

DOI: 10.3872/j.issn.1007-385x.2025.10.008

· 基础研究 ·

吉马酮通过激活 cGAS-STING 通路抑制前列腺癌 PC3 细胞增殖、迁移及侵袭

杨君, 汪洋(咸宁市中心医院暨湖北科技学院附属第一医院 泌尿外科, 湖北 咸宁 437100)

[摘要] **目的:** 探讨吉马酮(GM)调控环鸟苷酸-腺苷酸合成酶(cGAS)-干扰素基因刺激因子(STING)信号通路对前列腺癌(PCa)细胞增殖、迁移、侵袭及凋亡的影响。**方法:** 将PCa细胞PC3随机分为对照(正常培养)组、L-GM组、M-GM组、H-GM组(分别经120、240、480 $\mu\text{mol/L}$ GM处理)和GM + RU.521组(经480 $\mu\text{mol/L}$ GM + 1 $\mu\text{mol/L}$ cGAS抑制剂RU.521处理)。EdU染色和CCK-8法、划痕实验、Transwell实验、流式细胞术分别检测GM对PC3细胞增殖、迁移、侵袭和凋亡的影响, WB法检测GM对PC3细胞中cGAS和STING蛋白表达的影响。**结果:** 与对照组比较, L-GM、M-GM、H-GM组EdU阳性细胞率、细胞增殖活力、划痕愈合率、侵袭细胞数均显著降低(均 $P < 0.05$), 细胞凋亡率升高($P < 0.05$), cGAS和STING蛋白表达显著上调, 且均呈浓度依赖性(均 $P < 0.05$); 与H-GM组比较, GM + RU.521组EdU阳性细胞率、细胞增殖活力、划痕愈合率和侵袭细胞数均显著升高(均 $P < 0.05$), 细胞凋亡率降低($P < 0.05$), cGAS和STING蛋白表达显著下调(均 $P < 0.05$)。**结论:** GM通过激活cGAS-STING信号通路抑制PCa细胞增殖、迁移、侵袭并促进凋亡。

[关键词] 吉马酮; 环鸟苷酸-腺苷酸合成酶; 干扰素基因刺激因子; 前列腺癌; PC3细胞; 增殖; 迁移; 侵袭; 凋亡

[中图分类号] R737.35; R730.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1007-385x(2025) 10-1060-05

Germacrone suppresses the proliferation, migration, and invasion of prostate cancer PC3 cells by activating the cGAS-STING pathway

YANG Jun, WANG Yang (Department of Urology, Xianning Central Hospital & the First Affiliated Hospital of Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100, Hubei, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate the effects of germacrone (GM) regulation of the cyclic GMP-AMP synthase (cGAS)-stimulator of interferon gene (STING) signaling pathway on the proliferation, migration, invasion and apoptosis of prostate cancer (PCa) cells. **Methods:** PCa PC3 cells were randomly separated into the control group (normal culture), the L-GM, the M-GM, the H-GM groups (each treated with 120, 240, 480 $\mu\text{mol/L}$ GM respectively), and the GM + RU.521 group (treated with 480 $\mu\text{mol/L}$ GM + 1 $\mu\text{mol/L}$ cGAS inhibitor RU.521). EdU staining, CCK-8 assay, scratch assay, Transwell assay, and flow cytometry were applied to detect the effects of GM on the proliferation, migration, invasion, and apoptosis of PC3 cells, respectively. WB assay was used to detect the effects of GM on the expressions of cGAS and STING proteins in PC3 cells. **Results:** Compared with those in the control group, the rate of EdU-positive cells, cell proliferation activity, scratch healing rate, and the number of invasive cells in the L-GM, M-GM, and H-GM groups were significantly reduced (all $P < 0.05$); the apoptosis rate increased ($P < 0.05$); the expressions of cGAS and STING proteins were significantly upregulated, and were concentration-dependent (all $P < 0.05$). Compared with those in the H-GM group, the rate of EdU positive cells, cell proliferation activity, scratch healing rate and the number of invasive cells in the GM + RU.521 group were significantly elevated (all $P < 0.05$); the cell apoptosis rate decreased ($P < 0.05$); and the expressions of cGAS and STING proteins were significantly downregulated (all $P < 0.05$). **Conclusion:** GM inhibits the proliferation, migration, invasion and promotes the apoptosis of PCa cells by activating the cGAS-STING signaling pathway.

[Key words] germacrone (GM); cyclic GMP-AMP synthase (cGAS); stimulator of interferon gene (STING); prostate cancer (PCa); PC3 cell; proliferation; migration; invasion; apoptosis

[Chin J Cancer Biother, 2025, 32(10): 1060-1064. DOI: 10.3872/j.issn.1007-385x.2025.10.008]

前列腺癌(prostate carcinoma, PCa)是50岁以上男性最常见的恶性肿瘤,近5年发病率呈上升趋势^[1]。早期局限性PCa可通过手术或放疗治愈,而转移性PCa(常扩散至骨、肺、肝等器官)是导致死亡的主要

[作者简介] 杨君(1978—),男,本科,副主任医师,主要从事泌尿外科肿瘤研究

[通信作者] 汪洋(扫码获取作者通信方式)



原因^[2]。雄激素剥夺治疗和抗雄激素治疗是目前转移性 PCa 的主要临床干预方法,然而其临床治疗效能不佳^[3]。因此,寻找 PCa 新的生物标志物和治疗靶点对提高 PCa 患者的生存率至关重要。研究^[4]发现,在 PCa 等多种类型癌症中,环鸟苷酸-腺苷酸合成酶(cyclic GMP-AMP synthase, cGAS)-干扰素基因刺激因子(stimulator of interferon gene, STING)信号通路激活,可调控多种分子过程从而增强抗肿瘤免疫,对 PCa 具有潜在的治疗效果。吉马酮(germacrone, GM)是一种从传统中药中分离出来的天然产物,具有抗炎、抗氧化、抗肿瘤等多种药理学功能,可以抑制 PCa、胃癌、肺癌、食管癌细胞的恶性生物学行为^[5-6]。然而,GM 如何通过 cGAS-STING 信号通路调控 PCa 恶性进展的机制尚未明了。因此,本研究旨在阐明 GM 调控 cGAS-STING 信号通路抑制 PCa 恶性进展的机制,为提高 PCa 患者疗效提供新策略。

1 材料与方法

1.1 细胞及主要试剂

PCa 细胞 PC3 (货号:CL-0185)购自武汉益普生物科技有限公司,GM (货号:WKQ-0000295)购自四川省维克奇生物科技有限公司,cGAS 抑制剂 RU.521 (货号:inh-ru521)购自北京达科为生物技术有限公司,CCK-8 细胞增殖检测试剂盒(货号:HB-CCK-8)购自上海汉恒生物工程有限公司,EdU-555 细胞增殖检测试剂盒(货号:CX003L)购自上海雅酶生物医药科技有限公司,Annexin V-FITC 凋亡检测试剂盒(货号:APOAF)购自上海嵘崑达实业有限公司,BCA 蛋白定量试剂盒(货号:B5001)购自北京兰博利德商贸有限公司,高敏型 ECL 试剂盒(货号:ECL001)购自广州博鹭腾生物科技有限公司,GAPDH、cGAS、STING、HRP 标记山羊抗兔抗体(货号:ab181603、ab252416、ab227705、ab6721)购自英国 Abcam 公司。

1.2 细胞培养、分组及处理

PC3 细胞在含 10% FBS 和 1% 青/链霉素的 RPMI 1640 培养基中培养,将对数生长期、生长状态良好的 PC3 细胞随机分为对照组、GM 低剂量(L-GM)组、GM 中剂量(M-GM)组、GM 高剂量(H-GM)组和 GM + RU.521 组。对照组为正常培养细胞,L-GM、M-GM、H-GM 组分别用 120、240、480 $\mu\text{mol/L}$ GM^[7]处理细胞,GM + RU.521 组用 480 $\mu\text{mol/L}$ GM + 1 $\mu\text{mol/L}$ cGAS 抑制剂 RU.521^[8]处理细胞。培养 24 h 后进行后续实验。

1.3 CCK-8 法和 EdU 染色检测 GM 对 PC3 细胞增殖的影响

CCK-8 法:将各组 PC3 细胞以 2.5×10^4 个/孔的

密度接种在 96 孔板中,培养 24 h 后,向每个孔中加入 10 μL CCK-8 试剂,在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 4 h,使用酶标仪在 450 nm 波长处测量光密度(D)值。

EdU 染色法:将各组 PC3 细胞以 1.5×10^4 个/孔的密接种于 96 孔板中,加入 50 $\mu\text{mol/L}$ EdU 溶液,培养 1 h,在 3% 多聚甲醛溶液在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下固定 30 min。于荧光显微镜下观察细胞并拍照,按照公式“EdU 阳性细胞率 = EdU 阳性细胞数/DAPI 总细胞数 \times 100%”计算 EdU 阳性细胞率。

1.4 划痕实验检测 GM 对 PC3 细胞迁移的影响

将各组 PC3 细胞以 4×10^5 个/孔接种于 12 孔板,培养至形成融合单层后,用 200 μL 无菌移液枪头垂直划伤,PBS 轻柔冲洗 2 次,分别于划痕后 0 h 和 24 h 在倒置显微镜下拍照记录伤口,用 ImageJ 软件测量创面面积,计算划痕愈合率。

1.5 Transwell 实验检测 GM 对 PC3 细胞侵袭的影响

将各组 PC3 细胞密度调整为 2×10^4 个/mL,取 200 μL 接种于预铺基质胶的 Transwell 上室中,在下室中加入 600 μL 含 10% 胎牛血清的培养基,在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下处理 48 h。100% 甲醇溶液在冰上固定 15 min,0.05% 结晶紫染色 15 min,用湿棉棒清除 Transwell 上室面未侵袭的细胞,PBS 清洗后,在显微镜下观察并统计侵袭细胞数。

1.6 流式细胞术检测 GM 对 PC3 细胞凋亡的影响

将各组 PC3 细胞以 1×10^4 个/孔接种于 6 孔板中,培养 48 h 后收获细胞,用冷 PBS 洗涤 2 次,用 100 μL 结合缓冲液重悬,将细胞悬液与 5 μL Annexin V-FITC 和 5 μL PI 染色液混合,室温下暗置 10 min,将细胞重悬于 400 μL 结合缓冲液中,1 h 内用流式细胞仪进行分析。按照公式“细胞凋亡率 = 凋亡细胞数/总细胞数 \times 100%”计算 PC3 细胞的凋亡率。

1.7 WB 法检测 GM 对 PC3 细胞中 cGAS、STING 蛋白表达的影响

使用含有蛋白酶和磷酸酶抑制剂的 RIPA 缓冲液提取各组 PC3 细胞总蛋白,采用 BCA 测定法测量蛋白质浓度。经 10% SDS-PAGE 电泳分离后,将蛋白条带转移至 PVDF 膜上,5% BSA 封闭 1 h。随后,将膜与 cGAS (稀释比例 1:1 000)、STING (稀释比例 1:400)、GAPDH (稀释比例 1:10 000)一抗 4 $^{\circ}\text{C}$ 处理过夜。次日,在 HRP 标记山羊抗兔二抗 (稀释比例 1:2 000) 中室温处理 1 h,用 ECL 试剂显色后通过 ImageJ 软件分析蛋白质条带的灰度值。

1.8 统计学处理

以上主要实验均独立重复 3 次。采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析。符合正态分布的计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示,两组间比较行 SNK-*q* 检验,多组间比较采用单因

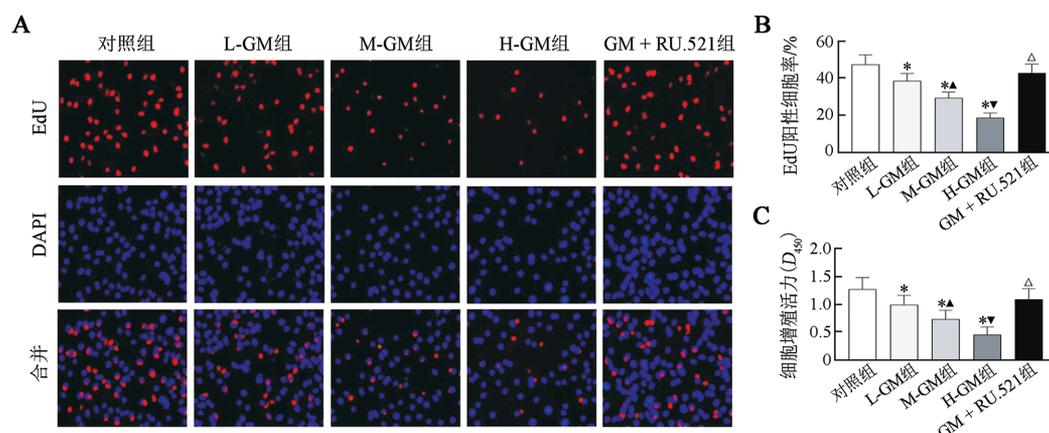
素方差分析。以 $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 GM显著抑制PC3细胞增殖

EdU染色法(图1A、B)和CCK-8法(图1C)检测结果显示,与对照组相比,L-GM、M-GM、H-GM组EdU

阳性细胞率、细胞增殖活性均显著降低(均 $P < 0.05$),呈剂量依赖性。与H-GM组相比,GM + RU.521组EdU阳性细胞率、细胞增殖活性均显著升高(均 $P < 0.05$)。结果表明,低、中、高剂量的GM均能显著抑制PC3细胞的增殖能力,而同时使用cGAS抑制剂RU.521可部分逆转GM的增殖抑制作用。



A、B:EdU染色法检测PC3细胞增殖能力($\times 200$);C:CCK-8法检测PC3细胞增殖活力的影响。与对照组比较,* $P < 0.05$;与L-GM组比较,[△] $P < 0.05$;与M-GM组比较,** $P < 0.05$;与H-GM组比较,[△] $P < 0.05$ 。

图1 不同浓度GM对PC3细胞增殖的影响

2.2 GM显著抑制PC-3细胞迁移与侵袭并促进凋亡

划痕实验和Transwell实验检测结果(图2A、B)显示,与对照组相比,L-GM、M-GM和H-GM组PC3细胞划痕愈合率、侵袭细胞数均显著降低(均 $P < 0.05$),呈剂量依赖性;与H-GM组相比,GM + RU.521组划痕愈合率、侵袭细胞数均显著升高(均 $P < 0.05$)。流式细胞术检测结果(图2C)显示,与对照组相比,L-GM、M-GM和H-GM组细胞凋亡率均显著升高(均 $P < 0.05$);与H-GM组相比,GM + RU.521组细胞凋亡率显著降低($P < 0.05$)。实验结果表明,GM能显著抑制PC3细胞的迁移和侵袭能力并诱导细胞凋亡,而同时使用cGAS抑制剂RU.521可逆转GM的这些效应,包括回复细胞的迁移与侵袭能力并减少凋亡。

2.3 GM激活PC3细胞中cGAS、STING蛋白表达

WB法检测结果(图3)显示,与对照组相比,L-GM、M-GM、H-GM组PC3细胞中cGAS和STING蛋白表达均显著增加(均 $P < 0.05$),呈剂量依赖性;与H-GM组相比,GM + RU.521组细胞中cGAS和STING蛋白表达均显著减少(均 $P < 0.05$)。结果提示,GM通过激活cGAS-STING信号通路发挥效应。

3 讨论

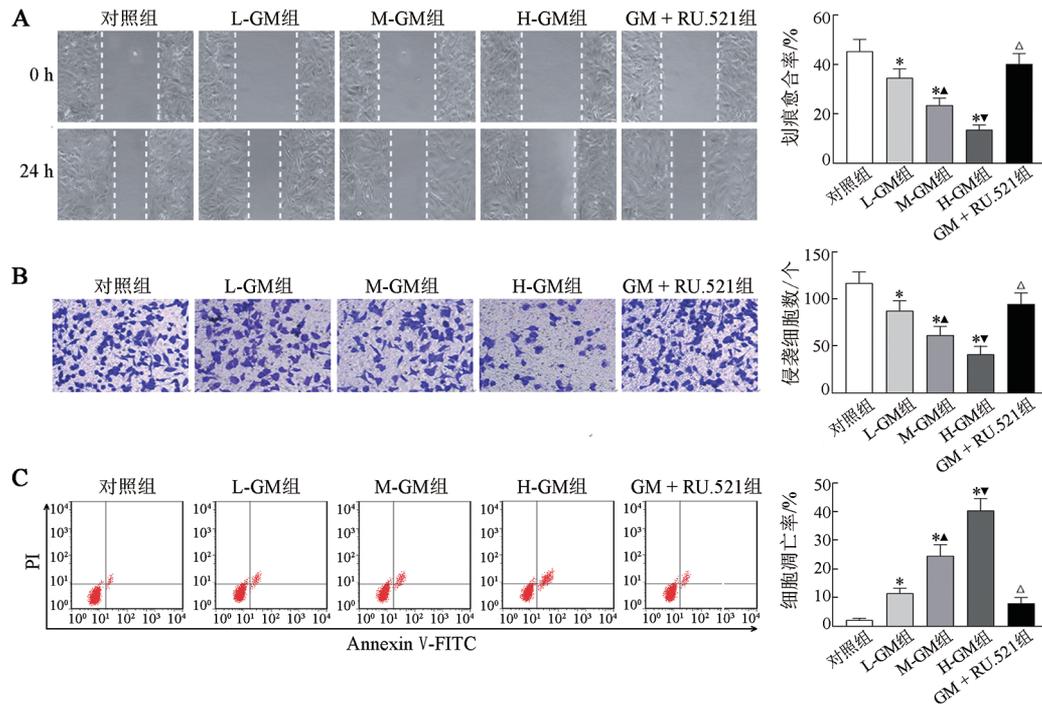
PCa是男性泌尿生殖系统最常见的恶性肿瘤之一,其发病率和病死率在全球分别位居第二和第五,在中国分别位居第六和第七,且呈上升的趋势。研

究^[9]表明,年龄、种族、遗传、家族史和生活方式(如肥胖、吸烟等)是导致PCa高发的危险因素。虽然接受根治性治疗的PCa患者预后良好,但约三分之一的病例进展为晚期转移性PCa,由于受到获得性耐药的阻碍,5年生存率显著降低^[10]。正常细胞通过调控自身表达及对环境信号的应答维持内稳态,而肿瘤细胞则劫持这一稳态机制,营造有利于自身快速增殖、迁移和转移的微环境,从而驱动PCa的发生与发展^[11]。因此,探讨PCa细胞恶性进展的分子机制,对寻找新的PCa治疗靶点和开发相关的药物,提高患者的治疗效能至关重要。

固有免疫在识别外源性核酸中起着重要作用,尤其是通过cGAS-STING通路对细胞质DNA的感知。正常情况下,外源DNA被核酸酶降解,而细胞稳态的破坏会导致细胞质DNA积累,cGAS在与双链DNA结合时感知并被激活,cGAS将ATP和GTP转化为cGAMP,cGAMP与其CDN将信号传递到STING的下游内质网蛋白,并导致I型INF的分泌,在多种肿瘤中发挥抗肿瘤免疫的作用^[12]。GENG等^[13]发现,斑点型锌指结构蛋白(speckle-type POZ protein, SPOP)可以调控PCa的DNA损伤诱导的cGAS-STING激活下游的免疫抑制和抗肿瘤活性。HSU等^[14]发现,精氨酸饥饿激活cGAS-STING通路并伴有I型INF反应上调抑制氧化磷酸化和DNA修复的基因表达,导致DNA损伤和染色质泄漏,诱导肿瘤细胞通过代谢物耗竭和代谢基因的表现遗传

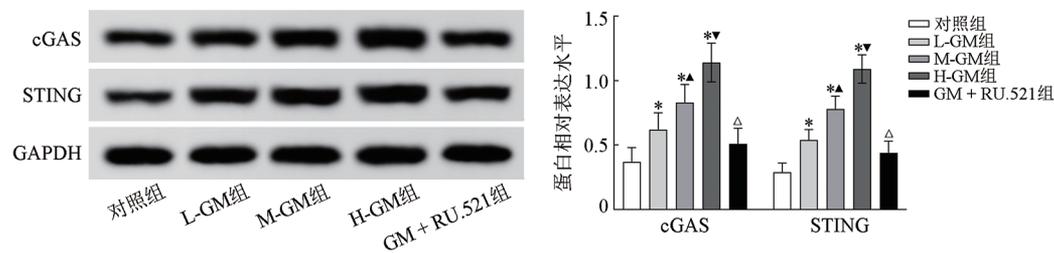
沉默来杀伤 PCa 细胞; 体内实验显示, 精氨酸饥饿通过增强 INF 反应和免疫细胞募集抑制体内 PCa 小鼠模型的生长。HU 等^[15]发现, 碳离子辐照通过激活 cGAS-STING 通路, 增加肿瘤内 CD4⁺ T 细胞和巨噬细胞浸润, 并提升脾内 CD8⁺ T 细胞和效应记忆 T 细胞的比例; 同时还能增强肿瘤浸润 CD8⁺ T 细胞的 IFN- γ 的分泌, 减少肿瘤及脾中耗竭 T 细胞, 从而在免疫功能健全的 PCa 小

鼠中表现出显著的抗肿瘤活性。LI 等^[16]发现, 沉默 HOXC13 可通过诱导细胞 DNA 损伤和激活 cGAS-STING 通路抑制 PCa 细胞的恶性进展。本研究结果发现, cGAS、STING 在 PCa 细胞中低表达, 且伴随着 PCa 细胞增殖、迁移、侵袭能力的上升, 凋亡率下降, 提示激活 cGAS-STING 通路可能抑制 PCa 细胞的恶性生物学进展, 可能作为 PCa 的潜在的治疗靶点。



A: 划痕实验检测细胞迁移能力; B: Transwell 实验检测细胞侵袭能力($\times 400$); C: 流式细胞术检测细胞凋亡水平。与对照组比较, $^*P < 0.05$; 与 L-GM 组比较, $^\wedge P < 0.05$; 与 M-GM 组比较, $^\vee P < 0.05$; 与 H-GM 组比较, $^\triangle P < 0.05$ 。

图 2 不同浓度 GM 对 PC3 细胞迁移、侵袭和凋亡的影响



与对照组比较, $^*P < 0.05$; 与 L-GM 组比较, $^\wedge P < 0.05$; 与 M-GM 组比较, $^\vee P < 0.05$; 与 H-GM 组比较, $^\triangle P < 0.05$ 。

图 3 WB 法检测各组 PC3 细胞中 cGAS 和 STING 蛋白表达

中药可在多种肿瘤治疗中发挥重要作用。姜黄作为一种传统中草药, 常用于治疗炎症和肿瘤, GM 是来源于姜黄的天然倍半萜类化合物, 对多种肿瘤具有好的疗效^[17]。WU 等^[18]发现, GM 通过诱导 G2/M 期细胞周期阻滞、促进细胞凋亡以及线粒体介导的细胞凋亡, 抑制细胞增殖, 在胃癌中发挥抗肿瘤作用。ZHAO 等^[19]发现, GM 通过调控 Akt/MDM2/p53

信号通路以浓度依赖的方式, 抑制肺癌细胞增殖, 诱导细胞凋亡和 G1/S 细胞周期停滞。FANG 等^[20]发现, GM 通过下调乙肝病毒 X 蛋白结合蛋白 (hepatitis B X-inter-acting protein, HBXIP) 抑制胃癌细胞的增殖, 并诱导 G0/G1 期细胞周期停滞和凋亡, 促进自噬体的形成。ZHANG 等^[21]发现, GM 通过抑制食管鳞状细胞癌细胞中 STAT3 的活性, 抑制细胞增殖并诱导调

亡。YU等^[7]发现,GM通过抑制Akt/mTOR信号通路诱导PCa细胞凋亡与自噬。本研究发现,经GM处理后PCa细胞中cGAS和STING蛋白呈高表达,并且GM以剂量依赖的方式降低PCa细胞的增殖、迁移及侵袭能力并促进细胞凋亡,同时采用cGAS抑制剂RU.521则可以逆转GM对PCa细胞恶性生物学行为的抑制作用,提示GM可能通过激活cGAS-STING信号通路抑制PCa细胞的恶性进展,其可作为PCa的潜在治疗药物。

综上所述,GM可通过cGAS-STING信号通路抑制PCa细胞的恶性进展。然而,本研究未进行体内实验验证,且仅聚焦于cGAS-STING这单一信号通路。后续将完善动物实验,并拓展至更多相关信号网络通路,以深入阐明其机制。

【参考文献】

- [1] HAN Q, XIE Q R, LI F, *et al.* Targeted inhibition of SIRT6 via engineered exosomes impairs tumorigenesis and metastasis in prostate cancer[J]. *Theranostics*, 2021, 11(13): 6526-6541. DOI: 10.7150/thno.53886.
- [2] AZAD A A, KOSTOS L, AGARWAL N, *et al.* Combination therapies in locally advanced and metastatic hormone-sensitive prostate cancer[J]. *Eur Urol*, 2025, 87(4):455-467. DOI: 10.1016/j.eururo.2025.01.010.
- [3] ZHOU L J, SONG Z S, HU J Y, *et al.* ACS3 represses prostate cancer progression through downregulating lipid droplet-associated protein PLIN3[J]. *Theranostics*, 2021, 11(2): 841-860. DOI: 10.7150/thno.49384.
- [4] YANG J, XU Z H, ZHENG W T, *et al.* Identification of the cytoplasmic DNA-sensing cGAS-STING pathway-mediated gene signatures and molecular subtypes in prostate cancer[J/OL]. *BMC Cancer*, 2024, 24(1): 732[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38877472/>. DOI: 10.1186/s12885-024-12492-3.
- [5] RIAZ A, RASUL A, KANWAL N, *et al.* Germacrone: a potent secondary metabolite with therapeutic potential in metabolic diseases, cancer and viral infections[J]. *Curr Drug Metab*, 2020, 21(14): 1079-1090. DOI: 10.2174/1389200221999200728144801.
- [6] LIN Z J, YANG Y C, LIU T, *et al.* Germacrone alleviates breast cancer-associated osteolysis by inhibiting osteoclastogenesis via inhibition of MAPK/NF- κ B signaling pathways[J]. *Phytother Res*, 2024, 38(6): 2860-2874. DOI: 10.1002/ptr.8195.
- [7] YU Z Q, XU J P, SHAO M F, *et al.* Germacrone induces apoptosis as well as protective autophagy in human prostate cancer cells[J]. *Cancer Manag Res*, 2020, 12: 4009-4016. DOI: 10.2147/CMAR.S250522.
- [8] 王芳, 胡洁琼, 冯彦虎, 等. 次乌头碱通过cGAS/STING通路调节胃癌细胞增殖、迁移、侵袭和免疫逃逸[J]. *中国免疫学杂志*, 2023, 39(10): 2178-2183. DOI: 10.3969/j.issn.1000-484X.2023.10.028.
- [9] BANERJEE P, KAPSE P, SIDDIQUE S, *et al.* Therapeutic implications of cancer stem cells in prostate cancer[J]. *Cancer Biol Med*, 2023, 20(6): 401-420. DOI: 10.20892/j.issn.2095-3941.2022.0714.
- [10] SCHAFFER E J, LAVERSANNE M, SUNG H, *et al.* Recent patterns and trends in global prostate cancer incidence and mortality: an update[J]. *Eur Urol*, 2025, 87(3): 302-313. DOI: 10.1016/j.eururo.2024.11.013.
- [11] 李蕊, 杨柳, 刘家云. 环磷腺苷效应元件结合蛋白对前列腺癌PC3细胞迁移、侵袭和细胞周期的影响[J]. *中国肿瘤生物治疗杂志*, 2025, 32(6): 587-593. DOI: 10.3872/j.issn.1007-385x.2025.06.004.
- [12] WANG Y, LUO J W, ALU A Q, *et al.* cGAS-STING pathway in cancer biotherapy[J/OL]. *Mol Cancer*, 2020, 19(1): 136[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32887628/>. DOI: 10.1186/s12943-020-01247-w.
- [13] GENG C D, ZHANG M C, MANYAM G C, *et al.* SPOP mutations target STING1 signaling in prostate cancer and create therapeutic vulnerabilities to PARP inhibitor-induced growth suppression[J]. *Clin Cancer Res*, 2023, 29(21): 4464-4478. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-23-1439.
- [14] HSU S C, CHEN C L, CHENG M L, *et al.* Arginine starvation elicits chromatin leakage and cGAS-STING activation via epigenetic silencing of metabolic and DNA-repair genes[J]. *Theranostics*, 2021, 11(15): 7527-7545. DOI: 10.7150/thno.54695.
- [15] HU W, ZHANG Z S, XUE Y S, *et al.* Carbon ion irradiation exerts antitumor activity by inducing cGAS-STING activation and immune response in prostate cancer-bearing mice[J/OL]. *Cancer Med*, 2024, 13(2): e6950[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38379323/>. DOI: 10.1002/cam4.6950.
- [16] LI M Z, BAI G W, CEN Y, *et al.* Silencing HOXC13 exerts anti-prostate cancer effects by inducing DNA damage and activating cGAS/STING/IRF3 pathway[J/OL]. *J Transl Med*, 2023, 21(1): 884[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38057852/>. DOI: 10.1186/s12967-023-04743-x.
- [17] LOU G H, HUANG Y, WANG Y, *et al.* Germacrone, a novel and safe anticancer agent from genus *Curcuma*: a review of its mechanism[J]. *Anticancer Agents Med Chem*, 2023, 23(13): 1490-1498. DOI: 10.2174/1871520623666230420094628.
- [18] WU L, WANG L F, TIAN X G, *et al.* Germacrone exerts anti-cancer effects on gastric cancer through induction of cell cycle arrest and promotion of apoptosis[J/OL]. *BMC Complement Med Ther*, 2020, 20(1): 21[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32020876/>. DOI: 10.1186/s12906-019-2810-3.
- [19] ZHAO Y, CAI J, SHI K H, *et al.* Germacrone induces lung cancer cell apoptosis and cell cycle arrest via the Akt/MDM2/p53 signaling pathway[J/OL]. *Mol Med Rep*, 2021, 23(6): 452[2024-11-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33880579/>. DOI: 10.3892/mmr.2021.12091.
- [20] FANG X, TAN T F, GAO B B, *et al.* Germacrone regulates HBXIP-mediated cell cycle, apoptosis and promotes the formation of autophagosomes to inhibit the proliferation of gastric cancer cells[J/OL]. *Front Oncol*, 2020, 10: 537322[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33244453/>. DOI: 10.3389/fonc.2020.537322.
- [21] ZHANG R, HAO J, GUO K W, *et al.* Germacrone inhibits cell proliferation and induces apoptosis in human esophageal squamous cell carcinoma cells[J/OL]. *Biomed Res Int*, 2020, 2020: 7643248[2024-11-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32071920/>. DOI: 10.1155/2020/7643248.

[收稿日期] 2024-11-20

[修回日期] 2025-08-12

[本文编辑] 党瑞山