

【前沿科技】

2025 年新质蛋白十大技术难题

(中国食品科学技术学会新质蛋白专业委员会 北京 100048)

摘要 新质蛋白作为不依赖传统畜牧或渔业生产的新型蛋白资源,是践行“大食物观”,保障国家食物供给安全的核心战略方向,对推动食品产业升级,实现全球可持续发展具有重要意义。当前新质蛋白产业虽呈现快速发展态势,但在技术产业化、产品品质优化等方面仍面临诸多瓶颈。基于行业发展现状与 2025 年技术趋势,本文梳理形成新质蛋白十大技术难题,系统阐述各难题的背景、挑战与解决路径,以期对相关领域的科研攻关、产业创新及政策制定提供参考,助力新质蛋白产业高质量发展。

关键词 新质蛋白; 技术难题; 生物制造; 大食物观

文章编号 1009-7848(2026)01-0001-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2026.01.001

蛋白质作为构成生命机体的核心营养素,是保障人类健康与生命活动的基础物质。当前,全球蛋白质供给高度依赖传统畜牧业与渔业,这一模式不仅引发严峻的环境问题,还面临资源约束的瓶颈,难以满足人口持续增长和生活水平不断提升对蛋白质供应的巨大需求。面对食物系统的发展困境,“大食物观”理念为我国食品产业高质量发展和技术创新指明方向,明确提出“向森林、向江河湖海、向设施农业要食物”“发展生物科技、生物产业,向动物植物微生物要热量、要蛋白”。

新质蛋白作为不依赖传统养殖的新型蛋白资源,凭借自然资源需求少,低碳环保,降低生产成本,生产工艺高效、省时等显著优势,为我国提供从传统的动物途径以外获取食物蛋白的全新技术手段,也是落实“大食物观”的重要途径^[1-3]。我国《“十四五”生物经济发展规划》明确指出,要发展合成生物学技术,探索研发新质蛋白等新型食品,实现食品工业迭代升级。北京市人民政府也将新质蛋白纳入战略性基础性绿色产业发展范畴,为新质蛋白产业发展提供政策支撑。

通过推动新质蛋白产品研发和技术创新,相关产品有望实现对餐桌上传统肉、蛋、奶产品的部分替代与功能补充,为大众消费者创造出感官特性与传统肉、蛋、奶产品高度一致,在营养均衡性及功能适配性上更具优势的未来食品^[4-6]。然而,新

质蛋白产业在从实验室走向工业化生产的过程中,仍面临蛋白提取效率低,产品品质拟真度不足,规模化生产技术不成熟等全链条技术挑战。基于此,本文系统梳理 2025 年新质蛋白领域十大技术难题,深入剖析各难题的背景、挑战与解决路径,以期为行业科研攻关、产业创新及政策制定提供参考,助力我国新质蛋白产业高质量发展,筑牢国家多元化蛋白供给体系。

1 新质蛋白的意义及发展现状

1.1 新质蛋白的内涵

新质蛋白(NeoProtein)泛指所有不依赖传统畜牧业或传统渔业方式获得的蛋白资源,涵盖植物蛋白、微生物蛋白、动物细胞蛋白、昆虫蛋白、藻类蛋白等新兴蛋白行业(图 1)。借助新质蛋白生产技术体系与健全食品产业加工体系,可稳定、高效地生产新质蛋白食物,实现从传统畜牧或渔业养殖模式向工厂车间制造模式的变革,能在很大程度上解决传统动物蛋白生产的问题,已逐渐成为未来拓展我国国民乃至全球人类获取食用蛋白的重要方式^[7-9]。

1.2 新质蛋白的重大意义

1) 保障食物蛋白供给安全 传统畜牧业与渔业主导的蛋白供给模式,正面临资源约束、环境压力与供给效率的三重瓶颈。据统计,全球畜牧业贡献 14.5%的温室气体排放,消耗 30%的地球土地资源与 1/3 的清洁水源,且养殖用地沙化率已达 1/3。同时,我国动物蛋白对外依赖度居高不下,

收稿日期: 2025-12-16

通信作者: 中国食品科学技术学会新质蛋白专业委员会

E-mail: cifst@126.com

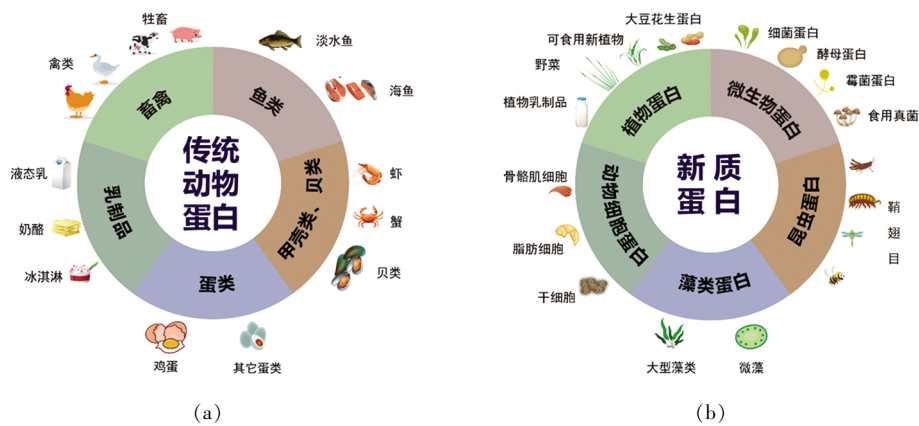


图1 传统动物蛋白与新质蛋白的来源

Fig.1 Sources of traditional animal protein and NeoProtein

仅大豆加工中 80%用于蛋白饲料,2022 年大豆进口量达 9 108 万 t(耗资 612 亿美元),供给安全风险显著。在此背景下,新质蛋白通过生产模式的根本性变革,将食品制造从“田间地头”推向“工厂车间”。以微生物蛋白为例,其生产效率较传统养殖业提升 100 倍,节水超 90%且无需农药化肥,可突破传统生产的资源环境边界。英国一家公司已成功利用威尼斯镰刀菌发酵获取高纤维、低饱和脂肪的优质蛋白,通过 165 m³ 发酵罐,一次生产就可满足 25 万根香肠需要的蛋白。创新蛋白合成路径将变革食物制造模式,如通过植物蛋白直接加工食品和微生物蛋白规模化发酵等技术路径,不仅能破解我国蛋白供给对外依赖的困境,还能形成动物性蛋白食品的有效补充,构建“多元化、可持续、高安全”的蛋白供给体系,实现蛋白资源的本地化、高效化生产,满足高质量食品需求,为保障国家食品安全提供核心支撑^[9-11]。

2) 提高人民营养健康水平 膳食是影响健康的主要因素,膳食因素每年导致全球 1 100 万人死亡(其中,中国 300 万人),主要原因之一是传统动物性食品摄入过多。新质蛋白在营养价值方面相较于单一的传统动物蛋白有显著优势,是改善居民膳食结构,降低疾病风险的关键抓手^[11-13]。《JAMA》子刊一项覆盖 41.6 万人群(23.7 万名男性、17.9 万名女性)的 16 年追踪研究证实,植物蛋白对动物蛋白的部分替代具有明确健康益处。该研究表明,每 1 000 kcal(4 184 kJ)能量中增加 10 g 植物蛋白摄入,男性心血管疾病、中风等总和死

亡风险降低 12%~30%,女性降低 17%~29%;若将 3%的动物蛋白能量替换为植物蛋白,男、女全因死亡风险均降低 10%,心血管死亡风险分别降低 11%与 12%,男性中风风险更可降低 22%^[14]。从蛋白营养的角度,酵母蛋白的蛋白质含量超过 80%,富含 9 种必需氨基酸,满足世界卫生组织(WHO)的全蛋白标准,蛋白质消化率校正评分(PDCAAS)高达 1.0,与乳清蛋白类似;微藻蛋白富含 9 种必需氨基酸,且支链氨基酸含量丰富,消化释放生物活性肽占比和含量均高于乳清和大豆蛋白。

3) 有利全球可持续发展 联合国预测 2050 年全球人口将达 98 亿,届时肉类需求将增至当前的 1.5 倍,传统养殖模式的低效率已无法匹配这一增长速度。普通牲畜蛋白质转化效率极低,以猪肉为例,动物摄食总能量经自身消耗与转换损耗后,最终转化为可食用蛋白的比例仅 9%,若按此效率扩张养殖规模,则地球资源将不堪重负。新质蛋白在生产可持续性方面相较于单一的传统动物蛋白有显著优势,无需经历动物生长的多层能量循环,可直接利用一级原料高效合成蛋白。例如,酵母在 24 h 内每 1 000 kg 培养体系可新增 2 000 kg 蛋白质,大豆新增 10 kg,而奶牛仅新增 1 kg,微生物蛋白的效率优势尤为突出^[9,15]。研究表明,若 2050 年用真菌蛋白替代全球 20%的牛肉消费,每年可减少 56%的森林砍伐及相关碳排放;细胞培养肉的生产周期较传统方式缩短 83%,转化率提高 5.8 倍,可节省 78%的淡水,减少 92%的 CO₂ 排放^[16]。此外,新质蛋白还能拓展蛋白资源边

界,通过开发可食用新植物、微藻、昆虫等新型原料,挖掘非传统蛋白来源,形成对传统动物蛋白的有效补充,为破解全球可持续发展的难题提供创新路径。

1.3 新质蛋白的发展现状

当前,全球新质蛋白市场呈现“快速扩容、区域分化”的特征。据波士顿咨询公司(BCG)与BlueHorizon联合报告《耐人寻味:蛋白质的转型》预测,2035年全球新质蛋白市场规模将达9700万t,占全球蛋白质供应的11%,对应市场价值超2900亿美元,其中植物蛋白占比最高(6900万t),微生物蛋白(2200万t)与细胞培养蛋白(600万t)将成为增长主力。日本经济新闻2024年5月数据显示,全球替代蛋白市场按国别排名,美国居首、中国位列第四;按机构排名,中国江南大学跻身第八,反映出我国在新质蛋白领域的科研实力已具备国际竞争力。区域布局上,欧美凭借技术先发优势与消费接受度,在细胞培养肉与高端植物蛋白领域领先;中国则依托庞大消费市场与政策支持,在微生物蛋白(如酵母蛋白)、植物蛋白加工装备领域快速追赶,形成“欧美领跑,中国追赶,新兴市场潜力释放”的竞争格局。

从政策与资本支持来看,新质蛋白已成为各国战略竞争的关键领域,政策红利与资本投入持续加码。贝索斯地球基金投入1亿美元支持商业替代蛋白开发,2024年贝索斯可持续蛋白中心在北卡罗莱纳州立大学、帝国理工学院、新加坡国立大学建立3个研发中心,各获3000万美元融资,聚焦微藻蛋白、微生物发酵蛋白等技术突破。英国建立UKRI微生物食品工程生物学研究中心,欧盟投入1400万欧元支持基于发酵的食品配料研发。美国国会更将中国视为重要竞争对手,11名共和党议员致信相关部门,呼吁确保美国在创新蛋白领域的领导地位,特别提及江南大学的技术进展,凸显该领域的战略重要性。

我国也十分重视新质蛋白的发展,从国家层面到地方政府,都在积极出台各类政策,为新质蛋白的发展提供了有力保障。2022年3月6日,习近平总书记提出“发展生物科技、生物产业,向植物、动物、微生物要热量、要蛋白”。国家发展和改革委员会发布的《“十四五”生物经济发展规划》指

出,发展合成生物学技术,探索研发“人造蛋白”等新型食品,实现食品工业迭代升级。同时,农业农村部也在《“十四五”农业农村科技发展规划中》指出,研究细胞培养肉、合成蛋奶油、功能重组蛋白等营养型食品的培养和制造技术,将新质蛋白的研究列为重点发展方向。在地方政府和学会层面,2025年北京市政府工作报告的总体要求和重点任务中,明确提出“推进先进能源、替代蛋白等战略性基础性绿色产业发展”。2025年中国食品科学技术学会成立新质蛋白专业委员会,在新质蛋白领域探讨产业发展路径,提供技术、政策、金融多层次方案。国家开发投资集团有限公司联合无锡市、江南大学建立新质蛋白生物制造创新中心,投入软硬件资源(总建筑面积8680m²),推动细胞培养肉、功能重组蛋白等技术产业化。从这些政策和资本投入的导向可以看出,新质蛋白不仅在科技创新中占据重要地位,而且在推动生物经济发展和食品产业升级方面具有战略意义。这种“国家战略引导、地方协同推进、产学研用融合”的发展体系,不仅为企业提供了研发和生产新质蛋白的政策环境,而且有助于整个行业的高质量发展。

2 2025年新质蛋白十大技术难题

基于当前新质蛋白产业发展阶段的核心需求与技术瓶颈,结合全球产业2025年发展新趋势,中国食品科学技术学会新质蛋白专业委员会经系统性调研以及多轮专家研讨与梳理,形成2025年新质蛋白十大技术难题,全面覆盖新质蛋白从原料提取、细胞创制、装备开发到产品应用的全产业链核心卡点,既反映当前产业实践中的“卡脖子”问题,又契合未来5至10年技术发展的关键突破点,旨在为行业技术攻关与创新突破提供明确指引。

2.1 低变性植物蛋白绿色高效提取技术

植物蛋白为新质蛋白的重要组成部分。目前,碱溶酸沉的湿法分离技术是提取植物蛋白最常用的手段,然而,湿法提取过程伴随pH值和温度的剧烈变化,会破坏植物蛋白的天然结构,导致蛋白变性,发生不可逆聚集^[7]。现有提取技术存在能耗高、污染重、蛋白易变性等问题,严重制约了植物蛋白的功能特性和在植物基食品中的推广应用^[18]。

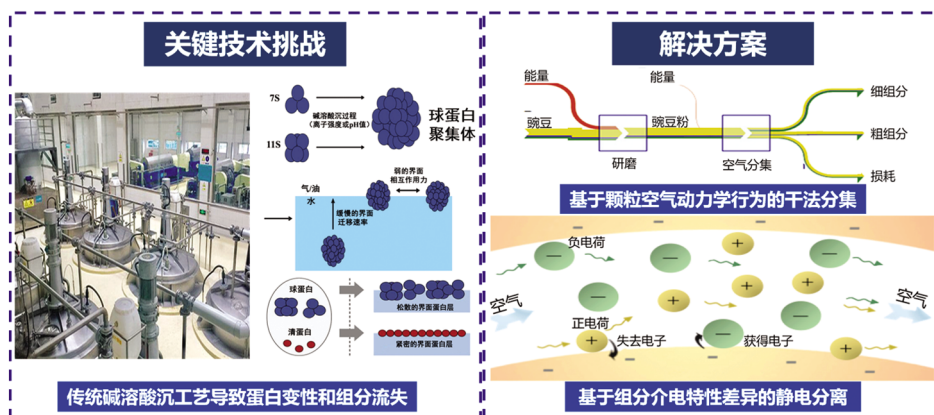


图2 低变性植物蛋白绿色高效提取技术挑战与解决方案^[19-20]

Fig.2 Challenges and solutions in green and high-efficiency extraction technology for low-denaturation plant protein^[19-20]

针对以上挑战,应重点发展低变性、绿色高效的蛋白提取技术路径。可系统开发以干法分离与水相分离为核心的温和提取新工艺,充分利用植物蛋白与非蛋白组分在粒度、密度及表面特性等方面的物理差异,通过构建螺旋气流场,依据沉降速度的分化实现蛋白的高效、精准分离。在此基础上,进一步耦合水相提取技术,实现对蛋白组分的温和富集与纯化。该技术路径以环境友好为导向,最大限度保留蛋白质的完整组分、天然构象和功能性质,有效避免传统提取方式导致的蛋白变性、聚集及功能损失。

系统推进并应用此类绿色提取技术,将显著提升植物蛋白原料的品质与产业效益:一方面可

大幅改善蛋白的溶解性、乳化性和凝胶性等功能特性,为高品质植物肉、乳制品替代品等终端产品提供优质原料支撑;另一方面通过降低能耗和污染,推动生产过程向低碳转型,增强产业可持续性和经济性。

2.2 新质蛋白仿肉多维结构构建及汁液感拟真度提升

我国新质蛋白仿肉制品拟真度方面仍存在显著短板,面临的核心技术瓶颈在于:单一来源新质蛋白功能局限,无法同步实现良好的凝胶性、持水、持油性,导致产品口感风味逊于传统肉类,尤其汁液感明显不足,严重制约消费者接受度与行业推广^[9, 21]。



图3 新质蛋白仿肉多维结构构建及汁液感拟真度提升技术挑战与解决方案^[22-23]

Fig.3 Challenges and solutions in multidimensional structure construction and juiciness simulation fidelity enhancement for NeoProtein-based meat analogues^[22-23]

针对上述问题,可从三大路径开展系统性技术攻关:一是开展功能性新质蛋白规模化制备,通过生物技术结合物理场处理,优化蛋白结构,降低变性聚集程度,提升其功能性质;二是开发异源新质蛋白协同高效融合技术,设计专用混合设备,实现高固形物含量下的蛋白网络融合,构建高强度、高持水、持油三维结构;三是实施天然植物油脂结构化技术,借助生物法预处理与物理场重组,构建拟真脂肪组件以模拟肉类的汁液释放感。

系统推进上述技术研发,有助于实现新质蛋白仿肉制品在咀嚼性与多汁性方面的双重突破,显著提升产品拟真度和综合风味体验,从而推动新质蛋白产业向高品质、高接受度方向升级,强化其在国家食品战略中的支撑作用。

2.3 细胞培育肉长期传代成肌细胞的创制

细胞培育肉以生物合成高效获取优质动物蛋白,破解传统畜牧业痛点为核心目标,而成肌细胞作为合成肌肉蛋白的关键底盘细胞,其细胞系构建质量决定生产效率与产品品质,因此永生化成肌细胞创制是产业突破的核心^[24]。当前,永生化成肌细胞构建面临三大核心瓶颈:一是,原代成肌细胞受 Hayflick 极限制约,难以在维持细胞核心功能的前提下实现永生增殖;二是,增殖与分化能力兼顾,目前构建细胞系虽能提升细胞增殖效率,但会导致细胞丧失向成肌分化的能力;三是,安全性与稳定性不足,长期传代可能出现遗传突变,且缺乏统一质量标准,难以保障食用安全与稳定的生产工艺^[25]。

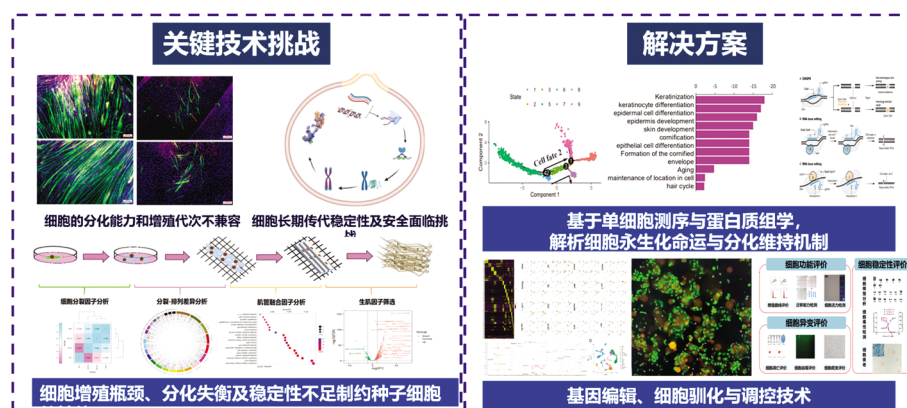


图 4 细胞培育肉长期传代成肌细胞的创制技术挑战与解决方案^[26-28]

Fig.4 Challenges and solutions in establishing a scalable serum-free cultivation system for cell-cultured meat^[26-28]

针对上述瓶颈,需从 3 个方面开展攻关:一是通过单细胞测序、蛋白质组学技术,找到“细胞永生关键命运决定”与“分化能力维持的调控机制”的关键平衡节点,明确调控细胞生长的“关键信号通路”为细胞系构建提供理论依据;二是结合 CRISPR-Cas9 基因编辑与细胞驯化,增强细胞增殖能力和环境耐受性,辅以表观遗传调控优化细胞周期,保留分化潜能,此外,引入表观遗传调控手段,如组蛋白修饰、DNA 甲基化调控,优化细胞周期相关蛋白的表达,延长细胞传代次数的同时维持分化潜能;三是构建质量评价体系,明确增殖速率、分化效率等核心指标,制定标准化流程,助力合规应用。

永生化成肌细胞的创制,能为生物反应器连

续化、标准化生产提供稳定细胞资源,突破原代细胞局限以提升生产效率与产品一致性;同时从降低细胞获取成本,优化培育工艺,推动流程规模化等维度,系统性减少单位肉类生产成本,为细胞培育肉商业化落地筑牢技术根基。

2.4 细胞培育肉规模化无血清培养体系的构建

细胞培育肉作为一种新兴的可持续食物资源,在未来食品与蛋白替代领域展现出巨大潜力。然而,在其产业化进程中,培养基开发仍面临关键技术瓶颈,严重制约了成本降低与规模化应用。当前主要问题表现在 4 个方面:首先,细胞培养高度依赖胎牛血清等动物来源成分,不仅成本高昂、来源有限,还存在伦理风险^[29];其次,培养基中营养因子组成复杂,不同细胞类型的需求差异显著,缺

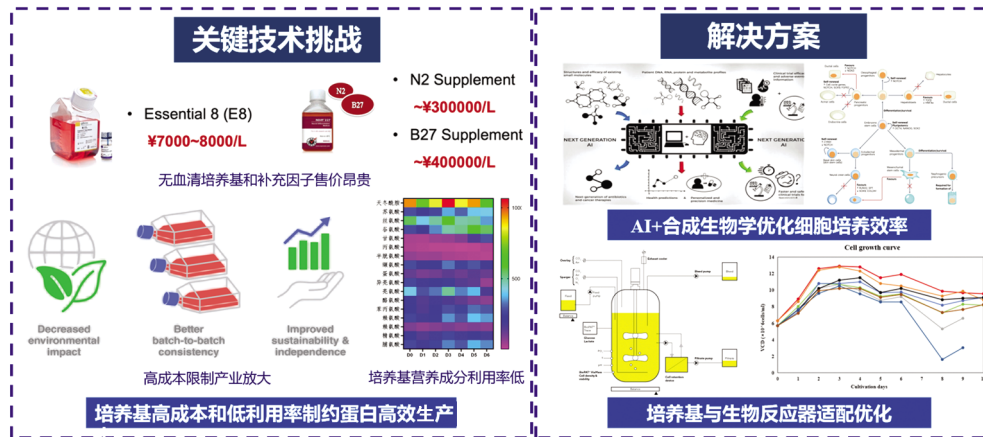


图5 细胞培育肉规模化无血清培养体系的构建技术挑战与解决方案^[31]

Fig.5 Challenges and solutions in low-carbon processing and automated solid-state fermentation equipment integration for edible fungal protein^[31]

乏系统化的优化模型;第三,无血清培养基中的信号分子和调控机制尚未完全阐明,导致细胞生长和分化效率低下^[30];最后,培养基在大规模生物反应器中的利用效率不足,无法满足高密度环境下营养供给。

挑战技术攻关可以从以下几个方面展开:一是发展植物源、重组蛋白及小分子替代物,逐步替代动物血清,降低培养成本并提升可持续性;二是结合多组学与人工智能算法,解析不同细胞的代谢需求和信号通路,建立精准的培养基设计与优化模型;三是通过合成生物学与蛋白工程手段,定向设计生长因子、细胞因子和载体蛋白,改善细胞增殖与分化效率;四是结合生物反应器工程设计与动态营养调控技术,提升培养基利用效率以适配高密度培养需求。

细胞培育肉无血清培养基的研发,是实现产业规模化与成本控制的核心驱动力。在规模化应用层面,它通过摆脱对胎牛血清等动物源成分的依赖,构建了稳定、可控且标准化的供应链,为生物反应器的大规模、连续化生产提供了基础。在成本控制方面,无血清培养基不仅直接消除了占生产成本绝大部分的血清费用,还通过化学成分明确了配方体系,为精准营养优化、减少浪费和长期工艺迭代提供了平台,从而系统性地降低了单位生产成本,为细胞培育肉的商业化落地和市场竞

争力奠定了坚实基础。

2.5 微生物发酵菌体蛋白高效细胞工厂的构建

微生物发酵菌体蛋白可用作食品和饲料蛋白来源,前景广阔^[32]。然而,我国在高蛋白菌株选育和菌体蛋白合成途径的强化等方面存在明显瓶颈。当前微生物发酵菌体蛋白产业面临的核心技术问题在于:菌株的蛋白质合成效率、生物量积累上限有限,氨基酸合成协调性较差等^[33]。

针对上述问题,可从三大路径开展系统性技术攻关:一是挖掘和开发更适合食品蛋白生产的非传统酵母、真菌或细菌等新型宿主,通过适应性进化、重构微生物代谢网络等手段将碳源和能量最大限度地导向目标产物的合成路径;二是全方位强化蛋白合成通路,在转录翻译层面、蛋白折叠与分泌层面、前体与能量供应等方面优化氨基酸和菌体蛋白的生物合成;三是结合适应性实验室进化与高通量筛选技术,建设自动化平台,通过有效的报告系统(如荧光标记、生长偶联等)快速筛选高蛋白菌株,同时将菌株构建、培养、检测等流程自动化,加速细胞工厂的迭代优化周期。

系统推进上述技术研发,有助于实现菌体蛋白的高效生物制造,促进循环经济,催生新兴绿色产业和高价值市场,实现可持续性承诺,同时提供稳定、高效、可持续的新型蛋白原料来源。

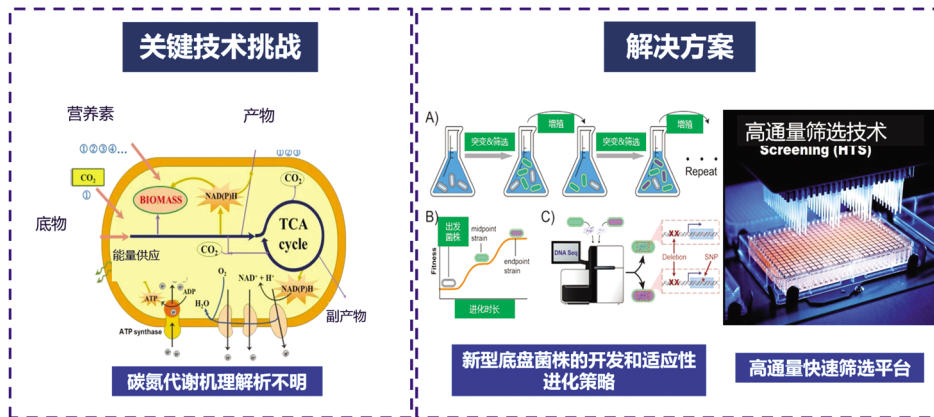


图 6 微生物发酵菌体蛋白高效细胞工厂的构建技术挑战与解决方案^[34-35]

Fig.6 Challenges and solutions in constructing high-efficiency cell factories for single-cell protein (SCP) production via microbial fermentation^[34-35]

2.6 蛋白生物制造反应器设计与高密度发酵过程控制的智能化

蛋白生物制造反应器设计与过程控制的智能化，直接影响目标蛋白的生产效率和产业经济效益^[36]。当前产业面临的核心技术瓶颈在于：现有生物反应器在菌株高密度发酵过程中存在如何实现

过程的高度自主、高效和稳定等“放大效应”问题。目前缺乏能够实时、在线、精准监测关键生物参数的有效传感器，多数参数依靠频繁取样分析，存在严重滞后性^[37]。同时，菌株自身的代谢状态会随时间变化，通用性差，难以精准建立描述这一复杂系统的数学模型(机理模型或数据驱动模型)。

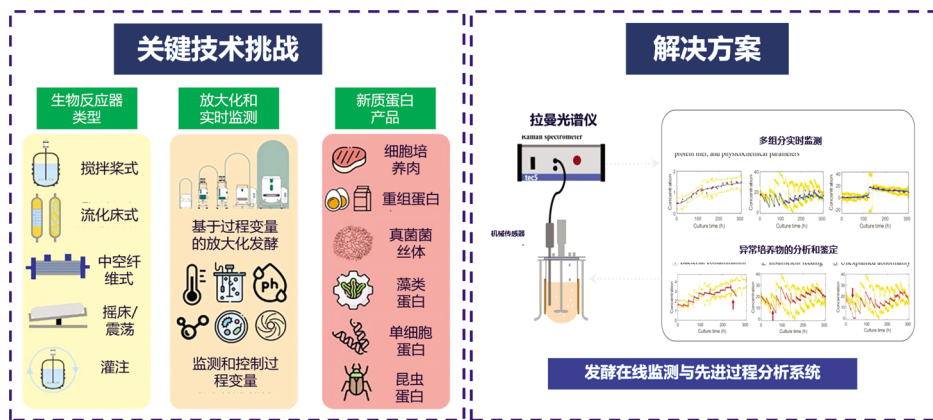


图 7 蛋白生物制造反应器设计与高密度发酵过程控制的智能化技术挑战与解决方案^[38-39]

Fig.7 Challenges and solutions in intelligent reactor design and high-cell-density fermentation process control for protein biomanufacturing^[38-39]

针对上述问题，可从三大路径开展系统性技术攻关：一是新型智能化反应器的设计与模块化概念，利用计算流体力学模拟不同规模反应器内的流场、剪切力、传质效率，推动从批次发酵向连续发酵的工艺变革，使连续过程更稳定，更易控制；二是开发新型在线监测与先进过程分析技术，

研发基于光谱学(如近红外 NIR、拉曼光谱)、电容原理等的新型在线传感器，通过机器学习算法，构建多维参数之间的关联模型，实时推断关键生物参数；三是人工智能控制，创建一个与物理反应器对应的数字孪生体系，利用机器学习算法对海量过程数据进行分析，强化长期控制策略，实现反应

器的自适应和预测性控制,优化运行参数。

系统推进上述技术研发,有助于实现菌种的高密度自主可控发酵,大幅提升蛋白产量,优化生产效能与经济效益,保障产品质量一致性与生产稳定性,还能够推动产业向柔性、数字化生产模式转型,生产多种高价值蛋白产品,快速响应市场需求变化。

2.7 功能蛋白高效表达酵母底盘细胞的精准设计

多数功能蛋白具备优异功能,用途广泛,是新质蛋白产业的重要组成部分^[40]。然而,目前在毕赤

酵母和克鲁维酵母底盘细胞的精准设计、蛋白正确折叠分泌以及代谢通路的全局调控等方面存在明显短板。当前产业面临的核心技术瓶颈在于:遗传工具与调控元件的精确性与多样性不足,高效无痕的基因编辑工具有待优化;外源功能蛋白的表达给宿主细胞带来巨大代谢负荷;此外,蛋白折叠、分泌与降解过程存在研究瓶颈,外源蛋白在酵母中容易错误折叠,形成包涵体或滞留在内质网中,导致分泌效率低下^[41]。



图8 功能蛋白高效表达酵母底盘细胞的精准设计技术挑战与解决方案^[42]

Fig.8 Challenges and solutions in precision design of yeast chassis cells for high-efficiency functional protein expression^[42]

针对上述问题,可从三大路径开展系统性技术攻关:一是开发合成生物学工具包,构建精准调控体系,通过元件工程、CRISPR 技术升级和代谢线路设计,减轻菌体自身代谢负荷,精准调控蛋白表达;二是结合机器学习全局优化底盘网络,挖掘外源蛋白表达引起的代谢瓶颈和压力响应基因,理性设计和构建更高效的酵母底盘细胞;三是重构蛋白质合成与分泌途径,在酵母底盘中重建翻译后修饰模块和糖基化途径,促进蛋白质正确折叠。

系统推进上述技术研发,有助于定制细胞工厂,高效表达各种特种工业酶,推动工业过程的“酶催化”替代,发展更加绿色、可持续的生物制造新路线。同时,上述技术能够推动新型功能蛋白产业的发展,生产用于新质蛋白、精准营养、生物传

感等领域的各种新型功能蛋白,形成定制化功能蛋白的新产业模式。

2.8 食用菌蛋白的低碳加工与自动化固态发酵装备集成技术

食用菌蛋白的低碳加工与装备集成是实现产业升级的关键环节,当前仍面临诸多技术挑战。主要问题包括:传统发酵工艺中温湿度分布不均,代谢产物波动大,导致过程参数难以实时精确调控^[43];规模化生产中发酵稳定性差、能耗高、设备集成度低;高温长时间加工易导致蛋白变性与功能活性下降,严重影响产品品质与营养保留^[44]。

针对以上瓶颈,可从3个方面推进技术突破:一是构建固态发酵智能调控系统,集成原位传感与AI动态优化策略,通过高光谱成像实时监测菌丝生物量与代谢标志物变化,实现温湿度、通气量

等参数的动态自反馈调节；二是系统优化发酵工艺体系,调控培养基组成、碳氮比、通气量和气相氧分压等关键条件,建立多参数在线检测与反馈控制机制,提升生产稳定性与得率;三是开发低碳

加工技术,融合非热加工(如冷等离子体、高压处理)与酶法改性,在温和条件下改善蛋白功能特性,并配套建立营养保留与功能评价体系。

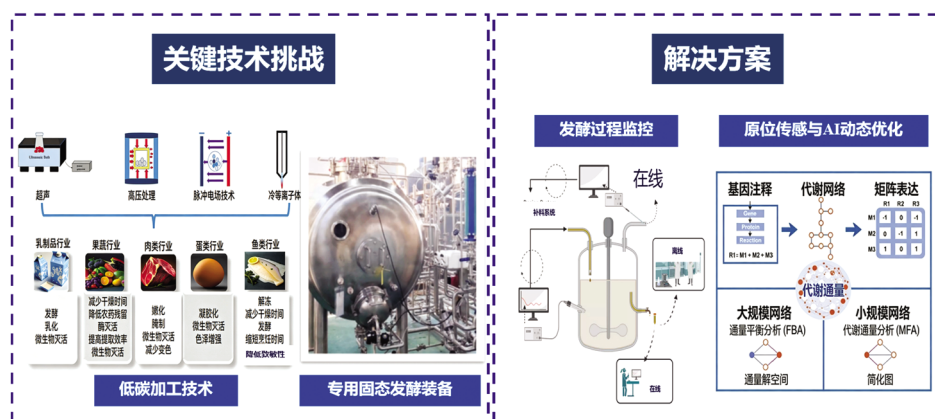


图 9 食用菌蛋白的低碳加工与自动化固态发酵装备集成技术挑战与解决方案

Fig.9 Challenges and solutions in low-carbon processing and automated solid-state fermentation equipment integration for edible fungal protein

该智能传感-AI-非热加工等技术的集成系统化解决方案,将有力促进食用菌蛋白生产的标准化与绿色化,实现“三升三降”,即提升品质、效率与应用价值,降低能耗、成本与环境影响。最终推动食用菌蛋白走向标准化、规模化、绿色化制造,强化我国食品蛋白供应的自主可控能力,支撑新质蛋白产业高质量可持续发展。

2.9 酵母蛋白加工适应性优化与多场景应用开发

酵母蛋白作为一种高营养、可持续的微生物蛋白,在新质蛋白领域应用潜力巨大^[45]。然而,其产业化进程仍面临加工适应性不足的关键瓶颈。酵母蛋白天然的聚集体结构导致其颗粒尺寸较大,溶解性与乳化性较差,限制其在食品体系中的广泛应用^[46]。同时,蛋白组成与结构不明,缺乏在复杂食品矩阵中的系统性适配研究,制约了其多场景开发与应用。

应对策略可从 3 个方面着手:一是通过高压微射流、球磨等物理纳米化改性技术,降低蛋白粒度,提升其溶解性、乳化性与凝胶性,从而改善产品的稳定性与口感;二是结合蛋白质组学与生物信息学方法,解析其多级结构及修饰特征,建立构

效关系模型,并利用其特殊结构优势拓展至脂肪模拟物等细分领域;三是构建涵盖热学特性、流变性能与消化行为的多维度评价体系,系统评估酵母蛋白在凝胶、乳化及发泡体系中的适用性。

技术突破将显著提升酵母蛋白的溶解性和稳定性,推动其在蛋白饮料、重组肉、乳等高附加值领域中的应用;明确其结构-功能机制,有助于特医食品和个性化营养品等高价值产品开发;提升系统适配性,可促进跨赛道应用,增强供应链韧性,提升产业竞争力,助力可持续蛋白供应体系建设。

2.10 威尼斯镰刀菌蛋白富集与提质增效利用

威尼斯镰刀菌来源的菌丝体蛋白,作为一种营养丰富、安全性高的新型蛋白资源^[47],已获得国际权威机构认证,2025 年被我国卫生健康委员会列为新食品原料。然而,该菌株具有由“几丁质-葡聚糖”构成的刚性细胞壁,严重阻碍蛋白释放与消化吸收,导致功能性与营养利用率偏低,已成为制约高附加值产品开发的共性技术瓶颈^[48]。

针对细胞壁结构屏障导致的提取难、消化率低等问题,可重点从两大路径开展绿色高效提取技术攻关:一是开发高压均质耦合 pH 迁移的分级提取技术,通过机械剪切力破坏细胞壁实现蛋白

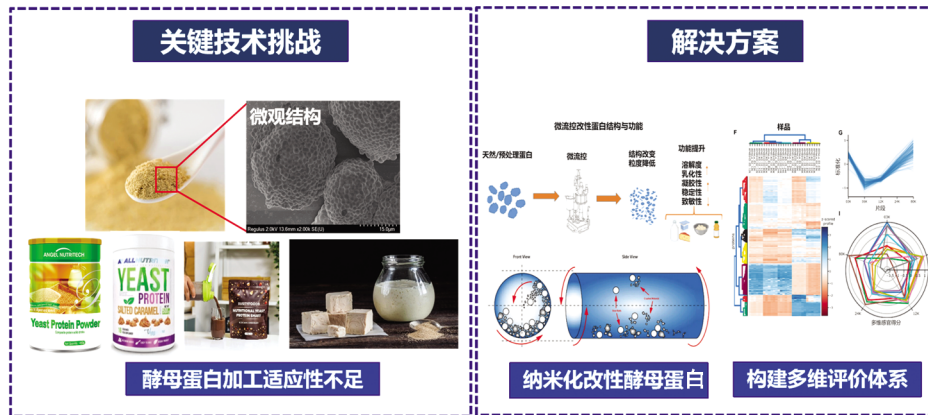


图 10 酵母蛋白加工适应性优化与多场景应用开发技术挑战与解决方案

Fig.10 Challenges and solutions in processing adaptability optimization and multi-scenario application development for yeast-derived protein

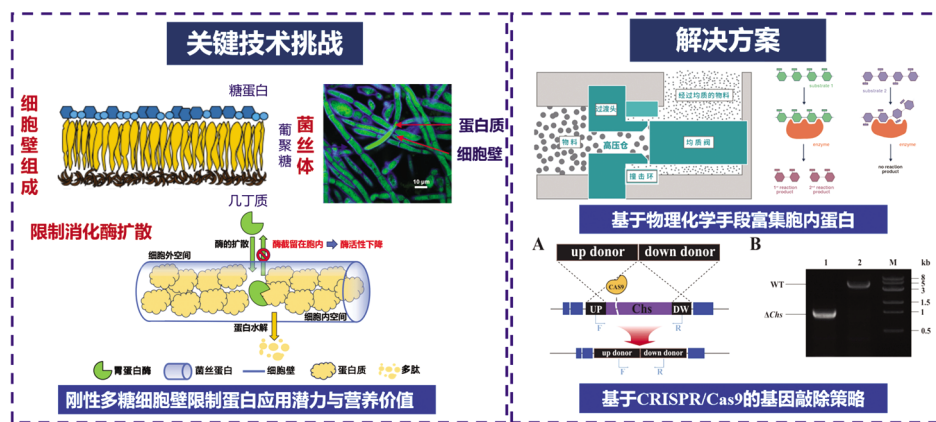


图 11 威尼斯镰刀菌蛋白富集与提质增效利用术挑战与解决方案^[49-50]

Fig.11 Challenges and solutions in protein enrichment and value-added processing for *Fusarium venenatum*^[49-50]

高效分离，并可引入酶法预处理以降低能耗，此外，建立基于介电特性的静电分离技术，利用蛋白质与细胞壁组分在电学性质上的差异实现组分的物理筛分；第二，利用 CRISPR 基因编辑技术靶向敲除细胞壁主要成分——几丁质和葡聚糖相关合成酶的编码基因，降低威尼斯镰刀菌细胞壁厚度和韧度，提高后期提取加工中胞内蛋白的可及性和利用度。

系统突破细胞壁高效分离与提取技术，将显著提升威尼斯镰刀菌蛋白的产品品质与产业竞争力，可使蛋白消化率有效提高，生物效价媲美乳清蛋白，满足特医食品、运动营养及婴幼儿配方等高端市场对蛋白品质的严苛要求。

3 2025 年新质蛋白十大技术难题的意义

3.1 定位

新质蛋白十大技术难题的梳理与攻关，是践行“大食物观”，构建国家多元化蛋白供给体系的核心举措，助力新质蛋白成为食品产业升级与粮食安全的新支柱，对保障国家食物供给安全，推动食品产业“从传统制造向生物制造”转型具有重要战略意义。

3.2 目标

十大技术难题的突破，将创造食品蛋白生产新模式、产业新业态、社会新需要，推动新质蛋白产业实现从“量的积累”到“质的飞跃”的跨越。在生产模式上，通过细胞工厂构建、智能化反应器设

计等技术突破,将蛋白制造从“田间地头”全面转向“工厂车间”,实现新质蛋白的高效生产;在产业业态上,依托酵母蛋白多场景应用、威尼斯镰刀菌蛋白提质增效等技术,催生植物基肉制品、微生物蛋白功能食品、细胞培养肉等新业态,拓展食品产业边界;在社会需求层面,通过仿肉产品汁液感拟真度提升和低变性植物蛋白功能保留等技术,满足消费者对“健康、美味、可持续”蛋白产品的升级需求,推动新质蛋白从“可接受”向“更偏好”转变,最终实现从“补充与替代”到“扩展与不可替代”的升级,以高质量供给满足人民美好生活对优质蛋白的新需求。

3.3 使命

十大技术难题的核心使命,是构建“基础研究引领,产业创新驱动”的食品领域创新体系,为全球新质蛋白产业发展提供中国方案。一方面,难题聚焦新质蛋白领域的基础科学问题,推动科研力量向“从0到1”的原始创新突破,填补行业基础研究空白;另一方面,通过低变性植物蛋白绿色提取,食用菌蛋白低碳加工等技术攻关,将实验室成果转化为可产业化的技术方案,形成“基础研究-技术开发-产业应用”的闭环。这种以技术难题为纽带的创新模式,不仅能提升我国在新质蛋白领域的科技话语权,而且能为保障国家食物供给安全,提升人民生命健康水平提供核心技术支撑。

3.4 愿景

通过强化政策与基金投入,集中攻坚新质蛋白十大关键技术,突破新质蛋白规模化生产、高品质制备的核心瓶颈,使我国在细胞培养肉、微生物蛋白、植物蛋白改性等领域达到国际领先水平,形成涵盖“原料开发-技术装备-终端产品-标准认证”的完整产业链,推动我国成为全球新质蛋白的科技创新策源地与产业发展高地,为全球食品体系转型与可持续发展贡献中国力量。

4 展望

随着全球“双碳”目标的深化推进,粮食安全战略的持续强化以及国民营养健康需求的全面升级,新质蛋白作为破解传统蛋白供给资源约束、环境压力与品质瓶颈的核心路径,其研究与应用既能缓解传统养殖的资源环境压力,又能优化膳食

结构,降低疾病风险,更是落实“大食物观”,保障国家食品安全的关键路径。当前,在国家“十四五”生物经济规划等政策支持和叠加高校与企业的协同攻关下,新质蛋白产业正加速进阶。预计未来几年,随着十大技术难题逐步攻克,新质蛋白将在食品行业占据重要地位,成为健康饮食新潮流的核心驱动力。抓住这一机遇,既是推动当下可持续发展的选择,也是为后代构建未来食品体系的长远布局。顺势而为方能有所作为。发展新质蛋白,功在当代,利在千秋!

参 考 文 献

- [1] CALICIOGLU O, FLAMMINI A, BRACCO S, et al. The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions[J]. Sustainability, 2019, 11(1): 222.
- [2] ISMAIL I, HWANG Y H, JOO S T. Meat analog as future food: A review[J]. Journal of Animal Science and Technology, 2020, 62(2): 111-120.
- [3] 陈坚. 中国食品科技:从2020到2035[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 1-5.
CHEN J. Food science and technology in China: From 2020 to 2035[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 1-5.
- [4] ASCHEMANN-WITZEL J, GANTRIIS R F, FRAGA P, et al. Plant-based food and protein trend from a business perspective: Markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(18): 3119-3128.
- [5] 李兆丰, 徐勇将, 范柳萍, 等. 未来食品基础科学问题[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(10): 9-17.
LI Z F, XU Y J, FAN L P, et al. Fundamental research in future foods[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(10): 9-17.
- [6] 周景文, 张国强, 赵鑫锐, 等. 未来食品的发展:植物蛋白肉与细胞培养肉[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(10): 1-8.
ZHOU J W, ZHANG G Q, ZHAO X R, et al. Future of food: Plant-based and cell-cultured meat[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020,

- 39(10): 1–8.
- [7] DE BOER J, AIKING H. On the merits of plant-based proteins for global food security: Marrying macro and micro perspectives [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(7): 1259–1265.
- [8] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 植物基肉制品研究进展与未来挑战[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(8): 1–10. JIANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Advance and challenges in plant-based meat [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(8): 1–10.
- [9] 李兆丰, 孔昊存, 刘潇, 等. 新质蛋白: 机遇与挑战 [J]. *生物工程学报*, 2025, 41(5): 1691–1704. LI Z F, KONG H C, LIU X, et al. NeoProtein: Opportunity and challenge [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2025, 41(5): 1691–1704.
- [10] 高智利, 杨军飞. 植物蛋白肉的研究进展与发展趋势[J]. *食品安全导刊*, 2021(12): 184–186. GAO Z L, YANG J F. Research progress and development trend of plant protein meat [J]. *China Food Safety Magazine*, 2021(12): 184–186.
- [11] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 299–305. OU Y J, ZHENG M J, ZENG H L, et al. Advance in plant-based meat research [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(12): 299–305.
- [12] WOOLF P J, FU L L, BASU A. vProtein: Identifying optimal amino acid complements from plant-based foods [J]. *PLoS One*, 2011, 6(4): e18836.
- [13] LAWAL K G, KAVLE R R, AKANBI T O, et al. Enrichment in specific fatty acids profile of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* larvae through feeding [J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100016.
- [14] HUANG J, LIAO L M, WEINSTEIN S J, et al. Association between plant and animal protein intake and overall and cause-specific mortality [J]. *JAMA Internal Medicine*, 2020, 180(9): 1173–1184.
- [15] 齐显尼, 何泓兴, 孔泽曦, 等. 微生物细胞工厂驱动新质蛋白生物制造 [J]. *中国食品学报*, 2025, 25(9): 16–30. QI X N, HE H X, KONG Z X, et al. NeoProtein biomanufacturing via designer microbial cell factories [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(9): 16–30.
- [16] HUMPENÖDER F, BODIRSKY B L, WEINDL I, et al. Projected environmental benefits of replacing beef with microbial protein [J]. *Nature*, 2022, 605(7908): 90–96.
- [17] FERNANDO S. Production of protein-rich pulse ingredients through dry fractionation: A review [J]. *LWT*, 2021, 141: 110961.
- [18] HEWAGE A, OLATUNDE O O, NIMALARATNE C, et al. Novel extraction technologies for developing plant protein ingredients with improved functionality [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 129: 492–511.
- [19] ZHU H G, TANG H Q, CHENG Y Q, et al. Electrostatic separation technology for obtaining plant protein concentrates: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113: 66–76.
- [20] SCHUTYSER M A I, PELGROM P J M, VAN DER GOOT A J, et al. Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 45(2): 327–335.
- [21] VALLIKKADAN M S, DHANAPAL L, DUTTA S, et al. Meat alternatives: Evolution, structuring techniques, trends, and challenges [J]. *Food Engineering Reviews*, 2023, 15(2): 329–359.
- [22] MONROY-RODRIGUEZ I, LOPEZ-HERNANDEZ R E, VILLALOBOS-ESPINOSA J D C, et al. Structural and functional modification of proteins by microfluidization: Principles and applications in food technology and engineering [J]. *ACS Food Science & Technology*, 2025, 5(10): 3677–3689.
- [23] LI H J, ZHANG L L, JIA Y Y, et al. Application of whey protein emulsion gel microparticles as fat replacers in low-fat yogurt: Applicability of vegetable oil as the oil phase [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(12): 9404–9416.
- [24] STOUT A J, KAPLAN D L, FLACK J E. Cultured meat: Creative solutions for a cell biological problem [J]. *Trends in Cell Biology*, 2023, 33(1): 1–4.
- [25] DAVID S, TSUKERMAN A, SAFINA D, et al. Co-culture approaches for cultivated meat production [J]. *Nature Reviews Bioengineering*, 2023, 1(11): 817–831.
- [26] YANG F, LI R, ZHAO C, et al. Single-cell sequencing reveals the new existence form of dermal papilla cells in the hair follicle regeneration of cashmere goats [J]. *Genomics*, 2022, 114(2): 110316.
- [27] 杨峰, 李莹莹, 王守伟, 等. 细胞培育肉种子细胞

- 永生化诱导研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(12): 52-62.
- YANG F, LI Y Y, WANG S W, et al. Research on immortalization induction of cell cultured meat seed cells[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science & Technology, 2022, 22(12): 52-62.
- [28] YANG F, HU H J, LI Y Y, et al. Research on organized method and regulatory mechanism of cell cultured meat based on modified silk[J]. Food Science and Human Wellness, 2025, 14: 9250222.
- [29] GUAN X, SUN W Q, MA Z W, et al. From lab to industry: Technologies and challenges for scaling up bioprocesses in cell-based food production [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 161: 105040.
- [30] XIN G, LEI Q Z, YAN Q Y, et al. Trends and ideas in technology, regulation and public acceptance of cultured meat[J]. Future Foods, 2021, 3: 100032.
- [31] DRISKILL J H, PAN D. Control of stem cell renewal and fate by YAP and TAZ[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2023, 24(12): 895-911.
- [32] LEE S Y, YUN S H, JEONG J W, et al. Review of the current research on fetal bovine serum and the development of cultured meat[J]. Food Science of Animal Resources, 2022, 42(5): 775.
- [33] MESSMER T, KLEVERNIC I, FURQUIM C, et al. A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation in the absence of serum starvation[J]. Nature Food, 2022, 3(1): 74-85.
- [34] VAMAN A M, HE L, YOU L, et al. Elucidation of intrinsic biosynthesis yields using ^{13}C -based metabolism analysis [J]. Microbial Cell Factories, 2014, 13(1): 42.
- [35] SANDBERG T E, SALAZAR M J, WENG L L, et al. The emergence of adaptive laboratory evolution as an efficient tool for biological discovery and industrial biotechnology[J]. Metabolic Engineering, 2019, 56: 1-16.
- [36] NIKITA S, BANERJEE S, JESUBALAN N G, et al. Holistic process control framework for smart biomanufacturing: A deep learning driven approach [J]. Computers & Chemical Engineering, 2024, 187: 108742.
- [37] YEE C S, ZAHIA-AZIZAN N A, ABD RAHIM M H, et al. Smart fermentation technologies: Microbial process control in traditional fermented foods[J]. Fermentation, 2025, 11(6): 323.
- [38] PORTO DE SOUZA VANDENBERGHE L, MURAWSKI DE MELLO A F, MATTE BORGES MACHADO C, et al. Alternative proteins production: Current scenario, bioreactor types, and scale-up strategies[J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2025, 5(1): 15-34.
- [39] DONG X X, SHI Y T, YAN X, et al. Comprehensive cell culture monitoring: Leveraging in-line Raman spectroscopy for enhanced biopharmaceutical manufacturing insights[J]. Process Biochemistry, 2024, 143: 1-12.
- [40] EASTHAM J L, LEMAN A R. Precision fermentation for food proteins: Ingredient innovations, bio-process considerations, and outlook—a mini-review [J]. Current Opinion in Food Science, 2024, 58: 101194.
- [41] AUGUSTIN M A, HARTLEY C J, MALONEY G, et al. Innovation in precision fermentation for food ingredients[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(18): 6218-6238.
- [42] NICKEL W, RABOUILLE C. Mechanisms of regulated unconventional protein secretion [J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2009, 10(2): 148-155.
- [43] WANG J, CHEN C H, ZHAO F Y, et al. Process optimization of microbial fermentation with parameter uncertainties via distributionally robust discrete control[J]. Journal of Process Control, 2023, 132: 103116.
- [44] ACHARYA V V, CHAUDHURI P. Modalities of protein denaturation and nature of denaturants[J]. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research, 2021, 69(2): 19-24.
- [45] MA J R, SUN Y F, MENG D M, et al. Yeast proteins: The novel and sustainable alternative protein in food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 190-201.
- [46] CHENG T F, ZHANG G F, SUN F W, et al. Study on stabilized mechanism of high internal phase Pickering emulsions based on commercial yeast proteins: Modulating the characteristics of Pickering particle via sonication[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 104: 106843.

- [47] AHMAD M I, FAROOQ S, ALHAMOUD Y, et al. A review on mycoprotein: History, nutritional composition, production methods, and health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 121: 14–29.
- [48] COLOSIMO R, WARREN F J, EDWARDS C H, et al. The interaction of α -amylase with mycoprotein: Diffusion through the fungal cell wall, enzyme entrapment, and potential physiological implications [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106018.
- [49] WU X H, ZHOU Z T, LUO S J, et al. Cell wall engineering –guided strategy for high –efficiency biosynthesis of nutrient–fortified *Fusarium venenatum* mycoprotein[J]. Bioresource Technology, 2025, 436: 133005.
- [50] WU X H, WANG M R, LUO S J, et al. Dual enhancement of mycoprotein nutrition and sustainability via CRISPR –mediated metabolic engineering of *Fusarium venenatum*[J/OL]. Trends in Biotechnology, (2025–11–19)[2025–12–15]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167779925004044>.

Top 10 Technical Challenges of NeoProtein in 2025

(Committee on NeoProtein, Chinese Institute of Food Science and Technology, Beijing 100048)

Abstract As a new type of protein resource that does not rely on traditional livestock or fishery production, NeoProtein is a core strategic direction for practicing the ‘Big Food Concept’ and safeguarding national food supply security. It holds great significance for promoting the upgrading of the food industry and realizing global sustainable development. Although the NeoProtein industry is currently showing a trend of rapid development, it still faces many bottlenecks in aspects such as technology industrialization and product quality optimization. Based on the current development status of the industry and the 2025 technology trends, this paper sorts out and identifies the top 10 technical challenges in the field of NeoProtein, and systematically expounds the background, challenges and solutions for each challenge. It is expected to provide references for scientific research, industrial innovation and policy formulation in related fields, and contribute to the high–quality development of the NeoProtein industry.

Keywords NeoProtein; technical challenges; biomanufacturing; big food concept