

## 香菇多糖结构与功能研究进展

董浩然, 姜宁, 陆欢, 付阳, 李巧珍\*, 于海龙\*

上海市农业科学院食用菌研究所, 国家食用菌工程技术研究中心, 农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室, 上海 201403

**摘要:** 香菇(*Lentinula edodes*)作为我国重要食用菌,具有悠久的栽培历史,如今在全球广泛应用于食品和药用领域。香菇富含生物活性多糖,其中 $\beta$ -葡聚糖的含量尤为丰富。自20世纪70年代以来,人们发现香菇多糖的抗癌生物活性之后,针对香菇多糖的活性研究从未停止。研究表明,香菇多糖具有多种显著的生物活性,涵盖抗氧化、抗肿瘤、抗衰老、抗炎、免疫调节、抗病毒、保肝以及降胆固醇等功效。香菇多糖的分离提纯方法、化学性质与生物活性一直备受世界各地学者的密切关注。基于前人的工作基础,全面总结了香菇多糖的最新研究进展,包括香菇多糖的分离方法及不同分离方法对其结构活性的影响、结构特征与多糖生物活性的关系以及香菇多糖在发挥生物活性时的作用机制等内容,期望为香菇多糖在医疗和功能性食品领域的进一步应用提供有价值的信息参考。

**关键词:** 香菇;香菇多糖;分离提纯;结构特征;生物活性

DOI:10.19586/j.2095-2341.2024.0127

中图分类号:Q539, S646.1

文献标志码:A

## Research Progress on Structure and Function of Lentinan

DONG Haoran, JIANG Ning, LU Huan, FU Yang, LI Qiaozhen\*, YU Hailong\*

Key Laboratory of Edible Fungi Resources and Utilization (South), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Engineering Research Center of Edible Fungi, Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China

**Abstract:** *Lentinula edodes*, as an important edible fungus in China, has a long history of cultivation. It is now widely used in the fields of food and medicine worldwide. *Lentinula edodes* is rich in bioactive polysaccharides, especially  $\beta$ -glucan. Since the discovery of the anticancer biological activity of lentinan in the 1970s, the research on the activity of lentinan has never stopped. Studies have shown that lentinan possesses a variety of significant biological activities, including antioxidant, anti-tumor, anti-aging, anti-inflammatory, immunomodulatory, antiviral, hepatoprotective, and cholesterol-lowering effects. The isolation, purification, chemical properties, and biological activities of lentinan have always attracted close attention from scholars around the world. Based on the previous work, this article comprehensively summarized the latest research progress of lentinan, including the separation methods of lentinan and the impact of different separation methods on its structural activity, the relationship between structural characteristics and polysaccharide biological activity, and the mechanism of action of lentinan in exerting biological activity. The paper was expected to provide valuable information references for the further application of lentinan in the fields of medical treatment and functional foods.

**Key words:** *Lentinula edodes*; lentinan; separation methods; structural characteristics; bioactivity

香菇(*Lentinula edodes*),在中国被誉为“国菇”,也称为香蕈、香蘑、香菰或椎茸,属于担子菌门、伞菌纲、伞菌目、光茸菌科、香菇属<sup>[1]</sup>。因其馥郁的香气、滑嫩的口感以及丰富的营养、保健和药

收稿日期:2024-07-12; 接受日期:2024-09-27

基金项目:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-20);山东省重点研发项目(20221ZGC023);上海市农业科学院卓越团队(沪农科卓(2022)001);山东省泰山产业领军人才项目(LJNY202116)。

联系方式:董浩然 E-mail: dhr605061238@163.com

\*通信作者 李巧珍 E-mail: liqiaozhen@saas.sh.cn; 于海龙 E-mail: yuhailong\_01@126.com

用价值,备受广大消费者喜爱。香菇在亚洲东南部的众多国家广泛栽培,如中国、日本、韩国等,野外常见于金缕梅科、壳斗科、桦木科等阔叶树木上的木腐菌。香菇是我国产能最大的食用菌品种,目前也是世界第一大食用菌。据中国食用菌协会及世界粮农组织的数据统计,2022年我国香菇产量达到1 295.48万t,占全国食用菌总产量的30%以上,占全球香菇总产量的98.3%<sup>[2]</sup>。作为高蛋白低脂营养丰富的菌类,香菇中蛋白含量为3.02~3.76 g·100 g<sup>-1</sup>、多糖含量为0.88~1.02 g·100 g<sup>-1</sup>、脂肪含量为0.35~0.45 g·100 g<sup>-1</sup>、纤维含量为1.03~1.10 g·100 g<sup>-1</sup><sup>[3]</sup>。在香菇众多营养成分中,香菇多糖的营养和药用特性尤为显著。早在1969年,《自然》就首次阐述了香菇多糖具有抗肿瘤的功效,此后,国内外的学者逐渐对其展开了深入探究,发现香菇多糖还具有免疫调节<sup>[4]</sup>、抗氧化<sup>[5-6]</sup>、抗病毒<sup>[7]</sup>以及抗菌<sup>[8]</sup>等多种生物活性。本文旨在对香菇多糖的提取、结构特性以及生物活性进行综述,期望为香菇多糖后续的全方位研究与科学高效地开发利用给予理论支撑。

## 1 香菇多糖的提取及纯化

### 1.1 香菇多糖的提取方法

香菇多糖作为香菇中重要的营养物质及活性物质,其结构、分子量及生物活性受到提取方法及纯化方法的影响。香菇多糖提取方法目前主要有溶剂提取、辅助提取以及复合提取。溶剂提取法一般包括水提取法、碱提取法以及酸提取法。

Pattanayak等<sup>[9]</sup>通过水提取法获得以3个(1→6)- $\alpha$ -D-吡喃半乳糖残基、2个(1→6)- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖残基、1个(1→4)- $\alpha$ -D-吡喃甘露糖残基和2个(1→3)- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖残基主链连接方式,平均分子量为 $1.79 \times 10^5$  Da ( $1 \text{ Da} = 1.660 \ 54 \times 10^{-27}$  kg)的香菇多糖组分。碱提取法是通过稀碱破坏细胞壁促进细胞中多糖浸出的方法。碱提取法具有多糖的提取率高、浸提时间短等优点,但同时存在易破坏多糖的结构、造成多糖生物活性下降、提取液黏稠度上升、过滤困难等问题。Zhang等<sup>[10]</sup>通过碱提法获得以(1→3)- $\beta$ -D-葡萄糖残基为主链,(1→6)- $\beta$ -D-葡萄糖残基为侧链的连接方式,平均分子量为 $6.05 \times 10^5$  Da的香菇多糖组分。酸提取法是利用酸性溶液提取香菇多糖的一种方法。碱提取

法及酸提取法相对水提取法均可提高多糖的提取率,但由于酸碱在提取过程中易造成糖苷键的破坏,常导致多糖活性下降。

辅助提取的方法主要利用超声波<sup>[11]</sup>、微波<sup>[6]</sup>、加热回流<sup>[12]</sup>、酶解<sup>[13-14]</sup>等方式加速细胞壁的分解、增强多糖在提取剂中的溶解和扩散,从而提高多糖得率。同时,由于反应条件温和,能极大程度地保留香菇多糖的生物活性。Lin等<sup>[6]</sup>通过微波辅助萃取的方法获得以 $\beta$ -葡聚糖苷键连接,平均分子质量为 $1.2 \times 10^5$  Da的香菇多糖组分,得率为13.28%,且表现出较强的抗氧化性。与溶剂提取方法比较,辅助提取方法具备操作简单、时间短、安全节能,且多糖提取率及多糖纯度显著提高等优点<sup>[15]</sup>。周欣等<sup>[11]</sup>利用超声法提取香菇多糖,提取时间仅20 min,多糖提取率达14.20%,同水提取法相比,提取时间缩短了83.33%。

复合提取法是将两种或两种以上的方法结合运用的方法。秦令祥等<sup>[16]</sup>采用超声波协同复合酶法提取香菇多糖,同单一提取方法比较,提取率提高了41.75%。此外,除了上述多糖提取方式,Ke等<sup>[17]</sup>的研究展示了匀浆法在提高香菇多糖提取效率方面的有效性;Zhang等<sup>[18]</sup>采用的两步超声强化亚临界水提取方法可显著提高多糖的得率且抗氧化活性同对照组比较最高;贾薇等<sup>[19]</sup>研究指出,采用0.9% NaCl提取后,进一步用80 °C水和5% NaOH进行二次提取,获得的 $\beta$ -葡聚糖含量最高,达68.26%。各提取方法的提取时间、提取温度以及多糖得率详见表1。

### 1.2 香菇多糖的纯化方法

粗提的香菇多糖含有多种其他非多糖物质,例如蛋白质、色素、脂质、维生素以及多酚等。这些物质会影响香菇多糖的生物活性及后续作用机理的研究。因此,对粗提的香菇多糖进行纯化至关重要。研究人员通过离子交换色谱、凝胶过滤色谱等方法对香菇多糖进行纯化。此外,采用不同膜的连续超滤结合高效凝胶渗透色谱(high performance gel permeation chromatography, HPGPC)方法纯化香菇水提物中的多糖组分,为大规模多糖纯化提供了一种更绿色、高效的纯化思路<sup>[27]</sup>。

目前,香菇多糖的分离纯化技术仅限于实验室规模,同时存在有机溶剂残留的问题,不利于其生物活性的评估以及后期的应用。开发一些绿色操作和高效节能的提取纯化方法,如酶提取法、膜

表1 香菇多糖的提取方法  
Table 1 Extraction methods of lentinan

| 提取方式        | 提取时间/min | 提取温度/°C | 料液比/(g·mL <sup>-1</sup> ) | 多糖得率/% | 参考文献 |
|-------------|----------|---------|---------------------------|--------|------|
| 水提法         | 90       | 90      | 1:10                      | 2.01   | [20] |
| 碱提法         | 60       | 60      | 1:20                      | 18.68  | [21] |
| 酸提法         | 300      | 85      | 1:40                      | 7.49   | [22] |
| 酶-微波-超声辅助提取 | 10       | 48      | 1:30                      | 9.38   | [23] |
| 超声提取        | 14       | 室温      | 1:30                      | 14.39  | [24] |
| 亚临界水提取      | 15       | 120     | 1:30                      | 14.11  | [25] |
| 酶辅助提取       | 93       | 54      | 1:29                      | 15.65  | [26] |
| 超声强化亚临界水提取  | 40       | 140     | 1:25                      | 17.34  | [18] |

分离技术等具有重要的意义<sup>[28]</sup>。

## 2 香菇多糖的结构

结构决定性质,性质决定功能。香菇多糖的生物活性与其结构息息相关,因此,对其结构特征分析显得尤为重要。色谱[高效离子色谱、高效尺寸排阻色谱、高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)、HPGPC、气相色谱]、光谱(紫外-可见光谱、傅里叶变换红外光谱、核磁共振光谱)和X射线光电子能谱等技术广泛用于香菇多糖中单糖组成、分子量和糖基链接类型的分析。

香菇多糖的分子量一般可通过渗透压法、黏度测量法、沉降法、凝胶渗透色谱法(gel permeation chromatography, GPC)、HPLC以及HPGPC等方法测定,分子量范围在 $1.16 \times 10^3 \sim 6.842 \times 10^6$  Da。香菇多糖分子量与其生物活性存在一定的联系。Tang等<sup>[27]</sup>通过HPGPC方法获取3种香菇多糖组分,LE-UF-1( $1.36 \times 10^5$  Da)、LE-UF-2( $1.4 \times 10^4 \sim 6.1 \times 10^4$  Da)以及LE-UF-3( $1.4 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4$  Da)。Chen等<sup>[29]</sup>在此基础上探究了3种多糖组分的生物活性,结果表明,3种组分的多糖在体内均表现出显著的免疫调节活性,且分子量较小的多糖对免疫调节活性的影响更为显著。Zhao等<sup>[26]</sup>在香菇中分离出另外两种多糖LEP-1( $1.52 \times 10^5$  Da)和LEP-2( $6.447 \times 10^5$  Da),其均具有抗肿瘤活性,且分子量较大的LEP-2抗肿瘤活性更显著。香菇多糖的单糖组成通常利用水解、衍生化和色谱-质谱进行分析。单糖的成分与香菇多糖生物活性有一定的联系。作为杂多糖,香菇多糖通常由葡萄糖(Glu)、半乳糖(Gal)、甘露糖(Man)以及阿拉伯糖(Ara)

按照不同摩尔比组成。另外,部分学者的研究发现,香菇多糖中还存在糖醛酸和氨基葡聚糖,例如Zhang等<sup>[30]</sup>利用碱提取法分离出酸性杂多糖LSMS-1和LSMS-2,两种多糖在体外抗肿瘤试验中表现出显著活性,且LSMS-2具备更强的抗癌能力,表明这两种多糖的抗肿瘤活性与其单糖组成和糖醛酸含量有关。香菇多糖属于一种具有 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3)-D-葡聚糖结构特征的多糖。其初级结构主要以(1-3)- $\beta$ -D-葡萄糖残基作为主链(图1)。具体而言,在每5个葡萄糖之中,存在2个(1-6)葡萄糖残基的支链。这些支链是由(1-6)- $\beta$ -D-和(1-3)- $\beta$ -D-葡萄糖残基共同组成。不仅如此,其中还包含有数量较少的内部 $\beta$ -(1-6)键<sup>[31]</sup>。香菇多糖的高级空间结构呈三螺旋结构,该结构与多糖的生物活性密切相关。研究发现,香菇多糖的初级结构不变,而三螺旋结构消失,其抗肿瘤活性会急剧减弱<sup>[32-33]</sup>。

## 3 香菇多糖的功能活性

香菇多糖通过与不同受体相互作用并触发下游信号的级联反应,发挥出多种生物活性,如抗氧化活性、抗肿瘤活性、免疫调节活性、抗病毒活性和抗菌活性等。

### 3.1 抗氧化活性

活性氧(reactive oxygen, ROS)是一类产生于代谢过程中的氧化物质,包括超氧阴离子( $O_2^-$ )、过氧化脂质(ROOH)、过氧化氢( $H_2O_2$ )和羟基自由基( $OH^\cdot$ )等<sup>[34]</sup>。在生理条件下,细胞内的ROS处于一个动态平衡,抗氧化系统起关键性作用。然而,当细胞处于氧化应激状态时,细胞内部的ROS生成速率超过其清除速率,平衡被打破,则会

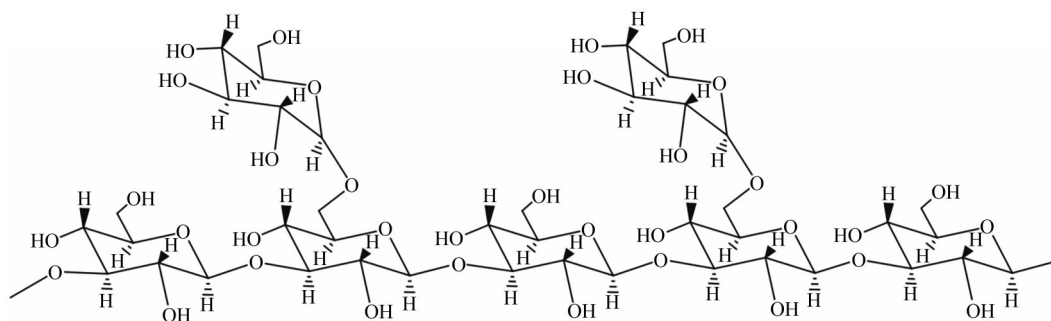


图1 香菇多糖的初级结构

Fig. 1 Primary structure of lentinan

导致ROS积累,引发细胞损伤、炎症反应、细胞凋亡、蛋白质氧化和DNA损伤等病理过程<sup>[35-36]</sup>,同时引发衰老和相关疾病,如自身免疫性疾病和心血管疾病<sup>[8]</sup>等。

香菇多糖是一类高效的天然抗氧化大分子物质。研究证实,香菇多糖不仅能够清除自由基,同时,还能提高抗氧化系统的抗氧化能力。其抗氧化活力受多糖的来源<sup>[37-39]</sup>、提取方式<sup>[13]</sup>的不同而存在差异。赵婷婷等<sup>[37]</sup>的研究表明,通过水提法提取的香菇菌柄多糖(*Lentinula edodes* stalks polysaccharides, LSP),经过 Sevag 法和透析法去除蛋白和小分子后,获得含有吡喃糖环的香菇多糖组分,并在体外抗氧化试验中呈现出对超氧阴离子、DPPH 自由基和羟自由基较强的还原清除能力。时国庆等<sup>[38]</sup>的研究显示,香菇菌柄多糖具有较强的 $\text{Fe}^{3+}$ 还原能力、羟自由基和DPPH自由基清除能力以及总抗氧化能力,且呈现量效关系。赵茹等<sup>[13]</sup>的研究表明,香菇多糖的总还原能力虽略低于同浓度的抗坏血酸,但却展现出较强的羟基自由基清除能力。

抗氧化酶在氧化应激反应中发挥重要作用。香菇多糖在体外或体内抗氧化活性测试中,均表现出调节抗氧化酶活力的生物活性,且调节能力同剂量存在一定联系。Chen等<sup>[40]</sup>和Yu等<sup>[41]</sup>的研究表明,高剂量香菇多糖喂养的大鼠体内抗氧化酶活性强于低剂量组。

### 3.2 抗肿瘤活性

世界卫生组织发布的相关数据显示,癌症患病人口比率呈上升趋势。2018年全球新增癌症病例超1 810万例,而2022年全球新增癌症病例则超2 000万例。据国家癌症中心发布的数据,2018年我国癌症新发病例380.4万例,而2022年

新发病例增至482.47万例。我国癌症发病率上升趋势远高于全球水平。在癌症发病率不断上升的严峻形势下,寻求有效的抗癌方法至关重要。食用菌多糖的出现为抗癌领域带来新的选择。

1969年,Chihara等<sup>[42]</sup>利用香菇中分离出的多糖成功抑制小鼠体内肿瘤。自此,众多学者对香菇多糖的抗肿瘤作用进行了深入研究。研究表明,香菇多糖对多种癌细胞具有显著的体外抑制增殖作用,既能调节免疫系统,又具有直接抗肿瘤活性,显示出重要的抗肿瘤潜力<sup>[43]</sup>。目前推测,香菇多糖抗肿瘤的机制有如下几种:免疫调节作用机制、直接抗肿瘤作用机制以及协同增效抗肿瘤作用机制<sup>[44]</sup>。免疫调节作用机制是指香菇多糖通过调节人体免疫系统,如激活T淋巴细胞、NK细胞以及巨噬细胞等方式发挥抗肿瘤作用<sup>[45]</sup>;直接抗肿瘤作用机制是指香菇多糖通过非免疫调节的直接作用方式<sup>[44]</sup>,具体包括:体外抑制肿瘤细胞<sup>[46]</sup>、诱导肿瘤细胞凋亡<sup>[47]</sup>,以及诱导肿瘤细胞自噬<sup>[48-49]</sup>等。而协同增效抗肿瘤的作用机制则是指香菇多糖作为辅助药物,在临床癌症的治疗中发挥作用,具体表现为香菇多糖可提高奥沙利铂的药物活性<sup>[50]</sup>,进而增强其诱导癌细胞凋亡的能力。

此外,香菇抗肿瘤活性取决于香菇多糖的分子量、糖苷键结构、单糖组成、空间结构以及剂量<sup>[51]</sup>。Wang等<sup>[52]</sup>研究发现,香菇多糖分子量在 $4.0 \times 10^5 \sim 6.0 \times 10^5$  Da范围内,多糖具有较强的抗肿瘤活性。分子量高的香菇多糖抗肿瘤活性大于分子量低的香菇多糖抗肿瘤活性<sup>[26]</sup>。Qian等<sup>[53]</sup>的研究则指出分子量最大的LW-1对肿瘤的抑制作用小于分子量相对较高的LW-2。故具有较强的抗肿瘤活性的香菇多糖分子量应处在一个范围,过大或过小均影响其活性发挥,而造成这一现象的

潜在机制仍缺乏科学的解释。Morales等<sup>[54]</sup>发现含有线性(1→3)- $\alpha$ -D-葡聚糖结构的G-3对乳腺肿瘤细胞抑制作用最强。Wang等<sup>[46]</sup>的研究证实,以 $\beta$ -(1→3)-D-葡萄糖为主链的香菇多糖不仅可增强免疫力,还能通过直接杀死肿瘤细胞及诱导肿瘤细胞凋亡来发挥作用。Zhang等<sup>[30]</sup>分离出酸性杂多糖LSMS-1和LSMS-2,其中LSMS-2主要由木糖(Xyl)和葡萄糖醛酸(GluA)组成,同LSMS-1比较具备更强的抗癌能力,表明多糖的抗肿瘤活性与其单糖组成相关。以上证据表明,香菇多糖的抗肿瘤活性是由多种因素共同决定的,制备香菇多糖的过程中,需要综合考虑这些因素,以确保其抗肿瘤活性的充分发挥。例如,在原料的选择上,应选用品质优良、来源可靠的香菇,以保证多糖的质量和活性。在提取和纯化过程中,要采用合适的技术和方法,尽量减少对多糖结构和活性的破坏。同时,还可以对多糖进行适当的修饰和改性,以增强其抗肿瘤活性和生物利用度。

### 3.3 免疫调节活性

免疫调控指的是机体对免疫应答进行的一系列调节过程,其最终目的在于维持内环境的稳定。这一过程通过多种方式发挥作用,如调节免疫细胞的增殖和分化,确保分化出足够数量和类型的免疫细胞以有效对抗病原体;同时,它还涉及调节细胞因子的释放,以协调免疫细胞的行动。免疫调节是一个动态平衡的过程。研究表明,适度的炎症反应有利于机体,但异常的炎症反应可能导致免疫系统失调,进而削弱人体的免疫力<sup>[32]</sup>。

香菇多糖作为天然生物反应调节剂,能显著增强人体免疫力<sup>[55-56]</sup>。Wang等<sup>[57]</sup>的研究发现,非小细胞肺癌患者的免疫调节能力在香菇多糖的影响下显著提升。此外,香菇多糖提高机体的免疫调节活性能力的强弱与多糖的提取方式、结构以及组分等相关。例如Chen等<sup>[61]</sup>从香菇水提取物中分离出3种香菇多糖组分,分别为F1、F2及F3(分子量F1>F2>F3)。评估多糖的免疫调节作用时,3个多糖组分都能保护宿主免受免疫抑制。F1仅在增强细胞免疫方面有显著效果,而F2和F3改善了细胞免疫、体液免疫和先天免疫<sup>[29]</sup>。

### 3.4 抗病毒活性

香菇多糖及其衍生物表现出强大的抗病毒特性。这一特性在近些年的临床试验中得到证实,香菇多糖对多种病毒展现出抗病毒作用。例如常

见的流感病毒、肝炎病毒、单纯疱疹病毒等在食用菌多糖的作用下其活性及传播能力显著下降。这种抗病毒效应的实现,主要通过两种关键机制。其一,是激活或增强网状内皮细胞和巨噬细胞的吞噬能力。网状内皮细胞和巨噬细胞作为人体免疫系统的重要组成部分,它们的吞噬能力增强,意味着能够更有效地清除病毒。例如,在病毒入侵初期,激活后的细胞能够迅速识别并吞噬病毒颗粒,阻止其进一步扩散<sup>[58]</sup>。其二,通过调节免疫机制来提高宿主的免疫功能。免疫系统是人体对抗病毒的天然防线,食用菌多糖能够增强这一防线,使其更加强大而精准地抵抗和抑制病毒。关于香菇多糖的抗病毒研究文章和报道相对较少,但已有的文献表明,香菇及香菇多糖均具备抗病毒的生物活性<sup>[7,59-60]</sup>。Elhusseiny等<sup>[7]</sup>表明,香菇提取物对单纯疱疹Ⅱ型病毒(herpes simplex Ⅱ virus,HSV)和腺病毒表现出轻微的抗病毒特性。Kuroki等<sup>[59]</sup>观察到,香菇提取物中含有许多生物活性化合物,可直接抑制小鼠体内流感病毒增殖,同时降低了流感病毒的感染能力。Ren等<sup>[60]</sup>研究表明,香菇多糖对坏死病病毒(infectious hematopoietic necrosis virus,IHNV)具有直接灭活和抑制其复制的作用。此外,饲料添加香菇多糖可显著降低轮状病毒对仔猪的腹泻指数。轮状病毒是导致仔猪腹泻的常见病原体之一,对仔猪的健康成长造成严重影响。香菇多糖的添加显著缓解了轮状病毒对仔猪回肠黏膜中sIgA和细胞因子含量、肠道健康相关基因的表达以及抗氧化能力的影响<sup>[61]</sup>。这不仅为畜牧业中的病毒防控提供了有力的支持,也进一步证明了香菇多糖在抗病毒领域的广泛应用潜力。

### 3.5 抗菌活性

香菇多糖具有阻止细菌和真菌生长的能力,不同于传统的抗生素,香菇多糖具备抗菌作用相对广泛、耐药性的可能性低以及副作用较小的特点,这些特点为香菇多糖的抗菌治疗提供了新的可能性。一般认为,香菇多糖可以阻止细菌在机体内复制,并调节和增强机体自身的免疫防御机制,从而起到抑菌的效果。侯爱萍等<sup>[62]</sup>研究了香菇多糖对9种细菌、7种真菌的体外抑制作用,结果显示,9种细菌和3种真菌受到抑制。路志芳<sup>[63]</sup>等研究了香菇多糖对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌的抑制作用,二者达到最大抑制作用时间存在差

异。胡国元等<sup>[64]</sup>采用滤纸片法测定真菌多糖成分对大肠杆菌、白色念球菌和金黄色葡萄球菌的影响。结果显示,不同浓度的香菇多糖对3种菌均具有抑制作用。周欣等<sup>[11]</sup>的研究表明,香菇多糖提取物在9种指示菌里,对其中7种展现出了抑制作用。金黄色葡萄球菌、藤黄微球菌、枯草芽孢杆菌以及酿酒酵母等所受到的抑制较为突出,尤其针对大肠杆菌的抑制效果最为显著,其抑菌直径达到了13.63 mm。以上的研究充分证明了香菇多糖在抗菌领域的显著活性和潜在的应用价值。

### 3.6 其他活性

除了以上的功能活性,香菇多糖还具有治疗糖尿病、护肝、降胆固醇等功能活性。食用菌作为一种天然食材,在治疗糖尿病、护肝、降胆固醇等方面展现出巨大的潜力<sup>[65-66]</sup>。Afati等<sup>[67]</sup>研究指出,与市售 $\beta$ -葡聚糖相比,从香菇中提取的 $\beta$ -葡聚糖在降低小鼠血糖水平方面表现更为出色,其效果提高了72.92%。Song等<sup>[68]</sup>研究表明,给大鼠饲喂酸水解香菇残多糖(Ac-LRP),并观察脂多糖诱导大鼠肝损伤程度及关键酶的活性变化,发现肝细胞组织学结果显示Ac-LRP减轻了肝坏死现象,同时肝酶(丙氨酸转氨酶、天冬氨酸转氨酶和碱性磷酸酶)的浓度也明显降低,且受Ac-LRP剂量增加的影响。此外,Im等<sup>[69]</sup>利用富含 $\beta$ -葡聚糖的香菇发酵提取物饲喂对乙酰氨基酚诱导肝损伤的大鼠,发现该提取物能够显著降低肝酶——丙氨酸转氨酶、天冬氨酸转氨酶和乳酸脱氢酶的浓度,从而有效减轻肝损伤。而Morales等<sup>[70]</sup>则从香菇中提取了 $\beta$ -葡聚糖和麦角甾醇的混合液,并研究了这一混合物对小鼠的影响。研究结果显示,饲喂 $\beta$ -葡聚糖和麦角甾醇提取物的小鼠,其血清中的胆固醇含量明显降低。这一发现不仅揭示了香菇多糖在调节血脂方面的潜在作用,还进一步表明了香菇多糖具有抗高胆固醇的潜在应用价值。

## 4 展望

香菇是一种常见的食用菌,其多糖作为一种重要的生物活性成分,在医学和保健领域具有广泛的应用前景。研究表明,香菇多糖具有显著的抗氧化特性,可以清除体内自由基,减少氧化应激对细胞的损害,从而有助于维持身体健康和延缓

衰老。此外,香菇多糖还表现出良好的抗炎作用,能够抑制炎症因子的释放,减轻炎症反应,对于炎症性疾病的防治具有重要意义。除此之外,香菇多糖还显示出潜在的抗肿瘤活性,其可以通过调节免疫功能、促进凋亡、抑制肿瘤细胞增殖等多种途径抑制肿瘤的发生和发展。这为利用香菇多糖开发抗肿瘤药物提供了新的思路和可能性。未来的研究可以进一步探讨香菇多糖分子量、初级结构以及高级结构对于不同类型肿瘤的作用机制,以及其与化疗药物的协同效应,为肿瘤治疗领域的创新带来新的希望。在功能性食品开发方面,香菇多糖也具有巨大的潜力。可以将其应用于调节血糖和血脂,降低心血管疾病的风险。此外,香菇多糖还可能对抗病毒感染,增强免疫力,减少感染性疾病的发生。通过进一步研究香菇多糖的生物活性和作用机制,我们可以设计出更多种类的功能性食品,满足不同人群的健康需求,促进整体健康水平的提升。

综上所述,香菇多糖作为食用菌多糖家族中的重要成员,具有多种生物活性和健康益处,其应用前景广阔。未来的研究可以在进一步揭示其结构关系和作用机制的基础上,加大开发力度,为人类健康和疾病防治带来更多创新成果和可能性。香菇多糖的发展必将为食品、保健品和药品行业带来新的发展契机,为推动健康产业的蓬勃发展贡献力量。

## 参 考 文 献

- [1] ROYSE D J, BAARS J, TAN Q. Current overview of mushroom production in the world[M]//Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications, Wiley-Blackwell, 2017, 5-13.
- [2] 曹斌, 张月吟, 高博. 全球香菇产业发展历史、现状及趋势[J]. 食用菌学报, 2024, 31(03): 1-20.  
CAO B, ZHANG Y Y, GAO B. Development history, current situation and trends of global *Lentinula edodes* industry[J]. Acta Edulis Fungi, 2024, 31(03): 1-20.
- [3] 叶雷, 清源, 吴建, 等. 不同比例桑枝屑基质栽培香菇的营养成分比较[J/OL]. 中国食物与营养, doi:10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20231011.001[2024-09-28]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20231011.001>.  
YE L, QING Y, WU J, et al.. Comparison of nutritional constituents of *Lentinus edodes* cultivated in different mulberry sawdust substrate[J/OL]. Food Nutr. China, doi: 10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20231011.001[2024-09-28]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20231011.001>.
- [4] 马传贵, 张志秀, 肖宝. 食用菌多糖抗肿瘤和免疫调节活性及其作用机制研究进展[C]//中国食用菌协会, 中国食用菌

- 协会药用真菌委员会. 第十二届药用真菌学术研讨会论文集. 2023.
- [5] CHOWDHURY M M H, KUBRA K, AHMED S R. Screening of antimicrobial, antioxidant properties and bioactive compounds of some edible mushrooms cultivated in Bangladesh[J/OL]. Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob., 2015, 14(1): 8[2024-10-10]. <https://doi.org/10.1186/s12941-015-0067-3>.
  - [6] LIN Y Y, ZENG H Y, WANG K, *et al.* Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of diverse polysaccharides from *Lentinus edodes*: process optimization, structure characterization and antioxidant activity[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2019, 136: 305-315.
  - [7] ELHUSSEINY S M, EL-MAHDY T S, AWAD M F, *et al.* Proteome analysis and *in vitro* antiviral, anticancer and antioxidant capacities of the aqueous extracts of *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus* edible mushrooms[J/OL]. Molecule (basel switz.), 2021, 26(15): 4623[2024-10-15]. <https://doi.org/10.3390/molecules26154623>.
  - [8] GARCIA J, AFONSO A, FERNANDES C, *et al.* Comparative antioxidant and antimicrobial properties of *Lentinula edodes* Donko and Koshin varieties against priority multidrug-resistant pathogens[J]. South African J. Chem. Engin., 2021, 35(1): 98-106.
  - [9] PATTANAYAK M, MAITY P, SAMANTA S, *et al.* Studies on structure and antioxidant properties of a heteroglycan isolated from wild edible mushroom *Lentinus sajor-caju*[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2018, 107: 322-331.
  - [10] ZHANG Y, LI Q, SHU Y M, *et al.* Induction of apoptosis in S180 tumour bearing mice by polysaccharide from *Lentinus edodes* via mitochondria apoptotic pathway[J]. J. Funct. Foods, 2015, 15: 151-159.
  - [11] 周欣. 香菇多糖提取工艺的优化及其体外抗菌试验研究[J]. 饲料研究, 2023, 46(13): 87-92.
  - ZHOU X. Optimization of extraction process for shiitake mushroom polysaccharides and its *in vitro* antibacterial test[J]. Feed. Res., 2023, 46(13): 87-92.
  - [12] 李明樾, 王梦娜, 李占峰, 等. 基于加热回流法的香菇多糖提取工艺优化及其产品研发[J]. 食品科技, 2024, 49(3): 210-216.
  - LI M K, WANG M N, LI Z X, *et al.* Optimization of Lentinan extraction process based on heating reflux method and its product development[J]. Food Sci. Technol., 2024, 49(3): 210-216.
  - [13] 赵茹, 康明丽, 张琴, 等. 酶解辅助提取香菇多糖工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 116-121.
  - ZHAO R, KANG M L, ZHANG Q, *et al.* Enzymatic hydrolysis-assisted extraction and antioxidant activity of polysaccharide from *Lentinus edodes*[J]. Food Res. Dev., 2023, 44(12): 116-121.
  - [14] 程俊文, 吴学谦, 贺亮, 等. 香菇子实体多糖分步酶解法提取研究[J]. 食用菌学报, 2009, 16(2): 67-71.
  - CHENG J W, WU X Q, HE L, *et al.* Extraction of polysaccharide from *Lentinula edodes* fruit bodies using stepwise enzymic hydrolysis[J]. Acta Edulis Fungi, 2009, 16(2): 67-71.
  - [15] 聂小宝, 张长峰, 侯成杰. 微波法辅助提取香菇多糖的工艺研究[J]. 食品工业, 2012, 33(9): 37-39.
  - NIE X B, ZHANG C F, HOU C J. Technical study on the extraction of lentinan with microwave[J]. Food Ind., 2012, 33(9): 37-39.
  - [16] 秦令祥, 周婧琦, 崔胜文, 等. 超声波协同复合酶法提取香菇多糖的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(19): 63-67.
  - QIN L X, ZHOU J Q, CUI S W, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted compound enzyme extraction technology of lentinan[J]. Food Res. Dev., 2018, 39(19): 63-67.
  - [17] KE L, CHEN H. Homogenate extraction of crude polysaccharides from *Lentinus edodes* and evaluation of the antioxidant activity[J]. Food Sci. Technol., 2016, 36: 533-539.
  - [18] ZHANG J, WEN C, QIN W, *et al.* Ultrasonic-enhanced subcritical water extraction of polysaccharides by two steps and its characterization from *Lentinus edodes*[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2018, 118: 2269-2277.
  - [19] 贾薇, 余燕贞, 刘红丽, 等. 香菇子实体中高 $\beta$ -葡聚糖含量多糖提取物制备及体外免疫活性[J]. 食用菌学报, 2023, 30(4): 51-58.
  - JIA W, YU Y Z, LIU H L, *et al.* Preparation and *in vitro* activity of B-Glucan-Rich polysaccharide extracts from *Lentinula edodes* fruiting bodies[J]. Acta Edulis Fungi, 2023, 30(4): 51-58.
  - [20] AKRAM K, SHAHBAZ H M, KIM G R, *et al.* Improved extraction and quality characterization of water-soluble polysaccharide from gamma-irradiated *Lentinus edodes*[J]. J. Food Sci., 2017, 82(2): 296-303.
  - [21] 李波, 芦菲, 南海娟. 香菇碱性多糖提取工艺的研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2010, 38(2): 92-95.
  - LI B, LU F, NAN H J. Study on the extraction of alkaline soluble polysaccharide in *Lentinus edodes*[J]. J. Henan Inst. Sci. Technol. (Nat. Sci. Ed.), 2010, 38(2): 92-95.
  - [22] 郝强, 刘晓宇, 冯睿, 等. 香菇多糖的提取数学模型研究[J]. 食品科技, 2007, 32(11): 87-89, 109.
  - HAO Q, LIU X Y, FENG R, *et al.* Study on the mathematical model of optimum yield of *Lentinan polysaccharid*[J]. Food Sci. Technol., 2007, 32(11): 87-89, 109.
  - [23] YIN C, FAN X, FAN Z, *et al.* Optimization of enzymes-micro-wave-ultrasound assisted extraction of *Lentinus edodes* polysaccharides and determination of its antioxidant activity[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2018, 111: 446-454.
  - [24] KE L Q. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Lentinus edodes* based on enzymatic treatment: Extraction of *Lentinus edodes* polysaccharides[J]. J. Food Proc. Preserv., 2015, 39(3): 254-259.
  - [25] ZHANG J X, WEN C T, GU J Y, *et al.* Effects of subcritical water extraction microenvironment on the structure and biological activities of polysaccharides from *Lentinus edodes*[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2019, 123: 1002-1011.
  - [26] ZHAO Y M, WANG J, WU Z G, *et al.* Extraction, purification and anti-proliferative activities of polysaccharides from *Lentinus edodes*[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2016, 93: 136-144.
  - [27] TANG W, LIU C C, LIU J J, *et al.* Purification of polysaccharide from *Lentinus edodes* water extract by membrane separation and its chemical composition and structure characterization[J/OL]. Food Hydrocoll., 2020, 105: 105851[2024-10-10]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105851>.
  - [28] SHI L. Bioactivities, isolation and purification methods of poly-

- saccharides from natural products: a review[J]. Int. J. biol. macromol., 2016, 92: 37-48.
- [29] CHEN S P, LIU C C, HUANG X J, *et al.*. Comparison of immunomodulatory effects of three polysaccharide fractions from *Lentinula edodes* water extracts[J]. J. Funct. Foods, 2020, 66: 103791.
- [30] ZHANG Q, CONG R, HU M, *et al.*. Immunoenhancement of edible fungal polysaccharides (lentinan, tremellan, and pachyman) on cyclophosphamide-induced immunosuppression in mouse model[J/OL]. Evid. Based Compl. Altern. Med., 2017, 2017: 9459156[2024-10-10]. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/9459156>.
- [31] SASAKI T, TAKASUKA N. Further study of the structure of lentinan, an anti-tumor polysaccharide from *Lentinus edodes*[J]. Carbohydr. Res., 1976, 47(1): 99-104.
- [32] ZHANG L N, LI X L, XU X J, *et al.*. Correlation between anti-tumor activity, molecular weight, and conformation of lentinan[J]. Carbohydr. Res., 2005, 340(8): 1515-1521.
- [33] SURENJAV U, ZHANG L N, XU X J, *et al.*. Effects of molecular structure on antitumor activities of (1→3)- $\beta$ -D-glucans from different *Lentinus edodes*[J]. Carbohydr. Polym., 2006, 63(1): 97-104.
- [34] KAMADA N, SEO S U, CHEN G Y, *et al.*. Role of the gut microbiota in immunity and inflammatory disease[J]. Nat. Rev. Immunol., 2013, 13:321-335.
- [35] YANG J, LUO J, TIAN X, *et al.*. Progress in understanding oxidative stress, aging, and aging-related diseases[J/OL]. Antioxidants (basel switz.), 2024, 13(4): 394[2024-10-10]. <http://dx.doi.org/10.3390/ANTIOX13040394>.
- [36] FORMAN H J, ZHANG H Q. Targeting oxidative stress in disease: promise and limitations of antioxidant therapy[J]. Nat. Rev. Drug Discov., 2021, 20: 689-709.
- [37] 赵婷婷, 商洛华, 姚肖翰, 等. 香菇菌柄营养成分、多糖结构表征及其体外抗氧化活性[J/OL]. 菌物研究, doi:10.13341/j.jfr.2022.1522[2024-07-08]. <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2022.1522>. ZHAO T T, SHANG L H, YAO X H, *et al.*. *Lentinula edodes* stalks' nutrient composition, characterization of polysaccharide structure and its antioxidant activity in vitro[J/OL]. J. Fungal Res., doi: 10.13341/j.jfr.2022.1522[2024-07-08]. <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2022.1522>.
- [38] 时国庆, 杨林霄, 李镁娟, 等. 鲜品香菇柄中多糖闪式提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 186-191. SHI G Q, YANG L X, LI M J, *et al.*. Study on flash extraction technology and antioxidant activity of polysaccharides from fresh *Lentinus edodes* stalk[J]. Food Mach., 2023, 39(8): 186-191.
- [39] 何皎, 孙晓菲, 潘琳, 等. 五种香菇营养成分及其香菇多糖的抗氧化性评价[J]. 农产品加工, 2023, (8): 56-60+65. HE J, SUN X F, PAN L, *et al.*. Evaluation of the nutritional composition of five mushroom species and the antioxidant properties of their mushroom polysaccharides[J]. Farm. Prod. Proc., 2023, (8): 56-60+65.
- [40] CHEN X, ZHONG H Y, ZENG J H, *et al.*. The pharmacological effect of polysaccharides from *Lentinus edodes* on the oxidative status and expression of VCAM-1 mRNA of thoracic aorta endothelial cell in high-fat-diet rats[J]. Carbohydr. Polym., 2008, 74(3): 445-450.
- [41] YU Z H, YIN L H, QIAN Y, *et al.*. Effect of *Lentinus edodes* polysaccharide on oxidative stress, immunity activity and oral ulceration of rats stimulated by phenol[J]. Carbohydr. Polym., 2009, 75(1): 115-118.
- [42] CHIHARA G, MAEDA Y, HAMURO J, *et al.*. Inhibition of mouse sarcoma 180 by polysaccharides from *Lentinus edodes* (berk.) sing[J]. Nature, 1969, 222: 687-688.
- [43] TRIVEDI S, PATEL K, BELGAMWAR V, *et al.*. Functional polysaccharide lentinan: role in anti-cancer therapies and management of carcinomas[J/OL]. Pharmacol. Res. Modern Chin. Med., 2022, 2: 100045[2024-10-15]. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2022.100045>.
- [44] 张玉, 张琪琳, 王静林, 等. 香菇多糖构效关系、抗肿瘤作用机制及药代动力学研究进展[J]. 中国医院药学杂志, 2023, 43 (7): 804-812. ZHANG Y, ZHANG Q L, WANG J L, *et al.*. Advances in structure activity relationship, anti-tumor mechanism and pharmacokinetics of lentinan[J]. Chin. J. Hospital Pharm., 2023, 43 (7): 804-812.
- [45] BISEN P S, BAGHEL R K, SANODIYA B S, *et al.*. *Lentinus edodes*: a macrofungus with pharmacological activities[J]. Curr. Med. Chem., 2010, 17(22): 2419-2430.
- [46] WANG K P, ZHANG Q L, LIU Y, *et al.*. Structure and inducing tumor cell apoptosis activity of polysaccharides isolated from *Lentinus edodes*[J]. J. Agric. Food Chem., 2013, 61(41): 9849-9858.
- [47] BAO L, WANG Y, MA R, *et al.*. Apoptosis-inducing effects of lentinan on the proliferation of human bladder cancer T24 cells[J]. Pak. J. Pharm. Sci., 2015, 28(5): 1595-1600.
- [48] ZHANG Y, LIU Y, ZHOU Y X, *et al.*. Lentinan inhibited colon cancer growth by inducing endoplasmic reticulum stress-mediated autophagic cell death and apoptosis[J/OL]. Carbohydr. Polym., 2021, 267: 118154[2024-10-15]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118154>.
- [49] LI W Y, WANG J L, HU H P, *et al.*. Functional polysaccharide *Lentinan* suppresses human breast cancer growth via inducing autophagy and caspase-7-mediated apoptosis[J]. J. Funct. Foods, 2018, 45: 75-85.
- [50] ZHANG Y, LI Q, WANG J F, *et al.*. Polysaccharide from *Lentinus edodes* combined with oxaliplatin possesses the synergy and attenuation effect in hepatocellular carcinoma[J]. Cancer Lett., 2016, 377(2): 117-125.
- [51] JIN Y, ZHANG L N, ZHANG M, *et al.*. Antitumor activities of heteropolysaccharides of *Poria cocos* mycelia from different strains and culture media[J]. Carbohydr. Res., 2003, 338(14): 1517-1521.
- [52] WANG K P, WANG J, LI Q, *et al.*. Structural differences and conformational characterization of five bioactive polysaccharides from *Lentinus edodes*[J]. Food Res. Int., 2014, 62: 223-232.
- [53] QIAN Y, WANG D, FAN M, *et al.*. Effects of intrinsic metal ions of lentinan with different molecular weights from *Lentinus edodes* on the antioxidant capacity and activity against proliferation of cancer cells[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2018, 120: 73-81.

- [54] MORALES D, RUTCKEVISKI R, VILLALVA M, *et al.* Isolation and comparison of  $\alpha$ - and  $\beta$ -D-glucans from shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) with different biological activities[J/OL]. Carbohydr. Polym., 2020, 229: 115521[2024-10-10]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115521>.
- [55] XU X, YAN H, TANG J, *et al.* Polysaccharides in *Lentinus edodes*: isolation, structure, immunomodulating activity and future prospective[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2014, 54(4): 474-487.
- [56] DAI X, STANILKA J M, ROWE C A, *et al.* Consuming *Lentinula edodes* (shiitake) mushrooms daily improves human immunity: a randomized dietary intervention in healthy young adults[J]. J. Am. Coll. Nutr., 2015, 34(6): 478-487.
- [57] WANG X E, WANG Y H, ZHOU Q, *et al.* Immunomodulatory effect of lentinan on aberrant T subsets and cytokines profile in non-small cell lung cancer patients[J]. Pathol. Oncol. Res., 2020, 26(1): 499-505.
- [58] GUO Y, CHEN X, GONG P. Classification, structure and mechanism of antiviral polysaccharides derived from edible and medicinal fungus[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2021, 183: 1753-1773.
- [59] KUROI T, LEE S, HIROHAMA M, *et al.* Inhibition of influenza virus infection by *Lentinus edodes* mycelia extract through its direct action and immunopotentiating activity[J/OL]. Front. Microbiol., 2018, 9: 1164[2024-10-15]. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01164>.
- [60] REN G M, XU L M, LU T Y, *et al.* Structural characterization and antiviral activity of lentinan from *Lentinus edodes* mycelia against infectious hematopoietic necrosis virus[J]. Int. J. Biol. Macromol., 2018, 115: 1202-1210.
- [61] 毛湘冰, 胡海燕, 陈代文, 等. 饲料添加香菇多糖对轮状病毒攻毒断奶仔猪回肠屏障功能的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(8): 4323-4331.
- MAO X B, HU H Y, CHEN D W, *et al.* Effects of dietary lentinan on ileal barrier function of weaned pigs challenged by rotavirus[J]. Chin. J. Anim. Nutr., 2021, 33(8): 4323-4331.
- [62] 侯爱萍, 张树梅. 香菇多糖抗菌抗病毒普适性研究[J]. 药学研究, 2015, 34(4): 199-201.
- HOU A P, ZHANG S M. Study on antibacterial and antiviral universality of lentinan[J]. J. Pharm. Res., 2015, 34(4): 199-201.
- [63] 路志芳, 蒋鹏飞. 香菇多糖的抑菌效果试验[J]. 上海蔬菜, 2017(4): 85-87.
- [64] 胡国元, 李超影, 陈默, 等. 香菇多糖和金针菇多糖的提取及其抑菌活性[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(6): 30-34.
- HU G Y, LI C Y, CHEN M, *et al.* Extraction and antimicrobial activities of polysaccharide from *Lentinus edodes* and *Flammulina velutipes*[J]. J. Wuhan Inst. Technol., 2013, 35(6): 30-34.
- [65] DAS L, BHAUMIK E, RAYCHAUDHURI U, *et al.* Role of nutraceuticals in human health[J]. J. Food Sci. Technol., 2012, 49(2): 173-183.
- [66] VENTURELLA G, FERRARO V, CIRLINCIONE F, *et al.* Medicinal mushrooms: bioactive compounds, use, and clinical trials[J/OL]. Int. J. Mol. Sci., 2021, 22(2): E634[2024-10-15]. <https://doi.org/10.3390/molecules28145393>.
- [67] AFIATI F, FIRZA S F, KUSMIATI K, *et al.* The effectiveness  $\beta$ -glucan of shiitake mushrooms and *Saccharomyces cerevisiae* as antidiabetic and antioxidant in mice Sprague Dawley induced alloxan[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2019, 2120.
- [68] SONG X, CAI W, REN Z, *et al.* Antioxidant and hepatoprotective effects of acidic-hydrolysis residue polysaccharides from shiitake culinary-medicinal mushroom *Lentinus edodes* (Agaricomycetes) in mice[J]. Int. J. Med. Mushrooms, 2021, 23(2): 85-96.
- [69] IM S B, KIM K J, JIN S W, *et al.* Chemical components and hepato-protective effect of *Lentinula edodes* fermented by lactic acid bacteria[J]. J. Mushroom, 2021, 19(3): 191-199.
- [70] MORALES D, TEJEDOR-CALVO E, JURADO-CHIVATO N, *et al.* *In vitro* and *in vivo* testing of the hypocholesterolemic activity of ergosterol- and  $\beta$ -glucan-enriched extracts obtained from shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) [J]. Food Funct., 2019, 10(11): 7325-7332.