

溃疡性结肠炎的纳米治疗策略：前沿研究与临床应用

刘汝冰*, 孙尚国, 许克伟, 史红岩, 陈燕, 盛淑婷

阜阳师范大学附属阜南医院消化内科, 安徽 阜阳

收稿日期: 2025年5月5日; 录用日期: 2025年5月28日; 发布日期: 2025年6月6日

摘要

溃疡性结肠炎(UC)是一种慢性炎症性肠病,严重影响患者的生活质量。近年来,纳米技术的迅速发展为UC的治疗带来了新的希望。当前研究显示,纳米药物递送系统能够有效提高药物在肠道的生物利用度,纳米材料则展现出显著的抗炎特性,帮助缓解炎症反应。此外,纳米技术在生物标志物的检测中也显示出良好的应用潜力,能够实现更早期和更精确的疾病监测。尽管纳米策略在UC管理中展现出诸多优势,但仍面临一些挑战,如纳米材料的安全性和生物相容性等问题。本文旨在综述当前纳米技术在溃疡性结肠炎研究中的进展,探讨其可能的临床应用及未来研究方向,以期对溃疡性结肠炎的治疗提供新的思路和方法。

关键词

溃疡性结肠炎, 纳米技术, 纳米药物递送, 抗炎, 生物标志物

Nanotherapeutic Approaches for Ulcerative Colitis: Frontier Research and Clinical Application

Rubing Liu*, Shangguo Sun, Kewei Xu, Hongyan Shi, Yan Chen, Shuting Sheng

Department of Gastroenterology, Affiliated Funan Hospital of Fuyang Normal University, Fuyang Anhui

Received: May 5th, 2025; accepted: May 28th, 2025; published: Jun. 6th, 2025

Abstract

Ulcerative colitis (UC) is a chronic inflammatory bowel disease that significantly impacts patients'

*通讯作者。

文章引用: 刘汝冰, 孙尚国, 许克伟, 史红岩, 陈燕, 盛淑婷. 溃疡性结肠炎的纳米治疗策略: 前沿研究与临床应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(6): 338-347. DOI: 10.12677/acm.2025.1561731

quality of life. In recent years, the rapid advancement of nanotechnology has brought new hope for UC treatment. Current studies demonstrate that nanodrug delivery systems can effectively enhance the bioavailability of therapeutics in the intestinal tract, while nanomaterials exhibit remarkable anti-inflammatory properties to alleviate inflammatory responses. Moreover, nanotechnology shows promising potential in biomarker detection, enabling earlier and more precise disease monitoring. Despite the advantages of nanotherapeutic strategies in UC management, challenges remain, including concerns regarding the safety and biocompatibility of nanomaterials. This review aims to summarize recent progress in nanotechnology-driven UC research, explore its potential clinical applications, and propose future directions, with the goal of providing novel strategies and approaches for UC therapy.

Keywords

Ulcerative Colitis, Nanotechnology, Nanodrug Delivery, Anti-Inflammatory, Biomarkers

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. 前言

溃疡性结肠炎(UC)是一种慢性炎症性肠病, 主要特征为结肠黏膜的反复炎症和溃疡形成, 严重影响患者的生活质量。尽管目前的治疗方案包括抗炎药物、免疫抑制剂和生物制剂等, 但这些常规疗法往往伴随着疗效有限和显著的副作用。因此, 寻找更有效的治疗策略成为了医学研究的重要方向。近年来, 纳米技术的发展为溃疡性结肠炎的治疗提供了新的希望, 通过设计和开发多种纳米药物递送系统, 能够改善药物在肠道中的稳定性和生物利用度, 从而增强治疗效果。

研究表明, 传统的溃疡性结肠炎治疗药物在肠道内的降解速度较快, 且生物利用度低, 这限制了它们的临床应用。例如, CX5461 作为一种抗自身免疫疾病的药物, 其临床应用因溶解度低和靶向性不足而受到限制。最新研究开发的以黄芪提取物为基础的纳米囊泡(SFELNVs), 成功实现了 CX5461 的口服递送, 显著提高了药物浓度并减少了炎症反应[1]。此外, 功能性碳点(MML-CDs)也表现出了良好的抗氧化能力和生物相容性, 能够有效缓解溃疡性结肠炎症状, 并调节肠道微生物群的失调[2]。

纳米药物递送系统的一个重要优势在于其能够利用肠道炎症区域的特性进行靶向递送。研究者们探索了多种以纳米粒子为基础的给药系统, 包括响应性纳米载体, 这些载体能够在特定环境条件下释放药物, 进而实现精准治疗。例如, 使用 pH 响应性和反应性氧种(ROS)响应性纳米粒子可以确保药物在到达炎症部位后再释放, 从而提高药物的局部浓度和疗效[3]。纳米药物递送系统在 UC 治疗中展现出独特优势, 然而其作用机制和临床应用价值仍有深入挖掘的空间。从作用机制来看, 除了利用肠道炎症区域特性进行靶向递送以及智能释放机制外, 纳米载体与肠道上皮细胞的相互作用方式也值得深入探讨。研究发现, 某些纳米载体能够通过与肠道上皮细胞表面的特定受体结合, 以胞吞的方式进入细胞内部, 实现药物的精准释放, 这种主动靶向机制相较于被动靶向(如 EPR 效应), 能更有效地将药物运输至病灶部位。

此外, 关于中药成分与纳米载体结合的研究也显示出良好的前景。中药成分因其低溶解度和生物利用度限制了其在临床中的应用, 而纳米药物递送系统(NDDS)可以显著提高这些成分的稳定性和生物利用度, 为中药在治疗溃疡性结肠炎中的应用提供了新可能[4]。例如, 纳米复合物能够有效修复结肠上皮屏障并调节炎症微环境, 展现出良好的治疗效果。

综上所述, 纳米技术在溃疡性结肠炎的治疗中展现出了广阔的应用前景。通过开发新型的纳米药物递送系统, 能够有效克服传统疗法的局限性, 提供更精准和个体化的治疗方案。未来的研究应继续探索不同纳米材料的应用潜力, 以实现更好的临床效果。

2. 纳米药物递送系统在溃疡性结肠炎中的应用

近年来, 纳米药物递送系统(NDDS)在溃疡性结肠炎(UC)治疗中显现出广阔的应用前景。溃疡性结肠炎是一种慢性、特发性的炎症性肠病, 表现为肠道的持续性炎症, 给患者的生活质量带来了严重影响。传统的治疗方法如抗炎药、免疫抑制剂和抗生素等, 虽然有效, 但常伴有系统性副作用, 且在精确定位炎症区域方面存在挑战。因此, 纳米技术被认为是解决这一问题的有效途径, 它可以利用纳米颗粒的独特物理化学性质, 实现对肠道炎症区域的精准靶向药物递送[5]。

2.1. 纳米载体的类型与特性

纳米载体有多种类型, 包括脂质体、聚合物纳米颗粒、无机纳米颗粒等。其中, 脂质体因其优良的生物相容性和生物降解性, 成为了热门的研究对象。聚合物纳米颗粒则能够通过调节其组成和结构, 实现对药物释放速率的控制。无机纳米颗粒如金属氧化物, 则因其独特的光学和电学性质而被广泛应用于靶向递送。研究表明, 纳米载体能够有效穿透肠道的生理屏障, 且在炎症部位具有较高的渗透性和滞留效应, 使得药物能够在病灶区域达到更高的浓度, 从而提升疗效[6]。

2.2. 药物释放机制与生物相容性

药物的释放机制对于纳米药物递送系统的疗效至关重要。纳米载体通常采用智能释放机制, 根据肠道环境(如 pH 值、温度、酶的存在等)进行药物释放。例如, 某些纳米颗粒可以在酸性环境中快速释放药物, 这对于溃疡性结肠炎患者的治疗尤为重要, 因为该病症常伴随着肠道环境的改变。此外, 良好的生物相容性是纳米载体成功应用的关键因素之一。纳米载体的材料选择和表面修饰可以显著影响其生物相容性, 研究显示, 通过改性纳米载体的表面, 可以有效降低其免疫原性, 提高其在体内的稳定性和靶向性[4]。

2.3. 临床前研究与临床试验结果

目前, 关于纳米药物递送系统在溃疡性结肠炎治疗中的临床前研究和临床试验结果逐渐增多。临床前研究表明, 利用纳米载体递送传统中药成分, 可以显著提高药物的稳定性和生物利用度, 从而增强治疗效果。此外, 已有临床试验显示, 基于纳米技术的药物递送系统在改善患者症状、减少副作用方面具有良好的效果。这些研究为未来的临床应用提供了有力的依据, 表明纳米药物递送系统在溃疡性结肠炎的治疗中具有潜在的临床应用价值, 并为推动其在实际医疗中的使用奠定了基础[7]。

在临床应用价值方面, 虽然已有部分临床试验显示出纳米药物递送系统的有效性, 但仍需更多大规模、多中心的研究来进一步验证。目前的临床试验大多样本量较小, 研究周期较短, 难以全面评估纳米药物的长期疗效和安全性。未来的研究应注重开展长期随访研究, 观察纳米药物对患者肠道微生态、免疫系统以及整体健康状况的长期影响。此外, 纳米药物递送系统在不同病情严重程度、不同年龄段和不同遗传背景的 UC 患者中的应用效果也存在差异, 深入研究这些差异, 有助于实现个性化治疗, 提高纳米药物的临床应用价值。

3. 纳米材料的抗炎特性

纳米材料因其独特的物理化学特性而在医学领域中显示出巨大的潜力, 特别是在抗炎治疗方面。溃

溃疡性结肠炎(UC)作为一种慢性炎症性肠病,其治疗面临着诸多挑战,包括药物的靶向性不足和副作用较大。近年来,研究者们致力于利用纳米材料的特性来改善 UC 的治疗效果。例如,反应性氧种(ROS)在 UC 的发病机制中起着重要作用,因此开发能够响应 ROS 的纳米材料成为一个有效的策略。这些纳米材料能够在炎症部位释放药物,从而提高治疗效果和减少全身副作用[7] [8]。

此外,纳米材料的表面功能化也为其抗炎特性提供了新的可能性。研究表明,通过将药物装载在纳米颗粒中,可以实现对特定靶点的有效靶向,进而增强药物在炎症区域的聚集。例如,利用巨噬细胞膜包裹的纳米药物可以显著提高其在炎症部位的靶向性,从而提高治疗效果[7] [9]。这些研究结果为纳米材料在抗炎治疗中的应用提供了理论支持。

3.1. 纳米颗粒的抗炎机制

纳米材料的抗炎机制较为复杂,除了传递抗炎药物、调节免疫细胞极化和调节肠道微生物组外,还涉及对细胞内信号通路的调控。以 NF- κ B 信号通路为例,纳米材料可以通过抑制该通路的激活,减少炎症因子的转录和表达,从而发挥抗炎作用。一些无机纳米颗粒,如二氧化钛纳米颗粒,能够阻断 NF- κ B 信号通路中关键蛋白的磷酸化过程,进而抑制炎症反应。此外,纳米材料的尺寸、形状和表面电荷等物理化学性质对其抗炎效果也有显著影响。研究表明,较小尺寸的纳米颗粒更容易穿透生物膜,到达炎症细胞内部发挥作用;而特定形状(如棒状)的纳米颗粒可能具有更高的靶向性和细胞摄取效率。

纳米颗粒通过多种机制发挥其抗炎作用。首先,纳米颗粒能够有效地传递抗炎药物至炎症部位,从而减轻炎症反应。例如,一些研究开发了以反应性氧种为响应的纳米颗粒,这些颗粒在炎症环境中能够释放包裹的药物,促进炎症的缓解[7] [10]。其次,纳米颗粒还能够调节免疫细胞的极化,促进 M2 型巨噬细胞的形成,从而抑制炎症因子的释放。这种机制对于 UC 的治疗至关重要,因为 UC 中 M1 型巨噬细胞的增多会加重炎症情况[8] [9]。

此外,纳米颗粒能够通过调节肠道微生物组的组成来发挥抗炎作用,恢复肠道的微生态平衡。例如,某些纳米材料能够促进有益菌的生长,抑制致病菌的繁殖,从而改善肠道的健康状态[10] [11]。这种多重作用机制使得纳米颗粒在 UC 的治疗中展现出良好的前景。

3.2. 不同纳米材料的比较分析

不同类型的纳米材料在抗炎效果和应用前景上存在显著差异。根据其成分,纳米材料可以分为无机纳米颗粒、有机纳米颗粒和混合型纳米颗粒。无机纳米颗粒如氧化锌纳米颗粒被广泛研究,显示出良好的抗氧化和抗炎特性,能够有效减轻 UC 模型小鼠的症状[12]。而有机纳米颗粒,如以乳酸-羟基乙酸共聚物(PLGA)为基础的纳米颗粒,因其良好的生物相容性和可降解性,近年来获得了广泛关注,这些颗粒能够通过靶向性释放药物来抑制炎症[3] [13]。

此外,混合型纳米材料,如结合了有机和无机成分的纳米颗粒,表现出更好的抗炎效果。例如,某些研究表明,通过将植物提取物与纳米颗粒结合,可以增强其抗炎活性和生物利用度,这为 UC 的治疗提供了新的思路[14] [15]。不同类型的纳米材料在性能和应用上具有各自的优势,其选择应根据具体的治疗需要和机制来进行。

3.3. 纳米材料在动物模型中的应用效果

在动物模型中,纳米材料的应用效果已被广泛研究,显示出其在 UC 治疗中的潜力。例如,研究人员利用反应性氧种响应的聚合物纳米颗粒对 DSS 诱导的 UC 小鼠进行治疗,结果表明,这些纳米颗粒能够有效减轻炎症,改善小鼠的临床症状和组织病理变化[14] [16]。此外,某些纳米材料能够通过靶向性释

放药物，显著提高药物在炎症部位的浓度，从而增强药效。

实验还显示，纳米颗粒不仅能改善 UC 小鼠的体重和大肠长度，还能够降低炎症标志物的水平，表明其具有良好的抗炎作用[17] [18]。此外，纳米材料的生物相容性和低毒性使其成为 UC 治疗的理想选择，未来有望进入临床应用。

综上所述，纳米材料在溃疡性结肠炎的抗炎治疗中展现出良好的应用前景，通过不同的机制发挥作用，具有显著的临床价值。随着研究的深入，纳米材料的应用将为 UC 患者提供更安全、高效的治疗选择。

4. 纳米技术在生物标志物检测中的潜力

随着纳米技术的发展，生物标志物的检测在溃疡性结肠炎(UC)的诊断和治疗监测中展现出巨大的潜力。传统的生物标志物检测方法往往面临灵敏度和特异性不足的问题，而纳米技术的引入则为这一领域带来了新的机遇。通过设计纳米传感器，研究人员可以在微小的样本量中检测到生物标志物的存在，进而提高了检测的准确性和效率。例如，利用功能化的纳米粒子，可以实现对特定生物标志物的选择性结合，从而增强信号的检测灵敏度和特异性。这种技术的应用不仅可以帮助早期诊断 UC，还可以用于监测疾病的进展和疗效评估[6] [19]。

4.1. 纳米传感器的设计与应用

纳米传感器的设计是实现高灵敏度生物标志物检测的关键。近年来，研究者们开发了多种不同类型的纳米传感器，包括基于金属纳米颗粒、量子点以及碳纳米管等材料的传感器。这些纳米传感器通过表面修饰与目标生物标志物特异结合，能够在复杂的生物样本中实现高效的信号放大。例如，HST-Arg NPs 作为一种新型的纳米载体，具有良好的抗氧化能力和生物相容性，能够在溃疡性结肠炎的炎症环境中靶向释放生物活性分子，从而实现炎症标志物的精准检测[19]。此外，纳米传感器可以通过与其他检测技术结合，如光学传感、电子传感等，进一步提高检测的灵敏度和准确度。这种多元化的检测手段为 UC 的早期诊断和个体化治疗提供了新的可能性。

4.2. 生物标志物的选择与验证

在溃疡性结肠炎的研究中，选择合适的生物标志物对纳米传感器的应用至关重要。常见的生物标志物包括炎症因子(如 $\text{TNF-}\alpha$ 、IL-6 等)、氧化应激相关分子以及肠道屏障功能的指标。在选择生物标志物时，需要考虑其在疾病发展过程中的动态变化和临床相关性。通过对这些生物标志物的验证，可以确保纳米传感器在临床应用中的可靠性和有效性。研究表明，利用纳米技术可以显著提高生物标志物检测的灵敏度和特异性，从而为临床决策提供更为准确的依据[5] [20]。

4.3. 临床应用前景与挑战

尽管纳米技术在生物标志物检测中展现了广阔的应用前景，但在实际临床应用中仍面临诸多挑战。其中，纳米材料的生物相容性及安全性是首要考虑的问题。此外，如何在复杂的生物环境中保持纳米传感器的稳定性和有效性，也是亟待解决的技术难题。同时，纳米技术的临床转化需要大量的临床试验数据支持，以证明其在实际应用中的有效性和可靠性。未来，随着纳米技术的不断进步和相关法规的完善，纳米传感器在溃疡性结肠炎的早期诊断和疗效监测中有望发挥更大的作用，为患者提供更为精准的治疗方案[4] [21]。

5. 纳米策略的优势与局限性

纳米材料在溃疡性结肠炎(UC)治疗中发挥着关键作用，对不同纳米材料进行系统比较和分析，有助

于更精准地选择和应用。无机纳米颗粒，像氧化锌纳米颗粒，其突出优势在于具备强大的抗氧化和抗炎能力，能有效减轻 UC 模型小鼠的症状。不过，部分无机纳米颗粒可能存在潜在的生物安全性风险，如在体内的长期蓄积问题，限制了其临床广泛应用。无机纳米颗粒比较适合用于短期治疗且炎症反应较为严重的 UC 患者，利用其快速抗炎的特性缓解症状。有机纳米颗粒以乳酸-羟基乙酸共聚物(PLGA)为代表，生物相容性和可降解性良好，能通过靶向释放药物抑制炎症。但它也存在药物包封率有限、释放动力学调控难度较大的缺点。有机纳米颗粒适用于对安全性要求较高、需要长期维持治疗效果的患者，可实现药物的缓慢持续释放。混合型纳米材料结合了有机和无机成分的优点，展现出更好的抗炎活性和生物利用度。例如植物提取物与纳米颗粒结合的混合型材料，能在增强抗炎效果的同时，提高生物利用度。然而，其制备工艺相对复杂，成本较高。混合型纳米材料适合病情较为复杂、单一材料难以达到理想治疗效果的 UC 患者。综上所述，不同纳米材料在 UC 治疗中各有优劣和适用范围。在实际应用时，应根据患者的具体病情、身体状况以及治疗目标，综合考虑纳米材料的特性，选择最为合适的纳米材料或其组合，以实现最佳的治疗效果。

5.1. 纳米技术的治疗优势

纳米技术在治疗溃疡性结肠炎(UC)中的应用展现了显著的优势。传统治疗往往难以有效定位药物至炎症部位，导致疗效不足。而纳米载体因其微小的尺寸和大比表面积，能显著提高药物的靶向性和生物利用度。研究表明，使用纳米载体可通过增强渗透和滞留效应(EPR 效应)在炎症区域实现药物的高效积累，从而改善治疗效果[6]。例如，利用 pH 敏感性纳米载体，可以在肠道特定的 pH 环境中释放药物，确保药物在炎症部位的选择性释放，避免对健康组织的影响[20]。此外，某些纳米系统还可以通过响应性释放机制，如反应氧种(ROS)或酶的介导，进一步增强治疗的精准性和效率[7]。这一系列纳米策略不仅提升了药物的治疗效果，还降低了传统治疗所带来的副作用，改善了患者的生活质量。

5.2. 当前研究中的局限性与风险

尽管纳米技术在溃疡性结肠炎的治疗中展现出良好前景，但其应用仍面临一些局限性和风险。首先，纳米药物的生物相容性和长期安全性尚未完全明确。在一些研究中，纳米载体可能引发免疫反应或毒性反应，影响患者的健康[22]。其次，尽管纳米技术可以改善药物的靶向性，但目前许多纳米载体在实际应用中仍存在药物释放不稳定的问题，导致药物在炎症部位的浓度不足[20]。此外，纳米材料的生产和规模化应用面临技术和经济挑战，尤其是在确保生产的一致性和可控性方面，这可能限制了其临床转化的速度和广度[23]。最后，纳米技术在监管和伦理方面也面临挑战，如何确保其安全性和有效性，仍需进一步研究和规范。

5.3. 纳米技术与其他治疗方法结合

纳米技术与其他治疗方法的联合应用为溃疡性结肠炎(UC)的治疗开辟了广阔前景，但目前仍有诸多方面值得深入探索。在联合用药方面，除了现有研究中纳米载体与单一药物的结合，未来可尝试将多种作用机制互补的药物同时搭载于纳米载体上。例如，将具有抗炎作用的药物与调节免疫功能的药物联合，借助纳米载体的靶向性，使其精准作用于炎症部位，协同发挥治疗效果，既能减轻炎症反应，又能调节机体免疫平衡，提高治疗的全面性和有效性。

在联合治疗手段上，纳米技术与光疗、热疗等物理治疗方法的结合具有巨大潜力。光热纳米材料可在近红外光照射下产生热量，实现对炎症组织的局部热疗，破坏炎症细胞，同时纳米载体还可携带药物进行同步治疗。这种联合方式不仅能增强治疗效果，还能减少药物用量，降低潜在副作用。此外，纳米

技术与基因治疗的结合也值得关注。通过纳米载体将治疗性基因精准递送至病变细胞，修复或调控异常基因表达，从根源上治疗 UC，为攻克这一难题提供新的思路。

然而，联合治疗也面临一些挑战。不同治疗方法之间的协同机制尚不明确，需要深入研究以优化联合方案。同时，联合治疗可能带来更复杂的安全性问题，如纳米材料与其他治疗手段相互作用产生的潜在风险等。未来的研究应聚焦于明确联合治疗的作用机制，开展更多的临床前和临床试验，评估其安全性和有效性，推动纳米技术与其他治疗方法联合应用在 UC 治疗中的广泛应用，为患者带来更好的治疗效果和生活质量的改善。

5.4. 未来研究方向的建议

针对溃疡性结肠炎的纳米策略，未来的研究应聚焦于几个关键方向。首先，研究应致力于开发新型的纳米药物载体，进一步提升药物的靶向性和释放控制能力。例如，结合智能生物材料和纳米技术，可以设计多响应性纳米载体，实现对多种炎症信号的精准响应[7]。其次，必须加强对纳米载体的生物相容性和长期安全性的评估，确保其在临床应用中的安全性[4]。此外，未来的研究还应关注纳米药物的临床转化，通过开展更多的临床试验来验证其有效性和安全性，为纳米技术在溃疡性结肠炎的治疗中建立更坚实的科学基础[21]。最后，研究者应积极探索纳米技术与传统治疗手段的组合策略，以实现协同增效，提升治疗效果，改善患者的整体健康状况。

6. 纳米策略的临床应用现状与展望

6.1. 现有临床应用案例分析

近年来，纳米技术在溃疡性结肠炎(UC)治疗中的应用逐渐增多，尤其是通过纳米载体系统实现药物的靶向输送。研究表明，基于纳米技术的药物输送系统能够有效改善药物的生物利用度和靶向性。例如，使用氢化脂蛋白(HDL)、低密度脂蛋白(LDL)和极低密度脂蛋白(VLDL)作为载体的环孢素 A (CycloA)制剂，在小鼠模型中显示出显著的治疗效果，能够有效减少临床活动性和炎症标志物的表达[22]。此外，针对 UC 的反应性纳米载体，如 pH 响应系统和酶响应系统，已被开发用于实现药物的选择性释放，从而降低药物在健康组织中的非特异性吸收，增强对病变区域的靶向输送[7]。这些研究表明，纳米技术在 UC 的治疗中具有良好的应用前景。

6.2. 纳米技术与其他治疗方法的结合

纳米技术的应用不仅限于单一药物的递送，还可以与其他治疗方法相结合，提高治疗效果。例如，将小干扰 RNA (siRNA)与聚合物微米胶囊结合使用，能够有效靶向炎症部位，并减少炎症相关细胞因子的生成，从而改善 UC 的病理状况[24]。这种多重治疗策略的结合，能够利用纳米载体的特性，增强药物的生物相容性和靶向性，进而提高治疗效果。此外，纳米技术结合传统中药成分的研究也在进行中，表明纳米载体可以显著提高中药成分的溶解性和生物利用度，显示出治疗 UC 的潜力[4]。

6.3. 未来临床应用的前景与挑战

尽管纳米技术在 UC 治疗中展现出许多优势，但仍面临一些挑战。首先，尽管纳米载体能够改善药物的靶向性，却仍需解决其在体内的稳定性和释放速率问题，以确保药物能够在炎症区域有效释放[20]。其次，纳米材料的生物相容性和安全性仍需进一步评估，以降低潜在的毒性反应。此外，临床转化过程中，如何将实验室研究成果推广到实际应用中，也是一项重要挑战。未来的研究需要集中在纳米载体的优化设计、联合疗法的开发以及临床试验的设计上，以推动纳米技术在 UC 治疗中的广泛应用。通过克

服这些挑战，纳米策略有望在溃疡性结肠炎的治疗中发挥更大的作用，改善患者的生活质量。

7. 总结和讨论

纳米技术的引入为溃疡性结肠炎的治疗开辟了新的前景，其独特的药物递送系统、增强的抗炎效果以及早期检测能力使其在临床应用中展现出巨大的潜力。随着纳米材料和技术的发展，研究者们正在积极探索如何将这些创新应用于溃疡性结肠炎的管理中。

一个显著的优势是，纳米技术能够改善药物的靶向递送。这意味着药物可以更精准地作用于病变组织，从而减少副作用并提高治疗效果。这一特点无疑为慢性疾病的治疗提供了新的思路，尤其是对于那些反复发作、难以控制的溃疡性结肠炎患者。此外，纳米材料的应用能增强药物的生物相容性，使得药物在体内的稳定性和释放效率得到显著提升，这对于提高患者的依从性和生活质量至关重要。

然而，尽管纳米技术展现出了诸多优势，相关研究仍面临不少挑战。当前的研究多集中于实验室阶段，临床试验的数量相对较少。这就要求我们在未来的研究中，深入探讨纳米技术在临床应用中的实际效果及其安全性。尤其是在涉及到长期使用和不同患者群体的情况下，纳米材料的潜在毒性和生物累积效应都需要进行详细评估。此外，纳米技术的标准化和生产工艺的完善也是推广应用时必须面对的重要问题。

在平衡不同研究结果的过程中，学术界需重视不同研究之间的相互关系与补充。一方面，已有研究为我们提供了纳米技术在溃疡性结肠炎管理中的初步证据；另一方面，新的研究成果也可能对先前的结论提出质疑或补充。这种动态的研究环境要求研究者们保持开放的态度，积极交流和分享数据，从而推动这一领域的进步。

未来的研究方向应集中于如何将纳米技术与现有的治疗方法进行有效整合。通过多学科的合作，结合药物化学、生物工程和临床医学等领域的最新进展，可以探索出更为综合的治疗方案。这不仅有助于提高药物的疗效，也能为患者提供个性化的治疗选择，从而改善整体的治疗体验。

综上所述，纳米技术在溃疡性结肠炎的治疗中，尽管面临一些挑战和局限性，但其潜力不容忽视。通过持续的研究和临床验证，纳米技术有望成为未来溃疡性结肠炎治疗的重要组成部分，为患者带来更有效的治疗选择，提升其生活质量。

基金项目

安徽省卫健委科研项目(AHWJ2024Ab0161, 刘汝冰)。

参考文献

- [1] Zhang, M., Xu, X., Su, L., Zeng, Y., Lin, J., Li, W., *et al.* (2024) Oral Administration of *Sophora flavescens*-Derived Exosomes-Like Nanovesicles Carrying CX5461 Ameliorates DSS-Induced Colitis in Mice. *Journal of Nanobiotechnology*, **22**, Article No. 607. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02856-z>
- [2] Wu, T., Bai, X., Zhang, Y., Dai, E., Ma, J., Yu, C., *et al.* (2024) Natural Medicines-Derived Carbon Dots as Novel Oral Antioxidant Administration Strategy for Ulcerative Colitis Therapy. *Journal of Nanobiotechnology*, **22**, Article No. 511. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02702-2>
- [3] Shrestha, P., Duwa, R., Lee, S., Kwon, T.K., Jeong, J. and Yook, S. (2024) ROS-Responsive Thioketal Nanoparticles Delivering System for Targeted Ulcerative Colitis Therapy with Potent HDAC6 Inhibitor, Tubastatin A. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, **201**, Article 106856. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2024.106856>
- [4] Gao, C., Yang, Z., Song, R., Sheng, H. and Zhu, L. (2025) Nanotechnology-Based Drug Delivery System for Targeted Therapy of Ulcerative Colitis from Traditional Chinese Medicine: A Review. *International Journal of Pharmaceutics*, **673**, Article 125375. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125375>
- [5] Hu, S., Zhao, R., Xu, Y., Gu, Z., Zhu, B. and Hu, J. (2024) Orally-Administered Nanomedicine Systems Targeting Colon Inflammation for the Treatment of Inflammatory Bowel Disease: Latest Advances. *Journal of Materials Chemistry B*,

- 12, 13-38. <https://doi.org/10.1039/d3tb02302h>
- [6] Ardekani, Z.M., Lorenzo-Leal, A.L. and Bach, H. (2024) Nanomedicine-Mediated Drug Delivery for Potential Treatment of Inflammatory Bowel Disease: A Narrative Review. *Nanomedicine*, **19**, 163-179. <https://doi.org/10.2217/nnm-2023-0267>
- [7] Chen, M., Lan, H., Jin, K. and Chen, Y. (2023) Responsive Nanosystems for Targeted Therapy of Ulcerative Colitis: Current Practices and Future Perspectives. *Drug Delivery*, **30**, Article 2219427. <https://doi.org/10.1080/10717544.2023.2219427>
- [8] Ma, L., Lyu, W., Song, Y., Chen, K., Lv, L., Yang, H., *et al.* (2023) Front Cover: Anti-Inflammatory Effect of *Clostridium butyricum*-Derived Extracellular Vesicles in Ulcerative Colitis: Impact on Host MicroRNAs Expressions and Gut Microbiome Profiles. *Molecular Nutrition & Food Research*, **67**, Article 2370029. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202370029>
- [9] Sun, T., Kwong, C.H.T., Gao, C., Wei, J., Yue, L., Zhang, J., *et al.* (2020) Amelioration of Ulcerative Colitis via Inflammatory Regulation by Macrophage-Biomimetic Nanomedicine. *Theranostics*, **10**, 10106-10119. <https://doi.org/10.7150/thno.48448>
- [10] Jia, Z., Yu, M., Wang, W., Ghazimirsaeid, S., Qu, Y. and Zhang, M. (2024) An Oxidative Cleavage-Based Cruciform DNA Nanostructure for *in Vivo* Hypochlorous Acid Visualization to Monitor Intestinal Inflammation. *Analytical Chemistry*, **96**, 9621-9628. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c01272>
- [11] Kan, L., Zheng, Z., Fu, W., Ma, Y., Wang, W., Qian, H., *et al.* (2024) Recent Progress on Engineered Micro/Nanomaterials Mediated Modulation of Gut Microbiota for Treating Inflammatory Bowel Disease. *Journal of Controlled Release*, **370**, 43-65. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.04.014>
- [12] Govindarasu, M., Vaiyapuri, M. and Kim, J. (2024) Protective Effect of Zinc Oxide Nanoparticles Synthesized Using *Cassia alata* for DSS-Induced Ulcerative Colitis in Mice Model. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **47**, 1393-1407. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03047-8>
- [13] Gao, S., Zheng, H., Xu, S., Kong, J., Gao, F., Wang, Z., *et al.* (2023) Novel Natural Carrier-Free Self-Assembled Nanoparticles for Treatment of Ulcerative Colitis by Balancing Immune Microenvironment and Intestinal Barrier. *Advanced Healthcare Materials*, **12**, Article 2301826. <https://doi.org/10.1002/adhm.202301826>
- [14] Zhao, X., Zhang, Y., Wang, P., Liu, K., Zheng, Y., Wen, J., *et al.* (2024) Layer by Layer Self-Assembled Hyaluronic Acid Nanoarmor for the Treatment of Ulcerative Colitis. *Journal of Nanobiotechnology*, **22**, Article No. 633. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02933-3>
- [15] Müller, E.K., Białas, N., Eppler, M. and Hilger, I. (2022) Nanoparticles Carrying NF- κ B P65-Specific siRNA Alleviate Colitis in Mice by Attenuating NF- κ B-Related Protein Expression and Pro-Inflammatory Cellular Mediator Secretion. *Pharmaceutics*, **14**, Article 419. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14020419>
- [16] Zhang, D., Zhu, B., Xu, Y., Luo, F., Chen, T., Chen, L., *et al.* (2025) Oleanolic Acid-Based Nanoparticles for the Treatment of Ulcerative Colitis. *Nanomedicine*, **20**, 677-690. <https://doi.org/10.1080/17435889.2025.2467019>
- [17] Zhou, S., Yu, Z., Yao, W., Wang, M., Yang, Y., Qin, J., *et al.* (2025) Pectin/Caffeic Acid Nanoparticles in a Poloxamer Thermosensitive Gel for the Treatment of Ulcerative Colitis by Inhibiting cGAS-STING Pathway. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **247**, Article 114419. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.114419>
- [18] Xiao, J., Zhou, S., Fei, F., Long, L. and Guo, C. (2025) Pectin-Loaded Ferulic Acid Nanoparticles: A Potential Therapeutic Strategy for Ulcerative Colitis via Modulation of the cGAS-STING Pathway. *Toxicology and Applied Pharmacology*, **499**, Article 117317. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2025.117317>
- [19] Chi, X., Chen, T., Luo, F., Zhao, R., Li, Y., Hu, S., *et al.* (2024) Targeted No-Releasing L-Arginine-Induced Hesperetin Self-Assembled Nanoparticles for Ulcerative Colitis Intervention. *Acta Biomaterialia*, **190**, 560-578. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.10.037>
- [20] Kumar, A., Vaiphei, K.K., Singh, N., Datta Chigurupati, S.P., Paliwal, S.R., Paliwal, R., *et al.* (2024) Nanomedicine for Colon-Targeted Drug Delivery: Strategies Focusing on Inflammatory Bowel Disease and Colon Cancer. *Nanomedicine*, **19**, 1347-1368. <https://doi.org/10.1080/17435889.2024.2350356>
- [21] Motamedzadeh, A., Rahmati-Dehkordi, F., Heydari, H., Behnam, M., Rashidi Noshabad, F.Z., Tamtaji, Z., *et al.* (2024) Therapeutic Potential of Phycocyanin in Gastrointestinal Cancers and Related Disorders. *Molecular Biology Reports*, **51**, Article No. 741. <https://doi.org/10.1007/s11033-024-09675-3>
- [22] Scarcello, E., Abdel-Mottaleb, M.M.A., Beduneau, A., Moulari, B. and Pellequer, Y. (2021) Amelioration of Murine Experimental Colitis Using Biocompatible Cyclosporine a Lipid Carriers. *Drug Delivery and Translational Research*, **11**, 1301-1308. <https://doi.org/10.1007/s13346-020-00835-z>
- [23] Minakshi, P., Kumar, R., Ghosh, M., Brar, B., Barnela, M. and Lakhani, P. (2020) Application of Polymeric Nanomaterials in Management of Inflammatory Bowel Disease. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, **20**, 982-1008. <https://doi.org/10.2174/1568026620666200320113322>

-
- [24] Ibaraki, H., Hatakeyama, N., Arima, N., Takeda, A., Seta, Y. and Kanazawa, T. (2022) Systemic Delivery of siRNA to the Colon Using Peptide Modified PEG-PCL Polymer Micelles for the Treatment of Ulcerative Colitis. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, **170**, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2021.12.009>