

人造肉的研究进展和应用前景

曾志鲁¹, 黄道武², 罗东辉¹, 华洋林^{1*}

(1. 广东海洋大学食品科学与工程学院, 广东阳江 529568) (2. 江西正盈食品有限公司, 江西宜春 336400)

摘要:近年来随着人们对身心健康、环保及美味食品的追求,我国肉类农产品的供求出现了严重的不平衡及波动。欧美等国已经投入大量资源开展人造肉研究,预计未来可能将对我们的食品及肉制品市场造成很大的影响。所以将人造肉来替代我们传统肉类的产品,首先需要能够提供肉的美味和营养,还要给生态能源、环境等带来可持续性发展。人造肉主要分为两种:一种是通过植物蛋白及其他植物性成分合成的植物人造肉,另外一种是通过动物干细胞合成的细胞人造肉。但人造肉目前仍存在较多的技术、安全以及成本等方面问题。该文对人造肉的研究现状和存在的问题进行综述,以期对我国人造肉及相关领域研究提供参考。

关键词:人造肉;植物人造肉;细胞人造肉;发展前景

文章编号: 1673-9078(2022)10-337-341

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1006

Research and Application Prospects of Artificial Meat

ZENG Zhilu¹, HUANG Daowu², LUO Donghui¹, HUA Yanglin^{1*}

(1.College of Food Science and Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529568, China)

(2.Jiangxi Cowin Food Co. Ltd., Yichun 336400, China)

Abstract: In recent years, the increasing pursuit of more sustainable, nutritional, and appealing food has led to a serious imbalance between supply and demand of meat in China. European and American countries have invested a lot of resources in research on artificial meat that may significantly affect the future of food markets in China. Artificial meat is mainly divided into two types, one is plant-based meat synthesized from plant proteins and other plant components, and the other is cell-cultured meat produced using animal stem cells. This substitute for conventional meat shows potential as a delectable and nutritious alternative. Furthermore, it reduces ecological footprint for environmental sustainability. Despite its advantages, there are many technical, safety, and cost limitations in manufacturing artificial meat. This article highlights the discussion around its current research progress and the prevailing challenges, with the aim to guide future research on artificial meat in China.

Key words: artificial meat; plant-based meat; cell-cultured meat; development prospects

引文格式:

曾志鲁,黄道武,罗东辉,等.人造肉的研究进展和应用前景[J].现代食品科技,2022,38(10):337-341

ZENG Zhilu, HUANG Daowu, LUO Donghui, et al. Research and application prospects of artificial meat [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 337-341

食物是我们人类赖以生存和持续发展的根本需求,在整个人类文明发展过程之中,早期一直在为如何吃饱肚子而奋斗。而当前人们对饮食的需求已经从“吃得饱”向“吃得好”转变,肉类消费是人们健康饮食的重要组成部分,因为肉不仅是一种兼具美味与口感并且营养丰富的动物源性食品,也是一类重要的工业产品,与人们的生活息息相关。很多时候还有“无

收稿日期: 2022-08-12

基金项目: 广东省重点领域计划项目 (2021B707060001)

作者简介: 曾志鲁 (1993-), 女, 硕士, 助教, 研究方向: 碳水化合物资源开发与利用, E-mail: zengzhilu@gdou.edu.cn.

通讯作者: 华洋林 (1976-), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向: 天然产物活性研究与健康产品开发, E-mail: huayanglin@gdou.edu.cn

肉不欢”的观念,所以肉制品的消费也是衡量社会发展的重要指标之一。

而根据联合国人口司 (United nations population division, UNPD) 日前发布的《世界人口展望》预计,世界人口总数还将持续增长,在 2017 年世界人口有 76 亿人口,目前世界人口总数将接近 80 亿。到 2050 年可能预计增到 97 亿,并将在 21 世纪 80 年代达到 104 亿人口的峰值。而肉类的消费与人口的增长成相关,全球肉类消费将从 2000 年的 22 499.8 万 t 增加到 2015 年的 31 928.4 万 t,累计增长 41.9%,年平均增加 2.4%。而人均肉类消费量从 2000 年的 37.39 kg 增加到 2015 年的 43.44 kg,累计增长 16.2%,年平均增加 1.0%^[1]。但是肉类的来源将涉及动物养殖、动物屠

宰及肉类产品加工整个产业链,这都将在饲养土地/草地、动物饲料、水资源等各个方面有巨大消耗。所以大量消费肉类制品首先将会造成环境污染,例如增加温室气体排放量、消耗大量的土地和水资源;其次大量消费肉类制品的不合理饮食习惯将引起人体潜在的健康隐患,如造成三高人群和大量的肥胖人群;最后肉类消费也引起动物福利的缺失,所以人们开始关注并担忧大量肉制品消费带来的问题。

全球人口持续增长、综合消费能力增强、饮食结构变化等各种因素叠加使得人平均肉制品消费量及肉类需要总量不断增长,目前肉类的生产模式的可持续性将面临严峻挑战。动物疾病发生、气候干旱变化等各种的因素容易影响动物养殖,使得肉类产品的价格波动很大。如在2019年初因为非洲猪瘟等原因,猪肉的价格增加了近3倍^[2]。气候变化也是我们人类面临的全球性问题,动物养殖也是气候变化和环境污染的原因之一,2020年9月,我国国家主席习近平在联合国大会上向世界宣布了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标。因此寻找目前肉类制品替代方案非常必要,也十分迫切。主要从两方面来考虑,在环境保护考虑,需要减少动物养殖过程中导致的温室气体排放和养殖过程中对环境造成污染;在能源消耗考虑,需要减少动物养殖过程中大量消耗饲养原料、水资源和占用土地等资源。在此背景下,人造肉开始变成近期最具热点和前沿的话题之一,并在2019年被《麻省理工科技评论》评选为十大最具突破和新兴技术之一^[3]。各国政府纷纷出台相关政策,来支持肉类替代品的开发与消费方案。

1 人造肉的分类及行业标准

人造肉作为近年开始兴起的革命性的食品,目前国内外学术界还没有人造肉比较明确的分类和定义,但比较常见和有代表性的分类有两类^[4-6]。其中一类是以植物蛋白为原料制备的植物人造肉,该产品因可以最大限度地模拟真实肉品的外观和口感,在国内外文献中常见的名称有“植物素肉”、“植物蛋白基肉制品”、“Plant-based Meat”、“Soy-based Meat”^[7-9],这一类通常被称作植物蛋白肉、植物肉、合成肉、素肉等。第二类是利用细胞培养技术、合成生物技术为基础,以动物细胞为原料,通过动物的细胞培养、扩增、制备得到细胞人造肉,细胞培养肉不需要经过动物饲养等生产环节而为我们提供稳定的肉类蛋白,主要的名称为“Cultured Meat”、“Animal Free Meat”、“Cultivated Meat”、“Invitro Meat”、“培育肉”、“细胞培养肉”、“试管肉”^[10-12]等。也

有学者认为从生物学分类上藻类和菌类不属于植物范畴,以微生物混菌发酵得到的可食性单细胞蛋白(Single Cell Protein, SCP)为主要原料获得菌体蛋白肉,然后经挤压重组后加工而成菌种蛋白仿肉制产品^[13]。该产品一般还是划入到植物肉方向来考虑。

个人认为,除了上述以植物蛋白为原料制备的植物人造肉和以细胞为原料制备的细胞人造肉外,还有一种以植物蛋白如豌豆蛋白和大豆蛋白等为主要原料,添加一定比例的禽类肉通过挤压成型工艺得到的重组人造肉。重组人造肉在产品的口感、外观、营养等方面都可以通过植物蛋白、肉类的添加比例来调节,可以接近传统的肉制产品,也适合工业化的生产。同植物人造肉相比重组人造肉有更好的口感、外观。同细胞人造肉相比重组人造肉可进行口感、营养等调节。重组人造肉的市场前景乐观,但本文主要探讨植物人造肉和细胞人造肉的研究进展,重组人造肉将另外综述。

植物人造肉的标准已经建立并开始逐步规范。中国食品科学技术学会在2020年12月25日发布了《植物基肉制品》(Plant-based meat, T/CIFST 001-2020)团体标准,该标准详细规定了植物基肉制品的基本要求、技术要求、检验规则和判定规则等。《植物基肉制品》填补植物肉行业标准空白,也让“植物人造肉”的标准化和产业化发展更具可行性。美国植物基食品协会先后发布了一系列植物基食品推荐性标准,明确植物基食品的定义,也对植物基食品标签标示做了要求。由于在生产技术、安全、营养等原因,细胞人造肉的标准相对比较滞后,目前还没有比较明确标准。

2 植物人造肉的研究进展

人类食用植物人造肉有着悠久的历史,植物蛋白也在早期人类饮食文化中有重要地位,在食物匮乏时代,植物蛋白产品就是营养和健康的选择。虽然植物人造肉具有传统肉品相似的营养,但在肉质感、颜色及风味物质等方面还有一定的差距。现代的植物人造肉主要是利用分离出的植物蛋白为主要原料,添加脂肪、色素、风味剂、黏合剂以及其他食品功能添加物,通过静电纺丝技术、挤压成型技术、热剪切法加工技术、食品3D打印技术等加工工艺,形成肉类纤维组织结构,最后得到具有肉类口感、颜色和味道的产品^[14-16]。

2.1 植物人造肉市场

古代中国就有豆制品代替肉制品习惯,近年加上国外植物概念火热,在年轻人的追捧之下,“植物基”的概念随之爬上国内新风口。国内在植物肉市场有市场容量大、市场接受度高、产品品种丰富,2020年国

际植物肉领军企业雀巢、Beyond Meat 等陆续在国内建厂，深圳星期零食品科技公司也推出以大豆、鹰嘴豆、藜麦、微藻为主要原料的植物肉以及植物蛋白食品。有预测植物人造肉在亚太地区将成为增长最快的市场^[17]。随着投资力度不断加大和技术进步，未来国内植物肉产品正成为全球投资热点，商业前景广阔，非常值得期待。

2.2 植物人造肉的优势

在生产植物人造肉时，产品的外观、质地、风味、口感等都是最基本的感官要求，其次营养成分上更接近传统肉。而植物人造肉在以下方面有一定优势，首先植物蛋白的原料来源广泛，最常见有豆类蛋白，如蚕豆、豌豆、鹰嘴豆、瓜尔豆；还有谷物蛋白如小麦、大麦、大米、玉米、高粱；食用菌蛋白如鸡腿菇、金针菇、杏鲍菇、双孢菇等。其次着色剂在颜色方面也有多种选择。植物人造肉还可以根据市场和消费者需要，选择不同原料，添加不同比例，甚至可以添加微量元素和矿物质，减少不饱和脂肪酸添加等，满足不同的人群需要。最后植物人造肉生产成本可控，根据不同的市场和消费者需要来确定原料和成本，适合工业化、规模化生产。

中国一直都有食用素食的饮食习惯，在对消费者接受人造肉意愿调查中发现，植物人造肉产品容易被消费者接受。随着“健康中国 2030”推进，人们的健康意识逐渐加强，越来越多的人接受并追求素食主义，植物人造肉可以很好的满足该类人群需求，植物肉也被素食主义者认为是最合适并且容易被接受的产品。另外工业化生产植物人造肉时，根据不同消费者需求配比不同原料，可以满足一些健身群体和对特定成分过敏人群。有研究表明植物人造肉也有助于降低体重、脂肪、胆固醇和血压水平，从而降低中风、心脏病和癌症的风险^[18]，植物人造肉也是一种很有前景的健康食品^[19]，将对传统肉类市场产生强烈的竞争。

2.3 植物人造肉的不足

从营养角度来看，传统肉含有丰富的蛋白质、脂肪，也富含维生素和微量元素。植物蛋白加工成的植物人造肉在氨基酸模式有较大差别，传统肉制品蛋白消化率校正后的氨基酸得分（PDCAAS）超过或接近于 1.0，能满足人体必需氨基酸需求，而很多植物蛋白含硫氨基酸和赖氨酸的含量低于动物蛋白，PDCAAS 得分比动物蛋白低^[20]，因此需要对植物人造肉替代传统肉从营养方面进行深入研究^[21]。

在产品的肉质感和风味方面。传统肉类制品中的

因为含有蛋白质、脂肪、挥发性物质等组分的存在，产品烹饪加工后会形成滑嫩爽口、鲜润多汁、有嚼口的口感和独特、饱满的味道，相比之下植物人造肉目前多以加入香精、色素等方式调味，虽然风味、质地比较接近，但产品往往风味单薄、多汁性和咀嚼性差，不能够还原肉类的特征风味，在质构、色泽、风味及口感等方面与传统肉有一定的差距。模拟出具有肉类特征的植物人造肉或许是一个发展方向，使其在色泽、味道、质地等方面接近传统肉，咀嚼感也更接近传统肉，从而实现植物人造肉市场快速增长，满足消费感官和健康需要，也被更多消费者的接受和喜欢^[22]。

3 细胞人造肉的研究进展

细胞人造肉是指在体外的培养条件下，在培养基中利用动物细胞组织中的多能干细胞等培养出来的具有传统肉类结构、风味口感的产品^[23]。2019 年，周光宏等^[24]利用猪肌肉干细胞培养获得了中国第一块细胞培养肉，标志着中国的细胞培养肉技术的兴起。

3.1 细胞人造肉的可能性

21 世纪初期诞生的合成生物学并在食品工业应用，改变了人类利用资源的方式^[25]，使得细胞人造肉成为可能。食品合成生物学是一门新兴交叉学科，通过设计及构建新的细胞工厂，通过设计添加需要的原料如酶制剂、蛋白质、脂肪、维生素和矿物质等成分，通过组合转化成食品组分，使得食品原料和生产方式可持续^[26]。

细胞人造肉的生产首先是提取肌肉干细胞，在特定培养条件下（如适合的氧气、温度、碳水化合物和生长因子）进行增殖，通过生长增殖形后得到肌肉细胞和脂肪细胞，融合成类似肌肉组织，最后得到人造肉产品。在细胞人造肉生产过程中的细胞系选择、培养条件、反应器等都会限制其产业化。此外细胞人造肉在营养和色、香、味方面与传统肉相比有更大的差距，但是通过在肌肉蛋白中同时合成血红素蛋白来改善外观，香味物质的合成和添加来改变味道，重塑成型技术改变质地结构都将细胞人造肉更加接近传统肉^[27]。

3.2 细胞人造肉的进展

近年来，合成生物学和仿生生物学在食品工业的应用，细胞培养已经可以获得一定量的动物肌肉组织，但细胞人造肉相关产品的市场接受和认可度还很低。最主要原因是细胞人造肉制品还无法做到传统肉的外观。要想获得满足消费者需求并被市场接受的细胞人造肉产品，必须解决细胞人造肉色香味问题，同时提升

产品成型技术使细胞人造肉有很好的咀嚼感。目前国内江南大学陈坚院士团队对人造肉的大规模商品化技术和动物细胞培养技术开展了大量研究和归纳总结^[28]。国外有更多的公司在细胞人造肉进行研究工作,如美国的 Memphis Meats 与 Modern Meadow、荷兰的 Mosa Meat 和以色列的 Supermeat (鸡肉) 等^[29]。但细胞人造肉还在期待中。

3.3 细胞人造肉的不足

科技的发展使得细胞人造肉成为可能,目前已经可以批量生产出人造肉产品,细胞人造肉在被消费者和市场接受的程度比较低^[30]。主要原因有其一,细胞人造肉随着技术的进步已经不是天价,但不能被市场日常消费接受,更多消费者只是进行尝鲜。生产成本过高决定目前细胞人造肉还不能够进行大规模产业化和商业化。其二,现阶段细胞人造肉制品还无法接近传统肉的品质。Specht 等^[31]总结了目前的各项技术,认为细胞人造肉在商业生产上没有根本的技术缺陷,但这些技术成本较高,只适合于小规模生产,大规模的商业生产还有待时日^[32]。其三,细胞人造肉的安全性还待评价,目前还没有行业标准和评价标准。

4 展望

人造肉是近几年提出的一种肉类替代品方案,人造肉产品的品类逐渐丰富起来,人造肉行业正以良好的势头发展,具有广阔的前景和巨大的发展潜力。但是从目前人造肉产业的研究进展和上市销售的产品中,也能看到人造肉产业存在很多的不足。植物人造肉在口感、色泽、风味上与传统肉类出现较大的差异。在口感方面,肉质纤维感差,没有嚼劲,肉质松散。在色泽方面,植物人造肉颜色较深,没有传统肉的细腻光泽感。风味方面,调味品和肉味香精包埋效果差,粉味重,烹饪后的肉味不足,且使用豆类蛋白制造的植物蛋白肉中残留有豆腥味^[33]。细胞人造肉充满前景但也同样充满调整,虽然已经有成功培养出细胞人造肉的报道,但目前还无法进行量产。因为规模化生产上仍存在需要克服的技术难点,例如分离增殖能力强的干细胞、特定培养基筛选、高效的细胞培养器和产品重塑成型技术等。只有突破技术难点,进行规模化生产才能降低生产成本。商业化生产后才能逐步解决细胞人造肉的原料不足、成本高、不安全、品质(外观、口感、风味、色泽)与真肉(具有丰富致密的纤维结构,口感鲜嫩多汁,富有弹性和咀嚼性^[34])有差距等一系列问题。

人造肉行业目前尚处探究摸索的阶段,除了植物

人造肉有团体标准外,细胞人造肉行业的各个标准和法则还没有制定和完善。不同地区的人群对人造肉的态度、观点和接受度是不同的,消费者的观点和态度是影响人造肉产业发展的关键因素^[35]。目前消费者接受程度呈现出传统肉高于植物人造肉、植物人造肉高于培养人造肉^[36]。但人造肉市场已经成为资本追逐的风口,特别是植物人造肉已经成为天然、健康、时尚的新方向,以豌豆、小麦和大豆蛋白为主导的植物基蛋白,还可开发出更多具有不同植物成分的植物人造肉替代产品。目前已经应用于西式快餐汉堡、素食餐厅、休闲食品等领域。国内上市公司烟台双塔食品股份有限公司已经推出系列的植物肉产品,大受消费者的欢迎。

人造肉的生产制造不仅需要达到良好的肉类感官品质,同时也需要保持良好的营养成分组成和较高的营养价值标准。如在蛋白质、碳水化合物、脂肪和膳食纤维等各方面营养元素都保持较高的丰度。人造肉只有在安全、营养和成本方面有优势时才能成为肉制品的真正替代品,否则只能停留在一个备选的阶段。

参考文献

- [1] 陈加齐,魏晓娟,朱增勇,等.近年来全球畜产品消费趋势分析及未来展望[J].农业展望,2017,1:70-76
- [2] Gong L, Xu R, Wang Z, et al. African swine fever recovery in China [J]. Veterinary Medicine and Science, 2020, 14(8): 322-325
- [3] MIT Technology Review. 10 Breakthrough Technologies 2019 [EB/OL]. <https://www.technologyreview.com/lists/technologies/2019>
- [4] 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
- [5] Sharma S, Thind S, Kaur A. *In vitro* meat production system: Why and how [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(12): 7599-7607
- [6] Sarah B, Graham G, David P, et al. Artificial meat and the future of the meat industry [J]. Animal Production Science, 2017, 57(11): 2216-2223
- [7] 高育哲,肖志刚,何梦宇,等.植物素肉的研究现状及趋势[J].粮食与饲料工业,2020,4:32-34
- [8] 刘素素,沙磊.植物蛋白基肉制品的营养安全性分析[J].食品与发酵工业,2021,47(8):297-303
- [9] Tziva M, Negro S O, Kalfagianni A, et al. Understanding the protein transition: The rise of plant-based meat substitutes [J]. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2020, 35: 217-231

- [10] Krintiras G A, Gobel J, Van Der Goot A J, 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
- [11] Suthers P F, Maranas C D. Challenges of cultivated meat production and applications of genome-scale metabolic modeling [J]. *AIChE Journal*, 2020, 66(6): e16235
- [12] 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
- [13] 袁波,王卫,张佳敏,等.人造肉及其研究开发进展[J].*食品研究与开发*,2021,42(9):183-190
- [14] Chiang J H, Loveday S M, Hardacre A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues [J]. *Food Structure*, 2018, 19: 100102
- [15] Godoi F C, Prakash S, Bhandari B R. 3D printing technologies applied for food design: status and prospects [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44-54
- [16] 刘梦然,毛衍伟,罗欣,等.植物蛋白素肉原料与工艺的研究进展[J].*食品与发酵工业*,2021,47(4):293-298
- [17] Mordor Intelligence. Meat substitutes market-growth, trends, and forecast (2019-2026) [EB/OL]. <https://www.valuemarketresearch.com/report/meat-substitutes-market>
- [18] Phillip T. A plant-based diet, atherogenesis, and coronary artery disease prevention [J]. *The Permanente Journal*, 2015, 19: 62-67
- [19] 刘新旗,夏绍琪,张弛.大豆蛋白与大豆肽的生物活性及加工特性研究进展[J].*食品科学技术学报*,2020,38(3):1-10
- [20] Hertzler S R, Lieblein-Boff J C, Weiler M, et al. Plant proteins: Assessing their nutritional quality and effects on health and physical function [J]. *Nutrients*, 2020, 12(12): 1-27
- [21] Estell M, Hughes J, Grafenauer S. Plant protein and plant based meat alternatives: Consumer and nutrition professional attitudes and perceptions [J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, 13(3): 1-18
- [22] Cordelle S, Redl A, Schlich P. Sensory acceptability of new plant protein meat substitutes [J]. *Food Quality and Preference*, 2021, 98: 104508
- [23] Post M J. Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects [J]. *Meat Science*, 2012, 92(3): 297-301
- [24] 周光宏,丁世杰,徐幸莲.培养肉的研究进展与挑战[J].*中国食品学报*,2020,20(5):1-11
- [25] 李宏彪,张国强,周景文.合成生物学在食品领域的应用[J].*生物产业技术*,2019,4:5-10
- [26] 陈坚.中国食品科技:从2020到2035[J].*中国食品学报*,2019,19(12):1-5
- [27] 张国强,赵鑫锐,李雪良,等.动物细胞培养技术在人造肉研究中的应用[J].*生物工程学报*,2019,35(8):1374-1381
- [28] 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
- [29] Bonny S P F, Gardner G E, Pethick D W, et al. Artificial meat and the future of the meat industry [J]. *Animal Production Science*, 2017, 57(11): 2216-2223
- [30] Bohm I, Ferrari A, Woll S. Visions of *in vitro* meat among experts and stakeholders [J]. *Nanoethics*, 2018, 12(3): 211-224
- [31] Specht E A, David R W, Erin M R C, et al. Opportunities for applying biomedical production and manufacturing methods to the development of the clean meat industry [J]. *Biochem Eng J*, 2018, 132: 161-168
- [32] Bhat Z F, Morton J D, Mason S L, et al. Technological, regulatory, and ethical aspects of *in vitro* meat: A future slaughter-free harvest [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(4): 1192-1208
- [33] 杜雅荣,刘霞,李喜宏,等.低温储藏大豆对其所制豆浆腥味物质调控效应研究[J].*粮食与油脂*,2017,30(10):20-25
- [34] 李莹,张伟敏,黄海珠,等.三种猪肉质构特性比较研究[J].*食品研究与开发*,2018,39(10):22-27
- [35] Michel F, Hartmann C, Siegrist M. Consumers' associations, perceptions and acceptance of meat and plant-based meat alternatives [J]. *Food Quality and Preference*, 2021, 87: 104063
- [36] 生吉萍,石鸿旭,刁梦瑶,等.基于文献的探讨:培养人造肉会被大众接受吗?[J].*中国食物与营养*,2020,26(6):39-43