

糖尿病足溃疡创面修复及智能化护理干预研究进展

赵亚会 韩伟*

联勤保障部队第九六〇医院 内分泌科

DOI:10.32629/carnc.v4i4.21461

[摘要] 糖尿病足溃疡(diabetic foot ulcer,DFU)是糖尿病最严重的慢性并发症之一,是非创伤性下肢截肢的首要原因,传统修复与护理模式存在功能单一、评估主观、院外管理薄弱等局限。本文以“病理机制-创面修复-智能护理”为主线,系统梳理国内外研究进展,对比分析临床常用创面修复技术的优劣及相关证据,精简阐述智能敷料、可穿戴设备、人工智能辅助决策三大智能化护理模式的核心应用并总结其优缺点,提出未来加速再生医学转化、研发低成本适老化智能产品、制定规范化诊疗标准等研究方向,以期为DFU临床护理与科研提供理论参考。

[关键词] DFU; 创面修复; 智能化护理

中图分类号: G264.3 **文献标识码:** A

Research progress on wound repair and intelligent nursing intervention of diabetes foot ulcer

Yahui Zhao Wei Han*

Endocrinology Department of the 960th Hospital of the Joint Logistics Support Force

[Abstract] diabetes foot ulcer (DFU) is one of the most serious chronic complications of diabetes and the primary cause of nontraumatic lower limb amputation. The traditional repair and nursing model has limitations such as single function, subjective evaluation, weak management outside the hospital, etc. This article takes "pathological mechanism wound repair intelligent nursing" as the main line, systematically reviews the research progress at home and abroad, compares and analyzes the advantages and disadvantages of commonly used clinical wound repair technologies and related evidence, simplifies and elaborates on the core applications of the three intelligent nursing models of intelligent dressings, wearable devices, and artificial intelligence assisted decision-making, and summarizes their advantages and disadvantages. It proposes future research directions such as accelerating the transformation of regenerative medicine, developing low-cost anti-aging intelligent products, and formulating standardized diagnosis and treatment standards, in order to provide theoretical reference for DFU clinical nursing and scientific research.

[Key words] DFU; Wound repair; Intelligent nursing

引言

DFU是糖尿病最严重的慢性并发症之一,具有高发病率、高致残率和高死亡率的特点^[1]。临床研究表明,全球糖尿病患者终身发生DFU的风险为19%~34%,每年新增病例约1860万例,我国糖尿病患者DFU年发病率达8.1%^[2-3]。Zhang Y等学者提出,DFU是非创伤性下肢截肢的首要原因,约50%的非创伤性截肢由其导致,我国DFU患者截肢率为22.4%^[4-5]。DFU临床治疗难度大,多数患者创面首次愈合后3~5年复发风险高达60%,5年死亡率高达50%~70%,与多数恶性肿瘤相当,给个人、家庭及社会带来沉重的医疗负担^[6]。

DFU创面愈合是涉及神经病变、缺血、感染、炎症反应异常及多种细胞功能障碍的复杂病理生理过程。糖尿病患者代谢紊

乱导致创面长期处于慢性炎症状态,炎症微环境失衡、血管再生受阻、上皮化延缓及生物膜形成是创面难愈的关键因素^[7]。传统修复策略包括清创、抗感染、减压及敷料覆盖等,但功能单一,难以动态调控创面微环境,且存在评估主观性强、院外管理薄弱等显著局限^[8]。

近年来,生物医学工程与数字健康技术的交叉融合为DFU诊疗带来了革命性突破。以智能水凝胶敷料、可穿戴设备及人工智能辅助决策为代表的智能化护理干预模式,实现了创面状态实时监测、风险提前预警及干预方案动态调整,为DFU创面修复与全周期管理提供了全新解决方案。本文系统梳理近年来国内外DFU创面修复与智能化护理干预的研究进展,对比分析不同技术的临床价值与局限性,为临床护理实践与后续科研工作提供理论参考。

1 DFU的病理机制

DFU的出现受到多重因素的影响，其核心环节包括以下三点。第一，糖尿病患者血糖持续处于高水平状态给血管功能造成了损伤，易诱发一系列外周动脉疾病，下肢血液灌注明显受限，导致局部区域缺氧缺血，是DFU形成、创面愈合缓慢的主要影响因素^[9-10]。第二，高血糖会影响神经丝蛋白的正常合成，对轴突结构造成了明显破坏，患者机体存在明显氧化应激反应，能量无法正常完成代谢，神经元功能有退化性改变，患者难以觉察足部的轻微外伤，使DFU破损面积扩大、感染症状加重^[11]。第三，糖尿病患者身体免疫力下降，机体长期处于慢性炎症状态，一旦足部溃疡会加重伤口区域的炎症刺激，炎症消退速度慢，不利于伤口愈合，最终形成溃疡^[12]。

2 DFU创面的修复方式(附对比证据)

2.1 负压封闭引流术(VSD)

VSD核心是在创面血运充足、感染组织彻底清除后，通过持续负压引流与冲洗，清除脓腐、坏死组织及渗出液，维持密闭环境防感染扩散，同时扩张毛细血管、改善微循环，促进创面愈合^[13-14]。操作流程为：定制VSD海绵覆盖创面，半透性贴膜密封创面及周围皮肤，连接持续负压源维持恒定负压^[15]。

对比证据：方竞国以Wagner 3~4级DFU患者为研究对象，观察组采用VSD治疗，对照组采用单一清创治疗，结果显示观察组创面愈合时间显著短于对照组，换药次数更少，局部症状评分更低，证实VSD疗效优于传统单一清创^[16]。

优点：清除创面分泌物效果显著，感染控制能力强，可改善创面微循环，促进愈合；缺点：对创面血运要求高，需彻底清除感染组织，操作相对复杂，不适用于血运极差的重症创面。

2.2 干细胞与外泌体治疗

干细胞(以MSCs为主)来源广泛、免疫原性低，可分泌细胞因子、生长因子抑制慢性炎症，促进血管新生；外泌体作为干细胞旁分泌载体，继承其生物学功能，可调控修复信号通路，且无免疫排斥、无成瘤风险，安全性更高^[17]。

对比证据：张洋在DFU动物实验中，采用外泌体联合蜂王浆治疗，结果显示联合治疗组小鼠创面愈合率达100%，而对照组仅为10%，组间差异显著，证实该联合方案修复效果优异^[18]。

优点：修复效果突出，尤其适用于重症难愈创面；外泌体安全性高、储存便捷；缺点：多数研究停留在I/II期临床试验，长期疗效及安全性数据不足，成本较高，技术门槛高。

2.3 富血小板血浆技术(PRP)

PRP分为同种异体(al-PRP)与自体(au-PRP)两类，可快速释放生长因子，激活内源性修复机制，促进成纤维细胞增殖、血管新生^[19]，且自体来源无免疫排斥、制备简便、成本可控，已获多个国内外DFU指南推荐(B级证据)^[20]。

对比证据：相较于传统敷料覆盖，PRP局部应用可显著缩短DFU创面愈合时间，降低复发率，尤其适用于中度创面；与VSD相比，PRP操作更简便、创伤更小，但感染控制能力弱于VSD。

优点：自体来源安全，制备简便，成本可控，已实现规范化临

床应用；缺点：对重症感染创面修复效果有限，需严格把控制备流程，避免污染。

2.4 三种修复方式核心对比

临床适用性：VSD适用于感染明显、渗出液多的中重度创面；PRP适用于中度、血运尚可的创面；干细胞与外泌体适用于传统方法治疗无效的重症难愈创面。疗效侧重点：VSD侧重感染控制与分泌物清除；PRP侧重激活内源性修复；干细胞与外泌体侧重重症创面的再生修复。安全性：PRP、外泌体安全性较高；VSD需注意负压控制，避免创面损伤；干细胞存在潜在成瘤风险(外泌体可规避)。

3 智能化护理干预的主要方式

3.1 智能敷料与创面微环境监测

核心应用：融合传感、智能响应及药物缓释技术，分为监测型、响应型及多功能一体化三类，可实时监测DFU创面pH、温度等指标，实现感染预警、靶向释药，构建“监测-预警-干预”闭环^[21-23]。

优点：实现护理从“经验判断”向“数据支撑”转变，感染预警及时，干预精准，提升护理效率；缺点：成本较高，传感数据标准化不足，长期使用稳定性有待提升。

3.2 可穿戴式设备监测模式

核心应用：以智能鞋、减压鞋垫为主，可实时监测足底压力，上传数据至云端护理系统，构建“监测-预警-指导-随访”居家闭环护理，提升居家护理规范性^[24-26]。

优点：便携、无创，适配中老年患者居家康复，可降低DFU创面受压、复发风险，减轻患者往返医院负担；缺点：设备续航不足，老年患者操作门槛高，数据传输稳定性有待提升。

3.3 人工智能辅助护理模式

核心应用：通过图像识别、深度学习，实现DFU创面量化评估、愈合进程监测，整合多维度数据构建风险预测模型，辅助个体化干预决策^[27-31]。

优点：克服人工评估的主观性与误差，风险分层精准，可提升诊疗决策科学性；缺点：多为小样本单中心研究，缺乏长期数据，模型适配性需进一步优化。

4 总结与展望

DFU作为糖尿病最严重的慢性并发症，是非创伤性下肢截肢的首要原因，其高复发率、高死亡率给全球医疗体系带来沉重负担。近年来，DFU领域实现了创面修复技术与护理模式的双重革新：在治疗端，已形成“传统技术优化升级-再生医学创新突破”的治疗体系，VSD仍是临床应用广泛的成熟技术，PRP已获指南推荐并实现规范化应用，干细胞与外泌体为重症难愈创面提供了全新方向；在护理端，智能化护理模式打破传统局限，构建起全周期管理闭环，提升了诊疗效果。

但目前干细胞与外泌体治疗多数停留在I/II期临床试验阶段，智能化护理研究以小样本探索为主，均缺乏长期数据；先进技术成本高、操作复杂，难以下沉至基层。未来应重点推进干细胞、外泌体多中心III期临床试验，开展智能化护理成本-效益

分析;突破关键技术瓶颈,开发低成本、易操作的智能产品,制定基层版诊疗指南,为DFU患者提供更高效、精准、全面的诊疗护理服务。

参考文献

[1]马圆圆,籍胤玺,李曾一,等.糖尿病足溃疡患者血清Beclin-1、TIMP-2、Smad3水平及与感染类型的相关性分析[J].临床心身疾病杂志,2026,32(2):44-48.

[2]沈速群.下肢功能性训练及银离子凝胶干预对糖尿病足溃疡患者康复效果的影响[J].中国现代药物应用,2026,20(9):152-155.

[3]McDermott K,Fang M,Boulton AJM,et al.Etiology,epidemiology,and disparities in the burden of diabetic foot ulcers[J].Diabetes Care,2023,46(1):209-221.

[4]Zhang Y,Liu H,Yang Y, et al. Incidence and risk factors for amputation in Chinese patients with diabetic foot ulcers: A systematic review and meta-analysis[J].Frontendocrinol (Lausanne),2024,15:1405301.

[5]王宏睿,吴康,张佳东,等.糖尿病足溃疡修复的机制探索与基础研究进展[J].中国骨伤,2025,38(09):964-968.

[6]Armstrong DG,Swerdlow MA,Armstrong AA, et al. Five year mortality and direct costs of care for people with diabetic foot complications are comparable to cancer[J].J Foot Ankle Res,2020,13(1):16.

[7]郭瑞,彭会珍,浦仕彪,等.糖尿病足溃疡难愈性创面的相关研究进展[J].云南民族大学学报(自然科学版),2024,33(03):325-334+376.

[8]陈兆军,潘旭月,邓品,等.糖尿病足溃疡局部创面治疗的进展及展望[J].足踝外科电子杂志,2022,9(04):95-100.

[9]Waheed FNM,Vangaveti VN,Malabu UH. Ischemic heart disease and its risk factors in patients with diabetic foot ulcers: a systematic review and meta-analysis[J].Diabetes Metab Syndr,2022,16(2):102414.

[10]Du YQ,Wang J,Fan WJ,et al.Preclinical study of diabetic foot ulcers: From pathogenesis to vivo/vitro models and clinical therapeutic transformation[J].Int Wound J,2023,20(10):4394-4409.

[11]Anuradha U,Mehra NK,Khatri DK.Understanding molecular mechanisms and miRNA-based targets in diabetes foot ulcers[J].Mol Biol Rep,2024,51(1):82.

[12]Chen LF,Shen SY,Wang SY.LncRNA SNHG16 knockdown promotes diabetic foot ulcer wound healing via sponging miR-31-5p[J].Tohoku J Exp Med,2023,261(4):283-289.

[13]刘楚贤,陈世玖.负压封闭引流术治疗糖尿病足溃疡疗效的Meta分析[J].医学综述,2020,26(18):3723-3728.

[14]陈林,石昆林.负压封闭引流联合生长因子治疗糖尿病足溃疡的效果[J].中国医学创新,2026,23(8):90-95.

[15]周明.当归黄芪汤口服联合黄柏液外敷对进行负压封闭引流治疗的糖尿病足患者炎症指标及疼痛症状的影响[J].当代医药论丛,2026,24(2):128-130.

[16]方竞国,张叙填,郑洁漫.负压封闭引流技术联合清创治疗在糖尿病足Wagner3~4级创面中的应用效果观察[J].中国当代医药,2026,33(6):71-74.

[17]韩冬梅,董静,韦薇.基于细胞的再生医学治疗药品药学技术要求及展望[J].中国新药杂志,2025,34(24):2605-2609.

[18]张洋.蜂王浆通过血管内皮生长因子信号轴提升干细胞外泌体治疗糖尿病足溃疡效能研究[J].中国医药指南,2025,23(14):21-24.

[19]李红晓,李岩,杨波.益气活络生肌汤联合自体富血小板血浆治疗糖尿病足溃疡的临床疗效观察[J].中国合理用药探索,2026,23(01):117-122.

[20]黄森,陈涛,王振飞,等.富血小板血浆治疗感染性糖尿病足溃疡的疗效[J].江苏医药,2020,46(11):1156-1158.

[21]DIAO J,MENG Y,WANG L,et al.Temperature/pH responsive CS/ NIPAM-based hydrogel with controlled release of Ga3+ for improved infected wound healing[J].Chem Eng Sci,2024,294:120104.

[22]朱孟飞.基于柔性电子的智能温度响应伤口敷料系统的设计及其在促进伤口愈合中的研究[D].合肥:安徽医科大学,2024.

[23]WANG C,FANK, SHIRZAEI S E,et al.A microfluidic wearable device for wound exudate management and analysis in human chronic wounds[J].Sci Transl Med,2025,17(795):t882.

[24]王占星,Roland M,陈钊钰,等.糖尿病鞋功能性研究进展[J].中国皮革,2021,50(1):1-8.

[25]欧阳济.基于智能鞋系统的糖尿病足综合症监测研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[26]陆琦,曾金艳,顾蒙曦,王水.智能可穿戴设备在临床护理中的应用现状与优化策略——以无锡地区为例[J].现代医院,2026,26(01):122-125+131.

[27]李鸾,麦耀锋,陈灿烽,等.基于糖尿病足多阶段病程管理的AI智能体构建与验证[J].新医学,2026,57(4):329-338.

[28]王小叶,安俊红,刘倩,等.移动智能技术在糖尿病足患者自我管理中的应用进展[J].军事护理,2024,41(11):17-20.

[29]汪怡,袁丽,李饶.智能可穿戴设备在糖尿病患者足部监测中的研究进展[J].中国医学装备,2022,19(8):019.

[30]陈乃梅,朱振涛,杨卫华.“治未病”理论与人工智能在糖尿病视网膜病变防治中的研究进展[J].中国中医眼科杂志,2024,34(8):790-793.

[31]张洁,丁珊妮,陈慈爱,等.数字疗法在糖尿病足患者中应用的研究进展[J].中华护理杂志,2025,60(11):1399-1404.

*通讯作者:

韩伟(1985—),女,汉族,山东聊城人,本科,中级职称,研究方向:糖尿病相关并发症护理。