

^{60}Co - γ 射线辐照协同包装材料对生鲜鸡肉贮藏期品质的影响

温晓梅*, 蓝碧锋, 吴俊师, 罗鹏宇, 梁淑敏

(广州辐锐高能技术有限公司, 广东省工业钴-60伽玛射线应用工程技术研究中心, 广东广州 511458)

摘要: 为延长生鲜鸡肉的贮藏期、保证其品质安全和拓宽流通范围提供理论指导, 该研究以生鲜鸡肉为研究对象, 通过测定汁液流失率、挥发性盐基氮 (Total Volatile Base Nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸 (Thiobarbituric Acid, TBA)、色差值及菌落总数等指标, 探讨不同辐照剂量: 0、2、4、6 kGy, 和不同包装材料: 聚乙烯 (PE)、复合尼龙 (PA/PE)、复合聚偏二氯乙烯 (PVDC/PE) 处理下的鸡肉在 4 °C 条件下贮藏期内品质变化情况。结果显示: 辐照能有效地杀灭鸡肉内微生物, 同时有效抑制微生物的生长; 但辐照处理后, 鸡肉的 TBA 值明显上升 ($P<0.05$), 且辐照引发脂质的氧化作用对鸡肉品质影响较大; 结合不同包装材料分析发现, PA/PE 包装组的鸡肉, 其贮藏期的品质表现较好, 辐照处理后 TBA 值变化较小, 各样品组的 TBA 值变化范围为 0~0.76 mg/kg; 且在贮藏期间变现出较好的色泽, 在贮藏期间 a^* 值有所上升, 可达 5.12 (4 kGy)。综合分析, 优选 PA/PE 包装结合 4 kGy 辐照剂量进行处理, 在 4 °C 贮藏条件下, 可保证生鲜鸡肉安全品质的同时, 将贮藏期延长至 18 d。

关键词: 生鲜鸡肉; 贮藏保鲜; 品质变化; 辐照; 包装材料

文章编号: 1673-9078(2024)01-158-172

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.1584

The Effect of ^{60}Co - γ -irradiation Assisted Packaging Materials on the Storage Quality of Fresh Chicken Meat

WEN Xiaomei*, LAN Bifeng, WU Junshi, LUO Pengyu, LIANG Shumin

(Guangzhou Furui High Energy Technology Co. Ltd., Guangdong Industrial ^{60}Co Gamma Ray Application Engineering Technology Research Center, Guangzhou 511458, China)

Abstract: To provide theoretical guidance for prolonging the storage period of fresh chicken meat, guaranteeing its quality safety and expanding the circulation area, fresh chicken meat was used as the research object in this study, the effects of different irradiation doses (0, 2, 4, 6 kGy) and packaging materials (PE, PA/PE, PVDC/PE) on the quality of fresh chicken meat during storage at 4 °C were studied, based on the measurements of the drip loss rate, TVB-N, TBA, color difference and total bacteria count. The results showed that irradiation could effectively kill the microorganisms in chicken meat and inhibit the growth of microorganisms. However, after irradiation, the TBA value increased significantly ($P<0.05$), and the lipid oxidation induced by irradiation had a great effect on the quality of chicken meat. The examinations on irradiation combined with different packaging materials showed that the quality of chicken meat in the PA/PE packaging group was better during storage, and after irradiation, the TBA value changed little, ranging from 0~0.76 mg/kg for individual sample

引文格式:

温晓梅, 蓝碧锋, 吴俊师, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照协同包装材料对生鲜鸡肉贮藏期品质的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 158-172.

WEN Xiaomei, LAN Bifeng, WU Junshi, et al. The effect of ^{60}Co - γ -irradiation assisted packaging materials on the storage quality of fresh chicken meat [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 158-172.

收稿日期: 2022-12-14

作者简介: 温晓梅 (1994-), 女, 硕士, 研究方向: 食品辐照加工, E-mail: 2111704031@e.gzhu.edu.cn

groups, and their colors were quite good during storage, with the a^* value increasing up to 5.12 (4 kGy). Taken together, PA/PE packaging combined with irradiation at a dose of 4 kGy was the optimal option to ensure the safety and quality of fresh chicken meat, and extend the storage period at 4 °C to 18 days.

Key words: fresh chicken; preservation and freshness; quality variation; irradiation; packaging materials

鸡肉在我国普遍食用，是主要的肉类蛋白质来源。但因其含丰富的蛋白质和高营养价值，被认为是微生物生长的潜在培养基^[1]。因此，如何在生产、加工、运输和贮藏的过程中控制鸡肉的微生物载量并保持其风味，对保障鸡肉的卫生安全和拓展鸡肉经济市场具有重要意义。

食品辐照保鲜技术，作为一种新型的绿色“非热”加工技术，具有安全性高、价格便宜、应用范围广、营养成分损失少和保持食品良好感官等特点^[2,3]。该技术被广泛研究和应用于提高肉类食品的品质和安全中，被认为是控制肉类和肉制品中致腐和致病微生物的最佳方法^[4]。国际原子能组织在食品辐照技术应用中提出，10 kGy 以下辐照的食品，没有毒理学上的危险，同时食品在营养学和生物学上也是安全的^[5]。目前我国也建立了相关标准 GB 14891.7-1997 辐照冷冻包装畜禽肉类卫生标准。但是，对于生鲜禽肉的辐照应用未建立相关规范。此外，辐照在杀灭微生物的同时，由于氧化还原环境的改变而会降低肉类的质量，特别在高剂量辐照条件下，会导致肉及肉制品的特性发生不良改变，如颜色变化和脂质过氧化等，进而可能会对消费产生负面影响^[6,7]。目前，如何控制辐照剂量达到减少或抑制微生物生长的同时，最大限度地降低该技术对肉品质负面影响，仍是需要解决的问题。此外，食品包装作为现代食品工业的最后一道工序，它既保护食品质量和卫生，同时也方便了食品运输。然而，不同材质的包装材料，其阻氧、阻光和隔水性能存在差异，进而会影响食品的保鲜效果。许多研究也表明，不同的包装材料对肉制品贮藏过程中的品质会造成不同的影响^[8,9]，且辐照会对塑料包装材料的光学、热学、力学性能及阻隔性等产生一定的影响^[10]。

本研究从辐照剂量的控制和包装材料的选择这两方面对生鲜鸡肉的保鲜进行研究探讨。通过测定贮藏期间内鸡肉的汁液流失率、pH 值、挥发性盐基氮 (TVB-N)、硫代巴比妥酸值 (TBA)、色差值和菌落总数等指标的变化情况，评价不同辐照剂量和包装材料对 4 °C 条件下贮藏期内鸡肉品质的影响，旨在为保障辐照生鲜鸡肉贮藏期的品质和建立辐照

鸡肉的工艺标准奠定基础。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

现宰活清远鸡：市售，每只去毛、去内脏后的质量约为 1 000 g。

包装袋：PE 平口袋，复合尼龙 (PA/PE) 平口袋：深圳市世博包装有限公司；PVDC/PE 平口袋：苏州加包装技术有限公司。

试剂与耗材：PCA 培养基、均质袋、一次性培养皿，广州环凯微生物有限公司；氯化镁、硼酸、氯化钠、0.1 mol/L 盐酸滴定液、硫代巴比妥酸 (TBA)、三氯乙酸等均为分析纯，购于上海麦克林生化科技股份有限公司。

WR-R10 色差仪，深圳市威福光电科技有限公司；PHS-25 型 pH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司；K9560 型全自动凯氏定氮仪，山东海能科学仪器有限公司；760CRT 双光束紫外可见分光光度计，上海精密科学仪器有限公司；SHP-250 型生化培养箱，广东环凯微生物科技有限公司；BSC-1804 II A2 生物安全柜，江苏安泰生物技术有限公司；YP103A 电子天平，上海浦春计量仪器有限公司；XT-400D 单室真空包装机，上海星田机械制造有限公司；29083-571 恒温振荡仪，美国 forma scientific。

1.2 实验方法

1.2.1 鸡肉的分装与贮藏

在无菌室内取整鸡鸡胸肉，并用蒸馏水冲淋；然后用不同包装材料（辐照灭菌后的 PE、PVDC/PE、PA/PE 平口袋，辐照剂量为 3 kGy）进行抽真空包装。

1.2.2 辐照处理

将包装好的样品送至广州辐锐高能技术有限公司进行钴-60 γ 射线辐照，放射源活度为：122.14 居里；设定辐照剂量梯度为 0（未辐照）、2、4、6 kGy，实际吸收剂量为：0（未辐照）、1.86、4.19、6.66 kGy；剂量率为：19.05 Gy/min；辐照处理结束后立即取样进行贮藏期第 0 天的分析，剩余样品置于 4 °C 冰箱冷藏保存，每隔 3 d 再取样检测。

1.2.3 感官评价

根据 GB 2707-2016《食品安全国家标准鲜(冻)畜、禽产品》中的感官要求规定,鸡肉的感官评价项目由色泽、气味和组织状态组成,根据表1的评价标准用9分分别进行表述。7~9表示良好,4~7表示肉质可接受,1~4表示变质。最终分别以色泽、气味、组织状态各得分的平均值评价样品整体情况。

表1 感官评分标准表

指标	感官描述	赋值
色泽	颜色呈淡红色/淡黄色,无变色,表面有光泽	7~9
	颜色沉闷,变深,表面略有光泽	4~7
	严重变色,由淡红色变棕褐色/颜色发白,无光泽	1~4
气味	淡鸡肉腥味,新鲜,无异味	7~9
	重鸡肉腥味,有一定异味	4~7
	重鸡肉腥味,有腐臭味,有强烈异味	1~4
组织状态	肉质紧密,富有弹性,少量液体,不黏手	7~9
	肉质一般,弹性一般,中等液体,一般黏手	4~7
	肉质松软,无弹性和韧性,大量液体,很黏手	1~4

1.2.4 汁液流失率的测定

参考朱迎春等^[11]的方法进行测定。称量包装前的鸡肉的质量,记为(W_1)。然后,在设定的贮藏期时间点取出样品,用无菌滤纸吸取鸡肉表面的汁液后,称鸡肉的质量,记为(W_2)。最后,根据公式(1)计算汁液损失率。

$$A = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A ——汁液损失率, %;

W_1 ——包装前鸡肉质量, g;

W_2 ——吸取表面汁液后鸡肉质量, g。

1.2.5 pH值的测定

参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》方法。取 10.00 g 的肉样放入烧杯,加入 80 mL 去离子水,浸渍 30 min 后过滤,取上清液,用 pH 计测定 pH 值。

1.2.6 TVB-N的测定

依据 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》方法中的第二法,稍作修改。取 10.00 g 搅碎后的肉,加入 80 mL 蒸馏水,浸渍 30 min,用中速滤纸过滤,保留滤液。取 5 mL 的滤液,移至蒸馏管中,加入 5 mL (10 g/L) 氧化

镁悬液,按照仪器要求测定。

1.2.7 TBA的测定

参照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》方法。

1.2.8 色度的测定

将鸡肉从包装袋取出,暴露在空气中 15 min 后切片 (3 cm×3 cm×3 cm)。采用色差仪,校正色度测试仪后,随机选择样品 3 个部位进行测定 L^* 、 a^* 值和 b^* 值。

1.2.9 菌落总数的测定

依据 GB 4789.2-2016《食品微生物学检验 菌落总数测定》的要求进行测定。

1.2.10 数据分析

在 Excel 进行数据的统计,数据数值均表示为平均值 ± 标准偏差;采用 GraphPad Prism 8.0 软件进行数据分析和制图。采用 SPSS 26.0 对实验数据进行显著性差异分析。

2 结果与讨论

2.1 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期感官分值的影响

肉类和肉类产品具有消费者高度期望的典型感官特性,因此感官评价在肉类贮藏品质评价中具有重要意义^[12]。根据表 2~4 所显示,不同包装材料的鸡肉随辐照剂量的处理情况变化不同。在贮藏期的第 0 天,PE、PVDC/PE 包装组的鸡肉,经过不同辐照剂量处理后,各感官指标变化不明显 ($P>0.05$);而 PA/PE 包装组的鸡肉,经辐照处理后在色泽方面表现出明显差异 ($P<0.05$),辐照明显影响了 PA/PE 包装组鸡肉的色泽,且色泽得分较高,该结果表明辐照有利于提高 PA/PE 包装组的色泽感官。关于辐照剂量对肉类感官评价的影响情况,雷英杰等^[13]对生鲜猪肉的电子束辐照处理保鲜研究中指出高剂量的辐照处理会影响生鲜肉感官。而在本研究中发现对于生鲜鸡肉,当辐照剂量为 6 kGy 时,在贮藏期第 0 天,其各感观分值无明显下降。从整体上看,各样组的感官分值在贮藏期间存在明显的变化 ($P<0.05$),但是辐照后的样品组,其综合感官得分高于未辐照样品组。如,在贮藏期第 6 天,未辐照 PE 包装组的色泽得分为 6.67,气味得分为 5.00,组织结构为 6.67;辐照组 2 kGy 的鸡肉,色泽得分为 7.00,气味得分为 7.00,组织结构为 6.67,综合得分优于未辐照处理组,该结果在 4、6 kGy 处理组亦可发现。同样地,在 PA/PE 包装组、PVDC/PE 包装组也有相同结果。

表 2 不同辐照处理剂量对PE包装鸡肉贮藏期感官分值的影响 (分)

Table 2 Effects of different irradiation treatment doses on sensory scores of PE packaged chicken during storage

指标	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
色泽	0	7.67±0.94 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Aa}	7.67±0.94 ^{Aa}	9.00±0.00 ^{Aa}
	3	7.67±0.47 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Aa}	8.33±0.94 ^{Aa}	7.00±0.82 ^{Ba}
	6	6.67±0.47 ^{Aa}	7.00±0.00 ^{Ba}	7.00±0.82 ^{ABa}	6.67±0.47 ^{Ba}
	9		5.00±0.82 ^{Ca}	5.67±0.47 ^{Ba}	4.67±0.47 ^{Ca}
	12		4.67±0.47 ^{Ca}	5.33±0.47 ^{Ba}	4.33±0.47 ^{Ca}
	15			4.67±0.47 ^B	4.33±0.47 ^C
	18			1.67±0.94 ^C	4.00±0.82 ^C
	21				3.67±0.47 ^C
气味	0	8.33±0.94 ^{Aa}	8.67±0.47 ^{Aa}	8.00±0.82 ^{Aa}	7.67±0.94 ^{Aa}
	3	9.00±0.00 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Ab}	8.00±0.00 ^{Ab}	7.00±0.00 ^{ABc}
	6	5.00±0.82 ^{Ba}	7.00±0.82 ^{Bab}	7.00±0.82 ^{ABa}	7.33±0.94 ^{Ab}
	9		6.00±0.00 ^{BCa}	5.00±0.82 ^{Ba}	5.67±0.47 ^{Ca}
	12		5.33±0.47 ^{Ca}	5.33±0.47 ^{Ba}	5.33±0.47 ^{Ca}
	15			4.33±0.47 ^B	5.67±0.94 ^C
	18			2.67±0.42 ^C	4.67±0.47 ^{BC}
	21				4.33±0.47 ^C
组织结构	0	7.67±0.94 ^{Aa}	8.33±0.94 ^{Aa}	8.00±0.82 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Aa}
	3	7.67±0.47 ^{ABa}	8.00±0.00 ^{Ba}	8.00±0.00 ^{Aa}	8.00±0.00 ^{Aa}
	6	6.67±0.47 ^{Ba}	6.67±0.47 ^{Ca}	8.00±0.00 ^{Ab}	6.67±0.47 ^{Ba}
	9		5.00±0.00 ^{Da}	5.67±0.47 ^{Ba}	6.33±0.47 ^{Ba}
	12		5.00±0.00 ^{Da}	5.67±0.47 ^{Bab}	6.33±0.47 ^{Bb}
	15			5.00±0.82 ^{BC}	6.00±0.00 ^B
	18			4.00±0.82 ^C	4.00±0.82 ^C
	21				4.00±0.82 ^C

注：“A、B、C、D、E、F、G、H”表示贮藏时间对各组的显著性差异，“a、b、c、d”表示辐照剂量对各组的显著性差异，无相同字母表示两组间有显著性差异 ($P < 0.05$)，下同。

表 3 不同辐照处理剂量对PA/PE包装鸡肉贮藏期感官分值的影响 (分)

Table 3 Effects of different irradiation treatment doses on sensory scores of PA/PE packaged chicken during storage

指标	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
色泽	0	8.33±0.47 ^{Aa}	9.00±0.00 ^{Ab}	9.00±0.00 ^{Ab}	9.00±0.00 ^{Ab}
	3	7.33±0.47 ^{Bab}	7.67±0.47 ^{Bab}	8.00±0.82 ^{ABb}	8.33±0.47 ^{Aa}
	6	7.00±0.00 ^{Ba}	7.00±0.82 ^{BCa}	7.33±0.47 ^{Ba}	6.33±0.47 ^{Ba}
	9		6.33±0.47 ^{BCa}	5.33±0.47 ^{Ca}	6.33±0.47 ^{Ba}
	12		5.33±0.47 ^{Da}	5.00±0.82 ^{Ca}	4.67±0.94 ^{Ca}
	15			4.33±0.47 ^C	4.67±0.47 ^C
	18			4.67±0.94 ^C	5.00±0.82 ^{CD}
	21			4.33±0.47 ^C	4.33±0.47 ^{CD}
	24			5.00±0.82 ^C	3.33±0.94 ^{CDE}
	27				3.00±0.94 ^{DE}
	30				2.33±0.47 ^E

续表 3

指标	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
气味	0	9.00±0.00 ^{Aa}	8.33±0.94 ^{Aa}	8.33±0.94 ^{Aa}	7.33±1.25 ^{Aa}
	3	8.33±0.47 ^{Ba}	7.33±0.47 ^{ABab}	7.33±0.47 ^{ABab}	6.00±0.86 ^{ABb}
	6	7.00±0.00 ^{Ca}	6.67±0.47 ^{ABa}	6.33±0.47 ^{BCa}	6.33±0.47 ^{ABa}
	9		6.00±0.82 ^{Ba}	6.00±0.00 ^{BCa}	5.33±0.94 ^{BC}
	12		6.00±0.82 ^{Ba}	6.00±0.82 ^{BCa}	5.00±0.86 ^{BCDa}
	15			5.33±0.94 ^D	3.67±0.47 ^{BCD}
	18			5.33±0.47 ^C	4.00±0.82 ^{CDE}
	21			5.67±0.94 ^C	3.89±1.26 ^{CDEF}
	24			5.00±0.82 ^{CD}	3.33±0.47 ^{DEF}
	27				2.67±0.47 ^{EF}
	30				2.00±0.82 ^F
组织结构	0	9.00±0.00 ^{Aa}	8.67±0.47 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Aa}	8.67±0.47 ^{Aa}
	3	7.67±0.47 ^{Aa}	7.67±0.47 ^{Ba}	7.67±0.47 ^{ABa}	8.67±0.47 ^{Aa}
	6	6.00±0.82 ^{Ba}	7.33±0.47 ^{Ba}	6.67±0.48 ^{Ba}	8.67±0.47 ^{Ab}
	9		5.00±0.00 ^{Ca}	6.00±0.82 ^{CDa}	5.67±0.47 ^{Ba}
	12		4.67±0.42 ^{Ca}	5.67±0.47 ^{CDa}	5.33±0.47 ^{BCDa}
	15			5.00±0.00 ^{CD}	4.67±1.25 ^{BCD}
	18			5.67±0.94 ^{CD}	5.00±0.82 ^{BC}
	21			5.67±0.47 ^{CD}	4.00±0.82 ^{CD}
	24			4.67±1.25 ^D	4.33±0.47 ^{BCD}
	27				4.00±0.82 ^{CD}
	30				3.33±0.47 ^D

表 4 不同辐照处理剂量对PVDC/PE包装鸡肉贮藏期感官分值的影响 (分)

Table 4 Effects of different irradiation treatment doses on sensory scores of PVDC/PE packaged chicken during storage

指标	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
色泽	0	8.33±0.47 ^{Aa}	9.00±0.00 ^{Aa}	9.00±0.00 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Aa}
	3	7.67±0.47 ^{Aa}	8.33±0.47 ^{Aa}	7.33±1.24 ^{ABa}	7.67±0.94 ^{ABa}
	6	5.33±0.94 ^{Ba}	6.33±1.25 ^{Ba}	6.00±0.82 ^{ACa}	6.00±0.82 ^{BCa}
	9		5.33±0.47 ^{Ba}	5.67±0.94 ^{BCDa}	5.67±0.47 ^{Ca}
	12		5.67±0.94 ^{Ba}	5.00±0.00 ^{CDa}	5.33±0.94 ^{CDa}
	15		5.67±0.47 ^{Ba}	5.00±0.00 ^{CDa}	5.33±0.47 ^{CDa}
	18			4.33±1.25 ^{CD}	3.67±1.25 ^{DE}
	21			4.00±0.82 ^D	3.33±0.94 ^E
	24			4.00±0.82 ^D	3.33±0.94 ^E
	27				3.00±0.82 ^E
	30				2.67±0.47 ^E

续表 4

指标	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
气味	0	9.00±0.00 ^{Aa}	9.00±0.00 ^{Aa}	8.33±0.94 ^{Aa}	7.67±0.94 ^{Aa}
	3	8.33±0.94 ^{Aa}	8.33±0.94 ^{ABa}	8.67±0.47 ^{Aa}	7.33±0.47 ^{Aa}
	6	5.00±0.82 ^{Ba}	6.33±0.47 ^{Cb}	6.67±0.47 ^{Bb}	7.33±0.47 ^{Ab}
	9		6.67±0.47 ^{BCa}	6.67±0.47 ^{Ba}	5.67±0.94 ^{Ba}
	12		4.00±0.82 ^{Da}	4.33±0.47 ^{Ca}	5.33±0.94 ^{BCa}
	15		3.33±1.25 ^{Da}	4.33±0.47 ^{Ca}	5.33±0.94 ^{BCa}
	18			4.00±0.82 ^C	5.00±0.82 ^{BC}
	21			2.00±0.82 ^D	4.67±0.47 ^{BC}
	24			1.67±0.94 ^D	4.67±0.47 ^{BC}
	27				3.67±0.47 ^{CD}
组织结构	30				3.00±0.82 ^D
	0	8.67±0.47 ^{Aa}	7.67±0.94 ^{Aa}	8.67±0.47 ^{Aa}	8.67±0.47 ^{Aa}
	3	7.67±0.47 ^{Aa}	7.67±0.47 ^{ABa}	8.67±0.47 ^{Ab}	7.00±0.00 ^{ABa}
	6	5.33±0.47 ^{Ba}	6.67±0.47 ^{BCb}	6.33±0.94 ^{Bab}	6.67±0.47 ^{Bb}
	9		5.33±0.47 ^{CDa}	6.00±0.82 ^{BCa}	6.00±0.00 ^{Ba}
	12		5.33±0.94 ^{CDa}	5.00±0.00 ^{CDa}	5.67±0.94 ^{BCa}
	15		4.67±0.94 ^{Da}	4.67±0.47 ^{DEa}	6.00±0.82 ^{Ba}
	18			4.00±0.82 ^{DE}	4.00±1.41 ^{CD}
	21			3.67±0.47 ^E	3.33±1.25 ^D
	24			3.67±0.47 ^E	3.67±0.94 ^D
27				3.00±0.82 ^D	
30				2.67±0.47 ^D	

2.2 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期汁液流失率的影响

汁液损失率是衡量肉类质量的一个指标,该值越大,则肉的嫩度、多汁度和感官品质就越低^[14]。从表 5 整体上看,随着贮藏期的延长,各不同包装组的汁液流失率均上升,该结果与 Karami 等^[15]在山羊肉贮藏保鲜研究中一致。其中,未辐照 PE 包装组的汁液损失率在贮藏期间变化明显 ($P < 0.05$),未辐照 PA/PE 和 PVDC 包装组的汁液损失率在贮藏期间无明显差异 ($P > 0.05$),表明 PA/PE 和 PVDC 包装组有利于鸡肉持水性的保持。此外,由表 5 可

知,PE 包装的未辐照处理组的汁液流失率从第 0 天的 15.48%,至第 6 天升到 17.02%,变化约 2.00%;2 kGy 辐照处理组,经过 12 d 的贮藏期,汁液损失率增加了 4.61%;4 kGy 辐照处理组,经过 18 d,上升了 8.82%;6 kGy 辐照处理组,经 18 d 后,上升了 8.20%。该结果表明,在相同贮藏期内,高剂量组比低剂量组的汁液损失率更大。同样地,在 PA/PE 和 PVDC/PE 包装组也发现类似结果。Zhang 等^[16]的研究中表明辐照会破坏肉类的肌肉原纤维。因为鸡肉肌肉受到了物理破坏,进而导致水分流失。

表 5 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期汁液流失率的影响 (%)

Table 5 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the drip loss of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	15.48±0.40 ^{Aa}	15.01±1.61 ^{Aa}	13.78±0.28 ^{Aa}	12.21±3.04 ^{Aa}
	3	19.14±0.96 ^{Bab}	19.82±3.32 ^{Bb}	15.69±0.05 ^{ABa}	17.66±0.95 ^{Bab}
	6	17.02±0.13 ^{Ca}	18.24±1.28 ^{Ba}	18.16±3.49 ^{Ba}	16.79±2.49 ^{Ba}
	9		20.76±0.76 ^{Ba}	17.49±2.06 ^{Bb}	20.32±0.43 ^{BCa}
	12		19.62±3.25 ^{Ba}	25.77±0.21 ^{Cb}	20.75±3.25 ^{BCa}
	15			25.52±0.00 ^C	21.77±1.60 ^{BC}
	18			22.60±0.00 ^C	20.36±0.00 ^C
	PA/PE	0	17.20±1.53 ^{Aa}	14.89±1.14 ^{Aa}	15.21±0.85 ^{Aa}
3		17.83±0.40 ^{Aba}	19.37±1.17 ^{Bb}	17.66±2.12 ^{Ab}	18.21±1.33 ^{Aab}
6		17.13±1.39 ^{Aa}	17.21±0.47 ^{Ca}	19.79±0.19 ^{Bb}	18.90±1.20 ^{ABb}
9			19.96±1.55 ^{Ba}	23.39±0.59 ^{Cb}	20.89±1.01 ^{ABCa}
12			20.80±1.63 ^{Ba}	20.71±2.37 ^{BCa}	19.33±3.01 ^{ABa}
15				21.69±2.10 ^{BC}	22.14±4.17 ^{BC}
18				21.47±0.00 ^{BC}	19.97±0.00 ^{ABC}
21				22.00±0.53 ^{BC}	20.57±1.08 ^C
PVDC/PE	0	14.41±1.26 ^{Aa}	14.77±2.23 ^{Aa}	18.35±2.26 ^{Aa}	15.08±4.77 ^{Aa}
	3	13.47±1.18 ^{Aa}	19.46±0.78 ^{Bb}	20.37±2.63 ^{Ab}	20.36±1.00 ^{ABb}
	6	16.75±0.07 ^{Aa}	22.42±1.44 ^{Cb}	16.11±3.27 ^{Aa}	20.20±0.14 ^{ABb}
	9		20.48±1.82 ^{CDa}	22.16±2.98 ^{Ba}	20.72±0.40 ^{ABb}
	12		16.91±0.97 ^{ABa}	19.75±0.12 ^{ABb}	17.86±0.00 ^{ABb}
	15		22.16±1.40 ^{CDa}	22.35±2.80 ^{BCa}	21.44±4.86 ^{Ba}
	18			20.04±0.00 ^{ABC}	18.26±0.00 ^{AB}
	21			23.23±1.37 ^C	16.49±3.69 ^{AB}
	24		19.95±3.38 ^{ABC}	17.65±4.12 ^{AB}	
	27			18.46±3.98 ^{AB}	

2.3 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期pH值的影响

有研究提出,在贮藏期间,肉中的肌肉糖酵解产生的酸性物质,使得pH值降低;而随着贮藏时间的延长,酸性物质积累会抑制参与肌糖原水解的酶,导致肌糖原不能进一步分解,同时微生物产生的氨气和蛋白酶产生的碱性基团,最终导致pH值升高^[17]。据表6所显示,各样品组中的pH值随着贮藏期的延长均有所上升($P<0.05$),这可能是微生物和蛋白酶的作用,产生碱性基团所引起的。此

外,辐照组与未辐照组存在明显性差异($P<0.05$),在贮藏期第0天,PE和PA/PE包装组的鸡肉,当辐照剂量为4kGy时,pH值开始上升($P<0.05$);PVDC/PE包装组的鸡肉,当辐照剂量为2kGy时,pH值就开始有所上升($P<0.05$)。该结果表明,辐照会对鸡肉的pH值产生影响,这可能是因为辐照造成鸡肉蛋白质的分解,产生了氨基酸,进而造成鸡肉pH值的上升。在小龙虾的辐照研究中就提出,在辐照后虾肉中的蛋白质加速分解成氨基酸^[18]。

表 6 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期pH值的影响

Table 6 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the pH of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	5.48±0.02 ^{Aa}	5.46±0.00 ^{Aa}	5.51±0.02 ^{Ab}	5.51±0.01 ^{Ab}
	3	5.61±0.02 ^{Ba}	5.50±0.01 ^{Bb}	5.62±0.02 ^{Ba}	5.56±0.01 ^{Bc}
	6	5.54±0.00 ^{Ca}	5.55±0.01 ^{Ca}	5.60±0.06 ^{Bab}	5.62±0.01 ^{Cb}
	9		5.65±0.03 ^{Da}	5.63±0.01 ^{Ba}	5.63±0.01 ^{Ca}
	12		5.62±0.02 ^{Da}	5.61±0.01 ^{Ba}	5.77±0.03 ^{Db}
	15			5.54±0.01 ^C	5.74±0.01 ^E
	18				5.89±0.01 ^F
PA/PE	0	5.51±0.04 ^{Aa}	5.50±0.01 ^{Aa}	5.56±0.01 ^{Ab}	5.57±0.01 ^{Ab}
	3	5.76±0.02 ^{Ba}	5.62±0.01 ^{Bb}	5.63±0.01 ^{BEb}	5.61±0.01 ^{Bb}
	6	5.73±0.00 ^{Ba}	5.59±0.01 ^{Cb}	5.63±0.03 ^{BEbc}	5.65±0.04 ^{CDc}
	9		5.61±0.01 ^{Ba}	5.62±0.00 ^{BEb}	5.65±0.00 ^{CDc}
	12		5.65±0.02 ^{Dab}	5.63±0.04 ^{Cb}	5.63±0.02 ^{BCa}
	15			5.61±0.02 ^{BD}	5.68±0.02 ^{DF}
	18			5.60±0.01 ^D	5.64±0.00 ^E
	21			5.64±0.01 ^{CE}	5.66±0.01 ^{CD}
	24			5.66±0.02 ^A	5.68±0.03 ^{DF}
	27				5.71±0.02 ^F
30				5.84±0.02 ^G	
PVDC/PE	0	5.48±0.02 ^{Aa}	5.71±0.08 ^{Ab}	5.76±0.02 ^{Abc}	5.79±0.02 ^{ACc}
	3	5.74±0.01 ^{Bab}	5.72±0.01 ^{Aa}	5.76±0.00 ^{Ab}	5.83±0.03 ^{BFc}
	6	5.88±0.01 ^{Ca}	5.82±0.00 ^{Bb}	5.86±0.01 ^{Bc}	5.79±0.01 ^{ACd}
	9		5.69±0.01 ^{Aa}	5.75±0.02 ^{Ab}	5.80±0.03 ^{Ab}
	12		5.71±0.02 ^{Aa}	5.67±0.03 ^{Cb}	5.63±0.03 ^{Dc}
	15		5.74±0.02 ^{Aa}	5.63±0.01 ^{Db}	5.66±0.03 ^{Eb}
	18			5.60±0.01 ^E	5.68±0.01 ^E
	21			5.68±0.02 ^F	5.86±0.01 ^F
	24			5.97±0.02 ^G	5.85±0.02 ^F
	27				5.77±0.01 ^A
30				5.81±0.02 ^{BC}	

2.4 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期TVB-N值的影响

TVB-N 值是评价肉类新鲜度的重要指标之一, 大部分研究表明, TVB-N 与菌落总数有显著相关性, 腐败细菌的存在会分解肉类蛋白质, 导致 TVB-N 值上升^[9]。根据 GB 2707-2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》规定^[11], 禽肉

TVB-N 值 ≤ 15.00 mg/100 g。从表 7 中发现, 在贮藏期第 0 天, 各样品组的 TVB-N 值均小于国家限量标准。其中与未辐照组相比, 3 种包装组的鸡肉样品辐照后 TVB-N 值均上升, 其中, 辐照剂量为 4 kGy 和 6 kGy 时, PE 包装组的鸡肉出现显著差异 ($P < 0.05$), 辐照剂量为 6 kGy 时, PA/PE、PVDC/PE 包装组的鸡肉出现显著差异 ($P < 0.05$)。该结果表明, 辐照处理可促进鸡肉的挥发性盐基氮的增加,

但不同包装材料对辐照影响的响应不同。此外，辐照对 PA/PE、PVDC/PE 包装材料的鸡肉剂量的影响较小，当辐照剂量为 6 kGy 时，该包装组的 TVB-N 值才升高较明显。而随着贮藏期的延长，各样品的 TVB-N 值均有所上升，但与未辐照的肉样品相比，辐照组在贮藏期间 TVB-N 值的增加较慢，该结果与猪肉相关的研究所得出的结果相似^[20,21]，辐照

会抑制腐败微生物的生长，进而抑制微生物所引起的蛋白质分解，延缓了 TVB-N 值的增长。此外，PE 包装组 TVB-N 值的增长速度较快，这可能是由于相较于 PA/PE 和 PVDC/PE 材料，PE 材料包装袋的气体透过率较大，随着贮藏期延长，其氧气的存在促进了微生物生长，进而致使肉中的氨基酸分解生成具有挥发性的氨及胺类等碱性含氮物质^[22,23]。

表 7 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期 TVB-N 值的影响 (mg/100 g)

Table 7 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the TVB-N of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	6.79±1.56 ^{Aa}	7.43±0.29 ^{Ab}	8.86±0.51 ^{Abc}	9.91±0.66 ^{Ac}
	3	9.20±0.80 ^{Bab}	8.58±0.12 ^{Aa}	9.89±0.04 ^{ABCb}	9.74±0.70 ^{Ab}
	6	12.05±0.51 ^{Ca}	10.16±0.12 ^{Ab}	9.79±0.26 ^{ABb}	10.04±0.41 ^{Ab}
	9		15.08±1.00 ^{Ba}	11.15±0.71 ^{Cb}	9.98±0.81 ^{Ab}
	12		16.91±1.85 ^{Ba}	10.64±0.60 ^{BCb}	9.96±0.14 ^{Ab}
	15			12.84±0.51 ^D	10.04±0.90 ^A
	18			16.96±1.47 ^E	11.74±0.03 ^B
	21			13.02±0.99 ^C	
PA/PE	0	7.10±0.01 ^{Aa}	7.66±0.72 ^{Ab}	8.26±1.12 ^{Ab}	8.76±0.41 ^{Ab}
	3	7.44±0.34 ^{ABa}	8.81±0.22 ^{Ab}	8.52±0.74 ^{Ab}	9.92±0.12 ^{Bc}
	6	7.82±0.72 ^{Ca}	9.46±0.26 ^{Aa}	8.17±2.23 ^{Aa}	8.99±0.30 ^{ABa}
	9		9.65±0.38 ^{Aa}	8.64±0.29 ^{Ab}	8.18±0.20 ^{BCb}
	12		14.48±1.67 ^{Ba}	9.34±1.64 ^{Ab}	10.00±1.00 ^{BCb}
	15			10.22±0.20 ^A	9.55±0.00 ^{BC}
	18			13.84±1.79 ^B	10.72±1.15 ^C
	21			14.38±0.09 ^B	10.14±0.73 ^C
	24		14.99±1.36 ^B	10.51±0.14 ^C	
	27			11.82±1.05 ^D	
	30			11.92±1.52 ^D	
PVDC/PE	0	7.83±0.07 ^{Aa}	7.90±1.20 ^{Aa}	7.53±0.61 ^{Aa}	10.04±0.54 ^{Ab}
	3	8.60±0.46 ^{Aa}	9.42±0.36 ^{Bb}	8.07±0.13 ^{Aa}	10.19±0.67 ^{Ac}
	6	11.36±1.14 ^{Ba}	9.91±0.40 ^{Ba}	10.51±0.02 ^{Ba}	10.98±0.36 ^{ABa}
	9		11.13±0.35 ^{Ca}	10.42±0.43 ^{Bb}	10.80±0.16 ^{ABab}
	12		12.86±0.24 ^{Da}	11.73±0.45 ^{Bb}	10.35±0.71 ^{Ac}
	15		12.91±0.94 ^{Da}	11.00±1.73 ^{Ba}	11.04±0.10 ^{ABa}
	18			10.44±1.03 ^B	11.46±0.22 ^{AB}
	21			14.04±2.31 ^C	12.32±0.43 ^{AB}
	24		18.91±0.33 ^D	11.44±0.27 ^{AB}	
	27			11.21±0.05 ^{AB}	
	30			15.83±2.44 ^C	

2.5 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期TBA值的影响

TBA 值能判断肉类酸败的程度，一般认为 0.50 mg/kg 为肉类酸败的临界值，当肉类的 TBA 值大于临界值时，会产生不良感官气味^[24]。根据表 8 所显示，各样品组的 TBA 值随着贮藏期的延长而呈现上升趋势 ($P<0.05$)。其中，在贮藏期第 0 天，各包装组的 TBA 值均低于 0.50 mg/kg，而从整体上看，除 PA/PE 包装组，其他辐照处理包装组的 TBA 值，相较于未辐照处理组有所上升 ($P<0.05$)。且随辐照剂量的增加，TBA 值增大。之前相关的研究结果表明，辐照会诱导加速鸡肉脂肪的氧化^[25]。但

在本研究中发现，但在本研究中发现，对于辐照的诱导脂肪氧化作用，不同包装组的响应不同。在不同包装组中，辐照对 PE 和 PVDC/PE 包装组样品的脂肪氧化诱导作用最大。在贮藏期第 0 天，PE 包装辐照组的 TBA 值范围为：0.03~0.22 mg/kg；PVDC/PE 辐照组的 TBA 值范围为 0.20~0.34 mg/kg，经 4、6 kGy 辐照处理后的样品，在贮藏在贮藏期的第 3~6 天就已超过酸败临界值；相反地，辐照对 PA/PE 包装组样品的 TBA 值影响最小，经辐照处理后的样品的 TBA 值仍较低，与未辐照处理组相近，而在经过 30 d 的贮藏期后，TBA 值最大为 0.76 mg/kg (6 kGy)。

表 8 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期TBA值的影响 (mg/kg)

Table 8 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the TBA of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	-0.05±0.01 ^{Aa}	0.00±0.02 ^{Aa}	0.16±0.06 ^{Ab}	0.22±0.09 ^{Ab}
	3	0.20±0.02 ^{Ba}	0.44±0.04 ^{Bcb}	0.27±0.03 ^{Bc}	0.64±0.04 ^{Bd}
	6	0.41±0.00 ^{Ca}	0.51±0.00 ^{Ca}	0.52±0.06 ^{Ca}	0.78±0.09 ^{Cb}
	9		0.48±0.00 ^{Ca}	0.63±0.00 ^{Cb}	1.11±0.07 ^{Dc}
	12		0.34±0.02 ^{Ba}	0.43±0.00 ^{Db}	1.54±0.01 ^{Ec}
	15			0.59±0.04 ^C	1.41±0.05 ^F
	18			0.58±0.02 ^C	1.06±0.01 ^G
	21				0.84±0.04 ^D
PA/PE	0	-0.06±0.00 ^{Aa}	-0.08±0.00 ^{Ab}	-0.04±0.00 ^{Ac}	-0.07±0.01 ^{Aab}
	3	-0.03±0.00 ^{Ba}	0.08±0.02 ^{Bb}	0.11±0.02 ^{Bb}	0.11±0.03 ^{Bb}
	6	0.03±0.01 ^{Ca}	0.04±0.02 ^{Ba}	0.12±0.02 ^{Bb}	0.12±0.03 ^{Bb}
	9		0.22±0.01 ^{Ca}	0.27±0.04 ^{Cb}	0.32±0.00 ^{Cb}
	12		0.17±0.05 ^{Da}	0.28±0.01 ^{Cb}	0.26±0.03 ^{Db}
	15			0.28±0.00 ^C	0.35±0.01 ^C
	18			0.38±0.02 ^D	0.36±0.00 ^C
	21			0.40±0.04 ^D	0.64±0.00 ^E
	24			0.34±0.02 ^E	0.76±0.02 ^F
	27				0.73±0.01 ^F
30				0.69±0.04 ^G	
PVDC/PE	0	-0.07±0.00 ^{Aa}	0.20±0.04 ^{Ab}	0.23±0.13 ^{Ab}	0.34±0.03 ^{Ac}
	3	0.09±0.00 ^{Ba}	0.39±0.02 ^{Bb}	0.51±0.02 ^{Bc}	0.74±0.00 ^{Bd}
	6	0.28±0.00 ^{Ca}	0.38±0.06 ^{Ba}	0.86±0.12 ^{Bb}	0.91±0.12 ^{Cdb}
	9		0.51±0.07 ^{Ba}	0.80±0.02 ^{Ba}	0.85±0.06 ^{Bb}
	12		0.93±0.01 ^{Ca}	1.15±0.02 ^{DEb}	0.82±0.04 ^{Bcc}
	15		1.32±0.12 ^{Da}	1.19±0.07 ^{Efa}	0.99±0.01 ^{Db}
	18			1.25±0.05 ^{EF}	1.25±0.00 ^E
	21			1.31±0.08 ^G	1.10±0.03 ^F
	24			1.04±0.09 ^D	1.50±0.11 ^G
	27				1.69±0.03 ^H
30				1.61±0.15 ^H	

2.6 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期 L^* 值和 a^* 值的影响

肉的颜色会影响消费者的接受度^[26]。从表 9 中可以发现,各处理组的 L^* 值,在贮藏期间存在差异性变化,其中不同包装组和不同辐照剂量组的差异性变化不同。PVDC/PE 包装的各辐照组鸡肉,在贮藏期内 L^* 值存在明显性差异,随着贮藏期延长, L^* 明显上升($P<0.05$); PA/PE 包装组的鸡肉经辐

照 4 kGy 和 6 kGy 处理后, L^* 在贮藏期内明显上升($P<0.05$); PE 包装组的鸡肉经 2 kGy 和 4 kGy 辐照处理后, L^* 在贮藏期内出现明显上升($P<0.05$)。有研究指出, L^* 值与鸡肉组织的保水能力相关,保水能力下降时, L^* 值会有所上升^[27]。根据结果推测, PVDC 包装组的鸡肉随着贮藏期的延长,鸡肉组织的保水能力下降明显。而辐照处理也可能会影响鸡肉组织的保水能力。

表 9 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期 L^* 值的影响

Table 9 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the L^* of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	46.42±0.66 ^{Aa}	49.14±1.00 ^{Aa}	47.35±3.21 ^{ABa}	47.74±1.30 ^{Aa}
	3	56.69±2.74 ^{Ba}	48.59±0.18 ^{Ab}	45.42±1.30 ^{Ab}	48.65±0.50 ^{Ab}
	6	49.12±0.10 ^{Aa}	40.97±2.45 ^{Bb}	44.06±1.24 ^{Ab}	54.42±0.64 ^{Bc}
	9		52.24±1.88 ^{Aa}	46.47±1.83 ^{Ab}	48.27±2.09 ^{Aab}
	12		58.42±2.06 ^{Ca}	50.90±0.56 ^{Bb}	49.03±1.84 ^{Ab}
	15			55.27±0.66 ^C	50.51±1.52 ^A
	18			62.72±3.18 ^D	48.20±1.27 ^A
	21				50.72±2.07 ^A
PA/PE	0	45.59±1.04 ^{ABa}	47.75±2.00 ^{ABab}	44.52±1.29 ^{Abc}	43.08±1.64 ^{Afc}
	3	51.72±0.62 ^{Ba}	50.28±1.16 ^{Ba}	44.09±1.27 ^{ABb}	48.60±2.25 ^{BDHa}
	6	47.21±1.97 ^{Aa}	43.45±1.24 ^{Ab}	41.57±1.21 ^{Bb}	40.76±1.69 ^{Ab}
	9		48.29±2.44 ^{ABa}	47.55±2.01 ^{ac}	49.28±0.73 ^{DGHa}
	12		52.35±4.64 ^{Ba}	48.30±1.16 ^{ac}	47.35±0.52 ^{BDEa}
	15			52.79±0.83 ^D	44.96±0.71 ^{EF}
	18			49.62±1.47 ^{CE}	45.91±1.33 ^{BE}
	21			51.02±0.07 ^{DE}	51.96±1.14 ^G
PVDC/PE	0	44.28±0.38 ^{Aa}	44.05±0.66 ^{Aa}	47.53±0.70 ^{Ab}	41.78±0.83 ^{Ac}
	3	46.64±0.79 ^{Ba}	46.19±0.76 ^{Bab}	49.35±0.26 ^{Bb}	45.39±2.09 ^{Ba}
	6	50.88±1.24 ^{Ca}	49.19±1.30 ^{Cab}	47.46±0.72 ^{Ab}	43.11±1.74 ^{ABc}
	9		47.08±0.66 ^{Bab}	47.37±0.59 ^{Ab}	45.81±0.47 ^{Ba}
	12		47.71±0.76 ^{BCa}	50.54±0.92 ^{BCb}	45.00±0.18 ^{Bc}
	15		53.85±0.16 ^{Da}	49.39±0.73 ^{Bb}	50.10±2.62 ^{Cab}
	18			50.61±1.04 ^{BC}	52.41±0.66 ^C
	21			50.45±1.22 ^{BC}	47.25±1.32 ^C
	24		51.70±0.55 ^{BC}	53.05±0.94 ^C	
	27			50.24±0.20 ^C	
	30			52.05±0.55 ^C	

表 10 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期 a^* 值的影响

Table 10 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the a^* of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	1.42±0.71 ^{Aa}	1.80±0.22 ^{ABab}	1.56±0.47 ^{Ab}	2.54±0.70 ^{Ab}
	3	2.72±0.11 ^{Ba}	1.51±0.33 ^{Ab}	1.55±0.19 ^{Ab}	1.42±0.41 ^{Bb}
	6	3.27±1.35 ^{Ca}	2.40±0.81 ^{BCa}	1.65±0.30 ^{Aa}	1.66±0.05 ^{ABa}
	9		3.00±0.59 ^{Ca}	1.56±0.12 ^{Ab}	1.79±0.15 ^{ABb}
	12		4.01±0.34 ^{Da}	1.38±0.17 ^{Ab}	2.18±0.40 ^{ABCc}
	15			2.94±0.39 ^B	2.23±0.77 ^{ABC}
	18			4.30±0.71 ^C	2.97±0.27 ^C
	21				4.14±0.33 ^D
PA/PE	0	1.45±0.24 ^{Aa}	2.91±0.12 ^{Ab}	3.86±0.69 ^{ACc}	2.03±0.31 ^{Aab}
	3	2.23±0.16 ^{Ba}	3.58±0.15 ^{Bbc}	3.02±0.33 ^{Bb}	3.97±0.29 ^{BCc}
	6	3.59±0.31 ^{Cca}	3.25±0.18 ^{ABab}	3.00±0.25 ^{Bb}	3.86±0.50 ^{Bc}
	9		3.66±0.33 ^{Bab}	3.08±0.73 ^{ABa}	3.93±0.38 ^{BCb}
	12		4.58±0.38 ^{Ca}	3.78±0.56 ^{ABCa}	4.60±0.53 ^{BCDEa}
	15			3.20±0.24 ^{AB}	4.30±1.06 ^{BDC}
	18			4.12±0.13 ^C	5.03±0.70 ^{DE}
	21			5.12±0.15 ^D	4.90±0.12 ^{CDE}
	24			4.24±0.11 ^C	4.77±0.23 ^{BCDE}
	27				5.60±0.02 ^E
30				6.86±0.14 ^F	
PVDC/PE	0	2.14±0.66 ^{Aa}	2.42±0.66 ^{Aa}	2.42±0.11 ^{ABa}	2.25±0.63 ^{ACa}
	3	1.89±0.54 ^{Aa}	3.48±0.53 ^{Bb}	1.95±0.61 ^{ABa}	1.93±0.20 ^{ABa}
	6	2.04±0.62 ^{Aa}	1.90±0.10 ^{Aa}	2.07±0.44 ^{ABa}	2.82±0.44 ^{ACDa}
	9		3.52±0.82 ^{Ba}	2.34±0.84 ^{ABa}	3.12±0.35 ^{CDA}
	12		2.40±0.57 ^{Aa}	1.94±0.02 ^{ABa}	2.97±0.55 ^{CDA}
	15		1.96±0.16 ^{Aa}	1.53±0.09 ^{Ab}	1.20±0.17 ^{Bb}
	18			3.00±0.40 ^B	2.59±0.59 ^{AC}
	21			2.14±0.25 ^A	2.80±0.57 ^{ACD}
	24			2.68±0.70 ^B	1.29±0.06 ^B
	27				3.60±0.28 ^D
30				2.67±0.22 ^{ACD}	

从表 10 中可知，与未辐照处理组相比，辐照处理后的 PE 和 PA/PE 包装组的 a^* 值有所上升，存在明显性差异 ($P < 0.05$)，辐照对 PVDC/PE 包装组的 a^* 值无明显影响 ($P > 0.05$)。结果表明，辐照处

理对于不同包装组的颜色状态会产生不同的影响。有研究指出， a^* 值的变化可能是氧化还原电位的降低以及羧基肌红蛋白的形成所造成的。而辐照处理也会使鸡肉的色泽达到最佳的鲜红状态，且红度值

(a^* 值) 的增加更容易让消费者接受^[28]。此外, 虽然不同包装组鸡肉的 a^* 值在贮藏期间也存在不同的差异性变化, 如: PVDC/PE 包装组, 经 6 kGy 辐照处理后, 在贮藏期间存在明显性差异, 随着贮藏

期的延长 a^* 值上升; PE 和 PA 包装组鸡肉的 a^* 值随着贮藏期的延长均上升 ($P < 0.05$), 但是整体上看, 辐照处理后的鸡肉样品, 其贮藏期间的红度值 (a^* 值) 上升有所延缓。

表 11 不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期菌落总数的影响 (lg CFU/g)

Table 11 Effect of different irradiation doses and packaging materials on the total bacterial count of chicken during storage

包装材料	贮藏期/d	辐照剂量/kGy			
		0	1.86	4.19	6.66
PE	0	5.33±0.02 ^{Aa}	3.32±0.01 ^{Aa}	2.62±0.08 ^{Ac}	1.96±0.05 ^{Ac}
	3	7.98±0.02 ^{Ba}	3.69±0.02 ^{Bb}	2.10±0.03 ^{Bc}	2.39±0.03 ^{Ad}
	6	8.70±0.03 ^{Ca}	4.34±0.02 ^{Cb}	2.43±0.10 ^{Ac}	2.40±0.13 ^{Ac}
	9		6.61±0.04 ^{Da}	3.05±0.2 ^{Cb}	2.32±0.01 ^{Ac}
	12		7.59±0.14 ^{Ea}	4.46±0.02 ^{Db}	2.22±0.13 ^{Ac}
	15			4.73±0.2 ^E	2.40±0.10 ^A
	18			8.05±0.66 ^F	4.20±0.03 ^B
	21			8.84±0.03 ^G	7.47±0.04 ^C
	24				
PA/PE	0	4.98±0.11 ^{Aa}	3.83±0.05 ^{Ab}	2.64±0.04 ^{Ac}	2.46±0.07 ^{Ad}
	3	6.82±0.10 ^{Ba}	4.05±0.06 ^{Ab}	2.60±0.04 ^{Ac}	2.16±0.12 ^{Bd}
	6	7.42±0.00 ^{Ca}	4.58±0.26 ^{Bb}	2.39±0.07 ^{Bc}	2.28±0.23 ^{ABc}
	9		6.43±0.05 ^{Ca}	2.87±0.02 ^{Cb}	2.22±0.15 ^{ABc}
	12		6.96±0.03 ^{Da}	3.53±0.04 ^{Db}	2.22±0.13 ^{ABc}
	15			3.76±0.06 ^D	2.34±0.11 ^{AB}
	18			6.79±0.07 ^E	3.86±0.01 ^C
	21			7.24±0.04 ^F	4.20±0.07 ^D
	24				4.31±0.09 ^D
27				4.65±0.10 ^E	
PVDC/PE	0	5.48±0.03 ^{Aa}	3.37±0.03 ^{Ab}	2.41±0.08 ^{Ac}	2.36±0.10 ^{Ac}
	3	6.20±0.06 ^{Ba}	3.83±0.03 ^{Bb}	3.35±0.03 ^{Bc}	2.24±0.10 ^{Ad}
	6	8.68±0.04 ^{Ca}	5.02±0.07 ^{Cb}	4.04±0.02 ^{Cc}	2.52±0.05 ^{Bd}
	9		5.20±0.02 ^{Da}	4.24±0.17 ^{CDb}	2.8±0.05 ^{Ac}
	12		6.02±0.06 ^{Ea}	4.47±0.03 ^{DEb}	2.35±0.06 ^{Cc}
	15		7.81±0.04 ^{Fa}	4.66±0.08 ^{EFb}	2.94±0.04 ^{Dc}
	18			4.97±0.03 ^{FG}	3.77±0.02 ^E
	21			7.27±0.02 ^H	4.96±0.00 ^F
	24			7.39±0.08 ^H	5.47±0.11 ^G
27				5.62±0.03 ^H	
30				6.35±0.03 ^I	

2.7 辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期菌落总数的影响

菌落总数是评价肉类新鲜度的重要指标之一^[29],根据 GB 16869-2005《鲜、冻禽产品》的规定,鲜禽产品的菌落总数 $\leq 1 \times 10^6$,当样品的菌落总数超过该值时,则认定为无法食用。根据表中显示,在贮藏期第 0 天,相较于未辐照组,辐照后的鸡肉样品中的菌落总数明显下降 ($P < 0.05$),表明辐照能有效杀灭鸡肉中的微生物。此外,相关研究结果显示,未经处理的生鲜肉类,在 4 °C 贮藏条件下,只能贮藏 4 d 左右^[30,31]。而在本研究中的未辐照的样品组,贮藏期在 3 d 内,菌落总数达 1×10^6 以上;经过 2 kGy 辐照处理后,不同包装样品分别在贮藏期第 9 天 (PE、PA/PE)、第 12 天 (PVDC/PE),鸡肉的微生物菌落数超过标准规定值;经 4 kGy 辐照处理后的样品组,至第 18 天 (PE、PA/PE)、第 21 天 (PVDC/PE),微生物菌落数超过标准规定值;当辐照剂量达 6 kGy 时,除 PE 包装组外,其他包装样品组的贮藏期达 27 d 以上微生物菌落总数才超标。结果表明,经过辐照处理后的样品组,其菌落的生长速度受到抑制,进而延长了贮藏期。且辐照剂量越高,贮藏期间微生物的生长越慢,该结果与郑读等^[32]对辐照常温小龙虾的研究结果相同。

3 结论

本文通过测定 pH、TVB-N、TBA、色度值及菌落总数等指标评价贮藏期鸡肉品质的变化,探究不同辐照剂量和包装材料对鸡肉贮藏期品质的影响,为辐照与包装材料协同保鲜方法在生鲜鸡肉冷藏保鲜中的应用中提供理论基础。通过研究发现:未辐照样品组在贮藏期 3 d 内,细菌总数超过 10^6 CFU/g,限制了其在市场的流通范围。而辐照技术能有效杀灭微生物的同时,可以抑制微生物的生长,延长贮藏期。但与此同时,辐照亦会影响鸡肉的感官色泽和肉质的组织结构,会加速鸡肉的蛋白质和脂质的氧化。通过结合不同包装材料后,发现不同包装组对辐照引发的作用,产生不同响应。因此在实际应用中,除了要控制辐照剂量,也应该将包装材料的选择考虑其中。在本研究中认为,选择 PA/PE 包装材料,结合 4 kGy 辐照处理的协同保鲜工艺,生鲜鸡肉在 4 °C 真空贮藏期间表现出较好品质。在该保鲜工艺下,生鲜鸡肉的贮藏期可延长至 18 d。

参考文献

- [1] HAMED H, NAWAZ A, JIN G, et al. Effect of frozen and refrozen storage of beef and chicken meats on inoculated microorganisms and meat quality [J]. *Meat Science*, 2021, 175: 108453.
- [2] 洪奇华,王梁燕,孙志明,等.辐照技术在肉制品加工保鲜中的应用[J].核农学报,2021,35(3):667-673.
- [3] AN K A, JO Y, AKRAM K, et al. Assessment of microbial contaminations in commercial frozen duck meats and the application of electron beam irradiation to improve their hygienic quality [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5444-5449.
- [4] 董娟聪,程娇,党旭红,等.辐照对冷冻肉类食品品质影响的研究现状[J].核技术,2022,45(1):17-23.
- [5] 刘俊轩,苏霞,何彦瑾,等.辐照保鲜技术对肉类及其制品影响的研究现状[J].食品与发酵工业,2012,38(10):151-154.
- [6] CHOULIARA E, BADEKA A, SAVVAIDIS I, et al. Combined effect of irradiation and modified atmosphere PA/PE packaging on shelf-life extension of chicken breast meat: microbiological, chemical and sensory changes [J]. *European Food Research & Technology*, 2008, 226(4): 877-888.
- [7] DUTRA M P, CARDOSO G P, FONTES P R, et al. Combined effects of gamma radiation doses and sodium nitrite content on the lipid oxidation and color of mortadella [J]. *Food Chemistry*, 2017, 237(Dec.15): 232.
- [8] 敖晓林,傅宝尚,祁立波,等.不同包装材料对烤制鲑鱼贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(16):279-285.
- [9] 陈尚戊,李吉洪,汤利元,等.气调包装对辐照生鲜猪肉保鲜效果及品质的影响[J].肉类工业,2022,4:12-17.
- [10] 赵胜男,李佳怡,杨青华,等.辐照对常见塑料食品包装材料物理化学性能的影响[J].包装工程,2022,43(9):31-38.
- [11] 朱迎春,李茜,马丽珍,等.不同包装方式和贮藏温度对牛肉保水性的影响[J].食品研究与开发,2016,37(22):15-19.
- [12] RD A, MP A, LP A, et al. Necessary considerations for sensory evaluation of meat products: Quality indicators of meat products [J]. *Sensory Analysis for the Development of Meat Products*, 2022: 31-50.
- [13] 雷英杰,陈尚戊,敬楹莹,等.电子束辐照处理对生鲜猪肉的保鲜作用[J].现代食品科技,2021,37(10):136-144.
- [14] WANG B, XU C C, LIU C, et al. The effect of dietary lycopene supplementation on drip loss during storage of lamb meat by iTRAQ analysis [J]. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2021, 10 (2): 3390.
- [15] KARAMI M, ALIMON A R, SAZILI A Q, et al. Effects of dietary antioxidants on the quality, fatty acid profile, and lipid oxidation of longissimus muscle in Kacang goat with aging time [J]. *Meat Science*, 2011, 88(1): 102-108.
- [16] ZHANG M, HE L C, LI C, et al. Effects of gamma ray

- irradiation-induced protein hydrolysis and oxidation on tenderness change of fresh pork during storage [J]. *Meat Science*, 2020, 163: 108058.
- [17] TAO Y M, MA L L, LI D D, et al. Proteomics analysis to investigate the effect of oxidized protein on meat color and water holding capacity in Tan mutton under low temperature storage [J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2021, 146(1):111429.
- [18] SÁNCHEZ M, PLAZA L, ANCOS B D, et al. Quantitative bioactive compounds assessment and their relative contribution to the antioxidant capacity of commercial orange juices [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2003, 83(5): 430-439.
- [19] SONG W L, DU Y F, YANG C X, et al. Development of PVA/EVA-based bilayer active film and its application to mutton [J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2020, 133(3): 110109.
- [20] LI C L, HE L C, JIN G F, et al. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage [J]. *Meat Science*, 2017, 128(Jun.): 68-76.
- [21] NISAR M F, ARSHAD M S, YASIN M, et al. Evaluation of gamma irradiation and moringa leaf powder on quality characteristics of meat balls under different PA/PE packaging material [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 10(7): 1111.
- [22] GOULAS A E, KONTOMINAS M G. Combined effect of light salting, modified atmosphere PA/PE packing and oregano essential oil on the shelf-life of sea bream (*Sparus aurata*): Biochemical and sensory attributes [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(1): 287-296.
- [23] 李新,熊光权,廖涛,等.小龙虾虾肉辐照后理化指标与蛋白质性质分析[J].核农学报,2016,30(10):1941-1946.
- [24] 姜秀杰,张德权,张东杰,等.包装形式对辐照调理鸡肉理化特性的影响[J].核农学报,2011,25(2):276-280.
- [25] 郑读,白婵,熊光权,等.⁶⁰Co-γ射线辐照对鳙鱼品质及挥发性物质的影响[J].食品安全质量检测学报,2022, 13(8):2457-2464.
- [26] HUGHES J M, CLARKE F M, PURSLOW P P, et al. Meat color is determined not only by chromatic heme pigments but also by the physical structure and achromatic light scattering properties of the muscle [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(1): 12509.
- [27] DERAKHSHAN Z, CONTI G O, HEYDARI A, et al. Survey on the effects of electron beam irradiation on chemical quality and sensory properties on quail meat [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 112: 416-420.
- [28] 赖宏刚,蒋云升,张元嵩,等.辐照处理对冷鲜鸡肉的品质影响[J].江苏农业科学,2018,46(19):206-211.
- [29] HAMED H, NAWAZ A, JIN G, et al. Effect of frozen and refrozen storage of beef and chicken meats on inoculated microorganisms and meat quality [J]. *Meat Science*, 2021, 175(8): 108453.
- [30] 王国霞,刘梦龙,李小兵,等.X射线辐照对冷鲜猪肉品质和货架期的影响[J].现代食品科技,2022,38(10):178-186.
- [31] 徐晨,白婵,耿胜荣,等.⁶⁰Co-γ射线辐照对草鱼贮藏品质的影响[J].核农学报,2018,32(6):1116-1124.
- [32] 郑读,李北平,熊光权,等.辐照对小龙虾常温贮藏品质的影响[J].肉类研究,2021,35(6):44-49.