



叶可萍,陈承普,苏艺萌,等.从“发酵生产、食品加工、营养功能”三大视角审视真菌蛋白的50年发展[J].南京农业大学学报,2026,49(5):1259-1272.

Ye K P, Chen C P, Su Y M, et al. A fifty-year development of mycoprotein: a review from the perspectives of “fermentation production, food processing and nutritional function” [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(5): 1259-1272.

特约综述

从“发酵生产、食品加工、营养功能”三大视角 审视真菌蛋白的50年发展

叶可萍*, 陈承普, 苏艺萌, 宋紫晴, 黄娜, 钟雯, 顾哲宇, 周光宏

(南京农业大学食品科学技术学院, 江苏 南京 211800)

摘要:在蛋白质供给压力、膳食结构转型与资源环境约束加剧的背景下,真菌蛋白作为一种以丝状真菌菌丝体为基础、经工业发酵获得的微生物蛋白,因兼具天然纤维结构、优质蛋白组成及低脂、高膳食纤维等特征,受到替代蛋白研究领域的持续关注。本文以威尼斯镰刀菌(*Fusarium venenatum*)蛋白为代表,从发酵生产、食品加工和营养功能3个视角系统综述真菌蛋白50年来的研究进展。总体来看,真菌蛋白的优势不仅在于其可规模化发酵生产,更在于其保留天然菌丝结构的食品加工逻辑,以及在能量摄入调节、糖脂代谢改善和肌肉蛋白合成支持等方面表现出的潜在营养价值。然而,其产业化应用仍面临发酵放大、菌株改良、结构调控、风味适配及本土化消费场景拓展等挑战。本文可为真菌蛋白的基础研究深化、食品化应用开发及可持续蛋白产业布局提供参考。

关键词:真菌蛋白;发酵生产;食品加工;营养功能

中图分类号:TS201.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)05-1259-14

A fifty-year development of mycoprotein: a review from the perspectives of “fermentation production, food processing and nutritional function”

YE Keping*, CHEN Chengpu, SU Yimeng, SONG Ziqing, HUANG Na,
ZHONG Wen, GU Zheyu, ZHOU Guanghong

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Under increasing pressure from protein supply demands, dietary transitions, and resource and environmental constraints, mycoprotein has attracted growing attention as a microbial protein derived from filamentous fungal mycelia through industrial fermentation. Owing to its intrinsic fibrous structure, high-quality protein composition, low fat content, and richness in dietary fiber, mycoprotein shows distinctive potential in the alternative protein field. Taking *Fusarium venenatum*-derived mycoprotein as a representative example, this review summarizes its fifty-year development from the perspectives of fermentation production, food processing, and nutritional function. Overall, the value of mycoprotein lies not only in its scalability through fermentation, but also in its processing logic based on the preservation of natural mycelial structures and its potential benefits in energy intake regulation, glucose and lipid metabolism, and muscle protein synthesis. Nevertheless, its broader industrial application still faces challenges related to fermentation scale-up, strain improvement, structural control, flavor adaptation, and localization for diverse dietary contexts. This review provides a reference for advancing fundamental research, food application development, and sustainable protein industry strategies related to mycoprotein.

Keywords: mycoprotein; fermentation production; food processing; nutritional function

在全球人口增长、膳食结构转型以及资源与环境负担日益加剧的背景下,蛋白质供给体系正面临重新调整^[1]。传统动物蛋白在营养质量与感官属性方面具有优势,但其生产高度依赖土地、水资源和饲料投入,并伴随较高的温室气体排放^[2];植物蛋白虽然在资源利用效率上具有一定优势,但在必需氨基酸平衡、蛋白质量稳定性以及食品加工适配性等方面仍存在局限^[3]。如何构建兼具营养价值、工业可扩展性

收稿日期:2026-04-15

基金项目:肉品质量控制与新资源创制全国重点实验室开放课题(SKLMQCCMD2025012)

作者简介:叶可萍,教授,博导,主要从事肉品质量控制与新资源创制方面的研究,E-mail:yekeping.arc@163.com。*通信作者。

与环境可持续性的替代蛋白路径,已成为食品科学、生物技术和公共营养研究领域的核心议题。基于微生物生物量的蛋白生产方式因其高转化效率和较低的农业资源依赖度而受到持续关注^[4],其中以丝状真菌菌丝体为基础的真菌蛋白(mycoprotein)是目前少数已完成长期食品级产业化验证的微生物蛋白类型^[5]。与以分离、重组和高强度加工为核心工艺的植物蛋白不同,真菌蛋白以完整菌丝体为食品基质,具有天然丝状结构、高蛋白含量以及低脂、不含胆固醇等营养特征^[6],在仿肉制品、功能食品及可持续蛋白体系中展现出巨大潜力。自20世纪后期,以 *Fusarium venenatum* 为代表的真菌蛋白实现商业化^[7]以来,该技术路径逐步从应对蛋白资源压力的工程方案演变为兼具食品属性与健康价值的产业体系。

近年来,随着发酵工程、合成生物学和食品加工技术的发展,真菌蛋白的研究重心已由早期的可行性探索 and 安全性评价转向发酵菌种优化、发酵过程控制、食品组织化构建、风味调控以及营养功能机制等方面。一方面,在上游发酵环节中,菌种筛选、发酵控制和成本控制等方面仍存在挑战^[8];另一方面,下游食品化加工逐渐形成区别于植物蛋白挤压重组的技术路线,涉及复合凝胶体系构建、冷冻或定向加工诱导纤维结构形成^[9]以及风味调控等关键环节。另外,营养学与公共健康领域的研究表明,真菌蛋白不仅能够提供高质量蛋白,还因其蛋白与独特的细胞结构,在能量摄入调节、糖脂代谢改善和肌肉蛋白合成等方面表现出潜在功能价值^[6]。尽管如此,现有研究仍呈现出明显的分散性:部分研究聚焦真菌蛋白的营养或健康效应^[10],部分研究关注发酵工艺或食品加工技术^[11],而对其从发酵生产到食品应用的整体技术逻辑、产业化进展及营养功能机制之间的关联缺乏系统梳理,在食品科学与营养科学框架下仍需进一步评估与整合。

基于此,本文从发酵生产、食品加工和营养功能特性出发,围绕真菌蛋白的发展脉络与产业基础、生产工艺与关键技术、营养特性与功能价值以及未来挑战与发展方向等方面,系统综述真菌蛋白领域的研究进展,旨在为真菌蛋白相关研究的进一步深化及其在可持续食品体系中的应用提供参考。

1 真菌蛋白的发展脉络与产业基础

1.1 发展脉络与关键里程碑

真菌蛋白的产业化形成于20世纪中后期蛋白供给压力与工业发酵技术发展的共同背景下。与早期主要面向饲料用途的微生物蛋白不同,以 Quorn 为代表的真菌蛋白从开发初期即定位于人类食品原料,其产业化关键在于获得兼具连续培养适应性、食品安全性和结构加工潜力的丝状真菌菌株。如图1所示,Quorn 真菌蛋白产业化最早可追溯至英国食品集团 Rank Hovis McDougall(RHM)研发计划^[12]。该计划旨在利用大宗谷物与淀粉类原料,筛选能够高效转化为可食用菌丝体生物质的微生物,并进一步开发具有肉类质构替代潜力的食品原料。经过大规模菌株筛选,A3/5菌株在蛋白积累、气味特征、安全性风险和发酵适应性等方面更符合产业化目标,最终被确定为 Quorn 真菌蛋白的核心生产菌株。该菌株最初被鉴定为 *Fusarium graminearum*,后续经分类学修订归为 *Fusarium venenatum*^[13]。

真菌蛋白能够从实验室走向食品市场,核心转折点发生在安全性评价体系的建立上。1970—1980年,围绕 *Fusarium* sp. 可能产生真菌毒素形成了系统安全性评价资料,评价内容重点包括潜在真菌毒素风

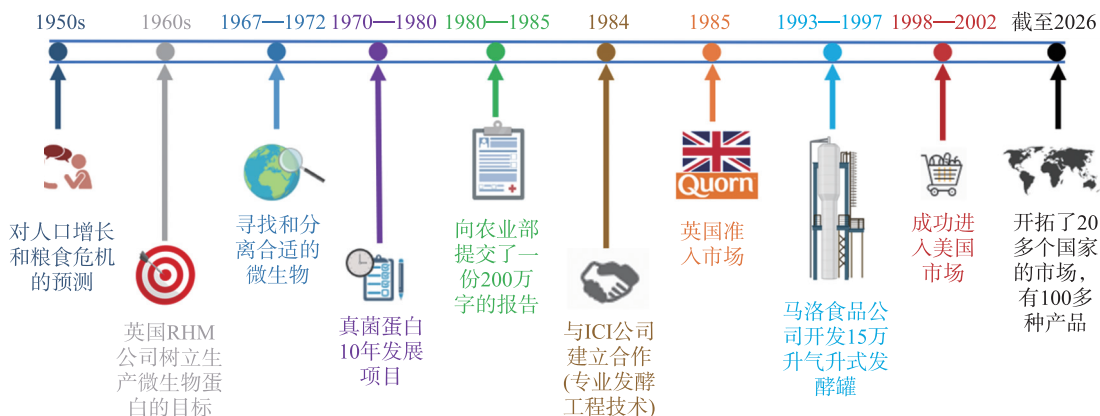


图1 Quorn 真菌蛋白的发展历程

Fig. 1 The development history of Quorn mycoprotein

险、动物饲喂安全性及人体试食耐受性^[14]。上述结果于1983年前后提交给英国农业、渔业与食品部(MAFF),并在1985年获批在英国市场销售^[8]。由此可见,Quorn真菌蛋白的产业化并非单纯依赖发酵工艺放大,而是在长期安全评价、监管审查与食品化应用验证共同支撑下逐步实现的。相关回顾也指出,Quorn的商业化成功本质上是长期研发积累、法规审评和市场培育共同作用的结果^[15]。这一过程虽然延长了产品上市周期,但也为其后续跨区域准入和商业化扩张奠定了较为稳固的法规基础与市场信任。

在安全性评价和英国市场准入的基础上,Quorn真菌蛋白随后进入产业化放大阶段。RHM与杜邦(DuPont)等相关工业合作方在连续发酵、无菌控制和反应器放大等方面开展工艺开发,推动生产体系由试验规模向商业化连续发酵转化,并为后续稳定供应和产品扩张奠定了工程基础^[8]。早期生产体系曾依赖连续搅拌釜式反应器,但随着工业合作和发酵工程优化的推进,气升式发酵技术逐步成为规模化生产的重要支撑^[16]。自1985年在英国上市后,基于*F. venenatum*的真菌蛋白逐步进入欧洲、北美及部分亚太市场,并在长期消费过程中积累了安全性和营养价值相关证据^[14]。中国于2025年正式批准*F. venenatum*真菌蛋白作为新食品原料,标志着该类产品进入全球最大食品消费市场之一,成为其全球化进程中的最新里程碑。

1.2 法律法规与消费者接受度

近年来,真菌蛋白已逐步进入全球主要国家和地区的食品监管体系,总体监管思路日趋清晰,在鼓励产业创新的同时确保公众食用安全。各国对真菌蛋白的监管差异主要体现在准入程序上,而安全审评的核心关注点基本一致,均集中于生产菌株身份与遗传稳定性、发酵及后处理工艺控制、脱核酸与杂质去除、重金属和微生物污染控制、营养适用性、潜在毒理与过敏风险,以及标签真实性和特定人群提示等方面。我国对真菌蛋白的监管主要依据《中华人民共和国食品安全法》和《新食品原料安全性审查管理办法》。凡在我国无传统食用习惯的真菌来源食品原料,原则上需按新食品原料申报,由国家卫生健康委员会组织安全性审查,重点评估其原料属性、生产工艺、质量规格、毒理学资料、营养学特性及食用安全性。2025年11月,国家卫生健康委员会发布2025年第7号公告,正式批准威尼斯镰刀菌蛋白为新食品原料,明确其可由*F. venenatum* A3/5或TB01菌株经发酵、脱核酸、灭活、过滤等工艺制成。该公告同时规定,产品蛋白质含量应不低于 $50.0\text{ g}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ (以干基计),RNA含量应不高于 $2.0\text{ g}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ (以干基计),并要求对婴幼儿、孕妇、哺乳期妇女及食用真菌过敏者标注不适宜食用提示。这标志着我国真菌蛋白已具备明确的法规准入路径和产业化政策基础。

在国际上,美国、加拿大、新加坡、澳大利亚、新西兰等国家以及欧盟虽然采用不同法律法规,但对产品的核心安全管理要求高度一致。美国主要通过“一般认为安全(generally recognized as safe, GRAS)”路径管理*F. venenatum*来源的真菌蛋白,表明其在特定用途下具备食品应用基础,但企业仍需对菌株身份、生产一致性、配料标识、用途、安全等承担主体责任。欧盟委员会则依据(EU)2015/2283号法规将真菌蛋白作为新型食品(1997年5月15日后缺乏食用历史的食品)实施统一管理,需要完成授权后方可上市,但2024年对与Quorn使用相同菌株和工艺的*F. venenatum*真菌蛋白可不再重复进入新型食品授权程序。加拿大对真菌蛋白实行新型食品上市前通知制度,要求系统提交产品、生产工艺、营养组成、微生物学、毒理学及潜在致敏性资料;新加坡则将真菌蛋白纳入新型食品上市前批准框架,重点审查毒性、过敏性、生产安全性和膳食暴露风险;澳大利亚和新西兰也通过新型食品管理和标准体系对真菌蛋白相关产品实施准入控制。

真菌蛋白在全球食品体系中的身份并不明确,它既不同于传统食用菌子实体,也不同于植物蛋白分离物,而是以丝状真菌菌丝体为基础的发酵生物物质食品原料。Quorn以品牌形式进入零售体系,早期产品以超市场景销售(例如由Sainsbury推出的咸味派类产品)^[14],使真菌蛋白第一次以真实食品形式而非实验室发酵产物完成市场验证。市场在产品传播策略上刻意弱化“fungus”字样,以更易被消费者接受的表述进行沟通^[16],这反映出消费者接受度并非单纯由“是否愿意吃真菌”决定,而是由产品形态、风味与文化共同塑造。欧洲市场对Quorn类产品接受度较高,这与其长期素食/低肉消费选择、多元即食食品文化以及对低脂高纤维健康的认同有关。随着早期“蛋白危机”的弱化,Quorn的定位逐渐从应急蛋白向健康、低环境负担的新型蛋白转变,推广到欧洲、澳大利亚、美国以及亚洲市场^[8]。由全球替代蛋白权威机构The Good Food Institute(GFI)发布的《美国真菌蛋白消费者概览》显示,仅有28%的受访者对“由蘑菇和真菌制成的肉类”概念“非常”或“有些”熟悉,而当向消费者解释了真菌蛋白的生产过程及其能制成类似肉类的

产品后,33%的人认为它“非常有吸引力”,23%的人表示如果提供免费样品,他们“极有可能”或“非常可能”尝试;当使用“Mycoprotein(真菌蛋白)”“Mycelium protein(菌丝蛋白)”或“Nutritional fungi protein(营养真菌蛋白)”等字样时,约有50%的消费者表现出尝试意愿。与欧洲市场相比,真菌蛋白在东亚市场的挑战并不完全来自对“真菌”本身的文化陌生,更多可能来自产品形态的饮食适配性以及风味口感与家庭烹饪方式的匹配程度。好食品研究所亚太区(GFI APAC)对真菌蛋白领军品牌 Quorn 在亚洲的拓展调研显示,在新加坡等亚太地区,消费者对“无肉食品”的认知基准线是极其成熟、廉价的“传统素肉”。真菌蛋白必须在形态和质地上突破传统面筋、豆腐的局限,才能在亚洲家庭的餐桌上立足,而不是仅作为“西式快餐替代品”。

2 真菌蛋白的生产工艺与关键技术

真菌蛋白的生产本质上是一种以食品属性为导向的微生物发酵过程,不同于以高纯度活性成分为目标的制药发酵,也区别于以生物量或蛋白产量最大化为核心的单细胞蛋白发酵。如图2所示,真菌蛋白的生产核心在于获取具有食品属性的菌丝体物质,而非以胞外代谢产物或单一组分为目标,其工艺流程包括菌种活化、受控发酵、热处理降低RNA含量以及离心分离等上游发酵步骤,获得结构与成分适用于食品加工的菌丝体原料。在此基础上进入下游加工阶段,通过添加凝胶类蛋白及风味物质等辅料,实现质构构建与风味适配,随后结合冷冻组织化处理诱导菌丝发生重排与定向聚集,形成具有层状纤维结构的仿肉组织形态,从而实现真菌产品的食品化与结构化设计特征。因此,真菌蛋白生产体系已实现从发酵工程到食品化加工的贯通融合,共同决定其产业化应用潜力与消费场景适配性。

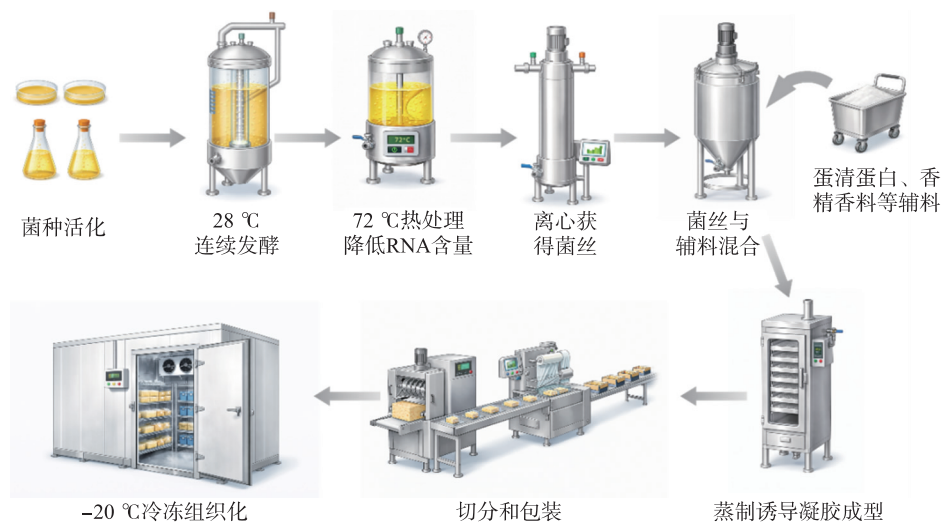


图2 以鸡块类真菌蛋白产品为例的生产与食品化加工流程

Fig. 2 Production and food-processing workflow of mycoprotein using nugget-type products as an example

2.1 上游技术:菌种开发与发酵优化

真菌蛋白的上游部分包括菌种筛选与菌株发酵,其核心科学问题在于如何获得既适合连续发酵又满足食品安全的丝状真菌菌丝体,并在可控条件下达到高蛋白、高生物量与稳定形态等特征。

在菌种筛选方面,筛选对象通常聚焦于丝状真菌,其具有酵母和细菌不具备的天然纤维状菌丝结构,更有利于形成有咀嚼性的纤维结构。从食品角度看,菌种筛选标准主要包括4个方面:1)安全性,包括不产真菌毒素、无致敏性与无毒理学风险;2)营养与组成,例如干基中蛋白含量一般要求在40%以上,必需氨基酸模式接近动物蛋白;3)生长动力学特征,包括菌丝生长速度、溶氧需求、碳氮源利用率及是否可以连续培养等;4)食品属性,包括颜色、风味以及菌丝形态是否适于下游食品加工。*F. venenatum*之所以成为目前最典型的真菌蛋白规模化生产菌种,就在于其在上述4个方面表现均衡,而类似菌种如*Rhizopus* sp. 和*Neurospora* sp. 在某些食品应用中也表现出潜力^[17]。随着微生物育种与合成生物学技术的发展,基因编辑与代谢工程为进一步提升真菌蛋白的生产效果提供了新的路径。真菌蛋白有关菌株潜在的改造靶点包括提高蛋白合成效率、优化氨基酸组成、提升非粮碳源利用、降低色泽或代谢副产物生成等。例如,通过调控氮代谢通路提高蛋白得率,通过调整碳流分配降低脂类副产物的积累^[18]。然而,此类技术带来食

品安全与毒理审查体系、市场端的“GMO 食品”消费者接受度等问题,基因编辑菌株更多处于研究或食品以外场景试验阶段,离食品产业化场景还有比较长的一段路要走。

发酵工程是决定真菌蛋白生产效率的核心环节。与酵母等单细胞微生物相比,丝状真菌在深层液体培养中会形成分散菌丝、菌团或菌球等不同形态,体系黏度、流变特性和氧传递行为也更为复杂,因此其工艺设计通常不能简单套用高剪切、高搅拌强度的常规模式,而需根据菌株特性和产品目标选择更合适的反应器与运行方式^[17]。对于以菌丝体本身为目标产物的真菌蛋白生产,连续发酵可维持菌丝体的稳定形态,同时提高单位时间产出的生物量,但发酵条件的调控还取决于目标产物类型、形态控制要求与放大条件。因此,真菌蛋白发酵过程中的关键工程变量控制应为多因素协同优化,包括氧供与传质能力(如溶氧水平、体积氧传递系数等)、剪切力、培养基组成及碳氮配比、底物供给方式、pH 值、温度等理化条件,共同影响菌丝生长、形态演替、代谢分配和单位体积生产效率,最终决定真菌蛋白生产的稳定性与经济性^[19]。其中,溶氧水平是限制丝状真菌代谢的重要因素,过低的溶氧会导致代谢流偏向发酵端并降低蛋白得率,而过高溶氧需求会增加搅拌与曝气负担,带来能耗与机械剪切问题^[15]。剪切力影响菌丝长度与聚集状态,高剪切环境会导致菌丝断裂,不利于后续形成食品组织化的纤维质构,而低剪切环境则可能会形成菌团或菌球,使氧传递受限,降低生物量累积^[5,16]。此外,碳氮比直接影响菌丝代谢流向与蛋白产量,而补料分批发酵与连续发酵之间的选择,则涉及代谢稳态控制与放大可行性问题^[5]。

2.2 下游技术:食品化加工与品质调控

发酵获得的真菌蛋白菌丝体尚难以直接呈现仿肉制品所需的纤维结构及风味特征,需通过后续食品化加工对其结构与功能进行调控与重构。植物蛋白组织化通常以分离蛋白或浓缩蛋白为原料,通过高温、高剪切和压力作用诱导蛋白解折叠、取向和再聚集,从而重构纤维状结构;真菌蛋白则以发酵形成的完整菌丝体为结构基础,加工重点在于保留天然菌丝形态,并通过复合凝胶网络、冷冻诱导取向和成型技术增强菌丝间结合与结构稳定性。由此,真菌蛋白食品化加工并非简单复制植物蛋白挤压重构路径,而是形成了以天然菌丝保留、网络补强和结构定向调控为核心的技术路线^[20]。

肉类的弹性、咀嚼感与保水性依赖肌原纤维蛋白的热凝胶机制^[21],而真菌蛋白的菌丝细胞壁由 β -葡聚糖和几丁质组成,其自身凝胶能力远不足以支撑肉制品所需的力学性能。因此食品化加工中普遍采用在真菌蛋白菌丝体外加其他蛋白质(如蛋清蛋白、马铃薯蛋白、大豆分离蛋白等)、多糖(如海藻酸钠、卡拉胶、魔芋粉等)等物质来构建“复合凝胶网络结构”,作为质构支撑与水分固定的核心体系(图 3-a)。蛋清蛋白在加热条件下会发生变性与聚集,形成连续的蛋白凝胶相,将真菌菌丝嵌入其中形成类似复合材料结构,可显著提高产品的弹性与断裂强度。多糖体系则通过离子交联或热诱导形成凝胶网络,例如 Ca^{2+} 诱导的海藻酸钠“卵盒结构”可提供较强的凝胶硬度与形状保持性,而 κ -卡拉胶在 K^+ 诱导下形成脆性凝胶,增强产品的咀嚼断裂感^[22]。这些凝胶网络通过氢键、疏水作用、静电作用与离子交联等共同构成多尺度支撑结构,使产品在加工、冷冻、加热与咀嚼过程中保持结构稳定,在这个过程中一些加工参数如 pH 值、离子强度、加热曲线、剪切处理与冷却速率均会显著影响产品的凝胶网络结构,在产品研发过程中需要关注与考虑。



图3 真菌蛋白仿肉纤维结构构建技术

Fig. 3 Technologies for constructing fibrous structures in mycoprotein-based meat analogues

在真菌蛋白产品凝胶体系形成之后,食品化加工过程中需构建具有纤维取向特征的宏观结构,以模拟肉类肌束组织的质构特性。肉类的纤维结构来源于肌纤维束沿特定方向排列形成的层状组织结构,并呈现明显的可分离纤维感,这也是仿肉制品中最难模拟的质构特征之一。植物蛋白主要通过热挤压技术中的链段解旋与再聚集实现纤维重构^[23],而真菌蛋白可利用菌丝自身的天然丝状结构,通过冷冻诱导纤维

化、3D 打印等技术,实现分层排列、纤维取向及可分离纤维状质构的构建。冷冻速率通过影响冰晶尺寸和分布,进一步调控菌丝体的排布与聚集。较慢冻结条件下,较大冰晶的生长可促进菌丝和凝胶相被排挤至冰晶间隙,形成较明显的束状聚集和层状结构;较快冻结则倾向于形成较小且分布更均一的冰晶,使结构更加细密,但宏观层状分离和纤维取向可能相对较弱^[24]。如图 3-b 所示,真菌蛋白的冷冻诱导纤维化,主要是通过冷冻过程中形成的冰晶作为物理模板定向生长,并排挤固相与水相,造成相分离与真菌蛋白菌丝重排。缓慢冻结条件下,大冰晶生长和冰晶之间的挤压作用使菌丝聚集成束,产品呈现层状组织;解冻后冰晶融化留下的孔隙进一步增强产品的各向异性纤维网络(方向性结构),使产品能够形成可咀嚼的纤维网络结构^[25]。与植物蛋白挤压“由无序到有序”的链段重构不同,冷冻纤维化属于“模板驱动相分离”,其影响因素包括冷冻速率、温度梯度、预冻结/最终冻结温度等,共同决定纤维的层状结构特征、取向排列,以及形成纤维状连续网络所赋予的质构和口感特性(层状结构厚度、方向性与撕裂行为)。该技术路径的优势在于能量需求低、工艺相对温和且不依赖高温高剪切设备,但缺点在于结构可控性有限、方向性与层状阶梯受冰晶生长动力学影响较大,并且对后续凝胶网络的配合依赖较强。然而,冰晶对凝胶网络存在一定的不可逆破坏作用,冷冻工艺下凝胶体系的强度和保水性显著下降。

近年来研究人员开始利用 3D 打印技术构建真菌蛋白产品的组织化结构。如图 3-c 所示,基于挤出式食品 3D 打印的结构构建方法逐渐受到关注。真菌蛋白菌丝在挤出过程中具有部分定向排列能力,若辅以合适的复合凝胶体系,则能够实现纤维方向可控的结构构建。真菌蛋白 3D 打印墨水通常需要由菌丝体、蛋白类凝胶辅料、多糖胶体和水相共同构成^[9]。其中,菌丝体提供纤维结构基础,蛋清蛋白等蛋白类辅料可增强热凝胶支撑和层间结合^[20],海藻酸钠等多糖则有助于调节黏度、结构恢复和形状保持性。理想墨水应在喷嘴挤出时表现出剪切变稀特性,以降低挤出阻力;沉积后则需快速恢复黏弹网络,并具有足够的储能模量和屈服应力,以防止塌陷、流散或层间融合。与冷冻路线不同,3D 打印允许在宏观尺度上设计纤维路径、空间分布与孔隙结构,更适用于个性化营养与定制食品的开发。然而真菌蛋白墨水必须同时具备剪切变稀性、快速结构恢复能力与足够的储能模量以维持打印后稳定性,这要求合理的流变调控、凝胶网络补强与后处理方式匹配。例如,复合海藻酸钠或蛋清可实现打印后网络重构,提高结构保持性与机械性能^[9]。当前该路线主要存在于实验室阶段,瓶颈包括流变窗口窄、工艺稳定性不足、打印后微结构与质构关系尚不明确等问题,但从技术趋势而言,其代表了真菌蛋白从“静态模板”走向“动态制造”的结构加工新范式。此外,在植物基仿肉制品中用于制备纤维结构的技术,如高水分挤压技术、静电纺丝技术、湿法纺丝技术和高温锥形剪切等技术^[26]在真菌蛋白仿肉纤维结构构建的适配性尚未研究。未来应开发更多的仿制纤维技术协同应用,以适配仿肉制品的多样化需求。

风味表现是影响产品市场接受度的重要因素。真菌蛋白本身具有一定鲜味基础和风味可塑性,但其感官短板通常来自发酵、加工和储藏过程中形成的不良挥发性风味。已有研究表明,镰刀菌属来源的真菌蛋白具有较高的谷氨酸水平,结合其相对温和的基底气味和纤维状结构特征,使其不仅是仿肉制品的重要蛋白原料,也可为后续鲜味增强和肉香构建提供基础^[24,27-29]。然而,真菌蛋白的风味具有明显的双面性。一方面,鲜味氨基酸、核苷酸和肽类可为风味塑造提供正向基础;另一方面,不良风味可能来源于发酵底物和培养基残留、微生物代谢副产物、热加工反应、少量脂质或辅料氧化,以及储藏包装过程中挥发性醇类、醛类、酮类和呋喃类物质的变化,从而形成发酵味、氧化味或陈味等感官缺陷。因此,真菌蛋白风味优化的重点并不只是简单掩盖异味,而是在保留其鲜味基础的同时,从发酵源头、后处理过程和储藏条件 3 个方面抑制异味物质的生成、释放与累积^[30]。

基于此,真菌蛋白的风味调控可从发酵端、后处理端和产品构香端协同展开。在前端发酵调控阶段,可通过优化培养基的碳氮组成及供氧量等条件,调节风味前体的形成与转化,从源头减少异味前体和微生物代谢副产物的积累。在中端后处理阶段,可采用热处理、真空脱气、洗涤、乙醇洗涤、吸附剂辅助或生物脱味等方式削弱异味;现有研究表明,热、非热及生物技术组合均可有效减少蛋白类替代食品中的异味,而微生物脱味的重要机制之一就是將醛、酮等关键异味分子进一步转化为气味阈值更低的醇类或羧酸^[31-33]。在后端正向风味构建方面,可利用酵母抽提物、发酵酶解产物、天然来源氨基酸和还原糖、香辛料及可控脂肪来源进行反应性香味构建,通过鲜味增强、美拉德反应和烹调香气生成,形成更接近畜肉制品的肉香、鲜味和复合熟制风味^[34-35]。与此同时,清洁标签理念的强化正在使真菌蛋白风味构建从单纯异味遮盖转向天然来源配料、发酵衍生物和反应性风味体系的协同设计。有研究指出,消费者通常将清洁

标签理解为配方更简洁、成分更天然、更少的人工添加且标签更易识别。因此,未来真菌蛋白风味优化将更倾向于依赖发酵酶解产物、酵母抽提物和反应性风味前体等天然控制手段,实现更自然的异味脱除和肉味增强,而非单纯依赖添加外源香精来进行异味掩蔽^[29,34]。

综合来看,真菌蛋白的下游加工并非简单复制植物蛋白依赖挤压重构纤维的组织化路径,而是以发酵形成的天然菌丝体为结构基础,通过复合凝胶网络增强菌丝间结合与保水能力,并结合冷冻诱导取向、3D打印成型和风味调控等手段,进一步改善产品的层状结构、咀嚼质构和感官接受度。与植物蛋白从分离蛋白出发、依靠高温高剪切实现蛋白重组不同,真菌蛋白加工更强调对天然菌丝结构的保留、固定与定向调控。这一特点使其在替代蛋白食品开发中形成了区别于植物蛋白挤压组织化的加工逻辑和应用优势。

3 真菌蛋白的营养特性与功能价值

真菌蛋白兼具高质量蛋白与结构性膳食纤维的营养属性(图4),这种“蛋白+纤维”的组合在常见的动物与植物来源的替代蛋白产品中并不常见,因此其生理功能不仅体现在为机体提供氨基酸底物与保障组织生长与修复,还涉及胃肠动力、能量代谢以及脂糖代谢等多方面营养调控。从营养科学视角评价真菌蛋白,既需要讨论其氨基酸组成、生物利用度与蛋白质量等营养指标,也需要关注细胞壁结构、可溶-不溶膳食纤维组合以及脂质组分特征等特殊因素,这些因素共同决定了真菌蛋白的营养特性与潜在功能价值。

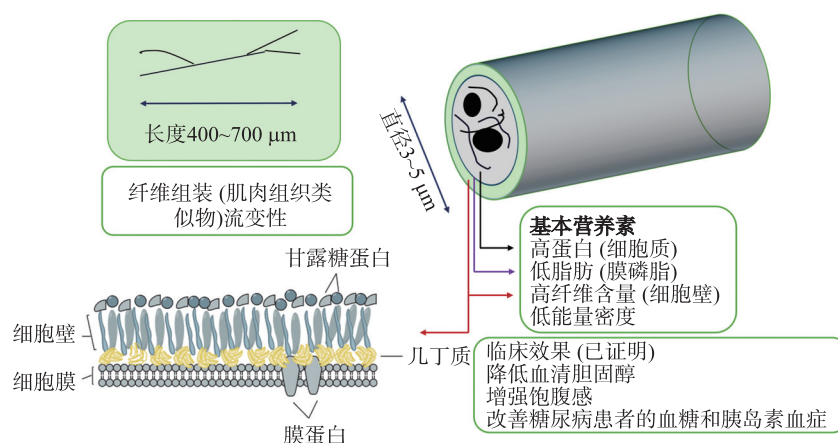


图4 真菌蛋白的结构、营养和功能特点

Fig. 4 Structural, nutritional, and functional characteristics of mycoprotein

3.1 营养特性

真菌蛋白在营养组成上具有高蛋白、高膳食纤维、低脂肪和低能量等特点(表1)。与牛奶、鸡蛋、畜禽肉类及大豆、小麦等传统蛋白来源相比,其营养优势主要体现在蛋白质与结构型膳食纤维共存、脂肪和胆固醇负担较低等方面。在宏量营养素方面,真菌蛋白总碳水化合物及糖含量极低,而蛋白质含量为 $11.25 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,与鸡蛋和小麦处于相近水平,低于多数畜禽肉类,但高于牛奶;在氨基酸组成上,真菌蛋白含有人体所需的全部必需氨基酸,涵盖组氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸等。在微量营养素层面,真菌蛋白最突出的特征为高膳食纤维与低脂低能量,总膳食纤维含量达 $6.00 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,高于动物源蛋白,并与部分植物性蛋白来源存在差异,且总脂肪含量仅为 $2.90 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,其中饱和脂肪酸为 $0.60 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,远低于鸡蛋、畜禽肉类及小麦等,同时能量密度仅 $355.64 \text{ kJ} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,显著低于多数动物蛋白来源。此外,真菌蛋白不含胆固醇,但矿物质含量丰富,铁、锌含量分别为 $0.50, 9.00 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,真菌蛋白锌含量较高、钠含量较低,提示其在矿物质组成上具有一定特点,但相关比较仍需结合产品形态、配方组成和数据来源途径进行判断,同时还含有一定量的硒等矿物质。因此,真菌独特的成分构成使其在提供优质蛋白的同时兼具低脂肪、高纤维、低能量的营养优势,为其作为健康蛋白来源提供了重要的理论依据。

从蛋白质角度看,真菌蛋白属于优质蛋白来源,其必需氨基酸构成较为均衡。Lee 等^[6]研究显示,真菌蛋白中的亮氨酸、赖氨酸与苏氨酸等含量较高,尤其亮氨酸比例接近乳制品蛋白,这对于蛋白质合成与肌肉生长具有重要意义。在蛋白质质量评价方面,真菌蛋白的蛋白质消化率校正氨基酸评分(protein digestibility-corrected amino acid score, PDCAAS)接近 1.0,可消化必需氨基酸评分(digestible indispensable amino acid score, DIAAS)也显示其具有较高的蛋白质量和必需氨基酸供给能力,这表明真菌蛋白不仅具有

较均衡的氨基酸组成,其必需氨基酸也具有较好的消化利用潜力^[36]。一些急性摄入研究表明,真菌蛋白摄入后血浆必需氨基酸水平显著升高,但释放动力学呈现较为平缓而持续的变化,这与乳清蛋白等快速吸收蛋白形成对比,表明真菌蛋白的细胞壁结构可能在一定程度上调节了蛋白释放与吸收速率^[35]。在替代蛋白中,真菌蛋白这一功能极具营养价值,因为植物蛋白往往受限于某一必需氨基酸不足(如小麦的赖氨酸缺陷)或具有较低 DIAAS,而动物蛋白虽然蛋白质量高,却伴随较高饱和脂肪和胆固醇摄入风险。

表 1 真菌蛋白与传统来源蛋白的成分组成比较^[8]

Table 1 The composition of mycoprotein compared with traditional protein sources^[8]

成分 Components	真菌蛋白 Mycoprotein	牛奶 Milk	鸡蛋 Egg	牛肉 Beef	猪肉 Pork	鸡肉 Chicken	大豆 Soybean	小麦 Wheat
蛋白质/(g·100 g ⁻¹)	11.25	3.40	12.56	20.20	21.80	24.00	14.00	13.70
必需氨基酸								
组氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.35	0.09	0.30	0.66	0.89	0.72	0.60	2.30
异亮氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.52	0.20	0.68	0.87	1.06	1.22	1.10	3.40
亮氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.86	0.32	1.10	1.53	1.83	1.82	1.80	6.80
赖氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.83	0.26	0.90	1.60	2.05	1.39	1.40	2.50
蛋氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.21	0.08	0.39	0.50	0.60	0.68	0.30	1.80
苯丙氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.49	0.16	0.66	0.76	0.91	1.17	1.10	4.40
色氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.16	0.05	0.16	0.22	1.03	0.19	0.30	1.00
苏氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.55	0.15	0.60	0.84	0.28	0.71	0.80	2.80
缬氨酸/(g·100 g ⁻¹)	0.62	0.22	0.76	0.94	1.24	1.21	1.10	4.50
总膳食纤维/(g·100 g ⁻¹)	6.00	微量	微量	微量	微量	微量	6.10	11.20
总脂肪/(g·100 g ⁻¹)	2.90	1.70	9.51	4.30	4.00	1.10	7.30	2.50
饱和脂肪酸/(g·100 g ⁻¹)	0.60	1.10	3.13	1.70	1.40	0.30	0.90	0.74
总碳水化合物/(g·100 g ⁻¹)	3.00	4.70	微量	0.06	微量	微量	5.10	71.10
糖/(g·100 g ⁻¹)	0.50	4.60	微量	微量	微量	微量	1.64	5.00
铁/(mg·100 g ⁻¹)	0.50	0.02	1.75	3.50	0.80	0.40	3.00	3.60
锌/(mg·100 g ⁻¹)	9.00	0.40	1.29	0.40	2.10	0.70	0.90	2.80
钠/(mg·100 g ⁻¹)	5.00	43.00	142.00	43.00	63.00	60.00	1.00	2.00
硒/(μg·100 g ⁻¹)	20.00	1.00	11.00	1.00	13.00	12.00	5.00	70.70
维生素 B ₁₂ /(μg·100 g ⁻¹)	微量	0.40	0.89	0.40	微量	微量	微量	微量
能量/(kJ·100 g ⁻¹)	355.64	192.46	631.78	719.65	514.63	443.50	589.94	1 418.38

真菌蛋白的另一显著特征是具有“结构型”膳食纤维,其菌丝体细胞壁主要由 β-葡聚糖和几丁质组成,二者以共价或非共价结合形成致密的纤维网状结构,共同构成了真菌蛋白特有的细胞壁骨架。与谷物、豆类等植物源膳食纤维不同,真菌蛋白的结构型膳食纤维具有独特的糖苷键连接方式与聚合度,使其在肠道发酵特性、免疫调节活性及代谢调控功能上展现出差异化优势,这也是真菌蛋白区别于传统动植物蛋白的重要营养与功能基础。Colosimo 等^[37]发现这种特殊的组合结构可延缓消化和影响胃肠动力,进一步增加粪便体积。此外,真菌蛋白可与消化体系中的酶和胆汁酸发生物理结合,从而影响脂质吸收与胆固醇代谢。与植物蛋白中常见的抗营养因子(如植酸)不同,真菌蛋白的纤维结构不干扰矿物质吸收,且具有较高的胃肠耐受性。此外,这种“结构型纤维”的作用方式不同于燕麦或大麦中以游离形式存在的 β-葡聚糖,主要聚焦在小肠环境中的黏度与溶胀行为以及与蛋白质共存于细胞壁框架中的物理效应,这意味着其不仅提供纤维含量,还可能参与消化动力学调控。

脂质构成方面,真菌蛋白具有低总脂肪、低饱和脂肪且零胆固醇的特征^[38],可在不增加胆固醇负担的前提下提供优质蛋白与膳食纤维,而肉类来源的蛋白往往伴随较高的饱和脂肪摄入。而与大豆或豌豆等植物蛋白相比,真菌蛋白脂肪含量更低且脂肪酸组成更有利于健康。此外,真菌蛋白作为快速生产的单细胞蛋白,胞内具有较高的核酸含量(约 10%),但 Yazdian 等^[39]发现通过对发酵液的短暂热处理可激活胞内的 RNA 降解酶,进一步离心分离可使其核酸含量降低至世界卫生组织建议的 2% 以下,以规避高嘌呤食物带来的痛风风险。值得注意的是,高核酸这一特点因菌种而异,有些菌种的真菌蛋白核酸含量在可接受范围内,因此不需要进行降核酸处理。

从整体营养构成来看,真菌蛋白提供了一种不同于动物蛋白与植物蛋白的优质蛋白与膳食纤维共存的特殊成分,不仅可以替代动物蛋白用于结构构建与氨基酸供给,还能承担膳食纤维来源的功能,是一种兼具结构营养与功能营养的复合型食材,在替代蛋白食品、肠道友好食品与代谢健康食品中具有广阔的应

用空间。

3.2 功能价值

真菌蛋白的功能价值主要体现在控制能量摄入、调控糖脂代谢与促进肌肉生长3个方面。这些功能均与其“双营养属性”相关,即蛋白质提供氮源与氨基酸,结构型纤维影响消化吸收动力学,因此其功能表现往往不是某个单一成分作用,而是由蛋白质、膳食纤维与细胞壁结构共同决定。

3.2.1 控制能量摄入与调节食欲 控制能量摄入是近几年真菌蛋白功能研究中较为突出的方向。Bottin等^[40-41]多项短期干预研究发现真菌蛋白摄入后能量摄入显著下降,在等热量条件下,与相同蛋白质量的动物蛋白对照相比,真菌蛋白可显著降低随后一餐或24 h的总能量摄入,这一现象表明真菌蛋白可能在食欲调节与饱腹感维持方面具有作用。真菌蛋白摄入能控制能量摄入的机制并非完全归因于经典的胃肠激素途径,Rigamonti等^[42]研究发现真菌蛋白的食欲调节效应并未伴随胰高血糖素样肽1、酪酪肽(PYY)等肠促激素的显著升高,这与乳清等快速吸收蛋白的机制不同。真菌蛋白的食欲调控机制更可能与消化释放动力学有关。这可能是由于真菌蛋白的丝状结构可形成一定黏度,延缓胃排空速度,或通过肠道内的物理屏障调节蛋白水解速率,使氨基酸释放更为缓慢且持久,这种“缓释放动力学”可维持更长时间的氨基酸供应,减少餐间饥饿感^[43]。值得注意的是,这种机制与“提高消化负担”的概念不同,而是源于食品结构导致的消化时长的延长,因此具有较好的胃肠耐受性。

综合来看,与乳清蛋白的“快吸收-短饱腹”不同,真菌蛋白在能量摄入与食欲调节方面表现出“慢吸收-长饱腹”型的功能机制,其主要取决于真菌蛋白的结构与消化动力学,而非机体内分泌激素的短时激增,在替代蛋白食品与能量管理型食品中具有潜在应用价值。

3.2.2 调控糖脂代谢 从糖代谢角度看,Turnbull等^[44]和Shahid等^[45]多项临床急性摄入研究表明,真菌蛋白可降低餐后胰岛素峰值,并呈现更为平缓的血糖曲线。这一现象可从2个机制解释:一是真菌蛋白形成的黏稠环境可以延缓淀粉与蛋白的消化速度,从而降低葡萄糖吸收速率与胰岛素需求^[46];二是细胞壁结构可能通过物理方式影响小肠中消化酶的扩散与底物接触,形成一种“结构性消化屏障”^[47]。然而,在空腹血糖与总体血糖曲线上的研究结果存在差异^[48],因此目前可以认为真菌蛋白在糖代谢方面的主要调控作用在于降低胰岛素负荷与调节餐后葡萄糖释放,而不是直接降低空腹血糖或改变机体内葡萄糖稳态平衡,这与其作为功能性食品结构基料的定位相符。

现有临床、动物及体外研究提示,真菌蛋白可能通过多种途径影响血脂相关指标,但不同研究在试验对象、干预周期和评价指标上仍存在差异,其对心血管疾病风险的长期影响仍需更多长周期人群研究验证。动物试验和临床研究都表明真菌蛋白中几丁质和 β -葡聚糖成分的摄入能够与胆汁酸结合并增加胆汁酸排泄,促使肝脏利用血浆胆固醇合成新胆汁酸,从而降低血浆低密度脂蛋白胆固醇水平,但对高密度脂蛋白胆固醇影响较小^[49-51]。Gibbs等^[52]揭示了真菌蛋白基肉类替代食品可显著降低人体总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇及甘油三酯水平,改善血脂谱,降低心血管代谢疾病风险。Colosimo等^[53]通过体外模拟胃肠道消化试验发现,真菌蛋白结构可影响脂肪酶作用和胆盐结合过程,提示其可能通过降低脂解效率和影响胆固醇重吸收参与脂质代谢调节。这与Ye等^[54]对其他膳食纤维摄入可降低Ⅱ型糖尿病和心血管疾病风险的研究结论相似。此外,真菌蛋白不存在胆固醇且饱和脂肪含量低,可减少膳食胆固醇和脂肪的摄入负担。

整体而言,真菌蛋白通过其结构与成分对机体糖脂代谢进行调控,其细胞壁结构与蛋白组成是主要决定因素,这一调控模式既区别于传统动植物蛋白,也为其在糖脂代谢异常相关疾病的膳食干预与功能性食品开发中提供了重要的理论依据与应用方向。

3.2.3 促进肌肉合成 肌肉蛋白合成依赖必需氨基酸供应,必需氨基酸中的亮氨酸是公认的调控肌蛋白合成的核心氨基酸。为规避受试蛋白自身固有组分差异对试验结果的干扰,Monteyne等^[55]利用亮氨酸含量设置一致的真菌蛋白与牛奶蛋白饮料评估发现,真菌蛋白对健康年轻男性静息态及抗阻运动后骨骼肌蛋白合成的刺激效应显著优于牛奶蛋白,其混合肌肉蛋白分数合成率提升幅度更大,构成更适宜肌肉蛋白合成的代谢环境。与乳清等快速吸收蛋白相比,真菌蛋白的氨基酸释放更为平缓,但持续时间更长,这意味着其对肌肉蛋白合成具有剂量依赖特征^[56]。作为一种“缓释放型蛋白”,真菌蛋白更能维持机体中氨基酸供给,减少蛋白分解。

从蛋白质量角度看,真菌蛋白的PDCAAS与DIAAS较高^[36],这不仅说明其氨基酸组成优良,含有人

体所需的全部必需氨基酸,而且必需氨基酸可被有效消化与吸收。虽然真菌蛋白的吸收不如乳清蛋白迅速,但这并不影响机体合成肌肉,真菌蛋白通过持续性释放氨基酸,仍能有效支持运动后肌蛋白合成^[57]。West等^[57-58]研究表明在亮氨酸匹配平衡条件下,真菌蛋白无论以完整食物基质形式还是浓缩物形式摄入,对健康年轻男性静息态及抗阻运动后肌原纤维蛋白合成率的刺激效应均相当。Derbyshire等^[59-60]通过整合多项随机对照试验、临床干预等研究发现,真菌蛋白在全生命周期中均能有效支持肌蛋白合成,并在老年人群中支持高蛋白质饮食下的肌蛋白合成稳态,有助于肌肉量维持。现有研究显示,单次摄入或短期高蛋白膳食条件下,真菌蛋白可刺激健康人群及部分老年受试者的静息态或运动后肌肉蛋白合成,其效果在部分研究与动物蛋白膳食相近。此外,Grissen等^[61]研究发现,与燕麦、大豆、小麦等植物蛋白相比,真菌蛋白不存在赖氨酸或含硫氨基酸缺陷,在不进行蛋白互补的情况下即可支持肌肉蛋白合成。

综合而言,真菌蛋白凭借其优质且均衡的氨基酸组成及独特的代谢特征被描述为“高质量、缓释放型”蛋白来源,可为机体提供肌肉蛋白合成所需的氨基酸,其氨基酸释放平缓且持续时间长,可维持机体长期氨基酸供给,减少蛋白分解,对肌蛋白合成的促进效应具有多维度优势。现有证据提示,真菌蛋白可作为支持肌肉蛋白合成的优质替代蛋白来源,为不同人群通过膳食干预支持肌肉健康提供了兼具营养性与可持续性的优质选择,在运动营养和老年营养场景中具有应用潜力。由于相关研究多基于急性摄入、短期干预或肌肉蛋白合成率等中间指标,其对长期肌肉量维持、肌力改善和训练适应的影响仍需更多长周期研究验证。

4 总结与展望

真菌蛋白以丝状真菌菌丝体为基础,兼具发酵生产的可扩展性、食品加工中的结构优势以及蛋白质与膳食纤维共存的营养特征。以威尼斯镰刀菌蛋白为代表,该类蛋白已形成较为明确的菌株筛选、安全评价、发酵生产和食品化应用基础。其产业价值不仅来自替代动物蛋白的供给潜力,也来自天然菌丝结构在质构构建中的加工优势,以及低脂肪、高膳食纤维和较高蛋白质量所带来的营养功能潜力。现有研究结果提示,真菌蛋白在能量摄入调节、餐后糖脂代谢改善和肌肉蛋白合成支持等方面具有一定应用价值,但相关效应仍受食品基质、摄入量、研究周期和受试人群等因素影响,长期健康作用仍需进一步验证。近期研究也显示,*Fusarium*来源真菌蛋白的进一步推广仍需解决发酵过程优化、菌株稳定性、安全审查、RNA控制、成本控制和消费者接受等问题^[24];合成生物学与蛋白加工工程的发展则为提升菌株性能、改善底物利用效率和优化食品品质提供了新的技术路径^[62]。因此,真菌蛋白未来发展仍需在生产稳定性、食品适配性和营养证据方面继续深化。

真菌蛋白产业化在食品工业和生物制造发展中仍处于初期,在上游的发酵工艺与菌种改良、下游的食品化加工、消费端的消费惯性及文化方面仍有很大的发展空间,且系统化的产业链和供给链未形成。国际上对真菌蛋白科学研究的报道长期集中于其营养优势、可持续性贡献与仿肉制品应用,但其未来发展的关键是让消费者真正地接受以真菌蛋白为首的替代蛋白,并作为日常饮食的组成,而非新奇的尝试^[62]。这不仅要求真菌蛋白在产量、可持续性和工业化水平上突破,还要求其风味工艺的改良和大众对产品消费理念的形。

当前真菌蛋白最严峻的技术挑战在生物过程层面。丝状真菌的生长高度敏感,菌丝密度、分散状态、剪切反应与氧传递之间存在复杂的协同效应,发酵参数不能使用简单的线性处理优化,多变量和多噪声对智能化发酵模型的建立提出更高的要求。与细菌或酵母的悬浮培养相比,丝状真菌培养液通常具有更高的黏弹性和流变复杂性,这不仅干扰生物反应器的能量输入与质量传递,还限制了高密度培养的稳定性^[63]。实际放大过程中,机械剪切过低会导致形成菌团,阻碍氧传递,剪切过高则可能抑制生长或破坏细胞壁结构,导致产量下降与发酵不稳定。连续高密度培养的工业需求与菌丝体微观形态控制形成的矛盾,使真菌蛋白的生产仍主要依赖间歇或补料分批工艺,这种工艺特性进一步放大了批次差异、生产一致性与成本结构的不确定性,导致真菌蛋白难以像植物蛋白一样实现标准化稳定生产。未来,真菌蛋白菌丝发酵应大力发展连续培养、在线监测和智能调控技术,提高规模化放大过程的稳定性与可控性。

在菌株遗传层面,真菌蛋白生产菌株尚未建立起类似酿酒酵母或枯草芽孢杆菌那样成熟的菌株改良技术体系。现阶段工业菌株多由随机诱变与筛选而来,近年来虽然有学者已利用CRISPR等工具改良野生菌株来调控菌丝体中细胞壁成分^[64],然而不同于传统合成生物学将菌体作为细胞工厂,需要考量直接

使用真菌蛋白的菌体对于基因编辑潜在的食品安全风险和监管控制难点。此外,相比植物蛋白的“原料—分离—挤压”的成熟食品加工过程,真菌蛋白的下游加工仍处于探索阶段。现有商业产品主要依赖冷冻诱导形成纤维结构,通过冰晶挤压使菌丝排列来构建类似肌纤维的层状结构,这一过程能耗高、对原料水分与几何尺寸要求高,难以实现针对不同食品文化的高度可塑性。与此相比,植物蛋白已形成高水分挤压、酶解生香、脂质复配等成熟的加工技术,同时具备成本低和食品化自由度高的优势^[65]。因此,上游发酵过程与下游食品结构加工之间存在断层,而不同丝状真菌产生的形态差异为开发更多样的食品化加工方法提供了思路,并非所有肉制品都具备显著的纤维结构,例如肉糜类制品乳化香肠、狮子头、肉饼等。因此,在未来,需要建立适用于食品领域的遗传工具体系,在安全合规前提下提升真菌蛋白原料发酵过程中蛋白积累和底物利用效率,并在加工层面运用酶法改性、3D 打印、酶促生香和脂质协同风味调控等新型食品加工技术,提高真菌蛋白产品的品质,提升其在多元饮食场景中的应用。

除了技术本身,产业层面同样存在艰巨的挑战,真菌蛋白作为低能耗、低土地资源占用和低成本发酵蛋白,其成本主要由培养基、能耗与设备资本开支等构成,通过更低的生产成本则会增强真菌蛋白的经济效益。丝状真菌发酵依赖高氧传递效率,生物反应器的搅拌与曝气功耗较大,而形态设计和发酵过程控制专用的真菌蛋白生物发酵罐将进一步降低能耗和发酵效率,从而进一步降低真菌蛋白的生产成本。此外,真菌蛋白对碳源要求较高,目前工业生产普遍依赖葡萄糖浆、淀粉水解液等食品级底物,其供应链模式不同于大豆蛋白、小麦蛋白或豌豆蛋白,大规模产业化生产将受限于糖源价格。近年来,已有不少学者利用农业副产物如秸秆、糖化液或工业淀粉废液,提取其中的粗糖作为菌丝体发酵的碳源,但仍存在抑制物积累、糖化效率低、脱毒难度大等问题,缺乏利用农业副产物进行连续发酵并大规模产业化的技术基础^[66]。未来,应推动农业副产物的碳源利用由实验室研究向工业转化应用,利用农业副产物发酵的糖化效率提升技术、发酵抑制物去除技术和戊糖高效利用技术等将成为重点研究方向。

食品文化与消费生态的差异构成真菌蛋白产业未来的第3类障碍。西方与东亚地区在对真菌蛋白消费接受度上存在显著差异,其背后不是概念理解差异,而是烹饪方式差异。西方食品具有结构化加工与即食食品的传统,消费者既接受块状、片状、条状产品,也接受即烹或即食制品。而东亚饮食则依赖汤、面、粥、余、蒸、炒等处理方式,消费者更关注食品的弹性、黏结性与汤吸附性,而非单纯的纤维感^[67]。因此,现有真菌蛋白产品,如仿鸡块、汉堡饼、肉条,被视为西式食品的替代者而非普通食材,因此并不能自然进入东亚餐桌。另外,真菌蛋白虽然具有核苷酸与氨基酸带来的天然鲜味,但缺乏动物蛋白经过高温加工后产生的脂质风味与美拉德香气,因此需要通过底物配比、氨基酸/核苷酸前体、酶促生香或共发酵策略构建更接近动物食品的风味谱系^[68]。

真菌蛋白的营养健康评价体系的不完善构成第4类挑战。目前,关于真菌蛋白的研究仍以营养成分分析、临床营养效果或体外消化机制为主,而缺乏基于菌丝体结构特点进行系统探究真菌蛋白消化与代谢机制的研究,特别是其细胞壁纤维与蛋白质的结构对胃排空、氨基酸吸收动力学、脂肪代谢与胆汁酸结合等的作用机制尚未系统阐明。另外,国际上用于评价蛋白质质量的 DIAAS 体系尚未在替代蛋白领域形成统一标准,氨基酸动力学与稳定同位素示踪技术在真菌蛋白领域也未广泛应用^[69]。此外,真菌蛋白的健康定位仅靠短期临床与简单膳食对比,真菌蛋白长期摄入对肠道微生物、糖脂代谢和代谢的影响仍缺乏长周期的数据。

参考文献 References:

- [1] Barrett C B, Benton T G, Cooper K A, et al. Bundling innovations to transform agri-food systems[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(12): 974–976.
- [2] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 401–415.
- [3] Etzbach L, Gola S, Küllmer F, et al. Opportunities and challenges of plant proteins as functional ingredients for food production[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121(50): e2319019121.
- [4] Leger D, Matassa S, Noor E, et al. Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118(26): e2015025118.
- [5] Finnigan T J A, Theobald H E, Bajka B. Mycoprotein: a healthy and sustainable source of alternative protein-based foods[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2025, 16: 105–125.
- [6] Lee D, Pan J H, Kim D, et al. Mycoproteins and their health-promoting properties: *Fusarium* species and beyond[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(3): e13365.

- [7] Wiebe M. Myco-protein from *Fusarium venenatum*: a well-established product for human consumption[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 58(4): 421–427.
- [8] 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.
- [9] Chen C P, Gao Y F, Xu H, et al. Construction and mechanism of mycoprotein-based meat analogue fibrous structures under the coupled effects of sodium alginate, 3D printing, and freezing[J]. Food Hydrocolloids, 2026, 174: 112427.
- [10] Derbyshire E J, Delange J. Fungal protein-what is it and what is the health evidence? A systematic review focusing on mycoprotein[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 5: 581682.
- [11] Whittaker J A, Johnson R I, Finnigan T J A, et al. The biotechnology of quorn mycoprotein: past, present and future challenges[M]//Nevalainen H. Grand challenges in fungal biotechnology. Cham: Springer International Publishing, 2020: 59–79.
- [12] Edelman J. The development of a new food[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 1988, 43(4): 279–283.
- [13] Derbyshire E J, Finnigan T J A. Mycoprotein: a futuristic portrayal[M]//Future foods. Amsterdam: Elsevier, 2022: 287–303.
- [14] Finnigan T J, Wall B T, Wilde P J, et al. Mycoprotein: the future of nutritious nonmeat protein, a symposium review[J]. Current Developments in Nutrition, 2019, 3(6): nzz021.
- [15] Yang Q, Lin W L, Xu J W, et al. Changes in oxygen availability during glucose-limited chemostat cultivations of *Penicillium chrysogenum* lead to rapid metabolite, flux and productivity responses[J]. Metabolites, 2022, 12(1): 45.
- [16] Veiter L, Rajamanickam V, Herwig C. The filamentous fungal pellet: relationship between morphology and productivity[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(7): 2997–3006.
- [17] Godley A. Green entrepreneurship in UK foods and the emergence of the alternative meat sector: Quorn 1965–2006[J]. Business History, 2025, 67(7): 1877–1903.
- [18] 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]. Trends in Biotechnology, 2026, 44(3): 745–765.
- [19] Bungard S J. Bugs in the works: biology at ICI billingham[J]. Journal of Biological Education, 1992, 26(4): 252–256.
- [20] Muhedaner M, Song Z Q, Chen C P, et al. Tentative exploration of the 3D printing performance of the mixed inks with egg white proteins and mycoprotein fibrous to improve the quality of mycoprotein alternatives[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142202.
- [21] Chezan D N, Flannery O, Patel A. Factors affecting consumer attitudes to fungi-based protein: a pilot study[J]. Appetite, 2022, 175: 106043.
- [22] Cerrone F, O'Connor K E. Cultivation of filamentous fungi in airlift bioreactors: advantages and disadvantages[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2025, 109: 41.
- [23] Sha L, Xiong Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: science, technology, and challenges[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102: 51–61.
- [24] Gnaim R, Dyer P S, Ledesma-Amaro R. *Fusarium*-based mycoprotein: advancements in the production of sustainable meat substitutes[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 159: 104981.
- [25] Rodger G W, Angold R E. The effect of freezing on some properties of quorn myco-protein[M]//Food freezing: today and tomorrow. London: Springer London, 1991: 87–95.
- [26] He J, Evans N M, Liu H Z, et al. A review of research on plant-based meat alternatives: driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2639–2656.
- [27] Majumder R, Miatur S, Saha A, et al. Mycoprotein: production and nutritional aspects: a review[J]. Sustainable Food Technology, 2024, 2(1): 81–91.
- [28] Xue L X, Shi K, Zhang Y, et al. Evaluation of the umami in edible fungi and study on umami extraction of *Agaricus bisporus*[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106069.
- [29] Wang X P, Liu H G, Li J Q, et al. Research advances in mushroom umami: substance characteristics, multidimensional attributes, umami peptide screening, and umami assessment[J]. Current Research in Food Science, 2025, 11: 101210.
- [30] van Bokhorst-van de Veen H, Pegiou E, Kan L J, et al. Microbial safety, spoilage, and flavor changes in mycoprotein under different thermal treatments and packaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 100: 103892.
- [31] Zhou Y J, Zhang Y, Liang J M, et al. From formation to solutions: off-flavors and innovative removal strategies for farmed freshwater fish[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104318.
- [32] Vurro F, De Angelis D, Squeo G, et al. Exploring volatile profiles and de-flavoring strategies for enhanced acceptance of lentil-based foods: a review[J]. Foods, 2024, 13(16): 2608.
- [33] Fischer E, Cayot N, Cachon R. Potential of microorganisms to decrease the “beany” off-flavor: a review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(15): 4493–4508.
- [34] Raza A, Song H L, Raza J, et al. Formation of beef-like odorants from glutathione-enriched yeast extract via Maillard reaction[J]. Food & Function, 2020, 11(10): 8583–8601.
- [35] Chen C P, Gao Y F, Xu H, et al. Comparative analysis of enzymatic hydrolysis kinetics and bioactive peptide release during *in vitro* digestion of mycoprotein and conventional meat[J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146452.
- [36] Azizi R, Baggio A, Capuano E, et al. Protein transition: focus on protein quality in sustainable alternative sources[J]. Critical Reviews in Food

- Science and Nutrition,2025,65(18):3401–3421.
- [37] Colosimo R,Harris H C,Ahn-Jarvis J,et al. Colonic *in vitro* fermentation of mycoprotein promotes shifts in gut microbiota,with enrichment of *Bacteroides* species[J]. Communications Biology,2024,7:272.
- [38] Derbyshire E,Ayoob K T. Mycoprotein:nutritional and health properties[J]. Nutrition Today,2019,54(1):7–15.
- [39] Yazdian F,Hajizadeh S,Shojaosadati S A,et al. Production of single cell protein from natural gas:parameter optimization and RNA evaluation [J]. Iranian Journal of Biotechnology,2005,3(4):235–242.
- [40] Bottin J H,Cropp E,Finnigan T J A,et al. Mycoprotein reduces energy intake and improves insulin sensitivity compared to chicken[J]. Obes Facts,2012,5(1):55–79.
- [41] Bottin J H,Swann J R,Cropp E,et al. Mycoprotein reduces energy intake and postprandial insulin release without altering glucagon-like peptide-1 and peptide tyrosine-tyrosine concentrations in healthy overweight and obese adults;a randomised-controlled trial[J]. British Journal of Nutrition,2016,116(2):360–374.
- [42] Rigamonti A E,Leoncini R,de Col A,et al. The appetite-suppressant and GLP-1-stimulating effects of whey proteins in obese subjects are associated with increased circulating levels of specific amino acids[J]. Nutrients,2020,12(3):775.
- [43] Li K,Qiao K N,Xiong J,et al. Nutritional values and bio-functional properties of fungal proteins:applications in foods as a sustainable source [J]. Foods,2023,12(24):4388.
- [44] Turnbull W,Ward T. Mycoprotein reduces glycemia and insulinemia when taken with an oral-glucose-tolerance test[J]. The American Journal of Clinical Nutrition,1995,61(1):135–140.
- [45] Shahid M,Gaines A,Coyle D,et al. The effect of mycoprotein intake on biomarkers of human health;a systematic review and meta-analysis[J]. The American Journal of Clinical Nutrition,2023,118(1):141–150.
- [46] 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.
- [47] Chen X Y,Zhu L,Zhang H,et al. Structural barriers governing starch digestibility in intact highland barley cells;a closer insight from cell wall and protein matrix[J]. Carbohydrate Polymers,2025,348:122796.
- [48] Whelehan G,West S,Abdelrahman D R,et al. The addition of mycoprotein to a mixed-meal impacts postprandial glucose kinetics without altering blood glucose concentrations;a randomised controlled trial[J]. European Journal of Clinical Nutrition,2024,78(9):757–764.
- [49] Sima P,Vannucci L,Vetvicka V. β -glucans and cholesterol(review)[J]. International Journal of Molecular Medicine,2018,41(4):1799–1808.
- [50] Fadel J G,Newman R K,Newman C W,et al. Hypocholesterolemic effects of beta-glucans in different barley diets fed to broiler chicks[J]. Nutrition reports international,1987(35):1049–1058.
- [51] Braaten J T,Wood P J,Scott F W,et al. Oat beta-glucan reduces blood cholesterol concentration in hypercholesterolemic subjects[J]. European Journal of Clinical Nutrition,1994,48(7):465–474.
- [52] Gibbs J,Leung G K. The effect of plant-based and mycoprotein-based meat substitute consumption on cardiometabolic risk factors;a systematic review and meta-analysis of controlled intervention trials[J]. Dietetics,2023,2(1):104–122.
- [53] Colosimo R,Mulet-Cabero A I,Warren F J,et al. Mycoprotein ingredient structure reduces lipolysis and binds bile salts during simulated gastrointestinal digestion[J]. Food & Function,2020,11(12):10896–10906.
- [54] Ye E Q,Chacko S A,Chou E L,et al. Greater whole-grain intake is associated with lower risk of type 2 diabetes,cardiovascular disease,and weight gain 1–3[J]. The Journal of Nutrition,2012,142(7):1304–1313.
- [55] Monteyne A J,Coelho M O,Porter C,et al. Mycoprotein ingestion stimulates protein synthesis rates to a greater extent than milk protein in rested and exercised skeletal muscle of healthy young men;a randomized controlled trial[J]. The American Journal of Clinical Nutrition,2020,112(2):318–333.
- [56] Monteyne A J,Coelho M O,Porter C,et al. Branched-chain amino acid fortification does not restore muscle protein synthesis rates following ingestion of lower-compared with higher-dose mycoprotein[J]. The Journal of Nutrition,2020,150(11):2931–2941.
- [57] West S,Monteyne A J,Whelehan G,et al. Ingestion of mycoprotein,pea protein,and their blend support comparable postexercise myofibrillar protein synthesis rates in resistance-trained individuals[J]. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism,2023,325(3):E267–E279.
- [58] West S,Monteyne A J,Whelehan G,et al. Mycoprotein ingestion within or without its wholefood matrix results in equivalent stimulation of myofibrillar protein synthesis rates in resting and exercised muscle of young men[J]. British Journal of Nutrition,2023,130(1):20–32.
- [59] Derbyshire E. Fungal-derived mycoprotein and health across the lifespan;a narrative review[J]. Journal of Fungi,2022,8(7):653.
- [60] Derbyshire E J,Theobald H,Wall B T,et al. Food for our future:the nutritional science behind the sustainable fungal protein-mycoprotein. A symposium review[J]. Journal of Nutritional Science,2023,12:e44.
- [61] Gorissen S H M,Crombag J J R,Senden J M G,et al. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates[J]. Amino Acids,2018,50(12):1685–1695.
- [62] Wu X H,Wu Y K,Lv X Q,et al. Synthetic biology and protein processing engineering-driven microbial protein supply by yeast and filamentous fungi[J]. Trends in Food Science & Technology,2025,166:105408.
- [63] Wucherpennig T,Kiep K A,Driouch H,et al. Morphology and rheology in filamentous cultivations[M]//Advances in applied microbiology.

- Amsterdam; Elsevier, 2010: 89–136.
- [64] Yu Q H, Li Y C, Wu B, et al. Novel mutagenesis and screening technologies for food microorganisms: advances and prospects[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(4): 1517–1531.
- [65] Zhang Z Y, Zhang L J, He S D, et al. High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: a review[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(8): 4873–4908.
- [66] Bajić B, Vučurović D, Vasić Đ, et al. Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agro-industrial residues and by-products[J]. *Foods*, 2023, 12(1): 107.
- [67] Ciaffi J, Mancarella L, Ripamonti C, et al. Ultra-processed food consumption and systemic inflammatory biomarkers: a scoping review[J]. *Nutrients*, 2025, 17(18): 3012.
- [68] Wang X Y, Ye S X, Yan X, et al. Prospects and challenges of umami in edible fungi: biological sources, structure-function relationship, production, mechanism, and evaluation[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2026, 25: e70305.
- [69] Moughan P J, Lim W X J. Digestible indispensable amino acid score(DIAAS): 10 years on[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2024, 11: 1389719.

责任编辑: 范雪梅



叶可萍, 南京农业大学教授, 博士生导师, 国家肉品质量安全控制技术研究中心副主任, 南京农业大学“钟山学术新秀”, 神农中国农业科技奖肉品加工与质量控制创新团队成员, 龙头企业研究生工作站负责人。近年来, 聚焦于肉品品质及贮藏保鲜、肉品中病原菌预测与控制、真菌蛋白仿制肉等方面开展科学研究, 主持国家自然科学基金项目3项、国家“十四五”重点研发计划项目、国家“十四五”“揭榜挂帅”项目、江苏省自然科学基金项目、新疆重大科技专项、国家食品安全风险评估中心项目、企业重大产学研合作项目等20余项, 以第一或通信作者发表论文70余篇, 参编教材与书籍2部, 作为主要完成人获得教育部教学成果二等奖、江苏省教学成果二等奖、神农中华农业科技奖优秀创新团队奖等多项荣誉。