

陈亚淑, 刘锐, 陈洪建, 等. 植物乳(奶)物质组成、加工难题及其创新技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 20–33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110308

CHEN Yashu, LIU Rui, CHEN Hongjian, et al. Research Progress on Material Composition, Processing Problems and Innovative Technology of Plant-based Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 20–33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110308

· 未来食品 ·

植物乳(奶)物质组成、加工难题及其创新技术研究进展

陈亚淑¹, 刘锐², 陈洪建¹, 陈委³, 王雪⁴, 马洪江⁴, 郝倩¹, 全双¹, 周琦¹, 黄庆德¹, 邓乾春^{1,*}

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 农业农村部油料加工重点实验室, 湖北武汉 430062;

2. 农业农村部食物与营养发展研究所, 北京 100081;

3. 统一企业(中国)投资有限公司, 江苏昆山 215300;

4. 黑龙江北纬四十七绿色有机食品有限公司, 黑龙江齐齐哈尔 161500)

摘要: 广义来讲, 以谷物、坚果和植物果实/果肉为原料制成的饮料, 以及其他植物来源的原料与植物蛋白制成的饮品统称为植物乳(奶)。植物乳(奶)具有无乳糖、无胆固醇、无激素、低饱和脂肪、无抗生素等优势, 且兼具独特感官风味与营养功能, 符合消费者的营养化、多元化消费需求。我国植物乳(奶)消费基础好、发展潜力大, 但相关产业仍存在加工技术创新不足、原料开发有限、风味口感有待提高、营养品质与消化特性不明、学科体系不完善等突出问题。基于此, 本文对植物乳(奶)的分类与物质组成, 加工难题、新型加工技术和装备、产业与科技发展趋势、产业对策等进行了全面分析与阐述, 为促进国内植物乳(奶)产业高质量发展、形成核心竞争力和满足人们日益增长的营养健康需求提供参考。

关键词: 植物乳(奶), 加工技术, 产业现状, 发展趋势

中图分类号: TS252.42

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)18-0020-14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110308



本文网刊:

Research Progress on Material Composition, Processing Problems and Innovative Technology of Plant-based Milk

CHEN Yashu¹, LIU Rui², CHEN Hongjian¹, CHEN Wei³, WANG Xue⁴, MA Hongjiang⁴, HAO Qian¹,
QUAN Shuang¹, ZHOU Qi¹, HUANG Qingde¹, DENG Qianchun^{1,*}

(1. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Key Laboratory of Oilseeds Processing, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China;

2. Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;

3. President Enterprises Food Company, Kunshan 215300, China;

4. Heilongjiang 47°N Green Organic Food Co., Ltd., Qiqihar 161500, China)

Abstract: In broad sense, beverages made from nuts and plant fruits/pulp, as well as other plant-derived materials including proteins etc. are collectively known as plant-based milk. Plant-based milk has multiple advantages such as lactose free, cholesterol free, hormone free, low saturated fat, antibiotics free, special sensory flavor, as well as unique nutritional functions, which fit with the diversified needs of consumers. The market size of plant-based milk in China is huge, which also has great development potential. However, there are still many unsolved problems, such as backward processing technology, insufficient raw material development, unsatisfied sensory properties, vague nutritional and digestive char-

收稿日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(32001656); 现代农业产业技术体系(CARS-14)。

作者简介: 陈亚淑(1993-), 女, 博士, 特聘研究员, 研究方向: 油料加工与植物基食品, E-mail: cheniyashu@caas.cn。

* 通信作者: 邓乾春(1979-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 油料加工与营养学, E-mail: dengqianchun@caas.cn。

acteristics, and incomplete academic discipline etc. From this, the processing problems of plant-based milk, new processing technology and equipment, innovative technology development trend, industrialization policy comprehensively are described and discussed in this paper. This paper will contribute to the industrial development of domestic plant-based milk, and further satisfying people's growing demand for nutrition and health.

Key words: plant-based milk; processing technology; industrial status; development trend

目前,“健康和可持续”是国内外食品行业发展的主要驱动因素,一直以来植物乳(奶)在安全性(不含抗生素)、营养性(零胆固醇和低饱和脂肪)、人道性(动物保护)和碳排放(节能减排)等方面存在诸多有利因素。据文献报道,植物豆乳(奶)碳足迹为 0.51~0.52 kg CO₂ eq/L,约为牛奶(0.99~1.08 kg CO₂ eq/L)的 1/2^[1],随着近年来食品科技的创新,宗教人群、动保主义者、素食主义者以及乳糖不耐受人群的需求被不断放大,欧美乳制品市场开始主动迎合上述人群,使得来源绿色安全、营养精准可控的植物乳(奶)越来越受到市场和消费者的青睐。AC 尼尔森数据显示,2018 年植物乳(奶)已抢占美国 15% 的乳制品零售市场,体量达到数十亿美元,并且还在以每年 50% 的速度激增,2020 年统计显示,美国弹性素食家庭占受访家庭的 15.6%,主要消费牛奶和植物性饮料,另外植物性消费家庭占家庭总数的 22.8%,主要消费植物乳(奶);在英国,植物乳(奶)也因连年保持 30% 的市场增长率,在 2017 年被政府列入了居民消费价格指数(consumer price index, CPI)的统计范围^[2]。国外这一植物基浪潮也影响了国内的一些消费人群的消费理念,进而催生、助推了国内植物乳(奶)市场的快速发展。

实际上,中国植物乳(奶)产业具有悠久的发展历程,相传豆奶/豆浆最早由我国西汉淮南王刘安发明,距今已有接近 2000 年历史。传统豆浆加工工艺简单,将黄豆浸泡后使用石磨进行湿磨即可得到,一直以来深受中国人民喜爱,又是一种老少皆宜的营养食品,可以说是最早流行的“植物乳(奶)”^[3]。除此之外,核桃乳、花生乳、椰子乳等植物乳(奶)具备宜人的独特香气和风味,同时富含蛋白质、健康油脂、矿物质等营养成分,在我国具有广泛的消费基础。在国内,植物乳(奶)市场同样发展快速,据天猫国际数据显示,目前中国植物乳(奶)饮品复合增长率为各类饮品中的第一,2007~2016 十年间复合增长率达 24.5%,市场规模是美国和西欧的两倍以上,同时我国《植物蛋白饮料 豆奶和豆奶饮料》、《植物蛋白饮料 核桃露(乳)》、《植物蛋白饮料 杏仁露》等国家标准的颁布,也为我国植物乳(奶)产业健康快速发展保驾护航。

目前我国针对植物乳(奶)的制备工艺和风味、口感、营养、稳定性等方面的研究已有较良好基础,然而我国植物乳(奶)产业发展仍然存在着较多问题,特别是基础研究与学科体系的建设、技术与装备的创新和个性化、精准化、数字化产品创新等方面与国外相比,仍存在差距。基于此,本文将针对上述角度,

对植物乳(奶)的分类与物质组成,加工难题、新型加工技术和装备、产业与科技发展趋势和产业对策等进行综述,以期为我国相关产业的创新 and 高质量发展提供参考与支撑。

1 植物乳(奶)的分类与物质组成

作为一种可同时补充蛋白质、不饱和脂肪酸和功能性植物小分子等营养素的饮料,根据原料与加工工艺的不同,植物乳(奶)具有不同的物质组成,因此对其进行分类研究十分必要。

1.1 植物乳(奶)的分类

植物乳(奶)的定义可以分为狭义和广义两大类。狭义的植物乳(奶)主要是以坚果和植物果实/果肉为原料,通过多种生产工艺制成,如豆浆、椰浆等,从更广泛的角度来看,由植物来源的原料与植物蛋白制成的饮品也统称为植物乳(奶)^[4]。按照加工工艺来分,植物乳(奶)可分为发酵型和非发酵型,另外可根据所用原料将植物乳(奶)分为豆奶、核桃奶、花生奶、杏仁奶、燕麦奶、椰奶、巴旦木奶、大米奶、大麻奶和亚麻奶等^[4](如表 1 所示),进一步可根据原料的分类将植物乳(奶)大致分为:谷类(燕麦、大米)、假谷物(藜麦)、豆类(大豆、豌豆、鹰嘴豆)、坚果(核桃、杏仁、巴旦木、巴西坚果、腰果、榛子)、种子(花生、芝麻、向日葵、亚麻籽、火麻)和高蛋白/油脂果实(椰子)等六种植物乳(奶)。作为蛋白质、钙和多种营养素的补充剂,植物乳(奶)不仅可以直饮(早餐奶、学生或老人营养奶),同时也可作为咖啡、茶的伴侣以及食品加工(烘焙产品、植物基冰淇淋)的工业原料。

表 1 植物乳(奶)分类、原料来源^[5]

Table 1 Classification, raw material sources of plant-based milk^[5]

植物乳(奶)分类	原料来源
坚果基植物乳(奶)	杏仁、椰奶、榛子、开心果、核桃、巴旦木、腰果等
豆基植物乳(奶)	豌豆、鹰嘴豆、芸豆、大豆、花生、羽扇豆、豇豆等
种子基植物乳(奶)	芝麻、亚麻、大麻、葵花籽、南瓜籽等
谷物基植物乳(奶)	大米、小米、玉米、大麦、燕麦、高粱、黑麦、小麦等
假谷物基植物乳(奶)	藜麦、苜蓿、苋菜等

1.2 植物乳(奶)的物质组成

根据分类不同,植物乳(奶)主要物质组成存在较大差异,主要包括营养性成分和安全风险因子,对植物乳(奶)的稳定性、感官风味、健康功效和应用场景会产生显著影响。表 2 总结了国内外市售的植物乳营养成分含量,可见豆奶(乳)类植物乳(奶)的蛋白质含

表2 国内外市售典型植物乳(奶)主要营养物质组成表

Table 2 Main nutrients of typical plant-based milk sold at home and abroad

植物乳 (奶)类型	能量 (kJ)	营养成分(g/100 mL)				
		蛋白质	碳水化合物	脂肪	膳食纤维	α -亚麻酸
豆奶(乳)	228.0	2.5	7.2	1.7	—	—
	250	3	7.1	2	—	—
	211.0	2.3	6.6	1.6	—	—
	216	3.3	4.5	2	—	—
	215	4.2	1.9	3	—	—
	273	6	2.2	3.6	—	—
	189	4.7	0.1	2.2	3.4	—
燕麦奶(乳)	274	1.2	9.2	2.5	—	—
	197	0.6	7.2	1.2	2.50	—
	130	0.6	2.8	1.2	3.500	—
	259	1	7	3	1.4	—
	228	1.3	8.1	1.9	—	—
	239	0.3	12	0.8	0.30	—
	107.0	0.6	3.1	1.2	—	—
巴旦木奶(乳)	333	1.2	6.2	5.6	—	—
	117	0.6	1.9	2.8	—	—
	239	0.8	5.2	3.7	—	—
	224	0.7	7.7	2.2	—	—
椰奶(乳)	192	0.6	7.3	1.6	—	—
	182	1.3	5	2.3	—	1.2
	188	0.9	3.6	2.7	1.5	1.4
	168	1.6	0.9	3.5	0.4	1.8
亚麻籽奶(乳)	208	0.7	6.8	1.8	—	—
	221	1.2	7	2.2	—	—
	208	1.2	6	2.4	—	—
	221	1	6.8	2.4	—	—
杏仁奶(乳)	182	0.8	8.4	0.7	—	—
	207	3.6	2.3	2.7	0.8	—
复合植物奶(乳)	207	3.6	2.3	2.7	0.8	—

注:“—”表示市售产品标签未提及。

量一般较高,大米乳、燕麦乳的蛋白质含量偏低,燕麦类植物乳(奶)类膳食纤维含量较高,亚麻籽类植物乳(奶)的多不饱和脂肪酸如 α -亚麻酸含量较高。

1.2.1 蛋白质 总体来说,在不添加外源蛋白的情况下,大豆植物乳(奶)的蛋白质含量较高,与牛奶相似,对成年人来说一般认为是一种包含了所有必需氨基酸的全蛋白;而其他植物乳(奶)的蛋白质含量较低,大米植物乳(奶)的蛋白质含量最低^[6-7]。同时,与牛奶蛋白相比,植物乳(奶)蛋白质的必需氨基酸组成特别是蛋氨酸、赖氨酸等略有不足,例如豌豆、杏仁和大豆组织蛋白的限制性氨基酸为蛋氨酸和半胱氨酸^[8]。亚麻蛋白与大米等谷物类蛋白质的限制性氨基酸是赖氨酸^[9]。由于上述氨基酸的限制,一般认为植物蛋白的营养价值低于动物源蛋白,同时由于植物源抗营养因子如植酸、皂苷等的存在,植物蛋白的消化率低于乳蛋白,总体来说,植物蛋白的生物价(BV)与可消化氨基酸评分(DLAAS)略低于牛奶蛋白,例如牛奶蛋白 BV 为 104,酪蛋白为 80,大豆、豌豆和亚麻籽蛋白的 BV 评分分别为 74、65、77.4;牛奶蛋白 DLAAS 为 115,酪蛋白为 111,大豆和豌豆蛋白的 DLAAS 评分分别为 89、80^[6,9]。

1.2.2 油脂和脂溶性成分 如表 3 所示,植物乳(奶)

中脂肪酸组成主要以不饱和脂肪酸为主,饱和脂肪酸含量一般较低(但椰奶饱和脂肪酸约占 80%),且不含胆固醇,对降低低密度脂蛋白与胆固醇有益,因此对血脂相关的心脑血管疾病干预具有更好的正效应^[10]。虽然椰奶饱和脂肪酸较高,但主要是中链甘油三酯(MCT),对降低胆固醇、防治高脂血症等具有一定积极作用。另外,一般认为植物乳(奶)中可能含有较丰富的脂溶性活性成分,如维生素 E、维生素 A 和植物甾醇等,总的来说,更高比例的多不饱和脂肪酸特别是 n-3 PUFA 等具有生物活性的必需脂肪酸以及脂溶性活性成分,使得植物乳(奶)在健康活性方面具有较突出优势。

表3 植物乳(奶)主要脂肪酸组成表

Table 3 Main fatty acid compositions of plant-based milk

植物乳(奶)类型	主要脂肪酸组成(%)						
	饱和脂肪酸				不饱和脂肪酸		
	月桂酸	肉蔻酸	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸
豆奶(乳) ^[11]	—	—	9.8	3.7	21.9	53.7	9.9
燕麦奶(乳) ^[12]	—	—	19.9	1.9	43.1	34.2	0.8
花生奶(乳) ^[13]	—	—	12.4	4.8	50.1	31.8	0.1
杏仁奶(乳) ^[14]	—	—	7.5	3.1	64.1	22.9	0.08
核桃奶(乳) ^[15]	—	—	—	—	18.1	61.8	9.7
椰奶(乳) ^[16]	50.0	17.3	7.5	2.7	0.01	0.77	—
亚麻籽奶(乳)	—	—	5.9~8.7	3.8~5.3	18.1~19.5	14.3~17.0	50.9~57.9

注:“—”表示文献未提及。

1.2.3 膳食纤维 膳食纤维指不能被人体消化道酶分解的多糖类物质,在维持人体健康方面具有重要作用,被称为“第七大营养素”^[17]。作为非淀粉多糖,膳食纤维主要来源于植物和菌类的细胞壁,包括纤维素、半纤维素、果胶、木质素和几丁质等,具有改善与促进消化系统健康、降低脂肪及胆固醇的摄取、预防心脑血管疾病、增强免疫力、防治糖尿病等功能。在植物乳(奶)中,籽类、谷类或果实原料细胞壁中的多种可溶性或不可溶的膳食纤维,如亚麻籽胶、杏仁多糖和大豆多糖等,均具有潜在的益生元特性,有益于人体健康,尤其在调节肠道菌群和微生态健康方面具有突出作用。例如燕麦奶中的 β -葡聚糖会增加饱腹感、降低血糖和胆固醇^[5];亚麻籽乳中含有亚麻籽胶,具有改善肠道菌群、控制体重、增强饱腹感、保护肠道与心血管健康等功能;豆奶中大豆纤维具有降低动物/人体内血浆胆固醇的效果,且不会降低对矿物质元素锌和铜的吸收,并具有维持肠道健康、控制血糖和血脂的功能^[18-19]。

1.2.4 矿物质与维生素 大部分植物乳(奶)原料富含钙、镁、硒、钾、锌、磷、铜和锰等矿物质元素,例如杏仁、大豆中钙的含量分别约为 269、277 mg/100 g,镁的含量分别约为 270、280 mg/100 g,钾的含量分别约为 733 和 1797 mg/100 g^[20],统计市场中的植物乳(奶)钙含量发现其含量是高度可变的,当使用外源

钙强化时,通常植物乳(奶)的钙含量高于牛奶。一般来说,植物乳(奶)中强化钙所用的碳酸钙吸收率较高,但容易沉淀,降低了植物乳(奶)中钙的生物可及性^[21-22]。牛奶被认为是维生素的优良来源,但是牛奶中维生素 D 含量低,通常需要外源添加进行强化。植物乳(奶)中维生素 D 含量也较低,因此商业化的植物乳(奶)通常也会添加维生素 D 进行营养强化。同时,豆乳、杏仁乳、火麻乳中维生素 E 的含量与牛奶(微量)相比具有优势,分别可达 4.0、3.84 和 13 mg/100 mL;椰奶、杏仁奶和腰果奶等维生素 A 的含量>60 $\mu\text{g}/100\text{ mL}$,约为牛奶含量的 2 倍^[23];总体上植物乳(奶)中脂溶性维生素的含量与牛奶相比有优势,水溶性维生素则有待强化。

1.2.5 活性小分子 植物乳(奶)一般含有有益的生物活性小分子,如黄酮、酚酸、木酚素、植物固醇等^[24];尤其是植物多酚具有优良的抗氧化性能,在抗癌、抗辐射损伤、抗微生物致病菌、降血脂、预防心血管疾病等方面具有良好的健康保障作用。例如花生奶中的白藜芦醇具有抗氧化、抑菌、保护肝脏、预防心脑血管疾病、抗辐射和抗艾滋病等生物活性^[25]。芝麻乳中的芝麻酚可以抑制高脂高果糖饮食喂养的小鼠的肥胖和胰岛素抵抗,降低肝脏脂肪生成,抑制白色脂肪组织的脂质积累和炎症反应,通过改善线粒体脂质代谢减少脂肪细胞大小和棕色脂肪组织向白色脂肪的转化^[26]。木酚素是一种天然的植物雌激素,在亚麻籽植物乳(奶)中含量较高,可通过控制三种雌二醇合成酶抑制卵巢雌激素的产生,降低乳腺癌的风险,同时也表现出显著的抗结肠癌作用^[27]。这些植物乳(奶)中特有的功能性成分往往不在产品标签上标注,对于饮料有特殊需求的人群如患心血管疾病风险高的人群(胆固醇水平较高、年龄相关慢性病患者等),摄入植物乳(奶)可能会有更明显的效果。

1.2.6 安全风险因子 虽然植物乳(奶)不含乳糖,可以有效解决由乳糖不耐受引起的不良反应,但仍然存在一些潜在的安全风险因子如过敏性成分、有毒有害成分和抗营养成分等,需要引起高度重视。大豆是最常见的 8 种食物过敏原之一^[28],大豆中可发酵的寡糖、糖醇等可引起部分人的过敏反应,摄入豆奶后引起肠胃胀气,另外文献报道近 14% 对牛奶过敏的人也对大豆蛋白有过敏反应^[29]。相反,大米植物乳(奶)具有低过敏性,可有效克服过敏原引起的摄入不良反应^[30]。此外,杏仁、亚麻籽等植物乳(奶)原料中含有一类重要天然糖苷,即生氰糖苷,包括苦杏仁苷、扁桃腈糖苷和亚麻苦苷等,摄入后在体内 β -葡萄糖苷酶、羟腈分解酶的降解作用下产生葡萄糖、氢氰酸等,氢氰酸是一种剧毒氰化物,可损伤呼吸、中枢、循环、消化系统等。在豆科植物(大豆、花生等)、蕨类、高粱、亚麻籽等原料中还存在抗维生素因子,其作用机理一般包括两种,一种是化学结构与某种维生素相似,如双香豆素与维生素 K 结构相似,在代谢过

程中与维生素产生竞争效应,因此导致动物对维生素的利用下降;另外一种是通过破坏维生素活性,如脂肪氧化酶可破坏维生素 A、类胡萝卜素的结构,导致其丧失生物活性,降低效价。植酸是植物籽粒(包括谷物、豆类、坚果等)中磷酸盐的主要储存形式,不能被缺乏植酸酶的单胃动物包括人类所吸收利用;与此同时,由于植酸盐对金属离子有较强的螯合能力,使之对矿物质如钙的吸收产生不良影响,并会降低消化酶活性,降低对蛋白质的消化率等,因此也被称为抗营养因子。

2 植物乳(奶)的加工难题

根据植物乳(奶)的分类,植物乳(奶)加工中面临的难题也各有侧重,如豆乳加工过程中豆腥味、脲酶等降低其食用品质的问题,燕麦乳加工过程中淀粉颗粒影响其顺滑口感的问题,但总的来说,植物乳(奶)加工过程中面临的难题可主要分为安全、营养、稳定等方面。

2.1 植物源安全风险因子难以高效脱除

对于生氰糖苷、抗维生素因子等热敏性安全风险因子,应充分考虑在熟制工艺中对其进行有效脱除^[31]。对于植物乳(奶)中致敏原包括大豆 7S、11S 蛋白、花生 7S、11S、2S 蛋白,谷物种子中的谷蛋白等,目前应用较多的解决方法主要为酶解法、发酵法、高静压及辐照等方法^[32]。谷物种子中植酸主要集中在外壳及其胚芽部分,胚乳部分含量较低,而大豆种皮中几乎不含植酸,仅 1% 分布于胚芽,而 99% 的植酸都遍布于子叶,并存在于亚细胞结构蛋白体中。因此针对不同原料,可选择性通过不同方法消减植酸,如脱壳去除法、水焯去除法和浸泡去除法等,此外也可通过蒸煮、萌芽、微生物发酵以及添加外源植酸酶等方法对植酸进行脱除^[33-34]。

2.2 植物细胞壁组织限制内源营养素溶出

越来越多的证据表明,食物对健康的益处不仅仅取决于其个别成分,更取决于食物的结构(或基质),食物结构不仅在消化和随后的生理代谢反应中起调节作用,也影响其在加工过程中营养素的溶出效果。植物食物的结构是由细胞壁决定的,细胞壁是一个在微观水平上的植物食物结构的典型例子;细胞壁本身是聚合结构,主要由一个以纤维素骨架核心(无支化和线性 β -1-4 D-葡萄糖单元)与由几种多糖(例如,果胶和半纤维素)组成的水化凝胶基质结合而成。胞间层富含果胶,作为植物细胞的最外层,由它将两个植物细胞连接在一起^[35]。植物细胞壁的结构和组成因植物种类、组织分布和生长阶段而异^[36]。总的来说,豆类和其他双子叶植物种子细胞壁主要富含果胶和木聚糖,谷物和其他单子叶植物的谷物细胞壁果胶含量较低,但含有阿拉伯木聚糖和/或混合连接的 β -d-葡聚糖。植物细胞内的蛋白、油脂、膳食纤维以及小分子植物化学物的溶出极大受到细胞壁的限制。因此,为了提高植物乳(奶)的固形物含量即增

大其营养素的溶出,热处理、挤压、发酵、研磨和均质等加工阶段的技术优化与创新十分重要。通过改变食品结构,如经过热与压力处理时,细胞壁破裂成多孔型结构,内源营养素从细胞内部释放出来,提高植物乳(奶)中蛋白质、脂质、多酚、黄酮类化合物的溶出率。

2.3 体系稳定性的控制

作为一种多相分散体系,植物乳(奶)含有多种不同的胶体物质,如蛋白质、脂质、油脂体、多糖、多酚、植酸及其不同的复合物、植物组织碎片等微粒,体系整体具有热力学不稳定性,易发生相分离^[37]。导致植物乳(奶)发生物理性失稳的主要因素包括:a. 力诱导分离:植物乳(奶)中分散的上述微粒密度与水相不同,这导致它们会因引力作用发生移动;密度比水小的颗粒物质,如油脂体或脂肪液滴,倾向于上浮,而密度更高的颗粒物质,如植物细胞碎片、淀粉颗粒、蛋白聚集体、碳酸钙颗粒等,倾向于下沉。b. 聚集:在植物乳(奶)中油脂体、蛋白质包埋的脂肪液滴、蛋白质颗粒和/或植物细胞碎片之间存在静电、疏水等相互作用,当胶体间相互作用力发生改变时易出现聚集现象,主要包括絮凝与聚结;因此植物乳(奶)在储藏过程中易出现分层、沉淀现象,并会引起沙砾、白垩等不良口感。植物乳(奶)也会因为各种化学或生化过程而引起体系失稳,包括氧化、水解和微生物作用等,也会使植物乳(奶)稳定性与安全性下降,并产生令人不愉快的挥发性气味。

2.4 体系风味的调节

受到市场欢迎的植物乳(奶)一般具有烤坚果味、焦香和甜香味,同时由于其原料自身特有的性质,不同植物乳(奶)还会具备独特的风味如椰子味、豆香味、亚麻香味和谷物香味等;但不可否认的是,植物乳(奶)本身也可能含有负面属性的风味,除了上述提到的由于多不饱和脂肪酸氧化产生的哈喇味等,还可能有植物原料本身特有的草味、生味、土腥味,主要的物质基础包括低分子的醇、醛、酮和呋喃等,例如较为典型的异味物质包括具有蘑菇味的1-辛烯-3-醇、青草味的己醛、黄瓜味的(E)-2-辛烯醛、油脂味的(E,E)-2,4-癸二烯醛、青草味的2-戊基呋喃等^[38],然而有些物质单独嗅闻时并不会产生明显异味,混合时才会增强其异味,因此关于异味的物质基础也是植物乳(奶)研究的热点和难点。关于异味成分的形成机制,以豆乳为例,一般认为C6醛是豆科植物乳(奶)风味的重要组成成分,来源于脂肪氧合酶(LOX)的酶促氧化途径,亚油酸和亚麻酸是其主要的前体底物,亚油酸被LOX氧化产生9-或13-羟基-亚油酸氢过氧化物,又进一步被氢过氧化物裂解酶作用形成己醛、(E)-辛烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛等。亚麻酸作为底物时,则形成(E)-2-己烯醛、(E,Z)-3,6-壬二烯醛等。己醛、(E)-2-己烯醛等是脂肪氧合酶途径青草味的主要风味贡献成分^[39]。大豆制浆过程中也会涉

及到非酶反应,脂质、蛋白质、碳水化合物等作为不同的前体物质,会形成不同的氢过氧化物、自由基等氧化中间产物并最终导致异味的产生。这都对植物乳(奶)生产过程中体系风味的调节提出要求^[40]。

2.5 腐败变质的控制

新鲜的植物乳(奶)中因富含碳源、氮源,微生物极易繁殖,导致胀罐、胀袋等腐败变质现象发生。主要原因包括:a. 植物乳(奶)原料本身存在霉变、腐败情况,导致最终产品微生物指标难以达标;b. 植物乳(奶)杀菌方式的选择不当。巴氏灭菌可杀灭植物乳(奶)中致病性细菌和绝大多数非致病性细菌,但仍保留了小部分较耐热的细菌及芽孢,因此货架期较短。超高温瞬时灭菌(UHT)耦合无菌罐装、先罐装再高温高压灭菌是植物乳(奶)加工中常用的较安全的灭菌方法^[41];c. 杀菌过程中出现问题,控制不当,如高温高压灭菌时产品堆积过剩,出现杀菌不彻底现象,UHT-无菌罐装过程中,杀菌机与管道清洗不当等,均可能造成最终产品在储藏过程中腐败变质现象。因此有必要发展绿色、高效控制植物乳(奶)有害微生物产生的方法和技术。

2.6 多场景的应用

为了满足不同应用场景如餐饮、工业和零售等,植物乳(奶)的加工需要突破不同的问题。例如餐饮用植物乳(奶)在消费之前可能需要与茶、咖啡等调配,对植物乳(奶)体系的环境应激(包括酸碱度、温度和离子等)稳定性等有更高的要求。工业用植物乳(奶)一般采用大包装,面临着运输与储藏成本较高的问题。零售直饮型植物乳(奶)则需要针对不同消费场景如早/晚餐用、零食用等,同时由于不同职业、年龄、收入和学历等人群对植物乳(奶)消费需求与偏好差异较大,更要突破特定人群细分不同的消费体验需求,在营养、风味、多元化和个性化方面对植物乳(奶)加工提出更高要求。

3 国内外植物乳(奶)的加工技术

为了解决上述加工难题,植物乳(奶)加工过程中不可缺少的工艺步骤包括原料清选、熟制、调配和灭菌等,同时,新的植物乳(奶)加工技术与装备的出现也为更高效的解决上述问题提供了支撑。

3.1 传统技术

如图1所示,传统植物乳(奶)加工工艺流程主要包括熟制、浸泡、磨浆、除渣、调配、罐装、高温高压灭菌等,可分别解决植物乳(奶)加工过程中安全风险因子消减、营养素溶出困难和有害微生物的控制等加工问题,得到可市场化的植物乳(奶)。

3.1.1 熟制 传统的植物乳(奶)熟制工艺主要包括烘烤、常压蒸煮等。熟制过程原料中淀粉糊化,植物原料的生青味可得到有效控制,同时可去除部分原料中热敏抗营养因子及有毒有害物质如生氰糖苷等,并起到部分灭酶效果,另外熟制过程中可发生美拉德等

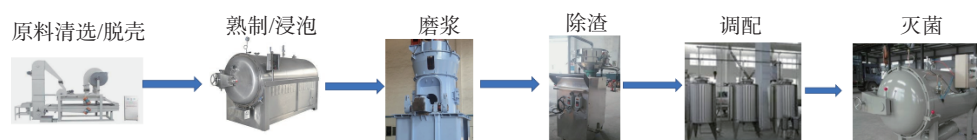


图 1 植物乳(奶)传统工艺主要加工步骤流程图

Fig.1 Flow chart of traditional processing steps of plant-based milk

反应,促使植物原料风味发生改变,促进生香。因此,熟制工艺是大多数植物乳(奶)加工的重要步骤之一。

3.1.2 浸泡 浸泡是植物乳(奶)生产的重要预处理过程,其主要目的是促进谷物或坚果等植物原料的软化和膨胀^[42],有利于研磨过程原料的破裂。这不仅降低了机械磨碎强度而且使蛋白质充分水合更容易浸出,增加提取率。此外,浸泡处理也有助于减少初始微生物含量、消除异味、改善感官特性并提高营养价值。水浸泡阶段可用于大豆、榛子、大米、杏仁、老虎坚果、谷物、芝麻和花生等原料^[43]。

3.1.3 磨浆 磨浆是生产植物乳(奶)过程中的提取步骤。磨浆的目的是破坏植物细胞或者亚细胞结构,促进蛋白质、脂类和其他可溶性固形物的释放。传统的植物乳(奶)磨浆工艺包括使用石磨、陶瓷磨等,主要依靠植物原料在浸泡软化后放置于两个粉碎面之间,通过施加超过物料抗压强度极限的压力而实现粉碎。磨浆可分为干磨和湿磨,干磨通常效率较低并且不利于烫漂与浸泡,因此通常使用湿法研磨来生产植物乳(奶)^[44]。水的添加量、研磨温度、pH、研磨类型和进料速率等因素对植物乳(奶)固形物含量和得率有重要的影响^[45]。湿磨可应用于老虎坚果、大豆、椰子、腰果、榛子、大麻种子、豇豆、杏仁、核桃和花生等原料^[43]。

3.1.4 除渣 除渣是植物乳(奶)生产过程中的必要步骤,目的是为了分离饮料中的固体颗粒和悬浮杂质。主要除去不溶性纤维使微粒达到一定的细度,从而有利于提高产品的稳定性。根据最终产品要求,传统除渣工艺根据对产品颗粒度需求程度不同,可采用不同的过滤材料,如双层粗棉布、细棉布(25 μm)和不同尺寸的滤网(120、150、180 和 200 目等)^[44]。

3.1.5 调配 植物乳(奶)产品中的蛋白质、维生素和矿物质的含量至关重要,因此部分植物乳(奶)的加工过程中会选择外源强化添加营养素,增加产品中特定营养素的总含量。同时为了提高植物乳(奶)的口感风味,糖、盐、酸度调剂和香精香料等也会在该阶段加入。另外,为了保持植物乳(奶)在高温灭菌后的稳定体系,乳化稳定剂如单,双甘油脂肪酸酯、蔗糖脂肪酸酯、吐温、羧甲基纤维素钠和黄原胶等也会在该阶段加入。

3.1.6 灭菌 商业化的植物乳通常经过巴氏杀菌或超高温灭菌处理来延长保质期。通常巴氏杀菌、超高温瞬时灭菌(UHT)和高温高压灭菌会被用于植物乳(奶)中的微生物灭活,但可能导致食品成分结构和

理化特性发生变化,特别是稳定乳液的蛋白质、多糖结构破坏后会导致体系失稳,并且乳体系中淀粉受热会导致黏度显著增加,这也可能对植物乳(奶)的食用品质产生重大影响。

3.2 新技术

传统的植物乳(奶)生产技术如热处理会破坏天然的营养成分且稳定性不高、货架期短。因此出现一些新兴技术以生产在外观、风味、稳定性和营养价值方面具有优势的植物乳(奶)。新兴的技术如超高压均质、脉冲电场、欧姆加热、酶解技术及微生物发酵技术在植物基牛奶替代品的生产中有着巨大的潜力(表 4)。

3.2.1 物理(场)加工技术

3.2.1.1 微波调质技术 传统熟制工艺如炒制、蒸煮等,虽然广泛应用于花生、大豆等植物乳(奶)制备过程,但存在热效率低、不均匀和对风味/稳定性破坏较大等问题。炒制工艺通过热传导、对流和辐射使热量从外部传至物料,存在温度梯度且加热不均、局部过热,一方面造成蛋白质热变性,破坏天然乳化体系;另一方面易使热敏性营养素发生热氧化,并产生苯并吡等风险因子,造成风味和营养的双重负面影响。蒸煮等工艺热效率低,同时对植物原料风险因子的脱除效果有限,对水资源造成浪费。作为一种超高频电磁波,微波能够促使偶极分子高频往复运动产生“内摩擦热”,会被食物和水等吸收从而使自身发热,不需热传导过程即可实现同时加热、同时升温,速度快且均匀,能耗为传统加热的几分之一甚至几十分之一^[46-47],并可实现: a. 熟制脱去生氰糖苷等安全风险因子; b. 美拉德反应实现增香; c. 钝化植物原料内源氧化酶,提高氧化稳定性; d. 破坏细胞壁结构,促使植物营养素解聚、溶出。

3.2.1.2 高效提浆技术 工业常通过挤压、研磨、剪切、撞击和弯曲折断等方式对物料进行粉碎,其中制备花生、大豆植物乳(奶)时常使用陶瓷湿磨的挤压与剪切力进行提浆。但有些原料如亚麻籽呈现扁平椭圆形状,在研磨时易出现皮仁分离、粉碎不均现象;燕麦等小颗粒原料在蒸煮后难以通过碾压使其得到粉碎,这极大降低了提浆效应,限制了内源营养素的溶出。目前发展的超细高效碾磨技术主要包括胶体磨粉碎、微流化粉碎和滚筒粉碎等,其中胶体磨等作为多级在线乳化分散机,通过转齿与定齿相对的高速旋转,被加工物料通过本身的重量或外部压力加压产生的向下螺旋冲击力,穿过胶体磨定、转齿之间的

间隙时受到强大的剪切力、摩擦力和高频振动等物理作用,使物料被有效地乳化、分散和粉碎,达到物料超细粉碎及乳化的效果^[48]。

3.2.1.3 超高压均质(UHPH) 热处理广泛地应用于豆浆和花生等植物原料,而对于淀粉含量高的植物基原料,如燕麦、大米等因容易发生淀粉糊化而导致产品黏度增大,同时过热会引起植物乳蛋白质变性,热敏性活性成分损失等问题,因此对于植物乳(奶)的生产技术中非热处理技术具有较大优势^[49]。与热处理相比,应用超高压均质等非热处理后最终产品质量效果更好且营养、质地、口感和颜色的变化最小。如表4所示,UHPH的主要作用是提高如杏仁乳、豆乳的物理稳定性,延长货架期^[50],其具有有效灭活微生物、保留微量营养素、绿色节能和加工均匀等显著优点^[51-52]。UHPH原理是液体样品在均质机的腔体内受到剪切力、空穴爆炸力而产生高速流体撞击作用和涡旋作用,液体样品的结构遭到破坏,最终乳液的颗粒变得更小达到更稳定的状态,可有效地提高植物乳(奶)的稳定性^[53]。此外由于高压会对微生物产生影响,UHPH处理同时可以抑制有害微生物的生长,达到灭菌的目的^[54]。与UHT处理相比,经UHPH(300 MPa, 80 ℃)处理后,豆浆胶体稳定性更高、初级氧化水平稳定、己醛值显著降低,在室温下储存时间可达6个月^[55]。200和300 MPa的UHPH都减少了孢子和肠杆菌数量,并使植物乳(奶)粒径减小;200 MPa时豆浆蛋白部分变性,而在300 MPa下与UHT处理的变性程度相同^[54]。UHPH处理后产品具有更长的保质期和更好的质量特性,因此代替热处理生产植物乳(奶)有着巨大的应用前景,但UHPH设备需要与无菌灌装相结合,对生产装备与过程控制要求更严格。

3.2.1.4 脉冲电场(PEF) PEF是在温度30~40 ℃范围内将样品暴露于高压脉冲下的非热食品灭菌技术。外加高强度脉冲电场(10~80 kV/cm)会发生电穿孔效应增加微生物细胞膜的通透性,最终导致细胞损伤或死亡^[56]。如表4所示,PEF可灭活食品内源性酶,杀死微生物,并对营养、质地、口感和颜色的负面影响较小^[57-58],该技术主要适用于低电导率和低黏度的液体食品,目前已逐渐应用于液体产品(包括植物乳(奶))来延长保质期^[22]。研究发现应用PEF处理豆浆可有效灭活大肠杆菌和金黄色葡萄球菌,而对豆浆的质量特性没有影响,因此该技术可能是豆浆巴氏杀菌热处理的有利替代技术^[59]。另外PEF处理及其参数优化(处理时间、脉冲强度、脉冲频率和脉冲宽度)会影响其灭酶效果,大豆脂氧合酶的活性随着处理时间、脉冲强度、脉冲频率和脉冲宽度的增加而降低,较强的处理参数导致大豆脂氧合酶的失活程度更高。在42 kV/cm下,PEF对大豆脂氧合酶的最大灭活达到88%(持续1036 μs,脉冲频率为400 Hz,脉冲宽度为2 μs,温度为25 ℃)^[60]。PEF不会使孢

子失活,故可通过添加有机酸或乳酸链球菌肽、调节pH等灭活孢子。目前该技术实现工业化仍有一定的局限性,如成本高、工业用PEF设备开发有限等^[61]。

3.2.1.5 欧姆加热(OH) 欧姆加热是一种通过低频电流来加热食物的先进的热处理技术,可杀灭腐败微生物,延长食品的保质期。当施加50~60 Hz的电流到食品基质上,由于电能通过电阻介质传输促进离子重组并增加了分子的运动速度从而促进了热能的释放^[44]。欧姆加热的优点包括提高热敏成分保留率、提高产量和能效,加热快速且均匀等^[62],其中电场强度、温度和时间都会影响处理后的效果。Saxena等^[63]在三个电场强度(24、32和48 V/cm)和四个温度(60~90 ℃)下,处理时间为5~20 min的处理条件下,研究了欧姆加热对甘蔗饮料中多酚氧化酶活性的影响;研究发现在60 ℃时,多酚氧化酶活性随电场强度的增加而降低,而在70~90 ℃时,在32和48 V/cm处观察到酶活性增加。如表4所示,该技术也可用于豆浆的生产,不仅减少了豆腥味,而且由于其电化学和热效应相结合降低了胰蛋白酶抑制剂和糜蛋白酶抑制剂的活性^[64-65],但工业化应用过程中仍存在着诸如电阻率不均匀而产生的“冷点”等风险。

3.2.2 生物加工技术

3.2.2.1 酶解技术 酶解技术反应条件温和、能耗少、效率高且溶剂消耗少,不仅能促进细胞内化合物的释放,增加可溶性糖和蛋白质含量,提高产品生物活性;还可提高稳定性,改善植物乳(奶)感官品质。首先,酶解技术是植物乳(奶)生产中促进营养素溶出的关键步骤,碳水化合物酶和蛋白酶是广泛应用于植物基食品的酶^[66]。碳水化合物酶水解植物细胞壁层中的糖苷键,促进不溶性纤维分解、生成低分子量糖并释放蛋白质和其他的胞内化合物^[67];如纤维素酶可水解初生细胞壁,而果胶酶水解次生细胞壁。使用果胶酶破坏植物细胞壁组分网络结构可以增加谷物饮料中蛋白质和脂肪的释放率^[68]。其次,酶解技术可以起到改善植物乳(奶)稳定性与风味的效果。Rosenthal等^[69]研究发现碳水化合物酶处理(1.2% Celluclast 1.5 L, 3 h)不仅提高了豆浆在储存时的物理稳定性,还改善了豆腥异味。而一般认为蛋白酶水解后会释放含有苦味的低分子量肽,但Sahoo等^[70]将两种来源于向日葵种子的非商业蛋白酶固定化后,加入豆浆中并在30 ℃下酶处理1 h,结果发现产品豆腥味下降,宜人气味增加。从组成来看,蛋白质酶水解后所产生的低分子量肽主要由疏水性氨基酸组成,疏水性、初级序列、空间结构、肽链长度和分子的大小对于肽的苦味也很重要,需要进行特定酶解来控制植物乳(奶)的风味^[66]。酶解还可提高植物基乳制品的生物活性,该技术不仅可将大分子物质降解为生物活性更高的小分子化合物,而且会增加生物活性成分(多酚、黄酮等)的释放量。如蛋白酶处理大豆乳、亚麻籽蛋白酶解后大豆肽、酶水解产物显示出抗氧化、抗

表 4 植物乳(奶)新型加工技术及其对食品品质的影响
Table 4 New processing technology of plant-based milk and their effects on food quality

工艺	植物乳(奶)	参数	效果	应用难题	文献
超高压均质	豆奶	207、276 MPa; 121、145 ℃	总微生物数量减少、稳定性提高		[79]
	杏仁	200、300 MPa; 55、65和75 ℃	粒径减小, 物理稳定性提高		[80]
	榛子	0、25、50、75、100和150 MPa; 15 ℃	高于75 MPa的压力可促进pH、糖的含量和溶解度的增加, 并降低颗粒密度和尺寸	需要将设备与无菌灌装相结合, 对生产装备与过程控制要求更严格 ^[79] 。	[81]
	小麦	300 MPa、40 ℃	过氧化物酶活性降低80%		[82]
脉冲电场	大豆	18、20 和 22 kV/cm; 25、50、75 和 100 脉冲; 0.5 Hz; 26 ℃	改变表观黏度, 并促进了产品颜色的显著变化	投资成本高, 工业用脉冲电场设备开发有限 ^[61]	[83]
	大豆	35 kV/cm; 200 HZ; 800和1400 μs	脂肪酸和矿物质保留率与热处理组相比有效提高		[84]
欧姆加热	大豆	220 V; 50 Hz; 0、3、4、5、10和15 min	有效促进胰蛋白酶和糜蛋白酶抑制剂的失活	欧姆加热最主要依靠电阻率, 复杂体系易引起加热不均, 出现“冷点” ^[85]	[85]
	大豆	50、500、5000和10 kHz; 160、180、200和220 V; 0、1、3、5、10和15 min; 90 ℃	促进脲酶失活		[86]
酶解	花生	Viscozyme L、半纤维素、纤维素; 52 ℃, 90 min	蛋白质提取率分别增加8.2%、10.2%和12.2%		[87]
	燕麦	淀粉酶、纤维素酶、木聚糖酶、蛋白酶; 50 ℃, 90 min	蛋白质含量增加, 小分子肽释放导致抗氧化性提高、抗营养因子减少	成本相对较高, 由于酶的特异性, 针对不同原料需进行优化	[88]
	藜麦	α-淀粉酶、木瓜蛋白酶Profix 100 L、生物蛋白酶N100L和风味酶; 50 ℃、180 min	蛋白酶处理增加了蛋白质溶解度		[88]
	大豆	Viscozyme L; 50 ℃	蛋白质和总异黄酮含量提高接近一倍		[89]
	杏仁	三株乳酸菌(F3、M47、A62); 37 ℃、24 h	抗氧化能力增强		[78]
微生物发酵	大豆	鼠李糖乳杆菌; 37 ℃、18 h	苷元和酚类化合物含量增加、抗氧化能力增加	专用菌种的筛选、发酵条件的优化	[90]
	杏仁	罗伊氏乳杆菌、嗜热链球菌; 37 ℃/42 ℃; 24 h	改变内部结构, 形成弱凝胶, 利于持水		[91]

炎、抗肥胖和免疫调节等活性^[71]。同时由于植物原料中酚类化合物可能与球状蛋白质通过疏水相互作用和氢键结合形成蛋白-酚类复合物, 因此通过蛋白酶水解芝麻后总酚释放量增加^[72]。

3.2.2.2 微生物发酵技术 微生物发酵技术生成植物酸乳一般采用两种或多种微生物菌种的混合培养发酵, 以增强发酵效果并提高最终产品的质量^[73], 其中乳酸菌(LAB)、杆菌和酵母菌是使用最广的微生物^[74], 能改善植物乳(奶)的感官特性、提高营养和健康价值。首先, 发酵通过降低不理想的气味或者产生香气来改善植物乳(奶)的风味。花生奶发酵后, 由于正己醛和正己醇减少, 豆腥味得到改善, 并在发酵过程中释放具有奶油糖香气的二乙酰和 2,3-丁二酮^[66]。其次, 发酵可通过增加营养物质含量、提高营养物质的生物利用度, 减少抗营养因子来改善植物性乳制品的营养价值^[75]。发酵不仅可以增加蛋白质和维生素的含量^[73], 也可提高钙和维生素的生物利用度。使用双歧杆菌发酵发现豆浆中的粗蛋白含量、B 族维生素如核黄素和硫胺素含量都显著增加^[76]。同时在发酵过程中会生成维生素(如 V_k 和 B 族维生素), 例如酵母发酵能促进 VB₂ 的产生^[73]。此外, LAB 能够产生植酸酶催化植酸盐的水解产物, 肌醇和磷酸盐等, 因此发酵技术有可能降低植物原料抗营养因子的含量, 增加矿物质的利用率^[77]。发酵还有助于改善植物基牛奶的生物活性。经乳酸菌发酵后, 杏仁奶中酚类化合物含量提高, 因而具有更高的抗氧化能力^[78]; 经

LAB 发酵后, 大豆可产生抑制血管紧张素转换酶(ACE)的生物活性肽, 具有降血压作用^[54]; 发酵时乳酸菌产生的 β-葡萄糖苷酶可将豆浆中共轭异黄酮转化为生物活性更高的糖苷酮。

综上, 不同植物乳(奶)加工新工艺对于其理化特性、营养素含量、风味和安全等均会产生相应的影响, 在研发植物乳(奶)过程中遴选运用一种或多种新型加工工艺耦合, 可能会对植物乳(奶)品质提升起到较好效果。

4 植物乳(奶)产业与科技发展趋势

4.1 产业发展迅速, 相关企业数量和规模都在快速增长, 市场规模将破千亿

植物乳(奶)市场是全球功能性饮料等新型食品开发类别中快速增长的细分市场之一, 从全球角度来看, 预计复合年增长率(CAGR)高于 10%, 因此到 2023 年, 世界市场预计将超过 260 亿美元。《2020-2025 年中国植物蛋白饮料行业市场需求与投资规划分析报告》显示, 2020 年我国植物乳(奶)市场规模已经达到 500 亿元, 未来几年植物乳(奶)行业的年均增速有望保持在 20% 以上, 预计 2025 年植物乳(奶)市场规模将超 3000 亿元。天猫新品创新中心发布的《2020 植物蛋白饮料创新趋势》表明, 2020 年我国线上植物蛋白饮料市场高速发展, 销量增长 18 倍, 销售额增长近 10 倍, 远超其他饮料品类。随着近两年的发展, 以燕麦奶、杏仁奶为代表的植物乳(奶)市场规模逐渐扩大^[92]。英敏特报告显示, 每一类植物乳(奶)

年销量都逐年增加,植物乳(奶)多样化发展迅速;2017年至2018年燕麦奶、杏仁奶与椰奶分别增长了71%、10%和16%^[93]。根据英敏特数据,截至2021年5月,以燕麦为原料的植物乳(奶)/酸奶的上市量比一年前同期增长了110%。同时根据英敏特发布《中国乳饮料创新趋势洞察》数据预测,中国牛奶和乳饮料市场(包括乳酸菌饮料)将于2026年达到3624亿元人民币,年均复合增长率为6.11%,未来5年,该市场将保持稳健增长。

4.2 “植物蛋白+”特征凸显,场景化、个性化消费需求旺盛,新品不断涌现,呈多元化发展

据统计,影响消费者购买植物乳(奶)的因素排名前三的分别为口味、健康、营养,场景化、个性化消费需求逐步提高。传统第一代植物乳(奶)饮料如豆浆等,以补充蛋白为主要需求,第二代植物乳(奶)如燕麦乳等,以植物乳(奶)的独特风味、宣传某一项营养功效如补充膳食纤维等为主,未来植物乳(奶)将势必向着高营养价值和满足不同人群营养、应用场景的市场需求来细分发展。目前植物乳(奶)除了常见的豆奶、杏仁奶和椰奶,还出现了藜麦蛋白饮料、芝麻奶、山核桃蛋白饮料、米浆、榛子奶、羽扇豆奶、火麻奶和亚麻籽奶等。亚麻籽植物乳(奶)是一种适合不同人群且营养素非常全面、营养价值极高的健康食品,特别需要指出的是,亚麻籽乳富含n-3系列唯一必需多不饱和脂肪酸 α -亚麻酸(α -linolenic acid, ALA, 含量约为59%)。市场上还推出了“巴旦木+夏威夷果”和“燕麦+藜麦”等双植物蛋白饮品^[92],凸显出“植物蛋白+”特征需求^[94]。复合型植物乳(奶)、早餐用植物乳(奶)和咖啡/茶饮调配用植物乳(奶)等产品的不断推陈出新、迭代升级,植物乳(奶)产品在减肥、美容、调节肠道功能、改善心脑血管健康和调节血压/血脂等方面的营养健康作用潜力的持续发掘,也显示出了消费者对于个性化、营养化、场景化消费的需求正在不断升级。

4.3 技术和装备不断升级,呈现绿色化、低碳化、智能化发展态势

从目前的消费趋势来看,消费者逐渐将注意力越来越多地放在清洁标签食品上,同时保持食品的天然风味和品质^[95]。一方面,食品行业基于自身发展需求,以减少能源消耗并使原料价值最大化、实现经济可持续性为目标,致力于加工技术与装备的革新升级^[96]。因此,消费者的需求和经济可持续性共同促进了工艺的不断升级,追求绿色环保的生产工艺,提高生产效率、降低“三废”和碳排放、降低成本、提高产品的质量。目前大力发展的超高压等非热灭菌、间接式(直喷/浸入)超高温瞬时灭菌、超高压无菌后均质、超声、微波、生物酶解、发酵技术等工艺技术^[96-97],以实现植物乳(奶)零/低添加、纯天然、高活性、清洁标签、环境友好等特质。另一方面,在植物乳(奶)加工的部分工艺环节、数据的采集与分析应用方面,为

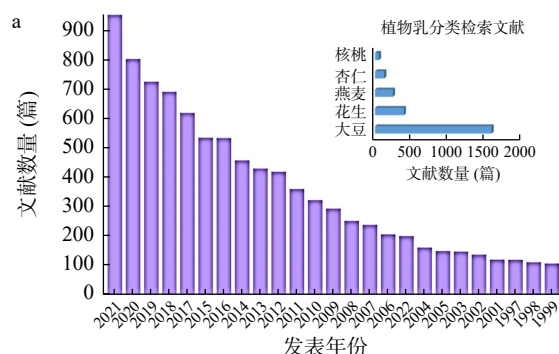
了减少人工的使用,传感器与机电一体化的新型自动化、智能化控制技术的发展和运用,不仅能让植物乳(奶)加工工艺如浸泡、蒸煮、均质等过程中温度、压强等参数得到更加精确与稳定的控制,从而提高植物乳(奶)的加工质量、生产效率、产业效益,亦是国内外植物乳(奶)产业发展的必然趋势。

4.4 植物乳(奶)评价方法和技术愈加规范、系统和科学

天然的成分和独具特色的风味等优质属性决定了植物乳(奶)广阔的发展前景,然而受到各种限制性因素的影响,人们对其营养价值和前景的认识并不深刻。如在植物乳消化吸收评价方面,国际领先的INFOGEST模型基于现有的临床等实验所得生理数据模拟上消化道的消化过程,兼具科学性、先进性和可操作性。而国内目前关于植物乳(奶)饮料的标准多集中于对其感官、理化指标和食品安全方面的规范,对植物乳(奶)饮料的整体食用品质包括感官、营养素含量、安全性指标、储藏稳定性、消化吸收特性和植物蛋白营养价值评价的标准极少,特别是系统的科学评价方法标准在国内尚属空白。市售植物乳(奶)饮料的质量参差不齐,消费者对该类饮料品质的需求日益提高,因此迫切需要制订相关的评价标准,按照统一的、科学的、先进的和全面的评价方法,作为以质论价、规范植物乳(奶)饮料品质标准的重要依据,同时也促进国内该行业的进一步发展,通过输出“均衡营养”、“突出强化营养类型”促进相关产品和产业的发展。

4.5 基础研究愈加深入,学科体系不断完善

植物乳(奶)相关论文发表数量呈明显逐年递增趋势(图2),其中大豆植物乳(奶)的研究发表数量最多,其次为花生、燕麦、杏仁和核桃等植物乳(奶)。对于植物乳(奶)的加工工艺、理化品质等方面的研究使得植物乳(奶)这一学科体系不断完善,植物乳(奶)属于广义水包油O/W乳液体系,其理化稳定性方向的研究较多;但与牛奶相比,在学科细分程度与研究深度上,仍存在差距,特别是植物乳(奶)新型加工工艺、特有感官特性评价、植物天然油脂体-植物多糖大分子互作、胶体界面化学和植物乳(奶)小分子抗氧化等基础研究领域,值得研究者关注。另



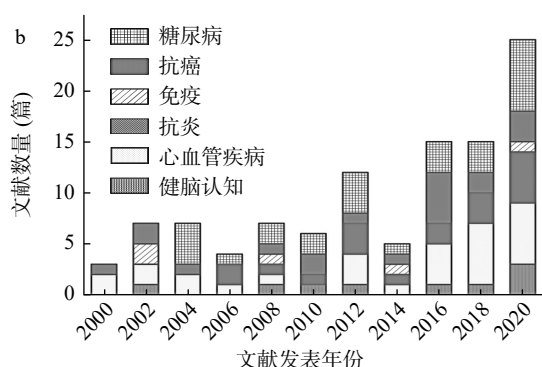


图 2 植物乳(奶)文献检索情况

Fig.2 Retrieval situation of plant-based milk literature

注:图 a 为不同植物乳(奶)类型发表文献;图 b 为植物乳(奶)不同功能发表文献(数据来源:Web of SCI)。

外,近二十年来,关于植物乳(奶)营养健康活性的研究呈增长趋势,特别是关于植物乳(奶)在防治心脑血管疾病、糖尿病和抗炎方面的研究呈上涨趋势,并在逐渐丰富完善。

5 我国植物乳(奶)产业发展对策

尽管我国植物乳(奶)产业在工艺、设备和产品多样性等方面已有较大创新与突破,特别是近年来清洁标签、零添加自稳定豆乳、坚果乳等相关产品的开发成功并实现市场化投放,但与国外相比,我国该产业在学科体系建设、关键加工装备研制和个性化设计与产品创制等方面发展仍存在明显差距,在目前全球掀起的新一波人体感知、精准营养、绿色低碳、享受愉悦和智能制造等食品科技创新浪潮下,需要充分结合我国健康特征、膳食模式和农业现代化发展需求和相关产业背景来推动我国植物乳(奶)产业高质量快速健康发展。

5.1 充分结合健康中国、乡村振兴等国家政策

首先,为贯彻落实《“健康中国 2030”规划纲要》、《国民营养计划(2017~2030)》等相关文件和行动计划,应把满足人们营养健康需求放在设计和创制新型植物乳(奶)的重要位置。其次,应该充分结合我国目前正在大力实施的乡村振兴战略,在促进农产品加工高质量发展政策保障上,国家和相关部委相继出台了《关于拓展农业多种功能促进乡村产业高质量发展的指导意见》(农产发[2021]7号文)等重要文件,基于植物乳(奶)在农产品加工业、健康食品产业具有巨大发展潜力,将进一步助推产业扶贫和乡村振兴,高度符合国务院关于促进乡村产业振兴的政策需求,产业带动性强,产业链长且拓展空间大。

5.2 充分结合我国膳食模式和营养健康现状

据全球疾病负担研究结果显示,膳食因素成为导致心血管等慢性疾病死亡的头号风险因素,已成为影响人群健康的重要危险因素。《中国居民膳食指南科学研究报告(2021)》中提到,对我国城乡居民膳食主要来源的调查显示,我国居民蛋白摄入结构中动物性蛋白呈增长趋势,植物性蛋白呈下降趋势,富含

n-3 长链多不饱和脂肪酸油脂、膳食纤维等植物营养素摄入也存在不足。植物乳(奶)饮料通过精准设计应富含植物蛋白、功能脂质、膳食纤维和植物多酚等多种特征营养成分,以在平衡我国膳食结构、干预慢病发生发展等方面发挥重要作用。

5.3 充分挖掘我国可利用原料

“从更好满足人民美好生活需要出发”,要发展生物科技、生物产业,向植物、动物和微生物要热量、要蛋白,不断满足人民群众对美好生活的需要,是“大食物观”的内在要求^[98]。当前,我国在蛋白质资源紧缺的国情下,充分开发并有效利用各类蛋白原料是摆在食品从业者面前的一项重要任务。例如我国是油料生产和消费大国,每年消费食用油脂量高达 3800 万 t,2021 年消费食用油已达 4254.5 万 t(国家统计局),其中大豆、花生、芝麻、亚麻等饼粕约 8000 万 t,富含植物蛋白、膳食纤维、油脂和多酚等营养成分,但主要作为饲料使用,其生物转化率和利用率不高,当前由于油料低温制油技术的突破和大力推广,饼粕的食用价值显著提升,具有制备高品质植物乳(奶)的潜力,不仅可高效利用其中的营养成分,充分发掘、高效利用我国植物蛋白资源,也符合国家“碳中和”的发展方针政策。

5.4 充分开展植物乳(奶)基础研究与技术创新

随着消费者对于感官享受、方便快捷、营养健康和个性化等方面的需求不断加码,增强理论基础研究与技术创新的科技投入是现阶段面对植物乳(奶)产业发展需求的重要保障。因此,应该进行产学研用一体化布局,积极开展植物乳(奶)加工领域理论基础与技术创新研究,深入开展植物乳(奶)胶体化学、风味化学、酶学和营养学等理论与物质基础研究,着眼于提高植物乳(奶)产品风味、营养和稳定性等食用品质形成分子机理、调控机制、功能评价和绿色加工等方面,加大科技创新投入,促使我国植物乳(奶)产业快速健康发展。

5.5 充分与上下游产业交叉融合

发展植物乳(奶)产业,提高植物乳(奶)营养健康属性,践行健康中国战略要求,更要注重上下游产业交叉融合,通过与上游育种产业融合,利用作物遗传育种技术,通过育种获得低豆腥味的大豆、高芝麻素的芝麻、高白藜芦醇花生、高木酚素和 α -亚麻酸的亚麻等,通过好原料助力生产好产品,并积极与大健康、智能制造等产业交叉融合,通过营养强化升级+营养功能评价提高植物乳(奶)产品附加值,通过加工工艺与装备改造提高植物乳(奶)加工生产效率、节约成本,并普及优质植物乳(奶)营养健康知识和理念,使消费者拥有更多选择,带动我国国产优质植物乳(奶)原料品种优选、扩种、生产、加工,带动产业与市场的升级。

参考文献

[1] COLUCCIA B, AGNUSDEI G P, DE LEO F, et al. Assessing

- the carbon footprint across the supply chain: Cow milk vs soy drink[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(3): 151200.
- [2] CHRISTOPHER A W, TREY M, BRANDON R M. Beverage milk consumption in the united states: Who is substituting from dairy to plant-based beverages?[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(12): 11209–11217.
- [3] 孙晓欢, 李佳勋, 荣建华, 等. 干豆和湿豆制作豆浆的营养评价[J]. *粮食与饲料工业*, 2014, 12(11): 17–20. [SUN X H, LI J X, RONG J H, et al. Nutritional assessment of soybean milk by dry beating and wet milling[J]. *Grain and Feed Industry*, 2014, 12(11): 17–20.]
- [4] 闫宗伟. 植物蛋白饮料的营养状况及未来发展[J]. *现代食品*, 2021(16): 101–103. [YAN Z W. Nutritional status and future development of plant protein beverages[J]. *Modern Food*, 2021(16): 101–103.]
- [5] SETHI S, TYAGI S K, ANURAG R K. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: A review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(9): 3408–3423.
- [6] MÄKINEN O E, WANHALINNA V, ZANNINI E, et al. Foods for special dietary needs: Non-dairy plant-based milk substitutes and fermented dairy-type products[J]. *Food Science and Nutrition*, 2016, 56(3): 339–349.
- [7] JESKE S, ZANNINI E, ARENDT E K. Evaluation of physico-chemical and glycaemic properties of commercial plant-based milk substitutes[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2017, 72(1): 26–33.
- [8] SCHAAFSMA G. The protein digestibility-corrected amino acid score[J]. *The Journal of Nutrition*, 2000, 130(7): 1865–1867.
- [9] BOYE J, WIJESINHA-BETTONI R, BURLINGAME B. Protein quality evaluation twenty years after the introduction of the protein digestibility corrected amino acid score method[J]. *British Journal of Nutrition*, 2012, 108(2): 183–211.
- [10] YANAI H, KATSUYAMA H, HAMASAKI H, et al. Effects of dietary fat intake on HDL metabolism[J]. *Journal of Clinical Medicine Research*, 2015, 7(3): 145–149.
- [11] HAIPING L, YONG L, YAN B, et al. Conjugated linoleic acid conversion by six *Lactobacillus plantarum* strains cultured in mrs broth supplemented with sunflower oil and soymilk[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(6): 330–336.
- [12] 王鑫媛, 卢海强, 谷新晰, 等. 干酪乳杆菌纯种发酵燕麦乳工艺及其产品质量分析[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 126–134. [WANG X Y, LU H Q, GU X X, et al. Technology of oat milk fermentation by *Lactobacillus casei* and product quality analysis[J]. *Chinese Journal of Food*, 2021, 21(1): 126–134.]
- [13] 文泽富, 刁太清. 维生素A花生乳营养成分研究[J]. *四川食品工业科技*, 1996(1): 50–52. [WEN Z F, DIAO T Q. Study on nutritional composition of vitamin a peanut milk[J]. *Sichuan Food Industry Science and Technology*, 1996(1): 50–52.]
- [14] 《植物蛋白饮料 杏仁露》(GB/T 31324-2014)标准解读[J]. *饮料工业*, 2016, 19(5): 1–4. [Interpretation of the standard of plant protein beverages almond milk (GB/T 31324-2014)[J]. *Beverage Industry*, 2016, 19(5): 1–4.]
- [15] 夏君霞, 房明虎, 王俊转, 等. 鉴别核桃饮料产品中添加其它坚果的研究[J]. *饮料工业*, 2015, 18(2): 26–29. [XIA J X, FANG M H, WANG J Z, et al. Studies on detection of doping other nuts in walnut beverage products[J]. *Beverage Industry*, 2015, 18(2): 26–29.]
- [16] PATIL U, BENJAKUL S. Coconut milk and coconut oil: Their manufacture associated with protein functionality[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(8): 2019–2027.
- [17] 张小莺, 孙建国. 功能性食品学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 14–16. [ZHANG X Y, SUN J G. Functional food[M]. Beijing: Science Press, 2017: 14–16.]
- [18] SWALLAH M S, FAN H, WANG S, et al. Prebiotic impacts of *Soybean residue* (Okara) on eubiosis/dysbiosis condition of the gut and the possible effects on liver and kidney functions[J]. *Molecules*, 2021, 26(2): 326–327.
- [19] 靳福娅, 李雄亮, 马梦焱. 浅谈膳食纤维的生理功能及其在食品中的应用[J]. *广东化工*, 2021, 48(24): 50–51. [JIN F Y, LI X L, MA M Y. The Introduction of the physiological function of dietary fiber and its application in food[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(24): 50–51.]
- [20] VANGA S K, RAGHAVAN V. How well do plant based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk?[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(1): 10–20.
- [21] HEANEY R P, RAFFERTY K. The settling problem in calcium-fortified soybean drinks[J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 2006, 106(11): 1753.
- [22] HEANEY R P, DOWELL M S, RAFFERTY K, et al. Bioavailability of the calcium in fortified soy imitation milk, with some observations on method[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2000, 71(5): 1166–1169.
- [23] ROMULO A. Nutritional contents and processing of plant-based milk: A review[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 998(1): 012054.
- [24] FERRAGUT V, VALENCIA-FLORES D C, PÉREZ-GONZÁLEZ M, et al. Quality characteristics and shelf-life of ultra-high pressure homogenized (UHPH) almond beverage[J]. *Foods*, 2015, 4(2): 159–172.
- [25] 任秀莲, 邢峰, 解利利. 花生中白藜芦醇的研究现状及应用展望[J]. *食品研究与开发*, 2008, 29(5): 163–166. [REN X L, XING F, XIE L L. Research status and application prospect of resveratrol in peanut[J]. *Food Research and Development*, 2008, 29(5): 163–166.]
- [26] YIN F, SANCHETI H, LIU Z, et al. Mitochondrial function in ageing: coordination with signalling and transcriptional pathways[J]. *The Journal of Physiology*, 2016, 594(8): 2025–2042.
- [27] QIU S X, LU Z Z, LUYENGI L, et al. Isolation and characterization of flaxseed (*Linum usitatissimum*) constituents[J]. *Pharmaceutical Biology*, 1999, 37(1): 1–7.
- [28] PATEL B Y, VOLCHECK G W. Food allergy: Common causes, diagnosis, and treatment[C]// Mayo Clinic Proceedings, 2015, 90(10): 1411–1419.
- [29] ZEIGER R S, SAMPSON H A, BOCK S A, et al. Soy allergy in infants and children with IgE-associated cow's milk allergy[J]. *The Journal of Pediatrics*, 1999, 134(5): 614–622.
- [30] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, et al. The composition, extraction, functionality and applications of rice proteins: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 64: 1–12.
- [31] 禹晓, 黄沙沙, 程晨, 等. 不同品种亚麻籽组成及抗氧化特性分析[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(6): 879–888. [YU X, HUANG S S, CHENG C, et al. Composition and antioxidant charac-

- teristics of different flaxseed cultivars[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2018, 40(6): 879–888.]
- [32] 伍恒, 钱和, 汪何雅, 等. 发酵法对降低食品过敏原的作用[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 453–457. [WU H, QIAN H, WANG H Y, et al. A summary on removing the allergen from food by fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(8): 453–457.]
- [33] 陈佳悦, 范蓓, 刘贵巧, 等. 食品中植酸及其降解产物的研究进展[J/OL]. 食品科学: 1–16[2023-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230217.1522.028.html>. [CHEN J Y, FAN B, LIU G Q, et al. Review on advance of phytic acid and its degradation products in food[J/OL]. Food Science: 1–16[2023-04-11].]
- [34] 齐宝坤, 王琪, 钟明明, 等. 高压均质辅助酶解豆乳对蛋白结构及抗营养因子的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 368–377. [QI B K, WANG Q, ZHONG M M, et al. Effects of high-pressure homogenization assisted enzymatic hydrolysis of soybean milk on protein structure and anti-nutritional factors[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 368–377.]
- [35] SCHELLER H V, ULVSKOV P. Hemicelluloses[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61(1): 263–289.
- [36] COLOSIMO R, WARREN F J, EDWARDS C H, et al. Comparison of the behavior of fungal and plant cell wall during gastrointestinal digestion and resulting health effects: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110(2): 132–141.
- [37] AHRENS S, VENKATACHALAM M, MISTRY A M, et al. Almond (*Prunus dulcis* L.) protein quality[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2005, 60(3): 123–128.
- [38] FENG X, LI X, ZHANG C, et al. Formation mechanism of hexanal and (E)-2-hexenal during soybean [*Glycine max* (L.) Merr] processing based on the subcellular and molecular levels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 70(1): 289–300.
- [39] ZHANG C, HUA Y, LI X, et al. Key volatile off-flavor compounds in peas (*Pisum sativum* L.) and their relations with the endogenous precursors and enzymes using soybean (*Glycine max*) as a reference[J]. Food Chemistry, 2020, 333(1): 127469.
- [40] 马磊, 孙君明, 韩粉霞. 大豆豆奶风味品质研究进展[J]. 大豆科学, 2012, 31(3): 478–482. [MA L, SUN J M, HAN F X. Advances on the study of soymilk flavor[J]. Soybean Science, 2012, 31(3): 478–482.]
- [41] 佟臻, 高彦祥. 液体饮料无菌灌装技术发展趋势[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 464–472. [TONG Z, GAO Y X. Advanced progress of aseptic filling technology for liquid drinks[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 464–472.]
- [42] PADMA M, JAGANNADARAO P V K, EDUKONDALU L, et al. Physico-chemical analysis of milk prepared from broken rice[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, 7(2): 426–428.
- [43] AYDAR E F, TUTUNCU S, OZCELIK B. Plant-based milk substitutes: Bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 70: 103975.
- [44] BOCKER R, SILVA E K. Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects[J]. Future Foods, 2021, 5: 10098.
- [45] SEOW C C, GWEE C N. Coconut milk: Chemistry and technology[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2003, 32(3): 189–201.
- [46] WONG W L E, GUPTA M. Using microwave energy to synthesize light weight/energy saving magnesium based materials: A review[J]. *Technologies*, 2015, 3(1): 1–18.
- [47] TORKI-HARCHEGANI M, GHANBARIAN D, PIRBALOUTI A G, et al. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 407–418.
- [48] CHEN T, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Micronization and nanosizing of particles for an enhanced quality of food: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(6): 993–1001.
- [49] VALENCIA-FLORES D C, HERNÁNDEZ-HERRERO M, GUAMIS B, et al. Comparing the effects of ultra-high-pressure homogenization and conventional thermal treatments on the microbiological, physical, and chemical quality of almond beverages[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(2): 199–205.
- [50] POLISELI-SCOPEL F H, HERNÁNDEZ-HERRERO M, GUAMIS B, et al. Comparison of ultra high pressure homogenization and conventional thermal treatments on the microbiological, physical and chemical quality of soymilk[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 42–48.
- [51] ZAMORA A, GUAMIS B. Opportunities for ultra-high-pressure homogenization (UHPH) for the food industry[J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(2): 130–142.
- [52] MOLLAKHALILI-MEYBODI N, NEJATI R, SAYADI M, et al. Novel nonthermal food processing practices: Their influences on nutritional and technological characteristics of cereal proteins[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(6): 1725–1744.
- [53] ARAUJO A. Method for preparing a beanless-flavor soymilk and/or okara using carbon dioxide in a state of sublimation: US, 7258889 B2[P]. 2005-09-09.
- [54] CRUZ N, CAPELLAS M, HERNANDEZ M, et al. Ultra-high-pressure homogenization of soymilk: Microbiological, physico-chemical and microstructural characteristics[J]. *Food Research International*, 2007, 40(6): 725–732.
- [55] POLISELI S F H, HERNÁNDEZ H M, GUAMIS B, et al. Sterilization and aseptic packaging of soymilk treated by ultra high pressure homogenization[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 22(4): 81–88.
- [56] ROSS A I V, GRIFFITHS M W, MITTAL G S, et al. Combining nonthermal technologies to control foodborne microorganisms[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, 89(2–3): 125–138.
- [57] SILVA A R A, SILVA M M N, RIBEIRO B D. Health issues and technological aspects of plant-based alternative milk[J]. *Food Research International*, 2020, 131: 108972.
- [58] ZHAO W, YANG R. Pulsed electric field processing of protein-based foods[J]. *Advances in Food Processing Technology*, 2019: 137–147.
- [59] LI Y Q, TIAN W L, MO H Z, et al. Effects of pulsed electric field processing on quality characteristics and microbial inactivation of soymilk[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(8): 1907–

1916.

[60] YING Q L, QUN C, XIU H L, et al. Inactivation of soybean lipooxygenase in soymilk by pulsed electric fields-Science Direct[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(2): 408–414.

[61] PATARO G, FERRARI G. Limitations of pulsed electric field utilization in food industry[M]. *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow*, 2020: 283–310.

[62] WATTANAYON W, UDOMPIJITKUL P, KAMONPATANA P. Ohmic heating of a solid-liquid food mixture in an electrically conductive package[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 289: 110180.

[63] SAXENA J, MAKROO H A, SRIVASTAVA B. Effect of ohmic heating on polyphenol oxidase (PPO) inactivation and color change in sugarcane juice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(3): e12485.

[64] SAINI A, MORYA S. A review based study on soymilk: Focuses on production technology, prospects and progress scenario in last decade[J]. *The Pharma Innovation Journal*, 2021, 10(5): 486–494.

[65] LU L, ZHAO L, ZHANG C, et al. Comparative effects of ohmic, induction cooker, and electric stove heating on soymilk trypsin inhibitor inactivation[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(1–3): 495–503.

[66] PENHA C B, SANTOS V, SPERANZA P, et al. Plant-based beverages: Ecofriendly technologies in the production process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 72(4): 102760.

[67] VONG W C, LIU S Q. Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 52: 139–147.

[68] PANDEY S, POONIA A. Plant-based milk substitutes: a novel non-dairy source[J]. *Innovations in Food Technology*, 2021: 63–71.

[69] ROSENTHAL A, DELIZA R, CABRAL L, et al. Effect of enzymatic treatment and filtration on sensory characteristics and physical stability of soymilk[J]. *Food Control*, 2003, 14(3): 187–192.

[70] SAHOO A K, GAIKWAD V S, RANVEER R C, et al. Improvement of shelf life of soymilk using immobilized protease of *Oerskovia xanthineolytica* NCIM 2839[J]. *3 Biotech*, 2016, 6(2): 1–7.

[71] MAGDALENA K, AGNIESZKA K C, ANNA K. Use of different proteases to obtain flaxseed protein hydrolysates with antioxidant activity[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(7): 1027.

[72] AHMET G, CAVIT B, FAITH M Y. Sesame bran as an unexploited by-product: Effect of enzyme and ultrasound-assisted extraction on the recovery of protein and antioxidant compounds[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283(15): 637–645.

[73] TANGYU M, MULLER J, BOLTON C J, et al. Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(23): 9263–9275.

[74] STEPHANIE J, EMANUEL E, et al. Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials[J]. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 2017, 110(8): 42–51.

[75] RASIKA D, VIDANARACHCHI J K, LUIZ S F, et al. Probiotic delivery through non-dairy plant-based food matrices[J]. *Agriculture*, 2021, 11(7): 599–620.

[76] HOU J W, YU R C, CHOU C C. Changes in some components of soymilk during fermentation with bifidobacteria[J]. *Food Research International*, 2000, 33(5): 393–397.

[77] REKHA C R, VIJAYALAKSHMI G. Bioconversion of isoflavone glycosides to aglycones, mineral bioavailability and vitamin B complex in fermented soymilk by probiotic bacteria and yeast[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 109(4): 1198–1208.

[78] WANSUTHA S, YUENYAOW L, JANTAMA K, et al. Antioxidant activities of almond milk fermented with lactic acid bacteria[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2018, 42: 115–119.

[79] TORO-FUNES N, BOSCH-FUSTE J, VECIANA-NOGUES M T, et al. Effect of ultra high pressure homogenization treatment on the bioactive compounds of soya milk[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 597–602.

[80] KARLIS B, VOLKER G, ELKE W, et al. Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects[J]. *Food Chemistry*, 2016, 192: 82–89.

[81] GUL O, SARICA OGLU F T, MORTAS M, et al. Effect of high pressure homogenization (HPH) on microstructure and rheological properties of hazelnut milk[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 411–420.

[82] CODINA-TORRELLA I, GUAMIS B, FERRAGUT V, et al. Potential application of ultra-high pressure homogenization in the physico-chemical stabilization of tiger nuts' milk beverage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 40: 42–51.

[83] XIANG B Y, SIMPSON M V, NGADI M O, et al. Effect of pulsed electric field on the rheological and colour properties of soy milk[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2011, 62(8): 787–793.

[84] MORALES-DE L P M, SALVIA-TRUJILLO L, ROJAS-GRAÜ M A, et al. Impact of high intensity pulsed electric fields or heat treatments on the fatty acid and mineral profiles of a fruit juice-soymilk beverage during storage[J]. *Food Control*, 2011, 22(12): 1975–1983.

[85] KNIRSCH M C, DOS SANTOS C A, DE OLIVEIRA SOARES A A M, et al. Ohmic heating—a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(9): 436–441.

[86] LI F D, CHEN C, REN J, et al. Effect of ohmic heating of soymilk on urease inactivation and kinetic analysis in holding time[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(2): E307–E315.

[87] LIU C, HAO L, CHEN F, et al. Study on extraction of peanut protein and oil bodies by aqueous enzymatic extraction and characterization of protein[J]. *Journal of Chemistry*, 2020, 2020(1): 1–11.

[88] AIELLO G, LI Y, XU R, et al. Composition of the protein ingredients from insoluble oat byproducts treated with food-grade enzymes, such as amylase, cellulose/xylanase, and protease[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2695.

[89] PENHA C B, FALCÃO H G, IDA E I, et al. Enzymatic pretreatment in the extraction process of soybean to improve protein and isoflavone recovery and to favor aglycone formation[J]. *Food Research International*, 2020, 137(6): 109624.

[90] ZHAO D Y, SHAH N P. Changes in antioxidant capacity, isoflavone profile, phenolic and vitamin contents in soymilk during

extended fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 58(2): 454–462.

[91] BERNAT N, CHÁFER M, CHIRALT A, et al. Probiotic fermented almond “milk” as an alternative to cow-milk yoghurt[J]. *International Journal of Food Studies*, 2015, 4(2): 201–211.

[92] 钱瑜, 白杨, 王晓. 新老品牌较量升温植物乳市场将进入洗牌期[J]. *中国食品*, 2021(5): 74–75. [QIAN Y, BAI Y, WANG X. The plant-based milk market will enter a shuffle period when new and old brands compete with each other[J]. *Chinese Food*, 2021(5): 74–75.]

[93] WOOD Z. Plant-based milk the choice for almost 25% of Britons now[J]. *The Guardian*, 2019, 19.

[94] NAWAZ M A, TAN M, ISETH S, et al. An emerging segment of functional legume-based beverages: A review[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(5): 1064–1102.

[95] MORENO-VILET L, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ H M,

VILLANUEVA-RODRÍGUEZ S J. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel thermal processing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 196–206.

[96] ROMBAUT N, TIXIER A S, BILY A, et al. Green extraction processes of natural products as tools for biorefinery[J]. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 2014, 8(4): 530–544.

[97] GALANAKIS C M. Emerging technologies for the production of nutraceuticals from agricultural by-products: A viewpoint of opportunities and challenges[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2013, 91(4): 575–579.

[98] 焦宏, 李丽颖, 杨瑞雪. 践行大食物观, 让“中国饭碗”更稳更健康[N]. *农民日报*, 2022-08-11(8). [JIAO H, LI L Y, YANG R X. Practice the concept of big food to make the “Chinese rice bowl” more stable and healthy[N]. *Farmer's Daily*, 2022-08-11(8).]