孔隙呈降低趋势 (图 4a、4b), 此现象可能是由于 NaOH 添加后因异质多糖间氢键作用获得强化, 及不易流动形式存在的自由水分含量增加所致, 进而促使从凝胶表面逸散出去的凹洞显著减少, 此趋势与析水率的结果相一致。添加 0.30% 及 0.50% NaOH 的共混凝胶断面微观结构呈现松散化趋势, 孔隙率重新出现提高, 主要原因可能是凝胶强度降低导致网络结构中水分在冻干过程更易逸散所致。Ren 等^[27]研究两种弱碱盐 Na_2CO_3 及 NaHCO_3

形成的碱性条件对甘薯淀粉-凉粉草多糖复合凝胶性质过程亦发现了类似现象,与对照相比,0.00~3.00 g/L低质量浓度碱条件下可使共混凝胶孔隙更小并使结构更加紧密,进一步升高碱浓度,微观结构出现松散化现象。扫描电镜结果显示适量添加碱利于形成更好的可得然胶-魔芋胶共混体系凝胶微观结构。

2.6 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶水分分布性质分析

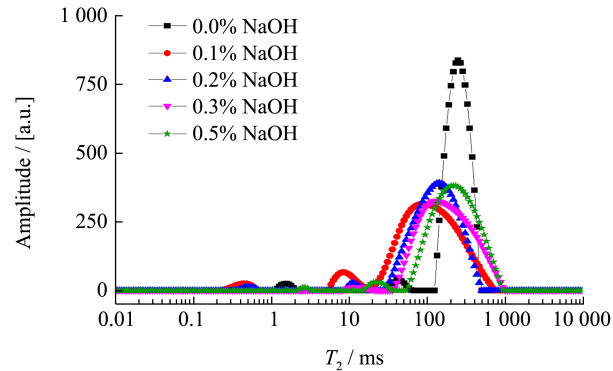


图 5 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶水分分布
Fig.5 The LF-NMR spectroscopy of plant-based abalone gels preparation with Curdlan-Konjac gum blends

表 4 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶弛豫参数
Table 4 The relaxation parameters of Curdlan-Konjac blend gels

NaOH 质量 分数/%	A21/%	A22/%	A23/%
0.00	0.46 ± 0.01 ^a	1.29 ± 0.24 ^a	98.25 ± 0.43 ^a
0.10	0.50 ± 0.02 ^{ab}	2.79 ± 0.16 ^b	96.72 ± 0.34 ^b
0.20	0.55 ± 0.01 ^b	3.32 ± 0.90 ^c	96.23 ± 0.74 ^b
0.30	0.59 ± 0.03 ^{bc}	2.70 ± 0.27 ^b	96.71 ± 0.20 ^b
0.50	0.62 ± 0.02 ^c	2.51 ± 0.46 ^b	96.87 ± 0.86 ^b

注:不同字母表示水分分布性质相应指标之间的差异显著 ($P<0.05$)。

不同 NaOH 添加量的可得然胶-魔芋胶共混凝胶低场核磁波谱图及峰信息见图 5 及表 4,可综合反映共混凝胶的食品水分分布情况。由图 5 可知受测各个样品均存在 3 个峰,依弛豫时间先后顺序依次表征三类不同性质水分,依次为 T21(结合水)、T22(不易流动水)及 T23(游离水)^[28]。由表 4 可知,五组样品 96.00% 以上为游离水,显示共混凝胶中的水分主要以游离水形式存在。与对照相比,添加 0.10% NaOH 使共混凝胶结合水含量增加了 8.70%,随钠离子质量分数增加结合水量呈微幅增加趋势,可能是由于静电相互作用增强引起。添加 0.10% 及 0.20% NaOH 可得然-魔芋胶共混凝胶的不易流动

水含量增加了 116.27% 及 157.36%,显示共混体系凝胶网络结构获强化进而驱动了凝胶网络结构中水分迁移,少量游离水转换为不易流动水。Zhong 等^[29]考察可得然胶-魔芋胶体系时发现两类多糖分子间形成三维网络结构的主要原因是氢键作用诱导网络结构形成导致水分子自由流动空间受限,并表现出松弛时间提前。随 NaOH 添加量进一步提高至 0.30% 及 0.50%,不易流动水含量从峰值回落,与析水性质结果对比可知不易流动水含量与析水特性呈负相关,凝胶强度获巩固时对不易流动水分束缚增强。高质量分数 NaOH 弱化了共混凝胶网络结构,不易流动水析出,游离水含量获提高。上述结果表明,不同 NaOH 添加量可以通过调节水分的存在形式及分布进而改变共混凝胶的网络结构强度。

2.7 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶傅里叶红外分析

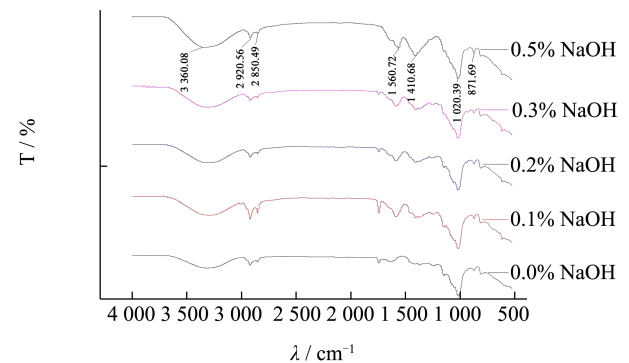


图 6 可得然胶-魔芋胶共混体系素鲍鱼凝胶傅里叶红外图
Fig.6 FT-IR spectrum of plant-based abalone gels preparation with Curdlan-Konjac gum blends

图 6 为含 NaOH 的可得然胶-魔芋胶共混凝胶 FT-IR 图谱,结果显示五种样品具类似峰形,共混凝胶在 3 430.00 cm^{-1} 附近存在羟基伸缩振动。与对照样相比,添加 0.10% 及 0.20% 碱量后,羟基振动峰位置从 3 446.75 cm^{-1} 依次偏移至 3 438.86、3 426.38 cm^{-1} ,随 NaOH 添加量进一步增加羟基伸缩振动峰增强并向高波数方向偏移,表明可得然胶-魔芋胶共混凝胶中形成氢键数减少,主要因为过量添加 NaOH 后多糖共混凝胶亲水胶体成分与水分子形成了相对更少的氢键引起。添加低质量分数碱可强化可得然胶-魔芋胶共混体系中魔芋胶此类多糖成分分子间的作用力,利于魔芋胶多糖分子间通过氢键相互作用形成螺旋亚结构并缠结形成共混体系三维网络凝胶结构。但添加相对高质量分数 ($>0.30\%$) NaOH 条件下,可得然胶受 NaOH 的影响,除与水分子形成

氢键外,与多糖分子亦能形成氢键作用,可得然胶分子束缚水能力减弱,在凝胶网络结构中水分子运动更容易,从而不利于可得然胶及魔芋胶网络结构的形成并导致凝胶网络结构弱化,宏观上表现出添加相对高 NaOH 添加量样品的流变及质构强度降低而析水现象加剧。傅里叶红外光谱图中未检测到可得然胶-魔芋胶共混凝胶新的峰的出现,表明添加碱后可得然胶和魔芋胶之间未发生共价相互作用。研究人员发现可得然胶-冷胶共混体系凝胶性能的改善主要归因于可得然胶和明胶之间的氢键形成,也未发现两类高分子之间存在共价相互作用^[25]。因此,可得然胶与魔芋胶多糖分子之间存在氢键相互作用,同时适量碱的加入也增强了两种多糖分子之间的氢键相互作用。

3 结论

添加 NaOH 能够有效调节可得然胶-魔芋胶共混体系的静态流变特性、溶胶-凝胶转变进程、流变、质构性质、析水行为以及微观结构。在低质量分数 NaOH (0.10%~0.20%) 条件下,共混体系的黏稠度显著增加,剪切变稀现象更为明显,同时显著提升了溶胶-凝胶转变过程中的黏弹性模量和凝胶化速率,并增强了共混凝胶的硬度和弹性。此外,共混凝胶基质变得更加致密,断面区域更为平整。然而,当 NaOH 添加量进一步增加时,共混凝胶的强化趋势出现逆转。通过低场核磁共振和傅里叶红外光谱分析发现,低质量分数 NaOH 条件下,共混凝胶中不易流动水的含量增加,增强了可得然胶-魔芋胶分子间的氢键作用力,从而构建了更为稳定的共混体系三维网络结构,进而强化了溶胶-凝胶转变过程中的流变学特征参数、质构性质及微观结构,同时降低了析水率。本研究为素鲍鱼制备工艺及配方优化提供了新的思路,并为利用 NaOH 调节可得然胶-魔芋胶共混体系在素鲍鱼胶基制备中的应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] MCCLEMENTS D J, GROSSMANN L. The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 4049-4100.
- [2] KYRIAKOPOULOU K, DEKKERS B, VAN DER GOOT A J. Plant-based Meat Analogues [M]. *Sustainable meat production and processing*. Academic Press, 2019: 103-126.
- [3] MCCLEMENTS D J, GROSSMANN L. A brief review of the science behind the design of healthy and sustainable plant-based foods [J]. *NPJ Science of Food*, 2021, 5(1): 17.
- [4] JOSHI V K, KUMAR S. Meat analogues: Plant based alternatives to meat products-A review [J]. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 2015, 5(2): 107-119.
- [5] 俞珊,段孟霞,童彩玲,等.可得然胶功能性质及其在食品中的应用研究进展[J].*食品科学*,2022,43(19):277-284.
- [6] GROSSMANN L, MCCLEMENTS D J. The science of plant-based foods: Approaches to create nutritious and sustainable plant-based cheese analogs [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 207-229.
- [7] GREIS M, SAINIO T, KATINA K, et al. Physicochemical properties and mouthfeel in commercial plant-based yogurts [J]. *Foods*, 2022, 11(7): 941.
- [8] NUTTER J, SHI X, LAMSAL B, et al. Designing and characterizing multicomponent, plant-based bigels of rice bran wax, gums, and monoglycerides [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 138: 108425.
- [9] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN DER GOOT A J. Structuring processes for meat analogues [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 81: 25-36.
- [10] KYRIAKOPOULOU K, KEPPLER J K, VAN DER GOOT A J, et al. Alternatives to meat and dairy [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12: 29-50.
- [11] LIU Z, REN X, CHENG Y, et al. Gelation mechanism of alkali induced heat-set konjac glucomannan gel [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 116: 244-254.
- [12] HOU Y, LIU H, ZHU D, et al. Influence of soybean dietary fiber on the properties of konjac glucomannan/ κ -carrageenan corn oil composite gel [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107602.
- [13] 蒋明峰,肖满,倪学文,等.魔芋葡甘聚糖与可得然胶的相互作用[J].*食品科学*,2016,37(19):54-58.
- [14] 庄远红,刘静娜,潘裕添,等.pH对魔芋胶复配体系凝胶特性及色泽的影响[J].*生物加工过程*,2014,12(3):58-61.
- [15] 吴其晔,巫静安.高分子材料流变学[M].高等教育出版社,2002.
- [16] KASTNER H, EINHORN-STOLL U, SENGE B. New parameters for the examination of the pectin gelation process [J]. *Gums and Stabilisers for the Food Industry*, 2012, 16: 191-197.
- [17] FU J T, RAO M A. Rheology and structure development during gelation of low-methoxyl pectin gels: the effect of sucrose [J]. *Food Hydrocolloids*, 2001, 15(1): 93-100.
- [18] LEE M H, BAEK M H, CHA D S, et al. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide

- gums [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(4): 345-352.
- [19] 张昊伟,伍娟,辛孟瑶,等.超声协同TG酶处理乳清蛋白/马铃薯蛋白水解物复合凝胶的特性[J].现代食品科技, 2023,39(8):148-155
- [20] YAN J K, CAI W D, WANG C, et al. Macromolecular behavior, structural characteristics and rheological properties of alkali-neutralization curdlan at different concentrations [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105785.
- [21] 庄远红,刘静娜,潘裕添,等.pH对魔芋胶复配体系凝胶特性及色泽的影响[J].生物加工过程,2014,12(3):58-61.
- [22] 邹秀容,朱建华,刘日斌,等.基于动态流变学的明胶/变性淀粉共混体系溶胶-凝胶相互转变动力学解析[J].食品科学,2020,41(3):37-46.
- [23] TADA T, MATSUMOTO T, MASUDA T. Influence of alkaline concentration on molecular association structure and viscoelastic properties of curdlan aqueous systems [J]. Biopolymers: Original Research on Biomolecules, 1997, 42(4): 479-487.
- [24] YE W, YAN B, PANG J, et al. A study of the synergistic interaction of konjac glucomannan/curdlan blend systems under alkaline conditions [J]. Materials 2019, 12(21): 3543.
- [25] ZHOU T Q, WANG X C, GAO L Y, et al. Construction and properties of curdlan gum/gellan gum binary composite gel system [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109391.
- [26] JIANG S, ZHAO S C, JIA X W, et al. Thermal gelling properties and structural properties of myofibrillar protein including thermo-reversible and thermo-irreversible curdlan gels [J]. Food Chemistry, 2020, 311: 126018.
- [27] REN Y M, XIAO W H, RONG L Y, et al. The role of alkali in sweet potato starch-Mesona chinensis Benth polysaccharide gels: Gelation, rheological and structural properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 170: 366-374.
- [28] LIU S, NIU L Y, TU J, et al. The alleviative effect of curdlan on the quality deterioration of konjac glucomannan thermo-irreversible gels after commercial sterilization at 121 °C [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 238: 124134.
- [29] ZHONG G, WANG Z, CHEN Q, et al. Effects of different non-ionic polysaccharides on the heat-induced gelling properties of curdlan [J]. Polymers, 2024, 16(23): 3345.