

• 科学论坛 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025.04.08.0003

食品化工核心技术的科学问题

李兆丰^{2,4} 孔昊存⁴ 田一雄² 夏路¹ 陈坚^{1,3,4*}

1. 江南大学 未来食品科学中心,无锡 214122

2. 江南大学 食品学院,无锡 214122

3. 江南大学 生物工程学院,无锡 214122

4. 江苏集萃未来食品技术研究所,宜兴 214200

[摘要] 化学工程学的理论体系与技术方法正深度融入食品工业,成为推动产业升级与可持续发展的重要引擎。在此背景下,本文系统阐释了食品化工的科学内涵,即通过化学工程原理与食品科学的交叉融合,实现食品组分定向转化、加工过程精准调控及产品品质全面提升。针对当前食品化工领域的关键技术难题与科学问题,分析了基础前沿和国家重大需求,最后提出了食品化工方向未来可探究的重要科学问题,以期为保障国家粮食安全与实现碳中和目标提供科学支撑。

[关键词] 食品化工;关键科学问题;学科交叉;基础研究

中国的食品工业是全球第一大食品产业,在我国现代工业体系中占有首要位置。中国食品工业协会数据显示,2024年1—8月,全国规模以上食品工业企业实现工业增加值同比增长4.0%,利润总额3 841.6亿元,同比增长11.7%,农副食品加工业、食品制造业、酒、饮料和精制茶制造业利润总额增长幅度位居前列。食品工业是国民经济发展的有力支撑^[1],作为连接农业资源市场化与服务居民美好膳食需求的重要产业,食品工业在保障民生、拉动内需、扩大国际影响力、带动相关产业和脱贫攻坚、构建我国内外双循环新发展格局和人类命运共同体等方面作出了巨大贡献,是名副其实的国民经济支柱产业。

我国食品加工制造产业在经历了以满足量的需要为主要特征的食品安全保障阶段后,进入了以满足质的需要为主要特征的营养健康食品制造新时代以及科技高投入、高产出、高收益阶段,食品制造规模化、集约化、智能化、绿色化发展水平明显提升。但从整体看,我国食品产业整体科技水平和高端制造能力不高,对外依存度比较高,仍属于发展和转型中产业,食品产业转型升级

级和高质量发展迫切需要科技创新。

解决当前及未来阶段关键核心技术的“卡脖子”问题,提升产业整体技术水平,推动食品生产方式的根本转变,需要突破食品加工核心技术及其背后的关键科学问题。食品化工是融合化学、工程学、生物学与食品科学,以解析食品成分转化规律、优化加工工艺为核心,服务食品原料增值、生产高效化及产品功能化的交叉领域;它是现代食品工业实现从传统经验生产向科学精准生产转型的核心支撑,既保障食品高效稳定供给与安全质控,又推动原料全价值链开发及功能食品创新,助力产业绿色化与高质量发展。基于此,本文在总结传统化工学科特色的基础上,围绕食品化工的科学内涵和边界进行了深入探讨,聚焦食品化工核心技术和关键科学问题,从基础前沿、国家重大需求等方面开展深入研讨分析,初步总结了我国食品化工的瓶颈技术问题和关键科学问题,指出未来食品化工的重要研究方向。

1 食品化工的科学内涵与技术难题

化学工程学是研究原料的组成、能量或物态发生变

收稿日期:2025-04-08; 修回日期:2025-09-11

* 通信作者,Email:jchen@jiangnan.edu.cn

引用格式: 李兆丰,孔昊存,田一雄,等. 食品化工核心技术的科学问题. 中国科学基金,2025,39(5):799–806.

Li ZF, Kong HC, Tian YX, et al. Key scientific issues in the core technologies of food chemical engineering. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(5): 799–806. (in Chinese)

化的过程和方法,以及所得到的产品及其用途的工程学,通俗的表达就是基于实验室内方法,以工业规模连续方式生产的过程。核心内涵是揭示物质转化过程中质量传递、能量传递、动量传递以及分离和反应之间的内在关系,创建高效、清洁、节能、安全、经济的物质转化工艺和相关系统^[2]。化学工程学科经过百年发展,初步形成了以化学、物理学、数学和生物学基本原理和方法为基础,以传递过程原理与化学反应工程为核心的学科体系,为解决学科复杂工程问题奠定了坚实的理论基础^[3,4]。

食品是由化学物质构成的,化学是食品科学的重要科学基础。化工技术在食品的生产、加工、贮运等过程中的使用历史悠久,从食品组分生产到合理膳食的规划和功能性食品的开发,从农残和添加剂检测到食品储运等,本质上都涉及化工问题^[5,6]。实践经验表明,食品行业的发展需要对食品原料及配料在加工制造和储藏过程中出现的化学化工问题进行深入探究和解决,才能有效保障食品安全,提升食品品质、增加食品种类、增强食品功能,进而满足消费者日益增长的需求,提升广大人民群众的生活质量和健康水平。

1.1 食品化工

食品加工科学化的一个重要表现就是化工单元操作的引入和运用,现代化工单元操作被引入食品加工领域后,促进食品工业迅速向大规模、连续化和自动化发展^[7]。食品化工主要研究食品营养成分的化学组成及其性质表征、食品的质量安全及其检测、食品的工程设计与研发、食品的加工储藏与运输、食品的品质管理与监督等涉及食品全产业链的问题,是衔接食品科学与化学工程科学之间的重要桥梁,是食品科学与工程学科的重要组成部分(图1)。

食品化工技术推动了食品原料和配料的规模化生产,有助于现代食品工业的发展,如淀粉、油脂、蛋白质、甜菜红素、阿拉伯胶等食品组分的规模化提取工艺均依据化工原理设计^[8-10]。与传统石油化工相比,食品加工条件相对温和,且生产体系具有跨介质、多尺度、非均相的典型特点,“三传一反”在食品化工中更复杂。例如,食品在加工过程中,传质传热会对组分变化产生影响,进而影响产品品质和安全,但目前相关模型和理论仍不完善,难以精准预测食品加工的传质传热过程及其对产品质量安全的影响^[11]。同时,食品储运过程中也存在大量化工问题,如美拉德反应、酯化反应等,这些化学反应过程会显著影响食品的安全和风味品质^[12]。当前,食品安全形势的持续改善为技术创新提供了有利契机,通过化工技术手段对食品未知掺假物进行系统性筛查,对潜在危害物进行高效甄别,并建立特征标志物的识别体系,已成为实现食品风险因子精准鉴别与高通量检测的核心突破口^[13]。随着食品工业向“营养与健康”方向的战略转型持续推进,在应对传统食品加工体系复杂性、供应链脆弱性、质量安全性等固有挑战的同时,食品的营养健康属性对检测技术和食品化工过程监控提出了更高要求。

1.2 食品化工的重大技术难题和科学问题

相对于化学化工过程,食品化工过程需要解决食品加工中面临的较多独特问题,如加工过程存在原辅料多样性、热敏性、易腐败、易氧化、固态加工、非牛顿流体特性等,尤其是食品化工过程要求原辅料和加工过程在“食品级”状态下进行。目前,食品化工基础研究的深度还不够,在基础研究和反应机制方面仍需静心深耕;在酶制剂、发酵菌株、高端生产设备等方面需要加强知识产权建设;食品化工需在“三传一反”的基础上,针对食



图1 食品化工的基本内涵

Fig.1 Fundamental Connotation of Food Chemical Engineering

品生产体系跨介质、多尺度、非均相的特点,实现食品安全、风味、营养等的全方位提升以及包装、储运的绿色智能化。食品化工行业目前存在的重大技术难题和科学问题总结如下。

1.2.1 食品加工与储藏的化工问题

(1) 食品添加剂的合成

食品添加剂按照来源可以分为化学合成和天然食品添加剂两种。化学合成食品添加剂存在化学反应过程的安全性、产品的安全性、产品后味差等问题。设计新型添加剂分子和合成途径,实现添加剂的高效合成与减少副产物,优化产品安全性评价方法是食品添加剂化学合成研究需要解决的重要科学问题^[10,14]。天然食品添加剂是指动植物或微生物进行正常的代谢所获得的产物,如胡萝卜素、辣椒红素等,但传统的提取方法效率和得率较低。构建高效的微生物发酵合成和提取方法,更高效地从植物中提取与分离目标组分是天然添加剂生产面临的主要难题^[15,16]。目前食品化工行业发酵菌种来源受限、代谢机理不清晰、发酵产率低下,是限制天然香料生物发酵合成效率的关键因素,有待进一步研究。

(2) 食品组分的提取分离

食品组分的规模化提取多采用化工技术,然而食品化工行业中底物溶解度低、产物分离纯化困难,组分分离过程中呈现高度的非线性、时变性特征,所涉及的流体力学、结晶学、化工分离等化工问题有待深入研究^[17]。以食用油的化学浸出工艺为例(图2),浸出是植物油生产过程中最关键的操作环节,决定着出油率、副产物含量和成品油质量,涉及从固相转移到液相的传质过程,分为三个阶段:从料坯内部到外表面、穿过介面层、由介面层到流动混合油,各阶段的传质类型和分子

运动方式及其受溶剂、温度、其他组分等的影响规律,是决定油脂浸出效率的关键,仍需深入剖析。此外,油料的化学组成复杂,除油脂外,还含有蛋白质、多糖、脂肪酸、色素、蜡质等多种组分,油脂与其他组分的分子互作机制及稳定状态解除所涉及的热力学原理,是决定油脂品质的关键,有待彻底阐明。

因此,突破绿色浸提、膜分离、色谱分离等食品化工关键技术,实现食品组分分离提取过程的绿色智能化,能够为食品精深加工及副产物综合利用提供技术保障;酶的高效分离纯化、固定化、催化与化学反应高效耦合问题,是决定食品组分提取效率和产品品质的关键科学问题;食品香气提取、色素提取、功能性物质的提取过程,色香味保护、活性保持的理论和工艺基础研究,是提高食品质量和功能的关键^[18]。同时,纳米、微米等尺度的食品组分化工分离操作,对食品营养特性、微生物发酵特性、感官特性等的影响规律有待具体阐明^[19]。

(3) 食品加工中的传质传热

食品生产体系中跨介质、多尺度、非均相的典型特点,使得食品化工的“三传一反”更复杂,探究食品加工过程传热传质对品质和安全的影响机制,对精准调控食品加工过程和产品品质具有重要意义^[20]。加热是实现食品加工、保证食品安全的首要途径,但由于传统加热方法能量传递环节多,普遍存在效率低和环境负担重的问题,高温加热后易出现营养流失、失水、脱油等品质劣变的问题,这是食品加工行业亟待解决的技术瓶颈之一^[13]。热敏性营养成分与其他组分的分子互作机制及食品加工过程所涉及的热力学原理,建立食品高温加热的品质调控措施,是决定食品营养品质的关键因素。微波、超高压、超声、电磁感应、超高温等新技术手段在食品化工过程中的加工原理与加工动力学模型等有待彻底阐明^[11,21]。

(4) 食品加工中的化学变化

食品在加工过程中,必然伴随着化学变化(如美拉德反应、酯化反应等),这些化学变化对食品感官品质、营养品质、安全性及储存稳定性影响极大。以美拉德反应为例(图3),还原糖和氨基化合物在食品加工过程中易发生美拉德反应,美拉德反应赋予食品独特的色泽、风味和口感,提升面包、咖啡、烤肉等的感官品质;同时,美拉德反应会降低蛋白质的生物学效价,并产生丙烯酰胺,引起营养品质劣变。因此,食品加工需要平衡美拉德反应的双重影响。

探究食品组分结构变化及其对产品品质的影响机制,对于食品加工过程的精准控制和食品品质的定向调控意义重大。食品加工中的风味物质受温度、pH、水分

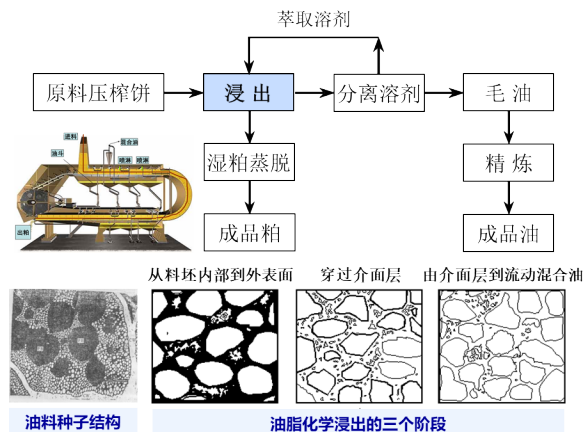


图2 食用油的化学浸出工艺及其三个阶段

Fig.2 Chemical Leaching Process of Edible Oil and Its Three Stages

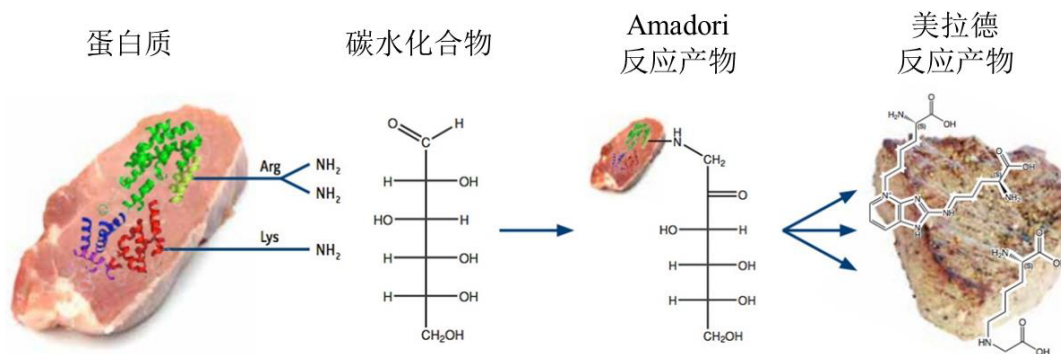


图3 美拉德反应过程中食品组分的化学变化
Fig.3 Chemical Changes of Food Components during the Maillard Reaction

活性、其他组分等的影响仍需深入剖析^[12]。传统发酵食品中风味的生物合成过程及调控机理是发酵食品行业现代化改造的重要依据。营养强化剂、天然色素和功能性物质的生化合成过程,催化原件缺乏、合成途径设计困难,与细胞互作机制不清晰等问题,限制了产率 and 生产强度的提升^[16]。

(5) 食品储运中的化学变化

食品储运过程影响食品的营养、风味、安全与品质。食品在储运过程的防腐问题,解析储运环境(温湿度、气体成分)触发的营养流失(如维生素氧化)、风味劣变(如脂质哈败)、安全风险(如亚硝酸盐生成)等的化学机制,明确其对不同品类食品(谷物、肉制品、果蔬)品质的动态影响规律,是延长食品货架期及保质期的关键^[22]。大宗食品的长期储运保鲜,保鲜剂、防腐剂等对食品品质的影响规律,突破大宗食品长期储运技术难题,如开发绿色保鲜剂/防腐剂并量化其对食品品质的影响边界,创新气调储运、智能温控等技术以延缓化学劣变,这些是直接关系到粮食安全战略落地与食品货架期延长的核心需求。

1.2.2 食品安全与质量控制的化工问题

(1) 食品风险因子检测与控制

“民以食为天,食以安为先”,加强食品安全监管,关系到全国人民“舌尖上的安全”,影响到广大人民群众身体健康和生命安全。食品加工过程中危害因子的形成、迁移和转化规律及控制机理,食品中有害物质生物分析的分子识别与作用机制,食品危害物(镉大米、生物胺、真菌毒素等)减除机理与方法,是关系食品安全与质量的关键问题^[23]。食品中未知掺假物和真实性特征标志物的挖掘和识别研究,如何通过材料、方法、智能化创新实现食品危害物检得出、检得准、检得快,是实现食品真实性精准鉴别和高通量识别的关键^[24-27]。

(2) 食品包装材料及其对食品品质的影响

食品包装作为食品的载体,关系到食品的营养、安全 and 质量。良好的食品包装可以最大限度地保护营养,还可以阻止环境中污染物的侵害,延长食品的贮存时长^[28,29]。传统的塑料包装应用十分广泛,然而塑料的化学成分使得塑料包装存在安全隐患,传统包装材料中有害物的迁移及安全问题有待深入挖掘,例如白酒中塑化剂的迁移规律。利用高分子化工原理和手段,创制高阻隔、耐高温、可降解、食品安全性高的新包装材料,对于延长食品货架期、保障食品安全以及推进生态文明建设具有重要作用^[28,30,31]。

1.2.3 食品加工装备的化工问题

装备是驱动产业高速发展的“引擎”。我国粮食发酵装备水平较低,成套装备长期依赖进口,大型食品企业80%的高端装备依赖进口。传统发酵食品无法直接照搬国外装备,智能化装备的核心技术水平落后于生产力发展需求。增强食品加工产业核心技术竞争力,尤其需要高端食品设备国产化。脱水、粉碎、微波、提取、结晶、固态发酵、固态蒸馏、半固态发酵等食品化工过程中关键参数的精确测定和传质传热模型的精确构建,是实现食品加工装备与食品化工反应过程科学适配的基础,也是基于多参数、多尺度数据开发高端智能装备的基础^[31-33]。

2 食品化工方向未来可探究的重要科学问题

食品化工作为交叉学科,融合了化学工程、生物技术、材料科学等领域的核心理论与技术。伴随全球人口的增长、资源的约束和可持续发展的需求,食品化工领域亟需在基础科学和工程应用层面突破创新,可重点从以下八个关键方向探讨其未来重要科学问题:

2.1 跨尺度食品化工数据库构建与智能算法开发

食品化工涵盖从原料预处理到终端产品加工的全流程,涉及酶催化、微生物代谢、热加工、分离纯化等多

环节,当前碎片化的数据体系(如单一环节的酶活性数据、孤立的发酵参数记录)难以支撑系统性工艺优化。亟需建立跨尺度、标准化的食品化工全链条数据库,不仅包含酶功能(温度/pH耐受性、底物特异性)、细胞代谢动力学数据,还需整合原料特性(如谷物淀粉含量、果蔬细胞壁结构)、加工过程参数(如挤压温度、膜分离压力)及产品品质数据(如口感、保质期),形成覆盖“原料—过程—产品”的完整数据体系。

在此基础上,开发多维度机器学习算法:针对上游原料筛选,通过深度学习建立原料组分与加工适应性的关联模型;针对中游过程优化,利用强化学习动态调控发酵补料策略、热加工温度曲线;针对下游品质控制,结合迁移学习实现不同产品的快速质控预测。同时,可参考BioCyc、KEGG的工业延伸模式,增设食品专属模块,构建开源共享的数据平台,并制定数据标准化规范(如数据采集格式、误差校正方法),打破领域数据壁垒,推动食品加工、生物工程、计算机科学的跨学科协作,实现从“经验驱动”到“数据智能驱动”的产业升级。

2.2 工程规模的固态食品加工体系“三传一反”机制研究

固态加工是食品工业的重要环节(如固态发酵酱油、谷物挤压成型、果蔬冻干),但其气—固—液三相非均相体系的传质(如氧气扩散、水分迁移)、传热(如局部过热)及反应动力学(如酶解反应速率)耦合机制复杂,成为工程放大的关键瓶颈,需从工程规模开展研究。微观层面,利用原位成像技术(如激光共聚焦)解析基质孔隙结构与传质效率的关联;介观层面,通过离散元法(Discrete Element Method, DEM)结合计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD),建立固态体系“三传一反”的多物理场耦合模型;宏观层面,优化固态加工装备设计,如开发自适应翻抛装置解决发酵基质营养不均问题,设计梯度控温冻干设备提升食品复水性,探索微波辅助固态蒸馏、超声强化固态提取等新型工艺,实现固态食品加工从“经验放大”到“科学设计”的转变,覆盖发酵、提取、成型等全场景。

2.3 “双碳”战略下食品化工的绿色低碳路径

在“双碳”战略背景下,食品化工需构建“源头减碳—过程降碳—末端固碳”的全生命周期低碳体系。源头层面,利用生物质资源替代化石能源,如以秸秆、果渣等制备生物燃料驱动干燥、灭菌工艺,采用绿氢作为加氢反应(如植物油氢化)的能源;过程层面,开发低能耗工艺,如低水耗固态发酵替代液态发酵、膜分离—蒸发集成技术减少废水排放、热泵技术回收加工过程余热;末端层面,推动副产物高值化利用,如豆渣提取膳食纤维、

果渣制备果胶、酵母废液合成生物塑料,同时探索碳捕集技术(如发酵过程CO₂转化为食品级CO₂),构建“资源—产品—废弃物—再生资源”的循环体系,覆盖原料种植、加工生产、废弃物处理全链条,助力食品工业实现碳中和目标。

2.4 食品化工过程的智能感知与装备升级

食品化工过程常涉及高粘度(如酱醪)、多相(如发酵液中菌丝体)、强干扰(如高温灭菌)体系,传统传感器难以实现微观变化的实时监测。未来可重点开发原位在线检测技术,如基于拉曼光谱的成分实时分析、微型电极阵列的代谢产物动态监测、近红外光谱的水分/脂肪含量快速测定,实现加工过程“透明化”;构建数字孪生系统,整合感知数据与工艺模型,模拟不同参数对产品品质的影响,实现过程预演与故障预警;升级模块化智能装备,如可重构式发酵罐适应不同菌种培养需求,自清洁膜组件减少食品污染风险,柔性挤压设备实现多品类谷物食品生产,结合边缘计算与自适应控制算法,实现pH、溶氧、温度等参数的实时优化,推动食品化工从“刚性生产”向“柔性定制”转型。

2.5 微生物组工程的全新应用场景

传统微生物组学研究多集中于食品发酵过程中的群落结构分析(如泡菜、奶酪中的菌群组成),未来需向“功能解析—定向设计—多场景应用”转变。一方面,深入解析微生物群、原料基质、加工环境、产品品质等的互作机制,如揭示肠道益生菌与食品基质(如膳食纤维)的协同作用、发酵食品中菌群代谢产物(如有机酸)对产品风味的调控规律。另一方面,开发合成微生物群落(SynComs)的工程化技术,利用CRISPR-Cas基因编辑、群体感应调控等工具,设计具有特定功能的菌群组合,既包括传统发酵食品中的提质增效菌群,如提升酱油鲜味的混合菌种,也涵盖食品废弃物处理菌群(如厨余垃圾高效降解菌群)、功能性食品生产菌群(如高产γ-氨基丁酸的复合菌种),同时探索微生物组在食品保鲜(如生物保鲜菌剂)、原料预处理(如秸秆降解菌群)等场景的应用,推动微生物组技术从食品发酵向全产业链延伸。

2.6 工业菌株的功能机制解析与定向改造

酿酒酵母、乳酸菌、产酶菌株等工业菌株是食品化工的核心细胞工厂,其性能直接决定工艺效率与产品品质。未来可从两方面深入研究:一是解析菌株逆环境耐受机制,通过适应性实验室进化(Adaptive Laboratory Evolution, ALE)、多组学分析,挖掘高渗(如高糖果汁发酵)、高温(如高温灭菌后菌株复苏)、高酸(如泡菜发酵)环境下的关键功能基因,揭示菌株应激响应的调控网

络;二是优化菌株代谢合成效率,解析代谢溢流(如乙酸、乳酸过量积累)的分子机制,设计pH敏感启动子、群体感应调控系统等动态调控元件,平衡菌株生长与产物合成,开发高产功能性成分的工程菌株,同时挖掘高活性发酵菌株、耐加工益生菌等,覆盖食品加工中的关键场景,满足不同工艺需求。

2.7 多酶复合体的基础科学研究与工程化应用

多酶复合体因“底物通道效应”具有高效催化优势,是解决食品工业中复杂底物降解(如秸秆糖化)、风味物质级联合成(如香气前体转化)的关键。目前仍存在核心科学问题待解决:一是结构与组装机制,基于冷冻电镜、X射线晶体学解析天然多酶复合体的空间结构,设计DNA折纸、蛋白骨架、纳米载体等人工支架实现酶的定向组装;二是传质与催化效率,利用微流控芯片模拟食品加工中的限域环境(如细胞内微区),优化酶间距与反应条件,提升底物传质效率;三是工程化应用,将人工多酶复合体应用于食品原料预处理、功能性成分合成、食品加工副产物利用,推动多酶催化技术从实验室走向工业化。

2.8 基因工程菌的生物安全与科学监管

高产酶工程菌、益生菌工程菌等基因工程菌在食品化工中的应用日益广泛,其生物安全风险(如基因水平转移、生态入侵)与法规适配性成为关键问题。未来需构建“风险评估—安全控制—法规支撑”的完整体系。在风险评估技术方面,开发基因水平转移检测方法(如数字PCR监测质粒逃逸),评估工程菌在食品加工环境、人体肠道、自然环境中的存活与扩散风险。在安全控制策略方面,设计生物containment系统,如温度敏感型毒素—抗毒素自杀开关、营养缺陷型菌株,防止工程菌逃逸后的生态危害。在法规支撑体系方面,建立基于全生命周期的生物安全评价模型,区分封闭式与开放式应用场景的风险等级,为法规的制定提供科学数据,推动建立“分类分级”监管策略,平衡基因工程菌的技术创新与食品安全。

3 展望

食品化工作为融合化学工程、合成生物学与材料科学的交叉学科,将在全球粮食安全、资源高效利用及碳中和目标驱动下迎来范式变革。未来研究需以“数据驱动设计—过程精准调控—绿色循环制造”为核心框架,深度融合合成生物学、人工智能与化学工程,突破多尺度基础理论与工程技术瓶颈,同时兼顾生物安全与社会伦理,推动食品产业向智能化、低碳化方向升级,为全球食品供应与可持续发展提供创新解决方案。

参考文献

- [1] 钟石新. 中国食品工业协会:8月食品消费价格首现正增长. 中国食品工业,2024(20):10—11.
Zhong SX. China Food Industry Association:Food consumer prices saw positive growth for the first time in august. China Food Industry, 2024(20):10—11. (in Chinese)
- [2] Wu ZY,Wang H,He C,et al. The application of physics-informed machine learning in multiphysics modeling in chemical engineering. Industrial & Engineering Chemistry Research,2023,62(44):18178—18204.
- [3] Li JH,Kwauk M. Exploring complex systems in chemical engineering—The multi-scale methodology. Chemical Engineering Science,2003,58(3/4/5/6):521—535.
- [4] Li JH,Ge W,Wang W,et al. Focusing on the meso-scales of multi-scale phenomena—In search for a new paradigm in chemical engineering. Particuology,2010,8(6):634—639.
- [5] 李兆丰,徐勇将,范柳萍,等. 未来食品基础科学问题. 食品与生物技术学报,2020,39(10):9—17.
Li ZF,Xu YJ,Fan LP,et al. Fundamental research in future foods. Journal of Food Science and Biotechnology,2020,39(10):9—17. (in Chinese)
- [6] Farooq S,Abdullah,Zhang H,et al. A comprehensive review on polarity,partitioning,and interactions of phenolic antioxidants at oil-water interface of food emulsions. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,2021,20(5):4250—4277.
- [7] Anukiruthika T,Yoha KS,Moses JA,et al. Unit Operations in Food Processing. New York:Apple Academic Press,2024:131—183.
- [8] Rashwan AK,Younis HA,Abdelshafy AM,et al. Plant starch extraction,modification,and green applications:A review. Environmental Chemistry Letters,2024,22(5):2483—2530.
- [9] Avci E,Akcicek A,Tekin Cakmak ZH,et al. Isolation of protein and fiber from hot pepper seed oil byproduct to enhance rheology, emulsion,and oxidative stability of low-fat salad dressing. ACS Omega,2024,9(9):10243—10252.
- [10] Farooq S,Ahmad MI,Zheng SJ,et al. A review on marine collagen: Sources,extraction methods,colloids properties,and food applications. Collagen and Leather,2024,6(1):11.
- [11] Dalvi-Isfahan M,Mokhtarian M. Simultaneous heat and mass transfer modeling for frozen hamburger:Investigation of cooking parameters and microbial inactivation kinetics,Journal of Research & Innovation in Food Science & Technology,2024,13(2):109.
- [12] Prado R,Gastl M,Becker T. Aroma and color development during the production of specialty malts:A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,2021,20(5):4816—4840.
- [13] Kumari L,Jaiswal P,Tripathy SS. Various techniques useful for determination of adulterants in valuable saffron:A review. Trends in Food Science & Technology,2021,111:301—321.
- [14] Penha CB,De Paola Santos V,Speranza P,et al. Plant-based beverages:Ecofriendly technologies in the production process. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2021,72:102760.
- [15] Wang JN,Ma WQ,Ma WX,et al. Strategies for the efficient biosynthesis of β -carotene through microbial fermentation. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2024,40(5):160.

- [16] Chen HB, Guo GP, Li QY, et al. Designing a microbial factory suited for plant chloroplast-derived enzymes to efficiently and green synthesize natural products: Capsanthin and capsorubin as examples. *Metabolic Engineering*, 2025, 88; 215—227.
- [17] Li M, Ho KKHY, Hayes M, et al. The roles of food processing in translation of dietary guidance for whole grains, fruits, and vegetables. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019, 10; 569—596.
- [18] Mariatti F, Gunjević V, Boffa L, et al. Process intensification technologies for the recovery of valuable compounds from cocoa by-products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68; 102601.
- [19] Loveday SM. Food proteins: Technological, nutritional, and sustainability attributes of traditional and emerging proteins. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019, 10; 311—339.
- [20] Omara AAM, Mohammedali AAM. Thermal management and performance enhancement of domestic refrigerators and freezers *via* phase change materials: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66; 102522.
- [21] Jadhav HB, Choudhary P. Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: A review. *Discover Food*, 2024, 4(1); 20.
- [22] Alp D, Bulantekin Ö. The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: A review. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(6); 1333—1343.
- [23] Chen L, Darriet P. Strategies for the identification and sensory evaluation of volatile constituents in wine. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(5); 4549—4583.
- [24] Shao B, Li H, Shen JZ, et al. Nontargeted detection methods for food safety and integrity. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019, 10; 429—455.
- [25] Brandt K, Barrangou R. Applications of CRISPR technologies across the food supply chain. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019, 10; 133—150.
- [26] Kang WC, Lin H, Jiang H, et al. Advanced applications of chemoresponsive dyes based odor imaging technology for fast sensing food quality and safety: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(5); 5145—5172.
- [27] Priyadarshi R, Rhim JW. Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 62; 102346.
- [28] Cheng H, Xu H, Julian McClements D, et al. Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 2022, 375; 131738.
- [29] Zhang MY, Biesold GM, Choi W, et al. Recent advances in polymers and polymer composites for food packaging. *Materials Today*, 2022, 53; 134—161.
- [30] Perera KY, Jaiswal AK, Jaiswal S. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods*, 2023, 12(12); 2422.
- [31] 郭志明, 张鹏敏, 李兆丰, 等. 食品智能仓储、包装技术与高端装备研究进展. *中国食品学报*, 2025, 25(1); 12—25.
- Guo ZM, Zhang PM, Li ZF, et al. Advance of food intelligent storage and packaging technology and high-end equipment. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(1); 12—25. (in Chinese)
- [32] 田师一, 姜国新, 毛岳忠, 等. 食品智能感知技术的发展与前沿探索. *中国食品学报*, 2024, 24(6); 1—11.
- Tian SY, Jiang GX, Mao YZ, et al. Development and frontier exploration of food intelligent perception technology. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(6); 1—11. (in Chinese)
- [33] 杨化宇, 刘东红, 廖小军, 等. 多物理场下食品组分的交互响应及真实场景加工控制方法. *中国食品学报*, 2024, 24(5); 126—137.
- Yang HY, Liu DH, Liao XJ, et al. Interactive responses of food components under multiphysics fields and control strategies for processing in real scenarios. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(5); 126—137. (in Chinese)

Key Scientific Issues in the Core Technologies of Food Chemical Engineering

Zhaofeng Li^{2, 4} Haocun Kong⁴ Yixiong Tian² Lu Xia¹ Jian Chen^{1, 3, 4*}

1. Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

3. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

4. Institute of Future Food Technology, JITRI, Yixing 214200, China

Abstract The theoretical framework and technological methodologies of chemical engineering are being deeply integrated into the food industry, serving as a critical driving force for industrial upgrading and sustainable development. Within this context, this paper systematically elucidates the scientific essence of food chemical engineering, which lies in the interdisciplinary convergence of chemical engineering principles and food science to achieve directional transformation of food components, precise regulation of processing procedures, and holistic enhancement of product quality. Focusing on the core technological challenges and scientific issues in contemporary food chemical engineering, this study analyzes both foundational frontiers and national strategic imperatives. Finally, it proposes pivotal scientific issues for future exploration in this field, aiming to provide scientific underpinnings for ensuring national food security and achieving carbon neutrality goals.

Keywords food chemical engineering; key scientific issues; interdisciplinary cooperation; fundamental research

陈 坚 中国工程院院士,江南大学教授,博士生导师。长期从事发酵工程、食品生物技术领域的研究和教学工作。获国家技术发明奖二等奖2项、国家科学技术进步奖二等奖1项、何梁何利基金科学与技术创新奖、中国专利金奖等科技奖励。

李兆丰 江南大学副校长,教授,博士生导师。长期从事淀粉生物技术方面的研究。教育部国家级高层次人才,国家重点研发计划项目首席科学家,主持国家自然科学基金青年科学基金项目(B类),获国家技术发明奖二等奖等科技奖励。

(责任编辑 王 磊 张 强)

* Corresponding Author, Email: jchen@jiangnan.edu.cn