

数字与人工智能技术赋能神经外科

杨学军 贾旺 毛颖 江涛

【摘要】 神经外科正步入智能化和个体化的精准时代。新一代神经外科医师不仅需要精湛的手术技能,还需要掌握计算机技术、影像学技术和神经调控技术等。人工智能在神经外科领域的应用包括机器学习、深度学习、大语言模型等。本文介绍数字与人工智能技术应用于中枢神经系统肿瘤、脊柱疾病、癫痫和脑血管病的典型范例。数智神经外科侧重强调数字化和智能化在神经外科领域的深度融合,应建立智能感知、智能认知、智能决策和智能操作的技术体系。随着数字化与智能化的深度融合,神经外科必将迎来前所未有的技术变革。

【关键词】 数字技术; 人工智能; 神经外科(学); 精准医学; 综述

Digital and artificial intelligence technologies empowering neurosurgery

YANG Xue-jun¹, JIA Wang², MAO Ying³, JIANG Tao²

¹Department of Neurosurgery, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua Medicine, Tsinghua University, Beijing 102218, China

²Department of Neurosurgery, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China

³Department of Neurosurgery, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China

Corresponding author: YANG Xue-jun (Email: ydenny@126.com)

【Abstract】 Neurosurgery is entering an era of intelligent and personalized precision. The new generation of neurosurgeons needs not only superb surgical skills, but also the ability to master computer technology, imaging technology and neuromodulation. The application of artificial intelligence (AI) technology in neurosurgery includes machine learning (ML), deep learning (DL) and large language model (LLM). This article introduces specific cases in neurological tumors, spinal diseases, epilepsy and cerebrovascular diseases. Digit-intelligent neurosurgery focuses on the deep integration of digitalization and intelligentization in the field of neurosurgery. Digit-intelligent neurosurgery should establish a technical system of intelligent perception, intelligent cognition, intelligent decision-making and intelligent operation. With the deep integration of digitalization and intelligentization, neurosurgery will usher in unprecedented technological changes.

【Key words】 Digital technology; Artificial intelligence; Neurosurgery; Precision medicine; Review

This study was supported by Beijing Natural Science Foundation (No. L246048).

Conflicts of interest: none declared

神经外科学由于涉及精细结构解剖、重要功能区保护、实时决策,以及高精度操作,被认为是医学领域最具挑战性的学科之一。现代神经外科发展至今历经奠基阶段(20世纪初至中叶)、显微神经外

科时代(20世纪50-80年代)、计算机与神经导航时代(20世纪90年代至21世纪初),已迈入强调智能化与个体化的精准神经外科时代。人工智能(AI)、脑机接口(BCI)、多组学与基因治疗、再生与康复医学的发展是重要的技术驱动^[1]。相比前辈,新一代神经外科医师要脱颖而出,不仅要训练和掌握精湛的手术操作技能,还要同时具备计算机、影像学、神经调控和个性化诊疗能力。本文聚焦数字和人工智能技术赋能神经外科,以期实现高效、精准和个性化的诊疗目标。

doi: 10.3969/j.issn.1672-6731.2025.02.001

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(项目编号:L246048)

作者单位:102218 清华大学附属北京清华长庚医院神经外科(杨学军);100070 首都医科大学附属北京天坛医院神经外科(贾旺,江涛);200040 上海,复旦大学附属华山医院神经外科(毛颖)

通讯作者:杨学军,Email:ydenny@126.com

表1 人工智能技术体系及其在神经外科领域的潜在应用

Table 1. AI technology system and its potential application in neurosurgery

技术	概念	核心模型	神经外科应用
机器学习	人工智能的一个分支,指计算机通过数据学习规律,并根据这些规律进行预测或决策,无需明确编写具体规则,简单而言,就是让计算机“模仿”人类学习方式,从经验(数据)中不断优化表现	监督学习:如支持向量机、随机森林、Logistic 回归 无监督学习:如聚类分析、主成分分析 半监督学习 强化学习:如深度Q网络、近端策略优化	医学影像分析:机器学习算法用于脑肿瘤检测、脑出血分割、颅内动脉瘤预测 手术风险预测:机器学习算法评估术后预后 脑电数据分析:用于癫痫发作预测、帕金森病症状分析
深度学习	机器学习的一个子集,采用人工神经网络进行端到端学习,尤其擅长处理高维数据,如图像、音频和文本	卷积神经网络:主要用于图像处理,如U-Net模型用于医学影像分割 循环神经网络、长短时记忆神经网络:用于时序数据分析,如脑电信号解码 变换器:用于自然语言处理,也是大语言模型的基础 生成对抗网络:用于合成医学影像数据,增强数据集	MRI自动分割:如U-Net模型分割脑肿瘤以提高诊断效率 术中导航优化:基于三维卷积神经网络和术中影像优化神经导航系统 脑电信号解码:利用长短时记忆和变换器解析脑电信号,用于脑机接口控制
大语言模型	是一种基于变换器架构的深度学习模型,主要用于自然语言处理,如文本理解、生成、翻译等	双向自回归变换器、T5:用于文本生成、问答系统等 用于生物医学文本挖掘的双向编码表示变换器、医学路径语言模型:专门针对医学文本处理的大语言模型 DeepSeek:更高效的训练策略、增强的推理能力、针对中文和多模态任务的特定调整,可完成高质量的文本生成,具备稳定的运行环境,支持大规模部署	医学文献分析:大语言模型可自动总结神经外科文献,辅助临床医师获取关键信息 智能病历生成:通过自然语言处理自动完成手术记录、病历记录 医学问答与辅助决策:通过大语言模型提供手术建议、病例分析
计算机视觉	通过深度学习算法分析图像和视频,包括目标检测、图像分割和图像识别等任务	目标检测:如YOLO算法、Faster R-CNN算法,用于检测脑部病变 图像分割:如U-Net模型,用于医学影像处理 图像增强:如生成对抗网络合成医学图像,提高人工智能模型的训练效果	实时术中影像分析:计算机视觉用于术中MRI/CT分析,提高手术精准度 术中神经和血管识别:帮助术者识别重要神经和血管,避免手术损伤
强化学习	是一种基于奖励反馈机制的机器学习算法,常用于自动决策、机器人控制、游戏人工智能等	深度Q网络:用于智能决策、机器人、自主系统的发展 近端策略优化:广泛用于机器人、自动驾驶、智能体训练等领域 软演员-评论家算法:用于机器人、自动驾驶、智能体控制等领域	机器人手术路径优化:强化学习可优化手术机器人在复杂解剖结构中的路径规划 自动脑深部电刺激参数调节:强化学习可用于自动优化脑深部电刺激参数,提高疗效
知识图谱/专家系统	知识图谱是一种结构化数据表示方法,将实体、关系和属性连接起来,以支持语义搜索、问答系统和智能推荐等任务	神经外科知识图谱的数据来源:医学文献、电子病历、神经影像数据(MRI、CT、PET)、基因组数据、专家知识库(医师经验总结、指南) 神经外科知识图谱的构成:疾病实体、治疗方法、病因关系、术后预后 神经外科专家系统的构成:知识库由神经外科专家、临床指南、医学研究等汇总形成,涵盖疾病诊断、手术方案、术后管理等 推理引擎:通过规则推理或案例推理,自动分析患者情况,提供个性化医疗建议 用户接口:临床医师输入患者信息可获取人工智能推荐的诊疗方案	结合机器学习,自动扩展知识图谱,提高模型推理能力,例如,结合影像组学、基因组学、电子病历,制定个性化精准治疗方案 专家系统+大语言模型,实现智能问诊 5G+人工智能+知识图谱,实现远程神经外科智能监测

R-CNN, region-convolution neural network, 区域卷积神经网络

一、神经外科医师须知的数字与人工智能知识

近年来,神经外科领域围绕人工智能主题的讨论和应用很多,但多数神经外科医师仍专注于手术技术的训练和提高,对数字和人工智能技术的了解有限。数字和人工智能技术在神经外科领域的拓展应用,需要神经外科医师具备基本的知识素养和学习能力,而非机械应用和盲目信任,这对保证将人工智能技术应用于临床,并正确、有效、安全地转化为神经外科患者的照护方案至关重要。

数字技术是较广泛的概念,包括计算机系统、互联网、大数据、云计算、物联网等,主要用于处理、存储和传输信息。人工智能是数字技术的延伸应用,专注于模拟人类智能,通过算法和数据训练使机器具备学习、推理和决策能力,如自然语言处理(NLP)、图像识别(image recognition)、机器学习(ML)等^[2]。神经外科领域人工智能技术体系包括

机器学习、深度学习(DL)、大语言模型(LLM)、计算机视觉(CV)、强化学习(RL)和知识图谱(KG)等^[3-4](表1)。

二、构建数智神经外科的技术体系

数智神经外科(digit-intelligent neurosurgery)并不是新兴或独立的学科,而是侧重强调数字化(digitalization)和智能化(intelligentization)在神经外科领域的深度融合,结合人工智能、大数据、手术机器人、脑机接口、神经导航、虚拟现实(VR)和增强现实(AR)、术中多模态影像学等前沿技术,突破神经外科医师的智能和体能极限,旨在提高神经外科手术精准度、安全性和实时性,有助于优化临床照护方案,实现高效、精准和个性化的诊疗目标。清华大学临床医学院院长、中国工程院院士董家鸿教授是国际上精准外科(precision surgery)的倡导者和实践者,在精准肝胆外科、数字外科、智能手术等领

域做出了卓越贡献,他推动了数智外科理论与技术体系的建立,将人工智能、数字孪生、三维可视化、手术机器人等前沿技术深度融入外科实践,促进了精准医疗在外科领域的应用。他提出的数智外科体系的全面框架同样适用于神经外科^[5-7]。

1. 智能感知技术 数智外科的智能感知技术包括:(1)多模态影像学融合技术评估脏器区域结构和功能。(2)脏器功能的监测技术。(3)肿瘤转移淋巴结的精确示踪技术。(4)肿瘤异质性与侵袭前沿的定量分析。(5)病灶病理学特征的 6D 评估(组织学形态、分级、分期、分子/遗传学特征、微环境、增殖特征)。(6)可佩戴的外科医疗监测及评估系统。

2. 智能认知技术 数智外科的智能认知技术包括:(1)基于多组学数据,解析肿瘤生物学行为,精确肿瘤分级、分期。(2)病理生理状态下器官功能评估与重塑,研发结构-功能的精准定位、形变-重塑多维量化评估的技术和设备。(3)脏器再生/重塑与重构潜力的综合评估,指导病灶切除与功能保护的平衡。(4)建立数字化外科风险分级与风险管控系统。

3. 智能决策 数智外科的智能决策包括:(1)基于脏器数字孪生技术,构建脏器和手术过程数字化“双胞胎”,实现医疗数据与物理实体无缝融合和实时交互。(2)建立基于病灶切除、脏器保护、损伤控制三要素平衡的脏器特异性智能化外科决策法则。(3)多模态大模型辅助临床决策,构建生成式脏器多模态大模型,提高临床决策和手术规划。

4. 智能操作技术 数智外科的智能操作技术包括:(1)病灶实时显示与判识技术。(2)融合荧光成像手术导航技术。(3)计算机辅助增强现实手术技术。(4)智能手术室技术。人工智能多模态大模型与增强现实混合显示技术融合赋能手术环境,建设智能互联、信息融合、精准高效的智能手术空间。(5)器官腔道介入和穿刺机器人、自然腔道手术机器人、微米/纳米机器人的研发。

5. 大数据分析挖掘 数智外科的大数据分析与挖掘包括:(1)医疗大数据基础设施建设,大数据整合管理、互联互通、互认共享、分析检索、标准规范、隐私保护等技术的研发和工程化。(2)医疗健康大数据分析与挖掘,例如,本体术语服务、搜索引擎与跨数据库检索、表型组建构和分析、多维数据融合和关联分析。(3)构建以多模态数据为基础、以标准化诊疗方案为依据、以精准手术切除关键技术参数智能计算为支撑的全流程一体化智能手术规划

系统。

6. 教育与培训 数智外科的教育与培训包括:(1)以疾病诊疗必需的体外仿生构建和仿生训练,研发基于典型外科疾病诊疗的数字模拟训练系统。(2)通过增材制造,实现器官功能化、体外微环境和生物微环境的构建;多模态影像学数据的三维医疗模型。(3)裸眼立体视觉显示与模拟训练,实现高性能裸眼三维立体医学影像。(4)基于力反馈精准控制技术的手术培训,实现手术力觉临场感。

三、人工智能在神经外科领域应用的典型范例

近年来,随着深度学习算法、增强现实技术、机器人辅助手术系统及多模态影像数据融合技术的快速发展,神经外科诊疗模式从传统经验依赖型逐步转向数据驱动型。人工智能在中枢神经系统肿瘤、脊柱疾病、癫痫和脑血管病中的应用具有巨大潜力^[3-4]。(1)中枢神经系统肿瘤:影像学研究证实,机器学习特别是卷积神经网络(CNN)、支持向量机(SVM)和随机森林(RF)算法在胶质瘤诊断和分类中表现出色^[8]。基于卷积神经网络分析有助于影像科医师对原发性中枢神经系统淋巴瘤与多形性胶质母细胞瘤进行准确鉴别诊断^[9]。三维卷积神经网络在脑膜瘤皮质分割和体积估算方面取得高精度结果^[10]。通过随机森林算法开发出一种基于 IDH 突变和 1p/19q 共缺失的胶质瘤分类预测模型^[11]。基于机器学习算法开发出个性化解剖模型用于肿瘤术中诊断^[12]。通过深度卷积神经网络和荧光成像技术进行术中胶质瘤诊断,准确率高于神经外科医师术中主观判断^[13]。拉曼成像结合卷积神经网络可以实现高级别胶质瘤分子特征的准确识别^[14]。(2)脊柱疾病:不仅通过机器学习算法构建了腰椎滑脱手术后不良事件风险预测模型^[15],而且开发了用于检测腰椎手术中血管损伤的算法^[16]、用于前路颈椎融合系统分类的计算机视觉算法^[17],以及腰椎间盘突出症术后长期服用阿片类药物剂量和疗程的预测算法^[18];此外,深度学习算法在预测相邻节段脊柱疾病方面的表现优于神经外科专家的主观诊断^[19]。(3)癫痫:脉冲神经网络(SNN)可以作为癫痫手术适应证的选择决策工具^[20]。通过 fMRI 和极端梯度提升算法(XGBoost)识别癫痫患者的语言模式^[21],监督机器学习预测颞叶癫痫术后预后^[22],机器学习探索癫痫患者脑结构和功能变化并提出连接距离收缩在个性化手术预测中的作用^[23]。(4)脑血管病:整合神经网络分割模型(HeadXNet 模型)可

以提高颅内动脉瘤的诊断效能^[24]。机器学习模型根据动脉瘤部位和大小可以有效区分破裂与未破裂动脉瘤,并根据动脉瘤形态特征开发出一种预测其稳定性的机器学习模型^[25]。通过机器学习算法还可以对颅内动静脉畸形等进行分类,并预测迟发性脑缺血^[26]。此外,机器学习的手部运动检测器还可以模拟微血管吻合术^[27]。上述应用范例仅是部分人工智能在神经外科领域的应用,多数研究均突出强调局限性,如数据缺失、样本量限制、单中心研究、依赖大型训练数据集和过度拟合风险、需外部验证和前瞻性研究等。

四、大语言模型、知识图谱/专家系统与神经外科

目前,适用于医学领域的大语言模型开发集中于医学问答(Med-PaLM、ChatDoctor)、临床决策支持(Med-PaLM 2、ClinicalBERT)、电子健康记录解析(ClinicalBERT、GatorTron)、医学文献分析(BioGPT、PubMedGPT)、医学影像辅助诊断(Med-PaLM M)和药物研发(BioGPT、DeepSeek-Med)等方面^[27]。近日异军突起的 DeepSeek 依靠其低算力需求、快速部署、即时响应、高效流畅、数据不出院、安全可控的优势,激起了大语言模型促进医疗机构智能化转型的热潮。神经外科领域可以开发应用的场景主要包括神经外科学知识库智能化构建与智能医学问答,辅助神经外科医师精准决策,定制化神经外科手术前/术后指导,神经外科运营效能管理,护理机器人多元应用场景拓展,人工智能辅助神经外科医科研、创新与成果转化,优化神经外科患者就医体验,基于大语言模型病历智能质控,合理用药智能精准审核,医疗核心指标智能监控与风险预警。大语言模型在人工智能医院建设中的关键应用已经来临,清华大学智能产业研究院设计研发的人工智能医院——Agent Hospital 将于 2025 年上半年面向公众开放。作为医疗虚拟世界,Agent Hospital 模拟真实医院设施和流程,目前共建设 21 个临床科室,每个科室配备多位人工智能医师提供相应医疗服务,覆盖绝大多数常见疾病和主要重大疾病,而对于支持疾病列表外的疾病,Agent Hospital 也能提供相当高质量的诊断分析。上海等城市的人工智能医院也正在探索中。

我们必须清楚地认识到,深度学习算法作为黑箱模型,其决策过程缺乏透明性,可能影响医疗决策的信任度;人工智能诊断系统的误诊或漏诊,也

有可能造成严重后果,因此,如何提高模型的可解释性和可靠性是关键问题。大语言模型在医学判断准确性任务上的表现远不如临床医师,常表现出缺乏常识性医学推理能力和倾向产生“幻觉”,其在应对开放式临床场景方面的局限性也引发对其在真实医学任务中推理稳健性和泛化能力的担忧。目前的人工智能系统多基于静态数据训练,动态适应性不足,尤其难以应对诸如神经外科手术的高风险手术中突发状况如血管破裂。不同影像学设备的时间和空间分辨率差异导致融合误差,形成多模态数据融合的瓶颈,也影响神经导航的精准度。

真实医疗应用场景中人工智能辅助临床医师完成绝大多数工作,是智慧医疗应用的落地方向。关于人工智能医师能否完全替代人类,董家鸿院士给出精辟告诫:“倡导智慧医疗是必不可少的,不能否认人工智能医疗在某些方面能够超越人的生理和智力极限、提升健康医疗服务的精准度和效率,但在医疗实践中,不确定性是常态,这些不确定的事件,最终还是要留给人来处理”。

数智神经外科势必将迎来大的发展,未来 5~10 年应从以下方向实现突破:(1)量子计算赋能人工智能模型,可解决超大规模数据处理问题,实现神经外科实时动态手术规划。(2)脑机接口整合,通过侵入式或非侵入式方式,实现术中脑电信号闭环调控。(3)数字孪生构建个体化虚拟模型,模拟不同手术方案疗效。(4)远程手术与 5G 网络,实现神经外科专家远程操控机器人完成急诊手术。(5)人工智能辅助病理诊断,术中冰冻组织切片结合人工智能快速界定肿瘤边界,指导精准切除。(6)构建标准化数据平台,推动国家级神经外科数据库开放共享。(7)人工智能医学在数据隐私、伦理与法律层面的研究与探索。(8)加强医工交叉学科教育,培养“懂临床、精技术”的新型神经外科医师团队。随着数字化与智能化的深度融合,神经外科必将步入一个前所未有的变革时代。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] Xu F, Ming D, Jung TP, Xu P, Xu M. Editorial: the application of artificial intelligence in brain-computer interface and neural system rehabilitation[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17:1290961.
- [2] Reis J, Melão N. Digital transformation: a meta-review and guidelines for future research[J]. *Heliyon*, 2023, 9:e12834.
- [3] Awuah WA, Adebusoye FT, Wellington J, David L, Salam A, Weng Yee AL, Lansiaux E, Yarlagadda R, Garg T, Abdul-Rahman T, Kalmanovich J, Miteu GD, Kundu M, Mykolaivna

- NI. Recent outcomes and challenges of artificial intelligence, machine learning, and deep learning in neurosurgery[J]. *World Neurosurg* X, 2024, 23:100301.
- [4] Tangsrivimol JA, Schonfeld E, Zhang M, Veeravagu A, Smith TR, Härtl R, Lawton MT, El-Sherbini AH, Prevedello DM, Glicksberg BS, Krittanawong C. Artificial intelligence in neurosurgery: a state-of-the-art review from past to future[J]. *Diagnostics* (Basel), 2023, 13:2429.
- [5] Dong JH, Huang ZQ. Precise liver resection—new concept of liver surgery in 21st century[J]. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*, 2009, 47:1601-1605.[董家鸿, 黄志强. 精准肝切除——21世纪肝脏外科新理念[J]. *中华外科杂志*, 2009, 47:1601-1605.]
- [6] Dong J, Yang S, Zeng J, Cai S, Ji W, Duan W, Zhang A, Ren W, Xu Y, Tan J, Bu X, Zhang N, Wang X, Wang X, Meng X, Jiang K, Gu W, Huang Z. Precision in liver surgery[J]. *Semin Liver Dis*, 2013, 33:189-203.
- [7] Dong JH, Zhang N. Precision surgery[J]. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*, 2015, 53:321-323.[董家鸿, 张宁. 精准外科[J]. *中华外科杂志*, 2015, 53:321-323.]
- [8] Buchlak QD, Esmaili N, Leveque JC, Bennett C, Farrokhi F, Piccardi M. Machine learning applications to neuroimaging for glioma detection and classification: an artificial intelligence augmented systematic review[J]. *J Clin Neurosci*, 2021, 89:177-198.
- [9] McAvoy M, Prieto PC, Kaczmarzyk JR, Fernández IS, McNulty J, Smith T, Yu KH, Gormley WB, Arnaout O. Classification of glioblastoma versus primary central nervous system lymphoma using convolutional neural networks[J]. *Sci Rep*, 2021, 11:15219.
- [10] Boaro A, Kaczmarzyk JR, Kavouridis VK, Harary M, Mammi M, Dawood H, Shea A, Cho EY, Juvekar P, Noh T, Rana A, Ghosh S, Arnaout O. Deep neural networks allow expert-level brain meningioma segmentation and present potential for improvement of clinical practice[J]. *Sci Rep*, 2022, 12:15462.
- [11] Zhou H, Chang K, Bai HX, Xiao B, Su C, Bi WL, Zhang PJ, Senders JT, Vallières M, Kavouridis VK, Boaro A, Arnaout O, Yang L, Huang RY. Machine learning reveals multimodal MRI patterns predictive of isocitrate dehydrogenase and 1p/19q status in diffuse low- and high-grade gliomas[J]. *J Neurooncol*, 2019, 142:299-307.
- [12] Tonutti M, Gras G, Yang GZ. A machine learning approach for real-time modelling of tissue deformation in image-guided neurosurgery[J]. *Artif Intell Med*, 2017, 80:39-47.
- [13] Shen B, Zhang Z, Shi X, Cao C, Zhang Z, Hu Z, Ji N, Tian J. Real-time intraoperative glioma diagnosis using fluorescence imaging and deep convolutional neural networks[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48:3482-3492.
- [14] Hollon T, Orringer DA. Label-free brain tumor imaging using Raman-based methods[J]. *J Neurooncol*, 2021, 151:393-402.
- [15] Fatima N, Zheng H, Massaad E, Hadzipasic M, Shankar GM, Shin JH. Development and validation of machine learning algorithms for predicting adverse events after surgery for lumbar degenerative spondylolisthesis[J]. *World Neurosurg*, 2020, 140:627-641.
- [16] Karhade AV, Bongers MER, Groot OQ, Cha TD, Doorly TP, Fogel HA, Hershan SH, Tobert DG, Srivastava SD, Bono CM, Kang JD, Harris MB, Schwab JH. Development of machine learning and natural language processing algorithms for preoperative prediction and automated identification of intraoperative vascular injury in anterior lumbar spine surgery[J]. *Spine J*, 2021, 21:1635-1642.
- [17] Ames CP, Smith JS, Pellisé F, Kelly M, Alanay A, Acaroğlu E, Pérez-Grueso FJS, Kleinstück F, Obeid I, Vila-Casademunt A, Shaffrey CI Jr, Burton D, Lafage V, Schwab F, Shaffrey CI Sr, Bess S, Serra-Burriel M; European Spine Study Group; International Spine Study Group. Artificial intelligence based hierarchical clustering of patient types and intervention categories in adult spinal deformity surgery: towards a new classification scheme that predicts quality and value[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44:915-926.
- [18] Karhade AV, Ogink PT, Thio QCBS, Cha TD, Gormley WB, Hershan SH, Smith TR, Mao J, Schoenfeld AJ, Bono CM, Schwab JH. Development of machine learning algorithms for prediction of prolonged opioid prescription after surgery for lumbar disc herniation[J]. *Spine J*, 2019, 19:1764-1771.
- [19] Goedmakers CMW, Lak AM, Duey AH, Senko AW, Arnaout O, Groff MW, Smith TR, Vleggeert-Lankamp CLA, Zaidi HA, Rana A, Boaro A. Deep learning for adjacent segment disease at preoperative MRI for cervical radiculopathy[J]. *Radiology*, 2021, 301:664-671.
- [20] Grigsby J, Kramer RE, Schneiders JL, Gates JR, Brewster Smith W. Predicting outcome of anterior temporal lobectomy using simulated neural networks[J]. *Epilepsia*, 1998, 39:61-66.
- [21] Torlay L, Perrone-Bertolotti M, Thomas E, Baciú M. Machine learning: XGBoost analysis of language networks to classify patients with epilepsy[J]. *Brain Inform*, 2017, 4:159-169.
- [22] Memarian N, Kim S, Dewar S, Engel J Jr, Staba RJ. Multimodal data and machine learning for surgery outcome prediction in complicated cases of mesial temporal lobe epilepsy[J]. *Comput Biol Med*, 2015, 64:67-78.
- [23] Larivière S, Weng Y, Vos de Wael R, Royer J, Frauscher B, Wang Z, Bernasconi A, Bernasconi N, Schrader DV, Zhang Z, Bernhardt BC. Functional connectome contractions in temporal lobe epilepsy: microstructural underpinnings and predictors of surgical outcome[J]. *Epilepsia*, 2020, 61:1221-1233.
- [24] Park A, Chute C, Rajpurkar P, Lou J, Ball RL, Shpanskaya K, Jabarkheel R, Kim LH, McKenna E, Tseng J, Ni J, Wishah F, Wittber F, Hong DS, Wilson TJ, Halabi S, Basu S, Patel BN, Lungren MP, Ng AY, Yeom KW. Deep learning-assisted diagnosis of cerebral aneurysms using the HeadXNet model[J]. *JAMA Netw Open*, 2019, 2:e195600.
- [25] Silva MA, Patel J, Kavouridis V, Gallerani T, Beers A, Chang K, Hoebel KV, Brown J, See AP, Gormley WB, Aziz-Sultan MA, Kalpathy-Cramer J, Arnaout O, Patel NJ. Machine learning models can detect aneurysm rupture and identify clinical features associated with rupture[J]. *World Neurosurg*, 2019, 131:e46-e51.
- [26] Asadi H, Kok HK, Looby S, Brennan P, O'Hare A, Thornton J. Outcomes and complications after endovascular treatment of brain arteriovenous malformations: a prognostication attempt using artificial intelligence[J]. *World Neurosurg*, 2016, 96:562-569.
- [27] Chen RS. Prospects for the application of healthcare big data combined with large language models[J]. *Sichuan Da Xue Xue Bao (Yi Xue Ban)*, 2023, 54:855-856.[陈润生. 医疗大数据结合大语言模型的应用展望[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2023, 54:855-856.]

(收稿日期:2025-02-12)

(本文编辑:彭一帆)