

电子束辐照灭菌对南美白对虾性能的影响

许零¹ 吴沥豪¹ 陈功¹ 毋思思¹ 任康¹ 周艳艳¹ 吴云建² 颜良豪² 郭文忠²

¹(厦门大学公共卫生学院 传染病疫苗研发全国重点实验室 翔安创新实验室 厦门 361102)

²(福建汇盛生物科技有限公司 漳州 363000)

摘要 电子束(Electron beam, EB)辐照灭菌是避免微生物污染影响食品品质的有效方法。为探究南美白对虾使用电子束灭菌后的性能变化,采用10 MeV电子加速器辐照加工系统对样品进行辐照(吸收剂量范围0~12 kGy),并对虾的蛋白质、脂肪和氨基酸含量, pH, 挥发性盐基氮, 质构特征, 微生物学及感官满意度进行测试。结果表明:蛋白质、脂肪含量均在正常范围内。在最佳吸收剂量(6~8 kGy)时,表征虾新鲜度的挥发性盐基氮含量较低,大部分氨基酸含量达峰值,咀嚼性、内聚性等质构特征明显提升,未检出微生物菌落,颜色和口感更好。这表明EB辐照灭菌是一种有效的食品微生物控制手段,在不降低冷冻南美白对虾营养成分等性能的情况下,使其口感更为新鲜。

关键词 南美白对虾, 电子束辐照, 灭菌

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0064

引用该文:

许零, 吴沥豪, 陈功, 等. 电子束辐照灭菌对南美白对虾性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(6): 060404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0064.

XU Ling, WU Lihao, CHEN Gong, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the properties of frozen *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(6): 060404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0064.



Effects of electron beam irradiation on the properties of frozen *Litopenaeus vannamei*

XU Ling¹ WU Lihao¹ CHEN Gong¹ WU Sisi¹ REN Kang¹ ZHOU Yanyan¹

WU Yunjian² YAN Lianghao² GUO Wenzhong²

¹(State Key Laboratory of Infectious Disease Vaccine Development, Xiang An Biomedicine Laboratory & School of Public Health, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

²(Fujian Huisheng Biotechnology Co.Ltd., Zhangzhou 363000, China)

基金资助: 福建省2021年科技计划: 冷链物流新冠病毒消杀科研攻关项目(2021H0001)、福建省科技计划高校产学研合作项目(2021Y4007)、厦门大学科研成果落地转化项目、厦门市海洋与渔业发展专项资金项目(18CYY007HJ04)、深圳市自然科学基金(JCYJ20220530143401003)资助

第一作者: 许零,女,1971年8月出生,2005年于日本东京工业大学获博士学位,现任厦门大学公共卫生学院教授,博士生导师,主要从事生物材料的辐射化学与辐射工艺研究,E-mail: lingxu@xmu.edu.cn

收稿日期: 初稿 2023-08-01; 修回 2023-09-27

Supported by Science and Technology Plan for 2021 of Fujian Province: Novel Coronavirus Disinfection Research Project of Cold Chain Logistics (2021H0001), Fujian Provincial Science and Technology Plan University Industry-University Cooperation Project (2021Y4007), Scientific Research and Conversion Project of Xiamen University, Xiamen Marine and Fishery Development Special Fund Project (18CYY007HJ04), and Natural Science Foundation of Shenzhen City (JCYJ20220530143401003)

First author: XU Ling (female) was born in August 1971, and obtained her doctoral degree from Tokyo Institute of Technology in 2005. Now she is a professor and doctoral supervisor at the School of Public Health, Xiamen University, engaged in the research on radiation chemistry and radiation processes of biological materials. E-mail: lingxu@xmu.edu.cn

Received 01 August 2023; accepted 27 September 2023

ABSTRACT Electron beam (EB) irradiation is an efficient method for avoiding microbial contamination affecting food quality. To explore the properties of *Litopenaeus vannamei* after EB sterilization, samples were irradiated at an absorbed dose of 0–12 kGy using a 10-MeV backward wave linear accelerator and tested for protein, fat, and amino acid content; pH; volatile saline nitrogen; textural features; microbiology; and organoleptic satisfaction. The results showed that the protein content and fat content were in the normal range. In the optimal absorbed dose range (6–8 kGy), TVB-N, which characterizes the freshness of shrimp, was apparently lower. Further, most of the amino acids peaked; textural features such as chewiness and cohesiveness were significantly enhanced; no microbial colonies were detected; and both color and taste were relatively better. These results suggest that EB irradiation sterilization is an effective method for microbiological control of food, and it results in greater freshness without degradation of the properties of frozen *Litopenaeus vannamei* in terms of nutrient content and other properties.

KEYWORDS *Litopenaeus vannamei*, Electron beam irradiation, Sterilization

CLC TL99

南美白对虾是世界三大养殖虾之一^[1-3], 含有丰富的蛋白质等营养成分, 这也增加了在物流过程中微生物污染的风险, 易引起腐败, 影响口感并传播疾病^[4]。在我国疫情期间, 中国多地海关陆续在南美白对虾外包装和内部环境样本中检出新冠病毒核酸阳性。这一事件引发了公众的广泛关注, 部分消费者担心购买和食用南美白对虾可能感染新冠病毒, 导致南美白对虾的市场需求急剧下降。为保护大众健康, 中国海关总署于2020年7月10日发布通知, 暂停厄瓜多尔涉事企业的冻南美白对虾进口, 并加强了南美白对虾等进口冷链食品的管控。该事件对南美白对虾进口行业造成了极大冲击。基于此, 福建省政府组织了应急攻关项目开展冷链食品的消杀技术研究。

辐照灭菌技术已被广泛应用于食品、农产品、医疗、水处理等领域的灭菌, 常用的辐照灭菌技术有 γ 射线、X射线和电子束(Electron beam, EB)^[5-6]。与⁶⁰Co γ 射线辐照相比, EB辐照更为高效^[7]。其中, 10 MeV电子加速器辐照加工系统是全球主要的商业化辐射灭菌设施。当电子束辐照在特定吸收剂量范围内时, 可对食品进行消毒灭菌, 不仅能减少食品腐败, 延长储存时间, 也不会对食品的理化性质带来明显变化^[8-10]。世界粮农组织发现, “对食品进行高达10 kGy的总体平均吸收剂量的辐照通常不会产生毒理学危害”, 并且“未产生额外的营养或微生物学问题”^[11]。

本研究旨在以厄瓜多尔冷冻南美白对虾食品为研究对象, 通过分析辐照前后的蛋白质含量、挥发性盐基氮、脂肪含量、pH、氨基酸含量、质构分析、微生物和感官等变化, 探索南美白对虾辐照灭菌的最佳参数, 从而优化灭菌工艺条件。

1 材料与amp;方法

1.1 样品前处理

南美白对虾购自 Expalsa, Exportadora de Alimentos S. A. A, 个体大小均匀, 平均质量20 g/只, 虾肌肉净含量10~13 g/只。将虾分为7组, 未辐照1组为对照组, 其余组采用3~12 kGy范围内的6个吸收剂量。之后对虾进行分类、称重、包装、贴标签, 并冷冻储存在-20 °C冰箱中。

1.2 辐照条件

将样品置于含充足冰袋的保温箱中, 应用同方威视电子加速器辐照加工系统(IS1020, 10 MeV/20 kW, 厦门鑫科高能辐照技术有限公司)进行辐照。辐照参数: 平均束流强度2 mA, 扫描宽度300~800 mm, 表面辐照不均性 $\leq\pm 5\%$ 。除对照组(0 kGy)外, 吸收剂量分别设置为3 kGy、4 kGy、6 kGy、8 kGy、9 kGy和12 kGy。辐照后样品在冷冻条件下运输并储存在-20 °C。

1.3 理化、微生物特性测定

1.3.1 蛋白质含量测定

蛋白质含量由漳州出入境检验检疫局综合实验进行检测。根据GB 5009.5—2016(食品安全国家标准-食品中蛋白质的测定)^[12]的第一方法, 通过凯氏定氮仪(SKD-1000, 中国)进行测定。

1.3.2 氨基酸含量测定

取1 g虾腹部第一节, 用10 mL盐酸溶液(6 mol/L)在(110 \pm 1) °C下静置22 h, 过滤残留物后将溶液稀释至100 mL恒定值。取0.1 mL溶液进一步稀释至10 mL, 之后, 将样品溶液通过0.22 μ m

滤膜过滤到小瓶中。吸取 20 μL 样品溶液或混合氨基酸标准溶液，注入装有离子色谱仪(Thermo ICS 5000, 美国)和氨基酸分析柱(Thermo Dionex AminoPacTM PA-10, 美国)的自动氨基酸分析仪中，对不同种类的氨基酸含量进行检测。

1.3.3 挥发性盐基氮测定

样品寄至漳州出入境检验检疫局综合实验室。依照国家标准 GB 5009.228—2016^[13]，采用凯氏定氮法测定挥发性盐基氮的含量。

1.3.4 脂肪含量测定

脂肪含量由漳州出入境检验检疫局综合实验室检测。检测方法依据国家标准 GB 5009.6—2016^[14]的第二法进行检测。

1.3.5 pH 测定

去除冷冻南美白对虾的头尾，仅使用可食用的虾肉部分。称取虾肉 10 g，加蒸馏水 90 mL，匀浆放置 30 min 后，通过 pH 计(Lei Ci E-201F, 中国)对滤液的 pH 进行测量并记录。

1.3.6 质构分析

将冷冻南美白对虾在冷水下冲洗干净，虾尾去壳，取虾腹部第二、三节，制成相同规格。通过质构仪(TA-XT plus, 英国)，采用 TPA 模式，选择平底柱形探头。测定参数设为：测试前速度 1 mm/s，测试速度为 2 mm/s，TPA 测试后速度与测试速度一致，形变量 40%，预压力 5 g。测定虾辐照前后硬度、黏附性、弹性、内聚性、胶着度、咀嚼性、回复性共 7 个指标。

1.3.7 微生物学检验

取辐照前后的冷冻南美白对虾，测定微生物菌落总数、检验金黄色葡萄球菌和大肠杆菌。参照 GB 4789.3—2016、GB 4789.10—2016 和 GB 4789.3—2016 标准，菌落总数采用平板计数琼脂，金黄色葡萄球菌和大肠杆菌分别使用 Baird-Parker 琼脂和结晶紫中性红胆盐琼脂(均购自广东环凯微生物科技有限公司)。

1.3.8 感官评估

将辐照前后的冷冻南美白对虾采用盲法分组，以去头或去尾作为标记。煮熟后由参与测试者品尝口感做出综合评价。基于 Annamalai 等^[15]的研究，根据样品的颜色、杂质、外观、气味、口感、壳/肉黏着性和口味，以 5 分制进行全面评估。评估的感官特性包括：颜色(5: 无变色, 1: 极端变色); 杂质(5: 少, 1: 很多); 外观(5: 好, 1: 坏); 气味

(5: 非常理想, 1: 存在异味); 口感(5: 坚硬, 1: 非常柔软); 壳/肉黏着性(5: 小, 1: 大), 口味(5: 非常可口, 1: 极不理想), 这些分数的平均值定义为样品的总体可接受性(5: 非常理想, 1: 极不理想)。

1.3.9 分析方法

数据表示为平均值 \pm 标准差。使用 SPSS 26.0 软件(SPSS Inc., 美国)通过方差分析(ANOVA)比较不同组间是否存在差异，并使用 GraphPad Prism 8 进行分析。结果在 $p < 0.05$ 时，具有统计学意义。

2 结果与讨论

鲜虾主要由水(约 78%)、蛋白质(约 18%~20%)、脂肪(约 0.5%~2%)、灰分(约 1%~3%)、氨基酸、胆固醇等组成^[16]。电子束辐照可能会改变这些组分的分子结构，从而影响南美白对虾的理化性能。微生物的存在也可能影响南美白对虾的口感和品质。因此，对蛋白质、脂肪和氨基酸含量、pH、挥发性盐基氮值、微生物学及感官满意度进行研究，评价电子束辐照对南美白对虾营养价值和品质的影响。

2.1 吸收剂量对南美白对虾蛋白质的影响

虾肌肉中的蛋白质主要由肌原纤维蛋白(60%~70%)和肌浆蛋白(20%~30%)组成^[17]。辐照对南美白对虾蛋白质含量的影响如图 1 所示。

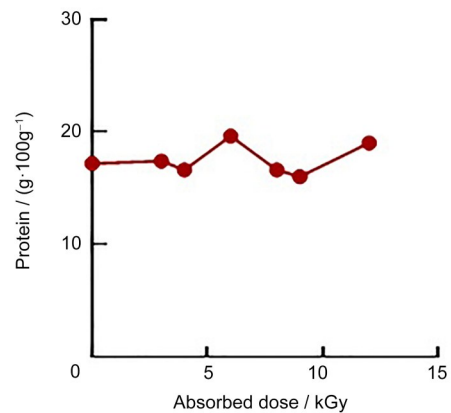


图 1 电子束辐照过程中南美白对虾蛋白质含量变化
Fig. 1 Protein of electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

对照组(0 kGy)和辐照组蛋白质含量在统计学上没有显著差异($p > 0.05$)。本研究结果表明，EB 辐照对南美白对虾蛋白质含量的影响不显著，且辐照后各吸收剂量组都保持良好的蛋白质含量，虾的营养价值得以保证。结果与之前的研究一

致^[18-19]，这可能是由于蛋白质的层次结构具有独特的性状，对低剂量辐射不敏感^[20]。

2.2 吸收剂量对南美白对虾挥发性盐基氮的影响

挥发性盐基氮是动物性食品由于酶和细菌的作用，在腐败过程中，使蛋白质分解而产生氨及胺类等碱性含氮物质，是衡量冷冻水产品新鲜度的重要指标。挥发性盐基氮的增加与腐败细菌和内源性酶的活性有关^[21]，《动物源鲜冻海产品卫生标准》中海虾挥发性盐基氮的最高标准为 30 mg/100 g^[22]。如图2所示，冷冻储存 10 d 后，各组挥发性盐基氮值均在限制范围内，对照组 (0 kGy) 挥发性盐基氮含量显著高于辐照组 ($p < 0.05$)。结果表明，辐照可以减少挥发性盐基氮的产生，原因可能是电离辐射抑制了微生物的生长和代谢，降低了微生物分解和利用蛋白质的可能性^[23]。与相关报道^[24]显示，电子束照射减少了白对虾中挥发性盐基氮含量，从而延长储存时间一致。

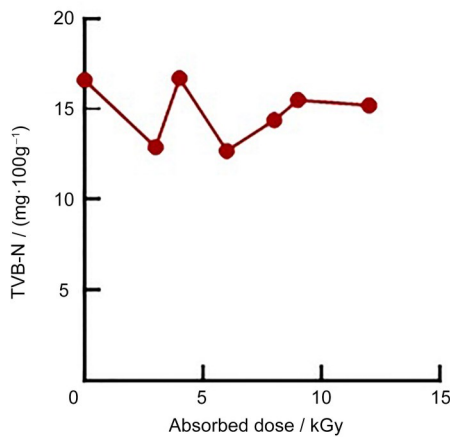


图2 电子束辐照过程中南美白对虾挥发性盐基氮含量变化
Fig. 2 TVB-N of electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

2.3 吸收剂量对南美白对虾脂肪含量的影响

辐照诱导的自氧化过程与无辐照时的自氧化非常相似，只是辐照加速了此反应的进行^[21]。辐照对脂肪含量的影响取决于脂肪的类型、剂量、温度和氧化速度以及环境条件等诸多因素，其主要作用是使脂肪酸长链中的 C-C 键发生断裂形成链烷烃，继发反应可生成通常的烯羟基，一般不影响营养价值变化^[25]。依据图3结果所示，南

白对虾辐照前后脂肪的变化范围为 0.8 ~ 1.0 g/100 g，辐照组和对照组 (0 kGy) 之间的脂肪含量在统计学上没有显著差异 ($p > 0.05$)。从本研究中可以得出，南美白对虾体内的少量脂肪对电离辐射相对不敏感，与其他研究结果相同^[18,26]。

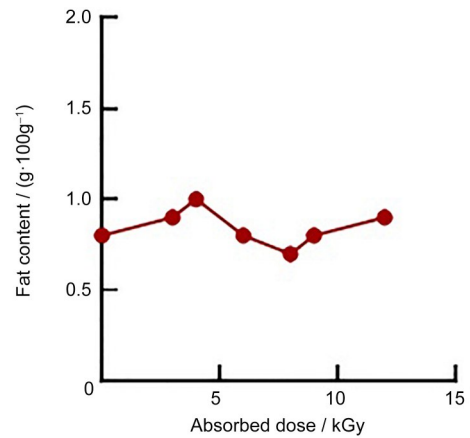


图3 电子束辐照过程中南美白对虾脂肪含量变化
Fig. 3 Fat of electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

2.4 吸收剂量对南美白对虾 pH 的影响

在 -20 °C 下冷冻 10 d 后，南美白对虾的 pH 变化情况如图4所示。

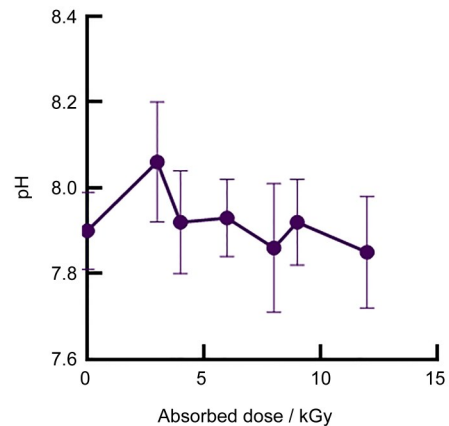


图4 电子束辐照过程中南美白对虾 pH 变化
Fig. 4 pH of electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

与对照组 (0 kGy) 相比，3 kGy 组 pH 显著升高 ($p < 0.05$)，其余组 pH 在统计学上没有显著差异 ($p > 0.05$)。pH 是评价虾质量的重要指标之一，研究发现，辐照样品的 pH 会随着储存时间而增加^[27]，反映了腐败的虾肌肉中碱性细菌代谢物的积累^[28]。辐照后 pH 的轻微升高可能是由于储存过程中微生物腐败形成的碱性化合物 (如氨和挥发

性碱)所致,这与下文微生物检验发现3 kGy组存在少量细菌菌落相对应。对辐照斑节对虾的研究同样发现,3 kGy处理后pH比对照样品显著增加^[26]。因此,采用4 kGy及以上电子束辐照灭菌有利于冷冻食品的储存和冷链运输。

2.5 吸收剂量对南美白对虾氨基酸的影响

氨基酸是海洋食品中的重要营养物质,人体不能合成的氨基酸,必须通过饮食摄取。本研究进行了氨基酸分析,以评估电子束辐照对不同种类氨基酸含量的影响。由表1可知,对照组(0 kGy)与辐照组相比,大部分氨基酸含量在统计学上没有显著差异($p > 0.05$),这与上述辐照未影响南美白对虾

的蛋白质含量结果相似,但电离辐射仍可能改变蛋白质的构象、结构和功能^[29],导致氨基酸含量发生变化。如表1和图5所示,吸收剂量8 kGy组组氨酸(His)显著增加($p < 0.05$);12 kGy组蛋氨酸(Met)低于对照组($p < 0.05$)。辐照后虾氨基酸含量增加可能与蛋白质辐照降解有关,而高剂量辐射会破坏氨基酸支链,从而引起氨基酸含量降低^[30]。尽管大多数辐照组氨基酸含量没有观察到差异,但大部分氨基酸含量在8 kGy处显示出峰值,与感官满意度结果一致,说明电子束辐照对虾的营养价值和风味的改善起到了积极的作用,并且在8 kGy时效果明显。

表1 电子束辐照过程中南美白对虾的氨基酸含量
Table 1 Amino acid content of electron beam irradiated *Litopenaeus vannamei*

氨基酸含量/(mg·(100 g) ⁻¹)	吸收剂量/ kGy Absorbed dose							
Amino acid content	0	3	4	6	8	9	12	
精氨酸 Arg	24.26±9.38	20.52±12.12	25.78±14.87	25.05±14.38	27.42±7.81	21.62±22.01	20.32±16.62	
赖氨酸 Lys	12.43±5.49	10.57±5.34	13.64±3.77	11.54±6.02	16.63±8.39	10.68±5.03	7.88±6.56	
亮氨酸 Leu	15.06±4.45	13.65±2.89	15.57±6.31	13.64±8.92	19.83±9.58	14.97±11.74	8.89±7.61	
苏氨酸 Thr	1.97±1.11	2.98±2.40	1.53±1.45	1.92±1.02	3.72±1.03	3.52±2.68	2.66±2.08	
甘氨酸 Gly	12.64±3.73	12.29±3.13	11.52±2.06	10.16±6.04	18.04±10.65	14.18±8.17	10.57±4.36	
缬氨酸 Val	6.16±2.62	6.54±2.88	6.19±2.82	6.06±2.88	9.56±3.84	8.23±4.89	5.04±3.24	
异亮氨酸 Ile	5.49±1.93	5.63±2.28	5.36±2.21	5.55±3.06	8.35±3.95	7.14±4.53	4.81±2.92	
蛋氨酸 Arg	3.24±0.50	2.34±1.22	2.21±0.49	2.02±1.68	3.92±3.57	2.20±1.46	1.21±1.07*	
组氨酸 His	1.98±0.80	2.41±1.16	2.64±1.40	3.42±1.64	4.40±0.74*	3.04±2.80	3.01±1.62	
苯丙氨酸 Phe	5.90±2.82	5.45±1.43	6.27±1.83	5.21±1.87	8.85±4.25	7.87±4.35	5.05±2.61	
谷氨酸 Glu	20.74±4.98	16.52±7.01	18.97±5.37	22.83±12.77	34.16±31.79	25.47±27.01	20.79±14.05	
天冬氨酸 Asn	10.12±6.11	6.12±6.90	6.89±7.37	12.89±9.58	15.73±15.60	11.33±17.91	9.70±9.31	
酪氨酸 Tyr	4.29±1.35	1.83±1.60	2.97±0.73	1.49±0.51	4.69±3.77	2.36±3.13	1.97±1.33	

注:*,表示 $p < 0.05$ 。

Note: *, stands for $p < 0.05$.

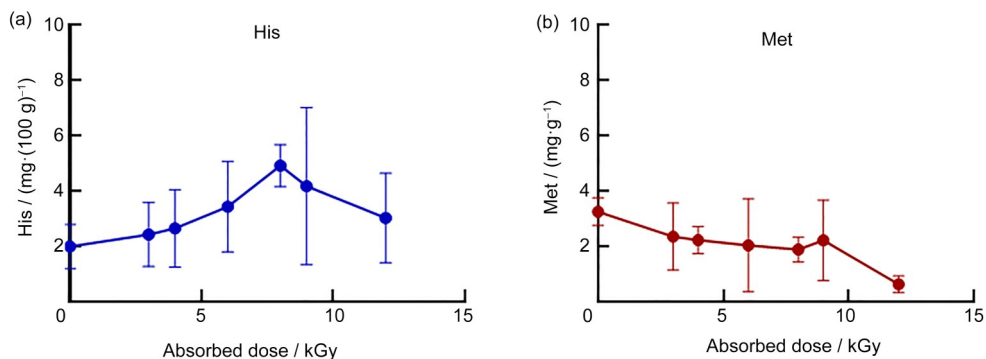


图5 电子束辐照过程中南美白对虾的氨基酸含量:(a)组氨酸;(b)蛋氨酸
Fig. 5 Amino acid content of electron beam irradiated *Litopenaeus vannamei*: (a) histidine; (b) methionine

2.6 吸收剂量对南美白对虾质构特征的影响

在食品中，质构特征分析已广泛应用于各种食品评价，是判断食品质量和口感的重要指标。质构特征通常包括硬度、弹性和耐嚼性等。本研

究中使用的质构分析仪是为了模拟人类口腔的咀嚼运动，通过检测固体和半固体样品，评估食物在咀嚼过程中的力学性能。图6展示了南美白对虾的一系列质构特征。

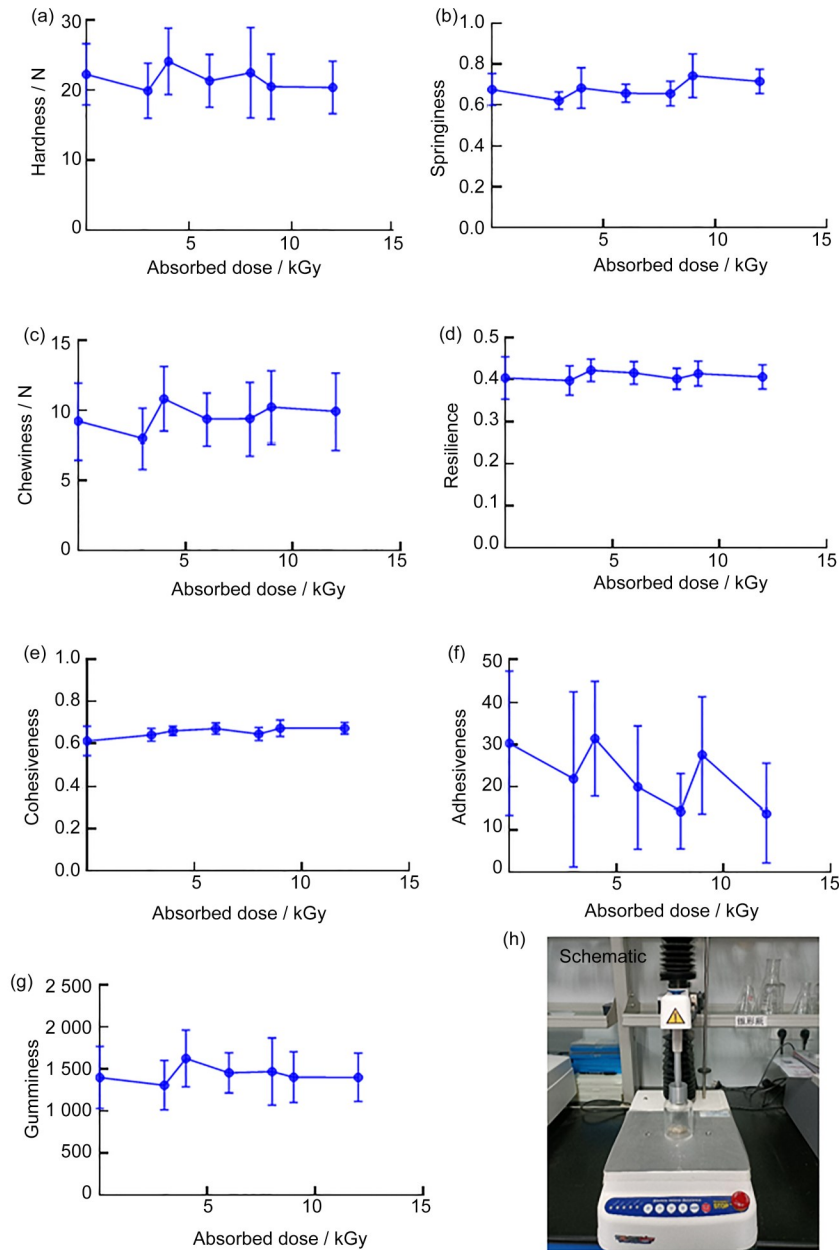


图6 电子束辐照过程中冷链虾的硬度(a)、弹性(b)、咀嚼性(c)、回复性(d)、内聚性(e)、黏附性(f)、胶着度(g)、示意图(h)的质构分析

Fig.6 Texture profile analysis on hardness(a), springiness (b), chewiness (c), resilience (d), cohesiveness (e), adhesiveness (f), gumminess (g), schematic (h) of electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

由图6，统计学分析显示，对照组(0 kGy)和辐照组的硬度、咀嚼性、回复性、胶着度在统计学上没有显著差异($p>0.05$)，9 kGy组弹性显著增加($p<0.05$)，4 kGy、6 kGy、9 kGy和12 kGy内聚

性显著增加($p<0.05$)。这表明经电子束辐照后，虾肉抵抗外力紧密连接的性能明显提升，更有弹性、口感更好。可能是在高剂量电子束辐照下，肌肉纤维中肌原纤维的致密性增加所致^[30]，文献研究

报道了相似的结果^[31-33]。虾肉的黏附性是指虾肉表面和舌、牙、口腔等附着时，剥离它们所需要的力，8 kGy、12 kGy 组黏附性显著降低 ($p < 0.05$)，这说明辐照后虾更易食用。虽然没有显著差异，但可以发现，增加辐照剂量，咀嚼性和内聚性有总体上升的趋势，因此，电子束辐照对南美白对虾的质构特征有一定的改善作用，有利于提升虾质地和口感。

2.7 吸收剂量对南美白对虾微生物菌落的影响

电子束辐照是一种典型的绿色灭菌方式，可有效减少食品中的细菌数量，在提高食品质量和安全方面具有很大的应用前景。电子束辐照对冷链虾细菌菌落的影响如表2所示：未经辐照的南美白对虾菌落总数初始含菌量较高，达 2.5×10^5 CFU/g，金黄色葡萄球菌和大肠杆菌含菌量高于 10^2 CFU/g。

表2 电子束辐照对南美白对虾微生物菌落生长情况的变化分析
Table 2 Microbiological colony of electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

吸收剂量 / kGy Absorbed dose	菌落总数/(CFU·g ⁻¹) Total plate count	金黄色葡萄球菌/(CFU·g ⁻¹) Staphylococcus aureus	大肠杆菌/(CFU·g ⁻¹) Escherichia coli
0	2.5×10^5	2×10^2	9.5×10^2
3	5×10^4	5×10	5×10
4	-	-	-
6	-	-	-
8	-	-	-
9	-	-	-
12	-	-	-

2.8 吸收剂量对南美白对虾感官满意度的影响

在微生物控制的同时，保持良好的感官满意度也是决定南美白对虾经济价值的重要因素。对于水产品新鲜度的评估，除上述科学实验测量外，还包括感官评估。感官评估是在人体感官的帮助下，通过问卷调查来评价食品的感官满意度，并通过统计学建立评价模型，对食品进行定性和定量的测量和分析。本实验中，虾肉在100℃沸水中煮5 min后，采用0~5标度法对辐照前后的熟制虾肉进行评价。因世界卫生组织宣布用10 kGy以下剂量辐照食品是安全的，今后可不再进行毒理学评价试验，所以感官评估纳入0~9 kGy吸收剂量辐照的样品进行品尝。

结果表明，各组南美白对虾的感官评价都在可接受范围内。辐照组南美白对虾颜色、口感评

经3 kGy的吸收剂量辐照后，菌落总数、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌含菌量均明显降低，但仍可检出部分细菌菌落。而4 kGy以上的辐照组未检出细菌，这与文献发现4.7 kGy辐射使虾肌肉中的微生物降低到无法检测的水平结果相似^[33]，可能与电离辐射的杀灭作用有关，电离辐射具有的能量可直接影响微生物的DNA，对真菌或细菌细胞造成损害^[34]。值得一提的是，有关电子束辐照新型冠状病毒COVID-19的研究表明，电子束可对新型冠状病毒的包膜蛋白层造成电离损伤，辐照电子能量为2 keV时损伤效率最高，从而实现新冠病毒的灭活^[35]。

此外，电子束辐照在工业规模下半小时内即可完成，意味着对于冷链虾等水产养殖食品，电子束辐照是一种有效且经济的灭菌方式。

分高于对照组 ($p < 0.05$)，其余杂质、外观、气味、壳/肉黏附性、口味评分与对照组在统计学上没有显著差异 ($p > 0.05$)。这说明电子束辐照后，有助于改善南美白对虾的颜色和口感，同时维持了外观、气味、口味等感官指标。这一结果与氨基酸含量、挥发性盐基氮值及质构特征一致。综合表3中的各项感官评分，发现吸收剂量为8 kGy时，虾的外观、气味、口感和口味评分最高。因此，认为8 kGy的辐照可以改善虾的整体风味，同时也最接近水产养殖食品的推荐标准^[36]。南美白对虾辐照组与对照组(0 kGy)相比，用最佳条件辐照的虾风味更好，新鲜度更高，微生物量更低。此外，蛋白质含量、脂肪含量、pH均与对照组相近，表明EB辐射对南美白对虾的理化性能仅有轻微影响。总之，这项研究为南美白对虾提供了一种控制微生物污染并提高新鲜度和风味的工艺。

表3 电子束辐照对南美白对虾感官评价的变化分析
Table 3 Sensory evaluation on electron beam irradiated frozen *Litopenaeus vannamei*

	吸收剂量 / kGy Absorbed dose					
	0	3	4	6	8	9
颜色评分 Color	4.14±0.82*	4.38±0.74	4.50±0.54	4.13±0.84	4.50±0.54	4.25±0.46
杂质评分 Impurity	4.15±1.03	4.50±0.76	4.13±0.99	4.13±0.99	4.38±1.06	4.38±0.74
外观评分 Appearance	4.14±0.94	4.00±1.07	4.31±0.70	3.88±1.13	4.63±0.52	4.25±0.71
气味评分 Odor	3.51±1.08	3.75±1.17	3.38±1.19	3.94±0.86	4.38±0.74	3.81±0.92
口感评分 Texture	3.86±0.81*	4.00±0.76	3.88±0.99	4.06±0.78	4.31±0.46	4.19±0.84
壳/肉黏着性 Crust/tissue adhesiveness	3.90±0.91	3.81±0.65	3.75±0.89	4.00±1.07	4.13±0.64	4.38±0.74
口味评分 Taste	3.79±1.03	4.00±0.93	3.50±1.20	3.50±1.07	4.50±0.54	4.06±1.00
总分 Total	27.490	28.438	27.438	27.626	30.813	29.314

注: *,表示 $p<0.05$ 。

Note: *, stands for $p<0.05$.

3 结论

本研究以0~12 kGy的吸收剂量对南美白对虾进行EB辐照,以研究其对蛋白质、脂肪和氨基酸含量、pH、挥发性盐基氮值、微生物菌落、质构特征及感官满意度的影响,从而确定南美白对虾冷链运输的最佳辐照条件。在理化性能方面,辐照对蛋白质、脂肪含量无影响,保持其原有的营养价值;4 kGy及以上辐照剂量不改变虾的pH,且有助于降低挥发性盐基氮含量,当6 kGy时达到最小值,说明控制辐照工艺条件可提高虾的新鲜度;咀嚼性、内聚性等质构特征随辐照剂量的增加呈上升趋势,虾的质地更佳;同时,大部分氨基酸含量在8 kGy处显示出峰值,对虾的营养价值和风味的提升起到了积极的作用。在控制微生物污染方面,当辐照剂量在4 kGy及以上时,对微生物的杀灭效应显著。在感官评估部分,发现辐照有助于改善虾的颜色和口感,吸收剂量为8 kGy时,外观、味道和整体评价都有显著提升。综合研究结果发现,吸收剂量控制在6~8 kGy的电子束辐照是一种有效的杀菌策略,不仅可以保持南美白对虾良好的风味,还起到了较好的杀菌效果。本文为南美白对虾冷链运输及杀菌提供了一种绿色、方便、经济的方法。

作者贡献声明 许零提出了本文的研究思路和实验方案。吴沥豪、毋思思、任康、吴云建、颜良豪、郭文忠参与材料准备、实验方案的讨论及冷链辐照前后数据测定分析。许零、陈功、周艳艳完成论文初稿的写作。许零是项目的构思者及

负责人,指导整个论文的撰写与修改。全体作者均以阅读并同意最终的文本。

参考文献

- Lu X, Luan S, Cao B X, *et al.* Heterosis and heritability estimates for the survival of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under the commercial scale ponds[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, **36**(2): 62-68. DOI: 10.1007/s13131-016-0942-6.
- Boyd C E, Davis R P, Wilson A G, *et al.* Resource use in whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* farming in Ecuador[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2021, **52**(4): 772-788. DOI: 10.1111/jwas.12818.
- Fernández de Alaiza García Madrigal R, de Assis Teixeira da Silva U, dos Santos Tavares C P, *et al.* Use of native and non-native shrimp (Penaeidae, Dendrobranchiata) in world shrimp farming[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, **10**(4): 899-912. DOI: 10.1111/raq.12206.
- Li Y, Lei Y T, Tan Y Q, *et al.* Efficacy of freeze-chilled storage combined with tea polyphenol for controlling melanosis, quality deterioration, and spoilage bacterial growth of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Food Chemistry*, 2022, **370**: 130924. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130924.
- 王哲, 林璠琦, 孙贤, 等. 核技术在新冠疫情防控中的应用评述[J]. *核技术*, 2020, **43**(12): 120001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120001.
WANG Zhe, LIN Fanyu, SUN Xian, *et al.* Review of nuclear technology in the application of COVID-19

- epidemic prevention and control[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(12): 120001 DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120001.
- 6 许零, 苏智阳, 周丽娟, 等. 医用口罩辐照灭菌工艺的可行性与风险评估[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0016.
- XU Ling, SU Zhiyang, ZHOU Lijuan, *et al.* Feasibility and risk assessment of radiation sterilization processing for medical masks[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0016.
- 7 Shahi S, Khorvash R, Goli M, *et al.* Review of proposed different irradiation methods to inactivate food-processing viruses and microorganisms[J]. Food Science & Nutrition, 2021, **9**(10): 5883-5896. DOI: 10.1002/fsn3.2539.
- 8 Gautam R K, Venugopal V. Electron beam irradiation to control biohazards in seafood[J]. Food Control, 2021, **130**: 108320. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108320.
- 9 Munir M T, Federighi M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations[J]. Foods, 2020, **9**(7): 878. DOI: 10.3390/foods9070878.
- 10 Ahmed H, Maunula L, Korhonen J. Reduction of norovirus in foods by nonthermal treatments: a review[J]. Journal of Food Protection, 2020, **83**(12): 2053-2073. DOI: 10.4315/JFP-20-177.
- 11 World Health Organization. International consultative group on food irradiation, task force group on the use of irradiation to ensure hygienic quality of food, 1986, Vienna, Austria[R]. World Health Organization, 1987.
- 12 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. National food safety standard Determination of protein in food: GB 5009.5—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- 13 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of volatile salt nitrogen in food: GB 5009.228—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- 14 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. National food safety standard Determination of fat in food: GB 5009 6—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- 15 Annamalai J, Sasikala R, Debbarma J, *et al.* Effect of delayed icing on the quality of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during chilled storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, **39**(6): 2878-2885. DOI: 10.1111/jfpp.12539.
- 16 Annamalai J, Sivam V, Unnikrishnan P, *et al.* Effect of electron beam irradiation on the biochemical, microbiological and sensory quality of *Litopenaeus vannamei* during chilled storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, **57**(6): 2150-2158. DOI: 10.1007/s13197-020-04250-7.
- 17 Ando M, Nakamura H, Harada R, *et al.* Effect of super chilling storage on maintenance of freshness of kuruma prawn[J]. Food Science and Technology Research, 2004, **10**(1): 25-31. DOI: 10.3136/fstr.10.25.
- 18 Zhao Y, Yu H L, Li H H, *et al.* Effect of E-beam irradiation on the qualitative attributes of shrimp (*Penaeus vannamei*) [J]. Food Bioscience, 2023, **52**: 102350. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102350.
- 19 Lee N Y, Kang C S, Kim H S. Effects of γ -irradiation on the quality changes of fresh noodles prepared from wheat cultivated with N-fertilization treatments[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, **26**(1): 135-142. DOI: 10.1007/s10068-017-0018-1.
- 20 Lin X P, Yang W G, Xu D L, *et al.* Improving gel properties of hairtail surimi by electron irradiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, **110**: 1-5. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2014.12.017.
- 21 Mutwakil. Meat spoilage mechanisms and preservation techniques: a critical review[J]. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2011, **6**(4): 486-510. DOI: 10.3844/ajabssp.2011.486.510.
- 22 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品: GB 2733—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the

- People's Republic of China. National food safety standard Standard for fresh and frozen marine products of animal origin: GB 2733—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- 23 Yu H L, Zhang J H, Li H H, *et al.* Effects of E-beam irradiation on the physicochemical properties of Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Food Bioscience, 2022, **50**: 101803. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101803.
- 24 Mehrzadeh S, Roomiani L. Effect of gamma irradiation and modified atmosphere packaging on the shelf-life of white shrimp (*Metapenaeus affinis*)[J]. Iranian Journal of Fisheries Sciences, 2021, **20**(4): 1004-1021. DOI: 10.22092/ijfs.2021.350431.0.
- 25 哈益明. 辐照食品及其安全性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1-10.
HA Yiming. Irradiated food and its safety[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 1-10.
- 26 Marasinghe B N A, Rathnayake R M N P, Ranasinghe R D R, *et al.* Effect of gamma irradiation on microbial, physical and chemical parameters of postharvest *Penaeus monodon* F[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, **192**: 109883. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109883.
- 27 Li X, Xiong G, Liao T, *et al.* Analysis of physicochemical characteristics and protein properties in irradiated crayfish [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2016, **30** (10): 1941-1946. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.10.1941.
- 28 Pan C, Chen S J, Hao S X, *et al.* Effect of low-temperature preservation on quality changes in Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*: a review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, **99** (14): 6121-6128. DOI: 10.1002/jsfa.9905.
- 29 Kuan Y H, Bhat R, Patras A, *et al.* Radiation processing of food proteins — a review on the recent developments [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, **30**(2): 105-120. DOI: 10.1016/j.tifs.2012.12.002.
- 30 Mahto R, Ghosh S, Das M K, *et al.* Effect of gamma irradiation and frozen storage on the quality of fresh water prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) and tiger prawn (*Penaeus monodon*)[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, **61**(2): 573-582. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.12.028.
- 31 Wang H R, Suo R, Liu X B, *et al.* A TMT-based proteomic approach for investigating the effect of electron beam irradiation on the textural profiles of *Litopenaeus vannamei* during chilled storage[J]. Food Chemistry, 2023, **404**: 134548. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134548.
- 32 Lyu M C, Mei K L, Zhang H, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from *Tegillarca granosa* meat[J]. Food Chemistry, 2018, **254**: 64-69. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.165.
- 33 Sinanoglou V J, Batrinou A, Konteles S, *et al.* Microbial population, physicochemical quality, and allergenicity of molluscs and shrimp treated with cobalt-60 gamma radiation[J]. Journal of Food Protection, 2007, **70**(4): 958-966. DOI: 10.4315/0362-028X-70.4.958.
- 34 Akuamoah F, Odamtten G T, Kortei N K. Impact of gamma radiation on the microbiological quality of smoke dry shrimp (*Penaeus notialis*) from three different water sources in Ghana[J]. Cogent Food & Agriculture, 2018, **4** (1): 1484200. DOI: 10.1080/23311932.2018.1484200.
- 35 Feng G B, Liu L, Cui W Z, *et al.* Electron beam irradiation on novel coronavirus (COVID-19): a Monte - Carlo simulation[J]. Chinese Physics B, 2020, **29**(4): 048703. DOI: 10.1088/1674-1056/ab7dac.
- 36 中华人民共和国农行部. 冷冻水产品辐照杀菌工艺: NY/T 1256—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Irradiation practice for the control of microflora in freeze aquatic products: NY/T 1256—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.