

# Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒抑制侵袭性乳腺癌的作用机制研究

李鑫玉<sup>1</sup>, 吴发亮<sup>1</sup>, 居瑞军<sup>1</sup>, 彭效明<sup>1</sup>, 谷庆阳<sup>1</sup>, 马凌悦<sup>2\*</sup>

(1. 北京石油化工学院, 北京市恩泽生物质重点实验室, 北京 102617;  
2. 北京大学第一医院药剂科, 北京 100034)

**摘要:** 制备包载光敏剂 Ce6 和白藜芦醇 (RES) 的 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒并对其进行表征, 在细胞分子水平验证其联合光动力治疗 (PDT) 的抗肿瘤效果。采用薄膜水合法制备 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒, 通过透射电镜、粒度仪、红外光谱和 X 射线衍射对其进行表征, 测得平均粒径为 (71.9±2.0) nm, Zeta 电位为 (1.48±0.12) mV, PDI 为 0.106, Ce6 和 RES 的包封率分别为 83.74% 和 80.12%, 具有良好的粒径分布和稳定性。以乳腺癌 MDA-MB-231 细胞为对象, 经多组对照分析, Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒在 PDT 激活下对癌细胞的抑制效果显著; Western Blot 分析上皮-间质转化 (EMT) 相关蛋白的表达水平可知, Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒在 PDT 激活下, 显著抑制三阴性乳腺癌 (TNBC) 细胞的增殖、迁移和侵袭, 并通过下调 EMT 相关蛋白的表达抑制细胞的侵袭性。研究结果为 Ce6-RES@ Soluplus 结合 PDT 治疗在 TNBC 中的抗肿瘤应用提供了有力的实验支持和分子机制解释。

**关键词:** 三阴性乳腺癌; 光动力治疗; Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒; 上皮-间质转化; 生物利用度

**中图分类号:** R979.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2025)11-0113-06

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.11.021

## Study on mechanism of Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles in inhibiting invasive breast cancer

LI Xin-yu<sup>1</sup>, WU Fa-liang<sup>1</sup>, JU Rui-jun<sup>1</sup>, PENG Xiao-ming<sup>1</sup>, GU Qing-yang<sup>1</sup>, MA Ling-yue<sup>2\*</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Enze Biomass Fine Chemicals, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Pharmacy Department, Peking University First Hospital, Beijing 100034, China)

**Abstract:** Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles containing Ce6 photosensitizer and resveratrol (RES) are prepared and characterized, and their anti-tumor effects combined with photodynamic therapy are verified at the cellular molecular level. Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles are prepared via thin film hydration method, and characterized by means of transmission electron microscopy, particle size analyzer, infrared spectroscopy and X-ray diffraction. It is found that the Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles has an average particle size of 71.9 nm±2.0 nm, a zeta potential of 1.48 mV±0.12 mV, a PDI of 0.106, encapsulation efficiency rates to Ce6 and RES of 83.74% and 80.12%, respectively, a good particle size distribution and an excellent stability. Taking MDA-MB-231 breast cancer cells as the object, it is found that Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles activated by photodynamic (PDT) present significant inhibitory effect on MDA-MB-231 cancer cells. It is indicated through using Western Blot tool to analyze the expression levels of epithelial mesenchymal transition (EMT) related proteins that Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles under PDT activation inhibits significantly the proliferation, migration and invasion of triple-negative breast cancer cells, and inhibit the invasiveness of cells by down-regulating the expression of EMT-related proteins. The study results provide strong experiment support and molecular mechanism explanation for the application of Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles combining with PDT thereby in inhibiting triple-negative breast cancer.

**Key words:** triple-negative breast cancer; photodynamic therapy; Ce6-RES@ Soluplus nanoparticles; epithelial-mesenchymal transition; bioavailability

三阴性乳腺癌 (TNBC) 是一种高度侵袭性的乳腺癌亚型, 缺乏雌激素受体、孕激素受体和 HER2 蛋白表达, 这使其对现有的靶向疗法无反应<sup>[1]</sup>。TNBC 患者的预后较差, 复发率高, 并且对常规化疗产生耐药性<sup>[2]</sup>。因此, 开发新型治疗策略, 如光动力治疗 (PDT) 法, 显得尤为重要<sup>[3]</sup>。PDT 法结合光敏剂与特定波长的光照射, 可诱导活性氧物质 (ROS) 的生成, 从而实现肿瘤细胞的精准杀伤<sup>[4]</sup>。PDT 法的

另一个优势在于不会产生耐药性。

白藜芦醇 (RES) 是一种来源于多种植物的天然多酚类化合物, 具有抗氧化、抗炎和抗肿瘤活性<sup>[5]</sup>。对乳腺癌等多种肿瘤, RES 表现出显著的抑制作用, 能够干扰癌细胞增殖、诱导其凋亡并阻止其侵袭和转移<sup>[6]</sup>。然而, 由于 RES 水溶性差和生物利用度低, 临床应用受到限制<sup>[7]</sup>。近年来, 纳米技术为提高 RES 的生物利用度提供了新的解决方案。纳米

收稿日期: 2025-02-17; 修回日期: 2025-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81703453); 北京市教委科技计划一般项目 (KM202210017011); 大学生创新创业训练计划项目 (2024J00285)

作者简介: 李鑫玉 (2000-), 女, 硕士生, 研究方向为天然产物与活性分子, 2720172586@qq.com; 马凌悦 (1988-), 女, 博士, 副主任药师, 研究方向为临床药学、临床药理, 通讯联系人, malingyue003@126.com。

药物递送系统可以提高药物的溶解性、稳定性,并改善药物在体内的靶向分布<sup>[8]</sup>。

本研究采用 Soluplus 纳米颗粒系统作为递送载体,将 RES 与光敏剂 Ce6 共同包封,以提高其对 TNBC 的治疗效果。Soluplus 是一种两亲性聚合物,能够增强难溶性药物的溶解度<sup>[9]</sup>。通过将 RES 和 Ce6 结合在纳米颗粒中,PDT 治疗下可以显著提高药物的抗肿瘤效果,尤其是在抑制细胞迁移和侵袭方面<sup>[10]</sup>。相关研究表明,纳米颗粒的应用不仅能改善药物的生物利用度,还通过有效的药物递送系统增强 PDT 的治疗效果<sup>[11]</sup>。

此外,进一步探讨了这种纳米颗粒递送系统对上皮-间质转化(EMT)的调控作用。EMT 在肿瘤的侵袭和转移中起着关键作用<sup>[12]</sup>,RES 在被纳米颗粒包封后,通过 PDT 可以更好地调控 EMT 相关的信号通路,抑制肿瘤细胞的迁移和侵袭<sup>[13]</sup>。这为未来 TNBC 的治疗提供了新的思路和实验依据<sup>[14-15]</sup>。

## 1 材料、试剂与仪器

### 1.1 材料与试剂

白藜芦醇(Resveratrol, RES),购自 Sigma-Aldrich;光敏剂 Ce6(Chlorin e6)购自 Frontier Scientific;载体材料 Soluplus,购自 BASF 公司。

### 1.2 仪器

R-1005 旋转蒸发器,郑州长城科工贸有限公司生产;JY96-IIN 超声波粉碎机,东莞洛泰公司生产;e2695-2998 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司生产;NanoBrook 90Plus 粒度分析仪,美国 Brookhaven 公司生产;Thermo Nicolet IS5 傅里叶变换红外光谱仪,美国 Thermo Fisher 公司生产;InfiniteF50 酶标仪,瑞士 Tecan 公司生产;CFX96 Touch 实时定量 PCR 仪,伯乐生命医学产品有限公司生产。

### 1.3 细胞株

乳腺癌细胞株 MDA-MB-231,购自北京中生奥邦生物科技有限公司,培养于含 10% 胎牛血清(FBS)+1% 双抗的 Leibovitz's L-15 培养基,置于 37℃、5% CO<sub>2</sub> 培养箱中培养。

## 2 实验方法

### 2.1 纳米颗粒的制备

采用薄膜水合法制备 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒。Soluplus、Ce6 和 RES 按 150:1:1 的质量比溶解于甲醇中,混匀后在 45℃ 下进行旋转蒸发形成薄膜。加入 10 mL 磷酸盐缓冲液(PBS)溶液,45℃ 下水合 30 min,得到纳米颗粒悬浮液。冰浴条

件下对悬浮液进行探头超声,条件为 100 W,2 s 开、2 s 关,超声 4 min,使纳米粒均匀分散,完成后于 4℃ 储存。

### 2.2 纳米颗粒表征

使用 Brookhaven 光散射粒度分析仪测定纳米颗粒的粒径和多分散性指数(PDI);使用 Zetasizer 分析仪测定纳米颗粒的 Zeta 电位;将纳米颗粒悬浮液滴在铜网格上,晾干后在透射电子显微镜下观察其形态;使用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)扫描样品压片,得到红外光谱图;研磨样品成细粉状,装载于样品台上,进行 X 射线衍射(XRD)测定。

### 2.3 包封率测定

采用高效液相色谱法(HPLC)测定 Ce6 和 RES 的包封率。

在 306 nm 波长下,以乙腈和水(40:60, V/V)作为流动相,建立 RES 的标准曲线。通过 Sephadex G-25 柱分离出游离药物,对纳米颗粒悬浮液进行收集。加入甲醇,溶解后通过 HPLC 测定药物的含量,根据标准曲线计算药物的实际包封率,包封率的计算式为:

$$\text{包封率}(\%) = (\text{包封的药物量} / \text{总药物量}) \times 100\%$$

### 2.4 细胞培养及处理

MDA-MB-231 细胞培养条件为 Leibovitz's L-15 培养基+10% 胎牛血清(FBS)+1% 双抗,放置在 37℃、100% 空气环境下培养,直至细胞融合度达到 70%~80% 时进行实验处理。实验组分为对照组、RES 组、RES@ Soluplus 组、Ce6-RES@ Soluplus 暗背景处理组和 Ce6-RES@ Soluplus 光动力治疗组。

### 2.5 细胞存活率检测

采用 CCK-8 法测定细胞存活率。将对数生长期的 MDA-MB-231 细胞接种于 96 孔板中,每孔 9 000 个细胞,培养 24 h 后加入不同浓度的 RES、Ce6、Ce6@ Soluplus 和 Ce6-RES@ Soluplus,分别在暗背景和光动力(50 mW,光照 5 min)条件下进行处理。孵育 12 h 后,加入 10 μL CCK-8 试剂,继续孵育 90 min,使用酶标仪在 450 nm 波长下测定吸光值,计算细胞存活率。

### 2.6 细胞迁移实验

通过划痕实验评估不同药物处理对细胞迁移能力的影响。将对数生长期的 MDA-MB-231 细胞接种于 6 孔板,培养至细胞融合率达 95% 时,用 200 μL 移液器吸头在细胞层上划痕。各实验组加入不同药物处理,在 0 h 和 12 h 拍照记录划痕愈合情况。使用 ImageJ 软件计算划痕区域的愈合宽度、细胞迁移率。Transwell 实验中,将  $2.5 \times 10^5$  /mL 的细胞接种

于 Transwell 小室的上腔,处理后孵育 24 h,收集穿过小室的细胞,进行结晶紫染色,用光学显微镜观察并统计细胞穿透率。

## 2.7 Western Blot 检测

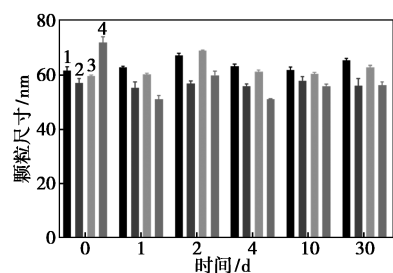
Western Blot 分析 EMT 相关蛋白的表达水平。提取各组细胞总蛋白,使用 BCA 蛋白定量试剂盒测定蛋白浓度。通过 SDS-PAGE 将蛋白样品分离,并转移至 PVDF 膜,分别使用相应一抗和 HRP 标记的二抗进行孵育。加入 ECL 发光底物,使用化学发光成像系统检测条带信号。相对蛋白表达量通过图像分析软件进行定量,以  $\beta$ -Actin 作为内参。

## 3 结果与分析

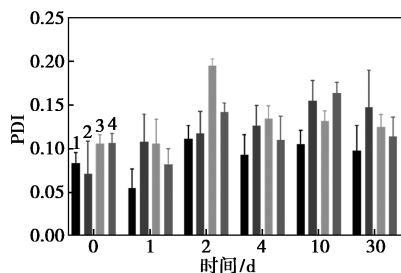
### 3.1 粒径、多分散指数与电位

Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒悬浮液经稀释超声混匀后置于电位杯中,测试粒径及 Zeta 电位。测得粒径为  $(71.9 \pm 2.0)$  nm,大多集中在 60~80 nm 之间,具有良好均匀性。Zeta 电位为  $(1.48 \pm 0.12)$  mV,表面电荷较低,在水性介质中能稳定存在。经计算得到 Ce6 和 RES 的包封率分别为 83.74% 和 80.12%。综合数据显示 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒的稳定性良好,适用于药物递送。

在第 0、1、2、4、10 d 和 30 d,颗粒尺寸保持稳定。PDI 值为 0.106,整个实验期间颗粒的分散性和均匀性较好,见图 1、图 2。结果表明,Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒在长时间内具备良好的结构完整性,为后续药物递送提供可靠保障。



(a) 粒径稳定性



(b) PDI 稳定性

1—Soluplus; 2—RES@ Soluplus; 3—Ce6@ Soluplus;  
4—Ce6-RES@ Soluplus

图 1 纳米颗粒稳定性

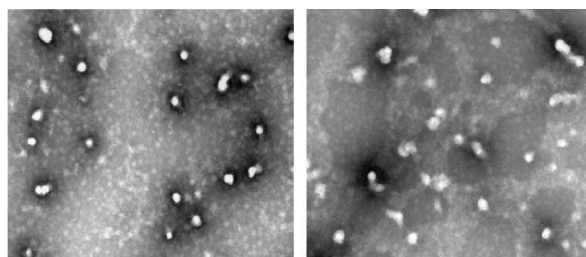
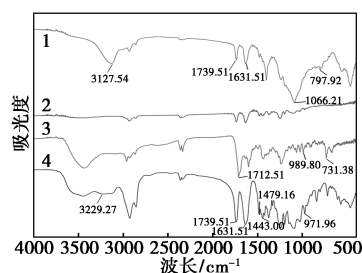


图 2 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒的透射电镜图

### 3.2 红外光谱分析

对 RES、Ce6、@ Soluplus 和 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒进行 FT-IR 分析,如图 3。由图 3 可知,在 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒中,原 RES 的羟基特征峰发生偏移,C=O 吸收峰有所变化,证明 RES 已成功负载于纳米颗粒中。同时 Ce6 吸收峰的改变验证了其被成功包封于纳米颗粒中。分析可知,所制备的 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒显著改变了药物分子结构,提高了水溶性和生物利用度。

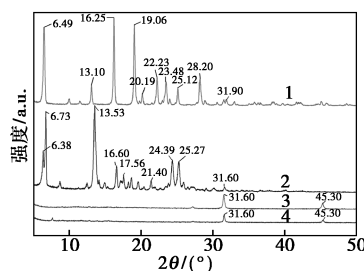


1—RES; 2—Ce6; 3—Soluplus 纳米颗粒;  
4—Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒

图 3 FT-IR 图谱

### 3.3 X 射线衍射分析

在 Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒中,属于 RES 和 Ce6 的典型结晶性衍射峰显著减弱甚至消失,证明 RES 和 Ce6 的结构从结晶态转变为无定形态,见图 4。无定形态有助于提高药物的溶解性和生物利用度,XRD 结果进一步证实了药物在 Soluplus 纳米



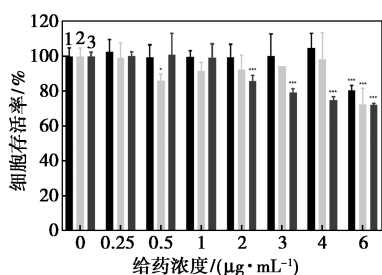
1—RES; 2—Ce6; 3—Soluplus 纳米颗粒;  
4—Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒

图 4 XRD 图谱

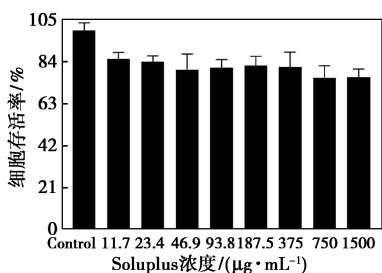
颗粒中的成功包封效果。

### 3.4 暗背景细胞毒性实验

在暗背景条件下,投药浓度为 2  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,RES 和 RES@ Soluplus 组细胞存活率略低于对照组,分别为 89.75%  $\pm$  3.24% 和 87.46%  $\pm$  3.18%。浓度为 6  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,Ce6-RES@ Soluplus 组存活率显著低于 Ce6 组,为 72.38%  $\pm$  0.81%, ( $P < 0.05$ ),见图 5。结果表明,在无光激活下,Ce6-RES@ Soluplus 的毒性较低,保证了其在暗背景下的安全性,为 Ce6-RES@ Soluplus 的光动力治疗应用提供了基础安全性数据。



1—Ce6;2—Ce6@ Soluplus;3—Ce6-RES@ Soluplus  
(a)不同组别在 MDA-MB-231 细胞中的表达



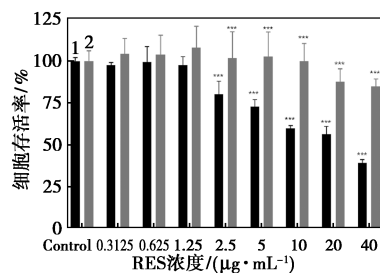
(b)Soluplus 在 MDA-MB-231 细胞中的深色背景细胞毒性

图 5 暗背景条件下各处理组对 MDA-MB-231 细胞存活率的影响

### 3.5 PDT 对细胞存活率的影响

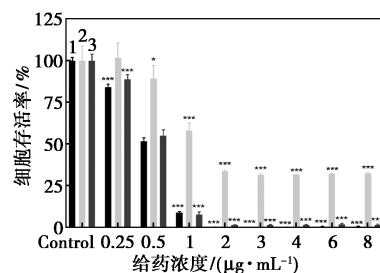
在光动力治疗条件下不同药物及不同浓度对 MDA-MB-231 细胞存活率的影响见图 6。在投药浓度为 4  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,Ce6-RES@ Soluplus 组相较于

Ce6 组、Ce6@ Soluplus 组的细胞存活率显著降低至 43.67%  $\pm$  2.15% ( $P < 0.01$ )。在最高浓度 8  $\mu\text{g}/\text{mL}$  下,Ce6-RES@ Soluplus 组细胞存活率进一步下降至 30.47%  $\pm$  1.62%,有显著的细胞抑制效果。表明 Ce6-RES@ Soluplus 在 PDT 激活条件下对细胞具有显著杀伤效果,验证了 Ce6-RES@ Soluplus 在 PDT 治疗中对 TNBC 细胞的抗肿瘤潜力。



1—RES;2—RES@ Soluplus

(a)不同浓度 RES



1—Ce6;2—Ce6-RES@ Soluplus;3—Ce6@ Soluplus

(b)PDT 激活

图 6 PDT 条件下不同药物及浓度对 MDA-MB-231 细胞存活率的影响

注: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.0005$ , \*\*\*  $P < 0.0001$ 。

不同药物处理后细胞形态发生显著变化,结果见图 7。对照组细胞形态正常,24 h 和 48 h 内细胞呈典型的纺锤状,分布均匀。RES 组和 RES@ Soluplus 组在 48 h 后部分细胞开始收缩,而 Ce6-RES@ Soluplus 光动力治疗组在 24 h 即观察到细胞变圆,细胞间隙增加,48 h 几乎所有细胞表现为圆形,且细胞数量明显减少。表明 Ce6-RES@ Soluplus

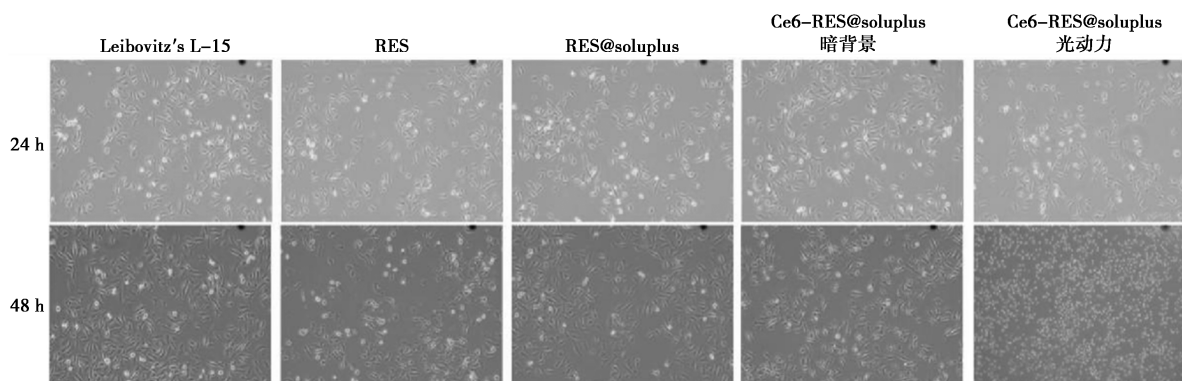


图 7 各组细胞形态学观察结果(24 h 和 48 h)

在 PDT 激活下显著影响细胞形态,推测其对细胞生长的抑制及凋亡效应显著增强。

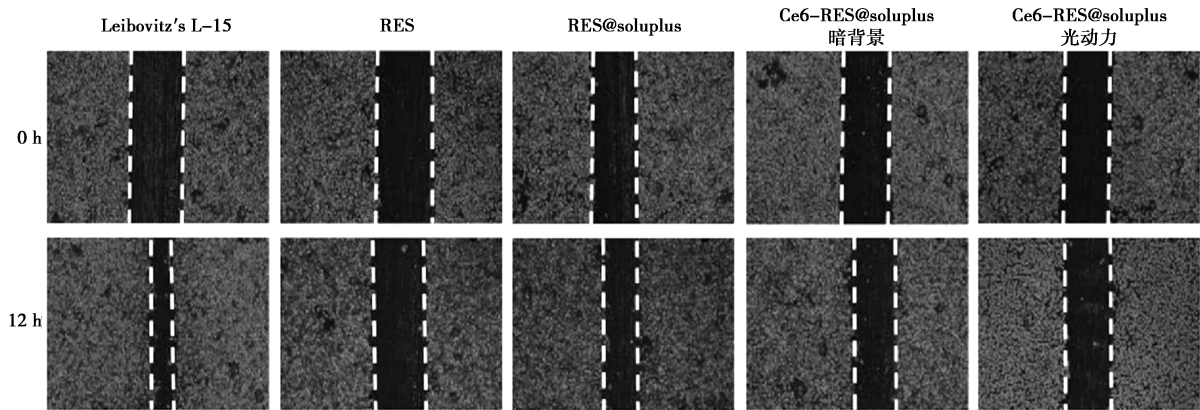
### 3.6 细胞划痕实验

细胞划痕实验结果如图 8(a)。对照组细胞愈合率为  $62.15\% \pm 5.43\%$ , 细胞有较强的迁移能力; RES 组的细胞愈合率为  $20.36\% \pm 3.29\%$ ; RES@ Soluplus 组为  $23.15\% \pm 3.56\%$ 。在 PDT 条件下 Ce6-RES@ Soluplus 组细胞愈合率显著降低至  $7.07\% \pm 1.05\%$ , 相比对照组降低了  $88\%$  ( $P < 0.001$ ), 对细胞

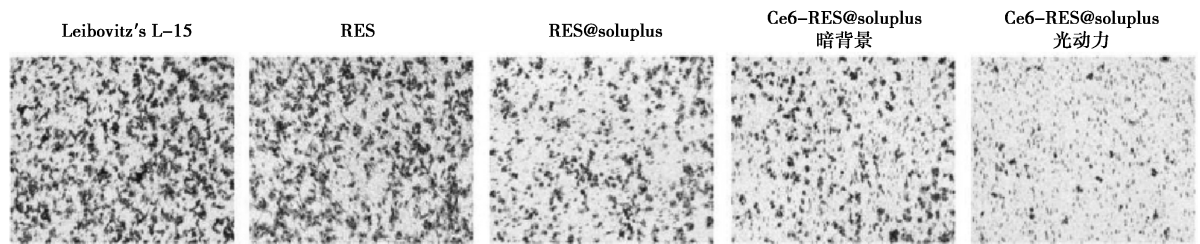
迁移具有显著的抑制效果。

Transwell 实验结果见图 8(b), 对照组侵袭细胞数量高达  $293 \pm 13$  个, RES 组侵袭细胞数降至  $178 \pm 9$  个, RES@ Soluplus 进一步降低至  $131 \pm 7$  个。Ce6-RES@ Soluplus 光动力治疗组中, 细胞穿过小室的数量减少至  $6 \pm 2$  个, 侵袭率几乎降至 0%, 相比对照组显著降低了  $98\%$  ( $P < 0.001$ )。

结果表明, Ce6-RES@ Soluplus 在 PDT 激活下显著抑制了 TNBC 细胞的迁移侵袭能力。



(a) 给药后的细胞划痕图像(0 h 和 12 h)

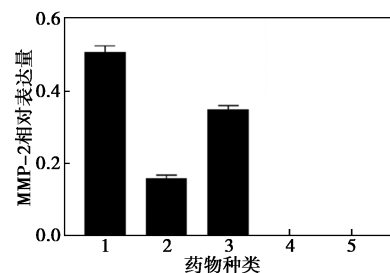


(b) 穿透 Transwell 隔室的细胞图像

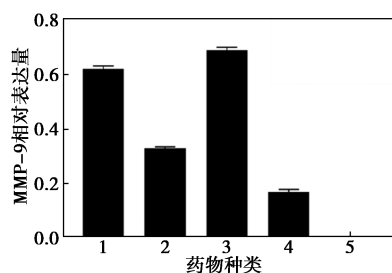
图 8 不同药物处理对 MDA-MB-231 细胞迁移、侵袭能力的影响

### 3.7 EMT 相关蛋白表达的 Western Blot 分析

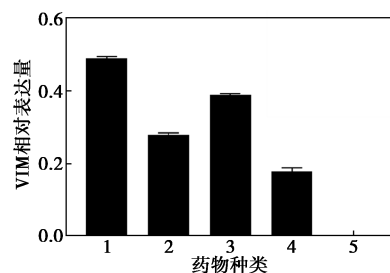
对照组中, MMP-9、MMP-2、VIM 和 VEGF 的相对表达量均接近 1.0。RES 组和 RES@ Soluplus 组 MMP-9、MMP-2、VEGF 的表达量略显降低, Ce6-RES@ Soluplus 光动力治疗组的 4 种蛋白表达量与对照组相比显著降低 ( $P < 0.001$ ), 见图 9。数据表明, Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒结合 PDT 显著抑



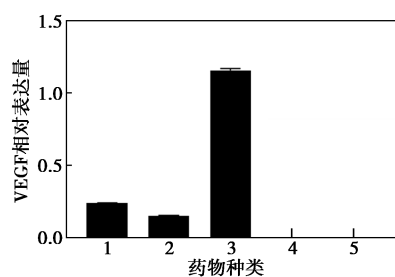
(b) MMP-2 表达量



(a) MMP-9 表达量



(c) VIM 表达量



(d) VEGF 表达量

1—Leibovitz's L-15; 2—RES; 3—RES@ Soluplus; 4—Ce6-RES@ Soluplus 暗背景处理; 5—Ce6-RES@ Soluplus 光动力治疗

图 9 不同药物处理对 EMT 相关蛋白表达的调控抑制了 EMT 相关蛋白的表达,从而有效阻止 TNBC 细胞的迁移与侵袭。

以上实验及数据分析表明, Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒在 PDT 条件下表现出显著的细胞毒性、形态变化、迁移和侵袭抑制能力,并通过下调 MMP-9、MMP-2、VIM 和 VEGF 等蛋白表达有效阻断了 TNBC 细胞的 EMT 过程。该研究为 Ce6-RES@ Soluplus 结合 PDT 治疗在 TNBC 中的抗肿瘤应用提供了有力的实验支持和分子机制解释。

#### 4 结论

通过薄膜水合法成功制备了包载 RES 和 Ce6 的 Soluplus 纳米颗粒,粒径为  $(71.9 \pm 2.0)$  nm, Zeta 电位为  $(1.48 \pm 0.12)$  mV, PDI 为 0.106, Ce6 和 RES 的包封率分别为 83.74% 和 80.12%, 较小的粒径使其具有渗透到肿瘤微环境中并长期滞留的能力。Soluplus 纳米颗粒载体系统不仅提高了 Ce6 和 RES 的溶解性,还增加了药物的体内稳定性,避免药物在生理环境中快速降解。此外,通过包载 Ce6,进一步增强 Soluplus 纳米颗粒载体系统的光敏性和生物利用度,降低系统毒性的同时,具有显著的靶向效应。

Western Blot 分析显示, Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒在 PDT 条件下显著抑制了 EMT 相关蛋白(如 MMP-9、MMP-2、VIM、VEGF)的表达,从而有效阻止了 TNBC 细胞的迁移和侵袭。表明纳米颗粒负载系统在调控肿瘤细胞的转移能力方面具有显著作用,能够有效阻止肿瘤细胞侵袭到周围组织的能力<sup>[16]</sup>。

此外, PDT 对 EMT 过程的抑制效果显著。研究表明, EMT 在肿瘤转移过程中起到关键作用,通过调控 EMT 相关通路,可以有效抑制肿瘤的迁移能力<sup>[17]</sup>。Ce6-RES@ Soluplus 纳米颗粒通过 PDT 激

活,显著降低了 VEGF 的表达,从而减少了肿瘤血管生成。该抑制效果不仅限制了肿瘤细胞的迁移能力,也抑制了血管生成,从而减少了肿瘤对营养的需求并降低了转移扩散的可能性。

未来可以进一步优化 Soluplus 纳米颗粒系统,探索如何改善 PDT 的光敏效率,并通过调整纳米颗粒的粒径、表面电荷等因素以优化其在体内的靶向性和穿透力。此类优化不仅可能提升治疗效果,也可以减少药物的全身性副作用。本研究结果表明,纳米颗粒结合 PDT 为 TNBC 提供了具有潜力的治疗选择,但在正式进入临床应用之前,还需进一步的体内研究和长期疗效评估。

#### 参考文献

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel R L, *et al.* Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3): 209-249.
- [2] Patel P, Wahan S K, Vishakha S, *et al.* Recent progress in histone deacetylase (HDAC) 1 inhibitors as anticancer agents[J]. *Current Cancer Drug Targets*, 2023, 23(1): 47-70.
- [3] Dos Santos A F, Terra L F, Wailemann R A M, *et al.* Methylene blue photodynamic therapy induces selective and massive cell death in human breast cancer cells[J]. *BMC Cancer*, 2017, 17(1): 194.
- [4] Chen J, Fan T, Xie Z, *et al.* Advances in nanomaterials for photodynamic therapy applications: Status and challenges[J]. *Biomaterials*, 2020, 237: 119827.
- [5] Jiang Z, Chen K, Cheng L, *et al.* Resveratrol and cancer treatment: Updates[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2017, 1403(1): 59-69.
- [6] Guo K, Feng Y, Zheng X, *et al.* Resveratrol and its analogs: Potent agents to reverse epithelial-to-mesenchymal transition in tumors[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 644134.
- [7] Vieira I R S, Tessaro L, Lima A K O, *et al.* Recent progress in nanotechnology improving the therapeutic potential of polyphenols for cancer[J]. *Nutrients*, 2023, 15(14): 3136.
- [8] Kursvietiene L, Kopustinskiene D M, Staneviciene I, *et al.* Anti-cancer properties of resveratrol: A focus on its impact on mitochondrial functions[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(12): 2056.
- [9] Buddhiraju H S, Balaraman J, Dehariya D, *et al.* PLGA nanoparticle loaded with antioxidants and photosensitizer for ROS shock mediated phototherapy of triple negative breast cancer[J]. *Biomed Mater*, 2023, 18(6): 065007.
- [10] Thomas-Moore B A, Dedola S, Russell D A, *et al.* Targeted photodynamic therapy for breast cancer: The potential of glyconanoparticles[J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(23): 6501-6513.
- [11] 刘庄, 冯良珠. 光功能纳米材料与肿瘤光学治疗展望[J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1339-1342.

(下转第 125 页)

- by sunlight [J]. *Environmental Science-Nano*, 2018, 5 (5) : 1078–1089.
- [9] Anis S F, Hashaikh R, Hilal N. Functional materials in desalination: A review [J]. *Desalination*, 2019, 468: 114077.
- [10] Feng H, Qiu Y, Li Y, *et al.* High-efficiency 3D solar evaporators with the PSAVF strategy for achieving excellent salt resistance [J]. *Solar Energy*, 2024, 278: 120765.
- [11] Chen C, Kuang Y, Hu L. Challenges and opportunities for solar evaporation [J]. *Joule*, 2019, 3 (3) : 683–718.
- [12] Zhang Y, Sivakumar M, Yang S, *et al.* Application of solar energy in water treatment processes: A review [J]. *Desalination*, 2018, 428: 116–145.
- [13] Zhang P, Liao Q, Yao H, *et al.* Direct solar steam generation system for clean water production [J]. *Energy Storage Materials*, 2019, 18: 429–446.
- [14] Chen C, Li Y, Song J, *et al.* Highly flexible and efficient solar steam generation device [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (30) : 1701756.
- [15] Li X, Xu W, Tang M, *et al.* Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (49) : 13953–13958.
- [16] Li R, Zhang L, Shi L, *et al.* MXene TiC<sub>2</sub>: An effective 2D light-to-heat conversion material [J]. *ACS Nano*, 2017, 11 (4) : 3752–3759.
- [17] Wang Q, Guo Q, Jia F, *et al.* Facile preparation of three-dimensional MoS<sub>2</sub> aerogels for highly efficient solar desalination [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12 (29) : 32673–32680.
- [18] Guo Z, Wang J, Wang Y, *et al.* Achieving steam and electrical power from solar energy by MoS<sub>2</sub>-based composites [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131008.
- [19] Lin Y, Huang X, Hu L, *et al.* Self-assembly MoS<sub>2</sub>@ MnO<sub>2</sub> nanoflowers for the fluorescence/magnetic resonance dual-modal sensing of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and photothermal therapy [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6 (23) : 22265–22274.
- [20] Yang H, Zhao J, Wu C, *et al.* Facile synthesis of colloidal stable MoS<sub>2</sub> nanoparticles for combined tumor therapy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 351: 548–558.
- [21] Hyotanishi M, Isomura Y, Yamamoto H, *et al.* Surfactant-free synthesis of palladium nanoclusters for their use in catalytic cross-coupling reactions [J]. *Chemical Communications*, 2011, 47 (20) : 5750–5752.
- [22] Ishida J, Nakatsuji M, Nagata T, *et al.* Synthesis and characterization of *N,N*-dimethylformamide-protected palladium nanoparticles and their use in the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction [J]. *ACS Omega*, 2020, 5 (16) : 9598–9604.
- [23] Li B, Wang Q, Zou R, *et al.* Cu<sub>7.2</sub>S<sub>4</sub> nanocrystals: A novel photothermal agent with a 56.7% photothermal conversion efficiency for photothermal therapy of cancer cells [J]. *Nanoscale*, 2014, 6 (6) : 3274–3282.
- [24] Bu X, Zhou D, Li J, *et al.* Copper sulfide self-assembly architectures with improved photothermal performance [J]. *Langmuir*, 2014, 30 (5) : 1416–1423.
- [25] Ayala-Orozco C, Urban C, Knight M W, *et al.* Au nanomatryoshkas as efficient near-infrared photothermal transducers for cancer treatment: Benchmarking against nanoshells [J]. *ACS Nano*, 2014, 8 (6) : 6372–6381.
- [26] Huang X H, El-Sayed I H, Qian W, *et al.* Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128 (6) : 2115–2120.
- [27] Guo H, Yan P, Sun X, *et al.* Ion-engineered solar desalination: Enhancing salt resistance and activated water yield [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149918.
- [28] Zhou L, Tan Y, Wang J, *et al.* 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10 (6) : 393–398.
- [29] Wu S, Xiong G, Yang H, *et al.* Multifunctional solar waterways: Plasma-enabled self-cleaning nanoarchitectures for energy-efficient desalination [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9 (30) : 1901286. ■

(上接第 118 页)

- [12] Ma C, Wang Y, Chen W, *et al.* Caspase-1 regulates the apoptosis and pyroptosis induced by phthalocyanine zinc-mediated photodynamic therapy in breast cancer MCF-7 cells [J]. *Molecules*, 2023, 28 (16) : 5934.
- [13] Kyuno D, Takasawa A, Kikuchi S, *et al.* Role of tight junctions in the epithelial-to-mesenchymal transition of cancer cells [J]. *Biochim Biophys Acta Biomembr*, 2021, 1863 (3) : 183503.
- [14] Sarkar R, Biswas S, Ghosh R, *et al.* Exosome-sheathed porous silica nanoparticle-mediated co-delivery of 3, 3'-diindolylmethane and doxorubicin attenuates cancer stem cell-driven EMT in triple negative breast cancer [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2024, 22 (1) : 285.
- [15] Dini I, Grumetto L. Recent advances in natural polyphenol research [J]. *Molecules*, 2022, 27 (24) : 8777.
- [16] Majumder A, Ray S, Banerji A. Epidermal growth factor receptor-mediated regulation of matrix metalloproteinase-2 and matrix metalloproteinase-9 in MCF-7 breast cancer cells [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2019, 452 (1/2) : 111–121.
- [17] Yan L, Song Z, Yi L, *et al.* TMEM176B inhibits ovarian cancer progression by regulating EMT via the Wnt/ $\beta$ -catenin signaling pathway [J]. *Journal of Translational Medicine*, 2025, 23 (1) : 350. ■