

大豆-坚果奶酪类似物的制备及其性质研究

陈斗艺¹, 邱晓敏², 林美云², 郑倩望¹, 叶志伟¹, 郭丽琼¹, 林俊芳¹, 邹苑^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 汕头市华乐福食品有限公司, 广东汕头 515825)

摘要: 该研究采用大豆乳、腰果乳及巴旦木蛋白为原料制备一种奶酪类似物, 目的是确定最佳工艺配方以制备出高品质的大豆-坚果奶酪类似物, 然后评价其理化性质、感官特性、储藏稳定性和消化特性。研究结果显示: 具有最佳品质的大豆-坚果奶酪类似物基本配方为(皆为质量分数): 腰果乳 50.00%, 大豆乳 50.00%; 并以植物乳质量为基准, 依次添加植物油 3.09% (椰子油与葵花籽油比例为 7:3)、巴旦木蛋白 2.01%、TG 酶 0.33%、柠檬酸 0.10%、乳酸 0.10%; 以凝乳质量为基准, 添加胶体 1.08%、蔗糖 4.00%。大豆-坚果奶酪类似物硬度值 0.88 N、整体感官评分 7.71 分, 可以与商品化动物奶酪相媲美。此外, 随着储藏时间增加其硬度值从 0.94 N 增加到 1.15 N, 无明显变硬和析水现象。体外消化结果显示其蛋白电泳条带在肠道消化 180 min 后全部消失, 游离脂肪酸释放速率为 60%。因此, 制备的大豆-坚果奶酪类似物营养价值高, 具有较佳的感官品质, 储藏稳定性好且蛋白易于消化, 能够作为动物奶酪的替代物以满足人们对奶酪的需求。

关键词: 大豆; 坚果; 奶酪类似物; 质构; 感官评定

文章编号: 1673-9078(2024)04-177-185

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.4.0430

Preparation and Properties of Soybean-nut Cheese Analogs

CHEN Douyi¹, QIU Xiaomin², LIN Meiyun², ZHENG Qianwang¹, YE Zhiwei¹,

GUO Liqiong¹, LIN Junfang¹, ZOU Yuan^{1*}

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Shantou Hualefu Food Company, Shantou 515825, China)

Abstract: A novel cheese analog was prepared using soybean milk, cashew milk, and almond protein as raw materials. The best formula of soybean-nut cheese analogs with high quality was prepared, and their physical and chemical properties, sensory properties, storage stability, and digestive properties were evaluated. The results show that the formula of soybean-nut cheese analogs with the best quality was as follows (all in mass fraction): cashew milk 50.00%, and soybean milk 50.00%. Based on the mass of plant milk, the following were added: vegetable oil: 3.09% (coconut oil and sunflower oil in a ratio of 7:3), almond protein: 2.01%, TG: 0.33%, citric acid: 0.10%, and lactic acid: 0.10%. Based on the curd mass, 1.08% colloid and 4.00% sucrose were added. The hardness of the soybean-nut cheese analog was 0.88 N and the overall sensory score was 7.71, which are comparable to those of commercial animal-based cheese. In addition, with an increase in storage time, the soybean-nut cheese analog hardness increased from 0.94 N to 1.15 N, with no significant hardening or water separation.

引文格式:

陈斗艺, 邱晓敏, 林美云, 等. 大豆-坚果奶酪类似物的制备及其性质研究[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 177-185.

CHEN Douyi, QIU Xiaomin, LIN Meiyun, et al. Preparation and properties of soybean-nut cheese analogs [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 177-185.

收稿日期: 2023-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32001832); 广东省自然科学基金面上项目 (2022A1515010057)

作者简介: 陈斗艺 (1999-), 女, 在读硕士生, 研究方向: 蛋白质化学与工程, E-mail: 1799740203@qq.com

通讯作者: 邹苑 (1989-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 蛋白质化学与工程, E-mail: zouyuan@scau.edu.cn

The results of the in vitro digestion profiles of cheese analogs showed that the protein bands disappeared completely after 180 min intestinal digestion, and the release of free fatty acid was relatively low at 60%. Therefore, the prepared soybean-nut cheese analogs have high nutritional value, good sensory quality, good storage stability, and easily digestible protein, and can effectively serve as a substitute for animal-based cheese, meeting the cheese preferences of consumers.

Key words: soybean; nut; cheese analog; texture; sensory evaluation

传统奶酪主要是以牛奶、羊奶等动物乳液为原料,通过添加发酵剂和凝乳酶使蛋白质絮凝聚集,析出部分乳清,继续发酵使其成熟的一种奶制品,其含有丰富的蛋白质、钙、脂肪、磷和维生素等成分,是一种营养丰富的天然乳制品^[1]。由于我国面临奶源不足、奶酪制作成本高等问题,奶酪制品仍得不到普及。此外,大规模生产奶酪会导致温室气体排放增加、占用大量耕地面积、水资源等一系列环境问题^[2,3]。随着人们对环境可持续发展、身体健康及动物保护意识的不断提高,越来越多的人开始关注奶酪类似物^[4]。

奶酪类似物通常指的是由植物基原料制成的,具有与动物奶酪制品相似的外观、质地和口感^[5]。目前,国内外有关奶酪类似物的研究还处于起步阶段,市面上的产品仍然存在各种问题,如口感粗糙、风味不佳、加工过度等。这也引起了食品科研工作者及企业的广泛关注。例如, Oyeyinka 等^[6]采用 40% 的腰果乳替代豆乳生产奶酪类似物,干物质中的蛋白质含量达到 63.99%,感官评分为 7.0 分(满分为 9.0)。Adejuyitan 等^[7]发现,50%:50% 的大豆乳和椰奶制备的奶酪类似物(7.3 分)比 100% 大豆奶酪有更高的感官评分(5.7 分),可能是椰奶掩盖了大豆的豆腥味。由此可知,豆类、谷物和坚果类可作为奶酪类似物的主要原料,并通过复配植物乳进一步改善奶酪类似物品质。然而,目前的研究主要是制备植物基奶酪类似物,很少系统研究奶酪类似物的质构、感官特性、消化特性、储藏特性等。

大豆乳在我国素有“绿色奶牛”之称,并且大豆乳是目前消费最广泛,接受度最高的植物乳,含有大量的多不饱和脂肪酸,不含胆固醇,是高质量蛋白质的良好来源^[8]。但是,豆类物质的不良风味限制了其在奶酪类似物中的广泛应用。因此,有必要挖掘其他植物乳与大豆乳复配,以期在一定程度上降低或掩盖豆类物质的不良风味。其中,坚果类植物乳营养丰富,且具有坚果类特殊香味,如腰果富含脂肪、纤维、矿物质、蛋白质、单宁和维生素

C^[9]; 巴旦木富含蛋白质,并含有少量胡萝卜素、维生素 B1、B2 和消化酶^[10]。基于此,本研究选用腰果乳和大豆乳复配再加入巴旦木蛋白制备具有高蛋白兼具优良风味的大豆-坚果奶酪类似物;为了更好地迎合不同年龄段消费者的喜好,将样品制备成携带食用方便的奶酪棒形式;以感官评分为主要评价指标,并通过单因素试验结合响应面优化确定最佳工艺配方;进一步对大豆-坚果奶酪类似物的理化性质、感官特性、储藏稳定性和消化特性进行系统研究。

1 材料与方法

1.1 原料及试剂

烘焙腰果、大豆、椰子油、葵花籽油、谷氨酰胺转氨酶(TG 酶)、蔗糖购于淘宝;黄原胶、卡拉胶、刺槐豆胶、巴旦木蛋白由大昌华嘉化学国际贸易(上海)有限公司提供;商品化植物基奶酪 1、2 分别购于 Daiyafood、Violife;商品化动物奶酪 1、2 分别购于淘吉奶酪棒、夏洛克奶酪棒;胰蛋白酶(酶活 250 U/mg)、胃蛋白酶(酶活 3 000 U/g)、胰脂肪酶(酶活 30 000 U/mg)均购于上海源叶生物科技有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),德国生物弗罗克斯;考马斯亮蓝 R-250,上海源叶生物科技有限公司。使用的所有其他化学品都是分析级的。

1.2 主要仪器设备

主要仪器设备如表 1 所示。

1.3 实验方法

1.3.1 大豆-坚果奶酪类似物的制备

大豆-坚果奶酪类似物的制备工艺流程如下:

大豆、腰果打浆→大豆乳腰果乳混合→加入椰子油、葵花籽油、巴旦木蛋白→均质(1 500 r/min、10 min)→加入柠檬酸、乳酸酸化(45 ℃、2 h)→加入 TG 酶交联(45 ℃、2 h)→过滤乳清→凝乳→胶体蔗糖复合溶液加入凝乳→搅拌→奶酪浆液→装模→冷却成型

表 1 实验仪器与设备

仪器名称	型号	生产厂家
水浴锅	HH-2	上海力辰科技仪器有限公司
高速剪切机	T18	德国 IKA 公司
pH 计	PB-10	德国 Sartorius 公司
冷冻干燥机	FD-10-50	北京博医康实验仪器有限公司
恒温加热磁力搅拌器	PC-420D	美国 CORNING 公司
台式恒温振荡器	IS-RSD3	美国 CRYSTAL 公司
质构仪	EZ-SX	日本 SHIMADZU 公司
pH 电位滴定仪	888	瑞士 Metrohm 公司
杜马斯快速定氮分析仪	Rapid N exceed	德国 Elementar 公司
垂直电泳仪	DY CZ-24DN	北京六一生物公司
凝胶成像仪	Gel Doc XR	美国 Biorad 公司

以感官评分作为大豆-坚果奶酪类似物品质的主要评价指标,探究油脂种类和含量、酸化剂、蛋白质含量、胶体、TG 酶含量对其品质的影响,确定响应面优化最佳因素水平;进一步利用响应面的中心组合试验优化大豆-坚果奶酪类似物的最佳工艺配方。

1.3.2 感官评价

参照奶酪的食品安全国家标准 GB 5420-2021 招募十名人员,五名男性,五名女性,年龄 18~30 岁,培训后对样品进行感官评价。感官评分标准见表 2,计算十名感官评分员的平均分即为样品的最终得分。

表 2 大豆-坚果奶酪类似物的感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria of soybean-nut cheese analogues

项目	特征描述	评分/分
外形 (10 分)	奶酪表皮均匀光滑, 细致, 无损伤	8~10
	奶酪表皮均匀光滑, 存在微量气孔	5~7
	奶酪表皮粗糙, 存在大量气孔	0~4
色泽 (10 分)	色泽均匀, 呈乳白色, 光泽度好	8~10
	色泽较为均匀, 呈乳黄色, 光泽度稍差, 较暗淡	5~7
	色泽不均匀, 呈淡黄色, 暗淡无光泽	0~4
组织状态 (25 分)	质地均匀成型, 柔软细腻无颗粒状, Q 弹, 无裂痕粗糙断面	23~25
	质地较为均匀成型, 较为细腻无颗粒状, 较 Q 弹, 出现粗糙断面裂痕	16~22
	质地较为粗糙疏松, 较硬或较软, 呈豆腐渣状, 弹性差	8~15
口感及气味 (55 分)	滋味自然均匀, 酸甜适中, 香味温和, 无豆腥味	50~55
	滋、气味良好, 香味较淡, 存在轻微豆腥味	40~49
	有豆腥味, 具有酸味或甜味突出	30~39
整体感官 (10 分)	可接受, 且喜欢	9~10
	接受, 尚可	7~8
	接受但一般, 不排斥	5~6
	不能接受	0~4

1.3.3 化学组分测定

对大豆-坚果奶酪类似物的粗脂肪 (GB 5009.6-2016)、蛋白质 (杜马斯燃烧定氮法, 蛋白质系数为 6.25)、灰分 (GB 5009.4-2016)、水分 (GB 5009.3-2016) 进行测定, 差值法计算总碳水化合物^[11]。

1.3.4 质构测定

将大豆-坚果奶酪类似物 and 商品化奶酪切块成 3 mm×3 mm×3 mm 的正方体, 采用 TPA 模式对样品进行两次压缩。选用 P/2 圆柱形探头 (直径为 5 mm), 探头在测试前、测试中和测试后的速率分别为 2、1、2 mm/s, 触发力为 0.20 N, 将压缩应变设为 60%。

1.3.5 体外消化

根据 Minekus 等^[12]的方法建立体外模拟静态消化模型, 并略作改动, 消化液组成用 NaCl 代替 NaHCO₃^[13]。将大豆-坚果奶酪类似物口腔咀嚼 2 min 左右, 直至适合吞咽的颗粒大小, 取样品。将样品和唾液 (SSF) 1:1 混合, 在 pH 值 7.0, 37 °C 条件下消化 2 min^[14]。将口腔食糜与胃液 (SGF) 1:1 混合, 加入胃蛋白酶使其活性达到 2 000 U/mL, 调 pH 值至 3.0, 在 37 °C 消化 2 h^[15]。将上述胃消化后的食糜与肠液 (SIF) 1:1 混合, 加入胆汁盐溶液 (最终浓度为 10 mmol/L)、胰蛋白酶 (活性 100 U/mL) 和胰脂肪酶 (活性 2 000 U/mL), 调 pH 值至 7.0, 消化 2 h 后在 100 °C 水浴 5 min 将酶灭活, 终止反应。分别在胃消化 0、30、60、120 min, 肠消化 135、150、180、240 min 取样进行 SDS-PAGE, 分析蛋白质消化情况。

1.3.5.1 SDS-PAGE

将消化液样品离心取沉淀物并进行真空干燥, 对干燥样品进行 SDS-PAGE 分析。将样品稀释液 (质量分数为 1% 的蛋白溶液) 与上样缓冲液 (体积分数为 10% 的甘油, 质量分数为 10% 的 SDS, 1.0 mol/L pH 值 6.8 的 Tris-HCl 缓冲液, 体积分数为 1% 的 β - 巯基乙醇, 质量分数为 0.1% 的溴酚蓝) 混合, 沸水浴 5 min。制备体积分数为 12% 的分离胶和 5% 的浓缩胶, 胶板厚度为 1 mm, 上样量为 15 μ L, 于恒压下进行电泳。凝胶电泳后, 用考马斯

亮蓝 (R-250) 溶液染色 1 h, 然后在乙醇乙酸脱色液中脱色, 直到观察到清晰的背景。使用分子成像仪 Gel DocXR 系统 (Bio-Rad) 扫描 SDS-PAGE 凝胶并用 Image J 软件对谱带强度进行分析^[16]。

1.3.5.2 游离脂肪酸的测定

肠消化阶段, 使用自动滴定仪通过 pH-Endpoint 方法监测 H^+ 的产生, 测定游离脂肪酸 (FFA) 释放速度。采用 0.1 mol/L 的 NaOH 自动滴定, 保持消化过程中 pH 值为 7.0, 记录全程 NaOH 的体积消耗曲线, 参考 Hu 等^[17]的方法计算游离脂肪酸的含量。

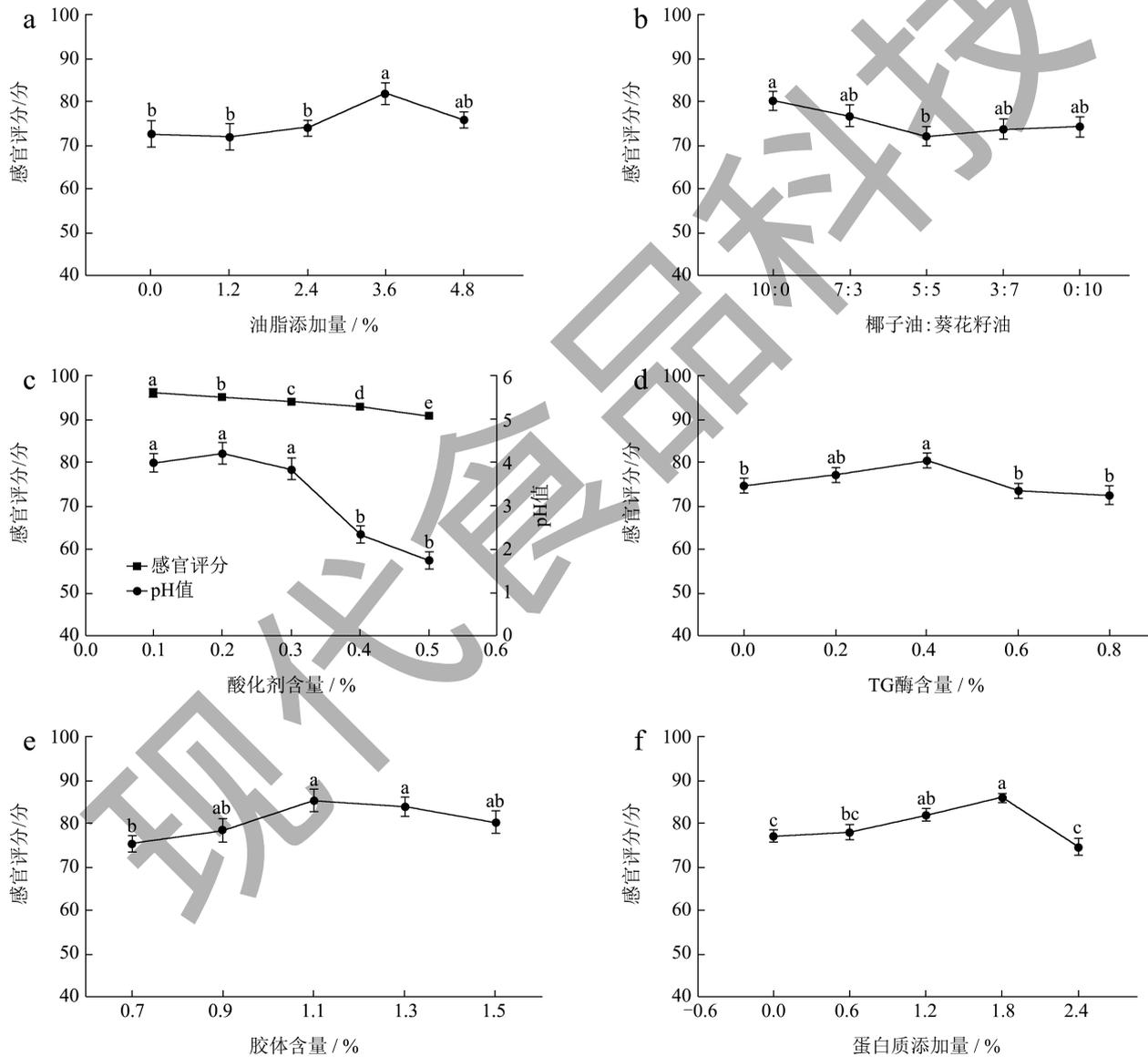


图 1 油脂含量 (a)、不同油比例 (b)、酸化剂含量 (c)、TG 酶含量 (d)、胶体含量 (e) 及蛋白质含量 (f) 对大豆-坚果奶酪类似物感官评价的影响

Fig.1 The effects of oil content (a), proportion of different oils (b), acidifier content (c), TG enzyme content (d), colloid content (e), protein content (f) on sensory evaluation scores of soybean-nut cheese analogues

注: 不同小写字母表示样品间差异显著 ($P < 0.05$), 图 2~4 同。

1.4 数据处理与统计分析

所有试验重复3次,结果为平均值±标准误差,使用Origin 2018作图;采用SPSS 26统计软件对数据进行差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 大豆-坚果奶酪类似物的制备

以感官评分为参考指标,研究油脂含量、不同油的比例、酸化剂含量、TG酶含量、胶体含量及蛋白质含量对大豆-坚果奶酪类似物品质的影响(皆为质量分数),结果如图1所示。当植物油3.60%、蛋白质1.80%、TG酶0.40%,酸化剂0.20%(其中柠檬酸0.10%,乳酸0.10%)以及亲水胶体1.10%(其中卡拉胶0.60%,黄原胶0.20%,刺槐豆胶0.30%)时,大豆-坚果奶酪类似物的感官评分最高,分别为81.70、85.65、80.20、82.00、85.20分。依据此结论,进一步以大豆-坚果奶酪类似物感官评分作为响应值,采用对其感官评分有显著影响的油含量、蛋白含量、TG酶含量和胶体含量为4因素,进行4因素3水平的响应面分析实验,试验因素水平见表3。运用响应面软件共设计29组试验,结果如表4所示。验证这四个因素彼此之间的交互作用,从而得出最优配方组合为油脂3.09%,蛋白2.01%,TG酶0.33%,胶体1.08%(其中卡拉胶0.60%,黄原胶0.20%,刺槐豆胶0.28%)。后续对该最佳配方制备的大豆-坚果奶酪类似物的理化、质构、感官及消化特性进行系统性研究。

表3 响应面优化实验的因素及水平

Table 3 Factors and levels of response surface optimized experiments

因子	水平/%		
	-1	0	1
油脂添加量	2.4	3.6	4.8
蛋白质添加量	1.2	1.8	2.4
胶体含量	0.9	1.1	1.3
TG酶含量	0.2	0.4	0.6

2.2 大豆-坚果奶酪类似物的化学组成

大豆-坚果奶酪类似物与商品化动物/植物基奶酪化学组成如表5所示。可知大豆-坚果奶酪类似物的蛋白质含量远高于商品化植物基奶酪制品,甚至是优于商品化动物奶酪制品;碳水化

合物含量显著低于商品化植物基和动物基奶酪;脂肪含量也相对较低。另外,大豆-坚果奶酪类似物蛋白质含量显著高于张琦^[18]报告的大豆奶酪(7.10%~13.60%),脂肪含量低于Vs等^[19]报告的豆乳-椰奶制作的奶酪类似物(25.61%~27.10%)与Ali等^[20]的牛奶-豆乳奶酪(43.51%~47.33%)。这些结果表明本研究所制备的大豆-坚果奶酪类似物具有高蛋白、低碳水化合物、低脂肪的特点,这也正是符合当代消费者对健康食品的理念。

表4 响应面分析方案及结果

Table 4 Response surface analysis and results

序号	A-油脂添加量/%	B-蛋白质添加量/%	C-胶体含量/%	D-TG酶含量/%	感官评分/分
1	0	-1	1	0	74.6
2	0	0	1	1	74.2
3	0	-1	0	-1	81.76
4	1	1	0	1	72.2
5	0	-1	0	1	81.2
6	0	0	0	0	84.48
7	-1	0	0	1	78.32
8	0	0	0	0	85.3
9	1	1	0	0	78
10	0	0	-1	-1	82.78
11	0	1	1	-1	84.6
12	-1	0	-1	0	76.8
13	0	0	1	-1	75.2
14	-1	1	0	0	80.78
15	0	1	0	1	79.12
16	-1	0	1	0	74.6
17	0	0	-1	1	76.61
18	1	-1	0	0	76.55
19	-1	-1	0	0	78.6
20	0	1	1	0	80.17
21	-1	0	0	-1	76.61
22	0	0	0	0	86.88
23	0	0	0	0	82.9
24	1	0	1	0	73.33
25	0	1	-1	0	80
26	0	-1	-1	0	83.17
27	1	0	0	-1	78.77
28	0	0	0	0	86.05
29	1	0	-1	0	77.05

表 5 大豆-坚果奶酪类似物与商品化动物/植物基奶酪制品的化学组成表

Table 5 Chemical compositions of soybean-nut cheese analogues and commercial animal/plant-based cheese products

检测项目	样品名称				
	大豆-坚果 奶酪类似物	商品化 动物奶 酪 1	商品化 动物奶 酪 2	商品化 植物基 奶酪 1	商品化 植物基 奶酪 2
蛋白质 /%	20.05 ± 0.18	8	6.9	3.3	0.6
脂肪/%	13.83 ± 0.06	10	17.1	23.3	15
碳水 化合物/%	3.16 ± 0.02	17	17.5	13.3	11
水分/%	62.53 ± 0.18	—	—	—	—
灰分/%	0.43 ± 0.01	—	—	—	—

注：“—” 阈值未知。

2.3 大豆-坚果奶酪类似物的质构

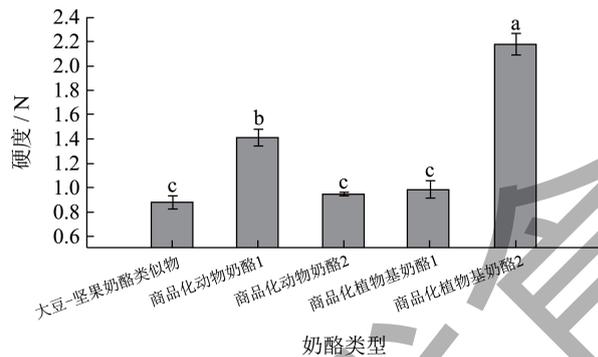


图 2 大豆-坚果奶酪类似物与商品化动物/植物基奶酪制品的质构

Fig.2 Texture properties of soybean-nut cheese analogues and commercial animal/plant-based cheese products

奶酪的质构与奶酪的组成和结构密切相关，是评价奶酪品质的一项重要指标。图 2 是大豆-坚果奶酪类似物和商品化动物和植物基奶酪制品的硬度值比较。结果发现，大豆-坚果奶酪类似物的硬度为 0.88 N，与商品化植物基奶酪 1 (0.98 N) 和动物奶酪 2 硬度值 (0.94 N) 没有显著性差异，但明显低于商品化动物奶酪 1 (1.41 N) 和植物奶酪 2 的硬度值 (2.18 N)。可能原因是大豆-坚果奶酪类似物含有较低的脂肪和碳水化合物含量，形成的凝胶网络结构要弱于其它商品化奶酪产品。这与前人研究结果一致，Rogers 等^[21]提到在奶酪中脂肪小球占据蛋白质基质的空间，在奶酪中随着脂肪含量的

增加，脂肪颗粒会破坏蛋白质的网络结构，从而导致硬度值下降。此外，有文献提到在凝乳中加入多糖，凝胶机械强度会随碳水化合物（多糖）浓度的增加而增加，侯俊杰^[22]采用大豆球蛋白（SG）-甜菜果胶（SBP）制备凝胶，随着 SBP 含量的增加，凝胶的破裂应力从 11.13 N 增加到 31.39 N。

2.4 大豆-坚果奶酪类似物的感官评价

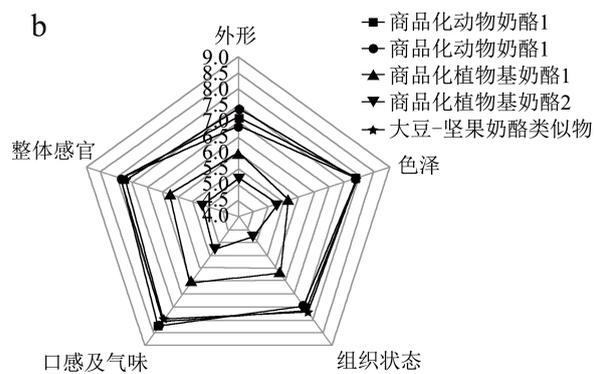


图 3 大豆-坚果奶酪类似物与商品化动物/植物基奶酪制品的外观 (a) 和感官评价雷达图 (b)

Fig.3 The appearance (a) and sensory evaluation radar map (b) of soybean-nut cheese analogues and commercial animal/plant-based cheese products

对大豆-坚果奶酪类似物进行感官评价，并与商品化动物/植物基奶酪进行比较，结果见图 3。从图 3a 可知大豆-坚果奶酪类似物的外观与商品化

动物奶酪两者皆表皮均匀、无损伤,色泽呈乳白色、有光泽,商品化植物基奶酪表皮无光泽、粗糙,存在裂缝。从图 3b 可知商品化动物奶酪整体感官评分 8.00 分、口感气味 8.50 分,大豆-坚果奶酪类似物在色泽、外形和组织状态可与商品化动物奶酪相媲美但整体感官为 7.71 分不及动物奶酪,因为在口感及气味(7.98 分)上不够理想,仍存在少量的豆类风味,乳脂感较差。植物基奶酪 1、2 的色泽(5.65 分、5.27 分)、外形(5.98 分、5.24 分)评分最低,与图 3a 相对应。其质地粗糙呈颗粒状,因为大量使用碳水化合物来取代脂肪使产品具有颗粒状质地^[23],同时存在一种令人不愉快的味道,这可能与调味剂用量过多有关^[24],因此感官评分最低(6.31 分、5.18 分)。总的来说,大豆-坚果奶酪类似物比商品化植物基奶酪接受度更高,但对比动物奶酪其口感、风味略有不足。

2.5 大豆-坚果奶酪类似物的储藏稳定性

本研究还考察了大豆-坚果奶酪类似物在 4 °C 贮藏条件下的外观和硬度变化,结果如图 4 所示。样品随着储藏时间的增加光泽度略微降低,出现轻微析水的现象,硬度值缓慢增加,贮存 20 d 其硬度从 0.94 N 增加到 1.15 N。这个结果可能与储藏过程中水分的析出和脂肪氧化有关,增强了体系内蛋白质、脂肪和碳水化合物之间的相互作用。Ramos 等^[25]发现了类似的结果,未涂层奶酪在储藏 20 d 后硬度值从 0.25 N 增加到 2.00 N。

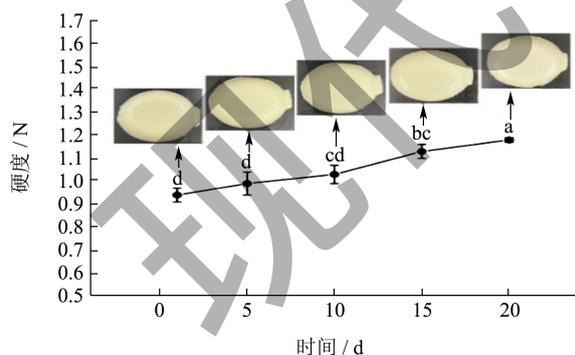


图 4 大豆-坚果奶酪类似物在 4 °C 贮藏条件下的外观和硬度变化

Fig.4 The appearance and hardness of soybean-nut cheese analogues during storage at 4 °C

注:图中不同小写字母表示样品间差异显著($P < 0.05$)。

2.6 大豆-坚果奶酪类似物的消化特性

样品在消化过程中的外观变化图如图 5 所示,

图 5a 可观察到在胃消化初始阶段,消化液有明显的大颗粒,到 120 min 胃消化结束,在胃液、胃蛋白酶作用下,消化液固体内容物明显减少;随着肠道消化的进行,肉眼可见消化液浑浊,肠道消化结束时大颗粒不存在。

图 5b 是样品消化内容物的 SDS-PAGE 图谱。消化内容物具有五条清晰条带(a、b、c、d、e),其中 a 条带主要是小分子蛋白和多肽, bc 条带主要包括 11S 球蛋白碱性亚基 B (20~25 ku) 和 2S 白蛋白(18~22 ku), d 条带主要是 11S 球蛋白酸性亚基 A (30~37 ku), e 条带是 7S 球蛋白,由 α 亚基(72 ku)、 α' 亚基(85 ku) 和 β 亚基(53 ku) 三种亚基组成。大豆蛋白中 11S 和 7S 的含量最高,达到了总蛋白含量的 70%~75%^[26], 腰果蛋白中包括 7S 球蛋白^[27],但 e 条带在 SDS-PAGE 图谱上不清晰,主要是因为对大豆和腰果进行热处理会使 7S 蛋白完全变性^[28,29],同时在凝乳过程中 TG 酶使 7S 蛋白交联形成更大分子量的蛋白,可以观察到样品槽中存在少量大分子聚集体无法进入浓缩胶^[30],造成 7S 条带变浅。

在胃消化阶段,所有条带从 30~60 min 颜色逐渐加深,这可能是蛋白质先从基质中释放出来导致的,之后随着消化的进行, b、c、d、e 的蛋白条带明显变浅,同时 a 条带颜色加深,说明随着消化时间延长蛋白质逐渐被水解成 6~15 ku 的多肽和小分子蛋白,在肠道消化 180 min 后所有条带消失,说明蛋白被水解成更小的短肽或氨基酸。进一步分析条带灰度值,灰度值越大蛋白质含量越高。如图 5c 所示所有条带在胃消化 30~60 min 灰度值增加,之后随着消化时间的增加, b、c、d、e 条带的灰度值急剧降低,条带 a 灰度增加,在 180 min 时灰度值趋近 0,与图 5b 结果一致。这与传统奶酪中酪蛋白水解动力学一致,在胃消化 120 min 时,凝胶上看不到完整的酪蛋白,但仍可见约 4~6 ku 的大片段酪蛋白和多肽,在肠道消化 180 min 后,酪蛋白已经完全消失^[31]。

脂肪主要在小肠被水解为甘油、脂肪酸等,通过记录 NaOH 的体积消耗曲线,能够计算出产生的游离脂肪酸含量,从而分析样品脂肪消化速率。图 6 显示了肠消化过程中游离脂肪酸的释放行为。大豆-坚果奶酪类似物在消化初期 FFA 释放速率缓慢,1 h 后释放速率快速增长,在肠消化结束时, FFA 释放速率为 60%,说明脂肪没有被完全消化。Lamothe 等^[32]比较不同动物干酪在胃肠道环境中脂

肪酸释放的动力学，了解到不同动物干酪的脂肪酸释放率平均为 80%。由此说明，大豆-坚果奶酪类似物脂肪具有一定抗消化能力且相较于动物奶酪具有更低的脂肪消化率。

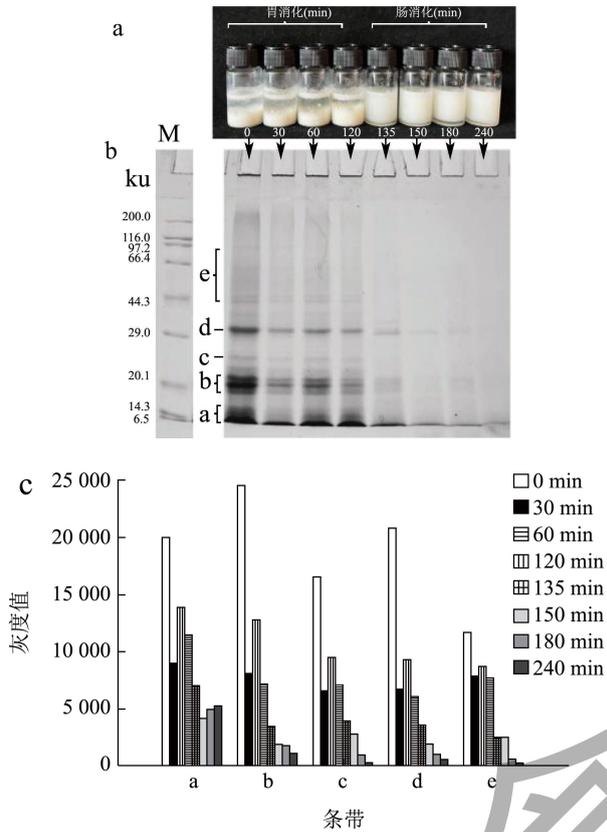


图 5 大豆-坚果奶酪类似物在静态消化过程中的消化产物 (a)、SDS-PAGE图谱 (b)、条带灰度值 (条带对应于 SDS-PAGE结果, c)

Fig.5 The photos of digestive product (a), SDS-PAGE profile (b), band intensity (c) of soybean-nut cheese analogues during digestion *in vitro*

注: M 为蛋白分子量标准样品。

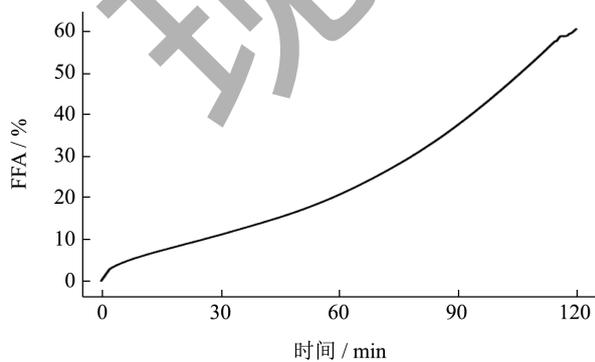


图 6 大豆-坚果奶酪类似物消化中游离脂肪酸的释放行为
Fig.6 Release of FFA from soybean-nut cheese analogues during digestion

3 结论

在大豆乳 50.00% 和腰果乳 50.00% 混合的基础上，以植物乳质量为基准，依次添加 3.09% 植物油（椰子油与葵花籽油比例为 7:3）、2.01% 巴旦木蛋白、0.33% TG 酶、0.10% 柠檬酸、0.10% 乳酸；以凝乳质量为基准添加 1.08% 胶体，4.00% 蔗糖，可制备出最佳品质的大豆-坚果奶酪类似物（以上皆为质量分数）。该大豆-坚果奶酪类似物含有蛋白质 20.05%，脂肪 13.83%，水分 62.53%，灰分 0.43%，碳水化合物 3.16%，具有高蛋白、低脂肪、低碳水化合物的优点，符合现代消费者对健康食品的追求。大豆-坚果奶酪类似物的硬度为 0.88 N，整体感官评分为 7.71 分，质构特性和感官特性与商品化动物奶酪相似，但口感和气味略逊色。随着储藏时间的延长，大豆-坚果奶酪类似物硬度从 0.94 N 上升到 1.15 N，有轻微上升，主要是由于有少量水从奶酪凝胶中析出。体外静态消化结果发现蛋白电泳条带在消化 180 min 时消失，说明其蛋白质易于被消化，FFA 释放速率为 60%，脂肪未被完全消化。综上所述，大豆-坚果奶酪类似物可以作为动物奶酪的替代品。

参考文献

- [1] 顾春华,刘煜,王建军,等.奶酪的营养价值及奶酪中生物活性肽的研究进展[J].食品安全导刊,2021,20:186-189.
- [2] MICHAEL A C, MARCO S, JASON H, et al. Multiple health and environmental impacts of foods [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(46): 23357-23362.
- [3] DAVID J M, GROSSMANN L.A brief review of the science behind the design of healthy and sustainable plant-based foods [J]. NPJ Science of Food, 2021, 5(1): 17.
- [4] CHRISTOPHER J H, WIEBKE B, TED S, et al. Health, environmental, and animal rights motives for vegetarian eating [J]. Plos One, 2020, 15(4): e230609.
- [5] LUTZ G, DAVID J M. The science of plant-based foods: approaches to create nutritious and sustainable plant-based cheese analogs [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118(part A): 207-229.
- [6] ADEWUMI T O, JULIANA H O O, YUSUF S A. Nutritional composition and consumer acceptability of cheese analog from soy and cashew nut milk [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14285.
- [7] JOHNSON A A, BOSEDE F O, MOYINWIN O A. Production and evaluation of cheese-like product from the blend of soy milk and coconut milk [J]. Archives of

- Applied Science Research, 2014, 6: 263-266.
- [8] QIN PINGXU, WANG TAORAN, LUO YANGCHAO. A review on plant-based proteins from soybean: health benefits and soy product development [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 7: 100265.
- [9] BRENDA D C, PENNY M K. Achieving optimal essential fatty acid status in vegetarians: current knowledge and practical implications [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2003, 78(3 Suppl): 640S.
- [10] 刘志彬, 戈珊瑚, 张雯, 等. 巴旦木和巴旦木皮对健康成人血脂水平、抗氧化能力和寒热证的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(12): 24-30.
- [11] MUTIAT A B, SAMSON A O, FAUSAT L K, et al. Chemical composition and sensory properties of soy-tiger nut cheese [J]. Ceylon Journal of Science, 2019, 48(4): 353-358.
- [12] MANS M, ALMINGER M, PAULA A, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113-1124.
- [13] DAMIEN J L D, STEVEN L F, CAMILLE M, et al. *In vitro* digestion of foods using pH-stat and the INFOGEST protocol: impact of matrix structure on digestion kinetics of macronutrients, proteins and lipids [J]. Food Research International, 2016, 88: 226-233.
- [14] KUNAL K, SUPRATIM G. Pectin degree of esterification influences rheology and digestibility of whey protein isolate-pectin stabilized bilayer oil-in-water nanoemulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107789.
- [15] LÉA G, LAURIE E R, STEVE L, et al. Identification of texture parameters influencing commercial cheese matrix disintegration and lipid digestion using an *in vitro* static digestion model [J]. Food Research International, 2019, 121: 269-277.
- [16] JIN MANHONG, XIE YUN, XIE PEILAN, et al. Physicochemical and functional properties of *Pleurotus geesteranus* proteins [J]. Food Research International, 2022, 162: 111978.
- [17] HU YUYING, LI CHUNMEI, TAN YUNBING, et al. Insight of rheology, water distribution and *in vitro* digestive behavior of starch based-emulsion gel: impact of potato starch concentration [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107859.
- [18] 张琦. 大豆干酪加工技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [19] KADBHANE V, SHELKE G, THORAT S. Preparation of non dairy cheese analogues enriched with coconut milk [J]. The Pharma Innovation Journal, 2019, 8(10): 56-60.
- [20] BARKAT A, KIRAN Y K, HAMID M, et al. Imitation of soymilk-cow's milk mixed enzyme modified cheese: their composition, proteolysis, lipolysis and sensory properties [J]. Journal of Food Science & Technology, 2017, 54(5): 1273.
- [21] NEAL R R, MARYANNE AD, CHRISTOPHER R D, et al. The effect of aging on low-fat, reduced-fat, and full-fat cheddar cheese texture [J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(10): 4756-4772.
- [22] 侯俊杰. 大豆蛋白-甜菜果胶相互作用及其对食品微结构及感官性质影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [23] MIROSLAV H, TAMARA D H, LJUBICA D, et al. Physical and sensory aspects of maltodextrin gel addition used as fat replacers in confectionery filling systems [J]. Food Science & Technology, 2014, 59(1): 495-503.
- [24] MAXIMILIANO N S, JAMES B. Dairy-free imitation cheese: is further development required? [J]. British Food Journal, 2020, 122(12): 3727-3740.
- [25] ÓSCAR L R, JOANA O P, SARA I S, et al. Evaluation of antimicrobial edible coatings from a whey protein isolate base to improve the shelf life of cheese [J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(11): 6282-6292.
- [26] WILLIAM J W, GLEN E B, ANNE K S. Ultracentrifugal differences in soybean protein composition [J]. Nature, 1961, 191(4796): 1395-1396.
- [27] CHRISTOPHER P M, CASEY C G, RICHARD L W. *In vitro* digestion of soluble cashew proteins and characterization of surviving IgE-reactive peptides [J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2014, 58(4): 884-893.
- [28] 王京. 热处理方式对豆乳蛋白质结构及体外消化性的影响[D]. 北京: 北京农学院, 2022.
- [29] 王洋玲. 热加工方式对腰果营养组分、风味组成及致敏性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [30] XING GUANGLIANG, CONCETTA V L G, ANDREA C, et al. Gelling behavior of bio-tofu coagulated by microbial transglutaminase combined with lactic acid bacteria [J]. Food Research International, 2020, 134: 109200.
- [31] LOTTI E, OLIVIA M, LYCHOU A, et al. Higher microbial diversity in raw than in pasteurized milk Raclette-type cheese enhances peptide and metabolite diversity after *in vitro* digestion [J]. Food Chemistry, 2021, 340: 128154.
- [32] SOPHIE L, MARIE M C, SYLVIE L T, et al. Influence of cheese matrix on lipid digestion in a simulated gastrointestinal environment [J]. Food & Function, 2012, 3(7): 724-731.