

食用菌抗氧化活性成分及其抗氧化作用机制研究进展

Research advance on antioxidant active composition and antioxidant mechanisms of edible fungi

肖星凝¹ 袁 娅¹ 廖 霞¹ 王丽颖¹ 石 芳¹ 明建^{1,2}

XIAO Xing-ning¹ YUAN Ya¹ LIAO Xia¹ WANG Li-ying¹ SHI Fang¹ MING Jian^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学国家食品科学与工程实验教学中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. National Food Science and Engineering Experimental Teaching Center, Southwest University, Chongqing 400715, China)

摘要:食用菌不仅味道鲜美,而且具有多种生物活性,其中最重要的活性之一就是抗氧化活性。食用菌中的抗氧化活性成分主要包括多糖类、多酚类、萜类和硒类等。文章综述了国内外食用菌抗氧化成分及其抗氧化作用机制的研究现状,旨在进一步发掘和利用食用菌的食药价值,扩大其在食品和医药领域的应用范围。

关键词:食用菌;抗氧化活性;作用机制

Abstract: Edible fungi are tasty as well as full of all kinds of biological activity, and the antioxidation is one of the most important activities among them. Polysaccharides, polyphenols, terpenoids, and selenium are the major antioxidants of edible fungi. In this paper, it was reviewed the research advance of antioxidant substances and the antioxidant mechanism of edible fungi, and the future research direction was also summarized, aiming to develop and utilize edible and medicinal values of the polysaccharides in the future, and improve its application in the fields of food and medicine.

Keywords: edible fungi; antioxidant activity; antioxidant mechanism

近年来,由自由基和活性氧(ROS)引起的细胞氧化损伤和衰老备受人们的关注^[1-2]。当机体内自由基积累过多时,可能会造成糖降解、DNA 链断裂、蛋白质变性、细胞膜结构损伤或解体,从而引发动脉粥样硬化、癌症等疾病^[3-4]。虽然细胞和有机体含有天然的抗氧化系统,包括一系列保护酶(SOD、CAT 等)和酶类抗氧化剂,但不足以完全修复氧化损

伤^[5-6]。为了减少自由基造成的氧化损伤,大量合成的抗氧化剂被广泛应用,如叔丁基对苯二酚(TBHQ)、没食子酸丙酯(PG)等^[7]。但有研究^[8]表明,合成抗氧化剂对人体健康具有一定的潜在危害,如肝损伤和致癌作用。同时,有学者^[9-10]研究发现茶叶、葡萄酒、可可中含有丰富的多酚类化合物,它们也能够清除自由基,有效防御氧化作用,而且几乎没有危害。因此,获取天然抗氧化活性成分对预防自由基氧化损伤引发的各种疾病有着极其重要的意义。

食用菌味道鲜美、营养丰富,含氨基酸、蛋白质、矿物元素、维生素等多种营养成分^[11-12]。同时还含有多糖类、多酚类、生物碱类、萜类、植物甾醇等多种次生代谢产物^[13],表现出抗氧化、抗衰老、抗肿瘤、降血糖和降脂等功能活性。因此,食用菌逐渐成为深受人们喜爱的健康食品^[14-15]。研究^[16-17]表明,食用菌具有明显的抗氧化活性,并与菌体的多酚及多糖含量密切相关。国内外学者^[18-22]对食用菌的抗氧化活性研究取得了较多的成果。本文综述了食用菌中抗氧化活性成分及其作用机制,旨在为食用菌类健康食品的开发提供科学依据。

1 食用菌中抗氧化物质

1.1 多糖类

食用菌多糖广泛地存在于各种食用菌中。研究^[23]发现,食用菌多糖能够清除活性氧、抑制脂质过氧化、提高抗氧化酶活性,起到保护细胞膜和抗衰老的作用。猴头菇多糖^[24]、香菇多糖^[24]、银耳多糖^[24]、鸡腿菇多糖^[24]、灰树花多糖^[24]、毛木耳多糖^[25]、牛肝菌多糖^[26]、树舌灵芝多糖^[27]、灵芝多糖^[27]、云芝多糖^[27]、血红铆钉菇多糖^[28]、杯伞菌多糖^[29]都能够不同程度地清除 DPPH⁺ 自由基、羟自由基($\cdot\text{OH}$)和超氧阴离子自由基(O_2^-)。Liu 等^[30]报道了白灵菇、杏鲍菇和姬菇菌丝体多糖清除羟基自由基的能力分别为 32.20%, 16.10%, 8.70%, 清除 DPPH⁺ 自由基的能力分别为

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: XDJK2016E113); 重庆市社会民生科技创新专项(编号: cstc2015shmszx80019); 国家自然科学基金面上项目(编号: 31271825); 国家自然科学基金面上项目(编号: 31471576)

作者简介: 肖星凝,女,西南大学在读本科生。

通信作者: 明建(1972—),男,西南大学教授,博士。

E-mail: mingjian1972@163.com

收稿日期: 2016-07-15

17.90%,16.80%,20.50%,清除超氧阴离子的能力分别为19.10%,16.30%,20.30%。Thetsrimuang 等^[31]研究发现新鲜香菇、香菇子实体、香菇菌丝体 3 种粗多糖抗氧化活性大小为菌丝体>子实体>新鲜香菇。松茸多糖 TMP-A 的抗氧化活性与 Vc 相当,可以明显减轻 H₂O₂诱导的 PC12 细胞损伤^[32]。姬菇菌丝体锌多糖 MZPS 能够明显提高衰老模型小鼠中的超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶活性,并能明显降低小鼠体内丙二醛等脂质过氧化物的含量^[33]。

1.2 多酚类化合物

多酚类化合物是一类重要的天然抗氧化剂,能够清除自由基和淬灭活性氧,主要包括酚酸类、黄酮类、单宁类以及花色苷类等植物次生代谢产物。一些重要的食用菌中多酚物质被发现具有抗氧化活性^[34]。Palacios 等^[35]研究发现双孢蘑菇、杏杏丽蘑、鸡油菌、喇叭菌、蜡伞菌、松乳菇、平菇等食用菌中酚类物质含量在 1~6 mg/g,黄酮类物质含量为0.9~3.0 mg/g,均对亚油酸自动氧化表现出抑制作用,其中鸡油菌抑制脂质过氧化作用最强,双孢蘑菇抗氧化活性最低。陈龙等^[36]研究发现金耳、银耳、木耳 3 种食用菌中槲皮素含量相当,金耳和银耳中芦丁和表儿茶素含量较高,木耳中儿茶素和绿原酸含量较高,3 种食用菌多酚均有极强的抗氧化活力。Heleno 等^[37]研究发现 18 种葡萄牙野生蘑菇的酚类物质含量均达到 7.9 mg/g,均有明显的抗氧化活性。王婷婷等^[38]研究发现 4 种野生菌(黄皮疣柄牛肝菌、马勃菌、黑牛肝菌、鸡枞)多酚含量大小为黄皮疣柄牛肝菌>马勃菌>黑牛肝菌>鸡枞,黄皮疣柄牛肝菌多酚抗氧化活性最好,黑牛肝菌相对其他野生菌抗氧化活性较差。

1.3 萜类化合物

萜类化合物是指具有(C₅H₈)_n通式及其不同饱和程度的含氧衍生物,具有抑菌、抗氧化等作用^[39]。Dissanayake 等^[40]研究发现平菇麦角甾醇能够有效抑制油脂的氧化。Intaraudom 等^[41]研究发现小皮伞科中一种新螺环倍半萜类物质,具有抑制蜡样芽孢杆菌的作用。刘晓珍等^[42]研究发现黑灵芝中三萜类化合物含量为 40.92%,具有清除 DPPH⁺自由基能力、还原力和螯合亚铁离子能力,对β-胡萝卜素-亚油酸能产生抑制作用,充分说明黑灵芝中三萜类化合物具有较强的抗氧化活性。

1.4 硒类物质

硒是一种重要的膳食微量元素,同时也是一种抗氧化物质,对人体健康有着至关重要的作用。天然野生食用菌中含有硒,主要以硒多糖、硒蛋白等形式存在,但含量相对较低。硒多糖能显著提高血液中硒的含量和 GSH-Px 的活性,降低脂质过氧化物的含量,提高机体修复活性氧损伤的能力。Malinowska 等^[43]研究发现猴头菇的富硒多糖可以明显地抑制脂质过氧化,抑制能力随着富硒多糖浓度的增加而增加。另有研究^[44]表明富硒的香菇提取物比普通香菇提取物具有更好的抗氧化活性。吴丹^[45]研究发现硒多糖浓度在 50~250 μg/mL 内,富硒平菇多糖和富硒香菇多糖均具有一定的清除羟自由基(·OH)和超氧阴离子自由基(O₂⁻)的能力,且

清除率随着多糖浓度的增加而上升。灵芝中提取、纯化后的硒蛋白表现出很强的·OH 和 O₂⁻ 的清除能力,其抗氧化能力随着硒蛋白中硒含量的增加而增强^[46]。

2 食用菌抗氧化作用机制

抗氧化剂的种类、结构不同,抗氧化作用机制也会不同。食用菌的抗氧化作用机制主要包括:自由基直接清除作用、脂质氧化抑制作用、螯合过渡金属离子、激活体内抗氧化相关酶活性等。

2.1 直接清除自由基

自由基是细胞正常生理活动的代谢产物,主要包括羟自由基(·OH)、超氧阴离子自由基(O₂⁻)、过氧化脂质、过氧化氢和单线态氧 5 种自由基。自由基过量堆积会对机体产生危害,如羟基自由基能产生极强的氧化作用,是造成蛋白质和多糖分解、脂质过氧化、核酸断裂的主要自由基。超氧负离子自由基能引发体内脂质过氧化,加速机体衰老,引发癌症、心血管疾病等一系列疾病。因此,直接清除自由基是食用菌抗氧化非常重要的作用机制之一。

食用菌中黄酮、多酚、多糖可以直接淬灭单线态氧、阻止自由基链式反应及脂质过氧化等来避免机体产生氧化损伤。Jayakumar 等^[47]研究发现 10 mg/mL 的平菇乙醇提取物对 O₂⁻ 的清除率达到 60.02%。李波等^[4]研究发现七种云南产食用菌清除·OH 的能力大小为:黄牛肝菌>鸡油菌>块菌>竹荪>黑虎掌>美味牛肝菌>草菇,黄牛肝菌的清除能力最强。Kurni 等^[48]研究发现野生灵芝的甲醇提取物能较好地清除 DPPH⁺ 自由基,主要因为含有较多的植物多酚和类黄酮。

2.2 抑制脂质过氧化

正常情况下,氧自由基反应和脂质过氧化反应在机体新陈代谢过程中处于动态平衡状态,维持着机体许多正常的生理生化反应和免疫反应。一旦这种平衡失衡,就会引起氧自由基连锁反应,形成脂质过氧化物(LPO)、丙二醛(MDA)和 4-羟基壬烯酸(HNE),从而改变了细胞膜的流动性和通透性,最终导致细胞结构和功能改变。

食用菌中多糖、黄酮类物质可与脂质链式氧化反应的中间产物(脂自由基或脂氧自由基)反应,从而终止链反应,抑制脂质氧化。采用微波辅助提取的黑木耳多糖和超声波法提取的黑木耳多糖均能够抑制脂质过氧化过程,降低脂质过氧化水平^[49-50]。Hua 等^[51]研究发现竹荪水溶性多糖可以降低受试小鼠体内 MDA 的含量,同时减轻脂褐质水平。李芳亮等^[52]研究发现褐蘑菇水溶性多糖对 H₂O₂ 诱导的红细胞氧化溶血及血浆 MDA 生成有很强的抑制作用。

2.3 螯合过渡金属离子

多酚环上的羟基通过与 Fe²⁺ 或 Cu²⁺ 络合,避免了脂质过氧化反应,从而抑制氧自由基的产生^[53]。如 Fe²⁺ 既能介导脂质过氧化,也是·OH 产生的催化剂。

研究^[54]发现食用菌多糖或多酚提取物可以通过螯合过渡金属离子来抑制氧自由基的产生且螯合能力也是随着提取物浓度的增加而增加。Liu 等^[20]研究发现 5 种野生蘑菇

水提物和醇提物均有螯合亚铁离子的作用,其中水提物螯合亚铁离子的能力比醇提物更强。Wong 等^[55]研究发现马来西亚锥形湿伞菌的甲醇提取物在浓度 20 mg/mL 时螯合金属离子能力达到 94%。Yaltirak 等^[56]研究发现红菇的乙醇提取物在浓度 5 mg/mL 时螯合亚铁离子能力达到 58%。Gursoy 等^[57]研究发现 7 种不同羊肚菌的甲醇提取物对过渡金属离子的螯合能力随着提取物浓度的增加而增加。

2.4 激活机体抗氧化体系相关酶

机体自身的抗氧化体系包括酶系统和非酶系统。超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化物氢酶(CAT)等是体内主要的抗氧化酶,这些酶可以清除自由基和脂质过氧化物,如 SOD 可清除 O²⁻, GSH-Px 可清除脂质过氧化物,而 CAT 可清除红细胞及线粒体中的 H₂O₂。机体内一些小分子物质(如 Vc、V_E和 GSH 等)则构成体内抗氧化的非酶系统。

食用菌中多糖或多酚可以通过抑制氧化酶系(如过氧化物酶、脂氧化酶以及 P-450 酶系等)或激活抗氧化酶来发挥抗氧化作用^[58]。大球盖菇多糖(SRP)可使小鼠 MDA 含量显著降低、GSH-Px 活性和总抗氧化能力显著提高^[59]。竹荪子实体水溶性多糖可提高小鼠体内中 SOD、GSH-Px 活性^[60]。白蘑菇的乙醇提取物可提高小鼠肝脏、心脏和血清中抗氧化酶的活性^[61]。

2.5 其他抗氧化机理

抗氧化物质还可以通过提高免疫淋巴细胞活性、增强机体免疫能力而起到抗氧化作用。正常情况下,淋巴细胞需要一定的活性氧存在才能开展其正常的防御功能,如果活性氧过量,就容易产生氧化损伤而失去免疫活性。Fuente 等^[62]研究发现谷胱甘肽(GSH)、N-乙酰半胱氨酸(NAC)、硫代脯氨酸(TP)和牛磺酸(TAU)对小鼠淋巴细胞有促增殖作用,当 GSH 浓度为 5 mmol/L,TP 浓度为 1 mmol/L,NAC 和 TAU 浓度为 40 mmol/L 时,对淋巴细胞促增殖作用最大。Gao 等^[63]研究发现血红铆钉菇菌丝体多糖 GRMP1 和 GRMP2 具有一定的抗淋巴细胞增殖活性。

3 结语

目前,有关食用菌中抗氧化物质及抗氧化作用机制已开展较多研究,但因食用菌品种繁多,抗氧化活性成分复杂,对食用菌抗氧化的研究也主要集中在食用菌多糖方面,而对于食用菌中其它抗氧化物质的组成、抗氧化机制、生物利用度、构效关系等方面研究较少,比如萜类物质。食用菌中抗氧化活性物质结构与活性之间的构效关系将是今后研究的重点,对食用菌多糖进行结构化修饰以提高其抗氧化活性也是未来研究趋势之一。

在抗氧化活性评价方法方面,多采用传统化学抗氧化活性评价方法,但这些方法并不能完全准确地反映抗氧化物质在人体内的抗氧化活性及其机制。采用更为接近机体环境的抗氧化活性评价方法(如细胞抗氧化测定方法(CAA)和动物实验等方法),才能更加准确地反映出活性物质的抗氧化活性。因此,创新抗氧化活性评价方法,开展抗氧化活性评

价及作用机制的研究,必将是今后抗氧化领域研究的一个重要方向。

参考文献

[1] SEIFRIED H E, ANDERSON D E, FISHER E I, et al. A review of the interaction among dietary antioxidants and reactive oxygen species[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2007, 18(9): 567-579.

[2] KIM D B, SHIN G H, KIM J M, et al. Antioxidant and anti-ageing activities of citrus-based juice mixture[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 920-927.

[3] 党蕾,郝佳欣,江海涛.几种食用菌多糖抗氧化活性比较[J].安徽农学通报,2010,16(5):76-77.

[4] 李波,徐贵华,芦非,等.七种云南产食用菌的抗氧化活性研究[J].食用菌,2010(2):66-67.

[5] FERNÁNDEZ-TOMÉ S, RAMOS S, CORDERO-HERRERA I, et al. In vitro chemo-protective effect of bioactive peptide lunasin against oxidative stress in human HepG2 cells[J]. Food Research International, 2014, 62: 793-800.

[6] ZHENG Lan, LIU Min, ZHAI Guo-yin, et al. Antioxidant and anti-ageing activities of mycelia zinc polysaccharide from pholiotanameko SW-03[J]. Science of Food and Agriculture, 2015, 95(15): 3 117-3 126.

[7] SUN Yong-xu, KENNEDY J F. Antioxidant activities of different polysaccharide conjugates (CRPs) isolated from the fruiting bodies of *Chroogomphus rutilus* (Schaeff.: Fr.) O. K. Miller[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 510-514.

[8] YUAN Jiang-feng, ZHANG Zhi-qin, FAN Zhi-chao, et al. Antioxidant effects and cytotoxicity of three purified polysaccharides from *Ligusticum chuanxiong* Hort[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(4): 822-827.

[9] SCHROETER H, HEIS C, BALZERJ, et al. (-)-Epicatechin mediates beneficial effects of flavanol-rich cocoa on vascular function in humans[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(4): 1 024-1 029.

[10] FENERCIOGLU A K, SALER T, GENÇ E, et al. The effects of polyphenol-containing antioxidants on oxidative stress and lipid peroxidation in Type 2 diabetes mellitus without complications[J]. Journal of Endocrinological Investigation, 2010, 33(2): 118-124.

[11] SULLIVAN R, SMITH J E, ROWAN N J. Medicinal mushrooms and cancer therapy: translating a traditional practice into western medicine[J]. Perspectives in Biology and Medicine, 2006, 49(2): 159-170.

[12] 邹盛勤,陈武.食用菌的营养成分·药理作用及开发利用[J].安徽农业科学,2005,33(3):502-503.

[13] GEOSL A, SIPOS L, STEFANOVITS-BANYAI E, et al. Antioxidant, polyphenol and sensory analysis of *Agaricus bisporus* and *Agaricus subrufescens* cultivars [J]. Acta Alimentaria, 2011, 40(1): 33-40.

[14] GUILLAMÓN E, GARCÍA-LAFUENTE A, LOZANO M, et al. Edible mushrooms: Role in the prevention of cardiovascular diseases[J]. Fitoterapia, 2010, 81(7): 715-723.

[15] KALAC P. Chemical composition and nutritional value of European species of wild growing mushrooms: A review[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 9-16.

[16] BAI Ming-sheng, WANG Chen, ZONG Shi-chun, et al. Antioxidant polyketide phenolic metabolites from the edible mushroom *Cortinarius purpurascens* [J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3 424-3 427.

[17] XIAO Jian-hui, XIAO Dai-ming, CHEN Dai-xiong, et al. Polysaccharides from the medicinal mushroom *Cordyceps taii* show antioxidant and immunoenhancing activities in a *D*-Galactose-induced aging mouse model[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2012, 2 012: 1-15.

[18] REIS F S, MARTINS A, BARROS L, et al. Antioxidant properties and phenolic profile of the most widely appreciated cultivated mushrooms: A comparative study between in vivo and in vitro samples[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50 (5): 1 201-1 207.

[19] ORHAN I, ÜSTÜN O. Determination of total phenol content, antioxidant activity and acetylcholinesterase inhibition in selected mushrooms from Turkey[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2011, 24(3): 386-390.

[20] LIU Yun-tao, SUN Jun, LUO Ze-yu, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from Southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5): 1 238-1 244.

[21] LEAL A R, BARROS L, BARREIRA J C M, et al. Portuguese wild mushrooms at the “pharma-nutrition” interface: Nutritional characterization and antioxidant properties[J]. Food Research International, 2013, 50(1): 1-9.

[22] LALOGEROPOULOS N, YANNI A E, KOUTROTAIS G, et al. Bioactive microconstituents and antioxidant properties of wild edible mushrooms from the island of Lesbos, Greece[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 55: 378-385.

[23] 陈爱葵, 易广, 李爱群. 食用菌在提高人体免疫力方面的功效[J]. 中国食用菌, 2004, 23(3): 7-9.

[24] 周萍, 安东, 王朝川, 等. 食用菌复合多糖的抗氧化活性研究[J]. 中国食用菌, 2011, 30(6): 42-45.

[25] SUN Yong-xu, LIU Ji-cheng, KENNEDY J F. Purification, composition analysis and antioxidant activity of different polysaccharide conjugates (APPs) from the fruiting bodies of *Auricularia polytricha* [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 299-304.

[26] ZHANG An-qiang, XIAO Nan-nan, HE Peng-fei, et al. Chemical analysis and antioxidant activity in vitro of polysaccharides extracted from *Boletus edulis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 49(5): 1092-1095.

[27] KOZARSKIA M, KLAUSA A, NIKŠI M, et al. Antioxidative activities and chemical characterization of polysaccharide extracts from the widely used mushrooms *Ganoderma applanatum*, *Ganoderma lucidum*, *Lentinus edodes* and *Trametes versicolor* [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2012, 26(1/2): 144-153.

[28] VAZ J A, BARROS L, MARTINS A, et al. Chemical composition of wild edible mushrooms and antioxidant properties of their water soluble polysaccharidic and ethanolic fractions[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 610-616.

[29] GAO Chan-juan, WANG Zhang-yong, SU Ting-ting, et al. Optimisation of exopolysaccharide production by *Gomphidius rutilus* and its antioxidant activities in vitro[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(3): 2 299-2 305.

[30] LIU Xiao-nan, ZHOU Bo, LIN Rong-shan, et al. Extraction and antioxidant activities of intracellular polysaccharide from *Pleurotus* sp. mycelium[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(2): 116-119.

[31] THETSIRIMUANG C, KHAMMUANG S, CHIABLAEM K, et al. Antioxidant properties and cytotoxicity of crude polysaccharides from *Lentinus polychrous* Lév [J]. Food Chemistry, 2011, 128(3): 634-639.

[32] DING Xiang, TANG Jie, CAO Mei, et al. Structure elucidation and antioxidant activity of a novel polysaccharide isolated from *Tricholoma matsutake* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(2): 271-275.

[33] ZHANG Jian-jun, MA Zhao, ZHENG Lan, et al. Purification and antioxidant activities of intracellular zinc polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* SS-03 [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 111: 947-954.

[34] CHEUNG L M, CHEUNG P C K, OOI E C. Antioxidant activity and total phenolics of edible mushroom extracts[J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 249-255.

[35] PALACIOS I, LOZANO M, MORO C, et al. Antioxidant properties of phenolic compounds occurring in edible mushrooms[J]. Food Chemistry, 2011, 128(3): 674-678.

[36] 陈龙, 李文峰, 令博, 等. 金耳、银耳、木耳多酚提取及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 52-56.

[37] HELENO S A, BARROS L, SOUSA M J, et al. Tocopherols composition of Portuguese wild mushrooms with antioxidant capacity[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1 443-1 450.

[38] 王婷婷, 游金坤, 严明, 等. 4种野生菌多酚的体外抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(9): 148-152.

[39] 李亮, 尚晓东, 谭琦. 担子菌中甲羟戊酸途径影响萜类物质合成的研究[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(3): 53-61.

[40] DISSANAYAKE D P, BEYTUNGA D T U, VASUDEWAN S, et al. Inhibition of lipid peroxidation by extracts of *Pleurotus Ostreatus* [J]. Pharmacognosy Magazin, 2009, 5 (19): 266-271.

[41] INTARAUDOM C, BOONYUEN N, SUPOTHINA S, et al. Novel spiro-sesquiterpene from the mushroom *Anthracyllum* sp. BCC18695 [J]. Phytochemistry Letters, 2013, 6(3): 345-349.

[42] 刘晓珍, 聂少平, 李文娟, 等. 黑灵芝中性提取物三萜含量测定及抗氧化作用研究[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2011, 4(6): 332-337.

[43] MALINOWSKA E, KRZYCZKOWSKI W, HEROLD F, et al. Biosynthesis of selenium-containing polysaccharides with antioxidant activity in liquid culture of *Hericiumerinaceum* [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, 44(5): 334-343.

[44] TURLO J, GUTKOWSKA B, HEROLD F. Effect of selenium enrichment on antioxidant activities and chemical composition of *Lentinula edodes* (Berk.) Pegl. mycelial extracts[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(4): 1 085-1 091.

[45] 吴丹. 富硒香菇多糖和富硒平菇多糖体外抗氧化活性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5 841-5 843.

[46] 杜明, 赵镭, 陈芳, 等. 富硒灵芝中高抗氧化活力、高硒含量的水溶性硒蛋白的纯化[J]. 食品发酵与工业, 2006, 32(2): 108-112.

[47] JAYAKUMAR T, THOMAS P A, GERALDINE P. In-vitro antioxidant activities of an ethanolic extract of the oyster mushroom, *Pleurotusostreatus* [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(2): 228-234.

[48] KURNI Nagaraja, MALLIKARJUN N, RAJA Naika, et al. Antioxdatave activities of wild macro fungi *Ganodermaapplanatum* (Pers.) [J]. Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research, 2014, 7(3): 166-171.

[49] ZENG Wei-cai, ZHANG Zeng, GAO Hong, et al. Characterization of antioxidant polysaccharides from *Auricularia auricular* using microwave-assisted extraction [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(2): 694-700.

[50] MA Jiang-wei, QIAO Zeng-yong, XIANG Xia. Optimisation of extraction procedure for black fungus polysaccharides and effect of the polysaccharides on blood lipid and myocardium antioxidant enzymes activities [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(3): 1 061-1 068.

[51] HUA Yang-lin, YANG Bao, TANG Jian, et al. Structural analysis of water-soluble polysaccharides in the fruiting body of *Dictyophora indusiata* and their in vivo antioxidant activities[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 343-347.

[52] 李芳亮, 王锐, 刘莹, 等. 褐蘑菇水溶性多糖抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究开发, 2012, 24(3): 374-377.

[53] 刘慧刚. 天然植物有效成份茶多酚和大蒜素拮抗三丁基锡毒性作用效果的研究及机制的探讨[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 38-56.

[54] 孙娟, 郑朝辉, 刘磊, 等. 4 种珍稀食用菌粗多糖的抗氧化活性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(3): 404-409.

[55] WONG J Y, CHYEF Y. Antioxidant properties of selected tropical wild edible mushrooms [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2009, 22(4): 269-277.

[56] YALTIRAK T, ASLIM B, OZTURK S, et al. Antimicrobial and antioxidant activities of *Russuladelica* Fr. [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(8): 2 052-2 056.

[57] GURSOY N, SARIKURKCU C, CENGIZ M, et al. Antioxidant activities, metal contents, total phenolics and flavonoids of seven *Morchella species* [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(9): 2 381-2 388.

[58] 侯玉艳, 桑兰, 游金坤, 等. 食用菌多酚的生物活性研究进展[J]. 中国食用菌, 2014, 33(6): 1-4.

[59] 王峰, 王晓炜, 陶明, 等. 大球盖菇多糖清除自由基活性和对 D-半乳糖氧化损伤小鼠的抗氧化作用[J]. 食品科学, 2009, 30(5): 233-238.

[60] 谭楹新, 叶涛, 刘湘新, 等. 植物提取物抗氧化成分及机理研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 288-292.

[61] LIU Jun, JIA Liang, KAN Juan, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of ethanolic extract of white button mushroom (*Agaricusbisporus*) [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 51: 310-316.

[62] FUENTE M D L, HEMANZ A, VINIEGRA S, et al. Sulfur-containing antioxidants increase in vitro several functions of lymphocytes from mice [J]. International Immunopharmacology, 2011, 11(6): 661-669.

[63] GAO Chan-juan, WANG Yan-hua, WANG Chen-yu, et al. Antioxidant and immunological activity in vitro of polysaccharides from *Gomphidiusrutilus* mycelium [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 2 187-2 192.

(上接第 125 页)

[10] 郭恩有, 刘木华, 赵杰文, 等. 脐橙糖度的高光谱图像无损检测技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 91-93, 103.

[11] ZHAO Jie-wen, CHEN Quan-sheng, VITTAYAPADUNG S, et al. Determination of apple firmness using hyperspectral imaging technique and multivariate calibrations [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 226-231.

[12] 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128-133, 185.

[13] RAJKUMAR P, WANG Ning, EIMASRY G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194-200.

[14] 洪添胜, 乔军, MICHAEL O Ngadi, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151-155.

[15] 单佳佳, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于高光谱成像技术的苹果内外部品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 140-144.

[16] ZHU Da-zou, WANG Kun, PAN Bin-shuang, et al. Identification of Wheat Cultivars Based on the Hyperspectral Image of Single Seed [J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2012, 7: 167-172.

[17] 周竹, 李小昱, 陶海龙, 等. 基于高光谱成像技术的马铃薯外部缺陷检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 221-228.

[18] 高海龙, 李小昱, 徐森森, 等. 透射和反射高光谱成像的马铃薯损伤检测比较研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3 366-3 371.

[19] 中华人民共和国农业部. NY/T 1066—2006 马铃薯等级规格[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[20] ARAUJO M C U, SALDANHA T C B, GALVAO R K H, et al. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 57: 65-73.

[21] WU Wei, WALCZAK B, MASSART D L, et al. Artificial neural networks in classification of NIR spectral data: design of the training set [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory System, 1996, 33(1): 35-46.

[22] 吴佳, 汤全武, 史崇升, 等. 马铃薯品质无损检测技术研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 257-271.