电子束辐照剂量率对真空包装冷鲜牛肉品质的影响

王宁[1,2]，王晓拓[1]，王志东[1]，丁武[2]
（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：研究了电子束辐照剂量率对真空包装冷鲜牛肉品质的影响，为电子束辐照在冷鲜肉保鲜中的应用提供理论依据。将真空包装的冷鲜牛肉在 2 kGy 的辐照剂量下分别经不同剂量率(0、700、1500、2500、3500 Gy/s)处理，然后再置于 2 ℃冰箱内贮存 15 d。贮藏期内分别对微生物指标（菌落总数（TBC））和理化指标 (挥发性盐基氮含量（TBA-N）、硫代巴比妥酸值（TBARS）、过氧化值（POV）、巯基（SH）、二硫键（SS）、色泽（L*和 a*））进行测定，对比不同剂量率处理对辐照效果的影响。结果表明，在 2 kGy 的辐照剂量下，在一定剂量率范围内随着剂量率的不断增大，冷鲜牛肉的 TBC、TVB-N、TBARS、POV、SS 和 L*值均显著降低，而 SH 和 a*值增加（$p<0.05$）。综合分析各指标说明电子束辐照剂量率对冷鲜牛肉品质有显著的影响；同时可得出，在 2 kGy 的辐照剂量下，剂量率为 2500Gy/s 处理组，贮藏 15 d 后，细菌总数 5.161 log(CFU/g)，TVB-N 值为 16.6 mg/100g，POV 值为 1.126 meq/kg，TBARS 值为 0.218 mg/100g，SH 和 SS 分别为 0.395 和 0.379 mmol/g pro，L*和 a*值分别为 40.34 和 19.57，综合辐照效果最佳。

关键词：剂量率；辐照；电子束；冷鲜牛肉；品质
文章篇号：1673-9078(2015)7-241-247 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.038

Effect of Electron Beam Irradiation Dose on the Quality of Vacuum-packaged Chilled Fresh Beef

WANG Ning[1,2], WANG Xiao-tuo[1], WANG Zhi-dong[1], DING Wu[2]
(1.Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricutural Science, Beijing 100193, China)
(2.College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: The effect of the dose rate of electron beam irradiation on the quality of vacuum-packaged chilled fresh beef was studied, providing a theoretical basis for the application of electron beam irradiation to the preservation of chilled fresh meat. Vacuum-packaged chilled fresh beef was treated with a 2-kGy irradiation dose at a dose rate of 0, 700, 1500, 2500, or 3500 Gy/s and stored in a refrigerator at 2 ℃ for 15 days. During the storage period, physicochemical indicators (i.e., total volatile basic nitrogen (TVB- N) content, peroxide value (POV), thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS), sulfhydryl (SH) groups, disulfide bonds (SS), lightness L*, and redness a*) and a microbiological indicator (total bacterial count (TBC)) of quality were estimated, and the impacts of various dose rates on the effect of irradiation were compared. For a dose of 2 kGy, increasing the dose rate resulted in significantly reduced values of TBC, TVB-N, TBARS, POV, SS, and L*, but increased values of SH and a* ($p < 0.05$). After 15 days of storage, the treatment group (irradiated with a dose of 2 kGy and a dose rate of 2500 Gy/s) exhibited TBC, TVB-N, POV, TBARS, SH, SS, L*, and a* values of 5.161 colony-forming units (CFU)/g, 16.6 mg/100 g, 1.126 meq/kg, 0.218 mg/100 g, 0.395 mmol/g pro, 0.379 mmol/g pro, 40.34, and 19.57, respectively, representing the optimal irradiation effects.

Key words: dose rate; irradiation; electron beam; chilled fresh beef; quality

冷鲜肉质地柔软，富有弹性，汁液流失少，滋味鲜美，营养价值高[1]，因此越来越受到消费者的青睐。冷鲜肉虽然在整个生产、流通过程中始终处于低温环境下，大多数微生物的生长繁殖被抑制，但一些耐低温的微生物仍然可以生长，甚至引发食物中毒[2]。因此，寻求一种既能保持其原有风味，又可有效杀菌，延长货架期的新型保鲜技术迫在眉睫。有“冷杀菌”之称的电子束辐照技术具有高效、安全、清洁等特点，不会引起食品内部温度的增加，可较好地保持食品原有的色香味和外观品质[3]。

牛肉是全世界很受欢迎的食品，也是中国人消费的主要肉类食品之一[4]。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[5]。然而，辐照时肉中的蛋白质、糖、脂等易与水辐

收稿日期：2014-09-17
基金项目：公益性行业（农业）科研专项经费（201103007）

解产生的离子和自由基作用，从而引发一系列物理化学变化[6]。目前可用于食品辐照加工的射线主要有电子束和γ 射线[7]。以往许多研究发现γ 射线会引起自由基、氢过氧化物的生成，导致食品氧化效应[8]，而电子束辐照过程中可能存在还原效应，可在一定程度上降低氧化程度[9]。目前国内外对辐照效果的研究，多集中在辐照类型与辐照剂量等因素的影响方面。贾倩等[10]研究表明γ 射线辐照处理会加速素鸡的氧化效应，而电子速辐照处理对素鸡的氧化效应低于同等剂量γ 射线处理所引起的氧化效应。Lacroix 等[11]认为至少在 1~2 kGy 的辐照剂量才能有效控制微生物的生长。然而，本课题的前期工作表明：剂量率也显著影响辐照效果。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的影响鲜有报道。法逸华等[12]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鲜牛肉，分析在 2 kGy 的电子束辐照剂量下不同剂量率对牛肉中微生物、蛋白质、脂肪和色泽等品质的影响，以期为电子束辐照在冷鲜牛肉保鲜中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

牛肉里脊，购自于北京第五肉联厂。

1.2 仪器与设备

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；BL-50A 立式压力蒸汽灭菌锅，上海博讯实业有限公司医疗设备厂；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循环水式多用深空泵，郑州长城科工贸有限公司；HWS 智能型恒温恒湿培养箱，宁波江南仪器厂；T6-新世纪紫外可见分光光度计，中国普析公司；SW-CJ-2F 超净工作台，苏州安泰空气技术有限责任公司；QL901 涡旋混匀器，江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司；CR-400 色差计，日本 Konica Minolta 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

新鲜牛肉用孔径 4 mm 的绞肉机绞成肉糜后用聚乙烯袋进行真空包装（包装后肉的厚度在 1 cm）。25 g 每份共 60 份用于 TBC 的测定；10 g 每份共 120 份用于 TBARS 值、TVB-N、L*和 a*值的测定；150 g 每份共 20 份用于油脂提取 POV 值的测定；5 g 每份共 20 份用于 SH 和 SH 的测定。然后置于 2 ℃冰箱中，待辐照。

1.3.2 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，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 ℃，样品单层摆放没有重叠（确保电子束能完全穿透），辐照后置于 2 ℃冰箱贮藏。

1.3.3 菌落总数的测定

按照GB/T4789.2-2010方法进行操作。

1.3.4 挥发性盐基氮含量

TVB- N 测定方法按照 GB/T5009.44-2003 半微量扩散法测定。

1.3.5 过氧化值

冷鲜牛肉中油脂的提取参照 GB/T 5009. 44-2003 方法进行，提取的油脂进行过氧化值(POV)的测定。POV 值的测定参照 GB/T 5538-2005 方法进行。

1.3.6 TBARS 值

参照 Kanmani[13]略作改进。取 10 g 样品，加 50 mL7.5%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 0.02 M TBA 溶液，90 ℃水浴中保温 40 min，取出冷却 1 h 后离心 5 min (16000×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:

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

与TBA反应的物质的量(TBARS)以每100 g肉中丙二醛的毫克数表示。

1.3.7 巯基和二硫键

参照 Beveridge 等[14]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 μL Ellman 试剂，将悬浮液置于室温(25±1 ℃)下保温 1 h，10000×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：

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

其中 73.53=106/1.36×10^4，1.36 为摩尔消光系数，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 β-巯基乙醇，室温下反应 1 h，之后加入 10 mL 12% TC，3000×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。

1.3.8 L*和 a*

CR-400色差仪检测，L*、a*是三维矩形颜色空间参数，L*为明度轴参数，0表示黑，100+表示白；a*为红/绿轴参数，正值为红色，负值为绿色，0为中性色[15]。

1.3.9 数据分析

试验所得数据采用Origin 7.5软件进行处理分析及制图，结果用“平均值±标准误差”格式表示。各指标均重复3次，然后取平均值。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照剂量率对微生物菌落总数的影响

表 1 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期间菌落总数[log(CFU/g)]的变化

Table 1 Changes in the TBC (log(CFU/g)) of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

辐照剂量率/(Gy/s)	贮藏时间/d			
	0	5	10	15
0	5.219±0.174^a	5.712±0.008^a	6.971±0.036^a	7.638±0.005^a
700	4.463±0.342^b	4.64±0.054^b	6.12±0.035^b	6.266±0.023^b
1500	4.172±0.013^b	4.311±0.073^c	4.777±0.087^c	5.352±0.012^c
2500	3.341±0.148^c	3.681±0.144^d	4.295±0.004^d	5.161±0.159^d
3500	2.848±0.097^c	2.903±0.000^e	3.872±0.022^e	4.995±0.082^d

注：表中每列不同小写字母代表不同剂量率在 5%水平上差异显著。

从表 1 可以看出，15 d 的冷藏过程中辐照处理组的细菌总数均比未辐照组的低，差异达到显著水平（p<0.05），并且随着剂量率的增大，细菌总数不断减少。贮藏第 0 d，与未辐照组相比，700、1500、2500、3500 Gy/s 辐照处理组细菌总数分别降低 0.765、1.047、1.878、2.371 log(CFU/g)，差异达到显著水平（p<0.05）。贮藏第 15 d，未辐照组的细菌总数为 7.638log(CFU/g)，已经超出 6 log(CFU/g)的国家标准，辐照组的细菌总数均没有超标。3500 Gy/s 处理 15 d 时细菌总数最低，仅为 4.995 log(CFU/g)。综上可见，2 kGy 辐照剂量对冷鲜牛肉有明显的杀菌效果，而且在 2 kGy 时，剂量率越大，杀菌效果越好。这是由于当食品辐照时，微生物细胞中的主要组成 DNA 同其他分子一样被电离和激发，DNA 的任何改变都会引起细胞功能和繁殖的变化。当辐照能量超过一定限量时，这些变化不能修复，引起细胞死亡或丧失繁殖能力。在同一辐照剂量下，剂量率越大，单位时间内辐照能量就越大，导致细胞失活、死亡率增大[16]。

2.2 电子束辐照剂量率对挥发性盐基氮含量的影响

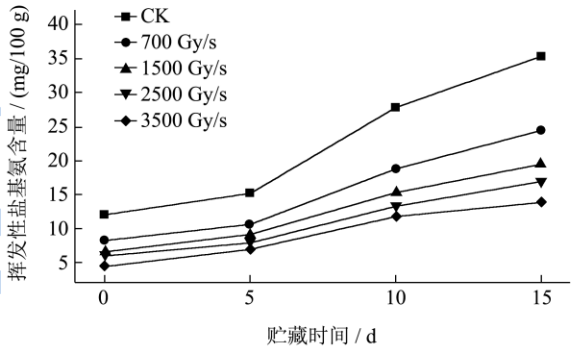


图 1 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期间挥发性盐基氮含量的变化

Fig.1 Changes in the TVB-N content of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

肉以及肉制品富含蛋白质，因微生物的作用使蛋白质和非蛋白含氮化合物降解产生氨和初级、二、三级胺等碱性含氮物质从而导致肉发生腐败[17]。TVB-N 是目前用于评价肉质新鲜度的唯一理化指标。从图 1 可以看出，辐照后牛肉的 TVB-N 含量大幅下降（p<0.05）。随着贮藏时间的延长，各组 TVB-N 值均呈上升趋势，未辐照组在贮藏 10 d 后 TVB-N 值为 27.6 mg/100g，远超过国家规定的最高限值 20 mg/100 g。15 d 时，3500 Gy/s 处理组 TVB-N 值最低为 13.9 mg/100g，未超过国标。由此可见，高剂量率组可有效抑制微生物的生长、繁殖，使 TVB-N 值增长缓慢。

2.3 电子束辐照剂量率对过氧化值的影响

过氧化值是表示油脂等被氧化程度的指标，是指 1 kg 油脂中所含氢过氧化物的毫摩尔数，用于说明样品是否因已被氧化而变质[18]。由图 2 可知，经过电子束处理的冷鲜牛肉在 0、5、10 d，POV 值显著高于对

照组（p<0.05）。0 d 时，辐照组中随着剂量率的增加，过氧化值逐渐降低，2500 Gy/s 时最低为 1.177 meq/kg。贮藏前期，各组过氧化值均呈现上升趋势，10 d 以后呈下降趋势（p<0.05）。15 d 时，辐照组中 700、1500、3500 Gy/s 处理组过氧化值分别为 1.726、1.185、1.216 meq/kg，而 2500 Gy/s 处理组最低，为 1.126 meq/kg。

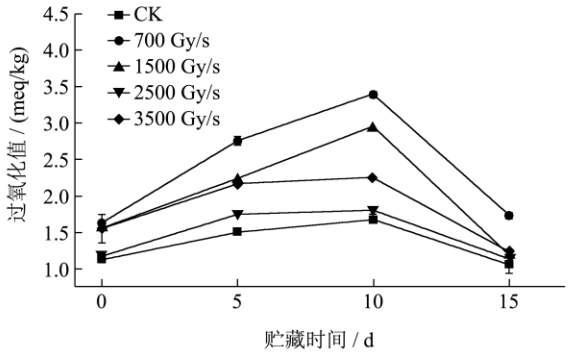


图 2 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期过氧化值的变化

Fig.2 Changes in the POV of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

过氧化值在贮藏期间出现先上升后下降趋势可能是由于氢过氧化物歧化为二级氧化产物。氧化初期，氢过氧化物的生成速度大于分解速度，过氧化值升高；由于过氧化物会降解成小分子醛、酮等物质，随着氧化程度的加深，氢过氧化物的分解速度大于生成速度，此时过氧化值降低[19]。

2.4 电子束辐照剂量率对 TBARS 的影响

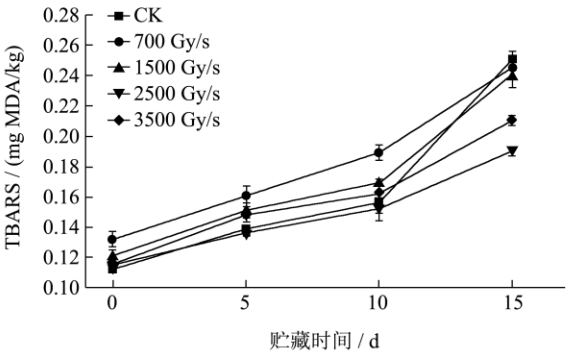


图 3 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期 TBARS 值的变化

Fig.3 Changes in TBARS of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

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[20]。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（0.114mg/100g），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 0.131、0.125、0.115、0.12 mg/100 g（p<0.05）。在 5、10 d 辐照组的 TBARS 值均高于未辐照组，而 15 d 时，2500 Gy/s 剂量率的 TBARS 最低，为 0.218 mg/100g。马丽珍等[21]研究表明，γ 射线辐照冷却猪肉导致 TBARS 增加，且剂量越高增加幅度越大。Rababah 等[22]用电子束辐照新鲜鸡肉后也发现 TBARS 增加。由此可见，辐照加速了冷鲜牛肉脂肪氧化，在一定范围内剂量率越大，TBARS 值反而越小，氧化程度越弱。

2.5 电子束辐照剂量率对蛋白氧化的影响

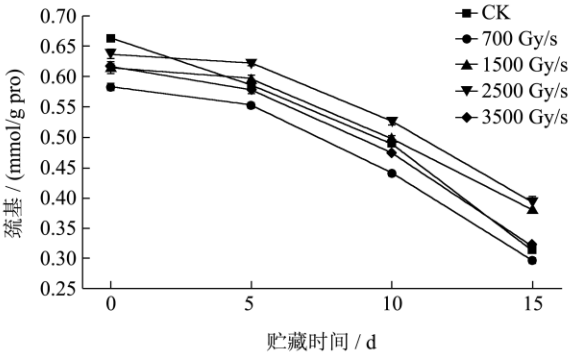


图 4 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期巯基含量的变化

Fig.4 Changes in SH groups of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

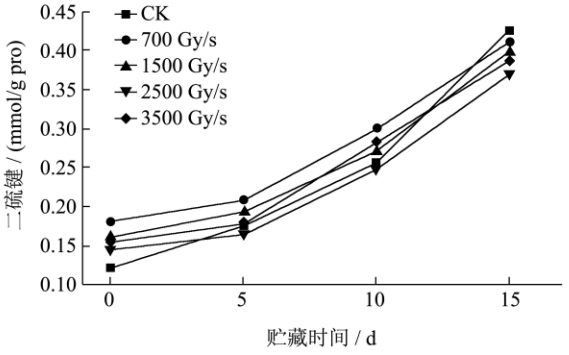


图 5 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期二硫键含量的变化

Fig.5 Changes in SS of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

食品经辐照处理、热处理、剪切或暴露于空气，均会导致蛋白质的结构变化，使其半胱氨酸残基暴露。半胱氨酸残基发生氧化导致巯基含量减少和二硫键含量的增加[19]。由图 4、5 可知，未辐照牛肉蛋白初始的巯基和二硫键含量分别为 0.663 和 0.121 mmol/gpro），而辐照后牛肉的初始巯基含量显著下降，二硫键含量显著上升（辐照剂量率为 700、1500、2500、3500 Gy/s 时，巯基含量分别为 0.583、0.613、0.637、0.615 mmol/g pro，二硫键含量分别为 0.179、0.155、0.163、0.161 mmol/g pro）（p<0.05）。随着贮藏时间的

延长，巯基含量不断下降，二硫键含量不断生成。15 d 时，2500 Gy/s 剂量率的巯基含量最大，为 0.395 mmol/g pro。二硫键含量最小为 0.379 mmol/g pro。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。由此可知，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。

2.6 电子束辐照剂量率对色泽的影响

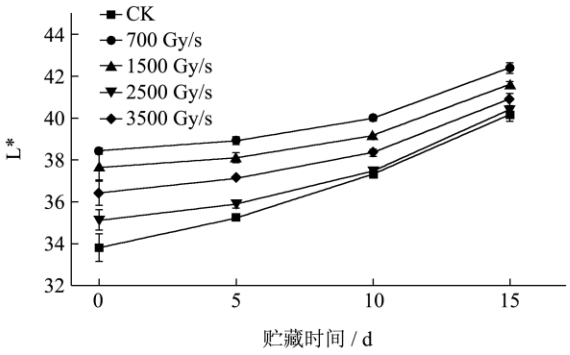


图 6 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期 L*值的变化

Fig.6 Changes in L* of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

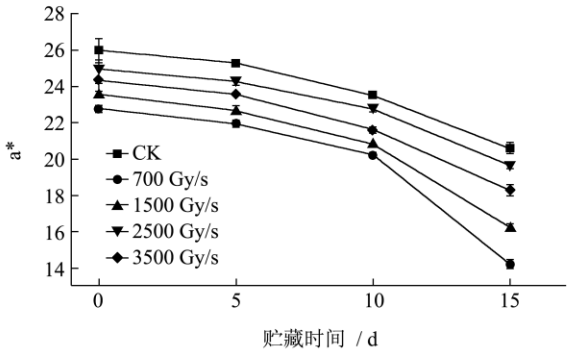


图 7 不同剂量率下冷鲜牛肉在贮藏期 a*值的变化

Fig.7 Changes in a* of chilled fresh beef for different irradiation dose rates during the storage period

色泽是食品的基本物性，是评价肉制品质量的重要指标，很大程度上影响消费者对产品的选择[15]。a*(红度参数)和 L* (白度参数)是评价肉制品颜色的重要参数。由图 6、7 可知，2 kGy 电子束辐照处理导致牛肉 L*显著增加，在低于 2500 Gy/s 范围内，随着剂量率的增大，L*值逐渐降低。辐照组之间彼此差异性显著，其中 2500 Gy/s 处理样品 L*最小为 35.11，最接近于对照组。2 kGy 电子束辐照处理导致牛肉 a*下降，在低于 2500 Gy/s 范围内，随着剂量率的增大，a*值逐渐增大。辐照组之间彼此差异性显著，其中 2500 Gy/s 处理组 a*值最大为 25.35，与对照组差异不显著（$p>0.05$），色泽较好。电子束辐照后，辐照剂量率越高，冷鲜肉的颜色越鲜艳。这可能是因为肉色的变化主要由冷鲜肉中肌红蛋白分子决定。肌红蛋白分子，特别是铁原子对环境变化和能量增大非常敏感[23]。

3 讨论

3.1 电子束辐照剂量率对微生物的影响

电子束辐照具有迅速的杀菌效果，而且辐照剂量率与杀菌效果有密切相关性。Lacroix 等[24]报道细菌总数在 6 kGy 剂量辐照后，细菌总数显著下降，而且剂量率 20 kGy/h 比 2 kGy/h 灭菌效果更好。本研究发现 2kGy 剂量辐照贮藏 15 d 后，牛肉的菌落总数分别为 6.266 log(CFU/g)（700Gy/s）、5.352 log(CFU/g)（1500 Gy/s）、5.161 log(CFU/g)（2500Gy/s）、4.995 log(CFU/g)（3500Gy/s）。与此同时，未辐照的牛肉细菌总数达到 7.638 log(CFU/g)，也比辐照组的牛肉高很多（$p<0.05$）。由此可知，2 kGy 电子束辐照杀菌效果显著（$p<0.05$）；而且在此剂量下，剂量率越大，杀菌效果越好。

3.2 电子束辐照剂量率对 TVB-N 的影响

TVB-N 是由于在肉品腐败过程中酶和细菌对其作用，使蛋白质分解产生氮以及胺类等有挥发性的碱性含氮物质[25]。Byun 等[26]研究了在贮藏期间不同的物理、化学指标与肉的货架期的关系，发现 TVB-N 与肉的微生物指标有关。本试验中，辐照剂量率小的处理组和未辐照组其 TVB-N 值在贮藏 15 d 时都要高于 3500 Gy/s 辐照组，结合表 1 可知这可能是由于初始菌落数高，微生物繁殖过快，从而导致 TVB-N 值大幅升高。而 3500 Gy/s 剂量率组很好地抑制微生物生长繁殖，从而使 TVB-N 值增长缓慢。

3.3 电子束辐照剂量率对氧化的影响

辐照对脂肪氧化的影响主要是由于辐照提高了自由基生成的速度，引发了自由基的链式反应[27]。辐照剂量越高，自由基生成量越大，脂肪氧化速度也会越快。本研究发现，当以 2 kGy 剂量辐照时，TBARS 值和过氧化值显著高于未辐照组（$p<0.05$），与其他辐照组相比，2500 Gy/s 辐照组牛肉的脂肪氧化程度最低。这可能是由于剂量率的大小显著影响自由基的生成速度和生成量，从而导致牛肉脂肪呈现出不同程度的氧化效应。

蛋白质氧化被证实是由自由基链式反应引起的，这与脂肪氧化是类似的。脂类氧化产生的自由基又会引发蛋白质产生自由基，形成聚合物和蛋白质-脂类复

合物出现的一些可能作用机制[28]。牛肉辐照后蛋白质巯基形成二硫键意味着巯基的氧化和相关共价化合物的产生，使蛋白质构象发生改变。本试验表明，不同剂量率显著影响蛋白的氧化程度，与其他辐照组相比，2500 Gy/s 辐照组牛肉的蛋白氧化程度更低。对于本研究的发现，作者认为有关电子束辐照剂量率对次级产物和瞬间中间自由基的变化进行检测有待于进一步研究。

3.4 电子束辐照剂量率对色泽的影响

肉色的呈现主要与肌肉中肌红蛋白有关，而且肌红蛋白在辐照条件下发生了一些变化，而且这种产物在没有外来条件影响时，性质比较稳定。0 d，电子束辐照后 a*值下降，随着剂量率的增大，冷鲜肉 a*值有增大的趋势。各处理组在贮藏期间 a*下降，L*上升。这可能是由于剂量率的大小显著影响体系中的微生物细菌总数以及氧化作用，从而影响冷鲜牛肉色泽的变化。

4 结论

4.1 牛肉经不同剂量率辐照处理后，剂量率越大，微生物细菌总数就越少，TVB-N 值也越小。

4.2 不同剂量率辐照处理后，在一定剂量率范围内，随着剂量率的增大，TBARS、POV、SS 和 L*显著降低，而 SH 和 a*值显著增大（$p<0.05$）。

4.3 本研究发现：在 2 kGy 剂量下，2500 Gy/s 辐照组能够较好地抑制微生物的生长繁殖和蛋白质的腐败变质，减缓冷藏过程中脂肪和蛋白氧化，改善冷鲜牛肉的色泽，从而降低贮藏过程中微生物和氧化带来的品质劣变，改善冷鲜牛肉的品质，达到保鲜的效果。

参考文献

[1] 王金枝,孔宝华,刁新平.冷却肉保鲜的研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2004,5:66-67
WANG Jing-zhi, KONG Bao-hua, DIAO Xin-ping. Research Progress on Fresh-keeping of Chilled Meat [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2004, 5: 66-67

[2] 韩军,于宏伟,陈灿,等.冷却肉中单核增生李斯特氏菌的抑菌研究[J].中国食品学报,2014,14(5):98-105
HAN Jun, YU Hong-wei, CHEN Can, et al. Study on the Inhibiting for Listeria Monocytogenes in the Chilled Meat [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(5): 98-105

[3] 杨文鸽,李超,徐大伦,等.电子束辐照对泥蚶肉挥发性风味成分的影响[J].中国食品学报,2012,12(3):176-184
YANG Wen-ge, LI Chao, XU Da-lun, et al. Effect of Electron Beam Irradiation on the Volatile Flavors in Tegillarca Granosa Meat [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(3): 176-184

[4] 马世榜,徐杨,汤修映,等.利用可见近红外光谱多指标综合预测生鲜牛肉储存期[J].光谱学与光谱分析,2012,32(12):3242-3246
MA Shi-bang, XU Yang, TANG Xiu-ying, et al. Prediction of Storage Time of Fresh and Near-Infrared Spectroscopy Beef with Multi-Index Using Visible t [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32, (12): 3242-3246

[5] 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. Effection of Electron Beam Irradiation on Sterlization and Sensory Quality of Tegillarca granosa [J]. Food Science, 2009, 30(22): 383-386

[6] 于玲,位正鹏,步营.辐照对冷冻牡蛎营养品质的影响[J].齐鲁渔业,2010,27(1):12-13
YU Ling, WEI Zheng-peng, BU Ying. Effect of Irradiation on Nutritional Qualities of Frozen Oyster [J]. Shandong Fisheries, 2010, 27(1): 12-13

[7] 尚颐斌,高美须,李淑荣,等.电子束辐照对冷鲜猪肉品质的影响[J].核能学报,2013,27(4):437-442
SHANG Yi-bin, GAO Mei-xu, LI Shu-rong et al. Effect of Electron Beam Irradiation on Quality of Fresh Chilled Pork [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(4): 437-442

[8] 王文亮,李霞,王守经,等.食品油脂辐照氧化研究进展.中国食物与营养,2009, 2:29-31
WANG Wen-liang, LI Xia, WANG Shou-jing, et al. Study of Fat Oxidation of Food after Irradiation [J]. Food and Nutrition in China, 2009, 2: 29-31

[9] Pillai S D, Walzem R, Moody K. E-Beam Irradiated Diats for Neutropenic Bone Marrow Transplant Recipients:Technology and Hospital Food Supply Chain Consideration.2nd FAO/IAEA RCM on “Development of irradiated food for Immuno-Compromised patients and other potential target grounps”, Philippine, 2011

[10] 贾倩,李淑荣,高美须,等.电子束和γ 射线辐照对素鸡杀菌效果及氧化效应的影响[J].食品科学,2013,34(13):61-65
JIA Qian, LI Shu-rong, GAO Mei-xu et al. Comparative Effects of Electron Beam and Gamma Ray Irradiation on Microorganism Inactivation and Oxidation of Steamed Tofu Rolls [J]. Food Science, 2013, 34(13): 61-65

[11] Lacroix M, OUATTARA B, SAUCIER L, et al. Effect of Gamma Irradiation in Presence of Ascorbic Acid on Microbial Composition and TBARS Concentration of Ground Beef Coated with an Edibal Active Coating Radiation [J]. Physics and Chemistry, 2004, 71: 71-75

[12] 法逸华.低剂量率γ 射线照射对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 γ Irradiation [D]. Suzhou: Soochow University, 2004

[13] 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

[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] 朱金虎,黄卉,李来好.食品中感官评定发展现状[J].食品工业科技,2012,33(8):398-401
ZHU Jin-hu, HUANG Hui, LI Lai-hao. Development of Sensory Evaluation in Food Science [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(8): 398-401

[16] 施培新.食品辐照加工原理与技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2004
SHI Pei-xin. Food Irradiation Processing Theory and Technology [M]. Beijing: Chinese Press of Agricultural Science and Technology, 2004

[17] Zhen Yang, Haiyan Wanga, Wei Wanga, et al. Effect of MeV E-beam Irradiation Combined with Vacuum-packaging on the Shelf Life of Atlantic Salmon Fillets during Storage at 4 ℃ [J]. Food Science, 2014, 145: 535-541

[18] Azeredo H, Faria J A F, Da Silva M A A P. Minimization of Peroxide Formation Ratein Soybean Oil by Antioxidant Combinations [J]. Food Research International, 2004, 37(7): 689-694

[19] 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, Protelysis and Flavor Compounds during Processing of Sausage [D]. Guangzhou: South of China, 2011

[20] Ulu H. Evaluation of Three 2-thiobarbituric Acid Method for the Measurement of Lipid Oxidation in Various Meats and Meat Products [J]. University of Technology, 2011Meat Science, 2004, 67(4): 683-687

[21] 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–do- se Gamma Ray [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 184-187

[22] Rababah T, Hettiarachchy N S, Horax R, et a1. Thiobarbiturix 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

[23] Brewer S. Irradiation effects on meat color–a review[J]. Meat Science, 2004, 68(1): 1-17

[24] M L Lacroix, W Smoragiewicz, M Jobin, et al. The Effect of Irradiation of Fresh Pork Loins on the Protein Quality and Microbiological Changes in Aerobically for Vacuum-packaged [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63: 317-322

[25] 王真真,李苗云,赵改名,等.真空包装冷却猪肉生物胺与腐败指标的相关性[J].食品科学,2013,34(14):335-339
WANG Zhen-zhen, LI Miao-yun, ZHAO Gai-ming, et al. Correlations between Biogenic Amines and Spoilage Parameters of Vacuum-Packaged Chilled Pork [J]. Food Science, 2013, 34(14): 335-339

[26] BYUN J S, MIN J S, KIM I S, et al. Comparison of Indicators of Microbial Quality of Meat during Aerobic Cold Storage [J]. Food Protect, 2003, 66: 1733-1737

[27] 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 Irradiationon Lipid Oxidati on of Chilled Meat [J]. Food Science, 2004, 25(11): 303-306

[28] 崔海旭.肉蛋白质氧化机制以氧化对肉制品品质和功能性的影响[J].食品工业科技,2009,30(6):337-341
CUI Hai-xu. Mechanism of Protein Oxidation from Muscle and the Effects of Oxidation on Muscle Food Quality and Functional Properties [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(6): 337-341