

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.09

申慧珊, 张捷, 张艳艳, 等. γ 射线辐照对小麦粉面筋蛋白结构及功能特性的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 76-83.SHEN H S, ZHANG J, ZHANG Y Y, et al. Effect of γ -irradiation on functional properties and structure of wheat gluten protein[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 76-83.

γ 射线辐照对小麦粉面筋蛋白结构及功能特性的影响研究

申慧珊^{1,2,3}, 张捷^{1,3}, 张艳艳¹, 刘兴丽¹, 王宏伟^{1,3}, 张华^{1,2,3}✉

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 面制食品国家地方联合工程研究中心(河南), 河南 郑州 450001;
3. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300)

摘要: 采用不同剂量的⁶⁰Co- γ 射线辐照(0、5、10、15、20、25 kGy)处理小麦粉, 研究辐照对其面筋蛋白的结构和功能特性的影响。结果表明: 辐照使面筋蛋白二硫键断裂, 游离巯基含量增加。傅里叶变换红外光谱表明, 辐照导致 α -螺旋含量降低、 β -折叠含量增加, 使面筋蛋白的二级结构发生了重排。拉曼光谱和表面疏水性的观测结果表明, 芳香族氨基酸侧链的微环境发生了变化, 经过辐照处理, 色氨酸和酪氨酸残基更趋于暴露态, 表面疏水性增强。辐照处理提高了面筋蛋白的溶解度、持水性、持油性及乳化性, 在 15 kGy 处理时达到最大值(溶解度 0.46 mg/mL, 持水性 3.13 g/g, 持油性 4.33 g/g, 乳化活性 6.669 m²/g)。综上所述, 适当剂量的 γ 射线辐照处理可以改变面筋蛋白的二级、三级结构, 并改善其溶解性、持水性和乳化性等功能特性, 有利于拓展面筋蛋白的应用空间, 为其在食品工业上的应用提供理论指导。

关键词: γ 射线辐照; 面筋蛋白; 结构特性; 功能特性

中图分类号: TS 213.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)04-0076-08

网络首发时间: 2024-07-02 14:31:47

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240701.1708.016>

Effect of γ -irradiation on Functional Properties and Structure of Wheat Gluten Protein

SHEN Hui-shan^{1,2,3}, ZHANG Jie^{1,3}, ZHANG Yan-yan¹, LIU Xing-li¹,
WANG Hong-wei^{1,3}, ZHANG Hua^{1,2,3}✉

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center of Cereal-Based Foods (Henan), Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462300, China)

Abstract: In this paper, wheat flour was irradiated at different doses (0, 5, 10, 15, 20 and 25 kGy) to investigate the effects of ⁶⁰Co- γ -irradiation on the structural and functional properties of its gluten. The

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 河南省高校科技创新团队(23IRTSTHN029); 河南省重点研发专项(231111113200)

Supported by: Henan University Science and Technology Innovation Team (No.23IRTSTHN029); Key Research and Development Program of Henan Province (No.231111113200)

作者简介: 申慧珊, 女, 1994 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为谷物食品功能化加工。E-mail: shen1685778117@163.com

通信作者: 张华, 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 研究方向为速冻食品加工与安全控制。E-mail: zhh7510@126.com

disulfide bond was broken by irradiation, and the content of the free sulfhydryl group increased. The results of Fourier infrared spectroscopy showed that the secondary structure of gluten protein was rearranged with decrease in α -helix content and an increase in β -sheet content. Raman spectroscopy and surface hydrophobicity showed that the microenvironment of aromatic amino acid side chains changed. Irradiation treatment resulted in the tryptophan and tyrosine residues tending more toward the exposed state, and the surface hydrophobicity increased. Meanwhile, irradiation increased the solubility, water and oil holding, and emulsifying properties of gluten proteins, and the maximum value reached at 15 kGy (solubility is 0.46 mg/mL, water holding 3.13 g/g, oil holding 4.33 g/g, emulsification 6.669 m²/g). In conclusion, the proper dose of gamma-irradiation can change the secondary and tertiary structure of gluten, and improve its functional properties such as solubility, water retention and emulsification, which is conducive to expanding the application space of gluten protein and providing theoretical references for industrial applications.

Key words: γ irradiation; gluten protein; structure; functional properties

小麦粉是我国主要的成品粮之一，其加工制品深受欢迎。然而，因其脱离了小麦种皮的保护，在储藏过程中易受到微生物和虫害的污染，降低产品质量，造成经济损失^[1]，因此，探索无污染的绿色防霉防虫储藏方式一直是小麦粉储藏领域的研究热点。

γ 射线辐照是一种利用电离辐射提高食品安全性的食品加工技术，具有穿透力强、能耗低、无污染、适宜产业化生产等优势，辐照可以有效避免高温或高压造成的不稳定、成本高以及破坏食品风味和品质的弊端，有利于保持食品的营养品质及其风味、延长保质期^[2]。联合国粮农组织（FAO）、国际原子能机构（IAEA）和世界卫生组织（WHO）认为辐照食品不存在毒理学、营养学和微生物学方面的问题，可供人类安全食用^[3]。

使用辐照技术对小麦粉进行处理，可以达到很好的灭菌杀虫效果，且不改变小麦粉的基本组分（水分、粗蛋白、脂肪、淀粉）的含量，同时辐照作为一种快速、有效的物理改性方法，可以通过改变小麦粉的加工品质，来满足不同的产品需求^[4]。目前关于辐照对小麦粉品质的影响研究主要集中于小麦粉的加工品质及其淀粉结构与理化特性。辐照降低了面团的形成时间、稳定时间、拉伸曲线面积和拉伸阻力，提高了小麦粉的吸水率^[5]；同时，辐照引起了小麦粉中淀粉分子的降解，破坏了淀粉的长程和短程有序结构，导致破损淀粉含量增加，溶解度和膨胀力提高，糊化参

数（峰值黏度、最终黏度、崩解值、回生值）降低^[4, 6]；而对小麦粉中的另一个重要组成成分——面筋蛋白的影响研究却鲜有报道。由醇溶蛋白和麦谷蛋白组成的面筋蛋白，占小麦蛋白含量的 80%~85%，是小麦粉面团具有独特粘弹性的原因，其结构和功能特性对面团品质有着重要的影响。

因此，本文通过使用不同剂量辐照处理的面粉为样品，探究辐照对面筋蛋白结构和功能特性的影响，为辐照在小麦粉中的应用及面筋蛋白改性提供一定的理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦粉：河南金苑粮油有限公司；十二烷基硫酸钠（SDS）、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠：天津市大茂化学试剂厂； β -巯基乙醇、甘氨酸、Tris、溴化钾、溴酚蓝、考马斯亮蓝 G250：上海麦克林生化科技有限公司。所有试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

T6 型紫外可见分光光度计：北京普析公司；INVENIO 傅里叶变换红外光谱仪：德国 Bruker 公司；INVIA 激光共聚焦显微拉曼光谱仪：英国 Renishaw 公司；IKA 高速剪切均质机：德国 Fluko 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品的辐照处理

小麦粉用双层聚乙烯袋包装，在河南省同位

素研究所进行辐照剂量为 5、10、15、20、25 kGy 的 $^{60}\text{CO-}\gamma$ 射线辐照处理, 以未辐照样品为对照, 标记为 0 kGy。

1.3.2 面筋蛋白的提取

取不同剂量辐照处理的小麦粉 300 g (0~25 kGy), 加入小麦粉质量 45% 的去离子水, 于和面机中和面 10 min, 制备成表面光滑的面团, 用保鲜膜包裹在 25 °C 静置 0.5 h 后放入去离子水中, 不断揉洗面团, 期间换水直至洗至水清, 取出面筋蛋白, 冻干后研磨, 过 100 目筛后进行后续测定。

1.3.3 二级结构的测定

采用傅里叶变换红外光谱仪测定二级结构。称取 5 mg 面筋蛋白与烘至恒重的溴化钾在红外灯下以 1:100 (w:w) 的比例进行混匀、研磨、压片。使用 Paekfit 4.12 软件对酰胺 I 带 (1 600~1 700 cm^{-1}) 进行基线、高斯去卷积和二阶导数曲线拟合。

1.3.4 游离巯基及二硫键的测定

采用 DTNB 比色法测定游离巯基及总巯基含量^[7], 游离巯基和总巯基含量用公式 (1) 计算:

$$\text{SH}_F / \text{SH}_T = \frac{A_{412} \times 73.53 \times D}{C} \quad \text{式 (1)}$$

式中: SH_F 为游离巯基含量; SH_T 为总巯基含量; C 为蛋白质浓度, mg/mL; D 为稀释因子 (5.02 用于计算游离巯基、10 用于计算总巯基)。

二硫键的含量由公式 (2) 计算:

$$S - S = \frac{\text{SH}_T - \text{SH}_F}{2} \quad \text{式 (2)}$$

式中: SH_T 为总巯基含量; SH_F 为游离巯基含量。

1.3.5 氨基酸侧链的测定

适量蛋白粉末置于载玻片上, 使用激光共聚焦显微拉曼采集光谱。拉曼光谱的采集波长范围为 4 000~300 cm^{-1} , 分辨率为 3 cm^{-1} , 积分时间为 10 s, 激发波长为 785 nm。

1.3.6 表面疏水性的测定

面筋蛋白的表面疏水性采用溴酚蓝结合法进行测定^[8]。表面疏水性用公式 (3) 计算:

$$\text{溴酚蓝结合量}(\mu\text{g}) = \frac{(A_{\text{对照}} - A_{\text{样品}}) \times 200}{A_{\text{对照}}} \quad \text{式 (3)}$$

式中: $A_{\text{对照}}$ 为对照溶液在 595 nm 处的吸光度值; $A_{\text{样品}}$ 为样品溶液在 595 nm 处的吸光度值。

1.3.7 持水性及持油性的测定

参考王宏伟等^[7]的方法进行测定持水性及持油性。取 0.1 g 面筋蛋白于提前称重的离心管中, 加入 8 mL 去离子水 (大豆油), 涡旋 1 min 后于室温静置 60 min, 然后离心 20 min (4 500 r/min)。弃去上清液, 用滤纸轻轻吸去离心管壁上残留后称重。持水性 (WHC) 和持油性 (OHC) 用公式 (4) 计算:

$$\text{WHC} / \text{OHC}(\text{g} / \text{g}) = \frac{M_3 - M_2 - M_1}{M_1} \quad \text{式 (4)}$$

式中: M_1 为面筋蛋白的质量, g; M_2 为离心管的质量, g; M_3 为沉淀物与离心管的质量, g。

1.3.8 溶解度的测定

面筋蛋白的溶解度参考 Hu 等^[9]的方法进行测定, 略有修改。取 0.3 g 的面筋蛋白于 30 mL 去离子水中, 搅拌 30 min 后离心 30 min (25 °C, 3 000 r/min)。使用考马斯亮蓝法测蛋白浓度, 操作如下: 取 0.1 mL 上清液与 5 mL 考马斯亮蓝 G250 溶液混匀, 静置 2 min 后测定吸光度值 A_{595} 。以去离子水代替样品溶液为空白, 以牛血清蛋白做标准曲线。

1.3.9 乳化活性的测定

取 0.06 g 面筋蛋白与 12 mL 磷酸盐缓冲液 (pH=7) 混合, 加入 4 mL 大豆油, 以 10 000 r/min 均质 2 min, 迅速从底部吸取 0.1 mL 乳化液以 0.1% SDS 溶液稀释至 10 mL, 混匀后于 500 nm 下测定吸光度值 A_0 , 面筋蛋白的乳化活性指数 (EAI) 用公式 (5) 计算:

$$\text{EAI}(\text{m}^2 / \text{g}) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times 100}{C \times (1 - \Phi) \times 10\,000} \quad \text{式 (5)}$$

式中: A_0 为吸光度值; C 为原样品的溶液浓度, g/mL; Φ 为溶液中油的体积分数。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理汇总, 用 IBM SPSS Statistics 23 进行显著性分析, 以不同上标字母表示差异性 ($P < 0.05$)。所有实验重复 3 次, 数据以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 辐照对面筋蛋白二级结构的影响

如表 1 所示, 辐照处理显著改变了面筋蛋白

的二级结构,与对照样品(0 kGy)相比,随着辐照剂量的增加,面筋蛋白的 β -折叠含量呈先上升后降低的趋势, α -螺旋与 β -转角的含量呈下降趋势,无规卷曲含量无显著变化,这与Zhang^[10]等报道的辐照对鹰嘴豆蛋白二级结构的影响结果相一致。辐照改变了蛋白质的构象,导致蛋白质部

分解折叠,引起 α -螺旋结构含量降低, β -折叠含量的增加,表明辐照使蛋白质结构变得松散。辐照促进面筋蛋白中紧密的 α -螺旋结构转化为更加伸展的 β -折叠结构,使位于分子内部的基团暴露出来,蛋白质发生变性,从而引起了面筋蛋白功能特性的变化^[11]。

表 1 辐照对二级结构的影响

Table 1 Effect of irradiation on the secondary structure

辐照剂量/kGy	α -螺旋/%	β -折叠/%	β -转角/%	无规卷曲/%
0	21.64±0.50 ^a	34.04±0.31 ^d	22.65±0.74 ^a	21.67±0.57 ^a
5	20.93±0.28 ^b	34.43±0.19 ^d	23.40±0.69 ^a	21.25±0.57 ^a
10	20.79±0.12 ^b	34.84±0.26 ^c	23.04±0.20 ^a	21.33±0.19 ^a
15	20.26±0.05 ^c	38.21±0.32 ^a	20.46±0.29 ^b	21.07±0.62 ^a
20	20.30±0.03 ^c	37.22±0.59 ^b	21.33±1.05 ^b	21.15±0.52 ^a
25	20.29±0.20 ^c	37.13±0.31 ^b	21.26±0.55 ^b	21.32±0.21 ^a

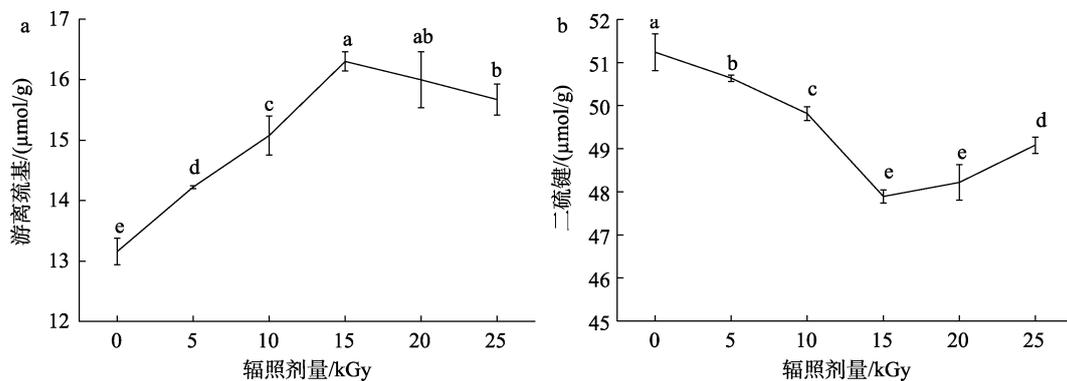
注:同一列中不同的上标字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different superscript letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2 辐照对面筋蛋白游离巯基及二硫键的影响

蛋白质中的游离巯基和二硫键是维持蛋白质空间结构的重要作用力,而二硫键起到维持骨架结构的作用,游离巯基的含量决定了蛋白质通过分子间或者是分子内形成二硫键的难易程度。如图1所示,随着辐照剂量的增加,游离巯基含量先增加后下降,而二硫键含量呈先下降后增加的趋势,均在15 kGy时达到峰值(游离巯基含量最高为16.30 $\mu\text{mol/g}$ 、二硫键的含量最低为47.89 $\mu\text{mol/g}$),

表明辐照过程中面筋蛋白发生了游离巯基逐渐向二硫键转变。这是因为辐照使蛋白质发生变性,二硫键发生断裂,面筋蛋白的结构打开,大量的游离巯基由蛋白分子内部转移到分子表面,导致暴露的游离巯基数目增加,游离巯基含量上升^[12],而随着辐照剂量的再次增加,蛋白质内部结构中含-SH的氨基酸转移到分子表面,暴露出的部分游离巯基被氧化,形成新的二硫键,造成游离巯基含量下降与二硫键的含量上升。



注: a: 游离巯基; b: 二硫键。数据上方不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: a: free sulfhydryl group; b: disulfide bond. Different letters above the data indicate significant difference ($P<0.05$), the same below.

图 1 辐照对游离巯基和二硫键的影响

Fig.1 Effects of irradiation on free sulfhydryl groups and disulfide bonds

2.3 辐照对面筋蛋白氨基酸侧链的影响

氨基酸侧链芳香族基团在拉曼光谱中具有特

征带,可以提供氨基酸侧链的微环境化学信息,反映蛋白质结构的变化。拉曼光谱中 760 cm^{-1} 与

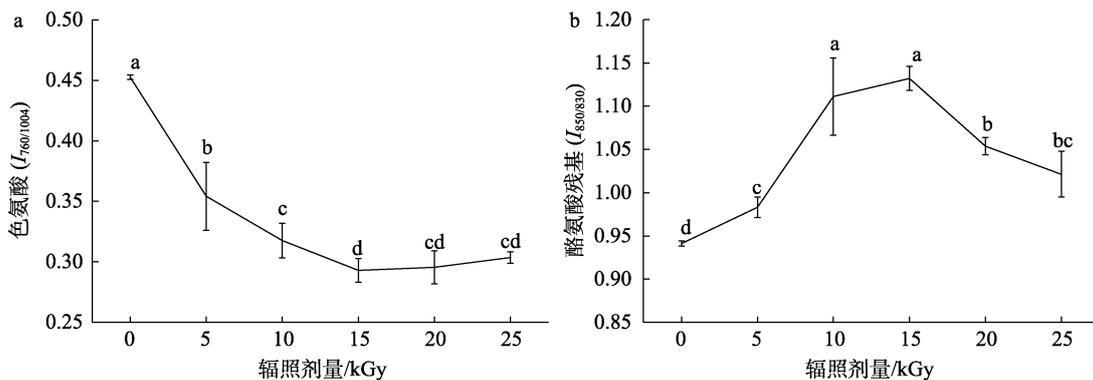
$1\ 004\ \text{cm}^{-1}$ 处峰强的比值能够表征色氨酸残基的微环境变化。如图 2a 所示,随着辐照剂量从 0 kGy 增加至 15 kGy, $I_{760/1004}$ 由 0.45 降低到 0.29, 表明色氨酸暴露程度增加, 当辐照剂量继续从 15 kGy 增加至 25 kGy, $I_{760/1004}$ 无显著性变化, 表明 15 kGy 以上的辐照剂量对色氨酸暴露程度与 15 kGy 无明显区别。

$I_{850/830}$ 所代表的费米共振可以反映酪氨酸残基在微环境中的暴露或嵌入的程度。 $I_{850/830}$ 值的降低表明酪氨酸残基被掩埋在蛋白质内部, 并参与氨基酸之间的分子内和分子间氢键的形成, $I_{850/830}$ 值的增加表明酪氨酸残基暴露于水相或极性微环境中^[13]。 $I_{850/830}$ 强度比在 0.7~1.0 范围内表明酪氨酸残基完全埋藏在疏水环境中, 而强度大

于 1 时, 酪氨酸残基逐渐暴露于蛋白质分子表面。如图 2b 所示, 经过辐照处理之后, $I_{850/830}$ 的值由 0.94 增加到 1.13。说明酪氨酸残基在辐照处理后逐渐暴露于极性环境中, 其中 15 kGy 剂量的辐照处理效果最为明显。辐照导致了面筋蛋白内部基团的暴露, 改变了氨基酸侧链所处的微环境, 破坏了维持面筋蛋白三级结构的作用力, 导致蛋白质的三级结构发生了变化。

2.4 辐照对面筋蛋白表面疏水性的影响

如图 3 所示, 与未辐照面筋蛋白相比, 辐照显著增加了面筋蛋白的溴酚蓝结合量, 表明辐照提高了面筋蛋白的表面疏水性。随着辐照剂量的增加, 溴酚蓝结合量呈现先增加后降低的趋势, 15 kGy 辐照处理的面筋蛋白表现出最高的表面疏水性。



注: a: 色氨酸, b: 酪氨酸残基。
 Note: a: tryptophan, b: tyrosine residue.

图 2 辐照对氨基酸侧链的影响

Fig.2 Effect of irradiation on amino acid side chain

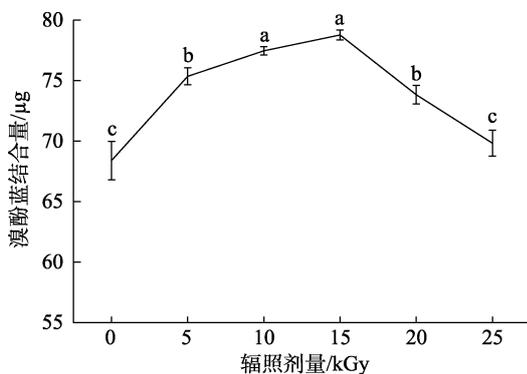


图 3 辐照对表面疏水性的影响

Fig.3 Effect of irradiation on surface hydrophobicity

表面疏水性可以表征蛋白质三级结构的变性程度, 反映出暴露在极性溶液中的疏水性氨基酸数量。辐照处理导致蛋白构象发生变化, 蛋白质

分子结构打开, 包埋于分子内部的一些疏水性氨基酸残基暴露, 促进了疏水性残基与溴酚蓝相结合^[11,14]。而当辐照剂量再次升高, 暴露出过多的疏水性残基, 疏水相互作用导致蛋白质的重新聚集, 导致面筋蛋白的表面疏水性有所降低^[15]。

2.5 辐照对面筋蛋白溶解度的影响

溶解度反应了蛋白质-蛋白质及蛋白质-水之间的相互作用, 是持水性和持油性等功能特性的重要基础。与未辐照面筋蛋白相比, 辐照显著提高了面筋蛋白的溶解度(图 4), 经过 15 kGy 剂量处理的面筋蛋白, 其溶解度达到最大值(0.46 mg/mL)。辐照处理后, 面筋蛋白的有序结构被破坏, 改变了蛋白质的构象, 使较多的亲水性氨基酸朝向水

一侧,从而增加了蛋白质与水之间的相互作用^[16],导致面筋蛋白的溶解度增加。随着辐照剂量的进一步提升(15~25 kGy),其溶解度下降,原因可能是在更高剂量的辐照之下,伸展的蛋白分子之间通过非共价键作用交联、重新形成大分子聚集体,形成不溶性的蛋白质^[17],导致溶解度有所降低。

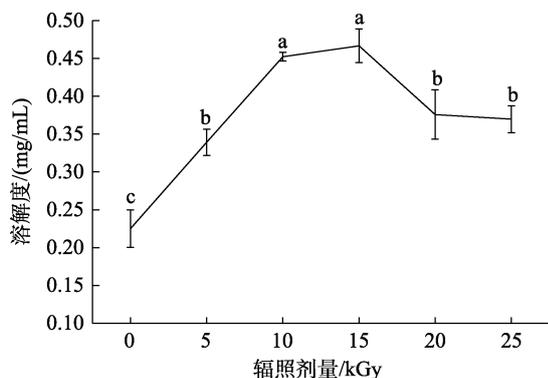


图 4 辐照对溶解度的影响

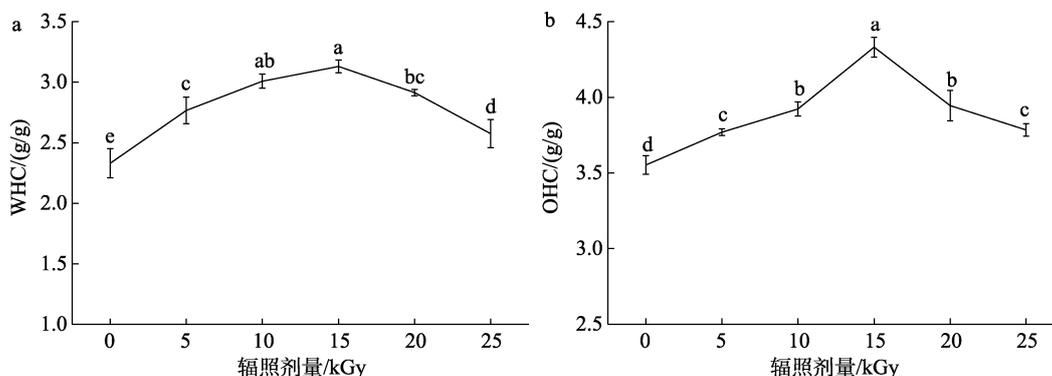
Fig.4 Effect of irradiation on solubility

2.6 辐照对面筋蛋白持水性及持油性的影响

持水性和持油性是指蛋白质吸收并保持水和油的能力,是蛋白质的重要性质。如图 5a 所示,与未辐照面筋蛋白相比,辐照显著提升了面筋蛋

白的持水性 ($P<0.05$)。相较于对照组 (0 kGy), 15 kGy 辐照的面筋蛋白持水性从 2.41 g/g 增加到 3.13 g/g, 而随着辐照剂量的继续增加, 持水性有所降低, 在 25 kGy 时持水性降低到 2.49 g/g, 但仍高于未辐照面筋蛋白。这是因为辐照改变了蛋白质的结构, 使蛋白质变为不规则的松散排列方式, 导致极性基团 (亲水基团) 暴露, 与水分子结合的机率提高, 面筋蛋白与水的水合程度增强, 从而提高了持水性^[18], 这与蛋白质溶解度的研究结果一致。

从图 5b 可以看出, 未经过辐照处理的面筋蛋白的持油性最小 (3.55 g/g), 随着辐照剂量的增加, 面筋蛋白的持油性有所提高, 在 15 kGy 照射剂量下, 持油性达到峰值 (4.33 g/g), 这是由于辐照处理使面筋蛋白的构象发生变化, 二级结构更加舒展, 更多的非极性基团 (亲脂基团) 暴露在蛋白质表面; 表面疏水性的增加也使蛋白质和油滴之间更有效的吸附与扩散, 从而增加了蛋白-油相互作用。随着辐照剂量的继续增加, 表面疏水性和溶解度降低, β -折叠向 α -螺旋转化, 这也导致了持油性随之降低^[19]。



注: a: 持水性, b: 持油性。

Note: a: water binding capacity, oil binding capacity.

图 5 辐照对持水性和持油性的影响

Fig.5 Effect of irradiation on water holding capacity and oil holding capacity

2.7 辐照对面筋蛋白乳化活性的影响

蛋白质同时具有亲水性基团和疏水性基团, 因此属于两亲物质而具有乳化活性。乳化活性是评价蛋白质乳化性能的重要指标之一, 是指当水与油相互融合时, 单位重量蛋白质稳定油水界面的能力。

如图 6 所示, 辐照后面筋蛋白的乳化活性显著增加 ($P<0.05$), 且随辐照剂量的增加呈现先上升后下降的趋势, 在 15 kGy 处理时达到最大值 (6.669 m^2/g)。这是因为经过适当的辐照处理, 面筋蛋白的溶解度增加、面筋蛋白的三级结构被打开, 暴露了疏水性基团, 改变了蛋白质分子表

面的亲水/亲脂性^[20], 这些变化促进了更多蛋白质分子与油水界面层的结合, 蛋白质在油水界面的吸附能力提高, 最终改善了蛋白质的乳化活性。随着辐照剂量的持续增加, 面筋蛋白再次聚集, 导致蛋白质无法有效连接油相和水相, 形成界面蛋白膜, 进而导致乳化活性呈现下降趋势。姚钢^[21]等也发现随着 γ 射线剂量的升高, 胚芽米蛋白的乳化活性呈现先升高后降低的趋势, 且在中剂量时达到最高, 他们认为 γ 射线辐照在一定程度上延缓了蛋白质的变性程度和聚集现象, 减少了蛋白质柔性程度的损失, 从而提升了蛋白质在界面处的舒张、重排和降低了界面空间位阻, 提高了乳化活性, 当剂量过高时, 蛋白质重新聚集, 疏水基团重新包埋, 导致了乳化活性的降低。

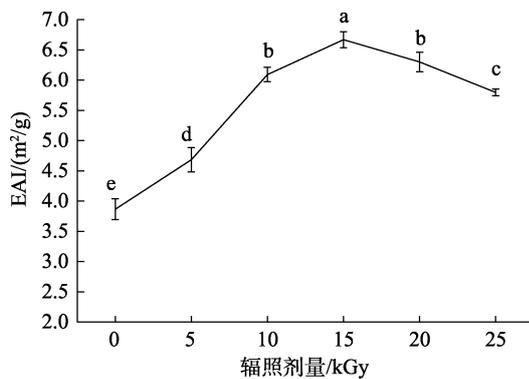


图 6 辐照对乳化活性的影响

Fig.6 Effect of irradiation on emulsify activity index

3 结论

本文研究了 γ 射线辐照对小麦粉面筋蛋白结构与功能特性的影响。结果表明: 辐照处理破坏了面筋蛋白的二硫键, 使其动态转变为游离巯基; 改变了面筋蛋白的二级结构, 导致 α -螺旋含量减少、 β -折叠含量增加; 同时使面筋蛋白的三级结构发生了变化, 色氨酸和酪氨酸更趋于“暴露态”, 提高了面筋蛋白的表面疏水性, 从而使面筋蛋白的功能特性(持水性、持油性、乳化活性及溶解度)发生了不同程度的改变。相较于未辐照面筋蛋白, 当辐照剂量为 15 kGy 时, 面筋蛋白的持水性、持油性、溶解度和乳化活性增加程度最高, 说明适当剂量的辐照处理, 可以改善面筋蛋白的功能特性。

参考文献:

- [1] ZHANG H, SUN J, ZHANG Y, et al. Retention of deoxynivalenol and its derivatives during storage of wheat grain and flour[J]. Food Control, 2016, 65: 177-181.
- [2] YANG J Y, PAN M F, HAN R, et al. Food irradiation: an emerging processing technology to improve the quality and safety of foods[J]. Food Reviews International, 2023.
- [3] 蔡颖莹, 魏文婧, 董鹏程, 等. 电子束辐照对肉中微生物和肉品质的影响及机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 446-453.
CAI Y, WEI W, DONG P, et al. Advances in the effect and mechanism of electron beam irradiation on microorganisms and meat q-uality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 446-453.
- [4] BASHIR K, SWER T L, PRAKASH K S, et al. Physico-chemical and functional properties of gamma irradiated whole wheat flour and starch[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2017, 76: 131-139.
- [5] 王守经, 柳尧波, 胡鹏, 等. 高能电子束辐照对小麦粉品质及面团流变学特性的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1517-1524.
WANG S, LIU Y, HU P, et al. Effects of high energy electron beam irradiation on quality and dough rheology of wheat flour[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(8): 1517-1524.
- [6] WANG G, WANG D, HUANG M. Effect of 10 MeV electron beam irradiation on the structure and functional properties of wheat starch[J]. Food Biophysics, 2023, 18(3): 470-477.
- [7] 王宏伟, 陈彬云, 张艳艳, 等. 亚麻籽胶及沙蒿胶对冻融面筋蛋白微观结构和持水性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 90-96.
WANG H, CHEN B, ZHANG Y, et al. Effects of flaxseed gum and *Artemisia sphaerocephala* Krasch gum on the microstructure and water-binding capacity of gluten obtained from frozen-thawed wheat dough[J]. FoodScience, 2023, 44(6): 90-96.
- [8] GIRARD A L, BEAN S R, TILLEY M, et al. Interaction mechanisms of condensed tannins (proanthocyanidins) with wheat gluten proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 1154-1162.
- [9] HU F, ZOU P R, ZHANG F, et al. Wheat gluten proteins phosphorylated with sodium tripolyphosphate: Changes in structure to improve functional properties for expanding applications[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1342-1351.
- [10] ZHANG Y, KONG Y, XU W, et al. Electron beam irradiation alters the physicochemical properties of chickpea proteins and the peptidomic profile of its digest[J]. Molecules, 2023, 28(16).
- [11] 张晗, 高星, 宣仕芬, 等. 电子束辐照对鲈鱼肉肌原纤维蛋白生化特性及其构象的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 81-86.
ZHANG H, GAO X, XUAN S, et al. Effects of electron beam irradiation on biochemical properties and structure of myofibrillar

- protein from lateolabrax japonicus meat[J]. FoodScience, 2019, 40(13): 81-86.
- [12] CHEN H, BIAN Z, WEN P, et al. Insight into the molecular mechanism underlying the enhancement of antioxidant activity in ovalbumin by high-energy electron beam irradiation[J]. Food Chemistry, 2024, 433: 137384.
- [13] WANG B R, LI Y L, WANG H W, et al. In-situ analysis of the water distribution and protein structure of dough during ultrasonic-assisted freezing based on miniature Raman spectroscopy[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105149.
- [14] WANG L, ZHANG X X, LIU F R, et al. Study of the functional properties and anti-oxidant activity of pea protein irradiated by electron beam[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 124-129.
- [15] 臧艳妮, 赵妍嫣, 罗水忠, 等. 超声波和糖基化复合改性对小麦面筋蛋白性质和结构的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 122-128.
- ZANG Y, ZHAO Y, LUO Y, et al. Effects of ultrasonic treatment and glycosylation modification on characteristics and structure of wheat gluten[J]. Food Science, 2017, 38(5): 122-128.
- [16] ZHANG M, FENG X, LIANG Y, et al. Effects of electron beam irradiation pretreatment on the structural and functional properties of okara protein[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 79: 103049.
- [17] 陈勇, 王晶, 江连洲, 等. 不同辐照剂量对红豆分离蛋白结构及特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(4): 39-43.
- CHEN Y, WANG J, JIANG L, et al. Different radiation doses on the structure and functional effect of red bean protein isolates[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(4): 39-43.
- [18] 莫耽, 黄行健, 段雅庆, 等. 辐照对大豆分离蛋白功能特性影响[J]. 食品科学, 2011, 32(1): 52-55.
- MO D, HUANG X, DUAN Y, et al. Effect of irradiation on functional properties of soybean protein isolate[J]. Food Science, 2011, 32(1): 52-55.
- [19] WANG L, DING Y, ZHANG X, et al. Effect of electron beam on the functional properties and structure of defatted wheat germ proteins[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 202: 9-17.
- [20] GUO Y N, WANG Z J, HU Z D, et al. The temporal evolution mechanism of structure and function of oxidized soy protein aggregates[J]. Food Chemistry-X, 2022, 15: 100382.
- [21] 姚钢, 李冰, 孙福伟, 等. γ 射线对胚芽米蛋白结构、乳化特性和食用品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(2): 62-71.
- YAO G, LI B, SUN F, et al. Effects of γ -rays pretreatment on protein structure, emulsifying properties and edible quality of germ rice[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(2): 62-71. 