DOI:10.12441/spyswjs.20240821001 [文章编号] 1673-1689(2024)12-0127-10

黄原胶对蛋清蛋白泡沫型凝胶特性的影响

万 俊[1] 张孝芹[1] 杨樱洁[2] 艾民珉[2*]

(1. 广东农工商职业技术学院热带农林学院,广东 广州 510507; 2. 华南农业大学食品学院,广东 广州 510642)

摘要:【目的】揭示黄原胶(XG)对蛋清蛋白泡沫型凝胶特性的调控作用。**【方法】**以添加复合黄原胶的蛋清蛋白泡沫型凝胶为对象,测定凝胶的褐变强度、色泽、质构、流变、分子构象和微观结构的变化。**【结果】**随着黄原胶质量分数的增加,蛋清蛋白泡沫型凝胶的a^*值和褐变强度显著增加,而L^*值和b^*值显著降低;当黄原胶质量分数为1.2%时,蛋清蛋白泡沫型凝胶的硬度、回复性、咀嚼性均达到最大值,分别为109.18 g、0.16和49.04 g;添加黄原胶显著提高了蛋清蛋白泡沫型凝胶的弹性模量(G')和储能模量(G''),增强了凝胶网络结构的稳定性和强度;蛋清蛋白泡沫型凝胶中的总巯基、二硫键的质量摩尔浓度和内源性荧光强度显著降低,而游离巯基的质量摩尔浓度显著增加;当黄原胶质量分数为0.6%~1.2%时,蛋清蛋白泡沫型凝胶形成更小且更致密的网络微观结构。**【结论】**添加适量黄原胶能有效改善蛋清蛋白泡沫型凝胶的特性和结构,为蛋清凝胶加工特性的创新研究提供理论依据。

关键词:黄原胶;蛋清蛋白;凝胶特性

Effect of Xanthan Gum on the Properties of Egg White Protein Foam-Type Gel

WAN Jun[1] *ZHANG Xiaoqin*[1] *YANG Yingjie*[2] *AI Minmin*[2*]

(1. Tropical Agriculture and Forestry College, Guangdong AIB Polytechnic, Guangzhou 510507, China; 2. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to explore the regulatory effects of xanthan gum (XG) on the properties of egg white protein foam-type gel. [**Method**] The changes of browning intensity, color, textural properties, rheological properties, molecular conformation, and microstructure of the egg white protein foam-type gel supplemented with xanthan gum were determined. [**Result**] With the increase in mass fraction of xanthan gum, the a^* value and browning intensity of the egg white protein foam-type gel increased significantly, while the L^* value and b^* value decreased significantly. When the mass fraction of xanthan gum was 1.2%, the hardness, resilience, and chewiness of the egg white protein foam-type gel reached the maximum values, which were 109.18 g, 0.16, and 49.04 g, respectively. The addition of xanthan gum significantly increased the elastic modulus (G') and energy storage modulus (G'') of the egg white protein foam-type gel, and enhanced the stability and strength of the gel network structure. The molar concentrations of total sulfhydryl group and disulfide bond and the endogenous fluorescence intensity decreased significantly, while the molar concentration of free sulfhydryl group increased significantly. When the mass fraction of xanthan gum was 0.6%~1.2%, the egg white protein foam-type gel formed a smaller and denser network microstructure. [**Conclusion**] Adding an appropriate amount of xanthan gum can effectively improve the properties and structure of the egg white protein foam-type gel. The findings

基金项目:广东省农村科技特派员科技助力百县千镇万村高质量发展基金项目(KTP20240013);广东省基础与应用基础研究基金省市联合基金项目(2023A1515110947);广州市基础研究计划与应用基础研究基金项目(SL2022A04J01101)。

通信作者:艾民珉(1993—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事禽蛋综合加工与利用研究。E-mail:scauaiminmin@scau.edu.cn

收稿日期:2024-08-21 **修回日期:**2024-10-10

provide a theoretical basis for innovative research on the processing characteristics of egg white gels.
Keywords: xanthan gum; egg white protein; gel property

禽蛋主要由蛋壳、蛋清和蛋黄三部分组成。蛋清中含有9.7%~10.6%的蛋白质，包括卵清蛋白、卵黏蛋白、卵转铁蛋白和溶菌酶等[1]，这些蛋白质具有优异的起泡性和凝胶性。起泡性使得蛋清在搅拌时能够形成稳定的泡沫结构，而凝胶性则允许蛋清蛋白在特定条件下固化，形成具有三维网络结构的半固体凝胶。蛋清的起泡性与凝胶性与其蛋白质的空间构象密切相关[2]，并且在食品加工过程中，通过精调pH、温度等条件，可以优化蛋清蛋白的功能特性，从而改善食品的质构和口感，提升食品的整体品质。在食品工业中，蛋清的起泡性和凝胶性不仅能够改善食品的感官特性，还能增强食品的稳定性，广泛应用于蛋糕、慕斯、蛋白酥皮和鱼丸等产品的制作中，并发挥了关键作用[3]。因此，深入研究蛋清的起泡性和凝胶性，对于创新食品加工技术、提升食品品质具有重要意义。

黄原胶主要由葡萄糖和半乳甘露聚糖组成，其二级结构通过氢键相互作用形成稳定的棒状双螺旋结构。黄原胶因其显著的增稠性和热稳定性，在食品工业中用于改善食品的质地和稳定性。在蛋清蛋白凝胶的制备中，加入黄原胶可显著影响凝胶的特性。Zhang等[4]研究表明，随着黄原胶质量分数的增加，蛋清凝胶的硬度和弹性均显著升高，而凝胶中游离巯基的质量摩尔浓度和表面疏水性则显著降低，这些变化可能导致凝胶表面结构变得更加粗糙。此外，Jaberi等[5]通过使用不同质量分数的黄原胶与蛋清蛋白复合制成气凝胶体系，发现随着黄原胶质量分数的增加，蛋清凝胶的网络结构变得更加紧凑。

尽管已有研究探讨了黄原胶对蛋清凝胶特性的影响[4-6]，但关于黄原胶与蛋清蛋白的相互作用机制及如何影响凝胶的理化性质和稳定性的相关研究仍然较少。作者基于蛋清蛋白的起泡性与凝胶性，通过分析蛋清蛋白泡沫型凝胶的褐变强度、色泽、质构、流变、分子结构和微观结构等特性，探究不同质量分数的黄原胶对蛋清蛋白泡沫型凝胶的理化性质及稳定性的影响，为蛋清凝胶在新型食品中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鸭蛋：北海海恋商贸有限公司；黄原胶（食品级）：东方博金生物科技有限公司；β-巯基乙醇（β-Me）、8-苯胺-1-萘磺酸（ANS）：北京索莱宝科技有限公司；5，5’-二硫代双-2-硝基苯甲酸（DTNB）、乙二胺四乙酸（EDTA）、三氯乙酸（TCA）：天津市富宇精细化工有限公司；三羟甲基氨基甲烷（Tris）、甘氨酸（Gly）：广州赛国生物科技有限公司；尿素（Urea）、十二烷基硫酸钠（SDS）：天津福晨化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

紫外分光光度计：UV-2600型，日本岛津公司；均质机：IKA T25 Digital型，德国IKA公司；荧光分光光度计：RF-5301PC型，日本岛津公司；质构仪：TA.XT Plus型，英国Stable Micro Systems公司；流变仪：MCR301型，奥地利Anton Paar公司；色差仪：X-RITE SP62型，美国爱色丽公司；真空冷冻干燥机：DGJ-10C型，上海博登生物科技有限公司；扫描电镜：KYKY-EM8000型，北京中科科仪股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蛋清蛋白泡沫型凝胶的制备

将新鲜鸭蛋的蛋清与蛋黄分离，取蛋清备用。分别向蛋清中加入质量分数为0（对照）、0.6%、0.8%、1.2%、1.6%的黄原胶，使用磁力搅拌器搅拌3 h以充分溶胀黄原胶，然后用均质机以3 000 r/min的转速均质3 min，随后置于90 ℃水浴锅中加热30 min，迅速放入冷水中冷却，最后放入4 ℃冰箱冷藏备用。

1.3.2 褐变强度的测定

取5 g样品加入40 mL蒸馏水中，在室温下以10 000 r/min均质2 min，然后使用冷冻高速离心机于5 000 r/min、4 ℃条件下离心15 min，去除沉淀取上清液。使用紫外分光光度计分别在420 nm和294 nm测量其吸光度，分别以A_{420}值和A_{294}值反映褐变强度和美拉德反应速率。

1.3.3 色泽的测定

分别在黑白背景下对色差仪进行校准，然后在5个位置测定样品表面的颜色，用L^*值、a^*值和

b^*值表征样品的颜色。整个操作过程需在同一光线环境下进行。

1.3.4　质构特性的测定

为保证样品大小的均一性，将样品切割成1 cm×1 cm×1 cm的立方体。选择P/36R探头和TPA模式对每个样品进行质构测试。测试参数为：压缩程度50%，触发力5.0 g，测试前速度、测试中速度及测试后速度均为1 mm/s。

1.3.5　流变特性的测定

取2 mL未经过加热的样品置于平台上，初始温度设定为20 ℃。探头下压后，用液体石蜡密封样品以防止水分流失。首先进行温度扫描，分为3个阶段：升温速度为5 ℃/min，范围为20~90 ℃，应变为1%，角频率为10 rad/s；在90 ℃下平衡30 min，应变为1%，角频率为10 rad/s；降温速度为5 ℃/min，应变为1%，角频率为10 rad/s。然后进行振幅扫描，扫描范围为0~1 000%，角频率为10 rad/s。最后进行频率扫描，扫描范围为1~100 rad/s，应变为1%。

1.3.6　巯基和二硫键的测定

取3 g样品，在10 000 r/min的条件下分散于27 mL PBS缓冲液（0.1 mol/L，pH 8.0）中。以10 000 r/min的速度匀浆2 min，再以10 000 r/min的速度离心15 min，收集上清液。使用Bradford法测定上清液中的蛋白质质量浓度。

游离巯基质量摩尔浓度的测定：将0.2 mL上清液、2.8 mL Tris-Gly缓冲液（0.089 mol/L Tris、0.09 mol/L Gly、0.004 mol/L EDTA、8 mol/L Urea，pH 8.0）和0.02 mL Ellman试剂（用Tris-Gly缓冲液配制成质量浓度为4 mg/mL的DTNB溶液）混合，将混合物置于40 ℃水浴中反应15 min，最后在412 nm处测量吸光度。

总巯基质量摩尔浓度的测定：取0.2 mL上清液和2.8 mL Tris-Gly缓冲液（1.5 mg/mL β-Me、体积分数0.5% SDS、8 mol/L Urea，pH 8.0）于40 ℃水浴中反应60 min。然后用12 g/dL的TCA沉淀1 h，于4 000 r/ min离心10 min，收集沉淀并用12 g/dL的TCA冲洗3次。将沉淀溶解于10 mL的Tris-Gly缓冲液（8 mol/L Urea，pH 8.0）中，加入0.02 mL Ellman试剂后在40 ℃下反应15 min，使用紫外分光光度计于412 nm处测定上清液的吸光度。巯基的质量摩尔浓度计算见式（1），二硫键的质量摩尔浓度计算见式（2）。

$$C_S = A \times 10^6 \times \frac{D}{C \times \varepsilon \times b} \quad (1)$$

式中：

C_S——巯基的质量摩尔浓度，μmol/g；

A——412 nm处的吸光度；

D——稀释倍数；

C——蛋白质质量浓度，mg/mL；

ε——巯基基团的摩尔消光系数，13 600 L/（mol·cm）；

b——光程M，1 cm。

$$C_d = \frac{(C_T - C_F)}{2} \quad (2)$$

式中：

C_d——二硫键的质量摩尔浓度，μmol/g；

C_T——总巯基的质量摩尔浓度，μmol/g；

C_F——游离巯基的质量摩尔浓度，μmol/g。

1.3.7　内源性荧光光谱的测定

取3 g样品，在10 000 r/min条件下分散至PBS溶液（0.1 mol/L，pH 7.0）中，随后在10 000 g下离心10 min。离心结束后，取上清液并将其蛋白质质量浓度调至0.1 mg/mL。使用荧光分光光度计进行内源性荧光光谱扫描。测量条件为：激发波长280 nm，扫描范围300~500 nm，狭缝宽度5 nm，灵敏度调为低。

1.3.8　拉曼光谱的测定

将1.5 g冻干样品粉末置于用锡箔纸覆盖的载玻片上，设置相关参数为：激光器波长532 nm，激光功率100 mW，扫描范围3 300~400 cm^{-1}，光谱分辨率2.0 cm^{-1}，扫描样本3次，曝光60次。利用LabSpec 6软件进行基线校正与平滑处理，并以苯丙氨基酸残基为基准进行归一化处理。

1.3.9　微观结构的测定

将样品切割成0.2 cm×0.2 cm×0.2 cm的立方体，在室温下用体积分数2.5%的戊二醛溶液浸泡24 h以固定样品。用PBS溶液洗涤样品3次，随后将其置于真空冷冻干燥器中进行冷冻干燥处理。喷金后使用环境扫描电场对样品表面进行扫描，并使用Image J软件分析微观拍摄结果，计算样品孔径大小。

1.4　**数据处理**

结果均以平均值±标准误差的形式表示，使用

IBM SPSS Statistics 26软件对试验数据进行多重比较及显著性分析，采用Origin Pro 2019b软件绘制图表。所有试验均重复3次。

2 结果与讨论

2.1 黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶褐变强度的影响

A_{294}值反映美拉德反应的速率，A_{420}值则体现褐变强度[7]。如表1所示，添加了不同质量分数黄原胶的蛋清蛋白泡沫型凝胶的A_{294}值和A_{420}值显著大于对照组（除添加黄原胶质量分数1.6%样品的A_{420}值）。当黄原胶质量分数为0.6%时，A_{294}值和A_{420}值均显著升高，表明低质量分数的黄原胶可促进还原糖、氨基酸聚集，加快美拉德反应速率。但随着黄原胶质量分数的增大，A_{294}值和A_{420}值均显著下降。一方面，添加过量黄原胶增大了蛋清蛋白泡沫型凝胶的黏稠度，使凝胶体系的流动性降低，反应底物被包埋，从而阻碍美拉德反应的进行[8]；另一方面，黄原胶具有较为稳定的双螺旋结构[9]，添加大量黄原胶可能会增强其对高温处理的耐受性，进而阻碍蛋清蛋白泡沫型凝胶的褐变。

表1 黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶褐变强度及色泽的影响

Table 1 Effects of xanthan gum mass fraction on the browning intensity and color of egg white protein foam-type gel

黄原胶质量分数/%	A_{294}值	A_{420}值	L^*值	a^*值	b^*值
0	1.12±0.33^{e}	0.46±0.13^{d}	95.37±0.46^{a}	−1.91±0.14^{a}	7.04±0.35^{a}
0.6	4.79±0.35^{a}	1.95±0.25^{a}	94.29±0.49^{ab}	−1.23±0.21^{c}	5.17±0.08^{b}
0.8	2.69±0.42^{b}	1.60±0.33^{b}	93.79±0.37^{bc}	−1.08±0.14^{c}	4.69±0.57^{b}
1.2	2.01±0.41^{c}	0.95±0.13^{c}	92.70±1.97^{c}	−1.40±0.09^{b}	5.63±1.05^{b}
1.6	1.55±0.20^{d}	0.62±0.16^{cd}	92.50±2.21^{c}	−1.50±0.04^{b}	5.15±0.55^{b}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2 黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶色泽的影响

蛋清蛋白泡沫型凝胶的a^*值均显著高于对照组，而L^*值和b^*值显著低于对照组（除添加黄原胶质量分数0.6%样品的L^*值），表明添加不同质量分数的黄原胶均可显著改变蛋清蛋白泡沫型凝胶的色泽。其中a^*值为负值，表示样品偏绿，这可能是由于加热处理后，蛋清中的半胱氨酸和蛋氨酸分离出硫化氢，铁元素与硫元素反应生成绿色的硫化亚铁[10]。随着黄原胶质量分数的增加，L^*值逐渐降低，这主要是由于黄原胶质量分数的增加导致凝胶体系黏稠度增加，从而降低了光的反射。b^*值为正值，主要是美拉德反应引起的褐变所致，同时黄原胶具有热稳定性，加热不易分解，仍然保持黄原胶本身的颜色。

2.3 黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶质构特性的影响

如表2所示，与对照组相比，添加不同质量分数黄原胶的蛋清蛋白泡沫型凝胶在硬度和弹性等方面均明显降低。这是由于黄原胶的添加降低了蛋清蛋白泡沫型凝胶的流动性，干扰了蛋清蛋白分子之间的相互作用，从而影响了蛋清蛋白泡沫型凝胶致密聚集微结构的形成，导致凝胶硬度显著降低[11]。弹性反映了凝胶结构被初始压缩破坏的程度，蛋清蛋白泡沫型凝胶的弹性低于对照组，可能是由于形成的聚集结构不稳定，不利于分子

表2 黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶质构特性的影响

Table 2 Effects of xanthan gum mass fraction on the textural properties of egg white protein foam-type gel

黄原胶质量分数/%	硬度/g	弹性/%	内聚性	黏着性/g	咀嚼性/g	回复性
0	391.51±2.81^{a}	0.90±0.01^{a}	0.71±0.01^{a}	278.59±3.44^{a}	249.43±0.78^{a}	0.35±0.01^{a}
0.6	84.17±33.72^{c}	0.71±0.03^{b}	0.50±0.01^{b}	49.58±21.18^{c}	48.76±4.61^{b}	0.15±0.01^{c}
0.8	90.69±17.71^{c}	0.69±0.03^{b}	0.42±0.01^{c}	53.46±14.14^{c}	33.18±4.35^{b}	0.13±0.01^{d}
1.2	109.18±8.92^{b}	0.75±0.04^{b}	0.50±0.01^{b}	64.83±8.56^{b}	49.04±5.71^{b}	0.16±0.01^{bc}
1.6	88.08±11.34^{c}	0.86±0.01^{a}	0.52±0.01^{b}	52.90±6.21^{c}	47.75±2.46^{b}	0.16±0.01^{b}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

间的相互作用和化学关联，这也导致凝胶的内聚性降低。随着黄原胶质量分数的增加，蛋清蛋白泡沫型凝胶的硬度和黏着性均呈现先增大后减小的趋势，并在质量分数为1.2%时达到最大值。这是因为在凝胶形成过程中，游离巯基转化为二硫键，该共价键的形成强化了凝胶结构。

2.4　黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶流变特性的影响

2.4.1　温度扫描

凝胶的黏弹性强度可由凝胶的储能模量和损耗模量表示。如图1所示，当温度在20~75 ℃时，凝胶的G'和G''保持稳定。当温度在75~80 ℃时，凝胶的G'和G''均随温度的升高而增加，这是由于随着温度的升高，蛋白质发生变性，并在共价键的作用下形成不可逆的凝胶网络[12]。黄原胶分子在高温条件下，其有序结构转变为无序结构，可快速融入蛋白质的网络结构中[13]，导致流动性降低，黏弹性增大。当温度升高至90 ℃时，G'和G''趋于平缓。而当温度从90 ℃降至20 ℃时，凝胶的G'和G''持续增加，主要是由于蛋白质与蛋白质或多糖与蛋白质分子之间的氢键相互作用再次生成并增强，同时加热导致凝胶过程变得不可逆。

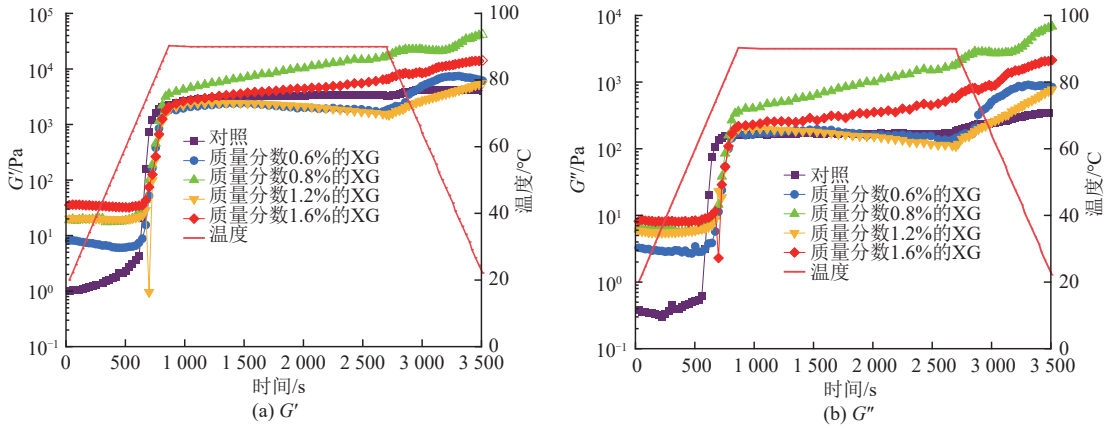


图1　蛋清蛋白泡沫型凝胶的G'和G''随温度的变化结果

Fig. 1　Changes in G' and G'' of egg white protein foam-type gel with temperature

2.4.2　振幅扫描

如图2所示，在线性黏弹区内，G'保持恒定，不随剪切应变的变化而变化。随着剪切应变的进一步增大，凝胶的结构逐渐被破坏，G'减小，而G''保持稳定。随着黄原胶质量分数的增加，蛋清蛋白泡沫型凝胶的G'和G''交叉应力点减小，这是因为在高应变条件下，凝胶转变为溶胶，蛋清蛋白泡沫型凝胶的网络结构稳定性和抗变形能力减弱[14]。同时，加热可以增大分子间的距离，使分子间的相互作用力降低，体系内的缠结点数量减少，从而改变了蛋清蛋白泡沫型凝胶的流动性[15]。

2.4.3　频率扫描

蛋清蛋白泡沫型凝胶的G'随着角频率的增大整体呈上升趋势，见图3(a)。然而，在黄原胶质量分数为0.6%和1.2%且角频率大于80 rad/s的情况下，G'逐渐减小，表明凝胶的弹性逐渐减弱。当黄原胶质量分数为0.6%、0.8%、1.6%时，蛋清蛋白泡沫型凝胶的G''呈现先增大后减小的趋势。在低角频率下，G''急剧增大，同时在角频率为20~75 rad/s时相对稳定，整体呈上升趋势；当角频率大于75 rad/s时，G''急剧减小，见图3(b)。黄原胶质量分数为1.2%的蛋清蛋白泡沫型凝胶变化趋势与其他组类似，但在角频率大于75 rad/s时，G''急剧增大。在扫描范围内，蛋清蛋白泡沫型凝胶的G'和G''均表现出低频依赖性，且G'大于G''(除对照组)，表明凝胶体系的弹性部分超过黏性部分，表现出类似固体的凝胶行为。

如图3(c)所示，随着角频率的增大，对照组的复合黏度趋于0，表明主要是共价键参与形成凝胶网络；随着黄原胶质量分数的增加，复合黏度逐渐降低，这可能是由于较少的二硫键参与形成复合凝胶网络结构[16]。

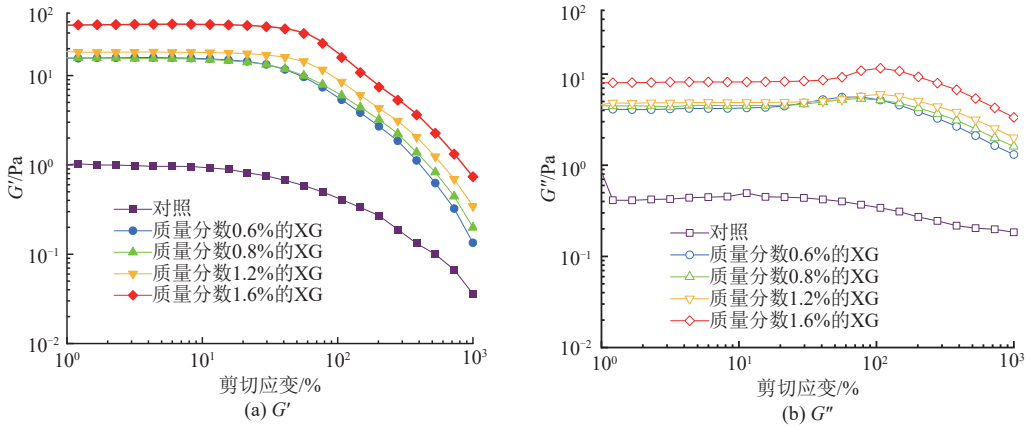


图 2　蛋清蛋白泡沫型凝胶的 G' 和 G'' 随振幅的变化结果

Fig. 2　Changes in G' and G'' of egg white protein foam-type gel with amplitude

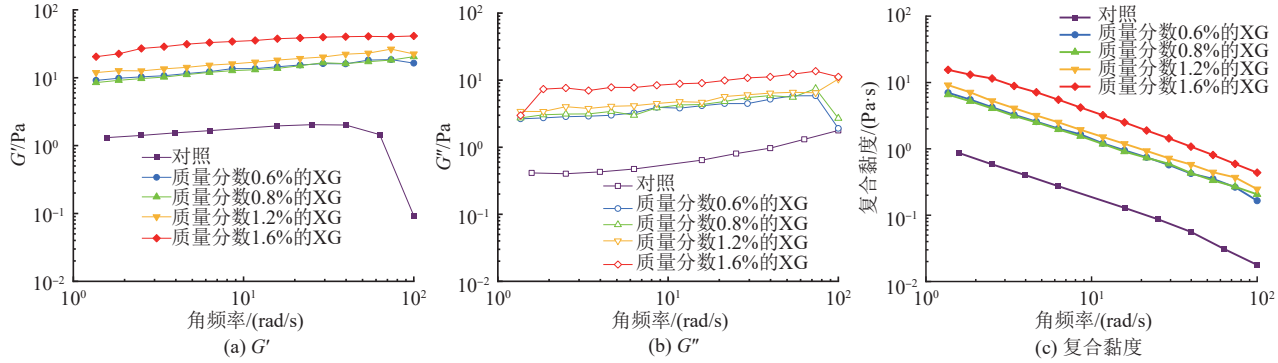


图 3　蛋清蛋白泡沫型凝胶的 G'、G'' 和复合黏度随角频率的变化结果

Fig. 3　Changes in G', G'', and complex viscosity of egg white protein foam-type gel with angular frequency

2.5　黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶巯基和二硫键的影响

巯基是蛋白质分子中最活跃的官能团之一，氧化后会快速生成新的二硫键，从而促进凝胶的形成，并增强凝胶体系的稳定性[17]。如图 4 所示，蛋清蛋白泡沫型凝胶中总巯基和二硫键的质量摩尔浓度随着黄原胶质量分数的增加而明显下降，而游离巯基的质量摩尔浓度则明显上升。这主要是由于加热导致蛋清蛋白泡沫型凝胶的蛋白质发生聚集[18]，引起二硫键断裂。同时，加热变性使蛋白质分子结构暴露，导致二硫键与巯基发生交换反应，且半胱氨酸易氧化，形成含有二硫键的胱氨酸。随着黄原胶质量分数的增加，半胱氨酸的氧化速率降低，二硫键的形成速率低于二硫键转化为巯基的速率，从而导致二硫键的质量摩尔浓度降低，而游离巯基的质量摩尔浓度升高[19]。

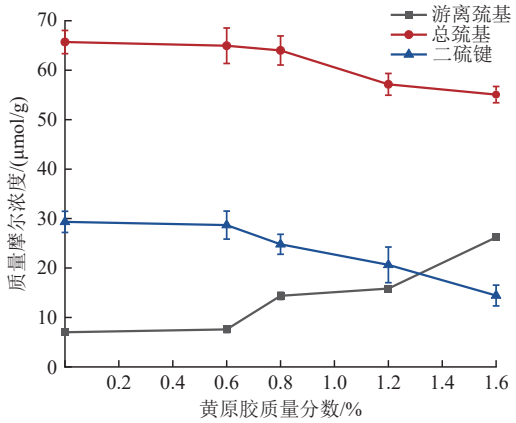


图 4　黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶巯基和二硫键的影响

Fig. 4　Effects of xanthan gum mass fraction on the sulfhydryl and disulfide bond in egg white protein foam-type gel

2.6　不同蛋清蛋白泡沫型凝胶的内源性荧光光谱

内源性荧光主要由色氨酸（Trp）、酪氨酸（Tyr）和苯丙氨酸（Phe）残基产生，其中 Trp 起主要作用。对照组的内源性荧光光谱呈平缓趋势，见图 5，这是由于加热处理会使蛋白质发生聚集，导致荧光残基基团被遮蔽。添加黄原胶的蛋清蛋白泡沫型凝胶

的相对荧光强度均大于对照组，且随着黄原胶质量分数的增加，相对荧光强度逐渐降低，并伴有最大荧光强度对应波长的蓝移。这说明添加黄原胶可使蛋白质与蛋白质或多糖与蛋白质分子之间的相互作用增强，导致蛋白质的构象发生变化，从而使Trp包埋在其他疏水大分子的侧链内部，导致荧光强度的下降[20]。同时，构象变化使复合物趋向于折叠状态，导致最大发射波长蓝移[21]。

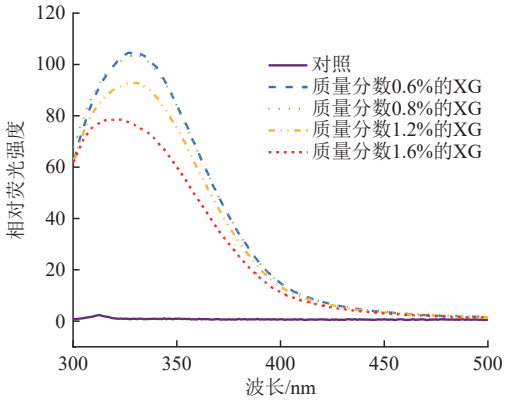


图5　不同蛋清蛋白泡沫型凝胶的内源性荧光光谱图

Fig. 5　Endogenous fluorescence spectra of different egg white protein foam-type gel

2.7　不同蛋清蛋白泡沫型凝胶的拉曼光谱

不同蛋清蛋白泡沫型凝胶的拉曼光谱如图6所示，蛋清蛋白泡沫型凝胶的拉曼光谱中各峰位归属见表3。1 712~1 626 cm^{-1}对应酰胺I带，1 330~1 220cm^{-1}对应酰胺III带，这些峰反映了蛋白质的主链结构，主要通过N—H和C═O基团之间的氢键维持稳定[22-23]。由表3可知，α螺旋和β折叠峰均发生明显偏移，表明添加黄原胶显著影响蛋清蛋白的α螺旋和β折叠结构。蛋清蛋白泡沫型凝胶中氨基酸残基微环境的变化结果见表4。850 cm^{-1}和830 cm^{-1}处峰的比值（I_{850}/I_{830}值）称为Tyr费米共振，比值低表示Tyr残基被埋在疏水环境中，并倾向于作为氢键供体以增强内部氢键[24]。随着黄原胶质量分数的增加，I_{850}/I_{830}值减小且均小于1，表明Tyr残基包埋于疏水环境中，可能参与氨基酸分子内和分子间氢键的形成。1 340 cm^{-1}和760 cm^{-1}对应Trp残基，而1 450 cm^{-1}光谱带对应脂肪酸族残基（C—H、—CH_2和—CH_3的弯曲振动）[25]。随着黄原胶质量分数的增加，Trp残基和脂肪族氨基酸的相对拉曼强度均先降低后增加，且均在黄原胶质量分数为0.8%时达到最低值，这可能与蛋白质疏水相互作用有关。表明蛋清蛋白中Trp残基先由包埋的疏水环境暴露于极性环境，后变为部分包埋状态；加入黄原胶后，蛋清蛋白分子间的疏水作用先减弱后增强。脂肪族氨基酸先是暴露于分子外部，然后部分埋藏于分子内部，

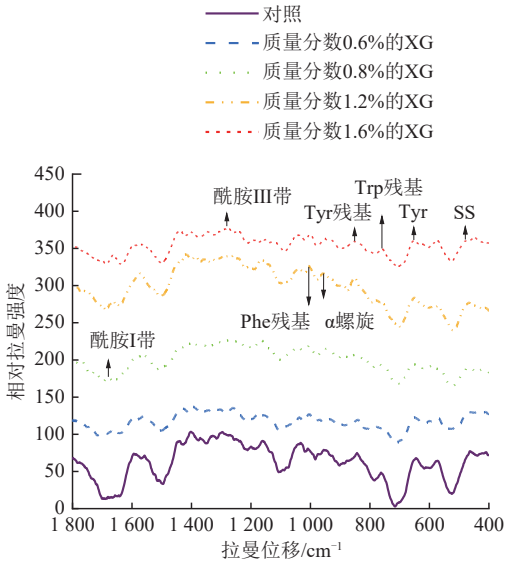


图6　不同蛋清蛋白泡沫型凝胶的拉曼光谱图

Fig. 6　Raman spectra of different egg white protein foam-type gel

表3　蛋清蛋白泡沫型凝胶拉曼峰归属结果

Table 3　Attribution of Raman peak in egg white protein foam-type gel

黄原胶质量分数/%	拉曼位移/cm^{-1}							
	Tyr	Trp	Tyr残基	α螺旋	Phe残基	β折叠	Trp残基	微环境极性
0	645	760	843	952	1 007	1 261	1 370	1 445
0.6	650	754	840	940	1 000	1 256	1 365	1 453
0.8	650	767	843	951	1 004	1 241	1 359	1 449
1.2	648	762	843	950	1 004	1 248	1 382	1 445
1.6	650	760	849	952	1 000	1 244	1 371	1 445

表 4　蛋清蛋白泡沫型凝胶的氨基酸残基微环境分析

Table 4　Microenvironment of amino acid residues in the egg white protein foam-type gel

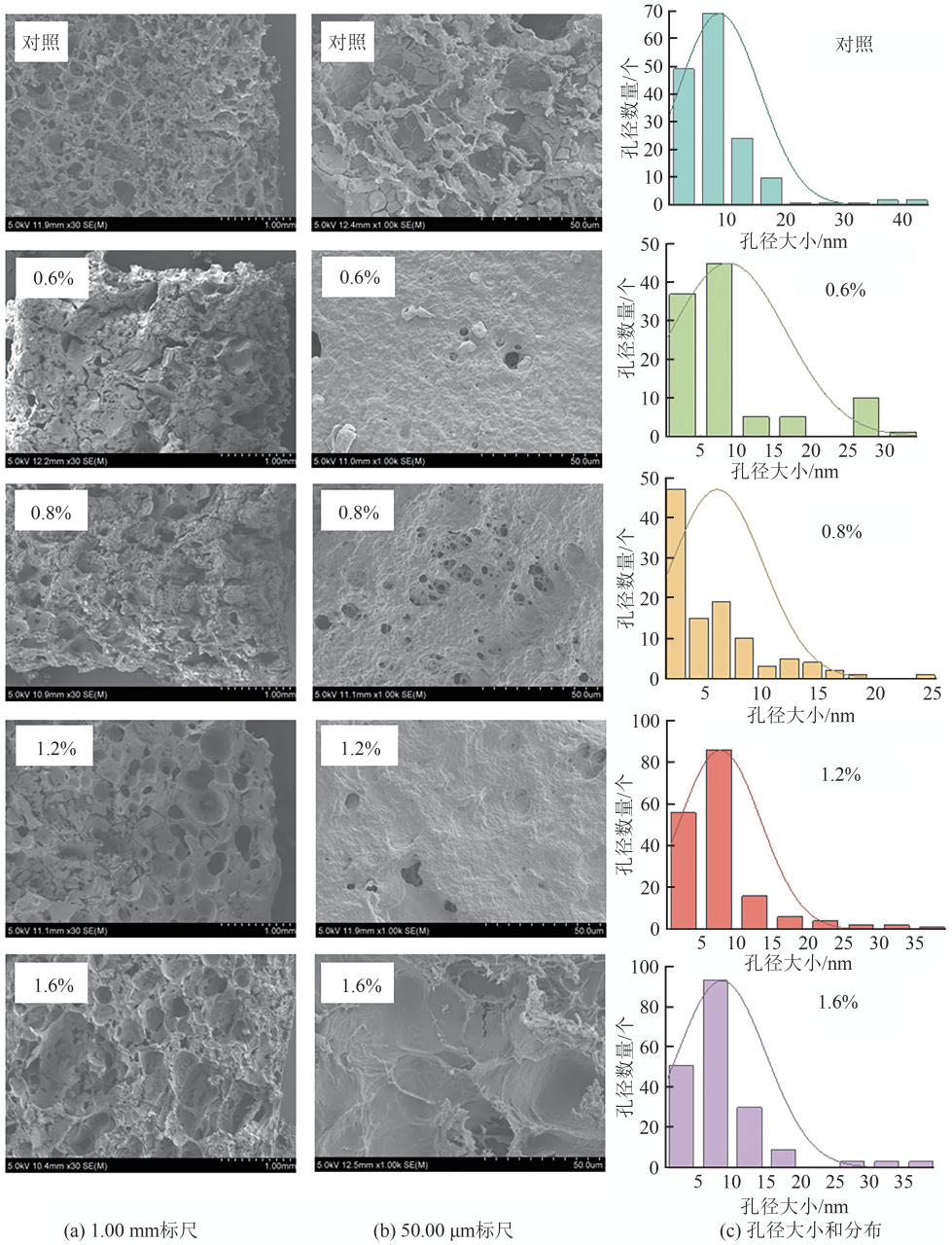
黄原胶质量分数/%	Tyr 费米共振	Trp 伸缩振动	脂肪族氨基酸
0	0.77±0.11^{a}	1.05±0.04^{b}	1.02±0.15^{bc}
0.6	0.68±0.06^{a}	1.13±0.01^{a}	1.25±0.34^{a}
0.8	0.48±0.06^{b}	1.07±0.05^{ab}	0.94±0.03^{c}
1.2	0.48±0.03^{b}	1.13±0.16^{a}	1.12±0.12^{b}
1.6	0.47±0.09^{b}	1.13±0.03^{a}	1.13±0.13^{b}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

这也说明黄原胶通过调控蛋清蛋白氨基酸残基微环境影响其凝胶特性。

2.8　黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶微观结构的影响

扫描电镜可以观察到样品的微观结构，包括三维结构和空间排列等[26]。黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶微观结构的影响见图 7。对照组在干燥后呈现多孔结构，孔径大小集中在 0~10 nm。当黄原胶质量分数为 0.6% 时，蛋清蛋



(a) 1.00 mm标尺　　(b) 50.00 μm标尺　　(c) 孔径大小和分布

图 7　黄原胶质量分数对蛋清蛋白泡沫型凝胶微观结果的影响

Fig. 7　Effects of xanthan gum mass fraction on the microstructure of egg white protein foam-type gel

白泡沫型凝胶中可观察到明显的球形蛋白质结构，这可能是由于带负电荷的多糖质量浓度增加，导致其与蛋白质之间的静电排斥作用增强，从而使蛋白质发生团聚。当黄原胶质量分数大于0.6%时，蛋清蛋白泡沫型凝胶结构变得更加致密，孔径主要集中在0~5 nm，这可能是由于多糖中羟基与水分子之间形成了大量的氢键，从而减少了蛋清蛋白与水分子之间的相互作用力，最终形成孔洞更小、结构更致密的网络结构[27]。当黄原胶的质量分数达到1.6%时，致密的凝胶结构被破坏，凝胶的孔径增大。

3　结论

作者考察了不同质量分数黄原胶对蛋清蛋白泡沫型凝胶特性及其结构的影响。结果表明，当黄原胶质量分数高于0.6%时，美拉德反应速率降低，蛋清蛋白泡沫型凝胶的色泽变浅，总巯基和二硫键的质量摩尔浓度下降，而游离巯基的质量摩尔浓度增加，蛋清蛋白泡沫型凝胶形成孔洞更小、更致密的网络结构。当黄原胶质量分数由0.6%增加到0.8%时，凝胶结构呈现松散状态，蛋清蛋白泡沫型凝胶的弹性、回复性等均降低；当黄原胶质量分数为1.2%时，蛋清蛋白泡沫型凝胶的硬度、回复性、咀嚼性等均达到最大值。该研究有效改善了蛋清蛋白泡沫型凝胶体系的网络结构，增强了凝胶体系的稳定性，为后续蛋清蛋白泡沫型凝胶的加工特性研究提供了理论依据。

参考文献

[1] 芦鑫宏，向小乐，庾卓思，等. 蛋清热凝胶透明机制研究进展[J]. 食品与机械，2024，40(5)：210-218.
LU X H，XIANG X L，YU Z S，et al. Research progress on transparency mechanism of egg white heat gel[J]. Food & Machinery，2024，40(5)：210-218.(in Chinese)

[2] YU Y L，GUAN Y，LIU J B，et al. Molecular structural modification of egg white protein by pH-shifting for improving emulsifying capacity and stability[J]. Food Hydrocolloids，2021，121：107071.

[3] 段汝清，苏宇杰，王俊伟，等. 瓜尔豆胶酶解液改性蛋清蛋白凝胶性质的研究[J]. 食品与生物技术学报，2018，37(7)：714-721.
DUAN R Q，SU Y J，WANG J W，et al . Effect of guar gum hydrolysate on gel properties of egg white protein[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2018，37(7)：714-721.(in Chinese)

[4] ZHANG H，YANG L L，TU Y G，et al. Changes in texture and molecular forces of heated-induced egg white gel with adding xanthan gum[J]. Journal of Food Process Engineering，2019，42(4)：e13071.

[5] JABERI R，NIA A P，NAJI-TABASI S，et al. Rheological and structural properties of oleogel base on soluble complex of egg white protein and xanthan gum[J]. Journal of Texture Studies，2020，51(6)：925-936.

[6] ZANG J W，ZHANG Y Y，PAN X Y，et al. Advances in the formation mechanism，influencing factors and applications of egg white gels：a review[J]. Trends in Food Science & Technology，2023，138：417-432.

[7] 范红，艾民珉，曹媛媛，等. 黄原胶和魔芋胶抑制碱诱导鸭蛋清凝胶的高温液化[J]. 现代食品科技，2021，37(4)：172-179，86.
FAN H，AI M M，CAO Y Y，et al. Xanthan gum and konjac gum inhibits liquefaction of alkali-induced duck egg white gelsat high temperature[J]. Modern Food Science and Technology，2021，37(4)：172-179，86.(in Chinese)

[8] 叶倩，徐宁，郭红英，等. 黄原胶对Suc-Asn反应体系中5-羟甲基糠醛形成的影响[J]. 激光生物学报，2020，29(5)：461-468.
YE Q，XU N，GUO H Y，et al. Effect of xanthan gum on the formation of 5-hydroxymethylfurfural in Suc-Asn reaction system[J]. Acta Laser Biology Sinica，2020，29(5)：461-468.(in Chinese)

[9] BHAT I M，WANI S M，AHMAD MIR S，et al. Advances in xanthan gum production，modifications and its applications[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology，2022，42：102328.

[10] LI J H，WANG C Y，ZHANG M Q，et al. Effects of selected phosphate salts on gelling properties and water state of whole egg gel[J]. Food Hydrocolloids，2018，77：1-7.

[11] 樊睿. 卡拉胶和黄原胶对蛋清凝胶硬度和持水力的影响及高凝胶特性蛋清粉的应用研究[D]. 雅安：四川农业大学，2023.

[12] 刘俊锋. 超声波处理、磷酸化结合TGase交联复合改性对蛋清热凝胶硬度及持水力的影响[D]. 雅安：四川农业大学，2023.

[13] 张惠琳，林捷，郑华，等. 黄原胶和瓜尔豆胶对鸡血凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技，2023，44(18)：106-114.
ZHANG H L，LIN J，ZHENG H，et al. Influences of xanthan gum and guar gum on gelation properties of chicken

blood[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18):106-114.(in Chinese)

[14] PATEL A R, CLUDTS N, SINTANG M D B, et al. Edible oleogels based on water soluble food polymers: preparation, characterization and potential application [J]. Food & Function, 2014, 5(11):2833-2841.

[15] 王路,李映,刘传生. 二氧化硅气凝胶改性聚酯的流变性能研究[J]. 合成技术及应用,2023,38(2):32-38.
WANG L, LI Y, LIU C S. Study on rheological properties of silica aerogel modified polyester chips[J]. Synthetic Technology & Application, 2023, 38(2):32-38.(in Chinese)

[16] WANG C Y, LI J H, LI X, et al. Molecular forces and gelling properties of heat-induced gel from egg white protein glycated with isomalto-oligosaccharide[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99:105356.

[17] YANG H J, ZHANG W G, LI T, et al. Effect of protein structure on water and fat distribution during meat gelling[J]. Food Chemistry, 2016, 204:239-245.

[18] TOTOSAUS A, MONTEJANO J G, SALAZAR J A, et al. A review of physical and chemical protein-gel induction [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(6):589-601.

[19] JIMÉNEZ-SAIZ R, BELLOQUE J, MOLINA E, et al. Human immunoglobulin E (IgE) binding to heated and glycated ovalbumin and ovomucoid before and after *in vitro* digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(18):10044-10051.

[20] AI M M, ZHOU Q, XIAO N, et al. Enhancement of gel characteristics of NaOH-induced duck egg white gel by adding $Ca(OH)_2$ with/without heating [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103:105654.

[21] 何文. 卵白蛋白-黄原胶相互作用及其稳定乳浊液的特性研究[D]. 南昌:江西农业大学,2021.

[22] 姚玉雪,谢萱,闫世长,等. 酶解时间对大豆分离蛋白结构及功能性质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(6):135-143.
YAO Y X, XIE X, YAN S Z, et al. Effect of enzymatic hydrolysis duration on structure and functional properties of soybean protein isolate[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(6):135-143.(in Chinese)

[23] 何冬雪,冯紫蓝,申铉日,等. 分子动力学结合拉曼光谱评价乳液界面蛋白结构变化[J]. 食品科学,2024,45(7):87-95.
HE D X, FENG Z L, SHEN X R, et al. Structural changes of interfacial proteins in emulsions evaluated by molecular dynamics combined with Raman spectroscopy [J]. Food Science, 2024, 45(7):87-95.(in Chinese)

[24] 李春翼,王启明,雷小娟,等. 微射流处理麦醇溶蛋白-芦丁复合物的拉曼光谱分析[J]. 食品与发酵工业,2022,48(24):233-238.
LI C Y, WANG Q M, LEI X J, et al. Raman spectroscopy analysis of gliadin-rutin complex under dynamic high-pressure microfluidization [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24):233-238.(in Chinese)

[25] 李杨,和铭钰,吴长玲,等. 空化微射流对生物酶法豆渣蛋白结构影响的拉曼光谱分析[J]. 食品科学,2020,41(1):105-111.
LI Y, HE M Y, WU C L, et al. Raman spectroscopy analysis of the effect of cavitation microjet on the structure of soybean dreg protein from aqueous enzymatic extraction of soybean oil[J]. Food Science, 2020, 41(1):105-111.(in Chinese)

[26] HEERTJE I. Structure and function of food products: a review[J]. Food Structure, 2014, 1(1):3-23.

[27] 袁一心. 硫酸化多糖介导的蛋清蛋白凝胶特性及增凝机理研究[D]. 长春:吉林大学,2023.

(责任编辑:刘冬梅)