

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250303004

引用格式: 赵明, 杜婉嘉, 李婷, 等. 黑木耳多糖、多肽稳定性及功能特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 103–112.

ZHAO M, DU WJ, LI T, *et al.* Research on the stability and functional characteristics of polysaccharides and peptides from *Auricularia auricula* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 103–112. (in Chinese with English abstract).

黑木耳多糖、多肽稳定性及功能特性研究

赵明, 杜婉嘉, 李婷, 孔祥辉*, 毛雪*

(黑龙江省科学院微生物研究所, 哈尔滨 150010)

摘要: **目的** 研究不同食品加工环境对黑木耳多糖、多肽抗氧化活性的影响, 分析黑木耳多糖、多肽的食品功能特性。**方法** 以黑木耳为原料, 通过酶解法制备黑木耳多糖、多肽, 在不同食品添加剂、金属离子、高温、pH、光照强度条件下, 对黑木耳多糖、多肽的抗氧化稳定性、功能特性和性状特征进行评价。**结果** 光照、强酸强碱、 Na^+ 、 K^+ 、灭菌方式对黑木耳多糖的抗氧化活性影响不大, Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、葡萄糖、蔗糖的添加会导致黑木耳多糖的抗氧化活性降低, 赤藓糖醇、柠檬酸、山梨酸钾和苯甲酸钠的添加会导致黑木耳多糖的抗氧化活性增加。光照、pH 5~7、灭菌方式对黑木耳多肽的抗氧化活性影响不大, Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、葡萄糖、蔗糖的添加会导致黑木耳多肽的抗氧化活性降低, Na^+ 、 K^+ 、赤藓糖醇、柠檬酸、山梨酸钾和苯甲酸钠的添加会导致黑木耳多肽的抗氧化活性增加, 其中在 60 °C 时抗氧化活性最高。黑木耳多糖、多肽持水性偏低, 具有一定的持油能力, 起泡性、泡沫稳定性、乳化性和乳化稳定性均以剂量依赖性方式增加, 冻干粉不耐受高温会变性失活。**结论** 以黑木耳为原料制备的黑木耳多糖、多肽适用于作为乳化剂、起泡剂等辅料或功能性配料用于食品、保健品、药品、化妆品等行业, 本研究可为黑木耳精深加工提供理论基础。

关键词: 黑木耳; 多糖; 多肽; 抗氧化; 功能特性

Research on the stability and functional characteristics of polysaccharides and peptides from *Auricularia auricula*

ZHAO Ming, DU Wan-Jia, LI Ting, KONG Xiang-Hui*, MAO Xue*

(Institute of Microbiology Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150010, China)

ABSTRACT: Objective To explore the impacts of diverse food processing environments on the antioxidant activity of polysaccharides and peptides derived from *Auricularia auricula*, and analyze the food functional characteristics of these polysaccharides and peptides. **Methods** Taking *Auricularia auricula* as the raw material, *Auricularia auricula* polysaccharides and peptides were prepared through enzymatic hydrolysis. Various conditions of different food additives, metal ions, high temperatures, pH and light intensity were simulated to assess the

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(A类)(CZKYF2024-1-A003)

第一作者: 赵明(1997—), 男, 研究实习生, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: 1466712663@qq.com

*通信作者: 孔祥辉(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: kxh29@126.com

毛雪(1990—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: mx45792027@163.com

antioxidant stability, functional characteristics, and morphological features of *Auricularia auricula* polysaccharides and peptides. **Results** Exposure to light, strong acids and bases, as well as the presence of Na^+ , K^+ , and the sterilization method, had a minimal impact on the antioxidant activity of *Auricularia auricula* polysaccharides. However, the addition of Fe^{3+} , Cu^{2+} , glucose and sucrose caused a decline in the antioxidant activity of *Auricularia auricula* polysaccharides. In contrast, the addition of erythritol, citric acid, potassium sorbate and sodium benzoate enhanced the antioxidant activity of *Auricularia auricula* polysaccharides. Lighting, a pH range of 5–7, and the sterilization method had little effect on the antioxidant activity of *Auricularia auricula* peptides. The addition of Fe^{3+} , Cu^{2+} , glucose and sucrose led to a decrease in the antioxidant activity of *Auricularia auricula* peptides, while the addition of Na^+ , K^+ , erythritol, citric acid, potassium sorbate and sodium benzoate increased the antioxidant activity of *Auricularia auricula* peptides, with the highest antioxidant activity observed at 60 °C. *Auricularia auricula* polysaccharide and polypeptide possessed general water-holding capacity and certain oil-holding capacity. Their foaming property, foam stability, emulsifying property and emulsifying stability increased in a dose-dependent manner. The freeze-dried powder became denatured and inactivated if it could not tolerate high temperatures. **Conclusion** The polysaccharides and peptides prepared from *Auricularia auricula* are suitable for use as emulsifiers, foaming agents, or functional ingredients in industries such as food, health products, pharmaceuticals, cosmetics, etc. This study can offer a theoretical basis for the deep processing of *Auricularia auricula*.

KEY WORDS: *Auricularia auricula*; polysaccharides; peptides; antioxidant; function characteristics

0 引言

黑木耳(*Auricularia auricula*)是食药两用真菌,富含人体所需的多种营养物质^[1],含有丰富的多糖、蛋白质、维生素、膳食纤维和矿物质等功效成分。黑木耳多糖是其主要活性成分,具有抗氧化、降血脂、抗凝血、降血糖、抗肿瘤等生理活性^[2]。同时,黑木耳中蛋白质含量可达10%~16%,可作为优质活性肽的原料来源,通过酶解法制备活性肽。

心血管疾病、神经退行性疾病、癌症等重大疾病^[3]都与机体内的氧化损伤有关,人们可以通过补充体内的抗氧化剂,来减轻与氧化损伤相关的问题。研究表明多肽、多糖可以通过清除体内过量的自由基、提高抗氧化酶活性等^[4]方式在机体内发挥抗氧化活性。与其他(动物或植物)来源相比,食用菌来源的多肽和多糖具有来源渠道广泛、前期处理简单、得率较高等特点,已在功能性食品、添加剂和药品等领域得到广泛应用^[5]。近年来,研究表明黑木耳多肽(*Auricularia auricula* peptides, AAPP)、黑木耳多糖(*Auricularia Auricula* polysaccharide, AAPS)具有很好的抗氧化活性,而关于 AAPP、AAPS 的稳定性和功能特性报道较少。多肽、多糖会受到氧化、水解等作用发生降解,不同加工环境(如食品添加剂、金属离子、高温、pH、光照强度)也会影响多肽、多糖的结构,从而影响其抗氧化活性^[6]。同时,多肽、多糖的分子量、氨基酸或单糖组成以及空间结构等特点,使它们具有乳化性、抗菌、保湿等食品特性^[7],在食品加工中可以用来改善食品稳定性,增强口感和质地^[7]。若将 AAPP、AAPS 开发为功能性食品、药物、化妆品等,应

对其稳定性和功能特性进行评价,使其可以最大限度的发挥功能作用。

本研究主要以 AAPP 和 AAPS 对羟自由基清除能力为指标,从贮存、加工的角度分析其抗氧化活性的稳定性,以及食品功能特性,提高 AAPP 和 AAPS 在食品领域的潜在应用价值,为其进一步应用和功能性食品开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑木耳(干品,含水量 13.2%)[黑龙江省科学院微生物研究所提供]。

中性蛋白酶(600000 U/g)、碱性蛋白酶(500000 U/g)(丹麦诺维信公司);果胶酶(FDY-2212, 60000 U/mL)、纤维素酶(CEL-01, 11000 U/g)[夏盛(北京)生物科技开发有限公司];硫酸亚铁、水杨酸、过氧化氢、磷酸氢二钠、氯化钠、氯化钾、氯化铜、氯化铁、蔗糖、葡萄糖、苯甲酸钠、柠檬酸(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

ZQLY-300V 全温振荡培养箱(上海知楚仪器有限公司); Infinite 200 多功能酶标仪[瑞士帝肯(Tecan)公司]; IKA T10 basic 均质机(艾卡仪器设备有限公司); HVE-50 灭菌锅[舜友(上海)生物技术有限公司]; CR21N 高速冷冻离心机(日本日立 HITACHI 公司); SL-SM300 超声波微波组合反应系统(南京顺流仪器有限公司); 雷磁 PHS-3C 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); HMS-20 大容量磁力搅拌器(上海沪析实业有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 AAPP、AAPS 的制备

实验室前期以黑木耳为原料, 通过酶解法制备得到多肽和多糖并对其酶解条件进行优化, 实验以优化后的多肽和多糖为实验对象。AAPP^[8]: 固液比 1:45、中性蛋白酶与碱性蛋白酶活比 1:1.5、酶用量 1600 U/mg、酶解时间 120 min、酶解温度 50 °C、pH 7.5, 提取率为 9.2%、纯度为 65.2%。AAPS^[9]: 固液比为 1:40、果胶酶添加量为 3%, 酶解时间 90 min、酶解温度 52 °C、pH 5.0, 提取率为 32.5%、纯度为 76.8%。

1.3.2 光照对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响

参考唐雅园等^[10]的方法, 将 AAPP 和 AAPS 配制成质量浓度 1 mg/mL 的溶液, 置于三角瓶中, 封住杯口。将三角瓶分别置于自然光、日光灯和避光处存放, 除光照条件外, 其他环境条件保持一致, 每隔 2 d 取样, 测定羟基自由基清除能力。

1.3.3 pH 对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响

参考刘晓艺等^[11]的方法, 将 AAPP 和 AAPS 样品溶解在不同 pH 下的缓冲液中, 配制成质量浓度为 1 mg/mL 的溶液, 2 h 后, 测定羟基自由基清除能力。

1.3.4 温度对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响

参考宋姗姗等^[12]的方法, 将 AAPP 和 AAPS 配制成质量浓度 1 mg/mL 的溶液。溶液分别置于不同温度下避光保温, 每 0.5 h 取样一次, 测定羟基自由基清除能力。

1.3.5 金属离子对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响

参考宋姗姗等^[12]的方法, 使用不同浓度的氯化钠、氯化钾、氯化铜和氯化铁溶液配制 AAPP 和 AAPS 溶液 (1 mg/mL), 室温避光放置 2 h 后, 测定羟基自由基清除能力。

1.3.6 常用食品配料对多糖抗氧化稳定性的影响

参考赵广河等^[13]的方法, 蔗糖、葡萄糖和赤藓糖醇分别为(0%、1%、2%、3%、4%、5%); 柠檬酸(0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%); 山梨酸钾和苯甲酸钠(0%、0.005%、0.010%、0.015%、0.020%、0.025%)分别使用 AAPP 和 AAPS 溶液(1 mg/mL)溶解, 全部溶解后室温避光放置 2 h, 测定羟基自由基清除能力。

1.3.7 灭菌方式对多糖抗氧化稳定性的影响

参考赵广河等^[13]的方法, 分别用煮沸灭菌(100 °C, 10 min)、巴氏灭菌(70 °C, 30 min)、微波灭菌(2.4 W/g, 10 min)、高压灭菌(121 °C, 15 min, 0.11 MPa)、紫外线灭菌(30 W, 30 min)方式处理 AAPP 和 AAPS 溶液(1 mg/mL), 测定羟基自由基清除能力。

1.3.8 功能特性分析

(1) 水溶性测定

0.25 g AAPP 或 AAPS 溶于 25 mL 超纯水, 90 °C 水浴 1 h 后 10000 r/min 离心 10 min, 弃去上清液后冻干, 记录所得冻干粉末质量, 水溶性(water solubility, WS)的计算如公式(1)所示:

$$WS/\% = \frac{1-m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: WS 为水溶性, %; m 为冻干粉末质量, g; M 为溶解后冻干粉末质量, g。

(2) 膨胀度测定

0.25 g AAPP 或 AAPS 置于 15 mL 离心管, 移入 10 mL 超纯水, 待 AAPP 或 AAPS 完全被超纯水湿润后静置放置 20 h, 弃去上清液, 读取湿润后体积, 膨胀度(swelling power, SP)的计算如公式(2)所示:

$$SP/(\text{mL/g}) = \frac{V}{M_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: SP 为膨胀度, mL/g; V 为冻干粉湿润后总体积, mL; M_1 为冻干粉末质量, g。

(3) 持水性和持油性测定

0.5 g AAPP 或 AAPS 和 25 mL 蒸馏水或大豆油在 50 mL 离心管混合, 100 r/min 磁力搅拌 60 min, 10000 r/min 离心 10 min, 弃去上清液, 持水性(water holding capacity, WHC)/持油性(oil holding capacity, OHC)的计算如公式(3)所示:

$$WHC/OHC/(\text{g/g}) = \frac{\text{样品吸收水或油的重量/g}}{\text{样品重量/g}} \quad (3)$$

(4) 起泡性和泡沫稳定性测定

将不同浓度的 AAPP 或 AAPS 溶液均质, 记录均质前后体积 V_1 、 V_2 计算起泡性(foaming capacity, FC), 在 30 min 后记录总体积 V_3 , 计算泡沫稳定性(foaming stability, FS), 计算如公式(4)和(5)所示:

$$FC/\% = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$FS/\% = \frac{V_3 - V_2}{V_2 - V_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中: FC 为起泡性, %; FS 为泡沫稳定性, %; V_1 为均质前体积, mL; V_2 为均质后体积, mL; V_3 为均质后 30 min 后体积, mL。

(5) 乳化性和乳化稳定性测定

将不同浓度的 AAPP 或 AAPS 溶液与大豆油混匀, 均质后离心, 计算乳化性(emulsifying capacity, EC), 将乳液在 80 °C 下加热 30 min, 冷却后离心, 计算乳化稳定性(emulsifying stability, ES), 计算如公式(6)和(7)所示:

$$EC/\% = \frac{\text{乳化层体积/mL}}{\text{混合液总体积/mL}} \times 100\% \quad (6)$$

$$ES/\% = \frac{\text{最终乳化层体积/mL}}{\text{混合液总体积/mL}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: EC 为乳化性, %; ES 为乳化稳定性, %。

(6) 温度耐受性

称量 AAPP 或 AAPS 粉末 6 份, 每份 0.5 g, 放入 5 mL 的小离心管内, 并用封口膜密封, 分别放置在预先设定好温度[20(室温)、35、50、65、80、95 °C]的恒温干燥箱内

30 min, 将处理好的 AAPP 或 AAPS 粉末转移至称量纸上, 观察 AAPP 或 AAPS 粉末在不同温度条件下的颜色变化并拍照记录。

1.3.9 羟基自由基清除能力测定

酶解液、6 mmol/L 水杨酸乙醇溶液和 6 mmol/L 硫酸亚铁溶液各 0.5 mL, 混合均匀, 加入 3% 双氧水溶液 0.5 mL, 在 37 °C 下反应 30 min。在 510 nm 处测定样品的吸光度 A_1 ; 对照组用等体积去离子水代替双氧水溶液, 测定相应的吸光度 A_2 ; 空白组用等体积去离子水代替样品溶液, 测定相应的吸光度 A_0 。计算公式如公式(8)所示。

$$\text{羟基自由基清除能力} = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (8)$$

1.4 数据处理

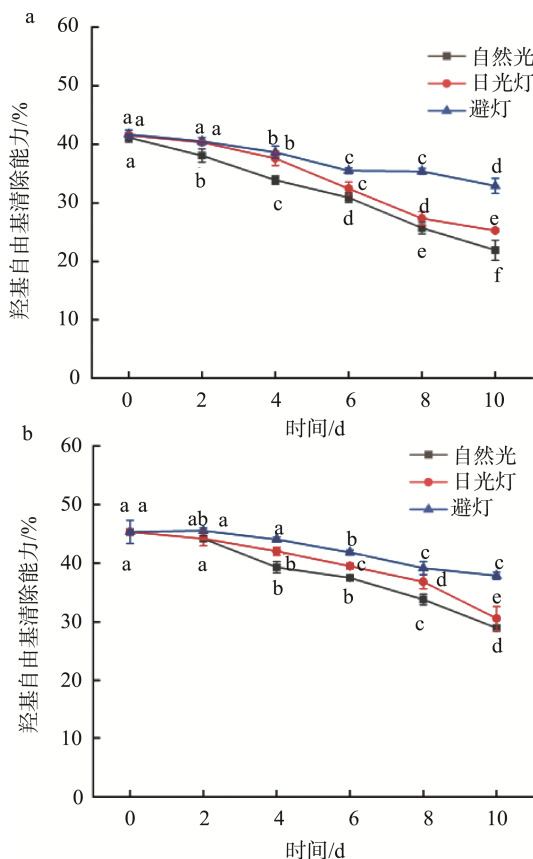
实验重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示, 采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 AAPP、AAPS 抗氧化稳定性实验结果

2.1.1 光照对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响分析

如图 1 所示, 随着光照时间的延长, AAPP 和 AAPS 溶液



注: 不同小写字母表示组内差异显著($P < 0.05$), 图 2~8 同。

图 1 光照对 AAPP (a) 和 AAPS (b) 抗氧化活性的影响
Fig.1 Effects of light on the antioxidant activity of AAPP (a) and AAPS (b)

的羟基自由基清除能力均呈下降趋势。影响顺序为自然光>日光灯>避光, 其中自然光对 AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力影响最大。赵广河等^[13]的研究结果则显示 3 种光照处理条件下对多糖的羟基自由基清除率影响无显著差异, 这与本研究结果相悖, 可能和多糖的糖苷键类型以及分子量等有关。通常单批次食品加工不会超过 6 h^[14], 同时大部分生产加工的机器为不锈钢避光仪器, 因此可以认为, 光照对 AAPP 和 AAPS 溶液食品加工过程的氧化稳定性影响较小。

2.1.2 pH 对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响分析

如图 2 所示, 当 pH 在 3~8 范围时, AAPP 溶液的抗氧化活性呈现先下降再缓慢升高后下降的趋势, AAPS 溶液的抗氧化活性呈现先缓慢降低后缓慢升高的趋势。AAPP 溶液在 pH 5~7 之间表现出了稳定的抗氧化活性, 但在 pH 8 时抗氧化活性显著下降, 可能原因是在碱性条件下, 多肽含有的 L-型氨基酸能够部分转化为 D-型氨基酸, 以混合型氨基酸的形式存在, 导致多肽的结构性质发生改变, 同时在碱性条件下还会影响多肽带电荷性质, 导致抗氧化活性下降^[14]。AAPS 溶液在强酸条件下, 可以与溶液中的色素形成交联结构, 来增加抗氧化活性^[10], 但随着体系中酸性的减弱, 色素会发生降解^[10], 导致抗氧化活性降低。但随着体系中碱性的增强(OH⁻), 多糖中某些基团发生去质子化带上负电荷, 这些带负电的基团能够增强多糖分子与自由基之间的静电吸引作用, 使多糖更容易与自由基结合并将其清除。同时, 碱性环境可能会诱导多糖分子发生构象变化, 暴露出更多潜在的抗氧化活性位点, 增加了多糖与自由基的反应几率。

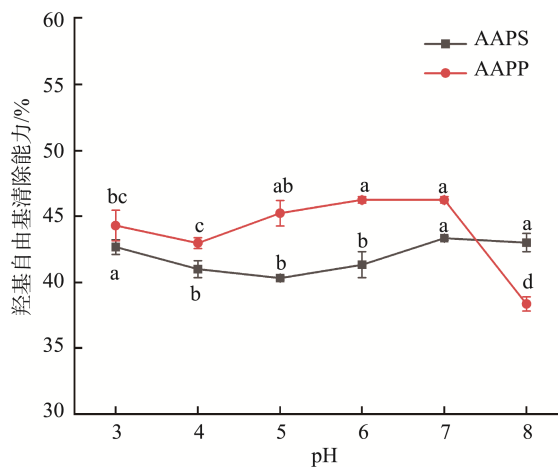


图 2 pH 对 AAPP 和 AAPS 抗氧化活性的影响
Fig.2 Effects of pH on the antioxidant activity of AAPP and AAPS

2.1.3 温度对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响分析

加热是食品最常见的加工方式之一, 探究加热温度对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化活性的影响具有重要的意

义。如图 3 所示。随着加热时间的延长, AAPS 溶液抗氧化活性变化不显著。但不同温度下对 AAPP 溶液抗氧化活性的影响存在差异, 其中 $60\text{ }^{\circ}\text{C}>80\text{ }^{\circ}\text{C}>40\text{ }^{\circ}\text{C}>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。刘丹^[15]从大豆中得到的抗氧化肽在温度为 $63\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 抗氧化活性最好。温度过高会导致多肽的二级结构发生改变^[15], 从而导致其活性降低。

在温度 $40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, AAPS 溶液的抗氧化活性随时间上下波动, 在 2.5 h 后, 3 个条件下的多糖抗氧化活性处于下降状态, 加热温度越低, AAPS 溶液的抗氧化能力下降速度越缓慢。在温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, AAPS 溶液的抗氧化活性随着时间的延长呈下降趋势。温度的变化可诱发多糖结构的改变^[16], 从而导致多糖的理化性质发生改变。AAPS 溶液对温度的耐热性较差, 储存时或在食品加工过程中, 不易长时间维持在较高的温度。

2.1.4 金属离子对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响分析

如图 4 可知, 在不同浓度的 Na^+ 、 K^+ 溶液体系中

AAPS 溶液的抗氧化能力均未出现明显改变, 而 AAPP 溶液随着 Na^+ 、 K^+ 浓度的升高, 羟基自由基清除能力总体上呈上升趋势, 这可能是离子化的 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 打破多肽的电荷平衡, 使得体系内的离子强度发生变化, 从而增强了其抗氧化能力, 这与 SHEN 等^[17]和李雪^[18]发现的结论一样。不同浓度的 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 处理后, AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化活性随 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 离子浓度的增加呈现下降趋势。 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 能够破坏多肽之间的特殊化学力作用, 导致多肽的理化性质发生改变, 溶解度变低, 一些基团外露在表面^[19], 使得其活性发生改变。多糖可以和金属离子结合形成复合物, 从而使得溶液中多糖的浓度下降, 羟基自由基清除能力下降。加入 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 后 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化活性下降的原因还可能是溶液中的 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , Cu^{2+} 被还原成 Cu^+ , 导致溶液体系内的抗氧化活性降低^[10]。因此在加工生产 AAPP 和 AAPS 溶液时, 应当尽量避免添加 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 相关添加剂。

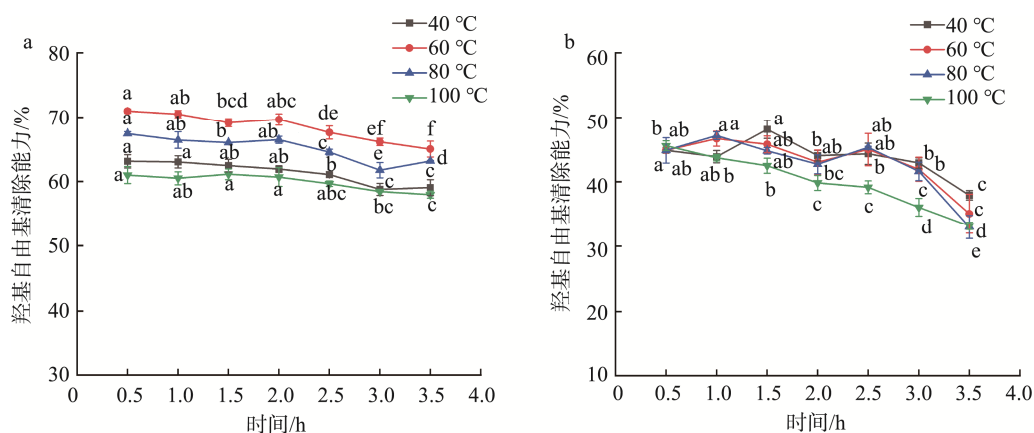


图 3 温度对 AAPP (a) 和 AAPS (b) 抗氧化活性的影响
Fig.3 Effects of temperature on the antioxidant activity of AAPP (a) and AAPS (b)

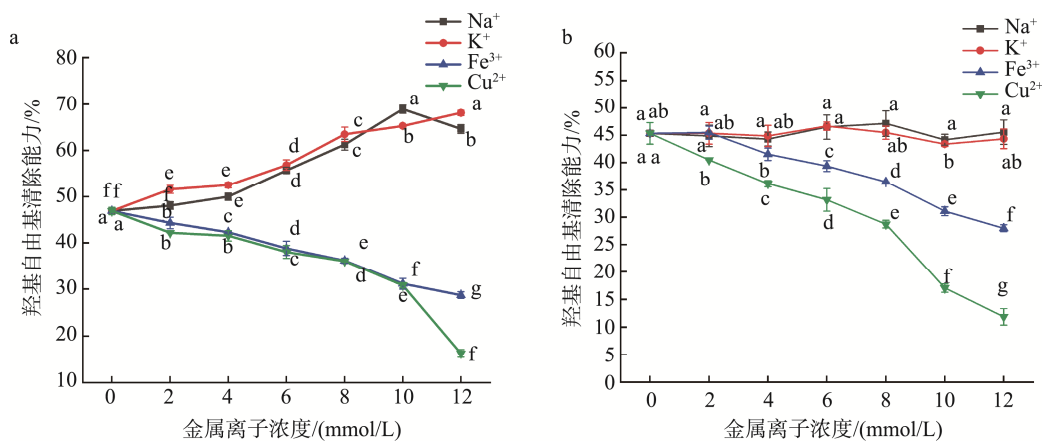


图 4 金属离子对 AAPP (a) 和 AAPS (b) 抗氧化活性的影响
Fig.4 Effects of metal ions on the antioxidant activity of AAPP (a) and AAPS (b)

2.1.5 常用食品配料对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响分析

(1) 甜味剂对 AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力影响分析

加入甜味剂葡萄糖、蔗糖后, AAPP 和 AAPS 溶液的抗氧化能力总体上显著降低($P < 0.05$)(图 5a、5b 所示); 而加入赤藓糖醇后 AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力总体上随赤藓糖醇浓度的增大而呈现上升趋势(图 5c 所示)。与 AAPP 相比葡萄糖、蔗糖对 AAPS 溶液的影响更大。有研究表明, 赤藓糖醇能够与自由基反应生成赤藓酮糖和

赤藓糖^[20-21], 达到清除自由基的目的; 赤藓糖醇也可抑制机体内自由基的产生^[22]。因此, 在未来生产 AAPP 和 AAPS 加工产品时, 应该尽量避免添加传统甜味剂蔗糖和葡萄糖, 可以考虑使用赤藓糖醇这类的代糖来达到增甜的目的。

(2) 柠檬酸对 AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力影响分析

加入柠檬酸, AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力总体上显著升高($P < 0.05$)(图 5d 所示)。柠檬酸是一种抗氧化剂增效剂, 能够增加抗氧化剂的抗氧化活性^[23]。肽链上的氨基酸残基可与柠檬酸中的羧基和羟基结合成为供氢体^[11],

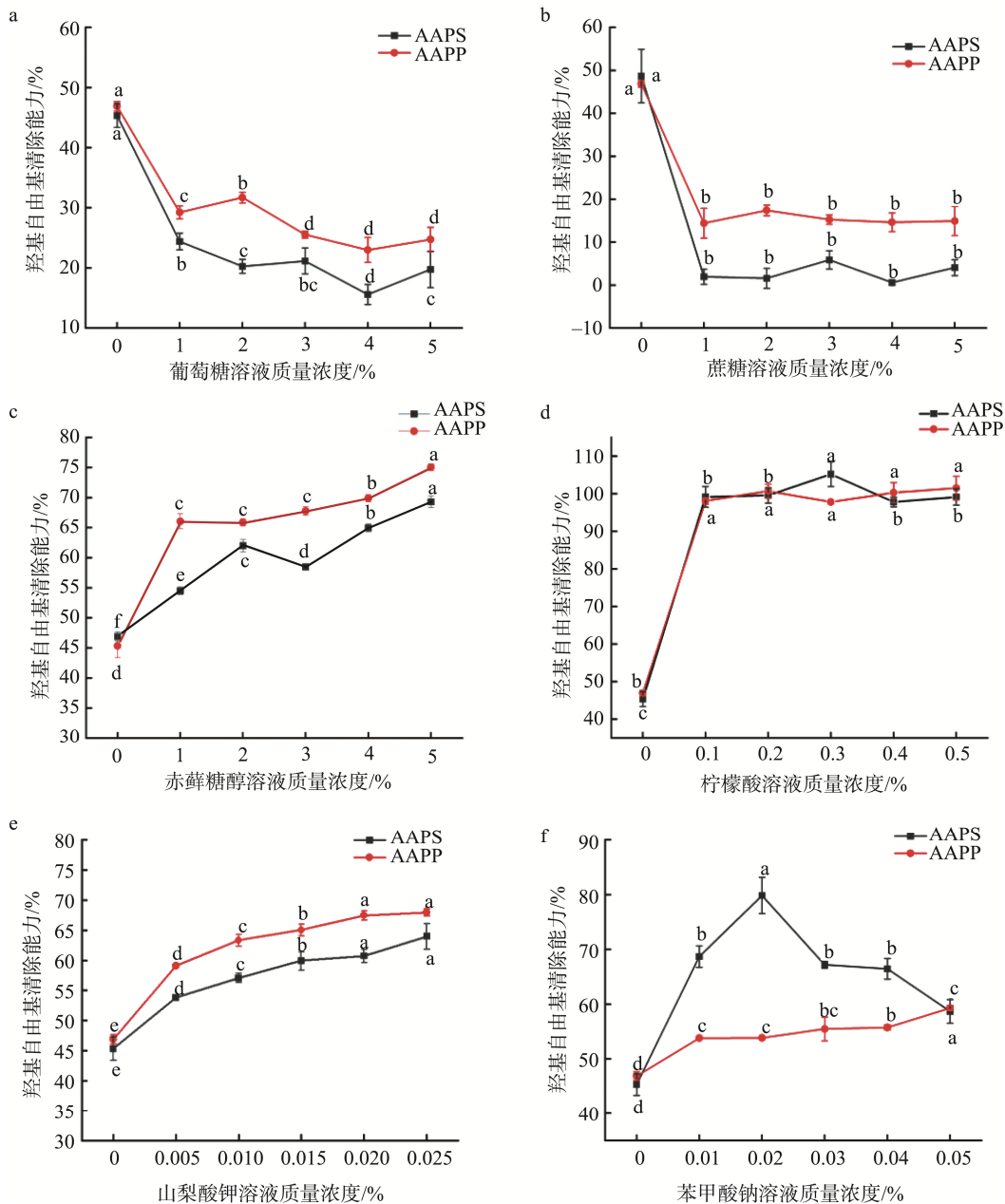


图 5 常用食品配料对 AAPP 和 AAPS 抗氧化活性的影响

Fig.5 Effects of common food ingredients on the antioxidant activity of AAPP and AAPS

进而增强 AAPP 的抗氧化活性。刘晓艺等^[11]的研究表明柠檬酸对红花籽抗氧化肽具有增效协同作用, 增强其抗氧化活性。有研究也证实, 柠檬酸可以作为食品的抗氧化剂提高食品的安全使用时间^[23]。

(3)防腐剂和 AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力影响分析

食品防腐剂是日常食品加工中应用最为广泛的一种添加剂。通过添加防腐剂可以预防食品在保藏过程中的腐败和变质, 进而延长食品的可食用时间^[24]。两种常见防腐剂山梨酸钾和苯甲酸钠添加后 AAPP 和 AAPS 溶液的羟基自由基清除能力总体上升高(图 5e、图 5f 所示)。山梨酸钾是一种弱抗氧化性的防腐剂^[25], 含有共轭双键可清除自由基, 抑制氧化链式反应, 在 AAPP 和 AAPS 溶液中添加山梨酸钾可以提高抗氧化活性。苯甲酸钠为酸性添加剂, 在其干预下, AAPP 和 AAPS 溶液得失电子的能力增强, 进而提高其抗氧化能力^[10]。其中苯甲酸钠对 AAPS 溶液的影响更大。柠檬酸和山梨酸钾均为酸性添加剂, 均表现出增强抗氧化活性。

2.1.6 灭菌方式对 AAPP 和 AAPS 溶液抗氧化稳定性的影响分析

如图 6 所示的 5 种灭菌方式对 AAPP 和 AAPS 溶液的抗氧化活性影响程度较小。多肽和多糖的结构相对稳定, 分子内的化学键能够抵御热作用, 在温度、压力条件下不易被破坏, 因此灭菌过程没有对其产生影响, 保持了原有清除羟基自由基的活性位点和结构特征, 使得其清除能力不因灭菌而改变。因此, 对 AAPP 和 AAPS 溶液进行加工产品时可任意挑选灭菌方式。

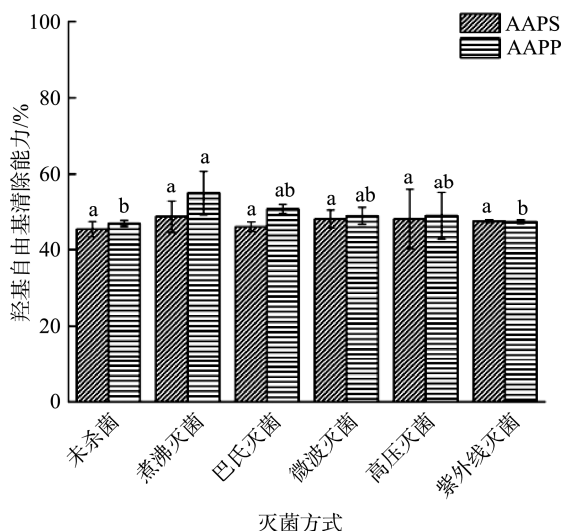


图 6 灭菌方式对 AAPP 和 AAPS 抗氧化活性的影响
Fig.6 Effects of sterilization methods on the antioxidant activity of AAPP and AAPS

2.2 食品特性及功能特性分析

2.2.1 WS、WHC 和 OHC 分析

如表 1 所示, AAPP 和 AAPS 的 WS 均超过 95%, 表现

出了较好的溶解性。WHC 对产品加工中的黏性、可塑性以及样品流动性等影响很大, WHC 的高低对产品的质地和感官有很大的影响^[26-27]。而 OHC 的高低对食品风味的保留时间存在一定的影响, 因此较高 OHC 的物质可以延长食品保质期^[28-29]。如表 1 所示, 与其他已报道的多肽、多糖相比, AAPP 和 AAPS 的 WHC 略有不足, AAPP 的 WHC (0.63 ± 0.02 g/g) 低于碱性蛋白酶解多肽的 WHC (2.02 g/g)^[28]; AAPS 的 WHC [(0.90 ± 0.05) g/g] 与酸李果实多糖 (0.95 ± 0.04)^[30] 比较相似, 但低于马铃薯皮多糖 [(4.097 ± 0.537) g/g]、火龙果多糖 [(3.87 ± 0.35) g/g]^[31] 和三七多糖 [(6.75 ± 0.67) g/g]^[32] 等。ALETOR 等^[33] 建议 WHC 在 1.49~4.72 g/g 范围内, 可以应用在相对黏性大的食品加工中。AAPS 的 WHC 略低还可归因于其分子质量和粒径的分布, 分子质量较大的多糖分子可以重叠交错形成网状结构, 当与水分子结合后形成刚性水凝胶结构, 不易与水分子分散, 而相对分子质量较小的多糖难以形成网状结构与水分子结合相对弱一些^[30]。AAPP 的 OHC 为 [(3.20 ± 0.02) g/g] 低于马梦婷^[28] 报道的多肽 OHC (4.553 g/g)。AAPS 的 OHC 为 [(4.38 ± 0.15) g/g] 与马铃薯皮多糖 (4.398 ± 0.040) g/g 和菠萝芯多糖 (4.250 ± 0.055) g/g 具有相似的 OHC^[33]。AAPP 和 AAPS 可以作为食品风味保持剂来增加食品的口感, 同时因其具有较高的抗氧化活性, 还可以防止食品中油脂的氧化, 延长食品的保质期。

表 1 AAPP 和 AAPS 的 WS、WHC 和 OHC
Table 1 WS, WHC and OHC of AAPP and AAPS

样品	WS/%	WHC/(g/g)	OHC/(g/g)
AAPP	98.91±0.77	0.63±0.02	3.20±0.02
AAPS	95.45±0.32	0.90±0.05	4.38±0.15

2.2.2 FC 和 FS 分析

由图 7 可知, 溶液在 5~30 mg/mL 时 AAPP 和 AAPS 的 FC 和 FS 均以剂量依赖性方式增加。AAPS 在 5~15 mg/mL 范围内, 形成的泡沫不稳定, 在 30 min 内几乎全部消散, 而随着 AAPS 质量浓度的增加, FC 和 FS 逐渐增大, 在 30 mg/mL 时 FS 达到 16.38%, 与 AAPP 20 mg/mL 时的 FS 相近, 在相同质量浓度下 AAPP 的 FC 和 FS 较 AAPS 高。AAPP 的 FC 和 FS 较高的原因可能是随着溶液体系内多肽浓度的增大, 会使多肽与水的表面形成稳定的泡沫, 同时泡沫表面膜的黏附性也会随之增加^[27]。

2.2.3 EC 和 ES 分析

由图 8 可知, 溶液在 5~30 mg/mL 时 AAPP 和 AAPS 的 EC 和 ES 均以剂量依赖性方式增加, 且与浓度有很大的关系, 这与 WANG 等^[34] 和 DRANCA 等^[35] 的研究结果相似。随着 AAPP 浓度的增加, 其在体系中排列的更加致密, 可以形成一定强度的界面膜, 从而使其 EC 和 ES 都逐渐增强。毕晓娟^[27] 的研究表明, 多糖的 EC 主要受到其结构内的

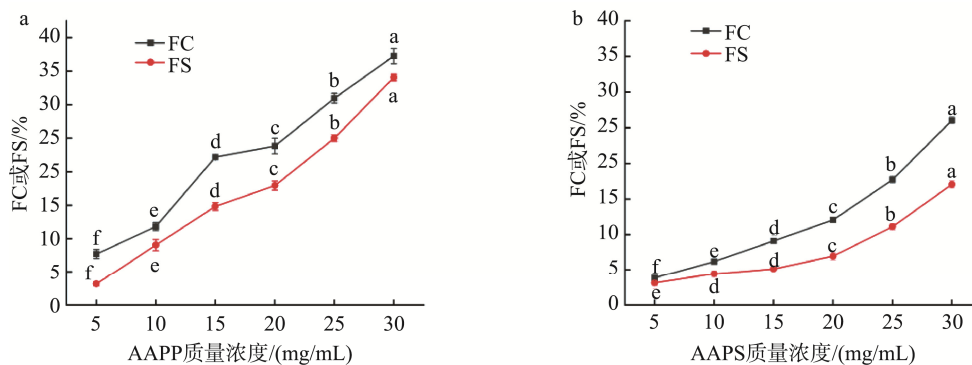


图 7 质量浓度对 AAPP (a)和 AAPS (b) FC 和 FS 的影响
Fig.7 Effects of mass concentration on FC and FS of AAPP (a) and AAPS (b)

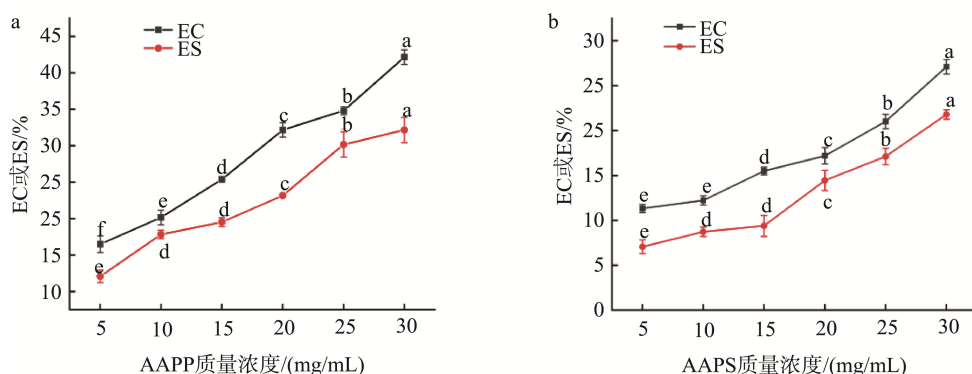


图 8 质量浓度对 AAPP (a)和 AAPS (b) EC 和 ES 的影响
Fig.8 Effects of mass concentration on EC and ES of AAPP (a) and AAPS (b)

疏水基团(特别是甲氧基)的影响,而 ES 主要受到多糖的分子量和其单糖组成、官能团和支链结构等在空间上所产生的位阻的影响^[36]。BAI 等^[37]实验表明高分子量多糖所对应的 EC 和 ES 更强,这是因为高分子量可以使样品分子更好地停留在油/水界面,从而表现更强的 EC^[31]。

2.2.4 温度耐受性分析

将 AAPP 和 AAPS 的冻干粉分别放置于提前预热的 35、50、65、80、95 °C 的烘箱内,恒温 30 min 后用肉眼观察其状态,结果如图 9 所示,同未处理冻干粉对照组相比,随着温度的增加 AAPP 和 AAPS 粉末颜色都有不同程

度的加深。由于 AAPP 的粉末自身就是灰黑色,观察效果不理想,但随着温度的增加 AAPP 和 AAPS 均出现了微微焦糊香气。结果表明,AAPP 和 AAPS 的冻干粉不耐受高温,在高温下会变性失活,因此需要低温储存。这与王童欣^[38]所得到的结论一致,多肽冻干粉不耐受温度的影响。AAPP 和 AAPS 的溶液因有溶剂水作为缓冲热传递并且分子较分散,可限制氧化反应;而在冻干粉状态下无溶剂缓冲,同时分子聚集紧密,易充分接触氧气,高温时抗氧化活性受影响较大。因此,AAPP 和 AAPS 的溶液较冻干粉更耐受高温。

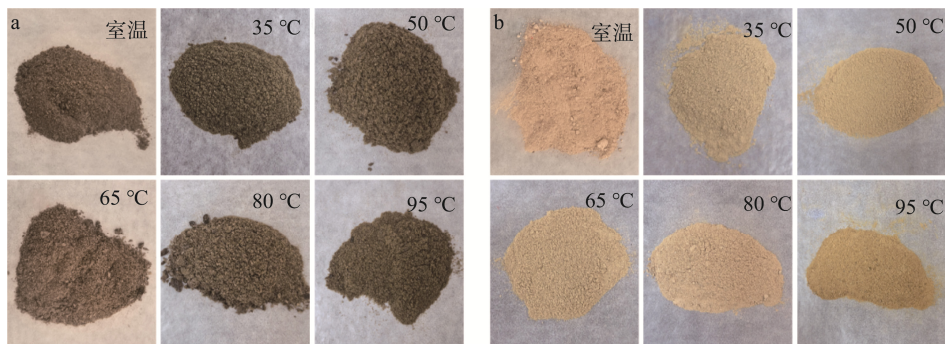


图 9 温度对 AAPP (a)和 AAPS (b)外观的影响
Fig.9 Effects of temperature on the exterior of AAPP (a) and AAPS (b)

3 讨论与结论

本研究主要围绕 AAPP 和 AAPS 在不同加工环境下的抗氧化活性稳定性及部分食品功能特性展开。得出如下结论, AAPP 和 AAPS 的 WS 均超过 95%, 溶解性较好; 二者 OHC 较高, 可作为食品风味保持剂增加食品口感, 防止食品中油脂氧化, 延长保质期; 在一定浓度范围内, AAPP 和 AAPS 的 FC、FS、EC 和 ES 均以剂量依赖性方式增加, 可用于改善食品的相关品质。此外, 添加柠檬酸、山梨酸钾、赤藓糖醇和苯甲酸钠等可增强 AAPP 和 AAPS 溶液的抗氧化活性, 在食品加工中合理利用这些特性, 可开发出具有更高抗氧化活性的功能性食品。

尽管本研究从多个方面研究了 AAPP 和 AAPS 的部分理化性质, 但仍存在一些局限性和待解决问题, 如在探讨影响因素时, 影响机制的研究还不够深入, 缺乏更深入的机制层面的分析等。综上, AAPP 和 AAPS 适合于作为乳化剂、起泡剂等辅料或功能性配料用于食品、保健品、药品、化妆品等行业中。

参考文献

- [1] 黄卉妍, 赵明, 李博文, 等. 黑木耳多糖、多肽营养饮品研制及其保健功能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 172–180.
HUANG HY, ZHAO M, LI BW, *et al.* Research on the development of *Auricularia auricula* polysaccharide and polypeptide nutritional beverage and its health function [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 172–180.
- [2] 吴孔阳, 原瑞材, 杨同香, 等. 响应面法优化羊肚菌多糖提取工艺研究[J]. 洛阳师范学院学报, 2021, 40(2): 19–23.
WU KY, YUAN RC, YANG TX, *et al.* Optimization of wxtraction technology of *Morchella esculenta* polysaccharides by response surface methodology [J]. Journal of Luoyang Normal University, 2021, 40(2): 19–23.
- [3] WANG YH, LV ZH, JIANG TF, *et al.* Extraction and determination of polysaccharides in the holothuria [J]. Journal of Ocean University of China, 2005, 35(6): 987–990.
- [4] DONG Y, LIN HQ, MIAO, *et al.* Advances in enzymatic extraction of polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 351–358.
- [5] 王大红. 复合酶全酶解提取工艺提取荷花花粉多糖的工艺研究[J]. 武汉职业技术学院学报, 2023, 22(5): 116–120.
WANG DH. Research on the process of compositeenzyme enzymatic hydrolysis method of lotus pollen polysaccharides [J]. Journal of Wuhan Polytechnic, 2023, 22(5): 116–120.
- [6] 李兴太, 纪莹. 线粒体氧化应激与天然抗氧化剂研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 268–277.
LI XT, JI Y. Recent advances in mitochondrial oxidative stress and natural antioxidants [J]. Food Science, 2015, 36(7): 268–277.
- [7] 郑燕韦, 韦凤, 庞光沃, 等. 单性木兰叶多糖的超声辅助提取工艺及稳定性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 188–192.
ZHENG YF, WEI F, PANG GW, *et al.* Study nltrasonic-assisted extraction technology and stability of polysaccharides from leaves of *Magnolia kwangsiensis* Figlar & Noot [J]. China Condiment, 2023, 48(12): 188–192.
- [8] 周天天, 陈香利, 毛雪, 等. 具有 ACE 抑制活性的黑木耳多肽酶解工艺优化[J]. 中国食物与营养, 2025, 31(1): 51–54.
ZHOU TT, CHEN XL, MAO X, *et al.* Optimization of enzymatic hydrolysis of *Auricularia auricula* polypeptides with ACE inhibitory activity [J]. Food and Nutrition in China, 2025, 31(1): 51–54.
- [9] KONG XH, MA YP, PAN Y, *et al.* Extraction optimisation and lipid-lowering activity of *Auricularia heimuer* polysaccharides [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2021, 39(6): 452–459.
- [10] 唐雅园, 王雪峰, 韦珍, 等. 香蕉花多糖抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 100–107.
TANG YY, WANG XF, WEI Z, *et al.* Antioxidant activity and stability of polysaccharide from banana flower [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 100–107.
- [11] 刘晓艺, 周玉岩, 过利敏, 等. 不同分子量红花籽抗氧化肽稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 94–102.
LIU XY, ZHOU YY, GUO LM, *et al.* Study on the stability of antioxidant peptides from xafflower xeedss with different molecular weight [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 94–102.
- [12] 宋姗姗, 杨艾华, 王微微, 等. 火炭母提取物抗氧化性及稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(12): 23–30.
SONG SS, YANG AIH, WANG WW, *et al.* Study on antioxidant activity and stability of the extracts from *Polygonum chinense* L [J]. China Food Additives, 2021, 32(12): 23–30.
- [13] 赵广河, 陆玺文, 胡梦琪, 等. 桃金娘果实多糖抗氧化稳定性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 65–70.
ZHAO GH, LU XW, HU MQ, *et al.* Study of antioxidant stability of polysaccharides from *Rhodomyrtus tomentosa* (Ait.) Hassk Berries [J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 65–70.
- [14] PENG L, ZHAO MM, CAO YL, *et al.* Purification and identification of anti-oxidant soybean peptides by consecutive chromatography and electrospray ionization-mass spectrometry [J]. Rejuvenation Research, 2014, 17(2): 209–211.
- [15] 刘丹. 大豆抗氧化活性肽的生物制备技术及稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LIU D. The research on biological preparation technology and stability of antioxidant peptide from soybean [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [16] 隋亚君. 桃金娘多糖的分离纯化及其化学结构研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
SUI YJ. The isolatio and structure reserch on the polysaccharides in rhodomyrtus tomentosa fruit [D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [17] SHEN Q, OU AN, LIU S, *et al.* Effects of ion concentrations on the hydroxyl radical scavenging rate and reducing power of fish collagen peptides [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(4): e12789.
- [18] 李雪. 紫花芸豆抗氧化肽的分离纯化及其稳定性的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
LI X. Purification and stability study of antioxidant peptides from purple bean [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.
- [19] WONG FC, XIAO J, ONG MG, *et al.* Identification and characterization of antioxidant peptides from hydrolysate of bluespotted stingray and their stability against thermal, pH and simulated gastrointestinal digestion

- treatments [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 614–622.
- [20] 方华, 李源. 海藻糖与热激蛋白在酿酒酵母耐受乙醇胁迫中的作用[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(6): 84–89.
FANG H, LI H. The roles of trehalose and heat shock proteins for enhancing ethanol tolerance of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. China Biotechnology, 2014, 34(6): 84–89.
- [21] 陈奕冰, 田力, 宋宁. 人红细胞冻干保护剂的研究进展[J]. 中国输血杂志, 2015, 28(3): 338–341.
CHEN YB, TIAN L, SONG N. A review of lyophilized reagent for human red blood cells [J]. Chinese Journal of Blood Transfusion, 2015, 28(3): 338–341.
- [22] 高圣君, 茅俊. 赤藓糖醇对柠檬汁饮料中维生素 C 保护作用的研究[J]. 食品工业科技, 2014(3): 49–51.
GAO SJ, MAO J. Study on the protective effect of erythritol on vitamin C in lemon juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014(3): 49–51.
- [23] 陈国艳, 陈若馨, 聂绪恒, 等. 抗氧化剂对青刺果油氧化稳定性的影响[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(2): 31–34.
CHEN GY, CHEN RX, NIE XH, *et al.* The effect of antioxidant on the oxidation stability of *Prinsepia utilis* rrole oil [J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(2): 31–34.
- [24] 李辉. 食品防腐剂在食品中应用现状分析[J]. 食品安全导刊, 2021(9): 50, 52.
LI H. Analysis of the current application status of food preservatives in food [J]. China Food Safety Magazine, 2021(9): 50, 52.
- [25] 于倩男. 山梨酸的抑菌性、抗氧化性及其在烘焙产品中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
YU QN. Antimicrobial and antioxidant properties of sorbic acid and its application in bakery [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [26] 张欣, 刘盈, 刘会平, 等. 荠菜粗多糖提取优化及其理化功能与抗氧化性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(2): 103–111.
ZHANG X, LIU Y, LIU HP, *et al.* Extraction condition optimization, physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharide from *Capsella bursa-pastoris* [J]. Food Research and Development, 2024, 45(2): 103–111.
- [27] 毕晓娟. 元宝枫籽粕酶解多肽的提取及活性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
BI XJ. Study on Extraction of enzymatic hydrolyzed polypeptide from *Acer truncatum* seed meal and its activity [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [28] 马梦婷. 棉籽蛋白结构功能特性与多肽抗氧化活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
MA MT. Study on Functional and structural properties of cottonseed protein and the antioxidant activity of peptides [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [29] 徐雅琴, 刘柠月, 李大龙, 等. 蓝靛果多糖功能特性、结构及抗糖基化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 8–14.
XU YQ, LIU NY, LI DL, *et al.* Functional properties, structure and anti-glycosylation activity of polysaccharide from blue honeysuckle fruit (*Lonicera caerulea* L.) [J]. Food Science, 2020, 41(2): 8–14.
- [30] 温辉珍, 杨子, 阿吉艾克拜尔·艾萨, 等. 新疆酸李果实多糖的理化性质、功能及其流变学特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(18): 57–66.
WEN HZ, YANG Z, AJIAIKEBAIER AIS, *et al.* Physicochemical, functional, and rheological properties of polysaccharides from *Prunus cerasifera* Ehrhart fruits [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(18): 57–66.
- [31] CHEN RZ, LUO SJ, WANG CX, *et al.* Effects of ultra-high pressure enzyme extraction on characteristics and functional properties of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel pectic polysaccharides [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 121: 107016.
- [32] WU J, CHEN RZ, TAN L, *et al.* Ultrasonic disruption effects on the extraction efficiency, characterization, and bioactivities of polysaccharides from *Panax notoginseng* flower [J]. Carbohydr Polym, 2022, 291: 119535.
- [33] ALETOR O, OSHODI AA, IPINMOROTI K. Chemical composition of common leafy vegetables and functional properties of their leaf protein concentrates [J]. Food Chemistry, 2002, 78(1): 63–68.
- [34] WANG L, ZHANG B, XIAO J, *et al.* Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127–135.
- [35] DRANCA F, VARGAS M, OROIAN M. Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* ‘Falticeni’ apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 100: 105383.
- [36] NIE XR, LI Y, DU G, *et al.* Structural characteristics, rheological properties, and biological activities of polysaccharides from different cultivars of okra (*Abelmoschus esculentus*) collected in China [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 459–467.
- [37] BAI CL, CHEN RZ, ZHANG Y, *et al.* Comparison in structural, physicochemical and functional properties of sweet potato stems and leaves polysaccharide conjugates from different technologies [J]. International Journal of Biological Macromolecules 2023, 247: 125730.
- [38] 王童欣. 大青鲨鱼皮多肽的性质分析与功效研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
WANG TX. Study on the properties and effects of hybrid peptides from the skin of *Prionace glauca* [D]. Xiamen: Xiamen University, 2021.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)