

电子束辐照对烧卖微生物生长模型及货架期的影响

颜伟强¹, 岳玲¹, 李华平³, 郑琦¹, 王海宏¹,
戚文元¹, 陈志军¹, 包英姿², 孔秋莲^{*1}

(1. 上海市农业科学院 作物所, 上海 201106; 2. 上海束能辐照技术有限公司, 上海 201401; 3. 淮安市食品药品检验所, 江苏 淮安)

摘要: 为解决传统食品烧卖产业化生产中因微生物滋生而导致的保质期短的问题, 作者以预制生烧卖为试材, 研究了不同贮藏温度下烧卖微生物生长规律及过氧化值的变化。结果表明, 电子束辐照能够有效降低烧卖微生物数量, 延长烧卖保质期, 但较高剂量处理会促进脂质氧化。6~8 kGy 剂量电子束辐照对脂质氧化影响较小, 30 ℃贮藏 3 d 时, 辐照烧卖的过氧化值与未辐照产品无显著性差异 ($P>0.05$)。4 ℃下冷藏时, 6~8 kGy 剂量电子束辐照烧卖的保质期可达 30 d, 较未辐照产品延长 20 d。依据不同贮藏温度下的菌落总数、霉菌和酵母菌的变化, 分别建立了相应的 Gompertz 微生物生长模型, 模型的相关系数均大于 0.95, 能够有效描述辐照烧卖贮藏期间微生物动态变化, 可预测不同贮藏时间内的微生物生长水平。

关键词: 电子束辐照; 烧卖; 微生物; Gompertz 模型; 过氧化值

中图分类号: TS 205.9 文章编号: 1673-1689(2023)11-0074-07 DOI: 10.12441/spyswjs.20210929003

Study on Microbial Growth Model and Shelf-Life of Shao-Mai during Electron Beam Irradiation

YAN Weiqiang¹, YEU ling¹, LI Huaping³, ZHENG Qi¹, WANG Haihong¹, QI Wenyuan¹,
CHEN Zhijun¹, BAO Yingzi², KONG Qiulian^{*1}

(1. Grop Institute, Shanghai Academy of Agriculture Science, Shanghai 201106, China; 2. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China; 3. Huai'an Institute for Food and Drug, Huai'an 223300, China)

Abstract: To address the issue of short shelf life due to microbial proliferation in the industrialized production of a traditional food Shao-Mai, the pre-made and unsteamed Shao-Mai was treated with electron beam irradiation at different doses. The growth patterns of microorganisms and changes in peroxide values in irradiated Shao-Mai under different storage temperatures were studied. The results showed that electron beam irradiation effectively reduced the microbial count in Shao-Mai and prolonged the shelf life. However, higher doses of irradiation promoted lipid oxidation. Irradiation doses of 6~8 kGy irradiation showed no promoting effect on lipid oxidation, and the irradiated

收稿日期: 2021-09-29 修回日期: 2021-11-08

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字 2016 第 6-3-4 号); 上海市工程技术研究中心项目(19DZ2251600)。

作者简介: 颜伟强(1974—), 男, 博士, 主要从事农产品深加工研究。E-mail: webweifree@163.com

* 通信作者: 孔秋莲(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要从事农产品辐照保鲜加工方面的研究。E-mail: qiuliankong@yahoo.com

Shao-Mai exhibited no significant difference in peroxide value compared to non-irradiated products ($P>0.05$) after 3 days of storage at 30 °C. When refrigerated at 4 °C, Shao-Mai irradiated at dose of 6~8 kGy had a shelf life of up to 30 days, which was 20 days longer compared to non-irradiated products. According to the changes of total bacterial count and moulds and yeasts under different storage temperatures, the corresponding Gompertz microbial growth models were established respectively. The correlation coefficients of the models were all greater than 0.95, effectively describing the dynamic changes in microbial growth of irradiated Shao-Mai during storage and predicting the microbial level over different storage times.

Keywords: electron beam irradiation, Shao-Mai, microorganisms, Gompertz model, peroxide value

烧卖在中国历史悠久,传统手工的烧卖制作一般是和面制皮、馅料制作和包馅子,其中面皮和馅料是制作是决定烧卖风味的关键,面皮和馅料做成上不封死的细褶儿形状,蒸熟后食用^[1]。随着生活节奏的加快,传统美食烧卖在消费市场中基本是预制产品为主,购买后通过简单蒸煮即可食用。烧卖制作所选用的原料较多,营养丰富,因此产品若在加工或贮藏过程中控制不当,会出现微生物快速生长繁殖,容易诱发食品安全问题^[2],因此必须严格控制产品加工过程的卫生。

在实际生产中,杀灭食品中微生物的技术通常可分热力灭菌与非热力灭菌,由于热力灭菌对产品的色香味影响较大^[3],而非热力灭菌对食品色香味及营养物质影响相对较小。辐照技术是目前最为常用的非热灭菌技术之一,其突出优点是辐照可穿透被辐照产品包装物,灭菌效果显著^[4]。近年来高能加速器辐照以其灭菌速率高,装置安全可靠,综合性能高,在实际生产中应用越来越广泛^[5]。在传统的烧卖工业化生产中,产品中微生物生长与繁殖直接影响产品货架期。作者通过研究电子束辐照后的烧卖在不同贮藏条件下的微生物变化及生长模型,可以预估辐照后烧卖产品的贮藏期限,保证食用安全。现有的关于食品微生物生长模型的研究较多,如李飞燕研究贮藏过程中冷却牛肉微生物模型来预测冷却牛肉的微生物污染情况^[6],樊振江研究鲜切莲藕微生物模型用于预测产品的货架寿命^[7],张宏伟研究低温储存期间原料乳微生物预测模型用于预测产品品质安全贮藏时间等^[8]。常用微生物生长预测模型主要有 Gompertz、Logistic、Richards 等^[9-10],由于 Gompertz 模型最能体现微生物生长特点,因此该模型是目前研究中最为常用的方法^[11]。以市购烧卖

为研究对象,研究不同电子束辐照剂量、贮藏条件等对烧卖的微生物变化、微生物生长模型和产品在贮藏过程主要品质指标(过氧化值)的变化,初步建立电子束辐照烧卖微生物生长模型,为预测产品贮藏期提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

烧卖:上海清美绿色食品(集团)有限公司;平板计数琼脂、孟加拉红等培养基:均购自北京陆桥技术股份有限公司;压力蒸汽灭菌器 LDZX-75KBS:上海申安;生物安全柜 SHSN-W1-02-201S:赛默飞世尔科技公司;电子天平(精度 0.01 g):赛多利斯科学仪器;ZQZY-70BS 振荡培养箱:上海知楚仪器。

1.2 辐照处理

清华同方威视高能电子加速辐照装置,电子束能量 10 MeV,功率 20 kW,烧卖装入 PE 自封袋中,辐照剂量设定 6、8、10 kGy,每个剂量水平设置 3 次重复。

1.3 实验方法

1.3.1 微生物测定 本实验中涉及微生物检测项目如菌落总数、霉菌和酵母菌、金黄色葡萄球菌、副溶血性弧菌均采用现行的 GB 4789 中的对应标准。

1.3.2 过氧化值测定 采用沸程为 30~60 °C 石油醚提取烧卖中脂肪,每次取样量为 30 g,加入 5 倍取样量的石油醚(mL),摇晃 60 s,确保所取样品完全浸泡在石油醚中,在室温避光处浸泡 12 h 取出,摇晃后将石油醚与样品通过无水 Na₂SO₄ 过滤,收集到的滤液置于 60 °C 恒温水浴中挥发石油醚,测定参照标准 GB/T 5009.37 中滴定法进行^[12]。

1.3.3 微生物生长模型建立 采用 Gompertz 模型对辐照后烧卖菌落总数、霉菌和酵母菌落生长情况进行拟合^[13-14],即通过实验测得不同贮藏温度下的微生物数量与其对应的贮藏时间进行拟合处理,模型方程为:

$$\lg N=a+c\exp(-\exp(-bd))$$

式中: N 为储藏时间为 t 时的微生物数量,CFU/g; a 为初始菌落总数含菌量的对数值, \lg (CFU/g); b 为时间为 m 时的相对最大比生长速率, h^{-1} ; d 为储藏时间 t 与达到相对最大生长速率所需要的时间 m 的差。

1.4 统计分析

每个处理平行检测 3 次,数据分析与图像处理分别用 SPSS 和 Origin 软件。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照处理对烧卖微生物的影响

采用 6.0 kGy 和 8.0 kGy 剂量对烧卖进行电子束辐照处理,辐照后分别于 30 ℃和 4 ℃恒温条件下贮藏,贮藏过程中产品菌落总数、霉菌和酵母菌变

化情况见表 1~2。未经辐照灭菌处理烧卖的菌落总数、霉菌和酵母菌初始含菌量较高。可以看出,采用 6.0、8.0 kGy 电子辐照剂量对烧卖具有很好灭菌效果,产品辐照后的初期一般未检出微生物,随着贮藏时间的增加,微生物数量迅速增加,在贮藏温度为 30 ℃和 4 ℃条件下,当贮藏时间达 20 h 和 30 d 后,微生物出现迅速生长繁殖趋势。这是因为产品经电子束辐照后,直接或间接破坏产品中微生物的核糖核酸、蛋白质和酶等生理活性物质,从而杀灭了微生物或抑制微生物正常代谢功能,所以辐照之后的产品在初始阶段未检出或检出少量的微生物。本研究采用 6~8 kGy 的辐照剂量,该范围辐照剂量无法完全杀灭烧卖中所有微生物,即残留的微生物正常代谢功能受到破坏或抑制,但由于产品含水率较高即水分活度高,这些受辐照破坏的部分微生物生理功能会重新自我修复,经过一定时间修复后部分微生物重新恢复正常生长与繁殖,即在合适条件下,其生长曲线恢复正常特征^[15-16]。比较表 1 和表 2 中不同温度下产品微生物变化,显然采用低温贮藏能够有效抑制辐照后烧卖中微生物生长。

表 1 不同辐照剂量烧卖在 30 ℃条件下微生物数量

Table 1 Effect of irradiation doses on microorganism of Shao-Mai stored under 30 ℃

贮藏时间/h	菌落总数/(CFU/g)		霉菌和酵母菌数量/(CFU/g)	
	6 kGy	8 kGy	6 kGy	8 kGy
0	<10	<10	<10	<10
3	10	<10	<10	<10
6	1.10×10^2	10	10	<10
9	90	10	50	10
12	4.75×10^3	20	1.20×10^2	40
15	1.26×10^4	40	2.10×10^2	70
21	5.60×10^5	3.80×10^3	7.30×10^2	1.20×10^2
24	6.60×10^6	1.60×10^6	8.00×10^2	1.60×10^2
30	1.58×10^7	1.00×10^7	9.60×10^2	2.10×10^2
36	7.94×10^7	1.26×10^7	1.10×10^3	2.80×10^2
42	1.26×10^8	2.00×10^7	2.69×10^3	5.80×10^2
48	2.30×10^8	8.70×10^7	1.58×10^4	6.30×10^2
72			3.98×10^5	2.00×10^4
96			3.16×10^6	1.58×10^5
120			6.31×10^6	2.00×10^5
144			5.01×10^6	7.94×10^5
168			7.94×10^6	1.58×10^6

表 2 不同辐照剂量烧卖在 4 ℃条件下微生物数量

Table 2 Effect of irradiation doses on microorganism of Shao-Mai stored under 4 ℃

贮藏时间/h	菌落总数/(CFU/g)		霉菌和酵母菌总数/(CFU/g)	
	6 kGy	8 kGy	6 kGy	8 kGy
0	<10	<10	<10	<10
5	<10	<10	<10	<10
10	10	<10	<10	<10
15	10	10	<10	<10
20	102	10	10	<10
23	1.70×10 ²	10	10	10
28	5.00×10 ³	6.30×10 ²	40	20
30	6.60×10 ⁵	1.70×10 ⁵	2.00×10 ³	1.20×10 ³
35	1.58×10 ⁶	2.50×10 ⁵	3.95×10 ³	1.60×10 ³
40	2.77×10 ⁶	4.40×10 ⁵	1.25×10 ⁴	2.00×10 ³
43	3.98×10 ⁶	3.15×10 ⁵	5.20×10 ³	3.40×10 ³
45	4.51×10 ⁶	4.75×10 ⁵	3.15×10 ⁴	7.94×10 ³
50	3.16×10 ⁶	4.95×10 ⁵	5.00×10 ⁴	1.58×10 ⁴

表 3 是不同电子束辐照剂量对产品致病菌的灭菌效果。结果显示,采用 6.0 kGy 和 8.0 kGy 电子束辐照剂量对产品中致病菌(金黄色葡萄球菌和副

溶血性弧菌)有很强的灭菌效果,在整个实验观察期内,辐照后产品均未检出致病菌。

表 3 不同辐照剂量烧卖在 30 ℃条件下致病菌生长情况

Table 3 Effect of irradiation doses on pathogenic bacteria of Shao-Mai stored under 30 ℃

贮藏时间/h	金黄色葡萄球菌总数/(CFU/g)			副溶血性弧菌总数/(CFU/g)		
	0 kGy	6 kGy	8 kGy	0 kGy	6 kGy	8 kGy
0	3.1×10 ⁴	<10	<10	5.3×10 ⁴	<10	<10
24	1.3×10 ⁶	<10	<10	1.7×10 ⁵	<10	<10
72	7.8×10 ⁷	<10	<10	6.3×10 ⁷	<10	<10
168	8.4×10 ⁹	<10	<10	3.7×10 ⁹	<10	<10

2.2 电子束辐照烧卖微生物生长模型的建立

作者研究了经电子束辐照处理后烧卖在不同贮藏条件下的微生物生长情况,其微生物检测结果采用 Origin8.0 软件处理,得到不同电子束辐照烧卖微生物 Gomperz 生长模型。在 30 ℃贮藏条件下,辐照后的产品在相同条件下菌落总数的生长速度明显高于霉菌和酵母菌的生长速度,见图 1~2。在较低温度(4 ℃)下贮藏辐照后产品,微生物在 30 d 内可以控制在一个较低水平。不同辐照处理剂量产品其微生物生长呈 S 状曲线,采用高剂量辐照(8 kGy)处理能够有效抑制产品的微生物生长繁殖速率,见图 3~4。

表 4 为电子束辐照烧卖微生物 Gomperz 生长模型的参数。不同条件下微生物生长模型拟合方程

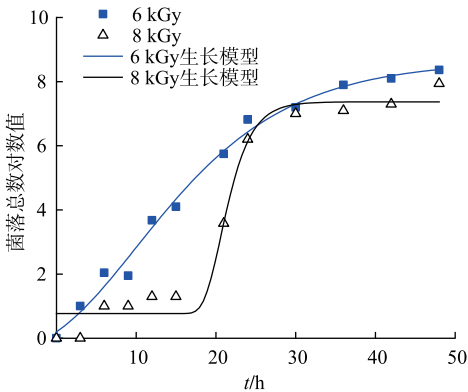


图 1 电子束辐照后烧卖在 30 ℃的菌落总数生长模型
Fig. 1 Growth model of total bacterial count in Shao-Mai under EB irradiation stored under 30 ℃

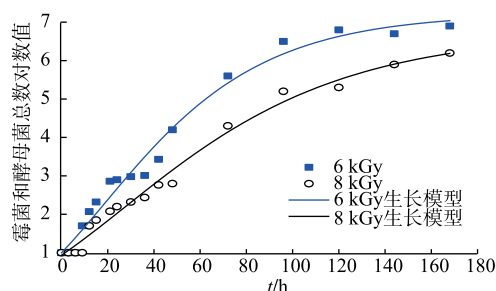


图2 电子束辐照后烧卖在 30 °C 的霉菌和酵母菌生长模型
Fig. 2 Growth model of total moulds and yeasts count in Shao-Mai under EB irradiation stored under 30 °C

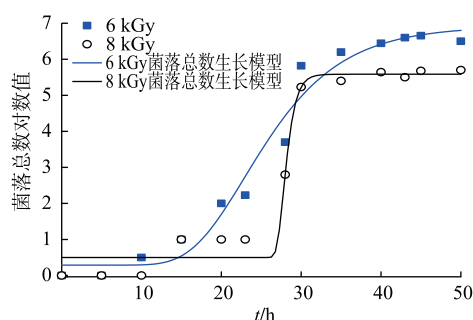


图3 电子束辐照后烧卖在 4 °C 的菌落总数生长模型
Fig. 3 Growth model of total bacterial count in Shao-Mai under EB irradiation stored under 4 °C

拟合度(R^2)均大于 0.95,同时各方程的 a 值(初始含菌情况)基本都接近于 0,这与辐照后产品微生物数量实际情况基本一致,说明 Gompertz 模型适用于电子束辐照后烧卖的微生物生长趋势,该模型曲线与相关肉品微生物生长模型基本一致^[17]。

2.3 电子束辐照对烧卖过氧化值(POV)的影响

不同贮藏条件下电子束辐照后烧卖的 POV 与贮藏时间的关系见图 5~6。结果显示,电子束辐照之后的产品过氧化值(POV)与未辐照产品的 POV 有

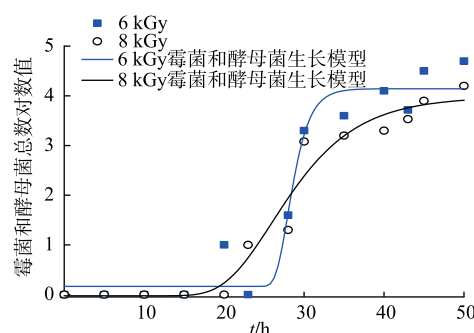


图4 电子束辐照后烧卖在 4 °C 的霉菌和酵母菌生长模型
Fig. 4 Growth model of total moulds and yeasts count in Shao-Mai under EB irradiation stored under 4 °C

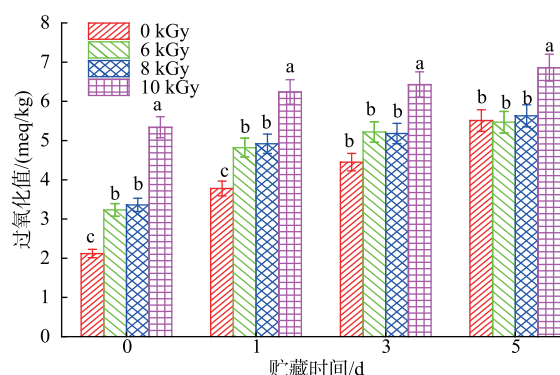
显著差异 ($P < 0.05$),POV 随辐照剂量增加而增加。辐照剂量为 10 kGy 时的 POV 达 5.51 meq/kg,而辐照剂量为 6 kGy 和 8 kGy 的 POV 差异并不显著($P > 0.05$)。在 30 °C 贮藏条件下,烧卖的 POV 均出现增加,未辐照产品 POV 变化显著高于辐照后产品,贮藏 5 d 后,未辐照产品与 6、8 kGy 辐照产品的 POV 差异并不显著($P > 0.05$);相对而言,在 4 °C 贮藏条件下,辐照后产品 POV 变化较为缓慢,而未辐照烧卖 POV 升高最明显,贮藏 30 d 的产品从最初 2.32 meq/kg 升至 9.43 meq/kg。6、8 kGy 辐照后产品在 30 d 贮藏期间,其 POV 差异并不显著($P > 0.05$),10 kGy 辐照后的产品在贮藏过程中 POV 升高,但相对缓慢。比较辐照后烧卖在 30 °C 和 4 °C 的 POV,说明辐照后烧卖应采用低温贮藏,能够有效减缓其脂质氧化的速度^[3]。

对于含脂质类食品而言,辐照后产品过氧化值是评价辐照产品质量的一个重要指标^[17]。大量研究表明,含脂质类物质的食品经辐照后其 POV 会出现不同程度增加,这是因为辐照产生的自由基诱发脂

表 4 电子束辐照后烧卖的微生物生长模型

Table 4 Growth model of Shao-Mai under EB irradiation

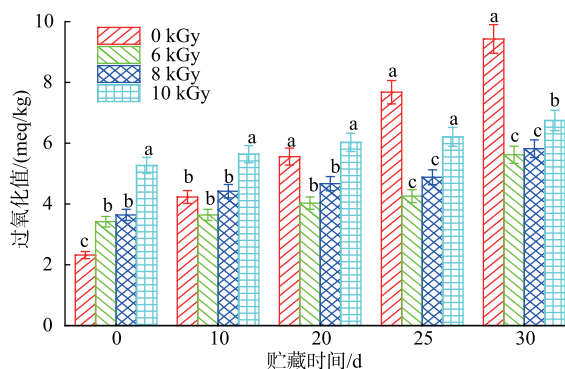
微生物	辐照剂量/kGy	贮藏温度/°C	Gompertz 模型				R^2
			a 值	b 值	c 值	m 值	
菌落总数	6	30	-0.543	0.092	9.196	10.046	0.988
	8	30	0.766	0.469	6.603	20.642	0.972
	6	4	0.288	0.149	6.630	22.936	0.968
	8	4	0.500	1.196	5.085	27.806	0.973
霉菌和酵母菌总数	6	30	-0.557	0.025	7.778	18.974	0.979
	8	30	-0.452	0.018	7.180	27.500	0.985
	6	4	0.166	0.663	3.977	27.994	0.951
	8	4	-0.024	0.169	4.003	25.988	0.953



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图5 贮藏温度 30 °C 时不同电子束辐照剂量对烧卖过氧化值的影响

Fig. 5 Effects of different irradiation doses on peroxide value of Shao-Mai at storage temperature of 30 °C



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图6 贮藏温度 4 °C 时不同电子束辐照剂量对烧卖过氧化值的影响

Fig. 6 Effects of different irradiation dose on peroxide value of Shao-Mai at storage temperature of 4 °C

肪的过氧化反应,且 POV 增加与辐照剂量成正相关^[18-19]。经 6、8 kGy 辐照后 POV 增加量相对较小,这是由于电子束处理时间短,自由基促使脂质氧化反应时间短,所以在电子束辐照结束时 POV 数值变化较小,因此其 POV 变化绝对值并不高。类似产品经⁶⁰Co γ 射线辐照后,其 POV 值增加量大,主要是由于

⁶⁰Co γ 辐照时间长(通常需要数小时),因此辐照过程中持续产生自由基诱导脂质氧化,导致过氧化值迅速升高。因此,高能电子束辐照高脂质类产品应结合低温贮藏方法,可以有效克服辐照后产品 POV 升高;在 4 °C 贮藏 20 d,未辐照产品 POV 与辐照产品 POV 逐渐趋于一致,这主要由于未辐照产品的微生物含量高,微生物生长代谢过程中会促使产品中脂肪氧化^[20],而辐照之后产品由于微生物数量少,其生长代谢能力相对较低,所以 POV 变化较小。未辐照烧卖在 20 d 后由于微生物生长繁殖达到稳定期,因此其 POV 显著升高并超过所有辐照处理产品,该变化趋势与前述微生物生长模型基本一致^[21]。

3 结语

研究电子束辐照对烧卖微生物生长及其过氧化值的影响,分析了电子束辐照对烧卖的微生物及其生长模型、脂质氧化的情况,通过建立 Gompertz 微生物生长模型,能有效地反映产品辐照后微生物生长情况。6~8 kGy 辐照剂量经 30 °C 贮藏 3 d 后,其过氧化值与未辐照产品无显著性差异 ($P > 0.05$)。不同贮藏温度对辐照后产品微生物生长繁殖速率影响大,电子束辐照后产品的微生物生长特点符合 Gompertz 模型。辐照产品贮藏于 4 °C 条件下,当电子束辐照剂量低于 8 kGy 时,对其过氧化值影响较小,辐照能够有效杀灭产品中微生物,延长了产品贮藏期,依据其微生物生长模型,产品的贮藏期可达 30 d。由于作者所在实验室采购的未灭菌的烧卖初始含菌量普遍较高,在贮藏过程中微生物迅速生长,产品货架期在 4 °C 贮藏低于 10 d。因此为了延长烧卖的货架期,必须快速降低产品的初始微生物数量。采用电子束辐照方式可以快速杀死产品中的微生物,且在货架期内其过氧化值无显著性差异,达到延长产品保质期的目的。

参考文献:

- [1] 王猛,赵瑞斌,石同瑶. 烧卖源流与技术传承:以内蒙古呼和浩特为例[J]. 农业考古,2019(1):187-191.
WANG M,ZHAO R B,SHI T Y. Research on the origin and traditional skills of Shao-Mai in Hohhot of inner Mongolia[J]. *Agricultural Archaeology*,2019(1):187-191. (in Chinese)
- [2] 刘芳,兰全学,李碧芳,等. 国内外即食食品微生物限量标准解析[J]. 食品与生物技术学报,2017,36(2):215-223.
LIU F,LAN Q X,LI B F,et al. Comparative analysis on domestic and international microbiological limits for ready-to-eat foods [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*,2017,36(2):215-223. (in Chinese)
- [3] 岳玲,孔秋莲,颜伟强,等. 电子束辐照对冷鲜鸡肉的杀菌效果[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(12):1319-1323.
YUE L,KONG Q L,YAN W Q,et al. Research on electron beam irradiation on sterilizing effects of refrigerated chicken[J].

- Journal of Food Science and Biotechnology**, 2018, 37(12):1319-1323. (in Chinese)
- [4] 张慇,刘倩. 国内外果蔬保鲜技术及其发展趋势[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(8):785-792.
ZHANG M, LIU Q. Study on present situation and development trends of fruit & vegetable preservation in the world[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2014, 33(8):785-792. (in Chinese)
- [5] 邓文敏,陈浩,裴颖,等. 高能电子加速器在食品辐照加工中的应用分析[J]. 核农学报, 2012, 26(6):919-923.
DENG W M, CHEN H, PEI Y, et al. The application analysis of high energy electron accelerator in food irradiation processing[J]. **Journal of Nuclear Agricultural Sciences**, 2012, 26(6):919-923. (in Chinese)
- [6] 李飞燕,张一敏,王秀江,等. 贮藏过程中冷却牛肉微生物模型的建立[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(7):220-224.
LI F Y, ZHANG Y M, WANG X J, et al. Predictive models of microbial organisms in chilled beef during storage[J]. **Food and Fermentation Industries**, 2011, 37(7):220-224. (in Chinese)
- [7] 樊振江,郝亚勤,张素君,等. 鲜切莲藕微生物模型的建立及货架寿命预测[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1):326-329.
FAN Z J, HAO Y Q, ZHANG S J, et al. Microorganism growth model foundation and shelf life prediction of fresh-cut lotus roots [J]. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, 2007, 23(1):326-329. (in Chinese)
- [8] 张宏伟,郑冬梅,孔保华,等. 低温储存期间原料乳微生物预测模型建立[J]. 食品工业科技, 2016, 37(11):122-125.
ZHANG H W, ZHENG D M, KONG B H, et al. Establishment of predicting model for raw milk at low temperature storage[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2016, 37(11):122-125. (in Chinese)
- [9] CASSARES M, SAKOTANI N L, KUNIGK L, et al. Effect of gamma irradiation on shelf life extension of fresh pasta [J]. **Radiation Physics and Chemistry**, 2020, 174:108940.
- [10] ALTILIA S, FOSCHINO R, GRASSI S, et al. Investigating the growth kinetics in sourdough microbial associations [J]. **Food Microbiology**, 2021, 99:103837.
- [11] AKKERMANS S, LOGIST F, VAN IMPE J F. Parameter estimations in predictive microbiology: statistically sound modelling of the microbial growth rate [J]. **Food Research International**, 2018, 106:1105-1113.
- [12] 王巍,李金龙,王丽静,等. 坚果类食品过氧化值测定的影响因素分析[J]. 食品科学, 2007, 28(10):484-486.
WANG W, LI J L, WANG L J, et al. Factors on determination of nuts POV values [J]. **Food Science**, 2007, 28(10):484-486. (in Chinese)
- [13] 刘芳. 低温改良气调包装半加工菜贮藏特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
- [14] 胡位歆. 新鲜水果货架期预测模型的构建[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [15] 戚文元,颜伟强,孔秋莲,等. 电子束辐照对即食凤爪品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(9):925-931.
QI W Y, YAN W Q, KONG Q L, et al. Effects of electron beam irradiation on quality for instant chicken feet [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2012, 31(9):925-931. (in Chinese)
- [16] JEONG S G, YANG J, PARK J H, et al. Gamma irradiation improves the microbiological safety and shelf-life of kimchi seasoning mixture [J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2020, 134:110144.
- [17] 张朝正,王建玲,华伯元,等. 宠物食品中沙门氏菌辐照模型的建立[J]. 中国酿造, 2011, 30(7):42-45.
ZHANG C Z, WANG J L, HUA B Y, et al. Establishment of *Salmonella* sp. in pet food irradiation model [J]. **China Brewing**, 2011, 30(7):42-45. (in Chinese)
- [18] KONG Q L, YAN W Q, YUE L, et al. Volatile compounds and odor traits of dry-cured ham (*Prosciutto crudo*) irradiated by electron beam and gamma rays [J]. **Radiation Physics and Chemistry**, 2017, 130:265-272.
- [19] 汪昌保,赵永富,王志东,等. 电子束和 γ 射线辐照对猪油脂肪氧化的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(10):1924-1930.
WANG C B, ZHAO Y F, WANG Z D, et al. Comparative effects of electron beam and gamma ray irradiation on lipid oxidation of lard [J]. **Journal of Nuclear Agricultural Sciences**, 2015, 29(10):1924-1930. (in Chinese)
- [20] 李成梁,靳国锋,马素敏,等. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21):271-278.
LI C L, JIN G F, MA S M, et al. Progress in understanding and controlling the detrimental effects of irradiation treatment on meat quality [J]. **Food Science**, 2016, 37(21):271-278. (in Chinese)
- [21] 吴宝森,孙玥晖,刘姝韵,等. 发酵肉制品中脂肪、蛋白质水解氧化与微生物的关系[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3):832-837.
WU B S, SUN Y H, LIU S Y, et al. Relationship between hydrolysis and oxidation of fat and protein with microorganisms in fermented meat products [J]. **Journal of Food Safety & Quality**, 2017, 8(3):832-837. (in Chinese)