DOI:10.12441/spyswjs.20260608001 [文章编号] 1673-1689(2026)07-0032-07

# 面向个性化营养的食品3D打印机电系统与智能决策研究

赵 慧[1] 宋海贺[1] 郭永峰[1] 赵 晶[1] 宋士新[2*]

(1. 长春电子科技学院机电工程学院,吉林 长春 130114; 2. 吉林农业大学食品科学与工程学院,吉林 长春 130118)

**摘要:**食品3D打印是增材制造与食品科学深度交叉融合的前沿领域,正逐步由造型制造向个性化营养定制平台方向演进。这一转变的实现,离不开智能机器人、多模态感知、数字孪生与人工智能等机电系统前沿技术的支撑。作者立足于机电系统,阐述了食品3D打印从传统挤出成形向智能集成化机电系统的演变历程,详细梳理了多材料打印、原位烹饪集成、闭环感知控制等关键技术;重点分析了作为整个系统"大脑"的智能决策环节,涵盖个性化营养模型融合、数字孪生驱动工艺优化、人工智能(artificial intelligence, AI)赋能的生成设计等核心内容;总结了该技术产业化过程中面临的挑战,并对人机协同智能营养制造系统的未来发展方向进行了展望。

**关键词:**食品3D打印;个性化营养;机电系统;数字孪生;人工智能

# Food 3D Printing Technology for Personalized Nutrition: Electromechanical Systems and Intelligent Decision-making

*ZHAO Hui*[1] *SONG Haihe*[1] *GUO Yongfeng*[1] *ZHAO Jing*[1] *SONG Shixin*[2*]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130114, China; 2. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** Food 3D printing technology, as a cross-integrated frontier field between additive manufacturing and food science, is evolving from shape manufacturing to a personalized nutrition customization platform. The core driving force of this transition lies in the advanced technologies for electromechanical systems, including intelligent robots, multimodal perception, digital twins, and artificial intelligence. From the perspective of electromechanical systems, the author expounds the evolution process of food 3D printing systems from simple extrusion to intelligent integrated electromechanical systems and the key technologies including multi-material printing, *in-situ* cooking integration, and closed-loop sensing control. It highlights the intelligent decision-making link as the "brain" of the entire system, involving the integration of personalized nutrition models, process optimization driven by digital twins, and generative design enabled by artificial intelligence (AI). Finally, this article summarizes the core challenges faced by industrialization of the technology and makes an outlook on the future development directions of intelligent nutrition manufacturing systems featuring human-machine collaboration.

**Keywords:** food 3D printing; personalized nutrition; electromechanical system; digital twin; artificial intelligence

近年来,个性化营养逐渐受到人们的广泛关注。传统食品工业难以满足吞咽障碍患者、特定代谢疾病人群及极端环境作业人员的膳食需求,在个性化、靶向化营养配餐方面存在明显不足。

**基金项目:**吉林省科技发展计划重点研发项目(20260203100SF);吉林省自然科学基金面上项目(20240101199JC)。

**通信作者:**宋士新(1991—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事食品3D打印、食品胶体与界面化学、食品功能因子载运和利用、生物质基功能膜材料开发与应用研究。E-mail:shixins@jlau.edu.cn

**收稿日期:**2026-06-08 **修回日期:**2026-07-01

食品3D打印是一种新型先进食品加工技术，该技术以计算机辅助设计模型为依据，通过自下而上的逐层堆积方式实现食品成形，在食品定制化、精准化、创新性等方面优势显著，可对食品营养成分、质地特性及外观形态进行精准调控[1-5]。

食品3D打印系统主要由食品墨水材料、成形制造工艺、传感与控制技术组成[6-11]。目前，机电系统是制约食品3D打印从实验室的造型技术转化为可用的营养制造平台的关键因素[12-14]。食品3D打印本质是一种典型的信息物理系统：硬件端依托多轴机械臂、高精度挤出设备及多场协同驱动装置实现食材物料的精准输送；虚拟端结合数字孪生、机器学习等智能技术，建立数据与指令的关联。鉴于现有综述多聚焦于传统食品打印材料和工艺优化，作者从机电系统出发，解析并构筑智能食品3D打印技术体系，梳理其技术迭代的内在逻辑，通过系统总结现有研究成果，明确未来技术突破的核心方向，为推动食品3D打印从实验室基础研究走向产业化应用提供理论支撑。

## 1 基于机电系统的食品3D打印

纵观食品3D打印设备的发展历程，其迭代呈现出从单一功能的开环执行装置，向集感知、判断与执行于一体的综合信息物理系统的升级趋势。

### 1.1 核心打印工艺的机电原理与执行子系统

从机电系统方面分析，食品3D打印的本质是实现数字模型向实体食品的精准转化。支撑这一转化过程的执行子系统，主要包括运动系统、挤出系统与基底系统[15-16]。其中，机电系统研究的重点是挤出系统，其控制精度直接决定打印产品的质量。因此，国内外学者围绕挤出系统的性能优化开展了大量研究[17-21]。Pan等[18]设计了一种新型行环6通道均压夹具，用于解决多喷头打印过程中因流体流动阻力不均导致的挤出同步性差等问题。该设备采用气动挤出模头，采用特殊设计的流道结构以平衡挤出压力，可将多材料协同打印效率提升82.7%。但该项研究仅采用单一控制策略，未考虑物料黏度随时间变化的特性，导致系统自主调节能力较差。为解决物料流变性质波动问题，相关研究逐步聚焦于闭环控制技术。其中Wang等[22]提出的温度-压力双层闭环联用控制系统最具代表性。该系统融合Bang-Bang控制与比例积分微分（proportional-integral-derivative，PID）控制，实现了喷嘴温度的快速精准调节；同时依托自适应模糊PID算法实时优化挤出压力，有效削弱了物料流变性能波动与外部环境干扰对打印精度造成的负面影响，为高黏度食品原料的高精度打印提供了可行方案。该系统的优势在于融合了传统控制方法和机器学习算法，显著提升了整体运行稳定性，标志着食品3D打印挤出过程从固定参数控制转为在线动态优化的新阶段。但该系统仍存在局限性，其在线调控性能高度依赖传感器的检测准确性与程序运算速度，当打印速率较高或材料黏度较低时，可能会出现调控滞后、精度下降等问题。

与连续挤出方法不同，喷墨打印借助压电执行器驱动油墨经超细喷嘴喷射形成液滴，通过精准调控微滴喷射频率与位置制备高分辨率微观结构，分辨率可达70 dpi以上[23]。该技术具备非接触、高精度等优势，但对3D打印油墨流变特性要求严苛，限制了其在高黏度食品原料中的应用。整体而言，当前食品3D打印挤出控制已从单一机械结构控制逐步发展为多传感信息融合的智能动态调控，但如何平衡控制精度、实时响应性与设备成本，仍是制约该技术工业化推广的核心难题。

### 1.2 多材料协同与打印-烹饪集成系统

复杂营养配比与多层次风味的食品制造依赖多材料协同打印，这对机电系统的多料路快速无干扰切换、协同作业能力提出了更高的要求。传统工艺多通过时序控制切换多个独立喷头，普遍存在打印效率低、各打印喷头间易结合不良等问题[24-27]。为解决上述问题，Pan等[28-29]在选择性柔顺装配机械臂（SCARA）打印机中加装换向阀，实现单喷头内2种不同物料的高速切换与协同打印。该技术以流道的机电重构代替了复杂笨重的多喷头机械移动结构，烘焙试验验证了该技术的可行性。但该方法在材料切换过程中仍存在物料混合后精度下降等问题，无法满足高精度空间营养成分分配的加工需求。为进行营养成分的空间数字排布，需发展真正意义上的多物料同步打印技术。基于此，该团队进一步研发了气动式多通道协同打印系统，完成了3种不同黏度食品油墨的同时打印，并将复杂结构食品的打印速率提高了82.7%[18]。该研究在提升打印速率、实现复杂材料组合上取

得了突破，但其对各打印材料的流变特性一致性要求较高，极大限制了其实际应用。

为简化食品3D打印成形到使用的全流程，打印-烹饪一体化技术也逐步得到发展与应用[30-33]。目前该技术有2种方案：第一种是基于激光等精确能量场的局部处理。Blutinger等[31]研发了多波长激光精细烹饪装置，利用红外激光对打印好的食物进行烘烤与切割，在鸡肉加工中实现了理想的表皮焦化效果，较传统烤炉可有效降低食材损失。该方案能够准确控制输入能量、缩小热效应区域，显著改善产品质地与风味。第二种是将能量场和打印紧密结合。有研究者提出采用微波3D打印在鱼糜挤出过程中进行靶向加热，依托食材凝胶成形机理，实现打印与凝胶固化同步，可显著提高产品的成形品质，为有效解决食品3D打印固化问题提供了一条可行的技术路径[34-36]。另外，激光烧结也可实现鱼糜打印及表面凝胶化同步进行[37-39]，通过激光烧结提高鱼糜墨水的凝胶强度及打印精度。这种打印-熟化同步的策略可显著提升打印结构的自支撑性能，解决复杂悬空结构易坍塌的问题[40]。总体而言，2种方案均可实现精准热管理，但热量输入不当易破坏周边结构及热敏性营养物质，同时设备集成结构复杂、成本较高。未来，根据不同食材的营养与质构特性，智能匹配并动态调控集成化烹饪工艺，是该领域的重要研究方向。

### 1.3 基于多模态感知的闭环智能控制

为保障食品物料在流变特性波动下的成形稳定性与产品质量，引入实时感知与闭环控制是实现系统智能化的关键。早期打印监控多依赖成形后的检测，而目前的研究主要聚焦于在线、非接触式的感知调控技术。有关在线视觉感知方面，Ma等[41]提出了基于计算机视觉（computer vision，CV）的前馈闭环控制及在线监测系统。该系统通过高清相机实时采集挤出纤维直径数据并传输至控制器，数据经处理后系统自动调控气压式比例阀开启幅度以改变挤出速率，有效解决了高黏度物料打印过程中堵头、断线等问题。试验结果显示，该计算机视觉控制方案可将挤出精度提升至97.6%，解决了挤出不足问题。该研究的创新在于把机器视觉从传统的事后监测手段升级为预测性闭环控制的输入，但该技术对图像处理算法精度与实时性要求极高，难以适应物料表面反光、背景对比度较低等复杂打印场景。除视觉反馈外，高阶智能控制还需要结合其他信息以及更复杂的控制算法。Tamir等[42]提出将模糊逻辑反馈与打印机数学模型相结合的闭合回路方案，利用模糊逻辑修正即时反馈及模型预估之间的误差，实现实时打印参数动态调整。该方案无需依赖精准的数学模型，对非线性、时变系统适用性较强，是数据驱动与模型驱动融合的尝试；但模糊规则的建立与优化依赖专家经验，未进行泛化处理。

目前食品3D打印智能控制技术从单一反馈控制阶段发展为融合多模态感知与多种算法的综合阶段。然而，高精度、自适应的复杂控制算法依赖高精度传感器、高计算量及多标定数据，与食品3D打印低成本、高可靠性需求相矛盾。因此，开发兼具高性能、鲁棒性与实用性的轻量级智能控制方法，是未来食品3D打印过程中机电控制系统的重要发展方向。

## 2 智能化决策在食品3D打印中的应用

智能化决策层建立在硬件系统之上，是食品3D打印系统的“大脑”，它可依据个性化营养需求，完成经过系列算法与模型生成驱动硬件的动作指令。

### 2.1 个性化营养模型的集成框架

个性化营养以构建用户端的营养画像为基础。系统可结合用户生理参数、健康指标、活动量以及基因信息等多维数据，利用营养学算法计算每日所需的能量及各类营养素摄入量，并在海量的食材数据库内完成自动化配方匹配和计算，并将其转换成可用于3D打印的食谱[43]。

早期研究主要依托计算机辅助设计（computer-aided design，CAD）软件，实现食品形状与结构的数字化控制。Matas-Gil等[44]开发了一套虚拟仪器（virtual instrument，VI）系统，支持用户自主设计食品的主体形态，并支持用户明确表达自身对微量营养素的个性化需求。基于该数字化信息，研究团队设计出含孔隙结构的软糖模型，该模型可精准填充定制化微量营养素。采用淀粉琼脂凝胶在50 ℃下经0.4 mm窄喷嘴开展打印试验，发现该配方打印适配性好，可高精度复现数字模型结构。该方案初步实现了食品形态与营养的耦合

定制，但所用营养模型较为静态，未考虑不同个体对营养素吸收与利用率的差异。为实现营养需求与配方的科学精准匹配，需精准预判营养配方的可打印性。针对食品3D打印中营养配方可打印性预测缺失、试错成本高的问题，有研究者构建了新型配方优化模型[45]。该模型基于多维度特征提取方法，融合高斯过程回归（Gaussian process regression，GPR）算法，并结合补充试验验证，对比分析了GPR模型预测值与试验值间的相对误差。结果显示，该模型对试验数据的拟合效果较好，可有效评估3D打印结构成形质量，分析物料配方与打印设备之间的适配性，为生产具有定制化感官与营养特征的食品提供了技术支撑。该模型可显著减少产品研发阶段的探索性试验次数，在一定程度上打破了食品领域与机电系统的技术隔阂。但该模型对样本数量与数据质量依赖性强，在全新原料配比与未覆盖的加工条件下，预测效果仍需通过试验进一步验证。

综上，食品3D打印个性化营养模型的数字化集成已从早期单一的形态设计阶段发展为数据与算法支撑的配方设计阶段。当前该领域仍存在2个核心问题：一是缺乏涵盖“组成-流变学性质-结构特征-营养价值”的一体化关联数据库；二是需研发融合食品物理化学知识的混合模型，提升预测模型的可解释性与外推能力。

### 2.2 数字孪生驱动的工艺优化与形性预测

数字孪生技术通过构建现实世界实体的高保真虚拟镜像，实现工艺过程的仿真预测与参数优化。在食品3D打印体系中，基于物理机理的数值模拟方法，尤以计算流体力学（computational fluid dynamics，CFD）和有限元法（finite element method，FEM）为代表，是构建数字孪生的基础[46-47]。其中，CFD模拟被广泛用于解析打印过程中的流体力学现象[48-49]。通过建立CFD仿真体系与实际打印系统间的映射关系，可在计算机中复现不同打印条件（如打印速度、温度、路径等）下的整个打印过程，获得材料的挤出流态、层间黏合及变形情况等信息[48]。Guo等[50]采用CFD分析了螺杆型与注射筒型挤出装置的流态差异，发现螺杆型挤出过程中螺旋腔内出现复杂的逆流现象，从机理层面阐释了螺杆型挤出过程中的不稳定性成因。该团队进一步利用CFD模拟了黑米、薏米、绿豆、糙米、荞麦等5种谷物凝胶的挤出过程，预测了各物料的挤出压力，试验结果与仿真趋势大致吻合[51]。该类仿真技术可有效捕捉试验难以观测的内部流动细节，为物料筛选、打印缺陷溯源分析提供了重要支撑。但现有CFD模型大多将食物材料视为均质流体，难以准确反映含颗粒、纤维食品的非均匀性、触变性等复杂流变特性。相较于聚焦流动过程的CFD技术，FEM技术更侧重于分析打印结构的力学响应规律。Oyinloye等[52]利用FEM技术系统探究鱼糜浆料挤出后的膨胀行为、打印样品的残余应力与变形特征，发现喷嘴直径是影响上述力学行为的关键参数。该方法可有效预测食品打印成形及贮存过程中可能面临的结构稳定性风险。整体而言，无论是CFD技术还是FEM技术，其模拟结果与实际生产过程仍存在一定误差，主要归因于材料本构模型的精准度不足，以及对多物理场（如流场、温度场、应力场等）之间的耦合作用的简化处理。

因此，未来食品3D打印数字孪生难以依靠单一机理仿真或单纯数据驱动模型实现高精度预测。食品3D打印核心发展方向应为开发物理信息神经网络（physics-informed neural networks，PINN）等混合建模方法，将已知物理定律嵌入数据驱动的神经网络，依托数据捕捉复杂现象，同时确保仿真过程遵循基本物理规律，以此构建更高效、可靠且可用于实时预测优化的下一代食品3D打印数字孪生系统。

### 2.3 基于AI与智能算法的多目标优化与生成设计

AI可有效解决打印精度、生产效率、营养保留率等多目标优化问题，不仅能够进行事后检测，还可进行在线质量监控。Huang等[53]采用AI图像识别技术监测巧克力打印过程中的形变及缺陷，形状识别率达90%以上。该研究表明，AI可用于在线质量监控环节，但未构建“感知-决策-执行”的闭环智能控制循环。此外，AI改变了个性化食品的设计模式，有效降低了用户的参与门槛。香港科技大学研究团队利用AI和Python并结合文本转图像算法与图像转网格计算方法，通过生成式人工智能创建简化二维图像，实现了食品3D形状打印[54]。该技术无需依赖专业CAD建模，普通用户即可完成个性化设计，显著提升了设备易用性。但该方法中AI生成形状的可加工性无法确定，且

形态设计与营养配方优化相互独立，尚未实现一体化设计。未来AI在食品3D打印领域的应用将呈现两大趋势：一是研发集成化智能系统，实现生成式设计、营养配方优化、工艺参数优化与在线控制的端到端整合优化；二是研发可解释AI技术，提升AI决策的透明度和可信度，实现人机深度协作创新。

## 3 展望

当前，食品3D打印从实验室走向产业化仍面临诸多机电系统层面的挑战。其根本矛盾在于精度、效率、营养品质三者的协同兼顾：高精度、复杂结构的成形通常需要降低打印速度并施加精细的能量场，这不仅与规模化高效生产的需求相冲突，还易造成热敏性营养成分流失。在系统执行层面，食品原料普遍存在非牛顿流体特性，流变性随时间动态变化，制约了打印连续性与产品批次一致性。在模型构建与智能决策层面，现有技术缺乏可精确表征“机械-热-流变”多物理场耦合的高保真模型，导致数字孪生的预测精度有限；同时，营养设计、工艺仿真与硬件控制尚未形成统一的数据体系与行业标准，阻碍了端到端智能化解决方案的集成与规模化应用。

针对上述挑战，未来食品3D打印的突破需要机电系统与人工智能、材料科学的深度融合。第一，发展跨尺度智能营养定制技术，实现从宏观结构到微观营养素分布的同步精准控制及营养素释放的程序化调控；第二，推进智能材料与4D打印技术研发，开发具备刺激响应特性的新型食品油墨，使打印食品能在特定触发条件下自主实现形变、变色或风味释放，实现食品动态特性与交互体验的融合；第三，全面提升装置智能化水平，研发兼具多模态传感和自适应控制算法的新一代打印设备，实现媲美人工主厨的实时监控与动态调控能力；第四，推动行业协同共建，搭建“需求-设计-仿真-制造-反馈”全流程的标准数字平台，构建完整技术生态链，为面向消费者的营养定制化制造服务奠定基础。

食品3D打印是实现个性化营养供给的新型技术，而机电系统作为智能装备、感知控制、数字孪生、人工智能等技术的融合载体，是推动食品3D打印从概念阶段向实用阶段转变的关键。作者从机电技术和智能化角度出发，系统梳理了食品3D打印的关键技术及发展现状。综上，食品3D打印技术在保证系统稳定性、提升建模准确性及统一行业标准等方面还需进一步研究。随着相关技术的持续突破，食品3D打印有望突破现有技术壁垒，构建面向用户的个性化人机融合智慧营养制造模式，推动精准营养技术的推广应用。

## 参考文献


[1] Liu Z B，Zhang M，Bhandari B，et al. 3D printing：printing precision and application in food sector[J]. Trends in Food Science & Technology，2017，69：83-94.

[2] 童强，杨俊豪，肖帅磊，等. 3D打印技术在特医食品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技，2026，47(5)：494-503. Tong Q，Yang J H，Xiao S L，et al. Research progress on the application of 3D printing technology in special medical foods[J]. Science and Technology of Food Industry，2026，47(5)：494-503.(in Chinese)

[3] Wu R N，Jiang J H，An F Y，et al. Research progress of 3D printing technology in functional food，powering the future of food[J]. Trends in Food Science & Technology，2024，149：104545.

[4] Feng M，Zhang M，Bhandari B. Innovations in 3D printing of food for special medical purposes：potential applications of 4D/5D printing technology[J]. Current Opinion in Biotechnology，2025，94：103318.

[5] Teng X X，Li C L，Mujumdar A S，et al. Progress in extrusion-based food printing technology for enhanced printability and printing efficiency of typical personalized foods：a review[J]. Foods，2022，11(24)：4111.

[6] Seol J，Kim J，Hong Y，et al. Toward intelligent 3D food printing：a review on the perspective of materials，fabrication，monitoring，and control[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2026，66(5)：1012-1043.

[7] Ma Y Z，Zhang L. Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods：a mini review[J]. Current Opinion in Food Science，2022，44：100803.

[8] Wang Y F，McClements D J，Bai C J，et al. Application of proteins in edible inks for 3D food printing：a review[J]. Trends in Food Science & Technology，2024，153：104691.

[9] Zhang C，Wang C S，Therriault D，et al. Development of aqueous protein/polysaccharide mixture-based inks for 3D printing towards food applications[J]. Food Hydrocolloids，2022，131：107742.

[10] 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.

[11] Wang M S，Li D N，Zang Z H，et al. 3D food printing：applications of plant-based materials in extrusion-based food printing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2022，62(26)：7184-7198.

[12] Wolstrup A F，Spangenberg J，Yamamoto A，et al. Advances in 3D printed electromechanical sensors：performance comparison，trends，and future directions[J]. Additive Manufacturing，2025，106：104799.

[13] 王玉，李思齐，张宇辰，等. 基于机械臂的多向3D打印系统[J]. 机电工程技术，2024，53(2)：137-141.
Wang Y，Li S Q，Zhang Y C，et al. Robotic-based multi-directional 3D printing system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology，2024，53(2)：137-141.(in Chinese)

[14] 安嘉强，汤晓华，吴婧，等. 奶油蛋糕远程3D打印机器人数控协同机电系统设计[J]. 食品与机械，2019，35(5)：123-126，143.
An J Q，Tang X H，Wu J，et al. Design of robot NC cooperative electromechanical system for remote 3D cake printer[J]. Food & Machinery，2019，35(5)：123-126，143.(in Chinese)

[15] Umeda T，Kozu H，Kobayashi I. Analysis of pumpkin paste printability for screw-based 3D food printer[J]. Food and Bioprocess Technology，2024，17(1)：188-204.

[16] Neamah H A，Tandio J. Towards the development of foods 3D printer：trends and technologies for foods printing[J]. Heliyon，2024，10(13)：e33882.

[17] Tezel T，Kovan V. Determination of optimum production parameters for 3D printers based on nozzle diameter[J]. Rapid Prototyping Journal，2022，28(1)：185-194.

[18] Pan J F，Chen X C，Liu J Y，et al. Scalability potential of a pneumatic extrusion-based 3D printing system for food products [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2025，106：104257.

[19] 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.
Tong Q，Yang J H，Xiao S L，et al. Research progress on the application of multi-nozzle 3D printing technology in food processing[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(19)：492-500.(in Chinese)

[20] Ji C，Cha A，Shin D. Design of viscosity and nozzle path using food 3D printer and pneumatic pressure syringe-type dispensing system[J]. Applied Sciences，2023，13(22)：12234.

[21] Wilms P，Daffner K，Kern C，et al. Formulation engineering of food systems for 3D-printing applications：a review[J]. Food Research International，2021，148：110585.

[22] Wang J H，Cao H，Shen J N，et al. Research on optimizing forming accuracy in food 3D printing based on temperature-pressure dual closed-loop control [J]. Micromachines，2025，16(10)：1156.

[23] Guo Y，Patanwala H S，Bognet B，et al. Inkjet and inkjet-based 3D printing：connecting fluid properties and printing performance [J]. Rapid Prototyping Journal，2017，23(3)：562-576.

[24] Brown N C，Ames D C，Mueller J. Multimaterial extrusion 3D printing printheads [J]. Nature Reviews Materials，2025，10(11)：807-825.

[25] Tang T T，Zhang M，Bhandari B，et al. Personalized transformation of 3D printing for traditional multi-material food with stuffing：a review [J]. Food Bioscience，2024，59：104112.

[26] Wang Y，Ge Z Y，Li L，et al. Multimaterial 3D printing of plant protein-based material [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2025，100：103901.

[27] Fujiwara K，Suzuki Y，Toba K，et al. Multifunctional 3D food printer with quad-screw nozzle for four-color printing and dual ink mixing [J]. Journal of Food Engineering，2025，388：112384.

[28] Pan J F，Chen X C，Zhu Y L，et al. Design and development of dual-extruder food 3D printer based on selective compliance assembly robot arm and printing of various inks[J]. Journal of Food Engineering，2024，370：111973.

[29] Pan J F，Chen X C，Tian H，et al. An innovative approach for multi-colored 3D printed food：assembling a reversal valve to a selective compliance assembly robot arm 3D printer[J]. Journal of Food Process Engineering，2025，48(4)：e70117.

[30] Tong Q，Yang J，Jiang Y，et al. Research on real-time cooking of 3D-printed silver carp surimi using $CO_2$ laser [J]. Journal of Food Process Engineering，2026，49(3)：e70406.

[31] Blutinger J D，Tsai A，Storvick E，et al. Precision cooking for printed foods *via* multiwavelength lasers[J]. npj Science of Food，2021，5：24.

[32] Hertafeld E，Zhang C，Jin Z Y，et al. Multi-material three-dimensional food printing with simultaneous infrared cooking[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing，2019，6(1)：13-19.

[33] Schillaci E，Gràcia A，Capellas M，et al. Numerical modeling and experimental validation of meat burgers and vegetarian patties cooking process with an innovative IR

laser system[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022,45(9):e14097.

[34] Zhao Z L, Wang Q, Yan B W, et al. Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67:102546.

[35] Yu X F, Zhao Z L, Zhang N N, et al. Effects of preheating-induced denaturation treatments on the printability and instant curing property of soy protein during microwave 3D printing[J]. Food Chemistry, 2022,397:133682.

[36] Xiong Y, Zhao Z L, Zhang N N, et al. A novel method for high-temperature microwave 3D printing of golden thread surimi: combination of thermally reversible gelatin and κ-carrageenan[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 161:110856.

[37] Tong Q, Jiang Y, Xiao S L, et al. Research on improving the structural stability of surimi 3D printing through laser cooking techniques[J]. Journal of Food Engineering, 2024,375:112075.

[38] Tong Q, Xiao S L, Bi Y, et al. Laser-assisted 3D printing for localized coagulation of minced shrimp[J]. Journal of Food Engineering, 2026, 404:112761.

[39] Fujiwara K, Igeta Y, Toba K, et al. Laser cook fusion: layer-specific gelation in 3D food printing *via* blue laser irradiation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(7):6265-6281.

[40] Tsubaki S, Ide A, Slocombe D R, et al. Radiofrequency and microwave 3D bioprinting of emulsion gel for dysphagia diets[J]. Scientific Reports, 2025, 15:25023.

[41] Ma Y Z, Potappel J, Chauhan A, et al. Improving 3D food printing performance using computer vision and feedforward nozzle motion control[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 339:111277.

[42] Tamir T S, Xiong G, Fang Q H, et al. Machine-learning-based monitoring and optimization of processing parameters in 3D printing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2023, 36(9):1362-1378.

[43] Zoran A, Gonzalez E A, Mizrahi A B, et al. Cooking with computers: the vision of digital gastronomy[M]//Galanakis C M. Gastronomy and Food Science. Amsterdam: Elsevier, 2021:35-53.

[44] Matas-Gil A, Derossi A, Martínez-Monzó J, et al. 3D-printed gummies with programmable internal voids as delivery systems for customized amounts of micronutrients[J]. Journal of Food Engineering, 2025, 388:112371.

[45] Maldonado-Rosas R, Alfaro-Ponce M, Cuan-Urquizo E, et al. Printability prediction of food formulations for 3D printing using a Gaussian process regression model[J]. Journal of Food Engineering, 2025, 395:112534.

[46] Wang Z Y, Xie F, Wang Z Y, et al. Digital twin-driven sorting system for 3D printing farm[J]. Applied Sciences, 2025, 15(18):10222.

[47] Nunez M, Charles P E, Berlioz S, et al. Multiscale characterization of an *in-situ* foamed 3D printed lightweight structure for the design of a complex digital twin[J]. Results in Engineering, 2025, 26:105661.

[48] Kadival A, Kour M, Meena D, et al. Extrusion-based 3D food printing: printability assessment and improvement techniques[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(5):987-1008.

[49] Nikolaou E N, Apostolidis E, Nikolidaki E K, et al. The development and optimization of extrusion-based 3D food printing inks using composite starch gels enriched with various proteins and hydrocolloids[J]. Gels, 2025, 11(8):574.

[50] Guo C F, Zhang M, Bhandari B. A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162(C):397-404.

[51] Guo C F, Zhang M, Devahastin S. 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 286:110113.

[52] Oyinloye T M, Yoon W B. Investigation of flow field, die swelling, and residual stress in 3D printing of surimi paste using the finite element method[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78:103008.

[53] Huang J H R, Lim G C W, Su C H, et al. Utilizing artificial-intelligence image recognition systems to assist in the quality control analysis of 3D printing chocolate appearance and styling after oleogel adding[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 62(10):1945-1956.

[54] Lee C K W, Xu Y, Yuan Q, et al. Advanced 3D food printing with simultaneous cooking and generative AI design[J]. Advanced Materials, 2025, 37(13): 2408282.