

# 辐照剂量率对牛肉脂肪和蛋白氧化及蛋白特性的影响

王宁<sup>1,2</sup>, 王晓拓<sup>1</sup>, 丁武<sup>2</sup>, 王志东<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

(2. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为研究电子束辐照剂量率对冷却牛肉脂肪和蛋白氧化及蛋白理化特性的影响, 试验分析了电子束辐照处理不同剂量率对脂肪和蛋白氧化程度及其蛋白溶解性、疏水性及持水力等特征指标的影响。结果表明: 2kGy 电子束辐照后牛肉脂肪及蛋白氧化程度显著加剧, 蛋白溶解性及持水力显著降低, 疏水性显著增加 ( $p < 0.05$ ); 在 0~2500 Gy/s 剂量率范围内, 随着剂量率的增大, 牛肉的 TBARS、酸价、过氧化值、羰基和二硫键含量降低, 巯基含量上升, 脂肪及蛋白氧化程度减弱; 剂量率与蛋白溶解性和持水性呈显著正相关, 而与疏水性呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )。试验结果进一步证明了电子束辐照剂量率会显著影响牛肉脂肪及蛋白氧化。辐照氧化导致蛋白结构的破坏, 引起蛋白理化特性的显著变化 ( $p < 0.05$ ), 这为电子束辐照过程中冷却牛肉的氧化控制提供理论参考。

**关键词:** 电子束; 剂量率; 氧化; 理化特性; 冷却牛肉

文章编号: 1673-9078(2015)8-122-128

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.8.021

## Effect of Dose Rate on Lipid and Protein Oxidation and the Properties of Beef Proteins

WANG Ning<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-tuo<sup>1</sup>, DING Wu<sup>2</sup>, WANG Zhi-dong<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-Food Products Processing of Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China) (2. College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The Chilled beef meat was irradiated with electron beams and the effect of irradiation dose rate on the degree of lipid and protein oxidation was examined. Additionally, physicochemical properties of beef proteins such as the solubility, surface hydrophobicity, and water-holding capacity (WHC) were evaluated. The results demonstrated that after irradiation with 2 kGy electron beam, the degree of lipid and protein oxidation increased, and the surface hydrophobicity of beef proteins increased significantly ( $p < 0.05$ ). In contrast, the solubility and water-holding capacity of the proteins decreased. On increasing the irradiation dose rate from 0 to 2500 Gy/s, the thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), acid value, peroxide value (POV), and carbonyl and disulfide (SS) content decreased; thiol group (SH) content of beef meat increased; and the degree of beef protein oxidation decreased. The dose rate, showed significant positive correlation with protein solubility and water-holding capacity (WHC), whereas a significant negative correlation with surface hydrophobicity of beef proteins ( $p < 0.05$ ). The results revealed that the dose rate of electron beam irradiation could significantly affect the oxidation of lipid and protein. Radiation oxidation could result in damage to the protein structure and significant changes in the physicochemical properties of proteins. These results provide a theoretical reference to control chilled beef oxidation during electron beam irradiation.

**Key words:** electron beam; dose rate; oxidation; physicochemical properties; chilled beef

早在 20 世纪 90 年代, 中国就已经成为世界第一大肉类生产国<sup>[1]</sup>。冷却肉常常因为冷链系统的断裂、冷藏温度不够低或其他原因造成微生物超标, 肉品变

收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201103007)

作者简介: 王宁(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事农产品加工与贮藏研究

通讯作者: 王志东(1958-), 男, 研究员, 研究生导师, 主要从事食品质量与安全研究

质<sup>[1-2]</sup>。电子束辐照是一种冷杀菌技术, 可以达到杀灭各种致病性微生物和人畜共患的寄生虫, 减少食源性疾病, 达到保鲜、延长保质期、减少营养损失等效果<sup>[3]</sup>。研究表明电子束辐照能有效杀灭肉中的微生物, 提高其食用安全性, 延长货架期<sup>[4]</sup>。然而, 辐照处理会催化自由基的大量生成<sup>[5]</sup>从而诱导或加速肉与肉制品中脂肪及蛋白的氧化。

脂肪氧化是冷却肉品质降低的重要原因之一<sup>[5]</sup>。脂肪氧化生成氢过氧化物, 再分解成醛、酮及低级脂肪

酸等从而导致风味、质地、颜色和营养的恶化。脂肪氧化产生的羰基类物质,尤其是醛类物质对于肉制品起着积极或消极的双重作用。蛋白质氧化是影响肉制品品质的另一重要原因,而蛋白质氧化可能会改变蛋白质的疏水性,持水性,结构以及溶解度<sup>[6]</sup>。以往的许多研究发现辐照影响肉以及肉制品氧化的因素主要集中在以下两个方面:辐照剂量;辐照射线类型。朱俊玲<sup>[7]</sup>等研究发现真空包装的羊肉TBARS值随着辐照剂量的增加而增加。吴庆<sup>[8]</sup>等报道6 kGy时,γ射线辐照后的TBARS值和过氧化值均比电子束高。而本实验室经过长期的研究发现:电子束辐照氧化与剂量率也有很密切的关系。到目前为止,国内外有关辐照剂量率的研究主要集中在医学方面,而关于电子束辐照剂量率对食品氧化的影响却鲜有报道。法逸华等<sup>[9]</sup>发现当辐照剂量为5 Gy时,由2.25 Gy/h组到3.75 Gy/h组,剂量率增加,肿瘤细胞凋亡率也增加,当剂量率由3.75 Gy/h增加至4.50 Gy/h,凋亡率反下降,出现反剂量率效应。

本试验中利用电子束辐照处理冷却牛肉,分析在2 kGy的电子束辐照剂量下不同剂量率对牛肉脂肪及蛋白氧化效应的影响,以期控制电子束辐照过程中冷却牛肉的氧化劣变提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂、仪器

牛肉由北京市第五肉联厂提供。

硫代巴比妥酸、氯仿、甲醇、石油醚、乙醇、三羟甲基氨基甲烷(Tris)、β-巯基乙醇、尿素、EDTA钠盐、DTNB试剂、Ellman试剂、4-羟乙基哌嗪乙磺酸(HEPES)、2,4-二硝基苯肼(DNPH)、硫酸链霉素、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、溴酚蓝、氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、三氯乙酸、浓盐酸、乙酸乙酯、盐酸胍;试验用水为超纯水。

FZ-10/15型高能电子加速器,中国原子能科学研究院;BS224S-电子天平,德国Sartorius公司;SIGMA-离心机,北京五洲东方科技发展有限公司;SHA-BA双功能数显恒温恒湿振荡器,上海比朗仪器有限公司;DHG-9140电热恒温鼓风干燥箱,北京陆希科技有限公司;FYL-YS-12低温保存箱,北京福意联电器有限公司;SHB-III循环水式多用真空泵,郑州长城科工贸有限公司;T6-新世纪紫外可见分光光度计,中国普析公司;QL901涡旋混匀器,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 样品制备

将所购买的冷却牛肉用聚乙烯真空袋(透氧率是15.5 cc/m<sup>2</sup>/24 h/25 °C/atm)进行真空包装,然后置于0~4 °C冰箱中,待辐照。每10 g用聚乙烯袋真空包装,共60份用于TBARS值的测定;每150 g用聚乙烯袋真空包装,共10份用于油脂提取POV值和酸价的测定;每5 g用聚乙烯袋真空包装,共40份用于羰基值、SH和SH的测定;每4 g用聚乙烯袋真空包装,共10份用于蛋白溶解性的测定;每6 g用聚乙烯袋真空包装,共20份用于蛋白持疏水性和持水性的测定。然后置于0~4 °C冰箱中,待辐照。

#### 1.2.2 电子束辐照处理

电子束辐照处理在北京原子高科股份有限公司进行,采用FZ-10/15型高能电子加速器,能量10 MeV,辐照剂量为2 kGy,剂量率分别为700、1500、2500和3500 Gy/s。辐照温度0~4 °C,辐照过程中各小包装样品单独摆放没有重叠(确保电子束能完全穿透),所有样品经电子束辐照后置于0~4 °C冰箱贮藏。

#### 1.2.3 过氧化值和酸价

过氧化值的测定参照GB/T 5538-2005<sup>[10]</sup>方法进行。油脂酸价的测定参照GB 5530-85<sup>[11]</sup>进行。

#### 1.2.4 TBARS值

参照Paari A Kanmani<sup>[12]</sup>略作改进。取10 g牛肉糜,加50 mL 7.5%的三氯乙酸(含0.1% EDTA),振摇30 min,双层滤纸过滤两次,取5 mL上清液加入5 mL 0.02M TBA溶液,90 °C水浴中保温40 min,取出冷却1 h后离心5 min(18000×g),上清液移入18×180 mm试管内,加入5 mL氯仿摇匀,静置分层后取上清液分别在532 nm和600 nm处比色,测定吸光度值,记录吸光值并用以下公式计算TBA值:

$$TBA(\text{mg}/100\text{g}) = (A_{532} - A_{600}) / 155 \times (1/10) \times 72.6 \times 100$$

与TBA反应的物质的量(TBARS)以每100g肉中丙二醛的毫克数表示。每个样品重复3次,取其平均值。

#### 1.2.5 羰基值

测定方法按照Levine等<sup>[13]</sup>方法略加改进。0.1 mL蛋白质溶液与0.5 mL的2,4-二硝基苯肼的HCl溶液,在25 °C下避光反应40 min。空白样品反应液中不含2,4-二硝基苯肼。然后加入0.5 mL 20%的三氯乙酸(TCA),震荡后离心(12000×g, 5 min),弃去上清液。蛋白沉淀用1 mL的乙醇-乙酸乙酯溶液(1:1, V/V)洗涤沉淀3次并挥发完溶剂后,将蛋白质悬浮于1 mL 6 mol/L盐酸胍溶液中,在37 °C条件下水浴保温30 min。以空白为对照读取样品在370 nm下的吸光值,蛋白质羰基衍生物的含量(nmol/mg protein)使用摩尔吸光系数为22000 M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>计算。

### 1.2.6 巯基和二硫键

参照Beveridge等<sup>[14]</sup>的Ellman试剂分析方法略加改进。加4 mg DTNB试剂于1 mL的Tris-甘氨酸缓冲液(0.086 mol/L Tris, 0.09 mol/L甘氨酸, 4 mmol/L EDTA, pH 8.0)中, 配成Ellman试剂。取5 g牛肉糜加入25 mL Tris-甘氨酸缓冲液匀浆, 取0.5 mL匀浆液于2.5 mL的Tris-甘氨酸-8 mol/L尿素缓冲液, 漩涡震荡, 加入20  $\mu$ L Ellman试剂, 将悬浮液置于室温(25 $\pm$ 1  $^{\circ}$ C)下保温1 h, 10000 $\times$ g离心15 min, 测定412 nm处吸光度( $A_{412}$ ), 以牛血清蛋白为标准, 280 nm测定相应蛋白含量。计算公式:

$$\mu\text{molSH} = 73.53A_{412}/C$$

注: 73.53=106/1.36 $\times$ 10<sup>4</sup>, 1.36为摩尔吸光系数, C为样品的蛋白质浓度, mg/mL。

测定二硫键时, 取0.2 mL匀浆液, 加入2 mL Tris-甘氨酸-10 mol/L尿素缓冲液, 再加入0.02 mL  $\beta$ -巯基乙醇, 室温下反应1 h, 之后加入10 mL 12% TC, 3000 $\times$ g离心, 沉淀用12% TCA洗涤两次, 将沉淀溶于3 mL的Tris-甘氨酸-8 mol/L尿素缓冲液, 用上述方法测定总巯基含量, 二硫键含量为总巯基含量与游离巯基含量的差值。

### 1.2.7 蛋白溶解性

参照Joo等<sup>[15]</sup>的方法并稍作改进。(1)总蛋白质溶解度: 4 g牛肉糜加28 mL冰冷的1.1 mol/L KI的0.1 mol/L的磷酸钾缓冲液(pH 7.2), 冰浴下匀浆(5000 $\times$ g), 离心20 min, 4  $^{\circ}$ C下振动抽提12 h。上清液用双缩脲法测定, 溶解度表示为mg/g肉。(2)肌浆蛋白质溶解度: 4 g牛肉样加28 mL冰冷的0.025 mol/L的磷酸钾缓冲液(pH 7.2), 冰浴下匀浆, 离心20 min(5000 $\times$ g), 4  $^{\circ}$ C下振动抽提12 h。上清液用双缩脲法测定, 溶解度表示为mg/g肉。3)肌原纤维纤维蛋白质溶解度=总蛋白质溶解度-肌浆蛋白质溶解度。

### 1.2.8 蛋白疏水性

参考孙为正<sup>[16]</sup>的方法, 用20 mM磷酸盐缓冲液(pH 6.0)将肌原纤维蛋白悬浮液浓度调至2 mg/mL。取2 mL稀释蛋白液加入40  $\mu$ L 1 mg/mL的溴酚蓝(BPB)溶液, 充分混合。对照组处理为磷酸缓冲液中直接加入溴酚蓝溶液(不含肌原纤维蛋白), 其余操作同上。处理组和对照组在室温下震荡10 min, 然后在4  $^{\circ}$ C条件下4000 $\times$ g离心15 min。磷酸缓冲液空白作为本底, 上清液在595 nm处测定吸光度。用结合态的疏水BPB(总BPB与游离BPB的差值)作为表面疏水性指数。

### 1.2.9 蛋白持水性

参照潘君慧<sup>[17]</sup>的方法进行。精确称重6 g左右冷鲜肉( $W_1$ )置于底部垫有纱布的50 mL离心管中, 在

2000 $\times$ g, 4  $^{\circ}$ C下离心20 min后称重( $W_2$ , g), 离心后的样品置于烘箱中在105  $^{\circ}$ C下烘制恒重, 测定除去水分后的肌肉重( $W_3$ , g)。持水率由以下公式计算:

$$\text{持水率}/\% = (W_2 - W_3)/(W_1 - W_3) \times 100\%$$

### 1.2.10 数据分析

实验所得数据采用Origin 7.5软件进行处理分析及制图, 结果用“平均值 $\pm$ 标准误差”格式表示。所有试验重复3次。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子束辐照剂量率对过氧化值的影响

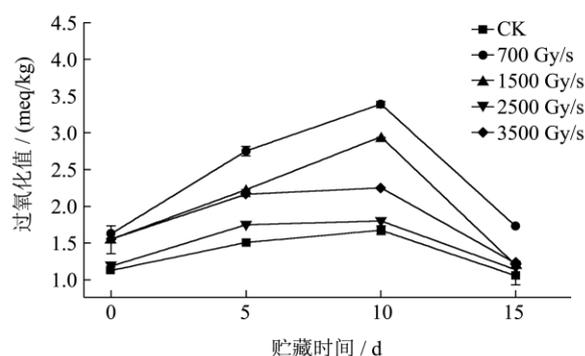


图1 不同剂量率下冷却牛肉在贮藏期过氧化值的变化

Fig.1 Changes in peroxide value POV of chilled beef at different irradiation dose rates during storage

脂肪氧化初级产物都是氢过氧化物尤其是过氧化氢, 过氧化值主要测定系统中过氧化氢含量, 通常被用来表征肉类中脂类氧化程度<sup>[18]</sup>。由图1可知, 辐照后牛肉的初始过氧化值显著高于未辐照组, 辐照组中随着剂量率的增大, 过氧化值逐渐降低, 2500 Gy/s时最低为1.177 meq/kg。各组过氧化值在贮藏前期均呈上升趋势, 在第10 d达到最大值, 分别为1.67、3.385、2.94、1.794、2.245 meq/kg, 各组之间差异性显著( $p < 0.05$ )。肌红蛋白通过自动氧化形成高铁肌红蛋白, 并且在此过程中产生超氧化物, 随即通过歧化反应生成 $H_2O_2$ 和氧<sup>[19]</sup>。这些过氧化物和氧化物能有效地促进脂质氧化。此外,  $H_2O_2$ 能与高铁肌红蛋白相互作用, 迅速产生高活性物质-超铁肌红蛋白, 这种物质被证实能够催化脂质进行过氧化反应产生氢过氧化物<sup>[20]</sup>。贮藏后期, 各组过氧化值均下降, 这是由于氢过氧化物歧化为二级氧化产物<sup>[20]</sup>。

### 2.2 电子束辐照剂量率对酸价的影响

酸价是指中和1 g油脂中游离脂肪酸所需要的氢氧化钾的毫克数, 可有效衡量油脂中游离脂肪酸的含

量,反映了肉样中脂肪的降解程度。酸价越高,表明油脂劣变越严重。如图2所示,贮藏当天辐照处理组酸价显著高于未辐照组 ( $p < 0.05$ ),辐照组中随着剂量率的增大,酸价降低,在剂量率增大到 2500 Gy/s 时酸价达到最小值为 0.522 mg/g,当剂量率继续增大至 3500 Gy/s 时,酸价开始上升,但与 2500 Gy/s 处理组相比差异不显著 ( $P > 0.05$ )。随着贮藏时间的延长,各组酸价均呈上升趋势,说明贮藏过程中油脂的品质一直在恶化。贮藏末期 15 d, 2500 Gy/s 处理组酸价为 1.585 mg/g,相对于其他辐照组酸价最低,油脂品质较好。

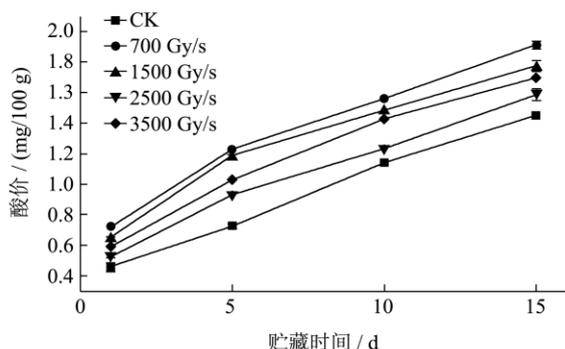


图2 不同剂量率下冷却牛肉在贮藏期酸价的变化

Fig.2 Changes in acid value of chilled beef at different irradiation dose rates during storage

### 2.3 电子束辐照剂量率对 TBARS 值的影响

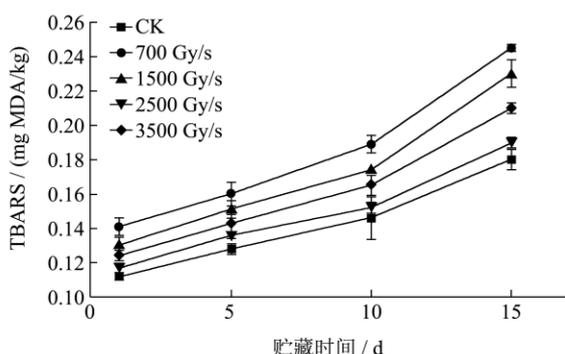


图3 不同剂量率下冷却牛肉在贮藏期 TBARS 的变化

Fig.3 Changes in TBARS of chilled beef at different irradiation dose rates during storage

TBARS值是指动物性油脂中不饱和脂肪酸氧化分解所产生的衍生物主要是丙二醛与TBA反应的结果<sup>[21]</sup>。TBARS值的高低表明脂肪二级氧化产物的多少,是最广泛的用于评价脂肪氧化程度的指标之一。由图3可知,未辐照牛肉初始TBARS值较小(0.112 mg/100 g),而辐照后牛肉的初始TBARS值显著上升,其中剂量率为700、1500、2500、3500 Gy/s时, TBARS值分别为0.141、0.13、0.117、0.124 mg/100 g ( $p < 0.05$ )。随

着贮藏时间的延长,各组TBARS值逐渐增大,且辐照组的TBARS值均高于未辐照组。15 d时,辐照组中2500 Gy/s剂量率的TBARS最低,为0.19 mg/100 g。马丽珍等<sup>[22]</sup>研究表明,γ射线辐照冷却猪肉导致TBARS增加。Rababah等<sup>[23]</sup>用电子束辐照新鲜鸡肉后也发现TBARS增加。本试验结果表明,2 kGy辐照剂量加速冷却牛肉脂肪氧化,不同剂量率辐照对脂肪氧化的影响程度不同,2500 Gy/s处理组氧化程度最低。

### 2.4 电子束辐照剂量率对羰基含量的影响

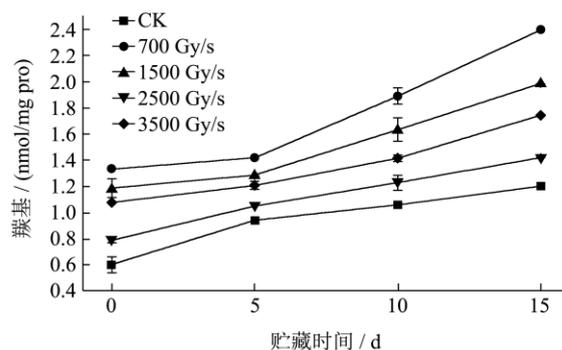


图4 不同剂量率下蛋白质羰基含量的变化

Fig.4 Changes in carbonyl group content of proteins at different irradiation dose rates

蛋白质羰基的产生是蛋白氧化的重要指标之一,羰基主要由氨基酸侧链(通常为易受自由基攻击的带有NH或者NH<sub>2</sub>的氨基酸残基)及肽键的氧化断链产生<sup>[24]</sup>,羰基含量越高表明蛋白氧化程度越高<sup>[25]</sup>。由图4可知,贮藏初期,空白对照蛋白羰基含量为0.599 nmol/mg protein,2 kGy辐照条件下,辐照组的羰基含量显著高于未辐照组 ( $P < 0.05$ )。随着辐照剂量率的增大,蛋白质羰基含量呈现下降趋势,当剂量率增大到2500 Gy/s时,羰基达到最小值0.786 nmol/mg protein ( $P < 0.05$ ),当剂量率继续增大至3500 Gy/s时羰基含量开始上升。随着贮藏时间的延长,五组牛肉蛋白中的羰基含量均逐渐增加。贮藏15 d,五组的羰基含量分别增加至1.199、2.393、1.985、1.417和1.743 nmol/mg protein,与其他辐照组相比,2500 Gy/s处理组的羰基含量最低,蛋白氧化程度最低。

### 2.5 电子束辐照剂量率对巯基、二硫键的影响

蛋白氧化会导致蛋白质中巯基交联形成二硫键,从而造成巯基含量下降<sup>[26]</sup>,通常蛋白氧化程度越高总巯基含量越低<sup>[27]</sup>。由图可知,贮藏初期,与对照组巯基、二硫键含量(0.663、0.121 mmol/mg protein)相比,700、1500、2500和3500 Gy/s剂量率辐照处理组的巯基分别显著降低了12.1%、7.5%、3.9%、6.6%,

二硫键含量分别显著增加了 47.9%、33.1%、18.2%、28.1% ( $P < 0.05$ )。辐照组中,当剂量率增大至 2500 Gy/s 时, 巯基含量达到最高二硫键含量达到最低, 因此蛋白氧化程度最弱。整个贮藏期内, 各组巯基含量不断下降, 二硫键含量不断生成。这可能是因为氧化导致蛋白结构伸展, 从而使临近的巯基形成二硫键<sup>[26,28]</sup>。结合图 4、5、6 表明辐照导致蛋白氧化加剧, 而且在同一辐照剂量时, 剂量率显著影响蛋白的氧化程度。

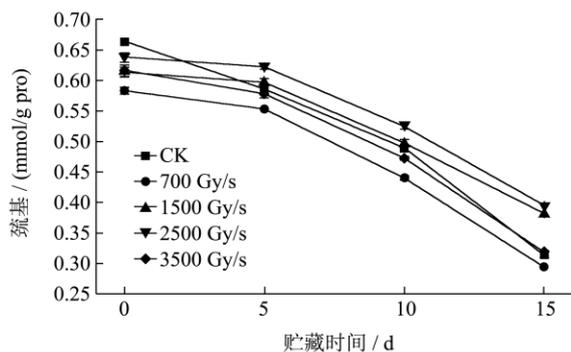


图 5 不同剂量率下蛋白质巯基和二硫键含量的变化

Fig.5 Changes in thiol group (SH) and disulfide (SS) content of the proteins at different irradiation dose rates

### 2.6 电子束辐照剂量率对蛋白溶解度的影响

溶解度可用于表征蛋白质的聚集和交联程度<sup>[29]</sup>。由图可知, 空白对照组的溶解度为 17.782 mg/g, 辐照处理后蛋白溶解度显著降低, 与空白对照相比, 剂量率为 700、1500 和 2500 Gy/s 时, 溶解度分别下降了 42.6%、29.7% 和 8.7% ( $P < 0.05$ )。随着剂量率的增大, 溶解度显著增加 ( $P < 0.05$ ), 剂量率继续增至 3500 Gy/s, 溶解度出现显著下降 ( $P < 0.05$ )。结合图 456 可得出: 蛋白氧化降低了溶解度, 而且氧化程度越深, 溶解度越低。Srinivasan 等<sup>[30]</sup>也发现氧化能显著降低鱼肉蛋白的溶解度。

氨基酸残基的氧化修饰能够引起蛋白质天然构象的改变, 使分子内的疏水基团暴露; 蛋白质通过分子间疏水相互作用发生聚集, 导致溶解度下降。而巯基的变化和二硫键等交联的形成, 容易导致蛋白质的凝

聚和沉淀, 也会显著降低其溶解度。

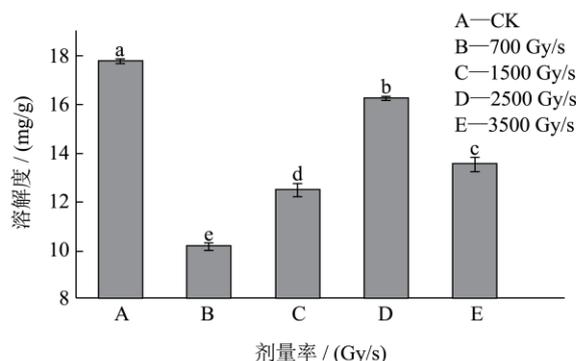


图 6 不同剂量率下蛋白溶解度的变化

Fig.6 Changes in the solubility of the proteins at different irradiation dose rates

注: 图中不同小写字母代表不同处理在 5%水平上差异显著。

### 2.7 电子束辐照剂量率对蛋白疏水性的影响

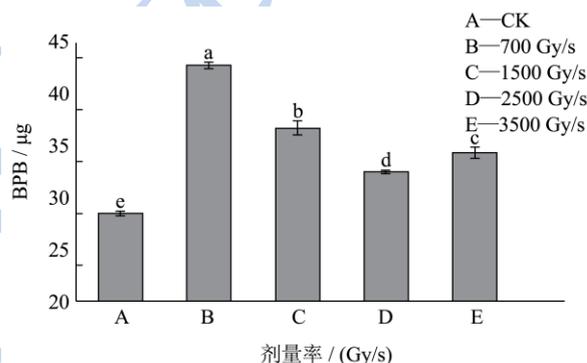


图 7 不同剂量率下蛋白表面疏水性的变化

Fig.7 Changes in surface hydrophobicity of the proteins at different irradiation dose rates

注: 图中不同小写字母代表不同处理在 5%水平上差异显著。

通过测定蛋白质表面疏水性的变化可反映氧化引起的蛋白质的物理或化学特性的变化。蛋白质疏水性残基可与溴酚蓝结合(BPB), 从而可以通过测定蛋白质与溴酚蓝的结合量来反映蛋白质的表面疏水性<sup>[31]</sup>。由图可知, 未辐照组肌原纤维蛋白质结合溴酚蓝的量为 28.47 μg, 当蛋白经 700、1500、2500 和 3500 Gy/s 辐照处理后, 溴酚蓝结合量分别为 42.78、36.69、32.54、34.42 μg。这表明辐照处理后蛋白的疏水性均显著增大, 而且随着剂量率的增大, 蛋白质表面疏水性显著降低 ( $P < 0.05$ )。这可能是由于氧化导致肌原纤维蛋白中一些位于蛋白质分子结构内部中的疏水性残基暴露, 从而促进了这些疏水性残基与溴酚蓝的结合<sup>[32]</sup>。Sun 等<sup>[28]</sup>也曾报道, 蛋白氧化会导致蛋白质中疏水性氨基酸的暴露。疏水性残基的暴露会影响蛋白质

的水合能力,从而导致蛋白质的持水性下降。

## 2.8 电子束辐照剂量率对蛋白持水性的影响

持水力是指当肌肉受到外力作用时,其保持原有水分与添加水分的能力。肌肉的持水力会影响肉的食用品质包括滋味、多汁性、香气等,还会产生PSE肉,造成经济损失。蛋白质氧化会对持水性产生不可忽视的影响<sup>[33]</sup>。由图可知,未经辐照处理的蛋白持水性为83.2%,辐照组的持水性较未辐照组显著降低( $P<0.05$ )。辐照组中随着剂量率增大,持水性逐渐增加( $P<0.05$ ),当剂量率增大至2500 Gy/s时,持水性为80.8%。剂量率继续增大,持水性出现下降,但差异不显著( $P>0.05$ )。

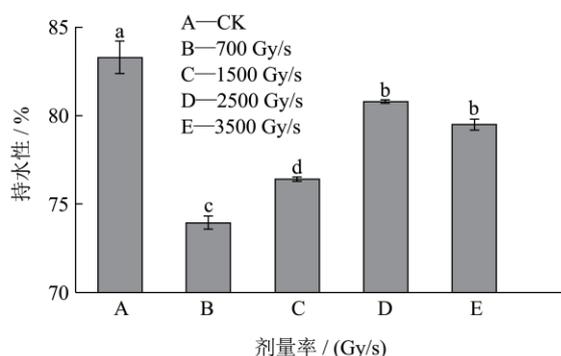


图8 不同剂量率下蛋白持水性的变化

Fig.8 Changes in water-holding capacity (WHC) of the proteins at different irradiation dose rates

注:图中不同小写字母代表不同处理在5%水平上差异显著。

蛋白氧化生成羰基及二硫键使蛋白质发生交联、降解及变性,结构遭到破坏,导致肌肉持水性降低。纯化的肌原纤维蛋白在被 $H_2O_2$ 氧化后持水力降低,研究<sup>[34]</sup>发现这与酪氨酸-酪氨酸交联物的形成有关,揭示了蛋白氧化交联产物对持水力存在不利影响。

## 3 结论

电子束辐照后,冷却牛肉中脂肪及蛋白氧化均显著增强( $P<0.05$ );在辐照组中,剂量率(700~3500 Gy/s)越大,脂肪及蛋白氧化程度越弱,当剂量率为2500 Gy/s时氧化程度最弱;蛋白氧化会导致疏水基团的暴露,从而增大蛋白的表面疏水性,同时降低了溶解性;蛋白氧化会造成一部分结合紧密的不易动态水态变为自由流动水,从而降低蛋白持水性。综上所述,电子束辐照对冷却牛肉的氧化存在着明显的剂量率效应,进而显著影响蛋白理化特性。

## 参考文献

- [1] 李银,孙红梅,张春辉,等.牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J].中国农业科学,2013,46(7):1426-1433  
LI Yin, SUN Hong-mei, ZHANG Chun-hui, et al. Analysis of frozen beef protein oxidation effect during thawing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(7): 1426-1433
- [2] 李苗云,孙灵霞,周光宏,等.冷却猪肉不同贮藏温度的货架期预测模型[J].农业工程学报,2008,24(4):235-239  
LI Miao-yun, SUN Ling-xia, ZHOU Guang-hong, et al. Prediction model for the shelf-life of chilled pork stored at different temperatures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 235-239
- [3] 白艳红,赵电波,毛多斌,等.电子束辐照冷却猪肉杀菌工艺优化[J].农业工程学报,2009,25(12):312-317  
BAI Yan-hong, ZHAO Dian-bo, MAO Duo-bing, et al. Process optimization of electron beam radiation on chilled pork [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 312-317
- [4] 李超,杨文鸽,徐大伦,等.电子束辐照对泥蚶杀菌保鲜效果的影响[J].食品科学,2009,30(22):383-386  
LI Chao, YANG Wen-ge, XU Da-lun, et al. Effect of electron beam irradiation on sterilization and sensory quality of tegillarca granosa [J]. Food Science, 2009, 30(22): 383-386
- [5] 哈益明,王锋,李淑荣,等.辐照处理对冷却肉脂肪氧化影响的研究[J].食品科学,2004,25(11):303-306  
HA Yi-ming, WANG Feng, LI Shu-rong et al. Effects of irradiation on lipid oxidation of chilled meat [J]. Food Science, 2004, 25(11): 303-306
- [6] 张培培,吴雪燕,汪淼,等.肉制品中脂肪氧化与蛋白质氧化及相互影响[J].食品与发酵工业,2013,39(5):143-148  
ZHANG Pei-pei, WU Xue-yan, WANG Miao, et al. The interaction of lipid and protein oxidation of meat products [J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(5): 143-148
- [7] 朱俊玲,马丽珍,卢智.低剂量辐射对真空包装冷却羊肉微生物与理化指标的影响[J].中国食品学报,2006,6(5):85-91  
ZHU Jun-ling, MA Li-zhen, LU Zhi. Effect of irradiation at low-dose gamma ray on the microbiological and physicochemical characteristics of vacuum-packaged chilled mutton [J]. Journal of China Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(5): 85-91
- [8] 吴庆,孔秋莲,戚文元等.γ射线和电子束辐照对意式风干火腿色泽和脂质氧化的影响[J].上海农业学报,2013,29(2):38-42  
WU Qing, KONG Qiu-lian, QI Wen-yuan, et al. Effects of γ-ray/electron beam irradiation on color and lipid oxidation

- of prosciutto [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2013, 29(2): 38-42
- [9] 法逸华.低剂量率 $\gamma$ 射线照射对肿瘤细胞凋亡及杀伤机制的研究[D].苏州大学,2004
- FA Yi-hua. Study on the mechanism of tumor cell apoptosis and death induced by low dose-rate  $\gamma$  irradiation [D]. Suzhou: Soochow University, 2004
- [10] GB/T 5538-2005,动植物油脂 过氧化值测定[S]
- GB/T 5538-2005, Animal and vegetable fats and oils-determination [S]
- [11] GB 5530-85, 植物油检验 酸价测定法[S]
- GB 5530-85, Inspection of vegetable oils methods for determination of acid value [S]
- [12] Marianne N Lund, Marchen S Hviid, Leif H Skibsted. The combined effect of antioxidants and modified atmosphere packaging on protein and lipid oxidation in beef patties during chill storage [J]. *Meat Science*, 2007, 76: 226-233
- [13] Levine R L, Williams J A, Stadtman E R, et al. Carbonyl assays for determination of oxidatively modified proteins [J]. *Method Enzymol*, 1994, 233: 346-357
- [14] Beveridge T, Toma S, Nakai S. Determination of SH- and SS-groups in some food proteins using ellman's reagent [J]. *Journal of Food Science*, 1974, 39: 49-51
- [15] Joo S T, Kauffman R G, Kim B C, et al. The relationship of sarcoplasmic and myofibrillar protein solubility to colour and water-holding capacity in porcine longissimus muscle [J]. *Meat Science*, 1999, 52(3): 291-297
- [16] 孙为正.广式腊肠加工过程中脂质水解蛋白质降解及风味成分变化研究[D].广州:华南理工大学,2011
- SUN Wei-zheng. Studies on lipolysis, proteolysis and flavor compounds during processing of sausage [D]. Guangzhou: South of China University of Technology, 2011
- [17] 潘君慧.冻藏方式、猪肉蛋白氧化及猪肉品质关系的研究[D].江南大学,2011
- PAN Jun-hui. The relationships of frozen storage, porcine myofibrillar protein oxidation and quality of pork products [D]. Jiangnan University, 2011
- [18] Azeredo H, Faria JAF, Da Silva, MAAP. Minimization of peroxide formation rate in soybean oil by antioxidant combinations [J]. *Food Research International*, 2004, 37(7): 689-694
- [19] Benjakul S, Visessanguan W, Leelapongwattana K. Characteristics of muscle from two species of bigeye snapper, *priacanthus tayenus* and *priacanthus macracanthus* [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2002, 26(4): 307-326
- [20] 林森森,廖明涛,刘书臣,等.鲮鱼 4℃贮藏期间色素物质及脂质氧化的变化[J].*中国食品学报*,2014,14(7):87-94
- LIN Seng-seng, LIAO Ming-tao, LIU Shu-chen, et al. Changes of pigments and lipid oxidation of skipjack tuna during 4 °C storage [J]. *Journal of China Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(7): 87-94
- [21] Ulu H. Evaluation of three 2-thiobarbituric acid method for the measurement of lipid oxidation in various meats and meat products [J]. *Meat Science*, 2004, 67(4): 683-687
- [22] 马丽珍,南庆贤,戴瑞彤.真空包装冷却猪肉低剂量辐照后的理化和感官特性变化[J].*农业工程学报*,2003,19(4): 184-187
- MA Li-zhen, NAN Qing-xian, DAI Rui-tong. Changes in physicochemical and sensory characteristics of vacuum-packaged chilled pork irradiated at low-dose gamma ray [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 184-187
- [23] Rababah T, Hettiarachchy N S, Horax R, et al. Thiobarbituric acid reactive substances and volatile compounds in chicken breast meat infused with plant extracts and subjected to electron beam irradiation [J]. *Poultry Science*, 2006, 85(6): 1107-1113
- [24] Stadtman E R. Protein oxidation and aging [J]. *Free Radical Research*, 2006, 40: 1250-1258
- [25] 李银,李侠,张春晖,等.羟自由基导致肉类肌原纤维蛋白氧化和凝胶性降低[J].*农业工程学报*,2013,29(12):286-292
- LI Yin, LI Xia, ZHANG Chun-hui et al. Oxidation and decrease of gelling properties for meat myofibrillar protein induced by hydroxyl radical [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 286-192
- [26] Wang YS, Xiong YL, Rentfrow GK, et al. Oxidation promotes cross-linking but impairs film-forming properties of whey proteins [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115: 11-19
- [27] Dean RT, Fu SL, Stocker R, et al. Biochemistry and pathology of radical-mediated protein oxidation [J]. *Biochemical Journal*, 1997, 324: 1-18
- [28] Sun WZ, Zhou FB, Sun DW, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of myofibrillar proteins [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(7): 1703-1712
- [29] 胡忠良,邹玉峰,林玉海,等.氧化程度对肌原纤维蛋白热凝胶及理化特性的影响[J].*食品科学*,2013,34(17):19-22
- HU Zhong-liang, ZOU Yu-feng, LIN Yu-hai et al. Effect of oxidation degree on heat-induced gel formation and physico-chemical properties of myofibrillar protein [J]. *Food*

- Science, 2013, 34(17): 19-22
- [30] Srinivasan S, Hultin H O. Chemical, physical, and functional properties of codproteins modified by anonyz micfree-radical-generating system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45: 310-320
- [31] 李银. 蛋白氧化对肌肉保水性的影响机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014
- LI Yin. Effect-mechanism of protein oxidation on water-holding capacity of muscle [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2014
- [32] Li Y Q, Kong B H, Xia X F, et al. Structural changes of the myofibrillar proteins in common carp (*Cyprinus carpio*) muscle exposed to a hydroxyl radical-generating system [J]. Process Biochemistry, 2013, 3(15): 1-8
- [33] 陈茜茜, 王俊, 黄峰. 蛋白质氧化对肉类成熟的影响研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(3): 285-288
- CHENG Qian-qian, WANG Jun, HUANG Feng. Research progress in effect of protein oxidation on meat aging [J]. Food Science, 2013, 34(3): 285-288
- [34] Bertram H C, Kristensen M, Baron C P, et al. Does oxidation affect the water functionality of myofibrillar proteins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55: 2342-2348