

陈建胜, 杨正友, 王延圣, 等. 食用菌营养成分、功能活性及加工现状研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 358–366. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050298

CHEN Jiansheng, YANG Zhengyou, WANG Yansheng, et al. Research Progress in Nutrient Composition, Functional Activity and Processing Status of Edible Fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 358–366. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050298

· 专题综述 ·

食用菌营养成分、功能活性及加工现状研究进展

陈建胜^{1,2}, 杨正友², 王延圣^{1,3}, 弓志青¹, 王文亮¹, 贾凤娟¹, 崔文甲¹, 张 剑¹, 侯福荣¹, 李永生¹, 宋莎莎^{1,*}

(1. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 农业农村部新食品资源加工重点实验室,

山东省农产品精深加工技术重点实验室, 山东济南 250100;

2. 山东农业大学生命科学学院, 山东泰安 271000;

3. 新飞达(山东)食品有限公司, 山东德州 251100)

摘要: 食用菌是一类具有药食两用功能的大型真菌, 自古以来就被用作民间药物和健康食品。食用菌富含蛋白质、多糖、萜烯和脂质等营养活性物质, 具有抗癌、免疫调节、抗高胆固醇血症、抗病毒、抗糖尿病和抗炎等作用, 随着全球经济的快速发展以及绿色健康饮食观念的日益深入, 食用菌受到众多消费者的欢迎, 对其加工产品提出了更高的要求。本文综述了近年来关于食用菌营养、活性物质及加工产品的研究进展, 以期对食用菌产业的高质量可持续发展提供思路。

关键词: 食用菌, 功能活性, 食用菌产品, 营养成分, 食用菌多糖

中图分类号: TS255

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)12-0358-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050298



本文网刊:

Research Progress in Nutrient Composition, Functional Activity and Processing Status of Edible Fungi

CHEN Jiansheng^{1,2}, YANG Zhengyou², WANG Yansheng^{1,3}, GONG Zhiqing¹, WANG Wenliang¹,
JIA Fengjuan¹, CUI Wenjia¹, ZHANG Jian¹, HOU Furong¹, LI Yongsheng¹, SONG Shasha^{1,*}

(1. Key Laboratory of Deep Processing Technology for Agricultural Products, Key Laboratory of Advanced Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;

2. College of Life Science, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China;

3. New Feida (Shandong) Food Co., Ltd., Dezhou 251100, China)

Abstract: Edible fungi is a group of large fungi for culinary purpose and medicinal use, which used as folk medicine and healthy food from ancient times. Multiple bioactive components such as proteins, polysaccharides, terpenes, and lipids exist in them and therefore recently sparked much attention due to their therapeutic properties such as anti-cancer, immunomodulatory, anti-hypercholesterolemia, antiviral, antidiabetic, and anti-inflammatory effects. With the rapid development of global economy and growing concept of green and healthy diet, they are gaining popularity among consumers, putting forward higher requirements for the processed products. This article reviews the research progress on the nutrition, active substances, and processed products of edible fungi in recent years, in order to provide ideas for the high-quality and sustainable development of the edible fungi industry.

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 山东省重点研发计划(2022TZX00024); 山东省重点研发计划(2022TZX00025); 2024年度山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目“酶解耦合美拉德反应制备复合调味料关键技术研究及产业化”; 山东省食用菌创新团队产后加工岗位专家项目(SDAIT-07-09)。

作者简介: 陈建胜(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: 1813552667@qq.com。

*** 通信作者:** 宋莎莎(1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬精深加工技术研究, E-mail: songshasha125@163.com。

Key words: edible fungi; functional activity; edible mushroom products; nutrient composition; edible mushroom polysaccharide

食用菌, 含有丰富且优质的蛋白质, 通常具有满足膳食要求的必需氨基酸谱, 可作为肉类的替代蛋白^[1]。食用菌不仅高蛋白低脂肪, 而且含有丰富的维生素以及人体所需的多种矿物质, 营养价值较高, 是一种低热量的健康食品^[2]。在中国, 食用菌资源丰富, 食用历史悠久, 世界食用菌约四分之一的种类都可以在中国大地上找到它们的足迹。“药食同源”理论认为, 食用菌可作为药食兼用的食物, 通过长期的服用来达到调节人体某种不平衡的效果^[3]。食用菌中含有多种氨基酸和矿物质、粗多糖、粗脂肪以及粗蛋白等几种主要营养物质^[4], 由于食用菌丰富的营养价值和人们日益增长的生活水平, 人们对食用菌的需求量也增长迅速。据第一届菌物科学与工程国际大会报道, 食用菌年产量 40 余年间增长了 700 倍, 已达 4000 余万吨, 年产值 3000 多亿元^[5]。目前, 食用菌主要还是以蔬菜的形式来进行处理和烹饪。除了炒菜、煲汤、火锅之外, 冷冻速食食品、保健药品、食用菌饮料、发酵粮食制品、休闲食品和调味品等食用菌的加工产品也逐渐出现。

本文从食用菌的营养组成, 活性物质功效, 以及加工现状展开综述, 旨在为食用菌产品开发提供营养价值和保健价值的依据。同时也为我国食用菌产业的绿色可持续发展提供新思路。

1 食用菌的营养组成成分

食用菌含有丰富的蛋白质、必需氨基酸、维生素、矿物质和膳食纤维等营养物质, 而且含有较低的热量和脂肪^[6-8]。以羊肚菌为例, 除水分外, 羊肚菌蛋白质、粗多糖和维生素 D 的干基含量分别为 45.8%、5.06%、181.53 μg/100 g, 羊肚菌含有 16 种氨基酸, 总氨基酸 (total amino acids, TAA)、必需氨基酸 (essential amino acids, EAA)、非必需氨基酸 (nonessential amino acids, NEAA) 及鲜味氨基酸含量分别为 34.5%、13.5%、21.0%、9.38%, 具有较高的营养价值^[9]。研究发现, 不同种类的食用菌营养成分略有不同, 组成成分的含量占比也有较大差异。例如, 李娜等^[10]对常见的 18 种食用菌进行了营养组分分析, 结果发现香菇中富含麦角硫因, 含量高达 336 mg/kg, 且灰树花、羊肚菌、双孢菇和鸡腿菇的麦角硫因含量也高于 100 mg/kg。与其他 17 种食用菌相比, 富含己醛、甲基壬基甲酮、反-2-辛烯醛、2-正戊基呋喃、2,4-壬二烯醛等成分。张慢等^[11]对 7 种常见食用菌进行成分分析发现, 海鲜菇和平菇水分含量最高, 杏鲍菇多糖含量显著高于其他食用菌, 海鲜菇多酚含量显著低于其他食用菌, 秀珍菇和双孢菇的粗蛋白含量显著高于其他 5 种食用菌, 且双孢菇灰分和多酚含量最高。

此外, 食用菌中的矿物质和微量元素例如钙、

铁、锌、钾、镁、硒、铜等含量丰富, 但不同食用菌中矿物质的含量也不一样。刘仙金^[12]对闽东古田地区 14 种食用菌做了矿物质检测发现, 矿物质元素含量大致顺序为镁、钙>铁、锌>铜、锰>锶>硒、钼、钴。颜戊利等^[13]发现被测的 20 种食用菌中, 猴头菇等含钾较高而钠较低, 是治疗缺钾性疾病的良药, 也是高血压患者的食疗佳品。钙含量最高的黑木耳可视为人体补钙的重要来源之一。大部分食用菌富含铁, 长裙竹荪和姬松茸富含锌且两者的矿物质元素含量比较丰富。由于食用菌含有丰富且不同含量的矿物质元素, 所以可以根据自身需求来选择不同的食用菌进行食疗。

2 食用菌活性物质及其功效

食用菌不仅具有营养价值, 而且富含活性物质, 具有极高的保健价值。其中有多糖类、多酚类、萜类、甾醇类、核苷类物质等^[14], 具有免疫抗癌, 保肝健胃, 调节血糖, 调节肠道菌群, 抗击溃疡, 抗氧化抗衰老等保健功能, 具体参考表 1。

表 1 食用菌功能
Table 1 Function of edible fungi

食用菌功能	相关食用菌	相关参考文献
抗癌抗肿瘤	灵芝、猴头菇等	[15-18]
免疫调节	白芝、灵芝等	[16,18-19]
抗菌抗病毒	香菇、蛹虫草、滑子菇等	[16-17,20-21]
抗氧化、抗衰老	羊肚菌、灵芝等	[15-16,22-23]
降血糖血脂	灵芝、羊肚菌、平菇等	[17,24-25]
抗糖尿病	灵芝、冬虫夏草等	[24,26]
保护心血管	羊肚菌等	[18,25]
保肝健胃调节肠道	猴头菇、灵芝、双孢菇等	[16-18,27]

食用菌中的活性成分种类丰富, 其中就有抗癌抗肿瘤的成分。比如 Li 等^[15]通过生物活性引导纯化和色谱分离技术对灵芝提取物中的生物活性物质进行富集和单个化合物的分离, 其中活性物质 Ganoderiol F 可以通过抑制 CDK4/CDK6 来延缓细胞周期进程从而达到抗癌细胞活性的作用。程孟雅等^[16]也整理出很多肿瘤患者和肿瘤动物的模型, 其肠道中的某些细菌种群往往会发生较大变化, 这种变化可能是由肿瘤引起的, 也可能正是因为产生这种变化而使宿主易受致癌性病原体的影响, 而某些食用菌多糖可以通过作用于肠道菌群来抵抗肿瘤。谭一罗等^[18]也列举出羊肚菌具有抗氧化、抗衰老、抗病毒、抗癌等效果。Gao 等^[19]通过超滤和柱色谱法从白带菌中纯化了一种为 GLP-3 的水溶性多糖, 具有免疫调节效果。刘莹^[20]采用 K-B 法对褐蘑菇、香菇和滑子菇粗多糖进行体外抑菌试验, 发现 3 种食用菌粗多糖对革兰氏阴性菌的大肠杆菌、沙门氏菌及革兰

氏阳性菌的金黄色葡萄球菌都有抑制性效果。李丹等^[21]通过将香菇多糖与不同浓度的感染未感染 HIV 的人 PBMC 进行体外培养后,采用 ELISA 法分别检测 PBMC 分泌 IL2、IL12、IFN γ 、IL4、IL10、TNF α 的情况。菇多糖促进感染未感染 HIV 的 PBMC 分泌 I 类细胞因子,抑制分泌 II 类细胞因子。Zhang 等^[22]发现羊肚菌蛋白水解产物及其衍生物对 H₂O₂ 诱导的氧化应激的细胞保护作用。Liuzzi 等^[23]总结了氧化应激在与年龄相关的 ND 中的作用,重点关注食用菌中存在的抗氧化化合物的当前知识,并强调它们通过抵消与年龄相关的 ND 来保持健康衰老的潜力。Gonzalezibanez 等^[25]发现食用和药用蘑菇(平菇、玉米黑粉菌、灵芝)可降低高脂肪加蔗糖饮食喂养的肥胖 Wistar 大鼠脂肪组织的内质网应激和炎症,达到消炎降血脂的作用。Shang 等^[26]研究发现冬虫夏草提取的一定剂量的多糖可以缓解糖尿病的代谢紊乱症状,有助于机体恢复正常水平。Duan 等^[27]发现双孢菇多糖具有调节肠道菌群的作用。食用菌具有多种生物活性成分和生理功能,尤其是抗肿瘤、降血糖、免疫调节、消炎等作用极具药物开发潜力。

3 食用菌加工现状

食用菌因富含蛋白质和独特的风味物质而散发鲜香,使其具有“素中之荤”的称号。食用菌产品通常所用的原料分为食用菌菌丝体和子实体,两者实为同源,只是食用菌不同的生长阶段^[28]。两者各有所长,菌丝体是食用菌生长的初级阶段,生长周期短,由于发酵工艺简单,不受气候和地域限制,比较容易实

现现代工业化生产。市面上见到的各种蘑菇,都是食用菌子实体,可被用来炒菜、煲汤,这是菌丝体所不能比的。两者虽然形态不一样,但是营养物质和活性成分大致相同,都可以用于产品加工。近年来,随着人们生活质量的提高,大众对绿色食品的关注度越来越高,对食用菌营养和功能价值的认可度也逐渐提升,市面上食用菌加工产品的种类也越来越多,包括食用菌预制菜、食用菌饮料制品、食用菌发酵粮食制品、食用菌休闲食品、调味品和药品保健品等,详见表 2。

3.1 食用菌预制菜

随着人们生活节奏的加快,市面上涌现出越来越多的即食、速食类产品,如开袋即食类、开水冲泡类以及自热类预制菜类制品。预制菜是科技时代下的产物,根据现代化流水线标准,对菜品原料进行简单的制作加工,经过科学卫生的包装,通过简单地加热就可以直接食用的便携菜品。由于符合市场、降低成本、增加效益并且便携快捷,越来越受到广大年轻消费者的青睐,市场前景广阔^[29]。食用菌营养价值高,风味独特鲜香,含有多种功能活性物质,符合当代绿色健康的饮食标准,是预制菜的优选原材料之一^[30]。

3.1.1 冻干预制菜 冷冻干燥技术是利用原料中水分升华原理,通过真空处理将物料冷冻至共晶点温度以下,并最终升华以除去物料中水分的干燥方法^[31]。由于水分以固体状态直接升华,因此产品的色泽、质构和形状基本不变,同时可最大程度地保留食品原料中维生素、矿物质、蛋白质和酚类等营养成分^[32]。由于食用方便,便于携带,营养丰富等原因受到年轻消费者青睐。比如目前市面上的冻干食用菌麦片,冻干食用菌速食面,冻干食用菌养生粥,冻干菌菇汤类^[33]。对于蔬菜类预制菜,经过加工后其口感与味道会有一定的下降,而陈晨等^[33]发现冻干之后的食用菌与汤汁分离,不会在保存运输的过程中与汤汁混合而丧失了原本的鲜香与口感,进而延长了产品的保质期。殷玲等^[34]发现与低温油炸相较,真空冷冻干燥草菇脆片中主要挥发性化合物为烷烃类(81.07%)、酯类(8.54%)和含氮、硫化化合物类(7.9%),果香味和烤香风味明显。食用菌的加入,填补了预制菜蔬菜种类过少的缺口,也满足新兴“轻烹饪”“快节奏”的餐饮市场需求^[35]。

3.1.2 航天食品 航天食品指的是宇航员在太空中吃的食品,结合宇航员的口味和进食方式研发的一种超级便携并且营养丰富的食品。为了方便进食一般加工成一口大小,所以航天食品又称为“一口吃”食品。食用菌营养多元化,蛋白含量高,符合航天食品的要求。将冻干的食用菌混合其他果蔬研磨成粉做成的复水食品,体积小重量轻,方便进食,在 26 ℃ 下,10 min 左右即可复水使用^[36]。

3.1.3 食用菌方便食品 随着人们生活节奏的加快,

表 2 食用菌产品类型

Table 2 Classification of edible fungi fermented foods

产品大类	产品小类	相关食用菌	参考文献
食用菌预制菜	冻干预制菜	香菇、草菇、茶树菇、蟹味菇等	[31-35]
	航天食品	香菇、灵芝等	[36]
	食用菌方便食品	香菇、草菇、杏鲍菇等	[33]
食用菌饮料	食用菌酒	灵芝、猴头菇、羊肚菌等	[39-40]
	果肉饮料	木耳、银耳、猴头菇等	[41-43]
	发酵饮料	蛹虫草、猴菇等	[44-49]
	茶	蛹虫草、猴头菇等	[47]
	乳饮料	银耳、木耳等	[46,48]
	咖啡	草菇等	[53]
	复合功能饮料	人参、灵芝等	[50-52]
发酵粮食制品	米制品	灵芝、虫草、白芝等	[57-62]
	面制品	金针菇、香菇、灵芝等	[63-66]
休闲食品	功能性饼干,点心	猴头菇、杏鲍菇等	[67]
	多糖软糖	银耳、杏鲍菇等	[68-69]
	果脯脆片类	香菇、滑子菇、杏鲍菇等	[70-72]
调味品	发酵酱油	香菇等	[76]
	发酵食醋	羊肚菌、香菇、猴头菇等	[77]
	酱料	香菇、杏鲍菇等草菇	[78-79]
	菌汤料包	牛肝菌、鸡枞菌等	[80]
药品保健品	药品和保健品	白芦菇、木耳、银耳、灵芝等	[81-84]

市场上涌现出越来越多的速食产品,如开袋即食类、开水冲泡类以及自热类食品。由于食用方便,便于携带,营养丰富等原因受到年轻消费者青睐。比如目前市面上的冻干食用菌麦片,周宇等^[37]以口蘑冻干粉、小米粉、奶粉为原料制备的即食冲调米稀,具有易消化,营养成分保存度高等特点。孙艺飞^[38]将松蘑鸡脂汤料进行冻干,得到的产品速溶性良好香气浓郁。总而言之,由于食用菌的稳定性较差,真空冷冻干燥相比其他干燥方法更具优势。

3.2 食用菌饮料

食用菌饮料大致分为两大类,一类是以发酵为主的食用菌饮料,另一类是以子实体浸泡,切片打碎添加的饮料。

3.2.1 食用菌酒 继灵芝、虫草等药用价值的食用菌可以制作成养生药酒之后,近年来随着科技的发展,人们逐渐发明出另一种食用菌与酒的结合方式,即食用菌发酵酒,使得食用菌菌丝体发酵过程中的活性成分充分释放并与酒融为一体。左蕾蕾等^[39]利用猴头菇、香菇和金针菇,通过食用菌多糖浸泡三周浸提,白酒降度,每升 36vol% 白酒添加 50 g 蜂蜜,10% 明胶溶液的加入量为 1 mL/L,200 目椰壳活性炭的加入量为 0.08 mg/L 调配澄清制得的三菇保健酒具有特殊风味。石思文等^[40]将羊肚菌菌丝加入到糯米酒的固态发酵中,加曲量 2.0%,糖化温度 28 ℃,酵母加量 2.5%,发酵时间为 4 d 制成的新型羊肚菌营养强化米酒,包含了食用菌多糖等活性成分,具有醇厚的发酵酒香。

3.2.2 食用菌果肉饮料 食用菌果肉饮料就是食用菌经过打碎或者研磨成粉,然后通过浸提配制成的饮料。原材料经过清洗、浸泡、打浆、调配、均质、灌装、杀菌等生产工艺,最后冷却为成品。田一涵等^[41]以大枣、黑木耳为原料,山楂、枸杞为辅料,再加入白砂糖与羧甲基纤维素钠配制而成的菌类复合型饮料酸甜可口且具有较好的风味。林梦涵等^[42]利用 20% 的黑木耳浆和 25% 的红枣浆,加入 6% 的蜂蜜与 0.10% 的柠檬酸调配的复合饮料,状态均匀口感适中,且对羟自由基清除率为 67.17%,具有一定抗氧化能力。此外,孔祥辉等^[43]以猴头菇和山楂为主要原料,利用 1.2% 含量的纤维素酶,控制底物浓度在 5%、pH5.0、温度在 40 ℃ 左右,酶解时间 2.5 h,随后再将 15% 的猴头菇酶解汁与 25% 的山楂汁、8% 的蔗糖配制出酸甜可口的具有猴菇风味和山楂口味的复合型饮料。

3.2.3 食用菌发酵饮料 有研究表明,食用菌菌丝体的营养价值并不低于子实体^[44],并且液态发酵得到的菌丝体更利于规模化生产,所以食用菌饮料的发展逐渐倾向于发酵型饮料。发酵型饮料又分为一次发酵和二次发酵,张越等^[45]利用次生代谢产物诱导营养培养基发酵蛹虫草菌丝,并将发酵后的培养液按照葡萄糖添加量 25 g/L、精氨酸添加量 0.4 g/L、复合

B 族维生素 20 mg/L、蒸馏水 1000 mL、pH6.4 制成一种新型保健饮料,口味清淡酸甜适中,虫草素含量达到 40.012~41.364 mg/L。Sun 等^[46]将猴头菇和银耳添加到益生菌发酵中,发酵过程减少了不愉快的风味,如壬醛和 1-辛烯-3-醇,电子舌结果表明,发酵过程增加了饮料的酸味,降低了苦味和涩味,从而改善了口感。金星^[47]把蛹虫草和茶叶发酵相结合,并使茶多酚和咖啡碱含量有所减少,其中茶的酚氨比降低 54.38%,鲜度提高 36.17%,醇度增加 117.39%,澄清度提高 72.51%;表明茶的品质有所提高,蛹虫草和茶叶发酵之间有相互促进的功效。Qiu 等^[48]将玫瑰香菇和乳酸菌混合发酵,发酵样品中总酚、总黄酮、游离氨基酸和呈味核苷酸的含量均高于对照组,且具有较强的抗氧化能力。Zang 等^[49]将灵芝多糖在大豆粕培养基固态发酵,浸提液结合红枣提取汁调配,按照培养基干粉经过浸提、粗滤、澄清、稀释、调配、灌装、密封等工序,最后杀菌为成品,得到灵芝多糖保健口服液。

3.2.4 食用菌发酵咖啡等复合功能饮料 功能饮料指的是适合特定人群,并且能够调节机体功能,兼具补充能量和抗疲劳作用的饮料。利用食用菌所制成的功能饮料,具有补充人体能量,糖分,维生素等微量元素的保健功能。王天威等^[50]利用小鼠为对照组、糖对照组、人参复方 10 倍浓缩液的 4.16、8.33、16.66 mL/kg·BW 剂量组,分别进行负重游泳试验、血乳酸、肝糖原和力竭游泳。与对照组相比,人参复方组小鼠更活跃,验证了一款人参复方功能饮料确实具有抗疲劳的效果。杨茜茜^[51]在灵芝发酵雪梨汁中添加白砂糖 4%、蜂蜜 3.2%、维生素 C 0.09%,黄原胶 0.7% 状态稳定,利咽化痰,具有增强免疫力的功效。周春晖等^[52]利用灵芝多糖制成的功能饮料,在体外抗氧化活性试验中得出最佳配方:白砂糖 10%、芒果浓缩汁 4%、柠檬酸 0.2%,体外清除自由基试验结果表明,灵芝多糖功能饮料对 DPPH·和 OH·均具有良好的清除作用。这也证实了该产品具有一定的抗氧化能力。此外,随着工作强度和压力的增大,熬夜加班已经越来越常见,咖啡也受到消费者的喜爱。部分食用菌咖啡在提神减压的同时还能补充矿物质和营养元素,这种类似于蘑菇咖的产品已在流行^[53]。这些产品绿色健康,能够减少食品安全问题的出现。

3.3 食用菌发酵粮食制品

谷物作为日常生活中不可或缺的基本元素,为人们带来了丰富的能量、蛋白质和矿物质等。由于谷物皮质中含有较高的粗纤维,所以带皮的粗粮口感较为粗糙^[54]。随着谷物的加工越来越精细,其中富含的膳食纤维和必需氨基酸的皮质渐渐流失^[55]。因此,谷物复合强化营养也成为粮食发展中不可忽略的问题。如大米、小麦、玉米、花生等主要粮食作物,都可以作为谷物复合发酵的优质基质。

3.3.1 食用菌发酵米制品 复合米是一种营养含量

丰富的强化米,通过添加一种或几种特殊的营养强化物质来满足人们健康饮食的需求,并且经过食用菌菌丝体发酵后,米质的营养活性成分有明显的增强,这说明米制品经过食用菌发酵后能达到营养强化的目的^[56]。如付铭等^[57]以大米为基质,固态发酵灵芝菌丝体,所得产物制作成米粉,赖氨酸提高 4.78 倍、多糖含量提高 4.48 倍,从而达到强化营养的作用。韩建荣等^[58]利用灵芝发酵玉米粉产生的淀粉酶来降解玉米淀粉,使得还原糖和蛋白质的含量都有很大提升,所以玉米粉的消化吸收率和营养价值都有所提高。刘方^[59]分别以籼米、粳米、糙米为原料,虫草培养基发酵,利用双螺杆挤压技术制作了三种复合米,均具有良好的热糊稳定性和冷糊稳定性,并且蛋白质、脂肪以及虫草素含量均优于原品种大米。李艳芳等^[60]以玉米糝为培养基,灵芝发酵产物干燥处理制成的灵芝米,玉米淀粉有效降解,氨基酸和多糖含量增加,兼顾了谷物的营养价值和食用菌的保健功能。食用菌发酵不仅能为米制品提高蛋白质和还原糖的含量,还能缓解淀粉老化,甚至去除一些有害物质。马誉畅^[61]以液体发酵灵芝菌粗酶液研究缓解糙米淀粉老化的问题,其中的 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶和木聚糖酶都对淀粉老化具有缓解作用。灵芝菌中的酶提升了糙米的品质,使糙米硬度降低,口感得到改善。Banjoko 等^[62]通过固体发酵法,发现白芝能够有效降解花生粕中黄曲霉毒素 B1。

3.3.2 食用菌发酵面制品 面制品由小麦磨成的面粉制作而成,按照面粉中蛋白质的含量可以将面粉分为高筋粉、中筋粉、低筋粉。由于面粉越碾越细,越碾越精,小麦中的营养元素损耗严重,所以营养强化面粉应运而生。其中食用菌发酵面制品发展前景广阔,不仅营养价值高,还具有食用菌的保健效果。黑龙江省北大荒麦业有限责任公司^[63]利用小麦玉米作为发酵培养基,将金针菇、香菇、灵芝等食用菌接种并进行固态发酵,得到的食用菌面粉富含 18 种氨基酸,5 种以上矿物质,多种维生素及多糖。经过食用菌菌丝发酵和面粉制成的面制品,如面包、馒头、面条等,在具有营养价值的同时也具备了食用菌的部分

功能性。如 Biao 等^[64]研究发现,增加面团中蘑菇粉与小麦粉的比例会增加峰值粘度和最终粘度,15% 蘑菇粉、10% 麦芽糊精和 1.5% 碳酸氢钠制作出的饼干可以得到最佳的感官评测。胡龙^[65]利用蛹虫草固体发酵制成的食用菌挂面,在富含虫草素的同时降低了 eGI(估计血糖生成指数)值,在调节饮食控制血糖方面提供了新的思路。刘宇锋^[66]利用灵芝漆酶发酵面粉制作馒头时发现,漆酶可以对小麦蛋白的交联、面筋网络结构、淀粉颗粒的膨大和聚集产生影响,从而改善馒头的品质。食用菌与面粉的结合,在强化面粉营养的同时,又增加了食用菌的应用前景。

3.4 食用菌休闲食品

伴随经济发展,休闲食品俨然已经成为人们日常食品消费中的新宠。随着人们生活水平的提高、消费升级步伐的加快和新兴零售的快速发展,休闲食品消费格局逐步转换到风味型、营养型、享受型和功能型。近年来由于人们饮食结构变化,心血管、高血压、糖尿病等慢性疾病的患病率大大增加,对人体有着独特保健功能、被西方国家称为“植物性食品的顶峰”的菌类食品越来越受到人们的追捧。近年来市场上出现的猴菇饼干、木耳软糖、香菇果脯、香菇豆干等等。李云波等^[67]将杏鲍菇干燥制粉后添加到韧性饼干中发现,100 g 低筋面粉中添加 6 g 杏鲍菇粉和其他材料制作出的饼干,脆性和硬度有一定程度下降,咀嚼性和回复性增加,并且具有蘑菇的鲜香,改善了饼干原有的口感和品质。杨熹珠等^[68]以银耳多糖、百合、橘皮为原料制成的软糖表面光滑,色泽诱人,有弹性但不粘牙。王甜等^[69]发现最佳的软糖条件为琼脂 1%、明胶 1%、杏鲍菇 12 g、白砂糖 40 g、柠檬酸 3 g,干燥条件为 50~55 ℃ 干燥 7~8 h。香菇、滑子菇等都可以制作脆片,但由于香菇脆片浓郁的香气以及低油脂含量,所以是被用来制作脆片的优良选择^[70]。Ren 等^[71]优化了油炸杏鲍菇脆片的预处理工艺,将杏鲍菇脆片进行漂烫+超声波辅助渗透预处理,可以减少产品含油率、提高真空油炸杏鲍菇的品质。马征祥等^[72]在真空油炸制作杏鲍菇脆片时,杏鲍菇切片厚度为 2 mm,漂烫温度 90 ℃ 处理 90 s,

表 3 食用菌主要呈味物质种类^[73-74]

Table 3 Main flavor substances of edible fungi^[73-74]

种类	主要物质	主要作用
可溶性糖醇	海藻糖、甘露糖、果糖、肌糖、树胶醛糖、核糖等	呈甜
	甘露醇等	呈甜
氨基酸	天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸等	呈鲜
	丙氨酸、甘氨酸、苏氨酸、丝氨酸等	呈甜
	异亮氨酸、甲硫氨酸、亮氨酸、精氨酸等	呈苦
	谷氨酰胺、组氨酸等	无味
核苷酸	肌苷酸、鸟苷酸、黄苷酸、尿苷酸、腺苷酸等	助鲜,去除苦涩等异味
有机酸	乙酸、琥珀酸、草酸、苹果酸、焦谷氨酸、 α -酮戊二酸、延胡索酸、甲酸、柠檬酸、乳酸等	相互作用,提味增鲜
其他呈味物质	无机离子、纤维素、粗纤维、粗脂肪、碳水化合物、酯类等	间接或直接影响风味

此时得到的杏鲍菇脆片含油量较低,口感酥脆。

3.5 食用菌调味品

调味品是增加菜肴色香味的同时又能保证人体健康的辅助食品,食用菌中呈味物质丰富,含有多种可溶性糖醇、呈味氨基酸、呈味核苷酸、有机酸和其他呈味物质见表 3。

其中 Yang 等^[75]将氨基酸分为四类,鲜味、甜味、苦味与无味。食用菌富含鲜香的呈味物质,已成为调味品热点原料。萧晋川等^[76]利用香菇、羊肚菌、猴头菇的液态发酵液与制醋工艺相结合制成的复合醋,澄清透明,入口酸香。赵杨杨等^[77]发现香菇酱油中米曲霉接种量 0.8×10^6 个/g、香菇添加量 3%(质量比)、制曲时间 54 h、成曲润水量 54%(质量比)时,中性蛋白酶活性可达 4414.31 U/g 干曲。梁国栋等^[78]研制出一种新型杏鲍菇调味酱,复合酶解后,氨基酸的种类和含量增多。宋莎莎等^[79]利用香菇和草菇为主要原料,研发出一款新型的、色泽鲜丽、口感极佳、香辣适中的复合食用菌酱。赵丹等^[80]以野生白牛肝菌和鸡枞菌为原材料,通过初步加工制成的菌菇汤冻调味料,食用菌多糖和蛋白的保有量较高,不仅营养丰富,而且口味鲜香。

3.6 食用菌药品和保健品

食用菌不仅蛋白质、纤维素、维生素等含量高,且富含多种食用菌多糖、三萜、黄酮等活性成分,具有较高的药用保健价值^[81],因此可用于制备多种保健品,灵芝孢子粉、灵芝孢子油等产品已经获得保健批号并在市场取得了良好的经济效益^[82]。目前,共有灵芝、木耳、银耳、香菇等 20 多种食用菌进行了药品开发,总计开发出一百多种药物,其中口服药物占据九成以上,注射和外用的药物仅占一小部分^[83]。对食用菌功能活性的研究还有待加强,高精的药物研发处于较低水平。自然界存在的菌物大约 40 万种,但是发掘利用的菌物还不到十分之一^[84]。应当注重中药的开发和现代制药技术相结合,增加对食用菌药品的开发与利用。注重某种食用菌的特色药理价值的研究,深入了解免疫调节以及抗肿瘤等活性成分的代谢调控机制,做到人工可定向合成某种单一的有效成分。

4 结论与展望

食用菌产品深加工是未来食用菌发展的一个重要趋势。随着科技的发展,食用菌产品的种类和加工方法也会越来越多,需要充分利用现有的技术,加强与食用菌的结合。在食品方面,侧重食用菌产品的口感、色泽、香气、保存运输等方面的发展;药用方面,侧重有效成分的最大吸收利用,比如了解食用菌活性成分的代谢机制,实现人工可控的定向培养,获得最大含量的活性成分。利用食用菌的功能性成分,有针对性地开发新产品来面向不同的消费群体。产品做到成本低廉、工艺完善、产业化自动化、生产周期缩短、更加高效地制备食用菌产品。充分发挥食用菌

特殊风味、活性成分以及营养特性,食用菌深加工必须结合实际情况和自身特点,提高我国食用菌的产业价值。对食用菌采用区域化种植,发展当地特色优势食用菌发展,加强对食用菌废弃物的利用程度,实现食用菌产业的绿色可持续发展。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] AYIMBILA F, KEAWSOMPONG S. Nutritional quality and biological application of mushroom protein as a novel protein alternative[J]. *Current Nutrition Reports*, 2023, 12(2): 290–307.
- [2] 张金霞, 陈强. 食用菌质量安全浅谈[J]. *中国农业信息*, 2012, 8(16): 16–18. [ZHANG J X, CHEN Q. Discussion on quality and safety of edible fungi[J]. *Agricultural Information of China*, 2012, 8(16): 16–18.]
- [3] 王保平, 赵斌. 基于“药食同源”理论下的食用菌保健功能探析[J]. *中国食用菌*, 2019, 38(10): 121–123. [WANG B P, ZHAO B. Study on the health function of edible fungi based on the theory of "Homology of medicine and food"[J]. *Chinese Journal of Edible Fungi*, 2019, 38(10): 121–123.]
- [4] 杨琴, 张桂香, 王晓巍, 等. 环纹蘑菇营养成分分析及蛋白质营养价值评价[J]. *华中农业大学学报*, 2018, 37(6): 113–118. [YANG Q, ZHANG G X, WANG X W, et al. Analysis of nutrient compositions and evaluation of protein nutritional value of *Ajaricus taeniatus* [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018, 37(6): 113–118.]
- [5] 付晓. 第一届菌物科学与工程国际大会在长春举行[J]. *中国会展(中国会议)*, 2023(4): 16. [FU X. The First International Conference on Bacterial Science and Engineering is held in Changchun[J]. *China Convention and Exhibition (China Conference)*, 2023(4): 16.]
- [6] LAKHANPAL T N, RANA M. Medicinal and nutraceutical genetic resources of mushrooms[J]. *Plant Genetic Resources*, 2005, 3(2): 288–303.
- [7] YU Q N, GUO M J, ZHANG B, et al. Analysis of nutritional composition in 23 kinds of edible fungi[J]. *Journal of Food Quality*, 2020, 2020: 1–9.
- [8] CARDWELL G, BORNMAN J F, JAMES A P, et al. A review of mushrooms as a potential source of dietary vitamin D[J]. *Nutrients*, 2018, 10(10): 1498–1509.
- [9] 黄世群, 秦琳, 仲伶俐, 等. 羊肚菌与香菇主要营养成分分析及氨基酸评价[J]. *四川农业科技*, 2022, 417(6): 58–60. [HUANG S Q, QIN L, ZHONG L L, et al. Analysis of main nutrients and amino acid evaluation of Morel mushroom and mushroom[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2022, 417(6): 58–60.]
- [10] 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* *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 volatile flavor compounds in common edible fungi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(18): 441–448.]
- [11] 张慢, 邢苏徽, 千春录, 等. 7 种食用菌的营养成分及抗氧化性分析[J]. *食品科技*, 2022, 47(6): 120–126. [ZHANG M, XING S H, QIAN C L, et al. Analysis of nutritional constituents and an-

- tioxidant properties of seven species of edible mushrooms[J]. Food Science and Technology, 2002, 47(6): 120–126.]
- [12] 刘仙金. 食用菌中矿物质元素含量的测定[J]. 食药菌, 2018, 26(5): 306–309. [LIU X J. Detection of mineral elements in mushroom[J]. Journal of Edible and Medicinal Fungi, 2018, 26(5): 306–309.]
- [13] 颜戊利, 王林静. 食用菌矿物质含量测定和营养评价[J]. 食品科技, 2010, 35(7): 81–84. [YAN W L, WANG L J. Measurement of mineral elements and nutritional evaluation of edible mushrooms[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(7): 81–84.]
- [14] ASSEMIE A, ABAYA G. The effect of edible mushroom on health and their biochemistry[J]. International Journal of Microbiology, 2022, 2022: 8744788.
- [15] LI X M, XIE Y Z, PENG J J, et al. Ganoderiol F purified from *Ganoderma leucocontextum* retards cell cycle progression by inhibiting CDK4/CDK6[J]. Cell Cycle, 2019, 18(21): 3030–3043.
- [16] 程孟雅, 杨亚兰, 杨桥, 等. 食用菌多糖调控肠道菌群研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 145–149. [CHENG M Y, YANG Y L, YANG Q, et al. Effect of edible mushroom polysaccharide on human gut microbiome[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 145–149.]
- [17] EDSON H P D A, MARISE A D B R, MARIN L, et al. Investigation into the intake of edible mushroom *Pleurotus ostreatus* (Aqueous Extract Oyster Mushroom) on biochemical indices of female wistar rats[J]. American Journal of Plant Sciences, 2023, 14(2): 177–190.
- [18] 谭一罗, 苏文英, 樊继伟, 等. 羊肚菌化学成分及药理作用研究进展[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(5): 1025–1028. [TAN Y L, SU W Y, FAN J W, et al. Research advances of morchella chemical compositions and pharmacological effect[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 62(5): 1025–1028.]
- [19] GAO X, QI J Y, HO C T, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of a water-soluble polysaccharide from *Ganoderma leucocontextum* fruiting bodies[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 249(2): 116874.
- [20] 刘莹. 三种食用菌粗多糖体外抗菌活性研究[J]. 食药菌, 2009, 31(2): 66–68. [LIU Y. Study on antibacterial activity of crude polysaccharides of three edible fungi *in vitro*[J]. Edible Fungi, 2009, 31(2): 66–68.]
- [21] 李丹, 尚红, 姜拥军, 等. 香菇多糖体外抗 HIV 的免疫调节作用的实验研究[J]. 中国免疫学杂志, 2004(4): 253–255. [LI D, SHANG H, JIANG Y J, et al. *In vitro* immune regulatory effect of lentinan on HIV-infected PBMC[J]. Chinese Journal of Immunology, 2004(4): 253–255.]
- [22] ZHANG Q, WU C E, SUN Y J, et al. Cytoprotective effect of morchella esculenta protein hydrolysate and its derivative against H₂O₂-induced oxidative stress[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Science, 2019, 69(3): 255–265.
- [23] LIUZZI G M, PETRAGLIA T, LATRONICO T, et al. Antioxidant compounds from edible mushrooms as potential candidates for treating Age-Related neurodegenerative diseases[J]. Nutrients, 2023, 15(8): 1913.
- [24] WANG K, BAO L, MA K, et al. A novel class of α -glucosidase and HMG-CoA reductase inhibitors from *Ganoderma leucocontextum* and the anti-diabetic properties of ganomycin I in KK-Ay mice[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2016, 127: 1035–1046.
- [25] GONZALEZIBANEZ L, MENESES M E, SANCHEZ-TAPIA M, et al. Edible and medicinal mushrooms (*Pleurotus ostreatus*, *Ustilago maydis*, *Ganoderma lucidum*) reduce endoplasmic reticulum stress and inflammation in adipose tissue of obese Wistar rats fed with a high fat plus saccharose diet[J]. Food & function, 2023, 14(11): 5048–5061.
- [26] SHANG X L, PAN L C, TANG Y, et al. 1H NMR-based metabolomics of the hypoglycemic effect of polysaccharides from *Cordyceps militaris* on streptozotocin-induced diabetes in mice[J]. Natural Product Research, 2020, 34(10): 1366–1372.
- [27] DUAN H, YU Q, NI Y, et al. Effect of agaricus bisporus polysaccharides on human gut microbiota during *in vitro* fermentation: An integrative analysis of microbiome and metabolome[J]. Foods, 2023, 12(4): 859.
- [28] NAIR R B, LENNARTSSON P R, TAHERZADEH M J. Mycelial pellet formation by edible ascomycete filamentous fungi, neurospora intermedia[J]. AMB Express, 2016, 6(31): 1–10.
- [29] 安俊文, 方梓莹, 高希西, 等. 我国预制菜产业的发展现状、影响因素及发展趋势[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–8[2023-04-22]. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034935. [AN J W, FANG Z Y, GAO X X, et al. Development status, influencing factors and development trend of China's prepared vegetable industry[J/OL]. Food and Fermentation Industry: 1–8[2023-04-22]. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034935.]
- [30] 曹晶晶, 孙达锋, 苟学磊, 等. 食用菌预制菜加工现状分析及展望[J]. 中国食药菌, 2022, 41(10): 62–65. [CAO J J, SUN D F, GOU X L, et al. Analysis and prospect of current processing situation of the prefabricated edible fungi dishes[J]. Chinese Edible Fungi, 2022, 41(10): 62–65.]
- [31] 吴满刚, 王俊山, 段立昆, 等. 不同干燥处理方法对鸡肉丁的干燥效果[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 235–241. [WU M G, WANG J S, DUAN L K, et al. Effects of different drying methods on drying chicken cubes[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(7): 235–241.]
- [32] MERIVAARA A, ZINI J, KOIVUNOTKO E, et al. Preservation of biomaterials and cells by freeze-drying: Change of Paradigm[J]. Journal of Controlled Release, 2021, 336: 480–498.
- [33] 陈晨, 陈勇. 食用菌冻干技术及其冻干产品的开发与应用[J]. 食药菌, 2023, 31(1): 28–32. [CHEN C, CHEN Y. Development and application of freeze-dried technology and FD products of mushroom[J]. Edible and Medicinal Fungi, 2023, 31(1): 28–32.]
- [34] 殷玲, 常诗洁, 赵立艳, 等. 低温油炸与冷冻干燥生产草菇脆片的特性[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 192–199. [YIN L, CHANG S J, ZHAO L Y, et al. Quality characteristics of straw mushrooms (*Volvariella volvacea*) chips prepared by low-temperature vacuum frying and vacuum freeze drying[J]. Food Science, 2017, 38(22): 192–199.]
- [35] 张韵, 李蕊蕊, 周圣弘. 食用菌作为预制即热菜肴的应用前景及途径[J]. 食品安全导刊, 2021, 327(34): 138–140. [ZHANG Y, LI H H, ZHOU S H. Application prospect and realization of edible fungi as ready-to-heat cuisine[J]. Food Safety Guide, 2021, 327(34): 138–140.]
- [36] 蒋书歌, 侯宇豪. 航天食品的特征、类型及发展趋势[J]. 食品安全导刊, 2017(24): 49–50. [JIANG S G, HOU Y H. Characteristics, types and development trend of space food[J]. Food Safety Guide, 2017(24): 49–50.]
- [37] 周宇, 王楚寒, 毛磊, 等. 口蘑冻干粉冲调米稀加工工艺及其冲调性的研究[J]. 农村实用技术, 2019(12): 52–54. [ZHOU Y, WANG C H, MAO L, et al. Study on processing technology and blanking property of lyophilized rice diluted with mushroom powder]

- der[J]. Rural Practical Technology, 2019(12): 52-54.]
- [38] 孙艺飞. 美拉德反应与鸡脂对松蘑菌汤风味影响及产品开发[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023. [SUN Y F. Effect of Maillard Reaction and chicken fat on flavor of tricholoma matsutake soup and product development[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.]
- [39] 左蕾蕾, 曾里, 曾凡骏. 一种提高免疫力的三菇保健酒的研制[J]. 酿酒, 2011, 38(2): 74-76. [ZUO L L, ZENG L, ZENG F J. Development of edible fungus healthy liquor[J]. Wine Making, 2011, 38(2): 74-76.]
- [40] 石思文, 江洁, 崔琳, 等. 羊肚菌营养强化米酒发酵工艺的优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 175-181. [SHI S W, GANG J, CUI L, et al. Optimization technology of morchella esculenta fortified rice wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(23): 175-181.]
- [41] 田一涵, 陈思宇. 黑木耳保健型复合饮品的研制[J]. 当代农机, 2022, 385(8): 93-94. [TIAN Y H, CHEN S Y. Development of black fungus health compound drink[J]. Contemporary Agricultural Machinery, 2022, 385(8): 93-94.]
- [42] 林梦涵, 赵大鹏, 付坤铭, 等. 黑木耳红枣复合果肉饮料的工艺研究[J]. 人参研究, 2022, 34(2): 46-49. [LIN M H, ZHAO D P, FU K M, et al. Study on technology of auricula and red jujube compound pulp beverage[J]. Ginseng Research, 2022, 34(2): 46-49.]
- [43] 孔祥辉, 李定金, 罗舒函, 等. 猴头菇山楂饮料制备工艺及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 154-160. [KONG X H, LI D J, LUO S H, et al. Study on preparation technology and stability of hericium erinaceus and hawthorn beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 154-160.]
- [44] TANG Y J, LIU R S, LI H M. Current progress on truffle submerged fermentation: A promising alternative to its fruiting bodies[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(5): 2041-2053.
- [45] 张越, 张志军, 丁舒, 等. 基于营养培养基发酵的虫草素功能饮料配方优化[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(1): 85-92. [ZHANG Y, ZHANG Z J, DING S, et al. Formula optimization of cordycepin health beverage based on nutritious culture medium[J]. Preservation and Processing, 2021, 21(1): 85-92.]
- [46] SUN H L, CHEN X, XIANG Y K, et al. Fermentation characteristics and flavor properties of *Hericium erinaceus* and *Tremella fuciformis* fermented beverage[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102017.
- [47] 金星. 蛹虫草在茶叶发酵中的应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014. [JING X. Application of Cordyceps pupa in tea fermentation[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014.]
- [48] QIU L Q, ZHANG M, CHANG L. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the phytochemicals content, taste and aroma of blended edible rose and shiitake beverage[J]. Food Chemistry, 2022, 405(Pt A).
- [49] ZANG W G, LIU X, CHEN Y Q. Restarch of nutritious & healthy *Ganoderma* polysaccharide oral liquid by solid fermentation[J]. Food Research and Development, 2006, 27(9): 94-96.
- [50] 王天威, 池叶楠, 刘轶群, 等. 一款人参复合配方饮料缓解体力疲劳功能评价及其作用机制研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(1): 8-14. [WANG T W, CHI Y N, LIU Y Q, et al. Study on the functional mechanism of ginseng compound in relieving physical fatigue[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 35(1): 8-14.]
- [51] 杨茜茜. 灵芝发酵雪梨汁制备新型雪梨饮料的工艺研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [YANG X X. Study on the preparation technology for a new type of snow pear beverage from *Ganoderma lucidum* Fermented snow pear juice[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]
- [52] 周春晖, 唐璐, 范瑞, 等. 灵芝多糖功能饮料的研发及体外抗氧化活性分析[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(11): 64-71. [ZHOU C H, TANG L, FAN R, et al. Development and *in vitro* antioxidant activity analysis of *Ganoderma lucidum* polysaccharide functional beverage[J]. Preservation and Processing, 21(11): 64-71.]
- [53] 美国: 蘑菇咖啡走俏洛杉矶饮品市场[J]. 中国食用菌, 2018, 37(3): 41. [United States: Mushroom coffee is popular in the Los Angeles beverage market[J]. China Edible Fungi, 2018, 37(3): 41.]
- [54] 王春晓, 方海滨, 陈志周, 等. 双螺杆挤压即食杂粮粉配方及工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 89-95. [WANG C X, FANG H B, CHEN Z H, et al. Formulation and process optimization of ready-to-eat multigrain powder extruded by twin-screw[J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 89-95.]
- [55] ARYA S S, SHAKYA N K. High fiber, low glycaemic index (GI) prebiotic multigrain functional beverage from barnyard, fox-tail and kodo millet[J]. LWT-Food Science and Technonogy, 2021, 135(135): 109991.
- [56] 关颖贤, 江洁, 潘玲, 等. 食用菌发酵食品的研究进展[J/OL]. 食品工业科技: 1-13[2023-04-10]. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022080181. [GUAN Y X, JIANG J, PAN L, et al. Research progress of fermented food by edible fungi[J/OL]. Science and Technology of Food Industry: 1-13[2023-04-10]. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022080181.]
- [57] 付铭, 江洁, 狄文婷, 等. 大米为基质灵芝菌丝体固态发酵条件的优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 186-191. [FU M, JIANG J, DI W T, et al. Optimization of the condition with rice of *Ganoderma lucidum* mycelium solid culture[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(2): 186-191.]
- [58] 韩建策, 赵文婧, 高宇英. 灵芝固态发酵降解玉米淀粉的初步研究[J]. 食品与发酵工业, 2004(7): 59-61. [HAN J R, ZHAO W J, GAO Y Y. A preliminary study on corn starch degradation by solid-state fermentation of *Ganoderma lucidum*[J]. Food and Fermentation Industry, 2004(7): 59-61.]
- [59] 刘方. 虫草素复合米的制备工艺及性质研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015. [LIU F. Preparation and properties of restructuring rice with cordycepin[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2015.]
- [60] 李艳芳, 张立伟, 王相刚, 等. 固体发酵法制作寒地黑土灵芝米技术研究[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(10): 50-52. [LI Y F, ZHANG L W, WANG X G, et al. Study on techniques for making *Ganoderma lucidum* rice in cold region of black soil by solid fermentation[J]. Shaanxi Agricultural Sciences, 2018, 64(10): 50-52.]
- [61] 马誉畅. 灵芝菌胞内酶液对糙米老化及品质的影响[D]. 太原: 山西师范大学, 2021. [MA Y C. The effects of retrogradation and quality of brown rice by intracellular enzyme solution of *Ganoderma lucidum*[D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2021.]
- [62] BANJOKO I, AJUWON K, ROTIMI V, et al. Production of flakes made from cereal enriched with edible mushroom for toddlers (P11-050-19)[J]. Current Developments in Nutrition, 2019, 3(Suppl 1): nzz048.
- [63] 固态发酵食用真菌系列面粉研发[Z]. 黑龙江省, 黑龙江省北大荒麦业有限责任公司, 2004-01-01. [Solid state fermentation edible fungus series flour development[Z]. Heilongjiang Province,

Heilongjiang Beidahuang Wheat Industry Co., Ltd., 2004-01-01.]

[64] BIAO Y, CHEN X, WANG S, et al. Impact of mushroom (*Pleurotus eryngii*) flour upon quality attributes of wheat dough and functional cookies-baked products[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 361-370.

[65] 胡龙. 蛹虫草固体发酵优化及其在低GI产品开发中应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021. [HU L. Optimization of solid fermentation of *Cordyceps militaris* and its application in the development of low GI products[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2021.]

[66] 刘宇锋. 灵芝(*Ganoderma lucidum*)漆酶发酵参数优化及其在改善馒头品质方面的研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2014. [LIU Y F. Improvement of laccase production from *Ganoderma lucidum* HSD06B and the application of improving the quality of chinese steamed bread[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2014.]

[67] 李云波, 钱静, 靳羽慧, 等. 添加杏鲍菇粉对韧性饼干品质特性的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2018, 46(2): 24-28. [LI Y B, QIAN J, JIN Y H, et al. Effect of *Pleurotus eryngii* powder addition on the characteristics of semi hard biscuit[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 46(2): 24-28.]

[68] 杨燕珠, 段贤源, 洪栋, 等. 银耳多糖软糖的研制[J]. 价值工程, 2017, 36(11): 135-137. [YANG X Z, DUAN X Y, HONG D, et al. Processing technology of Tremella polysaccharide soft sweets[J]. Value Engineering, 2017, 36(11): 135-137.]

[69] 王甜, 张正茂. 杏鲍菇软糖生产工艺优化[J]. 食品工业, 2012, 33(12): 15-17. [WANG T, ZHANG Z M. Optimization of preparation processing of *Pleurotus eryngii* soft candy[J]. Food Industry, 2012, 33(12): 15-17.]

[70] 张桓, 辛松林, 刘美仑等. 国内食用菌产业及其产品发展状况[J]. 山西农经, 2023, 337(1): 100-103. [ZHANG H, XIN S L, LIU M L, et al. Development of domestic edible fungi industry and its products[J]. Shanxi Agricultural Economics, 2023, 337(1): 100-103.]

[71] REN A Q, CAO Z Z, TANG X X, et al. Reduction of oil uptake in vacuum fried pleurotus eryngii chips via ultrasound assisted pretreatment[J]. Frontiers in Nutrition, 2022.

[72] 马征祥, 王文亮, 崔文甲, 等. 不同前处理措施对真空油炸杏鲍菇脆片品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(1): 82-86.

[MA Z X, WANG W L, CUI W J, et al. Study on effects of pretreatment on quality of mushroom crisp[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(1): 82-86.]

[73] 王文亮, 宋莎莎, 宋康, 等. 食用菌呈鲜呈味物质提取工艺研究进展[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 237-240. [WANG W L, SONG S S, SONG K, et al. Research advance on extraction condition of flavor components in edible fungus[J]. Food Industry, 2015, 36(7): 237-240.]

[74] ZHU R Y, WEN Y X, WU W H, et al. The flavors of edible mushrooms: A comprehensive review of volatile organic compounds and their analytical methods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022: 1-15.

[75] YANG J H, LIN H C, MAU J L. Non-volatile taste components of several commercial mushrooms[J]. Food Chemistry, 2001 (72): 456-471.

[76] 萧晋川, 张勇, 李弘文, 等. 复合食用菌功能醋的研制[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 118-121. [XIAO J C, ZHANG Y, LI H W, et al. Preparation of compound edible fungi functional vinegar[J]. Chinese Condiments, 2021, 46(2): 118-121.]

[77] 赵杨杨, 于贞. 香菇酱油制曲工艺的优化[J]. 中国调味品, 2023, 48(2): 115-119. [ZHAO Y Y, YU Z. Optimization of koji-making technology of *Lentinus edodes* soy sauce[J]. Chinese Condiments, 2023, 48(2): 115-119.]

[78] 梁国栋, 裴文宏, 程菲儿, 等. 杏鲍菇调味酱的研制及流变性测定[J]. 农产品加工, 2023, 569(3): 62-66, 71. [LIANG G D, PEI W H, CHENG F E, et al. Development of *Pleurotus eryngii* seasoning sauce and its application in sausage[J]. Processing of Agricultural Products, 2023, 569(3): 62-66, 71.]

[79] 宋莎莎, 李延年, 李永生, 等. 香菇复配草菇食用菌酱制备工艺研究[J]. 中国果菜, 2023, 43(2): 37-43. [SONG S S, LI Y N, LI Y S, et al. Research on the preparation process of *Lentinus edodes* and *Volvariella volvacea* compound edible mushroom sauce[J]. Chinese Journal of Fruit and Vegetable Sciences, 2023, 43(2): 37-43.]

[80] 赵丹, 韩清华, 周海军, 等. 菌菇汤冻调味料制备与工艺优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 196-201. [ZHAO D, HAN Q H, ZHOU H J, et al. Preparation and process optimization of jellylike fungi seasoner[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 196-201.]

[81] 赵强. 白芦菇种属鉴定、营养评价与栽培技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. [ZHAO Q. Study on the identification, nutrition evaluation and cultivation techniques of bailu moshroom[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]

[82] 李通. 食用菌产业化生产模式初探[J]. 农业工程技术, 2016, 36(29): 18, 20. [LI T. Study on industrialization production model of edible fungi[J]. Journal of Agricultural Engineering Technology, 2016, 36(29): 18, 20.]

[83] 吴素蕊, 严明, 陈旭, 等. 我国食(药)用菌药品开发现状[J]. 中国食用菌, 2020, 39(7): 1-9. [WU S R, YAN M, CHEN X, et al. Current status of the development of edible and medicinal fungi medicine in China[J]. Chinese Journal of Edible Fungi, 2019, 39(7): 1-9.]

[84] 卯晓岚. 中国大型真菌[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000. [MAO X L. Macrofungi in China[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2000.]