

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0901

电子束辐照对南美白对虾虾仁风味的影响

赵莘芷, 李高尚, 杨文鸽*

(宁波大学 食品科学与工程学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 采用不同剂量(2、4、6、8、10 kGy)电子束对南美白对虾虾仁进行辐照处理, 通过测定虾肉中游离氨基酸、游离核苷酸等呈味物质含量, 结合电子鼻、电子舌技术和感官评价等方式, 综合评估电子束辐照对南美白对虾虾仁风味品质的影响。结果表明, 虾仁主要的呈味氨基酸和呈味核苷酸包括 Glu、Ala、Gly、AMP、IMP, 且适当剂量电子束辐照有助于虾仁鲜甜风味的呈现, 8 kGy 组虾仁游离氨基酸的鲜甜滋味达到最佳, AMP 的滋味强度值(Taste Active Value, TAV)在 4 kGy 和 10 kGy 组中分别达最大值和最小值, 8 kGy 组仅次于 4 kGy 组; 电子束辐照对虾仁感官评分无显著影响, 但电子鼻和电子舌分析表明, 电子束辐照能使虾仁味感和嗅感特征发生变化, 10 kGy 高剂量下区分度最为显著。综上, 利用电子束辐照对南美白对虾虾仁进行前处理, 8 kGy 及以下剂量有助于保持与改善虾仁的风味和品质。

关键词: 南美白对虾; 虾仁; 电子束辐照; 风味; 品质

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2026)01-0113-08

Effect of electron beam irradiation on flavor of *Litopenaeus vannamei* meat

ZHAO Xinzhi, LI Gaoshang, YANG Wenge*

(College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: In this study, five different doses of electron beam irradiation (2, 4, 6, 8, 10 kGy) were used to treat *Litopenaeus vannamei* meat. The effects of electron beam irradiation on the flavor of shrimp meat were evaluated by measuring the content of free amino acids and free nucleotides, together with electronic nose, electronic tongue technology and sensory evaluation. The results show that the main flavor amino acids and flavor nucleotides in shrimp meat include Glu, Ala, Gly, AMP and IMP, and appropriate doses of electron beam irradiation helped to present the fresh and sweet flavor of shrimp meat. The fresh and sweet taste of free amino acids in shrimp meat reached its best in the 8 kGy group. The TAV of AMP reached its maximum and minimum values in the 4 kGy and 10 kGy groups, respectively, and that of 8 kGy group was second only to the 4 kGy group. Electron beam irradiation had no significant effect on the sensory evaluation of shrimp meat, but the results of electronic nose and tongue analysis showed that electron beam irradiation could change the taste and olfactory characteristics of shrimp meat, with the most significant discrimination at high doses of 10 kGy. In summary, using electron beam irradiation for pre-treatment of *Litopenaeus vannamei* meat, in doses of 8 kGy or less, could help maintain and improve the flavor quality.

Keywords: *Litopenaeus vannamei*; shrimp meat; electron beam radiation; flavor; quality

收稿日期: 2024-09-01 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900903); 宁波市公益性计划项目(2019C10007)

第一作者: 赵莘芷, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: 1305743056@qq.com

*通信作者: 杨文鸽, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: yangwenge@nbu.edu.cn

南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*), 又名白肢虾、凡纳滨对虾, 因其肉质鲜美、口感细嫩、营养价值高而深受消费者喜爱, 2023 年我国南美白对虾海水养殖量高达 142.98 万 t, 是我国东南沿海地区重要的水产品之一^[1]。然而, 高蛋白、高营养、高水分使得离水后的南美白对虾极易腐败, 造成良好风味丧失、货架期缩短。因此, 亟须寻找一种有效的前处理方式, 来保持南美白对虾良好风味和品质, 并延长其货架期。

电子束辐照(Electron Beam Irradiation, EBI)是一种利用电子加速器对食品进行高能电子束照射的冷处理技术, 具有高效、绿色、环保等优点, 是 γ -射线辐照技术的替代品^[2]。目前电子束辐照技术已经被广泛应用于食品领域, FAO/IAEA/WHO 联合专家委员会认为, 对食品进行不超过 10 kGy 剂量的辐照不会带来毒理学危害^[3]。电子束辐照能够改变生物大分子的组成和结构, 抑制微生物的生长繁殖, 降低某些过敏原的免疫原性, 达到延长水产品保质期、消减食品致敏性等效果^[4-5]。但是电子束辐照也可能对食品风味产生影响, 从而影响其食用品质^[6-7]。因此, 探究电子束辐照对南美白对虾风味的影响, 对拓展其在水产品加工中的应用尤为重要。

南美白对虾虾仁是市场上常见的一种水产销售品种, 本研究采用电子直线加速器对虾仁进行辐照处理, 测定处理前后虾仁的游离氨基酸、呈味核苷酸含量, 采用电子鼻、电子舌分析特征变化, 评价电子束辐照对虾仁风味品质的影响, 为该技术应用用于南美白对虾虾仁的保鲜及其致敏性的消减提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

海水养殖的鲜活南美白对虾购自宁波路林水产市场, 虾体质量(12.5 ± 2.2) g, 2 h 内带冰运达实验室。盐酸、氢氧化钾、氯化钠、柠檬酸三钠、磺基水杨酸、高氯酸、甲醇、乙醇、正己烷、无水磷酸二氢钠、无水磷酸氢二钠均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 氨基酸、ATP、ADP、AMP、IMP、HxR、Hx 标准品, Sigma-Aldrich 公司; 0.22 μ m 水相滤膜, 天津津腾实验设备有限公司。试验用水

均为超纯水。

1.2 仪器与设备

DL-DZ-10/20-III 电子直线加速器, 宁波雷大加速器有限公司; XHF-D 高速分散器, 宁波新芝生物科技股份有限公司; ML 104/02 型电子天平, 梅特勒-托利仪器(上海)有限公司; Centrifuge 5804 R 高速冷冻离心机, 德国 Eppendorf 公司; L-8800 氨基酸自动分析仪, 日本 Hitachi 公司; 1260 Infinity II 液相色谱系统, 美国安捷伦公司; PEN 3 型便携式电子鼻, 德国 Airsense 公司; Smartongue 电子舌, 上海瑞玢智能科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将南美白对虾置于铺冰操作台上, 去头去壳后得到虾仁, 虾仁按每袋质量(400.0 ± 5.0) g 平铺, 真空包装。采用电子直线加速器进行辐照处理, 输出能量 $E=10$ MeV, 能量不稳定性 $\Delta E/E \leq 5\%$, 扫描不均匀度 $\leq 10\%$ 。为防止出现辐照不均匀现象, 辐照时的虾仁采取单包排列, 且不重叠。辐照剂量分别设定为 2、4、6、8、10 kGy, 以不辐照样品为对照组(0 kGy)。

1.3.2 游离氨基酸的测定

参考 Yang 等^[8]的方法。1.0 g 虾仁样品与 19 mL 5% 磺基水杨酸溶液混合后, 进行两次均质, 冷冻离心(4 $^{\circ}\text{C}$, 10 000 r/min, 10 min), 取 1 mL 上清液, 加入 7 mL 0.2 mol/L 柠檬酸三钠缓冲液, 振荡混匀后用 0.22 μ m 滤膜过滤, 通过氨基酸自动分析仪检测游离氨基酸。

1.3.3 呈味核苷酸的测定

参考 Wei 等^[9]的方法。2.0 g 虾仁样品与 10 倍体积预冷 5% 高氯酸混合后, 冰上充分研磨, 冷冻离心(4 $^{\circ}\text{C}$, 10 000 r/min, 5 min), 取 5 mL 上清液加入 10 mol/L⁻¹ KOH 调节 pH 值至 2.8~3.2。混合液冷冻离心(4 $^{\circ}\text{C}$, 5 000 r/min, 5 min), 取上清液加入 0.5 mol/L PBS(pH 7.5)调节 pH 值至 7.0, 振荡混匀后用滤膜过滤。

通过高效液相色谱法(HPLC, Agilent 1260)进行分析, 色谱柱(Shodex GS-320 HQ, 7.5 mm id $\times$ 300 mm)。HPLC 条件: 流动相 0.2 mol/L PBS 缓冲液(pH 3.7); 温度 30 $^{\circ}\text{C}$; 检测波长 254 nm/4 nm; 流速 0.6 mL/min。

1.3.4 滋味强度

滋味强度值 (Taste Active Value, TAV) 可以量化某种物质对整体呈味特征的贡献度^[10], 按照下式计算:

$$R_{TAV} = \frac{A}{B}$$

式中: R_{TAV} 为滋味强度值; A 为试验样品中呈味物质浓度; B 为呈味物质感官阈值.

1.3.5 电子鼻测定

利用电子鼻进行分析, 参考 Hu 等^[11]的方法并进行适当修改. 4.0 g 虾仁样品切碎后置于 10 mL 玻璃样品瓶中密封, 室温平衡 20 min 后测定. 测定时间 100 s, 清洗时间 100 s, 环境温度 (22±1) °C. 将所得原始数据导入系统自带的识别系统中进行分析.

1.3.6 电子舌测定

参考 Bai 等^[12]的方法并进行适当修改, 滋味分析通过电子舌测定. 5.0 g 虾仁样品加入 50 mL 纯水, 进行两次均质. 室温静置 10 min 后离心 (10 000 r/min, 15 min), 取适量上清液至洁净玻璃烧杯中. 每组样品进行 6 次平行测定, 每次测定前使用纯水

对电极进行清洗. 将所得原始数据导入电子舌识别系统进行分析.

1.3.7 感官评价

参考 Shi 等^[13]的方法并进行适当修改, 选择 12 名经过训练的同学作为感官评定人员. 采用“视觉—触觉—嗅觉”作为评价方式, 对不同处理条件下的南美白对虾虾仁色泽、形态、质地、气味进行打分, 每个项目满分 25 分, 记录各项指标评分, 并计算得到总分, 感官评分标准细则见表 1.

1.4 数据分析

所有实验均重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示. 利用 SPSS 26.0 统计学软件 ANOVA 进行方差分析, 显著水平为 $P<0.05$; 使用 Origin 2022 软件进行相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 游离氨基酸分析

游离氨基酸在虾肉滋味呈现中发挥着重要作用^[14]. 虾仁样品经辐照后, 游离氨基酸相对含量及变化情况见表 2. 与对照组相比, 辐照组虾肉中游离 Ser、Pro、Arg、Tyr、Lys、His 含量下降, Glu、

表 1 南美白对虾虾仁感官评分标准

分值	色泽	形态	质地	气味
20~25	色泽正常, 有光泽	组织紧密完整	富有弹性, 肉质紧实	虾类特有的鲜香味
15~19	有隐约黄色, 较有光泽	组织紧密较完整	有弹性, 肉质偏软	鲜香味淡, 无异味
10~14	微黄色或微红, 较有光泽	组织较紧密完整	弹性较差, 肉质偏软	鲜香味不明显, 轻微异味
5~9	黄色或明显红色, 无光泽	组织不够紧密, 欠完整	弹性差, 肉质软	失去鲜香味, 轻微异味
1~4	黄褐色, 无光泽	组织松散不完整	失去弹性	明显腥臭异味

表 2 南美白对虾虾仁的游离氨基酸质量分数

单位: 10⁻⁵

游离氨基酸	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
Thr	120.71±2.65 ^b	108.91±1.81 ^c	112.88±2.60 ^c	61.87±0.96 ^e	137.35±4.57 ^a	92.55±1.30 ^d
Ser	37.20±0.88 ^a	26.16±0.93 ^{bc}	17.52±5.68 ^d	21.93±0.00 ^{cd}	8.01±0.00 ^e	27.49±0.00 ^b
Glu	170.49±1.24 ^f	202.53±1.29 ^d	224.90±0.00 ^c	176.04±0.00 ^e	251.85±1.29 ^a	235.41±0.00 ^b
Gly	543.03±6.58 ^e	587.19±1.75 ^d	725.65±0.62 ^b	527.43±1.04 ^f	775.55±1.14 ^a	688.31±1.63 ^c
Ala	184.88±1.98 ^f	255.67±0.78 ^c	407.69±0.73 ^a	225.18±1.43 ^e	333.51±3.42 ^b	246.71±0.00 ^d
Pro	581.65±9.22 ^a	550.28±7.09 ^b	486.84±1.64 ^c	344.39±4.24 ^e	465.49±10.57 ^d	453.44±5.01 ^d
Arg	619.10±9.59 ^a	534.44±1.53 ^b	617.17±0.00 ^a	387.79±2.42 ^e	520.28±0.00 ^c	502.51±1.89 ^d
Val	22.15±0.00 ^{bc}	23.21±0.00 ^b	18.41±0.00 ^d	16.30±0.00 ^e	20.83±2.06 ^c	32.44±0.00 ^a
Met	2.17±0.00 ^{ab}	0.00±0.00 ^b	4.26±0.00 ^a	2.08±0.00 ^{ab}	3.79±2.63 ^a	3.44±1.62 ^a

表 2 （续）

游离氨基酸	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
Ile	9.54±1.91 ^{ab}	9.99±3.46 ^{ab}	10.62±1.08 ^{ab}	7.91±2.11 ^b	9.99±0.00 ^{ab}	12.11±0.00 ^a
Leu	22.26±1.10 ^{bc}	17.99±5.29 ^{cd}	24.36±0.00 ^{ab}	16.43±3.16 ^d	23.99±0.00 ^{ab}	28.25±0.00 ^a
Tyr	24.60±4.03 ^a	19.33±0.00 ^b	22.43±1.49 ^{ab}	20.17±0.00 ^{ab}	23.93±3.19 ^{ab}	22.30±0.00 ^{ab}
Phe	29.63±12.09 ^a	30.21±0.00 ^a	25.96±0.00 ^a	28.35±5.78 ^a	25.17±8.72 ^a	30.50±0.00 ^a
Lys	86.47±8.59 ^a	62.37±0.00 ^b	75.88±1.21 ^a	56.95±2.03 ^b	62.37±11.58 ^b	58.48±3.18 ^b
His	33.10±2.61 ^b	30.74±0.00 ^a	28.08±1.28 ^a	21.59±3.74 ^b	28.37±4.10 ^a	27.45±5.06 ^{ab}
TFAA	2 486.98±23.86 ^c	2 459.02±3.33 ^c	2 802.64±6.75 ^a	1 914.39±14.43 ^d	2 690.48±23.60 ^b	2 461.37±9.68 ^c
UFAA	170.49±1.24 ^f	202.53±1.29 ^d	224.90±0.00 ^c	176.04±0.00 ^e	251.85±1.29 ^a	235.41±0.00 ^b
SFAA	2 086.56±14.88 ^c	2 062.66±9.97 ^d	2 367.74±8.10 ^a	1 568.59±4.88 ^f	2 240.19±11.20 ^a	2 010.99±0.19 ^c
BFAA	229.93±25.27 ^a	193.83±8.71 ^{ab}	210.00±1.39 ^a	169.76±15.60 ^b	198.44±28.36 ^{ab}	214.97±9.87 ^a
TPAA	2 257.06±16.11 ^c	2 265.18±11.26 ^c	2 592.64±8.10 ^a	1 744.63±4.88 ^d	2 492.04±11.73 ^b	2 246.40±0.19 ^c

注：（1）同一行不同小写字母表明差异显著（ $P<0.05$ ），表 3~表 5 相同；（2）TFAA 为总游离氨基酸，UFAA 为鲜味氨基酸，SFAA 为甜味氨基酸，BFAA 为苦味氨基酸，TPAA 为总愉快味氨基酸，包括鲜味氨基酸 Glu 和甜味氨基酸 Thr、Ser、Gly、Ala、Pro、Arg、苦味氨基酸 Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、Lys、His。

Ala 含量显著增加，其中 Glu 在 8 kGy 组增加 47.72%，Ala 在 4 kGy 组增长达 120.52%，Gly 除 6 kGy 组以外都显著增加，而其余的氨基酸和氨基酸总量变化没有规律。Glu 与鲜味核苷酸有强协同作用^[15]，并且 Ala、Gly 作为甜味氨基酸对虾肉滋味有积极贡献。由于不同氨基酸的结构差异，它们对电子束辐照的敏感程度不同^[16]。电子束辐照会促进蛋白质水解，使其分解成氨基酸，造成总游离氨基酸含量上升，但随着剂量的增加，游离氨基酸结构遭到破坏，总游离氨基酸含量出现下降^[17]。总体上，经辐照处理后的鲜味氨基酸、愉悦味氨基酸占总游离氨基酸比例上升，苦味氨基酸含量下降，由此可见，适当的电子束辐照处理能使南美白对虾虾仁风味更加鲜美。

TAV 大于 1 表示风味物质对样品的整体味道

有显著贡献，且为正相关^[18-19]，因此可用 TAV 来进一步分析电子束辐照处理对虾肉呈味氨基酸的影响，具体结果见表 3。在表 3 的各组虾肉数据中，Glu、Gly、Ala、Pro、Arg、Lys、His 的 TAV 均大于 1，表明这些游离氨基酸均对虾肉滋味有重要贡献。Glu 是水产品中重要的鲜味物质，可以与其他氨基酸产生协同作用，在贡献鲜味的同时还能掩盖苦味；Gly、Ala、Pro、Arg 都为甜味氨基酸，是虾类的甜味来源之一；Lys、His 虽呈苦味，但可结合自由水使肌肉结构紧密，来提供更好口感^[20]。各样品组中，鲜甜味氨基酸 TAV 远高于不良风味来源的 Lys、His；在 2、4、6、8 kGy 电子束辐照组与对照组比较后发现，Glu、Gly、Ala 的 TAV 增加显著（6 kGy 组增加不明显），Pro、Arg、Lys、His 的 TAV 均有所减少。相对于 8 kGy 组，10 kGy

表 3 南美白对虾肉游离氨基酸的 TAV

游离氨基酸	阈值/ 10^{-5}	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
Glu	30	5.68±0.04 ^f	6.75±0.04 ^d	7.50±0.00 ^c	5.87±0.00 ^e	8.40±0.04 ^a	7.85±0.00 ^b
Gly	130	4.18±0.05 ^e	4.52±0.01 ^d	5.58±0.00 ^b	4.06±0.01 ^f	5.97±0.01 ^a	5.29±0.01 ^c
Ala	60	3.08±0.03 ^f	4.26±0.01 ^c	6.79±0.01 ^a	3.75±0.02 ^e	5.56±0.06 ^b	4.11±0.00 ^d
Pro	300	1.94±0.03 ^a	1.83±0.02 ^b	1.62±0.01 ^c	1.15±0.01 ^e	1.55±0.04 ^d	1.51±0.02 ^d
Arg	50	12.38±0.19 ^a	10.69±0.03 ^b	12.34±0.00 ^a	7.76±0.05 ^e	10.41±0.00 ^c	10.05±0.04 ^d
Lys	50	1.73±0.17 ^a	1.25±0.00 ^b	1.52±0.02 ^a	1.14±0.04 ^b	1.25±0.23 ^b	1.17±0.06 ^b
His	20	1.66±0.13 ^a	1.54±0.00 ^a	1.40±0.06 ^a	1.08±0.19 ^b	1.42±0.20 ^a	1.37±0.25 ^{ab}

组 Glu、Gly、Ala 的 TAV 均显著下降。综上可知, 8 kGy 及以下剂量辐照更有助于南美白对虾肉游离氨基酸呈现鲜甜滋味。卢佳芳等^[21]在研究花鲈鱼肉时也得到了相似结果。

2.2 游离核苷酸分析

呈味核苷酸和游离氨基酸之间具有协同作用, 共同影响着食品风味的呈现^[22], 本研究各样品组中游离核苷酸的相对含量见表 4。鉴于 ATP 降解产物是影响虾类风味的重要成分, 而辐照能对虾肉中的游离核苷酸含量产生影响。与对照组相比, 辐照组 ATP 和 ADP 含量均有下降, 但差异不显著; HxR 含量除 8 kGy 组外, 其余各组增加不显著; AMP、IMP、Hx 含量有增有减, 无明显规律。各组虾肉中主要的核苷酸为 AMP, 其次为 IMP, 其除具有鲜甜味外, 还能抑制苦味的呈现^[23]。与对照组相比, 10 kGy 组 AMP 含量显著下降, 而 IMP、HxR、Hx 含量上升, 但差异不显著。实验中未检测到腺嘌呤核苷 (AdR), 表明虾肉中 ATP 降解途径主要为 ATP→ADP→AMP→IMP→HxR→Hx, 这也是大部分水产品的核苷酸降解途径^[24]。虾肉 ATP 在酶作用下降解成 ADP、AMP 和 IMP, 并进一步形成 HxR 和 Hx, 其中 AMP、IMP 具有鲜甜味, HxR、Hx 呈苦味。辐照虽然可能会加速 ATP 分解, 造成 AMP 堆积, 但随着辐照剂量的增加, AMP 生成 IMP 速度增加, 而 IMP 降解为 HxR 的效率很低^[25], 使样品中 IMP 堆积, 结果反而更有利于虾肉鲜味的

呈现。

AMP、IMP 的 TAV 见表 5。由表可见, 不同组虾肉中主要呈味核苷酸为 AMP (TAV 均大于 1), 表明 AMP 对虾肉鲜甜滋味的贡献度较大。在 4 kGy 和 10 kGy 组中, AMP 的 TAV 分别达到最大值和最小值, 8 kGy 组 AMP 的 TAV 仅次于 4 kGy 组, 而 IMP 的 TAV 变化无规律。

2.3 电子鼻分析

电子鼻能模拟嗅觉器官收集并量化样品整体气味特征^[26], 表 6 为电子鼻各传感器对应具体的物质种类。

表 6 电子鼻传感器对应相关检测物质

序号	传感器名称	主要检测物质
1	W1C	芳香族
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨及芳香成分 (氨水)
4	W6S	氢化物
5	W5C	烷烃芳香成分 (短链烷烃)
6	W1S	甲烷 (甲基类)
7	W1W	硫化物 (无机硫化物)
8	W2S	乙醇及部分芳香族化合物 (醇类)
9	W2W	芳香成分及有机硫化物
10	W3S	烷烃及脂肪族 (长链烷烃)

在对传感器贡献率进行 loading 分析时, 其数值距离原点越远, 表明在表征风味时发挥的作用越

表 4 南美白对虾虾肉的游离核苷酸质量分数 单位: 10⁻⁵

游离核苷酸	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
ATP	6.10±0.37 ^a	4.95±0.86 ^a	5.70±0.13 ^a	4.81±0.43 ^a	4.96±0.43 ^a	5.32±0.62 ^a
ADP	16.34±1.95 ^a	14.03±0.39 ^a	16.04±0.62 ^a	13.70±0.81 ^a	15.64±0.23 ^a	15.26±0.98 ^a
AMP	204.96±7.88 ^{ab}	206.03±0.55 ^{ab}	231.04±18.32 ^a	201.29±25.82 ^{ab}	222.18±7.82 ^a	188.50±10.17 ^b
IMP	13.99±3.39 ^{ab}	23.12±9.21 ^{ab}	10.14±3.05 ^b	24.44±9.13 ^{ab}	11.11±0.46 ^b	26.56±3.28 ^a
HxR	0.31±0.08 ^b	0.56±0.22 ^{ab}	0.62±0.09 ^{ab}	0.43±0.01 ^{ab}	0.65±0.07 ^a	0.49±0.14 ^{ab}
Hx	0.85±0.20 ^a	0.61±0.29 ^a	0.78±0.08 ^a	1.30±0.54 ^a	0.92±0.00 ^a	1.02±0.16 ^a

注: ATP 为三磷酸腺苷, ADP 为二磷酸腺苷, AMP 为一磷酸腺苷, IMP 为肌苷酸, HxR 为次黄嘌呤核苷, Hx 为次黄嘌呤。

表 5 南美白对虾虾仁呈味核苷酸的 TAV 值

呈味核苷酸	阈值/10 ⁻⁵	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
AMP	50	4.10±0.16 ^{ab}	4.12±0.01 ^{ab}	4.62±0.37 ^a	4.03±0.52 ^{ab}	4.44±0.16 ^{ab}	3.77±0.20 ^b
IMP	25	0.56±0.14 ^{abc}	1.08±0.35 ^a	0.40±0.12 ^c	0.98±0.37 ^{ab}	0.44±0.02 ^{bc}	1.06±0.13 ^a

大。如图 1 所示,电子鼻传感器 loading 图中显示 W1W、W1S 所占权重较大,两个传感器的贡献率分别为 80.56% 和 17.44%,贡献率和为 98.00%,表明这两个传感器能代表虾肉的整体风味,在区分各组南美白对虾虾肉嗅感差异中起重要作用,即经电子束辐照后,虾肉中的挥发性物质(如 H_2S 、甲烷等)发生了显著变化。

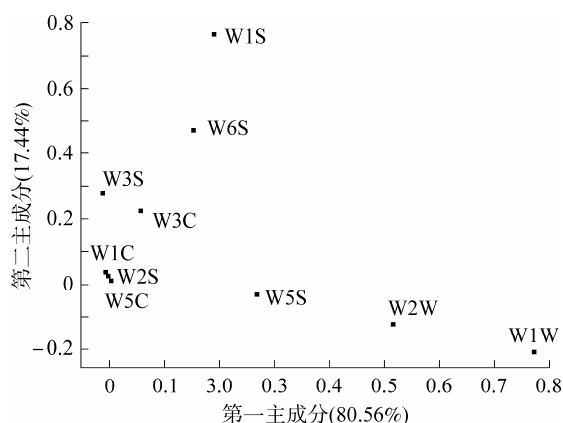


图 1 电子鼻传感器 loading 图

不同组别样品的各传感器响应值雷达图如图 2 所示。由图可知,0 kGy 和 6 kGy、2 kGy 和 8 kGy 组的雷达图轮廓较为相似,说明虾肉整体挥发性气味相近。鉴于传感器响应值能反映物质含量的变化,因此与其他组别相比,发现 10 kGy 组的响应值和雷达图轮廓均存在显著差异,表明该组样品气味显著不同。其中, W1W 数值增加至 3.0,表明经过 10 kGy 电子束辐照后,会产生硫化物,并呈现

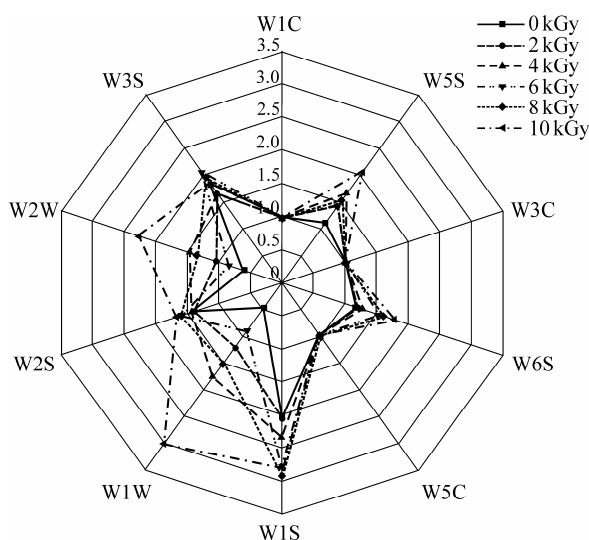


图 2 南美白对虾虾肉的电子鼻雷达图

出一定的不良气味,其原因可能是脂质经电子束辐照后发生氧化和分解,进一步加速了含硫蛋白的裂解,生成 H_2S 气体^[27]。

对南美白对虾虾肉电子鼻数据进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),结果如图 3 所示。可通过观察 PCA 图中样品分散点的聚散程度来分析气味差异,分散点距离越远,说明气味差异越大。由图可见,0、2、4、10 kGy 剂量处理组样品气味可以进行有效区分,且 10 kGy 组样品与对照组气味差异最大;6、8 kGy 剂量处理组样品区域有重叠,表明该两组样品的气味更相近,较难完全区分^[28]。由此可见,10 kGy 高剂量电子束辐照会导致虾仁产生不良风味。

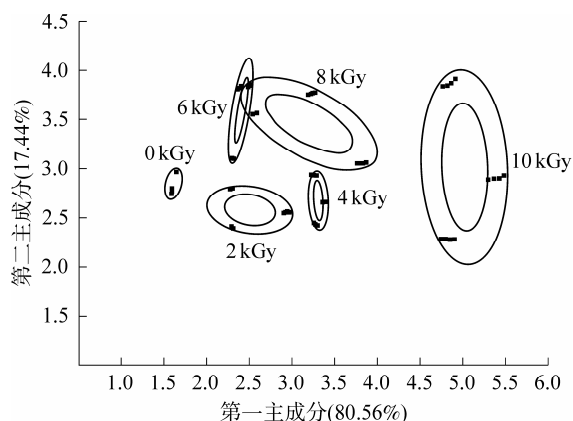


图 3 南美白对虾虾肉的电子鼻 PCA 图

2.4 电子舌分析

通过电子舌系统对各组虾仁滋味进行主成分分析,结果如图 4 所示。由图可见,第一主成分贡献率为 94.63%,第二主成分贡献率为 3.47%,两者贡献率总和达到 98.10%,表明主要成分可代表

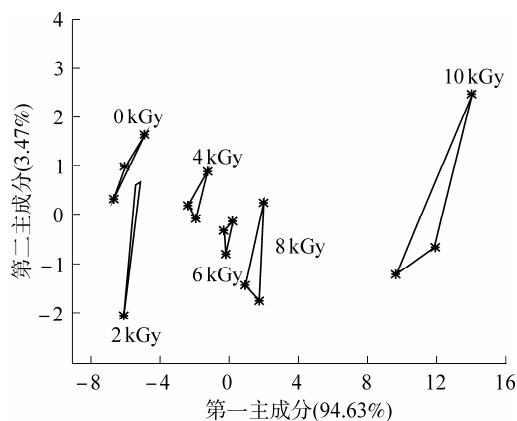


图 4 南美白对虾虾肉的电子舌 PCA 图

虾肉整体滋味。在进行 PCA 分析时, 各组样品之间无重叠, 表明均被充分分离; 各分散点间距离越远, 表明滋味差异越大^[29]。因此由图 4 可知, 随着辐照剂量增加, 各组与对照组间的滋味差异也越来越大, 尤其是 10 kGy 组虾仁滋味的变化最为显著。

2.5 感官评分的变化

感官评价对南美白对虾虾肉的品质评价至关重要, 因为食品风味最终还是需要依赖人的感官来进行评判。由图 5 各组的虾仁感官评分可知, 经辐照后虾仁的感官评分均比对照组有所增加, 但各组别之间无显著差异 ($P>0.05$), 说明总体上 2、4、6、8、10 kGy 剂量的电子束辐照并不会影响虾仁的感官评价, 且本文所得结果与余慧琳等^[30]在研究电子束辐照 (2、4、7、10 kGy) 对带鱼感官评定影响时得出的结论一致。

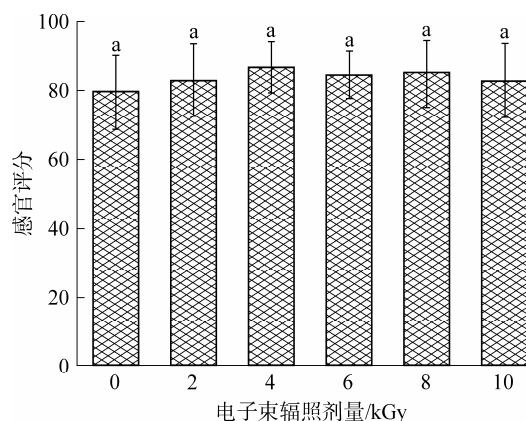


图 5 电子束辐照处理对南美白对虾虾仁感官评分的影响

3 结论

与对照组相比, 8 kGy 及以下剂量辐照有助于南美白对虾肉游离氨基酸呈现鲜甜滋味; 辐照组 ATP 和 ADP 含量均有下降, 但差异不显著; 各组虾肉中主要的核苷酸为 AMP, 其次为 IMP, AMP 的 TAV 在 4 kGy 和 10 kGy 组中分别达最大值和最小值, 8 kGy 组 AMP 的 TAV 仅次于 4 kGy 组。电子鼻和电子舌测试结果表明, 电子束辐照使样品间风味产生了可以区分的差距, 高剂量 (10 kGy) 辐照条件下感应到更多的如 H_2S 、甲烷等化合物, 此类物质易导致虾肉不良风味的产生。辐照后虾仁的感官评分均比对照组有所增加, 但之间无显著差异。综上所述, 8 kGy 及以下剂量电子束辐照有助

于保持与改善南美白对虾虾仁风味、品质。结合本研究课题组利用电子束辐照保鲜虾仁, 消减其过敏原致敏性, 结果可为电子束辐照技术应用于南美白对虾虾仁品质控制提供依据, 对提高对虾商品价值有积极意义。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
- [2] BYSTROV P A, GORDEEV A V, KOLOKOLOVA A Y, et al. Prospects of electron beam irradiation to ensure microbiological safety of food products[J]. Physics of atomic nuclei, 2018, 81(10):1526-1530.
- [3] 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]. Geneva, Switzerland, 1987.
- [4] GAUTAM R K, VENUGOPAL V. Electron beam irradiation to control biohazards in seafood[J]. Food control, 2021, 130:108320.
- [5] WEI Q, MEI J, XIE J. Application of electron beam irradiation as a non-thermal technology in seafood preservation[J]. LWT-food science and technology, 2022, 169:113994.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] YANG J J, HUANG P Y, SUN B L, et al. Comparison of freezing and heating treatment sequence on biochemical properties and flavor of swimming crabs (*Portunus trituberculatus*) meat during freeze-thaw cycles[J]. Food research international, 2024, 175:113758.
- [9] WEI H M, TIAN Y Y, LIN Y M, et al. Condition-dependent adenosine monophosphate decomposition pathways in striated adductor muscle from Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*)[J]. Journal of food science, 2020, 85(5):1462-1469.
- [10] 步营, 何玮, 胡显杰, 等. 超高压对蓝蛤酶解液风味及

- 其蛋白质结构的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1):104-116.
- [11] HU M Y, WANG S Y, LIU Q, et al. Flavor profile of dried shrimp at different processing stages[J]. LWT-food science and technology, 2021, 146:111403.
- [12] BAI J, FAN Y, ZHU L L, et al. Characteristic flavor of Antarctic krill (*Euphausia superba*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) induced by thermal treatment[J]. Food chemistry, 2022, 378:132074.
- [13] SHI S, WANG X, WU X, et al. Effects of four cooking methods on sensory and taste quality of *Portunus trituberculatus*[J]. Food science & nutrition, 2020, 8(2): 1115-1124.
- [14] YIN M Y, MATSUOKA R, YANAGISAWA T, et al. Effect of different drying methods on free amino acid and flavor nucleotides of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle[J]. Food chemistry, 2022, 396:133620.
- [15] TANIMOTO S, KAWAKAMI K, MORIMOTO S. Changes in the free amino acid content of the shucked oyster (*Crassostrea gigas*) stored in salt water at 3 °C[J]. Fisheries and aquatic science, 2013, 16(2):63-69.
- [16] 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(3):72-78.
- [17] 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):57-64.
- [18] LIU C S, GU Z F, LIN X X, et al. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) and storage temperature on bacterial counts, color change, fatty acids and non-volatile taste active compounds of oysters (*Crassostrea ariakensis*)[J]. Food chemistry, 2022, 372: 131247.
- [19] CHEN D W, ZHANG M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food chemistry, 2007, 104(3):1200-1205.
- [20] 王新颖, 李俊熙, 毛云, 等. 碱性氨基酸调控牦牛肉糜制品品质特性的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 11:117570.
- [21] 卢佳芳, 朱煜康, 徐大伦, 等. 不同剂量电子束辐照对花鲈鱼肉风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12):153-158.
- [22] 安玥琦, 阮秋凤, 张学振, 等. 6种淡、海水鱼糜制品的滋味特征及其指纹图谱的建立[J]. 食品科学, 2023, 44(10):231-239.
- [23] 黄晓霞, 游云, 刘巧瑜, 等. 不同剂量⁶⁰Co- γ 射线辐照对烟鸡胸肉贮藏过程中滋味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(7):56-64.
- [24] DONG S L, NIU Y B, WEI H M, et al. Effect of super-chilling storage on maintenance of quality and freshness of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Food quality and safety, 2023, 7(2):217-225.
- [25] LIN W C, HE Y M, SHI C, et al. ATP catabolism and bacterial succession in postmortem tissues of mud crab (*Scylla paramamosain*) and their roles in freshness[J]. Food research international, 2022, 155:110992.
- [26] 李永杰, 唐月, 李慧瑶, 等. 基于智能感官和气相色谱-质谱联用技术研究食盐添加量对风干肠风味特征的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4):1-7.
- [27] ABEDI A S, KHAKSAR R, FERDOUSI R, et al. Influence of radiation processing of cooked beef sausage on its lipids[J]. Journal of the American oil chemists' society, 2014, 91(3):421-427.
- [28] 马蕊, 李敏, 李艳娟, 等. 基于电子鼻分析不同PET阻隔瓶对鲜牛奶风味的影响[J]. 食品工业, 2024, 45(1): 300-304.
- [29] LI H Y, WANG Y, ZHANG J X, et al. Prediction of the freshness of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) using E-nose, E-tongue, and colorimeter based on biochemical indexes analyzed during frozen storage of whole fish[J]. Food chemistry, 2023, 402:134325.
- [30] 余慧琳, 赵燕, 李泓浩, 等. 高能电子束辐照带鱼营养及品质变化[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9):178-188.

(责任编辑 章踐立)