

面向健康与可持续的未来食品：关键技术与发展趋势研究

马云天, 姚馨月, 于清欢, 王欣*, 吕欣*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 本文聚焦面向健康和可持续的未来食品, 系统梳理了驱动未来食品发展的关键技术与创新方向。细胞培养肉、合成生物学与精准发酵、3D 打印及非热杀菌等前沿技术, 为未来食品的健康与可持续的双重目标提供了支撑。在健康层面, 功能性食品、植物基替代品以及低糖、低脂、低盐产品的研究不断深化, 推动精准营养与轻负饮食的实现。在可持续层面, 可再生资源的利用、食品废弃物向高值成分或单细胞蛋白的转化、区块链与物联网驱动的食物浪费减量, 以及生物基绿色活性包装的开发, 共同促进了资源高效利用与环境友好生产。本综述旨在整合相关研究与动态, 助力食品行业向更健康、更可持续的方向转型。

关键词: 未来食品; 前沿技术; 健康; 可持续性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0572

Future Foods for Health and Sustainability: A Study on Key Technologies and Development Trends

MA Yuntian, YAO Xinyue, YU Qinghuan, WANG Xin*, LYU Xin*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This review focuses on future foods for health and sustainability, systematically outlining the key technologies and innovation directions driving the evolution of the food industry. Cutting-edge techniques such as cultured meat, synthetic biology and precision fermentation, three-dimensional (3D) printing, and non-thermal sterilization provide robust support for achieving the dual goals of health and sustainability of future foods. On the health front, research into functional foods, plant-based alternatives, and products with low sugar, low fat, and low salt content has advanced considerably, facilitating the realization of precision nutrition and low-burden diets. Regarding sustainability, the utilization of renewable resources, conversion of food waste into high-value ingredients or single-cell proteins, waste reduction driven by blockchain and the Internet of Things (IoT), and the development of bio-based green active packaging collectively promote resource efficiency and environmentally friendly production. This review aims to integrate relevant research and developments, thereby contributing to the transformation of the food industry toward a healthier and more sustainable future.

Key words: future food; cutting-edge technologies; health; sustainability

如今, 食品行业正处于关键转型期, 未来食品的发展方向受到高度关注。与此同时, 我国食品安全风险成因复杂, 监管流程效率偏低^[1]。在此背景下, 构建可持续、更环保和更健康的食品体系已成为行业发展的必然选择。利用可再生资源生产食品、减少食品生产和消费过程中的废弃物排放, 从而降低对土地、水资源和生物多样性的负面影响, 已成为行业共识。例如, 纤维素等可再生资源可用于食品的生产过程^[2], 这不仅有利于促进食品多元化, 同时也符合可持续发展的理念。此外, 区块链、物联网与大数据等信息技术的应用, 正有效减少食品浪费。

收稿日期: 2026-04-13; 修回日期: 2026-06-29; 接受日期: 2026-06-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2025B04032); 中央引导地方科技发展资金 (2024ZY-JCYJ-02-45); 陕西省重点研发计划项目重点产业创新链项目 (2024NC-ZDCYL-03-10); 陕西省科技创新团队项目 (2024RS-CXTD-75)

作者简介: 马云天 (1999-), 男, 博士研究生, 研究方向: 合成生物学, E-mail: 2995821258@qq.com; 共同第一作者: 姚馨月 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与功能评价, E-mail: 1349356470@qq.com

通讯作者: 王欣 (1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 功能多糖、食品加工副产物资源化利用及食品开发, E-mail: wangxin_2018@nwsuaf.edu.cn; 共同通

讯作者: 吕欣 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 合成生物学, E-mail: xinlu@nwsuaf.edu.cn

近年来，食品领域不断涌现出新的技术。这些技术正逐渐影响着未来食品的发展趋势。例如，消费者能够借助区块链技术追溯食品从农场到餐桌的全过程，这有助于提高消费者对产品的信心，从而推动食品产业的发展。细胞培养肉、3D 打印、人工智能等技术逐渐应用于食品生产与研发，不仅能够提升食品的品质和安全性，还能够创造出全新的食品形态和消费体验。合成生物学与精准发酵技术则为关键功能因子的供应提供了解决途径，从而有助于摆脱对传统动植物提取的依赖，实现低碳、高效、可持续的生产模式。新型食品杀菌技术的应用能为消费者提供保留天然风味的食品，顺应了市场对天然口感的追求。图 1 展示了食品安全现状、关键技术、驱动因素以及未来食品的挑战与机遇。食品安全现状（食品供应、食品污染及消费者需求升级）和多种前沿技术的持续创新，共同推动着未来食品的发展。当前，慢性病流行、蛋白质需求增长、新型食品加工技术的安全性及伦理问题成为未来食品的主要挑战。同时，政策支持、技术创新与市场需求变化为未来食品提供了发展机遇。本文对食品领域出现的一些前沿技术在提高食品营养价值、改善食品风味、保障食品安全和促进食品产业可持续发展方面的应用现状进行综述，旨在梳理当前的研究成果和发展动态。本文从功能食品、植物基食品以及低糖、低脂和低盐食品三个方向探讨了未来食品的发展趋势，为相关领域的研究和实践提供参考，推动食品行业朝着更加健康、可持续的方向迈进。

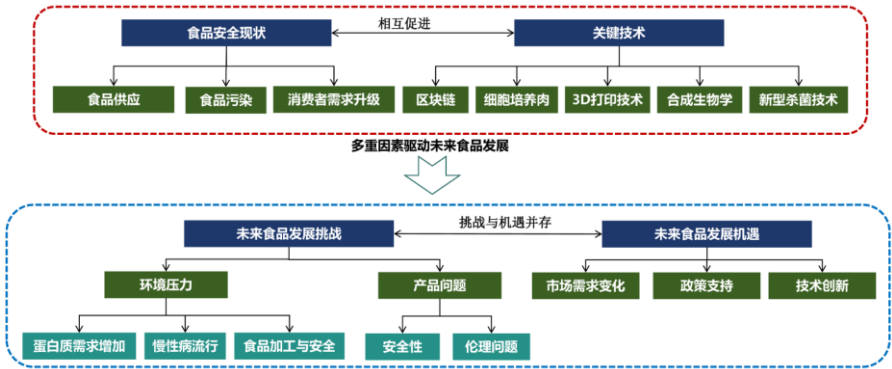


图 1 食品安全现状与关键技术驱动未来食品发展；未来食品发展机遇与挑战并存

Fig.1 Current food safety status and key technologies drive the development of future foods; opportunities and challenges coexist in future food development

1 未来食品发展的背景与驱动因素

1.1 食品安全现状

根据联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations，FAO）的定义，食物安全指任何人在任何时候都可以在物质、社会和经济层面上获得足够、安全和营养的食品，以满足他们的饮食需求和食物偏好，从而过上积极健康生活的一种状态^[3]。当前，极端天气是造成粮食损失的重要原因之一。例如，2023 年 8 月中旬，中国黑龙江水灾造成稻穗沉积淤泥，品质下降^[4]。除了食品供应外，食品还面临着多种污染挑战。沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等常见致病菌都可能引发食源性疾病与食物中毒。微生物检测技术的进步有助于降低食物中毒的发生率。例如，PCR 技术和传统培养法结合应用，可形成优势互补，提升食源性致病菌检测的可靠性与实用性^[5]。不仅如此，恒温扩增技术、基因芯片与生物芯片等新型生物检测技术及高通量检测手段，还能显著提升检测的准确性与效率。除微生物污染外，部分生产者为了改善产品感官特性或延长保质期，存在超范围、超限量使用食品添加剂的行为^[6]。在产品流通环节，因冷链设施不完善、温度控制不当或包装材料不合格，食品易在储运和销售过程中发生变质或二次污染。此外，农业生产与养殖环节的安全意识薄弱，可能导致化肥、农药过度使用，抗生素与激素滥用，进而造成农畜产品中农残、兽药残留超标。与此同时，全氟化合物、微塑料等新型污染物可通过食物链富集，对人体内分泌系统、免疫功能等产生潜在危害^[7,8]。食物安全的内涵涵盖供应与质量双重维度，当前各环节面临从极端天气到微生物、添加剂、残留及新型污染物等多重风险，而检测技术的融合发展为风险防控提供了有力支撑。

1.2 消费需求升级与个性化趋势

随着社会的进步,消费者不仅关注食品的营养成分,还对食品的原材料来源和生产加工方式提出了更高的要求。因此,低脂、低糖和低盐食品,功能食品和植物基食品等市场份额有望继续扩大。其中,功能性食品将不断创新,针对特定健康问题或人群的功能性食品(如具有免疫调节、肠道健康维护等功能的)会更受关注。消费者对于能够根据个人口味、营养需求、生活方式等定制的食品的需求会持续增加。食品企业将更多地提供定制化服务,从产品的成分、口味、包装到食用建议等。现代消费者需求日益多样化、个性化,传统市场调研方法难以满足需求,大数据分析将成为关键手段。通过整合消费数据以预测市场波动、建立实时反馈机制、优化物流路径,并推动大数据与云计算融合,食品企业能够显著提升供应链协同效率与市场响应能力。

1.3 前沿技术驱动的食品产业革新

技术创新正在深刻改变着食品产业的格局,使未来食品朝着更高效、个性化和可持续发展的方向发展。在食品原料层面,基因编辑技术通过对食品原料的基因改造,可精准地提升食品中的营养成分含量或赋予其新的功能特性。例如,利用 CRISPR/Cas9 技术编辑番茄 *SICSN5B* 基因,成功获得高维生素 C 番茄材料,为番茄品质改良提供了新途径^[9]。CRISPR 技术还可用于开发抗病、高产的作物,或低致敏性食品,有助于应对粮食安全挑战和减少过敏性问题。在生产方式上,利用生物工程技术如发酵工程、细胞培养技术等,能够开发出更多高活性、高纯度的功能性成分。通过细胞培养技术生产细胞培养肉等产品,不仅能满足消费者对健康及环保的需求,还可解决传统农业生产面临的资源和环境问题。而在产品流通与消费终端,智能包装技术则为保障食品品质、传递信息提供了关键支持。这是因为智能包装具有多种信息传达功能,能够实时监测食品品质。例如,热致变色材料能够随温度变化而改变颜色^[10]。

2 食品前沿技术

2.1 区块链与溯源技术

区块链技术的应用极大地提升了食品从生产到消费的各个环节的质量与安全保障水平。消费者能够借助该技术追溯食品从农场到餐桌的全过程。王青瑜和陈琴琴提出的食品溯源平台基于智能区块链技术,通过融合物联网数据采集、链上元数据索引与链下分布式存储的协同架构,以及模块化的智能合约设计(包括用户验证、数据存储、交易更新等),实现了食品供应链全流程的自动化、可信化流转。以乳制品供应链为例的实验表明,相比传统 MySQL 集群,该平台将追溯响应时间从 68.2 小时缩短至 8.9 小时,数据篡改风险从 22.1%降至 0.7%,并在共识机制正常条件下保障了节点间 100%数据一致性与 99.9%以上的节点同步成功率,为构建高效、透明、可信的食品溯源体系提供了可行的技术方案与实证依据^[11]。区块链所提供的信息透明度,会通过影响消费态度、感知行为控制和主观规范,进而显著作用于消费者的购买意愿^[12]。而企业的规模、社会责任承诺力度,以及产品层面的品牌叙事、认证资质、咖啡包装上的区块链信息标注等特征,将会影响区块链平台所展示的相关信息^[13]。研究表明,区块链的可追溯性与透明性对感知信息质量和感知系统质量均有积极影响,而这两者又进一步显著提升消费者对有机食品的购买意愿。感知信息质量与感知系统质量之间的契合度越高,消费者的购买意愿就越强;反之,若二者差异较大,购买意愿则会降低^[14]。智能供应链管理在食品行业的应用已取得显著成效,该领域将朝着全链条智能化、个性化定制和绿色供应链等方向持续演进,不断提升食品供应链的效率、透明度与可持续性。

数字化将人工智能、物联网、边缘计算、区块链、数字孪生等现代信息技术应用于农业食品链的各个环节(从生产、加工、运输、销售到消费),以实现系统集成化、可持续性、韧性和透明度。数字化不仅仅是无纸化或自动化,而是通过数据驱动的方式连接所有利益相关者,实现端到端的智能决策和闭环优化^[15]。可追溯性、可持续性以及减少食物浪费,是数字化为食品领域所带来的主要效益。Chen 等^[16](2021)针对农产品供应链中溯源困难与管理效率低下的问题,提出了一套融合区块链与深度强化学习的数字化解决方案。该方案首先构建了基于区块链的农产品供应链溯源框架,借助工作量证明机制实现溯源数据的去中心化存储、防篡改与一致性保障,从而有效提升农产品安全性。随后,设计了深度强化学习驱动的供应链管理方法(DR-SCM),利用深度 Q 网络在复杂动态环境中自主优化生产与储存决策,以最大化利润。仿真实验结果表明,该数字化方案不仅能够可靠实现产品溯源,而且在不同供应链场景下取得的利润均优于启发式方法和 Q-learning 方法,同时表现出更高的适应性与训练效率。该研究为利用数字技术解决农产品供应链中的溯源与管理难题提供了有力的实证支持^[16]。

区块链与数字化技术的融合有效突破了传统食品供应链在溯源效率、数据可信度及信息透明度等方面的瓶颈,显著增强了消费者的购买意愿与信任水平。同时,随着人工智能、物联网等数字技术的综合应用,食品供应链正朝着智能化、个性化及绿色可持续方向演进。

2.2 智能感知技术

电子鼻、电子舌等设备及智能仿生感知技术可用于食品风味识别和评估,从而在食品质量控制、研发等领域发挥作用。例如,多感知检测技术结合 CNN-GRU-Attention 预测模型能够有效地提高鱼肉新鲜度检测的准确性^[17]。采用电子舌和电子鼻技术对红枣酒的滋味和风味进行分析,结果表明,超高压处理组的红枣酒丰度(鲜味的回味)显著高于对照组,传感器 W3C(对氨和芳香族物质灵敏)和 W5C(对烷烃芳香物质灵敏)对超高压处理组的红枣酒响应值显著高于对照组,最终证实了超高压处理有助于改善红枣酒整体的品质^[18]。除电子舌和电子鼻外,一些基于神经影像和脑电图等脑机接口技术可以更加直观地看到消费者潜意识反应。风味感知始于化学刺激在初级味觉皮层、初级嗅觉皮层以及三叉神经通路中的并行编码。这些信号随后在更高阶脑区进行整合,形成一个分布在前脑皮层、边缘系统和皮层下结构的神经回路^[19]。利用脑电图、脑磁图、功能性磁共振成像和脑机接口技术等非侵入性设备,可以将这些信号解码为直观的感官数据^[20],这为智能感官评价和新型人机交互提供了有效途径。消费者的主观感受是决定食品接受度与市场成功的关键,仅靠仪器分析无法完全替代人对风味、口感等感官属性的真实评判。因此智能感知技术还需要结合消费者感官评价。智能感知技术与传统感官评价的有机结合,将成为未来食品风味研究与人机交互发展的重要方向。

2.3 大数据分析 with 人工智能技术

基于大数据与机器学习的智能化方法,正为推动功能活性成分稳态增效递送领域迈向精准、高效的设计新阶段。功能食品中的活性成分常因稳定性差、溶解性低、生物利用度不足而难以发挥作用。例如,虾青素是一种具有良好抗氧化活性的天然类胡萝卜素,但存在疏水性、稳定性差及生物利用度低的问题。脂质基系统、天然聚合物基系统和智能响应型递送系统等多种载体体系已被应用于虾青素的高效递送,提升了虾青素的稳定性、生物利用度及靶向性^[21]。随着大数据技术与机器学习方法的兴起,稳态增效递送体系研究正在经历从“经验驱动”迈向“数据驱动”的范式转型。机器学习可基于组分分子描述符、载体物性参数、工艺条件及体外/体内功能评价等多源数据,构建“组分-载体-工艺-结构-活性”间的非线性映射模型,赋能载体结构的逆向设计、释放行为的多尺度预测及工艺参数的全局最优筛选,显著提高递送体系的构建效率与靶向性能^[22]。

借助大数据分析历史数据和市场趋势,可优化库存管理与需求预测,从而减少积压 and 浪费。大数据在库存管理中实现实时监控、自动补货和滞销品识别,优化库存分配和物流网络,提升供应链效率^[23]。大数据分析不仅有助于提高食品检测效率和准确性,也为食品安全风险评估提供了新的手段,能够更准确地预测和预防风险。研究人员提出了一种基于一阶动力学积分维纳过程的微生物预测建模与风险分析方法,并将其应用于小麦受霉菌和链格孢菌感染的研究。在所测试的场景中,小麦储存期间霉变(即有害真菌)的指数增长与食品安全程度的下降相抵消,并预测了首次超过安全阈值的时间。该方法在模拟食品中微生物危害实际生长过程方面具有可行性,能够提供有价值的微生物预警信息,从而保障食品安全^[24]。大数据分析技术为解决粮食安全和农业可持续性提供了新途径。相较于传统依赖样本调查的产量估计方法,大数据技术利用数据多样性、遥感图像、传感器数据等,提高了粮食产量估计的准确性和及时性。利用传感器、GPS、RFID 等技术,大数据可实时监控粮食物流环节,跟踪货物的位置、状态及温度,从而提升粮食储运安全性,减少损耗和浪费^[25]。此外,大数据和预测分析在提升食品废弃物回收行业企业竞争优势方面具有重要作用,明确影响大数据和预测分析采用的关键因素,将为企业合理运用大数据和预测分析提供依据^[26]。

人工智能在食品领域的应用已从实验室研发延伸至工业化生产,尤其在糖醇和有机酸的生物合成中发挥着显著的变革性作用^[27]。人工智能驱动的酶催化速率与特异性工程(EKAD, AI-driven Enzyme Engineering for Kcat and specificity)是一种集成多种前沿计算工具的人工智能方法,整合了 ESM-2 蛋白质语言模型、基于 DLKcat 模型的双向 Kcat 活性预测,以及 AlphaFold 2 结构建模和分子对接。EKAD 方法可普遍用于通过调控酶特异性来提高有价值的代谢产物的生产。在一项研究中,仅通过一轮 EKAD 即可筛选出可逆酶延胡索酸水合酶的一个单点突变(V365E),该突变显著提高了对琥珀酸合成的特异性。将携带该突变的重组马克斯克鲁维酵母,同时引入来自大

肠杆菌的异源转氢酶,在 37 °C 下发酵 96 小时后,琥珀酸产量达到 103.9 g L⁻¹,是野生型菌株产量的 1 000 倍以上^[28]。人工神经网络(ANN, Artificial Neural Network)和自适应神经模糊推理系统(ANFIS, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)是两种常用于复杂生物过程建模与优化的数据驱动人工智能工具。采用人工神经网络(ANN)和自适应神经模糊推理系统(ANFIS)能够以极高的精度预测产物浓度^[29]。利用这两种人工智能工具对所选刺激物(乙二胺四乙酸(EDTA)、椰子油和氯化钠)在促进柠檬酸生产中的作用进行建模和优化后,柠檬酸最高浓度达到 43.08 g L⁻¹,与未添加刺激物的发酵过程相比提高了 49.1%^[29]。ANN 和 ANFIS 是该研究中实现柠檬酸高效生产的核心工具,精准预测了代谢刺激物对柠檬酸产量的影响,这一方法可推广到其他高价值发酵产品的工艺优化中。

以大数据、机器学习为代表的人工智能技术正在推动食品领域多个维度(包括功能活性成分递送、供应链管理、食品安全风险评估、粮食安全监测以及生物合成与发酵优化)从依赖人工试错转向基于数据决策。这些方法通过构建多源数据间的非线性映射与预测模型,显著提升了设计效率、预测精度及工艺优化水平,为实现精准、高效、智能化的食品研发与生产提供了强有力的技术支撑。

2.4 细胞培养肉技术

细胞培养肉是通过体外培养动物细胞来模拟细胞在体内的生长和分化过程,从而生产出与传统肉制品具有相似营养和感官特性的肉类产品^[30]。细胞培养肉领域的核心难题之一是研发出能够支撑细胞大规模扩增与组织结构化工程的生物材料。最近,一种由海藻酸钠、黑豆分离蛋白与氧化结冷胶复合而成的植物源水凝胶,被用于制备微载体与可打印支架,适用于培养肉相关应用。该水凝胶能支持细胞的黏附、增殖与分化,并且能显著增强成肌活性。以该水凝胶为原料,采用 3D 打印技术制备出的宏尺度晶格支架具有优异的打印适应性、结构保真性与细胞相容性^[30]。另一项研究则通过调控分离乳清蛋白与海藻酸钠二醛间席夫碱键的形成,并通过引入二价阳离子,对海藻酸钠二醛进行二次交联处理制备出了一种水凝胶材料,显著提高了永生化牛卫星细胞的代谢活性与黏附能力^[31]。

细胞培养肉技术的主要优势在于其环境友好性,例如大幅减少土地、水资源消耗及温室气体排放。然而,目前细胞培养肉生产成本高昂,难以完全模拟真实肉类的复杂纹理与风味,且大规模生产系统尚不成熟。此外,严格的监管命名与标签争议也反映出公众对其安全性和自然性的深层疑虑。随着生物反应器、无血清培养基和 3D 组织工程等核心技术的突破,细胞培养肉生产成本正在逐年下降。细胞培养肉有望在高端餐饮和替代蛋白市场中占据一席之地,以应对全球人口增长及气候变化的压力。

2.5 合成生物学与精准发酵技术

合成生物学强调从系统层面对代谢通路、能量网络及调控元件进行模块化构建与整体优化,从而实现高效、稳健、可预测的生物制造体系^[32]。合成生物学技术能够用于生产对人体健康具有重要价值的化合物。据报道,利用 N-乙酰葡萄糖胺途径可高效合成 6'-唾液酸乳糖。通过表达 6'-唾液酸乳糖生物合成关键酶、阻断乳糖降解途径并敲除竞争途径相关基因对菌株进行改造,成功实现了 1.92 g L⁻¹ 的 6'-唾液酸乳糖合成。最后,通过缓解生长与产物合成的代谢冲突,将 6'-唾液酸乳糖的产量提升至 6.21 g L⁻¹^[33]。除 6'-唾液酸乳糖外,乳-N-四糖也是一种重要的人乳寡糖,具有塑造肠道菌群和调控免疫等功能。研究人员构建了 β -半乳糖苷酶活性可调控的菌株文库,从而实现乳糖水解可控性,既能生成葡萄糖和半乳糖用于尿苷二磷酸糖的生物合成,又能保留足量完整乳糖,作为乳-N-四糖组装的底物。经优化后的工程菌株以乳糖为底物,实现了 2.4 g L⁻¹ 乳-N-四糖的合成^[34]。二十二碳六烯酸已证实在免疫调节与慢性病防治中具备临床应用价值,可通过抗炎、调节免疫细胞和改善代谢等途径发挥作用。通过系统筛选 16 个裂殖壶菌的天然启动子,在不损害细胞生长或脂质滴度的前提下驱动基因表达。最终,工程菌株的二十二碳六烯酸产量相比野生型菌株,提高了 6.5%~20.9%^[35]。上述研究表明,合成生物学通过模块化重构代谢通路、敲除竞争基因、阻断底物降解并缓解生长与产物合成的代谢冲突,能够高效合成重要的功能物质。

合成生物学通过设计和改造微生物,使其变成能够高效生产目标物质的细胞工厂,而精准发酵为这些被改造过的微生物提供最佳的生长环境,从而精准地生产出目标物质。精准发酵技术通过发酵工艺优化与下游分离纯化,可以从丰富且廉价的底物中生产食品原料^[36]。例如,精准发酵技术为米胚的高附加值利用提供了可行路径。米胚具有较高的营养价值,但容易发生变质,常被当作废弃物丢弃。据报道,利用乳酸菌精准发酵工艺可将米胚转化

为 γ -氨基丁酸提取物。以短乳杆菌为发酵菌株,对添加谷氨酸钠的酶解米胚进行发酵,在最优工艺条件下, γ -氨基丁酸的转化效率可达 80%,且该提取物具有显著的神经保护作用^[37]。蘑菇种植产业产生了大量的菌柄,含有大量甲壳素,有待开发利用。研究首先采用五步甲壳素酶酶解蘑菇菌柄获取 N-乙酰-D-氨基葡萄糖,随后通过精准发酵技术,利用工程化大肠杆菌菌株,以 N-乙酰-D-氨基葡萄糖为原料制备出了高纯度的甲壳五糖,产量达 0.032 g L^{-1} ^[38]。精准发酵技术能够将农业副产物高效转化为高附加值产品,为农业副产物的高值化转化提供了可行途径。

合成生物学通过对代谢通路、调控元件及能量网络的模块化重构与整体优化,结合精准发酵技术在工艺放大与环境适配方面的协同作用,能够高效合成具有重要功能价值的食品原料及活性成分。合成生物学与精准发酵的深度融合,正推动生物制造体系迈向高效、可控、可持续的发展新阶段。

2.6 食品 3D 打印技术

食品 3D 打印技术将 3D 打印与食品工艺制造相结合,可实现食品形状、质地和营养的个性化设计,适用于特殊饮食需求^[39]。食品 3D 打印机主要采用挤出成型技术,可以将富含营养素的原料制备成具有三维造型的产品,能够满足消费者的审美与营养双重需求。例如,豌豆蛋白与大豆蛋白具备优异的成型性能,以及良好的功能特性和营养价值,被广泛用作食品 3D 打印墨水。此外,通过添加多糖、多酚等其他食品组分,还可进一步改善其打印性能与综合品质,而这些添加成分通常也具有较好的生物活性^[40]。最近,研究人员基于机器视觉的挤出量动态调控装置,开发了挤出速率过程监测与调控软件,并将其应用于食品 3D 打印,与恒定气压打印相比,此设备的挤出过程更加稳定,有效保障了连续打印制品的质量一致性^[41]。

近年来,3D 食品打印技术虽取得显著进展,但仍面临诸多挑战,例如标准化程度有限、安全隐患、打印质量不稳定、材料受限,均阻碍了其规模化应用^[42]。不同材料的打印参数差异较大,建议建立开放式云存储平台以实现打印参数的共享。同时,应制定统一的国际安全标准,未来的监管框架需针对新型食品墨水和复杂打印结构制定相应规范,并推动监管机构、业界与研究者之间的协作^[43]。在消费者接受度方面,部分人群仍存顾虑。为系统考察影响 3D 打印食品购买意愿的关键因素,研究通过网络问卷收集了 542 名 60 岁以上日本居民的有效数据,采用 5 级李克特量表测量购买意愿、环境意识、技术认知、感知有用性、时尚敏感性以及饮食行为与健康意识等变量对购买意愿的影响。综合运用结构方程模型验证假设路径,并基于因子得分进行 K-means 聚类分析。结果表明,结构方程模型拟合良好,且对消费者购买意愿具有较强解释力。环境意识正向影响感知有用性与时尚敏感性,时尚敏感性进而正向影响 3D 打印技术认知,技术认知又正向影响感知有用性,感知有用性最终正向促进购买意愿。饮食行为与健康意识对感知有用性的直接影响不显著,表明老年人日常健康意识并未直接提升其对 3D 打印食品有用性的认知。此外,还发现老年消费者购买意愿受价格与知名厂商影响较大,对口味的关注度相对较低,呈现出对新产品持谨慎态度且更信赖可靠品牌与合理定价的特征。同时,老年消费者较为重视环保,若感知到 3D 打印食品有助于减少食物浪费和促进可持续发展,则更可能接受^[44]。另一项研究将视角转向年轻消费群体,基于计划行为理论(TPB),引入感官吸引力、食物恐新症、感知健康风险和环保友好性四个扩展变量,探究台湾大学生对 3D 打印食品的行为意向。采用滚雪球抽样法,通过电子邮件、社交媒体及个人网络等渠道在线发放问卷。台湾大学生对 3D 打印食品的购买意向主要受环保友好性、感官吸引力、态度和主观规范的正向驱动,同时受到食物恐新症和感知健康风险的负向抑制。感知行为控制的影响未达显著水平,这提示在新技术食品消费情境下,消费者可能更重视外部评价与产品属性本身,而非个体对消费行为的自我控制感。研究者指出,环保意识较高的年轻群体可作为 3D 打印食品在台湾市场的初期目标受众。在推广策略上,应着力提升产品的感官吸引力,使 3D 打印食品在外观、气味和口味上贴近当地传统食品以降低陌生感;同时,提供清晰透明的营养与成分标签,以消除消费者的健康风险顾虑^[45]。

2.7 食品新型杀菌技术

传统热杀菌会在一定程度上破坏食品的营养、色泽和风味。以脉冲电场、低温等离子体和高静压技术等为代表的非热杀菌技术正在从高端、特定品类的食品向更广泛的食品领域扩展。脉冲电场技术是一种冷杀菌技术(图 2),在非热条件下灭活微生物、能更好地保持食品品质并延长贮藏期^[46]。据报道,与热杀菌相比,脉冲电场处理的杏仁浆不仅能使杏仁浆达到商业无菌要求,而且能更好地保留其挥发性风味物质,所得产品粒径显著更小,稳

定性更高^[47]。据报道,脉冲电场对醋酸菌的杀菌效果存在明确的强度阈值(21.64 kV/cm),低于该值效果微弱,超过后细胞抵抗力迅速崩溃,符合电穿孔理论中不可逆微孔形成的特征。在膜损伤层面,扫描电镜观察到细胞皱缩、穿孔乃至裂解,流式细胞术证实膜通透性增加4倍以上。膜脂组成中,总不饱和脂肪酸(主要是油酸C18:1 ω 9)占比由77.12%骤降至67.19%,饱和脂肪酸由22.00%升至31.88%,膜流动性显著下降。这种刚性化并非适应性保护,而是活性氧攻击不饱和脂肪酸双键造成的直接氧化损伤,使膜丧失自我修复能力,使损伤不可逆。伴随膜屏障丧失,离子及核酸、蛋白质大量泄漏,电导率增加41.4%。此外,关键酶乙醇脱氢酶和乙醛脱氢酶的相对活性分别下降80.0%和93.1%,因强电场破坏了维持蛋白质构象的非共价键,导致活性中心不可逆失活。氧化应激与能量崩溃进一步加剧致死:胞内活性氧升至对照的4.25倍,脂质过氧化产物丙二醛含量增加3.30倍;同时ATP急剧下降,能量代谢崩溃既源于离子梯度修复的消耗,也源于呼吸链酶的直接损伤,彻底剥夺了细胞修复的可能。该研究表明脉冲电场处理下的膜物理破裂、酶功能失活、氧化损伤与能量枯竭的协同作用,共同实现了对醋酸菌的快速、不可逆灭活^[48]。

在乳制品生产过程中,由于脉冲处理时间极短(微秒级),体系内不会产生足以断裂共价键的剧烈温升,因此蛋白质等大分子主要经历极化、偶极取向重排等可逆性构象调整,而非遭受不可逆电穿孔或热诱导的变性与聚集。相比传统热处理,脉冲电场处理后的乳清蛋白变性率显著降低^[49]。对于酪蛋白胶束,外加电场可改变其表面电荷分布,引起胶束粒径的可逆性减小及结构松弛,且不影响其天然胶体状态^[49]。在维生素保留方面,脉冲电场在实现有效微生物灭活的前提下,对水溶性维生素几乎无损失。研究表明,维生素B12在脉冲电场处理前后及与原料奶的对比中均未观察到显著性差异^[50]。尤为值得关注的是,脉冲电场能够诱导维生素C的构象转变,促使其从烯醇式向酮式异构体转化,且不破坏维生素C母核结构。自由基清除实验和还原能力测试证实,处理后维生素C的抗氧化性能得到显著增强^[51]。在发酵酒加工中,脉冲电场处理能够显著提高总酚、总黄酮和花青素等有益成分的提取率与含量,同时,脉冲电场可促进酯化反应,提高具有果香特征的乙基丙酸酯和乳酸乙酯产量,并使黄酒中中链及长链脂肪酸乙酯含量达到自然陈化3年的水平^[52]。此外,脉冲电场处理可显著增加甜味和鲜味氨基酸含量、减少苦味氨基酸,从而降低酒体的苦涩感,还能促进高级醇氧化为醛或酸,有效减轻新酒的辛辣刺激风味。然而,该技术的应用效果高度依赖于处理参数的精确优化,过高的电场强度或过长的处理时间可能导致敏感花色苷及部分有机酸在后续储存中发生氧化、裂解或聚合而损失^[52]。因此,在实际应用中需在工艺收益与潜在风险之间建立精细平衡,以确保脉冲电场处理的安全性及有效性。脉冲电场在鱼类加工中通过电穿孔效应显著影响多种成分与工艺过程。在脂质提取方面,脉冲电场可增加细胞膜通透性,促进脂质释放。然而,膜破裂后脂质暴露于氧气及促氧化剂中,可能加速脂质氧化。脉冲电场对脂质氧化的影响呈双向性:低强度场可能通过激活超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)等保护酶系统发挥抗氧化作用,而高强度场则通过促进活性氧(ROS)生成和促氧化剂暴露加速氧化^[53]。此外,脉冲电场可诱导蛋白质部分展开,暴露疏水区域和阳离子基团,同时促进多糖链解聚,从而改善蛋白质-多糖复合物的功能特性^[53]。

低温等离子体处理后的食品周围会产生光子、离子和活性自由基,这些作用离子与微生物表面接触,导致微生物细胞被破坏造成微生物的死亡(图3)^[54]。冷等离子体的杀菌主要依赖活性氧(ROS)与活性氮(RNS)。活性氧包括羟基自由基($\text{OH}\cdot$)、臭氧(O_3)、单线态氧(O_2)和过氧化氢(H_2O_2),它们能氧化膜脂中的不饱和脂肪酸引发链式过氧化反应,同时攻击蛋白质的氨基酸侧链(如含硫基团),导致细胞膜通透性剧增和功能酶失活;活性氮则包括一氧化氮($\text{NO}\cdot$)和二氧化氮($\text{NO}_2\cdot$),它们水解后会生成亚硝酸与硝酸,显著降低局部pH值,从而破坏代谢酶的活性中心。等离子体放电产生的紫外辐射(UV)可直接造成孢子DNA嘧啶二聚化,抑制复制转录^[55]。与传统杀菌技术相比,低温等离子体的处理过程无需添加化学添加剂,没有使用过多的水和能源,符合绿色环保的理念。低温等离子体杀菌兼具微生物控制与风味保留双重优势,可作为延长食品货架期的可行技术方案^[47]。据报道,160 kV/450 s的低温等离子体处理可使预制菜的菌落数在72小时内维持在5 lg CFU/g以下,满足冷链配送的短期流通预制菜产品的微生物安全要求^[56]。与传统高温短时杀菌组相比,低温等离子体处理组的质构保留效果更优,脂质氧化水平降低了32%。低温等离子体处理有效保留了赋予肉香特征的醛类、酮类物质,而高温短时杀菌处理则产生了含硫类异味^[56]。

冷等离子体处理食品时,其产生的活性氧和活性氮物种会与食品中的多种组分发生化学作用。据报道,冷等离子体可诱导氨基酸残基(尤其是含硫氨基酸和芳香族氨基酸)的氧化、羰基化、硝基化以及交联聚合,导致蛋白质结构展开、溶解度降低和功能特性改变^[57]。冷等离子体中的活性物种可攻击不饱和脂肪酸的双键,引发链式

氧化反应，生成初级氧化产物（氢过氧化物）和次级氧化产物（醛、酮、醇等挥发性化合物），从而加速脂质氧化并产生不良风味^[57]。此外，维生素（尤其是抗坏血酸）和多酚类化合物也易被氧化降解或转化，而部分结合态酚类则可能因细胞结构破坏而释放，导致总酚含量出现升高或降低^[57]。这些化学变化最终表现为食品色泽、pH、香气和质地的显著改变，且其影响程度高度依赖于处理参数（气体种类、电压、时间等）和食品基质特性，例如含水丰富的液态食品（乳制品、果汁）反应更为剧烈，而干燥食品（坚果、谷物）则相对稳定^[57]。总体而言，冷等离子体技术在发挥杀菌保鲜作用的同时，也可能引发一系列有益或有害的化学修饰，其最终效果需结合具体应用场景综合评估。

高静压技术利用水或油作为传压介质，在常温或温和加热条件下对食品施加 100~1 000 MPa 的压力，经一定时间处理后不仅可以有效杀灭微生物，还能有效钝化内源性酶，最大限度保持食品的原有品质^[58]。据报道，300 MPa 及以上的高静压处理即可稳定马鹿肉 pH 值并抑制微生物增殖。而 500 MPa 及以上压力处理可将菌落数降至 1 log CFU/g 以下^[59]。非热杀菌技术核心优势在于能够在尽量不破坏食品天然感官与营养属性的前提下，保证食品的安全性。随着技术的不断进步和规模化应用，非热杀菌技术将更广泛地应用于未来食品工业中。脉冲电场、低温等离子体与高静压技术各具优势与适用场景，未来需根据产品特性、产能规模及成本要求进行技术选型，并通过设备改进与工艺优化突破产业化瓶颈，推动其在更广泛食品工业中的应用。

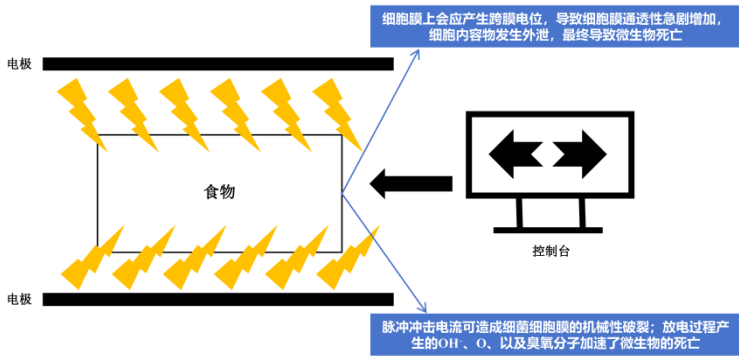


图 2 脉冲电场示意图

Fig.2 Pulse electric field diagram

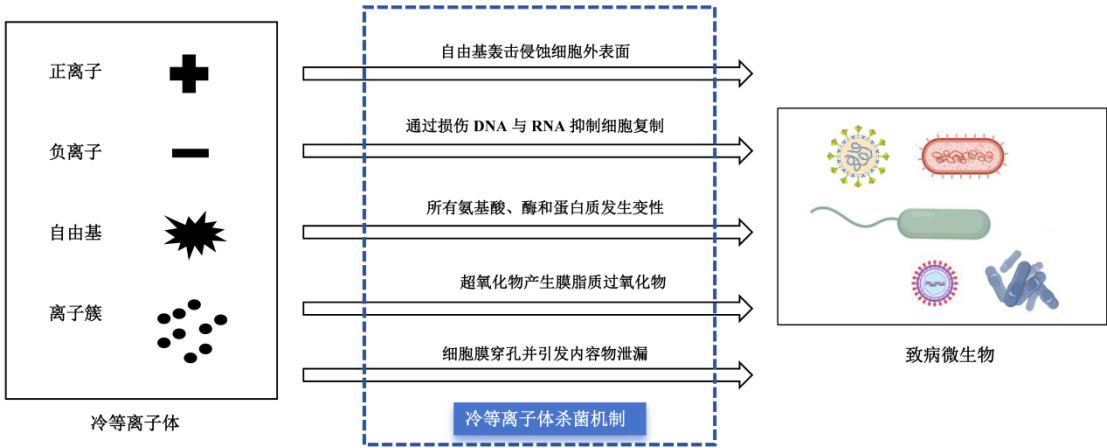


图 3 低温等离子体杀菌原理

Fig.3 Principle of cold plasma sterilization

3 未来食品创新方向

未来食品会用到新原料、新技术，做出更安全、更有营养、符合可持续发展的新一代产品。功能食品、植物基食品、低糖低脂低盐食品等产品，已成为行业未来食品的核心研发方向，以满足全人群精准营养与轻负饮食需

求。

3.1 功能食品

随着肠道微生物与健康关系研究的深入,以调节菌群平衡为核心的功能性食品将持续创新。玉米蛋白活性肽能有效改善胃肠道微生物群的结构组成,促进有益菌增殖,抑制病原菌生长,维持胃肠道微生态平衡,从而可对抗幽门螺杆菌感染^[60]。玉米蛋白活性肽为具有调节肠道菌群功能的功能食品的开发提供了支持。同时,具有增强免疫力功能的食品也将不断升级。这主要归功于研究人员对具有免疫调节活性功能成分的持续探索,同时,关于这些成分如何发挥免疫调节作用的理论基础也在不断完善。研究人员采用酶解结合超滤技术从钝顶节旋藻中制得藻蓝蛋白肽,随后,利用 UPLC-MS/MS 技术从中筛选出六条新型高免疫活性肽,能增强 RAW264.7 细胞免疫功能并促进细胞因子分泌^[61]。在理论基础方面,研究人员系统总结了多糖结构与其免疫调节活性之间的关系,并且从免疫系统调节、免疫调节受体及肠道菌群调控三个层面,系统阐述了天然功能多糖的免疫调节作用机制,这增强了对具有免疫活性多糖的理解,为多糖作为膳食补充剂的开发应用提供理论支持^[62]。

天然功能多糖由于其活性和功能特性将在未来功能食品研发中扮演重要角色。天然功能多糖具有多种生物活性,例如抗氧化、降血脂和免疫调节等。低分子量天然多糖在具有较高生物利用度的同时,还具有优异的降脂活性。例如,通过酶解粗柄羊肚菌多糖获取的低分子量多糖具有较高的抗氧化活性和胰脂肪酶抑制活性。同时,在小鼠模型中,低分子量粗柄羊肚菌多糖能更有效地降低血清和肝脏脂质水平^[63],此研究为粗柄羊肚菌多糖在减肥食品中的应用提供了理论基础。据报道,在环磷酸腺苷诱导的免疫损伤小鼠模型中,血红铆钉菇水提多糖和碱提多糖可分别通过调节乳杆菌科/乳杆菌属介导的植物激素信号转导通路,以及阿克曼菌科/阿克曼菌属介导的赖氨酸降解通路发挥免疫调节作用^[64],这为血红铆钉菇多糖在功能食品领域的开发与应用提供了实验数据。天然功能多糖不仅能作为功能因子,还能用作其他功能因子的运送和保护载体。例如,多糖基纳米载体具有高表面积体积比、表面易修饰、合成简单、载量高、稳定性好、生物安全性高等优点,能保护功能因子,提高其口服生物利用度,为功能性食品开发提供保障^[65]。

3.2 植物基食品

植物基食品原料具有丰富的营养成分。例如常用的大豆,其蛋白质含量高且氨基酸组成平衡,富含生理活性成分,饱和脂肪酸含量低,这些特性有助于降低疾病风险^[66]。植物基食品包括植物基肉制品、植物基乳制品、植物基蛋制品、植物基饮品、植物基烘焙食品等。表 1 总结了近年来研发的植物基食品。植物蛋白、植物碳水化合物和植物油脂可通过发酵技术、挤压加工技术和 3D 打印技术制作成植物基食品(图 4)。发酵技术可有效提升植物基食品的风味。据报道,以大豆分离蛋白和豌豆分离蛋白制作的植物基香肠具备良好的组织结构和加工特性,通过发酵技术显著提升了该植物基香肠的风味^[67]。植物基乳制品如杏仁奶、燕麦奶、豆奶等,为乳糖不耐受者提供了选择。虽然植物基乳制品存在黏度低和稳定性差等问题,但添加黄原胶作为稳定剂有助于提高植物基乳制品的质量^[68]。通过发酵技术制备的植物基酸奶具有适合乳糖不耐受者和素食者饮用的特点,在燕麦发酵乳的研发过程中,研发人员探究了燕麦乳的发酵特性并优化了燕麦乳的发酵配方,为燕麦发酵乳的开发提供了依据^[69]。除了发酵技术,3D 打印技术也可应用于植物基食品的生产。例如,以豌豆分离蛋白、魔芋胶和天然胡萝卜粉为原辅料,进行精准 3D 复合打印,生产出模拟三文鱼色泽与质构的植物基替代物,产品的黏性和弹性与真实三文鱼类似^[70]。此外,利用大豆分离蛋白-大米淀粉复合凝胶模拟鱼肌肉组织,以纳米淀粉-卡拉胶乳液凝胶模拟鱼脂肪组织,再利用双喷头 3D 打印技术还可以生产出高质量的植物基黄花鱼肉^[71]。

将饮食习惯转向植物基替代品,能够对可持续生产及人体健康等问题产生积极影响。然而,消费者对植物基肉制品的消费意愿并不高。在研发植物基产品的过程中,进行感官优化有助于提升消费者接受度。一项针对消费者对植物基金枪鱼与金枪鱼罐头态度的调查发现,粉色和干燥感是金枪鱼样品的特征,对喜好度产生积极影响;而不吸引人的外观、异味、豆类/蔬菜味、苦味、胶状感以及黏牙感则是植物基样品的特征,对喜好度产生负面影响,这说明植物基产品的感官特性在很大程度上左右着消费者的选择^[72]。此外,该研究确定了两个对植物基鱼类替代品喜好程度不同的消费者群体。其中一个群体(占消费者的 27%)对所有植物基样品的喜好度评分显著更高,且植物基类似产品的消费频率也更高,这可能是因为他们购买食品时比另一个群体更注重食品的营养成分与天然性,这表明有关植物基肉制品的知识的普及也将对植物基食品的推广产生积极作用^[62]。另外,较低的价格也有

助于提高植物基肉制品的接受度^[73]。植物基肉制品的模仿加工程度同样会影响消费者的购买意愿。一项针对 607 名瑞士消费者的在线研究表明,在植物基肉制品中,消费者对轻度加工肉类/鱼类(如鸡胸肉、金枪鱼)的感知环境友好度、感知健康度及购买意愿的评价均低于超加工产品(如肉丸、鱼条),这说明对动物源产品的一对一模仿可能对购买意愿产生不利影响^[74]。因此,未来植物基肉制品的研发方向应是对超加工肉制品的模仿,以提高消费者对植物基肉制品的接受度。一项针对植物基蛋白消费认知的研究,以具有人口代表性的 1 002 名荷兰消费者为样本,采用在线实验法深入考察了消费者对植物基蛋白的子分类方式及其引发的推断效应。研究将参与者随机分配至 5 种产品(蘑菇、蘑菇碎、植物基肉碎、混合肉碎、肉碎)与 3 种晚餐情境(蛋白质丰富晚餐、美味晚餐、普通晚餐)组合的组间设计中。结果表明,消费者并未将植物基蛋白视作单一同质类别,而是依据类比性、加工程度、新颖性和植物来源四个维度对其进行多维子分类。这些分类维度会系统性地触发关于价格、口感、便利性、熟悉度、健康及可持续性等方面的差异化推断,进而影响消费态度与购买意愿。在诸多推断因素中,感官吸引力和熟悉度被识别为驱动积极态度与购买意愿的最关键力量。该研究揭示了一个“类比悖论”:高类比性的仿肉制品虽能在健康、口感等方面引发正面推断,但因其同时伴随高加工程度的认知,又会触发负面推断,两者之间形成内在张力。相比之下,便利性、烹饪享受以及不同晚餐情境的调节作用则相对有限。植物基蛋白产品的推广不能仅依赖“仿肉”类比策略,还需在加工形象与感官体验之间寻求精细平衡,为市场细分与沟通设计提供了重要的实证参考^[75]。另一项关于植物基豆浆购买意愿的研究,采用盲测与知情品尝实验相结合的设计,考察了品牌权益与口味感知的交互作用。研究发现,品牌权益对消费者的影响路径因品牌类型而异。当传统乳制品品牌进行跨品类延伸时,其强大的品牌权益不仅能直接提升消费者的购买意愿,还展现出独特的感官迁移效应——消费者在知晓品牌后,对产品“牛奶般”和“奶油香甜”的味觉感知显著增强,这种经由品牌唤起的感官联想间接促进了购买意愿。相较之下,专营植物基品牌的影响力虽同样能正向影响购买意愿,但无法触发“牛奶般”的味觉联想。此外,品牌信息的披露会进一步放大两类品牌权益对购买意愿的驱动效应。上述差异揭示了乳制品品牌延伸的独特优势:凭借与常规乳制品之间高度的感官契合,传统品牌得以调动消费者已有的积极味觉记忆,形成跨越产品类别的认知捷径。而对于植物基专营品牌而言,在难以复刻此类感官联想的情况下,应更着力于凸显健康、可持续等象征性价值,以建立竞争优势^[76]。

植物基食品在营养成分、健康效益及可持续生产方面具有显著优势,已成为未来食品发展的重要方向。发酵、挤压及 3D 打印等加工技术的应用,有效提升了植物基制品的风味、质地与仿生特性。然而,消费者接受度仍受感官品质、价格、加工模仿程度及产品认知等多重因素影响。未来植物基食品的研发需在感官优化与消费心理之间取得平衡,重点发展超加工类型的仿生产品,以提升市场认可度。

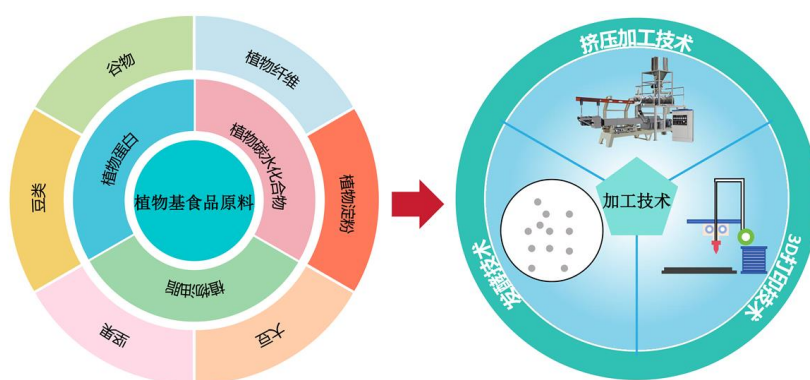


图4 植物基食品原料以及加工技术

Fig.4 Plant-based food raw materials and processing technologies

3.3 低糖、低脂和低盐食品

食源性疾病的多发促使消费者对低糖和低脂食品的需求增加。在降低糖分和脂肪含量的同时,如何保持和提升食品的口感与品质是此类产品研发的重要方向。通过改进加工工艺、优化配方等手段,可以使低糖、低脂食品在口感、风味、质地等方面更接近传统食品。例如,随着健康意识的提升,低糖、低脂巧克力逐渐成为市场首选。低糖、低脂巧克力的研发主要集中在以下两方面:一是采用可可脂包水乳液、油凝胶、水凝胶、多糖及蛋白质作

为部分或完全脂肪替代物；二是使用多元醇、高效甜味剂、低/难消化碳水化合物、甜味蛋白及天然原料来开发无糖巧克力产品^[77]。目前已研发的部分低糖和低脂食品见表 1。

研究表明，长期摄入过量的食盐会显著增加高血压、心脑血管病等慢性疾病的发生风险^[78]。因此，降低食品中的盐分含量，同时保持食品的原有品质、风味和性状是未来食品研发的重要方向。通过工艺优化和原料创新，可以在显著降低产品盐分含量的同时，有效保障甚至提升产品的感官品质、风味特征和安全性。例如，研究人员以东方白虾和紫苏为原料，通过传统制备结合添加曲种协同发酵的方法制备了低盐紫苏虾酱，其中盐分含量为 106 mg/100 g，低于 GB/T 23789-2009 国家标准中对于盐分含量不高于 120 mg/100 g 的要求，且与市场上的产品相比具有高蛋白的特点^[79]。

钾盐及风味增强肽的应用正成为低盐食品研发的重要手段。富钾盐的使用可在不改变消费者用盐习惯的前提下，具有减钠与补钾的双重益处。临床证据表明，使用富钾盐可显著降低卒中和心血管事件发生的风险^[80]。然而，过量使用替代盐会损害食品的感官品质。为此，咸味肽与增咸肽的研发与应用成为极具潜力的减盐技术方向。咸味肽本身能直接引发咸味感知，而增咸肽则通过与 NaCl 协同作用，上调上皮钠通道（ENaC）对 Na⁺的响应频率，使低盐体系呈现高盐等效的咸味强度。二者通过结合咸味受体（ENaC、TRPV1）或钙感受受体（CaSR），触发味觉细胞去极化及神经信号传导，实现直接呈咸或增强咸味感知，从而实现食品减盐^[81]。研究表明，鸡汤来源的 17 种增咸肽可在不额外引入钠离子的前提下增强咸味、提升适口性。其中，增咸肽 TPLVDR 在极低盐浓度（氯化钠 0.1%~0.2%）下即可产生明显增咸效果，当肽浓度为 0.23~0.29 mg·mL⁻¹时，适口性最佳且增咸效果显著。另一增咸肽 AEINKILGN 则适用于中高盐体系（氯化钠 0.3%~0.6%），在其浓度为 1.16 mg·mL⁻¹时，适口性达最大值 5.38，同时保持浓郁咸味与良好风味^[82]。增咸鲜味肽能结合鲜味受体 T1R1/T1R3 的关键位点，产生鲜味-咸味协同效应，放大咸味感知。此外，增咸鲜味肽可促进唾液醛固酮分泌，提高味觉细胞对 Na⁺的敏感性，从而在低盐浓度下诱导出强烈咸味^[83]。以双孢蘑菇蛋白酶解物为原料可制备增咸鲜味肽。最高效的增咸鲜味肽 YDPNDPEK 在 0.4% 浓度下可实现 30% 的减盐幅度而不降低咸味感知^[83]，在未来低盐食品研发中展现出极大的应用潜力。

消费者对健康饮食的追求推动了低糖、低脂、低盐食品的快速发展。通过工艺优化、配方替代及功能性肽的应用，可在显著降低糖、脂、盐含量的同时，有效保障甚至提升食品的感官品质与风味特征。

表 1 低糖、低脂和植物基食品

Table 1 Low-sugar, low-fat, and plant-based foods				
食品类型	食品名称	制作方法	结论	参考文献
低糖食品	低糖即食莲子	以三氯蔗糖替代蔗糖制作低糖即食莲子	低糖即食莲子 GI 值约为 47.58，属于低 GI 食物	[84]
低糖食品	低糖老式蛋糕	采用甜菊糖苷、赤藓糖醇、山梨糖醇 3 种甜味剂以不同的比例进行调配，以代替蔗糖制作低糖老式蛋糕	低糖老式蛋糕 GI 为 30，属于低 GI 食品	[85]
低糖植物基食品	低糖植物基冰淇淋	阿洛酮糖 13.7%、椰浆粉 8%、豌豆分离蛋白 3%、复配稳定剂 0.31%	低糖植物基冰淇淋总糖含量为 1.37%±0.05%，其感官评分为 9.34±0.11，而对照组为 7.42±0.22	[86]
低糖食品	低糖柑橘果酱	减少蔗糖添加量，并添加柑橘纤维用作辅料以改善果酱的品质	添加柑橘纤维的低糖柑橘果酱的屈服应力和稠度系数分别从 1.320、4.244 Pa s 增加至 20.301、14.491 Pa s；最优配方产品能量为 611 kJ/100 g，仅占市售柑橘果酱能量的 60%	[87]
低糖食品	低糖青稞蛋糕	用木糖醇代替蔗糖制备低糖青稞蛋糕	海藻酸丙二醇酯、谷氨酰胺转氨酶和褐藻胶对低糖青稞蛋糕品质综合评分均起到了改良作用，品质综合评分可达 0.987	[88]
低糖食品	低糖香草天使蛋糕	最佳配方为鸡蛋蛋白 110 g，麦芽糖醇 40 g，低筋面粉 60 g，黄油 20 g，玉米淀粉 2 g，白醋 1 g，香草粉 6 g，盐 1 g，烘烤温度 160 ℃	所生产的低糖香草天使蛋糕感官评分达到了 91	[89]
低糖食品	低糖葛根饼干	小麦粉 100 g、起酥油 38 g、葛根全粉 20 g、麦芽糖醇 10~12 g 或纽甜 4 mg、泡打粉 0.8 g、鸡蛋 12 g、食盐 0.7 g、水 7 ml 时，饼干感官品质最佳	与普通饼干相比，1 kg 小麦粉制作的饼干可减少 2 MJ 能量	[90]
低脂食品	酸奶	以接种 2%（m/V）发酵剂的巴氏杀菌乳为原料，分别制备蜂胶提取物和罗勒籽胶，将其添加到牛奶中制成酸奶样品	蜂胶可显著提高样品的抗氧化活性、酚类物质含量及色泽指数，但会降低感官接受度；兰香子胶可显著提升质构与流变特性、酸度、亮度及感官接受度	[91]
低脂食品	低脂蛋黄酱	配制 10%（m/V）酪蛋白溶液并调至 pH 值 11，与蛋黄液复配，得到蛋黄-酪蛋白溶液，随后通过后酸化工艺制备低脂蛋黄酱（油脂含量 30%）	以市售高脂蛋黄酱为参照，10 分制评价色泽、弹性、黏度、可接受性，后酸化组各指标评分均显著高于预酸化组，且蛋黄-酪蛋白复配组后酸化的可接受性评分达 8.09±0.85，与市售产品接近	[92]
低脂食品	低脂切达干酪	采用皮尔逊方法将生牛乳标准化为 0.72%脂肪含量，另添加 0.84%籽胶，均质后加入发酵剂、CaCl ₂ （1.5 mM）、凝乳酶，经凝乳、切割、煮制、盐渍（2.5%）、压榨（550 kPa，18 h）后真空包装，12 ℃成熟 60 天	正常干酪饱和脂肪酸含量为 36.05 g/100 g，低脂切达干酪饱和脂肪酸含量为 17.28 g/100 g	[93]
植物基食品	植物基奶酪	通过将玉米醇溶蛋白（25%）和青稞 β -葡聚糖（10%）等原料混合搅拌、加工成型和后处理制备植物基奶酪	青稞 β -葡聚糖会延长胃排空时间、降低氨基酸和脂肪酸释放率；青稞 β -葡聚糖能显著提高多种短链脂肪酸含量	[94]
植物基食品	功能饮料	将龙爪稷悬浮于蔗糖水溶液中，接种混清魏斯氏菌 2LABPT05 与植物乳杆菌 299 v（接种量 1%，二者体积比 1:1），在摇床培养箱中以 30 ℃、200 转/分钟的条件发酵至体系 pH 值为 4.5~5.0	发酵处理后，该制品的抗糖尿病活性（ α -葡萄糖苷酶抑制率：发酵后 21%；未发酵 14%）和总酚含量（以没食子酸当量计：发酵后 244 mg GAE/kg PBFB；未发酵 181 mg GAE/kg PBFB）显著提高	[95]

植物基食品	豆类凝胶	选用小扁豆、红扁豆和鹰嘴豆全谷物面粉（红扁豆面粉为去皮后的），以及矿泉水、盐、葵花籽油和柠檬汁用于制备凝胶；按配方比例混合所有原料，搅拌 2 min，使其降低；红小扁豆凝胶更硬、更具胶黏性，鹰嘴豆凝胶紧实但硬度较高，小扁豆凝胶呈粗糙沙质感；添加油脂和柠檬汁可降低豆类本味、增强酸味	面粉含量增加会提升豆类凝胶硬度、刚度等质构参数，食盐含量增加则	[96]
植物基食品	植物基肉制品	对牛肉、鸡肉、猪肉三种天然肉类，以及市面四款商用植物基仿肉制品的营养组成与体外消化特性展开了对比分析	天然肉类的蛋白质含量均高于 25 g/100 g，而植物基仿肉制品的蛋白质含量介于 14.1~19.8 g/100 g。植物基仿肉制品的平均钠含量约为天然肉类的 7.9 倍，但其胆固醇含量更低、多不饱和脂肪酸含量更高	[97]
植物基食品	植物基奶酪	最佳配方为 15%木薯淀粉、20%大豆分离蛋白、7%明胶、椰子油与木薯淀粉比例 1:1	植物基干酪蛋白质含量达 170.1 g/kg，显著高于市售植物基干酪；脂肪含量为 114.7 g/kg，低于市售乳源干酪	[98]

4 可持续食品生产

4.1 新型食物资源的开发

将自然界中的可再生资源转化为可食用成分有助于促进食品多元化。纤维素是自然界中最丰富的天然有机高分子聚合物,属于一种可再生资源,可作为脂肪替代品^[99]。例如,由纤维素及单宁酸改性纤维素稳定的皮克林乳液可用于替代猪脂肪。在香肠中使用上述纤维素材料稳定的乳液替代猪背脂后,不仅提高了香肠在贮藏期间的氧化稳定性,还降低了香肠中饱和脂肪酸含量与能量摄入,改善了香肠的营养特性^[100]。细菌纤维素糊也可用作脂肪替代品。据报道,采用 3.0% (m/m) 细菌纤维素糊替代 25%~50% (m/m) 起酥油制备植物基汉堡肉饼,可使最终产品呈现出更好的感官特性^[101]。上述研究表明,纤维素及其改性材料为开发低脂、营养更均衡的肉制品提供了可行途径。

食用昆虫也是一种可持续发展的食物新资源。食用昆虫的养殖较传统畜禽养殖占用更少的土地,具有更高的饲料转化效率却排放更少的温室气体,且部分种类具有转化餐厨垃圾、农业废弃物的能力,能减缓环境与资源压力^[102]。昆虫粉蛋白质含量较高,富含不饱和脂肪酸和矿物质,可作为辅食为特定人群补充营养。研究表明,食用蟋蟀强化辅食不仅与优质谷物辅食在促进婴儿绝对身长增长方面具有相同的效果,还具有更高的年龄别身长 Z 评分,证实了食用蟋蟀蛋白在婴儿生长中的潜在价值^[103]。在食品中添加可食用昆虫粉可增强食品的营养价值。帝王蛾与黑水虻幼虫粉替代部分小麦粉添加到饼干中后,饼干的蛋白质含量明显提高。然而,当昆虫粉添加比例超过 10% 时,饼干的消费者接受度均显著下降,表明小麦粉的昆虫粉替代阈值为 10%,为这类饼干的生产提供了重要的参考价值^[104]。蓖麻蚕蛹蛋白提取物蛋白质含量高达 80.11%,氨基酸组成良好,包含所有必需氨基酸,且在呈味氨基酸含量上表现优异,同时具备出色的起泡和乳化性能,添加蓖麻蚕蛹蛋白提取物的巧克力冰淇淋也具有较高的消费者接受度^[105]。食用蟋蟀、帝王蛾、黑水虻及蓖麻蚕蛹等食用昆虫展现出了良好的营养价值和功能特性,但需注意在传统食品中的替代阈值以保障消费者接受度。以波兰 Z 世代大学生为对象,探究健康关注、环境关注、对含昆虫食品的态度和购买意向与其消费意愿之间的关系,并检验上述因素能否预测消费者对不同产品形态的接受度。通过在线平台对波兰 5 所高校的学生进行问卷调查,共回收有效问卷 950 份。研究发现在直接食用整只昆虫的情境下,健康关注与消费意愿无显著关联。环境关注虽与三种昆虫本体(蟋蟀、黄粉虫、蝗虫)的消费意愿呈显著正相关,但关联强度有限。当产品形态转变为加工食品时,环境关注的解释力则显现出来,在所有含昆虫食品品类中均与消费意愿显著相关。消费者在了解昆虫饲养的环境效益后,接受度会相应提高。尽管环境关注和健康关注在单因素分析中表现出一定影响,但在纳入多因素模型后,态度和购买意向才是更为直接的预测因子。在产品策略层面,受访者对将昆虫作为“隐藏成分”嵌入熟悉食品(如面包、即食餐、零食)的接受度明显高于直接食用整只昆虫,这提示企业在市场导入期宜优先开发“昆虫粉末”或“昆虫蛋白”嵌入传统食品的产品形态,以降低消费者的感官抗拒与心理门槛,循序渐进地培育市场接受度^[106]。

4.2 食品副产物的资源化利用

食品废弃物是制备高价值生物聚合物与生物活性成分的优质原料^[107]。新型萃取技术能够实现多酚和多糖等活性成分的高效提取,这类成分具备抗氧化和抗菌等多种生物活性,可支持功能性食品的研发^[108]。例如,脉冲电场萃取技术提取效率高,且无溶剂废弃物产生。采用该技术从鳄梨籽中提取的活性物质,富含多酚、脂肪酸等多种功能性化合物,所得提取物的抗氧化活性可达 95.56%,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈面积分别为 396 mm² 和 785 mm²^[109]。人工智能模型的应用可精准预测提取工艺的最优参数组合,大幅提升新型提取溶剂与工艺的开发效率。红花籽粕球蛋白组分具有优良的起泡性和乳化性。相关研究结合响应面法(RSM)与人工神经网络-遗传算法(ANN-GA)对其提取工艺开展优化,结果表明,相较于 Box-Behnken 设计方法,ANN-GA 模型的理论得率上限更高,对复杂非线性体系的适配性更强^[110]。

除了从食品废弃物中提取活性成分,还可利用微生物发酵获取微生物蛋白。例如,在最佳工艺条件下,少根根霉菌株可利用米糠获得可观的蛋白质含量(49.5%)^[111]。食品废弃物消化液是单细胞蛋白生产的合适底物。研究表明,添加豆腐黄浆水可提升食品废弃物消化液在微藻单细胞蛋白生产中的利用率,可进一步将生物量浓度提高至 2.7 克/升,所得生物量的蛋白质含量高达 62%,同时培养成本降低了 66%^[112]。利用食品加工废弃物生产单

细胞蛋白, 不仅为食品工业提供高质量的蛋白质, 还能减少可再生资源的浪费和对环境的污染。

4.3 减少食物浪费

近年来, 全球食物浪费量逐渐增加, 不仅制约了经济增长, 还加剧了环境问题。农业生产、采后处理与贮藏, 以及食品加工、流通和消费等全链条环节均会产生食物浪费。食品供应链效率低下以及食品生产过程存在信息缺失是造成食物浪费的主要原因。区块链、物联网与大数据等信息技术的应用, 正有效减少食品供应链中的食物浪费量。区块链技术可追踪食品供应链, 提高透明度, 优化库存管理, 减少因信息不对称导致的浪费。物联网通过传感器和射频识别技术实时监控食品温度、湿度等, 确保运输和储存条件符合要求^[113]。例如, 冷链物流中, IoT设备实时监控温度, 防止食品变质。需要注意的是, 在食品供应链中部署物联网虽然可减少食物浪费, 但也会推高产品价格, 这与消费者价格敏感度、产品属性, 以及零售商的品质营销策略等因素有关^[114]。减少食物浪费技术正在快速发展, 未来将更加智能化和可持续。以菲律宾为研究案例, 从成本、可行性、基础设施需求及实施效能四个维度对人工智能解决方案进行排序, 确定了 Too Good To Go 平台是最具实用性的人工智能方案, 成本最低, 适配资源有限场景。Too Good To Go 技术年成本 3 600 美元, 浪费减少率 40%, 数据准确率 90%。引入 AI 技术后, 50% 的餐厅实现食物浪费显著减少, 整体运营效率提升 46%^[115]。该技术为资源受限地区开展 AI 驱动的食物浪费减量工作提供了可行且高效的实施路径。减少食物浪费技术的推广和应用有助于确保有更多的食物可用于满足人们的基本需求, 减少对自然资源的过度开发和利用, 推动整个社会向可持续方向发展。通过技术创新和模式变革, 全球食物浪费问题有望得到有效控制。

4.4 可持续包装

全球每年塑料包装的产量与消耗量巨大。方便食品包装多采用石油基材料, 其生产、处理过程不仅消耗大量原油, 还会排放温室气体, 且废弃塑料降解时间长, 容易对环境造成不良影响^[116]。环保包装材料能够减少白色污染及对生态环境的破坏, 降低资源消耗与碳足迹, 同时促进可回收材料使用和循环经济发展。生物基食品包装材料因其可被微生物分解转化为无害物质, 能有效减少环境污染和后续处理成本。生物基包材在食品领域的应用逐渐增多。其中, 壳聚糖基材料表现尤为突出。据报道, 壳聚糖基绿色活性复合膜以负载没食子酸的壳聚糖纳米粒为填料, 纳米粒与壳聚糖基体之间通过界面相互作用, 显著提升了复合膜的力学性能与阻隔性能。同时, 引入的载没食子酸纳米粒大幅增强了复合膜的抗菌与抗氧化活性, 能够有效抑制食源性微生物增殖并延缓脂质氧化^[117]。然而, 生物基食品包装材料面临成本高、安全性存疑和消费者认知度不高等问题^[118]。生物基材料成本是传统塑料的 2~3 倍, 且规模化生产设备需改造。此外, 部分可降解材料易在潮湿环境中过早分解, 影响食品货架期^[119]。尽管如此, 随着科技进步和消费者环保意识的提升, 生物基材料仍有望成为食品包装行业的主流选择^[120]。

5 未来食品发展的挑战与机遇

(1) 全球范围内糖尿病、高血压等慢性病的流行, 对未来食品的研发提出了更高要求。因此, 需要提升食品加工技术与安全保障能力, 以提供更健康的产品^[121]。合成生物技术通过改造微生物(如酵母、藻类)生产蛋白质、脂肪或功能性成分, 能提高食品生产效率和质量, 满足精准营养需求, 还可能在免疫调节和慢性病治疗领域发挥作用。合成生物技术在食品领域的应用面临安全、伦理与监管等多重挑战: 基因编辑脱靶、遗传不稳定及基因漂移可能引发生态风险, 消费者对“非自然”食品存疑且长期安全性未明, 同时技术迭代快而法规滞后, 评价体系复杂。针对上述挑战, 可通过强化生物遏制(如营养缺陷型菌株)、完善全链条安全评价(结合基因测序、毒理学与遗传稳定性数据)、加强公众沟通与多方参与, 并加快标准建设、建立菌株安全性数据库, 从而在保障安全的前提下释放其创新潜力。

(2) 生物技术产品可能引入新的过敏原或其他潜在危害, 需要加强长期和全面的安全性研究。未来需建立覆盖全链条的安全性评估体系, 包括对微生物和细胞培养产物进行系统的毒理学和致敏性评价。昆虫体内的抗菌蛋白、抗菌肽和溶菌蛋白等物质, 将在调节免疫、抗菌、抗肿瘤和调节血糖等方面发挥作用^[122]。然而, 食用昆虫在安全性方面存在诸多问题, 涵盖微生物污染、毒素与过敏风险、农药残留等方面, 需要严格把控各个环节, 以保障食用安全^[123]。可采用数字化追溯与检测技术实现从养殖到加工的全流程监控, 并结合快速检测方法控制微生物与农残。同时, 在保障安全的前提下利用其功能成分开发高附加值产品。

(3) 细胞培养肉目前的生产成本相对较高。并且目前大部分培养肉产品由单种细胞和细胞支架构成,成分单一,与传统肉类的质构和风味特征仍存在一定差距^[124]。此外,细胞培养肉在发展过程中还面临多方面伦理问题。细胞培养支架和培养基的安全性尚存疑虑,生物反应器的污染风险也亟待研究解决,这些因素使得细胞培养肉的食品安全仍存在争议^[125]。可通过开发无血清培养基、共培养多细胞类型、结合 3D 生物打印与风味强化工艺,逐步解决成本、结构与风味问题。消费者对身体健康、动物福利及食品质量的日益关注,正推动其接受该类产品作为传统肉类的可持续替代选择^[126]。因此,营销方应重点宣传细胞培养肉在健康、动物福利、食品质量与环保方面的优势。当消费者认识到培养肉具有一定营养功能,且其味道、质构更接近传统肉类时,接受程度会大幅提升^[127]。

(4) 3D 打印技术可实现食品营养配比和形状的定制化,满足特殊饮食需求。多喷头技术可同时使用不同食材,实现营养配比和颜色组合的个性化定制,满足儿童、老年人及特殊人群的多样化需求。3D 打印技术还支持可持续原料(如植物蛋白和细胞培养肉),从而减少传统畜牧业的环境负担^[128]。然而,3D 食品打印设备价格高昂,严重阻碍了该技术的广泛应用。消费者若对 3D 打印食品技术了解不足,可能对其产生疑虑^[129]。未来可将 3D 打印技术与人工智能、机器学习融合,提升精度和效率,并通过规模化生产降低成本。同时加强消费者教育,展示 3D 打印在个性化营养(如儿童、老年人特殊饮食)、可持续原料(植物蛋白、细胞培养肉)等方面的独特价值,从而提高消费者接受度。

(5) 在未来食品的法规与标准制定方面,新型食品原料(如昆虫蛋白)的分类界定、安全性评价方法及质量标准尚未健全;新型加工技术(如 3D 打印食品)的工艺操作规范与产品质量控制标准缺失,生产规范与质量评价体系仍处探索阶段;部分技术创新产品因“无标可依”难以合规上市^[130]。从国际比较看,欧盟、美国和中国在应对未来食品创新方面已形成不同的政策框架与治理逻辑,差异显著。在新型食品原料管理上,欧盟依托《新型食品法规》(Regulation (EU) 2015/2283)建立了集中审批与清单管理机制,昆虫蛋白等明确归入新型食品,须经欧洲食品安全局(EFSA)风险评估并由欧盟委员会授权方可上市,全流程透明但周期较长。美国食品药品监督管理局(FDA)则未设专门的“新型食品”类别,对昆虫蛋白主要依据《联邦食品、药品和化妆品法案》的掺杂与标签条款进行监管,企业可通过“一般认为安全”(GRAS)自行确认或申报,路径相对灵活。我国由国家卫生健康委依据《食品安全法》及《新食品原料安全性审查管理办法》实行审批制,已批准蚕蛹、云实蛀虫等部分昆虫原料作为新食品原料,但整体审批周期长、分类界定偏于保守。3D 打印食品面临更突出的标准真空。欧盟和美国多将其置于现有食品生产法规框架下:欧盟要求 3D 打印食品符合《食品卫生法规》及食品接触材料等相关规定,且如使用新成分仍需走新型食品审批;美国 FDA 则强调生产企业应遵守现行良好生产规范(CGMP)、危害分析与风险预防控制措施,并依据食品设施注册与标签规则运行,技术上倾向于通过发布行业指南填补监管空白。相较之下,我国市场监管总局负责食品生产许可分类,现行目录尚未纳入 3D 打印食品等新兴业态,导致企业在申请食品生产许可证(SC 证)时缺乏对应类别,产品上市困难。为应对上述挑战,可采取以下对策:第一,健全新型食品原料的分类界定与安全性评价标准,加快国家标准立项,完善审查程序;第二,完善相关技术创新产品的标签标识规范与功能声称标准;第三,建立快速标准响应机制以缓解“无标可依”问题,同时积极参与国际标准制定,推动国内外标准对接与互认,构建适应未来食品产业发展的标准治理体系。

6 结论

未来食品的发展面临诸多挑战,同时也充满机遇。随着全球人口增长和饮食结构的变化,对蛋白质等营养物质的需求激增,给食品供应带来了巨大压力。糖尿病、高血压等慢性病在全球范围内的流行,凸显了优化膳食结构和加强食品营养健康研究的重要性。食品加工和安全保障水平有待进一步提高,特别是对于生物技术产品,其可能引入新的过敏原或其他潜在危害,需要开展长期、全面的安全性研究。科学技术的进步深刻改变着食品生产、加工、流通和消费的各个环节,为未来食品的开发提供了技术支撑。合成生物学技术能够改造微生物,高效生产蛋白质、脂肪和功能性成分,满足精准营养需求;3D 打印技术可以定制食品的营养配比和形状,满足特殊饮食需求,且有助于降低食材损耗和减轻传统畜牧业的环境负担。消费者需求的变化,尤其是对健康、创新型食品的旺盛需求,为市场注入了强大的发展动力。为推动食品行业朝着更加健康、可持续的方向发展,满足人们日益多样化的食品需求,科研机构和企业应加大技术研发投入,探索新型食品原料和加工技术,提高食品的品质和安全性。同时,食品企业及相关机构应加强对消费者的科普宣传和教育,提升消费者对未来食品的认知度和信任度。只有通过技术创新、法规完善和消费者教育的协同发力,才能为人们提供更加优质的食品,实现食品行业的可持续发

展。

参考文献

- [1] WU, D, WANG Y. Food safety risk prediction and regulatory strategies based on machine learning: evidence from agricultural products [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2026, 10: 1838879.
- [2] WENG Y, OGUZLU H, YAN P, et al. Nano-cellulose encapsulation for nutrient fortification in food powders: A narrative review [J]. *Powder Technology*, 2026, 480: 122647.
- [3] 谭洪卓,方忠祥,易翠平.可持续发展理念下澳大利亚食品产业现状与未来趋势[J].*粮油食品科技*,2025,33(1):14-24.
- [4] 李姝峣.粮食隐形损失评估及可持续性影响研究[D].长春:吉林大学,2025.
- [5] 李雪艳,魏彩姣,王庄舒,等.多重 PCR 检测技术和传统培养法在食源性致病菌检测中的应用分析[J].*质量与认证*,2025,1:96-98.
- [6] 东雪.食品添加剂滥用的行政监管问题研究[D].石家庄:河北师范大学,2025.
- [7] 姚邓雕.典型全氟化合物及其替代品对斑马鱼胚胎的免疫毒性及机理[D].贵州:贵州大学,2024.
- [8] 程志飞,姚思扬,刘慧娟.微塑料的食源性污染及单独暴露的毒理学效应研究进展[J].*环境与健康杂志*,2026,43(2):182-185.
- [9] 安煊森,王雁伟,田文超,等.基于 CRISPR/Cas9 技术创制高维生素 C 番茄材料[J].*中国生物化学与分子生物学报*,2025,41(3):460-469.
- [10] 陈景华,林晨璐,方应大为,等.热致变色材料的变色机理及其在智能包装中的应用[J].*包装学报*,2024,16(6):81-91.
- [11] 王青瑜,陈琴琴.智能区块链在食品溯源系统的应用研究[J].*食品安全质量检测学报*,2026,17(8):93-105.
- [12] DUONG C D, NGUYEN T H, NGO T V N, et al. Perceived blockchain-related information transparency and organic food purchase intention: an extension of the theory of planned behaviour with the moderation role of blockchain-based trust [J]. *British Food Journal*, 2025, 127(3): 1131-1152.
- [13] SAMOGGIA A, FANTINI A, GHELFI R, et al. The promised potential of blockchain technology for transparency and fairness in agri-food chains: insights from the coffee sector [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2025, 9: 1401735.
- [14] HO B D, DUONG D C, NGO V N T, et al. How blockchain-enabled drivers stimulate consumers' organic food purchase intention: An integrated framework of information systems success model within stimulus-organism-response theory in the context of vietnam [J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2025, 41(13): 8246-8264.
- [15] AMENTAE T K, GEBRESENBET G. Digitalization and future agro-food supply chain management: A literature-based implications [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 12181.
- [16] CHEN H, CHEN Z, LIN F, et al. Zhuang, P. Effective management for blockchain-based agri-food supply chains using deep reinforcement learning [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 36008-36018.
- [17] 袁也,周博,吴泽玮.基于电子鼻和机器视觉的鱼肉新鲜度检测研究[J].*食品与发酵工业*,2024,50(24):313-320.
- [18] 易宗伟,蔡文超,崔梦君,等.超高压处理对红枣酒品质的影响[J].*食品研究与开发*,2025,46(3):62-67.
- [19] YANG T Y, CAO M, QIAN Z Y, et al. Flavor-oriented brain-computer interface (Flavor-BCI): Neural decoding of eating and sensory perception with emerging applications in food evaluation [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2026, 25(2): e70442.
- [20] ANBARASAN R, GOMEZ CARMONA D, MAHENDRAN R. Human taste-perception: Brain computer interface (BCI) and its application as an engineering tool for taste-driven sensory studies [J]. *Food Engineering Reviews*, 2022, 14(3): 408-434.
- [21] 崔馨瑶,苏文涛,宋勋禹.虾青素及其递送系统在疾病预防和功能食品应用中的研究进展[J].*现代食品科技*,2026,42(6):35-46.
- [22] 肖杰,刘俊彬,王玉堂,等.大数据与机器学习赋能功能食品稳态增效递送体系的智能化构建前沿进展[J].*食品科学*,2026,47(3):1-12.
- [23] 袁泽陆.基于大数据分析的食品消费趋势预测与供应链优化策略[J].*产业创新研究*,2025,1:51-53.
- [24] CHEN Q, ZHAO Z, WANG X, et al. Microbiological predictive modeling and risk analysis based on the one-step kinetic integrated Wiener process [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 75: 102912.
- [25] 李红.大数据分析在粮食安全和农业可持续性中的应用[J].*农机使用与维修*,2024,4:115-117.
- [26] NILASHI M, BAABDULLAH A M, ABUMALLOH R A, et al. How can big data and predictive analytics impact the performance and competitive advantage of the food waste and recycling industry? [J] *Annals of Operations Research* 2025, 348 (3): 1649-1690.
- [27] LUAN C, LIU W, YAO Y, et al. Emerging applications of artificial intelligence in microbial-based sugar alcohol and organic acid production: Recent advances [J]. *Food Bioscience*, 2026, 76: 108226.

- [28] ZENG D W, ZHU Y F, JIANG Y H, et al. Establishment of succinic acid production in recombinant *Kluyveromyces marxianus* enhanced by AI-guided enzyme specificity engineering and redox-controlled fermentation optimization [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 523: 168210.
- [29] AMENAGHAWON A N, OMORUYI B O, KENNETH I, et al. Biotechnological conversion of yam peels for enhanced citric acid production: Data-driven machine learning modeling and global sensitivity analysis of the impact of metabolic stimulants [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 191: 116022.
- [30] JEONG D, JANG G, LEE J E, et al. Plant-based hydrogels for microcarrier and scaffold applications in cultivated meat production [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 111907.
- [31] FOLEY C, FLOREANI R A. Impact of whey protein on the physico-mechanical properties of alginate dialdehyde scaffolds and cell adhesion for cultivated meat applications [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 170: 111749.
- [32] 胡苗苗,秦舒放.合成生物学在母乳寡糖合成中的应用及研究进展[J].生物技术通报,2025,41(11):28-34.
- [33] ZHU M X, XIA H Z, XU X H, et al. A novel de novo biosynthetic pathway for efficient synthesis of 6'-sialyllactose in *Escherichia coli* [J]. Acs Synthetic Biology, 2025, 14(10): 4016-4024.
- [34] PALUR D S K, PRESSLEY S R, MCGILL A, et al. Lacto-N-tetraose biosynthesis from lactose via metabolically rewired *Escherichia coli* [J]. Metabolic Engineering, 2026, 94: 182-191.
- [35] YAN C X, ZHENG Y, ZHANG S, et al. Characterization and application of *Schizochytrium* sp. HX-308 promoters for enhanced docosahexaenoic acid biosynthesis [J]. Food Bioscience, 2025, 64: 105948.
- [36] 雒明朔.精准发酵生产功能性食品成分的研究进展[J].中外食品工业,2025,4:102-104.
- [37] HYUN J, RHEU K M, LEE S, et al. Rice GABA®: Valorization of rice germ through lactic acid bacterial precision fermentation for enhanced GABA production and functional properties [J]. LWT, 2025, 229: 118221.
- [38] WINDELS A, DECLERCK L, SNOECK S, et al. Bioconversion of mushroom chitin-rich waste into valuable chitin oligosaccharides using a combined approach of biocatalysis and precision fermentation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(16): 9769-9781.
- [39] 李晓丹,刘颖,李央,等.不同食品原料在3D打印技术中的应用研究进展[J].中国食品学报,2025,25(12):386-396.
- [40] AGHABABAEI F, MCCLEMENTS D. J, PIGNITTER M, et al. Plant protein edible inks: Upgrading from 3D to 4D food printing [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102280.
- [41] LIN L, LIU J W, CHEN X C, et al. Food 3D printing based on machine vision with dynamic control of extrusion to improve print quality [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 106: 104280.
- [42] TIWARI S K, MODI Y K, BARNWAL V K. Recent advances and future perspective in 3D printing of food for industrial applications [J]. Rapid Prototyping Journal, 2025, 32(4): 1007-1022.
- [43] YHRTYTRNEAMAH H A, TANDIO J. Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing [J]. Heliyon, 2024, 10(13): e33882.
- [44] SHIGI R, SEO Y. Acceptance of 3D printed foods among senior consumers in Japan. Food Quality and Preference [J]. 2024, 118: 105213.
- [45] CHANG M Y, HSIA W J, CHEN H S. Breaking conventional eating habits: Perception and acceptance of 3D-printed food among Taiwanese university students [J]. Nutrients. 2024, 16: 1162.
- [46] 高志威,李海天,吴晓龙,等.冷杀菌技术在浆果采后保鲜中应用的研究进展[J].保鲜与加工,2026,26(5):129-141.
- [47] WANG Y, MA S R, LIU J C, et al. Non-thermal preservation of almond pulp: Microbial inactivation dynamics and quality attributes enhanced by pulsed electric field [J]. Journal of Food Engineering, 2026, 407: 112849.
- [48] TENG Y, CHEN B, YAO R, et al. Pulsed electric field inactivation of *Acetobacter aceti*: Mechanisms and efficacy elucidation [J]. Foods. 2025, 14: 4188.
- [49] YAN B, WANG L H, CAI J L, ZHANG X J, et al. Shifting the processing boundary: On-Farm Pulsed Electric Field Intervention (OFPI) for proactive bioburden reduction and functionalization of raw milk [J]. Trends in Food Science & Technology. 2026, 174: 105844.
- [50] CERIBELI C, OTTE J, WALKLING-RIBEIRO M, et al. Impact of non-thermal pasteurization technologies on vitamin B12 content in milk [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2023, 84: 103303.
- [51] ZHANG Z H, ZENG X A, BRENNAN C S, et al. Effects of pulsed electric fields (PEF) on vitamin C and its antioxidant properties [J].

- International Journal of Molecular Sciences. 2015, 16: 24159-24173.
- [52] FENG Y, YANG T, ZHANG Y, et al. Potential applications of pulsed electric field in the fermented wine industry [J]. *Frontiers in Nutrition*. 2022, 9: 1048632.
- [53] PENG B, MA H, XU L, et al. Application, mechanism and future prospect of electric field in fish processing and preservation: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*. 2025, 163: 105212.
- [54] MURTAZA B, WANG L, LI X, et al. Cold plasma: A success road to mycotoxins mitigation and food value edition [J]. *Food Chemistry*, 2024, 445: 138378.
- [55] EZZATI S, AHANGARI H, MOHAMMADIAN M, et al. Cold plasma-mediated inactivation of apore-forming microorganisms: Mechanisms, quality attributes, and efficiency parameters [J]. *Food Science & Nutrition*. 2025, 13: e70429.
- [56] SHI Q H, XIAO Y, ZHOU Y M, et al. Effect of low-temperature plasma sterilization on the quality of pre-prepared tomato-stewed beef brisket during storage: Microorganism, freshness, protein oxidation and flavor characteristics [J]. *Foods*, 2025, 14(7), 1106.
- [57] BAYATI M, LUND M N, TIWARI B K, et al. Chemical and physical changes induced by cold plasma treatment of foods: A critical review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024, 23: e13376.
- [58] 石硕,李清昕,额尔敦巴雅尔,等.高静压技术对鲜切荒漠肉苁蓉品质及苯乙醇苷提取量的影响[J].食品与机械,2025,41(7):137-148.
- [59] ENKHBOLD M, LORINCZ A, ELAYAN M, et al. Effect of high hydrostatic pressure on the quality parameters of wild red deer (*Cervus elaphus*) meat [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2025, 15(8): 4336.
- [60] LI G, XIE Y, WANG Q, et al. Biologically active peptides from corn gluten meal improve microbiota disorders caused by *Helicobacter pylori* infection in mice [J]. *Molecules*, 2025, 30(3): 705.
- [61] ZHAO C, ZHANG T, MA S, et al. Preparation, structure and activity determinations of novel immunomodulatory peptides from *Limnospira platensis* [J]. *Algal Research*, 2025, 90: 104262.
- [62] HUANG Y, ZHANG C, XUE H, et al. Research progress on the structure-activity relationship and action mechanisms of polysaccharides with immunomodulatory activity [J]. *Journal of Functional Foods*, 2025, 134: 107072.
- [63] LI D, MIAO H, LIU R, et al. Enzyme-hydrolyzed polysaccharides from *Morchella importuna*: preparation, structural characterization, and multi-omics of lipid metabolism regulation [J]. *Food Chemistry*, 2026, 517: 149343
- [64] YANG J, LEI K, ZHANG W, et al. Structure-activity relationship of *Chroogomphus rutilus* polysaccharides on gut microbiota mediated immunomodulatory effects [J]. *Food Bioscience*, 2026, 78: 108622.
- [65] 夏明杰,杨立娜,余科金,等.天然多糖基纳米递送载体在功能性食品中的应用[J].中国食品学报,2025,25(1):442-454.
- [66] .徐婧婷,孙艺娇,郭顺堂.植物基食品的科学共识与未来发展思考[J].粮油食品科技,2024,32(4):45-53.
- [67] 宁家文,聂庆,周亚楠,等.植物基香肠中蛋白比例优化及发酵剂对其风味的影响[J].中国食品学报,2024,24(10):327-336.
- [68] 殷莉,王彦勇,慕希芳.黄原胶的生产及在乳制品和植物基乳制品中的应用[J].食品与发酵工业,2025,51(14):433-440.
- [69] 何巧艳.燕麦发酵乳的制备及品质改良研究[D].无锡:江南大学,2024.
- [70] 朱益源,徐恩波,程焕,等.基于高精度 3D 打印的三文鱼植物基替代物研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(11):111-120.
- [71] 利婕.基于高精度 3D 打印的植物基模拟黄花鱼肉组织复合结构研究[D].杭州:浙江大学,2024.
- [72] APPIANI M, CATTANEO C, LAUREATI, M. Plant-based fish analogues vs. fish: Assessment of consumer perception, acceptance, and attitudes [J]. *Food Quality and Preference*, 2025, 123: 105329.
- [73] IMRAN M, & ZHANG L Y. Production of plant-based meat: functionality, limitations and future prospects [J]. *European Food Research and Technology*, 2023, 249(9): 2189-2213.
- [74] GRANATO G, WASSMANN B. To imitate or not to imitate? How consumers perceive animal origin products and plant-based alternatives imitating minimally processed vs ultra-processed food [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 472: 143447.
- [75] VAN DER MEER M, FISCHER A R H, ONWEZEN M C. (M)eat more plants: How category dimensions and inferences shape consumer acceptance of plant-based proteins [J]. *Food Quality and Preference*. 2025, 127: 105434.
- [76] PARMIGGIANI F, CASATI M, CASTELLARI E, et al. Animal-based brands taking the plant-based opportunity: A tasting experiment exploring consumer acceptance of plant-based brand extensions [J]. *Agribusiness*. 2025, 2025: 1-17.
- [77] SELVASEKARAN P, CHIDAMBARAM R. Advances in formulation for the production of low-fat, fat-free, low-sugar, and sugar-free chocolates: An overview of the past decade [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113: 315-334.

- [78] 李晓琨,徐文骁,尚靖雯,等.食品减盐策略研究进展[J]. 食品科学,2025,46(21):362-375.
- [79] 戴国伟,金晓阳.低盐紫苏虾酱制备工艺优化及其挥发性风味物质分析[J].食品工业科技,2024,45(7):227-234.
- [80] KISSOCK K R, GARRETT G S, MKAMBULA P, et al. Switching the world's salt supply—Learning from iodization to achieve Potassium enrichment [J]. *Advances in Nutrition*, 2024, 15(1): 100148.
- [81] LE B, YU B, AMIN M S, et al. Salt taste receptors and associated salty/salt taste-enhancing peptides: A comprehensive review of structure and function [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 129: 657-666.
- [82] ZHANG J, LIANG L, ZHANG L et al. ACE inhibitory activity and salt-reduction properties of umami peptides from chicken soup [J]. *Food Chemistry*, 2023, 425: 136480.
- [83] WANG Z, CHENG Y, MUHOZA B, et al. Discovery of peptides with saltiness-enhancing effects in enzymatic hydrolyzed *Agaricus bisporus* protein and evaluation of their salt-reduction property [J]. *Food Research International*, 2024, 177: 113917.
- [84] 庄洁.低糖即食莲子加工工艺及其品质特性的研究[D].福州:福建农林大学,2024.
- [85] 沈彤,杨莹莹, 张烨,等.低糖老式蛋糕研制及其升糖指数测定[J].科技创新与应用,2023,13(23):80-83.
- [86] 张来在.低糖植物基冰淇淋配方及工艺优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [87] 钟洪浩.低糖柑橘果酱研发及其非酶褐变的通径分析[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [88] 黄益前,张雨薇,郑万琴,等.低糖青稞蛋糕品质复合改良剂配方研发[J].美食研究,2019,36(3):54-59.
- [89] 何清波.低糖香草天使蛋糕生产工艺条件优化[J].农业工程,2018,8(5):69-73.
- [90] 雷镇欧.低糖葛根饼干的研究[J].粮食与饲料工业,2018,2:21-24.
- [91] NOSHADI M, KARAMI M, ARAB M, et al Effect of propolis extracted and basil gum addition on physicochemical, rheological, sensory, and antioxidant properties of low-fat yogurt [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2025, 62(10): 1935-1944.
- [92] BI A Q, ZHU B W, CONG N, et al. Yolk and casein sequence self-assembly for low-oil emulsion gel and its application in low-fat mayonnaise [J]. *Foods*, 2025, 14(1): 36.
- [93] BAZEZEW A M, EMIRE S A, SISAY M T, et al. Application of *Ximenia americana* seed mucilage as a fat substitute to enhance the characteristics of low-fat Cheddar cheese [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2025, 19 (1): 630-643.
- [94] 张晓轩,刘栗君,叶发银,等.青稞 β -葡聚糖/玉米醇溶蛋白植物基奶酪消化及其益生性能体外评价[J].食品与发酵工业,2025,51(19):79-87+95.
- [95] VILA-REAL C, COSTA C, PIMENTA-MARTINS A, et al. Novel fermented plant-based functional beverage: Biological potential and impact on the human gut microbiota [J]. *Foods*, 2025, 14(3): 433.
- [96] MOUSSAOUI D, GONZALEZ M, RIZO A, et al. Mechanical and sensory properties of pulse gels in the development of new plant based food [J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): 9407.
- [97] YANG Y Y, ZHENG Y X, MA W P, et al. Meat and plant-based meat analogs: Nutritional profile and *in vitro* digestion comparison [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 143: 108886.
- [98] FAN M M, WEI T, LU X, et al. Comprehensive quality evaluation of plant-based cheese analogues [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(13): 6595-6604.
- [99] 冯志强,段邓乐,马路凯,等.农产品废弃物中纤维素的提取及其在食品工业中的应用[J].食品安全质量检测学报,2021,12(18):7305-7313.
- [100] PRABSANGOB N, HANGSALAD S, UDOMRATI S. Okra cellulose crystals stabilized Pickering emulsion: A practical tool for soybean oil inclusion to improve nutritive profile of sausages [J]. *Food Chemistry: X*, 2025, 27: 102356.
- [101] LEE J S, HAN J. Exploring the potential of bacterial cellulose paste as a fat replacer for low-fat plant-based hamburger patties [J]. *Food Research International*, 2024, 176: 113832.
- [102] 赵敏,冯颖,陈晓鸣.食用昆虫作为可持续食物资源的前景与挑战[J].中国农业科技导报,2025,27(12):134-147.
- [103] OKEYO N O, WILLE C E, KIIRU S M, et al. Effect of edible cricket enriched complementary porridge and nutrition education on linear growth of children 6-14 months in siaya county, kenya: A randomized 2 x 2 factorial trial [J]. *Maternal and child nutrition*, 2026, 22(1): e70156.
- [104] MSHAYISA V V, VANQA N, KINYURU J. Nutritional, antioxidant, and sensory evaluation of biscuits enriched with *Hermetia illucens* and *Gonimbrasia belina* flours [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2026, 12(1): 111-127.

- [105] SAETAE D. Eri silkworm pupae protein: A novel edible insect ingredient for enhancing ice cream quality and consumer acceptance [J]. *Future Foods*, 2025, 11: 100533.
- [106] PLATTA A, MIKULEC A, RADZYMIŃSKA M, et al. Willingness to consume and purchase food with edible insects among generation Z in Poland [J]. *Foods*, 2024, 13: 2202.
- [107] MASOOD S, SHAHBAZ H M, SHAIK M A S, et al. Strategic valorization of heterogeneous organic wastes for sustainable food packaging: A circular economy approach [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2025, 165: 105353.
- [108] INGALLINA C, SPANO M, PRENCIPE S A, et al. Enhancing human health through nutrient and bioactive compound recovery from agri-food by-products: A decade of progress [J]. *Nutrients* 2025, 17: 2528.
- [109] FAIZAH N, WIDIYASTUTI W, SETYAWAN H, et al. Extraction of antioxidant and antibacterial agents from avocado (*Persea americana*) seed using pulsed electric field method [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119803.
- [110] XIAO K E, WANG Q Y, MENG X Y, et al. Artificial intelligence-assisted optimization of extraction process, characterization, and functional analysis of globulin from safflower seed meal [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2025, 12: 1708593.
- [111] HASSAN F M, NAUREEN A, SARWAR A, et al. Optimization of fermentation parameters for enhanced and low-cost production of single-cell protein from rice polishing using *Rhizopus oligosporus* [J]. *Italian Journal of Food Science*, 2025, 37(4): 219-232.
- [112] PARAKH S K, TONG Y W. Co-utilizing tofu whey with food waste digestate enhances techno-economic feasibility of microalgal single-cell protein production [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 436: 133011.
- [113] AHMADZADEH S, AJMAL T, RAMANATHAN R, et al. Comprehensive review on food waste reduction based on IoT and big data technologies [J]. *Sustainability*, 2023, 15: 3482.
- [114] HASSINI E, BEN-DAYA M, BAHROUN Z. Modeling the impact of IoT technology on food supply chain operations [J]. *Annals of Operations Research*, 2025, 348(3): 1619-1648.
- [115] CEJAS R. Food waste reduction AI technologies in restaurant management: An MS-TORO approach [J]. *Processes* 2025, 13: 2419.
- [116] LEE C, NOH Y, CHO H, et al. Fabrication of insulation spacers for ultra-high voltage gas-insulated switchgear using eco-friendly bio-based epoxy composite material characterisation evaluation [J]. *High Voltage*, 2025, 10(2): 451-457.
- [117] BU Q H, YUE Z F, WANG Z H, et al. Sustainable bio-based active packaging films: Enhancing chitosan with gallic acid-loaded nanoparticles [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2025, 9(6): 1053-1065.
- [118] 高娇娣.“低碳化”——将成未来方便食品包装主旋律[N].中国食品报,2023-07-24(2).
- [119] 刘家欣,梁梦茜,张群利.生物基可降解包装材料在果蔬保鲜中的研究进展[J].包装工程,2025,46(3):10-18.
- [120] 张玲玲.环保型生物基食品包装材料的开发与应用探讨[J].食品安全导刊,2024,30:186-189.
- [121] 刘墨林,陈坚院士:未来食品与生物制造[J].高科技与产业化,2024,30(10):9-10.
- [122] ZIELINSKA E, PANKIEWICZ U. The potential for the use of edible insects in the production of protein supplements for athletes [J]. *Foods*, 2023, 12: 3654.
- [123] 胡爱祥,游帅.食用昆虫研究现状与展望[J].蚕业科学,2024,50(5):469-475.
- [124] 李鑫,彭常安,许月明,等.细胞培养肉技术的研究进展[J].商丘师范学院学报,2024,40(12):59-64.
- [125] 田刘凌,顾成博.细胞培养肉发展的伦理问题与应对策略[J].食品与发酵工业,2023,49(24):338-346.
- [126] FU W, ZHANG H P, WHALEY J E, et al. Do consumers perceive cultivated meat as a sustainable substitute to conventional meat? Assessing the facilitators and inhibitors of cultivated meat acceptance [J]. *Sustainability*, 2023, 15: 11722.
- [127] 张玉珍,王二朋,袁婧.消费者对细胞培养肉接受程度的研究综述[J].食品与发酵工业,2025,51(6):398-404.
- [128] 童强,杨俊豪,肖帅磊,等.多喷头 3D 打印技术在食品加工中的应用研究进展[J].食品工业科技,2025,46(19):492-500.
- [129] RINSHANA P F, MURUGESAN B, KIM Y H, et al. Advances in 3D food printing technology: innovation and applications in the food industry [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2025, 34 (2): 403-421.
- [130] 刘夫国,戴陈霖,张桂育,等.面向可持续与营养健康的未来食品展望[J].食品科学,2026,47(7):1-19.