

· 肿瘤治疗研究 ·

DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.20250227.007

肿瘤外科学发展现状与趋势分析*

张旭** 顾良友 贾通宇

解放军总医院第三医学中心 泌尿外科医学部,北京 100039

[摘要] 肿瘤外科学作为肿瘤综合治疗的重要支柱,经历了从传统开放手术向腹腔镜手术和机器人手术的变革。近年来,依托人工智能、大数据、5G通信和分子生物技术等前沿科技,推动了肿瘤外科学向远程化、精准化和智能化迈进。远程手术技术有望实现跨区域医疗资源共享,为偏远地区患者提供优质诊疗服务;基于CRISPR/Cas9的“分子手术刀”则为基因层面的精准干预打开了新局面;AI在术前影像分析、手术路径规划及风险预测中的应用提升了个性化治疗水平。然而,医疗资源分配不均、技术推广难以及伦理法律问题,仍是肿瘤外科学面临的挑战。展望未来,肿瘤外科学将在可解释性AI、多模态成像和自主手术等新技术驱动下,进一步提升精准性与智能化水平,推动整体治疗模式的革新,最终为患者带来更高的生存率与生活质量。

[关键词] 肿瘤;外科学;微创手术;人工智能;精准外科

近年来,肿瘤疾病已成为全球范围内最严重的公共健康问题之一。随着全球人口老龄化、城市化进程加快以及环境污染的加剧,肿瘤的发病率和死亡率呈现持续上升的趋势,已成为威胁人类生命健康的主要原因之一^[1]。根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的统计数据,全球每年新增癌症病例约2000万例,癌症相关死亡人数接近1000万,约占全球总死亡人数的六分之一^[2]。预计到2050年,全球癌症负担将进一步增加,每年新增癌症病例数可能超过3500万例,比2022年增加约77%^[3]。肿瘤不仅对患者及其家庭造成沉重的心理和经济负担,也对国家医疗系统提出了巨大的挑战。如何有效预防、诊断和治疗肿瘤,成为医学领域的重要课题。

外科手术在肿瘤的诊断、分期以及根治性治疗中发挥着不可替代的作用,在多学科协作模式(Multidisciplinary Treatment, MDT)中,肿瘤外科

始终占据核心地位^[4]。近年来,随着微创技术、机器人辅助手术和精准医学的迅速发展,肿瘤外科学在手术技术、设备及治疗策略等方面取得了显著进展,为患者带来了更高的生存率和更好的生活质量^[5]。同时,个体化治疗、精准医学和人工智能等新技术的引入,也推动了肿瘤外科学的转型与升级,为实现更高效、更精准的治疗方案提供了可能^[6]。

本文旨在系统梳理肿瘤外科学的发展历程、现状及面临的挑战,并分析其在新技术、新理念驱动下的未来发展方向。通过总结肿瘤外科学领域的研究成果与进展,希望为研究人员和临床医生提供参考,为提高肿瘤患者的治疗效果和预后提供新思路。

1 肿瘤外科学的发展历程

1.1 早期发展阶段

解剖学知识、外科止血的操作、无菌术以及麻醉等技术的发展共同构成了现代外科学的基础。得益

收稿日期:2024-11-28;修回日期:2025-02-21

* 本文根据国家自然科学基金委员会第373期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: xzhang301@163.com

本文受到北京首发专项(首发2024-1-5042)的资助。

引用格式:张旭,顾良友,贾通宇. 肿瘤外科学发展现状与趋势分析. 中国科学基金, 2025, 39(1): 50-59.

Zhang X, Gu LY, Jia YT. Analysis of the current status and trends in oncology surgery development. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(1): 50-59. (in Chinese)

于化学工业在第一次工业革命期间的迅猛发展,一氧化二氮、乙醚等具有麻醉功效的化学试剂被人们发现,并广泛生产。1846年9月30日,美国口腔科医生威廉·莫顿顺利使用乙醚实现无痛手术操作。同年10月16日,莫顿公开展示吸入乙醚后对患者进行颈部血管瘤切除手术,取得了巨大成功^[7]。

1861年,匈牙利妇产科医生伊格纳茨·塞梅尔维斯发现洗手可显著降低孕妇产褥热及死亡率,呼吁医生洗手和消毒,并将当时产褥感染死亡率由18%降低至1.2%,开启了人类与病菌感染对抗的先河。17世纪初,显微镜的出现使得当时科学界认识到微生物的存在。1862年,巴斯德则揭示了微生物与感染的关系,并发明了巴氏消毒法。1865年,李斯特将巴斯德细菌学理论应用于外科手术,被公认为“外科消毒之父”^[8]。

1.2 现代肿瘤外科的形成

1.2.1 解剖学和生理学知识的完善

继维萨里之后,人体解剖及动物解剖空前活跃,并取得了各种各样的新发现。17世纪英国科学家哈维在观察动物解剖和静脉瓣的基础上,首先提出心脏血管是一封闭的管道系统,论证了全身血液循环,使生理学从人体解剖学中划分出去^[9]。此后,新技术的应用使生理学研究日益深入,反射、新陈代谢、电刺激等概念不断被提出。19世纪,生理学开始进入全盛时期。由法国生理学家贝尔纳提出的内环境概念已成为生理学中的一个指导性理论。1900年“血型之父”卡尔·兰德斯坦纳发现不同人的血液混合有时会发生凝集,确认红细胞有不同的血型:A、B、C(后更名为O)、AB。ABO血型系统的发现,找到了以往输血失败的主要原因,为安全输血提供了理论指导^[10,11]。

1.2.2 手术技术的规范化和标准化

进入20世纪,外科手术取得了重大的进步,变得更加安全和有效。随着材料学、制造业的发展,过去用于制作手术工具的青铜、铁器、骨质等材料逐渐改进为不锈钢等金属材质,更为锋利坚固且易于消毒保存。伴随着蒸汽灭菌法、洗手法、口罩、手术衣、灭菌橡胶手套等在手术中的应用,尤其是无影灯、透视仪、监护器等各种电器设备的使用,在各项新技术推动下,手术室设施和管理水平迅速迈上了新台阶。在过去的100年中,外科手术不断追求专业化,同时也在追求最小创伤和个体化治疗。

1.3 微创外科的兴起

20世纪80年代以来,以腹腔镜技术为代表的

微创外科技术在肿瘤治疗领域得到了广泛应用和迅速发展。1982年,被誉为“腹腔镜手术之父”的 Kurt Semm^[12]首次报道了腹腔镜手术系统的临床应用。随着内窥镜摄像机和高分辨率视频监视设备的发展与应用,Philippe Mouret 于1987年首次运用电视腹腔镜进行胆囊切除,手术医生能够获得更清晰的手术视野,有利于手术的精准操作,这一里程碑式的手术标志着腹腔镜时代的到来。目前,腹腔镜技术已广泛应用于消化系统肿瘤、泌尿系统肿瘤等实体肿瘤的外科治疗中。已有研究表明,与传统开放手术相比,腹腔镜手术在肿瘤的治疗中展现出与开放手术相当的长期肿瘤学疗效^[13,14]。此外,腹腔镜手术还具有住院时间短、手术创伤小、术中出血少、术后并发症发生率低等多优势^[15]。尽管腹腔镜手术优势明显,但其也存在一定的局限性。首先,由于腹腔镜手术的操作受到空间限制,手术视野和手术器械的灵活性不如传统手术,对术者的技术水平提出了较高要求。此外,腹腔镜下难以处理急性出血等紧急情况,手术风险相对较高。因此,微创外科的开展需要肿瘤外科医生经过系统培训,不断提高技术水平,规范手术操作,才能最大限度发挥其优势,造福患者。

2 现代肿瘤外科学术技术现状

2.1 机器人手术技术

随着机器人远程控制技术的发展以及传统腹腔镜技术在复杂外科手术应用方面显露出的不足,外科手术机器人系统应运而生,引领了外科学术一次新的革命。机器人手术是利用高级外科手术平台,以腹腔镜为基础,使用机器人系统辅助医生实施复杂的外科手术。迄今为止,许多机器人手术系统已获准使用,例如 AESOP、ZEUS、Da Vinci 和 Enhance。在这些系统中,由 Intuitive Surgical 开发的达芬奇手术系统于2000年获得美国食品和药物管理局(Food and Drug Administration, FDA)的批准,标志着手术机器人开始商业化。经过四次迭代,达芬奇手术系统已成为全球最受欢迎和使用最广泛的手术机器人^[16]。达芬奇系统的出现一改以往手术室常规格局,颠覆了传统外科观念。术者无须刷手上手术台,而是通过操作平台控制灵活的机械臂和360°可旋转腕关节器械。达芬奇机器人手术系统具备10~15倍高清放大的裸眼3D手术视野、7个自由度的腕式活动范围以及颤抖滤除等优势,克服了传统腹腔镜手术的重大局限,使得术野局部解

剖更为精细、操作更加精准^[17]。一项涵盖百万级临床研究的 meta 分析显示,达芬奇机器人手术在输血量、术后并发症发生率和住院时间等方面优于腹腔镜手术和开放手术^[18]。2006年,笔者所在的中国人民解放军总医院引入了国内第一台达芬奇机器人并开展了国内首例机器人辅助腹腔镜手术:机器人前列腺癌根治术。此后,机器人手术在国内开始蓬勃发展。

随后,中国手术机器人公司也取得了长足的发展。2010年,天津大学开发了 MicroHand A——第一个国产的腹腔镜机器人手术系统。MicroHand S 手术系统于 2021 年 10 月获得了国家药品监督管理局的市场批准,成为国内首个获得批准的腹腔镜手术机器人。其他中国的机器人手术系统包括 Edge MP1000、Toumai MT1000 和 KangDuo SR1000 已经获得医疗器械注册批准。2022 年 7 月,上海医疗机器人公司研发的 SkyWalker 系统获得 FDA 认证,成为第一个获得此类认可的中国机器人手术系统。中国大陆外科机器人公司不仅追求高质量和可靠性,还具有更高的成本效益比。随着技术的不断推进和医疗市场的培育,中国的外科机器人手术系统必将在未来发展中取得突破。

2.2 个体化与精准外科

传统手术模式中,外科手术的决策由外科医生的触觉和视觉主导。近些年来,机器人辅助腹腔镜手术的兴起大大推动了外科的进步与发展,但随之而来的巨大弊端是触觉反馈的丧失。因此,通过整合 CT、MRI 等传统影像数据,手术导航技术使外科医生可以实时获取特定解剖信息,优化手术路径,为精准外科奠定了坚实的基础^[19]。同时,基于增强现实(Augmented Reality, AR)和虚拟现实(Virtual Reality, VR)的导航系统在进行影像数据分析和重建、手术路径规划、术中导航等方面实现了术者空间感知能力的提升,为外科手术提供更加细致的实时指导。有研究报道,VR 在神经外科和骨科手术培训和导航中的应用显著提高了患者术前手术路径模拟和复杂解剖结构的可视化能力,也使得外科医生能够在虚拟环境中验证手术方案的安全性和可行性^[20]。AR 相关的工具已在包括颌面外科、口腔科、耳鼻喉外科、神经外科、骨科、脊柱外科等多个领域展现出了极大的潜力^[21]。这些技术通过与人工智能(Artificial Intelligence, AI)的结合,进一步改善了数据分析和预测能力,为复杂手术方案的实施提供保障^[22]。

分子影像技术的引入也为精准外科的发展提供了重要的支持。分子影像技术与生物标志物的结合,使外科治疗从“解剖导向”向“分子导向”转变。PET、SPECT 等影像技术不仅能提供病灶的形态学信息,还能揭示分子功能特征。这种分子水平的精准定位,不仅能优化肿瘤手术切除边界,还可减少术后复发风险^[23]。PSMA PET-CT 在临床的应用提高了前列腺癌局限性病灶和转移性病灶的检出率,有助于肿瘤的术前诊断和分期^[24]。此外,光学成像方法(如荧光成像等)通过分子探针增强组织对比度,可有效识别微小病灶,为病灶的精准切除和患者的术后恢复提供帮助^[25]。

在这些现代科技的支持下,外科治疗逐渐从传统的经验性治疗向更科学、更精确的个体化治疗转变。在未来,个体化手术将以患者独特的解剖学和病理学特征为基础,通过术前数据收集、术中实时反馈和术后评估,“量身定制”最佳手术方案,以实现降低手术风险、提高患者获益的目的。但需要指出的是,个体化外科治疗仍面临着许多挑战:导航技术的多模态融合与实时性有待进一步优化,分子标记的研发与临床转化须克服生产成本低、靶点难以寻找等现状,如何实现技术普及和标准化仍是个体化外科治疗面临的重要问题。

2.3 多学科协作诊疗模式

2007年,英国利兹大学 Morris 等人的一项研究强调了多学科联合诊疗(Multidisciplinary Team, MDT)在恶性肿瘤治疗中的重要性^[26]。同年,四川大学华西医院在治疗结直肠癌的诊疗过程中引入 MDT 概念,成为国内首家引入 MDT 的医院^[27]。自此以后,随着治疗手段的增多及各专业学科的融合,肿瘤外科学的发展已经从单一的手术治疗模式转变为 MDT 模式^[28],国际上多家大型癌症中心建立了 MDT 治疗模式,并在多种肿瘤治疗中得到了广泛的应用^[29]。MDT 模式超越了传统的单一学科治疗框架,通过内科、外科、放疗科、医学影像科、病理科等多个学科的紧密合作,针对恶性肿瘤患者制定个性化、综合化的治疗方案。该模式强调术前术后的综合评估与辅助治疗,旨在最大限度地发挥各学科的专业优势,提高治疗效果,改善患者的生存质量和生活预后。

MDT 模式在肿瘤外科得到广泛应用,得益于其多方面优势。在 MDT 模式下,患者面对的接诊对象从单一的接诊医生转变为一个诊疗专家团队。通过采取多学科协作的方式,开展多学科讨论,评估患

者病情,突破单一治疗的弊端,形成科学、合理、规范的个体化治疗方案,确保了高质量的诊断、循证决策和最佳治疗计划,过度诊疗和误诊误治得以最大程度地避免。其次,MDT 模式通过综合评估确定针对每一个患者个体的最佳治疗方案,并由相关学科单独或多学科联合执行。多项针对结直肠癌的研究结果表明,MDT 模式下的工作能够显著提高患者的诊断准确性,术前 MDT 评估与患者预后的改善和生存质量的提高相关^[30,31]。此外,在 MDT 模式的支持下,患者诊断和治疗的等待时间得以缩短,同时避免了可能出现的重复检查、重复治疗,降低患者诊疗费用,减轻经济负担。

随着医疗技术的进步和对个体化治疗需求的增加,未来,MDT 模式将继续在肿瘤治疗中发挥重要作用。通过技术协作、资源共享和共同发展,形成符合国情并可推广复制的规范化肿瘤 MDT 模式,从而提升肿瘤规范化诊疗水平、服务能力和肿瘤 MDT 诊疗质量,提高患者的生存率及生活质量。

3 肿瘤外科学的未来展望

3.1 手术机器人新技术

肿瘤外科是医学领域中极具挑战性的分支,随着手术机器人技术的不断发展,外科手术正在经历一场技术革命。手术机器人结合了精准机械操作、高速网络技术、VR 和 AR 等现代科技手段,为肿瘤手术提供了全新的解决方案。特别是远程手术的实施、VR/AR 的广泛应用以及纳米手术机器人的探索,不仅显著提升了手术的精准性,还改善了患者的治疗体验,为肿瘤外科带来了全新的机遇^[32]。

远程手术技术在肿瘤外科中的应用,使得顶级医疗资源得以突破地理限制,为更多患者提供优质的治疗服务。通过高速网络连接,外科专家能够远程操控机器人进行肿瘤切除手术,这在偏远地区和特殊环境中具有重要意义^[33]。例如,一些腹腔或脑部肿瘤切除手术需要极高的技术要求和精密仪器,而远程手术技术能够将顶尖专家的技术传递到手术现场,大幅降低患者手术风险。同时,这种技术也减轻了患者前往大型医疗中心的负担,缩短了等待时间,提高了治疗效率。然而,远程手术的普及还面临一些技术挑战,例如网络延迟可能导致手术反应不够及时,而数据传输过程中的安全性问题也需要解决。随着 5G 通信和人工智能技术的发展,这些难题有望逐步克服,使远程手术在肿瘤外科中的应用更加广泛。

VR 和 AR 技术则为肿瘤外科带来了突破性的进步。在术前规划阶段,VR 技术能够为医生提供患者身体的三维重建模型,清晰显示肿瘤的形态、大小及其与周围组织的关系,帮助医生制定最佳的手术方案^[34]。在手术过程中,AR 技术通过实时影像叠加,将患者体内的解剖结构投影到医生视野中,提供动态的手术导航。例如,在肝脏或胰腺肿瘤手术中,AR 技术能够标记重要的血管和神经位置,避免误伤关键结构^[35]。此外,VR/AR 技术还在医学教育和外科培训中展现了独特的优势。外科医生可以通过虚拟手术模拟系统反复练习复杂手术,从而提升技能,减少对真实患者的潜在风险^[36,37]。这种技术的应用,不仅提高了手术的精准性和效率,也为肿瘤外科的未来发展奠定了技术基础。

纳米手术机器人则代表了手术机器人技术的微观革命,为肿瘤外科提供了精确到细胞层面的治疗方式。这些微型机器人能够通过血管进入人体,定位并治疗肿瘤组织。例如,在癌症治疗中,纳米机器人可以将药物精准递送至肿瘤部位,显著提高化疗药物的靶向性,减少对健康组织的副作用。此外,纳米机器人还可用于清除血栓、修复组织以及实时监测治疗效果。与传统手术相比,纳米手术机器人具有更高的微创性和精准性,为一些难以操作的肿瘤治疗提供了新的解决思路^[38]。尽管纳米手术机器人目前仍处于早期研究阶段,但其应用前景广阔。技术的进一步突破需要克服制造复杂微型设备的难题,并解决其在体内的运动控制和生物相容性问题。同时,如何确保这些机器人在治疗后能够安全降解或排出体外,也是未来研究的重要方向。

综上所述,手术机器人新技术为肿瘤外科带来了深刻的变革。从远程手术的突破到 VR/AR 技术的广泛应用,再到纳米手术机器人的探索,这些技术推动了肿瘤手术的智能、精细化和微创化发展。尽管这些技术在应用中仍面临一些挑战,但随着技术进步与多领域合作的深入,手术机器人将在肿瘤外科中扮演更加重要的角色^[39]。未来的肿瘤外科将更加个性化、智能化,为患者带来更高质量的医疗服务和生活保障。

3.2 AI 和大数据

AI 和大数据技术近年来在医疗领域的广泛应用,推动了医学的智能化进程,尤其在手术规划和临床决策支持方面,表现出了巨大的潜力。AI 的学习能力和大数据的分析能力相结合,为外科医生提供了精准、个性化的治疗方案,并帮助预测患者的病程

和治疗效果,极大地提升了医疗效率和质量^[40]。

首先,AI在手术规划中的应用,极大地提高了手术的精准性和安全性。AI通过深度学习技术,可以处理大量的影像数据,自动分析患者的CT、MRI和X光影像,帮助医生快速识别病变部位并进行三维重建。Rocca等^[41]使用AI模型来改进结直肠癌肝转移的放射学诊断,精确率为100%,可以帮助医生发现难以识别的肝转移。对于肿瘤手术等高风险手术,AI能够精确标注肿瘤的边界及其与周围组织的关系,辅助医生制定最优的手术路径和切除策略。例如,AI可以在术前预测肿瘤的生长模式和可能的转移情况,帮助医生更好地规划手术方案,降低手术中的风险^[42]。AI还能够实时监测手术过程中的关键参数,为医生提供决策支持,确保手术的精确度和患者的安全。在临床决策支持系统中,AI通过整合和分析患者的病历、实验室检查数据以及影像资料,能够为医生提供个性化的治疗建议^[43]。AI系统能够根据海量的历史病例数据,通过模式识别与机器学习,预测疾病的进展和治疗反应,帮助医生作出更加科学和精准的决策。例如,在肿瘤治疗中,AI可以分析患者的基因组数据,评估不同治疗方案的效果,从而为患者量身定制最佳的治疗方案。此类智能决策系统不仅减轻了医生的工作负担,还提高了治疗的精确性^[44]。

同时,大数据技术在医学中的应用,推动了临床研究的深度发展和预测模型的构建。通过大数据分析,医学研究人员能够汇聚来自不同医院和临床试验的数据,发现疾病的规律、病因及其与生活方式、遗传因素的关系。这些数据驱动的临床研究不仅有助于发现新的疾病生物标志物,还能为疾病的早期诊断提供依据。在临床实践中,大数据还能够帮助构建疾病预测模型,预测患者未来可能出现的并发症或病程进展,为个性化治疗提供理论支持。例如,通过大数据分析,研究人员能够预测哪些患者可能会在手术后出现并发症,从而采取预防措施,优化治疗方案^[45]。

总之,AI与大数据技术在医学领域的结合,不仅使手术规划和临床决策更加精准和个性化,还推动了医学研究和预测模型的发展。随着技术的不断进步和应用的深入,AI和大数据将在未来的医疗健康领域发挥越来越重要的作用,推动精准医学的实现,最终提高患者的治疗效果和生活质量。

3.3 自主手术技术

近年来,随着机器人技术与人工智能算法的不

断进步,自主手术已成为外科学领域备受关注的研究热点。区分自主性与自动化是深入理解自主手术技术的核心问题。自动化行为基于预设的确定性或概率性理论,表现出高度的可预测性,其运行依赖于固定的规则和参数。然而,自主性则要求更高层次的认知能力,能够根据外部环境的动态变化进行任务规划和调整,具有更高级的适应能力。2017年,Yang等将手术机器人的自主性分为六个等级^[46]:无自主性(Level 0)、机器人辅助(Level 1)、任务自主性(Level 2)、条件自主性(Level 3)、高级别自主性(Level 4)和完全自主性(Level 5)。实现自主手术技术的关键在于将现有技术进行有效整合,包括传感器融合、机器学习、实时影像处理和机器人控制等。在Level 1阶段,机器人主要为外科医生提供物理辅助,这是后续更高等级自主功能开发的基础;Level 2至Level 4的技术进步,则逐步扩展了机器人对手术规划的理解和执行能力,为最终实现全面自主手术奠定基础。

目前,受制于高昂的研发成本、法律法规和伦理道德等因素,大多数商用手术机器人仍然停留在Level 0阶段。对于刚性骨组织手术,已有商业化的自主性3级手术机器人系统。例如,TSolution One骨关节手术机器人,基于智能手术规划模块自主对骨骼进行精确切割,医生仅监督手术操作^[47]。但是,对于腹腔脏器等软组织手术,由于软组织形变的不可预测性,需要更加复杂的计算能力。尽管高级别自主手术机器人的临床应用仍需时日,但其对医疗行业的潜在影响却不容忽视。在未来,自主手术技术有望提高手术的安全性和效率,同时缓解医疗资源压力,为患者提供更优质的医疗服务。

3.4 分子手术刀

传统癌症治疗方法,包括化疗、放疗和手术,常常伴随显著的副作用和局限性。近年来,基因和分子技术的进步为癌症的精确靶向治疗提供了有前景的方法,可能减少副作用并提高治疗效果。在这些进展中,CRISPR/Cas9基因编辑系统作为一种“分子手术刀”脱颖而出,提供了无与伦比的治疗精度^[48,49]。

CRISPR/Cas9源自细菌的适应性免疫系统,通过引导RNA到达目标基因序列,实现对DNA的精准切割。在癌症治疗中,这项技术不仅能够直接靶向癌基因,还能够恢复抑癌基因的功能,为精准癌症治疗提供了一种新途径^[50]。CRISPR/Cas9还可以增强免疫治疗的疗效,通过敲除免疫检查点基因如

PD-1, 可以增加 T 细胞活性, 减少免疫抑制, 从而增强抗肿瘤反应^[51]。CRISPR/Cas9 也可用于修饰癌细胞的耐药基因, 从而增加癌细胞对药物的敏感性^[52]。CRISPR/Cas9 技术已从临床前研究进入癌症治疗的早期临床试验, 包括血液系统恶性肿瘤和实体瘤在内的各种癌症, 正通过 CRISPR/Cas9 技术进行靶向治疗^[49,50]。

尽管 CRISPR/Cas9 前景广阔, 但仍存在若干挑战 and 伦理问题。CRISPR/Cas9 的一个主要问题是其可能产生脱靶效应, 导致不必要的突变, 并引发不良后果。高保真 Cas9 变体和碱基编辑技术旨在最小化脱靶效应, 但仍需进一步研究以确保临床应用的安全性^[52]。在涉及生殖细胞基因编辑时, 存在伦理问题, 尽管体细胞编辑更容易被接受, 但仍需严格的伦理准则来规范其应用^[48,53]。此外, CRISPR/Cas9 治疗的高成本成为其广泛应用的障碍。随着进一步的完善, CRISPR/Cas9 可能成为肿瘤精准治疗的主流技术, 为有效和个性化的癌症治疗带来希望。

4 肿瘤外科学面临的挑战

4.1 资源分配不均

中国的医疗资源分布存在显著的地区差异, 这些差异阻碍了特别是在农村和欠发达地区对优质医疗服务的获得。尽管自 2009 年以来, 国家进行了广泛的医疗改革, 旨在实现公平的医疗服务获取, 但城乡及少数民族地区的医疗资源差异仍然显著^[54-56]。这些差异在多个指标上得到了体现, 例如医院数量、医疗人员和先进医疗设施的分布。2020 年, 中国有 1580 家大型医院, 平均每个省份有 51 家。从区域角度来看, 东部(434 家)和中南部(386 家)地区的高水平医院数量高于其他地区, 其次是西南(232 家)、北部(222 家)、东北(168 家)和西北(138 家)^[56,57]。

解决这些差异的需求迫在眉睫, 尤其是考虑到实现《“健康中国 2030”规划纲要》中设定的目标, 该规划旨在确保在全国范围内实现公平的医疗服务^[57]。利用机器人系统和高速通信技术进行远程手术, 成为弥合医疗差距的具有广阔前景的解决方案^[58], 前期研究表明远程手术的预后与传统手术相当, 且无手术并发症增加风险。

要充分实现远程手术技术缩小医疗支持不均衡的潜力, 我们需要在农村和偏远地区大力发展通信基础设施。通过提供激励措施来支持远程手术的普

及, 如对医疗资源不足的地区医院进行补贴及对医务人员的培训, 可以进一步促进远程手术技术在医疗系统中的整合。此外, 人工智能、增强现实和触觉反馈系统的集成, 也有望进一步提高远程手术的效果和安全性。

4.2 持续创新与人才培养

在科研与临床转化进程中, 挑战重重。监管上, 中国临床研究审批流程曾较为冗长, 虽经改革已有显著改善, 如实施 60 个工作日的新药临床试验申请 (IND) 备案制度, 但与国际先进水平相比, 仍存在一定差距。在遵循国际人用药品注册技术协调会 (ICH) 准则的进程中, 监管体系须不断调整适应, 这在一定程度上对科研成果快速进入临床转化阶段造成了影响, 延缓了转化效率。资金方面, 国内企业研发投入远不及国际领先者, 规模小、回报低、同质化竞争等问题致使资金难以为继, 且资金分配倾向理论研究, 不利于临床转化。技术层面, 新药靶点同质化, 新靶点探索浅, 临床与科研协作障碍多, 如沟通不畅、数据获取难, 临床科学家缺乏, 学术机构重理论轻应用, 制约基础研究成果向临床的有效转化^[59]。

然而, 机遇亦存。政策上, 政府积极鼓励肿瘤临床研究, 改革监管、优化审批流程, 如缩短 IND 备案时间, 发布研发指南, 自然科学基金资助临床项目, 推动转化。研究能力方面, 中国临床研究环境得到改善, 肿瘤研究成果受到国际认可, 更多原创药在海外获批^[60,61]。丰富的患者资源、医生的积极态度、医疗水平的提升及生物标志物评估优势, 为科研与临床转化创造有利条件, 助力基础研究成果服务临床。

医学技术呈井喷式发展, 在肿瘤学领域体现明显。这要求外科医生不断学习新的知识和技能, 包括掌握新药物特性、适应新治疗规范、运用新诊断技术等, 以在复杂多变的医疗环境中为患者提供精准有效的治疗, 跟上医学发展步伐, 确保自身专业素养与时俱进, 避免知识老化和技能落后, 从而更好地应对各类疾病挑战, 提升医疗服务质量和水平。

4.3 伦理、道德和法律问题

从数据隐私保护到患者知情同意、从算法公平性到错误责任划分, AI 在诊疗决策和患者管理中的应用带来了巨大的创新潜力, 但也引发了诸多伦理挑战。这些伦理问题不仅关系到 AI 技术的应用效果, 还涉及其社会责任和可持续性^[62]。

在医疗 AI 系统中,数据隐私与安全是最为关键的伦理问题之一^[63]。AI 依赖于大量患者的个人健康数据。如果数据没有足够的监管机制,患者隐私将面临严重威胁。例如,2015 年谷歌公司未经授权使用英国国家健康服务系统(NHS)患者数据的事件,便突显了医疗数据隐私保护的薄弱环节。因此,在数据传输和存储过程中采用端到端加密、差分隐私技术及去标识化处理,降低敏感信息暴露风险。另外,建立完善的数据监控系统,对数据的采集、存储和处理实行严格的权限管理,确保只有授权人员能够访问患者敏感信息。

知情同意是医学伦理的基本原则之一,AI 技术的引入使这一问题更加复杂。由于 AI 算法多具备“黑箱”特性,其决策过程和推理机制对外界不可见,患者和医生往往难以理解 AI 的决策依据。这种不透明性可能导致患者对 AI 的信任度降低,从而影响其知情同意的有效性。因此,确保患者在知情的基础上作出选择是 AI 医疗应用中的重要伦理要求。推进可解释 AI 技术的研究,将 AI 决策过程转化为易于理解的形式,有助于提高患者的参与度和决策质量。

AI 模型的偏见问题在医疗领域尤为突出^[64]。医疗数据本身可能存在种族、性别、年龄等方面的偏见,这些偏见可能在训练 AI 模型时被放大,导致某些群体(如少数族裔、低收入群体等)在诊疗中遭遇不公正对待。为此,AI 开发者需要确保数据的多样性和代表性,特别是在数据采集阶段,避免忽视边缘群体。充分考虑公平性,确保其能够为所有群体提供平等的医疗服务,避免算法加剧现有的社会不平等。在模型训练过程中应用重新采样、加权调整、偏见检测与修正算法等技术,减少因数据偏差引起的不公平风险。

AI 系统在医疗决策中不可避免地面临错误的风险。由于 AI 的决策过程通常难以追溯,出错时责任归属常常不明确,目前并无明确的法律框架来界定。为此,必须建立一个清晰的责任体系,明确各方在 AI 系统中的责任,确保在出现错误时能够及时追究责任。

5 结 论

肿瘤外科学的发展历程充分体现了科技进步对医学变革的深远影响。从传统开放手术到微创技术的普及,再到手术机器人、精准医学和分子影像学的

快速崛起,肿瘤外科学实现了从经验驱动向技术与科学驱动的跨越。近年来,人工智能、增强现实等新兴技术的加入,更是将肿瘤外科推向精准化与个性化的新高度。科技的持续进步不仅显著提升了手术的效率 and 安全性,还深化了 MDT 模式的应用,为个体化治疗提供了有力支撑。然而,资源分配不均、伦理与法律问题等现实挑战,仍需全社会共同努力解决,确保技术进步的成果惠及所有患者。展望未来,随着人工智能、远程手术和分子手术刀等技术的不断突破,肿瘤外科学有望实现更深层次的创新。

参 考 文 献

- [1] Siegel RL, Miller KD, Wagle NS, et al. Cancer statistics, 2023. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2023, 73(1): 17–48.
- [2] World Health Organization. Global cancer burden growing amidst mounting need for services[EB/OL]. [2024-11-17]. <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services>.
- [3] International Agency for Research on Cancer. Global Cancer Observatory: Cancer Today [EB/OL]. [2024-11-17]. Available: <https://gco.iarc.fr/today/en>.
- [4] Lu ZH, Chen Y, Liu D, et al. The landscape of cancer research and cancer care in China. *Nature Medicine*, 2023, 29(12): 3022–3032.
- [5] Gu LY, Yin CL, Jia TY, et al. Robotic surgery in China. *The Innovation*, 2023, 4(5): 100499.
- [6] He XJ, Liu XW, Zuo FL, et al. Artificial intelligence-based multi-omics analysis fuels cancer precision medicine. *Seminars in Cancer Biology*, 2023, 88: 187–200.
- [7] Robinson DH, Toledo AH. Historical development of modern anesthesia. *Journal of Investigative Surgery*, 2012, 25(3): 141–149.
- [8] Nakayama DK. Antisepsis and asepsis and how they shaped modern surgery. *The American Surgeon*, 2018, 84(6): 766–771.
- [9] Persaud TVN, Loukas M, Tubbs RS. *A history of human anatomy*. Springfield, Illinois, U. S. A.: Charles C. Thomas, Publisher, Ltd., 2014.
- [10] Foster M. Lectures on the history of physiology during the sixteenth, seventeenth and eighteenth centuries. *Nature*, 1925, 115: 45.
- [11] Singer C. *The evolution of anatomy: a short history of anatomical and physiological discovery to Harvey: being the substance of the Fitzpatrick lectures delivered at the Royal college of physicians of London in the years 1923 and 1924*. New York: A. A. Knopf, 1925.

- [12] Semm K. Endoscopic appendectomy. *Endoscopy*, 1983, 15(2): 59—64.
- [13] Liu ZH, Wang N, Wang FQ, et al. Oncological outcomes of laparoscopic versus open surgery in PT4 colon cancers: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Surgery*, 2018, 56: 221—233.
- [14] Chen K, Cao GD, Chen B, et al. Laparoscopic versus open surgery for rectal cancer: a meta-analysis of classic randomized controlled trials and high-quality Nonrandomized Studies in the last 5 years. *International Journal of Surgery*, 2017, 39: 1—10.
- [15] Breda A, Finelli A, Janetschek G, et al. Complications of laparoscopic surgery for renal masses: prevention, management, and comparison with the open experience. *European Urology*, 2009, 55(4): 836—850.
- [16] Dupont PE, Nelson BJ, Goldfarb M, et al. A decade retrospective of medical robotics research from 2010 to 2020. *Science Robotics*, 2021, 6(60): eabi8017.
- [17] Mikhail D, Sarcona J, Mekhail M, et al. Urologic robotic surgery. *Surgical Clinics of North America*, 2020, 100(2): 361—378.
- [18] Ricciardi R, Seshadri-Kreaden U, Yankovsky A, et al. The COMPARE study: comparing perioperative outcomes of oncologic minimally invasive laparoscopic, da vinci robotic, and open procedures: a systematic review and meta-analysis of the evidence. *Annals of Surgery*, 2024, DOI: 10.1097/SLA.0000000000006572.
- [19] Boekestijn I, van Oosterom MN, Dell'Oglio P, et al. The current status and future prospects for molecular imaging-guided precision surgery. *Cancer Imaging*, 2022, 22(1): 48.
- [20] Randall McKnight R, Pean CA, Stewart Buck J, et al. Virtual reality and augmented reality-translating surgical training into surgical technique. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 2020, 13(6): 663—674.
- [21] Li B, Wei H, Yan J, et al. A novel portable augmented reality surgical navigation system for maxillofacial surgery: technique and accuracy study. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2024, 53(11): 961—967.
- [22] Huang X, Liu XG, Zhu B, et al. Augmented reality surgical navigation in minimally invasive spine surgery: a preclinical study. *Bioengineering*, 2023, 10(9): 1094.
- [23] Fathinul Fikri AS. Molecular Imaging - a way forward in translating disease behaviour in an era of personalized medicine. *Journal of International Medical Research*, 2018, 46(2): 652—653.
- [24] Combes AD, Palma CA, Calopedos R, et al. PSMA PET-CT in the diagnosis and staging of prostate cancer. *Diagnostics*, 2022, 12(11): 2594.
- [25] Olubiyi OI, Lu FK, Calligaris D, et al. Advances in molecular imaging for surgery. *Image-Guided Neurosurgery*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 407—439.
- [26] Morris EJA, Maughan NJ, Forman D, et al. Identifying stage III colorectal cancer patients: the influence of the patient, surgeon, and pathologist. *Journal of Clinical Oncology*, 2007, 25(18): 2573—2579.
- [27] 汪晓东, 李立. 结直肠肿瘤多学科协作诊治模式下整体构建理念及基本组织架构. *中国普外基础与临床杂志*, 2007, 14(3): 339—342.
Wang XD, Li L. Whole constructive conception and basic organization structure in multi-disciplinary team for colorectal cancer. *Chinese Journal of Bases and Clinics in General Surgery*, 2007, 14(3): 339—342. (in Chinese)
- [28] Song PP, Wu Q, Huang Y. Multidisciplinary team and team oncology medicine research and development in China. *Bioscience Trends*, 2010, 4(4): 151—160.
- [29] Keller DS, Berho M, Perez RO, et al. The multidisciplinary management of rectal cancer. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2020, 17(7): 414—429.
- [30] Ye YJ, Shen ZL, Sun XT, et al. Impact of multidisciplinary team working on the management of colorectal cancer. *Chinese Medical Journal*, 2012, 125(2): 172—177.
- [31] Rosander E, Holm T, Sjövall A, et al. Preoperative multidisciplinary team assessment is associated with improved survival in patients with locally advanced colon cancer: a nationwide cohort study in 3157 patients. *European Journal of Surgical Oncology*, 2021, 47(9): 2398—2404.
- [32] Alip SL, Kim J, Rha KH, et al. Future platforms of robotic surgery. *The Urologic Clinics of North America*, 2022, 49(1): 23—38.
- [33] Payne CJ, Yang GZ. Hand-held medical robots. *Annals of Biomedical Engineering*, 2014, 42(8): 1594—1605.
- [34] Jessop ZM, Al-Sabah A, Gardiner MD, et al. 3D bioprinting for reconstructive surgery: principles, applications and challenges. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 2017, 70(9): 1155—1170.
- [35] Nishida N, Yamakawa M, Shiina T, et al. Artificial intelligence (AI) models for the ultrasonographic diagnosis of liver tumors and comparison of diagnostic accuracies between AI and human experts. *Journal of Gastroenterology*, 2022, 57(4): 309—321.
- [36] Leal Ghezzi T, Campos Corleta O. 30 years of robotic surgery. *World Journal of Surgery*, 2016, 40(10): 2550—2557.
- [37] 陈子建, 宋荆洲. 基于示教学习的介入手术机器人手术动作预测算法. *中国科技论文在线* 2022. [2024-11-20]. <https://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/202203-85>.

- [38] Shivalkar S, Chowdhary P, Afshan T, et al. Nanoengineering of biohybrid micro/nanobots for programmed biomedical applications. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2023, 222: 113054.
- [39] 曹鹏, 王国慧, 易波, 等. 国产手术机器人的发展现状与未来方向. *结直肠肛门外科*, 2024, 30(3): 249—252, 258.
Cao P, Wang GH, Yi B, et al. The development status and future direction of domestic surgical robots. *Journal of Colorectal & Anal Surgery*, 2024, 30(3): 249—252, 258. (in Chinese)
- [40] Yang J, Li YJ, Liu QQ, et al. Brief introduction of medical database and data mining technology in big data era. *Journal of Evidence-Based Medicine*, 2020, 13(1): 57—69.
- [41] Rocca A, Brunese MC, Santone A, et al. Early diagnosis of liver metastases from colorectal cancer through CT radiomics and formal methods: a pilot study. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 11(1): 31.
- [42] Wang LD, Alexander CA. Big data analytics in medical engineering and healthcare: methods, advances and challenges. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2020, 44(6): 267—283.
- [43] Pastorino R, De Vito C, Migliara G, et al. Benefits and challenges of big data in healthcare: an overview of the European initiatives. *European Journal of Public Health*, 2019, 29(Supplement_3): 23—27.
- [44] Wang XY, Qu HZ, Fang XD. Omics big data and medical artificial intelligence. *Yi Chuan*, 2021, 43(10): 930—937.
- [45] Jing Y, Yang JW, Johnson DB, et al. Harnessing big data to characterize immune-related adverse events. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2022, 19(4): 269—280.
- [46] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Science Robotics*, 2017, 2: eaam8638.
- [47] Chan J, Auld TS, Long WJ, et al. Active robotic total knee arthroplasty (TKA): initial experience with the TSolution one[®] TKA system. *Surgical Technology International*, 2020, 37: 299—305.
- [48] Mondal R, Brahmabhatt N, Sandhu SK, et al. Applications of clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR) as a genetic scalpel for the treatment of cancer: a translational narrative review. *Cureus*, 2023, 15(12): e50031.
- [49] Samareh Salavatipour M, Poursalehi Z, Hosseini Rouzbahani N, et al. CRISPR-Cas9 in basic and translational aspects of cancer therapy. *BioImpacts*, 2024, 14(6): 30087.
- [50] Mehrabadi S, Salmani Izadi F, Pasha S, et al. The potential therapeutic applications of CRISPR/Cas9 in the treatment of gastrointestinal cancers. *Current Molecular Medicine*, 2024, DOI: 10.2174/0115665240243076231116080113.
- [51] Li MM, Chen FL, Yang Q, et al. Biomaterial-based CRISPR/Cas9 delivery systems for tumor treatment. *Biomaterials Research*, 2024, 28: 0023.
- [52] Panda R, Mohan S, Vellapandian C. Harnessing epigenetic mechanisms to overcome immune evasion in cancer: the current strategies and future directions. *Cureus*, 2024, 16(10): e70631.
- [53] Pierce EA, Aleman TS, Jayasundera KT, et al. Gene editing for *CEP290*-associated retinal degeneration. *New England Journal of Medicine*, 2024, 390(21): 1972—1984.
- [54] Jin J, Wang JX, Ma XY, et al. Equality of medical health resource allocation in China based on the gini coefficient method. *Iranian Journal of Public Health*, 2015, 44(4): 445—457.
- [55] Liang BH, Huang LF, Chen Z, et al. Regional differences, dynamic evolution, and influencing factors of high-quality medical resources in China's ethnic minority areas. *Frontiers in Public Health*, 2024, 12: 1436244.
- [56] Dong EH, Xu J, Sun XT, et al. Differences in regional distribution and inequality in health-resource allocation on institutions, beds, and workforce: a longitudinal study in China. *Archives of Public Health*, 2021, 79(1): 78.
- [57] Yuan L, Cao J, Wang D, et al. Regional disparities and influencing factors of high quality medical resources distribution in China. *International Journal for Equity in Health*, 2023, 22(1): 8.
- [58] Wang Y, Ai Q, Zhao WY, et al. Safety and reliability of a robot-assisted laparoscopic telesurgery system: expanding indications in urological surgery. *European Urology*, 2024, 85(5): 506—507.
- [59] Wang F, Ruan DY, Xu RH. Challenges and opportunities in oncology drug development and clinical research in China. *Cell*, 2024, 187(7): 1578—1583.
- [60] Liu Y, Zhang N, Xie CC, et al. Evolution of drug regulations and regulatory innovation for anticancer drugs in China. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2022, 12(12): 4365—4377.
- [61] Li MN, Yu WY, Ye F, et al. Awareness of and attitudes toward translational medicine among health personnel in hospitals in Shanghai, China. *Journal of International Medical Research*, 2019, 47(1): 438—452.
- [62] Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, et al. AI in health and medicine. *Nature Medicine*, 2022, 28(1): 31—38.
- [63] The Lancet. AI in medicine: creating a safe and equitable future. *Lancet*, 2023, 402(10401): 503.
- [64] Kundu S. AI in medicine must be explainable. *Nature Medicine*, 2021, 27(8): 1328.

Analysis of the Current Status and Trends in Oncology Surgery Development

Xu Zhang* Liangyou Gu Tongyu Jia

Department of Urology, Third Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100039, China

Abstract Oncology surgery, as a crucial pillar of comprehensive tumor treatment, has evolved from traditional open surgery to laparoscopic and robotic-assisted procedures. In recent years, advancements in cutting-edge technologies such as artificial intelligence, big data, 5G communication, and molecular biotechnology have propelled oncology surgery toward remote, precise, and intelligent approaches. Remote surgery is expected to facilitate cross-regional sharing of medical resources, providing high-quality treatment services to patients in remote areas. Meanwhile, the CRISPR/Cas9-based “molecular scalpel” has opened new avenues for precision interventions. AI applications in preoperative imaging analysis, surgical pathway planning, and risk prediction have significantly enhanced the level of personalized treatment. However, challenges such as uneven distribution of medical resources, difficulties in technology dissemination, and ethical and legal concerns continue to pose obstacles for oncology surgery. Looking ahead, driven by advancements in explainable AI, multimodal imaging, and autonomous surgery, oncology surgery will further enhance its precision and intelligence, fostering innovations in overall treatment models and ultimately improving patient survival rates and quality of life.

Keywords tumor; oncology surgery; minimally invasive surgery; artificial intelligence; precision surgery

张 旭 中国科学院院士,解放军总医院泌尿外科医学部专业技术少将主任、主任医师、教授,博士生导师。我国泌尿外科腹腔镜和机器人技术的奠基人。全军科技领军人才,全军战创伤重点实验室主任。研究方向为泌尿系统肿瘤的微创手术治疗、基础及转化研究。获国家科学技术进步奖二等奖 2 项。

(责任编辑 贾祖冰 张 强)

* Corresponding Author, Email: xzhang301@163.com