

油凝胶替代脂肪的研究及在植物肉饼中的应用

李恩泽, 吴静雯, 贾心悦, 毛立科*
(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 本研究以菜籽油和椰子油为油相, 以单甘酯 (monoglyceride, MG)、蜂蜡、米糠蜡、巴西棕榈蜡、小烛树蜡 (candelilla wax, CLW) 为凝胶剂制备油凝胶, 探究不同添加量 (5%、10%、15%、20%) 凝胶剂对油凝胶持油力、质构特性、流变学性质的影响。结果表明, 当凝胶剂添加量为15%及以上时, 油凝胶的持油力均达到96%以上; MG的融化特性与牛油最为相似, 但单一凝胶剂制备的油凝胶难以模仿牛油的质构性质。因此, 本实验固定凝胶剂添加量为15%, 选用不同质量比的MG和CLW复配制备油凝胶, 并用于制备植物肉饼。结果表明, 当MG与CLW复配比为3:7时, 油凝胶的质构性质、流变学性质最接近牛油, 植物肉饼的感官品质最佳, 显示出较好的脂肪替代潜力。

关键词: 牛油; 凝胶剂; 油凝胶; 植物肉饼; 脂肪替代物

Preparation and Application of Oleogel as Fat Substitute in Plant-Based Patties

LI Enze, WU Jingwen, JIA Xinyue, MAO Like*
(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, oleogels were prepared with rapeseed oil and coconut oil as oil phase and monoglyceride (MG), beeswax, rice bran wax, carnauba wax or candelilla (CLW) wax as gelling agent, and the effects of different concentrations of gelling agent (5%, 10%, 15%, and 20%) on the oil-holding capacity, textural properties and rheological properties of oleogels were investigated. The results showed that the oil-holding capacity of the oleogels prepared with 15% and more gelling agent was more than 96%; the melting characteristics of MG were most similar to those of butter, but the textural properties of oleogels prepared with a single gelling agent were not comparable to that of butter. Therefore, mixtures of MG and CLW in different proportions by mass were used to prepare oleogels with 15% oleogels and plant-based patties. The results showed that the oleogel prepared with a 3:7 mixture of MG and CLW was the closest to butter in terms of textural and rheological properties, and the resulting patty had the highest sensory quality, showing that this oleogel has a better potential for use as a fat substitute.

Keywords: butter; gelling agent; oleogels; plant-based patties; fat substitute

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230527-260

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 08-0045-10

引文格式:

李恩泽, 吴静雯, 贾心悦, 等. 油凝胶替代脂肪的研究及在植物肉饼中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 45-54.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230527-260. <http://www.spkx.net.cn>

LI Enze, WU Jingwen, JIA Xinyue, et al. Preparation and application of oleogel as fat substitute in plant-based patties[J].

Food Science, 2024, 45(8): 45-54. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230527-260.

<http://www.spkx.net.cn>

动物脂肪在肉制品的加工中对产品的风味、口感和质地等起到重要作用^[1]。然而, 动物脂肪含有大量的饱和

脂肪酸和胆固醇, 过度摄入将会对人体健康造成潜在威胁^[2]。有研究表明单纯降低肉制品中的动物脂肪含量或直

收稿日期: 2023-05-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31972073)

第一作者简介: 李恩泽 (2002—) (ORCID: 0009-0002-4803-3816), 男, 本科生, 研究方向为功能配料与功能食品。

E-mail: 2579941889@qq.com

*通信作者简介: 毛立科 (1983—) (ORCID: 0000-0002-1418-5224), 男, 副教授, 博士, 研究方向为功能配料与功能食品。

E-mail: likemao@cau.edu.cn

接利用植物油代替动物脂肪会对肉制品的质构性质、流变学性质等产生显著负面影响^[3-4]。由此可见,如何在降低肉制品中动物脂肪含量的同时又能够保持最终产品的品质显得尤为必要。

油凝胶是指将少量凝胶剂添加在液态植物油中,经过加热搅拌至完全溶解,再经冷却凝固形成的有机凝胶体系^[5]。液态油脂被固定在凝胶剂分子以自组装或结晶的方式自发形成的三维结构中,不仅获得了传统固体脂肪的物理特性^[6],而且具有“零反式”和低饱和脂肪酸的优点,是替代传统固体脂肪的新型健康油脂产品^[7]。凝胶剂作为油凝胶的关键组成部分,其结构会直接影响油凝胶的质构及流变学性质^[8-9]。单甘酯(monoglyceride, MG)是食品中广泛使用的乳化剂,也是常用的低分子量凝胶剂,可在油脂中形成结晶网络,进而形成凝胶^[10-11]。天然蜡主要从植物本身或植物油中提取,如米糠蜡(rice bran wax, RBW)、小烛树蜡(candelilla wax, CLW)、巴西棕榈蜡(carnauba wax, CW)等,此外还有动物来源的天然蜡,如蜂蜡(beeswax, BW)^[12]。天然蜡能在质量分数低至1%~4%条件下使液态植物油凝胶化,因其形成的凝胶具有高持油力和良好凝胶性而得到广泛关注^[13]。

植物肉主要是以植物蛋白为原料,通过高水分挤压、3D打印、静电纺丝等技术生产的具有类似肉类结构、口感和风味的动物替代品^[14]。相较于传统肉制品,植物基蛋白肉因其节约环境资源的属性和对人类健康的益处而备受青睐。研究表明,若饮食中摄入更多植物基成分,可大大降低肥胖、糖尿病等疾病的发生,同时对癌症、心血管疾病等也具有积极的预防作用^[15]。然而,相较于传统肉制品因含动物脂肪而具有多汁、嫩滑的口感而言,植物肉风味单薄、多汁性差^[16],因此如何优化植物肉的感官属性、使其产生与动物肉相似的口感十分必要。在传统肉制品加工中使用油凝胶替代动物脂肪已有研究,Woern等^[17]利用菜籽油和乙基纤维素制备油凝胶并部分替代脂肪生产意大利腊肠,发现用油凝胶替代动物脂肪对腊肠的质构参数没有影响,且油凝胶中的脂肪球与真实肉中的动物脂肪结构相似。Wolfer等^[18]用菜籽油和BW替代牛脂肪制备的法兰克福香肠与使用传统工艺制备的香肠感官评价结果无显著差异。

但目前尚缺少将油凝胶作为动物脂肪替代物生产植物肉饼的研究,因此本研究以菜籽油和椰子油(质量比4:1)为油相,系统探究5种凝胶剂及其添加量对油凝胶体系物性方面的影响,通过比较牛油与不同油凝胶在持油力、质构性质、流变学性质的差异,初步确定替代牛油的方案。固定合适凝胶剂添加量,选择两种合适的凝胶剂进行复配,将不同复配比油凝胶作为脂肪替代物进行植物肉饼的制备,探究油凝胶替代牛油在植物肉饼中

的效果,确定最佳复配比例,为植物肉品质提升提供一定的理论依据和借鉴思路。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

牛油 漯河佰展油脂有限公司;菜籽油 益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;椰子油 济南翰慈堂经贸有限公司;大豆拉丝蛋白 百川生物科技有限公司;小麦面筋蛋白 华丰粉业有限公司;醋酸酯淀粉 上海鑫泰食品配料商城;甲基纤维素 山东赫达股份有限公司;三聚磷酸钠、MG 河南万邦化工科技有限公司;甜菜根粉 安徽汉合堂健康产业有限公司;猪肉香精 山东天博食品配料有限公司;食盐 中国盐业股份有限公司;食用白砂糖 北京糖业烟酒集团有限公司;味精 莲花健康产品集团食品有限公司;混合香辛料(肉桂、月桂、肉豆蔻、白胡椒、八角、花椒、丁香) 沃特莱斯生物科技有限公司;BW、RBW、CW、CLW 苏州逾世纪生物科技有限公司。以上所有原料与凝胶剂均为食品级。

1.2 仪器与设备

HAAKE IQ air型流变仪 美国Thermo Fisher Scientific公司;CT3型物性分析仪 美国Brookfield公司;3k15型离心机 美国Sigma-Aldrich公司;S22-2型恒温磁力搅拌器 上海司乐仪器有限公司;YP5002型电子天平 上海越平科学仪器有限公司;UMC5型斩拌机 德国Stephan公司;KWS1523LQ-F2(XS)型烤箱 广东格兰仕集团有限公司。

1.3 方法

1.3.1 油凝胶的制备

以菜籽油和椰子油(质量比4:1)为油相,选用MG、BW、RBW、CW、CLW作为凝胶剂,将不同添加量(5%、10%、15%、20%)的凝胶剂分别与油相混合,将样品置于恒温磁力器中在400 r/min、90℃条件下加热搅拌至凝胶剂完全融化,室温静置24 h备用。

1.3.2 油凝胶持油力的测定

油凝胶的持油力分析参照Pieve等^[19]的方法并加以修改,对10 mL离心管标号并称质量,记为A;称取2 g左右上述步骤中制备的油凝胶样品于离心管中,室温放置24 h,整体质量记为B;后以15 000 r/min的速度在室温环境下离心30 min,将离心管取出,倒置于滤纸上,使游离的液态油脂完全析出,记录样品和离心管整体质量,记为C。持油力测定重复3次,数据取平均值,按下式计算:

$$\text{持油力}/\% = \frac{C-A}{B-A} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3 油凝胶硬度的测定

采用物性分析仪测定油凝胶的机械性能（硬度）。约15 g油凝胶在室温条件下于25 mL圆柱形玻璃烧杯中成胶，24 h后进行测定。测试条件：采用直径为1 cm的探头（TA 10/1000），以1 mm/s的恒定速度压入油凝胶样品，触发点负载为0.05 N，下压深度10 mm。硬度取最大穿透力值，每个样品进行3次重复实验，数据取平均值。

1.3.4 油凝胶流变学性质的测定

使用AR1500型流变仪研究油凝胶的流变学性质。测试条件：采用平行板（直径40 mm），间隙为1 mm，所有测试均在25 °C进行。1）固定频率为1 Hz，在0.01%~100%的范围内进行振荡应变扫描，确定油凝胶的线性黏弹区，即不破坏样品结构的实验范围，然后保持应变为0.01%，频率从0.1 Hz增加至10 Hz进行频率扫描，研究油凝胶随时间变化的形变行为，记录其储能模量（ G' ）和损耗模量（ G'' ）的变化；2）黏度测定：流动模式，剪切速率的范围为0.1~100 s⁻¹；3）温度扫描：固定扫描频率为1 Hz，振荡应变为0.02%，以5 °C/min的加热速率从25 °C升高至90 °C进行温度扫描。

1.3.5 油凝胶替代脂肪植物肉饼的制备

植物肉饼的配方：大豆拉丝蛋白17%、水25.5%（用于大豆拉丝蛋白复水）、油凝胶10%、冰水28.5%、调味料4.6%、色素0.4%、猪肉香精3%、甲基纤维素2.5%、小麦面筋蛋白5%和醋酸酯淀粉3.5%。

制备工艺：以大豆拉丝蛋白、水质量比为1:1.5的比例将大豆拉丝蛋白在常温下复水，浸泡至柔软无硬芯，拆丝后放入粉碎机破碎20 s，使大豆拉丝蛋白成丝状，低温保存备用。在斩拌机中加入冰水与黏结剂、调味料、甜菜根粉和肉味香精等混合配料，在2 °C、1 000 r/min的条件下低温斩拌1 min，随后加入油凝胶以2 000 r/min的转速斩拌1 min，最后加入处理好的大豆拉丝蛋白，以1 000 r/min的转速真空（真空度为0.08 MPa）斩拌3 min。然后使用肉饼模具（直径90 mm、高度15 mm）定型，每个肉饼质量约为100 g，直径约90 mm，厚度约为12 mm。将植物肉饼在烤箱中180 °C上下火烤制15 min。

1.3.6 植物肉饼感官评定

将制备的植物肉饼切成均匀的小块用于感官评定，参考T/CIFST 001—2020《植物基肉制品》中植物基肉制品的感官品质要求及胡盼盼等^[20]的方法，进行适当修改后制定评分标准如表1所示。选取10名经过培训的食品学院学生组成评定小组进行感官评价。

表1 植物肉饼感官评定标准

指标	评定标准	分值
风味	风味适中，无异味，无豆腥味	5~10
	风味不适，有异味	1~5
色泽	明亮均一，接近动物肉色泽	5~10
	暗且不均匀，与动物肉色泽偏差大	1~5
口感	口感好，有嚼劲，质地均匀	7~10
	口感、嚼劲一般，质地不均	4~7
	口感差，质地不均，过软或过硬	1~4
组织状态	拉丝效果好，纤维状态明显，组织结构紧密	7~10
	拉丝效果一般，纤维状态一般，组织结构略微松散	4~7
总体可接受性	拉丝效果差，纤维状态不明显，组织结构松散	1~4
	品质佳，可接受性良好	7~10
	品质一般，可接受性一般	4~7
	品质差，不可接受	1~4

1.3.7 植物肉饼质构特性的测定

参考蒋小锋^[21]、程怡媚^[22]和杨震^[23]等对质构特性的测定方法并加以改进。将样品冷却至室温后，用刀片在植物基肉饼上随机取样5点，将其切成大小一致、形状相同的长方体（1.5 cm×1.5 cm×1 cm），密封保存，然后对待测样品利用质构分析仪进行质构特性测定。选用直径50 mm的圆柱形探头（TA25/1000）进行2次循环测试，触发点负载为5 g，压缩变形量设置为30%，测前速率、测试中速率、测后速率均为1 mm/s，触发力为5 g。

1.3.8 植物肉饼持水性的测定

参考杨勇等^[24]和美国谷物化学协会蛋白质物质的水合能力测定方法AACC88-04，并稍作修改。将解冻后的样品进行粉碎，称取约1 g粉碎样品，准确记录其质量 m_1 ，放入10 mL离心管中，空离心管质量记为 m_2 ，加入5 mL去离子水，振荡混匀，常温静置30 min。以5 000 r/min离心15 min，吸出上层液体后称离心管和沉淀物质量，记为 m_3 。每个样品重复3次，持水性按式（2）计算：

$$\text{持水性} / (\text{g/g}) = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{m_1} \quad (2)$$

1.3.9 植物肉饼持油力的测定

方法同1.3.8节持水性测定，用菜籽油代替去离子水并计算其持油力。

1.3.10 植物肉饼蒸煮损失的测定

参考李颖等^[25]测定植物肉蒸煮损失的方法，并稍作修改。将解冻后的植物肉饼称质量并记为 m_4 ，烤箱预热后180 °C上下火烤制15 min，待植物肉饼冷却至室温，用滤纸将表面渗出的汁液吸净，称质量记为 m_5 ，蒸煮损失计算如式（3）所示：

$$\text{蒸煮损失} / \% = \frac{m_4 - m_5}{m_4} \times 100 \quad (3)$$

1.3.11 植物肉饼解冻损失的测定

参考赵知微^[26]测定植物肉解冻损失的方法，并稍作

修改。将冷冻贮藏的植物肉饼取出称质量记为 m_6 ，放置在室温下解冻4 h，用滤纸吸掉表面渗出的汁液，称量解冻后的样品质量记为 m_7 。解冻损失计算如式(4)所示：

$$\text{解冻损失}/\% = \frac{m_6 - m_7}{m_6} \times 100 \quad (4)$$

1.4 数据处理与统计分析

每组实验数据重复3次测量，结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示。使用Excle 2019和Origin 2021进行数据处理并制图，通过SPSS 26.0软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA)。在整个研究中采用Duncan检验分析，显著性水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 油凝胶持油力分析

油凝胶产品的一个重要特性是能够将油较好地束缚在凝胶体系内，而持油力是评价油凝胶宏观性质的重要指标^[27]。油凝胶持油力越高，说明凝胶剂与复合植物油的结合能力越好，形成的油凝胶体系的内部结构越稳定^[28]。由表2可知，BX、RBW、CLW在添加量为5%时持油力可以达到98%及以上，可能是因为这3种凝胶剂与复合植物油在较低浓度下就能形成致密的结构，将油相紧紧束缚在凝胶体系内。而CLW添加量高于5%时，其持油力无显著性差异，说明CLW在添加量为5%时，油凝胶形成了稳定且致密的凝胶结构。MG、RBW、CW形成的油凝胶的持油力随凝胶剂添加量的增加具有增加的趋势，其中CW形成的油凝胶在凝胶剂添加量高于15%时持油力与凝胶剂添加量不呈剂量关系，并无显著性差异，可能是因为当CW添加到一定浓度时，网络结构基本固定。在添加量为15%及以上的条件下，所选的凝胶剂均能与复合植物油形成强的凝胶结构，且持油力均在96%以上，持油能力最好的是BX、CLW，其次是RBW、CW，持油力最差的为MG。根据预实验结果，牛油的持油力为100%，凝胶剂添加量为15%及以上条件下制备的油凝胶的持油力与牛油相近，都能较好地模拟牛油。

表2 凝胶剂的种类与添加量对油凝胶持油力的影响

Table 2 Effects of addition of different types and amounts of gelling agents on the oil-holding capacity of oleogels

凝胶剂	持油力/ $\%$			
	5%	10%	15%	20%
BX	100.00±0.00 ^{Aa}	99.69±0.08 ^{Bb}	100.00±0.00 ^{Aa}	100.00±0.00 ^{Aa}
MG	79.31±0.13 ^{Cd}	91.08±0.22 ^{Cc}	96.79±0.10 ^{Db}	98.70±0.12 ^{Ca}
RBW	98.53±0.23 ^{Bb}	99.52±0.26 ^{Ba}	99.70±0.07 ^{Ba}	99.63±0.10 ^{Bab}
CW	67.91±0.50 ^{Dc}	87.77±0.07 ^{Db}	98.32±0.28 ^{Ca}	98.08±0.39 ^{Da}
CLW	100.00±0.00 ^{Aa}	100.00±0.00 ^{Aa}	100.00±0.00 ^{Aa}	99.66±0.13 ^{ABa}

注：同列大写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)；同行小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。表3同。

2.2 油凝胶质构分析

油凝胶的硬度在一定程度上能够反映出凝胶剂对

液态油的固化能力，硬度越大，其凝胶的网络结构越密集，对液态油的固化能力越强^[29]。5种凝胶剂在不同添加比例下均能形成稳定的凝胶结构，对应的油凝胶硬度如表3所示。结果表明，随着5种凝胶剂添加量的增加，油凝胶的硬度显著提升，这可能是由于随着凝胶剂的添加量增大，形成的油凝胶网络结构更致密且更耐形变，体系硬度增大^[30]。此外，当凝胶剂添加量高于5%时，天然蜡基凝胶剂形成的油凝胶硬度普遍高于MG，有研究表明天然蜡能在较低添加量条件下构建具有较好质构特性的油凝胶，是最有效的结晶性凝胶因子^[31]，这与实验结果相吻合。根据预实验结果，牛油的平均硬度为(42.80±1.97) N，使用单一凝胶剂制成的油凝胶难以模拟牛油的硬度。

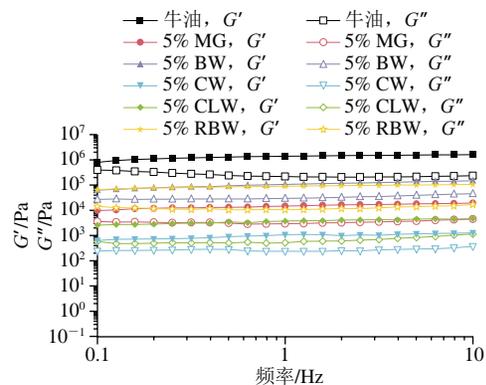
表3 凝胶剂的种类与添加量对油凝胶硬度的影响

Table 3 Effects of addition of different types and amounts of gelling agents on the hardness of oleogels

凝胶剂	硬度/N			
	5%	10%	15%	20%
BW	4.720±0.137 ^{Ad}	8.450±0.137 ^{Bc}	29.760±0.112 ^{Ab}	47.420±0.276 ^{Ca}
MG	1.690±0.044 ^{Cd}	3.200±0.089 ^{Fc}	12.290±0.111 ^{Eb}	30.310±0.153 ^{Da}
RBW	0.670±0.015 ^{Dd}	5.010±0.141 ^{Cc}	18.420±0.124 ^{Cb}	25.550±0.091 ^{Ea}
CW	0.230±0.003 ^{Ed}	3.440±0.128 ^{Dc}	15.370±0.084 ^{Db}	51.680±0.226 ^{Aa}
CLW	4.410±0.060 ^{Bd}	14.900±0.039 ^{Ac}	27.270±0.110 ^{Bb}	49.270±0.142 ^{Ba}

2.3 油凝胶流变学性质分析

流变学性质是油凝胶的一个重要宏观特性，了解这些流变学性质对油凝胶的应用具有重要意义。图1显示不同凝胶剂种类和添加量下制备的油凝胶和牛油样品进行频率扫描所获得的频率扫描曲线。结果表明，所有样品的 G' 均比 G'' 大，表明所有样品都形成了凝胶结构，呈固体状态；所有油脂体系的 G' 和 G'' 随扫描频率的增加变化趋势不明显，没有出现从凝胶到溶胶的转变，表明所有样品在测试范围内频率依赖性弱^[32]。此外，随着凝胶剂添加量的增大，所有样品的 G' 和 G'' 都随之增大，说明凝胶剂在油凝胶内部形成了更加致密的三维网状结构，与油相之间缔合得更加紧密，表现出更强的机械强度^[33]。当凝胶剂添加量为20%时，BW、CW、CLW形成的油凝胶样品的 G' 与牛油较为接近，可以推测凝胶内部含有更多紧密排列的晶体形态，凝胶网络结构更加致密、稳定。



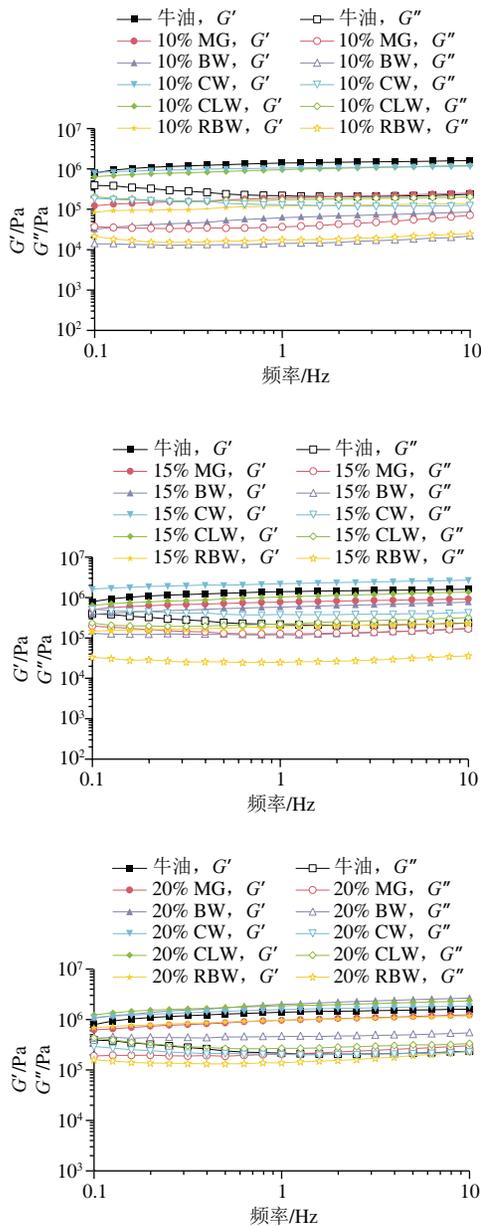


图1 凝胶剂种类和添加量对油凝胶样品频率扫描中复合模量的影响
Fig.1 Effects of addition of different types and amounts of gelling agents on the storage (G') and loss (G'') moduli of oleogel samples as a function of frequency

图2显示不同凝胶剂种类和添加量制备的油凝胶和牛油样品的黏度随剪切速率的变化情况。结果表明,所有样品的黏度均随着剪切速率的增加而减小,呈现“剪切变稀”的现象,符合油脂体系属于假塑性流体的特性^[34]。对于同种凝胶剂制备的油凝胶,具有更高凝胶剂添加量的油凝胶表现出更高的黏度,说明凝胶能力更强的样品具有更高的黏度。在凝胶剂添加量为15%和20%时, MG、CLW、BW形成的油凝胶的黏度变化曲线与牛油样品的黏度变化曲线相似。

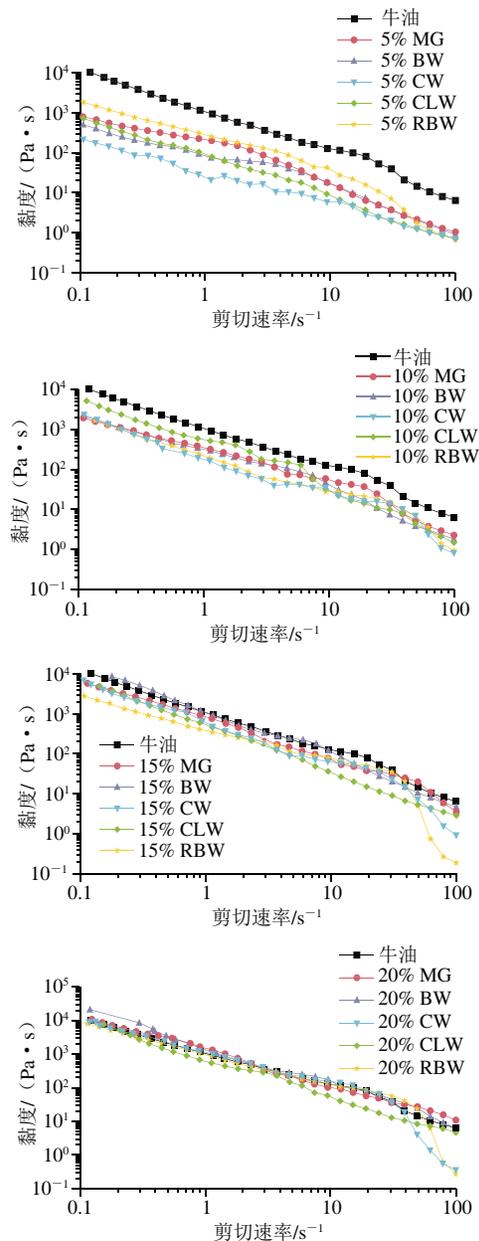


图2 凝胶剂种类和添加量对油凝胶样品黏度的影响
Fig.2 Effects of addition of different types and amounts of gelling agents on the viscosity of oleogel samples

温度扫描曲线可以反映凝胶剂种类和添加量对油凝胶体系热稳定性的影响。如图3所示,随着温度升高,在所有添加量条件下, RBW油凝胶的 G' 呈持续缓慢下降的趋势,而BW油凝胶的 G' 先缓慢下降后迅速下降。5%的CW和MG油凝胶表现出与BW油凝胶一样的变化规律,但10%、15%和20% CW和MG油凝胶的 G' 持续缓慢下降,与RBW油凝胶的变化规律相同。同时,随温度升高,在所有添加量条件下, BW和CLW油凝胶 G' 的变化规律与牛油相似。 G' 迅速下降后,随着温度继续上升,出现临界相变温度,油凝胶由凝胶态转变为液态,体系表现出黏性行为。RBW油凝胶的相变温度均为最高,凝

胶体系的热稳定性最好。此外,随着凝胶剂添加量的增加,5种凝胶剂对应的临界相变温度均有提高,说明体系的热稳定性随着凝胶剂添加量的增加而增加。

结果表明,当凝胶剂添加量为15%及以上时,油凝胶的持油力较好;MG、CLW、BW油凝胶的流变学特性与牛油相似,但使用单一凝胶剂制备的油凝胶难以模仿牛油的质构性质,同时CLW属于天然植物蜡,符合植物肉的加工要求。因此后续实验固定凝胶剂添加量为15%,选用不同质量比的MG和CLW进行复配(1:9、3:7、5:5、7:3、9:1)制备油凝胶,并进行进一步分析。

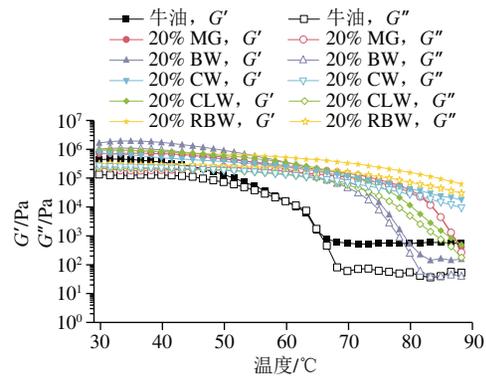
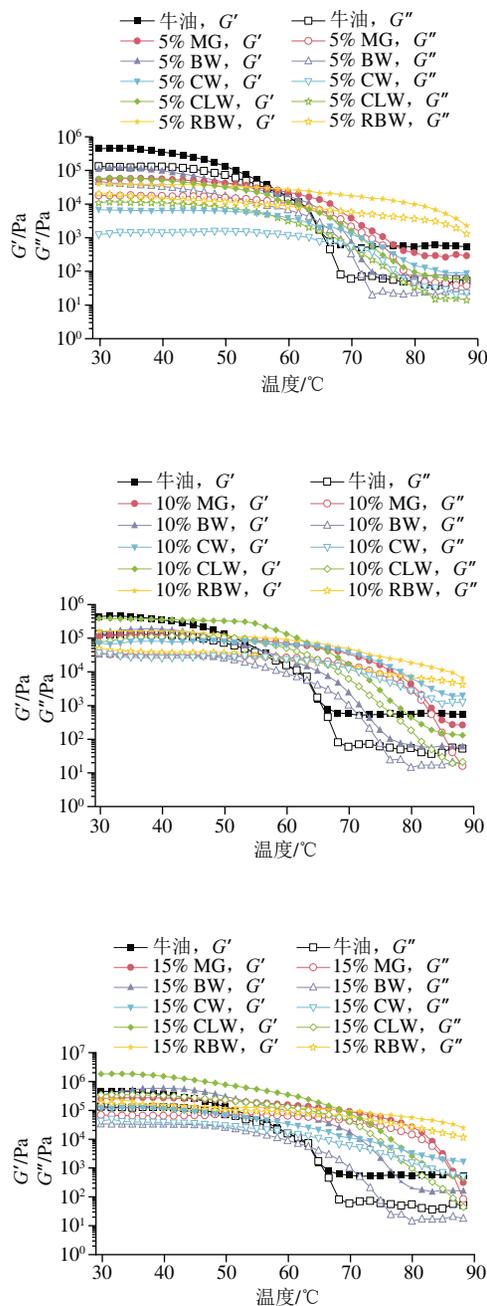


图3 凝胶剂种类和添加量对油凝胶样品温度扫描中复合模量的影响
Fig. 3 Effects of addition of different types and amounts of gelling agents on the G' and G'' of oleogel samples as a function of temperature

2.4 MG与CLW复配比油凝胶持油力的影响

表4表明,复配油凝胶均能形成稳定的凝胶结构。在凝胶剂添加量为15%的条件下,不同MG与CLW复配比制备的油凝胶均具有较高的持油力,在MG:CLW复配比为9:1时制备的油凝胶的持油力最低,与另外4组差异显著,可能是由于MG含量较高会使油凝胶网络结构更加松散。其余各组油凝胶之间的持油力没有显著性差异,总体稳定性较高。

表4 不同MG与CLW复配比油凝胶的持油力

质量比	1:9	3:7	5:5	7:3	9:1
持油力/%	99.91±0.08 ^A	99.90±0.08 ^A	99.77±0.15 ^A	99.80±0.08 ^A	98.63±0.06 ^B

注:大写字母不同表示显著差异($P < 0.05$)。

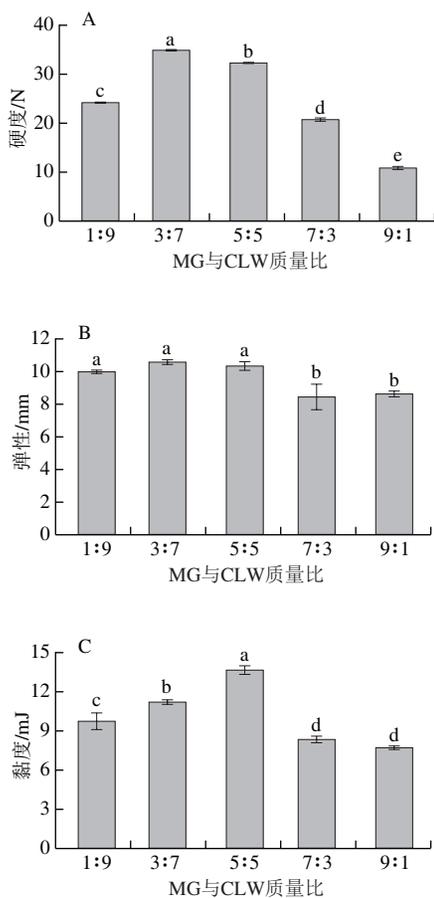
2.5 MG与CLW复比对油凝胶质构特性的影响

如图4A所示,随着MG添加量增加,油凝胶的硬度呈现先增加再下降的趋势。在MG与CLW复配比为1:9到3:7之间硬度迅速增加,且在3:7时达到最大,在3:7到9:1间油凝胶硬度显著下降。在凝胶剂添加量为15%时,MG与CLW复配比为3:7和5:5时油凝胶的硬度均高于单独添加两种凝胶剂,这表明MG和CLW之间可能存在着协同作用,这种协同作用可以使油凝胶形成更为致密的网络结构,使产品的硬度增大。当MG与CLW复配比为7:3和9:1时,油凝胶硬度显著降低,这可能是由于当MG比例过多时,凝胶体系的稳定性被破坏,所形成的凝胶网络结构松散且不耐形变,油凝胶硬度显著下降。

如图4B所示,在MG与CLW复合油凝胶中,随着MG比例的增加,油凝胶的弹性变化并未呈现出规律性。当MG与CLW复配比为3:7时,油凝胶的弹性到达最大。当MG与CLW复配比为7:3时,油凝胶的弹性最低。

如图4C所示,随着MG添加量的增加,复合油凝胶的黏度先升高后降低,当MG与CLW复配比为5:5时油凝胶的黏度达到最大。当MG与CLW复配比为1:9、3:7、

5:5和7:3时黏度存在显著性差异,当MG与CLW复配比为7:3和9:1时,油凝胶的黏度与其余3组相比显著下降,可能是由于MG比例过高,形成的油凝胶结构松散,黏度过低^[35]。



A.硬度; B.弹性; C.黏度。小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图4 不同MG与CLW复配比油凝胶的质构特性

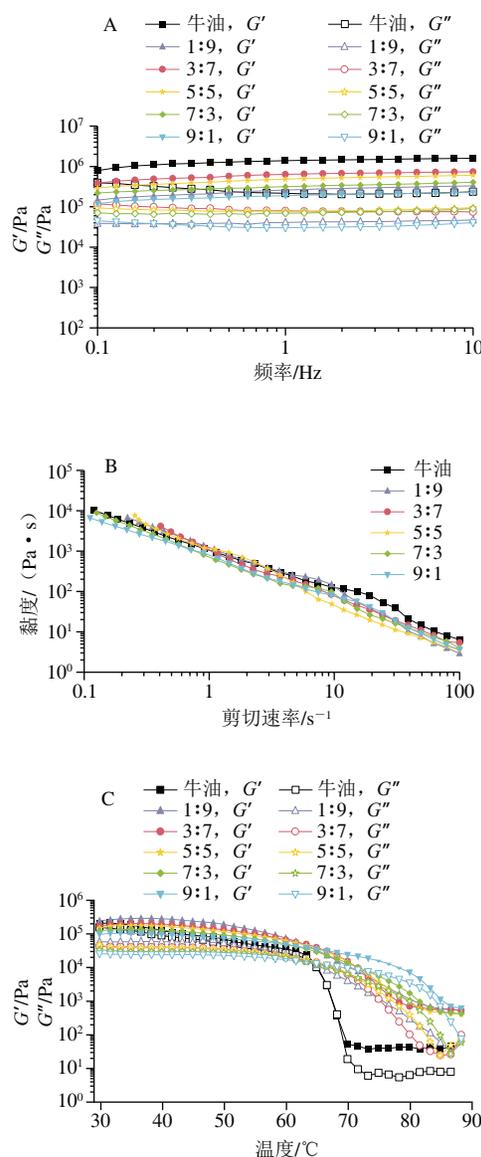
Fig. 4 Textural properties of oleogels with different ratios of MG to CLW

2.6 MG与CLW复配对油凝胶流变学性质的影响

图5A显示不同MG与CLW复配比例制备的油凝胶和牛油样品的频率扫描曲线。结果表明,随着扫描频率的增加,所有样品在测试范围内的 G' 与 G'' 变化趋势不明显,即所有油凝胶在测试范围内对频率都具有较好的耐受性,且所有样品都形成了稳定的凝胶网络结构。此外,所有油凝胶的 G' 都较大,且所有样品的 G' 均比 G'' 大,说明此黏弹性体系的固体弹性行为突出。在频率扫描中,MG与CLW复配比为3:7的油凝胶的 G' 最高,可能是由于其内部网络结构更加致密、稳定。

图5B显示不同MG与CLW复配比制备的油凝胶和牛油样品的黏度随剪切速率的变化情况。结果表明,所有样品的黏度均随着剪切速率的增加而减小,呈现“剪切变稀”的现象,且在凝胶剂添加量为15%的条件下,5种油凝胶的黏度变化曲线与牛油样品的黏度变化曲线相似。

随着MG在复合凝胶剂中比例的增加,油凝胶的临界相变温度逐渐提高,体系的热稳定性逐渐增加^[36]。图5C显示不同MG与CLW复配比制备的油凝胶和牛油样品的温度扫描曲线。结果表明,当MG与CLW复配比为1:9、3:7和5:5时,随着温度升高 G' 呈现出相同的变化规律,均为先缓慢下降,在60℃左右迅速下降,然后在80℃左右趋于平缓;当MG与CLW复配比为7:3和9:1时,随着温度升高 G' 先缓慢下降,在温度达到80℃左右时迅速下降。当MG与CLW复配比为9:1时相变温度达到80℃,此时体系的热稳定性最强。当MG与CLW复配比为3:7时,油凝胶的相变温度为60℃左右,融化特性与牛油最为相似。



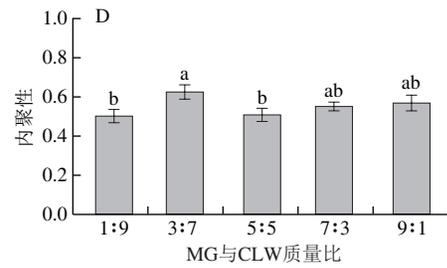
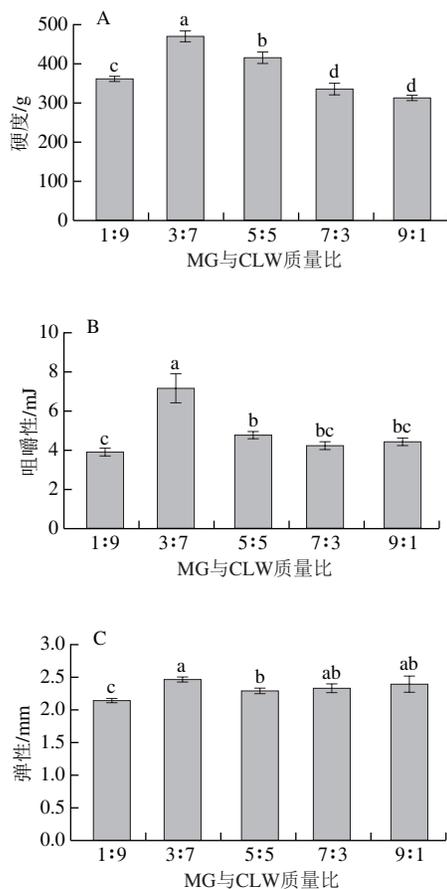
A.频率扫描曲线; B.黏度-剪切速率曲线; C.温度扫描曲线。

图5 不同MG与CLW复配比油凝胶的流变学性质

Fig. 5 Rheological properties of oleogels with different ratios of MG to CLW

2.7 MG与CLW复配油凝胶对植物肉饼质构特性的影响

肉制品的质构特性能准确反映产品的感官特性,是评价肉质优劣的常用指标之一^[37]。硬度、咀嚼性、弹性等是表征质构特性的主要参数^[38]。硬度是指材料局部抵抗硬物压入其表面的能力^[39],咀嚼性的大小可以表征植物肉饼在人体口腔咀嚼的难易程度;弹性是一个描述产品具有弹性形变性质的物理量,反映样品的恢复能力;内聚性主要用来表示产品内部颗粒间经挤压后的内聚力,反映食物抵抗外力破坏并保持紧密连接的性质^[40]。随着油凝胶中MG添加量的增加,植物肉饼在硬度(图6A)、咀嚼性(图6B)都呈先升高后降低的趋势,其中MG与CLW复配比为3:7时的硬度和咀嚼性最大;此外,不同处理组的植物肉饼的弹性(图6C)和内聚性(图6D)先升高后降低再升高,当MG与CLW复配比为7:3和9:1时无显著性差异,当MG与CLW复配比为3:7时的咀嚼性和内聚性最大。综上,以MG与CLW复配比为3:7的油凝胶制备的植物肉饼在硬度、弹性、咀嚼性等方面均最高。根据MG与CLW复配比对油凝胶质构特性影响的研究结果,MG与CLW复配比为3:7制备的油凝胶在硬度、弹性方面均最高,说明凝胶强度大的油凝胶对植物蛋白肉饼具有更好的颗粒填充效果,从而增加植物蛋白肉饼的硬度、弹性等质构特性。



A.硬度; B.咀嚼性; C.弹性; D.内聚性。

图6 不同MG与CLW复配油凝胶的植物肉饼质构特性

Fig. 6 Textural properties of plant-based patties prepared with oleogels with different ratios of MG to CLW

2.8 MG与CLW复配油凝胶对植物肉剪切负载的影响

剪切测试是判断肉制品嫩度的主要方法,嫩度可以用刀具切割样品时所需的剪切负载表示,反映样品抵抗剪切能力的特性^[40]。不同MG与CLW复配比下制备的植物肉饼的剪切测试结果如图7所示。结果表明,CLW的添加量高于MG时,植物肉饼能够达到较高的剪切负载,当MG与CLW复配比为3:7时达到最大,但随着MG在凝胶剂中比例的增加,剪切负载反而下降,说明在MG和CLW的比例适当时能够提升植物肉饼的剪切特性进而调控其加工性能。

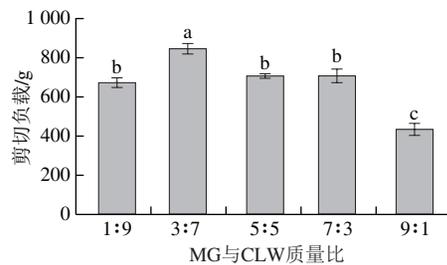


图7 不同MG与CLW复配油凝胶的植物肉剪切负载

Fig. 7 Shear loading of plant-based patties prepared with oleogels with different ratios of MG to CLW

2.9 MG与CLW复配比对植物肉饼汁液保持能力的影响

植物肉饼的持水性、持油性、蒸煮损失、解冻损伤可一定程度代表其对汁液的保持能力,而植物肉饼汁液保持能力的不同会导致产品经咀嚼时汁液释放情况的差异^[26,37]。植物肉饼的汁液包括水和油两种,持水性和持油性不仅影响肉制品的滋味、香气、多汁性、营养成分等食用品质,还将直接影响肉的成品率^[37]。在肉制品中,蒸煮损失可代表产品对水分和油脂的束缚能力,解冻损失是评价冷冻产品品质的重要指标,二者结合能一定程度描述产品汁液的变化情况,可作为表征植物基肉饼多汁性的两个客观指标^[41-42]。表5表明,随着MG在凝胶剂中比例的上升,植物肉饼的持水性和持油性呈现出先上升后下降的趋势,当MG与CLW复配比为3:7时达到最大,综合性能最好。随着MG添加量的增加,硬度整

体呈下降趋势, 凝胶网络变松散, 水分损失和油脂损失逐渐增加, MG与CLW复配比为9:1时汁液损失严重, 产品品质下降严重。此外, 随着MG在凝胶剂中添加量的增加, 蒸煮损失和解冻损失均呈现出先下降后上升的趋势, 在MG与CLW复配比为3:7时达到最低(11.42%和1.58%), 且在3:7和5:5时均无显著性差异。可能由于在这两个比例下油凝胶的微观网络结构紧密, 对水和脂肪的束缚能力最强, 产品多汁性较好。

表5 不同MG与CLW复配比下植物肉饼汁液保持能力

Table 5 Water and oil retention capacity, cooking and thawing loss of plant-based patties prepared with oleogels with different ratios of MG to CLW

质量比	持水性/(g/g)	持油性/(g/g)	蒸煮损失/%	解冻损失/%
1:9	1.19±0.02 ^c	0.51±0.02 ^b	12.21±0.33 ^b	1.64±0.05 ^c
3:7	1.29±0.01 ^a	0.57±0.01 ^a	11.42±0.29 ^c	1.58±0.01 ^c
5:5	1.25±0.02 ^b	0.54±0.02 ^a	11.43±0.19 ^c	1.58±0.02 ^c
7:3	1.17±0.02 ^c	0.48±0.01 ^b	12.64±0.10 ^a	1.73±0.02 ^b
9:1	1.13±0.02 ^d	0.49±0.03 ^b	12.80±0.04 ^a	1.92±0.06 ^a

注: 同列小写字母不同表示差异显著(P<0.05), 表6同。

2.10 MG与CLW复配比对植物肉饼感官评价结果的影响

感官评价在一定程度上反映了消费者对产品的喜爱和接受程度^[43]。表6显示以不同MG和CLW复配比的油凝胶制成的植物肉饼感官评分结果。结果表明, 随着MG在复合凝胶剂中添加量的增加, 植物肉饼在风味、口感、组织状态和总体可接受性上的得分均呈现出先增高再降低的趋势, 当MG与CLW复配比为3:7时以上各指标得分均为最高。在色泽方面, 5种复配比下制备的植物肉饼的打分没有显著差异。当MG与CLW复配比为9:1时各项评分均为最低, 植物肉饼的硬度较低且弹性较差, 导致咀嚼性大大下降。同时当MG与CLW复配比为1:9、7:3和9:1时, 凝胶剂自身的风味显著, 使产品出现明显异味, 消费者的接受度大大降低。总体而言, 当MG与CLW复配比为3:7时的植物肉饼感官品质最佳, 消费者的接受度最高。

表6 不同MG与CLW复配比下植物肉饼感官评分

Table 6 Sensory evaluation of plant-based patties prepared with oleogels with different ratios of MG to CLW

复配比	风味得分	色泽得分	口感得分	组织状态得分	总体可接受性得分
1:9	7.03±0.15 ^a	7.08±0.10 ^a	6.70±0.10 ^{ab}	6.70±0.18 ^{ab}	6.85±0.08 ^{ab}
3:7	7.17±0.06 ^c	7.03±0.21 ^a	6.97±0.21 ^a	6.90±0.20 ^a	7.03±0.14 ^a
5:5	7.12±0.13 ^a	7.05±0.09 ^a	6.93±0.16 ^a	6.90±0.13 ^a	7.02±0.10 ^a
7:3	6.83±0.06 ^b	6.93±0.28 ^a	6.75±0.31 ^{ab}	6.62±0.15 ^{ab}	6.75±0.18 ^{bc}
9:1	6.73±0.12 ^b	6.77±0.15 ^a	6.53±0.15 ^b	6.43±0.06 ^b	6.57±0.08 ^c

3 结论

当凝胶剂的添加量为15%及以上时, 油凝胶的持水力、流变学性质接近牛油, 然而单一凝胶剂制备的油凝

胶难以模仿牛油的质构性质。因此, 固定凝胶剂添加量为15%, 选择MG与CLW进行复配, 结果表明MG与CLW复配比为3:7时制备的油凝胶能最大程度模仿牛油的物性特征且植物肉饼的可接受性最高。本研究主要从物性方面探究了不同凝胶剂添加条件下得到的油凝胶模拟牛油并将其添加到植物肉中的可行性, 为植物肉品质提升提供一定的理论依据和借鉴思路, 后续可以从微观结构、热力学性质等方面进行全面而深入的应用研究。

参考文献:

- [1] TOMASCHUNAS M, KOEHN E, BENNWITZ P, et al. Quantitative and qualitative variation of fat in model vanilla custard desserts: effects on sensory properties and consumer acceptance[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(6): 894-901. DOI:10.1111/1750-3841.12128.
- [2] 董学文, 张苏苏, 李大宇, 等. 脂肪替代物在肉制品中应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 1961-1966. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2017.06.004.
- [3] YOUSSEF M K, BARBUT S. Effects of protein level and fat/oil on emulsion stability, texture, microstructure and color of meat batters[J]. Meat Science, 2009, 82(2): 228-233. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.01.015.
- [4] KWON H C, SHIN D, YUNE J H, et al. Evaluation of gels formulated with whey proteins and sodium dodecyl sulfate as a fat replacer in low-fat sausage[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127682. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127682.
- [5] HUGHES N E, MARANGONI A G, WRIGHT A J, et al. Potential food applications of edible oil organogels[J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(10): 470-480. DOI:10.1016/j.tifs.2009.06.002.
- [6] 唐彩利, 胡建兵, 郭时印, 等. 凝胶剂种类对双低菜籽油基凝胶油结构及性能的影响[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 667-677. DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2021084.
- [7] PATEL A R, DEWETTINCK K. Edible oil structuring: an overview and recent updates[J]. Food & Function, 2016, 7(1): 20-29. DOI:10.1039/c5fo01006c.
- [8] 毛筱艺, 王丽萍, 吴玉柱, 等. 卵磷脂与山梨醇酐单硬脂酸酯复合对菜籽油凝胶凝胶特性的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(12): 31-36. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210621.
- [9] 钟金锋, 覃小丽, 刘雄. 凝胶油及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(3): 272-279. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201503051.
- [10] CHEN C H, TERENTJEV E M. Aging and metastability of monoglycerides in hydrophobic solutions[J]. Langmuir, 2009, 25(12): 6717-6724. DOI:10.1021/la9002065.
- [11] 刘国琴, 南阳, 刘新旗. 单甘酯添加量对油脂凝胶物理性质与晶体结构的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2016.11.001.
- [12] 张若宁, 张彦慧, 刘楠, 等. 油凝胶作为氢化油脂替代物的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(8): 222-234. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2022.08.032.
- [13] SHI Y, LIU C, ZHENG Z, et al. Gelation behavior and crystal network of natural waxes and corresponding binary blends in high-oleic sunflower oil[J]. Journal of Food Science, 2021: 3987-4000. DOI:10.1111/1750-3841.15840.
- [14] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 植物基肉制品研究进展与未来挑战[J]. 中国食品学报, 2020, 20(8): 1-10. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.08.001.

- [15] SONG M Y, FUNG T T, HU F B, et al. Association of animal and plant protein intake with all-cause and cause-specific mortality[J]. *JAMA Internal Medicine*, 2016, 176(10): 1453-1463. DOI:10.1001/jamainternmed.2016.4182.
- [16] 赵婧, 宋弋, 刘攀航, 等. 植物基替代蛋白的利用进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 1-8. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021070082.
- [17] WOERN C, MARANGONI A G, WEISS J, et al. Effects of partially replacing animal fat by ethylcellulose based organogels in ground cooked salami[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110431. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110431.
- [18] WOLFER T L, ACEVEDO N C, PRUSA K J, et al. Replacement of pork fat in frankfurter-type sausages by soybean oil oleogels structured with rice bran wax[J]. *Meat Science*, 2018, 145: 352-362. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.07.012.
- [19] PIEVE S D, CALLIGARIS S, CO E, et al. Shear nanostructuring of monoglyceride organogels[J]. *Food Biophysics*, 2010, 5(3): 211-217. DOI:10.1007/s11483-010-9162-3.
- [20] 胡盼盼, 朱科学, 郭晓娜, 等. 干燥方式对半干型小麦拉丝蛋白素牛肉质构的影响及机理分析[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(8): 22-27. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2020.08.005.
- [21] 蒋小锋, 李芳, 任雯雯, 等. 木瓜蛋白酶结合滚揉处理对马肉嫩度的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(12): 230-234. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201412043.
- [22] 程怡媚, 薛雨菲, 关东, 等. 木瓜蛋白酶对冷冻马肉饼理化特性及感官品质的改良作用[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(4): 46-53. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.4.007.
- [23] 杨震, 贡慧, 刘梦, 等. 辅料配比及烹饪方式对速冻羊肉饼品质的影响[J]. *肉类研究*, 2018, 32(1): 23-29. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201801004.
- [24] 杨勇, 王中江, 陈惠惠, 等. 大豆蛋白-淀粉基素肉制品高湿挤压工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 133-144. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.12.018.
- [25] 李颖, 李保玲, 董新玲, 等. 石榴皮提取物对生猪肉饼品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(1): 45-50. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190930-232.
- [26] 赵知微. 素肉饼配方及加工工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 8-18.
- [27] 徐杰, 孙浩, 张国红, 等. 核桃油基油凝胶的制备及特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(5): 188-193. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022682.
- [28] HWANG H, KIM S, SINGH M, et al. Organogel formation of soybean oil with waxes[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2012, 89(4): 639-647. DOI:10.1007/s11746-011-1953-2.
- [29] 汪鸿, 孙立斌, 张亮, 等. 小烛树蜡油脂凝胶的性质及作用机理研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 91-95. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2021.06.015.
- [30] 苏丽娜, 陈岚, 岳程程, 等. 巴西棕榈蜡和单甘酯复配对高油酸葵花籽油凝胶油结构和特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 128-135. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022040131.
- [31] 苏丽娜, 陈岚, 岳程程, 等. 天然蜡基油脂凝胶制备、结晶特性及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(21): 372-385. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211224-288.
- [32] 袁冬雪, 常婧瑶, 殷永超, 等. 油凝胶替代动物脂肪在肉制品中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 467-474. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021070277.
- [33] TAVERNIER I, PATEL A R, VAN DER MEEREN P, et al. Emulsion-templated liquid oil structuring with soy protein and soy protein: κ -carrageenan complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 65: 107-120. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.11.008.
- [34] 丁泽敏, 刘渝港, 夏会平, 等. 猪油和单甘酯含量对菜籽油凝胶油性质的影响研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(1): 56-60. DOI:10.12166/j.zgyz.1003-7969/2020.01.013.
- [35] 胡培泓, 司盘-蜡复合油凝胶结构及性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 68-80.
- [36] 史逸飞. 天然蜡基凝胶油脂的构建及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 21-22.
- [37] 邓文亚. 改善植物基牛肉饼多汁性的原料预处理技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021: 18-20.
- [38] 明建, 李洪军. 不同酶嫩化处理对牛肉物性的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(12): 156-159. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.12.031.
- [39] AGUIRRE M E, OWENS C M, MILLER R K, et al. Descriptivesensory and instrumentalttexture profile analysis of woody breast in marinated chicken[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(4): 271-276. DOI:10.3382/ps/pex428.
- [40] 吴元浩. 植物基牛肉饼质构特性研究: 基质蛋白与拉丝蛋白复合效果分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2021: 19-22.
- [41] 杨竺红. 即食小麦拉丝蛋白素肉饼的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 15-26.
- [42] YOUSSEF M K, BARBUT S, SMITH A. Effects of pre-emulsifying fat/oil on meat batter stability, texture and microstructure[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2011, 46(6): 1216-1224. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.01.015.
- [43] SANTHI D, KALAIKANNAN A, SURESHKUMAR S. Factors influencing meat emulsion properties and product texture: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(10): 474-499. DOI:10.1080/10408398.2013.858027.