DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.02.014

微生物蛋白的关键生产技术体系与食品产业应用

汪超[1,2]，夏路[1]，李兆丰[3]，陈坚[1,2*]

（1. 江南大学未来食品科学中心，江苏无锡 214122；2. 江南大学生物工程学院，江苏无锡 214122；
3. 江南大学食品学院， 江苏无锡 214122）

摘要：食物蛋白是人类最重要的营养素之一，而现有的蛋白质获取方式难以满足人口持续增长、生活水平不断提升对蛋白质供应的巨大需求；微生物蛋白制造是利用廉价的生物质原料并以车间生产的方式高效生产蛋白质原料，有望成为未来最有效、最可行的替代蛋白来源之一。本文阐述了酵母蛋白、微藻蛋白、丝状真菌蛋白等微生物菌体蛋白的应用情况，乳蛋白、卵清蛋白、血红蛋白等微生物合成功能食品蛋白的发展情况，从培养底物的选择与利用、菌种的选育、发酵过程控制、蛋白的分离与提取等方面全面梳理了微生物蛋白制造的关键技术体系。研究认为，在微生物蛋白具有多重生产优势而在食品产业中应用案例甚少的背景下，开展微生物蛋白的食品化应用及产业化，亟需解决微生物蛋白的食品化加工、营养与安全评价两个层面的问题。相关研究可为国家替代蛋白战略、微生物蛋白产业发展布局等研究提供基础参考。

关键词：替代蛋白；微生物蛋白；技术体系；食品产业应用；大食物观

中图分类号：R-1　　**文献标识码：**A

Key Manufacturing Technologies of Microbial Protein and Its Application in Food Industry

Wang Chao[1,2], Xia Lu[1], Li Zhaofeng[3], Chen Jian[1,2*]

(1. Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: Food protein is one of the most important nutrients for human beings. The existing ways of obtaining protein are difficult to satisfy the huge demand for protein supply owing to the continuous growth of population and the continuous improvement in living standards. Microbial protein manufacturing is the efficient production of protein raw materials by using cheap biomass raw materials in the way of workshop production, which is expected to become one of the most effective and feasible alternative protein sources in the future. This research introduces industrial application status of several microprotein such as yeast protein, microalgae protein, and filamentous fungi protein, and functional proteins such as lactoprotein, ovalbumin, and hemoglobin. The research also sorts out key manufacturing technical systems involved in substrate selection and utilization, strain breeding, fermentation process control, and protein extraction. It is concluded that in the context that microbial protein has multiple production advantages and few application cases in the food industry, to promote food application and industrialization of microbial protein, it is urgent to solve two problems: food processing as well as evaluation of nutrition and safety. The research can provide a basic reference for national alternative protein strategies and the development layout of the microprotein industry.

Keywords: alternative protein; microbial protein; technology system; food industrial application; an all-encompassing approach to food

收稿日期：2023-12-25；**修回日期：**2024-03-07

通讯作者：*陈坚，江南大学教授，中国工程院院士，研究方向为发酵工程、食品生物技术；E-mail：jchen@jiangnan.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“‘大食物观’指导下的替代蛋白产业发展战略研究”(2022-XZ-57)，“未来食品与生物技术”(2023-JB-05)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

蛋白质是三大营养素之一，在人体中发挥着多种重要作用：构成和修补人体组织的主要成分，构成人体内的主要生理活性物质（如酶、抗体、激素），参与调节体液平衡以及运输各类物质[1]。目前，全球蛋白质消费仍以动物蛋白为主，主要包括禽肉、畜肉、水产品、乳制品等；这些食物提供了多种蛋白质来源，在一定程度上满足了居民的膳食需求。随着地球人口激增、经济社会发展，预计2050年全球食物蛋白需求增量将达到当下的30%~50%[2]。在我国，从1980年至今，蛋白质自给率呈逐年下降趋势，目前食品蛋白质自给率仅为74.6%[3]；未来，依靠种植 / 养殖的传统食品蛋白供给方式将面临严峻考验[4]。

替代蛋白即以植物蛋白、昆虫蛋白、微生物蛋白等代替传统的畜禽养殖动物蛋白，不仅有助于保障国家粮食安全、满足居民不断增长的蛋白质需求、促进居民膳食结构的多样化，而且支持开发更健康且更可持续的优质蛋白供给方式、缓解传统蛋白生产方式伴生的诸多问题[5,6]。然而，细胞培养蛋白仍面临成本高昂、技术壁垒高、难以量产的问题，植物蛋白存在豆腥味、过敏源、消化率低的问题，昆虫蛋白存在公众接受度低、应用场景少的问题，这些问题阻碍着替代蛋白产业的发展。微生物蛋白指以可再生生物质原料等为底物，通过在发酵罐中培养微生物的方式制造蛋白，具有生产速率快、营养丰富、消化率高等优势，有望成为未来应用最为广泛的替代蛋白。目前，微生物蛋白已在饲料行业获得广泛应用，而有关食品应用的研究较少，加之相关技术尚不成熟、政策监管仍不完善，现有发展水平难以支撑在未来食品领域的产业化及市场化。

本文聚焦替代蛋白的重要组成部分——微生物蛋白，从微生物蛋白制造的技术体系、产业化挑战两方面进行深入分析，旨在提出微生物蛋白产业化应用建议，为国家适时布局微生物蛋白产业提供基础参考。

二、微生物蛋白及其应用

微生物蛋白生产主要分为生物质发酵、精密发酵两种技术体系：前者依靠微生物繁殖速度快、蛋白质含量高的特点，高效生产大量菌体蛋白；后者将微生物设计为“细胞工厂”，应用基因编辑技术，生产具有特定功能的蛋白质成分。

（一）微生物菌体蛋白的种类及其应用

1. 酵母蛋白

酵母菌是人类文明史中最早被利用的微生物。近年来，酵母蛋白广泛应用于普通食品（如乳制品、蛋白饮料、素肉、烘焙食品、调味剂），功能食品（如蛋白粉、能量棒、蛋白棒）[7~10]，这是因为酵母蛋白具有多种优势：含有9种人体所有必需的氨基酸，营养丰富；无致敏成分，适合人群广泛；高含量谷氨酸带来风味特性；体外消化率高（约81%），易被人体吸收；具有增色特性和保水性。在素肉的生产过程中，酵母蛋白可替代其中5%~40%的植物蛋白[11,12]。2023年12月，安琪酵母股份有限公司申报的酵母蛋白被批准为新食品原料，成为我国审批通过可用作食品原料的第一类微生物蛋白[13]。

2. 微藻蛋白

藻类蛋白最早应用于饲料，早在国家“七五”攻关计划中就开始了藻类饲料蛋白的专题研究[14]。微藻中的蛋白质含量高且富含长链多不饱和脂肪酸、类胡萝卜素等生物活性分子[15,16]，如螺旋藻含有的蛋白质是同等质量牛肉的3倍[17]。微藻蛋白具有适用于食品化加工的理化特性，如小球藻、钝顶螺旋藻蛋白提取物可实现凝胶化，普通小球藻蛋白具有较酪蛋白、大豆分离蛋白等商业化乳化蛋白质更好的乳化力和乳化稳定性[18]。

然而，在品种数以千计的微藻中，只有少数才可作为食品或食品配料进行商业化生产。目前，美国食品和药物管理局批准了6个可供人类安全食用的微藻种属：节旋藻（螺旋藻）、莱茵衣藻、小球藻、杜氏藻属、眼虫藻。自2004年至今，我国批准了钝顶螺旋藻、拟微球藻等7类微藻蛋白可用于食品。近期，莱茵衣藻申报新食品原料已通过食品安全风险评估中心专家评审委员会的技术审查[17]。

3. 丝状真菌蛋白

常用于生产丝状真菌蛋白的菌株有枯萎镰刀菌、黄石镰刀菌、米曲霉等。相比酵母、细菌等菌

体蛋白，丝状真菌蛋白味道更鲜美，富含纤维素，具有类似肉质的组织结构，可用于生产肉类替代品。

丝状镰刀菌是第一个被开发的真菌蛋白（20世纪60年代末），由英国RHM原料公司耗时3年，从近3000种真菌中挑选出的用于蛋白产品开发的最佳真菌；含有9种人体必需的氨基酸、不含胆固醇、饱和脂肪酸含量低、富含膳食纤维等性质，使其在真菌蛋白开发中广受青睐。自20世纪80年代起，丝状镰刀菌的安全性、生产工艺、核糖核酸去除技术、营养成分等已获得详细研究和开发。

黄石镰刀菌是一种生产可食用蛋白质的微生物，由美国Nature’s Fynd公司在地热泉水中发现。黄石镰刀菌生产的黄石镰刀菌体蛋白，含有9种必需氨基酸的完整蛋白质，不含胆固醇或反式脂肪，可用于制作纯素食的肉类和乳制品。通过专用发酵技术，实现了黄石镰刀菌体蛋白的无抗生素添加、无毒处理、大规模托盘培养与获取。

（二）微生物合成功能食品蛋白

1. 乳蛋白的微生物合成

乳蛋白是动物奶中的主要营养成分，具有增强免疫力、调节肠胃功能、调节激素等生理功能[19]。目前，利用合成生物学手段已实现乳铁蛋白、酪蛋白、乳球蛋白、乳白蛋白等的微生物合成（见图1）[20]。乳铁蛋白是乳清蛋白中一种含量极低的蛋白质（0.02~0.2 g/L），因其在牛乳中含量极低且具有抗菌和免疫调节的功能，成为研究关注点[21]。与牛奶中的提取物相比，微生物合成乳铁蛋白具有生产成本低、生产效率高等特点[22,23]。美国Perfect Day公司是全球布局乳蛋白生产技术专利最多的公司，拥有人工合成牛乳蛋白编码基因的脱氧核糖核酸序列、6种牛乳蛋白合成重组质粒的构建、不同乳蛋白的分离纯化方法、人造奶的配方组分等专利。

2. 卵清蛋白的微生物合成

鸡蛋清中的卵清蛋白是一种优质蛋白质，占蛋清蛋白总量的50%以上。目前，卵清蛋白已在丝状真菌、大肠杆菌、毕赤酵母等宿主中成功表达[24]。例如，利用丝状真菌里氏木霉菌异源表达雉科动物来源的特定基因来合成卵清蛋白，相应产品的特性（如抗原性、生物活性）与鸡蛋来源的卵清蛋白类似[25]。美国Clara Food公司作为世界上第一家生产人造鸡蛋白的公司，开始使用酿酒酵母、枯草芽孢杆菌生产卵清蛋白。

3. 血红蛋白的微生物合成

血红蛋白是含铁的血红素类蛋白，可作为食品调味剂、着色剂、营养强化剂。合成生物学技术已经实现利用酿酒酵母、大肠杆菌进行血红蛋白的合成[26]。例如，改造酿酒酵母底盘细胞，首次实现牛血红蛋白（11.7±0.4 mg/L）、猪血红蛋白（19.3±2.8 mg/L）、大豆血红蛋白（108.2±3.5 mg/L）、三叶草血红蛋白（13.7±0.5 mg/L）的高效表达[27]。美国Impossible Foods公司采用合成生物学方式实现血红蛋白的微生物合成以及工业化生产，获得的添加血红蛋白的植物肉在烘烤时能够呈现自然的焦褐色和“肉香”。

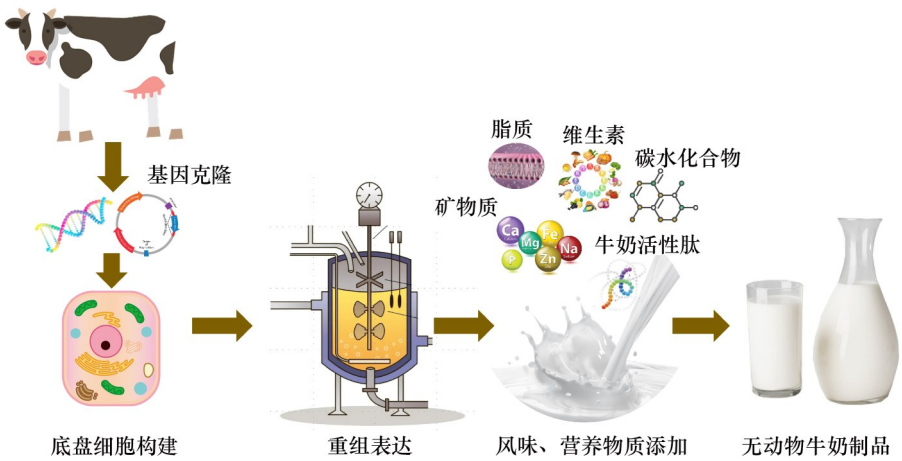

图1　人造奶的生物合成过程

三、微生物蛋白制造的关键技术体系

微生物蛋白制造的技术路线涵盖发酵原料的选择、菌种的选育、发酵过程优化、蛋白的分离与提取，相关过程涉及碳氮协同代谢、基因编辑、菌株诱变、高通量筛选、发酵过程的优化与控制、蛋白纯化等多种技术。目前，针对微生物蛋白制造过程中存在的底物转化蛋白效率低、蛋白生产速率慢而难以适应工业生产、规模化发酵生产过程传质效率低等问题，主要从培养底物的选择与利用、菌种选育、发酵过程控制、蛋白的分离提取等方面出发，开展微生物蛋白生产的关键技术体系研究（见图2）。

（一）培养底物的选择与利用

1. 培养底物的选择

微生物培养所需的营养成分主要有碳源、氮源、无机盐、生长因子、水等。碳源为合成细胞结构提供碳元素和能源，常用的碳源有淀粉、淀粉水解糖、有机酸、低碳醇等。氮源在微生物培养基中的含量因发酵目的产物的不同而不同，生产微生物蛋白对氮源的需求量大。常用的氮源分为有机氮源、无机氮源：前者有黄豆饼粉、花生饼粉、玉米浆、蛋白胨、酵母粉、鱼粉等，后者有氨水、液氨、尿素、硝酸盐、铵盐等。

当前，以淀粉糖、大豆、玉米等农产品为主的微生物蛋白生产方式已无法满足社会发展需要，因而利用农业副产品及废弃物、工业废弃物、一碳化合物等原料生产微生物蛋白逐渐成为趋势[28]，不仅能有效降低生产成本，而且具有环境友好和可持续特点[29,30]。农业废弃物主要指粮食、果蔬等加工过程产生的副产物，如玉米浆、马铃薯渣、麸皮、酒糟、糖蜜等，富含碳源和氮源；以秸秆为代表的木质纤维素等原料，在适当的预处理后也可被微生物所利用并转化出蛋白[31]。大多数的丝状真菌及酵母，均可利用由蔬果废弃物（如枣渣、葡萄果皮、香蕉皮、芒果渣、甜橙皮、石榴皮、苹果渣、糖蜜等）构成的底物[32~34]。

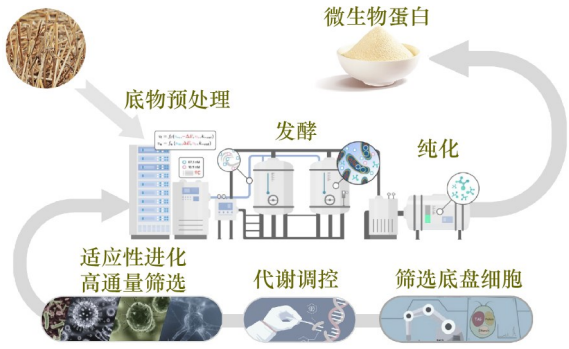

图2　微生物蛋白制造的关键技术体系

能用于微生物蛋白生产的工业废弃物，主要来源于酿酒、食品加工、食用油、乳制品、淀粉生产、造纸等轻化工业。相关工业废弃物含有较多的有机碳、有机氮、磷、无机盐等可供乳酸菌、酵母、霉菌、光合细菌等微生物生产并繁殖所需的营养物质，一般不含有重金属等有毒有害物质。浓缩废水以提高其中的碳、氮含量，再补充适量的营养素，便可进行微生物蛋白的发酵生产[35]。例如，利用啤酒废水生产微生物蛋白，在获取菌体蛋白的同时实现啤酒废水的资源化利用[36]；利用奶制品厂的副产物（乳清）培养微生物生产蛋白，添加微量元素、维生素、硫酸铵可使乳清完全转化为菌体蛋白[37]。英国3F Bio公司使用丝状真菌威尼斯镰刀菌并以生物乙醇生产后的残留物为基础底物，成功生产了菌体蛋白[38]。

目前已筛选出多种可高效利用一碳化合物的天然微生物，包括甲醇细菌、化能自养菌、光合自养微生物3类。德国黑斯伍公司以甲醇为原料生产细菌蛋白，实现万吨级生产规模。但与多数碳源相比，甲醇生产菌体蛋白的成本偏高，故甲醇常用作生产附加值更高的重组蛋白[39]。化能自养菌主要利用的底物有CO、CO_2。北京首朗生物科技有限公司以钢铁工业尾气中的CO为碳源、氨水为氮源，实现生物合成乙醇梭菌蛋白的工业化生产能力（年产量为万吨级）[40]。光自养是微藻产业中最为常见的养殖方式，微藻通过光合作用将无机碳源（如CO_2、碳酸盐）转化成有机物，实现经济且环境友好的养殖方式[17]。

2. 底物的预处理

多数的农业、工业废弃物在用作发酵底物前，需要经过预处理以提高微生物对生物质的利用效率。尤其是木质纤维素一类的农业废弃物，因其具有特殊成分及结构特性，在用作发酵底物前需要经物理水解、化学水解、酶解，增加葡萄糖、木糖、阿拉伯糖等可用性碳源[37,41,42]。物理处理包括机械处理（如碾压、粉碎、剪切），微波处理，超声处理，

热处理。化学预处理利用化学反应来破坏生物质结构。生物预处理利用酶或微生物作用，使木质纤维素降解为可利用的产物。对于富含淀粉的底物，需要采取高温糊化处理以使淀粉颗粒中的直链淀粉、支链淀粉水解为可溶性糖，进而提高菌体的利用效率。将回收的橄榄果废弃物进行碱性水解并作为解脂耶氏酵母的发酵底物，理想生产条件下的蛋白质含量可达菌体量的59%[43]。诸如餐厨垃圾、屠宰场废弃物等，需经过除杂、粉碎、打浆、过滤等预处理，加入一定比例的辅料，再接种微生物进行发酵。

（二）菌种的选育

1. 微生物宿主细胞的选择

微生物蛋白的发酵生产过程以微生物的生命活动为中心，因而微生物菌种对生产微生物蛋白的周期、成本、产品质量等构成决定性的影响。不同的微生物具有不同的生长特性、底物选择性、蛋白表达系统、代谢网络，应根据微生物蛋白的生产需求来选择合适的宿主：对于生产食用性微生物菌体蛋白，一般选择安全性高、生长速率快的宿主菌株；对于需要特定培养底物的微生物蛋白，一般选择可以利用、底物环境适应性好的宿主菌株；对于生产特定目标蛋白，一般选择蛋白表达系统稳定的宿主菌株。

2. 微生物代谢网络的调控与优化

随着基因编辑等底层技术的突破，选育微生物蛋白生产菌株不再局限于从天然环境中筛选。当前研究已能利用基因工程改造微生物细胞，调控并优化微生物代谢通路，进而提高原料向微生物蛋白的转化效率及速率[44]。

为了实现微生物蛋白的高效积累，应为微生物菌体生长及蛋白的生产提供充足的前体和能量，也需降低无用及有害次级代谢产物的生成。相应的关键点是加快菌体生长速率，提高底物碳氮利用效率及能量效率。首先，精准调控并优化细胞代谢及组分，使细胞结构更为精简、分裂速度更快，实现微生物的快速繁殖。其次，运用代谢工程-系统优化策略，设计并重构代谢模块，调整代谢通路的流向与产物分布，敲除非必要的次生通路，建立碳氮协同调控机制，减少多糖、核酸等副产物积累，提升原子经济性；重编程蛋白合成代谢网络，强化蛋白合成途径，提高蛋白转化对碳氮源的利用效率[45]。此外，对于自产毒素的菌株，需要阻断有毒副产物的合成路径，以消除有毒副产物的产生。

3. 适应性进化与高通量筛选

将适应性进化与高通量筛选相结合，可以高效筛选并获得优势菌株，构建利用范围广泛且廉价的底物谱，生长速率快、蛋白品质好、生产强度高的菌株特性。利用适应性进化，通过连续转染、自然选择、体外进化等方式优化微生物的特性，生成蛋白质高表达型突变株，同时提高自身对目标蛋白的耐受性。在应用微生物蛋白表达的高通量筛选技术时，需采用适当的筛选平台，如流式细胞仪、单细胞激光捕获、微流控芯片等，以快速、高效、准确地检测微生物蛋白量。

近年来，通过适应性进化结合高通量筛选技术，获得了威尼斯镰刀菌等高效生产微生物蛋白的细胞工厂，实现了以枣渣、糖蜜、甲醇等为原料发酵生产菌丝蛋白。例如，采取适应性实验室进化、细胞壁重塑、强化氮代谢途径关键基因、削弱细胞壁合成等策略，获得中试流加培养条件下的工程酵母菌株，最大生物量为63.37 g DCW/L，甲醇转化率为0.43 g DCW/g，蛋白质含量为50.6%，氨基酸含量为41.78%[46]；以甲醇作为唯一碳源对微生物进行筛选，获得能高效利用甲醇生产蛋白的多形汉逊酵母菌，利用该菌株发酵生产甲醇蛋白，产品蛋白含量达60%[47]；以酿酒酵母、产朊假丝酵母为出发菌株，通过紫外诱变得到蛋白产量显著提高且性能稳定的突变株[48]。此外，上海昌进生物科技有限公司筛选自然原始菌种，经过持续迭代进化和人工驯化出高营养、口感佳、生长优势大的克鲁维酵母菌株，面向市场推出基于微生物蛋白的类奶油、类芝士等系列产品。

（三）发酵过程控制

1. 发酵过程优化

微生物蛋白的生产水平取决于生产菌株本身性能，还需赋予微生物合适的环境条件（如环境温度、底物供给、溶氧、pH）才能发挥出优良的蛋白生产能力[49,50]。

发酵温度是影响微生物蛋白产量的重要因素之一，而大多数微生物生长与蛋白积累的最适宜温度不相同。为了收获更多的微生物蛋白，往往选择分

阶段控温：前期控制适宜微生物生长繁殖的温度，当菌体量接近峰值时，再提高或降低培养温度，使其处于最佳的蛋白生产条件。发酵时间也是控制微生物蛋白产量的重要因素。在培养前期，微生物蛋白往往随发酵时间的延长而不断增加；当培养基中的底物消耗完毕后，微生物自身分解代谢，导致蛋白含量下降。因此，在发酵过程中应持续监测底物和蛋白含量，当底物消耗完毕或蛋白含量呈现下降趋势时则立即停止发酵并收集菌体和蛋白。

混菌培养也是生产微生物蛋白常用的策略。在以木质纤维素为底物的蛋白生产过程中，为得到更好的发酵结果，较多使用不同的微生物组合发酵稻草秸秆，还根据发酵产物中的粗纤维含量和粗蛋白含量筛选出最佳的微生物组合，达到最大程度降解利用纤维素的目的[51]。传统的微藻培养方式是依赖光合作用的自养，细胞密度和蛋白含量均较低。异养则利用有机碳源，在没有光照的情况下对微藻进行培养，通常能实现较高的生物量密度。现代化微藻培养方式已从自养转变为混养，但在大幅提高微藻产率及微藻蛋白质量的同时，面临染菌的风险。国内已有研究团队利用异养培养-稀释-光诱导复合培养技术，在降低染菌风险的同时，使小球藻产量提高到40~100 g DCW/L；蛋白含量显著提高，最高为自养养殖的80倍。

2. 反应器的设计与优化

国内生产微生物蛋白多使用机械搅拌式生物反应器。搅拌式发酵罐通过增加转速产生小尺寸气泡，以有效增加气液传质，但高速机械搅拌不仅能耗较高，而且剪切力容易造成细胞损伤，不适用于丝状真菌蛋白的生产。通气搅拌式反应器具有结构简单、耗能低、传质效果好、溶氧率高等特性，获得更多关注[52]。还有研究改良了微纳米鼓泡发酵罐设计，产生的微纳米气泡尺寸小且均匀稳定，在显著减小比表面积的同时增加了气泡在液体中的停留时间[53]。

好氧甲烷氧化菌是一种能够利用甲烷、生长速率较高的微生物。底物甲烷在水中的溶解度较低，严重影响了甲烷氧化菌对其的转化利用。强制环流发酵罐通过压缩空气使反应器内液体循环，能以连续培养的方式进行甲烷氧化菌的发酵，将有效提高气液传质、增加微生物蛋白的生产效率[54]，已广泛用于好氧性甲烷菌蛋白的工业化生产[55]。微藻培养分为开放和封闭两种体系：前者（如跑道池塘）具有低成本、操作简单、易清洗、低能耗的优点，但存在生产效率低、易受污染等问题；后者（如管式、平板式）凭借其灵活性更高、光照表面积大、气液传质速率高、生产强度高、不易受到污染等优势，已应用于多种微藻的培养[56]。

（四）蛋白的分离与提取

蛋白的分离与提取是微生物蛋白生产的最后一个环节。为了最大程度地收获纯净的微生物蛋白，需要根据微生物蛋白的理化性质，选取合适的细胞破碎和蛋白质提纯方法。

在很多情况下，分泌到培养基中的蛋白质提取分离比较容易，而对于细胞内蛋白质，需要采用机械式（使用物理剪切力，如超声波法、高压匀浆法、高速珠磨法）和非机械（化学、酶）方法对细胞进行有效的破碎[57]。对于微生物生产的活性蛋白，破碎不能影响到目的蛋白产物的活性，因而在破碎过程中应尽可能保持低温。此外，细胞一旦破碎也就失去了代谢调节机制的控制，目的蛋白会受到蛋白酶的作用；需要迅速提取目的蛋白，也可加入抑制剂、降低温度以控制蛋白酶的作用。

例如，酿酒酵母除了细胞膜，还有坚硬的细胞壁。相较于细菌，酵母细胞的破壁更加困难，往往需要更长时间的物理破碎或化学酶法裂解细胞。被释放的酵母蛋白可通过碱法溶解、等电点沉淀法等来提取。NaOH是常用的酵母蛋白萃取剂（见图3），酵母蛋白的溶解度随着pH的升高而增加，pH≈12时可实现酵母蛋白与脂质等不溶性组分的分离。将溶液的pH降低到蛋白等电点附近（pH≈4.5），有利于酵母蛋白的沉淀以实现酵母蛋白的提取[58]；在此过程中加入适量十二烷基硫酸钠，能抑制内源酶对蛋白质的消化，明显提高酵母蛋白的提取率[59]。在毕赤酵母生产乳铁蛋白的生产过程中使用诱导型启动子，在发酵结束时诱导酵母细胞裂解，相应裂解产物可直接用于蛋白质的纯化，显著降低蛋白提取成本[60]。对于乙醇梭菌蛋白的提取，需要调节发酵醪液的pH和温度，使微生物蛋白变性沉淀，再经离心浓缩并添加絮凝剂后混合均匀，进行压滤脱水，产生的滤饼经干燥、粉碎后即得乙醇梭菌蛋白粉[40]。

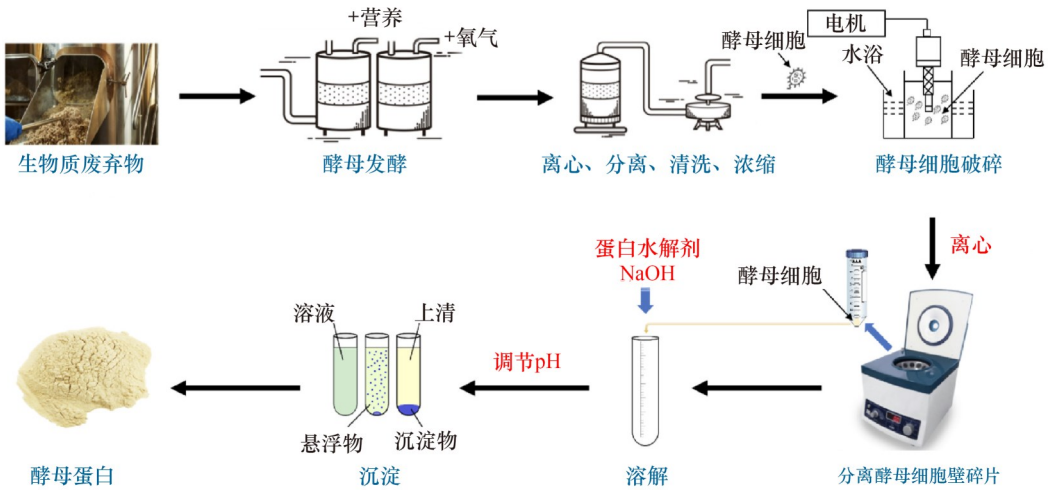

图3　酵母蛋白的分离提取过程

四、微生物蛋白的食品化应用及产业化挑战

微生物蛋白凭借其生产原料来源广泛、生产速率快、生产成本低、营养丰富等优势，已在饲料行业得到较多使用，但应用于食品产业的案例为数甚少。微生物蛋白作为未来食品行业最具潜力的替代蛋白类型，为了实现食品级的规模化生产与产业化应用，亟需解决微生物蛋白的食品化加工、营养与安全评价两个层面的问题。

（一）微生物蛋白的食品化加工与利用

微生物蛋白在食品中的应用场景主要有营养强化剂、肉类替代品，尤其是蛋白粉、烘焙食品、素肉。涉及的食品化加工技术包括：微生物蛋白结构功能及加工适用性评价、功能改性与品质提升、组分互作与风味质构调控、重组加工与产品成型。

微生物种类繁多，而不同微生物蛋白的自身特性对食品化的加工将产生积极或消极的影响。例如，与动物肉相比，微生物蛋白肉缺少油脂香气、其血红蛋白和纤维结构在风味、颜色、口感上都与传统观念上的肉有较大差距。本研究通过微生物蛋白产品的营养组成与理化性质分析，建立了提高微生物蛋白食品加工性能的系列生物物理改性技术（如菌丝蛋白与酵母蛋白纤维成型高水分挤压加工工艺）；形成智能化微生物蛋白肉仿真和复配理论及其技术体系，获得系列微生物蛋白肉新产品，实现了规模化应用示范（见图4）。

值得指出的是，当前研究尚未建立完备的微生物蛋白仿真复配理论，微生物蛋白产品存在仿真度不高，咀嚼性、厚重感、保水性、风味不佳等问题，复配策略仍待深化[61]。① 开展配方研究，去除不良风味，拓展特殊风味食品化应用场景；② 探究微生物蛋白在组织网络结构形成过程中与其他成分的相互作用关系，改善微生物蛋白产品的质构特性[62]；③ 微生物蛋白含有丰富的营养物质，需要针对其营养开展功能性研究，建立适用性强的深加工工艺，进一步优化微生物蛋白的呈现形态，实现蛋白优质、营养丰富、风味优良、质构拟真、色泽相似，让更多的消费者接受微生物蛋白产品。

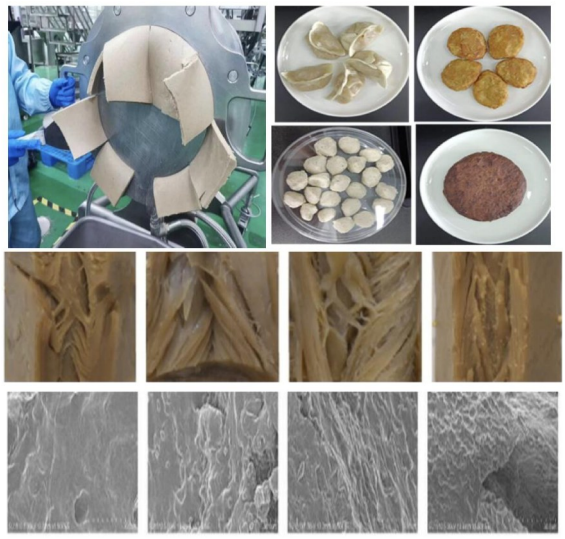

图4　菌丝蛋白纤维成型高水分挤压加工工艺

（二）微生物蛋白的营养安全控制与评价

微生物蛋白的营养和安全受发酵底物、微生物自身代谢路径、培养环境等因素的影响。发酵底物决定了微生物生产蛋白氨基酸及其他营养物质的含量，调控底物配比可使菌株平衡生产氨基酸、矿物质、脂肪酸等营养物质。出于自身生长代谢需要，某些微生物在培养过程中不可避免会产生核酸或毒素等影响人体健康的物质，可通过有效的代谢调控手段来实现核酸含量的消减、自产毒素的消除。

除了对微生物菌株选育、发酵过程、培养环境、食品化加工过程进行风险控制，在微生物蛋白正式入市前还需对潜在的营养和风险因子进行严格检测及评估。根据联合国蛋白质咨询组对微生物蛋白安全性评估标准，用于食品生产的微生物菌株不得含有毒素等疾病源，产出的最终产品不得含有活细胞、原料及试剂残留；目标产品也需通过动物毒理学实验、人体临床实验，最终形成微生物蛋白安全性报告。欧洲食品安全局已经对一些微生物蛋白进行了安全评价，如解脂耶氏酵母被定义为新型食品且具有安全性。多种真菌菌丝体在发达国家市场上实现稳定生产和长期流通。在我国，新的食品蛋白进入市场之前需经过标准化安全评估程序并符合市场准入制度，微生物蛋白可根据新的食品原料和添加剂两大类进行管理[63]；但仍涉及许多监督难题，在真菌来源的发酵蛋白类原料中，目前仅有酵母蛋白被正式列入新食品原料目录。

我国微生物蛋白相关的营养与安全评价技术相比国际前沿存在显著差距。发达国家开展了微生物蛋白产品营养特性的系统研究，而我国尚未建立微生物蛋白的全营养评价指标体系、成分信息、代谢及生物利用度等评价指标，未能支持对微生物蛋白整体营养健康作用的明确评价。微生物蛋白生产来源和工艺带来很多未知的食用安全风险，如新加坡等国家建立了相关的安全评价指南，而我国缺乏针对新工艺采用的外源性材料、产生的非预期性成分等的识别与评估技术。

为了进一步完善政策与监管体系以满足产业发展需要，亟待发展基于人体代谢与消化模型、分子感官等技术，解析微生物蛋白加工过程中营养增益与危害因子阻控协同机理。突破微生物蛋白安全风险评价、特征成分甄别等关键技术，建立营养及食用特性评价模型，制定食用安全评价和营养食用特性评价相关的标准规范，形成生产、工艺、终端产品评价报告，推动建立适应国情的微生物蛋白监管与政策制度体系，理性指导和精准规范食用微生物蛋白的研发、生产与市场化。

五、结语

“大食物观”的提出，为替代蛋白在我国的发展营造了良好的宏观环境。从可持续的角度预判，替代蛋白将成为未来食品市场变迁的重点趋势之一。微生物蛋白凭借其营养丰富、生产效率高的优点，可为缓解食品蛋白资源供给压力、满足居民日益增长的美好生活需要提供更低碳、更安全的替代方案。目前，针对微生物蛋白底物转化效率低、生产速率慢等规模化生产瓶颈，研究人员已在底物选择与预处理、菌种选育、发酵过程控制与优化、蛋白分离与提取等方面开发出一系列关键技术。为实现微生物蛋白在食品领域的全面应用，需要在微生物蛋白的食品化加工、营养与安全评价等方面开展深入研究。未来，只有通过持续的技术创新和突破，提高微生物蛋白的生产效率和产品品质，不断优化相关产业生态，保障微生物蛋白市场的健康发展，实施严格合理的审查和监管，促进微生物蛋白的安全营养和积极的市场准入，才能真正实现微生物蛋白的消费普及。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 25, 2023; **Revised date:** March 7, 2024

Corresponding author: Chen Jian is a professor of Jiangnan University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include fermentation engineering and food biotechnology. E-mail: jchen@jiangnan.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of the Alternative Protein Industry Guided by the All-encompassing Approach to Food” (2022-XZ-57), “Future Food and Biotechnology” (2023-JB-05)

参考文献

[1] 韩永霞. 食物蛋白质与人体免疫力 [J]. 食品安全导刊, 2020 (36): 45–47.
Han Y X. Food protein and human immunity [J]. China Food Safety Magazine, 2020 (36): 45–47.

[2] 汪超, 刘元法, 周景文. 细胞培养肉的生物伦理学思考 [J]. 生物工程学报, 2021, 37(2): 378–383.

Wang C, Liu Y F, Zhou J W. Bioethical considerations of cell-cultured meat [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(2): 378–383.

[3] 徐海泉, 郭红宇, 刘瀛弢, 等. 食物自给率研究现状与思考 [J]. 中国食物与营养, 2022, 28(12): 44–47.
Xu H Q, Guo H Y, Liu Y T, et al. Current status and reflections on food self-sufficiency research [J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(12): 44–47.

[4] 李兆丰, 孔昊存, 刘延峰, 等. 未来食品: 机遇与挑战 [J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 1–13.
Li Z F, Kong H C, Liu Y F, et al. Future foods: Opportunity and challenge [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 1–13.

[5] 陈坚. 未来食品: 任务与挑战 [J]. 中国食物与营养, 2022, 28(7): 5–6.
Chen J. Future foods: Tasks and challenges [J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(7): 5–6.

[6] 汪超, 夏路, 陈坚, 等. 基于“健康中国”战略的未来食品科研平台构建 [J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 433–437.
Wang C, Xia L, Chen J, et al. Construction of future food research platform based on healthy China strategy [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 433–437.

[7] Pancrazio G, Cunha S C, de Pinho P G, et al. Spent brewer’s yeast extract as an ingredient in cooked hams [J]. Meat Science, 2016, 121: 382–389.

[8] 唐晓荞, 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. Nutritional evaluation of yeast protein [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2020, 31(6): 100–104.

[9] 尤孝鹏, 陈智先. 运动营养食品的营养素、功能及酵母蛋白在其中的应用前景 [J]. 食品工业科技, 2023, 1(3): 1–13.
You X P, Chen Z X. Nutrient, function and application prospect of yeast protein in sports nutrition food [J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 1(3): 1–13.

[10] 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 (18): 10–12.
Nie H J. Analysis of nutritional components of yeast protein and its application in protein bar [J]. Farm Products Processing, 2022 (18): 10–12.

[11] Jach M E, Serefko A, Ziaja M, et al. Yeast protein as an easily accessible food source [J]. Metabolites, 2022, 12(1): 63.

[12] 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.

[13] 关于巴拉圭冬青叶(马黛茶叶)等9种“三新食品”的公告 [J]. 饮料工业, 2023, 26(6): 1–2.
Announcement on 9 kinds of “three new foods” such as Paraguayan hollyleaf (yerba mate leaf) [J]. Beverage Industry, 2023, 26(6): 1–2.

[14] 高风正, 葛保胜, 向文洲, 等. 生物技术研究引领中国微藻产业发展的六十年: 回顾与展望 [J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(1): 26–39.
Gao F Z, Ge B S, Xiang W Z, et al. Development of microalgal industries in the past 60 years due to biotechnological research in China: A review [J]. SCIENTIA SINCIA Vitae, 2021, 51(1): 26–39.

[15] Koyande A K, Chew K W, Rambabu K, et al. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans [J]. Food Science and Human Wellness, 2019, 8(1): 16–24.

[16] Lum K K, Kim J, Lei X G. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed [J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2013, 4(1): 53.

[17] 陈峰, 杨帅伶, 刘宾. 微藻蛋白质及其在食品中的应用研究进展 [J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 21–32.
Chen F, Yang S L, Liu B. Microalgal protein and research progress on application in foods [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 21–32.

[18] Ursu A V, Marcati A, Sayd T, et al. Extraction, fractionation and functional properties of proteins from the microalgae Chlorella vulgaris [J]. Bioresource Technology, 2014, 157: 134–139.

[19] 周正富, 庞雨, 张维, 等. 乳蛋白重组表达与人造奶生物合成: 全球专利分析与技术发展趋势 [J]. 合成生物学, 2021, 2(5): 764–777.
Zhou Z F, Pang Y, Zhang W, et al. Recombinant expression of milk proteins and biosynthesis of animal-free milk: Analysis on related patents and trend for technology development [J]. Synthetic Biology Journal, 2021, 2(5): 764–777.

[20] 张齐, 崔金明, 蒙海林, 等. 7种牛奶蛋白基因在大肠杆菌中的异源表达 [J]. 集成技术, 2016, 5(6): 79–84.
Zhang Q, Cui J M, Meng H L, et al. Synthesis of seven milk proteins in escherichia coli [J]. Journal of Integration Technology, 2016, 5(6): 79–84.

[21] Séverin S, Xia W S. Milk biologically active components as nutraceuticals: Review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2005, 45(7/8): 645–656.

[22] Jin L, Li L H, Zhou L X, et al. Improving expression of bovine lactoferrin N-lobe by promoter optimization and codon engineering in Bacillus subtilis and its antibacterial activity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(35): 9749–9756.

[23] Cui S X, Lv X Q, Sun G Y, et al. Recent advances and prospects in purification and heterologous expression of lactoferrin [J]. Food Bioengineering, 2022, 1(1): 58–67.

[24] Takahashi N, Orita T, Hirose M. Production of chicken ovalbumin in Escherichia coli [J]. Gene, 1995, 161(2): 211–216.

[25] Järviö N, Parviainen T, Maljanen N L, et al. Ovalbumin production using Trichoderma reesei culture and low-carbon energy could mitigate the environmental impacts of chicken-egg-derived ovalbumin [J]. Nature Food, 2021, 2(12): 1005–1013.

[26] Zhao X R, Zhou J W, Du G C, et al. Recent advances in the microbial synthesis of hemoglobin [J]. Trends in Biotechnology, 2021, 39(3): 286–297.

[27] Xue J, Zhou J, Li J, et al. Systematic engineering of Saccharomyces cerevisiae for efficient synthesis of hemoglobins and myoglobins [J]. Bioresour Technol, 2023, 370: 128556.

[28] 王国坤, 蔺玉萍, 王钦宏, 等. 微生物蛋白制造的发展趋势与挑战 [J]. 科学通报, 2023, 68(21): 2779–2789.
Wang G K, Lin Y P, Wang Q H, et al. Microbial protein manufacturing: The developing trend and challenge [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(21): 2779–2789.

[29] 杨瑞, 罗刚, 张士成, 等. 餐厨垃圾制备单细胞蛋白研究进展 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2022, 61(2): 229–237.
Yang R, Luo G, Zhang S C, et al. A review of single cell protein production from food waste [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2022, 61(2): 229–237.

[30] 寇慧, 文晓霞, 叶思廷, 等. 微生物发酵生产饲用菌体蛋白的研究进展 [J]. 饲料工业, 2021, 42(21): 26–33.
Kou H, Wen X X, Ye S T, et al. Research progress on microbial fermentation for production of feed bacterial proteins [J]. Feed Industry, 2021, 42(21): 26–33.

[31] Ritala A, Häkkinen S T, Toivari M, et al. Single cell protein-state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001—2016 [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 2009.

[32] Hosseini S M, Khosravi-Darani K. Response surface methodology for mycoprotein production by fusarium venenatum ATCC 20334 [J]. Journal of Bioprocessing & Biotechniques, 2011, 1(1): 2–6.

[33] Praksah P, Namasivayam S K R, Narendrakumar G. Optimization of growth parameters for elevated production of mycoprotein—Fusarium venenatum using response surface methodology [J]. Journal of Pure & Applied Microbiology, 2014, 8(6): 4843–4849.

[34] Lo Curto R B, Tripodo M M. Yeast production from virgin grape marc [J]. Bioresource Technology, 2001, 78(1): 5–9.

[35] 周澍, 海洪, 金文英, 等. 利用缫丝废水处理过程中产生的微生物蛋白制备复合氨基酸 [J]. 环境污染与防治, 2011, 33(8): 14–17.
Zhou S, Hai H, Jin W Y, et al. Preparation of compound amino acid from microbial protein produced in reeling wastewater treatment process [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(8): 14–17.

[36] 王冬梅, 郭书贤, 梁跃辉, 等. 酵母菌发酵啤酒生产废水产微生物油脂和菌体蛋白的研究 [J]. 中国油脂, 2017, 42(4): 108–112, 117.
Wang D M, Guo S X, Liang Y H, et al. Production of microbial oil and bacterial protein from beer production wastewater fermented by yeast [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(4): 108–112, 117.

[37] Schultz N, Chang L, Hauck A, et al. Microbial production of single-cell protein from deproteinized whey concentrates [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 69(5): 515–520.

[38] Bushnell C, Specht L, Almy J. State of the industry report fermentation [R]. Washington DC: The Good Food Institute, 2022.

[39] Johnson E A. Biotechnology of non-saccharomyces yeasts—The ascomycetes [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(2): 503–517.

[40] 蔺兴法, 邹方起, 莫志朋, 等. 钢铁工业尾气发酵乙醇醪液菌体蛋白的制备工艺 [J]. 化工管理, 2022 (11): 143–145.
Lin X F, Zou F Q, Mo Z P, et al. The production of bacterial proteins from ethanol mash by fermentation of iron and steel industry tail gas [J]. Chemical Management, 2022 (11): 143–145.

[41] 高乐, 吴信, 贾文娣. 一种生物质材料高效低成本预处理结合固态发酵方法及在单细胞蛋白饲料生产中的应用: CN113729110A [P]. 2021-12-03.
Gao L, Wu X, Jia W D. An efficient and low-cost pretreatment of biomass materials combined with solid state fermentation method and its application in single-cell protein feed production: CN113729110A [P]. 2021-12-03.

[42] Song G J, Madadi M, Sun C H, et al. Surfactants facilitated glycerol organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass by structural modification for co-production of fermentable sugars and highly reactive lignin [J]. Bioresource Technology, 2023, 383: 129178.

[43] Rages A A, Haider M M, Aydin M. Alkaline hydrolysis of olive fruits wastes for the production of single cell protein by Candida lipolytica [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2021, 33: 101999.

[44] 刘延峰, 邓梦婷, 陈坚. 微生物替代蛋白生物制造: 进展与展望 [J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 1–5.
Liu Y F, Deng M T, Chen J. Microbial alternative protein biomanufacturing: Advances and perspectives [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 1–5.

[45] Xu J, Wang J, Ma C L, et al. Embracing a low-carbon future by the production and marketing of C1 gas protein [J]. Biotechnology Advances, 2023, 63: 108096.

[46] Meng J, Liu S F, Gao L, et al. Economical production of pichia pastoris single cell protein from methanol at industrial pilot scale [J]. Microbial Cell Factories, 2023, 22(1): 198.

[47] 姜岷, 章文明, 马江锋, 等. 一株利用甲醇制备高赖氨酸单细胞蛋白的多形汉逊酵母菌及其应用: CN105861343B [P]. 2019-05-07.
Jiang M, Zhang W M, Ma J F, et al. A strain of polymorphic hansenomyces polymorphus using methanol to produce high lysine single cell protein and its application: CN105861343B [P]. 2019-05-07.

[48] 张立宏, 冯丽平, 史春辉, 等. 酵母发酵马铃薯淀粉废弃物产单细胞蛋白的能力强化 [J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(7): 9–15.
Zhang L H, Feng L P, Shi C H, et al. Strengthen bioconversion of potato starch waste into single- cell protein with fermentation by Saccharomyces [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(7): 9–15.

[49] 刘云肖. 可利霉素发酵菌渣生产单细胞蛋白发酵过程优化及参数相关分析 [D]. 上海: 华东理工大学(硕士学位论文), 2012.
Liu Y X. Optimization and parameter correlation analysis of single cell protein fermentation process produced by colimycin fermentation residue [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology (Master's thesis), 2012.

[50] 赵蕾, 张克英, 丁雪梅, 等. 夏橙皮渣产单细胞蛋白菌种筛选和发酵条件的优化 [J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(10): 101–105.
Zhao L, Zhang K Y, Ding X M, et al. Study of strains screening and fermentation conditions for SCP produce using citrus byproducts [J]. Food and Fermentation Industries, 2008, 34(10): 101–105.

[51] 鲁旭锋, 朱慧霞, 吴欢, 等. 微生物发酵稻草秸秆生产蛋白饲料培养条件优化 [J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 66–71.
Lu X F, Zhu H X, Wu H, et al. Optimization of culture conditions for protein feed production from straw stalks by microbial fermentation [J]. China Brewing, 2021, 40(4): 66–71.

[52] 高瑞, 段钰汀, 戴震, 等. 微生物发酵废弃生物质合成单细胞蛋白的研究现状进展 [J]. 环境工程, 2018, 36(5): 150–155.
Gao R, Duan Y T, Dai Z, et al. Waste biomass from microbial fermentation for single cell protein production: A review [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(5): 150–155.

[53] Hensirisak P, Parasukulsatid P, Agblevor F A, et al. Scale-up of microbubble dispersion generator for aerobic fermentation [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2002, 101(3): 211–227.

[54] 宋安东, 张炎达, 杨大娇, 等. 合成气厌氧发酵生物反应器的研究进展 [J]. 生物加工过程, 2014, 12(6): 96–102.
Song A, Zhang Y D, Yang D J, et al. Research progress in bioreactors for anaerobic fermentation of syngas [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2014, 12(6): 96–102.

[55] 高子熹, 郭树奇, 费强. 生物转化温室气体生产单细胞蛋白的研究进展 [J]. 化工学报, 2021, 72(6): 3202–3214.
Gao Z X, Guo S Q, Fei Q. Recent progress in microbial bioconversion of greenhouse gases into single cell protein [J]. CIESC Journal, 2021, 72(6): 3202–3214.

[56] 傅晓莹, 乔玮博, 史硕博. 微生物利用一碳底物生产单细胞蛋白研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(3): 1–11.
Fu X Y, Qiao W B, Shi S B. Microbial production of single cell proteins from single carbon substrates: A review [J]. Food Science, 2023, 44(3): 1–11.

[57] Marson G V, da Costa Machado M T, de Castro R J S, et al. Sequential hydrolysis of spent brewer's yeast improved its physicochemical characteristics and antioxidant properties: A strategy to transform waste into added-value biomolecules [J]. Process Biochemistry, 2019, 84: 91–102.

[58] 岳红卫, 韩富亮. 酿酒酵母蛋白提取工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 304–307, 318.
Yue H W, Han F L. Optimization of protein extraction from Saccharomyces cerevisiae [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 304–307, 318.

[59] 龚迪, 毕阳, 王军节, 等. 基于蛋白组学的水果蛋白质提取方法 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 376–379.
Gong D, Bi Y, Wang J J, et al. Protein extraction methods of fruit based on proteomics [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(3): 376–379.

[60] García-Montoya I, González-Chávez S A, Salazar-Martínez J, et al. Erratum to: Expression and characterization of recombinant bovine lactoferrin in E. coli [J]. BioMetals, 2013, 26(3): 535.

[61] 曾艳, 张学文, 李德茂, 等. 菌体蛋白替代鸡胸肉的炸鸡块品质变化 [J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 152–159.
Zeng Y, Zhang X W, Li D M, et al. Quality change of fried chicken nuggets with chicken breast substituted by mycoprotein [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 152–159.

[62] Sakai K, Sato Y, Okada M, et al. Improved functional properties of meat analogs by laccase catalyzed protein and pectin crosslinks [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 16631.

[63] 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.