

猴头菇多糖的化学修饰及其生物活性研究进展

王舰¹, 蔡高袁¹, 吴莲花², 李伶俐^{3*}, 孙培龙¹, 杨开^{1*}

1 浙江工业大学食品科学与工程学院, 浙江 杭州 310014

2 浙江慧和健康科技有限公司, 浙江 丽水 323006

3 丽水市农林科学研究院, 浙江 丽水 323000

摘要: 猴头菇多糖是猴头菇中的主要活性成分, 具有抗氧化、抗肿瘤、调节免疫等多种生物活性。然而, 天然猴头菇多糖存在溶解性、生物利用度和活性强度等局限, 因此常通过化学修饰优化其性能。近年来有关猴头菇多糖的化学修饰、结构特征及其对生物活性的影响研究已有不少报道, 但未见有相关综述性论文。本文通过系统梳理与整合分析现有文献, 归纳了近年来猴头菇多糖化学修饰和生物活性方面的研究进展, 阐述了包括硫酸化、乙酰化、磷酸化、硒化、羟乙基化等猴头菇多糖的化学修饰方法通过引入新的官能团取代多糖链上的羟基等基团, 概括了猴头菇多糖化学修饰后的结构变化以及对猴头菇多糖的溶解性、电荷与稳定性、黏度与流变性、乳化性等理化性质的影响, 分析了猴头菇多糖经化学修饰的生物活性变化及其机理。本文明确了猴头菇多糖的结构修饰与生物活性变化的相关性, 为猴头菇及其他食用菌多糖修饰的进一步研究和应用提供参考。

关键词: 猴头菇多糖; 化学修饰; 结构特征; 生物活性; 机理

[引用本文]

王舰, 蔡高袁, 吴莲花, 李伶俐, 孙培龙, 杨开, 2026. 猴头菇多糖的化学修饰及其生物活性研究进展. 菌物学报, 45(3): 250269
Wang J, Cai GY, Wu LH, Li LL, Sun PL, Yang K, 2026. Research advance in the chemical modification methods and the biological activities of *Hericium erinaceus* polysaccharides: a review. Mycosystema, 45(3): 250269

资助项目: 浙江省“尖兵领雁+X”科技计划项目(2025C01101); 浙江省自然科学基金(LLSSZ25C200001)

This work was supported by the Zhejiang Provincial Key Research and Development Program (2025C01101) and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LLSSZ25C200001).

*Corresponding authors. E-mails: LI Lingli, lilingli649@sina.com; YANG Kai, yangkai@zjut.edu.cn

Received: 2025-09-10; Accepted: 2025-10-20

Research advance in the chemical modification methods and the biological activities of *Hericium erinaceus* polysaccharides: a review

WANG Jian¹, CAI Gaoyuan¹, WU Lianhua², LI Lingli^{3*}, SUN Peilong¹, YANG Kai^{1*}

1 College of Food Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China

2 Zhejiang Wiseplus Health Technology Co. Ltd., Lishui 323006, Zhejiang, China

3 Lishui Institute of Agriculture and Forestry Sciences, Lishui 323000, Zhejiang, China

Abstract: *Hericium erinaceus* polysaccharides as the main active component extracted from *H. erinaceus* have many biological activities such as anti-oxidation, anti-tumor, and immune regulation. However, there are some limitations in solubility, bioavailability and activity intensity of natural *H. erinaceus* polysaccharides. In recent years, certain progress has been made in the studies of chemical modification, and structural features, having effects on the biological activities of *H. erinaceus* polysaccharides. In this paper, the recent advances in the study of chemical modification and biological activities of *H. erinaceus* polysaccharides are summarized, and the chemical modification methods of *H. erinaceus* polysaccharides through introducing new functional groups to substitute hydroxyl groups on the polysaccharide chains are elucidated. The changes in the structure and physicochemical properties of the chemically modified *H. erinaceus* polysaccharides are introduced, and the alterations in biological activities and the underlying mechanisms of the chemically modified *H. erinaceus* polysaccharides are analyzed and discussed. It is expected that this work might provide a theoretical basis for further exploration of modification of *H. erinaceus* polysaccharides.

Keywords: *Hericium erinaceus* polysaccharides; chemical modification; structural characteristics; biological activities; mechanisms

猴头菇 *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. (HE), 又称猴头菌、猴头蘑, 为齿菌科、猴头菇属真菌, 是一种常见的药食兼用菌, 主要生长在蒙古栎上, 富含多种营养成分(Dai 2010; Friedman 2015; Wu *et al.* 2019)。猴头菇子实体主要成分包括糖类(20%–60%)、蛋白(10%–25%)和脂肪(4%–8%)等, 而猴头菇菌素和猴头菇菌酮等小分子化合物含量通常不到 1%, 其化学成分可能因栽培条件和地理环境因素而呈现差异(何晋浙等 2016; Kostanda *et al.* 2024)。猴头菇多糖(HE polysaccharide, HEP)是猴头菇中主要的活性成分(Wang *et al.* 2019c), 可以从其子实体、发酵菌丝体及培养液中提取分离得到。

研究表明, 猴头菇多糖具有保护胃黏膜(Cui *et al.* 2023)、调节免疫(Yu *et al.* 2021)、抗氧化(Wang *et al.* 2018)、降血糖(Cai *et al.* 2020)、调节肠道菌群(Chen S *et al.* 2024)、保护神经(Guan *et al.* 2024)等多种活性。食用菌多糖的生

物活性与其化学结构(单糖组成、糖苷键类型、分子量等)密切相关, 这是它们功能不同的根本原因(Zhu *et al.* 2025)。猴头菇多糖与其他食用菌多糖在化学结构和活性功能上存在显著区别。此外, 鉴于猴头菇多糖来源(子实体、菌丝体和培养液等)与提取纯化方法的不同, 导致其结构存在复杂性、多样性与不确定性。因此, 系统梳理比较不同猴头菇多糖结构的共性特征, 对于阐明其构效关系至关重要。得益于其独特的结构特性和生物活性, 猴头菇多糖被视为一种开发功能性食品和药品的理想来源, 具有广阔的应用前景(He *et al.* 2017)。

然而, 天然猴头菇多糖在溶解性、生物利用度和生物活性强度等方面仍存在局限。为改善这些不足, 化学修饰广泛应用于多糖的结构优化, 通过引入特定基团, 改变多糖的理化性质和结构特征调控其生物活性。同时, 正向修饰作用的确定需基于系统的实验验证, 结合活

性、安全性、稳定性等综合判断。

近十年来猴头菇多糖的化学修饰、结构特征及其对生物活性的影响研究已有不少报道,但未见有相关综述性论文,因此本文通过系统梳理与整合分析现有文献,明确猴头菇多糖的结构修饰与生物活性变化的相关性,为猴头菇及其他食用菌多糖的后续研究和应用提供参考。

1 猴头菇多糖的化学修饰

猴头菇多糖的分子量、单糖组成、结构重复单元以及糖苷键的类型与特异性等,共同决定了猴头菇多糖的独特特征。与其他食用菌多糖相比,猴头菇多糖主链除常见的(1→3)- β -D-葡聚糖和(1→6)- β -D-葡聚糖外,还结合半乳糖、甘露糖等共同构成杂多糖结构(Chen SK *et al.* 2023)。猴头菇多糖的结构多样性主要因其不同的来源和提取纯化方法,而多糖的化学结构与其生物活性有着密切的关系(Wang *et al.* 2024)。因此全面解析多糖的结构特征对阐明多糖的构效关系尤为重要。通过对比不同猴头菇多糖的结构,发现其分子量和结构重复单元等存在一定差异,不同来源猴头菇多糖的提取方法、单糖组成、分子量以及主要糖苷键类型见表1,其中部分数据对应后文中化学修饰原料的猴头菇多糖。

对比不同来源的猴头菇多糖(表1),子实体多糖结构相对稳定,主要由葡萄糖构成;而通过液体发酵获得的菌丝体多糖则结构差异较大,其组成受菌种类型、培养基成分及发酵条件等多种因素调控,常含有不同比例的半乳糖、甘露糖、岩藻糖等。此外,提取方法(如热水提取、碱提取、超声辅助提取等)也会显著影响多糖的分子量和化学组成,进一步增加其结构的不确定性。在糖苷键类型上,猴头菇多糖除常见的(1→3)- β 和(1→6)- β 外,还含有(1→)- α 和(1→6)- α 等多种类型。

猴头菇多糖的修饰方法包括物理、生物、化学修饰等,通过改变多糖的结构(空间结构、取代基类别与取代度、分子量及其分布等),以

此获得具有更高或新的生物活性的多糖衍生物。相较于物理修饰局限于形态的变化,生物修饰依赖天然生物分子的固有特性,总体修饰范围受限,多糖的化学修饰将特定基团引入多糖链中,能够显著提升其理化特性和生物活性,实现更稳定、更多元化的修饰(Liu *et al.* 2024)。目前,多糖的化学修饰主要包括氧化、羧甲基化、乙酰化、磷酸化、硫酸化、点击反应和聚合物接枝等(Chen X *et al.* 2024)。

现有化学修饰猴头菇多糖的报道中,猴头菇多糖多来源于子实体,其单糖组成与多数报道的结果基本一致(表1)。然而,对于化学修饰的猴头菇多糖的结构表征的研究仍较为有限,后续有必要开展更多的多糖结构表征,这有助于深入理解修饰前后多糖的结构性质及其生物活性变化。多糖不同化学修饰的反应路径和典型取代度总结见表2,根据猴头菇多糖的单糖组成(Liu *et al.* 2021; Su *et al.* 2023),在化学式表达中选择以葡萄糖基础单元来代表猴头菇多糖。化学修饰有效突破了天然多糖在溶解性、稳定性或安全性等方面的限制,同时通过构效关系调整了其生物活性。因此,选择合适的化学修饰方法对于改善猴头菇多糖的生物活性至关重要,本文将系统论述化学修饰对猴头菇多糖的理化特性及生物活性的影响。

1.1 硫酸化修饰

猴头菇多糖的硫酸化修饰是将硫酸根基团引入多糖羟基位点,形成稳定的硫酸酯键。根据反应体系与催化条件的不同,硫酸化修饰方法分为氯磺酸-吡啶法、三氧化硫法和浓硫酸法等(Niu *et al.* 2023)。硫酸化修饰方法是影响硫酸化多糖生物活性的关键因素。修饰方法的选择影响取代试剂、反应时间和温度等。王新宇(2011)系统对比了氯磺酸-吡啶法和浓硫酸法两种方法修饰小刺猴头菇多糖,氯磺酸-吡啶法通过酯化反应将硫酸基团引入多糖链,取代度可达0.94,而浓硫酸法的取代度约为0.82。浓硫酸法工艺简便,但反应剧烈且取代度不均一,而氯磺酸-吡啶法的反应条件温和,取代度可控,适用性较广。

表 1 猴头菇多糖的结构特征

Table 1 Structural characteristics of *Hericium erinaceus* polysaccharides

来源 Sources	提取方法 Extraction methods	单糖组成 Monosaccharide composition	分子量 Molecular weight /kDa	糖苷键 Glycosidic bond	参考文献 References
子实体 Fruiting body	热水提取 Hot water extraction	Fuc/Glc-HCl/Gal/ Glc/Xyl/Man= 0.098/0.009/0.476/ 0.369/0.004/0.043	16.3	-	Li <i>et al.</i> 2024
	热水提取 Hot water extraction	Rha/Fuc/Man/Glc/ Gal = 1.47/0.93/ 1.36/8.68/4.08	18.3	(1→)- α -D-Glc, (1→3,4)- α -D-Glc, (1→6)- α -D-Gal, (1→3,4)- β -D-Man, (1→3)- α -Rha, (1→2)- β -L-Fuc	Wu <i>et al.</i> 2018; 古佩娴等 2022 Wu <i>et al.</i> 2018; Gu <i>et al.</i> 2022
	热水提取 Hot water extraction	Man (5.13%), Glc (43.02%), Gal (51.85%)	12.713	-	廖兵武 2023
	热水提取 Hot water extraction	Glc/Man/Gal= 1.47:0.21:1.00	-	-	Liao 2023 周艳 2021
	热水提取 Hot water extraction	Glc/Gal/Man/Ara= 50.80/42.30/4.58/2.29	16.15	-	Zhou 2021 Luo <i>et al.</i> 2020; Qin <i>et al.</i> 2017; Ren <i>et al.</i> 2017
	热水提取 Hot water extraction	-	-	-	徐兵等 2018
	碱提取 Alkali extraction	Glc (67.0 g/100 g)	5 400, 290	(1→)- β -D-Glc, (1→3)- β -D-Glc, (1→3,6)- β -D-Glc, (1→6)- β -D-Glc	Xu <i>et al.</i> 2018 Wang <i>et al.</i> 2019b
	碱提取 Alkali extraction	Glc	538	(1→)-Glc, (1→3)-Glc, (1→3,6)-Glc	张安强等 2009
	酶辅助提取 Enzyme assisted extraction	Glc (53.5%), Rha (10.0%), Man (1.2%) and Gal (0.4%)	5.6	(1→)- α -L-Rha, (1→)- β -D-Glc, (1→6)- β -D-Glc, (1→3, 6)- β -D-Glc	Zhang <i>et al.</i> 2009 Liu <i>et al.</i> 2021
	酶-微波辅助提取 Enzyme-microwave assisted extraction	Glc/Gal/Fuc = 12.07/6.23/0.02; 18.79/10.22/0.49; 14.52/13.91/0.52; 20.84/19.07/1.57; 9.14/8.79/1.19 (HEP from different geographical origins)	-	-	何晋浙等 2016 He <i>et al.</i> 2016
发酵菌丝体 Fermented mycelium	热水提取 Hot water extraction	Glc, Gal, Man, Glc-UA	36.1	(1→3)- β -D-Glc, (1→6)- β -D-Glc, (1→3,6)- β -D-Glc, (1→6)- α -D-Gal, (1→)- β -D-Man, (1→2)- α -D-Man	Hu <i>et al.</i> 2021
	酶-微波辅助提取 Enzyme-microwave assisted extraction	Glc:Gal:Fuc = 2.21: 7.71:1.39	-	-	何晋浙等 2016 He <i>et al.</i> 2016
液体深层 发酵浸膏 Liquid submerged fermentation extract	热水提取 Hot water extraction	-	43.3	-	王新宇 2011 Wang 2011

注: -表示文献中未表明

Note: -, not specified in the literature.

氯磺酸-吡啶法中强酸性的氯磺酸与吡啶形成的络合物可实现羟基的质子活化, 进而促进硫酸根基团的区域选择性取代, 获得高取代度

的硫酸化多糖。周艳(2021)采用氯磺酸-吡啶法对猴头菇多糖进行硫酸化修饰, 并通过单因素试验和响应面法系统优化猴头菇多糖硫酸化的

工艺参数, 氯磺酸-吡啶的摩尔比为 1:4, 反应温度为 59 °C, 反应时间为 2.6 h, 可获得最大取代度 0.457。张安强等(2009)通过氯磺酸-吡啶法实现了水不溶性猴头菇多糖的功能改性, 采用碱提醇沉法获得的猴头菇多糖经硫酸化修饰后, 分子的表面极性显著增强, 水溶性提高, 这为天然多糖的溶解性改善提供了重要技术路径。

1.2 乙酰化修饰

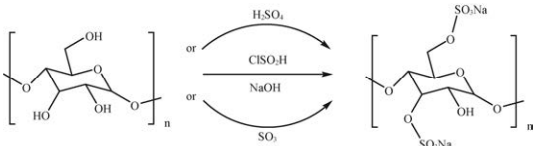
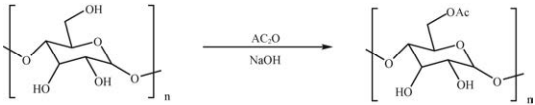
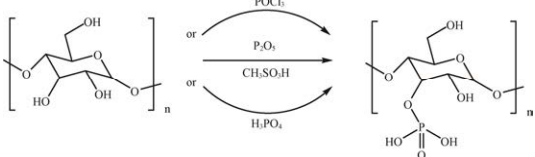
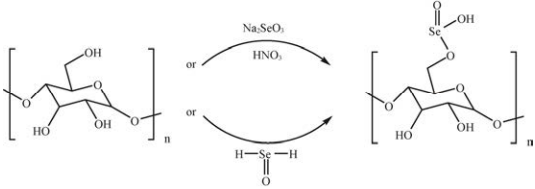
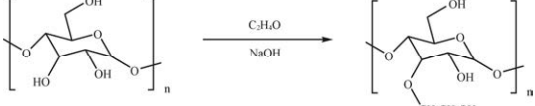
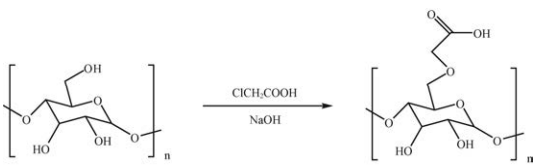

猴头菇多糖的乙酰化修饰是通过引入乙酰

基与多糖的羟基发生酯化反应。乙酰化修饰通过破坏分子内及分子间的氢键网络, 诱导多糖发生构象重组, 提升多糖链延展度, 促使更多表面极性基团暴露, 改变多糖的水溶性和疏水性(Li *et al.* 2023)。

常用的多糖乙酰化修饰方法包括乙酸酐-吡啶法和碱性乙酰化法等(Wang X *et al.* 2022)。徐兵等(2018)通过乙酸酐法对猴头菇多糖进行修饰。在工艺优化方面, 乙酰化反应的关键参数包括料液比、反应时间和温度。通过响应面实

表 2 猴头菇多糖化学修饰方法分类及反应路径

Table 2 Classification and reaction path of chemical modification of *Hericium erinaceus* polysaccharides

化学修饰 Chemical modification	反应路径 Reaction path	典型取代度范围 Typical degree of substitution range	参考文献 References
硫酸化 Sulfation		0.4–2.0	Huang <i>et al.</i> 2019
乙酰化 Acetylation		0.1–3.0	Wang X <i>et al.</i> 2022; Li <i>et al.</i> 2023
磷酸化 Phosphorylation		0.01–0.20	Xia <i>et al.</i> 2021; Zhu <i>et al.</i> 2024
硒化 Selenium		0.01–0.30	Yang <i>et al.</i> 2020; Zhan <i>et al.</i> 2022
羟乙基化 Hydroxyethylation		0.05–0.20	Ren <i>et al.</i> 2017; 宋玉龙 2020 Ren <i>et al.</i> 2017; Song 2020
羧甲基化 Carboxymethylation		0.1–2.2	Xie <i>et al.</i> 2021; Wei <i>et al.</i> 2024
巯基化 Sulfhydrylation		0.1–0.5	Stengel <i>et al.</i> 2024; Kosaka <i>et al.</i> 2025

验设计确定最佳的乙酰化修饰猴头菇多糖的工艺参数为：反应温度 30 °C，时间 3 h，料液比 1:34 g/mL，乙酰化多糖取代度 0.609。在其他多糖的修饰研究中，如沙蒿多糖的乙酰化中 NaOH 体系与甲酰胺体系的对比表明，不同反应介质可能影响取代度及产物结构(Li *et al.* 2016)。这提示猴头菇多糖的乙酰化反应体系中试剂选择与反应条件需进一步探索，以优化分子链的构象与功能特性。

1.3 磷酸化修饰

猴头菇多糖的磷酸化修饰是通过引入磷酸基团以取代多糖链羟基结构的化学改性，该修饰机制通过引入带有 3 个负电荷的磷酸根基团，可显著提升多糖的整体电负性，从而优化其功能特性及生物活性。目前广泛应用的磷酸化修饰法主要包括三氯氧磷法、五氧化二磷法、磷酸法及磷酸盐法等(Xia *et al.* 2021)。

关于猴头菇多糖的磷酸化修饰研究中，廖兵武(2023)通过采用混合磷酸盐体系，对纯化的猴头菇多糖进行修饰。实验数据显示，磷酸化多糖中磷酸基团含量为 7.95%，推测合成的磷酸化猴头菇多糖的取代度较低。磷酸化多糖的取代度与反应体系参数(取代试剂比例、反应时间和温度等)显著相关，通过优化磷酸盐比例和反应温度可显著提高多糖衍生物的取代度。

1.4 硒化修饰

硒化多糖因其显著的生物活性特征，已成为功能糖化学研究的热点(Huang *et al.* 2020)。与无机硒相比，硒与多糖形成特殊的硒氧键，更容易被人体吸收和利用(Chen *et al.* 2017)。多糖硒化修饰通过构建多糖-硒复合物，在分子水平上实现生物活性保留与微量元素功能强化，提高了生物利用度(Zhan *et al.* 2022)。目前的多糖硒化修饰方法主要采用硝酸-亚硒酸钠法和亚硒酰氯法等(Yang *et al.* 2020)。

硒化多糖的化学修饰方法中，硝酸-亚硒酸钠法作为经典工艺被广泛应用。Qin *et al.* (2017)采用该方法对猴头菇多糖进行硒化时，通过改变取代度、温度和反应时间等条件，成功制备了 9 种不同取代度的硒化多糖。基于硒含量评估的最优条件为亚硒酸钠添加量 400 mg，温度

90 °C，反应时间 8 h，硒含量可达 13.98%。

鉴于传统硝酸-亚硒酸钠法中硝酸的强腐蚀性，以及亚硒酰氯法中酰氯试剂稳定性差且产生毒副产物等问题，开发绿色安全的硒化多糖修饰方法具有重要研究价值。研究表明，基于抗坏血酸还原亚硒酸钠制备的纳米硒复合物生物活性较高且毒性低(Lin *et al.* 2023)。古佩娴等(2022)在抗坏血酸和亚硒酸钠的氧化还原体系中，成功合成稳定的猴头菇多糖纳米硒复合物，硒含量达 481.79 μg/g。

1.5 羟乙基化修饰

多糖的羟乙基化修饰是指通过环氧乙烷介导的亲核取代反应，在多糖链中引入羟乙基，从而提高生物活性。羟乙基化修饰较温和，对猴头菇多糖的螺旋结构等构象能较好保留，提高猴头菇多糖的生物活性(Ren *et al.* 2017)。

1.6 其他化学修饰

除上述修饰方法外，羧甲基化、巯基化和选择性氧化等化学修饰也可拓展应用于猴头菇多糖的结构修饰。然而，相较于其他多糖体系，目前这些化学修饰尚未在猴头菇多糖中获得充分研究。因此，未来可以开发猴头菇多糖的新型化学修饰体系，通过精准调控取代基类型与位点，协同改善猴头菇多糖的理化性质和生物活性，提升猴头菇多糖的功能应用价值。

2 修饰猴头菇多糖的结构性质

猴头菇多糖通过硫酸化、乙酰化等化学修饰后，多糖链上的羟基等基团被部分取代，改变猴头菇多糖的结构特征，影响猴头菇多糖的溶解性、电荷与稳定性、黏度与流变性、乳化性等理化性质。

2.1 分子量和分子结构

猴头菇多糖的化学修饰中酸性或碱性及高温等反应条件可能会导致多糖链或糖苷键断裂，分子量降低。而取代基的引入通常不会改变多糖主链长度，分子量的增加程度与取代度相关。

化学修饰通过改变猴头菇多糖的电荷、氢键及空间位阻等，影响其分子构象。官能团的

引入取代了多糖链上的部分羟基,诱导猴头菇多糖分子构象变化。目前对于猴头菇多糖化学修饰产物的表征主要基于取代度和红外特征峰的分析。猴头菇多糖不同化学修饰类型的取代度和红外吸收峰(表3)揭示了多糖化学结构的变化,并为多糖修饰反应提供了双重验证标准。

2.2 高级构象

猴头菇多糖的分子间氢键是形成和稳定核心有序结构的主导作用,范德华力、疏水作用等则进一步稳定这些结构并在分子聚集和网络的形成中发挥作用。这些相互作用力的协同效应,使得猴头菇多糖能够形成独特且稳定的三股螺旋等有序构象,并进一步形成复杂的聚集体或网络,最终深刻影响其生物活性。

硫酸化、磷酸化等电荷主导修饰通过引入

强负电荷和破坏氢键,显著增强多糖链间静电相互作用,破坏有序结构,使多糖链更舒展、刚性更强。羟乙基化主要通过增强亲水性和引入空间位阻来提高溶解度,对电荷影响小,对有序结构的破坏通常弱于电荷型修饰。乙酰化等疏水修饰减弱氢键,增加疏水性,可能诱导分子聚集或改变链柔性。而硒化主要引入硒元素,改变元素组成和特定官能团,对整体构象的影响较小,生物活性的提升常归因于硒的生物功能而非剧烈的多糖结构变化。此外,大体积的取代基可能通过空间位阻限制链的旋转,增加构象刚性。

猴头菇多糖经化学修饰后,其高级构象发生显著变化,可通过多种技术联合解析。扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)直观显示修饰前后

表3 猴头菇多糖化学修饰的光谱特征

Table 3 Spectral characteristics of chemical modification of *Hericium erinaceus* polysaccharides

化学修饰 Chemical modification	取代度 Degree of substitution	特征吸收峰 Characteristic absorption peaks	参考文献 References
硫酸化 Sulfation	0.457	S=O 键 1 270 cm^{-1} 和 C-O-S 键 834 cm^{-1} The S=O bond at 1 270 cm^{-1} and the C-O-S bond at 834 cm^{-1}	周艳 2021 Zhou 2021
	0.94	S=O 键 1 259 cm^{-1} 和 C-O-S 键 808 cm^{-1} The S=O bond at 1 259 cm^{-1} and the C-O-S bond at 808 cm^{-1}	王新宇 2011 Wang 2011
	2.61	1 237 cm^{-1} 的 OSO_3^- 的 S=O 的伸缩振动, 820 cm^{-1} 的 C-O-S 的伸缩振动 The S=O stretching of OSO_3^- at 1 237 cm^{-1} and the C-O-S stretching at 820 cm^{-1}	张安强等 2009 Zhang <i>et al.</i> 2009
乙酰化 Acetylation	0.609	1 640.28 cm^{-1} 的 C=O 双键的伸缩振动, 1 398.14 cm^{-1} 的 C-O 单键的伸缩振动 The C=O stretching vibration at 1 640.28 cm^{-1} and the C-O stretching vibration at 1 398.14 cm^{-1}	徐兵等 2018 Xu <i>et al.</i> 2018
磷酸化 Phosphorylation	0.079 5	-	廖兵武 2023 Liao 2023
硒化 Selenium	0.139 8	1 078.35 cm^{-1} 的 O-Se-O 拉伸振动和 617.31 cm^{-1} 的 Se-O-C 拉伸振动 The O-Se-O stretching vibration at 1 078.35 cm^{-1} and the Se-O-C stretching vibration at 617.31 cm^{-1}	Qin <i>et al.</i> 2017
	0.000 481 79	多糖纳米硒表面的 OH 伸缩振动峰发生蓝移现象(从 3 326.12 cm^{-1} 移位至 3 400.39 cm^{-1}), 且 C=O 伸缩振动峰从 1 641.36 cm^{-1} 移位至 1 620.15 cm^{-1} The O-H stretching vibration peak of polysaccharide nano-selenium exhibited a blue shift from 3 326.12 cm^{-1} to 3 400.39 cm^{-1} , with a concomitant red shift of the C=O stretching vibration peak from 1 641.36 cm^{-1} to 1 620.15 cm^{-1} .	古佩娴等 2022 Gu <i>et al.</i> 2022
羟乙基化 Hydroxyethylation	-	1 363 cm^{-1} 描述对称的 $-\text{CH}_2-$ 拉伸振动 The symmetric $-\text{CH}_2-$ stretching vibration at 1 363 cm^{-1}	Ren <i>et al.</i> 2017

多糖聚集态形貌的差异, 如网络结构致密化或疏松、表面粗糙度改变等。圆二色谱(CD)可揭示化学修饰对多糖链二级结构(如螺旋构象)的影响, 观测特征吸收峰的偏移或强度变化。原子力显微镜(AFM)和小角 X 射线散射(SAXS)技术, 能够直观表征修饰前后链的形态、刚性、聚集状态及溶液中整体构象参数, 明确修饰诱导的链伸展、蜷缩或分子间聚集行为。借助分子模拟技术, 可构建修饰多糖的三维动态模型, 从原子层面解析化学基团引入导致的局部空间位阻效应、氢键网络重组或静电斥力变化, 从而综合阐明化学修饰通过改变分子内/间相互作用力, 最终驱动多糖高级结构演变的内在机制。猴头菇多糖的生物活性与其高级构象密切相关, 猴头菇多糖化学修饰后高级构象变化对生物活性的影响见表 4。

2.3 溶解性

天然多糖通常含有大量的羟基, 这些羟基形成分子内和分子间氢键, 容易导致分子结构紧密, 水溶性差。化学修饰通过引入亲水性基团能显著提高多糖的溶解性(Laffargue *et al.* 2023)。亲水性基团通过增加分子极性, 增强与水分子的相互作用, 破坏多糖链间的氢键网络, 从而提升溶解性。例如, 采用碱提醇沉法制备的猴头菇多糖经过硫酸化修饰后的溶解性从初始的水不溶性转化为完全水溶的状态(张安强等 2009), 而磷酸化修饰中猴头菇多糖在 40 °C 的最大溶解浓度从 10 mg/mL 上升至 20 mg/mL (廖兵武 2023)。硫酸化和磷酸化等带电基团的引入, 能够显著提高多糖分子的表面电荷密度, 增强分子间的静电排斥作用, 减少分子链的聚集, 促进分散。

表 4 化学修饰猴头菇多糖的高级构象及生物活性

Table 4 Higher-order conformation and bioactivity of chemical modification of *Hericium erinaceus* polysaccharides

化学修饰 Chemical modification	高级构象变化 Higher-order conformational transition	生物活性影响 Effect on bioactivity	参考文献 References
硫酸化 Sulfation	螺旋结构松散或解旋; 分子链伸展性增加 The helical structure loosens or unwinds; the extensibility of the molecular chains increases	免疫调节活性↑, 抗病毒活性↑ Immunomodulatory activity ↑; antiviral activity ↑	Huang <i>et al.</i> 2019
乙酰化 Acetylation	氢键减弱, 有序度降低; 柔性增加 Hydrogen bonding weakens, molecular order decreases; flexibility is enhanced	抗氧化活性↑, 免疫调节活性↑ Antioxidative activity ↑; immunomodulatory activity ↑	Long <i>et al.</i> 2022
磷酸化 Phosphorylation	分子链电荷密度增大; 构象刚性增强 The charge density of molecular chains increases; conformational rigidity increases	抗肿瘤活性↑, 免疫调节活性↑ Antitumor activity ↑; immunomodulatory activity ↑	Xia <i>et al.</i> 2021; Laffargue <i>et al.</i> 2023
硒化 Selenium	构象变化复杂, 取决于硒的结合方式和位置; 可形成纳米颗粒负载 The conformational changes are complex, depending on the binding modes and sites of selenium; these compounds can enable nanoparticle loading	抗氧化活性↑↑, 抗肿瘤活性↑, 免疫调节活性↑ Antioxidative activity ↑↑; antitumor activity ↑; immunomodulatory activity ↑	Yang <i>et al.</i> 2020; Zhan <i>et al.</i> 2022; Cheng <i>et al.</i> 2023
羟乙基化 Hydroxyethylation	亲水性增强; 螺旋结构保持较好 Hydrophilicity enhanced; helical structure well preserved	水溶性↑, 免疫调节活性↑ Solubility ↑; immunomodulatory ↑	Ren <i>et al.</i> 2017; 宋玉龙 2020 Ren <i>et al.</i> 2017; Song 2020
羧甲基化 Carboxymethylation	分子链伸展; 结晶度显著下降; 溶液黏度增加 Molecular chain extension; significantly decreased crystallinity; solution viscosity increased	免疫调节活性↑, 抗肿瘤活性↑ Immunomodulatory activity ↑; antitumor activity ↑	Xie <i>et al.</i> 2021; Zhang <i>et al.</i> 2024
巯基化 Sulfhydrylation	疏水区域形成; 可能自组装成胶束 Hydrophobic domain formation; potential spontaneous self-assembly into micelles	粘膜粘附性↑ Mucoadhesive ↑	Stengel <i>et al.</i> 2024; Kosaka <i>et al.</i> 2025

2.4 电荷和稳定性

猴头菇多糖经化学修饰后,其电荷特性与稳定性的变化机制可能与修饰基团的引入及分子结构的变化密切相关。化学修饰过程中引入的基团直接影响多糖的表面电荷特性。研究表明,硒化猴头菇多糖通过引入纳米硒颗粒,Zeta 电位绝对值显著提高,由初始的 (-13.00 ± 1.27) mV 增至 (-42.10 ± 2.69) mV (古佩娴等 2022)。这可能是硒化过程中多糖的羟基和羰基与纳米硒结合,导致表面羟基电离程度增加,负电荷密度显著提高。同时硒化猴头菇多糖的 X 射线光电子能谱(XPS)数据证实,零价态纳米硒与多糖骨架通过化学键结合,有效避免了硒颗粒的聚集,维持了电荷的均匀分布。

化学修饰对猴头菇多糖稳定性的提升涉及物理形貌与分子构象的协同优化。研究表明,硒化修饰能够显著降低多糖的粒径,形成均一分散的球形颗粒,扫描电镜显示,修饰后颗粒分散性良好,避免了原始 HEP 因柔性链构象导致的缠绕和聚集(Qin *et al.* 2017)。这种形貌的规则性与表面电荷的增强共同提升了溶液的胶体稳定性。

2.5 黏度和流变性

猴头菇多糖的化学修饰会显著改变多糖的分子结构、电荷分布及分子间作用力,调控多糖链构象和聚集状态,从而影响黏度及流变行为。化学修饰如硫酸化、硒化及乙酰化等通过改变多糖分子量、构象及官能团分布等,影响多糖的溶液性质。硫酸化修饰引入的硫酸基团可增加多糖表面负电荷,静电排斥效应促使分子链伸展,溶液黏度可能升高;硒化修饰则通过提高 Zeta 电位绝对值[从 (-13.00 ± 1.27) mV 提高至 (-42.10 ± 2.69) mV]增强分散稳定性(古佩娴等 2022),减少颗粒聚集,可能导致剪切变稀行为更显著。而乙酰化等修饰则通过引入疏水性基团,促进分子间疏水缔合,形成更紧密的网络结构,可能伴随着黏弹性增强。此外,化学修饰可能导致多糖分子量降低,进而引发黏度下降。

2.6 乳化性

乳化性指物质稳定油水两相界面的能力。

猴头菇多糖的化学修饰通过改变分子亲水-疏水平衡、引入疏水基团或形成复合结构,从而提升其乳化性能。乙酰化猴头菇多糖的羟基部分被取代后,疏水性增强,可能更易在油水界面吸附,形成稳定的乳液。尽管未直接测试乳化性,但类似多糖的乙酰化研究表明,疏水基团的引入可显著提高表面活性和乳化稳定性(Huang *et al.* 2022)。

除了引入疏水基团外,硒化猴头菇多糖通过降低粒径和增加表面电荷(古佩娴等 2022),也可能形成均一分散的乳液颗粒,提升乳化效率。

3 修饰猴头菇多糖的生物活性

多糖的化学组成和结构特征是其理化性质和生物活性的重要因素(Zhu *et al.* 2025)。天然多糖可以通过多种化学修饰方式,改变其结构和构象,实现多糖原有生物活性的增强或赋予新的生物活性。经过化学修饰后,猴头菇多糖在体外细胞实验中表现出显著增强的生物活性。目前,关于化学修饰提升猴头菇多糖生物活性的研究大多停留在体外细胞模型的活性验证与作用机制探讨的阶段,而直接且系统的体内活性验证研究相对有限。但已有的体外活性结果普遍展现出良好的应用潜力,为后续的体内活性研究提供了重要的依据,同时也为化学修饰猴头菇多糖在功能性食品开发及药物递送等领域的应用前景奠定基础。猴头菇多糖经不同的化学修饰后生物活性变化见图 1。

3.1 抗氧化活性

多糖的抗氧化活性主要来自多糖链中提供氢原子的能力,多糖的分子量、单糖的组成和分子构象的变化会影响多糖的供氢能力,从而影响抗氧化活性(Chen Y *et al.* 2024)。猴头菇多糖自身具有一定的抗氧化活性(Wang *et al.* 2018; 郭杨昇等 2023),而通过正向作用的化学修饰能使其抗氧化活性进一步增强。修饰基团的化学性质(电荷、螯合能力、亲疏水性等)以及对多糖结构(分子量、空间构象、活性位点暴露程度等)的影响是决定猴头菇多糖抗氧化活性变化的关键因素。

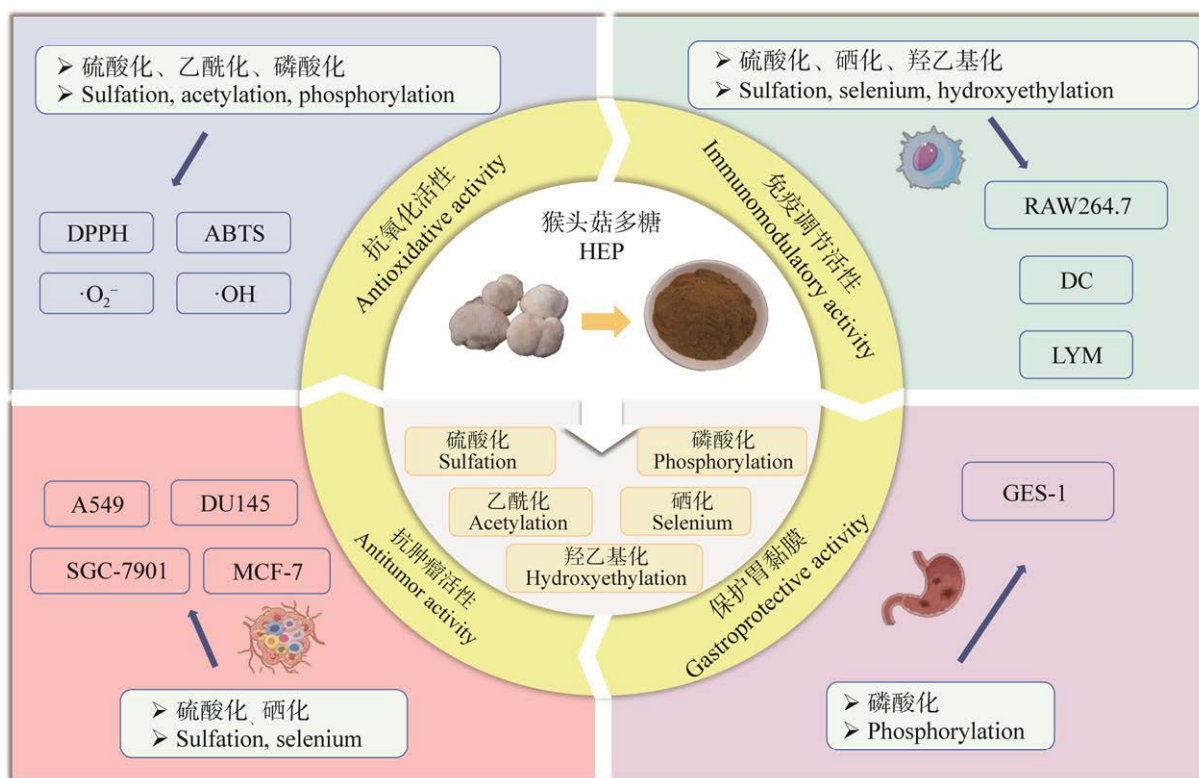


图 1 化学修饰猴头菇多糖的生物活性

Fig. 1 The biological activities of chemically modified *Hericium erinaceus* polysaccharides (HEP).

猴头菇多糖引入负电荷基团(硫酸基、磷酸基等),能有效增强抗氧化活性,通过静电吸引促进与带正电自由基(如 ABTS⁺)的相互作用和电子转移,以及提供整合金属离子的能力,抑制金属催化氧化。周艳(2021)测定硫酸化前后猴头菇多糖清除 DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基的能力,硫酸化多糖对自由基的 EC₅₀ 值分别较原多糖降低 43.70%、53.09%、66.79%、71.35%;磷酸化猴头菇多糖清除 DPPH 自由基和羟基自由基能力显著高于未修饰多糖,在浓度高于 150 μg/mL 时剂量依赖性增强(廖兵武 2023)。而多糖中乙酰基的引入可以激活多糖链中异头碳的氢原子,使多糖供氢能力提升,抗氧化活性增强(Wang *et al.* 2019a)。乙酰化修饰的猴头菇多糖在取代度为 0.609 时,对 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧阴离子自由基的最大清除率分别较原多糖提高 21.9%、80.6%、75.6% (徐兵等 2018)。

其他化学修饰对猴头菇多糖的抗氧化活性

也可能存在促进作用。羧甲基化修饰与硫酸化修饰相似,通过引入负电荷基团来提高清除自由基能力(Zhang *et al.* 2024)。硒化修饰中硒是硒依赖性抗氧化酶的辅助因子,在体内可转化为硒依赖性抗氧化酶的活性中心,如 GSH-Px、TRx 和 SOD 等,能有效催化人体细胞中脂质氢过氧化物和过氧化氢的分解(Cheng *et al.* 2018),硒化修饰提升多糖抗氧化活性在其他多糖体系中得到证实,如硒化金樱子果肉多糖(Zhan *et al.* 2022),其作用机制见图 2A。因此可以推测猴头菇多糖的其他化学修饰也可能增强其抗氧化活性,但仍需进一步的实验验证。

在一定范围内,抗氧化活性随着取代度的增加而增强,浓硫酸法和氯磺酸-吡啶法制备的硫酸化猴头菇多糖取代度分别为 0.82 和 0.94,相比原多糖的清除超氧阴离子能力,其 SOD 活力分别提高了 27.53%和 102.49%。取代度过低对多糖的修饰效果不明显,而过高则可能使空间位阻增大,掩蔽活性基团,同时可能破坏多糖的螺旋构象,影响生物活性。

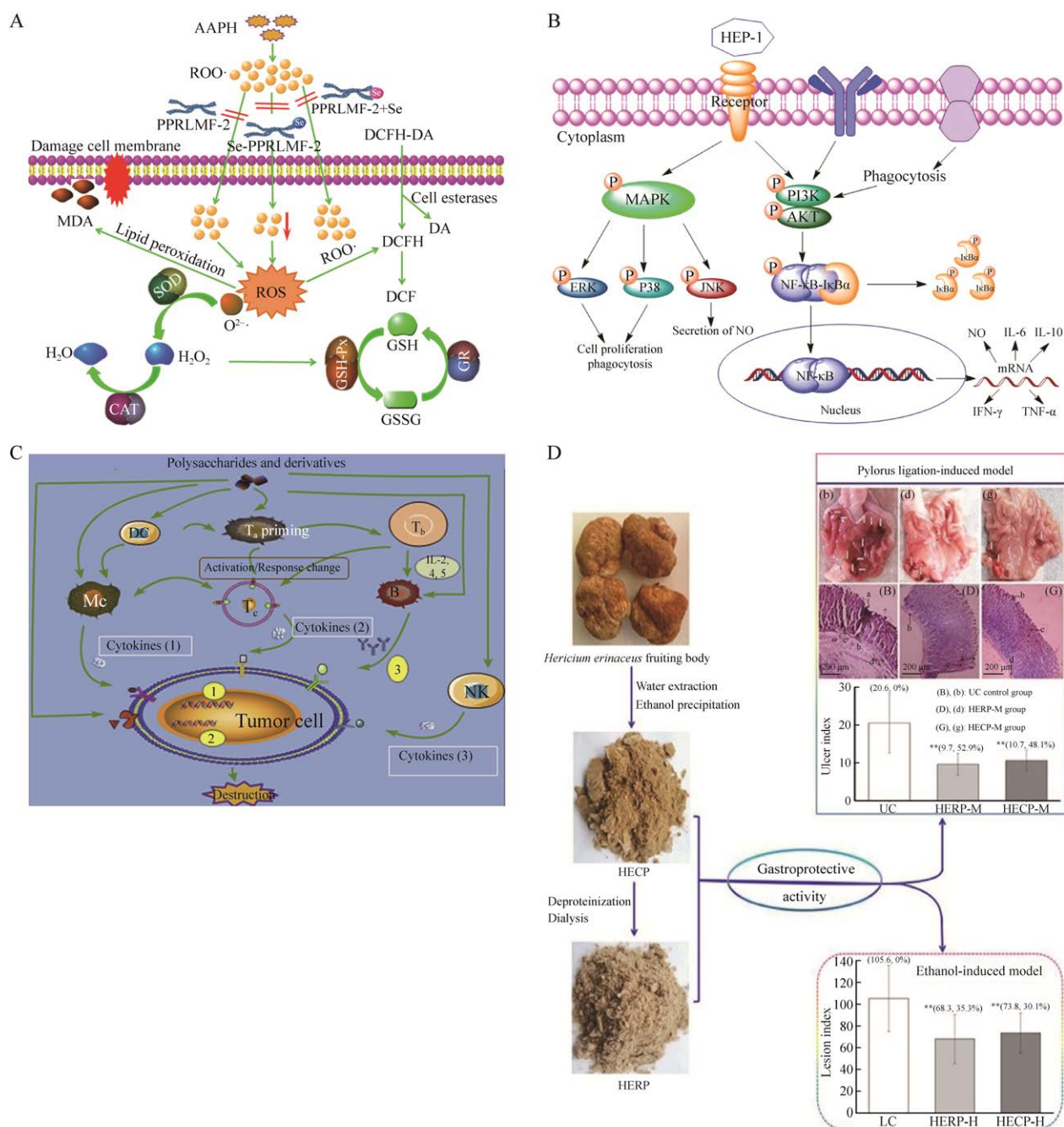


图 2 多糖的生物活性机制 A: 抗氧化活性(Zhan *et al.* 2022); B: 免疫调节活性(Yang *et al.* 2022); C: 抗肿瘤活性(Xie *et al.* 2020); D: 保护胃黏膜(Wang *et al.* 2018)

Fig. 2 Biological activity mechanism of polysaccharides. A: Antioxidative activity (Zhan *et al.* 2022); B: Immunomodulatory activity (Yang *et al.* 2022); C: Antitumor activity (Xie *et al.* 2020); D: Gastroprotective activity (Wang *et al.* 2018).

此外，修饰基团的取代发生在多糖链的不同羟基位置(C-2、C-3、C-6)，可能因其空间位置和邻近基团的不同，对活性的影响也有差异。而多糖的分子量和构象方面，修饰过程本身(如酸、碱、高温处理)可能伴随多糖链的降

解或交联，导致分子量变化。同时，取代基的引入可能会显著改变多糖分子的构象(如从螺旋变为无规卷曲或反之)，影响活性位点暴露和接触效率。多糖分子量和高级结构的变化也是影响最终活性的重要因素，需要更深入的实验来

进行系统研究。

3.2 免疫调节活性

猴头菇多糖具有免疫调节活性，其作用机制主要涉及多糖激活宿主固有免疫系统的多维度应答，如增强巨噬细胞和淋巴细胞的活性(Yin *et al.* 2021)。多糖通过模式识别受体的信号转导途径，有效激活巨噬细胞并诱导免疫因子的产生，从而增强免疫功能(Deng *et al.* 2018; 李杨等 2021)。Yang *et al.* (2022)通过体外实验证实，猴头菇多糖能够促进 RAW264.7 细胞中 NO 的产生和白细胞介素-6、白细胞介素-10、干扰素- γ 、肿瘤坏死因子- α 的产生以及信号分子的磷酸化，通过 NF- κ B、MAPK 和 PI3K/Akt 通路提高免疫力(图 2B)。

猴头菇多糖通过化学修饰对其分子结构进行优化，可显著增强其免疫调节活性，为开发高效低毒的天然免疫调节剂提供了重要研究方

向。猴头菇多糖的免疫调节活性与其结构参数密切相关，包括取代基类型、取代度、取代位置、分子量及糖链构象等。这些结构参数共同决定了多糖分子的空间构型、电荷分布及亲水性，进而影响其与免疫细胞表面受体的识别与结合效率。

不同取代基赋予猴头菇多糖不同的免疫调节特性，这主要取决于取代基的化学特性和多糖分子构象的变化。硫酸化、硒化和羟乙基化都能增强猴头菇多糖的免疫活性，但其作用机制和免疫效应存在明显差异(表 5)。硫酸化修饰通过引入带负电的硫酸基团增强多糖与免疫细胞表面受体的静电相互作用，显著增强巨噬细胞增殖，诱导巨噬细胞和淋巴细胞分泌关键免疫调节细胞因子(Chen X *et al.* 2023)。硒化修饰猴头菇多糖具有较强的抗氧化性和电子传递能力，能有效激活树突状细胞中的 MAPK 和

表 5 化学修饰猴头菇多糖的免疫调节活性

Table 5 Spectral characteristics of chemical modification of *Hericium erinaceus* polysaccharides

免疫活性	硫酸化	硒化	羟乙基化
Immune activity	Sulfation	Selenium	Hydroxyethylation
主要增强作用	直接、强烈的免疫激活	抗氧化协同免疫调节	温和持续的免疫激活
Major enhancements	Direct and robust immune activation	Antioxidant-mediated synergistic immune regulation	Sustained mild immune stimulation
核心机制	①增强多糖与免疫细胞表面受体的静电相互作用，巨噬细胞吞噬活性 \uparrow 、NO 释放 \uparrow ②激活 MAPK 和 NF- κ B 信号通路	① 具有较强的抗氧化性和电子传递能力，巨噬细胞吞噬活性 \uparrow ，NO \uparrow ② 增强 MAPK 和 NF- κ B 信号通路，刺激 DCs 产生 p-p38、p-ERK 和 p-JNK 蛋白的表达，增加 I κ B α 和 I κ B β 蛋白降解，并促进 DCs 表达 p50 和 p65 蛋白	① 巨噬细胞吞噬活性 \uparrow 、NO \uparrow ② 促进树突状细胞与自然杀伤细胞间的相互作用，提高树突状细胞对 IL-12、IL-15、IL-18、NF- κ B 的 mRNA 表达
Core mechanism	① Enhanced electrostatic interactions between polysaccharides and immune cell surface receptors, significantly increased macrophage phagocytic activity and NO release ② Activation of the MAPK and NF- κ B signaling pathways	① It exhibits strong antioxidant activity and electron transfer capacity, enhances macrophage phagocytic activity, and increases NO production ② It enhances the MAPK and NF- κ B signaling pathways, stimulates dendritic cells (DCs) to express p-p38, p-ERK, and p-JNK proteins, increases the degradation of I κ B α and I κ B β proteins, and promotes the expression of p50 and p65 proteins in DCs	① Increased macrophage phagocytic activity and NO production ② Promotes interactions between dendritic cells and natural killer cells and upregulates dendritic cell mRNA expression of IL-12, IL-15, IL-18, and NF- κ B
独特优势	免疫激活迅速、强度高	强抗氧化性和硒依赖性免疫	溶解性和稳定性提升
Distinctive advantages	Rapid and potent immune activation	Strong antioxidant capacity and selenium-dependent immunity	Enhanced solubility and stability
潜在风险	可能破坏多糖主链	硒中毒风险	过度修饰掩蔽活性基团
Potential risks	Potential cleavage of polysaccharide backbone	Risk of selenium intoxication	Over-modification may mask active functional groups
参考文献	Huang <i>et al.</i> 2019; Chen X <i>et al.</i> 2023	Qin <i>et al.</i> 2017; Cheng <i>et al.</i> 2018	Ren <i>et al.</i> 2017; 宋玉龙 2020 Ren <i>et al.</i> 2017; Song 2020
References			

NF- κ B 信号通路,从而刺激细胞因子的产生(Qin *et al.* 2017)。羟乙基化修饰猴头菇多糖则有利于促进树突状细胞与自然杀伤细胞间的相互作用,促进 IL-18 的表达和分泌(宋玉龙 2020)。

分子量是决定猴头菇多糖免疫活性的另一关键参数,其影响具有双重性:一方面,分子量降低有利于多糖分子的溶解性和细胞膜通透性提高:鼠李糖内切酶解得到的猴头菇多糖相对分子质量为 5.6 kDa,较未修饰多糖明显降低,促进 RAW 264.7 细胞释放 NO 的能力显著高于未修饰多糖,同时能更有效地增强 CD40、CD86 等表达及吞噬活性(Liu *et al.* 2021)。另一方面,过低的分子量可能导致空间构象改变和受体结合位点减少。除分子量外,化学修饰还能通过改变多糖的取代度、取代位置、空间构象等结构,优化其与免疫细胞表面受体的相互作用,进而增强信号通路激活能力和免疫调节功能。

此外,通过包埋技术对修饰猴头菇多糖进行递送系统构建,不仅改善其生物利用度和稳定性,还能协同放大其免疫调节活性。黄凤佳(2023)开发的 PLGA 包被硒化猴头菇多糖(Se-HEP-PLGA-NPs),相较于原 Se-HEP, 0.061–0.488 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 浓度范围的 Se-HEP-PLGA-NPs 对鸡脾 T 淋巴细胞和 B 淋巴细胞的增殖具有显著性提升。Luo *et al.* (2020)以巨噬细胞为模型对比研究 Se-HEP-PLGA 和 HEP-PLGA-Se 纳米颗粒的免疫调节活性,发现 2 种纳米颗粒在 0.98–15.63 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 范围对巨噬细胞的吞噬活性显著升高,其中 Se-HEP-PLGA 在浓度为 3.91 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时活性显著高于其他各组。硒化多糖 PLGA 纳米颗粒不仅保证了硒化多糖的免疫活性,而且提高了硒化多糖的吸收和免疫活性。

以上多项体外细胞实验表明,硫酸化、硒化和羟乙基化猴头菇多糖展现出比天然多糖更强的免疫调节活性。然而,体外细胞模型难以完全模拟机体内复杂的生理环境,需通过体内实验进一步验证。

在评估多糖从基础研究向实际应用的转化潜力时,体内实验是不可或缺的核心环节。通

过系统评价多糖在体内的生物活性,可有效验证其体外活性是否具备确切的体内功效,从而为其实际应用提供关键依据。在已报道的文献中,硒化猴头菇多糖在雏鸡新城疫的疫苗免疫模型中通过提高抗体滴度,显著促进淋巴细胞增殖和细胞因子分泌,明确验证了硒化修饰多糖在体内的免疫增强作用(黄凤佳 2023);酶促修饰猴头菇多糖可通过改善肠道结构与吸收功能、调节脾脏免疫状态以及促进腹膜巨噬细胞成熟,进一步增强其免疫调节活性(Liu *et al.* 2021)。此外,基于壳聚糖修饰多壁碳纳米管的猴头菇多糖递送系统,在小鼠体内实现向免疫器官的靶向富集,长效缓释并持续刺激,协同增强免疫调节活性(Ren *et al.* 2020)。

体内活性实验证实了修饰可作为提升多糖体内生物活性的有效策略。同时,其他修饰方法的体外活性研究为后续开展体内活性验证提供前期基础和关键依据。未来的研究需构建完善的体内模型,进一步评估和证实化学修饰猴头菇多糖的应用潜力。

3.3 抗肿瘤活性

多糖的抗肿瘤活性主要通过两种途径介导:一种是增强免疫应答,激活各种免疫细胞和增加免疫调节因子的产生(图 2C);另一种则是直接抑制或杀死肿瘤细胞(Li *et al.* 2019)。猴头菇多糖除了通过调节细胞因子(IFN- γ 、TNF- α 、IL-2)增强免疫调节作用发挥抗肿瘤效果(石祥生 2018)外,还能直接抑制或杀死肿瘤细胞,通过诱导细胞凋亡、阻断细胞周期、影响细胞信号转导和抑制细胞增殖等方式来发挥其抗肿瘤作用(Xie *et al.* 2020; 黄振帝等 2023)。

猴头菇多糖经化学修饰后,其抗肿瘤活性呈现显著提升,这一提升具有结构依赖性和机制特异性。不同的取代基通过特异性分子相互作用影响猴头菇多糖的抗肿瘤活性。硫酸化猴头菇多糖(取代度 0.457)对人胃癌细胞 SGC-7901 抑制作用的 IC₅₀ 值较原多糖从 425.09 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 下降到 308.36 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 下降 37.86% (周艳 2021); 硒化猴头菇多糖浓度为 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,人肺癌细胞 A549 和人前列腺癌细胞 DU145 的存活率

为 52.73%、30.46%，较原多糖(1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$)下降 40.15%、70.84% (古佩娴等 2022)。硫酸基与磷酸基等负电荷基团更倾向增强免疫调节功能，其机制是通过静电相互作用与免疫细胞表面的受体结合，激活下游信号通路。而硒化则主要提升直接细胞毒性，通过诱导氧化应激或干扰代谢过程杀伤肿瘤细胞，其作用机制主要包括：硒元素的加入增强了促氧化应激能力，诱导肿瘤细胞内 ROS 水平显著升高，导致 DNA 损伤和线粒体功能障碍。HEPS-Se 可下调 PI3K/Akt 信号通路活性，抑制肿瘤细胞增殖相关基因表达。尽管修饰多糖抗肿瘤活性的提升已在细胞实验得到证实，但其在体内的实际功效仍需后续研究进行系统评估。

多糖的抗肿瘤活性与其理化特性(分子量和单糖组成等)密切相关(Chen *et al.* 2018)。分子量通过影响组织渗透性和受体结合效率调控多糖抗肿瘤活性。较高分子量多糖具有更强的免疫原性，能有效激活补体系统和巨噬细胞，但肿瘤组织渗透性差；较低分子量多糖易于在肿瘤组织扩散，但受体结合能力弱(卢可可等 2014；孟思彤等 2014)。硫酸基等取代基的位置直接影响多糖的空间构象和生物活性，多糖 C-6 位因空间位阻较小，通常比 C-2、C-3 位更易与受体结合，且更显著刺激淋巴细胞增殖(Yang *et al.* 2013)。

3.4 保护胃黏膜

基于乙酸诱导的大鼠胃溃疡模型研究表明，增强胃黏膜保护、抗炎和抗氧化等多重机制的协同效应，是猴头菇多糖发挥胃保护作用的关键(Wang XY *et al.* 2022；甘泽隆等 2023)。Wang *et al.* (2018)通过建立乙醇诱导和幽门结扎诱导的模型研究猴头菇多糖对大鼠的胃保护作用，发现猴头菇多糖是通过增加胃组织中的 NO、PGE2 和 ECF 来实现对胃黏膜的保护(图 2D)。

通过大鼠体内实验和 GES-1 细胞模型的研究，Hou *et al.* (2022)系统探讨了猴头菇多糖对乙醇诱导胃黏膜损伤的保护作用，其机制涉及维持胃黏膜结构完整、减少细胞脱落和抑制炎症反应等多种途径，协同构建了有效的防御屏

障，从而缓解乙醇对胃黏膜损伤，预防急性胃溃疡的发生。廖兵武(2023)采用磷酸化猴头菇多糖来研究乙酸诱导人胃黏膜上皮细胞 GES-1 的急性损伤模型，发现磷酸化猴头菇多糖可通过恢复细胞活力、促进细胞增殖、抑制细胞坏死、维持受损 GES-1 细胞的分泌功能等途径增强修复乙酸诱导的 GES-1 细胞急性损伤，体外细胞实验初步表明，磷酸化修饰具有提升猴头菇多糖保护胃黏膜活性的潜力，其实际功效有待通过体内实验进一步评估与验证。

4 结论与展望

猴头菇多糖的生物活性呈现显著的构效相关性，与其单糖组成、分子量和空间结构等密切相关。现阶段对猴头菇多糖修饰研究主要集中于化学修饰，通过引入不同的活性基团以优化其理化性质与生物活性。修饰后的猴头菇多糖在抗氧化、免疫调节、抗肿瘤和保护胃黏膜等方面已展现出显著的活性增强，但该结论目前主要基于体外细胞实验，因此后续研究亟待通过系统的体内实验以验证其实际应用潜力。尽管目前对猴头菇多糖的修饰、结构特征和生物活性的研究已得到初步阐明，但当前研究仍存在多糖修饰效率与产物均一性较低、构效机制研究不完善、毒性和安全性评估不足等问题，制约其在食品药品等领域的应用。

未来猴头菇多糖修饰的研究应重点关注以下方面：(1) 开发猴头菇多糖更加绿色高效的修饰方法；(2) 深入解析修饰多糖的构效关系；(3) 对修饰猴头菇多糖进行全面的的安全性评价；(4) 通过系统的体内实验验证化学修饰后猴头菇多糖生物活性的提升；(5) 拓展修饰猴头菇多糖在功能性食品和药品等领域的应用。

作者贡献

王舰：论文撰写、审阅及修改；蔡高袁：论文撰写及修改；吴莲花：文献调研及论文修改；李伶俐：论文修改；孙培龙：思路指导；杨开：论文指导、审核与修改。

利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

[REFERENCES]

- Cai WD, Ding ZC, Wang YY, Yang Y, Zhang HN, Yan JK, 2020. Hypoglycemic benefit and potential mechanism of a polysaccharide from *Hericium erinaceus* in streptozotocin-induced diabetic rats. *Process Biochemistry*, 88: 180-188
- Chen D, Sun S, Cai D, Kong G, 2017. Induction of mitochondrial-dependent apoptosis in T24 cells by a selenium (Se)-containing polysaccharide from *Ginkgo biloba* L. leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 101: 126-130
- Chen S, Zhang F, Liu L, Feng J, Zhang J, Yang Y, Wu D, Guo Q, Liu Y, 2024. Physicochemical properties of polysaccharides from *Hericium erinaceus* by steam explosion pretreatment and its effects on human gut microbiota. *Food Hydrocolloids*, 156: 110365
- Chen SK, Li YH, Wang X, Guo YQ, Song XX, Nie SP, Yin JY, 2023. Evaluation of the “relative ordered structure of *Hericium erinaceus* polysaccharide” from different origins: based on similarity and dissimilarity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(46): 17886-17898
- Chen X, Shen M, Yu Q, Chen Y, Xie J, 2024. Recent advance in chemistry modified methods of natural polysaccharides and their applications. *Trends in Food Science & Technology*, 144: 104317
- Chen X, Wu S, Huang R, Liu X, Shen M, Xie J, 2023. Immunomodulatory activity and mechanism of Chinese yam polysaccharide after sulfated modification. *Industrial Crops and Products*, 197: 116549
- Chen Y, Jiang X, Xie H, Li X, Shi L, 2018. Structural characterization and antitumor activity of a polysaccharide from ramulus mori. *Carbohydrate Polymers*, 190: 232-239
- Chen Y, Zhang N, Chen X, 2024. Structurally modified polysaccharides: physicochemical properties, biological activities, structure-activity relationship, and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(7): 3259-3276
- Cheng K, Sun Y, Liu B, Ming J, Wang L, Xu C, Xiao Y, Zhang C, Shang L, 2023. Selenium modification of natural products and its research progress. *Foods*, 12(20): 3773
- Cheng L, Wang Y, He X, Wei X, 2018. Preparation, structural characterization and bioactivities of Se-containing polysaccharide: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120: 82-92
- Cui M, Ma Q, Zhang Z, Li W, Chen W, Liu P, Wu D, Yang Y, 2023. Semi-solid enzymolysis enhanced the protective effects of fruiting body powders and polysaccharides of *Hericium erinaceus* on gastric mucosal injury. *International Journal of Biological Macromolecules*, 251: 126388
- Dai YC, 2010. Species diversity of wood-decaying fungi in northeast China. *Mycosystema*, 29: 801-818
- Deng C, Fu H, Shang J, Chen J, Xu X, 2018. Dectin-1 mediates the immunoenhancement effect of the polysaccharide from *Dictyophora indusiata*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109: 369-374
- Friedman M, 2015. Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(32): 7108-7123
- Gan ZL, Xie GB, Xie LY, 2023. Potential mechanism of *Hericium erinaceus* in the treatment of chronic gastritis analysed by network pharmacology and molecular docking techniques. *Mycosystema*, 42(12): 2422-2441 (in Chinese)
- Gu PX, Yin HS, Hu K, Wu XY, Zhong NJ, Guo J, Huang C, Hu Y, Chen Y, Wang Y, Wu FF, 2022. Preparation, structural characterization and anti-proliferation activity of selenized *Hericium erinaceus* polysaccharide. *Food Science*, 43(22): 68 (in Chinese)
- Guan Y, Wang C, Li L, Dai X, Liu Y, Hsiang T, Liu S, Wang D, 2024. Structural characterization of *Hericium coralloides* polysaccharide and its neuroprotective function in Alzheimer's disease. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277: 133865
- Guo YB, Du X, Liu C, Chang MC, Meng JL, Deng B, Liu JY, 2023. Changes of polyphenol compounds and their antioxidant activities of *Hericium erinaceus* fruiting bodies in simulated gastrointestinal digestion *in vitro*. *Mycosystema*, 42(5): 1151-1162 (in Chinese)
- He JZ, Xu YY, Sun PL, 2016. The comparison of nutrients, chemical composition and antioxidant activity of polysaccharides from six *Hericium erinaceus* specimens. *Food and Fermentation Industries*, 42(1): 134-140 (in Chinese)
- He X, Wang X, Fang J, Chang Y, Ning N, Guo H, Huang L, Huang X, Zhao Z, 2017. Structures, biological activities, and industrial applications of the polysaccharides from *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97: 228-237
- Hou C, Liu L, Ren J, Huang M, Yuan E, 2022. Structural characterization of two *Hericium erinaceus* polysaccharides and their protective effects on the alcohol-induced gastric mucosal injury. *Food Chemistry*, 375: 131896

- Hu W, Song M, Wang C, Guo Z, Li Y, Wang D, 2021. Structural characterization of polysaccharide purified from *Hericium erinaceus* fermented mycelium and its pharmacological basis for application in Alzheimer's disease: oxidative stress related calcium homeostasis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193: 358-369
- Huang FJ, 2023. Study on the preparation and immune enhancement of selenized *Hericium erinaceus* polysaccharide PLGA nanoparticles. MS Thesis, Fujian Agriculture and Forestry, Fuzhou. 1-37 (in Chinese)
- Huang L, Shen M, Morris GA, Xie J, 2019. Sulfated polysaccharides: immunomodulation and signaling mechanisms. *Trends in Food Science & Technology*, 92: 1-11
- Huang S, Yang W, Huang G, 2020. Preparation and activities of selenium polysaccharide from plant such as *Grifola frondosa*. *Carbohydrate Polymers*, 242: 116409
- Huang Z, Zong MH, Lou WY, 2022. Effect of acetylation modification on the emulsifying and antioxidant properties of polysaccharide from *Millettia speciosa* Champ. *Food Hydrocolloids*, 124: 107217
- Huang ZD, Miao HB, Pei DY, Tang XH, Wu Q, Huang ZX, 2023. Active components and their research progress of *Tricholoma matsutake*. *Mycosystema*, 42(10): 2025-2040 (in Chinese)
- Kosaka S, Kurebayashi K, Yamato N, Tanaka H, Haruta N, Yamamoto M, 2025. Thiyl chemistry: cysteine-catalyzed maleate isomerization via aqueous thiyl radical processes. *Green Chemistry*, 27(10): 2743-2750
- Kostanda E, Musa S, Pereman I, 2024. Unveiling the chemical composition and biofunctionality of *Hericium* spp. fungi: a comprehensive overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11): 5949
- Laffargue T, Moulis C, Remaud-Siméon M, 2023. Phosphorylated polysaccharides: applications, natural abundance, and new-to-nature structures generated by chemical and enzymatic functionalisation. *Biotechnology Advances*, 65: 108140
- Li H, Feng J, Liu C, Hou S, Meng J, Liu JY, Zilong S, Chang MC, 2024. Polysaccharides from an edible mushroom, *Hericium erinaceus*, alleviate ulcerative colitis in mice by inhibiting the NLRP3 inflammasomes and reestablish intestinal homeostasis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 267: 131251
- Li H, Wang Y, Zhao P, Guo L, Huang L, Li X, Gao W, 2023. Naturally and chemically acetylated polysaccharides: structural characteristics, synthesis, activities, and applications in the delivery system: a review. *Carbohydrate Polymers*, 313: 120746
- Li J, Hu X, Li X, Ma Z, 2016. Effects of acetylation on the emulsifying properties of *Artemisia sphaerocephala* Krasch. polysaccharide. *Carbohydrate Polymers*, 144: 531-540
- Li W, Song K, Wang S, Zhang C, Zhuang M, Wang Y, Liu T, 2019. Anti-tumor potential of astragalus polysaccharides on breast cancer cell line mediated by macrophage activation. *Materials Science and Engineering: C*, 98: 685-695
- Li Y, Guo SX, Chen J, 2021. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Tuber* (Pezizales, Ascomycota). *Mycosystema*, 40(4): 873-894 (in Chinese)
- Liao BW, 2023. A study on protective effects of polysaccharide from *Hericium erinaceus* and its phosphorylated derivatives against injured GES-1 cells. PhD Dissertation, South China University of Technology, Guangzhou. 1-104 (in Chinese)
- Lin X, Mu J, Chen Z, Zhang Y, Ye X, Gao X, Chen W, Luo Y, Li B, 2023. Stabilization and functionalization of selenium nanoparticles mediated by green tea and Pu-Erh tea polysaccharides. *Industrial Crops and Products*, 194: 116312
- Liu X, Ren Z, Yu R, Chen S, Zhang J, Xu Y, Meng Z, Luo Y, Zhang W, Huang Y, Qin T, 2021. Structural characterization of enzymatic modification of *Hericium erinaceus* polysaccharide and its immune-enhancement activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166: 1396-1408
- Liu Y, Shi Y, Zou J, Zhang X, Zhai B, Guo D, Sun J, Luan F, 2024. Extraction, purification, structural features, biological activities, modifications, and applications from *Taraxacum mongolicum* polysaccharides: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259: 129193
- Long H, Xiao J, Wang X, Liang M, Fan Y, Xu Y, Lin M, Ren Z, Wu C, Wang Y, 2022. Laminarin acetyl esters: synthesis, conformational analysis and anti-viral effects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 216: 528-536
- Lu KK, Zhang YQ, Yuan Y, Ming J, 2014. Progress in the studies of the structure-antitumor activity relationship of sulfated polysaccharides and its molecular mechanisms. *Food Science*, 35(23): 297-302 (in Chinese)
- Luo Y, Ren Z, Bo R, Liu X, Zhang J, Yu R, Chen S, Meng Z, Xu Y, Ma Y, Huang Y, Qin T, 2020. Designing selenium polysaccharides-based nanoparticles to improve immune activity of *Hericium erinaceus*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143: 393-400
- Meng ST, Xu YZ, Wang ZY, 2014. Research progress on chemical modification of polysaccharide and their biological activities. *Natural Product Research and Development*, 26(11): 1901-1905 (in Chinese)

- Niu C, Liu Y, Yang Y, Wang R, Li T, 2023. Advances in sulfonated modification and bioactivity of polysaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253: 126400
- Qin T, Ren Z, Huang Y, Song Y, Lin D, Li J, Ma Y, Wu X, Qiu F, Xiao Q, 2017. Selenizing *Hericium erinaceus* polysaccharides induces dendritic cells maturation through MAPK and NF- κ B signaling pathways. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97: 287-298
- Ren Z, Luo Y, Liu X, Zhang J, Chen S, Yu R, Xu Y, Meng Z, Li J, Ma Y, Huang Y, Qin T, 2020. Preparation, characterization and controlled-release property of CS crosslinked MWCNT based on *Hericium erinaceus* polysaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153: 1310-1318
- Ren Z, Qin T, Qiu F, Song Y, Lin D, Ma Y, Li J, Huang Y, 2017. Immunomodulatory effects of hydroxyethylated *Hericium erinaceus* polysaccharide on macrophages RAW264.7. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105: 879-885
- Shi XS, 2018. Study on the efficacy of *Hericium erinaceus* polysaccharide in tumor immunotherapy. MS Thesis, Northeast Forestry University, Harbin. 1-39 (in Chinese)
- Song YL, 2020. The influence of hydroxyethylated *Hericium erinaceus* polysaccharide for interaction between DCs and NKs in mice. MS Thesis, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou. 1-55 (in Chinese)
- Stengel D, Jörgensen AM, Polidori I, Kapitza P, Ricci F, Bernkop-Schnürch A, 2024. The power of sulfhydryl groups: thiolated lipid-based nanoparticles enhance cellular uptake of nucleic acids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 654: 1136-1145
- Su Y, Li H, Hu Z, Zhang Y, Guo L, Shao M, Man C, Jiang Y, 2023. Research on degradation of polysaccharides during *Hericium erinaceus* fermentation. *LWT*, 173: 114276
- Wang X, Wang Z, Shen M, Yi C, Yu Q, Chen X, Xie J, Xie M, 2022. Acetylated polysaccharides: synthesis, physicochemical properties, bioactivities, and food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(15): 4849-4864
- Wang X, Zhang Z, Wu Y, Sun X, Xu N, 2019a. Synthesized sulfated and acetylated derivatives of polysaccharide extracted from *Gracilariopsis lemaneiformis* and their potential antioxidant and immunological activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124: 568-572
- Wang XY, 2011. Studies on preparation and activity of sulfated polysaccharides of *Hericium caput-medusae* (Bull:Fr) Pers. MS Thesis, Jilin Agricultural University, Changchun. 1-36 (in Chinese)
- Wang XY, Wang M, Yin JY, Song YH, Wang YX, Nie SP, Xie MY, 2022. Gastroprotective activity of polysaccharide from the fruiting body of *Hericium erinaceus* against acetic acid-induced gastric ulcer in rats and structure of one bioactive fraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 210: 455-464
- Wang XY, Xu R, Yin JY, Wang YX, Ma LY, Nie SP, Xiong T, Xie MY, 2019b. Physicochemical, structural and rheological properties of alkali-extracted polysaccharide from fruiting body of *Hericium erinaceus*. *LWT*, 115: 108330
- Wang XY, Yin JY, Zhao MM, Liu SY, Nie SP, Xie MY, 2018. Gastroprotective activity of polysaccharide from *Hericium erinaceus* against ethanol-induced gastric mucosal lesion and pylorus ligation-induced gastric ulcer, and its antioxidant activities. *Carbohydrate Polymers*, 186: 100-109
- Wang XY, Zhang DD, Yin JY, Nie SP, Xie MY, 2019c. Recent developments in *Hericium erinaceus* polysaccharides: extraction, purification, structural characteristics and biological activities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(Supp.1): S96-S115
- Wang Z, Zheng Y, Lai Z, Hu X, Wang L, Wang X, Li Z, Gao M, Yang Y, Wang Q, Li N, 2024. Effect of monosaccharide composition and proportion on the bioactivity of polysaccharides: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254: 127955
- Wei Y, Cai Z, Ma A, Zhang H, 2024. Rheology and gelation of aqueous carboxymethylated curdolan solution: impact of the degree of substitution. *Carbohydrate Polymers*, 332: 121921
- Wu F, Zhou C, Zhou D, Ou S, Zhang X, Huang H, 2018. Structure characterization of a novel polysaccharide from *Hericium erinaceus* fruiting bodies and its immunomodulatory activities. *Food & Function*, 9(1): 294-306
- Wu F, Zhou LW, Yang ZL, Bau T, Li TH, Dai YC, 2019. Resource diversity of Chinese macrofungi: edible, medicinal and poisonous species. *Fungal Diversity*, 98: 1-76
- Xia S, Zhai Y, Wang X, Fan Q, Dong X, Chen M, Han T, 2021. Phosphorylation of polysaccharides: a review on the synthesis and bioactivities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184: 946-954
- Xie L, Shen M, Hong Y, Ye H, Huang L, Xie J, 2020. Chemical modifications of polysaccharides and their anti-tumor activities. *Carbohydrate Polymers*, 229: 115436
- Xie L, Shen M, Wang Z, Xie J, 2021. Structure, function and food applications of carboxymethylated polysaccharides: a comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 118: 539-557
- Xu B, Wang HL, Lin XY, Chen YY, 2018. Acetylation

- modification of polysaccharides from *Hericium erinaceus* and its antioxidant activity. *Science and Technology of Food Industry*, 39(8): 50-55 (in Chinese)
- Yang J, Zhu B, Zheng J, Sun L, Zhou D, Dong X, Yu C, 2013. Stimulation of lymphocyte proliferation by oyster glycogen sulfated at C-6 position. *Carbohydrate Polymers*, 94(1): 301-308
- Yang W, Huang G, Huang H, 2020. Preparation and structure of polysaccharide selenide. *Industrial Crops and Products*, 154: 112630
- Yang Y, Li J, Hong Q, Zhang X, Liu Z, Zhang T, 2022. Polysaccharides from *Hericium erinaceus* fruiting bodies: structural characterization, immunomodulatory activity and mechanism. *Nutrients*, 14(18): 3721
- Yin Z, Liang Z, Li C, Wang J, Ma C, Kang W, 2021. Immunomodulatory effects of polysaccharides from edible fungus: a review. *Food Science and Human Wellness*, 10(4): 393-400
- Yu R, Sun M, Meng Z, Zhao J, Qin T, Ren Z, 2021. Immunomodulatory effects of polysaccharides enzymatic hydrolysis from *Hericium erinaceus* on the MODE-K/DCs co-culture model. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187: 272-280
- Zhan Q, Chen Y, Guo Y, Wang Q, Wu H, Zhao L, 2022. Effects of selenylation modification on the antioxidative and immunoregulatory activities of polysaccharides from the pulp of *Rosa laevigata* Michx. fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, 206: 242-254
- Zhang AQ, Ma X, He RJ, Ge Q, Yang K, Sun PL, Zhang JS, 2009. Structure and conformation analysis of sulfated polysaccharide from the fruiting bodies of *Hericium erinaceus*. *Food and Fermentation Industries*, 35(3): 64-67 (in Chinese)
- Zhang XX, Zhang WW, Ni ZJ, Thakur K, Zhang JG, Khan MR, Xu WD, Wei ZJ, 2024. Effects of different chemical modifications on physicochemical and antioxidation properties of *Lycium barbarum* seed dreg polysaccharides. *Food Chemistry: X*, 22: 101271
- Zhou Y, 2021. Study on sulfation modification and biological activity of polysaccharides from *Hericium erinaceus*. MS Thesis, Heilongjiang University, Harbin. 1-44 (in Chinese)
- Zhu H, Xie L, Zhang W, Yu Q, Chen Y, Xie J, 2024. Extraction and properties of *Cyclocarya paliurus* leaf polysaccharide and its phosphorylated derivatives. *Industrial Crops and Products*, 210: 118205
- Zhu L, Gong H, Gan X, Bu Y, Liu Y, Zhang T, Chen J, Xu Y, Shi S, Li T, Li B, Wang S, Wang H, 2025. "Processing-structure-activity" relationships of polysaccharides in Chinese Materia Medica: a comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 358: 123503
- [附中文参考文献]**
- 甘泽隆, 谢光波, 谢丽源, 2023. 基于网络药理学及分子对接技术探究猴头菇治疗慢性胃炎的潜在作用机制. *菌物学报*, 42(12): 2422-2441
- 古佩娴, 尹惠双, 胡坤, 吴小勇, 钟南京, 郭娟, 黄超, 胡勇, 陈云, 王颖, 伍芳芳, 2022. 硒化猴头菇多糖的制备、结构表征及抗增殖活性. *食品科学*, 43(22): 68
- 郭杨昇, 杜笑, 刘畅, 常明昌, 孟俊龙, 邓冰, 刘靖宇, 2023. 模拟胃肠消化过程中猴头菇多酚类物质及其抗氧化活性的变化规律. *菌物学报*, 42(5): 1151-1162
- 何晋浙, 徐瑶阳, 孙培龙, 2016. 不同来源猴头菌营养成分及其多糖化学组成和抗氧化活性比较. *食品与发酵工业*, 42(1): 134-140
- 黄凤佳, 2023. 硒化猴头菇多糖 PLGA 纳米粒的制备及其免疫增强作用的研究. 福建农林大学硕士论文, 福州. 1-37
- 黄振帝, 苗华彪, 裴丁玉, 唐湘华, 吴倩, 黄遵锡, 2023. 松口蘑的活性成分及其研究进展. *菌物学报*, 42(10): 2025-2040
- 李杨, 郭顺星, 陈娟, 2021. 珍稀名贵食药真菌块菌属的化学成分及药理活性研究进展. *菌物学报*, 40(4): 873-894
- 廖兵武, 2023. 猴头菇多糖及其磷酸化衍生物对 GES-1 细胞损伤的保护作用研究. 华南理工大学博士论文, 广州. 1-104
- 卢可可, 张月巧, 袁娅, 明建, 2014. 硫酸化修饰多糖抗肿瘤活性构效关系及分子机制研究进展. *食品科学*, 35(23): 297-302
- 孟思彤, 徐艳芝, 王振月, 2014. 多糖的化学修饰对其生物活性影响研究进展. *天然产物研究与开发*, 26(11): 1901-1905
- 石祥生, 2018. 猴头菇多糖的肿瘤免疫治疗功效研究. 东北林业大学硕士论文, 哈尔滨. 1-39
- 宋玉龙, 2020. 羟乙基化猴头菇多糖对小鼠树突状细胞和自然杀伤细胞相互作用的影响. 福建农林大学硕士论文, 福州. 1-55
- 王新宇, 2011. 小刺猴头菌硫酸化多糖的制备与活性研究. 吉林农业大学硕士论文, 长春. 1-36
- 徐兵, 王华丽, 林晓颖, 陈义勇, 2018. 猴头菇多糖的乙酰化修饰及其抗氧化活性研究. *食品工业科技*, 39(8): 50-55
- 张安强, 马新, 何荣军, 葛青, 杨开, 孙培龙, 张劲松, 2009. 硫酸酯化猴头菌多糖的结构与构象分析. *食品与发酵工业*, 35(3): 64-67
- 周艳, 2021. 猴头菌多糖的硫酸化修饰及生物活性研究. 黑龙江大学硕士论文, 哈尔滨. 1-44