论著·专家述评

智能神经外科:技术融合、临床革新与未来挑战

吕胜青[1],肖晶晶[2] 陆军军医大学(第三军医大学)第二附属医院:[1]神经外科,[2]信息科,重庆

［摘要］ 神经外科发展现已迈入以人工智能(artificial intelligence, AI)为核心驱动力的智能神经外科新阶段。智能神经外科是以现代神经医学为基础,融合AI、机器学习、手术机器人、脑机接口、大数据、数字孪生及神经调控等前沿技术,通过人机协同模式构建覆盖"术前精准评估-术中实时导航与辅助-术后精细化管理"全流程的智能化诊疗体系。其核心技术支柱包括深度学习驱动的影像自动分割与分子分型预测、手术机器人实现亚毫米级精准操作、脑机接口建立脑与外设直接通信通路、多模态数据融合整合临床、基因组与影像信息,构建预测模型优化决策、数字孪生与神经调控技术实现个体化治疗模拟与可逆性神经调节。临床应用已广泛覆盖脑肿瘤的最大化安全切除、帕金森病与癫痫等功能性疾病的参数个性化调控、脑血管病的微创介入治疗,并在军事医学领域展现出颅脑战创伤快速智能救治的重大价值。然而,数据隐私、算法责任、伦理规范及技术普及不均等问题仍是其发展面临的严峻挑战。智能神经外科的本质是现代前沿技术赋能传统学科,形成智能化操控体系,最终实现"以患者为中心"的精准个性化医疗。未来发展方向将聚焦于核心技术从辅助向半自主演进、智慧手术室构建与远程协同以及从疾病治疗向神经功能增强的拓展。该体系的建立与推广,将在技术创新与伦理规范的平衡中推动神经外科诊疗范式的重塑,为全球患者提供更精准、安全、高效的医疗服务。

［关键词］ 神经外科学;人工智能;机器人;脑机接口;大数据

［中图法分类号］ R319;R651 ［文献标志码］ A

Intelligent neurosurgery: technological convergence, clinical transformation, and future challenges

LÜ Shengqing[1], XIAO Jingjing[2] [1]Department of Neurosurgery, [2]Bio-Med Informatics Research Center, Second Affiliated Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, China

［**Abstract**］ The development of neurosurgery has now entered a new stage of Intelligent Neurosurgery, driven by artificial intelligence (AI) as its core force. Intelligent Neurosurgery, grounded in modern neurosurgery, integrates cutting-edge technologies such as AI, machine learning, surgical robotics, brain-computer interfaces (BCIs), big data, digital twins, and neuromodulation. Through a human-machine

［基金项目］ 陆军军医大学红医人才库(医疗名师2025)和重庆市卫生健康委员会适宜技术推广项目资助(2026cgjstg003)

［通信作者］ 吕胜青,陆军军医大学第二附属医院神经外科主任、教授、主任医师、博士生导师。主要从事神经肿瘤和创伤性脑损伤的基础与临床研究。先后兼任中华医学会神经外科学分会委员、中国医师协会神经外科医师分会委员、重庆市医学会神经外科学分会副主任委员、重庆市神经外科医师分会副会长、中国抗癌协会神经肿瘤专业委员会副主任委员等学术职务。主持国家级、省部级及军队级科研项目20项,总经费逾千万元;以第一/通信作者发表SCI论文36篇(其中8篇IF>10),获省部级科技一、二等奖各1项。荣获重庆英才创新领军人才、人民好医生特别贡献奖、军队优秀专业技术人才岗位津贴、重庆市高层次人才、重庆市学术技术带头人、中央军委保健委员会会诊专家、陆军军医大学红医名师等荣誉。担任《中华创伤杂志》《陆军军医大学学报》《Glioma》等10本期刊编委。E-mail:lvsq0518@tmmu.edu.cn

2097-0927/Copyright © 2026, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

引用格式:吕胜青,肖晶晶. 智能神经外科:技术融合、临床革新与未来挑战[J]. 陆军军医大学学报,2026,48(05):523-529. DOI:10.16016/j.2097-0927.202512031.

Citation:LÜ S Q, XIAO J J. Intelligent neurosurgery: technological convergence, clinical transformation, and future challenges[J]. J Army Med Univ, 2026, 48(05):523-529. DOI:10.16016/j.2097-0927.202512031.

collaborative model, it constructs an intelligent diagnosis and treatment system covering the entire process of "precise preoperative evaluation—intraoperative real-time navigation and assistance—meticulous postoperative management." Its core technological pillars include deep learning-driven automated image segmentation and molecular subtype prediction, surgical robots achieving submillimeter precision, BCIs establishing direct communication pathways between the brain and external devices, multimodal data fusion integrating clinical, genomic, and imaging information to build predictive models for optimized decision-making, and digital twin and neuromodulation technologies enabling personalized treatment simulation and reversible neural regulation. Clinical applications now extensively cover maximal safe resection of brain tumors, personalized parameter optimization for functional disorders such as Parkinson's disease and epilepsy, and minimally invasive interventional treatments for cerebrovascular diseases. Furthermore, Intelligent Neurosurgery demonstrates significant value in military medicine for the rapid, intelligent management of traumatic brain injury. However, challenges including data privacy, algorithmic accountability, ethical norms, and uneven technology dissemination remain critical obstacles to its development. The essence of Intelligent Neurosurgery lies in empowering traditional disciplines with cutting-edge technologies to form an intelligent control system, ultimately achieving "patient-centered" precision medicine. Future directions will focus on the evolution of core technologies from assistance towards semi-autonomy, the construction of smart operating rooms and remote collaboration, and the expansion from disease treatment to neural function enhancement. The establishment and promotion of this system will reshape the paradigm of neurosurgical diagnosis and treatment by balancing technological innovation with ethical norms, ultimately delivering preciser, safer, and more efficient medical services to patients worldwide.

[**Key words**] neurosurgery; artificial intelligence; robotics; brain-computer interfaces; big data

The program by the Red Medical Talent Pool (2025 Renowned Medical Mentors) of Army Medical University and the Appropriate Technology Promotion Project of Chongqing Municipal Health Commission (2026cgjstg003). Correspondence author: LÜ Shengqing, E-mail: lvsq0518@tmmu.edu.cn

20世纪50年代以前,神经外科医师主要是在裸眼下进行手术,手术死亡率和致残率在30%左右,被称为大体神经外科时代(又称肉眼神经外科时代)[1];20世纪60年代,MAHMUT GAZI YASARGIL教授开创性运用显微镜开展大脑中动脉与颞浅动脉吻合搭桥手术,由此拉开了显微神经外科时代的序幕[2],显著降低了神经外科手术的死亡率与致残率;20世纪80年代,随着介入神经外科技术、立体定向神经外科技术以及微创外科理念的推广与普及,神经外科医师借助新兴技术与设备,在最大限度切除病灶的同时又能最大程度安全保留神经功能,此阶段被称为"微创神经外科时代"(又称微侵袭神经外科时代)[1];"精准医学"概念[3]自2015年正式提出以来,神经外科领域再次取得显著进步。精准医学技术,结合了基因组学、蛋白质组学和生物信息学等领域的深入研究,为个体化、精准化的医疗服务提供了支撑。在神经外科中,精准影像诊断与导航、术中荧光技术、术中唤醒麻醉和术中核磁共振的应用,以及术后精准病理诊断和分子病理分型等技术,都极大地提高了手术精确性和治疗有效性。例如,基因组学的深度分析有助于了解疾病遗传背景,为早期预测、诊断及预后评估提供依据。蛋白质组学研究有助于了解疾病的病理生理机制,为治疗方案制定提供依据。生物信息学则为处理海量基因数据提供了技术手段。这些技术的应用,使得神经外科医生在诊疗过程中能够更加准确地为患者提供更高效的个体化诊疗服务。随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术[4-5]的飞速发展,神经外科学与智能化工程技术的深度融合,智能神经外科时代已经到来。AI辅助诊断、大数据分析[6]在手术方案决策中的应用、机器人手术的推广以及远程医疗协作等,正在成为神经外科领域的显著特征。AI技术在脑肿瘤、脑血管疾病以及神经退行性疾病的诊断中展现出高准确率和快速诊断速度,同时在临床应用案例中也显示出其在提升诊断准确性和效率的巨大潜力。

1 智能神经外科体系概念

智能神经外科体系是以现代神经医学与生物学理论为基础,融合大数据分析、AI、智能机器人技术、脑机接口、神经调控、虚拟现实(virtual reality, VR)等前沿科学技术,通过人机协同模式提升神经外科疾病

诊断、手术规划、术中全方位辅助操作及预后评估精准度和效率的学科体系。其目标是构建覆盖“术前精准评估-术中精准导航与辅助-术后精细化管理”全链条智能化诊疗体系[7-8]。有别于传统神经外科诊疗技术,智能神经外科体系重点依靠人工智能方法,打造全新临床技术应用理念,期望实现为更多神经外科病患服务[9]。

2 智能神经外科体系核心内涵

2.1 技术基础:人工智能驱动的五大核心支柱

人工智能作为智能神经外科体系的核心技术基础,通过机器学习、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等模式,不仅研究和开发用于模拟、延伸和扩展人类智能的理论和方法,还在实际应用中显著提高了手术精度、诊断准确性和治疗效果。①机器学习[10]:在神经外科领域,研究者通过应用多层感知器(multi-layer perceptron, MLP)、卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和递归神经网络(recursive neural network, RNN)等方法,将影像图像进行分割与融合,提高了临床神经系统疾病(如脑胶质瘤)的诊断率,并显著缩短了影像报告的时间,节约了大量人力物力;借助深度学习分析影像数据(如MRI、CT等),可实现脑胶质瘤分子分型预测、病灶自动分割等功能,辅助医生制定个性化诊疗方案[11];②机器人技术:AI辅助的神经外科手术机器人融合触觉反馈与图像识别技术,可提升手术精度、减少术中损伤、缩短手术时间,已在脑肿瘤切除和脊柱脊髓疾病诊疗中广泛应用[12-13];③大数据挖掘与分析:多模态数据融合可整合临床数据、基因组学、影像学等多源信息,构建疾病预测模型,优化诊疗路径,提升诊治水平[14-15];④基于机器学习的诊疗推荐系统:能对海量人类疾病临床资料(病史、症状、体征和检查检验结果等)进行综合分析,优化治疗决策,降低人为误诊误判率[16];⑤人工神经网络[17]:通过模拟人脑神经元之间连接与信号处理机制,构建具备学习、联想与推理能力的计算模型,可从海量多模态数据中自动提取特征、发现潜在规律,并借助监督或无监督学习实现持续数据自我优化。目前,神经网络已在辅助诊断、个性化手术规划以及智能决策等方面展现出重要价值。近年来,首都医科大学附属北京天坛医院赵继宗院士提出“网络神经外科”新概念,从脑功能保护、神经调控和意识障碍等领域,阐述脑网络在神经外科疾病诊疗中的重要意义[18]。

2.2 应用场景:覆盖围术期全流程

AI在神经外科疾病诊疗中,特别是在神经外科围手术处理中发挥重要作用[8,19]。①影像诊断:将海量神经影像进行AI分析与处理,是智能神经外科最早期的应用场景,大幅缩短了影像报告时间,提高了诊断准确率。②术前规划:通过混合现实(mixed reality, MR)技术构建三维脑部模型,模拟手术路径,降低手术风险。③术中导航:利用实时影像更新和机器人辅助定位,精准避开功能区(如运动皮层、语言中枢等),实现最大范围肿瘤切除与最大限度功能保留。④术后管理:基于AI预后评估系统预测并发症风险,指导康复训练,提供术后随访指导与管理。⑤教学培训:虚拟/混合现实技术(VR/MR)在神经外科医生技能培训中发挥着日益重要的作用。

2.3 核心目标:精准、微创、高效

智能神经外科体系的核心目标在于提升患者的诊疗水平,体现神经外科疾病诊疗的精准性、安全性与高效性,降低治疗相关风险和并发症的发生[20]。①精准化:通过智能算法减少人为误差,通过采用先进深度学习模型,能降低脑肿瘤边界识别误差;②微创化:采用内镜、立体定向等技术实现小切口或微创治疗(如癫痫神经调控术);③高效率:AI辅助的术中病理诊断技术,能显著缩短病理报告时间,提高手术效率。

2.4 发展阶段与挑战

智能神经外科目前处于起步阶段,技术应用集中于大型三甲教学医院,但已覆盖颅脑损伤、脑肿瘤、脑血管病、功能性疾病(如帕金森病)等主要领域。

人工智能医学应用面临诸多伦理问题,具体表现在患者公平受益、责任认定、生命安全及隐私泄露等方面。可能体现在以下方面:①技术性问题:医疗AI技术本身的局限性;②主体性问题:相关主体道德缺失以及认识不到位;③社会性:社会监管力度不足、法律规范不健全且约束力度不够。伦理问题[21]坚持“以人为本”的设计原则,构建医疗AI伦理原则体系,完善医疗AI侵权责任机制,强化医疗数据的保护与合理利用,加强医疗、法律及社会等多领域的跨学科合作。

3 智能神经外科体系临床应用

作为新兴的重要学科领域,智能神经外科将朝着多学科融合与自主化方向发展,其临床新技术将推动学科迅速成长壮大。

3.1 脑机接口(brain computer interface, BCI)

BCI指在人或动物大脑与外部设备之间创建的直接连接,实现脑与设备的信息交换,是一种变革性人

机交互技术[22]。其作用机制是绕过外周神经和肌肉,直接在大脑与外部设备之间建立全新的通信与控制通道,它通过捕捉大脑信号并将其转换为电信号,实现信息的传输和控制。在神经外科领域,脑机接口技术[23]可用于意识障碍患者的神经功能重建、神经假体植入(如电子耳蜗和人工视网膜)等,以期有效恢复患者因脑和脊髓损伤等疾病丧失的运动功能和交流能力,实现让患者重新回归社会的医疗目标。

3.2 神经外科手术机器人

神经外科手术机器人是一种无框架立体定向手术设备,它集成了多模态生物信号感知技术,能够实现半自主的手术操作。这些机器人系统通过高度灵活的操作能力,模拟医生手部动作,提供精准、稳定的手术操作。它们还配备先进的图像识别技术,实时获取手术部位图像信息,为医生提供准确的术中导航。此外,手术机器人系统具备高度智能化特点,能够根据手术需求自动调整手术器械的位置和角度,提高手术效率。当前,神经外科手术机器人[24-28]可应用于颅内病变活检、脑脓肿引流、血肿穿刺引流、导航定位、深部脑刺激、立体脑电图、内镜扶持以及辅助三叉神经痛球囊压迫术等。随着机器人辅助手术技术的持续发展,越来越多的神经外科患者从中受益。

3.3 数字孪生(digital twin, DT)

数字孪生又称数字映射、数字镜像,是在信息化平台上模拟物理实体、流程等仿真过程,通过虚拟患者模型优化个体化治疗方案,在神经外科领域,数字孪生技术可用于神经肿瘤定位、术前路径规划,术中实时跟踪和肿瘤术后精准放疗等[29]。

3.4 神经调控(neural control technology,NCT)

在神经科学层面,利用植入性和非植入性神经调控技术,依靠物理(电、磁、光、声、超声等)或化学手段来改善人类生命质量。相对于原先毁损和切除而言,它重点强调“调控”,即该过程是可逆的,治疗参数是可被体外调整,可借助植入设备(电极和泵),通过多种刺激方式和药物递送发挥作用。当前已经广泛地用于运动障碍性疾病、顽固性疼痛、癫痫、精神障碍性疾病、脑类疾病、成瘾症以及神经系统受损后功能恢复治疗方面,例如硬膜外脊髓电刺激可促进截瘫患者恢复行走能力[30-31]。

3.5 军事医学领域

颅脑战创伤与军事脑科学是军事医学的重要领域,现代军事医学的发展迫切需要运用信息化技术和人工智能方法,构建适合我军现状的颅脑战创伤应急救治专科体系。近年来,解放军总医院神经外科学部张剑宁教授团队和陆军军医大学蒋建新院士团队[32]在战创伤救治领域,以卫生勤务智能化为切入点,针对战现场搜救、检伤分类、现场救治及医疗后送等不同场景,搭建智能神经外科新技术应用平台,为我国国防卫生事业的发展做出有益探索。进入21世纪,军事脑科学研究领域迅速成为生命科学研究的热点。脑科学研究不仅引领着人类对自身认知与智能活动的深入探索,如对大脑认知边界和理解自身方式的拓展,军事脑科学范式也随之转变。通过研究人脑的深层构造和运行机理,可开发出全新的信息处理系统与智能化武器装备。目前,“脑控”和认知计算技术在提升武器系统智能化、升级改造军事装备方面展现出了巨大潜力,而且,“制脑权”争夺已然成为世界军事强国间竞争的新焦点,将对未来战争产生极为深远影响,甚至改变将来战争模式[33]。

4 未来展望

智能神经外科体系的终极目标是构建“临床医生-AI-智能机器人”高效协同的医疗生态系统。未来已来,智能神经外科通过逐步整合AI、脑机接口、智能机器人技术、大数据、计算神经外科学、光遗传学技术等前沿技术,有序构建覆盖“诊断-治疗-康复”的全流程智能体系,推动手术从“机械操作”向“认知增强”跃迁[34]。而临床医生则更加专注于医疗决策与人文关怀。这一变革不仅将使神经系统疾病治愈率大幅提升,也将重新定义人类对“健康”与“能力”的认知。

4.1 核心技术突破

从辅助工具到决策主体的渐进式变革。未来AI将会驱动全流程智能诊疗:术前深度学习算法可分析多模态影像(CT、CTA、DSA、MRI、PET等),实现脑肿瘤基因突变类型预测,指导靶向药物选择;术中AI实时监测脑组织移位,自动修正导航偏差,误差控制在亚毫米级;术后通过病理数据与基因组信息,预测肿瘤复发风险及预后。新一代神经外科智能机器人集成AI规划、实时反馈与微创操作能力以及全闭环控制,并实现自动手术操作。脑机接口是未来功能重建的神经桥梁,通过解码神经信号,可实现运动功能重建[35]。随着柔性电极与材料学的进步,组织相容性进一步提高,胶质瘢痕与排异反应大大降低,获取多维度神经信息时程得到跨越式提升,结合智能神经外科机器人[25-27]柔性电极自动植入系统,充分实现脑机接口双向信息互通与闭环控制;未来脑机接口深入结合光遗传学技术,同步实现基因编辑神经元与外部设备双向通信以及个性化闭环系统,为帕金森病、癫痫等

功能性疾病提供革新式个性化调控方案。

4.2 智慧手术室构建

全数字精准智能化手术室将实现从物理空间到智能生态的转变,有利于智能神经外科核心技术落地实施。智慧手术室多模态数据融合平台,集成术中影像(CT、MRI、DSA等)和术中超声、电生理、血流动力学等实时数据,通过AI算法生成动态手术导航图,系统将数字影像导航投射至患者解剖部位,辅助实时手术;人机交互界面,语音控制与手势识别技术减少术中操作步骤,手术医生可通过自然语言指令调整机器人参数,大大提升手术质量与效率。基于智能神经外科体系开发实时触觉反馈系统,增强手术触觉感知与实时反馈闭环系统;在5G或未来更高通量信息传输技术支持下,临床专家可实时指导基层医院完成复杂手术,有利于推动优质医疗资源下沉,真正解决区域医疗不平衡问题。

4.3 未来临床应用场景:从疾病治疗到功能增强的全方位演变

4.3.1 脑肿瘤精准治疗 AI在脑肿瘤中的应用[36-37],可望实现AI全程辅助激光间质热疗技术,经微小针孔植入光纤消融深部脑肿瘤,实现精准切除与个体化治疗;智能神经外科体系的手术机器人全自动技术结合术中3D显微技术和术中影像实时重建,并有机结合术中MRI/CT/超声/分子病理,实现亚厘米级肿瘤定位,解决脑肿瘤术中漂移的核心难题。

4.3.2 功能性神经外科疾病治疗 帕金森病、梅杰综合征等疾病可实现AI个性化调整电极参数,缓解震颤与僵直等症状;三叉神经痛、面肌痉挛等功能性疾病可在智能神经外科机器人技术精准导航辅助下实现对运动症状精准调控;致痫灶精准定位与微创手术干预药物难治性癫痫[38],采用无框架机器人辅助颅内电极精准置入,结合射频热凝毁损和光遗传学调控等技术,通过靶向抑制癫痫样放电,降低癫痫发作频率。

4.3.3 脑血管病微创治疗 新一代介入机器人能使脑血管病治疗更加微创化;智能神经外科机器人辅助原发性脑出血可实现超早期微创清除[39],对脑干、丘脑等关键部位出血实施可视化定向引流,并可辅助神经内镜进行血肿清除手术。

4.3.4 神经失能状态功能增强 全程AI辅助脑机接口驱动外骨骼系统能够有效帮助截瘫患者实现站立行走,结合虚拟现实有效的康复训练,运动功能评分将能大幅提升。未来依据临床实际需求,结合大数据分析、光遗传学技术可以实现靶向激活运动皮层特异性神经元,有效促进神经环路靶向重塑。未来基于此可开发可穿戴的脑机接口(非侵入式)设备[35,40],可望实现神经外科疾病家庭康复。

智能神经外科体系是神经外科时代发展到现代必然会到来的学科方向,其本质是通过现代最前沿技术赋能,将大数据、AI、智能机器人技术以及最前沿的脑机接口以及靶向精准的神经调控技术有机结合,形成智能化操控体系,最终实现“以患者为中心”的精准个性化智能医疗。其推广应用不仅依赖于不断革新的前沿技术创新,还需要在标准的伦理规范与切实的临床实践之间找到平衡点,以推动神经外科学的可持续快速发展。

致谢 感谢清华大学附属北京清华长庚医院神经外科杨学军教授、首都医科大学附属北京天坛医院神经外科贾旺教授、解放军总医院第一医学中心神经外科学部陈凌教授、北京大学第三医院神经外科杨军教授和中南大学湘雅医院神经外科刘志雄教授对本文的建议与指导;感谢陆军军医大学第二附属医院神经外科刘国龙、黄国浩副主任医师在资料收集与整理等方面的工作!

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献:

[1] 赵继宗. 微创神经外科与转化医学[J]. 首都医科大学学报,2010,31(4): 461-464.
ZHAO J Z. Minimally invasive neurosurgery and translational medicine[J]. J Cap Med Univ,2010,31(4): 461-464.

[2] ERDEMOĞLU E, DAĞTEKIN A. Mahmut Gazi Yaşargil (1925-2025): a hundred years dedicated to neurosurgery from the Neurosurgery's Man of the Century[J]. Childs Nerv Syst,2026,42(1): 42. DOI:10.1007/s00381-026-07147-6.

[3] 杨军. 医工结合: 精准医学时代神经外科创新发展的战略高地[J]. 山东大学学报(医学版),2021,59(9): 83-88. DOI:10.6040/j.issn.1671-7554.0.2021.0967.
YANG J. Medico-engineering cooperation: a strategic plateau of neurosurgery innovation and development in the era of precision medicine[J]. J Shandong Univ Health Sci,2021,59(9): 83-88. DOI:10.6040/j.issn.1671-7554.0.2021.0967.

[4] COIERA E, LIU S D. Evidence synthesis, digital scribes, and translational challenges for artificial intelligence in healthcare [J]. Cell Rep Med, 2022, 3(12): 100860. DOI: 10.1016/j.xcrm.2022.100860.

[5] BAZOUKIS G, HALL J, LOSCALZO J, *et al*. The inclusion of augmented intelligence in medicine: a framework for successful implementation[J]. Cell Rep Med, 2022, 3(1): 100485. DOI:10.1016/j.xcrm.2021.100485.

[6] HECHLER E, WEIHRAUCH M, WU Y. Data fabric and data mesh research areas [M]//Data Fabric and Data Mesh Approaches with AI: A Guide to AI-based Data Cataloging,

Governance, Integration, Orchestration, and Consumption. Berkeley: Apress, 2023: : 375-392. DOI: 10.1007/978-1-4842-9253-2_17.

[7] 杨军.大数据与精准医学时代的智能神经外科[J].中华神经外科杂志,2021,37(9):865-868. DOI:10.3760/cma.j.cn112050-20210706-00334.
YANG J. Big data and precision medicine era's intelligent neurosurgery[J]. Chin J Neuro,2021,37(9):865-868. DOI:10.3760/cma.j.cn112050-20210706-00334.

[8] IMAN M, SAHITIA N, FATIMA L, *et al*. AI and neurosurgery: a new era of enhanced outcomes[J]. Neurosurg Rev,2024,47(1): 656. DOI:10.1007/s10143-024-02890-3.

[9] IQBAL J,JAHANGIR K,MASHKOOR Y,*et al*. The future of artificial intelligence in neurosurgery: a narrative review[J]. Surg Neurol Int, 2022, 13: 536. DOI: 10.25259/SNI_877_2022.

[10] MENZE B,ISENSEE F,WIEST R,*et al*. Analyzing magnetic resonance imaging data from glioma patients using deep learning [J]. Comput Med Imaging Graph, 2021, 88: 101828. DOI:10.1016/j.compmedimag.2020.101828.

[11] MOON H H,JEONG J,PARK J E,*et al*. Generative AI in glioma: Ensuring diversity in training image phenotypes to improve diagnostic performance for IDH mutation prediction [J]. Neuro Oncol,2024,26(6): 1124-1135. DOI:10.1093/neuonc/noae012.

[12] NATHOO N,ÇAVUŞOĞLU M C,VOGELBAUM M A,*et al*. In touch with robotics: neurosurgery for the future [J]. Neurosurgery, 2005, 56(3): 421-433. DOI: 10.1227/01.neu.0000153929.68024.cf.

[13] STULL J D,MANGAN J J,VACCARO A R,*et al*. Robotic guidance in minimally invasive spine surgery: a review of recent literature and commentary on a developing technology [J]. Curr Rev Musculoskelet Med,2019,12(2): 245-251. DOI:10.1007/s12178-019-09558-2.

[14] BYEON Y, PARK Y W, LEE S, *et al*. Interpretable multimodal transformer for prediction of molecular subtypes and grades in adult-type diffuse gliomas[J]. NPJ Digit Med, 2025,8(1): 140. DOI:10.1038/s41746-025-01530-4.

[15] CHOULEUR T, ETCHEGARAY C, VILLAIN L, *et al*. A strategy for multimodal integration of transcriptomics, proteomics, and radiomics data for the prediction of recurrence in patients with IDH-mutant gliomas [J]. Int J Cancer,2025,157(3): 573-587. DOI:10.1002/ijc.35441.

[16] AO C Y, JIN S S, DING H, *et al*. Application and development of artificial intelligence and intelligent disease diagnosis[J]. Curr Pharm Des,2020,26(26): 3069-3075. DOI:10.2174/1381612826666200331091156.

[17] 罗强,杜超,于玉国,等.复杂神经系统交叉科学:系统科学与脑科学的交叉前沿[J/OL].中国科学:生命科学,1-10 [2026-02-26]. https://link.cnki.net/urlid/11.5840.Q.20260116.0944.002.
LUO Q, DU C, YU Y G, *et al*. Complex neurological systems: the interdisciplinary frontier of systems science and brain science [J/OL]. Scientia Sinica (Vitae), 1-10 [2026-02-26]. https://link.cnki.net/urlid/11.5840.Q.20260116.0944.002.

[18] ZHAO J Z. Network neurosurgery [J]. Chin J Neurosurg, 2023,9: 4. DOI:10.1186/s41016-023-00317-4.

[19] LEVY A S,BHATIA S,MERENZON M A,*et al*. Exploring the landscape of machine learning applications in neurosurgery: a bibliometric analysis and narrative review of trends and future directions [J]. World Neurosurg, 2024, 181: 108-115. DOI:10.1016/j.wneu.2023.10.042.

[20] EL-HAJJ V G,GHARIOS M,EDSTRÖM E,*et al*. Artificial intelligence in neurosurgery: a bibliometric analysis [J]. World Neurosurg, 2023, 171: 152-158.e4. DOI: 10.1016/j.wneu.2022.12.087.

[21] 杨丽辉,彭菊红,何胜男,等.人工智能技术在脑干出血诊疗中的伦理问题[J].中华神经外科疾病研究杂志,2024,18(5): 68-71.
YANG L H,PENG J H,HE S N,*et al*. Ethical issues of artificial intelligence technology in the diagnosis and treatment of brainstem hemorrhage[J]. Chin J Neurosurg Dis Res,2024,18(5): 68-71.

[22] ZHANG H Y,JIAO L,YANG S X,*et al*. Brain-computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions[J]. Int J Surg,2024,110(9): 5745-5762. DOI: 10.1097/JS9.0000000000002022.

[23] ALVI M A,PEDRO K M,QUDDUSI A I,*et al*. Advances and challenges in spinal cord injury treatments[J]. J Clin Med,2024,13(14): 4101. DOI:10.3390/jcm13144101.

[24] BALL T, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ J, ZEMMAR A, *et al*. Robotic applications in cranial neurosurgery: current and future[J]. Oper Neurosurg, 2021, 21(6): 371-379. DOI: 10.1093/ons/opab217.

[25] 中华医学会神经外科分会功能神经外科学组,中国医师协会神经外科医师分会功能神经外科专业委员会.神经外科手术机器人辅助原发性脑干出血穿刺引流术专家共识(2025版)[J].中华神经医学杂志,2025,24(4):325-334. DOI:10.3760/cma.j.cn115354-20250127-00050.
Functional Neurosurgery Group of Neurosurgery Branch of the Chinese Medical Association, Functional Neurosurgery Professional Committee of Neurosurgery Physicians' Branch of the Chinese Medical Doctors Association. Expert consensus on neurosurgical robot-assisted puncture and drainage in primary brainstem hemorrhage (2025 edition)

[J]. Chin J Neuromed, 2025, 24(4): 325-334. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20250127-00050.

[26] 中国医师协会功能神经外科专家委员会,中华医学会神经外科学分会功能神经外科学组,中国医师协会神经调控专业委员会,等. 神经外科手术机器人辅助脑深部电刺激手术的中国专家共识[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2021, 26(7): 291-295. DOI: 10.11850/j.issn.1009-122X.2021.07.001.
Functional Neurosurgery Expert Committee of Chinese Medical Doctor Association, Functional Neurosurgery Group of the Neurosurgery Branch of Chinese Medical Association, Neuroregulation Professional Committee of the Chinese Medical Doctor Association, *et al*. China experts' consensus on neurosurgery robot-assisted deep brain electrical stimulation surgery[J]. Chin J Minim Invasive Neurosurg, 2021, 25(7): 291-295. DOI: 10.11850/j.issn.1009-122X.2021.07.001.

[27] 尹子霄,杨岸超,张建国. 神经外科机器人在植入式脑机接口中的应用现状及前景[J]. 临床外科杂志,2024,32(10): 1013-1016.
YIN Z X, YANG A C, ZHANG J G. Application status and prospect of neurosurgical robot in implantable brain-computer interface[J]. J Clin Surg, 2024, 32(10): 1013-1016.

[28] 冉旭,刘景鹏,彭菊红,等. 神经外科机器人辅助立体定向穿刺引流术治疗脑脓肿的疗效分析[J]. 局解手术学杂志, 2025,34(11): 987-992. DOI:10.11659/jjssx.06E025152.
RAN X, LIU J P, PENG J H, *et al*. Therapeutic effect of neurosurgical robot-assisted stereotactic puncture and drainage for brain abscess[J]. J Reg Anat Oper Surg, 2025, 34(11): 987-992. DOI:10.11659/jjssx.06E025152.

[29] 刘齐宏. 数字孪生导论[M]. 成都: 四川大学出版社, 2023: 162-183.
LIU Q H. Introduction to digital twin [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2023: 162-183.

[30] CAJIGAS I, VEDANTAM A. Brain-computer interface, neuromodulation, and neurorehabilitation strategies for spinal cord injury[J]. Neurosurg Clin N Am, 2021, 32(3): 407-417. DOI:10.1016/j.nec.2021.03.012.

[31] WAGNER F B, MIGNARDOT J B, LE GOFF-MIGNARDOT C G, *et al*. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury [J]. Nature, 2018, 563(7729): 65-71. DOI:10.1038/s41586-018-0649-2.

[32] 张剑宁,刘佳雨,娄昕,等. 努力提高颅脑战创伤一线快速诊断水平[J]. 中华神经外科疾病研究杂志,2025,19(6): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1671-2897.2025.06.001.
ZHANG J N, LIU J Y, LOU X, *et al*. Promoting rapid diagnostic capabilities for frontline management of military neurotrauma[J]. Chin J Neurosurg Dis Res, 2025, 19(6): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1671-2897.2025.06.001.

[33] 马少卿,王高峰. 脑机接口视域下人机意识问题研究[J]. 医学与哲学,2025,46(24): 7-13.
MA S Q, WANG G F. Research on human-machine consciousness from the perspective of brain-computer interface[J]. Med Philos, 2025, 46(24): 7-13.

[34] DI IEVA A, SUERO MOLINA E, LIU S D, *et al*. Computational neurosurgery [M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024 DOI:10.1007/978-3-031-64892-2.

[35] EDELMAN B J, ZHANG S L, SCHALK G, *et al*. Non-invasive brain-computer interfaces: state of the art and trends[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2025, 18: 26-49. DOI: 10.1109/RBME.2024.3449790.

[36] CHEN W, HUANG G H, REN P, *et al*. Support vector machine-based preoperative identification of IDH-Mutant low-grade gliomas in adult gliomas using clinical features [J]. BMC Neurol, 2025, 25(1): 412. DOI:10.1186/s12883-025-04435-7.

[37] CHEN W, REN P, HUANG G H, *et al*. Machine learning-based preoperative prediction of *IDH* mutation status in adult gliomas using clinical features[J]. Neurol Res, 2025: 1-9. DOI:10.1080/01616412.2025.2533418.

[38] TREVELYAN A J, MARKS V S, GRAHAM R T, *et al*. On brain stimulation in epilepsy[J]. Brain, 2025, 148(3): 746-752. DOI:10.1093/brain/awae385.

[39] 谢源,彭菊红,阴金波,等. 神经外科机器人辅助下多通道可视化脑干血肿清除术[J/OL]. 中华脑科疾病与康复杂志(电子版), 2025, 15(4): 254-256. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-123X.2025.04.011.
XIE Y, PENG J H, YIN J B, *et al*. Visualized multi-channel puncture and drainage of primary brainstem hemorrhage assisted by neurosurgical robot [J/OL]. Chin J Brain Dis Rehabil Electron Ed, 2025, 15(4): 254-256. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-123X.2025.04.011.

[40] YUAN Z B, SHI Z J, WANG Z X. Digital neurosurgery in the era of intelligent medicine: a scoping review[J]. Front Med, 2025, 12: 1700166. DOI:10.3389/fmed.2025.1700166.

(**收稿**:2025-12-10;**修回**:2026-02-12)

(编辑 栾 嘉)