

灵芝多糖的提取方法及其功能特性 研究进展

朱玲¹, 史吉平², 王晨光³, 刘莉^{2*}, 李保国^{1*}, 周靖³

(1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210; 3. 上海百信生物科技有限公司, 上海 201401)

摘要:首先对灵芝多糖的初级结构和高级结构进行了介绍;其次对近年来研究灵芝多糖的热水提取法、超声波提取法、微波提取法、酶提取法等提取方法进行了综述和比较;最后对灵芝多糖的抗氧化、抗肿瘤、降血糖等功能特性进行了阐述。

关键词:灵芝;多糖;结构;提取方法;功能特性

中图分类号:TS201.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)01-0055-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.01.013

Research progress of the extract methods and functional properties of ganoderma lucidum polysaccharides

ZHU Ling¹, SHI Ji-ping², WANG Chen-guang³, LIU Li^{2*}, LI Bao-guo^{1*}, ZHOU Jing³

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China; 3. Shanghai Baixin Bio-Tech Co., Ltd., Shanghai 201403, China)

Abstract: The primary structure and advanced structure of Ganoderma lucidum polysaccharides are introduced. Then the extract methods of the Ganoderma lucidum polysaccharide, such as hot water extraction method, microwave extraction method, ultrasonic extraction method, microwave extraction method, enzymatic extraction methods, and so on, are reviewed and compared. The functional properties of the Ganoderma lucidum polysaccharide, such as antioxidation, anti-tumor, reducing blood sugar, are also summarized.

Key words: Ganoderma lucidum; polysaccharide; structure; extract methods; functional properties

食用菌对人类的健康作用越来越受到国际社会的广泛重视。食用菌多糖作为食用菌的主要活性成分之一,现已成为世界健康产业的研究热点。目前,国内外已对灵芝、香菇、姬松茸、灰树花、鸡腿菇等多种食用菌多糖进行了较为系统的研究,其中灵芝(ganoderma lucidum)以及灵芝多糖以其独特的保健功能成为研究的热点。

灵芝(ganoderma lucidum)是担子菌纲、多孔菌科属灵芝真菌,在我国自古就有着“仙草”的美誉。《本草纲目》中记载,灵芝“甘温无毒,主治耳聋,利关节,保神,益精气,坚筋骨,好颜色,疗虚劳,治痔”。现代医学研究表明,灵芝用于治疗肝、肾病、高血压、高血脂、神经衰弱、心血管疾病以及抗肿瘤等都有良好的临床疗效。灵芝作为日常生活的保健滋补品,也已引起了世界各国的广泛注意和高度重视。灵芝中所含的化学功效成分有多糖、三萜、多肽、氨基酸、无机元素、甾醇、呋喃类衍生物、生物碱

和核苷类化合物等9类,其中多糖和三萜类是主要的有效成分。研究表明,灵芝多糖具有免疫调节、抗肿瘤^[1]、抗病毒、抗衰老^[2]、抗氧化^[3]、降血糖^[4]、降血脂等多种生物活性,因而灵芝多糖成为目前灵芝产业研究的一个热点。本文中对近年来灵芝多糖的结构、提取方法和功能特性的国内外研究进展进行了综述,以期对灵芝多糖的进一步开发利用和功能特性研究提供理论依据。

1 灵芝多糖的结构

灵芝多糖是多孔菌科灵芝属真菌菌丝体的次生代谢产物,存在于灵芝属真菌的菌丝体和子实体中。到目前为止,研究者们已经从不同种类的灵芝和灵芝的不同部位发现了超过200种的多糖化合物^[5]。这些多糖化合物按溶解性的不同可分为水溶性多糖、水不溶性多糖、酸溶性多糖和碱溶性多糖;按单糖的组成不同又可分为均多糖和杂多糖,均多糖主

收稿日期:2016-04-23

基金项目:上海市农业科技成果转化项目(沪农科转字2015第2-2号);中国科学院青年创新促进会专项经费项目(2015232)

作者简介:朱玲(1992-),男,硕士生;李保国(1961-),男,博士,教授,研究方向为食品和农产品加工新技术,通讯联系人,021-55271290, lbaoguo@126.com。

要由葡萄糖或半乳糖组成,而杂多糖的单糖种类主要包括木糖、葡萄糖、甘露糖、半乳糖、岩藻糖和阿拉伯糖。不同种类的灵芝多糖的单糖组成存在差异性, Yang 等^[6]用高效液相色谱法分析得出赤灵芝多糖主要是由木糖、果糖、葡萄糖、蔗糖和麦芽糖 5 种糖组成,其相对摩尔比为 0.4% : 14.4% : 12.8% : 0.7% : 50.9%, 而 Chen 等^[7]测得黑灵芝多糖仅是由葡萄糖、半乳糖和甘露糖组成,其相对摩尔比为 68.3% : 17.8% : 13.9%。除了单糖组成不同以外,不同种类的灵芝多糖的相对分子质量差别也很大,从 10^3 Da 到 10^6 Da 不等, Ye 等^[8]利用凝胶柱层析法测得赤灵芝子实体的一种多糖的相对分子质量为 7×10^3 Da, 而 Huang 等^[9]用同样的方式测得赤灵芝多糖的相对分子质量却达到 2.5×10^6 Da。此外,灵芝多糖的单糖连接方式也随着多糖种类的不同差异很大,绝大多数单糖以 α -(1 \rightarrow 6)、 β -(1 \rightarrow 3)、 β -(1 \rightarrow 6) 或 β -(1 \rightarrow 4) 为主链连接方式,侧链的种类和结构差别很大。黄静涵等^[10]运用 DEAE-Sephadex A25 离子色谱和 Sepharose CL-6B 凝胶色谱分离纯化得到一种新的灵芝多糖,并对该多糖的连接方式进行了分析,结果表明,该灵芝多糖具有一条以 β -(1 \rightarrow 3) 键合的吡喃葡萄糖主链,同时存在 β -(1 \rightarrow 3)-阿拉伯糖、 β -(1 \rightarrow 4)-半乳糖、 α -(1 \rightarrow 2)-木糖和 α -(1 \rightarrow 6)-葡萄糖的分支残基。

上述灵芝多糖的单糖组成、分子质量范围、糖苷

键的类型等,仅是对灵芝多糖的低级结构分析。而灵芝多糖的高级结构包括二级结构、三级结构和四级结构。多糖的二级结构一般指多糖主链间以氢键为主要次级键而形成的有序结构;另外,以二级结构为基础,通过糖单元间非共价键的相互作用而形成粗大且有序的构象即为多糖的三、四级结构^[11]。研究灵芝多糖的高级结构相当困难,目前研究灵芝多糖高级结构的方法主要有化学分析法、光谱分析法和生物学分析方法,何晋浙等^[12]利用刚果红多糖混合液在碱性溶液中波长的红移变化对灵芝多糖的三螺旋体结构进行分析研究,由于灵芝三螺旋体结构会导致刚果红多糖混合液在碱性溶液中紫外光谱发生位移变化,因此实验测得在 0.2 mol/L NaOH 中,刚果红溶液波长在 500 nm 处,刚果红-多糖混合液波长在 518 nm 处,紫外波长发生了 18 nm 的位移;随着 NaOH 浓度增加到 0.6 mol/L,多糖的三螺旋体结构被破坏,红移消失,说明由于碱浓度的增加,多糖结构从三螺旋体有序结构被破坏至无序结构,这也是一个典型的 β -(1 \rightarrow 3)-葡萄糖的三螺旋体结构性质。

2 灵芝多糖的提取方法

2.1 热水提取法

灵芝多糖微溶于常温水,易溶于热水,但不溶于有机溶剂如乙醇、醚等,利用多糖的这一性质,就能

稀有金属材料与工程,2012,41(1):184-188.

- (上接第 54 页)
- [16] 刘武灿,何兴娇,卢春山. 金属碳化物/氮化物催化剂加氢性能的研究[J]. 工业催化,2005,13(3):1-5.
- [17] Levy R B, Boundart M. Platinum-like behavior of tungsten carbide in surface catalysis[J]. Science,1973,181(4099):547-549.
- [18] Qin Y, Chen P, Duan J Z. Carbon nanofibers supported molybdenum carbide catalysts for hydrodeoxygenation of vegetable oils[J]. RSC Advances,2013,3(38):17485-17491.
- [19] Peter M M, Hudson W P, Jan-Dierk G, et al. Activity and stability of $\text{Mo}_2\text{C}/\text{ZrO}_2$ as catalyst for hydrodeoxygenation of mixtures of phenol and 1-octanol[J]. Journal of Catalysis,2015,328:208-215.
- [20] Anna L J, Robert W G, Jelmer D. Carbon nanofiber supported transition-metal carbide catalysts for the hydrodeoxygenation of guaiacol[J]. Chem Cat Chem,2013,5(10):2964-2972.
- [21] Sepulveda C, Leiva K, Garcia R, et al. Hydrodeoxygenation of 2-methoxyphenol over Mo_2N catalysts supported on activated carbons[J]. Catalysis Today,2011,172(1):232-239.
- [22] Jacques M, Hardi S, Ajay D, et al. Hydrodeoxygenation of oleic acid and canola oil over alumina-supported metal nitrides[J]. Applied Catalysis A: General,2010,382(2):176-180.
- [23] 卢雯婷,陈敬超,冯晶,等. 贵金属催化剂的应用研究进展[J].
- [24] Wildschut J, Mahfud F H, Venderbosch R H, et al. Hydrotreatment of fast pyrolysis oil using heterogeneous noble-metal catalysts[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research,2009,48(23):10324-10334.
- [25] Chen L G, Zhu Y L, Zheng H Y, et al. Aqueous-phase hydrodeoxygenation of carboxylic acids to alcohols or alkanes over supported Ru catalysts[J]. Journal of Molecular Catalysis A,2011,351:217-227.
- [26] West R M, Liu Z Y, Peter M, et al. Liquid alkanes with targeted molecular weights from biomass-derived carbohydrates[J]. Chem Sus Chem,2008,1(5):417-424.
- [27] Xia Q N, Cuan Q, Liu X H, et al. Pd/NbOPO₄ multifunctional catalyst for the direct production of liquid alkanes from aldol adducts of furans[J]. Angewandte Chemie International Edition,2014,53(37):9755-9760.
- [28] 朱俊华,丁洁莲,曾崇余. 载体对钨催化剂催化苯酚加氢制环己酮性能的影响[J]. 催化学报,2007,28(5):441-445.
- [29] 王欣,张舜光,侯凯湖. 非负载 Ni(Co)-Mo-Al₂O₃ 纳米催化剂的制备及其生物油模型化合物加氢脱氧性能研究[J]. 分子催化,2010,24(2):153-157. ■

将多糖从灵芝中提取出来。热水提取法操作简便,是目前工业上多糖提取应用最多的一种方法。为了确定热水提取灵芝多糖的工艺条件,张志军等^[13]以苯酚-硫酸法作为灵芝多糖的测定方法,对浸提过程中的温度、时间以及固液比3个因素进行了正交试验,结果表明,热水提取灵芝多糖的最佳提取条件为温度90℃,时间2 h,料液比1:15,得到的灵芝多糖的提取率为4.06%。但热水提取法存在提取率低、耗时长、料液损失大等缺陷。

2.2 超声波提取法

超声波技术作为一种新型的技术,被广泛地应用于农业、工业和食品等领域的各种方面,研究表明,超声波技术也能应用于灵芝多糖的提取,且效果显著。超声波提取法的原理:超声波是一种弹性机械波,具有强烈的空化效应和机械振动作用,用超声波处理灵芝样品可以破坏灵芝子实体的细胞壁,使多糖溶出。胡斌杰等^[14]以赤灵芝子实体为研究对象,对热水提取法和超声波提取法进行了比较,传统热水提取法的最佳工艺条件:料液比1:20,浸提温度90℃,提取时间2 h,多糖的提取率为1.40%,而超声波法提取灵芝多糖的最佳工艺条件:料液比为1:15,提取温度为60℃,超声时间25 min,灵芝多糖的提取率为1.71%,超声波法与传统热水法相比,提取时间缩短3/4,多糖提取率提高30%以上。Ma等^[15]用响应面的方法对超声波提取灵芝多糖进行了研究,结果显示,超声波提取灵芝多糖的最佳工艺条件为:超声功率320 W,温度69.9℃,超声时间33.2 min,得到的灵芝多糖的提取率为2.74%。相对热水提取法,超声波提取法具有提取率高、提取温度低和提取时间短等优点,但所需的设备投资成本大,尚未应用于工业生产。

2.3 微波提取法

微波是一种超高速电磁波,具有很强的穿透作用,在多糖提取过程中,可以使灵芝细胞中的极性物质尤其是水分迅速升温升压,细胞壁穿孔,使多糖从细胞中溶出,从而提高多糖的提取率^[16]。徐格非等^[17]以灵芝子实体为研究对象,进行了微波辅助法提取灵芝多糖的工艺研究,得到的微波辅助提取法的最适工艺为:首先将料液比1:15的灵芝子实体预浸润1 h,然后在320 W功率下微波提取30 min,再在100℃水浴条件下提取8 h,灵芝多糖的提取率为1.50%,而传统的热水提取法的提取率只有1.31%,微波辅助提取法可使灵芝多糖的提取率提高14.5%。黄璞等^[18]以黑灵芝孢子粉为研究对象,

利用响应面法优化了微波辅助提取黑灵芝孢子粉多糖工艺条件为:温度129℃、微波作用时间27 min、水料比为31:1。多糖提取率达到2.64%。微波辅助提取灵芝多糖提取率高、耗时短,操作简单,但微波提取对设备要求高,样品处理量小,在提取过程中会产生大量的蒸汽,工业上尚未应用。

2.4 酶提取法

酶提取法的原理是:灵芝多糖存在于灵芝子实体的细胞壁内壁,除了灵芝多糖以外,子实体细胞壁还含有蛋白质、纤维素、半纤维、果胶和几丁质等物质,这些物质的存在都会影响多糖的提取,因此可以选择能够作用于这些物质的酶处理灵芝子实体,从而提高灵芝多糖的提取率。陈栋等^[19]对酶法提取灵芝多糖的单因素进行了研究,比较了纤维素酶、果胶酶和木瓜蛋白酶对灵芝多糖的提取效果,发现这3种酶都能提高多糖的提取率,其中纤维素酶提取效果最好,其作用后灵芝多糖的提取率为1.50%,而水提法得到的灵芝多糖的提取率只有1.10%。张天笑等^[20]研究了纤维素酶、木瓜蛋白酶及菠萝蛋白酶复合酶法提取灵芝多糖的工艺条件,结果表明,在最佳复合酶配比纤维素酶1.5%、木瓜蛋白酶0.8%、菠萝蛋白酶3.5%条件下,灵芝粗多糖的提取率为1.70%。酶法辅助提取灵芝多糖,操作简单,投资成本小。但酶法提取也有一定的局限性,酶容易失活,酶的最佳温度及最佳pH范围小,为使酶的活性提高到最大值,必须严格控制酶反应温度及pH,反应条件的微小波动都可能降低酶的活性^[21],因此酶法辅助提取灵芝多糖尚未被应用于生产。

2.5 其他提取法

超临界流体和超高压等方法提取灵芝多糖的研究也有报道,但目前关于这些提取方法的研究还不够深入,提取效果不显著;而超微粉碎技术应用于香菇多糖、金针菇多糖和黑木耳多糖等的提取已有文献报道,提取效果非常明显,但在灵芝多糖提取方面的研究尚未有报道。不同的提取方法都有各自的优缺点,可以根据这些提取方法的特点组合在一起协同作用,发挥各自的优点,提高灵芝多糖的提取效果。如超声波-微波协同提取法和超声波-酶协同提取法中灵芝多糖的提取率明显高于单一提取方法的多糖提取率。

3 灵芝多糖的功能特性

3.1 抗氧化作用

氧化反应是生物体内提供能量的一个重要反

应,然而过多的氧自由基会与细胞中的 DNA、蛋白质和核酸等大分子有机物质结合发生反应,从而使生物组织受到严重的损害,同时衰老和肿瘤等疾病也与氧自由基过剩有很大的关系。

实验证明,灵芝多糖的抗氧化作用十分明显。张志军等^[22]采用铁氰化钾还原法测定灵芝多糖的还原能力,对灵芝多糖清除羟自由基、超氧阴离子的能力进行了研究。结果表明,灵芝多糖具有抗氧化的作用和清除自由基的能力,并且其清除能力与多糖的浓度存在着明显的量效关系。Kao 等^[23]以小鼠白血病单核巨噬细胞为研究对象,将灵芝子实体中提取出来的低分子质量 β -(1 \rightarrow 3)-葡聚糖导入到细胞系中,结果该细胞系的存活率从 40% 增长到了 80%,生存能力明显增强,同时细胞系内活性氧(ROS)含量明显降低。Kan 等^[24]对不同分子质量的灵芝多糖 GLP80、GLP60、GLP40 和 GLP 的抗氧化性质进行了研究,其中 GLP80 抗氧化效果最好,其他几种多糖 DPPH 清除能力和氧自由基清除能力由大到小依次为 GLP、GLP60、GLP40。这说明了不同分子质量的灵芝多糖的抗氧化能力是不同的,为未来寻找抗氧化性显著的多糖提供了指导。

3.2 抗肿瘤作用

灵芝多糖的抗肿瘤作用在 20 世纪 70 年代就开始被报道,研究发现,分子结构中主要由 β -(1 \rightarrow 3) 键连接的灵芝多糖具有抗肿瘤活性。Miyazaki 等^[25]以皮下移植过肉瘤-180 的小鼠为研究对象,用从灵芝孢子粉中提取出来的分支异多糖作用于小鼠,在小鼠腹腔内连续注射灵芝多糖后,小鼠体内肉瘤-180 的抑制率达到了 95.6%~98.5%,该灵芝多糖的侧链为 α -(1 \rightarrow 4)、 β -(1 \rightarrow 6) 和 β -(1 \rightarrow 3) 连接。随后 Sone 等^[26]研究发现,从灵芝子实体和发酵液中提取出来的多糖对肉瘤-180 也有抑制作用,同样这些多糖也具有 β -(1 \rightarrow 3) 和 α -(1 \rightarrow 4) 连接的葡聚糖单元。

研究者们对灵芝多糖抗肿瘤的机理进行了分析,认为灵芝多糖的抗肿瘤作用主要有 2 种途径:促进肿瘤细胞的凋亡和增强机体免疫功能,其中增强机体免疫功能是主要的调节途径^[27]。由于灵芝多糖是大分子物质,无法穿透到细胞内,但是这些大分子物质可以与免疫细胞受体结合从而进行调节。已有实验证明,真菌类的大分子物质有着先天免疫调节功能,但是这种先天免疫系统反应是一个复杂和多因子的过程^[28]。

3.3 降血糖作用

随着人们生活水平的提高,人口老年化及肥胖发生率逐步增加,导致糖尿病的发病率逐年增长,已成为世界严重的公共卫生问题。糖尿病是一种血糖超出平均水平所引起的内分泌代谢疾病,研究实验表明,灵芝多糖具有降血糖的功效。Meng 等^[29]以患糖尿病的小鼠为研究对象,将灵芝多糖作用于小鼠后,小鼠体内胰岛素含量显著提高,血糖浓度明显降低,同时发现灵芝多糖能减弱糖尿病小鼠氧化应激反应,而这种反应是导致糖尿病并发症产生的原因之一。朱科学等^[30]以 II 型糖尿病的大鼠为研究对象,研究了灵芝多糖对糖尿病大鼠血糖的改善关系,结果表明,灵芝多糖具有显著降血糖的作用,显著降低糖尿病大鼠胆固醇(cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)含量和升高高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)含量,从而改善糖尿病大鼠代谢紊乱的功能。

3.4 其他作用

脊椎损伤是导致神经功能紊乱的最主要的原因之一,对人体健康造成了严重的困扰。在最新的研究报告中,Emre 等^[31]发现,在脊椎损伤的小鼠体内半胱氨酸蛋白酶-3 水平、过氧化氢酶的活性、丙二醛含量和一氧化氮含量均有所提高,而在这些小鼠体内注射灵芝多糖后,这些物质的含量都显著下降,同时小鼠脊椎明显好转,说明灵芝多糖对脊椎损伤有着良好的治疗功能。除此之外,丁妍等^[32]对灵芝多糖抗辐射的功能进行了研究,他们以大剂量⁶⁰Co γ 射线全身照射雌性小鼠为放射损伤动物模型,灵芝多糖保护组小鼠在照射前 3 d 及照射后,以不同剂量的灵芝多糖连续灌胃 14 d,观察受致死剂量⁶⁰Co γ 射线照射小鼠的 30 d 存活率及生存时间长短,实验结果证实了灵芝多糖具有抗辐射功能,能显著提高受致死剂量⁶⁰Co γ 射线照射小鼠的存活率。另外,灵芝多糖抗凝血、保护肺损伤、保护肝脏和抗病毒等功能也有报道。

4 结语

目前,国内外在灵芝多糖的提取方法和功能特性等方面的研究取得了较大进展,灵芝多糖的应用领域也越来越广。但是灵芝多糖的提取技术还不成熟,工业上仍采取最传统的热热水提取法,微波提取、超声波提取和酶法提取技术等都仅限于实验室研

究,离工业化生产尚有一定的差距,其他的分离提取方法如超微粉碎等能否应用于灵芝多糖的提取也需要进行实验验证。灵芝多糖的构效关系尚不清楚、多糖纯化技术不稳定等诸多问题尚未解决。因此灵芝多糖的进一步研究方向应集中在改进现有的提取纯化方法和技术,提高多糖的提取效率;借助现代的仪器分析手段,进一步探明灵芝多糖的结构;阐明多糖结构与功能特性之间的关系。相信随着研究的深入,人们对灵芝多糖的结构和功能进一步认识,其应用也会越来越广。

参考文献

- [1] 李晓冰,谢忠礼,朱艳琴,等. 灵芝多糖抗肿瘤机制研究[J]. 中国医药杂志,2013,48(16):1329-1332.
- [2] You Y H, Lin Z B. Protective effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides peptide on injury of macrophages induced by reactive oxygen species[J]. Acta Pharmacol Sinica,2002,23(23):787-791.
- [3] 王君巧,聂少平,余强,等. 黑灵芝多糖对免疫抑制小鼠的免疫调节和抗氧化作用[J]. 食品科学,2012,33(23):274-277.
- [4] 肖春,吴清平,蔡玟,等. 灵芝粗多糖对糖尿病小鼠的降血糖作用[J]. 中国食用菌,2011,30(5):37-39.
- [5] Huie C W, Di X. Chromatographic and electrophoretic methods for *Lingzhi* pharmacologically active components[J]. Journal of Chromatography B,2004,812:241-257.
- [6] Yang Q, Wang S W, Xie Y H, et al. HPLC analysis of *Ganoderma lucidum* polysaccharides and its effect on antioxidant enzymes activity and Bax, Bcl-2 expression[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2010,46(2):167-171.
- [7] Chen X P, Chen Y, Li S B, et al. Free radical scavenging of *Ganoderma lucidum* polysaccharides and its effect on antioxidant enzymes and immunity activities in cervical carcinoma rats[J]. Carbohydrate Polymers,2009,77(2):389-393.
- [8] Ye L B, Zhang J S, Yang Y, et al. Structural characterization of a heteropolysaccharide by NMR spectra[J]. Food Chemistry,2009,112(4):962-966.
- [9] 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]. International Journal of Biological Macromolecules,2011,48(1):165-169.
- [10] 黄静涵,艾斯卡尔·艾拉提,毛健. 灵芝多糖的分离纯化及结构鉴定[J]. 食品科学,2011,32(12):301-304.
- [11] 张冬雪,王晓玲,刘高强. 灵芝多糖的结构及构效关系[J]. 食品工业,2015,36(11):258-261.
- [12] 何晋浙,邵平,孟祥河. 灵芝多糖的结构特征分析[J]. 分析化学,2010,38(3):372-376.
- [13] 张志军,李淑芳,刘建华. 灵芝多糖提取-水浸提条件的研究[J]. 天津农工业学报,2005,12(1):12-15.
- [14] 胡斌杰,陈金锋,王官南. 超声波法与传统热水法提取灵芝多糖的比较研究[J]. 食品工业科技,2007,28(2):190-192.
- [15] Ma C W, Feng M Y, Zhai X F, et al. Optimization for the extraction of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* and their antioxidant and antiproliferative activities[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2013,44(6):886-894.
- [16] 陈业高,海丽娜,毕先钧. 微波辐射在天然药用活性成分提取分离中的应用[J]. 微波学报,2003,19(2):85-89.
- [17] 徐格非,庞秀炳,高向东. 微波辅助法提取灵芝多糖[J]. 药学与临床研究,2007,15(4):297-299.
- [18] 黄璞,谢明勇,聂少平,等. 响应曲面法优化微波辅助提取黑灵芝孢子多糖工艺研究[J]. 食品科学,2007,28(10):200-203.
- [19] 陈栋,周永传,王春丽,等. 酶解法对灵芝多糖提取的影响[R]. 上海:上海市化学化工学会,2007,72-74.
- [20] 张天笑,刘红兵,张文竹,等. 复合酶提取灵芝多糖工艺及其抗氧化能力研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(4):4496-4498.
- [21] 刘富梁,金卫根,梁华正,等. 酶法在中药提取中的研究进展[J]. 时珍国医国药,2006,17(7):1152-1153.
- [22] 张志军,李淑芳,魏雪生. 灵芝多糖清除自由基活性的研究[J]. 食品研究与开发,2012,33(3):167-170.
- [23] Kao P F, Wang S H, Hung W T, et al. Structural characterization and antioxidative of low-molecular-weights Beta-1,3-giucan from the residue of extracted *Ganoderma lucidum* fruiting bodies[J]. Journal of Biomedicine and Biotechnology,2012,2012:1-8.
- [24] Kan Y J, Chen T Q, Wu Y B, et al. Antioxidant activity of polysaccharide extracted from *Ganoderma lucidum* using response surface methodology[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2015,72:151-157.
- [25] Miyazaki T, Nishijima M. Studies on fungal polysaccharides. XXVII. Structural examination of a water-soluble, antitumor polysaccharide of *Ganoderma lucidum*[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin,1981,29(12):3611-3616.
- [26] Sone Y, Okuda R, Wada N, et al. Structures and antitumor activities of the polysaccharides isolated from fruiting body and the growing culture of mycelium of *Ganoderma lucidum*[J]. Agricultural and Biological Chemistry,1985,49(9):2641-2653.
- [27] 谢明勇,聂少平. 天然产物多糖结构与功能研究[M]. 北京:科学出版社,2014:168-169.
- [28] Lowe E, Rice P, Ha T, et al. A(1→3)- β -D-linked heptasaccharide is the unit ligand for glucan pattern recognition receptors on human monocytes[J]. Microbes and Infection,2001,3(10):789-797.
- [29] Meng G, Zhu H, Yang S, et al. Attenuating effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides on myocardial collagen cross-linking relates to advanced glycation end product and antioxidant enzymes in high-fat-diet and streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Carbohydrate Polymers,2011,84(1):180-185.
- [30] 朱科学,聂少平,宋丹,等. 黑灵芝多糖对II型糖尿病大鼠血糖、血脂及肠系膜上动脉病变改善作用[J]. 食品科学,2013,34(23):300-304.
- [31] Emre C, Ramazan Kahveci, Ataur N O M, et al. Neuroprotective effects of *Ganoderma lucidum* polysaccharides against traumatic spinal cord injury in rat[J]. Injury,2015,46(11):2146-2155.
- [32] 丁妍,周向毅,崔莉,等. 灵芝多糖对辐射小鼠的防护作用[J]. 医药研究生学报,2014,27(11):1152-1155. ■