

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81065

猴头菇活性成分及其功能研究进展

王凯轩^{1,2} 林俊芳^{1,2} 郭丽琼^{1,2} 周凤龙^{1,2} 王娜³ 钟景儒³(1. 华南农业大学食品学院, 广东 广州 510642; 2. 广东微生态制剂工程技术研究中心, 广东 广州 510642;
3. 澳键丰泽生物科技有限公司, 广东 广州 510760)

摘要:猴头菇作为药食同源真菌在中国有悠久历史,它不仅味道鲜美还富含多种活性成分。在越来越注重饮食健康的当下,猴头菇可作为均衡膳食的不错选择。文章综合前人研究成果,对猴头菇所含的萜类、酮类、麦角硫因、多糖等活性成分进行系统性汇总,对它们的具体种类及其成分具有的不同活性功能进行阐述总结,并对活性成分未来的发展作出展望。

关键词:猴头菇; 萜类; 酮类; 多糖; 功能

Research progress on active ingredients and functions of *Hericum erinaceus*

WANG Kaixuan^{1,2} LIN Junfang^{1,2} GUO Liqiong^{1,2} ZHOU Fenglong^{1,2} WANG Na³ ZHONG Jingru³

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2. Research Center for Micro-Ecological Agent Engineering and Technology of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 3. Alchemy Biotechnology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510760, China)

Abstract: *Hericum erinaceus* has a long history in China as a medicinal and edible fungus. With delicious tastes, it also contains various active ingredients. In the current era of increasing emphasis on dietary health, *Hericum erinaceus* can be an ideal choice for a balanced diet. Based on previous research, this paper comprehensively summarizes the active ingredients contained in *Hericum erinaceus*, including terpenes, ketones, ergothioneine, and polysaccharides. The specific types and different active functions of corresponding ingredients are elaborated, while the prospect is also given on the future development of active ingredients.

Keywords: *Hericum erinaceus*; terpene; ketone; polysaccharide; function

猴头菇(*Hericum erinaceus*),隶属担子菌纲、猴菇目、猴菇科、猴菇属,广泛分布在中国的东北、西南,在日本、东欧也有分布^[1]。因其子实体外型类似猴子的脑袋而得名。猴头菇的菌丝体、子实体均含有丰富的营养物质^[2-3],包括多种维生素、氨基酸^[4]、多糖、萜类、酮类等成分^[5]。近年来随着研究的持续深入,不断地发现猴头菇巨大的应用价值,它具有抗氧化^[6]、抗癌^[7]、保护神经、抗衰老^[8]、降血糖^[9]、保护胃肠道^[10]等多种对人体有益的功能。

文章主要总结猴头菇中的萜类、酮类、麦角硫因、多

糖等活性成分及其对机体的有益功效,以期为猴头菇的进一步深入研究及产业化发展提供参考。

1 活性成分

1.1 萜类物质

萜类活性成分是猴头菇的一种次级代谢产物,由重复的异戊二烯单位组成,在不同食用菌中已经鉴定分离出许多萜烯类物质,例如二萜、三萜和倍半萜等^[11]。1994年,Kawagishi等^[12]从猴头菇菌丝体中分离得到新的二萜类化合物,通过核磁共振(¹H-NMR)与质谱(HR-FAB-

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:32072646,32272785);广东省现代农业产业技术体系创新团队建设—食用菌团队建设(编号:2022KJ103,2023KJ103)

通信作者:林俊芳(1963—),男,华南农业大学研究员,博士。E-mail:linjf@scau.edu.cn

收稿日期:2024-10-19 **改回日期:**2025-08-04

引用格式:王凯轩,林俊芳,郭丽琼,等.猴头菇活性成分及其功能研究进展[J].食品与机械,2025,41(9):218-226.

Citation: WANG Kaixuan, LIN Junfang, GUO Liqiong, et al. Research progress on active ingredients and functions of *Hericum erinaceus* [J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 218-226.

MS)检测确定了它们的结构,并将其命名为:Erinacines (猴头菌素)A、B和C。随着研究的深入,现已经有报道的猴头菇萜类物质达到20种^[13],详见表1,部分萜类化合物的含量见表2。

1.2 酮类化合物

自1990年日本科学家Kawagishi Hirokazu从猴头菇中分离出Hericenone A与B两种酮类化合物以来,科学家

们又陆续分离出更多的此类化合物,尽管含量很少,但多数均对神经生长因子(NGF)具有刺激作用,部分酮类化合物含量见表2。现有报道的猴头菇酮类物质已达13种。猴头菇分离物中还纯化得到了与酮类物质结构较为类似的其他化合物,详见表1。

1.3 多糖

多糖又称多聚糖,是食药菌中含量最多的活性成

表1 猴头菇中分离出的萜类、酮类化合物汇总
Table 1 Summary of terpenes and ketones isolated from *Hericium erinaceus*

物质名称	性状	参考文献	物质名称	性状	参考文献
Erinacines A、B、C、D、E、F、G、H	A~G:白色晶体;H:黄色无定形残留物	[12,14-16]	Hericerin A、Isohericenone J	A:淡黄色无定形粉末;J:无色无定形粉末	[31]
Hericenone A、B	无色晶体	[17-19]	Ergosterol、Ergosterol peroxide	/	[32]
Erinacines I、P、Q、R	I:黄色油状物;P:淡黄色无定形固体;Q:无色无定形固体;R:淡黄色无定形粉末	[16,20-22]	Erinacerin B、Hericenone E	E:无色油;B:无定形粉末	[33-34]
Hericenone C、D、E、H	C、D:白色晶体;E:无色油;H:淡黄色油	[23-24]	5 α , 8 α -Epidioxysterol	白色粉末	[34]
Hericenone F、G	F:浅黄色油;G:淡黄色凝块	[24]	Erinacenols A、B、C、D	A、C、D:浅棕色糖浆;B:黄色糖浆	[35]
Erinacines J	无色结晶	[25]	Erinacerin W	淡黄色透明油	[36]
Erinacines K	淡黄色油	[25]	Erinarol K	无色的油性固体	[37]
3-hydroxyhericenone F	棕色油	[26]	Erinacene D	无色胶	[38]
Hericenone I、J	无色晶体	[26]	Hericene A	白色粉末	[37,39]
Hericenone L	白色油	[27]	Erinaceolactam A、B、C、D、E	A:无色团簇晶体;B:无色油;C:白色无定形粉末;D:淡黄色无定形粉末;E:黄色无定形粉末	[40]
Erinacines Z1	无色油	[28]			
Erinacines Z2	无色油	[28]			
Hericenone K	无色油	[29]			
Erinacerin M、N	M:白色无定形粉末;N:白色非晶粉末	[30]			

表2 猴头菇中部分萜类与酮类化合物含量
Table 2 Content of some terpenes and ketones in *Hericium erinaceus*

活性成分	提取含量	参考文献
Erinacines A、B、C	398.7, 24.5, 4.9 mg/1.1 kg(湿重)	[12, 14, 15, 20, 25]
Erinacines D、E、F、G	4.9, 4.1, 19.7, 4.9 mg/1.38 kg(湿重)	
Erinacines I、H	10.3, 6.0 mg/1.5 kg(湿重)	
Erinacine Q	34.1 mg/182 g(湿重)	
Erinacine J、K	12.7, 3.1 mg/200 g(干重)	
Hericenone A、B	3.0, 3.2 mg/7.3 kg(湿重)	[19, 23, 24]
Hericenone C、D、E	37.8, 37.3, 4.5 mg/5.3 kg(湿重)	
Hericenone F、G、H	22.4, 11.8, 3.7 mg/5.3 kg(湿重)	
Hericenone L、Hericene A	25, 44 mg/8 kg(干重)	[27]
Hericerin A、Isohericenone J	7.3, 31.2 mg/2.5 kg(干重)	[31]
Erinacerin B、Hericenone E	4, 7 mg/5 kg(湿重)	[33]
Erinacenols A、B、C、D	2.2, 1.9, 1.3, 9.8 mg/3.8 kg(干重)	[35]
Erinaceolactam A、B、C、D、E	14, 15, 4, 12, 7 mg/5 kg(干重)	[40]

分,它是由 10 个及以上单糖分子通过糖苷键连接而成的一类结构复杂且相对分子质量庞大的天然聚合物^[41]。猴头菇多糖不仅具有抗炎^[42]、免疫调节^[43]、抗氧化^[44]等活性,还可以促进肠道益生菌生长、调节肠道菌群平衡、抗皮肤衰老^[45]。猴头菇多糖的组成结构不同也会具有不同的活性。

1.4 麦角硫因

麦角硫因(ergothioneine, EGT)又称巯基组氨酸三甲基内盐,组氨酸衍生物,热稳定性高、水溶性较好,是一种天然的抗氧化剂^[46]。麦角硫因分布于人体内各处如脑、肝、血红细胞等^[47-48],由于人体不能合成,只能从外界摄

入。在食用真菌中麦角硫因含量较为丰富,其在天然猴头菇菌丝体中含量为 376 mg/kg(干重)^[49]。通过改进猴头菇培养基能够一定程度上提高麦角硫因产量。

2 活性功能

2.1 保护神经系统

神经生长因子(NGF)在支持神经元存活、诱导分化和神经再生中起着关键作用。Kawagishi 等^[12]分离出猴头菌素后使用小鼠星形胶质细胞进行生物测定,发现对神经生长因子(NGF)具有较强的促进合成作用。不同的试验模型验证了它们可以治疗神经退行性疾病、促进神经再生、减轻脑损伤等,详见表 3。

表 3 猴头菇中保护神经系统的萜类、酮类化合物

Table 3 Terpenes and ketones that protect the nervous system in *Hericium erinaceus*

物质名称	功能	参考文献	物质名称	功能	参考文献
Erinacines A、B、C、D、E、F、G、H	利用小鼠星形胶质细胞进行测定,具有促进神经生长因子(NGF)合成的活性	[12,14-16]	Erinacines A	保护谷氨酸转运蛋白(GLT-1)及谷氨酸清除机制以保护大脑避免出现缺血性脑损伤	[51]
Hericenone C、D、E、H	对体外 NGF 合成有促进作用	[23-24]	Erinacines C	显著减少 TBI 导致的大脑炎症,并对大脑的损伤起到一定的治愈作用	[52]
Erinacines Z1	增强了星形胶质细胞中神经营养蛋白的产生	[28]	Erinacines S	以 5 月龄的老年痴呆症小鼠模型(APP/PS1)双转基因小鼠为研究对象,使 ab10 染色的斑块负担减轻(38.1±19.7)%;使大鼠皮层 IDE 水平提高(141.1±63.7)%	[53]
Erinacines Z2	促进 PC12 神经细胞的生长与分化	[28]	Erinacines T、U、V	在 10 μmol/L 浓度下促进 PC12 细胞神经突细胞生长	[54]
Erinacines 与 S	A 减轻了胶质细胞增生,对老鼠的髓鞘具有保护作用;此外,在喂养过程中还抑制了老鼠的焦虑与抑郁现象	[50]			

某些酮类化合物也对神经生长因子有影响,如 Hericenone E 可以刺激 NGF 的分泌,它还促进 NGF 诱导的 PC12 细胞的神经突生长,这种促进效果一定程度上是通过 ERK1/2 和 PI3K/Akt 通路影响的^[55]。

猴头菇多糖对神经系统也有保护作用,主要体现在延缓神经细胞的衰老死亡。晋雅等^[56]从猴头菇中分离出精多糖(HEP),通过 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基、羟自由基清除试验及过氧化氢胁迫 PC12 细胞损伤模型证明,HEP 对 3 种自由基均有清除活力且具有剂量依赖性,其对羟自由基清除效果最好;在低质量浓度(<1.5 mg/mL)时,IC₅₀ 为 2.89 mg/mL;HEP 孵育经过氧化氢处理的 PC12 细胞,其存活率随着多糖的浓度增加而提高,探究其原因是细胞内的抗氧化酶系活力与处理前对比,经多糖处理后均升高,说明 HEP 对氧化受损细胞具有重塑性。

大脑作为高级神经中枢,保护神经系统很大程度上要先护脑。在所有的药食同源真菌中,猴头菇是公认的可以促进大脑健康的真菌^[57]。一项研究^[58]从 15 个月龄时开始喂养小鼠高纯度的从猴头菇中提取的麦角硫因,

解剖前进行一些行为学、认知测试来探究衰老对认知的影响。在小鼠 23 月龄时进行解剖,并对海马组织以及一些理化指标进行检测。结果显示:饲养高纯度麦角硫因小鼠的海马中炎症和氧化应激的关键标志物 IL-6、TGF-β1、GFAP、Nrf2、SOD1、COX2、NOS2 均显著降低,海马体细胞更加健康完整;并减少了大脑炎症,改善了衰老带来的认知衰退;免疫组化结果显示,与谷氨酸神经传递相关的 nmdar1 和 mGluR2 表达增强,对衰老机体谷氨酸通路具有改善功能。Priori 等^[59]通过衰老的小鼠模型证实猴头菇提取物对延缓脑神经衰老、改善认知功能具有明显作用。

2.2 抑制癌细胞增长

猴头菇中分离出的部分萜类、酮类化合物具有细胞毒性,在不同浓度时可以抑制 HeLa 细胞生长。有些酮类化合物具有多种活性作用,如 Hericenone B 对细胞有毒性作用,还能够以浓度依赖性的方式抑制人血小板中胶原诱导的聚集,IC₅₀ 值约为 3 μmol/L^[17],此作用可用于预防血栓生成。猴头菇中具有抑制癌细胞或具有细胞毒性的活性成分详见表 4。

表 4 猴头菇中抑制癌细胞生长的活性成分

Table 4 Active ingredients that inhibit cancer cell growth in *Hericium erinaceus*

物质名称	功能	参考文献	物质名称	功能	参考文献
Hericenone A、B	A、B 对 HeLa 细胞均有明显的细胞毒性	[17-19]	Ergosterol、Ergosterol peroxide	对 3 种前列腺癌细胞 DU145、LN-CaP 和 PC3 均具有抗增殖活性	[32]
Hericenone L	对 EC109 细胞具有杀伤活性, IC ₅₀ 为 46 μg/L	[27]	Erinaceolactam	以剂量依赖性方式抑制人肝癌细胞株 SMMC-7221 的生长	[40]
Hericerin A、Isohericenone J	降低 HL-60 人急性早幼粒细胞白血病细胞增殖,诱导其凋亡	[31]	Erinacines A	通过激活 p70S6K、ROS,上调 p21 蛋白,阻滞 DLD-1 结肠癌细胞增殖	[60]

猴头菇蛋白与化疗药物 5-氟尿嘧啶(5-Fu)联合使用可以显著抑制肿瘤生长;有试验^[61]证明,猴头菇蛋白是通过调节肠道菌群组成、免疫炎症反应来促进 5-氟尿嘧啶的抗癌作用。从猴头菇中分离出的凝集素还可用于肿瘤识别,在猴头菇子实体内鉴定出两种凝集素:HEL1、HEL2。以 K562 人白血病细胞作为检测模型,发现 rHEL2 分离素可以作为分析癌细胞表面表达的黏液型 o-聚糖的有力工具^[62]。

2.3 提高免疫、抗氧化

猴头菇多糖在改善免疫系统、提高免疫力上具有较明显的作用。Qin 等^[43]对同一种猴头菇多糖进行修饰,得到 9 种硒化衍生物;硒化猴头菇多糖的平均相对分子质量为 22 000,由鼠李糖、甘露糖、半乳糖和葡萄糖组成, $n_{\text{鼠李糖}}:n_{\text{甘露糖}}:n_{\text{半乳糖}}:n_{\text{葡萄糖}}=1.0:1.1:16.2:36.8$ 。以树突状细胞(DCs)为模型,通过体外细胞培养发现硒化猴头菇多糖(sHEP)可以增强树突状细胞(DCs)对 T 淋巴细胞增殖的刺激,提高树突状细胞对抗原的呈递能力以及表型和功能成熟。该试验结果表明,硒化的猴头菇多糖可以作为天然的免疫调节剂。

Li 等^[44]提取的猴头菇多糖由甘露糖(Man)、鼠李糖(Rha)、葡萄糖(Glu)、半乳糖(Gal)和 L-岩藻糖(Fuc)5 种单糖组成。其中葡萄糖含量最高,鼠李糖含量最低。单糖构成比例为 $n_{\text{Man}}:n_{\text{Rha}}:n_{\text{Glu}}:n_{\text{Gal}}:n_{\text{Fuc}}=0.8:0.1:9.7:10.0:1.6$ 。用纯化后的猴头菇多糖处理猪的 IPEC-J2 肠上皮细胞,可以显著清除活性氧(ROS),并能减少乳酸脱氢酶(LDH)和丙二醛(MDA)的生成;猴头菇多糖在减少细胞

死亡的同时保持了线粒体膜电位的极性。说明猴头菇多糖具有氧化应激的保护作用。

麦角硫因不仅具有抗氧化作用,还是一种细胞保护剂。Roda 等^[8]用富含麦角硫因的猴头菇提取物喂养 23 月的高龄小鼠,与未饲养的野生型进行对比,在持续口服补充猴头菇原基提取物 8 个月(从 15 月龄至 23 月龄)后显著改善了小鼠的运动表现;理化指标检测结果显示,环氧化酶 2(COX2)和一氧化氮合酶 2(NOS2)水平在补充猴头菇提取物的动物体内显著降低,同时促凋亡蛋白 p53 水平增强。这些与衰老有关的因子变化可能会延长寿命,改善生活品质,同时改善运动能力。

猴头菇中的肽类物质也具有抗氧化活性。Xu 等^[63]用猴头菇肽 Lys-Ser-Pro-Leu-Tyr(KSPLY)来探究过氧化氢诱导的 HepG2 细胞氧化损伤的抗氧化作用机制,发现 KSPLY 能提高超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化氢酶(CAT)3 种酶的活性,表现出抗氧化能力。酚类也是食用菌中含量较多的次级代谢产物,它属于芳香族,具有多种不同的形式,可以是邻苯三酚、杨梅素、咖啡酸、槲皮素和儿茶素等;酚类物质在氧化过程中具有广泛的生物效应,包括抗氧化、抗菌、抗炎等作用^[64]。在培养基中加入硒元素可以促进猴头菇产生酚类物质,还能补充人体所需要的微量元素^[65]。表 5 展示了猴头菇中其他可以提高抗氧化的活性物质。

2.4 保护胃肠道黏膜

猴头菇多糖可以起到保护肠黏膜的作用。Ren 等^[66]在葡聚糖硫酸钠(DSS)诱导的 C57BL/6 小鼠结肠炎模型

表 5 猴头菇中部分提高免疫抗氧化活性物质

Table 5 Some substances that enhance immune and antioxidant activity in *Hericium erinaceus*

名称	活性功能	参考文献
5α, 8α-Epidioxysterosta-6, 22-dien-3β-yl	抑制阿霉素诱导的 HUVECs 过早衰老	[34]
Erinacerin B、Hericenone E	呈浓度依赖性降低 lps 诱导的 RAW 264.7 巨噬细胞 NO 和 PGE2 的生成水平	[35]
Erinacerin W	对 lps 激活的 BV-2 细胞诱导的 SH-SY5Y 细胞上 IL-6、IL-1β 和 TNF-α 的过表达具有保护作用	[38]
Erinacene D	呈剂量依赖性抑制 TNF-α 诱导的 NF-κB 转录活性	[38]
Hericenone A	对 TNF-α、IL-6 和 NO 的分泌具有中等抑制作用	[37, 39]

中,研究了猴头菇多糖(HECP,相对分子质量 86 670)的抗炎作用,结果表明,HECP 逆转了 DSS 诱导的肠道生态失调,维持了肠道屏障的完整性。Hou 等^[67]利用大鼠和 GES-1 细胞评估了猴头菇菌丝体多糖(HMP)和子实体多糖(HFP)对乙醇诱导的胃黏膜损伤的保护作用,结果表明,HMP 和 HFP 均能通过促进细胞迁移而对胃黏膜产生保护作用,且 HMP 的保护作用优于 HFP。Tian 等^[68]将对环磷酸胺(CTX)诱导的免疫功能低下小鼠作为猴头菇多糖(HEPs)对肠道屏障损伤的改善作用的模型,结果表明,HEP 有效提高了小鼠肝组织中总抗氧化能力(T-AOC)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)和总超氧化物歧化酶(T-SOD)水平,降低了丙二醛(MDA)含量;同时 HEPs 降低了肠道通透性,保护肠内黏膜屏障,对 CTX 诱导的免疫功能低下小鼠肠道屏障损伤具有改善作用。Chen 等^[10]对提取得到的猴头菇提取物进行 GC-MS 检测,发现其单糖组成为甘露糖(约 55.70%)、阿拉伯糖(约 0.7%)、鼠李糖(约 3.75%)、木糖(约 1.60%)、半乳糖(约 5.12%)和葡萄糖(约 33.10%);使用从猴头菇提取的多糖对三硝苯磺酸(TNBS)构成的大鼠肠黏膜损伤进行治愈效果研究,结果显示猴头菇多糖提取物治疗组的大鼠结肠中炎症因子水平下降,肠道炎症缓解,还提高了宿主免疫力。Li 等^[44]通过利用葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠溃疡性结肠炎模型来探究猴头菇子实体多糖(HEFPs)对胃肠道的保护作用,结果表明,猴头菇子实体多糖不仅能缓解应急炎症反应,而且与对照组相比肠道内微生物菌群也更加丰富。

虽然采用不同的提取方法可能会对其猴头菇多糖组成以及生物活性产生不同的影响^[69],但无论是直接食用提取出的猴头菇多糖,还是直接食用猴头菇子实体,对胃肠道的保护作用都非常显著。

2.5 调节肠道菌群

多糖类物质不能被人体分泌的消化液消化分解,它们能顺利到达大肠内,通过肠道微生物分解代谢。猴头菇多糖的摄入为肠道益生菌提供了有利的生存环境。肠道上皮的免疫机制、屏障保护、抗炎作用等都与微生物菌群有所关联^[70]。

Zhuang 等^[71]分别用水溶法、碱溶法从猴头菇子实体

中提取水溶性多糖(HEP-W)和碱溶性多糖(HEP-A),提取率分别为 0.3%,3.1%。HEP-W 由岩藻糖、葡萄糖胺、半乳糖、葡萄糖、甘露糖、葡萄糖醛酸组成;HEP-A 由岩藻糖、鼠李糖+阿拉伯糖、葡萄糖胺、半乳糖、葡萄糖、葡萄糖醛酸组成。可见 HEP-W 和 HEP-A 均为以葡萄糖为主的杂多糖组成。胃肠道模拟试验结果发现,两种多糖在发酵过程中被人体肠道菌群大量利用,促进了有益菌丰富度的增加,具有益生元作用。

另一项研究^[72],通过不同浓度乙醇提取猴头菇多糖,分别得到 HEP30、HEP50、HEP70,多糖含量分别为(46.57±1.70)%,(65.01±1.50)%,(58.55±1.40)%。将 3 种多糖进行体外粪便发酵试验,虽然采用男性女性不同的粪便样本,开始时粪便内微生物的种类数量也均不同,但经过发酵后结果趋于一致,说明 HEPs 对粪便微生物群的调节作用基本相同;经 HEPs 处理体外发酵 24 h 后,粪便内短链脂肪酸(SCFA)增加,pH 降低,说明产 SCFA 的有益菌数量提高,同时降低了致病菌的丰度。

Cho 等^[73]用含猴头菇的饲料喂养老年犬,结果发现,与喂养高蛋白低碳水的犬只相比,厚壁菌门/拟杆菌门(F/B)的比例降低,而 F/B 的比例与微生物生态系统的平衡有关,肥胖会导致 F/B 比例上升。说明食用猴头菇可以使肠道微生物群落 F/B 比例适当,拥有健康体型。

现有研究^[74]表明,“脑肠轴”通路与衰老、认知功能有密切关联。人体是有机的整体,作为“脑肠轴”中重要的一环,猴头菇多糖改善肠道菌群保护肠道黏膜对神经类疾病的治疗也有协同助益功效,如猴头菇多糖还可以改善睡眠,片段式睡眠及睡眠时间短可能是肠道菌群失调导致的,而睡眠不足引起的代谢紊乱可能是肠道菌群中某种菌过度生长所引起,猴头菇多糖的摄入调节了肠道菌群平衡,改善睡眠质量^[75]。表 6 展示了猴头菇中活性成分具有的其他功能作用。

3 结语

猴头菇中的功能活性物质种类丰富,功效优异,具有极大的开发利用价值。但由于像猴头菌素此类物质低难提取,现今的研究只停留在实验室层面,对于规模化应用

表 6 活性成分的其他功能作用

Table 6 Other functional effects of active ingredients

物质名称	功能	参考文献	物质名称	功能	参考文献
Erinacines K	在 500 μmol/L 浓度时有抗“MRSA”活性	[25]	猴头菇多糖 (HEP)	保护皮肤,显著提高皮肤抗氧化酶、MMP-1、TIMP-1 活性和胶原蛋白水平	[45]
3-hydroxyhericenone F	对内质网应激依赖性细胞死亡具有显著的剂量依赖性保护作用	[26]	Hericenone C、D、F、G	减少脂肪积累,具有减脂作用	[76]
Erinacenols A-D	对 α-葡萄糖苷酶活性有较强的抑制作用	[34]	Hericenone C	具有抗伤害能力	[77]

尚有很长路要走,已经有研究^[78]尝试优化培养方法来对猴头菌素的产量进行提高;同样量少、活性功能优异的还有猴头菇中的酮类物质,它所具有的细胞毒性对癌症有治疗效果,神经系统保护作用可以对抗神经性疾病,抗损伤能力可以保护细胞免受损伤等。它们对神经生长因子的促进作用可能会给老年痴呆、帕金森患者带来福音。现阶段在物质功能性研究的同时还可以对如何通过化学合成提高其产量、利用高新技术实现高效提取进行拓展。

猴头菇中麦角硫因含量较为丰富,它的性质稳定、抗氧化能力强,现如今使用工程菌株生产麦角硫因的产量已经显著提高,麦角硫因曾经昂贵的价格也开始变得亲民,随着研究的持续深入以及政策的放开,麦角硫因将会在更多领域使用。猴头菇多糖是目前研究较多的物质,它的提取相对容易,根据提取方法的不同,可得到不同组成的多糖与试验效果,利用这一特点可开发多种猴头菇多糖的营养产品。

综上,猴头菇作为一种药食同源真菌,美味且含有许多的活性成分:对神经系统具有保护作用的萜类、酮类化合物,能保护胃肠道、抗菌、抗炎的多糖类、酚类化合物,性质稳定抗氧化能力优异的麦角硫因等。现阶段研究猴头菇活性成分的主要门槛还是其含量低,分离成本高,培养猴头菇时间周期较长等,未来随着研究的不断深入,结合转基因工程可以定向提高猴头菇中某类活性成分含量,缩短生长周期;高端仪器设备的发展将会使得分离微量的活性成分更加高效,实验室层面的技术进步将会为工业化生产带来更多的可能。

参考文献

- [1] 谭佳媛,王栩俊,王星丽,等.猴头菇的养生保健价值(综述)[J].食药用菌,2015,23(3):188-193.
TAN J Y, WANG X J, WANG X L, et al. The health value of *Hericium erinaceus* (review) [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2015, 23(3): 188-193.
- [2] HELENO S A, BARROS L, MARTINS A, et al. Chemical composition, antioxidant activity and bioaccessibility studies in phenolic extracts of two *Hericium* wild edible species[J]. LWT- Food Science and Technology, 2015, 63(1): 475-481.
- [3] LAZUR J, KALA K, KRAKOWSKA A, et al. Analysis of bioactive substances and essential elements of mycelia and fruiting bodies of *Hericium* spp[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 127: 105981.
- [4] 张岩.猴头菇化学成分的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2016:1-7.
ZHANG Y. Research on the chemical components of *Hericium erinaceus* [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2016: 1-7.
- [5] 陈建胜,杨正友,王延圣,等.食用菌营养组成、功能活性及加工现状研究进展[J].食品工业科技,2024,45(12):358-366.
- [6] CHEN J S, YANG Z Y, WANG Y S, et al. Research progress in nutrient composition, functional activity, and processing status of edible fungi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 358-366.
- [7] HAN Z H, YE J M, WANG G F. Evaluation of in vivo antioxidant activity of *Hericium erinaceus* polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 52: 66-71.
- [8] LI G, YU K, LI F S, et al. Anticancer potential of *Hericium erinaceus* extracts against human gastrointestinal cancers[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2014, 153(2): 521-530.
- [9] RODA E, RATTI D, DE LUCA F, et al. Searching for a longevity food, we bump into *Hericium erinaceus* primordium rich in ergothioneine: the "longevity vitamin" improves locomotor performances during aging[J]. Nutrients, 2022, 14 (6): 1177.
- [10] KHURSHED R, SINGH S K, WADHWA S, et al. Therapeutic potential of mushrooms in diabetes mellitus: role of polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 1194-1205.
- [11] CHEN D L, YANG X, ZHENG C Q, et al. Extracts from *Hericium erinaceus* relieve inflammatory bowel disease by regulating immunity and gut microbiota[J]. Oncotarget, 2017, 8 (49): 85838-85857.
- [12] TONG Z J, CHU G D, WAN C M, et al. Multiple metabolites derived from mushrooms and their beneficial effect on alzheimer's diseases[J]. Nutrients, 2023, 15(12): 2758.
- [13] KAWAGISHI H, SHIMADA A, SHIRAI R, et al. Erinacines A, B and C, strong stimulators of nerve growth factor (NGF)-synthesis, from the mycelia of *Hericium erinaceum*[J]. Tetrahedron Letters, 1994, 35(10): 1569-1572.
- [14] QIU Y, LIN G L, LIU W M, et al. Bioactive compounds in *Hericium erinaceus* and their biological properties: a review [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(4): 1825-1844.
- [15] KAWAGISHI H, SHIMADA A, HOSOKAWA S, et al. Erinacines E, F, and G, stimulators of nerve growth factor (NGF)-synthesis, from the mycelia of *Hericium erinaceum*[J]. Tetrahedron Letters, 1996, 37(41): 7399-7402.
- [16] KAWAGISHI H, SHIMADA A, SHIZUKI K, et al. Erinacine d, a stimulator of NGF-synthesis, from the mycelia of *Hericium erinaceum*[J]. Heterocyclic Communications, 1996, 2(1): 51-54.
- [17] LEE E W, SHIZUKI K, HOSOKAWA S, et al. Two novel diterpenoids, erinacines H and I from the mycelia of *Hericium erinaceum*[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2000, 64(11): 2402-2405.
- [18] MORI K, KIKUCHI H, OBARA Y, et al. Inhibitory effect of hericenone B from *Hericium erinaceus* on collagen-induced

- platelet aggregation[J]. *Phytomedicine*, 2010, 17(14): 1 082-1 085.
- [18] RAMA RAO A V, REDDY R G. First unambiguous total synthesis of hericenone a proposed structure revised[J]. *Tetrahedron Letters*, 1992, 33(28): 4 061-4 064.
- [19] KAWAGISHI H, ANDO M, MIZUNO T. Hericenone A and B as cytotoxic principles from the mushroom *Hericum erinaceum*[J]. *Tetrahedron Letters*, 1990, 31(3): 373-376.
- [20] KENMOKU H, SHIMAI T, TOYOMASU T, et al. Erinacine Q, a new erinacine from *Hericum erinaceum*, and its biosynthetic route to erinacine C in the basidiomycete[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2002, 66(3): 571-575.
- [21] KENMOKU H, SASSA T, KATO N. Isolation of erinacine P, a new parental metabolite of cyathane-xylosides, from *Hericum erinaceum* and its biomimetic conversion into erinacines A and B[J]. *Tetrahedron Letters*, 2000, 41(22): 4 389-4 393.
- [22] MA B J, ZHOU Y, LI L Z, et al. A new cyathane-xyloside from the mycelia of *Hericum erinaceum*[J]. *Zeitschrift Fur Naturforschung Section B-A Journal of Chemical Sciences*, 2008, 63(10): 1 241-1 242.
- [23] KAWAGISHI H, ANDO M, SAKAMOTO H, et al. Hericenones C, D and E, stimulators of nerve growth factor (NGF)-synthesis, from the mushroom *Hericum erinaceum*[J]. *Tetrahedron Letters*, 1991, 32(35): 4 561-4 564.
- [24] KAWAGISHI H, ANDO M, SHINBA K, et al. Chromans, hericenone-F, hericenone-G and hericenone-H from the mushroom *Hericum-erinaceum*[J]. *Phytochemistry*, 1992, 32(1): 175-178.
- [25] KAWAGISHI H, MASUI A, TOKUYAMA S, et al. Erinacines J and K from the mycelia of *Hericum erinaceum*[J]. *Tetrahedron*, 2006, 62(36): 8 463-8 466.
- [26] UEDA K, TSUJIMORI M, KODANI S, et al. An endoplasmic reticulum (ER) stress-suppressive compound and its analogues from the mushroom *Hericum erinaceum*[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2008, 16(21): 9 467-9 470.
- [27] MA B J, MA J C, RUAN Y. Hericenone L, a new aromatic compound from the fruiting bodies of *Hericum erinaceum*[J]. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 2012, 10(5): 363-365.
- [28] RUPCIC Z, RASCHER M, KANAKI S, et al. Two new cyathane diterpenoids from mycelial cultures of the medicinal mushroom *Hericum erinaceum* and the rare species, hericum flagellum[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(3): 740.
- [29] ZHANG C C, YIN X, CAO C Y, et al. Chemical constituents from *Hericum erinaceum* and their ability to stimulate NGF-mediated neurite outgrowth on PC12 cells[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2015, 25(22): 5 078-5 082.
- [30] ASHOUR A, AMEN Y, ALLAM A E, et al. New isoindolinones from the fruiting bodies of the fungus *Hericum erinaceum*[J]. *Phytochemistry Letters*, 2019, 32: 10-14.
- [31] LI W, ZHOU W, KIM E J, et al. Isolation and identification of aromatic compounds in lion's mane mushroom and their anticancer activities[J]. *Food Chemistry*, 2015, 170: 336-342.
- [32] CHEN Z G, BISHOP K S, TANAMBELL H, et al. Characterization of the bioactivities of an ethanol extract and some of its constituents from the New Zealand native mushroom *Hericum novae-zealandiae*[J]. *Food & Function*, 2019, 10(10): 6 633-6 643.
- [33] NOH H J, YOON J Y, KIM G S, et al. Benzyl alcohol derivatives from the mushroom *Hericum erinaceum* attenuate LPS-stimulated inflammatory response through the regulation of NF- κ B and AP-1 activity[J]. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, 2014, 36(5): 349-354.
- [34] NOH H J, YANG H H, KIM G S, et al. Chemical constituents of *Hericum erinaceum* associated with the inhibitory activity against cellular senescence in human umbilical vascular endothelial cells[J]. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 2015, 30(6): 934-940.
- [35] LEE S K, RYU S H, TURK A, et al. Characterization of α -glucosidase inhibitory constituents of the fruiting body of lion's mane mushroom (*Hericum erinaceum*) [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2020, 262: 113197.
- [36] LIN J Y, CHEN Y P, LIN T W, et al. Discovery of a new compound, erinacerin w, from the mycelia of *Hericum erinaceum*, with immunomodulatory and neuroprotective effects [J]. *Molecules*, 2024, 29(4): 812.
- [37] XIE G B, TANG L, XIE Y, et al. Secondary metabolites from *Hericum erinaceum* and their anti-inflammatory activities[J]. *Molecules*, 2022, 27(7): 2 157.
- [38] LI W, SUN Y N, ZHOU W, et al. Erinacene D, a new aromatic compound from *Hericum erinaceum*[J]. *Journal of Antibiotics*, 2014, 67(10): 727-729.
- [39] MIYAZAWA M, TAKAHASHI T, HORIBE I, et al. Two new aromatic compounds and a new d-arabinitol ester from the mushroom *Hericum erinaceum*[J]. *Tetrahedron*, 2012, 68(7): 2 007-2 010.
- [40] WANG X L, XU K P, LONG H P, et al. New isoindolinones from the fruiting bodies of *Hericum erinaceum*[J]. *Fitoterapia*, 2016, 111: 58-65.
- [41] 伍芳芳. 猴头菇多糖的结构表征、免疫调节活性及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 1-3.
WU F F. Structural characterization, immunomodulatory activity and underlying mechanism of *Hericum erinaceum* polysaccharides[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 1-3.
- [42] LI H, FENG J X, LIU C, et al. Polysaccharides from an edible mushroom, *Hericum erinaceum*, alleviate ulcerative colitis in

- mice by inhibiting the NLRP3 inflammasomes and reestablish intestinal homeostasis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131251.
- [43] QIN T, REN Z, HUANG Y F, et al. Selenizing *Hericium erinaceus* polysaccharides induces dendritic cells maturation through MAPK and NF- κ B signaling pathways[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 97: 287-298.
- [44] LI J, MO J R, HU S Y, et al. Effects of *Hericium erinaceus* polysaccharide in porcine IPEC-J2 intestinal epithelial cells against apoptosis induced by oxidative stress[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2024, 280: 109902.
- [45] XU H, WU P R, SHEN Z Y, et al. Chemical analysis of *Hericium erinaceum* polysaccharides and effect of the polysaccharides on derma antioxidant enzymes, MMP-1 and TIMP-1 activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(1): 33-36.
- [46] 王进, 谷雅婷, 司波, 等. 麦角硫因的生物活性及其在食品领域中应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 99-106.
- WANG J, GU Y T, SI B, et al. Research progress on the biological activities of ergothione and its application in the food industry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 99-106.
- [47] TANG R M Y, CHEAH I K, YEW T S K, et al. Distribution and accumulation of dietary ergothioneine and its metabolites in mouse tissues[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1 601.
- [48] CHEAH I K, HALLIWELL B. Ergothioneine; antioxidant potential, physiological function and role in disease[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease, 2012, 1 822(5): 784-793.
- [49] CHEN S, HO K, HSIEH Y, et al. Contents of lovastatin, γ -aminobutyric acid and ergothioneine in mushroom fruiting bodies and mycelia[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 47(2): 274-278.
- [50] FU J T, YANG C J, LEE L Y, et al. Erinacine S, a small active component derived from *Hericium erinaceus*, protects oligodendrocytes and alleviates mood abnormalities in cuprizone-exposed rodents[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2024, 173: 116297.
- [51] HSU P C, LAN Y J, CHEN C C, et al. Erinacine a attenuates glutamate transporter 1 downregulation and protects against ischemic brain injury[J]. Life Sciences, 2022, 306: 120833.
- [52] LEE K F, HSIEH Y Y, TUNG S Y, et al. The cerebral protective effect of novel erinacines from *Hericium erinaceus* mycelium on in vivo mild traumatic brain injury animal model and primary mixed glial cells via Nrf2-dependent pathways[J]. Antioxidants, 2024, 13(3): 371.
- [53] CHEN C C, ZENG T T, CHEN C C, et al. Erinacine S, a rare sesterterpene from the mycelia of *Hericium erinaceus*[J]. Journal of Natural Products, 2016, 79(2): 438-441.
- [54] ZHANG Y T, LIU L, BAO L, et al. Three new cyathane diterpenes with neurotrophic activity from the liquid cultures of *Hericium erinaceus*[J]. Journal of Antibiotics, 2018, 71(9): 818-821.
- [55] PHAN C W, LEE G S, HONG S L, et al. *Hericium erinaceus* (Bull. : Fr) Pers. cultivated under tropical conditions: isolation of hericenones and demonstration of NGF-mediated neurite outgrowth in PC12 cells via MEK/ERK and PI3K-Akt signaling pathways[J]. Food Funct, 2014, 5(12): 3 160-3 169.
- [56] 晋雅, 彭国庆, 李萍, 等. 猴头菇多糖的理化性质及其神经保护活性[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 178-187.
- JIN Y, PENG G Q, LI P, et al. Physicochemical properties and neuroprotective activity of polysaccharides from *Hericium erinaceus*[J]. Modern Food Technology, 2024, 40(9): 178-187.
- [57] BRANDALISE F, RODA E, RATTI D, et al. *Hericium erinaceus* in neurodegenerative diseases: from bench to bedside and beyond, how far from the shoreline?[J]. Journal of Fungi, 2023, 9(5): 551.
- [58] RODA E, DE LUCA F, RATTI D, et al. Cognitive healthy aging in mice: boosting memory by an ergothioneine-rich *Hericium erinaceus* primordium extract[J]. Biology, 2023, 12(2): 196.
- [59] PRIORI E C, RATTI D, DE LUCA F, et al. *Hericium erinaceus* extract exerts beneficial effects on gut-neuroinflammation-cognitive axis in elderly mice[J]. Biology, 2023, 13(1): 18.
- [60] LU C C, HUANG W S, LEE K F, et al. Inhibitory effect of erinacines a on the growth of DLD-1 colorectal cancer cells is induced by generation of reactive oxygen species and activation of p70S6K and p21[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 21: 474-484.
- [61] WANG D D, ZHU X X, TANG X C, et al. Auxiliary antitumor effects of fungal proteins from *Hericium erinaceus* by target on the gut microbiota[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(6): 1 872-1 890.
- [62] KIM S. *Hericium erinaceus* isolectins recognize mucin-type O-glycans as tumor-associated carbohydrate antigens on the surface of K562 human leukemia cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1 093-1 102.
- [63] XU Z L, HU Q H, XIE M H, et al. Protective effects of peptide KSPLY derived from *Hericium erinaceus* on H₂O₂-induced oxidative damage in HepG2 cells[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(5): 1 893-1 904.
- [64] HUANG C W, HUNG Y C, CHEN L Y, et al. Chemical composition and antioxidant properties of different combinations of submerged cultured mycelia of medicinal mushrooms[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms,

- 2021, 23(8): 1-24.
- [65] GASECKA M, MLECZEK M, SIWULSKI M, et al. Phenolic and flavonoid content in *Hericium erinaceus*, *ganoderma lucidum*, and *agrocyste aegerita* under selenium addition[J]. *Acta Alimentaria*, 2016, 45(2): 300-308.
- [66] REN Y L, GENG Y, DU Y, et al. Polysaccharide of *Hericium erinaceus* attenuates colitis in C57BL/6 mice via regulation of oxidative stress, inflammation-related signaling pathways and modulating the composition of the gut microbiota[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2018, 57: 67-76.
- [67] HOU C L, LIU L Y, REN J Y, et al. Structural characterization of two *Hericium erinaceus* polysaccharides and their protective effects on the alcohol-induced gastric mucosal injury [J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131896.
- [68] TIAN B M, WANG P Y, XU T R, et al. Ameliorating effects of *Hericium erinaceus* polysaccharides on intestinal barrier injury in immunocompromised mice induced by cyclophosphamide [J]. *Food & Function*, 2023, 14(6): 2 921-2 932.
- [69] ZHANG Z F, LV G Y, SONG T T, et al. Effects of different extraction methods on the structural and biological properties of *Hericium coralloides* polysaccharides[J]. *Food Chemistry*, 2024, 445: 138752.
- [70] DO M H, SEO Y S, PARK H. Polysaccharides: bowel health and gut microbiota[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(7): 1 212-1 224.
- [71] ZHUANG H N, DONG H Y, ZHANG X W, et al. Antioxidant activities and prebiotic activities of water-soluble, alkali-soluble polysaccharides extracted from the fruiting bodies of the fungus *Hericium erinaceus*[J]. *Polymers*, 2023, 15(20): 4 165.
- [72] TIAN B M, GENG Y, XU T R, et al. Digestive characteristics of *Hericium erinaceus* polysaccharides and their positive effects on fecal microbiota of male and female volunteers during in vitro fermentation[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 858585.
- [73] CHO H W, CHOI S, SEO K, et al. Gut microbiota profiling in aged dogs after feeding pet food contained *Hericium erinaceus* [J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2022, 64(5): 937-949.
- [74] CLAPP M, AURORA N, HERRERA L, et al. Gut microbiota's effect on mental health: the gut-brain axis[J]. *Clinics and Practice*, 2017, 7(4): 987.
- [75] MATENCHUK B A, MANDHANE P J, KOZYRSKYJ A L. Sleep, circadian rhythm, and gut microbiota[J]. *Sleep Medicine Reviews*, 2020, 53: 101340.
- [76] HIRAKI E, FURUTA S, KUWAHARA R, et al. Anti-obesity activity of yamabushitake (*Hericium erinaceus*) powder in ovariectomized mice, and its potentially active compounds[J]. *Journal of Natural Medicines*, 2017, 71(3): 482-491.
- [77] LI J H, HAMAMURA K, YOSHIDA Y, et al. Hericenone C attenuates the second phase of formalin-induced nociceptive behavior by suppressing the accumulation of CD11c-positive cells in the paw epidermis via phosphorylated P65[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2024, 720: 150077.
- [78] CHENG P Y, LIAO H Y, KUO C H, et al. Enhanced erinacine A production by *Hericium erinaceus* using solid-state cultivation[J]. *Fermentation*, 2021, 7(3): 182.