

人工智能用于慢性伤口护理的研究进展

杨扬¹, 陈德凤², 李蓓³, 董旭辉³, 彭婉琳³, 何梦欣³, 李佳宝³

摘要: 阐述了人工智能的概念, 人工智能在伤口评估、敷料制备、伤口愈合预测等方面的应用, 提出人工智能技术应用于伤口护理可提高护理效率和质量, 应制定统一的伤口图像采集标准、优化人工智能设计、鼓励护理人员积极学习人工智能相关知识, 使人工智能更好地服务于伤口护理。

关键词: 慢性伤口; 人工智能; 机器学习; 伤口护理; 伤口图像; 伤口敷料; 伤口愈合; 综述文献

中图分类号: R472 **DOI:** 10.3870/j.issn.1001-4152.2024.05.018

Progress in the application of artificial intelligence in chronic wound care Yang

Yang, Chen Defeng, Li Bei, Dong Xuhui, Peng Wanlin, He Mengxin, Li Jiabao. School of Nursing, Youjiang Medical University for Nationalities, Baise 533000, China

Abstract: This paper expounds the concept of artificial intelligence and its application in wound assessment, dressing preparation, and wound healing prediction. It is proposed that the application of artificial intelligence technology in wound care can improve the efficiency and quality of care. It indicates that unified wound image acquisition standards should be formulated, artificial intelligence design should be optimized, and nursing staff should be encouraged to actively learn related knowledge of artificial intelligence.

Keywords: chronic wounds; artificial intelligence; machine learning; wound care; images of wounds; wound dressing; wound healing; review of literature

慢性伤口是指经 1 个月正规治疗尚未愈合也无愈合倾向的伤口^[1]。孟浩等^[2]的一项研究显示, 老年是我国慢性伤口患病比例最高的年龄段, 这可能与老年人生理功能下降、营养不良且常合并多种基础疾病有关。随着我国进入老龄化社会, 慢性伤口的发病率也在逐年上升。研究表明, 慢性伤口的发病率可达 2.21%^[3]。统计数据显示, 美国有超过 650 万人受到慢性伤口的影响, 导致每年的治疗费用高达 250 亿美元^[4]; 国内每例慢性伤口患者的平均治疗费用约为 12 055.4 元人民币^[5]。有效的伤口管理是促进慢性伤口愈合、减少医疗支出的重要举措。现存的慢性伤口管理模式难以对慢性伤口进行动态、全面、深入的评估, 而人工智能(Artificial Intelligence, AI)依靠其强大的数据处理能力, 已在慢性伤口领域取得了显著成果。2021 年国务院发布《关于推动公立医院高质量发展的意见》^[6], 明确提出要推进电子病历、智慧服务、智慧管理“三位一体”的智慧医院建设, 将人工智能与医疗的融合上升到国家层面。借助人工智能进行慢性伤口护理符合时代发展趋势, 有利于提升慢性伤口护理的效率和质量^[7]。本文对人工智能在慢性伤口护理领域的相关研究进行综述, 旨在帮助伤口护理专业人员及研究人员快速了解本领域的最新动态, 为未来人工智能与慢性伤口护理的研究提供参考, 以

提高慢性伤口护理质量。

1 人工智能概念与应用场景

人工智能是计算机科学的一个分支, 其核心思想为利用机器学习(Machine Learning, ML)、深度学习(Deep Learning, DL)等计算机算法实现对人脑智力的模拟、延展和扩充, 最终达到计算机独立自主的智能活动^[8]。McCarthy 在 1956 年的达特茅斯会议上首次提出人工智能的概念, 是用于描述一个“基于知识的系统”。随着芯片存储、大数据处理技术、无线通信技术等的飞速发展, 如今人工智能的研究范畴主要为机器学习、深度学习、临床决策支持系统(Clinical Decision Support System, CDSS)、专家系统(Expert System, ES)等^[9-11]。其中机器学习是人工智能的基础, 发展最成熟, 包括如神经网络、决策树、支持向量机、聚类算法、组件分析和贝叶斯分类器等数学模型^[11]。而在慢性伤口护理领域人工智能主要应用于图像捕获、电子病历(Electronic Medical Record, EMR)集成、整合伤口数据、远程医疗、风险预测、CDSS 等^[12-16]。

2 人工智能在慢性伤口领域中的应用

2.1 伤口局部评估 衡量伤口进展或恶化的最简单的方法之一是测量伤口的尺寸、伤口面积和体积^[17]。在传统的伤口测量中护理人员多采用棉签法、探针法等一维测量法, 该类方法虽简便快捷, 但在实际使用中大部分伤口伴窦道、瘘管, 一次性准确测量的难度较大, 可能需要反复测量, 且在测量的过程中易对伤口造成二次损伤^[18]。一项系统评价结果显示, 伤口护理人员过度依赖主观经验, 没有基于客观标准进行伤口评估, 导致测量结果参差不齐^[19]。为使伤口数

作者单位: 1. 右江民族医学院护理学院(广西 百色, 533000); 2. 广西壮族自治区人民医院胃肠·疝·肠痿外科; 3. 广西中医药大学护理学院

杨扬, 男, 硕士在读, 护士, 1318269925@qq.com

通信作者: 陈德凤, de_feng_chen@163.com

科研项目: 中华医学会杂志社护理学科研究课题(110)

收稿: 2023-10-08; 修回: 2023-12-29

据客观化,赵紫阳等^[20]设计了一种基于图像分割和孔洞修复的三维伤口测量方法,采用异源图像对齐算法和基于径像基函数(Radial Basis Function, RBF)的三维点云孔洞修复算法进行伤口创面测量,从而得到伤口的最大深度、体积等三维参数,结果表明其测量精度优于传统测量方法,且误差低于 3%。Ohura 等^[21]将基于 U-Net_VGG16 架构的卷积神经网络与深度置信网络、栈式自动编码相结合开发了一款伤口评估程序,该程序可自主学习而不需要编码器,根据逻辑关系和规则进行编程、对伤口创面进行自动分割,从而对伤口进行更准确的分期,有效地解决了慢性伤口分期困难的问题^[22]。Swerdlow 等^[23]基于人工神经网络和贝叶斯分类器设计了一种伤口图像自动分割及组织识别系统,该系统将所拍摄的组织图像及纹理特征传送给一组多层感知器和贝叶斯分类器,从而进行精准识别,结果显示准确率可达 91.5%。Filko 等^[24]基于 7 自由度(7 Degree of Freedom, 7-DOF)机械人手臂和 3D 扫描仪开发了一款全自动 3D 伤口测量系统,该系统首先使用 MobileNetV2 架构的卷积神经网络与 GrabCut 算法结合创建伤口的二维掩膜,其次将二维掩膜数据传递给三维点云模型计算出伤口的三维数据,最后再通过主动轮廓模型重建伤口的三维网格图计算出伤口的周长、面积和体积,结果表明与手持式 3D 相机所测量的数据^[25]相比,该系统所测量的周长、面积和体积错误率均有明显下降。与前述研究均需要使用专业设备不同,Wang 等^[26]研发了一种仅需要智能手机就能测量伤口尺寸的应用程序,该程序采用自体组织聚类方法(K-mean)将伤口图像根据颜色分割为不同的区域,从而达到测量伤口组织的作用。

人工智能在伤口评估中的应用能有效地减少护理人员测量伤口数据时的主观误差,提升慢性伤口护理效率,但目前的人工智能相关伤口测量技术均需要通过摄像设备近距离对伤口进行拍照,过程中需反复揭开敷料,难免会对伤口进行二次伤害及感染。因此未来的研究需要优化相关技术,将伤口测量技术与智能敷料相结合,通过温度、湿度等直接对伤口尺寸、面积及体积等进行测量,而不仅仅是依靠照相技术。

2.2 敷料制备 慢性伤口的治疗主要使用水凝胶、水胶体、纤维敷料等^[27],为伤口创造湿性愈合条件,但现有的大多数敷料不能主动反映伤口情况及对伤口情况做出积极反应,增加了患者往返医院的时间成本和治疗成本。随着技术的进步、智能敷料的出现为慢性伤口治疗提供了新的选择^[28]。智能敷料是指嵌入了微电子传感器、微处理器以及无线通信和无线电等智能工具,能对伤口的诊断和治疗起到改善作用的伤口敷料^[29]。Zhu 等^[30]研发了一种多功能两性离子水凝胶,可以同时检测伤口 pH 值和葡萄糖水平参数,当伤口环境变化时敷料随之变化,通过手机采集

敷料图片,人工智能可将其转换为红绿蓝三原色信号以监测伤口状态。与前者研究需要通过识别敷料状态达到监测伤口状态相比,Jiang 等^[31]将水凝胶敷料与银纳米线结合研发了一款兼具抗菌和传感特性的水凝胶敷料,同时将无线蓝牙模块集成到水凝胶中,实现了对伤口愈合状况的实时和远程监测。与对伤口状态的实时监测相比,对伤口的按需治疗显得尤为重要。Pang 等^[32]研发了一款具有双层结构的智能敷料,其上层由聚二甲基硅氧烷封装,蓝牙模块和电路控制模块分布在两侧,中央集成了温度控制模块和紫外线发光二极管,下层为含有庆大霉素的紫外响应型抗菌水凝胶。当伤口温度升高,温度控制模块控制紫外线发光二极管发射紫外线,触发下层水凝胶释放抗生素,以达到抑制感染的作用,同时该敷料还能将伤口状况以蓝牙通信的方式实时传送,以实时监测伤口愈合状态。实验证明该敷料具有良好的准确性和耐用性。虽然智能敷料在研究中已被证明在伤口评估、监测、治疗等方面有效,但多数研究还停留在动物实验阶段,还需大量临床研究证明其在人体应用的安全性和有效性。此外,智能敷料的成本过高,在实际推广中面临着许多难题,未来研究者可简化智能敷料装置,降低其成本以便于在临床推广。

2.3 伤口愈合预测 慢性伤口愈合难是伤口护理领域亟待解决的难题,如果能预测慢性伤口的愈合时间、愈合情况,可以更好地帮助护理人员制定伤口护理计划,提高患者生活质量,同时减轻患者的经济压力。为了预测慢性伤口愈合情况,众多国内外学者通过使用有效的评估、文档记录(包括图像捕获)和卷积神经网络技术,并学习数百万患者和数十亿数据库的经验,使伤口护理过程标准化,结果客观化。人工智能结合了人类智能,使伤口护理做到更精确、更以患者为中心,从而产生更好的结果^[17]。Howell 等^[33]使用人工智能的机器学习算法开发了一种能利用伤口组织的颜色分析慢性伤口愈合结果的预测模型,当肉芽组织为深红时提示感染,为苍白时提示创面床血管生成和血供不良。结果显示该算法与护理专家对慢性伤口愈合结果的判断有 91.5% 一致性。Jung 等^[34]基于机器学习和特征工程研发了一个慢性伤口愈合的预测模型,在 2009—2013 年该模型的数据集囊括了 59 953 例患者的基本人口统计学信息,以及 180 696 例伤口的定量和分类信息。该模型由 pROC R 计算的曲线下面积表示,试验结果显示该模型在慢性伤口中曲线下面积为 0.842,与 Margolis 等^[35]设计的基于人工的伤口预测模型相比,预测结果的准确率得到了大幅提高。与上述预测方法需要利用伤口图像预测预后不同,Garland 等^[36]通过分析伤口处乳酸水平,利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)将乳酸时间序列转换为相应的傅里叶系数,然后将所获数据输入支持向量机,生成一个模型,

结果显示预测准确率可达83%。虽然慢性伤口风险预测模型的准确率较好,可将其用于临床实践,提升慢性伤口的治愈率,但在实际使用中不同年龄段患者伤口特点不一样^[2],研究者应结合不同人群伤口特点及时优化和校准预测模型。

2.4 慢性伤口护理 CDSS 在慢性伤口治疗的过程中,患者的病情复杂,常伴有基础疾病,需联合多学科以全面评估患者全身状况,同时进行有效的疾病管理。在此过程中,还需要实施患者或照顾者的教育。然而,伤口专科护理的护士主要集中于三级医院^[37],这些因素极大地影响了护理人员在临床决策中的准确性,同时也影响患者治疗的连续性。Barakat-Johnson等^[16]开发了一款整合CDSS、EMR集成和远程医疗功能的组织分析应用程序(Tissue Analytics digital Application, TA App),该应用程序是基于机器学习的非知识库CDSS,适用于所有带集成摄像头的智能手机。使用该应用时,护理人员只需拍摄伤口照片并录入伤口数据,治疗端系统将自动生成EMR,并提供适合的治疗方法和敷料种类。患者端可以随时上传伤口照片,实时接收护理人员的治疗建议,从而实现对伤口愈合情况的实时追踪以及远程医疗。研究结果显示,与使用该应用程序之前相比,EMR的完整性明显提高,而伤口恶化和患者往返医院的通勤次数显著降低。尽管在慢性伤口护理中,利用CDSS的研究正在逐渐展开,但在国内对于这一领域的研究仍然相对有限。因此,有必要深入挖掘和拓展这一研究方向,以更全面地了解并推动慢性伤口护理中人工智能的应用。未来学者可根据国内的实际现状开发适合临床推广的CDSS,以提升慢性伤口护理质量。

3 问题与展望

3.1 伤口图像数量和质量难以保证 慢性伤口图像的数量与质量极大程度地影响人工智能的识别精度^[38],有别于眼科疾病和阿尔兹海默病等有独立的开源数据库^[39-40],目前国内外尚未建立标准且拥有大量慢性伤口图像的数据库,原因可能是慢性伤口图像属于光学三原色图像^[41],由智能手机等非专业设备所采集的伤口图像容易受到角度、光线、摄像头型号等因素影响,使慢性伤口图像同质化难以保证^[42]。未来我国应设立专门的慢性伤口图像数据库,制定统一的图像色块和拍摄标准,规范伤口图像的质量,提升伤口识别精度以及简化相关应用程序使用流程,以促进人工智能在慢性伤口护理领域的发展。

3.2 人工智能设备的局限性 人工智能在慢性伤口护理过程中展现了特有的优势,但目前人工智能设备对伤口的测量还停留在对伤口图像的分割、识别阶段,以及智能敷料在与伤口接触中的安全性还需要大量临床试验进一步验证。现阶段智能敷料运行的方式主要依靠微型电路供电,其潜在生物安全风险主要来自于放电反应中产生的金属离子,而目前相关设备

难以做到直接接触伤口时保证化学元素不发生泄露^[43]。在未来的研究中,研究者可致力于优化人工智能算法,将患者的人口学资料与图片内容相联系,对伤口进行综合智能诊断,选用生物安全性更高的敷料材质以提升智能敷料安全性、有效性,使人工智能更好地服务于慢性伤口护理。

4 小结

人工智能技术在伤口护理中提高了护理的效率和便捷性,也大大减轻了患者在治疗过程中的痛苦,节约了治疗相关的支出。但目前临床伤口护理过程中部分护理人员进行慢性伤口护理时,主要依靠自身及同行的主观经验,因此在慢性伤口护理过程中,急需寻找一种客观且规范的伤口治疗方法,这将有助于推进慢性伤口护理学科的发展。而人工智能通过其强大的数据提取能力,可客观、真实地反映伤口状况,有助于指导伤口护理实践。但由于我国人工智能用于伤口护理的研究起步晚,因此在应用阶段还存在着许多问题,如伤口图像质量参差不齐没有统一的标准、缺乏个性化设计、人工智能设备价格昂贵、相关技术人才紧缺、使用成本远远高于应用过程中所节约的医疗支出、护理人员对人工智能设备的使用还存在挑战。未来我国可以制定统一的伤口图像采集标准、优化人工智能设计、加大相关经费投入、推动护理人员积极学习人工智能相关知识,从而使人工智能可以更好地服务于伤口护理,推动伤口护理领域的发展。

参考文献:

- [1] Han G, Ceilley R. Chronic wound healing: a review of current management and treatments [J]. *Adv Ther*, 2017, 34(3): 599-610.
- [2] 孟浩, 苏建隆, 王睿, 等. 889例体表慢性难愈合创面住院患者临床流行病学研究[J]. *解放军医学院学报*, 2022, 43(3): 253-258.
- [3] Gethin G, Probst S, Stryja J, et al. Evidence for person-centred care in chronic wound care: a systematic review and recommendations for practice [J]. *J Wound Care*, 2020, 29(Sup9b): S1-S22.
- [4] Criscitelli T. The future of wound care [J]. *AORN J*, 2018, 107(4): 427-429.
- [5] Sun X, Ni P, Wu M, et al. A clinico-epidemiological profile of chronic wounds in wound healing department in Shanghai [J]. *Int J Low Extrem Wounds*, 2017, 16(1): 36-44.
- [6] 国务院办公厅. 关于推动公立医院高质量发展的意见 [J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2021(17): 174-178.
- [7] 马婷, 陈清财. 基于开放医疗大数据的人工智能研究 [J]. *医学与哲学*, 2022, 43(1): 1-4.
- [8] Busnatu Ş, Niculescu A G, Bolocan A, et al. Clinical applications of artificial intelligence: an updated overview [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(8): 2265.
- [9] Stead W W. Clinical implications and challenges of artificial intelligence and deep learning [J]. *JAMA*, 2018, 320(11): 1107-1108.

- [10] Savage T R. Artificial intelligence in medical education [J]. Acad Med, 2021, 96(9): 1229-1230.
- [11] Haug C J, Drazen J M. Artificial intelligence and machine learning in clinical medicine reply[J]. N Engl J Med, 2023, 388(25): 2398-2399.
- [12] Khoo R, Jansen S. The evolving field of wound measurement techniques; a literature review[J]. Wounds, 2016, 28(6): 175-181.
- [13] Li D, Mathews C. Automated measurement of pressure injury through image processing[J]. J Clin Nurs, 2017, 26(21-22): 3564-3575.
- [14] Sirazitdinova E, Deserno T M. 3D documentation of chronic wounds using low-cost mobile devices[J]. Stud Health Technol Inform, 2017, 245: 1237.
- [15] Sheehan P, Jones P, Giurini J M, et al. Percent change in wound area of diabetic foot ulcers over a 4-week period is a robust predictor of complete healing in a 12-week prospective trial[J]. Plast Reconstr Surg, 2006, 117: 1529-1542.
- [16] Barakat-Johnson M, Jones A, Burger M, et al. Reshaping wound care: evaluation of an artificial intelligence app to improve wound assessment and management amid the COVID-19 pandemic[J]. Int Wound J, 2022, 19(6): 1561-1577.
- [17] Queen D, Harding K. Data-driven specialisation of wound care through artificial intelligence[J]. Int Wound J, 2019, 16(4): 879-880.
- [18] 马燕飞, 宁宁, 陈佳丽, 等. 临床伤口测量方法研究新进展[J]. 四川医学, 2022, 43(10): 1033-1036.
- [19] Anisuzzaman D M, Wang C, Rostami B, et al. Image-based artificial intelligence in wound assessment; a systematic review[J]. Adv Wound Care (New Rochelle), 2022, 11(12): 687-709.
- [20] 赵紫阳, 林文伟, 罗冠泰, 等. 基于图像分割和孔洞修复的三维伤口测量方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10572-10578.
- [21] Ohura N, Mitsuno R, Sakisaka M, et al. Convolutional neural networks for wound detection; the role of artificial intelligence in wound care[J]. J Wound Care, 2019, 28(Sup10): S13-S24.
- [22] 周莉平. 多功能 DNA 水凝胶的设计及其在组织修复与再生中的应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [23] Swerdlow M, Guler O, Yaakov R, et al. Simultaneous segmentation and classification of pressure injury image data using Mask-RCNN [J]. Comput Math Methods Med, 2023, 2023: 3858997.
- [24] Filko D, Nyarko E K. 2D/3D wound segmentation and measurement based on a robot-driven reconstruction system[J]. Sensors (Basel), 2023, 23(6): 3298.
- [25] Filko D, Marijanovic D, Nyarko E K. Automatic robot-driven 3d reconstruction system for chronic wounds[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(24): 8308.
- [26] Wang L, Pedersen P C, Strong D M, et al. Smartphone-based wound assessment system for patients with diabetes[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2015, 62(2): 477-488.
- [27] 王延峰, 杨巧红, 刘安康. 人工智能在慢性伤口评估和治疗中的应用[J]. 护士进修杂志, 2022, 37(15): 1393-1396.
- [28] Farahani M, Shafiee A. Wound healing; from passive to smart dressings[J]. Adv Healthc Mater, 2021, 10(16): e2100477.
- [29] O'Callaghan S, Galvin P, O'mahony C, et al. 'Smart' wound dressings for advanced wound care; a review[J]. J Wound Care, 2020, 29(7): 394-406.
- [30] Zhu Y, Zhang J, Song J, et al. A multifunctional pro-healing zwitterionic hydrogel for simultaneous optical monitoring of pH and glucose in diabetic wound treatment[J]. Adv Funct Mater, 2020, 30(6): 1905493.
- [31] Jiang J, Ding J, Wu X, et al. Flexible and temperature-responsive hydrogel dressing for real-time and remote wound healing monitoring[J]. J Mater Chem B, 2023, 11(22): 4934-4945.
- [32] Pang Q, Lou D, Li S, et al. Smart flexible electronics-integrated wound dressing for real-time monitoring and on-demand treatment of infected wounds[J]. Adv Sci (Weinh), 2020, 7(6): 1902673.
- [33] Howell R S, Liu H H, Khan A A, et al. Development of a method for clinical evaluation of artificial intelligence-based digital wound assessment tools[J]. JAMA Netw Open, 2021, 4(5): e217234.
- [34] Jung K, Covington S, Sen C K, et al. Rapid identification of slow healing wounds[J]. Wound Repair Regen, 2016, 24(1): 181-188.
- [35] Margolis D J, Allen-Taylor L, Hoffstad O, et al. Diabetic neuropathic foot ulcers; predicting which ones will not heal[J]. Am J Med, 2003, 115(8): 627-631.
- [36] Garland N T, Song J W, Ma T, et al. A miniaturized, battery-free, wireless wound monitor that predicts wound closure rate early[J]. Adv Healthc Mater, 2023: e2301280.
- [37] 魏惠燕, 潘红英, 黄晨, 等. 医院社区多学科联动慢性伤口居家护理云平台的构建及实施[J]. 护理学杂志, 2022, 37(21): 86-89.
- [38] Rennert R, Golinko M, Kaplan D, et al. Standardization of wound photography using the wound electronic medical record[J]. Adv Skin Wound Care, 2009, 22(1): 32-38.
- [39] 李雨明, 何璇, 朱宏博, 等. 结合表型信息的阿尔兹海默症图卷积神经网络分类方法研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2021, 40(2): 177-187.
- [40] 赵蒙蒙, 鲁贞贞, 朱书缘, 等. 基于卷积神经网络的眼科光学相干断层成像图像的自动分类[J]. 北京生物医学工程, 2021, 40(6): 557-563.
- [41] Watanabe R, Shima K, Horiuchi T, et al. A system for wound evaluation support using depth and image sensors [J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2021, 2021: 3709-3712.
- [42] 雷常彬, 刘珊珊, 王聪, 等. 人工智能在压力性损伤中应用的研究进展[J]. 护理研究, 2023, 37(5): 887-891.
- [43] 陈锦苗, 陈萌, 任晓川, 等. 金属微电池敷料在创面修复中的研究进展[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2023, 39(6): 596-600.