

银耳多糖的结构、功能性及应用研究进展

许欢怡, 李泉岑, 郑明锋, 刘斌, 吕峰, 曾峰

Research Progress on Structure, Function and Application of *Tremella fuciformis* Polysaccharide

XU Huanyi, LI Quancen, ZHENG Mingfeng, LIU Bin, LV Feng, and ZENG Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

许欢怡, 李泉岑, 郑明锋, 等. 银耳多糖的结构、功能性及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 362–370. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040052

XU Huanyi, LI Quancen, ZHENG Mingfeng, et al. Research Progress on Structure, Function and Application of *Tremella fuciformis* Polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 362–370. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040052

· 专题综述 ·

银耳多糖的结构、功能性及应用研究进展

许欢怡^{1,2}, 李泉岑^{1,2}, 郑明锋^{1,2}, 刘 斌^{1,2,3}, 吕 峰^{1,2}, 曾 峰^{1,2,3,*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002;

2. 福建省亚热带果蔬加工工程技术研究中心, 福建福州 350002;

3. 国家菌草工程技术研究中心, 福建福州 350002)

摘 要: 银耳富含营养素, 银耳多糖是其中最主要的功能活性成分, 具有多种生物活性。银耳多糖的制备方法多样, 对于其结构的研究多集中在分子量、单糖组分和糖苷键类型等方面。本文综述了银耳多糖的制备、结构和抗氧化、抗肿瘤、调节免疫、改善记忆、抗炎、降血糖和降血脂等生物活性及其在食品、化妆品和医药方面的开发应用。未来需要优化银耳多糖的制备技术, 结合现代分析技术解析银耳多糖的高级结构, 对银耳多糖的功能及作用机理进行深入的研究, 以期对银耳的精深加工与产品研发提供理论参考。

关键词: 银耳多糖, 结构, 分子量, 功能性, 构效关系

中图分类号: TS219

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)04-0362-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040052

本文网刊:



Research Progress on Structure, Function and Application of *Tremella fuciformis* Polysaccharide

XU Huanyi^{1,2}, LI Quancen^{1,2}, ZHENG Mingfeng^{1,2}, LIU Bin^{1,2,3}, LÜ Feng^{1,2}, ZENG Feng^{1,2,3,*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Engineering Research Center of Fujian Subtropical Fruit and Vegetable Processing, Fuzhou 350002, China;

3. National Engineering Research Center of JUNCAO Technology, Fuzhou 350002, China)

Abstract: *Tremella fuciformis* is rich in nutrients, and *Tremella fuciformis* polysaccharide is the most important functional active component with a variety of biological activities. *Tremella fuciformis* polysaccharides can be prepared by various methods, and the research on its structure is mainly focused on molecular weight, monosaccharide components, and glycosidic bond type. This review summarizes the preparation, structure, and biological activities of *Tremella fuciformis* polysaccharides, such as antioxidant, anti-tumor, immune regulation, memory improvement, anti-inflammation, blood sugar and blood lipid lowering, and its development and application in food, cosmetics, and medicine. In the future, it is necessary to optimize the preparation technology of *Tremella fuciformis* polysaccharides, analyze the advanced structure of *Tremella fuciformis* polysaccharides with modern analytical techniques, and conduct in-depth research on the function and mechanism of action of *Tremella fuciformis* polysaccharides, so as to provide theoretical reference for the deep processing and product development of *Tremella fuciformis*.

Key words: *Tremella fuciformis* polysaccharide; structure; molecular weight; functionality; structure-activity relationship

银耳(*Tremella fuciformis* Berk.)属于真菌类银耳科银耳属, 是担子菌门真菌银耳的子实体^[1]。银耳

夏秋季生于阔叶树腐木上, 分布于中国福建、四川、浙江、江苏、安徽等省份。银耳富含多种营养素, 素

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 福建省科技计划项目(2021L3007)。

作者简介: 许欢怡(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养学, E-mail: xhy1994460697@163.com。

* 通信作者: 曾峰(1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品与分子营养学, E-mail: fengzengfz@163.com。

有“菌中之冠”的美称^[2]。银耳的能量较低,蛋白质丰富,富含 17 种氨基酸、多糖和膳食纤维,以及钙、磷、铁、钾、钠、镁、硫等多种微量元素。银耳既是名贵的营养滋补佳品,又是扶正强壮的“补药”。此外,银耳有补脾开胃、滋阴润肺和润肠通便的功效,有助于提高人体对外界致病因子的抵抗力^[2]。

现代营养学和食品科学研究表明,多糖是银耳中最主要的功能活性成分,具有抗氧化、抗肿瘤、调节免疫、改善记忆、抗炎、降血糖和降血脂等生物活性^[3]。随着社会结构和人们膳食结构的变化,高血压、糖尿病、高血脂、肥胖等疾病和饮食相关代谢综合征等的发病率呈现上升趋势。银耳多糖可作为一种安全无毒的天然活性成分,应用于辅助增强免疫力、改善代谢综合征等方面^[4]。但目前关于银耳多糖生物活性作用机制的研究仍不够深入,尚未阐明银耳多糖结构与功能活性之间的关系;银耳多糖的提取率低且质量不稳定,影响了银耳多糖的大规模开发应用。

基于此,本文综述了银耳多糖的制备方法、结构特征,并概述了银耳多糖的结构对其功能性的影响。以期对银耳的精深加工及银耳多糖的开发应用提供理论依据和参考。

1 银耳多糖的制备与结构

1.1 银耳多糖的制备

银耳多糖的传统制备方法有热水浸提法、酸碱浸提法和酶解提取法,但这些方法制备的银耳多糖得率相对较低,影响了银耳多糖的产业化和工业化体系发展^[5]。为此研究人员研发了新型的提取方法,以提高银耳多糖的提取率。银耳多糖新型制备方法主要有超声波提取法、微波提取法、加压和反复冻融等辅助提取方法,这些制备方法主要利用物理机械作用,使银耳快速破壁,有效提高银耳多糖的提取率或得率。目前银耳多糖的主要制备方法和提取率或得率如表 1 所示。

1.2 银耳多糖的结构研究

银耳多糖的相对分子量、单糖组成和糖苷键结构如表 2 所示,银耳多糖的分子量为 $1.92 \times 10^4 \sim 1.88 \times 10^7$ Da。银耳多糖的单糖组成会随着菌株的不同而有差异,其中含量较多的是葡萄糖、葡萄糖醛酸和甘露糖。同种原料的银耳多糖经过分离纯化后,所得各

个组分的分子量存在差异,各个组分的单糖组成相似,但单糖的摩尔比不同。多糖主链的连接方式除了先前认为的甘露糖主链结构外,还有葡聚糖主链结构,糖苷键类型也存在差异,并且多糖结构差异对其生物活性有一定的影响。目前,银耳多糖结构的研究主要集中在分子量、单糖组分、糖苷键类型等方面,通过实验推测其复杂的分子空间构象,但是银耳多糖的高级结构、功能性和作用机理等方面有待进一步深入探究。

2 银耳多糖的功能性研究

2.1 抗氧化活性

银耳多糖主要通过清除自由基和提高抗氧化酶的活性从而发挥抗氧化作用。张力凡等^[17]对银耳粗多糖的抗氧化活性研究表明,该多糖清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS] 阳离子自由基和羟基自由基的 IC_{50} 分别为 0.05 mg/mL、1.72 mg/mL 和 0.14 mg/mL,表明银耳多糖具有抗氧化能力。张先廷^[18]研究发现银耳多糖对 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧阴离子自由基的清除作用呈现剂量依赖性。Wen 等^[19]通过测定给予银耳多糖干预的被紫外线辐射的雌性大鼠中的超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化氢酶(CAT)的活性,发现 SOD、GSH-Px 的酶活力相对于未经处理的紫外线辐射阳性对照组分别增强了 14.72%、103.22%,且 CAT 的酶活力降低了 16.21%。该研究表明银耳多糖能够通过保护抗氧化酶从而减少水分流失、改善皮肤结构变化、增加 I 型胶原蛋白含量,证明了其能够增强机体的抗氧化能力。此外,对多糖结构差异研究表明分子量小且含有较多糖醛酸的银耳多糖抗氧化能力更强^[20-21]。

上述研究均证实了银耳多糖的抗氧化活性,但银耳多糖在哺乳动物体内抗氧化活性与多糖的结构关系尚未充分阐明。关于银耳多糖的糖苷键位置和类型、单糖单元、分子量和构象对抗氧化活性的影响有待进一步研究。

2.2 抗肿瘤活性

多糖是生物体内广泛存在的一类生物大分子,

表 1 银耳多糖的制备方法
Table 1 Preparation method of *Tremella fuciformis* polysaccharide

制备方法	实验条件	得率或提取率	参考文献
超声波辅助复合酶提取银耳子实体多糖	液料比80:1(mL/g)、超声功率480 W、超声时间40 min、复合酶(纤维素酶:木瓜蛋白酶:果胶酶=15:25:11)2%	多糖得率25.92%	[6]
微波辅助提取银耳子实体多糖	液料比50:1(mL/g)、粒度120目、微波功率400 W、微波时间2 h	多糖得率33.25%	[7]
高压脉冲电场辅助热水浸提银耳子实体多糖	液料比50:1(v/w)、电场强度20 kV/cm、脉冲数10、提取次数1次	多糖得率35.64%	[8]
加压热水浸提银耳子实体多糖	料液比1:75(g/mL)、提取温度120 ℃、提取压力1.0 MPa、提取时间40 min	多糖得率70.25%	[9]
反复冻融结合双水相浸提银耳发酵液和芽孢多糖	银耳发酵液和芽孢冻融处理3~5次,按体积比1:1~5加入无水乙醇/碳酸钾双水相体系,静置离心后采用透析袋透析再进行冷冻干燥	多糖提取率80%以上	[10]

表 2 银耳多糖的结构比较分析

Table 2 Comparative analysis of structure of polysaccharide from *Tremella fuciformis*

来源	多糖组分	分子量 (Da)	单糖组成和摩尔比	糖苷键	是否有三螺旋结构	其他发现	生物活性
银耳芽孢菌种 Tyc63胞外多糖 ^[11]	TPF-1	5.19×10 ⁵	岩藻糖:木糖:甘露糖:葡萄糖醛酸=9.25:23.4:16.05:37.1	α-呋喃糖	是	—	
	TPF-2	1.71×10 ⁵	岩藻糖:木糖:甘露糖:葡萄糖醛酸:半乳糖=1.78:9.55:12.63:128.59:13.91	α-呋喃糖	否	—	对ABTS ⁺ 、·OH具有清除能力,显示出抗氧化活性
	TPF-3	6.61×10 ⁵	鼠李糖:木糖:甘露糖:葡萄糖醛酸:半乳糖=3.8:30.78:52.78:12.73:14.6	β-呋喃糖	是	—	
发酵银耳胞外多糖 ^[12]	FTPS-1	2.57×10 ⁴	葡萄糖胺:半乳糖胺:葡萄糖:甘露糖=1.72:4.43:12.59:49.55:31.71	—	—	—	吸湿、保湿和抗氧化活性
	FTPS-2	1.78×10 ⁵	葡萄糖胺:半乳糖胺:葡萄糖:甘露糖=3.35:4.86:8.90:47.78:35.10	α-吡喃糖	—	—	
银耳子实体多糖 ^[13]	TFP60-2a	6.18×10 ⁵	鼠李糖:岩藻糖:木糖:甘露糖:葡萄糖=0.34:1.07:1.00:1.47:0.46	—	否	银耳多糖在30~200 ℃内具有良好的热稳定性推测该银耳多糖在溶液中以随机线团存在	—
银耳子实体多糖 ^[14]	TFP1	5.8×10 ⁵	甘露糖:木糖:岩藻糖:葡萄糖:葡萄糖醛酸=1.91:0.1:2.49:6.23:0.95	α-吡喃糖	—	多糖链可能通过范德华力和氢键相互作用形成缠绕,有多个分支,形成局部堆积	吸湿、保湿和抗氧化活性
银耳子实体多糖 ^[15]	TL04	2.03×10 ⁶	鼠李糖:甘露糖:葡萄糖=1:5.04:1.87	吡喃糖	—	多糖主链由(1→2)-和(1→4)-连接的甘露糖和(1→3)-连接的葡萄糖组成	抑制活性氧积累、乳糖脱氢酶释放和caspase-3活性,对PC12细胞损伤具有神经保护作用
银耳子实体多糖 ^[16]	CWE	1.92×10 ⁴	岩藻糖:半乳糖:木糖:甘露糖=1.7:1.0:3.9:6.0(研究中仅计算中性糖组成,下同)	—	—	线状结构较多	
	HWE	1.88×10 ⁷	岩藻糖:葡萄糖:木糖:甘露糖=3.2:1.0:5.8:8.7	α-D-吡喃糖	—	片状结构较少,但线状结构较多	抗消化性
	ALE	3.57×10 ⁶	岩藻糖:木糖:甘露糖=1.0:1.6:2.6	—	—		
	ACE	3.74×10 ⁴	半乳糖:葡萄糖=1.0:9.8	β-半乳糖、α-葡萄糖	—	既具有较大的片状结构又有较细的线状结构。	

注: TFP-1、TFP-2、TFP-3、FTPS-1、FTPS-2、TFP60-2a、TFP1、TL04为银耳多糖纯化后所得的银耳多糖组分,CWE、HWE、ALE、ACE分别为银耳经冷水浸提、热水浸提、碱浸提、酸浸提所得的银耳多糖组分。

因其具有抗癌活性、提高常规化疗药物的疗效且副作用小而引起广泛的研究^[22]。近年来对银耳多糖的功能性研究表明,银耳多糖通过诱导癌细胞凋亡从而具有抑制肿瘤的功效。Shi 等^[23]研究表明银耳多糖能够激活 A549 细胞中 sirtuin 1(SIRT1)蛋白的表达,从而导致 p62 表达增加,降低 p53 乙酰化和 B 细胞淋巴瘤相关蛋白的表达,最终减弱脂多糖(LPS)诱导的凋亡细胞死亡和自噬。Han 等^[24]的研究首次证实了银耳多糖通过 Bcl-2/Bax 和 caspase-3 凋亡途径诱导 PC-3 前列腺癌细胞凋亡。近年来的研究表明,银耳多糖对肝癌细胞具有抑制作用。银耳多糖能抑制 HepG22 细胞的生长,当浓度为 50 mg/mL 浓度时,抗肿瘤活性可达 92%^[25]。韩英等^[26]在银耳多糖对荷 H22 肝癌小鼠的抑瘤作用研究中发现,银耳多糖使多种与肿瘤相关的基因发生表达差异,其中抗原呈递基因(CD1A/CD1D)上调可以增强免疫系统对肿瘤的杀伤作用,P53 上调将受抑制的细胞停留在 G1 期。苏巧玲等^[27]发现银耳多糖可下调小鼠 B16 黑色素瘤细胞中过氧化物酶体增殖物激活受体(PPAR γ)的表达,上调 CD86 和 CD206 的表达,对黑色素瘤细胞转移具有抑制作用。银耳多糖对多种癌细胞具有抑制作用(图 1),包括 A549(人类肺泡基底上皮细胞)、PC-3(人前列腺癌细胞)、HepG22

(人肝癌细胞)、H22(小鼠肝癌细胞)以及 B16(黑色素瘤细胞)。

2.3 免疫调节活性

银耳多糖可以通过调节体液免疫、细胞免疫和免疫因子影响机体免疫(图 2)。徐文清^[28]通过对小鼠进行溶血素实验表明,银耳孢子多糖可增加小鼠溶血素含量,显著提高免疫低下小鼠体液免疫功能。银耳多糖通过刺激巨噬细胞、T 细胞,提高机体细胞免疫功能。湛淑平等^[29]探究了不同食用菌的免疫调节作用,发现 10 μ g/mL 的银耳多糖溶液能极大地促进肿瘤坏死因子 TNF- α 的分泌和增强 RAW264.7 巨噬细胞的吞噬能力。Shi 等^[30]研究了银耳多糖对烧伤和铜绿假单胞菌感染所致脓毒症小鼠外周血 T 细胞的影响,发现银耳多糖通过调节小鼠 CD4⁺CD25^{high} 调节性 T 细胞的活性,抑制白细胞介素-10(IL-10)的产生,并通过激活 CD4⁺T 细胞介导免疫,诱导 Th2/Th1 达到新的平衡从而减轻烧伤小鼠脓毒症。Zhou 等^[31]探讨银耳多糖对环磷酰胺诱导的免疫缺陷小鼠的作用研究发现,高剂量的银耳多糖(80 mg/kg)对小鼠的免疫增强效果最佳,可上调血清中 IL-2、IL-12、INF- γ 、IgG 水平,降低血清中 TGF- β 水平,显著促进肝、脾中 IL-1 β 、IL-4、IL-12 mRNA 表达,抑制 TGF- β mRNA 表达。因此,免疫功能实验结果表明银耳多

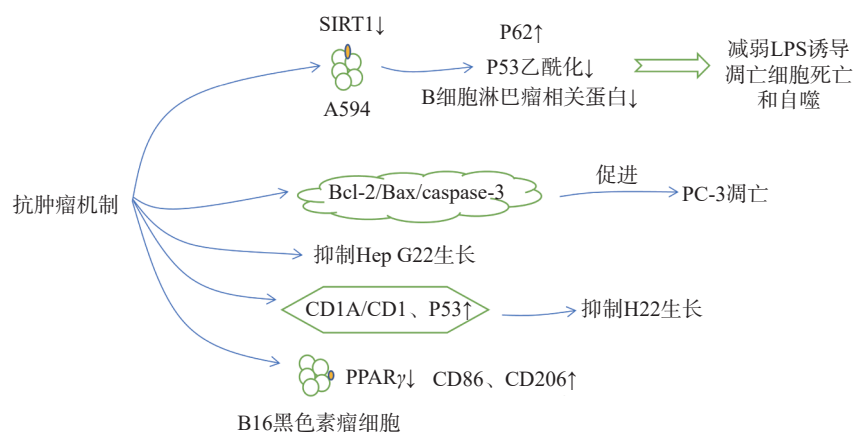


图 1 银耳多糖的抗肿瘤机制

Fig.1 Antitumor mechanism of *Tremella fuciformis* polysaccharide

糖对免疫缺陷小鼠的体液免疫和细胞免疫均有影响,并通过免疫细胞调控细胞免疫因子的合成和分泌。

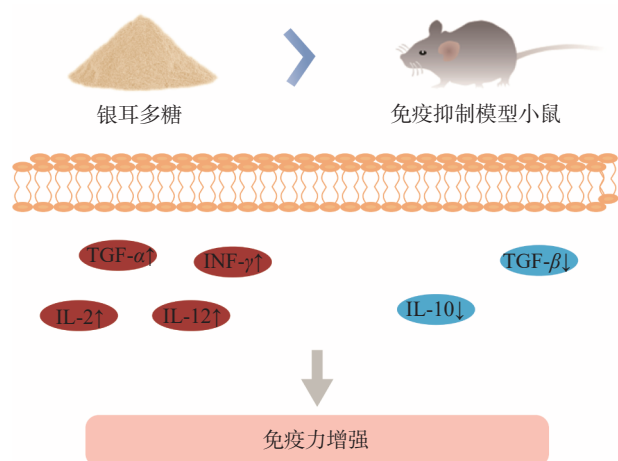


图 2 银耳多糖体内免疫调节机制

Fig.2 Immunomodulatory mechanisms of *Tremella fuciformis* polysaccharides in vivo

2.4 改善记忆力

引起记忆力下降的原因有很多,如大脑炎症、肿瘤、阿尔茨海默病等疾病严重的损害了神经细胞的功能,导致记忆力损伤。Kim 等^[32]研究发现,小鼠每日口服银耳多糖(100 或 400 mg/kg),14 d 后可显著逆转东莨菪碱诱导的学习和记忆障碍,增加中枢胆碱能的活性,从而改善小鼠的记忆力和学习能力。马素好等^[33]在通过针灸建立脑缺血学习记忆障碍小鼠模型后,采用跳台法、避暗法检测小鼠的行为学,发现银耳多糖可通过减少缺血脑组织病理改变、有害代谢物产生以及减轻脑神经元损伤等多种途径改善小鼠的学习和记忆能力。Park 等^[34]用银耳多糖对具有学习记忆障碍的大鼠进行饮食干预后发现 PC12 细胞的神经突生长与银耳多糖食用量呈剂量依赖关系,银耳多糖能增加大鼠脑内葡萄糖代谢,改善大鼠的记忆力。该研究还指出银耳多糖通过调控海马体中的腺苷反应元件结合蛋白信号通路和胆碱能系统改善认知功能。

因此,银耳多糖能影响脑组织中海马区神经细胞的基因表达活动、增加中枢胆碱能的活性以及保护脑部神经细胞等多种途径提高机体的认知能力,对于记忆力功能衰退的预防和改善具有一定的作用。研究表明,多糖还可通过其他途径间接影响记忆力,如黄精多糖和玉竹多糖可减轻细胞氧化损伤,间接改善学习记忆力^[35]。因此,银耳多糖改善记忆力的途径及机制有待深入研究。

2.5 降低血糖和血脂活性

银耳多糖通过调节糖代谢酶的活性,促进胰岛素的分泌及提高外周组织对葡萄糖的利用,进而阻断胆固醇的肝肠循环从而达到降血糖血脂的作用^[36]。Bach 等^[37]利用腹腔注射链脲佐菌素构建 1 型糖尿病大鼠模型,研究发现银耳胞外多糖能增加大鼠高密度脂蛋白胆固醇水平,降低甘油三酯、谷丙转氨酶和尿素水平,从而有效减轻 1 型糖尿病的病症。Cho 等^[38]研究发现,银耳多糖可通过调节 PPAR- γ 介导的脂代谢而改善胰岛素敏感性,从而发挥降血糖作用。Tu 等^[39]的研究表明,添加 0.6% 银耳多糖可提高淀粉凝胶中高分子量 α -糊精的比例,并与葡萄糖协同转运蛋白 1(SGLT 1)结合,延缓葡萄糖从淀粉凝胶中的扩散,从而起到降血糖的作用。该研究还指出,银耳多糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性与其分子结构有关, β -葡聚糖和 O-乙酰化葡萄糖醛酸甘露聚糖与 α -葡萄糖苷酶的结合亲和力高于葡萄糖醛酸甘露聚糖。

侯建明等^[40]发现,银耳多糖分子中含有羟基、羧基和氨基具有极强的亲水性,可吸附脂类和胆固醇,从而有利于肠道中脂类和胆固醇的排出。Pau-Roblo 等^[41]表示糖醛酸具有吸附胆固醇的能力。Chiu 等^[42]研究发现银耳多糖由于糖醛酸含量高、黏性大,能减少小鼠肠道中的脂肪吸收,从而降低小鼠体脂百分比和血清总胆固醇含量。因此,具有高粘度和高糖醛酸含量的银耳多糖有利于胆固醇的排出。Zhang 等^[43]的研究发现,高粘性的银耳多糖对胆固醇具有较强的吸附能力,从而降低小鼠体内 TC、

TG、LDL-C 含量,起到降血脂的作用,同时多糖的表面结构也对降脂活性产生了影响。相较于表面致密光滑、呈现海绵状结构的银耳多糖,表面粗糙、沟壑和孔洞较多的银耳多糖具有更高的胆固醇吸收能力,促进胆汁中胆固醇向胆汁酸的转化,降低血脂水平。此外,银耳多糖还通过调控与脂质代谢相关的基因达到降血脂的目的。银耳多糖与降低细胞中 PPAR- γ 、C/EBP α 和瘦素 mRNA 的表达呈量效关系,从而抑制 3T3-L1 脂肪细胞的分化^[44]。

以上研究证实了银耳多糖的结构对降血糖血脂功能产生重要影响。银耳多糖在改善饮食相关代谢综合征方面具有广阔的应用前景。但是目前的研究仍不够深入,关于银耳多糖降血糖血脂的构效关系尚不明确,同时银耳多糖作为大分子,其在体内如何降解及其降血糖血脂的作用机制仍未探明。

2.6 抗炎活性

银耳多糖在预防和改善炎症方面具有多途径、多靶点、低毒性、副作用小等独特的优势。Toll 样受体 4(TLR4)是脂多糖(LPS)的识别受体, LPS 与 TLR4 结合后能促进促炎信号通路 Akt、MAPK 和 NF- κ B 的活化,银耳多糖能抑制促炎信号通路,减少促炎因子的产生,从而起到抗炎作用。Kham 等^[45]研究发现,经银耳多糖处理后炎症小鼠 TLR4、TNF- α 、IL-6 基因表达明显下调。银耳多糖处理可显著抑制巨噬细胞 Akt、p38MAPK 和 NF- κ B 的活化,并抑制 MCP-1 的表达,从而减轻炎症反应^[46]。王昭晶等^[47]采用实时荧光定量 PCR 探究银耳多糖抗炎症作用,研究发现其对脂多糖诱导 RAW264.7 细胞产生的炎症因子 TNF- α 、IL-6 和 COX-2 具有显著的抑制作用。近年来逐渐兴起从肠道菌群的角度研究银耳多糖的抗炎活性机制。Xu 等^[48]研究发现,高剂量的银耳多糖可刺激 Foxp3⁺ T 细胞,促进抗炎细胞因子的产生,16S rRNA 测序分析表明,银耳多糖能显著增加肠道菌群多样性。此研究首次通过肠道菌群和代谢物途径分析确定银耳多糖在结肠炎中的潜在机制。随后,Xie 等^[49]指出银耳多糖可以通过调节肠道菌群减少小鼠的特应性皮炎。

综上所述,银耳多糖通过抑制 TLR4/Akt/MAPK/NF- κ B 促炎信号通路,调节 RAW264.7 和 Foxp3⁺ T

细胞从而减少炎症因子 TNF- α 、IL-6 和 COX-2 的产生。同时,银耳多糖通过提高肠道有益菌群的多样性和丰富度,调节炎症因子的产生,增强抗炎活性。目前,对银耳多糖的功能性研究多集中在抗氧化、调节免疫活性、降血糖血脂等方面,其抗炎活性的作用机制仍需进一步深入研究。

2.7 结构修饰及其功能性研究

银耳多糖具有诸多生物活性,已有的研究表明银耳多糖经硫酸酯化、磷酸酯化、羧甲基化、乙酰化、接枝等有效的修饰能提高其生物活性,包括增强吸湿保湿性能、提高抗氧化活性、促进淋巴细胞的增殖以及减少白细胞的降低。银耳多糖结构修饰及其功能如表 3 所示。

3 银耳多糖产品开发应用

3.1 银耳多糖在食品中的应用

银耳多糖的多羟基大分子结构可与油相小液滴以范德华力结合,并且银耳多糖具有一定的粘度能有效阻止小液滴之间的聚集,起到了乳化的作用^[57]。同时,银耳多糖具有高粘度、剪切稀释性、食品环境中的流变稳定性等特点,可广泛用作食品增稠剂^[58]。黄明德等^[59]对银耳多糖的乳化性研究发现 1% 浓度的银耳粗多糖溶液对大豆色拉油的乳化性能优于吐温 60、司盘 60、分子蒸馏单甘酯和大豆磷脂。张珊珊等^[60]将银耳多糖替代部分乳化剂和增稠剂添加到花生蛋白饮料中提高了饮料稳定性和质构特性。在面团中添加银耳能加强面筋蛋白的 α -螺旋、 β -折叠,提高结合水、缓慢消化淀粉和抗性淀粉的含量,增加面条中风味物质的含量^[61]。基于银耳多糖和黑木耳多糖具有降血糖活性的功能,羿月同等^[62]以银耳多糖和黑木耳多糖为主要原料研制了降血糖代餐饼干,此研究为银耳多糖代餐食品的开发应用提供了新思路。

银耳多糖不仅具有丰富的功能活性,并且能赋予食品良好的加工特性。目前研制了银耳酸奶、银耳挂面、银耳果冻、银耳多糖谷物蛋白固体饮料等银耳系列食品。

3.2 在化妆品行业的应用

银耳多糖具有吸湿、保湿及抗氧化能力。研究

表 3 银耳多糖结构修饰实例研究
Table 3 studies on structural modification of *Tremella fuciformis* polysaccharide

研究方法	研究结果	参考文献
磷酸酯化银耳多糖	修饰的银耳多糖干预后,比模型组白细胞数量增加了 39.97%,有助于保护机体的造血组织	[50]
硫酸化银耳多糖	修饰的银耳多糖可刺激脾淋巴细胞的增殖(增加了 202.41%),同时促进外周血淋巴细胞的增殖(增加了 31.00%),提高血清凝血抑制抗体滴度(增加了 49.14%)	[51]
硫酸化银耳多糖	修饰的银耳多糖可提高银耳多糖的淋巴细胞增殖活性和细胞介素-2(IL-2)mRNA 的表达	[52]
羧甲基化银耳多糖	修饰的银耳多糖具有较好的体外抗氧化活性(提高了 210%)、吸湿(提高了 400%)和保湿(提高了 50%)性能	[53]
乙酰化银耳多糖	与未修饰的银耳多糖相比修饰的银耳多糖对 DPPH 自由基的清除能力有所增强	[54]
儿茶素接枝银耳多糖	与未修饰的银耳多糖相比修饰的银耳多糖体外抗氧化活性高了 41.67%	[55]
低密度脂蛋白-银耳多糖配合物	修饰的银耳多糖体外抗氧化能力进一步提高	[56]

表明银耳中羟基的数量与其溶解度有关,羟基和羧基可以与水形成氢键,并且键与键之间相互交织形成了空间网络,以增强保水性^[63]。多糖链上羟基、乙酰基等亲水基团越多,其溶解度越好,作为注射剂或保湿剂的效果越好^[64]。陈海燕等^[65]利用响应面法优化保湿霜的配方含量,当银耳粗多糖提取液浓度为2%,保湿霜的保湿效果最佳。陈云波等^[66]研究证明银耳多糖具有良好的保湿效果,具有改善肤质、修护肌肤屏障、抗氧化等多重作用,是精华液、乳液等化妆品的优良添加剂。

3.3 在医药保健品行业的应用

银耳多糖作为一种安全无毒的天然活性产品,具有合成药物无法比拟的安全性。银耳多糖具有抗肿瘤、调节免疫活性、降血糖血脂、抗辐射、抗溃疡等作用,以银耳多糖为主要成分研发出了复方银耳鱼肝油乳、银耳孢糖胶囊、银耳孢糖肠溶胶囊、辅助降糖片、瘦身胶囊等产品^[36]。此外,银耳多糖的酸性基团在水溶液中带负电荷,可与壳聚糖组成纳米结构,使得银耳多糖具有良好的缓释性。将银耳多糖与壳聚糖、聚乙二醇混合制备成凝胶敷料,可达到长效、温和、促进创面愈合的目的^[67]。

银耳多糖具有独特的理化性质,如剪切稀释、弱凝胶、乳化等使其在液体产品中具有良好的稳定性。然而,银耳多糖的结构复杂多样性是研究结构与药理功能关系的巨大挑战,且从银耳提取得到的多糖质量不稳定以及发酵制得的多糖成本较高导致了银耳多糖在各个领域的开发应用受到影响^[67]。

4 结论与展望

银耳多糖分子具有结构复杂和活性多样的特点,既是银耳多糖研究的优势又是挑战。本文综述了银耳多糖在增强免疫、抗氧化、降血糖血脂、抗炎、改善记忆力以及结构修饰等方面的内容。多糖作为银耳主要的功能性物质一直都是研究的热点,但对其的研究仍存在着一些问题,本文在已有的研究基础上提出展望,为银耳多糖的研究开发提供参考:a. 银耳多糖作为生物大分子具有复杂的结构,其活性中心的构效关系尚不清楚,可分析不同来源银耳多糖的结构和活性差异的构效关系;b. 对于银耳多糖功能性的研究大多停留在动物和细胞层次上,对其作用机制的研究仍不够深入;c. 银耳中除了多糖外还含有蛋白质、矿物质等多种营养物质,提取所得多糖的纯度难以得到保证;d. 近年来食用菌多糖对肠道菌群的调节作用备受关注,但相关研究表明银耳多糖对肠道菌群的作用较少,未来可进一步从肠道菌群的角度探讨银耳多糖及其代谢产物在消化道中的降解和代谢变化,以此探究其发挥生物活性的机制;e. 对银耳多糖的功能性研究多集中于抗氧化、增强免疫力、辅助降血糖血脂方面,今后可从银耳多糖抗辐射及肠道保护作用方面深入研究。

未来需要进一步优化银耳多糖的制备技术,结

合现代分析技术解析银耳多糖的结构,在化学分析技术的基础上结合物理、生物等技术手段对银耳多糖的功能及作用机理进行深入的研究,为实现其在多个领域的大规模、市场化应用提供理论依据。

参考文献

- [1] 杨武干, 吴刚, 李彦生. 银耳生物学特性及袋料栽培新技术[J]. 农村科技, 2016(11): 61-63. [YANG W G, WU G, LI Y S. Biological characteristics of Tremella and new cultivation techniques of bag material[J]. Rural Science and Technology, 2016(11): 61-63.]
- [2] 潘春华. “菌中之冠”话银耳[J]. 绿化与生活, 2015(9): 42. [PAN C H. "The crown of bacteria" is white fungus[J]. Greening and Life, 2015(9): 42.]
- [3] 鄢雨季, 邓佳颖, 魏正勋, 等. 银耳多糖的制备、功能和产品开发的研究进展[J]. 食药菌, 2018, 26(3): 161-165. [WU Y J, DENG J Y, WEI Z X, et al. Research progress on preparation, characteristics and product development of functional polysaccharide of Tremella fuciformis[J]. Medicinal Food Bacteria, 2018, 26(3): 161-165.]
- [4] 李曦, 邓兰, 周娅, 等. 金耳、银耳与木耳的营养成分比较[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 77-82. [LI X, DENG L, ZHOU Y, et al. Nutritional components comparison between Tremella aurantialba, Tremella fuciformis and Auricularia auricula[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 77-82.]
- [5] 吴振亚. 银耳多糖的提取纯化、理化性质及抗氧化活性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015. [WU Z Y. Study on extraction, purification, physico-chemical characteristics and antioxidant activity of Tremella fuciformis polysaccharide[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.]
- [6] 魏正勋. 银耳子实体多糖的提取分离、结构鉴定及生物活性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015. [WEI Z X. Extraction, separation, purification, structure analysis and biological activity of Tremella fuciformis polysaccharide[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.]
- [7] 杨嘉丹, 刘婷婷, 张闪闪, 等. 微波辅助提取银耳多糖工艺优化及其流变、凝胶特性[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 289-295. [YANG J D, LIU T T, ZHANG S S, et al. Optimization of microwave-assisted extraction and rheological and gelling properties of polysaccharide from Tremella fuciformis[J]. Food and Science, 2019, 40(14): 289-295.]
- [8] 刘健影. 银耳多糖提取工艺优化及其在饮料中的应用[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015. [LIU J Y. Process optimization on the extraction of Tremella fuciformis polysaccharide and its application in beverages[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.]
- [9] 张闪闪, 杨嘉丹, 赵文婷, 等. 加压热水浸提银耳多糖的工艺优化、结构鉴定及抗氧化活性分析[J/OL]. 吉林农业大学学报: 1-11[2022-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200910.1512.004.html>. [ZHANG S S, YANG J D, ZHAO W T, et al. Process optimization, structure identification and antioxidant activity analysis of polysaccharides from Tremella fuciformis by pressurized hot water extraction method[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University: 1-11[2022-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200910.1512.004.html>.]
- [10] 马霞, 杨萌, 何艳, 等. 一种从发酵液中提取银耳多糖的方法: 上海, 201910265408.4[P]. 2019-06-04. [MA X, YANG M, HE Y, et al. Method for extracting Tremella polysaccharide from fermentation broth: Shanghai, 201910265408.4[P]. 2019-06-04.]
- [11] 王久莹. 银耳芽孢多糖的结构表征、生物活性研究及产品

- 开发[D]. 广州: 华南农业大学, 2018. [WANG J Y. The structure feature, biological activity and product development of polysaccharide from blasto spores of *Tremella fuciformis*[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.]
- [12] YANG M, ZHANG Z L, HE Y, et al. Study on the structure characterization and moisturizing effect of *Tremella polysaccharide* fermented from GCMCC5.39[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2021, 10(4): 471–479.
- [13] 邓佳颖. 银耳子实体多糖的分离纯化、结构鉴定、溶液构象和流变学特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018. [DENG J Y. Isolation, purification, structure identification, solution conformation and rheological properties of polysaccharide from *Tremella fuciformis* fruiting body[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.]
- [14] YUAN H J, DONG L, ZHANG Z Y, et al. Production, structure, and bioactivity of polysaccharide isolated from *Tremella fuciformis*[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 1010–1017.
- [15] JIN Y X, HU X Y, ZHANG Y, et al. Studies on the purification of polysaccharides separated from *Tremella fuciformis* and their neuroprotective effect[J]. *Molecular Medicine Reports*, 2016, 13(5): 3985–3992.
- [16] SHI X D, FENG J W, WANG S Y, et al. Primary structure, physicochemical properties, and digestive properties of four sequentially extracted polysaccharides from *Tremella fuciformis*[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 115: 105005.
- [17] 张力凡, 陈洁, 许飞, 等. 古田银耳粗多糖热水提取工艺正交优化及功能活性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 48–56. [ZHANG L F, CHENG J, XU F, et al. Orthogonal optimization of hot water extraction process of Gutian *Tremella fuciformis* crude polysaccharide and its functional activity[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 48–56.]
- [18] 张先廷. 银耳多糖的提取及抗氧化活性研究[J]. 辽宁化工, 2015, 44(9): 1158–1159. [ZHANG X T. Study on extraction and antioxidant activity of *Tremella* polysaccharide[J]. Liaoning Chemical Industry, 2015, 44(9): 1158–1159.]
- [19] WEN L R, GAO Q, MA C, et al. Effect of polysaccharides from *Tremella fuciformis* on UV-induced photoaging[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 20: 400–410.
- [20] 吴琼, 代永刚, 高长城, 等. 酸降解水溶性银耳多糖及抗氧化作用研究[J]. 食品科学, 2009, 30(13): 93–96. [WU Q, DAI Y G, GAO C C, et al. Antioxidations of acid-degrade water-soluble polysaccharides from *Tremella fuciformis*[J]. Food Science, 2009, 30(13): 93–96.]
- [21] LI P, JIANG Z, SUN T, et al. Comparison of structural, antioxidant and immuno-stimulating activities of polysaccharides from *Tremella fuciformis* in two different regions of China[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(8): 1942–1953.
- [22] XIE L M, SHEN M Y, HONG Y Z, et al. Chemical modifications of polysaccharides and their anti-tumor activities[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115436.
- [23] SHI X L, WEI W F, WANG N. Tremella polysaccharides inhibit cellular apoptosis and autophagy induced by *Pseudomonas aeruginosa* lipopolysaccharide in A549 cells through sirtuin 1 activation[J]. *Oncology Letters*, 2018, 15(6): 9609–9616.
- [24] HAN C K, CHIANG H C, LIN C Y, et al. Comparison of immunomodulatory and anticancer activities in different strains of *Tremella fuciformis* Berk[J]. *The American Journal of Chinese Medicine*, 2015, 43(8): 1637–1655.
- [25] CHEN B. Optimization of extraction of *Tremella fuciformis* polysaccharides and its antioxidant and antitumor activities *in vitro*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 81(2): 420–424.
- [26] 韩英, 徐文清, 杨福军, 等. 银耳多糖的抗肿瘤作用及其机制[J]. 医药导报, 2011, 30(7): 849–852. [HAN Y, XU W Q, YANG F J, et al. Tumor-inhibitory effect and mechanism of polysaccharide from *Tremella fuciformis* in mice[J]. *Herald of Medicine*, 2011, 30(7): 849–852.]
- [27] 苏巧玲, 李秀敏. 银耳多糖抗 B16 黑色素瘤肺转移的作用及机理研究[J]. 药学与临床研究, 2021, 29(5): 331–335. [SU Q L, LI X M. Effect and mechanism of *Tremella fuciformis* polysaccharide on lung metastasis of B16 melanoma[J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2021, 29(5): 331–335.]
- [28] 徐文清. 银耳孢子多糖结构表征、生物活性及抗肿瘤作用机制研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. [XU W Q. Study on structure feature biological activity and anti-tumor mechanism of polysaccharide from spore of *Tremella fuciformis* Berk[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.]
- [29] 湛淑平, 李明智, 董楠, 等. 不同食用菌多糖复配物对 RAW264.7 巨噬细胞的免疫调节作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 366–372. [CHEN S P, LI M Z, DONG N, et al. Immunomodulatory effects of different edible fungi polysaccharide complexes on RAW264.7 macrophages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 366–372.]
- [30] SHI Z W, LIU Y, XU Y, et al. Tremella polysaccharides attenuated sepsis through inhibiting abnormal CD4⁺ CD25^{high} regulatory T cells in mice[J]. *Cellular Immunology*, 2014, 288(1–2): 60–65.
- [31] ZHOU Y L, CHEN X Y, YI R K, et al. Immunomodulatory effect of Tremella polysaccharides against cyclophosphamide-induced immunosuppression in mice[J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 239.
- [32] KIM J H, HA H C, LEE M S, et al. Effect of *Tremella fuciformis* on the neurite outgrowth of PC12h cells and the improvement of memory in rats[J]. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2007, 30(4): 708–714.
- [33] 马素好, 赵建华. 银耳多糖对反复脑缺血再灌注小鼠学习记忆的影响[J]. 河南医学高等专科学校学报, 2016, 28(2): 65–67. [MA S H, ZHAO J H. Influence on the learning and memory of Tremella polysaccharides on repeated cerebral ischemia and reperfusion in mice[J]. Journal of Henan Medical College, 2016, 28(2): 65–67.]
- [34] PARK H J, SHIM H S, AHN Y H, et al. Tremella fuciformis enhances the neurite outgrowth of PC12 cells and restores trimethyltin-induced impairment of memory in rats via activation of CREB transcription and cholinergic systems[J]. *Behavioural Brain Research*, 2012, 229(1): 82–90.
- [35] 李孝娟, 周思诗, 杨梦青, 等. 3 种百合科植物多糖对学习记忆力的改善及其机制的研究进展[J]. 四川畜牧兽医, 2022, 49(5): 24–26. [LI X J, ZHOU S S, YANG M Q, et al. Research progress on the improvement of learning and memory by polysaccharides from three Liliaceae plants and its mechanism[J]. Sichuan Animal Husbandry and Veterinary, 2022, 49(5): 24–26.]
- [36] 陈岗. 银耳多糖的功能特性及其应用[J]. 中国食品添加剂, 2011(4): 144–148. [CHENG G. Functional characteristics and application of Tremella polysaccharides[J]. China Food Additives, 2011(4): 144–148.]
- [37] BACH E E, COSTA S G, OLIVEIRA H A, et al. Use of

- polysaccharide extracted from *Tremella fuciformis* Berk for control diabetes induced in rats[J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2015, 27(7): 585–591.
- [38] CHO E J, HWANG H J, KKIM S W, et al. Hypoglycemic effects of exopolysaccharides produced by mycelial cultures of two different mushrooms *Tremella fuciformis* and *Phellinus baumii* in ob/ob mice[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 75(6): 1257–1265.
- [39] TU J, ADHIKARI B, BRENNAN M A, et al. Acidic polysaccharides from black ear and silver ear mushrooms modulated the release and transport of glucose from gelatinised sorghum starch during digestion[J]. *Food Chemistry*, 2023, 411: 135426.
- [40] 侯建明, 陈刚, 蓝进. 银耳多糖对脂类代谢影响的实验报告[J]. 中国疗养医学, 2008(4): 234–236. [HOU J M, CHENG G, LAN J. Experimental reports for effects of *Tremella* polysaccharide on lipids metabolism[J]. *Chinese Journal of Convalescent Medicine*, 2008(4): 234–236.]
- [41] PAU-ROBOLOT C, COURTOIS B, COURTOIS J. Interactions between polysaccharides uronic acid sequences and lipid molecules[J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2010, 13(4): 443–448.
- [42] CHIU C H, CHIU K C, YANG L C. Amelioration of obesity in mice fed a high-fat diet with uronic acid-rich polysaccharides derived from *Tremella fuciformis*[J]. *Polymers*, 2022, 14(8): 1514.
- [43] ZHANG S S, XU X L, CAO X, et al. The structural characteristics of dietary fibers from *Tremella fuciformis* and their hypolipidemic effects in mice[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(2): 503–511.
- [44] JEONG H J, YOON S J, PYUN Y R. Polysaccharides from edible mushroom *Hinmogi* (*Tremella fuciformis*) inhibit differentiation of 3T3-L1 adipocytes by reducing mRNA expression of PPAR γ , C/EBP α , and leptin[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2008, 17(2): 267–273.
- [45] KHAM T J, XU X, XIE X, et al. *Tremella fuciformis* crude polysaccharides attenuates steatosis and suppresses inflammation in diet-induced NAFLD mice[J]. *Current Issues in Molecular Biology*, 2022, 44(3): 1224–1234.
- [46] RUAN Y, LI H, PU L M, et al. *Tremella fuciformis* polysaccharides attenuate oxidative stress and inflammation in macrophages through miR-155[J]. *Analytical Cellular Pathology*, 2018, 2018: 1–10.
- [47] 王昭晶, 罗耀辉, 曾亚威. 4 种银耳属多糖的理化特征、微观结构及其抗氧化和抗炎作用研究[J]. 中国药理学杂志, 2019, 54(21): 1788–1793. [WANG Z J, LUO D H, ZENG Y W. Physicochemical properties, microstructure, and antioxidant and anti-inflammation effects of four major polysaccharides from *Tremella*[J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 2019, 54(21): 1788–1793.]
- [48] XU Y Y, XIE L Y, ZHANG Z Y, et al. *Tremella fuciformis* polysaccharides inhibited colonic inflammation in dextran sulfate sodium-treated mice via Foxp3⁺ T cells, gut microbiota, and bacterial metabolites[J]. *Frontiers in Immunology*, 2021, 12: 648162.
- [49] XIE L N, YANG K Y, LIANG Y H, et al. *Tremella fuciformis* polysaccharides alleviate induced atopic dermatitis in mice by regulating immune response and gut microbiota[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 3027.
- [50] 杨萍. 银耳多糖磷酸酯化结构修饰及辐射防护作用的研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2013. [YANG P. Study on synthesis phosphated derivatives of polysaccharide from *Tremella fuciformis* Berk and its effects of radiation protection[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2013.]
- [51] ZHAO X N, HU Y L, WANG D Y, et al. The comparison of immune-enhancing activity of sulfated polysaccharides from *Tremella* and *Condonopsis pilosula*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1): 438–443.
- [52] 朱广双, 胡元亮, 曹侃, 等. 硫酸化银耳多糖和党参多糖对鸡 T 淋巴细胞增殖及白细胞介素-2mRNA 表达水平的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(7): 2535–2540. [ZHU G S, HU Y L, CAO K, et al. Effect of sulfated polysaccharides from *Tremella* and *Condonopsis pilosula* on T lymphocyte proliferation and mRNA expression level of interleukin-2 of broilers[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(7): 2535–2540.]
- [53] WANG X M, ZHANG Z S, ZHAO M X. Carboxymethylation of polysaccharides from *Tremella fuciformis* for antioxidant and moisture-preserving activities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 72: 526–530.
- [54] 徐兵, 陆灏钰, 徐倩, 等. 银耳多糖乙酰化修饰及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(18): 18–24. [XU B, LU H Y, XU Q, et al. Acetylation modification and antioxidant activity of polysaccharide from *Tremella fuciformis*[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(18): 18–24.]
- [55] LIU J, MENG C G, YAN Y H, et al. Structure, physical property and antioxidant activity of catechin grafted *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 82: 719–724.
- [56] 陈雪. 低密度脂蛋白-银耳多糖复合物的制备、表征及抗氧化性研究[D]. 保定: 河北大学, 2021. [CHEN X. Preparation, characterization and antioxidant activity of low density lipoprotein-*Tremella fuciformis* polysaccharide complex[D]. Baoding: Hebei University, 2021.]
- [57] 张黎君. 银耳多糖的功能及应用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(10): 148–150. [ZHANG L J. Research progress on function and application of *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. *Food Safety Guide*, 2022(10): 148–150.]
- [58] XU J Y, ZOU Y, GUO L Q, et al. Rheological and microstructural properties of polysaccharide obtained from the gelatinous *Tremella fuciformis* fungus[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 228: 153–164.
- [59] 黄晓德, 赵伯涛, 钱骅, 等. 银耳粗多糖乳化性及稳定性研究[C]//科技与产业对接—CIFST-中国食品科学技术学会第十届年会暨第七届中美食品业高层论坛论文摘要集. 南京: 中国食品科学技术学会, 2013: 253. [HUANG X D, ZHAO B T, QIAN H, et al. Research on emulsification and stability of the crude polysaccharide from *Tremella fuciformis*[C]//Technology and industry docking - CIFST - The 10th annual conference of China food science and technology society and the 7th China food industry high level forum. Nanjing: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013: 253.]
- [60] 张姗姗, 吴琼, 王冰聪. 银耳多糖对花生蛋白饮料稳定性的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(7): 200–204. [ZHANG S S, WU Q, WANG B C. Effects of *Tremella fuciformis* polysaccharides on stability of peanut protein beverage[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(7): 200–204.]
- [61] ZHANG L F, CHENG J, XU F, et al. Effect of *Tremella fuciformis* on dough structure and rheology, noodle flavor, and quality characteristics[J]. *LWT*, 2022, 172: 114180.
- [62] 羿月同, 张佳星, 贾铭杰, 等. 降血糖代餐饼干的研制[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(4): 39–45. [YI Y T, ZHANG J X, JIA M J, et al. Development of hypoglycemic meal replacement biscuits[J]. *Grain and Food Industry*, 2020, 27(4): 39–45.]

- [63] DU X J, ZHANG J S, LV Z W, et al. Chemical modification of an acidic polysaccharide (TAPA1) from *Tremella aurantialba* and potential biological activities[J]. *Food Chemistry*, 2014, 143: 336–340.
- [64] LU X Y, MO X Y, GUO H, et al. Sulfation modification and anticoagulant activity of the polysaccharides obtained from persimmon (*Diospyros kaki* L.) fruits[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 51(5): 1189–1195.
- [65] 陈海燕, 孙志双, 刘美含, 等. 林蛙皮银耳保湿霜的制备[J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(1): 84–89. [CHEN H Y, SUN Z S, LIU M H, et al. Preparation of *Rana chensinensis* skin Tremella moisturizing cream[J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science Edition)*, 2019, 45(1): 84–89.]
- [66] 陈云波, 黄永军, 蒋细妹, 等. 银耳多糖在化妆品中的应用[J]. *广东化工*, 2022, 49(8): 74–76, 96. [CHEN Y B, HUANG Y J, JIANG X M, et al. Application of Tremella polysaccharide in cosmetics[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(8): 74–76, 96.]
- [67] MA X, YANG M, HE Y, et al. A review on the production, structure, bioactivities and applications of *Tremella* polysaccharides[J]. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 2021, 35(3): 629–661.