

· 综述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.10.024

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240227.1518.016\(2024-02-27\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240227.1518.016(2024-02-27))

## 细胞膜仿生技术在乳腺癌应用中的研究进展\*

姜月<sup>1</sup>, 高源<sup>2</sup>, 张聚良<sup>1△</sup>

(1. 西京医院血管内分泌外科, 西安 710000; 2. 空军军医大学生物制药研究室, 西安 710000)

**[摘要]** 乳腺癌作为威胁全球女性生命健康的第一大癌症急需更加精准有效的治疗。由于细胞膜仿生技术有更高的靶向性、低毒性, 同时能逃避机体的免疫清除, 显示出了广泛的临床应用前景。该文综述了当前细胞膜仿生技术在乳腺癌中的研究现状、挑战及前景, 旨在进一步推动细胞膜仿生技术在临床上的应用。

**[关键词]** 乳腺癌; 细胞膜; 纳米技术; 治疗; 成像; 综述

**[中图分类号]** R737.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)10-1573-05

### Advances in cell membrane biomimetic technology for the application of breast cancer\*

JIANG Yue<sup>1</sup>, GAO Yuan<sup>2</sup>, ZHANG Juliang<sup>1△</sup>

(1. Department of Vascular and Endocrine Surgery, Xijing Hospital, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 2. Biopharmacy Research Office, Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**[Abstract]** As the first major cancer that threatens women's life and health worldwide, breast cancer needs more accurate and effective treatment urgently. Cell membrane biomimetic technology has a wide range of clinical application prospects due to its higher targeting, low toxicity, and can evade the body's immune clearance. This article reviewed the current research status, challenges and prospects of cell membrane biomimetic technology in breast cancer, in order to further promote the clinical application of cell membrane biomimetic technology.

**[Key words]** breast cancer; cell membrane; nanotechnology; treatment; imaging; review

国际癌症研究机构最新研究报告显示, 乳腺癌是全球发病率最高的恶性肿瘤, 约占所有癌症的 11.7%, 其在女性癌症中的病死率为第一位<sup>[1-2]</sup>。乳腺癌是一种起源于乳腺导管上皮细胞的高度异质性疾病, 传统药物靶向能力低、不良反应大, 而纳米材料作为药物载体可以提高药物的吸收利用率, 实现高效靶向药物递送, 延长药物半衰期, 但其缺乏特异性, 且生物分布较差, 导致癌症治疗低效, 进而阻碍了纳米材料在临床上的广泛应用。细胞膜仿生功能为纳米材料提供了良好的生物相容性和肿瘤靶向性, 受到了越来越多的研究关注。细胞膜仿生纳米载体(CMCNs)可以直接复制细胞膜的功能, 具有延长循环时间、抵抗免疫原性、降低纳米材料毒性、保护药物不被降解及特异性靶向等特点<sup>[3-4]</sup>。在基础研究中多种细胞膜作为 CMCNs 递送药物, 这在癌症治疗中也发挥了重要作用<sup>[5-6]</sup>。本文综述了基于 CMCNs 治疗乳腺癌的研究及相关进展, 旨在推进 CMCNs 在乳腺癌领域的临床应用。

#### 1 CMCNs 中不同细胞膜的特点

不同细胞膜可赋予该体系不同功能, 产生不同的

体内行为。CMCNs 最大优势是延长药物外周血循环作用时间, 避免免疫系统清除, 增强靶向化疗的高渗透性及长滞留效应<sup>[3,6]</sup>。红细胞膜由于易分离提取纯化, 是最早应用于 CMCNs 的细胞膜, 其上表达的分子将病原体吸引到细胞表面, 通过氧化作用杀死病原体<sup>[7]</sup>。它的优势在于延长纳米材料在体内的循环时间, 但缺乏肿瘤靶向性<sup>[8-9]</sup>。

由于癌细胞的增殖能力强, 体外培养易获得且具有肿瘤靶向能力, 这使得癌细胞膜成为 CMCNs 最理想的选择。癌细胞膜表面的肿瘤特异性抗原和黏附分子过表达, 可促进同源细胞的黏附。有研究证实, 相同癌细胞的自我识别能力会导致体内同源肿瘤的高度自我靶向性, 甚至能与异型肿瘤竞争, 增强药物向靶部位的递送效率<sup>[10-11]</sup>。

进入人体外周血的肿瘤细胞称为循环肿瘤细胞(CTC)。这些细胞可以通过循环系统到达远处组织并增殖形成转移。CTC 通过与血小板相互作用进一步黏附于内皮细胞, 使肿瘤细胞出现免疫逃逸, 从而发生肿瘤转移<sup>[12]</sup>。而使用血小板膜作为 CMCNs 可以选择性地黏附在肿瘤组织或受损的血管内皮上<sup>[13]</sup>,

靶向并清除 CTC,同时能够逃避巨噬细胞的检测<sup>[14]</sup>。

中性粒细胞膜的 CMCNs 在富含中性粒细胞的肿瘤中更有效<sup>[15]</sup>。然而中性粒细胞目前无法体外培养且半衰期仅为 7 h,因此作为药物递送载体受到限制<sup>[16]</sup>。巨噬细胞膜有助于细胞黏附并吞噬或清除人体内的异物、细菌、病毒或其他病原体<sup>[17-18]</sup>,同时可避免被免疫细胞识别,不会丧失归巢效应<sup>[18]</sup>。

## 2 CMCNs 在乳腺癌化疗中的应用

化疗是乳腺癌重要的系统治疗手段之一,但化疗药物无靶向性,毒副作用较大且会明显降低免疫力。CMCNs 与化疗药联合能增强药物的靶向性,明显降低化疗药对癌旁组织的损伤<sup>[19]</sup>。

SU 等<sup>[6]</sup>设计了一种红细胞膜包被紫杉醇的纳米粒子并与肿瘤穿透肽 iRGD 联合,结果发现给药 24 h 后,细胞膜包被紫杉醇的药物浓度是无膜包被的 1.99 倍,这显示出细胞膜包被后紫杉醇在血液循环中的滞留效应明显增强。并且,与膜包被不联合 iRGD 相比,联合 iRGD 给药可以明显增强对乳腺癌肺转移灶的治疗疗效,且组织学证实渗入的是肺转移灶而非正常肺实质。这种差异可能是由实体瘤血管的特殊性造成的,乳腺肿瘤的血管异常、纤维化和间质基质,形成经毛细血管运输屏障,限制了药物长循环的渗透,同时含有大量血流的肺可能更有利于药物的肺分布。

GONG 等<sup>[20]</sup>制备了 RAW264.7 和 4T1 细胞混合膜包被聚丙交酯-乙交酯(PLGA)并负载多柔比星进行大鼠肺转移模型肿瘤荧光定量分析,结果发现,与生理盐水组相比,癌细胞膜包被组、巨噬细胞膜包被组及混合膜包被组中乳腺癌肺转移灶数量分别减少 80.6%、77.8% 和 88.9%。该数据说明混合膜在 CMCNs 技术中靶向性优于单一细胞膜,在非癌组织中富集减少。这可能归因于高分散性、小尺寸和低血管化极限及靶向纳米材料对转移性肿瘤部位的可及性。

用中性粒细胞膜包被 PLGA 并装载第二代蛋白酶体抑制剂卡非佐米,同样能够持续靶向 CTC,抑制早期乳腺癌转移灶的形成<sup>[16]</sup>。有研究显示,通过活体低细胞术检测给药后 30 min 内小鼠血液循环药物捕获 CTC 的数量,膜包被组捕获了(29±10)个双阳性信号峰,约占通过的 CTC 总数的 25%;无膜包被组仅捕获(1±1)个双阳性峰。在小鼠乳腺癌肺转移模型中,直接使用卡非佐米并未观察到对肺转移灶的抑制作用,而使用膜包被组相比生理盐水组转移灶减少 87.2%<sup>[16]</sup>。进一步说明化疗领域中 CMCNs 最大的优势在于其可以赋予药物靶向性,而拥有靶向性的药物在癌旁组织中富集减少进而降低剂量限制性毒性。所有这些数据表明,膜包被组对 CTC 的细胞毒性在血液中基本保持,这可能归因于新技术在 CTC 中的选择性结合和内化。

KUMAR 等<sup>[21]</sup>构建了乳腺癌脑转移模型,并使用癌细胞膜包被 PLGA 负载的多柔比星给药,结果显示颅内膜包被组荧光强度为无膜包被组的 2 倍( $P <$

0.001)。证实了这一载药系统可以进入颅内病灶实现同型肿瘤病灶的靶向性,并在循环中提供隐身特性来增强脑细胞摄取<sup>[22]</sup>。在 24、48 h 的荧光成像中显示无差异,这可能是由于脑中的液体运动缓慢。纳米材料的清除率取决于纳米材料通过间质液到脑毛细血管的运动<sup>[22]</sup>。脑转移一直是乳腺癌中棘手的问题,有必要深入研究其在靶向脑转移乳腺肿瘤成像和治疗方面的真正潜力。

## 3 CMCNs 在乳腺癌光热治疗中的应用

光热疗法是将较高光热转换效率的材料注入体内,在近红外光照射下将光能转换为热能来杀死肿瘤细胞并抑制肿瘤转移和复发<sup>[23-24]</sup>。由于近红外光在体内的穿透深度浅,故光热疗法特别适合乳腺癌等相对浅表的肿瘤,但其靶向性差且对正常组织有一定程度损伤<sup>[25]</sup>。CMCNs 与光热疗法联合应用,能增强治疗的靶向性,降低对癌旁组织和正常组织的损伤且疗效得到明显提升<sup>[26]</sup>。

REN 等<sup>[27]</sup>使用红细胞膜包被  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性纳米团簇( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  MNC),通过给小鼠乳腺癌肺转移模型施加激光照射,结果发现无膜包被组温度从 33.0 °C 增加到 46.0 °C,膜包被组比无膜包被组高 5.4 °C。说明 CMCNs 联合  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  MNC 能够在体内有效地将光转换为热,并表现出比单一  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  MNC 更高的光热效应,这可能是因为 CMCNs 使肿瘤部位蓄积,使其具有更好的生物分布。

ZHAO 等<sup>[28]</sup>使用癌细胞膜包被黑磷量子点,并对小鼠腹腔注射抗细胞程序性死亡-配体 1(PD-L1)的药物。黑磷量子点的局部光热疗法与 PD-L1 免疫治疗相结合能明显抑制肿瘤的生长,同时浸润性  $\text{CD8}^+$  T 细胞增多,促进全身抗肿瘤反应。新一代光热转化剂的金纳米笼包被巨噬细胞膜用于体内光热癌症治疗<sup>[29]</sup>也证实了 CMCNs 具有良好的靶向肿瘤能力。

## 4 CMCNs 在乳腺癌光动力治疗中的应用

光动力疗法是利用光动力效应,使用特定波长照射肿瘤部位活化光敏药物并将能量传递给组织周围的氧,产生细胞毒性较强的单态氧,抑制并杀死肿瘤细胞。但由于光动力疗法消耗氧,形成低氧环境,导致低氧诱导因子等多种活性分子增多,诱导肿瘤血管生成,加速肿瘤生长和转移<sup>[30]</sup>。CMCNs 与光动力疗法联合,通过 CMCNs 持续输送氧气,扭转缺氧状态从而明显增强了光动力疗法的作用。

相比于其他溶剂,全氟三丁胺对氧的溶解度极高,是氧气输送的理想载体<sup>[31-32]</sup>。FANG 等<sup>[33]</sup>设计了一款仿生氧传递纳米探针使癌细胞膜包被人血清蛋白-吡啶菁绿-全氟三丁胺,其通过缺氧探针行免疫荧光染色确认氧浓度,结果发现膜包被组注射后 24 h 显示缺氧组织从 87.4% 减少到 8.3%,而无膜包被组和无全氟三丁胺组的缺氧改善较少。说明全氟三丁胺可以在保证光动力疗法治疗效果的同时改善肿瘤



部位的缺氧,从而持续抑制肿瘤生长。因此,纳米探针可能具有临床转化为有效氧传递剂的潜力,用以缓解肿瘤缺氧,增强光动力疗法的肿瘤杀伤能力。

LI 等<sup>[34]</sup>构建了基于卟啉的纳米材料同时装载葡萄糖氧化酶和过氧化氢酶,并用癌细胞膜包被。纳米材料有光照组、纳米材料及膜包被无光照组、纳米材料及膜包被有光照组的抑癌率分别为 67.5%、54.4% 和 97.1%,说明基于消耗肿瘤内葡萄糖的癌症饥饿疗法和光动力疗法的协同治疗效果明显。其中级联放大效应是通过催化内源性过氧化氢生成氧气促进微环境氧化,从而加速细胞内葡萄糖的分解,并在光照下增强单线态氧( $^1O_2$ )的生成。

## 5 CMCNs 在乳腺癌其他治疗中的应用

JIN 等<sup>[35]</sup>研究发现,癌细胞膜包被 PLGA 可以抑制人乳腺成纤维细胞介导的癌细胞迁移。与生理盐水组相比,膜包被组小鼠淋巴结的 CD4<sup>+</sup>T 细胞,脾脏和淋巴结中 CD8<sup>+</sup>T 细胞明显升高。这证明了在免疫活性小鼠中有增加细胞毒性 T 淋巴细胞数量的能力。该特性在个性化癌症疫苗诱导癌症特异性免疫反应中有巨大潜力<sup>[36]</sup>。

LIU 等<sup>[37]</sup>设计了一种包被有机硅内含氧化铈及多柔比星(T-CeNP)的癌细胞膜,并使用来自 4T1 细胞的培养基驱动 NIH3T3 细胞转分化为癌症相关成纤维细胞,结果发现 NIH3T3 在与 T-CeNP 孵育 48 h 后表现出类似成纤维细胞的表型,且在乳腺癌肝转移模型中,与生理盐水组相比,T-CeNP 组肝转移率降低 82.0%。这表明该新型药物可有效抑制多柔比星诱导的癌症相关成纤维细胞转分化,并促进癌症相关成纤维细胞向正常成纤维细胞的重编程。

基于优化靶向治疗,CAO 等<sup>[38]</sup>使用巨噬细胞膜包被 pH 敏感的脂质体内含恩美曲妥珠单抗(T-DM1)在小鼠乳腺癌肺转移模型中进行实验,结果发现,膜包被组对乳腺癌肺转移的抑制率为 87.1%,是 T-DM1 脂质体组的 1.88 倍( $P < 0.01$ )。证实膜包被组有效地提高了该药物对肺转移灶的特异靶向性,提示目前针对人表皮生长因子受体 2(HER2)阳性乳腺癌的靶向治疗的效果并未优于细胞膜提供的靶向能力。

## 6 CMCNs 在乳腺癌分子成像方面的应用

在不同种类的功能性无机纳米颗粒中,上转换纳米颗粒具有优越的发光性能,能通过上转换发光和 MRI 同时可视化肿瘤<sup>[39-40]</sup>。但由于其靶向性较差,无法实现更为精准的肿瘤成像。联合 CMCNs 可以赋予纳米材料良好的靶向性,使肿瘤动态成像成为可能<sup>[41]</sup>。

LI 等<sup>[42]</sup>将红细胞膜包被上转换纳米颗粒材料 NaGdF<sub>4</sub>:Yb,并用一种癌症靶向分磷脂聚乙二醇叶酸(DSPE-PEG-FA)插入细胞膜中,用于三阴性乳腺癌的靶向多模态成像。结果发现,小鼠乳腺癌模型中进行上转换发光成像时,无自发荧光干扰。与上转换

纳米颗粒组相比,膜包被组的肝脏摄取量明显降低,且在所有时间点肿瘤部位均显示出最亮的上转换发光信号。注射后 3 h,在肿瘤部位观察到上转换发光信号,信号至少持续 48 h,在 36 h 达到峰值。正电子发射断层摄影术(PET)成像结果也表明,与无 DSPE-PEG-FA 修饰组相比,DSPE-PEG-FA 修饰组显示出更高的示踪剂肿瘤摄取率。上转换发光纳米材料在 MRI 上可显像,可以将近红外辐射转换为可见光。通过这样的手段实现利用短半衰期核素标记的 CMCNs 进行肿瘤成像。

FANG 等<sup>[39]</sup>将癌细胞膜(MDA-MB-231)包覆 NaGdF<sub>4</sub>:Yb,结果发现,使用该 CMCNs 可以完成乳腺癌小鼠模型的活体 MRI/PET/上转换发光三模态肿瘤成像,并能进一步区分乳腺癌的亚型。其使用红细胞膜作为对照实验观察到红细胞膜组显示出与上转换纳米颗粒相似的肿瘤积聚,但与癌细胞膜组相比,荧光信号较低。上转换发光成像中,癌细胞膜组肝脏蓄积量远低于上转换纳米颗粒组,表明癌细胞膜涂层确实可以降低网状内皮系统的摄取。在 PET 成像中,将药物分别注射到 MDA-MB-231 和 MCF-7 荷瘤小鼠体内,MDA-MB-231 小鼠肿瘤部位摄取量远高于 MCF-7 小鼠,这与上转换发光和 MRI 成像结果一致。MDA-MB-231 和 MCF-7 小鼠之间的差异证明该探针可以用于乳腺癌的分子分类。区分分子亚型对于分子成像技术而言是巨大的一个进步,如何更加精确地区分乳腺癌亚型及推动临床影像诊断学发展有待进一步的研究。

## 7 总结与展望

CMCNs 的出现确实克服了纳米材料的一些固有缺点,如生物毒性、靶向性差等。一方面,其实现了目标药物受控释放,通过外周血循环在其他组织中的释放减少,减少了药物在正常组织和器官中的蓄积。另一方面,CMCNs 的主动靶向能力使更多的目标药物积聚在肿瘤部位,减少了对正常组织的损害。

但不可否认,CMCNs 的研究尚处于起步阶段,还没有完全发展到临床转化水平。在正式进入临床试验之前,仍有不少问题需要解决:(1)用于分离细胞膜材料和纳米材料涂层的许多技术效率低下且耗时,不仅成本增加,也可能导致批次间的差异,均一性差;(2)为保存细胞膜上蛋白活性,一般采取现制备现使用的方法,量化生产及储存仍旧还是一个难题;(3)仍需开发优化的提取技术,以获得足够的细胞膜等。

由于包覆在纳米材料上的细胞膜具有更好的隐形性和靶向性,细胞膜包被的纳米材料具有巨大的转化效益。在乳腺癌的治疗及应用方面,仅对原有的药物如紫杉醇或多柔比星进行包被伪装,都能起到改善药物对肿瘤细胞的杀伤能力及降低药物副作用的效果,尤其是对于乳腺癌的远处转移,也表现出优秀的抑瘤效应。目前各科学都在研究利用不同纳米材料的特性结合光疗法(包括光热疗法和光动力疗法)

同时联合化疗或其他抑瘤手段对肿瘤进行杀伤抑制。CMCNs 将成为一种很有前途的药物递送平台, 这样的递送平台推进了乳腺癌个性化精准治疗的应用。

## 参考文献

- [1] 王劲松, 魏家燕, 彭敏. 2023 年美国癌症统计报告和全球最新癌症统计数据解读及启示[J]. 实用肿瘤杂志, 2023, 38(6): 523-527.
- [2] ZHENG R, ZHANG S, ZENG H, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2016[J]. J Nat Cancer Center, 2022, 2(1): 1-9.
- [3] PAN W L, TAN Y, MENG W, et al. Microenvironment-driven sequential ferroptosis, photodynamic therapy, and chemotherapy for targeted breast cancer therapy by a cancer-cell-membrane-coated nanoscale metal-organic framework[J]. Biomaterials, 2022, 283: 121449.
- [4] 朱丽丽, 张倩茹, 权静. 用于癌症治疗的细胞膜包覆纳米粒子研究进展[J]. 郑州师范教育, 2023, 12(6): 1-8.
- [5] LIN M, LI Y, LONG H, et al. Cell membrane-camouflaged DOX-loaded  $\beta$ -glucan nanoparticles for highly efficient cancer immunotherapy[J]. Int J Biol Macromol, 2023, 225: 873-885.
- [6] SU J, SUN H, MENG Q, et al. Long circulation red-blood-cell-mimetic nanoparticles with peptide-enhanced tumor penetration for simultaneously inhibiting growth and lung metastasis of breast cancer[J]. Adv Funct Mater, 2016, 26(8): 1243-1252.
- [7] 冯之资, 沈诗洋, 莫然. 基于红细胞的仿生载体用于光热剂递送和肿瘤光热治疗的研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2022, 53(1): 28-36.
- [8] NGUYEN P H D, JAYASINGHE M K, LE A H, et al. Advances in drug delivery systems based on red blood cells and their membrane-derived nanoparticles[J]. ACS Nano, 2023, 17(6): 5187-5210.
- [9] LIU Z, XIE H, WANG T. Erythrocyte-cancer hybrid membrane-camouflaged prussian blue nanoparticles with enhanced photothermal therapy in tumors[J]. ACS Omega, 2023, 8(25): 23056-23066.
- [10] PAN W L, TAN Y, MENG W, et al. Microenvironment-driven sequential ferroptosis, photodynamic therapy, and chemotherapy for targeted breast cancer therapy by a cancer-cell-membrane-coated nanoscale metal-organic framework[J]. Biomaterials, 2022, 283: 121449.
- [11] LI X, YU Y, CHEN Q, et al. Engineering cancer cell membrane-camouflaged metal complex for efficient targeting therapy of breast cancer[J]. J Nanobiotechnology, 2022, 20(1): 401.
- [12] RUPP B, BALL H, WUCHU F, et al. Circulating tumor cells in precision medicine: challenges and opportunities[J]. Trends Pharmacol Sci, 2022, 43(5): 378-391.
- [13] ZHOU Y, LIANG Q, WU X, et al. siRNA delivery against myocardial ischemia reperfusion injury mediated by reversibly camouflaged biomimetic nanocomplexes[J]. Adv Mater, 2023, 35(23): e2210691.
- [14] XU Y, DU L, HAN B, et al. Black phosphorus quantum dots camouflaged with platelet-osteosarcoma hybrid membrane and doxorubicin for combined therapy of osteosarcoma[J]. J Nanobiotechnology, 2023, 21(1): 243.
- [15] ZHANG J, JI C, ZHANG H, et al. Engineered neutrophil-derived exosome-like vesicles for targeted cancer therapy[J]. Sci Adv, 2022, 8(2): eabj8207.
- [16] KANG T, ZHU Q, WEI D, et al. Nanoparticles coated with neutrophil membranes can effectively treat cancer metastasis[J]. ACS Nano, 2017, 11(2): 1397-411.
- [17] WU Y, WAN S, YANG S, et al. Macrophage cell membrane-based nanoparticles: a new promising biomimetic platform for targeted delivery and treatment[J]. J Nanobiotechnology, 2022, 20(1): 542.
- [18] YANG C, MING Y, ZHOU K, et al. Macrophage membrane-camouflaged shRNA and doxorubicin: a pH-dependent release system for melanoma chemo-immunotherapy[J]. Research, 2022, 2022: 9768687.
- [19] WU Y, ZHU R, ZHOU M, et al. Homologous cancer cell membrane-camouflaged nanoparticles target drug delivery and enhance the chemotherapy efficacy of hepatocellular carcinoma[J]. Cancer lett, 2023, 558: 216106.
- [20] GONG C, YU X, YOU B, et al. Macrophage-cancer hybrid membrane-coated nanoparticles for targeting lung metastasis in breast cancer therapy[J]. J Nanobiotechnology, 2020, 18(1): 92.
- [21] KUMAR P, TREUREN T V, RANJAN A P, et al. In vivo imaging and biodistribution of near infrared dye loaded brain-metastatic-breast-cancer-cell-membrane coated polymeric nanoparticles[J].

- Nanotechnology, 2019, 30(26):265101.
- [22] SONG E, GAUDIN A, KING A R, et al. Surface chemistry governs cellular tropism of nanoparticles in the brain[J]. Nat Commun, 2017, 8:15322.
- [23] 冯向欣, 李嘉欣, 蒋鸿俊, 等. 氮掺杂姜黄素碳点光热治疗肺癌细胞[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(1):56-65.
- [24] ALAMDARI S G, AMINI M, JALILZADEH N, et al. Recent advances in nanoparticle-based photothermal therapy for breast cancer[J]. J Control Release, 2022, 349:269-303.
- [25] CAO L, WU Y, SHAN Y, et al. A review: potential application and outlook of photothermal therapy in oral cancer treatment[J]. Biomed Mater, 2022, 17(2):352-359.
- [26] 李文兰, 王文渊, 任文秀, 等. 制备近红外光响应性仿生纳米探针及在乳腺癌光热诊疗中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(5):669-675.
- [27] REN X, ZHENG R, FANG X, et al. Red blood cell membrane camouflaged magnetic nanoclusters for imaging-guided photothermal therapy[J]. Biomaterials, 2016, 92:13-24.
- [28] ZHAO P, XU Y, JI W, et al. Biomimetic black phosphorus quantum dots-based photothermal therapy combined with anti-PD-L1 treatment inhibits recurrence and metastasis in triple-negative breast cancer[J]. J Nanobiotechnology, 2021, 19(1):181.
- [29] DHEYAB M A, AZIZ A A, KHANIABADI P M, et al. Gold nanoparticles-based photothermal therapy for breast cancer[J]. Photodiagnosis Photodyn Ther, 2023, 42:103312.
- [30] HAN P, ZHANG L, FU Y, et al. A dual-response drug delivery system with X-ray and ROS to boost the anti-tumor efficiency of TPZ via enhancement of tumor hypoxia levels[J]. Nanoscale, 2022, 15(1):237-247.
- [31] MA T, HAO Y, LI S, et al. Sequential oxygen supply system promotes peripheral nerve regeneration by enhancing Schwann cells survival and angiogenesis[J]. Biomaterials, 2022, 289:121755.
- [32] GERVITS L L, SIGAN A L, MARKOVA A A, et al. High-contrast and fast-removable <sup>19</sup>F-MRI labels with perfluoro-tert-butyl substituents[J]. Chem Med Chem, 2023, 18(18):e202300239.
- [33] FANG H, GAI Y, WANG S, et al. Biomimetic oxygen delivery nanoparticles for enhancing photodynamic therapy in triple-negative breast cancer[J]. J Nanobiotechnology, 2021, 19(1):81.
- [34] LI S Y, CHENG H, XIE B R, et al. Cancer cell membrane camouflaged cascade bioreactor for cancer targeted starvation and photodynamic therapy[J]. ACS Nano, 2017, 11(7):7006-7018.
- [35] JIN J, KRISHNAMACHARY B, BARNETT J D, et al. Human cancer cell membrane-coated biomimetic nanoparticles reduce fibroblast-mediated invasion and metastasis and induce T-cells[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(8):7850-7861.
- [36] 刘清文, 胡永茂, 马雁冰. 肿瘤细胞膜与细菌囊泡膜融合的纳米囊泡及其肿瘤效应[J]. 中国细胞生物学学报, 2023, 45(1):26-34.
- [37] LIU H J, WANG J, WANG M, et al. Biomimetic nanomedicine coupled with neoadjuvant chemotherapy to suppress breast cancer metastasis via tumor microenvironment remodeling[J]. Adv Funct Mater, 2021, 31(25):133-145.
- [38] CAO H, DAN Z, HE X, et al. Liposomes coated with isolated macrophage membrane can target lung metastasis of breast cancer[J]. ACS Nano, 2016, 10(8):7738-7748.
- [39] FANG H, LI M, LIU Q, et al. Ultra-sensitive nanoprobe modified with tumor cell membrane for UCL/MRI/PET multimodality precise imaging of triple-negative breast cancer[J]. Nanomicro lett, 2020, 12(1):62.
- [40] 李雪铭, 王芝娜, 罗明芳, 等. 同源靶向性多模态成像纳米探针在光热-化疗协同治疗中的应用[J]. 分子影像学杂志, 2023, 46(2):187-194.
- [41] LV S, SUN J, GUO C, et al. PAI/MRI visualization of tumor derived cellular microvesicles with endogenous biopolymer nanoparticles modification[J]. Int J Nanomedicine, 2022, 17:2883-2890.
- [42] LI M, FANG H, LIU Q, et al. Red blood cell membrane-coated upconversion nanoparticles for pretargeted multimodality imaging of triple-negative breast cancer[J]. Biomater Sci, 2020, 8(7):1802-1814.

(收稿日期:2023-11-22 修回日期:2024-01-11)

(编辑:袁皓伟)