

# 鹰嘴豆加工副产物豆汁在植物基奶油的应用

陈家凤\*, 朱云希, 范祖乐, 陈燕纯, 詹楚莲, 秦杰, 杨颖

(广东科贸职业学院餐旅学院, 广东广州 510430)

**摘要:** 由于市面上的动物奶油价格较高并伴随着畜牧业对生态环境的影响, 以及氢化植脂奶油对健康危害的问题, 奶油需要一种更为健康、安全、经济可行的替代方案。该研究利用鹰嘴豆加工副产物豆汁作为原材料, 通过回收煮豆后的剩余豆汁, 以豆汁中蛋白含量为标准, 浓缩处理至其蛋白含量为 2 wt.%。进而考量不同 pH 值和油含量对所制备的奶油的起泡性、稳定性、微观结构、宏观形貌、粘度和硬度的影响。研究发现, pH 值 (pH 值 3.0~8.0) 对奶油的起泡性无显著影响, 但泡沫稳定性和粘度呈先增加后减小趋势, pH 值为 4.0 时达到最高。而随着油含量增加 (0~50 wt.%) 起泡性下降, 但稳定性明显改善, 通过显微镜观察到大量乳滴吸附于气泡表面, 稳定了泡沫结构。当 pH 值为 4.0 且质量分数为 25 wt.% 时经发泡的奶油性状最佳, 此时发泡率为 123.39% (优于动物奶油), 室温放置 6 h 稳定性达 100%。该天然植物基奶油的开发可实现鹰嘴豆加工副产物的再利用, 替代成本较高的动物奶油以及不利于人体健康的氢化植脂奶油。

**关键词:** 鹰嘴豆; 加工副产物; 豆汁; 泡沫; 奶油; 应用

文章编号: 1673-9078(2024)08-98-105

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.1019

## Application of Aquafaba, A Chickpea Processing By-product, in Plant-based Cream

CHEN Jiafeng\*, ZHU Yunxi, FAN Zule, CHEN Yanchun, ZHAN Chulian, QIN Jie, YANG Ying

(Dining and Tourism Academy, Guangdong Polytechnic of Science and Trade, Guangzhou 510430, China)

**Abstract:** Because dairy cream costs relatively high, animal husbandry brings about environmental problems, and the hydrogenated non-dairy cream might cause health impacts, a more healthy, safe, and economical cream product alternative is required. In this study, a chickpea processing by-product, i.e., aquafaba, was recycled after boiling chickpeas and concentrated until its protein concentration reached 2 wt.%. Next, a plant-based cream was prepared and the effects of the pH and oil content on the foamability, stability, microstructure, appearance, viscosity, and hardness of the cream were investigated. It was found that pH (pH value 3.0~8.0) had insignificant influence on the foamability. However, foam stability and viscosity increased then decreased as a function of pH and peaked when pH was 4.0. Besides, foamability decreased with increasing oil content (0~50 wt.%), but foam stability was remarkably improved. Furthermore, microscopic observations showed a large number of emulsion droplets absorbed on the bubble surface, thereby stabilizing the foam structure. The quality of the prepared plant-based cream was optimal when pH and  $\phi$  were 4.0 and 25 wt.%, respectively. Under these conditions, the foamability was 123.39% (better than dairy cream) and the stability was maintained at 100% after standing

引文格式:

陈家凤,朱云希,范祖乐,等.鹰嘴豆加工副产物豆汁在植物基奶油的应用[J].现代食品科技,2024,40(8):98-105.

CHEN Jiafeng, ZHU Yunxi, FAN Zule, et al. Application of aquafaba, a chickpea processing by-product, in plant-based cream [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 98-105.

收稿日期: 2023-08-29

基金项目: 广东省科技创新战略专项资金(大学生科技创新培育)项目(pdjh2022b0873); 广东省普通高校特色创新项目(2023KTSCX277)

作者简介: 陈家凤(1993-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 蛋白质加工与利用, E-mail: jiafeng-chen@outlook.com

for 6 h at room temperature. The innovative development of this natural plant-based cream can realize the reutilization of chickpea processing by-products, and plant-based cream may become an ideal substitute for high-cost dairy cream and unhealthy hydrogenated non-dairy cream.

**Key words:** chickpea; by-product; aquafaba; foam; cream; application

随着奶茶、咖啡和烘焙食品的快速崛起，奶油在中国市场的规模日益扩大。然而，由于市面上的动物奶油价格较高并伴随着畜牧业对生态环境的影响，以及氢化植脂奶油对健康危害的问题<sup>[1]</sup>，奶油产品急需一种更为健康、安全、经济可行的替代方案。近年来，“植物基食品”成为了研究热点之一，它是指制备原料来源于纯天然植物，不含动物源食品或人工添加剂的新型食品<sup>[2]</sup>；植物基泡沫奶油便是其发展方向之一。

泡沫奶油的制备是通过搅打充气，促使部分脂肪聚结形成脂肪桥粘进而形成具有一定刚性的网络结构并截留气泡<sup>[3,4]</sup>。然而气泡易发生奥氏熟化，会导致所形成的网络结构崩溃<sup>[5]</sup>。目前大部分泡沫奶油需要添加合成表面活性剂（如蔗糖酯<sup>[6]</sup>、单甘酯<sup>[7]</sup>、硬脂酰乳酸钠、吐温、司盘等<sup>[8]</sup>）来稳定网络结构。关于采用天然植物原料制备植物基泡沫奶油的研究较少，如 Patel 等<sup>[9]</sup>使用单宁酸和葵花籽油制备了起泡性和稳定性均良好的泡沫奶油，但单宁酸较为苦涩，消费者难以接受。曾丽华等<sup>[3]</sup>使用玉米蛋白肽/植酸复合物、柑橘纤维和椰子油制备了植物基泡沫奶油，该奶油具有较好的粘弹性和可塑性。Fu 等<sup>[10]</sup>使用了大豆蛋白肽和椰子油，但该奶油起泡性较差，蛋白肽也有苦涩味和不良风味。

鹰嘴豆是世界第三大产量的食用豆类，市面上鹰嘴豆食品众多<sup>[11]</sup>。生产上，大部分鹰嘴豆食品涉及熬制煮熟工序，通常物料比为 1:2~1:6（鹰嘴豆与水质比）<sup>[12,13]</sup>，这导致大量加工副产物豆汁的产生，加重了废水处理成本，也不利于生态维护和可持续发展。近年研究表明，该豆汁中含有可溶性蛋白（主要为清蛋白和球蛋白）<sup>[14]</sup>、多糖（主要为淀粉、果胶和不溶性纤维）<sup>[15,16]</sup>和少量皂甙<sup>[17]</sup>，具有良好的界面活性和界面稳定性<sup>[18]</sup>。若能加以利用，将有助于解决鹰嘴豆加工产生的不良影响，增加产品附加值。

本研究拟利用鹰嘴豆加工副产物豆汁的良好界面特性，制备一款绿色天然、性状良好的植物基泡沫奶油。通过调节 pH 值和含油量，以蛋白含量为标准，对收集的豆汁品质进行标准化处理，并考察所制备的泡沫奶油的起泡性、泡沫稳定性、表观形

态、微观结构、粘度与硬度特性，对比市面上的动物奶油，提出最优的制备方案。该植物基泡沫奶油的开发可实现鹰嘴豆加工副产物的再利用与可持续发展，迎合食品工业对绿色生态与健康饮食的双重追求。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

鹰嘴豆，购于河北涞水县金谷粮油食品有限公司；葵花籽油，购于上海佳格食品有限公司；鹰嘴豆罐头，购于上海莫利食品有限公司；动物奶油，购于青岛雀巢有限公司；Folin- 酚蛋白定量试剂盒，购于北京鼎国昌盛生物技术有限责任公司；柠檬酸、碳酸钠，购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。所有试剂均为分析纯或食品级。

### 1.2 仪器与设备

TA.XTC-18 质构仪，上海保圣实业发展有限公司；P4 紫外可见光分光光度计，上海美谱达；PH100 数码显微镜，凤凰光学股份有限公司；NDJ-8S 数显旋转粘度计，上海力辰仪器科技有限公司；pHSJ-5T pH 计，上海仪电（集团）有限公司；FJ200-SH 高速分散机，上海沪析实业有限公司；T10 小型高速分散均质机，德国 IKA 集团。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 鹰嘴豆豆汁的制备

称量一定量的生鹰嘴豆，按料液比 1:3 (g/g) 加入蒸馏水，加热煮沸，直至最终料液比为 1:1 (g/g)。采用 400 目纱布过滤，获取上清液。

#### 1.3.2 蛋白含量的测定

根据 Lowry 法<sup>[19]</sup>测定豆汁中的蛋白含量。以牛血清白蛋白 (BSA) 为标准物，采用 Folin- 酚蛋白定量试剂盒测定标准曲线为  $y=1.0457x+0.0141$ ， $R^2=0.9985$ 。取 20  $\mu\text{L}$  样品加入 10 mL 蒸馏水中，震荡混匀后进行测定，每个样品平行三次。

#### 1.3.3 泡沫奶油的制备

称取一定量豆汁，使用 2 mol/L 柠檬酸溶液或

2 mol/L 碳酸钠溶液分别调节样品 pH 值至 3.0~8.0, 再加入 0~50 wt.% 植物油, 采用高速分散机进行打发 (5 400×g, 5 min), 由此制备泡沫奶油样品。

### 1.3.4 起泡性及泡沫稳定性的表征

采用统一规格为  $\Phi 40 \times 100$  mm 平底玻璃试管进行试验, 每个样品总量均为 20 g, 根据 1.3.3 方法制备样品, 记录样品打发前高度为  $h_0$ , 打发后即时高度为  $h_1$ 。随后用保鲜膜进行密封, 室温静置 6 h, 对静置过程中的样品进行拍照并测定泡沫高度, 记录为  $h_t$ 。按式 (1) 计算样品的起泡性 ( $F$ ), 式 (2) 计算放置时长为  $t$  的泡沫稳定性 ( $S$ )。

$$F = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \frac{h_t - h_1}{h_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$F$ —样品的起泡性, %;

$h_0$ —样品打发前高度, cm;

$h_1$ —打发后高度, cm;

$S$ —样品的泡沫稳定性, %;

$h_t$ —放置时长为  $t$  时的泡沫高度, cm。

### 1.3.5 粘度的表征

采用数显粘度计测定新鲜样品粘度, 选用 S3 型号转子, 在相同温度 (约 25 °C) 和剪切速度 (30 r/min) 条件下测定样品粘度, 每个样品平行三次。

### 1.3.6 微观结构及粒度的表征

采用智能一体液晶数码显微镜在明场条件下对新鲜样品微观结构进行观察并拍照记录。采用 ImageJ 2.0 软件对图像进行分析处理, 每种新鲜样品采集不少于 60 个气泡数据, 通过软件获得平均粒度。

### 1.3.7 质构性质的表征

测定新鲜样品的质构性质, 选用 TA/2 圆柱形探头 ( $\Phi=20$  mm), 测试前速度设定为 1 mm/s, 测试速度为 1 mm/s, 测试后速度为 1 mm/s, 测试距离为 20 mm, 每个样品平行三次。

### 1.3.8 感官评价的测定

感官评价测试员由受过感官评价基础训练的 5 名男生和 5 名女生组成 (年龄 20~40 岁)。样品均为新鲜制备, 1 为最低分, 5 为最高分, 具体感官评价指标与评分标准如表 1 所示。

表 1 奶油的感官评价标准

Table 1 Standard of sensory evaluation of cream

感官指标	品质特性
外观	具有良好可塑性, 色泽洁白, 无颗粒感 (最高 5 分)
风味	具有良好风味, 喜爱度高 (最高 5 分)
细腻感	组织纹理均匀细腻, 口感细腻绵滑, 不粗糙 (最高 5 分)
油腻感	口感油腻, 粘稠, 不清爽 (最高 5 分)
入口即化感	口感顺滑, 入口即溶, 不需咀嚼 (最高 5 分)

## 1.4 数据处理

试验样品测定均独立进行 3 次及以上重复。通过 SPSS 19.0 软件进行数据的方差分析 (ANOVA), 采用 Duncan 检验对多组样本间进行显著性分析 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 值对泡沫奶油的影响

模拟鹰嘴豆煮豆过程, 并使用煮豆后的豆汁副产物制备天然植物基泡沫奶油。首先, 采用 75 wt.% 豆汁和 25 wt.% 植物油混合, 经高速剪切发泡, 考察 pH 值对泡沫奶油的起泡性、泡沫稳定性、表现形态和粘度的影响。

如图 1 所示, 泡沫奶油的起泡性在 pH 值为 3.0~8.0 范围无显著性影响, 均值为 121.48%。将经打发的泡沫奶油在室温下 (约 25 °C) 静置, 探究不同 pH 值条件下泡沫奶油的稳定性。结果如图 1b 和 1c, 不同 pH 值的奶油其泡沫稳定性存在显著差异。在偏酸性条件下, 泡沫奶油的稳定性较为良好; pH 值为 4.0 和 5.0 的奶油经 6 h 室温静置仍保持 100% 的泡沫稳定性, 未观察到消泡、粗化、析水或析油等不良现象。pH 值为 3.0 和 6.0 的奶油放置 4 h 后仍保持 100% 泡沫稳定性, 放置 6 h 后出现轻微消泡和泡沫粗化现象。对于中性及偏碱性的奶油 (pH 值为 7.0~8.0), 泡沫稳定性则出现明显弱化。静置 0.5 h 后, pH 值为 8.0 的奶油出现明显泡沫粗化, 泡沫稳定性降至 72.81%; 静置 1 h 后, pH 值为 7.0 的奶油同样出现泡沫粗化, 泡沫稳定性为 83.14%, 而此时 pH 值为 8.0 的奶油则明显消泡, 仅有 12.83% 泡沫剩余量; 静置 6 h 后, pH 值为 7.0 和 8.0 的奶油均已基本完全消泡, 分别为 8.60% 和 5.62% 泡沫剩余量。

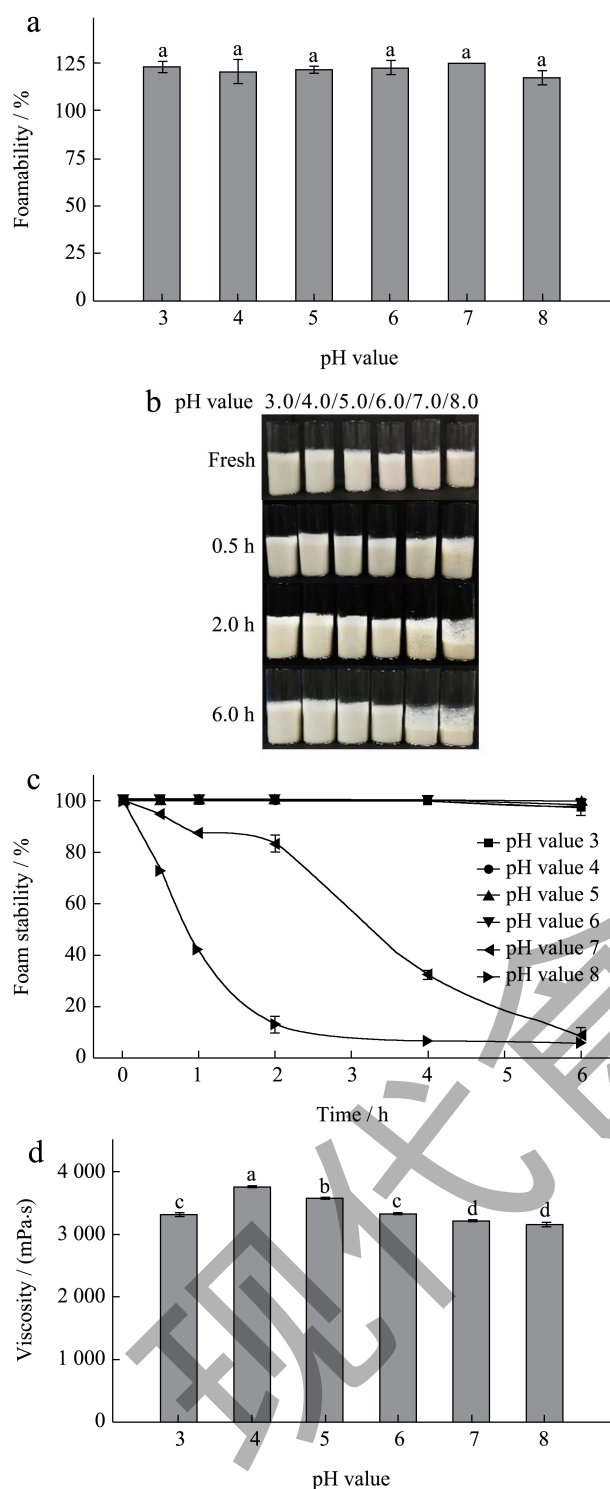


图1 不同pH值对起泡性(a)、表现形态(b)、泡沫稳定性(c)和粘度(d)的影响

Fig.1 Effects of different pH conditions on foaming capacity (a), appearance (b), foam stability (c) and viscosity (d)

注：图中不同小写字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

粘度是泡沫奶油稳定性的重要影响因素，通过测定奶油的粘度可进一步分析其稳定性变化的

原因。由图1d可知，pH值为4.0时泡沫奶油的粘度达到最大值，为3 741.33 mPa·s，其次是pH值为5.0的奶油，粘度为3 569.33 mPa·s。这可能与鹰嘴豆蛋白的等电点 ( $pI \approx 4.3$ ) 有关<sup>[20]</sup>，当pH值接近pI时，蛋白分子间的静电斥力减弱，而疏水作用力、范德华力、 $\Pi-\Pi$ 堆积等相互作用力使得蛋白分子间相互缠绕、紧密结合，宏观上可体现为体系粘度增加<sup>[21]</sup>。而粘度的增加则进一步减弱体系中分子的布朗运动速率，由此减小气泡聚合的概率以及气泡间的排液速率，延缓气-液界面薄膜变薄的过程，因此泡沫奶油的稳定性得以改善<sup>[22]</sup>。当pH值偏离pI时，可以看到泡沫奶油的粘度呈下降趋势，且pH值在7.0~8.0范围的减少程度更为明显。这可能是由于豆汁中不仅含有蛋白，还含有一些阴离子多糖（例如果胶）和皂素等负电成分<sup>[15-17]</sup>。当pH值  $> pI$  时蛋白为负电，静电斥力使得体系中的分子更倾向于独立分散，分子间相互缠绕的趋势减弱使得体系粘度明显下降，由此导致了奶油的泡沫稳定性在pH值为7.0~8.0范围明显变差（图1b和图1c）。

基于泡沫奶油在pH值为4.0条件下表现出较好的起泡性和泡沫稳定性，选用该pH值条件进行后续实验探究。

## 2.2 油含量对泡沫奶油的影响

### 2.2.1 起泡性和泡沫稳定性

泡沫奶油中油相质量分数 ( $\varphi$ ，反映油脂含量) 是影响奶油性状的关键指标，与最终产品的成本、外观、稳定性和理化性质（质构、口感等）等密切相关<sup>[23,24]</sup>。Quemada等<sup>[25]</sup>提出，当 $\varphi < 5$  wt.%时由于乳滴间距过大使得相互作用较弱，体系因此具有良好的流动性；当 $\varphi = 5$  wt.%~49 wt.%时，乳滴间则存在较强的相互作用且具有一定流动性，该条件适用于制备可充气乳状液产品，如泡沫奶油；当 $\varphi > 50$  wt.%时，由于体系中的乳滴过于紧密堆积使得体系失去流动性，难以打泡充气。基于此，本实验关于探究油含量对泡沫奶油的影响设定的研究范围为 $\varphi = 0 \sim 50$  wt.%。

首先观察油含量对泡沫奶油宏观性状的影响，如图2a所示，随着 $\varphi$ 增加奶油的起泡性显著减弱，由179.55% ( $\varphi = 0$  wt.%) 下降至14.09% ( $\varphi = 50$  wt.%)。此变化趋势与其他相关报道相一致<sup>[3,26]</sup>，推测是由于油脂具有消泡作用，抑制了豆汁的起泡性。随后

将经打发的泡沫奶油在室温静置, 观察不同油含量的泡沫奶油样品的泡沫稳定性 (图 2b 和 2c)。可以看到, 不添加植物油的豆汁样品 ( $\varphi=0$  wt.%) 其泡沫稳定性较差, 放置 0.5 h 已出现明显析水。随着静置时间延长, 泡沫进一步排水, 气-水界面薄膜变薄, 气泡变得不稳定, 发生气泡歧化、聚合, 宏观上表现为泡沫逐渐粗化、消失。当泡沫过大时 (静置 6 h 后) 由于光散射效应变差, 该样品泡沫层显现出豆汁原本的黄褐色, 此时稳定性为 74.00%。增加油含量 ( $\varphi=5$  wt.%~15 wt.%) 使得泡沫奶油稳定性得到改善, 相同时间下排水速率、泡沫粗化和消泡速率均有所延缓。当  $\varphi \geq 25$  wt.% 时泡沫奶油稳定性良好, 室温静置 6 h 后宏观上无显著性差异, 稳定性达 100%。由此可知, 尽管油含量的增加在一定程度上降低了奶油的起泡性, 但可以显著增强其泡沫的稳定性。Broode 等<sup>[27]</sup> 提出, 奶油泡沫结构的形成取决于乳滴部分的聚结作用。在搅打过程中, 一方面由于能量的注入促使乳滴加快吸附到气泡表面, 另一方面搅动导致部分乳滴失稳、聚结, 此时溢出的少量油脂将扩散到其他稳定的乳滴表面, 促使乳滴间发生相互桥联, 加强了气泡表面乳滴间的相互连接, 由此增强了泡沫奶油的稳定性<sup>[28]</sup>。

### 2.2.2 微观结构和平均粒度

样品的宏观性状由其微结构决定。通过显微镜观察鲜制泡沫奶油的微结构, 如图 3 所示, 不添加油脂的样品 ( $\varphi=0$  wt.%) 在显微镜下观察到气泡逐渐聚合, 体积增大, 说明其泡沫较不稳定。添加 5 wt.% 油含量的泡沫奶油在显微镜观察过程中未看到泡沫聚合现象, 泡沫多而均匀, 平均粒度为 9.07  $\mu\text{m}$ 。随着油含量增加 ( $\varphi=15$  wt.%~50 wt.%), 泡沫平均粒度从 9.51  $\mu\text{m}$  逐渐增加至 19.21  $\mu\text{m}$ , 且粒度差异逐渐增大 (图 4)。这可能是由于油脂的添加使得液体体系的粘度增加, 导致打发效果变差, 气泡即使被充入液体体系中也难以充分分散。

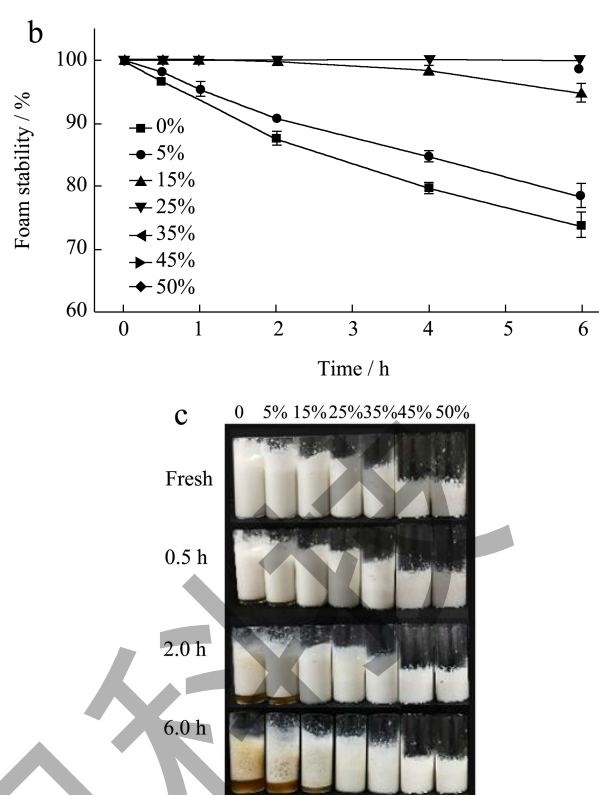
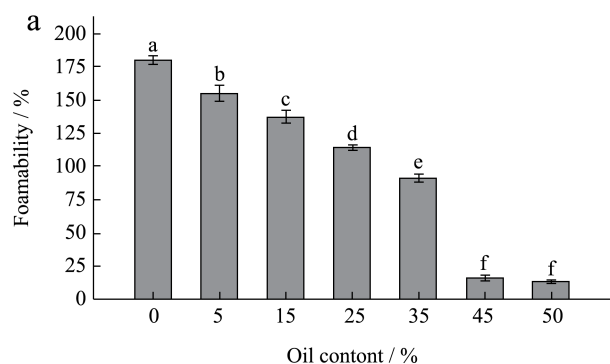


图 2 不同含油量对起泡性 (a)、泡沫稳定性 (b) 和表现形态 (c) 的影响  
Fig.2 Effects of different oil contents on foaming capacity (a), foam stability (b) and appearance (c)

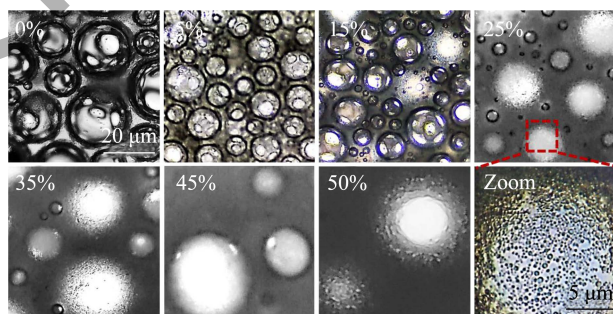


图 3 不同含油量对微观结构的影响  
Fig.3 Effects of different oil contents on microstructure

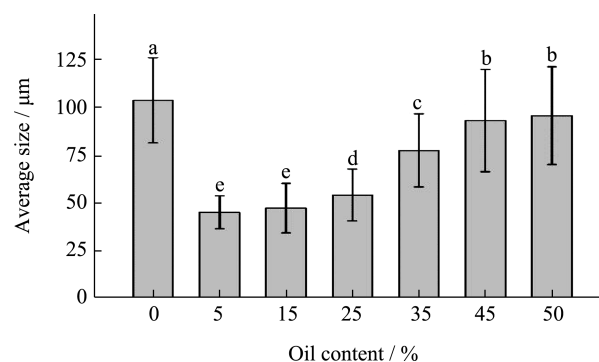


图 4 不同含油量对平均粒度的影响  
Fig.4 Effects of different oil contents on average size

聚焦单个气泡观察其表面微结构, 可以看到大量乳滴聚结在气泡表面起到稳定气-水界面的作用, 同时乳滴粒度较小, 约为 1 μm (图 3)。这说明了豆汁具有良好的气-水界面和油-水界面活性<sup>[3]</sup>, 能同时稳定该两种界面促使泡沫奶油成功制备。

### 2.2.3 粘度和硬度

粘度和硬度是评价泡沫奶油口感的重要物性指标。图 5a 显示了经打发的不同油含量的泡沫奶油的粘度, 可以看到随着油含量  $\phi$  从 0 wt.% 增加到 25wt.%, 泡沫奶油的粘度明显增大, 从 3 479.67 mPa·s 增加至 3 822.03 mPa·s; 进一步增加油含量 ( $\phi \geq 25$  wt.%) 则对粘度无显著影响。此外, 粘度的变化与泡沫稳定性的变化趋势一致, 说明粘度是影响泡沫稳定性的主要因素。图 5b 反映泡沫奶油的硬度大小, 随着油含量增加, 泡沫奶油的硬度呈现先增加后减弱的趋势, 当  $\phi=25$  wt.%~45 wt.% 时硬度达到最大, 为 1.75 g ( $P < 0.05$ )。这可能是由于添加一定量的油脂有利于乳滴聚结并在气-水界面形成稳定的吸附层, 由此形成具有一定刚性的气泡骨架。但是当添加过量油脂 ( $\phi=50$  wt.%) 时, 过多的油脂反而抑制了气泡的填充, 因此影响了体系整体的刚性结构<sup>[29]</sup>。

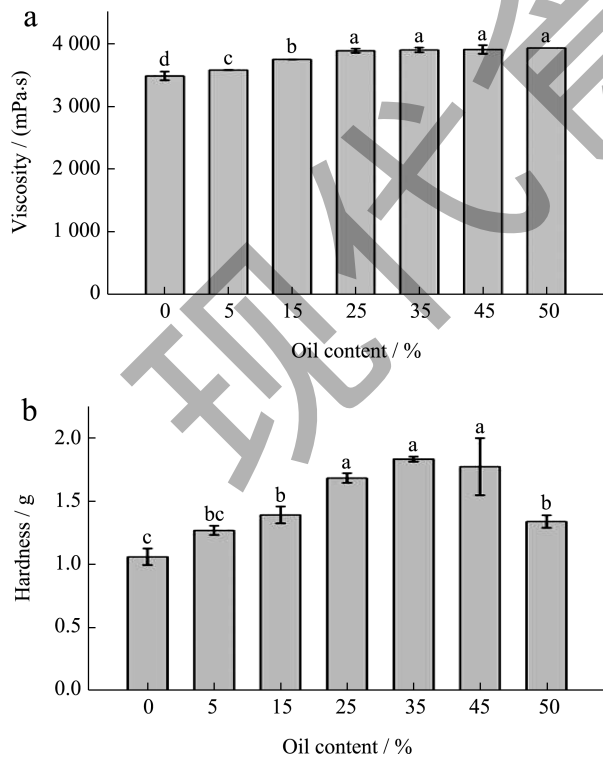


图 5 不同含油量对粘度 (a) 和硬度 (b) 的影响  
Fig.5 Effects of different oil contents on viscosity (a) and hardness (b)

基于起泡性、稳定性、粘度、硬度和膳食健康等综合因素考量, 选用油脂添加量为 25 wt.% 的制备方法来制作新型天然植物基泡沫奶油。

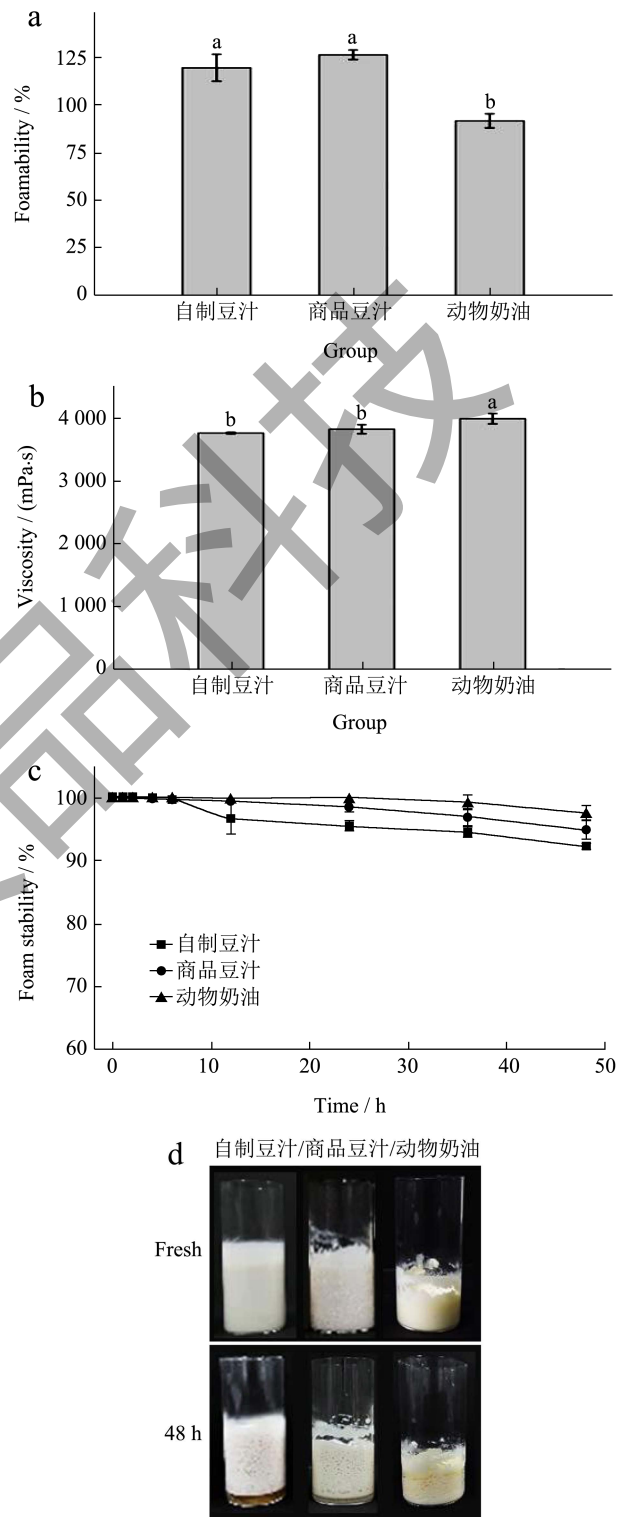


图 6 自制豆汁、商品豆汁制备的植物基奶油与动物奶油的起泡性 (a)、粘度 (b)、泡沫稳定性 (c) 和表观形态 (d)  
Fig.6 Foamability (a), viscosity (b), foam stability (c) and appearance (d) of plant-based cream prepared with self-produced or commercial aquafaba and dairy cream

### 2.3 自制豆汁、商品豆汁和动物奶油的比较分析

由于鹰嘴豆食品的生产较多涉及煮豆工序，导致大量豆汁副产物产生。本研究主要目的在于开发豆汁副产物的用途，变废为宝。基于上述研究使用的均为自制豆汁，为验证相关企业在生产过程中所产生的豆汁废料是否也能达到相同的发泡效果，通过采购市面上常见的鹰嘴豆罐头并收集当中汁液进行分析；同时也购买了雀巢公司的动物奶油，用来比较本研究所制备的泡沫奶油与动物奶油之间的品质差异。

表 2 自制豆汁、商品豆汁制备的植物基奶油与动物奶油的感官评价

Table 2 Sensory evaluation of plant-based cream prepared with self-produced or commercial aquafaba and dairy cream

感官指标	自制豆汁	商品豆汁	动物奶油
外观	3.30 ± 1.06 <sup>a</sup>	3.20 ± 0.79 <sup>a</sup>	3.50 ± 0.53 <sup>a</sup>
风味	3.60 ± 1.26 <sup>a</sup>	3.30 ± 0.95 <sup>a</sup>	3.20 ± 0.92 <sup>a</sup>
细腻感	4.00 ± 1.05 <sup>a</sup>	3.60 ± 0.70 <sup>a</sup>	4.20 ± 0.63 <sup>a</sup>
油腻感	2.60 ± 0.84 <sup>b</sup>	2.90 ± 0.74 <sup>b</sup>	4.10 ± 1.20 <sup>a</sup>
入口即化感	4.20 ± 1.03 <sup>a</sup>	3.80 ± 0.79 <sup>a</sup>	3.30 ± 1.42 <sup>a</sup>

注：同行不同上标小写字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

为了使自制豆汁和商品豆汁副产物所制备的泡沫奶油具有可比性，鉴于蛋白质是豆汁的主要组分而且是豆汁具有良好界面活性的主要因素，以豆汁中的蛋白质含量作为标准，通过测定自制豆汁的蛋白含量 (2.01wt.%) 并对商品豆汁副产物进行标准化处理，浓缩商品豆汁使两者蛋白含量相等。进而，使用经标准化的蛋白含量相同的自制豆汁和商品豆汁制备植物基泡沫奶油，并以动物奶油作为对照，如图 6 所示。在起泡性能方面，自制豆汁和商品豆汁制备的泡沫奶油的起泡性无明显差异，为 123.39%；而动物奶油的起泡性稍低，为 92.11% (图 6a)。动物奶油的较低起泡性可能与其较高的粘度有关，相较于自制豆汁和商品豆汁，动物奶油在搅打发泡前的质地更为粘稠，使得相同搅打功率下被搅动的强度明显较弱。

泡沫奶油较多用于奶盖、奶霜、蛋糕裱花等即食食品中，通常放置时间较短。上述实验结果已表明短时间内 (6 h) 使用自制豆汁制备的泡沫奶油具有较好的稳定性，本研究为了更好体现自制豆汁、商品豆汁制备的泡沫奶油与动物奶油之间的稳定性差异，将该实验的贮藏时间延长至 48 h。由图 6c 可

知，当静置时间为 6 h，三种样品的泡沫均无明显变化，泡沫稳定性保持 100%。放置 24 h 后，泡沫稳定性发生较小变化，其中商品豆汁制备的泡沫奶油的稳定性下降至 98.47%。与曾丽华等<sup>[3]</sup>研究结果相比较，其使用了玉米蛋白肽 / 植酸复合物、柑橘纤维和 30% 植物油制备的植物基泡沫奶油起泡性为 100%，放置 24 h 无明显消泡现象；而本研究所制备的泡沫奶油 (pH 值 4.0,  $\phi=25$  wt.%) 的起泡性略优 (123.39%)，稳定性相近 (98.47%, 24 h)。放置 48 h 后，动物奶油的泡沫稳定性最优，其次是商品豆汁和自制豆汁制备的泡沫奶油。从宏观上看，经 48 h 静置后，自制豆汁和商品豆汁制备的泡沫奶油均出现少量析水和泡沫粗化现象。值得注意的是，相较于自制豆汁，商品豆汁的颜色明显较浅，猜测是企业在煮豆工序中加入了一定量的抗氧化剂，抑制褐变。对于动物奶油，尽管其消泡程度较弱，但从宏观形态上也观察到了明显的泡沫粗化。

对自制豆汁和商品豆汁制备的泡沫奶油进行感官评价，并与动物奶油作对比，结果如表 2 所示。三者在外观、风味、细腻感、入口即化感方面评分接近，无显著性差异。但是采用自制豆汁和商品豆汁制备的泡沫奶油口感更为清爽，油腻感明显低于动物奶油。这可能是由于前者含有的泡沫更多且黏度更低赋予了它们更佳的口感体验 (图 6)。

综上，使用自制豆汁和商品豆汁制备的泡沫奶油性质较为接近，品质良好，口感较佳。这说明了回收相关食品企业的豆汁副产物，经相同标准浓缩处理后，可用于制备新型天然植物基泡沫奶油产品。

### 3 结论

本研究以鹰嘴豆食品生产过程中所产生的副产物豆汁为原材料，利用豆汁良好的界面特性，制备了天然植物基泡沫奶油。经测定，所用豆汁的蛋白含量为 2 wt.%，通过调节 pH 值至 4.0 同时添加 25 wt.% 植物油进行打发，可获得发泡性优于动物奶油 (123.39%)，泡沫稳定性 (100%) 大于 6 h，粘度和硬度分别为 3 741.33 mPa·s 和 1.75 g 的性状良好的泡沫奶油产品。该天然植物基奶油的开发可实现鹰嘴豆加工副产物的再利用，替代成本较高的动物奶油以及不利于人体健康的氢化植脂奶油。

### 参考文献

- [1] 刘莹.花生油体在搅打稀奶油中的应用研究[D].泰安:山东农业大学,2023.

- [2] 中国食品科学技术学会植物基食品分会.植物基食品的科学共识(2022年版)[J].中国食品学报, 2022,22(10):450-457.
- [3] 曾丽华,阮奇珺,王金梅,等.基于玉米肽-植酸复合物和柑橘纤维的泡沫乳液的制备及其性质[J].现代食品科技,2019,35(1):121-128.
- [4] 严靖,孙沁海,冯琴.反式脂肪酸对血脂代谢异常相关疾病的危害及机制[J].医学综述,2021,27(11):2119-2123.
- [5] BINKS B P, HOROZOV T S. Colloidal Particles at Liquid Interfaces [M]. Cambridge University Press, 2006.
- [6] JIANG J, JIN Y, LIANG X, et al. Synergetic interfacial adsorption of protein and low-molecular-weight emulsifiers in aerated emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 15-22.
- [7] BLANKART M, KRATZNER C, LINK K, et al. Technical emulsifiers in aerosol whipping cream-compositional variations in the emulsifier affecting emulsion and foam properties [J]. International Dairy Journal, 2020, 102: 104578.
- [8] 王琳.乳化剂对大豆蛋白搅打稀奶油品质的影响及其机理研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [9] PATEL A R, DROST E, BLIJDENSTEIN T B J, et al. Stable and temperature-responsive surfactant-free foamulsions with high oil-volume fraction [J]. Chem Phys Chem, 2012, 13(17): 3777-3781
- [10] FU L W, HE Z Y, ZENG M M, et al. Effects of soy protein composition in recombined soy-based cream on the stability and physical properties of whipping cream [J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 2020, 100: 2732-2741.
- [11] 肖瑶.鹰嘴豆复合豆奶粉的研制及营养评价[D].天津:天津科技大学,2020.
- [12] 杨海燕.风味鹰嘴豆软罐头加工工艺的研究[J].食品工业科技,2008,12:166-167.
- [13] SUMMO C, ANGELIS D, ROCHETTE I, et al. Influence of the preparation process on the chemical composition and nutritional value of canned puree of kabuli and apulian black chickpeas [J]. Heliyon, 2019, 5(3): e01361.
- [14] 李学红,郝楠楠,张露,等.萌芽处理对鹰嘴豆蛋白组分及界面性质的影响[J].中国粮油学报,2021,36(8):15-22.
- [15] 栗俊广,马旭阳,姜茜.鹰嘴豆膳食纤维的乳化性能研究[J].食品与发酵工业,2022,48(19):108-114.
- [16] ALSALMAN F, RAMASWAMY H. Changes in carbohydrate quality of high-pressure treated aqueous aquafaba [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106417.
- [17] SERVENTI L, GAOC, CHEN M, et al. Cooking Water Functional Properties [M]// Upcycling Legume Water: from wastewater to food ingredients. Springer, London, 2020: 87-103.
- [18] EREN E, CIHAT N, TATLISU N, et al. A new trend among plant-based food ingredients in food processing technology: aquafaba [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(20): 4467-4484.
- [19] LOWRY O H, ROSEBROUGH N, FARR A, et al. Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, 193(1): 265-75.
- [20] BOYE J I, AKSAY S, ROUFIK S, et al. Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 537-546.
- [21] 陈霞,周文娟,陆丹丹,等.菊粉替代稀奶油对益生菌慕斯质构及流变特性的影响[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2019,40(6):61-66.
- [22] 占福朝.酪蛋白酸钠基泡沫体系的调控及其机理研究[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [23] 陈雨杭.油脂结晶影响可充气乳状液稳定性的研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [24] 焦文娟.脂肪晶体结构对脂肪结晶乳液消化性能的影响及机理研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [25] QUEMADA D, BERLI C. Energy of interaction in colloids and its implications in rheological modeling [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2002, 98(1): 51-85.
- [26] 刘苑.脂肪结晶颗粒的气-水界面组装行为研究及其水基 Pickering泡沫体系的构建[D].广州:华南理工大学,2022.
- [27] BOODE K, WALSTRA P. Partial coalescence in oil-in-water emulsions 1. nature of the aggregation [J]. Colloids and Surfaces A, 1993, 81(13): 121-137.
- [28] 刘平利.油脂结晶特性影响植脂奶油品质的作用机制研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [29] 彭方帅.MFGM/MFGMP及加工条件对搅打奶油品质特性的影响[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.