

红菇的营养功能及生物活性研究进展

刘丽正, 刘永奇, 隋卓男, 彭洋洋, 张焱, 王小龙, 周雨琪, 鲁吉珂, 伊娟娟

Research Progress on Nutritional Function and Bioactivities of *Russula*

LIU Lizheng, LIU Yongqi, SUI Zhuonan, PENG Yangyang, ZHANG Yan, WANG Xiaolong, ZHOU Yuqi, LU Jike, and YI Juanjuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030358>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

食用菌中萜类物质及其生物活性研究进展

Research Progress of Terpenoids and Bioactivities in Edible Mushroom

食品工业科技. 2019, 40(1): 305-310 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.01.054>

大豆 γ -氨基丁酸的富集及产品开发研究进展

Research progress on γ -aminobutyric acid accumulation in soybean and its product development

食品工业科技. 2018, 39(9): 346-351 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.09.061>

大型真菌菌核生物活性研究进展

Research Progress in the Biological Activities of Macrofungus Sclerotia

食品工业科技. 2018, 39(21): 328-332 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.057>

莲废弃物活性成分的提取及其生物活性的研究进展

Recent Advances in Extraction and Biological Activities of Bioactive Compounds from Lotus Wastes

食品工业科技. 2021, 42(15): 364-371 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070034>

紫花苜蓿化学成分及其生物活性研究进展

Research progress on chemical composition and biological activities of *Medicago sativa* L.

食品工业科技. 2018, 39(11): 344-352 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.11.059>

杂粮营养功能与安全研究进展

Advances in the Nutritional Function and Safety of Coarse Cereals

食品工业科技. 2021, 42(14): 362-370 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060341>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘丽正, 刘永奇, 隋卓男, 等. 红菇的营养功能及生物活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 447-453. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030358

LIU Lizheng, LIU Yongqi, SUI Zhuonan, et al. Research Progress on Nutritional Function and Bioactivities of *Russula*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 447-453. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030358

· 专题综述 ·

红菇的营养功能及生物活性研究进展

刘丽正¹, 刘永奇^{1,+}, 隋卓男¹, 彭洋洋¹, 张焱¹, 王小龙², 周雨琪¹, 鲁吉珂^{1,*}, 伊娟娟^{1,*}

(1. 郑州大学生命科学学院, 河南郑州 450001;

2. 河南省银丰生物工程技术有限公司, 河南郑州 450001)

摘要: 红菇 (*Russula*) 是一种常见的食用真菌, 含有丰富的多糖、蛋白质、多酚、黄酮等营养物质及活性成分, 具有良好的降血糖、降血脂、抗癌、抑菌等生物活性。此外, 利用微生物发酵技术对食用菌进行发酵加工可有效提高其营养物质含量或转化衍生出新的功能活性物质。目前, 食用菌发酵加工的应用也逐渐增多。基于上述背景, 本文对食用菌红菇中主要活性成分的提取纯化及营养成分分析进行综述, 并重点强调了红菇活性成分的功能特性, 包括免疫调节、抗氧化、抗癌等。同时, 综述食用菌发酵加工应用和产品开发的研究现状, 以期红菇在功能食品领域的综合应用提供参考。

关键词: 红菇, 营养物质, 生物活性, 食用菌发酵, 产品开发

中图分类号: Q819

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)04-0447-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030358



本文网刊:

Research Progress on Nutritional Function and Bioactivities of *Russula*

LIU Lizheng¹, LIU Yongqi^{1,+}, SUI Zhuonan¹, PENG Yangyang¹, ZHANG Yan¹, WANG Xiaolong²,
ZHOU Yuqi¹, LU Jike^{1,*}, YI Juanjuan^{1,*}

(1. School of Life Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Yinfeng Bioengineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: *Russula* is a kind of edible fungi, rich in nutrients and bioactive ingredients including polysaccharides, proteins, lipids and so on. Meanwhile, it presents good biological activities such as hypoglycemic, hypolipidemic, anticancer and antibacterial activities. In addition, the application of microbial fermentation technology in edible fungi can effectively improve the nutrient content or produce new functional active substances. At present, the application of edible fungus fermentation process is gradually increasing. Based on the above researches, this study reviews the extraction and purification of bioactive components, as well as the analysis of nutrient substances in *Russula*. And the bioactivities of active ingredients in *Russula* are emphasized, including the immune regulation, antioxidant, anticancer activities and so on. Moreover, the research progress of application and product development in edible fungus fermentation field are summarized to provide some reference for the comprehensive application of *Russula* in functional food industry.

Key words: *Russula*; nutritional ingredients; biological activities; edible fungus fermentation; product development

红菇 (*Russula*) 属于真菌界、担子菌门、担子菌纲、红菇目、红菇科, 是一类扁半球形菌根真菌, 菌盖

呈深红色或暗紫红色, 边缘平滑或有不明显条纹。红菇主要分布于温带地区, 世界范围内主要产地为美

收稿日期: 2022-03-29 +并列第一作者

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31900296); 郑州大学青年人才企业合作创新团队支持计划 (32320422); 郑州大学技术开发 (合作) 横向项目 (20210442A, 20210327A)。

作者简介: 刘丽正 (2001-), 女, 本科, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: lizhengliu010210@163.com。

刘永奇 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: Lyq19980310@163.com。

* 通信作者: 鲁吉珂 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: ljk002004@163.com。

伊娟娟 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: yijuanjuanmsn@126.com。

国、日本、朝鲜及俄罗斯等,在我国主产于广西、福建、四川和云南等地^[1]。野生红菇不仅味道鲜美,同时富含脂肪酸、风味氨基酸、蛋白质、多糖、多酚和萜类等营养成分和生物活性物质^[2],是一种名贵的药食同源真菌。目前,人们越来越关注饮食结构,对营养与健康的意识不断提高,食用菌的功能活性近年来受到极大关注。研究表明,红菇中的多糖、多酚、黄酮等活性成分对人体健康具有一定的增益作用,主要包括抗氧化^[3]、免疫调节^[4]、抗炎^[5]、抗癌^[6]等,以红菇作为功能性原料进行开发的产品也逐渐进入市场。

此外,利用微生物对药食同源真菌进行生物转化,从而有效提高活性物质含量已经成为目前食用菌相关产品开发加工的研究热点之一。目前,代表性食用菌如灵芝、松露等活性成分及其发酵研究应用较为广泛、深入,但关于红菇营养成分及功能活性的系统性全面综述尚未见报道。因此,本文主要对红菇活性成分的提取纯化、功能活性研究以及相关食用菌发酵加工应用进行归纳总结,旨在为红菇进一步研究及其发酵功能性产品的开发提供一定参考。

1 红菇活性成分提取纯化及营养成分分析

1.1 红菇活性成分的提取纯化

1.1.1 红菇大分子活性成分的提取纯化 多糖是红菇中含量较高的大分子生物活性成分,具有抗氧化、抗癌、免疫调节等活性。但是不同品种红菇所含多糖的种类和含量均有所差异。例如,姚晓华^[7]分析了鳞盖红菇和正红菇的成分,发现正红菇和鳞盖红菇的水溶性粗多糖含量分别为4.25%和4.63%;刘芹^[8]以碱提法分别从长根菇与正红菇中提取多糖,其得率分别为5.01%和12.43%。基于此,针对不同目的产物,需要采用合适的方法对红菇中相关的活性成分进行有效的提取纯化,为红菇功能活性物质的开发利用提供基础。目前,已有研究采用不同的提取方法对红菇不同活性成分进行提取纯化,如表1所示。

红菇多糖属于真菌多糖的一种,具有十分广泛的生物学活性,如抗癌^[16]、降血脂^[17]、降血糖^[18]、降血压^[19]以及免疫调节^[20]等。目前常见的多糖提取方法包括:微波辅助提取法^[21]、有机溶剂提取法^[22]、酸碱提取法^[23]、酶辅助提取法^[24]等,这些方法所提多

糖产率均较高,且能够保持相对稳定的活性;实际应用过程中,应该根据综合收率和活性选择合适的提取方法。

由于粗提多糖中常含蛋白质、色素、低聚糖和小分子等杂质,因此多糖提取后需进一步纯化。研究中通常将一种或多种纯化方法相结合,使活性多糖高效分离^[25]。Zhang等^[26]利用水提法提取红菇多糖,采用梯度乙醇沉淀法和凝胶层析法将红菇多糖(WRP)分离为WRP-1、WRP-2和WRP-3三个纯化组分,并进一步实验探究其组成结构。Li等^[10]通过热水浸提、脱色、醇沉、Sevage除蛋白等多个步骤获得红菇粗多糖RVP,并通过柱层析和透析技术进一步纯化得到纯度较高的多糖RVP-1和RVP-2。红菇多糖的提取纯化目前研究较为完善,但仍需进一步改善其纯化方法,从而增加红菇多糖提取率及纯度。此外,最优的提取方法或纯化方法在不同品种红菇之间是否具有普遍性也有待于验证。

1.1.2 红菇中小分子活性成分的提取纯化 除多糖类水溶性大分子天然化合物之外,一些醇溶性小分子活性化合物如酚类、萜类、黄酮、酚酸等物质也具有广泛的生物与药理活性。红菇中的天然小分子活性物质以萜类和酚类为主,多采用有机溶剂(甲醇、乙醇、氯仿等)进行提取,而后采用色谱法进行纯化。例如,有研究采用乙醇浸提法对铜绿红菇和短针红菇中的萜类、生物碱、黄酮等活性小分子进行提取,并进一步探究其抑菌和抗氧化活性^[12]。Jian等^[13]采用三氯甲烷和甲醇混合溶剂对鳞盖红菇中的活性物质进行提取,并通过重复硅胶色谱和反相色谱对其进行分离纯化,得到一种新的三萜类物质。Gao等^[14]采用乙醇、甲醇和氯仿对蓝黄红菇中的小分子活性物质进行提取,得到一种新的神经酰胺类物质,并对其结构进行解析,但其生物活性有待于进一步探究。Tomohiro等^[15]首先用磷酸盐缓冲液对红菇蜡伞中的水溶性物质进行提取,然后通过亲和色谱和离子交换色谱对提取物进一步纯化,得到红菇蜡伞凝集素(HRL)。进一步研究发现,HRL不仅可以促进大鼠脾脏细胞中IL-6、IFN- γ 和IL-10等细胞因子的分泌,增强机体免疫调节能力。同时可与HIV病毒的gp120蛋白紧密结合,抑制病毒对正常细胞的感染,发挥抗HIV病毒活性。

表1 不同品种红菇活性成分及其提取纯化方法

Table 1 Bioactive components and extraction/purification methods of different varieties of *Russula*

红菇品种	成分	提取纯化方法	参考文献
正红菇	多糖	超声波辅助提取法	[9]
变绿红菇	多糖	水提法和凝胶色谱法	[10]
红豆红菇	多酚	甲醇浸提法和高效液相色谱	[11]
铜绿红菇、短针红菇	萜类、生物碱、黄酮类、还原糖和蒽醌类	乙醇浸提法	[12]
鳞盖红菇	Seco-环-A葫芦科三萜	氯仿/甲醇提取法和硅胶色谱法	[13]
蓝黄红菇	鞘氨醇类神经酰胺	有机溶剂浸提法	[14]
红菇蜡伞	红菇凝集素(HRL)	柱亲和层析法和阳离子交换层析法	[15]

以上结果显示,红菇中含有多糖、多酚、萜类等生物活性物质,为获取不同的目的产物,需要有针对性地采用合适的提取溶剂,且在提取过程中多结合超声、微波及酶解等处理方式进行辅助提取,可有效提升目的产物的提取效率。

1.2 红菇主要营养成分分析

红菇中含有丰富的脂类,是红菇营养成分的重要来源。脂肪酸是脂类的关键成分,它们不仅能够为机体提供能量,同时部分脂肪酸还可以参与机体代谢。李惠珍等^[27]通过气相色谱法对正红菇脂肪酸成分进行分析,发现正红菇脂肪酸主要由油酸(18:1)和亚油酸(18:2)组成,并且可能存在花生四烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)。Marina等^[28]分析了来自塞尔维亚的3种野生红菇属真菌的活性成分组成,发现了4种生育酚异构体,其中主要的脂肪成分为多不饱和脂肪酸。由上述可知,红菇中含有亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸等人体必需脂肪酸,对脑组织生长发育至关重要。因此深入研究红菇中的脂肪酸的成分含量及相关机制,对后续功能性食品或保健品开发具有一定价值。

其他研究表明红菇还富含可被人体吸收的蛋白质,而其氨基酸组成复杂,值得对红菇中蛋白质的氨基酸组成及含量进行深入探究。目前,氨基酸检测分析常用方法有液相色谱法、PICO-TAG氨基酸分析法、电化学分析法、紫外分光光度法等。例如,陈新华^[29]采用高效液相色谱法对灰肉红菇中所含蛋白质进行氨基酸分析,结果表明灰肉红菇子实体氨基酸种类齐全,不仅含有人体所必需的7种氨基酸,而且还含有多种非必需氨基酸。正红菇氨基酸种类丰富,必需和半必需氨基酸占总氨基酸含量的54.4%,其中必需氨基酸中以苯丙氨酸的含量最高^[30]。刘云派等^[31]通过PICO-TAG氨基酸分析法检测得出,革质红菇中氨基酸总含量高达26.53%,相较于常见的食用菌如香菇、金针菇、木耳等更高。

综上,红菇含有丰富的活性物质如多糖、多酚、黄酮等,同时还富含脂质、蛋白质等营养物质。现阶段对红菇的研究主要集中于红菇活性成分的提取,鲜有通过酶解、发酵等加工方式对红菇进一步处理,以改变其活性成分组成或含量的研究。鉴于目前酶法、发酵法等生物技术在食品中的应用日趋广泛,以生物法对红菇功能活性物质进行处理加工并开发相关产品具有广阔的前景。

2 红菇活性成分的功能特性

2.1 免疫调节活性

免疫调节活性是红菇重要的生物活性之一,近年来被广泛研究。免疫系统是机体防卫病原体入侵的一道强大防线,免疫细胞作为免疫系统的重要组成部分,在机体免疫防护过程中发挥重要作用。目前对红菇免疫调节作用的研究大多集中在红菇多糖。研究表明,红菇多糖具有提升免疫细胞活性的功能,可

以发挥一定的免疫调节活性。比如,李陈晨等^[32]研究表明,红菇多糖能在一定程度上促进RAW 264.7巨噬细胞的增殖,具有一定的体外免疫调节活性。此外,Li等^[4]从红菇中提取的多糖Rap-1,可有效降低炎症巨噬细胞中NO、IL-1 β 和TNF- α 的分泌水平,相应提高巨噬细胞的增殖率和吞噬效率;Somanjana等^[33]研究证实红菇多糖提取物RuseCap可以促进巨噬细胞中iNOS、COX-2、TNF- α 、IL-6等细胞因子分泌,在体外发挥免疫调节作用。上述研究表明,红菇多糖可以通过调节巨噬细胞中免疫相关因子的表达,从而提高免疫细胞活性,具有提升机体免疫力的潜力。但是这些研究仅仅在细胞水平上探究了红菇多糖的免疫调节活性,其在动物体内的安全性、生物利用度及是否同样可以发挥良好的免疫调节活性还有待于进一步研究,这对于红菇免疫调节相关产品的开发和利用具有重要意义。

2.2 抗氧化活性

抗氧化功能是衡量机体健康的一个重要指标。机体需维持体内氧化还原反应的平衡,构建完整的抗氧化体系,才能进一步保证机体稳态与健康。机体在代谢过程中产生的过量自由基会攻击周围的生物大分子,对机体产生不同程度的损伤。化学抗氧化剂虽然可以有效清除这些自由基,但是其成本较高,具有一定的毒副作用^[34]。与其相比,从食用菌、植物以及海洋生物中提取的天然抗氧化剂在安全性和成本方面占据优势,成为近年来人们关注和研究的热点。

红菇中含有丰富的多糖、多酚、黄酮等天然活性物质,属于天然的抗氧化剂。这些活性物质可以在体内直接清除自由基,同时也可提高机体内抗氧化酶的活性,相应减轻或修复自由基对机体的损伤。Yaltirak等^[3]初步证明了红菇醇提取物中的儿茶素对自由基具有一定的清除作用,表现出良好的抗氧化活性。庞庭才等^[35]通过微波辅助法提取红菇多糖,发现其对超氧阴离子、羟基自由基和DPPH自由基均表现出良好的清除能力,且呈现剂量依赖性。曾诗媛等^[36]通过研究表明,红菇水提取物中的活性成分不仅可以在体外有效清除自由基,并且可以提升小鼠体内SOD活性,降低MDA含量,发挥良好的体内辐射防护效果。综上所述,红菇中多酚、多糖等活性成分均表现出较强的抗氧化活性及氧化损伤防护能力。随着人们对红菇活性成分抗氧化功能的研究逐步深入,其抗氧化成分及其功能活性之间的构效关系同样值得进一步探究;同时,红菇抗氧化相关产品的开发与应用也有待加强。

2.3 抗癌活性

癌症在全球范围内的发病数和死亡数逐年升高,针对性的治疗手段主要包括化疗、放疗、靶向疗法等。除此之外,一些具有体内外抗癌活性的天然产物提取物正在积极开发中。研究发现正红菇多糖对癌细胞的增殖有显著抑制作用,在一定浓度范围内,

对淋巴细胞的增殖作用呈现剂量依赖性,表现出良好的抗癌活性^[6]。Liu等^[37]从灰肉红菇中提取多糖PRG1-1,发现其对子宫颈癌细胞(Hela)具有显著增殖抑制效果,可以提高癌细胞凋亡率。任玉莹等^[38]以红菇为原料提取获得乙酸乙酯提取物、乙醇提取物和水提取物,抗癌活性研究结果显示,乙酸乙酯提取物、乙醇提取物中富含多酚类物质,对乳腺癌细胞(MDA-MB-231)和子宫颈癌细胞(Hela)的生长具有抑制作用,展现良好的体外抗癌活性。此外,刘芹^[8]研究表明,正红菇子实体中碱提多糖(RVLAP)以及水提多糖(RVLWP)对S180肿瘤细胞的生长具有明显抑制作用,可协同增强环磷酰胺的抑瘤作用。以上研究结果均证实,红菇在抗癌方面具有较强潜力,但对其抗癌作用机制的相关研究较少,需要进一步探究其活性分子的抗癌机制,这将有助于从分子水平深化红菇的基础研究,为其作为抗癌佐剂的相关应用转化奠定基础。

2.4 其他生物活性

除多糖、多酚外,红菇中的其他活性成分也可表现出降血糖、降血脂、抗损伤、调节植物生长等生物调节功能。Matsuzaki^[39]从红菇子实体中分离得到(1R, 2S)-1-苯丙烷-1,2-二醇、异乳红菇素、红乳菇素A等5种化合物,发现其对莴苣的生长具有调节作用。魏杰等^[40]发现红菇多糖对小鼠肝脏衰老损伤具有一定程度抑制及修复效果。甘耀坤等^[41]发现红菇水提物能明显改善小鼠运动性疲劳情况,具有良好的消除疲劳作用。此外,红菇水提多糖(RVLWP)和碱提多糖(RVLAP)可显著抑制四氯化碳诱导的小鼠

血清中AST和ALT含量升高,提升SOD酶活,具有一定的肝脏保护效果^[42]。红菇提取物尼克酸对小鼠心肌损伤的保护效果显著^[43]。表2展示了不同种类红菇营养成分及其生物活性。

3 食用菌发酵加工应用现状及红菇发酵产品开发潜能

红菇等食用菌富含生物活性物质,它们可以在体内外发挥广泛的生物与药理活性。但是由于真菌特殊的细胞壁结构,仅依靠简单的提取方法难以高效利用这些活性物质。超声、超高压破碎等方法虽然可以在一定程度上提升活性物质提取率,但是存在能耗高、效率低等缺点。与其相比,利用微生物对食用菌进行发酵,一方面可以破坏真菌细胞壁结构使活性物质充分释放,提高提取效率;另一方面这些活性物质可能参与微生物代谢过程,转变为活性更高的次级代谢产物。值得强调的是,微生物发酵技术能耗较低、易于扩大生产,在食品与医药产业中具有潜在应用价值,是未来红菇等食用菌深加工的一个重要方向。表3总结了部分已报道的食用菌发酵产物及其生物活性。

以食用菌为发酵原料,向其中接种益生菌的发酵方式不仅可以提高发酵产物营养成分与活性物质含量,同时发酵过程中产生的次级代谢产物也具有更强的生物活性。例如,向双胞菇中接种一定量的乳酸菌进行发酵,可显著提升发酵产物中多酚类物质的含量,且醇提物具有更强的抗氧化活性^[48]。此外,以香菇作为发酵基质,向其中接种扁平乳杆菌,发酵产物

表2 不同红菇活性成分及其生物活性

Table 2 Different bioactive components and their biological activities of *Russula*

红菇名称	活性成分	生物活性	参考文献
野生灰红菇	多糖	抗氧化作用和抗癌作用	[44]
红菇	支链β-(1→3)-葡聚糖、半乳糖葡聚糖	促进巨噬细胞增殖、吞噬,以及NO和细胞因子(TNF-α和IL-1β)的分泌	[26]
红菇子实体	多糖、多酚	抗氧化、降血糖、抗炎作用	[41]
红菇	多酚	抗氧化作用	[45]
变色红菇、黑红菇、玫瑰红菇	对羟基苯甲酸和肉桂酸	抑制硫代巴比妥酸反应物质的生成和抗氧化活性	[27]
红菇	异缜白乳菇醛	对植物病原真菌的抑菌活性	[46]
红菇子实体	(1R, 2S)-1-苯基丙烷-1,2-二醇、异乳菇素、乳菇素A、8α、13-二羟基马拉糖基-5-伊斯拉酸γ-内酯和7α、8α、13-三羟基马拉糖基-5-伊斯拉酸γ-内酯	植物生长调节活性	[42]

表3 不同食用菌发酵加工应用

Table 3 The fermentation and processing of different edible fungi

食用菌		接种菌种	发酵产物功能	参考文献
中文名	拉丁名			
绣球菌	<i>Sparassis crispa</i>	乳酸菌	提升小鼠免疫功能	[47]
双胞菇	<i>Agaricus bisporus</i>	乳酸菌	提升多酚类含量及抗氧化活性	[48]
灵芝	<i>Ganoderma lucidum</i>	嗜酸乳杆菌、短双歧杆菌	提高小鼠免疫力、肠黏膜屏障功能;改善肠道菌群组成	[49]
香菇	<i>Lentinus edodes</i>	扁平乳杆菌	提高游离氨基酸和5'核苷酸含量,提升鲜味	[50]
平菇、鸡油菌	<i>Pleurotus ostreatus, Cantharellus cibarius</i>	乳酸菌	平衡发酵酸碱性;提升多酚类物质含量	[51]
金针菇	<i>Flammulina velutipes</i>	蛹拟青霉菌	提升多糖、虫草素、虫草酸等活性物质含量;提升抗氧化活性	[52]

中富含游离核苷酸与 5'核苷酸, 可以显著提升香菇本身的鲜味^[50]。以蛹拟青霉菌作为发酵菌种, 对金针菇进行发酵, 可以显著提升多糖、虫草素、虫草酸等活性物质含量, 并且发酵菌质表现出更强的还原力和 DPPH 自由基清除能力^[52]。Nishioka 等^[47]以绣球菌干粉作为部分发酵基质, 向其中接种乳酸菌进行发酵, 并对比绣球菌水提物及发酵产物水提物诱导小鼠巨噬细胞中各种凝血和炎症相关因子的表达情况, 发现两者均可提升小鼠免疫力, 同等剂量下, 发酵产物水提物表现出更加显著的效果。这可能与发酵产物中较高的 β -葡聚糖含量有关。

以上研究皆表明, 在食用菌中添加一定量的微生物, 或以食用菌作为部分发酵基质进行发酵, 可以有效提升发酵产物中多糖、多酚等活性物质的含量, 相应提高生物活性。这可能与微生物发酵过程中对食用菌的利用有关, 一方面微生物发酵过程中破坏了菌体细胞壁, 使食用菌中活性物质及细胞壁中的 β -葡聚糖释放到发酵液中, 它们可以在机体内发挥优异的抗氧化、抗炎、促进机体免疫力等功能。同时这些多糖、多肽等成分又可以为微生物的生长发育提供碳源、氮源, 并且一些多酚类小分子物质可能参与微生物的代谢过程, 生成结构不同、活性更强的次生代谢产物。

红菇作为一种富含天然活性物质的食用菌, 表现出广泛的生物与药理活性, 如抗炎、抗氧化、提升免疫力等。尽管目前红菇的发酵加工应用研究尚不多见, 但基于上述食用菌的益生菌发酵现状, 红菇作为一种优质食用菌原料, 通过适宜发酵技术探索研发具备更高营养与药用价值的相关产品具有十分广阔的前景。可以预见, 未来红菇活性物质和红菇发酵提取物在医疗药用、功能食品领域应用开发前景极为可观。

4 结论与展望

红菇作为一种药食两用真菌, 含有丰富的功效物质, 如多糖、多酚、黄酮等, 具有抗氧化、降血糖、抗癌等多种生物活性, 具有重要的药理作用及食用价值。但目前对于红菇的研究成果主要集中在红菇活性成分的提取纯化及功能活性挖掘上, 基础研究缺乏系统深入的机制探索。此外, 目前已发表的研究聚焦于红菇深层培养, 获得抗菌活性优良的红菇菌丝, 但鲜有关于红菇作为基质接种微生物进行发酵生产的报道。鉴于其他食用菌发酵产物中活性物质含量及生物功能均有所提升, 可以预见以红菇作为发酵基质, 接种适合的微生物对其进行发酵可增加红菇多糖、多酚、黄酮等活性物质的含量可得到生物活性更加优异的发酵产物。因此, 对红菇功能成分进行深入的活性机制探索, 或将其进行益生菌发酵并对发酵产物中活性成分展开理化性质和功能活性的研究, 均将对红菇产品在食品创新和医疗保健方面的质量提升发挥巨大推动作用。

参考文献

- [1] 甘耀坤, 赵良发, 戴卢, 等. 野生红菇研究综述[J]. 玉林师范学院学报, 2005(3): 70-74. [GAN Y K, ZHAO L F, DAI L, et al. A summary of the uncultivated red mushroom[J]. Journal of Yulin Teachers College, 2005(3): 70-74.]
- [2] 欧财篮, 陈秋杏, 苏仪梅, 等. 玉林红菇的综合开发利用现状研究[J]. 现代园艺, 2021, 44(1): 95-96, 167. [OU C L, CHEN Q X, SU Y M, et al. Research on comprehensive development and utilization of red mushroom in Yulin[J]. Xiandai Horticulture, 2021, 44(1): 95-96, 167.]
- [3] YALTIRAK T, ASLIM B, OZTURK S, et al. Antimicrobial and antioxidant activities of *Russula delica* Fr[J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(8): 2052-2056.
- [4] LI Y, LI X, CHU Q, et al. *Russula alutacea* Fr. polysaccharide ameliorates inflammation in both RAW264.7 and zebrafish (*Danio rerio*) larvae[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145(C): 740-749.
- [5] 刘英姿. 铁桐与红菇抑菌作用及其抗氧化性能的比较研究[D]. 广西: 广西师范大学, 2009. [LIU Y Z. Comparative study on bacteriostatic extractive and antioxidant activity between *Russula* and *Cyclobalanopsis glauca*[D]. Guangxi: Guangxi Normal University, 2009.]
- [6] WILMAR M, HIROYUKI Y, SYU-ICHI K, et al. Protein tyrosine phosphatase 1B inhibitory properties of seco-cucurbitane triterpenes obtained from fruiting bodies of *Russula lepida*[J]. Journal of Natural Medicines, 2017, 71(1).
- [7] 姚晓华. 正红菇的液体培养及其与鳞盖红菇的化学成份分析比较[D]. 广西: 广西大学, 1997. [YAO X H, The liquid culture of the *Russula vinosa* Lindbl and its comparison with the chemical composition analysis of the *Russula lepida*[D]. Guangxi: Guangxi University, 1997.]
- [8] 刘芹. 长根菇和正红菇多糖的分离纯化、结构及生物活性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [LIU Q, Studies on purification, structure and biological activities of polysaccharides from *Oudemansiella radicata* and *Russula vinosa*[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.]
- [9] 吴昊, 司月阳, 王珊珊, 等. 响应面法优化红菇多糖的提取工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(9): 90-94. [WU H, SI Y Y, WANG S S, et al. Optimization of extraction technology of polysaccharide from *Russula* by response surface methodology[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(9): 90-94.]
- [10] LI Y M, ZHONG R F, CHEN J, et al. Structural characterization, anticancer, hypoglycemia and immune activities of polysaccharides from *Russula virescens*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021: 184.
- [11] SOMANJANA K, SWARNENDU C, KRISHNENDU A. Expanding knowledge on *Russula alatoretica*, a novel mushroom from tribal cuisine, with chemical and pharmaceutical relevance[J]. Cytotechnology, 2019, 71(1): 245-259.
- [12] REHMAN N, MUNIBA S, MUHAMMAD I, et al. Evaluation of mycochemical analysis and *in vitro* biological activities of some *Russula* species (Agaricomycetes) from Pakistan[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2021, 23(10):35-43.

- [13] JIAN W T, ZE J D, ZHI H D, et al. Lepidolide, a novel seco-ring-A cucurbitane triterpenoid from *Russula lepida* (Basidiomycetes) [J]. *Journal of Biosciences*, 2002, 57(11-12): 963-965.
- [14] GAO J M, DONG Z L, LIU J K. A new ceramide from the basidiomycete *Russula cyanoxantha* [J]. *Lipids*, 2001, 36(2):175-180.
- [15] TOMOHIRO S, KOZUE S, HIROFUMI H, et al. Mannose-specific lectin from the mushroom *hygrophorus Russula* [J]. *Glyco-biology*, 2012, 22(5): 616-629.
- [16] PAN H T, WANG Y J, NA K, et al. Autophagic flux disruption contributes to *Ganoderma lucidum* polysaccharide-induced apoptosis in human colorectal cancer cells via MAPK/ERK activation [J]. *Cell Death and Disease*, 2019, 10(6): 456.
- [17] 陈旭健, 张原琪. 红菇多糖的提取及其降血糖、血脂作用研究 [J]. *食品科学*, 2010, 31(9): 255-258. [CHEN X J, ZHANG Y Q. Polysaccharide extract from *Russula* and its role of lowering blood glucose and lipid [J]. *Food Science*, 2010, 31(9): 255-258.]
- [18] Khatua S, Sen S, Ghosh M, et al. Exploration of nutritional, antioxidative, antibacterial and anticancer status of *Russula alatareticula*: Towards valorization of a traditionally preferred unique myco-food [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(6): 2133-2147.
- [19] LI H, WANG X, XIONG Q, et al. Sulfated modification, characterization, and potential bioactivities of polysaccharide from the fruiting bodies of *Russula virescens* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154: 1438-1447.
- [20] YUAN Y, LIU Y, LIU M D, et al. Optimization extraction and bioactivities of polysaccharide from wild *Russula griseocarnosa* [J]. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 2017, 25(4):520-530.
- [21] ABBAS D, LUTFUN N, SANAZ H, et al. Microwave-assisted extraction in natural products isolation [J]. *Methods in Molecular Biology* (Clifton, N. J.), 2012: 864.
- [22] PENG F, PENG P, XU F, et al. Fractional purification and bioconversion of hemicelluloses [J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30(4): 879-903.
- [23] ZHAO S F, HE Y, WANG C G, et al. Isolation, characterization and bioactive properties of alkali-extracted polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* [J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(11): 552.
- [24] DEKKER R. Enzymatic hydrolysis of plant polysaccharides: Substrates for fermentation [J]. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 1989, 22(12):1441-1456.
- [25] 李雪, 索柯柯, 张小苗, 等. 玛咖活性成分及其淀粉研究进展 [J]. *食品科学*, 2020, 41(19): 253-262. [LI X, SUO K K, ZHANG X M, et al. Recent progress in research on bioactive components and starch of *Lepidium meyenii* [J]. *Food Science*, 2020, 41(19): 253-262.]
- [26] ZHANG H, LI C C, F. H. L, et al. Fractionation, chemical characterization and immunostimulatory activity of β -glucan and galactoglucan from *Russula vinosa* Lindblad [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021: 256.
- [27] 李惠珍, 黄德鑫, 许旭萍, 等. 正红菇的化学成分的研究 [J]. *菌物系统*, 1998(1): 68-74. [LI H Z, HUANG D X, XU X P, et al. Study on the chemical compositions in *Russula vinosa* [J]. *Mycosystema*, 1998(1): 68-74.]
- [28] MARINA K, MARIJA I, ANGELA F, et al. Antioxidant extracts of three *Russula* genus species express diverse biological activity [J]. *Molecules*, 2020, 25(18): 1336.
- [29] 陈新华. 广东商品红菇形态和分子鉴定、营养成分分析及其生物活性研究 [D]. 湖南: 中南大学, 2010. [CHEN X H, Studies on morphological and molecular identifications, nutrient components analysis and biological properties of commercial *Russula* sp. produce in Guangdong [D]. Hunan: Central South University, 2010.]
- [30] CUCCHIARO H, LAURENS M L. Total protein analysis in algae via bulk amino acid detection: optimization of amino acid derivatization after hydrolysis with O-phthalaldehyde 3-mercaptopropionic acid (OPA-3MPA) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(19):5672-5679.
- [31] 刘云派, 刘小珍, 吴莉宇. 革质红菇营养成分分析 [J]. *光谱实验室*, 2001, 18(5): 637-639. [LIU Y P, LIU X Z, WU L Y. Nutritional composition analysis of *R. alutacea* [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2001, 18(5): 637-639.]
- [32] 李陈晨, 赖凤羲, 夏永军, 等. 正红菇多糖提取物的化学组成及细胞免疫活性 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(9): 115-121. [LI C C, LAI F X, XIA Y J, et al. Comparison of chemical composition and cellular immune activity of polysaccharide extracts obtained from different parts of *Russula vinosa* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(9): 115-121.]
- [33] SOMANJANA K, KRISHNENDU A. Alkaline extractive crude polysaccharide from *Russula senecis* possesses antioxidant potential and stimulates innate immunity response [J]. *The Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2017, 69(12):1817-1827.
- [34] 丁晓. 反式茴香醚对动物的抗氧化作用及机理研究 [D]. 山东: 山东农业大学, 2020. [DING X, The antioxidant capacity of trans-anethole and the potential mechanism in animals [D]. Shandong: Shandong Agricultural University, 2020.]
- [35] 鹿庭才, 胡上英, 陆媛媛, 等. 微波辅助提取红菇多糖及抗氧化性研究 [J]. *中国酿造*, 2016, 35(5): 157-161. [PANG T C, HU S Y, LU Y Y, et al. Microwave-assisted extraction of *Russula vinosa* polysaccharides and its antioxidant activity [J]. *China Brewing*, 2016, 35(5): 157-161.]
- [36] 曾诗媛, 甘耀坤, 叶楚芳. 红菇提取液对大鼠小鼠抗氧化作用的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(16): 7464-7466. [ZENG S Y, GAN Y K, YE C F. Study on effect of *Russula* extracting solution on anti-oxidation of the elder mice [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(16): 7464-7466.]
- [37] LIU Y, ZHANG J J, MENG Z L. Purification, characterization and anti-tumor activities of polysaccharides extracted from wild *Russula griseocarnosa* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018: 109.
- [38] 任玉莹, 曾庆华, 孙小凡, 等. 红菇活性物质提取及体外抗肿瘤活性初探 [J]. *教育现代化*, 2019, 6(25): 203-205. [REN Y Y, ZENG Q H, SUN X F, et al. Extraction of active substances and *in vitro* antitumor activity of *Russula* [J]. *Education Modernization*, 2019, 6(25): 203-205.]
- [39] MATSUZAKI N, WU J, KAWAIDE M, et al. Plant growth regulatory compounds from the mushroom *Russula vinosa* [J]. *My-*

- coscience, 2016, 57(6): 404-407.
- [40] 魏杰, 张潇, 张国坤, 等. 红菇多糖对小鼠肝脏衰老的抑制效果[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(3): 50-54. [WEI J, ZHANG X, ZHANG G K, et al. Inhibitory effect of *Russula farinipes* Romell polysaccharide on mice liver senescence[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 35(3): 50-54.]
- [41] 甘耀坤, 陈晓白, 曾诗媛, 等. 红菇提取液抗运动性疲劳作用的研究[J]. 食用菌, 2010, 32(1): 66-67. [GAN Y K, CHEN X B, ZENG S Y, et al. Study on the anti-exercise fatigue effect of *Russula* extract[J]. *Edible Fungi*, 2010, 32(1): 66-67.]
- [42] LIU Q, TIAN G T, YAN H, et al. Characterization of polysaccharides with antioxidant and hepatoprotective activities from the wild edible mushroom *Russula vinosa* Lindblad[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(35): 8858-8866.
- [43] 刘胤. 野生红菇尼克酸对强烈运动小鼠心肌损伤恢复作用的影响研究[J]. 中国食用菌, 2019, 38(10): 28-32. [LIU Y. Effect of *Russula vinosa* Lindblad Nikic acid on myocardial injury recovery in exercise mice[J]. *Edible Fungi of China*, 2019, 38(10): 28-32.]
- [44] ACAY H, BARAN M F. Fatty acid compositions of total lipid, phospholipid and triacylglycerol fractions of the wild edible mushroom *Pleurotus ostreatus* and *Russula delica* with cytotoxic activities on prostate carcinoma cell lines[J]. *Medicine Science*, 2019, 8(3): 736-740.
- [45] YOON K, LEE T. *In vitro* antioxidant, anti-hyperglycemic, anti-cholinesterase, and inhibition of nitric oxide production activities of methanol and hot water extracts of *Russula rosacea* mushroom[J]. *Journal of Mushrooms*, 2015, 13(1):1-10.
- [46] OSAKI-OKA K, SUYAMA S, SAKUNO E, et al. Antifungal activity of the volatile compound isovelleral produced by ectomycorrhizal *Russula* fungi against plant-pathogenic fungi[J]. *Journal of General Plant Pathology*, 2019, 85(6): 428-435.
- [47] NISHIOKA J, HIRAMOTO K, SUZUKI K. Mushroom *Sparassis crispa* (Hanabiratake) fermented with lactic acid bacteria significantly enhances innate immunity of mice[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2020, 43(4): 629-638.
- [48] EWA J, ANETA S, WOJCIECH R, et al. Evaluation of the potential use of probiotic strain *Lactobacillus plantarum* 299v in lactic fermentation of button mushroom fruiting bodies[J]. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 2016, 15(4): 399-407.
- [49] LI Y Y, LIU H, QI H W, et al. Probiotic fermentation of *Ganoderma lucidum* fruiting body extracts promoted its immunostimulatory activity in mice with dexamethasone-induced immunosuppression[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, 141: 111909-111909.
- [50] CHEN Z Q, FANG X J, WU W J, et al. Effects of fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* GDM1.191 on the umami compounds in shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*)[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130398-130398.
- [51] EWA J, ANETA S, WOJCIECH R, et al. Effect of lactic acid fermentation on antioxidant properties and phenolic acid contents of oyster (*Pleurotus ostreatus*) and chanterelle (*Cantharellus cibarius*) mushrooms[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(2): 439-444.
- [52] 朱蕴兰, 陈宏伟, 陈安徽, 等. 蛹拟青霉发酵金针菇菇柄过程中主要活性物质及抗氧化活性的动态变化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(4): 19-26. [ZHU Y L, CHEN H W, CHEN A H, et al. Dynamic analysis of the main active components and antioxidant activity in fermentation process of flammulina velutipes waste stalk by *Paecilomyces militaris*[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(4): 19-26.]