

中药载体水凝胶在糖尿病溃疡治疗中的应用及相关信号通路研究进展

刘 涛, 王彦斐*, 何志军, 顾玉彪, 陈 文, 李 岩, 李金鹏, 李 非

(甘肃省中医院, 甘肃 兰州 730050)

【摘要】糖尿病溃疡是糖尿病患者常见的并发症之一,严重影响患者的生活质量和预后。随着全球糖尿病患者数量的增加,治疗糖尿病溃疡的有效方法亟待开发。近年来,中药载体水凝胶因其优良的生物相容性、可控释放药物能力以及促进伤口愈合的特点,逐渐成为糖尿病溃疡治疗的研究热点。现有研究表明,中药载体水凝胶不仅能够提供局部药物释放,还能通过多种信号通路促进组织再生和修复。然而,在临床应用中还面临药物配方、载体材料选择及其生物相互作用等问题。文章综述了中药载体水凝胶在糖尿病溃疡治疗中的应用现状,探讨了其作用机制及相关信号通路的最新研究进展,以期为临床应用提供理论基础,并为未来的研究方向提供参考。

【关键词】中药载体水凝胶; 糖尿病溃疡; 信号通路; 治疗应用

DOI:10.70976/j.1008-0805.SZGYGY-2025-1423

CSTR:32392.14.j.1008-0805.SZGYGY-2025-1423

【中图分类号】R283.6 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1008-0805(2025)14-2734-05

糖尿病溃疡的发生与糖尿病患者血糖控制不佳、神经病变及血液循环障碍密切相关。糖尿病患者由于长期高血糖状态,容易出现神经损伤和微血管病变,导致局部血液供应不足和神经功能丧失,从而使得皮肤和软组织的愈合能力显著降低。研究表明,糖尿病患者的足部溃疡不仅增加了感染的风险,还可能导致严重的并发症,如足部骨髓炎和截肢^[1]。传统的治疗方法,如局部清创、抗生素使用及外科干预等,往往效果有限,且复发率高^[2]。

近年来,中药载体水凝胶作为一种新型的药物递送系统,逐渐引起了研究者的关注。水凝胶具有良好的生物相容性和药物释放特性,可以有效地将药物在伤口部位持续释放,从而促进伤口愈合^[3]。中药成分的结合不仅能够发挥其抗炎、抗氧化和促进细胞增殖的作用,还能够通过调节局部微环境,改善血液循环,促进愈合过程^[4,5]。文章将详细探讨中药载体水凝胶在糖尿病溃疡治疗中的应用及其相关的信号通路研究进展,期望为临床治疗提供新的思路和方法。

1 中药载体水凝胶的基本特性

中药载体水凝胶是一种新型的药物传递系统,具有良好的生物相容性和生物降解性。水凝胶的特性使其成为中药成分的理想载体,能够有效地保护药物成分,延长其释放时间,并提高生物利用度。水凝胶的基质通常由天然或合成聚合物构成,这些聚合物能够在体内被生物降解,减少对环境的影响,且在降解过程中不会产生有毒物质。研究表明,某些中药成分如黄芩苷和二氢杨梅素等在水凝胶中具有较好的结合能力,这使得水凝胶能够有效地载送这些药物并在体内释放^[6]。此外,水凝胶的物理性质,如弹性、黏性和吸水性等,也会影响其在体内的行为和药物释放特性。

1.1 生物相容性与生物降解性

生物相容性是指材料在生物体内与生物组织相互作用时,不引起不良反应的能力。中药载体水凝胶通常采用生物相容性良好的天然聚合物,如壳聚糖和明胶等,这些材料能够有效降低免疫反应,提高药物的安全性和有效性^[7,8]。生物降解性则是指材料在体内能够被生物体内的酶或微生物降解为无毒的代谢产物。

收稿日期:2024-10-27; 修订日期:2025-03-20

基金项目:国家自然科学基金地区项目(81660802;81860863;82460942);甘肃省青年人才基金项目(2024QNGR52);

甘肃省中医药管理局(GZKZ-2024-3);甘肃省自然科学基金(22JR5RA620;25JRRA275;25JRRA269);

甘肃省科技计划项目-重点研发计划(21YT5FA021);甘肃省青年科技基金项目(21JR11RA211);

甘肃省卫生健康科研行业项目(GSWSKY2024-65)

作者简介:刘 涛(1990-),男(汉族),甘肃白银人,甘肃省中医院主治医师,硕士学位,主要从事手足创伤、腕关节外科、周围神经损伤研究工作。

*通讯作者简介:王彦斐(1971-),女(汉族),甘肃兰州人,甘肃省中医院副主任医师,学士学位,主要从事足踝及创伤修复及糖尿病足临床护理工作。

中药载体水凝胶的生物降解性使其在给药后能够逐渐分解,减少对体内环境的负担,同时也便于药物的释放和吸收。这种特性使得水凝胶在生物医学领域,尤其是在药物传递系统中,得到了广泛应用^[9]。

1.2 药物释放机制

中药载体水凝胶的药物释放机制通常包括扩散、溶解和生物降解等多种方式。药物在水凝胶中的释放速率受到多种因素的影响,如水凝胶的交联度、孔隙结构、环境 pH 值和温度^[10,11]。例如,某些 pH 响应性水凝胶在酸性环境下能够快速释放药物,而在中性或碱性环境中则释放缓慢,从而实现药物的控释效果。此外,水凝胶的物理化学性质,如亲水性和黏附性,也会影响药物的释放行为。研究指出,优化水凝胶的结构和成分,有助于实现对药物释放速率的精准控制,从而提高治疗效果^[2,13]。

1.3 物理化学性质对治疗效果的影响

水凝胶的物理化学性质直接影响其在药物传递中的性能和治疗效果。例如,水凝胶的黏度、弹性和孔隙率等都会影响药物的释放速率和生物利用度^[14,15]。研究表明,具有适当黏度的水凝胶能够在体内保持较长的停留时间,进而提高药物的局部浓度和疗效。同时,水凝胶的交联度和结构也会影响其对药物的载药能力和释放机制。因此,在设计中药载体水凝胶时,需要综合考虑其物理化学性质,以便优化药物释放特性,达到更好的治疗效果。

2 中药载体水凝胶在糖尿病溃疡治疗中的应用

2.1 现有临床研究概述

近年来,糖尿病溃疡的治疗逐渐受到重视,尤其是中药载体水凝胶的应用。在临床研究中,许多学者探讨了中药成分与水凝胶的结合对糖尿病溃疡的疗效。例如,某些研究表明,含有中药成分的水凝胶能够促进伤口愈合,减轻炎症反应,并且在糖尿病患者中显示出良好的生物相容性和抗菌特性^[16]。此外,临床试验还发现,这类水凝胶能有效改善患者的生活质量,减少疼痛和不适感^[17]。虽然现有研究显示出积极的治疗效果,但仍需更多的大规模临床试验来验证其有效性和安全性,以便为临床应用提供更为坚实的依据。

2.2 中药成分的选择与配伍

中药成分的选择与配伍是中药载体水凝胶治疗糖尿病溃疡的重要环节。根据中医理论,糖尿病溃疡多与“湿热”“气血不足”等因素有关,因此在成分选择上应注重清热解毒、活血化瘀的中药。研究表明,像黄芩、丹参、当归等中药成分在促进伤口愈合方面具有显著效果^[18]。此外,合理的配伍可以增强药效,减少副作用。例如,将清热解毒的药物与活血化瘀的药物结

合使用,可以在改善局部血液循环的同时,加速伤口愈合过程^[19]。因此,基于中药成分的药理特性进行科学配伍,是提高治疗效果的关键。

2.3 水凝胶的制备方法与优化

水凝胶的制备方法与优化是确保其在糖尿病溃疡治疗中有效性的基础。目前,常用的水凝胶制备方法包括冷冻干燥法、化学交联法和物理交联法等^[20]。这些方法各有优缺点,选择合适的制备方法可以影响水凝胶的物理化学性质,如水分保持能力、机械强度和生物相容性等。例如,研究发现,利用化学交联法制备的水凝胶在水分保持能力和生物相容性方面表现优异,适合用于药物释放和伤口敷料^[17]。此外,水凝胶的优化也涉及到对中药成分的负载能力和释放行为的研究,确保其在治疗过程中能够持续释放有效成分,从而实现更好的治疗效果^[21]。

3 促进糖尿病溃疡愈合的机制

3.1 促进细胞增殖与迁移

在糖尿病溃疡的愈合过程中,细胞增殖与迁移是两个关键的生物学过程。研究表明,特定的生长因子和细胞因子能够显著促进伤口愈合。例如,表皮生长因子(EGF)已被证明可以增强糖尿病足溃疡患者的细胞增殖和迁移能力,从而加速愈合过程^[22]。此外,白细胞-血小板富血浆(L-PRF)在促进伤口愈合方面也显示了良好的效果,研究表明其能够通过促进成纤维细胞和内皮细胞的增殖与迁移,改善糖尿病患者的伤口愈合情况^[23]。此外,SDF-1/CXCR4 信号通路在糖尿病伤口愈合中也起着重要作用,能够促进细胞的迁移与增殖,从而加速愈合^[24]。这些机制的深入研究为糖尿病溃疡的治疗提供了新的思路。

3.2 抗炎作用的机制

糖尿病溃疡愈合过程中,炎症反应的调控至关重要。过度的炎症反应不仅延缓愈合进程,还可能导致伤口的进一步恶化。研究发现,某些天然产物如藻蓝蛋白(phycoerythrin)具有显著的抗炎作用,能够通过抑制炎症介质的释放来促进伤口愈合^[25]。此外,某些微小 RNA(miRNAs)在调节炎症反应中也扮演了重要角色,研究表明,miR-31-5p 的抑制能够增强糖尿病足溃疡的愈合效果^[26]。通过调控这些抗炎机制,可以有效地改善糖尿病患者的伤口愈合情况,降低并发症的发生率。

3.3 促进血管生成的作用

血管生成是糖尿病溃疡愈合的重要环节,良好的血供能够为愈合提供必要的氧气和营养物质。研究显示,特定的生长因子如 VEGF(血管内皮生长因子)在促进血管生成方面具有重要作用。糖尿病患者的伤口常伴随血管生成不足,导致愈合延迟。因此,针对血管生成的治疗策略如局部应用 VEGF 或其他促进血管生成的

因子,已成为研究的热点^[27]。此外,内皮细胞和成纤维细胞的相互作用也在血管生成中起到了关键作用,研究表明内皮细胞能够通过分泌特定因子促进成纤维细胞的增殖与迁移,从而支持血管生成的过程^[28]。通过这些机制的调控,可以有效促进糖尿病溃疡的愈合。

4 相关信号通路的研究进展

4.1 Wnt/ β -catenin 信号通路

Wnt/ β -catenin 信号通路是糖尿病溃疡愈合过程中至关重要的调节机制,参与了细胞增殖、分化、细胞外基质合成以及新生血管的生成。在伤口愈合过程中,Wnt/ β -catenin 通路激活后, β -catenin 转移到细胞核中,启动相关基因(如 c-myc 和 cyclin D1)的表达,从而促进细胞增殖和组织再生^[29]。在中药载体水凝胶中,加入具有 Wnt 信号调控活性的成分(如黄芩、连翘等)能够激活该信号通路,加速成纤维细胞和角质形成细胞的增殖与迁移,从而有效促进伤口闭合^[30]。因此,调控 Wnt/ β -catenin 通路可能是中药载体水凝胶治疗糖尿病溃疡的关键机制之一。

4.2 NF- κ B 信号通路

NF- κ B 信号通路在控制炎症反应中的作用显著,尤其在慢性糖尿病溃疡中持续的炎症反应往往导致组织损伤,妨碍正常的愈合过程。NF- κ B 通路的激活能够增加促炎因子(如 TNF- α 和 IL-1 β)的表达,导致炎症细胞的浸润和氧化应激的增加。通过抑制 NF- κ B 通路的活性,中药载体水凝胶能够减少促炎因子的释放,从而减轻炎症,促进伤口修复^[31]。因此,通过调控 NF- κ B 通路实现抗炎效果,是中药载体水凝胶在糖尿病溃疡治疗中的重要机制之一。

4.3 HIF-1 α /VEGF 信号通路

HIF-1 α (低氧诱导因子)通路在缺氧条件下发挥关键作用,特别是在糖尿病溃疡的血管生成和组织再生中。HIF-1 α 的激活能够促进血管内皮生长因子(VEGF)的表达,刺激新血管生成,从而改善缺氧溃疡区域的血液供应。研究表明,含有 Angelica dahurica 等中药成分的水凝胶可以通过 HIF-1 α 通路增加 VEGF 的合成,促进糖尿病伤口的愈合^[32]。此外,实验显示,HIF-1 α 的活化可以通过 AldoA 反馈回路调节 VEGF 表达,进一步增强血管生成和组织修复^[33]。

5 中药载体水凝胶的未来研究方向

5.1 新型材料的探索

在中药载体水凝胶的研究中,新型材料的探索是一个重要的方向。近年来,随着纳米技术和材料科学的发展,研究者们开始关注利用新型材料来改善水凝胶的性能。例如,研究发现多功能的硫化壳聚糖/黄酮复合水凝胶能够在 pH 和谷胱甘肽的双重响应下,作

为潜在的药物载体,这为中药成分的释放提供了新的思路^[6]。此外,利用金属离子结合特性的新型甘草多糖,显示出在药物传递中的潜在应用^[34]。这些新材料的开发不仅可以增强药物的稳定性和生物相容性,还能够实现对药物释放的精确控制,从而提高治疗效果。

5.2 结合现代生物技术的应用

现代生物技术的进步为中药载体水凝胶在糖尿病溃疡治疗中的应用带来了新的可能性。基因工程和细胞工程等技术可以提高水凝胶的生物活性和靶向性,增强治疗效果。例如,基因工程可将生长因子引入水凝胶,促进溃疡愈合;干细胞嵌入水凝胶则能同时发挥细胞修复和中药抗炎的双重作用。此外,现代提取技术(如超临界流体提取、液相色谱等)提高了中药成分的纯度和安全性,使其更适合慢性伤口管理。高通量筛选技术还加速了水凝胶配方的优化,有助于找到最佳组合。随着生物技术的进展,中药载体水凝胶将实现更精准、高效的治疗,并推动个性化方案的开发^[35,36]。

6 讨论

中药载体水凝胶在促进伤口愈合方面展现了显著的潜力,其作用机制涉及多个生物学信号通路,这为理解其疗效提供了新的视角。这一发现不仅丰富了糖尿病溃疡治疗的理论基础,也为临床实践提供了新的思路。尽管已有研究表明中药载体水凝胶可以有效促进糖尿病溃疡的愈合,但不同研究之间的结果和观点仍存在一定的差异。例如,有些研究强调了水凝胶的生物相容性和药物释放特性,而其他研究则更关注其对炎症反应的调节。因此,在未来的研究中,如何整合各方观点,系统性地评估中药载体水凝胶的综合疗效,将是一个重要的挑战。

此外,随着材料科学和生物医学技术的快速发展,中药载体水凝胶的临床应用前景愈发广阔。我们期待通过对其改良和优化,能够提高其在临床治疗中的适应性和有效性。然而,要实现这一目标,仍需加强基础研究与临床应用之间的联系,推动多学科的合作,以确保研究成果能够转化为实用的治疗方案。总之,中药载体水凝胶作为一种新兴的治疗手段,具有良好的应用前景和发展潜力。未来的研究应致力于解决当前存在的争议,深入探讨其作用机制,以推动其在糖尿病溃疡治疗中的广泛应用,为临床提供更为有效的解决方案。

参考文献:

- [1] JAROENARPORNDEWATANA A, KOONALINTHIP N, CHAWALTANPIPAT S, et al. Is the duration of diabetic foot ulcers an independent risk factor for developing diabetic foot osteomyelitis[J]. Foot (Edinb), 2023, 56:102000.

- [2] SYED M H, SALATA K, HUSSAIN M A, et al. The economic burden of inpatient diabetic foot ulcers in Toronto, Canada[J]. *Vascular*, 2022, 28(5):520.
- [3] ROSINHA P, SARAIVA M, FERREIRA L, et al. A retrospective cohort study on diabetic foot disease: ascertainment of ulcer locations by age group[J]. *Cureus*, 2022, 14(8):e28189.
- [4] OE M, FUKUDA M, OHASHI Y, et al. Evaluation of foot ulcer incidence in diabetic patients at a diabetic foot ulcer prevention clinic over a 10 - year period [J]. *Wound Repair Regen*, 2022, 30(5):546.
- [5] FENG J, WANG J, WANG Y, et al. Oxidative Stress and Lipid Peroxidation: Prospective Associations Between Ferroptosis and Delayed Wound Healing in Diabetic Ulcers[J]. *Front Cell Dev Biol*, 2022, 10:898657.
- [6] YUAN H, ZENG Z, LI D, et al. Multifunctional thiolated chitosan/puerarin composite hydrogels with pH/glutathione dual responsiveness for potential drug carriers[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 265(Pt 2):130841.
- [7] YANG J, ZHANG L, WANG Y, et al. Dihydroxyrubicin - loaded oxidized polysaccharide/L - arginine chitosan adhesive hydrogel promotes bone regeneration by regulating PI3K/AKT signaling pathway and MAPK signaling pathway [J]. *Carbohydr Polym*, 2024, 346:122614.
- [8] GOMOLKA M, NIEMCZYK L, SZAMOTULSKA K, et al. Biocompatibility of hemodialysis[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2020, 1251:91.
- [9] HUANG H, DAI Y, ZHANG Y, et al. System to screen and purify active ingredients from herbal medicines using hydrogel - modified human umbilical vein endothelial cell membrane chromatography coupled with semi - preparative high - performance liquid chromatography - offline - high - performance liquid chromatography - mass spectrometry[J]. *J Sep Sci*, 2023, 46(14):e2201010.
- [10] WANG S, LIU R, FU Y, et al. Release mechanisms and applications of drug delivery systems for extended - release [J]. *Expert Opin Drug Deliv*, 2020, 17(9):1289.
- [11] COSTELLO M A, LIU J, CHEN B, et al. Drug release mechanisms of high - drug - load, melt - extruded dexamethasone intravitreal implants[J]. *Eur J Pharm Biopharm*, 2023, 187:46.
- [12] REZK A I, OBIWELLOZOR F O, CHOUKRANI G, et al. Drug release and kinetic models of anticancer drug (BTZ) from a pH - responsive alginate polydopamine hydrogel: Towards cancer chemotherapy[J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 141:388.
- [13] YI H, YU H, WANG L, et al. Microneedle transdermal drug delivery as a candidate for the treatment of gouty arthritis: Material structure, design strategies and prospects [J]. *Acta Biomater*, 2024, 187:20.
- [14] WANG Y, WEI Y, WU Y, et al. Multifunctional nano - realgar hydrogel for enhanced glioblastoma synergistic chemotherapy and radiotherapy: a new paradigm of an old drug[J]. *Int J Nanomedicine*, 2023, 18:743.
- [15] CHATTERJEE S, HUI P C, SIU W S, et al. Influence of pH - responsive compounds synthesized from chitosan and hyaluronic acid on dual - responsive (pH/temperature) hydrogel drug delivery systems of Cortex Moutan[J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 168:163.
- [16] GE W, GAO Y, HE L, et al. Developing Chinese herbal - based functional biomaterials for tissue engineering[J]. *Heliyon*, 2024, 10(6):e27451.
- [17] SAVI G, GAJI G I M, SAVI G I M, SVIR G EV Z. Preparation and characterization of Alginate hydrogels with high water - retaining capacity[J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 15(12):2592.
- [18] CHEN J, WEI X, ZHANG Q, et al. The traditional Chinese medicines treat chronic heart failure and their main bioactive constituents and mechanisms[J]. *Acta Pharm Sin B*, 2023, 13(5):1919.
- [19] YAN F, LI F, LIU J, et al. The formulae and biologically active ingredients of Chinese herbal medicines for the treatment of atopic dermatitis[J]. *Bioned Pharmacother*, 2020, 127:110142.
- [20] DIAFERIA C, ROSA E, MORELLI G, et al. Fmoc - diphenylalanine hydrogels: optimization of preparation methods and structural insights [J]. *Pharmaceuticals (Basel)*, 2022, 15(9):1048.
- [21] LIU B, HUANG W, YANG G, et al. Preparation of gelatin/poly (γ - glutamic acid) hydrogels with stimulated response by hot - pressing preassembly and radiation crosslinking [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2020, 116:111259.
- [22] ILKELI E, GOKTAS DEMIRCAN F B, DUZGUN A C, et al. Intraleisional epidermal growth factor for diabetic foot ulcers[J]. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2022, 32(3):278.
- [23] WANG Y, WANG X, CHEN R, et al. The role of leukocyte - platelet - rich fibrin in promoting wound healing in diabetic foot ulcers [J]. *Int J Low Extrem Wounds*, 2024, 23(2):306.
- [24] OU S, WU X, YANG Y, et al. Tibial cortex transverse transport potentiates diabetic wound healing via activation of SDF - 1/CXCR4 signaling[J]. *PeerJ*, 2023, 11:e15894.
- [25] LIU R, QIN S, LI W. Phycocyanin: anti - inflammatory effect and mechanism[J]. *Bioned Pharmacother*, 2022, 153:113362.
- [26] CHEN L, SHEN S, WANG S. LncRNA SNHG16 knockdown promotes diabetic foot ulcer wound healing via sponging MIR - 31 - 3p [J]. *Tohoku J Exp Med*, 2023, 261(4):283.
- [27] WEN R, CHENG X, CAO H, et al. Transverse tibial bone transfer in the treatment of diabetes foot ulcer: a pilot study[J]. *Diabetes Metab Syndr Obes*, 2023, 16:2005.
- [28] MENG D H, ZOU J P, XU Q T, et al. Endothelial cells promote the proliferation and migration of Schwann cells[J]. *Ann Transl Med*, 2022, 10(2):78.
- [29] LI F L, DENG H, WANG H W, et al. Effects of external application of Chinese medicine on diabetic ulcers and the expressions of β - catenin, c - myc and K6 [J]. *Chin J Integr Med*, 2011, 17(4):261.
- [30] ZHAO Y N, LIU M, ZHANG Y, et al. Effect of Simiao Yogan Decoction on the expression of Wnt/β - catenin signaling pathway in diabetic ulcer model Rats[J]. *Zhongguo Zhong Xi Yi Jie He Za Zhi*, 2017, 37(1):79.
- [31] YANG H L, TSAI Y C, KORIVI M, et al. Lucidone promotes the cutaneous wound healing process via activation of the PI3K/AKT, Wnt/β - catenin and NF - κB signaling pathways[J]. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Res*, 2017, 1864(1):151.
- [32] GUO J, HU Z, YAN F, et al. Angelica daburica promoted angiogenesis and accelerated wound healing in db/db mice via the HIF - 1α/PDGF - β signaling pathway[J]. *Free Radic Biol Med*, 2020, 160:447.
- [33] LIU Y, MA R, JUAN D, et al. Adipose - derived mesenchymal stem cell - loaded β - chitin nanofiber hydrogel activates the AldolA/HIF - 1α pathway to promote diabetic wound healing[J]. *Am J Stem Cells*, 2023, 12(1):1.
- [34] YANG Y, YU M, MO Y, et al. Metal - ion - binding properties of glycyrrhiza polysaccharide extracted from Licorice: Structural charac-

- terization and potential application in drug delivery[J]. Carbohydr Polym, 2024, 346:122658.
- [35] LIU X, HU Z, HUANG Y, et al. Advances in novel biomaterials combined with traditional Chinese medicine rehabilitation technology in treatment of peripheral nerve injury[J]. Front Neurol, 2024, 15: 1421772.
- [36] ANTONATOS G, ASMENOUDI P, PANOUTSOPOULOU M, et al. Pharmacogenomics in psoriasis: paving the way towards personalized medicine[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(8):7090.

Research progress on application and related signaling pathways of Chinese herbal medicine carrier hydrogels in treating diabetic ulcer

LIU Tao, WANG Yanfei*, HE Zhijun, GU Yubiao, CHEN Wen, LI Yan, LI Jinpeng, LI Fei

(Gansu Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Diabetic ulcer (DU) is one of the common complications in diabetic patients, severely impacting their quality of life and prognosis. With an increasing global prevalence of diabetes, effective treatments for DU urgently need to be developed. In recent years, Chinese herbal medicine (CHM) carrier hydrogels have gradually emerged as a research hotspot in DU therapy due to their excellent biocompatibility, controlled drug release capabilities, and promotion of wound healing. Current studies have shown that CHM carrier hydrogels can not only enable localized drug delivery but also promote tissue regeneration and repair through multiple signaling pathways. However, challenges remain in clinical applications, including drug formulation, selection of carrier materials, and their biological interactions. This review summarizes the current application status of CHM carrier hydrogels in the treatment of DU, explores recent advances on their mechanisms of action and related signaling pathways, aiming to provide a theoretical foundation for clinical practice and insights for future research directions.

Key words: Chinese herbal medicine carrier hydrogel; Diabetic ulcer (DU); Signaling pathway; Therapeutic application; Research progress

(责任编辑:程文锋)