



冯宪超,张怡君,陈琳,等. 细胞培养肉支架技术:从生物材料到规模化培养的前沿进展与挑战[J]. 南京农业大学学报,2026,49(5):1233-1244.
Feng X C,Zhang Y J,Chen L,et al. Cultured meat scaffold technology:cutting-edge advances and challenges from biomaterials to large-scale cultivation [J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(5):1233-1244.

特约综述

细胞培养肉支架技术:从生物材料到 规模化培养的前沿进展与挑战

冯宪超*,张怡君,陈琳,李思阳,赵聪,闫帅,宋恩玺

(西北农林科技大学食品科学与工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:细胞培养肉是解决全球粮食安全与环境压力的战略性食品科技创新。然而,成本高昂与质构模拟困难仍制约其产业化。本文系统综述了支架生物材料的最新研究进展,包括多糖类、蛋白质类(动物源、微生物/真菌源、植物源)、合成聚合物及自组装肽等材料的特性、应用现状与面临挑战;梳理了多孔支架、脱细胞支架、纤维支架及水凝胶支架等主流支架制备策略的技术特点与应用场景;探讨了支架整合悬浮培养系统在规模化生产中的挑战。最后展望了“智能支架”与“智能生物反应器”深度耦合的智能化发展趋势,以及人工智能技术在支架优化、培养过程调控中的应用价值。本综述为培养肉生产领域的研究人员和企业提供了有价值的见解。

关键词:细胞培养肉;生物材料;三维支架;生物反应器;智能支架

中图分类号:TS219

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)05-1233-12

Cultured meat scaffold technology:cutting-edge advances and challenges from biomaterials to large-scale cultivation

FENG Xianchao*,ZHANG Yijun,CHEN Lin,LI Siyang,ZHAO Cong,YAN Shuai,SONG Enxi

(College of Food Science and Engineering,Northwest A&F University,Yangling 712100,China)

Abstract:Cultured meat represents a strategic food technology innovation to address global food security and environmental pressures. However,its industrialization is still constrained by high production costs and difficulties in texture simulation. This paper systematically reviews the latest research advances in scaffold biomaterials,including the characteristics,application status and challenges of polysaccharides,proteins(animal-derived,microbial/fungal-derived,plant-derived),synthetic polymers and self-assembling peptides. It summarizes the technical features and application scenarios of mainstream scaffold fabrication strategies such as porous scaffolds,decellularized scaffolds,fibrous scaffolds and hydrogels. The challenges of integrating scaffolds with suspension culture systems for large-scale production are also discussed. Finally,the intelligent development trend of the deep coupling of “smart scaffolds” and “smart bioreactors” is prospected,as well as the application value of artificial intelligence in scaffold optimization and culture process regulation. This review provides a valuable insights for researchers and enterprises in the field of cultured meat production.

Keywords:cultured meat;biomaterials;three-dimensional scaffolds;bioreactors;smart scaffold

随着全球人口增长及饮食结构的转变,肉类消费需求的快速增长与传统肉制品生产能力的矛盾日益显现^[1-2]。据联合国粮食及农业组织(FAO)预测,到2050年全球肉类需求将达到 4.55×10^8 t。这种供需矛盾迫切需要向可持续饮食模式转变。细胞培养肉作为一种革新性的生产方式,通过“更少但更好”的肉类生产策略^[3],对动物福利、人类健康和环境可持续性带来积极影响,同时也是实现我国“大食物观”战略的重要方向之一^[4-5]。此外,细胞培养肉为精准营养需求及极端环境下的食物供给(如太空基地)提供了新的解决途径,对未来农业发展具有重要意义。

收稿日期:2026-04-02

基金项目:陕西省重点研发计划项目-重点产业创新链(2024NC-ZDCYL-04-20);陕西省重点研发计划项目(2024NC2-GJHX-26);广西科技计划项目-“协同”行动计划(2025XTXT04012)

作者简介:冯宪超,教授,主要从事食品凝胶构建机制及应用研究,E-mail:xcfeng@nwsuaf.edu.cn。*通信作者。

细胞培养肉技术旨在通过体外培养动物肌肉、脂肪等细胞生产肉类产品,其产业化路径不仅关乎食品科技的创新,更是应对全球粮食安全、资源环境压力和动物福利挑战的战略选择。尽管技术进步显著,但成本居高不下和产品难以模拟真实肉类的复杂质构与风味,仍是制约其商业化的两大核心壁垒。其中,三维支架技术是破解这些难题的关键突破口。

培养肉支架面临着独特且严苛的评价维度。一方面,为对接大宗农产品价格体系,其材料及制造工艺须具备极高的经济可行性与成本控制优势;另一方面,支架基质本身须严格符合食品安全标准,或具备简便高效的无害化脱除工艺。同时,制造流程须具备高通量与连续化的工业生产特征,并能与大型动态生物反应器深度兼容,确保支架不仅能提供物理支撑,更能主动诱导细胞分化,模拟真实肉类的层次化质地、复杂的化学风味及全面的营养分布。

本文系统综述了支架生物材料(多糖类、蛋白质类、合成聚合物等)的最新进展,分析了多孔支架、3D打印、微载体等制备策略的工程特性,并探讨了支架整合悬浮培养系统在规模化生产中的挑战。最后,展望了“智能支架”与人工智能在生物过程控制中的潜力,旨在为该领域的研究与产业化提供系统性指导。

1 细胞培养肉生产过程及其对支架的功能需求

细胞培养肉的生产流程包括细胞分离纯化、大规模增殖、组织化培养与成熟(图1)。为了使培养肉在微观结构和宏观感官上高度贴近天然肌肉组织,支架的设计已从简单的“细胞载体”演变为能够提供复杂物理与生化信号的多功能集成平台。

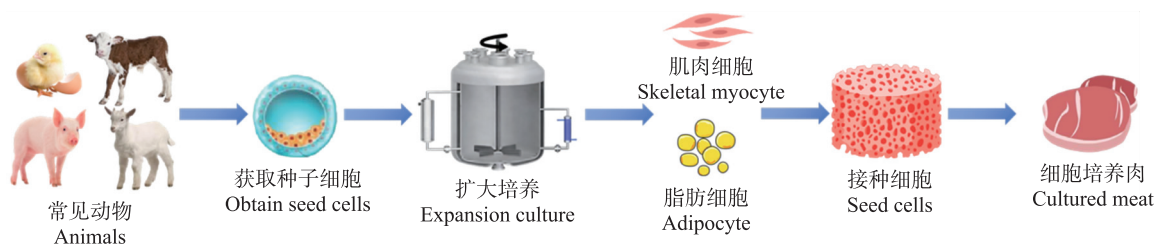


图1 细胞培养肉生产过程

Fig. 1 Production process of cultured meat

细胞分离纯化是细胞培养肉生产过程的第一步,此阶段目标是获取足量的种子细胞(如成肌卫星细胞、脂肪源性干细胞或多能干细胞)。在此阶段,通常通过活体动物提取能够生成肌纤维的特定细胞,如肌干细胞或卫星细胞。典型的可持续细胞来源包括平滑肌细胞、脂肪细胞和间充质干细胞(MSC),这些细胞可从牛、羊和鸡中分离。多个研究团队已利用牛卫星细胞(BSC)进行试验,这些是专职的肌肉祖细胞。然而,这些细胞主要分化为肌纤维。相比之下,肉类是一种复杂实体,包含肌肉、脂肪和结缔组织等多种组织类型^[6]。因此,仅使用卫星细胞来复制整个肉类成分是不够的,还需要整合其他脂肪细胞等类型,即其他来源的脂肪。间充质干细胞(MSC)因其能够分化为脂肪生成(脂肪)和肌生成(肌肉)谱系,是生产培养肉所需2种原代细胞类型的理想细胞来源。

生产过程的第二阶段是细胞大规模扩增,即对最初分离的细胞进行快速增殖以获得大量活细胞用于细胞培养肉。通常,这一增殖过程发生在生物反应器中,细胞在由必需氨基酸、糖类和促进细胞分裂的生长因子组成的高营养密度培养基中培养。在细胞培养肉的生产中,肌肉相关蛋白主要由分化的肌肉细胞产生^[4]。肌肉干细胞来源广泛、体外培养工艺成熟,能够增殖并产生肉类组织终末细胞^[7]。然而,干细胞的体外生存周期有限,其增殖能力随着培养时间的延长而显著降低^[8],对长期稳定的细胞供给造成一定限制。支架技术是细胞培养肉生产的重要分支,其作用不仅可为细胞提供三维附着基质,促进细胞分化成熟,还能创建类似天然肌肉组织的结构^[9]。最新研究表明,某些物种(如牛、鸡)的成纤维细胞在长期培养中可自发获得永生能力^[10-11]。相比于基因改造,这种“自发永生”不引入外源基因或病毒,更符合食品安全监管要求和消费者的接受度。为了实现商业可行性,必须开发低成本、无血清且符合食品安全标准的化学成分确定型培养基(CDM),以维持细胞的长效增殖活力。目前,搅拌罐式生物反应器(STR)是扩增阶段的主流设备,但其产生的局部剪切力可能损伤细胞膜。

为了实现对真实肉类组织的高度仿真,支架设计已深入到结构仿生、力学调控及感官属性集成等领

域。支架通过提供特定的力学微环境,如匹配天然组织约 10 kPa 的杨氏模量,可精准调控干细胞的定向分化与自我更新,避免过于坚硬的基质抑制细胞运动与成熟^[12]。在结构层面,利用静电纺丝或微流控技术构建的微纳米级对齐纤维束,能有效引导成肌细胞沿长轴排列并融合,产生排列有序的肌管,模拟天然肌肉的组织学纹理^[13]。针对整块肉类的大尺寸制备挑战,借鉴脱细胞植物材料(如菠菜、芹菜)天然的分级维管系统,可为组织提供高效的营养输送与气体交换通道,突破了传统块体支架的传质限制^[14]。此外,感官品质的提升已成为研究重点,通过在支架中负载特定香气前体物质,可在烹饪过程中诱发美拉德反应,赋予产品真实的焦香风味与视觉特征^[15]。同时,通过 3D 生物打印技术,可以精确控制肌脂比例及其空间排布,模拟出类似天然牛排的“大理石纹”质地,使培养肉在口感、风味相似度以及营养价值上实现全方位的仿生^[16]。

2 用作支架的生物材料类型

用于细胞培养支架的生物材料可来源于动物、植物、微生物或通过聚合物合成。虽然胶原蛋白等动物源性生物聚合物能提供类似自然环境的条件,但因其为动物来源,在培养肉领域存在伦理争议。因此,基于植物和微生物的生物材料来源正日益受到关注。表 1 展示了用于培养肉支架的多种生物材料类型。

表 1 用作支架的生物材料类型
Table 1 Types of biomaterials used as scaffolds

类别 Type	来源 Source	代表材料 Typical materials	主要优缺点 Main advantages and disadvantages	参考文献 References
多糖类	动物、海藻、植物、微生物	壳聚糖、海藻酸钠、透明质酸、纤维素	优点:亲水性好、生物相容性优、无毒; 缺点:黏附性差,缺少黏附位点,需改性	[17-18]
	动物源蛋白	胶原、明胶、纤维蛋白	优点:拉伸性好、高度模拟天然细胞外基质(ECM); 缺点:存在伦理争议	[19-20]
蛋白质类	微生物/真菌蛋白	菌丝体(裂褶菌等)	优点:天然多孔、可食用、风味佳、结构复杂; 缺点:需基因改造优化质地与生长速度	[21-22]
	植物蛋白	大豆蛋白、玉米醇溶蛋白、小麦谷蛋白、花生蛋白	优点:来源广、成本低、安全可食用、生物相容性好; 缺点:部分种类细胞黏附性能一般	[9,23-24]
合成聚合物	化学合成	聚乙二醇、左旋聚乳酸、聚乳酸-羟基乙酸共聚物	优点:结构可控、成本低、可批量化、性能稳定、可完全复刻、试验重复性好; 缺点:不可食用,部分降解慢/难降解,需彻底去除;相关研究较少	[25-26]
自组装肽	人工合成/生物制备	CH01、CH02	优点:可序列设计、自组装成纳米纤维、高度模拟 ECM,可功能化修饰,具备剪切稀化、自修复等特性; 缺点:成本较高,制备相对复杂	[27-28]

2.1 多糖类材料

多糖是生物体中广泛存在的物质,是一类由醛糖或酮糖通过糖苷键连接而成的天然高分子多聚物。因其具有良好的亲水性和较理想的生物相容性,是目前应用较多的支架材料^[29]。常用于培养肉支架的多糖材料主要包含壳聚糖、透明质酸、海藻酸钠及纤维素等。壳聚糖支架因具备良好的孔隙连通性与细胞亲和性,可有效介导细胞黏附、增殖及分化^[18]。海藻酸盐是从海藻中得到的提取物,海藻酸凝胶只需在钙离子存在的条件下即可形成^[29],无任何有毒有害物质,形成的三维水凝胶支架具备高含水率与可调微观结构,在软组织及软骨组织工程中被验证为可靠的三维支撑载体。透明质酸作为机体细胞外基质的天然组分,免疫原性低且生物相容性突出,其改性水凝胶支架能够有效促进细胞迁移与组织重塑,在创面修复及软组织工程中展现出良好的应用潜力。纤维素广泛存在于植物的细胞壁中,也可通过微生物发酵法进行生产,其作为生物支架材料表现出较高的力学强度,但是对细胞黏附性有限,常常采用化学修饰或表面电荷改性方法进行改善^[30]。Jordan 等^[17]采用硫酸水解法制备纤维素纳米晶须,并利用旋转涂抹技术对晶须表面进行改善。

2.2 蛋白质类材料

2.2.1 动物源蛋白(胶原、明胶、纤维蛋白) 骨骼肌在生理状态下,肌肉细胞在细胞外基质的包裹下有序排列形成肌肉组织,而细胞外基质的成分主要包括黏连蛋白、胶原蛋白、糖蛋白等。在细胞培养肉支架材料的研究中,早期是利用动物源蛋白^[31](胶原蛋白、明胶等)作为支架材料,促进细胞黏附和增殖。例如,

MacQueen 等^[19]采用浸入式旋喷纺丝技术生产与天然肌纤维直径尺寸相当的明胶纤维,并利用交联技术对明胶纤维进行交联处理,获得培养肉细胞支架。胶原和明胶^[20]制备的细胞支架具有很好的生物相容性和拉伸特性,随着研究的不断深入,需要探寻胶原和明胶的微生物体外合成方法。

2.2.2 微生物/真菌蛋白(菌丝体) 发酵蘑菇菌丝体(如裂褶菌)可直接生长出具有天然、复杂、强韧多孔结构的块体材料。菌丝体本身富含蛋白质和膳食纤维,风味独特(类似蘑菇),具有与动物肌肉组织相似的定向纤维排列能力,是构建“结构化全培养肉产品”(如牛排类似物)的理想支架^[22]。研究前沿在于遗传改造菌株以优化质地和生长速率,以及开发共培养技术。共培养通过形态控制提高了生物合成效率,但关键挑战仍然存在。与单一培养物相比,共培养系统更容易受到外来微生物的污染。在长期培养或规模扩大期间,菌株竞争不平衡和水平基因转移构成了风险。当目标化合物在细胞内产生或由特定菌株分泌时,需要改进分离和纯化方法^[21]。

2.2.3 植物蛋白 植物蛋白被认为是实现低成本、可食用支架的最有希望的途径。用于细胞支架制备的植物蛋白有大豆蛋白、玉米醇溶蛋白、花生蛋白、小麦谷蛋白等。植物蛋白因来源广、成本低,安全无毒可食用,成为细胞培养肉支架开发的重要来源。目前关于植物蛋白细胞支架的开发已经取得一系列研究成果。研究发现,以大豆蛋白为材料的细胞支架具有很好的生物相容性,且具有和细胞外基质相近的生化特性。玉米中的玉米醇溶蛋白是一种细胞相容性很理想的支架材料,早已被广泛应用于医学领域中仿生组织器官的制造^[9]。研究发现玉米醇溶蛋白对细胞的附着能力较强,以谷物醇溶蛋白(玉米、大麦和黑麦蛋白)为原料,制备出具有合适流变性质的纯植物基墨水,并通过高精度的静电场电流体喷射 3D 打印技术制造了微结构可控的谷物醇溶蛋白纤维支架^[23]。除了上述植物蛋白材料外,以小麦谷蛋白为原料利用水淬工艺制备了孔径范围为 50~250 μm 的三维多孔支架,所得小麦谷蛋白支架可支持小鼠骨骼肌成肌细胞和牛卫星细胞的增殖和分化^[24]。以花生拉丝蛋白为原料制备细胞支架,平滑肌细胞和间充质干细胞可以很好地黏附在支架上,并分化成具有平滑肌和脂肪特性的培养肉产品^[32]。

2.3 合成聚合物

合成聚合物由自然界中不易找到的材料构成。合成聚合物已成功用作其他应用的支架材料。合成聚合物的选择包括聚乙二醇(PEG)、聚 L-乳酸(PLLA)和聚乳酸-羟基乙酸共聚物(PLGA)。具有多通道的聚乙二醇水凝胶支架被发现可促进多层骨骼肌成肌细胞生长^[33]。由于骨骼肌是影响肉类质地的主要组成部分,聚乙二醇具有促进细胞生长的能力,表明其可能成为培养肉支架的可行选择。聚 L-乳酸和聚乳酸-羟基乙酸共聚物在组织工程中已被证实是修复大面积软组织缺损的良好支架。聚乳酸以植物源淀粉等可再生物质为原料,经发酵制备成乳酸,再通过聚合反应合成。在工业堆肥条件下聚乳酸可完全生物降解,最终转化为二氧化碳与水,对环境无污染。但是聚乳酸在应用过程中存在亲水性能较差、细胞相容性不够好、细胞黏附性差以及降解周期相对较长等缺陷,通常会利用多种可降解材料对其进行改性^[34]。PLGA 是一种典型的可生物降解仿生材料,自美国食品药品监督管理局(FDA)生物安全认证以来,已被用于疏水药物输送和组织工程^[26]。PLGA 的优势在于能够确保支架具有模拟目标材料的理想刚度。使用合成材料作为培养肉支架的优势在于可以低成本轻松生产不同构型。由于这些支架大都由人工合成,试验容易实现复现,确保了试验结果的可重复性。部分合成材料降解缓慢甚至完全不降解,因此需要额外时间和资源来确保这些材料从培养肉中彻底清除。目前关于合成材料作为培养肉支架的研究还非常有限。

2.4 自组装肽

自组装肽(SAP)因其多功能性和细胞外基质模拟特性,已被研究并应用于组织工程支架和 3D 生物打印材料。自组装肽的功能材料在组织再生方面已被广泛研究,包括抗菌和止血、伤口愈合、血管生成、骨骼和神经修复^[35]。自组装肽单体可响应环境刺激发生构象转变并自发组装,可应用于多种功能场景。调控多肽序列能够定向调控自组装行为;SAP 与生物大分子交联复合,可制备结构复杂、性能增强的先进定制化生物材料。氨基酸侧链为化学修饰提供了位点,可产生多样化的超分子结构和可适应性水凝胶。这些水凝胶可获得剪切稀化、生物活性、自修复和形状记忆等特性,从而拓展自组装肽材料的应用范围^[27]。自组装肽策略可用于构建多种功能性水凝胶,壳聚糖、纤维蛋白、弹性蛋白、明胶等生物聚合物可借助静电相互作用形成离子簇,进而实现协同自组装^[36]。

3 培养肉的支架类型

支架材料在组织工程和培养肉生产中至关重要,为细胞增殖和分化提供了关键框架。目前可用于支架制造的类型包括微载体、多孔支架、纤维支架、水凝胶支架等(图 2)。微载体通常为小型球形微珠,其表面可为细胞附着提供基底,因此适用于生物反应器中细胞培养的规模化。多孔支架通常由合成聚合物或天然与合成聚合物的组合构成,以相互连接的孔隙网络为特征,主要应用于组织成熟阶段。此类支架能模拟天然细胞外基质 (ECM),促进细胞渗透并实现高效营养物质与代谢废物交换^[37]。水凝胶结合三维生物打印技术,可构建支持细胞增殖和组织形态发生的三维微环境。表 2 展示了细胞培养肉的多孔支架类型及特点。选择合适的支架类型需根据预期应用及所需组织特性来确定。

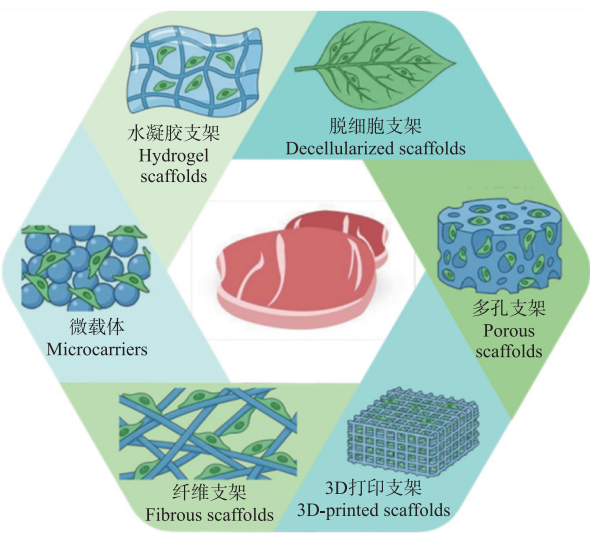


图 2 培养肉的支架类型
Fig. 2 Scaffold types for cultured meat

表 2 培养肉支架类型及特点

Table 2 Types and characteristics of cultured meat scaffolds

支架类型 Scaffold type	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
多孔支架	原材料来源广泛(天然/合成),加工方式多样(如冷冻干燥、挤压),可灵活调控孔隙、形状及力学性能以满足细胞需求。能有效支持气体交换、营养/废物传输	部分高性能材料(如明胶、胶原)依赖动物来源,在模拟肌肉复杂层次(如肌束排列、血管网络)方面能力有限	[38-39]
脱细胞支架	天然拓扑结构;具有多孔结构和维管特征,高压灭菌新路径	细胞亲和性差;植物纤维素骨架缺乏哺乳动物细胞识别位点(如 RGD 肽),存在批次差异	[14,40]
微载体支架	生产简单,可以有效扩大贴壁细胞的规模;高比表面积适合在生物反应器中规模化生产细胞生物量	若使用非食用微载体,细胞脱附与载体分离的高昂成本是其商业化的主要瓶颈	[41-42]
3D 打印支架	可生产复杂结构和特殊形状;结构定制化:能够精准控制肌纤维走向、孔隙分布及肌脂比例	打印分辨率低,引入交联剂;开发兼具高打印性、良好细胞相容性、可食性及适当机械强度的生物墨水难度大	[23-24]
纤维支架	仿生 ECM 结构;引导细胞排列,诱导肌纤维排列;材料选择广	孔隙率与渗透性低,规模化生产较难	[19,43]
水凝胶支架	可模拟自然发生的 ECM 结构,细胞相容性好	机械强度较低,营养物质扩散限制	[44-45]

3.1 多孔支架

多孔支架是以天然材料(如动物或植物源多糖/蛋白)或合成材料(如聚乳酸)作为原料,通过冷冻干燥、熔融沉积、溶剂浇铸等技术加工而成的具有三维多孔结构的细胞支架。多孔支架在制备过程中可灵活控制空间形状,从而满足不同细胞对气体成分、营养物质、代谢废物交换的需求。Ben-Arye 等^[9]以大豆组织蛋白(TVP)为原料制备的多孔支架,证实通过与产生 ECM 的支持细胞共培养和复杂的 ECM 沉积可改善肌生成,支架参数(如孔径、营养价值、质地和弹性)也可以通过定制 TVP 的植物蛋白组成和挤压参数来改善^[46]。利用快速冷冻明胶和透明质酸溶液可以生产多孔支架,冰晶形成的同时在整个支架结构中形成交联利用^[38],具有大于 90%的孔隙率,能够支持猪脂肪来源干细胞的附着、增殖和分化^[39]。

3.2 脱细胞支架

脱细胞支架是指通过脱细胞技术去除免疫原性细胞成分,由动植物器官/组织形成的生物材料^[47]。脱细胞支架主要由 ECM 组成,ECM 是一种三维(3D)框架,包含胶原蛋白、弹性蛋白、纤连蛋白、层粘连蛋白和基质细胞蛋白等细胞外大分子^[40]。同时,脱细胞后可以保留脱细胞基质的物理化学信号和生物性能,为机械支持提供基质,为后续细胞接种提供生物 3D 载体。因此,这种再细胞化的脱细胞基质可以植入患者体内进行组织工程,包括修复受损器官、再生内源性组织和替换缺失器官。

脱细胞蔬菜支架依托植物天然纤维网络,通过去除细胞成分保留三维拓扑结构,无需复杂结构设计即可模拟肌纤维排列与血管样通道,具有成本低廉、可持续性强等优势。当前应用热点集中于菠菜、花椰菜、芹菜等纤维发达的蔬菜,脱细胞处理可去除植物细胞,暴露出高度结构化的纤维素植物骨架,这有助于肌纤维排列。最新研究证实了不经脱细胞处理而直接进行高压灭菌的常见蔬菜,高压灭菌赋予其可调节的、模拟肉类的硬度,同时保留了哺乳动物细胞亲和分子。此外,研究还发现了高压灭菌蔬菜上多种独特的、有序的拓扑结构^[14]。

3.3 微载体支架

微载体(MC)是直径为100~500 μm的球形聚合物微珠,在细胞培养肉领域发挥出显著潜力。该支架通常利用多糖或蛋白质等生物大分子交联制备,细胞可吸附于其表面或内部。凭借极高的比表面积与优良的生物相容性,微载体不仅能显著提升细胞扩增密度,还兼具良好的可生物降解性。微载体的表面纹理和孔隙率对不同细胞类型的封装效率具有显著影响,因此选择合适的微载体对优化细胞培养过程至关重要。在肌肉细胞培养中,其高表面积体积比尤为适合规模化扩增,为培养肉生产提供了独特优势。

目前,商品化的微载体如Cytodex、Cytopore等已应用于肌肉干细胞培养,通常由聚苯乙烯、交联葡聚糖、明胶等材料制成,表面涂覆胶原蛋白或黏附肽以促进细胞附着。在培养肉生产中,微载体主要发挥2种作用:作为临时载体支持细胞增殖后去除细胞;通过降解释放细胞作为可食用载体直接整合入最终产品。可食用的多孔明胶微载体联合搅拌式生物反应器,可以高效扩增和分化肌肉和脂肪干细胞^[48],并利用3D打印模具将肌肉和脂肪微组织进行模块化组装,最终通过食品加工技术将其加工成厘米尺度的人造肉丸^[41]。Yen等^[49]开发了可食用的壳聚糖-胶原微载体,用于扩增牛间充质干细胞并形成细胞化微组织,结合植物蛋白油凝胶系统成功构建了分层和汉堡状2种培养肉原型。Norris等^[42]则利用水包油乳液与压印技术制备了表面具有沟槽结构的可食用微囊,有效促进了肌源性细胞的增殖、分化及有序排列,形成的微组织可进一步加工为肉饼并在烹饪中保持性状。

尽管微载体为大规模细胞扩增提供了相对简单的解决方案,但其应用仍面临细胞解离与分离成本高、微载体自身成本高、最大细胞密度限制以及对最终产品营养与感官特性潜在影响等挑战。替代策略如类器官培养或单细胞悬浮培养可能避免微载体的使用,但目前尚不确定何种方法能在成本与质量平衡上最优。总体而言,微载体作为培养肉生产中的关键工具,既可作为细胞扩增的临时平台,也可作为最终产品中“肉糜”或重组肉的基本结构单元,但其技术路径的经济性与实用性仍需进一步探索与优化。

3.4 3D打印/生物打印支架

3D打印作为生物制造的前沿技术,正逐步成为组织工程与器官再生的重要推动力^[50]。3D打印技术凭借精准的结构定制能力,成为肌肉纹理模拟的核心技术,可实现肌纤维走向、孔隙分布、肌脂比例的个性化设计,适配不同肉类产品的纹理需求。当前主流打印技术包括立体光固化成型(SLA)、熔融沉积成型(FDM)与生物墨水直写(DIW)。

生物墨水的性能优化是3D打印支架成功的关键,需兼顾打印精度、细胞相容性与可食性^[23]。理想的生物墨水不仅需要适宜的流变性以保证打印流畅性和结构精细度,同时须具备快速且充分的交联反应以保证打印结构的稳定性和强度。此外,生物墨水材料良好的生物相容性和可调的生物降解性也是确保细胞增殖分化和组织再生的必要前提^[51]。Su等^[23]首次使用谷物醇溶蛋白(玉米、大麦和黑麦)作为纯植物基的墨水和支架材料,同时结合新型的高精度3D打印技术,制造了与猪肌肉组织具有相似性的超细蛋白支架。

3.5 纤维支架

纤维支架一般由纳米/微米级细长纤维随机堆叠或有序排列,形成高孔隙、高连通性三维网络结构的仿生物材料支架,是最贴近天然细胞外基质形貌的主流支架类型。纤维支架主要采用静电纺丝技术制备支架。静电纺丝技术是利用静电作用力将明胶等高聚物溶液以一定流速挤出注射器针头形成微纳米级超细纤维,随后将细胞接种于超细纤维间隙并诱导分化为组织的塑形方式。这些纤维具有高表面积、可调节的孔隙率和封装各种化合物的能力^[43],该超细纤维可支持细胞的黏附并为其提供氧气和营养素的输送间隙,且该纤维细丝排列一致,有助于促进肌肉纤维的形成。MacQueen等^[19]通过静电纺丝技术制备出明胶纤维细丝,并将兔成肌细胞和牛平滑肌细胞接种在明胶纤维细丝上,经长时间培养形成完整组织,并证明培养肉制品与真实肌肉具有类似的结构和机械特性。但传统静电纺丝膜孔隙率低、渗透性差。微流控

纺丝技术作为一种新兴的微纳制造手段,通过在微通道内精准调控多相流体的流体力学行为(如层流剪切与界面交联),能实现对纤维形貌、内部结构及物理化学特性的连续高度可控调制。该技术可稳定制造纳米至微米级的超细纤维,在空间尺度上高度模拟天然细胞外基质的纤维网状拓扑结构。Chen 等^[52]基于微流控纺丝技术,以光交联型甲基丙烯酸海藻酸盐(AA-MA)与合成聚合物聚己内酯(PCL)为纺丝原料,成功构筑出兼具独特空间异质性的双层核壳纤维支架。为赋予支架主动诱导组织定向生长的生物学效应,该研究通过程序化控制收集器的运动速率与轨迹,实现了微米级纤维束的高度平行对齐排列。

3.6 水凝胶支架

水凝胶支架是以明胶、胶原蛋白、壳聚糖、透明质酸、海藻多糖等大分子物质为原料,通过物理或化学的方法交联聚合而成。水凝胶是一种高含水量的三维网状结构,具有生物相容性、可降解性、可调节性等优点^[45]。水凝胶可以模拟天然细胞外基质进行细胞定殖,具有良好的亲水性,其与细胞外基质含水量以及自然组织力学性能相似,可为组织提供良好的生长和分化平台^[53]。此外,支架材料具有较好的细胞相容性,培养基中的细胞生长因子和信号分子可快速渗透穿过支架到达细胞,通过调节高分子的浓度、交联度等来满足培养肉的培养需求^[44,54]。例如,Furuhashi 等^[55]将原代提取的牛肌细胞接种于胶原支架,结合电刺激方式培养 14 d,成功获得了肌管沿长轴呈高度整齐排列的、毫米级厚的肌肉组织。扩散动力学取决于支架的交联和微孔结构,支架的硬度会影响细胞运动、增殖和分化^[56]。过于坚硬的支架会抑制增殖和迁移,细胞需要在组织成熟过程中重塑支架。支架的生物化学性质对细胞相容性至关重要。细胞黏附和蛋白水解位点应掺入支架中,以促进细胞黏附和迁移。支架的机械性能经常用原子力显微镜测量,以揭示杨氏模量值,该模量值定义了与应力和应变相关的材料刚度。在体内,不同组织类型的杨氏模量是可变的,这有助于通过机械转导确定细胞命运。例如,脂肪组织和大脑是柔软的(0.2~1.0 kPa),骨骼肌是中间的(≤ 10 kPa),骨骼是坚硬的(30~45 kPa)组织。因此,在支架内概括这些刚度可以指导干细胞的分化。当肌肉卫星细胞生长在与天然干细胞生态位的硬度相匹配的基质中时,它可以进行自我更新^[56]。支架基质的可控降解与多态转换特性,在构建复杂多组织复合产品时具有显著的工程学优势。例如,利用部分支架材料的可逆交联特性,可有效规避多细胞共培养时分化条件不兼容的瓶颈。Zagury 等^[57]在构建人造肉用工程化大理石纹牛脂肪组织的研究中,首先利用低内毒素海藻酸钠支架分别包裹并诱导成熟的脂肪细胞与肌肉细胞,再通过构建体边界处精准螯合钙离子引发表层局部去交联,使离散的预分化组织微块表面发生微液化并紧密贴合,最终引入钙溶液进行二次交联固化。该策略在不妥协 2 类细胞各自最佳分化预处理条件下,实现了肌肉与脂肪微模块的无缝缝合,成功构筑出兼具特定机械强度且高度仿生真实牛肉“大理石花纹”微空间分布的复合组织。

4 细胞培养肉的扩大生产方式

支架整合悬浮培养系统是当前细胞农业中实现规模化与组织化培养肉生产的关键技术路径。该系统通过结合可食用微载体或三维支架与动态生物反应器培养,在提升细胞扩增效率的同时,也为最终产品提供了所需的纹理与结构。

在悬浮培养平台中,细胞可聚集成球体或依托微载体生长。例如,PoGelatin-MCs 微载体在旋转瓶生物反应器中支持猪卫星细胞和 C2C12 细胞在 7 d 内实现 20 倍扩增,并自发分化为成熟肌肉表型;3T3-L1 前脂肪细胞也能在其上增殖分化,从而实现脂肪含量可调的厘米级肉丸组装^[58]。研究进一步显示,通过优化培养方案,干细胞在可食用多孔微载体上的密度可显著提升,倍增时间甚至少于传统二维培养。壳聚糖-胶原等可食用微载体能支持多种细胞类型的快速黏附与扩增,几天内即可覆盖载体表面。与静态培养相比,动态培养系统(如旋转瓶和生物反应器)虽细胞总数相近,但能提供更均匀的细胞分布,这对最终产品的组织均质性至关重要。

为实现更高层次的组织仿生,大型可食用植物支架(如韭菜、蘑菇、苜蓿支架)也被引入悬浮培养系统。这些支架成本低廉,并能支持骨骼肌细胞和脂肪细胞的高效扩增与定向排列。例如,C2C12 细胞在包被支架上 5 d 内扩增 17 倍,猪肌肉卫星细胞形成排列整齐的融合层^[59]。三维支架的整合,既克服了悬浮培养系统在重现肉质嫩度、嚼劲和大理石纹特征方面的局限,也为产品提供了符合消费者预期的感官特性。

将支架或微载体培养从静态体系转移至动态生物反应器是实现规模化的必经环节^[60]。生物反应器

不仅提供可控的理化环境,其流体力学特性也深刻影响细胞行为和组织发育^[61]。如图3所示,主要生物反应器类型:1)搅拌式生物反应器:适用于微载体或小型支架的悬浮培养,但需注意高剪切力对细胞或脆弱组织的潜在损伤。2)灌注式生物反应器:培养液流经固定支架床,剪切力低、传质效率高,是组织分化与成熟的理想选择,并可整合机械或电刺激以促进肌肉成熟。3)波浪式生物反应器:通过温和摇动实现混合,剪切力较低,也适用于微载体或小支架的悬浮培养。

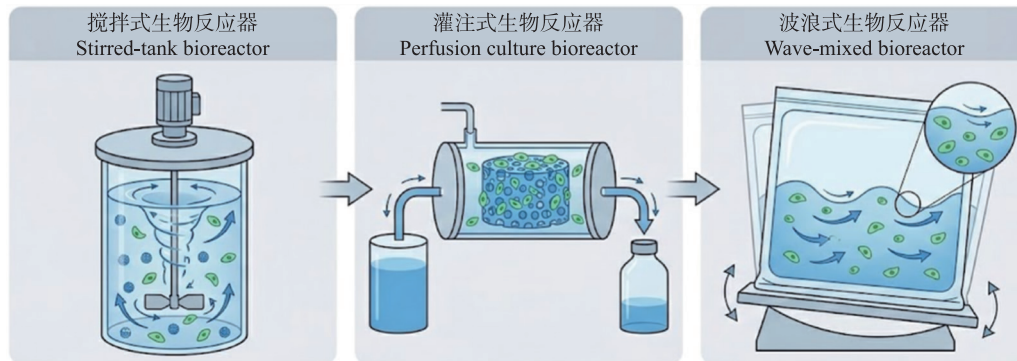


图3 主要生物反应器类型

Fig.3 Main types of bioreactors

另外,借鉴微生物工业发酵的悬浮发酵管式(柱式)生物反应器在规模化生产中尤其受到青睐,适用于微载体-细胞复合体或小型多孔支架的连续培养。其优势在于易于放大、混合与传质良好,且便于自动化过程控制。然而,它也面临若干工程挑战:在培养工艺中,需优化流体动力学与支架/微载体的密度、表面性质等特性,防止其沉降堵塞以保障营养交换均匀;精细量化流体剪切力对细胞黏附、增殖和分化的影响,确定最优培养力学条件;开发高效、温和的收获工艺,实现成熟组织化产品从反应器的收获及下游加工的衔接。

综上所述,支架整合悬浮培养系统通过微载体和三维支架与动态生物反应器的有机结合,为培养肉的高效扩增、组织化构建及最终产品质构的优化提供了综合性解决方案。未来的发展关键在于持续优化生物反应器设计、克服工程化挑战,并在成本控制与产品品质之间找到最佳平衡点。

5 整合与智能化趋势

未来的生物过程核心在于“智能支架”与“智能生物反应器”的深度耦合,以此实现培养肉组织生长的精准调控、全过程数字化管理,为其高密度构建与规模化生产提供核心技术支撑。智能支架内集成微传感器,可实时反馈局部微环境信息,智能生物反应器则依托这些信息,通过自适应算法动态调节灌注速率、营养成分、力学刺激等参数^[62],同时人工智能(AI)驱动优化能力可以对三维支架内的微环境进行精准调节,使其与悬浮培养系统协同作用,助力更高效的细胞生长和组织形成。具体而言,循环神经网络、LSTM和TCN等模型可分析pH值、溶解氧、代谢物、细胞密度和剪切应力的时间序列数据^[63],预测细胞状态转变并指导喂养、灌注和收获时间表;强化学习代理能依据实时传感器反馈的细胞密度、聚集体大小等信息,自适应调节搅拌、灌注和营养输送,维持稳定培养条件并最大化产量;结合深度学习代理模型的CFD,可基于生物反应器几何形状、支架尺寸等要素,模拟剪切应力场、支架变形和营养梯度,预测其对细胞活力、增殖和组织均匀性的影响^[64]。人工智能通过整合这些预测与分析能力,实现了动态培养系统的闭环控制,完成对搅拌速度、灌注流速及营养输送方案的实时自动化调节,而AI优化后的支架结构具备卓越的三维支撑与结构稳定性,能与悬浮培养系统完美融合,有效突破了传统贴壁培养在空间利用率和产量方面的局限^[65]。

6 总结与展望

细胞培养肉支架技术正处于从实验室创新迈向工业化应用的历史节点。用于培养肉应用的支架生物材料已取得显著进展,而支架生物材料的选择至关重要,其作用不仅为细胞生长提供结构支撑,还会影响营养物质流动及培养肉质相似性,直接决定所产肉类的生长状态与整体品质。然而,要实现培养肉的广

泛接受和成功商业化,仍需全面解决与生物材料、规模化生产、成本、质地、监管标准及安全性相关的多重挑战。其中,智能支架设计作为推动培养肉从实验室原型走向工业化应用的核心技术,其与智能生物反应器深度耦合的相关探索已成为重要突破方向,同时需严格遵循各国既定的食品安全与监管框架,在支架材料研发中优先选用食品级认证材料及安全交联剂,尽早完善安全性档案以加快监管审批。先进生物材料、智能技术及改进的生物加工工艺的整合,有望彻底改变食品生产方式,而跨学科合作与创新,以及聚焦多功能刺激响应型支架开发、AI 驱动平台完善等关键研究方向,将成为应对现有挑战、实现培养肉在全球食品体系中变革潜力的关键,为培养肉的高密度构建与规模化生产提供核心支撑。

展望未来,后续研究应聚焦2个方向:1)开发能够实时动态与细胞相互作用的支架将成为支架技术的核心。这类支架须具备适应性机械特性、生物活性信号传递能力,以及随组织生长阶段演变的表面化学特性。2)需要进一步开发人工智能驱动平台,以支持生物反应器系统中的多参数优化和实时决策。下一代支架技术将成为实现工业规模高效、稳定且经济可行的培养肉生产的关键。行业亟须建立共享的食品级支架基准测试标准,包括标准化测试组合、实验室外部验证以及公开可访问的数据集和模型卡片,从而加速该技术的工业化转化。

参考文献 References:

- [1] Xu X M, Sharma P, Shu S J, et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods[J]. *Nature Food*, 2021, 2(9): 724–732.
- [2] Mazac R, Meinilä J, Korkalo L, et al. Incorporation of novel foods in European diets can reduce global warming potential, water use and land use by over 80%[J]. *Nature Food*, 2022, 3(4): 286–293.
- [3] Resare Sahlin K, Trewern J. A systematic review of the definitions and interpretations in scientific literature of ‘less but better’ meat in high-income settings[J]. *Nature Food*, 2022, 3(6): 454–460.
- [4] 丁世杰, 李春保, 周光宏. 细胞培养肉技术及产业化进展与挑战[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 33–41.
Ding S J, Li C B, Zhou G H. Progress and challenge of cultured meat technology and industrialization[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(12): 33–41 (in Chinese).
- [5] 关欣, 汪丹丹, 方佳华, 等. 细胞培养肉技术: 研究进展与未来展望[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 1–13.
Guan X, Wang D D, Fang J H, et al. Cultured meat technology: advances and future perspectives[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(12): 1–13 (in Chinese).
- [6] 王亚芳. 基于原花青素-双醛壳聚糖-胶原复合支架生产牛源细胞培养肉的机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024: 1–13.
Wang Y F. Study on the mechanism of bovine cell-cultured meat production based on proanthocyanidins-dialdehyde chitosan-collagen composite scaffold[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024: 1–13 (in Chinese with English abstract).
- [7] Fish K D, Rubio N R, Stout A J, et al. Prospects and challenges for cell-cultured fat as a novel food ingredient[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 98: 53–67.
- [8] Ding S J, Wang F, Liu Y, et al. Characterization and isolation of highly purified porcine satellite cells[J]. *Cell Death Discovery*, 2017, 3: 17003.
- [9] Ben-Arye T, Shandalov Y, Ben-Shaul S, et al. Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat[J]. *Nature Food*, 2020, 1(4): 210–220.
- [10] Pasitka L, Cohen M, Ehrlich A, et al. Author correction: spontaneous immortalization of chicken fibroblasts generates stable, high-yield cell lines for serum-free production of cultured meat[J]. *Nature Food*, 2023, 4(1): 124.
- [11] Pasitka L, Cohen M, Regenbaum S, et al. Spontaneous immortalization of bovine fibroblasts following long-term expansion offers a non-transformed cell source for cultivated beef[J]. *Nature Food*, 2025, 6(11): 1079–1094.
- [12] Chaudhuri O, Gu L, Klumpers D, et al. Hydrogels with tunable stress relaxation regulate stem cell fate and activity[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(3): 326–334.
- [13] Zhuge W T, Ding X, Zhang W H, et al. Microfluidic generation of helical micromotors for muscle tissue engineering[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 447: 137455.
- [14] Liu Y, Gao A Q, Wang T T, et al. Growing meat on autoclaved vegetables with biomimetic stiffness and micro-patterns[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 161.
- [15] Lee M, Choi W, Lee J M, et al. Flavor-switchable scaffold for cultured meat with enhanced aromatic properties[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 5450.
- [16] 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: 5059.
- [17] Jordan J H, Easson M W, Condon B D. Alkali hydrolysis of sulfated cellulose nanocrystals: optimization of reaction conditions and tailored surface charge[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(9): 1232.

- [18] 马新芳,张静莹. 骨组织工程支架材料的研究现状与应用前景[J]. 中国组织工程研究,2014,18(30):4895-4899.
Ma X F, Zhang J Y. Development of bone tissue engineering scaffold materials[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research,2014,18(30):4895-4899(in Chinese with English abstract).
- [19] MacQueen L A, Alver C G, Chantre C O, et al. Muscle tissue engineering in fibrous gelatin; implications for meat analogs[J]. npj Science of Food,2019,3:20.
- [20] Jung S, Choi B, Lee M, et al. Bio-orchestration of cellular organization and human-preferred sensory texture in cultured meat[J]. ACS Nano, 2025,19(2):2809-2821.
- [21] Xu M M, Ming S, Cui J H, et al. Harnessing mycelium-based morphology of filamentous fungi in food biomanufacturing; integrated advances, challenges, and future perspectives[J]. Trends in Food Science & Technology,2026,172:105696.
- [22] Rubio N R, Xiang N, Kaplan D L. Plant-based and cell-based approaches to meat production[J]. Nature Communications,2020,11:6276.
- [23] 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.
- [24] Xiang N, Yuen J S K, Jr, Stout A J, et al. 3D porous scaffolds from wheat glutenin for cultured meat applications[J]. Biomaterials,2022,285:121543.
- [25] 周英菊. 海水浸泡对聚乙二醇聚氨酯涂层结构及性能的影响[D]. 大连:大连海事大学,2013:73.
Zhou Y J. The impact on structure and properties of PEG polyurethane coating immersing in seawater[D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2013:73(in Chinese with English abstract).
- [26] Mei X H, Li D C, Sun L, et al. Sustained release of quercetin through homogeneous poly(lactic-co-glycolic acid) microspheres to enhance MSCs biofunctions for regenerative therapy[J]. Regenerative Therapy,2026,31:101085.
- [27] 孙灵钰,郭佳慧,汪雨,等. 仿生器官芯片研究进展[J]. 应用化学,2022,39(1):18-34.
Sun L Y, Guo J H, Wang Y, et al. Research progress on bioinspired organs-on-chips[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry,2022,39(1):18-34(in Chinese).
- [28] Li J H, Wang J H, Long X R, et al. Correction:biodegradable polyurethane nerve conduits functionalized with NDP-MSH-loaded self-assembling peptide hydrogels for peripheral nerve regeneration[J]. Journal of Materials Chemistry B,2026,14(13):4197.
- [29] 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 X, Peng C A, Xu Y M, et al. Application of cell scaffold and tissue forming technology in cultured meat[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University,2023,42(2):52-60(in Chinese).
- [30] 唐雨楠,史陈晨,杨明,等. 纤维素基生物材料在细胞培育肉生产中的应用[J]. 食品科学,2022,43(19):295-307.
Tang Y N, Shi C C, Yang M, et al. A review of the application of cellulose-based biomaterials for cultured meat production[J]. Food Science, 2022,43(19):295-307(in Chinese).
- [31] Xiang N, Yao Y, Yuen J S K, et al. Edible films for cultivated meat production[J]. Biomaterials,2022,287:121659.
- [32] Zheng Y Y, Chen Y, Zhu H Z, et al. Production of cultured meat by culturing porcine smooth muscle cells *in vitro* with food grade peanut wire-drawing protein scaffold[J]. Food Research International,2022,159:111561.
- [33] Zauchner D, Müller M Z, Horrer M, et al. Synthetic biodegradable microporous hydrogels for *in vitro* 3D culture of functional human bone cell networks[J]. Nature Communications,2024,15:5027.
- [34] 孙斌. 生物可降解材料——聚乳酸及其共聚物的制备与性质研究[D]. 济南:山东师范大学,2015:86.
Sun B. Synthesis and properties of the biodegradable material-poly(lactide acid) and its copolymers[D]. Jinan:Shandong Normal University, 2015:86(in Chinese with English abstract).
- [35] Nie A G, Nie W H, Zhou N, et al. Self-assembling hydrogel for controlled release of bFGF and Ang-1 mimetic peptide promotes neurovascular repair in ischemic stroke rats[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A,2026,114(4):e70063.
- [36] Xing R R, Liu K, Jiao T F, et al. An injectable self-assembling collagen-gold hybrid hydrogel for combinatorial antitumor photothermal/photodynamic therapy[J]. Advanced Materials,2016,28(19):3669-3676.
- [37] 孙艳廷. 单细胞分析揭示三维肿瘤微环境中巨噬细胞动态免疫响应[D]. 郑州:郑州大学,2020:82.
Sun Y T. Dynamic immune response of macrophages in three-dimensional tumor microenvironment revealed by single-cell analysis[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2020:82(in Chinese with English abstract).
- [38] Luo J W, Liu C, Wu J H, et al. *In situ* injectable hyaluronic acid/gelatin hydrogel for hemorrhage control[J]. Materials Science and Engineering:C,2019,98:628-634.
- [39] 吴晓梅. 麦谷蛋白-壳聚糖 3D 细胞培养多孔支架的刚性和微结构研究[D]. 佛山:佛山科学技术学院,2024:3-7.
Wu X M. Stiffness and microstructure study of glutenin-chitosan 3D cell culture porous scaffolds[D]. Foshan:Foshan University,2024:3-7(in Chinese with English abstract).
- [40] 茹江江. 肝素化脂肪脱细胞基质通过递送脂肪衍生长因子促进小鼠创面愈合的实验研究[D]. 广州:南方医科大学,2024:113.
Ru J J. Experimental study on promoting wound healing in mice by delivering adipose-derived growth factors using heparinized adipose acellular matrix[D]. Guangzhou:Southern Medical University,2024:113(in Chinese with English abstract).
- [41] Liu Y, Wang R, Ding S J, et al. Engineered meatballs via scalable skeletal muscle cell expansion and modular micro-tissue assembly using porous gelatin micro-carriers[J]. Biomaterials,2022,287:121615.

- [42] Norris S C P, Kawecki N S, Davis A R, et al. Emulsion-templated microparticles with tunable stiffness and topology: applications as edible microcarriers for cultured meat[J]. *Biomaterials*, 2022, 287: 121669.
- [43] Ali K, Niaz N, Haq F U, et al. Electrospinning of food-grade polysaccharides and proteins: materials, challenges, and applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2026, 380: 125070.
- [44] Caliri S R, Burdick J A. A practical guide to hydrogels for cell culture[J]. *Nature Methods*, 2016, 13(5): 405–414.
- [45] Cai M Q, Chen L J, Wang T, et al. Hydrogel scaffolds in the treatment of spinal cord injury: a review[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2023, 17: 1211066.
- [46] 宋文娟. 猪脂肪间充质干细胞培养体系建立及体外制备培养脂肪研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2023: 160.
Song W J. Establishment of the culture system for porcine adipose-derived mesenchymal stem cells to prepare cultured fat *in vitro*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023: 160(in Chinese with English abstract).
- [47] 郜坤洁. 人脐带脱细胞细胞外基质水凝胶的制备及相关性能研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2022: 101.
Gao K J. Fabrication and characterization studies of human umbilical cord decellularized extracellular matrix hydrogel[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2022: 101(in Chinese with English abstract).
- [48] 尤晓颜, 李亚春, 段续. 人造肉生产工艺及其研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(6): 221–226, 240.
You X Y, Li Y C, Duan X. Research progress in manufacturing technique of artificial meat[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(6): 221–226, 240(in Chinese with English abstract).
- [49] Yen F C, Glusac J, Levi S, et al. Cultured meat platform developed through the structuring of edible microcarrier-derived microtissues with oleogel-based fat substitute[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 3138.
- [50] 杨霞霞. 胶原蛋白的3D生物打印及其在组织工程中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2025: 174.
Yang X X. 3D bioprinting of collagen and its applications in tissue engineering[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2025: 174(in Chinese with English abstract).
- [51] 潘小鹏, 吕玲玲, 张旭, 等. 光交联丝素蛋白生物3D打印墨水的研究进展[J]. *丝绸*, 2024, 61(8): 50–59.
Pan X P, Lü L L, Zhang X, et al. Research progress of photo-crosslinked silk fibroin 3D bioprinting ink[J]. *Silk*, 2024, 61(8): 50–59(in Chinese).
- [52] Chen X, Sun T, Shimoda S, et al. A micromanipulation-actuated large-scale screening to identify optimized microphysiological model parameters in skeletal muscle regeneration[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(44): 2403622.
- [53] Van Vlierberghe S, Dubruel P, Schacht E. Biopolymer-based hydrogels as scaffolds for tissue engineering applications: a review[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(5): 1387–1408.
- [54] Maitra J, Shukla V K. Cross-linking in hydrogels: a review[J]. *American Journal of Polymer Science*, 2014, 4(2): 25–31.
- [55] Furuhashi M, Morimoto Y, Ai S M, et al. Formation of contractile 3D bovine muscle tissue for construction of millimetre-thick cultured steak[J]. *Nature Partner Journals Science of Food*, 2021, 5: 6.
- [56] Freeman F E, Kelly D J. Tuning alginate bioink stiffness and composition for controlled growth factor delivery and to spatially direct MSC fate within bioprinted tissues[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17042.
- [57] Zagury Y, Ianovici I, Landau S, et al. Engineered marble-like bovine fat tissue for cultured meat[J]. *Communications Biology*, 2022, 5: 927.
- [58] 何孝银, 蔡焕, 黄晔, 等. 新型 SIRT1 激活剂 XZG2151 对 3T3-L1 前脂肪细胞分化的影响[J]. *徐州医科大学学报*, 2023, 43(2): 91–95.
He X Y, Cai H, Huang Y, et al. Effect of a novel SIRT1 activator XZG2151 on the differentiation of 3T3-L1 preadipocytes[J]. *Acta Academiae Medicinae Xuzhou*, 2023, 43(2): 91–95(in Chinese).
- [59] 吕晓. Reversine 对胎猪肌肉卫星细胞去分化及向雌性生殖细胞分化的作用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 77.
Lü X. The role of reversine on dedifferentiation of fetal porcine muscle satellite cells and differentiation into female germ cells[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012: 77(in Chinese with English abstract).
- [60] Porto de Souza Vandenberghe L, Murawski de Mello A F, Biagini G, et al. Bioreactors for cultivated meat production[M]//Soccol C R, Molento C F M, Reis G G, et al. *Cultivated meat: technologies, commercialization and challenges*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 107–130.
- [61] 韩昭昭, 孔桦, 许海燕. 动态力学因素在组织工程化血管构建中的作用及其研究进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2008, 25(3): 716–719.
Han Z Z, Kong H, Xu H Y. Achievement and progress of dynamic culture conditions on the construction of engineered blood vessel substitutes[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2008, 25(3): 716–719(in Chinese).
- [62] Lee J, Kim H, Lim H R, et al. Large-scale smart bioreactor with fully integrated wireless multivariate sensors and electronics for long-term *in situ* monitoring of stem cell culture[J]. *Science Advances*, 2024, 10(7): eadk6714.
- [63] 牛牛, 吴斌, 刘虎, 等. 人工智能驱动的内皮细胞力学信号时序解析及其在泛癌预后评估中的医工融合应用[J]. *中国临床新医学*, 2026, 19(1): 18–28.
Niu N, Wu B, Liu H, et al. AI-driven temporal decoding of endothelial mechanotransduction and its medico-engineering applications in assessing pan-cancer prognosis[J]. *Chinese Journal of New Clinical Medicine*, 2026, 19(1): 18–28(in Chinese with English abstract).
- [64] 顾朝辉. 生物信息挖掘新基因预测平台的建立与 TSEG-3 的克隆和功能初步研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 158.
Gu Z H. Establishing of novel gene prediction platform based on bioinformatics and data mining and the identification of TSEG-3[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 158(in Chinese with English abstract).

- [65] Li L Z, Zhang Y J, Xu Z P, et al. Engineering scaffold-cell interactions for cultured meat: mechanisms, materials, and emerging AI-driven strategies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 165: 105362.

责任编辑: 范雪梅



冯宪超,西北农林科技大学教授,农业农村部神农青年英才,中国畜产品加工研究会常务理事,陕西省现代农业产业技术体系肉类加工专家,陕西省水产学会大鲵产业发展与加工利用专业委员会主任, *Journal of Future Foods*、*Food Science of Animal Products*、《肉类研究》《肉类工业》等期刊编委。聚焦畜产品绿色制造科学与技术,成果揭示了天然小分子调控生物大分子有序组装的机制。在此基础上,研发了气凝胶保鲜和循环杀菌技术,发明了肉蛋白-多酚互作绿色调控技术,创建了凝胶支架各向异性与力学特性可编辑技术。成果在全国推广,10家规模以上企业3年累计销售额超50亿元。以第一完成人获得陕西省科学技术进步奖二等奖、陕西省专利一等奖、中国食品工业协会科学技术一等奖、陕西省高等学校科学技术一等奖。主持国家自然科学基金项目4项、博士后项目1项、省级课题3项和校企合作项目10余项;以第一及通信作者在 *Trends in Biotechnology*、*Nature Communications* 等国际著名期刊发表SCI论文70余篇;授权专利7件,软件著作权5件;出版专著1部;主编规划教材2部。近5年作国内外会议报告18次,2023年作为执行主席成功举办中国部畜禽产品加工与冷链产业创新发展论坛。指导的研究生入选首届中国科协青年人才托举工程博士生专项计划以及获得校级优秀硕士论文等荣誉。