

食用菌蛋白质的应用前景 及研究热点分析

王延圣^{1,2,3}, 翟夏秋^{1,2,3}, 郑筱光⁴, 弓志青^{1,2,3}, 崔文甲^{1,2,3}, 贾凤娟^{1,2,3}, 王文亮^{1,2,3,*}

- (1. 山东省农业科学院农产品研究所, 山东济南 250100;
2. 山东省农产品精深加工技术重点实验室, 山东济南 250100;
3. 农业部新食品资源加工重点实验室, 山东济南 250100;
4. 中国农村技术开发中心, 北京 100045)

摘要: 食用菌含有丰富多样的蛋白质资源, 其研究和应用日趋成熟。本文概述了食用菌蛋白质的种类和特点, 并系统总结了食用菌蛋白质在食品、医药、农业、化工、生物技术、纺织和生物传感器等领域的应用情况; 同时针对食用菌蛋白质的加工适应性、构效关系和规模化生产等研究热点展开讨论, 并对其发展趋势进行展望, 为食用菌蛋白质资源的开发利用和产业提升提供借鉴指导。

关键词: 食用菌, 蛋白质, 应用前景, 研究热点

Application Prospects and Research Hotspots of Edible Fungi Proteins

WANG Yan-sheng^{1,2,3}, ZHAI Xia-qiu^{1,2,3}, ZHENG Xiao-guang⁴, GONG Zhi-qing^{1,2,3},
CUI Wen-jia^{1,2,3}, JIA Feng-juan^{1,2,3}, WANG Wen-liang^{1,2,3,*}

- (1. Institute of Agro-food Science and Technology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;
2. Key Laboratory of Agro-products Processing Technology of Shandong Province, Jinan 250100, China;
3. Key Laboratory of Novel Food Resources Processing, Ministry of Agriculture, Jinan 250100, China;
4. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China)

Abstract: Edible fungi contains a rich variety of protein resources, and their research and application are becoming more mature. This article provides an overview of the species and characteristics of edible fungi proteins, and systematically summarizes the application in the fields of food, medicine, agriculture, chemistry industry, biotechnology, textile and biological sensors. At the same time, the research hotspots of edible fungi protein including processing adaptability, structure-activity relationship and large-scale production are discussed. The development trend is prospected to provide guidance for utilization and industrial upgrading of edible fungi protein resources.

Key words: edible fungi; protein; application prospects; research hotspots

中图分类号: TS255.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2019)10-0339-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.10.055

引文格式: 王延圣, 翟夏秋, 郑筱光, 等. 食用菌蛋白质的应用前景及研究热点分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(10): 339-344.

食用菌产业具有循环、高效、生态的特点, 能够利用农林牧业的废料进行生产, 是生态循环经济中的重要组成部分, 在促进农民增收、农业增效和国民健康等方面发挥着重要作用。近年来, 我国的食用菌产业得到了突飞猛进的发展, 截至 2015 年末, 全国食用菌总产量达到 3476 万吨, 实现产值 2516 亿元, 占世界食用菌总产量的 70% 以上, 是世界上最大的食用菌生产和消费国^[1]。目前可行商业化栽培的食用菌已经达到近 60 种, 其中有 30 多种已规模化栽

培, 成为仅次于粮、棉、油、菜、果, 在我国农业经济中位居第 6 的重要经济作物^[2]。

随着生活水平的不断提高, 人们对营养保健的消费要求越来越强烈, 食用菌是一种高蛋白、高膳食纤维、低脂肪的理想食品, 有着巨大的开发潜力。国内外对食用菌营养成分与功能的研究主要集中在食用菌多糖、虫草素以及三萜类等方面, 尤其是多糖类研究相对较多, 低层次重复现象严重^[3]。食用菌含有丰富的蛋白质成分, 含量高达 15%~25% (干重), 与

收稿日期: 2018-09-10

作者简介: 王延圣(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: sdnky_wys@163.com。

* 通讯作者: 王文亮(1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: cywwl@163.com。

基金项目: 山东省自然科学基金(三院联合基金, ZR2016YL029); 山东省农业科学院青年科研基金(2016YQN48)。

牛肉、猪肉等畜禽产品相当^[4]。近年来,科研人员陆续鉴定和分离了多种食用菌蛋白质,具有抗真菌、抗微生物、抗病毒、抗有丝分裂、免疫调节和降压作用等重要的生物功能活性,它们的大规模生产和工业化应用,解决了一系列微生物耐药性、农作物产出、可再生能源等医药和生物科技领域的难题^[5]。食用菌蛋白的功能活性和构效分析将成为未来食用菌营养保健功能研究的主要领域和突破点。本文拟从食用菌蛋白种类和特点、应用现状及研究热点三个方面对食用菌蛋白质进行系统介绍,以期对食用菌蛋白质资源的开发利用和产业提升提供借鉴和指导。

1 食用菌蛋白质的种类和特点

食用菌蛋白质结构复杂,种类丰富,功能多样,对于食用菌蛋白质的分类方法并不统一。按其来源可分为香菇蛋白、平菇蛋白、双孢菇蛋白、金针菇蛋白、杏鲍菇蛋白等;按其功能特性可分为凝集素、核糖体失活蛋白、免疫调节蛋白、漆酶、抗病毒蛋白及其它蛋白^[6-8]。

同细菌、动物和植物蛋白质相比,食用菌蛋白质具有诸多特点。一是由于食用菌种类繁多,其蛋白质具有许多其它来源蛋白质所不具备的生物活性,如专一的水解活性和高效的生物降解活性等;二是许多食用菌蛋白质具有较强的热稳定性和 pH 稳定性,有利于工业化规模生产;三是经过长久以来的验证,食用菌的安全性和健康功效得到了消费者的广泛认可,市场对食用菌蛋白质的接受程度高^[9]。

2 食用菌蛋白质的应用现状

2.1 食品加工领域

食用菌是极好的蛋白质来源,脂肪含量低,不含胆固醇,将食用菌直接添加到各种加工食品中,可以提高产品的质量特性和营养功效^[10]。Stephan 等^[11]利用平菇蛋白质作为配料,分别制作德国式和俄罗斯式煮制香肠,通过感官评测和质构分析发现,新产品同其它植物蛋白制作的香肠相比,具有更好的风味和质地,表明平菇蛋白质是煮制香肠蛋白配料的优质替代物。在食用菌加工过程中,香菇菌柄质地坚硬不宜加工,往往会作为产品边角料被废弃,但由于其蛋白质含量较高,目前已经部分用作酒精发酵的替代氮源^[12]。除此之外,灵芝、灰树花菇、姬松茸等食用菌被用于豆奶和葡萄酒的发酵,产品游离氨基酸和多糖含量大幅增加,风味和营养价值显著提高,在功能性酒精饮料开发方面具有广阔的市场前景^[13-15]。

目前食品生产中应用的各种水解酶大都来自于食用菌等高等真菌^[16]。食用菌蛋白酶被用于肉品嫩化、制作凝乳和奶酪以及水解蛋白质生产氨基酸类增味剂;糖苷酶生产的甜味剂用于烘焙、酿造和果汁生产等领域;脂肪酶用于烘焙和乳品等行业中脂质改性环节;漆酶和酪氨酸酶等氧化酶可以作为化学类氧化剂和饮料稳定剂的替代品,去除引起混浊褐变的酚类物质,保持葡萄酒和果汁等产品的质量均一稳定^[17-18]。研究发现,食用菌还可以用于新型天然食品着色剂的工业化生产^[19]。加强对不同种类食用

菌水解酶类功能活性的研究,可以为其在食品加工领域提供更多的应用。

2.2 医药领域的应用

食用菌蛋白质种类繁多且具备多种独特的生物活性,在医药领域的应用前景巨大。金针菇免疫调节蛋白(fungal immunomodulatory protein from *Flammulina velutipes*, FIP-fve)是一种潜在的功能性药物成分,具有显著的抗炎功效^[20]。研究者发现,口服 FIP-fve 可降低小鼠呼吸道合胞病毒(Respiratory Syncytial Virus, RSV)的复制和白细胞介素 6(Interleukin 6, IL-6)的表达,减少 RSV-诱导炎症和呼吸道疾病的发病机率^[21]。屋尘螨(HDM)是室内主要的过敏原之一,可引起哮喘等过敏性炎症,占所有病例的 85%,研究者发现口服 FIP-fve 对 HDM 诱导小鼠产生的急性呼吸道炎症具有抗炎作用,因此 FIP-fve 可用于过敏性呼吸道疾病患者的治疗^[22]。Zhang 等^[23]通过体外实验,研究了灵芝和平菇中的新型纳米蛋白提取物对巨噬细胞和健康骨细胞的细胞毒性作用,发现纳米蛋白提取物可以极大地抑制巨噬细胞的增殖,并且没有抑制成骨细胞的正常生长,为治疗各种骨科疾病奠定了基础。

此外,研究人员从茶树菇、杏鲍菇、葡萄色顶枝瑚菌、灰蚝蘑菇等食用菌中,分离提纯出了一系列具有抗肿瘤、抗炎、抗高血压的高效蛋白质活性组分^[24-27]。食用菌蛋白质作为一类具有潜在药用价值的多功能蛋白质,为新型药物的开发提供了丰富的素材,在未来医药领域必将发挥极其重要的作用。

2.3 农业领域

食用菌蛋白质在防治植物病虫害方面有着潜在应用。Erjavec 等^[28]对 94 种野生蘑菇的 150 种蛋白提取物进行了病原菌青枯菌(*Ralstonia solanacearum*)的抑菌活性测定,通过体外微量滴定板法鉴定出 15 种高抗菌活性蛋白质提取物,其中 11 种完全抑制细菌生长,4 种部分抑制细菌生长,表明蘑菇蛋白提取物可以有效治疗由青枯菌引起的植物枯萎病。食用菌中含有真菌生物素结合蛋白(biotin-binding proteins, BBPs),对线虫、昆虫和变形虫有一定毒性,是真菌化学防御系统的一部分^[29]。Wang 等^[30]研究了 14 种食用菌子实体的杀虫活性,通过分析水溶性、热稳定性和透析性等指标,发现食用菌蛋白质,特别是凝集素和溶血素等,对昆虫的毒性作用不受蛋白酶影响,是很好的杀虫剂原料。

食用菌蛋白质还可以用于饲料生产,提高动物对饲料的消化率。废弃的食用菌栽培基质中不但含有丰富的木质素和纤维素,而且蛋白质含量相对较高,将其添加到动物饲料中,能使饲料更容易消化吸收;通过向饲料中添加食用菌来源的酶,如木聚糖酶、葡聚糖酶或肌醇六磷酸酶等,也能够显著提高动物饲料的消化率^[31-32]。

2.4 化学工业领域

食用菌蛋白质在化学工业上的应用,主要通过不同种类和功能的酶来实现的^[33]。漆酶、过氧化物酶和酪氨酸酶等食用菌来源的酶,能够用于造纸、纺织和石

化等行业的废水处理,以及作为生物修复剂,清除土壤中的除草剂、杀虫剂、多环芳烃、卤代和硝基芳族化合物(如多氯联苯、三硝基甲苯)等污染物^[34-35]。在大规模工业生产中,利用食用菌蛋白质制备的固定化酶,表现出极强的稳定性,能够提高处理底物的数量,更容易与底物分离,从而大大降低生产成本^[36]。

漆酶是一种含铜的多酚氧化酶,能够氧化多种酚类和芳胺类化合物,还能够直接作用于木质素,氧化降解酚型和非酚型的木质素结构单元,因此漆酶在纸浆生物漂白、工业废水处理和有机染料脱色等方面有很大研究价值,被认为是造纸业中最具有发展前景的酶。但食用菌漆酶的生产成本很高,并且不适应严苛的工业生产条件,开发性质更稳定的酶和低廉高效的制备体系是目前食用菌酶工业化应用的热点^[37]。

2.5 生物技术领域

由于大量使用化肥和杀虫剂、除草剂等农药,导致有毒化学物质在土壤沉积,并严重污染水源和空气,是当今世界面临的主要环境问题之一。生物修复可以利用微生物将有毒化合物被降解为低毒化合物,见效快,成本低,因此真菌的生物修复能力正逐渐引起人们的兴趣。真菌(主要是担子菌)是生态系统物质循环中主要的分解者之一,通过分泌大量的胞外酶(如木质素过氧化物酶,锰过氧化物酶和漆酶等),可以将农药等进行生物转化分解,从而达到土壤修复的目的^[38]。

食用菌蛋白质在生物技术领域的另一大应用是降解木材。一些担子菌类能够通过生物酶高效降解木质素、纤维素和半纤维素,比较常见的是采用固态发酵手段,以可降解的农林业废弃物为原料,制备食用或饲用高等真菌的培养基,或者用于生产酶、蛋白质和药物组分^[39]。此外,食用菌蛋白质在可再生资源生产中也有着广泛应用^[40]。

2.6 纺织领域

在纺织领域,提取自食用菌的过氧化物酶和漆酶已被用于纺织品的酶促漂白及废水的脱色净化处理等环节。纺织企业排放的废水中含有难以降解的合成染料,对人和动植物具有一定毒性,采用物理或化学的方法处理纺织废水,成本高,过程复杂,而利用漆酶等生物手段处理纺织废水正受到广泛关注。从食用菌变绿红菇(*Russula virescens*)中分离纯化出一种分子量为69 kDa的单体蛋白质漆酶,纯化后作用于各种纺织染料和实验室染色剂(如活性艳蓝、溴百里酚蓝、铬黑T和孔雀石绿等),脱色效果显著^[41]。高恩丽等^[42]探讨了云芝漆酶对靛蓝废水的脱色净化作用,研究了不同温度、pH、靛蓝浓度、漆酶用量等因素对漆酶脱色作用的影响,研究发现当漆酶用量为15000 IU/kg牛仔布时,牛仔布的返沾程度减少85%,水洗废水中靛蓝含量减少83.8%。

2.7 生物传感器领域

酚类衍生物的测定在医疗保健、食品安全和污染监测等领域具有重要意义,与目前使用的检测方法相比,基于酪氨酸酶的生物传感器有明显的优势。

从双孢菇中提取的酪氨酸酶作为生物传感器的重要组成部分,已经在环境酚类污染物检测中得到应用^[43]。

生物传感器发展的一个关键方面是酶的有效固定,通过逐层组装固定光学透明载体上的蘑菇酪氨酸酶膜,使酶与聚阳离子聚合物交替固定,所制备的生物传感器用于光学检测邻苯二酚化合物L-3,4-二羟基苯丙氨酸(3,4-Dihydroxyphenyl L-Alanine),表现出良好的重复性和时间稳定性。通过吸收光谱和荧光光谱研究分析传感特性,基于吸光度测量的生物测定给出了23 $\mu\text{mol/L}$ 的检测限(limit of detection, LOD)和高达350 $\mu\text{mol/L}$ 的线性响应,基于荧光测量的生物测定给出3 $\mu\text{mol/L}$ 的LOD以及在几十微摩尔范围内的线性响应(确切值取决于蘑菇酪氨酸酶层数)^[44]。

3 食用菌蛋白质的研究热点

3.1 加工适应性研究

为了更好地利用食用菌资源开发新型食品和医药产品,有必要对食用菌经过各种加工处理(低温冷冻、热杀菌、脱水干燥和酸碱处理等)后的功能活性变化开展研究。Chang等^[45]模拟食品加工过程,评估了各种加工条件对来自双孢菇的凝集素(Agaricus bisporus lectin, ABL)和来自木耳的免疫调节蛋白(immunomodulatory protein of Auricularia polytricha, APP)两种食用菌蛋白质生物活性的影响,通过研究RAW264.7细胞在体外诱导TNF- α 和NO的产生,发现ABL和APP对巨噬细胞的活化功能在经过高温、冷冻、酸、碱和脱水处理后仍具有良好的稳定性,它们可以作为免疫刺激剂用于保健食品和制药行业。Tong等^[46]研究了金针菇中的FIP-fve和灵芝中的LZ8(recombinant Ling Zhi-8 protein, rLZ-8)两种活性蛋白质在不同食用加工处理下的加工耐受性,结果表明,在经过高温(100 $^{\circ}\text{C}$ 加热30 min)、高压(121 $^{\circ}\text{C}$ 高压灭菌15 min)和冷冻(-80 $^{\circ}\text{C}$)处理后,这两种蛋白质仍然可以诱导小鼠脾细胞的增殖和 γ 干扰素(interferon- γ , IFN- γ)的分泌;功能活性在0.6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸(pH=2)处理下不降低,但在5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠(pH=13)时显著下降;真空脱水后,FIP-fve和LZ8保留了大部分细胞增殖活性,但IFN- γ 分泌减少到初始值的一半左右。这些发现表明,这两种食用菌蛋白具有良好的耐热、抗冻性、耐酸性和脱水稳定性,在食品和保健品等领域具有巨大的应用前景。

此外,食用菌蛋白质在酶解过程中会获得大量功能性多肽,这些功能性多肽具有降高血压、降胆固醇、抗衰老、促进生长等生理功能^[7]。研究不同加工条件对提取食用菌功能性多肽的影响也是当前的研究热点之一,Zhao等^[47]以菇脚蛋白为原料,在超高压400 MPa条件下处理10 min提取生物活性肽,发现其对酒精代谢相关酶(乙醇脱氢酶和乙醛脱氢酶)活性存在影响。

3.2 构效关系研究

尽管已经有许多食用菌蛋白质生理功能和分子

特性方面的报道,但是关于其3D分子结构及构效关系的研究依然很少。Chen等^[24]研究了从茶树菇中提取的凝集素(Agrocybe aegerita lectin, AAL)的抗肿瘤功能和三维结构之间的相互关系。该研究确定了无配体的AAL及其乳糖复合物的晶体结构,结果发现二聚化是AAL诱导肿瘤细胞凋亡活性的先决条件,并且半乳糖和葡萄糖都是构成凝集素生物活性主要的碳水化合物配体。

酪氨酸酶能够催化酚类化合物转化为它们的醌衍生物,醌衍生物是形成黑色素的前体,由此引发的酶促褐变是食品行业中的一个重要研究领域。Ismaya等^[48]首次得到了双孢蘑菇酪氨酸酶复合物在2.3埃分辨率下的晶体结构,酪氨酸酶复合物是一个H(2)L(2)型的四聚体,H亚基起源于*ppo3*基因并且具有与其他酪氨酸酶类似的折叠,L亚基则具有与凝集素类似的折叠。

3.3 规模化生产研究

从食用菌中分离蛋白质的工艺耗时长、产量低、成本高,利用基因工程理论进行重组蛋白质规模化生产是一项前景广阔的技术^[49]。Hsu等^[50]采用巴斯德毕赤酵母表达系统,对灵芝中的LZ-8蛋白质进行了重组表达。Yeh等^[51]利用枯草芽孢杆菌和食品级乳酸乳球菌,重组表达了灵芝中的一种功能性免疫调节蛋白。为了降低生产成本,提高功能活性、产出量和纯化率,筛选最佳的蛋白表达系统来生产蛋白质十分关键。现有的表达系统包括细菌、酵母、昆虫、哺乳动物和植物细胞,其中利用酵母进行重组蛋白质的生产,表达量多,发酵规模大,可进行N-糖基化,但酵母特异性高甘露糖的存在往往限制了酵母的使用^[52]。利用大田作物(即植物表达系统)生产重组蛋白具有便宜、安全和生产规模大的特点,被认为是目前最有应用前景的手段之一^[53]。

4 展望

对于食用菌蛋白质资源的筛选,不应局限于长期食用或已经通过毒理学实验的品种,对于非食用或有毒的品种也应有所侧重,从它们中提纯的蛋白质仍有可能具备有益的功效。目前食用菌蛋白质大多从子实体、菌丝体及其悬浮液中获得,但分离提取工艺面临着产量低、耗时长、成本高等问题。一方面应继续发展食用菌高效生产栽培技术,以提高食用菌蛋白质的产量;另一方面应寻求技术创新或原理方法的突破,例如基因工程等手段实现食用菌蛋白质大规模生产。全基因组测序是食用菌蛋白质研究的重要手段,通过测序对编码的蛋白质进行鉴定和分类,将极大促进其在商业领域的开发应用。

关于食用菌蛋白质功能活性的相关作用机制仍知之甚少。除了继续探索食用菌蛋白质的构效关系外,还应加强其在生物体内生物活性的研究,特别是在研发免疫调节类新型药物时,需要考虑凝集素和免疫调节蛋白等活性蛋白质在人体免疫系统中的作用,避免过多的排异反应,从而保证食用菌蛋白质及其特殊生物活性在医药研究领域的成功应用。

食用菌蛋白质以其资源丰富、功能多样等优势,

必将在食品、医药、农业和生物技术等领域得到越来越广泛的应用。

参考文献

- [1]高茂林.中国食用菌产业“十三五”发展规划[EB/OL].2017-07-13.http://www.cefa.org.cn/2017/10/11/10244.html.
- [2]李玉.中国食用菌产业发展现状、机遇和挑战——走中国特色菇业发展之路,实现食用菌产业强国之梦[J].菌物研究,2018,16(3):125-131.
- [3]Wang X M, Zhang J, Wu L H, et al. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 279-285.
- [4]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.
- [5]杨雅轩,田勇,唐宇,等.食用菌功能活性蛋白通过TLRs信号通路的免疫调节作用研究进展[J].食品科学,2017,38(19):278-284.
- [6]Xu X F, Yan H D, Chen J, et al. Bioactive proteins from mushrooms[J]. Biotechnology Advances, 2011, 29(6): 667-674.
- [7]Ng T B. Peptides and proteins from fungi[J]. Peptides, 2004, 25(6): 1055-1073.
- [8]孙正祥,王瑞霞.食用菌中生物活性蛋白的研究进展[J].食用菌学报,2009,16(2):85-90.
- [9]Erjavec J, Kos J, Ravnikar M, et al. Proteins of higher fungi—from forest to application[J]. Trends in Biotechnology, 2012, 30(5): 259-273.
- [10]Moom B, Lo Y M. Conventional and novel applications of edible mushrooms in today's food industry[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 38(5): 2146-2153.
- [11]Stephan A, Ahlborn J, Zajul M, et al. Edible mushroom mycelia of *Pleurotus sapidus* as novel protein sources in a vegan boiled sausage analog system: Functionality and sensory tests in comparison to commercial proteins and meat sausages[J]. European Food Research and Technology, 2018, 244(5): 913-924.
- [12]Lin P H, Huang S Y, Mau J L, et al. A novel alcoholic beverage developed from shiitake stipe extract and cane sugar with various *Saccharomyces* strains[J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(6): 971-976.
- [13]Yang H L, Zhang L. Changes in some components of soymilk during fermentation with the basidiomycete *Ganoderma lucidum* [J]. Food Chemistry, 2009, 112(1): 1-5.
- [14]Yang H L, Zhang L, Xiao G N, et al. Changes in some nutritional components of soymilk during fermentation by the culinary and medicinal mushroom *Grifola frondosa* [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(1): 468-473.
- [15]Wang Q F, Huang Q H, Liang L, et al. Research on sugarcane juice fermentation by *Ganoderma lucidum* and assay of antioxidant activity of exopolysaccharide[J]. Journal of Food Processing and Presentation, 2018, 42(9): e13761.
- [16]Ghorai S, Banik S P, Verma D, et al. Fungal biotechnology in food and feed processing[J]. Food Research International, 2009, 42(5-6): 577-587.
- [17]Silva R. Bacterial and fungal proteolytic enzymes:

- production, catalysis and potential applications [J] . Applied Biochemistry and Biotechnology, 2017, 183 (1) : 1-19.
- [18] Singh A K, Mukhopadhyay M. Overview of fungal lipase: A review [J] . Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, 166 (2) : 486-520.
- [19] Dufosse L, Fouillaud M, Caro, Y, et al. Filamentous fungi are large-scale producers of pigments and colorants for the food industry [J] . Current Opinion in Biotechnology, 2014, 26 : 56-61.
- [20] Lee Y T, Wu C T, Sun H L, et al. Fungal immunomodulatory protein-fve could modulate airway remodel through by affect IL17 cytokine [J] . Journal of Microbiology Immunology and Infection, 2018, 51 (5) : 598-607.
- [21] Chang Y C, Chow Y H, Sun H L, et al. Alleviation of respiratory syncytial virus replication and inflammation by fungal immunomodulatory protein FIP-fve from *Flammulina velutipes* [J] . Antiviral Research, 2014, 110 : 124-131.
- [22] Chu P Y, Sun H L, Ko J L, et al. Oral fungal immunomodulatory protein-*Flammulina velutipes* has influence on pulmonary inflammatory process and potential treatment for allergic airway disease: A mouse model [J] . Journal of Microbiology Immunology and Infection, 2017, 50 (3) : 297-306.
- [23] Zhang J Y, Sun L L, Zapata P A, et al. M. Anti-inflammatory bone protective effects of nano-protein extracts from mushroom species: *Ganoderma lucidum* and *Pleurotus ostreatus* [J] . Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017, 17 (8) : 5884-5889.
- [24] Chen Y J, Jiang S, Jin Y X, et al. Purification and characterization of an antitumor protein with deoxyribonuclease activity from edible mushroom *Agrocybe aegerita* [J] . Molecular Nutrition & Food Research, 2012, 56 (11) : 1729-1738.
- [25] Yuan B, Zhao L Y, Rakariyatham K, et al. Isolation of a novel bioactive protein from an edible mushroom *Pleurotus eryngii* and its anti-inflammatory potential [J] . Food and Function, 2017, 8 (6) : 2175-2183.
- [26] Zhou R, Han Y J, Zhang M H, et al. Purification and characterization of a novel ubiquitin-like antitumor protein with hemagglutinating and deoxyribonuclease activities from the edible mushroom *Ramaria botrytis* [J] . AMB Express, 2017, 7 (1) : 47.
- [27] Ibadallah B X, Abdullah N, Shuib A S. Identification of angiotensin-converting enzyme inhibitory proteins from mycelium of *Pleurotus pulmonarius* (*Oyster mushroom*) [J] . Planta Medica, 2015, 81 (2) : 123-129.
- [28] Erjavec J, Ravnikar M, Brzin J, et al. Antibacterial activity of wild mushroom extracts on bacterial wilt pathogen *Ralstonia solanacearum* [J] . Plant Disease, 2016, 100 (2) : 453-464.
- [29] Bleuler-Martinez S, Schmieder S, Aebi M, et al. Biotin-binding proteins in the defense of mushrooms against predators and parasites [J] . Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78 (23) : 8485-8487.
- [30] Wang M, Trigueros V, Paquereau L, et al. Proteins as active compounds involved in insecticidal activity of mushroom fruitbodies [J] . Journal of Economic Entomology, 2002, 95 (3) : 603-607.
- [31] Van Kuijk S J A, Sonnenberg A S M, Baars J J P, et al. Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: A review [J] . Biotechnology Advances, 2015, 33 (1) : 191-202.
- [32] Phan C W, Sabaratnam V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes [J] . Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 96 (4) : 863-873.
- [33] Jose L A, Arnold L D. Microbial enzymes: Tools for biotechnological processes [J] . Biomolecules, 2014, 4 (1) : 117-139.
- [34] Yang S, Hai F I, Nghiem L D, et al. Understanding the factors controlling the removal of trace organic contaminants by white-rot fungi and their lignin modifying enzymes: A critical review [J] . Bioresource Technology, 2013, 141 : 97-108.
- [35] Kornilowicz - Kowalska T, Rybczynska K. Screening of microscopic fungi and their enzyme activities for decolorization and biotransformation of some aromatic compounds [J] . International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12 (8) : 2673-2686.
- [36] 吴定, 刘常金, 刘长鹏, 等. 固定化酶制备麦胚蛋白粉操作单元研究 [J] , 食品科学, 2016, 10 : 233-235.
- [37] Couto S R, Herrera J L T. Industrial and biotechnological applications of laccases: A review [J] . Biotechnology Advances, 2016, 24 (5) : 500-513.
- [38] Ribas L C C, De Mendonca M M, Camellini C M, et al. Use of spent mushroom substrates from *Agaricus subrufescens* (syn. *A. blazei*, *A. brasiliensis*) and *Lentinula edodes* productions in the enrichment of a soil-based potting media for lettuce (*Lactuca sativa*) cultivation: Growth promotion and soil bioremediation [J] . Bioresource Technology, 2009, 100 (20) : 4750-4757.
- [39] Bari E, Nazarnzhad N, Kazemi S M, et al. Comparison between degradation capabilities of the white rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor* in beech wood [J] . International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 104 : 231-237.
- [40] Ebrahimi R, Salehi M. Investigation of CO₂ emission reduction and improving energy use efficiency of button mushroom production using data envelopment analysis [J] . Journal of Cleaner Production, 2015, 103 : 112-119.
- [41] Zhu M J, Du F, Zhang G Q, et al. Purification a laccase exhibiting dye decolorizing ability from an edible mushroom *Russula virescens* [J] . International Biodeterioration and Biodegradation, 2013, 82 : 33-39.
- [42] 高恩丽, 仲伟佳, 付小兰, 等. 云芝漆酶对靛蓝废水脱色降解研究 [J] . 安徽农业科学, 2012, 40 (33) : 16321-16324.
- [43] Silva L M C, Salgado A M Coelho M A Z. *Agaricus bisporus* as a source of tyrosinase for phenol detection for future biosensor development [J] . Environmental Technology, 2010, 31 (6) : 611-616.
- [44] Fiorentino D, Gallone A, Fiocco D, et al. Mushroom tyrosinase in polyelectrolyte multilayers as an optical biosensor for o-diphenols [J] . Biosensors & Bioelectronics, 2010, 25 (9) : 2033-2037.
- [45] Chang H H, Chien P J, Tong M H, et al. Mushroom immunomodulatory proteins possess potential thermal/freezing

resistance, acid/alkali tolerance and dehydration stability [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 597-605.

[46] Tong M H, Chien P J, Chang H H, et al. High processing tolerances of immunomodulatory proteins in Enoki and Reishi mushrooms [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(9): 3160-3166.

[47] Zhao R J, Huo C Y, Qian Y, et al. Ultra-high-pressure processing improves proteolysis and release of bioactive peptides with activation activities on alcohol metabolic enzymes *in vitro* from mushroom foot protein [J]. Food Chemistry, 2017, 231: 25-32.

[48] Ismaya W T, Rozeboom H J, Weijne A, et al. Crystal structure of *Agaricus bisporus* mushroom tyrosinase: Identity of the tetramer subunits and interaction with tropolone [J]. Biochemistry, 2011, 50(24): 5477-5486.

[49] Rosano G L, Ceccarelli E A. Recombinant protein expression in *Escherichia coli*: Advances and challenges [J]. Frontiers in

(上接第 313 页)

activities of protein hydrolysates from *Rhopilema esculentum* [J]. Food Chemistry, 2012, 134: 2134-2140.

[24] Mohebbati R, Bavarsad K, Rahimi M, et al. Protective effects of long-term administration of *Ziziphus jujuba* fruit extract on cardiovascular responses in L-NAME hypertensive rats [J]. Avicenna Journal of Phytomedicine, 2018, 8(2): 143-151.

[25] 李鹏飞, 张伟, 马畅, 等. 自发性高血压大鼠心脏中 ACE, AT1R, ACE2 和 MasR 表达变化的研究 [J]. 中国应用生理学杂志, 2011, 27(2): 153-154, 224.

[26] 蔡冬梅, 林书坡, 蒋丽娟, 等. 替米沙坦对自发性高血压大鼠心肌 ACE2 表达的影响 [J]. 山东医药, 2009, 49(20): 43-44.

(上接第 338 页)

[32] 陈天忠, 姚歆和, 文利新. 虾头、虾壳资源综合利用研究进展 [J]. 湖南饲料, 2006, 4: 35-36.

[33] 段杉, 丁惠心, 熊云. 酶法回收虾头和虾壳中的蛋白质 [J]. 农产品加工(学刊), 2008(1): 43-46.

[34] 夏士朋. 克氏原螯虾壳中类脂和蛋白质的提取方法 [J]. 水产科技情报, 2003, 30(6): 270-271.

[35] 陈娜. 虾加工下脚料浓缩蛋白粉制备工艺研究 [J]. 食品研究与开发, 2014, 35(3): 35-38.

[36] 廖晓峰, 于荣. 克氏原螯虾壳中生物蛋白钙提取工艺 [J]. 食品研究与开发, 2010, 31(9): 82-86.

[37] 张文静, 陈舜胜. 虾壳中复合钙粉的制备工艺优化及大鼠对其吸收效果的评价 [J]. 食品科学, 2016, 37(14): 1-5.

[38] 王武刚, 米海峰, 潘化祥, 等. 虾壳粉作为饲料原料的研究进展 [J]. 科学养鱼, 2017(5): 26-27.

[39] 叶玉珍. 虾壳粉代替鱼粉养鲤鱼生产试验 [J]. 饲料研究, 1990(10): 5.

Microbiology, 2014, 5: 172.

[50] Hsu H Y, Hua K F, Wu W C, et al. Reishi immunomodulation protein induces interleukin-2 expression via protein kinase-dependent signaling pathways within human T cells [J]. Journal of Cellular Physiology, 2008, 215(1): 15-26.

[51] Yeh C M, Yeh C K, Peng H J, et al. Extracellular expression of a recombinant *Ganoderma lucidum* immunomodulatory protein by food-grade *Lactococcus lactis* system [J]. Food Biotechnology, 2009, 23(2): 162-178.

[52] Ahmad M, Hirz M, Pichler H, et al. Protein expression in *Pichia pastoris*: Recent achievements and perspectives for heterologous protein production [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(12): 5301-5317.

[53] Tekoah Y, Shulman A, Kizhner T, et al. Large-scale production of pharmaceutical proteins in plant cell culture—the protalix experience [J]. Plant Biotechnology Journal, 2015, 13(8): 1199-1208.

[27] Mugabo P, Raji I A. Effects of aqueous leaf extract of *Asystasia gangetica* on the blood pressure and heart rate in male spontaneously hypertensive Wistar rats [J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2013, 13: 283-289.

[28] Chappel M C, Ferrario C M. ACE and ACE2: Their role to balance the expression of angiotensin II and angiotensin-(1-7) [J]. Kidney International, 2006, 70(1): 8-10.

[29] Tanno T, Tomita H, Narita I, et al. Olmesartan inhibits cardiac hypertrophy in mice overexpressing renin independently of blood pressure: Its beneficial effects on ACE2/Ang(1-7)/Mas axis and NADPH oxidase expression [J]. Journal of Cardiovascular Pharmacology, 2016, 67(6): 503-509.

[40] 石天亮, 江辉, 肖乃虎, 等. 新鲜虾壳粉在中华鳖饲料中的应用 [J]. 当代水产, 2013(10): 74-75.

[41] Fagbenro O, Jauncey K. Growth and protein utilization by juvenile catfish (*Clarias gariepinus*) fed dry diets containing co-dried lactic-acid-fermented fish-silage and protein feedstuffs [J]. Bioresource Technology, 1995, 51(1): 29-35.

[42] Li L, Xue Y w, Zeng Y F, et al. Synthesis, characterization and mechanism analysis of modified crayfish shell biochar possessed ZnO nanoparticles to remove trichloroacetic acid [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 1244-1252.

[43] Cai Y, Xia C, Wang B, et al. Bioderived calcite as electrolyte for solid oxide fuel cells: A strategy toward utilization of waste shells [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(11): 10387-10395.

[44] 宋庆洋, 米武娟, 王斌梁, 等. 克氏原螯虾壳虾青素提取条件的优化 [J]. 环境科学与技术, 2018(6): 115-119.

《食品工业科技》愿为企业铺路、搭桥!