

真菌蛋白模拟肉研究现状及未来展望

周凯^{1,2,3}, 李乔智¹, 胡新¹, 周辉^{1,2,3}, 徐宝才^{1,2,3*}

(¹合肥工业大学食品与生物工程学院 合肥 230601

²合肥工业大学农产品生物化工教育部工程研究中心 合肥 230601

³合肥工业大学动物源食品绿色制造与资源挖掘安徽省重点实验室 合肥 230601)

摘要 随着全球人口的快速增长以及人们对优质蛋白需求的增加,传统动、植物蛋白资源“缺口”问题已逐渐显现,开发新型来源的替代蛋白具有重要的战略意义。应用替代蛋白原料生产的模拟肉可以解决传统肉类供应不足、资源消耗和废物排放量大、动物福利等问题。真菌蛋白作为一种新兴的替代蛋白,具有氨基酸组成均衡全面、膳食纤维丰富、饱和脂肪酸含量低等优点,并且真菌菌丝体的纤维状结构可以很好地还原肉类质地,用于开发模拟肉的潜力巨大。本文综述真菌蛋白的种类、生产过程、营养与安全特性及模拟肉加工技术研究进展,分析真菌蛋白模拟肉产品与市场现状,所面临的挑战以及未来发展方向。

关键词 真菌蛋白模拟肉; 加工技术; 营养安全; 产品与市场; 行业挑战

文章编号 1009-7848(2023)12-0323-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.12.033

肉类作为人类膳食结构中的重要组成部分,含有丰富的优质蛋白、B 族维生素和铁等矿物质元素,是人体所需多种营养物质的主要来源,其饱满诱人的口感与丰富多样的烹饪方式更让肉类在人们的生活中占据着不可或缺的地位。然而,随着当今社会的快速发展,急剧增加的人口对饮食的需求不断提高,肉制品的消耗量随之增加。据经济合作与发展组织预测,我国肉类供给缺口总量将在 2030 年超过 3 800 万 t,传统的畜牧养殖业已难以满足大幅增加的肉类需求。与此同时,肉类生产面临着越来越多的挑战,传统畜牧业的生产方式占用了大量的土地与水资源,且养殖过程中温室气体的排放量占全球总排放量的 12%^[1]。禽肉饲养过程中可能残存的激素、抗生素、兽药等,增加了人们对食品安全的顾虑;肉类中的营养物质均衡全面,同时也有着较高含量的饱和脂肪酸,大量食用可能会出现糖尿病、高血压、心血管疾病等健康问题^[2]。畜禽屠宰的过程往往伴随着残忍与血腥,由此引发的动物福利问题愈发受到各界关注^[3]。肉类在饮食中的特殊地位使人们对肉制品的需求几乎不可能减少,而不断增长的肉类需求与传统

养殖有限的生产力之间的矛盾正日益加深,模拟肉的出现似乎可以成为解决问题的答案。

根据替代蛋白来源及种类的不同,可以将模拟肉分为植物蛋白肉、细胞培养肉和真菌蛋白肉(菌体蛋白肉)三大类,中国食品科学技术学会在 2021 年发布的《植物基食品通则》团体标准(标准号:T/CIFST 002-2021)将以真菌、藻类等植物原料加工制得的食物归类为植物基食品。此外,微藻蛋白和昆虫蛋白作为肉类蛋白替代品的潜力也十分巨大^[4-5]。植物蛋白肉是指以大豆、豌豆等植物蛋白为原料,通过挤压等技术形成类似动物肉的结构,再添加风味成分以增强口感的仿肉制品。细胞培养肉是将动物干细胞分离到体外,使其在生物反应器中增殖分化形成肌纤维和组织,随后将获得的肌肉组织或细胞加工而得到的肉类^[6]。真菌蛋白肉也称菌体蛋白肉,是将目标菌种通过微生物发酵技术扩增,并以其作为基础蛋白原料,经过挤压等工序得到的模拟肉产品。本文以真菌蛋白肉为研究对象,阐述真菌蛋白的种类、营养成分和功能特性以及生产流程,重点阐述真菌蛋白肉的加工技术、安全性,分析现有产品与市场情况,分析行业所面临的挑战和未来发展趋势,以为真菌蛋白模拟肉的加工技术研究和产品开发提供参考。

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD21002)

第一作者: 周凯,男,博士,讲师

通信作者: 徐宝才 E-mail: baocaixu@163.com

1 真菌蛋白概述

真菌蛋白是一种单细胞蛋白,通常是由蛋白质、脂肪、碳水化合物以及核酸等物质组成的细胞质团。作为食品用途的真菌蛋白,按照其来源的不同,主要可以分为酵母蛋白、霉菌蛋白和食用菌蛋白3类。

1.1 酵母蛋白

酵母是一种单细胞真菌,可以通过发酵将葡萄糖转化为酒精和二氧化碳,并产生独特的风味物质,它们长期以来一直被用于生产发酵食品和饮料,如啤酒、面包和发酵乳制品等^[7]。作为单细胞蛋白的酵母蛋白,具有极高的营养价值,其蛋白含量约占细胞干质量的40%~60%,总体高于植物来源的蛋白含量,且低脂、无胆固醇,此外还含有核酸、维生素以及矿物质等多种营养素^[8-9]。唐晓莽等^[10]通过化学分析法分析酵母蛋白、大豆蛋白和乳清蛋白中必需氨基酸和非必需氨基酸的种类和含量,发现酵母蛋白的必需氨基酸含量丰富,氨基酸平衡度最高,对于动物的生长发育有着良好的促进作用。鉴于此,酵母蛋白被广泛用作营养补充剂、调味剂和牲畜饲料等。刘雪姣等^[11]将酵母蛋白添加到调理鸡胸肉中,不仅为鸡胸肉产品补充了优质的微生物蛋白,还能替代大豆分离蛋白、淀粉或者糊精,起到保水作用,从而提高调理鸡胸肉的香味和口感。聂海军^[12]以酵母蛋白为主要原料开发出一款蛋白棒,经感官评价及成分分析,发现该蛋白棒的风味与咀嚼感俱佳,并具有较好的营养价值。以色列一家公司利用资源回收的方式从农业和食品等产业的废弃物中收集酵母,经加工处理后获得酵母蛋白,为植物基产品提供蛋白原料。

1.2 霉菌蛋白

霉菌是形成分枝菌丝真菌的统称,也称作丝状真菌,当其处于适宜的生长环境时,往往会聚集成生成茂盛的菌丝体,这便是霉菌蛋白的来源^[13]。霉菌在食品工业中的用途十分广泛,它们能将加工原料中的淀粉等碳水化合物、蛋白质等含氮化合物及其它种类的化合物进行转化。酱类、豆豉、腐乳、毛豆腐等传统酿造发酵食品的生产都离不开霉菌的身影^[14],其中,用于生产真菌蛋白模拟肉制品中最广为人知的霉菌菌种是镰刀菌(*Fusarium venenatum* ATCC 20334)。某公司使用该菌生产

的天然浓缩蛋白粉于1985年在英国市场推出,经过多年的发展,产品类型已涵盖肉丸、肉糜、香肠和肉饼等一系列的仿肉食品^[15]。通过发酵镰刀菌得到的菌丝体,其蛋白质含量约占干质量的44%,包含所有种类的必需氨基酸,净蛋白质利用率值优于牛奶,膳食纤维含量为6%,其中包括2/3的 β -葡聚糖和1/3的几丁质,脂肪含量2.9%,远低于植物蛋白和传统肉类^[16]。同时,镰刀霉菌蛋白还能对人体提供铁、锌、硒、锰、钙和维生素B₂等无机盐和和维生素^[17]。Coelho等^[18]研究表明,食用霉菌蛋白具有增加饱腹感,调节血糖以及促进肌肉生长等多种营养功效。近年来,许多其它可食用的丝状真菌菌株,如红曲霉(*Monascus purpureus*)、米曲霉(*Aspergillus oryzae*)、盐渍副霉菌(*Paradendryphiella salina*)、米根霉(*Rhizopus oryzae*)等也通过各种发酵方式来生产霉菌蛋白^[19-22]。

1.3 食用菌蛋白

食用菌作为一种大型真菌,种类丰富多样,从生物学分类的角度来说,其中大部分属于担子菌亚门,如平菇、香菇、木耳等,少数属于子囊菌亚门,如虫草、羊肚菌等,具有极高的食用和药用价值,与之相关的菌食文化和烹饪技艺源远流长^[23]。食用菌蛋白主要来源于食用菌的子实体和菌丝体,其含量约占干质量的19%~37%,与猪肉、牛肉等畜产品的蛋白质含量相当甚至更高,接近大豆的蛋白质含量,同时含有人体所必需的8种氨基酸和婴儿所需的组氨酸^[24-25],蛋白质消化率为72%~83%,略低于传统肉类92%~94%的消化率数值^[26]。近年来,越来越多的研究表明,食用菌蛋白具有抗病毒、抗氧化、抗肿瘤以及免疫调节等多种生物功能活性。得益于丰富的营养价值和全面的功能特性,食用菌蛋白被广泛应用于食品加工中。如Mazlan等^[27]以大豆作为原料,加入适量的平菇蛋白,成功制备出纤维结构更好的肉制品,提高了植物基模拟肉的质量。Kim等^[28]用双孢菇菌丝体代替大豆蛋白制作牛肉饼,虽在感官方面与真正的牛肉饼尚有差距,但双孢菇肉饼的紧实度、弹性和咀嚼感均较大豆蛋白肉饼有所提高。食用菌蛋白是一种功能全面均衡、应用范围广、消费者接受程度高的替代蛋白,极具市场前景。

2 真菌蛋白模拟肉的加工技术

通过对霉菌或食用菌进行发酵,可以获得由无数条分支菌丝构成的菌丝体,菌丝体是真菌的营养器官,其直径通常在 10~20 μm ,形状呈圆筒状,与动物的肌肉纤维相似^[29]。以菌丝体作为蛋白原料生产出的模拟肉制品,在质地与结构上与传

统肉类更为接近,也是目前生产真菌蛋白模拟肉的主流原料。真菌蛋白模拟肉的加工技术如图 1 所示,主要包括真菌菌种的筛选与优化,丝状真菌蛋白的发酵生产,模拟肉质构、色泽和风味的模拟等方面。

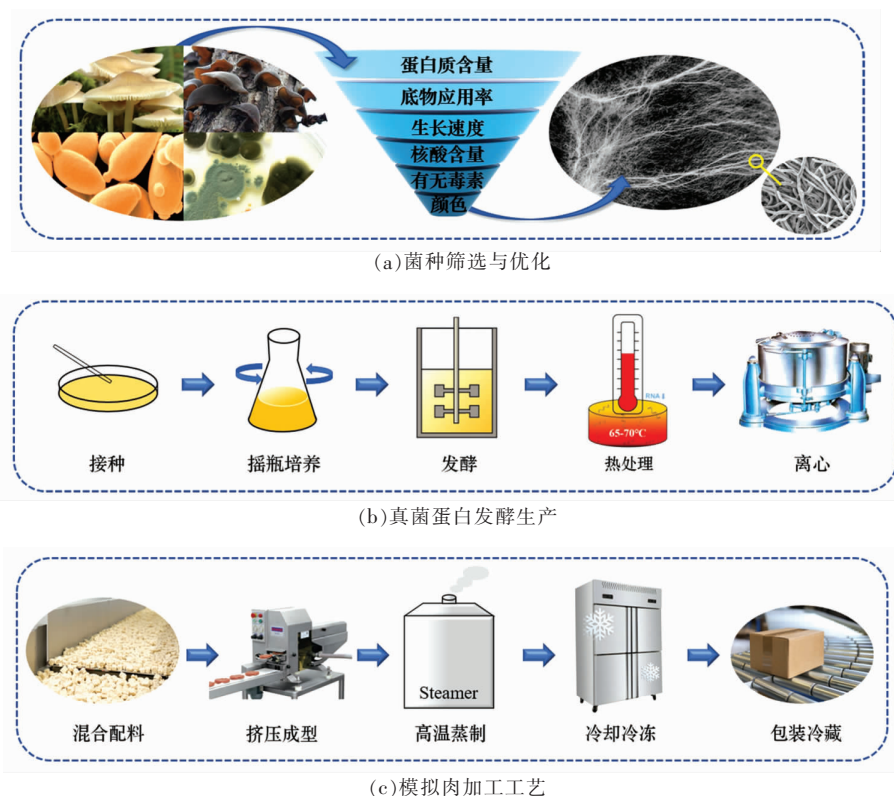


图 1 真菌蛋白模拟肉的加工技术

Fig.1 The processing technology of fungal protein based meat analogues

2.1 菌种筛选与优化

全世界真菌菌株的种类可达数十万种,根据利用真菌发酵获得最终产品的预期目的不同,菌种选择和优化的标准也有所差异。以生产真菌蛋白模拟肉为目的,选择的主要指标通常要求菌种具有较高的蛋白质含量和得率,较快的生长速度以及可以模拟肌肉纤维的丝状形态。某公司为了获得可用于商业化生产的真菌蛋白菌株,对 3 000 多种真菌进行严格的筛选,考查内容包括生长速度、蛋白质含量、菌丝颜色、底物应用和转化率、有无毒素以及核酸含量等,最终筛选出镰刀菌 (*Fusarium venenatum*),并成为一系列真菌蛋白产品的原料来源^[30]。近年来,菌种优化的方式不断推

陈出新,运用不同的改良方法可以针对性地改良菌株性状,使之更符合各类要求。Song 等^[31]运用重离子辐射诱变技术提高了小球藻的发酵生物量和蛋白产量,使其成为一种更经济的食品营养蛋白来源。武金霞等^[32]通过对紫色红曲霉进行微波辐射处理,使红曲色素产量较原始菌株提高了 0.57 倍,极大提升了发酵速率。

2.2 真菌蛋白的发酵生产

2.2.1 发酵形式 在菌种筛选和改良工作完成后,需对目标真菌大规模的培养来扩增蛋白产物,所用方法一般包括固态发酵和液体发酵两种形式。固态发酵是在几乎不含自由水,同时具备一定湿度的固体基质上,用一种或多种微生物进行的

生物反应过程。真菌培养中所用固体基质一般比较简单,例如稻草、麦麸、甜菜浆甚至橘子皮等均可使用^[33-34]。与液体发酵相比,固态发酵有着更少的投入成本,能耗低,并且发酵体积更容易控制^[35]。然而,由于真菌发酵对所需营养物质、温度和pH等条件的要求较高,固态发酵工艺参数的控制比液体发酵更具有挑战性,从固体基质中快速大量地收获发酵产物也存在着一定的困难^[36]。

采用液体发酵生产丝状真菌蛋白可以在短时间内获得更高的产量,是目前规模化生产真菌蛋白最常用的方式。液体发酵是指在无菌条件下将纯化的菌种接种于适宜的液体培养基内,通过振荡、搅拌等方式进行培养以获取大量培养物的过程。作为发酵底物的培养基需要具备丰富的食品级碳源、氮源,根据菌种生长特性的不同,还应补充适量的微量元素和生长因子等内容。液体发酵有3种常见的模式,即连续、分批和补料分批发酵。连续发酵持续向发酵罐内添加新鲜培养基,同时以相同的速度流出培养液,从而使发酵罐内的液量维持恒定,真菌在稳定状态下生长,是生产中应用最广泛的工艺;分批发酵时,液体基质和菌种一次全部加入,发酵完成后原料一次排出,其过程中除了有空气进入和尾气排出,与外部没有物质交换;补料分批发酵的基本原理是在发酵过程中逐步添加营养物质,以维持微生物的生长和代谢活动,从而提高发酵效率和产量,适用于长时间发酵的生产过程^[37]。

2.2.2 生物反应器 真菌液体深层发酵所用生物反应器可分为搅拌槽式反应器(stirred tank reactor, STR)、气升式反应器(airlift reactor, ALR)和鼓泡塔反应器(bubble column reactor, BCR)3种类型。STR是一种带有机械搅拌桨的圆柱形反应器,灭菌后的空气由反应器底部供应,并通过机械桨搅拌分散。STR可在整个发酵液中形成高剪切应力区域,适合对培养液黏度较高的真菌进行培养,搅拌一方面带来了充足的氧气和营养物质,另一方面也会对菌丝的结构造成破坏,使其呈球状生长^[38]。ALR通过在发酵罐底部引入空气,产生数百万个微小气泡,诱导液体和真菌发酵物在导流筒内向上移动,当到达顶端后气体从反应器顶部逸出,而发酵产物通过外部回路向下移动,并再次

进入气动搅拌的循环过程,气升式发酵的剪切应力低且在整个反应器中更加均匀,上升的气泡可以带来源源不断的氧气和营养物质,促进真菌菌丝的生长和分支^[39]。BCR也是一种非机械搅拌反应器,气体从底部进入反应器,形成的气泡逐渐上移,从而引起液相的搅拌。与ALR的区别在于:鼓泡塔式反应器中气泡的大小和数量可以通过调节气体流量和液体性质来控制,从而实现反应或分离过程的精确控制。

2.2.3 发酵条件 无菌发酵容器经初始灌装后,引入纯培养物进行接种,通过连续自动控制来保持恒定的环境条件。温度与真菌代谢和相关酶的活性高度相关,是影响真菌生长的重要环境参数,大多数真菌的最佳培养温度在25~30℃之间,少数嗜热菌种可在高于40℃的温度下存活^[40]。由于pH会改变酶活性、营养物质的溶解度以及营养物质进出细胞的速率等,因此培养基pH对真菌生长能力和产物的形态也有重要影响,如pH值分别为4,6,8时,冬虫夏草菌分别会呈现粗糙球团、均一球团以及丝状颗粒的形态^[41-42]。与大多数细菌和微藻等其它较小的微生物相比,真菌的丝状或团状形态使其更容易被收获。菌丝的直径通常在1~30 μm范围,长度从几微米到几米不等,选择开口适当的筛网或滤布可以轻易地将其捕获^[43]。在大规模培养的情况下,应通过离心过滤,配合真空条件以加快过滤速率,进一步使真菌生物质脱水^[44]。

以丝状镰刀菌蛋白的工业化生产为例,连续发酵过程持续约6周,培养温度在28~30℃之间,pH 6,在此过程中需要每隔6h对毒素进行检查,以确保所获得的发酵产物中不含真菌毒素。新鲜收获的培养液中往往具有较高浓度的RNA,若大量摄入,则其中所含嘌呤会导致人体内尿酸水平过高,增加痛风的患病风险。为了达到所需安全标准,一般通过加热的方法来激活内源性RNA酶,即将培养液在70℃的罐中加热30~45min,可使发酵产物的RNA含量从10%降到2%以下^[45]。将热处理后的培养液离心,提取到糊状物形态的目标真菌蛋白。

2.3 真菌蛋白模拟肉的加工工艺

2.3.1 质地的模拟 质地是评估模拟肉硬度、弹

性、脆度、咀嚼性的指标之一,对于消费者的感官体验有着十分重要的影响。要想获得如同真实肉类一般的口感,需将杂乱无序的菌丝聚集成块,使之结构变得紧密。某公司在烟熏火腿片、脆皮鸡块、肉糜等产品的生产过程中,使用琼脂、果胶、刺槐豆胶等胶凝剂以及鸡蛋清、氯化钙等固化剂,将以上辅料与真菌蛋白混合均匀,在压力作用下成型,经高温蒸制后冷却,随后冷冻,便获得一种与肉类质地相仿的纤维凝胶复合物^[16]。Akintoye 等^[46]发现在混合物中加入钙离子等二价阳离子,可以增强菌丝之间的交联作用,提高混合物的弹性模量,从而改善模拟肉的质地。将收获的菌丝体放在一定形状的带孔模具中,对其施加单轴压力,可以获得不同水分含量的压实菌丝体,此时纤维的排列方向沿着与施加压力的方向正交,沿不同的方向对其进行切割,可以获得类似鸡肉和牛肉的硬度和韧性值^[47]。冻融是创造理想肉质的关键工艺之一,冰晶的生长有效地推动菌丝聚集在一起,形成纤维束,使最终产品呈现肉状的纹理,通过这种方式形成的模拟肉结构具有很高的稳定性,在后续的各种加工及烹饪条件下能较好地维持原有质地^[48]。Finnigan 等^[16]对比了鸡肉、大豆蛋白肉和英国马洛食品公司研发的真菌蛋白肉的微观结构,发现通过高水分挤压技术制得的大豆蛋白肉制品具有明显的缆索状纤维结构,质地偏近于橡胶,而真菌蛋白模拟肉的纤维结构更加细致紧密,与传统鸡肉相比较为接近。

2.3.2 色泽的模拟 色泽是评价一种食品品质时的第一印象,直接影响人们对食品品质优劣、新鲜与否的判断。如何赋予真菌蛋白模拟肉贴近真实的肉色,关系到消费者对产品的接受度。根据选用发酵菌种的不同,所获得的菌丝体也会呈现不同的颜色,而作为生产真菌蛋白模拟肉的丝状真菌主要为白色。赋予其肉类色泽的技术途径主要有两种:一是直接将植物基色素添加到真菌蛋白中,目前应用较多的着色剂包括番茄红、甜菜红、胡萝卜素、焦糖色素等,通过此法可以方便、快捷地赋予制品“肉色”,然而存在颜色不够自然、后续热加工过程中容易褪色等问题^[49]。同时,对于不同生产目的的产品,所用色素的种类和添加量也有所差异。例如,生产一款仿鸡肉的真菌蛋白模拟肉制

品,发酵后收获的菌丝团色泽与鸡肉无异,因此无需另外添加色素。二是通过微生物发酵的方式来合成类似肉的颜色,国外一家公司运用基因工程手段改造毕赤酵母菌株^[50],经过工业化发酵生产大豆血红蛋白,将其作为配方,可以赋予食物类似牛肉的红褐色和质地。臧明伍等^[51]通过将食用真菌与红曲霉进行液态混菌发酵,制备出可模拟畜类肌肉组织的可食用菌丝体。

2.3.3 风味的模拟 食品风味是人们的感官对香味物质、呈味物质产生的综合感觉。菌种的选择是影响真菌蛋白模拟肉产品最终风味的重要方面,例如,经发酵的香菇、草菇、金针菇和黑木耳等食用真菌的菌丝体含有醛类、酮类、酯类、醇类、酚类、醚类等多种挥发性物质,呈味氨基酸的种类齐全,可以促进模拟肉中风味物质的形成^[52]。同时,培养基的选择也是影响菌丝风味的关键因素。利用果汁生长的真菌会在发酵产物中保留一些果香,而在含有牛肉膏、蛋白胨的基质中生长的真菌可能具有独特的肉类风味^[53]。根据对所需产品要求的不同,真菌发酵物的天然香味物质可能会成为理想的风味来源,若菌株本身的风味较差,则可使用外源添加物等配料进行调味。沈硕等^[54]将酵母抽提物添加到香菇素肉水饺馅中,发现其提升了素肉馅的鲜味和浓厚感。酵母抽提物具有丰富的蛋白质、鲜味肽及氨基酸,可以通过美拉德反应与还原性单糖发生反应,产生类似动物肉的风味,使香菇素肉水饺馅的风味更接近真实肉制品。

3 真菌蛋白模拟肉的营养与安全性

3.1 营养成分

随着人们生活水平的提高,国民对食品的需求已从满足基本的保障供给转变为追求营养健康,“低脂”“低糖”“高蛋白”“低固醇”等营养健康的食品成为人们的新追求。真菌蛋白作为一种新型蛋白质资源,具有蛋白质含量高,饱和脂肪与胆固醇含量低,富含膳食纤维等特点^[55],可以满足人们在日常生活中的高标准需求。表 1 列出以镰刀菌为代表的霉菌,以杏鲍菇菌丝体为代表的食用菌、啤酒酵母、大豆以及牦牛肉的营养成分的比较结果。

表1 镰刀菌、啤酒酵母、杏鲍菇、大豆和牦牛肉的营养成分

营养成分(干质量)	镰刀菌	啤酒酵母	杏鲍菇菌丝体	大豆	牦牛肉
蛋白质/g·(100 g) ⁻¹	44.00	47.57	27.90	35.00	24.53
必需氨基酸/g·(100 g) ⁻¹					
苏氨酸(Thr)	2.50	2.09	0.78	0.80	1.10
缬氨酸(Val)	2.80	2.64	1.14	1.10	1.30
甲硫氨酸(Met)	1.00	0.85	0.32	0.30	0.50
异亮氨酸(Ile)	2.40	2.22	0.94	1.10	0.80
亮氨酸(Leu)	3.90	3.34	1.71	1.80	1.55
苯丙氨酸(Phe)	2.30	2.08	1.31	1.10	1.21
赖氨酸(Lys)	3.80	3.33	0.77	1.40	1.80
组氨酸(His)	1.60	1.09	0.40	0.60	0.96
膳食纤维/g·(100 g) ⁻¹	24.00	1.40	13.90	15.50	0
碳水化合物/g·(100 g) ⁻¹	36.00	12.90	20.30	18.70	0.97
粗脂肪/g·(100 g) ⁻¹	12.00	1.30	4.30	16.00	1.60
微量元素/mg·(100 g) ⁻¹					
铁	0.40	1.76	116.24	8.20	1.73
锌	7.60	11.90	9.72	3.34	3.88
钙	48.00	27.00	10.47	191.00	4.34
钠	5.00	36.00	3.50	1.00	30.00
镁	49.00	273	121.43	199.00	25.68
能量/kJ	1 423.19	1 893.68	129.76	1 465.05	498.12
参考文献	[18], [56],[57]	[58],[59]	[60],[61]	[62]	[63]

3.1.1 蛋白质 作为传统肉类的替代品,真菌蛋白含有人体所需的全部必需氨基酸,是一种优质的蛋白质资源。从表1可看出,镰刀菌菌丝体、酿酒酵母的蛋白含量均占其干质量的40%以上,杏鲍菇菌丝体的蛋白含量约占干质量的28%,与蛋白质含量最高的动物蛋白——牛肉相当,能够满足人体的蛋白质需求,且亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸等氨基酸含量高于牛肉。此外,在蛋白质消化吸收率方面,以蛋白质消化率校正氨基酸评分(Protein Digestibility Corrected Amino Acids Score, PDCAAS)作为蛋白质消化吸收的衡量标准,牛肉蛋白质的评分为0.92,鸡肉蛋白为0.95,而镰刀菌蛋白的评分接近于1.0,与乳清蛋白(1.0)与酪蛋白(1.0)相当^[60],是能够促进人体生长发育和代谢的完全蛋白质。

3.1.2 脂肪 真菌蛋白所含的能量中,三分之一由脂肪提供,脂肪含量相较于畜禽肉要高,而其中不饱和脂肪酸占脂肪酸总含量的70%以上,对人

体健康的负担较小^[64]。以镰刀菌为例,每百克干菌丝体中脂肪含量约12g,其中单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量较高,多不饱和脂肪酸主要是亚油酸和 α -亚麻酸,而饱和脂肪酸仅占10%左右^[65]。

3.1.3 膳食纤维 相对于传统畜禽肉以及大豆蛋白模拟肉,真菌蛋白模拟肉的一个显著特征是富含膳食纤维。真菌的细胞壁中富含 β -葡聚糖、几丁质等多糖类物质,提供了丰富的膳食纤维来源。在镰刀菌中,12%是可溶性膳食纤维,88%是不溶性膳食纤维^[66]。

3.1.4 矿物质 真菌蛋白也是铁、锌、钙、钠、镁等的良好来源,这些矿物质是维持人体正常生命活动、机体新陈代谢和神经系统功能不可或缺的物质,通过摄入真菌蛋白可以达到与动物肉同样的补充效果。

3.2 对人体健康的影响

3.2.1 对胆固醇水平的影响 真菌蛋白是优质的

蛋白来源,纤维含量高,总脂肪和饱和脂肪酸(SFA)含量低。有临床试验表明,在饮食中添加适量的真菌蛋白,有助于降低血液中总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇的水平,并增加高密度脂蛋白胆固醇的含量^[67],从而降低患心脑血管疾病和中风等慢性疾病的风险^[68]。

3.2.2 对血糖反应的影响 血糖反应是指食物中的碳水化合物被分解为葡萄糖后,进入血液循环引起血糖浓度的变化情况。有研究表明,在日常膳食中加入真菌蛋白可以抑制血糖的快速升高,维持较长时间的饱腹感^[69]。真菌蛋白影响胰岛素和血糖浓度的机制尚未清楚,推测可能与高膳食纤维含量有关,可溶性膳食纤维可以减缓葡萄糖扩散进入小肠壁的速度,同时,膳食纤维降低了胃肠道中食物的流速,葡萄糖的吸收率因此下降^[70]。综上,真菌蛋白食品对于糖尿病患者和健康膳食人群有较大帮助。

3.2.3 真菌蛋白的致敏性 与花生、鸡蛋、牛奶、大豆、鱼类、小麦等常见的过敏原一样,真菌蛋白也存在一定的过敏风险。2018年, Jacobson 等^[71]研究了与 Quorn 真菌蛋白模拟肉食品相关的不良反应,通过对 1 752 例发生过敏反应的人群进行分析,发现有 312 人出现荨麻疹等皮肤过敏的症状,1 692 人在食用后 8 h 内出现呕吐、腹泻等胃肠道症状。然而,与花生、鸡蛋、大豆等常见的致敏食品相比,与真菌蛋白有关的过敏反应发生率非常低^[69]。

3.2.4 真菌蛋白与痛风 痛风是尿酸钠晶体在关节中沉积所导致的一种炎症性疾病,与嘌呤代谢异常有关,而嘌呤广泛存在于各种食物中,随血液流经肝脏时会被氧化分解为尿酸,当长期摄入过多高嘌呤含量的食物时,会引发痛风、高尿酸血症等一系列疾病,与基于植物和动物来源的蛋白质相比,真菌来源的蛋白质则有着更高的嘌呤浓度。谷物、坚果、薯类、豆制品食物中的嘌呤总量绝大部分低于 50 mg/100 g,食用菌干品中的嘌呤类物质含量在 178~780 mg/100 g,接近甚至高于畜禽动物肝脏中的嘌呤含量(猪肝 284.8 mg/100 g、牛肝 219.8 mg/100 g)^[72]。为了避免因食用真菌蛋白而引发尿酸含量过高,在发酵过程结束后,对收获的丝状真菌蛋白进行加热,可以激活内源性 RNA 酶以降低 RNA 含量,从而减少因摄入嘌呤而导致痛风

发生的风险^[73]。

3.2.5 真菌蛋白中的真菌毒素 曲霉属、青霉属及镰孢属等真菌在一定的环境条件下会产生容易引起人体病理变化和生理变异的毒素。由于这些次级代谢产物具有很强的毒性,因此对用于生产真菌蛋白的菌株,一定要检测其可能产生的真菌毒素,以保证安全性。禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*) 在培养过程中会产生大量的脱氧雪腐镰刀菌烯醇及玉米赤霉烯酮等致癌物,这些真菌毒素严重威胁着动植物和人类的生命健康^[74]。对于商业化的真菌蛋白产品,有必要对其进行严密的监测,以确保产品的安全性。

4 真菌蛋白模拟肉产品与市场

目前,欧洲和美国等国都已对真菌蛋白模拟肉开展了大量研究,相关企业数量众多,而我国在此领域的研究和应用严重缺乏。同传统的植物蛋白模拟肉一样,现有的真菌蛋白模拟肉已涵盖相当丰富的产品形式,包括肉糜、香肠、肉丸、午餐肉、汉堡肉饼等类型(表 2)。真菌蛋白肉类产品已在英国、美国、加拿大、泰国、日本、新加坡以及欧盟等国家批准上市,而更多的国家由于与真菌蛋白相关的法律法规和安全标准尚未完善,因此未能在全球市场普及。

随着国家对绿色低碳经济的推动,以低碳环保作为生产理念的替代蛋白模拟肉领域也有了更多的投资机遇。据谷孚发布的《2022 新蛋白发酵行业报告》显示,应用发酵技术生产真菌蛋白的初创企业数量自 2013 年开始逐年递增,几年间,经过全球创业者、企业家、投资人以及科研工作者的不懈努力,作为新兴蛋白来源的真菌蛋白已成为继植物蛋白、细胞培养之后的第三大替代蛋白。2021 年,真菌蛋白发酵领域的年度融资总额达到前所未有的 16.9 亿美元,占新蛋白领域年度融资总额的 1/3^[75]。

5 真菌蛋白模拟肉研发面临的挑战

5.1 菌种选育的研究不足

发酵菌种的选择毫无疑问是真菌蛋白模拟肉在生产过程中首先要考虑的问题。不同的菌种有着不一样的生长特性和菌丝体形态,这些差异会

表2 国内外真菌蛋白模拟肉重点企业基本信息

公司名称	国家	成立时间/年	所用菌种	产品类型	网站
Marlow Foods	英国	1985	镰刀菌	肉饼、香肠、肉丸以及整切肉类等	https://www.quorn.co.uk/
ENOUGH	英国	2015	镰刀菌	供应名为 ABUNDA 的真菌蛋白原料	https://www.enough-food.com/
Mycotechology	美国	2013	香菇菌丝体	供应天然香料 ClearIQ™ 与蛋白原料 FermentIQ™	https://www.mycotiq.com/
Meati Foods	美国	2016	某种食用菌	整切肉产品,包括鸡排和牛排等	https://meati.com/
Prime Roots	美国	2017	米麴菌	整切肉产品,包含切片香肠、火鸡和培根等	https://www.primeroots.com/
MyForest Foods	美国	2019	某种食用菌菌丝体	整切肉类产品	https://myforestfoods.com/
Aqua Cultured Foods	美国	2021	未公开	整切海鲜产品,包含金枪鱼、鲑鱼、鱿鱼和虾等	https://www.aquaculturedfoods.com/
Mycorena	瑞典	2017	米曲霉	肉糜、整切肉类以及海鲜类产品	http://mycorena.com/
Mushlabs	德国	2018	某种食用菌菌丝体	香肠、肉丸、汉堡饼等	https://www.mushlabs.com/
ProteinDistillery	德国	2021	啤酒酵母	汉堡肉饼、植物基禽蛋、奶酪等	https://proteindistillery.com/
昌进生物	中国	2017	马克斯克鲁维酵母	低脂奶油、奶酪芝士、冰淇淋(研发中)	暂无
蓝佳生物	中国	2021	某种食用菌菌丝体	模拟肉类和宠物食品(研发中)	http://www.bluecanopy.cn/
蘑米生物	中国	2022	镰刀菌	牛肉饼、肉肠、午餐肉、蛋白棒等(研发中)	https://moremeat.com

对模拟肉的口感和质地产生较大影响。其次,不同菌种的氨基酸组成、蛋白质含量等指标差别显著,直接决定着所生产模拟肉的营养价值。此外,菌丝体的生长速度和产量也是菌种选择过程中需要考虑的重要因素,生长周期短和产量高的菌株可以提高生产效率和产量,从而降低生产成本。若菌株的性状不够好,可以进行育种改良。例如通过基因组测序的方法寻找高产基因,培育出新的高产菌株,从而提高整体的生产效率。目前真菌蛋白发酵相关企业所用菌种主要集中于镰刀菌和几种食用菌等。为提升最终产品的品质,需进一步开展发酵菌种的筛选和改良工作,获取高产蛋白和安全菌株。

5.2 真菌蛋白的发酵成本较高

真菌蛋白主要通过发酵的方式获得原料,通过后续工艺加工产品,与技术成熟并可实现规模化应用的大豆蛋白相比,真菌蛋白的研发在产业配套和成本缩减方面还有很大的发展空间^[76]。在利用微生物发酵获得真菌蛋白的生物过程中,涉及很多影响成本的工艺参数,包

括使用发酵罐进行液体发酵,亦或者采用层架方式进行垂直立体化的固体发酵模式,投料配方的选择、发酵过程调控以及生物反应器的设计等内容。发酵过程的设计和優化,直接影响到目标产物的品质与生产效率。建立稳定、高效且持续性良好的工艺流程,对提高真菌蛋白能与模拟肉相关产品的市场竞争力具有重要意义。

5.3 模拟肉的纤维感需提升

对模拟肉纤维结构的构建是还原传统肉类口感过程中的重要一环。与其它植物基替代蛋白相比,真菌的菌丝体形态可以更好地复原畜禽肌肉组织细长的纤维结构。在当前的加工工艺中,广泛使用卡拉胶、琼脂等胶凝剂来聚集菌丝,并通过对其施加压力和冷冻来增强纤维之间的交联强度。尽管如此,真菌蛋白模拟肉依然存在纤维排列方向不够整齐、组织不够紧密等问题,与动物的肌肉纤维存在不小差距,在一定程度上影响消费者的认可程度。使用真菌蛋白作为墨水材料进行3D打印,应用含真菌蛋白的纺丝液进行静电纺丝,以实现菌丝体纤

纤维的定向排列,可作为真菌蛋白模拟肉品质提升的研究方向之一。

5.4 消费者认可程度有待提高

作为传统肉类的替代品,要想获得消费者的青睐,真菌蛋白模拟肉必须尽可能在口感、风味与色泽等方面向传统畜禽肉靠拢。据艾媒咨询^[77]对模拟肉国内市场的调研数据显示:有一半的消费者表示不愿意尝试新的模拟肉产品,在这类人群中,近半数的人是出于心理因素的影响,质疑模拟肉的安全性,担心技术不够成熟、口感不佳或是其它问题。相对于市场规模成熟的豆类蛋白模拟肉,目前国内消费者对真菌蛋白产品认可度不高,其原因是:一方面,真菌蛋白深加工技术的研究起步较晚,产品种类和形式较少,消费者了解程度低;另一方面,使用真菌蛋白仿制的肉类产品,其脂肪含量低,较难还原传统肉油脂的香味,产品品质有待进一步提高。为了提高人们对真菌蛋白模拟肉的接受程度,亟需对真菌蛋白模拟肉的加工技术进行深入研究,提高产品品质,增强产品吸引力。同时需要开展科普宣传工作,消除人们对新蛋白模拟肉的疑虑。

5.5 政策壁垒问题

我国对于生物安全与食品安全的问题高度重视,建立了涵盖面极广的法律框架对以上两种安全风险进行监管。应用发酵技术生产真菌蛋白原料,菌株的筛选对提升蛋白的表达效率和最终产品的价值至关重要,同时也涉及很多监管问题。首先筛选的菌株要符合《可用于食品的菌种名单》以及《可用于婴幼儿食品的菌种名单》,如不在名单内要进行申报;涉及基因编辑或者转基因的菌株,则需要参考《农业转基因生物安全管理条例》,通过农业转基因生物安全委员会的评审后,方可进行食品添加剂新品种的申报^[78]。2023年6月,国家卫健委批复“威尼斯镰刀菌 TB01 菌株发酵菌丝体蛋白”和“杏鲍菇菌丝体”两款原料作为新食品原料不予行政许可,至此,我国真菌来源的发酵蛋白类原料还未有申报成功的案例。虽然此次新食品原料的审批未通过,但是可以看到技术推动的真菌蛋白原料迭代正在发生。未来,相关部门应该继续加强监管,建立合理的市场准入制度,助力推动相关产业发展,在满足消费者食品安全的前提下,

正确引导和规范真菌蛋白的开发与引进。

6 总结与展望

世界人口的增长增加了人们对优质蛋白质的需求,传统肉类供应链面临着巨大压力。在此背景下,真菌蛋白的生产模式对环境更加友好,不会涉及动物福利问题,更加符合可持续发展的要求,因此真菌蛋白可作为一种极具潜力的替代蛋白来源,是践行“大食物观”的重要途径之一。然而,相比传统的畜禽肉类,真菌蛋白模拟肉要想获得广大消费者的认可,还有许多难关需要攻克。首先,要选育更多营养价值高、安全性好的菌种,以满足更多产品类型和形式的生产需求;其次,需要进一步改进模拟肉的质地、色泽和口感,使其更接近传统肉类产品,以提高消费者的接受度;再次,需加强对真菌蛋白营养价值的研究,确保其能够提供充足的蛋白质和其它营养成分;此外,生产成本问题不容小觑,需进一步降低生产成本,特别是发酵成本,以提高真菌蛋白相关产品的市场竞争力;最后,需要国家相关部门在政策上进行扶持,制订针对真菌蛋白相关产品的政策和法规,引导和规范行业的健康发展。随着对真菌蛋白模拟肉研究的逐步深入,未来会有越来越多的企业与科研机构投身真菌蛋白领域,助推行业发展,为消费者提供更多的选择。总体而言,真菌蛋白模拟肉有着广阔的市场前景与发展潜力,有望成为未来食品产业的重要组成部分。

参 考 文 献

- [1] HAVLIK P, VALIN H, HERRERO M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(10): 3709-3714.
- [2] HU F B, OTIS B O, MCCARTHY G. Can plant-based meat alternatives be part of a healthy and sustainable diet?[J]. Journal of the American Medical Association, 2019, 322(16): 1547-1548.
- [3] 柴同杰. 畜禽健康养殖与动物福利[J]. 中国家禽, 2014, 36(22): 2-7.
- CHAI T J. Healthy livestock breeding and animal

- welfare[J]. *China Poultry*, 2014, 36(22): 2-7.
- [4] CAPORGNO M P, BÖCKER L, MÜSSNER C, et al. Extruded meat analogues based on yellow, heterotrophically cultivated *Auxenochlorella protothecoides* microalgae[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102275.
- [5] SMETANA S, LARKI N A, PERNUTZ C, et al. Structure design of insect-based meat analogs with high-moisture extrusion[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 229: 83-85.
- [6] RUBIO N R, XIANG N, KAPLAN D L. Plant-based and cell-based approaches to meat production[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6276.
- [7] BEKATOROU A, PSARIANOS C, KOUTINAS A A. Production of food grade yeasts[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2006, 44(3): 407-415.
- [8] LIU Q, KANG J, ZHANG Z H, et al. Comparative study on the nutrient digestibility of diets containing brewer's yeast products processed by different techniques fed to T-cannulated growing pigs[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 278: 114981.
- [9] PATSIOS S I, DEDOUI A, SOSSIDOU E N, et al. Sustainable animal feed protein through the cultivation of *Yarrowia lipolytica* on agro-industrial wastes and by-products[J]. *Sustainability*, 2020, 12(4): 23.
- [10] 唐晓芬, 武宇, 樊军, 等. 酵母蛋白的营养质量评价[J]. *公共卫生与预防医学*, 2020, 31(6): 100-104.
- TANG X Q, WU Y, FAN J, et al. Evaluation of nutritional quality of yeast protein[J]. *Public Health and Preventive Medicine*, 2020, 31(6): 100-104.
- [11] 刘雪姣, 李沛, 郭江勇, 等. 添加酵母蛋白的轻食调理鸡胸肉制备工艺研究[J]. *肉类工业*, 2022, 43(1): 31-34.
- LIU X J, LI P, GUO J Y, et al. Study on preparation technology of light food prepared chicken breast meat with yeast protein added[J]. *Meat Industry*, 2022, 43(1): 31-34.
- [12] 聂海军. 酵母蛋白营养成分分析及其在蛋白棒中的应用研究[J]. *农产品加工*, 2022, 21(18): 10-12.
- NIE H J. Analysis of nutritional components of yeast protein and its application in protein bar[J]. *Agricultural Products Processing*, 2022, 21(18): 10-12.
- [13] 周艳玲. 食品发酵中微生物的应用现状与发展方向[J]. *现代食品*, 2020, 6(9): 63-64.
- ZHOU Y L. Application status and development direction of microorganisms in food fermentation[J]. *Modern Food*, 2020, 6(9): 63-64.
- [14] 龙超, 郭冬琴, 许杰. 中国发酵食品概况[J]. *食品安全导刊*, 2023, 17(6): 148-150.
- LONG C, GUO D Q, XU J. Overview of fermented food in China[J]. *Food Safety Guide*, 2023, 17(6): 148-150.
- [15] SHARIF M, ZAFAR M H, AQIB A I, et al. Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition[J]. *Aquaculture*, 2021, 531(5): 735885.
- [16] FINNIGAN T J A, 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): 21.
- [17] 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.
- [18] COELHO M O C, MONTEYNE A J, DUNLOP M V, et al. Mycoprotein as a possible alternative source of dietary protein to support muscle and metabolic health[J]. *Nutrition Reviews*, 2020, 78(6): 486-497.
- [19] LANDETA C, CICATIELLO P, LIENQUEO M E. Mycoprotein and hydrophobin like protein produced from marine fungi *Paradendryphiella salina* in submerged fermentation with green seaweed *Ulva* spp[J]. *Algal Research*, 2021, 56: 102314.
- [20] PEDRO S F, AKRAM Z, MOHAMMAD T. Production of edible fungi from potato protein liquor (PPL) in airlift bioreactor[J]. *Fermentation*, 2017, 3(1): 12.
- [21] REIHANI S F S, KHOSRAVI-DARANI K. Mycoprotein production from date waste using *Fusarium venenatum* in a submerged culture[J]. *Applied Food Biotechnology*, 2018, 5(4): 243-252.
- [22] SALGADO C L, MUNOZ R, BLANCO A, et al. Valorization and upgrading of the nutritional value of seaweed and seaweed waste using the marine fungi *Paradendryphiella salina* to produce mycoprotein[J]. *Algal Research*, 2021, 53: 102135.
- [23] 徐梓杰. 食用菌的营养价值及产业发展态势综述[J]. *食品安全导刊*, 2019, 13(3): 150.
- XU Z J. Review on nutritional value and industrial development of edible fungi[J]. *Food Safety Guide*,

- 2019, 13(3): 150.
- [24] 高观世, 张陶, 吴素蕊, 等. 食用菌蛋白质评价及品种间氨基酸互补性分析[J]. 中国食用菌, 2012, 31(1): 35–38.
- GAO G S, ZHANG T, WU S R, et al. Quality evaluation of protein in the edible fungus and utilizing the complementary principle of amino acid[J]. Chinese Edible Fungi, 2012, 31(1): 35–38.
- [25] 张璐, 弓志青, 王文亮, 等. 7 种大宗食用菌的呈味物质分析及鲜味评价[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 274–278.
- ZHANG L, GONG Z Q, WANG W L, et al. Analysis of flavor components and evaluation on umami of seven kinds of edible fungi[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 274–278.
- [26] BILAL A, WANI, BODHA R H, et al. Nutritional and medicinal importance of mushrooms[J]. Journal of Medicinal Plants Research, 2016, 4(24): 2598–2640.
- [27] MAZLAN M M, TALIB R A, CHIN N L, et al. Physical and microstructure properties of oyster mushroom–soy protein meat analog via single–screw extrusion[J]. Foods, 2020, 9(8): 16.
- [28] KIM K, CHOI B, LEE I, et al. Bioproduction of mushroom mycelium of *Agaricus bisporus* by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(9): 1561–1568.
- [29] 王舰, 江铨津, 黄镇宇, 等. 食用菌菌丝体的营养品质及其在肉制品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 80–90.
- WANG J, JIANG J J, HUANG Z Y, et al. Nutritional quality of edible fungi mycelium and its application in meat products[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2023, 14(12): 80–90.
- [30] ROBSON G D, TRINCI A P J. 21st century guidebook to fungi[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [31] SONG X J, WANG J, WANG Y C, et al. Artificial creation of *Chlorella pyrenoidosa* mutants for economic sustainable food production[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 340–345.
- [32] 武金霞, 王琰, 谭政浩, 等. 紫色红曲霉的微波诱变及其产红曲色素发酵条件的优化[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 618–624.
- WU J X, WANG Y, TAN Z H, et al. Microwave mutagenesis of *Monascus purpureus* and optimization of fermentation conditions for monascus pigment production[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 618–624.
- [33] NASEHI M, TORBATINEJAD N M, ZEREHDARAN S, et al. Effect of solid–state fermentation by oyster mushroom (*Pleurotus florida*) on nutritive value of some agro by–products[J]. Journal of Applied Animal Research, 2017, 45(1): 221–226.
- [34] OZSOYA H D, ARIKANA E B, CINKIRA C, et al. Fungal oil production from oleaginous fungi *Mucor circinelloides* and *Aspergillus oryzae* cultivated on sugar beet pulp[J]. Asia–Pacific Journal of Earth Sciences, 2015, 3(1): 734–741.
- [35] KAIRA G S. Agro–industrial wastes as feedstock for enzyme production[M]. California: Academic Press, 2016: 61–93.
- [36] MANAN M A, WEBB C. Design aspects of solid state fermentation as applied to microbial bioprocessing[J]. Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering, 2017, 4(1): 1–25.
- [37] DORAN P M. Bioprocess engineering principles: second edition[M]. California: Academic Press, 2013, 201–254.
- [38] 吴学风, 姜绍通, 张旻, 等. 机械搅拌生物反应器的 CFD 模拟及其在发酵生产乳酸中的应用[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 186–189.
- WU X F, JIANG S T, ZHANG M, et al. CFD simulation of mechanically stirred bioreactor and its application in fermentation production of lactic acid[J]. Food Science, 2010, 31(7): 186–189.
- [39] ZHU Y. Bioprocessing for Value–Added Products from Renewable Resources[M]. New York: Elsevier Science, 2007: 373–396.
- [40] MAGAN N. Fungi in extreme environments[M]. KUBICEK C P, DRUZHININA I S. Environmental and Microbial Relationships. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 85–103.
- [41] LIU Y S, WU J Y. Effects of Tween 80 and pH on mycelial pellets and exopolysaccharide production in liquid culture of a medicinal fungus[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2012, 39(4): 623–628.
- [42] PAPAGIANNI M. Advances in citric acid fermentation by *Aspergillus niger*: Biochemical aspects, membrane transport and modeling[J]. Biotechnology

- Advances, 2007, 25(3): 244–263.
- [43] ISLAM M R, TUDRYN G, BUCINELL R, et al. Morphology and mechanics of fungal mycelium[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 13070–13081.
- [44] NIGAM P S, SINGH A. Encyclopedia of food microbiology: second edition[M]. California: Academic Press, 2014: 415–424.
- [45] DENNY A R, AISBITT B, LUNN J. Mycoprotein and health[J]. Nutrition Bulletin, 2008, 33(4): 298–310.
- [46] AKINTOYE M, MOUSAVI R, FINNIGAN T. Edible fungi: GB2516491[P/OL]. (2015–01–28)[2023–08–21]. <https://patents.google.com/patent/GB2516491>.
- [47] EMERGY INC. Methods for forming directional mycelium fibers: CA3170982[P/OL]. (2021–08–19)[2023–8–21] <https://patents.google.com/patent/CA3170982>.
- [48] KNIGHT N, ROBERTS G, SHELTON D. The thermal stability of Quorn™ pieces[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2001, 36(1): 47–52.
- [49] 王圣楠, 马月辉, 赵桂苹, 等. 人造肉类技术特点和需求分析[J]. 畜牧兽医学报, 2020, 51(11): 2641–2650.
- WANG S N, MA Y H, ZHAO G P, et al. Technical characteristics and demand analysis of artificial meat[J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2020, 51(11): 2641–2650.
- [50] SMITA S, MARTIN H. Expression constructs and methods of genetically engineering methylotrophic yeast: US2018371469[P/OL]. (2018–12–27)[2023–08–21]. <https://patents.google.com/patent/US2018371469>.
- [51] 臧明伍, 张哲奇, 王守伟, 等. 用于替代蛋白素肉制备的真菌菌丝体的制备方法及其在替代蛋白素肉制备中的应用: CN113583882A[P/OL]. (2021–11–02)[2023–08–18]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- ZANG M W, ZHANG Z Q, WANG S W, et al. Preparation method of fungal mycelium for meat substitute protein and its application in meat substitute protein preparation: CN113583882A[P/OL]. (2021–11–02)[2023–08–18]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [52] 李娜, 吕爽, 董建国, 等. 常见食用菌营养成分及风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 441–448.
- LI N, LÜ S, DONG J G, et al. Analysis of nutritional components and flavor substances of common edible fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 441–448.
- [53] BARZEE T J, CAO L, PAN Z, et al. Fungi for future foods[J]. Journal of Future Foods, 2021, 1(1): 25–37.
- [54] 沈硕, 彭颖, 李沛, 等. 酵母抽提物对自制香菇素肉水饺馅风味的影响研究[J]. 肉类工业, 2021, 42(12): 33–38.
- SHEN S, PENG Y, LI P, et al. Effect of yeast extract on filling flavor of homemade lentinoid meat dumpling[J]. Meat Industry, 2021, 42(12): 33–38.
- [55] DERBYSHIRE E. Food-based dietary guidelines and protein quality definitions—time to move forward and encompass mycoprotein?[J]. Foods, 2022, 11(5): 11.
- [56] DUNLOP M V, KILROE S P, BOWTELL J L, et al. Mycoprotein represents a bioavailable and insulinotropic non-animal-derived dietary protein source: a dose-response study[J]. British Journal of Nutrition, 2017, 118(9): 673–685.
- [57] ROWAN N J, GALANAKIS C M. Unlocking challenges and opportunities presented by COVID-19 pandemic for cross-cutting disruption in agri-food and green deal innovations: Quo Vadis?[J]. Science of The Total Environment, 2020, 748: 141362.
- [58] KIM B G, LIU Y, STEIN H H. Energy concentration and phosphorus digestibility in yeast products produced from the ethanol industry, and in brewers' yeast, fish meal, and soybean meal fed to growing pigs[J]. Journal of Animal Science, 2014, 92(12): 5476–5484.
- [59] PULIGUNDLA P, MOK C, PARK S. Advances in the valorization of spent brewer's yeast[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102350.
- [60] 史琦云, 邵威平. 八种食用菌营养成分的测定与分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2003, 45(3): 336–339, 345.
- SHI Q Y, SHAO W P. Determination and analysis of nutritional components of eight edible fungi[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2003, 45(3): 336–339, 345.
- [61] 俞苓, 刘民胜, 陈有容. 杏鲍菇子实体和菌丝体营养成分的比较[J]. 食用菌, 2003, 25(2): 7–8.
- YU L, LIU M S, CHEN Y R. Comparison of nutrients in the fruit body and mycelium of *Pleurotus*

- eryngii*[J]. *Edible Fungi*, 2003, 25(2): 7-8.
- [62] 聂莹, 邢亚楠, 黄家章, 等. 主栽大豆营养品质及加工特性初探[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 1-7.
- NIE Y, XING Y N, HUANG J Z, et al. Study on nutritional quality and processing characteristics of main soybean[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(17): 1-7.
- [63] 刘亚娜. 牦牛肉营养特性及其影响因素研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- LIU Y N. Study on nutritional characteristics and influencing factors of yak meat[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.
- [64] 李月梅. 食用菌的功能成分与保健功效[J]. *食品科学*, 2005, 26(8): 517-521.
- LI Y M. Functional components and health benefits of edible fungi [J]. *Food Science*, 2005, 26 (8): 517-521.
- [65] 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.
- [66] DERBYSHIRE E, AYOUB K T. Mycoprotein; Nutritional and health properties [J]. *Nutrition Today*, 2019, 54(1): 1.
- [67] TURNBULL W H, LEEDS A R, EDWARDS G D. Effect of mycoprotein on blood lipids[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1990, 52(4): 646-650.
- [68] BUTTRISS J. *Phytonutrients* [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2012: 1-51.
- [69] TURNBULL W H, 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.
- [70] J L C, CHAMP M, BOILLOT J, et al. Role of viscous guar gums in lowering the glycemic response after a solid meal[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1994, 59(4): 914-921.
- [71] JACOBSON M F, DEPORTER J. Self-reported adverse reactions associated with mycoprotein (Quorn-brand) containing foods[J]. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 2018, 120(6): 626-630.
- [72] 蔡路昀, 冷利萍, 曹爱玲, 等. 食品中嘌呤含量分布研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(5): 74-81.
- CAI L Y, LENG L P, CAO A L, et al. Research progress of purine content distribution in food [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36 (5): 74-81.
- [73] NASSERI A T, RASOUL-AMINI S, MOROWVAT M H, et al. Single cell protein: Production and process [J]. *American Journal of Food Technology*, 2011, 6(2): 103-116.
- [74] O'DONNELL K, MCCORMICK S P, BUSMAN M, et al. 1984 'Toxicogenic *Fusarium* species: Identity and mycotoxicology' revisited [J]. *Mycologia*, 2018, 110(6): 1058-1080.
- [75] Good Food Institute. 2022 年产业现状报告发酵:肉、海鲜、蛋和乳制品[R/OL]. (2023-05-31)[2023-08-21]. <https://www.gficonsultancy.com/blog/2022>.
- Good Food Institute. The fermentation industry status report 2022: meat, seafood, eggs, and dairy products[R/OL]. (2023-05-31) [2023-08-21]. <https://www.gficonsultancy.com/blog/2022>.
- [76] 陈洪雨, 令狐昌丽, 罗颖, 等. 食用真菌蛋白制备及其应用研究进展[J]. *食用菌学报*, 2021, 28(6): 188-198.
- CHEN H Y, LINGHU C L, LUO Y, et al. Research progress on preparation and application of edible fungal proteins[J]. *Journal of Edible Fungi*, 2021, 28(6): 188-198.
- [77] Iimedia Research. 2019 中国人造肉产业研究与消费者行为调查报告[R]. (2019-07-10)[2023-08-21]. <https://www.iimedia.cn/c400/65211.html>.
- Iimedia Research. 2019 China Artificial Meat Industry Research and Consumer Behavior Survey Report [R]. (2019-07-10)[2023-08-21]. <https://www.iimedia.cn/c400/65211.html>.
- [78] 李德茂, 曾艳, 周桔, 等. 生物制造食品原料市场准入政策比较及对我国的建议[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(8): 1041-1052.
- LI D M, ZENG Y, ZHOU J, et al. Regulation and guidance for marketing of food ingredients from biomanufacturing and policy suggestions for China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35 (8): 1041-1052.

Research Status and Future Outlook of Fungal Protein Based Meat Analogues

Zhou Kai^{1,2,3}, Li Qiaozhi¹, Hu Xin¹, Zhou Hui^{1,2,3}, Xu Baocai^{1,2,3*}

(¹School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601

²Engineering Research Center of Bio-process of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230601

*³Key Laboratory for Animal Food Green Manufacturing and Resource Mining of Anhui Province,
Hefei University of Technology, Hefei 230601)*

Abstract With the rapid growth of the global population and the increasing demand for high-quality protein, the 'gap' in traditional animal and plant protein resources has gradually become apparent. Developing new sources of alternative proteins is of great strategic significance. The application of alternative protein raw materials in the production of simulated meat can solve problems such as insufficient supply of traditional meat, high resource consumption and waste emissions, and animal welfare. Fungal protein, as an emerging alternative protein, has the advantages of balanced and comprehensive amino acid composition, rich dietary fiber, and less saturated fatty acid. Additionally, the fibrous structure of fungal mycelium can effectively restore meat texture, making it a promising candidate for developing simulated meat. This article reviews the types, production processes, nutritional and safety characteristics of fungal proteins, as well as the research progress of simulated meat processing technology. The current market status, challenges, and future development directions of fungal protein based meat analogues are also analyzed.

Keywords fungal protein based meat analogues; processing technology; nutrition and safety; products and markets; industry challenge