

• 专题研究:肿瘤 •

AI 机器人技术在结直肠癌治疗中的现状与未来: 技术革新与临床转化

胡晓峰*, 王一飞, 王 峰

河北北方学院附属第一医院普通外科, 河北 张家口 075000

[摘要] 集成人工智能(artificial intelligence, AI)算法的机器人手术系统作为智能外科与生物医学工程交叉融合的前沿成果,正在重塑结直肠癌治疗的技术范式。该系统集成高精度机械臂、多模态影像识别、实时决策算法与知识迁移学习机制,在狭窄盆腔内的淋巴清扫、吻合构建与神经保护等关键操作中展现出优势。与传统腹腔镜手术相比,集成AI算法的机器人手术系统可实现0.5~1.0 mm级操作精度,实现术中AI淋巴结识别准确率98.7%,淋巴结清扫数量较传统腹腔镜多15%~20%,吻合口瘘发生率下降2~3个百分点(5.4%降至1.9%)。手术平均出血量为50~80 mL,明显低于腹腔镜的90~120 mL。随着机器人平台的快速发展以及5G远程通信、数字孪生、强化学习等技术的深度融合,结直肠癌机器人手术系统正逐步向高智能化、个体化与远程协作化方向发展。然而,该技术仍存在触觉反馈缺失、多模态数据融合延迟、监管路径不清晰以及医工协作体系不足等关键挑战。文章系统综述了集成AI算法的机器人手术系统在结直肠癌外科中的发展历程、临床应用优势、核心技术瓶颈及未来演进方向,重点探讨其在智能感知、术中协同、远程手术与临床转化路径中的价值,旨在为外科医生、工程研究人员与卫生政策制定者提供跨学科的理论依据与实践参考。

[关键词] 人工智能;手术机器人;结直肠癌;微创外科;生物医学工程

[中图分类号] R735.7;TP242

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2026)08-1154-12

doi: 10.7655/NYDXBNSN250905

The current situation and future of AI robot technology in the treatment of colorectal cancer: technological innovation and clinical transformation

HU Xiaofeng*, WANG Yifei, WANG Feng

Department of General Surgery, the First Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China

[Abstract] Robotic surgical systems integrated with artificial intelligence (AI) algorithms, as a frontier product at the intersection of intelligent surgery and biomedical engineering, are reshaping the technological paradigm of colorectal cancer treatment. These systems incorporate high-precision robotic arms, multimodal image recognition, real-time decision-making algorithms, and knowledge transfer learning mechanisms, demonstrating advantages in critical procedures such as lymphadenectomy, anastomotic construction, and nerve preservation within the confined pelvic cavity. Compared with conventional laparoscopic surgery, AI-integrated robotic systems can achieve an operating precision of 0.5–1.0 mm, an intraoperative lymph node recognition accuracy of 98.7%, and a 15%–20% increase in the number of lymph nodes dissected. The incidence of anastomotic leakage decreases by approximately 2–3 percentage points (from 5.4% to 1.9%), while mean intraoperative blood loss is reduced to 50–80 mL, significantly lower than the 90–120 mL typically observed in laparoscopic procedures. In recent years, driven by the rapid evolution of robotic platforms and the deep integration of technologies such as 5G remote communication, digital twins, and reinforcement learning, colorectal cancer robotic surgery systems are progressing toward higher levels of intelligence, individualization, and remote collaboration. Nevertheless, key challenges remain in clinical implementation, including the lack of tactile feedback, delays in multimodal data fusion, unclear regulatory pathways, and insufficient medical-engineering collaborative frameworks. This review systematically summarizes the developmental trajectory, clinical advantages, core technical bottlenecks, and future directions of AI-integrated robotic systems in colorectal surgery, with

[基金项目] 河北省卫计委医学科学重点课题计划(20200523)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: huxiaofeng_20@yeah.net (ORCID: 0009-0003-9318-3650)

particular emphasis on their value in intelligent perception, intraoperative coordination, remote surgery, and clinical translation pathways. The aim is to provide interdisciplinary theoretical foundations and practical references for surgeons, engineering researchers, and healthcare policymakers.

[Key words] artificial intelligence; surgical robots; colorectal cancer; minimally invasive surgery; biomedical engineering

[J Nanjing Med Univ, 2026, 46(08): 1154-1164, 1186]

在全球癌症负担持续加重的背景下,结直肠癌已成为严重威胁人类健康的重大疾病之一。2025年全球新发病例预计将突破220万例,其发病率和死亡率分别位居恶性肿瘤第3位和第2位^[1-2]。

随着微创外科理念的产生与临床推广应用,20世纪90年代腹腔镜技术的临床应用开启了结直肠癌微创外科手术的新阶段,通过微小切口和腔镜设备实现了手术创伤的最小化,并显著减少了术中出血和术后并发症^[3]。机器人辅助手术系统的出现标志着第2次技术进展,以达芬奇机器人系统代表的机器人辅助外科平台通过三维高清视野系统、动作缩放、震颤过滤和高自由度机械臂技术等创新技术,极大提升了手术精准度,特别是在盆腔狭窄区域的操作中展现出独特优势^[4-5]。当前,人工智能(artificial intelligence, AI)、第5代(fifth generation, 5G)通信等新兴技术的融合应用正在推动结直肠癌手术向智能化、精准化方向发展,这一技术演进历程不仅反映了外科医学的进步轨迹,也为未来手术模式的创新指明了方向^[6]。

文章聚焦集成AI算法的机器人手术系统在结直肠癌外科中的临床应用与未来前景,系统梳理相关技术发展前沿研究,评估当前的技术瓶颈、应用挑战及转化障碍,旨在为外科医生、工程研发人员和政策制定者提供跨学科参考框架,推动机器人手术与AI深度融合的规范应用与持续创新,加速其从实验验证走向临床实践的进程。

1 AI机器人手术系统的定义与核心价值

1.1 AI机器人手术系统的定义

集成AI算法的机器人手术系统作为智能外科技术的典型代表,是指整合了AI算法、高精度多功能手术机械臂、大数据学习、云端分析和实时多重影像导航的新一代手术操作平台。文章所称“集成AI算法的机器人手术系统”,是指在传统手术机器人基础上嵌入AI辅助算法并实现术前规划、术中识别与实时决策支持的智能化外科平台,兼具高精度操作与个体化优化能力。从工程学视角定义,集成

AI算法的机器人手术系统是集成多模态感知、自主决策算法和高精度执行机构的新型外科生物医学工程平台,其核心技术特征包括:①通过TOF相机/光学相干断层扫描等深度视觉传感器实现亚毫米级组织识别,精度空间分辨率可达0.05~0.10 mm^[7];②采用强化学习优化的运动控制算法,多维高自由度机械臂具备较高的组织形变补偿能力,误差补偿响应时间可以<8 ms^[8-9];③内置知识图谱系统可实时调用本地或云端数据库内超20万例手术数据支持决策,知识储备量超过大部分人类医师的手术经验^[4]。典型AI机器人系统的代表如达芬奇XI搭载的AI导引系统,已突破传统完全由人类外科医生支配的“主-从式”遥控操作机器人的局限,向着人机合作模式转变,在术区识别与淋巴结清扫方面展现出相对于人类手术者的优势,并且在研究中显示了较低的术后并发症发生率,标志着外科进入AI自我学习与认知增强阶段^[10-12]。

集成AI算法的机器人手术系统以病灶识别、术式优化和风险预警为核心功能。在结直肠癌治疗中其可以有效进行肿瘤边界预测以降低切缘阳性率,同时借助力学传感与数据库匹配实时监测吻合口张力,将术后出现切口瘘发生风险从5.4%降至1.9%(GRADE证据等级:中)^[13-14]。最后,该系统广泛具备持续学习能力,如美敦力的“美敦力妙手AI”每完成1 000例手术即更新一次操作规范库。这类系统正重新定义精准外科的标准,其技术范式已写入相关专业机器人手术指南。

1.2 AI机器人手术系统的核心优势

1.2.1 亚毫米级操作精准度

集成AI算法的机器人手术系统通过先进感知架构与智能补偿机制,实现了亚毫米级空间定位精度。系统采用三维结构光扫描结合动态感知网络,可实时构建高精度解剖模型,机械臂具备多维度精准控制,末端定位误差远低于人手操作极限。在结直肠癌手术中,该技术提升了肿瘤边界识别与神经保护效果,显著改善术后功能恢复与远期预后^[15]。其功能实现借助多模态影像实时配准算法:一是深

度学习驱动的生理运动预测模型,前瞻性修正呼吸周期带来的位移;二是多源影像校验机制,持续追踪组织形变;三是自适应滤波,消减环境干扰。前述临床试验性应用证实该系统在提高病灶识别精度和降低复发率方面具有显著优势。技术实现依托三大支柱:光学定位构建高密度图像;动态补偿修正解剖结构与器械误差;多模态数据融合整合术前与术中影像信息。尽管对人体深部组织定位和实时计算效率仍待优化,但这些技术进步标志着外科手术从经验依赖模式向智能感知模式的重要方向转变。

1.2.2 抗干扰操作稳定性

智能手术系统通过力反馈与震颤过滤实现精确操作,并借助大量的分布式传感器监测微力并动态校准,确保机械臂运行稳定^[16]。初步随访显示,其在复杂解剖操作中失误率显著低于传统腔镜,尤其适用于老年狭窄盆腔患者(GRADE证据等级:中)^[17]。

手术系统采用的高刚度碳纤维机械臂结构具有优异的柔性抗形变特性,配合基于神经网络的自适应控制算法,可根据不同组织阻力实时优化控制参数,使系统既能处理坚韧的筋膜组织,又能安全操作脆弱的神经血管束^[18]。在盆腔狭小空间内,系统能够保持恒定的缝合张力控制,使针距均匀度达到理想水平^[4]。机器人外科系统通过智能补偿与实时学习优化控制策略,结合新材料与算法确保稳定性。力反馈传感器精确传递组织弹性,闭环控制融合前馈与反馈,实现灵活精准操作。

1.2.3 知识迁移学习能力

在大数据分析和实时云平台数据库的技术加持下,集成AI算法的机器人手术系统的知识迁移学习能力代表了智能医疗领域的研究热点之一,该功能模块通过先进的机器学习架构与规律总结实现了机器人间的手术经验的智能化传承与优化^[19]。其核心技术建立在多模态手术知识图谱基础上,采用图卷积神经网络对复杂的手术操作流程进行结构化表征,能够有效捕捉不同术式间的潜在关联规律。

系统基于分布式联合学习整合多中心手术案例,构建多病种经验库,能识别解剖变异并提供实时预警,智能优化复杂解剖条件下手术路径规划。其分层注意力神经网络可从海量视频提取关键节点,建立质量评估体系,并结合虚拟仿真与增强现实加速训练与术中指导,降低术后并发症。同时借助高速网络通道与数据中心进行跨中心的知识共享,利用自适应算法持续优化,实现宏观手术规划

与微观操作统一。随着大量数据积累与更多医疗机构接入,机器人系统的学习和进步速度惊人。

1.3 技术基础与系统架构

1.3.1 硬件构成

在集成AI算法的机器人手术系统中,硬件构成是实现精准操作与智能交互的基础,直接决定了系统的稳定性、精确性和临床适配能力。其中,高自由度和高精度机械臂、力反馈系统和三维视觉模块构成了该系统的三大核心物理模块^[20]。

机械臂是外科机器人手术的核心,其需兼具灵活性、精度与生物兼容性。新一代机器人系统普遍采用多自由度冗余结构,支持狭小腹腔内高精度操作,并可只有搭载各类器械。同时柔性驱动与并联关节设计提升了机械臂的灵活性与效率,外骨骼手势操控实现了人机自然交互。力反馈系统通过高精度传感器采集压力与剪切力,结合触觉仿真让医生实时感知组织差异,有助精准切除并减少损伤^[21]。三维视觉模块整合术前影像学信息、实时多镜头成像、光学相干与近红外荧光等技术,实时重建解剖结构并标记肿瘤与血管,显著提升定位、切缘评估与血管保护精度^[22]。

1.3.2 软件核心

软件核心是集成AI算法的机器人手术“大脑”,其智能程度决定了能否实现场景理解与辅助判断。计算机视觉是手术系统的关键支撑,功能一般涵盖器官识别、病灶标注、血管分割和手势语义解析。器官识别依赖深度学习模型(如U型网络、掩膜区域卷积神经网络)在多模态数据库上训练,可自适应解剖结构差异并进行动态追踪。血管分割功能则聚焦于肠系膜动静脉与小血管的精准识别,以避免术中血管损伤,有效控制出血量。基于注意力机制的多尺度网络在复杂场景下表现优异,而轻量化模型则可以满足实时检测需求^[23]。部分先进平台可在术中自动高亮血管并叠加三维立体模型,提供增强现实视觉辅助。高阶系统则可以通过视觉识别提取语义信息,结合空间关系构建知识图谱,支持实时路径规划修改与风险预警建模提示。

1.3.3 实时决策系统与模型

实时决策系统是AI手术机器人的核心模块之一,承担路径规划、危险预警、异常处理和干预建议决策,通过结合计算机视觉、图优化和强化学习,实现自适应控制与数据解释,并适时给出提示与决策信息。其核心功能是通过术前影像与实时视觉构建拓扑模型,利用AI算法优化轨迹,减少组织损伤

和手术时间。在结直肠癌根治术中,该模块可从腹膜切开到血管结扎、肿瘤切除、术区处理与缝合等进行分步规划,避免神经及血管损伤,最大化保护患者正常解剖结构,有效缩短住院期,降低并发症与医疗成本^[24]。

危险预警模型旨在实时识别手术风险与异常状态,其核心是结合历史数据库与实时传感器获得信息的快速决策机制。系统通过融合视觉信息、力反馈信息、器械位置、动作预测、解剖结构信息、患者生命体征信息及音频等多模态信息,构建风险识别模型。利用支持向量机、随机森林和深度残差网络等技术在临床反馈与大量并发症数据后,可精准识别大出血、组织撕裂或器械误入等高危场景,并在操作前发出预警信息。例如,机械臂接近主血管且力信号异常时,系统能即时锁定操作并给出警示。部分新兴系统已将路径规划与预警整合为“智能控制回路”,通过贝叶斯或图神经网络实现多级推理,并依托云端知识库与远程更新实现跨中心学习,推动较安全的半自主甚至全自主手术的发展。

2 当前临床应用现状

2.1 主流机器人辅助系统平台比较

在结直肠癌外科中,手术机器人已由理论探索走向临床常规应用,尤其在复杂操作、淋巴清扫与神经保护等环节展现出较高的精度与安全性。国产平台的快速崛起,成为我国外科机器人系统技术本土化与临床普及化的重要推动力量^[25-26]。

达芬奇手术机器人具备高灵活度多臂协同、丰富的切换器械端口与三维立体高清视野,对复杂腹腔操作适应度较高,尤其在复杂解剖结构下的胰腺癌及直肠癌切除中优势突出。其模拟腕部技术(EndoWrist技术)提供七自由度操作,使以往狭窄区域的微创精准解剖与良好吻合成为可能^[26]。系统还配备镜头稳定与双操控台模式,提升操作舒适度与手术安全性^[24, 27-29]。相关研究结果显示其在术后功能保护(如自主排便及性功能)方面优于传统腹腔镜手术,尤其在低位保肛手术中具有显著临床意义^[30-32]。

国产外科机器人系统装备自主AI系统是国内学界自主研发的智能手术平台研究热点之一,近年来已在多个医疗单位中开展临床注册和批量应用^[33]。国产手术机器人结合优异的AI算法、力反馈与改良关节设计,在软组织操作中展现良好适应性,并配备自主导航模块实现半自动引导。其在成本与本地

化服务方面具备一定优势^[34]。

在系统结构、控制方式、器械兼容与信息化集成上,国产与达芬奇各有所长。前者更依赖AI模块,界面与力反馈系统性能方面有一定提升空间,但国产系统在临床试点中展现出响应迅速、高度智能引导、本土数据高适应性及成本优势,正在缩小国内外技术差距^[35-36]。

2.2 机器人辅助系统的应用优势

在结直肠癌根治性手术过程中,淋巴结清扫、肠管吻合与神经功能保护是三大决定术后疗效与生活质量的关键步骤。机器人系统较腹腔镜更精细可视,优势突出。第一,淋巴结清扫是肿瘤根治的重要环节,需在保护血管神经的同时彻底清除淋巴组织。机器人辅助手术凭借高清三维视野与增强景深,能高效实现紧贴血管的精准剥离。以达芬奇XI为代表的AI机器人系统,术中淋巴结识别准确率达98.7%,清扫数量较传统腹腔镜增加15%-20%(GRADE证据等级:中)。一项多中心随机临床试验(NCT02817126)显示,在1240例中低位直肠癌患者中,机器人手术组的3年局部复发率显著低于腹腔镜组(1.6% vs. 4.0%, HR=0.45),3年无病生存率更高(87.2% vs. 83.4%, HR=0.74),而总体生存率相近(GRADE证据等级:中)^[11]。机器人手术在血管周围及骶前等复杂区域具优势,能够提高清扫彻底性,改善病理分期准确性,从而为术后辅助治疗决策提供更可靠依据^[36]。

第二,在肠管吻合过程中,AI机器人手术系统依托多自由度腕式器械有效提升狭窄解剖空间的操作灵活性。相比传统腹腔镜操作,其在中低位直肠癌手术中具备更优的缝合与结扎能力,降低了切口张力和出血量^[37-38]。在解剖区域情况复杂、肠管肥厚或前列腺肥大等复杂情况下,机器人技术仍能维持稳定的操作表现^[38, 11]。一项跨越了10个国家/地区的29家医疗单位的多中心随机对照试验中,机器人辅助组与腹腔镜组的开腹转化率分别为8.1%(19/236)和12.2%(28/230);肝脏转移阳性率分别为5.1%(12/235)和6.3%(14/224),提示机器人辅助腹腔镜手术相较常规腹腔镜在降低开腹转化率方面表现出一定优势(GRADE证据等级:高)^[39]。另一项关于295例中低位直肠癌患者的多中心随机对照试验(NCT01042743和ISRCTN注册)结果显示机器人组肝脏转移阳性率更低(0 vs. 6.1%),且术后阿片类药物使用时长更短(GRADE证据等级:高)^[40]。此外,部分手术系统搭配的AI辅助判断模块能够在吻

合过程中实时分析缝线张力、缝合密度与局部血流灌注状态,提供量化反馈,以辅助术者判断吻合质量并及时进行调整。这种智能缝合技术的应用预示着机器人辅助手术将在吻合安全性方面迈入新的精度水平。

第三, AI机器人系统在术中神经保护方面展现出相比人类手术者更为精准的神经识别与避让能力。直肠癌手术涉及的盆腔部位自主神经丛结构复杂且解剖变异大,是术中最容易造成不可逆损伤的区域之一。传统腹腔镜手术因操作震动较大、可视范围有限、解剖结构异常等原因,易忽视和损伤关键神经结构^[41]。相比传统腹腔镜手术,机器人系统通过震动过滤技术减少不必要的组织损伤,并结合术中图像染色与AI识别显著增强术者术中神经保护。神经监测与实时电生理反馈帮助术者在关键步骤中避免损伤重要神经束。随着神经导航和术中监测技术的融合,机器人辅助手术正由解剖保护导向走向功能保留导向的精准干预目的,降低术后出现消化、泌尿及性功能障碍的发生风险。整体而言, AI驱动的机器人系统以智能化、可视化和高精度控制提升手术安全性,减少术后并发症,并有望改善患者长期生存质量。

2.3 集成AI算法的机器人手术系统的临床应用现状

大量临床研究已对机器人辅助手术在结直肠癌治疗中的疗效进行了系统评估。总体来看,尽管机器人系统可能在初学者初始阶段延长手术时间,但在术中出血控制、术后恢复速度及并发症控制方面展现出一定优势^[26]。

手术时间方面,根据多项前瞻性对照研究,机器人手术的平均操作时间为210~260 min,略高于传统腹腔镜组的180~220 min(GRADE证据等级:中)^[27]。但随着术者经验积累及操作平台的迭代更新,该差距逐步缩小。尤其在高位乙状结肠癌和中低位直肠癌手术中,机器人手术在视野调整和操作路径规划方面表现更优,有助于缩短术中耗时。

术中出血控制方面,机器人系统的稳定性与放大视野优势使得术区血管处理与保护更为精准。统计数据显示,机器人组的平均出血量为50~80 mL,明显低于腹腔镜组的90~120 mL(GRADE证据等级:中)^[28-29]。部分研究指出,机器人系统在特定血管解剖变异情况下更能有效避免误伤,从而降低术中失血风险与输血量。

在并发症发生率与转开腹率方面,机器人手术在吻合口瘘、术后感染及肠梗阻等方面的发生率整

体低于对照组,且术后住院时间亦呈现出缩短趋势,显示出术后恢复更快的趋势^[42]。一项包含11项随机对照试验、3 107例患者的系统评价与荟萃分析结果显示,接受直肠癌机器人手术的患者较腹腔镜手术组患者具有更低的转开腹率(OR=0.42, 95%CI: 0.28~0.63)、更低的再手术率(OR=0.45, 95%CI: 0.31~0.94)、获取淋巴结数更多(MD=0.67, 95%CI: 0.30~1.04)、环同切缘(circumferential resection margin, CRM)阳性率更低(OR=0.59, 95%CI: 0.41~0.85),且术后首次自主排尿(MD=0.78 d)、首次排便(MD=0.40 d)和首次排气(MD=0.45 d)时间均更短,但手术时间更长(MD+23.46 min, 95%CI: 15.76~31.16);两组在总体及短期并发症、失血量、住院时间、术中并发症、死亡率、保护性造口率及再入院率方面差异不显著,提示机器人手术在安全性和部分疗效指标上具有优势(GRADE证据等级:高)^[43]。

在结直肠癌外科中, AI机器人手术系统相较传统机器人系统在“感知—决策—执行”闭环上显著扩展能力: AI机器人手术系统通过多模态数据融合(术中内镜/荧光成像、医学影像图像重建、导航坐标、术者操作轨迹)与深度学习算法实现肠系膜血管与神经的实时分割、肿瘤边界概率热图及风险结构预警,从而在高位直肠系膜切除与中央血管结扎中提供路径规划与力学约束建议;传统机器人系统则主要提供稳定的器械操控、三维视野与滤抖放大,依赖术者经验完成解剖识别。AI机器人手术系统可根据手术阶段识别智能调用能量器械参数、提示牵拉方向与缝合顺序,并通过术野变化自适应镜头与机械臂位姿,进一步减少不必要的牵拉与热损伤;传统机器人系统虽可预设场景宏指令,但缺乏面向复杂解剖变异的自学习优化。

值得注意的是,虽然短期临床研究数据表明AI机器人手术系统具有一定的优势,但在远期生存率、复发率及长期功能恢复方面仍需大样本、长期随访的证据支持。此外,机器人手术的成本与可及性亦制约了其临床推广。

2.4 技术瓶颈与突破方向

当前AI机器人手术系统虽展现出一定潜力,但仍受系统集成繁杂、AI自主性和实时计算能力不足、信息闭环缺失及治疗成本较高的限制。现有系统多为“人控+机械臂”模式,缺乏AI实时智能路径规划与实时组织建模,难以在深部复杂解剖区域中实现自主手术导航,增加了手术时间与并发症风险^[44]。

机器人手术的安全性主要受限于术中收集和

感知数据不足,现有数据分析系统缺乏对不同临床特征患者解剖组织质地、张力及病理特征的实时判断能力和大数据分析经验,难以模拟外科医生的触觉经验,在神经保护或肠管缝合等高精度操作中易增加并发症风险。同时,手术过程存在信息孤岛,图像、动作与监测数据集成系统功能依然局限,术前和术后数据亦难反馈至建模数据库与导航环节,阻碍疗效追踪与个体化优化。尽管部分医院尝试融合电子病历与机器人平台数据以构建闭环信息架构,但受技术水平不足、高昂的设备与耗材成本、人员能力不足等限制了其普及。

在术前,AI机器人手术系统可基于数字孪生成患者特异的入路仿真与并发症风险分层;术后则将过程数据回灌模型,支持持续性能改进与个体化随访路径。临床层面,AI机器人手术系统有望提高负切缘率、标准化淋巴结清扫、缩短学习曲线并降低并发症与住院时长,但其真实获益受算法泛化、数据质量与团队配合影响,且需严格的人机协同边界与可解释审计;传统机器人系统则凭借成熟器械生态与稳定可预期的操作一致性,在可及性、成本与维护上仍具优势。

国产系统在成本控制上有所突破,已进入部分三甲医院试点,但精度与国际认可程度仍待提高。未来针对一体化AI外科体系,重点布局深度学习、多模态导航、触觉模拟及云端共享,并结合5G通讯技术与虚拟现实推动智慧医疗与远程手术应用可能是一种有潜力的研究方向^[45-46]。

3 外科机器人临床应用的挑战与前沿

3.1 触觉反馈缺失/多模态数据融合延迟

随着AI的发展,AI联合机器人在结直肠癌手术中展现出提高手术精准度与微创性的潜力,但仍受多模态感知数据融合与智能控制与反馈系统的限制。现有手术系统严重依赖视觉,缺乏触觉力学数据实时反馈与计算,难以精确判断组织质地和张力,影响解剖结构识别与操作稳定性。多模态信息融合存在延迟,算法多为静态框架,难以应对术中动态变化,易导致动作滞后或识别错误。当前主要技术限制包括传感器灵敏度不足、数据传输链路和计算过程复杂、融合算法缺乏鲁棒性,以及对术者经验性操作的误判风险。这些瓶颈限制了AI机器人在复杂手术情景下的应用与安全性。

3.2 多模态延迟创新解决方案

近年来,研究者尝试利用布置力学传感器阵

列、采用柔性电子皮肤与仿生微传感器构建类人触觉系统,在手术臂或钳端植入纳米压阻器与力觉模组等方式,实现对解剖组织接触力、应力与纹理数据的精准感知。部分策略通过力觉与视觉反演模型结合深度学习,在缺乏物理传感器时亦能实现触感重构。多模态融合方面,神经形态芯片与边缘计算的引入有效降低延迟,将高频任务本地化执行,并借助图神经网络与跨模态注意力机制实现多通道信号统一表征与信息实时调度优化。部分系统通过升级仿生压力感受器设计时序模块,实现关键术中不良事件的预测与风险预判。未来,探测技术与硬件的发展将进一步突破触觉还原与信息融合延迟的瓶颈。

3.3 术前模拟数字孪生技术

数字孪生技术在结直肠癌术前评估、路径规划与模拟中发挥巨大作用,其通过整合核磁共振、计算机断层扫描、内镜超声等多源影像与生理数据,重建三维动态模型,精确呈现肿瘤体积、血管神经及骨盆腔解剖,辅助AI优化术式预演^[47-48]。术前通过路径模拟、工具轨迹测试及切缘评估可提升决策效率与精准性。基于数字孪生技术的术中导航系统可实时捕捉器械位姿与组织变化,并动态更新虚拟模型,实现预测-反馈-修正的闭环控制^[49]。部分研究团队还将生理参数如局部灌注压、温度分布、解剖结构颜色变化等融入数字孪生平台,为术中风险评估与术后恢复预测提供更多维度支持^[50]。

总之,当前该技术在实际应用中仍面临系统计算量大、模型更新速率慢与患者个体参数差异大等问题。未来结合轻量化建模算法、图形处理加速芯片与标准化数据采集流程,将有望大幅推动数字孪生在临床辅助决策系统中的普及应用。

3.4 强化学习在动态调整中的应用

强化学习模块可以通过与环境交互和奖励反馈不断优化自身策略,已在数学博弈、工业生产、自动驾驶等领域成功应用。通过引入手术机器人,可提升结直肠癌手术中面对出血、肠管收缩等复杂情况的灵活性与自适应性。其通过模拟与历史数据学习,实现多策略选择和突发事件预测调整,优化牵拉角度、提高手术视野,增强操作稳定性。结合深度强化学习与模仿学习,可利用专家操作轨迹实现智能模仿与超越;融入模型预测控制后,更能在淋巴结清扫、吻合口张力调节等任务中进行未来状态预测与规划,显著提升系统智能化水平^[51]。

当前限制主要在于训练过程数据需求量大,临床数据采集尚不规范。同时,数据模型的泛化能力

与安全性仍需严格验证。未来结合仿真平台训练与术中微调、跨患者迁移学习与专家协同监督等策略,有望推动强化学习在AI手术中的广泛应用。

3.5 5G 远程手术的实践探索

5G 技术推动远程医疗技术的快速发展,高带宽、低延时和高可靠性使远程实时手术从理论走向实践,适用于偏远或灾害地区。结合5G 高速通信技术的达芬奇系统已实现跨地域精准操作,在结直肠癌手术中的表现接近本地操作,具备推广潜力。但该技术仍处探索期,面临数据与控制反馈延迟、网络稳定性与突发事件应对等挑战。未来需强化通信基础设施、手术容错机制与远程医疗团队协作,同时建立数据安全协议、专用网络接口和本地云端双重部署的AI 辅助模块,并建设两地手术协同培训平台。随技术研究的深入与推进,远程手术有望常态化。

4 临床转化与推广应用难题

4.1 新技术应用与推广现状分析

AI 驱动的手术机器人系统从研发走向结直肠癌手术的临床转化过程伴随伦理、监管、协作与经济等多重挑战。首先,作为第3类高风险医疗器械,AI 手术系统在诊疗中的辅助甚至主导角色,牵涉患者生命安全、知情同意及责任归属等敏感议题,若因算法推荐引发误操作,责任主体的认定尚缺乏统一标准。同时,该系统对患者数据的高度依赖,使隐私保护与数据使用边界问题更加突出,对相关信息的利用必须符合《个人信息保护法》《医疗器械监督管理条例》等法规,方能确保临床应用的安全与合规。当前,欧盟MDR 2022/2346 已明确提出对“自适应AI”算法需设定锁定机制(locked algorithm requirement),要求其在临床使用中保持性能可控、可追溯,以防止未经验证的模型漂移带来风险。与此同时,相关部门则提出“离线-在线双轨”监管要求,即临床使用前的算法必须以“离线版”形式通过验证与审批,而后续的持续学习和性能迭代仅能在“在线版”受控环境中开展,确保更新过程的透明性与可溯源性。这一系列问题提示,该技术未来伦理与监管框架不仅需解决“谁来负责”的问题,更应聚焦于如何界定AI 算法的动态演化边界、如何保障临床可解释性与患者人身与隐私安全,以实现工程创新与合规实践之间的平衡。

其次,伦理上的关键争议还包括患者自主权与知情选择的落实。由于AI 系统的工作机制高度复

杂,非专业人士难以全面理解其决策逻辑,因此如何构建可解释的AI 手术系统,并以通俗而准确的方式向患者进行风险告知,成为影响其接受度的重要因素。同时,AI 系统在术中对医生操作的限制或引导,也可能引发医疗行为自主性的伦理讨论^[52]。监管与伦理方面,AI 手术机器人涉及数据治理、模型漂移与安全冗余验证,需建立持续监测与更新备案机制;综合来看,AI 手术机器人代表从“工具增强”迈向“智能合作者”的范式升级,而传统外科手术机器人仍是当前广泛可用的高性能平台,二者在可预期阶段将长期共存并互补。

最后,从临床推广角度看,AI 手术机器人仍受制于医工融合不足、反馈闭环不健全与监管缺失。未来需强化伦理评估、明确责任边界、推动审批标准化与多部门协作,保障安全可持续转化。以达芬奇为例,其在中国获批历经多年验证,国产图迈天玑、微创妙手亦面临类似挑战。同时,路径规划、视觉识别、出血预测等AI 功能缺乏统一风险评估标准,制约临床应用与推广。

4.2 临床伦理争议焦点

AI 辅助手术机器人在结直肠癌领域的临床应用不仅面临复杂伦理与监管挑战。其融合智能算法、自动化操作与人机交互,直接干预患者生命,审批路径与传统医疗器械的差别带来了一系列复杂的问题与争议。在伦理层面,深度学习算法广泛用于术中识别与风险预测,但因可解释性不足,在术中突发并发症处理中更显突出。因此,算法逻辑可溯、系统行为可控应当是系统基本功能。在监管层面,监管部门对该技术的应用与创新要求具备严格的临床试验与注册资质,但现行评价标准难以覆盖其快速迭代学习、远程升级等特征。同时,数据合规亦是关键,模型训练依赖大量临床与影像数据,涉及隐私保护与跨院共享。当前国内尚缺专门法规,亟需制定涵盖知情同意、去标识化与数据流通的规范。整体而言,伦理、监管与数据治理需协同完善,方能推动其安全高效临床转化。

4.3 医生-工程师协作培训体系

手术机器人系统融合控制工程、图像处理、信息处理与模型建立、算法优化与临床解剖等多学科知识,其价值不仅依赖技术成熟,更取决于医生与工程团队的协作。目前合作仍缺乏系统化培训与沟通机制,导致设计与临床应用存在脱节。结直肠癌手术中的盆腔狭窄操作、血管神经识别与实时反馈若无精确建模,将影响安全性。为此建立“医生+

工程师”双轨培训可能是一个可行的选择,一方面推动交叉型人才培养,如部分医学院已设立智能外科方向;另一方面在医院组建跨科室团队,构建以患者受益为核心的协同创新机制。临床医师使用AI手术机器人的能力框架应符合K-S-A矩阵:知识层面需理解解剖学、AI功能边界与算法更新规程;技能层面强调熟练操作、异常应对及算法版本管理;态度层面则以保证患者安全优先,保持对AI结论的审慎和透明沟通。在此基础上,应依托国家级中心建立培训与认证体系,涵盖操作、异常处理、数据规范与算法理解,并通过模拟训练与人机协作评估量化安全与效率。跨学科深度融合是推动AI机器人手术在结直肠癌中安全应用的关键。

4.4 AI机器人结直肠手术的成本效益

目前,传统机器人手术系统如达芬奇平台的经济学争议集中在高额购置成本、维护费用耗材管理与开支上^[53]。AI辅助系统虽提升智能化,但初期投资高、算法优化与数据库维护需长期支出。在结直肠癌这种术式标准化、病例量大的领域,应基于真实世界数据开展经济学评价,以推动其临床应用与推广。

首先,相关研究者可以构建以贴近临床工作实际需求与“增量成本-效果比”为核心的评估框架。该框架需同时纳入手术时间、术中并发症率、术后恢复周期、住院时间、复发率等临床效益指标,以及手术费用、机器人系统折旧、人工干预次数、数据维护成本等经济指标。通过比对AI引导手术与传统手术路径在各阶段的差异,可量化AI系统的单位成本带来的可量化的患者效益^[54]。

其次,相关研究可引入患者生活质量调整受益与医疗费用净支出等卫生经济学指标,综合考虑寿命、生活质量与成本。若AI系统能提高淋巴结清扫完整性、保持肛门功能并减少术后并发症,其在提升患者长期生活质量、降低再入院率和社会经济负担方面的价值,将远超初期引进投入,形成良性循环^[55-56]。

在推广AI手术系统时需考虑不同医疗层级和地区的经济适配性。大型三甲医院可凭病例量和技术支持实现规模效应,而基层医院因资源与病例不足,成本可能偏高。因此,技术引进应具备可调参数,综合评估区域差异、成本回收周期与盈亏节点,避免盲目跟风,推动医疗体系高质量发展^[57]。

此外,应重视患者的经济负担与承受能力,不应一味追求先进与高科技治疗。当前许多AI或外科机器人手术相关费用无法纳入医保报销范围,需

患者自费承担。这种“支付能力-技术接纳”矛盾若无法缓解,将直接影响该技术在广大市场的渗透率和临床普及率。相关研究者及政策层面可以尝试开展各种前沿科技手术等高精尖治疗技术的医保试点工作,将符合条件的高效AI手术纳入支付目录,并通过临床路径管理与按病种付费等方式优化成本结构。当前结直肠癌手术机器人系统存在“以技术代替价值”的跟风风险:部分机构在缺乏适应证与成本-效果证据的前提下盲目上马,造成资源挤占与学习曲线期并发症上升。应以患者选择标准为先:优先中低位直肠癌、狭窄盆腔、肥胖、需神经功能保留者;常规难度、低风险病例不宜“为用而用”。现有随机证据虽然提示患者3年局部复发与无疾病进展结局有所改善,但总体生存差距尚不显著,故不可据此将AI机器人手术系统泛化为“首选”。在支付与受益方面,必须以真实成本(购置/维护/耗材/时间)与患者长期受益为基础,按预设阈值开展预算影响评估;达不到成本效果线的应用应限制在研究或严格审查范围。并应建立术者资质—病例难度—结局的关键绩效指标的闭环审计,与按结果付费或风险分担挂钩,用“适应证+价值证据”而非“设备存在”决定谁真正受益。

最后,只有在成本效益被客观量化、患者临床获益和接受度提升、医保支付机制合理配套的前提下,AI系统在结直肠癌外科中的技术优势才有可能真正转化为临床价值与社会效益。

5 未来展望与思考

在未来,集成AI算法的机器人手术系统将迈向更高维度的智能协作与微观化操控。下一代技术正在聚焦于纳米级机器人与生物电子接口的集成应用,前者可实现药物精准释放与术中微创干预,后者则通过与术者神经系统或组织信号的实时高效联通,提升机器人系统对病理状态的响应速度与适应能力。同时,智能手术室生态系统也正逐步成形,其核心在于融合术前规划、术中导航、术后评估与远程交互的一体化闭环平台,实现多模态数据驱动下的全周期手术智能管理。然而,随着AI决策在术中扮演越来越关键的角色,权责界定问题日益凸显。尤其在涉及算法误判或机器自主干预的情况下,手术医生、系统开发厂商与医院管理方的责任边界亟待明确。这不仅是技术问题,更是伦理与法律层面的挑战,未来需要建立透明可解释的技术标准与多主体共担机制,确保技术进步在可靠可控的

轨道上稳步推进。

总之,集成AI算法的机器人手术系统的推广应用与技术进步为结直肠癌根治性外科切除开辟了新的选择,随着对其的深入理解和评估技术的不断进步,基于AI算法+医疗外科机器人的精准医学策略有望在未来结直肠癌外科手术中发挥重要作用,极大提升患者生活质量与长期预后。

利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

Conflict of Interests:

All authors declare no conflicts of interest.

作者贡献声明:

胡晓峰、王一飞,王峰负责文献收集、资料分析、论文撰写与修改;胡晓峰负责论文最终定稿。

Author's Contributions:

HU Xiaofeng, WANG Yifei, and WANG Feng were responsible for literature collection, data analysis, manuscript drafting, and revisions. HU Xiaofeng was responsible for finalizing the manuscript.

[参考文献]

- [1] PRZYGODZKA P, SOCHACKA E, SOBOSKA K, et al. Neuromedin U induces an invasive phenotype in CRC cells expressing the NMUR2 receptor[J]. *J Exp Clin Cancer Res*, 2021, 40(1): 283
- [2] ZHENG R, ZHANG K, TAN S Y, et al. Exosomal circLPAR1 functions in colorectal cancer diagnosis and tumorigenesis through suppressing BRD4 *via* METTL3-eIF3h interaction[J]. *Mol Cancer*, 2022, 21(1): 49
- [3] AGHAYAN D L, KAZARYAN A M, DAGENBORG V J, et al. Long-term oncologic outcomes after laparoscopic versus open resection for colorectal liver metastases: a randomized trial [J]. *Ann Intern Med*, 2021, 174(2): 175-182
- [4] SAEIDI H, OPFERMANN J D, KAM M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis[J]. *Sci Robot*, 2022, 7(62): eabj2908
- [5] JOHANN S P, BAEK C, GRANDGEORGE P, et al. The strength of surgical knots involves a critical interplay between friction and elastoplasticity [J]. *Sci Adv*, 2023, 9(23): eadg8861
- [6] AGGARWAL A, HAN L, BOYLE J, et al. Association of quality and technology with patient mobility for colorectal cancer surgery[J]. *JAMA Surg*, 2023, 158(1): e225461
- [7] 姚宏伟, 孙应实, 张晓燕, 等. 结直肠癌多学科综合治疗协作组诊疗模式中国专家共识(2023版)[J]. *中国实用外科杂志*, 2024, 44(1): 1-16
YAO H W, SUN Y S, ZHANG Xi Y, et al. Chinese expert consensus on diagnosis and treatment model of multidisciplinary comprehensive treatment collaboration group for colorectal cancer (2023 Edition) [J]. *Chinese Journal of Practical Surgery*, 2024, 44(1): 1-16
- [8] 苟嵩淋. 基于强化学习的主从异构机械臂运动控制算法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023
MI S L. Control science and engineering research on reinforcement learning based motion control algorithm for master-slave heterogeneous robotic arm [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023
- [9] 刘 芬, 王 睿, 黄 芳, 等. 微创手术机器人RCM机械臂广义运动学误差建模与补偿研究[J]. *机械传动*, 2025, 49(8): 46-52
LIU F, WANG R, HUANG F, et al. Research on generalized kinematic error modeling and compensation of RCM robot arm for minimally invasive surgery robot [J]. *Mechanical Transmission*, 2025, 49(8): 46-52
- [10] FAUCHER F F, LIU K J, COSCO E D, et al. Protease activated probes for real-time ratiometric imaging of solid tumors[J]. *ACS Cent Sci*, 2023, 9(5): 1059-1069
- [11] FENG Q Y, YUAN W T, LI T Y, et al. Robotic *vs* laparoscopic surgery for middle and low rectal cancer: the REAL randomized clinical trial[J]. *JAMA*, 2025, 334(2): 136-148
- [12] FENG Q Y, YUAN W T, LI T Y, et al. Robotic versus laparoscopic surgery for middle and low rectal cancer (REAL): short-term outcomes of a multicentre randomised controlled trial[J]. *Lancet Gastroenterol Hepatol*, 2022, 7(11): 991-1004
- [13] BRUCCHI F, MONTRONI I, CIROCCHI R, et al. A systematic review of the da Vinci® Single-Port system (DVSP) in the context of colorectal surgery [J]. *Int J Colorectal Dis*, 2025, 40(1): 83
- [14] 秦 倩, 张 磊, 时飞宇, 等. 达芬奇机器人手术系统辅助直肠癌根治术学习曲线研究[J]. *中国实用外科杂志*, 2022, 42(8): 920-924
QIN Q, ZHANG L, SHI F Y, et al. Research on the learning curve of da Vinci robot surgical system assisted rectal cancer radical surgery [J]. *Chinese Journal of Practical Surgery*, 2022, 42(8): 920-924
- [15] 韩方海, 谢烨权. 腹腔镜和达芬奇机器人辅助下结直肠癌手术的功能保存[J]. *结直肠肛门外科*, 2024, 30(5): 520-526
HAN F H, XIE Y Q. Functional preservation of colorectal cancer surgery assisted by laparoscopy and da Vinci robot [J]. *Colorectal and Anal Surgery*, 2024, 30(5): 520-526
- [16] 马 宁, 刘 威, 陈志奇, 等. “膜”解剖引导下的Da-Vinci机器人直肠癌手术与腹腔镜全直肠系膜切除术

- 临床疗效的对照研究[J]. 中华结直肠疾病电子杂志, 2024, 13(1):45-53
- MA N, LIU W, CHEN Z Q, et al. A comparative study of clinical efficacy between da Vinci robotic rectal cancer surgery guided by “membrane” anatomy and laparoscopic total mesorectal excision[J]. Chinese Journal of Colorectal Diseases, 2024, 13(1):45-53
- [17] 周 瑜, 王小雨, 徐 黎, 等. 全身麻醉下达芬奇机器人手术在老年腹部手术中应用观察[J]. 现代生物医学进展, 2022, 22(2):254-258
- ZHOU Y, WANG X Y, XU L, et al. Application of da Vinci robotic surgery under general anesthesia in elderly abdominal surgery [J]. Advances in Modern Biomedicine, 2022, 22(2):254-258
- [18] LIU Y X, WANG Y, MA T Y, et al. Surgical stress response in Kangduo versus da Vinci robot-assisted colorectal cancer surgery: a post hoc analysis of a randomized controlled trial[J]. Int J Surg, 2025, 111(11):7963-7969
- [19] 张之远, 冯青阳, 许剑民. 直肠癌的手术治疗:达芬奇机器人手术的应用及其与腹腔镜手术的优劣[J]. 结直肠肛门外科, 2024, 30(3):259-263
- ZHANG Z Y, FENG Q Y, XU J M. Surgical treatment of rectal cancer: application of da Vinci robotic surgery and its advantages and disadvantages compared to laparoscopic surgery[J]. Colorectal and Anal Surgery, 2024, 30(3):259-263
- [20] 傅守勇, 吕 振, 梁文文. 达芬奇手术机器人患者手术平台组成原理及故障检修案例分析[J]. 中国医学装备, 2024, 21(9):185-188
- FU S Y, LV Z, LIANG W W. Composition principle and troubleshooting case analysis of da Vinci surgical robot patient surgical platform [J]. Chinese Medical Equipment, 2024, 21(9):185-188
- [21] 郭 松, 杨明杰, 谭 军. 手术机器人面临的一大挑战——力触觉反馈[J]. 中国生物医学工程学报, 2013, 32(4):499-503
- GUO S, YANG M J, TAN J. A major challenge faced by surgical robots - haptic feedback [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2013, 32(4):499-503
- [22] LI W, CHEN Z H, YANG J S, et al. Comparison of perioperative outcomes and oncological efficacy between da Vinci Si and da Vinci Xi robotic systems in colorectal surgery: systematic review and meta-analysis of controlled trials[J]. J Robot Surg, 2025, 19(1):332
- [23] GU Y K, CHEN R H, WU K, et al. A variable-speed-condition bearing fault diagnosis methodology with recurrence plot coding and MobileNet-v3 model[J]. Rev Sci Instrum, 2023, 94(3):034710
- [24] TSUKAMOTO S, NISHIZAWA Y, OCHIAI H, et al. Surgical outcomes of robot-assisted rectal cancer surgery using the da Vinci surgical system: a multi-center pilot phase II study [J]. Jpn J Clin Oncol, 2017, 47(12):1135-1140
- [25] LARACH J T, FLYNN J, KONG J, et al. Robotic colorectal surgery in Australia: evolution over a decade[J]. ANZ J Surg, 2021, 91(11):2330-2336
- [26] TEO N Z, NGU J C. A comparison between the da Vinci Xi EndoWrist Stapler and a conventional laparoscopic stapler in rectal transection: a randomized controlled trial[J]. Int J Med Robot, 2023, 19(3):e2501
- [27] BENCINI L, MORALDI L, MICELI E, et al. Robotic versus open distal pancreatectomy: a propensity score matching analysis[J]. Int J Med Robot, 2024, 20(6):e70025
- [28] REHMAN M U, MOUSSA R, AHMED N, et al. Clinical outcomes of robotic versus laparoscopic colorectal surgery during the early learning curve: a systematic review and meta-analysis[J]. Cureus, 2025, 17(6):e86196
- [29] SHYR B S, WANG S E, CHEN S C, et al. Propensity score-matched comparison of robotic and laparoscopic pancreaticoduodenectomy[J]. J Hepatobiliary Pancreat Sci, 2025, 32(8):620-629
- [30] HUANG C W, YE H Y S, MA C J, et al. Robotic colorectal surgery for laparoscopic surgeons with limited experience: preliminary experiences for 40 consecutive cases at a single medical center[J]. BMC Surg, 2015, 15:73
- [31] LIM J H, YUN S H, LEE W Y, et al. Single-port laparoscopic versus single-port robotic right hemicolectomy: Postoperative short-term outcomes[J]. Int J Med Robot, 2023, 19(3):e2509
- [32] 时 明. 减臂法达芬奇机器人手术在结直肠癌中近期临床疗效研究[D]. 长沙:中南大学, 2022
- SHI M. Recent clinical efficacy study of arm reduction da Vinci robotic surgery in colorectal cancer[D]. Changsha: Central South University, 2022
- [33] CHEN A Q, YUAN Z, CHEN H Y, et al. Investigation into the current status of cleaning, disinfection, and sterilization of da Vinci surgical instruments-a cross-sectional survey[J]. Gland Surg, 2023, 12(4):487-491
- [34] SIGHINOLFI M C, MESSINA L A, STOCCO M, et al. Cost analysis of new robotic competitors: a comparison of direct costs for initial hospital stay between da Vinci and Hugo RAS for radical prostatectomy [J]. J Robot Surg, 2024, 18(1):251
- [35] 马世勋, 狐 鸣, 马云涛, 等. 基于5G网络的图迈手术机器人远程动物实验研究[J], 2025, 6(1):12-17
- MA S X, HU M, MA Y T. etc Research on remote animal experiment of Tumai surgical robot based on 5G network [J], 2025, 6(1):12-17

- [36] SUN L F, LIU K, SU X S, et al. Robot-assisted versus laparoscopic-assisted gastrectomy among gastric cancer patients: a retrospective short-term analysis from a single institution in China [J]. *Gastroenterol Res Pract*, 2019, 2019: 9059176
- [37] YU S P, YUAN G D, LU S L, et al. Application of da Vinci robot and laparoscopy on repeat hepatocellular carcinoma [J]. *J Minim Access Surg*, 2022, 18(3): 378-383
- [38] GAMAL A, MOSCHOVAS M C, SAIKALI S, et al. Comparing the technological and intraoperative performances of Da Vinci Xi and Da Vinci 5 robotic platforms in patients undergoing robotic-assisted radical prostatectomy [J]. *Int Braz J Urol*, 2025, 51: e20240569
- [39] JAYNE D, PIGAZZI A, MARSHALL H, et al. Effect of robotic-assisted *vs* conventional laparoscopic surgery on risk of conversion to open laparotomy among patients undergoing resection for rectal cancer: the ROLARR randomized clinical trial [J]. *JAMA*, 2017, 318(16): 1569-1580
- [40] SEOK P, MIN L, CHOI G S, et al. Comparison of laparoscopic versus robot-assisted surgery for rectal cancers: the COLRAR randomized controlled trial [J]. *Ann Surg*, 2023, 278(1): 31-38
- [41] 孙占元, 李海, 侯少华, 等. 达芬奇机器人辅助直肠癌TME的临床效果研究[J]. *结直肠肛门外科*, 2024, 30(3): 311-316
- SUN Z Y, LI H, HOU S H, et al. Clinical efficacy study of da Vinci robot assisted rectal cancer TME [J]. *Colorectal and Anal Surgery*, 2024, 30(3): 311-316
- [42] 李政, 易波, 王国慧, 等. 基于CiteSpace的机器人结直肠手术临床应用现状与热点可视化分析[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(4): 578-591
- LI Z, YI B, WANG G H, et al. Clinical application status and hotspot visualization analysis of robot colorectal surgery based on CiteSpace [J]. *Chinese Journal of General Surgery*, 2024, 33(4): 578-591
- [43] ZOU J Y, ZHU H Y, TANG Y Q, et al. Robotic versus laparoscopic surgery for rectal cancer: an updated systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *BMC Surg*, 2025, 25(1): 86
- [44] 张成, 马锐, 段福孝, 等. 达芬奇机器人手术与腹腔镜手术治疗直肠癌的临床疗效对比(附550例报告)[J]. *结直肠肛门外科*, 2024, 30(3): 298-302
- ZHANG C, MA R, DUAN F X, et al. Clinical efficacy comparison of da Vinci robotic surgery and laparoscopic surgery for rectal cancer (report of 550 cases) [J]. *Colorectal and Anal Surgery*, 2024, 30(3): 298-302
- [45] 王铭含, 陈语, 杜慧江, 等. 增强现实在达芬奇手术机器人系统中的应用进展[J]. *机器人技术与应用*, 2025(1): 53-56
- WANG M H, CHEN Y, DU H J, et al. Progress in the application of augmented reality in da Vinci surgical robot system [J]. *Robotics Technology and Applications*, 2025(1): 53-56
- [46] 梁霄, 蔡秀军. 5G远程医疗机器人手术的现状和展望[J]. *中华消化外科杂志*, 2024, 23(4): 554-560
- LIANG X, CAI X J. The current status and prospects of 5G remote medical robot surgery [J]. *Chinese Journal of Digestive Surgery*, 2024, 23(4): 554-560
- [47] DAWOOD Y, BUIJTENDIJK M F J, SHAH H, et al. Imaging fetal anatomy [J]. *Semin Cell Dev Biol*, 2022, 131: 78-92
- [48] SHI Y, WU X T, PAYDARFAR J A, et al. An imaging-compatible oral retractor system for transoral robotic surgery [J]. *Ann Biomed Eng*, 2024, 52(9): 2473-2484
- [49] WANG R, ZHENG N, LIANG Y J, et al. Multi-perspective analysis of da Vinci surgical virtual reality training: a prospective randomized controlled study [J]. *J Robot Surg*, 2025, 19(1): 221
- [50] SUK C, HYEON Y, KYU O, et al. Learning curve for single-port robot-assisted rectal cancer surgery [J]. *Ann Surg Treat Res*, 2022, 102(3): 159-166
- [51] SOMASHEKHAR S P, SALDANHA E, KUMAR R, et al. Prospective analysis of 246 fires of da Vinci SureForm SmartFire stapler in colorectal cancer: first Indian study [J]. *J Minimal Access Surg*, 2025, 21(4): 365-372
- [52] 王畅, 朱丽萌, 王蒲生. 达芬奇手术机器人技术风险与伦理失范分析[J]. *医学与哲学*, 2025, 46(9): 30-35
- WANG C, ZHU L M, WANG P S. Risk and ethical misconduct analysis of da Vinci surgical robot technology [J]. *Medicine and Philosophy*, 2025, 46(9): 30-35
- [53] 郭东华, 邓露, 王惠平, 等. 不同方式申领达芬奇手术机器人一次性耗材的效果对比[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2024, 5(4): 671-675
- GUO D H, DENG L, WANG H P, et al. Comparison of the effects of different methods of applying for disposable consumables for da Vinci surgical robots [J]. *Journal of Robotic Surgery (Chinese and English)*, 2024, 5(4): 671-675
- [54] 时明, 李亮, 胡桂, 等. 达芬奇机器人减臂法手术在结直肠癌根治术中的近期临床疗效研究[J]. *湖南师范大学学报(医学版)*, 2022, 19(2): 28-32
- SHI M, LI L, HU G, et al. Recent clinical efficacy study of da Vinci robotic arm reduction surgery in radical resection of colorectal cancer [J]. *Journal of Hunan Normal University (Medical Edition)*, 2022, 19(2): 28-32
- [55] 刘洪昌, 李川, 张帆, 等. 达芬奇机器人低位直肠癌

(下转第1186页)

- [14] KHALIL A M, BERGHOT M A, GOUDA M A. Synthesis and study of some new 1,3-isoindoledione derivatives as potential antibacterial agents[J]. Eur J Med Chem, 2010, 45(4): 1552-1559
- [15] DÍAZ-GARCÍA D, FILIPOVÁ A, GARZA-VELOZ I, et al. A beginner's introduction to skin stem cells and wound healing[J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(20): 11030
- [16] WANG M L, HUANG X W, ZHENG H X, et al. Nanomaterials applied in wound healing: mechanisms, limitations and perspectives[J]. J Control Release, 2021, 337: 236-247
- [17] UBEROI A, MCCREADY VANGI A, GRICE E A. The wound microbiota: microbial mechanisms of impaired wound healing and infection [J]. Nat Rev Microbiol, 2024, 22(8): 507-521
- [18] YANG Y T, LIANG Y P, CHEN J Y, et al. Mussel-inspired adhesive antioxidant antibacterial hemostatic composite hydrogel wound dressing *via* photo-polymerization for infected skin wound healing[J]. Bioact Mater, 2022, 8: 341-354
- [19] BHARDWAJ S, MEHRA P, DHANJAL D S, et al. Antibiotics and antibiotic resistance- flip sides of the same coin[J]. Curr Pharm Des, 2022, 28(28): 2312-2329
- [20] PENG W, LI D, DAI K L, et al. Recent progress of collagen, chitosan, alginate and other hydrogels in skin repair and wound dressing applications[J]. Int J Biol Macromol, 2022, 208: 400-408
- [21] SHI C Y, WANG C Y, LIU H, et al. Selection of appropriate wound dressing for various wounds[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2020, 8: 182
- [22] SERPICO L, DELLO IACONO S, CAMMARANO A, et al. Recent advances in stimuli-responsive hydrogel-based wound dressing[J]. Gels, 2023, 9(6): 451
- [23] LIANG Y P, HE J H, GUO B L. Functional hydrogels as wound dressing to enhance wound healing[J]. ACS Nano, 2021, 15(8): 12687-12722
- [24] SIPOS A, MÁTÉ G, RÓTH E, et al. Synthesis of fluorescent ristocetin aglycon derivatives with remarkable antibacterial and antiviral activities [J]. Eur J Med Chem, 2012, 58: 361-367
- [25] FENTON O S, ANDRESEN J L, PAOLINI M, et al. β -aminoacrylate synthetic hydrogels: easily accessible and operationally simple biomaterials networks [J]. Angew Chem Int Ed, 2018, 57(49): 16026-16029
- [26] TIAN S, SU L Z, LIU Y, et al. Self-targeting, zwitterionic micellar dispersants enhance antibiotic killing of infectious biofilms-an intravital imaging study in mice[J]. Sci Adv, 2020, 6(33): eabb1112
- [27] XIA L, TIAN J, YUE T, et al. Pillar[5]arene-based acid-triggered supramolecular porphyrin photosensitizer for combating bacterial infections and biofilm dispersion[J]. Adv Healthc Mater, 2022, 11(4): e2102015
- [28] BERMAN J, KRYSAN D J. Drug resistance and tolerance in fungi[J]. Nat Rev Microbiol, 2020, 18(6): 319-331
- [29] ZUMAN P. Reactions of orthophthalaldehyde with nucleophiles[J]. Chem Rev, 2004, 104(7): 3217-3238
- [30] CAO Q C, SUN G F, WANG X, et al. Bioinspired self-degradable hydrogels towards wound sealing [J]. Biomater Sci, 2021, 9(10): 3645-3649
- (收稿: 2026-03-07; 修回: 2026-05-30; 录用: 2026-06-15)
(本文编辑: 陈汐敏)

(上接第1164页)

- 经括约肌间切除术临床疗效分析[J]. 中华胃肠外科杂志, 2019, 22(12): 1137-1143
- LIU H C, LI C, ZHANG F, et al. Clinical efficacy analysis of da Vinci robotic intersphincteric resection for low rectal cancer [J]. Chinese Journal of Gastrointestinal Surgery, 2019, 22(12): 1137-1143
- [56] 黄攀, 李正荣, 曹毅, 等. 达芬奇机器人系统在低位直肠癌经括约肌间切除术中的疗效研究[J]. 中国临床新医学, 2022, 15(7): 581-585
- HUANG P, LI Z R, CAO Y, et al. Study on the therapeutic effect of da Vinci robotic system in intersphincteric re-

section of low rectal cancer[J]. Chinese Journal of Clinical New Medicine, 2022, 15(7): 581-585

- [57] 项高悦, 杜逸芳, 沈洁, 等. 新质生产力对卫生健康事业高质量发展的影响研究——以达芬奇手术机器人的应用为例[J]. 中国卫生事业管理, 2024, 41(6): 612-614
- XIANG G Y, DU Y F, SHEN J, et al. Study on the impact of new quality productivity on the high quality development of health care: taking the application of da Vinci surgical robots as an example [J]. China Health Care Management, 2024, 41(6): 612-614
- (收稿: 2025-08-14; 修回: 2025-10-11; 录用: 2025-12-04)
(本文编辑: 戴玉娟)