

干热处理对杏鲍菇蛋白抗氧化活性的影响

陈怡静¹, 李萍¹, 康雨薇², 崔桂友^{1*}, 许慧卿^{1*}

(1. 扬州大学食品科学与工程学院, 扬州 225127; 2. 江苏旅游职业学院烹饪科技学院, 扬州 225500)

摘要: 目的 研究不同干热温度对不同质量浓度杏鲍菇蛋白抗氧化活性的影响。**方法** 用酶标仪测定经不同温度(65、80、95、110、125°C)烤制30 min, 不同质量浓度的杏鲍菇蛋白的抗氧化活性。**结果** 未进行干热处理的蛋白, 蛋白质质量浓度从0.2 mg/mL升至1.0 mg/mL, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基清除率由18.00%增加至19.83%; 蛋白质质量浓度为1.0 mg/mL时, 经110°C干热处理的蛋白比未经干热处理的蛋白DPPH自由基清除率增加了0.93%, 还原力增加了0.11%, 羟基自由基增加了27.71%, Fe²⁺螯合力增加了21.78%, 超氧阴离子清除率增加了15.76%。**结论** 经不同干热温度处理后的杏鲍菇蛋白抗氧化活性得到不同程度的增强, 实验结果可为研究如何提高蛋白质抗氧化活性提供理论依据。

关键词: 杏鲍菇蛋白; 干热处理; 抗氧化活性

Effects of dry heat treatment on the antioxidation activities of *Pleurotus eryngii* protein

CHEN Yi-Jing¹, LI Ping¹, KANG Yu-Wei², CUI Gui-You^{1*}, XU Hui-Qing^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Culinary Science and Technology College, Jiangsu College of Tourism, Yangzhou 225500, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of different dry heat temperatures on the antioxidation activities of *Pleurotus eryngii* protein with different mass concentrations. **Methods** The antioxidant activities of *Pleurotus eryngii* protein at different mass concentrations after 30 min baking at different temperatures (65, 80, 95, 110, 125°C) was determined by using a microplate analyzer. **Results** The 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine (DPPH) free radical scavenging rate of the protein without dry heating was increased from 18.00% to 19.83% when the protein mass concentration was increased from 0.2 mg/mL to 1.0 mg/mL; when the protein mass concentration was 1.0 mg/mL, compared with unheated protein, the temperature of the heat treated protein reaches to 110°C increased its DPPH free radical scavenging rate, deoxidization, hydroxyl radical, Fe²⁺ chelating and superoxide radical scavenging activity by 0.93%, 0.11%, 27.71%, 21.78% and 15.76%, respectively. **Conclusion** The antioxidant activities of the *Pleurotus eryngii* protein after different dry heat temperatures have been improved of being enhanced to varying degrees, which can provide a theoretical basis for studying how to improve the antioxidation activities of the *Pleurotus eryngii* protein.

KEY WORDS: *Pleurotus eryngii* protein; dry heat treatment; antioxidation activities

*通信作者: 崔桂友, 博士, 教授, 主要研究方向为食物资源和天然产物化学。E-mail: cuiguoyou@sina.com

许慧卿, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工及微生物技术。E-mail: yzuxhq@126.com

*Corresponding author: CUI Gui-You, Ph.D., Professor, College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China. E-mail: cuiguoyou@sina.com

XU Hui-Qing, Ph.D., Professor, College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China. E-mail: yzuxhq@126.com

0 引言

杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*)属真菌门、伞形目、侧耳科^[1], 是一种集食、药、医于一体的珍稀食用菌新品种^[2]。杏鲍菇口感鲜美、营养价值丰富, 具有抗衰老、抗氧化、抗病毒、抗肿瘤等生理作用^[3-4], 营养丰富, 蛋白质含量较高, 在我国含量丰富, 但人们利用完成品后剩余下脚料利用率较低^[5]。

为使杏鲍菇能被充分利用, 近年来, 对杏鲍菇的研究主要集中在其生物学特性和生物活性物质上^[6], 而对杏鲍菇蛋白质的研究并不充分。杏鲍菇蛋白质含有人体所需的 8 种必需氨基酸, 蛋白质分子量小, 容易被人体吸收, 是人体所需的优质蛋白质^[7]。蛋白质作为食品中主要的基本功能成分, 在食品加工的物理性质中起着重要的作用^[8-9]。在实际的食品生产加工过程中, 蛋白质的功能特性受多种因素影响, 尤其是受温度变化影响较大^[10-11]。目前, 对热处理后的杏鲍菇蛋白研究大多集中在 100℃ 以下的湿热处理, 对干热处理后的杏鲍菇蛋白的研究较少。周小理等^[12]虽对荞麦蛋白采用了干热处理, 但温度均在 100℃ 以下, 并未对 100℃ 以上进行研究。刘华勇等^[13]以湿热方式对辣木籽肽进行抗氧化研究时, 只做了 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基清除率这一指标, 并未对其他抗氧指标做检测。MESFIN^[14]研究了焙烤对鹰嘴豆分离蛋白理化性质和功能性质的影响, 发现干热处理显著提高了鹰嘴豆分离蛋白的抗氧化性能。以上研究虽对不同的蛋白进行了不同的热处理并研究了其抗氧化特性, 但对杏鲍菇蛋白进行干热处理后对其抗氧化活性的研究却鲜为报道, 为使其更利于抗氧化活性产品的研发和杏鲍菇的充分利用, 本研究对干热温度对杏鲍菇蛋白质抗氧化功能的影响进行探究, 并对其抗氧化活性进行体外评价, 拓宽干热处理杏鲍菇蛋白在多种食品中的应用, 为其开发新型工业化成品奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜杏鲍菇: 扬州市苏果超市。

DPPH、菲咯嗪、三氯乙酸(分析纯, 合肥巴斯夫生物科技有限公司); 磷酸盐缓冲液(分析纯, 上海博微生物科技有限公司); 无水乙醇、水杨酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 铁氰化钾、硫酸亚铁(分析纯, 天津市北辰方正试剂厂); 氯化铁(分析纯, 广州市科玛化学技术有限公司); 氯化亚铁、焦性没食子酸(分析纯, 上海展云化工有限公司); Tris-HCl(分析纯, 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司); 浓盐酸(分析纯, 天津市博林达科技有限公司);

过氧化氢(分析纯, 江西草珊瑚消毒用品有限公司); 8-苯胺-1-萘磺酸(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

1.1.2 主要仪器与设备

FA1104 型电子天平(精度 0.0001 g, 上海精密科学仪器有限公司); QL-901 型漩涡混合器(江苏海门市麒麟医用仪器厂); HR2050 高速冷冻离心机(湖南湘仪离心机仪器有限公司); Cary Eclipse 荧光分光光度计(美国瓦里安公司); DSC 8500 酶标仪(美国 Molecular Devices 公司); 756MC 紫外-可见分光光度计(上海菁华科技有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 样品蛋白前处理

通过采用碱提取和酸沉淀法^[15-16]得到杏鲍菇蛋白, 后对蛋白质液进行冻干得到蛋白粉, 分别对蛋白粉进行 65、80、95、110、125℃ 不同温度的干热处理 30 min, 得到样品蛋白。

1.2.2 杏鲍菇蛋白的抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除能力

参考王莹等^[17]和 HUANG 等^[18]的方法, 对实验方法做了如下更改。将 DPPH 溶解在无水乙醇中并稀释至终浓度为 0.2 mmol/L DPPH 来制备溶液。将热处理后的杏鲍菇蛋白质粉溶解于去离子水中配制为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的溶液, 取样品待测液与配制好的 DPPH 按 1:1 的体积比进行加样混合, 在 96 孔酶标板中避光反应 30 min, 然后使用酶标仪在 517 nm 的波长下进行扫描并记录其吸光度 A_{517} 代入公式(1)计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = 1 - \frac{A_{517} - A_x}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: A_x 代表以乙醇代替 DPPH 试剂作为试剂组的吸光度值; A_0 代表乙醇代替样品作为空白对照的吸光值。

(2) 还原力

以 İŞÇİMEN 等^[19]和 PEROVI 等^[20]的方法作参考, 将热处理后的杏鲍菇蛋白粉分别溶于 pH 为 6.6 的 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液中配制成 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的溶液作为备用, 配制好的蛋白溶液与 10 mg/mL 的铁氰化钾溶液分别取 1 mL 以 1:1 的体积比混合均匀后, 置于 50℃ 恒温水浴锅中 20 min, 冷却至室温后吸取 1 mL 10 mg/mL 的三氯乙酸溶液, 在高速离心机中以 3000×g 转速离心 10 min, 取 1 mL 的上清液和 1 mL 的去离子水以及 1 mg/mL 的氯化铁溶液 0.2 mL, 混合均匀后, 用移液枪取 20 μL 置于 96 孔酶标板中, 反应 10 min 后, 在波长为 700 nm 的条件下, 测量其吸光值, 记为 A_1 代入公式(2)计算:

$$\text{总还原力}/\% = 1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: A_2 : 试剂空白对照组的吸光值; A_3 : 以磷酸盐缓冲液代替样品作为空白对照组的吸光值。

(3) Fe²⁺螯合力

以 ROSSI 等^[21]的方法作参考, 将热处理后的杏鲍菇蛋白

粉用去离子水配制成 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的蛋白溶液, 分别取 0.5 mL 蛋白液、1.85 mL 的去离子水、0.2 mmol/L 的氯化亚铁 0.05 mL 和 5 mmol/L 的菲咯啉 0.1 mL, 混合均匀后, 用移液枪取 20 μ L 加入酶标板, 反应 20 min 后, 在 562 nm 处测量其吸光值记为 A_s , 代入公式(3)计算:

$$\text{Fe}^{2+}\text{螯合力}/\% = 1 - \frac{A_s}{A_{\text{对}}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: $A_{\text{对}}$: 以去离子水代替样品蛋白作为对照组的吸光值。

(4)超氧阴离子清除能力

在 25 $^{\circ}$ C 下使用酶标仪检测干热处理后杏鲍菇蛋白的超氧阴离子自由基清除活性, 参考孙莉莉等^[22]和 CHEN 等^[23]的方法并进行了一些修改。将不同处理温度的杏鲍菇蛋白溶于去离子水配制成不同质量浓度(0.2~1.0 mg/mL)的蛋白液后, 取 0.1 mL 蛋白样品, 溶解在 0.3 mL Tris-HCl 缓冲液(50 mmol/L, pH 8.2)中。在 25 $^{\circ}$ C 下加热 20 min 后, 通过加入 0.3 mL 焦性没食子酸(7 mmol/L)引发反应。反应 5 min 后, 加入 0.1 mL 的浓盐酸终止反应, 使用分光光度计在 325 nm 处一式 3 份测量所得溶液的吸光强度(A_{325}), 代入公式(4)计算:

$$\text{超氧阴离子清除}/\% = 1 - \frac{A_{325} - A_{\text{未}}}{A_{\text{未}}} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: $A_{\text{未}}$: 为未加焦性没食子酸的吸光值; $A_{\text{未}}$: 为未加样品蛋白的空白对照的吸光值。

(5)羟基自由基清除能力

参考渠宏雁等^[24]和 KLAUDIA 等^[25]的方法, 并做了如下修改: 称取一定量的杏鲍菇蛋白加入去离子水配制成 0.2~1.0 mg/mL 不同质量浓度的溶液, 取蛋白液分别以 1:1 的体积比依次加入 6 mmol/L 的硫酸亚铁溶液和 6 mmol/L 的水杨酸乙醇溶液及 7.5 mmol/L 的过氧化氢溶液, 混匀。在 37 $^{\circ}$ C 反应 1 h 后, 置于酶标仪中在 510 nm 处进行吸光度值的测定, 记为 A_{510} , 代入公式(5)计算:

$$\text{羟基自由基清除率}/\% = 1 - \frac{A_{510} - A_{\text{空}}}{A_{\text{水}}} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中: $A_{\text{空}}$: 加入蛋白样未加试剂的空白组的吸光值; $A_{\text{水}}$: 蒸馏水代替样品液的空白组的吸光值。

1.2.3 杏鲍菇蛋白的内源性荧光强度

参考史瑞婕^[26]检测内源性光谱的方法, 结合 8-苯胺-1-萘磺酸作为探针的原理, 在激发波长和发射波长为 390 和 470 nm 的条件下, 对不同热处理的杏鲍菇蛋白样品进行检测。

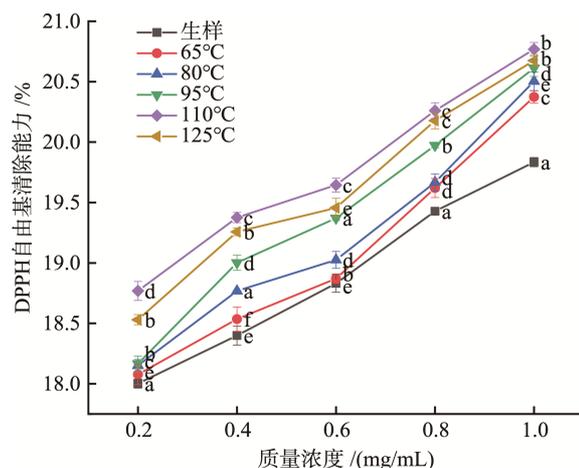
1.2.4 数据统计分析

本研究所有实验数据采用 SPSS 16.0 软件进行邓肯多重范围检验(Duncan's multiple range test, DMRT)分析, 采用 Origin 2018 64Bit 作图。所有数据均以“均值 \pm 标准偏差”表示。在这项研究中, 所有数据代表的是 3 个读数的平均值。

2 结果与分析

2.1 DPPH 自由基清除能力的测定结果

DPPH 是评估体外抗氧化活性较为可靠的方法^[27]。由图 1 可知, 未进行干热处理的蛋白, 蛋白质量浓度从 0.2 mg/mL 升至 1.0 mg/mL, DPPH 自由基清除率由 18.00% 增加至 19.83%; 蛋白质质量浓度为 1.0 mg/mL 时, 经 110 $^{\circ}$ C 干热处理的蛋白比未经干热处理的蛋白 DPPH 自由基清除率增加了 0.93%。随着蛋白质质量浓度的增加, 其 DPPH 自由基清除率显著升高; 随着干热温度的增加, 其 DPPH 自由基清除能力也逐渐增强, 说明干热处理使分子内部的功能基团得以暴露, 从而与 DPPH 发生反应, 增加了蛋白质分子 DPPH 自由基的清除能力。但加热温度达到 125 $^{\circ}$ C 时, 其清除能力却出现了下降现象。随着温度的升高清除能力逐渐上升的现象在 100 $^{\circ}$ C 以内时与朱莹莹等^[28]所研究的湿热处理藜麦蛋白随着温度升高 DPPH 自由基清除率也逐渐升高现象一致, 但 100 $^{\circ}$ C 以后的湿热处理朱莹莹等并未研究。杏鲍菇蛋白在 110 $^{\circ}$ C 下的干热处理 DPPH 自由基清除率逐渐升高, 但在 125 $^{\circ}$ C 时出现下降现象, 出现该现象很可能是结构展开后的小分子蛋白重新发生聚合形成大分子物质而引起的^[29]。



注: 图中不同小写字母代表同一浓度下、不同热处理之间差异显著($P < 0.05$), 下同。

图 1 不同温度下干热处理对 DPPH 自由基清除率的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of dry heat treatments on DPPH free radical scavenging rates at different temperatures ($n=3$)

2.2 还原力的测定结果

干热处理对杏鲍菇蛋白还原力的影响如图 2 所示, 蛋白质质量浓度为 1.0 mg/mL 时, 经 110 $^{\circ}$ C 干热处理的蛋白比未经干热处理的蛋白还原力增加了 0.11%。随着蛋白质质量浓度的增大, 其还原力逐渐增强, 但随着温度的升高, 其还原力在 125 $^{\circ}$ C 时出现下降。同一质量浓度下, 不同干

热处理组间存在差异。该现象可能是随着温度的升高, 蛋白质结构逐渐展开, 在 125°C 时随着蛋白质质量浓度的升高使蛋白质之间发生聚集, 形成大分子化合物使还原力下降^[30]。因此, 在本研究中干热处理温度在 110°C 时, 其还原力达到最佳。此现象与周小理等^[12]所研究的以干热、湿热不同热处理方式对苦荞蛋白的影响中得出在检测抗氧化活性中的还原力时, 干热处理 80°C 1 h 时还原力上升了 16.34%, 较为相似。且该研究中表明与干热相比, 湿热的还原力则出现下降现象。短时间内的干热会不同程度地提高其还原力, 但时间过长或温度过高则会导致还原力的下降。

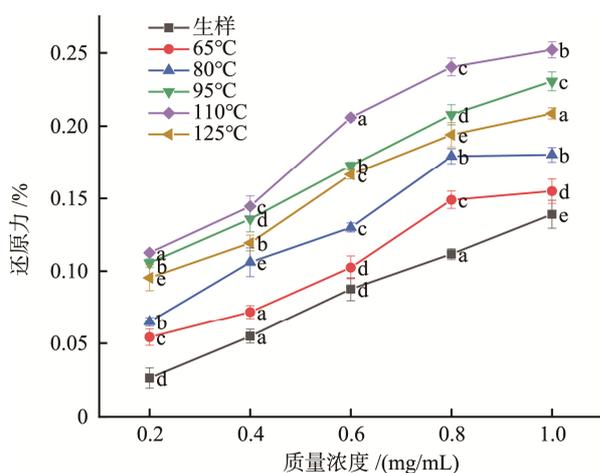


图 2 不同温度下干热处理对还原力的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of dry heat treatments on reducing power at different temperatures ($n=3$)

2.3 Fe^{2+} 螯合力的测定结果

某些蛋白螯合剂以改变过渡金属的物理位置形成不溶化合物, 来降低二价铁离子在机体产生活性氧的反应^[31]。如图 3 所示, 蛋白质质量浓度为 1.0 mg/mL 时, 经 110°C 干热处理的蛋白比未经干热处理的蛋白 Fe^{2+} 螯合力增加了 21.78%。随着干热处理温度升高, 杏鲍菇蛋白的螯合力以不同程度进行增长。由此可见, 干热处理使得蛋白质的结构和构象得以展开, 使蛋白质内部的氨基酸基团及多肽得以暴露, 使二价铁离子与其充分接触, 增大混合程度^[32]。但在 125°C 时其螯合力下降, 则有可能与温度升高使蛋白质发生分子聚合形成大分子有关^[33], 从而使得蛋白质分子在 110°C 时达到了最大。

2.4 超氧阴离子清除能力的测定结果

超氧阴离子在正常状态下与蛋白质、脂质等物质发生反应, 其通过与羟基反应而损坏机体功能^[34]。如图 4 所示, 蛋白质质量浓度为 1.0 mg/mL 时, 经 110°C 干热处理的蛋白比未经干热处理的蛋白超氧阴离子清除率增加了 15.76%。经过干热处理后, 自由基的清除能力总体而言得

到提升。其中在 110°C 时, 清除能力达到最强。在 125°C 时, 相较于 110°C 其超氧阴离子清除能力出现下降; 但经过干热处理后的杏鲍菇蛋白清除力与未加热蛋白相比仍得到了提升, 可见热处理可以增大蛋白分子内部超氧阴离子基团的暴露率, 使蛋白基团与焦性没食子酸接触率得到提高^[35]。

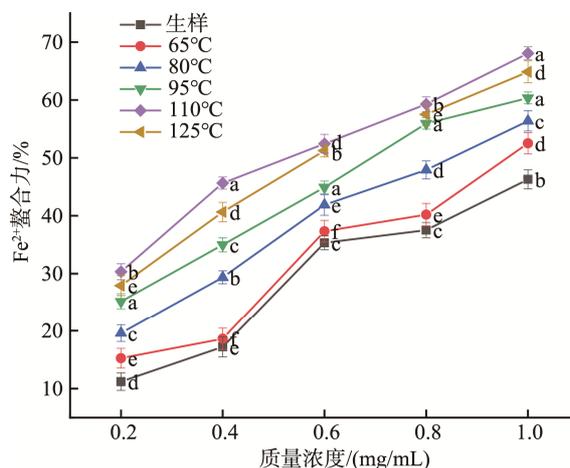


图 3 不同温度下干热处理对 Fe^{2+} 螯合力的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of dry heat treatments on chelating capacities of Fe^{2+} at different temperatures ($n=3$)

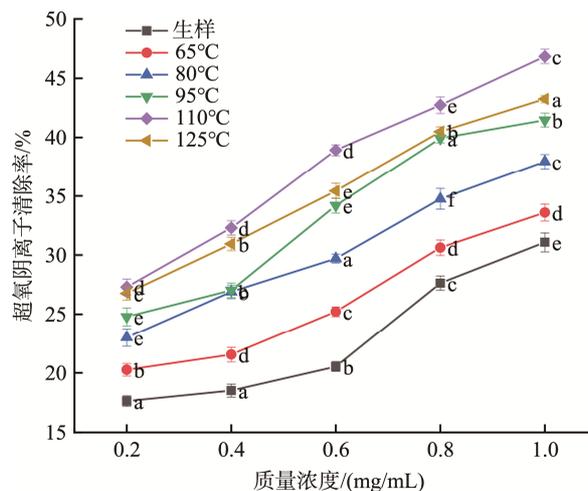


图 4 不同温度下干热处理对超氧阴离子清除率的影响($n=3$)

Fig.4 Effects of dry heat treatments on superoxide anion removal rates at different temperatures ($n=3$)

2.5 羟基自由基清除能力的测定结果

如图 5 所示, 随着蛋白质质量浓度的增加, 其羟基自由基清除能力也逐渐增加。在同一蛋白质质量浓度下, 干热温度升高, 自由基清除率也显著升高。当蛋白质质量浓度从 0.2 mg/mL 增加到 1.0 mg/mL 时, 未经加热的杏鲍菇蛋白自由基清除率分别为 11.03%、13.16%、16.03%、20.80%、29.63%; 蛋白质质量浓度的增大也伴随着其自由基清除率由 11.03% 加至 29.63%。从图 5 中可以看出, 当蛋白质质量浓度为 1.0 mg/mL

时,干热温度在 110℃时羟基自由基清除力达到最大,为 45.34%,比未经干热处理的蛋白增加了 27.71%。张鑫^[36]在研究不同浓度牛胶原蛋白的羟基自由基清除率时,蛋白浓度由 1%到 5%时,羟基自由基清除率由 28.29%增加至 42.8%。由此可见,随着蛋白质量浓度的升高,其羟基自由基清除率也逐渐升高,这是因为随着蛋白的增多,其暴露量逐渐增大,与试剂接触率也逐渐增多。在本研究中干热温度达到 110℃时,其羟基自由基清除能力达到最佳。

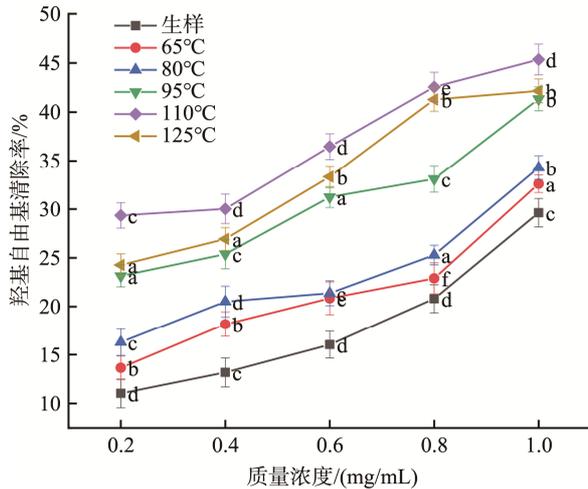


图 5 不同温度下干热处理对羟基自由基清除率的影响($n=3$)
Fig.5 Effects of dry heat treatments on hydroxyl radical scavenging rates at different temperatures ($n=3$)

2.6 内源性荧光光谱分析

荧光强度表明,由于苯基丙氨酸、酪氨酸和色氨酸等芳香族氨基酸的存在,蛋白质的三级结构可能发生构象变化。干热处理对杏鲍菇蛋白荧光光谱的影响如图 6 所示。以未经热处理的蛋白作为对照组,发现对照组与经干热处理后的蛋白荧光强度均在 345 nm 左右。结果表明,除 125℃处理的样品外,热处理后的杏鲍菇蛋白的荧光强度高于对照组蛋白。在所有干热处理的蛋白中,最高的荧光强度在 110℃加热 30 min 处,125℃加热 30 min 的荧光强度最低,甚至低于未处理蛋白。这是由于热处理导致蛋白质分子展开,从而使蛋白核心中隐藏的疏水基团暴露出来,但在 125℃时由于温度升高使展开的蛋白聚集成为大分子,从而使荧光强度降低。REN 等^[37]也观察了大豆分离蛋白在不同热处理条件下的荧光现象,发现在 121℃时其荧光强度也出现了降低,与本研究得出的结果一致。本研究结果也与蒋姗姗等^[38]对聚合乳清蛋白浓缩物的研究结果一致,随着温度的升高荧光强度均出现了下降现象,但与之不同的是他们的加热温度在 90℃时便出现了荧光强度降低的现象,而本文研究的结果是在 125℃时出现下降导致发生荧光强度下降时的温度略有差异的原因,除了是由于蛋白

的不同外,还及有可能是因为两者的热处理方式不同。

3 结论

本研究结果表明,干热处理改善了杏鲍菇蛋白在 DPPH 自由基清除能力、还原力、 Fe^{2+} 螯合力、超氧阴离子清除能力和羟基自由基清除能力方面的抗氧化活性。与之前研究的以湿热方式对杏鲍菇蛋白质进行热处理,其抗氧化活性随着温度升高逐渐增大的结果略有差异。研究结果表明随着干热处理温度的逐渐升高,蛋白质分子的结构得以展开,内部基团与试剂接触的可能性随之增加,使得抗氧化活性也逐渐增大,在 110℃加热 30 min 对杏鲍菇蛋白的抗氧化活性达到最佳,过度加热并不会改善其相关性,反而可能会使结构展开的小分子物质聚合成成为大分子物质,除此之外加热温度越高,蛋白质生成其他副产物的可能性也会越大。通过研究干热处理方式对杏鲍菇蛋白质的影响,可以利用其不同程度的抗氧化活性特点,在将来加强植物蛋白在产品中的应用,以开发新型健康食品。

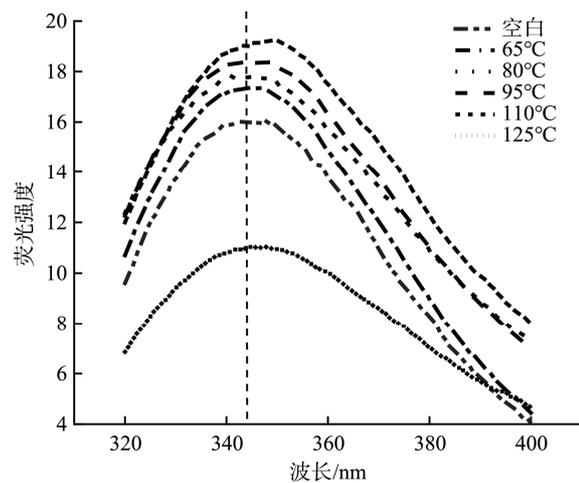


图 6 不同温度下干热处理对荧光强度的影响($n=3$)
Fig.6 Effects of dry heat treatments on fluorescence intensities at different temperatures ($n=3$)

参考文献

- [1] 郎田田, 雷妹敏, 陈红. 超声波辅助盐溶法提取杏鲍菇蛋白的工艺优化[J]. 中国调味品, 2018, 43(6): 19-23.
LANG TT, LEI SM, CHEN H. Process optimization of *Pleurotus eryngii* protein extraction by ultrasonic-assisted salt dissolution [J]. China Cond, 2018, 43(6): 19-23.
- [2] 熊荣园, 魏玲, 尚英. 预处理方式对杏鲍菇微波干燥特性的影响[J]. 食用菌, 2021, 43(1): 67-69.
XIONG RY, WEI L, SHANG Y. Effect of pretreatment methods on microwave drying characteristics of *Abalone mushroom* [J]. Edible Fungi, 2021, 43(1): 67-69.
- [3] MIYAZAWA N, MATSUOKA H, OZAWA Y. Palatability characteristics of *Pleurotus eryngii* var. *Tuoliensis* [J]. J Jpn Soc Food Sci, 2012, 59(3):

- 153–160.
- [4] 许新月, 崔文玉, 黄泽天, 等. 超声辅助纤维素酶法制备杏鲍菇蛋白质工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(20): 108–114.
XU XY, CUI WY, HUANG ZT, *et al.* Optimization of ultrasound-assisted cellulase process for the preparation of apricot mushroom protein [J]. Food Res Dev, 2020, 41(20): 108–114.
- [5] 赵换维, 王海华, 楚琰, 等. 杏鲍菇脚蛋白质提取工艺研究[J]. 科学咨询(科技·管理), 2021, (1): 34–35.
ZHAO HW, WANG HH, CHU Y, *et al.* Study on the protein extraction process of mushroom feet of *Abalone mushroom* [J]. Sci Adv (Sci Technol Manag), 2021, (1): 34–35.
- [6] SUN Y, LI W. Activity-guided isolation and structural identification of immunomodulating substances from *Pleurotus eryngii* [J]. Byron J, 2017, 51: 82–90.
- [7] 席甜, 冯翠萍, 程菲儿, 等. 杏鲍菇多肽的制备[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 490–495.
XI T, FENG CP, CHENG FER, *et al.* Preparation of peptides from *Agaricus blazei* [J]. J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed), 2015, 35(1): 490–495.
- [8] 孙天颖, 程红, 陈珂玥, 等. 热处理对葵花分离蛋白结构特性的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 69–71, 76.
SUN TY, CHENG H, CHEN KY, *et al.* Effect of heat treatment on the structural properties of sunflower isolated protein [J]. China Cond, 2021, 46(6): 69–71, 76.
- [9] 侯超凡, 陈振家, 郝利平. 不同处理对小米分离蛋白溶解性及亚基带分布的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(7): 37–41.
HOU CF, CHEN ZJ, HAO LP. Effects of different treatments on solubility and subunit band distribution of millet isolates [J]. China Cond, 2021, 46(7): 37–41.
- [10] 申挺挺, 郭琨, 李欣欣, 等. 杏鲍菇、白灵菇对芦笋老茎中木质纤维素的分解利用[J]. 山西农业科学(自然科学版), 2011, 39(11): 1170–1173.
SHEN TT, GUO J, LI XX, *et al.* Decomposition and utilization of lignocellulose in old stems of asparagus by *Agaricus blazei* and *Agaricus blazei* [J]. J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed), 2011, 39(11): 1170–1173.
- [11] 周荣荣, 庄柯瑾, 梁得福, 等. 不同热处理方式对芸豆蛋白提取及其体外消化性能的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 186–190.
ZHOU RR, ZHUANG KJ, LIANG DF, *et al.* Effect of different heat treatments on the extraction of kidney bean protein and its *in vitro* digestibility [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(12): 186–190.
- [12] 周小理, 侍荣华. 热处理方式对苦荞蛋白功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 292–298.
ZHOU XL, SHI RH. Effects of heat treatment on functional properties of tartary buckwheat protein [J]. Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(9): 292–298.
- [13] 刘华勇, 赵强忠, 马彩霞, 等. 加工条件对辣木籽肽抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 35–39.
LIU HY, ZHAO QZ, MA CX, *et al.* Effect of processing conditions on the antioxidant activity of *Moringa* seed peptides [J]. Food Mach, 2016, 32(10): 35–39.
- [14] MESFIN N. Effect of germination, roasting, and variety on physicochemical, techno-functional, and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolate powder [J]. Heliyon, 2021, 7(9): 28–31.
- [15] 赵换维. 杏鲍菇多肽的制备及体外活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1481–1486.
ZHAO HW. Preparation and *in vitro* activity of *Pleurotus eryngii* polypeptide [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(4): 1481–1486.
- [16] 刘庆, 李超, 耿中华, 等. 碱提酸沉法制备杏鲍菇蛋白质的工艺优化[J]. 食品工业, 2013, 34(10): 145–148.
LIU Q, LI C, GENG ZH, *et al.* Process optimization of alkali extraction and acid precipitation for the preparation of apricot mushroom protein [J]. Food Ind, 2013, 34(10): 145–148.
- [17] 王莹, 李锋涛, 黄美子, 等. 黄精多糖脱蛋白工艺及其抗氧化活性[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 57–62.
WANG Y, LI FT, HUANG MZ, *et al.* The process of polysaccharide deproteinization and its antioxidant activity of *Rhizoma polygonati* [J]. Food Ind, 2021, 42(12): 57–62.
- [18] HUANG CQ, TANG XY, LIU ZY. Enzymes-dependent antioxidant activity of sweet apricot kernel protein hydrolysates [J]. LWT, 2022, 1(15): 112825.
- [19] İŞÇİMEN EM, HAYTA M. Optimisation of ultrasound assisted extraction of rice bran proteins: Effects on antioxidant and antiproliferative properties [J]. Qual Assur Saf Crop, 2018, 10(2): 165–174.
- [20] PEROVI MN, PAJIN BS, ANTOV MG. The effect of enzymatic pretreatment of chickpea on functional properties and antioxidant activity of alkaline protein isolate [J]. Food Chem, 2022, 4(16): 131809.
- [21] ROSSI, GABRIELA BARBOSA, SERAGLIO, *et al.* Protein profile and antioxidant capacity of processed seeds from two common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars [J]. Int J Food Sci Technol, 2021, 12(31): 57–6.
- [22] 孙莉莉, 王维宇, 王振强, 等. 酶法制备大豆蛋白活性肽的工艺优化、分离纯化及抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(8): 38–42, 47.
SUN LL, WANG WY, WANG ZQ, *et al.* Process optimization, separation and purification and antioxidant activity of enzymatic preparation of soy protein active peptides [J]. Cere Oils, 2021, 34(8): 38–42, 47.
- [23] CHEN LH, LI DG, ZHU CC. Characterisation of antioxidant peptides from enzymatic hydrolysate of golden melon seeds protein [J]. Int J Food Sci Technol, 2021, 11(56): 5904–5912.
- [24] 渠宏雁, 李学鹏, 陈永泉. 提取条件对蜂花粉粗多糖抗氧化能力的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(2): 22–28.
QU HY, LI XP, CHEN YQ. Effect of extraction conditions on the antioxidant capacity of crude polysaccharides from bee pollen [J]. J Food Sci Biotechnol, 2022, 41(2): 22–28.
- [25] KLAUDIA RKORCZEK, TKACZEWSKA J, DUDA I, *et al.* Effect of heat treatment on the antioxidant activity as well as *in vitro* digestion stability of herring (*Clupea harengus*) protein hydrolysates [J]. J Aquat Food Prod Technol, 2021, 7(1): 806–825.
- [26] 史瑞婕. 杏鲍菇蛋白质结构表征及功能特性研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
SHI RJ. Study on protein structure characterization and functional properties of *Pleurotus eryngii* [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [27] 贾蕾, 何慧, 向极轩, 等. 碎米荠晒肽的制备及其体外抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 205–212.
JIA L, HE H, XIANG JQ, *et al.* Preparation and *in vitro* antioxidant activity of selenium peptides from crushed rice capsicum [J]. Food Ind Sci Technol, 2022, 43(6): 205–212.
- [28] 朱莹莹, 安双双, 王雷, 等. 不同热处理对藜麦蛋白质营养品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 49(1): 1–11.

- ZHU YY, AN SS, WANG L, *et al.* Effects of different heat treatments on protein nutritional quality of quinoa [J]. *J Cere Oils Ass*, 2021, 49(1): 1–11.
- [29] 胡佳丽. 基于超声/热处理的玉米蛋白抗氧化肽制备及其特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- HU JL. Preparation and characterization of corn protein antioxidant peptides based on ultrasound/heat treatment [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [30] 夏柯. 热处理对苦荞蛋白结构及功能特性的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016.
- XIA K. Effect of heat treatment on the structural and functional properties of buckwheat protein [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Technology, 2016.
- [31] 殷春雁, 李灿鹏, 刘自单. 干燥加热磷酸化修饰对辣木籽蛋白结构和抗氧化活性影响的研究[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(6): 204–211.
- YIN CY, LI CP, LIU ZD. Effects of drying and heating phosphorylation on structure and antioxidant activity of *Moringa oleifera* seed protein [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2021, 29(6): 204–211.
- [32] 刘晶, 胡晓, 杨贤庆, 等. 龙须菜蛋白质的提取及其酶解产物的抗氧化特性[J]. *浙江农业学报*, 2022, 34(5): 1061–1072.
- LIU J, HU X, YANG XQ, *et al.* Extraction of proteins from *Lobelia longifolia* and antioxidant properties of its enzymatic digestion products [J]. *Zhejiang J Agric*, 2022, 34(5): 1061–1072.
- [33] 何兴芬. 热处理对藜麦蛋白质功能特性、结构及体外消化的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- HE XF. Effect of heat treatment on functional properties, structure and *in vitro* digestion of quinoa proteins [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- [34] 胡帅. 发芽及热处理对粟谷蛋白抗炎、抗氧化的影响及其活性肽的分离与鉴定[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- HU S. Effects of germination and heat treatment on anti-inflammatory and antioxidant activity of mollugo gluten and isolation and identification of active peptide [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [35] 崔晓瑞, 王丽, 石菲菲, 等. 大球盖菇蛋白提取及抗氧化性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(22): 5949–5956.
- CUI XR, WANG L, SHI FF, *et al.* Study on protein extraction and antioxidant properties of *Agaricus grandis* [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(22): 5949–5956.
- [36] 张鑫. 牛胶原蛋白的功能特性及多肽的抗氧化活性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- ZHANG X. Study on functional properties of bovine collagen and antioxidant activity of polypeptide [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [37] REN C, XIONG W, PENG D, *et al.* Effects of thermal sterilization on soy protein isolate/polyphenol complexes: Aspects of structure, *in vitro* digestibility and antioxidant activity [J]. *Food Res Int*, 2018, 112: 284–290.
- [38] 蒋姗姗, 程建军, 李东飞. 聚合乳清浓缩蛋白对凝固型酸奶品质特性的影响[J]. *中国乳品工业*, 2017, 45(6): 73–77.
- JIANG SS, CHENG JJ, LI DF. Effect of polywhey protein concentrate on quality characteristics of solidified yoghurt [J]. *Chin Dairy Ind*, 2017, 45(6): 73–77.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



陈怡静, 硕士研究生, 主要研究方向为营养与食品卫生学。
E-mail: 1772893242@qq.com



崔桂友, 博士, 教授, 主要研究方向为食物资源和天然产物化学。
E-mail: cuiGuiyou@sina.com

许慧卿, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工及微生物技术。
E-mail: yzuxhq@126.com