

蜂蜡基灵芝多糖乳液凝胶体系构建 及抗疲劳功能比较

吴浩然^{1, 2, 3, 4}, 丁木淳^{2, 3, 4}, 高鑫^{2, 5}, 路昊东^{1, 2}, 张勇^{3*}, 刘超^{1, 2, 3, 4*}

(1. 吉林农业科技学院食品科学与营养工程学院, 吉林吉林 132101) (2. 吉林省酿造技术科技创新中心, 吉林吉林 132101) (3. 吉林农业科技学院“国家食物与营养教育示范基地”, 吉林吉林 132101) (4. 吉林农业科技学院食品科学与工程重点学科, 吉林吉林 132101) (5. 长春大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130022)

摘要: 常见人造奶油因含有较高的反式脂肪, 过量摄入会增加心脑血管患病率, 为了改善这一现状, 该研究选择蜂蜡作为壁材包埋灵芝多糖, 开发一种具有抗疲劳作用的灵芝多糖乳液凝胶作为奶油改良剂。通过 Zeta 电位仪和激光颗粒度仪测定乳液凝胶特性, 证实灵芝乳液凝胶具有良好的流变性和稳定性。通过单因素实验和响应面实验优化灵芝多糖包埋工艺, 结果表明: PGPR 添加量 2.3%、油相占比 58%、乳液温度 76 ℃、均质时间 5.7 min 时, 灵芝多糖包埋率达到最大值 93.21%。植物奶油添加灵芝多糖乳液凝胶后, 粒径减小, 乳液的均匀性和稳定性显著提高 ($P<0.05$); 质构分析显示灵芝多糖乳液凝胶使植物奶油硬度提升 22.58%, 黏性提升 9.23%, 弹性提升 18.42%, 植物奶油硬度提高至 14.28 gf; 电位绝对值增加至 28.26 mV, 乳液凝胶的冻融稳定性良好。经动物实验验证, 摄入灵芝多糖乳液凝胶的小鼠血尿素氮和全血乳酸含量水平升高, 肝糖原水平降低, 且呈剂量依赖性, 乳液凝胶抗疲劳活性显著 ($P<0.05$)。最终显示灵芝多糖乳液凝胶可改善植物奶油加工特性, 并为未来健康食品的开发提供数据基础。

关键词: 灵芝多糖; 蜂蜡; 包埋; 乳液特性

文章编号: 1673-9078(2026)03-54-63 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1695

Construction of A Beeswax-based *Ganoderma lucidum* Polysaccharide Emulsion Gel System and Optimization of Its Anti-fatigue Function

WU Haoran^{1,2,3,4}, DING Muchun^{2,3,4}, GAO Xin^{2,5}, LU Haodong^{1,2}, ZHANG Yong^{3*}, LIU Chao^{1,2,3,4*}

(1.School of Food Science and Nutritional Engineering, Jilin Institute of Agricultural Science and Technology, Jilin 132101, China)(2.Brewing Technology Innovation Center of Jilin Province, Jilin 132101, China) (3.Jilin Institute of Agricultural Science and Technology ‘National Food and Nutrition Education Demonstration Base’, Jilin 132101, China) (4.Jilin Province Grain Deep Processing School Enterprise Joint Technology Innovation Laboratory, Jilin 132101, China) (5.School of Food Science and Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: Common margarine contains high trans fats, and excessive consumption may increase the risk of developing cardiovascular and cerebrovascular diseases. To mitigate this, the present study used beeswax as a wall material to encapsulate polysaccharides. The characteristics of the emulsion gel were determined using Zeta potential and laser particle size analysis, confirming the good rheological and stability of the *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion gel. Through single factor experiments and response surface experiments, the encapsulation process of *Ganoderma lucidum* polysaccharides was optimized. The results showed that when the PGPR addition amount was 2.3%, the oil phase ratio was 58%, the emulsion temperature was 76 ℃, and the homogenization time was 5.7 min, the encapsulation rate of *Ganoderma lucidum* polysaccharides reached the maximum value of 93.21%. After adding the *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion gel to the vegetable margarine, the particle size decreased, and the uniformity and stability of the emulsion were significantly improved ($P<0.05$); texture analysis showed that the *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion gel increased the hardness of vegetable margarine by 22.58%, increased the viscosity by 9.23%, and increased the elasticity by 18.42%, increasing the hardness of vegetable margarine to 14.28 gf; the absolute value of the potential increased to 28.26 mV, and the freeze-thaw stability of the emulsion gel was good. Animal experiments verified that the mice that received the *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion gel had significantly higher blood urea nitrogen and total blood lactate levels, and lower liver glycogen levels, and the effect was dose-dependent, and the anti-fatigue activity of the emulsion gel was significant ($P<0.05$). Finally, it was shown that the *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion gel could improve the processing characteristics of vegetable margarine, and provide data basis for the development of future healthy food.

引文格式:

吴浩然,丁木淳,高鑫,等.蜂蜡基灵芝多糖乳液凝胶体系构建及抗疲劳功能比较[J].现代食品科技,2026,42(3):54-63.

WU Haoran, DING Muchun, GAO Xin, et al. Construction of a beeswax-based *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion gel system and optimization of its anti-fatigue function [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 54-63.

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2025-03-24; 接受日期: 2025-03-26
基金项目: 国家级大学生科技创新创业训练计划项目(202411439032号); 国家重点研发计划项目(2021YFD1600903)
作者简介: 吴浩然(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 微胶囊食品加工及检测, E-mail: whr010915@sina.cn
通讯作者: 张勇(1985-), 男, 硕士, 助教, 研究方向: 功能性食品, E-mail: 36345823@qq.com; 共同通讯作者: 刘超(1982-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 生物活性物质及食品加工技术, E-mail: 8908284@qq.com

Ganoderma lucidum polysaccharides (GLP) and developed a GLP emulsion gel with anti-fatigue effects as a cream improver. Properties of the GLP emulsion gel were determined using a zeta potential meter and laser granulometry, which confirmed that it had good rheology and stability. The GLP encapsulation process was optimized using single-factor and response surface methodology (RSM) experiments. Results showed that the GLP encapsulation rate reached a maximum value of 93.21% when the PGPR was 2.3%, the oil phase accounted for 58%, the emulsion temperature was 76 °C, and the homogenization time was 5.7 min. Addition of the GLP emulsion gel to the plant cream resulted in a reduced particle size and significant increase in the homogeneity and stability of the emulsion. Texture analysis showed that plant cream hardness, viscosity, and elasticity increased by 22.58%, 9.23%, and 18.42%, respectively, with plant cream hardness reaching 14.28 gf. The absolute electrical potential increased to 28.26 mV, and the emulsion gel exhibited good freeze-thaw stability. Animal experiments confirmed that mice ingesting the GLP emulsion gel showed elevated blood urea nitrogen levels and whole blood lactic acid content and decreased hepatic glycogen levels in a dose-dependent manner, with significant anti-fatigue activity observed. These findings demonstrate that GLP emulsion gels can improve the processing characteristics of plant creams and provide support for future health food development.

Key words: *Ganoderma lucidum* polysaccharide; beeswax; encapsulation; emulsion property

灵芝, 又名赤芝、灵芝草, 是一种珍贵的中药材, 在中国的传统医学中占据重要地位, 主要分布在广西、东北等地^[1,2]。灵芝主要活性成分为多糖、三萜和甾醇等活性物质, 已被报道具有调节免疫、抗肿瘤、延缓衰老等功能^[1]。其中, 灵芝多糖 (*Ganoderma lucidum* Polysaccharides, GLP) 主要由 β -葡聚糖组成, 具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤等生物活性, 广泛应用于健康食品、保健品和药品领域^[3-5]。

乳液体系作为一种保持活性成分稳定性的有效方法, 可用作提高 GLP 的稳定性和生物利用度^[6]。乳液通过将不稳定的成分包裹在水相或油相中, 防止氧化降解, 改善其功能性^[6]。油包水乳液体系是常见的结构, 通过将 GLP 负载在内部水相中, 可保持其生物活性^[7]。近年来, 乳液凝胶因其具备乳液的稳定性和凝胶的机械强度, 在食品领域备受关注^[8,9]。乳液凝胶结合乳液和凝胶的优点, 具有广泛的应用潜力, 尤其适用于低脂、低热量食品和功能性食品的开发^[10]。人造奶油是乳液凝胶的一种, 因其质地良好、稳定性高, 在烘焙和食品加工中广泛使用。然而, 由于人造奶油含有较高的反式脂肪, 过量摄入会增加心血管疾病、肥胖和糖尿病等健康风险^[11,12]。因此, 寻找健康的奶油替代品逐渐称为研究热点。

本研究选择蜂蜡这种天然无毒害且可生物降解的材料作为壁材制备凝胶^[13], 有研究表明其可以替代动物脂肪用于食品加工, 蜂蜡基油凝胶可提高食品的持水能力和结构稳定性^[14]。在此基础上, 将蜂蜡与灵芝多糖结合, 可形成更加稳定的乳液凝胶网络, 从而防止 GLP 在加工过程中的降解, 并改善食品的质地和口感。此外, 这种乳液凝胶体系具有良好的流变性和稳定性, 能够在烘焙过程中保持其结构完整性, 同时赋予奶油功能性和健康价值^[15,16]。本研究通过制备负载

灵芝多糖的油包水乳液凝胶, 探索替代或部分替代固体油脂的可能性。结果表明, 乳液凝胶不仅显著降低蛋糕奶油的脂肪含量, 还赋予其灵芝多糖的功能性, 提升营养价值, 更符合现代消费者对健康食品的需求。这一创新方法结合乳液和凝胶化技术, 为健康美味食品的开发提供新思路。该技术不仅适用于蛋糕奶油, 还可将其应用于冰淇淋、巧克力等食品, 推动食品工业向健康化、功能化方向发展。

1 材料与方法

1.1 原料

聚甘油蓖麻醇酯 (Polyglycerol Polyricinoleate, PGPR) (化学纯)、氢氧化钠 (分析纯)、盐酸 (分析纯), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 葡萄糖 (标准品)、蜂蜡 (分析纯), 上海源叶生物科技有限公司; 灵芝多糖 (食品级), 陕西天行健生物化工技术有限公司; 大豆油 (食品级), 安徽中粮油脂有限公司; 昆明种雄性小鼠, 长春市亿斯实验动物技术有限责任公司, 许可证号: SCXK(吉)2024-0005; 伦理实验批准号: 20240102。

1.2 主要仪器设备

JA1003 电子天平, 上海浦春计量仪器有限公司; H2050R-1 离心机, 湖南湘仪试验室仪器开发有限公司; SHA-B 恒温水浴振荡器, 天津市塞德利斯试验分析仪器制造厂; ES-E210B 电子天平, 天津市德安特传感技术有限公司; T6 新锐可见分光光度计, 北京普析通用仪器责任有限公司; SHA-B 恒温水浴锅, 天津市塞德利斯试验分析仪器制造厂; DHC-A 磁力搅拌器, 天津市塞德利斯试验分析仪器制造厂; IKA16000 分散机, 艾卡 (广州) 仪器设备有限公司; Mastersizer

3000+ 激光颗粒度仪, 马尔文(英国)仪器有限公司; Brookfield CT3 质构分析仪, 合测实业有限公司; Nano ZS 90 Zetasizer Zeta 电位仪, 马尔文(英国)仪器有限公司; A019-1-1 全血乳酸测定试剂盒, 南京建成生物工程研究所; C013-2-1 尿素氮测定试剂盒, 南京建成生物工程研究所。

1.3 试验方法

1.3.1 油相制备

取 5 g 的 PGPR (聚甘油酯-脂肪酸酯) 加入到大豆油中, 使用磁力搅拌器或机械搅拌器持续搅拌, 直到 PGPR 完全溶解, 形成均匀的油溶液; 然后将其置于 65 ℃ 的水浴中, 持续搅拌 1 h, 确保油溶液均匀受热, 形成稳定的油相。称取质量分数为 3.0% 的蜂蜡, 加入到预热后的油溶液中, 继续搅拌至蜂蜡完全溶解。称取质量分数为 2.7% 的蜂蜡, 加入到预热后的油溶液中, 继续搅拌至蜂蜡完全溶解, 继续搅拌一段时间, 使油相均匀混合, 形成稳定的油相基质。

1.3.2 油包水乳液制备

1.3.2.1 水相制备

取 5 g 灵芝多糖, 溶解在适量的水中, 制备成 5 wt.% 的灵芝多糖溶液。确保灵芝多糖完全溶解, 可以适当加热并搅拌以加速溶解, 形成稳定的水相组分。

1.3.2.2 灵芝多糖乳液凝胶制备

将制备好的 5% 灵芝多糖溶液缓慢加入到预热的油相中, 边加边搅拌, 确保均匀混合。使用均质机在 9 000 r·min⁻¹ 的转速下均质 5 min。均质过程中应保持均质机的转速稳定, 保乳液均匀分散。均质过程中可以适当冷却, 以防止乳液过热。均质完成后, 将乳液冷却至室温。将制备好的乳液转移到适当的容器中, 密封保存, 避免光照和污染。

1.3.3 灵芝多糖含量测定

1.3.3.1 葡萄糖标准曲线

配制一系列不同浓度的葡萄糖标准溶液 (0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 mg·mL⁻¹)。使用分光光度计在 540 nm 下测定每个标准溶液的吸光度。以葡萄糖浓度为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线。通过线性回归方程得到标准曲线方程。

1.3.3.2 灵芝多糖样品葡萄糖的测定

称取适量灵芝多糖样品, 用蒸馏水溶解, 配制适当 0.1 mg·mL⁻¹ 质量浓度的样品溶液。取 1 mL 标准溶液或样品溶液于 1.5 mL 离心管中。加入 0.5 mL 苯酚溶液 (5% m/V)。迅速加入 2.5 mL 浓硫酸, 混匀。室温下静置 10 min, 使反应完全。用分光光度计在

490 nm 波长处测定吸光度。根据样品溶液的吸光度, 通过标准曲线方程计算样品溶液中多糖的浓度。

1.3.4 灵芝多糖包埋率测定

使用分光光度法测定乳液中的灵芝多糖的包埋率。称取 0.25 g 乳液凝胶加热至 80 ℃, 趁热以 9 000 r·min⁻¹ 转速离心, 按 1.3.3 方法测定水溶液中多糖含量, 按公式 (1) 测定多糖包埋率。

$$T = (1 - \frac{Y_1}{Y_2}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

T ——包埋率, %;

Y_1 ——加入灵芝多糖质量浓度, g·mL⁻¹;

Y_2 ——乳液中灵芝多糖质量浓度, g·mL⁻¹。

1.3.5 包埋工艺优化

1.3.5.1 PGPR添加量对包埋率的影响

按油相占比为 50%, 乳液温度 35 ℃, 均质时间 5 min, 蜂蜡质量分数为 3.0%, 油相中 PGPR 质量分数分别设置为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 和 2.5%, 测定多糖包埋率, 确定 PGPR 最佳添加量。

1.3.5.2 油相占比对包埋率的影响

PGPR 添加量 (质量分数) 1.5%, 蜂蜡质量分数 3.0%、乳液温度 35 ℃、均质时间 5 min、油相占比设置为 10%、30%、50%、70%、90% 的情况下测定多糖包埋率, 确定油相占比最佳添加比例。

1.3.5.3 乳液温度对包埋率的影响

PGPR 添加量 (质量分数) 1.5%、蜂蜡质量分数 3.0%、均质时间 5 min、油相占比为 50%、乳液制备温度分别为 15、35、55、75、95 ℃ 的情况下测定多糖包埋率, 确定乳液凝胶制备最佳温度。

1.3.5.4 均质时间对包埋率的影响

PGPR 添加量 (质量分数) 1.5%、乳液温度 35 ℃、蜂蜡质量分数为 3.0%、油相占比为 50%、均质时间 1、3、5、7、9 min 的情况下测定多糖包埋率, 确定最佳均质时间。

1.3.6 响应面优化实验

以灵芝多糖包埋率为响应值, 选取 PGPR 添加量 (A)、油相占比 (B)、乳液温度 (C) 及均质时间 (D) 设计响应面实验。

1.3.7 灵芝多糖乳液凝胶性能测定

将制备的灵芝多糖乳液凝胶加入植物奶油中, 与普通的植物奶油进行对比来测定性能指标。

1.3.7.1 乳液粒径的测定

参考 Liu 等^[7]乳液粒径的测定方法, 使用 Malvern Mastersize 3000 测定灵芝多糖乳液凝胶的粒径, 折射

率为 1.52, 吸收指数为 0.001, 稀释剂折射率为 1.330。在多分散分析模式下测量粒度分布。

1.3.7.2 质构测定

将样品转移至胶冻杯(20 mm×35 mm)中, 样品深度为 15 mm, 硬度测试条件为 P5 探头, 测前速率 2 mm·s⁻¹, 测中速率 1 mm·s⁻¹, 测后速率 2 mm·s⁻¹, 触发力 2 g, 下压深度 8 mm, 返回距离 40 mm。

1.3.7.3 电位测定

取少量样品稀释 500 倍, 置于 Model DTS 1070C 电位样品池中, 采用电位分析仪测定其表面电位。测试参数设定: 25 ℃, 平衡时间 120 s。

1.3.7.4 冻融稳定性

将 2 mL 新制备的灵芝多糖乳液凝胶放入样品瓶中, 并在 -20 ℃ 下冷冻 4 h。随后, 将样品在室温(25 ℃)下解冻 6 h, 完成一个冻融循环。重复此过程四次, 测量其析出水的质量。

1.3.8 灵芝多糖乳液抗疲劳作用研究

1.3.8.1 实验动物分组

选取昆明小鼠 50 只, 雄性, 体质量(20±2) g, 在温度(25±1) ℃, 相对湿度 50%~60% 的环境中水料充足饲养。将小鼠随机分为低剂量、中剂量、高剂量组、运动空白组、不运动空白组五组, 每组 10 只, 适应性喂养 3 d。灵芝多糖乳液成人每日服用量约为 15 g, 根据等效剂量系数折算法, 低剂量、中剂量、高剂量组给药剂量分别为 0.97、1.95、3.9 g·kg⁻¹·d⁻¹, 空白对照组给予等体积的蒸馏水, 连续灌胃 30 d, 饲养期间, 饲料和水自由取用, 间隔 3 d 称重。

末次给药 30 min 后小鼠置于 25 ℃ 恒温水域中自由游泳, 并记录游泳力竭时间。小鼠开始游泳至小鼠头部完全没入水面以下 10 s 不能浮出水面为游泳力竭时间。若小鼠浮在水面上不动, 用玻璃棒在其附近搅动, 使其运动直至不能动为止, 然后进行解剖, 测定各项指标^[18]。

1.3.8.2 尿素氮/全血乳酸的测定

各组动物给药后进行眼球取血, 8 000 r/20 min 分离血清。按照尿素氮/乳酸 ELISA 试剂盒说明书操作, 取适量血清(如 10 μL)加入反应管中, 每孔加入酶标试剂 100 μL, 空白孔除外; 经温育、洗涤步骤后, 每孔先加入显色剂 A 50 μL, 再加入显色剂 B 50 μL, 轻轻震荡混匀, 37 ℃ 避光显色 15 min, 加终止液 50 μL, 终止反应。以空白孔调零, 450 nm 波长依序测量各孔的吸光度。

1.3.8.3 糖原测定

取 0.1 g 肝脏和肌肉样本, 置于 10 mL 试管中; 加入 0.75 mL 提取液, 置于沸水浴中煮沸 20 min, 用蒸

馏水定容到 5 mL, 混匀, 8 000 g 25 ℃ 离心 10 min, 取上清待测。0.05 mg·mL⁻¹ 葡萄糖溶液作为试剂 1, 试剂 2 为试剂盒自带。空白管(蒸馏水: 试剂 2=1:4)、标准管(试剂 1: 试剂 2=1:4)和测定管(样品: 试剂 2=1:4)混匀, 置沸水浴 10 min, 于 620 nm 波长处, 分别读取吸光度, 分别记为 A_1 、 A_2 和 A_3 , W 指待测样品质量。

$$D = \frac{C \times V_1 \times (A_3 - A_1)}{(A_2 - A_1) \times \frac{W \times V_1}{V_2}} \quad (2)$$

式中:

D —糖原含量, mg·L⁻¹;

C —葡萄糖溶液浓度, mg·L⁻¹;

V_1 —葡萄糖溶液体积, mL;

A_1 —空白管吸光度, OD;

A_2 —标准管吸光度, OD;

A_3 —测定管吸光度, OD;

W —待测样品质量, mg;

V_2 —待测上清体积, mL。

1.3.9 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 24.0 进行数据统计分析并进行单因素方差分析(ANOVA)。使用 Origin 2021 程序进行数据处理和图表绘制。 $P < 0.05$ 表示组间具有显著差异。

2 结果与讨论

2.1 包埋工艺

2.1.1 PGPR 添加量对包埋率的影响

PGPR 添加量对包埋率的影响见图 1。随着 PGPR 添加量从 0.5% 增加至 2.0%, 包埋率呈现持续上升的趋势, 尤其是在 1.5%~2.0% 之间, 包埋率从 75.28% 提升至最大值 91.02%。在此浓度下, PGPR 有效降低水滴的界面张力, 增强多糖在油相中的分散性和包埋效果。然而, 当 PGPR 添加量进一步增加至 2.5% 时, 包埋率升高率不明显, 曲线趋于平缓。由此可见, 2.0% 的 PGPR 添加量既能最大限度提升包埋率, 又能保持乳液的结构稳定性, 可避免过量 PGPR 的添加引起的相间平衡失调。因此, 确定 PGPR 添加量为 2.0%, 包埋率和乳液稳定性之间的最佳平衡点。类似的, 田文妮等^[19]采用蜂蜡构建脂质载体对姜黄素包埋时也有类似发现, 当油相中添加 5% 和 10% 的蜂蜡时, 其表现粘度和物理稳定性显著增强。

2.1.2 油相占比对包埋率的影响

油相占比对包埋率的影响见图 2, 结果表明当油

相占比为 50% 时, 包埋率达到 76.21%。在这一比例下, 水相中的多糖能够均匀分散并有效包埋到油相中。然而, 随着油相比例进一步增加至 90%, 尽管包埋率依然较高, 达到 89.26%, 但由于油相加大, 乳液的粘度显著增加, 可能影响其流动性和后续应用。因此, 50% 的油相占比能够在一定程度上维持乳液的流变性能和稳定性, 这一比例在优化 PGPR 作用的基础上起到协同增效的作用。

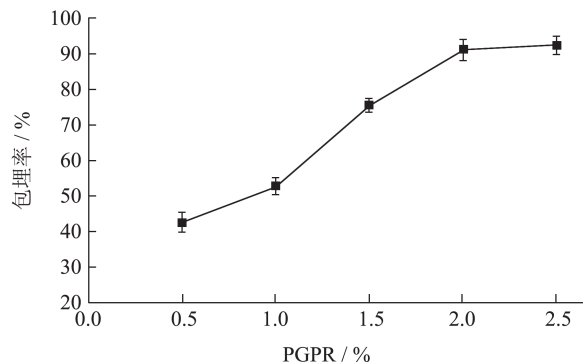


图 1 PGPR 添加量对包埋率的影响

Fig.1 Effect of PGPR addition on embedding rate

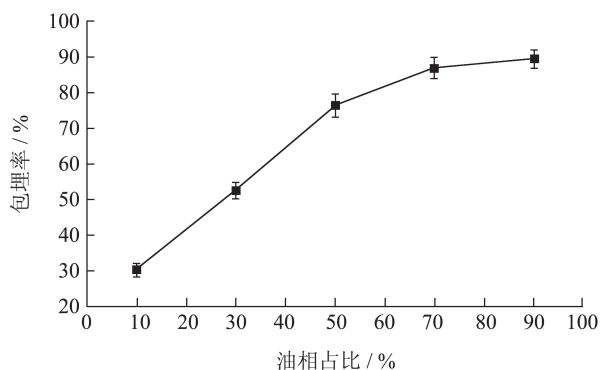


图 2 油相占比对包埋率的影响

Fig.2 Influence of oil-water ratio on embedding rate

2.1.3 乳液凝胶制备温度对包埋率的影响

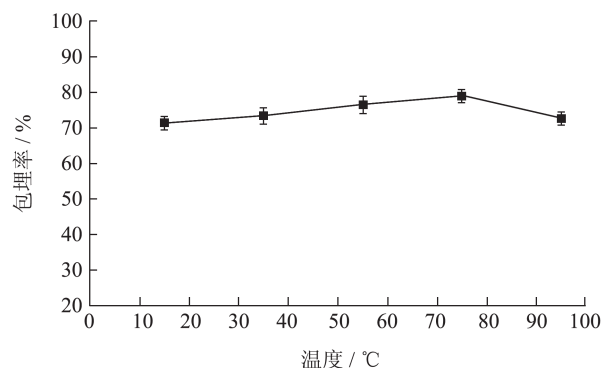


图 3 乳液制备温度对包埋率的影响

Fig. 3 Influence of emulsion preparation temperature on embedding rate

乳液凝胶制备温度对包埋率的影响见图 3。实验结果显示, 随着制备温度从 15 °C 逐步升高至 75 °C, 包埋率逐渐增加, 并在 75 °C 时达到最高值 78.65%。适宜的温度可以激发乳化剂的活性, 增强水滴的分散性, 从而提高包埋效率^[20]。然而, 温度进一步升高至 95 °C 后, 包埋率反而下降至 72.25%, 这可能是由于高温条件下乳化剂的分解或水相的蒸发, 导致乳液稳定性受到破坏。因此, 选择 75 °C 是乳液制备的最佳温度, 不仅能够有效提升包埋效率, 还能避免高温对乳液结构造成的不利影响。

2.1.4 均质时间对包埋率的影响

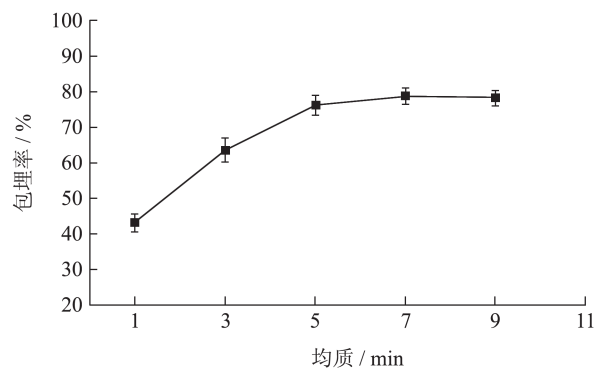


图 4 均质时间对包埋率的影响

Fig.4 Effect of homogenization time on embedding rate

均质时间对包埋率的影响影响见图 4, 实验结果表明, 随着均质时间从 5 min 增至 7 min, 包埋率从 76.24% 增加至 78.69%, 均质时间的适当延长有助于水相的充分分散, 进而提高包埋效率。然而, 延长至 9 min 后, 包埋率略有下降, 这可能是由于过长的均质时间导致油滴过度破碎, 影响乳液的整体稳定性。选择 5 min 的均质时间能够在确保较高包埋率的同时避免乳液结构的破坏, 进一步证明均质过程对乳液稳定性和包埋效果的积极影响。付红军等^[21]研究结果也证实上述结论, 当凝胶均质时间为 3 min, 加热温度为 55 °C 时包埋率最高, 均质时间延长则容易导致乳液凝胶破碎, 降低包埋率。

2.2 响应面实验结果分析

2.2.1 响应面实验结果

通过单因素结果取四因素三水平做响应面分析如表 1 设置, 以包埋率为响应值, 经软件 Design-Expert 8.0.6.1 分析, 试验结果见表 2。

包埋率与 PGPR 添加量、油相占比、乳液温度、均质时间的二元多项式模型为:

$$\text{包埋率} = +85.62 + 4.40A + 2.35B + 1.68C + 3.35D + 2.16AB + 0.455 \text{ } 0AC - 2.69A * D - 2.81BC + 2.58BD + 1.34C * D -$$

$2.35A^2-10.64B^2-1.91C^2-6.05D^2$, $R^2=0.949\ 4$, $R^2_{adj}=0.898\ 8$ 。

表 1 响应面试验工艺参数

Table 1 Process parameters of response surface test				
因素	A PGPR /%	B 油相占比 /%	C 乳液温度 /℃	D 均质时间 /min
-1	1.5	40	60	3
0	2.0	50	75	5
1	2.5	60	90	7

表 2 响应面实验结果

Table 2 Response surface test results					
序号	A PGPR /%	B 油相 占比/%	C 乳液 温度/℃	D 均质时间 /min	包埋率/%
1	2	50	60	7	84.04 ± 1.96
2	1.5	50	75	7	83.33 ± 1.64
3	1.5	50	75	3	75.32 ± 1.82
4	2	70	60	5	79.97 ± 2.21
5	2	50	75	5	90.63 ± 1.58
6	2	70	75	7	85.91 ± 1.98
7	2.5	70	75	5	85.10 ± 2.17
8	2.5	50	60	5	83.29 ± 1.76
9	2	70	75	3	69.10 ± 2.82
10	2	30	90	5	75.84 ± 1.96
11	1.5	50	90	5	77.86 ± 2.13
12	2.5	50	75	3	85.52 ± 2.36
13	1.5	70	75	5	71.98 ± 1.65
14	2.5	30	75	5	70.57 ± 1.89
15	2	50	60	3	79.11 ± 2.32
16	2	30	75	3	78.23 ± 2.51
17	1.5	30	75	5	66.09 ± 2.16
18	2	30	75	7	68.13 ± 1.59
19	1.5	50	60	5	76.40 ± 1.68
20	2.5	50	90	5	86.57 ± 1.86
21	2	50	90	3	80.21 ± 2.44
22	2	30	60	5	66.29 ± 1.57
23	2	50	90	7	85.50 ± 1.83
24	2	50	75	5	91.52 ± 2.61
25	2	50	75	5	91.11 ± 1.87
26	2	50	75	5	92.08 ± 2.36
27	2	70	90	5	78.27 ± 1.45
28	2	50	75	5	87.74 ± 1.94
29	2.5	50	75	7	87.78 ± 2.12

2.2.2 方差分析

由表 3 可知，以包埋率为响应值建立的模型 P 值 $<0.000\ 1$ ，故说明该试验设计合理，相关系数

$R^2=0.95$ 与修正系数 $R^2_{adj}=0.90$ 相近，说明该模型的实际值与预测值相吻合。且失拟项不显著 ($P>0.05$)，表明模型与试验数据拟合性较好，回归方程能较好的反应各因素与包埋率的关系。由方差分析表可知，AD、BC、 B^2 、 C^2 的显著性较高，表明各因素对包埋率的影响并不是简单的线性关系。此外，由方差分析表可知，各因素对包埋率的影响大小依次为： $A>B>D>C$ 。

表 3 方差分析

Table 3 Analysis of variance						
方差来源	平方和	自由度	均分	F 值	P 值	显著性
模型	1 427.49	14	101.96	18.76	<0.000 1	significant
A-PGPR	232.76	1	232.76	42.82	<0.000 1	**
B-油相占比	66.18	1	66.18	12.17	0.003 6	**
C-乳液温度	33.84	1	33.84	6.22	0.025 7	*
D-均质时间	134.67	1	134.67	24.77	0.000 2	**
AB	18.66	1	18.66	3.43	0.085 1	
AC	0.83	1	0.83	0.15	0.702 2	
AD	28.89	1	28.89	5.31	0.037 0	*
BC	31.64	1	31.64	5.82	0.030 1	*
BD	24.55	1	24.55	4.52	0.051 9	
CD	7.18	1	7.18	1.32	0.269 6	
A2	35.79	1	35.79	6.58	0.022 4	*
B2	734.34	1	734.34	135.08	<0.000 1	**
C2	23.57	1	23.57	4.34	0.056 1	
D2	237.62	1	237.62	43.71	<0.000 1	**
残差	76.11	14	5.44			
失拟项	64.63	10	6.46	2.25	0.225 4	not significant
纯误差	11.48	4	2.87			
总差	1 503.60	28				

注：* 表示显著性差异 ($P<0.05$)，** 表示极显著差异 ($P<0.01$)。

2.2.3 交互作用分析

RSM 的图形是特定的响应面 Y 对应 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 值构成的一个三维空间在二维平面上的等高图，可以直观地反映各因素对响应值的影响，从所得响应面分析图上可以分析出各因素之间的相互作用。经 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行响应面试验，得到图 X。由图 5 可知，AD、BC 等高线图呈椭圆形，说明两者交互作用明显，说明两因素的交互作用对包埋率具有显著性影响 ($P<0.05$)，其相对应的 3D 曲面图颜色变化也较为明显、峰型也较为陡峭，这与表 X 方

差分析结果一致。与此同时，AB、AC、BD、CD 响应曲面较为平缓，等高线图近似圆形，说明两者交互作用对包埋率影响不显著，亦与表 X 方差分析结果一致。

根据响应面优化得到最佳包埋率的条件为：PGPR 添加量：2.28%、油相占比：57.94%、乳液温度：75.99 ℃、均质时间：5.71 min。为方便实验，优化上述条件为：PGPR 添加量 2.3%、油相占比为 58%、凝胶制备温度 76 ℃、均质时间 5.7 min，灵芝多糖包埋率为 93.21%，与预测值无显著差异。

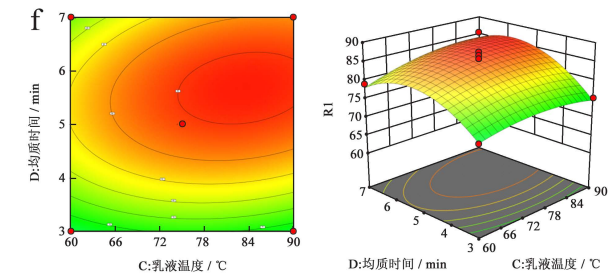
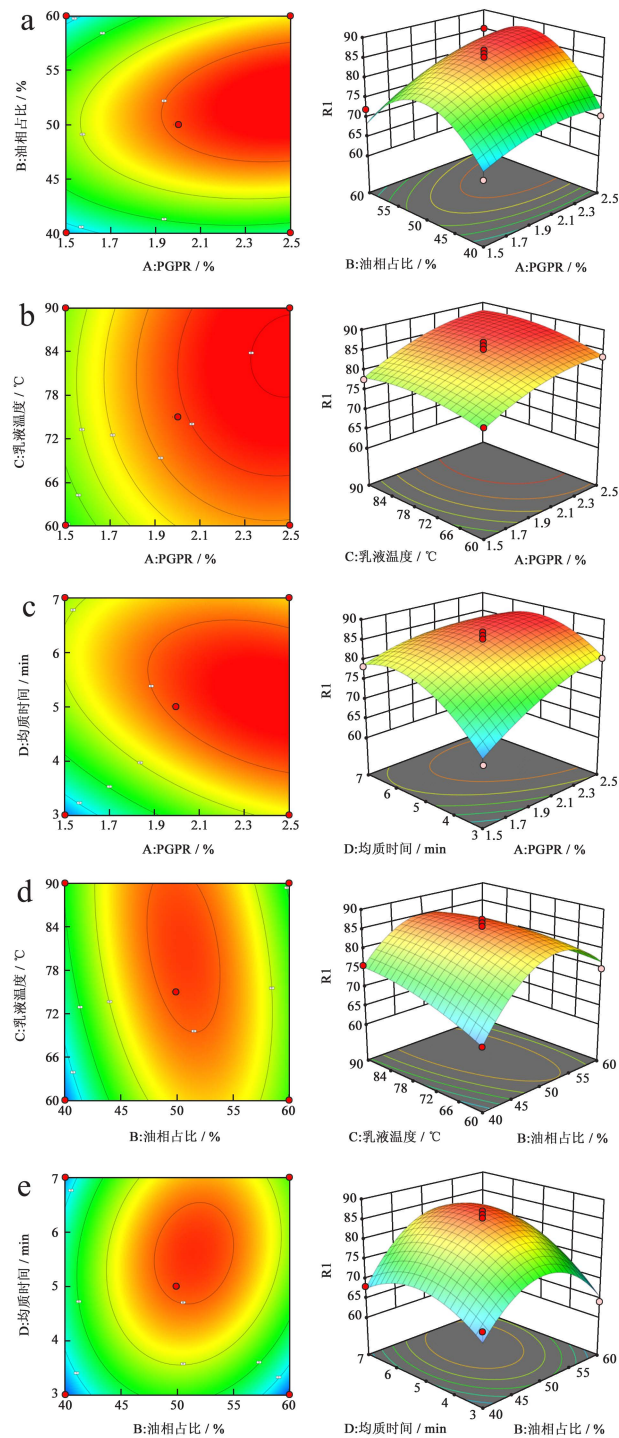


图 5 响应面分析图

Fig.5 Response surface analysis

2.3 灵芝多糖乳液乳化性质分析

2.3.1 粒径结果分析

在植物油脂种加入灵芝多糖乳液凝胶后粒径变化如图 6 所示，所有的粒径分布图均为单峰型，主要分布在 10 μm 和 100 μm 左右，与市售植脂奶油的分布相似。灵芝多糖乳液加入植物奶油后乳液粒径 10 μm 处体积占比增大，乳液变得更稳定，Li 等^[22]的研究结果也表明灵芝多糖乳液加入植物奶油后其稳定性增强，证明灵芝多糖乳液可以在脂肪混合物中形成微小且均匀的晶体，使脂肪球在乳液中有序分布，从而形成牢固的泡沫结构，且灵芝多糖乳液粒径小，口感光滑细腻，从而改善产品的适口性。

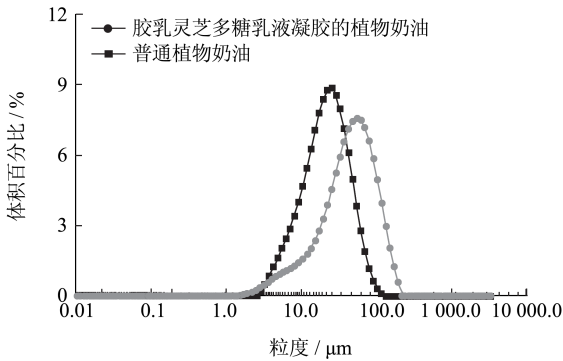


图 6 乳液粒径分布及百分比

Fig.6 Emulsion particle size distribution and percentage

2.3.2 质构和电位结果分析

植脂奶油的质构性能是评价植脂奶油感官品质的关键指标。而硬度与搅打奶油的涂抹性、口感等息息相关，黏性和弹性则是反映奶油流变性质的重要参数，这几种指标共同表明材料的结构形状和变形行为。由表 4 可知，随着乳化剂的引入，奶油的硬度、黏性和弹性呈现全面增加趋势，硬度提升 22.58%，黏性提升 9.23%，弹性提升 18.42%，添加灵芝多糖乳液凝胶后植物奶油硬度达到 14.28 gf，这种提升效果主要是由于乳化剂的作用，使连续相中的网络结构更加致密，且乳化剂通过替代界面蛋白，使界面蛋白膜变薄。在搅打过程中，脂肪球部分聚集率提高，更易穿透脂肪球膜，从而形成稳定的泡沫结构。从而赋予奶油更强的质构性能。

表 4 质构分析
Table 4 Texture analysis

样品	硬度/gf	黏性/gf·s	弹性	电位/mz
普通植物奶油	11.65 ± 0.15 ^b	-48.45 ± 0.23 ^b	0.38 ± 0.04 ^b	-26.32 ± 0.42 ^a
添加灵芝多糖乳液凝胶植物奶油	14.28 ± 0.34 ^a	-52.92 ± 0.56 ^a	0.45 ± 0.12 ^a	-28.26 ± 0.45 ^b

注：图中不同小写字母表示组间差异显著（ $P<0.05$ ）。

同时，添加乳化剂后，电位绝对值增加至 28.26 mV。乳化剂作为一种表面活性剂，分子中同时存在亲水基团和疏水基团。所以将其加入到植物奶油中后，乳化剂会在油相和水相的界面上聚集，亲水基朝向水相，疏水基朝向油相，从而在界面上形成一层膜。这层膜会使界面上的电荷分布发生变化，增加界面处的电荷密度，导致植物奶油的电位绝对值增大^[23,24]。

2.3.3 冻融结果分析

对每个样品进行 4 次冻融循环，以测试灵芝多糖乳液对植物奶油冻融稳定性的影响。如图 7 所示，经过 4 次循环后，普通植物奶油样品表观变化明显，其油凝胶比例最高。在其中观察到明显的不均匀性，表明发生相分离。说明随着灵芝多糖乳液凝胶的添加，植物奶油的冻融稳定性得到改善，该结果进一步印证灵芝多糖乳液凝胶在冷冻奶油食品应用方面具备一定潜力^[25]。灵芝多糖乳液凝胶体系对植物奶油的理化性质存在影响，相较于常规的乳化剂，蜂蜡的天然属性不仅提升了体系生物相容性，还可通过协同作用增强灵芝多糖的缓释性能，以上结论与刘松彬^[26]的研究成果类似。

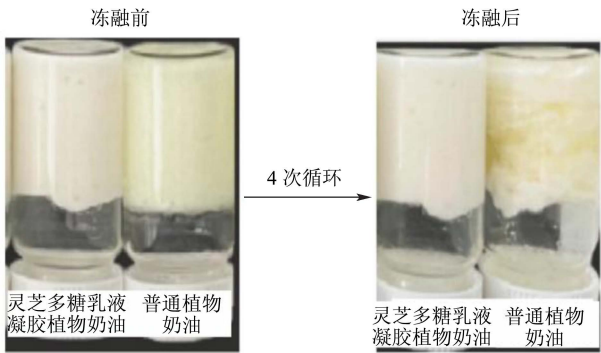


图 7 灵芝多糖乳液对植物奶油冻融稳定性的影响
Fig.7 Effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide emulsion on the freeze-thaw stability of vegetable creams

2.4 生化指标分析

根据表 5 可知，与空白运动组相比，不同剂量给药组均能降低小鼠的血尿素氮含量。其中，中、高剂量组尿素氮含量低于不运动空白组，灵芝乳液对尿素氮浓度的降低效果随给药剂量的增加而增加。以上实验结果表明，灵芝多糖包埋乳液凝胶可显著降低力竭

小鼠血尿素氮水平，且具有剂量依赖性，该趋势与玛咖多糖对尿素氮水平抑制效果一致^[27-29]。随着灵芝乳液凝胶给药剂量的增大，小鼠尿素氮水平越低，其作用效果越好，高剂量组的抑制效果最为明显，对比空白组降低了 37.47%（ $P<0.05$ ）。

根据表 6 可知，与空白组相比，阳性组与各给药组均能提高全血乳酸水平，其中不运动空白组高于空白组，且各个剂量组均含量高于不运动空白组。以上实验结果表明，乳液凝胶可提升力竭小鼠全血乳酸含量水平，且具有剂量依赖性，这说明乳液凝胶可能增强小鼠的无氧代谢，使其在力竭状态下维持较高的能量供应。

根据文献肝糖原和肌糖原含量可以反映身体疲劳的程度，可作为抗疲劳性的指标^[30-32]。由表 7 与 8 可知，与空白组相比，不运动空白组和各剂量给药组小鼠肝糖原水平均降低，其中低剂量组具有显著性差异（ $P<0.05$ ），中剂量组、高剂量组和不运动空白组具有极显著性差异（ $P<0.01$ ）。以上实验结果表明，灵芝多糖包埋乳液凝胶可显著降低力竭小鼠肝糖原水平，且与添加量为正相关。此外，不同剂量下的乳液凝胶对小鼠肌糖原水平也起到显著提高作用，且与添加量呈正相关，该趋势与 Yang 等^[33]的狭果茶蓼子多糖抗疲劳研究中糖原趋势变化一致。而肌糖原和肝糖原都是机体运动中各个生物化学反应的主要底物，乳液凝胶对于小鼠糖原水平的提高功能说明其在改善机体疲劳状况具有明显效果，也可以延缓疲劳的产生。

表 5 灵芝多糖包埋乳液凝胶对尿素氮浓度影响
Table 5 Effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide embedded emulsion gel on urea nitrogen concentration ($n=10$, $\bar{X}\pm s$)

组别	<i>n</i>	尿素氮浓度/(mmol·L ⁻¹)
运动空白组	10	14.01 ± 1.82
不运动空白组	10	10.23 ± 0.95 ^{**}
运动低剂量组	10	11.45 ± 0.82 [*]
运动中剂量组	10	9.23 ± 0.94 ^{***}
运动高剂量组	10	8.76 ± 1.01 ^{***}

注：* 表示运动空白组与运动各组含量相较具有显著性差异（ $P<0.05$ ），** 表示极显著（ $P<0.05$ ）；# 表示不运动空白组与运动各组含量相较具有显著性差异（ $P<0.05$ ），### 表示极显著差异（ $P<0.01$ ）。下同。

表 6 灵芝多糖包埋乳液凝胶对全血乳酸含量影响

Table 6 Effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide embedded emulsion gel on blood lactic acid content (*n*=10, *X*±*s*)

组别	<i>n</i>	全血乳酸含量/(mmol·L ⁻¹)
运动空白组	10	30.59 ± 2.48
不运动空白组	10	33.03 ± 2.89
运动低剂量组	10	35.34 ± 3.03 [*]
运动中剂量组	10	37.38 ± 2.26 ^{*#}
运动高剂量组	10	39.02 ± 3.17 ^{*#}

表 7 灵芝多糖包埋乳液凝胶对肌糖原含量影响

Table 7 Effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide embedded emulsion gel on muscle glycogen content (*n*=10, *X*±*s*)

组别	<i>n</i>	肌糖原/(mg·L ⁻¹)
运动空白组	10	0.87 ± 0.04
不运动空白组	10	1.01 ± 0.06
运动低剂量组	10	0.90 ± 0.15 [*]
运动中剂量组	10	1.13 ± 0.58 ^{***}
运动高剂量组	10	1.19 ± 0.87 ^{***}

表 8 灵芝多糖包埋乳液凝胶对肝糖原含量影响

Table 8 Effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide embedded emulsion gel on liver glycogen content (*n*=10, *X*±*s*)

组别	<i>n</i>	肝糖原/(mg·L ⁻¹)
运动空白组	10	4.86 ± 0.57
不运动空白组	10	5.21 ± 0.23
运动低剂量组	10	5.83 ± 0.75 [*]
运动中剂量组	10	6.21 ± 1.31 ^{**}
运动高剂量组	10	6.85 ± 1.05 ^{***}

3 结论

本研究以蜂蜡为壁材包埋灵芝多糖，制备乳液凝胶，并研究其抗疲劳功效。通过工艺优化，得到乳液凝胶最佳制备工艺条件为：蜂蜡添加量 2.7%、油相占比为 50%、乳液温度 78 ℃、均质时间 7.5 min 时，灵芝多糖包埋率达到最大值 93.21%。将灵芝多糖乳液凝胶添加到植物奶油中，不仅可以显著提高植物奶油加工特性。通过蜂蜡载体与灵芝多糖的协同作用，还显著提高了乳液凝胶的抗疲劳功能，其添加到食品中可以改善实验动物的肌糖原、肝糖原、尿素氮和血清乳酸浓度指标。综上，可将其作为抗疲劳营养强化剂添加到健康食品中，开发一种具有抗疲劳活性的乳化剂。

参考文献

[1] 李天依,林江,闫强强,等.灵芝的现代应用研究进展[J].临床医药文献电子杂志,2019,6(A2):152,193.

[2] 颜瑞辰,洪允炬,李悦,等.响应面法优化灵芝多糖提取工艺及其

抗氧化活性[J].菌物研究,2024,6:1-10.

[3] 马广礼,夏晓培.灵芝多糖对糖尿病肾病小鼠的改善作用及机制研究[J].天然产物研究与开发,2024,36(6):938-945.

[4] 潘云霞.灵芝多糖调控抗氧化因子表达抑制乳腺癌恶性表型研究[D].合肥:安徽中医药大学,2023.

[5] 丁翹.基于肠道菌群探讨黑灵芝多糖对2型糖尿病大鼠的影响机制[D].南昌:南昌大学,2020.

[6] YAMANAKA Y, KOBAYASHI I, NEVES M A, et al. Formulation of W/O/W emulsions loaded with short-chain fatty acid and their stability improvement by layer-by-layer deposition using dietary fibers [J]. LWT-Food Science & Technology, 2017, 76(B): 344-350.

[7] 张咪.油-水界面蛋白性质对油包水乳液稳定性影响的研究[D].无锡:江南大学,2023.

[8] 吴忆惠,黄桂颖,陈海光.乳液凝胶作为动物脂肪替代物的应用研究进展[J].食品科技,2023,48(12):236-243.

[9] 陶然,李高林,范蓓,等.大豆蛋白乳液凝胶研究进展[J].大豆科学,2024,43(1):95-106.

[10] 刁小琴,李曦,孙薇婷,等.乳液凝胶的构建及应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2022,13(4):1036-1043.

[11] LIN D Q, KELLY A L, MIAO S. The impact of pH on mechanical properties, storage stability and digestion of alginate-based and soy protein isolate-stabilized emulsion gel beads with encapsulated lycopene [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131262.

[12] HAN L, ZHOU S J, LU K Y, et al. Effects of inducer type and concentration on the formation mechanism of W/O/W double emulsion gels [J]. Food Chemistry, 2022, 379: 132166.

[13] HAN Z Y, CHENG K X, PAN Y M, et al. Influence of beeswax-based fish oil oleogels on the mechanism of water and oil retention in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) meat emulsion gels: Filling, emulsification and phase transition [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140188.

[14] ZHANG R F, ZHANG T, HU M Y, et al. Effects of oleogels prepared with fish oil and beeswax on the gelation behaviors of protein recovered from Alaska Pollock [J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 137: 110423.

[15] QAYUM A, HUSSAIN M, LI M, et al. Gelling, microstructure and water-holding properties of alpha-lactalbumin emulsion gel: Impact of combined ultrasound pretreatment and laccase cross-linking [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 110: 106122.

[16] 高玉星.基于蜂蜡的W/O型多重乳液的结构设计与性能调控[D].武汉:华中农业大学,2021.

[17] LIU Z L, CAO Z Y, ZHAO M M, et al. Synergistic influence of protein particles and low-molecular-weight emulsifiers on the stability of a milk fat-based whippable oil-in-water emulsion [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107520.

[18] 刘超,马遥,刘艳秋,等.超声波-酶法协同制备梅花鹿鹿血肽及其体内抗疲劳活性研究[J].食品安全质量检测学报,2024,15(6):22-29.

[19] 田文妮,宋增柳,杨淦,等.蜂蜡含量对纳米结构脂质载体消化释放行为及巨噬细胞摄取率的调控影响[J].食品科学,2023,44(21):35-43.

[20] 王小荣,李莉,宇文娣,等.水性蜡乳液的制备及其应用性能研究[J].皮革与化工,2023,40(5):18-21.

- [21] 付红军,李亚萍,王艳,等.响应面法优化山苍子精油微胶囊的制备工艺及其缓释性能研究[J].中国粮油学报2024,39(12):133-138.
- [22] LI Y H, LIAO T, LIU T X, et al. Effect of stearic and oleic acid-based lipophilic emulsifiers on the crystallization of the fat blend and the stability of whipped cream [J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136762.
- [23] DANILOSKI D, MCCARTHY N A, MARKOSKA T, et al. Conformational and physicochemical characteristics of bovine skim milk obtained from cows with different genetic variants of β -casein [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107186.
- [24] YAN G S, WANG S R, LI Y, et al. Effect of emulsifier HLB on aerated emulsions: Stability, interfacial behavior, and aeration properties [J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111505.
- [25] WU Y, ESKIN N, CUI W, et al. Emulsifying properties of water soluble yellow mustard mucilage: A comparative study with gum Arabic and citrus pectin [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 47: 191-196.
- [26] 刘松彬.基于花生油体的乳液凝胶制备及其在植脂奶油中的应用[D].福州:福建农林大学,2024.
- [27] TANG W M, LU J, XIE L H, et al. Structural characterization and antifatigue effect *in vivo* of maca (*Lepidium meyenii* Walp) polysaccharide [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(3): 757.
- [28] LI Y, XU F, ZHENG M, et al. Maca polysaccharides: A review of compositions, isolation, therapeutics and prospects [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 894.
- [29] ZHA S, ZHAO Q, CHEN J, et al. Extraction, purification and antioxidant activities of the polysaccharides from maca (*Lepidium meyenii*) [J]. Carbohydr Polym, 2014, 111: 584-587.
- [30] GAO X, QI J Y, HO C T, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of a water-soluble polysaccharide from *Ganoderma leucocontextum* fruiting bodies [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 249: 116874.
- [31] CHRISTOPHER J, CONTRERAS, DYADD M, et al. Incorporation of phosphate into glycogen by glycogen synthase [J]. Archives of Biochemistry & Biophysics, 2016, 597(1): 21-29.
- [32] JOHAN O, MATTEO F, MARTIN T, et al. Beta2-agonist impairs muscle insulin sensitivity in persons with insulin resistance [J]. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2024, 110(1): 275-288.
- [33] QIAO Y B, YE Y, CAI T X, et al. Anti-fatigue activity of the polysaccharides isolated from *Ribes stenocarpum* Maxim [J]. Journal of Functional Foods, 2022, 89: 104947.