

3种食用菌多糖的抗氧化活性和抑菌能力比较

苏安祥¹, 徐紫依¹, 金红举², 韦博艺¹, 祝玲玲¹, 杨苑兰¹, 杨文建¹, 胡秋辉¹

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院 江苏省食用菌保鲜与深加工工程研究中心, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023; 2. 甘肃省庆阳市合水县蔬菜开发办公室, 甘肃庆阳 745400)

摘要:以金针菇、黑木耳和银耳为原料制备食用菌多糖,测定多糖清除羟基自由基、超氧阴离子自由基、DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的能力,分析多糖对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌以及枯草芽孢杆菌的抑菌能力。结果显示,3种多糖对4种自由基均具有清除能力,金针菇多糖对 DPPH 自由基清除能力最强,浓度为 1.0 mg/mL 时,清除率可达 90% 以上;黑木耳多糖对超氧阴离子自由基和 ABTS⁺自由基的清除能力整体优于其余两种多糖;浓度为 1.0 mg/mL 时,3种食用菌多糖对羟基自由基最高清除率均达到 95% 以上。3种食用菌多糖对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌效果均随多糖浓度的增加而增强,其中金针菇多糖的抑菌能力最强。3种食用菌多糖可作为食品抗氧化剂和防腐剂。

关键词: 金针菇多糖;黑木耳多糖;银耳多糖;抗氧化活性;抑菌能力

Antioxidant and Antimicrobial Activities of Polysaccharides from Three Edible Mushrooms

SU Anxiang¹, XU Ziyi¹, JIN Hongju², WEI Boyi¹, ZHU Lingling¹,
YANG Yuanlan¹, YANG Wenjian¹, HU Qiuhui¹

(1. Jiangsu Province Engineering Research Center of Edible Fungus Preservation and Intensive Processing, Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Vegetable Development Office, Heshui County, Qingyang City, Qingyang 745400, Gansu, China)

Abstract: *Flammulina velutipes*, *Auricularia auricular*, and *Tremella fuciformis* were used as raw materials for the extraction of fungal polysaccharides. The antioxidant and antimicrobial activities of different polysaccharides were determined and compared. The scavenging abilities of fungal polysaccharides from the three edible mushrooms against hydroxyl ($\cdot\text{OH}$), superoxide anion ($\text{O}_2^{\cdot-}$), 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS⁺) free radicals were measured. The antimicrobial activities of the three polysaccharides against *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, and *Bacillus subtilis* were measured by the filter paper method. The results showed that the three fungal polysaccharides exhibited scavenging abilities against the four free radicals and strong antioxidant activity within the test concentration ranges. *F. velutipes* polysaccharides had the strongest scavenging ability against DPPH free radicals, with the highest scavenging rate over 90%. *A. auricula* polysaccharides demonstrated stronger scavenging abilities against superoxide anion and ABTS⁺ free radicals than the other two polysaccharides. All three polysaccharides exhibited hydroxyl radical scavenging rates over 95%. The inhibitory effects of all the fungal polysaccharides on *E. coli* and *S. aureus* enhanced with the increase in the polysaccharide concentration. Among these polysaccharides, *F. velutipes* polysaccharides had the strongest inhibitory effect on bacteria. In conclusion, the three fungal polysaccharides had strong antioxidant and antimicrobial activities, serving as candidate food antioxidants and preservatives.

Key words: *Flammulina velutipes* polysaccharides; *Auricularia auricularia* polysaccharides; *Tremella fuciformis* polysaccharides; antioxidant activity; antimicrobial activity

引文格式:

苏安祥,徐紫依,金红举,等.3种食用菌多糖的抗氧化活性和抑菌能力比较[J].食品研究与开发,2025,46(5):16-21.
SU Anxiang, XU Ziyi, JIN Hongju, et al. Antioxidant and Antimicrobial Activities of Polysaccharides from Three Edible Mushrooms[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 16-21.

多糖、活性蛋白等是食用菌的主要活性物质,研究证实这些活性物质具有抗肿瘤、抗氧化、降血糖、增强免疫等功能^[1]。食用菌多糖的抗氧化活性主要通过清除自由基能力的强弱体现。机体在整个代谢过程中产生大量的自由基,而当自由基在机体产生的数量超出了机体自身能够清除的数量时,将造成机体内蛋白质变性、细胞解体、生物膜结构破坏,甚至可能引起机体病变和导致机体的死亡^[2]。许多天然物质具有抗氧化能力,近年来,食用菌多糖的抗氧化活性研究引起了广泛关注^[3],例如有学者从白灵芝^[4]、秀珍菇^[5]等食用菌中提取多糖,发现其对于机体中的1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基、超氧阴离子自由基等有明显的清除效果。张博华等^[6]以大球盖菇、金针菇、香菇3种食用菌为原料提取真菌多糖,发现这3种多糖均具有抗氧化活性,并且3种真菌多糖之间抗氧化活性存在一定的强弱关系。

食用菌多糖除了具有较好抗氧化活性,还具备抑菌活性,是环境友好型天然抑菌剂来源。近些年,对于食用菌多糖抑菌作用研究不断深入,李向阳等^[7]从原木花菇和袋栽花菇的香菇子实体中提取多糖,并对常见致病菌进行抑菌试验,发现香菇多糖对金黄色葡萄球菌、绿脓杆菌、大肠杆菌和枯草芽孢杆菌均具有一定的抑菌作用,并且原木花菇中的香菇多糖抑菌效果更好;罗敬文等^[8]以3种木耳为原材料提取多糖并对多糖的生理活性进行研究,发现玉木耳、毛木耳、黑木耳多糖均具有抑菌活性,并且不同品种的木耳多糖所抑制的菌属具有一定的差异。以上研究对不同培养基质、不同类型的食用菌抑菌能力进行了比较,但不同品种的食用菌多糖抑菌能力研究较少,因此有必要对常见食用菌多糖的抑菌和抗氧化活性进行比较研究,以充分利用食用菌多糖抗氧化活性和抑菌活性,促进食用菌活性多糖的应用和相关产品开发。

本研究以金针菇、银耳和黑木耳3种食用菌为原料,通过热水浸提法制备食用菌多糖,对3种多糖抗氧化活性与抑菌活性进行比较分析,以期对金针菇、银耳和黑木耳多糖抗氧化与抑菌产品的开发提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

黑木耳、银耳:市售;金针菇冻干粉:北京绿友食品有限公司;大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌、

枯草芽孢杆菌:广东省微生物菌种保藏中心;水杨酸、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠:国药集团化学试剂有限公司;邻苯三酚、三羟甲基氨基甲烷(Tris):无锡市亚泰联合有限公司;30% H₂O₂试剂、铁氰化钾、三氯乙酸、过硫酸钾:天津市巴斯夫化工有限公司;盐酸试剂、三氯化铁:天津市科密欧化学试剂有限公司;硫酸亚铁:天津市致远化学试剂有限公司;无水乙醇:广州市科玛化学技术有限公司;DPPH、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]:合肥千盛生物科技有限公司;牛肉膏蛋白胨培养基:上海博唯生物科技有限公司。以上化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

420C型电热恒温水浴箱、RE-52AA型旋转蒸发器:北京伊诺泰仪器设备有限公司;L-80-XP型离心机:北京市永光明医疗仪器有限公司;722N型可见分光光度计:上海菁华科技仪器有限公司;UY120型电子天平:上海精科科技有限公司;QHX-250BSH-III型生化培养箱:上海圣科仪器设备有限公司;Z10型抑菌圈(抗生素效价)测量仪:重庆川东化工有限公司;DHG-9023A型烘箱:上海精宏实验设备有限公司。

1.3 方 法

1.3.1 食用菌多糖的制备

食用菌多糖的制备参考魏华等^[9]的方法,略作改动。黑木耳、银耳粉碎过60目筛备用。分别称取30g银耳、黑木耳、金针菇粉末,采用热水浸提法,按1:30(g/mL)料液比加入蒸馏水,并于90℃水浴3h。水浴结束后,5000r/min离心15min取上清液,旋转蒸发浓缩至原体积的1/4,加入3倍体积无水乙醇沉淀,4℃静置过夜,5000r/min离心10min后收集沉淀,置于50℃烘箱内烘干24h,获得食用菌多糖。

1.3.2 食用菌多糖抗氧化活性测定

1.3.2.1 DPPH自由基清除能力测定

DPPH自由基清除能力测定参照文献[10-11]方法并略作改动。分别吸取2mL不同浓度(0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0mg/mL)的3种食用菌多糖溶液于试管中,依次加入0.16mmol/L的DPPH溶液2mL,经振荡摇匀后置于25℃水浴锅内30min,在波长为517nm处测定试样吸光度。DPPH自由基清除率(X,%)根据下列公式计算。

$$X = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100$$

式中: A_0 为蒸馏水代替样品的吸光度; A_1 为不同质量浓度样品的吸光度; A_2 为蒸馏水和 DPPH 混合溶液的吸光度。

1.3.2.2 超氧阴离子自由基清除能力测定

参考 Yan 等^[12]的方法,并略作改动。分别吸取 2 mL 不同浓度(0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL)的 3 种食用菌多糖溶液于试管中,依次加入 0.2 mol/L、pH8.2 的 Tris-HCl 缓冲液 2 mL,经振荡摇匀后置于 37 °C 水浴锅内加热 30 min,然后加入 1 mL 已在 37 °C 水浴预热 2 min 的 7 mmol/L 邻苯三酚盐酸溶液并摇匀,5 min 后测定其在波长 320 nm 处的吸光度。超氧阴离子自由基清除率($Y, \%$)按照下列公式计算。

$$Y = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100$$

式中: A_1 为蒸馏水代替样品的吸光度; A_2 为不同质量浓度样品的吸光度。

1.3.2.3 羟基自由基清除能力的测定

羟基自由基清除能力参考文献[13-14]方法,并略作修改。取 2 mL 浓度为 6 mmol/L 的硫酸亚铁(FeSO_4)溶液和 2 mL 浓度为 6 mmol/L 的过氧化氢(H_2O_2)溶液混合,使其发生反应,生成羟基自由基。分别吸取 2 mL 不同浓度(0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL)的 3 种食用菌多糖溶液于试管中,依次加入 2 mL 浓度为 6 mmol/L 的水杨酸液,振荡摇匀后放置于 37 °C 水浴锅中加热 30 min,测定其在波长 510 nm 处的吸光度。羟基自由基清除率($P, \%$)根据下列公式计算。

$$P = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100$$

式中: A_0 为蒸馏水代替样品的吸光度; A_1 为不同质量浓度样品的吸光度; A_2 为用蒸馏水代替 H_2O_2 的吸光度。

1.3.2.4 ABTS⁺自由基清除能力的测定

参考 Chen 等^[15]的方法,并稍作改动。将等体积 7 mmol/L 的 ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 的 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液混匀,在避光条件下保存 15 h 获得 ABTS 储备液。将 ABTS 储备液用 10 mmol/L、pH7.4 的磷酸盐缓冲液稀释至波长 734 nm 处吸光度在 0.700 ± 0.020 之间,获得 ABTS 测定液,现配现用。分别吸取 2 mL 不同浓度(0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL)的 3 种食用菌多糖溶液于试管中,依次加入 2 mL ABTS 测定液,经振荡摇匀后在室温、避光条件下反应 6 min,立即测定其在波长 734 nm 处的吸光度。ABTS⁺自由基清除率($M, \%$)计算公式如下。

$$M = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100$$

式中: A_0 为蒸馏水替代样品的吸光度; A_1 为不同质量浓度样品的吸光度; A_2 为磷酸盐缓冲液代替 ABTS⁺

处理样品的吸光度。

1.3.3 食用菌多糖抑菌能力的测定

食用菌多糖抑菌能力参考文献[16-20]测定,并略作改进。用接种环将大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽胞杆菌、枯草芽孢杆菌接种在备好的斜面培养基中,37 °C 恒温培养 24 h 进行活化。使用无菌水将已活化好的菌种进行稀释,并制备成菌悬液。依次用移液枪移取 0.2 mL 每种菌的菌悬液,加在已制备好的牛肉膏蛋白胨固体培养基表层上,并涂布均匀。将 3 种食用菌多糖溶液进行稀释,依次配制成浓度为 0、0.5、1.0、1.5、2.0 mg/mL 的多糖溶液。并将已消毒和烘干的滤纸片分别浸泡在无菌水和多糖溶液中,随后轻置于培养基表面,将培养皿放于 37 °C 电热恒温水浴箱中恒温培养 24 h,观察并测量培养皿中抑菌圈直径。每个菌种做 3 次平行测定,并取平均值。

1.4 数据处理

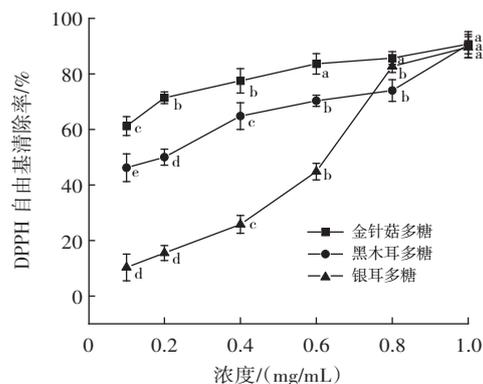
采用 Origin 2018 分析软件对数据进行分析,试验结果均为 3 次试验的平均值,试验结果用平均值 \pm 标准差表示。采用 SPSS Statistics 20 统计软件,用 t 检验比较两种处理样品间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 食用菌多糖抗氧化活性对比分析

2.1.1 食用菌多糖对 DPPH 自由基的清除作用

3 种不同浓度的食用菌多糖对 DPPH 自由基清除效果如图 1 所示。



同一多糖不同小写字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。

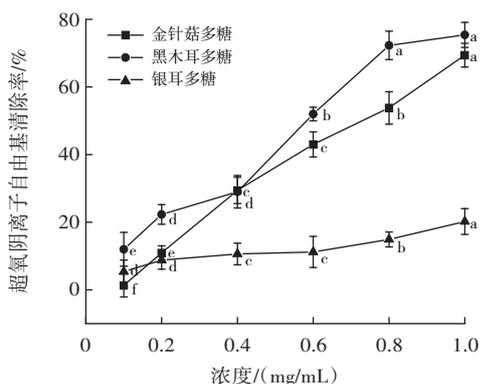
图 1 3 种食用菌多糖对 DPPH 自由基的清除率
Fig.1 Scavenging rates of three edible mushroom polysaccharides against DPPH free radicals

由图 1 可知,金针菇、银耳和黑木耳多糖对 DPPH 自由基清除率随浓度增加而增加。浓度为 0.1~0.6 mg/mL 时,3 种食用菌多糖对 DPPH 自由基清除能力由高到低依次为金针菇多糖>黑木耳多糖>银耳多糖;浓度为 0.8~1.0 mg/mL 时,金针菇多糖对 DPPH 自由基的清除作用最强,并且清除能力与其余浓度条件时相比变化

最大;浓度为 0.8 mg/mL 时,金针菇多糖与银耳多糖的 DPPH 自由基清除率均达到 80% 以上,黑木耳多糖的清除率达到 70% 以上。当 3 种多糖溶液浓度达到 1.0 mg/mL 时,3 种多糖溶液对于 DPPH 自由基的清除能力相当,均高于 89%。金针菇多糖 DPPH 自由基清除率最高,达到 90.7%。结果表明,3 种食用菌多糖溶液对 DPPH 自由基有明显的清除作用,并且金针菇多糖对 DPPH 自由基清除能力最强。

2.1.2 3 种食用菌多糖对超氧阴离子自由基的清除作用

3 种不同浓度的食用菌多糖对超氧阴离子自由基的清除作用如图 2 所示。



同一多糖不同小写字母表示存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

图 2 3 种食用菌多糖对超氧阴离子自由基的清除率

Fig.2 Scavenging rates of three edible mushroom polysaccharides against superoxide anion free radicals

由图 2 可知,随多糖溶液浓度的增加,3 种食用菌多糖溶液对于超氧阴离子自由基的清除作用增强。与 DPPH 自由基清除活性相似,浓度为 0.2~0.4 mg/mL 时,黑木耳多糖的超氧阴离子自由基清除率最高,其次为金针菇多糖,银耳多糖清除率最低;浓度为 0.4~1.0 mg/mL 时,3 种多糖的超氧阴离子自由基清除率由高到低依次是黑木耳多糖>金针菇多糖>银耳多糖。

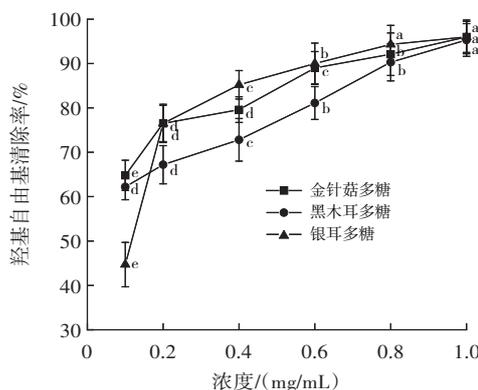
2.1.3 3 种食用菌多糖对羟基自由基的清除作用

3 种食用菌多糖对羟基自由基的清除率见图 3。

由图 3 可知,3 种食用菌多糖对羟基自由基的清除能力随着浓度的增加而提高。在浓度为 0.1 mg/mL 时,金针菇多糖与黑木耳多糖对羟基自由基的清除率较强,均达到 60% 以上,但银耳多糖羟基自由基清除率仅达 40% 以上,清除作用最差。当浓度为 0.2~1.0 mg/mL 时,3 种多糖对羟基自由基的清除率由高到低依次为银耳多糖>金针菇多糖>黑木耳多糖。当浓度为 1.0 mg/mL 时,三者对羟基自由基的清除率均较高,达到了 95% 以上。

2.1.4 3 种食用菌多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除效果

3 种不同浓度食用菌多糖对 ABTS⁺ 自由基清除效

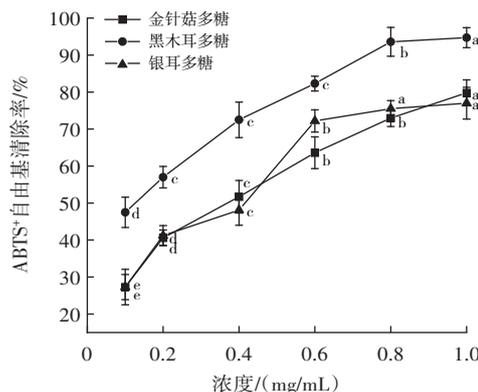


同一多糖不同小写字母表示存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

图 3 3 种食用菌多糖对羟基自由基的清除率

Fig.3 Scavenging rates of three edible mushroom polysaccharides against hydroxyl free radicals

果如图 4 所示。



同一多糖不同小写字母表示存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

图 4 3 种食用菌多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除率

Fig.4 Scavenging rates of three edible mushroom polysaccharides against ABTS⁺ free radicals

由图 4 可知,3 种食用菌多糖的清除作用随着浓度的增加而增强。当 3 种食用菌多糖浓度为 1.0 mg/mL 时,对 ABTS⁺ 自由基清除率均在 77% 以上;黑木耳多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除作用较其它两种更好,总体趋势是先增强后趋于平缓,ABTS⁺ 自由基清除率最高达到 94.71%。

2.2 3 种食用菌多糖抑菌作用比较分析

通过测定 3 种食用菌多糖对 4 种常见致病菌的抑菌圈直径来判断抑菌活性,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,3 种食用菌多糖均具有抑菌活性,且抑菌活性随浓度增加而增强。当多糖溶液浓度为 0~1.5 mg/mL 时,4 种病原菌抑菌圈直径增大,表明抑菌效果增强。在此浓度下,黑木耳多糖对蜡样芽孢杆菌的抑制效果最为明显,银耳多糖对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑菌活性较强。当多糖浓度为 1.5~2.0 mg/mL 时,金针菇多糖对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑制效

表1 3种真菌多糖对4种常见致病菌的抑菌活性

Table 1 Inhibitory effects of three fungal polysaccharides on four common pathogenic bacteria

多糖种类	浓度/ (mg/mL)	抑菌圈直径/mm			
		大肠杆菌	金黄色葡萄球菌	蜡样芽孢杆菌	枯草芽孢杆菌
金针菇多糖	0	8.52±0.13 ^e	8.92±0.11 ^e	8.88±0.13 ^e	8.63±0.14 ^e
	0.5	9.32±0.14 ^d	9.21±0.14 ^b	9.34±0.12 ^d	8.84±0.13 ^e
	1.0	9.84±0.12 ^c	9.62±0.16 ^a	9.54±0.16 ^c	9.73±0.17 ^b
	1.5	9.97±0.15 ^b	9.65±0.12 ^a	9.75±0.14 ^a	9.81±0.16 ^a
	2.0	10.16±0.13 ^a	9.68±0.14 ^a	9.66±0.11 ^b	9.77±0.14 ^b
黑木耳多糖	0	8.54±0.17 ^e	9.02±0.06 ^c	8.99±0.09 ^d	8.62±0.09 ^e
	0.5	9.01±0.16 ^b	9.18±0.11 ^b	9.35±0.08 ^c	9.02±0.10 ^b
	1.0	9.14±0.08 ^a	9.26±0.12 ^b	9.51±0.13 ^b	9.17±0.12 ^a
	1.5	9.18±0.07 ^a	9.32±0.06 ^b	9.63±0.07 ^a	9.24±0.08 ^a
	2.0	9.20±0.10 ^a	9.42±0.12 ^a	9.69±0.10 ^a	9.21±0.10 ^a
银耳多糖	0	8.46±0.06 ^e	8.94±0.07 ^c	8.95±0.09 ^c	8.58±0.07 ^e
	0.5	8.89±0.12 ^b	9.06±0.08 ^b	9.15±0.12 ^a	8.95±0.05 ^e
	1.0	9.03±0.11 ^b	9.12±0.06 ^a	9.08±0.11 ^b	9.03±0.04 ^b
	1.5	9.12±0.10 ^a	9.15±0.12 ^a	9.12±0.10 ^a	9.12±0.10 ^a
	2.0	9.14±0.06 ^a	9.13±0.11 ^a	9.09±0.05 ^b	9.16±0.05 ^a

注:同一多糖种类同列不同小写字母表示存在显著性差异($p<0.05$)。

果较好,对蜡样芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果稍弱;黑木耳多糖对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌的抑菌效果增强,但对枯草芽孢杆菌抑菌效果减弱;银耳多糖对金黄色葡萄球菌的抑菌效果减弱,对枯草芽孢杆菌的抑菌效果增强。总体而言,金针菇多糖对大肠杆菌的抑菌能力最强,黑木耳多糖对蜡样芽孢杆菌的抑菌能力最强,银耳多糖对枯草芽孢杆菌抑制能力最强。

3 结论

本研究以金针菇、黑木耳和银耳为原料,利用水提醇沉法提取3种食用菌多糖。通过测定3种食用菌多糖对DPPH自由基、超氧阴离子自由基、羟基自由基和ABTS⁺自由基的清除率,以及对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌和蜡样芽孢杆菌4种常见致病菌的抑菌圈直径,分析3种食用菌多糖抗氧化活性和抑菌能力。结果表明,3种食用菌多糖均具有抗氧化活性,并且多糖对于自由基的抗氧化活性具有剂量依赖性,金针菇多糖对DPPH自由基的清除效果较好,黑木耳多糖对超氧阴离子自由基和ABTS⁺自由基的清除效果较好,银耳多糖对羟基自由基的清除效果较好;3种食用菌多糖具有抑菌活性,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的抑制效果与多糖浓度呈正相关,对蜡样芽孢杆菌的抑制效果较差;银耳多糖对枯草芽孢杆菌的抑制效果随浓度上升而增强,黑木耳多糖、金针菇多糖对枯草

芽孢杆菌的抑制效果在0~1.5 mg/mL随着浓度的增高而增强。3种食用菌多糖均具有较强的抗氧化活性和抑菌活性,但是不同品种的食用菌多糖抗氧化效果和抑菌作用有明显区别,且对不同菌种的抑制作用也不同。食用菌多糖可以作为潜在的食品抗氧化剂和防腐剂。

参考文献:

- 温泉,王锡昌.食用茵风味物质的研究及应用进展[J].长江大学学报B(自然科学版),2006,3(4):211-213,229.
WEN Quan, WANG Xichang. Progress in flavor research of edible fungus and its application[J]. Journal of Yangtze University B: Natural Science Edition, 2006, 3(4): 211-213, 229.
- PRAMANIK M, CHAKRABORTY I, MONDAL S, et al. Structural analysis of a water-soluble glucan (Fr. I) of an edible mushroom, *Pleurotus sajor-caju*[J]. Carbohydrate Research, 2007, 342(17): 2670-2675.
- LEE Y L, YEN M T, MAU J L. Antioxidant properties of various extracts from *Hypsizygus marmoreus*[J]. Food Chemistry, 2007, 104(1): 1-9.
- 王耀辉.白灵菇多糖提取工艺优化及其抗氧化活性研究[D].太原:山西大学,2017.
WANG Yaohui. Optimization of extraction process of polysaccharide from *Pleurotus nebrodensis* and its antioxidant activity[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017.
- 陈芙蓉.秀珍菇多糖提取、纯化及其抗氧化活性研究[D].福州:福建农林大学,2014.
CHEN Furong. Study on extraction, purification and antioxidant activity of polysaccharide from *Pleurotus geesteranus*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- 张博华,张明,范祺,等.三种食用菌多糖及其复合多糖功能性评价研究[J].中国果菜,2021,41(6):74-79.
ZHANG Bohua, ZHANG Ming, FAN Qi, et al. Study on functional evaluation of three kinds of edible fungus polysaccharides and their compound polysaccharides[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(6): 74-79.
- 李向阳,胡一鸿,韦翔华,等.原木花菇与袋栽花菇中香菇多糖抗氧化和抑菌能力比较[J].湖南农业科学,2009(11):129-132.
LI Xiangyang, HU Yihong, WEI Xianghua, et al. Comparison of antioxidative and antimicrobial abilities of lentinan between wood planting flower-mushroom and bag planting flower-mushroom[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(11): 129-132.
- 罗敬文,司风玲,顾子玄,等.3种木耳多糖的抗氧化活性与抑菌能力比较分析[J].食品科学,2018,39(19):64-69.
LUO Jingwen, SI Fengling, GU Zixuan, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of polysaccharides from three species of *Auricularia*[J]. Food Science, 2018, 39(19): 64-69.
- 魏华,张娣,陆玲,等.几种食用菌多糖的提取与抗氧化性研究[J].南京师大学报(自然科学版),2017,40(2):72-75,88.
WEI Hua, ZHANG Di, LU Ling, et al. Extraction, purification and antioxidant activities of several polysaccharides from edible and medicinal fungi[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2017, 40(2): 72-75, 88.
- CHEUNG L M, CHEUNG P C K, OOI V E C. Antioxidant activity and total phenolics of edible mushroom extracts[J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 249-255.

- [11] 王莹, 邢晓玲, 李屿君, 等. 香菇多糖脱蛋白工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 98-103.
WANG Ying, XING Xiaoling, LI Yujun, et al. Study on de-protein technology and antioxidant activity of lentinan[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 98-103.
- [12] YAN J M, ZHU L, QU Y H, et al. Analyses of active antioxidant polysaccharides from four edible mushrooms[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 945-956.
- [13] 马晓华, 连宾. 几种常见食用菌清除羟基自由基能力的研究[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(10): 25-28.
MA Xiaohua, LIAN Bin. Hydroxyl radical scavenging activities of several kinds of edible fungi[J]. Food and Fermentation Industries, 2005, 31(10): 25-28.
- [14] WANG H, GAO X D, ZHOU G C, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of aqueous extract from *Choerospondias axillaris* fruit[J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 888-895.
- [15] CHEN G J, FANG C C, RAN C X, et al. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 903-914.
- [16] 吴存兵, 吴君艳, 李家春, 等. 黑乌龙茶茶多糖提取工艺的优化及其抗氧化与抑菌性分析[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(6): 1005-1012.
WU Cunbing, WU Junyan, LI Jiachun, et al. Optimized extraction condition of tea polysaccharide from dark oolong tea and analysis of its antioxidant and antibacterial activity[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(6): 1005-1012.
- [17] 龙杰凤, 胡秀虹, 范成念, 等. 黔产生黄精多糖的抑菌活性研究[J]. 贵州科学, 2022, 40(1): 5-9.
LONG Jiefeng, HU Xiuhong, FAN Chengnian, et al. Study on antibacterial activity of polysaccharide in *Polygonatum* from Guizhou[J]. Guizhou Science, 2022, 40(1): 5-9.
- [18] ZHAO Z W, WANG L, RUAN Y, et al. Physicochemical properties and biological activities of polysaccharides from the peel of *Dioscorea opposita* Thunb. extracted by four different methods[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 130-139.
- [19] AYUB M A, CHOQBKAR N, HANIF M A, et al. Chemical composition, antioxidant, and antimicrobial activities of *P. roxburghii* oleoresin essential oils extracted by steam distillation, superheated steam, and supercritical fluid CO₂ extraction[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(6): 2425-2438.
- [20] BENEK A, CANL K, ALTUNER E M. Antimicrobial and antioxidant activities of some mosses[J]. Anatolian Bryology, 2023, 9(1): 42-49.

责任编辑:冯娜

收稿日期:2024-01-07