

DOI:10.14188/j.ajsh.2021.04.003

灵芝多糖的生物活性及开发利用

马传贵¹, 张志秀¹, 刘洋洋², 孙思胜^{3*}

1. 北京京诚生物科技有限公司, 北京 102600;
2. 中国医学科学院药用植物研究所海南分所, 海南 海口 570216;
3. 许昌学院 食品与药学院/河南省食品安全生物标识快检技术重点实验室, 河南 许昌 461000)

摘要: 灵芝为最新纳入“药食同源”目录的名贵中药材, 具有很高的营养价值。灵芝多糖是灵芝中最主要的成分之一, 具有抗氧化、免疫调节、降血糖、抗肿瘤、调节肠道菌群等多种生物活性, 在保健食品和药用资源开发方面具有很大的利用价值。本文对近年来灵芝多糖生物活性的研究进展进行总结, 梳理了其开发应用的现状, 对后续的开发和利用进行了展望, 以为灵芝多糖相关健康产品的开发利用提供参考和借鉴。

关键词: 灵芝多糖; 生物活性; 开发利用

中图分类号: R931.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2021)04-0336-05

Bioactivity and utilization of *Ganoderma lucidum* polysaccharides

MA Chuangui¹, ZHANG Zhixiu¹, LIU Yangyang², SUN Sisheng^{3*}

1. Beijing Jingcheng Biological Technology Co. Ltd, Beijing 102600, China; 2. Hainan Branch Institute of Medicinal Plants Development, Chinese Academy of Medical Sciences, Haikou 570216, Hainan, China; 3. Key Laboratory of Biomarker Based Rapid-detection Technology for Food Safety of Henan Province, College of Food and Pharmacy, Xuchang University, Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: *Ganoderma lucidum* is a latest valuable Chinese medicinal material included in the catalogue of “homology of medicine and food”, which has high nutritional value. *Ganoderma lucidum* polysaccharide is one of the main components of *Ganoderma lucidum*, which has various bioactive effects such as antioxidation, immunomodulation, hypoglycemic effect, anti-cancer, modulating intestinal flora. *Ganoderma lucidum* polysaccharide shows great promise in the research and development of health care products and medicine. This paper summarizes the research progress of the biological activities of *Ganoderma lucidum* polysaccharide in recent years, reviews the current situation of its application, and makes a prospect for the follow-up development and utilization, with a view to providing reference for the development of *Ganoderma lucidum* polysaccharide related health products.

Key words: *Ganoderma lucidum* polysaccharide; biological activity; development and utilization

0 引言

灵芝(*Ganoderma lucidum*)为著名的药食两用真菌,属于担子菌门(Basidiomycota)伞菌纲(Agari-

comycetes)多孔菌目(Polyporales)多孔菌科(Polyporaceae)灵芝属(*Ganoderma*)真菌,最新已被纳入“药食同源”目录。在中国和许多亚洲国家被用作草药和功能性食品已有3 000多年的历史。近几

收稿日期: 2021-02-09 修回日期: 2021-06-15 接受日期: 2021-08-07

作者简介: 马传贵(1985-)男,农艺师,主要从事食药菌的栽培生理及功能产品开发。E-mail: lingzhichina@126.com

* 通讯联系人: 孙思胜(1982-),男,博士,讲师,主要从事食药两用植物资源开发与利用。E-mail: shengzhaojun124@163.com

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目(192102310441)

引用格式: 马传贵, 张志秀, 刘洋洋, 等. 灵芝多糖的生物活性及开发利用[J]. 生物资源, 2021, 43(4): 336-340.

Ma C G, Zhang Z X, Liu Y Y, et al. Bioactivity and utilization of *Ganoderma lucidum* polysaccharides [J]. Biotic Resources, 2021, 43(4): 336-340.

十年来,灵芝子实体中提取的多糖、三萜类、甾醇、蛋白质和多肽等活性物质已成为灵芝相关生物学活性和药理学研究的热点。灵芝多糖(*Ganoderma lucidum* polysaccharide, GLP)属于灵芝菌丝体的一种次级代谢产物,为灵芝中含量最丰富、活性最有效的成分之一;具有抗氧化、免疫调节、降血糖、抗肿瘤以及抗炎等生物活性^[1-3],并且已开发出许多产品。现就GLP生物活性及产品开发生的研究进展进行归纳与总结,以期为其活性评价及功能验证的进一步研究提供参考依据。

1 灵芝多糖(GLP)的生物活性

1.1 抗氧化

生物体在代谢过程中会产生各种氧自由基,而过多的自由基及其诱导的氧化反应会导致器官组织损伤,并与机体衰老、炎症和心脑血管疾病等病理过程密切相关。GLP可以与自由基结合来终止自由基连锁反应。GLP能使抗氧化酶活性上升,有效地清除羟自由基、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基、ABTS自由基、超氧自由基,减轻机体组织中的氧化损伤^[4]。此外,GLP还可以通过降低脂质过氧化(LPO)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)水平发挥有益的抗氧化作用^[5]。GLP还可以通过提高过氧化氢酶(CAT)的活性来增强抗氧化活性,催化H₂O₂的分解^[6]。GLP能抑制谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的耗竭和LPO,提高超氧化物歧化酶(SOD)活性,进而起到抗氧化作用^[5]。因此,GLP是通过诱导酶活性的提高以及与自由基结合来起到抗氧化作用的。

1.2 免疫调节

GLP是一种有效的免疫调节剂,能够全面且有效地调节免疫细胞的功能,包括巨噬细胞、B淋巴细胞、NK细胞、T淋巴细胞和DC细胞,同时释放多种细胞因子、趋化因子和生长因子,从而调节机体适应性免疫和先天性免疫。巨噬细胞是控制非特异性免疫的关键靶点,GLP可激活巨噬细胞增殖,当其浓度为20 μg/mL时,其刺激作用达到171%^[7]。GLP还可以刺激巨噬细胞产生二级介质一氧化氮(NO),一氧化氮是非特异性宿主防御入侵的重要介质,也是巨噬细胞活化的定量指标。当GLP浓度为1.25 μg/mL时,吞噬活性高于阳性对照(LPS, 1 μg/mL),提高了巨噬细胞的存活率,从58%(阴性对照, 5.00 μg/mL阿霉素)提高到97%(40.00 μg/mL GLP)^[8]。GLP的免疫调节功能是其多种生物活性的基础,包括降血糖、抗肿瘤和抗炎等。

1.3 降血糖

中药多糖具有较好的降血糖效果,安全无毒副作用且作用温和,具有巨大的市场开发潜力。GLP在控制血糖方面具有以下特点^[9]:改善β细胞功能紊乱,增强胰岛素作用;改善糖代谢,调节MAPK通路,延缓糖尿病并发症。GLP降血糖的机制主要包括以下两个方面:一是通过调节激素水平促进胰岛素分泌和修复胰岛细胞;二是调节控制葡萄糖代谢的酶的活性。GLP可降低血浆中IL-1β、IL-6和TNF-α的浓度^[10]。促炎细胞因子在炎症诱导的脂肪细胞和巨噬细胞的发育过程中分泌,并通过内分泌作用导致脂肪分解、脂质转运和脂质毒性加重,破坏外周组织胰岛素信号传导。GLP还可以预防2型糖尿病(T2DM)、非酒精性脂肪肝(nonalcoholic fatty liver disease, NAFLD)和心血管疾病(cardiovascular disease, CAD)的发生^[11]。GLP通过激活AMP活化蛋白激酶(Adenosine 5'-monophosphate (AMP)-activated protein kinase, AMPK)降低葡萄糖调节酶的mRNA水平,抑制肝脏葡萄糖生成,从而降低空腹血糖(FSG)水平,通过增强GLUT4表达和下调表达阻力来增加胰岛素抵抗,并降低附睾脂肪/体重(BW)比率、脂肪酸合成酶(fatty acid synthase, FAS)、乙酰辅酶a羧化酶1(ACC1)mRNA水平。GLP可下调肾上腺素所致高血糖和糖尿病患者的空腹血糖,提高体内的胰岛素水平,发挥降血糖作用。因此,GLP在细胞模型、动物模型以及临床试验中均显示出较好的降血糖作用。

1.4 抗肿瘤

肿瘤治疗一直是现代医学力求有效解决的大问题,抗肿瘤药物的研发是许多科研者力求突破的一大方向,现代研究发现GLP可抑制肿瘤细胞增殖和诱导细胞凋亡。研究发现,GLP能够抑制小鼠荷膀胱癌T24细胞的增殖,提高小鼠免疫功能^[12,13]。GLP的剂量与抑癌基因的高表达呈正相关,与小鼠肝脏原癌基因的高表达呈负相关,表明灵芝多糖在某种程度上可以通过调控原癌基因和抑癌基因的动态平衡来抑制癌症的发生与发展^[14]。有学者探讨了灵芝多糖对胃癌细胞的体内外抑制作用,证实其可通过诱导细胞凋亡、阻滞细胞周期来抑制胃癌细胞AGS及MKN45的增殖^[15]。此外,GLP可以通过增强宿主免疫系统来起抗肿瘤作用,而不是对肿瘤细胞的直接杀伤作用。GLP可以降低整合素的表达,抑制肿瘤细胞的粘附。GLP具有激活大肠癌细胞突变型P53的能力,P53是一种有效的肿瘤抑制因子,可以通过多种途径(生长抑制、凋亡或衰老、肿瘤

间质调节、血管生成和代谢以及阻断侵袭)阻止含癌性病变细胞的繁殖^[16]。由此说明, GLP既可以直接抑制肿瘤细胞的繁殖, 也可以通过免疫调节诱导肿瘤细胞的凋亡。

1.5 调节肠道菌群

GLP可用于调节肠道菌群。GLP能显著促进双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)、乳酸菌属(*Turicibacter*)、*Blautia*、粪球菌属(*Coprococcus*)等有益菌的增长; 抑制肠球菌属(*Enterococcaceae*)、多尔氏菌属(*Dorea*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)等有害菌的生长^[17]。口服GLP可通过增加微生物群的丰富度、降低硬壁菌与拟杆菌的比率以及诱导某些肠道细菌(S24-7、SMB53、陆麻科、别杆菌属、Rc4-4和瘤胃球菌科)的变化来调节肠道生物屏障功能^[18]。GLP极大地增加了乳杆菌属(*Lactobacillus*)的相对丰度, 进一步通过调节肠道微生物群来治疗慢性胰腺炎^[19], 说明GLP对肠道菌群具有一定的调节作用。

2 灵芝多糖(GLP)的开发利用

2.1 灵芝多糖(GLP)在食品中的开发应用

GLP的应用非常广泛, 韩国、塞尔维亚、澳大利亚以及中国等国家都将其应用在不同的食品中。在韩国, GLP提取物在保健品制作过程中被用于生产具有增强质地和口感的面包, 并在发酵过程中使用GLP来改善传统韩国yakju酒的质量和功效^[20]。在塞尔维亚, 将GLP无菌添加到皮尔斯纳啤酒中, 使啤酒有更好的身体感知, 并能增加健康益处^[21]。除此之外, 中国和澳大利亚中的很多企业都将GLP应用到功能性食品以及葡萄酒的开发中^[22]。其中, 华中农大食品系对GLP等活性成分的发酵、提纯及其功能食品的开发做了系统的研究, 开发出各种富含灵芝多糖、灵芝酸等功能因子的食品, 如灵芝饮料、灵芝酒, 以及药用多糖等植物药^[23]。因此, 灵芝多糖作为功能因子可制成保健食品, 也可作为食品原料加入饮料、糕点、口服液中, 极大地丰富了食品品种。

2.2 灵芝多糖(GLP)临床应用和药品开发

在上皮性卵巢癌的体外研究中, 灵芝多糖抑制了耐药细胞和敏感细胞的生长, 增强了顺铂对卵巢癌细胞的抗癌作用。在临床治疗中, 143例晚期癌症患者接受疗程6~12周的GLP(1.8 mg)治疗, 发现能显著改善淋巴细胞有丝分裂作用^[24]。对68例肺癌患者使用GLP治疗12周之后, 发现GLP的抗癌特性是通过增强免疫系统来起作用的, 与未治疗组相比, GLP处理组可显著改善CD₄/CD₈比值、T细胞和NK细胞的增殖^[25]。

目前已投入使用的灵芝制剂有片剂、针剂、冲剂、口服液、糖浆剂和酒剂等, 均取得了一定的临床疗效。通过对灵芝与红曲霉发酵条件、动力学参数和代谢调控的研究和确定, 最终利用灵芝发酵产物研制出的蜂参灵胶囊成为治疗糖尿病的一种新的药品^[26]。开发的灵芝类产品有: 灵芝多糖口服液, 灵芝多糖冲剂、片剂, 灵芝酒, 灵芝胶囊等, 灵芝孢子粉等。

2.3 灵芝多糖(GLP)与其他药物的联合应用

GLP可以作为治疗癌症的辅助药物。GLP通常与菊粉^[27]、5-氟尿嘧啶(5FU)^[16]和阿霉素(DOX)^[28]结合使用。GLP不仅增强了这些药物的活性或降血糖作用, 而且降低了它们的毒性, 保护正常细胞免受活性氧的积累毒害。GLP可与硒纳米粒子结合, 具有抑制LPS诱导的炎症的能力^[29]。据报道通过树突状细胞诱导的T细胞反应, GLP被制成用于癌症治疗的金纳米复合物^[30]。使用大豆磷脂、吐温80和胆固醇将GLP包封在脂质体中, 从而改善了对脾淋巴细胞增殖的刺激, 还将GLP和卵清蛋白(OVA)包裹在脂质体中, 这种GLPL/OVA通过激活和成熟引流淋巴结中的DCs来增强体液和细胞免疫反应^[31]。据报道通过电喷雾(ES)工艺将GLP装载到海藻酸钠(NaAlg)中, 这些微粒可以保护GLP在储存期间免受氧化降解^[32]。采用三针同轴电喷雾技术制备了更为复杂的卵黄壳颗粒(YSPs), 并将其用于伤口愈合, GLP作为主要的抗氧化成分被封装在YSPs的外壳中^[33]。此外, GLP与灵芝三萜类化合物的结合, 提供了一种具有细胞毒性和免疫调节活性的多化合物药物, 促进细胞因子的释放并激活免疫细胞^[34]。可见, GLP通过与其他药物的联合应用, 可以起到协同增效的作用。

3 展望

灵芝在我国已有3 000多年的药用历史, 是民间常用的传统名贵中药材, 对维护人体健康发挥着重要作用^[35]。GLP作为灵芝主要的生物活性成分, 近几十年来, 国内外学者对GLP的生物活性、保健功能等方面进行了广泛深入的研究, 发现该成分具有抗氧化、调节免疫、降血糖、抗肿瘤和调节肠道菌群等多种生物活性, 在食品开发及药物开发方面具有巨大的开发潜力。

基于目前的体外和体内研究, GLP为癌症的预防和治疗提供了一种有价值 and 有效的方法。然而, GLP不能作为癌症治疗的一线疗法。缺乏纯化的化合物或准确描述的提取物是临床研究的主要挑

战。用于预防和治疗癌症的药理活性化合物的数量和组成取决于灵芝的生长条件、菌株和提取方法。未来的临床研究需要采取实质性的步骤与方法,对活性成分进行定量的特征提取,这些提取物应在体外和体内研究中进行评估,并进行化学表征,以确认可用于实验研究的特定化合物的准确数量。GLP已被用作癌症治疗药物的辅助疗法,研究其活性成分与化疗药物之间的协同作用程度,以探索更好地应用于癌症治疗的协同效应。

随着人们健康意识的逐步提高,以GLP为主要成分的保健食品和药品具有广阔的发展空间和巨大的商业价值,相信随着对GLP生物活性的深入研究,GLP必将在抗氧化衰老、提高机体免疫力、抗肿瘤等方面作出更大贡献。GLP作为我国重要宝库中的珍品,在未来开发应用过程中,应通过产学研结合的方式,大大地提升我国灵芝以及GLP的科研水平。

参考文献

- [1] Zeng X, Li P, Chen X, *et al.* Effects of deproteinization methods on primary structure and antioxidant activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharides [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 126: 867-876.
- [2] 郑雷舒, 黄梦利, 巩圣坚, 等. 海南习用药材无柄灵芝质量标准研究[J]. *生物资源*, 2019, 41(4): 342-347.
Zheng L S, Huang M L, Gong S J, *et al.* Study on quality standard of *Ganoderma Sessilia* for Hainan traditional medicine [J]. *Biotic Resour*, 2019, 41(4): 342-347.
- [3] Zhu L N, Luo X, Tang Q J, *et al.* Isolation, purification, and immunological activities of a low-molecular-weight polysaccharide from the Lingzhi or Reishi medicinal mushroom *Ganoderma lucidum* (higher Basidiomycetes) [J]. *Int J Med Mushrooms*, 2013, 15(4): 407-414.
- [4] Shi M, Zhang Z Y, Yang Y N. Antioxidant and immunoregulatory activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharide (GLP) [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 95(1): 200-206.
- [5] Chen Y G, Shen Z J, Chen X P. Modulatory effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharides on serum antioxidant enzymes activities in ovarian cancer rats [J]. *Carbohydr Polym*, 2009, 78(2): 258-262.
- [6] Zhang J, Meng G, Zhai G, *et al.* Extraction, characterization and antioxidant activity of polysaccharides of spent mushroom compost of *Ganoderma lucidum* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 82: 432-439.
- [7] Shi M, Yang Y N, Hu X S, *et al.* Effect of ultrasonic extraction conditions on antioxidative and immunomodulatory activities of a *Ganoderma lucidum* polysaccharide originated from fermented soybean curd residue [J]. *Food Chem*, 2014, 155: 50-56.
- [8] Zhang J, Gao X, Pan Y, *et al.* Toxicology and immunology of *Ganoderma lucidum* polysaccharides in Kunming mice and Wistar rats [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 85: 302-310.
- [9] Zheng Y, Bai L, Zhou Y, *et al.* Polysaccharides from Chinese herbal medicine for anti-diabetes recent advances [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 121: 1240-1253.
- [10] Xu S, Dou Y, Ye B, *et al.* *Ganoderma lucidum* polysaccharides improve insulin sensitivity by regulating inflammatory cytokines and gut microbiota composition in mice [J]. *J Funct Foods*, 2017, 38: 545-552.
- [11] Xiao C, Wu Q, Zhang J, *et al.* Antidiabetic activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharides F31 down-regulated hepatic glucose regulatory enzymes in diabetic mice [J]. *J Ethnopharmacol*, 2017, 196: 47-57.
- [12] 刘奔, 郭鹏荣, 盛玉文, 等. 灵芝多糖对T24荷瘤裸鼠化疗效果及其免疫逃逸的影响[J]. *肿瘤防治研究*, 2015, 42(5): 459-465.
Liu B, Guo P R, Sheng Y W, *et al.* Effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharide on chemotherapy effect and immune escape in T24 bearing mice [J]. *Cancer Res Prev Treat*, 2015, 42(5): 459-465.
- [13] 王成财, 梁文波. 灵芝多糖对荷膀胱癌T24细胞小鼠T细胞亚群及AQP1、AQP3表达的影响[J]. *中国生化药物杂志*, 2016, 36(12): 33-36.
Wang C C, Liang W B. Effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharides on T cell subsets and AQP1, AQP3 expression of bladder cancer T24 cell line bearing mice [J]. *Chin J Biochem Pharm*, 2016, 36(12): 33-36.
- [14] Pan K, Jiang Q, Liu G, *et al.* Optimization extraction of *Ganoderma lucidum* polysaccharides and its immunity and antioxidant activities [J]. *Int J Biol Macromol*, 2013, 55: 301-306.
- [15] 邢会军, 侯雷, 孙勇, 等. 灵芝多糖对小鼠胃肿瘤活性的体内外抑制作用[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2017, 23(13): 116-120.
Xing H J, Hou L, Sun Y, *et al.* Anti-gastric tumor effect of *Ganoderma* polysaccharides *in vitro* and *in vivo* [J]. *Chin J Exp Tradit Med Formulae*, 2017, 23(13): 116-120.
- [16] Jiang D, Wang L, Zhao T, *et al.* Restoration of the tumor-suppressor function to mutant p53 by *Ganoderma lucidum* polysaccharides in colorectal cancer cells [J]. *Oncol Rep*, 2017, 37(1): 594-600.
- [17] 丁翹. 基于肠道菌群探讨黑灵芝多糖对2型糖尿病大

- 鼠的影响机制[D]. 南昌:南昌大学, 2020.
- Ding Q. The mechanism of polysaccharides from *Ganoderma atrum* on type 2 diabetic rats through gut microbiota [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [18] Jin M, Zhu Y, Shao D, *et al.* Effects of polysaccharide from mycelia of *Ganoderma lucidum* on intestinal barrier functions of rats [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 94 (Pt A): 1-9.
- [19] Li K, Zhuo C, Teng C, *et al.* Effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides on chronic pancreatitis and intestinal microbiota in mice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 93(Pt A): 904-912.
- [20] Kim J H, Lee D H, Lee S H, *et al.* Effect of *Ganoderma lucidum* on the quality and functionality of Korean traditional rice wine, yakju [J]. *J Biosci Bioeng*, 2004, 97(1): 24-28.
- [21] Leskosek-Cukalovic I, Despotovic S, Lakic N, *et al.* *Ganoderma lucidum*—Medical mushroom as a raw material for beer with enhanced functional properties [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(9): 2262-2269.
- [22] Bigliardi B, Galati F. Innovation trends in the food industry: the case of functional foods [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2013, 31(2): 118-129.
- [23] 罗璐. 灵芝多糖的结构分析与功能特性的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- Luo L. Studies on structural and functional character of *Ganoderma lucidum* polysaccharides [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [24] Gao Y H, Zhou S F, Chen G L, *et al.* A phase I/II study of a *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) P. Karst. extract (ganopoly) in patients with advanced cancer [J]. *Int J Med Mushr*, 2002, 4(3): 8.
- [25] Gao Y, Zhou S, Jiang W, *et al.* Effects of ganopoly (a *Ganoderma lucidum* polysaccharide extract) on the immune functions in advanced-stage cancer patients [J]. *Immunol Invest*, 2003, 32(3): 201-215.
- [26] 贾万利. 灵芝与红曲霉的高密度发酵及开发应用研究[D]. 太原:山西大学, 2004.
- Jia W L. High density fermentation of *Ganoderma lucidum* and *Monascus purpureus* and development research of a new medicine [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2004.
- [27] Liu Y P, Li Y M, Zhang W, *et al.* Hypoglycemic effect of inulin combined with *Ganoderma lucidum* polysaccharides in T2DM rats [J]. *J Funct Foods*, 2019, 55: 381-390.
- [28] Xu F, Li X, Xiao X, *et al.* Effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides against doxorubicin-induced cardiotoxicity [J]. *Biomed Pharmacother*, 2017, 95: 504-512.
- [29] Wang J, Zhang Y, Yuan Y, *et al.* Immunomodulatory of selenium nano-particles decorated by sulfated *Ganoderma lucidum* polysaccharides [J]. *Food Chem Toxicol*, 2014, 68: 183-189.
- [30] Zhang S, Pang G, Chen C, *et al.* Effective cancer immunotherapy by *Ganoderma lucidum* polysaccharide-gold nanocomposites through dendritic cell activation and memory T cell response [J]. *Carbohydr Polym*, 2019, 205: 192-202.
- [31] Liu Z G, Ma X, Deng B H, *et al.* Development of liposomal *Ganoderma lucidum* polysaccharide: formulation optimization and evaluation of its immunological activity [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 117: 510-517.
- [32] Yao Z C, Jin L J, Ahmad Z, *et al.* *Ganoderma lucidum* polysaccharide loaded sodium alginate micro-particles prepared via electrospraying in controlled deposition environments [J]. *Int J Pharm*, 2017, 524(1/2): 148-158.
- [33] Zhang C, Li Y, Hu Y, *et al.* Porous yolk-shell particle engineering via nonsolvent-assisted trineedle coaxial electrospraying for burn-related wound healing [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11(8): 7823-7835.
- [34] Calviño E, Manjón J L, Sancho P, *et al.* *Ganoderma lucidum* induced apoptosis in NB₄ human leukemia cells: involvement of Akt and Erk [J]. *J Ethnopharmacol*, 2010, 128(1): 71-78.
- [35] 叶鹏飞, 张美萍, 王康宇, 等. 灵芝主要成分及其药理作用的研究进展综述[J]. *食药用菌*, 2013, 21(3): 158-161.
- Ye P F, Zhang M P, Wang K Y, *et al.* The research progress on the main components and pharmacological effects of *Ganoderma lucidum* [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2013, 21(3): 158-161.

□

(编辑: 杨晓翠)