

# 电子束辐照处理对鸡蛋蛋清粉消化特性与结构的影响

黄梦玲 刘云

(北京化工大学生命科学与技术学院 北京 100029)

**摘要** 采用电子束辐照(剂量 5~100 kGy)预处理鸡蛋蛋清粉(Egg white protein powder, EWP),研究辐照预处理前后 EWP 体外消化率,以及消化液的抗氧化活性和蛋白结构变化。结果表明:不同吸收剂量条件下,EWP 均表现出优异的消化能力,辐照预处理后,EWP 消化率略高于未处理 EWP;当 100 kGy 预处理后,EWP 体外消化率高达(99.30±0.53)%;电子束辐照预处理后 EWP 经体外消化处理,其抗氧化活性均维持较高水平,ABTS·<sup>+</sup>清除能力超 80%,Fe<sup>2+</sup>螯合能力超 70%,·OH 清除能力约 40%。圆二色谱和荧光光谱分析表明,电子束辐照处理后,EWP 消化液蛋白二级结构发生了变化,蛋白表面暴露出更多的疏水氨基酸基团。十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳显示,在 25 kDa 和 10 kDa 附近明显看到两条小分子蛋白肽分子量分布。本研究结果为电子束辐照在蛋白食品加工领域中的应用提供了技术支持。

**关键词** 鸡蛋蛋清粉,电子束辐照预处理,体外消化,蛋白结构,抗氧化活性

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0051

## Effect of electron beam irradiation treatment on the *in vitro* digestibility and structure of egg white protein powder

HUANG Mengling LIU Yun

(College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT** This article reports the digestibility, antioxidant activity, and protein structure of treated egg white protein powder (EWP) after pretreatment with electron beam irradiation (EBI) at doses of 5–100 kGy. The results revealed that EWP exhibited excellent *in vitro* digestibility under the tested EBI dose conditions. After EBI pretreatment, the treated EWP digestibility of the treated sample was slightly higher than that of the untreated sample. When EWP was treated at 100 kGy EBI, the EWP *in vitro* digestibility was high, reaching up to (99.30 ± 0.53)%. The EWP digestion solution exhibited high antioxidation capacities of ABTS·<sup>+</sup> radical scavenging activity (> 80%), Fe<sup>2+</sup> chelation ability (>70%), and ·OH radical scavenging activity (~40%). Circular dichroism and fluorescence spectrum analyses indicated differences in the surface hydrophobicity and secondary structure of the EWP protein at the tested EBI doses. The protein peptides of the EWP digestion solution observed via sodium dodecyl-sulfate polyacrylamide gel electrophoresis were close to 25 kDa and 10 kDa. We believe that this study provides technical support for future practical applications of EBI in protein food-processing fields.

基金资助: 企业委托项目 (H2019167) 资助

第一作者: 黄梦玲,女,1998年7月出生,2015年本科毕业于华中农业大学,现为硕士研究生,E-mail: 992091079@qq.com

通信作者: 刘云,教授,博士生导师,E-mail: liuyun@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 初稿 2022-05-08; 修回 2022-05-24

Supported by Enterprise Entrusted project (H2019167)

First author: HUANG Mengling (female) was born in July 1998 and obtained her bachelor's degree from Huazhong Agricultural University in 2015. Now she is a graduate student. E-mail: 992091079@qq.com

Corresponding author: LIU Yun, professor, doctoral supervisor, E-mail: liuyun@mail.buct.edu.cn

Received 08 May 2022; accepted 24 May 2022

**KEYWORDS** Egg white protein powder, Electron beam irradiation pretreatment, *In vitro* digestion, Protein structure, Antioxidant activity

**CLC** TL99

鸡蛋是生活中最常见的食品之一,含有多种蛋白质,是人们机体获取蛋白质的主要来源。鸡蛋主要由56%的蛋清液、33%的蛋黄液和11%的蛋壳组成<sup>[1]</sup>,其中蛋清液中主要由87%的水和13%的固形物组成,固形物中含有90%的蛋白质。目前,已经在鸡蛋蛋白中发现了超100多种蛋白质,而每种蛋白质的含量差异较大,例如卵清蛋白约占54%、卵黏蛋白只有3.5%<sup>[2]</sup>。这些蛋白质的氨基酸组成接近人体必需氨基酸组成,具有较高营养价值,利于人体吸收。

辐照技术是食品加工中常见的一种非热加工方法,它可以在一定程度上延长食品保质期,赋予食品特殊品质。辐照包括了 $\gamma$ 辐照、紫外辐照、X射线辐照、电子束辐照等。辐照技术作用时间短、作用力强、能耗低,更重要的是可以最大限度地保存食物营养。国际上认为25~60 kGy吸收剂量对食品的营养价值及风味变化是在可接受范围内的,且由于鱼、家禽及低水份活度食品需要高剂量才能达到延长储藏期的效果。近年来,针对食品进行辐照处理的研究和应用越来越多,例如特医食品的制备、太空食品的灭菌<sup>[3-4]</sup>。此外,随着人们对宇宙探索的深入,太空食品的耐储存特性将会更为重要。食品被带上太空后,会一直暴露在高辐照条件下,导致食品营养特性发生改变。因此,食品科技工作者开始研究高剂量辐照对食品营养特性和可食性的影响<sup>[5-6]</sup>。辐照主要通过改变蛋白质分子构象和聚合形式,来改善蛋白质的功能特性。研究表明:适当剂量的 $\gamma$ 辐照可以增加大豆的抗氧化潜力,从而使他们能够减缓脂质氧化和蛋白质氧化,减少异味生成<sup>[7]</sup>。电子束辐照(EBI)通过电子加速器在短时间内生成的电子束直接或间接作用在食物上,产生化学、物理和生物效应,杀死微生物,延缓成熟、发芽抑制,促进材料转化,达到食品保鲜的目的,在食品加工中已有广泛应用<sup>[8-9]</sup>。与传统加工技术相比,EBI通过产生的自由基能够导致蛋白质的交联或聚合,杀死寄生虫,灭活微生物,更符合当前环保潮流。作为非热加工的一种处理方法,EBI在食品内部引起的温度变化小,具有高效率、低能耗、低成本以及可以在短时间内产生高能量等特点<sup>[10]</sup>。

当前,EBI处理鸡蛋蛋清粉(EWP)的研究多集

中于高剂量辐照降低鸡蛋蛋白中单一蛋白的致敏性,以及低剂量辐照对鸡蛋蛋白功能特性等方面。Seo等<sup>[11]</sup>利用50 kGy、100 kGy剂量的 $\gamma$ 辐照处理卵清蛋白,发现喂食辐照处理蛋白的小鼠过敏性反应明显降低;Jin等<sup>[12]</sup>利用5.4 kGy剂量的EBI预处理EWP,发现辐照可以增加EWP的水解度;Liu等<sup>[13]</sup>利用5.5 kGy剂量的EBI辐照处理EWP,发现辐照可以增加EWP的抗氧化活性。然而,EBI预处理对EWP蛋白消化特性的研究鲜有文献报道。因此,本文以EWP为原料,采用EBI(吸收剂量为5~100 kGy)预处理,研究EBI预处理对EWP体外消化特性、消化液抗氧化活性和结构的影响,以期为EBI技术在食品加工领域的应用提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与仪器设备

鸡蛋由上海蜜儿乐儿乳业公司提供;胰蛋白酶(CAS号9002-07-7, BR; 1:250)和胃蛋白酶(CAS号9001-75-6, USP; 1:30 000)购于阿拉丁试剂公司。2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azinobis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate)ABTS)、8-苯胺-1-萘磺酸(8-anilino-1-naphthalene-sulfonic acid, ANS)、氯化钠、氯化钾、氯化钙、牛血清蛋白、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠等均为国产试剂分析纯,十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)凝胶制备试剂盒购于北京索莱宝科技有限公司。

1 MeV电子束加速器(美国Wasik公司);湖北科技学院提供;J810圆二色谱仪:日本JASCO公司;RF6000荧光分光光度计:岛津仪器有限公司;UV756CRT紫外分光光度计:上海佑科仪器仪表有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 电子束辐照蛋清粉的制备

EBI处理EWP实验在湖北科技学院进行。鲜鸡蛋外壳洗净后,剥壳,将鸡蛋清液和蛋黄液分离,蛋清装盘,置于冰箱预冻24 h,然后进行真空干燥成蛋清粉,研磨,178  $\mu\text{m}$ (80目)过筛备用。将冻干蛋清粉均分成8份,分别装入PE塑料袋中,密封,进行电子

束辐照预处理,吸收剂量设定为 0 kGy、5 kGy、10 kGy、20 kGy、30 kGy、50 kGy、70 kGy 和 100 kGy。将辐照后的蛋清粉置于 4 °C 保存,备用。剂量为 0 kGy 时即是未处理组,作为空白对照。

### 1.2.2 蛋清粉体外消化处理方法

根据 Jing 等<sup>[14]</sup>报道方法稍作修改。取 1 mL 浓度为 1 mg/mL 的 EWP 溶液,加入到 20 mL 含有 10 mg/mL 胃蛋白酶的模拟胃液中(SGF, 120 mmol/L NaCl, 5 mmol/L KCl, 6 mmol/L CaCl<sub>2</sub>),溶液 pH 为 3.0,将混合物置于摇床内,100 r/min 转速,37 °C 下反应 2 h。

胃相反应后的溶液放置在 37 °C 下水浴,调 pH 至 7.5 后,取 1 mL 反应液加入 20 mL 含有 10 mg/mL 胰蛋白酶的模拟肠液(SIF, 80 mmol/L pH=7.5 磷酸缓冲液),将混合物置于摇床内,100 r/min 转速,37 °C 下反应 2 h。反应结束后,加入适量的蛋白酶抑制剂终止消化,获得蛋清粉体外消化液,并计算消化率。

### 1.2.3 蛋清粉体外消化率的测定

取 0.5 mL 浓度为 100 μg/mL 肠相消化后的样品,与 2.5 mL 蒸馏水、5.0 mL 考马斯亮蓝溶液混合,反应 20 min,在 λ=595 nm 下测量紫外吸光值。利用牛血清白蛋白标曲,计算样品中蛋白质含量。根据消化前后蛋白含量的变化,采用公式(1)计算消化率( $R_{\text{digestion}}$ ,%)。

$$R_{\text{digestion}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为消化前样品中蛋白质含量,mg/mL; $m_2$ 为消化后样品中蛋白质含量,mg/mL。

### 1.2.4 蛋清粉消化液抗氧化特性的测定

ABTS<sup>•+</sup>清除能力参照 Liu 等<sup>[13]</sup>报道方法稍加修改,测定蛋清粉消化液的 ABTS<sup>•+</sup>自由基清除率。将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液充分混合,在常温避光反应 12~16 h,生成 ABTS<sup>•+</sup>自由基母液。然后,吸取少量 ABTS<sup>•+</sup>自由基母液,用 pH=7.4 的 0.1 mmol/L 磷酸缓冲液稀释,直至稀释液吸光值(λ=734 nm)为  $A_{734}=0.70 \pm 0.02$ 。接着配制经 EBI 预处理后的 EWP 溶液不同浓度梯度(0.2 mg/mL、0.4 mg/mL、0.6 mg/mL、0.8 mg/mL 和 1.0 mg/mL),吸取 2.0 mL EWP 溶液与 2.0 mL 的 ABTS<sup>•+</sup>稀释液混合均匀,室温下反应 30 min 后,利用紫外分光光度计在 λ=734 nm 下测量反应液吸光

值  $A_1$ ,同样条件下测定空白溶液的吸光值为  $A_0$ 。每个样品平行测 3 次。用公式(2)计算消化液清除 ABTS<sup>•+</sup>自由基能力( $R_{\text{ABTS}}$ ,%)。

$$R_{\text{ABTS}} = \frac{A_1 - A_0}{A_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $A_1$ 为溶液反应 30 min 的吸光值; $A_0$ 为空白的吸光值。

•OH 清除能力参照文献[15]报道方法进行测定。分别配制 EWP 溶液浓度为 0.2 mg/mL、0.4 mg/mL、0.6 mg/mL、0.8 mg/mL 和 1.0 mg/mL 各 1 mL,依次加入 1.0 mL 浓度为 9 mmol/L 硫酸亚铁溶液、9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、8.8 mmol/L 双氧水溶液,混匀,37 °C 反应 0.5 h,在 λ=510 nm 处测定吸光度值  $A_a$ 。用乙醇替代样品作空白对照,测定吸光度  $A_b$ 。用去离子水代替双氧水溶液作阴性对照组,测定吸光度  $A_c$ 。采用上述同样的处理步骤,以相同浓度的维生素 C( $C_{\text{VC}}$ )溶液作阳性对照组。用公式(3)计算消化液•OH 清除能力( $R_{\text{OH}}$ ,%)。

$$R_{\text{OH}} = \left(1 - \frac{A_a - A_b}{A_c}\right) \times 100\% \quad (3)$$

Fe<sup>2+</sup>螯合能力参照文献[15]报道方法进行。分别配制浓度为 0.2 mg/mL、0.4 mg/mL、0.6 mg/mL、0.8 mg/mL 和 1.0 mg/mL 的 EWP 溶液各 1.0 mL,依次加入 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液和 1% 铁氰化钾溶液各 1.0 mL,混匀,50 °C 水浴 20 min。冷却后,加入 1.0 mL 10% 的三氯乙酸,8 000 r/min 离心 5 min,取 2.5 mL 上清液,依次加入 2.5 mL 水、0.5 mL 0.1% 氯化铁溶液,在 λ=700 nm 处测定吸光度值  $A_1$ 。用去离子水代替样品作空白对照,测定吸光度  $A_2$ 。以相同浓度维生素 C 进行同样处理作为阳性对照。用公式(4)计算消化液 Fe<sup>2+</sup>螯合能力( $R_{\text{Fe}}$ ,%)。

$$R_{\text{Fe}} = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100\% \quad (4)$$

### 1.2.5 圆二色谱分析

用磷酸盐缓冲液(10 mmol/L, pH=7.0)溶解蛋清粉,配制浓度为 0.1 mg/mL 蛋白溶液,放入样品池中,用圆二色谱仪分析蛋白质二级结构。测量条件:25 °C,氮气环境,波长扫描范围 190~250 nm,扫描速率 100 nm/min,带宽 0.1 cm。采用 Bestal 网址进行分析数据<sup>[16]</sup>。

### 1.2.6 表面疏水性分析

参照文献[17]报道方法并稍作修改。用0.1 mol/L pH=7.0的磷酸盐缓冲液溶解蛋清粉,配制成1 mg/mL溶液,6 000 g下离心10 min,取2 mL样品加入10  $\mu$ L浓度为8 mmol/L的ANS溶液中,混匀,用荧光光谱仪分析荧光强度。荧光分析条件为:激发波长375 nm,发射波长485 nm,扫描范围400~600 nm,数据间隔1 nm,激发光和发射带宽10 nm。

### 1.2.7 SDS-PAGE分析

参照Xue等<sup>[18]</sup>报道方法稍作修改。取浓度为5 mg/mL的EWP消化溶液15  $\mu$ L,与5  $\mu$ L 4x上样缓冲液混合,90  $^{\circ}$ C水浴加热10 min。第一个上样孔加入2.5  $\mu$ L蛋白标准品,之后每孔上样10  $\mu$ L,80 V电压下运行40 min后,120 V电压下运行1 h。考马斯亮蓝染色,经脱色液脱色后,拍照。

### 1.3 统计分析

每个样品平行测定3次,采用SPSS25软件进行方差分析,显著性水平为 $p<0.05$ ,Origin 2021 b软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 EBI预处理对EWP消化率的影响

EWP体外消化率是用来评估蛋白被消化酶水解的程度,能够进一步评估消化道摄入的蛋白百分比。消化率越高,蛋白营养价值越高。EBI处理前后,EWP体外消化率如图1所示。由图1可知,不同剂量

EBI预处理后,相对未处理组,处理后EWP消化率略有提高,但是EBI剂量与EWP消化率之间没有呈现统计学上的显著差异性。当剂量为100 kGy处理后,EWP体外消化率高达(99.30 $\pm$ 0.53)%。分析原因推测是,EBI处理影响EWP蛋白结构,EWP蛋白在不同吸收剂量下均发生了结构变化,使胃蛋白酶和胰蛋白酶更好地接触EWP,将大分子裂解成小分子肽。这一推测在后续SDS-PAGE分析得到了验证。

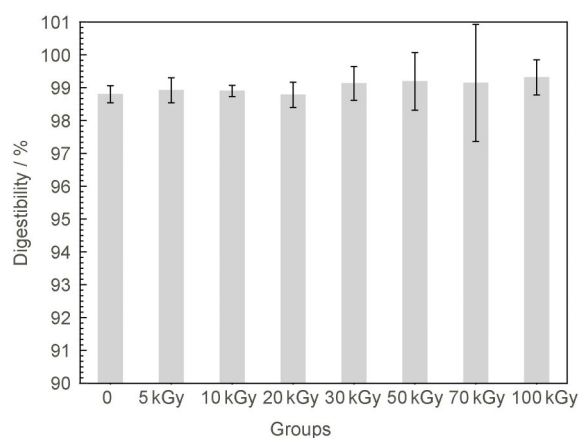


图1 不同EBI剂量对EWP消化率的影响

Fig.1 Effect of EBI pretreatment with different doses on in vitro digestibility of EWP

### 2.2 EBI处理对EWP消化液抗氧化活性的影响

研究了EBI预处理后EWP消化液的体外抗氧化活性,结果见表1。

表1 EBI剂量对EWP消化液抗氧化活性的影响

Table 1 Effects of EBI pretreatment with different doses on antioxidant ability of EWP digestibility solution

吸收剂量 / kGy	•OH清除能力 / %	ABTS <sup>•+</sup> 清除能力 / %	Fe <sup>2+</sup> 螯合能力 / %
Absorbed dose	•OH radical scavenging activity	ABTS <sup>•+</sup> radical scavenging activity	Fe <sup>2+</sup> chelation ability
0	41.38 $\pm$ 0.20 <sup>d</sup>	86.57 $\pm$ 0.36	84.36 $\pm$ 0.13
5	30.76 $\pm$ 0.99 <sup>f</sup>	82.91 $\pm$ 0.14	83.56 $\pm$ 0.13
10	32.86 $\pm$ 0.19 <sup>ef</sup>	80.76 $\pm$ 0.14	77.73 $\pm$ 0.13
20	41.22 $\pm$ 0.82 <sup>d</sup>	87.08 $\pm$ 0.26	82.06 $\pm$ 0.22
30	43.26 $\pm$ 0.30 <sup>e</sup>	84.50 $\pm$ 0.13	81.54 $\pm$ 0.13
50	47.95 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	83.45 $\pm$ 0.13	76.26 $\pm$ 0.14
70	46.16 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	85.01 $\pm$ 0.14	81.54 $\pm$ 0.14
100	39.94 $\pm$ 0.02 <sup>de</sup>	84.05 $\pm$ 0.14	83.59 $\pm$ 0.13

注:不同上标字母代表有显著性差异, $p<0.05$ 。

Note: different superscript letters represent significant differences,  $p<0.05$ .



由表1可知,EBI辐照预处理EWP后,消化液的ABTS $\cdot^+$ 清除能力和Fe $^{2+}$ 螯合能力的变化与吸收剂量没有统计学上的显著差异,消化液都有较为优异的抗氧化性能。然而,EWP消化液 $\cdot\text{OH}$ 清除能力与吸收剂量却存在统计学上的显著性差异。当吸收剂量较低(<20 kGy)时,消化液 $\cdot\text{OH}$ 清除能力从未处理组的41.38%降至了32.86%。随着吸收剂量增加(30~70 kGy), $\cdot\text{OH}$ 清除能力出呈现增加趋势,在70 kGy辐照处理后 $\cdot\text{OH}$ 清除能力达到了46.16%。当吸收剂量进一步增加至100 kGy时, $\cdot\text{OH}$ 清除能力却下降至39.94%,原因可能是EBI不同吸收剂量处理时,引起蛋白结构发生变化, $\cdot\text{OH}$ 的活性部位出现了不同程度的包埋与释放。在一定剂量处理条件下,由于EWP具有良好的消化性能,在消化过程中,消化酶能够充分作用于活性位点,生成小分子多肽,暴露出大量疏水性氨基酸,增强消化液抗氧化活性<sup>[19]</sup>。

### 2.3 EBI处理对EWP消化液蛋白二级结构的影响

采用圆二色谱研究EBI处理对EWP消化液蛋白二级结构的影响,结果如表2所示。由表2可知,当吸收剂量达到100 kGy时, $\alpha$ -螺旋含量从5.44%增加到7.7%, $\beta$ -折叠含量从32.07%降低到29.96%, $\beta$ -转角和无规则卷曲含量不变。这表明EBI辐照预处理对EWP消化液蛋白二级结构的影响,体现在 $\alpha$ -螺旋含量增加和 $\beta$ -折叠含量减少,这一结论与文献报道相一致<sup>[12]</sup>。Jin等<sup>[12]</sup>发现电子束辐照能够降低蛋白表面结构的完整性,增强蛋白分子间的作用力增强,从而影响蛋白质二级结构。EBI辐照预处理后,EWP能够与胰蛋白酶和胃蛋白酶结合的活性位点数目非常接近,消化过程中,多肽链上的未被破坏的活性位点均被暴露出来,导致生成多种肽的二级结构组成发生变化。

表2 不同EBI剂量下EWP消化液蛋白的二级结构组成  
Table 2 Effects of EBI pretreatment with different doses on the secondary structure of EWP

吸收剂量 / kGy	$\alpha$ -螺旋 / %	$\beta$ -折叠 / %	$\beta$ -转角 / %	无规则卷曲 / %
Absorbed dose	$\alpha$ -Helix	$\beta$ -Sheet	$\beta$ -Turn	Random coil
0	5.44	32.07	15.32	47.18
5	7.38	30.90	14.26	47.46
10	6.23	31.36	15.78	46.63
20	2.38	37.85	14.45	45.32
30	3.64	37.30	14.33	44.72
50	5.20	32.98	14.34	47.49
70	6.50	30.78	14.86	47.85
100	7.70	29.96	15.18	47.15

### 2.4 EBI处理对EWP消化液蛋白表面疏水性的影响

EBI处理对EWP消化液蛋白表面疏水性影响见图2。从图2可知,EBI处理后EWP消化液蛋白荧光光谱最大吸收波长不变,而吸收强度发生了变化,这表明EBI吸收剂量不影响EWP消化液蛋白三级结构,但会改变蛋白表面微环境的疏水特性<sup>[20]</sup>。高吸收剂量下(70 kGy和100 kGy),消化液表面疏水性增加,原因可能是蛋白肽链暴露在外的疏水性基团增多,增加了蛋白表面疏水性<sup>[20]</sup>。胃相消化过程中,胃蛋白酶的活性位点作用于芳香族氨基酸的氨基和羧基末端,高吸收剂量下,消化液中暴露在外的芳香族氨基酸更多<sup>[15]</sup>,提高蛋白消化率,这一结果与图1结果相一致。

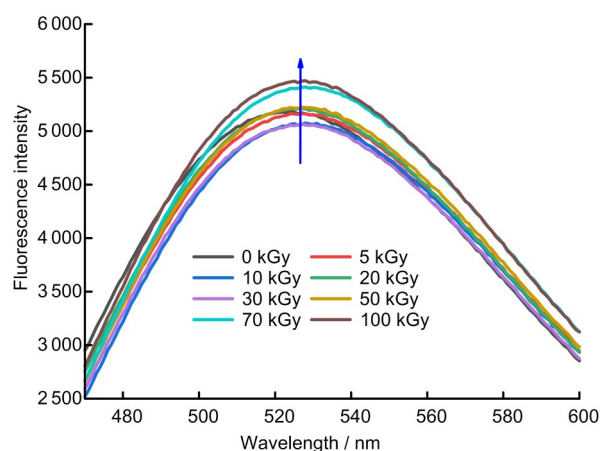


图2 不同EBI剂量对EWP消化液表面疏水性的影响  
(彩色见网络版)

Fig.2 Effects of EBI pretreatment with different doses on surface hydrophobicity of EWP digested solution (color online)

## 2.5 EBI 处理对 EWP 消化液蛋白分子量的影响

采用 SDS-PAGE 凝胶,研究了 EBI 辐照处理对 EWP 消化液蛋白分子量分布的影响,结果见图 3。由图 3 可知,经 EBI 处理后,EWP 消化液蛋白分子量在 24 kDa 和 10 kDa 处出现了明显条带,也就是说,EWP 蛋白消化后,生成分子量较大的多肽在 SDS-PAGE 条带上呈现在 24 kDa 附近,生成小分子量的多肽集中于 10 kDa 条带附近。从图 3 还可以看出,随着剂量增加,条带颜色略有变浅,采用 Quantity One 软件对条带进行定量分析,条带相对面积变化为 90%~100%,结果表明:吸收剂量和蛋白质分子量变化不存在统计学上的显著性。条带颜色变浅的原因推测可能是高剂量处理下,蛋白肽进一步断裂成更小分子量,该蛋白小肽在该凝胶上没有显示出来。这一结论与文献报道相一致,史晓霞等<sup>[21]</sup>通过对卵类黏蛋白进行体外消化处理,结果发现,卵类黏蛋白消化液在 SDS-PAGE 凝胶上呈现分子量约为 24 kDa 和 17 kDa 条带。

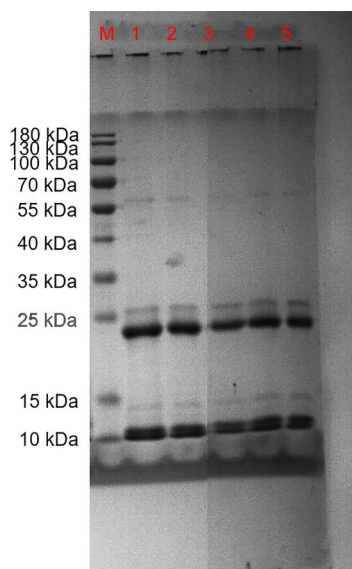


图 3 不同 EBI 剂量下 EWP 消化液的 SDS-PAGE 图  
M 表示 Marker,0,1,2,3,4 依次为 0 kGy,5 kGy,10 kGy,  
50 kGy,100 kGy 吸收剂量下的 EWP 消化液

Fig. 3 SDS-PAGE of EWP digestion solution at different EBI doses. M represents marker; 0,1,2,3,4 represents EWP digestion solution at 0 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 50 kGy, and 100 kGy EBI doses, respectively

## 3 结论

采用 EBI 辐照预处理 EWP,研究了不同剂量条件下,EWP 的体外消化特性和结构变化。结果表明:不同吸收剂量处理后,EWP 消化液 ABTS<sup>•+</sup>清除能

力和 Fe<sup>2+</sup>螯合能力略有提高,但没有呈现剂量上的统计学差异。•OH 清除能力保持在较高的水平,呈现剂量上的显著性差异。消化液抗氧化活性的变化,可能是由于 EBI 处理对蛋白结构的影响所致,EWP 二级结构组成、表面疏水性及分子量大小变化在 EBI 处理前后均发生了一定程度的变化。这一研究成果为 EBI 技术在 EWP 食品加工领域的应用奠定了基础和提供数据支撑。

**作者贡献声明** 刘云提出了本文的研究思路和实验方案,以及修改稿件;黄梦玲完成了本文所有实验工作和撰写初稿。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

**致谢** 感谢湖北科技学院陈涛副教授对 EWP 样品进行电子束辐照处理。

## 参考文献

- 1 Abeyrathne E D N S, Huang X, Ahn D U. Antioxidant, angiotensin-converting enzyme inhibitory activity and other functional properties of egg white proteins and their derived peptides - A review[J]. Poultry Science, 2018, **97** (4): 1462-1468. DOI: 10.3382/ps/pex399.
- 2 彭琦, 马美湖, 金永国. 酶解制备高溶解性蛋清蛋白粉工艺优化及其免疫调节活性研究[J]. 现代食品科技, 2018, **34**(4): 129-136, 226. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.021.  
PENG Qi, MA Meihu, JIN Yongguo. Optimization of enzymolysis parameters of highly soluble egg white protein powder and its application in immunoregulation *in vitro*[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, **34**(4): 129-136, 226. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.021.
- 3 Feliciano C P. High-dose irradiated food: current progress, applications, and prospects[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, **144**: 34-36. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2017.11.010.
- 4 Lung H M, Cheng Y C, Chang Y H, *et al.* Microbial decontamination of food by electron beam irradiation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, **44**(1): 66-78. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.03.005.
- 5 Watkins P, Hughes J, Gamage T V, *et al.* Long term food stability for extended space missions: a review[J]. Life Sciences in Space Research, 2022, **32**: 79-95. DOI: 10.1016/j.lssr.2021.12.003.
- 6 Cahill T, Hardiman G. Nutritional challenges and

- countermeasures for space travel[J]. Nutrition Bulletin, 2020, **45**(1): 98-105. DOI: 10.1111/nbu.12422.
- 7 Krishnan V, Singh A, Thimmegowda V, *et al.* Low gamma irradiation effects on protein profile, solubility, oxidation, scavenger ability and bioavailability of essential minerals in black and yellow Indian soybean (*Glycine max* L.) varieties[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, **307**(1): 49-57. DOI: 10.1007/s10967-015-4193-3.
- 8 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. DOI: 10.1016/j.ifset.2017.01.005.
- 9 Lv M C, Mei K L, Zhang H, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from *Tegillarca granosa* meat[J]. Food Chemistry, 2018, **254**: 64-69. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.165.
- 10 Xue P Y, Zhao Y, Wen C R, *et al.* Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties of corn flour and improvement of the gelatinization inhibition[J]. Food Chemistry, 2017, **233**: 467-475. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.04.152.
- 11 Seo J H, Lee J W, Kim J H, *et al.* Reduction of allergenicity of irradiated ovalbumin in ovalbumin-allergic mice[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2007, **76**(11/12): 1855-1857. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2007.02.094.
- 12 Jin Y, Liang R, Liu J B, *et al.* Effect of structure changes on hydrolysis degree, moisture state, and thermal denaturation of egg white protein treated by electron beam irradiation[J]. LWT, 2017, **77**: 134-141. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.11.025.
- 13 Liu X T, Liu J B, Zhang W Q, *et al.* Electron beam irradiation-induced structural changes increase the antioxidant activities of egg white protein[J]. LWT, 2019, **111**: 846-852. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.05.066.
- 14 Jing H, Sun J, Mu Y Y, *et al.* Sonochemical effects on the structure and antioxidant activity of egg white protein-tea polyphenol conjugates[J]. Food & Function, 2020, **11**(8): 7084-7094. DOI: 10.1039/d0fo01636e.
- 15 Wang J T, Chi Y J, Cheng Y, *et al.* Physicochemical properties, *in vitro* digestibility and antioxidant activity of dry-heated egg white protein[J]. Food Chemistry, 2018, **246**: 18-25. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.10.128.
- 16 Li P S, Sun Z, Ma M H, *et al.* Effect of microwave-assisted phosphorylation modification on the structural and foaming properties of egg white powder[J]. LWT, 2018, **97**: 151-156. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.06.055.
- 17 Liu G X, Liu J, Tu Z C, *et al.* Investigation of conformation change of glycated ovalbumin obtained by Co-60 gamma-ray irradiation under drying treatment[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, **47**: 286-291. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.03.011.
- 18 Xue H, Tu Y G, Xu M, *et al.* Changes in physicochemical properties, gel structure and *in vitro* digestion of marinated egg white gel during braising[J]. Food Chemistry, 2020, **330**: 127321. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127321.
- 19 Sarmadi B H, Ismail A. Antioxidative peptides from food proteins: a review[J]. Peptides, 2010, **31**(10): 1949-1956. DOI: 10.1016/j.peptides.2010.06.020.
- 20 Wang L, Ding Y Y, Zhang X 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. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.01.024.
- 21 史晓霞. 蛋清卵类粘蛋白分离纯化、结构表征及其过敏原性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- SHI Xiaoxia. Study on the isolation and purification, structural characterization and allergenicity of chicken egg white ovomucoid[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.