

3D 打印技术在人造肉领域的应用及进展

施忠芬¹ 杨子姗¹ 陈红艳¹ 田素梅²

(1. 云南农业职业技术学院, 云南 昆明 650212; 2. 德宏师范学院, 云南 德宏 678400)

摘要: 随着全球人口增长和资源环境压力加剧, 传统肉类生产模式面临严峻挑战, 人造肉作为一种可持续的肉类替代品, 近年来受到广泛关注。食品 3D 打印技术作为一种精准构建食品结构的增材制造技术, 在人造肉领域展现出巨大的应用潜力。文章综述了食品 3D 打印技术在人造肉制造中的应用进展, 重点介绍了基于植物蛋白和细胞培养的人造肉 3D 打印技术, 分析了食品 3D 打印技术在人造肉制造中面临的挑战, 包括打印材料的开发与优化、消费者需求与感官特性和人造肉 3D 打印技术的应用局限, 并展望了食品 3D 打印技术对推动人造肉产业发展的重要作用。

关键词: 3D 打印; 人造肉; 植物蛋白; 细胞培养; 感官品质

Artificial meat 3D printing technology and application progress

SHI Zhongfen¹ YANG Zishan¹ CHEN Hongyan¹ TIAN Sumei²

(1. Yunnan Vocational College of Agriculture, Kunming, Yunnan 650212, China;

2. Dehong Normal University, Dehong, Yunnan 678400, China)

Abstract: With the global population growth and increasing pressure on resources and the environment, traditional meat production methods face severe challenges. In contrast, artificial meat, a sustainable meat substitute, has received widespread attention in recent years. As an additive manufacturing technology for the precision construction of food structures, food 3D printing technology has shown great application potential in artificial meat. This paper reviews the application progress of food 3D printing technology in artificial meat manufacturing, focusing on artificial meat 3D printing technology based on plant protein and cell culture. Additionally, this paper analyzes the challenges faced by food 3D printing technology in artificial meat manufacturing, including the development and optimization of printing materials, consumer demand and sensory characteristics, and the application limitations of artificial meat 3D printing technology, with an outlook for food 3D printing technology in promoting the artificial meat industry development.

Keywords: 3D printing; artificial meat; plant protein; cell culture; sensory quality

随着全球人口的持续增长和生活水平的不断提升, 肉类消费需求呈现稳步上升的趋势。传统畜牧业作为肉类供应的主导模式, 在特定环境和场景中面临着资源消耗巨大、环境污染严重及动物福利伦理争议等挑战^[1]。据联合国粮农组织(FAO)统计, 畜牧业温室气体排放量约占全球总排放量的 14.5%, 已成为气候变化的重要驱动因素之一^[2-3]。此外, 在特殊环境作业、极端条件任务以及对食品安全和营养健康有特定要求的消费群体中, 对传统肉类生产方式提出了差异化需求。在此背景下, 人造肉作为满足

特殊环境和特定人群营养需求的补充方案应运而生。

人造肉是利用生物技术与食品工程等手段, 以植物蛋白或细胞培养为原料, 模拟动物肉类的口感、风味及营养成分所制成的食品。随着生物技术、食品科学及材料科学等领域的迅速发展, 人造肉产业取得了显著进展^[4]。目前, 市场上的人造肉产品主要可分为两大类: ① 细胞培养肉, 其通过提取动物干细胞并在生物反应器中增殖、分化, 最终形成在结构和成分上与动物肉相似的肉制品; ② 植物基肉, 其主要以大豆、豌豆、小麦等植物蛋白为原

基金项目: 云南省科技特派员项目(2023年度)

通信作者: 田素梅(1988—), 女, 德宏师范学院讲师, 硕士。E-mail: 826204008@qq.com

收稿日期: 2025-04-16 **改回日期:** 2025-11-07

引用格式: 施忠芬, 杨子姗, 陈红艳, 等. 3D 打印技术在人造肉领域的应用及进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 241-248.

Citation: SHI Zhongfen, YANG Zishan, CHEN Hongyan, et al. Artificial meat 3D printing technology and application progress[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 241-248.

料,并通过挤压、纺丝等工艺模拟动物肉类的纤维结构及口感。尽管人造肉产业发展迅速,无论是植物基肉还是细胞培养肉,在生产实践中仍面临诸多技术瓶颈。如植物基肉的质地和风味与传统动物肉仍存在一定差距,而细胞培养肉的生产成本高昂,且规模化生产尚未完全实现。因此,如何在提升产品品质的同时有效降低生产成本,是推动人造肉产业进一步发展的关键问题。

食品 3D 打印技术作为一种新兴的制造技术,凭借其在复杂结构构建、精准营养控制及个性化定制等方面的优势,为人造肉产业的发展提供了新的思路和方法。食品 3D 打印技术是指利用计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)软件构建三维模型,并通过逐层堆积的方式将可食用材料打印成具有特定形状、结构及功能的食品^[5]。与传统食品加工技术相比,食品 3D 打印不仅能够实现复杂几何形态及内部微观结构(如肌肉纤维、脂肪分布等)的精准控制,还能依据个体的营养需求及饮食偏好,精确调控食品的营养成分与风味物质,实现个性化定制。食品 3D 打印技术在人造肉制造领域取得了初步进展,研究人员^[6-8]已利用该技术成功制备了基于植物蛋白的植物肉及基于细胞培养的细胞肉,并对其质地、风味及营养成分等特性进行了系统研究。然而,食品 3D 打印技术在人造肉制造中的应用仍处于起步阶段,面临着诸多挑战,如打印材料的开发与优化、新型打印技术的开发与应用、3D 打印人造肉的感官品质提升等。因此,进一步优化食品 3D 打印技术,以提升打印精度、改善产品质量及风味,并实现规模化生产,是未来研究的重要方向。

文章拟综述食品 3D 打印技术在人造肉制造中的应用进展,并分析食品 3D 打印技术在人造肉制造中面临的挑战,旨在为推动人造肉产业的可持续发展提供参考。

1 食品 3D 打印技术与人造肉制造概念

1.1 人造肉的概念及发展背景

人造肉是指利用生物技术、组织工程和食品科学等手段,通过细胞培养或植物蛋白重组等方式,模拟动物肉类的口感、风味和营养成分而制成的食品^[9]。与传统肉类不同,人造肉的生产过程无需饲养和屠宰动物,通过细胞

培养或植物蛋白加工可直接生成肉类产品。人造肉的概念最早可追溯至 20 世纪 30 年代,英国科学家 Winston Churchill 曾预言,未来人类将可在实验室通过培养动物细胞生产肉类^[10]。然而,直至 21 世纪初科学家才成功研制出全球首款细胞培养牛肉汉堡^[11],这一突破性成果标志着人造肉技术迈入实质性发展阶段。

人造肉产业的快速发展受多重因素推动,主要包括环境可持续性、资源利用效率、动物福利及食品安全等方面的考量。传统畜牧业生产模式面临资源消耗巨大、环境污染严重及动物福利问题等诸多挑战。而人造肉的生产过程无需饲养和屠宰动物,能够显著减少温室气体排放,降低资源消耗,并在一定程度上缓解因畜牧业扩张而引发的生态问题^[12-15]。随着社会经济的发展与公众健康意识的提升,人们对食品安全、营养健康及个性化饮食的需求日益增长。传统畜牧业产品可能存在抗生素残留、激素使用及病原体污染等食品安全隐患,而人造肉可通过精准营养调控,生产出低脂肪、低胆固醇、高蛋白的健康食品^[16]。此外,基于人造肉的制造技术还可实现个性化定制,满足素食者、特定疾病患者及运动人群等不同群体的多样化营养需求。因此,人造肉被广泛视为一种具有可持续性的肉类替代方案。

近年来,市场上已推出多种植物肉及细胞培养肉产品^[17-20]。然而,其大规模商业化应用仍面临诸多挑战。一方面,生产成本仍然较高,限制了其市场竞争力;另一方面,目前部分人造肉产品在口感、风味及质地方面仍与传统肉类存在一定差距,影响消费者接受度。此外,公众对人造肉的认知度尚待提升,消费观念的转变亦需时间。

1.2 食品 3D 打印技术原理及优势

食品 3D 打印技术是一种基于增材制造(additive manufacturing, AM)原理的新型食品加工技术。该技术通过逐层堆积的方式,将可食用材料精确打印成特定形状、结构及功能的食品^[21-22]。该技术的应用不仅有助于提升食品加工的个性化与智能化水平,还为食品营养优化、功能性食品开发及特殊人群膳食定制提供了新的解决方案^[23]。相比传统人造肉制造方法,3D 打印人造肉优势见表 1。目前,人造肉 3D 打印技术仍需突破打印材料

表 1 食品 3D 打印人造肉优势
Table 1 Advantages of 3D printing artificial meat

对比维度	人造肉 3D 打印技术	传统人造肉制造方法
制造流程	数字化建模后直接逐层打印,减少加工步骤	依赖挤压、纺丝或生物反应器培养,流程复杂 ^[24]
结构精准性	可精准控制内部结构,模拟真实肉类的纤维和脂肪分布 ^[25]	难以模仿真实肉的纤维,脂肪分布,质地不均匀
材料利用率	3D 打印仅使用所需食材,利用率较高	原材料加工易产生角料浪费,利用率较低
个性化定制	可根据消费者需求调整形状、口感、营养成分比例	标准化生产,个性化程度有限
工艺灵活性	可实时调整配方和结构参数,适应不同需求	生产线调整较为复杂,灵活性低
环境影响	优化材料使用,降低碳排放;支持本地化生产减少运输消耗	植物肉生产需大量水和能源,细胞培养肉能耗高 ^[26]

适配性、打印效率及感官特性等关键技术瓶颈。随着多材料协同打印、4D打印等技术的发展,食品3D打印有望推动人造肉从实验室走向大众餐桌,重塑未来食品产业格局。

2 人造肉3D打印技术的应用现状

2.1 基于细胞培养的人造肉3D打印技术

基于细胞培养的人造肉3D打印技术通过整合生物工程与增材制造,旨在突破传统细胞培养肉的结构单一性与规模化生产瓶颈。该技术通常涉及细胞悬浮液与生物相容性支架材料的复合打印,通过仿生学设计原理构建三维结构,实现脂肪分布与肌肉纤维的精准排列^[27]。细胞培养肉生产过程如图1所示。自首个培养牛肉汉堡问世以来,培养肉类的受欢迎程度显著上升。在这一领域中,Kang等^[28]提出了肌腱-凝胶集成生物打印(TIP)技

术,利用BSC与BADSC两类干细胞,构建由纤维蛋白原与Matrigel组成的复合生物墨水,通过手动组装整合肌肉、脂肪与毛细血管网络,制造出具备完整三维结构与真实质感的整切牛排型培养肉如图2(a)所示。这一技术体现出生物打印在多组织结构构建与手工整合协同工艺方面的独特优势。Jeong等^[29]采用了数字光处理(DLP)生物打印技术,配合GelMA水凝胶作为生物墨水,实现了基因转化牛胚胎成纤维细胞的精准打印,如图2(b)所示。这一方法能够诱导细胞分化形成功能性肌肉与脂肪组织,且其打印产品在油炸处理后仍能维持结构稳定性与良好口感,凸显了DLP打印在结构精度与热稳定性控制方面的潜力。

除了培养牛肉领域的进展,培养猪肉的研发也已成为培养肉3D生物打印技术中另一个备受关注的重要研究方向。Li等^[30]基于层状水凝胶打印平台,将猪骨骼肌

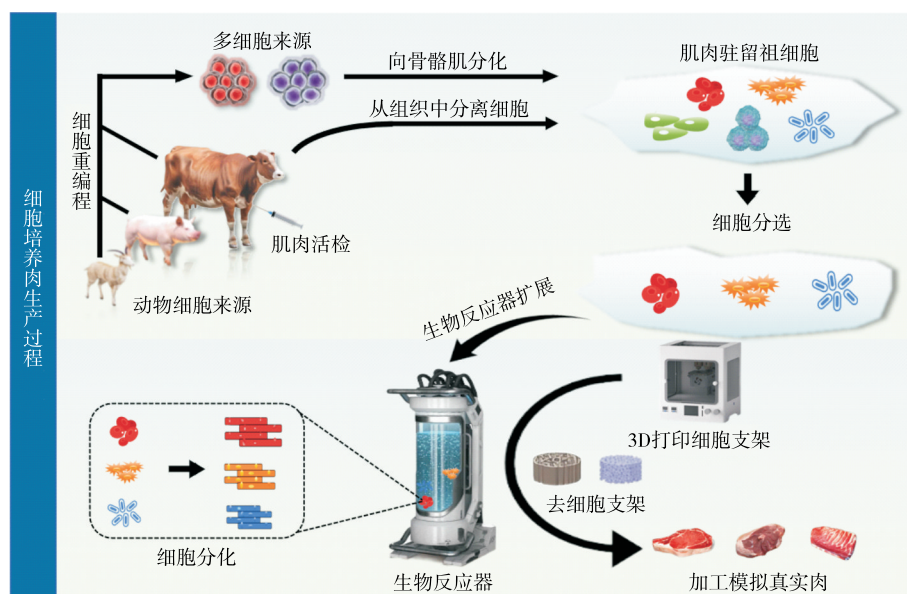
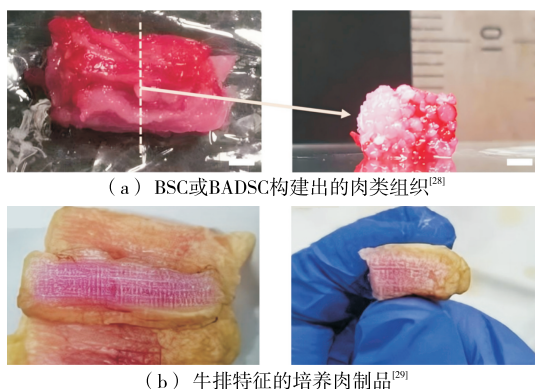


图1 细胞培养肉生产过程

Figure 1 Cell cultured meat production process



(b) 牛排特征的培养肉制品^[29]

图2 细胞培养牛肉

Figure 2 Cell cultured beef

卫星细胞精准封装于多层网格结构中,构建出高度仿生的三维细胞培养体系,显著提升了组织成熟度,并借助低成本材料降低了整体生产成本,突出了结构优化与经济性兼顾的技术优势。在培养肉研发过程中,高精度可食用支架的构建对于制造出与真实动物肉类相似的培养肉产品起着不可替代的关键作用。针对这一挑战,Su等^[31]进一步引入了电动流体动力学(EHD)打印技术,制造出具有400 μm 孔径的高分辨率植物蛋白支架,成功用于猪肌肉细胞的培养。尽管在构建大尺度结构方面仍有一定限制,但其在微结构分辨率上的表现,为高仿真肉片的制造提供了重要技术支撑。细胞培养人造肉的3D打印研究正在逐步向多层组织重构、高精度结构打印以及可食

用性支架开发等方向拓展。目前已应用的打印工艺主要包括 TIP、DLP、EHD 以及多层水凝胶打印等,这些技术通过对打印精度、材料力学性能、细胞生物活性等方面的协同优化,展现出良好的工程前景与产业化潜力。

2.2 基于植物蛋白的人造肉 3D 打印技术

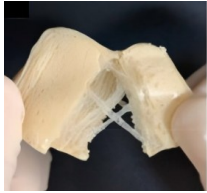
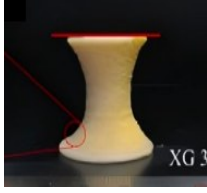
基于植物蛋白的人造肉 3D 打印技术,作为一种更加成熟且成本效益较高的方案,在当前人造肉市场中占据重要地位。该技术主要利用大豆、豌豆、小麦、蘑菇等植物蛋白为原料,通过 3D 打印精准构建肉类替代品的宏观外形与微观结构,从而模拟真实肉类的质构和口感特性^[32]。如 Qiu 等^[33]开发了一种基于植物蛋白的人造肉 3D 打印技术,通过将大豆蛋白(SPI)、小麦面筋(WG)和大米蛋白(RP)混合制备成可打印的食用墨水,成功改善了植物蛋白基人造肉的打印性能。研究表明,当 SPI、WG 和 RP 的比例约为 1:1:1 时,展现出优良的剪切变稀特性和

黏弹性能,有效降低了打印挤出阻力,同时提升了成型结构的稳定性。尤其是大米蛋白的引入,不仅改善了水分分布,还有效调控了系统黏度与剪切模量,使混合物更适合挤出成型。热处理后所得产品形成清晰的分层结构,其口感与质构均较为接近传统肉类。在人造肉内部结构方面,Tung 等^[34]提出了一种基于大豆蛋白的人造肉 3D 打印新方法,利用同轴喷嘴系统将卡拉胶与魔芋葡甘露聚糖作为辅助水胶体材料,插入植物蛋白基体中模拟真实肉类纤维结构。该技术有效提升了打印产物的强度和热稳定性,使其在加热后依然保持良好的形状与质地,并呈现出具有纤维状口感的仿真效果,为植物蛋白人造肉在工业化场景中的推广应用提供了新路径。

目前,基于植物蛋白的人造肉 3D 打印技术虽已取得显著进展,如表 2 所示。但仍面临着结构稳定性和规模化生产等关键挑战,未来研究应集中于开发更丰富的植物

表 2 基于植物蛋白的人造肉 3D 打印技术最新进展

Table 2 Latest progress on artificial meat 3D printing technology based on plant protein

目的	3D 打印方式	打印材料	产品	参考文献
使用水胶体交联生产具有纤维结构的人造肉	同轴 3D 打印	外轴:大豆蛋白糊(由分离大豆蛋白,马铃薯淀粉, CaCl ₂ 、KCl、黄原胶构成) 内轴:纤维溶液(由海藻酸钠,角叉菜胶和魔芋葡甘露聚糖组成)		[33]
使用植物蛋白构建 3D 打印人造肉	单轴挤出 3D 打印	植物蛋白食用油墨(由大豆蛋白、小麦面筋和大米蛋白构成)		[34]
开发具有可变质构特性的果胶食品模拟物	同轴 3D 打印	外轴:CaCl ₂ 交联溶液 内轴:基于果胶的食品模拟物		[35]
设计一种基于纳米乳剂的新型营养载体,用于 3D 食品打印	同轴 3D 打印	外轴:豆泥 内轴:纳米乳填充凝胶(由马铃薯淀粉、黄原胶、姜黄素的中链三酰基甘油乳液构成)		[36]
控制质地和味觉分布,研究不均匀味觉分布对感官知觉的影响	双轴挤出 3D 打印	材料 1:不含 NaCl 的小麦淀粉—蛋清 材料 2:含 NaCl 的小麦淀粉—蛋清		[37]

蛋白原料组合、优化热处理与打印工艺的协同效应,以及探索新型天然添加剂来增强产品的感官品质。同时,结合消费者接受度研究来优化产品设计,将有助于推动植物蛋白人造肉在市場中的进一步普及和应用。

2.3 混合型人造肉材料的3D打印技术

混合型人造肉材料的3D打印代表了人造肉研究的前沿方向,旨在融合植物蛋白与细胞培养两种技术路径的优势,突破单一材料带来的质构欠佳、成本高昂等限制。通过精准构建具有多层次组织结构的人造肉产品,该技术有望在质地、风味与营养等方面更接近天然肉类^[38-41]。如Murugan等^[42]提出了一种“细胞—植物混合打印”的创新方法,将猪骨骼肌细胞和脂肪细胞共培养在去细胞化植物支架(DPS)上,通过3D打印技术构建了具有类似真实肉类结构和质地的人造肉产品,如图3所示。试验中使用的去细胞化芦笋支架不仅为细胞提供了良好的附着和生长环境,还通过其天然的纤维束排列促进了细胞的定向排列,从而模拟了真实肉类的肌纤维结构。当植物支架提供基础结构支撑时,即使仅添加少量的培

养肌肉细胞,也能显著增强最终产品的风味特性和肉类相似度。这种混合型人造肉不仅在保水性和脂肪分布方面表现出色,还通过减少对动物细胞的依赖,大幅降低了生产成本。为了使3D打印的肉类在质地上更类似于天然肉类, Lee等^[43]利用单轴喷嘴3D打印机共挤出多材料墨水,以制备用于肉类和鱼类替代品的纤维化食品,从而验证了混合型人造肉材料在3D打印中的可行性。他们开发的多材料墨水由鱼糜基墨水(SI)和植物基墨水(PI)组成,通过单喷嘴打印与蒸汽处理实现纤维化结构。试验结果表明,PI和SI单独使用时因剪切模量低而无法保持结构,但通过共挤出形成的双柱或多柱结构在蒸汽处理后能够保持稳定和纤维化。此外,两种墨水在50℃条件下均发生不可逆糊化,形成强纤维(PI)与弱纤维(SI),共同构建纤维基质。切割测试显示,打印物体的纤维结构横向强度高于纵向强度,且纤维厚度随柱数或喷嘴尺寸增加而增强。该研究成功构建了一种基于3D打印与后处理技术的纤维化系统,为可持续食品类似物的开发提供了新的技术路径和研究思路。

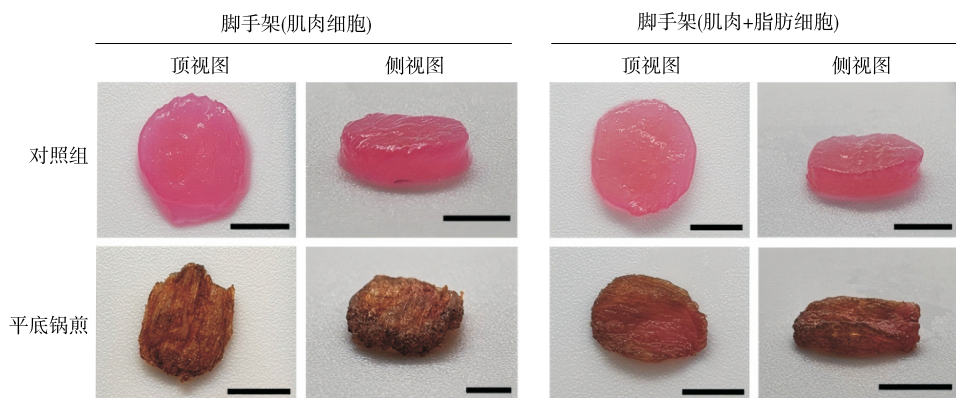


图3 未煮熟和煎炸样品的代表性图像^[42]

Figure 3 Representative images of uncooked and pan-fried samples

综上表明,混合型人造肉材料的3D打印探索极具发展潜力,它为解决当前人造肉领域面临的质构、风味和成本三大挑战提供了创新思路。未来研究应着重于优化不同材料间的相容性、探索更多功能性组分的协同作用,以及开发适用于混合材料的专用打印设备和工艺参数。同时,建立行业标准和规范也是推动这一新兴领域健康发展的关键步骤。通过跨学科合作和持续创新,混合型人造肉材料有望成为推动可持续食品系统变革的重要力量。

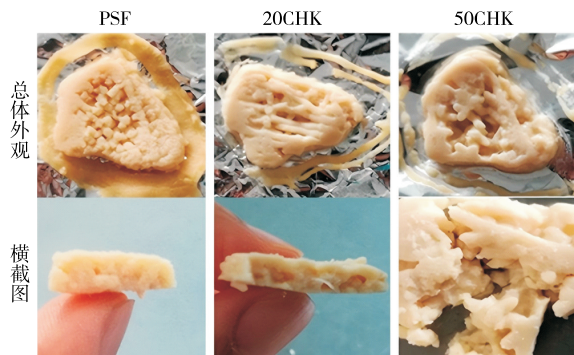
3 人造肉3D打印技术面临的挑战

3.1 打印材料的开发与优化

食品3D打印人造肉的成功与否,在很大程度上取决于打印材料的性能表现。材料的开发与优化不仅是打印过程的基础,更是构建完整技术体系的关键环节。适用于3D打印的人造肉材料需同时具备优良的流变特性、良

好的打印稳定性、合理的营养价值以及理想的感官品质等多方面性能^[44-46]。目前,关于3D打印培养肉的研究主要集中在牛肉和猪肉,而针对家禽及鱼类等其他动物细胞的研究相对较少,因此,有必要拓展不同种类的细胞来源,以丰富培养肉的品类,包括特定的亲水胶体,如增稠剂(如黄原胶和瓜尔豆胶)及胶凝剂(如转谷氨酰胺酶(TGase)和海藻酸钠),在增强生物墨水的可印刷性方面具有重要作用,可进一步优化其流变特性与结构稳定性。如Xu等^[47]利用3D生物打印技术成功开发出类似真实组织的人造鱼片。他们从大黄鱼中分离出肌肉干细胞和脂肪干细胞,并利用明胶基支架材料,通过3D打印引导细胞增殖和定向分化,成功构建出同时具备肌肉纤维与脂肪组织结构的培养鱼肉。在另一项研究中,Cheng-Rong等^[48]基于蛋清、豌豆蛋白、结冷胶、海藻酸钠和米糠副产

品的组合,开发出一种可用于3D打印的人造牛排。通过调控各组分比例,研究团队实现了人造牛排质地与口感的精细调节,为个性化营养干预提供了潜在解决方案。此外,Wang等^[49]则聚焦于软质人造肉的3D打印路径,以豌豆蛋白分离物(PPI)和鸡糜为基础原料,设计出结构可控、具有纤维构型的软质肉类替代品(图4)。研究表明,适量添加鸡糜(20%)能够显著改善PPI基材料的打印性能,使其在挤出过程中更易成形,并获得与真实肉类近似的纤维状结构。通过跨学科融合与配方创新,不仅可以提升产品的结构仿真度与感官质量,更有望在未来替代蛋白食品系统中实现突破性进展,进一步促进可持续食品体系的构建。



PSF 为含有淀粉和脂肪的PPI糊剂;20CHK 为在PSF糊剂中添加了20%的鸡肉;50CHK 为在PSF糊剂中添加了50%的鸡肉;将打印的样品在沸水中煮10 min

图4 3D打印的人造肉烹饪后的图片^[49]

Figure 4 3D printed artificial meat after cooking

3.2 消费者需求与感官特性

消费者需求与人造肉的感官特性之间存在紧密的双向互动关系。一方面,消费者对肉类的固有感官期望直接塑造了人造肉产品的开发方向;另一方面,人造肉的感官特性表现又决定了消费者的接受度和市场渗透率。这种交互关系不仅构成了人造肉产业发展的核心驱动机制,也对其技术路径与市场战略提出了更高要求。Schreuders等^[50]对评估肉类替代品的质构特性进行了全面综述,涵盖了机械测试、光谱分析和成像技术等方法。尽管现有技术能够从不同维度对无肉产品进行质构分析,但真正实现与传统肉类相媲美甚至超越的质构表现,仍依赖于这些方法在分辨率、准确性与多维整合能力方面的进一步优化。在风味调控方面,Kaleda等^[51]以燕麦—豌豆混合物作为基础开发肉类替代品,发现该组合虽赋予产品浓郁的谷物风味,但同时伴随一定的豆腥味和苦味。同时,Flores等^[52]研究表明,在挤压加工之前对无肉香肠进行发酵,有助于提高原料中营养物质的生物利用度,并通过减少或消除异味,或赋予令人愉悦的气味,从而改善产品的整体风味。此外,文化因素同样在消费

者对新型食品的接受度中扮演着至关重要的角色。Lupton等^[53]指出,少数参与者对食用或提供由人造肉或昆虫制成的3D打印食品表示兴趣或支持。多数消费者对人造肉的加工过程表示不安,认为“不自然”,有不新鲜、潜在危害、缺乏味道和营养成分低的质疑。因此,有必要使用跨国和跨文化研究收集有关肉类替代品的感官接受度的更多信息。

3.3 人造肉3D打印技术的应用局限

人造肉3D打印技术尽管展现出巨大潜力,但其实际应用仍面临多重技术瓶颈与产业化挑战。

(1) 生物墨水性能制约打印精度与产品稳定性,现有植物蛋白或细胞培养基质的流变性能、凝胶化特性和热稳定性难以同时满足打印工艺和仿真肉质构建的双重要求,导致精细结构重现困难,且成品在贮藏过程中容易发生组织结构变形和水分迁移。

(2) 生产成本与规模化矛盾突出,高精度3D打印设备投入巨大,原材料提纯和改性成本高昂,且打印速度慢、产能低,无法实现经济规模效益,使得最终产品价格远高于传统肉类,限制了市场竞争力。

(3) 多组分协同打印技术尚未成熟,肌肉纤维、脂肪组织、结缔组织等多种成分的同步打印和界面结合仍存在技术瓶颈,难以准确复制天然肉类的复杂组织结构和成分分布梯度,影响产品整体质构体验。

(4) 法规滞后与消费者认知偏差构成隐性壁垒,全球范围内针对3D打印食品特别是含有新型原料的人造肉产品的安全标准和监管体系尚不完善,消费者对“人造肉”的不自然感知和安全顾虑也阻碍了市场接受。

(5) 感官品质的长期一致性难以保障,由于原材料批次差异、生物材料自然老化和加工参数波动等因素,3D打印人造肉产品在批次间的感官一致性控制困难,尤其是风味释放动态过程和多汁性的稳定性表现不佳,影响消费者重复购买意愿和品牌忠诚度。

4 总结与展望

作为应对全球粮食安全危机与可持续消费需求的新颖解决方案,人造肉3D打印技术通过精准的细胞/蛋白定向组装与结构仿生设计,在质构调控、营养强化及资源节约方面展现出独特优势。文章系统性分析了人造肉3D打印技术的应用现状以及在感官特性中的突破性进展,并揭示了其在生物墨水性能、规模化生产、多组分协同打印及法规标准等维度的应用局限。

从长远视角看,人造肉3D打印技术不仅是食品工业的颠覆性变革,更是人类蛋白质供给范式从“牧场农场”向“数字智造”跃迁的关键载体。伴随着细胞农业、合成生物学与人工智能等前沿技术的深度融合,未来有望实现“按需打印”的个性化营养肉制品——从老年群体的高蛋白、易咀嚼肉糜到运动员定制化肌酸强化牛排。然而,

技术推广必须与生态环境效益评估同步推进,以确保其可持续性。未来应系统量化3D打印人造肉与传统畜牧业在碳足迹、水足迹及土地利用效率等方面的差异,防止其陷入“高技术、高能耗”困境。唯有依托技术创新、政策引导与消费者教育的协同推进,方能充分释放人造肉3D打印技术在构建可持续食品体系中的变革潜力。

参考文献

- [1] TILMAN D, CLARK M. Global diets link environmental sustainability and human health[J]. *Nature*, 2014, 515(7 528): 518-522.
- [2] HUR S J, KIM J M, YIM D G, et al. Impact of livestock industry on climate change: case study in South Korea—a review[J]. *Animal Bioscience*, 2024, 37(3): 405-418.
- [3] ZU ERMGASSEN E K H J, PHALAN B, GREEN R E, et al. Reducing the land use of EU pork production: where there's swill, there's a way[J]. *Food Policy*, 2016, 58: 35-48.
- [4] PESHUK L V, PRYKHODKO D Y. New technologies. artificial meat as a new source of protein products in the nutrition of modern people[J]. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2023, 31(3): 611-626.
- [5] 童强, 肖帅磊, 李易, 等. 3D打印技术在太空食品加工领域的研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(18): 299-306.
TONG Q, XIAO S L, LI Y, et al. Research progress on 3D printing technology in the field of space food processing[J]. *Food Science*, 2024, 45(18): 299-306.
- [6] 李佩锡, 周德志, 杨长明, 等. 生物3D打印研究进展: 动物、植物及微生物细胞的增材制造[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(19): 237-252.
LI P X, ZHOU D Z, YANG C M, et al. Advances in 3D bioprinting: additive manufacturing of living cells from animal, plant, and microbe[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(19): 237-252.
- [7] CHEN J H, ZHANG X, BASSEY A P, et al. Prospects for the next generation of artificial enzymes for ensuring the quality of chilled meat: opportunities and challenges[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(11): 3 583-3 603.
- [8] CORNET S H V, BÜHLER J M, GONÇALVES R, et al. Apparent universality of leguminous proteins in swelling and fibre formation when mixed with gluten[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106788.
- [9] BONNY S P F, GARDNER G E, PETHICK D W, et al. Artificial meat and the future of the meat industry[J]. *Animal Production Science*, 2017, 57(11): 2 216-2 223.
- [10] MCHUGH S. Real artificial: tissue-cultured meat, genetically modified farm animals, and fictions[J]. *Configurations*, 2010, 18(1): 181-197.
- [11] POST M J. Cultured beef: medical technology to produce food [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94 (6): 1 039-1 041.
- [12] BHAT Z F, KUMAR S, FAYAZ H. *In vitro* meat production: challenges and benefits over conventional meat production[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 241-248.
- [13] HOCQUETTE A, LAMBERT C, SINQUIN C, et al. Educated consumers don't believe artificial meat is the solution to the problems with the meat industry[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 273-284.
- [14] SOLEYMANI S, NAGHIB S M, MOZAFARI M R. An overview of cultured meat and stem cell bioprinting: how to make it, challenges and prospects, environmental effects, society's culture and the influence of religions[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, 18: 101307.
- [15] GUO X D, WANG D Y, HE B, et al. 3D bioprinting of cultured meat: a promising avenue of meat production[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2024, 17(7): 1 659-1 680.
- [16] MUNTEANU C, MIREȘAN V, RĂDUCU C, et al. Can cultured meat be an alternative to farm animal production for a sustainable and healthier lifestyle? [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 749298.
- [17] KAMALAPURAM S K, HANDRAL H, CHOUDHURY D. Cultured meat prospects for a billion! [J]. *Foods*, 2021, 10(12): 2 922.
- [18] YE Y L, ZHOU J W, GUAN X, et al. Commercialization of cultured meat products: current status, challenges, and strategic prospects[J]. *Future Foods*, 2022, 6: 100177.
- [19] PADHIARY M, BARBHUIYA J A, ROY D, et al. 3D printing applications in smart farming and food processing[J]. *Smart Agricultural Technology*, 2024, 9: 100553.
- [20] JIANG G H, AMEER K, KIM H, et al. Strategies for sustainable substitution of livestock meat[J]. *Foods*, 2020, 9(9): 1 227.
- [21] 周业贵. 3D打印肌细胞“人造肉”关键技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023: 11-12.
ZHOU Y G. Research on key technologies of artificial meat for 3D printed muscle cells[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023: 11-12.
- [22] 陈廉杰, 宁萌, 陈慧涛, 等. 人造肉脂肪组织3D打印轨迹规划算法[J]. *食品与机械*, 2023, 39(1): 3-8.
CHEN L J, NING M, CHEN H T, et al. Research on trajectory planning algorithm of artificial meat adipose tissue 3D printing [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(1): 3-8.
- [23] 刘倩楠, 张春江, 张良, 等. 食品3D打印技术的发展现状[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 265-273.
LIU Q N, ZHANG C J, ZHANG L, et al. Development status of 3D printing technology for food[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(16): 265-273.
- [24] DJISALOV M, KNEŽIĆ T, PODUNAVAC I, et al. Cultivating multidisciplinary: manufacturing and sensing challenges in cultured meat production[J]. *Biology*, 2021, 10(3): 204.
- [25] DU Q W, TU M L, LIU J H, et al. Plant-based meat analogs and fat substitutes, structuring technology and protein digestion:

- a review[J]. *Food Research International*, 2023, 170: 112959.
- [26] RAMACHANDRAIAH K. Potential development of sustainable 3D-printed meat analogues: a review[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 938.
- [27] WANG Y, CAI W, LI L, et al. Recent advances in the processing and manufacturing of plant-based meat[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(3): 1 276-1 290.
- [28] KANG D H, LOUIS F, LIU H, et al. Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting[J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 5 059.
- [29] JEONG D, SEO J W, LEE H G, et al. Efficient myogenic/adipogenic transdifferentiation of bovine fibroblasts in a 3D bioprinting system for steak-type cultured meat production[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(31): 2202877.
- [30] LI Y Y, LIU W T, LI S L, et al. Porcine skeletal muscle tissue fabrication for cultured meat production using three-dimensional bioprinting technology[J]. *Journal of Future Foods*, 2021, 1(1): 88-97.
- [31] SU L S, JING L Z, ZENG X J, et al. 3D-Printed prolamin scaffolds for cell-based meat culture[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(2): 2207397.
- [32] NOWACKA M, TRUSINSKA M, CHRANIUK P, et al. Developments in plant proteins production for meat and fish analogues[J]. *Molecules*, 2023, 28(7): 2 966.
- [33] QIU Y X, MCCLEMENTS D J, CHEN J, et al. Construction of 3D printed meat analogs from plant-based proteins: Improving the printing performance of soy protein-and gluten-based pastes facilitated by rice protein[J]. *Food Research International*, 2023, 167: 112635.
- [34] JUNG K, WEN Y X, HO C, et al. Meat analog production through artificial muscle fiber insertion using coaxial nozzle-assisted three-dimensional food printing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106898.
- [35] VANCAUWENBERGHE V, VERBOVEN P, LAMMERTYN J, et al. Development of a coaxial extrusion deposition for 3D printing of customizable pectin-based food simulant[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 225: 42-52.
- [36] YEON J, YOUNG Y, WOO K, et al. Production of customized food through the insertion of a formulated nanoemulsion using coaxial 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 311: 110689.
- [37] FAHMY A R, AMANN L S, DUNKEL A, et al. Sensory design in food 3D printing-structuring, texture modulation, taste localization, and thermal stabilization[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 72: 102743.
- [38] WANG T X, KAUR L, BENIWAL A S, et al. Physico-chemical and textural properties of 3D printed plant-based and hybrid soft meat analogs[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2023, 78(2): 375-382.
- [39] ALAM A N, KIM C J, KIM S H, et al. Trends in hybrid cultured meat manufacturing technology to improve sensory characteristics[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2024, 44 (1): 39-50.
- [40] SCHIELL C, PORTANGUEN S, SCISLOWSKI V, et al. Investigation into the physicochemical and textural properties of an iron-rich 3D-printed hybrid food[J]. *Foods*, 2023, 12(7): 1 375.
- [41] CHAO C, PARK H J, KIM H W. Effect of l-cysteine on functional properties and fibrous structure formation of 3D-printed meat analogs from plant-based proteins[J]. *Food Chemistry*, 2024, 439: 137972.
- [42] MURUGAN P, YAP W S, EZHILARASU H, et al. Decellularised plant scaffolds facilitate porcine skeletal muscle tissue engineering for cultivated meat biomanufacturing[J]. *NPJ Science of Food*, 2024, 8(1): 25.
- [43] LEE S H, KIM H W, PARK H J. Integrated design of micro-fibrous food with multi-materials fabricated by uniaxial 3D printing[J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112529.
- [44] HARISH K H, SHI H T, WENG W C, et al. 3D Printing of cultured meat products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(1): 272-281.
- [45] CHENG Z, QIU Y, BIAN M Y, et al. Muscle fibrous structural design of plant-based meat analogs: advances and challenges in 3D printing technology[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 147: 104417.
- [46] HE J, ZHAO Y G, JIN X, et al. Material perspective on the structural design of artificial meat[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 5(8): 2100017.
- [47] XU E B, NIU R H, LAO J H, et al. Tissue-like cultured fish fillets through a synthetic food pipeline[J]. *NPJ Science of Food*, 2023, 7(1): 17.
- [48] CHENG-RONG T B, YUNG-KAI L I N. Artificial steak: a 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products[J]. *Future Foods*, 2022, 5: 100121.
- [49] WANG T X, KAUR L, FURUHATA Y, et al. 3D printing of textured soft hybrid meat analogues[J]. *Foods*, 2022, 11 (3): 478.
- [50] SCHREUDERS F K G, SCHLANGEN M, KYRIAKOPOULOU K, et al. Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: a review[J]. *Food Control*, 2021, 127: 108103.
- [51] KALEDA A, TALVISTU K, VAIKMA H, et al. Physicochemical, textural, and sensorial properties of fibrous meat analogs from oat-pea protein blends extruded at different moistures, temperatures, and screw speeds[J]. *Future Foods*, 2021, 4: 100092.
- [52] FLORES M, PIORNOS J A. Fermented meat sausages and the challenge of their plant-based alternatives: a comparative review on aroma-related aspects[J]. *Meat Science*, 2021, 182: 108636.
- [53] LUPTON D, TURNER B. Food of the future? Consumer responses to the idea of 3D-printed meat and insect-based foods[J]. *Food and Foodways*, 2018, 26(4): 269-289.