



向瑞琪,谢 锋,李占彬. 食用菌多糖提取、检测、生物活性与机制研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2021(7):109-115.

食用菌多糖提取、检测、生物活性与机制研究进展

向瑞琪¹,谢 锋²,李占彬²

(1. 贵州医科大学 公共卫生学院,贵州 贵阳 550025;2. 贵州省分析测试研究院,贵州 贵阳 550000)

摘要:食用菌多糖具有多种活性,但其结构复杂,提取和分析方法繁多且各有特色。为了促进食用菌多糖工业化生产,本文重点介绍了近 5 年食用菌多糖的提取、分离、纯化和结构检测方法的优缺点以及食用菌多糖生物活性的作用机制,分析得出虽然食用菌多糖分析方法的研究众多,但因其具有复杂性,能应用于工业化生产的多糖提取的方法不多,因此还需努力探索不破坏多糖结构的同时提高提取率和纯度的方法。

关键词:食用菌多糖;提取方法;生物活性

食用菌指的是能够食用的大型真菌,通常称为蘑菇^[1]。多糖又称多聚糖,是由至少超过 10 个单糖分子通过糖苷键连接缩合而成的一类复杂结构且分子量庞大的天然高分子聚合物。食用菌中的重要活性成分是多糖,在真菌菌丝体、子实体、菌糠或发酵液中含有量较多^[2]。多糖具有降血糖、降血脂、抗氧化自由基、抗肿瘤、抗疲劳、抗衰老、调节免疫力、保护胃粘膜^[3]等生物活性。真菌多

糖具有糖蛋白含量少,毒副作用小^[4]等优点,因此真菌多糖可被添加在药品、食品、化妆品、保健品等产品中进行开发应用,市场前景非常广阔^[5]。本文除了对近 5 年食用菌多糖的提取、分离、纯化和结构检测 4 个方面的常用方法阐述以外,还加入了闪式提取法、亚临界水提法、壳聚糖絮凝法等新方法,并对其生物活性的作用机制进行系统阐述,为选择食用菌多糖的提取、分离、纯化和结构检测方法提供依据,并优化各类方法以便为工业化生产提供思路,促进科研人员对食用菌多糖的进一步研究开发利用。

1 食用菌多糖提取方法

由表 1 可知,热水浸提法和超声波提取法由于操作简单和成本较低是最常使用的,而闪式提取法、亚临界水提取法等新方法用于食用菌的多糖提取还较少。

收稿日期:2021-03-29
基金项目:贵州省科技计划项目科技重大专项(农业)(黔科合重大专项字 ZWCQ[2019]3013-5);贵州省科技计划项目(二级课题)(黔科合支撑[2019]2451-8-3)。
第一作者:向瑞琪(1996—),女,在读硕士,从事食品安全研究。E-mail:351763887@qq.com。
通信作者:谢锋(1979—),男,博士,研究员,从事食品检测技术、环境检测技术、食品快速检测技术和实验室信息化管理系统等研究。E-mail:xiefeng@gzata.cn。

Curriculum System Construction of Database System Principles for Agricultural Universities from the Perspective of Integration and Fusion

HU Xiao-hong, XI Lei, CHEN Bao-gang, LIU Qian

(College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In view of the problems in the current curriculum system of database system principles for agricultural universities, such as insufficient curriculum expansion, low adaptability to the development of new agricultural science, and limited support for students' employments, we carried out systematic reform in teaching contents, methods and resources focusing on the social needs and the background of agricultural big data, which formulated a coherent curriculum system of database system principle basis, application, frontier, cultural literacy and cross innovation. The curriculum system construction is considered from the systematic, scientific, interdisciplinary, developmental and personalized aspects to cultivate students' systematic ability, build their holistic view and improve their insights, which is presented to provide database technology support for the cultivation of new agricultural talents serving modern agriculture.

Keywords: integration and fusion; new agricultural science; database system principles

表 1 各种食用菌多糖提取方法的原理与优缺点

提取方法	原理	优点	缺点
热水提取法	热力质壁分离,水分子扩散	简单、低成本	时间长,提取率较低
碱提取法	碱使细胞壁吸水膨胀破裂,游离出多糖	时间短、提取率高、生物活性保存较好 ^[6]	腐蚀容器、废液对环境有害 ^[7]
酶提取法	酶水解细胞壁,溶出细胞内有效成分的	时间短、提取率高、不易破坏多糖结构 ^[8]	增加蛋白质含量、酶不易保存、价格昂贵 ^[9]
超声波提取法	超声波破坏细胞	时间短、提取率高	温度高易破坏多糖结构
微波提取法	微波让细胞内部压力超过细胞壁膨胀的能力,流出细胞中的活性成分	时间短、提取率较高、操作简单 ^[10]	温度高易破坏多糖结构,提取溶剂要求高 ^[11]
闪式提取法	破坏细胞组织,扩散多糖和生物活性物质	省时、高效、环保、同时提取蛋白质	高温易破坏多糖结构,实验条件需优化
亚临界水提取法	温度调节水状态提取	时间短、环保	高温易破坏多糖结构
超临界流体萃取	以类似气体的穿透力和液体的溶解度提取出多糖	提取率高、环保、操作简单 ^[12]	设备投入费用高

1.1 热水提取法

多糖是极性大分子,可用水作溶剂提取,再沉淀粗提液中的活性多糖^[13]。魏晓梅等^[14]用热水法提取 3 种云南野生食用菌多糖,通过正交试验得出楚雄青头菌粗多糖含量在这 3 种野生食用菌中最高为 6.18%。郑婷婷等^[15]优化热水浸提法提取黄皮疣柄牛肝菌多糖,在 51℃下提取 3.1 h 得多糖的提取率为 16.67%。热水提取法操作简单,低成本,是传统的提取方法,非常适合大规模的工业生产。但乙醇或丙酮用量大,长时间在高温下提取会影响其生物活性,通常还会使用其他方法辅助提取来减少提取时间,提高提取率。

1.2 超声波提取法

超声波提取法是声波产生高速、强烈的空化效应和搅拌作用,破坏食用菌的细胞^[16]。蒋益等^[17]采用超声波辅助提取金耳多糖 16 min,金耳多糖单位体积提取量为 2.85 g·L⁻¹。Chen 等^[18]用松茸提取多糖,以多糖提取率和抗氧化活性为指标,对比水提取法、超声提取法、微波提取法和酶提取法这 4 种多糖提取方法,研究发现超声波提取法的多糖提取率和抗氧化活性最高。虽然超声波提取法提取时间很短、提取率高,但是超声波提取时温度很高,可能会破坏多糖的结构,从而影响生物活性。

1.3 闪式提取法

闪式提取法是将待提取的食用菌经高速剪切力、搅拌力迅速被粉碎成细微颗粒,细胞组织被破坏。又由于局部负压渗透作用,使多糖和生物活性物质迅速扩散出来,达到提取效果^[19]。秦令祥等^[20]利用正交试验法优化香菇多糖的闪式提取工艺,得出提取 3 次,每次 90 s 时多糖的提取率为 6.83%。张雄等^[21]采用闪式提取法同步提取

猴头菇中多糖和蛋白质,提取时间 70 s,粉体粒度 90 目,猴头菇多糖提取率达(9.24±0.15)%,蛋白质提取率为 1.33%。该方法具有省时、节能、高效、环保,可同步提取多糖和蛋白质,且能有效保护天然产物的活性成分等优点。但对时间和粉体粒度需要控制,时间太长易使提取刀头温度升高破坏多糖结构;粒径过小时,其表面能较大且微粒间相互黏连,不利于多糖的溶出。

1.4 亚临界水提取法

将水加热至沸点以上,临界点以下,并控制系统压力使水保持为液态,这种状态的水被称为亚临界水,通过温度调节来控制提取速度^[22-23]。包怡红等^[24]利用响应面法优化亚临界水提取法提取木耳多糖的最佳提取条件为温度 152℃,时间 26 min,液料比 131:1 (mL:g),提取压力 1.0 MPa,此时木耳多糖提取率为 24.51%。孙林超^[25]以香菇为原料,采用亚临界水提取方法提取多糖,高效液相色谱法测含量。在最佳条件 110℃提取 7 min,提取 3 次,得样品多糖含量为 151 mg·g⁻¹。亚临界水提法采用纯水作萃取剂,不用或很少用有机溶剂,因此它是一种绿色环保的方法,提取时间也很短。但亚临界水萃取技术还处于起步阶段,有较多的技术需要突破,还未应用于工业生产^[25]。其次,高温高压下可能会影响物质的性质或使结构发生转变。

2 食用菌多糖的分离及纯化方法

通常经简单提取后得到的食用菌粗多糖中还包含蛋白、色素以及无机盐等,还需采用多种技术手段去除杂质,对其进一步纯化精制。

2.1 多糖脱蛋白

2.1.1 Seavage 法 蛋白质在有机溶剂中易变性,Seavage 法可用于多糖脱蛋白。郭淑臻等^[26]研

究了灰树花多糖 Sevage 法除蛋白的工艺,在单因素试验基础上采用响应面法确定了灰树花多糖 Sevage 法除蛋白的工艺条件:多糖溶液与 Sevage 试剂体积比 3.073:1,氯仿与正丁醇体积比 4.016:1,振摇时间 25.59 min,脱蛋白率为 37.95%,多糖含量为 78.32%。Sevage 方法简单,反应温和,成本较低,不会改变多糖结构,但完全脱除蛋白需要重复多次操作,这样会损失多糖。

2.1.2 三氯乙酸法 三氯乙酸是阴离子型沉淀剂,在低于蛋白质等电点的 pH 时,酸根与带正电荷的蛋白质形成不溶性盐而沉淀^[27]。王新嘉等^[28]采用 Sevage 法、盐酸-乙醇等电点法和三氯乙酸法,分析比较其对平菇多糖脱蛋白效果的影响。综合考虑蛋白质脱除率和多糖保留率两因素的影响,以三氯乙酸法效果最好。蛋白质脱除率为 89.5%,多糖保留率为 78.4%。三氯乙酸法较 Sevage 除蛋白法的去除效果好很多,不需要重复进行,所以不会过多损失多糖,适合大批量生产的工厂使用,但剧烈的反应可能影响多糖的结构。

2.1.3 盐酸法 当加入盐酸使 pH 接近蛋白质的等电点时蛋白质分子颗粒在溶液中没有相同电荷的相互排斥,分子之间的作用力减弱,于是凝聚沉淀就可将其去除。常飞等^[29]在贵州野生甜藤的多糖提取与脱蛋白研究中 HClO₄ 法脱蛋白效果最佳,经 3 次脱蛋白处理后蛋白脱出率为 94.78%,多糖损失率为 15.14%。盐酸法去除蛋白效果较好,且费用较低,适合工业生产,但沉淀时间长,对多糖有一定损失。

2.1.4 壳聚糖絮凝法 壳聚糖是一种天然物质,对蛋白质有络合和吸附作用,以沉淀的形式去除蛋白质。易晓敏^[30]研究了新型的壳聚糖法脱蛋白,其最佳工艺为料液比 50:1,4℃ 放置 2 h;该工艺条件下蛋白去除率为(60.11±0.47)%,猴头菇多糖损失率为(11.16±0.48)%,壳聚糖残留率为(1.01±0.005)%。与 Sevage 法对比,壳聚糖法的蛋白质去除率提高了 11.67%,多糖损失率降低了 80.87%。此方法多糖的保留率高,无毒无害,但会引入壳聚糖。

2.2 多糖脱色素

经过上述的提取法得到的去蛋白多糖一般会带有黄色、棕色或褐色等颜色,这时便可利用活性炭法、过氧化氢法、大孔树脂法等去除色素。活性炭具有微晶结构,微晶排列完全不规则。晶体中有微孔、过渡孔和大孔,使它具有很大的内表面,因此具有良好的吸附性,可以吸附有机色素等。张

达成等^[31]设计单因素试验和正交试验,得出在 pH5.0、温度 60℃ 时,使用 1.5% 活性炭量脱色银耳多糖 45 min,脱色率为 87.6%,多糖保留率为 83.1%。吸附反应的物理过程很温和,而且可再生较为环保,但活性炭的粒度、温度和 pH 等对脱色效果有一定影响,在非极性溶剂中脱色效果较差。

过氧化氢对酚类及其衍生物类色素有较好的去除效果,但过氧化氢的氧化性较强,有可能会破坏多糖的结构。石硕等^[32]应用响应面试验法对 H₂O₂ 脱色神仙草叶多糖工艺进行优化,得到 H₂O₂ 脱色神仙草叶多糖的最佳工艺为 H₂O₂ 体积分数 40%,温度 50℃,时间 3 h。在此条件下,多糖的脱色率与保留率分别为 45.3% 和 78.2%。

大孔树脂是一种聚合物吸附剂,对有机物具有浓缩、分离作用的高分子聚合物。内部具有较高的孔隙率,孔径也大。刘力萍等^[33]分别采用活性炭、过氧化氢和大孔树脂 D941 对灰树花胞外多糖进行脱色。大孔树脂 D941 脱色的脱色率为 74.24%,多糖保留率为 61.87%。大孔树脂理化性质稳定,不溶于酸、碱及有机溶剂,不受无机盐类及强离子低分子化合物的影响。同时由于多孔结构对分子大小不同的物质具有筛选作用等优点。缺点是影响解吸条件的因素较多,需要前处理,可能会有残留,操作复杂,不利于工业化的大规模生产。

2.3 多糖的纯化

2.3.1 沉淀法 通过加入能互溶的溶剂,改变溶剂的极性,从而改变不同分子量多糖的溶解度,从而达到纯化的效果。一般有乙醇分步沉淀法,盐析法等,前者是最常用的沉淀法。张玉娜等^[34]以香菇为对象,采用正交试验优化提取工艺条件。试验结果表明最佳工艺提取条件为乙醇浓度 90%、温度 75℃、提取时间 3 h、pH7.0,香菇多糖的提取率为 27.12%。

盐析法通常是在多糖提取液中加入中性盐(如氯化钠,氯化钾,硫酸铵等)按溶解度的大小将多糖依次进行分离。此法安全便捷、快速有效,蛋白脱除率和多糖回收率较高。孙文怡等^[35]利用响应面法对猴头菌子实体的纯化工艺进行优化,得出利用硫酸铵法去除多糖中杂蛋白的条件为 pH5.01,硫酸铵饱和度为 41%,溶液浓度为 4%。但沉淀法仅适合于溶解度相差较大的多糖组分。

2.3.2 膜分离法 膜分离技术是用天然或人工

合成的高分子薄膜,通过外界能量或化学位差推动多糖溶液进行分离的一种纯化方法。由于膜具有选择性,因此可以应用在物质的分离纯化中。依据截留分子量的不同可分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜和反渗透膜。陈思^[36]运用膜技术对猴头菇多糖、低聚糖的分离工艺进行研究。结果表明微滤(PES 0.1 μm)+纳滤(PA 300 Da)工艺的分离效果较好,其粗多糖得率为 10.08%,纯度 43.01%,提取液中多糖保留率 80.34%。膜分离法纯化多糖纯化度高、能耗和成本低,不需加热从而保护多糖结构,操作简单,适合工业化生产。但多糖具有一定黏度易使膜元件堵塞,不易清洗。

2.3.3 柱色谱法 也称柱层析,是根据多糖溶液中其他成分在固定相和流动相中分配系数不同,经多次反复分配将各成分分离出来^[37]。胡亚平等^[38]采用 DEAE-52 色谱柱分离纯化粗多糖,结果将硫磺菌子实体分离得到 3 种多糖组分(LSPS-I、LSPS-II、LSPS-III)。柱色谱法的设备简单,选择性好,易于自动化。但柱子相对较小,上样量少,分离纯化速度慢,成本高,大多局限于实验室使用。

3 食用菌多糖结构鉴定及测定

首先,需明确食用菌多糖的主要组成。采用完全水解、衍生化以及气相色谱或液相质谱等方法获得其单糖(包括糖醛酸等)组成和比例,同时还需采用高效凝胶色谱法或高效空间排阻色谱法测定多糖的分子质量等准确信息^[39]。高碘酸钠氧化、Smith 降解以及甲基化结合气相质谱法等确定糖链中单糖的连接顺序、连接位点、糖苷键及取代官能团类型^[40]。通常,利用红外光谱测定所含吡喃型、呋喃型糖环形式;一维及二维核磁共振波谱确定不同糖残基的连接顺序,以获得多糖的一级结构特性^[41]。最后利用刚果红实验分析多糖的三螺旋结构,原子力显微镜和扫描电镜对多糖分子的表现形貌进行观察^[42]。

3.1 化学分析方法

3.1.1 酸水解 完全水解是将多糖在酸的作用下,使得糖苷键完全断裂。目前常用的三氟乙酸的氧化性不强,水解条件易控制,广泛应用于真菌多糖的单糖水解试验中。首先加入酸溶液使多糖结构中的糖苷键断裂,使单糖分子解脱游离,再衍生化进入高效液相色谱或气相色谱对水解液中的单糖进行分析测定,以确定单糖的组成及摩尔比。部分酸水解一般用来判断多糖的主链和分支^[43]。

周礼元^[44]利用高效液相色谱测定金福菇多糖 TLH-G 的分子量为 4.1×10^3 Da,证明了在金福菇多糖中,分子量越小,抗氧化能力越强。

3.1.2 高碘酸氧化和 Smith 降解 由于高碘酸可以选择性的与多糖中连二羟基中的 C-C 键或连三羟基发生反应,生成醛和甲酸,因此糖苷键的类型和比例可以通过反应前后生成量之差来判断。Smith 降解是高碘酸氧化的还原过程,用气相色谱进行分析反应产物。钱礼顺^[45]通过高碘酸氧化和 Smith 降解分析发现,草菇子实体多糖一级结构中含有 α -吡喃糖苷键,为 1 \rightarrow ,1 \rightarrow 4 和 1 \rightarrow 6 键型。

3.1.3 甲基化分析 甲基化分析就是将多糖中羟基完全甲基化,单糖残基从食用菌多糖中释放出来,再经 NaBH_4 还原,最后乙酰化运用气相色谱-质谱联用法分析判断食用菌多糖中糖苷键的位置以及所占的比例。朱振元等^[46]通过紫外分光光度计,比旋光度测定,傅里叶红外技术,高碘酸氧化-史密斯降解,甲基化分析,刚果红实验等方法分析滑子菇多糖的结构。结果表明,滑子菇多糖的比旋光度为 $+120^\circ$,具有三股螺旋结构,主要由葡萄糖和甘露糖组成,摩尔比为 4.24:1.00。滑子菇多糖的主链由(1 \rightarrow 3)连接的葡萄糖和(1 \rightarrow 3)连接的甘露糖组成,(1 \rightarrow 3,6)连接的葡萄糖,(1 \rightarrow 3,6)连接的甘露糖和 T-葡萄糖的支链以及多酚类构成。因此,滑子菇多糖是多糖和多酚的复合物。

3.2 仪器分析法

3.2.1 红外光谱分析法 红外光谱分析法是根据多糖在特定波长上有特征吸收峰,这些独有的红外吸收光谱是由多糖中含有的官能团、异头碳的类型(α 型或 β 型)等在决定的^[47],由此可以得到多糖结构信息。目前应用较多的是现代近红外技术和傅里叶变换红外光谱技术。红外光谱法具有取样量少、操作简单、快速、特征性强等优点,并且其结果有较高的可重复性和准确性^[48]。张全才等^[49]对棘托竹荪红外光谱特征进行表征显示竹荪多糖为典型的 α -型葡聚糖。

3.2.2 核磁共振波谱法(Nuclear magnetic resonance, NMR) 核磁共振波谱法可用来确定多糖结构中重复单元的单糖组成以及糖苷键类型。它具有前处理操作简单以及不破坏样品的特点,但设备以及日常维护价格昂贵。主要包括一维核磁共振(1D-NMR)和二维核磁共振(2D-NMR)^[50]。朱森等^[51]借助光谱技术和核磁共振波谱法对两

种竹荪多糖结构进行研究,¹HNMR 谱结果显示,一种竹荪多糖由 4 种单糖构成,另一种由 3 种单糖组成。

3.2.3 气相色谱和液相色谱法 色谱法中的流动相是气体时,即为气相色谱;流动相是液体时,即为液相色谱^[52]。由于每种分子通过色谱柱的速率不同,因此多糖溶液中不同组分的保留时间也不同,以此判断多糖组成,但是多糖样品需要衍生化才能进入仪器^[53]。商佳琦等^[54]采用高效液相色谱法测定了 5 种食用真菌多糖的单糖组成,结果表明:银耳多糖和黑木耳多糖主要由甘露糖(38.4%~44.4%)和葡萄糖(24.4%~28.2%)组成。杏鲍菇多糖、金针菇多糖、猴头菇多糖主要由葡萄糖(51.5%~59.9%)和半乳糖(18.9%~28.4%)组成。气相色谱和液相色谱法用量少,分离效果好,重复性好,准确判断各组分物质,但是多糖样品需要衍生化才能进入仪器。

3.2.4 质谱法及色谱-质谱联用法 质谱法是测量离子的电荷与质量之比的方法,适合于分析物质结构。串联色谱是分离科学方法中的一项突破,可以提供更详细丰富的结构信息。郑恒光等^[55]采用气相色谱法测定单糖组成,气相色谱-质谱联用法测定糖苷键链接方式,得出杏鲍菇菇头粗多糖由占 84.4%的葡萄糖组成,最大的一个峰的分子质量为 3.816×10^{-7} Da,糖苷键主要链接方式由占 42.7%的 1,3-糖苷键和占 35.5%的 1,6-糖苷键组成。质谱法用量少,灵敏度更高,分析速度快,串联色谱技术使分离效果更佳,但对进样的样品有一定要求,需要进行前处理,且日常需仔细维护仪器。

4 生物活性及其机制

4.1 抗糖尿病

糖尿病由于胰岛素分泌或无法利用引起碳水化合物、脂肪、蛋白质等代谢紊乱。食用菌多糖降低血糖和血脂,从而达到抗糖尿病的效果。肖艳红等^[56]采用高脂高糖饲料喂养联合链脲佐菌素(STZ)腹腔注射法构建 T2DM 大鼠模型,灌胃给予牛肝菌多糖干预 28 d,表明牛肝菌多糖通过降低三酰甘油、总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇的含量,提升高密度脂蛋白胆固醇的含量,从而抑制血糖血脂代谢的紊乱。且多糖剂量越高降低三酰甘油和总胆固醇的效果越好。

4.2 抗氧化与抗炎症

人体内会不断产生自由基,过量自由基的产

生与很多疾病有关联。抗氧化物质就是抑制自由基的氧化反应或消除生成自由基的物质。食用菌多糖分子中含有大量的羟基,羟基能与活泼自由基孤对的电子配对发生还原反应,生成稳定自由基和水,从而清除自由基。范三红等^[57]对羊肚菌多糖利用 DEAE-52 纤维素层析柱和 Sephadex G-100 层析柱纯化得到由 D-甘露糖、D-葡萄糖、D-半乳糖、D-阿拉伯糖组成的 MEP-2,和由 D-甘露糖、L-鼠李糖、D-葡萄糖、D-半乳糖组成的 MEP-3,结果显示羊肚菌多糖有较强清除羟基自由基的能力,其中具有三股螺旋结构的 MEP-2 清除超氧阴离子自由基的能力较强,无双螺旋结构的 MEP-3 清除 1,1-二苯基-2-苦味酰肼自由基、羟基自由基较强。刘敏^[58]用真姬菇多糖处理表现出氧化应激和炎症反应的炎症小鼠,发现小鼠通过 ROS/TLR4/NF-KB 途径抑制 NF-KB 的激活实现体内的超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶的活性和抗氧化能力提高;提升血清中抗炎性细胞因子白细胞介素-10 水平,降低肿瘤坏死因子- α 等促炎性细胞因子水平。

4.3 免疫活性与抗肿瘤

食用菌多糖还参与细胞间通讯和识别信号,通过刺激细胞因子的表达和分泌来促进淋巴细胞产生相应抗体,从而抑制癌细胞增殖。郝正祺^[59]采用 MTT 法测定绣球菌多糖对小鼠巨噬细胞的增值活力,结果表明在一定浓度内,巨噬细胞随着多糖浓度增加而增值。陈沛等^[60]研究灰树花多糖对人肝正常细胞和人肝癌细胞的作用,用荧光探针来检测线粒体膜电位的变化,并通过细胞形态学观察发现灰树花多糖对正常细胞没有抑制作用,对肝癌细胞在一定浓度范围内有抑制作用,降低线粒体膜电位出现凋亡形态。

5 结论

食用菌多糖在制药、生物医学、食品和化妆品等行业受到广泛关注。目前,虽然多糖提取、分离、纯化及检测的研究已经取得较大的进展,但多糖结构复杂,能应用于工业化生产的高产量提取多糖的方法不多,因此在不破坏多糖结构的同时提高提取率和纯度方法还需努力探索。随着对食用菌多糖分析方法的深入研究,更多食用菌多糖提取方法得到优化,食用菌多糖的应用领域也会更加宽阔。我国食用菌多糖资源丰富,但对食用菌多糖的深加工产品不多^[61],还有很大的发展空间,未来前景广阔。结构决定功能,对食用菌多

糖的结构全貌还未完全探索出来,在这一方面还需应用开发更先进的技术手段破解食用菌多糖结构,研究结构对功能的影响以及作用方式,从而更好地利用发挥其对人类的有益作用。

参考文献:

- [1] 钟炼军,王强,张建斌.天然食用菌多糖物质及提取开发应用研究[J].中国食用菌,2019,38(4):5-7.
- [2] WANG Y X,SHI X D,YIN J Y,et al. Bioactive polysaccharide from edible *Dictyophora* spp.: Extraction, purification, structural features and bioactivities[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre,2018,14:25-32.
- [3] 吴雅清,冷小鹏.多糖体外抗氧化作用及其影响因素[J].广州化工,2018,46(4):49,16.
- [4] HANG Z F,LV G Y,SONG T T,et al. Comparison of the preliminary characterizations and antioxidant properties of polysaccharides obtained from *Phellinus baumii* growth on different culture substrates[J]. Carbohydrate Polymers,2015,132:397-399.
- [5] 顾可飞,周昌艳,李晓贝.食用菌的营养价值及药用价值[J].食品工业,2017,38(10):228-231.
- [6] 纪欣童,张思月,姜静怡,等.桦褐孔菌多糖提取条件的优化及其抗氧化活性分析[J].黑龙江大学(自然科学学报),2017,34(5):584-594.
- [7] 顾菲菲,李佳,杨晨东,等.碱提灵芝多糖的分离纯化、结构表征及免疫活性评价[J].中草药,2018,49(10):2359-2364.
- [8] 王兰英,唐萌,徐盼菊,等.4种方法提取花脸香蘑胞内多糖及其理化性质比较研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(3):61-66.
- [9] 扎罗,刘振东,王波,等.复合酶法提取西藏金耳粗多糖工艺研究[J].轻工科技,2018,34(1):23-25.
- [10] 张致呈,刘燕,赵志刚,等.微波辅助优化亚侧耳多糖提取工艺的研究[J].广州化工,2020,48(6):91-92.
- [11] 杨嘉丹,刘婷婷,张闪闪,等.微波辅助提取银耳多糖工艺优化及其流变、凝胶特性[J].食品科学,2019,40(14):289-295.
- [12] 刘春雷,李丹,彭彪.超临界 CO₂ 萃取脱脂技术在银耳多糖提取中的应用[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2015,27(3):252-256.
- [13] 陈祖琴,熊川,金鑫,等.不同提取方法对木耳多糖提取率的影响[J].食品安全质量检测学报,2017,8(5):1636-1641.
- [14] 魏晓梅,王瑞,吴丽芳,等.云南三种野生食用菌多糖提取工艺优化及其对比分析[J].食用菌,2018,40(1):68-70,76.
- [15] 郑婷婷,张文杰,严亮,等.热水法提取黄皮疣柄牛肝菌多糖工艺研究[J].食品研究与开发,2019,40(4):38-42.
- [16] LI C,HUANG X J,P Q,et al. Physicochemical properties of peanut protein isolate-glucomannan conjugates prepared by ultrasonic treatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2014,21(5):1722-1727.
- [17] 蒋益,郑惠华,刘广建,等.响应面优化超声波辅助提取金耳多糖的研究[J].食用菌,2019,41(6):60-64.
- [18] CHEN Y,DU X J,ZHANG Y,et al. Ultrasound extrac-
- tion optimization, structural features, and antioxidant activity of polysaccharides from *Tricholoma matsutake* [J]. Journal of Zhejiang University-Science B, 2017, 18(8): 674-684.
- [19] 陈光宇,何述金,周代俊,等.闪式提取猴头菌-地龙生物转化物中抗凝血活性成分的工艺研究[J].中国现代应用药学,2018,35(11):1698-1701.
- [20] 秦令祥,周婧琦,崔胜文,等.基于正交试验法的闪式提取香菇多糖工艺优化[J].食品研究与开发,2019,40(20):70-74.
- [21] 张雄,肖志勇,黄群,等.猴头菇多糖和蛋白质闪式联合提取工艺优化及结构鉴定[J].食品与机械,2019,35(10):117-121,183.
- [22] 郭妍婷,黄雪,吴梓敏,等.亚临界水提取生物活性物质的研究进展[J].仲恺农业工程学院学报,2016,29(3):65-71.
- [23] 张晓菲.亚临界水在食品中的应用及发展前景[J].现代食品,2018,32(2):67-70.
- [24] 包怡红,邓启.响应面法优化亚临界水萃取黑木耳多糖工艺[J].食品与生物技术学报,2016,35(10):1053-1060.
- [25] 孙林超.超声辅助亚临界水提取香菇多糖工艺的研究[J].粮食与油脂,2019,32(4):81-84.
- [26] 郭淑臻,张翔翔,雷红.灰树花多糖 Seavage 法除蛋白工艺的研究[J].安徽化工,2014,40(5):27-30.
- [27] 侯越,包鸿慧.榛蘑多糖提取液脱蛋白方法的研究[J].农产品加工,2018(15):69-70,76.
- [28] 王新嘉,雷国风,翟志军,等.平菇多糖中蛋白质脱除方法的比较[J].食品研究与开发,2017,38(5):111-118.
- [29] 常飞,王绍云,陈飞.贵州野生甜藤多糖的提取与脱蛋白方法研究[J].天然产物研究与开发,2015,27(2):294-300.
- [30] 易晓敏.猴头菇多糖的分离纯化、表征及其功能活性研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [31] 张达成,秦允荣.银耳多糖的活性炭脱色工艺研究[J].广东化工,2019,46(16):40-42.
- [32] 石硕,孙丽娜,仙颀,等.神仙草叶多糖提取及过氧化氢脱色工艺研究[J].现代中药研究与实践,2017,31(3):50-54.
- [33] 刘力萍,吴天祥,张宗启.灰树花胞外多糖不同脱色方法的研究[J].食品科技,2018,43(11):196-201.
- [34] 张玉娜,王倩文,张双灵.水提醇沉法提取香菇多糖的最佳工艺研究[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2019,37(1):43-46.
- [35] 孙文怡,战阳,郝锡联,等.盐析法纯化猴头菌多糖工艺条件的研究[J].吉林师范大学学报(自然科学版),2011,32(3):88-91.
- [36] 陈思.猴头菇多糖、低聚糖的膜法分离工艺研究[D].杭州:浙江工业大学,2019.
- [37] CHEONG K L,MENG L Z,CHEN X Q,et al. Structural elucidation, chain conformation and immuno-modulatory activity of glucogalactomannan from cultured *Cordyceps sinensis* fungus UM01[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 25: 174-185.
- [38] 胡亚平,王锦,郑丽,等.硫磺菌多糖的分离纯化及体外抗氧化、抗肿瘤活性初探[J].中国现代中药,2018,20(9):1131-1136.

- [39] FENG S L, CHENG H R, ZHOU X, et al. Antioxidant and anti-aging activities and structural elucidation of polysaccharides from *Panax notoginseng* root[J]. Process Biochemistry, 2019, 78: 189-199.
- [40] LI Q Z, WU D, ZHOU S, et al. Structure elucidation of a bioactive polydisaccharide from fruiting bodies of *Hericium erinaceus* in different maturation stages[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 196-204.
- [41] 姚芬, 高虹. 猴头菌多糖的提取纯化、结构特征及生物活性研究进展[J]. 食用菌学报, 2019, 26(4): 143-151.
- [42] WU F, ZHOU C, XHOU D, et al. Structural characterization of a novel polysaccharide fraction from *Hericium erinaceus* and its signaling pathways involved in macrophage immunomodulatory activity[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 37: 574-585.
- [43] RE Y, GENG Y, DU Y, et al. Polysaccharide of *Hericium erinaceus* attenuates colitis in C57BL/6 mice via regulation of oxidative stress, inflammation-related signaling pathways and modulating the composition of the gut microbiota[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2018, 57: 67-76.
- [44] 周礼元. 金福菇多糖 TLH-G 的结构鉴定及其抗氧化活性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [45] 钱礼顺. 超声辅助提取草菇子实体多糖及其结构表征与免疫活性评价[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [46] 朱振元, 韩丹. 滑子菇多糖提取工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 68-72.
- [47] LIN Z, LIAO W, REN J. Physicochemical characterization of a polysaccharide fraction from *Platygladus orientalis* (L.) franco and its macrophage immunomodulatory and anti-hepatitis B virus activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(29): 5813-5823.
- [48] SI H Y, CHEN N F, CHEN N D, et al. Structural characterization of a water-soluble polysaccharide from tissue cultured *Dendrobium huoshanense* C. Z. Tang et S. J. Cheng[J]. Natural Product Research, 2018, 32(3): 252-260.
- [49] 张全才, 李鸥叶, 施晓丹, 等. 棘托竹荪水溶性多糖理化性质、单糖组成和固体形貌研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(9): 65-71.
- [50] WANG X Y, YIN J Y, NIE S P, et al. Isolation, purification and physicochemical properties of polysaccharide from fruiting body of *Hericium erinaceus* and its effect on colonic health of mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 1310-1319.
- [51] 朱森, 侯怡铃, 唐贤, 等. 2 种竹荪多糖的结构鉴定及差异性分析研究[J]. 现代农业科技, 2019(7): 206-207, 220.
- [52] 何荣军, 金巧艳, 刘高丹, 等. 珊瑚菌子实体多糖结构鉴定与抗氧化活性[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(1): 73-79.
- [53] LIU W, YANG J G, JIE R, et al. Structure characterization and anti-inflammatory activity of polysaccharide ABD from *Agaricus blazei* Murill[J]. Modern Food Science & Technology, 2017, 33(5): 27-32.
- [54] 商佳琦, 滕翔宇, 范荣, 等. 5 种食用菌多糖的结构特征及抗氧化活性对比[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 77-83, 89.
- [55] 郑恒光, 沈恒胜, 杨道富, 等. 杏鲍菇菇头多糖的结构鉴定及生物活性评价[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 7-13.
- [56] 肖艳红, 张晓敏, 郭梦南, 等. 牛肝菌多糖对 2 型糖尿病大鼠血糖、体重及血脂水平的影响[J]. 中国老年学杂志, 2018, 38(5): 1192-1194.
- [57] 范三红, 贾槐旺, 张锦华, 等. 羊肚菌多糖纯化、结构分析及抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(3): 65-71.
- [58] 刘敏. 真姬菇 SK-03 菌丝体多糖结构及抗氧化、抗炎症分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [59] 郝正祺. 绣球菌多糖结构鉴定、流变凝胶学特性及其抗氧化和免疫功能的研究[D]. 太古: 山西农业大学, 2018.
- [60] 陈沛, 刘会平, 孙娜新, 等. 灰树花多糖的分离纯化及其体外抗肿瘤活性[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 107-114.
- [61] 侯可宁, 李毅. 食用菌多糖的提取、检测及应用研究进展[J]. 山东化工, 2017, 46(13): 49-51.

Research Status of Extraction, Detection, Biological Activity and Mechanism of Polysaccharides from Edible Mushrooms

XIANG Rui-qi¹, XIE Feng², LI Zhan-bin²

(1. School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Academy of Testing and Analysis, Guiyang 550000, China)

Abstract: Mushroom polysaccharide with a variety of activities, but its complex structure, extraction and analysis method is various and each has its own characteristics. In order to promote the industrial production of edible fungi polysaccharides, this paper mainly introduced the advantages and disadvantages of the extraction, separation, purification and structure detection methods of edible fungi polysaccharides in recent five years, as well as the mechanism of biological activity of edible fungi polysaccharides. It was concluded that although there were many analytical methods of polysaccharides from mushroom, there were few methods that could be applied to the extraction of polysaccharides from industrial production due to its complexity. Therefore, efforts should be made to improve the extraction rate and purity without destroying the structure of polysaccharides.

Keywords: mushroom polysaccharide; extraction method; detection; biological activity