

王玉丽, 李婷, 范玉文, 等. 钾离子对罗望子胶/ κ -卡拉胶复合凝胶特性的影响及机理分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 78-83.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070184

WANG Yuli, LI Ting, FAN Yuwen, et al. Effect of Potassium Ions on the Properties and Mechanism Analysis of Tamarind Gum/Kappa-Carrageenan Composite Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 78-83. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070184

· 研究与探讨 ·

钾离子对罗望子胶/ κ -卡拉胶复合凝胶特性的影响及机理分析

王玉丽, 李婷, 范玉文, 黄家钰, 聂珂楠, 院佩佩, 吴正奇*
(湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068)

摘要:为探究 K^+ 对罗望子胶/ κ -卡拉胶复合凝胶的特性及机理的影响, 本文采用流变学、质构分析、微观结构和红外光谱四种方法, 对不同 K^+ 添加量的复合凝胶的性能和结构进行研究。流变学结果显示, K^+ 的添加使凝胶体系的模量升高, 柔量和总形变量降低, K^+ 添加量增至 15 mmol/L 时, 表观粘度达到最高值 2690 Pa·s; 质构分析结果显示随 K^+ 添加量的增大, 凝胶体系强度和硬度增大, 但弹性和内聚性相对减少; 而红外光谱和微观结构证明了 K^+ 可以促进两种凝胶体系之间的相互作用, 使凝胶孔隙趋于致密均匀, 在 K^+ 添加量 15 mmol/L 时孔径间壁最为规则结实。结果表明, K^+ 的添加能够使凝胶体系表现较好的粘弹性和抗变形性, 使网状结构更加紧密, 为罗望子胶和 κ -卡拉胶的复配应用提供了理论参考。

关键词: 罗望子胶, κ -卡拉胶, 凝胶特性, 微观结构, 凝胶机理

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)10-0078-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070184



本文网刊:

Effect of Potassium Ions on the Properties and Mechanism Analysis of Tamarind Gum/Kappa-Carrageenan Composite Gel

WANG Yuli, LI Ting, FAN Yuwen, HUANG Jiayu, NIE Kenan, YUAN Peipei, WU Zhengqi*

(School of Bioengineering and Food Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To investigate the effect of K^+ on the properties and mechanism of the composite gel system consisting of tamarind gum and κ -carrageenan, four methods including rheology, texture analysis, microstructure, and infrared spectroscopy were used to investigate the properties and structure of the composite gel with different K^+ additions. The rheological results showed that the addition of K^+ increased the modulus of the gel system and decreased the compliance and total deformation. When the addition of K^+ increased to 15 mmol/L, the apparent viscosity reached its highest value of 2690 Pa·s. The results of texture analysis revealed that the strength and hardness of the gel system increased with the addition of K^+ , but its elasticity and cohesiveness decreased relatively. Infrared spectroscopy and microstructure demonstrated that K^+ could promote the interaction between tamarind gum and κ -carrageenan, the gel pores tend to be dense and uniform, and the inter-pore walls were most regular and strong at the K^+ addition of 15 mmol/L. The results showed that the addition of K^+ could make the gel system exhibit better viscoelasticity and anti-deformation, and make the network structure more compact, which would provide a theoretical reference for the application of tamarind gum and κ -carrageenan in compounding.

Key words: tamarind gum; κ -carrageenan; gel properties; microstructure; gelation mechanism

罗望子多糖胶 (Tamarind seed polysaccharide, TSP) 也称罗望子胶, 是从豆科植物罗望子种子胚乳

中提取出的一类天然植物胶。TSP 是由 D-葡萄糖、D-木糖和 D-半乳糖 (4:3:1) 组成的中性聚多糖, 不易

收稿日期: 2022-07-19

作者简介: 王玉丽 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物的开发与利用, E-mail: 395234168@qq.com。

* 通信作者: 吴正奇 (1966-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 天然产物的开发与利用, E-mail: hgwzq66@126.com。

溶解但易分散于冷水中,加热后可溶解形成均一的胶体溶液,具有良好的乳化性、耐热性、保水性和冻融稳定性等,常用作乳化剂、稳定剂、质地改良剂等^[1-2]。TSP 不能单独形成水凝胶,但在糖或酒精参与的条件可形成一定强度的半透明凝胶,成胶能力约为果胶的 2 倍,形成的凝胶具有广泛的 pH 耐受性且不受盐类的影响,粘稠性强、析水少且富有弹性^[3-4],此外, TSP 的无毒性、生物相容性及良好的凝结、成膜和保水等性质,使其常用于药物的包埋和缓释^[5]。

卡拉胶(Carrageenan, CG)又名石花菜胶、鹿角菜胶,是一类从红藻类海草中提取出的亲水线性多糖化合物,是由 α -(1,3)-D-4-硫酸-半乳糖和 β -(1-4)-3,6-内醚-D-半乳糖双糖重复单元作为基本骨架交替连接组成的硫酸化聚阴离子半乳糖^[6-7],其硫酸盐基团的数量和位点的差异使卡拉胶的类型多样,最常见的三种类型是 κ -卡拉胶、 ι -卡拉胶和 λ -卡拉胶,其中 κ -卡拉胶(KC)是一种温敏和钾敏型凝胶,具有易溶于冷水、透明度高和热可逆凝胶化的特点,常用于食品加工生产中^[8]。

目前国内外多对多糖进行复配研究,例如 Sittichoke 等^[9]研究发现将琼脂和 κ -卡拉胶分别与鲈鱼明胶相互作用后可改善鱼明胶质量,促进鲈鱼明胶的实际应用。Wei 等^[10]研究发现魔芋多糖和 κ -卡拉胶的复配凝胶体系的粘度和凝胶强度均比个体更好,凝胶特性得到了改善。TSP 不仅原料丰富,价格经济,而且具有良好的热稳定性和营养价值,是一类具有极大开发潜力的生物聚合物,但其难独立成胶的缺陷性限制了它的综合利用^[11]。 κ -卡拉胶单独成胶时,其凝胶体系脆性大、弹性小且水分易析出,而 TSP 具有较好的保水性和稳定性,但目前对于二者的复配研究几乎没有。将 TSP 与 KC 进行复配成胶,以达到弥补二者的缺陷性,改善凝胶性能,减少 TSP 的资源浪费的目的,扩大 TSP 复合凝胶作为功能性物质、包埋壁材等在食品、医药和化工等领域的应用。因此,本文基于预实验结果,选取 TSP 和 KC 不能单独成胶的临界浓度点,将 1.5% TSP 和 0.7% KC 配制成总多糖浓度为 2.2%(w/v)的 TSP-KC 复合凝胶,然后对不同 K^+ 添加量的 TSP-KC 复合凝胶的作用机理进行初步探索,研究 K^+ 对 TSP-KC 复合凝胶性能的影响,以期 TSP-KC 复合凝胶性质和作用机理的深入研究提供基础性参考,提高 TSP 和 KC 的综合利用率,为 TSP 在凝胶方面的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

罗望子胶 食品级,河南豫中生物工程有限公司; κ -卡拉胶 食品级,河南旗诺食品配料有限公司;氯化钾 分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

MCR92 安东帕流变仪 澳大利亚 Anton Paar GmbH 公司;TA.XT plus 质构分析仪 英国 Stable

Micro Systems 有限公司;JSM-5610LV 型扫描电子显微镜 日本 Hitachi 公司; Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪 美国 Thermo Nicolet 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 TSP-KC 复合凝胶的制备 参考 Zhang 等^[12]方法并作修改,称取 KCl 固体溶解配制成 1 mol/L KCl 溶液。将固定量的 TSP 和 KC 配制成 K^+ 浓度分别为 0、3、6、9、12、15、20 mmol/L 的 TSP-KC 复合凝胶,最终总多糖浓度为 2.2%(w/v)。搅拌均匀后充分水合,85 °C 水浴加热 30 min 后,置于 4 °C 冰箱中备用。测试样品前恢复至室温。

1.2.2 流变特性测定

1.2.2.1 稳态剪切测定 参考 Lin 等^[13]的方法,在室温下测定 TSP-KC 复合凝胶在 0.01~1000 s^{-1} 范围内表观粘度的变化曲线。配置参数:平行板直径 40 mm,间隙 0.5 mm。

1.2.2.2 动态粘弹性测定 将复合凝胶平衡至室温后,对样品进行频率扫描实验,测定 TSP-KC 复合凝胶的模量随频率的变化情况。具体参数为:应变:1%,频率:0.1~25 Hz。

1.2.2.3 蠕变恢复测定 参考 Sharma 等^[14]的方法并稍作修改。在 10 Pa 的恒定剪切应力作用下,测定应变和柔量(J)随时间的变化曲线。在应力消除后,再记录 2 min 恢复阶段的应变变化曲线。

1.2.3 质构特性测定 称取适量的复合凝胶放入样品皿中,选用 P/0.5 圆柱型探针对样品凝胶的内聚性、硬度和弹性进行测定。具体参数:测前、测中和测后速度均为 1.0 mm/s,测试距离 16 cm,压缩形变量为 30%,触发力为 5 g。

1.2.4 微观结构测定 使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察 TSP-KC 复合凝胶体系的微观结构。将凝胶样品切片处理后冷冻干燥,冻干样品进行喷金处理,于 30 kV 电压和 500×放大倍数下观察。

1.2.5 傅里叶红外光谱的测定 参考 Xie 等^[11]的方法对细节稍作改动,使用傅里叶变换红外光谱仪(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)对 TSP-KC 凝胶结构进行分析。将 KBr 粉末干燥后与凝胶冻干样品混合研磨成粉后压片处理,在 4000~500 cm^{-1} 波数范围内测定。

1.3 数据处理

每组样品不少于三个平行样,重复测定三次。使用 SPSS 25.0 和 Origin 2018 对实验数据进行分析 and 图表绘制,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Tukey's post-hoc 检验评估正态分布数据。 $*P<0.05$ 为统计学差异显著。

2 结果分析

2.1 流变特性分析

2.1.1 稳态剪切 图 1 表示不同 K^+ 添加量的 TSP-KC

复合凝胶的稳态剪切测试变化曲线,结果显示,随着剪切速率的增大,复合凝胶体系的表观粘度整体呈下降趋势,表现出假塑性和剪切稀化行为,这可能是因为剪切速率的增大使多糖结构遭到破坏,导致流阻降低,从而降低了粘度^[15]。当 K⁺的添加量达到 15 mmol/L 时, TSP-KC 复合凝胶表观粘度最高,约为 2690 Pa·s,而未添加 K⁺时复合凝胶最高表观粘度为 1480 Pa·s,说明 K⁺的添加会影响 TSP-KC 复合凝胶的假塑性行为。这可能是由于加入的 K⁺部分中和或屏蔽了 KC 的负电荷,削弱了静电排斥作用,促进凝胶化的形成,从而增加了该复合凝胶的表观粘度^[16]。杜徐楠等^[17]研究发现 K⁺与 κ-卡拉胶/刺槐豆胶相互作用, K⁺的添加增加了 KC 螺旋含量,使 κ-卡拉胶/刺槐豆胶结合位点增加,两者相互作用增强,从而增加了复合凝胶的表观粘度,这与上述结果相似。

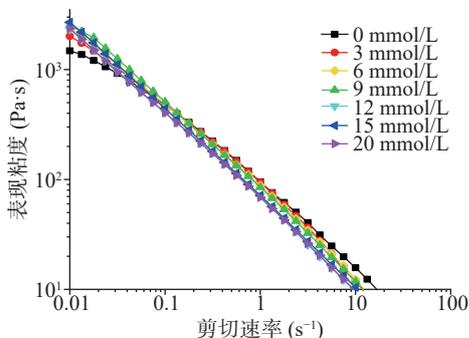


图1 不同 K⁺添加量 TSP-KC 复合凝胶的表观粘度
Fig.1 Apparent viscosity of TSP-KC gels with different K⁺ additions

2.1.2 动态粘弹性测定 图2 分别是不同 K⁺添加量的 TSP-KC 复合凝胶的模量(图 2a)和 tanδ(图 2b)随频率变化的曲线。图 2a 显示,在 0~14 Hz 的低频区域内,该凝胶体系的储能模量(G')明显高于损耗模量(G''), G'和 G''的变化基本稳定,随着 K⁺添加量增加 G'不断增大,但在该频率范围内相对平行,这说明该凝胶体系网络结构基本不受频率影响,表现出典型的固体凝胶行为^[18];图 2b 中凝胶体系的 tanδ 整体随着 K⁺添加量和频率的增加不断减少,并保持 tanδ<1,表现出显著的固态弹性行为,说明 K⁺可以有效地降低该凝胶体系的损耗正切角,增强其凝胶性^[19]。可能是 K⁺的添加促使复合凝胶体系中 KC 的螺旋-螺旋构象转变和聚集,使 KC 形成更加规则的网络结构,从而使 TSP 能够更好的嵌入到 KC 的网络结构中,进一步加强二者分子间的相互作用,具体表现为凝胶模量增强^[20]。这一结果与任艳艳^[21]对 κ-卡拉胶/魔芋葡甘聚糖复合水凝胶的研究结果相似,说明 K⁺能够改善复合凝胶的凝胶性能,增强其粘弹性。

2.1.3 蠕变和恢复 图3 是不同 K⁺添加量的 TSP-KC 复合凝胶的柔量(图 3a)和应变(图 3b)变化曲线,结果表明 K⁺的添加能够增强复合凝胶体系的抗变形性和凝胶强度。柔量是应变与应力之比,反映了

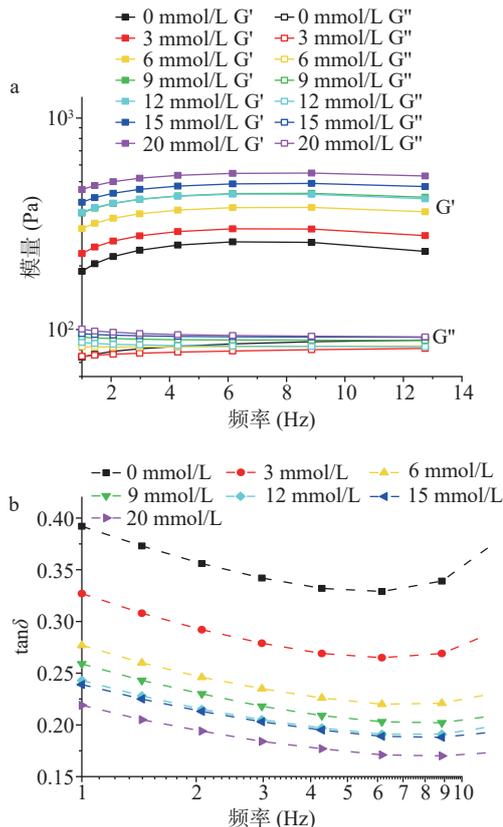


图2 不同 K⁺添加量 TSP-KC 复合凝胶的模量(a)和 tanδ(b)变化曲线

Fig.2 Modulus (a) and tanδ (b) variation curves of TSP-KC gels with different K⁺ additions

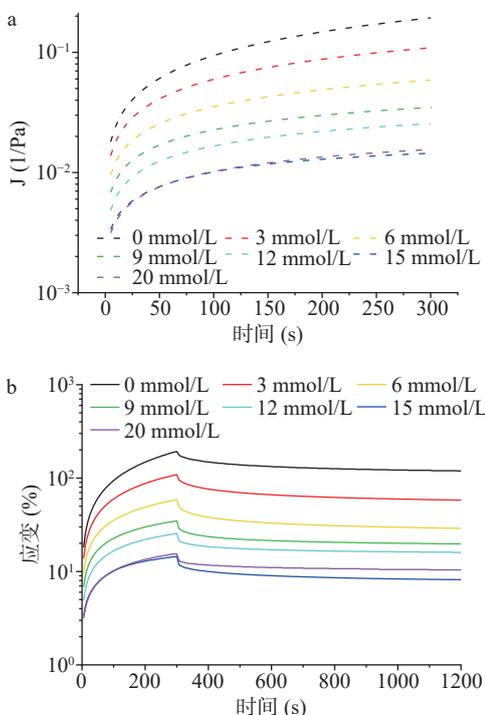


图3 不同 K⁺添加量 TSP-KC 复合凝胶的柔量(a)和应变(b)变化曲线

Fig.3 Compliance (a) and strain (b) variation curves of TSP-KC gels with different K⁺ additions

凝胶抗变形性的强弱, J 值越大,表示凝胶抗变形性越弱,说明凝胶体系结构越弱。图 3a 中, TSP-KC 复

合凝胶的 J 值整体随蠕变时间的增加而不断增大,但随着 K^+ 添加量的增加, J 值不断降低,表明 K^+ 的存在使该凝胶抗变形性增加,结构不断增强。总应变值是凝胶样品刚度的指标之一。如图 3b 所示,在蠕变时间范围内, TSP-KC 复合凝胶的应变迅速增加到最大,而后缓慢降低,随着 K^+ 添加量增加,凝胶体系的总应变整体呈下降趋势,这表明在 K^+ 添加量一定范围内, TSP-KC 复合凝胶是典型的粘弹性凝胶材料, K^+ 可以增强复合凝胶体系的网络结构,提高复合凝胶的强度。此外, K^+ 添加量在 20 mmol/L 时复合凝胶的总变形量大于 15 mmol/L 时的总变形量,这可能是因为 K^+ 与多糖竞相吸水,导致多糖过度凝聚,使得凝胶网络结构变弱,因而受到恒定应力时产生更大的形变量^[22]。由流变学结果可知, K^+ 添加量在 15 mmol/L 时, TSP-KC 复合凝胶的凝胶性能最优。

2.2 质构特性分析

质地剖面分析(TPA)是评估凝胶体系质构特性的重要手段。表 1 是 TSP-KC 复合凝胶体系在不同 K^+ 添加量下的 TPA 分析结果,随着 K^+ 添加量的不断增大,凝胶体系的硬度明显升高,在 K^+ 添加量为 12 mmol/L 时,凝胶硬度达到最高值 2715.792 g,而后开始下降,同时,加入 K^+ 后复合凝胶体系的弹性显著下降,但在 K^+ 添加量 15 mmol/L 时有逐渐回升的趋势。这可能是由于加入的 K^+ 与 KC 上的硫酸盐基团结合,使相邻的双螺旋结构聚集产生交联,诱导 KC 凝胶化,从而使复配凝胶的网络结构更加紧密有序,凝胶硬度增强,而弹性减弱^[23]。同样, K^+ 的添加

表 1 不同 K^+ 添加量条件下 TSP-KC 复合凝胶的质构参数
Table 1 Texture parameters of TSP-KC gels in different K^+ additions

K^+ 浓度 (mmol/L)	硬度(g)	弹性(mm)	内聚性
0	572.764±69.336 ^a	0.745±0.010 ^c	0.705±0.010 ^b
3	1382.874±178.506 ^b	0.111±0.111 ^a	0.090±0.090 ^a
6	1771.706±141.133 ^b	0.157±0.008 ^{ab}	0.040±0.022 ^a
9	2456.925±162.043 ^b	0.156±0.047 ^{ab}	0.100±0.018 ^a
12	2715.792±154.235 ^b	0.152±0.030 ^{ab}	0.128±0.069 ^a
15	2044.255±165.826 ^b	0.182±0.040 ^{ab}	0.074±0.044 ^a
20	1734.214±199.230 ^b	0.328±0.156 ^b	0.099±0.064 ^a

注:表中数据为平均值±标准误差, n=3; abc表示组内显著性差异($P<0.05$)。

使凝胶体系的内聚性显著降低后处于相对稳定状态,可能是由于 K^+ 的添加使凝胶体系内部分子间的结合相对减弱。结果表明 K^+ 对复合凝胶体系的质构特性具有显著影响,且 K^+ 添加量在 12 mmol/L 时,该凝胶体系显示出更高的硬度和较少的弹性。Wang 等^[24] 研究得出 K^+ 能够提高 KC 的硬度,但对其内聚性和弹性具有负面影响的结论,与上述结果相似。

2.3 微观结构分析

图 4 表示不同 K^+ 添加量的 TSP-KC 复合凝胶微观结构的 SEM 图像。结果表明一定范围内 K^+ 添加量可以改善凝胶体系的网络结构,提高其凝胶性能和保水性。未添加 K^+ 时,凝胶体系的网络结构孔径较大且不规则,但随着 K^+ 添加量的增大,结构空隙逐渐减小,间隙变得完整结实,这可能由于 K^+ 平衡了复合凝胶内部部分电荷,在分子间形成盐桥,增强了多糖分子间相互作用,使其构象转变更加稳定,结合更紧密^[24]。在 K^+ 添加量为 15 mmol/L 时, TSP-KC 复合凝胶的孔洞最为致密规则,表现出典型的固体弹性特征,而当 K^+ 添加量增加到 20 mmol/L 时,凝胶体系的网络结构变差,间隙干燥塌缩,孔隙结构失真。与流变学结果一致, K^+ 添加量为 15 mmol/L 时凝胶体系的网络结构最好。

2.4 红外光谱分析

FTIR 可用于糖类化合物分子间结构和相互作用的研究,进一步判断分子间氢键的强弱。图 5 表示 TSP 和 KC 以及 TSP-KC 复合凝胶在 4000~500 cm^{-1} 范围内的傅里叶红外光谱图。图 5a 中 TSP 在 1021 和 1649 cm^{-1} 附近分别出现了半乳糖环 C-O 键的伸缩振动峰和 C=O 的伸缩振动峰,这可能是 TSP 的线性结构包含葡萄糖、半乳糖和木糖残基,导致其出现了羰基吸收峰^[14]。而在 1376 cm^{-1} 附近出现了表现为木葡聚糖特征峰的 CH_2 的弯曲振动,表明 TSP 中存在木葡聚糖^[25-26]。 κ -卡拉胶在 840 和 924 cm^{-1} 附近分别出现了 D-半乳糖硫酸盐基团的弯曲振动和 3,6-脱水-D-半乳糖特征峰,在 1226 和 1034 cm^{-1} 附近出现硫酸酯的 S=O 的伸缩振动峰,说明 KC 为硫酸酯化多糖^[27-28]。此外, TSP 和 KC 分别在 3392.61 和 3423.17 cm^{-1} 处出现了典型的-OH 伸缩振动吸收峰,表明在 TSP 和 KC 中均存在氢键。图 5b 所示,

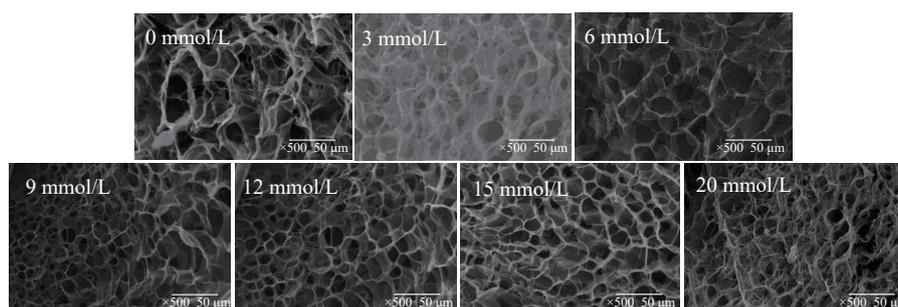


图 4 不同 K^+ 添加量 TSP/KC 复配凝胶的微观结构

Fig.4 Microstructures of TSP-KC gels with different K^+ additions

TSP-KC 复合凝胶体系的峰型与 TSP 基本相似, 只在指纹区具有差异性, 说明该复配凝胶体系以 TSP 网络结构为主体, 且随着钾离子添加量的增加, TSP-KC 复合凝胶的透过率逐渐降低, 吸收强度增大, 说明复合凝胶形成的主要作用力是氢键。同时, 随着 K^+ 添加量的增加, 复合凝胶的-OH 伸缩振动吸收峰向低波数移动, 而硫酸酯 S=O 伸缩振动的特征峰轻微向高波数方向移动, 这可能是由于 K^+ 的存在使硫酸基团数量减少, 增强了二者氢键相互作用, 结构更加致密, 促进了凝胶的成胶性和结构稳定性^[20,29]。这与 Makshakova 等^[30] 研究结果相似, K^+ 能够有效地屏蔽 KC 的硫酸根负电荷, 特异性结合 KC 的螺旋-螺旋结构, 增强二者的相互作用。

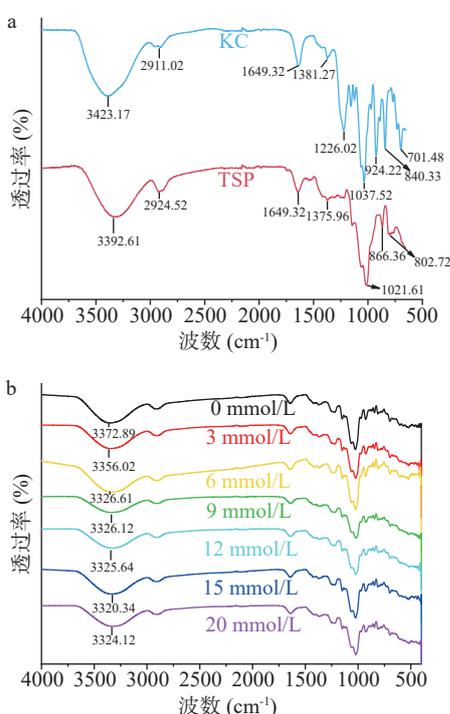


图5 傅里叶红外光谱图

Fig.5 Fourier infrared spectrogram

注: a: TSP 和 KC; b: 不同 K^+ 添加量的 TSP-KC 复合凝胶。

3 结论

本文对 TSP-KC 复合凝胶在不同 K^+ 添加量条件下的凝胶特性和微观结构进行了研究, 并对其凝胶形成机制进行了探索。实验结果表明, TSP 能帮助 KC 形成凝胶, 二者间的协同增效作用弥补了各自的缺陷性。且 K^+ 的添加能够诱导 KC 凝胶化, 促进了 TSP 和 KC 分子间的氢键相互作用, 促使该凝胶体系的网络结构增强, 趋于致密均匀, 提高了凝胶体系的稳定性和持水性, 改善了凝胶性能, 使其硬度、黏度以及抗变形性得到增强, 此外, 在 K^+ 添加量 15 mmol/L 时该凝胶体系具有较好的凝胶性能。但本研究仍有不足之处, 希望后续能够深入研究 TSP 和 KC 的具体结构变化以及结合位点情况, 对该复合凝胶机理进一步探索; 研究该复合凝胶体系的生物活性, 如抑菌性、抗氧化等, 探索其在产品中的效果, 扩大 TSP-

KC 复合凝胶在功能性食品和生物医学方面的开发与应用; 另外, 研究 TSP 复合材料作为壁材包载敏感性生物活性物质的控释和缓释载体作用, 为探索开发封装、保护或者递送敏感性生物活性物质的产品提供新思路。

参考文献

- [1] 刘爱国, 王思昕, 樊凯凯, 等. 罗望子胶与常用胶体的复配研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(15): 17-19. [LIU A G, WANG S X, FAN K K, et al. Study on compound of tamarind gum with common thickening agents[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(15): 17-19.]
- [2] CHAWANANORASEST K, SAENGTONGDEE P, KAEM-CHANTUEK P. Extraction and characterization of tamarind (*Tamarind indica* L.) seed polysaccharides (TSP) from three difference sources[J]. *Molecules*, 2016, 21(6): 775.
- [3] 韩明会, 于海龙, 朱莉伟, 等. 罗望子胶的流变学性质及凝胶特性研究[J]. *中国野生植物资源*, 2015, 34(3): 7-11. [HAN M H, YU H L, ZHU L W, et al. Study of rheological properties and gel performance of tamarind gum[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2015, 34(3): 7-11.]
- [4] 金明良, 覃小丽, 唐小媛, 等. 含罗望子胶的复配胶在牛奶果冻中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(10): 131-136. [JIN M L, QIN X L, TANG X Y, et al. Preparation of milk jelly using tamarind compound gums[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(10): 131-136.]
- [5] 赵陶磊, 聂彩清, 艾连中, 等. 罗望子多糖的结构、功能及其改性修饰研究进展[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(6): 67-76, 82. [ZHAO T L, NIE C Q, AI L Z, et al. Research progress on the structure, function and modification of tamarind seed polysaccharide[J]. *Food and Fermentation Science and Technology*, 2021, 57(6): 67-76, 82.]
- [6] 郑瑞峰, 王晓娟, 吴秋艳, 等. 卡拉胶凝胶保水机理及其应用研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(8): 186-188. [ZHENG R F, WANG X J, WU Q Y, et al. Study on water retention mechanism of carrageenan gel and its application[J]. *Journal of Food Safety*, 2022 (8): 186-188.]
- [7] 詹伟, 袁超, 崔波. 抗性糊精对 κ -卡拉胶凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(9): 19-24. [ZHAN W, YUAN C, CUI B. Effect of resistant dextrins on the gel properties of κ -carrageenan[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(9): 19-24.]
- [8] YUAN C, SANG L Y, WANG Y L, et al. Influence of cyclodextrins on the gel properties of kappa-carrageenan[J]. *Food Chemistry*, 2018, 266: 545-550.
- [9] SITTICHOKE S, SOOTTAWAT B, YACINE H. Physical and sensory properties of gelatin from seabass (*Lates calcarifer*) as affected by agar and κ -carrageenan[J]. *Journal of Texture Studies*, 2018, 49(1): 47-55.
- [10] WEI Y, WANG Y L, HE X J. Gel properties of k-carrageenan-konjac gum mixed gel and their influence factors[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 396-398(396-398): 1389-1393.
- [11] XIE F, ZHANG H, XIA Y J, et al. Effects of tamarind seed polysaccharide on gelatinization, rheological, and structural properties of corn starch with different amylose/amylopectin ratios[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105854.
- [12] ZHANG J H, JIANG L, YANG J, et al. Effect of calcium chloride on heat-induced *Mesona chinensis* polysaccharide-whey

- protein isolation gels: Gel properties and interactions[J]. *LWT*, 2022, 155: 112907.
- [13] LIN L H, SHEN M Y, LIU S C, et al. An acidic heteropolysaccharide from *Mesona chinensis*: Rheological properties, gelling behavior and texture characteristics[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107(Pt B): 1591–1598.
- [14] SHARMA M, MONDAL D, MUKESH C, et al. Preparation of tamarind gum based soft ion gels having thixotropic properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 102: 467–471.
- [15] WU D, YU S M, LIANG H S, et al. The influence of deacetylation degree of konjac glucomannan on rheological and gel properties of konjac glucomannan/ κ -carrageenan mixed system[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101(C): 105523.
- [16] 苏一帆, 钱志强, 刘忠. 无机盐对 κ -卡拉胶凝胶行为影响的机理[J]. *盐科学与化工*, 2021, 50(8): 16–20,33. [SU Y F, QIAN Z Q, LIU Z. Gelation mechanisms of κ -carrageenan in solutions under the influence of inorganic salts[J]. *Salt Science and Chemistry*, 2021, 50(8): 16–20,33.]
- [17] 杜徐楠, 陈改亭, 胡猛, 等. 离子对 κ -卡拉胶/刺槐豆胶相互作用的影响研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(3): 230–239. [DU X N, CHEN C T, HU M, et al. Effect of ions on kappa-carrageenan/locust bean gum interaction[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(3): 230–239.]
- [18] 樊蕊. 燕麦 β -葡聚糖复合凝胶制备技术及其凝胶机理研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(18): 35–40. [FAN R. Preparation technology of β -glucan composite gel and the analysis of gelation mechanism[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(18): 35–40.]
- [19] WANG W J, JIANG L, REN Y M, et al. Gelling mechanism and interactions of polysaccharides from *Mesona blumes*: Role of urea and calcium ions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 212: 270–276.
- [20] WANG N, TIAN J, WANG L L, et al. Fucoidan hydrogels induced by κ -carrageenan: Rheological, thermal and structural characterization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 191: 514–520.
- [21] 任艳艳. κ -卡拉胶/魔芋葡甘聚糖复合水凝胶机械性能强化与表征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. [REN Y Y. Enhancement and characterization of κ -carrageenan/ konjac glucomannan compound hydrogels[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.]
- [22] 江联. 凉粉草多糖-乳清分离蛋白凝胶体系的凝胶特性和凝胶机理的研究及应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [JIANG L. *Mesona chinensis* polysaccharide-whey protein isolate gel system: Gel properties, mechanism and its application[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.]
- [23] EVAGELIOU V I, RYAN P M, MORRIS E R. Effect of monovalent cations on calcium-induced assemblies of kappa carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 86: 141–145.
- [24] WANG Y L, YUAN C, CUI B, et al. Influence of cations on texture, compressive elastic modulus, sol-gel transition and freeze-thaw properties of kappa-carrageenan gel[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 202: 530–535.
- [25] ALPIZAR-REYES E, CARRILLO-NAVAS H, GALLARDO-RIVERA R, et al. Functional properties and physicochemical characteristics of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed mucilage powder as a novel hydrocolloid[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 209: 68–75.
- [26] 刘孝平, 邹雨珂, 刘路, 等. 不同品种罗望子果肉和种子多糖结构及抗氧化活性比较[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(8): 1807–1813. [LIU X P, ZOU Y K, LIU L, et al. Comparison of structure and antioxidant activity of fruit and seed polysaccharides from different varieties of tamarind[J]. *Southern Journal of Agriculture*, 2019, 50(8): 1807–1813.]
- [27] 卞紫秀, 董增, 张旭, 等. 海藻酸钠与卡拉胶复合膜的制备及性能[J]. *塑料工业*, 2018, 46(9): 39–43. [BIAN Z X, DONG Z, ZHANG X, et al. Preparation and performances of sodium alginate/ carrageenan composite packaging film[J]. *Plastics Industry*, 2018, 46(9): 39–43.]
- [28] WEBBER V, CARVALHO S M D, OGLIARI P J, et al. Optimization of the extraction of carrageenan from *Kappaphycus alvarezii* using response surface methodology[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 32(4): 812–818.
- [29] RASOOL A, ATA S, ISLAM A, et al. Kinetics and controlled release of lidocaine from novel carrageenan and alginate-based blend hydrogels[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 67–78.
- [30] MAKSHAKOVA O N, FAIZULLIN D A, ZUEV Y F. Interplay between secondary structure and ion binding upon thermoreversible gelation of κ -carrageenan[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 227(C): 115342.