

羊肚菌活性成分及其抗氧化与糖代谢调节作用研究进展

胡静祎*, 陈 琴, 司武阳

安徽粮食工程职业技术学院食品生物系, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年6月1日; 录用日期: 2026年6月28日; 发布日期: 2026年7月13日

摘 要

羊肚菌(*Morchella* spp.)兼具优良风味与多种生物活性,是近年功能食品研究的热点对象。其多糖、多酚、蛋白及肽、麦角硫因、维生素和矿物元素等活性成分中,多糖和多酚与抗氧化、糖代谢改善和肠道菌群调节关系最为密切。本文围绕羊肚菌活性成分组成、多糖提取与结构表征、抗氧化评价、糖代谢调节机制及其在功能性主食中的应用潜力进行综述。现有证据表明,羊肚菌多糖在体外自由基清除、消化酶抑制、胰岛素抵抗改善以及肠道菌群与短链脂肪酸调控方面具有潜力,但研究仍以体外和动物模型为主,结构解析深度和人体干预证据不足。未来应加强标准化原料控制、精准结构解析、真实食品体系评价和人体营养干预,以推动羊肚菌向可规模化的功能食品原料转化。

关键词

羊肚菌, 多糖, 多酚, 抗氧化, 糖代谢, α -葡萄糖苷酶, 肠道菌群, 功能食品

Research Progress on the Active Components of Morel Mushrooms and Their Antioxidant and Glucose Metabolism Regulation Effects

Jingyi Hu*, Qin Chen, Wuyang Si

Department of Food and Biology, Anhui Vocational College of Grain Engineering, Hefei Anhui

Received: June 1, 2026; accepted: June 28, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

Morel mushrooms (*Morchella* spp.) possess excellent flavor and diverse bioactivities, making them a

*通讯作者。

文章引用: 胡静祎, 陈琴, 司武阳. 羊肚菌活性成分及其抗氧化与糖代谢调节作用研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(4): 402-410. DOI: 10.12677/hjfn.2026.154044

hot topic in functional food research in recent years. Among its active components, including polysaccharides, polyphenols, proteins and peptides, ergothioneine, vitamins, and minerals, polysaccharides and polyphenols are most closely related to antioxidant activity, improved glucose metabolism, and regulation of gut microbiota. This review summarizes the composition of morel mushroom active components, polysaccharide extraction and structural characterization, antioxidant evaluation, glucose metabolism regulation mechanisms, and their application potential in functional staple foods. Existing evidence suggests that morel mushroom polysaccharides have potential in *in vitro* free radical scavenging, digestive enzyme inhibition, improvement of insulin resistance, and regulation of gut microbiota and short-chain fatty acids. However, research is still mainly based on *in vitro* and animal models, with insufficient depth of structural analysis and evidence of human intervention. Future research should focus on strengthening standardized raw material control, precise structural analysis, evaluation of real food systems, and human nutritional intervention to promote the transformation of morel mushrooms into scalable functional food raw materials.

Keywords

Morel Mushroom, Polysaccharide, Polyphenol, Antioxidant, Glucose Metabolism, α -Glucosidase, Gut Microbiota, Functional Food

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

羊肚菌(*Morchella* spp.)是一种珍贵的食药真菌,长期被视为高端食材。近年来栽培技术成熟和产业规模扩大,使其逐步走向工厂化生产和深加工应用,相关功能食品研究随之快速发展。其多糖和多酚被认为与抗氧化、糖脂代谢改善和肠道菌群调节关系最为密切,但已有研究多停留于体外和动物模型阶段,从成分发现到食品应用之间仍存在大量证据缺口。本文综述羊肚菌活性成分组成、多糖结构与活性、抗氧化与糖代谢调节机制及其在功能性主食中的应用潜力,并探讨当前研究不足与未来方向。

2. 羊肚菌营养基础与活性成分谱

2.1. 物种多样性与营养特征

已规模化栽培或较常研究的羊肚菌包括梯棱羊肚菌(*M. importuna*)、六妹羊肚菌(*M. sextelata*)、粗柄羊肚菌(*M. eximia*)、美味羊肚菌(*M. esculenta*)和尖顶羊肚菌(*M. conica*)等,不同物种、产地、栽培基质和加工方式均会影响其营养与代谢物组成[1]-[4]。羊肚菌通常具有低脂肪、高蛋白、较高膳食纤维和矿物质含量的特点,富含多种必需氨基酸、呈味氨基酸、5'-核苷酸和有机酸,共同构成其“鲜味-菌香”风味基础[1][2][5][6]。

2.2. 活性成分组成

羊肚菌活性成分中研究最集中的是多糖。多糖可来源于子实体、菌丝体或发酵液,其单糖组成常见于葡萄糖、半乳糖、甘露糖、阿拉伯糖、鼠李糖、木糖和葡萄糖胺等,糖苷键型、分子量、支化度和酸性基团含量差异较大[7][8]。除多糖外,羊肚菌还含有酚酸、黄酮样物质、麦角硫因、麦角甾醇、维生素和脂肪酸等小分子活性物质。不同产地尖顶羊肚菌多酚组成和抗氧化活性存在显著差异,提示地理来源和生长条件可能通过影响酚类积累而改变功能品质[9]。基于 UPLC-Q-TOF-MS 的非靶向代谢组研究证明,

不同地理来源羊肚菌在氨基酸、有机酸、脂质、核苷和酚类衍生物等代谢谱上存在可识别差异，为原料质量控制和产地溯源提供了方法学基础[10]。

2.3. 不同部位与产地差异

羊肚菌不同部位的利用价值也有差异。以六妹羊肚菌为例，菌柄市场价格低于菌盖，但其粗膳食纤维、矿物元素、氨基酸、核苷酸、总黄酮和麦角硫因等指标并不低，部分甚至高于菌盖[11]，可作为功能性食品配料、膳食纤维来源和呈味基料继续开发。

3. 羊肚菌多糖的提取、结构表征与结构-活性关系

3.1. 提取方法

羊肚菌多糖的提取方法直接影响得率、分子量分布、单糖组成和生物活性。传统热水提取操作简单但时间长、能耗高，且可能导致热敏组分降解；超声辅助、酶辅助、深共晶溶剂辅助等新方法可提高效率并调控结构特征[12] [13]。例如，超声辅助深共晶溶剂提取梯棱羊肚菌多糖时得率显著高于热水提取，所得多糖分子量降低、糖含量提高，并表现出较好的抗氧化及 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶抑制活性[12]，说明提取介质可通过改变分子量、支链和构象影响功能活性。

3.2. 结构表征与已知多糖

结构解析方面，常用方法包括苯酚-硫酸法测定总糖、HPLC 测定单糖组成、HPGPC 测定分子量、FTIR 鉴定官能团、甲基化和 GC-MS 推断糖苷键、NMR 阐明主链和支链结构。已有研究从梯棱羊肚菌、美味羊肚菌、六妹羊肚菌等分离得到多种具有免疫调节、抗氧化或代谢调节活性的葡聚糖、半乳甘露聚糖和杂多糖[14]-[18]。例如，梯棱羊肚菌子实体的新多糖具有免疫调节活性[14]；含 GlcNAc 的新多糖及不同葡聚糖组分可通过巨噬细胞相关信号通路调控免疫反应[15] [16]；美味羊肚菌半乳甘露聚糖也可激活免疫细胞参与生物效应[17]。

3.3. 结构-活性关系

关于结构-活性关系，当前较一致的认识是：适宜分子量、较高支化度、特定糖苷键型、一定含量的酸性基团，以及多糖-蛋白或多糖-酚复合结构，可能增强自由基清除、消化酶抑制和肠道菌群利用能力[7] [8] [19]。但不同研究采用的原料、提取条件、纯化程度和评价模型差异较大，导致同类指标的横向可比性有限。

为便于比较，表 1 汇总了部分羊肚菌多糖的来源、提取方式、分子量和主要活性。总体来看，分子量偏低或经超声、深共晶溶剂等方式处理后得到的多糖，往往在自由基清除和消化酶抑制上表现更好，如超声辅助深共晶溶剂提取的梯棱羊肚菌多糖分子量低于热水提取物，对 DPPH 和 α -葡萄糖苷酶的半抑制浓度均在 0.55 mg/mL 以下[12]。但这一规律并非绝对，单糖组成、糖苷键类型和支化程度同样影响活性，加之各研究测定条件不一，表中数值仅适合在同一研究内部比较。

未来若要将羊肚菌多糖作为明确功能因子，需要建立“原料批次-提取工艺-结构指纹-体外活性-消化转化-动物或人体效应”的连续证据链。

4. 酚类、麦角硫因、活性肽等小分子成分与多成分协同作用

4.1. 酚类化合物

相较于多糖，羊肚菌酚类和其他小分子成分研究系统性仍不足。羊肚菌中检测到的酚酸和黄酮样

Table 1. Structural characteristics and antioxidant and digestive enzyme inhibitory activities of polysaccharides from *Morchella esculenta*
表 1. 部分羊肚菌多糖的结构特征与抗氧化、消化酶抑制活性

多糖来源	提取方式	分子量	单糖组成/结构特点	主要活性(IC ₅₀ /抑制率)	文献
梯棱羊肚菌(<i>M. importuna</i>)	超声辅助深共晶溶剂	主峰约 7.3 × 10 ⁴ Da, 低于热水提取	葡萄糖、甘露糖、半乳糖为主	DPPH IC ₅₀ 0.55、α-葡萄糖苷酶 IC ₅₀ 0.15 mg/mL	[12]
美味羊肚菌(<i>M. esculenta</i>)胞外多糖	发酵后体外消化	消化后部分降解	杂多糖	α-淀粉酶抑制较强、α-葡萄糖苷酶中等; 经 PI3K/Akt 改善胰岛素抵抗	[20]
美味羊肚菌胞外多糖	液态发酵	—	杂多糖	1.0 mg/mL 时 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶抑制率约 73.46%、36.37%	[21]
美味羊肚菌子实体杂多糖 FMP-1	分离纯化	—	杂多糖	体外与体内抗氧化活性	[22]
六妹羊肚菌(<i>M. sextelata</i>)多糖	热水 + γ-辐照	辐照后降低	杂多糖	辐照改变其抗氧化能力	[23]
美味羊肚菌胞外多糖	发酵提取	—	杂多糖	体外自由基清除, 提高抗氧化酶活性	[24]

注：表中“—”表示原文未明确报告该参数；活性数据为各研究在其测定条件下的结果，不宜跨研究直接比较。

物质与 DPPH、ABTS、ORAC、还原力及脂质过氧化抑制能力密切相关[9] [25]。多酚通常可通过提供氢原子或电子、稳定自由基、螯合过渡金属离子等方式发挥抗氧化作用，同时也可能影响淀粉消化酶活性、葡萄糖转运和肠道菌群代谢。

羊肚菌多酚以小分子酚酸为主，已报道的有原儿茶酸、对羟基苯甲酸和对香豆酸等，其总量和组成受物种、产地影响较大，不同产地尖顶羊肚菌的多酚含量和抗氧化活性差异明显[9] [25]。多酚含量虽远低于多糖，但单位质量抗氧化能力较强，是化学法抗氧化测定中的重要贡献者。由于酚类成分热敏、易氧化，干燥和加工方式对其保留率影响较大，这也是羊肚菌功能品质波动的原因之一。

4.2. 麦角甾因、麦角甾醇与活性肽

食用菌中的麦角甾因可经特异性转运体 OCTN1 主动摄取并在线粒体中富集，是细胞内独特的水溶性抗氧化物；麦角甾醇在紫外照射下可转化为维生素 D₂，是食用菌区别于植物原料的重要营养特征[1] [2] [4]。羊肚菌等食用菌是膳食麦角甾因的重要来源，其含量随物种和部位而异，六妹羊肚菌菌柄中的麦角甾因并不低于菌盖[11]。麦角甾因和麦角甾醇含量较稳定、物种特征明显，可作为评价羊肚菌品质的参考成分。此外，羊肚菌蛋白富含必需氨基酸和呈味氨基酸，经酶解可制备活性肽，马建伟从美味羊肚菌蛋白中获得的抗氧化肽具有自由基清除和抗疲劳作用[26]，但此类研究尚少，肽的序列和构效关系仍有待明确。

4.3. 多组分协同效应

食品体系中的功能并不一定来自单一成分。多糖可通过形成黏性溶液、包埋淀粉颗粒影响淀粉消化；多酚可与蛋白、淀粉或多糖形成非共价复合物，改变酶抑制和消化释放行为；蛋白水解肽则可能同时具有自由基清除、金属螯合和酶抑制潜力[26] [27]。因此，羊肚菌作为食品原料时，其功能评价不宜只关注某一纯化组分，还应关注全粉、粗提物和加工食品基质中的协同或拮抗效应。

多酚与多糖或蛋白之间多以氢键、疏水作用等非共价方式结合,这种结合既可能提高复合物的抗氧化稳定性,也可能因多酚被包埋或结合而暂时降低其游离活性,在体系中表现为协同或拮抗[28]。就羊肚菌而言,目前针对各成分之间相互作用的专门研究还很少,全粉或粗提物的实际功能往往是多糖、多酚、麦角硫因和蛋白肽共同作用的结果,单一组分的活性数据不宜直接套用到食品体系。

5. 抗氧化活性评价与作用机制

5.1. 常用评价方法

氧化应激与炎症、胰岛素抵抗、 β 细胞损伤和糖脂代谢紊乱密切相关。羊肚菌抗氧化研究常使用 DPPH、ABTS、羟自由基清除、FRAP 还原力、ORAC, 以及细胞或动物体内 SOD、GSH-Px、CAT、MDA 等指标, 分别反映电子/氢转移、还原力、链反应抑制及内源性抗氧化系统等不同层面[19] [29]-[32]。

5.2. 羊肚菌多糖的抗氧化证据

羊肚菌多糖抗氧化证据较为丰富。早期研究表明, 美味羊肚菌胞外多糖具有体外自由基清除能力并可提高抗氧化酶活性[24]。从美味羊肚菌子实体分离的杂多糖 FMP-1 在体外和体内抗氧化模型中均表现出活性[22]。 γ -辐照可改变六妹羊肚菌多糖结构并影响其抗氧化能力, 提示适度降解或结构修饰可能改变活性暴露位点[23]。不同提取条件下获得的六妹羊肚菌多糖在理化性质和抗氧化活性上也存在差异[33]。总体而言, 多糖抗氧化机制可能包括直接清除自由基、螯合 $\text{Fe}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 等促氧化金属离子、增强内源性抗氧化酶活性、降低脂质过氧化产物, 以及调节 Nrf2/Keap1、NF- κ B 等氧化应激与炎症相关通路[19]。

5.3. 体外评价的局限性

抗氧化实验解释仍有几个共性风险。第一, 体外自由基清除并不等同于人体内抗氧化效应——多糖分子量大、直接吸收有限, 进入体内后更可能通过肠道菌群发酵产物和肠屏障间接发挥作用。第二, DPPH、ABTS 等化学法以有机相或半水相小分子自由基为底物, 对分子量大、溶解度有限的多糖反应受限, 所测 IC_{50} 更可能反映样品中残留低分子杂质或糖-蛋白复合物的贡献, 而非多糖主链本身的活性。第三, 不同实验的浓度、溶剂和阳性对照不一致, 造成活性强弱难以横向比较。后续研究应更多采用模拟消化-结肠发酵-细胞应激-动物或人体干预的连续模型, 并报告标准化的活性单位。

6. 糖代谢调节作用

6.1. 消化酶抑制

糖代谢调节是羊肚菌功能研究中较有应用前景的方向。餐后血糖升高与淀粉消化速度、葡萄糖吸收、胰岛素敏感性、肠道菌群代谢和炎症状态均相关。食品来源 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制剂可通过延缓淀粉水解和葡萄糖释放降低餐后血糖波动[27] [34]。需要注意的是, 当前文献多采用酵母来源 α -葡萄糖苷酶进行体外筛选, 但其与人小肠刷状缘麦芽糖酶-葡萄糖淀粉酶(MGAM)和蔗糖酶-异麦芽糖酶(SI)在底物特异性和动力学上存在显著差异, 体外强抑制不能直接外推为体内餐后血糖控制效果。

羊肚菌多糖在消化酶抑制方面已有直接证据。超声辅助深共晶溶剂提取的梯棱羊肚菌多糖表现出 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制活性[12]; 美味羊肚菌发酵来源胞内多糖和胞外多糖在结构与活性上存在差异, 胞外多糖对消化酶抑制更强, 胞内多糖可能更偏向延缓葡萄糖吸收与转运[20]。液态发酵所得羊肚菌胞外多糖在体外也表现出对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制作用[21], 这说明“羊肚菌多糖”并非功能上同质的单一物质, 不同来源和结构组分可能对应不同作用位点。

6.2. 动物模型与代谢调节证据

动物模型进一步支持羊肚菌多糖对糖脂代谢的调节潜力。梯棱羊肚菌多糖在高脂/链脲佐菌素诱导的糖尿病模型中可改善血糖稳态、胰岛素抵抗、脂质异常和炎症状态，并通过肠道菌群和肝脏代谢物重塑影响肠-肝轴[35]。美味羊肚菌多糖在2型糖尿病小鼠中可减轻糖尿病表型，改善肠屏障和肠道菌群结构[36]。体外消化与粪菌发酵研究显示，美味羊肚菌胞外多糖经胃肠消化后仍保留一定降糖活性，可通过PI3K/Akt信号改善胰岛素抵抗细胞的葡萄糖消耗，并调节Firmicutes/Bacteroidetes比值[20]。

6.3. 肠道菌群与短链脂肪酸路径

梯棱羊肚菌多糖在体外粪菌发酵中可显著提高短链脂肪酸生成，提示其可能以益生元样底物形式参与代谢调控[13]。多糖通常难以在上消化道完全吸收，进入结肠后可被特定菌群利用，产生乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸。短链脂肪酸可通过FFAR2/FFAR3 (GPR43/GPR41)受体激活肠L细胞分泌GLP-1和PYY，进而改善胰岛素敏感性；同时可上调ZO-1、occludin等紧密连接蛋白维持肠屏障，并通过AMPK通路调节肝糖异生和脂肪酸氧化。因此，羊肚菌多糖的降糖潜力并不只来自消化酶抑制，还来自“多糖结构-菌群利用-短链脂肪酸-肠屏障-胰岛素敏感性”的间接路径。当前不足在于，多数研究停留于菌群相关性分析，尚缺少无菌动物、粪菌移植和受体阻断等因果证据。

7. 食品加工与功能性主食开发

7.1. 食用菌粉在面制品中的应用

羊肚菌不仅可作为提取活性物质的原料，也可作为全粉、菌柄粉或发酵菌丝粉进入真实食品体系。面条、馒头、面包等主食载体消费频次高、配方可调，适合承载膳食纤维、多糖、多酚和蛋白组分。低GI面条研究表明，原料种类、可溶性膳食纤维、蛋白质、多酚和加工方式均会影响淀粉消化速率和血糖反应[37]-[40]。

食用菌粉在面制品中的应用已有可借鉴证据：香菇粉添加至面条可改善营养组成与预测血糖指数[37]；木耳粉添加至即食面可提高膳食纤维和抗氧化活性[38]；蘑菇粉添加至意面可提高抗氧化成分并调节预测血糖反应[39]。其作用路径主要包括稀释可消化淀粉并提高膳食纤维比例，多糖、多酚和蛋白共同影响消化酶活性，以及改变面筋网络与淀粉糊化结构而影响消化酶可及性。

7.2. 功能性主食开发策略

羊肚菌用于功能性主食开发时应避免只追求高添加量。添加量过高可能破坏面筋网络、增加断条率或引入过强菌味；过低又难以形成可检测的功能差异。合理策略是依据总多糖、总酚、膳食纤维等指标设定功能目标，通过质构、烹煮损失和感官评分确定可接受添加范围，并采用标准化模拟消化方法评价淀粉水解和活性释放，进一步通过细胞或人体餐后血糖实验验证功能效果[40]。对于声称抗氧化或调节糖代谢的食品，还需区分“原料活性”“加工后活性”“消化后可利用活性”和“人体实际效应”，避免以体外结果直接替代营养功效证据。

8. 现有不足与未来研究方向

8.1. 原料标准化

羊肚菌物种复杂，不同产区、栽培基质、采收期和干燥方式会导致活性成分差异显著。后续研究应明确物种鉴定、产地、栽培方式和子实体部位，建立多糖、多酚、麦角硫因和矿物元素等关键指标的质量指标。在具体指标上，可优先以多糖的分子量分布和单糖组成、原儿茶酸等特征酚酸以及麦角硫因含

量作为质量控制和产地区分的标志物，并配合 DNA 分子标记进行物种鉴定。

8.2. 结构解析与机制研究

许多研究仅报告总糖、单糖组成和分子量，尚不足以解释活性差异；体外酶抑制和自由基清除也只能作为筛选指标，不能替代生理效应证明。应加强 NMR、构象分析和分级纯化，并结合模拟消化、糖尿病动物模型、多组学、粪菌移植和关键通路阻断等方法明确作用路径。其中，二维核磁共振有助于确定糖苷键连接方式和支链位置，多角度激光光散射可获得较准确的分子量和构象信息，是突破当前结构解析瓶颈的可行手段。

8.3. 真实食品体系评价

纯化多糖的活性并不等同于全粉或加工食品的功能。羊肚菌进入面条、烘焙或饮品后会受到热处理、剪切、pH、油脂、蛋白和淀粉网络影响，应系统评估加工对多糖分子量、多酚保留、消化释放和酶抑制活性的影响。

8.4. 人体临床证据

当前证据主要来自动物和体外模型。未来可从短周期人体餐后血糖研究开始，评价含羊肚菌主食的 GI、血糖曲线、胰岛素反应和饱腹感，再扩展至更长周期的糖脂代谢和肠道菌群干预研究。具体可先以健康成人对象，采用交叉设计比较含羊肚菌主食与普通主食的餐后血糖反应，以血糖指数和餐后血糖曲线下面积为主要指标，胰岛素和饱腹感为次要指标；在此基础上，再以糖尿病前期或 2 型糖尿病人群开展数周的随机对照试验，观察空腹血糖、糖化血红蛋白、血脂和肠道菌群等变化。

9. 结论

羊肚菌具有较好的营养基础和功能食品开发潜力，其多糖、多酚、蛋白肽、麦角硫因和矿物元素等共同构成抗氧化与糖代谢调节研究的物质基础。现有证据显示，羊肚菌多糖可通过自由基清除、抗氧化酶调节、消化酶抑制、葡萄糖消耗改善、肠道菌群重塑和短链脂肪酸生成等途径发挥潜在作用。将羊肚菌作为功能性食品配料应用于主食体系更接近实际消费场景，但需要兼顾活性保留、消化转化、质构风味和人体有效性。未来只有建立标准化原料、精准结构、真实食品模型和人体证据之间的闭环，才能支撑其在抗氧化和糖代谢友好型食品中的高质量应用。

基金项目

安徽省高等学校科学研究项目(2023AH053270)、安徽省高校中青年教师培养行动项目(JNFX2024165)、安徽省高等学校科学研究项目(2025AHGXZK30211)。

参考文献

- [1] Li, Y., Chen, H. and Zhang, X. (2023) Cultivation, Nutritional Value, Bioactive Compounds of Morels, and Their Health Benefits: A Systematic Review. *Frontiers in Nutrition*, **10**, Article 1159029. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1159029>
- [2] Tietel, Z. and Masaphy, S. (2018) True Morels (*Morchella*)—Nutritional and Phytochemical Composition, Health Benefits and Flavor: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **58**, 1888-1901. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1285269>
- [3] Sunil, C. and Xu, B. (2022) Mycochemical Profile and Health-Promoting Effects of Morel Mushroom *Morchella esculenta* (L.)—A Review. *Food Research International*, **159**, Article 111571. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111571>
- [4] Wu, H., Chen, J., Li, J., Liu, Y., Park, H.J. and Yang, L. (2021) Recent Advances on Bioactive Ingredients of *Morchella esculenta*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **193**, 4197-4213. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03670-1>

- [5] 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.
- [6] 孙巧弟, 张江萍, 谢洋洋, 等. 羊肚菌营养素、功能成分和保健功能研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 323-328.
- [7] Tian, J., Zhang, Z., Shang, Y. and Zheng, Y. (2024) Extraction, Structure and Antioxidant Activity of the Polysaccharides from Morels (*Morchella spp.*): A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **264**, Article 130656. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130656>
- [8] Zhang, J., Zhao, J., Liu, G., Li, Y., Liang, L., Liu, X., *et al.* (2023) Advance in *Morchella* sp. Polysaccharides: Isolation, Structural Characterization and Structure-Activity Relationship: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **247**, Article 125819. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125819>
- [9] 卢可可, 谭玉荣, 吴素蕊, 等. 不同产地尖顶羊肚菌多酚组成及抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 6-12.
- [10] Dong, H., Zhao, X., Cai, M., Gu, H., E, H., Li, X., *et al.* (2022) Metabolomics Analysis of *Morchella sp.* from Different Geographical Origins of China Using UPLC-Q-TOF-MS. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article 865531. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.865531>
- [11] Qiu, Z., Ren, S., Zhao, J., Cui, L., Li, H., Jiang, B., *et al.* (2024) Comparative Analysis of the Nutritional and Biological Properties between the Pileus and Stipe of *Morchella sextelata*. *Frontiers in Nutrition*, **10**, Article 1326461. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1326461>
- [12] Pan, X., Xu, L., Meng, J., Chang, M., Cheng, Y., Geng, X., *et al.* (2022) Ultrasound-Assisted Deep Eutectic Solvents Extraction of Polysaccharides from *Morchella Importuna*: Optimization, Physicochemical Properties, and Bioactivities. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article 912014. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.912014>
- [13] Wang, S., Li, D., Li, G., Duan, N., He, C., Meng, J., *et al.* (2024) Functional Properties, Rheological Characteristics, Simulated Digestion, and Fermentation by Human Fecal Microbiota of Polysaccharide from *Morchella importuna*. *Foods*, **13**, Article 2148. <https://doi.org/10.3390/foods13132148>
- [14] Wen, Y., Peng, D., Li, C., Hu, X., Bi, S., Song, L., *et al.* (2019) A New Polysaccharide Isolated from *Morchella importuna* Fruiting Bodies and Its Immunoregulatory Mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, **137**, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.171>
- [15] Wen, Y., Bi, S., Hu, X., Yang, J., Li, C., Li, H., *et al.* (2021) Structural Characterization and Immunomodulatory Mechanisms of Two Novel Glucans from *Morchella importuna* Fruiting Bodies. *International Journal of Biological Macromolecules*, **183**, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.084>
- [16] Peng, D., Wen, Y., Bi, S., Huang, C., Yang, J., Guo, Z., *et al.* (2021) A New GlcNAc-Containing Polysaccharide from *Morchella importuna* Fruiting Bodies: Structural Characterization and Immunomodulatory Activities *in Vitro* and *in Vivo*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **192**, 1134-1149. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.051>
- [17] Zhang, N., Ma, H., Zhang, Z., Zhang, W., Chen, L., Pan, W., *et al.* (2022) Characterization and Immunomodulatory Effect of an Alkali-Extracted Galactomannan from *Morchella esculenta*. *Carbohydrate Polymers*, **278**, Article 118960. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118960>
- [18] Kuang, M.T., Zhang, J.L., Yao, Y.Y., *et al.* (2022) Purification, Structural Characterization and Immunomodulatory Activities of a Polysaccharide from the Fruiting Body of *Morchella sextelata*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **213**, 394-403. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.096>
- [19] Wang, J., Hu, S., Nie, S., Yu, Q. and Xie, M. (2015) Reviews on Mechanisms of *in Vitro* Antioxidant Activity of Polysaccharides. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, **2016**, Article 5692852. <https://doi.org/10.1155/2016/5692852>
- [20] Guo, W., Wang, X., Wang, B., Zhang, Y., Zhao, F., Qu, Y., *et al.* (2024) *In Vitro* Digestion and Fecal Fermentation Behaviors of Exopolysaccharide from *Morchella esculenta* and Its Impacts on Hypoglycemic Activity via PI3K/Akt Signaling and Gut Microbiota Modulation. *Food Chemistry: X*, **24**, Article 101870. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101870>
- [21] 林杉, 赵萍, 付云娜, 等. 羊肚菌胞外多糖液态发酵培养基配方优化及其体外降血糖活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 196-203.
- [22] Cai, Z., Li, W., Mehmood, S., Pan, W., Wang, Y., Meng, F., *et al.* (2018) Structural Characterization, *in Vitro* and *in Vivo* Antioxidant Activities of a Heteropolysaccharide from the Fruiting Bodies of *Morchella esculenta*. *Carbohydrate Polymers*, **195**, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.069>
- [23] Xiong, C., Li, Q., Li, S., *et al.* (2020) Effect of γ -Irradiation on the Structure and Antioxidant Activity of Polysaccharide Isolated from *Morchella sextelata*. *Bioscience Reports*, **40**, BSR20194522. <https://doi.org/10.1042/BSR20194522>
- [24] Fu, L., Wang, Y., Wang, J., Yang, Y. and Hao, L. (2013) Evaluation of the Antioxidant Activity of Extracellular Polysaccharides from *Morchella esculenta*. *Food & Function*, **4**, 871-879. <https://doi.org/10.1039/c3fo60033e>
- [25] Heleno, S.A., Stojković, D., Barros, L., Glamočlija, J., Soković, M., Martins, A., *et al.* (2013) A Comparative Study of Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Properties of *Morchella esculenta* (L.) Pers. from Portugal and

- Serbia. *Food Research International*, **51**, 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.020>
- [26] 马建伟. 美味羊肚菌蛋白抗氧化肽的制备及抗疲劳活性[J]. 中国酿造, 2023, 42(9): 198-204.
- [27] Li, X., Bai, Y., Jin, Z. and Svensson, B. (2022) Food-Derived Non-Phenolic α -Amylase and α -Glucosidase Inhibitors for Controlling Starch Digestion Rate and Guiding Diabetes-Friendly Recipes. *LWT*, **153**, Article 112455. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112455>
- [28] 贺俊, 王梦蝶, 陈小强, 应苗苗. 食源性多糖和多酚的相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 403-414.
- [29] Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. and Berset, C. (1995) Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. *LWT—Food Science and Technology*, **28**, 25-30. [https://doi.org/10.1016/s0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/s0023-6438(95)80008-5)
- [30] Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. and Rice-Evans, C. (1999) Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Free Radical Biology and Medicine*, **26**, 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
- [31] Benzie, I.F.F. and Strain, J.J. (1996) The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, **239**, 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- [32] Huang, D., Ou, B. and Prior, R.L. (2005) The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **53**, 1841-1856. <https://doi.org/10.1021/jf030723c>
- [33] Li, F., Jin, Y., Wang, J. and Xu, H. (2022) Structure Identification of Two Polysaccharides from *Morchella sextelata* with Antioxidant Activity. *Foods*, **11**, Article 982. <https://doi.org/10.3390/foods11070982>
- [34] Papoutsis, K., Zhang, J., Bowyer, M.C., Brunton, N., Gibney, E.R. and Lyng, J. (2021) Fruit, Vegetables, and Mushrooms for the Preparation of Extracts with α -Amylase and α -Glucosidase Inhibition Properties: A Review. *Food Chemistry*, **338**, Article 128119. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128119>
- [35] Pan, X., Meng, J., Xu, L., Chang, M., Feng, C., Geng, X., *et al.* (2022) In-Depth Investigation of the Hypoglycemic Mechanism of *Morchella importuna* Polysaccharide via Metabonomics Combined with 16S rRNA Sequencing. *International Journal of Biological Macromolecules*, **220**, 659-670. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.117>
- [36] Rehman, A.U., Siddiqui, N.Z., Farooqui, N.A., Alam, G., Gul, A., Ahmad, B., *et al.* (2022) *Morchella esculenta* Mushroom Polysaccharide Attenuates Diabetes and Modulates Intestinal Permeability and Gut Microbiota in a Type 2 Diabetic Mice Model. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article 984695. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.984695>
- [37] De, S., Chawla, P., Dattatray, A., Iqbal, M., Goksen, G., Dhull, S.B., *et al.* (2024) Formulation of Functional Noodles by Adding *Lentinus Edodes* Mushroom Powder: Physiochemical Attributes, Cellular Mineral Uptake and Improved Glycemic Index. *Food Chemistry: X*, **24**, Article 101900. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101900>
- [38] Zakaria, M.K., Matanjun, P., George, R., Pindi, W., Mamat, H., Surugau, N., *et al.* (2022) Nutrient Composition, Antioxidant Activities and Glycaemic Response of Instant Noodles with Wood Ear Mushroom (*Auricularia cornea*) Powder. *Applied Sciences*, **12**, Article 12671. <https://doi.org/10.3390/app122412671>
- [39] Lu, X., Brennan, M.A., Serventi, L., Liu, J., Guan, W. and Brennan, C.S. (2018) Addition of Mushroom Powder to Pasta Enhances the Antioxidant Content and Modulates the Predictive Glycaemic Response of Pasta. *Food Chemistry*, **264**, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.130>
- [40] Cui, C., Wang, Y., Ying, J., Zhou, W., Li, D. and Wang, L. (2024) Low Glycemic Index Noodle and Pasta: Cereal Type, Ingredient, and Processing. *Food Chemistry*, **431**, Article 137188. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137188>