

人造肉生产工艺及其研究进展

Research progress in manufacturing technique of artificial meat

尤晓颜 李亚春 段 续

YOU Xiaoyan LI Yachun DUAN Xu

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:人造肉作为一种创新的替代品,被广泛认为是解决肉类供应紧缺、环境影响和动物福利等问题的有效方式。根据制备技术的不同,人造肉可以分为植物蛋白肉、细胞培养肉和微生物蛋白肉 3 种类型。文章探讨了植物蛋白肉、细胞培养肉和微生物蛋白肉的生产工艺和感官品质提升工艺,分析了各自的技术优势和存在的挑战,并对未来人造肉产品的发展趋势进行了展望。

关键词:人造肉;植物蛋白肉;细胞培养肉;微生物蛋白肉;生产工艺

Abstract: Cultivated meat, as an innovative substitute for conventional meat, is widely recognized as an effective solution to challenges such as meat supply shortages, environmental impacts, and animal welfare concerns. Based on the production technology used, cultivated meat can be categorized into three types: plant-based meat, cell-cultured meat, and microbial protein meat. This review explores the production processes and sensory quality enhancement techniques for these three types of cultivated meat, analyzes their respective technological advantages and challenges, and provides a forecast on the future development trends of cultivated meat products.

Keywords: artificial meat; plant-based meat; cell-cultured meat; microbial protein meat; production process

随着世界人口数量及改造世界活动的不断增加,给自然资源、人类社会及生活环境带来了巨大影响^[1]。据联合国粮食及农业组织推算,到 2050 年,全世界对于肉类的需求量将会增加 70%,达到 4.55 亿 t^[2]。国家统计局数据显示,2021 年中国人均肉类消费量达 52 kg,为 1961 年的 16 倍。为了满足人民群众日益增长的肉制品需求,2020 年中国进口猪肉 480 万 t,占全球猪肉进口量

的 46.29%。猪、牛、羊等动物在饲养过程中需要占用和消耗大量土地、自然资源和饲养成本,并产生废水、废气以及土壤污染,同时,畜牧业的碳排放也加剧了温室效应^[3]。随着科学技术的发展,以及传统农业生产方式的不断更新升级,新型肉类替代品——人造肉,被认为是解决上述问题的有效方式之一。

根据生产方式,人造肉大致可以分为 3 种类型:第 1 种为植物蛋白肉,以大豆蛋白为原料添加植物血红蛋白所生产的仿制肉^[4];第 2 种为细胞培养肉,通过采用动物的干细胞进行增殖分化培养所生产的肌肉组织^[5-6];第 3 种为微生物蛋白肉,即采用合成生物学技术,通过微生物细胞合成的菌体(丝)蛋白、血红素^[7-8]和血红蛋白^[9],进一步加工完善所生产的仿制肉。文章拟对 3 种人造肉的加工工艺及其技术特点进行综述,比较不同生产工艺的优缺点,并对人造肉产品的发展方向进行展望,以期为中国人造肉研究和规模化生产提供依据。

1 植物蛋白肉的加工技术及原理

植物蛋白肉是以大豆、小麦、豌豆等植物蛋白为主原料,部分同时含有菌体蛋白、坚果、豆类或蔬菜等辅料,通过挤压、纺丝、调理等技术制备,具有与传统肉制品相似的外观、口感、触觉和营养价值的仿肉类产品。

1.1 挤压技术

挤压技术是一种集连续加热、压缩、干燥及成型等多个步骤为一体的过程^[10],该技术通过高温高压条件下对植物蛋白持续挤压,破坏其分子中的氢键和离子键等,使蛋白分子重组形成纤维结构,从而使蛋白质分子在后期加工中更容易被制作成具有肉类纹理的人造肉产品。挤压技术主要包括单螺杆挤压、低水分双螺杆挤压、高水分双螺杆挤压、超临界 CO₂ 挤压、双阶或多阶挤压等。与单螺杆挤压相比,双螺杆挤压在物料输送和混合性能上更为优越,能量利用率也更高。根据物料含水量的不同,双螺杆挤压技术可以分为高水分挤压(40%~80%)和低

基金项目:国家自然科学基金(编号:31200035)

作者简介:尤晓颜(1979—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail: xiaoyanyou@haust.edu.cn

收稿日期:2023-12-01 **改回日期:**2024-04-28

水分挤压(20%~40%)两类,高水分挤压温度相比低水分挤压的低,一般为 130℃以下,制备的产品营养成分和生理活性成分损失少。低水分挤压温度一般为 150℃以上,熟化能为机械能^[11],由于挤压温度较高,产品的持水性、复水性,营养成分以及生理活性成分受挤压温度影响较大。此外,设备运行过程中对材料的磨损也较严重,因而低水分挤压技术在植物蛋白肉产品制备中应用较少。超临界 CO₂ 挤压技术通过在模口处注入超临界 CO₂ 作为增塑剂和发泡剂,促进挤出物的膨化成型,由于模口温度和挤压温度较低,营养物质损耗较少,因而有利于对植物蛋白分子进行加工,可以通过控制操作条件来控制孔的产生和生长^[12]。因此,通过超临界 CO₂ 和挤压技术相结合,还可以降低生产能耗,在未来有着良好的应用前景^[13]。

1.2 纺丝技术

按照聚合物溶液的排列方式不同,纺丝技术可分为湿法纺丝与静电纺丝两大类^[14]。湿法纺丝技术主要是将蛋白质溶解后,通过喷头挤出丝状物料,并将其浸入到不能溶解蛋白质的溶剂中。在这一过程中,蛋白质在溶解与未溶解状态之间转换,通过对蛋白相的挤压作用来实现沉淀和凝固。Arêas 等^[15]开发了蛋白质湿法纺丝技术,用于生产大豆蛋白纤维,其主要工艺流程包括纺丝液的制备、挤压喷丝、凝固成型以及后期处理和包装。在湿法纺丝过程中,通过添加增稠剂和化学改性剂,可以显著提高蛋白质的可纺性和纤维质量,从而应用于人造肉的生产。湿法纺丝技术由于其产生的纤维形态规则、整齐且稳定性高等特点,在人造肉生产中备受推崇。但该技术工艺复杂、产量受限,且在洗涤过程中会产生大量含有化学试剂的废水,这些因素限制了其在工业化生产中的应用。

静电纺丝是一种能够制造具有高纵横比纳米级纤维的技术,主要由高压电源、集电极以及带移液管的毛细管组成,将具有高黏度的蛋白质溶液通过喷丝板变为酸性凝固液,产生定向的纤维,该过程称为静电纺丝技术^[9]。静电纺丝产生的蛋白纤维具有很好的功能特性,通过与黏合剂配合使用,可以进行组织化食品的生产^[12]。Mattice 等^[16]利用玉米醇溶蛋白为原料,采用静电纺丝技术制备出了蛋白纤维,用于植物蛋白肉的生产;并进一步比较了静电纺丝、机械拉伸和反溶剂沉淀 3 种不同蛋白纤维制备技术,指出静电纺丝技术在人造肉制作上存在生产通量低、生产工艺复杂及成本高的问题。此外,静电纺丝技术对原料蛋白的适用范围有一定的要求,因而不易进行商业化生产。

1.3 剪切技术

剪切技术是指采用剪切的方式制造植物蛋白纤维,剪切单元基于流变仪的工作原理设计,在剪切和高温的共同作用下,实现成型过程中对纤维微观结构的控制,使

得蛋白质排列成纤维结构^[17]。Krintiras 等^[18-19]采用 Couette Cell 技术制备大豆蛋白肉,该技术主要采用两组同心圆桶,相互嵌套,外圆桶(直径 0.125 m)固定,内圆桶(直径 0.095 m)匀速旋转,内外圆筒均采用蒸汽加热,在温度 120℃、加工时间(30±5)min、转速(25±5)r/min 条件下,植物蛋白原料在圆桶内的剪切区内受到剪切力作用被加工为结构层次分明的纤维结构,生产出具有工业级品质的 30 mm 厚大豆蛋白肉。与挤压技术相比,剪切过程中采用剪切和热相结合的方式,作用条件较为温和,原料在剪切过程中发生的形变易于控制,但目前采用该技术的最大剪切区体积仅为 7 L,因而生产能力有限,且由于其具体机理仍处在探索阶段,尚未大规模推广使用。

1.4 3D 打印技术

食品 3D 打印技术主要包括挤压式打印、选择性烧结印刷、黏合剂喷射和喷墨打印 4 种类型^[20]。植物蛋白肉主要是利用挤压式打印技术制备而成,通过将蛋白原料进行挤压,使蛋白质从喷头挤出后凝固形成层状纤维结构进而制备成仿真植物蛋白肉制品。2018 年,西班牙 Novameat 公司采用 3D 打印技术成功生产出植物性蛋白质素食牛排,并于 2020 年推出了 3D 打印牛排的升级版。Wang 等^[21]开发出以大豆蛋白和面筋为基底的 3D 打印凝胶材料配方,并采用热敏可可脂评估了其用于 3D 打印制备人造肉的可行性。陈廉杰等^[22]针对基于植物原料的人造肉脂肪组织部分 3D 打印成型质量不稳定,打印效率低等问题,研究并改进与食品材料相匹配的智能 3D 打印轨迹运动算法,减少打印路径中的堆积与拐角。尽管 3D 打印技术目前还存在产品生产成本较高、产能有限、外观和口感还达不到消费者的期待值等问题,仍需进一步改进和完善,但该技术在人造肉生产中表现出良好的应用前景,成为未来发展的主要技术^[23]。

挤压技术、湿法纺丝技术、静电纺丝技术、剪切技术和食品 3D 打印技术在植物蛋白肉生产中的优缺点见表 1。

2 细胞培养肉的加工技术及其原理

细胞培养肉是利用细胞生物学、组织工程和食品工程领域的先进技术,通过无菌实验室或工厂中大规模体外培养动物细胞和组织而生产的新型肉类食品^[24]。

2.1 干细胞的增殖分化技术

目前,人造肉生产中使用的干细胞类型包括胚胎干细胞、间充质干细胞、肌肉干细胞和成体干细胞等,这些干细胞经过特定诱导后可定向分化形成不同的组织细胞。随着种子细胞分离提取方法的改善,低成本细胞培养基的开发和干细胞的增殖分化技术成为产业化核心技术之一。由于细胞分裂存在海弗利克极限,细胞不能无限增殖。Edelman 等^[25]通过不断向细胞培养液中加入新的培养基以突破细胞分裂的限制,但人造肉的量产仍是

表 1 植物蛋白肉生产技术优缺点分析

Table 1 Analysis of advantages and disadvantages of vegetable protein meat production technology

类型	优点	缺点
静电纺丝技术	蛋白质功能特性较好,能够生产纳米级别的纤维	技术限制性强,成本高、安全性低
湿法纺丝技术	添加增稠剂、化学改性剂等改善纤维质量	工艺复杂,洗涤过程中排放大量含化学试剂的废液
单螺杆挤压技术	含水量低、易操作,产能较大,应用广泛	适用性单一、物料加工温度不均匀,剧烈的热机械作用会导致蛋白的不确定形变,影响纤维质量
高水分双挤压技术	含水量高、温度需求低、工艺更智能化	不易贮藏
低水分双螺杆挤压技术	易贮藏	口感受原材料影响较大,生产过程对材料磨损程度大
超临界 CO ₂ 挤压技术	易膨化成型、不易破坏原材料、能耗低	适用性单一
热剪切法	纤维结构明显,产品在纤维化过程中不易被破坏,机械能输入较低	技术不成熟,规模较小,一般只适用于实验室研究,且原料的比例及排列方式会影响产品结构
挤压和 3D 打印联用技术	物料可以迅速定型、操作温度低	原材料的需求和设备对接方面技术尚不够成熟

一个挑战,目前主要在实验室进行。在体外细胞培养中,可以通过不断补充营养液以促进细胞增殖,但细胞只能进行有限次的分裂。合适的培养基需满足以下条件:促进细胞正常生长、环保安全且对人体无害、成本低廉以适应大规模培养。早期研究使用动物血清作为培养基,其成分复杂、难以控制,且可能携带病毒,后期研究转向使用无血清培养基。无血清培养基成分明确,易于控制,且在细胞消耗营养物质时能够不断补充所需营养,从而更稳定、安全且质量可控,有利于细胞的增殖和分化。目前,中国还未见用于细胞培养肉的无血清培养基产品,这为国内企业提供了显著的商机^[26]。然而,无血清培养基中缺少能够灭杀病毒的蛋白质,因此维护无菌环境至关重要。有研究^[27]表明,使用可食用材料和低成本方法制造的水凝胶可促进肌肉细胞的生长,这为人造肉技术的培养基进步提供了新的可能性。

2.2 仿生细胞支架构建技术

肉类是由血管、筋膜和多层细胞聚合体组成的复杂结构,因此,在细胞培养肉生产中,构建支架系统尤为关键。细胞支架不仅为细胞黏附提供了必要的力学支撑,还确保了充足的生长空间和物质交换渠道。支架的组成与表面化学性质直接影响其与细胞的生物相容性,这些支架不仅能够促使细胞培养肉形成层次结构,还能增强其口感和咀嚼性。根据是否可食用,支架系统可分为两类:一类是可与细胞培养肉融合的无毒可食用支架,免去了培养完成后的分离过程;另一类是无毒但不可食用的支架,需在培养完成后进行人工分离。支架材料的应用形态主要有微载体、多孔支架和水凝胶 3 种。Filho 等^[28]提出了微载体技术,通过在 DEAE-Sephadex A 50 微球上贴壁培养细胞,有助于在有限空间内生产更多的细胞培养肉。微载体通常由高分子材料制成,主要被应用于疫苗、药物开发和生物医学领域,这些材料大多数不可食用或来源于动物组织,且成本较高,不适合商业化的大规模

生产^[29]。多孔支架采用微米级孔状结构的生物材料,允许细胞在其表面吸附并增殖,同时促进物质运输和代谢物传递^[30-31]。Tholmes 等^[32]采用一种无细胞毒性的多孔面包瓤材料作为支架,有效促进了细胞的黏附和增殖。水凝胶是一种通过物理化学交联形成的三维网络生物材料,具有良好的细胞相容性,Shi 等^[33]将原代提取的牛肌细胞种植于胶原或纤维蛋白基质凝胶纤维束中,结合电刺激进行 14 d 细胞培养,成功制备出具有长轴方向排列肌小管的三维培养肉。支架系统在细胞培养肉的生产中扮演着至关重要的角色,不仅影响其结构和口感,还涉及到是否可食用以及成本等因素。因此,选择合适的支架材料和形态对于推动细胞培养肉的商业化生产具有重要意义。

2.3 风味口感改进技术

风味特征是消费者判断肉制品品质优劣的重要指标,在风味方面,通过添加脂肪酸等风味物质不断模拟肉类特有风味,可增强细胞培养肉的感官评分。Kit 等^[34]在实验室成功生产出大量具有类似天然动物脂肪质地和构成的 3D 脂肪组织,该产品在视觉上与动物脂肪组织相似,具有类似的纹理结构。在人造肉生产中,通过蛋白质和人造脂肪的结合,可以模拟肉类中脂肪的分布和特性,从而提升人造肉的口感和营养价值。Mission Barns 公司通过从动物中分离细胞,并将这些细胞置于培养器中进行培养,在特制的培养器内喂食营养物、维生素、糖和蛋白质,使这些细胞成长为动物脂肪。该方法产生的是真正的纯动物脂肪,且在整个过程中无需饲养和屠宰动物,生产的肉类产品不含抗生素和其他可能的污染物。Hoxton Farms 公司运用细胞生物学和数字建模,在生物反应器中进行细胞培养,以产生与动物脂肪相同的脂肪结构。2023 年 9 月,中国某公司成功完成了细胞培养猪脂肪的 500 L 中试放大生产,赋能中国细胞培养肉食品的规模化生产。

在口感方面,借助于细胞支架技术使细胞培养肉产生纹理结构,可以增强其口感和咀嚼性。Milae 等^[35]通过将原代牛成肌细胞和原代牛脂肪间充质干细胞在具有不同硬度的明胶/海藻酸钠支架上进行二维分化来控制培养肉的感官和营养特性,评估了肌肉和脂肪分化质量对养殖肉感官特性的影响后,通过组装由高分化细胞组成的肌肉和脂肪结构,从而制造出与传统牛肉具有相似感官特征的细胞培养肉。Hee 等^[36]利用流体浴辅助 3D 打印技术和肌腱凝胶集成生物 3D 打印技术,成功构建了包含肌肉、脂肪组织和毛细血管的复杂结构。通过对真实和牛细胞纤维染色后的图像进行模仿,并手工排列堆叠,制造出直径为 5 mm、长度为 10 mm 的人造牛排,该牛排不仅具有和牛肉特有的大理石纹理,还能在一定程度上模拟牛肉的口感和营养成分。为了改善细胞培养肉的口感,支架材料不仅需要具备多孔性、生物相容性、生物可降解性和良好的加热特性,还必须是可食用的,确保食用安全。Ye 等^[37]通过采用可食用的多孔明胶微载体与搅拌式生物反应器,有效地在体外培养和扩增猪原代肌肉星形细胞(即猪骨骼肌干细胞),并诱导其分化成熟。随后,利用 3D 打印技术制造的肉球模具和食品级谷氨酰胺转氨酶,成功将微小的猪肌肉微组织组装成数厘米大小的人造猪肉丸。因此,未来细胞培养肉的商业化生产还需要开发出更环保和食用安全的技术,在提升培养肉的口感和营养价值的同时,满足大规模商业生产的需求。

3 微生物蛋白肉的制备原理和技术

3.1 微生物蛋白的生产与微生物蛋白肉的研究状况

微生物蛋白是一种以葡萄糖、淀粉、糖蜜、合成气、二氧化碳等为底物,利用微生物发酵生产的蛋白,其生产方式一般分为传统发酵、生物质发酵和精密发酵(将微生物宿主作为“细胞工厂”,生产特定功能成分)3 种类型。目前,用于发酵生产微生物蛋白的主要微生物菌种包括细菌、藻类、酵母和丝状真菌,酵母菌和丝状真菌是目前商业化生产微生物蛋白较为理想的菌株。如:丝状真菌镰刀菌(*Fusarium*)生产的菌丝蛋白不仅具有类似肉质的纹理结构,还富含可食性粗纤维有助于人体肠胃消化,是一种优质的肉类代用品。英国 Quorn 公司利用威尼斯镰刀菌发酵生产出了高纤维、低饱和脂肪的真菌蛋白 QuornTM,成功研制出利用微生物蛋白肉生产的汉堡,此后又陆续推出了香肠、肉卷类产品,深受消费者喜爱。Nature's Fynd 公司利用分离自黄石国家公园的黄色镰孢菌菌株开发出了 Fy ProteinTM真菌蛋白,该蛋白含有全部的 20 种常见氨基酸、矿物质和维生素,并使用该真菌蛋白制作出肉制品和乳制品。与传统养殖方式相比,土地使用以及用水量大大减少,同时还有助于减少温室气体排放。美国 Better Meat 公司研发出名为“Rhiza”的霉菌蛋白肉产品,官方命名为 Rhiza Mycoprotein Meat,作为肉

类添加剂和制作植物基肉类产品使用。近日,该公司宣布将推出霉菌蛋白技术生产的鹅肝,用于指定餐厅作为原料使用。目前,中国相关食品高新技术企业也纷纷布局微生物蛋白的生产,所用生产技术类型涉及酵母、菌丝体、微藻生物质发酵以及精密发酵四大类。此外,部分食用菌由于含有高比例易消化的蛋白质和膳食纤维,呈现出肉类的质地,可以作为一种肉类蛋白质的潜在替代物^[38-39]。Kyoungju 等^[40-41]研究指出,通过深层发酵培养的双孢霉(*A. bisporus*)的菌丝体具有肉状纤维结构,可用于生产美味、健康、营养的人造肉食品。高水分挤压技术是目前微生物蛋白肉生产中最具工业可行性的生产工艺,该技术通过对物料进行高温、高压、高剪切等作用力的综合应用,使物料在挤压过程中定向流动并在通过设备模头时发生质构重组,这一过程有效地形成了纤维状组织结构,赋予了产品较高的纤维组织化程度、弹性和韧性,从而生产出质地接近真实肉类的模拟肉制品,目前绝大多数企业均采用该技术进行微生物蛋白肉的生产。随着人口的增长和生活水平的提高,对优质蛋白质的需求不断增加,微生物蛋白作为一种优质蛋白源,2023 年真菌蛋白市场规模约为 40 亿美元,全球至少有 70 家公司在进行该领域的研究,包括 Meati Foods 等在内的许多公司已加快了创新速度,预计 2023—2033 年复合年增长率为 6%^[42]。

3.2 微生物蛋白肉的品质提升技术

良好的感官质量是评估肉类品质的关键指标,肉类鲜艳的红色尤其能激发消费者的购买意愿。由于微生物蛋白肉缺乏天然色素蛋白(如肌红蛋白和血红蛋白),难以达到传统肉类产品的色泽要求。血红蛋白的合成方法包括化学试剂萃取、酶解和生物合成法,前两者因成本高、环境污染及产物纯度低而不适于人造肉的大规模生产。目前,生物合成法是生产血红素和血红蛋白的主流方法^[43]。大肠杆菌、酿酒酵母和毕赤酵母等微生物是高效的血红蛋白合成平台,已成功表达合成猪肌红蛋白(P-Mb)、大豆血红蛋白(S-Hb)和透明颤菌血红蛋白(V-Hb)。尽管大肠杆菌能合成 P-Mb 与 S-Hb,但因内毒素风险不适宜用于食品级血红蛋白生产。Impossible Foods 公司采用毕赤酵母合成了获得 FDA 许可,并在多国申请专利的商业化大豆血红蛋白。通过增强毕赤酵母中血红素合成基因的 AOX1 启动子,整合大豆血红蛋白基因和转录激活因子 Mxr1p 等策略,以及优化的高密度发酵条件,成功实现了大豆血红蛋白的大规模工业生产^[44]。Yu 等^[27]通过增强毕赤酵母底盘细胞中血红素的供给水平,实现了高活性血红素结合蛋白的高效合成。通过消除血红素生物合成过程中的空间分离,优化前体合成等一系列措施,实现了多种高活性血红蛋白,包括猪肌红蛋白、大豆血红蛋白、透明颤菌血红蛋白和 P450-

BM3 在毕赤酵母中的合成。P-Mb、S-Hb、V-Hb 与 P450-BM3 的产量分别为 (162.46 ± 11.12) , (184.35 ± 17.14) , (32.32 ± 5.94) , (28.31 ± 5.44) mg/L。

为了在热处理过程中增强微生物蛋白肉的熟肉香气,可以向其添加含硫氨基酸(如 *L*-甲硫氨酸、胱氨酸和半胱氨酸)以改善产品风味。相较于传统的化学合成方法,含硫氨基酸的微生物发酵合成法因反应条件温和、环境友好而备受关注。Zhao 等^[7]通过代谢工程技术改造了谷氨酸棒杆菌 CYS-2,实现了 *L*-甲硫氨酸的微生物合成,发酵液中 *L*-甲硫氨酸质量浓度可达 (947.9 ± 46.5) mg/L。张博等^[45]以模块化代谢工程策略构建了 *L*-甲硫氨酸高产菌株大肠杆菌,通过对一碳模块甲基供体的增强和优化、过表达胱裂解酶和半胱氨酸内运基因,*L*-甲硫氨酸产量达到 18.26 g/L。此外,加入谷氨酰胺转氨酶(TGase)能催化形成谷氨酰胺和赖氨酸之间的异型肽键,将小块肉结合成大块肉,形成致密结构,从而提高人造肉的像真度。

4 总结与展望

人造肉作为未来食品的代表,充分满足了绿色、环保、健康、可持续发展的理念。相比于其他类型的人造肉而言,植物蛋白肉的生产技术目前更加成熟。通过对挤压技术、纺丝技术、剪切技术和食品 3D 打印等制备技术特点进行比较分析,确定高水分挤压技术是目前最为成熟、适合商业化生产植物蛋白肉的工艺。未来,植物蛋白肉的研究重点应集中于提高产品的口感,使其更接近真实肉类,同时降低生产成本,提高生产效率。细胞培养肉的市场化亟需提高产量,降低生产成本。随着动物细胞生物反应器的不断改良,将会促进动物细胞大规模培养技术的发展,为细胞培养肉的绿色制造提供新的动力。细胞培养肉的研究重点应集中于开发更加环保、食用安全的支架材料,优化细胞培养基配方,提高细胞增殖效率,同时降低生产成本,以满足大规模商业生产的需求。微生物蛋白肉营养丰富,富含多种生物活性物质,不含胆固醇,对心脑血管疾病患者友好。与植物蛋白肉和细胞培养肉相比,其生产效率更高。然而,微生物蛋白肉的推广仍面临挑战。首先,微生物蛋白需要进一步降低生产成本,增加生产的可持续性;其次,需要严格把控菌种产生的代谢物成分,以防止产生食物中毒等一系列安全问题;最后,许多微生物蛋白生产技术涉及基因改造,增加了监管复杂性和安全审核难度,企业研发风险高。微生物蛋白肉的研究重点应集中于筛选和改造高产、高质量的工程菌株,优化发酵工艺,提高蛋白质产量和质量,同时加强食品安全性评估。

综上,人造肉产业的发展需要多学科交叉融合,集成生物技术、食品科学、生物工程等多个领域的研究成果。未来,人造肉产业的发展重点应集中于提高产品品质、降

低生产成本、确保食品安全,推动产业化进程。同时,还需加强相关法律法规和标准体系建设,为人造肉产业的健康发展保驾护航。

参考文献

- [1] STEPHENS N, SILVIO L D, DUNSFORD I, et al. Bringing cultured meat to market: technical, socio-political, and regulatory challenges in cellular agriculture[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 155-166.
- [2] FAO. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective[J]. Land Use Policy, 2003, 20(4): 375.
- [3] 李石磊, 李莹莹, 王守伟, 等. 培育肉与传统肉类生产过程对环境的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(9): 1-10.
LI S L, LI Y Y, WANG S W, et al. Effects of cultivated meat and traditional meat production process on the environment[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2022, 41(9): 1-10.
- [4] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 299-305.
OU Y J, ZHENG M J, ZENG H L, et al. Advance in plant-based meat research[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 299-305.
- [5] 张斌, 屠康. 传统肉类替代品: 人造肉的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 327-333.
ZHANG B, TU K. The research advance of traditional meat substitutes: artificial meat [J]. Food Industry Science and Technology, 2020, 41(9): 327-333.
- [6] JENS S S, ALEJANDRO B G, STEPHANIE J, et al. Evaluation of the effects of different culture media on the myogenic differentiation potential of adipose tissue- or bone marrow-derived human mesenchymal stem cells [J]. International Journal of Molecular Medicine, 2014, 33(1): 160-170.
- [7] ZHAO X R, CHOI K R, LEE S Y, et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for secretory production of free haem[J]. Nature Catalysis, 2018(1): 720-728.
- [8] LIU L, MARTÍNEZ J L, LIU Z, et al. Balanced globin protein expression and heme biosynthesis improve production of human hemoglobin in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Metabolic Engineering, 2014, 21: 9-16.
- [9] MARTINEZ J L, LIU L F, PETRANOVIC D, et al. Engineering the oxygen sensing regulation results in an enhanced recombinant human hemoglobin production by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2015, 112(1): 181-188.
- [10] PIETSCH V L, KARBSTEIN H P, EMIN M A. Kinetics of wheat gluten polymerization at extrusion-like conditions relevant for the production of meat analog products[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 102-109.
- [11] ZHANG B, ZHANG Y, DREISOERNER J, et al. The effects of screw configuration on the screw fill degree and special mechanical energy in twin-screw extruder for high-moisture texturised defatted soybean meal[J]. Journal of Food Engineering,

- 2015, 157: 77-83.
- [12] SAUCEAU M, FAGES J, COMMON A, et al. New challenges in polymer foaming: a review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide[J]. *Progress in Polymer Science*, 2010, 36(6): 749-766.
- [13] 张金闯, 刘丽, 刘红芝, 等. 食品挤压技术装备及工艺机理研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 275-283.
- ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Research progress of food extrusion technology and equipment and process mechanism[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 275-283.
- [14] SATISH K. Meat analogs " Plant based alternatives to meat products: their production technology and applications"[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(5): 1 059.
- [15] ARÊAS J A G. Extrusion of food proteins[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2009, 32(4): 365-392.
- [16] MATTICE K D, MARANGONI A G. Comparing methods to produce fibrous material from zein[J]. *Food Research International*, 2020, 128(2): 1-8.
- [17] 王玉翔, 郑君君, 刘元法. 植物蛋白纤维制备技术及其在食品领域的应用[J]. *食品科学*, 2023, 44(17): 286-293.
- WANG Y X, ZHENG Z J, LIU Y F. Preparation technology of plant protein fiber and its application in food field [J]. *Food Science*, 2023, 44(17): 286-293.
- [18] KRINTIRAS G A, DIAZ J G, GOOT A J V D, et al. On the use of the couette cell technology for large scale production of textured soy-based meat replacers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169: 205-213.
- [19] KRINTIRAS G A, GÖBEL J, GOOT A J V D, et al. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a couette cell[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 160: 34-41.
- [20] LIU Z, ZHANG M, BHANDARI B, et al. 3D printing: printing precision and application in food sector[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 69: 83-94.
- [21] WANG S S, LIU S B. 3D Printing of soy protein- and gluten-based gels facilitated by thermosensitive cocoa butter in a model study [J]. *ACS Food Science Technology*, 2021(1): 1 990-1 996.
- [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. Trajectory planning algorithm for 3D printing of artificial meat adipose tissue[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(1): 3-8.
- [23] 童强, 姜宇, 佟垚, 等. 食品 3D 打印中的食品材料特性与应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
- TONG Q, JIANG Y, TONG Y, et al. Research progress on characteristics and application of food materials in food 3D printing[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
- [24] XIN G, LEI Q Z, YAN Q Y, et al. Trends and ideas in technology, regulation and public acceptance of cultured meat[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100032.
- [25] EDELMAN P D, MCFARLAND D C, MIRONOV V A, et al. Commentary: in vitro-cultured meat production [J]. *Tissue Engineering*, 2005, 11(5/6): 659-662.
- [26] 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 X, ZHOU J W, DU G C, et al. Technical development trend and suggestions of cell culture meat industry[J]. *China Engineering Science*, 2023, 25(3): 251-262.
- [27] YU F, ZHAO X R, JZHOU J W, et al. Biosynthesis of high-active hemoproteins by the efficient heme-supply *Pichia pastoris* chassis [J]. *Advanced Science* (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany), 2023, 10(30): e2302826.
- [28] FILHO P F S, NAIR R B, ANDERSSON D, et al. Vegan-mycoprotein concentrate from pea-processing industry byproduct using edible filamentous fungi [J]. *Fungal Biology and Biotechnology*, 2018, 5(3): 5.
- [29] LI B Y, WANG X, WANG Y, et al. Past, present, and future of microcarrier-based tissue engineering[J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2015, 3(2): 51-57.
- [30] SANNE V, DAAN L, ANON V E, et al. Bovine myoblast cell production in a microcarriers-based system [J]. *Cytotechnology*, 2018, 70(2): 503-512.
- [31] DRUSCH S, SERFERT Y, HEUVEL A V D, et al. Physicochemical characterization and oxidative stability of fish oil encapsulated in an amorphous matrix containing trehalose [J]. *Food Research International*, 2006, 39(7): 807-815.
- [32] THOLMES J T, JABERANSARI Z, COLLINS W, et al. Homemade bread: repurposing an ancient technology for in vitro tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2021, 280: 121267.
- [33] SHI L Y, DING P H, WANG Y Z, et al. Self-healing polymeric hydrogel formed by metal-ligand coordination assembly: design, fabrication, and biomedical applications[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2019, 40(7): e1800837.
- [34] KIT Y J S, K S M, NING X, et al. Aggregating in vitro-grown adipocytes to produce macroscale cell-cultured fat tissue with tunable lipid compositions for food applications[J]. *eLife*, 2023, 12: 1968065.
- [35] MILAE L, SOHYEON P, BUMGYU C, et al. Cultured meat with enriched organoleptic properties by regulating cell differentiation [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 77.
- [36] HEE K D, FIONA L, HAO L, 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): 50-59.
- [37] YE L, RUI W, SHIJIE D, 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.

(下转第 240 页)

- [42] LE N H, SHIN S, TU T H, et al. Diet enriched with Korean pine nut oil improves mitochondrial oxidative metabolism in skeletal muscle and brown adipose tissue in diet-induced obesity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(48): 11 935-11 941.
- [43] GEORGIADI A, LICHTENSTEIN L, DEGENHARDT T, et al. Induction of cardiac Angptl4 by dietary fatty acids is mediated by peroxisome proliferator-activated receptor β/δ and protects against fatty acid-induced oxidative stress[J]. Circulation Research, 2010, 106(11): 1 712-1 721.
- [44] BHANDAR I C, AGNIHOTR N. Pine nut oil supplementation alleviates the obesogenic effects in high-fat diet induced obese rats: a comparative study between epididymal and retroperitoneal adipose tissue[J]. Nutrition Research, 2022, 106(11): 85-100.
- [45] 刘治廷, 王忠娟, 张秀娟, 等. 马齿苋抑菌活性成分研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 359-371.
- LIU Z T, WANG Z J, ZHANG X J, et al. Recent advances in research on chemical components and antibacterial activities of *Portulaca oleracea* L.[J]. Food Science, 2023, 44(19): 359-371.
- [46] WEREMFO A, ADULLEY F, DABIE K, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from turkey berry (*Solanum torvum* Sw) fruits using response surface methodology[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2022, 30: 100387.
- [47] WANG Z Y, CHEN X Q. Functional evaluation for effective compositions in seed oil of Korean pine[J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(3): 215-217.
- [48] WEIR G C. Islet inflammation can be linked to the disruption of proinsulin processing in type 1 diabetes but not in type 2 diabetes [J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2022, 108(2): E21-E22.
- [49] CHRISTIANSEN E, WATTERSON K R, STOCKER C J, et al. Activity of dietary fatty acids on FFA1 and FFA4 and characterisation of pinolenic acid as a dual FFA1/FFA4 agonist with potential effect against metabolic diseases[J]. British Journal of Nutrition, 2015, 113(11): 1 677-1 688.
- [50] ITOH Y, KAWAMATA Y, HARADA M, et al. Free fatty acids regulate insulin secretion from pancreatic beta cells through GPR40[J]. Nature, 2003, 1 600(2 000): 2 001-2 004.
- [51] IM D S. FFA4 (GPR120) as a fatty acid sensor involved in appetite control, insulin sensitivity and inflammation regulation[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2017, 64: 92-108.
- [52] CHEN S J, HSU C P, LI C W, et al. Pinolenic acid inhibits human breast cancer MDA-MB-231 cell metastasis in vitro [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1 708-1 715.
- [53] 孔维漂, 芦鑫荣, 侯琳琳, 等. 维生素与免疫系统健康[J]. 四川大学学报(医学版), 2023, 54(1): 7-13.
- KONG W L, LU X R, HOU L L, et al. Vitamins and immune system health [J]. Journal of Sichuan University (Medical Sciences), 2011, 126(4): 1 708-1 715.
- [54] BENQUET C, KRZYSTYNIAK K, SAVARD R, et al. Modulation of exercise-induced immunosuppression by dietary polyunsaturated fatty acids in mice[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 1994, 43(2): 225-237.
- [55] MATSUO N, OSADA K, KODAMA T, et al. Effects of γ -linolenic acid and its positional isomer pinolenic acid on immune parameters of brown-norway rats[J]. Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 1996, 55(4): 223-229.
-
- (上接第 226 页)
- [38] 李春兰, 邹玉峰, 张玉洁, 等. 食用菌在肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(8): 49-56.
- LI C L, ZHOU Y F, ZHANG Y J, et al. Research progress of edible fungi in meat products[J]. Meat Research, 2022, 36(8): 49-56.
- [39] WANG W, ZHANG K, LI C, et al. A novel biodegradable film from edible mushroom (*F. velutipes*) by product: microstructure, mechanical and barrier properties associated with the fiber morphology [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 47: 153-160.
- [40] KYOUNGJU K, BYUNGSUN C, INHEE L, et al. Bioproduction of mushroom mycelium of *Agaricus bisporus* by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(9): 61-68.
- [41] ZHANG Z Y, ZHANG L J, SUN H J, et al. High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: a review [J]. Food Reviews International, 2023, 39(8): 4 873-4 908.
- [42] GRACE N A, SYLVIE R, NARITSADA T, et al. Macrofungi as a nutraceutical source: promising bioactive compounds and market value[J]. Journal of Fungi, 2021, 7(5): 397.
- [43] 赵鑫锐, 张国强, 李雪良, 等. 人造肉大规模生产的商品化技术[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(11): 248-253.
- ZHAO X R, ZHANG G Q, LI X L, et al. Commercialization technology of artificial meat mass production [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(11): 248-253.
- [44] ZHAO X R, ZHOU J W, DU G C, et al. Recent advances in the microbial synthesis of hemoglobin[J]. Trends in Biotechnology, 2020, 39(3): 286-297.
- [45] 张博, 王莹, 牛坤, 等. 代谢工程改造大肠杆菌一碳模块高效合成 L-甲硫氨酸[J]. 生物工程学报, 2023, 39(8): 3 302-3 317.
- ZHANG B, WANG Y, NIU K, et al. Efficient synthesis of L-methionine by metabolic engineering of *E. coli* one-carbon module[J]. Journal of Bioengineering, 2023, 39(8): 3 302-3 317.