

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80365

# 电子束辐照对不同植物油制备的辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的影响

欧阳梦云<sup>1,2,3</sup> 李文革<sup>1,2,3</sup> 曹胜<sup>4</sup> 莫默<sup>1,2,3</sup> 周毅吉<sup>1,2,3</sup>  
张祺玲<sup>1,2,3</sup> 徐远芳<sup>1,2,3</sup>

(1. 湖南省核农业与中药材研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业生物辐照工程技术中心, 湖南 长沙 410125; 3. 生物辐照技术湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410125; 4. 湖南省园艺研究所, 湖南 长沙 410125)

**摘要:** [目的] 研究不同植物油制备的辣椒油中类胡萝卜素和辣椒素类物质的辐照稳定性。[方法] 以菜籽油 (RO)、大豆油 (SO) 及其混合油 (RSO) 分别制备的辣椒油 RO-P、SO-P 和 RSO-P 为试材, 采用高能电子束 (10 MeV) 对其进行辐照处理, 研究不同辐照剂量 (4~12 kGy) 对辣椒油过氧化值 (PV)、酸价 (AV)、类胡萝卜素含量和辣椒素类物质含量的影响。[结果] 电子束辐照促进了辣椒油的脂肪氧化, 导致 PV 和 AV 增高, SO-P 的脂肪氧化程度最大。当辐照剂量为 4~12 kGy 时, 电子束辐照诱导的辣椒油的脂肪氧化酸败仍在可接受范围内。电子束辐照以剂量依赖的方式促进了辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的降解。在所有辣椒油中, 辣椒玉红素的辐照稳定性最强, 其次为  $\beta$ -胡萝卜素、 $\beta$ -隐黄素、玉米黄质和辣椒红素, 而辣椒素和二氢辣椒素的辐照稳定性相当。尽管 SO-P 在电子束辐照过程中更易发生脂肪氧化, 但 SO-P 中类胡萝卜素和辣椒素类物质的辐照稳定性更高。[结论] 不同辣椒油中类胡萝卜素和辣椒素类物质的辐照稳定性受到植物油原料中脂肪酸分布和抗氧化物质含量的影响。

**关键词:** 电子束辐照; 辣椒油; 类胡萝卜素; 辣椒素类物质; 氧化

## Effects of electron beam irradiation on carotenoids and capsaicinoids in pepper oils prepared by different plant oils

OUYANG Mengyun<sup>1,2,3</sup> LI Wenge<sup>1,2,3</sup> CAO Sheng<sup>4</sup> MO Mo<sup>1,2,3</sup> ZHOU Yiji<sup>1,2,3</sup>  
ZHANG Qiling<sup>1,2,3</sup> XU Yuanfang<sup>1,2,3</sup>

(1. Hunan Institute of Nuclear Agricultural Science and Chinese Herbs, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Hunan Province Engineering Technology Research Center of Agricultural Biological Irradiation, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Hunan Province Biological Irradiation Technology Engineering Research Center, Changsha, Hunan 410125, China; 4. Hunan Horticultural Research Institute, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the irradiation stability of carotenoids and capsaicinoids in pepper oils prepared using different plant oils. [Methods] With rapeseed oil (RO), soybean oil (SO), and their blended oil (RSO) as materials, pepper oils RO-P, SO-P, and RSO-P were prepared, and subjected to high-energy electron beam irradiation (10 MeV). The effects of different irradiation doses (4~12 kGy) on the peroxide value (PV), acid value (AV), carotenoid content, and capsaicinoid content of the pepper oils were investigated. [Results] Electron beam irradiation promoted lipid oxidation in the pepper oils, resulting in increased PV and AV values, with SO-P exhibiting the highest degree of lipid oxidation. When the irradiation dose ranged from 4 to 12 kGy, the irradiation-induced lipid oxidation and rancidity of

基金项目: 湖南省农业科技创新资金项目 (编号: 2024CX107); 湖南省重点研发项目 (编号: 2024JK2155)

通信作者: 李文革 (1966—), 男, 湖南省核农业与中药材研究所研究员, 博士。E-mail: 641386565@qq.com

曹胜 (1991—), 男, 湖南省园艺研究所助理研究员, 博士。E-mail: 1669149416@qq.com

收稿日期: 2025-04-18 改回日期: 2025-07-01

引用格式: 欧阳梦云, 李文革, 曹胜, 等. 电子束辐照对不同植物油制备的辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 95-101.

Citation: OUYANG Mengyun, LI Wenge, CAO Sheng, et al. Effects of electron beam irradiation on carotenoids and capsaicinoids in pepper oils prepared by different plant oils[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 95-101.

pepper oils remained within acceptable limits. Electron beam irradiation induced a dose-dependent degradation of carotenoids and capsaicinoids in pepper oils. Among all carotenoids, capsanthin demonstrated the highest irradiation stability, followed by  $\beta$ -carotene,  $\beta$ -cryptoxanthin, zeaxanthin, and capsorubin. The irradiation stability of capsaicin and dihydrocapsaicin was comparable. Although SO-P was more prone to lipid oxidation during electron beam irradiation, it exhibited higher irradiation stability of carotenoids and capsaicinoids. **[Conclusion]** The irradiation stability of carotenoids and capsaicinoids in different pepper oils is influenced by the fatty acid composition and antioxidant content of the plant oil used as the raw material.

**Keywords:** electron beam irradiation; pepper oil; carotenoids; capsaicinoids; oxidation

辣椒油是以辣椒粉和植物油按一定比例经高温煎炸而成的一种辣椒深加工产品,富含类胡萝卜素和辣椒素类物质,具有色泽鲜红、风味浓郁的特点<sup>[1]</sup>。因与膳食脂质共同食用可促进类胡萝卜素的吸收并提高其生物利用率<sup>[2]</sup>,辣椒油已成为重要的类胡萝卜素饮食来源,其作为一种天然调味料和着色剂已被广泛应用于餐饮业和食品工业中,在增色增味方面具有重要作用。据统计,2022 年全球辣椒油市场规模已达 50.91 亿元,预计到 2028 年将达到 68.59 亿元。辣椒油的色泽和辣味主要来源于辣椒类胡萝卜素和辣椒素类物质<sup>[3]</sup>。辣椒红素和辣椒玉红素是辣椒中特有的红色类胡萝卜素,其含量约占辣椒总类胡萝卜素的 50%,其次是玉米黄质、 $\beta$ -隐黄素、 $\beta$ -胡萝卜素等黄色类胡萝卜素<sup>[4]</sup>。这些脂溶性类胡萝卜素可以预防癌症、胃溃疡、动脉粥样硬化、中风、老年性黄斑变性和白内障<sup>[5-6]</sup>。辣椒素类物质主要包括辣椒素和二氢辣椒素,具有镇痛、抗氧化、抑制神经原性炎症和癌细胞增殖等健康益处<sup>[7]</sup>。

辐照(如  $\gamma$  辐照、电子束辐照等)作为一种新兴非热加工技术,近年来在提升食品质量和安全方面展现出显著优势<sup>[8]</sup>。然而,辐照可能诱导的活性成分损失极大限制了其在食品加工领域的广泛应用。类胡萝卜素和辣椒素类物质因其分子特性,极易在辐照过程中发生降解,尤其是含有共轭多烯链的类胡萝卜素。食品中类胡萝卜素和辣椒素类物质的辐解途径复杂,受到食品基质和辐照方法的影响。Muzzafar 等<sup>[9]</sup>研究发现, $\gamma$  辐照比电子束辐照更有利于类胡萝卜素的保留,在不同辐照剂量下,Kunri 红辣椒的类胡萝卜素损失率高于 Hybrid 红辣椒,这可能与 Hybrid 含有更多的抗坏血酸、黄酮类物质和酚类物质有关。Agyemang Duah 等<sup>[10]</sup>研究表明,2.5 kGy 的剂量可使辣椒素和二氢辣椒素含量增加,而 10.0 kGy 的剂量可导致辣椒素和二氢辣椒素含量降低,在 7.5~10.0 kGy 的剂量下,Unijol 辣椒的辣椒素损失率低于 Hetényi 辣椒。然而,系统性分析类胡萝卜素和辣椒素类物质辐照稳定性的研究尚未见报道,尤其是在包含辣椒油在内的油基辣椒食品基质中。此外,现有的关于辣椒油的研究主要集中在丙烯酰胺<sup>[11]</sup>、苏丹红染料<sup>[12-13]</sup>和罗丹明 B<sup>[14]</sup>的检测,或特征挥发性风味物质的鉴别<sup>[15-17]</sup>,而较少关注影响辣椒油色泽和辣味的化合物的损失。

油色和辛辣滋味是辣椒油最重要的品质属性,直接影响消费者偏好。研究拟以菜籽油(RO)、大豆油(SO)及其混合油(RSO)分别制备的辣椒油 RO-P、SO-P 和 RSO-P

为试材,在分析高能电子束诱导的辣椒油脂肪氧化的基础上,探讨不同辐照剂量对辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质含量的影响,以期富含类胡萝卜素和辣椒素类物质食品的辐照加工提供理论指导。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

辣椒红素、玉米黄质、 $\beta$ -隐黄素、 $\beta$ -胡萝卜素:纯度 $\geq$ 90%,上海麦克林生化科技有限公司;

辣椒玉红素、辣椒素、二氢辣椒素:纯度 $\geq$ 90%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

脂肪酸甲酯、 $\alpha$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚:纯度 $\geq$ 95%,美国 Sigma 公司;

$\gamma$ -生育酚:纯度 $\geq$ 95%,上海源叶生物科技有限公司;

正己烷、异丙醇:色谱纯,美国天地试剂公司;

干红辣椒(品种为二荆条)、菜籽油(RO)、大豆油(SO):市售;

其他试剂均为国产分析纯。

### 1.2 主要仪器与amp;设备

电子加速器辐照装置:DZ-10/20 型电子直线加速器,湖南省核农业与中药材研究所浏阳辐照中心;

紫外可见分光光度计:UVmini-1240 型,日本岛津公司;

高效液相色谱仪:Agilent 1100 型,美国 Agilent 公司;

气相色谱仪:GC-2010 型,日本岛津公司。

### 1.3 方法

1.3.1 辣椒油的制备 参照 Choi 等<sup>[11]</sup>的方法并稍作修改。将干红辣椒粉碎、过筛(16 目),按料液比 1:5 (g/mL)与预先加热至 160  $^{\circ}$ C 的 SO、RO 和 RSO(体积比 1:1)混匀,160  $^{\circ}$ C 搅拌 10 min,待混合物降至室温,密封,4  $^{\circ}$ C 贮藏 12 h,过滤,去除辣椒渣,得辣椒油 SO-P、RO-P 和 RSO-P,密封,4  $^{\circ}$ C 贮藏备用。每种辣椒油制备 3 份,每份使用不同批次的植物油和干红辣椒。

1.3.2 辐照处理 将辣椒油用 PE 袋密封包装(50 mL/袋),随后进行剂量为 0,4,8,12 kGy 的电子束辐照处理,每个剂量设 3 个平行。辐照过程均使用剂量片(FWT-60,均经中国计量科学研究院国家剂量保证服务 NDAS 比对标定)进行剂量跟踪,实际吸收剂量均在目标剂量 $\pm$ 0.3 kGy 内。

1.3.3 植物油中生育酚含量测定 参照 Zhang 等<sup>[3]</sup>的方法测得 RO、SO 和 RSO 中 4 种生育酚( $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚),并稍作修改。称取 0.5 g 油样于 25 mL 离心管,以

5 mL 正己烷(含 0.02 g/mL BHT 和 0.2 g/mL 抗坏血酸)溶解,添加 8 mL 体积分数为 90% 的甲醇,涡旋混匀 1 min, 4 °C、10 000 r/min 离心 15 min,收集水醇层于 25 mL 容量瓶中,残余物重复提取 3 次,合并水醇层,以 90% 甲醇定容至 25 mL,过 0.45 μm 有机膜后进行 HPLC 分析。色谱条件:Agilent Zorbax NH<sub>2</sub> 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm);流动相为正己烷-异丙醇(体积比 98:2);流速 1 mL/min;柱温 35 °C;荧光检测器;激发波长 298 nm;发射波长 325 nm。

1.3.4 植物油中脂肪酸含量测定 参照 GB 5009.168—2016 测定 SO、RO 和 RSO 的脂肪酸。

1.3.5 植物油氧化稳定性指数计算 参照 Zhang 等<sup>[3]</sup>的方法,以 C<sub>18</sub> 不饱和脂肪酸的相对百分比按式(1)计算 SO、RO 和 RSO 的氧化稳定性值

$$C_{ox} = \frac{m_1 + 10.3m_2 + 21.6m_3}{100}, \quad (1)$$

式中:

C<sub>ox</sub>——氧化稳定性指数;

m<sub>1</sub>——C<sub>18:1</sub>的相对百分比,%;

m<sub>2</sub>——C<sub>18:2</sub>的相对百分比,%;

m<sub>3</sub>——C<sub>18:3</sub>的相对百分比,%。

1.3.6 辣椒油过氧化值(PV)和酸价(AV)测定 分别参照 GB 5009.227—2023 和 GB 5009.229—2016。

1.3.7 辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质测定 参照 Duah 等<sup>[10]</sup>的方法测定辐照前后 SO-P、RO-P 和 RSO-P 中的类胡萝卜素(辣椒红素、辣椒玉红素、玉米黄质、β-隐黄素、β-胡萝卜素)和辣椒素类物质(辣椒素、二氢辣椒素)。

#### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2022 软件进行数据统计,结果以  $\bar{x} \pm s$  表示;采用 SPSS 2021 软件进行 Tukey 检验(显著性阈值为 0.05),字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ );采用 Origin 2022 软件绘图;所有试验均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 生育酚组成及含量

生育酚是植物油中广泛存在的微量伴随物,可通过阻断脂质过氧化的自由基链式反应,发挥油脂抗氧化作用<sup>[3]</sup>。由表 1 可知,SO 的总生育酚含量最高,其次是 RSO 和 RO。Mei 等<sup>[18]</sup>研究发现,相比于 RO,SO 的总生育酚含量更高。4 种生育酚在不同植物油中的分布差异显著( $P < 0.05$ )。RO 中 γ-生育酚和 α-生育酚较丰富,其含量分别约占总生育酚含量的 68% 和 28%,而 δ-生育酚和 β-生育酚含量较低(<3%)。一般来说,与 α-生育酚相比,植物油的 δ-生育酚含量较低<sup>[19]</sup>。SO 中 δ-生育酚含量为 α-生育酚的 2.25 倍,约占总生育酚含量的 21%,与 Mei 等<sup>[18]</sup>的研究结论类似。RSO 的生育酚分布介于 SO 和 RO 之间,并以 γ-生育酚和 α-生育酚为主。

表 1 植物油中生育酚含量

植物油	α-生育酚	β-生育酚	γ-生育酚	δ-生育酚	总量
RO	148.47 ± 6.11 <sup>a</sup>	6.38 ± 0.31 <sup>c</sup>	365.12 ± 11.08 <sup>c</sup>	14.06 ± 1.64 <sup>c</sup>	534.03 ± 10.11 <sup>c</sup>
SO	96.12 ± 5.13 <sup>c</sup>	8.47 ± 0.42 <sup>a</sup>	695.28 ± 17.45 <sup>a</sup>	216.66 ± 7.37 <sup>a</sup>	1 016.53 ± 21.41 <sup>a</sup>
RSO	121.88 ± 5.26 <sup>b</sup>	7.26 ± 0.61 <sup>b</sup>	529.71 ± 9.77 <sup>b</sup>	115.03 ± 7.01 <sup>b</sup>	773.88 ± 11.67 <sup>b</sup>

### 2.2 脂肪酸组成及含量

由表 2 可知,SO 中 C<sub>18:2</sub> 相对含量较高,其次为 C<sub>18:1</sub>、C<sub>18:3</sub>、C<sub>16:0</sub>,而 C<sub>16:1</sub> 和 C<sub>14:0</sub> 仅痕量存在(<0.2%),属于高亚油酸型植物油;RO 中 C<sub>18:1</sub>、C<sub>18:2</sub> 和 C<sub>18:3</sub> 相对含量最为丰富,属于高油酸型植物油;而 RSO 的脂肪酸分布介于 SO 和 RO 之间。这与大多数报道的关于 SO 和 RO 中脂肪酸分布的结果一致<sup>[3,19]</sup>。在所有植物油中,C<sub>16:0</sub> 为主要饱和脂肪酸(SFA),C<sub>18:1</sub> 为主要单不饱和脂肪酸(MUFA),C<sub>18:2</sub> 为主要多不饱和脂肪酸(PUFA)。不同植物油中的总 SFA 为 6.79%~14.06%,总 MUFA 为 20.71%~58.07%,总 PUFA 为 34.19%~64.64%。PUFA 是植物油氧化过程中最重要的元素,因此总 PUFA 高的 SO 易被氧化。值得注意的是,尽管 SO 含有最低的总 UFA,但其 Cox 值(8.12)为 RSO(6.33)的 1.28 倍,RO(4.57)的 1.78 倍。这是因为相比于 RSO 和 RO,SO 含有更高的 C<sub>18:2</sub> 和 C<sub>18:3</sub>。

表 2 植物油中的脂肪酸含量

脂肪酸	SO	RSO	RO
C <sub>14:0</sub>	0.05 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>a</sup>
C <sub>16:0</sub>	10.85 ± 0.48 <sup>a</sup>	7.41 ± 0.52 <sup>b</sup>	4.32 ± 0.37 <sup>c</sup>
C <sub>16:1</sub>	0.14 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.08 <sup>a</sup>
C <sub>18:0</sub>	3.16 ± 0.38 <sup>a</sup>	2.58 ± 0.29 <sup>b</sup>	2.36 ± 0.41 <sup>b</sup>
C <sub>18:1</sub>	20.57 ± 1.44 <sup>c</sup>	39.01 ± 1.83 <sup>b</sup>	57.85 ± 3.58 <sup>a</sup>
C <sub>18:2</sub>	53.11 ± 4.01 <sup>a</sup>	37.29 ± 1.50 <sup>b</sup>	20.64 ± 1.63 <sup>c</sup>
C <sub>18:3</sub>	11.32 ± 0.65 <sup>a</sup>	9.71 ± 0.82 <sup>ab</sup>	8.62 ± 0.30 <sup>b</sup>
C <sub>20:5</sub>	0.21 ± 0.08 <sup>c</sup>	2.49 ± 0.31 <sup>b</sup>	4.93 ± 0.27 <sup>a</sup>
ΣSFA	14.06 ± 0.60 <sup>a</sup>	10.05 ± 0.47 <sup>b</sup>	6.79 ± 0.52 <sup>c</sup>
ΣMUFA	20.71 ± 1.03 <sup>c</sup>	39.46 ± 2.88 <sup>b</sup>	58.07 ± 5.07 <sup>a</sup>
ΣPUFA	64.64 ± 4.02 <sup>a</sup>	49.49 ± 5.71 <sup>b</sup>	34.19 ± 2.86 <sup>c</sup>
ΣUFA	85.35 ± 5.93 <sup>b</sup>	88.95 ± 6.78 <sup>ab</sup>	92.26 ± 6.39 <sup>a</sup>

### 2.3 电子束辐照对辣椒油脂肪氧化的影响

PV 是脂肪氧化初期用于度量脂肪酸败程度的指标,其主要用于测定油脂中 UFA 被氧化成氢过氧化物的含量<sup>[3]</sup>。由图 1(a)可知,新制辣椒油的 PV 为 0.017~0.019 g/100 g,而辐照辣椒油的 PV 为 0.021~0.035 g/100 g,电子束辐照对辣椒油的 PV 影响较大。当辐照剂量 < 8 kGy 时,随着辐照剂量的增加,所有辣椒油的 PV 均呈显著增加趋势 ( $P < 0.001$ ),经 8 kGy 的辐照处理后,SO-P、RSO-P 和 RO-P 的 PV 分别增加了 83%,61%,44%,表明电子束辐照促进了辣椒油的脂肪氧化。类似的研究结果也在冷冻鸭肉<sup>[20]</sup>、鸡味调味品<sup>[21]</sup>、镇巴腊肉<sup>[22]</sup>、即食小龙虾<sup>[23]</sup>、山羊奶<sup>[24-25]</sup>的电子束辐照过程中被发现。当辐照剂量为 4~8 kGy 时,SO-P 的

PV 增幅显著高于 RSO-P 和 RO-P 的 ( $P < 0.001$ ),表明电子束辐照过程中 SO-P 比 RSO-P 和 RO-P 更易发生脂肪氧化,这可能是因为 SO 比 RSO 和 RO 含有更高的总 PUFA。随着辐照剂量的持续增加,3 种辣椒油的 PV 均呈降低趋势,表明电子束辐照诱导辣椒油脂肪氧化产生的氢过氧化物含量与辐照剂量并不呈线性关系。这可能是因为脂肪氧化产生的初级过氧化物不稳定,会进一步降解为醛、酮等次级过氧化物<sup>[26]</sup>,当初级过氧化物的形成速率快于分解速率时,PV 升高,反之则降低。当辐照剂量为 0~12 kGy 时,所有辣椒油的 PV 均低于 GB 2716—2018 中规定的限值 (0.25 g/100 g),表明当以 PV 为评价指标时,电子束辐照 (4~12 kGy) 诱导的辣椒油脂肪氧化酸败在可接受范围。

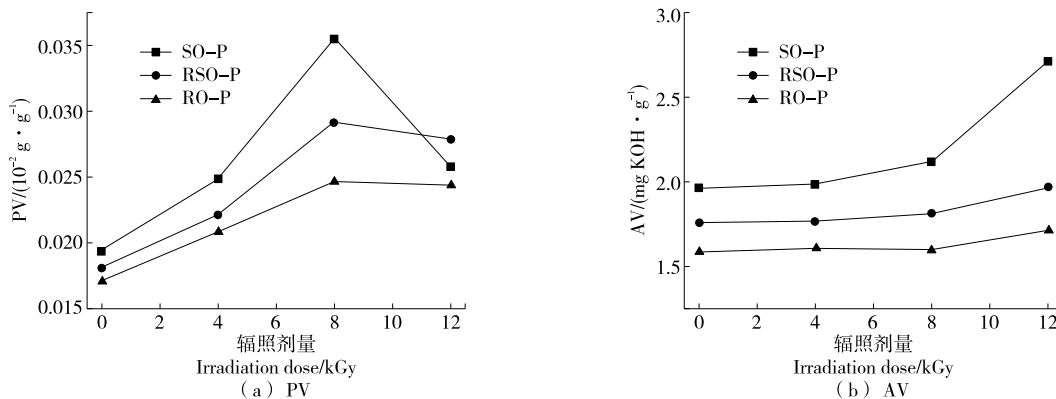


图 1 电子束辐照对辣椒油 PV 和 AV 的影响

Figure 1 Changes of PV and AV in pepper oils during electron beam irradiation

AV 表示甘油三酯水解产生游离脂肪酸的量,是脂肪氧化后期用于衡量脂肪酸败程度的重要指标<sup>[3]</sup>。由图 1(b)可知,与 PV 相比,辣椒油 AV 受电子束辐照的影响较小。当辐照剂量为 4~8 kGy 时,辣椒油的 AV 与新制辣椒油相比差异不显著。随着辐照剂量增加至 12 kGy,SO-P 的 AV 由 (1.96±0.18) mg KOH/g 增加至 (2.71±0.14) mg KOH/g (增幅为 38.23%,  $P=0.004$ ),RSO-P 的 AV 由 (1.76±0.07) mg KOH/g 增加至 (1.97±0.08) mg KOH/g (增幅为 11.96%,  $P=0.057$ ),RO-P 的 AV 由 (1.59±0.10) mg KOH/g 增加至 (1.71±0.09) mg KOH/g (增幅为 7.88%,  $P=0.152$ ),但均低于 GB 2716—2018 中规定的 AV 限值 (3 mg KOH/g)。当以 AV 为评价指标时,电子束辐照 (4~12 kGy) 诱导的辣椒油脂肪氧化酸败在可接受范围。

### 2.4 电子束辐照对辣椒油类胡萝卜素含量的影响

由图 2 可知,新制辣椒油中含有辣椒红素 (61.62±1.69) μg/g、玉米黄质 (29.37±1.07) μg/g、β-胡萝卜素 (26.04±1.40) μg/g、辣椒玉红素 (22.96±0.25) μg/g 和 β-隐黄素 (18.36±0.35) μg/g,而辐照辣椒油中含有辣椒红素 38.27~60.68 μg/g、玉米黄质 19.28~29.27 μg/g、β-胡萝卜素 19.44~27.20 μg/g、辣椒玉红素 19.28~22.90 μg/g 和 β-隐

黄素 13.37~18.16 μg/g。辣椒油类胡萝卜素的含量受辐照剂量的影响较大。在所有辣椒油中,辣椒红素、辣椒玉红素、玉米黄质、β-胡萝卜素和 β-隐黄素含量均随着辐照剂量的增加而降低,且辐照剂量越高,降解程度越大。例如,经 4, 8, 12 kGy 辐照处理后,SO-P 的辣椒红素含量分别降解了 4.39% ( $P < 0.001$ ), 11.33% ( $P < 0.001$ ) 和 24.09% ( $P < 0.001$ )。类似地,RSO-P 的 β-胡萝卜素含量分别减少了 1.84% ( $P=0.209$ ), 8.59% ( $P=0.002$ ) 和 17.05% ( $P < 0.001$ ),而 RO-P 的玉米黄质含量分别损失了 5.18% ( $P=0.055$ ), 13.61% ( $P < 0.001$ ) 和 31.81% ( $P < 0.001$ )。这与程竹林等<sup>[27]</sup>和 Yang 等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。含脂食品极易受电子束辐照产生的高能电子的影响而发生脂质过氧化,进而启动自由基链式反应,产生高活性的脂质自由基<sup>[29]</sup>,具有高度不饱和结构的类胡萝卜素可通过电子转移、提供氢原子和自由基加成等途径与这些自由基相互作用,进而阻断脂质自氧化的链式反应,其自身则发生氧化降解<sup>[30]</sup>。

从不同类胡萝卜素在电子束辐照过程中的保留情况来看,辣椒玉红素的辐照稳定性较高,经 4~12 kGy 辐照处理后,85.02%~98.81% 的辣椒玉红素保留在辣椒油中。电子束辐照导致 β-胡萝卜素和 β-隐黄素的损失更大,但仍有 78.13%~98.56% 的 β-胡萝卜素和 73.24%~96.85% 的



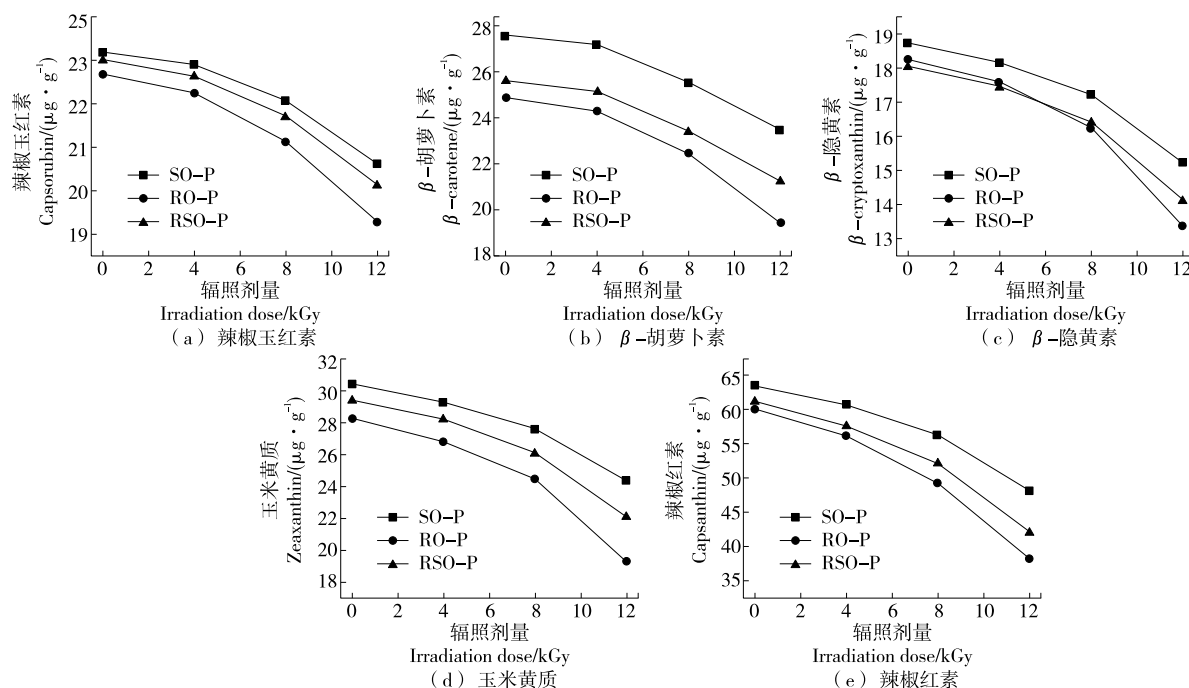


图2 电子束辐照对辣椒油类胡萝卜素含量的影响

Figure 2 Changes of the amount of carotenoids in pepper oils during electron beam irradiation

$\beta$ -隐黄素保留在辐照辣椒油中。与辣椒玉红素、 $\beta$ -胡萝卜素和 $\beta$ -隐黄素相比,电子束辐照对玉米黄质和辣椒红素的影响最为严重,经不同剂量的辐照处理后,玉米黄质的保留率分别为94.82%~96.21%(4 kGy),86.39%~90.78%(8 kGy),68.19%~79.97%(12 kGy),而辣椒红素的保留率分别为93.40%~95.61%(4 kGy),81.84%~88.67%(8 kGy),63.62%~75.91%(12 kGy)。酮基在一定程度上能增强类胡萝卜素的稳定性<sup>[3]</sup>,这可以从电子效应和空间位阻效应两方面进行解释。在电子效应上,酮基的吸电子作用可以降低相邻碳-碳双键的电子云密度,从而减少自由基对双键的攻击;在空间位阻效应上,酮基的存在增加了类胡萝卜素分子的立体复杂性,当自由基试图引发分子反应时,酮基的空间位阻可以阻碍自由基接近类胡萝卜素分子中的活性位点,从而起到保护作用<sup>[31]</sup>。因此,含有两个酮基和两个羟基的辣椒玉红素比含有一个酮基和两个羟基的辣椒红素更稳定。这与Zhang等<sup>[3]</sup>的研究结果一致。玉米黄质仅含有两个羟基,其辐照降解程度(3.79%~31.81%)小于辣椒红素(4.39%~36.38%),可能是由于辣椒红素的不对称分子结构,导致中间自由基物种的电子电荷更多地分布在酮基上,增加了其反应性<sup>[32]</sup>。理论上,含羟基的类胡萝卜素比胡萝卜素更稳定,因为羟基的存在会降低类胡萝卜素的自由基清除活性<sup>[3]</sup>。玉米黄质含有两个环羟基, $\beta$ -隐黄素含有一个环羟基,而 $\beta$ -胡萝卜素不含羟基,推测这3种类胡萝卜素的稳定性顺序应为 $\beta$ -胡萝卜素> $\beta$ -隐黄素>玉米黄质,与试验结果相矛盾,可能是因为在电子束辐照过程中,辣椒油类胡萝卜

素不仅发生了氧化反应,还可能发生了其他降解反应。

此外,类胡萝卜素的辐照稳定性因辣椒油类型而异。例如,经12 kGy辐照处理后,SO-P、RSO-P和RO-P中辣椒红素分别降解了24.09%、31.13%、36.38%。5种类胡萝卜素在不同辣椒油中遵循相同的辐照降解顺序,即RO-P>RSO-P>SO-P,表明类胡萝卜素在SO-P中的辐照稳定性更高,可能与SO含有更高的生育酚有关。

## 2.5 电子束辐照对辣椒油辣椒素类物质含量的影响

由图3可知,当辐照剂量为4~12 kGy时,所有辣椒油中的辣椒素和二氢辣椒素含量不断减少,分别从新制辣椒油的(529.27±4.79)和(214.15±3.76)  $\mu\text{g}/\text{g}$ 降至辐照辣椒油的472.43~528.25和189.45~216.18  $\mu\text{g}/\text{g}$ 。辣椒素和二氢辣椒素含量受辐照剂量的影响较大。在所有辣椒油中,辐照剂量越高,辣椒素和二氢辣椒素的含量损失越多。例如,经4,8,12 kGy辐照处理后,SO-P的辣椒素含量分别降解了1.20%( $P=0.131$ ),3.24%( $P=0.012$ ),8.79%( $P<0.001$ ),RO-P的二氢辣椒素含量分别损失了1.39%( $P=0.224$ ),4.80%( $P=0.004$ ),10.38%( $P<0.001$ )。这与彭玲等<sup>[33]</sup>和Ayob等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。辣椒油中的辣椒素和二氢辣椒素相较于上述5种类胡萝卜素,似乎对辐照的敏感性较低。经不同剂量的电子束辐照处理后,仍有89.91%~98.80%的辣椒素和89.62%~98.97%的二氢辣椒素保留在辣椒油中。与类胡萝卜素相似,含有不饱和结构的辣椒素类物质在电子束辐照过程中也易受脂质自由基的攻击而发生氧化降解。同种辣椒油中的辣椒素和二氢辣椒素在相同辐照条件下的降解程度相当,

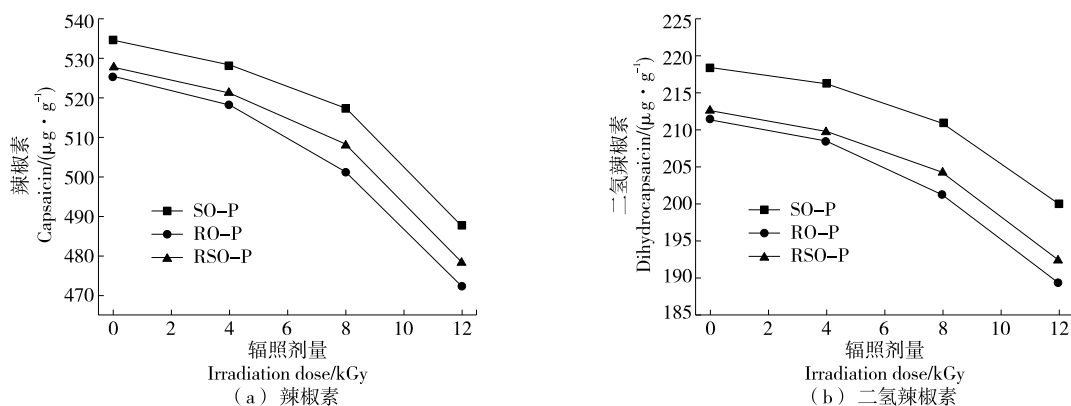


图 3 辣椒油辣椒素类物质含量在电子束辐照过程中的变化

Figure 3 Changes of the amount of capsaicinoids in pepper oils during electron beam irradiation

但后者的分子饱和度更高。此外,在任意辐照剂量下,RO-P中辣椒素类物质的降解程度均高于RSO-P和SO-P。例如,经12 kGy辐照处理后,RO-P中辣椒素含量的损失为RSO-P的1.07倍,SO-P的1.15倍,表明辣椒素类物质在RO-P中对辐照更敏感,可能与RO含有更高的总UFA有关。

### 3 结论

电子束辐照(4~12 kGy)促进了辣椒油的脂肪氧化。随着辐照剂量的增加,所有辣椒油的过氧化值均呈先上升后下降趋势,而总酸含量总体呈增加趋势。经不同剂量的电子束辐照处理后,辣椒油的过氧化值和总酸均在GB 2716—2018规定的限值标准内。电子束辐照以剂量依赖的方式促进了辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的降解。辣椒玉红素的辐照稳定性最强,其次为β-胡萝卜素、β-隐黄素、玉米黄质和辣椒红素。辣椒素和二氢辣椒素的辐照稳定性相当。基于类胡萝卜素和辣椒素类物质在电子束辐照过程中的降解程度,菜籽油制得的辣椒油对辐照最敏感,而大豆油制得的辣椒油对辐照最不敏感,这可能与大豆油含有较高的生育酚和较低的不饱和脂肪酸有关。后续可继续研究电子束辐照对不同品种的干红辣椒制备的辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的影响。

#### 参考文献

[1] LI D D, CHU B B, LI B, et al. The difference analysis of physicochemical indexes and volatile flavor compounds of chili oil prepared from different varieties of chili pepper[J]. Food Research International, 2024, 190: 114657.  
 [2] ZHANG Y B, LI R X, XU Z Z, et al. Recent advances in the effects of food microstructure and matrix components on the bioaccessibility of carotenoids[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104301.  
 [3] ZHANG R, CHEN K W, CHEN X H, et al. Thermostability and kinetics analysis of oil color, carotenoids and capsaicinoids in hotpot oil models (butter, rapeseed oil, and their blends)[J].

LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112216.  
 [4] SOUZA C S, DAOOD H G, DUAH S A, et al. Stability of carotenoids, carotenoid esters, tocopherols and capsaicinoids in new chili pepper hybrids during natural and thermal drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 163: 113520.  
 [5] HASSAN N M, YUSOF N A, YAHAYA A F, et al. Carotenoids of *Capsicum* fruits: pigment profile and health-promoting functional attributes[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 469.  
 [6] VILLA-RIVERA M G, OCHOA-ALEJO N. Chili pepper carotenoids: nutraceutical properties and mechanisms of action [J]. Molecules, 2020, 25(23): 5 573.  
 [7] ZHANG W, ZHANG Y, FAN J K, et al. Pharmacological activity of capsaicin: mechanisms and controversies (review)[J]. Molecular Medicine Reports, 2024, 29(3): 38.  
 [8] FAN X K, LI Y X, SUN Y Y, et al. Mechanisms of inhibition of prevailing spoilage bacteria *Weissella viridescens* in sauced duck product by e-beam irradiation synergistic modified atmosphere packaging[J]. Food Control, 2024, 159: 110261.  
 [9] MUZZAFAR M A, ALI S W, IQBAL M, et al. Comparative evaluation of ethylene oxide, electron beam and gamma irradiation treatments on commonly cultivated red chilli cultivars (Kunri and Hybrid) of Sindh, Pakistan[J]. Heliyon, 2024, 10(1): e23476.  
 [10] AGYEMANG DUAH S, SILVA E SOUZA C, DAOOD H G, et al. Content and response to γ-irradiation before over-ripening of capsaicinoid, carotenoid, and tocopherol in new hybrids of spice chili peppers[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111555.  
 [11] CHOI S, LEE Y, JUNG M, et al. Changes in acrylamide content and quality characteristics of red pepper oil by cooking method and conditions[J]. Food Control, 2024, 155: 110091.  
 [12] SHA X Y, HAN S, FANG G Q, et al. A novel suitable TLC-SERS assembly strategy for detection of Rhodamine B and Sudan I in chili oil[J]. Food Control, 2022, 138: 109040.  
 [13] 佟蕊, 齐颖, 扈晓鹏, 等. 薄层色谱与表面增强拉曼光谱联用快速检测辣椒油高脂肪基质中的苏丹红[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 223-229.

- TONG R, QI Y, HU X P, et al. Rapid detection of Sudan dyes in chili oil with high-fat using TLC-SERS[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(6): 223-229.
- [14] LI G L, CHEN N Y, ZHANG Y F, et al. Flower-like  $\beta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microsphere/multiwalled carbon nanotube composite for sensitive detection of carcinogenic Rhodamine B in chili oil[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 142: 107489.
- [15] YANG F, YAO S M, YUAN H B, et al. Quality characteristics and volatile components of chili oil prepared from the combination of shuanla and erjingtiao peppers[J]. Molecules, 2024, 29(23): 5767.
- [16] 杨芳, 王珍妮, 谭雨婷, 等. 基于GC-IMS结合多元统计方法研究掺入不同比例玉米油对橄榄辣椒油风味的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(10): 50-58.
- YANG F, WANG Z N, TAN Y T, et al. Study on effect of mixing different proportions of corn oil on flavor of olive chili oil based on GC-IMS combined with multivariate statistical method[J]. China Condiment, 2024, 49(10): 50-58.
- [17] 葛艳争, 孙晓雪, 安永强, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱、感官、电子鼻分析不同贮藏时间辣椒油风味成分[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 12-21.
- GE Y Z, SUN X X, AN Y Q, et al. Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 12-21.
- [18] MEI F Y, WANG H L, ZHANG Y Q, et al. Fast detection of adulteration of aromatic peanut oils based on alpha-tocopherol and gamma-tocopherol contents and ratio[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111168.
- [19] SUN L B, HUANG Z, WANG J G, et al. Effect of deodorization conditions on fatty acid profile, oxidation products, and lipid-derived free radicals of soybean oil[J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139656.
- [20] ARSHAD M S, KWON J H, AHMAD R S, et al. Influence of E-beam irradiation on microbiological and physicochemical properties and fatty acid profile of frozen duck meat[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(2): 1020-1029.
- [21] ZHENG Q, WANG H H, YUE L, et al. Effect of irradiation on volatile compound profiles and lipid oxidation in chicken powder seasoning[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 191: 109851.
- [22] 王甜, 吴锐霄, 杨春杰, 等. 不同电子束辐照处理对传统镇巴腊肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(10): 16-23.
- WANG T, WU R X, YANG C J, et al. Effects of electron beam irradiation on the quality of traditional Zhenba smoked cured meat[J]. Meat Research, 2022, 36(10): 16-23.
- [23] 湛玲薇, 杜柳, 占智敏, 等. 电子束辐照后即食小龙虾贮藏品质的变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(9): 162-167.
- SHEN L W, DU L, ZHAN Z M, et al. Changes in storage quality of ready-to-eat crayfish after electron beam irradiation[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 162-167.
- [24] WEN C L, CHEN Y, MADINA, et al. Identification and characterization of goat milk key flavor compounds and their precursors in electron beam irradiation and pasteurization on raw[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 87: 103416.
- [25] 文春露. 电子束辐照对山羊奶品质的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023: 4.
- WEN C L. Effects of electron beam irradiation on the quality of goat milk[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023: 4.
- [26] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Influence of microwave roasting on chemical composition, oxidative stability and fatty acid composition of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126974.
- [27] 程竹林, 王晓雨, 任贵平, 等. 电子束辐照对干枸杞生虫及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 221-228.
- CHENG Z L, WANG X Y, REN G P, et al. Effects of electron beam irradiation on the infestation and quality of dried goji (*Lycium barbarum*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 221-228.
- [28] YANG X X, BAI J Q, XIE Y K, et al. Evaluation of electron beam irradiation on the microbiological, phytochemicals, and aromatic profiles of three paprika (*Capsicum annum* L.) varieties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 98: 103869.
- [29] WAHYONO T, UJILESTARI T, SHOLIKIN M M, et al. Quality of pork after electron-beam irradiation: a meta-analysis study[J]. Veterinary World, 2024, 17(1): 59-71.
- [30] MONEGO D L, DA ROSA M B, DO NASCIMENTO P C. Applications of computational chemistry to the study of the antiradical activity of carotenoids: a review[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 37-44.
- [31] PÉREZ-GÁLVEZ A, MÍNGUEZ-MOSQUERA M I. Structure-reactivity relationship in the oxidation of carotenoid pigments of the pepper (*Capsicum annum* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(10): 4864-4869.
- [32] PÉREZ-GÁLVEZ A, MÍNGUEZ-MOSQUERA M I. Degradation of non-esterified and esterified xanthophylls by free radicals[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects, 2002, 1569(1/2/3): 31-34.
- [33] 彭玲, 徐远芳, 邓钢桥, 等. 辐照对干辣椒杀菌效果及辣椒素和辣椒红素的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 115-119.
- PENG L, XU Y F, DENG G Q, et al. Effect of irradiation on microbiological quality, capsaicin and capsanthin in dried chillies[J]. Food & Machinery, 2014, 30(6): 115-119.
- [34] AYOB O, HUSSAIN P R, SURADKAR P, et al. Gamma irradiation and storage effects on quality and safety of Himalayan paprika (Waer) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111667.