

食用菌硒多糖的研究进展

李楠楠^{1,2}, 林群英¹, 姚正颖¹, 孙力军¹, 金敬红¹, 白新宇¹, 王潇潇¹, 吴亮亮^{1,2*}

(1. 中华全国供销合作总社南京野生植物综合利用研究所, 江苏南京 211111)

(2. 江苏鸿丰果蔬食品有限公司, 江苏宿迁 223700)

摘要: 食用菌是一类兼具药食两用价值的大型真菌, 富含多糖、蛋白质、维生素及微量元素等多种营养成分, 其中食用菌多糖因具有抗肿瘤、降血糖、抗氧化、免疫调节等多种生物活性而成为功能性食品和药物研发人员的关注焦点。研究发现硒与多糖结合形成的硒多糖复合物, 不仅保留了多糖原有的结构和功能特性, 还因硒的引入进一步增强了其生物活性, 展现出更广阔的应用前景。该文系统综述了食用菌硒多糖的分离纯化方法、结构特征及其生物活性的研究进展, 探讨了食用菌硒多糖在功能性食品领域的应用潜力, 并针对当前研究中存在的不足对未来研究方向提出了展望, 为其构效关系解析及功能产品研发提供理论参考。

关键词: 食用菌; 硒多糖; 结构特征; 生物活性

文章编号: 1673-9078(2026)7-343-351

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0482

Advances in Selenium-polysaccharides from Edible Mushrooms

LI Nannan^{1,2}, LIN Qunying¹, YAO Zhengying¹, SUN Lijun¹, JIN Jinghong¹, BAI Xinyu¹,

WANG Xiaoxiao¹, WU Liangliang^{1,2*}

(1.China CO-OP Nanjing Institute for Comprehensive Utilization of Wild Plants, Nanjing 211111, China)

(2.Jiangsu Hongfeng Fruit and Vegetable Food Co. Ltd., Suqian 223700, China)

Abstract: Edible mushrooms are large fungi with medicinal and dietary values; they are rich in polysaccharides, proteins, vitamins, trace elements, and other nutrients. Among these components, polysaccharides have attracted increasing functional food and pharmaceutical attention owing to their anti-tumor, hypoglycemic, antioxidant, immunomodulatory, and other bioactive properties. Selenium-polysaccharide (SePs) complexes, formed by combining Se with polysaccharides, retain the original structure and functional properties of polysaccharides and further enhance their bioactivities via the introduction of Se, thereby offering broad application prospects. The isolation and purification methods, structural characteristics, and bioactivities of SePs from edible mushrooms were systematically reviewed in this paper. Additionally, the potential applications of edible mushroom-derived SePs in functional foods were examined; prospects for future research directions were outlined by identifying current research gaps. These findings provide a theoretical basis for understanding the structure-activity relationship and bioactivity mechanism of SePs in edible mushrooms and provide novel perspectives for the development of Se-enriched functional products.

Key words: edible mushrooms; selenium-polysaccharides; structural features; bioactivity

引文格式:

李楠楠,林群英,姚正颖,等.食用菌硒多糖的研究进展[J].现代食品科技,2026,42(7):343-351.

LI Nannan, LIN Qunying, YAO Zhengying, et al. Advances in selenium-polysaccharides from edible mushrooms [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 343-351.

收稿日期: 2025-03-10; 修回日期: 2025-07-11; 接受日期: 2025-07-12

基金项目: 江苏省科技副总项目(FZ20231476); 江苏省第六期“333”高层次人才支持项目; 中华全国供销合作总社科技创新项目(GXKJ-2024-002)

作者简介: 李楠楠(1989-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 多糖大分子结构与功能特性研究, E-mail: lnn1030@163.com

通讯作者: 吴亮亮(1986-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 食用菌工厂化栽培与应用研究, E-mail: wuliangliang0404@sina.com

硒(Se)是一种对人体健康至关重要的微量元素,广泛参与多种生理过程,包括氧化防御、甲状腺激素代谢以及免疫调节等^[1]。硒缺乏会引起氧化应激、甲状腺功能障碍以及癌症等多种疾病^[2,3]。根据化学形态,硒化合物可分为无机硒化合物(如亚硒酸盐和硒酸盐)和有机硒化合物(如硒多糖和硒蛋白)(图1)^[4]。其中,有机硒化合物因其较高的生物利用度和较低的毒性^[5,6],在营养学和医学领域备受关注。然而,来源于谷物、肉制品和海鲜等天然食物中的硒含量普遍较低^[3],往往不足以满足人体的日常需求。因此,通过生物强化技术提高食物中的硒含量成为研究热点。

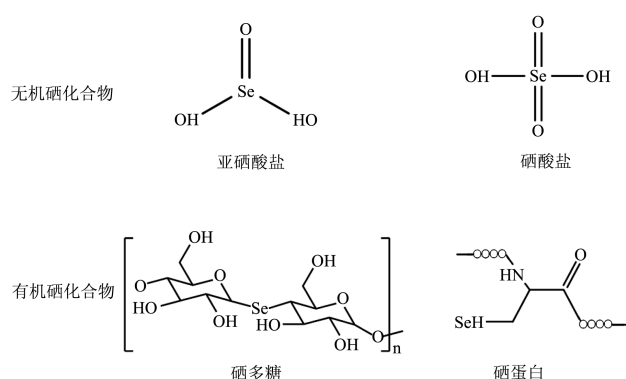


图1 硒化合物及其结构式

Fig.1 Selenium compounds and their structural formulae

食用菌因其独特的腐生营养模式和高效的硒积累能力,成为生产富硒食品的理想载体^[2]。许多食用菌物种能够将无机硒化合物转化为有机硒形式^[2],通过与菌体中的蛋白质和多糖结合,形成生物活性更高的有机硒化合物(硒蛋白和硒多糖)。硒蛋白是含有硒代半胱氨酸或硒代蛋氨酸的功能性蛋白质,其活性中心的硒原子赋予独特的催化特性。作为生物体内重要的功能分子,硒蛋白主要通过其酶学活性参与多种生理过程的精细调控,包括抗氧化防御、甲状腺激素代谢和氧化还原平衡维持等^[7]。食用菌硒多糖不仅保留了多糖的结构和功能特性,还因硒的引入而显著增强了其生物活性^[8],表现出更高的抗氧化、免疫调节、抗肿瘤和抗炎作用,且更易于被机体吸收和利用^[9]。因此,食用菌硒多糖在功能性食品和医药领域具有广阔的应用前景。

近年来,含硒多糖因其独特的生物活性而备受学术界关注,相关研究已系统总结了普通真菌多糖及含硒多糖的制备方法与功能特性。然而,作为重要功能性食品来源的食用菌硒多糖研究仍缺乏系统性梳理。本文聚焦食用菌来源的硒多糖,通过系统整合国内外最新研究成果,重点对其提取纯化工艺优化、结构特

征解析及生理活性机制三方面进行深入评述,并探讨了其在功能食品和医药领域的应用潜力。本综述旨在为食用菌硒多糖的资源化利用提供理论支撑,并为开发新型功能性食品膳食补充剂及辅助治疗药物的开发指明研究方向。

1 食用菌硒多糖的提取、纯化方法

食用菌硒多糖本质上属于多糖大分子,其分离纯化方法与常规多糖具有相似性。在食用菌硒多糖提取过程中,需经过洗涤、干燥、粉碎及脱脂等原料预处理步骤。表1总结了不同食用菌硒多糖的提取工艺参数、粗多糖得率及硒含量的关键数据。目前,热水浸提法因其操作简便、设备要求低且易于规模化实施,已成为食用菌硒多糖提取最广泛应用的方法之一。该方法典型的提取工艺参数包括提取时间2~22 h,提取温度60~100℃,固液比1:4~1:70(g·mL⁻¹),通过优化这些参数可获得具有抗氧化、抗炎、免疫调节以及抑制颅骨金属元素流失等多种生物活性的硒多糖^[9-12]。然而,热水浸提法存在提取时间长、温度高,效率低下的局限性;而稀碱提取法虽能提高提取效率并缩短分离时间,却因有机溶剂消耗量大且碱性环境易导致糖苷键断裂,可能影响多糖结构的完整性。总体而言,传统溶剂在提取效率、结构完整性、环境友好型及经济型等方面存在局限性,亟需开发更高效、温和且可持续的提取技术。

为克服传统溶剂提取的固有缺陷,近年来新型提取技术得到了快速发展。其中,超声波辅助提取、微波辅助提取和酶辅助提取等技术在食用菌硒多糖提取领域展现出显著优势^[13,14]。超声波辅助提取主要利用超声波产生的空化效应和机械剪切力来增强传质过程,该方法具有提取效率高、提取时间短、操作温度低、溶剂用量少等优势;微波辅助提取是通过偶极旋转和离子传导机制破坏细胞壁结构,降低传质阻力来增强天然多糖的提取。例如,刘春延^[17]以黑木耳为原料,在超声时间26 min、微波时间22 min、微波功率350 W、料液比1:58(g·mL⁻¹)条件下,粗硒多糖得率为11.79%;而赵博^[25]采用该技术从蛹虫草中提取硒多糖,在超声时间26 min、微波时间3.2 min、微波功率350 W、料液比1:32(g·mL⁻¹)条件下,粗硒多糖得率为5.05%。然而,超声波和微波辅助提取可能导致局部温度过高和机械振动过强,从而引起多糖分子降解。相比之下,酶辅助提取通过特异性降解细胞壁组分(如纤维素、果胶等),可在温和条件下实现高效提取。值得注意的是,酶辅助提取需要控制好关键的提取参数(提取温度、酶用量、pH值、提取时间)。

表 1 食用菌硒多糖的提取方法及其生物活性

Table 1 Method of extraction and purification of selenopolysaccharides from edible mushrooms and their biological activities				
来源	提取方法	粗多糖提取率/量 及硒含量	生物活性	参考文献
灵芝	冷水提取: 料液比 1:15 (g·mL ⁻¹), 26 ℃提取 12 h, 重复提取 3 次	多糖提取率: 4.60% 硒含量: 18.91 μg·g ⁻¹	硒多糖羟基自由基的 EC ₅₀ 值降低约 1.58 倍; ABTS ⁺ 自由基的 EC ₅₀ 值降低约 2.26 倍; 红血球溶血抑制率增加到 80% 以上; 提高了 RAW264.7 细胞中 TNF-α、IL-6 和 NO 的产生	[10]
香菇	复合酶法提取: 0.8% 纤维素酶、0.65% 木瓜蛋白酶和 0.8% 果胶酶, 料液比 1:20 (g·mL ⁻¹), 45 ℃提取 85 min, pH 值 4.5	多糖提取率: 18.16% 硒含量: 0.295 1 μg·g ⁻¹	硒多糖 DPPH·清除率 (1 600 μg·mL ⁻¹) 提高约 24.5%; DPPH·清除率的 IC ₅₀ 值降低约 8.5 倍; RAW264.7 细胞中的 TNF-α 和 IL1β/-6 水平分别降低了 70.5%、57.7% 和 78.2%	[11]
灰树花	热水提取: 料液比 1:30 (g·mL ⁻¹), 沸水提取 3 h	多糖提取率: 7.59% 硒含量: 8.37 μg·g ⁻¹	硒多糖 DPPH·清除率 (1 000 μg·mL ⁻¹) 提高 33.33%	[12]
灰树花	热水提取: 料液比 1:34.72 (g·mL ⁻¹), 100 ℃提取 22.62 h	多糖提取率: 14.23% 硒含量: 17.52 μg·g ⁻¹	硒多糖羟基自由基清除率 (2 000 μg·mL ⁻¹) 为 71.32%, 提高 74.16%	[13]
杏鲍菇	热水提取: 料液比 1:30 (g·mL ⁻¹), 70 ℃提取 2.5 h	多糖提取率: 32.20% 硒含量: 20.54 μg·g ⁻¹	硒多糖 DPPH·清除率 (5 mg·mL) 为 71.84%, 提高 19.36%; 羟基自由基清除率 (5 mg·mL ⁻¹) 为 55.21%, 提高 102.83%; 对 Cd ²⁺ 和 Cu ²⁺ 的最大结合能力 (pH 值 6.8) 分别为 52.42 mg·g ⁻¹ 和 32.93 mg·g ⁻¹	[14]
灵芝	回流水提: 料液比 1:70 (g·mL ⁻¹)	多糖提取率: 1.20% 硒含量: 0.83 mg·g ⁻¹	硒多糖组小鼠血液中 SOD、CAT、GSH-Px 和 AOC 活性分别为 188.1、16.39、26.16 和 13.24 U·mL ⁻¹ , 比模型组活性高 69.98%~117.96%	[15]
猴头菇	复合酶法提取: 0.5% 纤维素酶、0.6% 果胶酶、0.4% 木瓜蛋白酶	多糖提取率: 17.52% 硒含量: 0.282 mg·kg ⁻¹		[16]
黑木耳	超声-微波联合提取: 超声 26 min, 微波 22 min, 微波功率 350 W, 料液比 1:58 (g·mL ⁻¹)	多糖提取率: 11.79% 硒含量: 1.20 μg·g ⁻¹	硒多糖羟基自由基清除率 (11.5 mg·mL ⁻¹) 为 70.21%, 提高 10.97%; ABTS ⁺ 的清除率 (20 mg·mL) 为 87.57%, 提高 6.20%	[17]
真姬菇	热水提取: 80 ℃提取 3 h, 乙醇体积分数 85%, 乙醇倍数 3 倍	多糖提取率: 3.19% 硒含量: 68.79 μg·g ⁻¹	硒多糖羟基自由基清除率 (3 200 mg·L ⁻¹) 为 82.34%, 提高了 12.47%; DPPH 的清除率 (3 200 mg·L ⁻¹) 为 75.46%, 提高 15.31%; 还原力 (3 200 mg·L ⁻¹) 提高了 18.87%; 在炎症小鼠肺、肝、肾中的 CAT 活性高达 65.08、216.31 和 154.33 U/mg pro, GSH-Px 活性分别为 123.13±8.21、84.27±7.54 和 134.76±10.22 U/mg pro, 均较模型组有显著性提高	[18]
灰树花	热水提取: 100 ℃提取 2.6 h, 料液比 1:34.7	多糖提取率: 15.37%	硒多糖抑制肿瘤率达 64.38% (54 mg·kg ⁻¹ 时), 接近阳性对照组的抑瘤率 (68.58%), 及对 5-Fu 的减毒作用; 可显著提高 RAW264.7 细胞释放 NO, TNF-α 和 IL-1β	[19]
大球盖菇	热水提取: 超声处理 16.33 min, 63.18 ℃提取 2 h, 料液比 1:15, pH 值 7.65	多糖提取量: 223.69 mg·g ⁻¹	硒多糖组小鼠全血 GSH-Px 活性和 SOD 活性分别是对照组的 1.175 倍和 1.95 倍, 是多糖组的 1.016 倍和 1.101 倍	[20]
香菇	乙醇提取: 醇沉时间 15.45 h, 乙醇浓度 82.3%, pH 值 7.95	多糖提取量: 3.23 g·L ⁻¹ 硒含量: 87.59 μg·g ⁻¹		[21]
木耳	酶提取: 纤维素酶 50 ℃水解 2 h, 木瓜蛋白酶 45 ℃水解 1 h	多糖提取量: 794.60 mg·g ⁻¹ 硒含量: 24.02 μg·kg ⁻¹	硒含量与细胞膜流动性相关系数为 0.601 5, 硒多糖能显著改变腹水型 S180 细胞膜的流动性	[22]
蛹虫草	热水提取: 超声处理 15.11 min, 水提温度 59.26 ℃, 料液比 1:25, pH 值 7.17	多糖提取量: 113.65 mg·g ⁻¹ 硒含量: 17.27 μg·g ⁻¹	富硒多糖组比非富硒多糖组活性提高 10% 左右; 富硒多糖组的 MDA 含量比非富硒多糖组低 40% 左右	[23]
秀珍菇	超声波辅助纤维素酶技术: 酶添加量 2%, 料液比 1:50, 超声时间 50 min, 超声功率 220 W	多糖提取率: 19.77% 硒含量: 6.55 μg·mg ⁻¹	富硒多糖组小鼠脑和肝脏中 CAT、SOD、GSH-Px 活性与模型对照组相比均极显著升高, 而 MDA 含量均极显著降低	[24]
蛹虫草	超声-微波联合提取: 超声时间 26 min, 微波时间 3.2 min, 微波功率 350 W, 料液比 1:32 (g·mL ⁻¹)	多糖提取率: 5.05%	富硒多糖总还原力提升高达 21.11%, 羟基自由基提升高达 19.17%, 且计量依赖提升小鼠 AOC、SOD、GSH-Px 及 CAT 活性, 降低肝、肾、心及血清中的 MDA 含量	[25]

注: SOD, 超氧化物歧化酶; GSH-Px, 谷胱甘肽过氧化物酶; CAT, 过氧化氢酶; MDA, 丙二醛; AOC, 总抗氧化能力; TNF-α, 小鼠肿瘤坏死因子 α; IL-6, 白介素 -6; IL-1β, 白细胞介素 1β; NO, 一氧化氮。

研究表明,复合酶体系在食用菌硒多糖提取中展现出显著优势。Gu等^[11]和顾浩峰^[16]采用纤维素酶(0.5%~0.8%)、木瓜蛋白酶(0.4%~0.65%)和果胶酶(0.6%~0.8%)复合酶体系,分别从香菇和猴头菇中提取硒多糖,其粗多糖得率分别达到18.16%和17.52%,多糖中硒含量分别为 $0.295\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.28\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。此外,当酶法提取与超声波技术联用时,硒多糖提取效率可进一步提升。孙玉军^[24]通过超声波技术辅助纤维素酶水解从秀珍菇中提取硒多糖,在酶添加量2%,料液比1:50,超声时间50 min,超声功率220 W的条件下,粗硒多糖的提取率为19.77%,硒含量为 $6.55\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。以上研究表明,多种技术协同联用以实现食用菌硒多糖的有效提取是一种研究趋势。此外,提取后的粗硒多糖通常需要经过透析、沉淀和冷冻干燥等步骤进行纯化,最终获得可用于进一步研究的粗食用菌硒多糖制品。

鉴于现有提取技术的局限性,粗制食用菌硒多糖中通常含有多种杂质,包括色素、蛋白质、单糖及其他小分子物质。因此,分离和纯化粗食用菌硒多糖对于获得均一性硒多糖组分、解析其结构特征及阐明生物活性机制至关重要。关于粗硒多糖的纯化通常采用多级分离纯化策略。在初步纯化阶段,主要采用Sevage法和三氯乙酸法去除蛋白质杂质^[10,15,19],利用过氧化氢氧化和大孔树脂静态吸附进行脱色处理^[18,20,23,25],并通过透析去除小分子杂质^[23]。在硒多糖精细纯化阶段,柱层析技术因其高分离效能而被广泛应用。离子交换色谱作为关键分离手段,尤其适用于中性或酸性硒多糖的纯化,其中DEAE-纤维素52是最常用的阴离子交换介质^[26]。该方法通过调节NaCl梯度洗脱条件可实现高分辨率分离,但其分离效果受pH影响,需严格控制缓冲体系(通常pH值6.0~8.0),且该技术存在介质价格较高,再生步骤繁琐等局限性。凝胶过滤色谱基于分子筛原理,采用Sephadex G-50/G-100或Sephacryl S-400/S-500等介质,可实现对不同分子量硒多糖组分的温和分离,且能保持多糖的结构完整性^[27]。然而,凝胶过滤色谱技术存在分离速度慢、处理通量低等缺点,不利于大规模样品处理。为提高纯化效率,建议采用两种技术联用策略:首先通过离子交换色谱依据电荷差异进行初步分离,再经凝胶过滤色谱按分子量进一步分级,从而获得高纯度的硒多糖组分。最终通过浓缩、透析和冷冻干燥等处理,可制备出适用于结构表征和活性研究的优质样品。

食用菌硒多糖的提取纯化已形成传统与新兴技术并行的技术体系,传统热水浸提和稀碱法因操作简便仍被广泛采用,而超声、微波及酶解法在效率和产物

质量上更具优势;纯化主要采用多级分离策略,包括脱蛋白、脱色和柱层析等关键步骤。未来研究将重点聚焦绿色提取技术的开发、工艺参数的智能优化以及多种提取技术的协同联用,以期在提高多糖得率的同时更好地保持其生物活性,为食用菌硒多糖的深入研究和产业化应用提供技术支撑。

2 食用菌硒多糖的结构特征

含硒多糖的结构特征主要取决于其糖苷键的构型、单糖组成、非碳水化合物基团的取代位点及分子链构象等关键参数。天然含硒多糖通过氢键、盐键和范德华力等非共价相互作用与多糖分子的羟基或醛基连接,形成稳定的硒-多糖复合物。尽管已有多种天然含硒多糖被成功分离,但其精确的结构信息和构象特征仍缺乏系统研究。从化学组成来看,含硒多糖通常属于杂多糖,其单糖组成包括岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和木糖等,且其组成比例受原料来源和提取工艺的影响。近年来,多项研究揭示了不同来源食用菌硒多糖的组成及构型特征,为深入理解其生物活性机制奠定了基础。研究表明,硒在多糖中的存在形式及连接方式具有多样性,且其结构特征与硒的结合模式密切相关^[14,28]。从单糖组成来看,不同来源的食用菌硒多糖的单糖组成呈现显著差异,这种差异与其生物活性密切相关。例如,平菇硒多糖(Se-POP)主要由阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、木糖、岩藻糖和葡萄糖组成,在 $3\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 质量浓度下对DPPH自由基的清除活性可达到约80%^[29];而秀珍菇硒多糖(SPMP-2a)以葡萄糖、木糖、阿拉伯糖、甘露糖和鼠李糖为主要组分,在 $6\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 质量浓度时DPPH自由基清除率约70%^[22],表明单糖组成可能影响其抗氧化能力。此外,富硒灵芝多糖与普通灵芝多糖相比,其甘露糖和鼠李糖含量减少,而葡萄糖含量相应增加,同时灵芝硒多糖对小鼠HCa-f肝腹水癌细胞抑瘤率高达80.95%,较普通灵芝多糖提升近2倍多^[30],这表明单糖组成及含量的变化可显著影响硒多糖的抗肿瘤活性。在分子构型方面,食用菌硒多糖普遍以 α -吡喃糖苷键为主要连接方式^[31,32],但其分支结构的复杂程度不一。例如,灰树花硒多糖(Se-GFP-22)具有相对简单的箱型结构,其主链由1,4- α -D-Glcp单元组成,侧链为1,4- α -D-Glc^[12];而平菇硒多糖组分二(Se-POP-2)则呈现高度分支的复杂构型,其主链由 $\rightarrow(2,6)\text{-}\alpha\text{-D-Galp}$ 与 $\rightarrow(2,4)\text{-}\beta\text{-L-Arap}$ 交替连接构成,支链 $\beta\text{-D-Manp-(1}\rightarrow$ 和 $\beta\text{-D-Manp-(1}\rightarrow 4)\text{-}\beta\text{-L-Arap-(1}\rightarrow$ 分别通过O-2键连接在主链特定位点上^[31],有研究表明,这种高度分支的结构中游离的甘露糖残基可能与免疫调节活性密切

相关^[32],表明硒多糖的结构特征直接影响其生物功能。此外,同一来源的食用菌硒多糖的不同组分也表现出显著的结构-活性差异。平菇硒多糖中(Se-POP),以 $\rightarrow 3,6)\text{-}\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow 3)\text{-}\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow$ 为主链的Se-POP-3(主要由葡萄糖构成)表现出显著的抗肿瘤活性^[33],这归因于含有的葡萄糖1 $\rightarrow$ 3糖苷键,已被证实与抗肿瘤活性密切相关^[34];相比之下,以半乳糖为主骨架的Se-POP-2(主链为 $\rightarrow [2,6)\text{-}\alpha\text{-D-Galp-(1}\rightarrow 6)\text{-}\alpha\text{-D-Galp-(1}4\rightarrow 2,4)\text{-}\beta\text{-L-Arap-(1}\rightarrow [2,6)\text{-}\alpha\text{-D-Galp-(1}\rightarrow 6)\text{-}\alpha\text{-D-Galp-(1}4\rightarrow$)由于缺乏该关键糖苷键而活性较弱^[31],这些研究结果系统揭示了硒多糖的分子构型(包括主链连接方式、分支程度及特征糖苷键)与其生物活性之间的构效关系。硒的化学形态分析表明,其可能以三种形式存在:硒氧双键($\text{O}=\text{Se}=\text{O}$)取代甲基基^[31],硒酯^[9]或通过 Se-O-C 键与糖环连接^[32]。这种结合方式的多样性可能直接调控多糖的抗氧化、免疫调节等活性。特别是 $\text{O}=\text{Se}=\text{O}$ 结构的极性特征可能增强分子间相互作用,而硒酯形式则可能提供更稳定的硒释放机制。这些结构特征的研究为阐明含硒多糖的构效关系提供了重要依据。

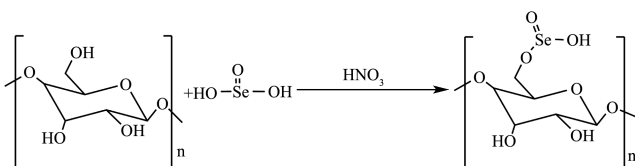


图2 天然多糖的硒化修饰

Fig.2 Selenium modification of natural polysaccharides

在硒化修饰过程中, Na_2SeO_3 会优先与多糖分子中的半缩醛羟基C6-OH发生特异性结合,形成稳定的硒酯结构(图2)。硒的取代位点及化学形态可以通过核磁共振和拉曼/傅立叶变换红外光谱进行表征。邓婕^[35]通过红外光谱分析证实羊肚菌多糖成功与硒元素结合形成硒化羊肚菌多糖。原子荧光光谱和凝胶渗透色谱分析显示,富硒羊肚菌多糖的硒含量显著提高至 $101.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、分子量降低至 $1.23\times 10^5\text{ Da}$,与未修饰的羊肚菌多糖(硒含量 $1.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分子量 $2.98\times 10^5\text{ Da}$)相比发生了显著变化。结合红外光谱、甲基化分析和核磁共振谱的综合表征,结果表明富硒羊肚菌多糖分子中的硒主要以亚硒酸酯形式存在。该多糖主要由甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成,其主链以1,4-糖苷键链接,并在O-6、O-3和O-2位点存在分支,属于 α -型多糖。此外,富硒羊肚菌多糖结构中还可能含有少量通过1,2-糖苷键连接且在O-6位点分支的葡萄糖单元,这些位点也是硒取代的主要位点。赵伟科等^[36]采用硝酸-亚硒酸钠法对纯化羊肚菌多糖进行硒

化修饰,成功制备了羊肚菌硒化多糖。红外光谱分析表明羊肚菌硒化多糖的异头碳呈现 α 构型,并存在明显的硒特征吸收峰,该硒化多糖具有较高的硒含量和良好的稳定性,其单糖组成分析显示由甘露糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖、半乳糖醛酸和半乳糖组成,摩尔比为1:0.42:3.57:3.34:1.86。

食用菌硒多糖的结构特征与生物活性呈现显著的构效关系。其结构特性主要取决于糖苷键构型、单糖组成及分支复杂程度,这些因素共同影响其抗氧化、抗肿瘤等生物活性。此外,硒化修饰可特异性改变多糖结构特征,为功能性硒多糖的定向设计提供了重要依据。

3 食用菌硒多糖的生理活性

硒多糖是食药两用菌中的一类具有重要药理活性和保健功能的生物大分子。近年来,研究者通过系统的体外(如细胞模型)和体内(如动物实验)研究,深入探究了食用菌硒多糖的多种生物活性及其健康益处。现有研究表明,食用菌硒多糖具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤、糖代谢调控、抗疲劳及器官保护等生理作用(图3)。下文将对这些生物活性及其潜在机制进行详细综述。

3.1 抗氧化

在生物医学研究领域,氧化还原平衡的调控机制一直是备受关注的重要科学问题。自由基作为活性氧族的重要成员,在细胞信号传导和免疫防御等生理过程中发挥着双重作用。然而,当自由基的产生与清除失衡时,会导致氧化应激状态,进而引发细胞损伤和多种疾病的发生。

研究表明,食用菌多糖具有显著的抗氧化活性,而经过硒修饰后的食用菌硒多糖则表现出更强的抗氧化能力。相较于普通多糖,食用菌硒多糖能够更有效地清除羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)和1,1-二苯基-2-苦肟基(DPPH)自由基,从而在减轻自由基诱导的机体氧化损伤方面展现出更优越的效果^[13,37]。例如,富硒蛹虫草多糖在总还原力、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(ABTS)自由基清除率等方面均优于普通多糖^[25],而富硒灰树花多糖对 $\cdot\text{OH}$ 的清除活性尤为突出^[13]。富硒平菇多糖不仅对ABTS和DPPH自由基的清除能力更强,还能显著抑制过氧化氢(H_2O_2)诱导的小鼠骨骼肌(C_2C_{12})细胞氧化损伤^[29]。此外,富硒灰树花多糖较普通多糖具有更强的DPPH自由基清除能力,这种活性提升与硒元素引起的分子量变化和构型修饰密切相关^[12]。

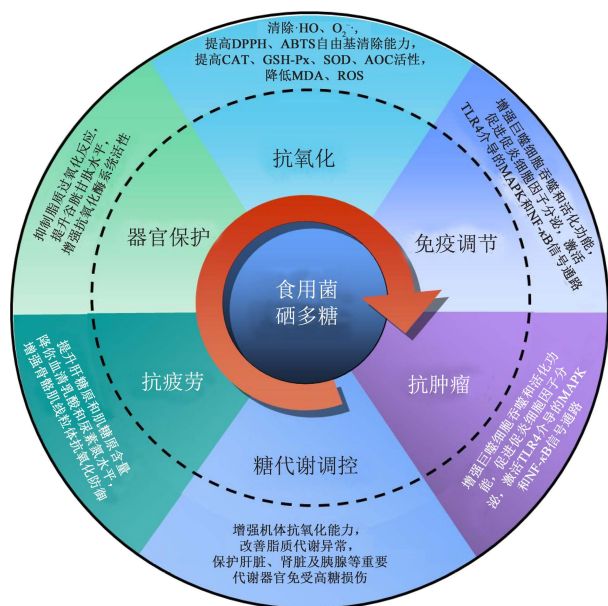


图3 食用菌硒多糖的生物活性

Fig.3 Bioactivity of selenopolysaccharides from edible mushrooms

在体内实验中, 硒多糖的抗氧化机制进一步得到验证。大球盖菇硒多糖可显著提高小鼠全血中谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和超氧化物歧化酶(SOD)活性, 同时降低丙二醛(MDA)水平^[20]。灵芝硒多糖不仅能抑制红细胞溶血, 还能通过上调过氧化氢酶(CAT)和GSH-Px活性保护H₂O₂损伤的小鼠神经元细胞系(PC12细胞), 并增强巨噬细胞的免疫调节功能^[10]。此外, 秀珍菇硒多糖可通过降低活性氧(ROS)水平和上调Bcl-2表达, 保护人角质形成细胞(HaCaT细胞)免受氧化应激性凋亡^[38]。最新研究还发现, 羊肚菌硒多糖(25 μg·mL⁻¹)不仅能提高体外抗氧化能力, 还能通过增强肝脏抗氧化防御系统缓解酒精性肝损伤^[39]。这些研究共同表明, 硒修饰可显著增强多糖的抗氧化效能, 使其在氧化应激相关疾病的干预中具有潜在应用价值。

3.2 免疫活性

研究表明硒修饰可显著增强食用菌多糖的免疫调节功能。Li等^[40]的体内实验揭示, 富硒灰树花多糖不仅能有效改善缺硒小鼠的免疫状态, 还表现出显著的补硒效果。在分子机制层面, 多项研究证实^[41-43]硒多糖主要通过TLR4/MAPK介导的信号通路发挥免疫调节作用。富硒灰树花多糖可促进巨噬细胞吞噬活性, 上调白细胞介素-2(IL-2)、肿瘤坏死因子-α(TNF-α)、干扰素-γ(IFN-γ)等关键细胞因子及其mRNA表达, 并通过TLR4/MAPK信号通路激活RAW264.7巨噬细胞^[40,42]。类似地, 王德^[31]发现平菇硒多糖能显著增强巨噬细胞活化和细胞因子分泌, 但其促增殖作

用与硒含量呈非剂量依赖性。最新研究显示, 富硒羊肚菌多糖通过TLR4-TRAF6-MAPK-NF-κB信号级联反应激活巨噬细胞免疫应答^[43]。综上所述, 硒修饰食用菌多糖的免疫调节作用主要涉及三个关键机制: (1) 增强巨噬细胞吞噬和活化功能; (2) 促进促炎细胞因子分泌; (3) 激活TLR4介导的MAPK和NF-κB信号通路。值得注意的是, 虽然硒含量与免疫活性存在相关性, 但其促进作用并非简单的剂量依赖关系。

3.3 抗肿瘤

食用菌硒多糖因其独特的抗肿瘤活性和低毒性特征而备受关注。研究表明^[30,43,44], 食用菌硒多糖通过多种途径发挥抗肿瘤作用。尚德静^[30]首次证实灵芝硒多糖对小鼠HCa-f肝腹水癌的抑制率达80.30%, 活性是普通多糖的2倍; Mao等^[44]发现灰树花硒多糖通过增强免疫功能显著抑制肿瘤生长, 其机制涉及促进TNF-α和IL-2分泌, 以及增强巨噬细胞吞噬功能。值得注意的是, 灰树花硒多糖不仅能增强5-Fu的抗肿瘤效果, 还可减轻其毒副作用^[45]。进一步研究发现, 硒化灰树花多糖通过死亡受体和线粒体途径协同抑制胃癌细胞增殖^[46]。Zhang等^[33,34]证实平菇硒多糖可通过调节Bax/Bcl-2蛋白比例和抑制上皮-间质转化过程诱导癌细胞凋亡。此外, Kaleta等^[47]发现富硒香菇多糖对正常细胞的促增殖作用显著高于癌细胞, 表现出良好的选择性。这些研究结果表明, 食用菌硒多糖具有多靶点、低毒性的抗肿瘤特性, 其作用机制主要包括免疫调节、直接诱导肿瘤细胞凋亡、抑制转移及协同化疗等方面。与常规化疗药物相比, 食用菌硒多糖对正常细胞毒性较低, 且能增强机体免疫功能, 在肿瘤辅助治疗和预防方面具有独特优势。

3.4 其他生理活性

食用菌硒多糖除具有显著的免疫调节和抗肿瘤活性外, 在糖代谢调控、骨骼健康维护、器官保护及抗疲劳等方面均展现出独特的生理调节功能。在糖代谢调控方面, Liu等^[48]的研究证实, 梭柄松苞菇硒多糖能显著改善链脲佐菌素诱导的糖尿病小鼠代谢紊乱, 其降糖机制涉及: 1) 增强机体抗氧化能力; 2) 改善脂质代谢异常; 3) 保护肝脏、肾脏及胰腺等重要代谢器官免受高糖损伤。在骨骼健康维护方面, Luo等^[49]发现富硒猴头菇多糖可通过调节骨代谢显著提高实验大鼠骨矿物质密度和骨矿物质含量, 表明其在骨质疏松防治中的潜在应用价值。

针对器官保护功能, 多项研究揭示了食用菌硒多

糖的抗氧化防御机制。Shi 等^[15]证实富硒灵芝多糖可通过三重保护机制减轻缺血再灌注损伤：1) 抑制脂质过氧化反应；2) 提升谷胱甘肽水平；3) 增强抗氧化酶系统活性，从而有效保护心脏和肝脏组织。最新研究发现，羊肚菌硒多糖具有显著的抗疲劳作用^[36]，其作用途径包括：1) 提升能量储备（肝糖原和肌糖原含量增加）；2) 改善代谢产物（血清乳酸和尿素氮水平降低）；3) 增强骨骼肌线粒体抗氧化防御（丙二醛含量降低，抗氧化酶活性提高）。这些研究结果系统揭示了食用菌硒多糖通过调节能量代谢、增强抗氧化防御和维护器官功能等多途径发挥生理调节作用的分子机制，为其在代谢性疾病防治、运动营养补充和器官保护等领域的应用提供了科学依据。

食用菌硒多糖通常比食用菌多糖具有更高的生物活性，这种增强效应主要归因于硒和多糖的协同作用。多糖分子本身具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤等生理功能，而硒的引入不仅显著增强了其生理活性，更通过与多糖分子形成特殊的复合结构。这种独特的硒-多糖协同体系，使得硒化多糖在保留原有生物活性的同时，整体功效得到显著提升，为其在生物医药领域的应用提供了重要价值。

4 食用菌硒多糖的应用

食用菌硒多糖作为一种兼具多糖生物活性和硒元素生理功能的天然产物，在食品、医药和保健品等领域展现出广阔的应用前景。近年来，食用菌硒多糖在功能性食品开发中的应用逐渐受到关注，尤其在饮品领域展现出独特优势。硒多糖因其优异的水溶性和生物活性，成为开发抗氧化功能性饮品的理想活性成分。罗盈依^[50]通过系统优化，建立了平菇硒多糖口服液的最佳配方体系：采用 1:30 的固液比（多糖冻干粉：蒸馏水），配合 6% 澄清剂、2% 木糖醇、0.05% 柠檬酸和 0.3% 山梨酸钾，该配方不仅最大限度保留口服液饮品中硒多糖等有效成分，还显著提升了产品的总抗氧化能力和感官品质。在此基础上，于苗苗^[51]进一步拓展应用范围，成功开发出海鲜菇硒多糖乳饮料，其优化配方包含 15% 富硒多糖溶液、0.05% 复合稳定剂及适量乳制品和调味剂，所得产品风味独特，稳定性好，具有良好的羟基自由基清除活性和 DPPH 自由基清除活性。这些研究为食用菌硒多糖在功能性饮品中的产业化应用提供了重要的技术参考和理论支撑。

食用菌硒多糖因其免疫调节、抗肿瘤和抗氧化等活性成为医药领域研究的热点。中南大学钟世安教授团队历经多年研究，成功从特殊驯化的平菇中分离纯化出两种具有全新结构的硒多糖，Se-POP-3 和 Se-

POP-21。实验研究表明，这两种硒多糖化合物具有以下显著特性：（1）良好的生物安全性，在实验剂量范围内未观察到明显的毒副作用；（2）显著的抗肿瘤活性，能够特异性诱导肿瘤细胞凋亡并有效抑制其转移扩散^[33,52]；（3）独特的免疫调节功能，既可促进 T 细胞分泌，又能修复受损细胞^[53]。这一研究为开发新型抗肿瘤药物提供了具有重要应用前景的候选分子。不过，目前关于食用菌硒多糖的研究仍处于实验室阶段，需进一步开展临床试验以验证其安全性和有效性。

食用菌硒多糖作为一种具有多重生物活性的功能性成分，在保健食品领域展现出显著的应用价值。硒多糖凭借其调节血糖、血脂、增强免疫、抗衰老、抗氧化和调节肠道菌群等功效^[54-57]，有望成为中老年人、亚健康人群的理想营养干预剂。目前市售产品剂型主要包括胶囊剂、口服液等单一制剂，未来可通过与益生菌、维生素等活性成分的协同复配，进一步优化其功能特性。尽管食用菌的硒多糖市场潜力巨大，但其规模化生产、标准化制定以及临床转化仍需突破。随着居民健康意识的提升和生物技术的创新发展，食用菌硒多糖有望在功能食品和精准医疗领域发挥更大价值。

5 展望

食用菌硒多糖凭借其硒元素与多糖的双重协同效应，在抗氧化、免疫调节及抗肿瘤等领域展现出显著潜力，具有重要的功能性食品与医药应用价值。然而，当前食用菌硒多糖研究已进入从基础探索向应用转化的关键阶段，但仍存在若干关键问题亟待解决。首先，食用菌硒多糖的制备、硒化修饰及生物利用度评价方面仍存在明显不足，可建立标准化的硒多糖制备工艺和质量控制体系，确保研究结果的可比性和可重复性；探索新型硒化修饰策略，如定点硒化技术，以获得更安全高效的硒多糖衍生物；开展人群干预研究，评估不同来源硒多糖的生物利用度和安全性差异。其次，尽管食用菌硒多糖的协同效应已被广泛证实，但其多靶点调控的分子机制仍不清晰，可结合单细胞转录组、定量蛋白组等策略明确硒多糖的多靶点作用通路。此外，食用菌硒多糖的构效关系尚未充分阐明，其活性构象与特定功能（如免疫增强或抗肿瘤）的关联需通过结构修饰与活性筛选进一步验证。最后，开展动物模型（如啮齿类急/亚慢性毒性试验）、体外细胞毒性评价（如正常/肿瘤细胞 IC₅₀ 比较）以及同位素示踪药物动力学分析，全面评估其安全性和有效性，以推动其在功能食品和药物开发中的应用。

参考文献

- [1] ZHOU F, PENG Q, WANG M, et al. Influence of processing methods and exogenous selenium species on the content and *in vitro* bioaccessibility of selenium in *Pleurotus eryngii* [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127661.
- [2] HU T, LI H, ZHAO G, et al. Selenium enriched *Hypsizygus marmoreus*, a potential food supplement with improved Se bioavailability [J]. LWT, 2021, 140: 110819.
- [3] KIELISZEK M, SERRANO SANDOVAL S. The importance of selenium in food enrichment processes. A comprehensive review [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2023, 79: 127260.
- [4] ROMAN M, JITARU P, BARBANTE C. Selenium biochemistry and its role for human health [J]. Metallomics, 2013, 6(1): 25-54.
- [5] YANG J, CAI J, CHEN Z, et al. Effect of steaming on the selenium form, structure, and bioavailability of selenopolysaccharides from *Chlamys nobilis* [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143715.
- [6] HUANG S, YANG W, HUANG G. Preparation and activities of selenium polysaccharide from plant such as *Grifola frondosa* [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 242: 116409.
- [7] PRASAD B, AKANKSHA A, KAUR P, et al. Understanding selenoproteins: Structural insights, biological functions and transformative applications in therapeutics [J]. Process Biochemistry, 2025, 150: 148-160.
- [8] XU M, ZHU S, LI Y, et al. Effect of selenium on mushroom growth and metabolism: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 328-340.
- [9] LI J, SHEN B, NIE S, et al. A combination of selenium and polysaccharides: Promising therapeutic potential [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 206: 163-173.
- [10] DONG Z, DONG G, LAI F, et al. Purification and comparative study of bioactivities of a natural selenized polysaccharide from *Ganoderma lucidum* mycelia [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 190: 101-112.
- [11] GU H, LIANG L, ZHU X P, et al. Optimization of enzymatic extraction, characterization and bioactivities of Se-polysaccharides from Se-enriched *Lentinus edodes* [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102346.
- [12] LI Q, WANG W, ZHU Y, et al. Structural elucidation and antioxidant activity a novel Se-polysaccharide from Se-enriched *Grifola frondosa* [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 42-52.
- [13] MAO G, ZOU Y, FENG W, et al. Extraction, preliminary characterization and antioxidant activity of Se-enriched Maitake polysaccharide [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101: 213-219.
- [14] WANG Y, JI Y, MENG K, et al. Effects of different selenium biofortification methods on *Pleurotus eryngii* polysaccharides: Structural characteristics, antioxidant activity and binding capacity *in vitro* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133214.
- [15] SHI W, HAN H, CHEN G, et al. Extraction, characterization of the polysaccharide extracts from Se-enriched *G. lucidum* (Se-GLP) and its inhibition against oxidative damage in ischemic reperfusion mice [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3): 774-778.
- [16] 顾浩峰.酶法辅助提取猴头菇中硒多糖工艺中复合酶用量的优化[J].食品与发酵科技,2017,53(4):39-44.
- [17] 刘春延,赵博,张国财,等.富硒黑木耳硒多糖超声-微波提取工艺优化及其抗氧化活性[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(4):435-440.
- [18] 刘敏.真姬菇SK-03菌丝体硒多糖结构及抗氧化、抗炎症分析[D].泰安:山东农业大学,2019.
- [19] 茆广华.灰树花子实体富硒及其硒多糖的研究[D].镇江:江苏大学,2014.
- [20] 苗元振.大球盖菇硒多糖分离纯化及其抗氧化活性分析[D].泰安:山东农业大学,2009.
- [21] 乔艳明.富硒条件下香菇液体培养基优化及硒多糖提取工艺[D].汉中:陕西理工学院,2016.
- [22] 宋广磊,杜琪珍.木耳硒多糖的分离纯化及对腹水型S180细胞膜流动性的影响[J].菌物学报,2010,29(5):713-718.
- [23] 宋振.蛹虫草胞内硒多糖提取及其抗氧化活性研究[D].泰安:山东农业大学,2009.
- [24] 孙玉军.秀珍菇多糖SPMP-2a的制备及其抗氧化活性研究[D].合肥:安徽农业大学,2017.
- [25] 赵博.蛹虫草富硒条件培养优化及硒多糖活性机理的研究[D].黑龙江:东北林业大学,2017.
- [26] PU Y, YIN C, ZHANG L, et al. Extraction, purification, structural characterization, pharmacological activities, and applications of *Tricholoma polysaccharides*: A review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 350: 120053.
- [27] LAI J, FAN X, ZHANG H, et al. *Polygonum cuspidatum polysaccharide*: A review of its extraction and purification, structure analysis, and biological activity [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 331: 118079.
- [28] 何倩倩,刘雨,满长森,等.硒多糖研究进展[J].食品与发酵工业, 2025,51(11):416-425.
- [29] MA L, ZHAO Y, YU J, et al. Characterization of Se-enriched *Pleurotus ostreatus* polysaccharides and their antioxidant effects *in vitro* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 421-429.
- [30] 尚德静.灵芝有机硒的生物转化及灵芝硒多糖的硒活性结构分析、抑癌作用的研究[D].大连:大连理工大学,2000.
- [31] 王德.平菇硒多糖的提取分离、结构表征及免疫活性研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [32] LO T, JIANG Y, CHAO A, et al. Use of statistical methods to find the polysaccharide structural characteristics and the relationships between monosaccharide composition ratio and macrophage stimulatory activity of regionally different strains of *Lentinula edodes* [J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 584(1): 50-56.
- [33] ZHANG Y, ZHANG Z, LIU H, et al. Physicochemical characterization and antitumor activity *in vitro* of a selenium polysaccharide from *Pleurotus ostreatus* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 2934-2946.
- [34] ZHANG Y, ZHANG Z, LIU H, et al. A natural selenium polysaccharide from *Pleurotus ostreatus*: Structural elucidation, anti-gastric cancer and anti-colon cancer activity *in vitro* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 201: 630-640.

- [35] 邓婕. 硒化羊肚菌多糖的制备、结构表征及生物活性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
- [36] 赵伟科, 杨道然, 王美华. 羊肚菌硒化多糖结构表征及抗运动疲劳作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 110-120.
- [37] 江洁, 麦海美, 解彬, 等. 羊肚菌菌丝体富硒条件优化及其硒多糖抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 120-125.
- [38] SUN Y, ZHOU C, HUANG S, et al. Selenium polysaccharide SPMP-2a from *Pleurotus geesteranus* alleviates H₂O₂-induced oxidative damage in HaCaT cells [J]. BioMed Research International, 2017, 2017(1): 4940384.
- [39] ZHANG Y, WANG L, HE J, et al. Antioxidation and hepatoprotection of selenium mycelium polysaccharides against alcoholic liver diseases from the cultivated morel mushroom *Morchella esculenta* (Ascomycota)[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2024, 26(1): 55-66.
- [40] LI Q, CHEN G, WANG W, et al. A novel Se-polysaccharide from Se-enriched *G. frondosa* protects against immunosuppression and low Se status in Se-deficient mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 117: 878-889.
- [41] LI Q, CHEN G, CHEN H, et al. Se-enriched *G. frondosa* polysaccharide protects against immunosuppression in cyclophosphamide-induced mice via MAPKs signal transduction pathway [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 445-456.
- [42] LI Q, ZHAO T, MAO G, et al. A Se-enriched *Grifola frondosa* polysaccharide induces macrophage activation by TLR4-mediated MAPK signaling pathway [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 238: 124108.
- [43] QIAN L, DU M, YANG X, et al. Microanalysis characterization and immunomodulatory effect for selenium-enriched polysaccharide from *Morchella esculenta* (L.) pers [J]. Molecules, 2023, 28: 2885.
- [44] MAO G H, REN Y, LI Q, et al. Anti-tumor and immunomodulatory activity of selenium (Se)-polysaccharide from Se-enriched *Grifola frondosa* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 82: 607-613.
- [45] MAO G, LI Q, DENG C, et al. The synergism and attenuation effect of Selenium (Se)-enriched *Grifola frondosa* (Se)-polysaccharide on 5-Fluorouracil (5-Fu) in Heps-bearing mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 2211-2216.
- [46] HUO Y, DING W J, LIU Y R, et al. Selenochemical modification of low molecular weight polysaccharides from *Grifola frondosa* and the mechanism of their inhibitory effects on gastric cancer cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269: 131812.
- [47] KALETA B, GÓRSKI A, ZAGOŹDŹON R, et al. Selenium-containing polysaccharides from *Lentinula edodes*-Biological activity [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223: 115078.
- [48] LIU Y, SUN J, RAO S, et al. Antidiabetic activity of mycelia selenium-polysaccharide from *Catathelasma ventricosum* in STZ-induced diabetic mice [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 62: 285-291.
- [49] LUO C, CHEN Y. Optimization of extraction technology of Se-enriched *Heridium erinaceum* polysaccharides by Box-Behnken statistical design and its inhibition against metal elements loss in skull [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(3): 854-860.
- [50] 罗盈依. 平菇富硒液体发酵条件优化及其富硒多糖饮品配方设计[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [51] 于苗苗. 富硒海鲜菇菌丝体发酵、活性研究及产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [52] ZHANG Z, ZHANG Y, LIU H, et al. A water-soluble selenium-enriched polysaccharide produced by *Pleurotus ostreatus*: Purification, characterization, antioxidant and antitumor activities *in vitro* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 168: 356-370.
- [53] WANG D, WANG J, LIU H, et al., The main structural unit elucidation and immunomodulatory activity *in vitro* of a selenium-enriched polysaccharide produced by *Pleurotus ostreatus* [J]. Molecules, 2022, 27(8): 2591.
- [54] LI J, CHEN Y, CAI Y, et al. Selenium-enriched *Tropicoporus linteus* mycelium enhances the anti-aging effect through antioxidant reactions in *Drosophila melanogaster* [J]. Journal of Functional Foods, 2024, 113: 106003.
- [55] WEN C, TANG J, LIU D, et al. Selenium release during the simulated gastrointestinal digestion and antioxidant activity of selenium nanoparticles stabilized by *Grifola frondosa* polysaccharides and gallic acid conjugates [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 315: 144620.
- [56] 沈琴, 路乐乐, 潘票, 等. 黑木耳硒化多糖制备、结构及体外活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 250-259.
- [57] 贾楠楠, 刘静, 王汉屏. 低分子量酶解灵芝硒多糖对小鼠肠道菌群的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 292-303.