



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：大豆杏仁植物基混合奶酪风味特征及理化性质
作者：高佳嘉，赵颖，胡海玥，杨晨，汪建明
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20240096
收稿日期：2024-04-30
网络首发日期：2024-11-05
引用格式：高佳嘉，赵颖，胡海玥，杨晨，汪建明. 大豆杏仁植物基混合奶酪风味特征及理化性质[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240096>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20240096

大豆杏仁植物基混合奶酪风味特征及理化性质

高佳嘉, 赵颖, 胡海玥, 杨晨, 汪建明
(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 为满足人们对植物基奶酪的需求, 本研究以大豆和杏仁为原料, 制备具有良好风味和质地的植物基混合奶酪 (mixed cheese, MC)。与大豆奶酪 (soy cheese, SC) 和杏仁奶酪 (almond cheese, AC) 相比, MC (1:3) 中 1-辛烯-3-醇含量减少了 10.92%, 苯甲醛含量减少了 12.32%, 表明豆腥味和杏仁味被掩盖。MC (1:3) 的硬度和咀嚼性分别为 1079.42 g 和 227.29 g, 相较于 SC 提高了 48.10% 和 83.24%。扫描电子显微镜观察到 MC (1:3) 内部形成了大小不均匀的复合物, 增强了内部蛋白质网络。大豆和杏仁混合制作植物基奶酪具有良好的风味和质地, 为植物基奶酪的开发提供新思路。

关键词: 大豆; 杏仁; 植物基奶酪; 风味; 理化性质

中图分类号: TS214.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(0000)00-0000-00

Flavor Characteristics and Physicochemical Properties of Soy-Almond Plant-Based Mixed Cheese

GAO Jiajia, ZHAO Ying, HU Haiyue, YANG Chen, WANG Jianming

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To meet the demand for plant-based cheese, soybean and almond were used in this study to prepare plant-based mixed cheese (MC) with good flavor and texture. Compared with soy cheese (SC) and almond cheese (AC), the content of 1-octen-3-ol and benzaldehyde in MC (1:3) decreased by 10.92% and 12.32%, indicating that the taste of soybean and almond flavors was masked. The hardness and chewiness of MC (1:3) were 1079.42 g and 227.29 g, respectively, which were 48.10% and 83.24% higher compared to SC. Scanning electron microscopy (SEM) also observed the formation of complexes with heterogeneous size within the MC (1:3), enhancing the internal protein network. The plant-based cheese made from mixed soybeans and almonds has good flavor and texture, providing new ideas for the development of plant-based cheese.

Key words: soybeans; almonds; plant-based cheese; flavor; physicochemical properties

风味是食品重要因素之一, 在食品材料和制品中, 发酵食品如奶酪具有由各种风味活性挥发物组成的复杂风味, 可以被添加到各种菜肴中以改善菜肴风味^[1]。近年来, 人们对健康的关注度越来越高, 消费者越来越倾向于寻求和购买植物基奶酪, 但目前的植物基奶酪存在口感不如传统奶酪好、味道不容易被接受等缺点, 因此植物基奶酪需要更进一步的开发和完善。

大豆是植物基奶酪中最常用的原料, 经常食用大豆食品可以预防肥胖和心脏病, 大豆中的异黄酮是一种促进人体健康的生物活性成分^[2]。虽然大豆奶酪目前已有研发, 但是单独由大豆制成的奶酪质地与动物基奶酪相比还需进一步改善。杏仁是一种用途广泛、营养丰富的坚果, 杏仁中的蛋白质、脂肪和微量元素可以赋予杏仁产品良好的营养、感官、品质和功能特性^[3]。因此, 将大豆和杏仁混合,

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-08-15

基金项目: 天津市合成生物技术创新能力提升行动重大科技攻关任务 (TSBICIP-KJGG-004-09)

作者简介: 高佳嘉 (1999-), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生; 通信作者: 汪建明, 教授, tustwjm@163.com

利用杏仁自身气味掩蔽豆腥味，制作混合蛋白植物基奶酪具有广阔的发展空间。

本研究将大豆和杏仁分别打浆，研究分别由豆浆和杏仁浆按照不同体积比混合制成的大豆奶酪（SC）、杏仁奶酪（AC）以及混合奶酪，通过电子鼻及气相色谱-质谱联用仪对其挥发性物质和理化性质进行分析，并进行感官评价，旨在开发具有良好风味和质地的植物基奶酪，为后期植物基奶酪的研发提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

大豆，天津利民调味有限公司；杏仁，河北承德露露有限公司。

碳酸氢钠、氯化钙，河南万邦实业有限公司；葡萄糖酸内酯、氯化钠，上海源叶生物科技有限公司；木瓜蛋白酶、风味蛋白酶、谷氨酰转氨酶，天津诺奥酶生产力促进有限公司；乳酸菌（*Lactobacillus plantarum*），西安聚生原生物科技有限公司。

ME204 型分析电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；DF-101S 型电热鼓风干燥箱、DK-8D 型水浴锅，上海博迅实业有限公司医疗设备厂；SP503A 型苏泊尔破壁机，浙江苏泊尔股份有限公司；MARS 60 型动态流变仪，德国哈克公司；TA-XT Plus 型质构分析仪，英国 Stable Microsystems 公司；SU1510 型扫描电子显微镜，日本 Hitachi 公司；PEN3 型电子鼻，德国 AIRSENES 公司；ISQ7000 型气相色谱-质谱联用仪（GC-MS），赛默飞世尔科技公司。

1.2 方法

1.2.1 植物基奶酪的制备

植物基奶酪的制备参照李莹莹^[4]的方法并稍作修改。大豆与杏仁分别按照料水比 1:8 和 1:5 打浆，豆浆和杏仁浆按照体积比（1:0、1:1、1:3、1:5、0:1）混合，80℃水浴灭菌 30 min，冷却后添加 1% 乳酸菌发酵剂、1% 葡萄糖酸内酯和 0.02% CaCl₂ 溶液，37℃发酵 12 h。发酵结束后，将样品放入 80℃水浴中灭菌 30 min，冷却后加 0.1% 风味蛋白酶、0.3% 木瓜蛋白酶、55℃酶解 3 h，随后加入 1.5% 脂肪酶，40℃、200 min 酶解 8 h，最后加入 0.1% 谷氨酰胺转氨酶（TG 酶），45℃酶解 1 h，80℃水浴灭酶 30 min，冷却后切割排乳清，随后压榨成型得到最终产品。

1.2.2 植物基奶酪主要成分的测定

根据 AOAC 方法^[5]，水分含量用 105℃烘箱干燥法测定，灰分含量用马弗炉法测定，脂肪含量用戈伯法测定，蛋白质含量用凯氏定氮法测定。pH 测定：称取 5 g 磨碎的奶酪，加入 80 mL 蒸馏水，煮沸，冷却后定容至 100 mL 中，过滤后使用数字 pH 计测定滤液的 pH。

1.2.3 植物基奶酪风味的测定

参照 Li 等^[6]的方法并稍做修改。使用电子鼻系统（PEN 3）对奶酪的香气进行分析，该系统配备的 10 个金属氧化物半导体传感器（如表 1）。称取 3 g 样品置于 40 mL 顶空瓶中密封，在 60℃水浴锅中平衡 30 min 后，用电子鼻系统通过吸取顶部气体进行检测分析，电子鼻设置检测时间 60 s，清洗时间 120 s，气体流量 1 L/min。

表 1 电子鼻传感器的性能

Tab. 1 Specific properties of the electronic nose sensor

编号	名称	功能
1	W1C	对芳香成分敏感
2	W5S	对氮氧化物敏感
3	W3C	对氨和芳香成分敏感
4	W6S	对氢化物敏感
5	W5C	对短链烷烃、芳香族成分和弱极性化合物敏感
6	W1S	对甲基敏感
7	W1W	对无机硫化物敏感
8	W2S	对醇类、醛类、酮类敏感
9	W2W	对芳香成分和有机硫化物敏感
10	W3S	对长链烷烃敏感

1.2.4 植物基奶酪挥发性化合物的测定

挥发性化合物参照 Wang 等^[7]的方法。在 20 mL 样品瓶中称取 3 g 样品，将三相萃取头插入 GC-MS 进样口使之老化，60℃水浴平衡 15 min，取出三相萃取头插入样品瓶中顶空萃取 40 min，再插入 GC-MS 进样口解析 15 min，检测其挥发性组分。

1.2.5 植物基奶酪质构性质的测定

参照 Tomar 等^[8]的方法，使用 TA-XT Plus 质构分析仪，配备 P100 Rmm 圆柱形探头，对奶酪样品的硬度和弹性进行分析。将储存于 4℃的样品切成 2.4cm×1.7cm×2.0 cm 的立方体，以 1 mm/s 的压缩速度压缩到原来高度的 30%。双咬合压缩循环，两次压缩间隔时间为 5 s，触发力为 5 g，根据分析仪计算样品的硬度、弹性、咀嚼性、内聚性、胶着性和回复力。

1.2.6 植物基奶酪流变性质的测定

参照 Ayyash 等^[9]的方法并进行修改。将样品在室温 (25±1) °C 下平衡 20 min。使用 MARS 60 动态流变仪进行测定,选择直径为 20 mm 的探头,上板和下板之间间隙 1 mm,应变设置 1%,频率为 0.1~100 Hz,记录流变过程中的储存模量 (G') 和损耗模量 (G'')。

1.2.7 植物基奶酪的微观结构

参照 Li 等^[10]的方法,将奶酪切成 5mm×5mm×2.0 mm 的小块,放入装有 2.5% 戊二醛

溶液的烧杯中,4°C 避光 3 h,用 PBS 缓冲液清洗 3 次,每次 10 min。随后用不同梯度乙醇溶液 (10%、30%、50%、70%、90%、100%) 脱水 10 min,再用氯仿脱脂 3 次,每次 15 min。将冻干后的样品在离子溅射器上进行喷金,用扫描电子显微镜观察其微观结构。

1.2.8 感官评价

感官评价参照 Shori 等^[11]的方法,对植物基奶酪从外观、质地、滋味、气味及可接受度进行评价。评价采用 10 分制,感官评分标准见表 2。

表 2 植物基奶酪的感官评分标准

Tab. 2 Sensory scoring criteria for plant-based cheeses

项目	较好 (7~10)	良好 (4~<7)	较差 (1~<4)
外观	表面光滑细腻,有光泽,颜色均匀一致	表面较光滑,颜色较均匀	表面粗糙,颜色不均匀,有其他异常颜色
质地	质地细腻,硬度非常合适,无杂质	质地较细腻,硬度较适中	质地较差,过稀或过稠,砂粒感严重
滋味	浓烈的奶酪香味,无异味	较淡的奶酪味,没有异味	过酸或过甜,有强烈的异味
气味	无酸臭味和豆腥味,有明显的发酵香味	无酸臭味,有少量豆腥味	酸臭味,有较浓的豆腥味,无发酵香味
可接受度	与市售非常相近,能够接受	与市售有一定差别,较能接受	不能接受

1.3 统计分析

所有实验重复 3 次进行,使用 SPSS 进行方差分析和邓肯检验,不同字母表示组间具有显著差异 ($p<0.05$)。

2.1 植物基奶酪的主要成分

植物基奶酪的主要成分见表 3。

2 结果与分析

表 3 植物基奶酪的主要成分

Tab. 3 The main ingredient of plant-based cheeses

参数	SC	MC (1:1)	MC (1:3)	MC (1:5)	AC
水分 (g/100 g)	65.12±0.04 ^a	64.92±0.04 ^a	58.64±0.02 ^d	61.98±0.02 ^c	62.84±0.03 ^b
蛋白质 (g/100 g)	10.84±0.02 ^b	11.23±0.02 ^{ab}	12.47±0.01 ^a	11.87±0.02 ^{ab}	11.8±0.02 ^{ab}
脂肪 (g/100 g)	20.62±0.01 ^d	21.09±0.02 ^d	25.12±0.03 ^a	23.73±0.01 ^b	22.24±0.02 ^c
灰分 (g/100 g)	2.84±0.01 ^b	2.75±0.02 ^{bc}	3.3±0.03 ^a	2.41±0.03 ^d	2.51±0.01 ^{cd}
pH	4.16±0.01 ^b	4.26±0.02 ^a	4.13±0.03 ^b	4.28±0.02 ^a	4.09±0.03 ^b

5 种奶酪中 MC (1:3) 的蛋白质含量最高,不同比例 MC 样品中随着杏仁浆的比例增加,蛋白质含量先升高后降低,但几乎都高于 SC。这可能是因为杏仁中的蛋白质含量高于大豆的,导致 SC 中蛋白质含量最低。与 SC 相比,MC 和 AC 中的水分含量较低,MC (1:3) 中的水分含量最低。这可能是由于 SC 的蛋白质和脂肪含量较低,因此持水能力也较弱。蛋白质含量越高,蛋白质分支之间的交联能力越强,从而增强了蛋白的凝胶基质,因此具有较强的持水能力^[12]。与 SC 和 AC 相比,MC

(1:3) 和 MC (1:5) 样品的脂肪含量显著升高 ($P<0.05$),其中 MC (1:3) 样品脂肪含量最高。奶酪中蛋白质和脂肪含量与水分含量成反比关系^[13]。动物基奶酪的 pH 在 4.5~5.5 之间。与动物基奶酪相比,5 种奶酪的 pH 偏低。这可能是因为植物基奶酪中多糖体系较少,蛋白质与多糖之间发生的静电相互作用较少,因此奶酪中 H^+ 浓度较高,这还需要进一步研究。所有奶酪的灰分含量无显著差异。

2.2 植物基奶酪的风味分析

电子鼻是区分气味特征的有效工具，它可以获得与样品中挥发性化合物相关的综合信息，利用电子鼻对五种奶酪的整体风味进行分析，结果如图 5 所示。

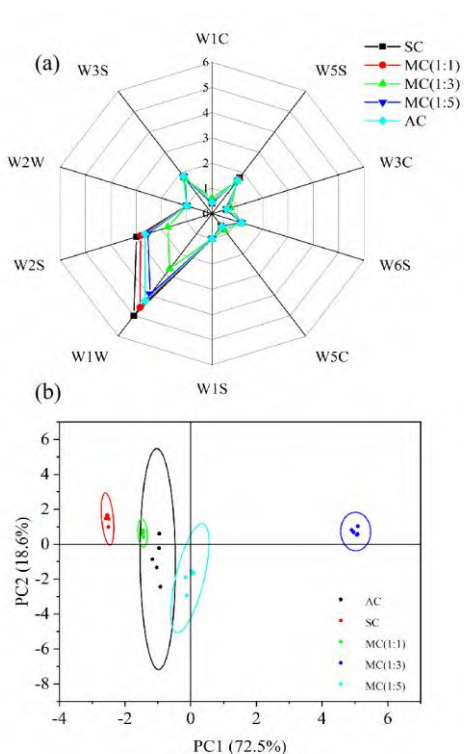


图 1 植物基奶酪的电子鼻雷达图 (a) 和主成分分析 (b)

Fig. 1 Electronic nose radargram (a) and principal component analysis (b) of plant-based cheeses

如图 1 (a) 所示，5 种奶酪对 W1C 几乎没有反应，这表明发酵过程中很少产生芳香化合物；虽然对 W3C、W5C、W1S 和 W2W 的信号强度较低，

但样品之间仍存在差异，这表明发酵过程中产生了少量的氨类、短链烷烃和有机硫化物。五种奶酪样品对 W1W 和 W2S 的信号强度最高，这表明在发酵过程中产生了较多的醇类、醛类、酮类以及无机硫化物等物质，说明发酵过程对奶酪的风味形成有着显著影响。主成分分析可以反映样品与变量（香气成分）之间的关系，用于化学模式识别中的分类和聚类。主成分 1 和主成分 2 的总贡献率为 91.1%，可以完全代表样品的整体信息。五种奶酪样品大致分为三个独立的区域，MC (1:1)、MC (1:5) 以及 AC 样品的分布相对集中，这说明三种样品较为相似，而 SC 和 MC (1:3) 样品分布比较独立，这说明两种样品的风味特征得到了区分，MC (1:3) 样品偏离最远，说明一定比例的混合可以明显改善奶酪的风味特征。

2.3 植物基奶酪的挥发性化合物分析

奶酪中的风味源于多种挥发性化合物的微妙平衡，挥发性化合物在奶酪的风味方面起着至关重要的作用^[14]。植物基奶酪中挥发性化合物的含量见表 4。SC、MC (1:1)、MC (1:3)、MC (1:5) 和 AC 奶酪中分别检测出 41、43、42、34 和 28 种挥发性化合物。

表 4 植物基奶酪中挥发性化合物的含量

Tab. 4 Content of volatile compounds in plant-based cheeses

类别	中文名	相对含量 (%)				
		SC	MC (1:1)	MC (1:3)	MC (1:5)	AC
醇类	1-戊醇	0.35	0.26	0.10	0.15	0.20
	(2S,3S) - (+) -2,3-丁二醇	4.29	—	—	—	—
	正己醇	2.86	1.10	0.54	—	—
	正丁醇	0.86	0.53	0.21	0.73	—
	2-庚醇	0.93	1.03	1.23	0.58	0.95
	1-辛烯-3-醇	12.75	6.25	1.83	0.50	—
	2-乙基己醇	17.56	4.49	3.10	2.29	3.73
	α,α -4-三甲基环己基甲醇	0.39	—	0.41	—	0.36
	二甲基硅烷二醇	6.59	6.11	1.81	3.75	4.05
	3-甲基-1-己醇	0.42	—	—	—	—
	2-丙基-1-庚醇	0.44	0.36	0.28	0.22	—
	2-丙基-1-戊醇	—	0.53	2.12	—	—

	4-乙基-1-辛炔-3-醇	—	—	—	0.38	—
	三甲基硅醇	2.11	0.51	0.72	—	0.42
	苯甲醇	—	4.26	3.00	3.6	1.09
酯类	乙酸丁酯	0.32	0.13	0.13	—	0.14
	乙酸苄酯	—	—	0.54	—	0.52
	2-甲基丁酸乙酯	0.21	—	—	—	—
	正己酸乙酯	0.27	—	0.32	0.45	—
	甲酸己酯	—	0.73	0.81	1.76	—
	邻苯二甲酸二乙酯	0.33	—	0.18	—	—
醛类	正己醛	3.89	0.88	7.51	3.64	4.36
	庚醛	0.46	0.21	0.18	0.21	0.73
	苯甲醛	6.76	58.76	61.96	70.23	74.28
	正辛醛	0.95	0.23	0.17	0.53	1.53
	正戊醛	0.54	—	0.45	—	0.39
	苯乙醛	1.02	—	—	—	—
	反-2-辛烯醛	0.6	0.14	0.78	1.38	0.80
	壬醛	2.11	0.68	0.47	0.50	1.84
	(Z)-2-壬烯醛	1.31	—	—	—	—
	癸醛	0.69	0.18	0.11	0.10	0.22
	2-癸烯醛(反)	—	—	—	—	0.19
	2-庚烯醛	—	0.18	—	0.16	—
	反式-2,4-癸二烯醛	—	0.12	0.07	0.08	—
酸类	异戊酸	0.91	1.36	0.86	0.78	0.19
	醋酸	6.16	2.23	1.45	1.29	—
	丁酸	1.33	0.24	0.13	—	—
	2-甲基丁酸	0.52	—	0.16	0.26	0.12
	2-甲基己酸	—	0.23	—	—	—
	丙基丙二酸	—	—	—	0.15	—
	异丁酸	—	0.32	0.23	0.27	—
苯酚类	甲苯	1.83	0	0.11	—	—
	乙基苯	0.31	0.31	0.52	—	0.19
	间二甲苯	1.16	—	—	—	1.05
	对二甲苯	0.8	—	—	—	0.41
	3,4-二甲氧基甲苯	0	0.18	0.14	0.16	0.49
酮类	3-羟基-2-丁酮	7.98	—	—	—	—
	2-庚酮	4.21	3.12	3.31	2.43	0.22
	3-甲基-2-戊酮	1.66	—	—	—	—
	4-甲基-2-己酮	—	0.08	0.09	—	—
其他物质	二硫化碳	—	0.63	2.41	1.71	0.26
	4,4'-二异硫氰酰-2,2'-基二磺酸二钠盐	0.21	0.15	—	—	—
	2-正戊基咪喃	1.03	0.37	0.37	0.28	0.94
	硝基咪喃代谢产物-咪喃唑酮	—	0.24	0.15	0.14	—
	氟化乙烯	—	0.28	—	—	—
	环庚三烯	—	0.23	—	—	—

正己烷	—	0.50	—	—	—
癸烷	0.77	—	—	—	—
三氯甲烷	—	—	—	0.10	—
2-氯辛烷	—	—	0.14	—	—
4-氯辛烷	—	0.23	—	0.24	—
6-甲基十八烷	—	0.07	0.06	0.15	—
异辛烷	—	0.08	—	—	—
1-亚甲基-1H-茛	—	0.08	—	—	—
亚硝基甲烷	2.11	1.40	0.84	0.80	0.60

注：—表示未检出。

醇类、醛类和酯类是食品风味的重要组成成分。醇类和醛类是五种样品中检测最广泛的化合物，SC、MC (1:1)、MC (1:3)、MC (1:5) 和 AC 中醇类和醛类含量分别为 49.55%、25.43%、15.35%、12.43%、10.8% 和 18.33%、61.38%、71.7%、76.83%、84.34%。醇类的产生可能与乳酸菌的发酵过程有关，这为氨基酸分解代谢的产物^[15]。醛类物质主要由不饱和脂肪酸氧化产生，可以给予样品芳香、果香以及坚果的清香气味，大多数直链醛来源于不饱和脂肪酸的氧化，支链醛来源于支链氨基酸的降解，醛类物质通常可以与醇类、氨基附着或缩合，产生与自身不同的香气，使产品的风味复杂化^[16]；酯类物质是在发酵过程中形成的，大多数酯类物质具有花香和果香味，发酵过程中产生的脂类物质主要有乙酸丁酯、乙酸苜酯等，这可以赋予产品果香味^[17]。

醇类物质是 SC 的主要成分，1-辛烯-3-醇属于醇类，是对豆腥味贡献程度最大的风味化合物，在 SC 中检测值为 12.75%。与 SC 相比，三种 MC 样品中 1-辛烯-3-醇含量明显下降，MC (1:3) 中 1-辛烯-3-醇含量为 1.83%，比 SC 降低了 10.92%；MC (1:5) 中的含量仅为 0.5%，与 SC 相比降低了 12.25%，这说明将大豆与杏仁混合后制作奶酪，其豆腥味可以得到很好的被掩蔽。2-乙基己醇具有甜味和淡淡的花香味，在 SC 样品中检测值为 17.56%，其他奶酪中也检测到少量的 2-乙基己醇，赋予奶酪淡淡的花香味。五种奶酪中均检测到 2-庚醇，2-庚醇具有和鲜柠檬类似的香气和青草香气，赋予奶酪果香味和青草香味。

醛类（如苯甲醛、正己醛、壬醛、正辛醛等）物质在三种 MC 样品及 AC 样品中占比较多，在 SC 中含量较少，且随着杏仁比例的增加，醛类物质呈现增加的趋势。苯甲醛是杏仁的主要风味物质，具有苦杏仁味及芳香味，在 AC 中占比最多，为 74.28%，MC (1:1)、MC (1:3)、MC (1:5) 中

也检测出较多的苯甲醛，含量分别为 58.76%、61.96% 和 70.23%，是奶酪挥发性化合物的主要成分，但 MC 样品中苯甲醛含量相对于 AC 中较低，这说明混合后的奶酪可以使杏仁风味降低。具有花果香的苯乙醛在 SC 样品中占 1.02%，在其他奶酪中未检测出。正己醛带有香草及水果味，在 MC (1:3) 中含量较高，为 7.51%，赋予奶酪花果的清香。壬醛具有玫瑰、柑橘等香气，并带有浓烈的油香，有利于奶酪增香。反-2-辛烯醛和正辛醛带有肉类及水果香味，这为奶酪也提供了良好的风味。

奶酪在发酵过程中也产生了一些酯类物质，赋予奶酪水果香和花香，使产品具有更好的风味。2-甲基丁酸乙酯仅在 SC 中被检出，其他样品中均未检出。酮类物质在 SC 中含量较多，酮类通常在低含量下呈现较好的香气，但在较高含量下，它们具有刺激性气味^[16]。五种奶酪中 2-庚酮含量较高，可以赋予奶酪果香味。呋喃类物质具有明显增甜增香的效果，呋喃酮能提高食品的甜度，并能掩盖发酵过程中的异味。此外，发酵过程中产生了酸类，赋予奶酪清新的酸度^[15]，发酵过程中产生的其它化合物也有助于风味的形成。

图 2 反映了 GC-MS 检测到的所有挥发物的热图，分别显示了 SC、MC (1:1)、MC (1:3)、MC (1:5) 和 AC 样品中每种挥发性化合物的浓度差异。SC 样品中正己醇、2-乙基己醇、1-辛烯-3-醇、正丁醇、乙酸丁酯的浓度较高，与醇类和酯类呈正相关，增强了奶酪的果香风味；MC (1:1) 样品与烷烃类和酮类呈正相关，MC (1:3) 样品与醇类、呋喃类、醛类以及酯类物质呈显著正相关。MC (1:5) 样品与酸类、醛类和烷烃类呈正相关，与醇类和酮类的相关性不明显。AC 样品主要与醛类物质呈显著正相关，庚醛、正辛醛等带有水果香味，赋予奶酪果香。醛的存在是新鲜奶酪的典型特征，因为奶酪中化合物很容易转化为醇和酸，因此醛类的比例会随着奶酪的老化而减少^[18]。

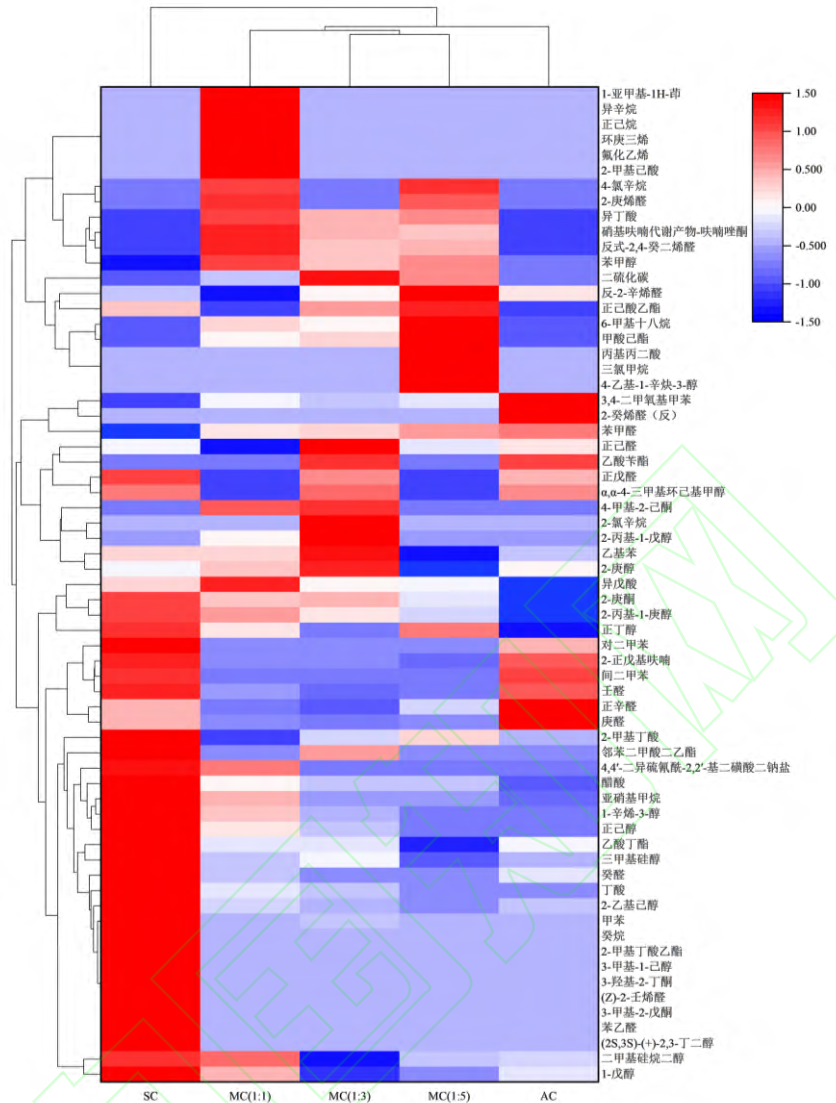


图2 植物基奶酪中挥发性化合物含量热图

Fig. 2 Heatmap of volatile compounds content in plant-based cheeses

2.4 植物基奶酪质构性质的分析

5种植物基奶酪质构特性的分析结果见表5。方差分析表明,不同奶酪的质地特征存在显著差异($P<0.05$)。由表5可知,MC的质地均高于SC,这说明大豆蛋白与杏仁蛋白交联有利于改善奶酪样品的质地。奶酪的硬度与蛋白质含量显著相关,蛋白质含量越高,形成的凝胶网络越强,硬度就越高。

在混合奶酪中,随着杏仁比例的增加,奶酪硬度呈现先增高后降低的趋势,总体来说,具有较高蛋白质和脂肪的奶酪通常具有较高的硬度值,并且其变形能力较低^[19]。MC(1:3)在所有奶酪中硬度最高,这可能是由于大豆蛋白和杏仁蛋白交联后增强了蛋白质网络,从而使奶酪具有较高的硬度。SC在五种奶酪中硬度最低,这可能是由于其水分含量

较高引起的,硬度与水分含量之间的负相关关系已被充分证明^[20, 21]。

奶酪硬度较高的另一种原因可能也与其脂肪含量较高有关,脂肪作为填充成分能够稳定凝胶网络,从而使奶酪具有较高的硬度^[22]。内聚性是衡量蛋白质基质内部结合强度的指标,五种奶酪内聚性几乎随pH值的降低而降低,可能是因为蛋白质在较低pH下其内聚性有所损失。奶酪的咀嚼性随着硬度的增加而增加,SC的咀嚼值低于MC和AC,但弹性值较高($P<0.05$),这可能是由于SC中具有较高的水分含量。奶酪的硬度与弹性、内聚性之间无明显联系。五种样品在回复力上无显著性差异。MC(1:3)的质地更接近动物基市售奶酪(Commercial cheese, CC),这表明将豆浆与杏仁浆混合后制作植物基奶酪有利于提高奶酪的硬度

和咀嚼性，使奶酪拥有较好的质地。

表 5 植物基奶酪的质构特性

Tab. 5 Textural properties of plant-based cheese

名称	SC	MC (1:1)	MC (1:3)	MC (1:5)	AC	CC
硬度 (g)	728.86±0.04 ^e	734.03±0.01 ^e	1079.42±0.02 ^a	985.45±0.01 ^c	784.33±0.02 ^d	1005.67±13.73 ^b
弹性 (mm)	0.43±0.01 ^d	0.42±0.02 ^d	0.47±0.03 ^b	0.45±0.02 ^c	0.45±0.01 ^c	0.50±0.01 ^a
内聚性 (-)	0.44±0.02 ^d	0.44±0.01 ^d	0.47±0.01 ^b	0.46±0.02 ^b	0.45±0.05 ^c	0.52±0.01 ^a
胶着度 (g)	291.91±0.02 ^f	330.96±0.03 ^e	566.52±0.02 ^a	452.82±0.04 ^c	367.95±0.02 ^d	520.94±10.14 ^b
咀嚼性 (g)	124.04±0.02 ^f	154.39±0.04 ^e	227.29±0.01 ^b	176.58±0.03 ^c	166.22±0.02 ^d	262.11±15.64 ^a
回复力 (-)	0.11±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.15±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.13±0.02 ^a	0.14±0.01 ^a

注：同行上标不同字母代表具有显著性差异 $P < 0.05$ ，CC：动物基市售奶酪。

2.5 植物基奶酪流变性质的分析

频率扫描测试用于评估奶酪在不同频率下的粘弹性特征，表明了样品的粘弹性固体行为，植物基奶酪的流变特性如图 3 所示。

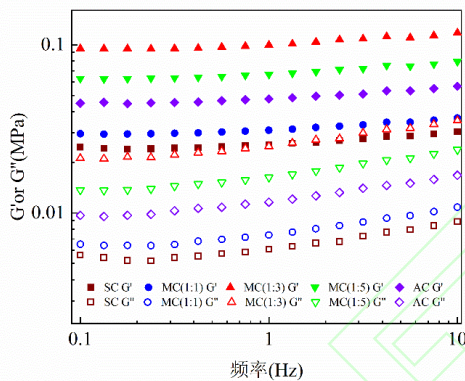


图 3 植物基奶酪的粘弹性特征 (频率扫描)

Fig. 3 Viscoelastic characteristics of plant-based cheeses (frequency scan)

由图 3 可知，在整个研究频率范围内 G' 值大于 G'' 值，这表明奶酪样品存在着相互连接的网络结构，说明样品的弹性占主导地位^[23]。这可能是由于奶酪中蛋白质-蛋白质的相互作用，使奶酪具有弹性特性，Bansal 等^[24]也有相似的研究结果，蛋白质含量高的奶酪其 G' 和 G'' 高于蛋白质含量低的奶酪。 G' 和 G'' 值均随频率增加而增大，这为凝胶结构的典型表现^[25]。Patel 等^[26]认为， G' 和 G'' 值随频率的增加可能是因为在较高频率下聚合物链的链间距离

发生的时间不足，而在较低频率下有足够的时间发生链间距离。脂肪含量对 G' 和 G'' 也具有影响，且与其呈正相关，脂肪含量高的样品表现出更好的弹性行为，这是因为在脂肪含量高的样品中，脂肪球与蛋白质之间的相互作用力更强^[24]。在频率扫描过程中，MC (1:3) 的储存模量最高，表明 MC (1:3) 比其他样品具有更高的弹性行为。此外，MC (1:3) 显示出较高的弹性行为可能也与其内部具有良好的完整性有关^[22]，还有可能是因为其样品中的蛋白质存在着更高的疏水相互作用^[27]。但是大豆蛋白和杏仁蛋白之间的网络结构和相互作用还需进一步研究。

2.6 植物基奶酪微观结构的分析

蛋白质是奶酪微观结构的主要决定因素，不同类型蛋白质的微观结构也有所不同^[3]。扫描电子显微镜显示不同奶酪的微观结构如图 4 所示。不同类型的植物基奶酪在质地和微观结构上存在差异，这可能是由于蛋白质种类及含量不同，从而影响了蛋白质网络中分子间的静电相互作用。由图 4 可知，SC 含有大量的大豆球蛋白，MC 中均可以观察到大豆蛋白与杏仁蛋白的直接相互作用，这可能是由于大豆蛋白和杏仁蛋白通过交联形成大豆蛋白-杏仁蛋白复合物，通过影响蛋白质分子间静电相互作用和疏水相互作用来增强蛋白质网络，因此形成了紧密的网络结构^[28]。

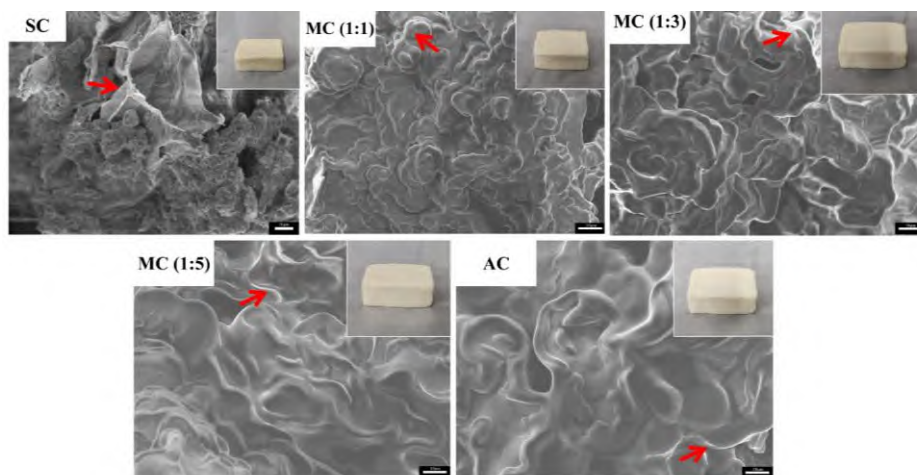


图4 植物基奶酪的扫描电子显微镜(箭头所指部位为油脂)

Fig. 4 Scanning electron microscopy of plant-based cheeses

MC (1:3) 与其它样品相比具有较为连续的蛋白质基质, 因此具有更高的硬度及更低的水分含量, 这与文献^[29]的研究结果一致。MC (1:1) 和 MC (1:3) 中明显地看到大豆蛋白与杏仁蛋白的交联, 并且 MC (1:3) 中观察到了大小不均匀的蛋白质聚集, 这可能与奶酪内部静电相互作用的降低和疏水相互作用的增加有关^[30]。MC (1:5) 中杏仁蛋白偏多, 但也可以观察到大豆蛋白与杏仁蛋白的交联。除蛋白质之间的交联外, 还可以观察到样品中存在较多的油脂, 脂肪的存在会增加蛋白质与脂肪的相互作用, 蛋白质在脂肪颗粒上的吸附可以使脂肪有效地充当蛋白质颗粒, 从而增加凝胶的交联密度^[3]。这表明, 由大豆和杏仁制成的 MC 改变了分别由大豆或杏仁制成植物基奶酪的微观结构, 并且杏仁比例不同会导致奶酪的微观结构也不同, MC (1:3) 中蛋白质结合更紧密, 这与上文 MC (1:3) 具有较好的网络结构, 从而具有较好的质地相呼应。

2.7 植物基奶酪的感官评价

奶酪类似物的感官特性对于产品的可接受性至关重要, 图 5 显示了每个评估参数的平均分数。

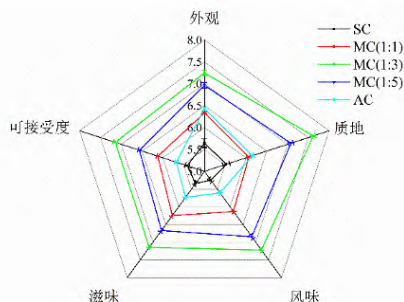


图5 植物基奶酪的平均感官得分

Fig. 5 Average sensory scores of plant-based cheeses

五种植物基奶酪的感官评分都在 5 分以上, 证明其风味是可以被小组成员接受的。但是 SC 样品的总体评分都比较低, 可能是因为它具有豆腥味, 质地较软并且颜色偏黄, 因此与 MC 相比接受程度较低。此外, SC 样品表面较粗糙, 导致其感官评分最低。MC (1:1) 感官评分在 6.5 分左右, 可能是因为杏仁添加较少, 蛋白质结合不够致密, 导致其质地和风味较差, 评分低。MC (1:3) 样品的评分显著高于其他奶酪 ($P < 0.05$), 在 7.5 分左右, 这说明 MC (1:3) 具有较好的质地, 且成功掩蔽了豆腥味, 在颜色及风味方面都能容易被接受。MC (1:5) 感官评分有所下降, 可能是因为杏仁添加比例过高, 杏仁味太浓导致的。AC 风味、滋味和可接受度均低于 5.5 分。感官评价证明了混合后的植物基奶酪具有较好的质地, 掩蔽了豆腥味, 感官评分较高。

3 结语

大豆和杏仁混合制作植物基奶酪在很大程度上改变了纯大豆奶酪的风味及质地, 通过电子鼻及挥发性化合物确定了发酵过程中产生了较多的醇类、醛类和酮类物质, 且 MC (1:3) 中 1-辛烯-3-醇和苯甲醛含量相较于 SC 和 AC 分别减少了 10.92% 和 12.32%, 这表明豆腥味和杏仁味得到了很好的掩蔽。MC (1:3) 的硬度和咀嚼性分别提升到了 1079.42 g 和 227.29 g, 相较于 SC 提高了 48.10% 和 83.24%。MC (1:3) 中大豆蛋白和杏仁蛋白相互交联使网络结构增强, 因此植物基混合奶酪具有较好的风味和质地, 为后期植物基奶酪的研发提供新思路。

参考文献:

- [1] IJIMA Y, MIWA A, SHIMADA K, et al. Superior high-efficiency and high-throughput volatile flavor extraction of Japanese fermented seasonings by solvent-assisted stir bar solid extraction with reverse extraction[J]. *Journal of bioscience and bioengineering*, 2024, 137(5): 372-380.
- [2] CAI J S, JING Y N, ZHI J M, et al. An update on the nutritional, functional, sensory characteristics of soy products, and applications of new processing strategies[J]. *Trends in food science & technology*, 2021, 112: 676-689.
- [3] DEVNANI B, ONG L, KENTISH S E, et al. Physicochemical and rheological properties of commercial almond-based yoghurt alternatives to dairy and soy yoghurts[J]. *Future foods*, 2022, 6: 100185.
- [4] 李莹莹. 大豆干酪的制备及后熟特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
- [5] TOWNSHEND A. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists, 14th edn[J]. *Analytica chimica acta*, 1987, 193: 400-401.
- [6] LI Y, YUAN L, LIU H, et al. Analysis of the changes of volatile flavor compounds in a traditional Chinese shrimp paste during fermentation based on electronic nose, SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. *Food science and human wellness*, 2023, 12(1): 173-182.
- [7] WANG B, WANG J, XU L Y, et al. Characterization of the key odorants in kurut with aroma recombination and omission studies[J]. *Journal of dairy science*, 2020, 103(5): 4164-4173.
- [8] TOMAR O, AKARCA G, V G O, et al. The effects of packaging materials on the fatty acid composition, organic acid content, and texture profiles of Tulum cheese[J]. *Journal of food science*, 2020, 85(10): 3134-3140.
- [9] AYYASH, MUTAMED, ABU-JDAYIL, et al. Rheological, textural, microstructural and sensory impact of exopolysaccharide-producing *Lactobacillus plantarum* isolated from camel milk on low-fat akawi cheese[J]. *Lwt-food science & technology*, 2018, 87: 423-431.
- [10] LI H, ZHANG Y, LIU T, et al. Transglutaminase (TG), glucono- δ -lactone (GDL) and citric acid (CA) induced whey protein isolation-milk fat emulsion gel embedding lutein and its application in processed cheese[J]. *Journal of dairy science*, 2023, 106(10): 6635-6645.
- [11] SHORI A B, HONG Y C, BABA A S. Proteolytic profile, angiotensin-I converting enzyme inhibitory activity and sensory evaluation of *Codonopsis pilosula* and fish collagen cheese[J]. *Food research international*, 2021, 143: 110238.
- [12] DEVNANI B, ONG L, KENTISH S, et al. Heat induced denaturation, aggregation and gelation of almond proteins in skim and full fat almond milk[J]. *Food chemistry*, 2020, 325: 126901.
- [13] VIGNEUX MP B, VILLENEUVE W, POULIOT Y, et al. Increasing the proportion of homogenised fat in cheese milk: Effect on cheese-making properties[J]. *International dairy journal*, 2022, 126: 105254.
- [14] DAI Y, XU Z, WANG Z, et al. Effects of fermentation temperature on bacterial community, physicochemical properties and volatile flavor in fermented soy whey and its coagulated tofu[J]. *Lwt-food science & technology*, 2023, 173: 114355.
- [15] PENG X, LIAO Y, REN K, et al. Fermentation performance, nutrient composition, and flavor volatiles in soy milk after mixed culture fermentation[J]. *Process biochemistry*, 2022, 121: 286-297.
- [16] QUE Z, JIN Y, HUANG J, et al. Flavor compounds of traditional fermented bean condiments: Classes, synthesis, and factors involved in flavor formation[J]. *Trends in food science & technology*, 2023, 133: 160-175.
- [17] KEENAN D F, BRUNTON N P, MITCHELL M, et al. Flavour profiling of fresh and processed fruit smoothies by instrumental and sensory analysis[J]. *Food research international*, 2012, 45(1): 17-25.
- [18] CHEN C A, TT A, HY A, et al. Characterisation of the key volatile compounds of commercial Gouda cheeses and their contribution to aromas according to Chinese consumers' preferences[J]. *Food chemistry: x*, 2022, 15: 100416.
- [19] OLUK A C. Effect of production variations on the composition, textural and microstructural properties, and volatile compounds of Turkish white cheese during ripening[J]. *Lwt-food science & technology*, 2023, 173: 114348.
- [20] GAMLATH J, ALDRED G P, PANOZZO J F. Barley (1 \rightarrow 3;1 \rightarrow 4)- β -glucan and arabinoxylan content are related to kernel hardness and water uptake[J]. *Journal of cereal science*, 2008, 47(2): 365-371.
- [21] ARD Y, MCSWEENEY P, MAGBOUL A, et al.

- Biochemistry of Cheese Ripening: Proteolysis[J]. Cheese (fourth edition), 2017: 445-482.
- [22] WANG W, JIA R, HUI Y, et al. Utilization of two plant polysaccharides to improve fresh goat milk cheese: Texture, rheological properties, and microstructure characterization[J]. Journal of dairy science, 2023, 106(6): 3900-3917.
- [23] CHEN T, WU Y, LIU F, et al. Unusual gelation behavior of low-acetyl gellan under microwave field: Changes in rheological and hydration properties[J]. Carbohydrate polymers, 2022, 296: 119930.
- [24] BANSAL V, KANAWJIA S K, KHETRA Y, et al. Steady and dynamic rheological properties of cheese dip: Effect of milk proteins, fat and cheddar cheese[J]. Measurement: food, 2022, 8: 100066.
- [25] QU R J, WANG Y, LI D, et al. Rheological behavior of nanocellulose gels at various calcium chloride concentrations[J]. Carbohydrate polymers, 2021, 274: 118660.
- [26] PATEL G, MURAKONDA S, DWIVEDI M. Steady and dynamic shear rheology of Indian Jujube (*Ziziphus mauritiana Lam.*) fruit pulp with physicochemical, textural and thermal properties of the fruit[J]. Measurement: food, 2022, 5: 100023.
- [27] ABDALLA A, ABU-JDAYIL B, ALSEREIDI H, et al. Low-moisture part-skim mozzarella cheese made from blends of camel and bovine milk: Gross composition, proteolysis, functionality, microstructure, and rheological properties[J]. Journal of dairy science, 2022b, 105(11): 8734-8749.
- [28] FANG T, GUO M. Physicochemical, texture properties, and microstructure of yogurt using polymerized whey protein directly prepared from cheese whey as a thickening agent[J]. Journal of dairy science, 2019, 102(9): 7884-7894.
- [29] MA A, SS B, JC B, et al. Interaction between phospholipase and transglutaminase in the production of semi-soft fresh cheese and its effect on the yield, composition, microstructure and textural properties[J]. Lwt-food science & technology, 2021, 154: 112722.
- [30] JIA Y, YAN X, HUANG Y, et al. Different interactions driving the binding of soy proteins (7S/11S) and flavonoids (quercetin/rutin): alterations in the conformational and functional properties of soy proteins[J]. Food chemistry, 2022, 396: 133685.