

黄油的研究进展

葛雨星¹, 成姝洁¹, 吴时敏^{*1,2}

(1. 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240; 2. 中美食品安全联合研究中心, 上海 200240)

摘要:近年来国内黄油的贸易量、关注度和研究热度显著上升。黄油开发及创新面临着如何提升感官特性、健康品质和绿色发展水平等多重挑战。作者综述了黄油市场及国内外研究现状,分析了未来黄油研发的重点方向与解决方法,重点探讨了未来黄油的原料创新和技术创新方式,旨在为当前黄油生产和新型黄油开发提供参考。

关键词:黄油;人造黄油;脂肪替代物;风味;发酵;凝胶化

中图分类号:TS 201 文章编号:1673-1689(2022)06-0021-10 DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2022.06.003

Research Progresses of Butter

GE Yuxing¹, CHENG Shujie¹, WU Shimin^{*1,2}

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Sino-US Joint Center of Food Safety, Shanghai 200240, China)

Abstract: In recent years, the domestic trade volume, public attention and research popularity of butter have increased significantly. Butter development and innovation are facing the triple challenges from sensory characteristics, health quality and green ecology. This paper summarizes the butter market and research status at home and abroad, and analyzes the key directions and solutions of butter research and development in the future. The raw material innovation and technological innovation of butter in the future were particularly discussed. The review aims to provide reference for current butter production and novel butter development.

Keywords: butter, margarine, fat substitute, flavour, fermentation, gelation

食用黄油的历史最早可追溯至新石器时代^[1],在19世纪工业革命之前,其一直是亚欧游牧民族的主要食用油。黄油一直受到政治、宗教、科技等因素的综合影响,其生产原料、生产工艺、市场需求等都在不断发展中。近年来,黄油因其独特的风味和口感获得了国内消费者和食品生产商的青睐,被广泛应用于各式食品的开发、制作及生产中。

人造黄油不同于从牛乳中加工获得的天然黄

油,其通常以食用植物油为原料,形成油包水的乳液体系^[2]。人造黄油最早是被用作天然黄油的经济型替代物。20世纪90年代以后,反式脂肪酸被证明会导致低密度脂蛋白数量升高和高密度脂蛋白数量降低,进而引发心血管疾病^[3]。因此,传统的人造黄油因其反式脂肪酸受到消费者和学界的抵制。近年来,随着含反式脂肪酸的氢化植物油已经或正在被全球性禁止,新型零反式脂肪酸的人造黄

收稿日期:2022-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(32061160476);上海市“科技创新行动计划”农业领域项目(19391902500)。

*通信作者:吴时敏(1970—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品质量与安全研究。E-mail:wushimin@sjtu.edu.cn

油将具有很好的研发驱动和市场前景。

1 黄油市场现状及趋势

1.1 黄油贸易现状及趋势

根据中华人民共和国海关总署公开数据,2021年我国进出口天然黄油及人造黄油的数量见图1。天然黄油和人造黄油的进出口量处于持续波动中。我国多从澳大利亚、新西兰等乳品大国进口黄油,进口量高于出口量数倍甚至数十倍。天然黄油每月的进出口量大部分高于人造黄油,天然黄油在市场需求、贸易量方面仍占据主导地位。受国际贸易格局、区域全面经济伙伴关系协定(regional comprehensive economic partnership,RCEP)的影响,天然黄油和人造黄油后续贸易量变化还有待观察。

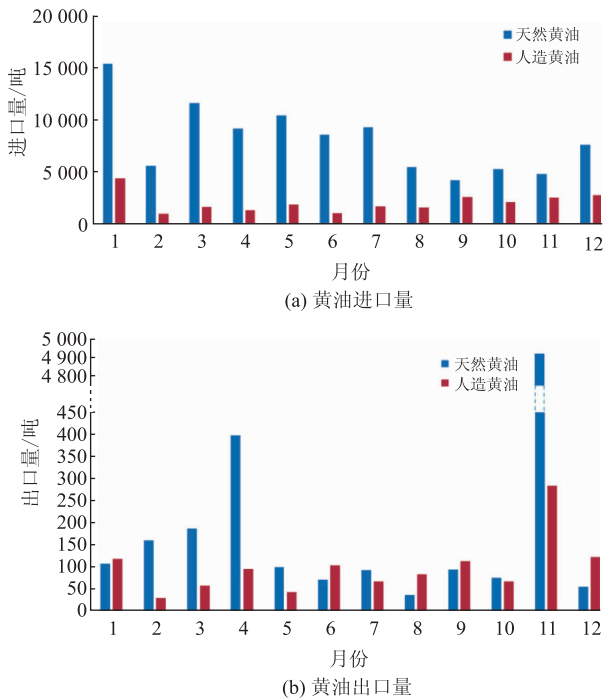


图1 2021年我国天然黄油和人造黄油贸易量

Fig. 1 Domestic trade of butter and margarine in 2021

1.2 国内外黄油产品现状及趋势

通过对中国主流电商平台上销售的黄油价格进行统计,可以发现目前中国市场上黄油的价格差异巨大,总体上天然黄油价格高于植物黄油,进口黄油价格高于国产黄油。按照原料分类,市面上的黄油可以分为天然黄油、植物黄油和混合黄油;按照风味分类,可以分为原味黄油和咸味黄油。从营养标签上看,天然黄油的原料主要是生牛乳或稀奶

油,而植物黄油中除精炼植物油外,还可以添加一些功能性组分,如VD、VE、VK等。

世界范围内,黄油生产格局基本固定。受饮食习惯的影响,国内产业对黄油认知度低,工业化生产水平不足,行业发展较慢,市场需求过度依赖进口。根据中华人民共和国海关总署公布的数据,新西兰已经成为中国黄油市场的最大进口国。市场上消费较多的黄油品牌如安佳、牧恩、威士宝等均来自新西兰。这可能与新西兰的优质奶源和成熟生产工艺,以及中新自贸协定中对黄油规定的零关税有关。2022年1月1日起,RCEP正式生效,曾经的壁垒手段如关税和配额限制等,将被技术壁垒取代。近年来,我国食品出口面临的技术壁垒的形式不断扩展,不再局限于质量、安全,而是逐渐拓宽至包装、标签、运输等。因此,我国一方面应充分利用RCEP协定的各项进出口优惠政策推动国内黄油贸易发展,提升出口黄油质量和市场份额;另一方面应预防针对黄油产品的技术壁垒,防止品质不良的黄油产品流入我国市场。

近期黄油需求增加,黄油价格有望持续走高。为应对激烈的竞争压力,国内外企业纷纷采取措施来提升黄油市场份额。1)创新外观:有设计师用木制刀具作为黄油的密封盖,既可以用密封盖直接取用黄油,又可以避免清洗刀具的麻烦;2)改良包装:如Mergulo公司开发了一款纤维基、不含聚乙烯的防油黄油包装盒,独特的铰链设计省去了中间的盛装过程,可以被直接端上餐桌;3)扩展用途:如Picnik公司推出的黄油咖啡口感丰富顺滑,引起了消费热潮;4)方便食用:如蒙牛乳业引进了可挤压涂抹的液体黄油品牌乐派克,覆盖消费者全天候的食用场景;5)升级工厂:如伊利集团全面升级位于新西兰西海岸的霍基蒂卡工厂,大幅提升旗下黄油品牌牧恩的产量;6)添加功能因子:如联合利华公司在黄油中加入了植物甾醇,以降低人体低密度脂蛋白和胆固醇含量,向消费者传递健康理念。

2 黄油研究现状

2022年1月,根据WOS核心数据库,以“Butter”或“Margarine”为主题词进行搜索,共检索到近万条结果。对检索结果的发表年份和发表国家进行分析,结果见图2。有关黄油的文献发表量及被引频次均逐年上升,表明黄油的研究热度与日俱

增。在稿源分布方面,美国发表的文献数量排在第一位,是我国的近4倍,前10名国家中有一半以上均是欧美发达国家。除美国外,前10名中其他国家发表的文献数量相差不大。研究黄油的文献数量排名与一个国家的人口、科技、乳业、经济和消费习惯密切相关。

在图2(a)和2(b)的基础上,基于VOS Viewer软件,对文献中频繁出现的关键词进行了关键词共现分析(见图2(c))。根据共现关系将高频关键词分

为了4个区域。蓝色区域聚焦于心血管疾病。绿色区域出现了风险评估的方法和结果,体现了膳食摄入黄油对健康影响的研究热度。红色区域的“质构”“同质多晶”“酯交换”等与人造黄油的理化性质紧密相关,研究人员常通过比较天然黄油和人造黄油的理化性质,以评价人造黄油模拟天然黄油的逼真度。黄色区域则主要是制备黄油的原料“牛奶”,牛奶的品质直接决定了黄油的质量。

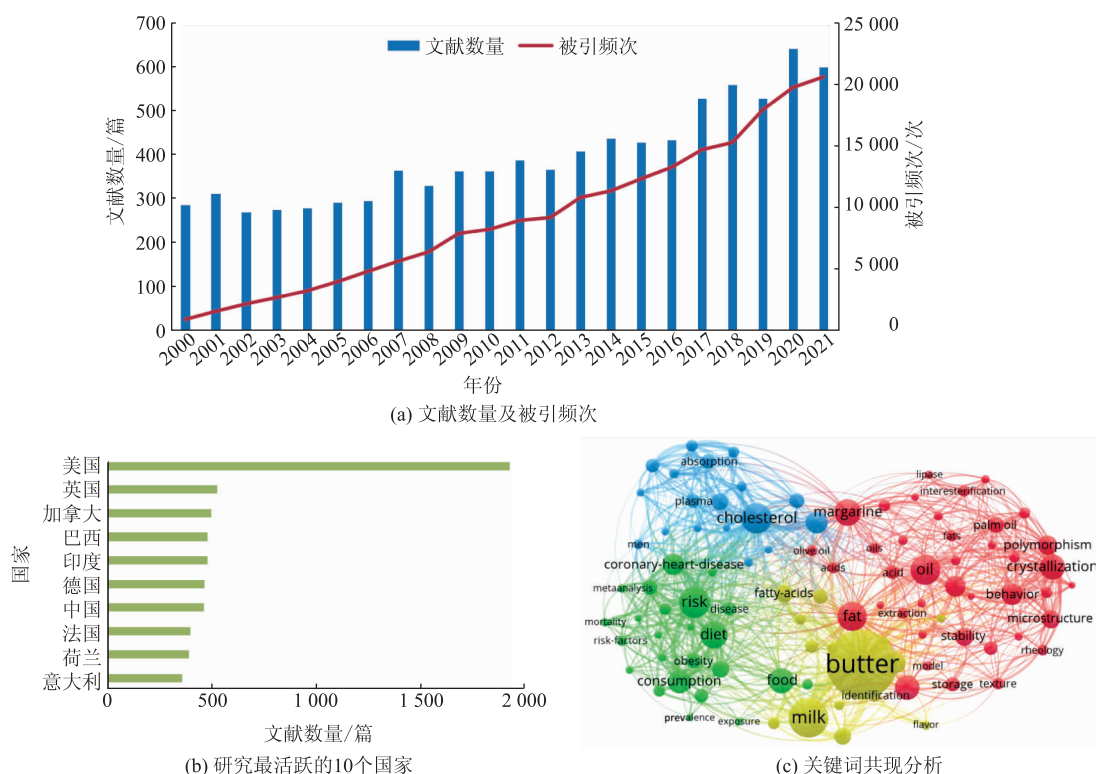


图2 21世纪以来黄油研究国际文献分析

Fig. 2 Analysis of global literature about butter since the 21st century

3 未来黄油发展面临的挑战

3.1 如何控制感官质量

表1汇总了影响消费者选择黄油产品的关键因素,感官品质是最重要的影响因素。由于原料、理化特性、加工参数等方面的区别,人造黄油和天然黄油在颜色、风味、质构等感官性质上总是存在差异。早在19世纪时,生产商就通过在人造黄油中添加食用色素或以有色大豆油和花生油为原料的方式,对本身无色的人造黄油进行染色,使其在

颜色上更接近天然黄油。时至今日,如何全方面地模拟天然黄油的感官性质并被消费者接受,一直都是研究者关注的焦点,并将成为未来的研究趋势。例如,Hwang等发现含10%(质量分数)向日葵蜡的大豆油在硬度上很接近人造黄油,但其熔点更高^[23]。

3.2 如何评估黄油对健康的影响

由于天然黄油中的饱和脂肪酸和部分人造黄油中的反式脂肪酸容易诱发心血管疾病,许多消费者认为黄油是不健康食品。但是,Dehghan等对136 384名来自5大洲21个国家的消费者开展了

长达 9 年的有关膳食摄入的跟踪调查。结果显示,日常摄入黄油与心血管疾病和死亡率并没有显著联系,因为黄油的摄入量远不及其他富脂食品^[24]。在一些实验中,黄油常被用作饮食中的脂肪来源。比如将黄油作为饱和脂肪酸的来源,比较其和 $n-6$ 多不饱和脂肪酸对肥胖人群肝脂肪、炎症和代谢的影响^[25]。

表 1 影响消费者选择黄油的因素^[4-22]

Table 1 Factors influencing consumers' choice for butter products^[4-22]

序号	消费者因素	销售策略	产品特性
1	年龄性别	产品命名	质构和风味
2	饮食习惯	营养宣传	原料质量
3	饮食文化	伦理问题	产品定价
4	口味偏好	环境友好性	生产工艺
5	社会环境	创新性设计	安全性

黄油中富含的丁酸盐已被证明是脑肠轴中的重要中介,对神经疾病也有影响。丁酸盐现已被用作抑郁症、神经退行性疾病、认知障碍等神经疾病的实验药物^[26]。虽然如此,但已有研究表明,摄入过量黄油的膳食模式反而会增加患抑郁症的风险。因此,黄油的摄入量需要被控制在合理范围内^[27]。

黄油作为日常膳食的重要组成部分,常被包括在目标物质的膳食来源筛查中。例如,持久性有机污染物苯并芘具有致癌性和基因毒性,易于在高脂食物中富集,在已报道的黄油产品中最高达 $6.20 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[28],远远超过欧盟规定的 $2.0 \mu\text{g}/\text{kg}$,对人体健康具有潜在威胁。

3.3 如何缓解黄油生产对环境的压力

黄油是典型的动物来源加工制品。研究者运用生命周期研究法、Meta 分析法对不同种类食品从生产到食用全周期中排放的温室气体量进行了分析,黄油产品全周期产生的温室气体量排在中间位置,高于植物及乳制品,低于反刍家畜产品如牛羊肉^[29]。也有学者运用生命周期研究法,探究了不同种类食品对环境的负担,发现对环境负担最大的食品种类是肉制品和乳制品,包括黄油在内^[30]。为缓解黄油制品对环境的压力,必须解决非乳源性黄油的各项技术问题,使其成为未来黄油的主要品种。

4 新型黄油

4.1 乳源性发酵黄油

发酵黄油具有独特的风味,广受消费者喜爱。生产发酵黄油时,既可以先发酵后搅乳^[31],也可以先搅乳后发酵^[32]。用于发酵黄油的发酵剂中通常含有产酸微生物如乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*)等,其可以降低 pH,防止黄油变质。为达到发酵增香的效果,还可以将产风味微生物如二乙酰乳酸菌(*L. lactis* ssp. *diacetylactis*)等加入。表 2 汇总了普通黄油和发酵黄油中风味物质的种类和检测方法。在鉴定黄油中风味物质时,最常用的分析方法是 GC-MS 和 SPME-GC-MS。与普通黄油相比,发酵黄油中具有更多的风味物质。醇类、酸类、酮类、酯类是最主要的风味贡献者, δ -癸内酯、2,3-丁二酮、丁酸等风味物质在多篇文献中被报道。有研究表明发酵剂种类会对风味物质的种类和浓度产生影响^[39]。为增强风味,Templeton 等在发酵剂中加入了柠檬酸和柠檬酸钠^[40]。酶法产香和发酵产香是黄油增香的主要手段,酶法产香的香气强度大,但香型单一,而发酵产香的香气强度虽不足,但香型丰富^[41],酶法产香和发酵产香结合是未来黄油增香的研究重点。

4.2 植源性黄油

4.2.1 通过新型原料制备的黄油替代物 乳木果原产自非洲,是一种经济价值很高的木本油料。乳木果仁脂肪含量超过 60%(质量分数),提取后获得的乳木果油脂肪酸组成丰富,是理想的黄油替代物。相比于天然黄油,乳木果油是非乳源的,其制备不涉及饲养过程,对环境构成的压力更小。杨耿等测定了乳木果油的脂肪酸组成,结果表明乳木果油由 8 种脂肪酸(棕榈酸、棕榈一烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、花生酸、花生一烯酸)组成,其中硬脂酸和油酸含量之和高达 88%(质量分数)^[42]。来自不同地理位置的乳木果油脂肪酸组成差异很大^[43],赋予了乳木果油广阔的应用前景。

2017 年,乳木果油通过了国家卫生计生委对新食品原料的审查,开始被用作食用油或食品辅料。已有多篇文献报道,以乳木果油为原料,通过分提^[44]或与棕榈硬脂混合^[45]的方式,可制备理想的可可脂替代物。但是,尚未见乳木果油用于制备黄油的报道,此应用仍需进一步探究。

除乳木果之外,牛油果富含多不饱和脂肪酸,

表 2 近 5 年黄油挥发性风味物质研究主要文献

Table 2 Research references of volatile flavour compounds in butter in recent five years

种类	年份	风味物质分析方法	风味物质数量	特征风味物质	创新点	参考文献
普通黄油	2021	GC-MS	64	δ -十二内酯	确定了 23 种有效风味物质。将标准溶液与黄油提取物进行了感官测试对比,确定了甜味、奶油味为黄油的关键风味。	[33]
				δ -癸内酯		
				γ -癸内酯		
				乙醛		
	2020	HS-SPME-GC-MS	30	丁酸	研究了 3 种奶牛饲料体系对挥发性化合物及感官特性的影响,结果表明室内种植牧草的饲料体系生产的黄油感官性质整体得分最高,而自然牧草和三叶草饲料体系的黄油有更理想的颜色,咸味也比较明显。	[34]
				戊醛		
				己醛		
				癸醛		
	2020	HS-SPME-GC-MS	4	乙酸乙酯	研究了人造黄油在水相中风味化合物的释放量。脂肪含量较高的人造黄油有更高的 2,3-丁二酮和丁酸释放量,而丁酸乙酯和香兰素的释放量减少。随着乳化剂含量增加,丁酸乙酯的释放量降低。	[35]
				丁酸		
				香兰素		
				2,3-丁二酮		
	2018	SPME/SDE-GC-O	23	δ -癸内酯	比较了同步蒸馏萃取(SDE)和固相微萃取(SPME)在提取风味物质时的有效性。结果表明,两种方法均能有效提取内酯类风味化合物,SDE 在定量分析方面性能更优。	[36]
				γ -十二内酯		
				δ -辛醇内酯		
月桂酸						
2018	HS-SPME-GC-MS	—	己酸	利用超高压对黄油进行增香处理,研究了不同压力及保压时间对其挥发性风味物质的影响。超高压处理可促进酸类、醇类、内酯类和醛类化合物的释放。2-庚酮、2-壬酮、2-十一酮、乙酸丙酯对天然黄油和超高压黄油的香气贡献较大,醛类化合物为超高压黄油特有。	[37]	
			辛酸			
			癸酸			
			月桂酸			
发酵黄油	2021	GC-MS-O	34	乙醇	将 Smen 发酵黄油经过捕集器提取(PTE)和溶剂辅助风味蒸发(SAFE)提取后进行 GC-MS-O 分析,确定了典型挥发性物质,两种提取方法的效果无显著差异。	[38]
				丁酸乙酯		
				3-甲基 1-丁醇		
				己酸乙酯		
	2020	GC-MS	57	己醇	探讨了以酸奶或奶油为原料生产的黄油中,发酵剂对挥发性物质和感官特性的影响。奶油黄油中的醇类、酯类、酸类含量高于酸奶黄油。	[39]
				硫代乙酸甲酯		
				丁酸甲酯		
				丁酸		
	2018	SPME-GS-MS	183	2-壬酮	研究了发酵黄油中挥发性风味物质。除常见风味物质外,由微生物转化得到的短链奇数碳脂肪酸、甲基酮和脂肪酸酯可以给黄油带来更复杂的风味。	[5]
2-戊酮						
丁酸乙酯						
				庚酸		

注:GC,气相色谱;MS,质谱;HS-SPME,顶空固相微萃取;O,嗅辨仪;Sensor,传感器。

且不含胆固醇,提取出的牛油果油也可被用于制备健康黄油替代物。Yong 在草饲奶牛产黄油中创新性地加入了牛油果油、牛油果汁和牛油果肉,并使用天然抗氧化剂维生素 E 制备出了一款富含 ω -3 脂

肪酸的天然功能性黄油^[46]。

4.2.2 通过高剪切技术制备的黄油替代物 为了丰富产品来源和降低对环境的压力,传统植源性原料如食用植物油,常通过高剪切、凝胶化和酯交换

的加工技术制备成人造黄油(见表3)。高剪切是指通过剪切力将原料粒径变得更小,因而使体系具有均一性、稳定性和流变性。常用的原料包括油脂和蛋白质,为维持体系稳定,还常在其中加入乳化剂

如聚甘油蓖麻醇酯^[48]。蛋白质在微粒化后具有流动性和顺滑口感,但是由于蛋白质的热不稳定性,蛋白基黄油替代物并不适用于高温加工环境,仅能用于替代常温下的涂抹脂。

表3 近10年新型非氢化人造黄油研究主要文献

Table 3 Research references of novel non-hydrogenated margarine in recent ten years

技术	年份	原料	质量指标	创新点	参考文献
高剪切	2021	鸭油、大豆油	感官性质、质构、结晶性、脂肪酸组成、氧化稳定性	制备了添加鸭油的人造黄油,改善了理化性质和氧化稳定性。	[47]
	2020	椰子油、棕榈油、聚甘油蓖麻醇酯	微观结构、热稳定性	调整了原料比例,在较低的乳化剂浓度下制备人造黄油,其冻融后保持了微观结构。	[40]
凝胶化	2020	小烛树蜡、蜂蜡、大豆油	质构、熔点、滴点、固体脂肪含量	添加蜡质来增强人造黄油的硬度。	[48]
		瓜子油、棕榈仁油	感官性质、氧化稳定性	用含30%(质量分数)棕榈油的混合植物油生产时,产品具有最佳的营养、理化性质和感官特性。	[49]
		高酯橘皮果胶、羧甲基纤维素	质构、熔点	将高酯橘皮果胶与羧甲基纤维素进行复配,作为脂肪替代物,最佳添加比例为10%(质量分数)。	[50]
	2018	精炼大豆油、 β -谷甾醇、卵磷脂	质构、熔点、微观结构、结晶度	将大豆油作为基料油, β -谷甾醇和卵磷脂等比例混合物作为复合凝胶剂,制备得到凝胶油基人造黄油。	[51]
		米糠油、明胶	质构、微观结构	以米糠油为基料油配制的明胶-油乳液凝胶具有类似黄油的质构。	[52]
酯交换	2018	大豆油、棕榈油	熔点、微观结构、固体脂肪含量、脂肪酸组成、甘油三酯种类	通过Box-Behnken设计优化了酯交换反应。	[53]
	2015	辛酸琥珀酸酯	感官性质、质构、发泡性、脂肪部分聚结率	辛酸基琥珀酸淀粉酯作为脂肪替代物的最适替代率为12%。	[54]

高剪切技术赋予了人造黄油更多的潜在健康特性。例如,可以使用饱和脂肪酸和胆固醇更低的基料油。Bertoia等以椰子油和棕榈油为原料制备了包含20%(质量分数)水的类似于黄油的乳液体系,并获得了理想的微观结构和冻结-解冻特性^[48]。除此之外,蛋白质也常被用于全部或部分替代油脂制备人造黄油,降低脂肪含量和热量^[55]。

4.2.3 通过凝胶化技术制备的黄油替代物 与高剪切类似,凝胶化也是常见制备黄油替代物的技术。凝胶化是指在体系中加入淀粉糊精、纤维素、胶体、蛋白质、食用蜡等物质形成油凝胶,甚至是不含油脂的凝胶,以获得均一、稳定的体系和类似于脂肪的感官性质。制备时,通常需要将原料和交联剂一起高温加热,使交联剂完全溶解,而后逐渐冷却以形成固体状态。例如,Hwang等在80℃下向大豆油中加入不同组合比例的小烛树蜡和蜂蜡,之后以

3.0℃/min的速率冷却至室温^[56]。在实际应用中,人造黄油的物理性质如熔点等更易被调整优化,因而其适用于多种消费场景。

目前,已有研究不使用脂质,而是通过复配纤维素、胶体、蛋白质并凝胶化,以制备低脂低热量的新型黄油替代物。徐群英等选用高酯橘皮果胶与羧甲基纤维素进行复配,以代替人造奶油中的脂肪。其中,高酯橘皮果胶起到胶凝剂和稳定剂的作用,而羧甲基纤维素可以提高胶凝速度和体系稳定性^[57]。在另一项实验中,Chen等以玉米醇溶蛋白、 β -胡萝卜素、甘油为油凝胶原料, β -胡萝卜素增加了凝胶强度,同时凝胶化提高了 β -胡萝卜素的光稳定性,88%的 β -胡萝卜素可以在64h内被保留下来^[58]。可见,凝胶化技术制备低脂人造黄油具有广阔的原料选择范围,更多的脂肪替代物还有待开发。

事实上,高剪切技术和凝胶化技术常被联用,

以制备复合型黄油替代物。Lee 等通过高速剪切制备了油包水高内相比乳液,再向分散相和连续相中加入交联剂,其中脂肪含量只有 20%(质量分数),大幅降低了脂肪用量和热量,满足消费者的健康需求^[59]。

4.2.4 通过酯交换技术制备的黄油替代物 黄油替代物还可以通过化学酯交换包括酶促酯交换获得,通过改变人造黄油原料油脂的甘油三酯结构,使其具备更理想的性质,增强原料可塑性。如表 3 所示,酯交换时常将含多不饱和脂肪酸的食用植物油和棕榈硬脂作为原料,因为棕榈硬脂可以保证黄油替代物的固体形态和高温稳定性,而含多不饱和脂肪酸的食用植物油可以保证酯交换产物的多样性和可塑性。与普通化学酯交换相比,酶促酯交换不仅更加绿色环保,还可以兼顾酯交换的随机性和特异性,酶促酯交换的特异性主要是通过特定酶的

催化时间来调控的,主要是作用于甘油三酯的 *sn*-1,3 位。Pande 等通过酶促酯交换丰富了人造黄油中甘油三酯的种类,使其晶型转变为最理想的 β' 晶型^[60]。

4.3 微生物黄油

非乳源性发酵黄油有望通过产油脂微生物来生产。微生物油脂是指利用微生物如菌体和藻体等生产,再经过油脂加工技术得到的油脂^[61]。表 4 汇总了近十年微生物产油的相关报道,可见真菌、酵母菌、细菌、藻类均可以生产微生物油脂,且不同微生物产油的脂肪酸组成及比例都不相同,丰富的微生物油脂是不同用途功能性油脂的重要来源。可食用微生物油脂具有纯度高、功能性强、安全性高、生产条件不限等优势,可作为制备人造黄油的原材料。

表 4 近 10 年微生物油脂研究主要文献

Table 4 Research references of microbiol oil in recent ten years

微生物种类	微生物名称	年份	产率/%	主要脂肪酸组成及质量分数/%	参考文献
酵母菌	<i>Yarrowia lipolytica</i>	2021	—	油酸(56.0)、亚油酸(19.9)、棕榈酸(6.0)	[62]
	<i>Rhodotorula glutinis</i>	2017	—	油酸(43.4)、棕榈酸(23.5)、硬脂酸(9.0)	[63]
	<i>Rhodospiridium kratochvilovae</i>	2017	46.8	油酸(45.3)、棕榈酸(21.9)、亚油酸(15.9)	[64]
细菌	<i>Rhodococcus opacus</i>	2016	—	棕榈酸(38.5)、十七烷酸(22.9)、油酸(13.7)	[65]
真菌	<i>Mortierella alpina</i>	2015	31.0	花生四烯酸(35.0)、EPA(30.0)	[66]
藻类	<i>Pavlova salina</i>	2021	49.4	EPA(19.1)、棕榈酸(15.1)、油酸(3.8)	[67]
	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	2019	44.8	EPA(28.4)、棕榈酸(11.3)、油酸(2.8)	[68]
	<i>Botryococcus braunii</i>	2019	5.5	油酸(59.6)、 α -亚麻酸(11.2)、棕榈酸(9.4)	[69]

4.4 昆虫黄油

黑水虻和黄粉虫中提取的脂质可替代天然黄油中的乳脂。当用质量分数 75% 的昆虫脂质替代时,黄油产品的色泽和涂抹性不会被影响,对环境产生的负担更少^[31]。在另一项研究中,用 25% 的昆虫脂肪替代烘焙制品中的黄油并不会降低消费者的感官愉悦度和产品接受度^[7]。用昆虫脂质生产人造黄油,不仅原料丰富,且有助于降低环境负担,值得被深入研究。

4.5 细胞黄油

合成生物学与相关交叉学科如人工智能、自动化、3D 生物打印等的飞速发展,已经催生了细胞工厂或细胞农业,如美国 Perfect Day 公司通过酵母细胞表达研制人造奶,为细胞黄油的生产提供了可能。以“碳中和”引领的全球绿色发展观,势必推动

未来黄油生产的细胞工厂研究。

5 展望

黄油虽然起源于欧美膳食,但近年来国内市场不断被拓宽,技术壁垒将成为黄油进出口贸易的主要影响因素。消费者一方面看重黄油感官品质,另一方面关注其健康风险,天然黄油生产对生态环境造成的负担也是急需解决的问题。为应对来自健康和环境的双重压力,研究者和生产商未来应从原料和技术两方面来提高人造黄油的品质。原料方面,不占用耕地的微生物油脂、占用更少生产资料的植物油脂和来源丰富的昆虫油脂是生产天然黄油替代物的理想原料,可以实现人造黄油的可持续性、功能性和绿色环保,推动食品工业可持续发展,应当被予以重视并大力发展。对于技术而言,应当优化

高剪切和凝胶化的技术参数,将高剪切技术和凝胶化技术相结合,维持人造黄油体系的均一性和稳定性,提高人造黄油模拟天然黄油的逼真度。在创新人造黄油技术的同时,不应当忽略其感官特性,只

有当人造黄油的感官特性(尤其是风味和质构)接近甚至优于天然黄油时,未来黄油才会拥有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] 科斯罗瓦伊莱恩. 黄油:一部丰富的历史[M]. 赵祖华,译. 北京:文化发展出版社,2020.
- [2] RAJAH K K, ROBINSON D J. Spreadable products[M]. 2th ed. The United States: Wiley, 2014.
- [3] 王瑞元,王兴国,金青哲,等. 科学、全面、正确认识反式脂肪酸安全问题[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(2): 1-4.
- [4] HWANG H S, SINGH M, BAKOTA E L, et al. Margarine from organogels of plant wax and soybean oil[J]. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, 2013, 90(11): 1705-1712.
- [5] DEHGHAN M, MENTE A, RANGARAJAN S, et al. Association of dairy intake with cardiovascular disease and mortality in 21 countries from five continents(PURE): a prospective cohort study[J]. **Lancet**, 2018, 392(10161): 2288-2297.
- [6] TAYLAN O. A hybrid methodology of fuzzy grey relation for determining multi attribute customer preferences of edible oil[J]. **Applied Soft Computing Journal**, 2013, 13(5): 2981-2989.
- [7] KIM S, MAGNINI V P. The impacts of descriptive food names on consumer impressions[J]. **International Journal of Hospitality Management**, 2020, 88: 1-11.
- [8] IRADUKUNDA C, AIDA W M W, OUAFI A T, et al. Aroma profile of a traditionally fermented butter (smen)[J]. **Journal of Dairy Research**, 2018, 85(1): 114-120.
- [9] BOZKURT H, BAYRAM M. Colour and textural attributes of sucuk during ripening[J]. **Meat Science**, 2006, 73(2): 344-350.
- [10] DELICATO C, SCHOUTETEN J J, DEWETTINCK K, et al. Consumers' perception of bakery products with insect fat as partial butter replacement[J]. **Food Quality and Preference**, 2020, 79: 1-9.
- [11] YOUN H, KIM J H. Effects of ingredients, names and stories about food origins on perceived authenticity and purchase intentions [J]. **International Journal of Hospitality Management**, 2017, 63: 11-21.
- [12] VANBERGUE E, HURTAUD C, PEYRAUD J L, et al. Effects of n-3 fatty acid sources on butter and hard cooked cheese; technological properties and sensory quality[J]. **International Dairy Journal**, 2018, 82: 35-44.
- [13] MEDEIROS N C, ABRANTES M R, MEDEIROS J M S, et al. Quality of milk used in informal artisanal production of coalho and butter cheeses[J]. **Semina: Ciencias Agrarias**, 2017, 38(4): 1955-1962.
- [14] NARAYANAN Y. Animal ethics and Hinduism's milking, mothering legends: analysing Krishna the butter thief and the ocean of milk[J]. **Sophia**, 2018(7): 133-149.
- [15] GÓRSKA-WARSEWICZ H, REJMAN K, LASKOWSKI W, et al. Butter, margarine, vegetable oils, and olive oil in the average polish diet[J]. **Nutrients**, 2019, 11(12): 1-15.
- [16] KRAUSE A J, LOPETCHARAT K, DRAKE M A. Identification of the characteristics that drive consumer liking of butter[J]. **Journal of Dairy Science**, 2007, 90(5): 2091-2102.
- [17] DUTTA A. Short communication: effect of carbon emission trading on European Union butter prices[J]. **Journal of Dairy Science**, 2019, 102(3): 2051-2053.
- [18] UCAR A, OZDOGAN Y, OZCELIK A O. Consumer attitudes toward food consumption and purchase in Turkey[J]. **Ecology of Food and Nutrition**, 2012, 51(6): 492-504.
- [19] HALDER K, SAHU J K, NAIK S N, et al. Improvements in makkhan(traditional Indian cultured butter) production: a review[J]. **Journal of Food Science and Technology –Mysore**, 2020, 58(5): 1640-1654.
- [20] DUDKIEWICZ A, HAYES W, ONARINDE B. Sensory quality and shelf-life of locally produced British butters compared to large-scale, industrially produced butters[EB/OL]. (2021-11-26)[2022-04-24]. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BFJ-02-2021-0172/full/html>.
- [21] FOUSEKIS P, GRIGORIADIS V. Spatial price dependence by time scale: empirical evidence from the international butter markets[J]. **Economic Modelling**, 2016, 54(8): 195-204.

- [22] WRONA M, NERIN C. Analytical approaches for analysis of safety of modern food packaging: a review[J]. **Molecules**, 2020, 25(3): 1-18.
- [23] BRASSARD D, TESSIER-GRENIER M, ALLAIRE J, et al. Comparison of the impact of SFAs from cheese and butter on cardiometabolic risk factors: a randomized controlled trial[J]. **American Journal of Clinical Nutrition**, 2017, 105(4): 800-809.
- [24] YILMAZ S O, ALTINCI A. Incidence of aflatoxin M1 contamination in milk, white cheese, kashar and butter from Sakarya, Turkey[J]. **Food Science and Technology**, 2019, 39: 190-194.
- [25] BJERMO H, IGGMAN D, KULLBERG J, et al. Effects of *n*-6 PUFAs compared with SFAs on liver fat, lipoproteins, and inflammation in abdominal obesity: a randomized controlled trial[J]. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 2012, 95(5): 1003-1012.
- [26] STILLING R M, CLARKE G, STANTON C, et al. The neuropharmacology of butyrate: the bread and butter of the microbiota-gut-brain axis?[J]. **Neurochemistry International**, 2016, 99: 110-132.
- [27] LI Y, LV M R, WEI Y J, et al. Dietary patterns and depression risk: a meta-analysis[J]. **Psychiatry Research**, 2017, 253: 373-382.
- [28] LOUTFY N, FUERHACKER M, TUNDO P, et al. Monitoring of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans, dioxin-like PCBs and polycyclic aromatic hydrocarbons in food and feed samples from Ismailia city, Egypt[J]. **Chemosphere**, 2007, 66(10): 1962-1970.
- [29] CLUNE S, CROSSIN E, VERGHESE K. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2017, 140(2): 766-783.
- [30] NOTARNICOLA B, TASSIELLI G, RENZULLI P A, et al. Environmental impacts of food consumption in Europe[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2017, 140: 753-765.
- [31] ARYANA K J, OLSON D W. A 100-year review: yogurt and other cultured dairy products[J]. **Journal of Dairy Science**, 2017, 100(12): 9987-10013.
- [32] 奥尔顿. 贝雷油脂化学与工艺学[M]. 王兴国, 金青哲, 译. 第6版. 北京: 中国轻工业出版社, 2016.
- [33] TEMPLETON H L, SOMMER H H. The use of citric acid and sodium citrate in buttermaking[J]. **Journal of Dairy Science**, 1935, 18: 97-104.
- [34] 刘昊. 酶解与发酵技术在黄油增香中的应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [35] 杨耿, 张勋, 陈亦豪, 等. 乳木果油的超声波辅助提取工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. **中国油脂**, 2018, 43(11): 89-93.
- [36] 张传光, 罗婷, 贡新华, 等. 云南引种乳木果现状及乳木果油脂脂肪酸组成分析[J]. **中国油脂**, 2019, 44(4): 102-104.
- [37] 郭婷婷, 汪颖, 黎丽, 等. 乳木果油制备类可脂条件优化及其性质研究[J]. **食品工业**, 2019, 40(1): 86-91.
- [38] KANG K K, JEON H, KIM I H, et al. Cocoa butter equivalents prepared by blending fractionated palm stearin and shea stearin[J]. **Food Science and Biotechnology**, 2013, 22(2): 347-352.
- [39] YONG P. Functional avocado butter with increased omega-3 content comprises grassland grazing cream, avocado pulp, avocado fruit juice, and antioxidants having function of improving body nutrition and skin health by increasing content of omega-3: KR2020141829[P/OL]. 2021-01-13[2022-1-27]. <https://www.google.co.in/patents/KR2020141829>.
- [40] BERTOIA L, WAGNER J R, MARQUEZ A L. Margarine-like emulsions prepared with coconut and palm oils: analysis of microstructure and freeze-thaw stability by differential scanning calorimetry[J]. **Journal of the American Oil Chemists Society**, 2020, 97(10): 1071-1081.
- [41] 李君, 崔怀田, 刘瑞琦, 等. 脂肪替代物在低脂人造黄油中的应用研究进展[J]. **中国粮油学报**, 2021, 36(6): 173-180.
- [42] HWANG H S, MOSER J K W. Properties of margarines prepared from soybean oil oleogels with mixtures of candelilla wax and beeswax[J]. **Journal of Food Science**, 2020, 85(10): 3293-3302.
- [43] 徐群英, 赵锦壮. 脂肪替代物对人造奶油物性品质的影响[J]. **食品科学**, 2020, 41(8): 52-56.
- [44] CHEN X W, FU S Y, HOU J J, et al. Zein based oil-in-glycerol emulgels enriched with β -carotene as margarine alternatives[J]. **Food Chemistry**, 2016, 211(11): 836-844.
- [45] LEE M C, CHEN T, RAVANFAR R, et al. Ultrastable water-in-oil high internal phase emulsions featuring interfacial and biphasic network stabilization[J]. **ACS Applied Materials and Interfaces**, 2019, 11(29): 26433-26441.
- [46] PANDE G, AKOH C C. Enzymatic synthesis of trans-free structured margarine fat analogues using stearidonic acid soybean and

- high stearate soybean oils[J]. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, 2012, 89(8): 1473-1484.
- [47] 王瑞元. 发展微生物油脂前景广阔[J]. **粮食与食品工业**, 2014, 21(4): 1-2.
- [48] TAMURA H, UENO S, NAKA A, et al. Characterisation of aroma profile and evaluation of aroma quality in sweet cream butter [J]. **International Dairy Journal**, 2020, 114(23): 1-9.
- [49] DADAL C, ELMAC Y. Influence of fat and emulsifier content on volatile release of butter aroma used in water phase and physical attributes of model margarines[J]. **European Journal of Lipid Science and Technology**, 2020, 122(7): 1-8.
- [50] GARVEY E C, SANDER T, OCALLAGHAN T F, et al. A cross-cultural evaluation of liking and perception of salted butter produced from different feed systems[J]. **Foods**, 2020, 9(12): 1-17.
- [51] LI Y, WANG Y, YUAN D, et al. Comparison of SDE and SPME for the analysis of volatile compounds in butters[J]. **Food Science and Biotechnology**, 2020, 29(1): 55-62.
- [52] 李燕杰, 梁钻好, 蒋卓, 等. 黄油超高压增香工艺优化研究[J]. **食品研究与开发**, 2018, 39(20): 73-78.
- [53] SARHIR S T, AMANPOUR A, BOUSETA A, et al. Fingerprint of aroma-active compounds and odor activity values in a traditional Moroccan fermented butter "Smen" using GC-MS-Olfactometry[J]. **Journal of Food Composition and Analysis**, 2020, 96: 1-10.
- [54] CAMPBELL R E, MIRACLE R E, GERARD P D, et al. Effects of starter culture and storage on the flavor of liquid whey[J]. **Journal of Food Science**, 2011, 76(5): 354-361.
- [55] YANG F, ZHANG M, PRAKASH S, et al. Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions [J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 2018, 49: 202-210.
- [56] SONWAI S, LUANGSASIPONG V. Production of zero-trans margarines from blends of virgin coconut oil, palm stearin and palm oil[J]. **Food Science and Technology Research**, 2013, 19(3): 425-437.
- [57] ITYOTAGHER A P, TERHILE C. Production and quality evaluation of margarine from blends of melon and palm kernel oils[J]. **World Journal of Food Science and Technology**, 2020, 4(3): 74-79.
- [58] 韩立娟, 陈浩, 刘胜, 等. 凝胶油基人造奶油质地和流变性能[J]. **食品科学**, 2018, 39(7): 14-19.
- [59] KANGCHAI W, SANGSIRIMONGKOLYING R, METHACANON P. Feasibility study of margarine substitute based on gelatin-oil emulsion gel[J]. **Chiang Mai Journal of Science**, 2018, 45(1): 505-514.
- [60] LI Y, ZHAO J, XIE X, et al. A low *trans* margarine fat analog to beef tallow for healthier formulations optimization of enzymatic interesterification using soybean oil and fully hydrogenated palm oil[J]. **Food Chemistry**, 2018, 255: 405-413.
- [61] 谢淑丽, 韩文芳, 陈勉, 等. 辛烯基琥珀酸淀粉酯对人造奶油品质的影响[J]. **食品工业科技**, 2015, 36(20): 128-132.
- [62] GIENKA I, GADASZEWSKA M, BLAZEJAK S, et al. Evaluation of lipid biosynthesis ability by *Rhodotorula* and *Sporobolomyces* strains in medium with glycerol[J]. **European Food Research and Technology**, 2016, 243(2): 275-286.
- [63] PATEL A, ARORA N, PRUTHI V, et al. Biological treatment of pulp and paper industry effluent by oleaginous yeast integrated with production of biodiesel as sustainable transportation fuel[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2016, 142: 2858-2864.
- [64] POONTAWEE R, YONGMANITICHAI W, LIMTONG S. Efficient oleaginous yeasts for lipid production from lignocellulosic sugars and effects of lignocellulose degradation compounds on growth and lipid production[J]. **Process Biochemistry**, 2016, 53: 44-60.
- [65] DAYRAS P, BIALAIS C, SADOVSKAYA I, et al. Microalgal diet influences the nutritive quality and reproductive investment of the cyclopoid copepod *Paracyclops nana*[J]. **Frontiers in Marine Science**, 2021(8): 1-14.
- [66] PEREIRA A S, MIRANDA S M, LOPES M, et al. Factors affecting microbial lipids production by *Yarrowia lipolytica* strains from volatile fatty acids: effect of co-substrates, operation mode and oxygen[J]. **Journal of Biotechnology**, 2021, 337: 37-47.
- [67] DESHMUKH S, KUMAR R, BALA K. Microalgae biodiesel: a review on oil extraction, fatty acid composition, properties and effect on engine performance and emissions[J]. **Fuel Processing Technology**, 2019, 191: 232-247.
- [68] MASON R P, JACOB R F. Eicosapentaenoic acid inhibits glucose-induced membrane cholesterol crystalline domain formation through a potent antioxidant mechanism[J]. **Biochimica et Biophysica Acta-Biomembranes**, 2015, 1848(2): 502-509.
- [69] FERREIRA G F, PINTO L R, FILHO R M, et al. A review on lipid production from microalgae: association between cultivation using waste streams and fatty acid profiles[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019, 109: 448-466.