

羊肚菌的营养成分、功能和加工的研究进展

田金凤, 尚远宏, 肖宗妮

Research Progress on Nutrient Composition, Function and Processing of Morels

TIAN Jinfeng, SHANG Yuanhong, and XIAO Zongni

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060297>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子束辐照对羊肚菌营养成分影响分析

Effectation analysis of electron beam irradiation on morels nutrient composition

食品工业科技. 2018, 39(12): 55-62 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.12.011>

酸枣叶的营养成分、保健功能及产品开发研究进展

Research Progress on Nutrient Composition, Health Functions and Product Development of Ziziphi Spinosae Folium

食品工业科技. 2018, 39(20): 330-336, 342 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.20.056>

子营养成分及功能利用研究进展

Research progress in nutrient composition, function and utilization of finger millet

食品工业科技. 2017(13): 329-334 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.13.062>

人乳营养成分及其生理功能

Nutrients and Physiological Functions of Human Milk

食品工业科技. 2019, 40(1): 286-291 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.01.051>

我国预包装食品标签中营养成分功能声称使用现况调查

Investigation on the Status of Nutrient Function Claims in Prepackaged Food Labelling in China

食品工业科技. 2018, 39(21): 306-309 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.054>

羊肚菌菌柄营养成分的分析与评价

Analysis and Evaluation of Nutritional Components in Stipe of *Morchella esculenta*

食品工业科技. 2021, 42(17): 335-342 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060267>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

田金凤, 尚远宏, 肖宗妮. 羊肚菌的营养成分、功能和加工的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 419–428. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060297

TIAN Jinfeng, SHANG Yuanhong, XIAO Zongni. Research Progress on Nutrient Composition, Function and Processing of Morels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 419–428. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060297

· 专题综述 ·

羊肚菌的营养成分、功能和加工的研究进展

田金凤, 尚远宏*, 肖宗妮
(攀枝花学院基础医学院, 四川攀枝花 617000)

摘要: 羊肚菌是一种食药兼用菌, 含有丰富的蛋白质、多糖、膳食纤维和有机酸等营养成分, 具有免疫调节、抗氧化、抗炎、抗肿瘤、抗疲劳和降血糖等功能, 可加工成保健品、休闲食品、饮品以及调味品等产品。本文综述了近十年来羊肚菌营养成分、功能以及产品加工等方面的研究现状, 旨在引导羊肚菌产业向科学与健康的方向发展。

关键词: 羊肚菌, 营养成分, 功能, 产品

中图分类号: TS209

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)09-0419-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060297

本文网刊:



Research Progress on Nutrient Composition, Function and Processing of Morels

TIAN Jinfeng, SHANG Yuanhong*, XIAO Zongni

(College of Basic Medicine, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

Abstract: Morels (*Morchella*) are edible and medicinal mushrooms. It is rich in nutrient compositions such as proteins, polysaccharides, dietary fibers, and organic acids. It has functions including immune regulation, antioxidant, anti-inflammatory, anti-tumor, anti-fatigue, and blood sugar reduction. It can be processed into health products, snacks, drinks, and seasonings. This article provides a comprehensive review of the research progress on nutrient compositions, functions, and product processing of morels in the past decade, aiming to guide the development of the morel industry in a scientific and healthy direction.

Key words: morel; nutrient composition; function; product

羊肚菌, 隶属于子囊菌亚门(Ascomycotina)羊肚菌科(Morchellaceae)羊肚菌属 *Morchella* Dill. ex Pers., 是一种喜低温环境且具有较高的经济和科学价值的食药兼用真菌, 已成为国内外研究的热点^[1-3]。羊肚菌含丰富的蛋白质、碳水化合物、脂肪、维生素、矿物质和水等营养素, 以及膳食纤维、酶、酚类、有机酸等非营养物质, 具有极高的营养保健和药用价值, 深受广大消费者的喜爱^[4-6]。长期食用具有抗疲劳、抑制肿瘤、增加人体免疫力等功效^[7-9]。羊肚菌属物种广泛分布于北半球温带地区, 中国是该属的物种多样性中心和分化分布中心^[10]。目前, 国内外羊肚菌的常见人工栽培品种见图 1, 而其他羊肚菌属物

种能否大田商业化栽培或推广, 值得进一步研究。

近年来, 羊肚菌的种质资源、生物学特性、栽培技术和产品开发等方面备受国内外学者的关注, 并取得了一些进展。然而, 随着羊肚菌栽培技术的提高和人工种植面积扩大, 生产过程中对种植风险的认识和防范不足, 可能会导致产量增加但质量下降、鲜品滞销和加工滞后等问题。因此, 树立可持续发展意识, 运用羊肚菌的营养成分和功能的知识, 合理利用和开发羊肚菌资源。本文综述了国内外近十年来羊肚菌营养成分、功能以及产品加工等方面的研究进展, 以期为羊肚菌资源的合理利用和开发提供参考。

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 四川省科学技术厅项目(2021YFN0101); 大学生创新创业训练计划项目(202111360007)。

作者简介: 田金凤(1981-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 药学和食品工程, E-mail: tjfasyh@163.com。

* 通信作者: 尚远宏(1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 药用资源学化学, E-mail: shyh611@126.com。



图1 羊肚菌的栽培品种

Fig.1 Cultivated species of morels

注: 图片来源 NCBI(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), A 为七妹羊肚菌 (*M. (Morchella) eximia*, NCBI 中的分类号为 txid1582338), B 为尖顶羊肚菌 (*M. conica*, txid5194), C 为羊肚菌 (黄色羊肚菌支系) (*M. esculenta* (Esculenta clade), txid39407), D 梯棱羊肚菌 (*M. importuna*, txid1174673), E 为变红羊肚菌 (*M. rufobrunnea*, txid368404), F 为六妹羊肚菌 (*M. sextelata*, txid1174677)。

1 羊肚菌的营养成分

1.1 营养素

羊肚菌的肉质脆嫩鲜美, 是一种营养丰富的食用菌, 其营养素含量丰富(富含碳水化合物、脂肪、蛋白质、维生素、矿物质和水等), 有助于增强人体免疫力、促进新陈代谢等作用。由于菌种种质资源、品种、生长环境和后期管理等因素影响, 报道羊肚菌营养素含量不尽相同, 如表1所示。从表1可知, 羊肚菌子实体中的各种营养素含量比例差异较大, 其中蛋白质平均含量最多(29.73%), 而脂肪平均含量最少(2.51%); 另外, 不同产地与不同品种的羊肚菌中各种营养素含量变化范围: 碳水化合物为 6.08%~35.9%、脂肪为 0.5%~5.84%、蛋白质为 15.7%~36.2%、矿物质为 7.1%~13.1% 和水为 4.56%~13.4%; 同时, 人工栽培的羊肚菌碳水化合物和脂肪含量的平均值(30.95% 和 2.88%)略高于野生羊肚菌碳水化合物和脂肪含量的均值(20.81% 和 1.85%), 而人工栽培的羊肚菌矿物质含量(8.67%)略低于野生羊肚菌矿物

质含量(9.08%); 研究表明人工种植和野生来源的羊肚菌营养素含量上的差异不大。因此, 人工种植的羊肚菌可以作为野生品的替代品, 以满足市场需要。

碳水化合物包括单糖、双糖、多糖等, 其中多糖是羊肚菌生物活性多样性的物质基础^[21], 特别是在抗氧化^[22-24]、抗肿瘤^[25] 和提高免疫^[26-28] 等方面的作用显著。蛋白质作为羊肚菌子实体中主要营养成分(平均含量 29.73%), 其含量在不同地区及品种间有一定差异(表1), 且羊肚菌是人类膳食中极好的蛋白质来源^[29]。田雨^[30] 通过超声辅助分级提取野生褐赭羊肚菌子实体的各组分蛋白, 研究发现清蛋白占蛋白质总含量的 54.10%; 谷蛋白次之, 占 11.34%; 球蛋白和醇溶蛋白分别占 9.24% 和 5.13%。氨基酸作为食品中的重要呈味物质, 对食品的风味产生着重要影响, 特别是在羊肚菌中, 谷氨酸和天冬氨酸的含量显著高于其他氨基酸, 这一特性可能是羊肚菌味道鲜美的主要原因之一^[31]。Gao 等^[32] 为了研究羊肚菌中的鲜味物质, 以六妹羊肚菌为原料, 采用酶解法, 提取子实体中鲜味成分, 并采用电子舌和电子鼻来评价感官特性, 发现 3 kDa 以下的肽段与鲜味的相关性最高, 其游离氨基酸 (224.83 ± 0.87 mg/g) 和 5'-核苷酸 (4.84 ± 0.32 mg/g) 含量最高, 整体风味性能最好。羊肚菌中的矿物质丰富, 且含有人体必需的多种矿质元素, 然而食用时需要注意羊肚菌中富集的重金属元素是否符合国家的含量规定要求。目前文献报道, 羊肚菌重金属元素含量一般都在安全阈值以内, 特别是人工种植的羊肚菌^[33]。维生素对于维持人体健康至关重要。据文献报道, 每 100 g 羊肚菌中 V_{B1} 的含量为 0.0243~0.0574 mg, V_{B2} 的含量为 0.02~0.163 mg, 烟酸的含量为 89.0 mg, 烟酰胺的含量为 130 mg^[34-35]。截至目前, 羊肚菌中维生素组分的研究较少, 建议加强不同品种和产地的人工栽培羊肚菌中维生素的检测与应用, 为羊肚菌食疗提供更多科学依据。

1.2 非营养物质

羊肚菌中非营养物质, 主要为膳食纤维、酶、酚类、有机酸等物质。膳食纤维是一种多糖类混合物, 且不能被人体消化吸收。羊肚菌中含有丰富的膳食纤维, 张羽婷^[36] 以梯棱羊肚菌为研究对象, 采用碱溶醇沉提取羊肚菌可溶性膳食纤维(得率均值为 15.38%), 其具有纤维素 I 型的特征, 且在 250 ℃ 以下有较强的热稳定性, 适用于 250 ℃ 以下的食品加工。而张楠等^[37] 报道, 种植的梯棱羊肚菌菌柄中膳食纤维含量 15.16 ± 0.11 g/100 g, 多酚含量 272.22 ± 3.14 g/100 g; 野生羊肚菌菌柄中膳食纤维含量 15.11 ± 0.07 g/100 g, 多酚含量 513.84 ± 6.71 g/100 g; 由此可知, 人工栽培与野生的羊肚菌菌柄中膳食纤维含量相近, 但两者多酚含量差异较大。石芳等^[38] 以黑脉羊肚菌为原料提取和鉴定多酚类物质, 研究得到游离酚 15 种, 分别为没食子酸、焦性没食子酸、原儿茶酸、对羟基苯甲酸、儿茶素、咖啡酸、绿原酸、荳草

表 1 羊肚菌子实体中的营养素含量
Table 1 Nutrient contents in the fruiting body of morels

繁殖来源	产地	品种种类	营养素的含量(g/100 g)					文献来源
			碳水化合物(糖类)	脂肪	蛋白质	矿物质(灰分)	水	
人工种植	北京市昌平区	梯棱羊肚菌	24.2	3.9	31.0	7.4	12.8	[11]
	北京市昌平区	六妹羊肚菌	29.3	4.3	27.6	8.6	13.2	
	北京市昌平区	尖顶羊肚菌	26.2	4.7	33.8	7.1	12.5	
	大理市	六妹羊肚菌	—	5.84	35.7	7.83	6.54	[12]
	宾川县	六妹羊肚菌	—	3.92	32.1	8.06	6.76	
	云龙县	六妹羊肚菌	—	4.92	35.7	7.6	6.56	
	北京银黄农业公司	欧氏羊肚菌	—	2.0	30.5	7.4	12.8	[13]
	北京银黄农业公司	梯棱羊肚菌	—	1.9	30.9	8.6	13.2	
	北京银黄农业公司	六妹羊肚菌	—	1.6	30.9	13.1	13.4	
	福建省周宁县	—	—	4.6	32.6	—	9.1	[14]
	甘肃省卓尼合作社	—	35.9	1.5	30.7	—	—	[15]
	甘肃民族师范学院, 种植	—	35.2	1.6	29.9	—	—	
	甘肃省舟曲县	—	34.9	1.4	29.6	—	—	
	山西省晋中	—	—	0.6	17.3	—	—	[16]
	山西省大同	—	—	1.2	15.7	—	—	
	陕西南泥湾地区	—	—	2.12	34.25	10.96	4.56	[17]
	林芝波密县塔鲁村	黑脉羊肚菌	6.08	4.02	28.64	8.23	—	[18]
	林芝波密县达兴村	黑脉羊肚菌	6.23	3.89	27.33	8.04	—	
	青海互助北山林场	—	—	1.36	24.51	—	—	[19]
野生	甘肃卓尼大峪沟	—	35.1	1.3	27.3	—	—	[15]
	合作市当周沟	—	34.6	1.5	27.4	—	—	
	舟曲沙滩森林公园	—	34.5	1.4	28.1	—	—	
	云南	—	8.35	—	31.91	—	9.56	[20]
	云南丽江	—	—	0.5	36.2	—	—	[16]
	四川南充	—	—	0.9	32.7	—	—	
	陕西南泥湾地区	—	—	1.78	30.71	10.96	4.56	[17]

注: “—”表示文献中未标注, 而数据取均值; 品种名称: 欧氏羊肚菌(*M. oweri*)和黑脉羊肚菌(*M. angusticeps*)。

素、芦丁、金丝桃苷、白藜芦醇、木犀草素、槲皮素、肉桂酸、阿魏酸; 结合酚提取物有 14 种。

在羊肚菌中也发现了几种有机酸(琥珀酸、苹果酸、柠檬酸和富马酸), 羊肚菌子实体中四种主要有机酸的浓度分别为: 琥珀酸(308.4 mg/kg)、富马酸(68.5 mg/kg)、柠檬酸(54 mg/kg)和苹果酸(43 mg/kg)^[39], 这可能是羊肚菌具有独特味道的原因之一。

2 羊肚菌的功能

近年来, 随着研究的深入, 研究者对羊肚菌功能有了更全面的认识。羊肚菌的功能主要包括免疫调节、抗氧化、抗炎、抗肿瘤、抗疲劳和降血糖等(图 2)。

2.1 免疫调节活性

目前研究发现, 羊肚菌多糖和免疫蛋白主要通过激活巨噬细胞、T 细胞、B 细胞和自然杀伤细胞(NK), 促进脾细胞增殖, 增加抗体分泌, 增强体液免疫来增强机体免疫功能(见表 2)。羊肚菌多糖的免疫调节作用主要表现在其能促进免疫细胞增殖, 促进 NO、细胞因子(IL-1 β 、IL-6 和 TNF- α 等)的分泌, 增强巨噬细胞的吞噬作用; 另外, 羊肚菌多糖还能通过结合或诱导 TLR4(或 TLR2)受体, 进而激活细胞内 MAPK 和 NF- κ B 等信号通路中的靶点, 来促进免疫细胞的增殖和活化, 使其具有免疫保护能力。近十

年, 除了羊肚菌的多糖和免疫蛋白外, 羊肚菌其他成分对调节机体免疫力的研究鲜有报道。同时, 目前研究仅表明, 羊肚菌多糖主要通过增强机体的免疫系统, 从免疫器官、免疫细胞和免疫分子三个层次来达到其免疫增强的功效。但是羊肚菌多糖刺激其靶细胞的分子机制还有待深入研究。

2.2 抗疲劳活性

抗疲劳是指通过某些方法或物质来减轻或消除疲劳感, 提高身体的耐力和抵抗力。张海信等^[48]在雄性大鼠的耐力训练实验中, 发现羊肚菌(羊肚菌粉混悬液, 350 mg/kg·d 灌胃 56 d)能显著降低大强度耐力训练大鼠血清脂质过氧化物丙二醛(MDA)含量, 提高血清过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性, 对大强度耐力训练中自由基异常增多引发的运动性疲劳有明显的延缓作用。而曹亮^[49]对 ICR 雄性小鼠在负重游泳、爬杆及常压耐缺氧实验中发现, 连续灌胃羊肚菌多糖(30 mg/kg·d, 由甘露糖与半乳糖按照摩尔比 1:1.059 组成)30 d, 可增加小鼠尿素氮含量(4.49 $\pm$ 0.36 mmol/L), 增强其耐缺氧时间(58.24 $\pm$ 3.06 min), 提升小鼠体内肝糖原储量(2548.52 $\pm$ 286.45 mg/g), 表明羊肚菌多糖对小鼠抗运动疲劳具

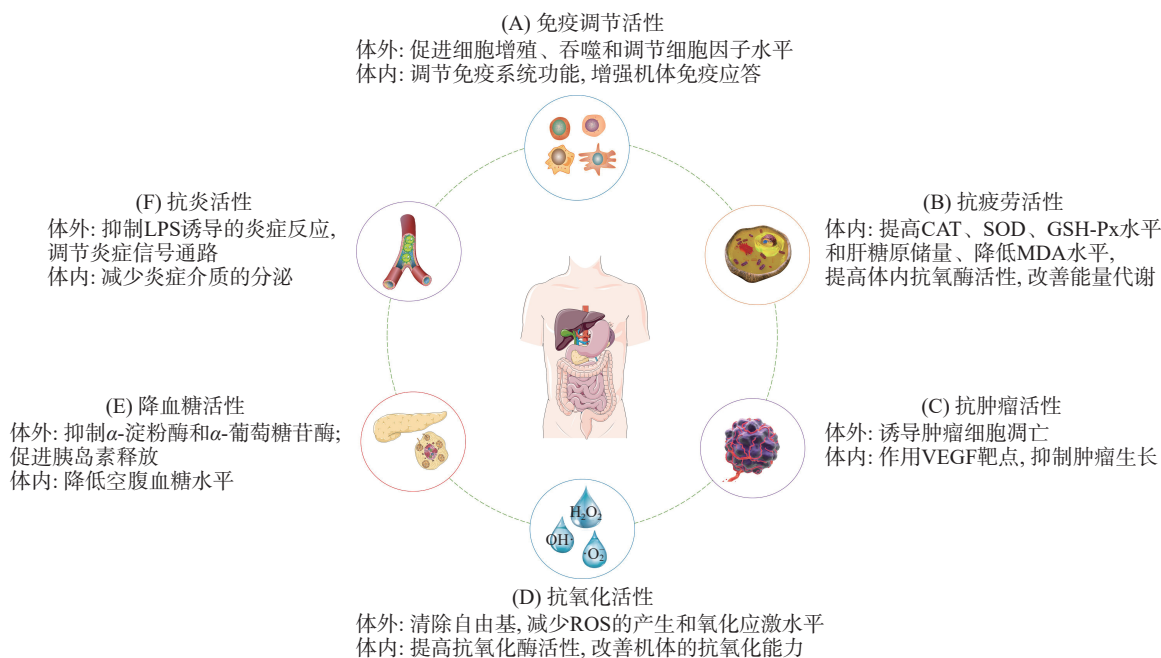


图 2 羊肚菌的生物活性和作用机制

Fig.2 Biological activities and action mechanisms of morels

表 2 羊肚菌的免疫调节作用

Table 2 Immunomodulatory effects of morels

样品	分子量	来源	方法	剂量	结果	文献
胞外多糖提取物	—	尖顶羊肚菌发酵液	HSF细胞 β -半乳糖苷酶染色法	62.5、125、250和500 $\mu\text{g/mL}$	羟脯氨酸含量 $\uparrow$; β -半乳糖苷酶活性 $\downarrow$	[40]
羊肚菌多糖	16.35 kDa	子实体	CCK-8法测淋淋巴细胞T和B及RAW264.7细胞的增殖	10 $\mu\text{g/mL}$ 20 $\mu\text{g/mL}$	淋巴细胞T、B的增殖率分别为31.18%、63.02% 巨噬细胞增殖率为63.12%	[41]
rFIP-mco免疫蛋白	—	尖顶羊肚菌子实体	LPS(1 $\mu\text{g/mL}$)预处理THP-1细胞的增殖、吞噬和细胞因子	30 $\mu\text{g/mL}$	与空白对照比, IL-1 β $\uparrow$ 、IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$; 激活NF- κ B信号通路 NF- κ B p65 $\uparrow$ 和I κ Ba $\uparrow$	[42]
MEP 2a胞外多糖	1391.5 kDa	发酵液	RAW264.7细胞的增殖、吞噬和细胞因子	50和100 $\mu\text{g/mL}$	与空白对照比, NO $\uparrow$ 、IL-1 β $\uparrow$ 、IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$; (MAPKs信号通路)p38 $\uparrow$ 、ERK $\uparrow$ 、JNK $\uparrow$ 以及其磷酸化的蛋白表达	[43]
MIPB50-W和MIPB50-S-1多糖	939.2和444.5 kDa	梯棱羊肚菌子实体	RAW264.7细胞的增殖、吞噬和细胞因子	7.81~500 $\mu\text{g/mL}$	与空白对照比, NO $\uparrow$ 、IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$; 激活MAPK和NF- κ B信号通路的TLR2 $\uparrow$ 和TLR4 $\uparrow$	[44]
MIPB70-1多糖	20.6 kDa	梯棱羊肚菌子实体	RAW264.7细胞细胞因子环磷酸腺苷小鼠免疫损伤	125~500 $\mu\text{g/mL}$ 150 mg/kg	与空白对照比, NO $\uparrow$ 、IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$; p38 $\uparrow$ 、ERK $\uparrow$ 、JNK $\uparrow$ 与模型组比, 血清中IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$	[45]
MSP-1多糖	11.7 kDa	六妹羊肚菌子实体	RAW264.7细胞的增殖、吞噬和细胞因子	0~400 $\mu\text{g/mL}$	与空白对照比, NO $\uparrow$ 、IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$	[46]
MSP2-1多糖	371.5 kDa	六妹羊肚菌子实体	RAW264.7细胞的增殖、吞噬和细胞因子	200 mg/mL	与空白对照比, NO $\uparrow$ 、IL-6 $\uparrow$ 、TNF- α $\uparrow$; 激活TLR4信号通路	[47]

注: “—”表示文献中未标注; HSF: 人皮肤成纤维细胞; LPS: 内毒素脂多糖; RAW264.7: 小鼠单核巨噬细胞白血病细胞; THP-1: 人单核细胞白血病细胞; NO: (一氧化氮, Nitric oxide); IL-1 β : (白细胞介素-1 β , Interleukin-1 beta); IL-6: (白细胞介素-6, Interleukin-6); TNF- α : (肿瘤坏死因子- α , Tumor necrosis factor- α); p38: (p38丝裂原活化蛋白激酶, p38 Mitogen-activated protein kinase); ERK: (ERK丝裂原活化蛋白激酶, Extracellular signal-regulated kinase); JNK: (JNK丝裂原活化蛋白激酶, c-Jun N-terminal kinase); TLR4: (Toll样受体4, Toll-like receptor 4); TLR2: (Toll样受体2, Toll-like receptor 2); p65: (p65蛋白, Protein 65); NF- κ B: (核因子 κ B, Nuclear factor kappa-B); I κ Ba: (核因子 κ B抑制因子 α , Inhibitory subunit of NF kappa B alpha); MAPK: (丝裂原活化蛋白激酶, Mitogen-activated protein kinase)。

有促进作用。目前的抗疲劳功效研究仅限于羊肚菌的抗疲劳相关生化指标的测定, 其抗疲劳的作用机制还亟待研究。

2.3 抗肿瘤活性

尽管近十年来关于羊肚菌是否具有直接抑癌作用的研究文献不多, 但国内外学者已经对其进行了有价值的探索。薛莉^[50]研究羊肚菌胞外粗多糖对S₁₈₀肉瘤小鼠的抑瘤作用, 与模型组比较, 粗多糖

(0.333、0.667 g/kg)剂量组能显著抑制S₁₈₀荷瘤小鼠肿瘤的生长, 提高胸腺指数, 减轻瘤组织中血管内皮生长因子(VEGF)的表达。同样实验方案, 黄瑶^[51]通过构建S180小鼠肿瘤模型, 发现羊肚菌多糖溶液(甘露糖、葡萄糖和半乳糖摩尔比为4:4:1)灌胃(20 mg/kg, 100 μL)8 d处理后, 与模型组比较, 羊肚菌多糖抑癌率可达50.32%, 降低VEGF和VEGFR(受体)蛋白表达, 通过PI3K/AKT信号通路和Ras

信号通路,共同抑制肿瘤细胞增长。目前两个团队的动物实验结果说明羊肚菌中多糖具有抗肿瘤作用,而 VEGF 是其主要作用靶点。

2.4 抗氧化活性

抗氧化活性是羊肚菌功效研究的热点。一般体外抗氧化活性主要以羊肚菌中的多糖、酚类和其他提取物等成分清除各种自由基的效果来衡量(见表 3)。在正常情况下,人体约 1%~3% 的氧气转变为自由基^[52],来维持机体内细胞的能量代谢和正常功能。而当人体内自由基引起的损伤积累超过了机体修复能力,就会导致细胞分化状态的改变甚至丧失,继而使之破裂、凋亡,从而引起人体健康问题。羊肚菌可有效清除各种自由基,因此,羊肚菌可作为抗氧化功能性食品和保健品开发的良好基料。

羊肚菌的体外抗氧化研究中,Li 等^[53]研究了羊肚菌(*M. esculenta*)子实体多糖 FMP-1(杂多糖,50、100 和 200 μg/mL)对 H₂O₂ 诱导的人肺泡上皮细胞 A549 氧化损伤的影响。发现 FMP-1 可以抑制 H₂O₂ 诱导的细胞色素 C 和 Caspase-3 等凋亡相关因子的释放,具有保护肺泡上皮细胞免受 H₂O₂ 氧化损伤的作用。同时,可以降低 MDA 水平、增强 SOD 的表达,提高总抗氧化能力(T-AOC),清除氧化损伤产生的活性氧(ROS),进而阻止细胞凋亡。而六妹羊肚菌水溶性多糖(平均分子量为 287588 Da),在 H₂O₂ 介导的氧化压力损伤的 PC12 细胞模型中,通过重塑 SOD、CAT、GSH-Px 等抗氧化酶系活性,缓解 H₂O₂ 诱发的氧化压力的细胞损伤;通过抑制 Caspase-3 活性,同时降低 Bax/Bcl-2 比值,抑制 PC12 细胞凋亡;使其具有优良的抗氧化活性,表现出一定的神经保护作用^[54]。

羊肚菌的体内抗氧化的实验研究中,小鼠经灌胃尖顶羊肚菌多糖(多糖组灌胃 10 mg/kg·d,连续灌胃 30 d),可显著抑制 CCl₄ 诱导的肝损伤小鼠肝脏和血清中丙二醛含量升高,提高肝脏和血清中总抗氧化

能力水平及血清中超氧化物歧化酶活性,说明尖顶羊肚菌多糖可增强小鼠体内的抗氧化活性^[55]。Fu 等^[56]研究羊肚菌胞外多糖 MEEP 体内抗氧化实验结果显示,其可显著提高 D-半乳糖诱导衰老小鼠的肝脏和血清中 SOD、CAT 和谷胱甘肽过氧化物酶(氧化酶)(GSH-Px)的活性,并显著降低血清和肝脏中的 MDA 水平,表明 MEEP 可以通过提高抗氧化酶活性来修复 D-半乳糖诱导衰老小鼠模型的氧化损伤。在其他动物实验中,Cai 等^[57]研究发现羊肚菌多糖 FMP-1(分子量 4.7×10⁴ Da)能显著保护斑马鱼胚胎免受 2,2-偶氮(2-酰胺丙烷)二盐酸盐(2,2-Azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride, AAPH)诱导的氧化损伤,主要通过减少 ROS 生成、NO 生成和细胞死亡使斑马鱼畸形和死亡率减少,以及降低 MDA 含量,提高 SOD、CAT 和 GSH-Px 水平来发挥保护作用,表明 FMP-1 具有作为一种天然抗氧化剂的潜在价值。

2.5 降血糖活性

羊肚菌是一种具有降血糖、降血脂功效的食用菌。研究人员李井雷等^[61]发现,羊肚菌胞外多糖 MEP(主要为中性多糖,并含有少量酸性多糖)能够有效抑制 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的活性,抑制率分别达到 53.13% 和 54.76%。此外,MEP 还具有一定的胆酸盐结合能力,呈现剂量依赖效应。在浓度为 5 mg/mL 时,MEP 对胰脂肪酶的抑制率接近 30%,同时还能够一定程度上抑制葡萄糖的扩散。结果表明,MEP 具有较强的降血糖、降血脂活性,但其机理还需进一步的研究。

2.6 抗炎活性

炎症被认为是先天免疫系统对组织损伤或细胞损伤的复杂生物反应,其中 ROS 和氧化应激被认为是引起慢性炎症的常见原因。目前,抗炎活性是羊肚菌的研究方向点,除了羊肚菌多糖、有机酸、酚类成分发挥抗炎作用外,Chen 等^[62]研究探讨羊肚菌是

表 3 羊肚菌体外清除自由基活性的抗氧化效果
Table 3 Antioxidant effects of free radical scavenging activity of morels *in vitro*

样品	剂量	自由基	清除率/EC ₅₀ /IC ₅₀	文献
羊肚菌胞外多糖	0.81~1.30 mg/mL	DPPH· ·OH	EC ₅₀ =1.09 mg/mL EC ₅₀ =0.86 mg/mL	[56]
羊肚菌乙醇提取物	1 mg/mL	DPPH·	66.47%	[58]
黑脉羊肚菌游离酚	—	DPPH· ABTS ⁺ ·	EC ₅₀ =48.358 μg/mL EC ₅₀ =0.392 μg/mL	[38]
黑脉羊肚菌结合酚	—	DPPH· ABTS ⁺ ·	EC ₅₀ =67.411 μg/mL EC ₅₀ =0.454 μg/mL	[38]
羊肚菌多糖	400 μg/mL	DPPH· ·OH O ₂ ^{-·}	81.11%、IC ₅₀ =119.32 μg/mL 85.71%、IC ₅₀ =74.26 μg/mL 72.78%、IC ₅₀ =161.49 μg/mL	[57]
羊肚菌多糖(EnMPS)	0.6 mg/mL	DPPH· ·OH O ₂ ^{-·}	58.47% 66.74% 76.92%	[59]
六妹羊肚菌蛋白质粗提物	1 mg/mL	DPPH· ABTS ⁺ ·	50.22% 93.01%	[60]

注:“—”表示文献中未标注;2,2-联氮基双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2-Azino bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS); 1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH); 超氧阴离子(Superoxide anion, O₂^{-·}); 羟自由基(·OH); 半数效应浓度(Median effective concentration, EC₅₀); 半数抑制浓度(Half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)。

否产生细胞外囊泡(具有膜结构,囊泡中含有一些脂质、核苷酸和蛋白质等)及其对脂多糖(LPS)诱导的RAW246.7巨噬细胞的抗炎作用中,发现在LPS诱导的炎症模型中,羊肚菌产生细胞外囊泡,并显著减少NO和ROS的产生。诱导型一氧化氮合酶(iNOS)、TNF- α 、IL-6、环氧化酶-2(COX-2)等炎症因子相关基因的表达呈剂量依赖性抑制。羊肚菌胞外囊泡还可以通过抑制ROS的产生和降低p38 MAPK信号通路的磷酸化水平来抑制LPS诱导的炎症反应,提示羊肚菌胞外囊泡可作为一种潜在的抗炎物质用于炎症性疾病的治疗。

2.7 其他活性

心肌损伤指的是心肌细胞受到不同程度的损伤或死亡,导致心肌功能受损的一种病理状态。郑红波^[63]研究选用了体重为 20 ± 2 g且患有运动心肌损伤昆明小鼠(雌雄各半),投喂羊肚菌胞内多糖(甘露糖与半乳糖摩尔比为1:1.059)浓度为20%、40%、80%的多糖肠溶胶丸(剂量1 g/d,服用4周)。结果表明,当羊肚菌胞内多糖浓度为20%、40%和80%

时,小鼠心肌损伤恢复率分别为23.26%、45.21%和68.94%。随着羊肚菌胞内多糖浓度的增加,小鼠心肌损伤恢复率逐渐增大,对小鼠运动心肌损伤修复的促进作用也随之增强。

肝损伤是指肝脏受到各种因素的损害,导致肝细胞受损或死亡,从而影响肝脏的正常功能。Nitha等^[64]探讨了培养的羊肚菌菌丝体的提取物对CCl₄和乙醇诱导的慢性肝毒性保护作用。与对照组相比,羊肚菌提取物(250和500 mg/kg)抑制了大鼠血清中谷氨酸-草酰乙酸转氨酶(GOT)、谷氨酸-丙酮酸转氨酶(GPT)和碱性磷酸酶(ALP)的活性;并提高了肝脏中CAT、SOD、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)、谷胱甘肽巯基转移酶(GST)和谷胱甘肽(GSH)的水平;同时,给予500 mg/kg体重剂量的羊肚菌提取物,降低了血清和肝组织中升高的MDA水平,表明羊肚菌菌丝体作为一种新型的肝保护剂具有潜在的治疗用途。

3 羊肚菌的产品加工

羊肚菌富含蛋白质、纤维、必需的维生素、矿物质和多不饱和脂肪酸等。在中国,羊肚菌的食用历史

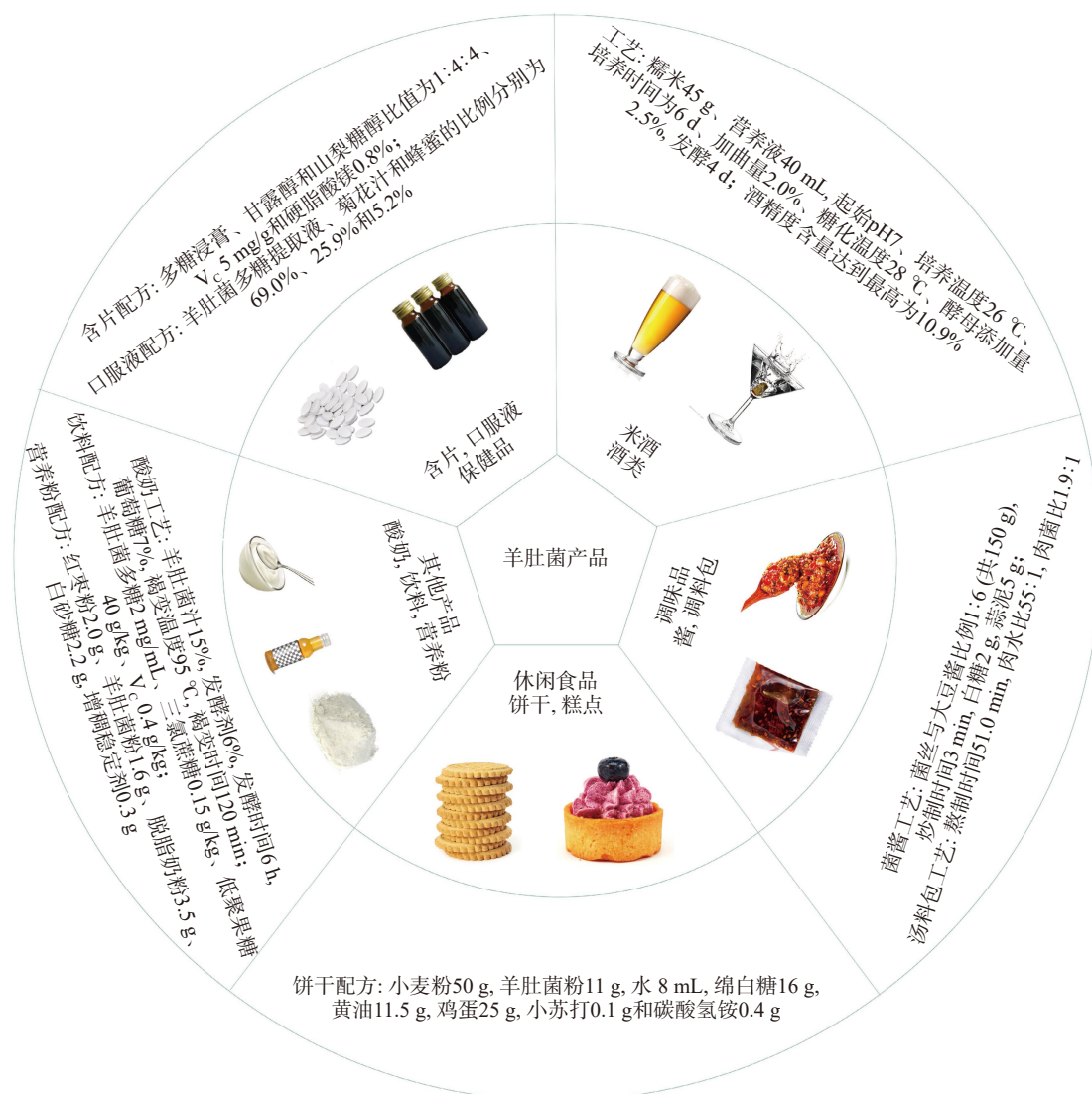


图3 羊肚菌加工产品

Fig.3 Processing products of morels

由来已久,《本草纲目》等著作均有记载;在欧洲和北美也很受欢迎,其产品早已被美国食品和药物管理局批准^[65],表明羊肚菌具有巨大的市场价值。最近研究发现,消费者在选择菌肉食品时,消费方式倾向于选择食品成分中植物性成分多而肉类成分少的食品^[66],如此非常有利于羊肚菌产品的市场推广。

羊肚菌的人工栽培商业化快速推广,季节性采收大量鲜菌集中上市。然而,新鲜羊肚菌只在特定的季节和气候内生长,含水量较高,质地脆弱,采后 1~2 d 容易出现腐烂现象,如果销售不及时,将导致大量鲜菇浪费。目前,羊肚菌的初级加工产品主要采用干制和速冻的加工形式得到干品和冻品,而干品主要在国内市场销售,占消费总量的 90% 以上^[67];冻品主要出口至欧洲各国。现阶段有关羊肚菌精深加工产品的市场占有率较低,但研究人员已经研制出羊肚菌的保健品^[31,68]、酒类^[69]、调味品^[70-71]、休闲食品^[72]及其他产品^[73-75](图 3)。

羊肚菌还含有多种生物活性化合物,如具有潜在的功能性食品特点的多糖、酚类和免疫蛋白等^[76]。而屠雅铄等^[77]对羊肚菌的食品毒理学安全性进行了研究,结果表明羊肚菌作为保健食品的原料或辅料是安全可行的,这一发现为羊肚菌在保健食品和药品中的应用提供了科学依据。研究人员应利用羊肚菌抗疲劳的功能,研发有助于缓解压力的口服液给上班族;利用降血糖的功能,研发可食用的糖类食品供给糖尿病患者;加大研究羊肚菌多糖、酚类和免疫蛋白等成分的提取纯化、结构鉴定、生物活性及产品加工,从而能更好地应用羊肚菌。

尽管羊肚菌作为基料在研发产品方面有着广泛的应用,但目前市场上仅有羊肚菌酱等少数产品已经实现了产业化。要真正实现羊肚菌产品的产业化,提高羊肚菌的附加值,需要加强研发和市场推广力度,以扩大消费受众并提升整个产业的效益。

4 结论与展望

羊肚菌作为珍贵的烹饪真菌,因其特异的感官特征和高营养价值而在全球范围内备受推崇。本文从羊肚菌的栽培品种、营养成分、功能以及产品加工等方面进行了综述。然而,该物种的研究仍存在着一些科学和技术问题,需要进一步深入研究和开发: a.羊肚菌商业化栽培品种少,生产过程中对种植风险的认识和防范不足。目前已经培育出多个人工栽培品种,但大田种植主要以六妹羊肚菌为主;同时羊肚菌子实体形成的关键表达调控机理研究基本空白,种植易跟风扩产且以种植经验代替科学现象普遍,以及户外生产条件不稳定,导致羊肚菌产量和品质可控制性差。另外,根据羊肚菌减产和绝收是否与品种遗传不稳定相关的问题,应深化羊肚菌的分子遗传和分子育种的研究。 b.羊肚菌的营养成分组成和含量存在差异。羊肚菌的营养丰富,可是由于菌种种质资源、品种、生长环境和后期管理等因素影响,其营养素和

非营养素物质的组成和含量不尽相同,建议尽快拟定羊肚菌干鲜品及其加工产品的质量和安全的国家标准。 c.羊肚菌部分功能中的活性成分和作用机制研究未明确。羊肚菌的功能主要包括免疫调节、抗氧化、抗炎、抗肿瘤和抗高脂血症等,但主要研究趋向于蛋白质、多糖等大分子物质的生物活性。另外,羊肚菌的抗疲劳、降糖降脂的研究仅限于相关的生化指标的测定,其作用机理还有待于进一步研究。 d.羊肚菌的产品加工主要集中于初级加工产品中的干品,产品附加值低。目前羊肚菌的价格较高,其销售依然采用“鲜销+干销”模式,易忽略精深加工产品的研究和推广,不利于其全产业链的健康发展,应该加强羊肚菌在保健食品和药品中的应用研究,以扩大消费受众并提升其整个产业的效益。

未来,羊肚菌的研究方向可能会更加多元化和深入化。例如,可以进一步开展羊肚菌的基因组学、转录组学和代谢组学研究,探索羊肚菌的生长发育机制和代谢途径;可以驯化选育适宜周年大田栽培的常温出菇新品种,并注重研究和发现羊肚菌中营养成分的功能特性在生产、加工和贮藏期间的变化规律,改善羊肚菌在加工过程中的品质变化,从而提高羊肚菌加工和综合利用水平奠定基础;可以深入研究羊肚菌的食品深加工和保鲜技术,开发更多羊肚菌制品,促进羊肚菌产业的良性发展;可以研究羊肚菌的生态学和保护,探索羊肚菌的生态环境和分布规律,制定羊肚菌的保护政策和措施。相信随着羊肚菌深入研究和推广,其会为人们的健康和经济发展做出更大的贡献。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] SUNIL C, XU B. Mycochemical profile and health-promoting effects of morel mushroom *Morchella esculenta* (L.)- A review[J]. *Food Research International*, 2022, 159: 111571.
- [2] 尚千涵, 高其媛, 杨婷, 等. 羊肚菌属群体遗传学和基因组进化的研究进展[J]. *中草药*, 2021, 52(18): 5782-5788. [SHANG Q H, GAO Q H, YANG T, et al. Research progress on population genetics and genomic evolution of *Morchella* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(18): 5782-5788.]
- [3] DU X H, ZHAO Q, YANG Z L. A review on research advances, issues, and perspectives of morels[J]. *Mycology*, 2015, 6(2): 78-85.
- [4] 任茜. 羊肚菌营养功能特性[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(9): 212-215. [REN X. Nutritional functional characteristics of *Morchella* spp. and development of health products[J]. *Edible Fungi of China*, 2020, 39(9): 212-215.]
- [5] TIETEL Z, MASAPHY S. True morels (*Morchella*)-nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(11): 1888-1901.

- [6] SAMBYAL K, SINGH R V. A comprehensive review on *Morchella importuna*: Cultivation aspects, phytochemistry, and other significant applications[J]. *Folia Microbiologica*, 2021, 66: 147–157.
- [7] 涂小曼, 谢光波, 唐岚, 等. 六妹羊肚菌的化学成分[J]. 菌物学报, 2021, 40(8): 2134–2147. [TU X M, XIE G B, TANG L, et al. Chemical composition of *Morchella sextelata* (Pezizales, Ascomycota)[J]. *Mycosystema*, 2021, 40(8): 2134–2147.]
- [8] HU M, CHEN Y, WANG C, et al. Induction of apoptosis in HepG2 cells by polysaccharide MEP-II from the fermentation broth of *Morchella esculenta*[J]. *Biotechnology Letters*, 2013, 35(1): 1–10.
- [9] LI F H, ZHENG S J, ZHAO J C, et al. Phenolic extract of *Morchella angusticeps* peck inhibited the proliferation of HepG2 cells *in vitro* by inducing the signal transduction pathway of p38/MAPK[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(11): 2829–2838.
- [10] 杜习慧, 赵琪, 杨祝良. 羊肚菌的多样性、演化历史及栽培研究进展[J]. 菌物学报, 2014, 33(2): 183–197. [DU X H, ZHAO Q, YANG Z L. Diversity, evolutionary history and cultivation of morels: A review[J]. *Mycosystema*, 2014, 33(2): 183–197.]
- [11] 贺国强, 魏金康, 吴尚军, 等. 人工栽培的三种羊肚菌营养成分及重金属测定比较[J]. 食用菌, 2021, 43(3): 68–70. [HE G Q, WEI J K, WU S J, et al. Comparison of the nutritional components and heavy metals of three kinds of artificially cultivated *Morchella* [J]. *Edible Fungi*, 2021, 43(3): 68–70.]
- [12] 尹继庭, 孔宁忠, 冯丽娜, 等. 六妹1号羊肚菌营养成分分析及评价[J]. 中国林副特产, 2021(2): 21–22, 24. [YIN J T, KONG N Z, FENG L N, et al. Analysis and evaluation of nutritional components of *Morchella sextelata* No. 1[J]. *Chinese Forest Side Products*, 2021(2): 21–22, 24.]
- [13] 贺国强, 魏金康, 吴尚军, 等. 欧氏羊肚菌子实体营养成分分析[J]. 中国食用菌, 2021, 40(4): 75–77, 86. [HE G Q, WEI J K, WU S J, et al. Analysis of nutritional nutritional morel oweri[J]. *Edible Fungi of China*, 2021, 40(4): 75–77, 86.]
- [14] 赵晨. 羊肚菌营养成分测定及营养价值评价[J]. 福建轻纺, 2020(3): 37–40. [ZHAO C. Nutrient composition determination and nutritional value evaluation of *Morchella*[J]. *Fujian Textile Industry*, 2020(3): 37–40.]
- [15] 贾辉, 樊尚义. 甘南野生和人工栽培羊肚菌营养成分的比较[J]. 甘肃高师学报, 2023, 28(2): 20–23. [JIA H, FAN S Y. Comparison of components of wild and artificially cultivated morels in Gannan tibetan autonomous prefecture[J]. *Journal of Gansu Normal University*, 2023, 28(2): 20–23.]
- [16] 乔俊, 支彩艳, 陈志文, 等. 野生和人工栽培羊肚菌营养价值对比分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 211–216. [QIAO J, ZHI C Y, CHEN Z W, et al. Comparative analysis of nutritional value between wild and cultivated *Morchella*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 211–216.]
- [17] 赵瑞华, 贺晓龙, 高小鹏, 等. 陕北野生和不同栽培模式羊肚菌营养成分比较分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 27–31, 73. [ZHAO R H, HE X L, GAO X P, et al. Comparative analysis of nutrients in fruiting bodies between wild and cultivated *Morchella* in different cultivation models[J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(2): 27–31, 73.]
- [18] 何峰, 梁杰. 野生黑脉羊肚菌营养成分分析[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 339–342. [HE F, LIANG J. Analysis of nutritional components of wild *Morchella angusticeps*[J]. *Food Industry*, 2022, 43(2): 339–342.]
- [19] 胥芮, 刘玉萍, 张晓宇, 等. 青海互助北山林场羊肚菌营养成分初探[J]. 北方园艺, 2016(10): 138–140. [XU R, LIU Y P, ZHANG X Y, et al. Study on the nutritional components of *Morchella vulgaris* from Beishan Forest in Huzhou of Qinghai Province[J]. *Northern Horticulture*, 2016(10): 138–140.]
- [20] 顾可飞, 周昌艳, 邵毅, 等. 云南省野生牛肝菌与羊肚菌营养成分分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(17): 129–133. [GU K F, ZHOU C C, SHAO Y, et al. The composition analysis of the wild boletus and morel in Yunnan Province nutrient[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(17): 129–133.]
- [21] 李婷, 刘冰, 林杉, 等. 羊肚菌多糖提取分离及生物活性研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(11): 117–125. [LI T, LIU B, LIN S, et al. Advances in extraction, isolation and bioactivity of polysaccharides from morel[J]. *China Biotechnology*, 2022, 42(11): 117–125.]
- [22] LI F, JIN Y, WANG J, et al. Structure identification of two polysaccharides from *Morchella sextelata* with antioxidant activity[J]. *Foods*, 2022, 11(7): 982.
- [23] XU N, LU Y, HOU J, et al. A polysaccharide purified from *Morchella conica* Pers. prevents oxidative stress induced by H₂O₂ in human embryonic kidney (HEK) 293T cells[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(12): 4027.
- [24] PAN X, XU L, MENG J, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction of polysaccharides from *Morchella importuna*: Optimization, physicochemical properties, and bioactivities[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 912014.
- [25] LIU C, SUN Y, MAO Q, et al. Characteristics and antitumor activity of *Morchella esculenta* polysaccharide extracted by pulsed electric field[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(6): 986.
- [26] ZHANG N N, MA H, ZHANG Z F, et al. Characterization and immunomodulatory effect of an alkali-extracted galactomannan from *Morchella esculenta*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278: 118960.
- [27] MENG X, CHE C, ZHANG J, et al. Structural characterization and immunomodulating activities of polysaccharides from a newly collected wild *Morchella sextelata*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 129: 608–614.
- [28] WEN Y, PENG D, LI C, et al. A new polysaccharide isolated from *Morchella importuna* fruiting bodies and its immunoregulatory mechanism[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 107: 8–19.
- [29] 赵曜, 张强. 羊肚菌的营养成分和药理作用研究进展[J]. 中国林副特产, 2022(1): 71–74. [ZHAO Y, ZHANG Q. Research progress on nutritional components and pharmacological effect of *Morchella esculenta*[J]. *Forest By-product and Specially in China*, 2022(1): 71–74.]
- [30] 田雨. 羊肚菌蛋白质提取及抗氧化肽制备研究[D]. 太原: 山西大学, 2020. [TIAN Y. Study on protein extraction and antioxidant peptide preparation of *Morchella esculenta*[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.]
- [31] 付天宇. 基于深层发酵的羊肚菌功能性食品研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. [FU T Y. Research on *Morchella esculenta* functional food on the submerged fermentation[D]. Changchun: Jilin University, 2013.]
- [32] GAO J, FANG D, KIMATU B M, et al. Analysis of umami taste substances of morel mushroom (*Morchella sextelata*) hydro-

- lysates derived from different enzymatic systems[J]. *Food Chemistry*, 2021, 362: 130192.
- [33] 蔡英丽, 马晓龙, 刘伟. 羊肚菌营养价值与保健功能综述[J]. *食药菌*, 2021, 29(1): 20–27. [CAI Y L, MA X L, LIU W. Review on nutritional value and health function of morel mushroom[J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2021, 29(1): 20–27.]
- [34] 黄世群, 秦琳, 仲伶俐, 等. 野生黑虎掌菌与羊肚菌营养成分测定及分析比较[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(12): 2098–2102. [HUANG S Q, QIN L, ZHONG L L, et al. Nutrients determination and comparison between wild sarcodon aspratus and *Morchella esculenta*[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 2098–2102.]
- [35] 熊宏苑, 宋卿. 云南 6 种食用菌中维生素 B₁ 和 B₂ 的含量调查[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(22): 7606–7609. [XIONG H Y, SONG Q. Investigation on the content of vitamin B₁ and B₂ in 6 kinds of edible fungi in Yunnan Province[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(22): 7606–7609.]
- [36] 张羽婷. 梯棱羊肚菌可溶性膳食纤维的提取优化及应用研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020. [ZHANG Y T. Extraction optimization and application of soluble dietary fiber from *Morchella importuna*[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020.]
- [37] 张楠, 叶晶晶, 廖春华, 等. 羊肚菌菌柄营养成分的分析与评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 335–342. [ZHANG N, YE J J, LIAO C H, et al. Analysis and evaluation of nutritional components in stipe of *Morchella esculenta*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 335–342.]
- [38] 石芳, 廖霞, 卢可可, 等. UPLC-DAD/ESI-TOF-MS 鉴定黑脉羊肚菌多酚化合物[J]. *食品科学*, 2017, 38(16): 115–121. [SHI F, LIAO X, LU K K, et al. Analysis of phenolic compounds in *Morchella angusticeps* Peck by ultra performance liquid chromatography-diode array detector/electrospray ionization-time of flight-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2017, 38(16): 115–121.]
- [39] WANG J, XIAO J, GENG F, et al. Metabolic and proteomic analysis of morel fruiting body (*Morchella importuna*) [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 76: 51–57.
- [40] 马利, 李霞, 张松. 尖顶羊肚菌胞外多糖提取物对皮肤成纤维细胞增殖和衰老的影响[J]. *菌物学报*, 2014, 33(2): 385–393. [MA L, LI X, ZHANG S, et al. Effects of exopolysaccharide extract from *Morchella conica* on proliferation and aging of human skin fibroblasts[J]. *Mycosystema*, 2014, 33(2): 385–393.]
- [41] 黄瑶, 蒋琳, 刘影, 等. 羊肚菌多糖提取、分离纯化及免疫调节活性[J]. *生物加工过程*, 2018, 16(6): 35–41. [HUANG Y, JIANG L, LIU Y, et al. Extraction, isolation, purification and immunoregulatory activity of polysaccharides from *Morehella esculenta*[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2018, 16(6): 35–41.]
- [42] WU G, SUN Y, DENG T, et al. Identification and functional characterization of a novel immunomodulatory protein from *Morchella conica* SH[J]. *Frontiers in Immunology*, 2020, 11: 559770.
- [43] LI J, WU H, LIU Y, et al. The chemical structure and immunomodulatory activity of an exopolysaccharide produced by *Morchella esculenta* under submerged fermentation[J]. *Food & Function*, 2021, 12(19): 9327–9338.
- [44] WEN Y, BI S, HU X, et al. Structural characterization and immunomodulatory mechanisms of two novel glucans from *Morchella importuna* fruiting bodies[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 145–157.
- [45] PENG D, WEN Y, BI S, et al. A new GlcNAc-containing polysaccharide from *Morchella importuna* fruiting bodies: Structural characterization and immunomodulatory activities *in vitro* and *in vivo* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 192: 1134–1149.
- [46] KUANG M T, XU J Y, LI J Y, et al. Purification, structural characterization and immunomodulatory activities of a polysaccharide from the fruiting body of *Morchella sextelata*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 213: 394–403.
- [47] LI F, WANG K, DONG X, et al. Structure, conformation and immunomodulatory activity of a polysaccharide from *Morchella sextelata*[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(7): 4628–4637.
- [48] 张海信, 熊正英, 葛士顺, 等. 羊肚菌对大强度耐力运动大鼠肝组织自由基代谢和糖储备的影响[J]. *通化师范学院学报*, 2022, 43(12): 71–77. [ZHANG H X, XIONG Z Y, GE S S, et al. Effects of *Morchella esculenta* on liver tissue free radical metabolism and the glucose reserve of rats in high-intensity endurance exercising[J]. *Journal of Tonghua Normal University*, 2022, 43(12): 71–77.]
- [49] 曹亮. 羊肚菌多糖对小鼠抗运动疲劳及耐缺氧的影响[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(6): 40–42. [CAO L. Effects of *Morchella esculenta* polysaccharide on anti-fatigue and anti-hypoxia in mice[J]. *Edible Fungi of China*, 2020, 39(6): 40–42.]
- [50] 薛莉. 羊肚菌胞外粗多糖对 S-(180) 肉瘤小鼠的抑制实验[J]. *山西中医学院学报*, 2014, 15(2): 27–29. [XUE L. Inhibitory effects of extracellular polysaccharides extracted from *Morchella esculenta* on S180 sarcoma[J]. *Journal of Shanxi College of Traditional Chinese Medicine*, 2014, 15(2): 27–29.]
- [51] 黄瑶. 羊肚菌多糖(ME-X)结构鉴定, 生物活性及抗肿瘤机制的研究[D]. 成都: 西华师范大学, 2019. [HUANG Y. The studies on structure identification, bioactivity activity and the mechanism of anti-tumor activity of the *Morehella esculenta* (L.) Pers polysaccharide (ME-X)[D]. Chengdu: China West Normal University, 2019.]
- [52] KUNWAR A, PRIYADARSINI K I. Free radicals, oxidative stress and importance of antioxidants in human health[J]. *Journal of Medical & Allied Sciences*, 2011, 1(2): 53–60.
- [53] LI W, CAI Z N, MEHMOOD S, et al. Polysaccharide FMP-1 from *Morchella esculenta* attenuates cellular oxidative damage in human alveolar epithelial A549 cells through PI3K/AKT/Nrf2/HO-1 pathway[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 865–875.
- [54] 熊川, 罗强, 李强, 等. 六妹羊肚菌多糖部分理化性质及抗氧化活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2017, 29(7): 1182–1187. [XIONG C, LUO Q, LI Q, et al. Physical and chemical properties of polysaccharide isolated from the fruiting bodies of *Morchella sextelata* and its antioxidant effect[J]. *Natural Products Research and Development*, 2017, 29(7): 1182–1187.]
- [55] 毕博, 于荣利. 尖顶羊肚菌多糖的超声波辅助提取工艺优化及其对肝损伤小鼠抗氧化活性的影响[J]. *食用菌学报*, 2016, 23(3): 53–56. [BI B, YU R L. Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from *Morchella conica* and their effects on selected antioxidant indices in mice with CCL4-induced liver injury[J]. *Journal of Edible Fungi*, 2016, 23(3): 53–56.]
- [56] FU L H, WANG Y, WANG J, et al. Evaluation of the antioxidant activity of extracellular polysaccharides from *Morchella esculenta*[J]. *Food & Function*, 2013, 4(6): 871–879.
- [57] CAI Z N, LI W, MEHMOOD S, et al. Structural characterization, *in vitro* and *in vivo* antioxidant activities of a heteropolysaccha-

- ride from the fruiting bodies of *Morchella esculenta*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 195: 29–38.
- [58] AHMAD N, MAHMOOD F, KHALIL S A, et al. Antioxidant activity via DPPH, gram-positive and gram-negative antimicrobial potential in edible mushrooms[J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2014, 30(9): 826–834.
- [59] DONG Y, QI Y, LIU M, et al. Antioxidant, anti-hyperlipidemia and hepatic protection of enzyme-assisted *Morchella esculenta* polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 1490–1499.
- [60] 郭志远, 徐恒, 王晓雨, 等. 响应面优化羊肚菌子实体蛋白质提取工艺及其抗氧化性研究[J]. *食药菌*, 2023, 31(2): 109–117.
- [GUO Z Y, XU H, WANG X Y, et al. Optimization of protein extraction from *Morchella esculenta* by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2023, 31(2): 109–117.]
- [61] 李井雷, 刘玉婷, 宗帅, 等. 羊肚菌胞外多糖体外降血糖降血脂活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(16): 39–45. [LI J L, LIU Y T, ZONG S, et al. *In vitro* hyperglycemic and hypolipidemic activity of *Morchella esculenta* extra-cellular polysaccharides[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(16): 39–45.]
- [62] CHEN Q, CHE C, YANG S, et al. Anti-inflammatory effects of extracellular vesicles from *Morchella* on LPS-stimulated RAW264.7 cells via the ROS-mediated p38 MAPK signaling pathway[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2023, 478(2): 317–327.
- [63] 郑红波. 羊肚菌胞内多糖对小鼠运动心肌损伤的影响[J]. *中国食用菌*, 2019, 38(8): 52–54. [ZHENG H B. Effects of intracellular polysaccharide from *Morchella esculenta* on myocardial injury in mice during exercise[J]. *Edible Fungi of China*, 2019, 38(8): 52–54.]
- [64] NITHA B, FIJESH P, JANARDHANAN K. Hepatoprotective activity of cultured mycelium of Morel mushroom, *Morchella esculenta*[J]. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 2013, 65(1-2): 105–112.
- [65] XU Y, TANG J, WANG Y, et al. Large-scale commercial cultivation of morels: Current state and perspectives[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2022, 106(12): 4401–4412.
- [66] LANG M. Consumer acceptance of blending plant-based ingredients into traditional meat-based foods: Evidence from the meat-mushroom blend[J]. *Food Quality and Preference*, 2020, 79: 103758.
- [67] 曾小峰, 高伦江, 曾顺德, 等. 羊肚菌保鲜与加工研究进展[J]. *南方农业*, 2022, 16(9): 224–227. [ZENG X F, GAOL J, ZENG S D, et al. Research progress on preservation and processing of morel mushroom[J]. *Southern Agriculture*, 2022, 16(9): 224–227.]
- [68] 王雪梅, 龙叶峰, 林勇涛, 等. 羊肚菌多糖含片的研制及其体外抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 163–172. [WANG X M, LONG Y F, LIN Y T, et al. Study on the preparation of polysaccharide lozenge from *Morchella esculenta* and its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 163–172.]
- [69] 石思文, 江洁, 崔琳, 等. 羊肚菌营养强化米酒发酵工艺的优化[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(23): 175–181. [SHI S W, GANG J, CUI L, et al. Optimization fermentation technology of *Morchella esculenta* fortified rice wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(23): 175–181.]
- [70] 赵航, 单程程, 刘超. 液体发酵产羊肚菌食用菌酱的制作工艺研究[J]. *中国调味品*, 2016, 41(5): 81–85. [ZHAO H, SHAN C C, LIU C. Production process of *Morchella esculenta* edible fungi sauce by liquid fermentation[J]. *China Condiments*, 2016, 41(5): 81–85.]
- [71] 蒋方国, 凌云坤, 徐宏, 等. 响应面法优化羊肚菌鸡脯汤料包工艺[J]. *中国调味品*, 2019, 46(3): 91–94, 99. [JIANG F G, LING Y K, XU H, et al. Optimization of the technology of *Morchella* and chicken breast soup package by response surface methodology[J]. *Chinese Condiments*, 2019, 46(3): 91–94, 99.]
- [72] 陈东琪, 刘超. 酥性羊肚菌饼干的工艺研制[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(13): 100–103. [CHEN D Q, LIU C. The development process of *Morchella esculenta* crispness biscuits[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(13): 100–103.]
- [73] TONG Q, YAN S, WANG S, et al. Optimization of process technology and quality analysis of a new yogurt fortified with *Morchella esculenta*[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42: e45822.
- [74] 李翔, 邓杰, 徐宏, 等. 响应面法优化羊肚菌红枣复合营养粉的加工工艺[J]. *食品研究与开发*, 2019, 49(17): 58–63. [LI X, DENG J, XU H, et al. Optimization of the processing technology of compound nutrition powder of *Morchella* and red jujube by response surface method[J]. *Food Research and Development*, 2019, 49(17): 58–63.]
- [75] 王雪梅, 龙叶峰, 周乐松, 等. 羊肚菌多糖饮液的制备[J]. *食用菌*, 2021, 43(3): 71–75. [WANG X M, LONG Y F, ZHOU L S, et al. Preparation of *Morchella* polysaccharide liquid[J]. *Edible Fungi*, 2021, 43(3): 71–75.]
- [76] LI Y, CHEN H, ZHANG X. Cultivation, nutritional value, bioactive compounds of morels, and their health benefits: A systematic review[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 399.
- [77] 屠雅铤, 孙晓明, 张卫明, 等. 羊肚菌食品毒理学安全性评价[J]. *中国野生植物资源*, 2001(6): 38–42. [TU Y X, SUN X M, ZHANG W M, et al. Toxicological assessment on food safety of *Morchella esculenta*[J]. *Wild Plant Resources of China*, 2001(6): 38–42.]