

基于CiteSpace的黄酮类化合物辐射防护可视化分析

刘 扬¹, 李廷洋¹, 李祎亮^{2,3}, 李佳慧¹, 陶 铭⁴, 尚海花^{2,3}, 侯文彬^{2,3}

1. 天津中医药大学中医药研究院 (天津 301617)
2. 北京协和医学院 (中国医学科学院) 放射医学研究所 (天津 300192)
3. 天津市放射医学与分子核医学重点实验室 (天津 300192)
4. 沈阳药科大学药学院 (沈阳 117004)

【摘要】目的 通过文献计量学方法, 分析黄酮类化合物辐射防护领域的研究现状与趋势, 为相关研发提供参考。**方法** 分别检索 Web of Science 核心合集 (WOS-CC) 和 CNKI 数据库的相关文献, 检索时间设定为建库至 2025 年 7 月 24 日。运用 CiteSpace 6.1.R3 软件进行年发文量、国家及机构合作、关键词共现、聚类及时间线等可视化分析, 英文时间分区选取 2008 年 1 月—2025 年 12 月, 中文时间分区选取 2004 年 1 月—2025 年 12 月。**结果** 初始检索到英文文献 1 073 篇, 中文文献 1 033 篇; 最终纳入英文文献 309 篇, 中文文献 258 篇。该领域年发文量呈波动上升趋势, 印度发文量居首 (59 篇), 伊朗研究中心性更高, 为 0.56。研究机构中以埃及知识银行和哈尔滨工业大学发文量最多, 均为 12 篇, 机构间合作较少。关键词显示, 研究热点集中于黄酮类化合物的抗氧化机制、紫外线及电离辐射等类型辐射损伤的防护和单体化合物 (如槲皮素、山楂黄酮) 的作用; 中英文研究各有侧重, 英文偏向分子机制与光保护技术, 中文聚焦成分提取与药理作用。**结论** 文献计量学分析展示了黄酮类化合物辐射防护研究的规律与趋势。黄酮类辐射防护研究潜力大, 未来需加强国际合作, 深入探索交叉机制及临床转化。

【关键词】 黄酮类化合物; 辐射防护; CiteSpace; 可视化分析; 文献计量学; 辐射防护剂

【中图分类号】 R963

【文献标识码】 A

Visual analysis for radiation protection of flavonoids based on CiteSpace

LIU Yang¹, LI Tingyang¹, LI Yiliang^{2,3}, LI Jiahui¹, TAO Ming⁴, SHANG Haihua^{2,3}, HOU Wenbin^{2,3}

1. College of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

2. Institute of Radiation Medicine, Peking Union Medical College & Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192, China

3. Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Tianjin 300192, China

4. College of Pharmacy, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 117004, China

Corresponding author: HOU Wenbin, Email: houwenbin@irm-cams.ac.cn

【Abstract】Objective To analyze the current research status and trend of flavonoids in the field of radiation protection by bibliometric method, and provide reference for related research and

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202504080

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (82104012, 82202950); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程国家医学健康科技战略平台与体系建设专项 (2022-I2M-2-003)

通信作者: 侯文彬, 博士, 研究员, 硕士研究生导师, Email: houwenbin@irm-cams.ac.cn

development. **Methods** The Web of Science Core Collection (WOS-CC) and China Knowledge Network (CNKI) databases were searched for relevant literature, and the search time was set from the establishment of the databases to July 24, 2025. CiteSpace 6.1.R3 software was used to perform visual analysis of annual publication volume, country and institutional collaboration analysis, keyword co-occurrence, clustering and timeline. The English time partition was selected from January 2008 to December 2025, and the Chinese time partition was selected from January 2004 to December 2025. **Results** The initial search yielded 1,073 English and 1,033 Chinese articles, and finally a total of 309 English and 258 Chinese articles were included. The number of annual publications in this field showed a fluctuating upward trend, with India leading the way with 56 publications, and the centrality of Iranian research was even higher with 0.56. Among the research institutions, the Egyptian Knowledge Bank and Harbin Institute of Technology had the highest number of publications, both with 12 articles, and there was less inter-institutional cooperation. The keywords showed that the research hotspots focused on the antioxidant mechanism of flavonoids, the protection against UV and ionizing radiation, and the role of single compounds (e.g., quercetin, hawthorn flavonoids); the studies in Chinese and English have their own focuses, with the English research favoring the molecular mechanism and photoprotection technology, and the Chinese research focusing on the extraction of components and pharmacological effects. **Conclusion** The bibliometric analysis shows the pattern and trend of the research on radiation protection of flavonoids. Flavonoids have great potential for radiation protection research, and international cooperation should be strengthened in the future to explore the cross-cutting mechanisms and clinical translation..

【Keywords】 Flavonoids; Radiation protection; CiteSpace; Visual analysis; Bibliometrics; Radioprotectants

随着现代科技的快速发展,电离辐射技术已广泛应用于多学科领域,涵盖医学诊疗(放射诊断与肿瘤放射治疗)、航空航天、工业无损检测及农业育种等方向^[1]。在生物医学领域,电离辐射疗法因其显著的临床疗效,已成为恶性肿瘤治疗的核心手段,有效提升了患者的生存质量。然而,电离辐射的双重效应值得关注:长期职业性暴露或治疗性辐射可能引发多器官功能损伤,导致显著的病理生理学改变^[2]。

电离辐射的生物损伤机制可分为直接效应与间接效应,前者通过高能粒子直接破坏生物大分子结构,引发急性辐射损伤^[3];后者通过辐射水解作用产生羟基和超氧化物自由基等活性氧簇,介导氧化应激反应,导致生物分子结构与功能的级联损伤^[3]。目前研究证实,电离辐射主要引发三大类生物损伤:DNA结构破坏、免疫抑制及造血系统损伤。辐射防护剂通过自由基清除与DNA化学修复机制发挥作用,可在辐射暴露前清除氧化自由基、修复暂时性DNA氧化损伤,从而降低辐射损伤。尽管已有多种候选化合物进入实验研究阶段,但临床实践中仍缺乏兼具高效防护效应与良好安全性的理想防护剂。

黄酮类化合物是植物次生代谢产物的典型代表,其分子结构特征为两个芳香环通过三碳链连

接形成C6-C3-C6骨架。根据结构差异可分为8个主要亚类:黄酮、黄酮醇、黄烷酮、异黄酮、查尔酮、花青素、黄烷醇及黄烷酮醇^[4]。研究表明,这类化合物具有广谱生物活性,包括抗菌、抗病毒、抗炎、调节糖脂代谢等药理作用^[5]。特别值得关注的是,多项研究揭示了黄酮类化合物在辐射防护领域的潜在应用价值:橙皮素可有效抑制紫外线(ultraviolet, UV) A (320~400 nm)、UVB (280~320 nm)辐射诱导的皮肤损伤,且不会引发红斑、脂质过氧化和炎症(髓过氧化物酶活性低)^[6];黄杞叶提取物通过激活核转录因子红系2相关因子2(nuclear factor-erythroid 2-related factor 2, NRF2)信号通路,调控谷胱甘肽过氧化物酶4(glutathione peroxidase 4, GPX4)表达,抑制电离辐射诱导的线粒体凋亡与铁死亡^[7];山奈酚则通过清除自由基、调控Prx5/胱天蛋白酶(Caspase)信号通路及修复内皮祖细胞功能等多重机制减轻辐射损伤^[8]。目前研究表明,黄酮类化合物辐射防护机制主要涉及DNA保护、抗氧化应激、免疫调节及造血功能维护等分子途径。

本研究采用文献计量学方法,系统分析Web of Science核心合集(WOS-CC)和CNKI数据库平台收录的黄酮类辐射防护相关文献。运用CiteSpace 6.1.R3可视化分析软件,通过关键词共

现、聚类分析及时间线图等方法,多维度解析该领域的研究热点、演进路径及发展趋势。本研究选取 WOS-CC 核心合集以及 CNKI 作为数据源, WOS-CC 数据库收录全球 12 400 余种高影响力学术期刊,具有严格的遴选标准与学科代表性。CNKI 收录了多领域的学术期刊、学位论文、会议论文,是全球最大的中文知识资源数据库。本研究旨在为黄酮类辐射防护剂的深度研发提供理论依据,为新型辐射防护产品的开发提供参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源与检索策略

英文文献以 WOS-CC 数据库为数据源。检索式为 TS= (“flavonoids” OR “flavanoid” OR “flavanones” OR “flavanoids” OR “flavonones” OR “flavonoids compounds” OR “flavonoid compounds” OR “flavone compounds” OR “flavonoids compound” OR “flavone compound” OR “flavonoid constituents” OR “flavonoide compound”) AND TS= (“protection” OR “conservation” OR “protect” OR “protective” OR “preservation” OR “shielded” OR “shield” OR “prevention” OR “defense” OR “defend” OR “defence”) AND TS= (“radiation” OR “medicine, radiation” OR “radiology” OR “radiation medicine” OR “radiation medical” OR “radiological medicine”)。中文文献检索以 CNKI 数据库平台为数据源。检索式为主题= (“黄酮+黄酮类+黄酮类化合物+黄酮类成分+黄酮类物质”) AND (“辐射”)。检索时间跨度均为建库至 2025 年 7 月 24 日。WOS-CC 数据库检索到文献 1 073 篇, CNKI 数据库检索到文献 1 033 篇。

1.2 文献筛选

英文文献限定语言为 English, 研究领域选择 chemistry、pharmacology pharmacy、biochemistry molecular biology、radiology nuclear medicine medical imaging、oncology、life sciences biomedicine other topics、dermatology。文献类型选择 Article。排除评论、会议和已撤回的文章获得文献 398 篇。中文文献学科选择中药学、药学、生物学、化学、肿瘤学,排除会议、报纸、成果获得文献 385 篇。

1.3 数据整理

将所得英文文献以标准化全记录格式(包含摘要、关键词及引文信息)导出,文件类型为“Plain Text File-Full Record and Cited References”。中文文献以“Refworks”引文管理格式导出,完整保留文献元数据信息。由两名独立研究者分别对文献题录类型、作者、标题、年份进行二次筛选与人工清洗,排除与黄酮类化合物辐射防护研究内容不相关文献、以及重复、缺失作者和年份信息文献。

1.4 数据分析工具及方法

CiteSpace 软件由德雷克塞尔大学陈超美教授团队开发,是基于文献计量学、可视化分析方法和数据挖掘算法,使用 Java 语言开发的文献计量引文可视化分析工具^[9]。

设置包含 4 个子文件夹的 CiteSpace 文件夹,分别为“输入”“输出”“数据”和“项目”。将整理得到的文献数据导入 CiteSpace 6.1.R3 软件的输入文件夹中进行分析。可视化分析设置:因中文文献 2004 年之前及英文文献 2008 年之前资料极少且可参考性差,故中文时间分区选取 2004 年 1 月—2025 年 12 月,英文时间分区选取 2008 年 1 月—2025 年 12 月。主题词每个切片的年份设置为 1,选择标准 top N 设置为 50,剪枝选择探路者,剪枝切片网络简化图集,节点类型选择作者、机构、国家和关键词。绘制国家和机构的合作网络图谱、关键词共现图谱、关键词聚类及突现图谱。合作网络图谱中节点半径越大,表示国家或机构对于相关研究的贡献越多。节点之间的连线越粗表示节点间的共现越强。不同年份用不同的颜色区分^[9]。关键词共现图谱中,节点大小反映关键词的出现频率,两节点间连线粗细与关键词共现频率成反比。中心性大小代表了节点在协作网络中的重要程度^[10]。关键词的聚类图展示了该领域研究热点分布,聚类标签揭示了研究领域的主要主题。采用对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)算法对不同的关键词进行聚类,聚类大小与聚类编号成反比^[11]。关键词聚类时间线图显示每个聚类根据交互和时间线退役出现最频繁的关键词。从时间维度直观地反映了该领域研究的阶段性热点和发展路径。关键词突现利用 Kleinberg 提出的爆发检测算法是 CiteSpace 的核心功能,用于捕获特定时期内关键词或参考文献

流行度的转折点。蓝线代表时间间隔，红线代表爆发的持续时间^[9]。爆发值的大小被用来衡量研究成果的创新性，是前沿的“足迹”。爆发值越大，研究成果的创新性越大，代表着该研究领域的前沿。

2 结果

2.1 年发文量图谱分析

研究最终英文文献获得 309 篇，中文文献获得 258 篇。黄酮类化合物辐射防护领域中英文文章年度发表趋势见图 1。英文文献发文量总体呈波动上升趋势，2008 年起开始缓慢上升，2022 年达到顶峰，2022 年发文量为 27 篇。中文文献首次发布于 1977 年，在 2004 年之前增长相对缓慢，发文量基本保持在 5 篇以下，于 2008 年数量开始显著攀升。在 2016 年达到顶峰（22 篇），但从 2016 年开始，发文量总体呈现下降趋势。中文文献相较于国外对于黄酮类化合物抗辐射的研究起步较早。从该领域的发文数量上观察，黄酮辐射防护领域整体发文量并不算高，也没有在某年的发文量上激增，整体发文上升趋势较为平缓，整体上对该领域的重视程度仍不够高。

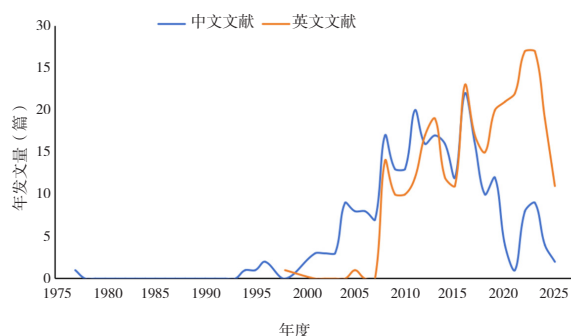


图1 中英文文献年发文量趋势图

Figure 1. Annual publication trend of Chinese and English literature

2.2 国家发文量图谱分析

国家发文量图谱如图 2 所示，其中共有 61 个节点，103 个链接，表明 61 个国家就黄酮类化合物辐射防护话题发表文章。对发文量前十的国家进行统计（表 1），印度在该领域的研究发文量最多（59 篇），为该领域的深入研究提供了重要参考。发文数量其次是中国和巴西，分别 50 篇和 26 篇。中心性前 6 的国家分别为伊朗（0.56）、中国（0.29）、美国（0.29）、意大利（0.26）、

印度（0.22）。伊朗具有较高的中心性，在国家合作网络中发挥中介作用。



图2 国家合作网络图谱

Figure 2. Mapping of country cooperation networks

表1 发文量排名前10国家分布情况

Table 1. Distribution of top 10 countries in terms of number of publications

序号	频次	中心性	国家
1	59	0.22	印度（INDIA）
2	50	0.29	中国（PEOPLES R CHINA）
3	26	0.08	巴西（BRAZIL）
4	22	0.11	韩国（SOUTH KOREA）
5	18	0.56	伊朗（IRAN）
6	18	0.29	美国（USA）
7	17	0.26	意大利（ITALY）
8	14	0.11	西班牙（SPAIN）
9	14	0.00	波兰（POLAND）
10	12	0.07	埃及（EGYPT）

2.3 机构合作图谱分析

机构合作图见图 3 和图 4，中英文发文量排名前 10 机构分布情况见表 2。英文文献机构合作图谱显示，339 个机构间共形成 308 次合作，合作紧密程度指数为 0.005 4。埃及知识银行（Egyptian Knowledge Bank）在发文数量上最多，为 12 篇。其次是巴巴原子中心（Bhabha Atomic Research Center）发文量为 5 篇。中文文献发文机构合作图谱显示，270 个机构间，共有 146 次合作，合作紧密程度为 0.004。哈尔滨工业大学发文数量最多，为 12 篇；其次是兰州大学，发文量为 11 篇。从结构间合作紧密程度来看，该研究领域机构间的合作较少，表明了当前研究该领域的机构尚且分散独立，领域内交流有待拓宽。

2.4 关键词共现图谱分析

关键词共现图谱见图 5 和图 6 所示。频次居前 20 的中英文文献关键词见表 3。英文文献关键词共现网络中，节点 =394，链路 =1 996。氧化应激（oxidative stress）和抗氧化活性

(antioxidant activity)、抗氧化剂 (antioxidant)、诱导氧化应激 (induced oxidative stress) 为高频关键词, 这些关键词与黄酮类化合物具有清除自由基和抗氧化作用从而达到辐射防护的目的相关联。脂质过氧化 (lipid peroxidation)、细胞凋亡 (apoptosis)、损伤 (damage)、基因损伤 (DNA damage) 是辐射损伤的主要类型^[12], 黄酮类化合物可能通过抑制这些过程实现保护。



图3 英文文献机构合作网络
Figure 3. Institution cooperation network for English literature

体外实验 (*in vitro*) 关键词提示研究多集中在细胞模型或分子层面的机制探索。另外关键词表达 (expression)、NF-κB (NF kappa b) 通路提示, 黄酮类化合物可能通过调控基因表达 (expression)、抑制 NF-κB 通路或影响自身生物合成途径来发挥防护作用, 这也是重点的研究方向。其中槲皮素 (quercetin) 是研究较多的代表性黄酮。

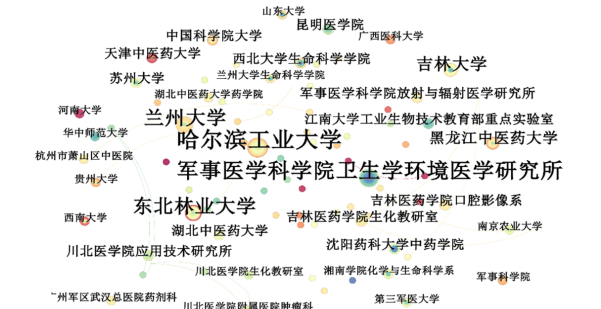


图4 中文文献机构合作网络
Figure 4. Institution cooperation network for Chinese literature

表2 中英文发文量排名前10机构分布情况
Table 2. Distribution of the top 10 institutions in terms of the number of publications in Chinese and English

序号	英文文献		中文文献	
	机构	发文量	机构	发文量
1	Egyptian Knowledge Bank	12	哈尔滨工业大学	12
2	Bhabha Atomic Research Center	6	兰州大学	11
3	Chinese Academy of Sciences	5	吉林医药学院	10
4	Consiglio Nazionale delle Ricerche	5	东北林业大学	9
5	Mazandaran University of Medical Sciences	5	军事医学科学院卫生学环境医学研究所	9
6	Egyptian Atomic Energy Authority	5	天津中医药大学	5
7	Institute of Nuclear Medicine & Allied Sciences	5	吉林大学	5
8	Defence Research & Development Organisation	5	川北医学院	5
9	Chinese Academy of Medical Sciences – Peking Union Medical College	4	湖北中医药大学	5
10	National Center for Radiation Research & Technology	4	沈阳药科大学	5



图5 英文文献关键词共现图谱
Figure 5. Keyword co-occurrence mapping for English literature

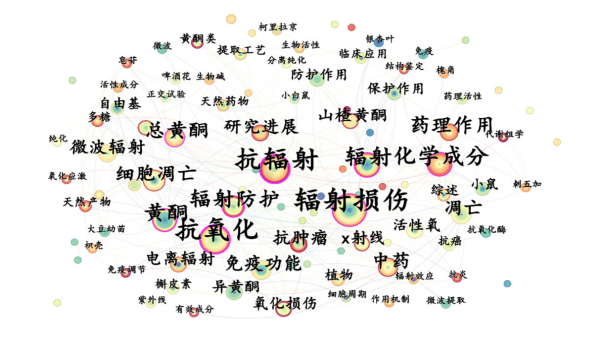


图6 中文文献关键词共现图谱
Figure 6. Keyword co-occurrence mapping for Chinese literature

表3 中英文文献高频关键词（前20）
Table 3. High frequency keywords in Chinese and English literature (top 20)

序号	英文文献		中文文献	
	关键词	频次	关键词	频次
1	flavonoids	112	辐射损伤	27
2	oxidative stress	66	抗辐射	26
3	antioxidant activity	58	抗氧化	24
4	antioxidant	40	黄酮	14
5	in vitro	39	辐射	14
6	radiation	30	化学成分	14
7	ionizing radiation	27	辐射防护	12
8	damage	25	总黄酮	12
9	phenolic compounds	24	药理作用	10
10	lipid peroxidation	22	细胞凋亡	9
11	dna damage	21	中药	8
12	ultraviolet radiation	20	凋亡	8
13	protection	20	免疫功能	8
14	apoptosis	18	微波辐射	7
15	skin	18	研究进展	7
16	nf kappa b	16	抗肿瘤	7
17	irradiation	16	电离辐射	6
18	quercetin	14	山楂黄酮	6
19	induced oxidative stress	14	X射线	6
20	expression	14	自由基	5

中文文献关键词共现网络中，节点 =295，链路 =557。关键词“辐射损伤”“抗辐射”“辐射防护”出现频次居于高位，表示对黄酮类化合物抗辐射效果的研究占比较大。关键词“化学成分”出现的频次为 14 次，目前对于化学成分的研究也是一个重点，而山楂黄酮作为代表的黄酮类辐射防护剂，在关键词出现频次中居于高位。关键词“免疫功能”提示黄酮类化合物可能通过增强机体免疫功能从而达到辐射防护的作用。关键词分析显示，从药用植物中提取天然抗辐射的黄酮类化合物是目前研究的重点。

2.5 关键词聚类分析

文献关键词图谱见图 7 和图 8，英文文献关键词聚类图谱聚类模块性指数 Q 值为 0.7235（>0.3），聚类轮廓性指数 S 值为 0.898 2（>0.5），3 394 个英文关键词共形成了 9 个聚类。中文文献关键词聚类图谱聚类模块性指数 Q 值为 0.711 2（>0.3），聚类轮廓性指数 S 值为 0.879 0（>0.5），295 个英文关键词共形成了 10 个聚类。中英文文献关键词图谱划分出来的社团结构均显著，各聚类间联系紧密，研究主

题接近，说明此次研究绘制的聚类图谱效果较好，聚类成员的一致性高，结果可信。

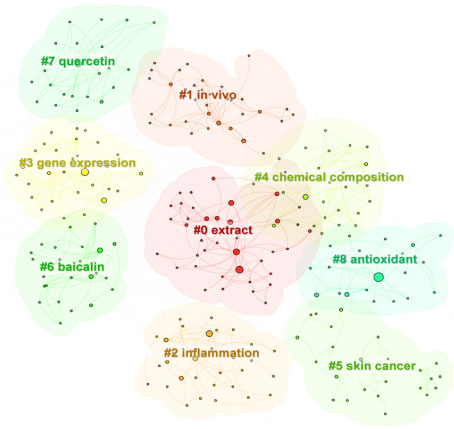


图7 英文文献关键词聚类图谱
Figure 7. Keyword clustering mapping for English literature

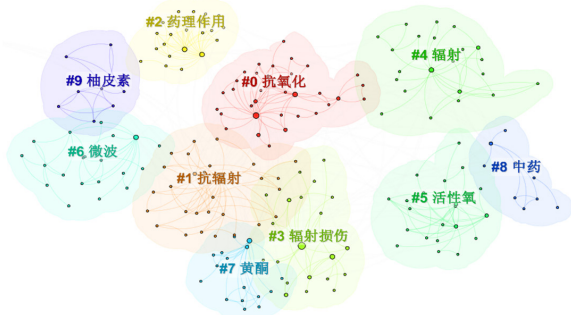


图8 中文文献关键词聚类图谱
Figure 8. Keyword clustering mapping for Chinese literature

中英文文献聚类汇总见表 4，英文文献关键词聚类中聚类 #0 extract、聚类 #4 chemical composition 和中文文献关键词聚类 #8 提示从药用植物中提取、发现具有辐射防护作用的黄酮类化合物是目前主要的研究方向。黄芩苷（baicalin）、槲皮素（quercetin）、柚皮素是目前研究较为深入的具有辐射防护作用的黄酮类化合物，为寻找相似结构的辐射防护剂提供了思路。英文文献中关键词聚类炎症（#2 “inflammation”）和抗氧化（#8 “antioxidant”）揭示了黄酮类化合物发挥辐射防护作用的关键机制，抗氧化和抗炎是重要防护辐射引起的损伤的重要路径。基因表达（“gene expression”）则深入到分子层面，说明研究已涉及辐射对基因的影响及黄酮类化合物的调控作用。中文文献关键词聚类 #6 微波，提示研究已拓展至非电离辐射防护领域。

表4 中英文文献关键词聚类汇总
Table 4. Summary of keyword clustering in Chinese and English literature

聚类	英文	中文
0	extract	抗氧化
1	in vivo	抗辐射
2	inflammation	药理作用
3	gene expression	辐射损伤
4	chemical composition	辐射
5	skin cancer	活性氧
6	baicalin	微波
7	quercetin	黄酮
8	antioxidant	中药
9		柚皮素

2.6 关键词聚类时间线分析

中英文文献关键词聚类时间线图见图 9 和图 10。从图中可知，英文文献聚类关键词横跨 2008—2025 年，而中文文献的聚类关键词主要分布在 2004—2023 年。英文文献聚类中的 #2

(inflammation) 和 #3 (gene expression) 时间跨度长且关键词较多，说明对于黄酮类化合物辐射防护机制的研究一直备受关注。中文文献聚类中的 #1 抗辐射的关注较持续。

2.7 突现词分析

中英文文献爆发最久突现词见表 5 和表 6。英文文献最新的突现词是“skin”“induced dna damage”和“expression”，这表明黄酮辐射防护机制的研究以及黄酮类化合物对光保护的研究是当前的研究热点。中文文献最新的突现词是“化学成分”，表明中文目前的研究重心在具有辐射防护作用的黄酮类化合物的发掘。

2.8 具有辐射防护作用的黄酮类化合物

具有辐射防护作用的黄酮类化合物包括槲皮素、葛根素、山楂黄酮等，近 10 年具有辐射防护作用的代表性黄酮类化合物见表 7。

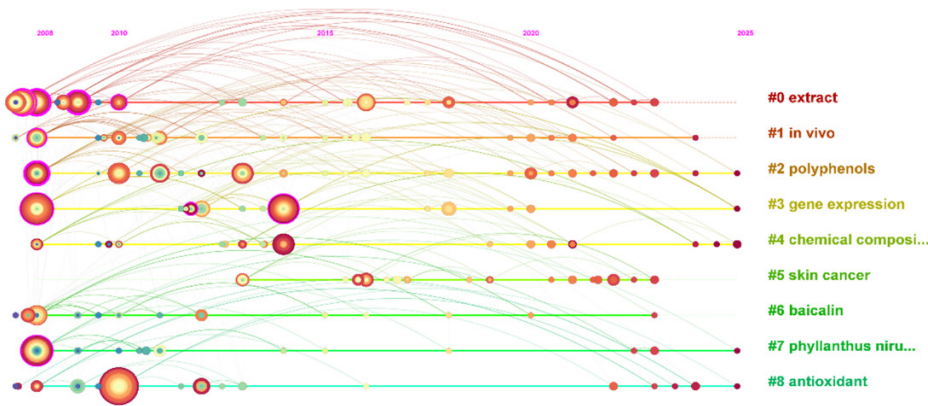


图9 英文文献关键词聚类时间线图谱
Figure 9. Timeline mapping of keyword clustering for English literature

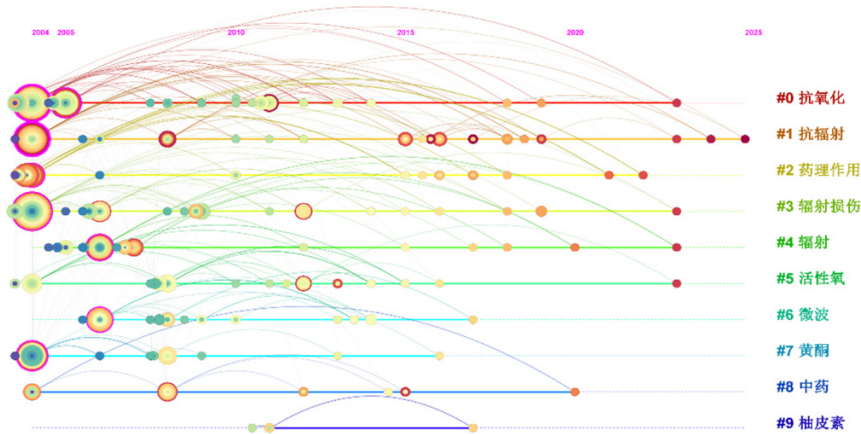


图10 中文文献关键词聚类时间线图谱
Figure10. Timeline mapping of keyword clustering for Chinese literature

表5 英文文献爆发最久的突现词
Table 5. The most prolonged bursts of emergent words for English literature

关键词	年份	爆发力指数	起始时间段	2008—2025
glutathione	2009	2.68	2009—2013	
ultraviolet radiation	2012	2.89	2016—2021	
expression	2017	3.18	2017—2023	
gene expression	2018	3.55	2018—2019	
sun protection factor	2016	3.13	2018—2019	
induced dna damage	2013	3.55	2021—2022	
skin	2014	4.73	2023—2025	

表6 中文文献爆发最久的突现词
Table 6. The most prolonged bursts of emergent words for Chinese literature

关键词	年份	爆发力指数	起始时间段	2004—2025
辐射损伤	2004	2.36	2005—2006	
黄酮	2004	3.20	2006—2009	
防护作用	2009	2.13	2009—2011	
凋亡	2004	1.96	2010—2015	
辐射防护	2005	2.73	2012—2013	
微波辐射	2008	1.90	2012—2016	
化学成分	2004	2.63	2018—2022	

表7 近10年具有代表性的黄酮类化合物及其辐射防护作用
Table 7. Representative flavonoids of the last decade and their radioprotective effects

黄酮类化合物	试验对象	辐射源	结论
槲皮素	脂质体	UVA、UVB	槲皮素抑制UVA和UVB辐射诱导的脂质氧化 ^[13]
	大鼠	电离辐射	槲皮素在辐射诱导的脑损伤后表现出显著的神经保护作用 ^[14]
	大鼠	γ射线	槲皮素对实验性辐射诱导的脑和垂体损伤中的神经保护作用 ^[15]
	大鼠	X射线	通过吸入槲皮素可通过减少炎症细胞的数量、减轻炎症反应和病理变化来改善放射性肺炎 ^[16]
葛根素	人外周血淋巴细胞	γ辐射	槲皮素可改善γ辐射诱导的人外周血淋巴细胞DNA损伤和生化变化 ^[17]
	人皮肤成纤维细胞	UVA	葛根素通过调节Nrf2和MAPK信号通路来减少人成纤维细胞中UVA辐射引起的氧化损伤和光老化 ^[18]
	人脐血管内皮细胞	X射线	葛根素通过靶向miR-34a的PLGF（胎盘生长因）减少辐射诱导的血管内皮细胞损伤 ^[19]
山楂黄酮	小鼠	X射线	山楂黄酮通过抑制ROS/NLRP3信号通路对辐射损伤小鼠睾丸的保护作用 ^[20]
	大鼠	微波辐射	山楂黄酮对微波辐射引起的大鼠肾脏组织损伤有一定治疗效果 ^[21]
芦丁和芦丁水合物	质粒DNA	γ射线	芦丁和芦丁水合物可以保护质粒DNA免受辐射诱导的损伤 ^[22]
山奈酚	小鼠	γ射线	山奈酚通过抑制氧化应激、减轻形态变化和细胞凋亡来对抗伽马辐射引起的组织损伤 ^[23]
水飞蓟宾	质粒DNA、人淋巴细胞	γ射线	水飞蓟宾可以保护质粒DNA免受辐射诱导的链断裂，并且可为淋巴细胞DNA提供保护 ^[24]
	小鼠		水飞蓟宾可显著降低辐射引起的死亡率和血液白细胞DNA损伤 ^[24]
紫檀芪	小鼠	UVB	紫檀芪可预防急性UVB引起的皮肤褶皱、厚度和发红的增加以及慢性UVB诱导的皮肤癌发生 ^[25]
穗花杉双黄酮	小鼠	γ射线	穗花杉双黄酮减轻了辐射对造血系统的损伤并促进了其恢复 ^[8]
柚皮苷	小鼠骨髓细胞	γ射线	柚皮苷可以保护小鼠骨髓细胞免受辐射引起的染色体损伤。清除自由基，从而减少辐射造成的损伤 ^[26]
芹菜素	人真皮成纤维细胞	UVB	芹菜素可防止UVB诱导的环丁烷嘧啶二聚体（CPD）形成、恢复核苷酸切除修复（NER）蛋白并防止人体皮肤细胞中UVB介导的细胞凋亡信号传导 ^[27]

3 讨论

本研究通过文献计量分析全面概述了黄酮辐射防护研究的进展,并重点展望了未来的研究方向。黄酮类化合物辐射防护研究的年度发文量呈稳步增长态势,但总体仍处于探索阶段,该领域具有显著的研究潜力与创新空间。从国家发文量来看,该领域全球研究格局呈现地域差异性,形成了亚洲为产出核心、欧美为影响力枢纽的多极化格局。发文量排名前 10 的国家中,亚洲国家占 5 个(印度、中国、韩国、伊朗、埃及),其中印度和中国在发文量上领先,凸显亚洲在该领域的核心地位。此外,伊朗虽发文量仅 18 篇,但中心性高达 0.56,远超其他国家,表明其研究具有极强的学术枢纽作用。美国和意大利虽发文量非顶尖,但中心性稳居前列,反映其研究的广泛渗透力。

关键词分析表明,该领域研究方向以黄酮类化合物的抗氧化机制及植物来源活性成分为主导。辐射可以通过辐射产生的反应自由基直接或间接改变分子的化学结构,从而导致 DNA 损伤。这些自由基还会与 RNA 和蛋白质发生反应,导致细胞功能障碍。若 DNA 损伤未被细胞修复,会导致细胞死亡;细胞凋亡还会刺激免疫系统,使细胞因子和趋化因子水平升高,进而诱导炎症反应,炎症和抗炎细胞因子都可以诱导氧化还原相互作用,并通过辐射放大氧化损伤^[16]。黄酮类化合物的核心作用是通过中和自由基、减少氧化损伤来对抗辐射引发的应激反应^[24]。从天然植物中发现具有辐射防护作用的黄酮类化合物作为辐射防护剂是目前研究的热点。目前,研究者已经从天然的药用植物中分离出许多具有辐射防护活性的黄酮类化合物,Devi 等^[28]证实,从圣罗勒叶中提取的荳蔻素和 Vicenin 可以使 γ 射线照射过的小鼠股骨骨髓中不同类型染色体畸变评分显著降低。柚皮苷主要存在于葡萄柚和其他柑橘类水果中,其可以提高过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶 mRNA 的合成,清除自由基,从而减少辐射造成的损伤^[26]。大豆异黄酮通过多靶点机制发挥辐射防护作用,包括直接增强抗氧化酶活性、抑制氧化应激标志物、调节脂质代谢、保护线粒体功能及 DNA 完整性^[29]。体外实验验证黄酮具有辐射防护活性的重要手段,很多研究通过体外实验证实了黄酮类化合物为有

效的抗氧化剂。如有研究者用碱性彗星测定、结构染色体畸变分析和胞质分裂阻断微核测定来评估蜂胶中黄酮的辐射防护能力^[30];研究者通过体外试验证明紫檀水提取物中黄酮通过增加细胞内总硫醇和还原型谷胱甘肽/氧化型谷胱甘肽比率,减轻辐射造成的活性氧、脂质过氧化、DNA 双链断裂和脾淋巴细胞中的细胞死亡^[31]。有研究者对山奈酚(10 $\mu\text{mol/L}$)预处理 24 Gy 伽马射线照射 24 h 后对人脐静脉内皮细胞进行处理可以显著提高细胞活力并减少细胞凋亡,表明山奈酚治疗可能通过防止内皮细胞凋亡来抑制肠道损伤^[23]。

通过关键词共现分析和关键词聚类分析筛选出槲皮素、黄芩苷、山楂黄酮为目前研究较为深入的从中药中提取的单体黄酮类化合物。槲皮素是预防和改善辐射损伤的经典化合物。Devipriya 等^[17]研究发现,槲皮素可改善 γ 辐射诱导的人外周血淋巴细胞 DNA 损伤和生化变化。Qin 等^[16]发现,通过吸入槲皮素可通过减少炎症细胞的数量、减轻炎症反应和病理变化来改善放射性肺炎。Baran 等^[15]证明,槲皮素具有在实验性辐射诱导的脑和垂体损伤中的神经保护作用。槲皮素可能是调节辐射诱导各种损伤的潜在药物。研究发现,黄芩苷可以通过提高超氧化物歧化酶水平降低丙二醛水平和 p-NF κ Bp65 和 p-I κ B α 蛋白的表达从而减轻辐射所致急性肺组织损伤^[32]。Lu 等^[33]发现,黄芩苷可以通过转化生长因子- β 和胞外信号调节激酶/糖原合酶激酶 3 β 信号通路缓解原代 II 型肺泡上皮细胞辐射诱导的上皮间质转化。胡琦等^[21]发现山楂黄酮可能可以通过抑制活性氧/NOD 样受体热蛋白结构域相关蛋白 3(NLRP3)信号通路调控睾丸细胞中促炎症细胞因子水平从而修复 X 射线引起的小鼠睾丸辐射损伤。有研究者发现山楂黄酮对微波辐射引起的大鼠肾脏组织损伤也有一定治疗效果^[22]。关键词突现分析发现黄酮类化合物辐射防护机制的研究和单体化合物辐射防护作用的研究已经是经典的研究主题,但仍有待深入探索。

黄酮类化合物辐射防护研究领域呈现亚洲为产出核心、欧美为影响力枢纽的多极化格局,未来跨国合作尤其是与伊朗、意大利等高中心性国家的联动或成关键突破点。对于关键词进行分析,黄酮类化合物抗辐射机制的研究将从抗氧化扩展至抗炎、DNA 修复等交叉机制。植物源黄酮的提

取、结构修饰及生物利用度优化仍然是未来研究的重点及热点。UV 辐射与皮肤损伤的关联性较强,可能推动黄酮在护肤品或药物中的开发。黄酮对抗氧化酶(如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶)的调控通路尚未完全明确,需结合基因编辑或代谢组学技术进一步研究。

聚类分析显示,黄酮辐射防护机制的研究以及对 UV 辐射防护的研究是主要研究领域。结合关键词聚类时间线分析得知,目前该领域的研究在辐射防护剂和抗氧化活性方面研究较早,而当前以药用植物中的黄酮辐射防护剂的研究为主。

本研究也存在一定局限,文献质量参差不齐,对了解研究领域整体结构的全局性可能较局限;可视化图形多系二维图谱展示,尚无更高维度层面的可视化展示,仍有待深入探索。因此,未来研究可通过检索多个文献数据库扩大样本范围,拓宽可视化分析视角,以更全面的研究促进对黄酮类化合物辐射防护领域的深入理解。

参考文献

- Johnke RM, Sattler JA, Allison RR. Radioprotective agents for radiation therapy: future trends[J]. *Future Oncol*, 2014, 10(15): 2345–2357. DOI: [10.2217/fon.14.175](#).
- Li YN, Zhang WB, Zhang JH, et al. Radioprotective effect and other biological benefits associated with flavonoids[J]. *Trop J Pharm Res*, 2016, 15(5): 1099–1108. DOI: [10.4314/tjpr.v15i5.28](#).
- Mashhadi Akbar Boojar M. An overview of the cellular mechanisms of flavonoids radioprotective effects[J]. *Adv Pharm Bull*, 2019, 10(1): 13–19. DOI: [10.15171/apb.2020.002](#).
- Farhan M, Rizvi A, Aatif M, et al. Current understanding of flavonoids in cancer therapy and prevention[J]. *Metabolites*, 2023, 13(4): 481. DOI: [10.3390/metabo13040481](#).
- Vicente O, Boscaiu M. Flavonoids: antioxidant compounds for plant defence and for a healthy human diet[J]. *Not Bot Horti Agrobot Cluj-Napoca*, 2018, 46(1): 14–21. DOI: [10.15835/nbha45210992](#).
- de Araújo Andrade T, Heimfarth L, Dos Santos DM, et al. Hesperetin-based hydrogels protect the skin against UV radiation-induced damage[J]. *AAPS PharmSciTech*, 2022, 23(6): 170. DOI: [10.1208/s12249-022-02323-8](#).
- Wu S, Tian C, Tu Z, et al. Protective effect of total flavonoids of *Engelhardia roxburghiana* Wall. leaves against radiation-induced intestinal injury in mice and its mechanism[J]. *J Ethnopharmacol*, 2023, 311: 116428. DOI: [10.1016/j.jep.2023.116428](#).
- Qu X, Li Q, Zhang X, et al. Amentoflavone protects the hematopoietic system of mice against γ -irradiation[J]. *Arc Pharm Res*, 2019, 42(11): 1021–1029. DOI: [10.1007/s12272-019-01187-0](#).
- Chen Y, Zhang J, Wu J, et al. A bibliometric and visual analysis of the use of ustekinumab in Crohn's disease using CiteSpace[J]. *Front Pharmacol*, 2024, 14: 1322319. DOI: [10.3389/fphar.2023.1322319](#).
- Yao W, Peng X, Guan Y, et al. Thyroid nodules: emerging trends in detection and visualization based on CiteSpace[J]. *Endocr Metab Immune Disord Drug Targets*, 2024, 24(1): 130–141. DOI: [10.2174/1871530323666230822143549](#).
- 冯悦颖, 陈天超, 柳馨怡, 等. 基于 CiteSpace 的国内外创伤后成长研究的可视化分析[J]. *护理研究*, 2024, 38(15): 2746–2756. [Feng YY, Chen TC, Liu XY, et al. Bibliometric analysis of post-traumatic growth research in China and abroad based on CiteSpace[J]. *Chinese Nursing Research*, 2024, 38(15): 2746–2756.] DOI: [10.12102/j.issn.1009-6493.2024.15.020](#).
- Lee K, Park JS, Kim YJ, et al. Differential expression of Prx I and II in mouse testis and their up-regulation by radiation[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2002, 296(2): 337–342. DOI: [10.1016/S0006-291X\(02\)00801-X](#).
- Fahlman BM, Krol ES. Inhibition of UVA and UVB radiation-induced lipid oxidation by quercetin[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(12): 5301–5305. DOI: [10.1021/jf900344d](#).
- Kale A, Pişkin Ö, Baş Y, et al. Neuroprotective effects of quercetin on radiation-induced brain injury in rats[J]. *J Radiat Res*, 2018, 59(4): 404–410. DOI: [10.1093/jrr/rry032](#).
- Baran M, Yay A, Onder GO, et al. Hepatotoxicity and renal toxicity induced by radiation and the protective effect of quercetin in male albino rats[J]. *Int J Radiat Biol*, 2022, 98(9): 1473–1483. DOI: [10.1080/09553002.2022.2033339](#).
- Qin M, Chen W, Cui J, et al. Protective efficacy of inhaled quercetin for radiation pneumonitis[J]. *Exp Ther Med*, 2017, 14(6): 5773–5778. DOI: [10.3892/etm.2017.5290](#).
- Devipriya N, Sudheer AR, Srinivasan M, et al. Quercetin ameliorates gamma radiation-induced DNA damage and biochemical changes in human peripheral blood lymphocytes[J]. *Mutat Res*, 2008, 654(1): 1–7. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2008.03.003](#).
- Mo Q, Li S, You S, et al. Puerarin reduces oxidative damage and photoaging caused by UVA radiation in human fibroblasts by regulating Nrf2 and MAPK signaling pathways[J]. *Nutrients*, 2022, 14(22): 4724. DOI: [10.3390/nu14224724](#).
- Liu C, Zhao Y, Xu X, et al. Puerarin reduces radiation-induced vascular endothelial cell damage via miR-34a/placental growth factor[J]. *Dose Response*, 2022, 20(1): 15593258211068649. DOI: [10.1177/15593258211068649](#).
- 郭娜, 孙云朝, 孙春霞, 等. 山楂黄酮通过抑制 ROS/NLRP3 信号通路对辐射损伤小鼠睾丸的保护作用[J]. *中成药*, 2023, 45(1): 258–263. [Gou N, Sun YZ, Sun CX, et al. Protective effects of hawthorn flavonoids on the testis of radiation-damaged mice via inhibition of the ROS/NLRP3 signaling pathway[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2023, 45(1): 258–263.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-1528.2023.01.049](#).
- 胡琦, 王海燕, 陈泊宇, 等. 山楂黄酮对微波辐射大鼠肾脏损伤的治疗作用[J]. *吉林医药学院学报*, 2016, 37(3): 175–177. [Hu Q, Wang HY, Chen BY, et al. Therapeutic effects of hawthorn flavonoids on kidney injury in microwave radiation rats[J]. *Journal of Jilin Medical College*, 2016, 37(3): 175–177.] DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.202302011](#).
- Ojha H, Institute of Nuclear Medicine and Allied Sciences,

- Sharma K, et al. *In-vitro* evaluation of rutin and rutin hydrate as potential radiation countermeasure agents[J]. Int J Radiat Res, 2016, 14(1): 9–16. DOI: [10.18869/acadpub.ijrr.14.1.9](https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.14.1.9).
- 23 Wang J, Li T, Feng J, et al. Kaempferol protects against gamma radiation-induced mortality and damage via inhibiting oxidative stress and modulating apoptotic molecules *in vivo* and *in vitro*[J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2018, 60: 128–137. DOI: [10.1016/j.etap.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.04.014).
- 24 Tiwari P, Kumar A, Ali M, et al. Radioprotection of plasmid and cellular DNA and Swiss mice by silibinin[J]. Mutat Res, 2010, 695(1–2): 55–60. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.11.007).
- 25 Sirerol JA, Feddi F, Mena S, et al. Topical treatment with pterostilbene, a natural phytoalexin, effectively protects hairless mice against UVB radiation-induced skin damage and carcinogenesis[J]. Free Radic Biol Med, 2015, 85: 1–11. DOI: [10.1016/j.freeradbiomed.2015.03.027](https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.03.027).
- 26 Jagetia GC, Venkatesha VA, Koti RT. Naringin, a citrus flavonone, protects against radiation-induced chromosome damage in mouse bone marrow[J]. Mutagenesis, 2023, 18(4): 337–343. DOI: [10.1093/mutage/geg001](https://doi.org/10.1093/mutage/geg001).
- 27 Britto SM, Shanthakumari D, Agilan B, et al. Apigenin prevents ultraviolet-B radiation induced cyclobutane pyrimidine dimers formation in human dermal fibroblasts[J]. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen, 2017, 821: 28–35. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2017.06.002](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2017.06.002).
- 28 Devi PU, Bisht KS, Vinitha M. A comparative study of radioprotection by Ocimum flavonoids and synthetic aminothiol protectors in the mouse[J]. British J Radiol, 1998, 71(847): 782–784. DOI: [10.1259/bjr.71.847.9771390](https://doi.org/10.1259/bjr.71.847.9771390).
- 29 Yoon GA, Park S. Antioxidant action of soy isoflavones on oxidative stress and antioxidant enzyme activities in exercised rats[J]. Nutri Res Practice, 2014, 8(6): 618–624. DOI: [10.4162/nrp.2014.8.6.618](https://doi.org/10.4162/nrp.2014.8.6.618).
- 30 Benkovic V, Knezevic AH, Orsolic N, et al. Evaluation of radioprotective effects of propolis and its flavonoid constituents: *in vitro* study on human white blood cells[J]. Phytother Res, 2009, 23(8): 1159–1168. DOI: [10.1002/ptr.2774](https://doi.org/10.1002/ptr.2774).
- 31 Ghali ENHK, Sandopu SK, Maurya DK, et al. Insights into the radioprotective efficacy of *Pterocarpus santalinus* L. aqueous extract[J]. Fitoterapia, 2024, 176: 105986. DOI: [10.1016/j.fitote.2024.105986](https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.105986).
- 32 葛永亮, 陶金华, 吴木军. 黄芩苷对辐射诱导的小鼠急性肺损伤保护作用机制研究[J]. 南京中医药大学学报, 2017, 33(6): 613–617. [Ge YL, Tao JH, Wu MJ. Effect of baicalin on radiation-induced acute lung injury in mice through antioxidant and anti-inflammatory properties[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 33(6): 613–617.] DOI: [10.14148/j.issn.1672-0482.2017.0613](https://doi.org/10.14148/j.issn.1672-0482.2017.0613).
- 33 Lu J, Zhong Y, Lin Z, et al. Baicalin alleviates radiation-induced epithelial-mesenchymal transition of primary type II alveolar epithelial cells via TGF- β and ERK/GSK3 β signaling pathways[J]. Biomed Pharmacother, 2017, 95: 1219–1224. DOI: [10.1016/j.biopha.2017.09.037](https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.09.037).
- 收稿日期: 2025 年 04 月 22 日 修回日期: 2025 年 07 月 20 日
本文编辑: 李 阳 钟巧妮