



· 综述 ·

人造海鲜的研究进展与展望

赵勇^{1,2,3*}, 王凡¹, 张昭寰^{1,2,3}, 潘迎捷^{1,2,3},
欧杰^{1,2,3}, 刘海泉^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学, 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 农业农村部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室(上海), 上海 201306;

4. 上海海洋大学, 食品热加工工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 由于人类的过度捕捞以及环境污染问题, 海洋生态系统遭受了极大的破坏, 海洋渔业的可持续发展面临诸多挑战。为了满足市场的需求, 发达国家投入大量资金进行人造海鲜的研究。人造海鲜肉主要分为两种, 一种是从植物中提取优质蛋白、脂肪和色素等合成的植物基海鲜肉, 另一种是通过获取海洋生物的干细胞增殖分化而来的培养海鲜肉。通过研究发现, 干细胞培养而来的海鲜肉在口感和风味上更接近真实海鲜肉。目前人造海鲜肉需要较高的技术要求和生产成本, 且生产出来的产品在口感上与真实海鲜肉存在较大差异。本文对两种来源的人造海鲜肉进行了总结, 分析了人造海鲜制作过程中重点关注的问题, 关注了3D打印技术在食品行业中的应用, 以期能够为我国人造肉在海鲜产品中的研究应用提供参考。

关键词: 人造海鲜; 植物蛋白; 细胞培养; 3D打印技术

中图分类号: S 986.1

文献标志码: A

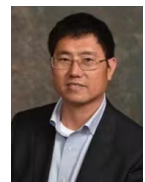
海产品的营养丰富, 是优质的健康膳食来源, 其营养物的浓度与海鲜种类呈明显的相关性, 海产品的种类又因产地而不同, 因此, 通过渔场开展以海鲜为基础的粮食战略有可能为全球粮食和营养安全作出重大贡献^[1]。而近年来, 海洋生态环境日益恶化, 据不完全统计, 全球海洋中大约有 5.25 万亿个塑料微粒, 甚至发现其存在于深海以及南北极海洋生物体内^[2], 全球 90% 的鱼类资源已经逼近渔业可持续发展的极限值^[3]。《太平洋岛国新闻》在 2017 年报道, 太平洋蓝鳍金枪鱼 (*Thunnus orientalis*) 数量较历史最

高时期减少了 97%, 部分商户甚至加大对幼鱼的捕捞力度, 金枪鱼的繁殖受到了严重地威胁。虽然国际社会对海洋生态环境的保护力度加大, 并达成了一系列海洋资源保护相关国际条约, 但仍然有很多人追逐利益无视规则, 破坏海洋渔业的可持续性^[4]。过度捕捞、非法捕捞和破坏性捕捞严重破坏生物的多样性和可持续性^[5], 如若不采取强制措施, 海洋渔业资源将面临枯竭。同时, 全球人口不断地增长, 预计到 2030 年达到 85 亿, 到 2050 年更是超过 97 亿^[6], 蛋白质作为主要营养素, 其需求量也将进一步增大。我

收稿日期: 2020-04-17 修回日期: 2020-05-20

资助项目: 国家自然科学基金(31671779、31972188); 上海市科技兴农项目[沪农科推字(2017)第4-4号]; 上海市教育委员会科研创新计划(2017-01-07-00-10-E00056)

通信作者: 赵勇(照片), E-mail: yzhao@shou.edu.cn; 刘海泉, E-mail: hqliu@shou.edu.cn



国是最大的水产养殖国家,在海鲜行业中水产养殖占有最大比重,但由于养殖技术比较落后、养殖户缺乏专业科学知识以及在水产养殖产业上管理不完善,造成了严重的水体富营养化、水体溶解氧参数降低、抗生素滥用等问题,给养殖水体带来严重的环境负担^[7]。

人造海鲜是社会经济和环境可持续、食品安全等背景下的必然趋势,能够解决当前传统海鲜行业包括渔业捕捞和淡水养殖带来的众多问题和弊端,是未来食品的主流方向。目前,人造海鲜的研究尚处于初始阶段,理论和技术都存在很多不足,生产成本也比较高,如何提升关键技术,拓展人造海鲜种类,低成本进行高效生产是重点关注的问题。因此,亟需探索一条健康、安全、促进渔业可持续发展的路线来应对全球对海产品需求量激增的局面。本文综述了人造海鲜肉的发展现状,对其研发过程进行了重点剖析,有望通过传统理念和新技术相互融合,促进人造海鲜肉的发展和推广,同时赢得民众广泛地认可。

1 人造海鲜

1.1 人造海鲜研究现状

人造肉作为2019全球十大突破性技术之一而备受关注^[8]。海鲜行业的异军突起,给人造肉带来了别样精彩。对于细胞培养海鲜肉的研究最典型的是位于美国加州的初创公司Finless Foods,该公司一直致力于利用细胞生物技术研发人造海鲜,实验室通过从鱼体中提取鱼肉干细胞,培养出了蓝鳍金枪鱼人造肉,且已经通过美国食品和药物管理局和美国农业部有关安全认证。Shiok Meats公司推出了虾饺成品,并计划开展多种甲壳类产品的研发,如蟹类、龙虾和对虾等。相比于细胞培养海鲜产品,植物基海鲜的发展更加快速,涉及到的海鲜产品种类更加丰富。New Wave Food公司主要是以海藻和大豆蛋白为主要蛋白来源,已经开发了植物虾,因其保证了100%纯植物、较低的脂肪且无胆固醇,因此深受素食主义者的喜爱。植物肉巨头Impossible Foods公司自2016年推出植物牛肉以来,已经在美国、香港、新加坡等国家的餐厅和超市中出售。在海鲜热推动下,Impossible Foods公司也展开了新一轮融资,志在开发比海

洋捕捞的鱼更美味的植物鱼肉,公司已推出了植物血红素为主要原料制成的鱼肉汤,与凤尾鱼(*Coilia mystus*)味道相似。Good Catch公司在市场上销售植物金枪鱼,是由豌豆、大豆、鹰嘴豆、小扁豆和蚕豆等植物蛋白为原料制成,公司还研发出冷冻素食蟹饼、冷冻素食鱼肉汉堡和素食鱼肉三明治等。

通过调查发现,仅少部分人会考虑到环境、动物福利方面而选择人造肉,绝大多数的消费者不会选择人造肉,认为人造肉的开发并不能解决这些问题^[9-10]。造成消费者对人造海鲜持反对或者沉默态度有诸多因素,首先,人造海鲜相关食品安全法规尚不完善,市场对食品方面监管存在漏洞;其次,人造海鲜外观、口感上不能满足大众期望,人们无法摆脱长期形成的饮食文化以及伦理等传统观念。究其根本原因,人造肉存在很多技术方面的挑战,不能达到人们对其必需的需求,很多消费者认为高成本生产过程中造成了很多不必要的浪费,因此,如何低成本进行大规模、高效生产是未来发展亟需解决的问题。

目前,我国在植物基产品如人造奶、人造蛋、植物肉饼等已经有了一定的发展,在细胞培养人造肉方面,南京农业大学周光宏教授带领团队培养出了我国第一块人造肉,是使用第6代猪肌肉干细胞培养20d而得,虽然只有5g,但实现了我国在细胞培养肉领域中0到1的突破,使我国进入了国际同类研究的前列。由此可以看出我国在食品“人造”方面具有较大的潜力,虽然人造海鲜风靡于国外初创公司以及资深研究实验室,国内在这方面的研究甚少,培养肉技术还处于开发阶段,但是,我国拥有辽阔的海洋优势和人才资源,利用已有的人造食品技术,进一步把“人造”推向海鲜将会成为现实。

1.2 植物基人造海鲜

近年来,随着人造肉的兴起,植物肉不再是传统意义上的由大豆蛋白、小麦蛋白、魔芋、食用菌等为原料通过挤压、蒸煮等加工而成的素肉(如面筋、腐竹、豆腐和魔芋糕等)。植物肉被冠以新的定义,即利用生物合成、生物化学、基因工程、现代发酵等技术,以植物源优质蛋白为主要原料,添加植物脂肪、植物色素以及其他植物性成分,使其在外观、纹理、风味和

口感等方面都能够十分贴近真实肉, 能够满足人体所需的各种营养因子, 百分百纯植物、高蛋白、低脂肪, 因为植物肉旨在减少肉食消费, 营养成分与动物肉相近, 因此也称肉类替代品。目前, 国外植物肉主要集中在汉堡、披萨、香肠等产品上, 国内产品主要有狮子头、丸子、饺子等, 深受千禧一族的喜爱。近几年越来越多的企业将“人造”食品转向了海鲜产品, 这将引起食品加工的又一次变革。

海洋生物中鱼、虾、蟹、贝类等都含有丰富的蛋白质, 而植物蛋白质由于来源广泛, 与人体氨基酸的基因结构相似, 在营养上也不亚于动物蛋白质, 因此被广泛开发利用于替代动物蛋白质的产品上。通过植物蛋白来制造具备自然海鲜相同营养价值的人造海鲜, 植物蛋白的选择以及品质改良显得尤为重要。

人造海鲜常用的植物蛋白有大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦面筋等。大豆中蛋白约占干重的40%, 蛋白含量丰富^[11], 而且大豆蛋白中富含人体所需的8种必需氨基酸, 且其氨基酸分数接近动物蛋白, 营养充足, 同时还具有良好的溶解性、凝胶性、保水性等功能特性, 因此, 可以替代动物蛋白在人类饮食中的地位^[12]。由于豌豆中丰富的蛋白含量, 全球植物肉行业的参与者们纷纷转向豌豆基产品的研发。梁婷婷等^[13]通过模拟体外肠道发酵来研究大豆蛋白和豌豆蛋白的作用, 发现其能够促进微生物蛋白的合成, 有利于肠道健康。对于海藻蛋白, 由于海藻物种之间存在结构差异, 不同品种之间蛋白质含

量也存在较大的差异, 且海藻中富含坚韧多糖构成的细胞壁和多酚类物质, 降低了海藻蛋白的可提取性和消化率, 过去海藻很少因为其蛋白质的营养价值而被推广, 在亚洲, 常常被作为一种海产蔬菜被食用, 在欧洲, 有些海藻如褐藻(*Phaeophyta*) 也会被用来作为食品添加剂^[14-15]。但有研究人员发现, 一些红藻(*Rhodophyceae*) 中含有高达47%的蛋白质^[16], 因此海藻将会成为一种很有前途的植物蛋白源, 近年来很多学者对海藻蛋白进行了相关研究^[17-19], 且有了一定的进展。

1.3 细胞培养人造海鲜

细胞培养肉是通过将细胞置于体外进行培养而成的肉, 因而也称“体外肉”、“离体肉”, 这个概念是幻想还是可能, 一直备受争议, 直到2013年, 荷兰生物学家 Mark Post 在实验室培养出了第一块人造牛肉, 证实了培养肉的可行性^[20], 随后, 世界上第一个用组织培养基培养的干细胞制作的汉堡问世并被品尝, 自此细胞培养肉受到了广泛关注^[21]。

目前, 人造海鲜是分离海洋动物的干细胞并在一定的条件下进行增殖分化, 进而形成肌肉组织, 但只能通过培养皿的不断复制才能产生极少的松塌组织, 所以今后的研究方向必然指向新兴技术实现规模化生产(图1)。现在面临的主要问题是构建一个适合海洋动物细胞的培养体系, 促使细胞实现永生细胞系的建立; 其次, 实现干细胞的规模化培养并能够连

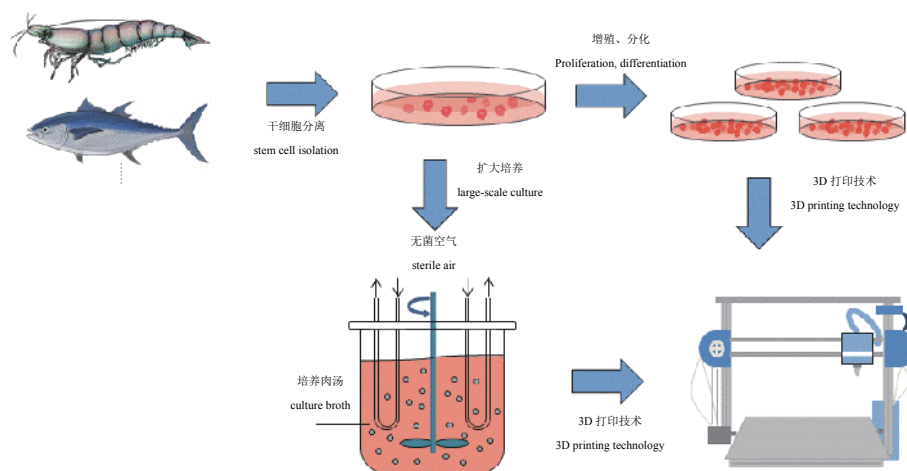


图1 人造海鲜生产流程图

Fig. 1 Production flow chart of artificial seafood

续传代,从而进行增殖分化,实现组织的形成。

培养基 海洋无脊椎动物中贝类、虾类等,以及脊椎动物中大多鱼类,目前均未成功建立起细胞系,这使得细胞体外培养存在很大的困难,基本上都是套用改良后的哺乳动物或者昆虫细胞的合成培养基,如Leibovitz's L-15培养基(L-15)、RPMI1640、MEM、M199、TC-199、TC-100、Grace昆虫培养基(Grace insect medium, GIM)和果蝇培养基(Drosophila medium, DM)等^[22-26],其中对海洋动物细胞增殖效果较好,评价较高的有L-15、M199和GIM等。经研究,这些培养基均可满足海洋动物细胞原代培养,但不能满足细胞的持续传代。海洋动物细胞对营养和生长因子的需求与陆地脊椎动物和昆虫类相差很大,因此,培养基组分是决定细胞增殖的关键,也有学者对对虾血淋巴生化成分进行了定性和定量分析,包括蛋白质组成、脂类物质(甘油三酯和胆碱等)、葡萄糖、尿酸和无机离子等,并测定其渗透压、pH值、温度等指标,将虾细胞体液生存条件与培养结果较好的培养基2×L-15、M199相结合设计新的培养基组成,但结果显示,并不能促进细胞增殖^[27-29]。

目前,海洋动物细胞还是依赖于含有血清的培养基,如胎牛血清、新生牛血清或小牛血清,一般适用浓度为10%~20%。血清能够为细胞提供生长、增殖的营养因子;提供结合蛋白,能够识别维生素、脂质、金属离子等,调节其活性并使之稳定;促进细胞的贴壁生长并维持细胞形态。但是血清中也含有很多影响细胞生长繁殖的因子,如生长抑制因子、毒性因子等,且血清组分不能明确,不同批次的血清其成分和活性悬殊很大,造成培养结果不稳定,给细胞培养带来了诸多麻烦^[30]。同时,血清成本较高,也限制细胞培养的规模化生产。近年来,由于无血清培养的诸多优点,很多研究者致力于无血清培养基的设计,但大多数细胞具有贴壁依赖性,即使能够铺张生长,也仅能够维持较短时间,之后便纷纷凋亡,成效不是很显著,因此,对无血清培养基的开发有待进一步的深入研究。

细胞系的建立 对虾、贝类、鱼类等海洋动物的囊胚及原肠胚等胚胎细胞尚未分化,具有较强的分裂能力,囊胚细胞也是建立胚胎

干细胞的重要材料,有利于细胞系的建立。在一定的体外培养条件下,囊胚细胞可以分化为不同的细胞类型,因此开展囊胚细胞的体外培养研究可以为建立海洋生物胚胎干细胞奠定基础^[31]。但是,用胚胎或幼体进行细胞和组织培养时,酵母、真菌和原生动物污染十分严重^[32],近年来对虾类以及贝类等组织的消毒也在不断地改进且有了一定的成效^[33-36],但距离理想化结果相差甚远。同时,细胞系的建立也有利于细胞培养条件的优化,二者相辅相成。干细胞在培养过程中会出现突变导致癌变或者衰亡现象,不利于肌肉组织的形成。因此,促使干细胞持续稳定的增殖分化是重点研究方向,开发适宜的培养体系对细胞进行传代培养至关重要。

规模化生产 用来生产人造肉的哺乳动物干细胞技术和生物反应器的开发已初具规模,为大规模人造海鲜的生产提供了可能。目前,海鲜细胞培养由于贴壁依赖性^[31],只能在培养皿中形成薄薄的一层,世界上第一例人造牛肉就用了一万多个标准培养皿。动物细胞从贴壁生长到悬浮培养需要进行基因工程或定向进化等驯化手段,但这可能会使消费者对细胞培养肉产生抵触心理,市场准入也会受到限制,因此,研究者发现可以采用微载体贴壁悬浮培养方法,这种方法最早是由Van Wezel^[37]于1967年提出,由于该法实施过程会遇到传质、传热、流体剪切应力等一系列难以解决的问题,因而发展缓慢。规模化生产不是简单的工艺放大,在反应器中,不同类型干细胞的扩增条件不同,需要使用适用的微载体来保护细胞的多能性和分化潜力,要综合考虑细胞代谢的动力学特性、营养物质的补充及废物的排出、氧气浓度以及CO₂分压等参数。

为了能够模拟细胞生存环境,微载体应该满足较大的比表面积,适应细胞的黏附作用并且能够灵活伸张收缩等^[38],同时维持组织形态,不会产生不良反应。微载体涂层设计至关重要,常用的涂层有胶原蛋白和ECM等^[39-40],肌肉细胞可以很容易通过蛋白酶将其与培养组织分离,且对细胞伤害较小^[41]。总之,微载体影响着培养组织的品质,但存在成本高昂、材料影响营养物质与细胞间传递等问题。现在也有许多学者在研究食品级可食用的材料,可以避免后续分

离带来的不可控因素,而且能够降低生产成本。

1.4 转基因人造海鲜

转基因动物也可以称为人造肉,尽管与传统的动物产出有相似之处,但转基因动物是人为改变基因组从而按照特定要求生长,因而可以被认为是人造肉^[42]。例如 AquaBounty Technologies 公司的科学家们将大马哈鱼 (*Oncorhynchus keta*) 的生长激素基因和大西洋鳕 (*Gadus morhua*) 的抗冻蛋白基因的启动子导入到大西洋鲑 (*Salmo salar*) 的受精卵细胞基因组中,有助于其在极寒的水中生存,且能够快速生长,上市时间仅为传统鲑类繁殖时间的一半,同时减少了大量的食物消耗,2015年,美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 批准了转基因大西洋鲑的上市申请,这也是世界上第一个获得批准的供食用的转基因动物^[43-44]。转基因技术已经相当成熟,非常适合传统的生产和基础设施,在不违背伦理道德的前提下,能够符合监管制度,满足食品安全生产要求,那么转基因技术则是另一种用来保护海洋生态系统的工具,适用于解决海鲜产品某一特定的问题。

2 三维 (3D) 打印技术

2.1 3D 打印技术及其应用

3D 打印技术,即利用计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 建立物体的立体模型,通过数字化程序发送到 3D 打印机,然后将原物料通过喷射或挤出等方式进行层层叠加形成三维实体,由于其运行过程类似于传统平面打印,故称之为 3D 打印。3D 打印技术由于可以制造传统生产方式无法完成的复杂结构,且简化了生产工艺流程,有效地节约人力、物力,降低了工业成本,适用于规模化作业生产,应用前景十分广阔,被认为是工业 4.0 最具有潜力的技术。自 3D 打印技术开发以来,被广泛应用到航空航天 (飞机验证机、客机结构部件、精密熔模铸造等)、生物医疗 (骨骼、牙齿、血管支架等)、教育 (模型制作、个性化设计等)、机械建筑 (工业设计、汽车、桥梁等)、服饰配件 (鞋类、服装、珠宝等) 及文物保护 (文物修复、文化传承等) 等领域^[45-50]。随着 3D 打印技术的发展,其必将无处不在,应用领域不断延伸,食品 3D 打

印技术是时代发展的产物,是科学技术发展的必然结果。

2.2 3D 打印技术在食品中的应用

近年来,3D 打印技术逐渐被引入到食品领域。食品 3D 打印技术是由美国康奈尔大学首次提出,发明了基于挤压工艺的 Fab@home 打印机,这是食品 3D 打印机的雏形^[51],随后,西班牙创业公司 Natural Machines 发明了名为“Foodini”的食品打印机,该款打印机设计了多个喷嘴同时工作,完善了食品 3D 打印机的功能,可以制作出材料丰富的食品,如汉堡、披萨、意面和蛋糕等。

食品 3D 打印根据材料的物性,分为挤出型、粉体凝结型和喷墨型三种方式。但是,如果想要获取更加真实的纹理结构,保证产品的质量,3D 打印食材必须要满足三点,即可打印性、适用性和可加工性^[52]。可打印性依赖于材料如何通过 3D 打印机进行处理和沉积,并在沉积后保持其结构。液态材料的 3D 打印受黏度或流变性能的影响。除了流变学性质,基于挤出技术的 3D 打印还会受到特定的凝胶机制 (交联) 和热性质 (熔点和玻璃转变温度) 的影响^[53-54]。粒度分布、润湿性、流动性等性能也会对粉体 3D 打印产生影响^[55-56]。在多组分体系中,蛋白质、碳水化合物和脂肪的比例变化会影响液体和粉末 3D 打印过程中食品材料的熔化、玻璃态和塑化。因此,要仔细研究食品的基本成分及其特性对 3D 打印技术的影响,选择适合材料特性的打印技术,而对于后续需要进行热加工的食品,也要考虑材料的物理和化学变化、流变性、结构和机械性能以及打印过程中材料相互作用对其后加工性能的影响。

目前,3D 打印技术在海鲜方面已经取得了初步的进展,如 Wang 等^[53] 评估了添加了 NaCl 的鱼糜凝胶的可打印性,根据流变学研究结果得出 1.5 g NaCl / 100 g 鱼糜混合物制成的鱼糜凝胶有助于料浆及时从喷嘴流出,获得黏性后沉积以保持其形状。Lipton 等^[57] 通过在扇贝肉泥中添加谷氨酰胺转移酶,打印成半球形,再经煮制可形成良好的球面形状,符合外观要求。Liu 等^[58] 将鱼肉煮熟获得肉汁,在肉汁中添加明胶粉,与少许鱼肉一起搅拌形成均匀的肉浆,然后经过 3D 打印技术印刷于食物表面。通过这种

方式将营养物质提取到了食物的表面, 使人们立即获得了食物的鲜美, 大大刺激了人们的味蕾, 同时这也满足了牙齿不好、味觉不敏感的老年人的需求, 有利于老年人调整膳食结构。Kouzani 等^[59]为吞咽困难的人设计了一款以金枪鱼泥(蛋白质)、南瓜泥(水果)和甜菜泥(蔬菜)为原料的 3D 打印金枪鱼。随着人们对膳食营养的要求提升, 近年来食品 3D 打印技术朝着精准营养方向发展, 但三维食品结构的设计严重依赖于材料特性和结合机制。3D 打印技术今后的发展方向要致力于合理设置蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素、矿物质以及其他功能因子等营养素成分的比例^[60], 考虑营养素之间有利的相互作用, 最大限度的满足人类对海鲜产品的需求。

3D 打印技术除了可以自由组合营养因子, 满足不同群体的精准营养膳食需求, 还可以设计肉的组织纹理, 实现人造海鲜在口感和外观上更加逼近真实肉^[61]。3D 打印技术与人造海鲜相关技术相结合, 既能够解决海鲜产品的供应短缺问题, 又保证了人类的健康发展。

3 人造海鲜与传统海鲜的对比

人造海鲜健康安全, 但与传统海鲜相比还是存在较大差异(表 1)。人造海鲜没有经过个体的发育过程, 因此, 减少了大量的食物消耗, 可以缓解渔业的捕捞压力, 合理配置水产养殖土地资源; 由于人造海鲜的生产周期远远低于传统海鲜, 因此可以提高供给水平, 满足人类对优质蛋白质的需求; 人造海鲜还可以避免摄入残存海洋生物和淡水养殖的生物中由于环境污染造成的各种有害物质, 如工业废水、有机

磷农药以及铅、汞等重金属, 使食用更加安全; 虽然人造海鲜在营养成分比例上无法与传统海鲜达到完全相同, 但其重在精准营养, 满足特殊人群需求; 人造海鲜技术一旦成熟并走向规模化生产后, 只需要像传统的工业化作业后即可端上餐桌, 同时也省去了复杂的前处理工作。传统海鲜虽然满足大众对营养和口感的需求, 但缺乏新技术的渗透, 安全、环境保护和动物福利等方面的问题也层出不穷, 不断挑战人们对传统海鲜的期望值。综上所述, 人造海鲜适应人类所需, 潜在的市场价值巨大。

4 总结与展望

随着人类社会经济水平的提高, 人们不再满足于传统的消费模式, 转而向高品质、高清洁和高环保的产品。植物肉主要原料是蛋白质, 蛋白质是人体能量最重要的来源, 摄入高品质、高含量的蛋白质产品, 不仅能够满足人们的膳食营养需求, 而且有利于改善血糖指标、保护心脏、减轻体质量、降低慢性疾病的风险等^[62-64]。细胞培养肉在节能减排, 安全方面具有很大优势, 这些优点为人造海鲜的研究给予了强大的动力。但食品中均存在多样性的特殊化学成分, 即在特定的条件下产生次生代谢产物, 可以称之为营养“暗物质”^[65], 人造海鲜属于新兴技术领域, 能否识别特殊营养化学成分以及建立起可量化的信息对人类健康安全起着重要作用。

为了实现人造海鲜的大规模生产, 满足人类对海产品的需求, 要利用好食品组学、食品合成生物学以及食品感知生物学三大学科, 加

表 1 人造海鲜与传统海鲜的区别

Tab. 1 Differences between artificial seafood and conventional seafood

	人造海鲜 artificial seafood	传统海鲜 conventional seafood
来源 source	干细胞培养/植物蛋白	海产捕捞/人工养殖
营养 nutrition	不能满足各种营养需求, 需要外源添加	富含DHA、EPA、多种维生素及钙、铁、碘、硒等矿物质元素
成本 cost	技术、实验、人才等成本较高	较低
口感 taste	软塌、无肉香	味道纯正鲜美
安全 safety	无菌无污染, 环保、健康	环境因素、人为因素导致有毒有害物质传播
消费者认可度 consumer recognition	沉默居多, 其次为反对	符合大众传统观念
动物福利 animal welfare	促进自然修复, 保护海洋动物自然繁殖	肆意捕捞, 破坏食物链平衡

强技术的改良和创新,解决细胞培养过程中存在的问题,开发适应于多种细胞稳定增殖分化成肌肉组织的生物反应器。此外,要从食品加工到过程管控以及成品检测,都进行严格把控,致力于绿色、环保、健康三大方面,并尽快出台人造海鲜肉食品安全风险评估和市场监督管理政策,这对保障我国食品供应安全、提升我国食品生物制造技术具有重要意义。同时,要加大力度普及人造海鲜的相关知识,促进消费者打破传统观念,提升消费者对人造海鲜的认可度。总而言之,海鲜行业正在经历一场前所未有的大变革,这场变革以替代海鲜为主题,变革者希望通过更健康、更环保、更高效的方式为人类提供丰富、可制造的海鲜产品。

参考文献 (References):

- [1] Hicks C C, Cohen P J, Graham N A J, *et al.* Harnessing global fisheries to tackle micronutrient deficiencies[J]. *Nature*, 2019, 574(7776): 95-98.
- [2] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, *et al.* Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250 000 tons afloat at Sea[J]. *PloS One*, 2014, 9(12): e111913.
- [3] Anderson C M, Krigbaum M J, Arostegui M C, *et al.* How commercial fishing effort is managed[J]. *Fish and Fisheries*, 2019, 20(2): 268-285.
- [4] 黄硕琳, 邵化斌. 全球海洋渔业治理的发展趋势与特点[J]. 太平洋学报, 2018, 26(4): 65-78.
Huang S L, Shao H B. Development trends and features of global marine fisheries governance[J]. *Pacific Journal*, 2018, 26(4): 65-78(in Chinese).
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of World Fisheries and Aquaculture in 2018[M]. Rome: FAO, 2018.
- [6] United Nations World Population Prospects 2019 Highlights. Department of Economic and Social Affairs Population Division[M]. UN, New York, 2019.
- [7] 陈如潮. 我国水产养殖业发展中存在的问题及其对策探究[J]. 南方农业, 2019, 13(23): 114, 117.
Chen R C. Problems and countermeasures in the development of aquaculture in China[J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(23): 114, 117(in Chinese).
- [8] 2019 年全球十大突破性技术揭晓 [J]. 科技传播, 2019, 11(7): 12-13.
Top 10 global breakthrough technologies announced in 2019[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2019, 11(7): 12-13 (in Chinese).
- [9] Hocquette A, Lambert C, Sinquin C, *et al.* Educated consumers don't believe artificial meat is the solution to the problems with the meat industry[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 273-284.
- [10] Slade P. If you build it, will they eat it? Consumer preferences for plant-based and cultured meat burgers[J]. *Appetite*, 2018, 125: 428-437.
- [11] Luthria D L, Maria John K M, Marupaka R, *et al.* Recent update on methodologies for extraction and analysis of soybean seed proteins[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(15): 5572-5580.
- [12] 冯子龙, 杨振娟, 袁保龙, 等. 大豆分离蛋白生产工艺与实践[J]. 中国油脂, 2004, 29(11): 29-30.
Feng Z L, Yang Z J, Yuan B L, *et al.* Production technology and practice of soybean protein isolate[J]. *China Oils and Fats*, 2004, 29(11): 29-30(in Chinese).
- [13] 梁婷婷, 佟立涛, 耿栋辉, 等. 大豆蛋白和豌豆蛋白对体外发酵特性及合成微生物蛋白的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 44-52.
Liang T T, Tong L T, Geng D H, *et al.* Effects of soy protein and pea protein on fermentation characteristics and microbial protein synthesis *in vitro*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(12): 44-52(in Chinese).
- [14] 闫秋丽, 郭兴凤. 海藻蛋白研究及应用进展[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(1): 179-182.
Yan Q L, Guo X F. Progress and application of seaweed proteins[J]. *Food Research and Development*, 2008, 29(1): 179-182(in Chinese).
- [15] Indegaard M, Minsaas J. Seaweed resources in Europe[J]. *Animal and Human Nutrition*, 1991(5): 21-64.
- [16] Černá M. Chapter 24-Seaweed proteins and amino acids as nutraceuticals[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2011, 64: 297-312.
- [17] Harnedy P A, FitzGerald R J. Bioactive proteins, pep-

- tides, and amino acids from macroalgae[J]. *Journal of Phycology*, 2011, 47(2): 218-232.
- [18] Harrysson H, Hayes M, Eimer F, *et al.* Production of protein extracts from Swedish red, green, and brown seaweeds, *Porphyra umbilicalis* Kützinger, *Ulva lactuca* (Linnaeus), and *Saccharina latissima* (Linnaeus) J. V. Lamouroux using three different methods[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2018, 30(6): 3565-3580.
- [19] Angell A R, Mata L, de Nys R, *et al.* The protein content of seaweeds: a universal nitrogen-to-protein conversion factor of five[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(1): 511-524.
- [20] Moritz M S M, Verbruggen S E L, Post M J. Alternatives for large-scale production of cultured beef: a review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 208-216.
- [21] Goodwin J N, Shoulders C W. The future of meat: a qualitative analysis of cultured meat media coverage[J]. *Meat Science*, 2013, 95(3): 445-450.
- [22] Hsu Y L, Yang Y H, Chen Y C, *et al.* Development of an *in vitro* subculture system for the oka organ (Lymphoid tissue) of *Penaeus monodon*[J]. *Aquaculture*, 1995, 136(1-2): 43-45.
- [23] 朱丹丹, 江世贵, 黄建华, 等. 斑节对虾性腺组织、细胞的原代培养条件优化[J]. *水产科学*, 2019, 38(2): 163-172.
- Zhu D D, Jiang S G, Huang J H, *et al.* Optimization of tissue and primary cell culture of tiger shrimp *Penaeus monodon*[J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(2): 163-172(in Chinese).
- [24] 陈颀, 许璞, 沈爱国, 等. 文蛤外套膜组织与细胞培养[J]. *海洋科学*, 2007, 31(6): 60-64.
- Chen J, Xu P, Shen A G, *et al.* Tissue and cell culture of mantle in *Meretrix meretrix*[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(6): 60-64(in Chinese).
- [25] Takeuchi Y, Inoue K, Miki D, *et al.* Cultured mussel foot cells expressing byssal protein genes[J]. *Journal of Experimental Zoology*, 1999, 283(2): 131-136.
- [26] 孙振兴, 李清, 唐锦秀, 等. 中国蛤蜊的组织培养[J]. *齐鲁渔业*, 2005, 22(6): 1-2.
- Sun Z X, Li Q, Tang J X, *et al.* Tissue culture of clam *Macra chinensis*[J]. *Shandong Fisheries*, 2005, 22(6): 1-2(in Chinese).
- [27] Huang J, Song X L, Yu J, *et al.* The components of an inorganic physiological buffer for *Penaeus chinensis*[J]. *Methods in Cell Science*, 1999, 21(4): 225-230.
- [28] 郑玉忠, 刘亚群, 刘昂, 等. 凡纳滨对虾肝胰脏原代细胞培养体系的优化[J]. *饲料工业*, 2015, 36(20): 47-50.
- Zheng Y Z, Liu Y Q, Liu A, *et al.* Optimization of culture system about *Litopenaeus vannamei* hepatopancreas primary cell[J]. *Feed Industry*, 2015, 36(20): 47-50(in Chinese).
- [29] Shimizu C, Shike H, Klimpel K R, *et al.* Hemolymph analysis and evaluation of newly formulated media for culture of shrimp cells (*Penaeus stylirostris*)[J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-animal*, 2001, 37(6): 322-329.
- [30] 薛庆善. 体外培养的原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- Xue Q S. Principles and techniques of *in vitro* culture[M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese).
- [31] 余黎明. 中国对虾细胞培养研究及其初步应用 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2004.
- Yu L M. The cell culture of *Fenneropenaeus chinensis* and its elementary application[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2004 (in Chinese).
- [32] Tong S L, Miao H Z. Attempts to initiate cell cultures from *Penaeus chinensis* tissues[J]. *Aquaculture*, 1996, 147(3-4): 151-157.
- [33] Gao C L, Sun J S, Xiang J H, *et al.* Primary culture and characteristic morphologies of medulla terminalis neurons in the eyestalks of Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 290(1): 71-80.
- [34] 郑玉忠, 刘亚群, 刘昂, 等. 凡纳滨对虾血淋巴细胞的原代培养与研究[J]. *中国农业信息*, 2015(19): 73-74.
- Zheng Y Z, Liu Y Q, Liu A, *et al.* Primary culture and research on blood lymphocytes of *Litopenaeus vannamei*[J]. *China Agriculture Information*, 2015(19): 73-74(in Chinese).
- [35] Van der Merwe M, Auzoux-Bordenave S, Niesler C, *et*

- al.* Investigating the establishment of primary cell culture from different abalone (*Haliotis midae*) tissues[J]. *Cytotechnology*, 2010, 62(3): 265-277.
- [36] Maiorova M A, Odintsova N A. Proliferative potential of larval cells of the mussel *Mytilus trossulus* and their capacity to differentiate into myogenic cells in culture[J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2016, 42(3): 281-285.
- [37] Van Wezel A L. Growth of cell-strains and primary cells on micro-carriers in homogeneous culture[J]. *Nature*, 1967, 216(5110): 64-65.
- [38] 李雪良, 张国强, 赵鑫锐, 等. 细胞培养肉规模化生产工艺及反应器展望[J]. *过程工程学报*, 2020, 20(1): 3-11.
- Li X L, Zhang G Q, Zhao X R, *et al.* Prospects of process and bioreactors for large scale cultured meat production[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2020, 20(1): 3-11(in Chinese).
- [39] Chen A K L, Reuveny S, Oh S K W. Application of human mesenchymal and pluripotent stem cell microcarrier cultures in cellular therapy: achievements and future direction[J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(7): 1032-1046.
- [40] Merten O W. Advances in cell culture: anchorage dependence[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2015, 370(1661): 20140040.
- [41] Nienow A W, Rafiq Q A, Coopman K, *et al.* A potentially scalable method for the harvesting of hmscs from microcarriers[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, 85: 79-88.
- [42] Bonny S P F, Gardner G E, Pethick D W, *et al.* What is artificial meat and what does it mean for the future of the meat industry?[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 255-263.
- [43] 王友华, 孟志刚, 薛爱红. 转基因三文鱼游上了北美餐桌[J]. *生命世界*, 2018(5): 10-11.
- Wang Y H, Meng Z G, Xue A H. Genetically modified salmon on the North American table[J]. *Life World*, 2018(5): 10-11(in Chinese).
- [44] Raven P A, Devlin R H, Higgs D A. Influence of dietary digestible energy content on growth, protein and energy utilization and body composition of growth hormone transgenic and non-transgenic coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1-4): 730-747.
- [45] Palaganas N B, Mangadlao J D, de Leon A C C, *et al.* 3D printing of photocurable cellulose nanocrystal composite for fabrication of complex architectures via stereolithography[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(39): 34314-34324.
- [46] Goulart E, de Caires-Junior L C, Telles-Silva K A, *et al.* 3D bioprinting of liver spheroids derived from human induced pluripotent stem cells sustain liver function and viability *in vitro*[J]. *Biofabrication*, 2019, 12(1): 015010.
- [47] Nowlan G A. Developing and implementing 3D printing services in an academic library[J]. *Library Hi Tech*, 2015, 33(4): 472-479.
- [48] Wang B Z, Chen Y. The effect of 3D printing technology on the future fashion design and manufacturing[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 496-500: 2687-2691.
- [49] Qian B B, Liu C D, Xu J M, *et al.* 3D cross-linking N-doped graphene framework for high sulfur nanocrystal storage[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2019, 52(29): 295502.
- [50] Murphy S V, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs[J]. *Nature Biotechnology*, 2014, 32(8): 773-785.
- [51] 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.
- [52] Muroi H, Hidema R, Gong J, *et al.* Development of optical 3D gel printer for fabricating free-form soft & wet industrial materials and evaluation of printed double-network gels[J]. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2013, 7(2): 163-168.
- [53] Wang L, Zhang M, Bhandari B, *et al.* Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 101-108.
- [54] Roos Y H. Glass transition temperature and its relevance in food processing[J]. *Review of Food Science and Technology*, 2010, 1(1): 469-496.

- [55] Shirazi S F, Gharekhani S, Mehrali M, *et al.* A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing[J]. *Science & Technology of Advanced Materials*, 2015, 16(3): 033502.
- [56] Diaz J V, Noort M W J, Van Bommel K J C. Method for the production of an edible object by powder bed (3D) printing and food products obtainable therewith: EP, 3131412A1[P]. 2017.
- [57] Lipton J, Arnold D, Nigl F, *et al.* Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing[C]// *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2010: 809-815..
- [58] Liu C, Ho C, Wang J. The development of 3D food printer for printing fibrous meat materials[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 284(1): 012019.
- [59] Kouzani A Z, Adams S, Whyte D J, *et al.* 3D printing of food for people with swallowing difficulties[C]// *Des-Tech 2016: Proceedings of the International Conference on Design and Technology*. Knowledge E, Dubai: United Arab Emirates, 2017: 23-29.
- [60] Sun J, Zhou W B, Yan L K, *et al.* Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 1-11.
- [61] Attalla R, Puersten E, Jain N, *et al.* 3D bioprinting of heterogeneous bi- and tri-layered hollow channels within gel scaffolds using scalable multi-axial microfluidic extrusion nozzle[J]. *Biofabrication*, 2019, 11(1): 015012.
- [62] Wycherley T P, Moran L J, Clifton P M, *et al.* Effects of energy-restricted high-protein, low-fat compared with standard-protein, low-fat diets: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 96(6): 1281-1298.
- [63] Santesso N, Akl E A, Bianchi M, *et al.* Effects of higher-versus lower-protein diets on health outcomes: a systematic review and meta-analysis[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 66(7): 780-788.
- [64] Rodriguez N R. Introduction to Protein Summit 2.0: continued exploration of the impact of high-quality protein on optimal health[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2015, 101(6): 1317S-1319S.
- [65] Barabási A L, Menichetti G, Loscalzo J. The unmapped chemical complexity of our diet[J]. *Nature Food*, 2020, 1(1): 33-37.

Research progress and prospect of artificial seafood

ZHAO Yong^{1,2,3*}, WANG Fan¹, ZHANG Zhaohuan^{1,2,3}, PAN Yingjie^{1,2,3},
OU Jie^{1,2,3}, LIU Haiquan^{1,2,3,4*}

(1. *College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

3. *Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Product on Storage and Preservation (Shanghai), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

4. *Engineering Research Center of Food Thermal-processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)*

Abstract: Seafood is rich in nutrients and is a source of high-quality healthy diet. The development of a seafood-based food strategy through fisheries has the potential to make a significant contribution to global food and nutrition security. However, due to human overfishing and environmental pollution, the marine ecosystem has been greatly damaged, and the sustainable development of marine fisheries is facing many challenges. China is the largest aquaculture country, and aquaculture accounts for the largest proportion in the seafood industry. However, due to the relatively backward aquaculture technology, farmers lack of professional scientific knowledge and

imperfect management in the aquaculture industry, serious water eutrophication, water dissolved oxygen parameters reduction, antibiotic abuse and other issues have caused serious environmental burden to the aquaculture water. Artificial seafood is an inevitable trend in the context of social economy, environmental sustainability, and food nutrition safety. It can solve many problems and overcome disadvantages caused by the current traditional seafood industry, including fishing and freshwater aquaculture, and it is the mainstream direction of food in the future.

Artificial seafood meat is mainly divided into two kinds: one is the plant-based seafood meat which is synthesized by extracting high-quality protein, fat and pigment from plants, and the other is the cultured seafood meat which comes from the proliferation and differentiation of stem cells of marine organisms. The main raw material of vegetable meat is protein. The intake of high-quality and high-content protein products can not only meet people's dietary nutritional needs, but also help to improve blood glucose indicators, protect the heart, reduce body weight and reduce the risk of chronic diseases. Cultured meat has great advantages in energy saving, emission reduction and safety, which give a strong impetus to the research of artificial seafood.

In this paper, the development status of artificial seafood meat was summarized, and the research and development process was analyzed emphatically. It is expected that the development and promotion of artificial seafood meat can be promoted through the integration of traditional ideas and new technologies, and win wide recognition from the public.

In order to realize the large-scale production of artificial seafood and meet the human demand for seafood, it is necessary to make good use of the three major sciences of foodomics, food synthetic biology and food perception biology, strengthen technological improvement and innovation, solve the problems in the process of cell culture, and develop a bioreactor suitable for stable proliferation and differentiation of various cells into muscle tissue. In addition, it is necessary to strictly control from food processing to process control and finished product testing, commit to the three major aspects of green, environmental protection, and health, and introduce artificial seafood meat food safety risk assessment and market supervision and management policies as soon as possible, which is of great significance for ensuring the safety of food supply and improving food biological manufacturing technology.

Key words: artificial seafood; plant protein; cell culture; 3D printing technology

Corresponding authors: ZHAO Yong. E-mail: yzhao@shou.edu.cn; LIU Haiquan. E-mail: hqliu@shou.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31671779, 31972188); Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program (T20170404); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (2017-01-07-00-10-E00056)