

分类号：

密级：



华中农业大学

HUAZHONG AGRICULTURAL UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER'S DEGREE DISSERTATION

基于流变学和摩擦学研究羧甲基纤维素对大豆酸奶口感
的影响

THE INFLUENCE OF CARBOXYMETHYL CELLULOSE ON
THE TEXTURE OF SOY YOGURT: A STUDY BASED ON
RHEOLOGY AND FRICTION ANALYSIS

研究生： 任卫文

CANDIDATE: REN WEIWEN

学 号： 2021309110013
STUDENT NO.:

专 业： 食品科学
MAJOR: FOOD SCIENCE

导 师： 李晶 教授
SUPERVISOR: PROFESSOR LI JING

中国 武汉
WUHAN, CHINA
二〇二四年六月
JUNE, 2024

华中农业大学硕士学位论文

基于流变学和摩擦学研究羧甲基纤维素对大豆酸奶口感的影响

The Influence of Carboxymethyl Cellulose on the Texture of Soy Yogurt: A Study Based on Rheology and Friction Analysis

研 究 生：任卫文

学 号：2021309110013

指 导 教 师：李 晶 教授

指 导 小 组：李 斌 教授

李 艳 教授

刘石林 教授

陈义杰 教授

梁宏闪 副教授

专业：食品科学

研究方向：食品胶体

获得学位名称：工学硕士 获得学位时间：2024 年 6 月 22 日

华中农业大学食品科学技术学院

二〇二四年六月

目 录

第一章 绪论.....	8
1 半固体食品的口感感知过程和植物基酸奶的口感偏好	8
1.1 半固体食品的口感感知过程.....	8
1.2 消费者对于植物基酸奶的口感偏好.....	9
2 植物基酸奶质地的调控方法	10
2.1 原料中组分的作用.....	10
2.2 发酵菌株的作用.....	14
2.3 加工方法对植物基酸奶结构或口感的影响	15
3 本课题的研究目的、意义及创新点	18
3.1 研究目的与意义.....	18
3.2 研究内容.....	18
3.3 创新点.....	20
第二章 羧甲基纤维素的浓度与电荷密度对大豆酸奶口感与稳定性的影响	21
1 引言.....	21
2 材料与方法.....	22
2.1 实验材料与试剂.....	22
2.2 实验仪器.....	22
2.3 实验方法.....	23
3 结果与分析.....	27
3.1 CMC 对大豆酸奶的外观状态的影响.....	27
3.2 CMC 对大豆酸奶色度的影响.....	28
3.3 CMC 对大豆酸奶 pH 值的影响.....	29
3.4 CMC 对大豆酸奶持水力的影响.....	31
3.5 CMC 对大豆酸奶的储藏稳定性的影响.....	32
3.6 CMC 对大豆酸奶中水分分布的影响.....	34
3.7 CMC 对大豆酸奶中颗粒粒度的影响.....	37
3.8 CMC 对大豆酸奶质构特性的影响.....	39
3.9 CMC 对大豆酸奶口感的调控作用.....	41
3.10 CMC 对大豆酸奶中蛋白质聚集体的影响.....	43
3.11 CMC 对大豆酸奶微结构的影响.....	44
4 本章小结.....	45
第三章 羧甲基纤维素对大豆酸奶流变学、摩擦学和口腔粘附性的影响	47

1 引言	47
2 材料与方法	48
2.1 实验材料与试剂	48
2.2 实验仪器	49
2.3 实验方法	49
3 结果与分析	52
3.1 CMC 对大豆酸奶流变学特性的影响	52
3.2 CMC 对大豆酸奶非线性流变学特性的影响	58
3.3 CMC 对大豆酸奶摩擦学特性的影响	63
3.4 CMC 对大豆酸奶口腔粘附性的影响	64
3.5 大豆酸奶的流变学摩擦学特性、口腔粘附性与口感的相关性	68
4 本章小结	69
第四章 羧甲基纤维素对大豆酸奶中蛋白质结构的影响研究	71
1 引言	71
2 材料与方法	72
2.1 材料与试剂	72
2.2 实验仪器	72
2.3 实验方法	73
3 结果与分析	75
3.1 CMC 对大豆酸奶中颗粒的 Zeta 电位的影响	75
3.2 CMC 对大豆酸奶中蛋白质亚基的影响	76
3.3 CMC 对大豆酸奶中蛋白质表面疏水性的影响	77
3.4 CMC 对大豆酸奶中蛋白质巯基含量的影响	79
3.5 CMC 对大豆酸奶内源荧光光谱的影响	80
3.6 CMC 对大豆酸奶的紫外吸收光谱的影响	81
3.7 CMC 对大豆酸奶中蛋白质二级结构及二硫键构型的影响	81
3.8 大豆酸奶中蛋白质结构与口感和凝胶特性之间的相关性	84
4 本章小结	86
第五章 结论与展望	87
1 结论	87
2 展望	88
参考文献	89

摘 要

近年来植物基酸奶受到广泛的关注，大豆酸奶作为其中的关键品类，却存在易析水和口感的顺滑厚重性不足的问题。在口腔加工过程中，大豆酸奶口感的感知会受到其流变学特性和摩擦学特性的影响。在前期研究发现，羧甲基纤维素（CMC）的浓度和电荷密度可以调控大豆酸奶的质地，改善稳定性和口感。基于此，本课题研究了 CMC 的浓度与电荷密度对大豆酸奶的稳定性、口感、微结构、流变学特性、摩擦学特性和口腔粘附性的作用规律，以及 CMC 的加入对大豆酸奶中蛋白质结构的影响。得到的主要结论如下：

1、研究了取代度为 0.7 的 CMC（CMC0.7）和 1.2 的 CMC（CMC1.2）在 0%到 1.1%的浓度范围内，对大豆酸奶的外观状态、稳定性、水分分布、质构、口感和微结构的影响。结果表明，在两种取代度下，当 CMC 浓度为 0.1%-0.3%时，大豆酸奶均呈现粗糙的外观，随着 CMC 的浓度从 0.5%升高到 1.1%，大豆酸奶的外观状态逐渐变得光滑，并且具有了一定的流动性。随着 CMC 的浓度从 0%增加到 1.1%，大豆酸奶的持水力（WHC）和白度呈现出先降低再升高的趋势，而粒径、凝胶强度和稠度出现了先升高后降低的趋势。CMC 浓度为 0.5%-1.1%的大豆酸奶的粒径显著小于未添加的大豆酸奶，且添加 CMC0.7 的大豆酸奶的 WHC 显著高于添加 CMC1.2 的大豆酸奶。添加 CMC0.7 在 0.5%-1.1%的浓度下可以有效提高大豆酸奶的储藏稳定性。在储藏 28 天后，添加 0.5%-1.1%浓度 CMC0.7 的大豆酸奶的 WHC 分别为 83.76%、91.18%、96.16%和 96.21%，显著高于未添加的大豆酸奶（72.73%）。冷冻扫描电镜和激光共聚焦显微镜分析显示，相比于未添加 CMC 的大豆酸奶，CMC 浓度为 0.1%-0.3%的大豆酸奶的微结构中的孔隙分布更加不均匀、蛋白质聚集体更大，而随着 CMC 浓度的进一步升高，在微结构中出现了层状结构，孔隙变得均匀，蛋白质聚集体变小。感官分析表明，随着 CMC 的浓度从 0.3%升高到 1.1%，大豆酸奶的粗糙感降低、厚重感升高，CMC0.7 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶的颗粒感评分与厚重感均显著高于未添加的大豆酸奶，并且添加 CMC0.7 的大豆酸奶比添加 CMC1.2 的大豆酸奶具有更加细腻的口感。CMC0.7 浓度为 0.7%的大豆酸奶的顺滑感评分最高，且在口感评估中获得了最高的总分，显著高于未添加的样品。因此，添加取代度为 0.7，浓度为 0.7%的 CMC 可以得到稳定性较高且口感最好的大豆酸奶。

2、研究了 CMC 的浓度和电荷密度对于大豆酸奶的流变学、摩擦学和口腔粘附性的影响，并探究了上述性质与大豆酸奶口感之间的相关性。流变学测试表明，所有样品均具有剪切稀化的特性，并且在线性粘弹区范围内储能模量 (G') 高于损耗模量 (G'')。随着 CMC 的浓度从 0.1% 升高到 1.1%，大豆酸奶的黏度、 G' 和 G'' 表现出降低的趋势，同时对剪切速率和震荡频率有更强的抵抗能力。CMC 浓度为 0.1% 和 0.3% 的大豆酸奶表现出了比不添加的大豆酸奶更高的粘度、 G' 和 G'' ，而其余浓度的大豆酸奶的粘度、 G' 和 G'' 则低于不添加的大豆酸奶。在相同浓度下，含有 CMC1.2 的大豆酸奶的 G' 高于含有 CMC0.7 的大豆酸奶。非线性流变学测试发现，随着振幅的升高，大豆酸奶的 G' 与 G'' 均先保持恒定再逐渐降低， G'' 逐渐大于 G' ，表现为 I 型流体特征。在 1% 和 10% 的应变下，随着 CMC 浓度的升高，大豆酸奶的弹性 Lissajous 曲线逐渐变宽而粘性 Lissajous 曲线逐渐变窄，表明应变中粘性响应的比例逐渐升高。当 CMC 的浓度为 1.1% 时，含有 CMC0.7 大豆酸奶的弹性 Lissajous 曲线所包围的面积大于含有 CMC1.2 的大豆酸奶，表明含有 CMC0.7 大豆酸奶在每个震荡循环中会消耗更多的能量。摩擦学测量结果显示，CMC 浓度为 0.7% 的大豆酸奶在大部分滑动速度下均有较低的摩擦系数值，与不含 CMC 的大豆酸奶相比，在 10 mm/s 的滑动速度下摩擦系数减少了约 23%。在 0.5%-1.1% 浓度下，添加 CMC0.7 的大豆酸奶的口腔粘附性比添加 CMC1.2 和未添加的大豆酸奶均更强。相关性分析表明，大豆酸奶中的糊口性、颗粒感、顺滑感、厚重感与流动行为指数、粘性频率指数、阻尼系数、能量耗散率成正相关，与稠度指数、粘弹性幂律常数、能量耗散、颗粒粒径、摩擦系数成负相关。

3、通过表面疏水性、巯基含量、紫外光谱、荧光光谱和拉曼光谱分析，探究了 CMC 的浓度与电荷密度对于大豆酸奶中蛋白质结构的影响规律。当浓度为 0.9% 和 1.1% 的 CMC0.7，及浓度为 0.5%-1.1% 的 CMC1.2 会阻碍大豆酸奶中蛋白质间二硫键的形成，使蛋白质分子具有更大的柔性；相同浓度下，CMC1.2 具有比 CMC0.7 更强的阻碍大豆酸奶中蛋白质二硫键形成的能力。随着 CMC 的浓度从 0.1% 升高到 1.1%，大豆酸奶中的无规则卷曲和 β -转角共同含量出现了升高的趋势，使得大豆酸奶中的蛋白质颗粒有了更多的弹性结构。另外，在浓度为 0.1% 和 0.3% 时，添加 CMC1.2 的大豆酸奶中的 α -螺旋和 β -折叠的含量高于添加 CMC0.7 的大豆酸奶。相关性分析表明，大豆酸奶中蛋白质的表面疏水性和厚重感出现了显著的正相关，和粒度出现了显著的负相关，和流变学中的流动行为指数、粘弹性频率指数等维持凝胶结构的

参数成显著的正相关性。蛋白质二级结构中的无规则卷曲的含量以及无规则卷曲和 β -转角共同含量，和口感中的糊口性、顺滑感、颗粒感呈现显著的正相关，和流动行为指数、幂律指数、储能模量、损耗模量、能量耗散成显著的负相关。

关键词：大豆酸奶；羧甲基纤维素；口感；流变学；摩擦学

ABSTRACT

In recent years, plant-based yogurt has received widespread attention. Soy yogurt, as a key category, suffers from issues such as easy syneresis, poor stability, and insufficient smoothness and thickness in mouthfeel. During oral processing, the perception of soy yogurt's mouthfeel dominance rheological and tribological. Previous research has shown that the concentration and charge density of carboxymethyl cellulose (CMC) can modulate the texture of soy yogurt, improving its stability and sensory attributes. Based on this, this study investigated the effects of CMC concentration and charge density on the stability, sensory attributes, microstructure, rheological properties, tribological properties, and oral adhesiveness of soy yogurt, as well as the impact of CMC addition on the protein structure in soy yogurt. The main conclusions obtained are as follows:

1. The effects of CMC with a degree of substitution of 0.7 (CMC0.7) and 1.2 (CMC1.2) within a concentration range of 0% to 1.1% on the appearance, stability, moisture distribution, texture, sensory attributes, and microstructure of soy yogurt were investigated. Results showed that under both substitution degrees, when CMC concentration was between 0.1% and 0.3%, soy yogurt exhibited a rough appearance. As the CMC concentration increased from 0.5% to 1.1%, the appearance of soy yogurt gradually became smoother, with a certain degree of fluidity. With the increase in CMC concentration from 0% to 1.1%, the water-holding capacity (WHC) and whiteness of soy yogurt showed a trend of first decreasing and then increasing, while particle size, gel strength, and consistency showed a trend of first increasing and then decreasing. The particle size of soy yogurt with CMC concentrations of 0.5% to 1.1% was significantly smaller than that of soy yogurt without CMC, and the WHC of soy yogurt with CMC0.7 was significantly higher than that of soy yogurt with CMC1.2. Addition of CMC0.7 at concentrations of 0.5% to 1.1% effectively improved the storage stability of soy yogurt. After 28 days of storage, the WHC of soy yogurt with CMC0.7 at concentrations of 0.5% to 1.1% was 83.76%, 91.18%, 96.16%, and 96.21%, respectively, significantly higher than that of soy yogurt without CMC (72.73%). Cryo-scanning electron microscopy and laser confocal microscopy analysis showed that compared to soy yogurt without added CMC, soy yogurt with CMC concentrations of 0.1% to 0.3% had a more uneven pore distribution and larger protein aggregates in the microstructure. With further increase in CMC concentration, a layered structure appeared in the microstructure, pores became more uniform, and protein aggregates became smaller. Sensory analysis indicated that as CMC concentration

increased from 0.3% to 1.1%, the roughness sensation of soy yogurt decreased while the thickness sensation increased. The particle sensation and thickness sensation scores of soy yogurt with CMC0.7 concentrations of 0.7% to 1.1% were significantly higher than those of soy yogurt without CMC, and soy yogurt with CMC0.7 had a finer texture compared to soy yogurt with CMC1.2. Soy yogurt with a CMC0.7 concentration of 0.7% had the highest smoothness sensation score and obtained the highest total score in sensory evaluation, significantly higher than the control sample. Therefore, adding CMC with a degree of substitution of 0.7 at a concentration of 0.7% can produce soy yogurt with higher stability and best sensory attributes.

2. The effects of CMC concentration and charge density on the rheology, friction, and oral adhesion of soy yogurt were investigated, along with the correlation between these properties and the sensory perception of soy yogurt. Rheological tests revealed that all samples exhibited shear-thinning behavior, with storage modulus (G') exceeding loss modulus (G'') in the linear viscoelastic region. As the CMC concentration increased from 0.1% to 1.1%, a decrease in viscosity, G' , and G'' of soy yogurt was observed, along with increased resistance to shear rate and oscillation frequency. Soy yogurt with CMC concentrations of 0.1% and 0.3% exhibited higher viscosity, G' , and G'' compared to yogurt without CMC, while soy yogurt with other concentrations had lower viscosity, G' , and G'' than yogurt without CMC. At the same concentration, soy yogurt containing CMC1.2 had a higher G' than soy yogurt containing CMC0.7. Non-linear rheological tests revealed that with increasing amplitude, both G' and G'' of soy yogurt initially remained constant before gradually decreasing, with G'' surpassing G' , indicating a Type I fluid behavior. Under 1% and 10% strain, as CMC concentration increased, the elastic Lissajous curves of soy yogurt gradually widened while the viscous Lissajous curves narrowed, indicating an increasing proportion of viscous response to strain. At a CMC concentration of 1.1%, the area enclosed by the elastic Lissajous curve of soy yogurt containing CMC0.7 was greater than that of soy yogurt containing CMC1.2, suggesting that soy yogurt containing CMC0.7 consumed more energy per oscillation cycle. Friction measurements showed that soy yogurt with a 0.7% CMC concentration had lower friction coefficients at most sliding velocities, with a 23% reduction in friction coefficient at a sliding velocity of 10 mm/s compared to yogurt without CMC. Soy yogurt with CMC0.7 at concentrations ranging from 0.5% to 1.1% exhibited stronger oral adhesion compared to yogurt with CMC1.2 and yogurt without CMC. Correlation analysis indicated that attributes such as mouth-coating sensation, particle sensation, smoothness sensation, and thickness sensation in soy yogurt were

positively correlated with flow behavior index, viscoelastic frequency index, damping coefficient, and energy dissipation rate, while negatively correlated with consistency index, viscoelastic power law constant, energy dissipation, particle size, and friction coefficient.

3. Through analysis of hydrophobicity, thiol content, ultraviolet spectroscopy, fluorescence spectroscopy, and Raman spectroscopy, the influence of CMC concentration and charge density on the protein structure in soy yogurt was investigated. CMC concentrations of 0.9% and 1.1% for CMC0.7, and concentrations ranging from 0.5% to 1.1% for CMC1.2, hindered the formation of intermolecular disulfide bonds in soy yogurt, resulting in greater flexibility of the protein molecules. At equivalent concentrations, CMC1.2 exhibited a stronger ability to inhibit the formation of protein disulfide bonds in soy yogurt compared to CMC0.7. As the CMC concentration increased from 0.1% to 1.1%, there was an increasing trend in the content of random coils and β -turns in soy yogurt, contributing to a more elastic protein particle structure in the yogurt. Additionally, at concentrations of 0.1% and 0.3%, the content of α -helices and β -sheets in soy yogurt with added CMC1.2 was higher compared to soy yogurt with added CMC0.7. Correlation analysis revealed significant positive correlations between protein hydrophobicity and thickness sensation in soy yogurt, and significant negative correlations with particle size, as well as significant positive correlations with rheological parameters such as flow behavior index and viscoelastic frequency index that maintain gel structure. The content of random coils in protein secondary structure, along with the combined content of random coils and β -turns, showed significant positive correlations with sensory attributes like mouth-coating sensation, smoothness sensation, and particle sensation, as well as significant negative correlations with rheological parameters like flow behavior index, power law index, storage modulus, loss modulus, and energy dissipation.

Keywords: Soy yogurt; Carboxymethyl cellulose; Mouthfeel; Rheology; Tribology

缩略语表

缩略语	英文全称	中文全称
ANS	8-Anilino-1-naphthalenesulfonic acid	8-苯胺-1-萘磺酸
CMC	Carboxymethyl cellulose	羧甲基纤维素
CMC0.7	Carboxymethyl cellulose with a substitution degree of 0.7	取代度为 0.7 的羧甲基纤维素
CMC1.2	Carboxymethyl cellulose with a substitution degree of 1.2	取代度为 1.2 的羧甲基纤维素
COF	Coefficient of friction	摩擦系数
CPMG	Carr-Purcell-Meiboom-Gill	脉冲序列
Cryo-SEM	Cryo-scanning electron microscopy	冷冻扫描电镜
CLSM	Confocal laser scanning microscopy	激光共聚焦显微镜
EPS	Extracellular polysaccharides	胞外多糖
G'	Storage modulus	储能模量
G''	Loss modulus	损耗模量
HPH	High-pressure homogenization	高压均质
LAOS	Large amplitude oscillation shear	大振幅震荡剪切
LVR	Linear viscoelastic region	线性粘弹区
PDMS	Polydimethylsiloxane	聚二甲基硅氧烷
SAOS	Small amplitude oscillatory shear	小振幅震荡剪切
SDS-PAGE	Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis	十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳
WHC	Water holding capacity	持水力

第一章 绪论

植物奶由于具有健康、环境友好等特点，在近些年销量稳步提升(Guzman-Luna et al 2022, Bocker and Silva 2022)。植物基酸奶与植物奶相比具有更丰富的感官体验，尤其受到青年消费者的青睐(Kumari et al 2021, Boeck et al 2021)，然而植物奶经乳酸菌发酵后难以实现与牛乳酸奶相似的顺滑细腻的口感，并且存在着易析水、稳定性差的问题(Reyes-Jurado et al 2021, Grasso et al 2020)。口感不仅是关键的感官特征，也是评价食品质量的重要指标(Guimaraes et al 2020)。因此，改善植物基酸奶的口感，提高其稳定性，是植物基酸奶进入商品化的一大挑战(Montemurro et al 2021)。

1 半固体食品的口感感知过程和植物基酸奶的口感偏好

1.1 半固体食品的口感感知过程

植物基酸奶属于半固体食品，易于变形，在口腔加工中所需的力相对较小，通常不需要进行咀嚼，但在舌头、腭和其他口腔结构之间会经历更微妙的过程(Guo 2021)。半固体食品进入口腔后，首先会受到舌头和上颚之间的压力与剪切力(Laguna et al 2021)。在这一阶段，口腔中食团的厚度会让舌头和上腭之间没有直接接触，使样品位于 Stribeck 曲线的流体动力学层内，这时食团的流变学特性主导着口感特征（图 1-1A 和 1-1B）。在这个过程中，可以感知到样品的奶油感、硬度、顺滑感、粘性和厚度。随后，口腔中分泌的唾液和食团混合稀释其稠度，唾液中的唾液淀粉酶会作用于食团中的淀粉，使其质地变薄（图 1-1C）。由于唾液的稀释和淀粉酶水解，食团无法支持舌头和上腭之间的力，导致舌头和上颚会出现接触。该阶段对应于 Stribeck 曲线的混合层，食团的流变学特性和表面性质都会影响到口感（图 1-1A 和 1-1B）。在这一阶段，可以感知到样品的顺滑感、颗粒感、内聚性和粘性。在食团经过进一步的口腔加工和吞咽过程后，口腔中的样品层减少，导致舌头接触上颚，从 Stribeck 的混合层过渡到了边界层，食品的口感受到食团的表面特性影响更为突出，这时可以感知到食品的顺滑感、颗粒感和粘性特征（图 1-1A 和 1-1B）(Vicente et al 2006)。吞咽后，根据食物残渣附着在口腔表面或咽部，分别感知到糊口性和白垩感(Camacho et al 2015)。在口腔加工过程中，可以感知舌头和上颚之间施加的力与厚度、舌头运动产生的阻力和摩擦、食物颗粒产生的不规则压力以及唾液包裹的食团

的表面特性等感觉，从而形成了半固体食品的口感特征(Guo 2021, He et al 2022, Upadhyay et al 2020)。值得注意的是，食品的口感感知是在消费者的大脑中形成的。因此，这些感知不仅受到半固体食品的流变和表面特性的影响，还会受到消费者口腔生理、年龄、性别和文化背景等因素的影响(He et al 2022, Wang et al 2022)。

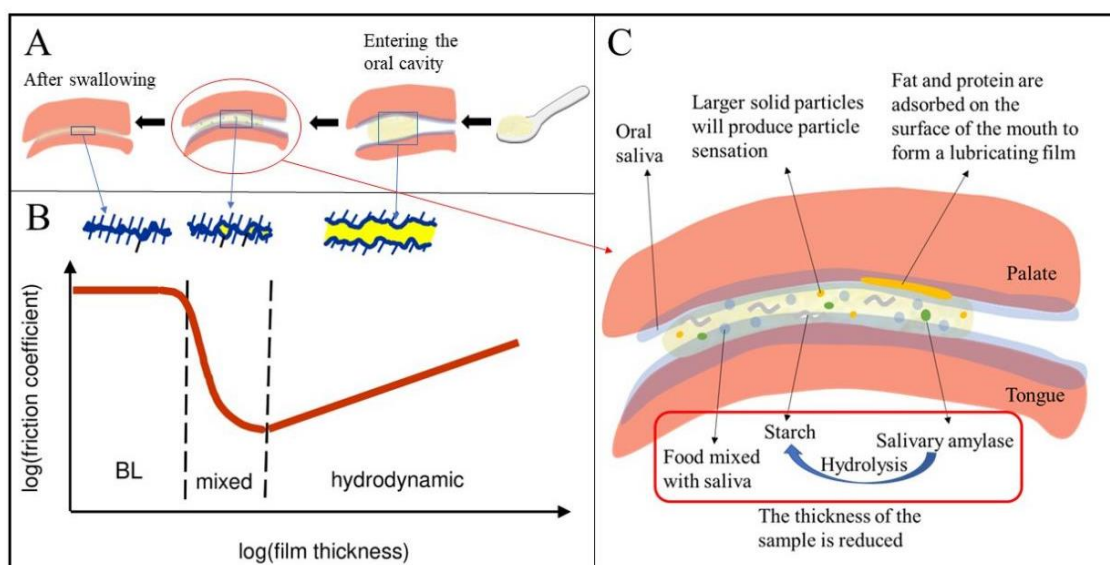


图 1-1 半固体食品在口腔加工过程中的口感感知。(A) 口腔加工过程中舌头与上腭之间的距离以及口腔中食物的状态；(B) 典型的 Stribeck 曲线表明了摩擦系数和食物厚度之间的关系 (Vicente et al 2006)；(C) 食团和唾液的混合、口腔中淀粉的水解以及油脂和蛋白质在口腔表面的吸附，降低了食团的厚度。

Fig. 1-1 The mouthfeel perception of semisolid food during the oral processing. (A) The distance between tongue and upper palate and the status of food in oral cavity during the oral processing; (B) typical Stribeck curve illustrating the relationship between the friction coefficient and the thickness of foods(Vicente et al 2006); (C) The mixture of food and saliva, the hydrolysis of starch in the oral cavity, and the adsorption of oil and protein on the oral surface reducing the thickness of foods.

1.2 消费者对于植物基酸奶的口感偏好

传统牛乳酸奶有着悠久的消费历史和广泛的消费者群体，对良好的感官特性有着相对统一的认可(Grossmann et al 2021)，但近年来才对种植物基酸奶进行了广泛系统的研究(Montemurro et al 2021)。植物基酸奶有多种植物源的材料，与牛乳酸奶相比具有更加复杂的感官特征，尤其是风味和颜色。因此，在特定植物基原料生产酸奶的研发阶段，有必要调查找到这种植物基酸奶良好的感官特性(Grossmann et al 2021, Montemurro et al 2021)。研究表明牛乳酸奶和植物基酸奶具有相似且同等受欢迎

迎的口感属性(Greis et al 2020, Gupta et al 2022, Grasso et al 2020)。Greis 等人通过感官时间优势方法来评估不同的植物基酸奶, 得出喜欢的时间驱动因素是厚度和奶油感, 不喜欢的是稀薄的口感(Greis et al 2020)。奶油感、厚度和粘度与可接受性成正相关(Esmerino et al 2017, Gupta et al 2022), 且奶油感总是代表着更好的产品质量, 通常受到人们的喜爱(Upadhyay et al 2020)。与牛乳酸奶相比, 植物基酸奶在口感上层次变化会更加明显, 原因可能是植物基酸奶凝胶结构更容易被口腔加工破坏, 或植物基酸奶中的淀粉会被唾液中的淀粉酶水解导致粘度降低, 从而在口腔加工过程中口感的感知有更大的变化(Greis et al 2020)。植物基酸奶的状态也影响着消费者的喜好, 如凝固型和搅拌型, 尽管搅拌型酸奶的凝胶硬度和稠度可能低于凝固型酸奶, 但搅拌型酸奶可能会具有更高的感官评分(Gupta et al 2022)。

2 植物基酸奶质地的调控方法

2.1 原料中组分的作用

植物基酸奶中的组分对酸奶的凝胶结构和口感具有显著的影响, 如蛋白质或外源添加的多糖和油等。在本节中, 综述了蛋白质的种类、浓度, 多糖与蛋白质之间的相互作用, 以及添加油脂的种类和乳化剂对植物基酸奶的持水力(WHC)、质地和色度的影响, 如图 1-2 所示。

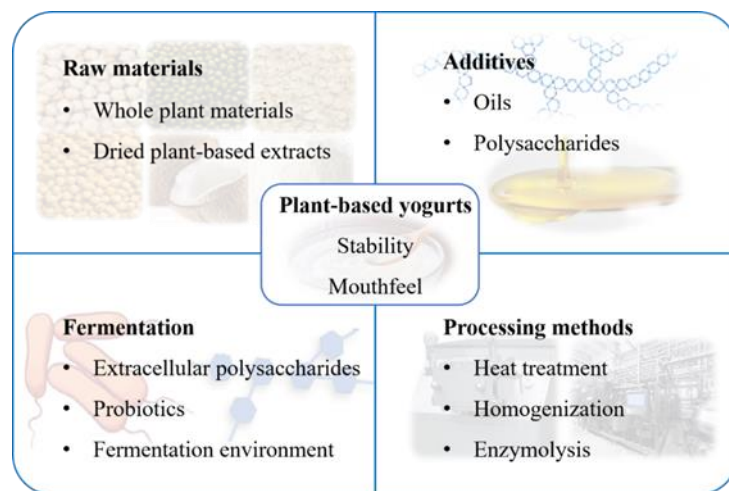


图 1-2 影响植物基酸奶稳定性和口感的因素: 原料、添加剂、发酵和加工方式

Fig. 1-2 Factors influencing stability and mouthfeel of plant-based yogurts: raw materials, additives, fermentation and processing methods

2.1.1 蛋白质的作用

植物基酸奶的微结构、流变学特性，口感和稳定性等都会受到蛋白质的种类和浓度的影响。Xinlu 等人比较了三种蛋白质含量相同的酸奶（复原乳酸奶、大豆酸奶和燕麦酸奶），发现大豆酸奶的硬度、WHC、G'和 G''值最高，蛋白质网络最致密，而燕麦酸奶尽管有最高的固体含量，但 WHC 和 G'最低，且蛋白质网络更疏松(Xinlu et al 2023)。Boeck 等人比较了扁豆酸奶、大豆酸奶和牛乳酸奶的凝胶特性，发现大豆酸奶和牛乳酸奶之间的 WHC 没有显著差异，但扁豆酸奶的 WHC 最高且具有较高的硬度和稠度以及致密的蛋白质网络(Boeck et al 2021)。振荡分析表明，随着发酵过程的进行，扁豆酸奶从液体转化为固体的速度快于大豆酸奶和牛乳酸奶。这是因为当 pH 等于 6 时，扁豆的溶解度相对较小，但大豆蛋白仍然具有较高的溶解度，只有 pH 小于 5 时，牛乳中的酪蛋白才会有大量的交联形成凝胶(Boeck et al 2021)。因此，随着发酵的进行，蛋白质的种类可能由不同的氨基酸组成，具有不同的等电点，从而导致不同的凝胶速度。

Zhou 等人比较了正常（正常）、7S 球蛋白缺乏（7S 缺乏）和脂氧合酶缺乏（LOX 缺乏）大豆原料生产的酸奶凝胶的特性，发现 LOX 缺乏制备的酸奶表现出最高的凝胶强度，达到凝胶点的时间最短，使用 CLSM 观察到了最致密的凝胶结构(Zhou et al 2019)。Wang 等人也发现了类似的结果，LOX 缺乏的蛋白质组分具有更多的可用巯基基团，这可以加速凝胶的形成和形成致密的蛋白质凝胶结构(Wang et al 2021)。此外，11S 亚基形成的蛋白质凝胶网络较为粗糙，会使摩擦测量的 Stribeck 曲线，从流体动力学状态到混合状态的转变更快，而 7S 亚基会形成更密集的蛋白质网络和更长的摩擦学边界状态(Pang et al 2021)。因此，蛋白质的亚基组成对植物基酸奶的凝胶结构、质地特征和摩擦学特性均有一定的影响。

2.1.2 多糖的作用

酸奶产品常添加琼脂、淀粉和果胶等胶凝剂，可以通过蛋白质与多糖的相互作用来调节酸奶的结构，获得所需的质地(Yang et al 2021)。在市场上，大约 80%的植物基酸奶含有亲水性胶体作为稳定剂，而乳化剂很少用于植物基酸奶(Boeck et al 2021)。Grasso 等人调查了市场上的六种植物基酸奶和牛乳酸奶，发现在含有多糖的情况下，产品的质地与蛋白质含量之间没有相关性，而多糖对质地特性有很大影响

(Grasso et al 2020)。因此，在植物基酸奶中添加多糖来调节凝胶结构并模仿牛乳酸奶的口感是一种普遍而有效的方法(Chalupa-Krebzdak et al 2018)。

在酸性条件下，当多糖和蛋白质具有相反的电荷时，多糖和蛋白之间的静电相互作用会增强凝胶的结构促进凝胶的形成。然而当多糖具有非离子性和亲水性时，则会成为蛋白质凝胶网络结构中的非活性填料。Jin 等人发现，纳米微晶纤维素会作为“活性”填料分布在蛋白质网络中，使得蛋白质凝胶网络中的静电相互作用、疏水相互作用和氢键显著增强，形成较为致密的网络结构，提高凝胶的 WHC、凝胶强度和粘弹性(Jin et al 2022)。然而，含有微晶纤维素的凝胶会减少凝胶体系中的氢键和二硫键，微晶纤维素随机包埋到蛋白质网络结构中，在蛋白质网络中起相反的作用，并可能阻碍蛋白质网络的形成(Jin et al 2022)。另外，Klost 等人研究发现与含有纤维素的蛋白质凝胶结构相比，没有纤维素的蛋白质凝胶结构会显示出更好的回复能力(Klost and Drusch 2019)。Wang 等人发现在酸性条件下凉粉草多糖和大豆分离蛋白(SPI)具有相反的电荷，并出现静电相互作用，通过增加凉粉草多糖的浓度可以增强凝胶网络结构中的疏水和氢键作用力，形成比纯 SPI 凝胶更致密的网络结构(Wang et al 2020)。食品体系中蛋白质和多糖的含量、酸化速度和发酵终点的 pH 值也对凝胶结构的性质有一定影响(Montellano Duran et al 2019)。例如，Montellano 等人发现酸化速率越低样品中悬浮的颗粒进行沉降的时间可能越长，从而形成具有较低的 WHC 的凝胶网络结构，酸化速率越快可用于聚集体重排的时间就越短，因此凝胶可能会具有更高的 WHC(Montellano Duran et al 2019)。在较低的蛋白质浓度条件下，增加多糖的浓度会与蛋白质竞争性结合，削弱以蛋白质为凝胶骨架的作用，降低 WHC(Montellano Duran et al 2019)。Cortez 等人还发现蛋白多糖凝胶的 WHC 和凝胶强度会受 pH 以及蛋白质和多糖的比例的影响(Cortez-Trejo et al 2022)。SPI 和黄原胶混合凝胶在 pH 为 4.5 时显示出较高的 WHC，但在 pH 为 4.0 时显示出更紧密和更强的凝胶结构，蛋白多糖的比例为 1:1 时在凝胶结构上表现出了最佳性能(Cortez-Trejo et al 2022)。

2.1.3 油脂的作用

加入到凝胶前浆液中的油脂被乳化后，油滴被嵌入蛋白质网络中作为活性填料，从而可以调节蛋白质凝胶网络的性质(Klost and Drusch 2019)。植物基酸奶中的油脂不仅可以控制疏水性芳香化合物的释放速度，还可以改善口感。一方面，油脂可以

提高植物基酸奶的粘度，并赋予食物厚重的口感特征。另一方面，它可以粘附在舌头和口腔表面，提高食物的顺滑感，并在吞咽后主导糊口性的感知(Dickinson 2018, Kupirovic et al 2017)。含油脂的蛋白质凝胶，在第一次咬合时与舌头上的油脂沉积最为相关，并且油脂沉积会随着口腔处理时间的延长而增加(Camacho et al 2015)。Riquelme 等人研究发现具有较大油滴的凝胶在口腔加工过程中油滴之间更容易聚结且具有更高的润滑性，但具有较小油滴的蛋白质凝胶在吞咽后会显示出更高的涂层保留量(Riquelme et al 2021)。

油的类型和浓度，可以改善摩擦学特性，调控产品的凝胶特性(Ningtyas et al 2021)。例如，Ningtyas 等人比较了无水乳脂、棕榈硬脂酸和大豆油三种不同类型的油在不同的浓度下对 SPI 凝胶特性的影响，发现含有无水乳脂和棕榈硬脂酸的 SPI 凝胶的硬度和粘度随浓度的增加而增加，而含有大豆油的 SPI 凝胶则随浓度的升高而显示出变软的趋势(Ningtyas et al 2021)。蛋白质网络中油的物理状态(固体或液态)对凝胶的特性有很大影响，油在口腔中更好的融化特性会带来更好的摩擦学特性和奶油感(Ningtyas et al 2021)。Shen 等人研究发现添加大豆油在 1%-3% 浓度下可以降低样品的硬度、弹性和粘性，随着油的浓度从 2% 升高到 4%，样品的咀嚼次数、咀嚼持续时间减少，咀嚼频率增加且吞咽时间缩短(Shen et al 2021)。这可能是因为油浓度越高的样品在口腔加工中会释放出更多的油，并具有较好的润滑特性(Shen et al 2021)。然而，Levy 等人发现葵花籽油含量的增加和油滴尺寸的减小可以增加土豆蛋白凝胶的硬度和粘度(Levy et al 2022)。Sim 等人发现添加葵花籽油可以提高蛋白质凝胶的强度(Sim et al 2020)。另外，植物基酸奶的颜色与牛乳酸奶具有一定的差异，植物基酸奶容易出现黄色、灰色等，添加油脂可以有效提高植物基酸奶的白度和光滑度，白度和光滑度与油脂含量和油滴粒径成正比(DePalma et al 2019, Levy et al 2022)。

在相同的油脂含量和类型下，不同的乳化剂对油滴的大小和凝胶的流变性能无显著性影响，但会显著影响凝胶的摩擦学性能。与蛋白质和其他表面活性剂相比，使用固体颗粒作为稳定剂会增加样品的摩擦系数，因为固体颗粒可以在液滴周围建立空间保护层，使液滴更能抵抗施加在其上的应力(Saavedra Isusi et al 2022)。例如，由果胶基微凝胶颗粒稳定的椰子油比稳定剂 SPI 具有更高的牵引系数(Saavedra Isusi et al 2022)。

2.2 发酵菌株的作用

发酵植物原料的发酵菌株特性对植物基酸奶的凝胶结构和口感具有显著的影响(Yang et al 2021)。与化学制剂相比,乳酸菌的产酸速率较低,还具有产胞外多糖(EPS)和蛋白水解酶的能力(Pang et al 2019, Ren and Li 2022)。具有高产 EPS 能力的发酵菌株生产的植物基酸奶,会有更高稳定性和更好的质地,这是减少增稠剂使用并满足消费者清洁标签要求的有效方法(Korcz and Varga 2021)。一些乳酸菌还会产生细胞外蛋白酶和淀粉酶,它们在调节植物基酸奶的凝胶化过程中也起到一定的作用(Ren and Li 2022)。

研究表明,由具有高 EPS 生产能力的乳酸菌发酵生产的酸奶具有降压、抗氧化、抑制肿瘤和增强人体免疫力等多种益生功能(Ishiguro et al 2018, Yang et al 2022)。同时,具有高 EPS 生产能力的发酵菌株可以增强质地、感官特性和储存稳定性,这是实现清洁标签的重要方法之一(Yang et al 2022)。EPS 可以与体系中的蛋白质出现相互作用,在凝胶网络内部进行部分或完全作为填充物,从而生成具有更加均匀致密的蛋白质凝胶网络(Yang et al 2022, Ripari 2019)。Yang 等人发现使用更高 EPS 生产能力的乳酸菌株会诱导 SPI 凝胶出现 β -折叠结构向 α -螺旋结构的转化,并增加疏水相互作用,产生有序、光滑、均匀的凝胶网络(Yang et al 2022)。根据乳酸菌产生的 EPS 是释放到系统中还是与细菌结合,可分为游离 EPS (fEPS) 和夹膜 EPS (cEPS)。这两者都有助于提高粘度、奶油感、抗剪切性和 WHC,但使用产 fEPS 的发酵菌株生产的酸奶比使用产 cEPS 发酵菌株具有更高的粘度(Abarquero et al 2022)。EPS 的使用方法有两种:添加到浆料中的非原位生产和在浆料中的通过乳酸菌自身合成的原位合成(Korcz and Varga 2021)。如今,消费者对清洁标签的需求越来越大,因此植物基酸奶制造商对原位 EPS 生产的开发特别感兴趣(Masia et al 2021)。在植物基酸奶中,使用具有生产 EPS 能力的发酵菌株比在生产中添加非原位 EPS 具有更好的稳定性和质地特征(Xu et al 2019)。Pang 等人发现 GDL 酸化的凝胶和 EPS 产量低的菌株生产的凝胶具有相似的结构,但使用具有较高的 EPS 生产能力的菌株生产的凝胶,会有更小的颗粒粒径,更好的润滑性,更高的凝胶强度和 WHC(Pang et al 2019)。Li 等人研究表明植物基酸奶的粘度和发酵菌株 EPS 的生产能力和所产 EPS 的分子量均呈现正相关的关系(Li et al 2014),在 Zannini 等人和 Lorusso 等人的研究中也出现了相似的结果(Zannini et al 2018, Lorusso et al 2018)。

发酵体系中的组分、pH 值、温度、培养时间和搅拌均会影响到菌株 EPS 的产量和 EPS 的结构特点，从而影响酸奶的最终质地(Yang et al 2021, Patrignani et al 2018, Hickisch et al 2016)。使用果糖作为碳源会产生更高分子量的 EPS(Peyer et al 2016)。Xu 等人发现由于 EPS 的改性作用，添加蔗糖可以改善发酵蚕豆蛋白凝胶的流变性和质地特性(Xu et al 2019)。Joshi 等人发现乳酸菌生产 EPS 的最佳条件是 pH 为 6.5、温度为 28 °C 和以蔗糖作为碳源(Joshi and Koijam 2014)。然而最适合生产 EPS 的 pH 值和温度并不适合植物基酸奶的生产，但有部分条件可以调整以促进 EPS 的生产。例如，Hickisch 等人发现在经过超高温（UHT）处理的羽扇豆基浆液中，乳酸菌株的产 EPS 的能力高于未经处理的样品(Hickisch et al 2016)。

一些菌株在发酵过程中会产生细胞外蛋白酶或淀粉酶，对调节植物基酸奶的结构和质地起着一定的作用(Peyer et al 2016)。菌株产生的胞外蛋白酶可以增加蛋白质的表面疏水性，降低蛋白质的分子量，这些小分子蛋白质通过分子间作用力聚集，会促进凝胶的形成，提高凝胶形成速度，但会降低凝胶硬度(Ren and Li 2022)。在植物基酸奶中添加益生元也可以调节植物基酸奶凝胶的特性。例如，二酰基甘油的添加可以增强发酵菌株的蛋白酶水解活性(Sengupta et al 2018)。Csatlos 等人发现含有小球藻的大豆酸奶具有更高的乳酸菌数和粘度(Csatlos et al 2023)。添加植物水提物（罗汉果、番石榴、枸杞或芒果）可以促进乳酸菌的繁殖，提高蛋白水解酶的活性和 EPS 的产量，改善植物基酸奶的质地(Bakr Shori et al 2021)。此外，混合菌株发酵也可以改善植物基酸奶的质地和流变学特性(Yang et al 2021)。

2.3 加工方法对植物基酸奶结构或口感的影响

为了获得具有稳定、良好口感的植物基酸奶，目前常用到的有热处理、高压均质处理（HPH）和酶处理等，这些加工方式也符合消费者对清洁标签的需求(Montemurro et al 2021)。

2.3.1 热处理

热处理不仅能使食品系统中的有害微生物失活延长产品的保质期，还能钝化植物原料中的抗营养因子，而且可以调控植物基酸奶的凝胶结构和质地。例如，热处理可以使淀粉糊化，提高产品的稳定性，使蛋白质变性和预聚集成凝胶网络，促进

凝胶的形成(Montemurro et al 2021, Chen et al 2016)。因此, 研究热处理对植物基酸奶凝胶结构的影响, 调整工业生产参数, 改善植物基酸奶的口感, 提高稳定性具有重要的意义。

Peng 等人发现经过 70 °C 以上的热处理, 大豆酸奶的凝胶结构从“串珠状”蛋白质网络转变为蛋白质颗粒堆叠的片状结构, 并聚集在链状网络周围, 形成类似于牛乳酸的凝胶结构和口感(Peng and Guo 2015)。使用 80 °C-95 °C 的热处理, 大豆酸奶的凝胶强度显著增加, 但达到 115 °C 的过度加热会降低酸奶的硬度(Zhou et al 2019)。对 SPI 经过 95 °C, 20 min 的热处理可以改善 GDL 酸化生成的 SPI 凝胶在线性和非线性区域的结构、耐应变性以及粘弹性(Huang et al 2022)。在热处理过程中同时引入紫外线辐射对食品的流变和质地特性有一定的影响(Pandiselvam et al 2022)。例如, Demir 等人比较了未处理、热处理 (63 °C, 30 min) 和盘管式紫外辅助热处理 (10 个循环, 77.67 J/mL, 60 °C) 三种预处理方法生产的燕麦酸奶的凝胶特性, 发现盘管式紫外辅助热处理的燕麦酸奶具有更好的稳定性(Demir et al 2021)。

此外, 超高温处理 (UHT) 也是一种调节植物基酸奶的结构、改善质地的有效方法。例如, 羽扇豆基酸奶经过超高温加热 (140 °C, 10 s) 处理后, 与巴氏灭菌相比, 表现出更高的黏度、粘弹性、更紧密的微结构和更高的 WHC(Hickisch et al 2016, Hickisch et al 2016)。UHT 加热处理会促进蛋白质结构的展开, 从而暴露出更多的巯基基团, 并增加二硫键的含量, 二硫键可能会在分子间或分子内, 引发出更多的交联, 从而增强凝胶网络(Hickisch et al 2016)。

2.3.2 高压均质处理

高压均质 (HPH) 可以减小油滴的尺寸、促进蛋白质分子的展开和疏水区域的暴露, 使得蛋白质、脂滴更加均匀的分布在水相中形成新的油水界面, 提高乳液的稳定性, 并且不需要加入额外的稳定剂和乳化剂(Levy et al 2021, Levy et al 2022)。

HPH 的压力是影响植物基酸奶的结构和质地特性的关键因素。Gul 等人发现, HPH 处理比未经处理的对照样品具有更均匀稳定的结构、更高的凝胶强度和更高的粘度, 而最高的均质压力并不能提供最佳的结构和质地特征(Gul et al 2021)。高达 100 MPa 的 HPH 处理使 G' 和 G'' 的值增加, 随后却随着压力的增加而逐渐降低, 在 100 和 50 MPa 处理的样品中可以观察到最高的凝胶硬度(Gul et al 2021)。Huang 等人也发现了类似的结果, 通过 1000 bar 高压均质制备的酸诱导 SPI 凝胶的 G' 和 G'' 的值

小于 400 bar 均质处理的凝胶，原因可能是较高的均质压力破坏了其内部凝胶结构，并降低了凝胶系统的强度(Huang et al 2022)。

当酸奶以植物蛋白、油和糖组成的混合材料为发酵浆料时，HPH 可以有效减少油滴的粒径，提高乳液的稳定性，避免发酵完成前颗粒的沉降问题(Levy et al 2021, Levy et al 2022)。Levy 等人发现增加均质压力（0.1-200MPa）可以避免油水分离、减小油滴的尺寸，但在不同均质压力之间，样品的 WHC 没有表现出显著性差异(Levy et al 2021)。此外，Cruz 等人发现超高压（200-300MPa）均质的大豆酸奶，由于油滴的粒径较低以及与蛋白质颗粒的相互作用，油滴并不明显，并且表现出更大的硬度、更易变形的行为和更高的 WHC(Cruz et al 2009)。

2.3.3 酶处理

酶水解会降低蛋白质的表面疏水性，因蛋白质凝胶的稳定性主要由疏水相互作用决定(Klost et al 2020)，这会阻碍蛋白质网络的形成，比未水解的样品展示出更低的凝胶强度和 WHC(Galante et al 2020)。蛋白质凝胶的质地特性（硬度、内聚性和咀嚼性）和粘度会随着蛋白质水解程度的增加或水解蛋白质比例的增加而降低(Li et al 2021, Zhao et al 2022)。Klost 等人发现当 Alcalase®水解的豌豆蛋白产生的肽小于 17 kDa 时，无法形成凝胶网络(Klost et al 2020)，Li 等人也得出了相似的结论(Li et al 2021)。淀粉酶可以用于降低高淀粉含量的植物性材料（如蚕豆，含有约 40%的淀粉）的粘度，从而避免产生高粘度的悬浮液阻碍后续的处理(Jiang et al 2020)。因此，通过部分酶水解生产的植物基酸奶可以降低粘度，实现与牛乳酸奶相似的口感、较高的蛋白质含量和抗氧化性能(Galante et al 2020)。尽管酶在改变植物基酸奶的质地方面非常有效，但需要考虑酶的特异性和高昂的价格(Pua et al 2022)。

2.3.4 其它加工方法

除 HPH 外，高压微射流、研磨和超声方法对植物基酸奶的质地特性也具有一定的调节作用。微射流会产生高剪切速率并提供一致的压力，可以形成片状和纤维状的凝胶结构，还可以降低酸奶的粒度，提高酸奶的 WHC、稠度和硬度(Demirkesen et al 2018)。行星式球磨机研磨豌豆分离蛋白可以改变蛋白质的二级结构，减小蛋白质颗粒尺寸增加溶解度，从而可以提高蛋白质凝胶的 G'、粘度和回复性(Liu et al 2021)。

因此，对于研磨植物性原料或植物基蛋白，这种方法可以减少稳定剂的使用，提高植物基酸奶的质量。此外，超声波和热处理可以实现协同效应(Penha et al 2021)。Zhao 等人发现超声热处理的样品会形成更紧凑、更均匀的凝胶网络，与仅热处理或超声处理相比，显示出最高的凝胶强度和 WHC(Zhao et al 2021)。

3 本课题的研究目的、意义及创新点

3.1 研究目的与意义

近年来，植物基酸奶由于其健康、环境友好等特点，逐渐受到消费者的广泛关注。然而植物基酸奶没有与牛乳酸奶相似的顺滑细腻的口感，并且存在稳定性差的问题。口感不仅是关键的感官特征，也是评价食品质量的重要指标。因此，改善植物基酸奶的口感，提高其稳定性，是植物基酸奶进入商品化的一大挑战。大豆是一种成本低廉、营养丰富的植物基原料，用于开发植物基酸奶有巨大的潜力，而大豆酸奶同样存在着易析水、口感粗糙且厚重性不足的问题。大豆酸奶从进入口腔到吞咽后的口感感知分别受到其流变学特性、摩擦学特性和口腔粘附性的影响，而流变学特性、摩擦学特性、口腔粘附性和口感又受到大豆酸奶中蛋白质结构的影响。羧甲基纤维素（CMC）具有无色、无味和生理惰性的优势，有不同的电荷密度，是一种常用的食品添加剂。前期研究发现，CMC 的浓度和电荷密度可以调控大豆酸奶的质地，改善稳定性和口感。基于此，本课题通过研究 CMC 的浓度与电荷密度对大豆酸奶的稳定性、口感、微结构、流变学特性、摩擦学特性和口腔粘附性的作用规律，以及 CMC 的加入对大豆酸奶中蛋白质结构的影响，并通过相关性分析探究大豆酸奶的口感、流变摩擦学特性、口腔粘附性和蛋白质结构之间的关系。对未来植物基酸奶质地的调控，口感与稳定性的改善和多糖的选择具有重要的参考价值。

3.2 研究内容

研究了 CMC 的浓度和电荷密度对大豆酸奶的稳定性、口感、微结构、流变学特性、摩擦学特性和口腔粘附性的作用规律，并通过相关性分析探究了大豆酸奶的口感和流变摩擦学特性、口腔粘附性之间的关系。探究了 CMC 的加入对于大豆酸奶

蛋白质结构的影响规律，并分析了其与大豆酸奶质地变化的相关性。具体主要研究内容如下：

(1) 研究了 CMC 的浓度和电荷密度对于大豆酸奶的稳定性和口感的影响。通过对大豆酸奶进行表观观察和色度的测定来反映大豆酸奶的表观状态。通过测定大豆酸奶的 WHC、粒度和低场核磁反映大豆酸奶的稳定性。通过感官评价和质构测试反映 CMC 的加入对于大豆酸奶口感和质地的影响，最后使用激光共聚焦显微镜和冷冻电镜来研究大豆酸奶的微结构。

(2) 研究了 CMC 的浓度和电荷密度对于大豆酸奶流变学、摩擦学和口腔粘附性的影响规律。通过流变学的稳态扫描、频率扫描、蠕变回复分析、大振幅震荡扫描和摩擦学测试来探究大豆酸奶的流变学与摩擦学特性。随后通过测定大豆酸奶在人口腔中的残留量和在猪舌上的残留量反映 CMC 对大豆酸奶口腔粘附性的影响。最后通过相关性分析，探究了上述性质与口感之间的相关性。

(3) 通过 Zeta 电位测量探究 CMC 对于大豆酸奶中颗粒表面电位的影响。通过紫外光谱、荧光光谱、拉曼光谱、表面疏水性、巯基含量和 SDS-PAGE，探究了 CMC 对大豆酸奶蛋白质结构和蛋白质亚基的影响，并分析了大豆酸奶中的蛋白质结构与口感、流变学和摩擦学等参数之间的相关性。

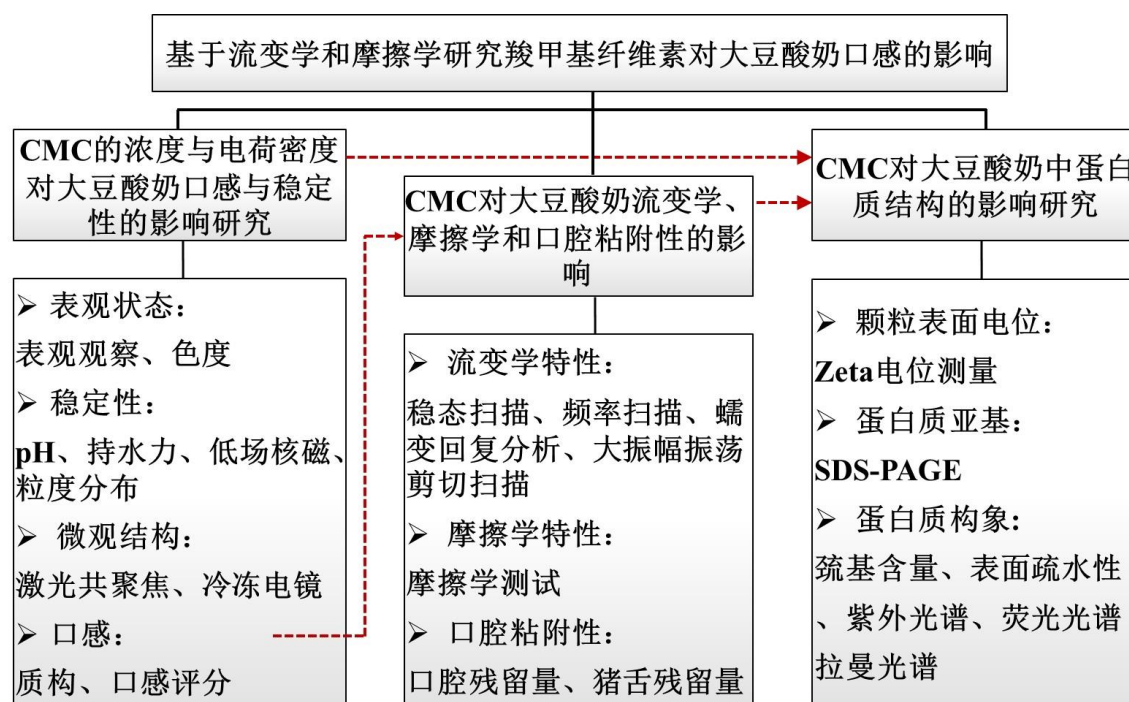


图 1-3 技术路线图

Fig. 1-3 Technology roadmap

4.3 创新点

1、本课题研究不同电荷密度和浓度的 CMC 对大豆酸奶稳定性及口感的影响规律，并确定了 CMC 最适的电荷密度和浓度，改善了大豆酸奶的颗粒感、顺滑感和厚重感，提高了其稳定性。

2、本研究使用了非线性流变学技术和口腔摩擦学技术，能模拟大豆酸奶在口腔加工过程中的大幅度形变和润滑特性，更合理的解释口感中的厚重感和顺滑感，并基于上述特性等建立了与其口感特征的关联。

第二章 羧甲基纤维素的浓度与电荷密度对大豆酸奶口感与稳定性的影响

1 引言

近年来,植物基酸奶受到了消费者的广泛关注,尤其在年轻消费者中深受喜爱(Boeck et al 2021)。大豆是一种在全球广泛种植并且具有较低成本的食品原料,富含优质的蛋白质、膳食纤维以及大豆异黄酮等功能性成分(Rizzo and Baroni 2018)。因此,大豆作为开发植物基酸奶的原料具有较大的应用潜力(Boeck et al 2021)。然而,大豆酸奶与许多其他植物基酸奶类似,面临着严重的相分离问题,并且缺乏类似于传统牛乳酸奶细腻厚重的口感(Kong et al 2022, Reyes-Jurado et al 2021, Montemurro et al 2021, Grasso et al 2020)。植物蛋白在发酵过程中的酸化易形成不连续的弱凝胶,导致相分离,使得稳定性较差(Bernat et al 2014)。此外,大豆酸奶的口感是影响消费者选择和消费偏好的一个重要感官属性,是评估酸奶质量的重要指标(Gupta et al 2022)。因此,大豆酸奶的口感与稳定性因素是在大豆酸奶产品开发过程中亟待解决的问题。

CMC 是在纤维素上的葡萄糖单元 2、3、6 位上发生随机取代,通过醚键连接羧甲基,取代度表示平均一个葡萄糖单元羧甲基的个数,商业类型 CMC 的取代度为 0.7-1.2(Rahman et al 2021, 熊文飞 2018)。CMC 具有优异的特性,例如无色、无味、无热量、生理惰性、在酸性条件下稳定,可以防止悬浮颗粒重力分离等,是应用比较广泛的稳定剂和增稠剂(Saifur Rahman et al 2021)。不同取代度的 CMC 会有不同的电荷密度,多糖的电荷密度影响着其与蛋白质的相互作用,进而影响着食品体系的质地(熊文飞 2018)。然而据我们所知 CMC 对大豆酸奶口感和稳定性影响并未发现报道,前期研究发现 CMC 的浓度和电荷密度可以调节大豆酸奶的质地,改善稳定性和口感。因此有必要探究不同电荷密度与浓度的 CMC 对大豆酸奶的稳定性和口感的影响。

因此本章主要探究了不同浓度和不同电荷密度的 CMC 对于大豆酸奶的外观,口感和稳定的影响。首先通过对大豆酸奶进行外观观察、色度的测定来反映大豆酸奶的外观状态,其次通过测定大豆酸奶的 pH、WHC、低场核磁和粒度来探究大豆酸奶的稳定性,通过对大豆酸奶进行感官评价和质构测试,探究大豆酸奶的口感和质

地，最后通过激光共聚焦显微镜（CLSM）和冷冻电镜（Cryo-SEM）探究大豆酸奶的结构特征，以期为阴离子多糖的选择，改善植物基酸奶的稳定性和口感方面提供一定的理论参考。

2 材料与方法

2.1 实验材料与试剂

黄大豆	市售	中粮集团有限公司
发酵剂PLE-101	嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌	微康益生菌（苏州）股份有限公司
白砂糖	市售	安琪酵母股份有限公司
尼龙滤布	150目	太和县源阳滤布织造厂
取代度为0.7的羧甲基纤维素（CMC0.7）	分子量250 kDa 粘度1500-3100 mPas	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
取代度为1.2的羧甲基纤维素（CMC1.2）	分子量250 kDa 粘度1500-3100 mPas	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
罗丹明B	\	美国Sigma-Aldrich公司

2.2 实验仪器

豆浆机	L18-P161	九阳股份有限公司
胶体磨	JM-LB50	温州市豪龙胶体磨厂
冷冻离心机	H1850R	湖南湘仪实验室仪器公司
水浴恒温搅拌器	HSJ-6	武汉德力祥仪器设备有限公司
电子天平	ME204E	梅特勒-托利多仪器公司
pH计	FE20	梅特勒-托利多仪器公司
冰箱	BCD-249WDEGU1	青岛海尔股份有限公司
磁力搅拌器	B4-1A	上海司乐仪器有限公司
电热鼓风干燥箱	WGL-230B	天津市泰斯特仪器公司
色彩色差计	CR-400	柯尼卡美能达公司

激光粒度分布仪	Mastersizer 2000	英国Malvern公司
质构仪	TA.XT.plus	美国PERVICEL公司
低场核磁共振分析仪	MesoQMR23-060H	上海纽迈电子科技有限公司
激光共聚焦显微镜	FV3000	日本奥林巴斯公司
场发射扫描电子显微镜	SU8010	天美（中国）科学仪器有限公司

2.3 实验方法

2.3.1 大豆酸奶的制备

大豆酸奶的制备参考 Zhou 等人的方法并有适当修改(Zhou et al 2019)，步骤如下：

(1) 称量 100 g 无发霉虫眼的大豆，使用去离子水冲洗两遍，并以去离子水与干大豆的比例为 1:3 的比例在 4 °C 的冰箱中浸泡 12 小时。

(2) 将浸泡的水倒掉并使用去离子水清洗浸泡后的大豆 2 次，加水混合使总重量为 1000 g，之后使用豆浆机五谷浆模式进行打浆，打浆结束后使用胶体磨精磨 1h，精磨结束后使用 150 目的尼龙滤布过滤，去掉滤渣保留滤液。

(3) 加入 7% (w/w) 的白砂糖到滤液中，并将不同浓度 (0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9% 和 1.1% (w/w)) 的取代度为 0.7 的 CMC (CMC0.7) 和取代度为 1.2 的 CMC (CMC1.2) 分别添加到滤液中，不含 CMC 的过滤豆浆作为对照组。

(4) 将调配后的豆浆放置在 90 °C 的水浴中，保持 15 分钟，进行巴氏杀菌，结束后放置在冷水中冷却至室温。

(5) 选择商业豆酸奶发酵菌粉 PLE-101 (组成为嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌)，将发酵剂分散到无菌水中，制备成 10% 的菌悬液，接种量为 0.05% (w/w)。

(6) 将接种后的豆浆滤液在 42 °C 中发酵 10 h，结束后转入到 4 °C 的冰箱中后熟 12 h。

将不含 CMC 的大豆酸奶命名为 SY，添加不同浓度 (0.1%-1.1%) CMC0.7 大豆酸奶分别命名为 SY-0.7-0.1%、SY-0.7-0.3%、SY-0.7-0.5%、SY-0.7-0.7%、SY-0.7-0.9%、SY-0.7-1.1%，添加不同浓度 (0.1%-1.1%) CMC1.2 的大豆酸奶分别命名为 SY-1.2-0.1%、SY-1.2-0.3%、SY-1.2-0.5%、SY-1.2-0.7%、SY-1.2-0.9% 和 SY-1.2-1.1%。

2.3.2 大豆酸奶的 pH 测定

大豆酸奶后熟 12 h 后使用 pH 计测量大豆酸奶的 pH 值。

2.3.3 持水力的测定

将 20.00 g 接种后的豆浆置于 50 mL 的离心管中，在 42 °C 下发酵 10 h，之后转移到 4 °C 的冰箱中后熟 12 h。使用离心机离心（4000 g，15 min），离心完成后倒出上清液。WHC 通过公式（2-1）计算(Cortez-Trejo et al 2022)。

$$WHC(\%) = \frac{W - W_0}{W} * 100 \quad (2-1)$$

其中 W 表示接种后豆浆的质量（g），W₀ 表示上清液的质量（g）。

2.3.4 低场核磁分析

将装有 2.00 g 接种后豆浆的核磁共振管置于 42 °C 发酵 10 h，转移到 4 °C 冰箱中后熟 12 h 后上机测试。将核磁共振管插入低场核磁共振分析仪的核磁共振探头中，通过 CPMG 序列收集横向弛豫时间（T₂）信号。测量参数设置如下：90° 和 180° 脉宽分别为 20.00 μs 和 39.00 μs，采样起始点控制参数 RFD 为 0.08 ms，模拟增益 RG1 为 20.00 db，接收带宽 SW 设置为 200.00 kHz，数字增益 DRG1 设置为 3，采样时间间隔 TW 为 4000.00 ms，累加扫描次数 NS 为 8，回波个数 NECH 为 5000。测量结束后将获得的数据进行反演，得到 T₂ 弛豫曲线(Ge et al 2022)。

2.3.5 粒度测定

在测定前，每个样品用玻璃棒顺时针方向搅拌 10 圈，然后使用去离子水稀释至 50 倍，用磁力搅拌器搅拌 30-45 min。使用激光粒度仪测定大豆酸奶的粒度分布。样品和水的折射率分别设定为 1.50 和 1.33(Greis et al 2022)。

2.3.6 色度测定

大豆酸奶的色度选择色彩色差计测定，依照 CIE-L*a*b* 的颜色坐标系。L 值表示亮度，范围从黑色（0）到白色（100），a 值的范围为从绿色（-60）至红色（+60），b 值的范围为从蓝色（-60）至黄色（+60）(Navicha et al 2017)。

2.3.7 质构测试

大豆酸奶的质构测试选择单次下压的 yogurt 模式，下压距离为 5 mm。探头选择 P/0.5，触发力为 2 g，测试前速度为 2 mm/s，测试中和测试后速度为 1 mm/s。测定结束后，得到硬度，内聚性，稠度和粘度指数四个参数，硬度为单次下压后出现的最大值，内聚性为曲线最大负峰处对应的值，稠度为曲线的正峰面积，粘度指数为曲线的负峰面积(Yazici et al 1997)。

2.3.8 口感感官评价

样品的感官分析在华中农业大学食品科学与技术学院的感官实验室进行。该实验室符合国际感官实验室设计标准（ISO 8589:1988）。选择 20 名的参与者组成感官评价小组，其中包括 14 名女性和 6 名男性，年龄在 21-28 岁之间，参与者均为食品科学与技术学院的研究生。参与者的口腔健康状况良好，没有服用药物，对样本成分没有过敏。参与者接受了 5 次每次为期 2 h 的感官评估方法的培训，参与者被要求在评估前 30 min 除了喝水外的禁食。依据先前的研究(Aktar et alH S Joyner 2019, Ji et al 2023, Appelqvist et al 2015, Ross et al 2019)，选择了硬度、粘度、顺滑感、颗粒感、厚重感、糊口性六种感官属性，如表 2-1 所示。顺滑感指舌头在食团表面移动时所感受到的摩擦力；厚重感指吞咽前口腔加工过程中所感受到的舌头和上颚之间的距离；颗粒感指吞咽前口腔和吞咽后喉咙中颗粒的感觉；糊口性指吞咽后食团薄膜覆盖口腔的程度。经培训后的感官评价小组每次送入口腔中的样品量保持一致，每个样本之间使用纯净水漱口，在六个样本后休息 5 min，每次评估时间不超过 2 h(Appelqvist et al 2015)。

表 2-1 大豆酸奶感官评价的感官属性和描述

Table 2-1 Sensory attributes and descriptions used in sensory evaluation of soy yogurts

感官属性	描述	评分
硬度	硬度适中	16-20
	较硬或较软	11-15
	过硬或过软	0-10
粘度	粘度适中	16-20
	粘度不足或粘度较高	11-15

	粘度过低或粘度过高	0-10
	非常顺滑, 舌头搅拌感受到的摩擦力较小	16-20
顺滑感	较为顺滑, 舌头搅拌能感受到一定的摩擦力	11-15
	顺滑性不足, 舌头搅拌感受到的摩擦力较大	0-10
	厚重感强, 舌头和上颚之间的食团厚度大	16-20
厚重感	厚重感一般, 舌头和上颚之间的食团厚度较大	11-15
	口感稀薄, 舌头和上颚之间的食团厚度较薄	0-10
	口感细腻, 感受不到酸奶中的颗粒	16-20
颗粒感	细腻程度不足, 能轻微感受到酸奶中的颗粒	11-15
	口感粗糙, 酸奶中的颗粒感受明显	0-10
	糊口性好, 吞咽后能感受到在口腔表面有明显的食团膜	16-20
糊口性	糊口性一般, 吞咽后感受到在口腔表面的食团膜不明显	11-15
	糊口性差, 吞咽后无法感受到在口腔中形成的食团膜	0-10

2.3.9 激光共聚焦显微镜分析

使用激光共聚焦显微镜观察大豆酸奶中蛋白质的聚集状态。将 1 mL 接种后的豆浆与 10 μ L 罗丹明 B 的 0.2% (w/v) 水溶液均匀混合。将染色的豆浆装载在单凹槽显微镜载玻片上, 用盖玻片覆盖, 在 42 $^{\circ}$ C 下保持 10 h, 然后转移到 4 $^{\circ}$ C 下保持 12 小时。用 60 $\times$ 油浸物镜和 488 nm 的激发波长观察样品(Yang et al 2021)。

2.3.10 冷冻电镜分析

用低温扫描电子显微镜观察大豆酸奶的微结构。取酸奶的内部样品, 放置在样品浴中, 用-210 $^{\circ}$ C 的液氮冷冻, 然后在 0.01 pa, -75 $^{\circ}$ C 下处理 40 min, 使水完全升华。样品涂上金层, 在 3000 $\times$ 和 10000 $\times$ 倍数下进行观察(Zhang et al 2022)。

2.3.11 统计分析

用 IBM SPSS Statistics 26 软件 Duncan 检验进行实验数据的方差分析(ANOVA) ($p < 0.05$ 时为存在显著性差异), 使用 origin 2022 对样品的口感评分进行 PCA 分析, 另外所有的图均使用 origin 2022 绘制。除非特别声明, 否则所有样品均有 3 个平行。

3 结果与分析

3.1 CMC 对大豆酸奶的外观状态的影响

大豆酸奶的外观反映着产品的质量，并且是消费者选择产品所考虑的重要因素(Zare et al 2011)。图 2-1A 和 2-1B 展示了添加 CMC0.7 和 CMC1.2 分别在 0 到 1.1% 浓度范围的大豆酸奶的外观。如图 2-1A 所示，添加 CMC 浓度为 0.1% 的大豆酸奶的外观表现出严重的脱水收缩和相分离现象。然而，在浓度为 0.3% 至 1.1% 和 SY 的大豆酸奶中并没有观察到明显的相分离。如图 2-1B 所示，浓度为 0.1% 和 0.3% 的大豆酸奶的横截面相对粗糙，含有 0.3% 浓度 CMC 的大豆酸奶也显示出明显的相分离。随着 CMC 浓度的升高，大豆酸奶的横截面变得更加光滑，析水现象消失。随着 CMC 的浓度从 0% 升高到 1.1%，勺子中的大豆酸奶的边缘逐渐变圆，没有了明显的棱，具有了一定的流动性，而 SY 样品没有表现出这种现象。在 0.1% 和 0.3% 浓度下出现了明显的析水现象的原因可能是 CMC 的加入导致体系中的大豆蛋白在酸性条件下因为静电相互作用而聚集，挤出了分子之间的水分(Yang et al 2021, Wusigale et al 2020, Turgeon et al 2007, de Kruif et al 2004)。随着 CMC 浓度的从 0.5% 升高到 1.1%，没有和蛋白质结合的 CMC 在溶液中形成了环和游离的尾部，可能通过空间排斥作用增强了大豆酸奶的稳定性(Guo et al 2021)。此外，未结合的 CMC 也增加了连续相的粘度，使得大豆酸奶的稳定性提高(Wu et al 2014)。在浓度为 0.9% 和 1.1% 浓度的大豆酸奶中，含有 CMC1.2 的大豆酸奶在勺中表现出了比含有 CMC0.7 的大豆酸奶更明显的边缘，表明添加 CMC0.7 的大豆酸奶在 0.9% 和 1.1% 时，具有比添加 CMC1.2 的大豆酸奶更好的流动性。

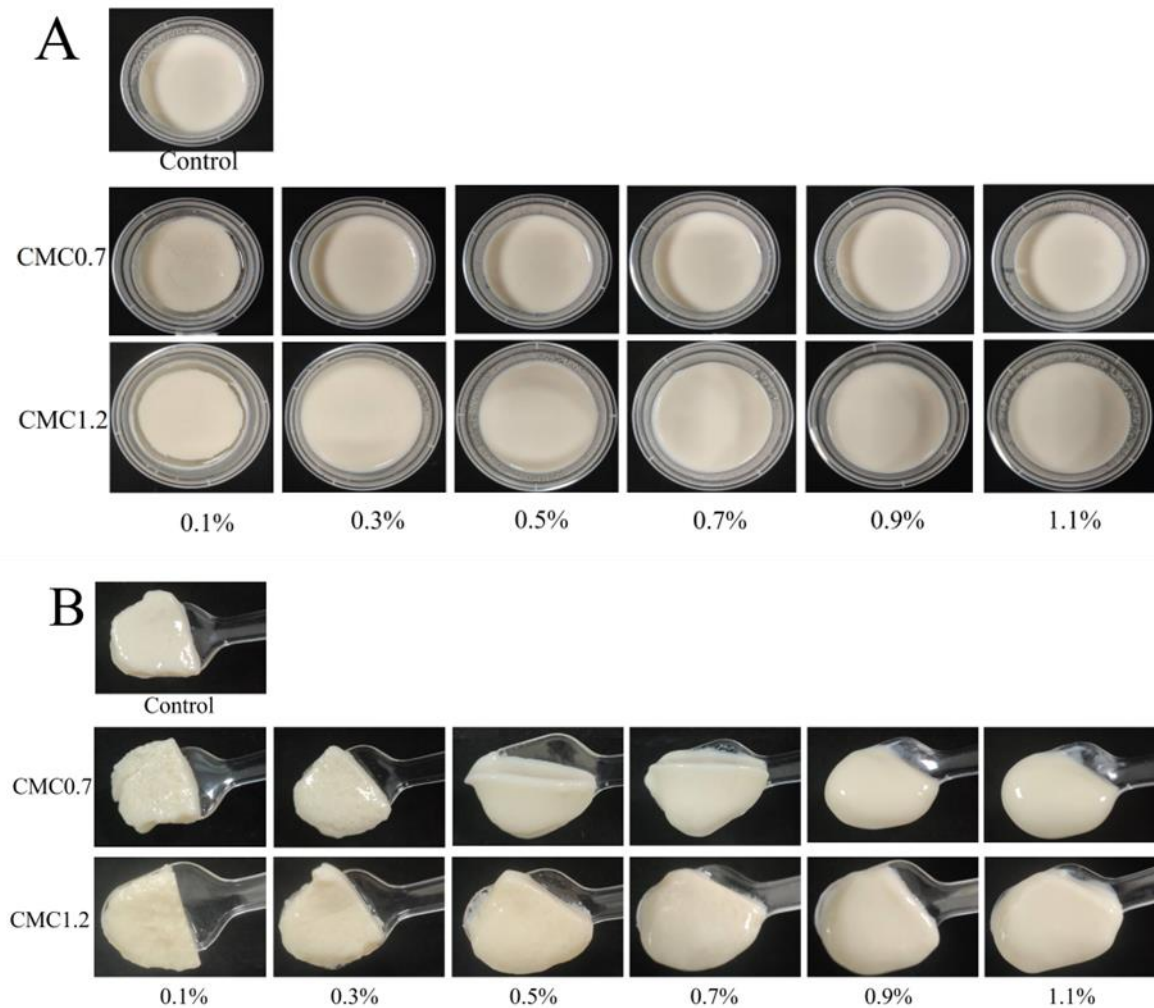


图 2-1 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在酸奶杯 (A) 和勺子 (B) 上的状态

Fig. 2-1 Appearance of soy yogurts in the box (A), and soy yogurts on the spoon (B) with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

3.2 CMC 对大豆酸奶色度的影响

大豆酸奶的外观，颜色是影响消费者选择商品的重要因素(Dai et al 2016)。L*值反映的是样品的白度，白色为 100，黑色为 0(Zare et al 2011)。如表 2-2 所示，SY 的 L*值最高，表明相比于添加 CMC 的大豆酸奶，没有添加 CMC 的大豆酸奶最白。然而，在浓度为 0.1%-0.5%时，添加 CMC 的大豆酸奶的白度显著低于 SY。但随着大豆酸奶中 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%，大豆酸奶的白度也具有一定程度的升高，当 CMC 的浓度升高到 0.7%及以上时，含有 CMC 的大豆酸奶与 SY 在白度上无显著性差异。添加 CMC 的大豆酸奶的 b*值均显著高于对照组，表明，添加 CMC 的大豆酸奶的颜色相对于 SY 会有更明显的黄色(Sanz et al 2008)。原因可能是在巴氏

杀菌时,加入的 CMC 参加了美拉德反应,生成了棕色的物质,使得黄度升高(Dai et al 2016)。相似的现象在添加木薯淀粉的椰子酸奶类似物中也被发现(Pachekrepapol et al 2021)。另外含有 CMC 的大豆酸奶在 0.1%浓度时的 b^* 值最高,原因可能是 0.1%浓度的大豆酸奶的脱水收缩,使得大豆酸奶中的固形物更加集中,从而有了更深的黄色。

表 2-2 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的颜色特征

Table 2-2 Color characteristics of soy yogurts containing different concentrations of CMC 0.7 and CMC 1.2

	Sample	L	a*	b*
Control	SY	87.113±0.255 ^{aA}	-0.715±0.034 ^{dC}	11.320±0.026 ^{fE}
	SY-0.7-0.1%	84.511±0.152 ^{dy}	-0.570±0.072 ^{cy}	14.220±0.119 ^{ax}
	SY-0.7-0.3%	85.834±0.917 ^{bcx}	-0.464±0.117 ^{bx}	13.388±0.185 ^{cx}
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	85.232±0.52 ^{cdy}	-0.389±0.041 ^{bx}	12.751±0.197 ^{dx}
	SY-0.7-0.7%	86.386±0.366 ^{abx}	-0.440±0.021 ^{bx}	12.797±0.084 ^{dy}
	SY-0.7-0.9%	86.374±0.164 ^{abx}	-0.193±0.011 ^{ax}	12.296±0.034 ^{ey}
	SY-0.7-1.1%	86.559±0.274 ^{abx}	-0.397±0.019 ^{bx}	13.729±0.074 ^{bx}
	SY-1.2-0.1%	85.396±0.072 ^{Cx}	-0.176±0.025 ^{Ax}	14.145±0.049 ^{Ax}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	86.172±0.61 ^{Bx}	-0.916±0.021 ^{Dy}	12.343±0.251 ^{CDy}
	SY-1.2-0.5%	86.170±0.597 ^{Bx}	-0.736±0.067 ^{Cy}	11.866±0.773 ^{DEy}
	SY-1.2-0.7%	86.398±0.379 ^{ABx}	-0.889±0.016 ^{Dy}	13.937±0.201 ^{Ax}
	SY-1.2-0.9%	86.497±0.344 ^{ABx}	-0.393±0.019 ^{By}	12.741±0.115 ^{BCx}
	SY-1.2-1.1%	86.488±0.315 ^{ABx}	-0.384±0.073 ^{Bx}	13.130±0.286 ^{By}

注:不同的标记(x和y)表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异($p < 0.05$)。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.3 CMC 对大豆酸奶 pH 值的影响

酸奶的 pH 值是一个重要的质量指标,对酸奶的质地和储藏有重要的影响(Benmeziane et al 2021)。如图 2-2 所示,添加 CMC 的大豆酸奶的 pH 值显著高于 SY。随着 CMC1.2 的浓度从 0.3%增加到 1.1%,添加 CMC1.2 的大豆酸奶 pH 值也显著增加,但在添加 CMC0.7 的酸奶中没有观察到这种趋势。Coutinho 等人也发现了类似

的结果,巴鲁杏仁发酵产品中的 pH 值也随着青香蕉淀粉浓度的增加而升高(Coutinho et al 2021)。除 0.1% 的浓度外,在相同浓度下,添加 CMC1.2 的大豆酸奶的 pH 值显著高于添加 CMC0.7 的大豆酸奶。这种差异可能是因为 CMC1.2 比 CMC0.7 携带有更多的羧酸根,可以结合更多的 H^+ ,降低了体系中 H^+ 的含量,从而使得含有 CMC1.2 的大豆酸奶具有更高的 pH 值。

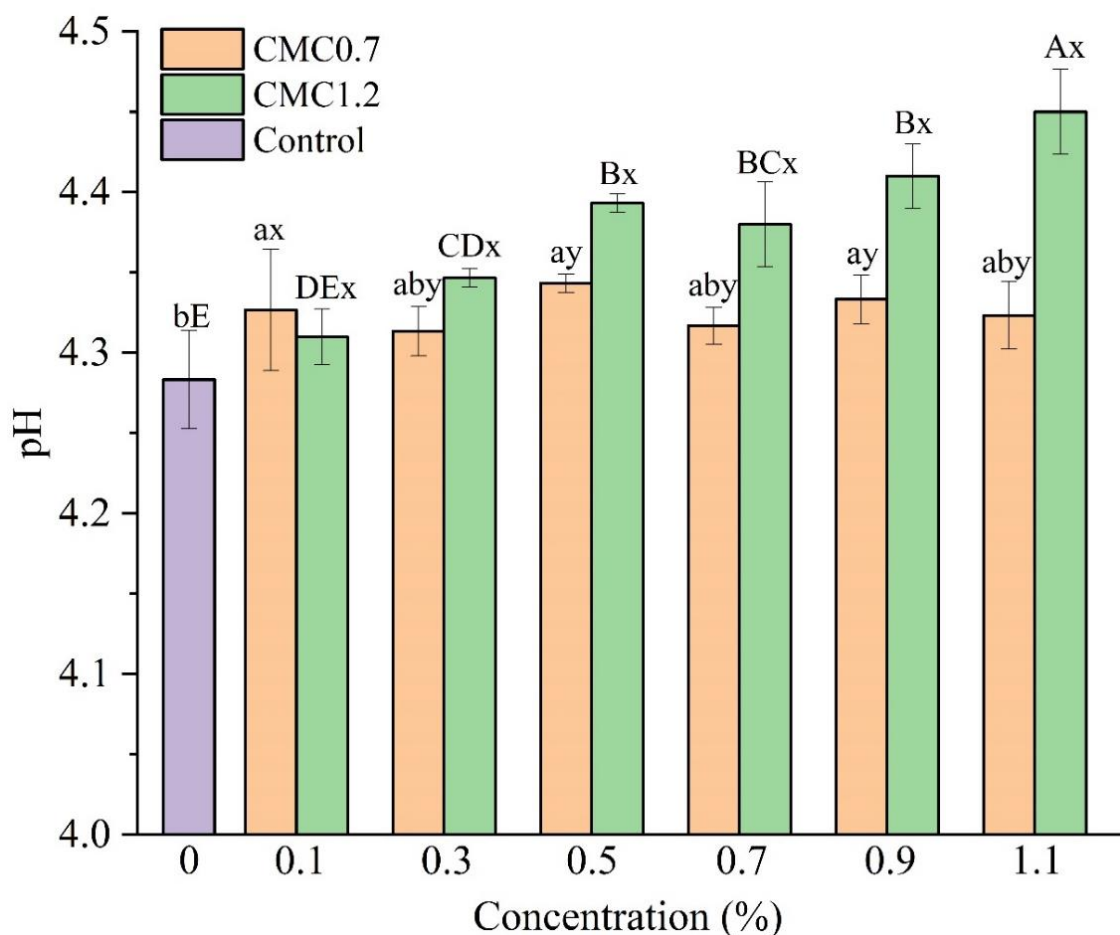


图 2-2 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的 pH 值。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 2-2 The pH of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.4 CMC 对大豆酸奶持水力的影响

持水力 (WHC) 是评估酸奶产品稳定性的关键指标(Cortez-Trejo et al 2022)。为了探究含有不同浓度的 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的稳定性, 测量了大豆酸奶的 WHC, 如图 2-3 所示。当 CMC 浓度从 0% 增加到 1.1% 时, 大豆酸奶的 WHC 表现出先下降再升高的趋势, SY-0.7-1.1% 表现出了最高的 WHC。添加 CMC0.7 的大豆酸奶在 0.1% 和 0.3% 浓度下的 WHC 显著低于 SY。然而, CMC0.7 的大豆酸奶在 0.5%-1.1% 浓度范围内的 WHC 分别为 86.95%、94.94%、98.10% 和 99.60%, 显著高于 SY 的 WHC。在 0.1% 和 0.3% 的浓度下, CMC0.7 的加入可能破坏了大豆酸奶原有的蛋白质结构, 降低了其在离心过程中保持水分的能力, 而当 CMC0.7 的浓度超过 0.5% 时, 大豆酸奶可能又形成了新的蛋白质凝胶网络结构(Guo et al 2021)。此外, 随着 CMC0.7 的浓度进一步增加, 大豆酸奶 WHC 的增加可能归因于 CMC0.7 中的亲水基团与水分子之间的相互作用, 可以束缚更多的水分子(Yan et al 2021, Wang et al 2020, Xiao et al 2020)。然而, 与添加 CMC0.7 的大豆酸奶相反的是, 添加 CMC1.2 的大豆酸奶, 除浓度为 1.1% 外, 其余浓度的 WHC 均显著低于 SY, 因此, CMC1.2 的添加对大豆酸奶的稳定性具有不利的影响。在 0.9% 和 1.1% 的浓度下, 因为 CMC1.2 的增稠作用也有助于大豆酸奶 WHC 的提高。此外, 在相同浓度下, 除 0.1% 和 0.3% 外, 添加 CMC1.2 的大豆酸奶的 WHC 均显著低于添加 CMC0.7 的大豆酸奶。原因可能是 CMC1.2 具有较高的取代度, 从而有更高的电荷密度, 增强了其与蛋白质的结合能力, 这种结合导致出现紧密的蛋白质和多糖复合物, 从而使得含有 CMC1.2 的大豆酸奶出现了局部的脱水(Turgeon et al 2007, Yang et al 2021)。相反, CMC0.7 则有较少的蛋白质结合位点, 因此大量的没有和蛋白质结合的多糖链可以与水分子进行溶剂相互作用, 增强了大豆酸奶在离心过程中的稳定性(Pereyra et al 1997)。另外, 在果胶和酪蛋白的体系中也出现了与本研究类似的结果, 具有较高酯化度或酰胺化度的果胶则带有较低的电荷密度和更好的稳定酪蛋白分散体系的能力(Liu et al 2006, Maroziene and de Kruif 2000)。Maroziene 等人研究发现高甲氧基果胶 (73% 甲基化果胶) 对酪蛋白胶束的稳定能力最高, 其次是酰胺化低甲氧基果胶 (35% 甲基化-20% 酰胺化果胶), 最低的是低甲氧基果胶 (35% 甲基化果胶)(Maroziene and de Kruif 2000)。Liu 等人发现酯化度低于 63.9% 的果胶需要更高的浓度来稳定酪蛋白分散体系, 而酯化度低于 50% 的果胶则无法稳定分散体系(Liu et al 2006)。

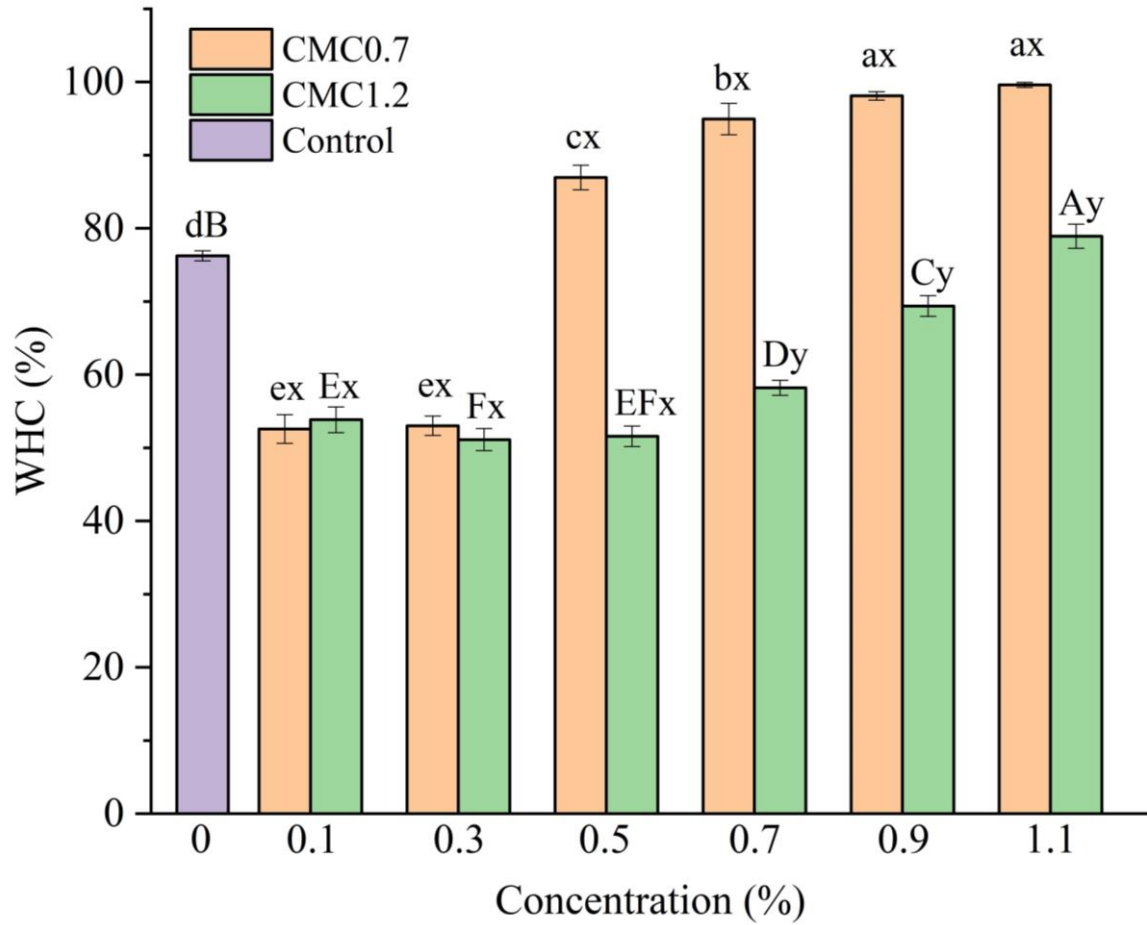


图 2-3 不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的 WHC。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 2-3 WHC of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.5 CMC 对大豆酸奶的储藏稳定性的影响

图 2-4 展示了添加 CMC0.7 和 CMC1.2 在 0.5%-1.1%浓度下的大豆酸奶和 SY 在 28 d 时间内 WHC 和 pH 的变化。如图 2-4A 和 2-4B 所示, 所有样品的 WHC 均展现了逐渐降低的趋势, 但下降幅度较低, 表明大豆酸奶在储藏的 28 d 时间内的稳定性变化不大(Cortez-Trejo et al 2022)。相似的现象也发现在发酵燕麦酸奶中, 随着储藏

时间的延长, 燕麦酸奶的脱水率逐渐升高, 表明其稳定性在储藏过程中也具有下降的趋势(Demir et al 2021)。另外, 在乳酸菌发酵藜麦饮料中的部分样品也出现了相似的结果(Lorusso et al 2018)。然而, Ahmed 等人发现添加阿格尔叶提取物的牛乳酸奶, 在储藏过程中稳定性出现了先升高后降低的现象(Ahmed et al 2021)。原因可能是提取物中的多酚, 改变了酸奶中蛋白质的结构, 促进了蛋白质之间的结合, 提高了截留水分子的能力(Kwon et al 2019)。此外, 在相同浓度下, 添加 CMC0.7 的大豆酸奶的 WHC 均高于添加 CMC1.2 的大豆酸奶, 因此 CMC0.7 具有比 CMC1.2 对大豆酸奶有更好的稳定作用。其中 SY-0.7-0.9%和 SY-0.7-1.1%的 WHC 在 0-28 d 内的 WHC 均相对较高, 其次为 SY-0.7-0.7%, 在 4 °C 存放 28 d 后的 WHC 分别为 95.16%, 96.21% 和 91.18%, 而 SY 在 4 °C 存放 28 d 后的 WHC 为 71.73%。因此, 添加 CMC0.7 在 0.7%-1.1% 的浓度范围可以有效提高大豆酸奶的稳定性。

在储藏期间大豆酸奶的 pH 值变化如图 2-4C 和 2-4D 所示, 所有大豆酸奶的 pH 均展示了逐渐降低的趋势, 原因是在储藏过程中, 大豆酸奶中的乳酸菌还在进行缓慢的发酵, 产生乳酸, 使得 pH 降低, 这一过程也被称作为后酸化(Altemimi 2018)。后酸化被认为是酸奶产品中的不良现象, 因为后酸化会缩短酸奶的保质期, 出现沉淀(Deshwal et al 2021)。pH 在约 14 天后 pH 的下降速度降低, 在添加菊粉的大豆酸奶和使用乳酸菌发酵的藜麦饮料中也出现了相似的趋势(Rinaldoni et al 2012, Lorusso et al 2018)。另外 CMC 的加入并没有改变大豆酸奶的 pH 在储藏过程中的变化趋势。Dai 等人在添加魔芋葡甘聚糖的脱脂牛乳酸奶中的体系中也发现在储藏的 21 天中所有样品的 pH 值均呈现下降的趋势(Dai et al 2016), 同样在添加木薯淀粉的椰奶酸奶类似物中也发现相似的结论(Pachekrepapol et al 2021)。

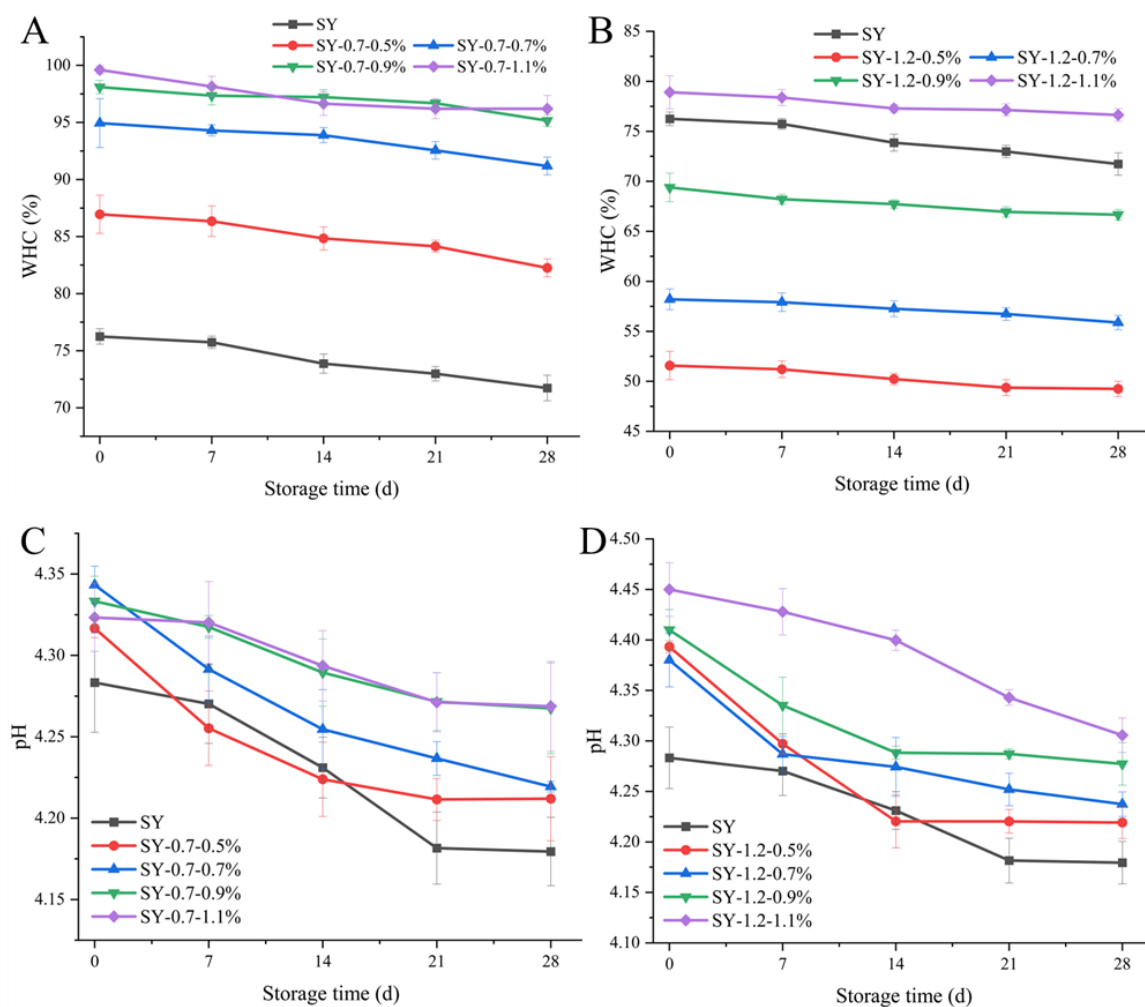


图 2-4 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在贮藏 0-28 天时间内持水力 (A 和 B) 和 pH (C 和 D) 的变化

Fig. 2-4 Changes in water holding capacity (A and B) and pH (C and D) of soy yogurt containing different concentrations of CMC during storage for 0-28 days

3.6 CMC 对大豆酸奶中水分分布的影响

T_2 弛豫曲线中出现的峰位置和峰面积分别代表样品中水分的活度和相对应的含量(Khanal et al 2018)。在弛豫时间中, T_{21} 的范围为 1-10 ms 表示大豆酸奶中的结合水峰位置, T_{22} 的范围为 10-200 ms 表示大豆酸奶中的半结合水或毛细管水峰的位置, T_{23} 的范围为在 200 ms 以上表示大豆酸奶中存在的游离水峰位置(Gilbert et al 2020, Dekkers et al 2016)。如图 2-5 所示, 大豆酸奶的 T_2 弛豫曲线均出现了三个峰, 且第二个峰面积最大, 这在乳酸菌发酵诱导的大豆蛋白凝胶中也出现了相似的现象(Yang et al 2022)。如表 2-3 和 2-4 所示, 在同一种多糖下, 随着多糖的浓度从 0.1% 升高到 1.1%, T_{21} 的值逐渐升高, 表明大豆酸奶中结合水的结合能力逐渐降低(Zhang et al

2021)。在相同的浓度下，除 0.9% 的浓度外，其余浓度中添加不同电荷密度 CMC 的大豆酸奶之间并没有显著性差异。随着 CMC 的浓度从 0.1% 升高到 1.1%， A_{21} 有升高的趋势，表明 CMC 的添加提高了大豆酸奶中结合水的比例。然而，随着 CMC 的浓度从 0.1% 升高到 1.1%， A_{23} 展现了逐渐下降的趋势，表明随着多糖浓度的升高，大豆酸奶中的游离水含量逐渐下降，原因可能是在凝胶体系中有更多的位点可以和水分子结合或在凝胶结构中有了更强的束缚水的能力(Yang et al 2022)。浓度为 0.1% 的大豆酸奶的 A_{23} 显著高于其它浓度的大豆酸奶，表明浓度为 0.1% 的大豆酸奶具有较高含量的游离水，原因可能是这个浓度下的大豆酸奶出现了严重的脱水收缩，析出大量的游离水。SY-1.2-0.1% 的 A_{23} 显著高于 SY-0.7-0.1%，表明在 0.1% 浓度下添加 CMC1.2 的大豆酸奶的脱水收缩的程度比添加 CMC0.7 的大豆酸奶更大。此外，在添加同种 CMC 的样品中，0.1% 浓度大豆酸奶的 T_{22} 和 A_{22} ，均显著低于其它浓度的大豆酸奶。而浓度为 0.1% 的大豆酸奶的 T_{22} 较低的原因可能是，相对于其它浓度的大豆酸奶，它有着更低含量的半结合水，而存在的较低含量的半结合水可以更大程度的和凝胶网络中的亲水基团结合或被截留在凝胶网络中，从而使得 T_{22} 的值更低。

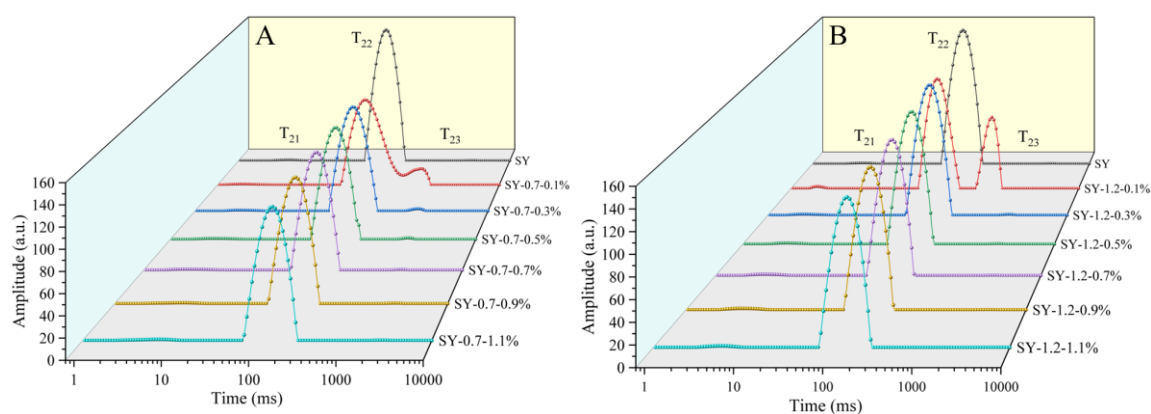


图 2-5 添加不同浓度 CMC0.7 (A) 和 CMC1.2 (B) 大豆酸奶的横向弛豫时间曲线

Fig. 2-5 Lateral relaxation time curves of soy yogurt with different concentrations of CMC0.7 (A) and CMC1.2 (B)

表 2-3 添加不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的横向弛豫时间

Table 2-3 Lateral relaxation time of soy yogurt with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

	Sample	T ₂₁ (ms)	T ₂₂ (ms)	T ₂₃ (ms)
Control	SY	4.51±0.31 ^{bcAB}	135.1±2.01 ^{aA}	2842.95±205.82 ^{aBC}
	SY-0.7-0.1%	2.16±0.92 ^{ex}	107.25±4.25 ^{bx}	653.15±53.51 ^{dx}
	SY-0.7-0.3%	2.98±0.35 ^{dex}	130.39±4.54 ^{ax}	1086.11±75.36 ^{dy}
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	3.23±0.27 ^{dex}	131.67±3.71 ^{ax}	1653.67±207.93 ^{cx}
	SY-0.7-0.7%	3.53±0.71 ^{cdx}	134.77±3.51 ^{ax}	2162.07±454.21 ^{bcx}
	SY-0.7-0.9%	4.92±1.05 ^{abx}	134.24±3.77 ^{ax}	2279±348.88 ^{by}
	SY-0.7-1.1%	5.83±0.61 ^{ax}	134.43±2.08 ^{ax}	2351.02±410.04 ^{aby}
	SY-1.2-0.1%	2.45±1.05 ^{Cx}	97.77±3.96 ^{By}	589.52±10.15 ^{Dx}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	2.95±0.49 ^{Cx}	134.77±4.62 ^{Ax}	2133.47±646.17 ^{Cx}
	SY-1.2-0.5%	3.01±0.34 ^{Cx}	133.35±3.73 ^{Ax}	2309.33±295.52 ^{Cx}
	SY-1.2-0.7%	3.09±0.28 ^{Cx}	133.43±1.53 ^{Ax}	2778.68±492.19 ^{BCx}
	SY-1.2-0.9%	3.59±0.51 ^{BCy}	135.51±1.26 ^{Ax}	3547.56±566.03 ^{Bx}
	SY-1.2-1.1%	5.34±0.89 ^{Ax}	135.43±0.58 ^{Ax}	5411.4±616.73 ^{Ax}

注：不同的标记（x 和 y）表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

表 2-4 含不同浓度的 CMC0.7 和 CMC1.2 大豆酸奶归一化后的峰面积

Table 2-4 Normalized peak areas of soy yogurts made with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2

	Sample	A ₂₁ (%)	A ₂₂ (%)	A ₂₃ (%)
Control	SY	0.49±0.10 ^{bB}	99.44±0.11 ^{aA}	0.07±0.01 ^{bB}
	SY-0.7-0.1%	0.52±0.14 ^{bx}	87.88±2.07 ^{bx}	10.56±3.01 ^{ay}
	SY-0.7-0.3%	0.75±0.13 ^{ax}	98.56±0.12 ^{ax}	0.69±0.17 ^{bx}
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	0.77±0.12 ^{ax}	98.83±0.11 ^{ax}	0.39±0.13 ^{bx}
	SY-0.7-0.7%	0.88±0.10 ^{ax}	99.01±0.15 ^{ax}	0.1±0.07 ^{bx}
	SY-0.7-0.9%	0.91±0.03 ^{ax}	99.07±0.02 ^{ax}	0.09±0.05 ^{bx}
	SY-0.7-1.1%	0.93±0.03 ^{ax}	98.98±0.03 ^{ax}	0.09±0.01 ^{bx}
	SY-1.2-0.1%	0.85±0.17 ^{ABx}	70.99±1.55 ^{By}	28.16±1.60 ^{Ax}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	0.62±0.23 ^{Bx}	99.21±0.31 ^{Ax}	0.17±0.08 ^{Bx}
	SY-1.2-0.5%	0.87±0.18 ^{ABx}	98.98±0.12 ^{Ax}	0.15±0.08 ^{Bx}

SY-1.2-0.7%	0.93±0.12 ^{ABx}	99.01±0.12 ^{Ax}	0.06±0.01 ^{Bx}
SY-1.2-0.9%	0.96±0.22 ^{ABx}	98.99±0.16 ^{Ax}	0.05±0.01 ^{Bx}
SY-1.2-1.1%	1.22±0.48 ^{Ax}	98.74±0.48 ^{Ax}	0.03±0.00 ^{Bx}

注：不同的标记（x 和 y）表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.7 CMC 对大豆酸奶中颗粒粒度的影响

酸奶中颗粒的粒径与酸奶的稳定性和口感密切相关(Sonne et al 2014, Greis et al 2022)。D[4,3]为体积加权平均粒径，如图 2-6A 所示。随着 CMC 的浓度从 0.1%增加到 1.1%，大豆酸奶的 D[4,3]出现了先升高后降低的趋势。在 CMC 的浓度为 0.1%-0.5%的范围内，添加 CMC 的大豆酸奶的 D[4,3]显著大于 SY。然而，当 CMC 浓度升高到 0.7%-1.1%时，大豆酸奶的 D[4,3]显著小于 SY。SY-0.7-0.7%的 D[4,3]为 50.72 μm ，SY 为 70.31 μm ，在大豆酸奶中添加浓度为 0.7%的 CMC0.7 有效降低了大豆酸奶的粒度，同时在口感感官评价中的颗粒感得分也得到了显著的增高。原因可能是，在 0.1%和 0.3%浓度的静电力作用下，CMC 周围聚集了更多的蛋白质聚集体，导致颗粒聚集程度增加。然而，随着 CMC 浓度的增加，CMC 的阴离子基团产生的静电排斥抑制了蛋白质之间的聚集，导致聚合物的粒径减小(Carpentier et al 2021, Zhao et al 2019)。粒度分布从小到大中的 90%处的直径为 $d(0.9)$ ，被用来反映分散体系中的大颗粒尺寸(Krzeminski et al 2011)。如图 2-6B 所示，在同一种多糖中，随着 CMC 的浓度从 0%升高到 1.1%， $d(0.9)$ 展现了先升高后降低的趋势，且当 CMC 的浓度升高到 0.5%-1.1%时， $d(0.9)$ 的值显著低于 SY，这和 D[4,3]的趋势相似。另外，在 0.1%-0.3%的浓度时，添加 CMC1.2 的大豆酸奶的 $d(0.9)$ 显著高于添加 CMC0.7 的大豆酸奶，在 0.7%-0.9%的浓度时，这一关系出现了逆转，当 CMC 的浓度升高到 1.1%时，添加 CMC0.7 和添加 CMC1.2 的大豆酸奶之间没有显著性的差异。大豆酸奶的粒度分布如图 2-7 所示，在添加的同一种多糖下，CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%，大豆酸奶的粒度分布曲线逐渐向左偏移，表明颗粒直径总体上逐渐变小。另外，随着 CMC 浓度的升高，大豆酸奶的粒度分布逐渐从一个峰变成了两个峰。CMC 浓度为 0%-0.5%的大豆酸奶在粒度分布图中均只出现了一个峰。而随着 CMC 浓度

的升高, SY-1.2-0.7%依旧只有一个峰, 而 SY-0.7-0.7%则有了一个较宽的峰, 然而随着 CMC 的浓度升高到 0.9%-1.1%时, 添加 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶均出现了两个峰。Liu 等人也发现, 在酸化乳饮料中, 添加低浓度的果胶和瓜尔豆胶混合增稠剂为 1 个峰, 而高浓度时会出现两个峰(Liu et al 2020)。综上所述, 添加 CMC 在 0.7%-1.1%的浓度时, 可以有效地降低大豆酸奶的颗粒尺寸。

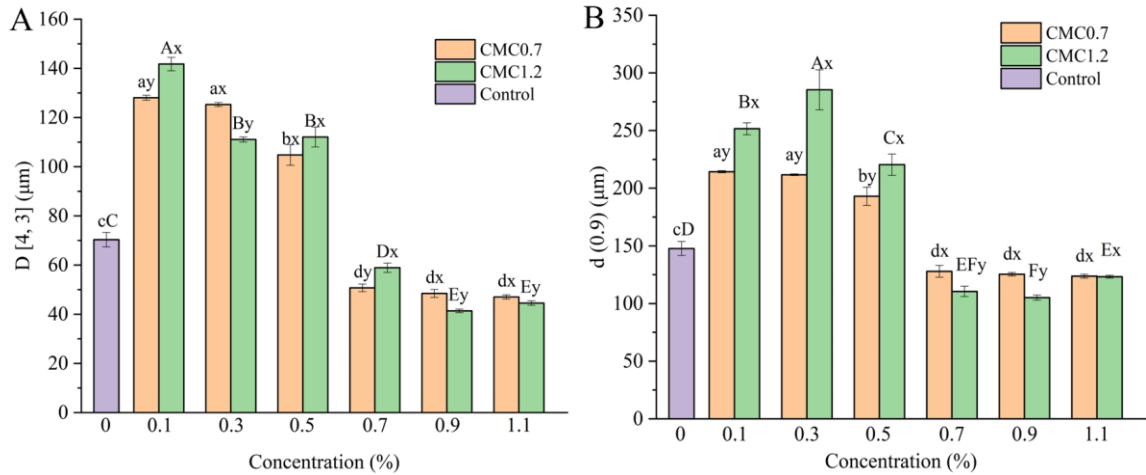


图 2-6 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的 D[4, 3] (A) 和 d (0.9) (B)。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 2-6 The D [4,3] (A) and d (0.9) (B) of soy yogurt with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

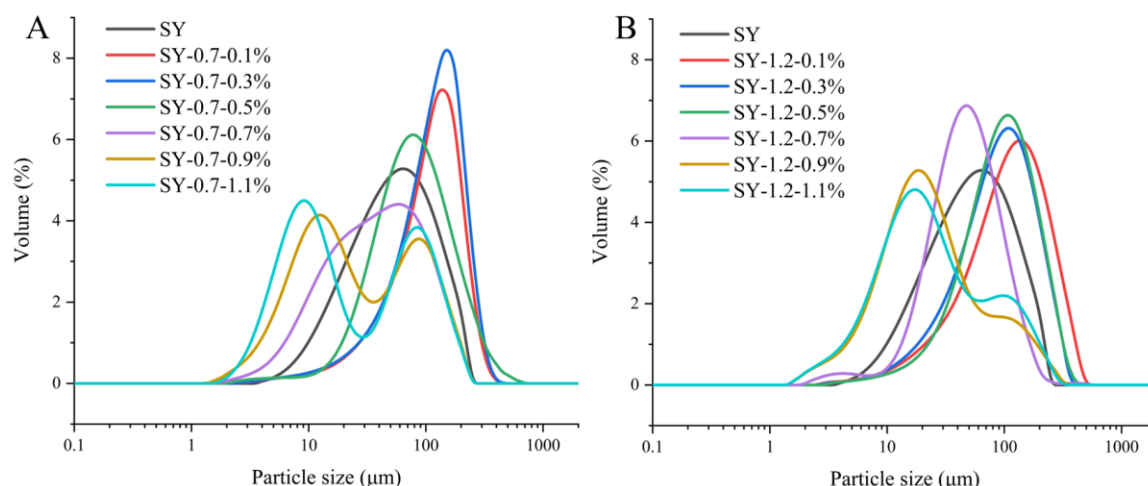


图 2-7 含有不同浓度 CMC0.7 (A) 和 CMC1.2 (B) 的大豆酸奶的粒度分布图

Fig. 2-6 Particle size distribution of soy yogurt containing different concentrations of CMC0.7 (A) and CMC1.2 (B)

3.8 CMC 对大豆酸奶质构特性的影响

大豆酸奶的质构测定是用来反映酸奶的凝胶特性和质量的一种重要表征方法 (Guo et al 2022), 大豆酸奶质构测试的结果如表 2-5 所示。随着 CMC 的浓度从 0% 升高到 1.1%, 大豆酸奶的硬度出现先升高再逐渐降低的趋势。CMC 浓度为 0.1% 的大豆酸奶的硬度最高, 原因可能是大豆酸奶的脱水收缩, 提高了固形物的局部含量, 从而增加了大豆酸奶的硬度。当 CMC 的浓度升高到 0.3% 时, 虽然没有出现明显的脱水收缩, 但加入的 CMC 促进了蛋白质颗粒之间的聚集, 形成了更大更为紧密的蛋白质聚集体, 从而使得含有 0.3% 浓度 CMC 的大豆酸奶的硬度也显著高于 SY。随着 CMC 浓度的进一步升高, 加入到大豆酸奶中的 CMC 可能与蛋白质竞争性结合, 使得蛋白质分子之间相互作用力减弱, 促进蛋白质和 CMC 之间的静电结合, 改变了原有的凝胶结构, 从而使得大豆酸奶的硬度降低。Li 等人也发现随着海藻多糖浓度的升高, 通过葡萄糖酸内酯酸化诱导的海藻多糖酪蛋白凝胶的硬度也表现出了先升高后降低的趋势 (Li et al 2021)。与添加 CMC0.7 的大豆酸奶相比, 添加 CMC1.2 的大豆酸奶的硬度更高, 原因可能是添加有更高电荷密度的 CMC1.2 和蛋白质之间具有更强的静电作用力, 从而可以形成更紧实的蛋白质聚集体, 提高了大豆酸奶的硬度 (Xiong et al 2017)。大豆酸奶的内聚性所反映的是凝胶网络结构中内部的作用力的大小, 分子间结合作用的强弱。在同一种多糖下, 随着 CMC 的浓度从 0.1% 升高到 1.1%, 含有 CMC 的大豆酸奶的内聚性展现了先升高后降低再升高的趋势。同样,

在添加甘草多糖的牛乳酸奶中也观察到其内聚性随着多糖浓度的升高出现了先升高后降低的趋势(Guo et al 2022)。出现这种现象的原因可能是,在初始加入的少量 CMC 时,因为静电相互作用,使得大量的蛋白质都被聚集到了多糖分子的周围,而蛋白质之间相互作用的位点减少。而随着 CMC 浓度的进一步升高,大豆酸奶的内聚性出现了升高的现象,原因可能是加入的 CMC 和蛋白质之间形成了新的凝胶网络结构,且影响大豆酸奶内聚性的主要作用力可能变为蛋白多糖之间的作用力(Li et al 2021)。然而随着多糖浓度的进一步升高,出现了大量的没有和蛋白质结合的 CMC,这时大豆酸奶的内聚性可能主要是由体系中多糖分子之间的作用力影响,大量的 CMC 所展现的增稠作用使得大豆酸奶的内聚性又有了一定程度的升高(Guo et al 2021)。因此大豆酸奶中的硬度和内聚性的改变,可能是因为大豆酸奶中蛋白质的凝胶网络结构改变(Lee and Lucey 2010)。质构参数中的稠度所反映的是大豆酸奶的流动性,稠度的值和流动性成反比。在同一种多糖下,随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%,大豆酸奶的稠度表现出了逐渐降低的趋势,并且添加 CMC1.2 的大豆酸奶的稠度值均显著大于添加 CMC0.7 的大豆酸奶。因此,随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%,大豆酸奶逐渐表现出了一定的流动性,同时添加 CMC0.7 的大豆酸奶比添加 CMC1.2 的酸奶展现出了更好的流动性,这和用勺子挖出的酸奶所表现出的现象一致。原因可能是不同电荷密度的 CMC 的加入产生了不同的凝胶网络结构(Li et al 2022)。粘性指数所反映的是大豆酸奶对质构仪探头的粘附程度,与口腔粘附性、糊口性有一定关系(Pereyra et al 1997)。随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%,大豆酸奶的粘性指数表现出了逐渐升高的趋势,表明含有更高 CMC 浓度的大豆酸奶对质构仪探头具有更高的粘附性,从而可能会有更强的口腔粘附性或糊口性(Pereyra et al 1997)。因此 CMC 的加入可以有效调节大豆酸奶的凝胶特性。

表 2-5 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 大豆酸奶的质构分析

Table 2-5 Texture analysis of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

	Sample	Firmness (g)	Cohesiveness (g)	Consistence (g-s)	Index of viscosity (g-s)
Control	SY	26.527±0.446 ^{cC}	4.436±0.432 ^{bA}	117.427±1.804 ^{cC}	11.592±0.411 ^{dC}
	SY-0.7-0.1%	58.925±2.267 ^{ay}	1.078±0.025 ^{fy}	223.396±7.997 ^{ay}	2.692±0.071 ^{fx}
	SY-0.7-0.3%	30.463±1.024 ^{by}	5.342±0.121 ^{ax}	130.467±3.023 ^{by}	4.274±1.615 ^{fx}
	SY-0.7-0.5%	20.470±0.395 ^{dy}	3.378±0.008 ^{ex}	91.876±1.717 ^{dy}	6.266±0.992 ^{ex}
	SY-0.7-0.7%	14.604±0.142 ^{ex}	3.090±0.03 ^{ex}	67.753±0.375 ^{ey}	18.307±1.012 ^{ex}

CMC1.2	SY-0.7-0.9%	8.317±0.086 ^{fy}	2.542±0.066 ^{ey}	43.087±0.418 ^{fy}	20.608±0.373 ^{bx}
	SY-0.7-1.1%	7.606±0.097 ^{fy}	2.772±0.034 ^{dey}	38.915±0.294 ^{fy}	23.544±0.357 ^{ax}
	SY-1.2-0.1%	102.379±2.485 ^{Ax}	1.872±0.855 ^{Cx}	389.941±18.326 ^{Ax}	3.581±1.767 ^{Ex}
	SY-1.2-0.3%	50.853±1.087 ^{Bx}	1.851±0.314 ^{Cy}	202.963±3.507 ^{Bx}	3.217±0.130 ^{Ex}
	SY-1.2-0.5%	28.176±0.744 ^{Cx}	3.051±0.265 ^{Bx}	119.470±2.525 ^{Cx}	6.967±0.422 ^{Dx}
	SY-1.2-0.7%	15.777±0.838 ^{Dx}	2.976±0.119 ^{Bx}	75.145±3.235 ^{Dx}	19.564±0.396 ^{Bx}
	SY-1.2-0.9%	15.026±0.818 ^{DEx}	2.884±0.134 ^{Bx}	68.328±2.238 ^{Dx}	18.838±1.417 ^{By}
	SY-1.2-1.1%	13.214±0.561 ^{Ex}	2.971±0.111 ^{Bx}	63.806±1.937 ^{Dx}	23.555±0.267 ^{Ax}

注：不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.9 CMC 对大豆酸奶口感的调控作用

口感是消费者对植物基酸奶偏好的关键决定因素(Grasso et al 2020)。由于明显的脱水和收缩,含有 0.1%浓度 CMC 的大豆酸奶被排除在口感评估之外。添加 0.3%-1.1%浓度 CMC 的大豆酸奶和 SY 的感官评分值如表 2-6 所示。随着 CMC 的浓度从 0.3%升高到 1.1%,颗粒感的得分和厚重感逐渐增加,表明大豆酸奶逐渐变得细腻厚重。颗粒感得分的变化趋势与粒度分布中测量的结果相一致, Sonne 等人也发现半固态食品的颗粒感和颗粒尺寸之间有显著的相关性(Sonne et al 2014)。含有 CMC0.7 浓度为 0.7%-1.1%和含有 CMC1.2 浓度为 1.1%的大豆酸奶的颗粒感评分和厚重感评分均显著高于 SY,因此添加 CMC 在一定浓度下可以让大豆酸奶变得更加细腻厚重,厚重感与大豆酸奶的可接受性呈正相关(Esmerino et al 2017)。在相同浓度下,含 CMC0.7 的大豆酸奶比含 CMC1.2 的大豆酸奶表现出更高的颗粒感和厚重感得分。除 SY-0.7-0.3%、SY-1.2-0.3%和 SY-1.2-0.5%外,所有样品的顺滑感均未观察到显著差异,但 SY-0.7-0.7%的顺滑感得分最高。CMC 浓度为 0.3%的大豆酸奶总分低于 SY,但随着 CMC 浓度的进一步增加,添加 CMC 的大豆酸奶总分高于 SY。大豆酸奶感官评分的 PCA 分析,如图 2-8 所示, PC1 和 PC2 值的和为 91.7%, PC1 和 PC2 可以反映大豆酸奶的口感特征(Huc et al 2016)。在 CMC 的浓度为 0.3%时的大豆酸奶的两个样品距离较近,其口感特征相似。在相同 CMC 的浓度下,添加不同电荷密度 CMC 的大豆酸奶之间具有一定的距离,尤其是在 0.5%和 0.7%的两个浓度下,不同

CMC 电荷密度的大豆酸奶分布在两个象限。综上所述，添加浓度在 0.5%至 1.1%之间的 CMC 可有效改善大豆酸奶颗粒感、厚重感、顺滑感等口感特征；另外在相同浓度下，不同电荷密度的 CMC 对大豆酸奶产生的口感具有一定的差异，CMC0.7 比 CMC1.2 具有更好的改善大豆酸奶口感的能力。

表 2-6 CMC0.7 和 CMC1.2 浓度为 0.3%-1.1%和 0%的大豆酸奶的感官评价

Table 2-6 Sensory evaluation of soy yogurts with CMC0.7 and CMC1.2 at 0.3%-1.1% concentrations and without addition

	Sample	Hardness	Viscosity	Mouth coating	Slipperiness	Graininess	Thickness	Total score
Control	SY	15.17±1.76 ^{bcd}	12.72±2.08 ^{bc}	14.17±2.68 ^{bcd}	14.61±3.16 ^{ab}	16.00±2.68 ^{cd}	13.72±1.60 ^c	86.39±5.29 ^{cd}
	SY-0.7-0.3%	13.61±2.68 ^{de}	12.17±1.98 ^c	13.00±2.95 ^{cd}	12.56±3.43 ^c	13.17±3.35 ^{fa}	13.67±2.43 ^c	78.17±10.17 ^{ef}
	SY-0.7-0.5%	17.06±1.55 ^a	14.39±2.52 ^{ab}	14.39±2.40 ^{bcd}	15.50±2.20 ^{ab}	17.17±2.12 ^{abc}	14.06±1.80 ^{bc}	92.56±5.67 ^{ab}
CMC0.7	SY-0.7-0.7%	16.56±2.09 ^{ab}	15.61±2.00 ^a	15.33±2.50 ^{ab}	16.06±1.92 ^a	17.78±1.80 ^a	15.44±1.79 ^{ab}	96.78±6.35 ^a
	SY-0.7-0.9%	16.28±1.96 ^{abc}	15.11±3.07 ^a	14.83±2.57 ^{abc}	14.94±2.46 ^{ab}	18.00±1.37 ^a	16.06±2.21 ^a	95.22±8.87 ^a
	SY-0.7-1.1%	14.33±3.55 ^{de}	14.89±3.07 ^a	14.28±2.47 ^{bcd}	15.14±2.13 ^{ab}	18.00±1.28 ^a	16.33±2.17 ^a	92.97±9.86 ^{ab}
	SY-1.2-0.3%	12.72±2.76 ^e	12.06±2.78 ^c	12.72±3.37 ^d	12.72±2.99 ^c	12.06±3.00 ^g	13.11±2.08 ^c	75.39±11.31 ^f
	SY-1.2-0.5%	14.83±1.25 ^{cd}	13.11±2.08 ^{bc}	14.22±2.20 ^{bcd}	13.61±3.01 ^{bc}	14.17±1.92 ^{ef}	13.17±1.34 ^c	83.11±6.75 ^{de}
CMC1.2	SY-1.2-0.7%	15.06±1.63 ^{bcd}	14.06±1.59 ^{ab}	14.61±1.75 ^{abc}	14.61±2.25 ^{ab}	15.11±1.94 ^{de}	14.28±1.67 ^{bc}	87.72±5.63 ^{bcd}
	SY-1.2-0.9%	14.00±2.52 ^{de}	14.36±2.30 ^{ab}	15.00±1.71 ^{ab}	15.06±2.34 ^{ab}	16.22±2.07 ^{bcd}	14.50±2.50 ^{bc}	89.14±8.04 ^{bc}
	SY-1.2-1.1%	15.11±2.63 ^{bcd}	15.69±1.95 ^a	16.39±1.58 ^a	15.78±1.77 ^a	17.67±1.19 ^{ab}	16.00±2.14 ^a	96.64±7.46 ^a

注：不同小写字母表明不同大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different soy yogurts ($p < 0.05$).

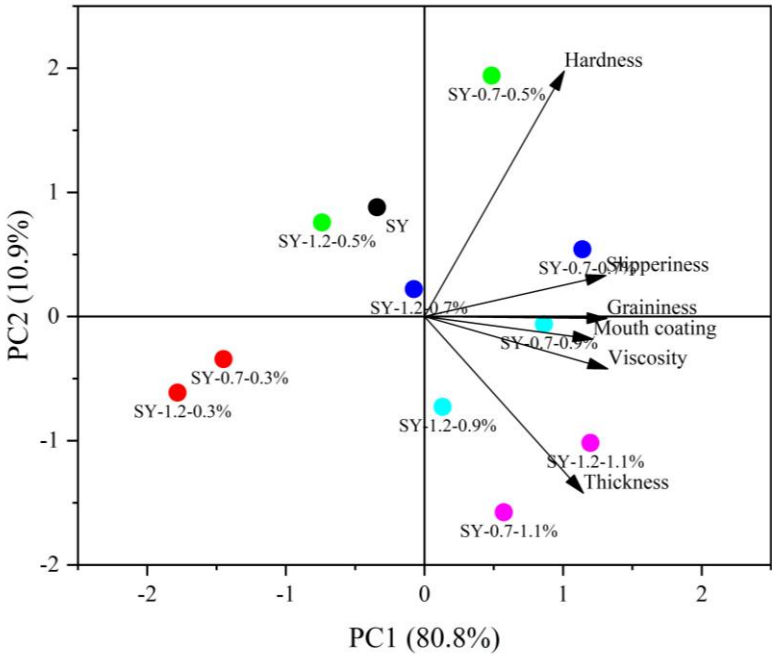


图 2-8 不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的 PCA 图

Fig. 2-8 PCA diagram of soy yogurt with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

3.10 CMC 对大豆酸奶中蛋白质聚集体的影响

大豆酸奶的激光共聚焦 (CLSM) 图像如图 2-9 所示, 图像中的红色区域表示存在由罗丹明 B 染色的蛋白质簇, 而暗区域对应于没有蛋白质的区域。SY 的蛋白质簇表现出均匀性和致密性。含有 CMC 浓度为 0.1% 和 0.3% 的大豆酸奶相比于 SY, 蛋白质团簇的聚集形态表现出更大的尺寸。这与观察到的含有 CMC 浓度为 0.1% 和 0.3% 的大豆酸奶显示出粗糙的质地和较大的粒径一致。Ge 等人也得到了类似的结果, 添加结冷胶的酸奶比不添加的酸奶表现出更高密度的酪蛋白簇(Ge et al 2022)。当 CMC 的浓度从 0.5% 增加到 1.1% 时, 蛋白质簇的密度逐渐降低。原因可能是, 当大豆酸奶中 CMC 浓度分别为 0.1% 和 0.3% 时, CMC 促进了蛋白质的进一步的聚集, 从而形成粗糙和致密的蛋白质簇(Ge et al 2022)。然而, 随着 CMC 浓度升高到 0.5%-1.1% 时, 聚集在蛋白质周围的 CMC, 可能因为静电排斥或空间位阻效应扩大了蛋白质簇之间的间隙(Carpentier et al 2021)。此外, 与含有 CMC0.7 的大豆酸奶相比, 具有 CMC1.2 的大豆酸奶表现出相对更密集的蛋白质簇。

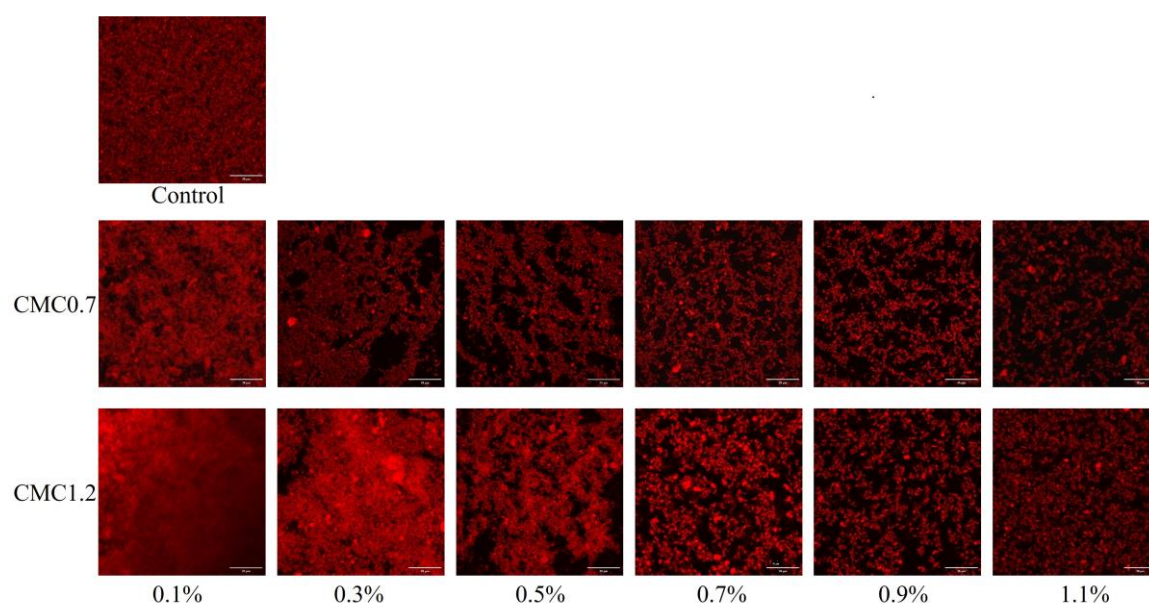


图 2-9 不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的激光共聚焦图。图中的比例尺为 20 μm 。

Fig. 2-9 Confocal microstructures of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2. The scale bar in the figure is 20 μm .

3.11 CMC 对大豆酸奶微结构的影响

酸奶的微结构对其流变学特性、WHC 和口感特性起着至关重要的作用(Tudorica et al 2004)。大豆酸奶的 Cryo-SEM 显微照片如图 2-10 所示。SY 的微结构呈现出均匀的蜂窝状结构,可以推断出 SY 的稳定性可能主要取决于蛋白质凝胶网络中孔隙对水的截留作用(Tudorica et al 2004)。将 CMC 添加到大豆酸奶中可以改变大豆酸奶的凝胶网络结构。在大豆酸奶中添加 0.1%和 0.3%浓度的 CMC 会破坏其原始的蜂窝状结构,导致微结构中的孔隙变得不均匀,这种变化与含有 CMC 浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶中观察到较低的 WHC 的结果相一致。随着 CMC 浓度的进一步增加,在大豆酸奶的微结构中会观察到层状结构,这种层状结构可能是没有与蛋白质聚集的 CMC 所形成。CMC0.7 浓度为 0.5%-1.1%的大豆酸奶的 WHC 的提高原因可能是 CMC0.7 与水分子的结合,以及层状孔隙对水分子的截留(Zhao et al 2018)。在 0.7%-1.1%的浓度下,含有 CMC0.7 的大豆酸奶的微结构中的孔隙比含有 CMC1.2 的大豆酸奶表现得更加均匀,这也可能是含有 CMC0.7 的大豆酸奶具有更高 WHC 的原因。

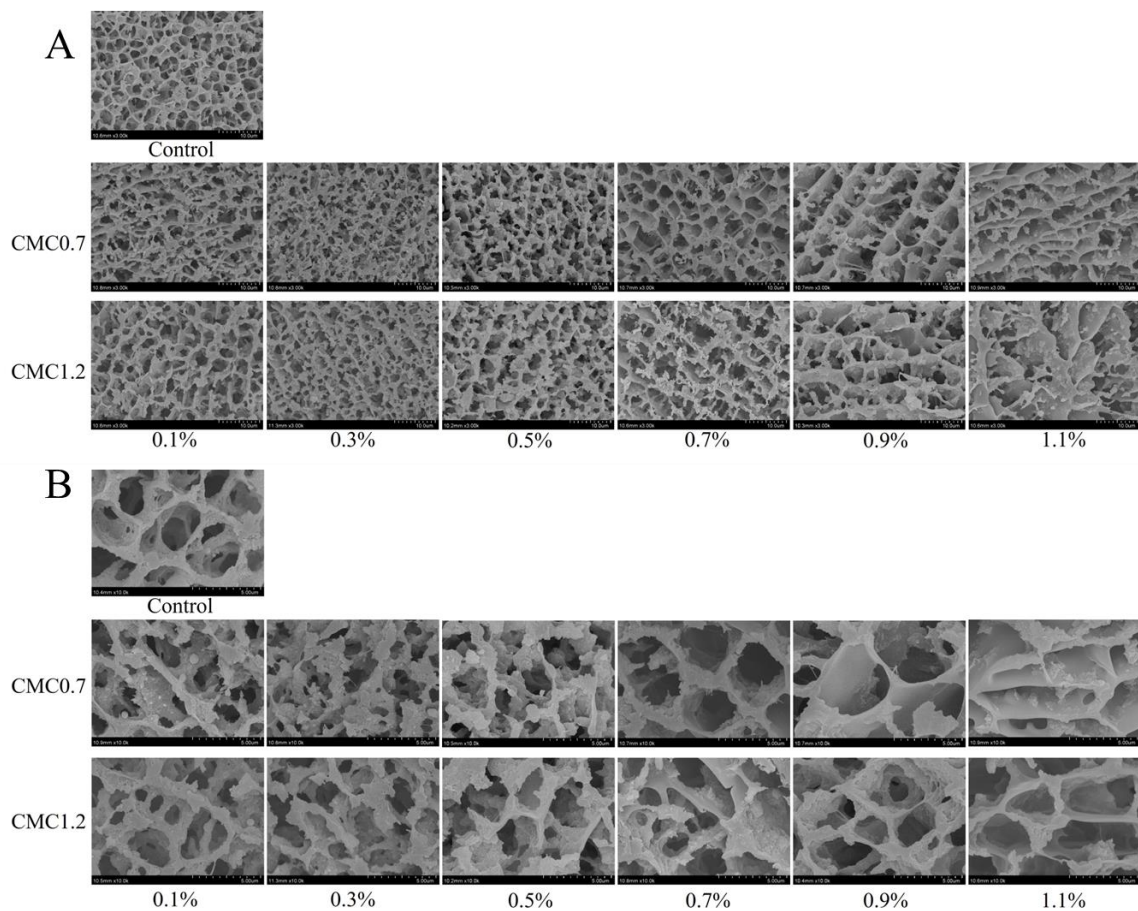


图 2-10 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的 Cryo-SEM 图像。图像放大倍数分别为 3000× (A) 和 10000× (B)。

Fig. 2-10 Cryo-SEM images of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2. The magnification of images was 3000× (A) and 10000× (B).

4 本章小结

CMC 的浓度和电荷密度对大豆酸奶的外观状态有明显的影响。在两种取代度下, CMC 浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶均呈现出了相分离现象, 横截面粗糙, 白度显著低于 SY 并且微结构中的孔隙分布不均匀。但随着 CMC 浓度的升高, 大豆酸奶的横截面逐渐变得更加光滑, 析水现象消失, 白度表现出升高的趋势, 微结构中的空隙逐渐变得均匀并且出现了层状结构。当 CMC 的浓度升高到 0.7%及以上时, 含有 CMC 的大豆酸奶与 SY 在白度上无显著性差异。

CMC 的浓度和电荷密度会对大豆酸奶的稳定性具有显著的影响, 添加 CMC0.7 在 0.5%-1.1%的浓度下可以有效提高大豆酸奶的储藏稳定性。当 CMC 浓度从 0%增加到 1.1%时, 大豆酸奶的 WHC 表现出了先下降再升高的趋势, SY-0.7-1.1%具有最高的 WHC。相比于 CMC1.2, 含有 CMC0.7 的大豆酸奶具有更好的稳定性。在大豆酸奶储藏的 28 d 中, 大豆酸奶的 WHC 和 pH 值均有轻微下降的趋势, 且在储藏的初始阶段下降幅度较大。在储藏 28 d 后, 添加 CMC0.7 在 0.7%-1.1%浓度的大豆酸奶的 WHC, 分别为 91.18%、96.16%和 96.21%显著高于未添加的样品 (72.73%)。CMC 浓度为 0.7%-1.1%时, 含有 CMC 的大豆酸奶的粒度显著小于 SY。通过低场核磁测试发现, 大豆酸奶中的水分形式主要是半结合水, 除 CMC 浓度为 0.1%的大豆酸奶外, 其余浓度的大豆酸奶的半结合水含量均高于 98%。

CMC 的加入可以有效改善大豆酸奶的颗粒感、厚重感和顺滑感, SY-0.7-0.7%有最高的感官评分并显著高于 SY, 且不同电荷密度的 CMC 会对大豆酸奶带来不同的口感与质地。质构测试显示, 随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%, 大豆酸奶的硬度和稠度表现了逐渐降低的趋势, 粘性指数出现了升高的趋势而内聚性展现了先升高后降低再升高的趋势。感官评价表明, 随着 CMC 的浓度从 0.3%升高到 1.1%, 大豆酸奶的颗粒感评分与厚重感评分有升高的趋势, 含有 CMC0.7 在 0.7%-1.1%浓度下的大豆酸奶和 SY-1.2-1.1%的颗粒感与厚重感评分均显著高于 SY。含有 CMC0.7 的大豆酸奶比含 CMC1.2 的大豆酸奶的颗粒感评分更高, SY-0.7-0.7%有最高的顺滑

感评分。因此，添加取代度为 0.7，浓度为 0.7%的 CMC 可以得到稳定性较高且口感最好的大豆酸奶。

第三章 羧甲基纤维素对大豆酸奶流变学、摩擦学和口腔粘附性的影响

1 引言

在上一章的研究中发现, CMC 对大豆酸奶的口感具有明显的改善作用, 而具有良好口感的大豆酸奶与其流变学、摩擦学和口腔粘附性密切相关。因此探究其与口感之间的关系, 对植物基酸奶开发, 口感的调控和产品的质量保证具有重要意义 (CullerH S Joyner 2019, Liu et al 2022)。

植物基酸奶是半固体食品中的一种, 在口腔加工的过程中, 半固体食品的口感受到食品的流变学特性, 摩擦学特性和口腔的粘附性的影响。半固体食品进入口腔初期, 此时半固体食品会填充在口腔中的舌头和上颚之间, 这时口感主要受到食品的流变学特性的影响(Aktar et alH S Joyner 2019)。目前常用的流变测试方式主要包括旋转测试、震荡测试和瞬态测试(Joyner 2018)。旋转测试主要为剪切速率扫描, 震荡测试包括小振幅震荡扫描 (SAOS) 和大振幅震荡扫描 (LAOS)。小振幅震荡扫描中设置的应变幅度在食品的线性粘弹区 (LVR) 内, 主要反映食品的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'')。LAOS 中设置的振幅会超出食品的 LVR, 相比于小振幅, 大振幅的设置可以更好的模拟半固体食品在口腔加工过程中舌头和上颚之间的运动以及在非线性粘弹区域内的流变学特性(Joyner 2018, Greis et al 2022)。瞬态测试主要为蠕变回复测试, 可以观察半固体食品长时间的应力松弛行为, 而对于震荡测试则不容易观察(Joyner 2018, Aktar et alH S Joyner 2019)。

随着口腔加工的进行, 半固体食品在口腔中被剪切并不断和口腔中的唾液混合, 此时的食品不能支撑舌头和上颚之间的分离, 使得舌头和上颚出现了接触, 这时口感受食品摩擦学特性的影响增大(Aktar et alH S Joyner 2019)。摩擦学测量是预测食物口感的一种有效方法, 尤其是其光滑度已被证明(Corvera-Paredes et al 2022)。口腔摩擦学测试是通过模拟食物在口腔加工过程中舌头和上颚之间的相对滑动来测量, 常选择摩擦副聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 作为接触食品的材料, 在摩擦副之间施加类似舌头和上颚之间作用力的法向力, 并以类似于舌头搅动的速度设置摩擦副的滑动速度(Rudge et al 2019)。同时, 唾液也会被添加到样品中, 以更好地模拟口腔中的环境, 半固体食品在口腔中的口感感知实际上是由食物和唾液的混合物所提供(Chen 2020,

Khramova and Popov 2022, Laguna et al 2021)。口腔加工结束后，到达吞咽的阈值，口腔中的食团会被舌头送至咽部进行吞咽。吞咽后，半固体食品还会有部分残留至口腔表面，此时会反映出半固体食品的糊口性，也被称作后感，这时的口感会受到食品对口腔的粘附性的影响(Ren et al 2024)。

因此本章在上一章得到的口感基础上，探究了不同浓度的 CMC0.7 和 CMC1.2 对于大豆酸奶流变学特性、摩擦学特性和口腔黏附性的影响，又通过相关性分析探究了其和大豆酸奶口感之间的相关性。以期为未来改善植物基酸奶的质地，通过仪器分析与口感的关系来预测口感，提高调控口感的效率提供一定的理论基础。

2 材料与方法

2.1 实验材料与试剂

黄大豆	市售	中粮集团有限公司
发酵剂PLE-101	嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌	微康益生菌（苏州）股份有限公司
白砂糖	市售	安琪酵母股份有限公司
取代度为0.7的羧甲基纤维素（CMC0.7）	分子量250 kDa 粘度1500-3100 mPas	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
取代度为1.2的羧甲基纤维素（CMC1.2）	分子量250 kDa 粘度1500-3100 mPas	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
聚二甲基硅氧烷（PDMS）	Sylgard184硅弹性体	美国道康宁公司
罗丹明B	\	美国Sigma-Aldrich公司
猪胃粘蛋白	\	美国Sigma-Aldrich公司
氯化钙	分析纯	国药集团化学试剂公司
氯化钾	分析纯	国药集团化学试剂公司
碳酸氢钠	分析纯	国药集团化学试剂公司
氯化钠	分析纯	国药集团化学试剂公司
磷酸二氢钾	分析纯	国药集团化学试剂公司

2.2 实验仪器

豆浆机	L18-P161	九阳股份有限公司
胶体磨	JM-LB50	温州市豪龙胶体磨厂
电子天平	ME204E	梅特勒-托利多仪器公司
流变仪	DHR-2	美国TA仪器
摩擦磨损试验机	UMT-2	美国布鲁克公司
冰箱	BCD-249WDEGU1	青岛海尔股份有限公司
水浴恒温磁力搅拌器	SHJ-A4	金坛市瑞华仪器公司
电热鼓风干燥箱	WGL-230B	天津市泰斯特仪器公司
荧光显微镜	Ti-S	美国Percival公司
紫外分光光度计	UV-1100	瑞利分析仪器有限公司
蠕动泵	YZ15-Pump	上海青浦沪西仪器厂

2.3 实验方法

2.3.1 大豆酸奶的制备

同第二章2.3.1

2.3.2 流变学测试

大豆酸奶的流变学特性通过流变仪DHR-2测定。选择直径为40 mm、间隙为1000 μm 的平行板进行稳定扫描测量、频率扫描测量和蠕变回复实验。选择直径为40 mm、锥度为2°的锥形板进行大振幅振荡剪切（LAOS）测量(Zhou et al 2022)。对于所有的流变学测试，温度均设置为25 °C。

2.3.2.1 稳态扫描测试

将稳定扫描测量的剪切速率设置为从 0.01 s^{-1} 至 100 s^{-1} ，以获得作为剪切速率和粘度之间的关系图。数据由方程（2-1）拟合(Wang et al 2020)。

$$\eta = K * r^{n-1} \quad (2-1)$$

其中 η 表示粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)， r 表示剪切速率 (s^{-1})， K 表示稠度指数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)， n 表示流动行为指数。

2.3.2.2 频率扫描测试

频率扫描测量的频率被设置为从 0.01 Hz 到 10 Hz，应变设置为 0.5%，使得所有样品都在线性粘弹性区域 (LVR) 内。得到储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 对频率 0.01 Hz 至 10 Hz 的图像。使用幂律类型的方程 (2-2) 和方程 (2-3) 对数据进行拟合。

$$G' = K' * \omega^{n'} \quad (2-2)$$

$$G'' = K'' * \omega^{n''} \quad (2-3)$$

其中， K' 和 K'' 分别表示弹性和粘性幂律常数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)， n' 和 n'' 分别表示弹性和粘性频率指数， ω 表示频率 (Hz) (Bi et al 2017)。

2.3.2.3 蠕变回复测试

在蠕变回复试验中，在所有样品的 LVR 内，将 0.5 Pa 的恒定剪切力施加到样品上，并保持 120 s，同时测量应变随时间的变化，并最终达到稳定状态（蠕变时间）。120 s 后，立即取消剪切力，再记录 120s 的应变变化（回复时间）。使用四元 Burger 方程 (2-4) 拟合蠕变曲线 (Aliabbasi et al 2023)，应变回复率通过方程 (2-5) 计算 (Bi et al 2017)。

$$J(t) = \frac{1}{G_H} + \frac{1}{G_V} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{1}{\eta_N} \quad (2-4)$$

其中， J 表示蠕变柔量 (Pa^{-1})， G_H 和 G_V 分别表示 Hooke 单元的弹性模量和 Voigt 单元的弹性模量 (Pa)， η_N 表示粘性分量 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)， τ 表示滞后时间 (s)。

$$R = \frac{\gamma_T - \gamma_P}{\gamma_T} \quad (2-5)$$

其中 R 是应变回复率， γ_T 和 γ_P 分别表示蠕变和回复应变 (%)。

2.3.2.4 大振幅震荡扫描测试

大振幅震荡扫描 (LAOS) 参考自 (Zhao et al 2022)。在 1 Hz 的频率下将应变设置为 0.01% 至 1000%，并且将流变仪的应变控制类型设置为直接应变。粘弹性模量 (G'_{LVR} 和 G''_{LVR}) 和阻尼系数 ($\tan\delta_{\text{LVR}}$) 可以在 LVR 内确定。从 LVR 过渡到非线性

性粘弹性区域的临界应变 (γ_c) 定义为初始 G' 的 95%(Xi et al 2019)。原始应变应力数据的波形信号基于 MATLAB (MathWorks, USA) 中的 Matlaos 程序(MITlaos v2.2 Beta)采集处理以获得弹性和粘性 Lissajous 曲线(Ewoldt et al 2009)。单次 LAOS 循环的能量耗散由方程 (2-6) 计算, 能量耗散率由方程 (2-7) 计算(Ewoldt et al 2010)。

$$E_d = \pi \gamma_0^2 G_1'' \quad (2-6)$$

其中 E_d 表示每个 LAOS 循环的能量耗散, γ_0 表示应变幅度 (%), G_1'' 表示一阶损耗模量 (Pa)。

$$\phi = \frac{E_d}{4\gamma_0 \sigma_{max}} = \frac{\pi \gamma_0 G_1''}{4\sigma_{max}} \quad (2-7)$$

其中, ϕ 为能量耗散率, σ_{max} 为每个 LAOS 循环中的最高应力 (Pa)。

2.3.3 摩擦学测试

采用摩擦磨损试验机和销盘式往复摩擦方式对大豆酸奶进行摩擦学分析, 以获得 0.2-20 mm/s 滑动速度下大豆酸奶的摩擦系数 (COF) (Liu et al 2018)。下摩擦副为玻璃板, 上摩擦副为直径为 6 mm 的聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 法向力为 2N。PDMS 通过硅弹性体试剂盒制备, 以基体比固化剂为 10:1 的比例混合均匀, 在真空下除去气泡, 使用直径为 6 mm 的 96 孔细胞培养板作为磨具加入到其中, 转移到 80 °C 的干燥箱中保温 2 h, 结束后从磨具上分离得到直径为 6 mm 的 PDMS 上摩擦副(Liu et al 2018)。

2.3.4 大豆酸奶在猪舌上粘附性的测定

选择猪屠宰后 24 小时内的新鲜猪舌头, 取猪舌头前侧部位的上表面, 并切成约 2mm 厚 1 cm² 大小的切片, 并将猪舌的粘膜面朝上粘在显微镜载玻片上。在实验开始前将切片浸泡在人工唾液中 30 min, 人工唾液的配方为 CaCl₂ (4 mM)、KCl (10 mM)、NaHCO₃ (2 mM)、NaCl (7 mM)、KH₂PO₄ (6.7 mM) 和猪胃粘蛋白 (1.0% w/v) (李彦磊 2021)。将大豆酸奶与罗丹明 B 荧光染料混合, 最终浓度为 0.01%。将 20 μ L 样品添加到猪舌表面, 并使其平衡 30 s, 在荧光显微镜下拍摄猪舌上样品的照片, 此时记为冲洗 0 mL。然后将载玻片放置在倾斜 45° 的塑料架上, 由蠕动泵控制, 流速设定为 6 mL/min, 分别在 1、2、4、6、10、15 和 20 mL 时, 停止冲洗, 并

在荧光显微镜下拍摄图像。所有的荧光拍照均在荧光显微镜中的参数设置保持一致。使用 ImageJ 软件分析荧光图片，以量化每次清洗后的荧光强度(Cook et al 2018)。

2.3.5 大豆酸奶在口腔的残留量测定

选择 10 名口腔健康的参与者，每次摄入 5 g 的大豆酸奶样本，吞咽后用 20 mL 的水冲洗 5 s，将冲洗水吐到塑料杯中（第一次冲洗）。然后再用另外 20 mL 的水冲洗 5 s 并将冲洗水吐到塑料杯中（第二次冲洗）。使用紫外分光光度计测定每次冲洗后的样品在 600 nm 处的浊度，并测定每种大豆酸奶从 0 g/20 mL 到 1 g/20 mL 的标准曲线，计算大豆酸奶在口腔中的残留量(Riquelme et al 2021)。

2.3.6 统计分析

所有样本均进行三次平行测试，数据以平均值±标准偏差（ $M\pm SD$ ）表示。采用 SPSS 26（Chicago, USA）Duncan 检验进行显著性分析（ $p < 0.05$ ）。模型拟合、相关性分析及本章的所有图片均由 Origin 2022（Northampton, USA）绘制。

3 结果与分析

3.1 CMC 对大豆酸奶流变学特性的影响

3.1.1 CMC 对大豆酸奶粘度的影响

如图 3-1 所示，所有样品的粘度都表现出随着剪切速率的增加而变稀的行为，均为假塑性流体，原因可能是由于凝胶网络结构中聚集体之间的键断裂(Cui et al 2014)。在含有海藻酸钠、结冷胶和魔芋胶的凝固型牛乳酸奶中也显示出类似的结果(Ge et al 2022)。如表 3-1 所示，K 为稠度指数与大豆酸奶的粘度成正比。在添加 CMC0.7 的大豆酸奶中，CMC0.7 浓度从 0%增加到 1.1%时，大豆酸奶的粘度表现出最初的增加，随后下降，最后又升高的趋势。而添加 CMC1.2 的大豆酸奶，随 CMC1.2 的浓度从 0%升高到 1.1%，K 值则表现出先升高后降低的趋势。CMC 浓度为 0.1% 和 0.3%的大豆酸奶表现出了比 SY 更高的粘度，而其他浓度的大豆酸奶的粘度则低于 SY。原因可能是含有 CMC 浓度为 0.1%和 0.3%时的大豆酸奶具有较低的 WHC，从而使得大豆酸奶会析出大量的水分，使得内部颗粒之间没有了水分的润滑导致颗

粒之间摩擦力增大,从而提高了大豆酸奶的粘度。也有可能是因为低浓度的 CMC 加强了蛋白质之间的进一步聚集从而有了更高的粘度。随着 CMC 的浓度从 0.3%升高到 0.7%,大豆酸奶的粘度却有降低的趋势,可能是 CMC 的加入改变了大豆酸奶的凝胶网络结构,使得体系内的相互作用力降低,从而使得大豆酸奶的粘度降低。但当 CMC 的浓度从 0.9%到 1.1%时,又可能会由于 CMC 的增稠作用,从而使得大豆酸奶的粘度又有一定程度的升高。 n 的大小主要反映流体非牛顿性质的强弱,与剪切稀化的程度成反比。如表 3-1 所示,在同种多糖下,随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%, n 值展现出逐渐升高的趋势,CMC 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶的 n 值高于 SY。表明含有更高浓度 CMC 的大豆酸奶则具有更强的抵抗剪切作用的能力,因此加入 0.7-1.1%浓度的 CMC 可以提高大豆酸奶抵抗剪切作用的能力。

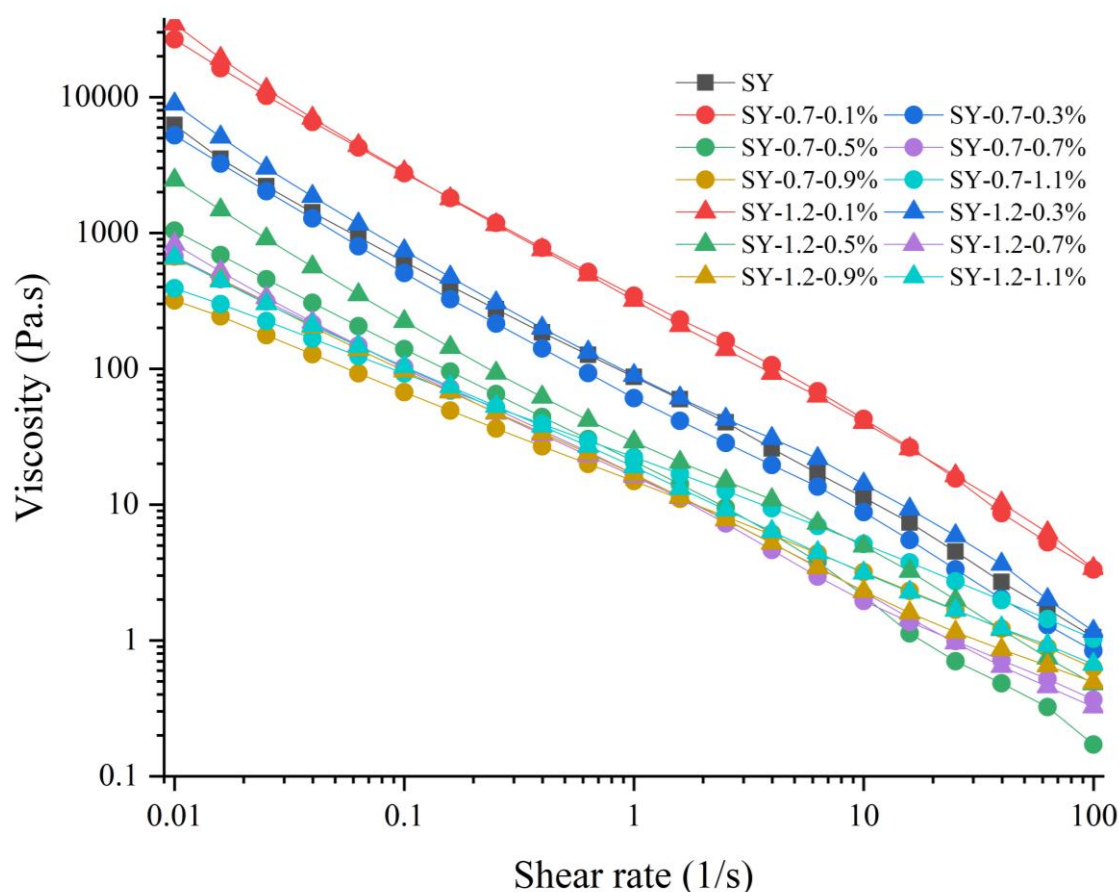


图 3-1 含不同浓度 CMC 0.7 和 CMC 1.2 大豆酸奶粘度对剪切速率的函数

Fig. 3-1 Viscosity as a function of shear rate of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

表 3-1 幂律模型的 K, n 拟合结果

Table 3-1 The fitting results of the power-law model for K and n

	Sample	K (Pa·s ⁿ)	n	R ²
Control	SY	35.733±1.068 ^{cC}	0.108±0.004 ^{dD}	0.998
	SY-0.7-0.1%	385.122±43.947 ^{ax}	0.000±0.024 ^{fx}	0.999
	SY-0.7-0.3%	118.883±5.704 ^{bx}	0.063±0.013 ^{ex}	0.999
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	11.876±0.229 ^{cx}	0.072±0.004 ^{ex}	0.996
	SY-0.7-0.7%	12.927±0.226 ^{cx}	0.240±0.004 ^{cx}	1.000
	SY-0.7-0.9%	12.33±0.135 ^{cx}	0.324±0.003 ^{bx}	1.000
	SY-0.7-1.1%	16.295±0.292 ^{cx}	0.362±0.004 ^{ax}	0.999
	SY-1.2-0.1%	291.756±10.971 ^{Ay}	0.002±0.011 ^{Ex}	0.999
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	79.563±3.665 ^{By}	0.070±0.010 ^{Dx}	1.000
	SY-1.2-0.5%	26.844±4.872 ^{Dx}	0.091±0.056 ^{Dx}	0.996
	SY-1.2-0.7%	13.200±0.329 ^{Ex}	0.166±0.007 ^{Cy}	0.999
	SY-1.2-0.9%	11.918±0.269 ^{Ex}	0.270±0.007 ^{By}	1.000
	SY-1.2-1.1%	9.017±0.060 ^{Ex}	0.350±0.002 ^{Ax}	0.999

注：不同的标记（x 和 y）表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.1.2 CMC 对大豆酸奶线性粘弹区域内粘弹性的影响

小振幅振荡剪切（SAOS）扫描是研究 LVR 中复杂流体粘弹性的一种广泛应用的技术(Geremias-Andrade et al 2016)。大豆酸奶的 G' 和 G'' 如图 3-2 所示。随着振荡频率从 0.01Hz 升高到 10Hz，所有样品的 G' 和 G'' 均呈增加趋势，且在整个的频率范围内，所有样品的 G' 值均高于 G'' 值，表明大豆酸奶主要呈现固体性质(Aliabbasi et al 2023)。随着 CMC 的浓度从 0%升高到 1.1%，大豆酸奶的 G' 和 G'' 的值呈现出先增加后降低再增加的趋势。CMC 浓度为 0.1%的大豆酸奶的 G' 和 G'' 明显高于 SY，原因可能是 CMC 的加入促进了蛋白质的聚集导致其凝胶结构改变。当 CMC 的浓度从 0.3%增加到 0.9%时，大豆酸奶的 G' 和 G'' 的值有降低的趋势，原因可能是大豆酸奶从蛋白质为骨架的凝胶结构转变为了蛋白质多糖共同组成的凝胶结构，降低了凝胶结构内的作用力。当 CMC 浓度升高到 1.1%时，可能由于 CMC 的增稠作用，使

得大豆酸奶的 G' 和 G'' 的值有了升高的趋势。在含有 0.005% 浓度海藻酸钠的牛乳酸奶中也显示出类似的结果，其 G' 值最低，而随着海藻酸钠的浓度的升高，牛乳酸奶的 G' 值升高(Xu et al 2019)。在相同浓度下，几乎在所有振荡频率下，含有 CMC1.2 的大豆酸奶的 G' 高于含有 CMC0.7 的大豆酸奶。这可能是因为，相比于具有 CMC0.7 的大豆酸奶，含有更高电荷密度的 CMC1.2 的大豆酸奶中蛋白质和多糖之间具有更强的相互作用，从而具有了更高的 G' 。如表 3-2 所示， K' 和 K'' 的变化与大豆酸奶的 G' 和 G'' 相似，而随着 CMC 的浓度从 0% 升高到 1.1%，大豆酸奶的 n' 和 n'' 值展现了先降低再升高的趋势，表明在一定浓度下 CMC 的加入降低了大豆酸奶的 G' 和 G'' 对震荡频率的敏感性。

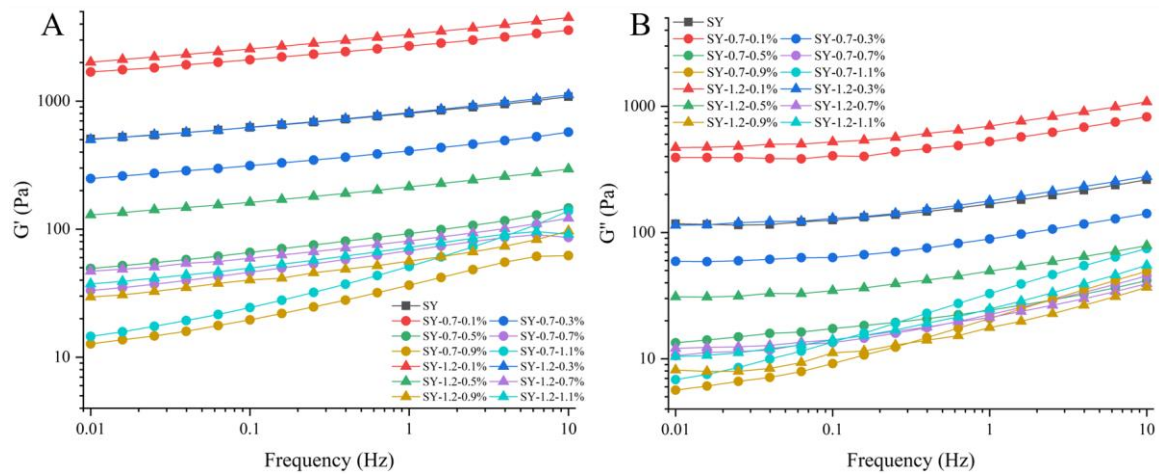


图 3-2 不同浓度 CMC 0.7 和 CMC 1.2 的大豆酸奶的 G' (A) 和 G'' (B) 对频率的函数

Fig. 3-2 G' (A) and G'' (B) as a function of frequency for soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

表 3-2 幂律模型的 K' 、 n' 、 K'' 和 n'' 的拟合结果

Table 3-2 The fitting results of the power-law model for K' , n' , K'' and n''

		$G' = K' * \omega^{n'}$			$G'' = K'' * \omega^{n''}$		
	Sample	K' (Pa·s ^{n'})	n'	R ²	K'' (Pa·s ^{n''})	n''	R ²
Control	SY	813.792±3.48 ^{bC}	0.113±0.002 ^{dD}	0.995	167.545±2.972 ^{bC}	0.189±0.009 ^{cC}	0.986
	SY-0.7-0.1%	2724.729±8.182 ^{ay}	0.111±0.002 ^{dx}	0.998	564.9±11.902 ^{ay}	0.129±0.011 ^{ex}	0.911
	SY-0.7-0.3%	417.343±2.294 ^{cy}	0.123±0.003 ^{dx}	0.993	94.254±1.661 ^{cy}	0.149±0.009 ^{dx}	0.951
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	95.301±0.881 ^{dy}	0.161±0.005 ^{cx}	0.988	25.863±0.393 ^{dey}	0.175±0.008 ^{cx}	0.973
	SY-0.7-0.7%	66.688±0.759 ^{ey}	0.152±0.006 ^{cx}	0.981	24.061±0.485 ^{dex}	0.250±0.012 ^{bx}	0.976
	SY-0.7-0.9%	36.809±0.492 ^{gy}	0.255±0.008 ^{bx}	0.991	21.325±0.225 ^{fx}	0.361±0.006 ^{ax}	0.997
	SY-0.7-1.1%	54.075±1.28 ^{fy}	0.385±0.014 ^{ax}	0.989	32.603±0.174 ^{dx}	0.365±0.003 ^{ax}	0.999
CMC1.2	SY-1.2-0.1%	3363.86±11.386 ^{Ax}	0.118±0.002 ^{CDx}	0.997	740.394±11.902 ^{Ax}	0.138±0.008 ^{Ex}	0.953
	SY-1.2-0.3%	828.86±4.013 ^{Bx}	0.12±0.002 ^{CDx}	0.994	187.197±2.87 ^{Bx}	0.148±0.008 ^{DEx}	0.962

SY-1.2-0.5%	217.303±1.011 ^{Dx}	0.123±0.002 ^{Cy}	0.995	51.79±0.789 ^{Dx}	0.157±0.008 ^{Dy}	0.967
SY-1.2-0.7%	83.516±0.682 ^{Ex}	0.144±0.004 ^{Bx}	0.989	23.002±0.451 ^{Ex}	0.2±0.011 ^{Cy}	0.965
SY-1.2-0.9%	59.223±0.827 ^{Ex}	0.179±0.008 ^{Ay}	0.978	18.83±0.377 ^{Ex}	0.264±0.012 ^{By}	0.980
SY-1.2-1.1%	71.212±0.785 ^{Ex}	0.145±0.006 ^{Ay}	0.981	26.656±0.562 ^{Ex}	0.291±0.012 ^{Ay}	0.982

注：不同的标记（x 和 y）表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.1.3 CMC 对大豆酸奶蠕变回复性的影响

蠕变回复实验可以分析大豆酸奶在长时间尺度下的粘弹性行为(Patel et al 2015, Geremias-Andrade et al 2016)。如图 3-3 所示，在恒定应力的作用下，应变和柔量初始表现为快速增加，表现为弹性行为特征，随后增加速度逐渐下降到达过渡态表现为滞弹性行为，弹性应变充分发展后，应变和柔量缓慢增加逐渐斜率恒定，表现为粘性行为特征。当应力突然撤掉时，应变首先会出现快速回复为弹性回复，然后缓慢回复为滞弹性回复，但由于存在粘性应变且大豆酸奶不是纯弹性体，应力消除后应变无法完全回复(Yu et al 2020, Bi et al 2014)。含有 CMC1.2 的大豆酸奶的应变随着 CMC 浓度的升高而逐渐增加。同样，添加 CMC 0.7 的大豆酸奶也表现出类似的趋势，但 SY-0.7-0.9%的应变却高于 SY-0.7-1.1%，这可能是由于 CMC 浓度较高，导致大豆酸奶粘度增加，从而使得 SY-0.7-1.1%具有更小幅度的应变(Yu et al 2020)。当 CMC 的浓度大于 0.3%时，含 CMC 的大豆酸奶的应变超过了 SY。因此，含 CMC 浓度在 0.3%至 1.1%范围内的大豆酸奶表现出比 SY 更柔软的质地(Zhao et al 2022)，而添加 0.1%浓度的 CMC 可提高大豆酸奶的凝胶强度，使大豆酸奶变得更硬(Jia et al 2022)。在相同浓度下，除了 0.3%的浓度外，含有 CMC0.7 的大豆酸奶表现出比含有 CMC1.2 的大豆酸奶更高的应变，表明相比于 CMC1.2，添加 CMC0.7 的大豆酸奶可以形成质地更软的大豆酸奶。原因可能是，具有较高电荷密度的 CMC1.2 与蛋白质的静电聚集的能力更强，导致含有 CMC1.2 的大豆酸奶比含有 CMC0.7 的大豆酸奶表现出更硬的凝胶结构(Jia et al 2022)。此外，SY-0.7-0.3%的回复率高于 SY-1.2-0.3%（表 3-3），这表明在蠕变过程中，SY-0.7-0.3%比 SY-1.2-0.3%表现出更大的弹性应变。

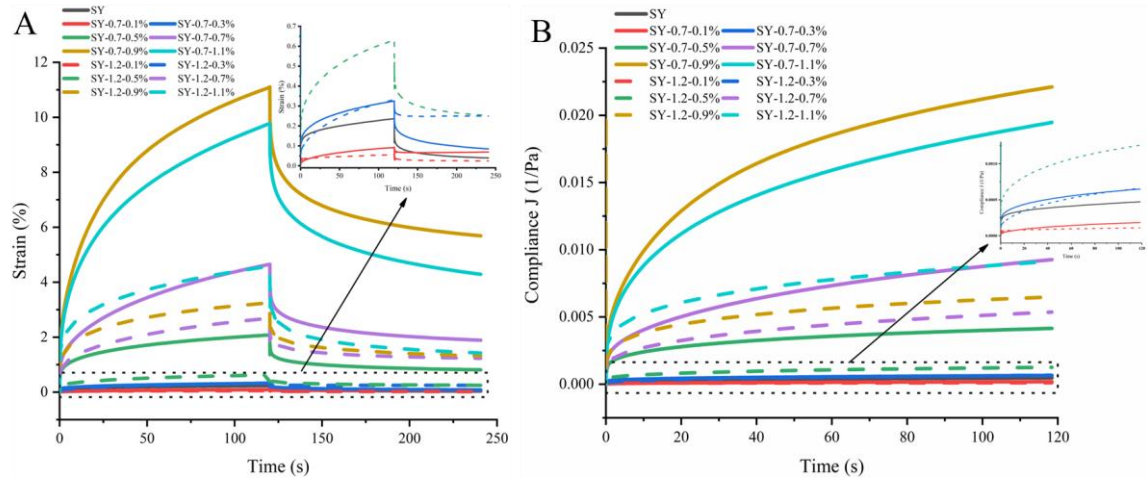


图 3-3 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 大豆酸奶的蠕变回复曲线 (A) 和柔量曲线 (B)

Fig. 3-3 Creep recovery curve (A) and corresponding compliance curve (B) of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

表 3-3 四元 Burger 方程的 G_H 、 G_V 、 τ 、 η_N 的拟合结果和回复率 (R)

Table 3-3 The fitting results of the G_H , G_V , τ , and η_N parameters of the quaternary Burger equation and recover rate (R)

	Sample	G_H (Pa)	G_V (Pa)	τ (s)	η_N (kPa·s)	R^2	R
Control	SY	5647.111±109.081 ^{bC}	4107.914±117.028 ^{cC}	3.889±0.287 ^{bB}	252.327±7.723 ^{cC}	0.955	0.832±0.041 ^{aA}
	SY-0.7-0.1%	37174.506±1213.526 ^{ax}	18987.746±1097.774 ^{ay}	8.096±0.96 ^{ax}	1044.890±51.556 ^{ay}	0.933	0.248±0.038 ^{dy}
	SY-0.7-0.3%	5753.174±123.674 ^{by}	5324.609±154.327 ^{bx}	1.800±0.150 ^{cdy}	344.026±11.384 ^{bx}	0.925	0.737±0.014 ^{bx}
	SY-0.7-0.5%	1489.914±38.519 ^{cY}	783.379±23.07 ^{dy}	4.361±0.324 ^{bx}	48.121±1.505 ^{dy}	0.956	0.608±0.023 ^{cx}
CMC0.7	SY-0.7-0.7%	882.166±31.981 ^{cdx}	376.015±9.533 ^{dx}	2.498±0.177 ^{cx}	18.556±0.414 ^{dex}	0.961	0.592±0.014 ^{cdx}
	SY-0.7-0.9%	846.531±36.563 ^{cdy}	281.463±5.705 ^{dx}	1.625±0.095 ^{dx}	17.710±0.396 ^{dex}	0.962	0.485±0.012 ^{ey}
	SY-0.7-1.1%	613.218±22.68 ^{dx}	130.573±2.197 ^{dx}	4.259±0.182 ^{bx}	10.038±0.225 ^{ex}	0.982	0.559±0.011 ^{dy}
	SY-1.2-0.1%	19826.143±128.541 ^{Ay}	46650.633±861.079 ^{Ax}	0.851±0.045 ^{Dy}	2618.350±44.012 ^{Ax}	0.968	0.561±0.068 ^{Cx}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	8449.786±121.711 ^{Bx}	5150.64±170.409 ^{Bx}	8.817±0.577 ^{Ax}	309.448±9.334 ^{By}	0.978	0.243±0.045 ^{Dy}
	SY-1.2-0.5%	2643.925±73.148 ^{Ex}	1986.598±61.262 ^{Dx}	1.902±0.168 ^{Cy}	106.293±3.107 ^{Dx}	0.931	0.598±0.018 ^{Cx}
	SY-1.2-0.7%	1114.101±42.106 ^{Fx}	620.398±18.599 ^{Ex}	1.676±0.145 ^{Cy}	34.477±1.010 ^{Ex}	0.929	0.540±0.013 ^{Cx}
	SY-1.2-0.9%	4428.146±137.58 ^{Dx}	419.875±12.735 ^{Ex}	0.177±0.013 ^{Ey}	31.881±0.790 ^{Ex}	0.912	0.593±0.023 ^{Cx}
	SY-1.2-1.1%	969.639±67.616 ^{Fx}	283.33±6.75 ^{Ex}	0.697±0.047 ^{Dy}	20.419±0.548 ^{Ex}	0.934	0.688±0.012 ^{Bx}

注：不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.2 CMC 对大豆酸奶非线性流变学特性的影响

3.2.1 非线性流变学行为

LAOS 技术可以用于分析食品在非线粘弹区的流变学特征和反映食品中的结构信息(Joyner 2018, Greis et al 2022)。如图 3-4 所示,在应变扫描的初始增加过程中, G' 和 G'' 都保持不变,且 G'_{LVR} 大于 G''_{LVR} ,这表明样品处于 LVR 中,主要表现出弹性行为(Zhao et al 2022)。然而,随着振幅的进一步升高, G' 和 G'' 均呈现出下降的趋势,表明大豆酸奶属于 I 型流体(应变变薄),这是聚合物溶液和熔体中的常见现象,原因类似于稳态剪切中的剪切变薄(Hyun et al 2011)。在高应变下, G'' 大于 G' ,原因可能是高应变破坏了大豆酸奶的结构,导致其永久变形和流动(Schreuders et al 2021)。在大振幅震荡剪切的状态下,系统的链取向或微结构会沿着流场的方向排列,悬浮的链段几乎没有机会重新加入网络结构,从而降低了系统的局部粘性阻力(Hyun et al 2011)。在 LVR 中,随着 CMC 浓度从 0%升高到 1.1%, G'_{LVR} 和 G''_{LVR} 都呈现出最初升高随后降低的趋势。这一观察结果与频率扫描的结果一致,表明低浓度的 CMC 可以增强大豆酸奶的硬度,而添加高浓度 CMC 的大豆酸奶比 SY 更柔软。阻尼因子($\tan\delta_{LVR}$)是反映大豆酸奶偏向于固体和偏向于流体的程度,较低的 $\tan\delta_{LVR}$ 值表明样品更加有弹性,而较高的值则表明样品有更好的流动性。如表 3-4 所示,随着大豆酸奶中 CMC 浓度的升高, $\tan\delta_{LVR}$ 呈现了逐渐升高的趋势,表明大豆酸奶的流动性也逐渐得到增强,这与质构中的稠度结果相一致。含有 CMC0.7 浓度为 0.9%-1.1%的大豆酸奶的 $\tan\delta_{LVR}$ 高于相同浓度下含有 CMC1.2 的大豆酸奶,这和第二章中大豆酸奶在勺子上的状态,CMC1.2 浓度为 0.9%-1.1%的大豆酸奶比 CMC0.7 浓度为 0.9%-1.1%的大豆酸奶有更明显的棱的结果相一致。 γ_c 为大豆酸奶的 LVR 的范围,SY-0.7-1.1%具有最长的 LVR 应变范围为 2.36%,SY-1.2-0.5 的 LVR 最短为 0.90%。

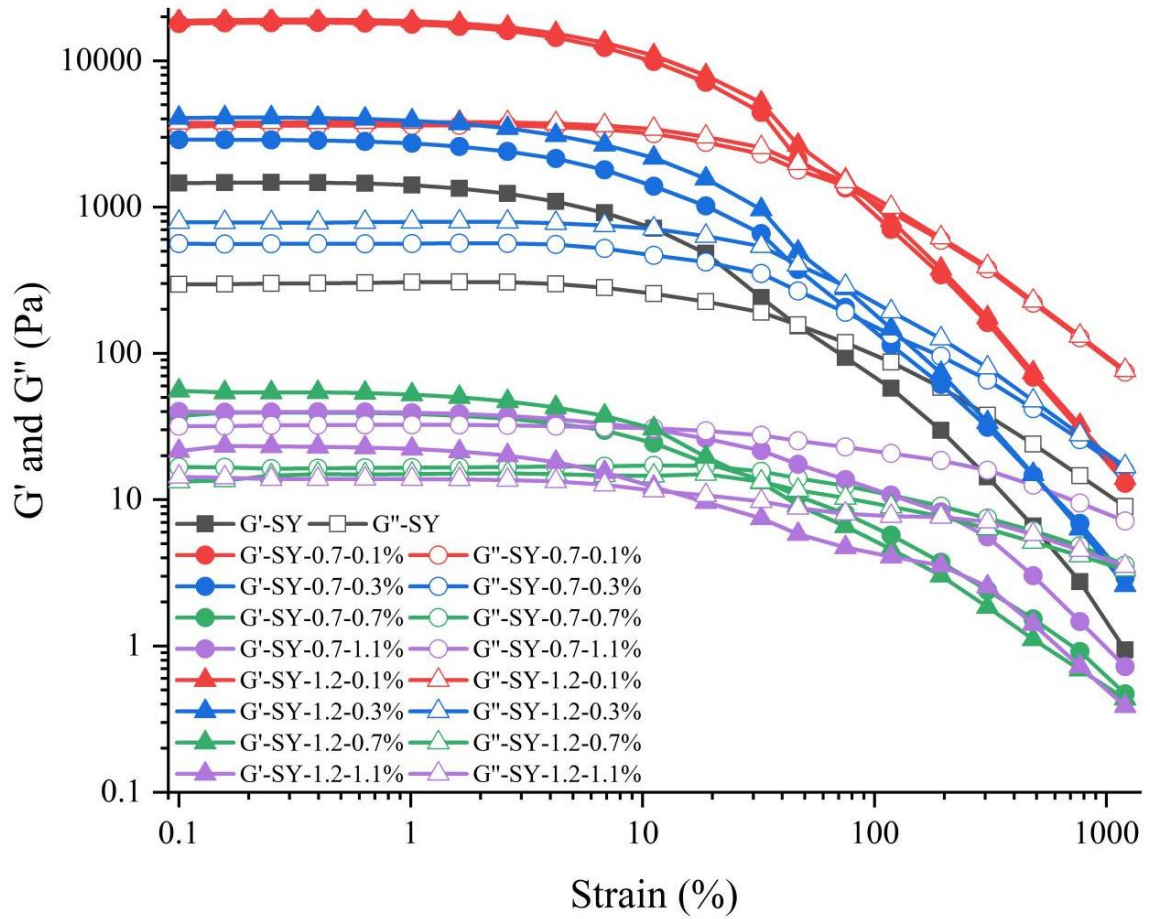


图 3-4 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的大振幅振荡剪切行为

Fig. 3-4 Large amplitude oscillatory shear behavior for soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2

表 3-4 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 大豆酸奶的粘弹性参数

Table 3-4 Viscoelastic parameters for soy yogurts made with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2

	Sample	G'_{LVR} (Pa)	G''_{LVR} (Pa)	$\tan\delta_{LVR}$	γ_c (%)
Control	SY	1467.683±551.443 ^{bcC}	299.289±94.298 ^{bcC}	0.204±0.008 ^{eD}	1.129±0.023 ^{eD}
	SY-0.7-0.1%	18186.067±2856.994 ^{ax}	3591.563±538.971 ^{ax}	0.197±0.001 ^{ex}	1.495±0.031 ^{dy}
	SY-0.7-0.3%	2872.893±307.634 ^{bx}	560.232±54.912 ^{bx}	0.195±0.002 ^{ex}	0.99±0.012 ^{fy}
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	120.173±2.874 ^{cx}	30.495±0.713 ^{cx}	0.254±0.001 ^{dx}	0.936±0.011 ^{fx}
	SY-0.7-0.7%	39.316±6.790 ^{cx}	16.419±1.761 ^{cx}	0.418±0.022 ^{cx}	1.700±0.048 ^{bx}
	SY-0.7-0.9%	42.499±3.340 ^{cx}	24.134±0.507 ^{cx}	0.568±0.03 ^{bx}	1.599±0.051 ^{cx}
	SY-0.7-1.1%	39.692±2.274 ^{cx}	32.094±1.880 ^{cx}	0.809±0.001 ^{ax}	2.355±0.024 ^{ax}
	SY-1.2-0.1%	19036.567±1488.46 ^{Ax}	3779.743±352.613 ^{Ax}	0.199±0.003 ^{Dx}	1.613±0.038 ^{Ax}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	4078.340±588.122 ^{Bx}	782.733±108.325 ^{Bx}	0.192±0.001 ^{Dx}	1.093±0.021 ^{Dx}
	SY-1.2-0.5%	849.331±86.897 ^{CDx}	173.692±20.356 ^{CDx}	0.205±0.003 ^{Dy}	0.902±0.017 ^{Ex}

SY-1.2-0.7%	54.012±2.868 ^{Dx}	14.360±0.619 ^{Dx}	0.266±0.003 ^{Cy}	1.301±0.039 ^{By}
SY-1.2-0.9%	53.426±1.458 ^{Dx}	17.390±0.345 ^{Dx}	0.326±0.002 ^{By}	1.123±0.025 ^{Dy}
SY-1.2-1.1%	23.136±0.836 ^{Dx}	13.923±0.055 ^{Dx}	0.602±0.020 ^{Ay}	1.184±0.032 ^{Cy}

注：不同的标记（x 和 y）表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

Note: Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.2.2 Lissajous 曲线分析

Lissajous 曲线可以反映与结构相关的非线性流变行为的变化(Ewoldt et al 2010)。大豆酸奶的弹性和粘性 Lissajous 曲线如图 3-5 所示。在低应变下，弹性 Lissajous 曲线呈现细长的椭圆形，而粘性 Lissajous 线呈现较宽的椭圆形，这表明应变响应主要由弹性贡献(Zhou et al 2022)。随着应变的进一步增加，弹性 Lissajous 曲线包围的区域逐渐变宽，而粘性 Lissajous 曲面包围的区域则逐渐变窄，表明大豆酸奶对施加应变的应力响应已从弹性转变为粘性，与图 3-4 中的结果一致。CMC 的浓度对大豆酸奶的 Lissajous 曲线也有明显的影响。在 1%和 10%的应变下，随着 CMC 浓度的增加，弹性 Lissajous 曲线逐渐变宽，粘性 Lissajou 曲线逐渐变窄，表明粘性响应的比例逐渐增加(Bi et al 2018)。1000%振幅下的部分粘性 Lissajous 曲线出现自交点和二次环，原因可能是测试时的瞬时卸载应力速度超过了新累积的弹性应变(Ewoldt and McKinley 2010)。在 1%-500%的振幅下，含有不同浓度 CMC 的大豆酸奶的 E_d 和 ϕ 如表 3-5 和表 3-6 所示。弹性 Lissajous 曲线所包围的区域表示每个振荡循环中由于粘性流动而造成的能量耗散(Huang et al 2022)。每个振荡循环中的能量耗散与当样品为纯塑性体时因为粘性流动可产生的最大能量耗散的比值为能量耗散率，用于反映样品固定振幅下塑性的程度，当能量耗散率为 0 时样品表现为纯弹性体，为 1 时表现为纯塑性体(Ewoldt et al 2010)。在同一个大豆酸奶样品中，随着应变幅度的升高，同一种酸奶在每个振荡循环下的能量耗散和能量耗散率逐渐增加。表明大豆酸奶在每个振荡循环中因为粘性流动消耗的能量耗散逐渐升高，也更加接近于纯塑性的流动。在 0.7%-1.1%的 CMC 浓度下，具有 CMC0.7 的大豆酸奶的能量耗散大于含有 CMC1.2 的大豆酸奶，这表明含有 CMC0.7 的大豆酸奶在每个循环中消耗更多的能量(Huang et al 2022)。

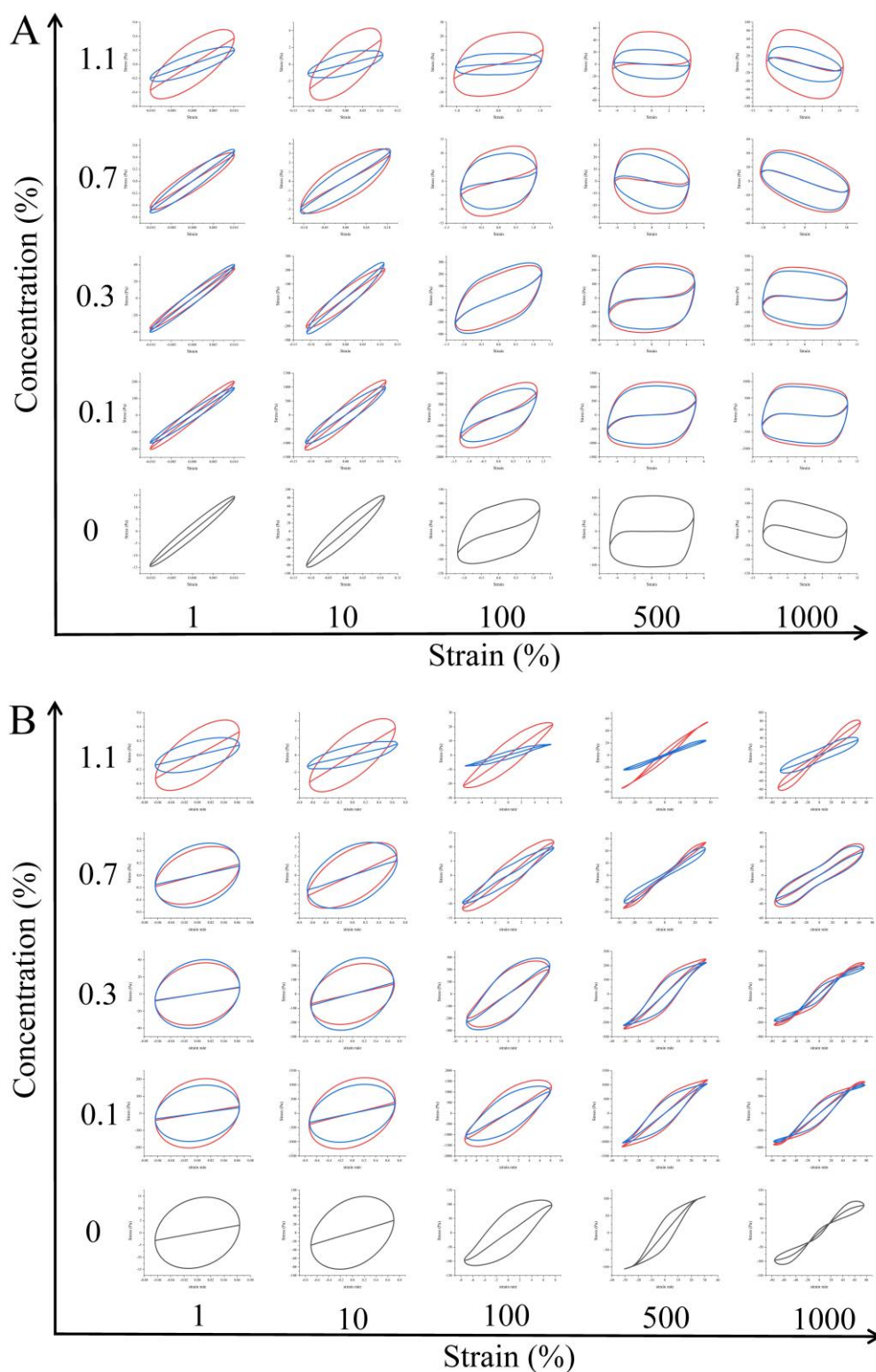


图 3-5 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2（对照（黑色）、CMC0.7（红色）和 CMC1.2（蓝色））的大豆酸奶的弹性 Lissajous 曲线（A）和粘性 Lissajous 曲线图（B）。内部实线为弹性或粘性应力。

Fig. 3-5 Elastic Lissajous curves (A) and viscous Lissajous curves (B), for soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2 (control (black), CMC0.7 (red) and CMC1.2 (blue)). The solid lines of inside are elastic or viscous stress.

表 3-5 含不同浓度 CMC 0.7 和 CMC 1.2 的大豆酸奶的能量耗散

Table 3-5 Energy dissipation for soy yogurts made with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2

	Sample	Ed1	Ed10	Ed100	Ed500
Control	SY	0.096±0.007 ^{cC}	8.023±0.895 ^{cC}	273.365±46.12 ^{cC}	1881.264±185.917 ^{cC}
	SY-0.7-0.1%	1.134±0.07 ^{ay}	99.448±7.132 ^{ay}	2886.106±171.675 ^{ay}	17255.669±1529.843 ^{ax}
	SY-0.7-0.3%	0.176±0.017 ^{by}	14.659±1.176 ^{by}	420.612±87.167 ^{bx}	3281.566±266.751 ^{bx}
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	0.01±0.001 ^{dx}	0.898±0.111 ^{dx}	45.028±0.334 ^{dx}	476.96±35.345 ^{dx}
	SY-0.7-0.7%	0.005±0.001 ^{dx}	0.539±0.042 ^{dx}	33.774±1.301 ^{dx}	481.477±50.129 ^{dx}
	SY-0.7-0.9%	0.008±0.001 ^{dx}	0.692±0.051 ^{dx}	42.142±0.005 ^{dx}	653.189±41.337 ^{dx}
	SY-0.7-1.1%	0.01±0.001 ^{dx}	0.968±0.11 ^{dx}	64.938±4.953 ^{dx}	985.769±116.868 ^{cdx}
	SY-1.2-0.1%	1.194±0.095 ^{Ax}	107.265±11.899 ^{Ax}	3128.891±382.601 ^{Ax}	17892.941±1868.955 ^{Ax}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	0.248±0.017 ^{Bx}	22.327±2.789 ^{Bx}	604.584±45.002 ^{Bx}	3727.586±437.918 ^{Bx}
	SY-1.2-0.5%	0.056±0.003 ^{CDx}	4.514±0.364 ^{Cx}	187.947±14.427 ^{Cx}	1634.704±201.957 ^{CDx}
	SY-1.2-0.7%	0.005±0.001 ^{Dx}	0.458±0.051 ^{Cx}	28.154±3.022 ^{Cx}	402.296±39.428 ^{Dx}
	SY-1.2-0.9%	0.005±0.001 ^{Dx}	0.573±0.053 ^{Cx}	32.148±2.098 ^{Cx}	520.421±31.914 ^{Dx}
	SY-1.2-1.1%	0.004±0.000 ^{Dx}	0.362±0.038 ^{Cx}	24.179±1.163 ^{Cx}	455.189±29.445 ^{Dx}

注：Ed1、Ed10、Ed100 和 Ed500 分别为在振幅为 1%、10%、100%和 500%时大豆酸奶的能量耗散。不同的标记（x 和 y）表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

Note: Ed1, Ed10, Ed100, and Ed500 represent the Energy dissipation of soy yogurt at strain of 1%, 10%, 100%, and 500%, respectively. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

表 3-6 含不同浓度 CMC 0.7 和 CMC 1.2 大豆酸奶的能量耗散率

Table 3-6 Energy dissipation rate for soy yogurts made with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2

	Sample	ϕ_1	ϕ_{10}	ϕ_{100}	ϕ_{500}
Control	SY	0.165±0.01 ^{dC}	0.235±0.016 ^{cD}	0.594±0.044 ^{bBC}	0.889±0.087 ^{abA}
	SY-0.7-0.1%	0.140±0.013 ^{dey}	0.199±0.023 ^{cx}	0.464±0.144 ^{cy}	0.731±0.064 ^{bcx}
	SY-0.7-0.3%	0.121±0.009 ^{ex}	0.171±0.012 ^{cx}	0.390±0.078 ^{cx}	0.666±0.070 ^{cx}
CMC0.7	SY-0.7-0.5%	0.254±0.014 ^{Cx}	0.412±0.049 ^{bx}	0.806±0.028 ^{ax}	0.907±0.08 ^{abx}
	SY-0.7-0.7%	0.275±0.018 ^{Cx}	0.390±0.024 ^{bx}	0.676±0.024 ^{bx}	0.892±0.118 ^{abx}
	SY-0.7-0.9%	0.411±0.032 ^{bx}	0.510±0.04 ^{ax}	0.715±0.007 ^{abx}	0.924±0.124 ^{ax}
	SY-0.7-1.1%	0.515±0.028 ^{ax}	0.566±0.071 ^{ax}	0.711±0.028 ^{abx}	0.910±0.126 ^{abx}
	SY-1.2-0.1%	0.181±0.011 ^{Cx}	0.264±0.032 ^{Dx}	0.617±0.088 ^{BCx}	0.858±0.115 ^{Ax}
CMC1.2	SY-1.2-0.3%	0.154±0.016 ^{Cx}	0.219±0.02 ^{Dx}	0.515±0.056 ^{Cx}	0.838±0.083 ^{Ax}
	SY-1.2-0.5%	0.168±0.013 ^{Cy}	0.248±0.028 ^{Dy}	0.544±0.060 ^{BCy}	0.876±0.119 ^{Ax}

SY-1.2-0.7%	0.222±0.011 ^{By}	0.329±0.037 ^{Cx}	0.705±0.089 ^{ABx}	0.880±0.105 ^{Ax}
SY-1.2-0.9%	0.250±0.015 ^{By}	0.388±0.040 ^{By}	0.635±0.158 ^{ABCx}	0.918±0.078 ^{Ax}
SY-1.2-1.1%	0.442±0.043 ^{Ay}	0.562±0.049 ^{Ax}	0.797±0.073 ^{Ax}	0.935±0.065 ^{Ax}

注： ϕ_1 、 ϕ_{10} 、 ϕ_{100} 和 ϕ_{500} 分别为在振幅为1%、10%、100%和500%时大豆酸奶的能量耗散率。不同的标记(x和y)表明在相同浓度下含有CMC0.7和CMC1.2的大豆酸奶之间存在显著性差异($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有CMC0.7和CMC1.2的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异($p < 0.05$)。

Note: ϕ_1 , ϕ_{10} , ϕ_{100} and ϕ_{500} represent the ϕ of soy yogurt at strain of 1%, 10%, 100%, and 500%, respectively. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.3 CMC 对大豆酸奶摩擦学特性的影响

摩擦学测量是反映食品的界面性质,预测食品口感的有效方法,摩擦系数(COF)和顺滑感有较强的负相关性(Dresselhuis et al 2008, Corvera-Paredes et al 2022)。图 3-6 展示了不同大豆酸奶之间的摩擦学特性。在 CMC 的浓度为 0.1%-0.3%时,样品的润滑特性从低到高分别为 SY-0.7-0.3%、SY-1.2-0.3%、SY-0.7-0.1%和 SY-1.2-0.1%,与频率扫描中 G'的排列顺序一致, G'值越高, COF 越低, 润滑特性越好。这种现象的原因可能是,在摩擦过程中刚性颗粒比软颗粒更容易被带入间隙,从而导致 COF 较低(You and SarkarG O Phillips 和 P A Williams 2021)。CMC 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶可以在摩擦副之间形成润滑层,从而降低滑动阻力。CMC0.7 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶中,大多数摩擦速度范围内表现出比浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶更低的 COF。此外,在添加相同的 CMC 中,在大多数摩擦速度下,CMC 浓度为 1.1%的大豆酸奶的 COF 高于 CMC 浓度为 0.7%的大豆酸奶,这表明 CMC 浓度过高的大豆酸奶不能获得良好的润滑特性。在口腔加工过程中舌头表面运动的平均速度为 10.34 mm/s(Peng et al 2000)。在摩擦速度为 10 mm/s 时, SY-0.7-0.7%的 COF 与 SY 相比降低了约 23%。口感的感官评估中也表明 SY-0.7-0.7%表现出最高的顺滑感得分。因此,添加 CMC0.7 在 0.5%-0.9%的浓度可以有效降低大豆酸奶的 COF,改善顺滑感。

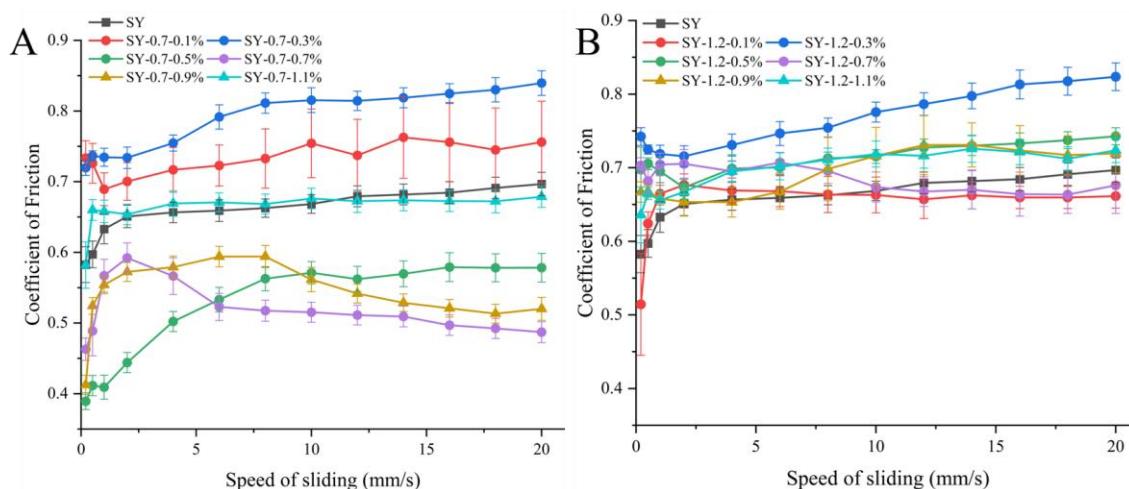


图 3-6 含不同浓度 CMC0.7 (A) 和 CMC1.2 (B) 大豆酸奶的 Stribeck 曲线

Fig. 3-6 Stribeck curves for soy yogurts prepared at different concentrations of CMC0.7 (A) and CMC1.2 (B)

3.4 CMC 对大豆酸奶口腔粘附性的影响

3.4.1 CMC 对大豆酸奶口腔残留量的影响

半固体食品中大量的感官特征都与食品在口腔残留的涂层密切相关,如厚重感,糊口性等(Camacho et al 2014)。相比于液态的食品,半固体食品通常有更长的口腔停留时间,是影响饮食和感官体验的重要因素。因为食物在吞咽后在口腔中的分布并不是均匀的,往往在舌头的外侧分布较少,在舌上面的中后侧具有较多的分布(Pivk et al 2008),因此我们测量了大豆酸奶在口腔中的残留量,来反映大豆酸奶在口腔中的粘附性(Camacho 2015)。如图 3-7 所示,在第一次使用 20 mL 水来冲洗时,几乎所有添加 CMC 的大豆酸奶的残留量均高于 SY,这表明,在经口腔加工吞咽后,添加 CMC 的大豆酸奶在口腔中具有更高的残留量。添加量为 0.3%的大豆酸奶具有较高的残留量,这和大豆酸奶在猪舌上在初始时具有较高的残留量的结果相一致(图 3-8 和图 3-9)。添加 CMC0.7 的大豆酸奶的残留量除在 0.5%的浓度外,其它浓度均高于添加 CMC1.2 的大豆酸奶。第二次冲洗的结果发现,CMC1.2 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶的口腔残留量并没有超过 SY(图 3-7B)。在第二次冲洗的结果中,添加 CMC0.7 的大豆酸奶除 0.3%外,其它浓度均显著高于添加 CMC1.2 的大豆酸奶。因此,添加 CMC0.7 在 0.7%-0.9%的浓度可以有效提高大豆酸奶在口腔中的残留量,且添加 CMC0.7 的大豆酸奶比添加 CMC1.2 的大豆酸奶在口腔中有更高的残留量。

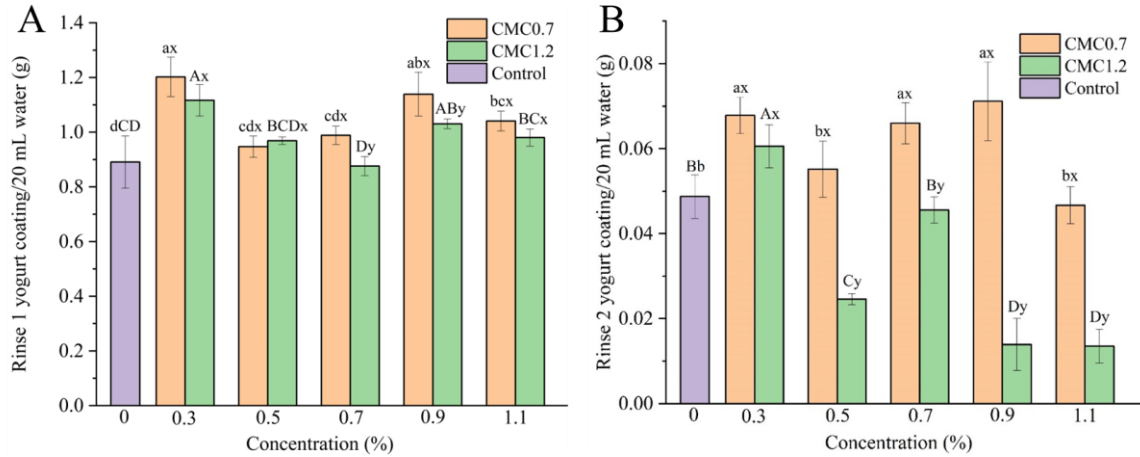


图 3-7 第一次冲洗口腔 (A) 和第二次冲洗口腔 (B) 中测得的残留量。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 3-7 The residual amounts measured in the first oral rinse (A) and the second oral rinse (B). Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.4.2 CMC 对大豆酸奶在体外猪舌残留量的影响

在口腔中，食品所粘附的主要位置是上颚和舌头，舌头是一个参与感觉和运动的器官，并传递着食品的口感特征(Doyle et al 2023, Hiimae and Palmer 2003)。在口腔环境健康的人群中，唾液会吸附到口腔的组织上，保护口腔组织，唾液可以包裹团聚进入口腔中的食物碎片(Mosca and Chen 2016, Pu et al 2021)。猪是杂食性动物，在猪舌的前端散布着与人类舌头相似的丝状乳头或真菌状乳头，猪舌被认为是模拟人类舌头的良好模型(李彦磊 2021)。如图 3-8 所示，随着冲洗的不断进行，每个图中的红色区域逐渐变得暗淡，表示猪舌上的样品量逐渐减少。SY-0.7-0.7%样品的红色区域相比于其他的样品持续的时间更长，表明其在猪舌上的残留量最高(Camacho et al 2014)。另外 CMC 浓度为 0.3%和 0.5%的大豆酸奶和 SY 在开始前 4 mL 左右的冲洗中下降的较慢，而在 6 mL 左右时下降的较快，表明在初始冲洗时较难从猪舌上冲洗下来，随着冲洗时间的延长最终被冲洗下来。而其它浓度的样品在初始的冲洗中就下降的较快 (图 3-9)，在随后的冲洗中下降的速率逐渐下降。原因可能是添加

有较高 CMC 的大豆酸奶其内部之间的内聚性较低，并且具有更多的亲水基团，因此加入到猪舌的表层容易被冲洗下来，从而表现出在初始时具有较快的下降速度，而与舌面直接接触的样品膜则具有较好的吸附性，使得后期的下降速度降低，并且具有更高内聚性的样品有更高的残留量。而 CMC 浓度为 0.3%和 0.5%的大豆酸奶有较高的内聚性，形成了较大的聚集体，同时从图 3-8 中也表现出，添加量为 0.3%和 0.5%的样品在初始的冲洗中其图像上显示出红色的不均匀分布。这种聚集体在初始时不易被冲洗下来且与舌面黏膜结合力较低，但随着冲洗量的增大，红色区域迅速降低。Camacho 研究发现酪蛋白酸钠稳定的乳液形成的涂层很可能与粘液层没有或很少有结合，从而会更容易被唾液冲走(Camacho 2015)。猪舌表面荧光强度的定量分析如图 3-9 所示，在 CMC 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶在猪舌上的残留量均超过了未添加 CMC 的大豆酸奶。添加 CMC0.7 的样品，在 20 mL 的冲洗结束后，在猪舌表面的残留量从高到低分别为添加量为 0.7%,0.9%和 1.1%的大豆酸奶，其次为 0%，0.3%和 0.5%。添加 CMC1.2 的大豆酸奶在冲洗结束后,大豆酸奶在猪舌上的残留量从高到低分别为添加量为 0.9%，1.1%，0.7%，0.3%，0%和 1.1%的大豆酸奶。SY-0.7-0.7%和 SY-1.2-0.9%分别在添加 CMC0.7 和 CMC1.2 的样品中猪舌上的残留量最高，原因可能是其与猪舌的粘附性和样品本身的内聚性均较高，较高的粘附性可以形成在猪舌面上的吸附膜，而较高的内聚性可以提高吸附膜的厚度不易被人工唾液冲走。这也和感官评分的结果相一致，SY-0.7-0.7%具有较高的糊口性、顺滑感和厚重感。在冲洗结束后，在浓度为 0.7%-0.9%时，含有 CMC0.7 的大豆酸奶具有比 CMC1.2 的大豆酸奶具有更高的在猪舌黏膜上的粘附性。综上所述，添加 CMC 在浓度为 0.7-1.1%时可以有效提高大豆酸奶在猪舌黏膜上的粘附性，SY-0.7-0.7%对猪舌表面黏膜的粘附性最强。

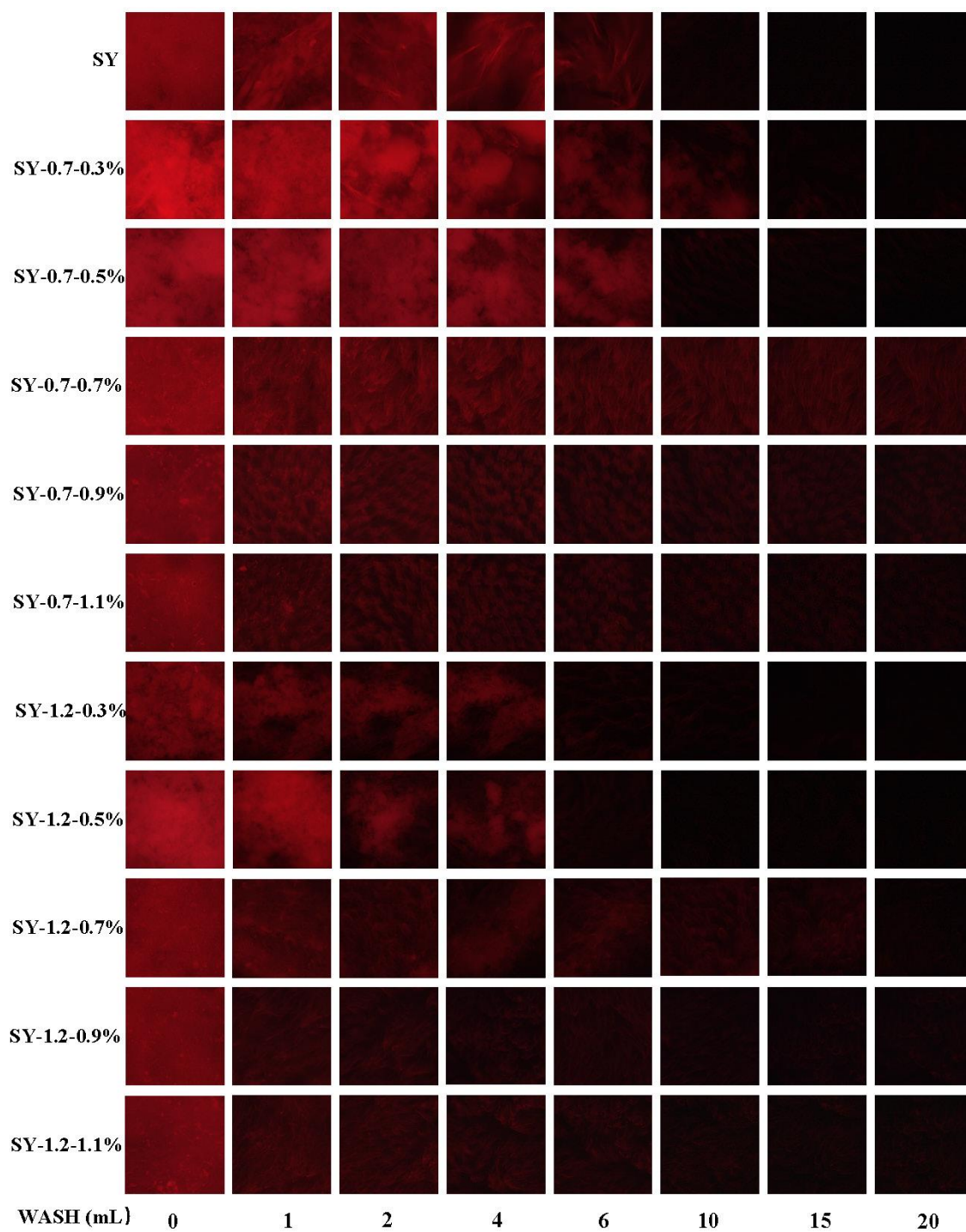


图 3-8 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在猪舌上残留的荧光图

Fig. 3-8 Fluorescence map of residual soy yogurts with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2 on pig tongue

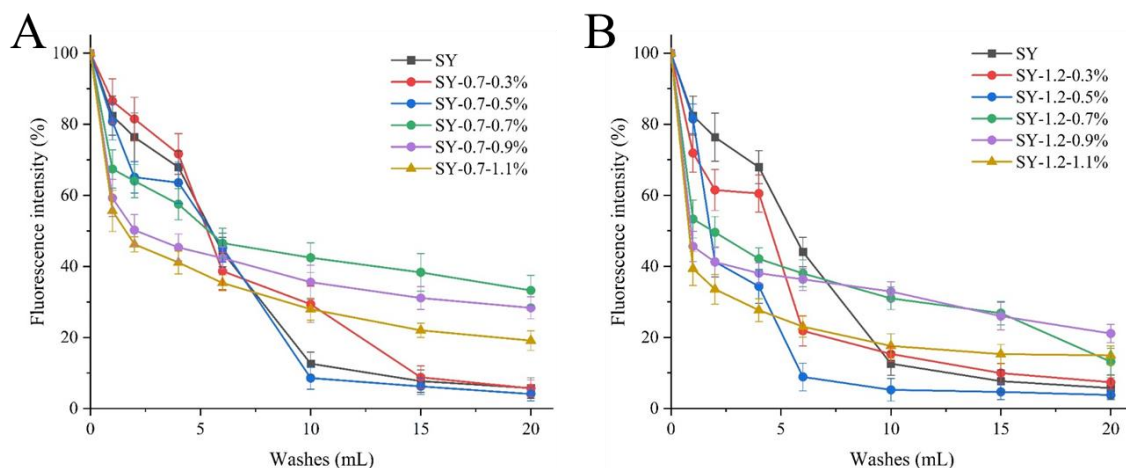


图 3-9 含有不同浓度 CMC0.7 (A)和 CMC1.2 (B) 的大豆酸奶在猪舌上残留的荧光强度

Fig. 3-9 Fluorescence intensity of residual soy yogurt with different concentration of CMC0.7 (A) and CMC1.2 (B) on pig tongue

3.5 大豆酸奶的流变学摩擦学特性、口腔粘附性与口感的相关性

大豆酸奶从进入口腔到吞咽后的口感会受到大豆的流变学、摩擦学和口腔粘附性的影响，为了探究其与大豆酸奶口感之间的相关性，如图 3-10 所示，展示了大豆酸奶的流变学、摩擦学特性等与口感的相关性热图。在流变学测量中，口感特征与 K 、 G_H 、 G_V 、 η_N 等与大豆酸奶的硬度或稠度成正比的参数呈负相关。在口腔加工中大豆酸奶几乎不需要用牙齿咀嚼，而是在舌头、上颚和其他口腔结构之间经历更微妙的过程(Guo 2021)。与大豆酸奶的感官评分呈负相关的参数越高，在口腔加工过程中的障碍越大，导致口感评估评分越低。因此，CMC 浓度为 0.3%的大豆酸奶具有更高的粘度和凝胶强度，则会导致较低的口感感官评分。然而，添加浓度为 0.5%-1.1%CMC 的大豆酸奶表现出较低的粘度和凝胶强度，则有了更高的口感感官评分。另外， n 、 n' 、 n'' 、 $\tan\delta_{LVR}$ 、 γ_c 和 ϕ 等参数与大豆酸奶的口感感官得分呈正相关。 $\tan\delta_{LVR}$ 代表大豆酸奶的流动性，表明更好的流动性和较高的口感感官评分之间呈正相关。参数 n 、 n' 、 n'' 和 γ_c 反映大豆酸奶对应变剪切或频率的抵抗力，其中 n 表示剪切稀化行为的程度，并且与厚度具有显著的正相关。因此，具有较低剪切稀化行为的大豆酸奶则会表现出来更好的厚重感，同样在牛乳饮料中也发现了相似的结果(Ji et al 2023)。因此，大豆酸奶具有更加柔软、更好的流动性和对剪切有更强抵抗力的大豆酸奶会表现出更好的口感。添加 0.5%-1.1%浓度 CMC 的大豆酸奶，具有更好的流动性、塑性、抗剪切稀化性和抗大应变能力，则表现出了更高的口感评分。另外，顺

滑感与大豆酸奶的 COF 和部分物理特性均表现出了显著的相关性，Baniasadidehkordi 等人在牛乳酸奶中也得到了类似的结果(Baniasadidehkordi and JoynerH S Joyner 2019)。大豆酸奶的颗粒粒径与口感中的颗粒感有显著的相关性，也与顺滑感和厚重感等因素有着显著的相关性。然而，大豆酸奶在口腔中的残留量与厚度和糊口性并没有显著的相关性。原因可能如下，厚重感可能不仅与口腔加工中，在舌头和上颚之间所感受到的厚度有关，还需要样品具有较好的粘附性，让口腔感受到样品带来的包裹感，才会得到较强的厚重感。糊口性被定义为样品在吞咽后在口腔中的残留对口腔形成的包裹的感觉。在吞咽后，虽然在口腔中具有一定的残留量，但残留的样品没有在口腔形成分布均匀的涂层、没有对口腔形成整体的包裹感依旧不能得到较好的糊口性。

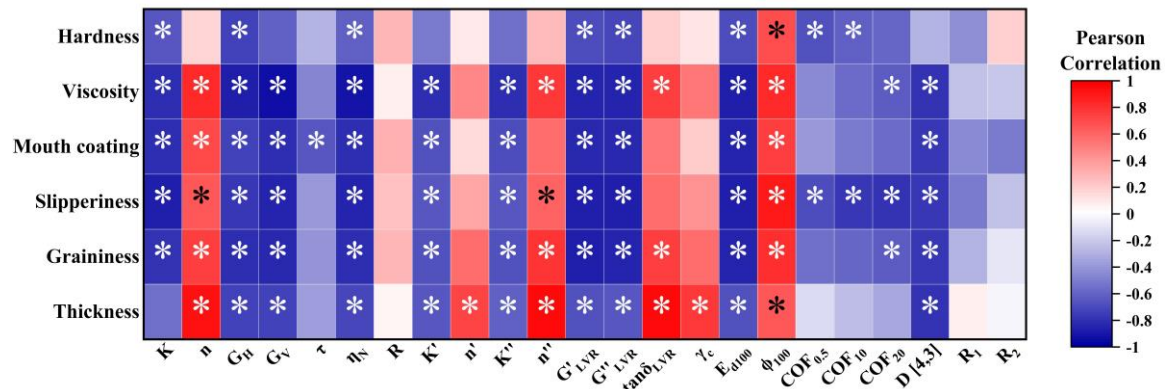


图 3-10 物理性质和口感评价之间的相关性热图。红色表示正相关，蓝色表示负相关，“*”表示显著性相关 ($p < 0.05$)。E_{d100} 和 φ₁₀₀ 表示 100%应变下每个 LAOS 循环的能量耗散和能量耗散率。COF_{0.5}、COF₁₀ 和 COF₂₀ 分别是在 0.5、10 和 20 mm/s 摩擦速度下的大豆酸奶的 COF。R₁ 和 R₂ 分别表示第 1 和第 2 次冲洗口腔中测得的残留量。

Fig. 3-10 Heatmap of the correlation between physical properties and sensory evaluation. Red indicates a positive correlation, blue indicates a negative correlation, and “*” denotes statistical significance ($p < 0.05$). E_{d100} and φ₁₀₀ represent the energy dissipation and energy dissipation rate at 100% strain for each LAOS cycle, respectively. COF_{0.5}, COF₁₀, and COF₂₀ are the coefficients of friction (COF) of soy yogurt at friction velocities of 0.5, 10, and 20 mm/s, respectively. R₁ and R₂ represent the residual amounts after the 1st and 2nd mouth rinses, respectively.

4 本章小结

CMC 可以有效调控大豆酸奶的流变学特性。流变学测试发现，大豆酸奶为假塑性流体且在 LVR 内 G' 高于 G''。在两种取代度下，随着 CMC 的浓度从 0% 增加到 1.1%，大豆酸奶的粘度、G' 和 G'' 均表现出先升高后下降的趋势，并且分别受到剪切

速率和震荡频率的影响有降低的趋势。CMC 的浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶表现出了比 SY 更高的粘度、 G' 和 G'' ，而其他浓度的大豆酸奶则低于 SY。另外，在相同浓度下，含有 CMC1.2 的大豆酸奶的 G' 高于含有 CMC0.7 的大豆酸奶。LAOS 实验表明，所有的样品均属于 I 型流体，SY-0.7-1.1%具有最长的 LVR 为 2.36%，SY-1.2-0.5%的 LVR 最短为 0.90%。随着应变的不断增大，大豆酸奶对施加应变的响应会从弹性响应转变为粘性响应，同时每个循环中的能量耗散率会因为粘性响应比例的升高而逐渐增加。在 1%和 10%的应变下，随着 CMC 浓度的升高，发现应变中的粘性响应的比例逐渐升高。在 1.1%的浓度下，含有 CMC0.7 的大豆酸奶的弹性 Lissajous 曲线所包围的面积明显大于含有 CMC1.2 的大豆酸奶，这表明含有 CMC0.7 的大豆酸奶在每个震荡循环中的能量耗散会大于含有 CMC1.2 的大豆酸奶。

添加 CMC0.7 在 0.7%-1.1%浓度下可以有效降低大豆酸奶的 COF。摩擦学测试表明，在 CMC 的浓度为 0.1%-0.3%时，大豆酸奶的润滑特性的排列顺序与对应的 G' 的排列顺序一致， G' 值越高，COF 越低，润滑特性越好。在添加 CMC0.7 浓度为 0.7%-1.1%的大豆酸奶的 COF 在整个摩擦速度中均低于 SY。SY-0.7-0.7%在大部分滑动速度下具有最低的 COF，且在摩擦速度为 10 mm/s 时其比 SY 降低了约 23%。

CMC 可以有效调控大豆酸奶的口腔粘附性。通过大豆酸奶在猪舌残留量的研究发现，CMC 浓度为 0.3%和 0.5%的大豆酸奶和 SY 在初始冲洗时，猪舌残留量的下降较慢，但随着冲刷量的延长，在猪舌上的残留量会迅速降低。而其它浓度的样品在冲洗初始时，残留量下降较快，随后下降速度降低。冲洗结束后，SY-0.7-0.7%在猪舌上的残留量最高。相关性分析表明，大豆酸奶中的糊口性、颗粒感、顺滑感、厚重感和 n 、 n'' 、 $\tan\delta_{LVR}$ 和 ϕ_{100} 成显著的正相关性，与 K 、 K' 、 K'' 、 E_{d100} 、 $D[4,3]$ 、COF 成显著的负相关。

第四章 羧甲基纤维素对大豆酸奶中蛋白质结构的影响研究

1 引言

前两章的研究得出不同浓度与电荷密度的羧甲基纤维素（CMC）可以有效调控大豆酸奶的凝胶特性、稳定性、口感和口腔粘附性。Yang 等人发现乳酸菌发酵诱导大豆蛋白凝胶的凝胶特性与蛋白质的结构密切相关，蛋白质在发酵过程中会解折叠，疏水基团暴露在外形成疏水聚集体，巯基在这过程中被氧化形成二硫键，促进凝胶网络的形成(Yang et al 2020)。因此，CMC 的浓度与电荷密度对大豆酸奶蛋白质结构的影响，以及蛋白质结构与大豆酸奶口感和凝胶特性的关系有必要进一步研究。

Zhou 等人比较了正常、7S 球蛋白缺乏和脂氧合酶缺乏的大豆原料生产的大豆酸奶的凝胶特性，发现 LOX 缺乏制备的酸奶表现出最高的凝胶强度、最致密的凝胶网络结构，原因可能是 LOX 缺乏的蛋白质组分具有更多的可用巯基基团，促进形成致密的蛋白质凝胶网络结构(Zhou et al 2019)。Li 等人对比了 3 种商业豌豆蛋白和 1 种实验室提取豌豆蛋白，发现实验室提取的豌豆蛋白质凝胶表现出更大的硬度和更致密的凝胶网络，原因可能是在商业豌豆蛋白中发酵诱导凝胶化的主要因素亚基 legumin 被解离和 β -折叠结构含量的下降(Li et al 2022)。Feyzi 等人认为 β -折叠结构对在培养发酵过程中的凝胶形成中起着关键作用(Feyzi et al 2018)。向蛋白质凝胶中加入油脂，会使得体系中的 β -折叠含量升高同时 α -螺旋、 β -转角和无规则卷曲含量减少，这种结构的转变有助于凝胶的形成(Han et al 2023, Zhou et al 2019)。Yang 等人发现，由高产胞外多糖（EPS）的乳酸菌株发酵诱导的大豆蛋白凝胶会使蛋白质出现从 β -折叠到 α -螺旋结构的转变，并增强疏水相互作用，促进形成均匀的三维网状凝胶结构(Yang et al 2022)。Hickisch 等人发现经过超高温处理（UHT）的羽扇豆基酸奶比巴氏杀菌处理有更高的硬度、稠度，更致密均匀的微结构(Hickisch et al 2016)。原因可能是 UHT 处理有助于蛋白质的展开，增加巯基基团的暴露，并增加二硫键的含量，导致分子间或分子内反应，增强交联作用，促进形成更致密的凝胶网络(Hickisch et al 2016)。

本章通过测量 Zeta 电位、聚丙烯酰胺凝胶电泳（SDS-PAGE）、表面疏水性、巯基含量、紫外光谱、荧光光谱和拉曼光谱探究了 CMC 的浓度和电荷密度对大豆酸

奶蛋白质结构的影响，并分析了大豆酸奶中的蛋白质结构与口感、流变学、摩擦学等参数之间的相关性。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

磷酸氢二钠	分析纯	国药集团化学试剂公司
磷酸二氢钾	分析纯	国药集团化学试剂公司
8-苯胺-1-萘磺酸	≥ 98%	美国Sigma-Aldrich公司
尿素	分析纯	国药集团化学试剂公司
Tris-base	≥ 99.9%	Biosharp生物科技有限公司
甘氨酸	> 99%	北京鼎国昌盛生物技术公司
二硫代双硝基苯甲酸	≥ 98%	上海源叶生物科技有限公司
乙二胺四乙酸二钠	分析纯	国药集团化学试剂公司
十二烷基硫酸钠 (SDS)	电泳级	美国Genview公司
蛋白质标准品	生化试剂	美国Thermo公司
Quick Blue快速染胶液	\	北京博奥龙免疫技术有限公司
BCA试剂盒	\	南京建成生物工程研究所
SDS-PAGE凝胶配制试剂盒	\	碧云天生物技术公司
SDS-PAGE蛋白上样缓冲液	\	碧云天生物技术公司

2.2 实验仪器

冷冻离心机	H1850R	湖南湘仪实验室仪器公司
电子天平	ME204E	梅特勒-托利多仪器公司
pH计	FE20	梅特勒-托利多仪器公司
冰箱	BCD-249WDEGU1	青岛海尔股份有限公司
电泳槽	VE-180	上海天能科技公司
电泳仪	DYY-10C	北京市六一仪器厂
翘板摇床	SK-R1807-E	大龙兴创实验仪器公司

离心机	5424	德国Eppendorf公司
凝胶成像分析系统	Universal Hood II	美国Bio-Rad公司
荧光光谱仪	F-4600	日本HITACHI公司
酶标仪	Spark	瑞士TECAN公司
紫外分光光度计	UV-1100	瑞利分析仪器有限公司
纳米粒度电位分析仪	NanoZS	英国Malvern公司
激光共聚焦拉曼光谱仪	LabRAM HR	法国Horiba公司

2.3 实验方法

2.3.1 大豆酸奶的制备

同第三章 2.3.1

2.3.2 大豆酸奶的 Zeta 电位测试

采用 Zeta 电位仪来测定大豆酸奶稀释液的 Zeta 电位。将后熟 12 h 的大豆酸奶用去离子水稀释 100 倍制备粒子稀释液。取适量稀释液于样品池中,温度设置为 25 °C,运行系统进行测试(Mu et al 2022)。

2.3.3 大豆酸奶中蛋白质的表面疏水性测定

8-苯胺-1-萘磺酸 (ANS) 作为荧光探针,通过荧光分光光度计测定大豆酸奶的表面疏水性 (H_0)。用 pH 7.0 的磷酸盐缓冲液 (PBS) 对样品进行梯度稀释,制备蛋白浓度为 0.005、0.01、0.05、0.1 和 0.5 mg/mL 的稀释液。然后将 40 μ L 的 10 mM 的 ANS 溶液加入到 5 mL 的稀释液中。激发波长为 390 nm,发射波长为 470 nm,发射和激发狭缝设置为 5 nm,所有测量均在 25 °C 下进行。绘制每种样品的标准曲线,计算得到 H_0 (Xu and Liu 2016)。

2.3.4 大豆酸奶中蛋白质巯基含量测定

将 50 mg 样品与 5 mL Tris-甘氨酸缓冲液 (8 mol/L 尿素、0.09 mol/L 甘氨酸、4 mol/L 乙二胺四乙酸二钠、0.086 mol/L Tris) 和 40 μ L Ellman 试剂 (溶解在 Tris-甘

氨酸缓冲液中的 5,5-二硫代双-2-硝基苯甲酸, 4 mg/mL) 混合均匀, 在 25 °C 避光保持 30 min。将混合物以 5000 g 离心 10 min 收集上清液, 在 412 nm 处测量上清液的吸光度(Yang et al 2021)。

2.3.5 SDS-PAGE 分析

使用 PBS 缓冲液 (pH 7.0) 稀释大豆酸奶的蛋白质浓度为 2 mg/mL 的样品稀释液, 并在沸水浴中用蛋白质负载染料加热 5 min, 以 5000 g, 5 min 离心取上清液。堆叠凝胶 (5%) 和分离凝胶 (12%) 分别在 80 V 和 120 V 下进行电泳。电泳结束后使用 Quick Blue 快速染胶液染色 2 h, 然后用去离子水脱色 6 h 在凝胶成像系统中拍照(Ma et al 2022)。

2.3.6 内源荧光光谱分析

大豆酸奶样品用 pH 为 7 的 PBS 缓冲液稀释到蛋白含量为 0.2 mg/mL。稀释液在 290 nm 处激发, 扫描 300-500 nm 的荧光发射光谱, 狭缝宽 5 nm, 扫描速率 200 nm/min(彭星云 2014)。

2.3.7 紫外吸收光谱分析

紫外光谱由紫外可见分光光度计测定。测定前不同样品, 均将蛋白质含量调节到 0.2 mg/mL, 置于石英比色皿中进行测量。扫描范围为 200 nm-700 nm, 间隔为 0.5 nm, 扫描速率为 50 nm/min。所有测量值均在 25 °C 下测定, 每个测量值重复 3 次(Liu et al 2023)。

2.3.8 拉曼光谱分析

使用激光共聚焦拉曼显微镜对大豆酸奶进行拉曼测量。取大豆酸奶于显微镜下的载玻片上, 收集其拉曼散射。该仪器配备了 785 nm 激光器、单个全息光栅和在 -40 °C 下工作的热电冷却电荷耦合设备探测器。使用 3 次扫描的平均光谱为获取光谱, 每次扫描的曝光时间为 10 s, 并存储拉曼位移为 400-2000 cm^{-1} 范围内的拉曼光谱信号, 对拉曼信号进行归一化处理, 并使用 PeakFit v4.1 进行多峰拟合获取大豆酸奶的二级结构含量和二硫键构象含量(Zhang et al 2016)。

2.3.9 统计分析

用 IBM SPSS Statistics 26 软件 Duncan 检验进行实验数据的方差分析(ANOVA) ($p < 0.05$ 时为存在显著差异), 所有的图均使用 origin 2022 绘制。选择除非特别声明, 否则所有处理均重复 3 次。

3 结果与分析

3.1 CMC 对大豆酸奶中颗粒的 Zeta 电位的影响

Zeta 电位值的正负可以反映粒子所带的电荷类型, 绝对值的大小可以反映在所处体系中颗粒的带电程度, 带电程度越高表明在所处体系中越稳定(Malhotra and Coupland 2004, Patil et al 2007)。如图 4-1 所示, 所有样品的 Zeta 电位值均显示为负数, 表明大豆酸奶中的颗粒在中性条件下均表现为负电性。随着 CMC 浓度的升高, 大豆酸奶分散粒子的稳定性逐渐提高(Kong et al 2022), 这与第二章中所探究的大豆酸奶的稳定性结果具有一定的不同, 原因在于本次所测得的结果是稀释后所测得, 不能代表原来大豆酸奶的稳定性。随着 CMC 浓度的升高, Zeta 电位的绝对值也逐渐增大, 表明 CMC 的加入改变了大豆酸奶中粒子的带电程度, 因此 CMC 和大豆酸奶中的蛋白质可能出现了相互作用聚集在一起。Zeta 电位的绝对值随 CMC 浓度的升高而有升高趋势的原因可能是 CMC 电离后会携带有负电荷, 而 CMC 在与大豆酸奶中的蛋白质静电结合后, 可能依旧会暴露出负电荷, 使得颗粒的总体带电程度升高, 从而导致随着 CMC 浓度的升高大豆酸奶颗粒的 Zeta 电位绝对值逐渐升高。王翠娜在 pH 为 7 的乳清蛋白和果胶的混合体系中也发现随着果胶浓度的升高, Zeta 电位的绝对值逐渐升高(王翠娜 2015), Wang 等人也发现在 pH 为 7 时 SPI 和大豆壳多糖的混合体系中的 Zeta 电位的绝对值高于单独的 SPI(Wang et al 2020)。

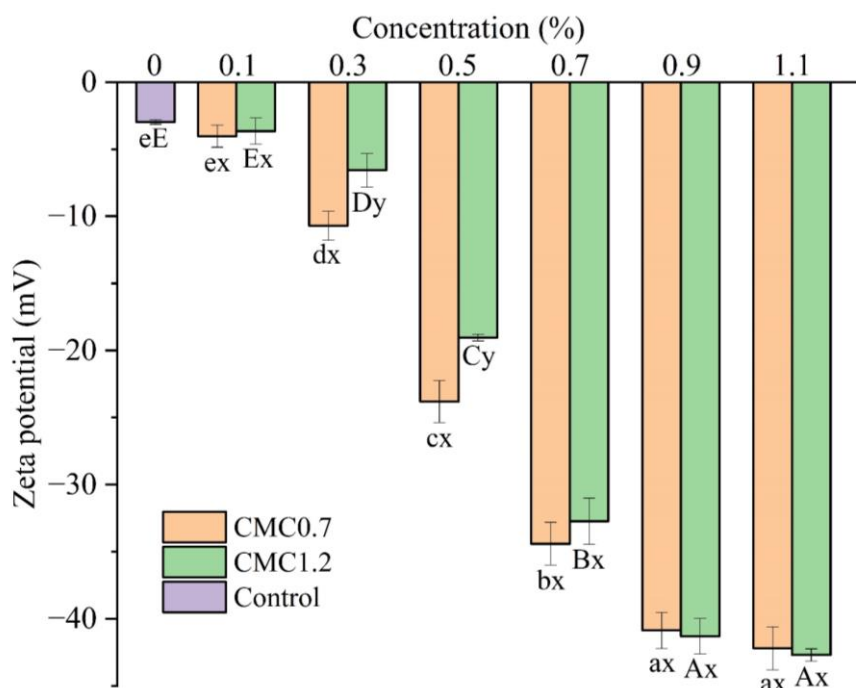


图 4-1 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶分散颗粒的 Zeta 电位值。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 4-1 Zeta potential values of dispersed particles in soy yogurt with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.2 CMC 对大豆酸奶中蛋白质亚基的影响

7S 的 β 亚基和 11S 的 B 亚基是组成粒子蛋白的主要亚基, 两者的相对含量占粒子蛋白的 50%-70%, 可溶性蛋白主要是 7S 的 α' , α 和 11S 的 A 亚基(彭璐 2022)。大豆中的蛋白质亚基可以分为: 倾向于形成单体、寡聚体, 并通常分布在粒子表面的 α' 、 α 和 A 亚基, 倾向于构成离子蛋白核心的 β 亚基, 主要与脂肪结合的亲脂蛋白成分 BX1 和 BX2(彭星云 2014)。如图 4-2 所示, SY 和 CMC0.7 浓度为 0.1%-0.5% 的大豆酸奶和 CMC1.2 浓度为 0.1%-0.3% 浓度的大豆酸奶, α' 和 α 亚基条带几乎消失, 表明这两个亚基可能在酸奶的发酵过程中分解, 而其它浓度样品还存在较为明显的条带。脂肪氧化酶 (LOX) 和 A3 条带经发酵后几乎消失, 表明这个蛋白质亚基在发酵过程中也可能被降解。此外凝集素 (Lectin) 在添加 CMC 浓度为 0.7%, 0.9%

和 1.1% 的样品中还具有少量的条带，而其它浓度则几乎没有明显条带。因此发酵对于大豆中的蛋白质具有一定的降解作用，而添加 CMC 在 0.7%-1.1% 的浓度对于大豆酸奶中的蛋白质在发酵过程中的降解可能具有一定阻碍作用。

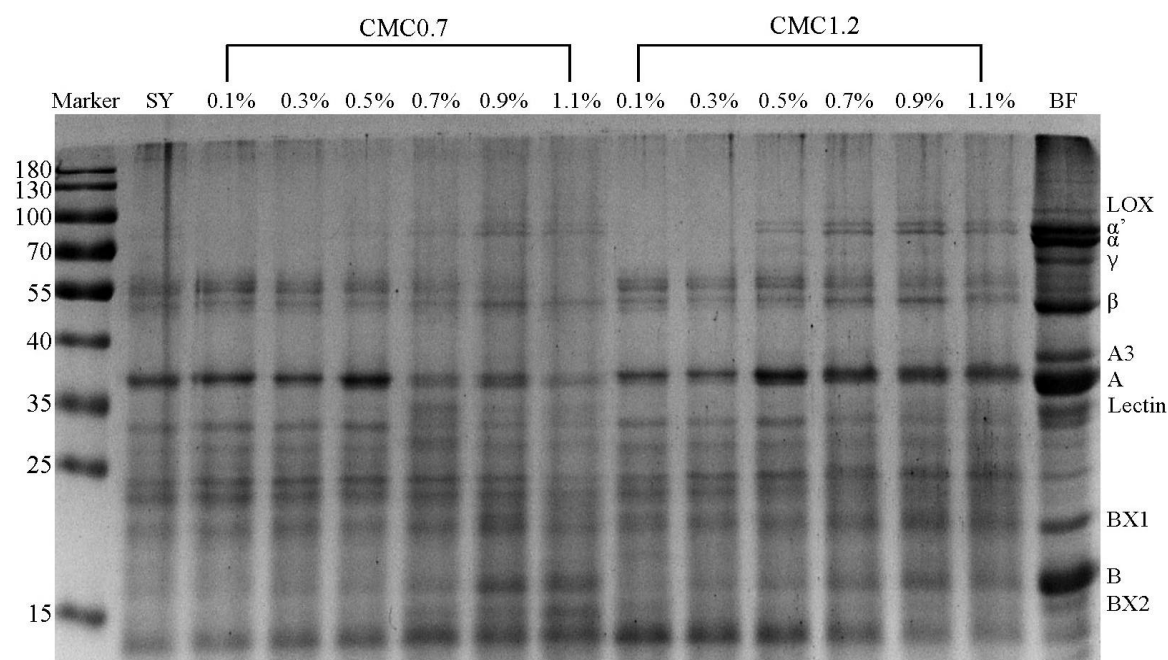


图 4-2 大豆酸奶和发酵前的 SDS-PAGE 图，其中 BF 为发酵前的样品

Fig. 4-2 SDS-PAGE images of soy yogurt and pre fermentation samples, where BF is the sample before fermentation

3.3 CMC 对大豆酸奶中蛋白质表面疏水性的影响

蛋白质的表面疏水性 (H_0)，反映着蛋白质的结构特征，当蛋白质的疏水基团暴露出来，且疏水基团之间没有进行结合，就会展现出来表面疏水性，蛋白质的 H_0 由蛋白质表面上与极性水环境接触的疏水基团的数量决定(彭璐 2022)。当蛋白质的疏水性增加时，蛋白质的二级、三级结构可能发生改变，二硫键含量降低，使得蛋白质间相互作用减弱，蛋白质分子的柔性增加(Jiang et al 2011)。如图 4-3 所示，随着 CMC 的浓度从 0 升高到 1.1%，大豆酸奶中蛋白质的 H_0 均展现出了先降低后升高的趋势。除 SY-0.7-0.5% 样品外，其余添加量在 0.5% 及以上时均显著大于 SY，然而 CMC 浓度为 0.1%-0.3% 的大豆酸奶的 H_0 小于 SY。因此 CMC 的加入浓度在 0.1% 到 0.3% 时，可能会因为静电作用，使得已经聚集的蛋白质颗粒更进一步聚集从而使得蛋白质颗粒表面的疏水性基团被掩盖，使得蛋白质颗粒的 H_0 小于 SY。随着 CMC 浓度升高到 0.9%，蛋白质 H_0 升高的原因可能是 CMC 和蛋白质之间形成竞争性结合，

阻碍了在发酵过程中的蛋白质聚集从而使得蛋白质的疏水基团暴露，使得疏水性提高。而随着 CMC 浓度的升高到 1.1%， H_0 下降的原因可能是 CMC 与蛋白质的结合使得蛋白质表面的疏水性基团被遮挡从而使得疏水性降低。在浓度为 0.5% 和 0.7% 时，添加 CMC0.7 大豆酸奶的 H_0 显著小于添加 CMC1.2 的样品，然而在添加量为 0.9% 和 1.1% 时，添加 CMC0.7 大豆酸奶的 H_0 显著大于添加 CMC1.2 的样品。原因可能是当 CMC 的浓度为 0.5% 和 0.7% 时，相比于 CMC0.7，添加 CMC1.2 的大豆酸奶提供了更多的电荷，使得蛋白质之间的聚集具有更大的阻碍作用，使得在 0.5% 和 0.7% 浓度时，添加 CMC1.2 的样品具有更高的 H_0 ，而当 CMC 的浓度进一步增加时，过高的电荷量反而造成了对蛋白质表面疏水基团的屏蔽(Xu and Liu 2016)。因此 CMC 所携带的电荷密度和浓度对于蛋白质颗粒的表面性质具有一定的影响。

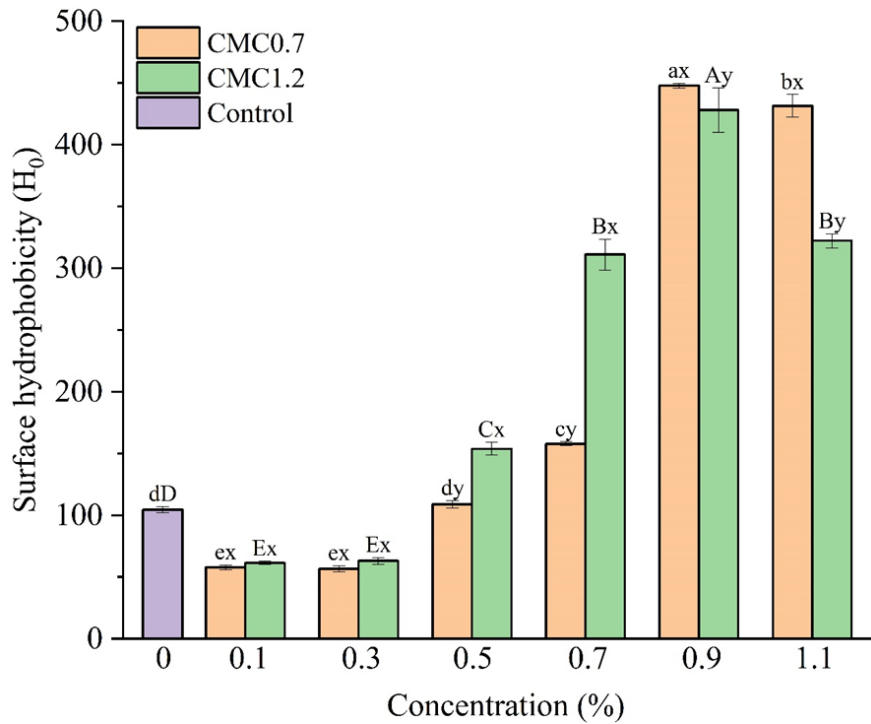


图 4-3 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的表面疏水性 (H_0)。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 4-3 The surface hydrophobicity of soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 and CMC1.2. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.4 CMC 对大豆酸奶中蛋白质巯基含量的影响

大豆酸奶中的巯基含量，代表蛋白质可以进一步聚集的程度，巯基之间通过氧化可以形成二硫键，促进蛋白质之间通过共价交联聚集在一起(Hickisch et al 2016)。如图 4-4 所示，在添加 CMC0.7 的样品中，浓度为 0.9%和 1.1%的大豆酸奶显著高于 SY，而其它浓度与 SY 并没有出现显著性的差异，这表明 CMC0.7 需要在较高的浓度（0.9%和 1.1%）时会阻碍蛋白质间二硫键的形成。而含有 CMC1.2 的大豆酸奶在 0.5%到 1.1%浓度时均显著高于 SY，表明添加 CMC1.2 的样品在 0.5%及以上时就开始阻碍了蛋白质间二硫键的形成。另外，CMC 的浓度在 0.5%-0.9%时，含 CMC1.2 大豆酸奶的巯基含量显著高于含有 CMC0.7 的大豆酸奶，这表明在一定浓度范围内，CMC1.2 具有比 CMC0.7 更强的阻断大豆酸奶中蛋白质二硫键形成的能力。

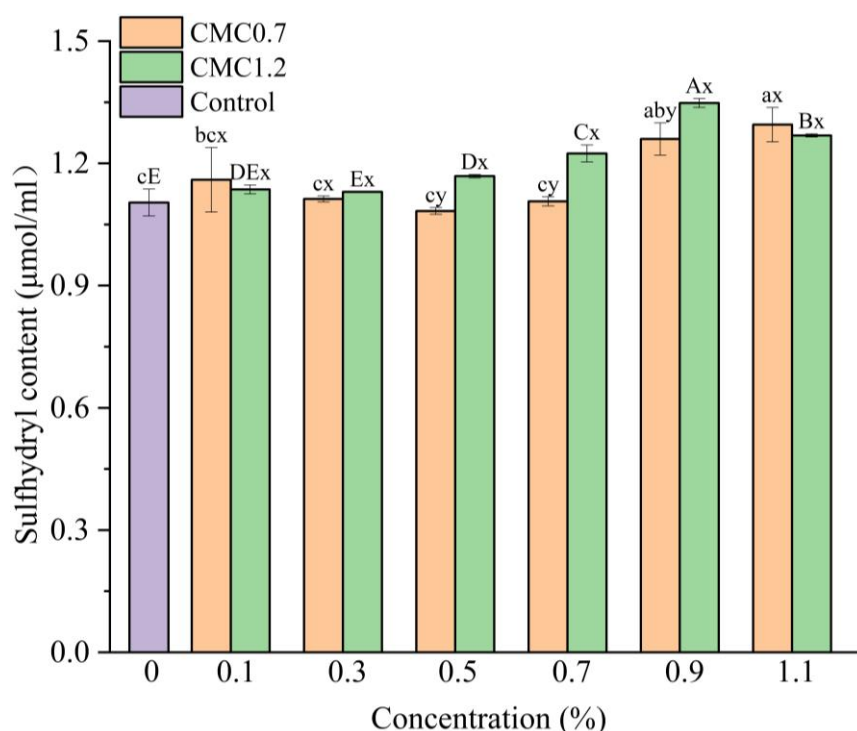


图 4-4 含有不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶的巯基含量。不同的标记 (x 和 y) 表明在相同浓度下含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同小写字母和不同大写字母的标记分别表明含有 CMC0.7 和 CMC1.2 的大豆酸奶在不同浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 4-4 The sulfhydryl content of soy yogurts with different concentration of CMC0.7 and CMC1.2. Different labels (x and y) indicate significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at the same concentration ($p < 0.05$). Different lowercase and uppercase letters denote significant differences between soy yogurts containing CMC 0.7 and CMC 1.2 at different concentrations ($p < 0.05$).

3.5 CMC 对大豆酸奶内源荧光光谱的影响

蛋白质中的色氨酸残基是提供蛋白质荧光光谱的主要生色团，其暴露的数量和所处环境影响着荧光强度和最大发射波长，从而可以反映蛋白质的结构特点和蛋白质之间的相互作用(Keerati-u-rai et al 2012)。蛋白质在发酵过程中会解折叠，促进疏水相互作用和二硫键的形成，促进形成凝胶网络(Yang et al 2020)。如图 4-5 所示，添加 CMC0.7 的大豆酸奶中，浓度为 0.9%，1.1%和 0.1%中的最大荧光强度值明显低于 SY，而其它浓度下的荧光强度值与 SY 相近，表明含有 0.1%，0.9%和 1.1%浓度 CMC0.7 的大豆酸奶体系中，色氨酸被埋藏在蛋白质内部(Wang et al 2020)。原因可能是添加量为 0.1%时，因为蛋白质之间的聚集导致了其荧光强度的下降。而在浓度为 0.9%和 1.1%时，色氨酸被屏蔽的原因可能是 CMC 浓度的升高，在蛋白质周围形成了屏障阻碍了色氨酸的暴露，同样 SY-1.2-1.1%的荧光强度也小于 SY。在添加 CMC1.2 的大豆酸奶中，浓度为 0.1%-0.9%的样品荧光强度峰值高于 SY，表明含有 CMC1.2 的大豆酸奶中色氨酸残基的暴露程度高于 SY(Zhan et al 2018)。因此，CMC1.2 比 CMC0.7 可能具有更强的阻碍蛋白质分子折叠的作用，从而会暴露出来更多的色氨酸残基。

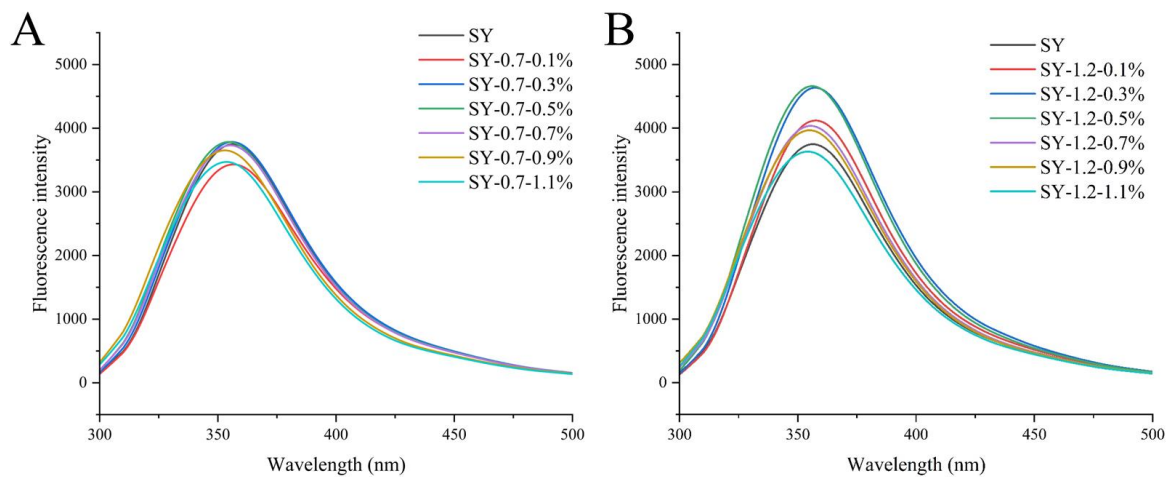


图 4-5 含有不同浓度 CMC0.7 (A) 和 CMC1.2 (B) 的大豆酸奶的内源荧光光谱

Fig. 4-5 The intrinsic fluorescence spectra for soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 (A) and CMC1.2 (B)

3.6 CMC 对大豆酸奶的紫外吸收光谱的影响

蛋白质的紫外吸收光谱, 在 260 nm 处附近的波长提供着苯丙氨酸残基的信息 (Yang et al 2021, Liu et al 2023)。如图 4-6 所示, 含有不同浓度和不同电荷密度 CMC 的大豆酸奶的紫外吸收的最大吸收波长和峰强度发生了变化, 表明 CMC 的加入改变了大豆酸奶中蛋白质氨基酸的环境 (Wang et al 2020)。随着 CMC 浓度从 0% 升高到 1.1%, 吸光度出现了升高的趋势, 表明蛋白质分子内的苯丙氨酸残基暴露的量升高, 原因可能是 CMC 与蛋白质之间的聚集形成蛋白多糖复合物阻碍了蛋白质之间的聚集, 从而暴露出了更高含量的苯丙氨酸残基 (Lange and Balny 2002)。CMC0.7 浓度为 0.1%-0.7% 的大豆酸奶的吸光度与 SY 接近, 浓度为 0.9% 和 1.1% 的大豆酸奶明显高于 SY, 而 CMC1.2 浓度为 0.1%-1.1% 的大豆酸奶的吸光度明显高于 SY, 表明 CMC1.2 可能比 CMC0.7 具有更强的促进蛋白质解折叠或阻碍蛋白质聚集的能力。因此 CMC 的加入可能会在发酵过程中促进蛋白质的解折叠或阻碍蛋白质间的聚集, 且 CMC1.2 具有比 CMC0.7 更强的效果。

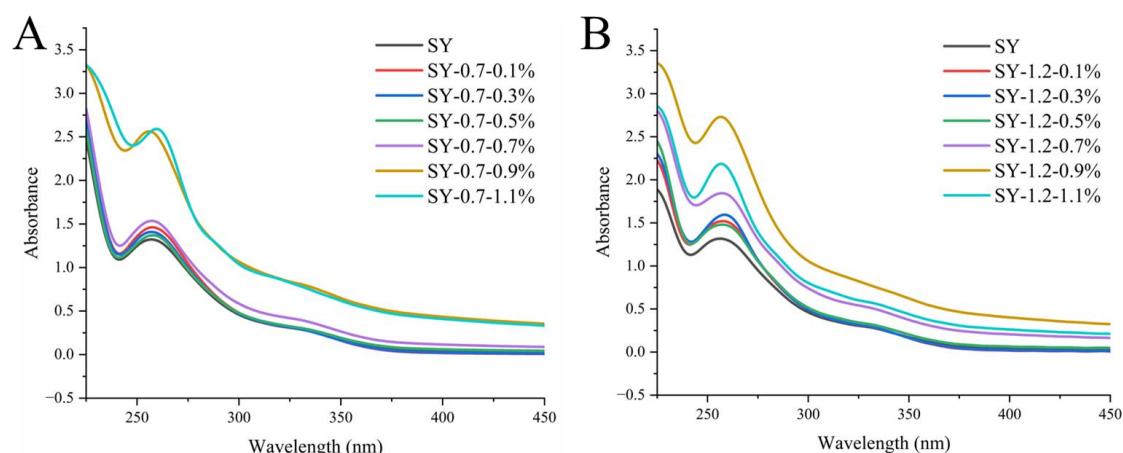


图 4-6 含有不同浓度 CMC0.7 (A) 和 CMC1.2 (B) 的大豆酸奶的紫外光谱

Fig. 4-6 The UV spectra for soy yogurts with different concentrations of CMC0.7 (A) and CMC1.2 (B)

3.7 CMC 对大豆酸奶中蛋白质二级结构及二硫键构型的影响

拉曼光谱是用来分析酸奶中蛋白质结构中的二级结构含量与二硫键构象的有效方法 (Herrero 2008)。如图 4-7A 和 4-7B 所示, 添加不同浓度和不同电荷密度的 CMC 的大豆酸奶的拉曼光谱具有一定的差异性, 表明 CMC 的加入影响大豆酸奶中蛋白

质二级结构和二硫键构型的组成。拉曼位移在 $1645\text{-}1690\text{ cm}^{-1}$ 处为酰胺一带，反映着蛋白质中的二级结构信息，其中 $1645\text{-}1660\text{ cm}^{-1}$ 为 α -螺旋， $1660\text{-}1670\text{ cm}^{-1}$ 为无规则卷曲， $1670\text{-}1680\text{ cm}^{-1}$ 为 β -折叠， $1680\text{-}1690\text{ cm}^{-1}$ 为 β -转角(Herrero 2008)。二硫键是维持蛋白质三级结构的重要化学键，由肽链上两个巯基氧化而成(Kang et al 2022)。在拉曼位移中 $506\text{-}545\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼强度反映着蛋白质中二硫键的构型，其中 $506\text{-}515\text{ cm}^{-1}$ 为旁式 (g-g-g)， $515\text{-}525\text{ cm}^{-1}$ 为旁-旁-反式 (g-g-t)， $535\text{-}545\text{ cm}^{-1}$ 为反-旁-反式 (t-g-t) (Dai et al 2022)。

大豆酸奶中的二级结构如图 4-7C 和 4-7D 所示，在添加 CMC0.7 的大豆酸奶中的 α -螺旋结构的含量均高于 SY，另外随着 CMC0.7 的浓度从 0.1%升高到 1.1%，大豆酸奶中的无规则卷曲结构的含量表现出了升高的趋势，并且无规则卷曲和 β -转角的共同含量也展现了升高的趋势。同时，在添加 CMC1.2 的大豆酸奶中也出现了相似的趋势。因此 CMC 的加入对于大豆酸奶中蛋白质的结构具有一定的影响，改变了蛋白质中二级结构的含量。在蛋白质的二级结构中， α -螺旋和 β -折叠结构较为刚性，分子间的排列紧密，不易弯曲变形。无规则卷曲和 β -转角是蛋白质中的弹性结构，可以为蛋白质分子提供灵活的连接，有利于蛋白质分子间的连接，增加了蛋白质分子间相互作用的可能性，易于通过疏水相互作用和氢键形成凝胶网络(Zheng et al 2020)。因此，CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%，大豆酸奶中的蛋白质颗粒趋向于向弹性结构的转变。在添加 CMC 的浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶中， α -螺旋和 β -折叠的含量要高于 SY 和添加 CMC 其它浓度的大豆酸奶，因此添加两种 CMC 的浓度在 0.1%和 0.3%时的蛋白质的刚性要高于其它组，这也和上一章中测得的含有 0.1%和 0.3%浓度 CMC 的大豆酸奶具有更高硬度的结果相一致。在浓度为 0.1%和 0.3%时，添加 CMC1.2 的大豆酸奶中的 α -螺旋和 β -折叠的含量高于含有 CMC0.7 的大豆酸奶，由此可见，添加 CMC1.2 在 0.1%和 0.3%的浓度下具有更大的刚性，同样与上一章中的结论相一致。

旁氏构型的二硫键是蛋白质中连接较为紧密的一种，在分子内形成较多，可能会导致蛋白质分子内的紧密连接。反旁反式构型是二硫键中最为开放的构型，常存在于分子间，能够促进分子间的连接。旁旁反式构型，处在二者之间，在保证有一定稳定性时也具有一定的灵活性(Kuhar et al 2021)。如图 4-7E 和 4-7F 所示，大豆酸奶中 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%，旁式构型二硫键表现出了升高的趋势，表明在蛋白质颗粒中，蛋白质分子内和分子之间连接的更加紧密。另外，在含有同一种

多糖的大豆酸奶中，CMC 浓度为 0.1%的大豆酸奶的旁旁反式构型含量最高且反旁反式构型最低。

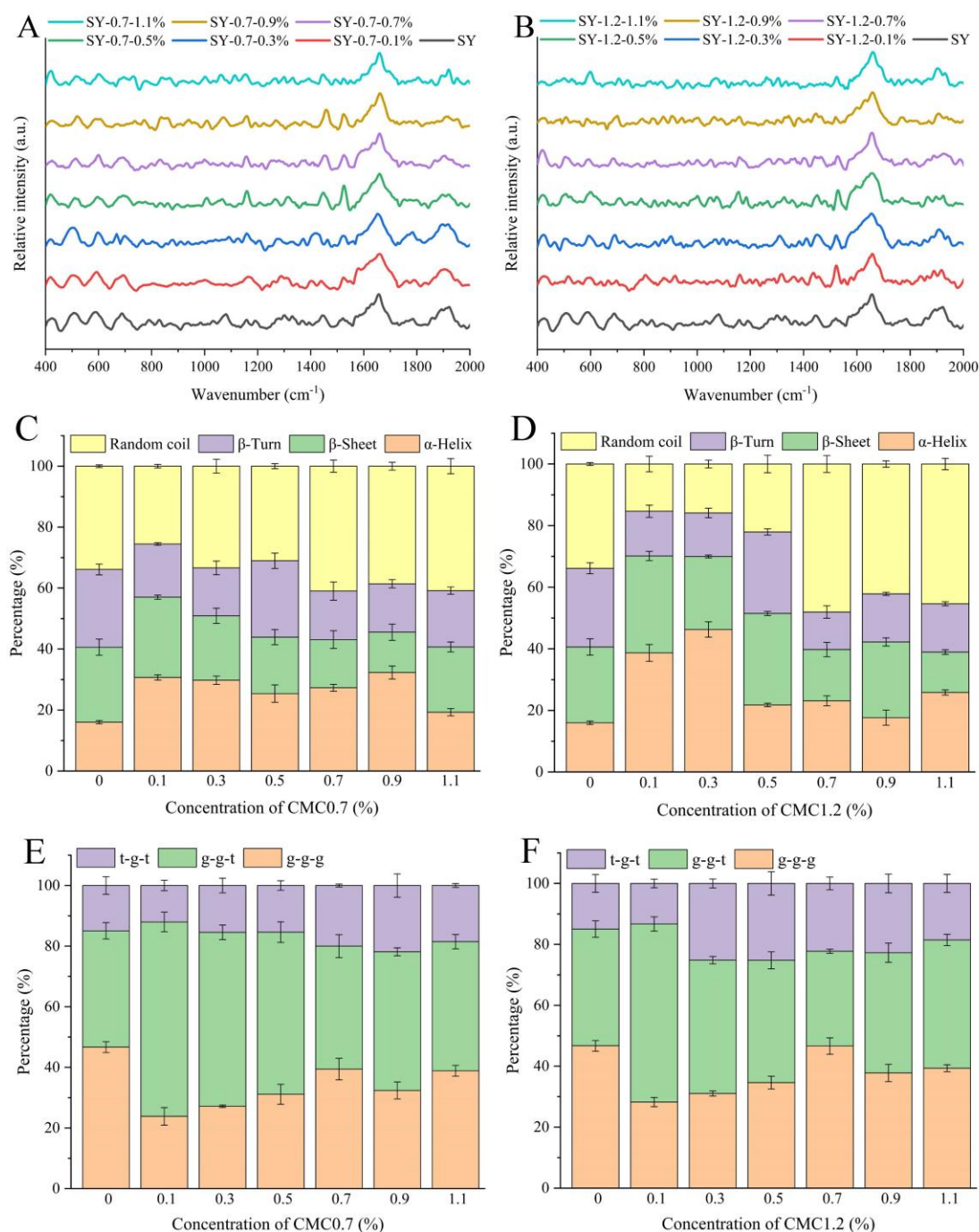


图 4-7 含不同浓度 CMC0.7 和 CMC1.2 大豆酸奶的拉曼光谱图 (A 和 B)、蛋白质二级结构含量 (C 和 D) 和二硫键构型含量 (E 和 F)

Fig. 4-7 Raman spectra (A and B), protein secondary structure content (C and D), and disulfide bond configuration content (E and F) of soy yogurt with different concentrations of CMC 0.7 and CMC 1.2

3.8 大豆酸奶中蛋白质结构与口感和凝胶特性之间的相关性

大豆酸奶中的蛋白质结构,影响着大豆酸奶的凝胶特性、稳定性和口感(Yang et al 2020, 马爽 2023, Klost et al 2020)。如图 4-8 所示,大豆酸奶颗粒的 Zeta 电位和多种因素都出现了显著的相关性,如与口感中的所有感官特征均出现了显著的负相关性,和流变学中的 K 、 G'_{LVR} 、 G''_{LVR} 、 G_V 、 K' 、 K'' 、 E_{d100} 等与大豆酸奶稠度或硬度成正比的参数成显著的正相关,而与 n 、 n' 、 n'' 等反映大豆酸奶抗剪切或震荡频率的参数成显著的负相关,表明大豆酸奶中颗粒所带电荷程度影响着大豆酸奶的凝胶特性与口感特征(Yang et al 2021)。Zeta 电位和 $D[4,3]$ 成显著的正相关,表明在 CMC 浓度为 0.7%-1.1% 的大豆酸奶具有比 SY 更低的粒度,原因可能是含有 CMC 的大豆酸奶颗粒表面有更高的电荷量,由于静电互斥效应阻碍了蛋白质之间的聚集。大豆酸奶中蛋白质表面疏水性和厚重感、颗粒感出现了显著的正相关,和粒度出现显著的负相关,和流变学中的 n 、 n' 等维持凝胶结构的部分参数呈现出显著正相关。 α -螺旋与 G'_{LVR} 、 G''_{LVR} 和 E_{d100} 呈现出了显著的正相关,而和大豆酸奶在蠕变过程中的回复率 (R) 成显著的负相关。大豆酸奶在蠕变回复行为中的 R 与大豆酸奶二级结构中的 α -螺旋成显著的负相关,与无规则卷曲和 β -转角共同含量 (TR) 成显著的正相关。在蠕变回复过程中回复率与在蠕变过程中的弹性应变成正比,因此大豆酸奶中蛋白质拥有较高弹性结构的蛋白质二级结构可能会在蠕变过程中表现出更高比例的弹性应变。无规则卷曲含量以及 TR 和大豆酸奶中的糊口性、顺滑感、颗粒感呈现显著的正相关和大豆酸奶中 K' 、 K'' 、 G_H 、 G_V 和 E_{d100} 等表示硬度的流变学参数呈现出显著的负相关,可见大豆酸奶中的蛋白质含有更高含量的柔性结构,会使得大豆酸奶变的相对更软(Zheng et al 2020),从而可能会有更好的流动性。此外,摩擦学特性和大豆的蛋白质结构之间没有表现出显著的相关性。

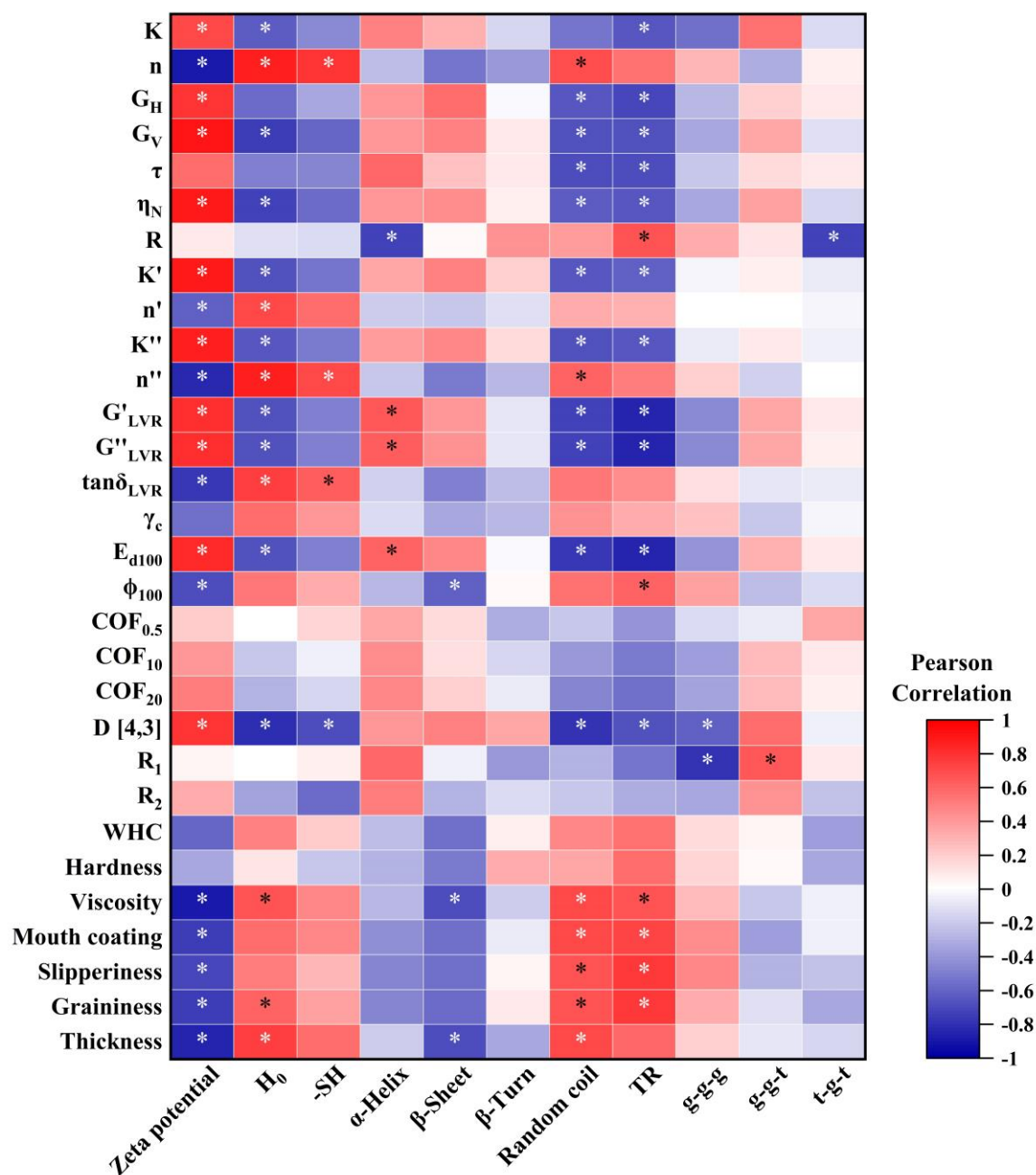


图 4-8 蛋白质信息与大豆酸奶的物性及口感之间的相关性热图。红色表示正相关，蓝色表示负相关，“*”表示显著性相关 ($p < 0.05$)。TR 为 β -转角与无规则卷曲的共同含量。

Fig. 4-8 Correlation heatmap between protein information and the physical properties and taste of soy yogurt. Red indicates positive correlation, blue indicates negative correlation, and “*” indicates significant correlation ($p < 0.05$). TR represents the common content of β -turn and random coil.

4 本章小结

加入浓度为 0.5%-1.1%的 CMC 可能会阻碍大豆酸奶中蛋白质在发酵过程中亚基的降解，蛋白质间二硫键的形成和疏水相互作用，从而阻碍蛋白质间的聚集，且 CMC1.2 具有比 CMC0.7 更强的效果。通过大豆酸奶的 Zeta 电位测试发现，大豆酸奶颗粒的 Zeta 电位均为负值，且随着 CMC 的浓度从 0%升高到 1.1%，大豆酸奶中颗粒 Zeta 电位的绝对值有升高的趋势。随着 CMC 的浓度从 0%升高到 1.1%，大豆酸奶中蛋白质的表面疏水性均展现出了先降低后升高的趋势。除 SY-0.7-0.5%样品外，其余添加量在 0.5%及以上时均显著大于 SY。浓度为 0.9%和 1.1%的 CMC0.7，及浓度为 0.5%-1.1%的 CMC1.2 会阻碍大豆酸奶中蛋白质间二硫键的形成，使蛋白质分子具有更大的柔性。

通过拉曼光谱分析发现不同浓度和电荷密度的 CMC 加入会改变大豆酸奶中蛋白质二级结构的组成与二硫键的构象。随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%，大豆酸奶中的无规则卷曲和 β -转角共同含量也展现了增加的趋势，因此大豆酸奶中的蛋白质颗粒趋向于向弹性结构的转变，这种弹性结构和大豆酸奶中的糊口性、顺滑感和颗粒感呈现显著的正相关性和 n 、 n' 、 n'' 、 G'_{LVR} 、 G''_{LVR} 、 E_{d100} 呈现出显著的负相关性。另外，在添加 CMC 的浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶中， α -螺旋和 β -折叠的含量高于 SY 和添加 CMC 其它浓度的大豆酸奶，这可能是含有 0.1%和 0.3%浓度 CMC 的大豆酸奶有更高凝胶强度的原因。在浓度为 0.1%和 0.3%时，添加 CMC1.2 的大豆酸奶中的 α -螺旋和 β -折叠的含量高于添加 CMC0.7 的大豆酸奶，这可能的使得添加 CMC1.2 在 0.1%和 0.3%的浓度下具有比含有 CMC0.7 的大豆酸奶更大的硬度的原因。

第五章 结论与展望

1 结论

本课题探究了取代度为 0.7 和 1.2 的 CMC，在 0%到 1.1%的浓度范围内对大豆酸奶的稳定性、口感、流变学特性、摩擦学特性和口腔粘附性的作用规律，并分析了流变学特性、摩擦学特性和口腔粘附性与大豆酸奶口感的相关性。最后进一步探究了 CMC 的浓度与电荷密度对于大豆酸奶蛋白质结构的影响规律及其与大豆酸奶质地之间的相关性。得到的主要结论如下：

1、CMC 的加入显著改变了大豆酸奶的外观状态与质地。在 CMC 浓度为 0.1%时大豆酸奶的外观出现了明显的脱水收缩且横截面粗糙、质地较硬、微结构中的孔隙分布不均匀，随着 CMC 浓度的升高，大豆酸奶的横截面逐渐变得更加光滑、析水现象消失、流动性增强、质地变软，在微结构中出现了层状的结构且孔隙变得均匀。当 CMC 浓度从 0%增加到 1.1%时，大豆酸奶的 WHC 表现出了先下降再升高的趋势。添加 CMC0.7 在 0.7%-1.1%浓度的大豆酸奶的稳定性显著高于 SY。低场核磁测试表明，大豆酸奶中的水分形式主要是半结合水，除 CMC 的浓度为 0.1%以外的样品中，大豆酸奶的半结合水量均高于 98%。适当浓度的 CMC 的加入可以有效改善大豆酸奶的颗粒感、厚重感和顺滑感，提高大豆酸奶的口感特征，且不同电荷密度的 CMC 会对大豆酸奶带来不同的口感。添加 CMC0.7 在 0.7%-1.1%浓度下的大豆酸奶和 SY-1.2-1.1%的颗粒感与厚重感评分均显著高于 SY，并且添加 CMC0.7 的大豆酸奶比添加 CMC1.2 的大豆酸奶的颗粒感评分更高，SY-0.7-0.7%的顺滑感评分最高同时感官评分总分最高且显著高于 SY。因此添加浓度为 0.7%的 CMC0.7 可以得到有较高稳定性且口感最好的大豆酸奶。

2、CMC 的浓度和电荷密度对于大豆酸奶的流变学、摩擦学和口腔粘附性具有明显的调控作用，并且发现流变学与摩擦学中的相关参数与大豆酸奶的口感有显著的相关性。所有大豆酸奶均为假塑性流体且在 LVR 内 G' 高于 G'' 。随着 CMC 的浓度从 0%增加到 1.1%，大豆酸奶的粘度、 G' 和 G'' 均表现出先升高后下降的趋势，并且分别受到剪切速率和震荡频率的影响有降低的趋势。CMC 的浓度为 0.1%和 0.3%的大豆酸奶表现出了比 SY 更高的粘度、 G' 和 G'' ，而其余浓度的大豆酸奶低于 SY。LAOS 分析表明，在 1%和 10%的应变下，随着 CMC 浓度的升高，发现应变中的粘

性响应的比例逐渐升高, 由弹性响应为主导转变为粘性响应为主导。摩擦学测量结果显示, 在 CMC 的浓度为 0.1%-0.3% 时, 大豆酸奶的润滑特性的排列顺序与对应的 G' 的排列顺序一致, SY-0.7-0.7% 在大部分滑动速度下具有最低的 COF。添加 CMC0.7 在 0.7%-1.1% 的浓度可以提高大豆酸奶的口腔粘附性。相关性分析表明, 大豆酸奶中的糊口性、颗粒感、顺滑感、厚重感和 n 、 n' 、 n'' 、 $\tan\delta_{LVR}$ 、 ϕ_{100} 等与大豆酸奶柔软、流动性成正比的参数为显著的正相关性, 与 K 、 K' 、 K'' 、 E_{d100} 、 $D[4,3]$ 、COF 成显著的负相关。

3、大豆酸奶中的蛋白质结构会受到所加入 CMC 的浓度和电荷密度的影响。随着 CMC 的浓度从 0% 升高到 1.1%, 大豆酸奶中蛋白质的表面疏水性均展现出了先降低后升高的趋势。除 SY-0.7-0.5% 外, 其余浓度在 0.5% 及以上时均显著大于 SY。在添加 CMC0.7 的样品中, 浓度为 0.9% 和 1.1% 的大豆酸奶的巯基含量显著高于 SY, 而添加 CMC1.2 浓度为 0.5%-1.1% 的大豆酸奶的巯基含量显著高于 SY。随着 CMC 浓度从 0.1% 升高到 1.1%, 大豆酸奶中的无规则卷曲和 β -转角共同含量出现了升高的趋势, 表明大豆酸奶中的蛋白质颗粒趋向于向弹性结构的转变, 且与大豆酸奶中的糊口性、顺滑感和颗粒感呈现显著的正相关性和 n 、 n' 、 n'' 、 G'_{LVR} 、 G''_{LVR} 、 E_{d100} 呈现出显著的负相关性。

2 展望

本研究探究了在不同浓度的 CMC0.7 和 CMC1.2 对于大豆酸奶的口感、稳定性、流变学特性、摩擦学特性、口腔粘附性和蛋白质结构方面的作用规律, 并有效改善了大豆酸奶存在的口感和稳定性的问题

在本文中探讨了 CMC 的取代度对大豆酸奶质量的影响, 未来 CMC 的支化度和主链的长度还需要再进一步的探究。在研究多糖的浓度、取代度、支化度和糖链长度等和蛋白质之间的相互作用的行为基础上, 可以通过实验结果做出一定的预测, 从而在面对新型的蛋白质时可以根据预测能够更加有效的筛选多糖, 达到改善口感提高稳定性的结果。

参考文献

1. Aktar T, Upadhyay R, Chen J. Sensory and Oral Processing of Semisolid Foods. In: H S Joyner eds., *Rheology of Semisolid Foods*. Switzerland: Springer International Publishing Ag, 2019. 231-247
2. Aliabbasi N, Emam-Djomeh Z, Askari G, Salami M. Design of glucono-delta-lactone-induced pinto bean protein isolate/kappa-carrageenan mixed gels with various microstructures: fabrication, characterization, and release behavior. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023, 103: 1484-1498
3. Altemimi A B. Extraction and Optimization of Potato Starch and Its Application as a Stabilizer in Yogurt Manufacturing. *Foods*. 2018, 7: 14
4. Bakr Shori A, Chin Wai P, Elham B, Salihin Baba A. Physicochemical analysis, proteolysis activity and exopolysaccharides production of herbal yogurt fortified with plant extracts. *International Journal of Food Engineering*. 2021, 17: 227-236
5. Baniasadidehkordi M, Joyner H S. Relationships Among Acid Milk Gel Sensory, Rheological, and Tribological Behaviors. In: H S Joyner eds., *Rheology of Semisolid Foods*. 2019. 323-347
6. Bernat N, Chafer M, Chiralt A, Gonzalez-Martinez C. Vegetable milks and their fermented derivative products. *International Journal of Food Studies*. 2014, 3: 93-124
7. Bocker R, Silva E K. Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects. *Future Foods*. 2022, 5: 100098
8. Boeck T, Sahin A W, Zannini E, Arendt E K. Nutritional properties and health aspects of pulses and their use in plant-based yogurt alternatives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021, 20: 3858-3880
9. Camacho S, van Riel V, de Graaf C, van de Velde F, Stieger M. Physical and Sensory Characterizations of Oral Coatings of Oil/Water Emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014, 62: 5789-5795
10. Camacho S M R. Oral Coatings: A Study on the Formation, Clearance and Perception. (Ph D dissertation). Wageningen University, 2015
11. Cook S L, Woods S, Methven L, Parker J K, Khutoryanskiy V V. Mucoadhesive polysaccharides modulate sodium retention, release and taste perception. *Food Chemistry*. 2018, 240: 482-489

12. Corvera-Paredes B, Sanchez-Resendiz A I, Medina D I, Espiricueta-Candelaria R S, Serna-Saldivar S, Chuck-Hernandez C. Soft Tribology and Its Relationship With the Sensory Perception in Dairy Products: A Review. *Frontiers in Nutrition*. 2022, 9: 874763
13. Csatos N-I, Simon E, Teleky B-E, Szabo K, Diaconeasa Z M, Vodnar D-C, Ciont C, Pop O-L. Development of a Fermented Beverage with Chlorella vulgaris Powder on Soybean-Based Fermented Beverage. *Biomolecules*. 2023, 13: 245
14. Culler M. Relationships Among Semisolid Food Microstructures, Rheological Behaviors, and Sensory Attributes. In: H S Joyner eds., *Rheology of Semisolid Foods*. Switzerland: Springer International Publishing Ag, 2019. 249-271
15. Dai C, Hou Y, Xu H, Huang L, Dabbour M, Mintah B K, He R, Ma H. Effect of solid-state fermentation by three different Bacillus species on composition and protein structure of soybean meal. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022, 102: 557-566
16. Dai S, Corke H, Shah N P. Utilization of konjac glucomannan as a fat replacer in low-fat and skimmed yogurt. *Journal of Dairy Science*. 2016, 99: 7063-7074
17. de Kruif C G, Weinbreck F, de Vries R. Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2004, 9: 340-349
18. DePalma K, Smith B, McDonald A G. Effect of Processing Conditions, Biochemical Properties, and Microstructure on Tofu Production from Yellow Field Peas (*Pisum sativum*). *Journal of Food Science*. 2019, 84: 3463-3472
19. Doyle M E, Premathilake H U, Yao Q, Mazucanti C H, Egan J M. Physiology of the tongue with emphasis on taste transduction. *Physiological Reviews*. 2023, 103: 1193-1246
20. Esmerino E A, Ferraz J P, Tavares Filho E R, Pinto L P F, Freitas M Q, Cruz A G, Bolini H M A. Consumers' perceptions toward 3 different fermented dairy products: Insights from focus groups, word association, and projective mapping. *Journal of Dairy Science*. 2017, 100: 8849-8860
21. Ewoldt R H, Hosoi A E, McKinley G H. Nonlinear viscoelastic biomaterials: meaningful characterization and engineering inspiration. *Integrative and Comparative Biology*. 2009, 49: 40-50
22. Ge Z, Yin D, Li Z, Chen X, Dong M. Effects of Commercial Polysaccharides Stabilizers with Different Charges on Textural, Rheological, and Microstructural Characteristics of Set Yoghurts. *Foods*. 2022, 11: 1764

23. Geremias-Andrade I M, Souki N P B G, Moraes I C F, Pinho S C. Rheology of Emulsion-Filled Gels Applied to the Development of Food Materials. *Gels (Basel, Switzerland)*. 2016, 2: 2030022
24. Grasso N, Alonso-Miravalles L, O'Mahony J A. Composition, Physicochemical and Sensorial Properties of Commercial Plant-Based Yogurts. *Foods*. 2020, 9: 9030252
25. Greis M, Sainio T, Katina K, Nolden A A, Kinchla A J, Seppa L, Partanen R. Physicochemical Properties and Mouthfeel in Commercial Plant-Based Yogurts. *Foods*. 2022, 11: 11070941
26. Guo Q. Understanding the oral processing of solid foods: Insights from food structure. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021, 20: 2941-2967
27. Gupta M K, Torrico D D, Ong L, Gras S L, Dunshea F R, Cottrell J J. Plant and Dairy-Based Yogurts: A Comparison of Consumer Sensory Acceptability Linked to Textural Analysis. *Foods*. 2022, 11: 463
28. He Y, Wang X, Chen J. Current Perspectives on Food Oral Processing. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2022, 13: 167-192
29. Hickisch A, Beer R, Vogel R F, Toelstede S. Influence of lupin-based milk alternative heat treatment and exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria on the physical characteristics of lupin-based yogurt alternatives. *Food Research International*. 2016, 84: 180-188
30. Hickisch A, Bindl K, Vogel R F, Toelstede S. Thermal treatment of lupin-based milk alternatives - Impact on lupin proteins and the network of respective lupin-based yogurt alternatives. *Food Research International*. 2016, 89: 850-859
31. Hiimae K M, Palmer J B. Tongue movements in feeding and speech. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*. 2003, 14: 413-429
32. Ji L, Otter D D, Cornacchia L, Sala G, Scholten E. Role of polysaccharides in tribological and sensory properties of model dairy beverages. *Food Hydrocolloids*. 2023, 134: 108065
33. Jia S, Zhao H, Tao H, Yu B, Liu P, Cui B. Influence of corn resistant starches type III on the rheology, structure, and viable counts of set yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022, 203: 10-18
34. Jiang J, Xiong Y L, Chen J. Role of β -Conglycinin and Glycinin Subunits in the pH-Shifting-Induced Structural and Physicochemical Changes of Soy Protein Isolate. *Journal of Food Science*. 2011, 76: 293-302

35. Jin X, Qu R, Wang Y, Li D, Wang L. Effect and Mechanism of Acid-Induced Soy Protein Isolate Gels as Influenced by Cellulose Nanocrystals and Microcrystalline Cellulose. *Foods*. 2022, 11: 461
36. Kang S, Zhang J, Guo X, Lei Y, Yang M. Effects of Ultrasonic Treatment on the Structure, Functional Properties of Chickpea Protein Isolate and Its Digestibility In Vitro. *Foods*. 2022, 11: 11060880
37. Keerati-u-rai M, Miriani M, Iametti S, Bonomi F, Corredig M. Structural changes of soy proteins at the oil-water interface studied by fluorescence spectroscopy. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*. 2012, 93: 41-48
38. Khramova D S, Popov S V. A secret of salivary secretions: Multimodal effect of saliva in sensory perception of food. *European Journal of Oral Sciences*. 2022, 130: 12846
39. Kong X, Xiao Z, Du M, Wang K, Yu W, Chen Y, Liu Z, Cheng Y, Gan J. Physicochemical, Textural, and Sensorial Properties of Soy Yogurt as Affected by Addition of Low Acyl Gellan Gum. *Gels*. 2022, 8: 453
40. Kuhar N, Sil S, Umapathy S. Potential of Raman spectroscopic techniques to study proteins. *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021, 258: 119712
41. Kumari M, Kokkiligadda A, Dasriya V, Naithani H. Functional relevance and health benefits of soymilk fermented by lactic acid bacteria. *J Appl Microbiol*. 2021, 133: 104-119
42. Kupirovic U P, Elmadfa I, Juillerat M-A, Raspor P. Effect of saliva on physical food properties in fat texture perception. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017, 57: 1061-1077
43. Kwon H C, Bae H, Seo H G, Han S G. Short communication: Chia seed extract enhances physiochemical and antioxidant properties of yogurt. *Journal of Dairy Science*. 2019, 102: 4870-4876
44. Lange R, Balny C. UV-visible derivative spectroscopy under high pressure. *Biochimica Et Biophysica Acta-Protein Structure and Molecular Enzymology*. 2002, 1595: 80-93
45. Levy R, Okun Z, Shpigelman A. Utilizing high-pressure homogenization for the production of fermented plant-protein yogurt alternatives with low and high oil content using potato protein isolate as a model. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022, 75: 102909

46. Li L, He H, Wu D, Lin D, Qin W, Meng D, Yang R, Zhang Q. Rheological and textural properties of acid-induced soybean protein isolate gel in the presence of soybean protein isolate hydrolysates or their glycosylated products. *Food Chemistry*. 2021, 360: 129991
47. Liu J, Nakamura A, Corredig M. Addition of pectin and soy soluble polysaccharide affects the particle size distribution of casein suspensions prepared from acidified skim milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006, 54: 6241-6246
48. Liu J, Pedersen H L, Knarreborg L, Ipsen R, Bredie W L P. Stabilization of directly acidified protein drinks by single and mixed hydrocolloids-combining particle size, rheology, tribology, and sensory data. *Food Science & Nutrition*. 2020, 8: 6433-6444
49. Liu Y, Zhu S, Li Y, Sun F, Huang D, Chen X. Alternations in the multilevel structures of chickpea protein during fermentation and their relationship with digestibility. *Food Research International*. 2023, 165: 112453
50. Lorusso A, Coda R, Montemurro M, Rizzello C G. Use of Selected Lactic Acid Bacteria and Quinoa Flour for Manufacturing Novel Yogurt-Like Beverages. *Foods*. 2018, 7: 7040051
51. Lorusso A, Coda R, Montemurro M, Rizzello C G. Use of Selected Lactic Acid Bacteria and Quinoa Flour for Manufacturing Novel Yogurt-Like Beverages. *Foods*. 2018, 7: 51
52. Ma X, Chi C, Pu Y, Miao S, Liu D. Conjugation of soy protein isolate (SPI) with pectin: effects of structural modification of the grafting polysaccharide. *Food Chemistry*. 2022, 387: 132876
53. Masia C, Geppel A, Jensen P E, Buldo P. Effect of *Lactobacillus rhamnosus* on Physicochemical Properties of Fermented Plant-Based Raw Materials. *Foods*. 2021, 10: 573
54. Montellano Duran N, Spelzini D, Boeris V. Characterization of acid - Induced gels of quinoa proteins and carrageenan. *Lwt-Food Science and Technology*. 2019, 108: 39-47
55. Montemurro M, Pontonio E, Coda R, Rizzello C G. Plant-Based Alternatives to Yogurt: State-of-the-Art and Perspectives of New Biotechnological Challenges. *Foods*. 2021, 10: 316
56. Mu Q, Su H, Zhou Q, Xiao S, Zhu L, Xu X, Pan S, Hu H. Effect of ultrasound on functional properties, flavor characteristics, and storage stability of soybean milk. *Food Chemistry*. 2022, 381: 132158

57. Pandiselvam R, Gok S B, Yuksel A N, Tekgul Y, Koc G C, Kothakota A. Evaluation of the impact of UV radiation on rheological and textural properties of food. *Journal of Texture Studies*. 2022, 53: 800-808
58. Patil S, Sandberg A, Heckert E, Self W, Seal S. Protein adsorption and cellular uptake of cerium oxide nanoparticles as a function of zeta potential. *Biomaterials*. 2007, 28: 4600-4607
59. Peng C L, Jost-Brinkmann P G, Miethke R R, Lin C T. Ultrasonographic measurement of tongue movement during swallowing. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2000, 19: 15-20
60. Pivk U, Godinot N, Keller C, Antille N, Juillerat M-A, Raspor P. Lipid deposition on the tongue after oral processing of medium-chain triglycerides and impact on the perception of Mouthfeel. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008, 56: 1058-1064
61. Pu D, Duan W, Huang Y, Zhang L, Zhang Y, Sun B, Ren F, Zhang H, Tang Y. Characterization of the dynamic texture perception and the impact factors on the bolus texture changes during oral processing. *Food Chemistry*. 2021, 339: 128078
62. Pua A, Tang V C Y, Goh R M V, Sun J, Lassabliere B, Liu S Q. Ingredients, Processing, and Fermentation: Addressing the Organoleptic Boundaries of Plant-Based Dairy Analogues. *Foods*. 2022, 11: 875
63. Rahman M S, Hasan M S, Nitai A S, Nam S, Karmakar A K, Ahsan M S, Shiddiky M J A, Ahmed M B. Recent Developments of Carboxymethyl Cellulose. *Polymers*. 2021, 13: 1345
64. Ren W, Liang H, Liu S, Li Y, Chen Y, Li B, Li J. Formulations and assessments of structure, physical properties, and sensory attributes of soy yogurts: Effect of carboxymethyl cellulose content and degree of substitution. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024, 257: 128661
65. Ren Y, Li L. The influence of protease hydrolysis of lactic acid bacteria on the fermentation induced soybean protein gel: Protein molecule, peptides and amino acids. *Food Research International*. 2022, 156: 111284
66. Rizzo G, Baroni L. Soy, Soy Foods and Their Role in Vegetarian Diets. *Nutrients*. 2018, 10: 43
67. Saavedra Isusi G I, Paz Puga D, van der Schaaf U S. Texturing Fermented Emulsion Gels from Soy Protein: Influence of the Emulsifying Agent-Soy Protein vs. Pectin Microgels-On Gel Microstructure, Rheology and Tribology. *Foods*. 2022, 11: 294

68. Saifur Rahman M, Saif Hasan M, Sutradhar Nitai A, Sunghyun N, Krishna Karmakar A, Shameem Ahsan M, Muhammad J A S, Boshir Ahmed M. Recent developments of carboxymethyl cellulose. *Polymers*. 2021, 13: 1345-1345
69. Shen Z, Liu Z, Rui X, Chen X, Jiang M, Dong M. Effects of fat content on the textural and in vivo buccal breakdown properties of soy yogurt. *Journal of Texture Studies*. 2021, 52: 334-346
70. Upadhyay R, Aktar T, Chen J. Perception of creaminess in foods. *Journal of Texture Studies*. 2020, 51: 375-388
71. Vicente J, Stokes J R, Spikes H A. Soft lubrication of model hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*. 2006, 20: 483-491
72. Wang W, Shen M, Jiang L, Song Q, Liu S, Xie J. Influence of Mesona blumes polysaccharide on the gel properties and microstructure of acid-induced soy protein isolate gels. *Food Chemistry*. 2020, 313: 126125
73. Wang X, Chen J, Wang X. In situ oral lubrication and smoothness sensory perception influenced by tongue surface roughness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022, 102: 132-138
74. Wang X, Chen Y, Wang Y, Dai W, Piao C, Yu H. Characteristics of lipoxygenase-based and lipoxygenase-deficient soy yogurt with modified okara. *Food Science and Biotechnology*. 2021, 30: 1675-1684
75. Xi Z, Liu W, McClements D J, Zou L. Rheological, structural, and microstructural properties of ethanol induced cold-set whey protein emulsion gels: Effect of oil content. *Food Chemistry*. 2019, 291: 22-29
76. Xiao Y, Li J, Liu Y, Peng F, Wang X, Wang C, Li M, Xu H. Gel properties and formation mechanism of soy protein isolate gels improved by wheat bran cellulose. *Food Chemistry*. 2020, 324: 126876
77. Xinlu W, Xiangzhen K, Caimeng Z, Yufei H, Yeming C, Xingfei L. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of plant-based yoghurt and dairy yoghurt. *Food Research International*. 2023, 164: 112375-112375
78. Xu K, Guo M, Du J, Zhang Z. Okra polysaccharide: Effect on the texture and microstructure of set yoghurt as a new natural stabilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019, 133: 117-126
79. Xu Y-T, Liu L-l. Structural and Functional Properties of Soy Protein Isolates Modified by Soy Soluble Polysaccharides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016, 64: 7275-7284

80. Xu Y, Coda R, Holopainen-Mantila U, Laitila A, Katina K, Tenkanen M. Impact of in situ produced exopolysaccharides on rheology and texture of fava bean protein concentrate. *Food Research International*. 2019, 115: 191-199
81. Yan J, Jia X, Yan W, Yin L. Double-Network Hydrogels of Corn Fiber Gum and Soy Protein Isolate: Effect of Biopolymer Constituents and pH Values on Textural Properties and Microstructures. *Foods*. 2021, 10: 356
82. Yang X, Feng J, Zhu Q, Hong R, Li L. A Relation between Exopolysaccharide from Lactic Acid Bacteria and Properties of Fermentation Induced Soybean Protein Gels. *Polymers*. 2022, 14: 90
83. Yang X, Ren Y, Li L. The relationship between charge intensity and bioactivities/processing characteristics of exopolysaccharides from lactic acid bacteria. *Lwt-Food Science and Technology*. 2022, 153: 112345
84. Yang X, Su Y, Li L. Study of soybean gel induced by *Lactobacillus plantarum*: Protein structure and intermolecular interaction. *Lwt-Food Science and Technology*. 2020, 119: 108794
85. Yang Y, He S, Zhang Y, Li X, Liu H, Li Q, Cao X, Ye Y, Sun H. Comparison of crude prolamins from seven kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) based on composition, structure and functionality. *Food Chemistry*. 2021, 357: 129748
86. You K-M, Sarkar A. Oral tribology of polysaccharides. In: G O Phillips 和 P A Williams eds., *Handbook of Hydrocolloids*. Woodhead Publishing, 2021. 93-124
87. Yu B, Zheng L, Cui B, Zhao H, Liu P. The effects of acetylated distarch phosphate from tapioca starch on rheological properties and microstructure of acid-induced casein gel. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020, 159: 1132-1139
88. Zannini E, Jeske S, Lynch K M, Arendt E K. Development of novel quinoa-based yoghurt fermented with dextran producer *Weissella cibaria* MG1. *International Journal of Food Microbiology*. 2018, 268: 19-26
89. Zhang X, Chen X, Gong Y, Li Z, Guo Y, Yu D, Pan M. Emulsion gels stabilized by soybean protein isolate and pectin: Effects of high intensity ultrasound on the gel properties, stability and 13-carotene digestive characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021, 79: 105756

90. Zhao J, Bhandari B, Gaiani C, Prakash S. Altering almond protein function through partial enzymatic hydrolysis for creating gel structures in acidic environment. *Current Research in Food Science*. 2022, 5: 653-664
91. Zhao X, Li D, Wang L-j, Wang Y. Rheological properties and microstructure of a novel starch-based emulsion gel produced by one-step emulsion gelation: Effect of oil content. *Carbohydrate Polymers*. 2022, 281: 119061
92. Zheng Y, Li Z, Zhang C, Zheng B, Tian Y. Effects of microwave-vacuum pre-treatment with different power levels on the structural and emulsifying properties of lotus seed protein isolates. *Food Chemistry*. 2020, 311: 125932
93. 李彦磊. 基于胶体结构构建的食品减盐策略及其机理研究. [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021
94. 马爽. 无机盐对大豆蛋白溶解度及构象影响的研究. [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2023
95. 彭璐. 发芽对乳酸菌发酵豆浆生理活性及大豆植物酸奶品质的影响. [硕士学位论文]. 江苏: 江南大学, 2022
96. 彭星云. 乳酸发酵豆乳凝胶质地:不同温度热烫大豆制备豆乳的比较. [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2014
97. 王翠娜. 聚合乳清蛋白与多糖相互作用对其凝胶特性影响及应用. [博士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2015
98. 熊文飞. 电荷密度调控多尺度下卵白蛋白-羧甲基纤维素静电复合机制及应用. [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2018
99. Abarquero D, Renes E, Fresno J M, Tornadijo M E. Study of exopolysaccharides from lactic acid bacteria and their industrial applications: a review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2022, 57: 16-26
100. Ahmed I A M, Alqah H A S, Saleh A, Al-Juhaimi F Y, Babiker E E, Ghafoor K, Hassan A B, Osman M A, Fickak A. Physicochemical quality attributes and antioxidant properties of set-type yogurt fortified with argel (*Solenostemma argel* Hayne) leaf extract. *Lwt-Food Science and Technology*. 2021, 137: 110389
101. Appelqvist I A M, Cochet-Broch M, Poelman A A M, Day L. Morphologies, volume fraction and viscosity of cell wall particle dispersions particle related to sensory perception. *Food Hydrocolloids*. 2015, 44: 198-207

102. Benmeziane F, Raigar R K, Ayat N E-H, Aoufi D, Djermoune-Arkoub L, Chala A. Lentil (*Lens culinaris*) flour addition to yogurt: Impact on physicochemical, microbiological and sensory attributes during refrigeration storage and microstructure changes. *Lwt-Food Science and Technology*. 2021, 140: 110793
103. Bi C-h, Li D, Wang L-j, Adhikari B. Effect of LBG on the gel properties of acid-induced SPI gels. *Lwt-Food Science and Technology*. 2017, 75: 1-8
104. Bi C-h, Li D, Wang L-j, Gao F, Adhikari B. Effect of high shear homogenization on rheology, microstructure and fractal dimension of acid-induced SPI gels. *Journal of Food Engineering*. 2014, 126: 48-55
105. Bi C-h, Li L-t, Zhu Y-d, Liu Y-d, Wu M, Li G, Huang Z-g. Effect of high speed shear on the non-linear rheological properties of SPI/IT-carrageenan hybrid dispersion and fractal analysis. *Journal of Food Engineering*. 2018, 218: 80-87
106. Boeck T, Zannini E, Sahin A W, Bez J, Arendt E K. Nutritional and Rheological Features of Lentil Protein Isolate for Yoghurt-Like Application. *Foods*. 2021, 10: 19
107. Camacho S, Liu K, van der Linden A, Stieger M, van de Velde F. Formation, clearance and mouthfeel perception of oral coatings formed by emulsion-filled gels. *Journal of Texture Studies*. 2015, 46: 399-410
108. Carpentier J, Conforto E, Chaigneau C, Vendeville J-E, Maugard T. Complex coacervation of pea protein isolate and tragacanth gum: Comparative study with commercial polysaccharides. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021, 69: 102641
109. Chalupa-Krebzdak S, Long C J, Bohrer B M. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *International Dairy Journal*. 2018, 87: 84-92
110. Chen J S. It is important to differentiate sensory property from the material property. *Trends in Food Science & Technology*. 2020, 96: 268-270
111. Chen N, Zhao M, Chassenieux C, Nicolai T. Thermal aggregation and gelation of soy globulin at neutral pH. *Food Hydrocolloids*. 2016, 61: 740-746
112. Cortez-Trejo M C, Loarca-Pina G, Figueroa-Cardenas J D, Manriquez J, Mendoza S. Gel properties of acid-induced gels obtained at room temperature and based on common bean proteins and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*. 2022, 132: 107873
113. Coutinho G S M, Ribeiro A E C, Prado P M C, Oliveira E R, Careli-Gondim I, Oliveira A R, Soares Junior M S, Caliarì M, Vilas Boas E V d B. Green banana starch enhances physicochemical and sensory quality of baru almond-based fermented product with

- probiotic bacteria. *International Journal of Food Science and Technology*. 2021, 56: 5097-5106
114. Cruz N S, Capellas M, Jaramillo D P, Trujillo A J, Guamis B, Ferragut V. Soymilk treated by ultra high-pressure homogenization: Acid coagulation properties and characteristics of a soy-yogurt product. *Food Hydrocolloids*. 2009, 23: 490-496
115. Cui B, Lu Y-m, Tan C-p, Wang G-q, Li G-H. Effect of cross-linked acetylated starch content on the structure and stability of set yoghurt. *Food Hydrocolloids*. 2014, 35: 576-582
116. Dekkers B L, de Kort D W, Grabowska K J, Tian B, Van As H, van der Goot A J. A combined rheology and time domain NMR approach for determining water distributions in protein blends. *Food Hydrocolloids*. 2016, 60: 525-532
117. Demir H, Simsek M, Yildirim G. Effect of oat milk pasteurization type on the characteristics of yogurt. *Lwt-Food Science and Technology*. 2021, 135: 110271
118. Demirkesen I, Vilgis T A, Mert B. Effect of microfluidization on the microstructure and physical properties of a novel yoghurt formulation. *Journal of Food Engineering*. 2018, 237: 69-77
119. Deshwal G K, Tiwari S, Kumar A, Raman R K, Kadyan S. Review on factors affecting and control of post-acidification in yoghurt and related products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021, 109: 499-512
120. Dickinson E. On the road to understanding and control of creaminess perception in food colloids. *Food Hydrocolloids*. 2018, 77: 372-385
121. Dresselhuis D M, de Hoog E H A, Stuart M A C, van Aken G A. Application of oral tissue in tribological measurements in an emulsion perception context. *Food Hydrocolloids*. 2008, 22: 323-335
122. Ewoldt R H, McKinley G H. On secondary loops in LAOS via self-intersection of Lissajous-Bowditch curves. *Rheologica Acta*. 2010, 49: 213-219
123. Ewoldt R H, Winter P, Maxey J, McKinley G H. Large amplitude oscillatory shear of pseudoplastic and elastoviscoplastic materials. *Rheologica Acta*. 2010, 49: 191-212
124. Feyzi S, Milani E, Golimovahhed Q A. Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.) Protein Isolate: The Effect of Extraction Optimization and Drying Methods on the Structure and Functional Properties. *Food Hydrocolloids*. 2018, 74: 187-196
125. Galante M, De Flaviis R, Boeris V, Spelzini D. Effects of the enzymatic hydrolysis treatment on functional and antioxidant properties of quinoa protein acid-induced gels. *Lwt-Food Science and Technology*. 2020, 118: 108845

126. Gilbert A, Rioux L-E, St-Gelais D, Turgeon S L. Characterization of syneresis phenomena in stirred acid milk gel using low frequency nuclear magnetic resonance on hydrogen and image analyses. *Food Hydrocolloids*. 2020, 106: 105907
127. Greis M, Sainio T, Katina K, Kinchla A J, Nolden A, Partanen R, Seppa L. Dynamic texture perception in plant-based yogurt alternatives: Identifying temporal drivers of liking by TDS. *Food Quality and Preference*. 2020, 86: 104019
128. Grossmann L, Kinchla A J, Nolden A, McClements D J. Standardized methods for testing the quality attributes of plant-based foods: Milk and cream alternatives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021, 20: 2206-2233
129. Guimaraes J T, Balthazar C F, Silva R, Rocha R S, Graca J S, Esmerino E A, Silva M C, Sant'Ana A S, Duarte M C K H, Freitas M Q, Cruz A G. Impact of probiotics and prebiotics on food texture. *Current Opinion in Food Science*. 2020, 33: 38-44
130. Gul O, Saricaoglu F T, Atalar I. Effect of high pressure homogenization on microstructure and rheological properties of hazelnut beverage cold-set gels induced glucono-delta-lactone. *Lwt-Food Science and Technology*. 2021, 143: 111154
131. Guo D, Yin X, Cheng H, Ye X, Chen J. Evaluating Physicochemical and Sensory Properties of Functional Yogurt Supplemented with Glycyrrhiza Polysaccharide as Potential Replacement for Gelatin. *Agriculture-Basel*. 2022, 12: 1289
132. Guo Y, Wei Y, Cai Z, Hou B, Zhang H. Stability of acidified milk drinks induced by various polysaccharide stabilizers: A review. *Food Hydrocolloids*. 2021, 118: 106814
133. Guzman-Luna P, Mauricio-Iglesias M, Flysjo A, Hospido A. Analysing the interaction between the dairy sector and climate change from a life cycle perspective: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2022, 126: 168-179
134. Han C, Yang X, Li L. Physicochemical properties and microstructure of soybean protein isolate-vegetable oil complex gels induced by lactic acid bacteria: Effects of vegetable oil types and concentrations. *Food Hydrocolloids*. 2023, 145: 109109
135. Herrero A M. Raman spectroscopy a promising technique for quality assessment of meat and fish: A review. *Food Chemistry*. 2008, 107: 1642-1651
136. Huang Z-g, Wang X-y, Zhang J-y, Liu Y, Zhou T, Chi S-y, Gao F, Li J, Tian B, Shi W-t, Bi C-h. Effect of heat treatment on the nonlinear rheological properties of acid-induced soy protein isolate gels modified by high-pressure homogenization. *Lwt-Food Science and Technology*. 2022, 157: 113094

137. Huc D, Michon C, Bedoussac C, Bosc V. Design of a multi-scale texture study of yoghurts using rheology, and tribology mimicking the eating process and microstructure characterisation. *International Dairy Journal*. 2016, 61: 126-134
138. Hyun K, Wilhelm M, Klein C O, Cho K S, Nam J G, Ahn K H, Lee S J, Ewoldt R H, McKinley G H. A review of nonlinear oscillatory shear tests: Analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS). *Progress in Polymer Science*. 2011, 36: 1697-1753
139. Ishiguro S, Uppalapati D, Goldsmith Z, Robertson D, Hodge J, Holt H, Nakashima A, Turner K, Tamura M. Extracellular polysaccharides extracted from *Parachlorella kessleri* enhance host antitumor immune responses and inhibit colon carcinoma growth in mice. *Cancer Research*. 2018, 78: 4706
140. Jiang Z Q, Wang J, Stoddard F, Salovaara H, Sontag-Strohm T. Preparation and Characterization of Emulsion Gels from Whole Faba Bean Flour. *Foods*. 2020, 9: 15
141. Joshi S R, Koijam K. Exopolysaccharide Production by a Lactic Acid Bacteria, *Leuconostoc lactis* Isolated from Ethnically Fermented Beverage. *National Academy Science Letters-India*. 2014, 37: 59-64
142. Joyner H S. Explaining food texture through rheology. *Current Opinion in Food Science*. 2018, 21: 7-14
143. Khanal B K S, Bhandari B, Prakash S, Liu D, Zhou P, Bansal N. Modifying textural and microstructural properties of low fat Cheddar cheese using sodium alginate. *Food Hydrocolloids*. 2018, 83: 97-108
144. Klost M, Drusch S. Structure formation and rheological properties of pea protein-based gels. *Food Hydrocolloids*. 2019, 94: 622-630
145. Klost M, Gimenez-Ribes G, Drusch S. Enzymatic hydrolysis of pea protein: Interactions and protein fractions involved in fermentation induced gels and their influence on rheological properties. *Food Hydrocolloids*. 2020, 105: 10
146. Korcz E, Varga L. Exopolysaccharides from lactic acid bacteria: Techno-functional application in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*. 2021, 110: 375-384
147. Krzeminski A, Grosshable K, Hinrichs J. Structural properties of stirred yoghurt as influenced by whey proteins. *Lwt-Food Science and Technology*. 2011, 44: 2134-2140
148. Laguna L, Fiszman S, Tarrega A. Saliva matters: Reviewing the role of saliva in the rheology and tribology of liquid and semisolid foods. Relation to in-mouth perception. *Food Hydrocolloids*. 2021, 116: 106660

149. Lee W J, Lucey J A. Formation and Physical Properties of Yogurt. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2010, 23: 1127-1136
150. Levy R, Okun Z, Davidovich-Pinhas M, Shpigelman A. Utilization of high-pressure homogenization of potato protein isolate for the production of dairy-free yogurt-like fermented product. *Food Hydrocolloids*. 2021, 113: 12
151. Levy R, Okun Z, Shpigelman A. High-Pressure Homogenization: Principles and Applications Beyond Microbial Inactivation. *Food Engineering Reviews*. 2021, 13: 490-508
152. Li A, Guo C, Li X, Li P, Yang X, Guo Y. Gelation mechanism and physical properties of glucono-delta-lactone induced alginate sodium/casein composite gels. *Food Hydrocolloids*. 2021, 118: 106775
153. Li C, Li W, Chen X, Feng M, Rui X, Jiang M, Dong M. Microbiological, physicochemical and rheological properties of fermented soymilk produced with exopolysaccharide (EPS) producing lactic acid bacteria strains. *LWT - Food Science and Technology*. 2014, 57: 477-485
154. Li N, Yang M, Guo Y, Tong L-T, Wang Y, Zhang S, Wang L, Fan B, Wang F, Liu L. Physicochemical properties of different pea proteins in relation to their gelation ability to form lactic acid bacteria induced yogurt gel. *Lwt-Food Science and Technology*. 2022, 161: 113381
155. Liu J, Cattaneo C, Papavasileiou M, Methven L, Bredie W L P. A review on oral tactile sensitivity: measurement techniques, influencing factors and its relation to food perception and preference. *Food Quality and Preference*. 2022, 100: 104624
156. Liu Q, Li Z, Pan X, Dai Y, Hou H, Wang W, Ding X, Zhang H, Li X, Dong H. Effect of grinding on the structure of pea protein isolate and the rheological properties of its acid-induced gels. *International Journal of Food Science and Technology*. 2021, 56: 3455-3462
157. Liu X, Guo J, Wan Z L, Liu Y Y, Ruan Q J, Yang X Q. Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers. *Food Hydrocolloids*. 2018, 77: 168-175
158. Liu Y, Hu J, Zhong M, Xu W. A novel, simple and rapid method for the detection of melamine from milk based on tribology measurements. *Tribology International*. 2018, 119: 66-72
159. Malhotra A, Coupland J N. The effect of surfactants on the solubility, zeta potential, and viscosity of soy protein isolates. *Food Hydrocolloids*. 2004, 18: 101-108

160. Marozienne A, de Kruif C G. Interaction of pectin and casein micelles. *Food Hydrocolloids*. 2000, 14: 391-394
161. Mosca A C, Chen J. Food oral management: physiology and objective assessment. *Current Opinion in Food Science*. 2016, 9: 11-20
162. Navicha W B, Hua Y, Masamba K, Kong X, Zhang C. Optimization of soybean roasting parameters in developing nutritious and lipoxygenase free soymilk. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2017, 11: 1899-1908
163. Ningtyas D W, Tam B, Bhandari B, Prakash S. Effect of different types and concentrations of fat on the physico-chemical properties of soy protein isolate gel. *Food Hydrocolloids*. 2021, 111: 11
164. Pachekrepapol U, Kokhuenkhan Y, Ongsawat J. Formulation of yogurt-like product from coconut milk and evaluation of physicochemical, rheological, and sensory properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2021, 25: 100393
165. Pang Z H, Safdar B, Wang Y L, Sun M Y, Liu X Q. Improvement of tribo-rheological properties of acid soymilk gels by reinforcement of 7S or 11S proteins. *Food Hydrocolloids*. 2021, 110: 9
166. Pang Z H, Xu R L, Zhu Y, Li H, Bansal N, Liu X Q. Comparison of rheological, tribological, and microstructural properties of soymilk gels acidified with glucono-delta-lactone or culture. *Food Research International*. 2019, 121: 798-805
167. Patel A R, Dumlu P, Vermeir L, Lewille B, Lesaffer A, Dewettinck K. Rheological characterization of gel-in-oil-in-gel type structured emulsions. *Food Hydrocolloids*. 2015, 46: 84-92
168. Patrignani F, Modesto M, Michelini S, Sansosti M C, Serrazanetti D I, Qvirist L, Siroli L, Camprini L, Mattarelli P, Lanciotti R. Technological potential of *Bifidobacterium aesculapii* strains for fermented soymilk production. *Lwt-Food Science and Technology*. 2018, 89: 689-696
169. Peng X, Guo S. Texture characteristics of soymilk gels formed by lactic fermentation: A comparison of soymilk prepared by blanching soybeans under different temperatures. *Food Hydrocolloids*. 2015, 43: 58-65
170. Penha C B, Santos V D, Speranza P, Kurozawa L E. Plant-based beverages: Ecofriendly technologies in the production process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021, 72: 12

171. Pereyra R, Schmidt K A, Wicker L. Interaction and stabilization of acidified casein dispersions with low and high methoxyl pectins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1997, 45: 3448-3451
172. Peyer L C, Zannini E, Arendt E K. Lactic acid bacteria as sensory biomodulators for fermented cereal-based beverages. *Trends in Food Science & Technology*. 2016, 54: 17-25
173. Reyes-Jurado F, Soto-Reyes N, Davila-Rodriguez M, Lorenzo-Leal A C, Jimenez-Munguia M T, Mani-Lopez E, Lopez-Malo A. Plant-Based Milk Alternatives: Types, Processes, Benefits, and Characteristics. *Food Reviews International*. 2021, 39: 2320-2351
174. Rinaldoni A N, Campderros M E, Perez Padilla A. Physico-chemical and sensory properties of yogurt from ultrafiltered soy milk concentrate added with inulin. *Lwt-Food Science and Technology*. 2012, 45: 142-147
175. Ripari V. Techno-functional role of exopolysaccharides in cereal-based, yogurt-like beverages. *Beverages*, 2306-5710. 2019, 5: 16
176. Riquelme N, Laguna L, Tarrega A, Robert P, Arancibia C. Oral behavior of emulsified systems with different particle size and thickening agents under simulated conditions. *Food Research International*. 2021, 147: 10
177. Ross A I V, Tyler P, Borgognone M G, Eriksen B M. Relationships between shear rheology and sensory attributes of hydrocolloid-thickened fluids designed to compensate for impairments in oral manipulation and swallowing. *Journal of Food Engineering*. 2019, 263: 123-131
178. Rudge R E D, Scholten E, Dijkman J A. Advances and challenges in soft tribology with applications to foods. *Current Opinion in Food Science*. 2019, 27: 90-97
179. Sanz T, Salvador A, Jimenez A, Fiszman S M. Yogurt enrichment with functional asparagus fibre.: Effect of fibre extraction method on rheological properties, colour, and sensory acceptance. *European Food Research and Technology*. 2008, 227: 1515-1521
180. Schreuders F K G, Sagis L M C, Bodnar I, Erni P, Boom R M, van der Goot A J. Small and large oscillatory shear properties of concentrated proteins. *Food Hydrocolloids*. 2021, 110: 106172
181. Sengupta S, Bhattacharyya D K, Bhowal J. Improved Quality Attributes in Soy Yogurts Prepared From DAG Enriched Edible Oils and Edible Deoiled Soy Flour. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2018, 120: 1800033

182. Sim S Y J, Hua X Y, Henry C J. A Novel Approach to Structure Plant-Based Yogurts Using High Pressure Processing. *Foods*. 2020, 9: 10
183. Sonne A, Busch-Stockfish M, Weiss J, Hinrichs J. Improved mapping of in-mouth creaminess of semi-solid dairy products by combining rheology, particle size, and tribology data. *LWT - Food Science and Technology*. 2014, 59: 342-347
184. Tudorica C M, Jones T E R, Kuri V, Brennan C S. The effects of refined barley beta-glucan on the physico-structural properties of low-fat dairy products: curd yield, microstructure, texture and rheology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2004, 84: 1159-1169
185. Turgeon S L, Schmitt C, Sanchez C. Protein-polysaccharide complexes and coacervates. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2007, 12: 166-178
186. Wang S, Yang J, Shao G, Liu J, Wang J, Yang L, Li J, Liu H, Zhu D, Li Y, Jiang L. pH-induced conformational changes and interfacial dilatational rheology of soy protein isolated/soy hull polysaccharide complex and its effects on emulsion stabilization. *Food Hydrocolloids*. 2020, 109: 106075
187. Wang Y, Zhang A, Wang X, Xu N, Jiang L. The radiation assisted-Maillard reaction comprehensively improves the freeze-thaw stability of soy protein-stabilized oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*. 2020, 103: 105684
188. Wu J, Du B, Li J, Zhang H. Influence of homogenisation and the degradation of stabilizer on the stability of acidified milk drinks stabilized by carboxymethylcellulose. *Lwt-Food Science and Technology*. 2014, 56: 370-376
189. Wusigale, Liang L, Luo Y. Casein and pectin: Structures, interactions, and applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2020, 97: 391-403
190. Xiong W, Ren C, Tian M, Yang X, Li J, Li B. Complex coacervation of ovalbumin-carboxymethylcellulose assessed by isothermal titration calorimeter and rheology: Effect of ionic strength and charge density of polysaccharide. *Food Hydrocolloids*. 2017, 73: 41-50
191. Yang, Ke C X, Li L. Physicochemical, rheological and digestive characteristics of soy protein isolate gel induced by lactic acid bacteria. *Journal of Food Engineering*. 2021, 292: 110243
192. Yang, Li A Q, Li D, Guo Y R, Sun L J. Applications of mixed polysaccharide-protein systems in fabricating multi-structures of binary food gels-A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2021, 109: 197-210

193. Yang M, Li N, Tong L, Fan B, Wang L, Wang F, Liu L. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of pea protein and mung bean protein-based yogurt. *Lwt-Food Science and Technology*. 2021, 152: 112390
194. Yang X, Li A Q, Li X X, Sun L J, Guo Y R. An overview of classifications, properties of food polysaccharides and their links to applications in improving food textures. *Trends in Food Science & Technology*. 2020, 102: 1-15
195. Yang X, Ren Y, Zhang L, Wang Z, Li L. Structural characteristics and antioxidant properties of exopolysaccharides isolated from soybean protein gel induced by lactic acid bacteria. *Lwt-Food Science and Technology*. 2021, 150: 111811
196. Yang X Y, Ren Y M, Liu H F, Huo C Y, Li L. Differences in the physicochemical, digestion and microstructural characteristics of soy protein gel acidified with lactic acid bacteria, glucono-6-lactone and organic acid. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021, 185: 462-470
197. Yazici F, Alvarez V B, Hansen P M T. Fermentation and properties of calcium-fortified soy milk yogurt. *Journal of Food Science*. 1997, 62: 457-461
198. Zare F, Boye J I, Orsat V, Champagne C, Simpson B K. Microbial, physical and sensory properties of yogurt supplemented with lentil flour. *Food Research International*. 2011, 44: 2482-2488
199. Zhan F, Yang J, Li J, Wang Y, Li B. Characteristics of the interaction mechanism between tannic acid and sodium caseinate using multispectroscopic and thermodynamics methods. *Food Hydrocolloids*. 2018, 75: 81-87
200. Zhang T, Li Z, Wang Y, Xue Y, Xue C. Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels. *Food Research International*. 2016, 83: 152-161
201. Zhang Y, Wang Y, Zhang R, Yu J, Gao Y, Mao L. Tuning the rheological and tribological properties to simulate oral processing of novel high internal phase oleogel-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*. 2022, 131: 107757
202. Zhao C, Chu Z, Miao Z, Liu J, Liu J, Xu X, Wu Y, Qi B, Yan J. Ultrasound heat treatment effects on structure and acid-induced cold set gel properties of soybean protein isolate. *Food Bioscience*. 2021, 39: 100827
203. Zhao J, Chen Z, Zou R, Zhang X. The application of agar oligosaccharides in directly acidified milk drinks. *Food Hydrocolloids*. 2018, 77: 421-426

204. Zhao Y, Khalid N, Shu G, Neves M A, Kobayashi I, Nakajima M. Complex coacervates from gelatin and octenyl succinic anhydride modified kudzu starch: Insights of formulation and characterization. *Food Hydrocolloids*. 2019, 86: 70-77
205. Zhou B, Drusch S, Hogan S A. Rheological fingerprinting and tribological assessment of high internal phase emulsions stabilized by whey protein isolate: Effects of protein concentration and pH. *Food Hydrocolloids*. 2022, 131: 107816
206. Zhou X, Chen H, Lyu F, Lin H, Zhang Q, Ding Y. Physicochemical properties and microstructure of fish myofibrillar protein-lipid composite gels: Effects of fat type and concentration. *Food Hydrocolloids*. 2019, 90: 433-442
207. Zhou Y, Li X, Hua Y, Kong X, Zhang C, Chen Y, Wang S. The absence of lipoxygenase and 7S globulin of soybeans and heating temperatures on the properties of soymilks and soy yogurts. *Lwt-Food Science and Technology*. 2019, 115: 108431