

# 替代蛋白食品工业化发展思考

胡海娟<sup>1,2</sup>, 王守伟<sup>1,2</sup>, 李宇轩<sup>1,2</sup>, 孙金沅<sup>3</sup>, 李石磊<sup>1,2</sup>, 李莹莹<sup>1,2</sup>, 孙宝国<sup>3\*</sup>

(1. 北京食品科学研究院中国肉类食品综合研究中心, 北京 100068; 2. 国家市场监督管理总局技术创新中心(动物替代蛋白), 北京 100068; 3. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048)

**摘要:** 替代蛋白食品是利用合成生物学、细胞工程等生物制造技术获取的新型蛋白食品, 具有可持续、合成高效等优势; 推进替代蛋白工程化和工业化, 对加快发展新质生产力、保障国家粮食安全具有重要意义。本文从国际竞争加剧、“大食物观”格局构建、新质生产力培育、可持续发展4个方面阐述了替代蛋白食品的发展价值, 从科技、监管、工业化3个方面系统梳理了国内外替代蛋白食品的发展现状。研究认为, 种子细胞系、无血清培养基、专用生物反应器、高效底盘菌株筛选及制备、植物蛋白肉塑形和赋味等关键技术有待突破, 食品安全标准及监管框架亟需建立, 关键要素的自主研发与生产能力以及产业链的细分领域也需加快拓展。针对性提出了加快替代蛋白食品工业化进程的发展建议, 以期为我国替代蛋白工业化研究、实践、监管等提供参考和启示。

**关键词:** 替代蛋白食品; 细胞培育肉; 微生物蛋白肉; 植物蛋白肉; 工业化生产; 产业链; 安全标准; 监管体系  
**中图分类号:** Q813 **文献标识码:** A

## Thoughts on the Industrialization of Alternative Protein Foods

Hu Haijuan<sup>1,2</sup>, Wang Shouwei<sup>1,2</sup>, Li Yuxuan<sup>1,2</sup>, Sun Jinyuan<sup>3</sup>, Li Shilei<sup>1,2</sup>,  
Li Yingying<sup>1,2</sup>, Sun Baoguo<sup>3\*</sup>

(1. China Meat Research Center, Beijing Academy of Food Sciences, Beijing 100068, China; 2. Technology Innovation Center of Animal-Derived Protein Alternatives, State Administration for Market Regulation, Beijing 100068, China; 3. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Alternative protein foods are obtained using biomanufacturing technologies such as synthetic biology and cell engineering; they are sustainable and efficient in synthesis. Promoting the engineering and industrialization of alternative proteins is crucial for developing new quality productivity and ensuring national food security in China. This study illustrates the development values of alternative protein foods from the aspects of intensified international competition, development of an all-encompassing approach to food, new quality productivity, and sustainable development. It also analyzes the development status of alternative protein foods in China and abroad from the scientific, regulatory, and industrialized perspectives. It was concluded that breakthroughs should be achieved in key technologies such as cell lines, serum-free media, dedicated bioreactors, high-efficiency screening and preparation of microbial chassis strains, and plant-based meat fabrication and flavoring. Meanwhile, it is necessary to establish food safety standards and regulatory frameworks, improve China's independent research and production capacities of key elements, and expand sub-sectors of the industrial chain. Furthermore, targeted suggestions are proposed to accelerate the industrialization of alternative protein foods.

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2024-12-19

通讯作者: \*孙宝国, 北京工商大学食品与健康学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为食品添加剂与安全; E-mail: sunbg@btbu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“细胞培育肉工业化发展战略研究”(2023-XZ-79); 国家重点研发计划项目(2024YFA0918300)

本刊网址: [sscae.engineering.org.cn](http://sscae.engineering.org.cn)

This study is expected to provide references and inspirations for the research, practices, and supervision of alternative protein industrialization in China.

**Keywords:** alternative protein foods; cell-cultured meat; microbial-based meat; plant-based meat; industrial production; industrial chain; safety standards; regulatory system

## 一、前言

替代蛋白食品指利用合成生物学、细胞工程等生物制造技术,以人工合成方式获得蛋白质分子并通过相关工艺制成的新型蛋白食品,具有可持续、合成高效等优势<sup>[1,2]</sup>,主要分为细胞培育肉、微生物蛋白肉、植物蛋白肉三大类代表性食品。世界各国积极推行绿色发展理念,2024年全球替代蛋白市场为157亿美元,未来数年内的年复合增长率超过9.9%<sup>[3-6]</sup>。替代蛋白的出现,改变了依靠动物饲喂生产肉类获得蛋白的传统肉类生产模式,有望发展出颠覆性、前瞻性产业,兼有绿色和可持续发展特征,对保障国家粮食安全具有战略价值<sup>[7,8]</sup>。长期以来我国面临蛋白质原料短缺问题<sup>[9]</sup>,传统养殖业和种植业获得蛋白的方式受制于可耕种土地面积,而我国人均土地面积明显低于世界平均水平<sup>[10]</sup>。为此,树立“大食物观”,发展生物科技和生物产业,向植物、动物、微生物“要热量”“要蛋白”,成为适应国情的发展方向;推进替代蛋白研究及其工业化,以工业制造方式生产并供给蛋白质,是践行“大食物观”的重要体现。

工业化生产替代蛋白可实现替代蛋白食品的可持续和高效率生产,将有效缓解我国蛋白质原料短缺、耕地面积不足等问题<sup>[11,12]</sup>。然而,虽然相关研究受到广泛关注<sup>[13,14]</sup>,但要实现替代蛋白食品的全面工业化生产,仍需在多个方面进行深入实践。①提高替代蛋白食品生产的科技水平是实现工业化的基础条件<sup>[15]</sup>。发展高效低成本的生产技术,才能推进替代蛋白食品的大规模工业化生产,从而改善替代蛋白食品的经济可行性和市场竞争力<sup>[14]</sup>。②创新替代蛋白食品安全标准与监管体系是保障工业化食品安全生产的必要条件<sup>[1]</sup>。建立科学的食品安全标准,将确保替代蛋白的生产质量和产品安全,引导在安全框架内进行替代蛋白食品的技术创新,防范潜在的食品安全风险,提高公众对替代蛋白食品的接受度。③逐步完善替代蛋白食品产业链<sup>[11]</sup>,覆盖从原材料、培养工艺到最终产品的各类关键要素,实现

从实验室研制到常态化市场供应的转变,才能向市场提供可持续的蛋白来源,满足居民对食品安全和健康的追求。

工业化是替代蛋白食品未来的发展趋势,但受制于起步时间晚、技术尚存瓶颈,目前三大主要替代蛋白食品处于不同的工业化发展阶段。①在细胞培育肉方向,越来越多的研究团队从实验室研发阶段转向规模化生产研发与验证阶段<sup>[13,16]</sup>,全球多家公司开始建设培育肉工厂,细胞培育肉的工业化趋势显现<sup>[17]</sup>,但关键生产技术仍待提升。②在微生物蛋白肉方向,得益于起步较早,已进入工业化和商业化发展阶段,但生产规模小、生产成本低、产业链待完善<sup>[9]</sup>。③在植物蛋白肉方向,国内外均已进入商业化发展阶段,但塑形和赋味技术不够完善,制约了产业化发展速度<sup>[18]</sup>。此外,全球替代蛋白食品生产技术演进迅速、市场需求日新月异,现有的食品安全与监管制度无法对替代蛋白食品进行有效监管,不利于推进替代蛋白食品的工业化发展。

探讨解决替代蛋白食品工业化发展困境较为迫切,对替代蛋白食品高质量发展具有重要意义。本文着眼我国替代蛋白食品工业化发展需求,全面梳理替代蛋白食品的发展价值、现状及存在问题,系统分析支撑替代蛋白食品工业化发展的基础要素,针对性提出加快替代蛋白食品工业化进程的发展建议,为我国替代蛋白工业化研究、实践、监管等提供参考和启示。

## 二、替代蛋白食品发展价值分析

### (一) 在国际竞争加剧的背景下,发展替代蛋白食品将增强国内产业的国际竞争力

发达国家具有全球食品供应链的控制权,在部分关键环节形成了垄断地位。长期以来,食品行业供应链面临诸多风险,成为大国竞争的重点方向。在全球范围内,食品供应链发展不平衡,发达国家在前端资源、供应链运行管理、市场规模等方面具有优势,而发展中国家在食品供应链上受到诸多制

约，处于相对劣势地位。我国在前端资源、工业生产等环节的对外依存度较高，是先进生产技术、关键原料、装备及配件等的需求方，在全球食品供应链关键环节中的作用发挥亟待加强。

在替代蛋白食品出现后，全球食品供应链体系新增了关键控制点。替代蛋白产业是工业生物技术、生物制造与食品产业的创新融合，表现为突破原有产业链结构、摆脱对前端自然资源的过度依赖，将促进全球食品产业链的延伸、分化和融合。发达国家开始制定支持替代蛋白产业链发展的政策，强化关键技术研究、工艺开发、工业化量产等环节<sup>[19]</sup>。可以预判，替代蛋白食品工业化发展趋势逐步明朗，替代蛋白食品将成为全球食品供应链竞争的新着力点。

### （二）在“大食物观”格局下，发展替代蛋白食品具有保障食品供给安全的意义

替代蛋白食品是“大食物观”发展格局的重要组成部分，向植物、动物、微生物“要蛋白”的直接体现。我国是肉类消费大国，蛋白供应压力较大。替代蛋白食品丰富了蛋白质来源的多样性，拓展了传统蛋白食品供给的边界。通过车间生产替代蛋白食品的方式，将有效替代传统的种植和养殖模式，使生产周期大幅缩减、生产过程更加高效、产量显著增加、生产成本有所降低，成为一种可持续的蛋白供给方式<sup>[20]</sup>。推动替代蛋白产业化发展，将有效缓解依靠传统种植业和养殖业供给蛋白的压力，构成保障国家粮食安全的新举措。

### （三）在培育新质生产力的形势下，发展替代蛋白食品对提升食品工业科技水平具有示范意义

替代蛋白食品以植物、动物细胞、微生物等为生产材料，通过细胞工程、组织工程、合成生物学等生物技术进行体外生产蛋白。相应制造过程科技水平较高、能够实现自主可控、便于工业化，是我国食品工业培育新质生产力的重要表现形式。《“十四五”生物经济发展规划》（2021年）、《“十四五”全国农业农村科技发展规划》（2021年）均将替代蛋白食品明确为提升新质生产力的手段，支持替代蛋白食品的培育发展，以升级传统食品工业、降低养殖业的环境资源压力。发展替代蛋白食品，对构建食品工业新质生产力、推动

食品工业可持续和高质量发展至关重要，在提升食品工业科技水平方面具有示范意义。

### （四）在可持续发展理念下，推广替代蛋白食品对社会进步具有综合性意义

全球人口继续增加，人均肉类消费量有所提升，而传统的动物蛋白生产依赖环境和资源，面临着显著的能耗压力<sup>[21]</sup>。与可持续发展理念相符，替代蛋白在环境保护、资源节约、公共健康方面具有比较优势。①生产替代蛋白通常伴随较低的温室气体排放强度，相较传统的动物蛋白具有明显的环境优势。世界农业生产和土地利用导致的温室气体排放约占全球总排放的25%，而推广替代蛋白食品可减少其中的70%<sup>[22]</sup>。②推广替代蛋白食品，有助于提高资源利用效率并节约资源。传统的动物饲养过程中饲料转化效率低下，如需要约7 kg的植物饲料才能生产1 kg的牛肉<sup>[23]</sup>，而直接利用植物蛋白作为居民食物来源，将更高效地转化资源、降低农田生产压力。③在公共健康方面，消费替代蛋白食品表现出积极效应。植物基饮食与心血管疾病、糖尿病、某些癌症的发生率降低相关<sup>[24]</sup>，部分替代蛋白食品可降低心脏病发病风险约25%<sup>[25]</sup>。替代蛋白食品的生产方式通常更卫生，可减少动物饲养和屠宰带来的病原体传播风险，降低禽流感、牛海绵状脑病等公共卫生事件的发生概率。

## 三、替代蛋白食品发展现状

### （一）国外发展情况

#### 1. 科技方面

在替代蛋白食品研发技术不断成熟的背景下，加速替代蛋白食品工业化进程成为当前的核心任务，主导方向为降低成本和规模化生产<sup>[26]</sup>。

开发低成本生产原料及相应技术，可从源头降低替代蛋白食品的生产成本。培养基是提供细胞体外生长所需成分的生产原料，约占细胞培育肉生产成本的40%~60%<sup>[27]</sup>。血清含有大量细胞体外持续生长和增殖所需的成分，是培养基中最重要的组分，但价格昂贵，因而成为培育肉工业化发展的制约性因素<sup>[28]</sup>。开发低成本的无血清培养基，是降低培育肉工业化生产成本的主攻方向。通过微藻衍生营养物质、哺乳动物细胞生产价格低廉的生长因子，得

到的无血清培养基可促进牛成肌细胞增殖,显著降低细胞培育肉的生产成本<sup>[29]</sup>。菌株是微生物蛋白肉的生产原料,决定了蛋白转化效率,成为微生物蛋白肉工程化的核心因素。高效底盘菌株筛选及制备技术有效提高了微生物蛋白转化效率,降低了相应生产成本。发达国家企业主要采用丝状真菌来生产微生物蛋白,以提高蛋白得率并降低成本,如利用威尼斯镰刀菌蛋白<sup>[30]</sup>、黄石镰刀菌蛋白<sup>[31]</sup>生产微生物蛋白肉产品。植物蛋白肉的生产技术相对成熟,如挤压技术得到广泛应用,又细分为低湿挤压技术、高湿挤压技术<sup>[32]</sup>;但塑形和赋味过程质量不稳定,存在不耐烹饪、缺乏纹理等成型问题,缺乏汁水感、有豆腥味等风味问题。甲基纤维素、魔芋凝胶可有效降低植物蛋白肉制品的水分损失并提高持水性和凝胶性,在改善产品口感问题方面较为有效<sup>[33,34]</sup>,但低成本的塑形和赋味技术仍待突破<sup>[35]</sup>。

开发规模化生产技术和处理装备是替代蛋白食品工业化生产的核心依托。可再生原料规模化处理技术推动微生物蛋白工业化生产方式变革,降低微生物蛋白的生产成本。可再生原料 CO<sub>2</sub> 及衍生的富能化合物是理想的微生物蛋白生产原料<sup>[9]</sup>,生产过程具有绿色和可持续特征。采用氢氧化菌处理可再生原料 CO<sub>2</sub> 合成微生物蛋白已用于规模化生产<sup>[36]</sup>。生物反应器为细胞体外生长提供可控的生长环境,是细胞培育肉规模化生产的必需装备<sup>[37]</sup>。细胞培育肉生产工艺主要分为供贴壁细胞生长、供悬浮细胞生长两大类。在供细胞贴壁生长的生物反应器中,将细胞接种在三维培养材料上,有利于细胞分化和组织形成,但存在细胞培养密度相对低、细胞收获难度大的问题<sup>[38,39]</sup>。对于培养悬浮动物细胞的搅拌生物反应器,使用传统的分批补料工艺可达到的细胞密度为  $2 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7$  /mL,使用灌注工艺可实现的细胞密度为  $1.2 \times 10^8$  /mL<sup>[27,40-42]</sup>;如果将灌注工艺优化为高强度交替切向流灌注技术,可达到的细胞密度为  $1.3 \times 10^8$  /mL<sup>[13]</sup>,但生产工艺不利于细胞分化和组织形成,在搅拌型生物反应器尺寸增大后容易造成细胞损伤<sup>[43]</sup>。

## 2. 监管方面

随着替代蛋白技术和产品的快速发展,相应的监管体系也在逐步调整和完善。① 美国替代蛋白食品监管涉及多个部门,细胞培育肉、植物蛋白肉产品的审批由美国食品药品监督管理局(FDA)和美

国农业部共同负责,微生物蛋白产品由FDA独立负责<sup>[44]</sup>;细胞培育肉的审批程序借鉴并沿用了传统食品的监管程序,涉及转基因技术的微生物蛋白食品需要有清晰的标签标注,作为植物蛋白肉关键化合物的大豆血红蛋白按照色素类食品添加剂分类由FDA批准上市<sup>[45]</sup>。② 新加坡将细胞培育肉、微生物蛋白类食品作为新型食品进行管理,由新加坡食品安全局负责监管,2020年颁发了全球首个细胞培育肉许可证<sup>[46]</sup>。监管框架经历了多次修改,重点补充了感官评价、安全性评价、审批流程等内容,在种子细胞的转基因监管方面新增了评价要求,更加关注食品安全问题。③ 以色列将替代蛋白类食品纳入新型食品监管框架,由以色列卫生部下属的国家食品局负责监管<sup>[19]</sup>。2024年,以色列卫生部向 Aleph Farms 公司发出“无疑问”信函,授予细胞培育牛排上市前批准<sup>[19]</sup>。④ 欧盟率先将细胞培育肉确立为新型食品原料,由欧洲食品安全局(EFSA)进行安全评估,将微生物蛋白肉纳入《新型食品法案》监管范围,确定微生物原料需通过安全资格认定后才能使用<sup>[47]</sup>。生产食品如果使用了转基因微生物但生产过程无外源基因,无需获得“遗传改造食品法规”批准,涉及转基因改造的微生物食品均需要注明标签。EFSA在评估后将解脂耶氏酵母生物质确定为新型食品,规定了使用条件和标签要求<sup>[48]</sup>。

## 3. 工业化方面

近年来,替代蛋白食品技术与监管不断创新,为替代蛋白食品工业化发展提供了良好的基础条件。① 在全球范围内细胞培育肉进入了快速发展阶段,相应市场规模稳步扩大;细胞培育肉企业超过174家,中试及以上规模的细胞培育肉生产线建成或在建数量已有21个,投资额超过31亿美元<sup>[19]</sup>。新加坡、美国、以色列发布了细胞培育肉生产许可,美国 Eat Just 公司、Upside Foods 公司,以色列 Aleph Farms 公司,澳大利亚 Vow Qualia 公司实现了细胞培育肉上市销售。② 微生物替代蛋白食品相较植物蛋白食品起步较晚,微生物蛋白在食品中的应用处于探索阶段,全球从事微生物蛋白开发和生产的公司超过80家。英国 Quorn 公司率先建立了威尼斯镰刀菌发酵工厂,应用高通量筛选、组学等技术获取高纤维、低饱和脂肪的优质蛋白,发布替代蛋白产品百余种。美国的 Prime Roots 公司、MyForest Foods 公司采用规模化发酵及食品化

加工技术，分别选择米曲菌菌丝、大型真菌的菌丝体生产整切类产品。对于可再生原料的规模化处理，国外公司在工程技术和设备方面经验丰富，可保障大规模生产过程中原料的稳定供应。在发酵环节，大型连续发酵设备具有自动化控制能力，可精确调节发酵参数（如温度、酸碱度、搅拌速度等），确保生产过程高效、稳定并降低综合成本。③植物蛋白肉产品已实现工业化生产，很多国家和地区在销售植物蛋白肉产品，相应产业链较为完善，如全球已有数百种植物蛋白肉制品上市，年销售额超过40亿美元。美国Impossible Foods公司以大豆蛋白为主要原料，添加了从转基因酵母中提取的血红蛋白，使植物蛋白肉产品接近真肉的口感和外观；美国Beyond Meat公司主要以豌豆蛋白为原料，生产和售卖汉堡肉饼、香肠等产品。

### （二）国内发展情况

#### 1. 科技方面

在国外替代蛋白食品快速发展的背景下，我国积极开展替代蛋白食品自主研发，基本掌握了关键替代蛋白食品规模化、低成本生产的关键技术。①对于细胞培育肉规模化生产，种子细胞至关重要：能够在体外连续传代培养后仍保持增殖和分化的能力，可以分化产生肌肉、脂肪、基质蛋白等所需的细胞类型。然而，种子细胞在体外经过长期连续的传代培养后形态及组成会发生变化，细胞开始老化并逐渐丧失增殖和分化能力，最终无法形成肌肉组织<sup>[49,50]</sup>；种子细胞的增殖和分化能力需要突破相关限制，才能保障细胞培育肉的规模化生产。永生猪成肌细胞系等研究工作为种子细胞开发提供了理论参考<sup>[51]</sup>，但涉及基因编辑可能存在转基因风险，在监管审批、消费者接受度方面面临新的挑战。②着眼降低微生物蛋白肉的生产成本，制备了可高产蛋白的丝状真菌底盘菌株并开发了相关的微生物蛋白肉产品<sup>[52]</sup>；相关企业基于可高产蛋白、食用安全的酿酒酵母底盘菌株，建立了酿酒酵母高密度发酵体系，开发了相关微生物蛋白肉产品，加快了微生物蛋白规模化生产技术的应用进程。③植物蛋白肉规模化生产技术相对成熟，低湿挤压工艺成为国内市场上植物蛋白肉的主流生产技术<sup>[53]</sup>。高水分挤压技术生产的即食蛋白产品具有理想的纤维结构，更接近真实肉的口感<sup>[54]</sup>。但在生产中会加入

香精香料进行调味赋香，以掩盖消费者不喜欢的植物蛋白特殊风味，更好接近真实肉的风味<sup>[55]</sup>。采用蛋白酶解物、植物油、氨基酸、还原糖等经美拉德反应生成肉味香精，或者利用酵母菌株合成肉味香精，可有效提升植物蛋白肉的风味<sup>[56,57]</sup>。

#### 2. 监管方面

我国尚未形成完善的替代蛋白食品监管体系。①与细胞培育肉相关的监管体系和法规正在建立过程中。细胞培育肉作为新型食品原料，在上市前需履行申报程序、通过监管部门审批，确保相关产品符合特定的食品安全和质量标准。《中华人民共和国食品安全法》规定，使用新的食品原料生产食品需向卫生行政管理部门提交安全评价材料，如果申报产品符合食品安全要求则获得许可并公布<sup>[58]</sup>。②微生物蛋白肉按照新型食品原料、添加剂两大类，分别纳入相关法规进行管理。《可用于食品的菌种名单》（2010年）、《可用于婴幼儿食品的菌种名单》（2011年）对食品用微生物进行监管，一些新的微生物菌种则按照《新资源食品管理办法》（2007年）执行。鉴于丝状真菌可能产生毒素和过敏原，需要针对应用菌株进行较长时间的安全性评价。作为新型食品原料的丝状真菌、细菌蛋白尚未获得批准，而酿酒酵母蛋白已于2023年获批准新型食品原料。微生物蛋白肉尚无上市销售产品，现有监管指南尚未覆盖基因工程微生物蛋白肉产品。中国食品科学技术学会发布了《植物基肉制品》（2020年）、《植物基食品通则》（2021年）团体标准，有助于规范植物基产品的市场宣传、标识标注等。

#### 3. 工业化方面

在“大食物观”格局下，替代蛋白食品工业化成为构建多元化食物供给体系的重要趋势，各类替代蛋白食品处于工业化发展的不同阶段。①细胞培育肉处于工业化发展初期，成立初创企业近10家，融资总额约为5亿元<sup>[19,59]</sup>，一些研究机构和企业开始进行中试工艺研发与生产线建设。中国肉类食品综合研究中心启动了新蛋白食品科技创新基地建设与关键技术研发项目，主要进行细胞培育肉规模化生产技术研发、小试生产工艺研发、中试生产线建设等。南京周子未来食品科技有限公司完成了细胞培育猪脂肪的中试放大生产，加快推出细胞培育猪脂肪、无血清培养基等产品。上海食未生物科技有

限公司建立了悬浮细胞系、低成本无血清培养基、新型工艺、创新产品等技术平台,正在开展永生化细胞系开发并建立中试工厂。②微生物蛋白肉工业化具有良好的发展基础。安琪酵母股份有限公司开始生产酿酒酵母菌体蛋白,相关产品列入了新型食品原料目录。江西富祥药业股份有限公司具备1000 t/a的微生物蛋白生产能力,霉菌蛋白产品主要供应国际市场。上海昌进生物科技有限公司基于自然原始菌种,经过迭代进化并人工驯化出高营养、口感佳、生长优势明显的克鲁维酵母菌株。青岛蓝佳生物科技有限公司利用可食用真菌发酵生产微生物蛋白制成的肉丝、肉饼、肉丸等,供应进一步的生产。也要注意,可再生原料规模化处理设备性能相对滞后,发酵设备存在规模较小、自动化程度低、难以实现连续化和大规模生产等问题。③植物蛋白肉处于工业化加速发展阶段,新兴企业获得融资,传统食品企业相继进入,形成了一定的市场规模。

## 四、我国替代蛋白食品工业化发展面临的挑战

### (一) 关键技术有待突破

在实现规模化生产、合理降低成本、加快替代蛋白食品工业化进程方面已有广泛共识,但支撑工业化发展的关键技术亟待深化和突破。例如,国外率先在低成本无血清培养基开发、细胞培育肉专用生物反应器等方面取得了突破性进展,而国内在相关关键技术方面的创新能力不强,导致许多核心生产原料与设备依赖进口,不利于掌握核心技术;国内在微生物蛋白合成、规模化生产成本方面相比国际先进水平存在差距。

#### 1. 种子细胞系

种子细胞系是细胞培育肉规模化生产的关键原料。虽然国内已有一定的研究基础,但培育肉专用种子细胞开发经验不足,缺乏细胞培育肉大规模生产所需且可分化产生肌肉、脂肪或基质蛋白的种子细胞系。需要深入研究种子细胞系的稳定性维持、增殖分化潜力调控、抗剪切力增强等内容,进一步阐释种子细胞体外生长调控机理,为解决现有技术难题提供突破口。

#### 2. 无血清培养基

低成本无血清培养基是降低培育肉工业化生产成本的关键原料,国内在培育肉专用的低成本无血清培养基产品方面与国外存在一定的差距。基于成熟细胞系的无血清培养基开发技术较为成熟,而基于动物肌卫星细胞、脂肪前体细胞等无血清培养基的开发应用经验不足,低成本制备技术和成熟产品以及相关研究报道均较少<sup>[60]</sup>。此外,生物多样性决定了不同类型种子细胞对培养基存在差异化的营养需求,针对不同类型细胞开发的无血清培养基具有个性化,加大了培育肉专用无血清培养基的开发难度。国外关于培育肉专用无血清培养基的研究报道较多<sup>[61,62]</sup>,相关的低成本制备技术已有研究进展<sup>[29,13]</sup>和生产实践<sup>[13]</sup>,为国内相关产品开发提供了可用借鉴。

#### 3. 专用生物反应器

专用生物反应器是细胞培育肉高效率、规模化工业生产的必备装备,国内在此方面的开发经验不足。国外通过改良和优化灌注工艺,已实现细胞在生物反应器内的高密度培养,为国内利用生物反应器进行培育肉规模化生产提供了直接参考。细胞培育肉生产过程既涉及细胞高密度培养和连续生产,又需要细胞分化和组织形成等特殊工艺步骤,国产生物反应器不能满足细胞培育肉工业化生产的需要;应尽快结合细胞培育肉的技术特点和工艺参数要求,研制细胞培育肉专用的生物反应器。

#### 4. 高效底盘菌株筛选及制备

菌株是合成微生物蛋白的核心原料。国外微生物蛋白食品公司和研发机构应用高通量、转录组学、蛋白质组学等技术制备高效菌株,深入分析菌株基因、蛋白表达调控机制,筛选出调控菌株代谢的关键基因和调控元件。我国在这方面的研究较少,对工业化生产过程中微生物底盘菌株的生长代谢调控机制缺乏足够的认识,导致微生物底盘菌株生产效率不高,底物利用和蛋白转化效率偏低;碳氮底物协同代谢机理、蛋白合成调控途径、细胞工厂性能等研究有待深化,蛋白综合生产成本居高不下,与国际先进水平存在差距。利用人工设计和基因组改造微生物底盘菌株以提高微生物蛋白生产效率成为国际研究热点,如英国的帝国化学工业有限公司将甲基营养型细菌的谷氨酸合成酶替换为大肠杆菌的谷氨酸脱氢酶,显著提高了菌株产率<sup>[63]</sup>。相

关工作为国内制备高效的微生物蛋白底盘菌株提供了参考。

### 5. 可再生原料的规模化处理

规模化处理可再生原料能力不足是微生物蛋白肉的技术卡点之一，突出表现在收集制备、规模化处理设备方面。收集CO<sub>2</sub>的常见方法是物理化学吸收法，但该方法对CO<sub>2</sub>浓度提出严格要求，收集成本会受到CO<sub>2</sub>浓度的显著影响。开发可稳定处理不同CO<sub>2</sub>浓度的收集技术是降低规模化收集CO<sub>2</sub>成本的关键，相关生产技术有待优化。制备过程用到的H<sub>2</sub>、甲醇等能量载体成本偏高，制约了通过CO<sub>2</sub>规模化生产微生物蛋白的规模，因而创制低成本、高转化率的催化载体是解决该问题的关键。此外，国际市场上可获得先进的可再生原料预处理设备，为国内升级现有生产设施、加强工程化设计和自动化控制能力提供了参照，有利于提高可再生原料的处理效率、扩大微生物蛋白的生产规模。

### 6. 植物蛋白肉塑形和赋味

国内植物蛋白肉技术较为成熟，但受限于国际技术壁垒，植物蛋白塑形和赋味过程质量不稳定，存在产品成型、风味塑造方面的问题，导致市售的大部分植物蛋白肉整体质地松散，肉质纤维感不强，无咀嚼脂肪、软骨、筋膜等口感。高湿挤压技术有望解决植物蛋白肉产品的上述不足。需要深入研究能够规模化制备的植物蛋白肉产品，开发增强最终产品凝胶性和持水性的新材料与新技术，提高肉质感并增强适口性。此外，为解决植物蛋白肉的赋味问题，可开发接近真实肉类风味物质的肉味香精，赋予植物蛋白肉更接近真实肉类的风味。

## （二）食品安全与监管体系有待完善

与替代蛋白食品快速发展同步，各国积极开展替代蛋白食品安全与监管体系方面的调整和创新，如新加坡、美国、以色列批准了细胞培育肉上市许可，多家公司的微生物蛋白肉、植物素肉等产品获得美国FDA“一般公认安全”认证、欧盟EFSA资格认证。然而我国尚未形成替代蛋白食品安全与监管体系，亟待进行完善和创新。

### 1. 食品安全标准有待明确

我国尚未建立替代蛋白食品的安全标准体系，未能覆盖相关产品的生产原料、生产工艺、安全性评价、营养分析等。植物蛋白肉、微生物蛋白肉已

有成熟的市场及产品，相比之下细胞培育肉尚未进入市场，如果存在与食品安全相关的问题，可能对消费者的健康构成直接威胁，因而需要有效的框架来评估细胞培育肉的安全性。全球范围内与细胞培育肉相关的食品安全标准匮乏，需要加强细胞培育肉产品涉及材料的食品安全性研究，尽快发布评价标准和监管政策，为推进细胞培育肉工业化发展提供重要依据。

### 2. 监管框架有待建立

我国尚未形成针对细胞培育肉类、微生物蛋白类替代蛋白食品的完整监管体系，无法为替代蛋白食品工业化发展提供框架支撑。对替代蛋白食品进行风险评估，既是食品安全监管部门的责任，也需要科研机构的参与；需要覆盖从生产原料、生产过程到终产品的质地、风味、营养成分等具体信息，以多方协作形式完善商业生态，可靠推动替代蛋白食品进入市场。

## （三）产业链有待建立和延展

替代蛋白食品作为食品科技领域的代表性成果，相关研究在国内外方兴未艾，也因起步时间、技术特点、生产工艺等存在明显差异而致国内外工业化进程不相同步。发达国家快速推进细胞培育肉工业化，一些关键技术成果已获得转化应用，而我国仍处于细胞培育肉工业化初期，全产业链亟待建立。在微生物蛋白肉领域，与处于优势地位的国家相比，国内在技术积累、研发投入、社会关注度等方面都存在差距，产业链发展不够完善。我国植物蛋白肉与国外发展差距较小，产业链上下游发展较为成熟，中游有待进一步延展。

### 1. 加强关键要素的自主研发能力

我国主要替代蛋白食品处于不同的工业化阶段，虽然植物蛋白肉已有较好条件，但细胞培育肉、微生物蛋白肉工业化发展涉及的产业链不够完善。相关产品类型的关键要素自主研发能力不强、关键技术未能落地应用，是工业化进程迟缓的直接原因。在原料方面，需要加快开展种子细胞开发、细胞培育肉专用无血清培养基研发，快速降低成本，逐步摆脱关键产品依赖进口的局面；在核心装备方面，需要加快研发生物反应器，支持工业化生产细胞培育肉所需的关键设备自主保障能力。此外，微生物蛋白产业链中游环节的关键要素有待突

破，如微生物蛋白生产用高效微生物底盘菌株资源库、优化发酵工艺、高效提取蛋白质等。

### 2. 加强关键要素的自主生产能力

我国主要替代蛋白食品均面临成本过高的问题，直接影响从技术研发到应用落地再到大规模工业化的发展进程。在替代蛋白食品工业化发展过程中，生产原料是决定工业化成本投入的源头性因素，关键生产装备是影响工业化成本投入的核心因素，需要围绕这两方面进行成本控制。在现阶段，细胞培育肉、微生物蛋白的生产原料（如种子细胞、无血清培养基、可再生原料）、大规模生产必备装备（如生物反应器）的自主生产能力均有待加强，在逐步降低直接生产成本后才能消除替代蛋白食品工业化生产的成本制约。

### 3. 拓展产业链上的细分领域

成熟的工业化发展需要以完整的产业链为支撑。我国主要替代蛋白食品尤其是细胞培育肉、微生物蛋白肉的工业化生产，既受到产业链不够完整的影响，也受到产业链上细分领域有效支撑不足的制约，导致当前生产成本居高不下、从技术研发到落地应用转化不畅。其中，微生物蛋白产业链的上游环节有待细分，尤其在原材料的选择上，成本较低的农业副产物存在来源分散、品质难以保障的问题，而可再生原料面临生产成本居高不下的难题。在植物蛋白肉产业链上，包括全谷物、豆类及其制品在内的原材料来源丰富，下游环节涉及的肉制品加工、休闲食品等行业发展较为完备，但位于产业链中游的生产工艺存在卡点，需要在拓展并细分塑形和赋味技术方面进行突破。

## 五、我国替代蛋白食品工业化发展建议

### （一）加强替代蛋白食品工业化生产关键技术研发

#### 1. 细胞培育肉

针对细胞培育肉工业化发展面临的关键技术转化落地不畅、生产成本偏高等问题，建议加大科研投入、实施政策激励，吸引企业和社会资金进入，重点在种子细胞系、低成本无血清培养基、大规模连续生产专用生物反应器等方面开展技术攻关。结合细胞培育肉大规模生产所需的种子细胞系特性，优化细胞培养条件、种子细胞系稳定性、体外精准调控细胞增殖分化能力、抗剪切力等，提升细胞的

生长性能和功能表现，取得细胞培育肉工业化生产核心环节的突破。借鉴生物医药领域的无血清培养基开发技术，通过替代成分筛选、生长因子使用、高通量筛选、培养基回收利用等方式，开发低成本、可个性化定制的培育肉专用无血清培养基，取得培育肉工业化生产成本控制瓶颈环节的突破。优化三维培养材料的材质和表面特性，发展气体交换技术和搅拌工艺，引入先进传感器和数据监控系统等，创制适用于细胞培育肉增殖分化和高密度培养的生物反应器，据此突破生物反应器连续生产和放大工艺技术难题。

#### 2. 微生物蛋白肉

针对微生物蛋白肉工业化生产综合成本偏高的问题，筛选和制备高效微生物底盘菌株，建立用于工业化生产优质蛋白的微生物底盘菌株资源库，完善可再生原料规模化处理技术，全面提高生产能力及效率。将适应性进化与高通量筛选结合，促进微生物高效生物转化蛋白的精准筛选，提高底盘菌株的生产效率。精准调控细胞代谢与细胞组分，设计并重构代谢模块，使改造后的微生物成为优质蛋白的细胞工厂，据此提高底盘菌株的底物利用率，制备高效微生物底盘菌株。开发高效破壁技术，提高底盘菌株的蛋白提取率，扩充专用微生物底盘菌株资源库。针对 CO<sub>2</sub> 等可再生原料，开发适应不同 CO<sub>2</sub> 浓度的收集技术，制备高转化率催化载体，降低 CO<sub>2</sub> 规模化生产微生物蛋白的综合成本，形成低成本、工业化的微生物蛋白先进生产方式。

#### 3. 植物蛋白肉

植物蛋白肉的工业化生产较为成熟，针对整块植物蛋白肉工业化生产存在质构、口感、风味等方面的不足，深入研究植物蛋白的物理和化学特性，创新塑形和赋味技术，优化关键酶制剂，引入功能性成分，全面提升相关产品的消费者接受度。结合植物基多糖、蛋白的物理和化学性质，研发热不可逆凝胶提升技术，开发基于大豆油体的植物基模拟脂肪，优化整块植物蛋白肉的制备工艺流程，改善植物蛋白肉的质构和口感，实现整块植物蛋白肉工业化生产模式创新。优化挤压膨化技术和挤压蒸煮工艺，重组蛋白结构，形成高品质的大豆拉丝蛋白，高度还原传统肉类的风味口感，提升植物蛋白肉工业化产品质量。突破植物蛋白肉工业化生产过程中存在的风味、色泽、质构持水性等难点，制备

与传统真肉一样具有高度纤维化结构、细腻紧实口感、特殊香气风味、类似颜色及多汁感的植物蛋白肉，实现植物蛋白肉的大规模工业化优质生产。

### (二) 建立适应国情的替代蛋白食品监管体制

#### 1. 建立食品安全标准

针对替代蛋白食品工业化发展，立足国情实际制定相关的食品安全标准及评估系统，对确保食品质量及安全、推动食品科技创新、提升食品行业公信力具有重要意义。我国已发布植物蛋白肉产品团体标准，植物蛋白标准处于国际先进水平。微生物蛋白肉处于起步发展阶段，现有法规仅能部分适用微生物蛋白肉，而没有针对新微生物菌种、基因工程微生物蛋白肉研制专门的食品安全标准；也需考虑发酵蛋白产品种类的多样性，开展上市前的风险评估，细化相关的食品安全标准。在细胞培育肉食品方向尚未建立食品安全标准，需协调农业、卫生、市场、工业和信息等管理部门，针对安全性、天然毒素、新型食品原料等开展风险评估，精准管理潜在风险，科学划分各环节的监管主体与职责，加快建立细胞培育肉食品安全标准。

#### 2. 完善食品监管细则

精准的监管细则是连接消费者与产业的“桥梁”，在保障消费者健康与食品安全的同时，有利于阐明替代蛋白食品的发展定位，促进替代蛋白产业的可持续发展。与替代蛋白食品的发展进程相对应，各类产品的监管阶段也存在差异性，如植物基蛋白监管细则较为完善，微生物发酵蛋白食品则因发酵蛋白产品具有多样性而需持续更新监管细则，细胞培育肉的监管体制尚未建立。在国际上加快发展细胞培育肉、发达国家普遍建立甚至实现商业化监管体制的背景下，考虑我国相关产业发展未来与国际市场接轨的必要性，建议研究和借鉴其他国家先发经验，加快补齐知识差距，论证并构建我国细胞培育肉食品的安全管理监管框架，形成监管细则，覆盖从生产原料、生产过程到最终产品质地、风味、营养成分的完整过程。

### (三) 推进食品行业协作与国际交流

#### 1. 引导食品行业高质量协同

替代蛋白食品工业化生产需要依托完备的产业链。面向相关产业链构建和壮大的需求，建立由优

势科技型企业（链主企业）牵头，科研院所、中下游企业、高校、社会资本参与的联合体（联盟），形成协同创新和利益分配机制；精准突破替代蛋白食品工业化发展的瓶颈环节与关键技术，贯通技术转化应用，开展产业链补强，择优培育各细分方向的“专精特新”企业。建立覆盖食品行业的合作平台，鼓励替代蛋白产业链上的企业协同发展，推动技术和资源整合，促进原料供应商、生产企业等渠道信息共享，改善替代蛋白企业的生产成本和运营效率，提升整个产业链的竞争力与可持续发展能力。其中，推动植物蛋白和微生物蛋白食品产业链进行自上而下的迭代升级，加强细胞培育肉产业链主体与上下游之间的汇聚融合，促进种子细胞研发、无血清培养基生产、生物反应器设计等环节的深度合作，形成配套设施与服务体系，提升产业链的整体效能。

#### 2. 开展食品领域的国际交流

面向国内外替代蛋白食品工业化的共同发展需求，着眼行业的国际发展前沿，设立国际合作交流平台，建立替代蛋白食品的国际交流“高地”。支持高校、科研院所与国际同行建立合作关系、开展联合研究，共同提升替代蛋白食品技术水平。积极参与和组织行业峰会、展览会、技术交流会，吸引国内外专家学者和优势企业，促成替代蛋白食品工业化发展的合作机会与资源互补。参与国际替代蛋白食品安全标准、监管制度的交流与评估，提升我国替代蛋白工业化生产的国际公信力。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** October 23, 2024; **Revised date:** December 19, 2024

**Corresponding author:** Sun Baoguo is a professor from the School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is food additives and safety. E-mail: sunbg@btbu.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Development of Cultured Meat Industrialization” (2023-XZ-79); National Key R&D Program of China (2024YFA0918300)

#### 参考文献

- [1] 金芬, 王洪萍, 钱永忠. 替代蛋白的食品安全风险、监管及展望[J]. 中国食品学报, 2022, 22(12): 42–51.  
Jin F, Wang H P, Qian Y Z. Alternative proteins: Food safety risk, regulatory and prospects [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(12): 42–51.

- [2] 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 S W, Li S L, Li Y Y, et al. Classification of artificial meat and suggestions on normalization of nomenclature for related terms [J]. Food Science, 2020, 41(11): 310–316.
- [3] Markets and Markets. Protein alternatives market by source [R]. Maharashtra: Markets and Markets, 2024.
- [4] Laura Wood. The cultured meat market: Global and regional analysis [R]. Dublin: Research and Markets, 2024.
- [5] Mordor Intelligence. Microbial protein market size (2024–2029) [R]. Telangana: Mordor Intelligence, 2024.
- [6] 北京恒州博智国际信息咨询有限公司. 全球与中国植物蛋白肉市场现状及未来发展趋势 [R]. 北京: 北京恒州博智国际信息咨询有限公司, 2023.  
QY Research. Global and China plant-based-protein meat market status and forecast [R]. Beijing: QY Research, 2023.
- [7] 浦华, 杨静, 王永伟, 等. 保障国家粮食安全的蛋白替代战略构想 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 149–157.  
Pu H, Yang J, Wang Y W, et al. Protein substitution strategy for ensuring national food security in China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(4): 149–157.
- [8] 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. Environmental impact of cultivated and traditional meat production processes [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(9): 1–10.
- [9] 王国坤, 蔺玉萍, 王钦宏, 等. 微生物蛋白制造的发展趋势与挑战 [J]. 科学通报, 2023, 68(21): 2779–2789.  
Wang G K, Lin Y P, Wang Q H, et al. Microbial protein manufacturing: The developing trend and challenge [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(21): 2779–2789.
- [10] 贺少华. 谈我国的土地与粮食 [J]. 中学地理教学参考, 1992 (S1): 18–19.  
He S H. On land and grain in China [J]. Teaching Reference of Middle School Geography, 1992 (S1): 18–19.
- [11] 汪超, 夏路, 李兆丰, 等. 微生物蛋白的关键生产技术体系与食品产业应用 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 121–131.  
Wang C, Xia L, Li Z F, et al. Key manufacturing technologies of microbial protein and its application in food industry [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 121–131.
- [12] Tuomisto H L, de Mattos M J T. Environmental impacts of cultured meat production [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(14): 6117–6123.
- [13] Pasitka L, Wissotsky G, Ayyash M, et al. Empirical economic analysis shows cost-effective continuous manufacturing of cultivated chicken using animal-free medium [J]. Nature Food, 2024, 5(8): 693–702.
- [14] Yun S H, Lee D Y, Lee J, et al. Current research, industrialization status, and future perspective of cultured meat [J]. Food Science of Animal Resources, 2024, 44(2): 326–355.
- [15] Cai J Q, Wang S W, Li Y Y, et al. Industrialization progress and challenges of cultivated meat [J]. Journal of Future Foods, 2024, 4(2): 119–127.
- [16] Hauser M, Zirman A, Rak R, et al. Challenges and opportunities in cell expansion for cultivated meat [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1315555.
- [17] Lee S Y, Lee D Y, Yun S H, et al. Current technology and industrialization status of cell-cultivated meat [J]. Journal of Animal Science and Technology, 2024, 66(1): 1–30.
- [18] Sha L, Xiong Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102: 51–61.
- [19] The Good Food Institute. 2023 state of the industry report cultivated meat and sea food [R]. Mumbai: The Good Food Institute, 2024.
- [20] Grossmann L, Weiss J. Alternative protein sources as technofunctional food ingredients [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2021, 12: 93–117.
- [21] Godfray H C J, Aveyard P, Garnett T, et al. Meat consumption, health, and the environment [J]. Science, 2018, 361(6399): eaam5324.
- [22] Springmann M, Mason-D’Croz D, Robinson S, et al. Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities [J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 69–74.
- [23] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): 20260–20264.
- [24] Satija A, Bhupathiraju S N, Spiegelman D, et al. Healthful and unhealthful plant-based diets and the risk of coronary heart disease in U.S. adults [J]. Journal of the American College of Cardiology, 2017, 70(4): 411–422.
- [25] Friedman M, Brandon D L. Nutritional and health benefits of soy proteins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(3): 1069–1086.
- [26] Porto S V L, Murawski M A F, Matte B M C, et al. Alternative proteins production: Current scenario, bioreactor types, and scale-up strategies [J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2024: 00309.
- [27] Humbird D. Scale-up economics for cultured meat [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2021, 118(8): 3239–3250.
- [28] Aswad H, Jalabert A, Rome S. Depleting extracellular vesicles from fetal bovine serum alters proliferation and differentiation of skeletal muscle cells in vitro [J]. BMC Biotechnology, 2016, 16: 32.
- [29] Yamanaka K, Haraguchi Y, Takahashi H, et al. Development of serum-free and grain-derived-nutrient-free medium using microalga-derived nutrients and mammalian cell-secreted growth factors for sustainable cultured meat production [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 498.
- [30] Ravanchi M T. Natural gas—New perspectives and future developments [M]. London: IntechOpen, 2022.
- [31] Graham A E, Ledesma-Amaro R. The microbial food revolution [J]. Nature Communications, 2023, 14: 2231.
- [32] Sun C X, Fu J L, Chang Y Y, et al. Structure design for improving the characteristic attributes of extruded plant-based meat analogues [J]. Food Biophysics, 2022, 17(2): 137–149.
- [33] Schuh V, Allard K, Herrmann K, et al. Impact of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) on functional characteristics of emulsified sausages [J]. Meat Science, 2013, 93(2): 240–247.
- [34] Jiménez-Colmenero F, Cofrades S, Herrero A M, et al. Konjac gel fat analogue for use in meat products: Comparison with pork fats [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(1): 63–72.

- [35] Wang Y Q, Tuccillo F, Lampi A M, et al. Flavor challenges in extruded plant-based meat alternatives: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(3): 2898–2929.
- [36] Martinez-Burgos W J, Souza C E, Pedroni M A B, et al. Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 124970.
- [37] Post M J, Levenberg S, Kaplan D L, et al. Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat [J]. *Nature Food*, 2020, 1: 403–415.
- [38] Bodiou V, Moutsatsou P, Post M J. Microcarriers for upscaling cultured meat production [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 10.
- [39] Verbruggen S, Luining D, van Essen A, et al. Bovine myoblast cell production in a microcarriers-based system [J]. *Cytotechnology*, 2018, 70(2): 503–512.
- [40] Risner D, Li F Z, Fell J S, et al. Preliminary techno-economic assessment of animal cell-based meat [J]. *Foods*, 2020, 10(1): 3.
- [41] Negulescu P G, Risner D, Spang E S, et al. Techno-economic modeling and assessment of cultivated meat: Impact of production bioreactor scale [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2023, 120(4): 1055–1067.
- [42] Garrison G L, Biermacher J T, Brorsen B W. How much will large-scale production of cell-cultured meat cost? [J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, 10: 100358.
- [43] Allan S J, De Bank P A, Ellis M J. Bioprocess design considerations for cultured meat production with a focus on the expansion bioreactor [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2019, 3: 44.
- [44] Food and Drug Administration. Formal agreement between FDA and USDA regarding oversight of human food produced using animal cell technology derived from cell lines of USDA-amenable species [R]. Washington DC: Food and Drug Administration, 2019.
- [45] Food and Drug Administration. In Brief: FDA approval of soy leghemoglobin as a color additive is now effective [R]. Washington DC: Food and Drug Administration, 2019.
- [46] Ong K J, Tejada-Saldana Y, Duffy B, et al. Cultured meat safety research priorities: Regulatory and governmental perspectives [J]. *Foods*, 2023, 12(14): 2645.
- [47] European Food Safety Authority. Novel food [R]. Parma: European Food Safety Authority, 2018.
- [48] Novel Foods and Food Allergens. Safety of *Yarrowia lipolytica* yeast biomass as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283 [J]. *EFSA Journal*, 2019, 17(2): e05594.
- [49] 张权, 张亚奇, 饶巍, 等. 长期传代培养对人脐带间充质干细胞生物学特性的影响 [J]. *中国细胞生物学学报*, 2019, 41(1): 42–52. Zhang Q, Zhang Y Q, Rao W, et al. Characterization of human umbilical cord mesenchymal stem cells after long-term expansion [J]. *Chinese Journal of Cell Biology*, 2019, 41(1): 42–52.
- [50] Lee D K, Kim M, Jeong J, et al. Unlocking the potential of stem cells: Their crucial role in the production of cultivated meat [J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 7: 100551.
- [51] 杨峰, 李莹莹, 王守伟, 等. 细胞培育肉种子细胞永生诱导研究 [J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 52–62. Yang F, Li Y Y, Wang S W, et al. Research on immortalization induction of cell cultured meat seed cells [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(12): 52–62.
- [52] Tong S, Chen W, Hong R, et al. Efficient mycoprotein production with low CO<sub>2</sub> emissions through metabolic engineering and fermentation optimization of *Fusarium venenatum* [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2024, 72(1): 604–612.
- [53] Zhang J C, Chen Q L, Kaplan D L, et al. High-moisture extruded protein fiber formation toward plant-based meat substitutes applications: Science, technology, and prospect [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 128: 202–216.
- [54] 朱嵩. 基于高分挤压技术的花生蛋白素肠制备及其贮藏特性研究 [D]. 北京: 中国农业科学院(硕士学位论文), 2019. Zhu S. Preparation and storage characteristics of peanut protein sausage based on high moisture extrusion technology [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (Master's thesis), 2019.
- [55] Liu X, Yang C, Qin J X, et al. Challenges, process technologies, and potential synthetic biology opportunities for plant-based meat production [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2023, 184: 115109.
- [56] 沈军卫. 大豆蛋白酶解物制备猪肉香精的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学(硕士学位论文), 2010. Shen J W. Study on preparation of pork flavor from soybean protein hydrolysates [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology (Master's thesis), 2010.
- [57] 高应瑞. 毕赤酵母表达风味强化肽呈味研究 [D]. 天津: 天津科技大学(硕士学位论文), 2011. Gao Y R. Study on flavor enhancement peptide expressed by *Pichia pastoris* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology (Master's thesis), 2011.
- [58] 李石磊, 李莹莹, 李雨爽, 等. 培育肉的监管发展战略研究 [J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 331–337. Li S L, Li Y Y, Li Y S, et al. Regulation and developmental strategies of cultivated meat: An overview [J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 331–337.
- [59] 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. Technological trend and suggestions for cultured meat industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 251–262.
- [60] Zhang S L, Lu H Y, Lou H H, et al. An efficient serum-free medium for ex vivo expansion of myoblasts from *Larimichthys crocea* for cultured meat production [J]. *Food Research International*, 2024, 196: 115073.
- [61] Kolkman A M, Van Essen A, Post M J, et al. Development of a chemically defined medium for in vitro expansion of primary bovine satellite cells [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 895289.
- [62] Messmer T, Klevernic I, Furquim C, et al. A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation in the absence of serum starvation [J]. *Nature Food*, 2022, 3(1): 74–85.
- [63] Windass J D, Worsley M J, Pioli E M, et al. Improved conversion of methanol to single-cell protein by *Methylophilus methylotrophus* [J]. *Nature*, 1980, 287(5781): 396–401.