DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260414013
引用格式: 田子昂, 王颖, 史宏博, 等. 功能性食品载体视角下人造肉的研究进展及挑战[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 94–104.
Tian Ziang, Wang Ying, Shi Hongbo, et al. Research progress and challenges of artificial meat from the perspective of functional food carriers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 94–104. (in Chinese with English abstract).

功能性食品载体视角下人造肉的研究进展及挑战

田子昂, 王　颖*, 史宏博, 陈佳丽, 严文博, 姜子涛

(天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津市食品生物技术重点实验室, 天津　300134)

摘　要: 以功能性食品载体为研究视角, 系统地梳理了人造肉产业的技术研发进展与产业化应用中面临的多重挑战。首先介绍了功能性食品载体的不同分类, 并重点对比分析了植物基人造肉与细胞培育肉作为功能性食品载体的核心优势与短板。在此基础上, 还详细阐述了两类人造肉在心血管健康、肠道微生态调节、骨骼发育促进、体重管理、抗氧化抗衰老、代谢机能提升、机体免疫增强七大健康领域的典型应用案例与实践成果。针对当前人造肉存在的营养不均衡、质构风味与天然肉类差异较大、规模化生产技术不成熟、市场认知度与接受度偏低等核心问题, 从营养配方优化、加工技术创新、产业链协同、科普宣传推广等维度提出发展优化路径, 为人造肉在功能性食品载体领域的研发创新与产业化落地提供坚实的理论依据与可行的技术思路, 同时为推动人造肉从普通替代食品向高附加值功能性营养食品升级、实现规模化与高质量产业发展提供重要的理论支撑与技术指引。

关键词: 功能性食品载体; 人造肉; 植物肉; 细胞培育肉; 功能性食品
中图分类号: TS218　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)14–0094–11

Research progress and challenges of artificial meat from the perspective of functional food carriers

TIAN Zi-Ang, WANG Ying*, SHI Hong-Bo, CHEN Jia-Li, YAN Wen-Bo, JIANG Zi-Tao

(*College of Biotechnology and Food Science*, *Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology*, *Tianjin University of Commerce*, *Tianjin* 300134, *China*)

ABSTRACT: From the perspective of functional food carrier, systematically discussed the technological research and development progress of artificial meat industry and the multiple challenges faced in the process of industrial application. Firstly, introduced the classification of functional food carriers, and compared and analyzed the core advantages and disadvantages of plant-based artificial meat and cell-cultured meat as functional food carriers. On this basis, elaborated the typical application cases and practical results of 2 types of artificial meat in 7 health fields: cardiovascular health, intestinal microecological regulation, bone development promotion, weight management, anti-oxidation and anti-aging, metabolic function improvement, and immune enhancement. Additionally, in view of the

收稿日期: 2026-04-14
基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(16JCYBJC43300, 18JCYBJC96000); 天津市大学生创新创业训练计划项目(XS2026100690081)
第一作者: 田子昂(2001—), 男, 硕士, 主要研究方向为食品添加剂。E-mail: tianziang@tjcu.edu.cn
***通信作者:** 王颖(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品添加剂。E-mail: yingwang@tjcu.edu.cn

core problems of artificial meat, such as unbalanced nutrition, great differences from texture and flavor of natural meat, immature large-scale production technologies, low market awareness and acceptance, development optimization paths were put forward from the aspects of nutrition formula optimization, processing technology innovation, industrial chain coordination and popular science publicity and promotion. It provided a solid theoretical basis and feasible technical ideas for the research and development innovation and industrialization of artificial meat in the field of functional food carriers. At the same time, it provides important theoretical support and technical guidance for promoting the upgrading of artificial meat from ordinary alternative food to high value-added functional nutritious food and achieving large-scale and high-quality industrial development.

KEY WORDS: functional food carrier; artificial meat; plant-based artificial meat; cell-cultured meat; functional food

0　引　言

基于公众消费升级与对营养健康食品需求持续攀升, 大众虽然偏好天然来源食材, 但人造肉依托低碳环保、营养精准调控等独有特质, 在健康食品创新赛道的应用价值逐步凸显[1], 已成为传统畜禽肉的重要替代研发方向, 在食品工业与营养健康领域获得广泛关注。植物肉以大豆、豌豆、小麦等传统植物蛋白为主要原料, 通过挤压膨化、高温剪切、3D 打印等加工技术, 形成近似肉类的组织结构[2]; 而细胞培育肉则依托体外细胞增殖分化技术与支架构建体系, 在实验环境中完成动物源肉类的培育生产[3], 二者协同推动肉类生产模式向高效化、健康化、生态化升级。人造肉在基质结构、成分可调性、加工适配性等方面具备成为优质功能性食品载体的天然优势, 植物肉的多孔网状基质为活性成分提供负载空间[4–5]; 细胞培育肉的动物源基质与人体具有高生物相容性, 二者均可通过配方调控与工艺优化实现功能因子的高效搭载与靶向递送[6–7]。依托这一载体优势, 将人造肉与功能性食品开发深度融合, 既能补齐传统功能性载体稳定性差、适口性不足等短板, 又能跳出单纯替代传统肉食的固有定位, 推动其向心血管健康、肠道调节、体重管理等细分功能性营养食品转型升级, 为可持续饮食体系构建与食品工业迭代升级提供重要支撑。

本文从功能性食品载体角度出发, 首先介绍了功能性载体的分类, 重点探讨了细胞培育肉与植物肉作为功能性食品载体的优劣势、适配性, 归纳了相关应用案例, 讨论了人造肉安全性以及质量控制方法, 全面梳理了人造肉作为功能性食品载体的发展瓶颈及发展优化路径, 为人造肉在功能性食品领域的研发与产业化提供理论参考和技术思路。

1　功能性食品载体分类

功能性食品载体是一类可对维生素、矿物质、益生菌、植物提取物等功能活性成分实现包埋、保护与稳定化, 并将其高效递送至人体作用位点的食品基质或制剂形态[8]。根据原料来源、载体形态、产品导向等不同分类方法, 常见的功能性食品载体可分为以下几类。

1.1　按原料来源分类

1.1.1　植物基载体

植物基功能性载体按原料类别可分为植物蛋白类、植物油脂类、植物多糖类三大类, 见图 1。

大豆蛋白因营养丰富, 蛋白质含量高且富含人体必需的 8 种氨基酸, 已被广泛认定为理想的植物蛋白原料[9], 而豌豆蛋白等亦为常用优质的植物基原料。大豆蛋白与豌豆蛋白具备优良化学特性, 经挤压成型、食品 3D、打印、静电纺丝等加工技术可实现蛋白质改性, 促使蛋白分子链取向改变并重新交联, 进而制成具有类似动物肉结构和质地的植物肉[13], 这类植物肉中的植物蛋白在加工过程中会形成三维网状结构, 可进一步制成胶囊微粒, 实现对功能性成分的包裹和承载[14], 从而实现一物多用。

除上述载体外, 植物油脂具有的疏水性可形成稳定的递送系统, 将活性物质包封, 起到保护、增溶、控释的作用[10,15]。例如, 其中奇亚籽油可借助双层乳液技术包埋核黄素[16]; 菜籽油与椰子油复配可用于负载维生素 E[17]; 菜籽油多重乳剂能高效包埋白藜芦醇[18]; 大豆油构建的 W/O/W 多重乳液递送系统在食品加工、药物靶向递送方面具备重要应用价值[11]。此外, 兼具保健功效与优良载体性能的植物多糖也是功能性食品载体的重要类型, 其制成的微胶囊可在模拟胃肠道环境中保护益生菌、提升其体内存活率[12,19]。

1.1.2　动物基载体

动物基功能性载体按原料类别可分为细胞培育肉载体、乳及乳制品载体、畜肉与蛋类载体、水产动物类载体等 4 大类, 见图 2。

细胞培育肉是通过体外细胞培养技术, 从动物本体获取种子细胞后经体外增殖、分化, 并依托支架材料构建而成的具备肉类质构与营养特征的食品[25]。其作为肉类生

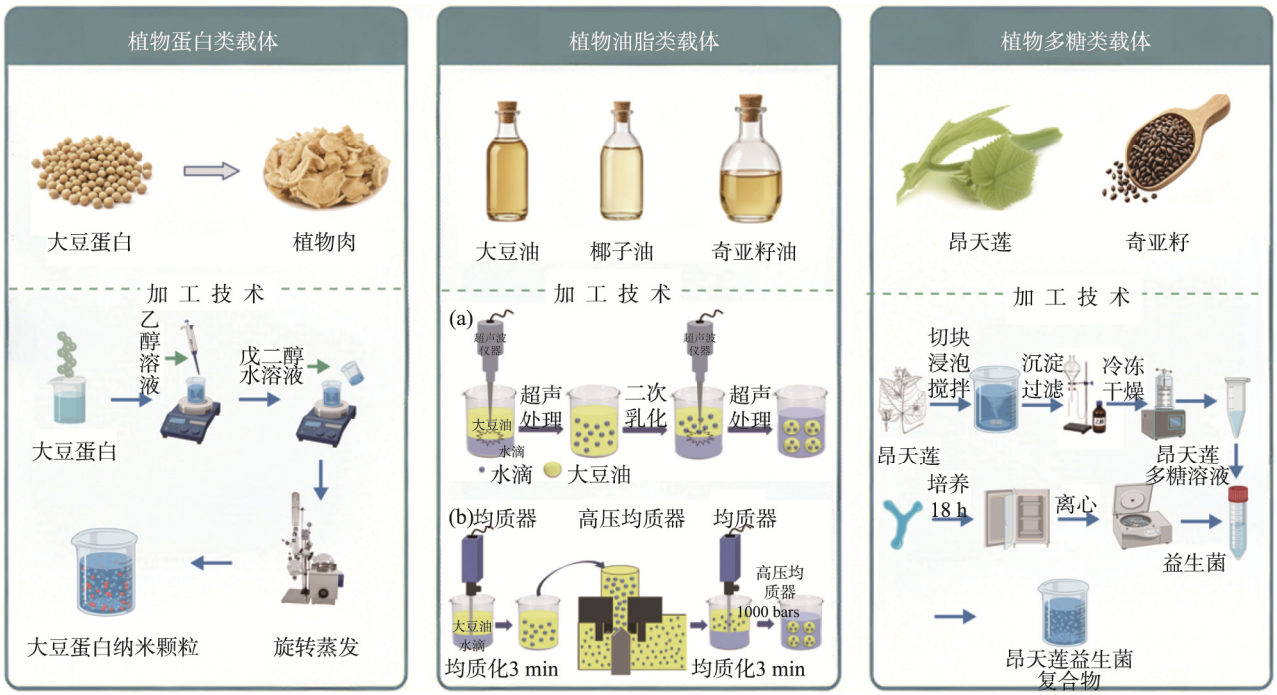


图 1 植物基功能载体按原料分类示意图[9–12]

Fig.1 Schematic diagram of plant-based functional carriers classified by raw materials[9–12]

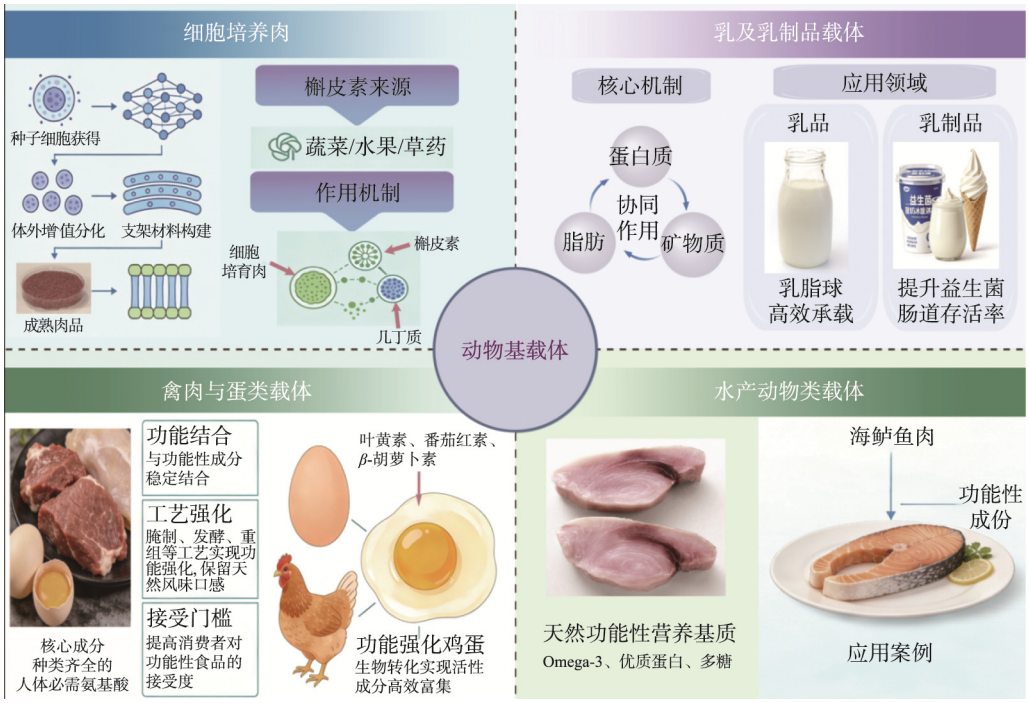


图 2 动物基功能载体按原料分类示意图[20–24]

Fig.2 Schematic diagram of animal-based functional carriers classified by raw materials[20–24]

产的颠覆性技术，亦具备功能性食品优质载体的核心特质。槲皮素作为广泛存在于多种蔬菜、水果及部分草药中的天然类黄酮[20]，在细胞培育肉的功能化与结构优化中展现了重要的应用价值。研究证实，槲皮素与几丁质、海藻酸钠的交联作用可显著增强细胞培育肉支架的机械性能与结构稳定性，以此构建的细胞培育肉在烹饪后能呈现出类似天然牛肉的质地[26]，既实现了蛋白质等基础营养的精准供给与优化，又通过活性成分与支架材料的协同作用达成

靶向功能强化的目标, 为细胞培育肉从营养替代向功能导向的升级提供了关键技术支撑。

此外, 一些动物源食材也是理想的功能性食品载体。例如, 乳及乳制品可依托自身优势, 稳固促进功能性成分吸收, 有效包裹脂溶性物质、益生菌、矿物质与活性蛋白[22,27]。畜禽肉和鸡蛋含有完全蛋白, 能结合功能成分并通过加工技术实现营养强化; 鸡蛋还可用于富集类胡萝卜素[23,28–29]。水产品本身富含 Omega-3 脂肪酸、优质蛋白等营养物质[30], 海鲈鱼肉常被加工为老年人营养强化食品[24]。

1.2　按载体形态分类

1.2.1　固态载体

固态载体根据形态可以分为块状、粉末状、颗粒状、片剂及胶囊 4 类。块状载体以植物肉、细胞培育肉为典型, 拥有三维网状结构, 在模拟肉类口感的同时, 可将功能因子结合于基质、肌肉间隙或肌细胞中。粉末状载体可负载益生菌、维生素等成分并保护其活性, 例如骆驼奶粉富含多种维生素、矿物质及免疫活性蛋白, 长期食用有助于提升人体免疫力[31]。颗粒状载体结构更稳定、应用场景更广, 代表性产品如大豆高钙饼干, 可补充钙质、守护骨骼健康[32]。片剂与胶囊依靠成型结构承载各类活性物质, 淀粉、壳聚糖、海藻磷酸盐等材料用于益生菌微胶囊, 既能提升菌体存活率, 也可作为底物实现缓释增殖[33]。

1.2.2　液体及半固体载体

液体及半固体是另一种常见的功能性食品载体形态。饮料类载体使用便捷, 如椰子水可发酵制成益生菌功能饮品[34]。凝胶与膏状载体如低脂无麸质白酱具备良好的载体应用价值, 可有效保护活性物质[35]。乳液类载体则借助乳化作用稳定包埋功能性成分, 吸收性与防护性二者兼备[36–37]。

1.3　按产品导向分类

功能性食品载体还可以按产品导向分类分为日常饮食类载体和特殊人群载体: 前者是利用天然食物搭配承载功能成分, 使用简单、受众广泛, 酸奶、牛奶都是常见选择。而后者因需结合特殊人群特定的生理特征进行设计, 做到精准递送、安全易消化, 例如婴幼儿采用乳基谷物糊补充营养[38], 老年人选用软烂低升糖食材和孕产妇则优先选择高营养密度食材[39], 慢性病患者则以低升糖指数食物为载体, 并搭配膳食纤维[40]。

2　人造肉作为功能性食品载体的优劣势

人造肉脱离传统动物养殖模式, 基质为人工调控制备的食品基料, 相较于传统动物肉和单一植物功能载体, 作为功能性食品载体具备一定的共性优势, 也是其区别于其他传统食品载体的核心。

2.1　人造肉作为功能性食品载体的优势

植物肉作为功能性食品载体, 核心优势体现在基质与产业的双重适配性, 其以植物蛋白、多糖为核心的凝胶基质可实现载体基底与功能因子的天然协同。同时植物肉产业化成熟, 原料成本低廉, 制备工艺与食品工业通用技术高度兼容, 功能因子负载可与基质制备同步完成, 无需新增复杂工序, 产业化落地门槛低[41]。此外, 其天然低脂低饱和脂肪、无动物源成分的特征, 既贴合现代健康饮食需求, 又能精准适配素食与半素食人群的功能食品消费空白, 且生产过程低碳环保, 契合功能性食品产业绿色可持续的发展趋势, 是现阶段兼具实用性与规模化潜力的功能性食品载体。

细胞培育肉作为功能性食品载体, 核心优势在于依托动物源肌脂组织基质与体外全流程精准调控技术, 实现了功能化的高适配性与高价值性。动物源本体基质与人体及动植物源功能因子均具备极高生物相容性, 可从根源上规避抗营养因子干扰, 大幅提升功能因子的人体生物利用度[42]。还拥有植物肉不具备的功能因子内源性合成能力, 能通过基因编辑或培养基调控, 让细胞自主富集功能因子, 配合三维支架的高负载量与精准缓释特性, 实现功能因子的稳定留存与靶向释放, 且无菌体外培养环境保障了功能因子活性与产品食用安全[43]。同时可精准调控肌脂比例与营养组成, 在保留动物肉天然含有的维生素 B_5、B_6、B_{12}、血红素铁等营养素的基础上, 融合植物肉低脂低饱和脂肪的健康优势, 实现营养素全覆盖与营养功能的双重协同[43], 还能规避植物蛋白致敏性问题, 拓宽功能因子添加范围, 兼顾天然肉类的食用特性与功能化的精准性, 是适配高端精准功能食品, 特医食品研发的优质载体, 兼具健康性与技术前瞻性。

2.2　人造肉作为功能性食品载体的劣势

植物肉中天然缺乏维生素 B_5、维生素 B_6、维生素 B_{12}、维生素 D、血红素铁等关键营养素, 若作为功能性食品载体开发全营养型功能产品, 需在负载靶向功能因子的同时, 额外强化这些短板营养素, 易导致产品配方复杂, 甚至出现功能因子与强化营养素的相互作用, 影响稳定性。作为植物肉的主要成分, 植物蛋白无法自然发展出纤维状特性, 且与真实肉类的质地相去甚远。此外, 豆腥味也显著限制了消费者对植物肉的偏好和接受度。已有研究证明加入细胞培育猪肉后的植物肉风味具有明显改善[44], 实现了植物肉与细胞培育肉二者之间的互补。

细胞培育肉的规模化生产在技术方面面临诸多难点, 不同干细胞的体内发育阶段、定位与多能性存在异质性, 且分离获取的难度不一, 需建立靶向的高效分离纯化体系以获得优质种子细胞[45]。细胞培养肉产业在我国面临着公众认知不足、市场接受度有限的现实困境, 薄弱的市场基础已成为阻碍产业可持续发展的关键。因此, 提升社会接

受度、激活潜在消费需求，是破除消费成见、推动细胞培养肉这一革新性食品技术实现产业化发展的必要路径[46]。

3 人造肉作为功能性载体的适配性

3.1 基础营养适配

植物肉的核心原料以大豆分离蛋白，豌豆蛋白等优质植物蛋白为主，这类蛋白的氨基酸组成与人体需求高度契合，含有人体必需的 8 种氨基酸，同时植物肉从原料层面摒弃了动物肉中含有的饱和脂肪与胆固醇，形成高蛋白，低饱和脂肪的营养特征[47]。该营养组合与减脂塑形的身体需求，心血管健康的维护要求高度适配，具备天然的健康优势。以高血压、高血脂人群为靶向的功能性植物肉肠产品[48]，可依托原料本身无胆固醇的固有特性实现胆固醇控制目标，无需额外添加降血脂功能成分，即可在食用过程中辅助改善人体相关代谢指标，为慢性代谢性疾病人群的膳食干预提供了天然，便捷的食品选择。

此外，植物肉中的膳食纤维，例如植物肉的原料大豆、燕麦、豌豆等本身富含膳食纤维如豌豆皮纤维，燕麦 β-葡聚糖等，在加工过程中可保留或定向添加，也可以解决传统动物肉没有膳食纤维的缺陷[49]。

3.2 目标人群适配

人造肉作为功能性食品载体的核心，凭借其营养可控，低致敏风险等特性，可适配多类核心需求人群(表 1)，从而解决传统饮食中的功能缺口。在心血管健康领域，可满足中老年的营养补充、肥胖人群的控能、上班族心脑血管防护需求；在肠道健康领域，可改善便秘人群、中老年人群及劳动人群的肠道健康；针对骨骼发育领域，可精准强化青少年骨骼关键营养素、改善骨质疏松及减轻骨质增生人群关节负担；同时，其低热量、高饱腹特性可适配体重管理人群，抗氧化成分可满足抗衰护肤需求，人造肉充足营养还可增强全年龄段人群免疫力，为不同人群提供了精准化的健康膳食载体。

表 1 人造肉对目标人群的适配

Table1 Suitability of artificial meat for the target population

功能性载体类型	目标人群	适配性	文献来源
心血管健康类	中老年人群	细胞培育肉作为功能性食品载体提供与动物肉功能性载体等效的营养成分，如矿物质等易缺乏的营养素，满足中老年人群的饮食理念	[50]
	肥胖人群	植物肉中的蛋白与膳食纤维可以提升饱腹感，较同等热量动物肉高 30%	[51]
	上班人群	摄入人造肉的关键在于提供基础营养，通过特定活性成分保护心脑血管功能坚持健康的植物饮食可使中风风险降低	[52]
肠道健康类	便秘人群	植物肉具有调节肠道微生物群和转基因生物群方面的作用，且还具有抗炎作用和缓解肠道疾病症状的功能，从而可以促进肠道健康	[53]
	中老年人群	细胞培育肉中的植物纤维支架可以解决便秘与菌群失衡，优质的植物蛋白还可以降低消化负担，植物活性成分亦可辅助抗炎护屏障	[54]
	劳动人群	植物肉中的高纤维可解决菌群失衡，缓解便秘	[55]
骨骼发育类	青少年人群	植物肉可精准强化骨骼关键营养素，符合儿童青少年饮食偏好的形态优势	[56]
	骨质疏松人群	植物肉中的植物蛋白能补充钙质，抑制骨质流失，预防和改善骨质疏松	[57]
	骨质增生人群	人造肉契合骨质增生人群的饮食需求，低热量、高纤维，助力控制体重以减轻关节负担，提供优质蛋白，支持软骨修复与关节保护	[58]
体重管理类	超重人群	植物肉具有低热量、饱腹感强，改善体内脂肪代谢等优点，从而达到减肥效果	[59]
	健身人群	植物肉中蛋白质量优，既可保证营养摄入，又可控制热量，食用后无多余负担	[60]
抗氧化抗衰老类	高危工作人群	植物肉中的许多成分具有天然抗氧化、抗炎，对抗环境诱导损伤的效果	[61]
	注重皮肤养护人群	植物肉中的植物蛋白可以调节油脂分泌，减少毒素摄入，提供皮肤所需营养	[62]
促进代谢类	有代谢综合征风险人群	植物肉消化吸收速度相对较慢，有助于控制餐后血糖水平	[63]
	减重人群	植物肉的能量密度较低，有助于减少热量摄入，控制体重	[64]
增强免疫类	中老年人	老年人摄入充足的植物蛋白，有助于维持免疫系统的正常功能，增强免疫力	[65]
	儿童	植物肉中富含类黄酮类化合物、多酚化合物等抗氧化物质，能够清除体内自由基，减少氧化应激和炎症反应	[66]

4　人造肉作为功能性食品载体的实际应用案例

人造肉在当代食品工业中的角色已不仅限于传统肉类的简单替代，其功能正逐渐扩展至营养与健康领域。通过有针对性地添加各类功能性成分，人造肉产品日益成为功能性食品载体。从功能载体类型的角度出发，当前的研究与应用亦可主要归纳为以下 7 个方向：心血管健康类功能性食品载体、肠道健康类功能性食品载体、体重管理类功能性食品载体、抗氧化抗衰老类功能性食品载体、骨骼发育类功能性食品载体、增强免疫类功能性食品载体、促进代谢类功能性食品载体。

4.1　心血管健康类功能性食品载体

人造肉凭借高蛋白质、低饱和脂肪的核心营养特征，成为心血管健康类功能性食品的重要载体。在植物肉方面，采用绿豆、马豆、豇豆蛋白浓缩物制备油炸植物肉丸以作为传统油炸肉丸的健康替代品，对降低膳食中饱和脂肪摄入量具有积极作用，不仅利用了 3 种豆类蛋白的协同互补作用，兼具高蛋白、低脂肪的优良营养特性，且有效规避了单一植物蛋白在功能性或感官品质上的局限，既能满足消费者对肉类风味的需求，又能显著降低膳食中饱和脂肪与胆固醇的摄入量[67]。而细胞培育肉可以通过成肌细胞与脂肪前体细胞共培养，因此可以精准调控肌内脂肪的含量与分布，避免大块脂肪沉积，从而降低心血管疾病风险，提升心血管健康适配性。

4.2　肠道健康类功能性食品载体

肠道健康改善是人造肉功能性开发的重要方向，植物肉与细胞培育肉分别通过差异化技术路径实现肠道健康强化，见图 3。

当前植物肉产品多以膳食纤维定向复配改性为创新技术路径，通过引入菊苣纤维、燕麦纤维、车前子壳纤维可溶性与不可溶性膳食纤维，在改良产品质构特性的同时，赋予产品肠道调节功能，可有效促进肠道蠕动、平缓餐后血糖波动，实现产品功能化升级[68]。采用膳食纤维浓缩物实现低热量、低糖、高膳食纤维的营养升级，弥补传统大豆蛋白植物肉膳食纤维不足、热量与碳水配比欠佳的短板；依托膳食纤维的生理作用，植物基香肠的制作配方里，加入卵叶车前子纤维，可起到促进肠道蠕动、加强肠道消化能力的作用[69]。不同于植物肉外源添加纤维的模式，细胞培育肉则依托原料调控与结构设计的优势，实现了支架材料与功能组分的一体化创新，以莲花纤维为骨架生产的细胞培育肉[70]，在食用后可同步增加膳食纤维摄入，进一步促进肠道蠕动，显著提升肠道健康水平，显示了作为肠道功能载体的独特潜力。

4.3　骨骼发育类功能性食品载体

人造肉在作为功能性食品载体时，可通过提高关键矿物质的生物利用度，针对性地对人体的骨骼发育进行营养强化。豆科类植物是优质植物肉原料，可显著提升矿物质吸收利用率、促进骨骼发育，为开发骨骼发育类功能性植物肉提供了重要依据[71]。

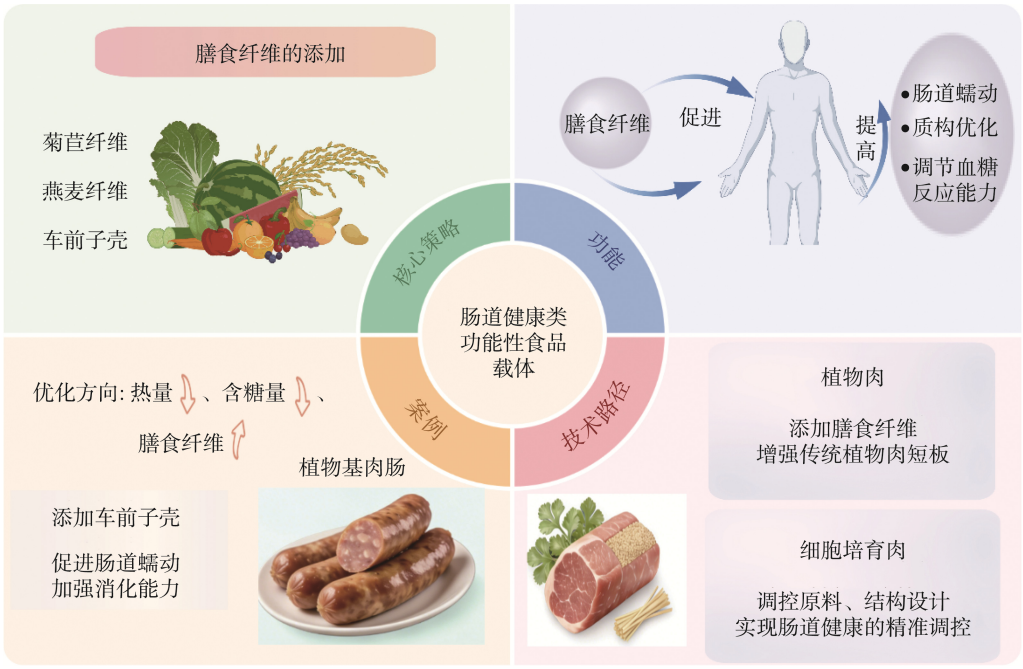


图 3　肠道健康功能性食品载体示意图

Fig.3　Schematicdiagram of functional food carriers for intestinal health

4.4 体重管理类功能性食品载体

多项人体临床试验表明，添加植物源功能性成分的体重管理食品能够有效帮助人体预防肥胖，在食品生产中应用这类新型植物源成分，既有助于实现膳食均衡，也能对体重管理发挥积极作用[72]。通过临床实验进一步证实，植物肉餐食相较于牛肉餐食，能在不降低饱腹感的前提下显著减少人体的能量摄入，可通过增强饱腹感实现体重管控，充分说明植物肉具备成为体重管理类功能性食品载体的重要价值[73]。

4.5 抗氧化抗衰老类功能性食品载体

抗氧化与抗衰老功能的定向开发，是植物肉突破传统食品属性，拓展功能性载体应用场景的核心创新方向。这类载体具备的抗氧化活性，不仅可通过清除体内自由基延缓机体衰老进程，更能降低癌症、心血管疾病等氧化应激相关慢性病的发病风险。现阶段研究已形成了天然活性成分与载体搭载的模式，通过复配的小麦低聚肽与葡萄籽提取物[74]、微胶囊包埋花青素、定向添加微藻[75]、挖掘豆类自身多酚及肽类等天然抗氧化组分，并结合 3D 打印、配方优化等技术手段，成功开发多款高抗氧化活性的植物肉产品，充分验证了植物肉在搭载抗氧化功能成分、实现膳食抗氧化干预方面的可行性与应用价值。

4.6 促进代谢类功能性食品载体

根据 Filip 等[76]进行的植物肉与传统肉类营养质量比较研究，通过分析产品能量值、饱和脂肪及膳食纤维等关键代谢相关参数，发现植物肉具有显著较低的饱和脂肪含量和较高的膳食纤维水平，这些特性有助于调节脂质代谢，从而有利于促进人体代谢健康，因此植物肉可作为促进代谢类功能性食品的理想载体。

4.7 增强免疫类功能性食品载体

植物肉中所含的多种生物活性成分具有调节免疫反应的潜力。Chatterjee 等[77]研究了大豆生物活性肽的功能特性，发现其能有效调节免疫反应，应用于豆腐、素肉等植物肉产品中，有助于增强消费者免疫力。

5 人造肉安全性与质量控制

人造肉作为传统肉类的替代产品，在使用安全方面有显著优势，其可控的工业化生产环境，可以有效地规避传统畜牧业中动物肉的沙门氏菌，以及各类动物瘟疫等人畜共患病的传播风险，且生产过程无需使用抗生素，同时能通过营养调控，降低食品的饱和脂肪与胆固醇含量[78]。但现在的两类主流人造肉均存在特异性安全隐患。植物蛋白肉的主要原料，如大豆分离蛋白含有胰蛋白酶抑制剂和低聚糖，同为主要原料的豆科植物种子存在植酸以及其他多种抗营养因子。这些成分会抑制蛋白质的消化吸收，还可能引起腹胀等不良反应[79]。且原料种植与贮藏过程中可能存在农药残留与黄曲霉素感染[80]。大豆蛋白和小麦蛋白以及花生蛋白还易引起人体过敏[81]。细胞培养肉的安全风险则更具生物特殊性。有专家认为人造肉体外培养步骤繁多，每一步都有被污染的可能，所以长期使用的潜在影响仍需进一步验证。

针对人造肉的安全风险，可以从原料、加工、最终产品及监管的全链条质量体系展开研究。原料端，植物蛋白肉可采用低致敏原料如豌豆蛋白等替代大豆蛋白[82]。同时检测并控制农药残留与真菌毒素含量。细胞培养肉则需严格管控种子细胞的分离、储存、加工环节。加工过程中，植物蛋白肉可对工艺进行优化，如采用乳化凝胶技术降低加热温度以减少有害物质产生，以及通过包埋铁元素、添加天然抗氧化剂抑制蛋白与油脂氧化[83]。细胞培养肉需实施全流程无菌操作，建立生物反应器生产的标准化参数，实时监控细胞增殖与分化过程。最终产品环节，至今尚无相应的统一的检测方法和产品国家标准发布，相关规则的完善与统一或成为未来需重点关注的趋势[84]。

6 结束语

6.1 植物肉与细胞培育肉发展瓶颈

植物肉存在先天营养缺陷，例如其天然缺失维生素 B_5、B_6、B_{12}、维生素 D 等核心营养素，若作为载体开发全营养功能性食品，额外强化营养素易造成配方复杂化，还可能引发功能因子与强化营养素的相互作用，降低产品稳定性[78]。

其次，植物蛋白原料本身由于不具备天然纤维结构，成品普遍存在干柴发紧、咀嚼感失真等质构短板，与动物肉的感官质感差距悬殊；加之大豆、豌豆等基底蛋白自带醛类、醇类、皂苷类物质所形成的浓重豆腥味，不仅严重破坏食用适口性[79]。质构失真与风味缺陷的双重感官短板相互叠加，极大降低了产品的食用体验，严重制约了消费者的接受度与日常食用偏好。

而细胞培育肉始终面临着技术规模化难以突破的现实困境。作为生产核心原料的种子细胞，其获取环节存在显著短板，不同来源的干细胞分离纯化难度差异极大，目前行业内仍缺乏精准、高效、标准化的靶向分离纯化体系；不仅细胞提取效率低、纯度难以保证，还极易出现细胞活性受损、增殖分化能力退化等问题，无法稳定获得优质的适合大规模扩增的种子细胞，严重制约了细胞培育肉产业化进程的推进[80]。

更重要的是，目前我国消费者对人造肉的整体认知较为匮乏，多数消费者对生产工艺、食品安全属性及营养特性方面缺乏科学全面的了解，直接导致市场接受度长期处于偏低水平。使得产业化难以转化为市场化，严重延缓

了产业从技术研发走向商业化落地的进程。

6.2　植物肉与细胞培育肉发展优化路径

针对上述问题, 提出以下发展优化路径: (1)植物肉可以通过营养强化来破解先天营养缺陷的短板, 通过微胶囊包埋、靶向递送技术实现营养素与功能因子的稳定负载, 规避组分间相互作用, 简化配方并保障营养稳定性[81]。(2)植物肉多以大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦谷蛋白等植物蛋白为核心原料, 通过高水分挤压、3D 食品打印等结构化加工工艺, 对植物蛋白进行分子重排与空间架构重塑, 仿生构建出类似动物肌肉的纤维状网络结构, 以此模拟真实肉类的纤维肌理、弹韧口感与咀嚼质构[82]; 同时结合微生物发酵、定向酶解等生物改性技术, 降解植物蛋白中的醛类、皂苷类异味前体, 有效去除豆腥味等不良风味[83], 并生成游离氨基酸、小分子肽等滋味物质, 优化产品基础风味与适口性, 从而在感官层面不断贴近传统肉类的食用体验。而细胞培育肉在技术层面可通过精准筛选、实现定向培育优质种子细胞, 搭建标准化种子细胞库以筑牢生产源头供给基础[84]; 同时着力突破高密度生物反应器规模化扩增、无血清培养基低成本适配、流体剪切力精准调控、可食用支架仿生构建以及肌细胞与脂肪细胞协同共培养等关键核心技术, 持续优化生产工艺、提升培养效率、严控产品均一性与品质稳定性, 有效降低产业化生产成本, 进而全面夯实工业化量产的技术根基[63]。(3)面向市场方面开展全方位科普与正向引导, 扭转消费者对人造肉固有的偏见, 重点传递健康、绿色可持续的核心卖点, 精准触达目标消费群体, 激发潜在消费需求[85]; 同时推进植物肉与细胞培育肉的复合应用, 借助植物肉成熟的产业化基础降低生产成本、提升产品适口性, 以互补型产品形态快速切入市场, 加速革新性食品技术的产业化落地。

参考文献

[1] 崔世帅, 马晓杰, 郑一晨, 等. 植物蛋白基乳液凝胶的制备及脂质替代研究进展[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 430–441.
Cui Shishuai, Ma Xiaojie, Zheng Yichen, et al. Research progress on plant protein-based emulsion gels and lipid substitution [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(7): 430–441.

[2] Stanco M, Uliano A, Nazzaro C. Exploring Italian consumers' perceptions of cultivated meat: barriers, drivers, and future prospects [J]. Nutrients, 2025, 17(19): 3061.

[3] 蒋依伶, 窦超然, 胡韵璇, 等. 植物基食品开发与市场应用进展[J]. 食品工业, 2025, 46(9): 255–261.
Jiang Yiling, Dou Chaoran, Hu Yunxuan, et al. Progress in the development and market application of plant-based foods [J]. The Food Industry, 2025, 46(9): 255–261.

[4] Kim B, Ko D, Choi S H, et al. Bovine muscle satellite cells in calves and cattle: a comparative study of cellular and genetic characteristics for cultivated meat production [J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100545.

[5] 孙保剑, 王笛, 蔡中胜, 等. 食品挤压技术在植物肉中的应用浅析[J]. 食品工业, 2024, 45(1): 221–224.
Sun Baojian, Wang Di, Cai Zhongsheng, et al. Application of food extrusion technology in plant meat [J]. The Food Industry, 2024, 45(1): 221–224.

[6] Maseko K H, Regnier T, Bartels P, et al. Mushroom mycelia as sustainable alternative proteins for the production of hybrid cell-cultured meat: a review [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(2): e70060.

[7] Pareti M, Guo J S, Yin J J, et al. Exploring Chinese consumers' perception and potential acceptance of cell-cultured meat and plant-based meat: a focus group study and content analysis [J]. Foods, 2025, 14(9): 1446.

[8] Li Xiquan, Song Yao, Yang Xiyue, et al. Multi-functional reinforced food packaging using delivery carriers: a comprehensive review of preparation, properties, and applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(6): e70050.

[9] 刘洪霞, 张学彪, 曲春红, 等. 植物肉产业发展趋势、国内外差距及政策建议[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 138–145.
Liu Hongxia, Zhang Xuebiao, Qu Chunhong, et al. Development trend of plant-based meat industry, domestic and foreign gaps and policy suggestions [J]. Science and Technologyof Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 138–145.

[10] Zeng Zhen, Deng Siqi, Liu Yang, et al. Targeting transportation of curcumin by soybean lipophilic protein nano emulsion: improving its bioaccessibility and regulating intestinal microorganisms in mice [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 142: 108781.

[11] Ghasemi H, Darjani S, Mazloomi H, et al. Preparation of stable multiple emulsions using food-grade emulsifiers: evaluating the effects of emulsifier concentration, W/O phase ratio, and emulsification process [J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(12): 2002.

[12] Roy A, Patra M, Sarkhel S, et al. Fucose-containing *Abromaaugusta* mucilage hydrogel as a potential probiotic carrier with prebiotic function [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132941.

[13] 陈思好, 赵芬, 李赫, 等. 植物基肉制品研究进展: 原料功能特性、结构重组技术、安全评价体系与未来挑战[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 125–135.
Chen Sihao, Zhao Fen, Li He, et al. Research progress on plant-based meat analogs: raw materialproperties, restructuringtechniques, safety evaluation systems, and future challenges [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 125–135.

[14] 彭梓琪, 廖宁, 刘昆仑, 等. 基于复合法的大豆蛋白纳米颗粒载体的制备与应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(22): 459–467.
Peng Ziqi, Liao Ning, Liu Kunlun, et al. Advancesinthe preparation and application of soy protein nanoparticle carriers based on the composite method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(22): 459–467.

[15] 孙情情, 谭文, 魏长庆, 等. 功能性植物油脂微胶囊制备及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 220–229.
Sun Qingqing, Tan Wen, Wei Changqing, et al. Preparation of functional vegetable oil microcapsules andtheir application in food industry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 220–229.

[16] Bou R, Cofrades S, Jiménez-Colmenero F. Physicochemical properties and riboflavin encapsulation in double emulsions with different lipid

sources [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 621–628.

[17] OliveiraN L, Espinal-Ruiz M, NevesI C O, et al. Evaluation of *α*-tocopherol microencapsulation stability with either coconut oil or canola oil cores in Greek yogurt and butter [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100277.

[18] Hemar Y, Cheng L J, Oliver C M, et al. Encapsulation of resveratrol using water-in-oil-in-water double emulsions [J]. Food Biophysics, 2010, 5(2): 120–127.

[19] Santos Fernandes S, Da Silva Cardoso P, Egea M B, et al. *Chia* mucilage carrier systems: a review of emulsion, encapsulation, and coating and film strategies [J]. Food Research International, 2023, 172: 113125.

[20] 林晓霞, 朱莉, 马静怡, 等. 槲皮素杜仲多糖纳米颗粒的表征、抗氧化及抗炎活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 126–134.
Lin Xiaoxia, Zhu Li, Ma Jingyi, et al. Characterization, antioxidant and anti-inflammatory activities of quercetin-*Eucommiaulmoides* polysaccharide nanoparticles [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 126–134.

[21] Lamothe S, Britten M, Gentès M C. Effects of partial substitution of milk fat for canola oil or linseed oil on the oxidative stability and volatile profile of high-protein dairy beverages [J]. International Journal of Dairy Technology, 2025, 78(4): e70066.

[22] Karaca O B, KhaledAlbayatı A A, Ağçam E, et al. Development of functional probiotic yogurt with prickly pear cladode pulp supplementation [J]. Food Bioscience, 2025, 69: 107018.

[23] Chen Xia, Yan Zhixun, Zhang Bing, et al. Lutein and astaxanthin supplementation induce competitive inhibition of carotenoid deposition in egg yolk [J]. Animals, 2025, 15(13): 1869.

[24] 陈茜, 吴燕燕, 暴伊芮, 等. 适于老龄人群的海鲈鱼滑营养与贮藏品质分析[J]. 渔业科学进展, 2025, 46(5): 69–84.
Chen Qian, Wu Yanyan, Bao Yirui, et al. Nutritional and storage quality analysis of sea bass (*Lateolabraxjaponicus*) paste suitable for the aging population [J]. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(5): 69–84.

[25] 王守伟, 李石磊, 李莹莹, 等. 人造肉分类与命名分析及规范建议[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 310–316.
Wang Shouwei, Li Shilei, Li Yingying, et al. Classification of artificial meat and suggestion sonnormalization of nomenclature for related terms [J]. Food Science, 2020, 41(11): 310–316.

[26] Wang Yafang, Wang Shancan, Zhuang Di, et al. Quercetin-enriched animal-free scaffolds for promoted cell proliferation and differentiation in cultured meat production [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141622.

[27] Zhao Yanyan, Li Xianping, Liu Yanpin, et al. High-calcium milk improves osteoporosis in postmenopausal women by regulating intestinal flora and steroid hormone biosynthesis [J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1607968.

[28] Zhang Jiajia, Ma Yanqiu. Formation mechanism and inhibition methods of frozen egg yolk gelation: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 148: 104491.

[29] Dansou D M, Zhang H Y, Yu Y N, et al. Carotenoid enrichment in eggs: from biochemistry perspective [J]. Animal Nutrition, 2023, 14: 315–333.

[30] Zhou Luo, Su Yingbing, Yang Daiqin, et al. Effects of two culture modes on muscular nutrition content and volatile flavor in Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris*) [J]. Biology, 2025, 14(6): 694.

[31] 赵静. 基于Raman-NIR光谱融合的粉末状食品掺伪检测研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
Zhao Jing. Research on powder food adulteration detection based on Raman NIR spectral fusion [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.

[32] 王熙, 姜文, 代朋, 等. 功能性饼干的有效成分及保健功能[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(5): 84–86.
Wang Xi, Jiang Wen, Dai Peng, et al. Activeingredients and health function of functional biscuits [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2024, 30(5): 84–86.

[33] Xie Aijun, Zhao Shanshan, Liu Zifei, et al. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: a review on carrier types and encapsulation techniques [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124784.

[34] Santos B N, Pereira A L F, Fonteles T V, et al. Development and evaluation of potential probiotic coconut water beverages: fermentation, storage, and consumer perception [J]. Processes, 2025, 13(8): 2554.

[35] Moin A, Ali T M, Hasnain A. Enhancing functional properties of rice starches through hydroxypropylation for development of reduced-fat white sauces [J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138860.

[36] He Jiangxing, Wu Xiaolin, Xie Youfa, et al. Capsaicin encapsulated in W/O/W double emulsions fabricated *via* ethanol-induced pectin gelling: improvement of bioaccessibility and reduction of irritation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 235: 123899.

[37] Ahmad R, Singh A, Purba A, et al. Novel rutin-casein composites as functional dry ingredients for the delivery of high concentration of rutin in dairy beverages: *in vitro* bioaccessibility, cytotoxicity, absorption, and intestinal barrier integrity [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 170: 111735.

[38] 曹家宝. 冲调婴儿复配营养米粉的研制及品质评价[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020: 1.
Cao Jiabao. Development and quality evaluation of infant compound nutritional rice noodles [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020: 1.

[39] 李炳庆, 苏珊珊. 特殊人群膳食需求分析与定制化营养方案[J]. 中外食品工业, 2025(11): 70–72.
Li Bingqing, Su Shanshan. Analysis of dietary demand of special population and customized nutrition scheme [J]. Global Food Industry, 2025(11): 70–72.

[40] Soh B X P, Smith N W, Von Hurst P R, et al. Evaluation of protein adequacy from plant-based dietary scenarios in simulation studies: a narrative review [J]. The Journal of Nutrition, 2024, 154(2): 300–313.

[41] 周景文, 张国强, 赵鑫锐, 等. 未来食品的发展: 植物蛋白肉与细胞培养肉[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(10): 1–8.
Zhou Jingwen, Zhang Guoqiang, Zhao Xinrui, et al. Future offood: plant-based and cell-cultured meat [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(10): 1–8.

[42] Takahashi H, Tanaka R I, Yoshida A, et al. Cultivated meat fabrication: a review of the latest cell biology, bioprocess technology, and tissue engineering [J]. Trends in Food Science & Technology, 2026, 168: 105505.

[43] 李鑫, 彭常安, 许月明, 等. 细胞支架与组织成型技术在细胞培养肉中的应用[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(2): 52–60.
Li Xin, Peng Changan, Xu Yueming, et al. Application of cell scaffold and tissue forming technology in cultured meat [J]. Journal of Wuhan PolytechnicUniversity, 2023, 42(2): 52–60.

[44] Jiang Hongwei, Meng Ziqing, Ding Shijie, et al. Effect of cell-cultured pork biomass on the texture and flavor characteristics of plant-based meat analogues [J]. Food Bioscience, 2025, 74: 107875.

[45] 孙孟君, 熊昌武, 陈颖雷, 等. 细胞培育肉研究现状、存在问题及发展对策浅析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(4): 401–408.
Sun Mengjun, Xiong Changwu, Chen Yinglei, et al. Analysis of research status, existing problems, and development countermeasures of cell-cultured meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 401–408.

[46] 关欣, 周景文, 堵国成, 等. 细胞培养肉产业技术发展态势及建议[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 251–262.
Guan Xin, Zhou Jingwen, Du Guocheng, et al. Technological trend and suggestions forcultured meat industry [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 251–262.

[47] Rout S, Sowmya R S, Srivastav P P. A review on development of plant-based meat analogues as future sustainable food [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(1): 481–487.

[48] Gréa C, Dittmann A, Wolff D, et al. Comparison of the declared nutrient content of plant-based meat substitutes and corresponding meat products and sausages in Germany [J]. Nutrients, 2023, 15(18): 3864.

[49] Sikora D, Rzymski P. Assessment of the potential nutritional value of cell-cultured chicken meat in light of European dietary recommendations [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 135: 106663.

[50] Anjom-Shoae J, Feinle-Bisset C, Horowitz M. Impacts of dietary animal and plant protein on weight and glycemic control in health, obesity and type 2 diabetes: friend or foe? [J]. Frontiers in Endocrinology, 2024, 15: 1412182.

[51] Baden M Y, Shan Z L, Wang F L, et al. Quality of plant-based diet and risk of total, ischemic, and hemorrhagic stroke [J]. Neurology, 2021, 96(15): e1940–e1953.

[52] Jia Jia, Dell'Olio A, Izquierdo-Sandoval D, et al. Exploiting the interactions between plant proteins and gut microbiota to promote intestinal health [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104749.

[53] Li Xinxin, Sim D, Wang Yushu, et al. Fiber-based biomaterial scaffolds for cell support towards the production of cultivated meat [J]. Acta Biomaterialia, 2025, 191: 292–307.

[54] Wu Qiming, Kan Juntao, Cui Zhengying, et al. Understanding the nutritional benefits through plant proteins-probiotics interactions: mechanisms, challenges, and perspectives [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(18): 3569–3587.

[55] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 338–345, 350.
Zeng Yan, Hao Xuecai, Dong Ting, et al. Research progress on raw material development, processing technology and nutritional properties of plant based meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 338–345, 350.

[56] Hu Junwei, Li Yi, Wang Zheng, et al. Association of plant-based dietary patterns with the risk of osteoporosis in community-dwelling adults over 60 years: a cross-sectional study [J]. Osteoporosis International, 2023, 34(5): 915–923.

[57] Hsu E. Plant-based diets and bone health: sorting through the evidence [J]. Current Opinion in Endocrinology, Diabetes, and Obesity, 2020, 27(4): 248–252.

[58] Cioffi I, Martini D, Del Bo'C, et al. Lentils based pasta affect satiation, satiety and food intake in healthy volunteers [J]. Current Research in Food Science, 2024, 9: 100858.

[59] Kumar M, Tomar M, Punia S, et al. Plant-based proteins and their multifaceted industrial applications [J]. LWT, 2022, 154: 112620.

[60] Ashaolu T J, Zarei M, Agrawal H, et al. A critical review on immunomodulatory peptides from plant sources; action mechanisms and recent advances [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(20): 7220–7236.

[61] Tomas M, Günal-Köroğlu D, Kamiloglu S, et al. The state of the art in anti-aging: plant-based phytochemicals for skin care [J]. Immunity & Ageing, 2025, 22(1): 5.

[62] Lemos G O, Torrinhas R S, Waitzberg D L. Nutrients, physical activity, and mitochondrial dysfunction in the setting of metabolic syndrome [J]. Nutrients, 2023, 15(5): 1217.

[63] Yang Yuyang, Zheng Yixin, Ma Wenping, et al. Meat and plant-based meat analogs: nutritional profile and *in vitro* digestion comparison [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108886.

[64] Jiang Linlin, Zhang Guoqing, Li Ye, et al. Potential application of plant-based functional foods in the development of immune boosters [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 637782.

[65] Kowalczewski P Ł, Gumienna M, Jeżowski P, et al. Potato protein-based vegan Burgers: discovering the health-promoting benefits and impact on the intestinal microbiome [J]. Nutrients, 2026, 18(1): 160.

[66] Shen Nan, Wang Tongfei, Gan Quan, et al. Plant flavonoids: classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132531.

[67] Penchalaraju M, Bosco S J D. Leveraging Indian pulses for plant-based meat: functional properties and development of meatball analogues [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(9): 5869–5877.

[68] Twarogowska A, Van Droogenbroeck B, Fraeye I. Application of Belgian endive (*Cichoriumintybus* var. *foliosum*) dietary fiber concentrate to improve nutritional value and functional properties of plant-based Burgers [J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101825.

[69] Noguerol A T, Larrea V, Pagán M J. The effect of *Psyllium* (*Plantagoovata* Forsk) fibres on the mechanical and physicochemical characteristics of plant-based sausages [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(10): 2483–2496.

[70] Wu Yueren, Li Yajun, Yang Qing, et al. Lotus fiber-derived scaffolds for enhanced cultured meat production: quality and sustainability [J]. Bioactive Materials, 2025, 51: 807–824.

[71] Pandey D K, Singh S, Dubey S K, et al. Nutrient profiling of *Lablab* bean (*Lablabpurpureus*) from north-eastern India: a potential legume for plant-based meat alternatives [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 119: 105252.

[72] Stabnikova O, Paredes-López O. Plant materials for the production of functional foods for weight management and obesity prevention [J]. Current Nutrition & Food Science, 2024, 20(4): 401–422.

[73] Muhlhausler B S, Belobrajdic D, Wymond B, et al. Defining the satiety characteristics of plant-based mince in comparison to standard beef mince [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2023, 82(OCE2): E173.

[74] 蒲志强, 顾铭, 张丽丽, 等. 基于 3D 打印技术开发功能性植物基人造肉[C]//中国营养学会, 中国疾病预防控制中心营养与健康所, 农业农村部食物与营养发展研究所, 中国科学院上海营养与健康研究所, 华中科技大学公共卫生学院. 中国营养学会第十五届全国营养科学大会论文汇编, 2022: 833.
Pu Zhiqiang, Gu Ming, Zhang Lili, et al. Development of functional plant-based artificial meat based on 3D printing technology [C]//Chinese Nutrition Society; Institute of Nutrition and Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention; Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences; School of Public Health, Huazhong University of Science and Technology. Proceedings of the 15th National Nutrition Science Congress of Chinese Nutrition Society, 2022: 833.

[75] Szpicer A, Onopiuk A, Barczak M, et al. The optimization of a gluten-free and soy-free plant-based meat analogue recipe enriched with anthocyanins microcapsules [J]. LWT, 2022, 168: 113849.

[76] Filip C, Kovács B, Casian T, et al. Comparative analysis of the nutritional quality of plant-based and traditional meat products across European markets [J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1603600.

[77] Chatterjee C, Gleddie S, Xiao C W. Soybean bioactive peptides and their functional properties [J]. Nutrients, 2018, 10(9): 1211.

[78] Neufingerl N, Eilander A. Nutrient intake and status in adults consuming plant-based diets compared to meat-eaters: a systematic review [J]. Nutrients, 2021, 14(1): 29.

[79] Ahmad M, Qureshi S, Akbar M H, et al. Plant-based meat alternatives: compositional analysis, current development and challenges [J]. Applied Food Research, 2022, 2(2): 100154.

[80] Gomez Romero S, Spielmann I, Boyle N. Genome-scale metabolic models in cultivated meat: advances, challenges, and future directions [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2025, 94: 103313.

[81] Liu Xiaoyuan, Deng Peng, Yang Tingting, et al. Effect of lipophilic proteins on the bean flavor formation: lipids oxidation and protein modification [J]. Food Biophysics, 2025, 20(4): 190.

[82] Tao Anqi, Zhang Hongyu, Duan Junnan, et al. Mechanism and application of fermentation to remove beany flavor from plant-based meat analogs: a mini review [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1070773.

[83] 郑妍. 植物肉面临的挑战及发展前景[J]. 粮食与食品工业, 2024, 31(3): 38–42.
Zheng Yan. Challenges and prospects of vegetarian meat [J]. Cereal& Food Industry, 2024, 31(3): 38–42.

[84] 杨峰, 李莹莹, 王守伟, 等. 细胞培育肉种子细胞永生化诱导研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(12): 52–62.
Yang Feng, Li Yingying, Wang Shouwei, et al. Research on immortalization induction of cellculturedmeatseedcells [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(12): 52–62.

[85] Xin Guan, Lei Qingzi, Yan Qiyuan, et al. Trends and ideas in technology, regulation and public acceptance of cultured meat [J]. Future Foods, 2021, 3: 100032.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)