

电子束、X射线与 γ 射线辐照 对红参粉灭菌效果及化学成分稳定性的比较

罗科迪¹ 诸葛慧¹ 沈丽娟² 马吕丽³ 许凌翔³ 丁盛³ 施申强⁴ 傅俊杰^{4,5}

¹(浙江大学农生环测试中心 杭州 310058)

²(浙江大学药学院 杭州 310058)

³(杭州胡庆余堂药业有限公司 杭州 311100)

⁴(浙江正实辐照技术有限公司 湖州 313013)

⁵(浙江大学原子核农业科学研究所 杭州 310058)

摘要 本研究通过电子束、X射线和 γ 射线在6~16 kGy剂量范围对红参粉进行辐照处理,采用超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(UPLC-Q-TOF-MS)技术系统分析34种化学成分,结合微生物限度检测和指纹图谱相似度评价,探究不同辐照方式对红参粉灭菌效果及主要成分的影响。结果表明:3种辐照方式在 ≥ 10 kGy剂量下均能满足微生物限度标准(需氧菌 $\leq 5 \times 10^3$ cfu/g,霉菌 $\leq 5 \times 10^1$ cfu/g),灭菌效果呈剂量依赖性;通过鉴定29种皂苷类成分构建的指纹图谱显示,所有辐照组相似度均大于0.97,证实主要活性成分未发生显著变化。本研究为红参辐照灭菌工艺的辐射源选择与剂量优化提供了科学依据。

关键词 红参,辐照灭菌,指纹图谱

中图分类号 R284, TQ461

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0091

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0091

引用该文:

罗科迪, 诸葛慧, 沈丽娟, 等. 电子束、X射线与 γ 射线辐照对红参粉灭菌效果及化学成分稳定性的比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2026, 44(1): 010404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0091.

LUO Kedi, ZHUGE Hui, SHEN Lijuan, *et al.* Comparison of sterilization effects and chemical composition stability of Red Ginseng powder treated by electron beam, X-ray, and γ -ray irradiation [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, 44(1): 010404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0091.



基金资助: 校企横向基金、浙江大学实验技术研究项目(SYBJS202534)

第一作者: 罗科迪,男,1986年10月出生,2017年于浙江大学获得硕士学位,主要从事高分辨率液相质谱联用技术的应用研究

通信作者: 傅俊杰,副教授, E-mail: E-fujj@zju.edu.cn

收稿日期: 初稿 2025-10-11; 修回 2026-01-04

Supported by Industry-University Collaborative Fund, and Experimental Technology Research Project of Zhejiang University (SYBJS202534)

First author: LUO Kedi (male) was born in October 1986, and obtained his master's degree from Zhejiang University in 2017.

Research focus: application of high-resolution liquid chromatography-mass spectrometry

Corresponding author: FU Junjie, associate professor, E-mail: E-fujj@zju.edu.cn

Received 11 October 2025; accepted 04 January 2026

Comparison of sterilization effects and chemical composition stability of Red Ginseng powder treated by electron beam, X-ray, and γ -ray irradiation

LUO Kedi¹ ZHUGE Hui¹ SHEN Lijuan²

MA Lüli³ XU Lingxiang³ Ding Sheng³ SHI Shenqiang⁴ FU Junjie^{4,5}

¹(Analysis Center of Agrobiological and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

²(Pharmaceutical Informatics Institute, College of Pharmaceutical Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

³(Hangzhou Hu Qing Yu Tang Pharmaceutical Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

⁴(Zhejiang Zhengshi Irradiation Technology Co., Ltd., Huzhou 313013, China)

⁵(Institute of Nuclear-Agricultural Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

ABSTRACT This study aims to investigate the effects of different irradiation methods—using electron beam, X-rays, and γ rays at a dose range of 6–16 kGy — on the microbial reduction and chemical composition of Red Ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) powder. Ultra-performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF-MS) was employed to systematically analyze 34 chemical components. Microbial limit tests and fingerprint similarity evaluations were also conducted. The results demonstrated that all three irradiation methods met the microbial limit standards (aerobic bacterial count $\leq 5 \times 10^3$ cfu/g, mold count $\leq 5 \times 10^1$ cfu/g) at doses ≥ 10 kGy, with sterilization efficacy showing dose dependence. Fingerprint analysis based on 29 identified saponins revealed similarity values above 0.97 for all irradiated samples, confirming that the major active components remained largely unchanged. This study provides a scientific basis for selecting radiation sources and optimizing doses in the sterilization processing of Red Ginseng powder.

KEYWORDS Red Ginseng, Radiation sterilization, Fingerprinting

CLC R284, TQ461

据《中国药典》记载,红参为五加科植物人参(*Panax ginseng* C. A. Mey.)的栽培品经蒸制后的干燥根和根茎,具有抗肿瘤^[1]、抗衰老^[2-3]、抗氧化^[4]和抗疲劳^[5]等多种药理活性,在医药和保健领域应用广泛。红参作为药理活性丰富的天然中草药炮制品,在生产加工、运输及贮藏过程中可能遭受微生物污染,甚至滋生致病菌^[6],导致产品不符合药品标准并对人体健康构成潜在威胁。因此,开展相关辐照灭菌工艺参数优化与质量评价研究,对红参开发应用中的安全性具有重要意义。中药常用的灭菌方法主要包括湿热灭菌法、干热灭菌法、臭氧灭菌法及辐照灭菌法等^[7],其中辐照灭菌技术是基于 γ 射线、电子束、X射线等高能射线实现微生物灭活的非热“冷灭菌”物理方法。该技术通过射线的直接作用,以及产生的自由基的间接作用共同破坏微生物结构,兼具高效可靠、穿透性良好、灭菌效果均匀的特点,可在产品完整包装状态下实施灭菌,能有效避免二次污染,因此在医疗、食品等领域已得到广泛应用。目前,国内常见的辐照源主要有⁶⁰Co γ 射线、电子束和X射线。已有研究报道,辐照处理可

能对中药材中的活性成分产生影响^[8-10]。例如,Gao等^[11]比较了用⁶⁰Co γ 射线与电子束以2 kGy和4 kGy剂量辐照后新鲜人参中10种人参皂苷及总皂苷含量的变化,并采用高效液相色谱法(HPLC)进行定量分析,发现随吸收剂量升高,总皂苷含量呈现降低趋势。《中国药典》(2020年版)一部将人参皂苷Rg1、Re及Rb1的含量测定作为红参质量控制和药效评价的关键指标^[12]。因此,在开展红参辐照灭菌处理后,对红参中人参皂苷类成分进行含量分析是必要的。中药质量评价中,指纹图谱技术是一种重要的整体性质量控制方法,能够较为全面地反映药材或制剂中多种化学成分的特征分布与相对含量变化^[13],从而用于评价其质量的一致性与稳定性^[13-14]。有研究采用指纹图谱技术,分析了不同灭菌方法处理后人参粉中皂苷含量的变化^[14-15]。本研究采用液相色谱-质谱联用(LC-MS)技术构建指纹图谱,液质联用技术结合了液相色谱的高分离效能与质谱的高灵敏度、高选择性检测优势,通过化合物的精确质量数及特征碎片离子信息,可对色谱峰进行初步归属与结构推断,为精准地评价中药在加

工或处理过程中化学成分的整体变化提供可靠的分析手段^[16-17]。

不同辐射源在射线性质、穿透能力和能量传递等方面存在差异,其对红参化学成分的影响亦可能不同。关于辐照对红参(及同属人参属药材)化学成分影响的研究已有一定积累^[18-19], You等^[20]采用8 kGy剂量的⁶⁰Co γ 射线辐照对比了人参、三七等药材灭菌前后的质量变化。但是,目前针对X射线及电子束辐照对红参关键质量指标的研究仍较少,尤其是缺乏三者相同剂量条件下对红参核心成分(如人参皂苷、糖类、氨基酸)影响的系统性对比分析。因此,系统评估不同的辐照对红参中人参皂苷等主要成分含量的影响,对于科学筛选辐照条件、保障红参质量稳定具有重要意义。同时,人参中还含有其他多种活性成分,例如糖类、氨基酸等^[21-22],为全面评估这3种辐照对红参化学成分的影响,本研究以红参粉为对象,采用3种不同的射线在不同吸收剂量下进行辐照处理,通过微生物限度检查评价其灭菌效果,同时以基于液相色谱-质谱联用技术(LC-MS)的指纹图谱技术考察不同吸收剂量下红参粉主要化学成分的变化,以期对红参生产中辐照灭菌工艺的辐射源筛选与剂量选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红参粉,杭州胡庆余堂药业有限公司;甲醇(色谱级)、二氯甲烷(色谱级)、乙腈(色谱级),上海安谱实验科技股份有限公司;超纯水;人参皂苷Rb₁对照品,中国食品药品检定研究院;甲醇(色谱级),德国Merck公司;甲酸(分析纯),北京索莱宝有限公司。

1.2 仪器与设备

高能电子束辐照装置(10 MeV/20 kW)、电子束转X射线辐照装置(5 MeV/20 mA)由浙江正实辐照技术有限公司提供;钴-60辐照源由浙江省农科院作物与核技术利用研究所提供。UPLC-Triple-TOF/MS(Ultra performance liquid chromatography-triple-time of flight mass spectrometer)系统:AcquityTM ultra型高效液相色谱仪,美国Waters公司;Triple TOF 5600+型飞行时间质谱,配有电喷雾离子源,美国AB SCIEX公司;超声清洗器,KQ-500E昆山市超声仪器有限公司;十万分之一天平,德国METTLER

TOLEDO公司;Eppendorf minispan离心机,德国Eppendorf公司;纯水机(Millipore Milli-Q Biocel);ACQUITY Premier HSS T3色谱柱(150 mm \times 2.1 mm, 1.8 μ m),美国Waters公司。

1.3 分析方法

1.3.1 样品辐照处理

取红参粉样品适量,分别用电子束、X射线和 γ 射线对红参粉进行辐照,吸收剂量设定为CK(未辐照处理样品,设置为对照组)、6 kGy、8 kGy、10 kGy、12 kGy、16 kGy。

1.3.2 微生物检验

参照《中国药典》(2020年版)四部中微生物检查法,按照《中华人民共和国药典》四部附录中“1105非无菌产品微生物限度检查:微生物计数法”和“1106非无菌产品微生物限度检查:控制菌检查法”的要求检测需氧菌总数,霉菌、酵母菌计数,耐胆盐革兰阴性菌、大肠埃希菌、沙门菌等控制菌。按照“1107非无菌药品微生物限度标准”进行判断。

1.3.3 指纹图谱样品溶液制备

精密称取红参样品粉末0.1 g,置于玻璃离心管中,加入4 mL 80%甲醇溶液,超声提取90 min,取2 mL加入1.5 mL离心管中,10 000 r/min离心10 min。在所有样品溶液中各吸取50 μ L,混合后制成QC样品。

1.3.4 色谱条件

红参提取液在ACQUITY Premier HSS T3色谱柱(150 \times 2.1 mm, 1.8 μ m)上进行分离。流动相由0.01%的甲酸水溶液(A相)和乙腈(B相)组成。洗脱程序为:0~2 min 3%~20% B; 2~4 min 20%~30% B; 4~8 min 30%~37% B; 8~15 min 37%~39% B; 15~16 min 39%~50% B; 16~23 min 50%~95% B; 23~24 min 95% B; 24~25 min 95%~3% B,之后保持3%流动相B洗脱3 min用以平衡色谱柱。流速和进样量分别保持在0.3 mL/min和3 μ L。柱温为50 $^{\circ}$ C。数据采集过程中,每8个测试样品之间插入一针80%甲醇溶剂空白样品和QC样品,用以监测仪器和方法稳定性。

1.3.5 质谱条件

采用负离子扫描模式:扫描范围 $m/z=80\sim 1\ 500$;雾化气(GS1)55 psi;雾化气(GS2)55 psi;气帘气(CUR)35 psi;离子源温度(TEM)550 $^{\circ}$ C;离子源电压(IS)-4 500 V(负)。一级扫描:去簇电压(DP)80 V,聚焦电压(CE)10 V。二级扫描:使用TOF

MS~Product Ion~IDA 模式采集质谱数据, CID 能量为 (60 ± 30) eV, 进样前, 用 CDS 泵做质量轴校正, 使质量轴误差小于 $2\text{ ppm}(10^{-6})$ 。

1.4 数据处理

下机数据使用 MS-DIAL (版本: 5.5)^[23] 进行自动批量处理, 包括峰提取、对齐与背景 (阈值: 样品/空白=5) 扣除等步骤, 过程中使用随行 QC 样进行峰面积校正, 导出所有共有峰的信息列表。使用 MS-DIAL 官网提供的实验质谱数据库和浙江大学农生环测试中心自建标准品质谱数据库, 结合 Reaxys 数据库、Nist 20 数据库以及已报道文献进行主要共有峰的指认; 以峰面积作为选择指纹图谱的共有峰的主要依据, 同时确保覆盖所有的主要峰与所有保留时间。将导出的所有峰进行标准化, 以未经辐照样品的峰列表数据作为对照指纹图谱, 以夹角余弦法计算所有其他吸收剂量下的样品图谱与对照指纹图谱的相似性。同时以 ProteoWizard 3.0 (<https://proteowizard.sourceforge.io/>) 将下机数据转换为通用格式, 使用 python-pymzml 包 (<https://github.com/>

pymzml/pymzML) 获取指纹图谱峰列表中所有峰的提取色谱图 (XIC), 分组导入基于 C# WPF 平台自行编写的质谱数据 XIC 查看器程序中进行进一步可视化。

2 结果与讨论

2.1 不同辐照技术不同吸收剂量对红参粉微生物限量指标的影响

2015 年, 国家食品药品监督管理总局发布的《中药辐照灭菌技术指导原则》规定吸收剂量原则上不超过 10 kGy, 然而, 为了更全面地探索不同吸收剂量对红参粉产品的影响, 本研究在遵循该指导原则的基础上, 进一步设置了 6 kGy、8 kGy、10 kGy、12 kGy、16 kGy 的梯度剂量, 旨在科学评估接近及适度超出建议剂量范围的灭菌效果。实验按 §1.3.2 方法进行微生物限度检测, 判断条件如下: 需氧菌总数 $\leq 5 \times 10^3$ cfu/g, 霉菌和酵母菌总数 $\leq 5 \times 10^1$ cfu/g。微生物限度检测结果见表 1。

表 1 红参粉经不同辐照处理后微生物限度检测结果
Table 1 Microbial limit test results of Red Ginseng powder treated with various irradiation methods

	设定值 Set value	实测值 Measured value	需氧菌总数 / (cfu·g ⁻¹) Aerobic microbial count	霉菌和酵母菌总数 / (cfu·g ⁻¹) Total moulds and yeasts count
电子束吸收剂量 / kGy Electron beam absorbed dose	CK	/	80 000	7 600
	6	6.3	48 000	5 100
	8	8.1	12 000	1 900
	10	10.7	50	0
	12	12.4	0	0
	16	16.2	0	0
γ 射线吸收剂量 / kGy γ -ray absorbed dose	CK	/	80 000	7 600
	6	6.5	49 000	5 150
	8	8.3	20 050	1 100
	10	10.2	0	30
	12	12.1	0	0
	16	16.4	0	0
X 射线吸收剂量 / kGy X-ray absorbed dose	CK	/	80 000	7 600
	6	6.8	46 500	4 100
	8	8.4	12 000	1 050
	10	10.7	0	0
	12	12.5	0	0
	16	15.8	0	0

3 种射线辐照对红参粉均有一定的灭菌效果, 并且随着吸收剂量的逐步增加, 灭菌效果呈现出明

显的增强趋势。当吸收剂量增加到 10 kGy 及以上时, 所有供试射线均能使红参粉的指标达到微生物

限度标准。这一结果表明,在满足中药辐照灭菌技术指导原则的剂量上限时,红参粉可以有效地实现微生物限度的控制。值得注意的是,在相同吸收剂量条件下,3种射线的灭菌效果没有明显差异。鉴于电子束和X射线在使用安全性方面的显著优势^[24],在实际生产中,可以优先考虑使用电子束和X射线进行辐照灭菌。

2.2 基于液质联用技术对不同吸收剂量辐照对红参粉主要成分影响的分析

本研究选取两批次的红参分别采用上述3种射线进行梯度剂量辐照处理以评估电子束、X射线及γ射线不同吸收剂量辐照对红参化学成分的影响。采用超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(UPLC-Q-TOF-MS)技术对辐照后红参样品进行分析,整理出94个共有色谱峰。红参的主要活性成分为人参

皂苷类化合物,主要包括原人参三醇型皂苷(如人参皂苷Rg₁、Rg₂)、原人参二醇型皂苷(如人参皂苷Rb₁、Rb₂)及红参特有侧链修饰后皂苷(如人参皂苷Rh₁、Rh₂,由皂苷元在炮制过程中发生羟基乙酰化或脱水等反应生成)^[25]。基于上述重要性,本研究重点对共有峰中的皂苷类成分及《中国药典》规定的指标性成分进行指认,明确鉴定共34个色谱峰,其中,29个为皂苷类成分,包括人参皂苷Re、人参皂苷Rg₁、人参皂苷Rb₁、人参皂苷Rb₂等,也包含少量有机酸和糖类成分,具体成分信息、保留时间及二级质谱特征见表2和图1。本研究不仅明确了辐照处理后红参的主要化学成分构成,为后续基于指纹图谱相似度评价红参主要成分的含量变化提供了数据基础,也为科学评估辐照灭菌工艺对红参化学成分的影响提供了依据。

表 2 红参共有峰及指认
Table 2 Common peaks and their identification in Red Ginseng

保留时间 / min <i>t_R</i>	质荷比 <i>m/z</i>	化合物名称 Name	离子类型 Ion type	分子式 Molecular formula	偏差 / ppm(10 ⁻⁶) Deviation	二级特征碎片 Fragment ions(10 ⁻⁶)
1.18	173.104 7	/	/	/	/	/
1.22	497.209 5	/	/	/	/	/
1.24	426.159 4	/	/	/	/	/
1.33	517.150 8	/	/	/	/	/
1.34	683.223 0	/	/	/	/	/
1.38	209.030 3	Glucaric acid	[M-H] ⁻	C ₆ H ₁₀ O ₈	0	57.034 92(44.3), 59.013 86(42.7), 71.013 89(100), 85.029 93(29.8)
1.40	387.113 6	Sucrose	[M+FA-H] ⁻	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	-2.1	59.013 40(100), 71.013 32(42.6), 89.023 90(34.6), 101.023 74(15.5), 113.023 66(15.5), 119.033 71(13.9)
1.42	601.134 0	/	/	/	/	/
1.42	377.084 3	/	/	/	/	/
1.47	191.019 8	Isocitric acid	[M-H] ⁻	C ₆ H ₈ O ₇	0.4	57.034 04(57.3), 67.018 45(54.6), 85.029 03(46.7), 87.008 15(100), 111.007 90(60.4), 154.999 09(2.4)
1.54	439.083 5	/	/	/	/	/
1.54	499.140 7	/	/	/	/	/
1.58	133.014 5	/	/	/	/	/
1.69	96.959 6	/	/	/	/	/
1.99	191.019 8	Citric acid	[M-H] ⁻	C ₆ H ₈ O ₇	0.4	57.034 28(59.1), 59.013 5(11.2), 67.007 01(2.3), 67.018 83(50), 73.031 24(1.2), 85.029 51(31.4), 87.008 55(100), 111.008 78(51.5), 129.015 9(1.1)
2.06	128.035 6	/	/	/	/	/
2.16	191.020 2	/	/	/	/	/

续表

保留时 间 / min	质荷比 m/z	化合物 名称 Name	离子类型 Ion type	分子式 Molecular formula	偏差 / ppm(10^{-6}) Deviation	二级特征碎片 Fragment ions(10^{-6})
2.66	488.177 2	/	/	/	/	/
2.76	447.113 7	/	/	/	/	/
3.51	471.208 0	/	/	/	/	/
3.57	385.077 5	/	/	/	/	/
3.78	385.078 4	/	/	/	/	/
3.95	211.064 6	/	/	/	/	/
4.33	863.502 8	/	/	/	/	/
4.94	539.234 3	/	/	/	/	/
5.33	961.536 6	20-Gluco- ginsen- oside Rf	[M-H] ⁻	C ₄₈ H ₈₂ O ₁₉	-1.2	89.024 72(100), 101.025 49(88.3), 119.034 64(98.7), 161.053 27(71.4)
5.57	961.537 6	Vinagin- senoside R ₄	[M-H] ⁻	C ₄₈ H ₈₂ O ₁₉	-0.6	59.014 10(47.9), 89.024 54(49.4), 113.024 92(50.2), 161.045 78(51.3), 475.376 68(61.6), 619.417 57 (17.9), 637.429 68(100)
5.76	977.535 7	/	/	/	/	/
6.09	945.541 4	Ginsen- oside Re	[M-H] ⁻	C ₄₈ H ₈₂ O ₁₈	-1.5	59.013 58(28.4), 85.029 46(8.9), 89.024 20(21), 101.024 32(17.1), 119.035 04(17.3), 143.034 31 (10.4), 161.045 32(25.5), 391.284 03(8.8), 457.367 83 (5.6), 475.378 06(45.4), 619.421 94(17.1), 637.432 66 (47.2), 783.492 28(30.9), 799.487 04(22), 945.543 94 (100)
6.20	845.487 2	Ginsen- oside Rg ₁	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₂ O ₁₄	-3.8	59.013 32(32.2), 71.013 34(31.5), 73.028 87(9.4), 85.028 96(12.3), 89.023 86(46.5), 101.023 68(38.3), 113.023 85(26.1), 119.034 31(26.7), 143.034 62 (11.4), 161.045 41(61.2), 179.055 83(27), 391.284 24 (11.3), 457.367 59(5.1), 475.378 30(100), 553.338 30 (5.7), 619.422 83(14.1), 637.431 91(94.2), 799.486 09 (54.8),
6.54	887.493 7	Vinagin- senoside R ₁	[M-H] ⁻	C ₄₄ H ₇₄ O ₁₅	-2.1	59.0134 90(64.9), 101.023 87(57.7), 161.045 15 (47.7), 475.377 92(33.3), 619.423 75(78.4), 637.431 26(100)
7.02	607.296 3	/	/	/	/	/
7.70	887.500 1	Acetyl-gin- senoside Rg ₁	[M+FA-H] ⁻	C ₄₄ H ₇₄ O ₁₅	-1.0	89.023 04(13.2), 101.023 37(10.9), 113.023 47(12.9), 161.045 62(14.2), 475.377 45(14.1), 781.476 54 (61.3), 887.502 1(100)
8.20	577.134 3	/	/	/	/	/
8.42	577.134 7	/	/	/	/	/
8.93	1 239.635 6	/	/	/	/	/
8.93	665.319 8	Chikuset- susaponin VI	[M+2FA- 2H] ²⁻	C ₅₉ H ₁₀₀ O ₂₇	-2.1	59.014 37(48.5), 89.023 86(49.1), 101.024 58(50.3), 159.030 21(62.3), 455.140 2(24), 553.294 02(43.1), 619.313 35(100)

续表

保留时 间 / min	质荷比 m/z	化合物 名称 Name	离子类型 Ion type	分子式 Molecular formula	偏差 / ppm(10^{-6}) Deviation	二级特征碎片 Fragment ions(10^{-6})
9.34	845.487 5	Ginsen- oside Rf	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₂ O ₁₄	-3.4	55.018 70(6), 59.014 09(17.7), 71.013 98(18.4), 73.029 51(7.1), 85.029 62(12.5), 89.024 49(23.5), 101.024 67(31.1), 113.024 37(19.1), 143.035 11(11.2), 161.045 69(36.3), 179.056 81(6.4), 221.067 58(9.7), 391.285 33(25.3), 457.367 86(13), 475.378 76(94.3), 637.431 46(60.7), 799.484 32(100)
9.98	650.315 3	/	/	/	/	/
9.99	1 255.626 8	/	/	/	/	/
10.05	815.477 5	Notogin- senoside R ₂	[M+FA-H] ⁻	C ₄₁ H ₇₀ O ₁₃	-2.9	59.013 49(11.6), 71.013 43(13.9), 85.029(9.9), 89.023 92(9.7), 101.024 04(17.1), 113.023 70(9.3), 131.034 61(5.9), 161.045 28(22.1), 391.284 78(23.9), 457.367 28(11.7), 475.378 02(100), 619.420 62(6.4), 637.431 58(54.7), 769.473 67(80)
10.17	665.318 5	Isomer of chikusetsu- saponin VI	[M+2FA- 2H] ²⁻	C ₅₉ H ₁₀₀ O ₂₇	-3.2	59.012 89(43.8), 71.013 18(43.1), 89.023 11(41.5), 113.023 01(57), 143.033 09(13.2), 161.043 81(41), 323.093 62(10.9), 459.379 35(12.1), 553.290 47 (48.9), 619.310 59(100)
10.32	1 155.605 9	/	/	/	/	/
10.32	1 107.592 6	Ginsen- oside Rb ₁	[M-H] ⁻	C ₅₄ H ₉₂ O ₂₃	-2.8	59.013 8(6), 71.013 75(6), 89.024 29(10.2), 101.024 35 (6.9), 119.035 08(9.9), 161.046 1(12.1), 179.056 63 (19.5), 221.067 49(12.1), 621.440 28(7.3), 783.494 45 (17.3), 945.546 99(25.1), 1107.598 32(100)
10.33	576.295 4	/	/	/	/	/
10.34	599.300 4	/	/	/	/	/
10.62	620.303 7	/	/	/	/	/
10.63	597.301 7	/	/	/	/	/
10.63	1 149.602 6	20(S)- Quinque- noside R ₁	[M-H] ⁻	C ₅₆ H ₉₄ O ₂₄	-3.2	113.023 89(6.6), 161.045 77(11.1), 179.056 39(13.8), 221.066 83(7.6), 323.098 23(5.2), 621.436 89(7.7), 783.492 52(15.9), 945.543 95(18.1), 1 089.584 38 (62.8), 1 107.595 10(100), 1 149.605 20(67.4)
10.76	829.493 7	Ginsen- oside Rg ₂	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₂ O ₁₃	-2.2	59.013 29(18.4), 71.013 72(19), 85.029 25(10.2), 89.023 96(9.9), 101.024 01(24.3), 113.024 13(11.7), 143.034 43(8.9), 161.045 47(26), 205.071 79(7.5), 391.284 31(20.8), 457.367 53(10.5), 475.377 91(100), 619.421 06(16.9), 637.431 57(45), 783.489 22(90.7)
10.93	1 255.632 4	/	/	/	/	/
10.93	650.314 9	/	/	/	/	/
11.04	955.491 1	/	/	/	/	/
11.04	500.240 0	/	/	/	/	/
11.17	561.290 4	/	/	/	/	/
11.17	584.293 8	/	/	/	/	/

续表

保留时间 / min t_R	质荷比 m/z	化合物名称 Name	离子类型 Ion type	分子式 Molecular formula	偏差 / ppm(10^{-6}) Deviation	二级特征碎片 Fragment ions(10^{-6})
11.18	1 123.589 5	/	/	/	/	/
11.18	1 077.581 8	Ginsenoside Rb ₂	[M-H] ⁻	C ₅₃ H ₉₀ O ₂₂	-3.1	89.024 32(7.8), 113.024(6.1), 131.034 90(12.8), 149.045 54(12.8), 191.056 12(20), 621.437 39(11.1), 783.491 39(21.9), 915.532 69(6.7), 945.545 03(22.9), 1 077.586 79(100)
11.27	683.438 3	/	/	/	/	/
11.54	1 119.593 2	20(S)-Ginsenoside Rs ₁	[M-H] ⁻	C ₅₅ H ₉₂ O ₂₃	-2.2	89.024 04(8.6), 149.045 43(10.5), 191.056 89(9.8), 765.484 18(13.2), 927.530 04(10.5), 1 119.597 28 (100)
11.55	605.299 6	/	/	/	/	/
11.93	683.437 8	/	/	/	/	/
12.03	1 125.597 3	/	/	/	/	/
12.04	1 077.582 0	Ginsenoside Rb ₃	[M-H] ⁻	C ₅₃ H ₉₀ O ₂₂	-2.9	59.013 40(5.5), 89.023 97(6.1), 149.045 29(20.3), 191.056 49(11.6), 621.438 17(6.5), 783.493 19(16), 915.535 95(7.9), 945.545 88(13.5), 1 077.587 08(100)
12.29	1 077.583 2	/	/	/	/	/
12.43	1 165.594 0	/	/	/	/	/
12.44	605.298 7	/	/	/	/	/
12.44	1 119.592 5	20(R)-Ginsenoside Rs ₁	[M-H] ⁻	C ₅₅ H ₉₂ O ₂₃	-2.8	71.013 55(8.9), 89.024 33(13.8), 113.024 76(9.3), 125.024 66(8.8), 149.045 07(17.9), 191.055 77(8.9), 233.066 56(5.3), 621.436 52(5.7), 783.490 32(13.2), 927.532 95(14.5), 1 077.583 82(100)
12.73	1 165.602 0	/	/	/	/	/
13.32	620.304 4	/	/	/	/	/
13.32	1 195.607 9	Yesanchnoside F	[M+FA-H] ⁻	C ₅₆ H ₉₄ O ₂₄	-3.2	179.056 14(15.2), 221.066 15(9.3), 945.536 59(15.2), 1 089.584 24(34), 1 107.597 86(50.1), 1 149.614 62 (100)
13.89	1 165.593 5	/	/	/	/	/
14.34	793.436 5	Isomer of chikusetsu-saponin IVa	[M-H] ⁻	C ₄₂ H ₆₆ O ₁₄	-1.9	75.008 48(25.7), 113.023 59(12.8), 175.023 64(9.2), 455.351 50(36.9), 497.362 86(17), 569.382 59(82.3), 587.394 94(26.6), 631.382 81(100), 673.394 43(11.8)
14.89	991.547 9	/	/	/	/	/
14.90	945.539 3	Ginsenoside Rd	[M-H] ⁻	C ₄₈ H ₈₂ O ₁₈	-3.7	59.013 85(8.2), 71.012 59(8.2), 89.025 06(12.3), 101.024 66(8.2), 113.026 64(8.2), 119.033 76(8.2), 161.046 37(12.3), 179.064 26(4.1), 621.431 53(16.1), 783.484 38(16.1), 945.540 85(100)
15.46	1 033.555 2	Pseudoginsenoside Rs ₁	[M+FA-H] ⁻	C ₅₀ H ₈₄ O ₁₉	-2.4	59.013 84(7.4), 89.023 76(6.1), 113.023 82(7.1), 143.033 31(5.8), 161.044 95(9.8), 459.384 25(7.7), 621.438 33(12.7), 663.450 62(5.2), 783.492 33(16.4), 927.537 03(46.4), 945.546 74(100)

续表

保留时 间 / min	质荷比 m/z	化合物 名称 Name	离子类型 Ion type	分子式 Molecular formula	偏差 / ppm(10^{-6}) Deviation	二级特征碎片 Fragment ions(10^{-6})
16.27	1 165.600 4	/	/	/	/	/
16.27	605.298 0	/	/	/	/	/
17.02	1 033.557 6	/	/	/	/	/
17.49	339.137 2	/	/	/	/	/
17.69	1 033.561 0	/	/	/	/	/
18.06	451.195 0	/	/	/	/	/
18.11	811.482 6	Ginsenoside Rg ₆	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₀ O ₁₂	-2.9	89.023 61(62), 101.024 41(66.3), 113.025 04(55.4), 125.025 17(64.1), 161.046 25(100)
18.33	811.482 6	Ginsenoside Rg ₄	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₀ O ₁₂	-2.9	59.013 46(21.7), 85.029 36(9.3), 89.024 35(8.6), 101.024 14(19.5), 113.024 22(10.1), 161.045 4(33.3), 457.369 05(5.1), 619.420 99(34.8), 765.479 65(100)
18.68	793.436 5	Chikusetsusaponin IVa	[M-H] ⁻	C ₄₂ H ₆₆ O ₁₄	-1.9	71.013 15(8), 89.023 52(7.4), 99.008 17(7.3), 455.351 64(19.2), 497.363(5.6), 523.379 87(12.7), 537.358 06(8), 569.383 62(24.9), 613.374 40(28.4), 731.440 14(6.1), 793.438 11(100)
18.89	665.425 3	Ginsenoside Rk ₃	[M+FA-H] ⁻	C ₃₆ H ₆₀ O ₈	-2.6	55.018 68(5.5), 59.014 09(5.5), 71.013 59(7.2), 85.029 63(7.2), 101.023 66(14.6), 113.023 02(7.2), 161.044 76(16.5), 619.422 81(35.5), 665.427 36(100)
19.37	829.494 6	20(S)-Ginsenoside Rg ₃	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₂ O ₁₃	-1.1	59.014 06(12), 71.013 91(14.6), 83.013 83(5.7), 85.029 8(7.4), 89.024 41(9.1), 101.024 38(17.8), 113.024 39(11.6), 161.045 93(23.2), 375.290 07(8.4), 459.383 21(24.5), 621.436 88(37.8), 783.488 95(100)
19.52	829.492 4	20(R)-Ginsenoside Rg ₃	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₂ O ₁₃	-3.7	59.013 44(10.1), 71.013 79(11.9), 85.029 19(9.3), 101.024 53(16.3), 113.024 54(11.1), 143.035 02(5.8), 161.045 50(22.3), 375.289 59(8.5), 459.383 20(24.3), 621.437 21(34.4), 783.489 10(100)
19.77	800.385 0	/	/	/	/	/
20.59	723.379 0	Gingerglycolipid B	[M+FA-H] ⁻	C ₃₃ H ₅₈ O ₁₄	-2.6	59.014 04(11.9), 89.024 95(10.6), 101.024 63(5.4), 119.035 13(6.6), 125.024 18(5.1), 161.045 40(5.9), 235.082 95(10.7), 279.233 23(100)
20.68	476.277 7	/	/	/	/	/
20.78	564.329 8	/	/	/	/	/
21.10	811.472 8	Ginsenoside Rk ₁	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₀ O ₁₂	-2.7	59.014 25(11.9), 71.015 77(6.1), 85.030 16(11.9), 89.023 76(6.1), 101.024 53(15), 113.024 52(24.1), 119.037 74(6.1), 159.029 99(9.1), 161.046 89(24.1), 603.420 94(15), 765.480 68(100)
21.28	811.483 0	Ginsenoside Rg ₅	[M+FA-H] ⁻	C ₄₂ H ₇₀ O ₁₂	-2.4	59.013 45(7.2), 71.013 72(14.4), 83.014 13(7.2), 85.029 83(14.4), 89.023 91(7.2), 101.021 97(21.7), 113.023 97(7.2), 119.034 54(14.4), 159.033 68(14.4), 161.045 59(21.7), 279.229 93(7.2), 603.426 58(14.4), 765.478 55(100)

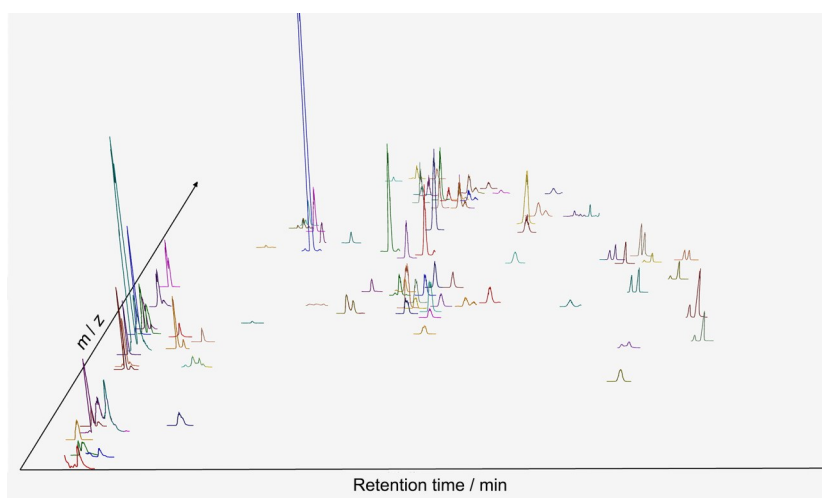


图1 红参共有峰
Fig.1 Common peaks of Red Ginseng

2.3 指纹图谱相似度

基于液质联用数据分析得到的94个峰的XIC谱进行整理,构建得到4组指纹谱图,如图2~4所示。按§1.4中实验方法,分别对经电子束、X射线、 γ 射线辐照处理后的两批次不同产地红参粉进行质谱数据指纹图谱相似度分析,结果见表3。指纹图谱相似度分析结果显示,所有辐照处理组红参粉的指纹图谱相似度均处于较高水平,表明红参粉的化学成分组成未发生显著变化,证实了辐照灭菌处理对其主要成分含量无显著影响。该结果证实了红参辐照灭菌工艺的可靠性与安全性,为红参辐照灭菌工艺的质量评价提供了科学依据。

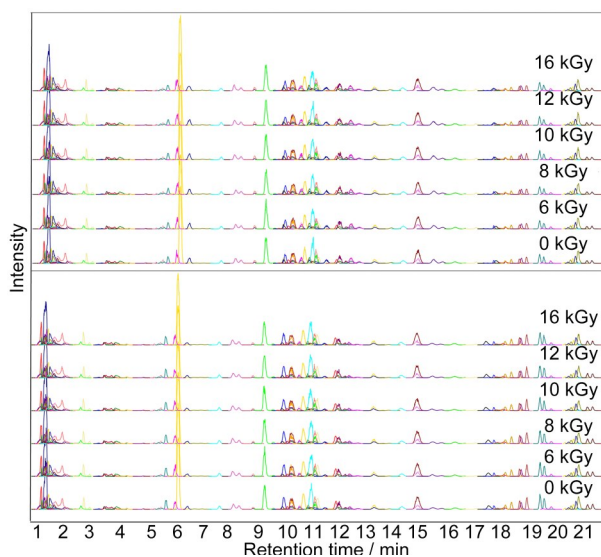


图2 X射线辐照处理两个批次红参辐照指纹图谱
Fig.2 Comparative irradiation fingerprint profiles of Red Ginseng from two batches processed by X-ray irradiation

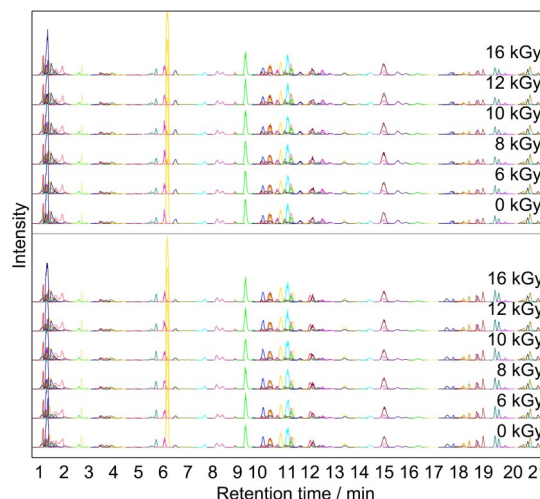


图3 电子束辐照处理两个批次红参辐照指纹图谱
Fig.3 Comparative irradiation fingerprint profiles of Red Ginseng from two batches processed by electron beam irradiation

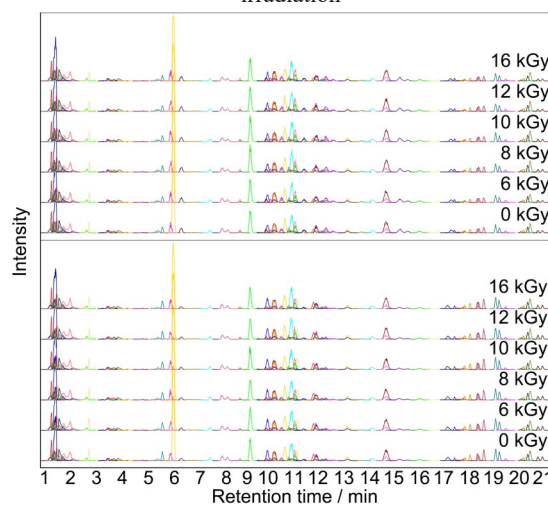


图4 γ 射线辐照处理两个批次红参辐照指纹图谱
Fig.4 Comparative irradiation fingerprint profiles of Red Ginseng from two batches processed by γ -ray irradiation

表3 两批次红参粉经不同吸收剂量的电子束、X射线和 γ 射线照射后的质谱数据指纹图谱相似度结果
Table 3 Similarity results of MS fingerprint profiles for two batches of Red Ginseng powder after irradiation with different electron beam, X-ray, and γ -ray absorbed doses

样品 Sample	电子束吸收剂量 / kGy Electron beam absorbed dose					X射线吸收剂量 / kGy X-ray absorbed dose					γ 射线吸收剂量 / kGy γ -ray absorbed dose				
	6	8	10	12	16	6	8	10	12	16	6	8	10	12	16
红参粉批次1 Red Ginseng powder batch 1	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99
红参粉批次2 Red Ginseng powder batch 2	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	0.98	0.97	0.98	0.98

3 结论

本研究旨在评估电子束、X射线和 γ 射线对红参粉的辐照灭菌效果及其主要成分的影响,探索有效的辐照吸收剂量工艺参数。从灭菌效果来看,3种辐照方式对红参粉均能有效灭菌,且灭菌效果随吸收剂量增加而增强,当吸收剂量提升至10 kGy及以上时,3种射线均能使红参粉的微生物指标满足要求。从成分稳定性来看,基于UPLC-Q-TOF-MS的分析结果显示,两批次不同产地红参粉经3种射线辐照后的样品的指纹图谱均具有高相似度,表明其主要化学成分未发生显著变化,证实在一定的剂量范围内,辐照处理在有效灭菌的同时不会影响红参主要成分含量。该研究结果支持了辐照灭菌技术应用用于红参粉的可靠性与适用性,为辐照工艺参数的选择提供了科学依据。

作者贡献声明 罗科迪、诸葛慧完成了本工作的实验、数据分析与论文主要撰写;沈丽娟指导了对指纹图谱的分析;马吕丽、许凌霄负责协助数据的收集和整理;丁盛、王皓琦参与实验设计和论文修改;施申强、傅俊杰设计并指导了该研究,完成本职工作辐照实验部分并提供基金支持。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- Chen X G, Liu H Y, Lei X H, *et al.* Cancer chemopreventive and therapeutic activities of red ginseng [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 1998, **60**(1): 71-78. DOI: 10.1016/s0378-8741(97)00133-5.
- Shin K K, Yi Y S, Kim J K, *et al.* Korean red ginseng plays an anti-aging role by modulating expression of aging-related genes and immune cell subsets[J].

Molecules, 2020, **25**(7): 1492. DOI: 10.3390/molecules25071492.

- Peng X J, Hao M Q, Zhao Y C, *et al.* Red ginseng has stronger anti-aging effects compared to ginseng possibly due to its regulation of oxidative stress and the gut microbiota[J]. *Phytomedicine*, 2021, **93**: 153772. DOI: 10.1016/j.phymed.2021.153772.
- 刘佳维, 岳超颖, 吴彝, 等. 红参多糖对小鼠抗氧化能力的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2019, **30**(9): 68-71. LIU Jiawei, YUE Chaoying, WU Shan, *et al.* Study on antioxidant ability of red ginseng polysaccharide in mice [J]. *China Food Additives*, 2019, **30**(9): 68-71.
- 王宇萌, 马春艳, 窦德强. 生晒参、红参和黑参对气虚大鼠作用的比较[J]. *辽宁中医杂志*, 2021, **48**(11): 195-198. DOI: 10.13192/j.issn.1000-1719.2021.11.053. WANG Yumeng, MA Chunyan, DOU Deqiang. Research on effect of Shengshaishen (Sun-dried ginseng), Hongshen (red ginseng) and Heishen (black ginseng) on qi deficiency of rats[J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2021, **48**(11): 195-198. DOI: 10.13192/j.issn.1000-1719.2021.11.053.
- 胡立荣, 欧阳波, 文晓柯. 中药制剂生产中的微生物污染途径及控制[J]. *中国药事*, 2015, **29**(6): 613-617. DOI: 10.16153/j.1002-7777.2015.06.010. HU Lirong, OUYANG Bo, WEN Xiaoke. Microbial contamination routes in production of traditional Chinese medicine preparations and its controls[J]. *Chinese Pharmaceutical Affairs*, 2015, **29**(6): 613-617. DOI: 10.16153/j.1002-7777.2015.06.010.
- 刘向萍, 袁建龙. 中药灭菌方法及典型问题分析[J]. *中国药事*, 2024, **38**(11): 1282-1286. DOI: 10.16153/j.1002-7777.20240558. LIU Xiangping, YUAN Jianlong. Analysis of sterilization methods and typical problems of traditional Chinese

- medicine[J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2024, **38** (11): 1282-1286. DOI: 10.16153/j.1002-7777.20240558.
- 8 康桂森, 王良才, 胡云霞, 等. 高能电子束辐照灭菌对甘草饮片质量的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(3): 030405. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0108.
- KANG Guisen, WANG Liangcai, HU Yunxia, *et al.* Effect of high-energy electron beam irradiation sterilization on the quality of Glycyrrhizae Radix et Rhizoma[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(3): 030405. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0108.
- 9 毛腾霄, 伍欣然, 张聪聪, 等. ^{60}Co γ 射线辐照灭菌对连翘质量影响的多元评价[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(1): 010403. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0049.
- MAO Tengxiao, WU Xinran, ZHANG Congcong, *et al.* Multiple evaluation of the effect of ^{60}Co γ irradiation sterilization on the quality of Fructus forsythiae[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(1): 010403. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0049.
- 10 郇倩, 卫蓓蓓, 陈维中. ^{60}Co γ 射线辐照灭菌对幼泻宁颗粒高效液相色谱指纹图谱和活性成分含量的影响[J]. 中国药业, 2025, **34**(9): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4931.2025.09.017.
- WU Qian, WEI Beibei, CHEN Weizhong. Effect of ^{60}Co γ -ray irradiation sterilization on HPLC fingerprint and active ingredient content in youxiening granules[J]. China Pharmaceuticals, 2025, **34**(9): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4931.2025.09.017.
- 11 Gao K, Chen J B, Wang Y H, *et al.* Effects of ^{60}Co - γ and electron beam irradiation on storage quality of *Panax ginseng*[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, **11** (9): 1627-1638. DOI: 10.1007/s11947-018-2108-3.
- 12 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部): 2020年版[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Part I): 2020 Edition [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.
- 13 邱娅璐, 高鹏, 何江, 等. 川芎指纹图谱的建立及 ^{60}Co - γ 辐照对其有效成分的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, **41**(5): 050303. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0007.
- QIU Yalu, GAO Peng, HE Jiang, *et al.* Establishing the fingerprints of Ligusticum chuanxiong and assessing the effects of ^{60}Co - γ irradiation on its active components[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, **41**(5): 050303. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0007.
- 14 卢晓林, 张欣渊, 周小雪, 等. 独活寄生丸HPLC指纹图谱的建立及灭菌方法的选择[J]. 山西医科大学学报, 2025, **56**(1): 76-82. DOI: 10.13753/j.issn.1007-6611.2025.01.011.
- LU Xiaolin, ZHANG Xinyuan, ZHOU Xiaoxue, *et al.* Establishment of HPLC fingerprints and selection of sterilization methods for Duhuo Jisheng Wan[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2025, **56**(1): 76-82. DOI: 10.13753/j.issn.1007-6611.2025.01.011.
- 15 白羽辛, 王玥玥, 贡济宇, 等. 不同灭菌方式人参粉的皂苷含量、指纹图谱分析及灭菌效果评价[J]. 食品工业科技, 2021, **42**(10): 229-235. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060074.
- BAI Yuxin, WANG Yueyue, GONG Jiyu, *et al.* Fingerprint analysis of saponins contents of ginseng powder in different sterilization methods and evaluation of sterilization effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, **42**(10): 229-235. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060074.
- 16 田齐聪, 于敏, 刘守国, 等. 多维度定性定量评价电子束辐照灭菌对黄芪质量的影响[J]. 核农学报, 2025, **39**(1): 77-88. DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2025.01.0077.
- TIAN Qicong, YU Min, LIU Shouguo, *et al.* Multi-dimensional qualitative and quantitative evaluation of the influence of electron beam irradiation sterilization on astragalus quality[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, **39**(1): 77-88. DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2025.01.0077.
- 17 刘虹, 刘鸿靖. 液质联用技术在药品质量分析中的应用[J]. 实验室检测, 2024, **2**(10): 147-149.
- LIU Hong, LIU Hongjing. Application of liquid chromatography-mass spectrometry technology in drug quality analysis[J]. Laboratory Testing, 2024, **2**(10): 147-149.
- 18 Jin Y, Shin H, Song K B. Electron beam irradiation improves shelf lives of Korean ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) and red ginseng[J]. Journal of Food Science, 2007, **72**(4): C217-C222. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2007.00334.x.
- 19 Byun M W, Yook H S, Kang I J, *et al.* Comparative effects of gamma irradiation and ozone treatment on hygienic quality of Korean red ginseng powder[J].

- Radiation Physics and Chemistry, 1998, **52**(1/2/3/4/5/6): 95-99. DOI: 10.1016/S0969-806X(98)00082-6.
- 20 游强蓁, 李雪松, 贺云杰, 等. 人参等中药材辐照灭菌前后质量对比研究[J]. 天津药学, 2017, **29**(5): 15-21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5687.2017.05.004.
- YOU Qiangzhen, LI Xuesong, HE Yunjie, *et al.* Comparative study on the quality of ginseng and other Chinese herbal medicines before and after irradiation sterilization[J]. Tianjin Pharmacy, 2017, **29**(5): 15-21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5687.2017.05.004.
- 21 周秋秋, 任谓明, 王艳红, 等. 红参的炮制、化学成分及药理活性研究进展[J]. 上海中医药杂志, 2016, **50**(2): 97-100. DOI: 10.16305/j.1007-1334.2016.02.029.
- ZHOU Qiuqiu, REN Weiming, WANG Yanhong, *et al.* Research progress on processing drugs methods, chemical composition and pharmacological activity of red ginseng[J]. Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine, 2016, **50**(2): 97-100. DOI: 10.16305/j.1007-1334.2016.02.029.
- 22 汤淼淼, 赵姝婷, 李冉琪, 等. 红参的炮制方法、化学成分及药理研究进展[J/OL]. 特产研究. (2024-04-01) [2025-10-11]. DOI: 10.16720/j.cnki.tcyj.2024.037.
- TANG Miaomiao, ZHAO Shuting, LI Ranqi, *et al.* Research progress on processing methods, chemical composition and pharmacology of red ginseng[J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research. (2024-04-01) [2025-10-11]. DOI: 10.16720/j.cnki.tcyj.2024.037.
- 23 Tsugawa H, Ikeda K, Takahashi M, *et al.* A lipidome atlas in MS-DIAL 4[J]. Nature Biotechnology, 2020, **38**(10): 1159-1163. DOI: 10.1038/s41587-020-0531-2.
- 24 高雯暄. X射线辐照技术对冷鲜鸡肉品质和优势菌群的影响及杀菌机理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- GAO Wenxuan. Influence of X-ray irradiation on quality and dominant microbiological characteristics of chilled chicken meat and its antibacterial mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- 25 周琪乐, 徐嵬, 杨秀伟. 中国红参化学成分研究[J]. 中国中药杂志, 2016, **41**(2): 233-249. DOI: 10.4268/cjcmm20160214
- ZHOU Qile, XU Wei, YANG Xiuwei. Chemical constituents of Chinese red ginseng[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, **41**(2): 233-249. DOI: 10.4268/cjcmm20160214