

# 人工智能在烧伤外科临床应用中的研究进展

丁亚荣, 王毅, 王俊康, 王海云

联勤保障部队第943医院烧伤整形科, 甘肃武威 733000

**摘要:** 烧伤是一种高致残率和病死率的急性创伤性疾病, 传统诊断与治疗手段存在主观性强、准确率低及个性化水平不足等问题。近年来, 随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的飞速发展, 在烧伤外科领域的应用取得了显著进步。AI在烧伤临床实践中的应用主要体现在烧伤深度与面积的精准诊断、术前风险评估、术中图像引导、辅助康复治疗及术后预后预测等方面。尽管目前AI技术仍面临诸多挑战, 但无疑将成为推动烧伤医学智能化进程的重要驱动力。本文综述了AI在烧伤外科临床应用的研究现状, 并展望了未来发展趋势, 旨在为烧伤外科学的进步提供有益参考。

**关键词:** 人工智能; 烧伤; 诊断; 康复; 预后预测

**中图分类号:** R319; R644

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-5227(2025)11-1103-07

**DOI:** 10.12435/j.issn.2095-5227.25071003

**引用本文:** 丁亚荣, 王毅, 王俊康, 等. 人工智能在烧伤外科临床应用中的研究进展 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (11): 1103-1109.

## Research advances in application of artificial intelligence in burn surgery

DING Yarong, WANG Yi, WANG Junkang, WANG Haiyun

Burn and Plastic Surgery Department of the 943 Hospital of the Joint Logistics Support Force of the People's Liberation Army, Wuwei 733000, Gansu Province, China

Corresponding author: WANG Haiyun. Email: 15293526899@139.com

**Abstract:** Burn injuries, as acute traumatic conditions with high disability and mortality rates, face challenges in traditional diagnosis and treatment methods due to strong subjectivity, low accuracy, and insufficient personalization. In recent years, with the rapid development of artificial intelligence (AI) technology, significant progress has been made in the field of burn surgery. The application of AI in burn clinical practice mainly includes precise diagnosis of burn depth and area, preoperative risk assessment, intraoperative image guidance, assisted rehabilitation treatment, and postoperative prognosis prediction. Although AI technology currently faces many challenges, it undoubtedly will become an important driving force in advancing the intelligentization of burn medicine. This article systematically summarizes the current research status of AI applications in burn surgery clinical practice and looks forward to future development trends, aiming to provide useful references for the advancement of burn surgery.

**Keywords:** artificial intelligence; burn; diagnosis; rehabilitation; prognosis prediction

**Cited as:** Ding YR, Wang Y, Wang JK, et al. Research advances in application of artificial intelligence in burn surgery [J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(11): 1103-1109.

烧伤作为一种致残率和病死率较高的急性创伤性疾病, 已成为全球性公共卫生问题<sup>[1-2]</sup>。据世界卫生组织统计, 全球每年约有1 100万人发生烧伤, 其中约18万人因烧伤及相关并发症死亡<sup>[2]</sup>。传统烧伤诊疗模式主要依赖医师的主观经验、手工评估和有限的辅助设备, 存在诊断准确率低、评估耗时且易受人为因素影响等不足<sup>[3-4]</sup>。同时, 烧伤创面复杂多变, 多模态数据整合程度有限, 导致治疗方案制定和术中决策支持效率低下且缺乏精准性, 影响患者的治疗效果和预后<sup>[5]</sup>。

随着机器学习、深度学习和计算机视觉等技术的快速发展, 人工智能(artificial intelligence, AI)为烧伤外科提供了从图像自动分析到辅助决策支持的新型解决方案<sup>[6]</sup>。多模态影像融合及虚拟现实(virtual reality, VR)技术的引入, 进一步丰富了烧伤创面和患者整体状态的动态监测方式, 推动了智能化诊疗和个性化康复的进程。本文系统梳理了AI在烧伤外科诊断、手术、康复及预后预测等方面的应用现状与研究进展, 探讨了其技术优势与挑战, 旨在为优化临床实践、提升患者预后和康复效果提供理论依据与实践参考。

## 1 AI在烧伤诊断中的应用

烧伤创面深度和面积的准确诊断对评估烧伤

收稿日期: 2025-07-10

基金项目: 省部级课题

第一作者: 丁亚荣, 学士, 主管护师。Email: 13679360072@163.com

通信作者: 王海云, 学士, 护士长, 主管护师。Email: 15293526899@139.com

患者病情及制定治疗方案至关重要。随着AI技术的不断进步,基于AI的图像分析方法在提升烧伤诊断的准确性和效率方面展现出良好效果。

### 1.1 烧伤深度诊断

传统上,烧伤深度的诊断主要依赖临床医师的主观经验,准确率仅为65%~70%<sup>[3]</sup>。尽管激光多普勒成像、激光散斑对比成像和高分辨率红外热成像等辅助技术已被应用于烧伤深度评估,但这些设备价格昂贵且操作复杂,限制了其临床推广应用<sup>[7-8]</sup>。AI技术借助算法工具,实现了对烧伤创面图像的自动化分割和分析。在分类算法中,烧伤的分级通常是按照其不同损伤深度进行划分,主要包括I度、浅II度、深II度和III度烧伤。此外,AI算法还会依据烧伤的发生部位对图像进行初步分类,再针对不同部位采用相应的分类算法进行细化识别。

烧伤图像的AI分类技术的发展可划分为3个阶段。第一阶段主要采用Fuzzy-ArtMap和多维缩放分析等早期神经网络方法,侧重于基本的模式识别和数据映射;第二阶段重点转向特征提取技术,广泛应用支持向量机、随机森林等传统机器学习分类器;第三阶段则将ResNet、DenseNet、Inception和牛津大学计算机视觉组(visual geometry group, VGG)等预训练深度神经网络模型用作基础架构,通过微调这些模型的参数或者应用迁移学习技术,来提取烧伤图像的深层特征,从而提升分类的准确性和稳定性。目前,利用深度学习算法对由数码相机或手机摄像头拍摄的可见光图像进行训练,已在烧伤深度识别领域取得了显著进展。Wang等<sup>[9]</sup>采用基于ResNet50的深度迁移学习方法,对I度烧伤、II度烧伤以及III度烧伤深度的诊断准确率均达到约80%。Nagrath等<sup>[10]</sup>利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)结合迁移学习,对不同深度的烧伤照片及健康皮肤图像进行了分类,其所采用的多种深度学习算法在烧伤深度分类的准确率均超过了90%。其中,VGG-16、DenseNet121和CNN模型的准确率分别达到了97.43%、96.66%和93.87%,显示出较强的分类性能和较高的临床应用潜力。结合光谱成像技术,AI算法能够对烧伤组织进行非侵入性、多波段的精准分析<sup>[11]</sup>。基于高光谱或多光谱成像技术采集的丰富光谱数据,通过AI模型进行特征提取和模式识别,能够准确区分不同烧伤深度的组织特征。Jeffrey等<sup>[12]</sup>利用1 037张多光谱图像训练了CNN模

型,该模型对于烧伤深度诊断的整体准确率高达89.29%,其中受伤后1~2天的准确率最低,为88.5%;3~4天时准确率最高,达到93.5%。另一项研究基于MBNet模型对高光谱图像中不同烧伤程度进行了检测。与K近邻算法(K-nearest neighbors, KNN)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、梯度提升机(gradient boosting machine, GBM)、线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、多层感知机(multilayer perceptron, MLP)、一维卷积神经网络(1D convolutional neural network, 1D CNN)及Transformer等传统机器学习算法相比,MBNet模型采用双向特征融合策略,在6种不同烧伤深度的识别中实现了93%的平均准确率,表现显著优于其他传统模型<sup>[13]</sup>。此外,AI技术还被用于超声图像的烧伤深度评估,在识别深度烧伤时的准确率高达99%<sup>[14]</sup>。这为多模态影像结合AI实现精准诊断提供了有力支持。

### 1.2 烧伤面积评估

传统的评估方法如九分法和Lund-Browder法依赖于医师的经验,往往存在主观性强、误差较大的问题<sup>[4]</sup>。当患者体型复杂、烧伤部位分散或创面不规则时,这些传统方法的局限性更加明显。近年来,基于深度学习的自动化烧伤面积测量方法逐渐兴起。深度学习算法通过构建多层神经网络,利用大量标注烧伤图像进行训练,能够自动提取烧伤创面特征,实现对烧伤区域的精准识别与分割。

深度学习语义分割模型通过对烧伤创面图像进行像素级分类,提取多层次图像特征,能够实现对烧伤组织与正常皮肤的精准区分。常用模型包括U-Net、DeeplabV3+、PSPNet和Mask R-CNN,凭借其强大的编码-解码结构和多尺度特征融合,能够完成高效且稳定的烧伤区域分割。Chang等<sup>[15]</sup>将ResNet101作为编码器集成到上述4种语义分割模型中,基于4 991张烧伤图像的数据集,采用边界标注法对整体烧伤区域和手掌进行了模型训练,并在标注前通过超像素分割对深层(II度和III度)烧伤区域进行预处理以实现精确分割。研究结果显示,DeeplabV3+、Mask R-CNN、U-Net和PSPNet模型在整体烧伤区域分割上的准确率分别为98.46%、98.41%、98.36%和97.83%;在深度烧伤区域的分割准确率则分别达到98.88%、98.64%、98.54%和97.98%<sup>[15]</sup>。在实现对烧伤区域的精准分

割后,结合拍摄距离、镜头焦距、像素数量以及患者的身高、体重、年龄和性别等参数,能够准确计算出烧伤面积百分比(%total body surface area, %TBSA)<sup>[15]</sup>。Xu等<sup>[16]</sup>提出了一种联合任务深度神经网络框架,实现了身体部位实例分割与烧伤区域语义分割的同步处理。该框架由ConvNeXt-B编码器、人体部位分割解码器、烧伤区域分割解码器和非对称注意力模块4部分组成。基于1340张烧伤创面彩色图像训练,该模型在烧伤区域分割任务中分别达到了73.82%的平均交并比和85.12%的平均骰系数。此外,该研究团队进一步开发了基于该框架的手机应用程序,可利用手机摄像头现场采集彩色烧伤图像,从而实现了%TBSA的实时测算<sup>[16]</sup>。

目前用于深度学习训练的烧伤图像大多为二维图像,难以全面且精确地反映创面形态及人体复杂曲面结构,从而限制了烧伤面积测量的准确性。虽然基于三维图像数据的深度学习模型逐渐兴起,但相关的数据采集与处理技术尚处于发展初期,且相关研究存在数据量有限、模型缺乏临床验证以及泛化能力不足等问题<sup>[17-19]</sup>。随着三维激光扫描技术的普及和计算机计算能力的提升,获取大规模、高质量且标注精准的烧伤图像数据集成为可能。基于此,开发更为适配的网络架构以实现烧伤图像的精准分割,将有望获得更佳的效果。

## 2 AI在烧伤手术中的应用

烧伤外科学是一门实践性很强的学科,通过外科操作对受损组织进行精准切除和修复重建是手术成功的关键。近年来,AI在烧伤手术中的应用日益深入,其主要体现在决策支持和术中引导两个方面。

### 2.1 决策支持

AI在烧伤手术决策支持中的应用逐渐深入。通过整合患者临床资料及手术相关因素,AI能够预测术中潜在的并发症和风险,帮助医师提前制定应对策略,降低手术风险。一项研究基于6种机器学习算法,构建了预测烧伤手术中出血量是否超过750 mL的模型<sup>[20]</sup>。结果表明,初始血红蛋白水平、手术开始时间与烧伤发生时间的间隔、初始血小板计数、切割及植皮的总面积比例,以及手术持续时间是影响术中出血量的重要预测因素<sup>[20]</sup>。尽管随机森林模型在大多数评价指标中表

现最佳,但其准确率仅为77.6%,表明这些传统机器学习算法仍需进一步训练和优化,以提高预测性能。与此同时,术中低血压预测指数(hypotension prediction index, HPI)对全麻患者的血液动力学监测同样尤为重要。AI驱动的HPI通过实时分析患者的生理数据,能够动态监控血液动力学变化,辅助医师术中决策,显著降低烧伤患者,尤其是游离皮瓣手术患者的术中低血压发生率及严重程度<sup>[21-22]</sup>。此外,AI在判断手术需求方面具有重要价值。一项研究评估了一种基于成像设备的AI诊断工具,用于辅助医疗团队判断烧伤创面应采取保守治疗还是手术治疗<sup>[23]</sup>,结果显示,多光谱成像的预测准确率为58%,而激光多普勒成像的准确率则高达90%<sup>[23]</sup>。该研究凸显了AI在烧伤管理中的潜力,但该AI模型采用的二元分类方法在捕捉烧伤创面多因素复杂性方面仍存在一定局限。

相比其他外科领域,AI在烧伤手术决策支持中的实际应用相对有限。这主要由于烧伤患者病情复杂多变、数据多样,而传统的预测模型多依赖于静态数据,难以充分捕捉动态变化和个体差异,进而给AI模型的开发和应用带来较大挑战。研究人员正通过实时采集和分析术中术区图像、组织灌注情况及生理监测数据,结合先进的AI算法,实现对手术进展和患者状态的动态评估与预测,这将成为提高烧伤手术决策支持能力的关键发展方向。

### 2.2 术中引导

目前,磨痂术等清创手术被认为是治疗深Ⅱ度以上烧伤的有效方法。AI系统可以分析术中图像和数据,实时判断创面组织的存活状态,从而辅助外科医师提高手术的精度和安全性<sup>[24-25]</sup>。一项基于猪烧伤模型的研究,探讨了术中多光谱成像结合AI辅助的有效性。该研究评估了外科医师在有无AI辅助成像设备情况下,对烧伤组织活力的判断能力。结果显示,AI模型对烧伤创面存活情况的判断准确率高达87%,而外科医师借助该AI辅助设备后的判断准确率提高了25%<sup>[26]</sup>。此项研究表明,AI辅助成像系统不仅能够优化外科医师的决策过程,还有助于降低烧伤创面过度切削的风险。在游离皮瓣重建方面,手术导航系统结合AI算法,能够实时分析患者影像数据,并通过增强现实技术将三维可视化信息叠加到医师视野中,从而实现精准的手术引导与辅助操作。相关系统

评价研究表明,该技术在优化术前规划和术中指导方面展现出显著潜力,不仅帮助外科医师精准定位供区及受区的血管解剖结构,提高穿支血管的识别准确率,还有效缩短了手术时间,增强了手术方案的科学性和可行性<sup>[27]</sup>。尽管AI在烧伤相关手术中的术中引导方面展现出广阔前景,但现有研究大多基于动物实验或小规模临床试验,缺乏足够的大样本、多中心临床数据支持。为充分验证AI在烧伤外科手术指导中的实际临床价值,还需开展大规模、多中心的系统性研究。在烧伤医学教育与培训方面,智能虚拟现实技术也展现出良好前景。有研究团队开发了一套基于VR的烧伤手术模拟训练系统,该系统通过智能终端为医务人员提供烧伤外科的知识培训及操作指导,支持对手术细节的精准操练,有效提高了医师的技能和手术安全性<sup>[28]</sup>。

目前,AI在烧伤手术过程中的应用尚处于起步阶段。随着相关技术的不断进步,智能清创导航、手术机器人以及基于增强现实的辅助系统将推动烧伤外科手术智能化发展的关键方向。

### 3 AI在烧伤康复中的应用

烧伤康复是一项复杂且长期的过程,包括伤口愈合监测、功能恢复训练、心理支持等多个方面。AI技术的引入为烧伤康复带来了精准高效的新途径,推动了烧伤康复模式的创新。

烧伤康复的初始阶段主要是物理治疗,旨在恢复因烧伤导致的肢体和肌肉功能,包括活动能力和力量的改善<sup>[29]</sup>。近年来,AI在物理治疗中的应用逐渐得到验证,已被用于患者康复训练数据的挖掘<sup>[30]</sup>和训练过程的实时监测<sup>[31]</sup>。Guo等<sup>[32]</sup>开发了一种基于超低频人体运动能量驱动的自供能AI手杖,能够辅助行动障碍患者恢复运动功能。此外,AI技术还促进了烧伤患者的远程监测与远程康复,实现了康复医疗服务的广泛覆盖和持续跟踪<sup>[33]</sup>。借助可穿戴设备与远程医疗系统,AI算法能够实时监测患者的康复进程,提供即时反馈,并支持与多学科医疗团队的在线虚拟会诊<sup>[34]</sup>。AI模型还能够预测康复治疗的效果,为个性化康复方案的制定提供科学依据<sup>[35]</sup>。除物理治疗外,集成了AI的智能手机应用程序能够实现对术后游离皮瓣的自动监测。该系统由自动识别皮瓣的分割模型和评估识别皮瓣灌注状态的分级模型组成,能够准确反映并量化皮瓣的状态<sup>[36-37]</sup>。

智能虚拟现实技术的应用为烧伤患者的康复带来了全新的模式和沉浸式体验。通过深度融合AI与VR技术,AI能够实现环境建模、动作识别、情绪分析及行为预测,从而大幅提升VR系统的交互性能和真实感,为患者提供更个性化和高效的康复支持<sup>[38]</sup>。在烧伤康复过程中,智能虚拟现实技术能够基于患者的生理心理状态动态调整虚拟场景并提供即时反馈,显著提升治疗的舒适度和效果。烧伤患者可通过便携式VR设备参与虚拟视频、音乐或互动游戏等场景,以减轻清创和换药过程中产生的疼痛与恐惧<sup>[39-41]</sup>。同时,借助AI对康复程序的智能调节和个性化设计,能够使康复训练更具针对性和成效性。一项纳入16项随机对照试验、涉及535名烧伤患者的系统评价表明,基于VR的康复干预不仅显著优于传统康复方法,提高了患者的生活质量和工作能力,在改善关节活动度方面同样表现出积极效果<sup>[42]</sup>。

尽管现有的部分研究以其他疾病或一般康复人群为对象,缺乏针对烧伤患者的专项验证,但这些研究成果和方法在烧伤康复领域仍具有重要的实际意义。目前,皮肤移植物成活、瘢痕挛缩预防及功能恢复等是烧伤康复的重要方面。随着AI算法的进步和烧伤医学数据集规模的扩大,针对这些关键问题的智能化系统将不断升级优化,从而助力烧伤康复的智能化发展进程。

### 4 AI在烧伤预后预测中的应用

借助AI算法对患者的烧伤情况、生命体征及相关临床数据进行综合分析,不仅可以精准预测患者的病死率和术后并发症风险,还能辅助医师制定科学合理的治疗方案,提前评估治疗风险,从而指导手术时机及康复策略的选择。已有研究表明,急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)与烧伤患者的不良预后密切相关<sup>[43]</sup>。Rashidi等<sup>[44]</sup>利用机器学习算法,结合烧伤患者中性粒细胞明胶酶相关脂质运输蛋白(neutrophil gelatinase-associated lipocalin, NGAL)和肌酐水平,构建了预测AKI的模型。该模型在整合NGAL与肌酐指标后,预测准确率高达96%。Tang等<sup>[23]</sup>基于157例重度烧伤患者的临床数据,采用XGBoost算法建立AKI风险预测模型,并筛选出APACHE II评分、全层烧伤面积、入院后24 h液体复苏量、脓毒症发生情况、入院后24 h尿量、序贯器官衰竭评估评分以及入院后48 h液体量7个关键预测因素。此外,脓毒症

是烧伤相关死亡和发病的主要原因之一<sup>[45]</sup>。Tran等<sup>[46]</sup>基于心率、体温、血红蛋白、尿素氮和总二氧化碳等指标,开发了一种机器学习模型用于预测烧伤患者的脓毒症。研究结果显示,该模型不仅优于传统预测方法,且所需输入特征较少,预测准确率高达90%<sup>[46]</sup>。Luo等<sup>[47]</sup>则采用逻辑回归方法,结合烧伤面积、血红蛋白水平、糖尿病史及血清钾浓度等指标,评估脓毒症风险。Jeon等<sup>[48]</sup>通过机器学习发现,未成熟粒细胞百分比亦可作为烧伤患者脓毒症发生风险的早期实验室指标。在其他并发症的风险评估方面,AI同样发挥着积极作用。Esumi等<sup>[49]</sup>基于烧伤患者ICU住院期间的生命体征及血液检测数据,构建了预测谵妄发生风险的模型。Xi等<sup>[50]</sup>通过多变量逻辑回归确定了瘢痕形成的独立预测因素,并开发出相应预测模型。Xie等<sup>[51]</sup>则基于Caprini风险评估量表,通过多变量逻辑回归分析确立了深静脉血栓形成的关键风险因素,开发了针对烧伤患者的预测模型。此外,机器学习算法在烧伤患者病死率预测中也表现出良好效果。Schmidt等<sup>[52]</sup>利用随机森林和梯度提升决策树等算法,基于德国烧伤登记中心的超过1万例病例数据,开发出一种新型BoBS评分系统。该评分系统在预测性能上显著优于传统评分,准确率达到93.1%<sup>[52]</sup>。

上述对烧伤患者并发症预测的研究主要集中于传统机器学习,这些方法对数据需求较低且具较好可解释性。然而,传统机器学习模型难以充分捕捉烧伤创面和患者多维数据间的复杂非线性关系,预测准确率有限。随着医学数据量的不断积累和多模态数据的融合,如果能构建具备高效特征自动提取和多模态融合能力的深度学习网络架构,将有望显著提高烧伤并发症及病死率预测的准确性和临床实用性。

## 5 结语与展望

AI在烧伤外科临床应用中取得了显著进展,推动了烧伤诊断、手术辅助及康复治疗智能化转型。然而,AI在临床推广中仍面临诸多挑战:(1)现有研究多基于单中心、小样本数据,缺乏大规模、多中心、多种族背景的多模态数据集支持,限制了模型的泛化能力和临床应用范围;(2)烧伤创面的三维结构复杂,二维图像难以全面反映其形态,如何有效融合三维成像及多模态数据以提高诊断和评估的准确性,仍是亟待解决的技术难

题;(3)AI模型的可解释性不足,临床决策支持体系融合度有限,影响了医师对AI辅助系统的信任和依赖;(4)隐私保护、数据安全及伦理问题也是AI广泛应用必须重视的重要方面;(5)烧伤术中AI技术对实时性和稳定性的需求极高,相关应用仍处于探索和验证阶段,需进一步优化<sup>[53]</sup>。

在技术进步和临床需求的共同推动下,烧伤外科AI的发展将呈现以下趋势:(1)构建涵盖二维/三维成像、临床指标及生理信号等多模态数据的大规模高质量标注数据库,提高算法的深度学习能力和泛化水平;(2)探索融合高光谱成像、超声和热成像等多种传感技术的诊断与监测系统,实现对烧伤创面微环境的精准感知和动态评估;(3)加强AI模型的可解释性研究,构建符合临床需求、透明且可追溯的智能决策支持平台,提高医师与AI系统的协同效率;(4)推动AI深度融入临床工作流程和远程医疗体系,实现烧伤诊疗和康复的全流程智能化、个性化管理;(5)加快术中智能导航、手术机器人等技术的临床转化,提升烧伤手术的智能化水平。随着技术的不断迭代与临床应用的深入,AI有望全面融入烧伤医学的全周期管理,推动烧伤外科向智能化方向发展,助力提升诊疗水平和患者生活质量。

**作者贡献** 丁亚荣:调查研究,文献搜集,初稿撰写;王毅:项目管理,文献搜集;王俊康:文献整理与分析;王海云:总体构思与审核修订。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

## 参考文献

- 1 Jeschke MG, van Baar ME, Choudhry MA, et al. Burn injury [J]. Nat Rev Dis Primers, 2020, 6: 11.
- 2 Siu WS, Ma H, Leung PC. Review on current advancements in facilitation of burn wound healing [J]. Bioengineering, 2025, 12 (4): 428.
- 3 Jaskille AD, Shupp JW, Jordan MH, et al. Critical review of burn depth assessment techniques: Part I. Historical review [J]. J Burn Care Res, 2009, 30 (6): 937-947.
- 4 Carrougher GJ, Pham TN. Burn size estimation: A remarkable history with clinical practice implications [J]. Burns Open, 2024, 8 (2): 47-52.
- 5 Rahman MM, Masry MEL, Gnyawali SC, et al. A framework for advancing burn assessment with artificial intelligence [J]. Mil Med, 2025, 190 (Supplement 2): 387-393.
- 6 郭华源, 刘盼, 徐洪丽, 等. 医学人工智能公共服务平台研究与建设 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (1): 104-112.
- 7 Claes KEY, Hoeksema H, Vyncke T, et al. Evidence based burn depth assessment using laser-based technologies: where do we stand? [J]. J Burn Care Res, 2021, 42 (3): 513-525.
- 8 Dang J, Lin M, Tan C, et al. Use of infrared thermography for assessment of burn depth and healing potential: a systematic review [J]. J Burn Care Res, 2021: irab108.

- 9 Wang Y, Ke Z, He ZY, et al. Real-time burn depth assessment using artificial networks: a large-scale, multicentre study [J]. *Burns*, 2020, 46 (8): 1829-1838.
- 10 Nagrath M, Kumar Sahu A, Jangid N, et al. Enhanced skin burn assessment through transfer learning: a novel framework for human tissue analysis [J]. *J Med Eng Technol*, 2023, 47 (5): 288-297.
- 11 Tan P, Ravulapalli K, Lewis CJ. A systematic review of advances in the use of spectral imaging in burn depth assessment [J]. *Burns*, 2025, 51 (3): 107401.
- 12 Carter JE, Shupp JW, Phelan HA, et al. Refinement of an artificial intelligence algorithm for enhanced burn wound depth assessment using multispectral imaging: an expanded proof of concept study [J]. *J Burn Care Res*, 2025; iraf057.
- 13 Wang SJ, Gu MH, Zhang ML, et al. Research on a burn severity detection method based on hyperspectral imaging [J]. *Sensors*, 2025, 25 (5): 1330.
- 14 Lee S, Rahul, Lukan J, et al. A deep learning model for burn depth classification using ultrasound imaging [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2022, 125: 104930.
- 15 Chang CW, Ho CY, Lai FP, et al. Application of multiple deep learning models for automatic burn wound assessment [J]. *Burns*, 2023, 49 (5): 1039-1051.
- 16 Xu XY, Bu QL, Xie JM, et al. On-site burn severity assessment using smartphone-captured color burn wound images [J]. *Comput Biol Med*, 2024, 182: 109171.
- 17 Meevassana J, Sumonsriwarankun P, Suwajo P, et al. 3D PED BURN app: A precise and easy-to-use pediatric 3D burn surface area calculation tool [J]. *Health Sci Rep*, 2022, 5 (4): e694.
- 18 Choi J, Patil A, Vendrow E, et al. Practical computer vision application to compute total body surface area burn: reappraising a fundamental burn injury formula in the modern era [J]. *JAMA Surg*, 2022, 157 (2): 129-135.
- 19 Chang CW, Wang HW, Lai FP, et al. Comparison of 3D and 2D area measurement of acute burn wounds with LiDAR technique and deep learning model [J]. *Front Artif Intell*, 2025, 8: 1510905.
- 20 Zuo FQ, Su JQ, Li Y, et al. Development and validation of a machine learning-based model for predicting intraoperative blood loss during burn surgery [J]. *Surgery*, 2025, 184: 109445.
- 21 Shaw KM, Safavi KC. The role of artificial intelligence in anesthesia monitoring and surveillance [J]. *Anesthesiol Clin*, 2025, 43 (3): 577-585.
- 22 Szrama J, Gradys A, Woźniak A, et al. The hypotension prediction index in free flap transplant in head and neck surgery: protocol of a prospective randomized controlled trial [J]. *Life*, 2025, 15 (3): 400.
- 23 Perusseau-Lambert A, Akram M, Frew Q, et al. Comparison between multispectral imaging and laser Doppler imaging to predict burn wound requirements for surgery [J]. *Burns*, 2025, 51 (8): 107650.
- 24 Tripathi AN, Kumar S, Sharma VK, et al. Comparing toric intraocular lens alignment: intraoperative image-guided system versus manual marking in cataract surgery: a randomized clinical trial [J]. *Int Ophthalmol*, 2025, 45 (1): 228.
- 25 丁辉, 王广志. 神经外科手术机器人与导航系统的发展与应用 [J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2025, 25 (2): 144-151.
- 26 Yu S, Dwight J, Siska RC, et al. Feasibility of intra-operative image guidance in burn excision surgery with multispectral imaging and deep learning [J]. *Burns*, 2024, 50 (1): 115-122.
- 27 Wolbert TT, White AE, Han J, et al. The application of augmented reality technology in free flap reconstruction: a systematic review [J]. *Microsurgery*, 2025, 45 (5): e70080.
- 28 Warner-Levy J, Sheikh Z, Dheansa B, et al. Enhancing acute reconstructive skills in burn surgery through virtual simulation [J]. *Plast Reconstr Surg Glob Open*, 2025, 13 (2): e6527.
- 29 Shaikh SA, Telang PA, Arora S. Physical therapy interventions of an electrical burn injury-afflicted patient: a case report [J]. *Cureus*, 2022, 14 (11): e31176.
- 30 Sivarajkumar S, Gao FY, Denny P, et al. Mining clinical notes for physical rehabilitation exercise information: natural language processing algorithm development and validation study [J]. *JMIR Med Inform*, 2024, 12: e52289.
- 31 Jatesiktat P, Lim GM, Kuah CWK, et al. Autonomous modeling of repetitive movement for rehabilitation exercise monitoring [J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2022, 22 (1): 175.
- 32 Guo XG, He T, Zhang ZX, et al. Artificial intelligence-enabled caregiving walking stick powered by ultra-low-frequency human motion [J]. *ACS Nano*, 2021, 15 (12): 19054-19069.
- 33 Barzegar Khanghah A, Fernie G, Roshan Fekr A. Design and validation of vision-based exercise biofeedback for tele-rehabilitation [J]. *Sensors*, 2023, 23 (3): 1206.
- 34 Latreche A, Kelaiaia R, Chemori A, et al. A new home-based upper- and lower-limb telerehabilitation platform with experimental validation [J]. *Arab J Sci Eng*, 2023: 1-16.
- 35 Santilli V, Mangone M, Diko A, et al. The use of machine learning for inferencing the effectiveness of a rehabilitation program for orthopedic and neurological patients [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2023, 20 (8): 5575.
- 36 Kim J, Lee SM, Kim DE, et al. Development of an automated free flap monitoring system based on artificial intelligence [J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7 (7): e2424299.
- 37 Hsu SY, Chen LW, Huang RW, et al. Quantization of extraoral free flap monitoring for venous congestion with deep learning integrated iOS applications on smartphones: a diagnostic study [J]. *Int J Surg*, 2023, 109 (6): 1584-1593.
- 38 Bulduk M, Can V, Aktaş E, et al. Artificial intelligence-assisted virtual reality for reducing anxiety in pediatric endoscopy [J]. *J Clin Med*, 2025, 14 (4): 1344.
- 39 May SL, Genest C, Francoeur M, et al. Virtual reality mobility for burn patients (VR-MOBILE): A within-subject-controlled trial protocol [J]. *Paediatr Neonatal Pain*, 2022, 4 (4): 192-198.
- 40 Phelan I, Furness PJ, Matsangidou M, et al. Designing effective virtual reality environments for pain management in burn-injured patients [J]. *Virtual Real*, 2023, 27 (1): 201-215.
- 41 Dewi IS, Handayani E, Masithoh RF, et al. Pain management with virtual reality in burn patients: a literature review [J]. *Br J Community Nurs*, 2024, 29 (Sup12): S22-S28.
- 42 Lan XD, Tan ZM, Zhou T, et al. Use of virtual reality in burn rehabilitation: a systematic review and meta-analysis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2023, 104 (3): 502-513.
- 43 Niculae A, Peride I, Tiglis M, et al. Burn-induced acute kidney injury-two-lane road: from molecular to clinical aspects [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23 (15): 8712.
- 44 Rashidi HH, Makley A, Palmieri TL, et al. Enhancing military burn- and trauma-related acute kidney injury prediction through an automated machine learning platform and point-of-care testing [J]. *Arch Pathol Lab Med*, 2021, 145 (3): 320-326.

- 45 Tedesco DJ, Hutter MF, Khalaf F, et al. Sepsis in burn care: incidence and outcomes [J]. *Mil Med Res*, 2025, 12 (1): 55.
- 46 Tran NK, Albahra S, Pham TN, et al. Novel application of an automated-machine learning development tool for predicting burn sepsis: proof of concept [J]. *Sci Rep*, 2020, 10 (1): 12354.
- 47 Luo WQ, Xiong L, Wang JS, et al. Development and performance evaluation of a clinical prediction model for sepsis risk in burn patients [J]. *Medicine*, 2024, 103 (48): e40709.
- 48 Jeon K, Lee NR, Jeong S, et al. Immature granulocyte percentage for prediction of sepsis in severe burn patients: a machine learning-based approach [J]. *BMC Infect Dis*, 2021, 21 (1): 1258.
- 49 Esumi R, Funao H, Kawamoto E, et al. Machine learning-based prediction of delirium and risk factor identification in intensive care unit patients with burns: retrospective observational study [J]. *JMIR Form Res*, 2025, 9: e65190.
- 50 Xi D, Yu HL, Yu T. Development of a predictive model for the relationship between serum pan-immunoinflammatory index levels and scar formation in facial burn patients [J]. *Am J Transl Res*, 2025, 17 (3): 2197-2209.
- 51 Xie LZ, Xu AH, Cai DD, et al. Development of a predictive model for deep vein thrombosis in burn patients based on the Caprini Risk Assessment Scale [J]. *Am J Transl Res*, 2025, 17 (1): 538-549.
- 52 Schmidt SV, Drysch M, Reinkemeier F, et al. Bochum Burn Survival (BoBS) score - A novel machine learning-based burn survival prediction score developed with data from the German Burn Registry [J]. *Burns*, 2025, 51 (8): 107614.
- 53 张勤. 人工智能决策系统在烧伤领域应用的主要瓶颈与解决途径 [J/OL]. *中华损伤与修复杂志 (电子版)*, 2019, 14 (6): 406-409.

(责任编辑:施晓亚,潘越)

(上接第1082页)

- 39 El Hajj Y, Shahin T, Dieng MM, et al. Pregnenolone sulfate induces transcriptional and immunoregulatory effects on T cells [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1): 6782.
- 40 Ayatollahi A, Bagheri S, Ashraf-Ganjouei A, et al. Does pregnenolone adjunct to risperidone ameliorate irritable behavior in adolescents with autism spectrum disorder: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial? [J]. *Clin Neuropharmacol*, 2020, 43 (5): 139-145.
- 41 Feng JY, Li HH, Shan L, et al. Clinical effect of vitamin D (3) combined with the Early Start Denver Model in the treatment of autism spectrum disorder in toddlers [J]. *Zhongguo Dang Dai Er Ke Za Zhi*, 2019, 21 (4): 337-341.
- 42 Kerley CP, Power C, Gallagher L, et al. Lack of effect of vitamin D (3) supplementation in autism: a 20-week, placebo-controlled RCT [J]. *Arch Dis Child*, 2017, 102 (11): 1030-1036.
- 43 Ellul P, Rosenzweig M, Peyre H, et al. Regulatory T lymphocytes/Th17 lymphocytes imbalance in autism spectrum disorders: evidence from a meta-analysis [J]. *Mol Autism*, 2021, 12 (1): 68.
- 44 Asadabadi M, Mohammadi MR, Ghanizadeh A, et al. Celecoxib as adjunctive treatment to risperidone in children with autistic disorder: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. *Psychopharmacology*, 2013, 225 (1): 51-59.
- 45 Romero-Miguel D, Lamanna-Rama N, Casquero-Veiga M, et al. Minocycline in neurodegenerative and psychiatric diseases: An update [J]. *Eur J Neurol*, 2021, 28 (3): 1056-1081.
- 46 Ghaleiha A, Alikhani R, Kazemi MR, et al. Minocycline as adjunctive treatment to risperidone in children with autistic disorder: a randomized, double-blind placebo-controlled trial [J]. *J Child Adolesc Psychopharmacol*, 2016, 26 (9): 784-791.
- 47 Raghu G, Berk M, Campochiaro PA, et al. The multifaceted therapeutic role of N-acetylcysteine (NAC) in disorders characterized by oxidative stress [J]. *Curr Neuropharmacol*, 2021, 19 (8): 1202-1224.
- 48 Smaga I, Frankowska M, Filip M. N-acetylcysteine as a new prominent approach for treating psychiatric disorders [J]. *Br J Pharmacol*, 2021, 178 (13): 2569-2594.
- 49 Dean OM, Gray KM, Villagonzalo KA, et al. A randomised, double blind, placebo-controlled trial of a fixed dose of N-acetyl cysteine in children with autistic disorder [J]. *Aust N Z J Psychiatry*, 2017, 51 (3): 241-249.
- 50 Wink LK, Adams R, Wang ZM, et al. A randomized placebo-controlled pilot study of N-acetylcysteine in youth with autism spectrum disorder [J]. *Mol Autism*, 2016, 7: 26.
- 51 Nikoo M, Radnia H, Farokhnia M, et al. N-acetylcysteine as an adjunctive therapy to risperidone for treatment of irritability in autism: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial of efficacy and safety [J]. *Clin Neuropharmacol*, 2015, 38 (1): 11-17.
- 52 Ghanizadeh A, Moghimi-Sarani E. A randomized double blind placebo controlled clinical trial of N-Acetylcysteine added to risperidone for treating autistic disorders [J]. *BMC Psychiatry*, 2013, 13: 196.
- 53 Hardan AY, Fung LK, Libove RA, et al. A randomized controlled pilot trial of oral N-acetylcysteine in children with autism [J]. *Biol Psychiatry*, 2012, 71 (11): 956-961.
- 54 Theoharides TC, Asadi S, Panagiotidou S. A case series of a luteolin formulation (NeuroProtek®) in children with autism spectrum disorders [J]. *Int J Immunopathol Pharmacol*, 2012, 25 (2): 317-323.
- 55 Savino R, Medoro A, Ali S, et al. The emerging role of flavonoids in autism spectrum disorder: a systematic review [J]. *J Clin Med*, 2023, 12 (10): 3520.
- 56 Aldekhail NM, Khojah H, Alsaadoun NH, et al. Herbal medicines in autism spectrum disorder: therapeutic potential, plant components, and dosage guidelines [J]. *Altern Ther Health Med*, 2025, 31 (6): 76-89.
- 57 Grosso C, Santos M, Barroso MF. From plants to psychoneurology: unravelling the therapeutic benefits of bioactive compounds in brain disorders [J]. *Antioxidants*, 2023, 12 (8): 1603.

(责任编辑:施晓亚,潘越)