

姬松茸多糖组成结构及提取技术研究进展

Research progress on constituent structure and extraction technique of the polysaccharide from *Agaricus blazei*

崔国梅 刘丽娜 田广瑞

CUI Guomei LIU Lina TIAN Guangrui

李顺峰 许方方 王安建

LI Shunfeng XU Fangfang WANG Anjian

(河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南 郑州 450002)

(Institute of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China)

摘要:概述了姬松茸多糖的组成结构及功能特性,列举和比较了多糖提取技术的研究实例及各提取方法的特点,指出了当前姬松茸多糖研究存在基础研究不系统、工艺条件不成熟、设备设施不完善、专种专用程度不高等问题,并对姬松茸多糖研究方向进行了展望。

关键词:姬松茸;多糖;组成结构;提取

Abstract: The composition, structure and functional properties of *Agaricus blazei* polysaccharide were summarized. The extraction techniques of polysaccharides and the features of different extraction methods were enumerated and compared. The problems in the research of *A. blazei* was discussed, such as unsystematic basic research, immature technological conditions, imperfect equipment and facilities, and low degree of specificity in seeds. In the end, the research direction of *A. blazei* polysaccharide was prospected.

Keywords: *Agaricus blazei*; polysaccharide; constituent structure; extraction

姬松茸(*Agaricus blazei*)又称巴西蘑菇、小松菇等,原产于巴西南部圣保罗的皮埃达德,属于担子菌门伞菌目蘑菇科蘑菇属,滋味鲜美浓郁,富含多糖、脂质、多肽、甾醇、人体必需氨基酸、矿物质、微量元素、纤维素和维生素

等多种成分^[1-3]。其多糖、多肽、多酚化合物、甾醇类等活性物质具有免疫调节、抗肿瘤、降血压、降血糖、抗氧化、抗菌消炎、改善骨质增生等功能特性^[4-7]。姬松茸的活性成分及其功能特性如表1所示。

研究拟综述姬松茸多糖的分子结构相应功能,且着重说明姬松茸多糖化学修饰与对应的功效及其功能活性的作用机理;列举几种多糖提取方法及工艺,比较姬松茸多糖提取方法的优缺点;详细概述姬松茸多糖在研究应用方面存在的问题,并从多角度对其未来研究方向进行展望,旨在深入阐述姬松茸的营养价值及保健功效,并为拓宽姬松茸的发展空间及加快姬松茸多糖的应用提供依据。

1 姬松茸多糖的组成结构

姬松茸多糖的化学结构是指其相对分子量、主链构成、多糖的一级结构、高级结构及结构修饰等。姬松茸多糖主要为 β -葡聚糖,还有 α -葡聚糖起能量储存的作用,另有杂多糖包括葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸、岩藻糖、鼠李糖、甘露糖等,而其功能活性成分主要为 β -D-葡聚糖、 β -(1,3)-D-葡聚糖、 β -(1,4)-D-葡聚糖及 β -(1,6)-D-葡聚糖等^[25]。

孙培龙^[8]利用醇分级沉淀法得到两种相对分子质量的姬松茸多糖,其中一种是由1,4糖苷键连接的吡喃型葡萄糖主链,且带少量蛋白的非淀粉 α -葡聚糖,另一种可能为带有吡喃型葡萄糖基的蛋白聚糖,这些多糖具有一定的抗肿瘤作用。Gonzaga等^[26]在姬松茸子实体多糖中分离到 β -葡聚糖,结构为 β -1,6-葡聚糖。魏红福等^[27]采取分级沉淀和凝胶过滤法从热水浸提的姬松茸多糖中分离出3种级分的多糖,其相对分子质量分别为 $>2.0 \times 10^6$,

基金项目:河南省重大公益专项项目(编号:201300110700);河南省科技攻关项目(编号:222102110287);河南省农业科学院自主创新项目(编号:2022ZC60)

作者简介:崔国梅,女,河南省农业科学院助理研究员,硕士。

通信作者:王安建(1969—),男,河南省农业科学院研究员,硕士。
E-mail: jgs1525@126.com

收稿日期:2022-10-13 **改回日期:**2023-05-06

表 1 姬松茸功能特性及有效成分
Table 1 Functional characteristics and active components of *A. blazei*

功能特性	有效成分
抑制肿瘤	多糖类(β-葡聚糖等) ^[8-10] 、多酚类、甾醇类 ^[10-11] 、杂多糖 ^[11] 、几丁质 ^[11] 等
降血糖	多糖类(β-葡聚糖等) ^[12] 、多酚类 ^[13] 、RNA 复合体 ^[11] 、多糖蛋白质复合物 ^[11] 、姬松茸提取物 ^[14] 等
降血压、降血脂	多糖类 ^[15] 、多肽类 ^[16] 、膳食纤维 ^[11] 、亚油酸等不饱和脂肪酸 ^[11] 等
抗炎抑菌	多糖类 ^[9,17-18] 、多肽类 ^[19] 、多酚类 ^[20] 等
免疫调节	多糖类 ^[10,21-23] 、多肽类 ^[19] 、甾醇类 ^[10] 等
改善骨质疏松	维生素 D ^[24] 、麦角甾醇类 ^[24] 等

1.4×10^6 , 3.8×10^5 , 其中一种级分的多糖主链为 α -(1→6)-D-吡喃型葡聚糖,并含少量结合蛋白。王夏梅^[11]利用柱层析法得到 7 个级分的姬松茸多糖:从结构上看,既有柔顺链高级构象,也有刚性链高级构象,还存在卷曲成球状高级构象;从成分上看,有 4 种为葡聚糖,2 种含有少量糖醛酸的葡聚糖,还有一种杂多糖(摩尔分数:葡萄糖 62.83%、半乳糖 28.43%、岩藻糖 5.54%、甘露糖 1.46%);从糖苷键上看:既有 α -(1→4)和 β -(1→6)相连,也有 α -(1→4)和 α -(1→6)连接,还有以 1:1 的 β -(1→6)和 β -(1→3)相连,此外还有 1 种多糖含有 β 和 α 两种构型,且单糖成分存在的岩藻糖由(1→2)和(1→6)相连,这些结构及构象体外检测具有促进脾细胞和巨细胞增殖的效果,呈现一定的免疫活性。Liu 等^[28]采用碱提法分离纯化出的姬松茸水溶性多糖,由(1→6)- β -D-吡喃半乳糖基、(1→6)- β -D-吡喃葡萄糖基和(1→3,6)- β -D-吡喃葡萄糖组成主链,在(1→3,6)- β -L-吡喃葡萄糖基的 O-3 之上,由(1→)- β -L-阿拉伯呋喃糖苷和(1→)- β -D-吡喃葡萄糖组成侧链。李晓等^[15]利用水提醇沉法提取姬松茸粗多糖,并采用 DEAE-纤维素离子交换法对姬松茸多糖进行层析分级,得到姬松茸酸性多糖级分(质量分数:葡萄糖 88.6%、半乳糖 2.4%、甘露糖 1.9%、鼠李糖 1.0%、半乳糖醛酸 0.5%、木糖 1.9%、阿拉伯糖 2.1%、岩藻糖 1.6%),这些酸性多糖对大鼠具有一定的降血脂作用。姬松茸多糖的提取制备工艺对其相对分子质量、单糖组成、单糖比例、糖苷键类型等影响显著,因此姬松茸多糖的组成结构与原料来源、提取工艺、纯化手段等密切相关。

有关香菇多糖的化学修饰研究相对较多,主要有羧甲基化、硫酸化、硫酸酯化、磷酸化、硒(Se)修饰等,修饰后的香菇多糖具有抗病毒、抗炎、抗氧化、抑制肿瘤、增强免疫力等功效^[29],但有关姬松茸多糖的化学修饰研究较少。磷酸化修饰姬松茸多糖对大肠杆菌和沙门氏菌具有一定的抑菌作用,且具有提升免疫力的作用^[30]。硫酸酯修饰的多糖可抑制单纯疱疹病毒和牛疱疹病毒,还可预防疱疹 2 型病毒感染生殖道,能抑制 HSV-1 和 HSV-2 的吸附、渗透和传播,提高抗肿瘤活性^[31-34]。为提高姬松茸多糖的活性功能,多从提取工艺及化学修饰两方面着

手研究。其中,特定的理化修饰会出现抗肿瘤、抗病毒性能减弱的现象,因此,并不是所有的结构修饰都能增强其功效。

姬松茸多糖的主链构成、相对分子量、多糖的一级结构(单糖组成、糖苷键类型、连接方式及分支程度等)、高级结构(空间构象)及多糖的结构修饰(理化修饰及生物修饰)是影响其功能特性的基础因素。姬松茸多糖的化学结构与其功能特性存在一定的构效关系,不同组成成分、结构、连接方式及结构修饰,其活性功能也不相同。姬松茸多糖的诸多组成结构造就了其具有多种优异的生物活性功能,比如抗肿瘤、免疫调节、降血糖、降血脂、抗炎、保肝等,且相应的作用机理也被广泛研究(见表 2)。这些组成结构及功能特性在开发保健品和新药方面具有重要的科学价值和临床潜力。

2 姬松茸多糖的提取

姬松茸多糖的提取工艺有热水、稀酸、稀碱、酶法、有机溶剂法等,且普遍采用超声、微波等作为辅助方式来提高多糖得率,但目前酶法提取姬松茸多糖得率相对较高,活性较好,也更高效。不同姬松茸多糖提取方法比较见表 3。

热水浸提法是最常见的提取方法,其原理是通过热作用使细胞质壁分离,使水更容易进入细胞促使多糖溶出,而稀酸稀碱虽然能够快速提取多糖,但因容易引起糖苷键断裂,多糖降解,提取率及活性低而应用较少。刘玮等^[18]利用热水浸提 sewage 法洗脱蛋白,再用 85% 醇沉、冻干后,得到姬松茸粗多糖中的总糖为 83.47%,该工艺下的多糖具有一定的抗炎活性,与李晓等^[15]的结果对比,不同工艺水提醇沉法得到的姬松茸多糖其功能特性并不一定相同。微波产生的热效应和高频电磁波不影响多糖的官能团但可以提高多糖提取率^[49],当姬松茸细胞吸收微波能量,胞内温度、压力上升超过其承受负荷时,细胞壁破裂从而释放出多糖。超声波的空化效应、击碎及热效应可以破坏细胞结构,增强传质及扩散能力,从而提高多糖提取率。付志英等^[50]在 80 W 超声波功率下提取得到的姬松茸粗多糖,其得率高达 19.70%。王宏雨等^[47]确

表 2 姬松茸多糖功能活性的作用机理

Table 2 Mechanism of functional activity of *A. blazei* polysaccharide

功能特性	作用机理	参考文献
抗肿瘤	通过抑制肿瘤细胞生长或增强机体免疫力来促进或诱导肿瘤细胞死亡,或是通过破坏细胞壁的形成从而直接杀伤肿瘤细胞	[35—37]
降血糖	通过促进胰岛素的分泌来抑制胰岛 α 细胞活性,或是通过保护胰岛 β 细胞而增加胰岛素敏感性,还可能是加速肝糖原代谢和促进机体对葡萄糖的利用	[12,38—39]
降血脂	一种说法是姬松茸多糖通过激活胆固醇代谢相关的信号通路并通过降低厚壁菌门/拟杆菌门的比例,降低瘤胃菌属菌群相对丰度,升高严格梭菌属、支原体菌属的菌群相对丰度,从而发挥调节血脂作用;另一种说法是姬松茸多糖的降血脂机制可能与其调控肝脏脂质代谢关键因子低密度脂蛋白、固醇调节原件结合蛋白-1C、胆固醇 7 α -羟化酶、B 类清道夫 F 等的表达有关,能够下调肝脏中固醇调节原件结合蛋白-1C 的表达,同时上调 B 类清道夫 F 的表达,减少脂质在肝脏中的积累,调节脂质代谢紊乱,达到降脂作用	[39,15]
抗炎	姬松茸多糖对大鼠关节肿胀、小鼠棉球肉芽肿亚急性炎症具有明显抑制作用,还可抑制哮喘小鼠气道炎症细胞,减轻气道的炎症反应,且在较高浓度时对炎症因子 TNF- α (肿瘤坏死因子)有显著的抑制作用	[40—41]
免疫调节	免疫调节作用通过增强淋巴细胞及吞噬细胞等免疫细胞的活性而促使免疫细胞分泌相应的细胞因子如干扰素等来提升免疫力,或者是通过激活 NF- κ B 信号转导通路,上调 iNOS 蛋白表达,促进 NO 释放,从而发挥免疫调节作用	[42—43]

表 3 不同姬松茸多糖提取方法比较^[44—51]

Table 3 Comparison of different extraction methods of *A. blazei* polysaccharide

提取方法	优缺点
水提取法	应用广泛,多糖结构稳定,投入低;提取量少,效率低,耗时长,易受水溶性蛋白影响
化学溶剂提取法	投入费用低,设备要求低;容易引起糖苷键断裂,多糖降解,进而影响多糖的提取率及活性,而且后续分离纯化难度大
酶提取法	条件温和,杂质少,损失少,可提取酶较脆弱,容易失活,条件严格;胞内多糖提取率高,损失少,方法优于酸法、碱法及水提法
微波辅助提取法	溶剂少,高效快速;微波加热不均匀,设备投入较高
超声波辅助提取法	时间短,温度低,可提取热敏成分;时间过长会破坏活性成分结构,降低提取率

定了超声波循环萃取法的最佳工艺为提取温度 40 ℃,超声功率 600 W,投料比 8%,提取时间 20 min。李健等^[48]研究发现,微波协同碱法的最佳工艺条件为氢氧化钠质量分数 7%、微波功率 640 W、提取时间 25 s、料液比 1 : 23 (g/mL),此条件下多糖提取率为 13.20%。梁婷等^[51]将粉碎的姬松茸子实体过筛,在 640 W 微波功率下提取 8 min,对过滤后的提取液进行浓缩干燥,其粗多糖得率达 9.04%。但也有研究^[52]表明,超声引起的空化作用通过一定的温度和剪切力来增加提取率,但同时也会改变多糖的结构及其理化特性。王艳等^[53]利用复合酶水解法($m_{\text{果胶酶}} : m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{木瓜蛋白酶}} = 140 : 3 : 400$),在 130 W 的超声功率下辅助提取 20 min,获得姬松茸粗多糖得率为 14.51%。杨丹妮等^[46]研究发现,超声波协同酶法的最佳工艺条件为料液比 1 : 35 (g/mL)、加酶量 3.3%、pH 6.0、酶解—超声温度 52 ℃、酶解—超声时间 50 min,

此条件下姬松茸基质多糖得率为 30.76%,与预测得率接近。目前,姬松茸多糖主要是从姬松茸中提取,未有工业化合成,为保证成本低、提取率高、节省省时高效,需将超声提取法、微波提取法和复合酶提取法等多种方法协同使用。

姬松茸多糖结构极为复杂,其化学成分、相对分子质量、结构及构象对其生物功能及活性均有影响。姬松茸多糖的提取率与提取方式、提取工艺条件等息息相关,为了提高姬松茸多糖得率,其提取研究也由单一的处理方式向复合的处理方式转变,由单一酶处理向复合酶处理转变,一方面弥补了单一提取方式提取时间长、提取率低的不足,另一方面对姬松茸多糖活性也有一定的影响。目前,由于姬松茸多糖结构复杂,提取纯化方面相对研究较少,能用于工业化生产的高效提取多糖的方法更是少之又少,提高姬松茸多糖的提取率、药用活性成分纯化与结构

鉴定成为阻碍多糖产品开发的关键短板。因此选择适宜的提取技术及工艺,研究新的提取手段,在不破坏多糖结构的同时提高提取率和纯度的方法还需进一步探索。

3 存在的问题及展望

3.1 存在的问题

姬松茸不仅味美,而且药用价值较高,尤其是姬松茸多糖在抗癌防癌、增强免疫力及抗疲劳等方面效果显著,且无毒副作用,因此以姬松茸为原材料,开发医用产品、保健品和功能性食品配料等具有良好的前景。但目前在姬松茸多糖功能特性及提取应用方面还存在一定的问题。

(1) 相关基础理论研究不成熟不系统。一方面,姬松茸多糖受相对分子质量、立体结构等多种因素的影响而呈现多样化的生理活性,而立体结构、构效关系、有效序列等理论方面的研究极为困难复杂,系统的理论研究及鉴定并不充实也不成熟。另一方面,姬松茸多糖作用机理不够深入系统,且多集中在体外或小白鼠试验阶段,体内吸收及作用机制研究不够深入,大多还处于“可能是”的推断阶段。此外,缺乏相关的抑制特性及系统热动力学研究,不同条件下(温度、浓度、pH、盐、光等)姬松茸多糖的化学特性不明了,与典型食物成分(蛋白质、脂肪、糖类等的相互作用特性不清楚。

(2) 姬松茸多糖提取纯化工艺条件不成熟或设备设施不完善。一方面,大部分提取纯化工艺仅限于理论及实验室研究,未能真正适应生产并形成规模,或是尚未形成标准化流程,操作复杂,成本偏高。另一方面,姬松茸多糖提取对设备参数要求较为精密,相应的设备欠缺或精密度不够,导致提取物纯度不够,活性不高,故大多数仅能应用于小型科研试验,理论或实验室研究所得数据与实际生产所得提取率有一定的差距,离产业化应用存在一定距离。

(3) 姬松茸育种及专种专用的研究程度不够。一方面,育种工作量大、野生姬松茸菌株较为罕见导致种质资源少、多糖高产菌种的定向育种技术缺乏等问题难题突出。另一方面,定向培育高产量高活性专用品种,充分挖掘基于多糖的特异资源方面,许多亟待解决的问题仍有待深入。此外,改良后的姬松茸种质资源缺乏共享机制,菌种仅与亲本开展了纵向对比,缺乏横向对比研究。

3.2 展望

对姬松茸多糖的研究及利用仍处于发展阶段,深入研究其作用机理,挖掘特异资源定向培育专用品种,开发高效低耗降本的提取技术,研发配套的高精尖设备设施或将是未来研究重点。

(1) 加强基础理论方面的研究。一方面,构建相对分子质量、空间结构、结构修饰与生理活性参数及成效等的系统数据,如基于多糖精细结构,研究不同成分的靶器

官、细胞信号通路,阐明多糖发挥活性功效的分子机制,探究其结构特性与免疫功能、抗癌等生物活性的构效关系,为多糖的提取纯化及检测提供基础理论支撑。另一方面,全面、深入、系统地研究姬松茸多糖及修饰物,明确其在抗肿瘤、抗炎、免疫调节、降糖降压等方面的作用机制,探索菌种、部位、菌龄及种植条件对活性功效的影响,为姬松茸食品、保健品和药品的开发提供相应指导。此外,综合运用生物工程、分子生物学、遗传学和代谢组学等生物技术手段,研究活性物质形成机制、抑制或激活作用机理、代谢通路及系统热动力学等,为活性物质累积、调控与应用提供理论支撑。

(2) 系统探究提取的工艺条件,开发或改良配套设备设施。一方面,构建姬松茸多糖的成套技术资料,完备工艺条件的同时,完善其功能特性的测定方法和尽可能地降低成本简化操作。另一方面,引入微波、酶法、超声波、超临界流体、超高压及高压脉冲电场等绿色辅助萃取技术,开发或改良相关提取及纯化设备,提高设备精密度、安全性及可操作性、降低提取成本,使研究成果能够顺利转化。此外,还可与企业实际情况相结合,将技术成果应用于企业规模化生产,以免研究成果局限于实验室。

(3) 定向培养高产菌株,专种专用。一方面,深入发掘特异的种质资源,繁育专用种质,成立核心种源基因库,构建姬松茸多糖有效的遗传转化系统,利用基因组定位编辑技术来改良育种,为其专用种质的繁育与优选创制奠定基础。另一方面,强化现代分子技术、分子生物学、遗传学等交叉融合,灵活结合诱变育种技术(物理诱变、化学诱变、复合诱变等)与杂交育种技术(甚至是远缘杂交),以满足研究及生产所需。此外,多渠道建立姬松茸优良种质交流共享平台及种质资源库,建立科学的管理办法,促进姬松茸多糖在育种上有所突破。

(4) 强化姬松茸多糖功能产品的开发利用。基于姬松茸多糖的构效关系,聚焦精准营养,开发具有靶向性功能的食品、保健品或药品,改变姬松茸产业的传统状况,提高附加值。

后续研究需将姬松茸多糖的提取、分离、纯化、活性研究、产品开发与临床应用融为一体,建立更加科学合理的功效评价体系,为姬松茸多糖效能的发挥和应用提供条件。随着科技进步,相关问题期望得到解决或者改善,姬松茸将得到更加充分的开发利用,释放该产业发展的巨大潜力。

参考文献

- [1] 范秀芝,姚芬,殷朝敏,等.外源诱导姬松茸麦角甾醇的合成[J].现代食品科技,2021,37(1):1-8.
FAN X Z, YAO F, YIN C M, et al. Exogenous induction of ergosterol synthesis in *Agaricus blazei* [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 1-8.

- [2] VITAL A C P, CROGE C, GOMES-DA-COSTA S M, et al. Effect of addition of *Agaricus blazei* mushroom residue to milk enriched with Omega-3 on the prevention of lipid oxidation and bioavailability of bioactive compounds after in vitro gastrointestinal digestion[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(6): 1 483-1 490.
- [3] KANG M, ZHAI F H, LI X X, et al. Total phenolic contents and antioxidant properties of buckwheat fermented by three strains of *Agaricus*[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 73: 138-142.
- [4] 顾可飞, 邵毅, 李晓贝, 等. 松茸与姬松茸营养成分差异性研究[J]. 农产品质量与安全, 2017(1): 73-78.
- GU K F, SHAO Y, LI X B, et al. Analysis on differences in nutritional ingredients between *Tricholoma matsutake* and *Agaricus blazei*[J]. Quality and Safety of Agro-products, 2017(1): 73-78.
- [5] LIU W, GE M, HU X, et al. The effects of *Agaricus blazei* Murill. polysaccharides on cadmium-induced apoptosis and the TLR4 signaling pathway of peripheral blood lymphocytes in chicken[J]. Biological Trace Element Research, 2017, 180(1): 153-163.
- [6] CARNEIRO A A J, FERREIRA I C F R, DUENAS M, et al. Chemical composition and antioxidant activity of dried powder formulations of *Agaricus blazei* and *Lentinus edodes* [J]. Food Chem, 2013, 138(4): 2 168-2 173.
- [7] VITAK T Y, WASSER S P, NEVO E, et al. The effect of the medicinal mushrooms *Agaricus Brasiliense*'s and *Ganoderma lucidum* (higher basidiomycetes) on the erythron system in normal and streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Int J Med Mushrooms, 2015, 17(3): 277-286.
- [8] 孙培龙. 姬松茸多糖的分离纯化、结构鉴定及抗肿瘤活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 112.
- SUN P L. Study on isolation, purification, structural identification and antitumor activity of polysaccharides from *Agaricus blazei murill*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 112.
- [9] 周宁. 姬松茸多糖对人体健康的改善作用及机制[J]. 中国食用菌, 2020, 39(1): 38-41.
- ZHOU N. The effect and mechanism of *Agaricus blazei* polysaccharide on human health[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(1): 38-41.
- [10] LARGATEAU M L, LARENA HERNANDEZ R C, RANNAL T R, et al. The medicinal *Agaricus* mushroom cultivated in Brazil: Biology, cultivation and non-medicinal valorization [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 92(5): 897-907.
- [11] 王夏梅. 姬松茸子实体多糖分离纯化、结构表征和免疫活性分析[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 1.
- WANG X M. The isolation, purification, structure characterization and immunological activity analysis of polysaccharides from the fruiting bodies of *Agaricus blazei* Murill.[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 1.
- [12] 李龙. 姬松茸对小鼠Ⅱ型糖尿病的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 17-18.
- LI L. Effect of *Agaricus blazei murill* on type Ⅱ diabetes mellitus in mice[D]. Suzhou: Soochow University, 2015: 17-18.
- [13] 魏奇. 姬松茸多酚降血糖活性及其作用机制的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020: 49-51.
- WEI Q. Study on the hypoglycemic activity and its mechanism of polyphenol from *Agaricus blazei* Murill fruiting bodies [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020: 49-51.
- [14] WEI Q, ZHAN Y S, CHEN B Z, et al. Assessment of antioxidant and antidiabetic properties of *Agaricus blazei* Murill. extracts[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 332-339.
- [15] 李晓, 卢学春, 李雨鑫, 等. 姬松茸多糖提取物对高脂血症大鼠降血脂作用研究[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(2): 56-64.
- LI X, LU C X, LI Y X, et al. Protective effect of *Agaricus blazei* polysaccharide extract on lipid lowering hyperlipidemia rats[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(2): 56-64.
- [16] 冯翠萍, 仵昱舟, 王将, 等. 姬松茸多肽质量指纹图谱分析及功能研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(2): 216-220.
- FENG C P, WU Y Z, WANG J, et al. The mass fingerprint analysis and function of *Agaricus blazei* Murill polypeptides[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(2): 216-220.
- [17] 吕娟, 白甫, 曹兰秀. 姬松茸多糖对糖尿病大鼠血清炎症因子和免疫功能的影响[J]. 中国老年学杂志, 2016, 36(1): 44-46.
- LU J, BAI F, CAO X L. Effects of *Agaricus subrufescens* polysaccharide on serum inflammatory factors and immune function in diabetic rats[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2016, 36(1): 44-46.
- [18] 刘玮, 杨继国, 任杰, 等. 姬松茸多糖 ABD 的结构表征及抗炎活性研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(5): 27-32, 26.
- LIU W, YANG J G, REN J, et al. Structure characterization and anti-inflammatory activity of polysaccharide ABD from *Agaricus blazei murill*[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(5): 27-32, 26.
- [19] 段国艳, 齐梦, 桂方晋, 等. 姬松茸子实体中活性肽的分离及其组成分析[J]. 中药材, 2008(6): 815-817.
- DUAN G Y, QI M, GUI F J, et al. Isolation and composition analysis of active peptides from *Agaricus blazei* Murill fruit body [J]. Chinese Medicinal Herbs, 2008(6): 815-817.
- [20] 侯玉艳, 桑兰, 游金坤, 等. 食用菌多酚的生物活性研究进展[J]. 中国食用菌, 2014, 33(6): 1-4.
- HOU Y Y, SANG L, YOU J K, et al. Biological activity research progress on polyphenol in edible fungus[J]. Edible Fungi of China, 2014, 33(6): 1-4.
- [21] 景彦萍. 三种食用菌子实体的营养成分及抗氧化性分析[D]. 太原: 山西大学, 2019: 6.
- JING Y P. Analysis of nutritional components and antioxidant activities of fruit bodies of three edible mushrooms[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019: 6.
- [22] LIN M H, LEE K M, HSU C Y, et al. Immunopathological effects of *Agaricus blazei* Murill polysaccharides against *Schistosoma mansoni* infection by Th1 and NK1 cells differentiation [J].

- International Immunopharmacology, 2019, 73: 502-514.
- [23] 蒋丽艳, 于智浦, 姚淑娟, 等. 姬松茸多糖 ABP-AW1 对免疫功能低下小鼠的免疫增强作用[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2017, 31(5): 393-398.
- JIANG L Y, YU Z P, YAO S J, et al. Immunity-enhancing effect of polysaccharide ABP-AW1 isolated from *Agaricus blazei* murill on immunosuppressive mice[J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2017, 31(5): 393-398.
- [24] 段县平, 马吉飞, 刘炳才. 姬松茸活性成分抗病作用的研究进展[J]. 动物科学与动物医学, 2004(5): 15-17.
- DUAN X P, MA J F, LIU B C. Research progress on *Agaricus blazei* active compound in resistance to diseases [J]. Animal Science & Veterinary Medicine, 2004(5): 15-17.
- [25] VALADARES D G, DUARTE M C, RAMIREZ L, et al. The therapeutic efficacy induced by the oral administration of *Agaricus blazei* Murill. against *Leishmania amazonensis* [J]. Parasitol Research, 2012, 111(4): 1 807-1 816.
- [26] GONZAGA M L C, MENEZES T M F, SUZA J R R D, et al. Structural characterization of β glucans isolated from *Agaricus blazei*, Murill. using NMR and FTIR spectroscopy[J]. Bioactive Carbohydrates & Dietary Fibre, 2013, 2(2): 152-156.
- [27] 魏红福, 孙培龙, 杨开, 等. 姬松茸子实体多糖分离纯化研究[J]. 中国食用菌, 2005, 24(5): 45-48.
- WEI H F, SUN P L, YANG K, et al. Study on isolation and purification of polysaccharide from fruiting body of *Agaricus blazei* murill[J]. Edible fungi of China, 2005, 24(5): 45-48.
- [28] LIU J C, SUN Y X. Structural analysis of an alkali-extractable and water-soluble Polysaccharide (ABP-AW1) from the fruiting bodies of *Agaricus blazei* Murill.[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(2): 429-432.
- [29] 牛天增, 许艳杰, 李知瑾, 等. 香菇多糖结构修饰研究进展[J]. 中国现代应用药学, 2015, 32(7): 895-900.
- NIU T Z, XU Y J, LI Z J, et al. Research advances of structural modification of lentinan[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2015, 32(7): 895-900.
- [30] 路晔. 磷酸化姬松茸多糖的制备及药理作用研究[D]. 天津: 天津农学院, 2016: 51.
- LU Y. Research on preparation and pharmacological effects of phosphorylated *Agaricus Blazei* Murill polysaccharide[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2016: 51.
- [31] CARDOZO F T G S, LARSEN I V, BRANDT C R, et al. In vivo anti-herpes simplex virus activity of a sulfated derivative of *Agaricus brasiliensis* mycelial polysaccharide [J]. Antimicrob Agents Chemother, 2013, 57(6): 2 541-2 549.
- [32] DE SOUSA CARDOZO F T G, CAMELINI C M, MASCARELLO A, et al. Antiherpetic activity of a sulfated polysaccharide from *Agaricus brasiliensis* mycelia[J]. Antiviral Research, 2011, 92(1): 108-114.
- [33] CARDOZO F, LARSEN I V, CARBALLO E V, et al. In vivo anti-herpes simplex virus activity of a sulfated derivative of *Agaricus brasiliensis* mycelial polysaccharide[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2013, 57(6): 2 541-2 549.
- [34] YAMAMOTO K A, GALHARDI L C. Antiherpetic activity of an *Agaricus brasiliensis* polysaccharide, its sulfated derivative and fractions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 52: 9-13.
- [35] GRINDER B, HETLAND G, JOHNSON E. Effects on gene expression and viral load of a medicinal extract from *Agaricus blazei* in patients with chronic hepatitis C infection[J]. International Immunopharmacology, 2006, 6(8): 1 311-1 314.
- [36] VERZOSA JUNIOR D, OLIVEIRA N J F D, DUARTE E R, et al. Serum hepatic biochemistry and electrophoretic protein profile of healthy and Ehrlich tumor-bearing mice treated with extracts of *Agaricus blazei* Murill.[J]. Semina: Ciencias Agrarias, 2016, 37(2): 763-772.
- [37] LIU Y, ZHANG L, ZHU X, et al. Polysaccharide *Agaricus blazei* Murill stimulates myeloid derived suppressor cell differentiation from M2 to M1 type, which mediates inhibition of tumor immune-evasion via the Toll-like receptor 2 pathway[J]. Immunology, 2015, 146(3): 379-391.
- [38] 陶茹莹, 张辉. 地龙蛋白和姬松茸多糖的药理研究[J]. 吉林中医药, 2017, 37(7): 706-708.
- TAO R Y, ZHANG H. Pharmacological study on earthworm protein and *Agaricus blazei* Murill [J]. Jilin Journal of Chinese Medicine, 2017, 37(7): 706-708.
- [39] 李雨鑫. 姬松茸多糖的降脂作用及其机制研究[D]. 吉林: 北华大学, 2020: 45.
- LI Y X. Study on lipid-lowering effect and mechanism of *Agaricus blazei* Murill polysaccharides [D]. Jilin: Beihua University, 2020: 45.
- [40] 赵容杰, 赵正林, 王丹, 等. 姬松茸多糖的抗炎作用[J]. 延边大学学报, 2004(1): 19-22.
- ZHAO R J, ZHAO Z L, WANG D, et al. Anti-inflammatory effects of *Agaricus blazei* Murill polysaccharide [J]. Journal of Medical Science Yanbian University, 2004(1): 19-22.
- [41] 门继光. 基于 MAPK 和 NF- κ B 信号通路的姬松茸多糖抑制哮喘气道炎症的实验研究[D]. 延吉: 延边大学, 2015: 27-32.
- MEN J G. Experimental study on the inhibition of MAPK and NF- κ B signaling pathway of the polysaccharide on airway inflammation of asthma[D]. Yanji: Yanbian University, 2015: 27-32.
- [42] 李雨鑫, 盛瑜, 杜培革, 等. 姬松茸多糖的提取及其对 D-半乳糖诱导衰老小鼠的免疫调节作用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 295-299, 308.
- LI Y X, SHEGN Y, DU P G, et al. Extraction of *Agaricus blazei* polysaccharides and its immunomodulatory effect on D-galactose-induced aging mice[J]. Science and technology of Food Industry, 2019, 40(12): 295-299, 308.
- [43] 房雷雷, 赵肖通, 张彦青, 等. 姬松茸多糖诱导巨噬细胞释放 NO 的机制[J]. 食品与机械, 2018, 34(5): 16-19.
- FANG L L, ZHAO X T, ZHANG Y Q, et al. mechanism of

- Agaricus brasiliensis polysaccharides inducing the NO release in macrophages[J]. Food & Machinery, 2018, 34(5): 16-19.
- [44] 徐勇. 姬松茸碱提水溶性多糖提取、结构鉴定及抗氧化活性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 16, 30, 53-54.
- XU Y. Extraction, structural elucidation and antioxidant activity of water-soluble polysaccharides alkali extracted from Agaricus blazei Murill.[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 16, 30, 53-54.
- [45] 喻文丽, 樊永红, 迪拉热·海米提, 等. 食用菌活性成分绿色提取方法研究进展[J]. 中国食用菌, 2020, 39(9): 8-14.
- YU H L, FAN Y H, DILARE H M T, et al. Research on green method for extracting active ingredients of edible fungi[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(9): 8-14.
- [46] 杨丹妮, 汪振炯, 吕胜男. 超声波协同酶法提取姬松茸基质多糖及其抗肿瘤活性研究[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 212-217.
- YANG D N, WANG Z J, LU S N. The optimal extraction technology and anti-tumor effect of Agaricus blazei Murill polysaccharide by cellulase assisted with ultrasonic method [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(11): 212-217.
- [47] 王宏雨, 张迪, 林衍铨, 等. 姬松茸多糖超声波循环提取工艺研究[J]. 中国食用菌, 2017, 36(4): 45-47.
- WAGN H Y, ZHANG D, LIN H Q, et al. Optimization on ultrasonic circulating extraction of polysaccharide from Agaricus blazei Murill[J]. Edible Fungi of China, 2017, 36(4): 45-47.
- [48] 李健, 孙宁, 刘宁, 等. 微波协同碱提法优化提取姬松茸多糖工艺[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 67-74.
- LI J, SUN N, LIU N, et al. Optimization of Agaricus blazei Murill polysaccharides microwave-assisted alkali extraction[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 67-74.
- [49] 景永帅, 孙丽丛, 程文境, 等. 微波辅助法提取多糖的研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 228-232.
- JING Y S, SUN L C, CHENG W J, et al. Research progress in microwave-assisted extraction of polysaccharides [J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 228-232.
- [50] 付志英, 林花, 丁玲. 应用超声波技术提取姬松茸多糖工艺的优化研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(10): 92-95.
- FU Z Y, LIN H, DING L. Research on optimization of extraction process of polysaccharides from Agaricus blazei by using ultrasonic technology[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2015, 27(10): 92-95.
- [51] 梁婷, 赵亚男, 刘爱丽, 等. 微波法提取姬松茸多糖的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(4): 236-238.
- LIANG T, ZHAO Y N, LIU A L, et al. Study on extraction of polysaccharides from Agaricus blazei Murill by microwave [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(4): 236-238.
- [52] CUI R, ZHU F. Ultrasound modified polysaccharides: A review of structure, physicochemical properties, biological activities and food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 491-508.
- [53] 王艳, 聂志勇, 贺瑛, 等. 超声波协同复合酶法提取姬松茸多糖[J]. 天然产物研究与开发, 2009, 21(5): 866-870.
- WANG Y, NIE Z Y, HE Y, et al. Study on the extraction of Agaricus blazei Murill polysaccharide with compound enzymes under ultrasonic wave [J]. Natural Product Research and Development, 2009, 21(5): 866-870.
-
- (上接第 168 页)
- [16] BUCHANAN C M, HYATT J A, LOWMAN D W. 2D-NMR of polysaccharides: Spectral assignments of cellulose triesters [J]. Macromolecules, 1987, 20(11): 2 750-2 754.
- [17] WANG X M, SUN R G, ZHANG J, et al. Structure and antioxidant activity of polysaccharide POJ-U1a extracted by ultrasound from ophiopogon japonicus[J]. Fitoterapia, 2012, 83: 1 567-1 584.
- [18] 陈春丽. 哈萨克药材别克参多糖分离纯化、抗炎免疫活性及药材质量标准研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2012: 29-30.
- CHEN C L. Studies on the Structure, immunomodulatory and anti-inflammatory activities of Erythronium sibiricum bulb polysaccharides and Erythronium sibiricum bulb's Quality Standard[D]. Urumqi: Xinjiang medical University, 2012: 29-30.
- [19] 李楠, 张香飞, 杨春杰. 板枣多糖初级结构表征及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 24-28, 49.
- LI N, ZHANG X F, YANG C J. Primary structure characterization and antioxidant activity of polysaccharide from Zizyphus jujuba cv. Banzao[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 24-28, 49.
- [20] 罗建蓉, 王诗雨, 蒋丽珠, 等. 琵琶甲多糖的提取分离、结构表征及生物活性研究[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(8): 1 057-1 063.
- LUO J R, WANG S Y, JIANG L Z, et al. Study on the extraction, separation, structural characterization and biological activities of polysaccharides from blaps rynchopetera fairmaire [J]. Chinese Journal of Modern Drug Application, 2023, 40(8): 1 057-1 063.
- [21] 龚雯, 唐婕, 韦雅渊, 等. 金花茶多糖分离纯化、结构表征及其体外抗氧化性[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 184-190.
- GONG W, TANG J, WEI Y Y, et al. Isolation, purification, structural characterization of polysaccharide from camellia nitidissima chi and its antioxidant activities in vitro [J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 184-190.
- [22] 杭书扬, 杨留枝, 史苗苗, 等. 山药皮残渣多糖结构表征及抗氧化活性测定[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 153-158, 206.
- HANG S Y, YANG L Z, SHI M M, et al. Characterization and antioxidant activity determination of polysaccharide from yam peel residue[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 153-158, 206.
- [23] HU M, CUI N, BO Z X, et al. Structural determinant and its underling molecular mechanism of STPC2 related to anti-angiogenic activity[J]. Marime Drugs, 2017, 15(2): 1-12.