

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241030004

引用格式: 祁新如, 杨柳, 孙晨, 等. 植物基蛋白原料品质特性及其在乳品行业中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 233–239.

QI XR, YANG L, SUN C, *et al.* Research progress on the quality characteristics of plant-based protein raw materials and their application in the dairy industry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 233–239. (in Chinese with English abstract).

植物基蛋白原料品质特性及其在乳品行业中的应用研究进展

祁新如¹, 杨柳¹, 孙晨¹, 刘鸿阳¹, 孙雪², 罗渝萍¹, 张涛¹,
潘道东¹, 吴振^{1*}

[1. 宁波大学食品科学与工程学院, 宁波 315000; 2. 斯坦德科创医药科技(青岛)有限公司, 青岛 266000]

摘要: 植物基原料是指从植物中提取或源于植物的果实原料, 多以膳食纤维和蛋白质为主要成分来源。这些原料可以用于食品、工业、环保等多个领域。目前, 随着消费者对“健康和可持续”的追求, 乳糖不耐受及素食群体的特殊需求, 植物基蛋白原料被广泛运用于乳品行业以生产营养性(零胆固醇和低饱和脂肪)、人道性(动物福利)和环保性(节能减排)的动物源乳替代品。本文综述了植物基蛋白原料品质特性及其在乳品行业中的应用研究进展, 为植物基原料在乳品行业中的研究和应用提供一定的参考。

关键词: 植物基蛋白原料; 植物基乳; 品质特性; 未来发展

Research progress on the quality characteristics of plant-based protein raw materials and their application in the dairy industry

QI Xin-Ru¹, YANG Liu¹, SUN Chen¹, LIU Hong-Yang¹, SUN Xue², LUO Yu-Ping¹,
ZHANG Tao¹, PAN Dao-Dong¹, WU Zhen^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315000, China;
2. Standard Sci-tech Innovation (Qingdao) Pharmaceutical Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

ABSTRACT: Plant-based raw materials refer to materials extracted from or derived from plants, with dietary fiber and protein as the main ingredients, which can be used in many fields such as food, industry, and environmental protection. At present, with the consumer quest for “health and sustainability” and the demand of lactose intolerant and vegetarian groups, plant-based protein materials are widely used in the dairy industry to produce nutritious (zero cholesterol and low saturated fat), humane (animal welfare) and environmentally friendly (energy saving and emission reduction) animal milk alternatives. This paper reviewed the research progress on the quality characteristics of plant-based protein raw materials and their application in the dairy industry, and provided a certain reference for the

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(32472356, 32072192); 浙江省基金项目(LR22C200001); 浙江省教育厅一般项目(Y202352124); 省部共建农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室开放基金项目(2021DG700024-KF202423)

第一作者: 祁新如(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为乳品科学与工程。E-mail: qixinrui@163.com

*通信作者: 吴振(1985—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为乳品科学与工程。E-mail: woodsens@163.com

research and application of plant-based materials in the dairy industry.

KEY WORDS: plant-based protein raw materials; plant-based milk; quality characteristics; future development

0 引言

植物基蛋白原料在乳品加工中不仅提供了多样化的选择和丰富的营养,还通过技术创新满足了消费者对健康和可持续性的需求,并推动了乳品市场的持续发展。植物基酸奶在我国仍处于起步阶段,在未来的酸奶市场中具有很大的发展空间^[1]。据《2020—2025年中国植物蛋白饮料行业市场分析与投资规划分析报告》指出,未来几年植物奶行业的平均增速有望保持在20%以上,预计到2025年植物奶市场规模将超过3000亿元。这种趋势是由消费者对营养健康和环保可持续的渴望所驱动的,植物基乳不含乳糖和胆固醇,含有多种维生素和矿物质以及更高比例的多不饱和脂肪酸,可以为人体提供健康保障^[2],植物基乳的开发生产可以减少温室气体排放,降低环境污染^[3]。本文对植物基蛋白原料品质特性及其在乳品行业中的应用研究进展进行综述,以期对植物基乳后续研究及相关功能产品开发提供理论支持。

1 植物基乳的发展现状

1.1 植物基乳的种类

植物基乳作为一种替代传统乳制品的食品,近年来在全球范围内迅速崛起^[4]。它是以核桃、大豆、燕麦、亚麻籽等植物果仁、果肉为原料,通过特定的加工工艺发酵制成的植物蛋白饮料产品^[5-6],它通过发酵工艺进一步增强了乳制品的营养价值和健康功能,富含益生菌、活性酶及有机酸等,有助于肠道健康和免疫力的提升。植物基发酵乳制品种类丰富多样,主要可以分为豆类基乳、谷物基乳、坚果基乳和其他^[7]。目前,市场上常见的植物基乳主要包括豆奶、椰奶、杏仁乳、燕麦奶、花生奶等^[8],这些乳制品各有其独特的营养价值和风味,不仅满足了消费者对健康、环保和多样性的需求,还为素食者、乳糖不耐受者等特殊人群提供了更多的选择^[9]。

1.2 植物基乳的营养特性

植物基乳的营养特性是一个多方面的话题,涉及到其蛋白质、脂肪、矿物质、维生素以及其他生物活性成分的含量和质量。植物基乳通常含有较低的饱和脂肪酸和更高比例的不饱和脂肪酸,且含有多种生物活性小分子,如酚酸、植物固醇(豆固醇、谷固醇)等^[2,10-13]。此外,植物基乳富含多种维生素和矿物质,如维生素E、钙、铁等。然而,在蛋白质水平上,植物基乳的含量通常低于动物乳,植物基乳的蛋白质含量通常在1%到1.3%之间,而动物乳

如牛奶的蛋白质含量约为3.5%^[14-15]。另外,对矿物质和维生素的低生物利用度也是植物基乳的主要限制因素之一^[16-17]。

1.3 植物基乳的功能特性

植物基乳具有替代动物乳制品的功能,且其零乳糖、零胆固醇,对于乳糖不耐受者、素食者等人群来说,是理想的替代品^[5],可以为人体提供一种方便、快捷的营养来源^[18]。此外,植物基乳发酵过程中产生的有机酸、香气物质等使其口感更为醇厚,接近传统乳制品的口感,为消费者提供更多的风味选择^[19]。这些发酵乳制品中的益生菌能够帮助增强肠道免疫力,改善肠道微生物环境,尤其是有益菌群的生长,有助于调节肠道菌群,促进肠道蠕动,预防便秘等肠道问题。植物基乳的开发不仅有助于满足口味需求,还能提供良好的益生功能,进一步提升肠道健康。对于现代人来说,保持肠道健康是维护整体健康的重要一环^[20],而植物基乳中的膳食纤维和益生菌有助于调节各种肠道问题。植物基乳的开发还可以减少温室气体排放,降低环境污染和资源消耗。随着全球环保意识的提高,植物基乳作为一种环保、可持续的食品选择,将受到越来越多消费者的青睐^[21],见图1。

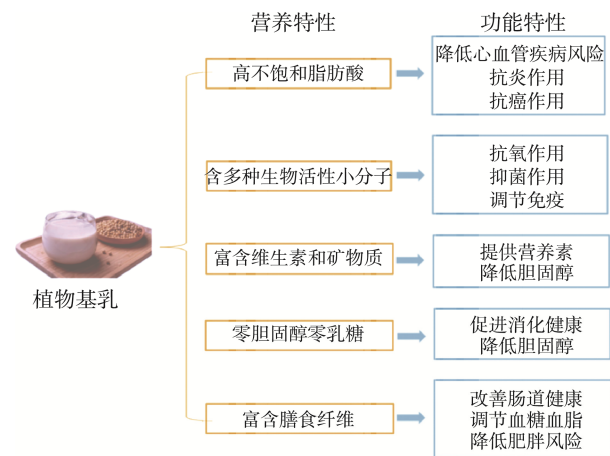


图1 植物基乳的营养特性和功能特性
Fig.1 Nutritional properties and functional properties of plant-based milk

2 植物基原料的加工特性

2.1 植物基原料的种类与特点

植物基作为原料其种类有很多,包括豆类(大豆、花生等)、谷物类(燕麦、大米等)、坚果类(杏仁、核桃等)、种

子类(芝麻、向日葵等)和伪谷物(藜麦、荞麦等),每种原料都有其独特的营养价值和品质特性^[1,3](表1)。

表1 植物基原料的种类与特点

种类	特点	参考文献
谷物类	中国传统膳食的主体,富含碳水化合物,也含有一定的蛋白质,其中含有的可溶性膳食纤维可预防慢性病的发生	[22]
坚果类	常见的坚果有杏仁、花生、榛子、核桃等,坚果中的不饱和脂肪酸较多,对肥胖、高胆固醇等人群有益	[23]
豆类	富含人体所需的全部必需氨基酸,包括扁豆、鹰嘴豆、斑豆、红芸豆等,是蛋白质、膳食纤维和铁和维生素等次要营养素的极好来源,但由于其豆腥味而不被广大消费者接受度	[24-25]
种子类	葵花籽、向日葵籽和豌豆等种子也是常见的植物基原料;这些种子富含不饱和脂肪酸、维生素和矿物质,有助于提高植物基乳制品的营养水平	[26]
伪谷物	藜麦是一种不含麸质的假谷物,其营养成分与谷物相当,具有更高的蛋白质含量、更均衡的氨基酸组成和更高水平的膳食纤维;但是,添加过多的藜麦会产生异味,且发酵质地也较粗糙	[1]

相比之下,单独使用某原料生产的植物乳与牛乳还是有一定差距,可以通过优化原料组合、改进加工工艺来生产出美味又营养的乳品。研究发现使用谷物做原料时混合不同原料,其矿物质(特别是铁和镁)、高质量脂肪和碳水化合物的含量可以得到显著提高^[15]。

2.2 植物基原料的类乳性与不足

植物基作为原料可以用来制作植物基乳制品、植物基肉制品,有些情况下也包括用植物性食材对动物产品形状、口感和风味的模仿^[27]。而植物基原料的类乳性主要体现在其模仿传统动物源乳制品的质地和口感的能力。新型酶解、发酵、杀菌等技术的运用能够帮助部分模拟动物乳的物理和化学特性^[28]。然而,植物原料普遍带有生涩、苦味^[29],以最常用的原料大豆为例,其在加工过程中容易出现较为严重的豆腥味,会极大地影响市场接受度^[25]。此外,植物基乳因较低的蛋白质含量和钙的可用性、较高的血糖生成指数(glycaemic index, GI)以及可能存在的抗营养因子导致其在营养方面还不及动物乳^[30]。

3 植物基原料的成品特性

3.1 植物基乳的乳加工特点

植物基乳的原料多样性为产品提供了丰富的口感和营养特性^[31],促使其在加工过程中采用不同的技术^[2],如

高压处理、脉冲电场等,以提升其类乳性^[32]。与传统乳制品不同,植物基乳需要对原料预先进行干法或湿法处理,新的加工技术如超微粉碎应运而生^[33],经过超微粉碎后的核桃粉,不仅蛋白质和不饱和脂肪酸的提取率显著提升,而且口感更加细腻,在储存过程中也不易出现沉淀^[34]。对于高油基制品如以坚果类为原料的产品,酶法改性可以调整油脂的组成,使其更适合特定的应用需求,另外也可以通过添加乳化剂(如单硬脂酸甘油酯和蔗糖脂肪酸酯)进一步改善其稳定性。研究显示,在相同的加工工艺处理下,原料种类的不同、生长条件的差异等,都会引起产品风味的改变^[7],因此在加工过程中,对各个参数都要进行精准控制,确保产品的稳定性和一致性,譬如水的硬度和pH,若调控不到位可能会破坏体系稳定性^[35]。

3.2 植物基乳的流变特性

从物理性质上来看,植物基乳本身是一个复杂的乳液体体系^[5],但是内部溶液的颗粒的组成和大小并不像普通牛奶那样均匀。植物基乳中含有蛋白质、淀粉等不溶性颗粒,在贮藏过程中可能通过沉淀、乳化或协同作用分离出来从而使产品不稳定,导致成品口感砂砾、体系油脂上浮^[36-37],可通过减小粒径以提高溶解度(均质)或使用乳化剂来提高悬浮稳定性^[38]。从流变学特性的角度来看,有些植物基乳的黏度较高,口感上更为浓稠,这与原料本身以及加工工艺密切相关^[39-40]。核桃油微乳的研究表明,含水量和无水乙醇含量对微乳体系的弹性模量(G')和黏性模量(G'')有显著影响,这说明加工条件可以显著改变植物基乳的流变特性^[41]。此外,蛋白质浓度也是影响植物基乳流变特性的重要因素,燕麦发酵乳的研究显示,随着蛋白质浓度的提高,其表观黏度也增大,表现出剪切变稀的假塑性流体特性^[42]。植物基乳的流变特性是一个复杂的现象,通过调整这些因素,可以优化植物基乳的流变特性,以满足不同的应用需求。

3.3 植物基乳的凝胶性

植物基乳凝胶性的形成机制涉及多个方面,包括蛋白质的聚集、分子间相互作用、pH变化引起的蛋白质变性、以及发酵过程中乳酸菌的代谢活动等^[43-44]。植物蛋白在乳品制作过程中通过疏水相互作用、静电相互作用、氢键、二硫键等作用力形成大分子难溶性聚集体,这种聚集体是凝胶形成的基础^[45],这一过程受到pH的影响,pH会影响蛋白质的二级结构和疏水基团的暴露程度,从而影响蛋白质的凝胶形成能力^[46]。目前,可以通过各种化学方法(复合共聚、Maillard反应、pH-shifting等)、物理方法(超声处理、欧姆加热等)和生物改性(如酶水解、发酵)等方法的运用改变蛋白质的结构来影响其凝胶特性^[28,47]。与乳清球状蛋白相比,虽然两者具有紧凑的球状结构和相似的凝胶机制,但植物蛋白的分子结构和功能属性与乳蛋白并不相同,植

物球蛋白分子结构更大、溶解性和乳化性更小。糖基化改性是公认的改善植物球蛋白乳化性的有效方式之一,研究发现利用同源多糖对大豆球蛋白进行糖基化修饰可以显著改善其乳化性^[48]。此外,超声波处理、酶法改性、加热改性和酰化改性都可以有效提升植物基乳的凝胶性^[49-52]。

3.4 植物基乳的发酵特性

发酵是提高植物基乳制品感官特性和健康益处的重要手段,乳酸菌不仅能改善植物蛋白的消化吸收,还能帮助分解植物蛋白中的大分子,使其更易于人体吸收。植物基乳在各种机制的共同作用下形成了特有的凝胶结构,进而通过益生菌发酵改善植物基乳的风味、营养和凝胶稳定性,这对植物基乳的品质至关重要^[53]。乳酸菌发酵可以去除抗营养因子等不利因素,提高植物蛋白的营养价值和蛋白质的生物利用率^[54-55]。发酵过程中产生的乳酸会导致 pH 下降造成蛋白质变性,使植物蛋白质聚集和交联增加,从而凝胶硬度随着发酵增强^[56]。经过热处理过的蛋白会影响酸奶发酵生产过程的稳定性,可以通过使用合适的发酵菌种,控制 pH 和离子强度,添加稳定剂和乳化剂等手段来改善^[57]。例如, *Lactobacillus plantarum* P8 与 *Streptococcus thermophilus* ND05 的复配可以提高发酵乳的活菌数和风味^[58]。此外,通过优化发酵条件,如添加低聚糖和中草药浸提液,可以改善发酵乳的质构和感官特性^[59-60],添加特定的益生菌如姬松茸多糖也可以提高发酵乳的黏度和活菌总数^[61]。

4 植物基乳的未来发展

4.1 植物基乳的健康应用

植物基乳在健康活性方面具有显著优势,但是在未来的健康应用方面仍然面临一些挑战。在蛋白质含量上,除了豆类饮料外其余都较低^[62],另外只有大豆蛋白的氨基酸种类与牛乳类似,这也导致我国在售的植物基酸奶品牌,基本上是以大豆为原料^[1]。因此,需要更多在蛋白质水平与牛乳相当的植物性产品。随着对高蛋白植物性牛奶替代品需求的增长,可以通过开发合适的脉冲浓缩蛋白和分离蛋白来满足^[62]。JESKE 等^[63]曾以小扁豆分离蛋白为蛋白源来生产巴氏杀菌牛奶替代品,最终测得该产品的蛋白质含量为 3.3%,与牛乳相当。在现代食品工业中,药食同源的概念得到进一步发展^[64-67],尤其是在乳制品行业,通过添加天然草本植物来提高酸奶的营养价值和保健功效越来越受欢迎,GIBSON 等^[18]和 SHORI 等^[68]发现在酸奶中添加党参可能会对人體健康产生功能性影响,如抗血管紧张素-I 转化酶(Angiotensin-I converting enzyme, ACE)活性,这在乳品行业具有显著的应用前景。未来的研究和科技进步将有助于解决现有的挑战,进一步提升植物基乳的营养价值和市场竞争力^[69]。

4.2 植物基乳的环境友好应用

植物基乳的消费量近年来持续上升,这不仅因为其拥有多种优良特性,还因为它在减少温室气体排放,降低环境污染以及缓解畜牧业压力方面具有显著优势,符合当前绿色健康食品发展的潮流^[70-71]。与传统酸奶相比,植物基乳在可持续性和环境保护方面更具优势^[1,71]。随着社会对于动物福利和环境保护意识的增强,植物基乳的加工技术也在持续发展以满足消费者对清洁标签和环境友好产品的需求,目前,高压脉冲电场等非热杀菌技术、酶解技术、发酵技术等被广泛研究和应用,在保持食品的天然风味和品质的同时减少能源消耗和环境污染^[1,3,72-73]。此外,新型绿色溶剂和乳化剂如植物油和生物柴油的采用,可以进一步提高产品的环保性能^[74-75]。

5 结束语

植物基乳,作为动物乳的理想替代品,其种类丰富多样,包含豆类基乳、谷物基乳、坚果基乳等,这种多样化的原料直接导致产品的质构、风味、品质特性和功能的差异。植物基乳富含多种维生素和矿物质以及多种生物活性小分子,在健康活性方面具有较突出优势,为降血脂、预防心血管疾病等提高良好的健康保障作用。然而,植物基乳在营养成分和质构风味方面还无法完全与动物乳媲美,目前,各种新兴工艺技术如超高压均质、脉冲电场等被研究运用到植物基乳的生产加工中,以期生产出质构优良、风味美好、营养健康、环保可持续的产品。未来,消费者的需求和科技的创新将会进一步推动植物乳行业的发展,植物乳将逐步替代动物乳并稳步增长。

参考文献

- [1] 刘瑾莹, 张雅媛, 李春梅, 等. 植物基酸奶制备及品质改良方法的研究现状[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(8): 115-124.
LIU JX, ZHANG YY, LI CM, et al. Research status of plant-based yogurt preparation and quality improvement methods [J]. Storage and Process, 2024, 24(8): 115-124.
- [2] 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.
CHEN YS, LIU R, CHEN HJ, 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.
- [3] ROMULO A. Food processing technologies aspects on plant-based milk manufacturing: Review [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1059(1). DOI: 10.1088/1755-1315/1059/1/012064
- [4] 郭顺堂, 徐婧婷. 植物基乳产业的发展趋势与技术创新[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(2): 1-9.
GUO ST, XU JT. Trends and technological innovations in plant-based milk industry [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2):

- 1-9.
- [5] 岳杨,汪超,陈亚淑,等.植物乳的香气、异味及其影响因素研究进展[J].食品科学,2023,44(21):330-340.
YUE Y, WANG C, CHEN YS, *et al.* Research progress on aroma, peculiar smell and influencing factors of plant milk [J]. Food Science, 2023, 44(21): 330-340.
- [6] 王占东,张居典,邵景海,等.植物基酸奶作为市场乳制品替代的可行性研究[J].食品安全导刊,2021(12):166-167,169.
WANG ZD, ZHANG JD, SHAO JH, *et al.* Feasibility study of plant-based yogurt as a substitute for dairy products in the market [J]. China Food Safety Magazine, 2021(12): 166-167, 169.
- [7] 尹新雅,王爽,朱玲,等.植物酸奶品质优化的研究进展[J].食品工业科技,2024,45(3):397-405.
YIN XY, WANG S, ZHU L, *et al.* Advances in quality optimization of plant-based yogurt [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 397-405.
- [8] AYDAR EF, 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. DOI: 10.1016/j.jff.2020.103975
- [9] MÄKINEN OE, WANHALINNA V, ZANNINI E, *et al.* Foods for special dietary needs: Non-dairy plant-based milk substitutes and fermented dairy-type products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(3): 339-349.
- [10] 熊腾飞.降胆固醇乳酸菌的筛选及其发酵豆奶产品的研制[D].南昌:南昌大学,2023.
XIONG TF. Screening of Lactic acid bacteria for lowering cholesterol and preparation of fermented soy milk product [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [11] ZHENG ZQ, HAN JG. Health benefits of dietary tree peony seed oil in a high fat diet hamster model [J]. Functional Foods in Health and Disease, 2017, 7(72): 135-148.
- [12] WANG XL, KONG XZ, ZHANG CM, *et al.* Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of plant-based yoghurt and dairy yoghurt [J]. Food Research International, 2023, 164: 112375.
- [13] 胡秀芳.茶多酚抗氧化机制研究现状[J].茶叶科学,1999(2):93.
HU XF. Research status of antioxidant mechanism of tea polyphenols [J]. Journal of Tea Science, 1999(2): 93.
- [14] MARTIN VD, EMANUELE ZANNINI, ELKE KA. Production of pulse protein ingredients and their application in plant-based milk alternatives [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 364-374.
- [15] SILVA ARAD, SANTELLI RE, BRAZ BF, *et al.* A comparative study of dairy and non-dairy milk types: Development and characterization of customized plant-based milk options [J]. Foods, 2024, 13(14): 2169.
- [16] RASIKA DMD, VIDANARACHCHI JK, ROCHA RS, *et al.* Plant-based milk substitutes as emerging probiotic carriers [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 38: 8-20.
- [17] 麻梦寒,冯朵,李梦洁,等.植物基食品加工技术、营养成分及其对不同人群的影响研究进展[J].食品安全质量检测学报,2024,15(18):123-130.
MA MH, FENG D, LI MJ, *et al.* Research progress on plant-based food processing technology, nutritional composition and its impact on different populations [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(18): 123-130.
- [18] GIBSON RS, CARRIQUIRY A, GIBBS MM. Selecting desirable micronutrient fortificants for plant-based complementary foods for infants and young children in low-income countries [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(2): 221-224.
- [19] 黄祖贤,李松泽,李营威,等.大豆酸奶风味物质研究进展[J].食品安全质量检测学报,2023,14(11):103-110.
HUANG ZX, LI SZ, LI YW, *et al.* Research progress on flavor substances of soybean yogurt [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(11): 103-110.
- [20] 任建敏.膳食纤维、植物营养素与微营养素对肠道菌群及健康的影响[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(6):8-17.
REN JM. Effects of dietary fiber phytonutrients and micronutrients on intestinal flora and health [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(6): 8-17.
- [21] GOKSEN G, ALTAF QS, FAROOQ S, *et al.* A glimpse into plant-based fermented products alternative to animal based products: Formulation, processing, health benefits [J]. Food Research International, 2023, 173(P2): 113344.
- [22] 樊红秀,张艳荣,孔晓涵,等.谷物在乳业中应用及谷物乳品主食化的研究进展[J].乳业科学与技术,2019,42(4):34-39.
FAN HX, ZHANG YR, KONG XH, *et al.* Research progress on the application of cereals in dairy industry and the staple food of cereals [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2019, 42(4): 34-39.
- [23] 牟泓羽,李莱兰,吴波,等.核桃紫米酸奶的研制及其品质分析[J].中国酿造,2024,43(4):179-185.
MOU HY, LI CL, WU B, *et al.* Development and quality analysis of walnut purple rice yogurt [J]. China Brewing, 2024, 43(4): 179-185.
- [24] TACHIE C, NWACHUKWU ID, ARYEE ANA. Trends and innovations in the formulation of plant-based foods [J]. Food Production Processing and Nutrition, 2023, 5(1). DOI: 10.1186/s43014-023-00129-0
- [25] 吴俊霞,程建明,薛峰.枸杞大豆蛋白植物基酸奶理化性质研究[J].食品与发酵工业,2023,49(10):193-198.
WU JX, CHENG JM, XUE F. Physicochemical properties of plant-based yogurt prepared by wolfberry and soy protein [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 193-198.
- [26] KULCZYK E, DROZŁOWSKA-SOBIERAJ E, BARTKOWIAK A. Novel milk substitute based on pea, bean and sunflower seeds with natural bioactive stabilisers [J]. Plants (Basel), 2023, 12(12): 2303.
- [27] 徐婧婷,孙艺娇,郭顺堂.植物基食品的科学共识与未来发展思考[J].粮油食品科技,2024,32(4):45-53.
XU JT, SUN YJ, GUO ST. Scientific consensus and reflections on the future development of plant-based foods [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 45-53.
- [28] 周素梅,唐健,牛志涛,等.新型植物基代乳:营养特性、加工现状与未来挑战[J].食品科学技术学报,2023,41(3):9-18.
ZHOU SM, TANG J, NIU ZT, *et al.* New plant-based milk substitutes: Nutritional properties, current processing status and future challenges [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(3): 9-18.
- [29] 李鹏,李朝旭,孙炜,等.植物基酸奶市场及生产研究报告[J].科技资讯,2022,20(14):59-61.
LI P, LI ZX, SUN W, *et al.* Plant-based yoghurt market and production research report [J]. Science & Technology Information, 2022, 20(14):

- 59–61.
- [30] CHALUPA-KREBZDAK S, LONG CJ, BOHRER BM. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives [J]. *International Dairy Journal*, 2018, 87: 84–92.
- [31] SETHI S, TYAGI SK, ANURAG RK. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: A review [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(9): 3408–3423.
- [32] PAUL AA, KUMAR S, KUMAR V, *et al.* Milk analog: Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(18): 3005–3023.
- [33] BOCKER R, SILVA EK. Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects [J]. *Future Foods*, 2022(5): 100098.
- [34] WANG F, O-SUKMANOV V, ZENG J. Effect of ultrafine grinding on functional properties of soybean by-product [J]. *Ukrainian Food Journal*, 2019, 8(4): 687–698.
- [35] CADOGAN J, EASTELL R, JONES N, *et al.* Milk intake and bone mineral acquisition in adolescent girls: Randomised, controlled intervention trial [J]. *BMJ*, 1997, 315(7118): 1255–1260.
- [36] BRIDGES M. Moo-ove over, cow's milk: The rise of plant-based dairy alternatives [J]. *Practical Gastroenterology*, 2018, 42(1): 20–27.
- [37] MÄKINEN OE, UNIAKKE-LOWE T, O'MAHONY JA, *et al.* Physicochemical and acid gelation properties of commercial UHT-treated plant-based milk substitutes and lactose free bovine milk [J]. *Food Chemistry*, 2015, 168: 630–638.
- [38] JAEGER SR, MATOS ADD, ODURO AF, *et al.* Sensory characteristics of plant-based milk alternatives: Product characterisation by consumers and drivers of liking [J]. *Food Research International*, 2024, 180114093. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114093
- [39] GRASSO N, ALONSO-MIRAVALLS L, O'MAHONY JA. Composition, physicochemical and sensorial properties of commercial plant-based yogurts [J]. *Foods*, 2020, 9(3): 252.
- [40] 马杰, 周建中, 张涛, 等. 植物基杏仁酸奶的研制及不同发酵剂对酸奶品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(21): 57–67.
- MA J, ZHOU JZ, ZHANG T, *et al.* Development of plant-based almond yogurt and influence of different starter cultures on yogurt quality [J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(21): 57–67.
- [41] 满妍妍, 张丽君, 徐怀德, 等. 核桃油微乳流变学特性[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(6): 69–75.
- MAN YY, ZHANG LJ, XU HD, *et al.* Rheological properties of walnut oil microemulsion [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(6): 69–75.
- [42] 何巧艳, 李海波, 罗小虎, 等. 不同蛋白质浓度对燕麦发酵乳品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(14): 180–186.
- HE QY, LI HB, LUO XH, *et al.* Effects of different protein concentrations on qualities of oat fermented milk [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(14): 180–186.
- [43] 葛侠. 大豆分离蛋白的糖基化改性及其凝胶性质的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- GE X. Glycosylation modification of soybean protein isolate and its gel properties [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [44] AHMADULLAH ZAHIR. 添加芸豆乳清的酸奶开发及其凝胶化和营养特性评价 [D]. 江苏: 南京农业大学, 2020.
- AHMADULLAH ZAHIR. Development of yogurt with kidney soybean whey and evaluation of its gelatinization and nutritional characteristics [D]. Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [45] LI NN, YANG M, GUO YH, *et al.* Physicochemical properties of different pea proteins in relation to their gelation ability to form lactic acid bacteria induced yogurt gel [J]. *LWT*, 2022, 161. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113381
- [46] 王宇慧, 张金凤, 李昊坤, 等. pH 对箭筈豌豆白蛋白和球蛋白物化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(17): 76–83.
- WANG YH, ZHANG JF, LI HK, *et al.* Effects of pH on the physicochemical properties of common vetch (*Vicia sativa* L) albumin protein and globulin protein [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(17): 76–83.
- [47] ZHANG XY, WANG Q, LIU Z, *et al.* Plant protein-based emulsifiers: Mechanisms, techniques for emulsification enhancement and applications [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 144. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109008
- [48] 彭秀清. 大豆多糖共价交联调控大豆蛋白乳化性质及相关分子机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- PENG XQ. Covalent cross-linking of soybean polysaccharides regulates emulsifying properties of soybean protein and related molecular mechanisms [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [49] 李健. 超声波改性燕麦球蛋白的研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- LI J. Study on ultrasound modified oat globulin [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [50] 孙婉. 大豆蛋白的酶法改性及其在猪肉肠中的应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- SUN W. Enzymatic modification of soybean protein and its application in pork sausage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [51] 孟小波, 华欲飞, 孔祥珍. 加热改性醇法大豆浓缩蛋白凝胶性的研究[J]. *中国油脂*, 2008, 33(10): 25–28.
- MENG XB, HUA YF, KONG XZ. Study on gelatinity of soybean protein concentrate by heating-modified alcohol method [J]. *China Oils and Fats*, 2008, 33(10): 25–28.
- [52] 姚璇, 吕晓慧, 金永国, 等. 动、植物蛋白的酰化改性及其应用研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(16): 337–346.
- YAO X, LI XH, JIN YG, *et al.* Research progress on acylation modification of animal and plant proteins and their applications [J]. *Food Science*, 2024, 45(16): 337–346.
- [53] 马晓艳, 万霞, 陈亚淑, 等. 植物基发酵乳的研究和应用进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(20): 320–335.
- MA XY, WAN X, CHEN YS, *et al.* Research and application progress of plant-based fermented milk [J]. *Food Science*, 2024, 45(20): 320–335.
- [54] 刘兴舟, 孙丽萍, 高德荣. 乳酸菌发酵植物蛋白质饮料的研究[J]. *软饮料工业*, 1995(1): 29–31.
- LIU XZ, SUN LP, GAO DR. Study on fermentation of plant protein beverage by lactic acid bacteria [J]. *Beverage Industry*, 1995(1): 29–31.
- [55] 易舒婷. 乳酸菌发酵豆乳关键技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- YI ST. Research on key technologies of lactic acid bacteria fermentation of soybean milk [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [56] ZANG JW, PAN XY, ZHANG YY, *et al.* Mechanistic insights into gel formation of egg-based yoghurt: The dynamic changes in physicochemical properties, microstructure, and intermolecular interactions during

- fermentation [J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113097.
- [57] 周丹丹, 朱永乐, 张任婧, 等. 基于植物乳植杆菌 BXM2 的发酵型功能饮料的开发及品质特性研究[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(7): 88–92.
- ZHOU DD, ZHU YL, ZHANG RJ, *et al.* Development and quality characteristics of fermented functional beverages based on *Lactobacillus plantarum* BXM2 [J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(7): 88–92.
- [58] 何秋雯, 王水泉, 鲍雅静, 等. 益生菌 *Lactobacillus plantarum* P8 与 *Streptococcus thermophilus* 混合发酵对发酵乳品质的影响[J]. *中国乳品工业*, 2012, 40(10): 8–13.
- HE QW, WANG SQ, BAO YJ, *et al.* Effect of mixed fermentation of probiotic *Lactobacillus plantarum* P8 and *Streptococcus thermophilus* on the quality of fermented milk [J]. *China Dairy Industry*, 2012, 40(10): 8–13.
- [59] 胡优. 植物乳植杆菌 grx03 的发酵特性及其发酵乳制备研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- HU Y. Fermentation characteristics of *Lactobacillus plantarum* grx03 and its preparation of fermented milk [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [60] 虞姣姣, 马亚芳, 温德兰, 等. 不同质量浓度低聚果糖和低聚半乳糖对发酵乳品质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 66–70.
- YU JJ, MA YF, WEN DL, *et al.* Effects of different concentrations of fructooligosaccharides and galacto-oligosaccharides on the quality of fermented milk [J]. *Food Science*, 2015, 36(7): 66–70.
- [61] 柴振宇, 苑丽园, 周晓梅, 等. 益生元、益生菌微生态制剂对发酵乳发酵特性的影响 [J]. *中国乳品工业*, 2020, 48(12): 28–31.
- CHAI ZY, YUAN LF, ZHOU XM, *et al.* Effect of prebiotics and probiotic microecological preparations on fermentation characteristics of fermented milk [J]. *China Dairy Industry*, 2020, 48(12): 28–31.
- [62] VOGELSANG-O'DWYER M, ZANNINI E, ARENDT EK. Production of pulse protein ingredients and their application in plant-based milk alternatives [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 364–374.
- [63] JESKE S, BEZ J, ARENDT EKZE, *et al.* Formation, stability, and sensory characteristics of a lentil-based milk substitute as affected by homogenisation and pasteurisation [J]. *European Food Research and Technology*, 2019, 245: 1519–1531.
- [64] AMADARSHANIE DBT, GUNATHILAKA TL, RAJITHA MS, *et al.* Functional and antiglycation properties of cow milk set yogurt enriched with *Nyctanthes arbor-tristis* L. flower extract [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112910
- [65] NAYAK BS, MARSHALL JR, ISITOR G, *et al.* Hypoglycemic and hepatoprotective activity of fermented fruit juice of morindacitrifolia (noni) in diabetic rats [J]. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2011, 2011: 875293.
- [66] MIN G, MAO BY, FAIZAN AS, *et al.* Effects of noni fruit and fermented noni juice against acute alcohol induced liver injury in mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2020(70): 103995.
- [67] LIU W, LÜ X, HUANG WH. Characterization and hypoglycemic effect of a neutral polysaccharide extracted from the residue of *Codonopsis pilosula* [J]. *CarbohydrPolym*, 2018, 197: 215–226.
- [68] SHORI AB, TIN YP, BABA AS. Codonopsis pilosula and fish collagen yogurt: Proteolytic, potential angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory activity and sensory properties [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 165. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113729
- [69] WANG X, WANG L, WEI X, *et al.* Invited review: Advances in yogurt development: Microbiological safety, quality, functionality, sensory evaluation, and consumer perceptions across different dairy and plant-based alternative sources [J]. *Journal of Dairy Science*, 2024. DOI: 10.3168/jds.2024-25322
- [70] CRAIG WJ, MESSINA V, ROWLAND I, *et al.* Plant-based dairy alternatives contribute to a healthy and sustainable diet [J]. *Nutrients*, 2023, 15(15): 3393.
- [71] STONEHOUSE DP, CLARK EA, OGINI YA. Organic and conventional dairy farm comparisons in Ontario, Canada [J]. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2001, 19(2): 115–125.
- [72] 黄云, 刘坤, 潘文杰, 等. 复合酶解对巴旦木乳理化稳定性及感官品质的影响[J/OL]. *中国油脂*, 1-19. [2024-12-17]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240186>
- HUANG Y, LIU K, PAN WJ, *et al.* Effect of compound enzymatic hydrolysis on physicochemical stability and sensory quality of almond milk [J/OL]. *China Oils and Fats*, 1-19. [2024-12-17]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240186>
- [73] 李晶晶. 荞麦酶解液植物乳杆菌发酵乳生产工艺及抗氧化活性分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2015.
- LI JJ. Production process and antioxidant activity analysis of fermented milk from *Lactobacillus plantarum* enzymatic hydrolysate from buckwheat [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.
- [74] 韩海康. 1%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐植物油替代芳烃类溶剂绿色乳油[Z]. 2011-06-10.
- HAN HK. 1% emamectin benzoate vegetable oil replaces aromatic solvent green emulsifiable concentrate [Z]. 2011-06-10.
- [75] 张源. 环境友好型高效氯氟菊酯水乳剂的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- ZHANG Y. Development of environment-friendly high-efficiency cyhalothrin aqueous emulsion [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)