

蔗糖对浒苔多糖凝胶流变特性及结构的影响

张承宗,汤国泯,黄慧琳,周建武,陈婕,林岱

Effect of Sucrose on Rheological Properties and Structure of *Enteromorpha prolifera* Polysaccharide Gel ZHANG Chengzong, TANG Guomin, HUANG Huilin, ZHOU Jianwu, CHEN Jie, and LIN Dai

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010009

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浒苔多糖铁的制备工艺优化及其结构表征

Optimization of preparation process of *Enteromorpha prolifera* polysaccharide-iron and its structure characterization 食品工业科技. 2018, 39(5): 161-165,170 https://doi.org/

菠萝蜜多糖流变学特性研究

Rheological Properties of Polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. Pulp 食品工业科技. 2021, 42(23): 81-86 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030007

氧化对肌原纤维蛋白流变学特性及结构的影响

Effect of Oxidation on Rheological Properties and Structure of Myofibrillar Protein 食品工业科技. 2019, 40(9): 29–33 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.006

蔗糖和葡萄糖对南极磷虾虾肉糜介电特性的影响

Effects of sucrose and glucose on the dielectric properties of minced Antarctic krill 食品工业科技. 2017(24): 58-64 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.012

壳聚糖对小麦面团流变学特性的影响

Effect of Chitosan on the Rheological Properties of Wheat Flour Dough

食品工业科技. 2018, 39(20): 30-34,40 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.20.006

玫瑰花粉对面团流变学特性及酥性饼干品质的影响

Effect of Rose Powder on Rheological Properties of Dough and Quality of Crisp Biscuits 食品工业科技. 2020, 41(19): 67–71,77 https://doi.org/10.13386/j.issn1002–0306.2020.19.011



关注微信公众号,获得更多资讯信息

张承宗,汤国泯,黄慧琳,等. 蔗糖对浒苔多糖凝胶流变特性及结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 97-103. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010009

ZHANG Chengzong, TANG Guomin, HUANG Huilin, et al. Effect of Sucrose on Rheological Properties and Structure of *Enteromorpha prolifera* Polysaccharide Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 97–103. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010009

・研究与探讨・

蔗糖对浒苔多糖凝胶流变特性及结构的影响

张承宗¹,汤国泯¹,黄慧琳¹,周建武²,陈 婕¹,林 岱^{1,*}

(1.福建医科大学公共卫生学院,福建福州 350122;2.浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江杭州 310018)

摘 要:通过在浒苔多糖(Enteromorpha prolifera polysaccharide, EP)中分别添加0、0.2、0.3、0.4 g/mL 蔗糖 (Sucrose, SUC),建立复合凝胶体系。采用全自动流变仪分析复合凝胶的流变学特性,傅立叶红外光谱和扫描 电子显微镜分析复合凝胶结构并考察二者之间的相互作用。结果表明,EP 凝胶属于假塑性流体,加入SUC 后没 有改变 EP 的流体性质,但是,添加0.2~0.3 g/mL SUC 显著增加了凝胶的黏度(P<0.05),增加了G'、G"和 tanδ, 表明 SUC 可以显著改良 EP 的黏弹性。此外,添加0.3 g/mL SUC 显著增加了凝胶的触变性等特性和持水性 (P<0.05)。结构分析结果显示 SUC 分子、水分子及 EP 分子间存在较强的氢键作用,微观结构显示添加0.3 g/mL SUC 使 EP 凝胶基质更细密,且断面结构更平整,孔隙更小。而当 SUC 浓度达到0.4 g/mL 时,维持 EP 凝胶结构 的氢键减少,凝胶致密度下降,黏弹性降低,持水能力下降。本研究发现0.3 g/mL SUC 促进了 EP 形成更加坚固、 持水、稳定的凝胶结构,为进一步高值化利用海洋绿藻资源提供理论依据。

关键词: 浒苔, 多糖, 蔗糖, 流变学特性

中图分类号:TS201.7 文献标识码:A DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010009 文章编号:1002-0306(2023)21-0097-07



Effect of Sucrose on Rheological Properties and Structure of *Enteromorpha prolifera* Polysaccharide Gel

ZHANG Chengzong¹, TANG Guomin¹, HUANG Huilin¹, ZHOU Jianwu², CHEN Jie¹, LIN Dai^{1,*}

(1.College of Public Health, Fujian Medical University, Fuzhou 350122, China;2.College of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A composite gel system was established by adding 0, 0.2, 0.3 and 0.4 g/mL sucrose (SUC) in *Enteromorpha prolifera* polysaccharide (EP), respectively. The rheological properties of the composite gel were analyzed by automatic rheometer, and the structure of the composite gel was analyzed by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and scanning electron microscopy (SEM) to investigate the interaction between the two. The results showed that EP gel was a pseudoplastic fluid, and the fluid properties of EP were not changed after the addition of SUC. However, the viscosity, G', G'' and tan δ of EP gel mixed with 0.2~0.3 g/mL SUC was significantly increased (*P*<0.05), indicating that the SUC could significantly improve the viscoelasticity of EP. In addition, thixotropy and water holding capacity of the gel mixed with 0.3 g/mL SUC was significantly increased (*P*<0.05). The results of structural analysis showed that there were strong hydrogen bonds among SUC, water, and EP molecules. The microstructure showed that the SUC concentration reached 0.4 g/mL, the hydrogen bonds maintaining the EP gel structure were reduced, and the gel density, viscoelasticity and water holding capacity were decreased. In this study, 0.3 g/mL sucrose promoted the formation of stronger, water-holding, and stable gel structure of EP, which would provide a theoretical basis for further high-value utilization of marine green algae

收稿日期: 2023-01-04

基金项目:福建医科大学启航基金项目(2019QH1001);福建医科大学高层次人才科研启动经费(XRCZX2017002)。

作者简介:张承宗(2000-),男,大学本科,研究方向:食品质量与安全,E-mail:1519924561@qq.com。

^{*}通信作者:林岱(1988-),女,博士,讲师,研究方向:膳食成分的结构、功能与健康风险,E-mail:amber@fjmu.edu.cn。

resources.

Key words: Enteromorpha prolifera; polysaccharide; sucrose; rheological properties

浒苔(Enteromorpha prolifera)是我国东南沿海 区域最常见的海洋绿藻之一,具有较高的药食两用价 值,历史典籍《本草纲目》及部分沿海城市地方志中 均记载了当地居民有食用浒苔的习惯[1-4]。浒苔多糖 (E. prolifera polysaccharide, EP)是从浒苔中提取的 一种酸性多糖,约占浒苔干重 48%~56%^[5],是浒苔中 最主要的生物大分子物质。前期研究发现 EP 是一 类含有硫酸根的多糖^[6],这种硫酸化多糖具有特殊的 生物活性,如抗凝血^[7]、抗氧化^[8]、降血脂^[9]、免疫调 节^[10]、抗炎症^[11]、抗肿瘤^[12]等。前期研究表明, EP 由鼠李糖、葡萄糖醛酸、阿拉伯糖、岩藻糖、甘露糖 和半乳糖组成[13],其水溶液具有凝胶性,在功能性增 稠剂、乳化剂、稳定剂等方向有良好应用潜能。然 而,天然来源多糖组分形成的水合凝胶在性质上存在 一定局限性,如凝胶强度差、持水能力弱、稳定性差 等[14-15]。因此,探索和建立一种性状更加稳定、功能 更加丰富的天然多糖复配凝胶体系将有助于浒苔多 糖的开发与利用。

蔗糖(Sucrose, SUC)常被用于生产果冻、饮料、 糕点等食品,能够增加产品的甜味,改善产品感官和 风味[16]。现有研究表明蔗糖不仅改善食物风味,还可 以提高多糖凝胶结构稳定性[17],例如,明胶在加入蔗 糖之后,动态黏弹性质及储能模量显著增加[18],另一 研究表明蔗糖可提高明胶的熔化温度[19],这些性质的 改变可以进一步提高明胶的稳定性。此外,糖分子与 多糖凝胶原有的羟基结合形成氢键,而蔗糖同时具有 较强的疏水作用,这种疏水作用与氢键构成的网状结 构极大限制了水分子向外迁移的能力,从而显著提高 凝胶持水性[20]。以上研究表明,蔗糖有助于改善多糖 凝胶特性, 而前期结构表征显示 EP 属于硫酸化杂多 糖,而目前关于此类多糖凝胶特性及蔗糖对其增效作 用的研究尚少。本实验通过添加不同浓度蔗糖建立 浒苔多糖-蔗糖(EP-SUC)的复配水合凝胶体系,从流 变学、微观结构、化学基团等角度考察复合凝胶的性 质与结构,为浒苔在食品领域的产业化应用提供理论 基础,为进一步开发和利用海洋绿藻提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

浒苔粉 福建省福清市海兴保健食品有限公司;蔗糖 食品级,福州奥研实验器材有限责任公司; 其它所有试剂皆为分析纯。

DK-S24 电热恒温水浴锅 上海精宏设备有限 公司; BSA124S 电子天平 赛多利斯科学仪器(北 京)有限公司; N-1300 旋转蒸发仪 上海爱朗仪有限 公司; MCR302 流变仪 Anton Paar; TDZ5-WS 离心 机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; MIX-2500 迷你混合仪 杭州佑宁仪器有限公司; LyoQuest85Plus 真空冷冻干燥机 西班牙 Telstar 公司; Thermo Scientific Nicolet iS20 傅立叶变换红外光谱仪 赛 默飞世尔科技有限公司; SC7620 溅射镀膜仪 英国 Quorum 公司; TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜 泰思肯(中国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 称取 60 g 浒苔粉加入到 3 L 蒸 馏水中,于 80 ℃ 水浴锅中水浴 2 h,取上清液后继续 加入 60 g 浒苔粉水浴 2 h,使用纱布将无法溶解的物 质过滤。将 2 次滤清液置于旋转蒸发仪中,设置温 度为 80 ℃,蒸发、浓缩 1.5 h 得到粗多糖。根据课题 组前期研究报道,采用 Sevag 法除去多糖中蛋白质 后,经过 DEAE Sephadex A-25 离子交换色谱及葡聚 糖凝胶 Sephadex G-100 色谱柱层析对多糖进行纯 化^[21],纯化后的溶液置于冷冻干燥获得 EP 粉末。最 终,样品中含可溶性多糖 56.12%。

EP 凝胶的制备: 在添加蔗糖之前, 需要首先考察 不同质量浓度 EP 形成凝胶的能力。分别配制 10 mL 浓度为 30、40、50、60、70 mg/mL 的 EP 溶液, 并将 各样品放置 80 ℃ 水浴锅中水浴 10 min, 振荡 30 s, 待溶液降至室温 25 ℃ 后备用。

EP-SUC 复配体系的制备:参考蔗糖在加工食品 过程中常用添加量^[22],分别配制浓度为 0、0.2、0.3、 0.4 g/mL 的蔗糖溶液,称取 EP 分别加入不同浓度蔗 糖溶液中,使样品中 EP 的终浓度均为 60 mg/mL。 将各样品放置在 80 ℃ 水浴锅中水浴 10 min,振荡 30 s,待溶液降至室温 25 ℃ 后备用。

1.2.2 流变特性的测定 流变特性测试采用安东帕 MCR302 流变仪平板-平板测量系统,平板直径 25 mm, 测量间隙 1.000 mm, 测试温度 25 ℃^[14]。

黏度测定: 对不同浓度 EP 及 EP-SUC 样品分别 进行旋转模式-剪切速率扫描实验, 设定测量温度为 25 ℃, 观察各 EP 溶液黏度 η 随剪切速率 γ 变化规 律, 探究不同 SUC 浓度对 EP 黏度的影响。

线性黏弹区测定:对添加不同 SUC 浓度的 EP 溶液进行振荡扫描-线性黏弹区测定,设定温度 25 ℃,频率 10 rad/s,应变扫描范围 0.1%~100%,测定 G'随 应变的变化情况,从而得到各 EP 溶液的线性黏弹 区,再进行动态黏弹性测定。

动态黏弹性测定:对不同浓度 EP-SUC 复合凝胶进行振荡扫描-频率扫描实验,在线性黏弹区间内设定应变,设定角频率为 0.1~100 rad/s,设定温度为 25 ℃,观察 G'、G"、tan∂(损耗角正切,tan∂=G"/G')随角频率的变化情况,探究不同 SUC 浓度对 EP 黏弹性的影响。

触变性测定: 对添加不同 SUC 浓度的 EP 溶液 进行旋转测量-3ITT 测量, 测定温度 25 ℃, 分别在

0.1 s⁻¹、100 s⁻¹、0.1 s⁻¹ 剪切速率下测量 EP 结构破坏 和恢复过程,探究经过较大剪切速率后含有不同 SUC 浓度的 EP 黏度恢复能力。

1.2.3 持水能力测定 分别制备 1 mL 不同浓度的 EP-SUC 复配凝胶溶液, 置于 1.5 mL 离心管中, 称量 装有凝胶样品的离心管质量 m₁。于 4000 r/min 离 心 30 min, 出去上层水后再次称量凝胶样品与离心 管质量 m₂, 称量空离心管质量 m^[23]。根据以下公式 计算凝胶持水能力:

持水力(%) =
$$\frac{m_2 - m}{m_1 - m} \times 100$$

1.2.4 傅立叶红外光谱(FTIR)测试 对添加不同 SUC浓度的 EP 溶液进行傅立叶红外光谱测试。测 试前将不同浓度 EP-SUC 复配凝胶进行冷冻干燥, 烘干至恒质量,且样品表面及内部无明显水分。采 用 ATR 测试方法^[24] 制备红外扫描用样品,即取少 量样品置于金刚石 ATR 模块中,波数范围 4000~ 600 cm⁻¹,扫描次数 32,分辨率 4 cm⁻¹,记录样品的 红外光谱。

1.2.5 扫描电镜(SEM)测试 对添加不同 SUC 浓度的 EP 溶液进行扫描电镜测试。测试前将不同浓度 EP-SUC 复配凝胶冷冻干燥至样品表面及内部无明显水分。取微量样品直接粘到导电胶上,并使用 SC7620 溅射镀膜仪喷金 45 s,工作电流为 10 mA; 随后使用 TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜观 察样品形貌^[25]。

1.3 数据处理

实验重复三次所得数据使用 GraphPad Prism 8.0.1 绘制相关图表,采用 SPSS 23.0 软件对多组样本 进行样本间差异显著性分析, P<0.05 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 EP 凝胶的流变特性研究

如图 1A 所示, 在测定剪切速率范围内(0.1~ 1000 s⁻¹),各浓度 EP 均随着剪切速率的增大而减小, 呈现出剪切稀化的假塑性流体特征,这一特征在天然 植物提取多糖中较为常见,例如银耳多糖凝胶[26]、铁 皮石斛多糖凝胶[27],均属于假塑性流体。剪切稀化对 食品加工过程有重要影响,在高剪切速率的物料体系 中,加入假塑性流体特征的多糖可以改进物料输送和 灌注工艺,使能量消耗减少,易于加工成型[25]。如 图 1B 所示,在 1 s⁻¹ 剪切速率条件下,浓度为 30 mg/mL 时, EP的黏度约为 23 Pa·s, 当浓度增至 50 mg/mL 时,黏度可提升至 60 Pa·s,这个过程可能是由于 EP 浓度升高使得分子链间作用加强,从而形成更加稳定 的网络结构或缠绕结构[28],使流体流动阻力增大。然 而,浓度范围在 50~70 mg/mL 时,黏度随浓度变化的 趋势并不显著(P>0.05), 而此时 EP 凝胶尚处于流动 状态, 推测这个阶段依靠 EP 分子形成的凝胶网络可 能出现卷曲,将部分化学键或基团包裹于内部^[29],

削弱了凝胶的黏度。有研究表明,质量浓度过高时, 水溶性多糖倾向于发送分子间缔合形成沉淀,导致黏 度降低^[28]。因此,为了拓展 EP 凝胶的应用范围,需 要建立复配体系增加 EP 凝胶的黏度。



Fig.1 Effect of EP concentration on gel viscosity 注: A: 流变特性曲线; B: 在 1 s⁻¹ 剪切速率黏度对比图; *组间 相比差异有统计学意义(*P*<0.05); 图 2、图 6~图 7 同。

2.2 不同浓度 EP-SUC 复合凝胶黏度测定

如图 2A 所示,不同浓度 EP-SUC 复合凝胶的黏





度在剪切速率 0.1~1000 s⁻¹ 范围内, 同样随着剪切速 率的增加而逐渐降低, 呈现出假塑性流体特征, 表明 添加 SUC 并不会改变 EP 的流体类型。此外, 在同 一剪切速率下, 随着 SUC 添加量增大, EP-SUC 复合 凝胶的黏度显著增大(*P*<0.05), 表明 SUC 可以适当 增加 EP 的黏度(图 2B)。但可以观察到, 相较浓度 0.3 g/mL, 添加 0.4 g/mL SUC 的 EP 凝胶黏度反而 略有下降, 表明 EP-SUC 复合凝胶可能存在凝胶临 界点, 超过临界点时, SUC 和 EP 分子很可能发生聚 集^[24], 导致黏度出现下降趋势。

2.3 不同浓度 EP-SUC 复合凝胶动态黏弹性测定

线性黏弹区是指在一个范围的应变下储能模量 G'能够保持基本不变的区域,即可执行测试而不破坏 样品结构的范围。因此,在对样品的动态黏弹性进行 分析时,首先需要确认线性黏弹区内的应力范围^[30]。 如图 3 所示,在 EP 中加入不同浓度 SUC 的样品,其 G'在 0.1%~100% 剪切应变范围内均基本无显著变 化,所以 0.1%~100% 为 EP 的线性黏弹区。





如图 4 结果显示,含有不同浓度 SUC 的 EP-SUC 的复合凝胶,其 G'均大于 G"(即 tanδ<1),当 tanδ<1 时,体系主要表现为固体弹性特征^[31],这个结果表明 不论是 EP 凝胶还是 SUC-EP 复合凝胶,其弹性在黏 弹性中均占主导地位,并处于类固体的凝胶状态。此 外,在 SUC 浓度较低的范围内,随着 SUC 浓度的增 加,G'和 G"也相应增大(图 4A~图 4C),并在 SUC 浓度为 0.3 g/mL 时分别达到最大值,继续提高 SUC 浓度,G'和 G"反而下降,并出现 G'和 G"曲线间距缩小的现象(图 4D),表明此时凝胶强度减弱。有研究表明,当物质浓度过高时,由热诱导方式形成的凝胶会出现不均匀的分子聚集,导致凝胶结构收缩,强度减弱^[32];此外,由图 5 可知, EP 和 EP-SUC 的 tanδ 值始 终介于 0.01~1 范围内,表明二者均为弹性大于黏度,SUC 的加入没有改变这个特性。

综上所述, EP 凝胶及 EP-SUC 复合凝胶的黏弹 性呈现明显不同,即低 SUC 浓度范围内(小于 0.3 g/mL), SUC 能增加复配体系黏弹性;在高 SUC 浓度范围 (大于 0.3 g/mL), SUC 反而降低了复配体系黏弹性,根 据类似水溶性多糖凝胶形成机制的研究^[33], SUC 对



- 图 4 不同浓度 EP-SUC 复合凝胶在角频率下模量的变化
- Fig.4 Changes in modulus of EP-SUC composite gel with different concentrations at angular frequency

注: A: 未添加蔗糖; B: 添加 0.2 g/mL 蔗糖; C: 添加 0.3 g/mL 蔗糖; D: 添加 0.4 g/mL 蔗糖。

EP 凝胶体系黏弹性的影响可能与 EP 化学基团改变 相关。

2.4 不同浓度 EP-SUC 复合凝胶触变性测定

触变性指物质经过较大剪切速率作用后,在小 剪切速率下物质仍能恢复原有结构的能力。触变性 作为一种可逆的溶胶现象,反映了物质黏度与剪切时 间的关系,和物质被打破结构之后重建的能力^[34]。如 图 6A 所示,6~60 s 为低剪切速率段(y=0.1 s⁻¹),此





时 EP 的黏度均处于较高水平。61~65 s 为高剪切速 率段(y=100 s⁻¹), EP 在高剪切速率下结构可能被破 坏,表现为黏度突然降低。66~185 s 为低剪切速率 段(y=0.1 s⁻¹),黏度有所恢复但并未达到原来的黏度 值,显示 EP 重建的结构,与原先结构仍有不同。经 高剪切后 60 s 黏度恢复程度如图 6B 所示,随着 SUC 浓度的增加, EP 黏度值的恢复程度也相应增 大,并在 SUC 浓度为 0.3 g/mL 时达到最大值 63.59%, 之后继续增加 SUC 浓度不再显著提高 EP 黏度值的 恢复程度。因此,浓度低于 0.3 g/mL 的 SUC 溶液能 显著提高 EP 黏度值的恢复程度,意味着在一定浓度 范围内的 SUC 有助于 EP 凝胶的结构重建。



注:A:三段式触变性曲线;B:凝胶黏度恢复测定。

2.5 不同浓度 SUC-EP 复合凝胶持水能力测定

此外, SUC 对 EP 凝胶持水能力也有显著影响, 如图 7 所示, EP 凝胶持水力约为 77%, 当添加 0.3 g/mL

SUC 后, 持水能力显著增强(P<0.05), 表明此时凝胶 网状结构限制水分子迁移的能力很强, 其原因可能 是 SUC 的多羟基结构对水分子有较强的吸附力, 另 外, 在 SUC 的存在情况下, 多糖分子之间形成更多 的氢键, 从而增加凝胶的持水能力, 这一结果与 SUC 对果胶持水能力影响的研究结果一致^[20]。而当 SUC 浓度达到 0.4 g/mL 时, 持水能力有所下降, 表明过 量 SUC 导致凝胶网络可能出现空隙, 吸附水分子的 能力减弱, 其原因可能与上述的氢键数量减少有关。



图 7 不同浓度 SUC 对 EP 凝胶持水能力的影响 Fig.7 Effect of SUC with different concentrations on waterholding capacity of EP gel

2.6 不同浓度 SUC 对 EP 结构的影响

如图 8 所示,不同 SUC 浓度复合凝胶在 3400~3200 cm⁻¹ 均出现宽而强的吸收峰,表现为不饱和的 缔合 O-H 伸缩振动^[9];在 1680~1620 cm⁻¹ 处出现很 弱的吸收峰,表现为 C=C 伸缩振动^[11];在 1430 cm⁻¹ 附近出现 O-H 弯曲振动峰^[9];在 1300~1000 cm⁻¹ 处存在多个 C-O 伸缩振动,1105.40 cm⁻¹ 附近存在醚 类物质 C-O-C 的吸收峰;这些官能团构成了 EP 凝 胶的基本结构骨架。在 880~680 cm⁻¹ 处出现的硫酸 基团 S-O 的反对称伸缩振动^[27],再次证明 EP 是硫酸 化的多糖。相较于单纯 EP 凝胶,SUC-EP 复合凝胶 在 2926±10 cm⁻¹ 范围内还多出现了一个弱吸收峰,即-CH,的不对称伸缩振动峰^[28],表明-CH,基团更可



图 8 不同浓度 EP-SUC 复合凝胶傅立叶红外光谱图 Fig.8 Fourier infrared spectrum of different concentrations of EP-SUC composite gels

能与其他侧链相互作用,从而对 EP 的结构产生一定 的影响^[35]。当 SUC 浓度由 0 g/mL 升高至 0.3 g/mL 时,3296.57、3264.83、3261.20、3265.85 cm⁻¹ 的 O-H 振动峰的逐渐增强,且羟基伸缩振动峰向低波长方向 迁移,表明这个过程氢键是维持凝胶结构的主导作用 力,并随着 SUC 浓度升高氢键数目逐渐增加,而当 SUC 浓度达到 0.4 g/mL 时,O-H 振动峰开始减弱, 表明此时氢键的数量在减少,这可能是由于 SUC 疏 水性较强,而过量的 SUC 降低了系统水分活度,使 疏水作用的形成更加容易,削弱了氢键的作用,导致 凝胶强度减弱^[36],类似的结果在 SUC 和大豆多糖的 复合凝胶体系中也被观察到^[37]。

2.7 不同浓度 EP-SUC 复合凝胶微观结构分析

由图 9 可知,含有不同浓度 SUC 的 EP-SUC 复 合凝胶的微观结构具有明显差异。其中,单纯 EP 凝 胶(图 9A)的微观结构较为松散,孔隙较大,呈现为片 状结构,同时伴有卷曲现象。加入 SUC 后, EP 凝胶 的基质愈发细密化,且断面结构也愈加平整,孔隙也 呈降低趋势,这种趋势在含有 0.3 g/mL SUC 的 SUC-EP 复合凝胶上表现最为显著,其凝胶微观结构均一, 排列较为整齐规律,呈现连续的立体菱形状结构 (图 9C)。当 SUC 浓度达到 0.4 g/mL 时,其凝胶结 构致密度反而下降,孔隙开始变大,立体菱形状结构 被削弱,表现为立体菱形状和平面片状结构并存。这 表明在一定浓度范围内, SUC 的加入能够强化 EP 的 微观结构,而超过该浓度范围后,SUC则削弱了复合 凝胶的微观结构,这个削弱现象与上述黏弹性、红外 光谱、持水能力等结果一致,即当 SUC 浓度达到 0.4 g/mL 时,维持 EP 凝胶结构的氢键减少,凝胶弹 性降低, 持水能力下降。因此, 向 60 mg/mL EP 中添加



图 9 不同浓度 SUC-EP 复合凝胶的扫描电子 显微镜图(2000×)



注: A: 未添加蔗糖; B: 添加 0.2 g/mL 蔗糖; C: 添加 0.3 g/mL 蔗糖; D: 添加 0.4 g/mL 蔗糖。

0.3 g/mL SUC 可以获得结构致密、高弹性、高持水性的复合凝胶。

3 结论

本研究通过添加不同浓度 SUC 构建 EP-SUC 复合凝胶体系,并考察了凝胶的流变学特性和结构。 结果表明,添加 SUC 会对 EP 的动态流变特性产生 影响,在低于 0.3 g/mL 的浓度范围内,随着 SUC 的 添加,EP 的黏度增大、弹性和黏性增加、持水能力增 强、经高剪切速率破坏后的恢复程度也随之提高,但 SUC 浓度高于 0.3 g/mL 时,SUC 则不再对 EP 流变 学特性产生显著影响。同时,基于傅立叶红外光谱和 微观结构分析,初步判断 SUC 分子与水分子及 EP 分子间的氢键作用在 EP 流变学特性中起主要作 用。本研究通过分析不同浓度 SUC-EP 复合凝胶的 流变特性和结构特点,以满足不同产品对黏度、凝胶 性及流变学特性的需求,为 EP 相关产品的质量、配 方和加工条件提供评估参数,从而进一步优化产品品 质,进一步高值化利用海洋资源。

参考文献

[1] 胡馨月,张维,赵行,等. 浒苔低聚糖的制备及抗氧化活性研 究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 3-9. [HU X Y, ZHANG W, ZHAO X, et al. Preparation and antioxidant activity of *Enteromorpha prolifera* oligosaccharide[J]. Food Research and Development, 2021, 42(12): 3-9.]

[2] WASSIE T, NIU K, XIE C, et al. Extraction techniques, biological activities and health benefits of marine algae *Enteromorpha prolifera* polysaccharide[J]. Frontiers Nutrition, 2021, 8: 747928.

[3] 林文庭. 浅论浒苔的开发与利用[J]. 中国食物与营养, 2007, 2(9): 3-5. [LIN W. Discussion on development and utilization of *Enteromorpha prolifera*[J]. Food and Nutrition in China, 2007, 2(9): 3-5.]

[4] 肖晓玮, 高晓翔, 吴一晶, 等. 台湾海峡绿藻种类、分布、活性物质及其资源利用[J]. 水产学杂志, 2021, 34(5): 86-99. [XIAO X W, GAO X X, WU Y J, et al. Species, distribution, active substances and resource utilization of green algae in Taiwan Strait[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(5): 86-99.]

[5] 陈达妙,林文庭. 浒苔多糖提取纯化和化学结构的研究进展[J]. 海峡预防医学杂志, 2012, 18(2): 2-4. [CHEN D M, LIN W T. Advances in extraction, purification and chemical structure of *Enteromorpha prolifera* polysaccharide[J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2012, 18(2): 2-4.]

[6] REN R D, YANG Z, ZHAO A L, et al. Sulfated polysaccharide from *Enteromorpha prolifera* increases hydrogen sulfide production and attenuates non-alcoholic fatty liver disease in high-fat diet rats[J]. Food & Function, 2018, 9(8): 4376–4383.

[7] QI X, MAO W, GAO Y, et al. Chemical characteristic of an anticoagulant-active sulfated polysaccharide from *Enteromorpha clathrata* [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1804–1810.

[8] HUANG L, HUANG M, SHEN M, et al. Sulfated modification enhanced the antioxidant activity of *Mesona chinensis benth* polysaccharide and its protective effect on cellular oxidative stress [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136(10): 1–6.

[9] XIAO H, FU X, CAO C, et al. Sulfated modification, characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Sargassum pallidum*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121(4): 7–14.

[10] CHEN Y, ZHANG H, WANG Y, et al. Sulfated modifica-

tion of the polysaccharides from *Ganoderma atrum* and their antioxidant and immunomodulating activities[J]. Food Chemistry, 2015, 186(23): 1–8.

[11] WANG Z, XIE J, SHEN M, et al. Sulfated modification of polysaccharides: Synthesis, characterization and bioactivities[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74(1): 47–57.

[12] LIN T, CHANG C, TENG A, et al. Sodium thiosulfate enhances production of polysaccharides and anticancer activities of sulfated polysaccharides in *Antrodia cinnamomea*[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 216(2): 4–12.

[13] LIN W T, WANG W X, LIAO D D, et al. Polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* improve glucose metabolism in diabetic rats[J]. Journal of Diabetes Research, 2015: 675201.

[14] WANG W, SHEN M, LIAN J, et al. Rheological behavior, microstructure characterization and formation mechanism of *Mesona blumes* polysaccharide gels induced by calcium ions[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 136–143.

[15] JOSÉ A. L, SÓNIA R M. Gelling and emulsifying properties of soy protein hydrolysates in the presence of a neutral polysaccharide[J]. Food Chemistry, 2019, 294; 216–223.

[16] 张志平, 彭帅, 牛丽红, 等. 蔗糖和果糖对罗非鱼皮明胶流变 性质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13): 262-265, 345. [ZHANG Z P, PENG S, NIU L H, et al. Effects of sucrose and fructose on rheological properties of Tilapia skin gelatin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(13): 262-265, 345.]

[17] 崔志强. 低糖果酱开发现状与工艺要点研究[J]. 食品研究 与开发, 2005(4): 38-43, 7. [CUIZQ. Research on development status and process points of low-sugar jam[J]. Food Research and Development, 2005(4): 38-43, 7.]

[18] CHOI Y, LIM S, YOO B. Measurement of dynamic rheology during ageing of gelatine-sugar composites[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2004, 39(9): 935–945.

[19] NIU L H, ZHOU X, YUAN C Q, et al. Characterization of tilapia (*Oreochromis niloticus*) skin gelatin extracted with alkaline and different acid pretreatments[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 336–341.

[20] 刘贺, 刘昊东, 郭晓飞, 等. 大豆皮低酯-高酯复合果胶凝胶的持水能力及力学、光学特性[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 111-114. [LIU H, LIU H D, GUO X F, et al. Water holding capacity and mechanical and optical properties of Soybean peel low ester/high ester composite Pectin gel[J]. Food Science, 2010, 31(19): 111-114.]

[21] 黄斌,林文庭. 浒苔多糖的分离纯化和成分分析[J]. 中国卫 生检验杂志, 2014, 24(3): 359-363. [HUANG B, LIN W T. Isolation, purification and composition analysis of *Enteromorpha prolifera* polysaccharides[J]. Chinese Journal of Hygiene Laboratory, 2014, 24(3): 359-363.]

[22] 张晓青, 马思聪, 闫瑞昕, 等. 椰子粉中蔗糖和葡萄糖添加量 的快速检测 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 240-243. [ZHANG X Q, MA S C, YAN R X, et al. Rapid determination of sugar and glucose addition content of coconut powder [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 240-243.]

[23] KOLSI R, FAKHFAKH J, KRICHEN F, et al. Structural characterization and functional properties of antihypertensive *Cymodocea nodosa* sulfated polysaccharide[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151(5): 11–22.

[24] XIE J, WANG Z, SHEN M, et al. Sulfated modification, characterization and antioxidant activities of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus*[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 7–15.

[25] 周文君, 池建伟, 易阳, 等. 龙眼、枸杞和红枣多糖的理化性 质及其协同益生活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 58-67. [ZHOU W J, CHI J W, YI Y, et al. Physicochemical properties and synergistic prebiotic activities of polysaccharides from longan fruits, goji berries, and jujube fruits[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 58-67.]

[26] 刘婷婷,杨嘉丹,曹宸瑀,等.银耳多糖与结冷胶复配体系的 流变及凝胶特性[J]. 食品科学,2019,40(17):72-76. [LIUTT, YANG J D, CAOCY, et al. Rheological and gelling properties of *Tremella fuciformis* polysaccharide and gellan gum mixtures[J]. Food Science, 2019, 40(17): 72-76.]

[27] 井玉林, 侯芙蓉, 唐文. 铁皮石斛多糖的流体性质与凝胶性 质分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 89-97. [JIN Y L, HOU F R, TANG W. Analysis of fluid and gelation properties of *Dendrobium officinale* polysaccharide[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 89-97.]

[28] ZHU Y, FANG B, LU Y, et al. Rheokinetics of the gelling process of water-soluble STMP-modified carboxymethyl hydrox-yethyl cellulose[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2017, 38(7): 1017–1020.

[29] 张静祎. 红小豆淀粉及 NaCl、蔗糖、油脂添加前后对淀粉特 性的影响研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020. [ZHANG J Y. Study on the effects of starch and NaCl, sucrose and oil on starch properties of Adzoko bean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.]

[30] ZHAO L, DONG Y, CHEN G, et al. Extraction, purification, characterization and antitumor activity of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3): 783–789.
[31] SHAO P, QIN M P, HAN L F, et al, Rheology and characteristics of sulfated polysaccharides from chlorophytan seaweeds Ulvafasciata [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 365–372.

[32] 徐伟, 马力, 袁永俊, 等. 低甲氧基果胶的胶凝机理及防止预 凝胶形成的措施[J]. 食品与发酵工业, 2005, 30(3): 90-93. [XU W, MA L, YUAN Y J, et al. The gelling mechanism of low methoxy pectin and the measures to prevent the formation of pregel[J]. Food and Fermentation Industry, 2005, 30(3): 90-93.]

[33] 朱建华, 邹秀容, 丘秀珍, 等. 蔗糖共溶质对琼脂-魔芋胶共混 体系溶胶-凝胶转变过程流变学性质及结构形成动力学的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 37-45. [ZHU J H, ZOU X R, QIU X Z, et al. Effects of sucrose co-solute on rheological properties and structure formation kinetics of Agar-konjac gum blends during solgel transition[J]. Journal of Food Science, 2019, 40(12): 37-45.]

[34] 胡圣飞, 李慧, 胡伟, 等. 触变性研究进展及应用综述[J]. 湖北工业大学学报, 2012(2): 57-60. [HUSF, LIH, HuW, et al. Research progress and application of thixotropy[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012(2): 57-60.]

[35] 张苒,杨洪武,刘咏. 黄秋葵秸秆多糖的流变学性质研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 261-266. [ZHANG R, YANG H W, LIU Y. Rheological properties of Okra straw polysaccharide[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(2): 261-266.]

[36] 林丽华. 凉粉草多糖提取优化、理化性质及流变胶凝特性 研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2017. [LIN L H. Study on extraction optimization, physicochemical properties and rheological characteristics of polysaccharide from *Gazebo alba*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.]

[37] 涂宗财, 刘玮, 王辉, 等. 大豆多糖胶的凝胶性研究[J]. 食品 工业科技, 2011, 32(8): 118-122. [TUZC, LIUW, WANGH, et al. Study on gelation capacity of soybean polysaccharide gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(8): 118-122.]