DOI 10.15302/J-SSCAE-2021.06.018

培育肉生产技术发展研究

关欣[1,2,3]，周景文[1,2,3]，堵国成[1,2]，陈坚[1,2,3]

（1. 江南大学未来食品科学中心，江苏无锡 214122； 2. 江南大学生物工程学院，江苏无锡 214122；
3. 粮食发酵工艺与技术国家工程实验室，江苏无锡 214122）

摘要：培育肉指不经饲养和屠宰动物、而是通过体外培养动物细胞来生产获得的新型肉制品，被视为最有可能解决传统牲畜生产导致资源消耗、环境污染、公众健康等问题的有效方案之一。本文概括了培育肉生产流程与关键技术，梳理了培育肉技术的国际发展态势，剖析了我国培育肉技术发展态势及行业发展面临的问题，据此提出我国培育肉生产技术的发展建议。研究发现，培育肉生产涉及细胞生物学、组织工程、发酵工程、食品工程等多学科领域的技术融合与综合运用，世界培育肉技术的发展处于起步和上升阶段；尽管行业领先企业已实现技术集成与产业化示范，但培育肉的工业化生产尚未完全实现，诸多关键技术瓶颈亟待突破。研究认为，我国培育肉行业起步较晚，面临研究基础薄弱、技术研发思路单一、产业化进程缓慢等问题，未来应加大对相关基础研发的政策和资金支持，加强跨行业交流并促进校企合作，注重消费者对培育肉的接受度与口味营养需求。

关键词：培育肉；肌肉组织；动物干细胞扩增；定向诱导分化；食品化加工

中图分类号：Q813　　**文献标识码：**A

Development of Cultured Meat Technology in China

Guan Xin[1,2,3], Zhou Jingwen[1,2,3], Du Guocheng[1,2], Chen Jian[1,2,3]

(1. Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: Cultured meat is a new type of meat product that is produced by ex vivo culture of animal cells instead of breeding and slaughtering animals; therefore, it is considered the most promising way to solve problems caused by traditional livestock production such as resource consumption, environmental pollution, and public health issues. This study analyzed cultured meat with focus on its production process, key technologies, international development trend, and issues of China's cultured meat industry, thereby proposing suggestions for the development of cultured meat technology in China. The production of cultured meat requires the integration of advanced technologies in multi-disciplinary fields including cell biology, tissue engineering, fermentation engineering, and food engineering. The development of global cultured meat technology is in its infancy and rising stages. Although industry-leading companies have achieved technological integration and industrialization demonstrations, the industrial production of cultured meat has not yet been realized and various key technological bottlenecks need to be broken. It was concluded that in China, the cultured meat industry starts late and its technological development faces problems such as weak research foundation, single research ideas, and slow industrialization process. In the future, China should increase policy and financial support for related basic research, strengthen interdisciplinary exchanges and school–enterprise cooperation, and pay more attention to the acceptance as well as taste and nutrition needs of consumers.

Keywords: cultured meat; muscle tissue; stem cell expansion; induced differentiation; food process

收稿日期：2021-06-23；**修回日期：**2021-08-13

通讯作者：陈坚，江南大学生物工程学院教授，中国工程院院士，研究方向为发酵工程与食品生物技术；E-mail: jchen@jiangnan.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“生物培育肉的发展战略研究”(2020-XY-17)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

联合国粮食及农业组织（FAO）、联合国人口司预测，到 2050 年，世界人口总人数将增至 90 亿，年均肉品消费需求将增至 4.65×10^8 t（是 2000 年总产量的 1 倍）[1]。在我国，近年来肉类产品供需也呈现严重的不平衡现象，如 2020 年肉类进口量为 9.91×10^6 t，同比增长约 60%；预测 2030 年人均肉类消费量将较 2010 年增长 2 倍 [2]。着眼未来，在有限的资源条件下保障人类的肉食供给成为重大挑战。与此同时，依赖传统农业的肉类生产方式，与资源环境之间的矛盾日益突出。禽畜饲养需要消耗大量的水、土地等资源，排放大量的温室气体而引发温室效应，还存在着动物伦理、公共健康等问题 [3]。FAO 报告 [4] 指出，生产 1 kg 牛肉需占用约 40 m^2 的土地、消耗 15 m^3 的水、产生 300 kg CO_2 当量；全球可用土地的 1/3 用于农业，其中绝大多数用作畜牧业牧场；农作物总产量的 30% 用于动物饲养，但因饲料物质转化率低而使得整个生态链条的物质转化效率极低 [4]。动物疫病如“非洲猪瘟”“禽流感”“疯牛病”等的广泛流行，也给传统养殖业带来了极大困难，需要投入大量物力、财力来保障肉品安全性，进而造成肉类生产成本的大幅增加 [5]。此外，随着经济社会的发展，居民对饮食的需求从“饱腹”转向“健康、卫生、美味、营养”，因此迫切需要开发更加高效、环境友好、可持续的肉类生产系统，以满足居民对肉品数量和品质的长远需求。

培育肉又称细胞培养肉，作为细胞农业最重要的组成部分，以细胞生物学、组织工程学为基础，根据肌肉组织的生长发育及损伤修复机理，利用体外培养动物细胞的方式来获得肌纤维、脂肪等构成肌肉组织的细胞，再经收集、塑形、食品化加工等过程制备可供食用的肉类制品 [6]；相关生产技术具有极高的资源转化率、良好的可持续性和动物友好性。相对于传统肉类生产，培育肉可为居民供应真实的动物蛋白，且生产过程不涉及牲畜的饲喂和宰杀，是一种高效、洁净的动物肉生产方式；生产周期仅为传统肉的 1/10，可迅速填补肉类市场空缺、稳定肉类食品价格 [7]；可有效缓解或解决与传统农业相关的社会环境问题，如激素与抗生素滥用、环境污染、动物伦理等 [8]。因此，培育肉被视为人类未来最有可能解决肉类制品生产与消费失衡的颠覆性方案之一，发展培育肉生产技术对保障肉制品充足供应、促进资源优化配置、推动传统农业模式转型升级、保持经济社会可持续发展都具有积极意义。

着眼我国培育肉的生产技术发展及市场需求，本文梳理培育肉的生产流程、主要环节，剖析培育肉工业化生产的关键技术瓶颈、基础科学问题；调研国际培育肉行业发展态势，分析我国培育肉技术研发进程与面临问题；针对性提出技术发展方向和行业发展策略，以期为我国培育肉的技术与产业发展提供基础参考。

二、培育肉生产的关键技术

得益于细胞生物学、组织工程等学科的飞速发展，培育肉技术概念已获得验证，相应生产流程涉及种子细胞获取、种子细胞体外扩增、成肌 / 成脂诱导分化、食品化处理等关键环节（见图 1）。然而，培育肉的工业化生产尚未完全实现，多项关键技术亟需突破。

（一）种子细胞高效获取技术

肌肉干细胞、胚胎干细胞、诱导多能干细胞、间充质干细胞等，具有分化成肌肉细胞 / 脂肪细胞的潜能，可作为培育肉制造的种子细胞。不同类型的干细胞在机体中所处的发育阶段、位置、多能性均有差异，获取方法、难易程度也不尽相同，需针对特定的细胞类型制定高效的分离纯化方案，开展种子细胞的高效获取，为培育肉生产的后续环节提供基础条件。

胚胎干细胞具有全能性，理论上能够在体外无限增殖，具有多向分化的潜能 [9]。然而，并不是所有物种的胚胎干细胞系都能被成功建立，如猪、牛等大型动物，野生鱼类等。

诱导多能干细胞指针对成纤维细胞等成体细胞，利用基因重编程技术诱导产生的多能性干细胞 [10]。猪诱导多能干细胞已被成功制备，可能成为培育肉生产的种子细胞类型 [11]。需要注意的是，诱导多能干细胞的体外培养条件极为复杂、操作难度较大，需进一步提高增殖、成肌分化的效率才能满足培育肉工业化生产的要求。

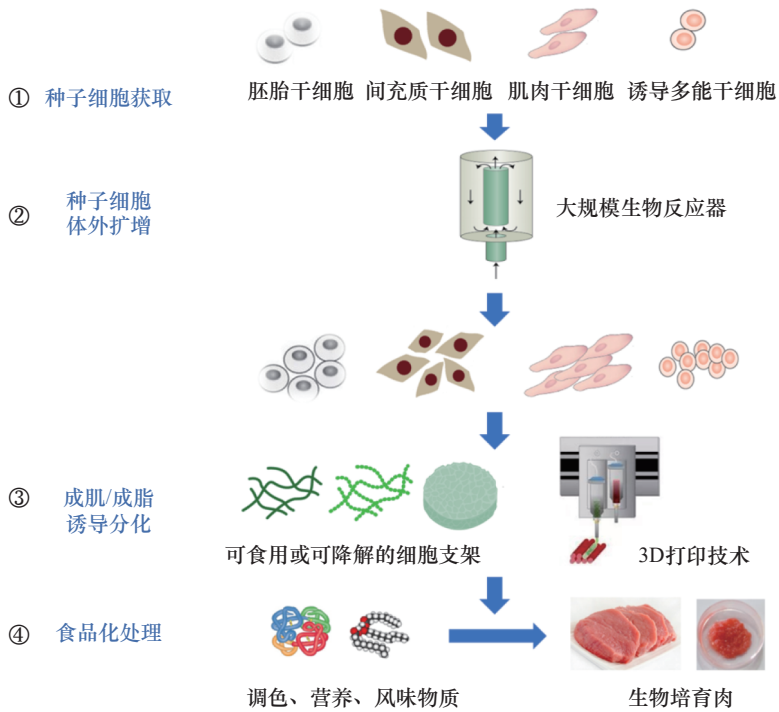

图 1　培育肉的生产流程

注：3D 打印表示增材制造

间充质干细胞、肌肉干细胞都属于成体干细胞，不具有全能性，但具有自我更新能力、多向 / 定向分化潜能。间充质干细胞通常可以从骨髓、脂肪组织中分离得到，来源广泛、获取简便、易于纯化和扩增培养；在体外，可通过不同的诱导条件分化为脂肪细胞、成骨细胞、肌细胞 [12]；成肌分化效率较低、成脂分化能力较高，通常用作生产脂肪组织的种子细胞。肌肉干细胞可从新鲜的肌肉组织中分离获取，是肌肉组织中特有的专能干细胞，具有较强的成肌分化能力；增殖到足够的数量时，细胞之间相互接触融合，很容易分化为肌管、成熟的肌纤维，通常用作生产肌纤维的首选种子细胞 [13]。

（二）细胞冻存技术

通过组织分离得到的原代动物干细胞、经过扩增后的大量干细胞，在最终诱导分化成肌纤维之前需要可靠稳定地长期保存，为后续的培育肉产品制造过程提供保障。干细胞的冻存比常规细胞要求更高，冷冻 / 复苏过程的渗透压、自由基、保护剂、低温等因素均可能诱发干细胞的非定向分化；除了提高细胞存活率以外，还需关注冻存过程对细胞分化率的影响，才能获得预期的冻存效率。

冻存保护剂在细胞冻存之前添加，用于保护细胞免受冷冻损伤，进而提高细胞复苏后的存活率；分为渗透性、非渗透性两类 [14]。渗透性冻存保护剂主要有二甲基亚砜（DMSO）、甘油等小分子化学物质，非渗透性冻存保护剂多为大分子物质（如糖类）。当前大多数研究采用 DMSO 作为细胞的冻存保护剂，复苏后的细胞存活率、贴壁率均较高 [15]。干细胞的冻存过程应尽量采用程控降温仪，严格控制降温速度（1~3 ℃ /min）；经过相变热释放（–15~–11 ℃）之后加快降温速度，待温度降至 –80~–90 ℃后再转入液氮中（–196 ℃）长期保存。

值得指出的是，在规模化生产培育肉之前，需对细胞冻存保护剂的食品安全性进行全面调研。经过 DMSO 或其他冻存保护剂处理后的细胞能否作为食品安全级的细胞进行培育肉的生产，需要开展深入研究，根据研究结果适时制定监管政策与法规。

（三）体外扩增技术

在体外培养干细胞时，为了保持细胞的正常生长与功能，不仅要将细胞置于适宜温度、酸碱度、湿度的无菌环境中，还要为细胞提供生长所需的基本营养物质（即培养基）。干细胞的扩增培养基通常由基础培养基、血清、细胞因子等添加物构成。

不同物种、不同类型的干细胞，对培养基有不同的偏好，需要根据具体情况筛选最佳的基础培养基。鉴于基础培养基用量大，在未来的培育肉工业化生产过程中，需要优化基础培养基中的成分构成以实现低成本成分的等效替代，尽量降低基础培养基的规模化使用成本。

血清也是影响干细胞体外生长行为的关键因素。许多干细胞需要在含有胎牛血清（通常为10%~20%）的培养基中培养，但胎牛血清价格高昂、营养成分既复杂又不明确、批次间差异大，不利于品质控制 [16]。因此，建立化学成分明确的无血清培养基，既可降低生产成本，也可保证生产过程的可控性和准确性，对培育肉的商品化生产至关重要。此外，根据细胞的增殖调控机理，筛选细胞因子、糖蛋白、小分子化合物等多种类型的营养物质并添加至培养基中，对提升细胞增殖能力、开发无血清培养基都至关重要 [17]。

设计和开发合适的智能生物反应器，优化并控制放大工艺过程，也是培育肉实现工业化生产的先决条件。目前，可用于培育肉生产的反应器类型有波浪式、堆积床、搅拌釜、气升式、灌流式等，但适合培育肉工业化生产的生物反应器类型尚待探究发展。获得最优过程参数的过程分析技术、培养基回收和细胞截留技术，都是培育肉工业化生产过程中保证产品质量、降低生产成本的重要前提条件 [18]。

（四）定向诱导分化技术

肌纤维是肌肉组织最重要、最基本的组成单元。动物干细胞在完成大量增殖并达到足够的细胞量后，后续目标是将其分化为骨骼肌纤维，产生大量的蛋白质（如肌球蛋白、肌动蛋白、肌红蛋白等）。肌肉干细胞在体内无需特殊调控便可以分化形成肌纤维，但在体外条件下通常需用含有 2% 马血清的分化培养基进行诱导分化 [19]。肌肉干细胞的成肌分化效率受培养基成分、培养条件的影响很大，体外分化效率往往不到 50%。对于全能干细胞而言，需要更加精准的调控策略，否则成肌分化效率将有所不足。

脂肪使肌肉拥有大理石样花纹，还可提高肉的香味和口感，因此培育肉的另一个研究重点是脂肪细胞的高效生产。单独或组合应用地塞米松、3– 异丁基 –1– 甲基黄嘌呤、胰岛素、吲哚美辛等试剂，可诱导间充质干细胞分化为脂肪细胞 [20]。需要注意的是，体外产生的脂肪细胞，其中的脂肪酸、甘油三酯及其他风味物质能否满足肉制品要求，有待深入研究。

（五）肌肉组织三维塑形技术

在体外生产出与真实动物肉具有相似质构、口感、风味的肌肉组织是培育肉的技术目标，提高培育肉产品的尺寸、厚度是当前的重点与难点。实验室通常使用的培养瓶或培养皿，仅能获得二维单片层的细胞；三维肌肉组织的形成，需要借助细胞支架。在生理状态下，细胞基质将肌纤维包裹，为细胞提供营养并使肌纤维有序排列；细胞外基质主要成分是胶原蛋白、粘连蛋白、糖蛋白等。体外培养所需的细胞支架，实质在于模拟细胞外基质的组成成分，使细胞可以粘附、获取营养并依赖其生长。有研究团队 [21] 将食用明胶做成纺丝，将兔骨骼肌成肌细胞植入其中，最终成型的产品接近真肉的质地，这为后续研究提供了突破方向。

为尽量避免使用动物源成分参与培育肉生产，筛选植物源蛋白（如大豆蛋白）、天然多糖类的大分子（如壳聚糖）、合成材料（如聚谷氨酸、聚乳酸）等作为细胞支架材料用于培育肉组织塑形，是目前的研究热点。3D 打印技术的迅速兴起和蓬勃发展，为培育肉制造提供了新的便利条件 [22]。多种类型的活细胞 3D 打印设备已经问世，经研究证实细胞在 3D 打印后的存活率达到 90% 并能在打印成型的三维空间内粘附、迁移、生长。采用 3D 打印技术来实现不同种类型细胞（如肌肉细胞、脂肪细胞）的混合打印，与细胞共培养技术相结合可实现不同细胞类型在统一培养基成分、培养条件下的协同生长，将是生产结构复杂、尺寸较大培育肉产品的重要技术途径。

（六）食品化处理技术

培育肉的生产过程不可避免地涉及如何使培养出来的肉制品更具食品特点。培育肉能够在未来市场上占据一席之地，最基本的要求就是在营养、口感、视觉、风味上与传统肉制品相当或更优。例如，体外培养的肌肉细胞中血红素含量很低，因此需要添加富含血红素的血红蛋白、食用色素来模拟

肉的颜色；肉香的来源是脂质氧化和美拉德反应，一些小分子化合物（如氨基酸）是“肉味”产生的主要原因 [23]。因此，通过食品化处理技术添加血红蛋白、风味物质、不饱和脂肪酸等，是强化培育肉产品的色、香、味，得到消费者喜爱的重要策略。

三、国际培育肉行业发展态势

（一）科研机构领跑行业

2000 年前后，美国、欧洲的科学界开始进行培育肉的技术开发和商业评估。2008 年，“世界培育肉研讨会”在挪威食品研究所举行，同时成立了“培育肉联盟”。2011 年，英国牛津大学学者首次发表综述文章，对培育肉的生命周期影响进行了调研和评估 [24]。2012 年，荷兰马斯特里赫特大学学者开始了培育肉的概念验证与技术研究，并于次年制造出了世界首例生物培育牛肉汉堡 [6]。随后，美国、日本、韩国等国的科研机构相继开展培育肉研发，推动了培育肉生产技术的迅速发展。

根据本研究初步统计，目前公开发表的培育肉相关论文接近 400 篇，发文数量前十位的机构分布在荷兰、英国、法国、瑞士、美国、新加坡，代表性的有瓦赫宁根大学，牛津大学，法国农业、食品和环境研究所等。从论文的主要内容来看，80% 以上的为综述型，对培育肉的环境影响、规模成本、技术可行性、消费者接受度、管理条例等进行梳理总结和分析讨论；约 10% 的为研究型，论述培育肉生产的关键技术研发进展，如动物干细胞的长期稳定扩增技术、用于细胞大规模扩增的生物反应器设计、培育肉成型所需的 3D 打印技术等。整体来看，虽然发达国家在培育肉生产技术研发方面启动较早，但目前并未完全突破技术体系，未来的技术开发空间广阔。

（二）初创企业发展迅速

近年来，培育肉领域的初创企业数量快速增长，世界范围内已有逾 60 家，从事业务包括培育肉产品、生产过程中所需各类设备及原料 [7]。这些企业分布于五大洲 20 个国家，其中北美约 37%，亚洲约 25%，欧洲约 31%，其他地区约 7%。至 2020 年年底，世界培育肉企业融资总额约 4.6 亿美元，近两年完成的融资约占 75%。Memphis Meats 公司（美国）作为行业的领跑者，已完成 B 轮 1.81 亿美元融资。一些极有潜力的初创企业也获得资本市场支持，融资额超过 2000 万美元的有 Mosa Meat 公司（荷兰）、BlueNalu 公司（美国）、Future Meat 公司（以色列）、Shoik Meats 公司（新加坡）、Cubiq Foods 公司（西班牙）。

培育肉企业公布的产业化产品及成本如图 2 所示。2013 年，Mosa Meat 公司的生物培育牛肉汉堡肉的造价约为 32.5 万美元（85 g），而 7 年后的生物培育牛肉的造价成本降至每百克 11.2 美元。Future Meat 公司公布的细胞培育鸡肉成本，从 2019 年的每百克 44 美元下降至 2021 年的每百克 3.9 美元，成为目前培育肉领域的最低生产成本。2020 年年底，新加坡监管机构批准了 Eat Just 公司（美国）的申请，允许公开销售生物培育鸡肉，这是世界首例上市的培育肉产品。整体来看，目前国际上已有丰富的培育肉产品类型，技术研发的不断深入带来了生产成本的显著降低；与生产成本直接相关的细胞培养体系及培养基配方，这是相关企业的商业机密，也由此形成了一定的技术和市场壁垒。

四、我国培育肉技术的发展现状与面临问题

（一）培育肉技术的发展现状

1. 培养肉相关研究机构和企业

近年来，我国开始重视并积极推动培育肉行业的发展，高校、科研院所纷纷涉足培育肉技术研究，相关论文发表、专利申请数量呈快速增长态势。我国开展培育肉研究的高校、科研院所、初创企业如表 1 所示。

南京农业大学研究团队在国内最早从事培育肉技术研发，2019 年宣布研发出中国首块培育肉（通过猪肌肉干细胞体外培养 20 天，后进一步分化得到的培育猪肉，质量为 5 g）。中国肉类食品综合研究中心、江南大学、浙江大学的研究团队也相继开展了培育肉生产技术开发、基础科学问题研究，包括动物干细胞体外增殖分化调控、细胞支架材料与制造工艺、生物工艺放大技术及装备开发等，覆盖猪、牛、鸡、鸽、鱼等多种畜禽水产动物物种。在企业方面，目前国内初具规模的培育肉企业有 3 家：Avant Meats 公司（香港）、南京周子未来食品科技有限公司、北京显生生物科技有限公司（CellX）。

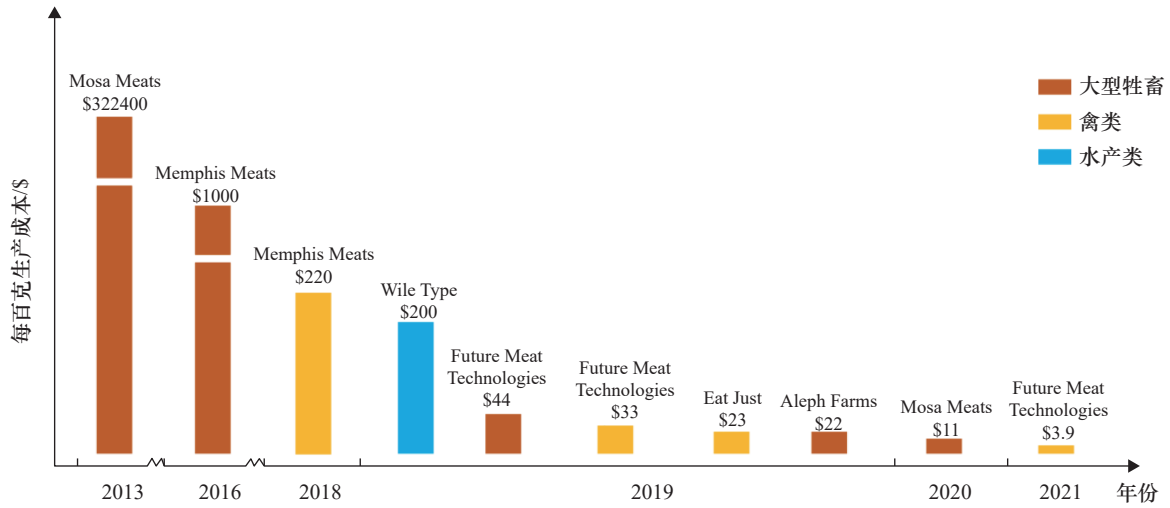

图 2　培育肉企业产业化产品及成本

表 1　我国培育肉行业的研究机构和企业情况

名称	性质	地区	成立/研究起步时间	技术/产品
南京农业大学	高校	南京	2009 年	细胞体外增殖分化调控、细胞支架材料与制造工艺、生物工艺放大技术及装备开发等
中国肉类食品综合研究中心	科研院所	北京	2018 年	
江南大学	高校	无锡	2019 年	
浙江大学	高校	杭州	2020 年	
Avant Meats公司	企业	香港	2018 年	培育水产品等
CellX公司	企业	上海	2020 年	培育猪肉等
南京周子未来食品科技有限公司	企业	南京	2020 年	培育猪肉等

此外，一批咨询投资机构，如谷孚商务信息咨询（上海）有限公司、食芯资本、力矩资本等，专注于包括培育肉在内的整个替代蛋白行业的研究调研、资本投资、技术服务等。

2. 培育肉相关专利及产品

2018 年以来，国内培育肉相关的初创企业逐步成立，获得了资本市场的积极支持，发展速度较快。在国内培育肉专利申请方面，2018—2020 年已公开 21 件，申请数量逐年上升（见图 3）；申请单位主要有江南大学、南京农业大学、中国肉类食品综合研究中心，涉及的技术方向包括种子细胞的分离纯化及扩增、培养基成分优化、培养装备设计、细胞三维成型技术、培育肉加工技术等。

在培育肉产品方面，Avant Meats 公司主打鱼肚、鱼肉等水产品类培育肉的研发，2019 年 11 月进行了鱼肚产品公开品尝测试，目前正在开展产业化放大技术的开发优化；南京周子未来食品科技有限公司、CellX 公司专注于畜禽类动物的培育肉技术研究，具有良好的商业前景和预期市场规模。

（二）培育肉技术发展面临的问题

1. 行业起步稍晚，研究基础待补强

与发达国家约 20 年前开始进行培育肉技术开发和产业布局相比，我国培育肉行业近年来才受到各方关注，起步稍晚。目前进行培育肉技术研发的企业、科研机构数量较少，大部分处于前期技术积累阶段，公开的产业化产品稀缺。突破培育肉生产的关键技术瓶颈，前提条件是阐明其背后的基础科学问题。培育肉技术研发的难点之一是肌肉干细胞等动物干细胞的体外大规模、低成本培养，相应核心科学问题即机体肌肉组织发育过程及调控机理的解析。已有的研究进展都是在生物、医学领域针对小鼠等模式动物或人进行的，较少针对猪、鸡、鱼等畜禽水产类动物的干细胞进行体外培养及发育调控等基础研究。由于存在种属间差异，不同物种的细胞发育特性、体外培养条件不尽相同，亟需开展

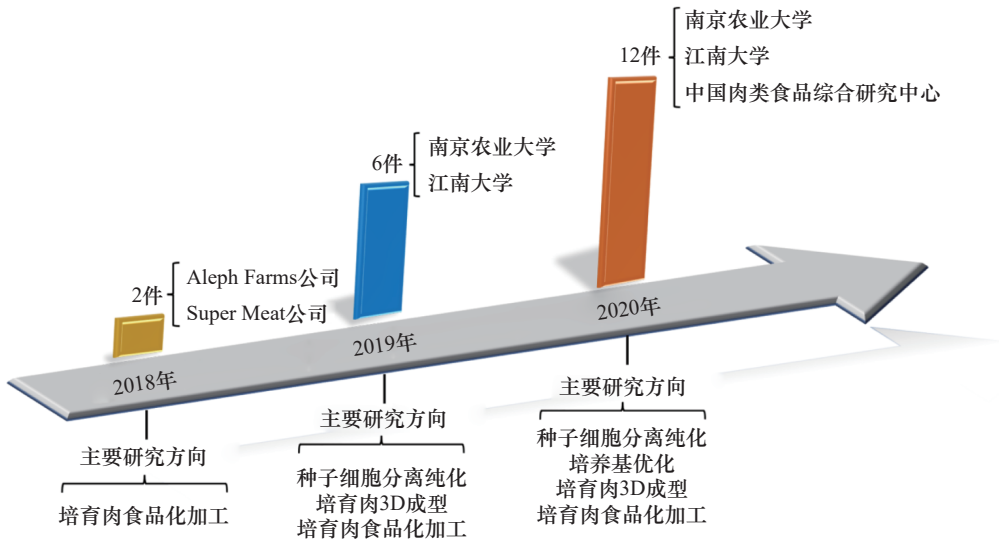

图 3　培育肉相关中国专利申请情况

畜禽水产动物的肌肉组织发育机理、干细胞体外增殖分化调控等方面的基础研究，才能为突破培育肉关键技术提供扎实的理论基础、清晰的技术路线。

2. 研发思路单一，多学科合作欠缺

培育肉生产需要以细胞生物学、食品合成生物学、组织工程、发酵工程、食品工程等多个学科的理论与技术作为基础。培育肉的生产思路在食品领域具有开创性，究其本质是基于组织工程领域“体外构建器官”技术衍生的策略和流程；虽然两方面的技术路线相似，但在研究目的、预期生产规模、成本要求方面存在显著区别。例如，在医学领域中，利用组织工程技术并结合干细胞移植可实现疾病的个体化精准治疗，看重的是材料的生物相容性及细胞的体内功能；但对于培育肉而言，超大生产规模、超低成本是实现产业化的先决条件，产品的风味、营养、食品安全性等也极为重要。目前，从事培育肉研究的团队较多在某一学科领域内拥有良好的基础和实力、具备攻克培育肉生产某一类关键技术瓶颈的能力，但技术开发活动大多遵循本学科的固有思路和策略，较大可能不是构建培育肉技术体系的最佳策略。囿于传统，各学科领域之间未能有深刻的交流与合作机制，可能导致各自开发出的单一关键技术互不适配，难以高效整合出完备的培育肉全流程生产体系。

3. 生产装备研发能力不足，制约产业化进程

与传统的食品加工生产线不同，培育肉的生产制造需要新建以动物细胞为生产原料，以细胞培养基为主要物料，具有大规模、自动化、智能化特征的专用生产线；生物反应器是核心装备。目前，应用大规模生物反应器制造的动物细胞培养产品简单分为两种：细胞的内 / 外源成分，如单克隆抗体、细胞因子等；细胞本身，如干细胞治疗产品。与现有的生物反应器不同，培育肉工业化生产所用的反应器需要实现超大规模、超低成本；培育肉的产品即细胞本身，对培养条件的要求更高，实现细胞高密度培养、维持细胞的功能是培育肉反应器设计的难点；需要采用可靠的过程控制手段，对细胞生长状态进行实时监控，对培养基进行回收利用，在最大程度上保障细胞产品的质量并降低生产成本。因此，相关生产装备的研发能力、过程工艺优化策略是培育肉工业化生产的重要基础条件，国内在此方面的研究较为缺乏，不利于产业化的稳步推进。

五、对策建议

培育肉作为未来食品体系的重要一员，是实现优质动物蛋白绿色供给的重要手段。对照国际先例，我国具有自主知识产权的培育肉产业化技术仍有待深入开发和持续完善。着眼产业构建与长远发展，应在国家层面加强对培育肉产业的引导和扶持，聚焦如何实现培育肉工业化生产这一核心问题，形成协调发展机制，组织开展技术攻坚，力争在激烈

的国际市场竞争中把握机遇、形成特色，让国产培育肉产品适时走上居民餐桌。

（一）加大基础研发投入，构建培育肉核心技术体系

2020 年，国家重点研发计划“绿色生物制造”重点专项申报指南首次涵盖“人造肉高效生物制造技术”，支持包括植物蛋白肉、培育肉在内的新型人造肉生产技术研发。尽管国家级科技计划项目开始重视培育肉技术发展，鼓励并支持科研人员开展基础与应用研究，但整体来看培育肉研究在我国仍属于新兴的小众领域，许多科研工作者对此仍不太了解或处于观望阶段。为了着力解决培育肉工业化生产中的短板技术，建议率先针对各类畜禽水产动物的干细胞生长行为、肌肉组织结构、营养与风味物质等方向开展基础研究；只有充分阐明肌肉组织的发育调控风味营养产生机理，才有可能真正实现培育肉技术的重大突破。

在后续的科技重大专项、重点研发计划、自然科学基金等国家级科技计划项目中，建议适当扩大培育肉相关技术的涵盖范围，合理增加经费投入；拓宽对培育肉研发机构、企业的政策与资金扶持渠道，支持社会资本、金融机构增加对培育肉产业的投资与信贷。针对培育肉生产的“卡脖子”技术问题，建议技术基础雄厚的科研单位、具备研发能力的企业联合开展细胞生物学、组织工程领域的基础研究工作，加速培育肉技术体系研发进程；发挥政府引导、企业主导、高校与科研院所协同参与的作用，形成新兴产业发展合力和活力，保障研发积极性，高效推进产业发展。

（二）支持跨行业交流，构建跨学科研究联盟

培育肉的技术研发需要干细胞工程、组织工程、肉制品加工、工艺放大与过程控制等多个领域的协同合作。只有跨行业的专家学者进行密切的科研合作，才能打破学科壁垒、打通生产全流程，保障培育肉技术取得实质性突破。生物医药行业近年来发展迅速，细胞治疗领域已有较成熟的细胞培养、重组蛋白放大生产等技术；关联行业的技术进步为培育肉的产业化提供了技术借鉴，应在广泛探讨、充分实验验证的基础上引入到培育肉生产。

建议相关优势高校、科研机构组建多学科联合研究中心，以跨学科研究联盟的形式开展培育肉技术研究；核心成员应涵盖从事肌肉发育和疾病、干细胞生物学、组织工程、放大工艺过程、肉制品加工等方向研究的专家学者，相关企业的技术开发人员。通过这种多学科专家组协作研发模式，从多个专业角度出发对培育肉生产全流程技术进行全面交流与深化论证，加快突破培育肉工业化生产的复杂技术瓶颈；明晰培育肉生产的上、中、下游关键控制节点以及质量控制标准，为培育肉监管政策、质量管理体系的制定提供依据。

（三）增强校企合作力度，加快培育肉成果转化

高校和科研院所在培育肉的政策监管、安全性评价、技术开发等方面具有良好的积累，基础研究实力强，拥有先进的仪器设备和实验平台，但基本不具备规模化生产的条件。培育肉企业拥有独立的研发部门，主要从事生产工艺的开发和优化，极少涉及基础研究。通过校企紧密合作，从基础、应用两个角度分别发挥自身独特优势，联合开展培育肉技术攻关，为具有国情特色的培育肉产业化发展提供保障。

着眼长远发展，在具备培育肉研发、规模化生产的基础条件后，建议保持校企合作模式，明晰利益分配机制，拓宽“产学研”覆盖范围，在培育肉产业技术研发、科技成果转化与应用、人才培养等方面开展深化合作；通过多方的优势互补、技术整合，为培育肉产业的突破发展创造良好条件；适时建设代表性培育肉的集成生产线，进行成果转化过程示范与成果展示，推动培育肉的产业化进程；对于规模化生产中发现的新技术问题，依托高校、科研院所的专业优势寻求解决办法，以此持续优化生产体系、逐步壮大产业规模、稳步提升发展水平。

（四）关注消费者需求，开发特色培育肉产品

当前培育肉的研发重点和热点集中在上游的细胞培养环节，尚未真正关注培育肉的“食物”属性，即肉的质构、口味、香气等。值得强调的是，培育肉作为一种食品，满足消费者的营养与口味需求是全行业科研活动的出发点和回归点；作为一种新兴食品，消费者的认知度、接受度有待提升，加之中西方饮食文化的显著差异，若直接沿用国外的培育肉生产策略和技术，未必能够生产出受到国人普遍

喜爱的肉食产品。

建议多渠道、多角度开展培育肉的消费宣传和调研，提高培育肉的公众接受度，获得有关消费者需求和建议的有效反馈；充分考虑居民的饮食习惯与文化，积极开发适应国民营养成分需求、风味口感多样化的培育肉产品；关注特殊人群、场景、环境等的需求，开发具有不同特点、特殊功效的产品，提高培育肉产品的价值层次。

参考文献

[1] Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision [R]. Rome: Agricultural Development Economics Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

[2] Huang S L, Liu A M, Lu C X, et al. Supply and demand levels for livestock and poultry products in the chinese mainland and the potential demand for feed grains [J]. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(5): 475–482.

[3] 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.

[4] Steinfeld H, Gerber P J, Wassenaar T, et al. Livestock’s long shadow: Environmental issues and options [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

[5] Jones B A, Grace D, Kock R, et al. Zoonosis emergence linked to agricultural intensification and environmental change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8399–8404.

[6] Post M J. Cultured beef: medical technology to produce food [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(6): 1039–1041.

[7] Guan X , 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: 1–12.

[8] Jiang G H, Ameer K, Kim H G, et al. Strategies for sustainable substitution of livestock meat. foods [J]. Foods, 2020, 9(9): 1–20.

[9] Tonti-Filippini N, Mccullagh P. Embryonic stem cells and totipotency [J]. Ethics and Medics, 2000, 25(7): 1–3.

[10] Takahashi K, Yamanaka S. Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibrobla [J]. Cell, 2006, 126(4): 663–676.

[11] Wu Z, Chen J J, Ren J T, et al. Generation of pig induced pluripotent stem cells with a drug-inducible system [J]. Journal of Molecular Cell Biology, 2009, 1(1), 46–54.

[12] Spaas J H, Schauwer C, Cornillie P, et al. Culture and characterisation of equine peripheral blood mesenchymal stromal cells [J]. The Veterinary Journal, 2013, 195(1): 107–113.

[13] Post M J. Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects [J]. Meat Science, 2012, 92(3): 297–301.

[14] 张天钰, 周双白, 李青峰. 干细胞冷冻保护剂的研究进展 [J]. 组织工程与重建外科杂志, 2019, 15(6): 425–427.
Zhang T Y, Zhou S B, Li Q F. Research progress of stem cell cryoprotectant [J]. Journal of Tissue Engineering and Reconstruction Surgery, 2019, 15(6):425–427.

[15] Diaferia G R, Dessi S S, Deblasio P, et al. Is stem cell chromosomes stability affected by cryopreservation conditions? [J]. Cytotechnology, 2008, 58(1): 11–16.

[16] Fang C Y, Wu C C, Fang C L, et al. Long-term growth comparison studies of FBS and FBS alternatives in six head and neck cell lines [J]. PLoS One, 2017, 12 (6): 1–16.

[17] Okamoto Y, Haraguchi Y, Sawamura N, et al. Mammalian cell cultivation using nutrients extracted from microalgae [J]. Biotechnology Progress. 2020, 36(2): 1–15.

[18] Zhang G Q, Zhao X R, Li X L, et al. Challenges and possibilities for bio-manufacturing cultured meat [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97, 443–450.

[19] Choudhury D, Ting T W, Swartz E. The business of cultured meat [J]. Trends in Biotechnology, 2020, 38(6): 573–577.

[20] Morganstein D L, Wu P, Mane M R, et al. Human fetal mesenchymal stem cells differentiate into white and brown adipocytes: A role for ERRalpha in human UCP1 expression [J]. Cell Research, 2010, 20(4): 434–444.

[21] 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, 20(3): 1–15.

[22] Dick A, Bhandari B, Prakash R. 3D printing of meat [J]. Meat Science, 2019, 153: 35–44.

[23] 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. Commercial production of artificial meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(11): 248–253.

[24] Tuomisto H L, Mattos M J T. Environmental impacts of cultured meat production [J]. Environmental ence & Technology, 2011, 45(14): 6117–6123.