

灵芝多糖化学结构及药理作用研究进展

井晓婕, 姜思亮, 夏永刚, 梁军*

黑龙江中医药大学 教育部北药基础与应用研究重点实验室, 黑龙江省中药
及天然药物药效物质基础重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要 灵芝是一种珍贵的药用真菌,在中医药和现代医学中均具有重要价值。中医认为灵芝具有补气安神、止咳平喘的功效。近年来,灵芝多糖作为灵芝的主要活性成分之一,因其表现出抗肿瘤、抗病毒、抗氧化、抗衰老等药理活性而备受关注。本文总结了灵芝多糖的化学结构及药理作用的研究现状,以期

关键词 灵芝多糖;化学结构;药理作用;研究进展

中图分类号:R284;R285

文献标识码:A

文章编号:1002-2392(2026)02-0120-09

DOI:10.19664/j.cnki.1002-2392.260046

灵芝(*Ganoderma*)为多孔菌科真菌赤芝 *Ganoderma lucidum* (Leyss. ex Fr.) KARST. 或紫芝 *Ganoderma sinense* Zhao, Xu et Zhang 的干燥子实体,《神农本草经》中列为上品首位,具有补虚益气、扶正固本、益寿延年之功效。据报道^[1],2024 年全球灵芝提取物市场规模为 6.780 2 亿美元,预计到 2032 年将达到 9.941 3 亿美元,2025—2032 年预测期内的复合年增长率为 4.90%。灵芝中的药效成分种类繁多,目前已发现包括多糖、膳食纤维、低聚糖、三萜类化合物、肽和蛋白质、醇类和酚类、矿物元素、维生素和氨基酸等多种生物活性物质^[2]。其中多糖类化合物作为灵芝的主要活性成分,已展现出免疫调节、抗氧化、抗疲劳、抗肿瘤、调节肠道菌群等多种药理作用^[3],在医药、食品、化妆品等领域展现出巨大的应用前景和潜在价值。因此,本文对灵芝多糖的化学结构及药理作用进行归纳

总结,以期

1 灵芝多糖的化学结构

灵芝多糖主要来源于赤芝 *G. lucidum*,其分子量通常分布于 $10^3 \sim 10^6$ Da。灵芝多糖按单糖组成的类型可大致分为均多糖和杂多糖两类。均多糖通常仅由葡萄糖(Glc)或半乳糖(Gal)构成,其骨架结构多为线性 β -构型的(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)(1 $\rightarrow$ 6)-葡聚糖(Glucan)或半乳聚糖,少数为 α -构型,部分灵芝均多糖存在分支结构^[4]。灵芝杂多糖的结构较为复杂,由不同比例的单糖构成,以 Glc 和 Gal 为主,还可能含有阿拉伯糖(Ara)、木糖(Xyl)、岩藻糖(Fuc)、甘露糖(Man)、鼠李糖(Rha)等多种单糖^[5],部分灵芝杂多糖伴随有蛋白质或多肽残基^[6]。本文总结了灵芝多糖单糖组成及分子量分布,相应多糖骨架及结构片段,见表 1,图 1。

表 1 灵芝多糖的组成及分子量

编号	名称	来源	单糖组成	分子量/Da	文献
1	GLPS	<i>G. lucidum</i>	Glc, Gal, Man	3.90×10^3	[7]
2	GLSP	<i>G. lucidum</i>	Ara, Glc, Gal	$4.00 \times 10^3 \sim 5.49 \times 10^6$	[8]
3	SeMPN	<i>G. lucidum</i>	Glc	9.69×10^3	[9]
4	MPN	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.03×10^4	[9]
5	GLP-2	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.95×10^4	[10]
6	BSEGLP	<i>G. lucidum</i>	Glc, Man, Gal	2.60×10^4	[11]

收稿日期:2025-03-24 修回日期:2025-10-22

基金项目:黑龙江省应用技术与开发项目(GA19C104);黑龙江省双一流学科协同创新成果项目(LJGXCG2023-017);黑龙江省青年岐黄学者培养项目(黑中医药教函[2023]36号)

作者简介:井晓婕(1998-),女,硕士研究生,研究方向:中药药效物质基础研究。

*通信作者:梁军(1984-),女,博士,研究员,硕士研究生导师,研究方向:中药药效物质基础及质量评价研究。

续表 1

编号	名称	来源	单糖组成	分子量/Da	文献
7	GLP - 1	<i>G. lucidum</i>	Glc, Gal, Fuc	1.07×10^5	[10]
8	GLPL1	<i>G. lucidum</i>	Glc	5.20×10^5	[12]
9	GLP - F1 - 1	<i>G. lucidum</i>	Glc, GalA	2.50×10^6	[13]
10	GLPL2	<i>G. lucidum</i>	Glc, Gal, Man	1.54×10^4	[12]
11	PSG - 1	<i>G. atrum</i>	Glc, GlcA, Man, Gal	1.01×10^6	[14]
12	GLP20	<i>G. lucidum</i>	Glc	3.75×10^6	[15]
13	LZ - D - 1	<i>G. lucidum</i>	Fuc, Glc, Gal	2.80×10^4	[16]
14	GLPCW - II	<i>G. lucidum</i>	Glc, Fuc, Gal	1.20×10^4	[17]
15	LMG	<i>G. lucidum</i>	Glc	3.98×10^3	[18]
16	GLSA50 - 1B	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.03×10^5	[19]
17	GLSB50A - III - 1	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.93×10^5	[20]
18	GLPZ - 2	<i>G. lucidum</i>	Glc	2.35×10^4	[21]
19	LZ - C - 1	<i>G. lucidum</i>	Fuc, Glc, Gal	7.00×10^3	[22]
20	GLPC2	<i>G. lucidum</i>	Man, Glc, GlcA, Gal, Xyl, Fuc	2.06×10^4	[23]
21	GLSW50A - II	<i>G. lucidum</i>	Glc	3.86×10^4	[20]
22	GLSWA - I	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.57×10^5	[24]
23	GLP - 2	<i>G. lucidum</i>	Gal, Man, Glc, Ara, Rha	2.20×10^4	[25]
24	PGL	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.26×10^5	[26]
25	FYGL - a	<i>G. lucidum</i>	Rha, Gal, Glc, GlcA	1.00×10^5	[27]
26	LZ - B - 1	<i>G. lucidum</i>	Fuc, Glc, Gal	1.12×10^4	[28]
27	PSG - 2	<i>G. atrum</i>	Gal, Fuc, Glc	6.90×10^4	[29]
28	SP	<i>G. lucidum</i>	Glc	1.00×10^4	[30]
29	GLPZ - 1	<i>G. lucidum</i>	Glc, Gal	6.61×10^3	[31]
30	SGL90 - 1	<i>G. lucidum</i>	Man, Glc, Gal, Fuc	6.40×10^3	[32]

灵芝多糖结构复杂程度不一,即使是同种来源的灵芝多糖其结构及组成也具有明显差异。有些灵芝多糖无支链或支链较短,而有些则形成高度复杂的分支。例如 SGL90 - 1 和 GLP - 2 都来源于赤芝 *G. lucidum*, 但 SGL90 - 1 含 4 种单糖并具有 7 个支链,而 GLP - 2 则只含 Glc 且无支链结构^[25,32]。此外,灵芝多糖的支链可通过 O - 6、O - 4 或 O - 2 等位点连接,进一步增加了其结构的复杂性。灵芝多糖的结构和组成与其生物活性密切相关,因此,灵芝多糖结构的复杂性进一步增加了在构 - 效关系研究中的挑战性。

2 灵芝多糖的药理作用及其机制

灵芝多糖凭借其多靶点、多途径的作用机制,在免疫调节、抗肿瘤、保肝、肠道菌群调节及降血糖等关键生理过程中展现出广泛而重要的药理活性。因此,本文对灵芝多糖上述关键药理作用及机制进行总结、归纳,旨在为开发高效、靶向的灵芝多糖药物提供参考。

2.1 免疫调节作用

免疫是指人体能够识别和清除外来病原体,保护机体免受疾病侵袭的一种生理功能,它对维持人类健康至关重要。灵芝多糖具有独特的双向免疫调节功能,在机体的免疫保护中发挥重要作用。一方面,灵芝多糖可通过刺激单核吞噬细胞(如单核细胞和巨噬细胞)、抗原呈递细胞(DCs)、粒细胞及 NK 细胞等免疫细胞,激活免疫应答^[33]。据报道^[32],灵芝多糖 SGL90 - 1 可通过激活 TLR4/MyD88/NF - κ B 信号通路,显著提高 RAW264.7 巨噬细胞的吞噬能力。此外,富含 β - Glucan - 8 的灵芝多糖提取物 GL - PS 可与巨噬细胞表面的补体 3 特异性结合,触发免疫应答,增强戊糖磷酸途径限速酶 G6PD 的活性,促进 NADPH 生成,从而激活一氧化氮合酶(NOS),进而显著提升巨噬细胞内一氧化氮(NO)的产量,增强其对病原体的杀伤能力^[34]。另一方面,灵芝多糖能够抑制过度免疫反应,从而阻止免疫反应失控,进而增强免疫耐受性^[35]。在

β -glucans 1	非纯多糖 包含 β -glucans和arabinogalactan 2	(1 $\rightarrow$ 4)-GlcP, T-GlcP, (1 $\rightarrow$ 4,6)-GlcP 3	(1 $\rightarrow$ 4)-GlcP, T-GlcP, (1 $\rightarrow$ 4,6)-GlcP 4
$\rightarrow$ 6)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$, and $\rightarrow$ 3)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ residues 5	(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-GlcP, (1 $\rightarrow$ 3,6)- β -D-GlcP, (1 $\rightarrow$ 6)- β -D-GlcP, t- β -D-GlcP 6	Mainly composed of $\rightarrow$ 6)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6)- α -D-GlcP-(1 $\rightarrow$, and $\rightarrow$ 3)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ residues 7	$\rightarrow$ 3)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,6)-GlcP-(1 $\rightarrow$ and $\rightarrow$ 4,6)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$ (21.9: 20.3: 23.7: 24.0: 3.7) 8
Backbone chain: $\rightarrow$ 4)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ and $\rightarrow$ 4,6)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ Branched chains: $\rightarrow$ 6)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ and $\rightarrow$ 4)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ 9	$\rightarrow$ 3)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,6)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$ and $\rightarrow$ 4,6)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$ (23.0: 34.6: 7.0: 14.1: 3.0) A few $\rightarrow$ 6)-D-GlcP-(1 $\rightarrow$ 10	T-GlcP-(1 $\rightarrow$ [6]-GlcP-(1 $\rightarrow$) _n T-GlcP-(1 $\rightarrow$ 4)-GlcAp-(1 $\rightarrow$, and T-GlcP-(1 $\rightarrow$ 4)-GlcAp-(1 $\rightarrow$ [6]-GlcP-(1 $\rightarrow$) 11	$\rightarrow$ 3)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-GlcP-(1 $\rightarrow$) 12
$\rightarrow$ [6)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$ 6)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$ 6)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$ 6)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$) 13	α -L-Fucp 14	β -D-GlcP 15	β -D-GlcP 16
β -D-GlcP 17	β -D-GlcP 18	α -D-GlcP 19	β -D-GlcP 20
β -D-GlcP 21	β -D-GlcP 22	β -D-GlcP 23	β -D-GlcP 24
β -D-GlcP 25	β -D-GlcP 26	β -D-GlcP 27	β -D-GlcP 28
β -D-GlcP 29	β -D-GlcP 30	β -D-GlcP 31	β -D-GlcP 32

图 1 灵芝多糖的基本骨架及结构片段(与表 1 编号一致)

免疫微环境中,T 辅助型 17 细胞(Th17)和免疫抑制调节性 T 细胞(Treg)之间的平衡对于维持人体免疫稳态至关重要,在健康条件下受到严格调控^[36]。Xiang 等^[37]研究表明灵芝多糖 PSG - 1 能够恢复 Th17/Treg

的比例失衡,恢复免疫稳态。在体外实验中,PSG-1对Th17和Treg细胞的分化均有抑制作用。同时,在环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠模型中,PSG-1能够通过调节TGF- β 1和IL-6的浓度,恢复免疫抑制小鼠模型中Th17/Treg细胞比例至正常水平,从而实现免疫与耐受的动态平衡。

2.2 抗肿瘤作用

癌症是世界公认的重大公共卫生问题,其发病率和病死率持续上升,对全球医疗体系构成严峻挑战。灵芝多糖对结肠癌、大肠癌、口腔鳞状细胞癌、肺癌等多种肿瘤表现出显著抑制作用,其作用机制复杂多样。Pan等^[38]研究发现,灵芝破壁孢子粉多糖GLP能够诱导结肠癌细胞特异性靶向自噬,GLP通过激活HT-29和HCT116结直肠癌细胞中MAPK/ERK通路,诱导该通路中LC3-II和p62蛋白表达水平增加,阻断自噬体和溶酶体融合,抑制自噬体积累,增加自噬通量,从而触发结肠癌细胞凋亡。此外,GLP还能减轻结肠炎及相关肿瘤的发生,这种作用是通过抑制TLR4/MyD88/NF- κ B信号通路,改善氧化偶氮甲烷(AOM)/葡萄糖硫酸钠(DSS)诱导的微生物群失调,增加短链脂肪酸的生成,减轻内毒素血症,从而减轻AOM/DSS诱导的结肠炎及结肠炎相关的大肠癌^[39]。灵芝粗多糖GLPS能够改变口腔鳞状细胞癌细胞的形态,阻止细胞迁移,减少集落和球体形成,从而减缓癌细胞的侵袭和增殖^[7]。Fu等^[40]研究发现,灵芝多糖在体内能够显著抑制肿瘤生长,提高小鼠存活率。其中,具有(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-Glcp主链的WGLP在S180小鼠腹水瘤模型中能够显著抑制肿瘤的生长。另一种灵芝多糖WSG通过诱导生长因子受体TGFBR和EGFR降解,有效减少ERK磷酸化,从而抑制肿瘤的发生和转移,提高了LLC1荷瘤小鼠的存活率^[41]。WSG还能够与其他抗癌药物联合应用,共同发挥抗肿瘤功效。在针对人舌癌细胞(SAS)的研究中,WSG与顺铂联合应用展现出协同效应,WSG能够有效减弱顺铂对正常上皮SG细胞的细胞毒性,并且通过提高Bax/Bcl-2的比率,诱导SAS细胞凋亡^[42]。

灵芝多糖还可通过免疫调节作用发挥抗肿瘤功效^[4,43]。Zhao等^[44]研究表明,单独使用灵芝多糖GP-1和GP-2对人乳腺癌细胞(MDA-MB-231)并未显示抑制效果,但当二者与巨噬细胞共培养时,能够显著促进巨噬细胞的增殖和吞噬作用,增强了其对MDA-MB-231细胞的抑制作用,从而验证了GP-1和GP-2的免疫抗肿瘤活性。肿瘤免疫微环境(Tumor immune microenvironment, TIME)是由肿瘤细

胞及周围的免疫细胞、基质细胞、细胞外基质和多种信号分子共同组成的复杂生理系统,在肿瘤的发生、发展、转移及治疗过程中发挥着至关重要的作用^[45]。PGSG是灵芝孢子粉中的一种 β -(1 $\rightarrow$ 3)-Glucan,能够通过多种途径重塑肿瘤免疫微环境以延缓肿瘤进展。首先,PGSG可激活巨噬细胞和树突状细胞(BM-DC),增强其吞噬能力并诱导IL-6、TNF- α 、IL-12等细胞因子释放;其次,通过减少髓源抑制细胞(MD-SC)和调节性T细胞的比例,抑制MDSC的分化及其免疫抑制功能;同时,促进M2型巨噬细胞向M1型转化,增强Th1和CTL细胞应答,进而逆转化疗导致的T细胞耗竭。在与吉西他滨联合使用时,PGSG通过上述机制协同化疗延缓肿瘤进展,并减轻治疗过程中的副作用^[46]。

2.3 抗病毒作用

据世界卫生组织统计^[47],自2019年12月以来,新型冠状病毒(COVID-19)全球感染病例超7.6亿例,死亡病例超690万例,病毒感染严重影响人类的健康和生活。灵芝多糖在抗病毒方面具有潜在应用价值,能够有效抑制多种病毒。据报道,两种灵芝水溶性蛋白-多糖复合物APBP和NPBP在抗HSV-1和HSV-2病毒方面均具有显著活性^[48]。其中,APBP效果更强,其50%有效浓度(EC₅₀)为300~520 μ g/mL。Jan等^[49]研究表明,口服灵芝多糖水提物RF3(每天剂量30 mg/kg)可使感染SARS-CoV-2病毒的仓鼠肺中病毒载量显著降低($P=0.03$),且在整个试验期间内,动物体质量并未减轻,进一步说明RF3不仅能降低肺部病毒载量,且无明显毒性。

灵芝多糖还可作为免疫佐剂发挥抗病毒功效。研究^[50]发现,灵芝多糖PS-G作为黏膜佐剂,与肠道病毒A71(EV-A71)黏膜疫苗联合使用时,能通过多种免疫调节机制发挥抗病毒作用。PS-G与EV-A71疫苗联合经鼻给药免疫小鼠后,可显著促进小鼠血清、唾液、鼻腔灌洗液、支气管肺泡灌洗液和粪便中EV-A71特异性抗体IgG和IgA的生成。经检测,相较于仅接种疫苗组,联合PS-G组中IgA水平更高,表明其抗体免疫反应更强。而且,PS-G与EV-A71疫苗联合,可诱导小鼠T细胞增殖和激活,刺激脾细胞产生更高水平的IFN- γ 和IL-17,从而增强了Th1和Th17型免疫反应,进而有助于对抗病毒感染^[50]。

2.4 保肝作用

在全球范围内,每年有200万人死于肝病,约占全球每年总死亡人数的4%^[51]。灵芝入心、肺、肝、肾经,素为养肝护肝之上品。随着现代科学技术的不断

进步,灵芝多糖已被证明可通过抗氧化损伤、抑制细胞凋亡和免疫炎症反应等多种途径减轻肝损伤。Liu 等^[52]研究表明,灵芝多糖 GLPS 可保护 CCl_4 诱导的肝细胞损伤。首先, GLPS 可通过降低 MDA 水平并提高 SOD 活性,保护肝细胞免受氧化损伤。同时, GLPS 可下调 NF- κ B 炎症信号通路中的 c-Rel 和 p65 蛋白表达,抑制下游因子 TNF- α 和 IL-1 β 的释放,从而减轻肝脏的炎症反应。此外, GLPS 还能抑制凋亡相关蛋白 Caspase-3 和 Caspase-8 激活,阻止肝细胞凋亡。最后, GLPS 通过下调 CYP1A 和 CYP3A 代谢酶的 mRNA 表达,减少 CCl_4 毒性代谢产物的生成,进一步减轻肝损伤。Zhang 等^[53]研究表明,灵芝多糖可通过抑制小鼠体内 NO 的生成,保护卡介苗 (BCG) 诱导的免疫性肝损伤。黑灵芝多糖 GAP 也可通过抗氧化、减轻炎症反应等机制对抗镉诱导的肝损伤^[54]。

灵芝多糖保护肝损伤的构-效关系尚不明确。灵芝粗多糖 (GLP) 中纯化的中性和酸性 β -葡聚糖 GLPB2 和 GLPC2 的分子量相似,但二者单糖组成不同。其中,糖醛酸含量较高的 GLPC2 展现出更为显著的肝保护作用。这一发现暗示糖醛酸含量可能是影响灵芝多糖肝保护活性的关键因素^[23]。然而,另外一种主链结构为 (1 $\rightarrow$ 4)-Galp,且含糖醛酸结构的灵芝多糖 GLP-2,同样证实了其对化学性肝损伤的保护作用^[24]。这表明灵芝多糖的具体作用机制与其化学结构、单糖组成以及分子量等因素的关系仍需进一步探索。

2.5 降血糖作用

糖尿病是一种全球性的慢性代谢疾病,给个人健康、家庭幸福和社会发展带来了沉重的负担。蛋白酪氨酸磷酸酶 1B (PTP1B) 是胰岛素信号通路的负调控因子,被公认为治疗 2 型糖尿病最具潜力的药物靶点之一^[55]。灵芝多糖作为一种天然的生物活性成分,能够有效抑制 PTP1B 活性,增强胰岛素敏感性,改善脂质代谢,从而维持血糖稳定。酸性糖蛋白 FYGL-a 的蛋白质结构与 O 型糖苷中的苏氨酸残基共价结合于多糖主链,通过与 PTP1B 竞争性抑制发挥抗糖尿病作用^[27]。从灵芝的子实体中筛选出一种名为 FYGL (Fudan-Yueyang-*G. lucidum*) 的新型 PTP1B 活性抑制剂,同样显示出有效的 PTP1B 抑制作用,其 IC_{50} 值为 $(5.12 \pm 0.05) \mu\text{g/mL}$ 。此外,从灵芝子实体中筛选出的一种水溶性蛋白-多糖复合物 FYGL,蛋白质与多糖的比值为 17:77,黏度-平均分子量 ($M\eta$) 为 $2.6 \times 10^5 \text{ g/mol}$ 。实验结果显示,口服 FYGL 治疗的 2 型糖尿病小鼠的血糖水平与对照组相比明显降低,与使用

临床药物二甲双胍治疗的 2 型糖尿病小鼠的血糖水平相当^[56]。

灵芝多糖还可通过改善胰岛细胞功能,促进血糖正常代谢。据报道^[57],链脉佐菌素诱导的糖尿病小鼠灌胃灵芝多糖 (GL-PS) 8 周后, GL-PS 高剂量组 (250 mg/kg) 能显著降低小鼠血糖、血清葡萄糖和甘油三酯水平,改善糖脂代谢 ($P < 0.05$)。同时, GL-PS 可对抗四氧嘧啶诱导的胰岛 B 细胞损伤,升高外周血胰岛素含量,促进胰岛素释放。高剂量 GL-PS 还可显著降低糖尿病小鼠肾脏醛糖还原酶活性,减少高血糖引起的多元醇旁路激活。此外, GL-PS 治疗 8 周后可改善糖尿病小鼠肾脏内氧化应激紊乱,降低肾组织内 MDA 含量,提高 SOD 活性,从而改善糖尿病小鼠的肾脏并发症。

2.6 调节肠道菌群作用

肠道菌群是指寄居在人体肠道内的庞大微生物群落,包括细菌、病毒、真菌等^[58],一些研究者将其视为人体的“第八大器官”。在药物的体内摄取及吸收过程中,肠道菌群发挥着至关重要的作用。Wang 等^[59]通过 Caco-2 细胞研究了灵芝多糖 (GLP) 的摄取及体内吸收机制。GLP 可通过内吞作用进入细胞,其过程表现为从细胞质向细胞核的累积。体外模拟肠道转运实验结果表明, GLP 的转运速率与浓度无关,而与糖类转运体的数量及种类密切相关。当 GLP 浓度较低 ($50 \mu\text{g/mL}$) 时,转运体 SGLT1 起主导作用,而当 GLP 浓度较高 ($100 \mu\text{g/mL}$) 时, SGLT1 则被 GLUT2 取代。此外, GLP 在小鼠十二指肠、小肠和盲肠的吸收过程呈现时间依赖性。

灵芝多糖对肠道菌群的调节作用与多糖分子量密切相关。Chang 等^[60]从灵芝菌丝体中分离出了灵芝粗多糖 WEGL 及 4 种不同分子量的多糖亚组分 (G1: $>300 \text{ kDa}$; G2: $10 \sim 300 \text{ kDa}$; G3: $<10 \text{ kDa}$; G4: 小分子糖类)。WEGL 不仅能逆转高脂饮食 (HFD) 诱导的小鼠肠道菌群失调,如厚壁菌 (Firmicutes) 与拟杆菌 (Bacteroidetes) 的比率变化及变形菌门 (Proteobacteria) 中内毒素水平降低等,还能维持肠道屏障的完整性,减少代谢性内毒素血症的发生。进一步研究发现,灵芝多糖调节肠道菌群和抗肥胖的效果与其分子量呈正相关。对比 WEGL 显示的减轻 HFD 小鼠的体质量、炎症和胰岛素抵抗作用,4 种亚组分中分子量最高的 G1 组分与 WEGL 作用程度相似, G2 组分显示出适度调节作用,而分子量较低的 G3、G4 组分则没有显示活性。Sang 等^[11]和 Shao 等^[61]的研究与 Chang 等^[60]一致,与 WEGL 中 G2 组分相似,灵芝破壁孢子粉多糖

BSGLP (26.0 kDa) 能够抑制 HFD 诱导的 C57BL/6J 小鼠肥胖、高脂血症、炎症和脂肪积累,而分子量为 11.079 kDa 的灵芝杂多糖 F31 同样具有促进肝脏中糖原的合成和储存、改善肠道菌群代谢的作用。此外,灵芝粗多糖肽 (GLPP) 的分子量分布在 3.89 kDa ~ 388.50 kDa 之间。研究发现, GLPP 能够改善 HFD 大鼠的肠道菌群组成, 调节与肝脏脂质代谢相关的 mRNA 表达, 并促进粪便中总胆汁酸的排泄^[62]。

2.7 神经保护作用

神经系统疾病 (Nervous system disease, NSDs) 是导致死亡和残疾的常见疾病之一, 给患者带来持续性痛苦和巨大精神压力。近年来, 随着人口增长和老龄化加剧, NSDs 相关的病死率和致残率不断上升, 进一步加剧了社会负担^[63]。抗炎是治疗神经系统疾病中不可或缺的一部分, 对于 NSDs 相关患者的研究中, 发现外周促炎标志物含量升高, 表明大脑中促炎和抗炎免疫状态失衡^[64-66]。因此, 目前针对 NSDs 相关疾病的研究多聚焦于大脑中炎症因子与抗炎过程的表达及调控。

灵芝多糖能够有效调控炎症因子的表达, 具有显著的抗炎活性和神经保护作用。促炎因子 IL-1 β 、iNOS 和 IL-6 的表达与神经退行性疾病密切相关, IL-1 β 作为一种重要的神经免疫介质, 可作用于包括神经元和小胶质细胞在内的多种细胞类型^[67]。在激活的小胶质细胞中, iNOS 表达升高合成的 NO 是神经退行性疾病的关键致病因素^[68]。IL-6 的表达则与炎症介质相关的阿尔茨海默病 (AD) 密不可分^[69-70]。研究表明, 由 β -Glucan 和阿拉伯半乳甘露聚糖 (Arabinogalactan) 组成的混合多糖 GLSP 能诱导 IEC-6 细胞增殖, 并抑制脂多糖 (LPS) 诱导的 NO 和促炎细胞因子的过度产生, 显示出较强的抗炎活性^[8]。灵芝多糖 GLP 可浓度依赖性抑制 LPS 及 A β 42 诱导的 IL-1 β 、IL-6 和 iNOS 的表达, 使其接近基础水平。同时, GLP 还可减弱与炎症相关的小胶质细胞迁移、形态学改变和吞噬能力, 从而间接证明 GLP 在 AD 治疗中起到神经保护作用^[71]。在治疗重度抑郁症 (MDD) 方面, 灵芝多糖也展现了优异的活性。Li 等^[72] 研究表明, 灵芝多糖 GLP 可调节小鼠海马中炎症因子的表达, 展现出强大的抗抑郁效果。GLP 通过激活慢性社会挫败应激 (CSDS) 模型小鼠海马中 Dectin-1 受体减弱了 IL-1 β 和 TNF- α 的表达, 增强了抗炎因子 IL-10 和神经营养因子 BDNF 的表达, 从而抑制 CSDS 小鼠海马中小胶质细胞的激活和星形胶质细胞的增殖。GLP 还可增强小鼠海马中抗抑郁受体 AMPA 的 GluA1/2 四

聚体表达及 GluA1 在 S845 位点的磷酸化, 从而增强 AMPA 受体功能, 发挥抗抑郁功效。

2.8 抗氧化作用

在生命过程中, 氧化代谢反应产生的过量自由基会引起脂质过氧化、细胞解体、DNA 断裂及蛋白质变性等过程, 与人体的衰老、肿瘤发生、心血管疾病等密切相关^[73]。灵芝多糖能够清除自由基、激活抗氧化酶系统, 从而显著增强机体的抗氧化能力。盖玉红^[74] 研究表明, 灵芝菌丝体多糖对羟基自由基 (OH $\cdot$) 和超氧阴离子自由基 (O $_2^{\cdot-}$) 均具有清除作用。其中, GLP_{31.7} 组分对 OH $\cdot$ 和 O $_2^{\cdot-}$ 清除率分别为 87.6% 与 24.3%。另有研究^[75] 表明, 未发酵 (GLP) 和发酵 (FGLP) 灵芝孢子粉多糖, 均能降低 HepG2 细胞氧化应激模型中细胞内 ROS 和 MDA 含量, 提高总抗氧化能力 (T-AOC), 增加抗氧化酶 (CAT、SOD、GSH-Px) 含量。二者可通过调节 Nrf2-ARE 信号通路, 促进 Keap1 和 Nrf2 复合物解离, 从而激活下游 HO-1、NQO1 等抗氧化酶基因, 抵抗氧化应激损伤。其中, FGLP 的调节作用更强, 抗氧化活性更高。

2.9 其他药理作用

除上述功效外, 灵芝多糖还具备心血管保护、抗疲劳、抗衰老、改善脊髓损伤等药理作用^[76-79]。Li 等^[76] 研究发现, 从紫芝子实体中分离的蛋白结合多糖 PSG-1 可通过降低血清乳酸脱氢酶 (LDH) 活性, 减轻阿霉素 (DOX) 诱导的心肌损伤, 从而抑制心肌细胞凋亡。PSG-1 还可通过减少线粒体通透性转换孔 (mPTP) 开放、调节线粒体中凋亡蛋白变化等途径, 抑制线粒体功能障碍, 从而减弱 DOX 诱导的小鼠心脏毒性。史亚丽等^[77] 研究发现, 灵芝多糖能够降低力竭小鼠血浆 GPT 及 CK 水平, 减轻肝脏及骨骼肌损伤, 从而维持组织器官正常功能, 发挥抗疲劳作用。灵芝三萜和多糖的混合制剂 (GL) 能够有效延缓中年雄性小鼠睾丸组织在结构、形态及功能上的年龄相关性衰退^[78]。这些作用是通过抑制由年龄引起的 ROS 和 MDA 过量, 抑制氧化应激实现的。同时, 通过降低 Bax/Bcl-2 比率, 维持睾丸细胞凋亡与增殖的平衡, 从而延缓衰老。此外, 灵芝多糖还能减少脊髓损伤后神经元凋亡, 并通过抑制 CD11b 与其配体 ICAM-1 相互作用, 降低因白细胞进入脊髓而引起的炎症反应及氧化应激, 从而保护脊髓免受损伤^[79]。

3 结语与展望

本文综述了灵芝多糖在化学结构及药理作用机制方面的研究进展, 总结了现有部分灵芝多糖的分子量、单糖组成及基本骨架等结构特征。因单糖组成及支链

分布等不同,灵芝多糖的结构具有显著差异,这种差异性与其药理作用及机制密切相关。目前,灵芝多糖已展现出免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、调节肠道菌群、降血糖及保肝等多种药理作用,并广泛应用于临床研究领域。目前对于其在体内、体外及临床中的机制研究已取得显著成效,但其结构与生物活性之间的具体关系尚不明确。

当前大多数研究主要聚焦于灵芝多糖的基本构型、分子量分布及单糖组成等初级结构特征,而对于其空间构型、分子链在不同环境中的排列及聚集行为等高级结构特征,尚缺乏系统而深入的解析。因此,未来亟需整合多种先进解析技术,如X射线衍射法、原子力显微镜、圆二色光谱等方法,全面揭示灵芝多糖的分子内与分子间相互作用、微观结构变化及构象稳定性等特征,以全方位、多层次的角度解析灵芝多糖的高级结构。同时,灵芝多糖的药理作用及机制方面仍有许多未知领域有待深入探索,例如其在细胞信号传导通路中的具体作用机制,及与其他生物分子之间的相互作用等,都需要更多研究来阐明。未来应通过多学科交叉的研究方法,从分子、细胞和整体动物等多个层面全面解析灵芝多糖的作用过程,为后续精准调控和合理应用打下坚实的理论基础。

此外,灵芝多糖作为一种天然活性成分,凭借其多种药理作用及低毒性等优势,在开发功能性产品领域具有广阔前景。首先,灵芝多糖可应用于新型抗肿瘤、保肝、降血糖等生物药的研发,为现代医药注入新活力。其次,基于其增强免疫与调节肠道菌群等功能,可开发以灵芝多糖为核心的功能性饮料与固体膳食等多样化健康食品,以满足不同人群的营养与保健需求。再者,凭借其卓越的抗氧化与抗衰老功效,灵芝多糖亦可应用于抗衰老面膜、精华及乳霜等护肤品的研发。随着纳米化、包埋与共轭等现代技术的不断突破,灵芝多糖的稳定性和生物利用度显著提升,应用形态日益丰富。在未来,灵芝多糖将有望在医药、保健品与美容等领域产生更大的应用价值与经济效益。

参考文献:

- [1] LTD D B M R P. Market research business consulting and strategy planning firm[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://www.databridge-marketresearch.com.html>.
- [2] BATRA P, SHARMA A K, KHAJURIA R. Probing Lingzhi or Reishi medicinal mushroom *Ganoderma lucidum* (higher Basidiomycetes): a bitter mushroom with amazing health benefits[J]. Int J Med Mushrooms, 2013, 15(2): 127-143.
- [3] WU S J, ZHANG S Y, PENG B, et al. *Ganoderma lucidum*: a comprehensive review of phytochemistry, efficacy, safety and clinical study[J]. Food Sci Hum Wellness, 2024, 13(2): 568-596.
- [4] LU J H, HE R J, SUN P L, et al. Molecular mechanisms of bioactive

- polysaccharides from *Ganoderma lucidum* (Lingzhi), a review[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 150: 765-774.
- [5] 张汇, 聂少平, 艾连中, 等. 灵芝多糖的结构及其表征方法研究进展[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 290-301.
- [6] LI Q Z, CHEN X, MAO P W, et al. N-Glycosylated *Ganoderma lucidum* immunomodulatory protein improved anti-inflammatory activity via inhibition of the p38 MAPK pathway[J]. Food Funct, 2021, 12(8): 3393-3404.
- [7] DE CAMARGO M R, FRAZON T F, INACIO K K, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharides inhibit *in vitro* tumorigenesis, cancer stem cell properties and epithelial-mesenchymal transition in oral squamous cell carcinoma[J]. J Ethnopharmacol, 2022, 286: 114891.
- [8] WEN L R, SHENG Z L, WANG J P, et al. Structure of water-soluble polysaccharides in spore of *Ganoderma lucidum* and their anti-inflammatory activity[J]. Food Chem, 2022, 373(Pt A): 131374.
- [9] DONG Z, DONG G, LAI F R, et al. Purification and comparative study of bioactivities of a natural selenized polysaccharide from *Ganoderma lucidum* mycelia[J]. Int J Biol Macromol, 2021, 190: 101-112.
- [10] LI J, GU F F, CAI C, et al. Purification, structural characterization, and immunomodulatory activity of the polysaccharides from *Ganoderma lucidum*[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 143: 806-813.
- [11] SANG T T, GUO C J, GUO D D, et al. Suppression of obesity and inflammation by polysaccharide from sporoderm-broken spore of *Ganoderma lucidum* via gut microbiota regulation[J]. Carbohydr Polym, 2021, 256: 117594.
- [12] LIU W, WANG H Y, PANG X B, et al. Characterization and antioxidant activity of two low-molecular-weight polysaccharides purified from the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*[J]. Int J Biol Macromol, 2010, 46(4): 451-457.
- [13] HUANG S Q, LI J W, LI Y Q, et al. Purification and structural characterization of a new water-soluble neutral polysaccharide GLP-F1-1 from *Ganoderma lucidum*[J]. Int J Biol Macromol, 2011, 48(1): 165-169.
- [14] ZHANG H, NIE S P, CUI S W, et al. Characterization of a bioactive polysaccharide from *Ganoderma atrum*: re-elucidation of the fine structure[J]. Carbohydr Polym, 2017, 158: 58-67.
- [15] LIU Y F, ZHANG J S, TANG Q J, et al. Physicochemical characterization of a high molecular weight bioactive β -D-glucan from the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*[J]. Carbohydr Polym, 2014, 101: 968-974.
- [16] YE L B, ZHANG J S, ZHOU K, et al. Purification, NMR study and immunostimulating property of a fucogalactan from the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*[J]. Planta Med, 2008, 74(14): 1730-1734.
- [17] YE L B, ZHANG J S, YE X J, et al. Structural elucidation of the polysaccharide moiety of a glycopeptide (GLPCW-II) from *Ganoderma lucidum* fruiting bodies[J]. Carbohydr Res, 2008, 343(4): 746-752.
- [18] KAO P F, WANG S H, HUNG W T, et al. Structural characterization and antioxidative activity of low-molecular-weights β -1,3-glucan from the residue of extracted *Ganoderma lucidum* fruiting bodies[J]. J Biomed Biotechnol, 2012, 2012: 673764.
- [19] DONG Q, WANG Y, SHI L, et al. A novel water-soluble β -D-glucan isolated from the spores of *Ganoderma lucidum*[J]. Carbohydr Res, 2012, 353: 100-105.
- [20] 王亚涛. 灵芝孢子粉多糖的分离纯化与结构鉴定[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [21] CHEN L, LING Y J, SUN J X, et al. A glucan from *Ganoderma lucidum*: structural characterization and the anti-inflammatory effect on Parkinson's disease *via* regulating dysfunctions of intestinal microecology and inhibiting TLR4/MyD88/NF- κ B signaling pathway[J]. J

- Ethnopharmacol, 2025, 343: 119446.
- [22] YE L B, ZHANG J S, YANG Y, et al. Structural characterisation of a heteropolysaccharide by NMR spectra [J]. Food Chem, 2009, 112(4): 962 – 966.
 - [23] CHEN S D, GUAN X Y, YONG T Q, et al. Structural characterization and hepatoprotective activity of an acidic polysaccharide from *Ganoderma lucidum* [J]. Food Chem X, 2022, 13: 100204.
 - [24] WANG Y T, LIU Y F, YU H Z, et al. Structural characterization and immuno – enhancing activity of a highly branched water – soluble β – glucan from the spores of *Ganoderma lucidum* [J]. Carbohydr Polym, 2017, 167: 337 – 344.
 - [25] LI Y Q, FANG L, ZHANG K C. Structure and bioactivities of a galactose rich extracellular polysaccharide from submergedly cultured *Ganoderma lucidum* [J]. Carbohydr Polym, 2007, 68(2): 323 – 328.
 - [26] BAO X, FANG J, LI X. Structural characterization and immunomodulating activity of a complex glucan from spores of *Ganoderma lucidum* [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2001, 65(11): 2384 – 2391.
 - [27] PAN D, WANG L Q, HU B W, et al. Structural characterization and bioactivity evaluation of an acidic proteoglycan extract from *Ganoderma lucidum* fruiting bodies for PTP1B inhibition and anti – diabetes [J]. Biopolymers, 2014, 101(6): 613 – 623.
 - [28] YE L B, LI J R, ZHANG J S, et al. NMR characterization for polysaccharide moiety of a glycopeptide [J]. Fitoterapia, 2010, 81(2): 93 – 96.
 - [29] ZHANG H, NIE S P, YIN J Y, et al. Structural characterization of a heterogalactan purified from fruiting bodies of *Ganoderma atrum* [J]. Food Hydrocoll, 2014, 36: 339 – 347.
 - [30] BAO X, LIU C, FANG J, et al. Structural and immunological studies of a major polysaccharide from spores of *Ganoderma lucidum* (Fr.) Karst [J]. Carbohydr Res, 2001, 332(1): 67 – 74.
 - [31] CHEN L, WANG X Y, SUN J X, et al. Structural characteristics of a heteropolysaccharide from *Ganoderma lucidum* and its protective effect against Alzheimer's disease via modulating the microbiota – gut – metabolomics [J]. Int J Biol Macromol, 2025, 297: 139863.
 - [32] HUANG J Q, SU Y F, WANG Q Y, et al. A glucomannan from defatted *Ganoderma lucidum* spores: structural characterization and immunomodulatory activity via activating TLR4/MyD88/NF – κ B signaling pathway [J]. Int J Biol Macromol, 2025, 294: 139195.
 - [33] 谢文琦, 韩雯, 付璐, 等. 灵芝调节免疫细胞功能的作用机制及研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43(7): 219 – 224.
 - [34] HU Y L, LIN Z X, FU H R, et al. Immunomodulatory effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide extract on peritoneal macrophage function of BALB/c mice [J]. Cell Mol Biol, 2022, 68(4): 31 – 34.
 - [35] REN L, ZHANG J, ZHANG T H. Immunomodulatory activities of polysaccharides from *Ganoderma* on immune effector cells [J]. Food Chem, 2021, 340: 127933.
 - [36] 马维江, 王平, 杨立民, 等. 辅助性 T 细胞 17 和调节性 T 细胞的免疫功能及其对非小细胞肺癌免疫调节作用的研究进展 [J]. 肿瘤研究与临床, 2020, 32(1): 66 – 69.
 - [37] XIANG Q D, YU Q, WANG H, et al. Immunomodulatory effect of *Ganoderma atrum* polysaccharides on Th17/Treg balance [J]. J Funct Foods, 2018, 45: 215 – 222.
 - [38] PAN H T, WANG Y J, NA K, et al. Autophagic flux disruption contributes to *Ganoderma lucidum* polysaccharide – induced apoptosis in human colorectal cancer cells via MAPK/ERK activation [J]. Cell Death Dis, 2019, 10(6): 456.
 - [39] GUO C L, GUO D D, FANG L, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharide modulates gut microbiota and immune cell function to inhibit inflammation and tumorigenesis in colon [J]. Carbohydr Polym, 2021, 267: 118231.
 - [40] FU Y L, SHI L, DING K. Structure elucidation and anti – tumor activity in vivo of a polysaccharide from spores of *Ganoderma lucidum* (Fr.) Karst [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 141: 693 – 699.
 - [41] HSU W H, QIU W L, TSAO S M, et al. Effects of WSG, a polysaccharide from *Ganoderma lucidum*, on suppressing cell growth and mobility of lung cancer [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 165 (Pt A): 1604 – 1613.
 - [42] HSU W H, HUA W J, QIU W L, et al. WSG, a glucose – enriched polysaccharide from *Ganoderma lucidum*, suppresses tongue cancer cells via inhibition of EGFR – mediated signaling and potentiates cisplatin – induced apoptosis [J]. Int J Biol Macromol, 2021, 193 (Pt B): 1201 – 1208.
 - [43] ZENG P J, GUO Z H, ZENG X, et al. Chemical, biochemical, preclinical and clinical studies of *Ganoderma lucidum* polysaccharide as an approved drug for treating myopathy and other diseases in China [J]. J Cell Mol Med, 2018, 22(7): 3278 – 3297.
 - [44] ZHAO L Y, DONG Y H, CHEN G T, et al. Extraction, purification, characterization and antitumor activity of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* [J]. Carbohydr Polym, 2010, 80(3): 783 – 789.
 - [45] GAO D Q. The role of non – malignant B cells in malignant hematologic diseases [J]. Hematology, 2025, 30(1): 2466261.
 - [46] 陈菲菲. 颗粒型灵芝孢子 β – 葡聚糖重塑肿瘤免疫抑制微环境辅助吉西他滨化疗的作用与机制 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2021.
 - [47] WHO. Coronavirus disease (COVID – 19) [EB/OL]. (2023 – 08 – 09) [2025 – 04 – 10]. <https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/coronavirus-disease-%28covid-19%29>.html.
 - [48] EO S K, KIM Y S, LEE C K, et al. Possible mode of antiviral activity of acidic protein bound polysaccharide isolated from *Ganoderma lucidum* on herpes simplex viruses [J]. J Ethnopharmacol, 2000, 72(3): 475 – 481.
 - [49] JAN J T, CHENG T R, JUANG Y P, et al. Identification of existing pharmaceuticals and herbal medicines as inhibitors of SARS – CoV – 2 infection [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2021, 118(5): e2021579118.
 - [50] LIN Y L, SHIH C, CHENG P Y, et al. A polysaccharide purified from *Ganoderma lucidum* acts as a potent mucosal adjuvant that promotes protective immunity against the lethal challenge with enterovirus A71 [J]. Front Immunol, 2020, 11: 561758.
 - [51] XIONG W Y, LI J F, TIAN A P, et al. Unravelling the role of PAN optosis in liver diseases: mechanisms and therapeutic implications [J]. Liver Int, 2025, 45(4): e70000.
 - [52] LIU Y J, DU J L, CAO L P, et al. Anti – inflammatory and hepatoprotective effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides on carbon tetrachloride – induced hepatocyte damage in common carp (Cyprinus carpio L.) [J]. Int Immunopharmacol, 2015, 25(1): 112 – 120.
 - [53] ZHANG G L, WANG Y H, NI W, et al. Hepatoprotective role of *Ganoderma lucidum* polysaccharide against BCG – induced immune liver injury in mice [J]. World J Gastroenterol, 2002, 8(4): 728 – 733.
 - [54] 赵艺方. 黑灵芝多糖对镉诱导肝损伤小鼠的保护作用研究 [D]. 贵阳: 贵州医科大学, 2024.
 - [55] WANG L J, JIANG B, WU N, et al. Small molecules as potent protein tyrosine phosphatase 1B (PTP1B) inhibitors documented in patents from 2009 to 2013 [J]. Mini Rev Med Chem, 2015, 15(2): 104 – 122.
 - [56] TENG B S, WANG C D, YANG H J, et al. A protein tyrosine phosphatase 1B activity inhibitor from the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum* (Fr.) Karst and its hypoglycemic potency on streptozotocin – induced type 2 diabetic mice [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(12): 6492 – 6500.
 - [57] 何朝勇. 灵芝多糖对链脲佐菌素诱导的小鼠糖尿病肾病的保护作用

- 用及其机制研究[D]. 北京:中国协和医科大学,2005.
- [58] NICHOLSON J K, HOLMES E, KINROSS J, et al. Host – gut microbiota metabolic interactions[J]. *Science*, 2012, 336(6086):1262 – 1267.
- [59] WANG Z C, ZHANG H R, SHEN Y B, et al. Characterization of a novel polysaccharide from *Ganoderma lucidum* and its absorption mechanism in Caco – 2 cells and mice model[J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 118(Pt A):320 – 326.
- [60] CHANG C J, LIN C S, LU C C, et al. *Ganoderma lucidum* reduces obesity in mice by modulating the composition of the gut microbiota[J]. *Nat Commun*, 2015, 6:7489.
- [61] SHAO W M, XIAO C, YONG T Q, et al. A polysaccharide isolated from *Ganoderma lucidum* ameliorates hyperglycemia through modulating gut microbiota in type 2 diabetic mice[J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 197:23 – 38.
- [62] LV X C, GUO W L, LI L, et al. Polysaccharide peptides from *Ganoderma lucidum* ameliorate lipid metabolic disorders and gut microbiota dysbiosis in high – fat diet – fed rats[J]. *J Funct Foods*, 2019, 57:48 – 58.
- [63] GBD 2016 NEUROLOGY COLLABORATORS. Global, regional, and national burden of neurological disorders, 1990 – 2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(5):459 – 480.
- [64] DAHL J, ORMSTAD H, AASS H C D, et al. The plasma levels of various cytokines are increased during ongoing depression and are reduced to normal levels after recovery[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2014, 45:77 – 86.
- [65] HOWREN M B, LAMKIN D M, SULS J. Associations of depression with C – reactive protein, IL – 1, and IL – 6: a meta – analysis[J]. *Psychosom Med*, 2009, 71(2):171 – 186.
- [66] FUMAGALLI G, MONZA L, CAVALETTI G, et al. Neuroinflammatory process involved in different preclinical models of chemotherapy – induced peripheral neuropathy[J]. *Front Immunol*, 2020, 11:626687.
- [67] ROTHWELL N, ALLAN S, TOULMOND S. The role of interleukin 1 in acute neurodegeneration and stroke: pathophysiological and therapeutic implications[J]. *J Clin Invest*, 1997, 100(11):2648 – 2652.
- [68] SAHA R N, PAHAN K. Regulation of inducible nitric oxide synthase gene in glial cells[J]. *Antioxid Redox Signal*, 2006, 8(5/6):929 – 947.
- [69] SU F, BAI F, ZHANG Z J. Inflammatory cytokines and Alzheimer's disease: a review from the perspective of genetic polymorphisms[J]. *Neurosci Bull*, 2016, 32(5):469 – 480.
- [70] SWARDFAGER W, LANCTÔT K, ROTHENBURG L, et al. A meta – analysis of cytokines in Alzheimer's disease[J]. *Biol Psychiatry*, 2010, 68(10):930 – 941.
- [71] CAI Q, LI Y Y, PEI G. Polysaccharides from *Ganoderma lucidum* attenuate microglia – mediated neuroinflammation and modulate microglial phagocytosis and behavioural response[J]. *J Neuroinflammation*, 2017, 14(1):63.
- [72] LI H R, XIAO Y H, HAN L, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharides ameliorated depression – like behaviors in the chronic social defeat stress depression model via modulation of Dectin – 1 and the innate immune system[J]. *Brain Res Bull*, 2021, 171:16 – 24.
- [73] SIES H. Oxidative stress: a concept in redox biology and medicine[J]. *Redox Biol*, 2015, 4:180 – 183.
- [74] 盖玉红. 灵芝多糖抗氧化活性研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2007.
- [75] ZHAO Y, LI Q Y, WANG M H, et al. Structural characterization of polysaccharides after fermentation from *Ganoderma lucidum* and its antioxidant activity in HepG2 cells induced by H₂O₂[J]. *Food Chem X*, 2023, 18:100682.
- [76] LI W J, ZHANG X Y, WU R T, et al. *Ganoderma atrum* polysaccharide improves doxorubicin – induced cardiotoxicity in mice by regulation of apoptotic pathway in mitochondria[J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 202:581 – 590.
- [77] 史亚丽, 蔡华, 孙闽君. 灵芝多糖抗疲劳及对力竭小鼠抗氧化、抗损伤作用研究[C]//第七届全国体育科学大会论文摘要汇编(二). 北京:烟台师范学院体育学院, 2004:424.
- [78] LI Y H, LIANG W, HAN Y L, et al. Triterpenoids and polysaccharides from *Ganoderma lucidum* improve the histomorphology and function of testes in middle – aged male mice by alleviating oxidative stress and cellular apoptosis[J]. *Nutrients*, 2022, 14(22):4733.
- [79] GOKCE E C, KAHVECI R, ATANUR O M, et al. Neuroprotective effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides against traumatic spinal cord injury in rats[J]. *Injury*, 2015, 46(11):2146 – 2155.

Research Progress on Chemical Structure and Pharmacological Effects of *Ganoderma* Polysaccharides

JING Xiaojie, JIANG Siliang, XIA Yonggang, LIANG Jun

Key Laboratory of Basic and Applied Research of Beiyao, Ministry of Education, Heilongjiang

Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine and Natural Medicine Pharmacodynamic

Material Bases, Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin 150040, China

Abstract *Ganoderma* is a valuable medicinal fungus with significant importance in both traditional Chinese medicine and modern medical practices. Historically, it has been esteemed for its abilities to replenish Qi (vital energy), calm the mind, and alleviate cough and asthma. In recent years, polysaccharides extracted from *Ganoderma* have garnered considerable attention as one of its primary active constituents, owing to their diverse pharmacological activities, including anti – tumor, antiviral, antioxidant, and anti – aging effects. This review summarizes the current research on the chemical structures and pharmacological effects of *Ganoderma* polysaccharides, aiming to provide a reference for their further development and application.

Key words *Ganoderma* polysaccharides; Chemical structure; Pharmacological effects; Research progress