

《标准编制说明》

一、工作简况，包括任务来源、制定背景、起草过程等；

（一）任务来源

本标准由湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所牵头申请修订，经国家标准化管理委员会批准，于 2024 年 12 月 31 日下达《2024 年第十批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发[2024]60 号），批准推荐性国家标准《冷却肉类辐照杀菌工艺》（计划号：20243735-T-326）的修订工作。

本标准由湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所、中广核辐照技术有限公司、苏州中核华东辐照有限公司、中国农业科学院农产品加工研究所、四川省原子能研究院、中金辐照武汉有限公司共同起草。

主要起草人为：邱亮、廖涛、白婵、鉏晓艳、于巍、欧阳正松、高美须、崔磊、高鹏、邱建辉、刘晓剑、黄敏、张文宣、曹逍、陈天宝、王千字、王炬光、李海蓝、耿媛媛。

（二）制定背景

肉是人们日常生活中不可缺少的食品，随着人民生活水平的提高，对肉食品主要分为：冷却肉和冷冻肉。冷却肉是指对严格执行检疫制度屠宰后的畜禽胴体迅速进行冷却处理，使胴体温度在 24 h 内降至 0~4℃并在后续的加工、流通、零售中始终保持 0~4℃的生鲜肉。冷却肉具有营养丰富、柔嫩多汁、味道鲜美等诸多优点，在我国大中城市已经普及。如何确保其食用安全性，减少营养成分的损失，尤其是确

保流通过程中冷却肉的安全性，是人们关注的问题。辐照加工技术已经在国际上被证实是一种有效的非热加工技术，其在肉类制品中的应用最为广泛，据中国同位素和辐射行业协会 2023 年 1 月份统计，肉类辐照加工量约占辐照食品总量的 50%—60%。

目前，关于冷却肉辐照的原国家标准《冷却包装分割猪肉辐照杀菌工艺》（GB/T 18526.7-2001）实施已超过 20 年，随着消费者对食品安全和品质的日益关注，此标准部分内容已不能满足现在工艺控制精细要求，主要存在如下问题：

1、此标准均只规定了辐照温度、辐照剂量，对辐照均匀度、有效吸收剂量及剂量计跟踪管理均未作要求。随着辐照产业的发展和食品消费市场结构的调整，现行标准已不能满足实际生产需要。

2、此标准中所引用的标准大部分已废止，一定程度上不能很好的满足市场的需求，特别是关于微生物部分，仅涉及沙门氏菌和寄生虫的限量要求，而猪肉污染最多的大肠杆菌并未涉及。因此，更新此标准对于保障公共健康和满足市场需求至关重要。

3、目前的标准只规定了猪肉，其他畜禽肉没有涉及。不同畜禽肉类其所含自由水及蛋白质含量不一样，初始微生物含量也不一样。因此，并不能以猪肉的辐照剂量标准规定所有冷却畜禽肉类，那样既不能达到灭菌目的，更会导致肉类营养流失，无法对企业起到指导作用。

考虑到冷却肉已经在我国中大型城市得到了推广，与之相关的工艺方法有必要作为推荐性国标，让更多行业的用户了解和掌握，且为

了与 ISO14470--2010 标准的结构组成保持一致，本次修订申请将冷却肉类辐照杀菌工艺作为推荐性国标立项。修订后的标准，将规范辐照技术在我国冷却肉类上的应用，在标准的保障和引导下，辐照技术会在提高我国食品质量和种类方面发挥更大的作用。

（三）起草过程

1.前期准备

本标准的主要内容是冷却猪肉的辐照杀菌工艺剂量的确定。在编写标准之前，起草人员首先收集国内外相关方面的辐照加工资料，走访调研相关企业并取样进行初始微生物检测。此外，在标准制定过程中，结合多年来标准起草单位、协作单位以及其他相关辐照加工和肉类加工企业根据 GB/T 18526.7-2001 《冷却包装分割猪肉辐照杀菌工艺》开展冷却猪肉辐照加工产业化应用实践，针对猪肉进行了辐照品质效应、辐照杀菌等关键参数的补充和验证。此外，根据标准起草组在总结前期利用 ^{60}Co - γ 射线和电子束辐照加工猪肉产品的产业化应用实践，为此次修订 GB/T 18526.7-2001 《冷却肉类辐照杀菌工艺》提供了较好的理论支撑和应用基础。在标准修订过程中，参考我国前期发布的 GB 18524-2016 《食品安全国家标准 食品辐照加工卫生规范》；GB/T 22210 《肉与肉制品感官评定规范》；GB 7718 《食品安全国家标准预包装食品标签通则》等有关辐照加工和肉类食品方面的标准，并严格执行了有关标准编写的要求。

2.方法建立

首先在猪肉加工厂源头收集已经加工好的猪肉，进行冷却处理后

包装，冷链物流至辐照加工厂；对猪肉进行辐照品质效应分析和辐照杀菌验证；结合近年来的国内外研究进展，最终建立规范性实用性的冷却猪肉辐照杀菌工艺。

3. 文本起草和征求意见

标准编制过程按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求，并参照 GB/T 20000.1-2014《标准化工作指南第1部分：标准化和相关活动的通用术语》的规定要求进行制定。遵循全面、科学、合理和可行的原则，辐照杀菌工艺和辐照对猪肉品质的影响等关键性技术指标的确定以试验数据和实践为依据，力求做到规范、科学，关键技术参数的规定和相关技术条款符合辐照加工单位实际情况。

4. 标准文本的完善与送审

本标准的编制小组广泛收集国内外相关资料，线上和线下同步进行意见征集，根据收集到的不同意见进行多次讨论和修改，充分吸纳各方建议，对标准文本和编制说明进行完善后，报送农业农村部农产品加工标准化技术委员会进行审查。

二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据，修订国家标准时，还包括修订前后技术内容的对比；

（一）标准编制原则

本标准的制定过程中遵循了以下几项原则：

1. 科学性

猪肉的卫生质量直接关系到消费者的健康安全和储藏安全，因此，

辐照杀菌工艺的确定务必具有科学性，在辐照最低剂量和最高耐受剂量的确定、辐照对产品质量影响的判断等方面首先确保科学，在标准适用范围规定的界限内力求完整，在标准文本编制过程中力求做到技术内容的表述科学准确、清晰易懂。

2. 先进性

对标准中有关内容的确定，严格遵守我国核安全法等法律法规及相关规章制度的要求，力求反映猪肉辐照杀菌研究领域的国内外先进技术及标准的发展现状与趋势，既体现目前稳定可靠的最新研究成果，又能为未来技术发展提供框架。

3. 适用性

在标准的工艺操作程序方面，始终把经济实用和可操作性作为重要的依据，确保标准的内容便于实施，并且易于被其他标准和文件引用。使标准中所规定的技术内容有利于提高猪肉卫生的安全性和辐照加工企业的实用性。

（二）主要内容及确定依据

1. 电子束辐照剂量与猪肉中微生物的关系

如图 1 所示，冷鲜猪肉的初始菌落总数为 $4.86 \lg(\text{CFU/g})$ ，辐照后各贮藏期内冷鲜猪肉的菌落总数均呈显著下降趋势 ($P < 0.05$)，且具有剂量依赖性。与未辐照组相比，当辐照剂量为 9 kGy 时，各贮藏期冷鲜猪肉的菌落总数分别降低至原来的 47.74%、35.71%、41.89% 和 43.60%。这表明辐照可有效杀灭冷鲜猪肉中的微生物，且辐照剂量越大，杀菌效果越明显。这是因为辐照对肉品中微生物 DNA 的损

伤随辐照剂量的增大而增大，影响了微生物正常的生长繁殖。随贮藏时间的延长，未辐照组和辐照组的菌落总数均不断升高，但辐照组的菌落总数始终低于未辐照组，且其增长速率也明显低于未辐照组。当贮藏至第 10 d 时，未辐照组的菌落总数超过国家规定的冷鲜猪肉安全食用标准 $6 \lg(\text{CFU/g})$ ，表明肉品变质；当贮藏至 15 d 时，1 kGy 辐照组的菌落总数超过限量标准，但其他剂量辐照组的菌落总数仍然维持在安全标准之内。这表明辐照可有效抑制冷鲜猪肉贮藏期间菌落总数的增长，延长货架期，且辐照剂量越高，保鲜效果越好。

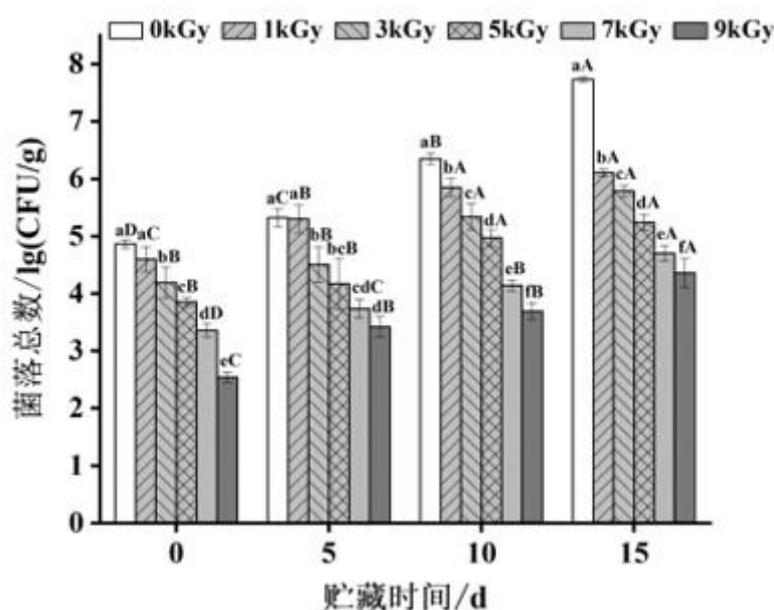


图 1 不同剂量电子束辐照处理对冷鲜猪肉贮藏期间菌落总数的影响

2. 电子束辐照剂量与色泽之间的关系

肉色是反应肉品质最直观的指标之一，也是影响消费者购买欲望的敏感因素，色差值可直接反应肉外观颜色的变化。如表 1 所示，与未辐照组相比，辐照后各贮藏期内冷鲜猪肉的 a^* 值均有显著升高趋势 ($P < 0.05$)，其中在贮藏初期，当辐照剂量 $\geq 7 \text{ kGy}$ ， a^* 值显著升

高；贮藏期为 5 和 10 d 时，当剂量 ≥ 3 kGy， a^* 值显著升高；贮藏期为 15 d 时，当剂量 ≥ 1 kGy， a^* 值显著升高 ($P < 0.05$)。随贮藏时间的延长，未辐照组冷鲜猪肉的 a^* 值在第 15 d 出现显著降低现象 ($P < 0.05$)，辐照组则维持了 a^* 值的稳定，甚至使 a^* 值呈现增大趋势。这说明辐照处理可使冷鲜猪肉在贮藏期间保持良好的红度值，延缓肉色的劣变。辐照后 a^* 值的升高一方面可能是由于射线产生的能量具有一定的还原性，同时辐照处理后周围环境中臭氧含量升高，使肌红蛋白更易以氧合肌红蛋白的形态存在。另一方面可能是由于辐照通过影响铁离子的存在价态而引起肉色的变化。Ahn 等研究发现 2.5 和 5 kGy 剂量的辐照提高了火鸡胸肉的 a^* 值，原因是辐照处理会降低肌肉的氧化还原电位，且产生了一氧化碳，可作为第 6 位配位基与肌红蛋白结合，形成一氧化碳肌红蛋白，不易被氧化，从而改善了 a^* 值。不同剂量辐照后冷鲜猪肉的 b^* 值和 L^* 值也有升高趋势，但规律性不强。 L^* 值的降低可能是由于辐照改变了肌原纤维的微观结构，降低了肌肉的保水性，肌肉表面水分析出增多导致其对光线不同程度的散射，造成了 L^* 值的差异。

表 1 不同剂量电子束辐照处理对冷鲜猪肉贮藏期间色差值的影响

色差值	贮藏 时间/d	辐照剂量/kGy					
		0	1	3	5	7	9
a*	0	7.50±0.45 ^{baB}	7.36±1.20 ^{bb}	8.33±0.40 ^{bc}	8.65±0.64 ^{ba}	10.14±0.35 ^{ab}	10.15±0.66 ^{ab}
	5	9.03±0.47 ^{cdA}	8.15±0.29 ^{dAB}	10.82±1.03 ^{aA}	10.72±0.13 ^{abA}	11.43±0.45 ^{aA}	9.82±0.38 ^{bb}
	10	8.44±1.16 ^{bcA}	7.98±0.54 ^{cAB}	10.47±0.58 ^{aAB}	10.09±1.05 ^{aA}	9.59±1.07 ^{abB}	10.47±0.18 ^{aAB}
	15	6.74±0.89 ^{cB}	9.18±0.34 ^{ba}	9.52±0.31 ^{bbC}	9.33±1.71 ^{ba}	11.42±0.37 ^{aA}	11.31±0.46 ^{aA}
b*	0	2.86±0.61 ^{bb}	2.97±0.38 ^{bb}	3.58±0.13 ^{bc}	3.39±0.45 ^{abB}	3.49±0.24 ^{abB}	4.04±0.39 ^{aB}
	5	2.48±0.08 ^{cB}	2.80±0.45 ^{cB}	4.90±0.72 ^{bb}	6.08±0.70 ^{aA}	5.93±0.69 ^{aA}	4.47±0.41 ^{baB}
	10	3.27±0.28 ^{dAB}	5.58±0.46 ^{aA}	3.30±0.60 ^{dC}	4.37±0.91 ^{bcB}	3.70±0.26 ^{cdB}	4.85±0.62 ^{abAB}
	15	3.71±0.50 ^{dA}	5.70±0.32 ^{abA}	6.22±0.15 ^{aA}	4.62±0.65 ^{cB}	5.91±0.69 ^{abA}	5.16±0.29 ^{bcA}
L*	0	39.52±0.91 ^{bcB}	38.99±0.07 ^{cC}	40.21±1.17 ^{abB}	39.17±0.27 ^{bcC}	38.58±0.28 ^{cC}	40.73±0.24 ^{aB}
	5	41.01±2.37 ^{bcB}	40.29±0.95 ^{cC}	41.48±1.69 ^{bcB}	42.12±1.68 ^{abcB}	44.50±0.83 ^{aA}	43.66±1.22 ^{abAB}
	10	39.80±1.66 ^{bb}	42.41±0.29 ^{abB}	35.25±1.11 ^{cC}	41.60±0.58 ^{abB}	41.00±2.26 ^{bb}	44.82±3.47 ^{aA}
	15	46.16±0.88 ^{ba}	48.74±1.26 ^{aA}	45.06±0.23 ^{ba}	45.64±0.28 ^{ba}	45.70±0.63 ^{ba}	45.74±1.18 ^{ba}

3. 电子束辐照剂量对猪肉质构的影响

质构特性是衡量肉食用品质的重要参数。表 2 所示为不同剂量电子束辐照后冷鲜猪肉的质构变化情况，相比于对照组，辐照后冷鲜猪肉的硬度显著增加 ($P < 0.05$)；咀嚼性随辐照剂量的增大呈增加趋势，主要与硬度的升高相关；辐照后，胶黏性显著增大 ($P < 0.05$)，但不同剂量处理组间无显著差异。这可能是由于辐照处理阻碍了肌浆网中 Ca^{2+} 的释放，导致钙蛋白酶活性降低，从而影响了肉的嫩度。Hultmann 等研究发现，辐照处理后大西洋鲑鱼片的硬度增加，与本研究结果一致。弹性和恢复力均在 1 kGy 时出现最大值，而其他剂量辐照组与对照组相比无显著性差异 ($P > 0.05$)；咀嚼性随辐照剂量的增大呈增加趋势，主要与硬度的升高相关；辐照后，胶黏性显著增大 ($P < 0.05$)，但不同剂量间无规律性变化；凝聚性与未辐照组相比也有增大现象。辐照后冷鲜猪肉质构特性的变化主要与肌原纤维微观结构的变化有关，各项指标的增加，可能是由于辐照引起了肌纤维

收缩，导致肉的结构更加紧密。

表 2 不同剂量电子束辐照处理对冷鲜猪肉质构的影响

质构指标	辐照剂量/kGy					
	0	1	3	5	7	9
硬度	2318.87±69.38 ^b	3065.67±112.34 ^a	3016.84±61.11 ^a	3045.53±51.95 ^a	3245.37±54.11 ^a	3143.87±57.88 ^a
弹性	0.87±0.03 ^{bc}	0.94±0.04 ^a	0.92±0.02 ^{ab}	0.84±0.02 ^c	0.9±0.04 ^{ab}	0.89±0.02 ^{ab}
凝聚性	0.51±0.04 ^c	0.63±0.03 ^{ab}	0.56±0.05 ^c	0.66±0.03 ^a	0.52±0.04 ^c	0.57±0.02 ^{bc}
胶黏性	1389.42±80.87 ^c	1727.47±43.41 ^a	1552.72±53.17 ^b	1699.42±69.31 ^a	1539.09±52.84 ^b	1711.22±54.33 ^a
咀嚼性	104.45±3.94 ^b	105.8±18.02 ^b	110.96±6.2 ^{ab}	119.77±18.73 ^{ab}	123.03±7.95 ^{ab}	133.09±5.32 ^a
恢复力	0.29±0.05 ^{bc}	0.4±0.03 ^a	0.24±0.02 ^c	0.33±0.02 ^b	0.27±0.03 ^c	0.34±0.03 ^b

4. 电子束辐照对冷却猪肉挥发性化合物的影响

为了探究辐照对冷鲜猪肉挥发性风味物质的影响，本研究通过顶空固相微萃取结合气质分析对不同剂量电子束辐照后贮藏期为 0 d 的冷鲜猪肉中挥发性物质进行检测，图 2 为通过 GC-MS 检测得到的不同剂量电子束辐照处理后冷鲜猪肉中挥发性成分的总离子流图。挥发性化合物在各处理组中的成分组成及相对含量如表 3 所示。共检测到 44 种挥发性化合物，其中 0、1、3、5、7 和 9 kGy 辐照处理组分别检测到 37、40、40、40、42 和 43 种挥发性化合物，高剂量辐照后冷鲜猪肉中挥发性物质成分最多。在检测到的 44 种挥发性物质中，包含醛类 13 种，醇类 9 种，烃类 7 种，酮类 4 种，酯类 1 种，酚类 2 种，呋喃类 1 种，含氮和含硫类共 7 种。醛类物质种类最多，其次是醇类物质。

不同剂量辐照组间各挥发性化合物的相对含量存在差异。醛类主要源自不饱和脂肪酸的氧化降解，挥发性较强且具有较低的阈值，是肉中重要的风味物质。醛类物质的相对含量在辐照处理后相比于未辐

照组显著增加 ($P < 0.05$)，当剂量为 9 kGy 时，其相对含量最高，从未辐照组的 34.19% 增加到 60.70%。这说明辐照处理促进了脂质的氧化降解，且辐照剂量越大，对脂质的氧化稳定性影响越大。其中己醛含量最为丰富，且随剂量的增加呈显著增加趋势 ($P < 0.05$)，其次是壬醛、正辛醛、庚醛和苯甲醛，辐照后也呈现增加现象，戊醛仅在 7 和 9 kGy 辐照组被检测到。己醛和庚醛主要是由亚油酸、花生四烯酸氧化生成，而壬醛主要源自油酸的氧化。研究表明，饱和直链醛一般具有强烈的令人不悦的味道，己醛、戊醛与青草及腐臭气味有关；庚醛、正辛醛、壬醛被认为具有脂肪、辛辣、鱼腥味和泥土味。辐照后以上物质含量的增加对肉的整体风味特征有不良影响。

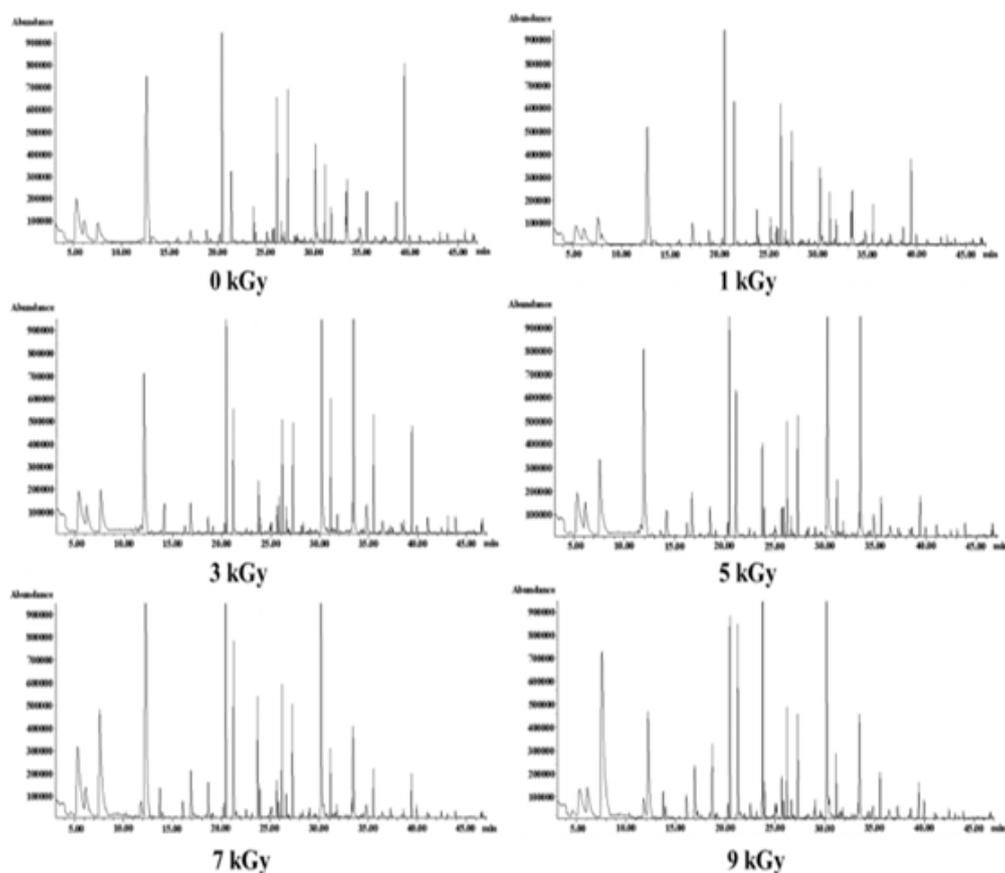


图 2 不同剂量电子束辐照处理后冷却猪肉中挥发性化合物的总离子

流图

醇类也主要源自于脂肪酸的氧化降解，尤其是 n-6 多不饱和脂肪酸。辐照处理后，醇类物质的总相对含量显著降低 ($P < 0.05$)，醇具有较强脂香和柑橘气息，辐照后其相对含量随辐照剂量的增加呈显著降低趋势 ($P < 0.05$)；1-辛烯-3-醇主要有亚油酸和花生四烯酸氧化生成，具有蘑菇气味，当辐照剂量 > 3 kGy 后，其相对含量相比于未辐照组显著增加 (3 kGy 后显著上升 ($P < 0.05$))，且具有剂量依赖性。酮类主要源自于美拉德反应或不饱和脂肪酸的氧化降解，阈值较低且具有清香气味。在检测到的酮类物质中，2,3-辛二酮占比最高，且其相对含量以及酮类物质总量均在辐照剂量 > 3 kGy 后显著上升 ($P < 0.05$)。酯类一般是由脂质氧化产生的醇类与游离脂肪酸相互作用产生，本研究中共检测到 1 种酯类物质，在总挥发性物质中占比较少。烃类物质的阈值相对较高，一般对肉品整体风味的贡献作用不大。呋喃类物质具有较低的阈值，可以赋予肉品甜香的气味。本实验中检测到一种呋喃类物质即 2-正戊基呋喃，其相对含量随辐照剂量的增加显著增大 ($P < 0.05$)。含硫类物质二甲硫基甲烷、二甲基砜和苜基甲基硫醚仅在 7 和 9 kGy 辐照组被检测到，有研究表明辐照后肉中的不良气味与含硫化合物有较大的相关性，其可能来自于含硫氨基酸的辐解，是辐照异味的主体成分。研究发现，低剂量辐照组比高剂量辐照组的山羊肉具有更好的风味与可接受性，且辐照组中检测到含硫化合物二甲基二硫的存在。本研究发现，辐照后含硫类及某些醛类(戊醛、己醛、庚醛等)物质相对含量的增加以及某些醇类(正辛醇等)相对

含量的降低对冷鲜猪肉的整体风味带来不利影响，且辐照剂量越高影响越大。

表 3 不同剂量电子束辐照处理对冷鲜猪肉中各类挥发性化合物总峰面积的影响 ($\times 10^6$)

物质种类	辐照剂量/kGy					
	0	1	3	5	7	9
醛类	56.83±4.11 ^e	80.31±4.20 ^d	83.98±8.26 ^d	105.78±9.61 ^c	123.82±14.64 ^b	217.15±17.11 ^a
醇类	34.43±2.07 ^{cd}	27.65±1.95 ^d	32.45±3.80 ^d	39.68±7.73 ^{bc}	42.34±4.87 ^b	62.66±6.67 ^a
烃类	23.63±3.61 ^c	20.57±1.96 ^c	28.37±2.76 ^b	30.08±3.06 ^b	31.20±1.11 ^{ab}	34.34±4.53 ^a
酮类	5.33±0.55 ^d	6.03±0.47 ^d	6.57±0.66 ^{cd}	7.82±2.26 ^c	10.63±1.78 ^b	19.12±0.73 ^a
酯类	3.08±0.82 ^{cd}	3.79±1.29 ^c	5.42±0.83 ^b	7.33±1.34 ^a	2.26±0.76 ^d	5.85±0.36 ^b
酚类	0.62±0.06 ^b	0.83±0.04 ^a	0.87±0.15 ^a	0.60±0.08 ^b	0.43±0.07 ^c	0.47±0.08 ^c
呋喃类	0.41±0.06 ^c	0.74±0.26 ^c	1.04±0.18 ^c	1.71±0.66 ^b	1.89±0.68 ^b	4.12±0.55 ^a
含氮类	12.30±0.75 ^a	9.13±0.44 ^b	8.61±0.39 ^{bc}	8.20±1.19 ^{bc}	6.81±0.94 ^c	7.83±2.89 ^{bc}
含硫类	nd	nd	nd	nd	1.71±0.52 ^b	2.21±0.14 ^a
含氮含硫类	29.91±2.44 ^a	14.45±3.09 ^b	16.18±3.61 ^b	9.71±1.87 ^c	7.95±1.25 ^c	6.97±1.54 ^c
总峰面积	166.55±8.31 ^d	163.88±9.57 ^d	183.91±8.97 ^d	205.61±23.39 ^c	234.62±25.10 ^b	369.29±12.60 ^a

综上所述，辐照处理会减缓生鲜肉 pH 值的上升，对微生物具有良好的杀菌作用，能够延长生鲜肉货架期 5~8 d。但是高剂量的辐照（7 kGy、9 kGy）处理不仅会降低生鲜猪肉的感官评分，还会加速其脂肪氧化速率，因此低剂量的辐照处理，更适合应用于生鲜猪肉的保鲜当中。挥发性风味物质方面，辐照处理后的生鲜肉醛类、酯类、酸类化合物含量会降低，从而对风味造成一定损失。

通过本次实验综合考虑：冷却肉最低辐照有效剂量为 1 kGy，最佳有效剂量为 3 kGy，最高耐受剂量不宜超过 6 kGy。在此条件下，猪肉辐照不仅具有较好的杀菌效果能延长生鲜肉货架期，而且对维持生鲜肉感官能起到一定积极作用。

5. 电子束辐照处理对冷鲜猪肉羰基 (MP) 氧化的影响

羰基是衡量蛋白质氧化程度的一个重要指标, 蛋白质中许多氨基酸侧链基团易被氧化生成羰基衍生物, 羰基含量越高表示蛋白氧化程度越大。由表 4 数据可知, 相同贮藏期内, 当辐照剂量 >3 kGy 时, 羰基含量与未辐照组相比呈显著升高趋势 ($P<0.05$), 这说明高剂量辐照处理会促进冷鲜猪肉 MP 的氧化, 降低其氧化稳定性。随贮藏时间的延长, 羰基含量与贮藏初期相比也呈显著升高趋势 ($P<0.05$)。羰基含量升高的原因一方面是由于 MP 受到水辐解产生的自由基的攻击, 导致含有自由氨基或亚氨基的氨基酸 (赖氨酸、精氨酸、脯氨酸等) 侧链基团的氧化以及多肽骨架的断裂, 促进了羰基化合物的产生。另一方面可能与脂质氧化相关, 脂质氧化后生成的活性醛、酮等物质可与组氨酸、半胱氨酸等氨基酸残基共价结合, 也会加速羰基化进程。

巯基易受羟自由基的攻击而发生氧化, 转化形成分子内或分子间二硫键, 导致蛋白质的交联, 巯基基团的丢失是蛋白质氧化的主要特征之一。如表 4 所示, 相同贮藏期内, 与未辐照组相比, 当辐照剂量 ≥ 3 kGy 时, 总巯基含量呈显著降低趋势 ($P<0.05$), 且具有剂量依赖性。这表明电子束辐照处理 (≥ 3 kGy) 可显著降低 MP 的氧化稳定性 ($P<0.05$)。随贮藏期的延长, 总巯基含量也逐渐降低。总巯基含量的降低伴随着二硫键含量的升高, 如表 5 所示, 二硫键含量随辐照剂量的增大呈剂量依赖性增加趋势 ($P<0.05$), 9 kGy 时二硫键含量最高, 但其随贮藏时间的变化趋势不显著。这说明辐照剂量是影

响蛋白氧化的主要因素，贮藏时间对总巯基和二硫键含量影响不大。以上结果表明，辐照诱导产生的自由基促进了 MP 氧化，蛋白质的有序结构被破坏，导致了部分包埋于分子内部的活性巯基的暴露，致使总巯基含量降低和二硫键含量升高。此外，蛋白氧化交联形成的聚合物可能覆盖住部分巯基，使其难以被检测到。Shi 等（2015）研究发现 10 kGy 的辐照剂量会导致鱼肉 MP 中活性巯基的暴露，并促进其氧化。

表 4 不同剂量电子束辐照处理对冷鲜猪肉贮藏期间 MP 羰基、总巯基和二硫键含量的影响

氧化指标	贮藏时间/d	辐照剂量/kGy					
		0	1	3	5	7	9
羰基 (nmol/mg pro)	0	0.43±0.09 ^{CD}	0.51±0.02 ^{CD}	0.52±0.06 ^{CD}	0.75±0.08 ^{BC}	0.88±0.03 ^{AD}	0.94±0.07 ^{AB}
	5	0.68±0.05 ^{CC}	0.78±0.19 ^{CC}	0.85±0.10 ^{CC}	1.09±0.06 ^{BB}	1.42±0.07 ^{BC}	1.58±0.13 ^{AA}
	10	1.04±0.09 ^{BB}	1.07±0.03 ^{BB}	1.15±0.08 ^{BB}	1.17±0.01 ^{BB}	1.53±0.01 ^{AB}	1.59±0.05 ^{AA}
	15	1.32±0.02 ^{AA}	1.35±0.1 ^{AA}	1.40±0.03 ^{AA}	1.42±0.05 ^{AA}	1.63±0.03 ^{AA}	1.67±0.03 ^{AA}
总巯基 (nmol/mg pro)	0	69.59±0.25 ^{AA}	67.37±1.86 ^{AA}	56.75±5.48 ^{AA}	54.88±3.70 ^{AA}	38.80±6.24 ^{AA}	34.96±2.19 ^{AA}
	5	67.52±1.94 ^{AB}	64.94±4.08 ^{AA}	55.03±3.39 ^{AA}	52.68±2.53 ^{AA}	35.73±3.53 ^{AA}	34.75±4.30 ^{AA}
	10	67.72±0.45 ^{AB}	65.88±1.27 ^{AA}	55.77±1.50 ^{AA}	48.55±5.36 ^{AB}	37.01±1.89 ^{AA}	34.17±3.31 ^{AA}
	15	66.07±0.74 ^{AB}	65.48±1.77 ^{AA}	51.03±7.59 ^{AA}	44.75±1.84 ^{BB}	35.96±0.67 ^{AA}	35.04±0.97 ^{AA}
二硫键 (nmol/mg pro)	0	6.75±0.99 ^{AA}	8.56±1.13 ^{AA}	15.69±0.71 ^{AA}	18.20±0.24 ^{AA}	18.44±0.59 ^{AA}	20.42±0.29 ^{AB}
	5	6.82±0.39 ^{AA}	8.64±0.25 ^{AA}	15.52±0.97 ^{AA}	18.05±0.60 ^{AA}	18.41±1.02 ^{AA}	20.77±1.05 ^{AB}
	10	6.59±0.25 ^{AA}	8.24±0.14 ^{AA}	15.86±0.27 ^{AA}	18.43±0.62 ^{AA}	18.73±1.13 ^{AA}	21.06±0.25 ^{AB}
	15	6.66±0.66 ^{AA}	8.83±1.26 ^{AA}	16.30±1.22 ^{AA}	18.52±0.92 ^{AA}	19.06±0.19 ^{AA}	21.95±0.07 ^{AA}

6.不同辐照方式下对于冷鲜猪肉的氧化效应

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。TBARS 值的高低表明脂肪二级氧化产物的多少，是用于评价脂肪氧化程度的最广泛指标之一。由表 5 可知，对照组 TBARS 值约 $0.052\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ，而经 4kGy 的 γ 射线辐照后，其 TBARS 值增加到 $0.424\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ，显著高于对照

组($p < 0.05$)。与对照组相比,经 4kGy 电子束辐照后 TBARS 值为 $0.119\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$, 较 γ 射线组低。表明相对于 γ 射线,电子束辐照可以减缓冷却猪肉脂肪的氧化。

表 5 不同处理对冷鲜猪肉 TBARS、羰基和双烯值的影响

处理方式 Treatment method	TBARS 值 TBARS values	羰基值 Carbonyl values	双烯值 Diene values
对照	$0.052 \pm 0.003\text{a}$	$0.093 \pm 0.009\text{a}$	$0.482 \pm 0.007\text{a}$
电子束	$0.119 \pm 0.005\text{b}$	$0.103 \pm 0.005\text{b}$	$0.504 \pm 0.020\text{b}$
γ 射线	$0.424 \pm 0.073\text{c}$	$0.118 \pm 0.047\text{c}$	$0.580 \pm 0.007\text{c}$

羰基值主要反映脂肪氧化分解产物醛、酮的含量。双烯值反映不饱和脂肪酸氧化初始形成的共轭双键的含量,其形成伴随氢过氧化物的产生,可表示特定时间下的氧化情况。由表 5 可知,对照组的羰基值显著低于辐照组;辐照处理组中,电子束组的羰基值为 $0.103\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$,显著低于 γ 射线组($0.118\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$)($p < 0.05$)。辐照肉的双烯值高于未辐照处理,双烯值从高到低依次为: γ 射线 $>$ 电子束 $>$ 对照组,3 个处理组之间差异显著($p < 0.05$)。表明辐照处理后猪肉中含较多氧化初始形成的共轭双键,氧化分解产物醛、酮的含量比未辐照组高。

7. 不同辐照方式对冷鲜肉营养品质的影响

由表 6 可知,经 2 种不同辐照方式处理的冷鲜猪肉蛋白质含量与对照组相比无显著差异。这可能是由于蛋白质含量是通过各种含氮物质总量来反映,因此辐照对蛋白质含量无影响。与对照组相比,冷鲜肉经 4.0kGy 剂量辐照处理后,其水分含量、脂肪含量、灰分均无显著差异,且辐照组之间差异也不显著。

表 6 不同处理对冷鲜猪肉水分、脂肪、蛋白质和灰分含量的影响

处理方法 Treatment method	水分含量 Water content	脂肪含量 Fat content	蛋白质含量 Protein content	灰分含量 Ash content
对照	73.479 ± 1.275a	18.301 ± 1.720a	20.359 ± 0.093a	1.015 ± 0.068a
电子束	73.402 ± 1.471a	17.865 ± 1.213a	20.282 ± 0.452a	1.011 ± 0.076a
γ 射线	73.396 ± 1.476a	17.077 ± 1.404a	20.241 ± 0.834a	0.948 ± 0.089a

8. 不同辐照方式对冷鲜肉理化性质的影响

由表 7 可知，电子束和的 γ 射线组的蒸煮损失分别为 23.059% 和 24.174%，均显著高于对照(18.985%) ($p < 0.05$)；剪切力分别为 2927.98N 和 2938.49N，显著低于对照组(3369.62N) ($p < 0.05$)。辐照处理后冷鲜肉的蒸煮损失显著升高，剪切力均显著降低($p < 0.05$)。在等剂量辐照的条件下，电子束组蒸煮损失显著高于 γ 射线组($p < 0.05$)，剪切力则无显著差异。

表 7 不同处理对冷鲜猪肉蒸煮损失和剪切力的影响

处理方式 Treatment method	蒸煮损失 Cooking loss/%	剪切力 Shear force/N
对照	18.985 ± 1.911a	3369.62 ± 348.29a
电子束	23.059 ± 1.963b	2927.98 ± 412.54b
γ 射线	24.174 ± 1.525c	2938.49 ± 367.17b

9. 不同辐照方式对冷鲜肉风味的影响

PEN3 电子鼻有 10 个传感器，每个传感器对不同气味成分敏感性不同。W1C 对芳香成分灵敏，W5S 对氮氧化物很灵敏，W3C 对氨水、芳香成分灵敏，W6S 对氢气有选择性，W5C 对烷烃、芳香成分灵敏，W1S 对甲烷灵敏，W1W 对硫化物灵敏，W2S 对乙醇灵敏，W2W 对芳香成分、有机硫化物灵敏，W3S 对烷烃灵敏。

表 8 代表不同传感器响应面值，结果表明，冷鲜猪肉经过不同方式的辐照处理后，2(W5S)、7(W1W)、9(W3S)号传感器最为敏

感，由此可知，氮氧化合物、硫化物和烷烃类物质是辐照后电子鼻主要的响应物质。与对照组相比，处理组增加了 3 种物质的生成量，经过辐照后冷鲜猪肉会产生一定的“辐照味”，但电子束和 γ 射线相比，电子束处理组的响应面值显著大于 γ 射线处理组 ($p < 0.05$)。由此可见电子束处理的冷鲜猪肉产生的“辐照味”更小，对冷鲜猪肉的保鲜效果更佳。

表 8 不同处理对各传感器响应值的影响

序号 No.	传感器 名称 Sensor name	处理方式 Treatment method		
		对照 Control	电子束 Electron beam irradiation	γ 射线 γ irradiation
1	W1C	1.349 ± 0.228b	1.357 ± 0.036bed	1.290 ± 0.020e
2	W5S	4.528 ± 1.814a	4.031 ± 0.473a	3.104 ± 0.064b
3	W3C	1.155 ± 0.092b	1.153 ± 0.012d	1.118 ± 0.007fg
4	W6S	1.074 ± 0.011b	1.063 ± 0.005d	1.062 ± 0.005f
5	W5C	1.074 ± 0.033b	1.075 ± 0.007d	1.059 ± 0.003f
6	W1S	1.747 ± 0.386b	1.686 ± 0.060bc	1.580 ± 0.036d
7	W1W	4.185 ± 1.655a	4.382 ± 0.269a	3.725 ± 0.106a
8	W2S	1.362 ± 0.230b	1.347 ± 0.044cd	1.289 ± 0.019e
9	W2W	2.033 ± 0.555b	1.789 ± 0.603b	1.547 ± 0.043c
10	W3S	1.211 ± 0.034b	1.182 ± 0.016d	1.184 ± 0.009f

10. 气调包装对辐照冷鲜猪肉的品质保持

分别按照空气包装(A、B组)和 35% O₂ + 65% CO₂(C组)、35%O₂ + 35%CO₂ + 30%N₂(D组)气调包装的包装条件进行包装，结合最低剂量(3K Gy)进行辐照测试。

生鲜肉的持水力是指肉品维持自身和向外界添加水分的能力。持水力的高低也是评判生鲜肉鲜度的关键指标之一，其数值直接关系到生肉类及其成品的质量、韧性、嫩度、口味和出产量等，在特定的

pH 值和储存温度下，生肉品持水力的改变大多是由于蛋白质水解和肌肉萎缩，导致水分被排挤到细胞外层空间中所导致的。在贮藏期内（表 9），B 组的持水性比 A 组的低，C、D 这 2 组之间无显著差异($p > 0.05$)，但相比 B 组，C、D 这 2 组生鲜肉持水能力更好，如表 9 所示。产生的原因可能是，由于辐照处理温度和气体组成比例的差异影响了蛋白质等氧化，以及蛋白质等与水分之间的相互作用，从而导致了水分丧失，随实验的不断进行，肌原纤维蛋白质氧化程度进一步增加，肌原纤维骨架的完整性也遭到了损害，肌肉保持水性变差。实验结果表明辐照处理会减小生鲜猪肉的持水力，而不同气调包装协同辐照处理，则在一定程度上可以减少辐照处理对生鲜猪肉持水力的影响。

表 9 不同气调包装对辐照生鲜猪肉持水力的影响

贮藏 时间/d	持水力/%			
	A 组	B 组	C 组	D 组
1	28.18 ± 0.09 ^b	27.13 ± 0.27 ^c	27.48 ± 0.19 ^b	27.09 ± 0.05 ^b
3	27.74 ± 1.02 ^c	21.52 ± 0.03 ^c	26.74 ± 0.82 ^c	26.59 ± 0.11 ^b
6	18.09 ± 0.11 ^c	17.30 ± 0.48 ^c	19.39 ± 0.41 ^c	19.26 ± 0.61 ^b
9	16.21 ± 0.31 ^{ab}	15.72 ± 0.69 ^c	17.81 ± 0.41 ^{ab}	18.04 ± 0.09 ^{bc}
12	15.83 ± 0.57 ^a	14.09 ± 0.49 ^{cd}	16.13 ± 0.97 ^a	16.87 ± 0.40 ^b

质构检测是对试样感官品质和质地的一个测试手段，被普遍的运用在食品行业中，其稳固性主要体现在了当试样遭遇外力时，如在进入口腔时或牙齿挤出肉块时抵抗变形的能力程度，弹性则用来描述在

受到重压后的试样回复至最初形态的程度。咀嚼量表示了样品在口内咀嚼过程中所消耗的能量多少，在一定范围内，与肉样体的总质量成正向相关性。

表 10 不同气调包装对辐照生鲜猪肉质构的影响

组别	硬度/g	黏度/(g·s)	回复性	黏聚性
A 组	2324.95 ± 0.92 ^a	-1.64 ± 0.11 ^c	0.19 ± 0.11 ^c	0.52 ± 0.01 ^c
B 组	1759.65 ± 0.99 ^c	-0.86 ± 0.21 ^c	0.25 ± 0.21 ^b	0.64 ± 0.04 ^b
C 组	1769.16 ± 2.93 ^d	-0.36 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.43 ^d	0.55 ± 0.21 ^a
D 组	1862.09 ± 4.02 ^b	-0.03 ± 0.03 ^a	0.24 ± 0.33 ^a	0.63 ± 0.42 ^d

其中，A 组的硬度最大为 2324.95g，B、C、D 组的硬度无显著性差异($p>0.05$)，其原因是由于辐照会使生鲜肉内部纤维变得疏松，各组的回复力和黏聚力都无显著性差异($p>0.05$)，黏度方面差异较大，在 12d 时，A 组的黏度最低，D 组的黏度远远小于 A 组的黏度，如表 10 所示。其原因可能是生鲜肉微生物的生产情况导致差异，微生物的大量繁殖会破坏蛋白质网状结构，使其变得粘稠，从 C、D 组经辐照处理和气调气体组分氧含量较低，抑制微生物效果最明显。实验结果表明气调处理能提高辐照生鲜猪肉的硬度，改善黏度，对提高生鲜猪肉的新鲜度有积极作用。

随着时间的延长，不同组分内的生鲜猪肉中的微生物都以不同速度进行繁殖。其中 A 组生鲜猪肉中微生物繁殖速度最快，在 12d 时菌落总数为 7.39lgcfu /g，菌落数 >6 lgcfu /g，肉制品发生腐败变质；与 B 组相比，C、D 这 2 组菌落数增长缓慢，在第 12 天时，菌落

数分别为 5.07lgcfu /g、4.80lgcfu /g，说明 C、D 组的样品维持着较好的新鲜度，2 组的抑菌效果最好。其原因很可能是由于 B、C、D 这 3 种试样，经过辐照处理后控制了部分微生物的生产繁殖，随着时间的增长，B 组微生物的生命活动越来越丰富，C、D 这 2 组由于在经过辐照处理后经气调包装，改善了气体组成成分，从而控制了肉类试样表面携带的细菌的生长繁殖。气调包装对菌落生长的主要控制在于 O₂ 含量影响肉样中厌氧菌的生长，而且 CO₂ 还作为一个抑菌剂，可以控制生猪在贮存时期内的好氧微生物的生长。实验结果表明，气调协同辐照处理，能更好抑制微生物的生长繁殖，比单一辐照处理效果更佳，其中 35% O₂ + 35% CO₂ + 30% N₂(D 组) 抑菌效果较好。

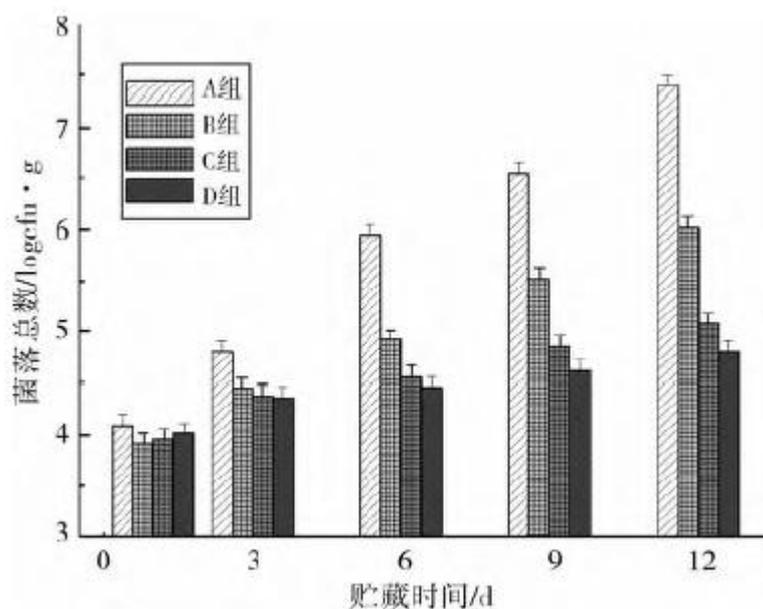


图 3 生鲜猪肉菌落总数的测定

(二) 修订前后技术内容对比

1. 修改了标准名称

将《冷却包装分割猪肉辐照杀菌工艺》修改为《冷却肉类辐照杀菌工艺》。

2. 增加、修改了冷却肉类、辐照工艺剂量等术语和定义

本标准第 3 章，2001 版第 3 章。

冷却肉类：活畜（猪、牛、羊、兔等）、禽（鸡、鸭、鹅等）宰杀、新鲜的被分割成块或切碎的处于 0-4℃ 状态的冷却肉类，包括带骨肉和其他器官（心、肝、舌）等。

最低有效剂量：为达到辐照目的所需的最低吸收剂量，即工艺剂量的下限值。

最高耐受剂量：不会对产品的品质和功能特性产生负面影响的^{最大}吸收剂量，即工艺剂量的上限值。

辐照工艺剂量：为了达到预期的工艺目的所需的吸收剂量范围，其下限值应不低于最低有效剂量，上限值应不高于最高耐受剂量。

剂量不均匀度：加工负荷内最大吸收剂量和最小吸收剂量之比。

4. 修改了冷却肉辐照前产品要求。

本标准第 4 章，2001 版第 4 章。

产品要求：冷却肉类应符合相应的标准规定，产品生产厂家应向辐照加工单位提供产品名称、生产批号、数量、包装尺寸和辐照要求等。

包装：包装材料必须选用食品级、耐辐照的材料，产品包装的规格和形式应方便辐照加工的进行，并能有效避免辐照加工后的再污染，且应符合 NY/T 3383 的规定。

建立工艺文件：应确定装载模式，并通过冷却肉的剂量分布测试，获得监测剂量计位置吸收剂量与产品最低吸收剂量、最大吸收剂量关

系，并建立工艺文件。

5. 修改了辐照源、最低辐照剂量等。

本标准第 5 章，2001 版第 5 章。

辐射源：电离辐射源为 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 放射性核素产生的 γ 射线、电子加速器产生的能量不高于 5 MeV 的 X 射线和电子加速器产生的能量不高于 10 MeV 的电子束。

辐照工艺剂量：冷却肉类的最低有效剂量根据初始含菌量确定，最高可接受剂量不能超过 7 kGy。辐照工艺剂量应设定在最低有效剂量与最高耐受剂量之间。

剂量不均匀度：产品辐照剂量不均匀度 ≤ 2.0 。

再辐照：冷却肉类食品不得再次辐照处理。

以下情况不被看作再辐照：

- a) 为了检疫控制而对已辐照处理的肉类进行的辐照；
- b) 对已辐照处理的肉类作为原料加工成的食品进行的辐照处理，且该食品中含量不超过 5%。

6. 删除了具体感官评价要求。

本标准第 6 章，2001 版第 7 章。

采用本标准辐照的冷却肉质量应同辐照前，感官评定参考 GB/T 22210，并且辐照后的冷却肉的食用品质和功能特性不会改变。

7.增加了产品放行要求。

本标准第 6 章。

应制定冷却肉辐照的放程序，确认冷却肉的吸收剂量满足工艺

剂量要求方可放行，并应考虑剂量测量系统的不确定度。

应规定控制和处理辐照不合格产品的相关职责和权利。应保存程序文件和记录以查找引起不合格的原因和问题。

8. 删除了“重复辐照”见 2001 年版的第 9 章。

9. 删除了“保质期”见 2001 年版的第 10 章。

10.增加了“记录和文件管理”的要求

见本标准第 10 章。

所有记录文件应妥善保管，在食品的保质期内备查，应至少保存 2 年。

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益；

（一）冷却猪肉辐照杀菌研究进展和实验验证的分析

冷鲜猪肉作为生鲜肉供应和消费的主要方向，正占据着越来越多的肉类市场，猪肉在生产、加工、运输、贮藏及销售的过程中，容易被微生物污染造成腐败变质，常温下，鲜肉货架期仅为 4 d 左右，货架期短成为限制冷鲜肉快速发展的主要瓶颈。传统保鲜方法如低温保鲜、真空包装等方法，能够在一定程度上延长生鲜肉的货架期。其原理主要是抑制了微生物的生长繁殖。并没有解决猪肉在屠宰运输过程中，极易污染沙门氏菌、大肠杆菌、肉毒梭菌等致病菌这些问题。辐照技术作为一种保鲜手段，特点在于良好的杀菌性能，杀菌速度快，操作简便，对食品中普遍存在的致病菌均有良好的杀菌效果。通过几十年的研究表明，低于 10 kGy 剂量的辐照处理，不会有残留问题，并

且温度变化小，不污染食品，相较于低温冷冻保藏，能耗降低了几倍到十几倍。因此推动辐照技术应用于生鲜猪肉的保鲜具有深远的意义。

目前我国应用于食品上的辐照射线类型主要有两种，一种是以 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 作为辐照源产生的 γ 射线，另一种是由高能加速器产生的电子束。高能电子束辐照处理相比于 γ 射线处理时间更短，能较好控制温度需要，且不存在放射性污染、核泄漏等一系列问题，更加方便的同时安全性更佳，因此电子束辐照处理在食品方面的应用更加广泛。Bouzarjomehri 等使用不同剂量电子束辐照香肠，结果表明电子束能有效减少细菌总数，且对沙门氏菌具有良好杀灭效果，2 kGy 辐照剂量为最优剂量。顾可飞等对猪里脊肉进行电子束辐照处理后的感官特性变化进行了分析研究，结果表明不超过 3 kGy 的低剂量电子束辐照后会 使里脊肉有轻度辐照味，贮存过程中“辐照味”可逐渐自行消失。能够增加猪肉色度感官，起到一定程度的保鲜效果。Parviz 等对鸡肉进行辐照处理后，在低温 4 °C 下贮藏，结果辐照组鸡肉货架期比对照组延长了 7 d，感官特性也优于对照组。程述震等研究了电子束辐照对冷鲜猪里脊肉品质及蛋白特性的影响，得出辐照处理能够加剧冷鲜猪肉的脂肪氧化，并使其蛋白质的溶解度和非蛋白氮含量增加。

蛋白质是肉品的重要组成成分，与肉的品质密切相关。对冷鲜肉进行辐照处理，会使肉中的水分子发生辐解，产生羟自由基、氢自由基等，促进蛋白质的氧化降解。有研究表明，辐照后猪肉 MP 中总羰基的含量显著提高，说明辐照促进了蛋白氧化(Zhang et al., 2020)。

而蛋白质氧化会引发一系列问题：第一，蛋白氧化不仅会对蛋白的微观结构造成影响，比如引起羰基化、蛋白交联和聚合、分子间二硫键的形成、肽链断裂等（Malheiros et al., 2019），还会导致蛋白质功能特性的变化，影响肉品的质构、色泽、持水性等食用品质（Fernandes et al., 2016），不利于肉品的加工和销售。蛋白过度氧化会使其凝胶结构松散，不能与水形成稳定的网状结构，且氧化程度越高，影响越大（赵冰等，2018），而凝胶强度的降低会使肉的口感变差。第二，会影响蛋白的可消化性。有研究发现蛋白可消化性随其氧化程度的增大呈先增后减趋势（Sante-Lhoutellier et al., 2007）。蛋白的轻度氧化可使其结构伸展，暴露更多的消化酶酶切位点，使蛋白更易被消化；但过度氧化会导致蛋白质交联和沉淀，形成致密的结构，掩埋相应的酶切位点，可消化性降低，使肉的营养价值下降（Hellwig et al., 2019）。第三，蛋白氧化还可能会导致氨基酸损失、氨基酸生物效率降低等（Li et al., 2017）。因此，在冷鲜肉辐照处理中，如何控制蛋白氧化是必须考虑的问题。脂质是产生肉品风味的重要前体物质，与肉的感官品质和营养价值有密切关系。研究表明，电子束辐照处理会降低脂质的氧化稳定性，且与辐照剂量有很大的相关性。刘春泉等（2014）研究发现，当辐照剂量 >4 kGy 时，冷冻山羊肉的脂质氧化程度与对照组相比明显加深；Dutra 等（2017）研究发现，高剂量辐照促进了熏香肠的脂肪氧化。脂质氧化一方面会导致异味、变色、滴水损失及有毒化合物的积累，影响消费者的接受度和健康（Falowo et al., 2014; Eric et al., 2015）。何立超等（2017）研究表明，一些醛类（如 3-甲基丁

醛、2-甲基丁醛等)及含硫化合物的形成是辐照后猪肉火腿肠异味增加的主要原因之一。另一方面脂质氧化可能会导致必需脂肪酸的减少,使肉的营养价值降低,且脂质氧化的大多数中间产物及终产物可与蛋白发生反应(Wazir et al., 2019),诱导蛋白氧化。除了脂质和蛋白质外,肉品中还含有少量碳水化合物、维生素等营养物质。通常,碳水化合物对射线的敏感度较低,在辐照处理下相对稳定,只有在较高剂量的辐照下才会发生氧化和降解等反应。但应用于肉品的辐照剂量一般控制在 10 kGy 以下,所以辐照对碳水化合物的影响极其微小。相比于碳水化合物,维生素对辐照的敏感性较高,且不同维生素对辐照的敏感性存在差异。水溶性维生素中,VB1 对辐照最为敏感,其次是 VC; 脂溶性维生素中,VE 的辐照敏感性相对较高。辐照剂量不同,对维生素的影响也有差异,一般来说,剂量越大对维生素的不利影响越大。

虽然微生物在受到辐射时所造成的损害,与其所处食品的化学成分、食品添加剂和防腐剂、水分活度等相关,综上所述,已有的国内外研究结果表明,在超过 7kGy 的合适辐照剂量足以达到冷却肉灭菌效果。

本试验验证结果与前人的研究结果基本一致,与 GB/T 18526.3-2001 的工艺剂量有一定的出入,建议冷却猪肉的最低有效剂量为 1.0 kGy,最佳辐照剂量为 3kGy,最高耐受剂量 7kGy。

(二) 技术经济论证

辐照灭菌是一种利用 γ 射线或电子束辐射,对产品进行杀菌、灭

菌和消毒的技术。据统计，截至 2023 年底，我国共有 105 家 γ 辐照企、事业单位，共有辐照装置 120 座，总设计装源量 1.9 亿 Ci，实际装源量 5500 万 Ci；安装运行的用于辐射加工的电子加速器装置 1153 台，总功率 83011.7kW。在国际上，欧美等发达国家的辐照技术服务市场已经进入了一个相对成熟的发展阶段，国际知名的综合灭菌商如 Sterigenics、Steris 等拥有分布于世界各地的数十家消毒灭菌服务网点。

随着辐照装置设计能力和保有活度的提升，以及医疗保健产品、食品等行业的跨国企业在我国境内设立子公司或代工厂，对产品的微生物提出了更高的要求，以及政府对消毒灭菌标准的提高和监管趋严，辐照灭菌企业需在国家相关标准指导下不断优化工艺技术、加强质量控制，推动服务的专业化。

（三）预期的经济效益、社会效益和生态效益

辐照灭菌具有显著的经济效益，与传统的加热和冷藏处理相比，可节约能耗 70%~90%。辐照处理后的食品可采用普通包装贮藏，省去大量制罐、冷冻冷藏等材料及能量消耗，辐照灭菌快速高效，如电子束辐照灭菌后可直接运输，无需仓储成本。食品安全需求推动行业增长。辐照灭菌行业发展前景分析显示随着人们对食品安全和品质的要求不断提高，食品辐照技术将会得到更广泛的应用。冷鲜猪肉因产品应用广、产销量巨大，有大量杀菌需求，辐照技术具有独特优势，未来市场需求将会持续增长。随着全民环保和节能意识增强，辐照灭菌技术相比传统消毒方法具有更高效、更节能、更环保的优势，避免了化学熏蒸产生残留或环境污染问题和高温灭菌对产品香味和色泽

的影响，符合现代社会对绿色生产和可持续发展的需求，因此在环保意识增强的背景下，该技术的应用前景十分乐观。

（四）与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况；

本标准对冷鲜猪肉在辐照过程和工艺方面，包括辐照前、辐照过程、辐照后、记录和文件管理等全部辐照生产环节提出了具体的技术要求，这些技术要求与其他标准没有重复，标准相关内容与其他标准没有矛盾或不协调不配套的，与国家产业政策协调一致。因此，本标准与我国的现行法律、法规和强制性国家标准没有冲突。

（五）以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因；

本标准未采用国际国外标准。因国际标准更侧重原则性框架，而中国标准细化到适用范围和工艺参数。

（六）与有关法律、行政法规及相关标准的关系；

本标准主要应用于冷却肉的辐照杀菌领域，引用的标准主要有 GB/T 17568《 γ 辐照装置设计建造和使用规范》；GB/T 22210《肉与肉制品感官评定规范》；GB/T 40590《辐射加工用电子加速器装置运行维护管理通用规范》；NY/T 3383 畜禽产品包装与标识等，上述标准中对肉类辐照加工工艺、感官评价、标签等规定与本项目相关内容一致。

从食品辐照的标准体系上看，推荐性的系列食品辐照工艺标准若能尽快修订，再加上专业协会学会的团体标准，就会形成很好的强制

性国家标准、包括本修订标准在内的推荐性工艺规范、行业标准和专业协会学会的具体食品品种的规程类团体标准，形成科学合理的标准体系，促进辐照技术的在保证我国食品加工水平上的应用。

（七）重大分歧意见的处理经过和依据；

本标准编制过程中未出现重大意见分歧。

（八）涉及专利的有关说明；

无。

（九）实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议；

采用辐照加工时，在工艺剂量范围内，具体可根据实际辐照目的和卫生质量确定，尽可能采用较低剂量，以减少辐照剂量增加引发的质量负面风险。

建议本标准作为推荐性标准发布。

（十）其他应当说明的事项。

无。

参考文献：

[1]葛凤芹.电子束辐照对冷鲜猪肉氧化及异味形成的影响研究[D].山东农业大学,2022.

[2]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.

[3]李丹丹,郑丽,刘雨晗,等.猪肉生物保鲜技术研究进展[J].肉类研

究,2020,34(11):98-105.

[4]侯召华,曾庆升,宁浩然,等.冷却肉储藏保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2015,15(01):64-68.

[5]Hassanzadeh P, Tajik H, Rohani S M R, et al. Effect of functional chitosan coating and gamma irradiation on the shelf-life of chicken meat during refrigerated storage[J]. Radiation physics and chemistry, 2017, 141: 103-109.

[6]顾可飞.电子束辐照对冷藏猪脊肉品质特性的影响[J].现代食品科技, 2013, 29(03): 498-500.

[7]Asmarani R R, Ujilestari T, Sholikin M M, et al. Meta-analysis of the effects of gamma irradiation on chicken meat and meat product quality[J]. Veterinary World, 2024, 17(5): 1084.

[8]程述震,刘伟,冯晓琳,等.电子束辐照对冷鲜猪里脊肉品质及蛋白特性的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(03):151-156.

[9] Zhang M, He L, 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.

[10] Malheiros J M, Braga C P, Grove R A, et al. Influence of oxidative damage to proteins on meat tenderness using a proteomics approach[J]. Meat Science, 2019, 148: 64-71.

[11]Fernandes R P P, Trindade M A, Lorenzo J M, et al. Effects of oregano extract on oxidative, microbiological and sensory stability of

sheep burgers packed in modified atmosphere[J]. *Food Control*, 2016, 63: 65-75.

[12]赵冰,李素,张顺亮,等.蛋白氧化对肌原纤维蛋白凝胶构效关系的影响[J].*食品科学*,2018,39(03):55-61.

[13]Sante-Lhoutellier V, Aubry L, Gatellier P. Effect of oxidation on in vitro digestibility of skeletal muscle myofibrillar proteins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(13): 5343-5348.

[14] Hellwig M. The chemistry of protein oxidation in food[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(47): 16742-16763.

[15] Li L, Liu Y, Zou X, et al. In vitro protein digestibility of pork products is affected by the method of processing[J]. *Food Research International*, 2017, 92: 88-94.

[16]刘春泉,冯敏,李澧,等.辐照处理对冷冻羊肉品质的影响[J].*核农学报*,2014,28(06):1018-1023.

[17]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: 232-239.

[18] Falowo A B, Fayemi P O, Muchenje V. Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review[J]. *Food Research International*, 2014, 64: 171-181.

[19]何立超,马素敏,李成梁,等.辐照处理提高猪肉火腿肠保鲜效果[J].*农业工程学报*,2016,32(22):296-302.

[20] Wazir H, Chay S Y, Zarei M, et al. Effects of storage time and temperature on lipid oxidation and protein co-oxidation of low-moisture shredded meat products[J]. *Antioxidants*, 2019, 8(10): 486.

[21]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.

[22]蔡颖萱,魏文婧,董鹏程,等.电子束辐照对肉中微生物和肉品质的影响及机制研究进展[J].*食品工业科技*,2023,44(08):446-453.

[23]刘福莉,陈华才,杨菁怡. γ 辐照和电子束辐照对猪肉火腿肠质量的影响研究[J].*中国计量学院学报*,2010,21(04):314-318.

[24]石梦琦,冯涛,孔秋莲,等.电子束辐照对冷鲜猪里脊肉风味的影响[J].*食品研究与开发*,2023,44(03):72-78.

[25]何立超,吴文敏,杨海燕,等. γ -辐照生鲜猪肉中氨基酸及小分子肽组成特征分析[J].*食品科学*,2018,39(24):26-33.