植物蛋白在植物基奶酪中的应用研究进展

田怀香，程　娟，陈　臣，于海燕，袁海彬，娄新曼※

（上海应用技术大学香料香精技术与工程学院，上海 201418）

摘　要：随着消费者对“健康”与“美味”食品的追求，植物基奶酪产品的开发已成为奶酪市场发展的重要趋势。植物蛋白作为其核心成分，对奶酪风味、口感以及营养价值具有重要作用。然而，将植物蛋白应用于该类食品中仍面临众多挑战，如难以达到与传统奶酪相当的风味品质，并且在可融化、可拉伸等方面的质地属性也表现不佳。因此，如何采用科学有效的方法提升植物基奶酪的品质特性是推动植物基奶酪市场发展的关键。基于此，该文首先介绍了植物基奶酪的主要成分及工艺，其次综述了不同植物蛋白的功能特性及其对植物基奶酪品质的影响。同时，探讨了蛋白修饰与生物发酵在改善植物蛋白结构及功能特性方面的应用，旨在提升植物蛋白在植物基奶酪中应用价值，推动高品质植物基奶酪的开发以及植物基产品市场的发展。

关键词：植物基奶酪；植物蛋白；风味；质构；品质提升

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202402092

中图分类号：TS214.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-6819(2024)-17-0017-13

田怀香，程娟，陈臣，等. 植物蛋白在植物基奶酪中的应用研究进展[J]. **农业工程学报**，2024，40(17)：17-29. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402092　http://www.tcsae.org

TIAN Huaixiang, CHENG Juan, CHEN Chen, et al. Research advances in the application of plant proteins to plant-based cheese[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(17): 17-29. (in Chinese with English abstract)　doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402092　http://www.tcsae.org

0　引　言

在健康中国的大背景下，消费者越来越关注绿色、健康的饮食方式。植物蛋白作为一种优质的食品原料，广泛存在于豆类、坚果、谷物等植物性原料中，可制成高蛋白、低碳水和低致敏性的食品，如植物肉、植物性（乳）饮料等。研究表明，适当增加植物蛋白的摄入可以减少动物脂肪和胆固醇的摄入，维持人体胆固醇正常水平[1]。就环境而言，植物蛋白替代动物蛋白可减少人类对动物资源的依赖，降低温室气体排放，减缓环境压力[2]。此外，植物蛋白具有一定的功能特性，如乳化性、凝胶性，这些性质使得植物蛋白可作为补充剂、乳化剂以及各种功能化合物载体应用于食品中[3]。目前，以植物蛋白制备的植物肉、植物性（乳）饮料、植物基奶酪等产品已经得到广泛关注。

植物基奶酪作为一种新兴的植物基产品，近年来，已得到国内外乳品公司的大量关注和研究，并将在未来迎来更大的发展空间和增长机会。然而，与酪蛋白（主要以球状为主）相比，植物蛋白不仅具有球状、纤维状的结构，还会呈现出颗粒状、片状等结构，其蛋白的复杂性为产品的研发和生产带来了挑战[4]。其次，大多数植物蛋白在油/水界面的吸附和结构化能力相对较弱，乳化性、胶凝等功能特性也不如酪蛋白[5]，这些结构与功能上的差异致使植物基奶酪在拉伸、融化性等方面的特性不如传统动物奶酪。此外，植物蛋白在加工过程中可能会暴露一些异味基团，导致产品出现苦味、涩味和腥味等不良风味，影响产品的口感以及接受度。

基于此，本文探讨了植物基奶酪与传统奶酪在成分和加工方式上的差异性；同时，分析了不同植物蛋白来源的结构和功能特点，从营养、质地以及风味方面阐明植物蛋白在植物基奶酪中应用的作用与挑战；并进一步综述了提升植物蛋白在植物基奶酪中的应用技术手段，包括以蛋白修饰或发酵技术改变植物蛋白的空间结构、界面性质及键合作用方式等，提高植物蛋白在奶酪应用方面的功能特性，以期为植物基奶酪市场的创新发展提供重要的理论参考。

1　植物基奶酪的组成成分及加工工艺

1.1　组成成分

奶酪的成分极大地影响其微观结构，也在宏观上对奶酪的品质发挥着重要作用。如图 1a 所示，切达干酪中蛋白质网络紧凑，脂肪填充在其中；而高水分的马苏里拉奶酪中蛋白质和脂肪平行排列；奶油奶酪在离散的蛋白质填充区之间存在一定空间，包含一个非连续的网络[6]。而在植物基奶酪加工过程中，多糖、脂肪、水分以及植物蛋白等物质通过自身结构以及彼此之间的相互作用构建奶酪结构（图 1b），如在大豆奶酪中，椰子油中的脂肪酸可以和淀粉形成络物，随后分散在大豆分离蛋白中，

收稿日期：2024-02-26　　修订日期：2024-05-21

基金项目：上海市科委省部级科研项目（22XD1432700）；上海市科委“上海工程技术研究中心”项目（20DZ2255600）

作者简介：田怀香，博士，教授，博士生导师，研究方向为食品风味化学。Email：tianhx@sit.edu.cn

※通信作者：娄新曼，博士，副教授，研究方向为食品风味化学。Email：louxm1018@sit.edu.cn

形成具有与乳制品类加工干酪相似的特性[7]。

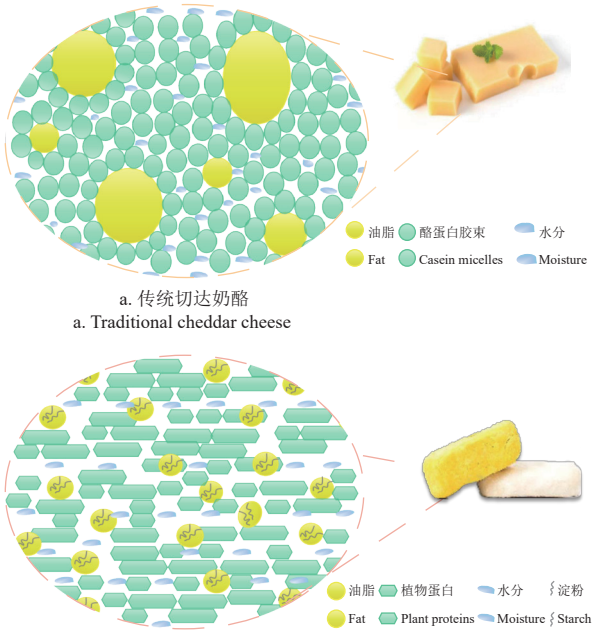


图 1 奶酪微结构[6-7]

Fig.1 Cheese microstructure[6-7]

1.1.1 植物蛋白

植物蛋白组成多样，不仅包含球蛋白，还包括清蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白等多种类型。作为植物基奶酪中的重要成分，其蛋白网络结构极大地影响奶酪融化、拉丝等质地变化[8]。目前国内外植物基奶酪中的蛋白来源多样，如玉米醇溶蛋白、大豆蛋白、鹰嘴豆蛋白等。NADIA 等[9] 探究了使用玉米醇溶蛋白和鹰嘴豆蛋白混合物来制作植物基奶酪替代品的可行性。基于这些蛋白源，国内外多家公司已成功开发出多种植物基奶酪产品（图 2），如 ChickP Protein 公司利用鹰嘴豆分离物制做的奶酪替代品，以及 Daiya 公司以马铃薯分离蛋白为基础开发的切达芝士条等。这些蛋白在植物基奶酪中发挥着多重作用。首先，植物蛋白具有一定表面活性，能够发挥乳化作用，可以通过降低油相和水相之间的界面焓，增加食品体系中乳液的稳定性[10]。其次，植物蛋白具有形成三维网状结构的能力，该结构能够提供一定的机械强度[11]，有助于植物基奶酪在加工和运输过程中的稳定性。丁玲[12] 研究发现，花生蛋白和多糖形成的稳定 Pickering 乳液凝胶，在超声作用下，该复合物的表面疏水性及相互作用力增强，形成紧密的结构，可用于低脂奶油的开发。以上特点使植物蛋白在植物基奶酪的应用中具有一定潜力。

图 2 植物基奶酪市场产品研究现状

Fig.2 Current research status of plant-based cheese market

然而，植物蛋白相较传统奶酪中的酪蛋白有更大的分子尺寸，且不具有酪蛋白灵活的无规则螺旋或者胶束结构[13]，致使植物蛋白很难像酪蛋白一样形成致密的凝胶网络结构，利用植物蛋白模仿传统奶酪所具有的高温融化特性、拉伸性和流动性等存在一定挑战[14]。此外，植物蛋白在加工分离过程常会被破坏成单个球状蛋白，这些球状蛋白会发生不同程度的聚集，降低蛋白质溶解度[15]，从而影响植物蛋白其他功能性质的发挥。因此，在植物基奶酪开发过程中，还需要考虑采用各种技术手段来改变或组装植物蛋白结构，如热处理[16]、超声[17]、生物发酵[18] 等，有助于改变植物蛋白的分子结构和聚集状态，提高其溶解度和稳定性。MEHRSA 等[19] 表明，乳酸发酵可以影响豌豆蛋白中氨基酸的组成及含量，并能提高豌豆蛋白的热稳定性。通过这些技术调整，能够显著增强植物蛋白在植物基奶酪中的应用性能，确保最终产品具备优异的品质和口感。

1.1.2 其余植物性成分

除了植物蛋白外，多糖常被视为非活性填料添加到植物基奶酪中，用于增强其与水结合的能力，以改善奶酪熔融性，形成质地更柔软的奶酪[20-21]。研究表明，大豆分离蛋白可以通过静电作用、疏水作用等与多糖发生相互作用，促进凝胶网络的形成以及维持三维结构[22]。此外，一些淀粉类物质作为食品中的稳定剂在改善植物基奶酪的质地方面也值得探讨，因为淀粉与蛋白之间复

杂的相互作用可以改变蛋白凝胶的质地、流变学特性和微观结构[23]。有研究表明，乙酰化后的玉米淀粉可以呈圆形膨胀颗粒分散在大豆分离蛋白中，从而形成致密的凝胶[24]，这种性质对于理解植物蛋白在模拟硬质奶酪等食品中的潜在应用具有启示意义。MOUNSEY 等[25] 发现，改性后的大米淀粉可代替酪蛋白，以控制蛋白质基质的弹性并改善模拟奶酪的质构。然而，淀粉的加入会在一定程度上影响产品的持水性以及脂肪的流动性，牺牲模拟奶酪部分的融化特性。因此，如何解决植物基奶酪在口感和质地方面的问题，仍然是研发该产品时需要重点关注的问题之一。

为使植物基奶酪在质地及口感上更接近传统奶酪，生产过程中通常会添加椰子油、棕榈油等植物油脂。油脂的加入不仅可以丰富奶酪的口感和质地，还可以利用其乳化作用将水和其他成分结合在一起，从而构建一个更稳定的体系。MASIÁ等[26] 发现，在豌豆蛋白乳液基质中，油滴会影响蛋白质之间的相互作用，具体来说，随着油脂含量的增加，所形成的凝胶强度相应减弱，但凝胶持水性会提高，这对于涂抹型软质奶酪类似物的生产具有一定参考。然而，值得注意的是，植物油脂在加工过程存在氧化风险，这些化合物不仅会对奶酪风味产生不良影响，还可能对人体健康产生潜在危害。因此，在实际生产过程中，需要采取有效的措施来降低油脂的氧化，例如控制油脂添加量、加工温度、添加抗氧化剂等。此外，生产者可以考虑添加调味剂和增稠剂等成分来平衡和改善植物基奶酪的风味和质地，从而弥补由植物性原料可能带来的风味或质地上的不足。

1.2　加工工艺

传统奶酪以动物奶为原料，利用乳酸菌和凝乳酶制作而成，而植物基奶酪主要使用非动物性的脂肪、蛋白质和淀粉等原料。由于成分上的差异，传统奶酪的生产方式难以直接用于植物基奶酪生产。例如，传统奶酪生产中使用的凝乳酶和乳酸菌可能无法在植物基质中发挥同等作用。因此，寻找新的生产方式或改进现有方法有助于提升植物基奶酪的品质。

目前，植物基奶酪生产的方式主要有两种，一种方法是将植物蛋白、淀粉、植物油脂等植物性原料成分进行组装，通过辅助使用超声、均质、酶解等技术来模拟传统奶酪的制作过程（图 3a），这些成分的适当平衡和兼容性可以赋予植物基奶酪在结构、质地及风味等方面的品质特征，目前已有相关专利以及研究涉及到该方法的使用。MEFLEH 等[27] 利用菊粉和橄榄油制备了一种乳液凝胶，并与豌豆浓缩蛋白相结合，开发了一种在延展性指数、硬度等方面与传统奶酪高度相似的涂抹型植物性奶酪。也有研究将一些非动物性来源的淀粉、脂肪、膳食纤维以及蛋白质进行组合，通过高剪切混合、加热、冷却等步骤，成功制备了硬质植物基奶酪[28]。MENGMENG 等[29] 通过将淀粉、蛋白质和油与水混合形成均匀的混合物，在加热条件下促使淀粉糊化和蛋白质变性，制备了可切片的植物基奶酪。该生产方法利用多种大分子物质进行混合与重组，具有生产效率高、风味口感易调节等优点，为开发符合中国消费者习惯的植物基奶酪产品提供了有利的支持。

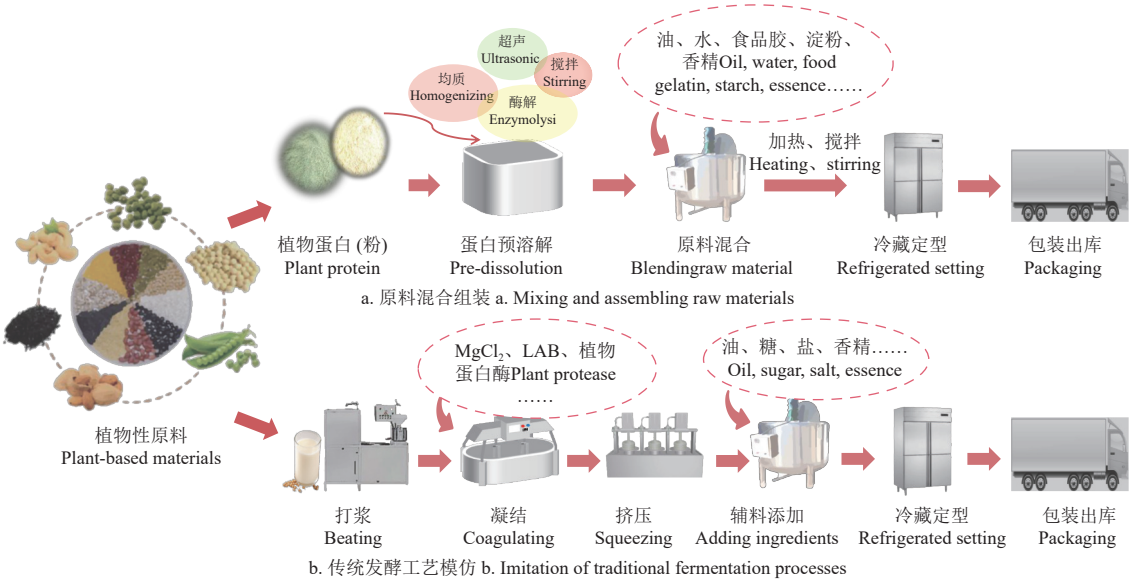


图 3　植物基奶酪生产工艺

Fig.3　Plant-based cheese production process

另一种方法是借鉴传统奶酪的生产方式，如图 3b 所示，植物性原料先进行组织破碎形成液态，在酶或（和）乳酸菌、酸性物质的作用下使植物蛋白在等电点沉淀，进一步可以辅以乳化剂、稳定剂等其他物质进行制备，这些成分通过共价或非共价作用赋予植物基奶酪在风味及质地方面的特征。该方法比较适合于软质奶酪的开发，MATIAS 等[30] 以大豆为主要原料，经过浸泡、打浆、过滤等步骤，再利用乳酸菌发酵，开发了一种类似于小瑞士奶酪品质的益生菌大豆奶酪。此外，为了模仿传统霉菌奶酪所具有的特殊纹理以及风味特征，真菌也被用于植

物基奶酪的生产。利用白地霉并添加一定量的乳酸菌发酵剂和氯化钙开发了软质霉菌奶酪，其中白地霉可以极大地促进大豆蛋白质和脂肪的降解，从而加速奶酪的成熟，在该过程中，白地霉还可以降解苦味肽，并产生一系列香气物质[31]。除了发酵外，一些商业植物蛋白酶，如菠萝蛋白酶、木瓜蛋白酶等也被作为凝固剂用于植物基奶酪的生产。LI 等[32] 采用不同凝固剂进行大豆奶酪酱生产时发现，大豆蛋白分子在经过一定酶处理后可以被降解为较小的肽片段，这有利于解决大豆奶酪中出现的颗粒状结构问题。然而，需要注意的是，蛋白经酶诱导后也可能产生一些苦味肽，导致制备的奶酪过酸或过苦，且结构较弱、不紧凑。因此，在使用酶进行生产时，也可以结合其他凝结植物蛋白的方法，以控制蛋白的水解程度，有效提高奶酪的质地和口感。同时，一些新型植物凝固剂也逐渐被应用，如辣木种子的提取物质在全脂、脱脂以及豆奶中表现出较好的凝乳活性[33]，这类新型凝固剂的出现为植物基奶酪的生产提供了新的机遇和发展方向。

2 不同植物蛋白来源

植物蛋白来源丰富，主要包括豆类、坚果、谷物、藻类等，目前在植物基奶酪中应用较多的主要以豆类和坚果类蛋白为主。不同来源的蛋白其功能特性有所差异，且它们在不同条件下的结构及功能特性表现复杂，例如，大豆分离蛋白在中性和碱性条件下表现出较好的乳化性能，而扁豆蛋白则在酸性条件下具有良好的乳化性[34]。因此，了解不同植物蛋白所具有的特性，对于筛选适合植物基奶酪生产的蛋白来源以及生产工艺尤为重要。

2.1 豆科类

相较其他植物蛋白来源，豆类通常含有较高的蛋白质含量，且其蛋白质易被人体消化。此外，豆类中还含有油脂、多糖、纤维和矿物质等成分，这些成分共同为乳酸菌提供良好的生活环境。经乳酸菌的发酵处理，有助于增加产品中不饱和脂肪酸的比例和氨基酸水平，同时增强蛋白的胶凝和乳化能力，进一步提升产品的营养价值[35-36]。例如从传统发酵豆制品中分离出的高产蛋白酶菌株可将豆浆中的植物蛋白降解成多肽和氨基酸，从而提高蛋白的消化吸收率[37]。然而，不同豆类中蛋白的功能特性存在差异，例如豌豆蛋白具有较好的表面疏水性，但在持水性方面表现较差，导致以豌豆分离蛋白制成的凝胶强度通常较弱[38]，但这有望应用于对硬度要求较低的奶酪生产。

大豆蛋白是当前植物基食品领域广泛应用的蛋白来源，除了蛋氨酸含量略低外，其余氨基酸组成与乳蛋白接近[39]。研究表明，发酵制得的大豆奶酪在最终的 pH 值、益生菌的活力和感官评分等方面也展现出了与传统奶酪相似的性能，但整体质地较软[30]。这一现象可能与大豆蛋白亲水性较好有关，导致其在加工过程中形成较为松散的蛋白网络结构。此外，当前越来越多其他豆类蛋白也被用于植物基奶酪的生产[40-41]，例如豌豆、绿豆[42]、鹰嘴豆和羽扇豆[43] 等。鹰嘴豆具有良好的乳化性、持水性等，非常适合用于乳制品配方。GRASSO 等[44] 研究表明，以鹰嘴豆蛋白制备出的植物基奶酪，可以显示出较高的黏附性、弹性和内聚性。InnovoPro 公司推出的鹰嘴豆蛋白 CPPro70 系列，被瑞士零售商 Migros 用于乳制品替代品的制作，为消费者提供了新的健康选择。2022 年 Kraft Heinz 基于人工智能技术以鹰嘴豆蛋白、水、椰子油和改性玉米淀粉，开发了一款植物基奶酪 NotCheese。MICHEL 等[45] 以豌豆蛋白作为乳化剂，结合摩擦学特性来模拟传统奶油奶酪中酪蛋白凝胶中的悬浮脂肪滴结构，并成功开发出一种口感、质地和风味接近传统奶油奶酪的植物基产品。Bunge 推出的一款 PurePro 蚕豆蛋白，当将其以每 100 g 奶酪添加 6.5 g 蚕豆蛋白到植物基奶酪当中时，与对照组相比，奶酪的融化性能从 3 mm 增加到了 9 mm。

与此同时，我们也必须面对大豆蛋白中可能存在的致敏性物质以及不良风味，如豆腥味。这些因素在一定程度上限制了大豆蛋白在相关产品中的应用。因此，开发无致敏性的大豆蛋白并探索有效去除豆腥味的方法，对于提升大豆蛋白在相关产品中的应用尤为重要。

2.2 坚果类

坚果是植物性油脂和蛋白质的重要来源，常被用于植物基奶酪的生产，例如腰果、杏仁、核桃等蛋白来源。与其他奶酪产品相比，以坚果为主要来源制备的植物基奶酪，其产品中蛋白含量较高，钠和饱和脂肪酸含量更低[46]。Dreamfarm 作为一家植物基奶酪初创公司，该公司推出的一款以杏仁为基础的植物基马苏里拉奶酪，其饱和脂肪酸的含量不到 1%，远低于传统马苏里拉奶酪。此外，将结晶氯化钙这一凝固剂添加于核桃粕蛋白可以产生硬度、黏附性较好的蛋白凝胶[47]，该蛋白还能与多糖类物质形成复合凝胶，且加入一定浓度的 NaCl 后形成的凝胶体系更致密且均匀[48]。这些性质为植物基奶酪质地和口感的改善提供了借鉴。同时，坚果特殊的香气更容易被中国消费者所接受，利用坚果进行部分替代豆类可以改善由原料带来的豆腥味问题，并赋予奶酪独特的坚果香气[49-50]。

2.3 薯类及谷物类

薯类和谷物类蛋白的加入有利于增加植物基奶酪的黏弹性并强化其结构，给奶酪提供一定的黏度，并赋予奶酪额外的紧实度和口感。薯类蛋白主要是马铃薯蛋白和木薯蛋白。研究表明，马铃薯蛋白可以表现出与乳清蛋白相当的乳化特性[51]，且其具有较高的胶凝、持水等功能特性。与豆科蛋白相比，马铃薯蛋白所形成的乳液稳定性稍差，但可与精氨酸、氢氧化钙形成更稳定凝胶体系[52]，这有助于提升植物基奶酪的质地及口感。对于谷物蛋白（例如大米蛋白、玉米蛋白等），其中，玉米醇溶蛋白因其在构建食品结构方面的潜力已被用于植物基奶酪的生产。玉米醇溶蛋白可以提供黏弹性和一个内聚结构[53]，且该蛋白的屈服应力大约发生在 7% 的应变率下，这与传统切达奶酪相似[54]。含 30% 玉米蛋白的奶酪样品已被证实在融化和拉伸性等方面表现出了与传统

奶酪的相似性[14]，这种性质的发生主要基于玉米醇溶蛋白在水环境中主要通过非共价相互作用形成网络，在一定的高温条件下与酪蛋白行为的相似性，即其中的非共价键被削弱而非丢失[9]。但单独使用玉米醇溶蛋白可能促使植物基奶酪形成过于坚韧的质地，精氨酸、氢氧化钙等碱性成分的加入可以用于降低玉米醇溶蛋白的表面疏水性，增加表面活性从而使其黏弹性更好[55]。

2.4　其他蛋白来源

随着技术的不断发展，各种不同来源的植物蛋白，如芝麻、海藻、亚麻籽等新型植物蛋白在植物基奶酪以及其他植物基食品生产中也有巨大潜力。亚麻籽蛋白具有高含量的疏水性氨基酸，可调节的结构特性以及较好的界面行为，使得亚麻籽蛋白有潜力制备具有高界面活性的乳化剂[56]。芝麻蛋白属于高质量的蛋白质，具有丰富的氨基酸组成、多种生物活性物质以及内源性蛋白酶[57]。这些蛋白所表现出来的特点（表 1），在植物基奶酪实际生产过程中具有重要意义。

表 1　不同植物蛋白来源的功能特性

Table 1　Functional characteristics of different plant protein sources

名称 Name	组分 Component	特点 Characteristics	不足 Weaknesses
大豆蛋白[31, 34] Soy protein[31, 34]	球蛋白（90%） 清蛋白（5%） 少量谷蛋白和醇溶蛋白	成本低、原料丰富、营养价值高，除了蛋氨酸含量偏低，其余氨基酸组成与牛乳接近；赖氨酸含量较高；蛋白质消化率与酪蛋白相当；形成复杂的凝胶网络结构	热稳定性差，不耐高温、豆腥味较重
豌豆蛋白[13, 27] Pea protein[13, 27]	球蛋白（55%） 白蛋白（20%）	氨基酸配比均衡，赖氨酸含量较高；无转基因；较好的表面疏水性	持水性较差，形成的凝胶较弱，制备的奶酪硬度较低
绿豆蛋白[58-59] Mung bean protein[58-59]	球蛋白（60%） 谷蛋白（10%） 微量醇溶蛋白	相比大豆分离蛋白含有更高含量的赖氨酸，低浓度下可形成较好的凝胶；风味温和，无豆腥味；相较其他植物蛋白热稳定性（70～78 ℃）更低	第一限制性氨基酸为含硫氨酸；富含 7S 豌豆球蛋白（vicilin），不含有二硫键
鹰嘴豆蛋白[43] Chickpea protein[43]	球蛋白（66%） 谷蛋白（22%） 其余为清蛋白	理想的氨基酸水平，赖氨酸尤其丰富，消化率可达约 90%，清蛋白由于其含硫氨基酸水平相对较高而具有较好的营养价值，高于其余杂豆和谷薯类蛋白；基本无豆腥味	限制性氨基酸为含硫氨酸和半胱氨酸；价格较高
羽扇豆蛋白[44] Lupin protein[44]	α-羽扇豆球蛋白和 β-羽扇豆球蛋白为主 其余为 δ-羽扇豆球蛋白和 γ-羽扇豆球蛋白	蛋白含量（40% 左右）仅次于大豆，淀粉含量较低，膳食纤维含量较高；持水、持油性较好，碱性条件下可作为良好乳化剂	其豆类本身略带苦味,存在致敏性
扁豆蛋白[34] Lentil protein[34]	球蛋白（70%） 白蛋白（16%） 谷蛋白（11%） 醇溶蛋白（3%）	具有较高的抗氧化活性和优异的乳化活性	蛋氨酸含量低（0.9%），消化率不高；有关扁豆蛋白的提取以及功能性质研究较少
马铃薯蛋白[51-52] Potato protein[51-52]	存在 3 种主要组分：Patatin（30%~40%,一种糖蛋白）、蛋白酶抑制剂（50%）以及其他多肽和蛋白质	氨基酸组成广泛，必需氨基酸占比（47%）高于大豆蛋白（38%）；属于完全蛋白，易于消化吸收；良好的凝胶性、起泡性和乳化性	马铃薯蛋白作为马铃薯淀粉工业的副产物，其在回收过程中高强度热处理导致其溶解度下降而破坏其功能性质；低浓度 NaCl（< 0.2 mol·L^{-1}）能提高其乳化活性
玉米蛋白[54-55] Corn protein[54-55]	醇溶蛋白（68%） 谷蛋白（22%） 球蛋白（1.2%） 少量白蛋白	能够提供独特的黏弹性结构，一定的拉伸性和流动性	限制性氨基酸为赖氨酸和色氨酸；水溶性差、口感粗糙、利用率低、营养价值低
燕麦蛋白[60] Oat protein[60]	球蛋白（55%） 醇溶蛋白（24%） 谷蛋白（10%） 清蛋白（2%）	该蛋白的消化率、生物利用度以及蛋白质净利用率较高，其蛋白效率比（2.3%）与酪蛋白效率比（2.5%) 相似；赖氨酸和苏氨酸含量较高；由燕麦蛋白形成的凝胶是类似聚合物凝胶的网络结构，其强度、弹性和持水性较好	蛋氨酸和半胱氨酸含量相对较低
核桃蛋白[47] Walnut protein[47]	谷蛋白（70%） 球蛋白（18%） 清蛋白（7%） 醇溶蛋白（5%）	精氨酸和谷氨酸含量较高；碱性条件溶解度较大	赖氨酸为第一限制性氨基酸；溶解度较差
杏仁蛋白 Almond protein	清蛋白（47%） 谷蛋白（40%） 球蛋白（10%） 醇溶蛋白（1%）	营养丰富、氨基酸种类齐全（谷氨酸含量较高）、风味独特、易于消化吸收；特定条件下，乳化性以及持油性优于大豆蛋白。	起泡性和稳定性较低；成本较高
腰果蛋白[61] Cashew protein[61]	球蛋白（>50%） 少量醇溶蛋白	所含蛋白一般是谷物的 2 倍多，较低的钠及饱和脂肪酸水平；碱性环境下表现出较好的乳化稳定性；80 ℃ 时其持油性较好	赖氨酸含量偏低，当前研究集中在腰果油脂提取与研究，对其蛋白功能性质研究少；成本较高；产量有限

3　植物蛋白对植物基奶酪品质特性的影响

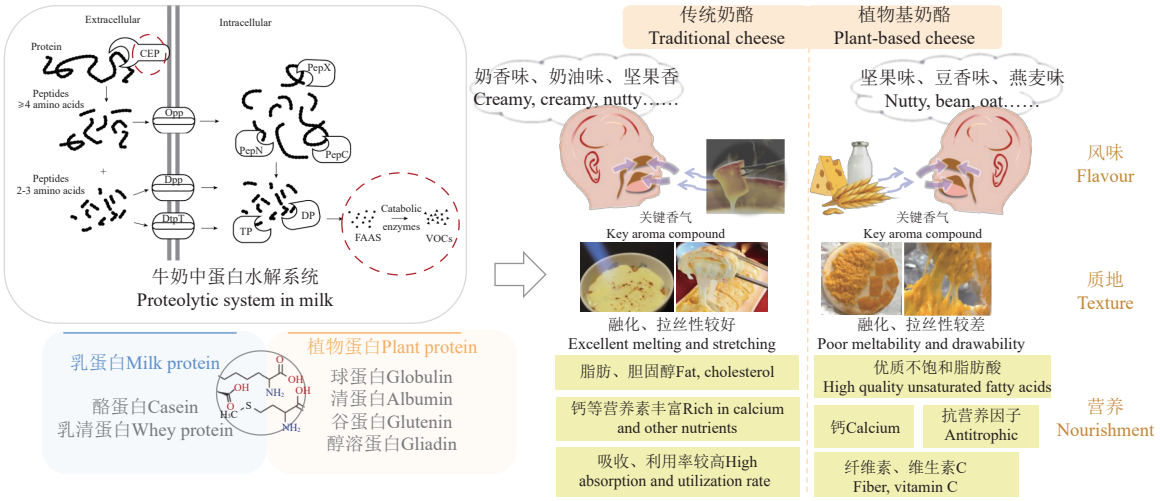
蛋白质对奶酪的品质具有重要作用。在传统奶酪中，乳蛋白是形成奶酪浓郁奶香和独特质地的关键。然而，由于植物基奶酪与传统奶酪在蛋白质的结构与组成、加工工艺等方面存在一定差异，这致使两者不仅在营养价值上有所区别，同时赋予了传统奶酪和植物基奶酪各自独特的品质特征与体验（图 4），使得消费者能够根据自己的喜好和需求做出选择。

3.1　风味特征

风味是评价消费者对植物基奶酪喜爱度的主要指标之一[62]。传统奶酪中，牛乳中酪蛋白具有高丰度脯氨酸残基，可形成开放且无序的二级结构，因此，更易被乳酸菌表面的一种细胞包膜蛋白酶（cellular envelope protease, CEP）水解，产生肽和氨基酸以及多种挥发性风味物质[63]。

植物蛋白与酪蛋白结构存在显著差异，部分植物蛋白中往往缺乏某些特定氨基酸，并且植物蛋白不具有酪蛋白的柔性胶束结构，这种差异导致大多数植物蛋白难以被发酵传统奶酪的微生物充分利用[4]，因此，筛选特定的、能够高效利用植物基质的奶酪发酵微生物显得尤为重要。

植物蛋白作为植物基奶酪重要成分之一，是风味物质的有效载体[64]，从而影响植物基奶酪中风味物质的释放或保留。此外，植物蛋白在发酵过程中还会参与一些支链氨基酸的合成，这些氨基酸是奶酪独特风味形成的关键。例如，大豆蛋白经过适当发酵后，能够合成 3-甲基丁酸这一重要的风味化合物。在其他风味成分的作用下，这种植物基奶酪显示出了与帕尔马干酪和爱蒙塔尔奶酪相似的香气特征[65]。此外，植物蛋白本身所具有的风味特征，如坚果、谷物等所带来的风味，也为植物基奶酪带来了特殊的香气，这些风味通常受到消费者的喜爱。陈洪等[66] 以腰果乳替代部分大豆乳制备的奶酪不仅口感细腻、营养价值较高，而且豆腥味也明显降低。豆腥味的产生主要来源于大豆以及一些豆科类的植物中存在的脂肪氧合酶，其在加工过程中产生的醇类（例如 1-己醇、1-辛烯-3-醇）、醛类（例如己醛）等挥发性异味物质，以及一些由皂苷、酚类化合物、肽等非挥发性物质所产生的不愉快风味[67]，这些风味物质属性往往与植物蛋白的质量密切相关。因此，在植物基奶酪风味方面，既需要模拟传统奶酪天然风味，也需要考虑如何消除植物原料中异味物质。底物调节或利用发酵手段改善原料中的化合物是目前抑制这些异味物质产生的有效方法[68]。例如，豌豆蛋白在酿酒酵母和植物乳杆菌发酵的作用下，其风味特征会发生显著的变化，并可以分别将其中呈现“豆味”的醛类物质降低 79.65% 和 78.94%[69]。



a. 蛋白结构/氨基酸组成不同
a. Protein structure/amino acid composition is different

b. 品质特征不同
b. Different quality characteristics

注：CEP 为细胞膜蛋白酶；Opp，Dpp 和 DtpT 为不同蛋白系统，分别是寡肽渗透酶转运系统、ABC 转运蛋白系统、离子连接转运蛋白系统；PepX，PepN 和 PepC 为不同细胞内蛋白酶，分别是 X-脯氨酰二肽基氨肽酶、细胞内内肽酶、细胞内氨肽酶；DP 为二肽酶；TP 为三肽酶；FAAs 为游离氨基酸；VOCs 为挥发性有机化合物。
Note: CEP is cell envelope proteinase; Opp, Dpp, and DtpT are different protein systems, namely oligopeptide permease transport system, ABC transport protein system, and ion-linked transporter; PepX, PepN, and PepC are different intracellular proteases, namely X-prolyl dipeptidyl aminopeptidase, endopeptidase, aminopeptidase; DP is dipeptidase; TP is tripeptidase; FAAs are free amino acids; VOCs are volatile organic compounds.

图 4 植物蛋白与乳蛋白对奶酪品质的影响[60]
Fig.4 The impact of plant proteins and milk proteins on the quality of cheese [60]

3.2 质地特征

传统奶酪是一种具有黏弹性的食品，其质地特征的变化主要受到酪蛋白网络结构和脂肪球的影响。在牛乳中，酪蛋白会与胶束磷酸结合，以酪蛋白胶束的蛋白聚合体稳定存在，在奶酪生产过程中，酪蛋白胶束可以在热处理、凝乳酶、酸等条件下去稳定化，从而形成乳凝胶，这是奶酪生产的关键步骤[70]。然而，由于植物蛋白与酪蛋白之间的结构差异，植物蛋白难以形成类似于乳蛋白凝胶胶束结构。因此，以植物蛋白为主要成分制备的奶酪在拉伸性、流动性以及高温融化等特性上表现较差。为了改善这一状况，研究者们尝试将植物蛋白组装或重建到某些结构当中，比如通过在球状植物蛋白结构中组装各种植物蛋白来模拟酪蛋白胶束结构[4]。研究表明，不同蛋白质亚组分可以形成组合的凝胶网络，如大豆蛋白与油茶籽蛋白形成的凝胶强度是纯大豆蛋白凝胶的 2 倍[71]，这为构建类似传统硬质奶酪结构提供了另一种可能性。然而，这种混合凝胶特性会受到不同蛋白种类的影响，呈现线性或非线性混合的效应，具体表现为增强、中性和弱化[72]。大豆分离蛋白与花生分离蛋白混合会促进其凝胶网络结构的形成，但花生分离蛋白与大米蛋白混合却使得凝胶结构遭到破坏[73]。因此，该方法需要了解不同植物蛋白所具有的结构特点及功能特性。

此外，植物蛋白与食品基质中其余组分的相互作用也会影响植物基奶酪的质地。植物蛋白可以通过与脂肪、碳水化合物连接在一起，增加所形成乳液的相互作用[11]，从而影响食品基质的微观结构。邵之晓等[74] 研究发现，

水的添加、油的含量以及温度会对以玉米醇溶蛋白为原料的植物基奶酪的拉伸性和流动性产生影响。同时，由于植物蛋白存在亲水性的基团，一些亲水物质的加入可以通过共价键的方式与植物蛋白发生交联，促进蛋白的凝胶化[75]。利用高内相乳液技术来制造植物性脂肪组织时发现，琼脂的加入增加了植物蛋白乳液凝胶的硬度并使其具有加热融化性[76]。但亲水物质的加入也可能对凝胶产生一定的削弱作用[72]。因此，在涉及植物基奶酪质地时，通过适当添加胶体、琼脂等大分子物质，有望改善植物基奶酪质地方面的不足。

3.3　营养特征

植物蛋白作为一种优质的蛋白资源，具有多种生物活性，开发潜力巨大[77]。以植物蛋白替代部分动物蛋白，有助于优化脂肪酸摄取平衡，增加优质多不饱和脂肪酸的摄取量，维护心血管健康，增强免疫力，预防由肥胖引起的慢性疾病[78]。然而，与传统奶酪相比，非乳制奶酪还需对一些营养素（钙、维生素等）进行强化以及氨基酸的补充[79]。为了解决这一问题，可以将豆类和谷物蛋白进行配比应用，以避免纯植物饮食中必需氨基酸的缺乏[40]。此外，植物蛋白通常包埋在木质素、半纤维素和其他难以被人体消化的多糖中，同时存在一些抗营养因子，导致其蛋白生物利用度较低[80]，通过不同蛋白的组合，有助于降低植物中存在的一些抗营养因子含量，提高蛋白生物利用度。BALOGUN 等[81] 将豆奶和坚果奶混合制作奶酪，所得奶酪在营养和感官质量与普通 100% 大豆制成的奶酪相当，且其中植酸盐和胰蛋白酶抑制剂的含量随着坚果含量的增加而显著降低，提高了产品的消化率。同时，借助前沿的物理创新技术（等离子体、超高压、脉冲电场等）以及生物技术手段（酶工程、发酵工程等）对蛋白结构进行改性，可以提升蛋白的溶解度以及其他功能特性，进而提高植物基奶酪的营养品质。

4　植物基奶酪品质提升

植物基奶酪的品质和口感与传统奶酪相比仍有待提升，这主要由于天然植物蛋白在乳化性、溶解度等方面的功能特性存在不足，虽然其具有一定的凝胶能力，但形成的凝胶结构及性质往往不如动物性蛋白凝胶稳定和均匀，且凝胶的强度和弹性也较低[57]。植物蛋白改性和生物发酵是改善蛋白功能特性以及提升植物基奶酪品质的 2 个重要方向（图 5）。植物蛋白可以通过物理、化学或酶法改性，改善结构和功能性质，使其产品更接近动物奶酪的质地和口感，而生物发酵通过接种特定的菌种进行发酵，改变植物基奶酪的口感、风味和营养价值，并且已有研究发现发酵技术产生可持续的发酵蛋白，这为利用植物性原料从实质上模拟酪蛋白，并进行植物基奶酪的生产提供了新思路。

4.1　植物蛋白改性

植物蛋白经过修饰改性后可以进一步提高其乳化性、溶解度以及形成凝胶的能力，这些性质对于奶酪质地的形成发挥着关键作用。尽管植物蛋白修饰改性技术已有了大量研究，但关于这类技术在植物奶酪中的应用研究还较少。目前，有关蛋白的修饰改性技术主要包括化学修饰、物理修饰、酶法修饰以及多种方式的组合，其中化学修饰方法不可避免的会使用一些化学物质，在食品中消费者接受度不高，对于食品来说可能并不适用，本文不予讨论。

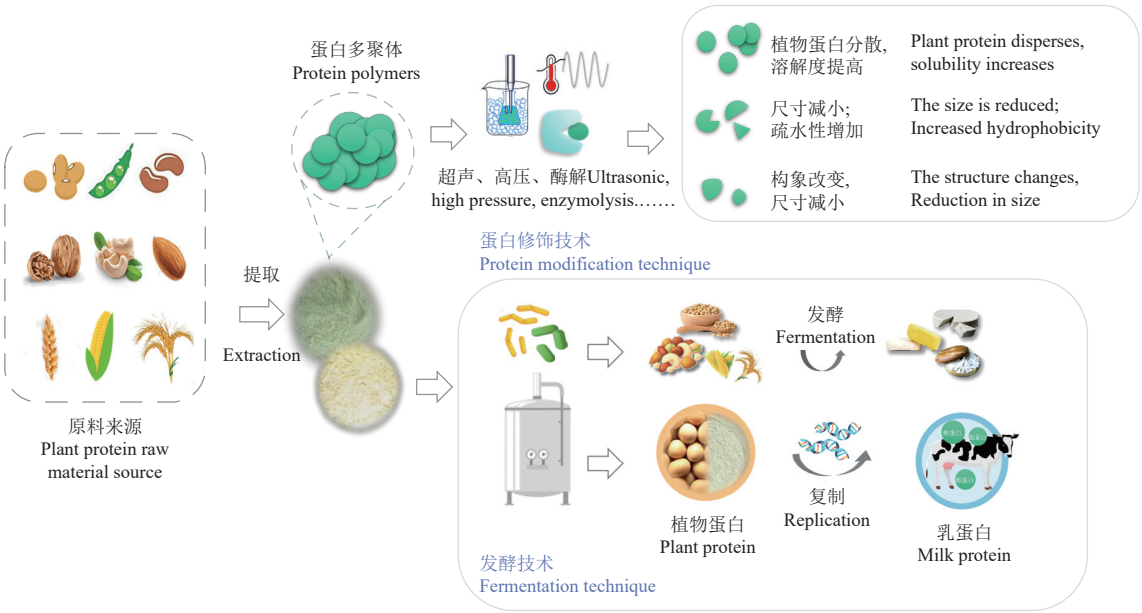


图 5　植物基奶酪品质提升手段

Fig.5　Plant-based cheese quality improvement means

4.1.1　物理改性

植物蛋白的物理改性具有可持续、低耗能、安全等优点，传统的热处理虽然简易，但在对植物蛋白高温处理过程，往往会伴随一些热敏性化合物的降解，从而影响产品的物理化学性质。为了解决这个问题，研究者们开发了一些非热处理技术，如脉冲电场、等离子体处理、

超高压、超声等。李可等[82]采用等离子体技术将鹰嘴豆蛋白进行 4 min 处理，有效改善了蛋白的溶解度以及乳化稳定性。更重要的是，这些技术可以在不损害蛋白质感官特性和生物活性的情况下改变其功能特性，保证产品最终的营养、感官以及安全[83-84]。

脉冲电场技术在有关蛋白质修饰方面值得一提，该技术处理可以得到一种分子之间呈现有序排列的变性蛋白质，其原理在于，脉冲电场技术能够破坏蛋白质的高级结构，暴露蛋白质内部疏水性基团，从而改变蛋白质的表面疏水性，提高蛋白质的分子柔性以及其他功能性质。这种经过脉冲处理的蛋白分离物或浓缩物可以满足人们对高蛋白植物基乳制品的增长需求[85]，同时为植物基奶酪产品的创新发展提供了重要思路。FERAWATI 等[13]利用不同的豆类脉冲粉和稳定剂的组合，成功制备出了坚固且可切片的豆类奶酪类似物，与传统高达奶酪硬度（1 636 g）相比，这种豆类脉冲蛋白制备的奶酪具有更高的硬度（1883～2 903 g, P< 0.01）、粗蛋白以及总膳食纤维含量，同时脂肪含量更低。高压处理可以通过诱导溶液中蛋白质的体积发生变化，使其蛋白质分子发生破裂、变性和聚集[86]。通过这一物理改性手段，植物蛋白被有效结构化，所形成的蛋白凝胶表现出较好的流变特性，其储能模量（G'）高于损耗模量（G''），从而表现出较好的弹性以及稳定性，在黏度和弹性方面达到与商业乳制品酸奶高度相似的水平[87]。高强度超声处理可以提高豌豆蛋白的蛋白质含量、溶解度和泡沫稳定性，但对其乳化性产生了不良影响[17]。因此，合理运用这些物理技术对于开发类似传统奶酪质地与风味的产品仍需进一步研究。

4.1.2 酶法改性

生物修饰是食品中较为理想的蛋白质处理方法，该方法是利用蛋白酶对蛋白质的特定位点进行切除，具有温和、反应时间短、对营养成分损害较少等优点。在生物酶的作用下，蛋白质的平均分子量降低、疏水区域的可用性提高以及可电离基团释放[88]，从而提高植物蛋白的溶解度，有效改善蛋白的功能特性。在植物基奶酪生产中，酶的使用可以改善蛋白的功能以及产品品质。例如微生物代谢所产生的转谷氨酰胺酶，将其应用于植物基奶酪中，可以增强和稳定蛋白质基质中三维网状结构，对奶酪的水分、质地、流变学和感官特性产生影响[89-90]。研究显示，酪氨酸酶可以在 α-玉米醇溶蛋白组分和马铃薯蛋白酶抑制剂之间引入新的共价键，促进马铃薯蛋白与玉米蛋白质混合乳液中凝胶结构的形成，有助于生产具有自溶、弹性和橡胶质地的植物蛋白产品[91]，有望促进植物基奶酪的创新。ZHAO 等[92]表明，杏仁蛋白在经过酶处理后其形成的乳液或凝胶基质会更加的稳定，可容纳更多的水分，并且蛋白质谱、粒径也会发生改变，从而影响产品的流变学、硬度和稳定性。大豆蛋白可以在风味蛋白酶最佳水解条件下将蛋白水解成分子量小于 5 kDa 的肽，以此制备的植物基奶酪可表现出良好的拉伸性（95 mm）和融化性（32 mm）[93]。

植物蛋白使用酶处理后，其产品的风味及营养也会得到提升，对于低分子蛋白水解物还有可能增加产品最终的抗氧化活性[94]，SONKLIN 等[95]首次报道了菠萝蛋白酶水解绿豆粕蛋白后感官以及抗氧化活性的变化，结果表明菠萝蛋白酶的使用暴露了寡肽链中的疏水性氨基酸，从而增强了产品的抗氧化活性。王敏等[96]利用酶解技术开发的玉米胚芽植物蛋白饮料，与未经酶解的样品相比，在口感、风味表现更佳，营养更丰富。

4.2 生物发酵技术

植物蛋白经过微生物发酵后，其结构会发生一定变化，LIU 等[18]借助蛋白质电泳和氨基酸分析，结果表明，在微生物的作用下，鹰嘴豆蛋白质分子量和氨基酸组成发生了变化，其中蛋白质中的 α-螺旋含量增加，β-片层含量显著下降。蛋白的球形结构被降解为更松散的状态，这种变化使得植物蛋白在结构上更加接近酪蛋白，存在于乳酸菌表面的酶类更易接近并作用于这些结构修饰后的植物蛋白，加速蛋白水解反应的进行，提高产品整体的品质特性。目前，借助发酵技术来复制乳中的酪蛋白也成为新型蛋白领域发展的重要方向，Perfect Day、Pureture 等乳品公司利用植物原料通过发酵技术产生了一类仿酪蛋白，该蛋白可应用于植物奶酪产品的开发，以模仿传统奶酪的拉伸、融化性特性。

发酵可以改善蛋白质的功能特性，使其在食品加工中具有更广泛的应用[97]。微生物中酶的存在可以切割蛋白质与非营养化合物之间的化学键，去除某些抗营养因子[98]，减少一些存在于棉子糖、水苏糖和毛蕊花糖等中引起肠胃胀气的 α-半乳糖苷[99]，提高植物蛋白的营养以及功能特性。另一方面，发酵也有利于产品最终风味形成以及改善不良气味的产生[100-101]，这可能是因为发酵过程中产生的微生物和代谢产物改善了蛋白质的风味。研究显示，在植物基乳液中利用乳酸菌发酵，不同菌株在一定程度上都具有形成风味以及去除异味的潜力，尤其是乳酸杆菌和链球菌。当使用乳酸杆菌和明串珠菌发酵时，其中表现出异味的正醛类物质（戊醛、己醛、壬醛）的含量明显降低；而使用链球菌进行发酵时，可以增加具有黄油味的双乙酰和戊二酮的水平[102]。此外，植物蛋白经过发酵可以有效减少某些风味物质所产生的异味问题，例如己醛，其具有典型“青草味”的物质[3]，有研究在利用乳酸菌发酵甜羽扇豆乳液时发现，发酵使得其中乳酸、乙酸和己酸的含量增加，己醛含量明显降低[43]。BEN-HARB 等[103]在发酵富含豌豆蛋白的乳液时也观察到类似的结果。在发酵过程，羽扇豆蛋白分离物中一些低分子量的多肽会被分解，从而减少苦味的生成[104]。以上结果均显示出发酵在作用于植物蛋白后所表现出来的优异特性，尤其有关蛋白多级结构的变化、异味的去除以及天然奶酪风味属性的产生。

5 结语与展望

植物基奶酪市场的扩大与植物蛋白的应用密切相关，尽管植物蛋白在结构与功能方面与乳蛋白存在较大差异。

然而，随着蛋白质非热处理技术以及生物技术的创新飞跃，特别是那些能够精准调控蛋白质结构与功能的高级技术手段（例如超高压、脉冲电场、酶工程等）的涌现，为植物蛋白在植物基奶酪中的高效转化与性能优化提供了强大的技术支持。同时，多种植物蛋白来源的开发，拓宽了植物基奶酪的原料选择。未来还需进一步关注解析不同植物蛋白的结构特征，确定适合于植物基奶酪生产的基本成分和加工方式，明晰各成分之间的相互作用及作用方式，均有助于调控最终产品的品质特性。针对发酵过程，可进行菌种的筛选并充分了解微生物的分子代谢路径，有助于真正地模仿传统奶酪的风味特征；最后，从消费者角度出发，关注植物基奶酪在制备过程中质地、营养和风味变化的同时，实现这类奶酪产品的“清洁标签”，以满足消费者对高质量产品的追求。

[参　考　文　献]

[1] TONG L T, XIAO T, WANG L, et al. Plant protein reduces serum cholesterol levels in hypercholesterolemia hamsters by modulating the compositions of gut microbiota and metabolites[J]. Iscience, 2021, 24(12): 103435.

[2] ANNIKA K C, BJöRN H, CECILIA K. Differences in environmental impact between plant-based alternatives to dairy and dairy products: a systematic literature review[J]. Sustainability, 2021, 13(22): 12599.

[3] HADIDI M, TAN C, ASSADPOUR E, et al. Emerging plant proteins as nanocarriers of bioactive compounds[J]. Journal of Controlled Release, 2023, 355: 327-342.

[4] SIM S Y J, SRV A, CHIANG J H, et al. Plant proteins for future foods: A roadmap[J]. Foods, 2021, 10(8): 1967.

[5] BROYARD C, GAUCHERON F. Modifications of structures and functions of caseins: A scientific and technological challenge[J]. Dairy Science & Technology, 2015, 95: 831-862.

[6] ONG L, LI X, ONG A, et al. New insights into cheese microstructure[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2022, 13: 89-115.

[7] FAN M, WEI T, LU X, et al. Comprehensive quality evaluation and interaction mechanism of processed cheese analogues prepared from starch, protein, and oil from plant sources[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6595-6604.

[8] GRASSO N, ROOS Y H, CROWLEY S V, et al. Composition and physicochemical properties of commercial plant-based block-style products as alternatives to cheese[J]. Future Foods, 2021, 4: 100048.

[9] NADIA G, FRANCESCA B, H Y R, et al. Plant-based alternatives to cheese formulated using blends of zein and chickpea protein ingredients[J]. Foods, 2023, 12(7): 1492.

[10] MEKALA S, SILVA E K, SALDAñA M D A. Mechanism, kinetics, and physicochemical properties of ultrasound-produced emulsions stabilized by lentil protein: A non-dairy alternative in food systems[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(1): 185-196.

[11] YANO H, FU W. Effective use of plant proteins for the development of “new” foods[J]. Foods, 2022, 11(9): 1185.

[12] 丁玲. 超声辅助制备花生分离蛋白-果胶复合乳液凝胶及其在植脂奶油中的应用[D]. 郑州：河南工业大学，2022.
DING Ling. Ultrasound-Assisted Preparation of Peanut Protein Isolate-Pectin Composite Emulsion Gel and its Application in Margarine[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)

[13] FERAWATI F, HEFNI M, öSTBRING K, et al. The application of pulse flours in the development of plant-based cheese analogues: Proximate composition, color, and texture properties[J]. Foods, 2021, 10(9): 2208.

[14] MATTICE K D, MARANGONI A G. Physical properties of plant-based cheese products produced with zein[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105746.

[15] MCCLEMENTS D J, GROSSMANN L. The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 4049-4100.

[16] GALVãO A M M T, FREITAS J C, KARATAY G G B, et al. Thermo-induced changes in the structure of lentil protein isolate (*Lens culinaris*) to stabilize high internal phase emulsions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127313.

[17] GAO K, ZHA F, YANG Z, et al. Structure characteristics and functionality of water-soluble fraction from high-intensity ultrasound treated pea protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107409.

[18] LIU Y, ZHU S, LI Y, et al. Alternations in the multilevel structures of chickpea protein during fermentation and their relationship with digestibility[J]. Food Research International, 2023, 165: 112453.

[19] MEHRSA E, BONASTRE O, RÉMI S. Pea protein extraction assisted by lactic fermentation: Impact on protein profile and thermal properties.[J]. Foods, 2021, 10(3): 549.

[20] OUYANG H, KILCAWLEY K N, MIAO S, et al. Exploring the potential of polysaccharides or plant proteins as structuring agents to design cheeses with sensory properties focused toward consumers in East and Southeast Asia: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(16): 4342-4355.

[21] BOUROUIS I, PANG Z, LIU X. Recent advances on uses of protein and/or polysaccharide as fat replacers: Textural and tribological perspectives: A review[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 11: 100519.

[22] WANG W, SHEN M, LIU S, et al. Gel properties and interactions of *Mesona blumes* polysaccharide-soy protein isolates mixed gel: The effect of salt addition[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 192: 193-201.

[23] KASPRZAK M M, MACNAUGHTAN W, HARDING S, et al. Stabilisation of oil-in-water emulsions with non-chemical modified gelatinised starch[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 409-418.

[24] YU B, REN F, ZHAO H, et al. Effects of native starch and modified starches on the textural, rheological and microstructural characteristics of soybean protein gel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 142: 237-243.

[25] MOUNSEY J S, O'RIORDAN E D. Characteristics of imitation cheese containing native or modified rice starches[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(6): 1160-1169.

[26] MASIÁ C, JENSEN P E, PETERSEN I L, et al. Design of a functional pea protein matrix for fermented plant-based cheese[J]. Foods, 2022, 11(2): 178.

[27] MEFLEH M, PASQUALONE A, CAPONIO F, et al. Spreadable plant-based cheese analogue with dry-fractioned pea protein and inulin-olive oil emulsion‐filled gel[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(12): 5478-5487.

[28] J·拉伊，I·费尔南德斯法雷斯. 硬质非乳制奶酪组合物及其制备方法: CN112955017A [P]. 2021-06-11.

[29] MENGMENG F, TENG W, XIANG L, et al. Comprehensive quality evaluation and interaction mechanism of processed cheese analogues prepared from starch, protein, and oil from plant sources[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6595-6604.

[30] MATIAS N S, BEDANI R, CASTRO I A, et al. A probiotic soy-based innovative product as an alternative to petit-suisse cheese[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 411-417.

[31] LI Y, ZHANG X, YANG J J, et al. Influence of the addition of *Geotrichum candidum* on the microbial, chemical, textural, and sensory features of soft soy cheese[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(11): e14823.

[32] LI Q, XIA Y, ZHOU L, et al. Evaluation of the rheological, textural, microstructural and sensory properties of soy cheese spreads[J]. Food and Bioproducts Processing, 2013, 91(4): 429-439.

[33] SÁNCHEZ-MUñOZ M A, VALDEZ-SOLANA M A, AVITIA-DOMÍNGUEZ C, et al. Utility of milk coagulant enzyme of *Moringa oleifera* seed in cheese production from soy and skim milks[J]. Foods, 2017, 6(8): 62.

[34] TANG Q, ROOS Y H, MIAO S. Plant protein versus dairy proteins: A pH-dependency investigation on their structure and functional properties[J]. Foods, 2023, 12(2): 368.

[35] ZIARNO M, BRYś J, PARZYSZEK M, et al. Effect of lactic acid bacteria on the lipid profile of bean-based plant substitute of fermented milk[J]. Microorganisms, 2020, 8(9): 1348.

[36] ŁOPUSIEWCZ Ł, ŚMIETANA N, LICHWIARSKA E, et al. The biotransformation of lupine seeds by lactic acid bacteria and penicillium camembert into a plant-based camembert alternative, and its physicochemical changes during 7 weeks of ripening[J]. Fermentation, 2022, 8(9): 447.

[37] 鲍捷，任晓蕾，郭宝松，等. 传统农家酱产蛋白酶菌株的分离及其在豆浆的应用[J]. 农业工程学报，2023，39(11)：266-273.
BAO Jie, REN Xiaolei, GUO Baosong, et al. Isolation of protease strains from traditional soybean paste and their application in soymilk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 266-273. (in Chinese with English abstract)

[38] GROSSMANN L, MCCLEMENTS D J. The science of plant-based foods: Approaches to create nutritious and sustainable plant-based cheese analogs[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 207-229.

[39] 韩雅君. 大豆分离蛋白的组分分离技术研究[D]. 北京：中国农业大学，2004.
HAN Yajun. The Study of Industrial Technology of Preparing 7s-rich and 11s-rich Soybean Protein Isolate [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)

[40] MEFLEH M, PASQUALONE A, CAPONIO F, et al. Legumes as basic ingredients in the production of dairy‐free cheese alternatives: A review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 8-18.

[41] VILLARINO C B J, ALIKPALA H M A, BEGONIA A F, et al. Quality and health dimensions of pulse-based dairy alternatives with chickpeas, lupins and mung beans[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(8): 2375-2421.

[42] 本山贵康，芦田茂. 绿豆蛋白凝胶状组合物及奶酪样食品: CN105077033A [P].2015-11-25.

[43] LAAKSONEN O, KAHALA M, MARSOL-VALL A, et al. Impact of lactic acid fermentation on sensory and chemical quality of dairy analogues prepared from lupine (*Lupinus angustifolius* L.) seeds[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128852.

[44] GRASSO N, BOT F, ROOS Y H, et al. The influence of protein concentration on key quality attributes of chickpea-based alternatives to cheese[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 2004-2012.

[45] MICHEL S, ROOS S, MARK A, et al. Novel plant-based cream cheese: A tribology perspective[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 335: 111172.

[46] CRAIG W J, MANGELS A R, BROTHERS C J. Nutritional profiles of non-dairy plant-based cheese alternatives[J]. Nutrients, 2022, 14(6): 1247.

[47] 谢为峰. 核桃蛋白凝胶形成及其凝胶特性研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2017.
XIE Weifeng. Study on Gel Formation and Gel Characteristics of Walnut Protein[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)

[48] LEI Y, OUYANG H, PENG W, et al. Effect of NaCl on the rheological, structural, and gelling properties of walnut protein isolate-κ-carrageenan composite gels[J]. Gels, 2022, 8(5): 259.

[49] CHEN C, ZHOU W, YU H, et al. Characterization of major odor-active compounds responsible for nutty flavor in Cheddar cheese according to Chinese taste[J]. Flavour and

Fragrance Journal, 2021, 36(2): 171-181.

[50] OYEYINKA A T, ODUKOYA J O, ADEBAYO Y S. Nutritional composition and consumer acceptability of cheese analog from soy and cashew nut milk[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14285.

[51] KRSTONOšIć V S, KALIć M D, DAPčEVIć-HADNAđEV T R, et al. Physico-chemical characterization of protein stabilized oil-in-water emulsions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 602: 125045.

[52] BAUNE M C, SCHROEDER S, WITTE F, et al. Analysis of protein-network formation of different vegetable proteins during emulsification to produce solid fat substitutes[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15: 2399-2416.

[53] SALGADO A M, OZTURK O K, HAMAKER B R, et al. Matching textural properties of commercial meat and cheese products using zein as the viscoelastic agent and calcium hydroxide as the textural modifier in plant-based formulations[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108323.

[54] MATTICE K D, MARANGONI A G. Evaluating the use of zein in structuring plant-based products[J]. Current Research in Food Science, 2020, 3: 59-66.

[55] OZTURK O K, SALGADO A M, HOLDING D R, et al. Dispersion of zein into pea protein with alkaline agents imparts cohesive and viscoelastic properties for plant-based food analogues[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108044.

[56] PENG D, YE J, JIN W, et al. A review on the utilization of flaxseed protein as interfacial stabilizers for food applications[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2022, 99(9): 723-737.

[57] 廖小微，陈业明. 芝麻种子中内源性蛋白酶的热稳定性及其运用[J]. 农业工程学报，2022，38(12)：301-307.
LIAO Xiaowei, CHEN Yeming. Thermal stability and application of endogenous proteases in sesame seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 301-307. (in Chinese with English abstract)

[58] SHIYU L, XUEWEI F, XIYU H, et al. A comprehensive review of mung bean proteins: Extraction, characterization, biological potential, techno-functional properties, modifications, and applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 3292-3327.

[59] HONGDONG S, QIUYUN F, KAI H, et al. Digestion characteristics of quinoa, barley and mungbean proteins and the effects of their simulated gastrointestinal digests on CCK secretion in enteroendocrine STC-1 cells[J]. Food Function, 2022, 13(11): 6233-6243.

[60] MIRMOGHTADAIE L, KADIVAR M, SHAHEDI M. Effects of succinylation and deamidation on functional properties of oat protein isolate[J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 127-131.

[61] 刘成梅，王芳，钟俊桢，等. 腰果蛋白的功能特性研究及其氨基酸组成分析[J]. 食品工业科技，2016，37(2)：88-92.
LIU Chengmei, WANG Fang, ZHONG Junzhen, et al. Functional properties and amino acid composition analysis of cashew protein[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(2): 88-92. (in Chinese with English abstract)

[62] FALKEISEN A, GORMAN M, KNOWLES S, et al. Consumer perception and emotional responses to plant-based cheeses[J]. Food Research International, 2022, 158: 111513.

[63] HARPER A R, DOBSON R C J, MORRIS V K, et al. Fermentation of plant‐based dairy alternatives by lactic acid bacteria[J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(5): 1404-1421.

[64] YANG L, ZHANG T, LI H, et al. Control of beany flavor from soybean protein raw material in plant-based meat analog processing[J]. Foods, 2023, 12(5): 923.

[65] NEDELE A K, BäR A, MAYER N, et al. Characterization of cheesy odor formed during fermentation of soy drink with Agrocybe aegerita[J]. Food Chemistry, 2022, 381: 132170.

[66] 陈洪，魏广智，郑倩望，等. 一种大豆腰果基奶酪及其制备方法：CN202210573689.1[P].2022-08-02.

[67] LEONARD W, ZHANG P, YING D, et al. Surmounting the off-flavor challenge in plant-based foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 63(30): 1-22.

[68] RITTER S W, GASTL M I, BECKER T M. The modification of volatile and nonvolatile compounds in lupines and faba beans by substrate modulation and lactic acid fermentation to facilitate their use for legume‐based beverages: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 4018-4055.

[69] XIANG L, ZHU W, JIANG B, et al. Volatile compounds analysis and biodegradation strategy of beany flavor in pea protein[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134275.

[70] 文峰，王稳航，沈登莱. 乳酪蛋白胶束结构及其凝胶形成机制概述[J]. 食品研究与开发，2004, 25(2)：29-32.

[71] 曾琳. 其他植物蛋白的添加对大豆蛋白热诱导凝胶性质的影响[D]. 无锡：江南大学，2022.
ZENG Lin. Effects of Other Plant Protein Addition on Heat-induced Gel Properties of Soy Protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[72] GUIDI S, FORMICA F A, DENKEL C. Mixing plant-based proteins: Gel properties of hemp, pea, lentil proteins and their binary mixtures[J]. Food Research International, 2022, 161: 111752.

[73] LIN D, ZHANG L, LI R, et al. Effect of plant protein mixtures on the microstructure and rheological properties of myofibrillar protein gel derived from red sea bream (*Pagrosomus major*)[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 537-545.

[74] 邵之晓，顾丰颖，刘昊，等. 玉米醇溶蛋白基马苏里拉干酪的研制[J]. 食品研究与开发，2022，43(14)：133-140.
SHAO Zhixiao, GU Fengying, LIU Hao, et al. Development of zein-based *Mozzarella* cheese[J]. Food Research and Development, 2022, 43(14): 133-140. (in Chinese with English abstract)

[75] YANG C, WANG X, HU H, et al. Cold-set oat protein isolate-

-gellan gum binary gels with various microstructures: Fabrication, characterization, formation mechanism, and controlled release properties[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107818.

[76] HU X, MCCLEMENTS D J. Construction of plant-based adipose tissue using high internal phase emulsions and emulsion gels[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103016.

[77] SAPNA L, PRANJAL Y, TARUN B, et al. Sustaining protein nutrition through plant-based foods: A paradigm shift[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2022, 6: 1037086.

[78] 王涛，季珊珊，汤鑫磊，等. 大豆和猪肉来源的高蛋白饮食对小鼠肥胖及肠道菌群的影响[J]. 食品科学技术学报，2024，42(2)：120-130.
WANG Tao, JI Shanshan, TANG Xinlei, et al. Effects of soybean and pork high protein diets on mice obesity and intestinal microflora[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 120-130. (in Chinese with English abstract)

[79] GLOVER A, HAYES H E, NI H, et al. A comparison of the nutritional content and price between dairy and non-dairy milks and cheeses in UK supermarkets: A cross sectional analysis[J]. Nutrition and Health, 2022, 30(1): 157-165.

[80] NASRABADI M N, DOOST A S, MEZZENGA R. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106789.

[81] BALOGUN M A, OYEYINKA S A, KOLAWOLE F L, et al. Chemical composition and sensory properties of soy-tiger nut cheese[J]. Ceylon Journal of Science, 2019, 48(4): 353-358.

[82] 李可，田金凤，郑思雨，等. 等离子体对鹰嘴豆分离蛋白溶解性和乳化特性的影响[J]. 农业工程学报，2021，37(4)：31-39.
LI Ke, TIAN Jinfeng, ZHENG Siyu, et al. Effect of plasma on solubility and emulsifying properties of chickpea protein isolates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 31-39. (in Chinese with English abstract)

[83] BASAK S, ANNAPURE U S. Recent trends in the application of cold plasma for the modification of plant proteins: A review[J]. Future Foods, 2022, 5: 100119.

[84] 江连洲，王一畅，马依彤，等. 微波对大豆蛋白氧化聚集体结构及功能特性的影响[J]农业工程学报，2023，39(9)：261-269.
JIANG Lianzhou, WANG Yichang, MA Yitong, et al. Effects of microwave treatment on the structural and functional properties of oxidized aggregated soybean proteins [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 261-269. (in Chinese with English abstract)

[85] VOGELSANG-O'DWYER M, ZANNINI E, ARENDT E K. Production of pulse protein ingredients and their application in plant-based milk alternatives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 364-374.

[86] WANG W, YANG P, RAO L, et al. Effect of high hydrostatic pressure processing on the structure, functionality, and nutritional properties of food proteins: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(6): 4640-4682

[87] SIM S Y J, HUA X Y, HENRY C J. A novel approach to structure plant-based yogurts using high pressure processing[J]. Foods, 2020, 9(8): 1126.

[88] NAZILA S, XUEPING J, BHESH B, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on solubility and surface properties of pea, rice, hemp, and oat proteins: Implication on high protein concentrations[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102515.

[89] GHARIBZAHEDI S M T, KOUBAA M, BARBA F J, et al. Recent advances in the application of microbial transglutaminase crosslinking in cheese and ice cream products: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 2364-2374.

[90] CADAVID A M, BOHIGAS L, TOLDRÀ M, et al. Cheese analogue-making process using microbial transglutaminase: Effects on texture and syneresis[J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 5(2): 104-110.

[91] GLUSAC J, DAVIDESKO-VARDI I, ISASCHAR-OVDAT S, et al. Gel-like emulsions stabilized by tyrosinase-crosslinked potato and zein proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 53-63.

[92] ZHAO J, BHANDARI B, GAIANI C, et al. Altering almond protein function through partial enzymatic hydrolysis for creating gel structures in acidic environment[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 653-664.

[93] XIE D, GAO Y, DU L, et al. Effect of flavorzyme - modified soy protein on the functional properties, texture and microstructure of *Mozzarella* cheese analogue[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11): e15963.

[94] WANG Y, LI Z, LI H, et al. Effect of hydrolysis on the emulsification and antioxidant properties of plant-sourced proteins[J]. Current Opinion in Food Science, 2022, 48: 100949.

[95] SONKLIN C, LAOHAKUNJIT N, KERDCHOECHUEN O, et al. Volatile flavour compounds, sensory characteristics and antioxidant activities of mungbean meal protein hydrolysed by bromelain[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55: 265-277.

[96] 王敏，张明丹，彭丹丹，等. 玉米胚芽植物蛋白饮料基料的工艺研究[J]. 河南工业大学学报（自然科学版），2021，42(3)：70-76.
WANG Min, ZHANG Mingdan, PENG Dandan, et al. Study on the process of corn germ plant protein beverage base[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 70-76. (in Chinese with English abstract)

[97] REN Y, LI L. The influence of protease hydrolysis of lactic acid bacteria on the fermentation induced soybean protein gel: Protein molecule, peptides and amino acids[J]. Food Research

International, 2022, 156: 111284.

[98] ALROSAN M, TAN T C, KOH W Y, et al. Overview of fermentation process: structure-function relationship on protein quality and non-nutritive compounds of plant-based proteins and carbohydrates[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 63(25): 11-15.

[99] XING Q, DEKKER S, KYRIAKOPOULOU K, et al. Enhanced nutritional value of chickpea protein concentrate by dry separation and solid state fermentation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59: 102269.

[100] XIE J, GäNZLE G M. Selection of adjunct cultures for the ripening of plant cheese analogues[J]. Food Microbiology, 2024, 122: 104555.

[101] PUA A, TANG V C Y, GOH R M V, et al. Ingredients, processing, and fermentation: Addressing the organoleptic boundaries of plant-based dairy analogues[J]. Foods, 2022, 11(6): 875.

[102] ENGELS W, SIU J, VAN SCHALKWIJK S, et al. Metabolic conversions by lactic acid bacteria during plant protein fermentations[J]. Foods, 2022, 11(7): 1005.

[103] BEN-HARB S, SAINT-EVE A, PANOUILLÉ M, et al. Design of microbial consortia for the fermentation of pea-protein-enriched emulsions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 293: 124-136.

[104] SCHLEGEL K, LEIDIGKEIT A, EISNER P, et al. Technofunctional and sensory properties of fermented lupin protein isolates[J]. Foods, 2019, 8(12): 678.

Research advances in the application of plant proteins to plant-based cheese

TIAN Huaixiang , CHENG Juan , CHEN Chen , YU Haiyan , YUAN Haibin , LOU Xinman※

(*School of Perfume and Aroma Technology*, *Shanghai Institute of Technology*, *Shanghai* 201418, *China*)

Abstract: With the global consumer demand for "healthy" and "delicious" food, plant-based cheese products are becoming a driving force in the food industry. Plant protein is the core component of plant-based cheese and plays a crucial role in shaping the overall flavor, texture, and nutritional value of plant-based cheese. However, it is very important to effectively utilize plant proteins to simulate the unique flavor and texture of traditional cheese, but there are many technical challenges in the actual production process. It is not easy to meet these key quality standards for plant-based cheese, not only because there are significant differences between plant-based protein and casein, but also because consumers are receptive to the unique flavor, excellent melting and stretching properties of traditional cheese. Therefore, exploring and developing efficient technological means to optimize the quality characteristics of plant-based cheese is crucial for driving its market growth. This article first conducts an in-depth analysis of the main components of plant-based cheese, with a focus on the key roles of plant-based proteins, starch, plant-based oils, and other key components. These ingredients not only provide necessary nutritional support, but also play a crucial role in shaping the flavor, texture, and overall quality of cheese. Subsequently, the system reviewed the production processes of two types of plant-based cheese currently available in the market. The first production method focuses on ingredient assembly, carefully mixing various ingredients in specific proportions, utilizing the functional characteristics and interactions of each ingredient to produce plant-based cheese with specific quality attributes. The inspiration for the second production process comes from the traditional way of making cheese, which uses soaking, coagulation, filtering and other steps to simulate the production process of traditional cheese, making plant-based cheese more similar in flavor and texture to traditional cheese. On this basis, the widely researched and applied types of plant proteins in the market were further introduced, and the structural and functional characteristics of these common protein sources and their impact on the overall quality of plant cheese were analyzed in detail. Different sources of plant protein exhibit significant differences in structure, function, and nutritional value, directly affecting the quality characteristics of plant cheese. In order to improve the application effect of plant protein in the production of plant cheese, this article explores various technical methods, especially physical and biological enzymatic hydrolysis and fermentation. Physical modification techniques (such as ultrasound, pulse, high pressure, etc.) can improve the solubility and stability of plant proteins; Enzyme processing technology utilizes specific biological enzymes to modify plant proteins, improving their processing performance and nutritional value; In addition, microbial fermentation can produce specific flavor compounds and functions. The components improve the overall quality of plant-based cheese through microbial metabolic activity. The application of these technological methods not only provides strong technical support for the research and production of plant-based cheese, but also provides effective solutions to meet the growing demand of consumers for "healthy" and "delicious" food. This article provides a review and analysis of the application of plant proteins in plant cheese, aiming to provide valuable insights and references for researchers and manufacturers in related fields. In addition, it is expected that there will be more technological innovations and breakthroughs in the future to drive the continuous progress and development of the plant-based cheese industry.

Keywords: plant-based cheese; plant protein; flavor; texture; quality improvement