

纳米递药系统治疗肿瘤疾病的研究进展

王 晴, 徐 芳, 王军涛*

湖北科技学院核技术与化学生物学院, 湖北 咸宁

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月9日

摘 要

目前, 纳米递药系统在临床治疗与研究中应用广泛, 表现出了显著的优势。它可以提升药物靶向性, 改善药物递送效率, 实现药物控释与长效合作, 增强难溶性药物的生物利用度, 拓展药物适用范围。这些优势使得纳米递药系统在治疗肿瘤、抗肿瘤、抗感染等方面展现出巨大潜力。但仍然还存在一些挑战。首先, 存在一些安全性问题, 纳米材料可能因长期滞留引发肝脾积累, 导致器官毒性; 某些纳米载体可能引发过敏反应, 需优化表面修饰以减少免疫识别。其次, 药代动力学与生物分布存在难题, 它的靶向效率低, 肿瘤组织的高间质液压或血脑屏障阻碍纳米颗粒渗透。最后, 个体差异化也会对其有影响, 每个患者的体质不同, 肿瘤微环境、基因型差异导致纳米药物响应率波动, 预存抗体可能加速清除。

关键词

纳米递药系统, 治疗新策略, 抗肿瘤, 临床研究

Research Progress of Nano-Drug Delivery Systems in the Treatment of Tumor Diseases

Qing Wang, Fang Xu, Juntao Wang*

School of Nuclear Technology and Chemistry & Biology, Hubei University of Science and Technology, Xianning Hubei

Received: November 8, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 9, 2025

Abstract

At present, nano-drug delivery systems are widely used in clinical treatment and research, demonstrating significant advantages. It can enhance the targeting of drugs, improve the efficiency of drug delivery, achieve the cooperation between controlled release and long-acting drugs, increase the bioavailability of poorly soluble drugs, and expand the scope of drug application. These advantages

*通讯作者。

文章引用: 王晴, 徐芳, 王军涛. 纳米递药系统治疗肿瘤疾病的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 1369-1376.
DOI: 10.12677/acm.2025.15123541

make the nano-drug delivery system show great potential in treating tumors, anti-tumor, anti-infection and other aspects. But there are still some challenges. Firstly, there are some safety issues. Nanomaterials may accumulate in the liver and spleen due to long-term retention, leading to organ toxicity. Some nanocarriers may cause allergic reactions, and surface modification needs to be optimized to reduce immune recognition. Secondly, there are challenges in pharmacokinetics and biodistribution. Its targeting efficiency is low, and the high interstitial hydraulic pressure of tumor tissues or the blood-brain barrier hinders the penetration of nanoparticles. Finally, individual differences will also have an impact on it. Each patient has a different constitution, and differences in the tumor microenvironment and genotypes lead to fluctuations in the response rate of nanomedicines, and pre-stored antibodies may accelerate clearance.

Keywords

Nano Drug Delivery System, New Treatment Strategies, Anti-Tumor, Clinical Research

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纳米递药系统是指利用纳米技术将药物封装在纳米尺度的载体中, 以实现靶向递送[1]和增强药物疗效[2]的系统。常见的纳米递药系统有脂质体[3][4]、纳米乳、聚合物纳米粒[5]、固体脂质纳米粒、树枝状大分子、金属纳米粒等等。纳米递药系统应用广泛, 尤其是在临床研究方面。通过纳米技术与药物结合形成复合物, 对我国在治疗肿瘤疾病[6]、神经系统疾病、呼吸系统疾病、血液类疾病、抗感染疾病的发展具有很大贡献。

2. 纳米递药系统及其分类

2.1. 纳米递药系统

纳米递药系统能够改善难溶性药物溶解、吸收, 还能保护药物, 减少体内外降解, 增加稳定性, 让药物在病变部位充分释放[7]。修饰纳米载体使其具靶向性, 精准递药到病变细胞, 减少对正常组织损害, 像部分递药系统可借助肿瘤微环境、表面功能化修饰等靶向病变部位[8]-[13]纳米递药系统能减少药物在非靶器官分布, 如新型递药策略能避开正常细胞, 降低对人体正常组织毒副作用。纳米载体的缓释作用, 使药物缓慢释放, 减少给药次数[14]。

2.2. 纳米递药系统的分类

2.2.1. 按载体材料分类

可以分为聚合物纳米颗粒、脂质体颗粒、磁性纳米颗粒、无机纳米颗粒和生物纳米颗粒。聚合物纳米颗粒是由天然或合成聚合物制成的纳米颗粒; 脂质体颗粒是由脂质分子组成的囊泡结构颗粒; 磁性纳米颗粒主要是由 Fe、Co、Ni 等金属颗粒及其氧化物组成的纳米颗粒; 无机纳米颗粒包括金属颗粒、金属氧化物颗粒、硅基颗粒、量子点等; 生物纳米颗粒是指生物微粒群, 如细胞外泌体、病毒、脂质体等。

2.2.2. 按药物释放机制分类

可以分为控释型和智能响应型。控释型药物释放机制是在药物核心外包裹半透膜, 通过膜孔控制药

物扩散速率。智能响应型药物释放机制利用温度、pH、光、酶、磁场等刺激触发材料结构变化(如溶胀、降解),从而控制药物释放。

2.2.3. 按靶向性分类

可以分为被动靶向、主动靶向和智能靶向。被动靶向利用特定组织或器官的生理结构特点,使药物或载体在体内自然分布差异,实现靶部位富集;主动靶向通过化学或物理方法修饰药物载体或分子,赋予其主动与靶标结合的能力,突破被动靶向的生理限制;智能靶向利用材料对环境刺激的响应性,动态调整药物释放行为,实现时空精准控制。

2.2.4. 按结构分类

可以分为纳米颗粒、纳米胶囊和纳米胶束。纳米颗粒是由高分子材料通过交联形成的实心或空心球状结构;纳米胶囊由壳层材料(如聚合物、脂质)包裹液态或固态核心形成;纳米胶束由两亲性分子(如聚合物、表面活性剂)在水中自组装形成。

3. 纳米递药系统在治疗肿瘤疾病方面的应用

徐旨露[5]等设计并合成两种多孔有机聚合物,用于构建抗癌药物的智能递药系统,能够靶向肿瘤部位,为开发新型、高效智能纳米药物载体提供新思路。通过载体材料的合成及纳米递药系统的构建、载药纳米粒的物理化学特性检测、体外细胞实验和体内动物实验,成功地合成了两种载药纳米粒,这两种载药纳米粒均具有较高的载药量、适宜的粒径和较好的稳定性。结果表明:(1)成功地合成了两种载药纳米粒,均具有良好的理化性能,分散均匀,形态为球形结构,粒径为纳米级。(2)Que-POP纳米粒具有酸敏感性,能在肿瘤酸性环境下进行特异性释放药物,产生抗肿瘤作用。(3)HF-900-DOX纳米粒具有过氧化氢酶活性,对正常细胞毒性小,而对癌细胞毒性大。这归因于肿瘤细胞内过表达过氧化氢,HF-900-DOX的酶活性可产生高水平的活性氧,使细胞内氧化还原水平失调,协同DOX的抗肿瘤作用,对肿瘤细胞杀伤作用力强,作用优于DOX组。HF-900-DOX能显著抑制小鼠体内的肿瘤生长,达到杀伤肿瘤细胞,治疗癌症的作用。

乔辉[8]等为了探讨pH敏感型纳米递药系统对于肿瘤疾病的治疗结果。选取了82例肿瘤患者,分为相等人数的2组,依次记为对照组和观察组。对照组给予常规化疗,观察组采用pH敏感型纳米递药系统给药,然后评估疗效。结果发现:经过治疗,观察组的治疗有效率为73.17%,高于对照组的51.22%,表明pH敏感型纳米递药系统治疗肿瘤疗效良好,且无明显副作用。

郝雨桐[15]等针对肿瘤微环境中的细胞提出了一种新型治疗策略,合成了一种新型铈基金属MOF纳米递药系统。该递药系统在肿瘤部位会产生大量活性氧,进而导致肿瘤细胞死亡,并激活免疫系统,具有较好的治疗效果。

鄢文峰[16]等合成了纳米二氧化硅,将其表面进行化学修饰接上苯硼酸,再将其作为载体负载姜黄素,即为纳米递药系统。考察姜黄素的负载量,以及其在不同酸碱pH下释放抑制肿瘤细胞的作用。结果表明,该纳米递药系统能够良好地负载姜黄素并在pH环境刺激下释放抑制肿瘤细胞,具有无毒、生物利用度高的特点。

杨芳[17]等采用溶剂交换法和纳米挤出技术制备得到HUSI NPs。利用马尔文粒径仪、透射镜分别进行尺寸、形貌表征;利用紫外分光光度计、便携式溶解氧仪和手持式红外热像仪对其性质进行表征;体外利用流式细胞术和激光共聚焦显微镜等手段,以HepG2为细胞模型,考察其细胞摄取、细胞毒性及其内在机制;体内实验以H22皮下荷瘤为模型,考察其体内代谢分布情况、抗肿瘤效果和生物安全性。发现HUSI NPs呈现“核壳结构”,粒径约为127.2 nm, PDI为0.381, Zeta电势为-18.5 mV,能够完整保

留红细胞膜表面膜蛋白和血红蛋白, 稳定性优良。

王晓晨[18]等采用溶液-凝胶法制备氨基化介孔二氧化硅(Aminated Mesoporous Silica, MSN-NH₂)纳米颗粒, 通过单因素实验制备得形貌良好, 粒径大小恰好合适的 MSN-NH₂ 纳米粒, 进行一系列研究。发现制备的 SMEH 纳米粒具有特异性靶向功能, 可将 SOR 递送至肿瘤部位, 通过 pH 响应和酶响应完成 SOR 的释放, 并通过 EA 协同 SOR 的 GSH 调控作用, 显著提高了抗肿瘤效果, 且该递送系统安全性良好, 显示出其在肿瘤治疗方面的巨大潜力。

袁一超[19]等制备了聚多巴胺的砒霜纳米递药系统来提高砒霜治疗肿瘤的疗效。在碱性条件下制备搭载砒霜的聚多巴胺纳米粒, 利用单因素考察法优化合成条件; 通过透射电子显微镜、激光粒度仪表征纳米粒大小, 并对其体内外抗肿瘤效果进行考察。体外释放度考察显示, 砒霜纳米粒具有一定的缓释效果。细胞毒性实验表明, 在低浓度下 PDA-ATO@NDDS 对细胞具有较强毒性($P < 0.01$)。体内药效学表明, ATO 与 PDA-ATO@NDDS 对小鼠肿瘤的抑制具有显著性差异($P < 0.05$), PDA-ATO@NDDS 具有较好的肿瘤抑制作用。

邢煜骞[20]等开发了一种基于温敏聚合物修饰的半导体聚合物纳米颗粒(SPNs)的纳米复合载药系统, 可用于增强癌症的联合治疗效果。该系统以 SPNs 为核心, 外层为温敏聚合物, 通过吸收近红外激光能量实现光热转换。升温后不仅可直接烧蚀肿瘤细胞, 同时触发温敏聚合物构象变化, 从而释放嵌入的抗肿瘤药物阿霉素。实验结果显示, 该纳米复合物具有优异的药物负载效率(90.2%)和光热转换性能(50 $\mu\text{g/mL}$, 10 min 升温 25 $^{\circ}\text{C}$)。该纳米复合载药平台在肿瘤联合治疗领域具有显著的潜在应用价值。

韦凤凰[21]等提出一种可诱导谷胱甘肽(GSH)消耗和自供 H_2O_2 用于癌症治疗的智能纳米载药系统(Cu/ZIF-8@GOx-DOX@HA, CZGDH)。当 CZGDH 通过透明质酸的靶向作用进入癌细胞后, 溶酶体的酸性环境触发阿霉素(DOX)、葡萄糖氧化酶(GOx)及 Cu^{2+} 的释放。DOX 作为化疗药物进入细胞核, 使癌细胞凋亡, 完成化学治疗进程。释放的 GOx 消耗葡萄糖产生 H_2O_2 , 达到饥饿治疗(ST)的目的。此外, Cu^{2+} 可以与癌细胞中过表达的 GSH 反应被还原为 Cu^+ , 破坏癌细胞的氧化还原平衡, 产生的 Cu^+ 和 H_2O_2 触发类 Fenton 反应生成羟基自由基(OH \cdot), 可杀死癌细胞, 完成化学动力学治疗。GSH 耗竭和 H_2O_2 自给能明显促进 OH \cdot 的生成, 可以同时解决 H_2O_2 不足和 GSH 过表达导致光化治疗效率有限的问题。该纳米载药系统对癌细胞治疗效果更好, 为抗肿瘤治疗提供了一种新策略。

刘梦[22]等以 ZIF-8 为载体发展了一种新的纳米递送体系, 实现了吉非替尼和 EGFR siRNA 的体内靶向共递送, 其生物安全性良好, 体内靶向性和体内外抗肿瘤活性均有积极响应。实验结果表明 Apt/(siRNA + GEF)@ZIF-8 纳米颗粒安全可靠, 治疗肿瘤效果良好。

冯晓龙[23]等设计合成了以 γ -聚谷氨酸为主链, β -环糊精和 3-氨基苯硼酸为支链的载铁和载药高分子材料, 并负载对近红外光敏感的纳米粒子, 利用环糊精实现高负载铁和光催化还原反应。将该载体材料负载在上转换纳米粒子上获得载药纳米粒子 R-B-A-DBQ-UCNP- Fe^{2+} 。实验表明该材料可促进 Fe^{2+} 持续循环转化, 增强肿瘤细胞的铁死亡, 其对肿瘤的抑制效果明显高于 R-B-A- Fe^{2+} 、R-B-A-DBQ- Fe^{2+} 组。

张兴祖[24]等合成了谷胱甘肽(GSH)响应的 Pt 前药(Pt-OH)以及主链上富含二硫键、侧链接枝多巴胺的两亲性嵌段共聚物(PP-SS-DA), 然后通过纳米沉淀法制备了负载 PtOH 与 Fe^{3+} 的纳米颗粒(PFS-NP), 并对其颗粒稳定性、光谱吸收特性、消耗 GSH 等进行了表征和验证。实验表明该研究基于金属-多酚的配位作用, 构建了同时负载 Pt-OH 与 Fe^{3+} 的 GSH 响应型纳米颗粒, 实现了基于顺铂的化学免疫治疗, 为增强改善顺铂类药物的治疗效果提供了新的思路。

刘梦茹[25]等以葡萄糖为原料, 采用水热法制备棒状碳纳米材料, 该材料具有良好的生物相容性、良好的载药能力和较高的光热效率(23.7%)。进一步使用 RCNs 负载 DOX 进行体内外实验, 在近红外照射下显示出良好的治疗效果, DOX@RCNs 表现出 52.2%的高细胞杀伤效率, 表明所制备的 DOX@RCNs 在

抗癌治疗中具有很大的潜力。

谢奕[26]等通过 RAFT 聚合反应合成聚合物载体材料,并通过薄膜水化法制备纳米粒,并进行实验表征,考察了纳米粒的粒径、zeta 电位、形貌特征以及 cGAMP 与载体材料的最佳 N/P 比等指标,还通过薄膜透析法,考察 DOX/cGAMP@NPs 中 DOX 和 cGAMP 的释放行为。实验表明,DOX/cGAMP@NPs 可以产生更高的 CD8⁺细胞浸润,可显著增加肿瘤引流淋巴结内成熟 DCs 的比例;同时,显著抑制了免疫抑制细胞群的增殖,表明其潜在的化学免疫治疗策略具有很大的应用前景。

裴泽荣[27]等基于肿瘤微环境的生物学特征,设计并制备了兼具双重靶向性的新型纳米胶束(GA-S-S-AS/Cy5 NPs)。该纳米胶束以一种简单和绿色的自组装方式获得,具有 EPR 效应和配体-受体识别的双重靶向作用,有利于在肿瘤内的聚集,对其抗肿瘤起到增效减毒效果,在递送中药抗肿瘤活性成分中具有一定的应用价值。

贾小钰[28]等利用二步去溶剂法制备载药的明胶纳米颗粒作为药物控制释放的载体材料,利用正负电荷的吸引力吸引具有近红外响应以及类酶活性的金纳米颗粒,并通过氧化还原反应负载一层导电高分子聚吡咯,最终制备得到一种具有在近红外一区高光热转化效率以及类酶活性的纳米复合药物,用于联合药物/化学动力学/光热癌症治疗。该系统在肿瘤微环境的微酸性条件下表现出高富集性,药物释放和化学动力学活性进一步增强,对细胞的抑制率达到了 95% 以上,可实现药物/化学动力学/光热高效协同治疗。

陈伟军[29]等研究旨在以具有生物活性的天然产物和多种金属离子构建具有 TME 响应性的多模式协同治疗平台用于抗肿瘤研究。为了以生物活性分子构建全功能纳米 MOFs(NMOFs)并筛选出具有明显抗肿瘤活性的金属离子,以丁香酸作为有机连接体,分别选用 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 等作为金属节点,以透明质酸作为靶向聚合物,构建出六种不同单金属节点且具有相同晶体学结构的响应型 NMOFs 材料,并用于金属离子抗肿瘤研究的初步筛选研究。实验结果表明,各产物均具有较好的抗肿瘤活性。

张舒瑞[30]等研究采用近红外光催化剂 CPAN 纳米粒子作为基底,在其上负载 DOX 作为化疗药物,并包裹上宫颈癌肿瘤细胞膜(HeLa 细胞系,CM),构建了 CPAN/DOX@CM(CD@CM)复合纳米载药系统,对其进行表征与性能测试,进一步探究 CD@CM 在体外和体内的抗肿瘤作用效果及生物安全性研究。该研究为减小或消除血管-肿瘤间负压、改善药物向肿瘤部位的高效递送、提高肿瘤治疗效果提供了新的方法和技术手段。

宁世龙[31]等通过壳聚糖与磷脂之间的静电相互作用自组装作用,采用改良的溶剂注入法制备了 RCP-NPs。制备的纳米粒呈类球形,在水中均匀分布,为橙红色混悬液,粒径分布为 110~120 nm,具有优异的均质性及分散性。细胞增殖实验表明,RCP-NPs 对小鼠乳腺癌 4T1 细胞的细胞毒性显著增强,其 24 h 及 48 h 的 IC₅₀ 值分别为 $7.09 \pm 1.07 \mu\text{g/mL}$ 和 $5.90 \pm 1.01 \mu\text{g/mL}$ 。通过流式细胞术证实了 RCP-NPs 能够显著促进细胞的摄取与凋亡。荷瘤小鼠模型中,RCP-NPs 能够显著抑制肿瘤的生长,体内安全性评价表明 R-BS/PC-MMs 具有良好的安全性及减少药物对肝脏器官的毒副作用。

刘丹蕊[32]等为了解决化疗药毒副作用大且易产生耐药性的问题,研究研发了一种将化疗与 PTT 相结合的磁性纳米药物递送系统(CDDP@PPy@Fe₃O₄)。该纳米粒子(NPs)利用 EPR 效应和氧化铁(Fe₃O₄)的磁靶向性实现药物向肿瘤组织的富集,促进 CDDP 释放到肿瘤及微环境中,同时发挥 PTT 与化疗的协同抑癌作用,克服化疗耐药性并减轻全身毒性,从而为 OSCC 患者提供一种安全有效的治疗策略。

要灿[33]等通过构建一种 Zn 掺杂的铁氧体为内核,基于铜/锆的 MOF [NH₂-UiO66 (Cu/Zr), UC]为外壳的具有过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、谷胱甘肽氧化酶(Glutathione-oxidase,

GSH-Ox)活性的磁性纳米复合材料。通过装载化疗药物阿霉素(Doxil, DOX)和抑制自噬的 PQ, 发现该体系能在弱酸性的肿瘤微环境下特异性释放药物, 在较高过氧化氢(Hydrogen Peroxide, H_2O_2)、谷胱甘肽(Glutathione, GSH)含量是通过纳米酶的多种酶活作用消耗 GSH, 促进 ROS 的生成, 在 Fe^{3+}/Cu^{2+} 诱导下促进肿瘤细胞发生死亡。针对肿瘤微环境构筑高效低毒的纳米酶复合载药体系, 为抗癌药物的开发提供了新的思路。

郭小菊[34]等在构建具有同时改善肿瘤酸性/乏氧微环境的碳酸钙基纳米粒, 实现同时高效包封化疗药物阿霉素(Doxorubicin, DOX)和血红蛋白(Hemoglobin, Hb); 具备同时改善肿瘤酸性和乏氧微环境的双重功效; 大幅度提升肿瘤的免疫原性, 逆转肿瘤免疫抑制微环境, 实现乳腺癌化疗免疫治疗疗效的显著提升, 为乳腺癌化疗免疫治疗提供新方法和新思路。该实验研究利用改良的碳酸钙辅助双微乳法合成 DOX 和血红蛋白共载碳酸钙基纳米粒(DHCaNPs)。DHCaNPs 不仅可以作为氧气递送载体来缓解肿瘤乏氧, 还可以通过消耗乳酸来中和酸性肿瘤微环境, 从而有效克服肿瘤对化疗的耐药性。在体内的抗肿瘤疗效中, DHCaNPs 表现出明显的抑制肿瘤生长和肿瘤肺转移的效果。

睢林[35]等首先合成了具有 CDT 和 PTT 双重功能的 PVP-CuS NPs。随后, 通过一锅法将 PVP-CuS NPs 锚定在 ZIF-8 内部获得 CuS@ZIF-8 (CZ), 负载模型药物阿霉素(DOX)后获得 CuS/DOX@ZIF-8 (CZD)。最后, 通过在 CZD 表面包覆一层叶酸修饰的红细胞膜(FA-RBCM, FR), 制得功能化复合递药系统 FA@RBCM-CuS/DOX@ZIF-8 NPs (FRCZD), 通过以下实验对 FRCZD 递药系统的构建与载体性能、生物安全性和体内外抗肿瘤药效作用进行系统研究。该实验构建的具有多重响应性释药能力的载药系统 FRCZD, 能够用作多种治疗策略的一体化协作平台, 在癌症尤其是耐药性乳腺癌治疗领域具有广阔的开发应用前景。

唐桩[36]等制备共负载平足蛋白(PDPN)小干扰 RNA (si-PDPN)及紫杉醇(PTX)的蛋黄脂质纳米共递药系统, 探讨其对食管鳞癌(ESCC)传统化疗药物疗效的影响及作用机制, 比较共递药系统对食管鳞癌 KYSE150 细胞增殖、凋亡、侵袭及迁移能力的影响, 评估其抗 ESCC 效应。结果发现 ESCC 组织及细胞中 PDPN 的表达显著高于癌旁组织及正常食管上皮细胞。EYLNPs-PTX-siPDPN 粒径为 (84.5 ± 1.4) nm, 4°C 保存下其粒径 14 d 内无明显变化。同时携带化疗药物紫杉醇及 si-PDPN 的共递药系统 EYLNPs-PTX-siPDPN 具有更强的抗 ESCC 效应。

4. 小结和展望

纳米递药系统在过去几十年中取得了显著的成就。从脂质体、聚合物纳米粒等传统纳米载体, 到响应性纳米材料、仿生纳米递药系统等新型技术, 纳米递药系统不断突破传统药物递送的局限性, 为疾病治疗带来了新的希望。在癌症治疗领域, 纳米递药系统通过主动靶向和被动靶向机制, 显著提高了化疗药物的疗效并降低了其毒副作用。如通过对纳米载体表面进行修饰, 使其能够特异性地识别肿瘤细胞表面的标志物, 实现药物的精准投递; 利用肿瘤组织的高通透性和滞留效应(EPR), 使纳米药物在肿瘤部位富集, 增强治疗效果。展望未来, 纳米递药系统的研究将朝着几个关键方向展开。一是智能响应型载体的开发, 通过对肿瘤微环境的 pH 值、温度、酶等刺激因素的响应, 实现药物的精准释放, 提高治疗效果。如中科院开发的 ROS 响应型纳米粒已进入 II 期临床试验, 展现出良好的应用前景。二是器官特异性递送系统的研究, 针对不同器官的生理特点和疾病特征, 设计具有特异性靶向能力的纳米载体, 实现药物的精准递送, 减少对正常组织的损伤。三是绿色合成技术的应用, 采用环保、可持续的方法制备纳米载体, 降低生产成本, 提高生产效率, 同时减少对环境的影响。此外, 结合人工智能优化纳米设计, 能够更高效地筛选和设计出性能优良的纳米载体; 探索液体活检(如 ctDNA 纳米传感器), 将为个性化癌症治疗提供更多依据。

基金项目

本项目获湖北科技学院横向科研项目(2024HX202、2023HX244、2022HX004), 湖北科技学院校级科研项目(2019-21GP07、2021-23GP02)支持。

参考文献

- [1] 刘喜. 可对靶向受体分布进行调节的口服主动靶向纳米递药系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2021.
- [2] 李雨洋. 黄芩素联合 β -内酰胺类药物抗 MRSA 多功能纳米递药系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西中医药大学, 2022.
- [3] 吴昊. 基于脂质体纳米递药系统共递送 SN38 与 miR-124-3p 联合治疗肝细胞癌的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [4] 王子肖. 水凝胶-脂质体纳米递药系统通过诱导铁死亡抑制胶质母细胞瘤复发[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [5] 徐旨露. 多孔有机聚合物纳米递药系统的构建及抗肿瘤研究[D]: [硕士学位论文]. 潍坊: 潍坊医学院, 2021.
- [6] 李婵莲, 宋佳敏, 陈美玲, 等. 巨噬细胞膜仿生纳米递药系统在疾病靶向治疗中的应用[J]. 中国药房, 2022, 33(18): 2290-2294.
- [7] 杨洋. 肿瘤靶向 ADM/FA-LNT-OA 纳米递药系统的制备及分子机制研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- [8] 乔辉. pH 敏感型纳米递药系统在肿瘤靶向治疗中的作用[J]. 深圳中西医结合杂志, 2021, 31(4): 98-99.
- [9] 姜良弟. 靶向 DR5 外泌体介导雷公藤甲素纳米递药系统的构建及抗恶性黑色素瘤作用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东中医药大学, 2021.
- [10] 张嘉仪. 用于增强药物递送和肿瘤治疗的靶向纳米递药系统的构建[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2022.
- [11] 于岫. CREKA 肿瘤靶向肽修饰聚集诱导发光 MOFs 纳米递药系统研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [12] 荆紫琪, 王雪, 闫天月. 靶向叶酸受体和线粒体的载雷公藤红素 PAMAM 纳米递药系统构建及体外抗炎作用[J]. 药学报, 2023, 58(3): 550-559.
- [13] 王鹏. 靶向纳米递药系统通过调节衰老及软骨修复治疗骨关节炎的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2025.
- [14] Ren, Y., Li, P., Xie, Y., Xu, J., Luo, Q., Chen, M., et al. (2025) Dual-Responsive Nanoparticles for Enhanced Drug Delivery in Breast Cancer Chemotherapy. *Journal of Controlled Release*, **377**, 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.11.026>
- [15] 郝雨桐. 基于代谢干预策略的纳米递药系统增强抗肿瘤免疫治疗研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [16] 鄢文峰. pH 敏感性姜黄素介孔硅纳米递药系统的制备表征及体内外抗肿瘤活性研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西中医药大学, 2021.
- [17] 杨芳. 基于血红蛋白携氧增敏的光-化疗联用仿生纳米递药系统用于抗肝癌研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2022.
- [18] 王晓晨. 谷胱甘肽调控型索拉非尼靶向纳米递药系统的制备及抗肝癌活性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2024.
- [19] 袁一超, 王春梅, 李策, 等. 聚多巴胺-砒霜纳米递药系统的构建及其抑瘤效果[J]. 中草药, 2023, 54(23): 7759-7764.
- [20] 邢煜骞, 赵曼. 双功能半导体聚合物纳米颗粒复合载药系统的构建[J]. 山东化工, 2025, 54(6): 12-15.
- [21] 韦凤凰, 侯丽, 姚懿芸, 等. 肿瘤微环境智能响应型纳米载药系统用于多模态协同治疗[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(7): 129-130.
- [22] 刘梦. 基于 ZIF-8 金属有机框架材料的多功能纳米给药系统的设计及抗肿瘤活性研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西科技师范大学, 2023.

-
- [23] 冯晓龙. 高效调控铁离子水平诱导肿瘤细胞死亡的纳米载药系统研究[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州大学, 2023.
- [24] 张兴祖. 谷胱甘肽响应的金属多酚纳米前药系统用于肿瘤化学免疫治疗的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2024.
- [25] 刘梦茹. 响应型纳米载药系统的构建及抗肿瘤性能研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2024.
- [26] 谢奕. 阿霉素-STING 激活剂纳米递药系统的构建及其在肿瘤免疫治疗中的应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2024.
- [27] 裴泽荣. 基于肿瘤微环境的 DNA 纳米递释系统对藤黄酸抗肿瘤增效减毒作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津中医药大学, 2023.
- [28] 贾小钰. 明胶纳米颗粒载药系统的构建及其抗肿瘤机制的研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2024.
- [29] 陈伟军. 多金属有机骨架纳米递药系统的构建及抗肿瘤作用研究[D]: [博士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [30] 张舒瑞. 仿淋巴回流的环化聚丙烯腈纳米载药系统的制备及抗肿瘤治疗[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [31] 宁世龙. 基于磷脂的 Rubropunctatin 纳米载药系统的构建及其抗癌活性研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2023.
- [32] 刘丹蕊. 近红外光响应型纳米载药系统介导的化疗-光热协同治疗口腔鳞癌的研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2025.
- [33] 要灿. 双靶向磁纳米酶载药系统的构建及其在肿瘤诊疗中的应用[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2023.
- [34] 郭小菊. 酸性/缺氧双重缓释碳酸钙基纳米递药系统的制备及其抗肿瘤研究[D]: [硕士学位论文]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2024.
- [35] 睢林. RBCM/ZIF-8 仿生纳米递送系统协同多策略抗肿瘤作用研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
- [36] 唐桩, 万妍, 万一元, 等. 靶向 PDPN 的蛋黄脂质纳米共递药系统构建及其体外抗食管鳞癌效应研究[J]. 徐州医科大学学报, 2025, 45(7): 490-496.