

纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用进展与挑战：从基础研究到临床转化

刘学礼¹, 乔 勇¹, 陈洪让^{2*}

¹阜阳师范大学附属阜南医院普外科, 安徽 阜阳

²安徽医科大学第一附属医院肝胆胰及移植外科二病区, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年6月2日; 录用日期: 2025年6月24日; 发布日期: 2025年7月3日

摘 要

本文综述了纳米材料在消化道肿瘤治疗中的最新研究进展及其面临的挑战。随着纳米技术的发展, 纳米材料在肿瘤的早期诊断、靶向治疗和药物递送等方面展现出巨大潜力。近年来, 研究者们不断探索不同类型的纳米材料及其机制, 力求在临床转化中实现更好的治疗效果。然而, 当前研究中仍存在诸多技术难题, 如纳米材料的生物相容性、靶向性及其长期安全性等问题, 限制了其在消化道肿瘤治疗中的广泛应用。本文旨在梳理该领域的研究现状, 分析存在的挑战, 并探讨未来的发展方向, 为推动纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用提供参考。

关键词

纳米材料, 消化道肿瘤, 基础研究, 临床转化

Advances and Challenges of Nanomaterials in the Treatment of Gastrointestinal Tumors: From Basic Research to Clinical Translation

Xueli Liu¹, Yong Qiao¹, Hongrang Chen^{2*}

¹Department of General Surgery, Fuyang Normal University Affiliated Funan Hospital, Fuyang Anhui

²Second Ward of Hepatobiliary, Pancreatic, and Transplant Surgery, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: Jun. 2nd, 2025; accepted: Jun. 24th, 2025; published: Jul. 3rd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 刘学礼, 乔勇, 陈洪让. 纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用进展与挑战: 从基础研究到临床转化[J]. 世界肿瘤研究, 2025, 15(3): 115-123. DOI: 10.12677/wjcr.2025.153015

Abstract

This review summarizes the latest research advances and challenges of nanomaterials in the diagnosis and treatment of gastrointestinal tumors. With the advancement of nanotechnology, nanomaterials have demonstrated significant potential in early tumor detection, targeted therapy, and drug delivery. Recent studies have explored diverse types of nanomaterials and their mechanisms to achieve better therapeutic outcomes in clinical translation. However, several technical hurdles, such as biocompatibility, targeting specificity, and long-term safety of nanomaterials, remain unresolved, limiting their broad application in gastrointestinal tumor therapy. This article aims to outline the current research landscape, analyze existing challenges, and discuss future directions to facilitate the clinical implementation of nanomaterials in gastrointestinal tumor treatment.

Keywords

Nanomaterials, Gastrointestinal Tumors, Basic Research, Clinical Translation

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

消化道肿瘤是全球范围内发病率和死亡率较高的恶性肿瘤之一，涉及胃肠道的多种类型，如食道癌、胃癌、结直肠癌及肝癌等。随着我们对肿瘤生物学理解的不断深入，传统治疗方法在临床应用中的局限性逐渐显现，患者在接受化疗和放疗时常常面临疗效不佳和副作用严重的问题。因此，亟需寻求新的治疗策略以提高消化道肿瘤的治疗效果。近年来，纳米材料因其独特的物理化学性质和良好的生物相容性，成为肿瘤治疗研究中的一个重要热点。纳米技术的进步使得我们能够开发出更为精准的靶向药物传递系统，从而提升治疗效果并降低副作用。

纳米材料在消化道肿瘤的应用潜力巨大，研究表明，生物纳米材料作为多功能药物传递载体，能够有效克服治疗耐药性，提高疗效。例如，在胃肠道间质瘤的研究中，生物纳米材料被发现能够在药物传递和三维肿瘤微环境建模中发挥重要作用，为这些稀有肿瘤的治疗提供了新的思路[1]。此外，海藻酸盐作为一种广泛研究的生物聚合物，因其优良的生物相容性和环境友好性，被用于设计微纳米系统以实现控制和靶向药物传递，这为癌症治疗提供了新的可能性[2]。

在治疗结直肠癌方面，应用纳米材料的策略也屡见成效。研究表明，刺激响应型药物递送系统能够根据肿瘤微环境的变化，精确释放药物，提高肿瘤细胞的靶向性和药物的生物利用度[3]。同时，纳米材料还可用于光热、光动力以及化学动力等新兴疗法，进一步丰富了消化道肿瘤的治疗手段[4]。这些进展不仅为消化道肿瘤的临床治疗提供了新的希望，也推动了肿瘤治疗的个体化和精准化。

然而，尽管纳米材料在消化道肿瘤治疗中展现出良好的前景，仍面临诸多挑战。首先，如何优化纳米材料的合成和功能性以提高其生物相容性和靶向性是当前研究的重点。其次，生物屏障如肠道的黏膜屏障和细胞屏障等，对纳米材料的传递效率构成挑战，需进一步探索如何克服这些生物屏障[5]。此外，纳米材料的长期安全性和毒性问题亦需引起重视。

综上所述，纳米材料在消化道肿瘤的治疗中展现出广阔的应用前景，然而要实现其从基础研究到临床转化的飞跃，仍需克服多方面的挑战。未来的研究应聚焦于纳米材料的优化设计和临床试验，以推动

其在消化道肿瘤治疗中的实际应用。

2. 纳米材料的种类及特性

纳米材料因其独特的物理化学特性及在生物医学领域的广泛应用，近年来备受关注。在消化道肿瘤的治疗中，纳米材料的种类繁多，包括一维、二维和三维纳米材料。这些材料的不同形态和结构特征使其在药物递送、靶向治疗及肿瘤微环境的调控中展现出不同的优势和潜力(表 1)。

2.1. 一维纳米材料

一维纳米材料通常指的是具有较大长度与宽度比的纳米结构，如纳米线、纳米管等。这些材料因其优越的电学和光学特性，广泛应用于药物递送系统及肿瘤靶向治疗。例如，碳纳米管(CNTs)作为一种重要的一维纳米材料，因其优异的生物相容性和能够有效载药的特性，成为了消化道肿瘤治疗的研究热点之一。研究表明，碳纳米管不仅可以用于药物的递送，还可以通过其表面修饰实现对特定肿瘤细胞的靶向作用，从而提高治疗的效果[4]。

此外，一维纳米材料的另一重要应用是其作为生物传感器的基础，用于实时监测肿瘤标志物。例如，改性的一维纳米材料在电化学传感器中的应用，可以实现对消化道肿瘤相关生物标志物的高灵敏度检测，这为肿瘤的早期诊断提供了可能[6]。

2.2. 二维纳米材料

二维纳米材料如石墨烯、氮化硼等，因其独特的二维结构和优异的力学、热学及电学性质，在纳米医学中展现出巨大的应用潜力。特别是在消化道肿瘤的治疗中，二维材料可以作为药物载体，增强药物的生物利用率和靶向性。例如，石墨烯氧化物因其良好的生物相容性和可调节的表面性质，已被广泛研究用于抗肿瘤药物的递送和释放[5]。

研究还发现，利用二维材料的优良光热效应，可以实现肿瘤的光热治疗。通过对肿瘤细胞的加热，诱导肿瘤细胞的凋亡，二维纳米材料在这一领域的应用显示出良好的治疗效果。此外，二维纳米材料在增强药物的穿透能力方面也表现出色，有助于克服生物屏障，提高药物在肿瘤部位的浓度，从而提高治疗效果[1]。

2.3. 三维纳米材料

三维纳米材料包括纳米颗粒、纳米胶囊等，其结构复杂且具有较大的比表面积，适合用于药物的缓释和控制释放。特别是在消化道肿瘤的治疗中，三维纳米材料能够模拟肿瘤微环境，为药物的靶向递送提供了新的思路。例如，聚乳酸-羟基乙酸(PLGA)基纳米颗粒因其良好的生物相容性和生物降解性，已被应用于消化道肿瘤的药物递送研究中。这些纳米颗粒能够有效地包载药物，并在肿瘤微环境中实现药物的定向释放[7]。

三维纳米材料的另一个重要特性是其能够与肿瘤微环境中的细胞相互作用，从而调节肿瘤细胞的生物学行为。研究表明，利用三维纳米材料构建的肿瘤模型能够更真实地反映肿瘤的生物特性，为新药的研发及疗效评估提供了良好的平台[8]。此外，随着纳米技术的发展，三维纳米材料在联合治疗、免疫治疗等方面也展现出广阔的应用前景，为消化道肿瘤的个体化治疗提供了新的可能性。

3. 纳米材料在消化道肿瘤中的作用机制

3.1. 靶向药物递送

纳米材料在靶向药物递送方面的应用为消化道肿瘤的治疗提供了新的可能性。研究表明，生物纳米材料作为多功能载体，在药物传递中展现出良好的效果，能够克服治疗耐药性并提高治疗效果。例如，

聚乳酸-羟基乙酸(PLGA)基纳米颗粒因其优良的生物相容性和生物降解性,已被广泛应用于消化道癌症的药物递送中。这些纳米颗粒可以通过调节其物理化学性质(如粒径、表面电荷等)来优化药物释放行为,从而在特定的肿瘤微环境中实现靶向药物释放[7] [9]。此外,利用铝酸盐等材料制备的微米和纳米系统也显示出在控释和靶向递送方面的潜力,这些系统可通过粘附特性和生物相容性提高药物的生物利用度,延长药物的释放时间,最终提升治疗效果[2]。

Table 1. Comparative analysis of advantages, disadvantages, and applicability of different types of nanomaterials
表 1. 不同种类纳米材料的优缺点比较及适用范围分析

纳米材料类型	特性	应用领域	局限性
一维纳米材料 (碳纳米管、纳米线)	- 高长宽比 - 优越的电学/光学特性 - 表面可修饰以增强靶向性 - 良好的生物相容性	- 靶向药物递送 - 生物传感器 (早期肿瘤标志物检测) - 电化学应用 (如肿瘤微环境监测)	- 长期安全性未明确 - 可能引发细胞毒性或免疫反应 - 大规模生产困难, 成本较高
二维纳米材料 (石墨烯、氮化硼)	- 二维层状结构 - 高力学强度、光热效应 - 表面可功能化 - 良好的药物负载能力	- 光热/光动力治疗 - 增强药物穿透性 (克服生物屏障) - 靶向药物载体	- 体内稳定性较差, 易聚集 - 光热效应可能损伤正常组织 - 合成工艺复杂, 成本较高
三维纳米材料 (PLGA 纳米颗粒、 纳米胶囊)	- 复杂三维结构 - 高比表面积, - 可负载多种药物 - 生物降解性(如 PLGA) - 模拟肿瘤微环境	- 药物缓释/控释系统 - 联合治疗 (化疗+免疫治疗) - 肿瘤微环境调控及 - 模型构建	- 制备工艺复杂, 一致性难以保证 - 个体差异影响疗效 - 长期代谢途径及毒性需进一步验证

3.2. 影像学应用

在影像学应用方面, 纳米材料为消化道肿瘤的早期诊断和监测提供了重要的工具。纳米颗粒因其独特的光学和磁学特性, 可以作为对比剂, 增强影像学成像的清晰度和灵敏度。研究发现, 某些金属纳米颗粒及其复合材料在 X 射线成像中展现出优异的对比效果, 能够提高肿瘤的可视化程度[9]。此外, 量子点等纳米材料也被应用于荧光成像, 能够实时监测肿瘤细胞的生物标志物, 提供动态的肿瘤发展信息, 从而指导临床决策[1] [10]。这些先进的影像技术不仅提高了肿瘤的发现率, 同时也为个性化治疗提供了重要依据。

3.3. 免疫治疗

纳米材料在免疫治疗中的应用同样值得关注。最新的研究显示, 纳米颗粒可以作为免疫调节剂, 增强机体对消化道肿瘤的免疫反应。例如, 某些固体肿瘤中, 利用纳米材料促进抗肿瘤疫苗的递送, 能够显著提高免疫系统对肿瘤细胞的识别和攻击能力[3] [9]。此外, 利用纳米材料靶向肿瘤微环境中的免疫抑制细胞, 能够有效恢复和增强 T 细胞的功能, 从而提高免疫治疗的疗效[8] [11]。这些新兴的纳米材料为消化道肿瘤的免疫治疗提供了新的思路和方法, 展现出良好的临床转化潜力。整体来看, 纳米材料在消化道肿瘤的治疗中不仅提供了多种作用机制, 也为未来的临床应用奠定了基础。

4. 基础研究中的纳米材料应用

4.1. 体外实验研究

体外实验是评估纳米材料在消化道肿瘤治疗中应用的重要步骤。近年来, 研究者们广泛探索了多种类型的纳米材料在体外环境中的效果。例如, 聚合物纳米颗粒因其优良的生物相容性和药物载运能

力而受到关注。研究表明, 聚合物纳米颗粒能够有效靶向癌症干细胞, 从而提高消化道恶性肿瘤的治疗效果[12]。此外, 应用纳米材料的化学特性, 可以设计出刺激响应型药物递送系统, 这些系统能够在特定的生理条件下释放药物, 从而提高药物的靶向性和有效性[3]。在体外实验中, 纳米材料的大小、形状及表面特性均显著影响其对肿瘤细胞的相互作用与药物释放行为。例如, 较大尺寸的纳米颗粒在与肿瘤细胞的结合和内吞过程中表现出更强的效果, 这为未来的治疗策略提供了重要的参考依据[13]。

4.2. 动物模型研究

动物模型在研究纳米材料的治疗效果及其机制中扮演着至关重要的角色。通过在小鼠等动物身上进行实验, 研究者能够更真实地模拟人类的生理反应和病理变化。多项研究显示, 纳米材料不仅能够有效减少肿瘤体积, 还能改善动物的生存率。例如, 采用改性纳米颗粒的实验表明, 能够通过靶向释放药物显著提高肿瘤细胞的凋亡率, 从而抑制肿瘤生长[7]。此外, 有研究报道了利用纳米材料作为放射保护剂, 能够有效减轻放疗引起的肠道损伤, 进而提高小鼠的生存率和生活质量[10]。这些动物模型研究为纳米材料在消化道肿瘤治疗中的临床转化提供了坚实的基础。

4.3. 机制探讨

纳米材料在消化道肿瘤治疗中的机制探讨主要集中在其对肿瘤微环境的影响及其药物释放和靶向能力上。研究表明, 纳米材料能够通过改变肿瘤微环境中的生物信号, 促进肿瘤细胞的凋亡和抑制增殖。例如, 某些纳米材料能够通过调节肠道微生物群的平衡, 降低肿瘤的发生率和进展速度, 这为肿瘤治疗提供了一种新的思路[14]。此外, 纳米材料的表面功能化技术使其能够在特定的生理条件下释放药物, 从而提高治疗的精准性和有效性。研究者们通过构建多功能纳米载体, 实现了对药物的精准输送和释放, 这一过程涉及复杂的细胞信号传导机制, 未来的研究将进一步揭示这些机制的详细过程[9]。整体来看, 纳米材料的多样性和可控性为消化道肿瘤的治疗提供了新的可能性, 未来的研究需要在基础机制与临床转化之间架起桥梁, 以推动纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用。

5. 临床转化的现状

在纳米材料应用于消化道肿瘤治疗的临床转化方面, 当前的研究进展显示出积极的趋势, 但仍面临诸多挑战。消化道肿瘤, 尤其是胃肠道间质瘤和结直肠癌, 具有较高的发病率和死亡率, 这促使研究者们探索纳米技术在这些肿瘤治疗中的应用。纳米材料的独特优势, 如高效的药物负载能力、安全性及靶向特性, 使其在消化道肿瘤的治疗中展现出良好的前景[9]。然而, 纳米材料在临床应用中的转化仍存在多个障碍, 包括高成本、临床试验数量不足及审批周期较长等问题。

5.1. 临床试验进展

在临床试验方面, 针对消化道肿瘤的纳米材料相关研究逐渐增多。研究表明, 生物纳米材料作为多功能药物传递系统, 能够有效克服治疗抵抗, 提高治疗效果[1]。然而, 当前临床试验的数量仍显不足, 且大多数研究处于早期阶段, 缺乏大规模的随机对照试验以验证其临床有效性和安全性。此外, 现有的临床试验多集中于特定类型的纳米材料, 如有机和无机纳米材料, 且在不同肿瘤类型中的适用性和效果尚需进一步研究和验证[9]。因此, 未来临床试验应注重纳米材料的多样化应用和大规模样本的效果评估, 以推动其向临床应用转化。

5.2. 成功案例分析

成功案例的分析为纳米材料在消化道肿瘤治疗中的临床应用提供了重要的参考。例如, 某些研究已

显示聚合物基纳米载体在结直肠癌药物递送中的有效性，能够显著提高药物的生物利用度和靶向性[2]。此外，针对胃肠道间质瘤的研究显示，纳米材料在靶向药物递送和模型肿瘤微环境构建中展现出良好的应用潜力。这些成功案例不仅验证了纳米材料在消化道肿瘤治疗中的有效性，也为将其推广至更广泛的临床应用奠定了基础。然而，尽管有这些成功的实例，临床转化的规模和速度仍然相对缓慢，仍需更多的临床数据支持。

5.3. 监管与伦理问题

在纳米材料的临床应用中，监管与伦理问题也不可忽视。由于纳米材料的特殊性质，其安全性评估和风险管理相较于传统药物更加复杂。目前，许多国家和地区尚未建立完善的纳米技术监管框架，导致纳米药物的上市审批过程较为缓慢。此外，伦理问题也随之而来，例如患者知情同意、临床试验的公平性和透明度等，这些都需要在未来的研究和实践中得到妥善处理。为此，建立合理的监管政策和伦理标准，将有助于加速纳米材料在消化道肿瘤治疗中的临床应用，促进研究成果的转化与应用。

6. 面临的挑战

纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用正在逐步发展，然而其临床转化过程中仍面临多重挑战。这些挑战包括安全性与毒性问题、制备与规模化生产的难题以及临床应用中个体差异的影响。解决这些问题对于实现纳米材料在消化道肿瘤治疗中的广泛应用至关重要。

6.1. 安全性与毒性问题

纳米材料的应用在肿瘤治疗中展现出良好的前景，但其安全性与毒性问题引发了广泛关注。由于纳米材料的尺寸微小，其在体内的行为与传统药物有所不同，可能导致意想不到的生物相互作用。例如，纳米颗粒可能在体内累积，进而引发毒性反应。这些反应可能包括细胞毒性、免疫反应以及对器官的损害等。因此，评估纳米材料的生物相容性和毒性是临床应用前不可或缺的一步。在一项研究中，作者探讨了生物纳米材料在消化道间质瘤治疗中的潜力，同时也指出了其在安全性方面的挑战，强调了在进行临床试验前需要进行深入的毒理学研究以确保患者的安全[1]。

6.2. 制备与规模化生产

纳米材料的制备与规模化生产是另一个巨大的挑战。尽管实验室中能够成功合成多种纳米材料，但在大规模生产时往往面临诸多技术难题。制备过程中的一致性、稳定性及其在生物环境中的表现都是需要考虑的关键因素。例如，某些纳米材料在生物体内的稳定性可能不如在实验室条件下的理想，这使得其临床应用受到限制。此外，纳米材料的生产成本也可能影响其临床转化的可行性。为了解决这些问题，研究者们正在探索新型的合成方法，如使用天然高分子(如海藻酸盐)作为基底，以提高纳米材料的生物相容性和生物可利用性[2]。这类材料不仅具备良好的药物递送能力，还能在制备过程中降低成本，提高生产效率。

6.3. 临床应用的个体差异

在临床应用中，个体差异对纳米材料治疗效果的影响也是一个不容忽视的问题。患者的遗传背景、肿瘤类型及其生物学特性、药物代谢能力等因素都会影响纳米材料的治疗效果。不同患者对同一纳米治疗的反应可能存在明显差异，这使得个体化治疗的必要性日益凸显。因此，未来的研究需要更多地关注如何根据患者的特征调整纳米材料的使用方案，以实现最佳的治疗效果。此外，个体差异也要求在临床试验设计中采取更为灵活的策略，以便在不同患者群体中评估纳米材料的安全性和有效性。通过深入了

解这些个体差异，研究者能够更好地优化纳米材料的设计和应用，进而提高其在消化道肿瘤治疗中的临床效果。

7. 未来发展方向

7.1. 新型纳米材料的研发

在纳米材料的研究中，新型纳米材料的研发是一个重要的未来方向。随着对纳米技术的深入研究，研究者们发现，生物纳米材料(Bio-nanomaterials)在药物递送和肿瘤微环境建模方面展现出巨大的潜力。这些材料不仅能够提高药物的生物利用度，还能够实现靶向药物递送，从而克服治疗耐药性，提高治疗效果[1]。另外，基于海藻酸盐的微纳米系统因其优良的生物相容性和环境友好性，已被广泛应用于癌症治疗中，尤其是在药物的控释和靶向递送方面展现出良好的前景[2]。未来的研究将需要关注这些新型纳米材料的合成、功能化以及其在临床应用中的有效性和安全性。

7.2. 多模态治疗策略

多模态治疗策略在消化道肿瘤的治疗中正日益受到关注。传统的单一治疗方法常常无法有效应对肿瘤的复杂性，因而结合不同的治疗手段以实现协同效应成为一种趋势。近年来，基于纳米材料的多模态治疗策略，如光热疗法、化学疗法和生物免疫疗法等，显示出显著的治疗潜力。例如，利用刺激响应型药物递送系统(DDSs)可以根据肿瘤微环境的变化，选择性释放药物，从而提高治疗效果并降低副作用[3]。此外，针对癌症干细胞的聚合物纳米颗粒也展示了靶向消化道恶性肿瘤的能力，这为未来的多模态治疗策略提供了新的思路[12]。

7.3. 跨学科合作的必要性

消化道肿瘤的治疗涉及生物医学、材料科学、临床医学等多个学科，因此跨学科合作显得尤为重要。不同领域的专家可以共同研发新型纳米材料，以满足临床需求。例如，纳米材料的生物相容性和生物降解性是其应用于医学的关键因素，这需要材料科学家的深入研究和验证[7]。此外，临床医生的反馈可以为基础研究提供实际的指导，帮助科学家们更好地理解肿瘤的生物特性，从而推动新疗法的临床转化。综上所述，建立跨学科的合作机制，将为消化道肿瘤的治疗带来新的机遇和挑战，促进纳米技术在这一领域的快速发展。

8. 总结和展望

在消化道肿瘤治疗领域，纳米材料的引入带来了显著的创新与进步。尽管胃肠道间质瘤(GIST)在所有消化道肿瘤类型中所占比例较小，但其复杂的临床表现与预后引起了广泛的关注。近年来，生物纳米材料的研究已逐渐成为焦点，这些材料被视为有前景的多功能药物递送平台，通过精准靶向治疗来克服传统治疗方法中存在的耐药性问题。相关研究证明，纳米材料不仅能有效提升药物的生物利用率，同时还能优化药物释放特性，从而增强治疗效果。

海藻酸盐凭借出色的生物相容性和环境友好性，成为纳米系统设计中的关键成分。研究显示，基于海藻酸盐的微纳系统能有效封装抗癌药物，提高其在消化道中的稳定性及药代动力学特性，为肿瘤的光热、光动力及化学动力疗法开辟了新途径。这些进展显现了纳米材料在消化道肿瘤治疗中的巨大潜力，但仍面临许多挑战，例如材料合成的优化及其临床转化的相关研究。未来的研究应当着重于深入开发和评估基于纳米材料的治疗策略，以促进实验室成果向临床应用的有效转化。特别是在消化道肿瘤的治疗上，纳米技术的整合被视为可以显著提升患者预后的重要手段。未来的临床试验应优先关注纳米材料在实际

应用中的安全性和有效性,尤其是在处理 GIST 等复杂疾病时的情况。此外,关于藻酸盐等生物材料的进一步研究也应被重视,特别是在提升药物的粘附性、穿透性及其在肿瘤靶向治疗中的效果等方面。未来的研究不仅要聚焦于纳米系统的设计,还应重视其在胃肠道环境中所需的稳定性、药物溶解度和生物降解性等关键参数的考量。通过这些努力,研究人员能够更有效地应对当前治疗中面临的挑战,助力于实现更为精准和有效的肿瘤治疗方案。因此,纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用前景堪忧,但需要持续的研究和临床验证,以充分展示其潜在价值。

随着纳米科技的快速发展,纳米材料在消化道肿瘤治疗中的潜力逐渐显露,成为当前研究的热点。纳米材料因其独特的物理化学特性,如较大的比表面积、优异的生物相容性和可调节的药物释放特性,提供了新的治疗思路 and 手段。通过靶向药物释放、增强药物的生物利用率以及减少副作用,纳米材料有望显著改善消化道肿瘤的治疗效果。尽管如此,当前关于纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用研究仍面临诸多挑战。首先,安全性问题是一个不可忽视的因素。纳米材料的生物相容性和毒性尚未完全明了,特别是在长期应用中,其对人体的潜在风险仍需深入探讨。研究者们需在材料的选择、合成工艺及其在生物体内的代谢途径等方面进行更加系统的评估。其次,纳米材料的有效性问题也不容忽视。虽然已有多项研究表明纳米材料在体外实验中展现出良好的抗肿瘤活性,但在临床转化过程中,如何确保其在体内的有效性和稳定性仍是一个重大挑战。未来的研究应聚焦于优化纳米材料的设计,以提升其在肿瘤微环境中的靶向性和释放效率,确保治疗效果的可持续性。此外,临床转化能力的不足也是制约纳米材料应用的关键因素。尽管实验室研究的结果令人鼓舞,但要将这些成果成功转化为临床疗法,需要克服许多技术和监管方面的障碍。研究者们应与临床医师紧密合作,进行多学科交叉研究,以推动纳米材料的临床试验进程。

未来研究应重点开发针对消化道肿瘤微环境特征(如低氧、酸性 pH)的微环境响应型纳米材料,以实现时空特异性药物释放。通过设计克服生物屏障的策略(如黏膜穿透增强剂)以及与免疫治疗(如靶向肿瘤新抗原的纳米疫苗)或基因治疗(如 CRISPR-Cas9 递送系统)的协同作用,可显著提升治疗精准性。同时,整合多模态联合疗法(如光热-化疗-免疫联合治疗)并建立标准化生产流程,将加速临床转化进程。跨学科合作(如结合人工智能驱动的材料设计)和灵活的监管框架,是解决生物相容性、规模化生产及个体化疗效等挑战的关键。这些进展有望推动纳米技术转化为临床可行的解决方案,最终改善消化道肿瘤患者的预后。通过对现有研究的全面审视,结合最新的技术进展,寻找最佳的解决方案,推动纳米材料的临床应用。展望未来,纳米材料在消化道肿瘤治疗中的应用前景依然广阔。随着技术的不断进步和研究的深入,有望克服现有的挑战,实现纳米材料的安全、高效的临床应用。唯有在安全性、有效性及临床转化能力三者之间找到良好的平衡,才能推动纳米材料在消化道肿瘤治疗中的实际应用,造福更多患者。随着研究的不断进展,我们期待在不久的将来,纳米材料能够为消化道肿瘤的治疗带来新的突破。

基金项目

国家自然科学基金(82402898, 陈洪让), 安徽省转化医学研究项目(2023zhyx-C51, 陈洪让), 安徽省弘德善医医学发展和医疗救助基金会临床科研发展专项基金(KYZX2024004, 陈洪让)。

参考文献

- [1] Gabellone, S., Vanni, S., Fausti, V., Misericocchi, G., Liverani, C., Spadazzi, C., *et al.* (2024) Exploring Nanotechnology Solutions for Improved Outcomes in Gastrointestinal Stromal Tumors. *Heliyon*, **10**, e40596. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40596>
- [2] Iravani, S. and Varma, R.S. (2022) Alginate-Based Micro- and Nanosystems for Targeted Cancer Therapy. *Marine Drugs*, **20**, Article No. 598. <https://doi.org/10.3390/md20100598>

-
- [3] Zhang, S., Zhang, H., Song, P., Wang, D. and Wang, Y. (2023) Colorectal Cancer Therapy Mediated by Nanomedicines. *Chemical Communications*, **59**, 4423-4435. <https://doi.org/10.1039/d2cc06212g>
- [4] Kanaoujiya, R., Porwal, D. and Srivastava, S. (2022) Applications of Nanomaterials for Gastrointestinal Tumors: A Review. *Frontiers in Medical Technology*, **4**, Article ID: 997123. <https://doi.org/10.3389/fmedt.2022.997123>
- [5] Wang, Y., Gou, K., Guo, X., Ke, J., Li, S. and Li, H. (2021) Advances in Regulating Physicochemical Properties of Mesoporous Silica Nanocarriers to Overcome Biological Barriers. *Acta Biomaterialia*, **123**, 72-92. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.01.005>
- [6] Wu, Z., Setyawati, M.I., Lim, H.K., Ng, K.W. and Tay, C.Y. (2022) Nanoparticle-Induced Chemoresistance: The Emerging Modulatory Effects of Engineered Nanomaterials on Human Intestinal Cancer Cell Redox Metabolic Adaptation. *Nanoscale*, **14**, 14491-14507. <https://doi.org/10.1039/d2nr03893e>
- [7] Sun, R., Chen, Y., Pei, Y., Wang, W., Zhu, Z., Zheng, Z., *et al.* (2024) The Drug Release of PLGA-Based Nanoparticles and Their Application in Treatment of Gastrointestinal Cancers. *Heliyon*, **10**, e38165. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38165>
- [8] Liu, B., Gao, X. and Piao, Y. (2024) Mapping the Intellectual Structure and Emerging Trends for the Application of Nanomaterials in Gastric Cancer: A Bibliometric Study. *World Journal of Gastrointestinal Oncology*, **16**, 2181-2199. <https://doi.org/10.4251/wjgo.v16.i5.2181>
- [9] Li, M., Li, N., Piao, H., Jin, S., Wei, H., Liu, Q., *et al.* (2025) Nanomaterials for Targeted Drug Delivery for Immunotherapy of Digestive Tract Tumors. *Frontiers in Immunology*, **16**, Article ID: 1562766. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1562766>
- [10] Zheng, C., Niu, M., Kong, Y., Liu, X., Li, J., Gong, X., *et al.* (2024) Oral Administration of Probiotic Spore Ghosts for Efficient Attenuation of Radiation-Induced Intestinal Injury. *Journal of Nanobiotechnology*, **22**, Article No. 303. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02572-8>
- [11] Kanagavalli, P. and Eissa, S. (2024) Exploring Various Carbon Nanomaterials-Based Electrodes Modified with Polymelamine for the Reagentless Electrochemical Immunosensing of Claudin18.2. *Biosensors and Bioelectronics*, **259**, Article ID: 116388. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116388>
- [12] Sun, Y., Li, B., Cao, Q., Liu, T. and Li, J. (2022) Targeting Cancer Stem Cells with Polymer Nanoparticles for Gastrointestinal Cancer Treatment. *Stem Cell Research & Therapy*, **13**, Article No. 489. <https://doi.org/10.1186/s13287-022-03180-9>
- [13] Lin, Y., Deng, H., Deng, F., Yao, S., Deng, X., Cheng, Y., *et al.* (2024) Remodeling of Intestinal Epithelium Derived Extracellular Vesicles by Nanoparticles and Its Bioeffect on Tumor Cell Migration. *Journal of Controlled Release*, **365**, 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.11.011>
- [14] Zang, J., Yin, F., Liu, Z., Li, F. and Zhang, Y. (2024) Bacteria-Tumor Symbiosis Destructible Novel Nanocatalysis Drug Delivery Systems for Effective Tumor Therapy. *Nanomedicine*, **20**, 305-318. <https://doi.org/10.1080/17435889.2024.2443388>