

畜产与海洋食品绿色高质加工及减损增效理论

李 娇¹, 毛相朝¹, 姜毓君³, 白艳红⁴, 周大勇², 张德权⁵, 朱蓓薇^{2*}

¹ 中国海洋大学食品科学与工程学院 山东青岛 266404

² 大连工业大学食品学院 辽宁大连 116034

³ 东北农业大学食品学院 哈尔滨 150030

⁴ 郑州轻工业大学食品与生物工程学院 郑州 450001

⁵ 中国农业科学院农产品加工研究所 北京 100193)

摘要 在大食物观及“双碳”战略下,推动畜产与海洋食品加工链绿色制造和可持续发展已刻不容缓。本文分析了我国畜产与海洋食品领域研究及产业发展现状和国家重大需求,凝练了该领域亟需解决的 4 个关键基础科学问题,包括解析畜产与海洋食品品质劣变机制,阐明其储运、加工和综合利用的生物学基础,建立加工过程危害物控制、品质提升及营养健康理论与技术,构建动物肉和营养组分生物合成的细胞工厂。对未来研究方向提出建议:基于多学科交叉的食品科技创新,布局低碳加工、生物制造、智能制造、细胞工厂、大数据、精准营养新业态,建立新型畜产与海洋食品低碳绿色加工与减损技术体系,使畜产与海洋食品满足人民群众对营养、健康、安全、美味、个性化的需求。

关键词 畜产与海洋食品; 绿色高质加工; 关键科学问题; 减损增效

文章编号 1009-7848(2024)05-0030-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.05.003

习近平总书记在党的二十大报告中指出:“树立大食物观,发展设施农业,构建多元化食物供给体系”。树立大食物观,是从更好地满足人民美好生活需要出发,顺应人民群众食物消费结构变化,在确保粮食供给的同时,保障肉类、乳品、蔬菜、水果、水产品等各类食物有效供给,是推进农业现代化的重要内容和客观要求^[1]。我国是世界第一的畜产品生产 and 消费国,肉、蛋产量保持世界首位,畜牧业和畜产品供给在大农业和大食物中具有重要战略地位^[2]。然而,畜牧业生产在农业碳排放过程中占有相当高的比例,联合国粮食及农业组织(FAO)报告指出,畜牧业的温室气体(GHG)排放贡献了 GHG 总排放量的 18%,在推行“双碳”战略的大背景下,传统畜产业向绿色生态型畜产业转型还需补齐发展短板^[3]。在屠宰加工过程中,我国畜牧业的绿色环保技术不足,水和能源的高消耗不适应绿色节能、资源节约的总体要求;全链条冷链物流保鲜技术的不足,影响了肉类从屠宰到餐桌的全过程品质^[4];标准化程度低,落后产能过剩

与先进产能不足的矛盾突出;适合我国膳食模式的畜产品质大数据库缺乏,“优质不优价”和“特色不清”问题凸显^[5]。

同时,在大食物观的视野下,积极发展“蓝色粮仓”战略,不仅关乎我国粮食安全,还能优化居民膳食结构和推进海洋渔业持续健康发展^[6]。该战略旨在通过现代海洋高新技术,高效开发海洋生物资源,打造一个以海洋水产品及相关产业为基础的供给系统,提升食物安全保障。海洋动物源蛋白质含量高,富含必需氨基酸和不饱和脂肪酸,可以有效改善居民健康水平^[7]。相比传统的陆地养殖,海上食物生产系统在土地利用、水耗、肥料与饲料消耗上更具节约效益,有助于减轻陆地资源环境压力,与我国提倡的“双碳”战略目标相契合^[8]。在此背景下,海洋食品加工技术显得尤为关键,需要发展先进的加工技术,以确保海洋食物资源在提供营养的同时,也具有更高的利用率和安全性,充分发挥其在国家食物供给系统中的战略价值^[9]。尽管如此,海洋食品产业在开发方式、科技创新能力等方面仍面临挑战,如海洋生态系统不断退化造成生物资源衰退;加工产业以初加工为主,资源利用程度不高;科技创新能力相对不足,关键技术攻克能力弱;产品同质化问题严重,智能

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32225039)

第一作者: 李娇,女,博士,副教授

通信作者: 朱蓓薇 E-mail: zhubeiwei@163.com

化程度不高等^[10]。

基于以上现状和国家重大需求,本文凝练了畜产和海洋食品领域亟需解决的4个关键基础科学问题,包括解析畜产与海洋食品品质劣变机制,阐明其储运、加工和综合利用的生物学基础,建立加工过程危害物控制、品质保持及营养健康理论技术,构建动物乳、肉和营养组分生物合成的细胞工厂,为建立新型畜产与海洋食品低碳绿色加工与减损技术体系指明研究方向,助力我国畜产与海洋食品实现高质量发展。

1 畜产与海洋食品加工储运过程品质劣变机制和减损理论与技术

1.1 构建生鲜动物源食品精准保鲜减损理论体系

我国是生鲜动物源食品生产大国与消费大国,畜禽肉品总产量与水产品总产量均居世界前列。由于地域、时间、空间等客观因素限制,我国生鲜动物源食品消费结构中僵直前与解僵成熟产品均占有一定比例。传统消费习惯更倾向于以僵直前的生鲜动物源食品为主,而僵直前的生鲜动物源食品保质理论长期缺乏^[11]。揭示僵直前生鲜产品保质的分子机制,阐明肉品质形成与劣变的代谢通路^[12],可为精准减损保鲜奠定理论基础。除了关注肉品的保鲜减损之外,乳制品作为动物源性食品重要组成部分,保持其活性成分的稳定性和有效性也同样重要。由于缺乏针对生鲜产品的保鲜减损基础理论体系,我国生鲜动物源食品损耗率远高于发达国家,其中生鲜畜禽肉损耗率高达8%~10%,生鲜水产品损耗率高达10%~15%,严重制约产业发展^[13]。低温贮藏等基于温度场的保藏手段虽能够有效避免生鲜动物源食品在贮运过程中发生腐败变质,但同时也会对其品质造成严重损耗。目前,不同僵直阶段生鲜动物源食品高效冷冻、解冻的品质变化规律及调控机制不清,生鲜动物源食品智能精准保鲜、包装鉴别技术的短缺,集约化、规模化冷链设施缺乏,导致我国生鲜动物源食品损耗率居高不下。

为建立绿色、节能、精准的生鲜动物源食品精准保鲜减损技术,我国亟待加强基础与应用基础研究,阐明储运过程生鲜动物源食品品质构、色泽、风味等品质变化规律及劣变调控机制,构建生鲜

动物源食品精准保鲜减损理论体系;建立适应于我国饮食习惯和烹饪方式的不同僵直阶段肉类高效冷冻和解冻方法,从肉品高效冷冻和解冻角度探究品质变化规律,调控蛋白脂质氧化、微生物及内源酶作用;围绕生鲜动物源食品绿色贮运、保质保鲜关键技术开展研究,开发高效、安全、绿色新型保鲜剂,建立保鲜剂精准控释缓释模型,研创具有高阻隔、纳米抗菌抗氧化、精准控释缓释包装等指示型包装材料和智能标签,建立融合识别模型及在线判定系统的智能包装保鲜、减损技术;加强冷链物流基础建设,提高生鲜动物源食品冷藏流通率,缩短冷链流通环节,跨领域、多技术协同增效助力生鲜动物源食品产业发展。

1.2 解析传统特色肉制品加工品质变化规律及调控机制

以畜产与海洋食品为原料加工而成的中国传统特色食品,是我国日常饮食的主要来源。传统中式肉制品种类因产地和乡土人情不同而存在很大差异,按照加工方法不同,可分为腌腊制品、酱卤制品、熏烧烤制品、干制品、油炸制品、香肠制品和火腿制品等,是千百年民间肉品加工经验和智慧的结晶^[14]。作为民族饮食文化瑰宝,传统特色肉制品的创新对于满足人民日益增长的美好饮食需要具有重要意义。由于我国烹饪方式和饮食习惯与西方存在根本性差异,现代化转型升级并没有国外成套理论技术可以引进,因此只能依靠自主创新推动中国传统肉制品由作坊式生产走向现代化加工。西方国家肉制品消费结构中以低温肉制品消费为主导,而我国仍以中、高温肉制品为主,在加工过程中普遍存在限量添加剂的种类较多、钠盐添加过高等问题,成为心血管疾病等发病率逐年上升的重要因素之一,严重威胁我国消费者身心健康^[15-16]。此外,与西式肉制品科学的工艺流程和先进的技术装备相比,我国传统特色肉制品工业化生产仍存在诸多瓶颈:一是不同类别畜产与海洋食品的加工适宜性不清楚;二是典型工艺中的质构、风味、色泽形成机制不明;三是产品加工工艺落后,品质稳定性差,易劣变;四是传统腌制、熏烤等过程产生的有害物控制薄弱;此外,还存在加工设备简陋,劳动强度大、加工效率低,能耗高、污染严重等问题。

为开发与完善畜产与海洋食品传统特色加工理论与技术,我国需要解析“减油、减糖、减盐”不减特色品质的内在机理,开发“三低一高”(低脂肪、低盐、低糖、高蛋白)的功能性肉制品,实现传统特色畜产和海洋食品的高营养和高品质;针对中国特色加工方式,如炖、炒、煮、涮、熏等方法,我国亟待开展不同畜产和海产品原料的加工适宜性研究,建立基于原料特性与感官品质、食用品质和营养功能品质参数的基础数据库;针对各典型工艺,包括腌制、熏制、烤制等,开展不同畜产品和海产品的质构、多汁性、风味等特征指标形成过程研究,明确特色肉制品在典型工艺中的质构、风味、色泽形成机制;探究工艺参数,如温度、时间和湿度等的控制对肉制品熟化程度、风味及质感的影响,建立传统特色肉制品风味、质构数字化评价体系 and 定量调控技术;创建传统特色肉制品安全风险快速识别和高效控制技术,降低传统肉制品加工过程中有害物残留;开发传统特色肉制品加工自动化配套装备及生产线,实现节能减排和综合效益提升。

1.3 建立组分氧化和内源酶系控制理论和技术

畜产与海洋食品的外观(色泽、纹理、形状)、风味(清新、腐败、酸味)和质地(水分含量、嫩度)等指标是评估其肉品质量好坏的直观特征^[17]。在畜产与海洋食品加工与储运过程中,由于其组成成分的特性以及各种外界因素的影响,其品质在经历复杂的生化反应后发生劣变损耗,对肉品的感官、营养功能和经济价值产生严重负面影响。其中脂肪和蛋白质氧化、内源酶作用加剧和微生物繁殖,是引起畜产与海洋食品品质劣变的主要因素。研究表明,不同来源的蛋白质和脂质可能对氧化的敏感性不同,同时每种加工方式根据强度的不同,对肉品的影响可能会呈现相反的效果^[18-19]。此外,品质劣变与肌肉中结构蛋白的降解有着密切关系,这种劣变初期通常受其内源性蛋白酶的影响,包括钙蛋白酶、组织蛋白酶、胰蛋白酶、羧肽酶等,引起蛋白质降解、脂质的氧化及水解,同时分解产生的代谢产物促进微生物的生长繁殖,加速了畜产与海洋食品品质劣变^[20]。因此,在畜产与海洋食品品质调控方面,还存在蛋白质和脂质氧化的多种反应路径及交互氧化机制不清楚,腐败

变质的内源酶和微生物代谢机制不明确等问题。此外,对于传统食品加工技术(热处理、冷冻冷藏、腌制等)在钝酶灭菌的同时往往会降低食品品质和营养价值,利用现代物理技术,如温度场、超声场、电场、电磁场等单物理场技术以及多物理场组合技术可在发挥钝酶灭菌作用的同时,最大程度地避免热处理对乳、肉制品品质的负面影响,然而相关理论基础尚不明确。

为建立畜产与海洋食品组分氧化和内源酶系控制理论和技术,首先要明确不同加工环节和不同储运条件对蛋白及脂质氧化的引发机理,探究蛋白脂质氧化的多种途径和交互氧化机制,从感官品质、食用品质和营养品质全方位阐明蛋白脂质氧化与畜产和海洋食品品质的关联机制;揭示畜产和海产品腐败变质的内源酶和微生物代谢的酶学机制,阐明导致蛋白质裂变的关键酶系、优势腐败菌及其对蛋白水解酶、肽酶和氨基酸降解酶的基因贡献度,完善食品内源酶系和微生物代谢调控理论;总结单一/耦合物理场的适应参数及复合场匹配原则,开发单物理场及多物理场耦合等新型绿色低碳控制技术,阐明物理场作用下肌肉超微结构、内源蛋白酶活性及蛋白功能变化规律,精准调控畜产与海洋食品内源酶和微生物代谢,实现我国畜产与海洋食品精准绿色减损保质。

2 畜产与海洋食品绿色加工与综合利用的生物学基础

2.1 宏量营养成分生物加工的酶学基础与生化工程技术

畜产与海洋食品是人类日常饮食中宏量营养成分,如蛋白质、脂肪等的主要来源,对其进行精深加工,不仅关系到人体健康,也关系到资源的高值化利用。生物加工方式,如微生物发酵/酶解等,不仅可以充分降解肌肉组织及各营养成分,提高资源利用率和附加价值,符合国家环保战略,而且可以避免有害物质的产生,保持甚至强化食品品质,增加食品的营养成分和活性成分,因此深受消费者喜爱,前景更加广阔^[21]。微生物发酵/酶解也可用于乳品加工,水解蛋白为多肽或氨基酸,降低乳蛋白致敏性,促进肠道消化吸收。由于研究起步时间较晚,知识产权意识淡薄,我国目前在畜产与海

洋食品中宏量营养成分的生物加工方面存在平台资源不充足、理论探究不充分、工业化效果不理想等多个限制,首先高特异性和高活性的自主知识产权专用菌种和酶的储备不足,亟需加强挖掘与开发,其次是微生物/酶与畜产与海洋食品宏量营养成分的相互作用机制不清楚,微生物发酵/酶解过程对食品感官品质的调控规律及机制不清晰,需要进行深度的理论探究;此外,微生物发酵/酶解过程的工业化应用不足以及微观层面产物分离与纯化的体系不够健全,需要进一步开发与优化^[22-23]。

基于上述背景,在微生物与酶资源的挖掘方面,首先需要突破传统筛选方式,利用大数据和模型预测等信息化方式,建立并完善全球化的微生物物种及丰度数据库,预测并挖掘高特异性、高活性及针对乳品、肉品、水产品的专属发酵菌种。建立完善微生物基因组和宏蛋白质组数据库,构建预测模型挖掘高特异性、高活性及高水解率的食物用酶。其次,生物分子的相互作用机制复杂,易受宏观条件及微环境影响,需要通过分子对接、动力学模拟等方式,探索微生物/酶与食品主要成分的特异性结合及作用机制,有针对性地选择不同方式进行畜产与海洋食品的生物加工。此外,微生物/酶发酵过程复杂且机制不清晰,具有高度非线性和明显不确定性等特点,需要建立适用不同食品种类和菌种/酶的发酵调控优化模型,对发酵过程的重要变量进行预测,还可以利用多酶组装/多菌种协同发酵等方式,实现畜产与海洋食品及副产物的充分利用。在上述基础上,根据微生物/蛋白质数据库,微生物/酶与食品成分的作用方式和发酵机理,利用基因工程进行菌种改良和酶的改造,进一步提升生物加工效能。最后,利用计算机技术建立智能化安全性评价体系,针对不同加工过程获得的食品进行安全性评估。利用数字化设计、机器视觉、智能控制等技术,建立智能化、自动化的产物分离与纯化体系,进一步提升生物法加工畜产与海洋食品及副产物的工业化水平。

2.2 畜产和海洋食品副产物的精深加工与高效利用

随着人们对环境保护和资源利用的关注日益增加,副产物的高值化利用逐渐成为热点话题。以

往畜类的皮毛、骨骼、内脏^[24]以及海产的皮、骨、鳞、壳^[25]等副产物往往被忽视或仅做简单处理,造成了资源的极大浪费,最大限度地提升资源的利用效率,关键在于全面挖掘副产物中的潜在价值,充分提取并利用这些成分。同时,强化乳制品的基础研究,突破其精深加工关键技术,在我国乳品工业技术进步中发挥重要作用。此外,畜产与海洋食品副产物的共同特点之一是水分含量很高,极易腐败变质,一般需要在短时间内及时加工。传统的生产和加工方式通常导致资源浪费和环境负担,绿色溶剂提取技术、低碳物理技术、微生物发酵技术等新兴技术为将副产物转化为有经济价值的产品提供了新途径^[26]。然而,加工副产物的高值化利用仍然面临一些挑战和机遇,副产物活性物质的低丰度和结构相似性阻碍高纯度物质的获取;副产物利用的现有技术体系不能为工程化技术提供完整解决方案,集成程度低,影响了副产物的最大价值利用;副产物加工后面临保持风味稳定性和提高腥味脱除效率的双重壁垒^[27],储存稳定性差和风味调整技术的不成熟成为制约副产物风味品质提升的关键因素;研究对活性物质在生物体内作用机理的认识不全面,仅限于细胞或动物模型,缺乏对于这些物质在人体特定生物学环境中,诸如肠道、血液和肝脏里的代谢动力学以及生物转化的深入探索。

为实现畜产和海洋食品副产物的开发和高值化利用,首先需要明确畜产和海洋食品加工副产品多元利用理论基础,阐明加工副产品中功能性成分组成、营养健康特性及其发挥功能性作用的生物学基础,为基料化、食品化、功能化产品开发奠定理论基础;提升技术研发创新,挖掘乳品深加工综合利用价值,解决稀奶油、奶酪、黄油等乳制品深加工产品以及乳清粉、乳糖、浓缩乳清蛋白粉等婴幼儿配方乳粉关键功能基料的国产化问题。进一步深度挖掘副产物中高附加值成分的理化/生物特征鉴定和分析分离技术,建立基于畜产和海洋食品加工副产物中的糖、蛋白等基质的高质化生物制造途径;基于超声波、脉冲电场、微波辅助萃取以及亚临界水水解等新兴辅助技术,运用高效菌酶联合工艺,通过合理酶设计、酶固定化、固态发酵和连续混合生物反应器系统,建立集成

高效生物转化催化处理加工副产物工程化方案;从分子层面探索副产物加工过程风味释放机制,聚焦游离酶法制备低聚肽,保留风味特性并减少腥味产生,调控美拉德反应以增强原有风味;评估活性物质的代谢途径和代谢产物,研究抗菌肽等副产物来源功能性肽的体内抑菌机制,以了解其在人体内的药代动力学特性。

2.3 基于大数据和人工智能的畜产和海洋食品生物制造平台

农业生产力和市场消费增长直接导致畜产和海洋食品产业供给量的提升,这也导致大量涉及食品过程加工、环境压力等方面问题接踵而至。畜产及海洋食品原料的智能化加工处理,可最大限度地提高各自利用率及相关产品的产量和质量,保障生产过程中的精确、高效以及环境友好。利用大数据及人工智能实现食品生物制造,主要包括产品数字化设计与优化、生物加工智能管控及食品生物制造装备智能化三大方面^[28]。国内畜产及海洋类食品生物制造技术近年来高速发展,相比较世界主要发达国家的制造装备智能化、自动化以及生物加工技术多样化等优势,普遍存在能耗高、稳定性不足及高效生物加工技术欠缺等问题。这些国家中,基于大数据的深度学习已在一定程度上被应用于开发生物制造的工具^[29],甚至是产品的营养及能量等信息的预测^[30]。深度学习可能是未来食品加工领域的一个重点探索目标,而国内该方向上的探索基本还处于利用传统机器学习水平。另外,国内虽然已具备基础智能化加工设备以及生物制造技术,但是整体装备智能制造、智能感知及智能控制水平仍需要进一步自主创新,尤其是涵盖食品设计及生物加工处理的品质智能化控制和涉及食品生物制造产业智能化发展的生物加工工具开发。

畜产与海洋食品智能化生物加工的进一步发展需要涉及新技术的开发以及新战略的制定,以便有效和可持续地推动整体及相关产业发展。如何利用大数据设计符合健康营养需求以及特定场景需求的生物制造食品,如何开发出高效畜产与海洋食品加工生物制造系统化、智能化方法及设备;如何解析生物加工过程中涉及各类关键生化代谢过程,智能化改造或设计加工过程中关键

酶和微生物高效制备体系,丰富食品生物制造策略等是现阶段畜产与海洋食品智能化生物加工的重点方向。这其中包括推动创新数字化设计、传感器及智能控制系统等多方面自主创新、自主设计、自主制造;根据不同细化来源的原料进行定制的智能分类处理。此外,利用大数据及人工智能的食品生物制造平台,构建融合食品原料三维结构信息及化学特征信息的基因挖掘算法流程框架,并引入可解释深度学习算法的分子动力学模拟轨迹分析,可以实现食品组分生物加工工具酶的多源信息挖掘及微生物工程菌的构建,对食品原料进行高效、精准生物制造。

3 畜产与海洋食品危害物控制与品质保持及营养健康理论

3.1 原料及加工过程中危害物形成机制、识别溯源与阻控消减

我国肉类在生产数量和增长速度方面虽然已位于世界第一,但是食品安全水平仍与世界先进水平之间存在明显差距^[31]。在畜产及水产养殖加工过程中还存在许多潜在的、新发的风险,致病微生物和化学危害物是导致食品安全问题的两个主要因素^[32]。微生物可以在适宜的温度、湿度和营养条件下生长繁殖,在生长过程中有些细菌还会产生毒素,进而导致机体产生不同程度的病理损伤,因此针对乳源等致病微生物的溯源与防控尤为重要。目前,在细菌和真菌毒素产生的机制方面,已经确定了一些常见的产生途径,然而,在实际食品加工和储存过程中,温度、湿度、氧气浓度、pH值等因素的相互作用和具体影响仍然存在一定的不确定性^[33-34]。另外,现代化的养殖业由于高度集约化,需大量使用药物来防治动物疾病,因此超量使用导致的农残兽残超标问题频发。工业“三废”的不合理排放和农药的滥用,会引起大气、土壤、水域及动植物的污染,致使动物遭受到化学性污染^[35-36]。在食品加工过程中,部分化学危害物可能会与食品原料或加工条件相互作用生成丙烯酰胺、丙烯醛、亚硝胺类化合物,有潜在致癌风险,在食品加工过程中准确监测和控制这些生成物的产生仍是难点,同时针对重金属、渔药、环境污染物等一些典型危害因子的活性消减技术、脱除净化

技术等,我国还处于探索阶段。

为保障公众的饮食安全与健康,应明确畜产和海洋食品原料中细菌和真菌毒素的变化规律,并探究危害物在不同加工环节和储存条件下的形成机制;加强对畜产和海洋食品原料的监测和检验,尤其是和婴幼儿食品相关的乳品原料,制定科学合理的检测标准,利用无损检测、精确检测以及快速检测等新技术手段提高分析的灵敏度、准确性和效率;深入研究现代加工技术(超高压、超声波、等离子体等)对畜产与海洋食品有害微生物和毒素抑制规律及机制,探究压力胁迫下有害微生物抗性规律及机理,同时解析其对化学危害因子的消减规律和机制;建立食品安全风险评估模型,以提高分类检测和定向检测种类覆盖度;关注畜产和海洋食品“从农田/海洋到餐桌”的全链路质量控制管理,通过使用先进的物联网、区块链等技术手段,实现对食品生产、加工、运输和销售环节的全程监控和溯源。

3.2 畜产与海洋食品精准营养与人类健康基础理论

我国居民的饮食结构持续呈现失衡态势,高糖、高脂、高嘌呤与低膳食纤维的不均衡摄入已成为慢性代谢病的潜在风险因子^[37]。过量食用脂肪含量高的肉类与食源性代谢紊乱有关,而忽视肉类的营养价值和完全排斥肉类消费也会导致营养不良以及机体成分的缺失。因此,明确畜产品与海洋食品摄入与健康之间的关系是研究的关键,需要考虑包括个体的遗传背景、生活方式、环境因素及生理状态等因素,这意味着食品消费与健康之间的量效关系在不同人群当中存在异质性^[38]。目前,国际上发达国家正由宏观营养学逐步过渡至基于组学的现代分子营养学^[39]。此学科更关注营养成分的稳态调控,针对性的营养设计,肠道菌群靶向调控以及新型健康食品的精准制造等,同时在特殊医学用途配方食品、特定人群食品和个性化食品方面的研发均处于前沿,已经进入个性化精准营养的新阶段。我国对全生命周期人群,尤其是特定生命周期人群食品、特殊医学用途配方食品在内的营养与人类健康基础理论方面还存在不足^[40]:一是畜产与海洋食品营养成分、活性因子之间的协同作用及其健康效应阐述不完善;二是

不同消费群体对畜产与海洋食品营养成分的需求和响应特点不明确;三是畜产与海洋食品营养与人体代谢之间的关联机制亟待研究;四是面向特殊人群的畜产与海洋食品蛋白功能定向设计的基础理论体系不够健全;五是适用不同人群和个体的食品精准营养设计智能化模型需要进一步开发和挖掘。

综上,在畜产与海洋食品精准营养与个性化制造领域,我国迫切需要针对其健康营养理论以及关键技术进行深入研究,实现关于特殊膳食食品、特殊医学用途配方食品、功能性食品、个性化食品等畜产与海洋营养健康食品的技术突破。依据不同年龄段和健康状态人群的生理和代谢特性,实现畜产与海洋营养健康食品的精准化功能和配方设计;全面解析畜产与海洋食品来源的脂质、蛋白、多糖等食品成分对营养和健康的影响机理;进一步探究畜产品与海洋食品中营养素和功能性成分的潜能,为特需人群,如老年人、处于特殊环境或有特殊医疗需求的个体开发健康肉制品提供科学依据,如肉品蛋白质对老年肌肉丢失的缓解机制等。还要结合大数据分析,建立适用于不同人群和个体的食品精准营养设计智能化模型,以实现更为精准、有效和安全的营养支持策略,依照个体营养需求,靶向设计开发定制化营养畜产品与海洋食品,保障人民生命健康。

4 畜产与海洋食品生物合成细胞工厂构建与高效制造理论

4.1 痕量营养成分生物合成细胞工厂构建与高效制造理论

消费者对于食品的追求已经由“基本保障”变为“营养健康”,畜产和海洋食品为人体提供很多优质蛋白的同时,也提供了多种对人体健康有益的痕量组分,如骨桥蛋白、虾青素^[41]、岩藻黄质^[42]、角鲨烯^[43]、血红蛋白^[44]等。这些痕量营养成分在畜产和海洋食品中含量虽然很低,但是通常具有很好的抗氧化、抗衰老等功能。直接从食物中获得需要进食过量的畜产和海洋食品,而直接提取费时、低效,易造成环境污染,大量养殖捕捞会破坏生态系统的平衡。因此,需要依赖微生物细胞工厂建立高效的痕量营养成分生物合成技术,实现痕量营

养成分的高效、可持续获得,改善食品的营养或添加新功能^[45]。随着对畜产、海洋生物基因组的深入挖掘^[46],解析畜产和水产品体内的生物合成途径以及畜产和海洋食品的营养成分,为细胞工厂进行畜产与海洋食品营养成分生物合成提供基础。细胞工厂作为新兴技术,用于畜产和海洋食品痕量营养成分合成生产仍存在诸多限制条件:细胞工厂的底盘微生物与动、植物本体合成通路存在差异,协同优化机制不明确;细胞工厂合成过程中关键酶资源不足,最优代谢通路难以确定;缺少对于底盘微生物的代谢网络的全局分析掌控,无法实现细胞工厂的全面调控;细胞工厂的能量供给和痕量营养物质生物合成通路的关联协同机制不清楚;畜产和海洋食品痕量营养成分的大规模发酵过程难以控制,产量提升存在困难;痕量营养成分与其它食物营养成分的互作机制不明确,难以发挥痕量营养成分的最佳活性;缺少对于不同类别的细胞工厂生产的畜产和海洋食品安全性评价体系。

为实现畜产与海洋食品生物合成细胞工厂的高效制造,我国仍需进一步发展海洋食品生物合成细胞工厂的基础理论和先进技术研究,挖掘更多种类的底盘微生物,解析底盘微生物、畜产和海洋生物的本体营养物质合成路径;根据不同畜产与海洋食品的生物合成路径、代谢流的平衡和能量最小化原理,重点突破代谢途径的理性挖掘和设计,并建立模块化的实验验证模型;从代谢网络全局调控的角度,系统解析畜产与海洋食品生物合成通路与微生物生长、能量供给的协同和拮抗机制;建立代谢产物感应器,实时检测调控多条代谢通路的平衡;开发全方位的发酵过程实时检测技术,结合不同微生物的生长特点,确立发酵调控的关键节点;明确痕量营养成分和主要营养成分的互作协同机制;结合细胞工厂代谢产物,运用适当的算法模型,建立适用于不同类别细胞工厂的食品安全评价体系。

4.2 高养殖成本水产细胞培养肉的生物合成与高效制造理论

随着人类整体生活发展水平的不断提升,全球肉制品的消耗量快速增长,传统肉类生产需要消耗大量的自然资源,同时还存在环境污染、动物

福利、抗生素滥用、兽药残留等食品安全问题。为践行大食物观,助力“双碳”目标实现,亟需发展细胞培养肉技术,绿色高效地获得低能耗、高安全性的新型肉制品^[47]。在国内外已成功通过细胞培养肉技术获得了牛肉、猪肉、鸡肉等畜禽肉类。针对养殖成本高、食用成分少的水产品,细胞培养肉技术可以充分降低生产成本,减少水体污染^[48],体现出更大的优势。目前,在水产品细胞培养肉方面,国外已成功制备金枪鱼、龙虾等产品并逐渐推向市场^[49],我国在工程化方面与国外差距逐渐显现。在畜产与海洋食品细胞培养肉生物合成与高效制造理论方面,存在的限制性因素主要有:难以获得可以持续生长、分化的可食用动物细胞,细胞的干性维持、分化与生长过程机制不明确;动物细胞持续生长分化所需的关键生长因子不明确;细胞培养肉依赖血清培养基,培养成本高^[50];生长环境要求高,种子细胞难以大规模培养;真实肉类由多种细胞互作生成,细胞培养肉难以模拟真实肉类的质构而开发出全肌肉产品;真实肉类的风味、色泽成分不明确,细胞培养肉难以仿制。

为实现畜产与海洋食品中高品质细胞培养肉的生物合成,我国仍需突破非基因编辑的干细胞定向编辑技术,建立干细胞物理、化学调控的永生、定向分化技术,阐明物化编程对细胞表型调控的分子生物学机制;解析关键生长因子对于动物细胞分化的影响机制,研究多元化细胞因子构建无血清培养基的性能调控方法,探索基于天然因子的培养基强化新策略;发展可食用支架及结构定向调控新方法,探索支架在不同生化环境下诱导干细胞行为变化的机理,构建细胞3D增殖体系;优化多元化细胞悬浮共培养体系,探究不同干细胞及其分泌物对共培养细胞表观特征的调控规律,建立高密度干细胞共培养体系;分析天然肉类微结构特征,建立模拟天然肉类特征的细胞培养肉质构精准构筑策略,揭示不同培养细胞组织与加工新方法调控细胞培养肉质构特征的规律;分析天然肉类色、香、味的关键成分,通过细胞工厂生物合成,建立模拟天然肉类的复配技术。

5 展望

畜产与海洋食品是保障粮食安全,落实大食

物观,构建多元化食物供给体系,满足食品多样化需求的基础性和未来产业。面对畜产与海洋食品产业未来发展的挑战和需求,围绕健康、循环、高效、低耗的绿色发展目标,聚焦新资源创制,加工制造技术革新,品质保持与增效,实现畜产与海洋食品安全化、高质化、生物化、营养化、智能化发展。基于多学科交叉的食品科技创新,布局低碳加工、生物制造、智能制造、细胞工厂、大数据、精准营养新业态,使畜产与海洋食品满足人民群众对营养、健康、安全、美味、个性化的需求,保障人民生命健康,不断提升我国畜产与海洋食品产业科技转型和健康持续发展。

参 考 文 献

- [1] 王崑欣. 广开食源, 践行大食物观[N]. 人民日报, 2024-01-05(5).
WANG Y X. Expand food sources and practice the concept of big food[N]. People's Daily, 2024-01-05(5).
- [2] 龚秋燕. 加快推进乳畜业发展 打造乳畜产业大县[N/OL]. 大理日报, (2024-01-31)[2024-04-15]. https://www.dalidaily.com/content/2024-01/31/content_60369.html.
GONG Q Y. Accelerate the development of the dairy and livestock industry and build a major county in the dairy and livestock industry [N/OL]. Dali Daily, (2024-01-31)[2024-04-15]. https://www.dalidaily.com/content/2024-01/31/content_60369.html.
- [3] 陈亮, 刘文奎, 张宜军, 等. 发展优质畜牧业助推乡村振兴与实现“双碳”目标有效衔接[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 2023, 25(1): 44-48.
CHEN L, LIU W K, ZHANG Y J, et al. Developing high-quality animal husbandry to promote the effective connection between rural revitalization and 'Double-Carbon'[J]. Journal of Shenyang Agricultural University (Social Science Edition), 2023, 25(1): 44-48.
- [4] 范梅华. 大食物观视野下打造家禽产业发展新优势的思考[J]. 中国禽业导刊, 2023, 40(6): 40-42.
FAN M H. Thinking on creating new advantages of poultry industry development under the vision of big food view[J]. Chinese Poultry Industry Guide, 2023, 40(6): 40-42.
- [5] DALILE B, KIM C, CHALLINOR A, et al. The EAT-Lancet reference diet and cognitive function across the life course [J]. The Lancet Planetary Health, 2022, 6(9): e749-e759.
- [6] 彭晓静. 全链发力深耕“蓝色粮仓”[N]. 经济日报, 2024-01-23(5).
PENG X J. Make full efforts to cultivate the 'blue granary' throughout the entire chain[N]. Economic Daily, 2024-01-23(5).
- [7] PURI M, GUPTA A, MCKINNON R A, et al. Marine bioactives: From energy to nutrition[J]. Trends in Biotechnology, 2022, 40(3): 271-280.
- [8] ZHAO S, LI T, WANG G, et al. Adjustment of meat consumption structure under the dual goals of food security and carbon reduction in China[J]. Agriculture, 2023, 13(12): 2242.
- [9] CHEMAT F, ROMBAUT N, MEULLEMIESTRE A, et al. Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 357-377.
- [10] 吕任之. 浅谈我国水产品工业现状及发展趋势[J]. 广东蚕业, 2020, 54(4): 49-50.
LÜ R Z. Talking about the current situation and development trend of my country's aquatic products industry [J]. Guangdong Sericulture, 2020, 54(4): 49-50.
- [11] 张德权, 侯成立. 热鲜肉与冷却肉品质差异之管见[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 83-90.
ZHANG D Q, HOU C L. Humble opinion on the quality difference between hot meat and chilled meat [J]. Meat Research, 2020, 34(5): 83-90.
- [12] XING T, GAO F, TUME R K, et al. Stress effects on meat quality: A mechanistic perspective[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(2): 380-401.
- [13] 张德权, 惠腾, 王振宇. 我国肉品加工科技现状及趋势[J]. 肉类研究, 2020, 34(1): 1-8.
ZHANG D Q, HUI T, WANG Z Y. Current situation and future trend of meat processing technology in china[J]. Meat Research, 2020, 34(1): 1-8.
- [14] 郑荣美, 胡萍, 张磊, 等. 低温肉制品研究现状与发展趋势[J]. 中国农学通报, 2024, 40(1): 143-150.
ZHENG R M, HU P, ZHANG L, et al. Research status and development trend of low temperature

- meat products[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(1): 143–150.
- [15] 刘冠绪, 张朵朵, 韩春元, 等. 肉制品绿色加工技术研究现状与展望[J]. 肉类工业, 2022(11): 1–7.
LIU G X, ZHANG D D, HAN C Y, et al. Research status and prospect of green processing technology for meat products[J]. Meat Industry, 2022(11): 1–7.
- [16] DE ARAÚJO P D, ARAÚJO W M C, PATARATA L, et al. Understanding the main factors that influence consumer quality perception and attitude towards meat and processed meat products [J]. Meat Science, 2022, 193: 108952.
- [17] QIU D, DUAN R, WANG Y Q, et al. Effects of different drying temperatures on the profile and sources of flavor in semi-dried golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. Food Chemistry, 2023, 401: 134112.
- [18] CHEN H, ZHAO G M, YU X L, et al. Exploring *in vitro* gastrointestinal digestion of myofibrillar proteins at different heating temperatures[J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135694.
- [19] KAUR L, HUI S X, MORTON J D, et al. Endogenous proteolytic systems and meat tenderness: Influence of post-mortem storage and processing[J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(4): 589–607.
- [20] AALIYA B, SUNOOJ K V, NAVAF M, et al. Recent trends in bacterial decontamination of food products by hurdle technology: A synergistic approach using thermal and non-thermal processing techniques [J]. Food Research International, 2021, 147: 110514.
- [21] GUO B, WU Q, JIANG C, et al. Inoculation of *Yarrowia lipolytica* promotes the growth of lactic acid bacteria, *Debaryomyces hansenii* and the formation of ethyl esters in sour meat[J]. Food Microbiology, 2024, 119: 104447.
- [22] PENG Z L, CHEN B B, ZHENG Q S, et al. Ameliorative effects of peptides from the oyster (*Crassostrea hongkongensis*) protein hydrolysates against UVB-induced skin photodamage in mice[J]. Marine Drugs, 2020, 18(6): 288.
- [23] LI L, LIU Y, ZOU X Y, et al. *In vitro* protein digestibility of pork products is affected by the method of processing[J]. Food Research International, 2017, 92: 88–94.
- [24] LÓPEZ-PEDROUSO M, ZAKY A A, LORENZO J M, et al. A review on bioactive peptides derived from meat and by-products: Extraction methods, biological activities, applications and limitations [J]. Meat Science, 2023, 204: 109278.
- [25] 赵勇, 武艺, 李玉锋, 等. 水产品副产物蛋白回收和高值化利用研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(11): 1943–1953.
ZHAO Y, WU Y, LI Y F, et al. Research progress on protein recovery and high-value utilization of by-products from aquatic products[J]. Journal of Fisheries, 2021, 45(11): 1943–1953.
- [26] 张瑜. 水产副产物中功能性成分研究进展[J]. 现代食品, 2023, 29(11): 8–11.
ZHANG Y. Research progress of functional components in aquatic by-products [J]. Modern Food, 2023, 29(11): 8–11.
- [27] 刘泽祺, 李明霞, 杨琳, 等. 畜禽副产物腥味形成机制及脱腥方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 86–93.
LIU Z Q, LI M X, YANG L, et al. Research progress on fishy odor generation mechanism and deodorization methods of livestock and poultry by-products[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2023, 14(16): 86–93.
- [28] 刘东红, 周建伟, 吕瑞玲, 等. 食品智能制造技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(7): 1–6.
LIU D H, ZHOU J W, LÜ R L, et al. Development and prospect of food intelligent manufacturing technology [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2020, 39(7): 1–6.
- [29] RYU J Y, KIM H U, LEE S Y. Deep learning enables high-quality and high-throughput prediction of enzyme commission numbers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(28): 13996–14001.
- [30] KHAN S, MONTEIRO J K, PRASAD A, et al. Material breakthroughs in smart food monitoring: Intelligent packaging and on-site testing technologies for spoilage and contamination detection[J]. Advanced Materials, 2024, 36(1): e2300875.
- [31] XIA L, ROBOCK A, SCHERRER K, et al. Global

- food insecurity and famine from reduced crop, marine fishery and livestock production due to climate disruption from nuclear war soot injection[J]. *Nature Food*, 2022, 3(8): 586–596.
- [32] MOUSAVI KHANEGHAH A, ABHARI K, EŞ I, et al. Interactions between probiotics and pathogenic microorganisms in hosts and foods: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 95: 205–218.
- [33] JAMALI S N, ASSADPOUR E, FENG J, et al. Natural antimicrobial-loaded nanoemulsions for the control of food spoilage/pathogenic microorganisms[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 295: 102504.
- [34] ROPKINS K, BECK A J. Using HACCP to control organic chemical hazards in food wholesale, distribution, storage and retail[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2003, 14(9): 374–389.
- [35] SAMARAJEEWA U. Emerging challenges in maintaining marine food-fish availability and food safety[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(6): 4734–4757.
- [36] VAN ASSELT E D, ARRIZABALAGA-LARRAÑAGA A, FOCKER M, et al. Chemical food safety hazards in circular food systems: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(30): 10319–10331.
- [37] LIU L, HU X, ZHAN Y, et al. China's dietary changes would increase agricultural blue and green water footprint[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 903: 165763.
- [38] 李春保, 印遇龙, 周光宏. 肉类营养与人体健康研究的战略思考[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(2): 190–196.
- LI C B, YIN Y L, ZHOU G H. Perspectives of meat nutrition and human health[J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(2): 190–196.
- [39] TROCI A, RAUSCH P, WASCHINA S, et al. Long-term dietary effects on human gut microbiota composition employing shotgun metagenomics data analysis[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2023, 67(24): 2101098.
- [40] 王琪, 姚剑军, 陈凤香. 膳食营养与人类大健康回顾与展望[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(8): 14–17.
- WANG Q, YAO J J, CHEN F X. Review and prospect of dietary nutrition and human health[J]. *Grains and Fats*, 2023, 36(8): 14–17.
- [41] GONG Z K, WANG H L, TANG J L, et al. Coordinated expression of astaxanthin biosynthesis genes for improved astaxanthin production in *Escherichia coli*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(50): 14917–14927.
- [42] SUN H, WANG J, LI Y, et al. Synthetic biology in microalgae towards fucoxanthin production for pharmacy and nutraceuticals[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2023, 220: 115958.
- [43] LOU-BONAFONTE J M, MARTÍNEZ-BEAMONTE R, SANCLEMENTE T, et al. Current insights into the biological action of squalene[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2018, 62(15): 1800136.
- [44] ZHAO X R, ZHOU J W, DU G C, et al. Recent advances in the microbial synthesis of hemoglobin[J]. *Trends in Biotechnology*, 2021, 39(3): 286–297.
- [45] LV X Q, WU Y K, GONG M Y, et al. Synthetic biology for future food: Research progress and future directions[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100025.
- [46] SHAO C W, SUN S, LIU K Q, et al. The enormous repetitive Antarctic krill genome reveals environmental adaptations and population insights[J]. *Cell*, 2023, 186(6): 1279–1294.
- [47] YANG M, WANG Q, ZHU Y, et al. Cell culture medium cycling in cultured meat: Key factors and potential strategies[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 138: 564–576.
- [48] BEN-ARYE T, LEVENBERG S. Tissue engineering for clean meat production[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2019, 3: 46.
- [49] LEE D Y, LEE S Y, JUNG J W, et al. Review of technology and materials for the development of cultured meat[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(27): 8591–8615.
- [50] DAI W, CHEN Y, XIONG W, et al. Development of a serum-free medium for myoblasts long-term expansion and 3D culture for cell-based meat[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(2): 1–15.

Theory of Green High-quality Processing and Loss Reduction in Livestock and Marine Food

Li Jiao¹, Mao Xiangzhao¹, Jiang Yujun³, Bai Yanhong⁴, Zhou Dayong², Zhang Dequan⁵, Zhu Beiwei^{2*}

¹College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, Shandong

²School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning

³College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030

⁴School of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001

⁵Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193)

Abstract Under the big food concept and the ‘dual carbon’ strategy, it is urgent to promote the green manufacturing and sustainable development of livestock and marine food processing chains. This paper analyzed the research and industrial development status and major national requirements in the field of livestock and marine food in China, and summarized four key fundamental scientific issues that need to be solved urgently in this field, including analyzing the quality deterioration mechanism of livestock and marine food, clarifying the biological basis of its storage, transportation, processing and comprehensive utilization, and establishing the theory and technology of hazardous substances control, quality improvement and nutrition and health in processing, constructing the cell factories for biosynthesis of animal meat and nutrient components. In addition, based on interdisciplinary innovation in food science and technology, this paper also put forward suggestions for future research directions, lay out new formats of low-carbon processing, bio-manufacturing, intelligent manufacturing, cell factory, big data and precision nutrition, establish a new low-carbon green processing and loss reduction technology system, so that livestock and marine food to meet the people’s nutrition, health, safety, delicious, personalized in needs.

Keywords livestock and marine products; green and high-quality processing; key scientific issues; loss reduction and efficiency enhancement