

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241230005

引用格式: 刘子涵, 赵雅琪, 刘阳, 等. 海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备工艺优化与质构分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 301–308.

LIU ZH, ZHAO YQ, LIU Y, *et al.* Preparation process optimization and texture analysis of sodium alginate-egg gel beads [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 301–308. (in Chinese with English abstract).

海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备工艺优化与质构分析

刘子涵¹, 赵雅琪¹, 刘阳², 郑静洁¹, 赵煜炜³, 郑振佳^{1*}

(1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东省高等学校食品营养与健康重点实验室, 泰安 271018;

2. 乳山市检验检测中心, 威海 264500; 3. 山东龙大美食股份有限公司,

山东龙大生猪产品工程技术研究有限公司, 烟台 265200)

摘要: **目的** 以海藻酸钠和鸡蛋为载体, 通过乳酸钙络合, 制备海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠, 优化其制备工艺并进行质构分析。**方法** 采用交联法制备海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠, 根据单因素实验设计, 探究了乳酸钙浓度、固化时间、固化温度等条件对凝胶珠硬度的影响。**结果** 在单因素条件下, 利用响应面法优化了凝胶珠的制备工艺, 得到最佳工艺条件: 乳酸钙浓度 6%、固化时间 27 min、固化温度 39 °C, 此条件下制备的凝胶珠内聚性 0.6457、回复性 0.6627、硬度 9.9983 gf、弹性 1.0000、咀嚼性 3.5975 gf、含水量 84.56%。**结论** 本研究制备的海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠回复性和弹性良好, 并确定该产品的最佳制备工艺, 为扩展凝胶珠在生物医学、材料科学等领域的应用前景提供了理论支持和参考。

关键词: 海藻酸钠; 鸡蛋; 凝胶珠; 工艺优化; 质构分析

Preparation process optimization and texture analysis of sodium alginate-egg gel beads

LIU Zi-Han¹, ZHAO Ya-Qi¹, LIU Yang², ZHENG Jing-Jie¹,
ZHAO Yu-Wei³, ZHENG Zhen-Jia^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Key Laboratory of Food Nutrition and Healthy in Universities of Shandong, Tai'an 271018, China; 2. Rushan City Inspection and Testing Center, Weihai 264500, China; 3. Shandong Longda Meishi Co., Ltd., Shandong Longda Pig Product Engineering Technology Research Co., Ltd., Yantai 265200, China)

ABSTRACT: Objective To prepare sodium alginate-egg gel beads using sodium alginate and egg as carriers through calcium lactate complexation, optimize their preparation process, and conduct texture analysis. **Methods** The sodium alginate-egg gel beads were prepared using the cross-linking method, and based on single-factor experimental design, the effects of calcium lactate concentration, curing time, and curing temperature on the hardness of the gel beads were explored. **Results** Under single-factor conditions, the preparation process of the gel beads was optimized using response surface methodology. The optimal preparation conditions were: 6% calcium lactate concentration, 27

收稿日期: 2024-12-30

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022TZXD0020); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0883)

第一作者: 刘子涵(2002—), 女, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 15589682777@163.com

*通信作者: 郑振佳(1985—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与功能食品。E-mail: zhengzhenjia@sdau.edu.cn

minutes of curing time, and a curing temperature of 39 °C. Under these conditions, the prepared gel beads had the following properties: Cohesiveness of 0.6457, recovery of 0.6627, hardness of 9.9983 gf, elasticity of 1.0000, chewiness of 3.5975 gf, and water content of 84.56%. **Conclusion** This study prepares alginate-egg gel beads with good recovery and elasticity, and determines the optimal process for the preparation of the product. This provides theoretical support and reference for expanding the application prospects of sodium alginate-egg gel beads in the fields of biomedicine and material science.

KEY WORDS: sodium alginate; egg; gel beads; process optimization; texture analysis

0 引言

海藻酸钠是从褐藻类的海带或马尾藻中获得的一种由 β -D-甘露糖醛酸和 α -L-古洛糖醛酸单元组成的多糖,具有良好的水溶性、生物相容性、无毒性 and 可降解性^[1]。海藻酸钠可作为微胶囊壁材控制药物释放^[2],通过调节凝胶的孔隙度和渗透性来控制功能成分在消化过程中的释放速度,从而提高其生物利用率,在生物医药和食品方面有着广泛应用^[3-5]。海藻酸钠分子链上的羧基,可以通过与金属阳离子之间发生配位作用,形成可逆的物理交联水凝胶网络^[6],例如与钙离子(Ca^{2+})、锌离子(Zn^{2+})、钡离子(Ba^{2+})等金属离子接触进行交联固化^[7-9],都会形成海藻酸钠凝胶球。

鸡蛋营养丰富,其中卵磷脂有助于提升记忆能力和认知能力^[10],含有的多种维生素和矿物质,具有促进机体生长发育、维持上皮组织稳定的功能^[11-13]。鸡蛋营养价值均衡,在凝胶珠中加入鸡蛋,会大大提高凝胶珠的营养价值。将鸡蛋加入海藻酸钠凝胶珠形成的海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠,可赋予鸡蛋新的形态,海藻酸钠形成的凝胶结构能够包裹并稳定鸡蛋中的营养成分,减少加工、贮藏过程中的损失。

在凝胶珠体系里,硬度较大的凝胶珠往往结构更为紧密,既能很好地维持自身的形状与质地,又能有效延缓药物的释放进程,从而达成活性成分的缓释或控释效果^[14]。因此本研究通过单因素实验探究乳酸钙浓度、固化时间、固化温度对凝胶珠制备的影响,结合响应面实验优化,采用 Design-Expert 13 软件分析各因素对凝胶珠硬度的影响,确定凝胶珠固定化制备的最佳条件。海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备不仅能推动该产品在其他食品类别或非食品领域的应用,如药品缓释、生物材料等,推动跨学科研究的发展,还在开发新型食品、改善食品品质和安全性、优化资源利用等方面具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

乳酸钙(食品级,河南金丹乳酸科技股份有限公司);

海藻酸钠(食品级,青岛明月海藻集团有限公司);鲜鸡蛋:超市购买;水:娃哈哈纯净水。

1.2 仪器与设备

SHJ-A6 恒温磁力搅拌水浴锅(常州市亿能实验仪器有限公司);KQ3200DE 数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司);TA.XTC-20 物性分析仪(上海保圣实业发展有限公司);LLS PLUS-B196 实验室蠕动泵[卡川尔流体科技(上海)有限公司];ME204E/02 电子天平[精度 0.0001 g,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司];SCIENTZ-10YG/A 冷冻干燥机(宁波新芝冻干设备股份有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备

用纯净水配制一定浓度的海藻酸钠溶液和不同浓度的乳酸钙溶液。将新鲜鸡蛋制成全蛋液,以 3:2 的比例与海藻酸钠溶液混合均匀,超声 2 min 去除气泡,用蠕动泵将混合液滴入乳酸钙溶液中,固化不同时间后取出,清洗后于 80 °C 水浴锅中加热 30 min,得海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠。

1.3.2 凝胶珠制备的单因素实验

参考王梦南^[15]的方法,以硬度为评价标准,进行单因素实验。在单因素实验中,首先考察了乳酸钙浓度(2%、3%、4%、5%、6%、7%)对凝胶珠硬度的影响,每个浓度的固化时间都为 30 min,在室温下进行固化;其次研究了固化时间(0、15、30、45、60 min)对凝胶珠硬度的影响,此时乳酸钙浓度保持 6%,同样在室温下固化;最后探究了固化温度(25、30、35、40、45 °C)对凝胶珠的影响,此时乳酸钙浓度也为 6%,固化时间设定为 30 min。

1.3.3 凝胶珠制备的响应面设计

依据单因素实验的数据,借鉴包永华等^[16]的方法,设计响应面实验。实验中选择乳酸钙浓度、固化时间、固化温度这 3 个变量作为自变量,硬度设为响应值,通过 Design-Expert 13 软件设计响应面的组合方案,旨在优化海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备工艺。具体实验设计中的响应面因素及其水平见表 1。

1.3.4 凝胶珠的全质构测定

使用物性分析仪,对制得的凝胶珠进行全面的质构特性测定,包括内聚性、回复性、硬度、弹性、咀嚼性等

指标, 每组实验均进行 10 次^[17]重复, 对所得数据进行统计分析, 计算各指标的平均值和方差。本研究采用 TA/0.5 凝胶探头, 质构剖面分析(texture profile analysis, TPA)测定模式下设置测定条件: 实验类型为全质构测试, 检测前速度 1 mm/s, 检测速度 1 mm/s, 检测后速度 1 mm/s; 检测模式为下压式, 压缩比 30%, 触发力 5.00 gf (1 gf=0.0098 N), 时间 5 s。

表 1 实验设计中的响应面因素及其水平

Table 1 Factors and levels in response surface experimental design

水平	因素		
	A 乳酸钙浓度/%	B 固化时间/min	C 固化温度/℃
-1	5	15	35
0	6	30	40
1	7	45	45

1.3.5 凝胶珠的含水量测定

本研究利用真空冷冻干燥法比较海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠和海藻酸钠凝胶珠含水量的差异^[18]。实验中记蒸发皿的净重为 m_1 , 将凝胶珠放入蒸发皿称量为 m_2 , 于-20℃冰箱中冷冻 6 h, 取出后放入冷冻干燥机, 处理 48 h。称量冻干后蒸发皿和凝胶珠的质量为 m_3 。凝胶珠的含水量计算见公式(1)^[19]。

凝胶珠的含水量/%= $\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\%$

(1)

1.4 数据处理

每组质构测试执行 10 次以确保数据的可靠性。使用 Excel 2019 进行数据处理, 计算出平均值与方差。应用 Origin 2018 64Bit 软件将数据绘制成图并分析单因素实验的最佳条件, 利用 Design-Expert 13 软件对各组数据进行详尽的响应面分析。利用 SPSS 25.0 软件对数据进行显著性分析, 不同字母表示组间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 凝胶珠制备的单因素实验结果

2.1.1 乳酸钙浓度对凝胶珠硬度的影响

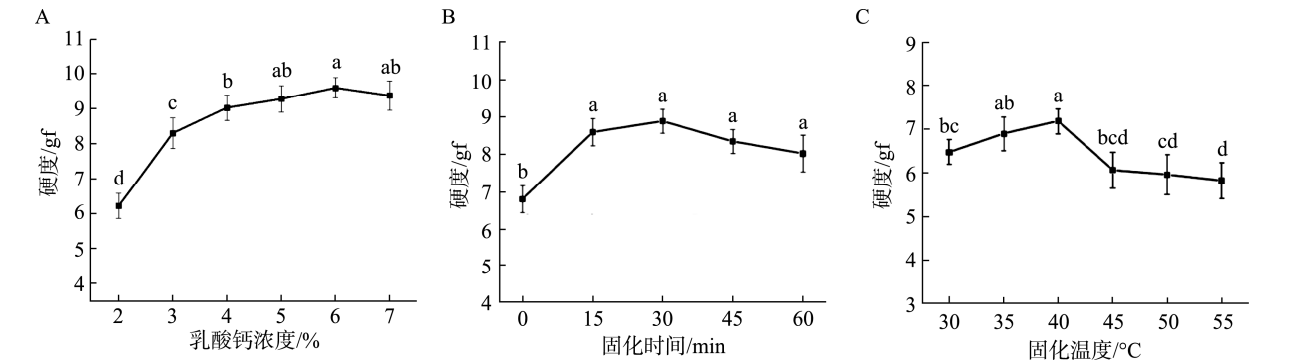
乳酸钙浓度对凝胶珠硬度的影响见图 1A, 在乳酸钙浓度为 2%~7%范围时, 凝胶珠硬度随着乳酸钙浓度的增加呈先增加后减小的趋势, 当乳酸钙浓度为 6%时, 硬度最大为 9.5930 gf; 当乳酸钙浓度为 2%时, 硬度最小为 6.2194 gf, 相差 3.3736 gf。随着乳酸钙浓度的增加, 溶液中 Ca^{2+} 的浓度也随之提高, 更多的 Ca^{2+} 参与交联反应, 凝胶网络更为密集, 从而提高了凝胶珠的硬度; 但当 Ca^{2+} 的浓度过高时, 海藻酸钠液滴表面因快速交联形成致密凝胶层, 阻碍 Ca^{2+} 内扩散, 导致外层过度交联而内层交联不足的梯度交联现象, 所以形成的凝胶珠硬度小^[20]。最终分析确定最佳乳酸钙浓度为 6%。

2.1.2 固化时间对凝胶珠硬度的影响

由图 1B 可知, 固化时间在 0~60 min 时, 凝胶珠硬度随着固化时间的延长呈先增大后减小的趋势, 在固化时间为 30 min 时, 海藻酸钠与乳酸钙形成的凝胶珠硬度最大为 8.6198 gf; 当固化时间为 0 min 时, 硬度最小为 6.9643 gf, 相差 1.6555 gf。固化时间短, 形成的凝胶网络结构较为疏松, 硬度较小; 固化时间过长, 导致凝胶珠表层过度交联, 不利于与周围水分子结合, 硬度降低^[21]。考虑到经济效益, 确定固化时间为 30 min。

2.1.3 固化温度对凝胶珠硬度的影响

由图 1C 可以得出, 固化温度在 30~55℃时, 凝胶珠硬度随着温度的升高呈先增大后减小的趋势, 在固化温度为 40℃时, 凝胶珠硬度最大为 7.1752 gf; 当固化温度为 55℃时, 硬度最小为 6.4065 gf, 相差 0.7687 gf。温度升高时分子热运动变剧烈, 固化反应随之加快。但温度过高会导致鸡蛋蛋白质变性^[22], 可能会堵塞凝胶网络的孔隙, Ca^{2+} 无法深入内部发生交联作用, 从而使硬度降低。高温固化还可能导致凝胶珠表面过早固化, 而内部未完全固化, 影响硬度及整体性能。因此最终确定固化温度为 40℃。



注: 不同小写字母表示组间具有显著性差异($P<0.05$), 图 4 同。

图 1 不同单因素对凝胶珠硬度的影响

Fig.1 Effects of different single factors on hardness of gel beads

2.2 响应面实验结果

2.2.1 响应面实验设计与结果

利用 Design-Expert 13 软件对每组数据进行完全回归分析, 得出回归方程为: $Y=9.99-0.0596A-0.2777B-0.2106C-0.1183AB-0.4585AC+0.6203BC-1.07A^2-1.04B^2-1.44C^2$ 。根据单因素实验结果, 确定了影响凝胶珠硬度的乳酸钙浓度、固化时间、固化温度这 3 个关键因素, 进而对制备凝胶珠的制备工艺进行优化, 实验设计与结果见表 2, 方差分析结果见表 3。

从表 3 可知, 回归分析显示模型具有显著性($P<0.01$), 而失拟项的 P 为 0.2547, 不显著, 说明此模型的拟合效果良好; 决定系数 R^2 为 0.9587, 表明测定的凝胶珠硬度与模拟预测值之间具有高度一致性; 校正后决定系数 R^2_{Adj} 为 0.9056, 表明该回归模型的可信度较高, 能够反映 90.56% 的响应变量变化。因此该模型在可信度和拟合度方面均表现优异, 适用于分析与预测海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的硬度。根据表 3 中的数据可知, A^2 、 B^2 、 C^2 、 AC 、 BC 对结果影响高度显著($P<0.05$, $P<0.01$); A 、 B 、 C 以及 AB 的交互作用对结果影响不显著($P>0.05$)^[16]。最终确定回归方程为 $Y=9.99-0.4585AC+0.6203BC-1.07A^2-1.04B^2-1.44C^2$ 。

表 2 响应面实验设计与结果
Table 2 Design and results of response surface test

分组	A 乳酸钙 浓度/%	B 固化 时间/min	C 固化 温度/℃	硬度/gf
1	6	30	40	10.4700
2	6	15	45	6.8030
3	6	30	40	10.0300
4	6	45	45	7.8900
5	5	15	40	8.4890
6	5	30	45	7.5550
7	6	15	35	8.3740
8	7	15	40	8.2370
9	5	30	35	7.1500
10	6	30	40	10.0370
11	7	45	40	7.0430
12	7	30	35	8.3170
13	6	30	40	9.8000
14	6	45	35	6.9800
15	7	30	45	6.8880
16	5	45	40	7.7680
17	6	30	40	9.6220

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Variance analysis of regression model

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性
模型	23.6200	9	2.6200	18.0500	0.0005	**
<i>A</i>	0.0284	1	0.0284	0.1956	0.6717	不显著
<i>B</i>	0.6172	1	0.6172	4.2400	0.0784	不显著
<i>C</i>	0.3549	1	0.3549	2.4400	0.1622	不显著
<i>AB</i>	0.0559	1	0.0559	0.3846	0.5548	不显著
<i>AC</i>	0.8409	1	0.8409	5.7800	0.0472	*
<i>BC</i>	1.5400	1	1.5400	10.5800	0.0140	*
<i>A</i> ²	4.8300	1	4.8300	33.2000	0.0007	**
<i>B</i> ²	4.5200	1	4.5200	31.1100	0.0008	**
<i>C</i> ²	8.7700	1	8.7700	60.3100	0.0001	**
残余	1.0200	7	0.1454			
失拟	0.6124	3	0.2041	2.0100	0.2547	不显著
总和	24.6400	16				
$R^2=0.9587$; $R^2_{Adj}=0.9056$						

注: **表示差异极显著($P<0.01$); *表示差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 凝胶珠硬度响应面交互作用分析

根据回归方程得到响应面与等高线, 由等高线的形状与稀疏可以看出两因素交互作用对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠硬度的影响强弱, 等高线呈椭圆则影响强, 呈圆形则影响弱^[23]。

图 2A 展示了乳酸钙浓度和固化时间交互作用对凝胶珠硬度的影响, 结果显示, 当固化时间达到最佳值时, 凝胶珠硬度随着乳酸钙浓度的增加趋于稳定; 当乳酸钙浓度达到最佳值时, 凝胶珠硬度随着固化时间的增加趋于稳定, 但乳酸钙浓度的影响程度略低于固化时间, 这表明固化时间对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠硬度的影响更显著, 且等高线呈圆形且稀疏, 说明两者的交互作用对凝胶珠硬度的影响不大。图 2B 展示了乳酸钙浓度和固化温度交互作用对凝胶珠硬度的影响, 当乳酸钙浓度达到最佳值时, 凝胶珠硬度随着固化温度的升高而逐渐降低; 而当固化温度达到最佳值时, 凝胶珠硬度随着乳酸钙浓度的增加而趋于稳定; 这表明固化温度对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠硬度的影响更为显著, 等高线呈椭圆形, 三维图倾斜面较大, 显示两者存在明显的交互作用。图 2C 展示了固化时间和固化温度交互作用对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的影响, 等高线呈椭圆形, 三维图倾斜面较大, 表明两者的交互作用对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的硬度有显著影响。综合响应面图分析结果, 各因素对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠影响作用由大到小依次为: 固化时间(B)、固化温度(C)、乳酸钙浓度(A), 与表 3 回归分析结果一致。

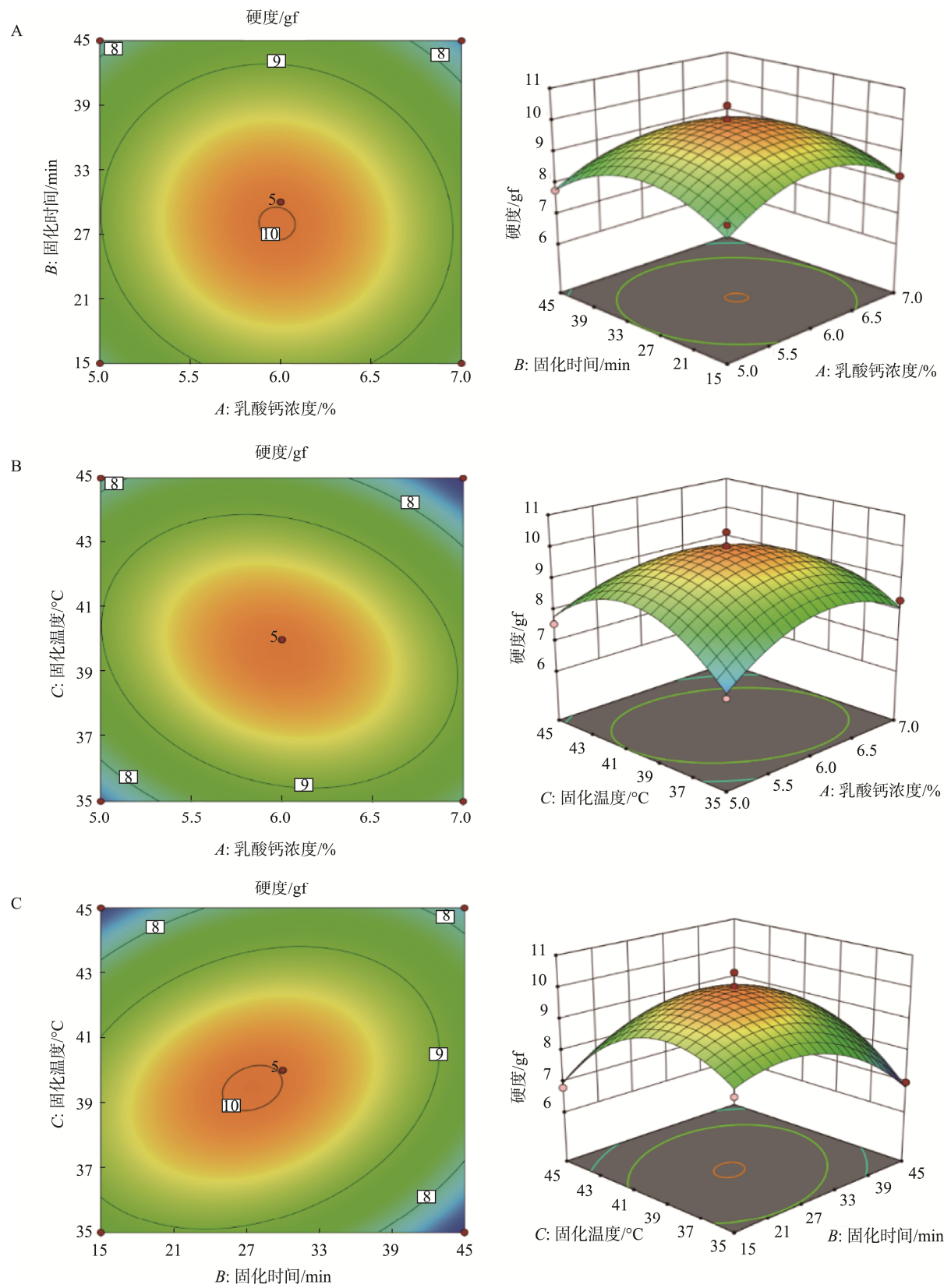


图 2 交互作用对海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠硬度影响的等高线图及响应面
Fig.2 Contour plot and response surface of the interactive effects on the hardness of sodium alginate-egg gel beads

2.2.3 验证实验

通过 Design-Expert 13 软件的优化分析, 确定了制备海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的最佳工艺参数为: 乳酸钙浓度 6.005%、固化时间 27.492 min、固化温度 39.452 °C。在此条件下, 海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的理论硬度为 10.0264 gf。然而, 考虑到实验条件和实际生产需求, 将最佳制备条件进行了调整: 乳酸钙浓度 6%、固化时间 27 min、固化温度 39 °C, 得到凝胶珠实际硬度为 9.9983 gf, 与理论值相差 0.0281 gf, 证明此模型对优化制备海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠工艺可行(图 3)。



图 3 最佳工艺制得的海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠图
Fig.3 Diagram of sodium alginate-egg gel beads prepared by the best process

2.3 全质构分析与含水量分析

本研究对海藻酸钠-鸡蛋混合凝胶珠与海藻酸钠凝胶珠的质构特性(包括内聚性、回复性、硬度、弹性、咀嚼性)及含水量进行了对比分析, 结果见图 4。

海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠与纯海藻酸钠凝胶珠的内聚性、回复性、硬度、弹性与咀嚼性对比结果分别见图 4A~E。海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的内聚性、回复性、硬度、弹性与咀嚼性分别为: 0.6457、0.6627、9.9983 gf、1.0000、3.5975 gf。与纯海藻酸钠凝胶珠相比, 海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠内聚性减小 4.77%, 回复性增加 25.12%, 硬度减小 32.66%, 弹性增加 152.41%, 咀嚼性减少 7.84%, 均表现出显著性差异 ($P<0.05$)。推测原因为超声除去海藻酸钠混合溶液中气泡时, 导致蛋黄中脂蛋白聚集和蛋黄颗粒部分分解离^[24], 热处理后破坏蛋黄蛋白结构, 降低其乳化能力^[25-26], 形成的凝胶网络包含海藻酸钠与鸡蛋蛋白质的交联结构^[27], 降低内聚性与咀嚼性^[28]; 蛋白质部分替代海藻酸钠的羧基后, 影响 Ca^{2+} 交联作用, 降低了混合体系的整体硬度; 鸡蛋中的蛋白质变性后可为混合体系提供额外的韧性与塑性, 且蛋白质分子形成的网络可以增加整体的可逆形变能力, 从而增加其弹性^[29-30]。海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的含水量为 84.56%, 海藻酸钠凝胶珠的含水量为 96.20%, 前者比后者低 11.64%, 这是由于海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠中加入的蛋白质使裸露的羟基数量减少, 在疏水相互作用、氢键、范德华力等多种非共价键结合的情况下^[31], 改变了水分的保持能力, 从而降低凝胶珠的总体含水量。

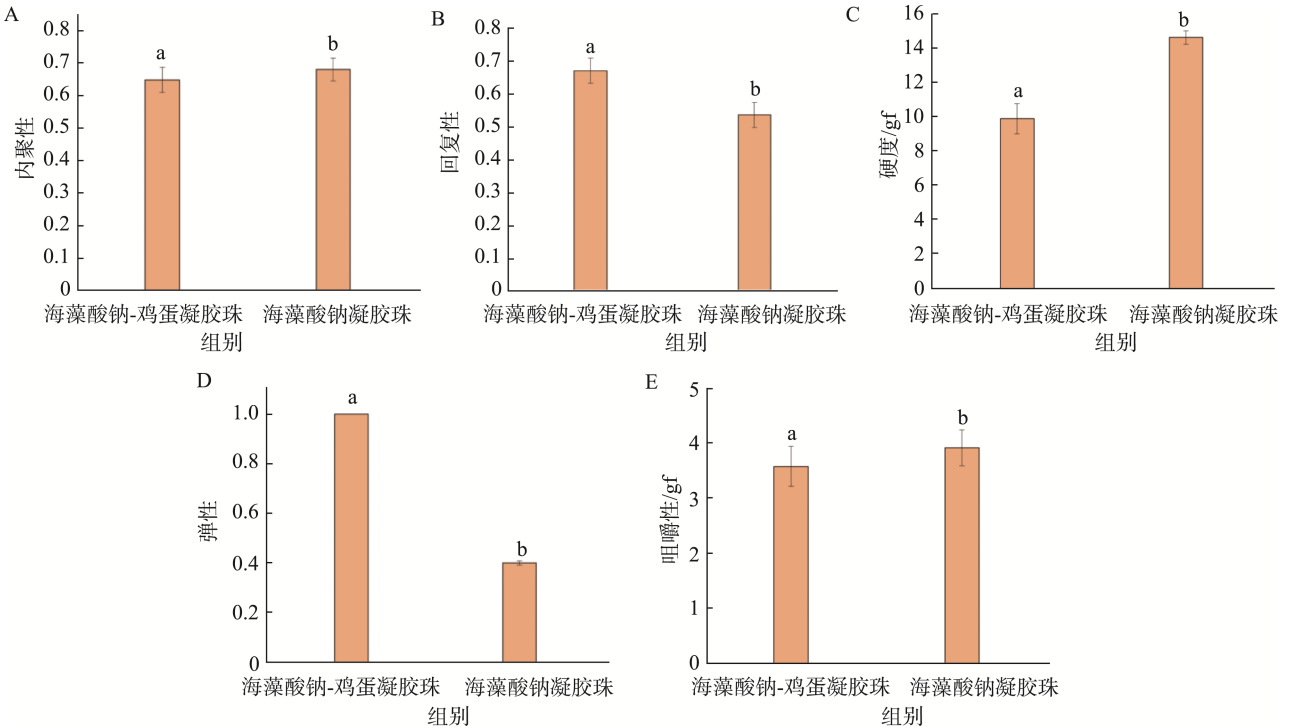


图 4 海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠与纯海藻酸钠凝胶珠质构对比图
Fig.4 Texture comparison plots of sodium alginate-egg gel beads and pure sodium alginate gel beads

3 结 论

本研究通过交联法成功制备了海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠,确定了最优的凝胶珠制备工艺参数为:乳酸钙浓度6%、固化时间为27 min、固化温度为39℃,在此条件下海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠综合性能最佳。本研究不仅优化了海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备工艺,还对比分析了其与纯海藻酸钠凝胶珠的性能差异,为凝胶珠的营养改良和应用提供了科学依据。虽然海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的硬度低于纯海藻酸钠凝胶珠,但其回复性和弹性更为优异,海藻酸钠中添加鸡蛋后提高了凝胶珠的营养价值,还改善了其感官特征,这对于开发新型食品具有重要价值。未来可进一步探索海藻酸钠与鸡蛋的比例对凝胶珠性能的影响,以及凝胶珠在不同食品中的应用潜力。

参考文献

- [1] GHEORGHITA PR, LOBIUC A, DIMIAN MH, *et al.* Alginate: From food industry to biomedical applications and management of metabolic disorders [J]. *Polymers*, 2020, 12(10): 2417.
- [2] 张勉铃,肖建辉,孙超,等.甘薯蛋白水解物对钙离子诱导下海藻酸钠凝胶形成的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(4): 67–81.
ZHANG ML, XIAO JH, SUN C, *et al.* Effect of sweet potato proteolysate on gel formation of sodium alginate induced by calcium ions [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(4): 67–81.
- [3] AZAD AK, SULAIMAN WMAW, ALMOUSTAFA H, *et al.* A dataset of microstructure features of electro-hydrodynamic assisted 5-fluorouracil-grafted alginate microbeads and physicochemical properties for effective colon targeted carriers drug delivery [J]. *Data in Brief*, 2024, 53: 110202.
- [4] HE LL, SHANG ZH, LIU HM, *et al.* Alginate-based platforms for cancer-targeted drug delivery [J]. *BioMed Research International*, 2020, 2020(1): 1487259.
- [5] 王斐吴,许波,王平,等.纤维素/海藻酸钠/明胶复合水凝胶的制备与性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(3): 1–12.
WANG FH, XU B, WANG P, *et al.* Preparation and properties of the cellulose/sodium alginate/gelatin composite hydrogel [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2024, 40(3): 1–12.
- [6] 华冰艳.基于海藻酸钠的智能凝胶材料的制备与应用[D].郑州:河南工业大学,2023.
HUA BY. Preparation and application of smart gel materials based on sodium alginate [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [7] HE MY, WANG CL, XU T, *et al.* Modification and preparation of four natural hydrogels and their application in biopharmaceutical delivery [J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(7): 7101–7144.
- [8] GAO NN, ZHANG Y, YANG ZH, *et al.* Ba²⁺/Ca²⁺ co-crosslinked alginate hydrogel filtration membrane with high strength, high flux and stability for dye/salt separation [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2024, 35(5): 108820.
- [9] URBANOVA M, MACKU J, KUBOVA K, *et al.* Structure, dynamics, and functional properties of hybrid alginate-pectin gels dually cross linked by Ca²⁺ and Zn²⁺ ions designed as a delivery device for self-emulsifying systems for lipophilic phytotherapeutics [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109693.
- [10] 张映萍,杨慧娟,张晋,等.鸡蛋蛋白质凝胶特性影响因素的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 343–347, 356.
ZHANG YP, YANG HJ, ZHANG J, *et al.* Progress on factors affecting protein gel properties in egg [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(6): 343–347, 356.
- [11] 孙爱琦,李倩.维生素A与临床相关疾病的研究进展[J]. *锦州医科大学学报*, 2024, 45(2): 108–112.
SUN AIQ, LI Q. Progress in vitamin A and clinically related diseases [J]. *Journal of Jinzhou Medical University*, 2024, 45(2): 108–112.
- [12] 胡琼越.代谢改造酵母异源合成维生素A(类视黄醇)[D].杭州:浙江大学,2023.
HU QY. Metabolic modification of yeast heterologous synthesis of vitamin A (retinoid) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [13] 吴胜男,兰瑞霞,胡胜兰,等.维生素A对肠道健康的调控机制及其在畜禽生产中的应用研究进展[J]. *饲料工业*, 2023, 44(18): 51–57.
WU SN, LAN RX, HU SL, *et al.* Progress in the regulation mechanism of vitamin A on intestinal health and its application in livestock and poultry production [J]. *Feed Industry*, 2023, 44(18): 51–57.
- [14] WANG YX, YANG XY, LI L. Formation of pH-responsive hydrogel beads and their gel properties: Soybean protein nanofibers and sodium alginate [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 1: 329.
- [15] 王梦南.海藻酸钠香叶醇凝胶珠的制备及在大米储藏中的应用[D].天津:天津科技大学,2022.
WANG MN. Preparation of sodium alginate geraniol gel beads and its application in rice storage [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.
- [16] 包永华,陆芝娟,刘莉,等.响应面设计法优化海藻酸钙凝胶珠制备条件[J]. *食品工业*, 2012, 33(7): 28–30.
BAO YH, LU ZJ, LIU L, *et al.* Optimization of calcium alginate gel bead preparation conditions [J]. *The Food Industry*, 2012, 33(7): 28–30.
- [17] 郑静洁,鲍佳欣,赵煜炜,等.低酯果胶-奶粉凝胶珠的制备工艺优化与质构分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(22): 92–100.
ZHENG JJ, BAO JX, ZHAO YW, *et al.* Preparation process optimization and texture analysis of low ester pectin-milk powder gel beads [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(22): 92–100.
- [18] 侯演林,陈胜慧子,蒲云峰,等.真空冷冻干燥及预处理方法应用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(23): 203–208.
HOU YL, CHEN SHZ, PU YF, *et al.* Progress in the application of vacuum freeze-drying and pretreatment methods [J]. *Food Research and*

- Development, 2023, 44(23): 203–208.
- [19] 温欣, 肖亚冬, 聂梅梅, 等. 基于主成分分析的不同品种蓝莓脆粒品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 208–217.
- WEN X, XIAO YD, NIE MM, *et al.* Comprehensive evaluation of crisp quality of different blueberry varieties based on principal component analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 208–217.
- [20] 郭曼妮, 陈展俊, 吴欣玥, 等. 海藻酸钠含水凝胶球的制备及特性表征[J]. 食品安全导刊, 2021(32): 129–132.
- GUO MN, CHEN ZJ, WU XY, *et al.* Preparation and characterization of sodium alginate [J]. China Food Safety Magazine, 2021(32): 129–132.
- [21] 张根生, 徐旖梦, 遇仕友, 等. 蛋黄凝胶形成机理及影响因素研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 1–5.
- ZHANG GS, XU YM, YU SY, *et al.* Formation mechanism and influencing factors of egg yolk gel [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 1–5.
- [22] 刘祎轩, 宋素芳, 赵鑫龙, 等. 鸡蛋存放温度、方法对鸡蛋营养成分的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(7): 239–242, 248.
- LIU YX, SONG SF, ZHAO XL, *et al.* The influence of egg storage temperature and method on egg nutrient composition [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(7): 239–242, 248.
- [23] 封亚星, 王少锋, 李永新, 等. 响应面法优化鸡肉鳕鱼蔬菜饼配方研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 309–316.
- FENG YX, WANG SF, LI YX, *et al.* Optimization of the formulation for chicken cod and vegetable patties by response surface analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 309–316.
- [24] XIE YX, WANG JQ, WANG Y, *et al.* Effects of high-intensity ultrasonic (HIU) treatment on the functional properties and assemblage structure of egg yolk [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60(C): 104767.
- [25] SUHAG R. Egg yolk, a multifunctional emulsifier: New insights on factors influencing and mechanistic pathways in egg yolk emulsification [J]. Applied Sciences, 2024, 14(21): 1–27.
- [26] HO JH, LEE TA, NAMAI N, *et al.* Thermal processing of liquid egg yolks modulates physio-chemical properties of mayonnaise [J]. Foods, 2022, 11(10): 1–16.
- [27] 周长旭. 鸡蛋热诱导凝胶形成及凝胶特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- ZHOU CX. Egg heat-induced gel formation and gel characteristics [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [28] 杨田, 李凤红, 李鑫, 等. 蛋黄冷冻凝胶化的产生原因及抑制方法的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 39–47.
- YANG T, LI FH, LI X, *et al.* Progress on causes and inhibition methods of yolk cryogination [J]. Food Science, 2024, 45(21): 39–47.
- [29] 葛庆联, 刘茵茵, 马丽娜, 等. 煮制时间对鸡蛋蛋白质特性的影响及相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(7): 171–174.
- GE QL, LIU YY, MA LN, *et al.* Effect of cooking time on egg structure characteristics and correlation analysis [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2021, 49(7): 171–174.
- [30] 罗婷婷, 李晶晶, 胡海玥, 等. 亚麻籽粕蛋白提取工艺优化及蛋白结构和功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 6(10): 1–17.
- LUO TT, LI JJ, HU HY, *et al.* Optimization of meal protein extraction process and protein structure and functional characteristics of flax seed [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 6(10): 1–17.
- [31] LIANG H, LIU N, BAI HY, *et al.* High-performance solar-driven interfacial evaporation through molecular design of antibacterial, biomass-derived hydrogels [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 608(P1): 840–852.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)