

## 电子束辐照冷却猪肉杀菌工艺优化

白艳红<sup>1</sup>, 赵电波<sup>1</sup>, 毛多斌<sup>1</sup>, 贾春晓<sup>2</sup>, 钱学梅<sup>3</sup>, 杨公明<sup>1,4\*</sup>

(1. 郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 郑州 450002; 2. 郑州轻工业学院材料与化学工程学院, 郑州 450002;  
3. 中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103; 4. 华南农业大学食品学院, 广州 510642)

**摘要:** 该研究采用响应曲面法, 以辐照剂量和束流能量为变量, 以菌落总数、红度值和亮度值为试验指标, 优化电子束辐照对冷却肉(肉块的长度约为14~15 cm, 宽度约为7~8 cm, 厚度约为2~2.5 cm)既达到杀菌保鲜效果又最大限度不影响色泽的最佳参数范围。结果表明, 在辐照剂量为3.09~3.63 kGy, 束流能量为2.37~3.51 MeV的参数范围内, 冷却肉菌落总数下降2个对数单位; 束流能量与辐照剂量之间存在协同增效作用, 但束流能量在杀菌过程中发挥的作用是最主要的。辐照剂量为2.38 kGy, 束流能量为2.64 MeV时, 红度值最小, 在辐照剂量2.24~2.99 kGy, 束流能量2.28~2.91 MeV的参数范围, 肉色保持鲜红, 与对照接近。辐照剂量为2.67 kGy, 束流能量为2.55 MeV时, 亮度值有最大值且与对照值接近; 在辐照剂量为2.05~2.92 kGy, 束流能量为2.09~2.80 MeV参数范围, 肉的色泽保持鲜艳。电子束辐照对冷却肉既达到杀菌保鲜效果又不显著影响色泽的最优参数为: 束流能量为2.80 MeV, 辐照剂量为3.09 kGy。研究结果能够为电子束辐照技术应用于肉类工业和在线辐照设备的研制提供技术支持。

**关键词:** 电子束, 辐照, 杀菌, 色泽, 肉, 冷却猪肉

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.054

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0312-06

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 Yanhong, Zhao Dianbo, Mao Duobin, et al. Process optimization of electron beam radiation on chilled pork[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 312—317. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

冷却肉在屠宰、分割、配送和销售各个环节都不可避免地会受到微生物的污染。目前, 冷却肉的生产主要以良好的操作规范和完善的冷链为保障, 传统的高温高压或巴氏杀菌等杀菌技术因影响产品组织性状而难于应用。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。Whangkey采用电子束辐照鲜猪肉, 束流能量为8 MeV, 剂量为3.5 kGy, 4℃条件下可贮藏6 d, 该剂量下的电子束辐照对需氧和嗜温性细菌的抑制作用很理想<sup>[1]</sup>。Poonp等报道, 用电子束辐照牛肉饼, 剂量分别为2、5、10 kGy, 4℃条件下可贮藏21 d, 其中2 kGy对牛肉饼中的腐败菌生长有显著抑制作用, 剂量大于5 kGy能彻底杀灭各种腐败菌<sup>[2]</sup>。Tarte等研究了电子束辐照对碎肉中李斯特氏菌的灭活效应, 结果表明剂量在0.424~0.447 kGy时, 对李斯特氏菌有很好的杀灭效果<sup>[3]</sup>。Chun H H.等研究了UV-C辐照对鸡胸肉中食源性致病菌的杀灭效果, 结果表明,

随着UV-C辐照剂量的增加, 其食源性致病菌数量显著下降( $p < 0.05$ ), 从而达到延长保质期的目的<sup>[4]</sup>。可见, 采用电子束辐照技术处理冷却肉可获得理想的杀菌效果。

一些研究表明, 电子束的能量超过一定值时, 对冷却肉的感官品质有一定的影响。Luchsinger等采用0~3.85 kGy剂量的电子束辐照剔骨猪肉, 可以有效杀灭肉中的大肠杆菌和沙门氏菌, 但较长时间存放会影响产品色泽<sup>[5]</sup>。J. Zhu等用电子束辐照结合变温贮藏(辐照后连续3 d每天置室温下1 h, 其余时间都置于4℃条件下贮藏)处理真空包装的猪里脊切片, 束流能量为12 MeV, 剂量为2.5 kGy, 可贮藏42 d, 但辐照后肉的红度值上升<sup>[6]</sup>。Zhao P.采用1 kGy低剂量电子束辐照小包装新鲜猪肉, 包装条件分为真空、72%CO<sub>2</sub>、50%CO<sub>2</sub>、25%CO<sub>2</sub>、空气, 辐照后2~4℃下贮藏14 d, 结果发现, 随着包装袋内O<sub>2</sub>的增加, 新鲜猪肉颜色逐渐变深, 其风味、品质均无明显变化<sup>[7]</sup>。Lewis等用电子束辐照脱骨去皮鸡胸肉, 束流能量为10 MeV, 剂量为1.0、1.8 kGy, 在0℃条件下分别贮藏0、14、28 d; 结果表明, 贮藏28 d后, 辐照样品的质构、风味和总体可接受性均下降, 且随着贮藏时间延长和辐照剂量的升高, 脂质氧化程度增加<sup>[8]</sup>。一些研究指出采用在原料肉中加入抗氧化剂的方法可减缓辐照造成的脂肪氧化<sup>[9-10]</sup>。马丽珍等研究了真空包装冷却猪肉低剂量辐照后的理化和感官特性变化, 结果表明, 保鲜液处理可以在一定程度上提高辐照效果, 冷却猪肉经过保鲜液处理+真空包装+2 kGy剂量辐照+冷藏, 可以最大程度地延长冷却猪肉的货架期<sup>[11]</sup>。孙志明等研究了γ射线辐照红曲的灭菌效果以及对主要成分的影响, 结果表明, 辐照可有效杀灭红曲中的杂菌和霉菌, 随着辐照剂量的

收稿日期: 2008-04-22 修订日期: 2009-08-26

基金项目: 河南省杰出人才创新基金项目(0521000600); 郑州轻工业学院博士科研启动基金项目(2005BSJJ14)

作者简介: 白艳红(1975—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事畜产品加工与质量控制方面的研究工作。河南省郑州市东风路5号 郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 450002。

Email: baiyanhong@zzuli.edu.cn

\*通信作者: 杨公明(1950—), 男, 陕西富平人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事食品加工新技术方面的研究工作。广州 华南农业大学食品学院, 510642。Email: ygm@scau.edu.cn

增加，红曲中的含菌量呈同步下降，经辐照灭菌后的红曲具有较好的耐贮藏性，可有效地提高保质期<sup>[12]</sup>。

上述研究均是辐照参数束流能量固定在某一水平上，在此基础上研究电子束辐照处理对冷却肉感官指标和微生物指标的影响，并指出电子束辐照对冷却肉品质的不良影响主要是由于束流能量高，作用剂量大等原因造成的。本研究在单因素试验的基础上，通过降低束流能量，减小电子束辐照对冷却肉色泽的影响，而不用与其他方法相结合。以束流能量和辐照剂量为变量，研究并优化出电子束辐照技术对冷却肉杀菌的最佳的工艺参数，为电子束辐照技术应用于肉类工业提供技术支持，为工业化在线的电子束辐照设备的选型和定制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

完成排酸后熟的冷却猪肉，取后腿半腱肌，购于冷却肉专卖店。采用无菌取样，样品取回后置于无菌室内进行分割，去除可见筋腱及结缔组织后，顺肌纤维分割成约 200 g 左右的肉块，肉块的长度约为 14~15 cm，宽度约为 7~8 cm，厚度约为 2~2.5 cm。分别进行真空包装（聚乙烯/聚酰胺复合膜，真空度 92 kPa），随机编号后进行辐照处理。

1.2 主要仪器设备

EBW1500/30-150CNC型高速能电子束辐照设备（德国），WSC-C型测色色差计（上海精密科学仪器有限公司），DZQ400/500型真空包装机（浙江兄弟包装机械有限公司），SW-CJ-1FD 超净工作台（苏州净化公司），HZQ-F1600 恒温振荡培养箱（太仓市实验设备公司），T0006590 移液枪（上海荣泰生化工程公司），GZX-DH202-3-BS 电热恒温干燥箱（上海贺德公司），ZDX-35SBI 型座式自动电热压力蒸汽灭菌器（上海申安医疗器械公司），无菌袋等。

1.3 方法

1.3.1 辐照处理

试验设计采用响应曲面法中 Central Composite 模式，见表 1 和表 2。以束流能量、辐照剂量两个因子为变量，分别以  $X_1$ 、 $X_2$  表示，根据辐照食品卫生管理办法和单因素试验结果（最低有效剂量为 1.5 kGy，最高耐受剂量为 4.0 kGy）<sup>[13-14]</sup>，选择辐照剂量范围为 1.5~4.0 kGy，束流能量范围为 1.8~3.8 MeV。

表 1 试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of experiments

因素	水平				
	上水平 (1)	下水平 (-1)	零水平 (0)	上星号臂 (1.414)	下星号臂 (-1.414)
束流能量 $X_1$	3.51	2.09	2.8	3.8	1.8
辐照剂量 $X_2$	3.63	1.87	2.75	4	1.5

将真空包装好的肉块垂直悬挂在测试平台上方，与辐照源距离为 500 mm，调整设备电压、电流和时间，按照实验设计参数进行辐照处理。辐照后样品置于 0~5℃ 条件下保存，及时测定待测指标。每个处理 3 个重复。

1.3.2 菌落总数测定

按照《食品卫生微生物学检验-菌落总数测定》（GB4789.2—2003）进行<sup>[15]</sup>。

1.3.3 色泽的测定

采用 WSC-C 测色色差计进行色泽的测定，主要测定红度值（ $a^*$ ）和亮度值（ $L^*$ ）。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照对冷却肉的杀菌效果

以束流能量和辐照剂量为  $X_1$ 、 $X_2$ ，以辐照后冷却肉的菌落总数为  $Y_1$ ，电子束辐照对冷却肉杀菌试验的结果见表 2。

表 2 电子束辐照对冷却肉菌落总数和色泽的影响

Table 2 Effects of electron beam radiation on the total colony form unit and color of chilled pork

试验 序号	$X_1$ (束流能 量/MeV)	$X_2$ (辐照剂 量/kGy)	$Y_1$ (菌落总数的对 数/(lg cfu · g <sup>-1</sup> ))	试验结果 预测值/ (lg cfu · g <sup>-1</sup> )	$Y_2$ 红度值 $a^*$	$Y_3$ 亮度值 $L^*$
1	1(3.51)	-1(1.87)	4.00	4.02	121	-31
2	1	1(3.63)	3.20	3.22	132	-31
3	0(2.80)	-1.414(1.50)	4.30	4.26	85	-20
4	-1.414(1.80)	0(2.75)	3.80	3.76	100	-21
5	0	1.414(4.00)	3.10	3.08	121	-31
6	1.414(3.80)	0	3.90	3.66	125	-32
7	0	0	3.75	3.78	90	-21
8	0	0	3.74	3.78	87	-20
9	-1(2.09)	-1	3.90	3.94	106	-25
10	0	0	3.75	3.78	89	-19
11	0	0	3.75	3.78	85	-20
12	-1	1	3.75	3.80	116	-26
13	0	0	3.90	3.78	91	-20
对照			5.60		74	-17

2.1.1 杀菌效果数学模型的建立及显著性检验

利用 Design Expert 软件对表 2 试验数据进行回归拟合，获得二元二次回归模型方程为

$$Y_1=3.78-0.24X_1-0.13X_2-0.16X_1X_2-0.18X_1^2+0.15X_2^2$$
$$(R^2=0.9755)$$

模型中的参数均为编码值。方差分析结果为：模型的显著性检验（ $p<0.0001$ ），失拟性检验（ $p=0.6034>>0.05$ ），表明模型的失拟性不显著。一次项 $X_1$ （ $p<0.0001$ ）、 $X_2$ （ $p=0.0041$ ），极显著；二次项 $X_1^2$ （ $p=0.0001$ ）、 $X_2^2$ （ $p=0.0005$ ），极显著；交互项 $X_1X_2$ （ $p=0.0014<0.01$ ），辐照剂量和束流能量之间的交互作用影响是显著的。采用 SPSS10.0 统计分析软件对试验值与预测值之间进行配对的 T 检验，结果为： $t$  值为 1.157，双边检验  $sig=0.273>0.05$ ，说明两组数据之间在统计水平上不存在显著性差异，该模型能准确地模拟电子束辐照对冷却肉的杀菌试验。对辐照杀菌效果影响因素的显著性次序为：束流能量>交互作用>辐照剂量。束流能量在杀菌过程中发挥最主要的作用。

2.1.2 杀菌效果数学模型的响应曲面分析

由图 1a 可见，在束流能量编码值为 -0.5 以上时，提

高辐照剂量则杀菌效果显著;当辐照剂量编码值在 0.5 以上时,随着束流能量的增加,菌落总数明显下降。当束流能量和辐照剂量两者的编码值都在 0 以上时,由辐照剂量增加引起的菌落总数下降幅度,大于相同单位电子束能量增加引起的下降幅度,说明当束流能量大于 2.8 MeV,辐照剂量大于 2.75 kGy 时,辐照剂量在杀菌效

果中起更主要作用。由图 1b 等高线上可以看出,在等高线 3.6 包括的扇形区域,菌落总数下降了 2 个对数单位,此时辐照剂量为 3.09~3.63 kGy,束流能量为 2.37~3.51 MeV,在该区域内随着辐照剂量和束流能量的逐渐增加,菌落总数逐渐下降,杀菌效果显著。

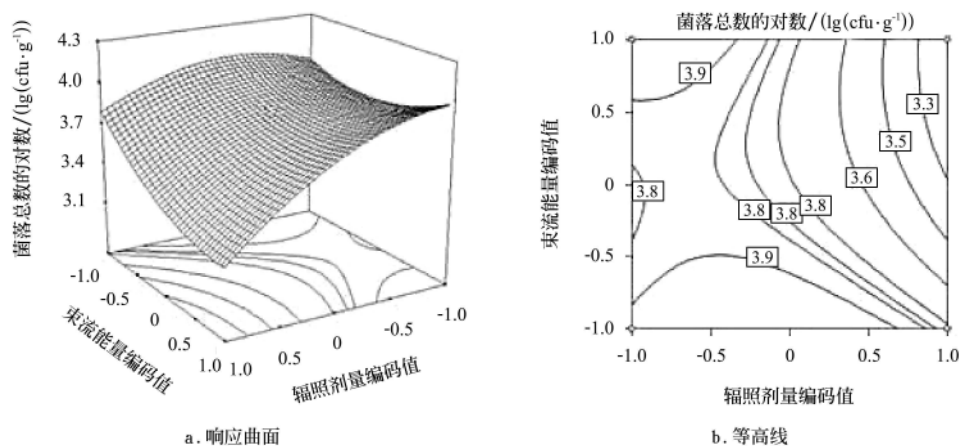


图 1 电子束辐照对冷却肉杀菌效果模型的响应曲面和等高线

Fig.1 Response surface and contour of model of electron beam radiation on sterilization of chilled pork

## 2.2 电子束辐照对冷却肉色泽的影响

### 2.2.1 色泽数学模型的建立与显著性检验

以束流能量和辐照剂量为  $X_1$ 、 $X_2$ ,以红度值  $a^*$  为  $Y_2$ ,亮度值  $L^*$  为  $Y_3$ ,电子束辐照对冷却肉色泽影响的试验结果见表 2。

利用 Design Expert 软件对表 2 试验数据进行回归拟合,获得二元二次回归模型方程分别为

$$Y_2 = 88.48 + 4.57X_1 + 8.27X_2 + 14.64X_1^2 + 13.28X_2^2 \\ (R^2 = 0.9737)$$

模型中的参数为编码值。模型显著性检验 ( $p < 0.0001$ ),失拟性检验 ( $p = 0.2308 > 0.05$ ),表明模型的失拟性不显著。一次项  $X_1$  ( $p < 0.0001$ )、 $X_2$  ( $p = 0.0041$ ),极显著;二次项  $X_1^2$  ( $p < 0.0001$ )、 $X_2^2$  ( $p < 0.0001$ ),极显著。

$$Y_3 = -20.11 - 1.03X_1 - 3.35X_2 - 4.19X_1^2 - 3.36X_2^2 (R^2 = 0.9632)$$

模型中的参数为编码值。模型 ( $p < 0.0001$ ),失拟性检验 ( $p = 0.1523 > 0.05$ );一次项  $X_2$  ( $p = 0.0349$ )显著;一次项  $X_1$  ( $p < 0.0001$ )、二次项  $X_1^2$  ( $p < 0.0001$ )和  $X_2^2$  ( $p < 0.0001$ ),极显著。表明上述两个模型能够准确地反映辐照对冷却肉色泽的影响。

### 2.2.2 色泽数学模型的响应曲面分析

由图 2 可知,响应面上的红度值有最小值,令偏微分方程  $\partial y_2 / \partial x_1 = 0$ ;  $\partial y_2 / \partial x_2 = 0$ ,则解方程得辐照剂量为 2.38 kGy,束流能量为 2.64 MeV,此时红度值  $a^*$  的最小值为 83.55;在此辐照参数下,冷却肉的红度与对照的红度值 (74) 最接近。由软件计算可得,在红度值为 89 的圆形区域内,束流能量范围为 2.28~2.91 MeV,辐照剂量为 2.24~2.99 kGy。

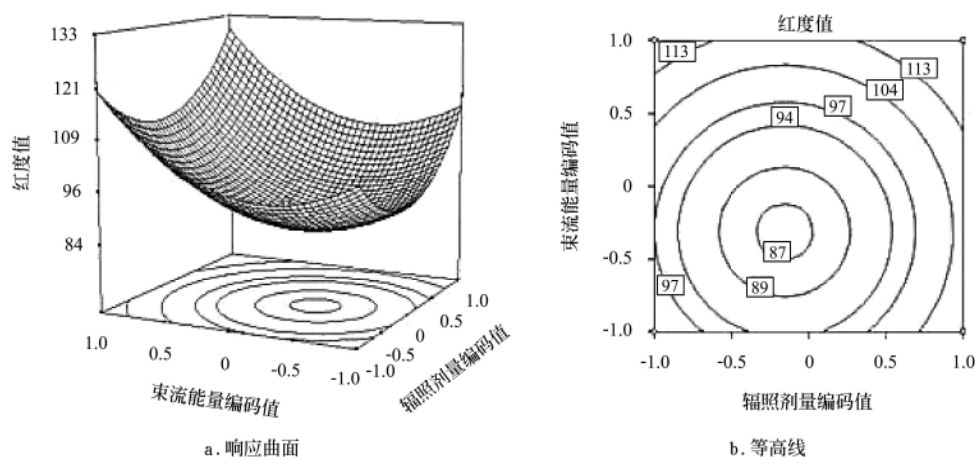


图 2 电子束辐照对冷却肉红度影响模型的响应面和等高线

Fig.2 Response surface and contour of model of electron beam radiation on redness value of chilled pork

如果辐照参数偏离这个圆形区域，肉的红度值将会上升。所以在生产中，为了获得理想的感官指标，最大限度地保持肉的原有红度，辐照参数设定应尽量在此区域内设定。

由图 3a 可知，响应面上的亮度值有最大值。令偏微分方程 $\partial y_3/\partial x_1=0$ ； $\partial y_3/\partial x_2=0$ ，则解方程得辐照剂量为

2.67 kGy，束流能量为 2.55 MeV，此时亮度值  $L^*$  最大值为-18.21。由图 3b 的模型的等高线图上可以看出，亮度为-20 的圆形区域内的束流能量范围为 2.09~2.80 MeV，辐照剂量范围为 2.05~2.92 kGy，在生产实际中，为了使肉的亮度达到最优指标，辐照的参数应在此区域设定。

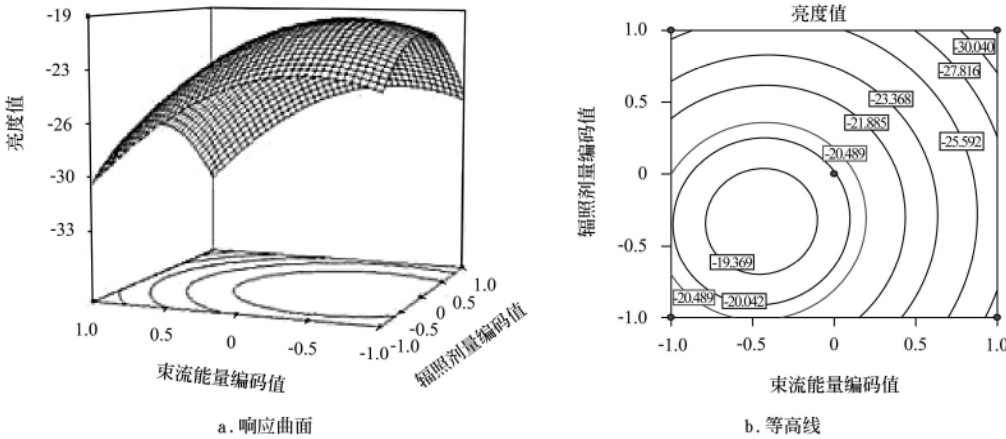


图 3 电子束辐照对冷却肉亮度影响模型的响应面和等高线  
Fig.3 Response surface and contour of model of electron beam radiation on lightness value of chilled pork

2.3 最佳工艺参数的确定及验证

在本研究中优化电子束对冷却肉辐照的最佳工艺参数的原则是以杀菌效果为最主要的考核指标，感官指标色泽（包括红度和亮度）的变化为参考指标，在最大限度不影响色泽的前提下达到最理想的杀菌效果。将红度、亮度、菌落总数 3 指标的参数范围取交集，束流能量为 2.37~2.80 MeV，在此范围内，束流能量对冷却肉的感官色泽影响较小，但束流能量越大，杀菌效果越好，所以最佳束流能量为 2.80 MeV；红度和亮度两指标的辐照剂量范围为 2.24~2.99 kGy，但此参数范围不能满足理想的杀菌效果的剂量要求（3.09~3.63 kGy），在尽可能减少电子束辐照对冷却肉感官不良影响的前提下，辐照剂量选为 3.09 kGy。将设备参数设定为优化的参数条件进行验证试验，样品经过辐照后，与对照样品一起置 4℃ 条件下进行贮藏，每隔 1 周检测 1 次菌落总数、红度和亮度值。经过最佳工艺辐照后的样品，1 周后肉的颜色鲜红，微生物指标正常；但对照样品已经变成暗红色，失去光泽，

气味正常。2 周后，处理样品仍然保持鲜红，气味正常；对照样品颜色为暗紫色，并具有轻微的酸臭味。经过 3 周后，辐照样品发生明显变化，颜色变得暗红，失去光泽，但菌落总数仍低于 10<sup>6</sup> cfu/g，而对照样品颜色变成棕褐色，已发生严重腐败。综合以上数据可知，经过最佳工艺辐照后的冷却肉保质期可达 3 周。

3 讨 论

由本研究结果可见，采用较低电子束辐照剂量对冷却肉进行辐照，在最大限度不影响其感官品质的情况下，能达到良好的杀菌效果。在辐照剂量不变，仅降低束流能量的情况下，对冷却肉的杀菌效果并没有显著减弱，但能够降低对感官指标和品质的不良影响。本研究还发现，如果提高辐照剂量或束流能量，则杀菌效果会明显提高，但对感官指标如色泽、弹性等有不良影响，甚至产生具有臭味和焦糊味的所谓的辐照味。Terrance 指出，降低电子束的能量，不利于包装袋内臭氧的生成，对冷却肉红度值和亮度值的影响较小<sup>[16]</sup>。Zhu M.J.等采用添加乳酸盐和安息香酸盐的方法来减小电子束辐照对火鸡胸肉色泽和品质的影响，发现添加乳酸盐的试验组对肉的色泽有很好的保护作用<sup>[17]</sup>，但添加乳酸盐会使冷却肉的风味发生变化，降低肉的食用品质和商品价值。Fielding L.M.等研究发现，在不同 pH 值条件下，电子束辐照对大肠杆菌的灭活过程中，辐照剂量对大肠杆菌的杀灭效果占主导地位<sup>[18]</sup>，但仍会对冷却肉产生轻微的辐照味。本研究是以杀菌效果和色泽变化为指标优化的电子束对冷却肉的辐照工艺参数。在此基础上还将进一步研究辐照参数的变化与肉的保水性、弹性以及风味变化之间的关系，揭示辐照味和色泽变化的机理，为电子束

表 3 最佳工艺条件下冷却肉样品在贮存期间菌落总数及色泽的变化

Table 3 Changes of colony form unit and color of chilled pork during storage under the condition of optimal process

贮藏时间/ d	对照			处理		
	红度	亮度	菌落总数的对数/ (lg(cfu · g <sup>-1</sup> ))	红度	亮度	菌落总数的对数/ (lg(cfu · g <sup>-1</sup> ))
0	78	-16	5.63	91	-21	3.84
7	25	-41	6.12	88	-44	4.01
14	16	-63	7.81	73	-47	4.60
21	12	-78	8.95	62	-63	5.71
28	11	-82	8.82	45	-71	7.82

辐照应用于冷却肉生产提供技术支持。

#### 4 结 论

1) 通过响应面法 (RSM) 建立了电子束辐照对冷却猪肉杀菌的数学模型, 分析出杀菌效果的显著性影响次序为束流能量 > 交互作用 > 辐照剂量; 菌落总数下降 2 个对数单位的辐照剂量范围为 3.09~3.63 kGy, 束流能量范围为 2.37~3.51 MeV, 在这两个参数范围内取值, 辐照剂量或束流能量越大, 杀菌效果越显著。

2) 在辐照剂量为 2.38 kGy, 束流能量为 2.64 MeV 时, 红度值  $a^*$  最小; 在束流能量 2.28~2.91 MeV 和辐照剂量 2.24~2.99 kGy 的参数范围时, 电子束辐照能更好地保持肉的红度。

3) 在辐照剂量为 2.67 kGy, 束流能量为 2.55 MeV 时, 亮度值  $L^*$  最大值为 -18.21; 在束流能量范围 2.09~2.80 MeV, 剂量范围 2.05~2.92 kGy 时, 肉的亮度不会发生明显的变化。

4) 电子束辐照对冷却猪肉既达到杀菌保鲜效果, 又最大限度不影响感官色泽, 最优的电子束辐照工艺参数为: 束流能量为 2.80 MeV, 辐照剂量为 3.09 kGy。经过最佳工艺条件辐照后的样品可以贮藏 3 周, 比对照延长 2 周。

#### [参 考 文 献]

- [1] Whangkey. Effect of different conveyer speed of electron beam irradiation on the oxidative and microbiological stability of ground pork during refrigeration[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2003, 23(1): 50—55.
- [2] Poop W B, Wong P Y Y, Dubeski P, et al. Application of electron beam irradiation pasteurization of ground beef from steers fed vitamin e fortified diets: microbial and chemical effects[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003, 83(6): 542—549.
- [3] Duong D Q, Crandall P G, Pohlman F W, et al. Improving ground beef safety and stabilizing color during irradiation using antioxidants, reductants or TSP[J]. Meat Science, 2008, 78(4): 359—368.
- [4] Chun H H, Kim J Y, Lee B D, et al. Effect of UV-C irradiation on the inactivation of inoculated pathogens and quality of chicken breasts during storage[J]. Food Control, 2010, 21(3): 276—280.
- [5] Luchsinger S E, Kropf D H, Zepeda C M G, et al. Color and oxidative ran- cidity of gamma and electron beam irradiated boneless pork chops[J]. Food Science, 1996, 61(5): 1000—1005.
- [6] Zhu J, Lee E J, Mendonca A, et al. Effect of irradiation on the quality of turkey ham during storage[J]. J of Pork Science, 2003, 66(1): 63—68.
- [7] Zhao P, Zhao T, Doyle M P, et al. Development of a model for evaluation of microbial cross-contamination in the kitchen[J]. J of Food Protection, 1996, 59(5): 493—500.
- [8] Lewis S J, Velasquez A, Cuppett S L, et al. Effect of electron beam irradiation on poultry pork safety and quality[J]. J of Poultry Science, 2002, 8(6): 896—903.
- [9] Romero M G, Mendonca A F, Ahn D U, et al. Influence of dietary vitamin E on behavior of *Listeria monocytogenes* and color stability in ground turkey pork following electron beam irradiation[J]. J of food protection, 2005, 68(6): 1159—1164.
- [10] Rababah T, Hettlarachchy 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]. J of Poultry Science, 2006, 85(6): 1107—1113.
- [11] 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 Lizhen, Nan Qingxian, Dai Ruitong. Hanges in physicochemical and sensory characteristics of vacuum-package chilled pork irradiated at low-dose gamma ray[J]. Transactions of CSAE, 2003, 19(4): 184—187. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙志明, 史建君, 赵小俊. 红曲的  $\gamma$  射线辐照灭菌研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 163—165.  
Sun Zhiming, Shi Jianjun, Zhao Xiaojun. Sterilization and decontamination of monascorubin powder by  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray irrigation[J]. Transactions of CSAE, 2005, 21(5): 163—165. (in Chinese with English abstract)
- [13] 卫生部令第 47 号, 辐照食品卫生管理办法[Z].
- [14] GB/T 18524—2001, 食品辐照通用技术要求[S].
- [15] GB 4789.2—2003, 食品卫生微生物学检验—菌落总数测定[S].
- [16] Arthur T M, Wheeler T L, Shackelfor, et al. Effects of low-dose, low-penetration electron beam irradiation of chilled beef carcass surface cuts on *escherichia coli* O157:H7 and meat quality[J]. J of Food Protection, 2005, 68(4): 666—672.
- [17] Zhu M J, Mendonca A, Min B, et al. Effects of electron beam irradiation and antimicrobials on the volatiles, color, and texture of ready-to-eat turkey breast roll[J]. J of Food Science, 2004, 69(5): 382—387.
- [18] Fielding L M, Cook P E, Grandison A S, et al. The effect of electron beam irradiation and modified pH on the survival and recovery of *Escherichia coli*[J]. J of Applied Bacteriology, 1994, 76 (4): 412—416.

## Process optimization of electron beam radiation on chilled pork

Bai Yanhong<sup>1</sup>, Zhao Dianbo<sup>1</sup>, Mao Duobin<sup>1</sup>, Jia Chunxiao<sup>2</sup>, Qian Xuemei<sup>3</sup>, Yang Gongming<sup>1,4\*</sup>

(1. Food Engineering and Biotechnology College, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Material and Chemical Engineering College, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

3. The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China;

4. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Effects of electron beam radiation on sterilization and color of chilled pork (14–15 cm in length, 7–8 cm in breadth, 2–2.5 cm in height) were studied by using response surface analysis through taking electron beam energy and dose as factors, colony form unit, value of redness, and value of lightness as responses. The results were as follows: There was an interaction between electron beam energy and dose, but electron beam energy played a leading role in sterilization. When dose ranged from 3.09 to 3.63 kGy and electron beam energy ranged from 2.37 to 3.51 MeV, the colony form unit would drop 2 logarithm units. The value of redness was minimum value when dose was 2.38 kGy and electron beam energy was 2.64 MeV. The value of redness was close to the control when the dose ranged from 2.24 to 2.99 kGy and the electron beam energy ranged from 2.28 to 2.91 MeV. The value of lightness was maximum and closed to the control as dose was 2.67 kGy and electron beam energy was 2.55 MeV. The value of lightness would become more acceptable when the dose ranged from 2.05 to 2.92 kGy and electron beam energy ranged from 2.09 to 2.8 MeV. The results showed that the optimal parameters of electron beam radiation on chilled pork were 2.8 MeV and 3.09 kGy. This study would provide the technical basis for application of electron beam radiation on pork industry.

**Key words:** electron beams, radiation, sterilization, color, meats, chilled pork