

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.010

陆雪, 乔炳乾, 杨思, 等. 酸性条件下小麦低聚肽增强紫薯花色苷抗氧化性的研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 84-90.

LU X, QIAO B Q, YANG S, et al. Enhancement of antioxidant capacity of purple sweet potato anthocyanins by wheat oligopeptides under acidic conditions[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 84-90.

酸性条件下小麦低聚肽增强紫薯花色苷抗氧化性的研究

陆雪, 乔炳乾, 杨思, 徐信豪, 余莉莉, 牛丽亚✉

(江西农业大学 食品科学与工程学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 在 pH 4.0 酸性条件下, 添加 25~100 g/L 的小麦低聚肽 (WOPs) 虽降低了紫薯花色苷 (PSPAs) 的热稳定性, 但两者相互作用增强了其抗氧化能力, 并随着其添加量的增加而增大。当添加量为 100 g/L 时, PSPAs 溶液在体外模拟消化后的 DPPH、ABTS 自由基清除能力和总抗氧化能力 (FRAP) 分别提高了 1.5 倍、34 倍和 34%, 且分别在 37 °C 和 45 °C 贮藏 7 d 后, 其抗氧化能力没有出现显著性降低, 相比于单独的 PSPAs 具有更强的生物活性以及更高的稳定性。紫外光谱和荧光光谱表明在实验浓度下, PSPAs 可以引起 WOPs 特定波长下吸收峰的红移和荧光猝灭, 证明 WOPs 和 PSPAs 之间存在相互作用。综上所述, WOPs 具有应用于酸性 PSPAs 饮料开发的潜力。

关键词: 紫薯花色苷; 小麦低聚肽; 抗氧化性; 稳定性; 相互作用

中图分类号: TS215 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)04-0084-07

网络首发时间: 2024-07-02 09:17:14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240701.1509.004>

Enhancement of Antioxidant Capacity of Purple Sweet Potato Anthocyanins by Wheat Oligopeptides under Acidic Conditions

LU Xue, QIAO Bing-qian, YANG Si, XU Xin-hao, YU Li-li, NIU Li-ya✉
(College of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University,
Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: Under the acidic conditions (pH 4.0), the addition of wheat oligopeptides (WOPs) (25~100 g/L) decreased the thermal stability of purple sweet potato anthocyanins (PSPAs), but enhanced its antioxidant capacity, which increased with the rise of the additive amount. When the addition was 100 g/L, the DPPH, ABTS free radical scavenging capacity and FRAP total antioxidant capacity of PSPAs solution after *in vitro* simulated digestion were increased by 1.5 times, 34 times and 34%, respectively. After storage at 37 °C and 45 °C for 7 d, the antioxidant capacity did not change significantly, and it had stronger biological activity and higher stability than those of PSPAs. UV and fluorescence spectra showed that PSPAs can affected the

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金 (31960458)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (No. 31960458)

作者简介: 陆雪, 女, 1999 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品加工与安全。E-mail: 3345538722@qq.com

通讯作者: 牛丽亚, 女, 1984 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: nly8483@163.com

redshift of absorption peak and fluorescence quenching at specific wavelength of WOPs at experimental concentration, which proved the interaction between WOPs and PSPAs. It can be seen from the above that WOPs have the potential to be applied in the development of acidic PSPAs beverages.

Key words: purple sweet potato anthocyanins; wheat oligopeptides; antioxidative activity; stability; interaction

紫薯花色苷 (purple sweet potato anthocyanins, PSPAs) 是从紫薯中提取出来的一类种类繁多、结构多样的可食用天然水溶性色素, 具有抗氧化、抗炎、预防慢性疾病等多种生理功效, 在食品工业中备受推崇^[1-2]。但由于其自身的结构特点, 紫薯花色苷易受外界环境因素影响, 存在色泽多变性和加工不稳定性等问题^[3]。

常用的改善花色苷稳定性的方法有分子化学改性、微胶囊和辅色作用等^[4-5]。其中辅色作用是通过花色苷与辅色物质的相互作用, 进而改善其稳定性^[6]。低聚肽是由氨基酸以肽键连接而成的一种介于蛋白质和氨基酸之间的化合物, 具有良好的加工特性和生理功能, 其特殊的结构基团, 如分子链上的氨基酸组成、氨基酸构型及末端氨基酸、电荷、两亲性等, 可为构建肽-花色苷复合物提供结构基础^[7-8]。Yao L 等研究发现含色氨酸的两亲性肽与矢车菊素-3-O-葡萄糖苷 (C3G) 共组装可以提高花色苷的稳定性^[9]。Yanwei Li 等通过丝素蛋白肽与 C3G 结合, 增强了 C3G 的物理化学稳定性, 并保持其抗氧化活性^[10]。Zhucheng Yin 研究了酪蛋白和酪蛋白水解物与 C3G 在 pH 7.0 缓冲溶液中的相互作用, 两者之间的相互作用在总抗氧化能力 (Ferric reducing ability of plasma, FRAP) 测定中表现为协同作用, 其结果可用于设计具有强大抗氧化能力的花色苷-低聚肽功能性饮料^[11]。目前通过辅色作用改善花色苷稳定性的研究主要以蛋白为主, 多为乳清蛋白、酪蛋白等, 而对低聚肽的研究较少^[12]。

小麦低聚肽 (Wheat oligopeptides, WOPs) 在较宽的 pH 范围内, 具有溶解度高、生物活性强等优点, 于 2012 年批准为新资源食品, 可以作为营养强化剂应用于酸性饮料中^[13-15]。但目前在酸性蛋白饮料中应用的多为动物来源的胶原蛋白肽, 而植物蛋白肽, 尤其是 WOPs 的应用较少。WOPs 富含谷氨酰胺, 含有的氨基、羟基和羧基

可以作为与花色苷反应的结合单元。课题组前期研究发现在中性体系下 (pH 6.8), WOPs 的添加可以显著改善 PSPAs 的稳定性, 并增强其抗氧化性。那么, WOPs 是否具有应用于酸性花色苷饮料, 并增强其生物活性的潜力? 可见, 在酸性条件下, 研究 WOPs 对 PSPAs 稳定性的影响, 尤其是对其抗氧化性的影响, 对于开发 WOPs-PSPAs 复合功能饮料具有重要的意义。

基于此, 本实验主要研究在酸性条件下, 不同添加量的 WOPs 对 PSPAs 生物活性及稳定性的影响, 重点分析 WOPs 和 PSPAs 在加速贮藏和体外模拟消化过程中生物活性的变化, 最后通过紫外光谱和荧光光谱探讨两者之间的相互作用, 以其扩大 WOPs 的应用领域。

1 材料与方法

1.1 实验材料

小麦低聚肽 (纯度 93%): 中食都庆 (山东) 生物技术有限公司; 紫薯花色苷 (纯度 25%): 西安傲梦思胜生物科技有限公司; DPPH (纯度 97%): 日本东京化成工业株式会社; ABTS (纯度 98%)、DNS、猪胆盐: 索莱宝生物科技有限公司; 其余试剂 (分析纯): 西陇科学股份有限公司。

1.2 实验设备

酶标仪 M2: 美国 Molecular Devices; 紫外可见分光光度计 UV-5200PC: 上海元析; 荧光分光光度计 970CRT: 上海精密科学。

1.3 样品制备

分别称取不同质量的 WOPs, 溶解于水中, 配制成 0、25、50、75、100 g/L 的溶液。调节 pH 值至 4.0。然后称取将 PSPAs (2 g/L) 加入上述溶液中, 搅拌均匀后, 于 95 °C、30 min 灭菌, 冷却至室温备用。

选择添加量为 100 g/L 的 WOPs+PSPAs 溶液 (WOPs+PSPAs) 分别置于 37 °C 和 45 °C 的恒温

培养箱中, 避光贮藏 7 d, 分别以 WOPs 和 PSPAs 溶液为对照。

选择添加量为 100 g/L 的 WOPs+PSPAs 溶液 (WOPs+PSPAs) 进行体外模拟消化实验, 分别以 WOPs 和 PSPAs 溶液为对照。根据 M. Minekus^[16]推荐的方法, 体外模拟消化过程包括 2 h 胃消化和 2 h 肠消化。每 30 min 采集一次样品, 于 10 000 r/min 下离心去除不溶物, 然后在 -80 °C 下冻存备用。

1.4 总花色苷含量

通过 pH 示差法测定总花色苷含量^[17], 按式 (1) 计算:

$$H = \frac{\Delta A \times MW \times DF \times 10^3}{\varepsilon \times l} \quad \text{式 (1)}$$

式中: H 为总花色苷含量 (mg/L); ΔA 表示 (A527-A700)_{pH 1.0}-(A527-A700)_{pH 4.5}; MW 表示花青素的分子质量 449.2, 以矢车菊素计; DF 为稀释倍数; ε 为摩尔消光系数 26 900; l 为光程距离。

1.5 抗氧化能力

1.5.1 DPPH 自由基清除率

参照 Reza Safair^[18]的方法略作修改。将 1.0 mL 的 DPPH 溶液与 0.1 mL 的样品混合均匀, 于室温 (25 °C) 下避光反应 25 min, 去离子水作空白对照。测定 517 nm 下的吸光度值, 通过式 (2) 计算:

$$\eta_{\text{DPPH}}(\%) = \left(1 - \frac{A_t - A_s}{A_c} \right) \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: A_c 表示样品溶剂与 DPPH 溶液反应后的吸光度值; A_t 表示样品与 DPPH 溶液反应后的吸光度值; A_s 表示样品同无水乙醇混合后的吸光度值。

1.5.2 ABTS 自由基清除率

参照 Li Zhou^[19]的方法略作修改。25 μL 样品与 3 mL ABTS 工作液混合均匀, 于室温下避光反应 10 min, 去离子水做空白对照。测定 734 nm 下的吸光度值, 通过式 (3) 计算:

$$\eta_{\text{ABTS}}(\%) = \left(1 - \frac{A_t - A_s}{A_c} \right) \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: A_c 表示样品溶剂与 ABTS 溶液反应后的吸光度值; A_t 表示样品与 ABTS 溶液反应后的吸光度值; A_s 表示样品同 95%乙醇混合后的吸光度值。

1.5.3 FRAP

参考 Muhammad Siddip^[20]的方法略做修改。40 μL 的样品和 260 μL 的 FRAP 工作液加入到 96 孔酶标板中, 震荡均匀, 于 37 °C 下反应 10 min。测定 593 nm 下的吸光度值, 以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 建立标准曲线 ($y=0.2247x+0.1355$), 以 $\text{mMFe}^{2+}/\text{g}$ 表达 FRAP 活性。

1.6 紫外光谱

用紫外可见分光光度计在 200~800 nm 波长范围内测定。

1.7 荧光光谱

使用荧光分光光度计测定, 激发波长为 280 nm, 发射波长为 250~450 nm。分别设置 $\Delta\lambda$ 为 15 nm 和 60 nm, 波长范围分别为 260~320 nm 和 260~450 nm, 使用同步扫描模式记录同步荧光光谱。

1.8 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据处理, SPSS 进行统计分析, 采用单因素方差分析, 后进行 Duncan 检验, $P<0.05$ 说明存在显著性差异, 通过不同的字母表示。采用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 总花色苷含量

酸性环境下 WOPs 对 PSPAs 热稳定性的影响如图 1 所示。可以看出添加 WOPs 后 PSPAs 的热稳定性有所降低, 并随着 WOPs 添加量的增加而降低, 当添加量为 25 g/L 和 50 g/L 时无显著性差异, 比 PSPAs 降低了 7.35%, 添加量为 75 g/L 和 100 g/L 时无显著性差异, 比 PSPAs 降低了 9.89%。

在酸性环境下, PSPAs 主要以黄烺盐阳离子的形式存在, 具有较高的稳定性, 其本身含有较多的羟基, 且花色苷阳离子缺少电子易发生反应, 这使得花色苷容易同其他物质发生相互作用, 从而影响其稳定性。因此, 可能是由于 WOPs 与

PSPAs 之间发生了相互作用，生成了花色苷衍生物，所以测定出来花色苷含量下降^[21]。

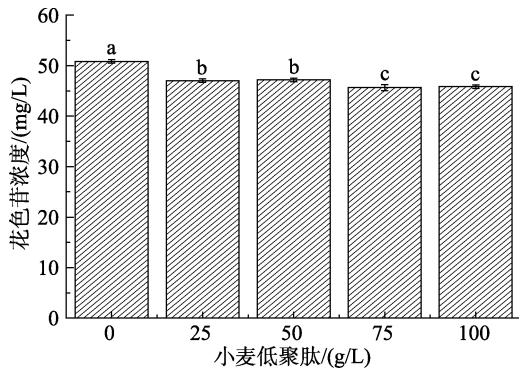
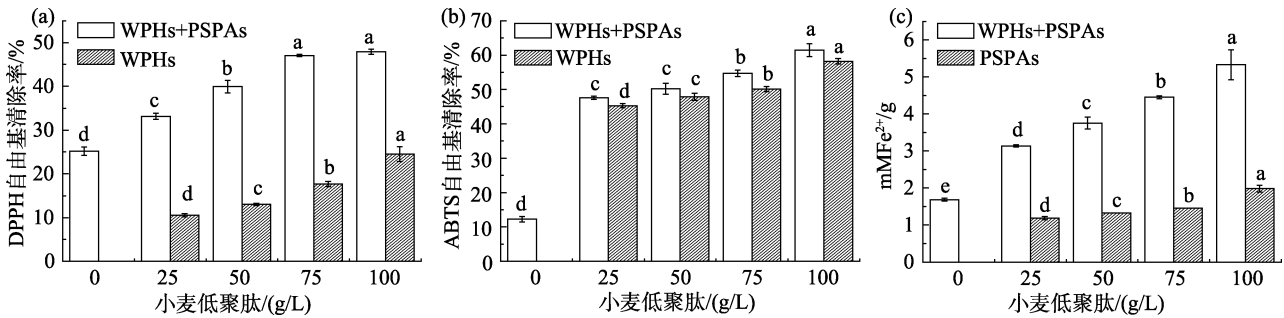


图 1 不同添加量的小麦低聚肽对紫薯花色苷热稳定性的影响

Fig.1 Effect of WOPs with different addition on thermal stability of PSPAs

2.2 抗氧化能力

酸性环境下灭菌后，WOPs 对 PSPAs 抗氧化能力的影响如图 2 所示，从图中可以看出，WOPs 可显著增强 PSPAs 的 DPPH、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力，并随着 WOPs 添加量的增加而增强。当 WOPs 添加量为 100 g/L 时，WOPs+PSPAs 相比 PSPAs 溶液的 DPPH 自由基清除能力增强了 90%，相比 WOPs 提高了 95%；比 PSPAs 溶液的 ABTS 自由基清除能力提高了 4 倍，相比 WOPs 提高了 5%；比 PSPAs 溶液的 FRAP 总抗氧化能力提高了 2.1 倍，相比 WOPs 提高了 1.68 倍。由前 3.1 可知，WOPs 与 PSPAs 两者之间可能发生了相互作用生成的衍生物，使得其抗氧化能力提升。



注：(a) DPPH 自由基清除率；(b) ABTS 自由基清除率；(c) FRAP 总抗氧化能力。

Note: (a) DPPH free radical scavenging rate; (b) ABTS free radical scavenging rate; (c) FRAP total antioxidant capacity.

图 2 小麦低聚肽对紫薯花色苷抗氧化活性的影响

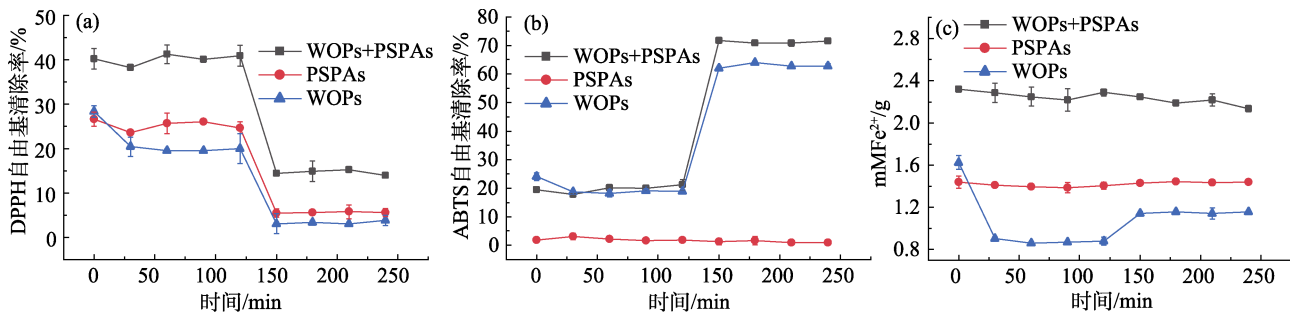
Fig.2 Effect of WOPs on antioxidant activity of PSPAs

2.3 体外模拟消化

2.3.1 抗氧化能力

WOPs 对 PSPAs 在体外模拟消化过程中抗氧化能力的影响如图 3 所示，从图中可以看出在消

化的前 30 min，WOPs 的 DPPH、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力均有所降低，而 WOPs+PSPAs 的抗氧化能力在消化过程初期未出现明显变化，可能因为 PSPAs 与 WOPs 的相互作



注：(a) DPPH 自由基清除率；(b) ABTS 自由基清除率；(c) FRAP 总抗氧化能力。

Note: (a) DPPH free radical scavenging rate; (b) ABTS free radical scavenging rate; (c) FRAP total antioxidant capacity.

图 3 体外模拟消化过程中抗氧化能力的变化

Fig.3 Changes of antioxidant capacity during the simulated in vitro digestion

用在消化初期对 WOPs 起到了一定的保护作用。WOPs+PSPAs 的抗氧化活性在胃、肠消化过程中显著高于 WOPs 和 PSPAs, 没有出现明显的波动。在消化结束后 WOPs+PSPAs 的 DPPH 自由基清除能力相比 PSPAs 提高了 150%, ABTS 自由基清除能力分别提高了 34 倍, FRAP 总抗氧化能力提高了 44%。

胃、肠消化环境存在较大的不同, 从图中可以明显看出 WOPs+PSPAs 的 DPPH 自由基清除能力在 120 min 时显著降低, 之后又趋于稳定; ABTS 自由基清除能力在 120 min 时显著增强, 然后趋于稳定, 而 PSPAs 没有发生明显变化。

2.4 加速贮藏

2.4.1 总花色苷含量

PSPAs 是一种对温度敏感的多酚类物质。从图 4 中可以看出在贮藏后 WOPs+PSPAs 中的总花色苷含量显著降低, 并随着贮藏温度的升高显著降低, 在 37 °C 和 45 °C 贮藏下分别降低了 15% 和 22%。PSPAs 在 37 °C 贮藏 7 d 后总花色苷含量没有发生显著性变化, 45 °C 贮藏 7 d 后其总花色苷含量降低了 8%。

2.4.2 抗氧化能力

PSPAs、WOPs+PSPAs 和 WOPs 在 37 °C 和 45 °C 贮藏后抗氧化能力的变化如图 5 所示。

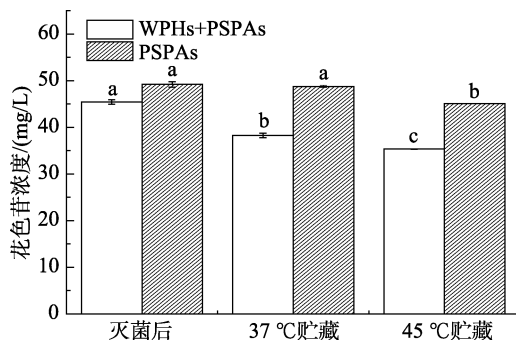
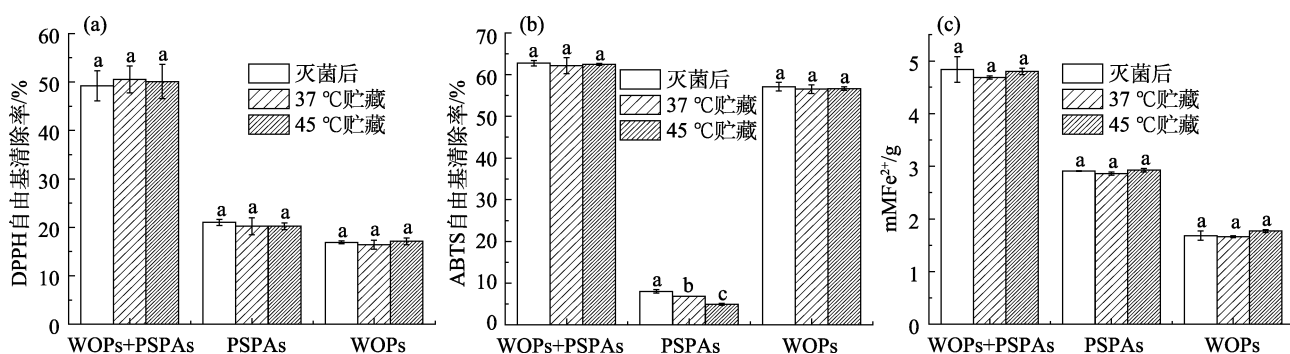


图 4 贮藏后总花色苷含量的变化

Fig.4 Changes of total anthocyanin content after storage

WOPs 和 PSPAs 作为天然产物, 容易在贮藏、高温、加工过程中造成损伤。从图中可以看出加速贮藏后 PSPAs、WOPs+PSPAs 和 WOPs 的 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力未发生显著的变化; WOPs 和 WOPs+PSPAs 的 ABTS 自由基清除能力在贮藏后没有显著降低。仅有 PSPAs 的 ABTS 自由基清除能力在贮藏后显著降低, 并随着贮藏温度的升高显著降低, 这是因为 PSPAs 在 7 d 的贮藏后有所降解。分析加速贮藏后剩余的总花色苷含量发现, 添加 WOPs 后溶液中总花色苷含量显著低于 PSPAs, 但其 DPPH、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力均未发生显著变化, 这可能是因为 WOPs 与 PSPAs 相互作用生成的衍生物具有较高的抗氧化能力。



注: (a) DPPH 自由基清除能力; (b) ABTS 自由基清除能力; (c) FRAP 总抗氧化能力。

Note: (a) DPPH free radical scavenging ability; (b) ABTS free radical scavenging ability; (c) FRAP total antioxidant ability.

图 5 贮藏后花色苷溶液的抗氧化性

Fig.5 The antioxidant activity of the anthocyanin solution after storage

2.5 光谱特征

2.5.1 紫外光谱

从图 6 中可以看其 250 nm 处的吸收峰在添加

PSPAs 后未发生偏移, 而在 280~300 nm 附近的吸收峰发生红移, 这表明 PSPAs 影响了 WOPs 中的色氨酸残基、酪氨酸残基以及苯丙氨酸残基。

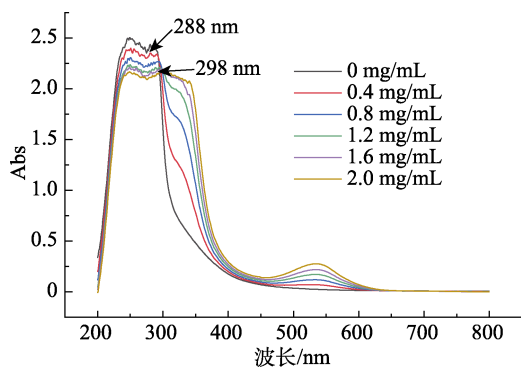


图 6 紫外可见光谱

Fig.6 UV-Vis spectroscopy

2.5.2 荧光光谱

从图 7 可以看出, 添加 PSPAs 后, WOPs 的荧光强度降低, 荧光强度随着 PSPAs 含量的增加而降低, 其峰值位置由 354 nm 红移至 364 nm。添加 PSPAs 后 WOPs 发生荧光猝灭, 这可能时因为两者之间相互结合形成复合物, 也可能是 PSPAs 同激发态分子碰撞, 缩短了激发态分子的寿命, 降低荧光强度^[22]。

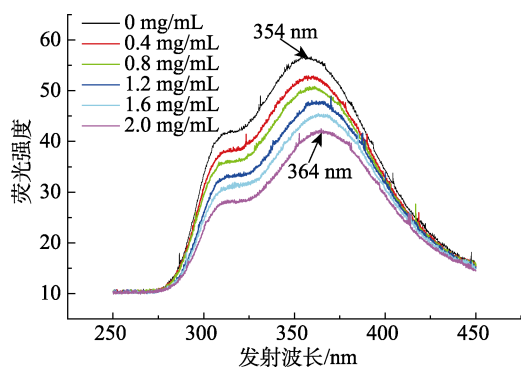
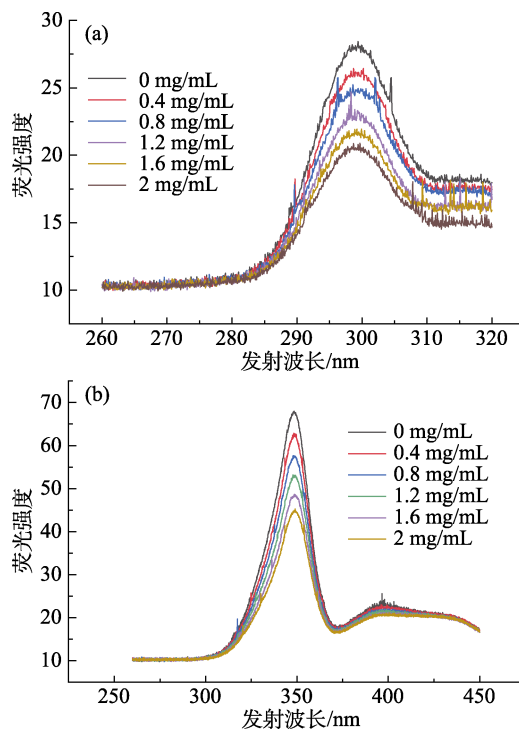


图 7 荧光光谱

Fig.7 Fluorescence spectrum

2.5.3 同步荧光光谱

当蛋白质周围的微环境发生变化的时候, 会引起氨基酸残基微环境的改变^[23]。发射波长峰值位置的偏移与氨基酸残基周围环境极性的变化相关^[24]。从图 8 中可以发现添加 PSPAs 后, 在酸性环境下 WOPs 同步荧光光谱的最大吸收峰位置没有发生偏移。这表明 WOPs 在酸性环境下, 酪氨酸残基和色氨酸残基周围的微环境没有因为 PSPAs 的加入而改变, 这可能是因为实验浓度下 PSPAs 对 WOPs 相关氨基酸残基周围环境的影响较小^[25]。



注: (a) 为 $\Delta\lambda=15$ nm; (b) 为 $\Delta\lambda=60$ nm。

Note: (a) is $\Delta\lambda=15$ nm; (b) is $\Delta\lambda=60$ nm.

图 8 同步荧光光谱


Fig.8 Synchronous fluorescence spectrum

3 结论

在酸性体系 (pH 4.0) 下灭菌后, WOPs 和 PSPAs 的相互作用, 虽降低了 PSPAs 的热稳定性, 但增强了 PSPAs 的抗氧化性, 当 WOPs 添加量为 100 g/L 时, PSPAs 溶液的 DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力分别提高了 0.9 倍、4.0 倍和 2.1 倍; WOPs 提高了 PSPAs 在体外模拟消化过程中的抗氧化能力; 经过 37 °C 和 45 °C 贮藏 7 d 后, 其抗氧化能力没有显著性降低。通过紫外光谱和荧光光谱发现, PSPAs 与 WOPs 两者之间发生了相互作用。可见, WOPs 具有应用于酸性 PSPAs 饮料开发的潜力。

参考文献:

- [1] HUANG Y, ZHOU S, ZHAO G, et al. Destabilisation and stabilisation of anthocyanins in purple fleshed sweet potatoes: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 1141-54.
- [2] YI M A, XIAO X, BAO W, et al. Density functional theoretical study on antioxidant activity of four anthocyanins from purple sweet potato[J]. Medicinal Plants: English Version, 2019, 10(2): 10-13.

- [3] 周新群, 冯欣欣, 孙洁, 等. 脱水预处理对冷冻紫薯花色苷损失的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 32-41.
 ZHOU X Q, FENG X X, SUN J, et al. Effect of dehydration pretreatment on the loss of anthocyanins in frozen purple sweet potato[J]. Food Science, 2023, 44(13): 32-41.
- [4] CORTEZ R, LUNA V, DIEGO A, et al. Natural pigments: stabilization methods of anthocyanins for food applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2017, 16: 180-198.
- [5] TAN C, WANG J, SUN B. Polysaccharide dual coating of yeast capsules for stabilization of anthocyanins[J]. Food Chemistry, 2021(5): 129652.
- [6] BARANI Y H, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Color stability and anthocyanins retention in microwave-thermally treated rose powder extracts during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020(10): e14727.
- [7] ROUNAK C, LORENI C P, Md MINHAJUL A, et al. Bioactive peptides in fermented foods and their application: a critical review[J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2023, 3(1): 88-109.
- [8] 罗永康, 张恒, 洪惠, 等. 生物活性肽功能与制备[M]. 北京中国轻工业出版社, 2019: 2-24.
 LUO Y K, ZHANG H, HONG H, et al. Function and preparation of bioactive peptides[M]. China Light Industry Press, Beijing, 2019: 2-24.
- [9] YAO L, XU J, ZHANG L, et al. Physicochemical stability-increasing effects of anthocyanin via a co-assembly approach with an amphiphilic peptide[J]. Food Chemistry, 202, 362: 130101.
- [10] LI Y, YAO L, ZHANG L, et al. Enhanced physicochemical stabilities of cyanidin-3-O-glucoside via combination with silk fibroin peptide[J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129479.
- [11] YIN Z, WU Y, CHEN Y, et al. Analysis of the interaction between cyanidin-3-O-glucoside and casein hydrolysates and its effect on the antioxidant ability of the complexes[J]. Food Chemistry, 2020, 340: 127915.
- [12] 袁婷婷, 周子艺, 赵吉春, 等. 基于共价/非共价结合的蛋白质与花色苷相互作用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 20: 293-299.
 YUAN T T, ZHOU Z Y, ZHAO J C, et al. The interactions between proteins and anthocyanins based on covalent/non-covalent binding: A review[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 20: 293-299.
- [13] 邵剑钢, 钱平, 刘晋, 等. 小麦低聚肽的功能作用研究进展及应用前景展望[J]. 中国食物与营养, 2016, (22): 72-4.
 SHAO J G, QIAN P, LIU J, et al. Research advancement and application prospect of function properties of wheat oligopeptides[J]. Chinese Food and Nutrition, 2016, (22): 72-4.
- [14] 关于批准中长链脂肪酸食用油和小麦低聚肽作为新资源食品等的公告 卫生部公告 2012 年第 16 号[J]. 中国食品, 2012, (21): 1.
 Announcement on the approval of medium and long chain fatty acid edible oil and wheat oligopeptide as new resource foods Announcement of the Ministry of Health No. 16, 2012[J]. China Food, 2012, (21): 1.
- [15] 凌空, 张铭皓, 高丽辉, 等. 体外模拟消化对小麦低聚肽抗氧化活性影响[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 82-86.
 LING K, ZHANG M H, GAO L H, et al. Effect on the antioxidant activity of wheat oligopeptides after in vitro digestion[J]. Food Industry, 2021, 42(4): 82-86.
- [16] MULET-CABERO A I, EGGER L, PORTMANN R, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food—an international consensus[J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113-24.
- [17] LANG Y, LI B, GONG E, et al. Effects of α -casein and β -casein on the stability, antioxidant activity and bioaccessibility of blueberry anthocyanins with an in vitro simulated digestion[J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127526.
- [18] SAFARI R, YAGHOUBZADEH Z. Antioxidant activity of bioactive peptides extracted from sea cucumber (*Holothuria leucospilata*)[J]. International Journal of Peptide Research and Therapeutics, 2020, 26(4): 2393-8.
- [19] ZHOU L, XIE M, YANG F, et al. Antioxidant activity of high purity blueberry anthocyanins and the effects on human intestinal microbiota[J]. LWT, 2020, 117: 108621.
- [20] SIDDIQ M, DOLAN K D, PERKINS-VEAZIE P, et al. Effect of pectinolytic and cellulolytic enzymes on the physical, chemical, and antioxidant properties of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) juice[J]. LWT, 2018, 92: 127-32.
- [21] 陈曦. 基于蛋白与小分子抗氧化剂协同效应的桑椹花色苷色素稳定化研究[D]. 江南大学, 2022.
 CHEN X. The synergistic effect of protein and small molecular antioxidants on the stability of mulberry anthocyanin pigment[D]. Jiangnan University, 2022.
- [22] 俞波. 药物与蛋白质大分子相互作用的光谱特性研究[D]. 南京航空航天大学, 2018.
 YU B. Spectroscopic studies on the interaction of drugs with protein[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [23] ZHANG Q J, LIU B S, HAN R, et al. Studies on the interaction of gliclazide with bovine serum albumin by fluorescence and synchronous fluorescence spectroscopy[J]. Spectroscopy Letters, 2016, 49(3): 208-13.
- [24] YU X, JIANG B, LIAO Z, et al. Study on the interaction between Besifloxacin and bovine serum albumin by spectroscopic techniques[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2015, 149: 116-21.
- [25] 张驰. 多酚与花生蛋白相互作用及其对花生蛋白致敏性的影响[D]. 西南大学, 2021.
 ZHANG C. The interaction of polyphenols with peanut protein and its effect on the allergenicity of peanut protein[D]. Southwest University, 2021. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。