培育肉与传统肉类生产过程对环境的影响

李石磊[1,2,3]，李莹莹[1,2,3]，王守伟[*1,2,3]，李雨爽[1,2,3]，杨 峰[1,2,3]

（1. 中国肉类食品综合研究中心，北京 100068；2. 北京食品科学研究院，北京 100068；3. 肉类加工技术北京市重点实验室，北京 100068）

摘要：通过分析传统肉类生产方式面临的挑战及培育肉产生的环境影响，表明培育肉是一种在生产技术、发展理念以及未来意义上具有先进性的肉类生产形式。通过对培育肉不同生命周期评估（LCA）的对比分析表明，影响培育肉生产的环境因素是多方面的，包括原料来源、细胞生长密度等，与传统肉类生产方式相比，培育肉的生产过程将占据更少的土地面积、消耗几乎可以忽略不计的淡水资源、在温室气体排放方面也具有较为明显的优势。另外，在降低培育肉生命周期对环境影响方面仍然有较大的提升空间，需通过开发适于工业生产的具体工艺及攻关系列基础技术问题进一步降低其对环境的影响，以满足人们对可持续发展的要求。然而，由于目前培育肉的工业化生产工艺尚未建立，对于细胞增殖、分化和培育肉质量控制等尚无明确参数，导致不同LCA之间存在较大差异，为促进培育肉产业化发展需尽快确定培育肉的工业化生产工艺，按照目前我国的装备试剂工业基础水平明确符合我国技术发展现状的培育肉LCA，为我国未来制定相关培育肉产业化发展政策提供理论依据。

关键词：培育肉；传统肉类；生产过程；生命周期评估；环境影响

中图分类号：TS 251　**文章编号：**1673-1689(2022)09-0001-11　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.09.001

Environmental Impact of Cultivated and Traditional Meat Production Processes

LI Shilei[1,2,3]，*LI Yingying*[1,2,3]，*WANG Shouwei*[*1,2,3]，*LI Yushuang*[1,2,3]，*YANG Feng*[1,2,3]

（1. China Meat Research Center, Beijing 100068, China; 2. Beijing Academy of Food Sciences, Beijing 100068, China; 3. Beijing Key Laboratory of Meat Processing Technology, Beijing 100068, China）

Abstract: Based on a comparative analysis of challenges faced by traditional meat production and the environmental impacts of cultivated meat, it is indicated that the cultivated meat is an advanced form of meat production in the production technology, development concept and future significance. The comparative analysis of different LCA of cultivated meat suggests various environment factors affecting of cultivated meat production, including raw material source, cell growth density and so on. Compared with the traditional meat production, the process of cultivated meat production could take up less land area and consume almost negligible fresh water resources, showing significant advantages in greenhouse gas emission. It can also be concluded from this study that there is still

收稿日期：2021-08-21

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFC2101400）；中国工程院战略研究与咨询项目（2022-XY-22）；北京市博士后工作经费资助项目（2018-ZZ-119）。

* **通信作者：**王守伟（1961—），男，教授级高级工程师，硕士研究生导师，主要从事食品安全与加工研究。E-mail：cmrcwsw@126.com

much room for improvement in reducing the impact of cultivated meat life cycle on the environment. It is necessary to further reduce its environmental impact by developing specific processes suitable for industrial production and tackling a series of basic scientific and technological problems, so as to meet the requirements of human civilization for sustainable development. However, the industrialized production technology of cultivated meat has not been established so far, and the specific parameters of cell proliferation, differentiation and quality control of cultivated meat have not yet been defined, resulting in great differences among different LCA. In order to promote the development of cultivated meat industrialization, it is necessary to determine the industrialized production technology of cultivated meat as soon as possible. According to the basic level of Chinese equipment reagent industry, the LCA of cultivated meat in line with the current situation of Chinese technological development should be counted, which could provide the theoretical basis for formulating the development policies of relevant cultivated meat industrialization in China in the future.

Keywords: cultivated meat, traditional meat, production process, life cycle assessment, environmental impaction

随着人口数量的持续增长和资源的不断消耗，健康、环保、可持续的生活方式成为当今社会的主流[1]。在肉品供应方面，人类通过不断对传统肉类的生产效率[2]、质量控制[3]、保鲜方式[4]、加工方式[5]等要素进行优化，极大提升了肉类食品供应能力。据联合国粮食及农业组织预测，2050 年全球肉类年产量将达到 4.55 亿 t，这几乎是 2000 年全球肉类产量(2.28 亿 t)的两倍[6]。2019 年，我国肉类产量 7 649 万 t，其中猪肉产量 4 255 万 t，约占全球总产量的三分之一[7]。然而，全球的养殖业占用了地球 30%可耕土地面积、消耗了全球 8%的淡水资源、产生了全球 18%的温室气体，给地球生态环境带来了严重的负担[8]。2016 年 4 月，我国农业部发布《全国生猪生产发展规划(2016—2020 年)》指导生猪产业转型升级和绿色发展[9]。另外，难以预测的瘟疫也严重影响了传统肉类的产能。2019 年以来爆发的非洲猪瘟造成了全球近一半生猪的死亡，也导致我国的猪肉供应出现了短时供给短缺[10]。

在此背景下，发展高效、环保、可持续的替代动物蛋白生产方式被寄予了广泛期待[11]。培育肉也被称作生物培育肉、培养肉等[12-14]，是利用动物细胞体外培养的方式控制其快速增殖、定向分化，并收集加工而成的一种新型肉类食品[12,15]。相对于植物蛋白肉等其他肉类替代物，培育肉因可直接为人类提供真实的动物蛋白而被广泛看作最具商业价值潜力的人类肉品替代物[16-17]，在生产技术、发展理念和存在意义等方面具有较强的先进性[18]。目前，包括中国、美国、日本等在内的多国政府、研究机构和近百家初创企业等正积极开展培育肉工业化的相关研发工作[18]。在环境影响方面，尽管目前相关初创企业、研究机构或学者等对培育肉的潜在环境影响、动物福利和健康优势等提出了多种假设，但由于培育肉没有实现商业化生产，人们对于这些研究的精准性仍存在一定分歧。在完全建立培育肉商业化生产之前，对环境、动物福利和人类健康影响等方面的预测仍将缺乏准确的依据[19]。

作者通过对传统肉类生产过程中的资源消耗、引起的生态退化和安全风险 3 方面进行分析，从土地、淡水、能源的消耗，温室气体和富营养物质排放以及药物残留和可能产生的细菌耐药性安全风险等方面总结了传统肉类生产方式面临的现实挑战；然后通过对传统养殖业发展新方向的总结和培育肉发展历程及其先进性的分析阐明人类肉品供应方式面临的变革需求及采用培育肉替代传统肉类的解决方案；进而按照能量流动的方向对培育肉上市前的全生命周期(原材料生产、培养基生产、种子细胞库建立和维护、细胞增殖和分化、培育肉食品化加工)进行剖析。同时结合近年来国际上发表的 5项培育肉生命周期评估(life cycle assessment，LCA)[20-24]对培育肉生产过程的关键控制点进行分析；最后通过对比培育肉与传统肉类的生产过程对环境的影响阐明培育肉在环境影响方面的优势，并提出培育

肉工业化生产过程中亟需攻克的技术关键点(高效细胞培养技术、培养基高效利用技术、无血清培养基生产技术、集约化生物反应器制造技术、工业化生产工艺流程优化)。

1 传统肉类生产方式面临的挑战

1.1 资源消耗

传统肉类生产需要占用大量土地用于畜牧养殖和饲料种植,如表 1 所示。生产 1 kg 牛肉所需土地面积高达 326.21 m^2,是禽肉的 26.7 倍、鸡蛋的 52.0 倍。再加之近些年全球经济的高速增长和人口数量的持续激增,全球的养殖业规模持续扩大。据统计,全球每年用于养殖业的土地面积占全部可耕地面积的 30%。同时,传统肉类生产对淡水资源需求也持续增长,水占动物体质量的 60%到 70%,是维持动物重要生理功能必需的物质;另外,大麦、玉米、小麦和大豆等饲料作物的种植需要大量淡水灌溉,畜牧养殖和加工过程中的清洁、降温、废物处理等均需要洁净淡水资源。因此,传统肉类生产过程需要消耗越来越多的淡水。从表 1 可见主要禽畜肉类生产所消耗的淡水资源巨大,生产 1 kg 羊肉所需淡水资源高达 1 803 L;另外,传统肉类的生产也消耗了大量的能源,主要用于饲料种植和运输加工环节,每生产 1 kg 牛肉消耗的能源高达 78.6 MJ。上述分析表明传统肉类生产过程消耗大量非再生资源。

表 1 传统模式下主要动物蛋白生产过程的资源消耗[21, 25]

Table 1 Resource consumption of major animal protein production processes in traditional models [21, 25]

种类	土地占用面积/m^2	淡水资源消耗量/L	能源消耗量/MJ
牛肉	326.21	1 451.00	78.60
羊肉	369.81	1 803.00	7.07
猪肉	17.36	1 796.00	16.00
禽肉	12.22	660.00	26.60
鸡蛋	6.27	578.00	12.30

注:能源消耗量、淡水资源消耗量和土地占用面积分别代表每生产 1 kg 相应动物蛋白的消耗量。

表 2 传统模式下主要动物蛋白生产过程的排放量[25]

Table 2 Emission amounts from major animal protein production processes in the traditional model[25]

种类	温室气体排放量(以 CO_2 质量计)/kg	富营养物质排放量(以 PO_4^{3-}质量计)/g
牛肉	99.48	301.41
羊肉	39.72	97.13
猪肉	12.31	76.38
禽肉	9.87	48.70
鸡蛋	4.67	21.76

注:富营养物质排放量、温室气体排放量分别代表每生产 1 kg 相应动物蛋白的排放当量。

1.2 生态退化

目前,每年由于人类活动向大气排放的近 370 亿吨二氧化碳中包括畜牧业在内的农业领域贡献了大约 18.4%[26],其中大部分温室气体的排放源于饲料生产和养殖阶段(如牛的胃中产生甲烷)。据统计,饲料生产和养殖阶段的温室气体排放量占肉品生产碳排放量的 80%以上[25]。如表 2 所示,生产 1 kg 牛肉将产生 99.48 kg 温室气体;另外,畜禽排泄物中的大量富营养物质(如氮、磷、钾)会导致水体富营养化,如生产 1 kg 牛肉将排放 301.41 g 富营养物质。目前,牲畜占全球哺乳动物(不包括人类)总量 94%,养殖业占据的大量草场和耕地对原有自然生态系统造成了破坏,进而影响了全球生物多样性。在世界自然保护联盟的红色名单上有 98 512 个物种面临灭绝的威胁,其中栖息地破坏是造成物种灭绝的主要因素[27]。上述分析表明传统肉类生产对地球的生态造成了多方面的负面影响。

1.3 安全风险

传统肉类中的兽药残留一直是全社会高度关注的敏感话题,近年来随着检测仪器的不断升级,人类对兽药残留的监控能力也越来越强,国际标准(CX/MRL2—2018)规定了动物源性食品中阿维菌素等 66 类兽药的最大残留限量,并提出卡巴氧等 13 种兽药残留风险管理建议[28],这为保障肉品安全发挥了关键作用。然而,目前的检测方法基本都定有检出限,检出限以下仍然存在一定的兽药残留风险,同时不断出现的新型替代药物和违规用药现象也给消费者带来了潜在的健康威胁。另外,残留兽药还可以间接通过植物吸收进入人类食物链,研究表明,黄瓜、番茄和莴苣对磺胺等多类兽药有明显吸收[29],鉴于人类食物的多元性,这也是人类健康的潜在威胁[30]。据统计,2010 年全球在动物养殖中使用抗生素类药物最多的 5 个国家分别是中国、美国、巴西、印度和德国,其中我国的单位面积抗生素使用量最高,总用量占全球的 23%[31]。英国奥尼尔委员会在 2016 年 5 月发布的一份报告指出目前全球每年死于耐药微生物感染的人数达到70 万且预计

2050 年将激增至 1 000 万,由于抗生素滥用引起的细菌耐药性正逐渐成为威胁人类健康的一大难题[32]。上述分析表明传统肉类生产过程中存在着多种持续威胁人类健康的安全风险。

2 培育肉发展的必然性分析

2.1 养殖业发展方向

相较 19 世纪时的食品供应系统,人类的食品供应体系已发生了革命性变化,食品生产已实现工业化,食品调配已实现全球化。再加之高效率的粮食种植、动物养殖、动物育种等新技术的不断涌现,全球养殖业生产效率有了明显提升。近年来出现的新型保鲜技术、电子商务技术等使人类的食品供应呈现出精准化和多样化发展趋势。另外,随着检测技术不断发展,人类对食品安全的关注和监控力度逐渐加强,兽药残留、农药残留、微生物、食品添加剂等的检测已成为确保人类食品安全的常态化监控手段。

近年来为了培育具有更高生产效率或抗病能力的动物新品种,提升传统肉类食品的生产效率或营养价值,包括动物转基因育种技术在内的生物技术已经被开发并取得了一定成果[33-34]。2019 年 3 月 8 日美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration,FDA)宣布取消 2016 年关于禁止美国生物技术公司生产的转基因三文鱼及鱼卵进入美国市场的警示,许可其在美国养殖及销售[35]。该产品的上市虽经历了近 20 年的监管审查,但作为目前全球首例批准上市的转基因动物将极大激励该技术的快速发展。另外,通过特异性靶点改造提升猪抗病毒能力的尝试也在全球不同实验室中展开,隶属于英国动物基因公司 Genus 的 Christianson 研究团队已经尝试利用转基因育种技术培育蓝耳病免疫的猪种[10]。这些新技术的发展表明人类在解决传统肉类生产过程中存在的问题上持续努力并不断取得突破。

目前人类的肉品供应体系依然是脆弱的。2019 年我国肉类产量 7 649 万吨,其中猪肉 4 255 万吨,约占世界总产量的三分之一[7]。然而,席卷全球的非洲猪瘟,使 2020 年我国的生猪产量较 2019 年同期下降 21.3%,猪肉价格高涨[7]。2019 年 9 月,国务院发布的《国务院办公厅关于稳定生猪生产促进转型升级的意见》中提出要加快发展禽肉、牛羊肉等替代肉品生产,更好地保障市场供应[36]。显然,随着我国人口的增长和居民消费水平的提高,单纯依靠传统养殖的肉类生产方式已经很难满足居民快速增长的肉品消费需求,发展培育肉等新型替代肉品既是解决当下我国养殖业面临的突出矛盾的有效手段,也是在未来全球高科技食品领域发展的战略要求。据新加坡食品局(Singapore Food Agency,SFA)统计,2018 年新加坡的食物自给率不足 10%,目前新加坡制定了 2030 年营养自给率达到 30%的战略目标[37]。另外,在当今追求碳中和的背景下发展传统肉类的替代物也是食品工业顺应人类文明发展趋势的必然举措。

2.2 培育肉的出现

2.2.1 发展历程 早在 1997 年,Van 等提交了人造肉的国际专利申请并获得了美国专利及商标局的授权,这是目前可查最早关于培育肉制备的报道[38];2002 年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)的研究人员在体外成功培育了火鸡源肌肉,另外,由 NASA 资助培育出第一块可食用的培育鱼片[39];2013 年,荷兰科学家 Mark Post 研制出世界上第一个牛源培育肉汉堡[40]。此后,培育肉的工业化发展进程明显加快。2020 年以色列培育肉初创企业 Future Meat 宣布已将鸡源培育肉价格降至每 100 g 6.64 美元;2020 年 12 月,新加坡成为全球第一个批准出售培育肉产品的国家[41]。目前,全球众多致力于开发培育肉产品的初创公司纷纷成立并获得大量融资,如美国的 Upside Meat 公司、荷兰的 Mosa Meat 公司等。

2019 年北京首农食品集团有限公司通过设立科研专项资助中国肉类食品综合研究中心开展培育肉的工业化研究并于 2020 年进行成果鉴定,展示了利用 3D 打印技术制备的猪源培育肉排产品和鸽源培育肉汤;2019 年南京农业大学宣布制备出培育肉实验样品,并在 2020 年进行了展示;2020 年由北京工商大学牵头的中国工程院战略咨询研究项目“生物培育肉的发展战略研究”获得立项并于 2021 年顺利结题;2021 年由江南大学牵头的“十四五”国家重点研发计划项目“人造肉高效生物制造技术”获得立项并实施;另外,国内也出现了多家致力于培育肉开发的初创企业。这些多方位、多层次资源的投入为我国培育肉的工业化发展奠定了良好基础。

2.2.2 发展优势

1)技术先进 培育肉制备技术是多学科交叉融合的产物,涉及食品科学、材料学、化学、物理学等领域,是在原有基础上的创新性开发和大规模应用,例如支架材料必须可食用并能够通过规模化生产降低成本。另外,通过工业化的方式培养肉品有助于实现肉类的标准化高效生产。培育肉研发需调动多方力量对其所需生产技术进行科研攻关,因此,有助于带动一批相关生化技术快速突破和产业化应用。

2)理念先进 近年来极端天气事件频发,应对气候变化已成为国际社会的共识,世界各国纷纷采取减排行动倡导绿色发展理念。2020 年 9 月 22 日,习近平总书记在第 75 届联合国大会一般性辩论上表示:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,争取在 2060 年前实现碳中和”。这说明环保将是未来人类文明的必然发展趋势。相较于传统肉类生产方式,培育肉可实现工业化生产,将有助于人类实现碳中和的发展理念。

3)意义重大 长期以来,传统的肉类生产方式在一次次技术升级中不断增加产能,并满足人类越来越高的需求,然而传统肉类生产中存在的环境污染、资源消耗等问题严重制约了肉类行业的持续健康发展,培育肉的出现颠覆了长久以来的肉类生产模式。另外,采用工业化的生产方式将有助于快速适应和满足未来的肉类食品供应需求。

3 培育肉的环境影响

3.1 培育肉的 LCA

按照 ISO 14040 的定义,LCA 是用于评估与某一产品(或服务)相关的环境因素及潜在影响的方法,通过编制生产系统内相关投入与产出的存量记录,评估与这些投入、产出有关的潜在环境影响。虽然目前没有工业化培育肉生产线出现,但培育肉的基本生产过程是确定的,主要阶段包括种子细胞获取、细胞增殖、细胞分化、食品化加工[19]。相较于生产流程,分析培育肉的生命周期将更加有利于分析其对环境的影响,依据 ISO 14040 对产品生命周期的定义,培育肉在上市前的生命周期按照能量流动的方向主要包括 5 部分(见图 1):原材料生产、培养基生产、种子细胞库建立和维护、细胞增殖和分化、培育肉食品化加工。

按照土地资源占用、温室气体排放、淡水资源利用和能源消耗 4 项环境影响参数对培育肉生命周期进行评估。具体内容如下:1)原材料生产阶段主要是培养基制备所需小麦、玉米或藻类等初级原料的种植,消耗的主要是土地和淡水资源,同时消耗部分化石能源或电力能源用于机械化种植、收割和运输等;2)培养基生产阶段主要包括初级原材料的灭菌和发酵过程,消耗的主要是用于维持发酵罐和高压灭菌装置运行及发酵车间温控的电力能源,

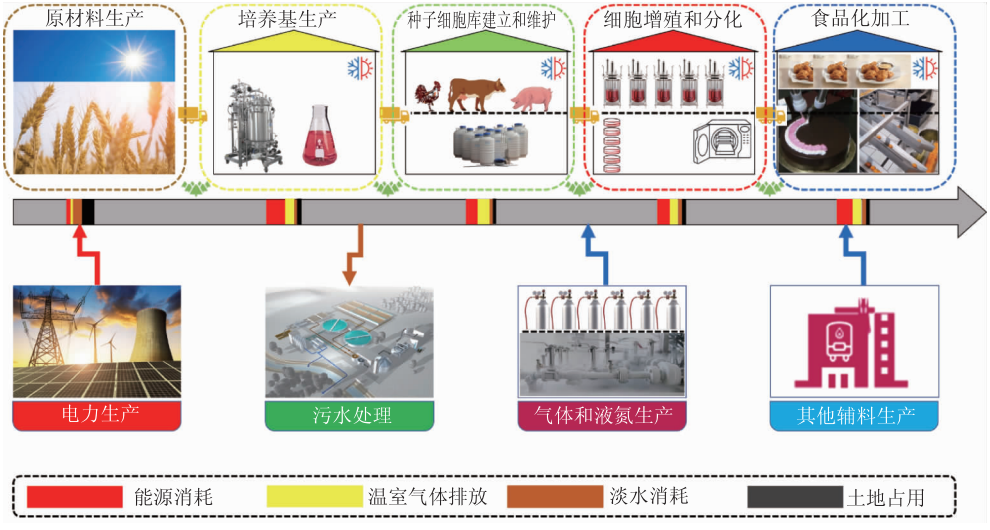


图 1 培育肉生产过程的全生命周期

Fig. 1 Whole life cycle of cultivated meat production process

同时还要占用少许土地用于建设厂房、消耗少许淡水资源用于发酵和高压灭菌(产生少量废水),另外发酵过程还将排放少量温室气体;3)种子细胞库建立和维护阶段主要包括供体动物饲养、器材及试剂消耗、设备高压灭菌及液氮存储等;4)细胞增殖和分化阶段主要是指细胞在培养箱、生物反应器等培养装置中的大规模增殖和分化培养过程,消耗的主要是用于维持培养温度、搅拌速度、加液流量、消毒用高压灭菌锅运行、生产车间的温控和洁净空气循环系统运行的电力能源,同时还消耗一定量的气体、培养皿和支架材料等耗材,以及一定量的水资源用于清洗、降温和灭菌等;5)培育肉食品化加工阶段主要包括培育肉的调色、赋味、塑形等工艺,主要消耗用于维持机械化加工设备运行、生产车间的温湿度及洁净度的电力能源,同时需要消耗少量的水资源用于清洁,以及一定量的辅料和添加剂等。

3.2 LCA 关键控制点分析

目前全球已有多个研究团队或机构对培育肉的 LCA 进行了模拟分析,结果见表 3。LCA1 是以蓝藻作为原料,研究结果表明细胞增殖和分化过程对环境影响最大,该过程占用了培育肉生命周期所消耗的 82%淡水资源、72%能源和 71%温室气体排放量。LCA2 与 LCA1 相比,由于不再将土壤存储的"绿水"计算在内,使 LCA2 的淡水资源消耗明显降低。同时,由于将小麦和玉米作为原料,使 LCA2 的土地占用面积明显增加。另外,计算过程中增加了生物反应器的加热耗能,使 LCA2 的最终能源消耗也有少许增加[20,22]。LCA3 是以蓝藻作为原料,研究结果表明培养基生产、细胞增殖和分化阶段共占用了 75%的能源消耗,另外由于该项研究计算了食品加工完成后到餐桌之间的环境影响因素,同时对物料运输和冷藏等因素进行了更加精确地计算,使 LCA3 在温室气体排放量和能源消耗方面相较于 LCA1 或 LCA2 有明显升高[24]。LCA4 是以大豆为原料,结果表明由于大豆比蓝藻、小麦或玉米等具有更低的单位面积产量使 LCA4 相较于 LCA1、LCA2 或 LCA3 的土地占用面积大幅增加[21]。

表 3 不同计算模式下培育肉的环境影响参数[16,20-22,24]

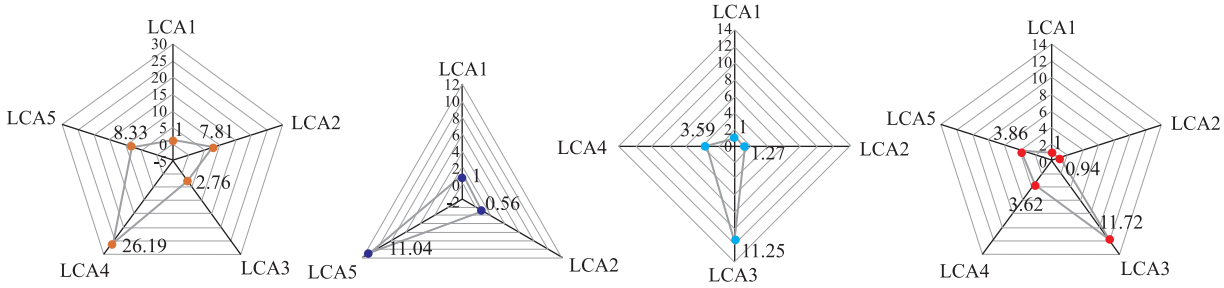
Fig. 3 Environmental impact parameters of cultivated meat under different calculation modes[16,20-22,24]

计算模式	土地占用面积/(m^2)	淡水资源消耗量/L	温室气体排放量/kg	能源消耗量/MJ
LCA1	0.19~0.23	0.37~0.52	1.90~2.24	26.00~33.00
LCA2	0.46~2.82	0.25	1.38~2.49	26.30~48.50
LCA3	0.39~0.77	—	23.90~24.64	290.70~373.00
LCA4	5.50	—	7.50	106.00
LCA5	1.70~1.80	4.20~5.60	2.50~13.50	—

注:不同环境影响参数代表在相应 LCA 中每生产 1 kg 培育肉的消耗量。

上述研究表明影响培育肉 LCA 的因素较多,其中包括:1)影响土地占用的关键因素。从能量转化角度分析,采用蓝藻、玉米、小麦或大豆作为原料均有一定可行性和合理性,然而由于不同作物的单位面积产量不同导致以不同原料来源计算的 LCA 中土地占用面积出现较大差异。如图 2(a)所示,LCA1、LCA3 采用蓝藻作为原料占用的土地面积最小,LCA4 采用大豆作为原料则需占用更多的土地面积。上述分析表明培育肉工业化生产所需的原料种类是影响最终土地占用面积的关键因素。2)影响淡水资源消耗的关键因素。影响培育肉 LCA 淡水资源消耗的因素多且复杂,目前无法实现对其全部影响因素的准确评估,因此未对 LCA3 和 LCA4 进行独立计算。如图 2(b)所示,由于 LCA2 不再将土壤存储的"绿水"计算在内,导致 LCA2 的水资源消耗量几乎是 LCA1 的一半,由于 LCA5 将细胞培养过程中的降温和设备清洗所需淡水资源都计算在内,使 LCA5 的水资源消耗量出现了大幅度增加。3)影响能源消耗的关键因素。现阶段由于培育肉的工业化生产工艺尚未形成,因此对于细胞的培养参数和品控参数都是无法确定的,这就导致不同 LCA 中关于能源消耗的计算由于侧重点不同出现较大的差异。如图 2(c)所示,由于 LCA1、LCA2 和 LCA4 中对生物反应器中细胞最高生长密度的预测不同(分别是 1×10^{10}、1×10^{8}、4×10^{6} 个/mL),因此最终的能源消耗量出现明显差异,细胞生长密度越高则能源消耗越低,说明细胞的生长密度是影响培育肉 LCA 中能源消耗的关键因素。4)影响温室气体排放量的关

键因素。能源消耗过程是培育肉工业化生产过程产生温室气体的主要阶段。从图 2（d）可以看出，LCA1、LCA3 和 LCA4 中温室气体排放量与能源消耗量(见图 2(c))呈现出一致性。上述LCA 都是在数据计算基础上得出的理论分析结果,但是现阶段对于工业化生产工艺的模拟仍不充分，影响培育肉 LCA 的关键点是多方面的(见图 3)。由于无血清培养基的制备技术尚未获得实质性突破,因此在培养基的生产环节仅仅模拟计算了糖类和氨基酸两类基础营养物质的生产,而对于细胞生长所必需的多种生长因子、无机盐和维生素等要素尚未计算在内,近年来随着技术的不断发展,已经有团队陆续宣称开发出了可用于培育肉生产的无血清生产技术，这将为更加精准化的培育肉 LCA 提供技术支撑。另外,随着培育肉工业化生产工艺的加快完善和具体工艺参数的确定,培育肉生产过程所需的装备、耗材、辅料等因素对环境影响的计算也将进一步精准化,LCA 结果也将更接近于实际生产值。



(a) 相对土地占用面积　(b) 相对淡水资源消耗量　(c) 相对能源消耗量　(d) 相对温室气体排放量

数据均以 LCA1 为基准计算。

图 2　不同计算模式下培育肉生产过程中不同环境影响因素间的差异分析

Fig. 2　Variance analysis of environmental factors in the process of cultivated meat production under different calculation modes

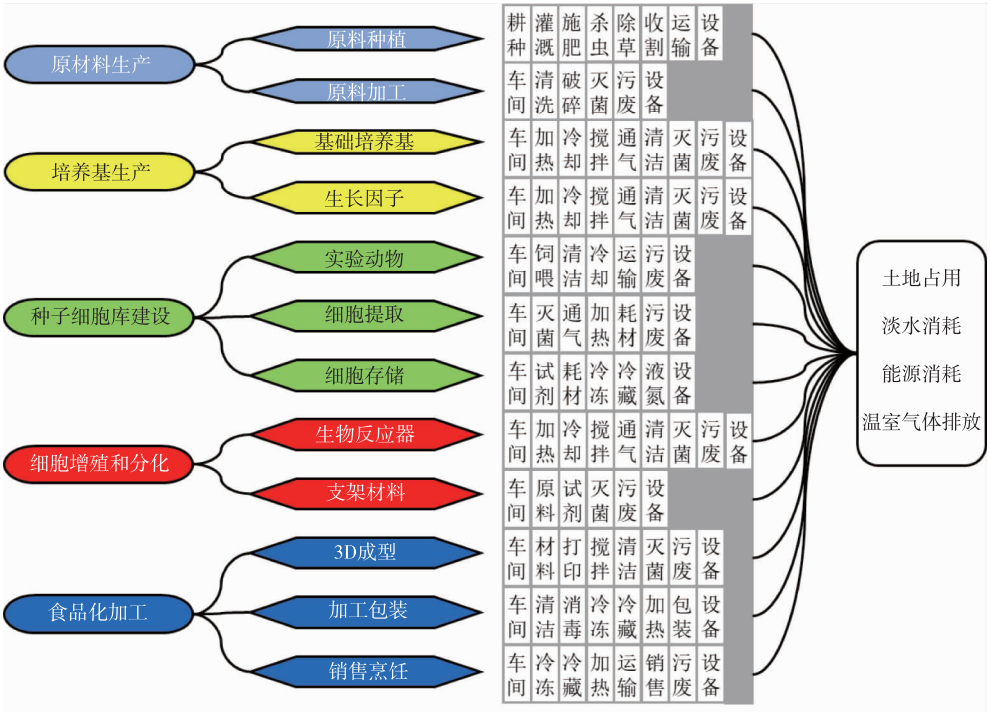


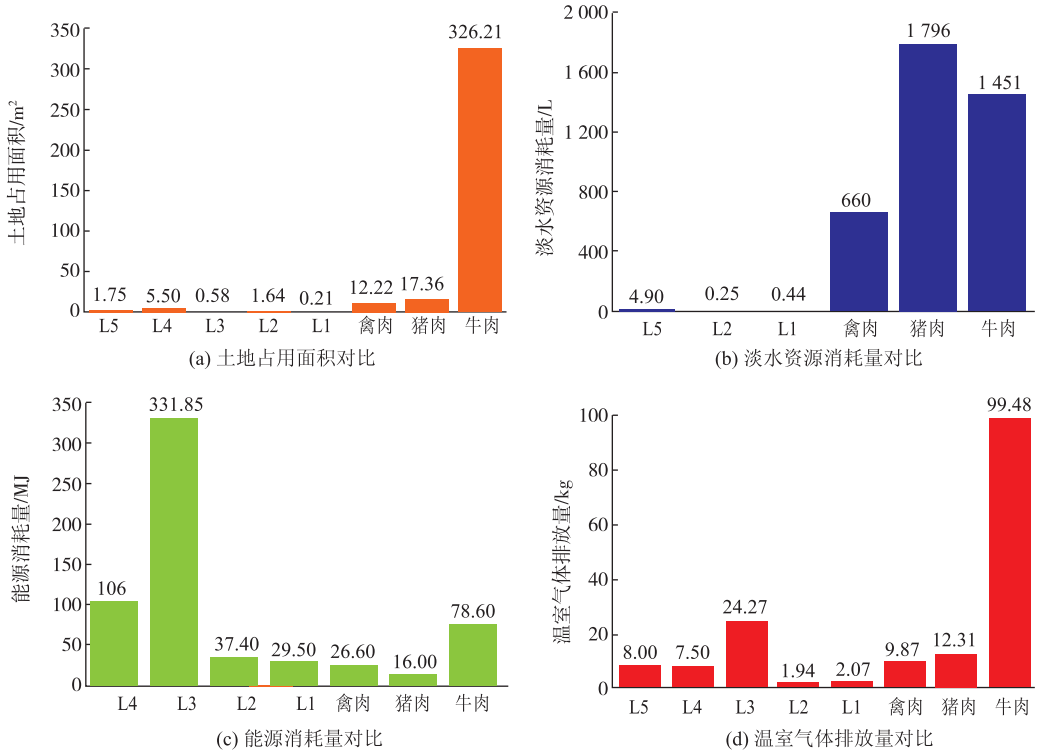
图 3　影响培育肉 LCA 的关键控制点

Fig. 3　Key control points affecting the LCA of cultivated meat

3.3 培育肉与传统肉类的对比

培育肉与 3 种代表性传统肉类牛肉、猪肉和禽肉的 LCA 对比结果见图 4。培育肉生产过程中占用的土地面积明显少于传统肉类,这是由于培育肉是依靠生物反应器这一集约化生产形式实现蛋白质高效转化,具有更高的空间利用率。另外,利用节约的土地进行绿化会进一步降低温室气体排放、保护淡水资源和物种多样性。由图 4(b)可知,生产培育肉消耗的淡水资源几乎可以忽略不计,节约的淡水资源可以补充地下水,并有助于形成更多的湿地面积等。而传统肉类的生产过程中不仅需要淡水资源生产饲料作物,更需要大量淡水资源维持动物的代谢等重要生理功能。另外,传统肉类生产过程中动物可以利用环境温度和自身的产热、降温系统实现体温恒定,而培育肉的生产过程中要维持动物细胞生长所需的恒定温度,则只能完全依靠主动加热或降温的方式,同时培育肉生产车间严格的环境控制也需要消耗能源,因此培育肉在依靠技术创新降低单位能耗方面有较大提升空间。由图 4(c)可知,将 L1 生产工艺中的细胞培养密度提升至 1×10^{10} 个/mL,可实现单位能耗优于牛肉并接近猪肉和禽肉。另外,随着风能、太阳能、潮汐能等可再生能源在电力生产中的广泛应用,培育肉生产过程的单位能耗将会进一步下降。由图 4(d)可知,在温室气体排放方面 L1、L2、L4 和 L5 都优于传统肉类,由于培育肉生产中温室气体排放主要与能源消耗有关,因此若使用清洁电力能源必将进一步降低其温室气体排放量。

上述分析说明培育肉工业化生产过程在土地资源占用、淡水资源利用和温室气体排放方面比传统肉类生产体现出明显的优势,而在能源消耗方面需要通过技术突破进一步降低单位能耗,从而体现培育肉的环保优势,降低生产成本。



图中数据为每生产 1 kg 相应肉的环境影响参数;L5、L4、L3、L2、L1 分别表示 5 种培育肉。

图 4 不同肉类生产过程中的环境影响

Fig. 4 Environmental impacts of different meat production processes

4 展 望

培育肉的出现既是人类科技和文明发展的必然,也是解决当下资源困境的重要举措。长期以来,传统肉类生产方式给人类带来了越来越丰富的肉类蛋白质供应,有效解决了食物短缺和营养缺乏问题。近年来,随着科技发展,传统肉类依靠集约化、规模化等生产方式大幅提升了生产效率,并开始尝

试利用基因改造等手段排除影响动物生长的不利因素，进一步提升传统肉类的生产效率和营养价值。但与生物反应器中规模化扩增的细胞相比较，传统肉类生产是依靠动物个体生产蛋白质,生产效率仍然较低。

上述分析结果表明在土地占用、淡水资源消耗和温室气体排放 3 个方面,培育肉均体现出比传统肉类更加明显的环保优势,同时在能量消耗方面需通过科研攻关和生产工艺优化使其进一步降低,为培育肉工业化发展奠定基础。具体技术开发建议包括:1)高效细胞培养技术,通过培养基、生物反应器和培养工艺参数等的优化提升细胞的生长速率和生长密度;2)培养基高效利用技术,通过培养基再生、生物反应器创新、培养基热量回收等技术提升培养基利用效率;3)无血清培养基生产技术,通过开发具有确定配方的高效培养基摆脱细胞培养过程对动物源性成分的依赖,仅利用生长因子和基础培养基实现发酵生产;4)集约化生物反应器制造技术,开发低成本的超大体积高效生物反应器制造技术;5)工业化生产工艺流程优化,利用节约的土地进行可再生能源生产，摆脱对化石能源的依赖,开发适于工业化生产和符合食品工业标准的装备、生产线和生产车间。

目前,对于培育肉 LCA 的研究结果是基于现有科技水平和合理推断基础上的测算,对于具体参数设置和细节量化仍然存在一定倾向性和随意性,一个或几个控制点参数设置差异或计算方式改变都可能导致统计结果出现明显变化,因此,为促进培育肉产业化发展需尽快确定培育肉的工业化生产工艺,按照目前我国的装备试剂工业基础水平明确符合我国技术发展现状的培育肉 LCA,为我国制定相关培育肉产业化发展政策提供理论依据。

参考文献:

[1] LICHFIELD G. 10 breakthrough technologies: the cow-free burger[J]. **MIT Technology Review**, 2019, 122(2): 21-22.
[2] DU M, FORD S P, ZHU M J. Optimizing livestock production efficiency through maternal nutritional management and fetal developmental programming[J]. **Animal Frontiers**, 2017, 7 (3): 5-11.
[3] MAGALHAES A F B, SCHENKEL F S, GARCIA D A, et al. Genomic selection for meat quality traits in Nelore cattle[J]. **Meat Science**, 2019, 148: 32-37.
[4] ZHANG L H , ZHANG M, MUJUMDAR A S. Technological innovations or advancement in detecting frozen and thawed meat quality: a review[EB/OL].(2021-8-12)[2022-5-14]. https://wwwtandfonline.53yu.com/doi/abs/10.1080/10408398.2021.1964434.
[5] 王守伟, 陈曦, 曲超. 食品生物制造的研究现状及展望[J]. 食品科学, 2017, 38 (9): 287-292.
[6] ALEXANDRATOS N, BRUINSMA J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision[R]. Rome: ESA Working Papers, 2012.
[7] 国家统计局. 2019 年国民经济运行总体平稳发展主要预期目标较好实现[EB/OL].(2020-2-17)[2020-8-14]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t20200117_1723383.html.
[8] STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T D, et al. Livestock's long shadow: environmental issues and options[M]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2006.
[9] 刘源, 张院萍. 全国生猪生产发展规划(2016—2020 年)[J]. 中国畜牧业, 2016, 10: 30-37.
[10] LICHFIELD G. The food issue[J]. **MIT Technology Review**, 2021, 124(1): 44-49.
[11] 王守伟, 孙宝国, 李石磊,等. 生物培育肉发展现状及战略思考[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 1-9.
[12] 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.
[13] 王廷玮, 周景文, 赵鑫锐,等,培养肉风险防范与安全管理规范[J]. 食品发酵与工业, 2019, 45 (11): 254-258.
[14] 董桂灵. “培育肉”的研究进展及相关专利申请[J]. 中国发明与专利, 2019, 16 (7): 71-75.
[15] SZEJDA K, URBANOVICH T. Meat cultivation: embracing the science of nature[R]. Washington: The Good Food Institute, 2019.
[16] VERGEER R, SINKE P, ODEGARD I. Tea of cultivated meat. Future projections of different scenarios [R]. Netherlands: CE Delft, 2021.
[17] DENT M. Plant-based and cultured meat 2020—2030[R]. England: IDTechEx Ltd., 2020.
[18] BYRNE B. Cultivated Meat[R]. Washington, DC: The Good Food Institute, 2021.
[19] GAO. FDA and USDA could strengthen existing efforts to prepare for oversight of cell-cultured meat [R]. Washington: US

Government Accountability Office, 2021.
[20] TUOMISTO H L, MATTOS M J. Environmental impacts of cultured meat production[J]. **Environmental Science and Technology**, 2011, 45 (14): 6117-6123.
[21] MATTICK C S, LANDIS A E, ALLENBY B R, et al. Anticipatory life cycle analysis of *in vitro* biomass cultivation for cultured meat production in the United States[J]. **Environmental Science and Technology**, 2015, 49 (19): 11941-11949.
[22] TUOMISTO H L, ELLIS M, HAASTRUP P. Environmental impacts of cultured meat: alternative production scenario[R]. San Francisco: American Center for Life Cycle Assessment, 2014.
[23] SINKE P, ODEGARD I. LCA of cultivated meat[R]. Netherlands: CE Delft, 2021.
[24] SMETANA S, MATHYS A, KNOCH A, et al. Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes[J]. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2015, 20 (9): 1254-1267.
[25] RITCHIE H, ROSER M. Environmental impacts of food production[R]. London: Our World in Data, 2021.
[26] RITCHIE H, ROSER M. Greenhouse gas emissions[R]. London: Our World in Data, 2020.
[27] BROOKS T M, PIMM S L, AKCAKAYA H R, et al. Measuring terrestrial area of habitat (AOH) and its utility for the IUCN Red List[J]. **Trends in Ecology and Evolution**, 2019, 34 (11): 977-986.
[28] ALIMENTARIUS C. Maximum residue limits (MRLs) and risk management recommendations (RMRs) for residues of veterinary drugs in foods[R]. London: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.
[29] AHMED M B, RAJAPAKSHA A U, LIM J E, et al. Distribution and accumulative pattern of tetracyclines and sulfonamides in edible vegetables of cucumber, tomato, and lettuce[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2015, 63 (2): 398-405.
[30] 杨晓静, 薛伟锋, 陈溪, 等. 面向人体暴露评价的植物中抗生素分析进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13 (1): 1-15.
[31] VAN B T P, BROWER C, GILBERT M, et al. Global trends in antimicrobial use in food animals[J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2015, 112 (18): 5649-5654.
[32] O'NEILL J. Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations[R]. UK: O'Neill Comissioin, 2016.
[33] RUAN J X , XU J , CHEN T R Y, et al. Genome editing in livestock: are we ready for a revolution in animal breeding industry? [J]. **Transgenic Research**, 2017, 26 (6): 715-726.
[34] WU G Y, BAZER F W. Application of new biotechnologies for improvements in swine nutrition and pork production[J]. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, 2019, 10 (1): 1-16.
[35] WALTZ E. First transgenic salmon sold[J]. **Nature**, 2017, 548 (7666): 148.
[36] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于稳定生猪生产促进转型升级的意见[J]. 饲料与畜牧, 2019(10): 5-8.
[37] TENG P. Assuring food security in Singapore, a small island state facing COVID-19[J]. **Food Security**, 2020, 12 (4): 801-804.
[38] VANEELEN W F, VANKOOTEN W J, WESTERHOF W. Industrial scale production of meat from *in vitro* cell cultures: WO9931222 (A1)[P]. 1999-06-24 [2021-03-25]. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=4&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19990624&CC=WO&NR=9931222A1&KC=A1.
[39] BHAT Z F, KUMAR S, FAYAZ H. *In vitro* meat production: challenges and benefits over conventional meat production[J]. **Journal of Integrative Agriculture**, 2015, 14 (2): 241-248.
[40] DANCE A. Engineering the animal out of animal products[J]. **Nature Biotechnology**, 2017, 35 (8): 704-708.
[41] Agency Singapore Food. Requirements for the safety assessment of novel foods[EB/OL]. (2022-4-22) [2022-6-20]. https://www.sfa.gov.sg/docs/default-source/food-import-and-export/Requirements-on-safety-assessment-of-novel-foods_22Apr.pdf.