

## · 标准与规范 ·

智能化技术在脊柱外科中的应用临床  
实践指南(2026 版)

中国医师协会骨科医师分会脊柱创伤学组 中国医师协会骨科医师分会智能骨科学组  
陕西省医师协会骨科微创专业委员会

通信作者: 贺宝荣, 西安交通大学附属红会医院脊柱外科, 西安 710054, Email: hebr888@163.com; 冯世庆, 山东大学齐鲁第二医院骨科, 济南 250033, Email: shiqingfeng@sdu.edu.cn; 许正伟, 西安市骨科研究所脊柱外科, 西安 710054, Email: irenewayne@126.com; 闫亮, 西安市红会医院脊柱外科, 西安 710054, Email: henry\_yanliang@163.com

**【摘要】** 面对复杂脊柱疾病诊疗中传统技术精度不足、安全性有限等挑战,以三维可视化、增材制造(3D 打印)、手术导航与机器人、人工智能及远程诊疗为代表的智能化技术正推动脊柱外科迈向精准与个性化治疗新阶段,然而目前尚缺乏上述智能化技术在脊柱外科临床应用中的规范或指南。为规范并推广相关技术的临床应用,由中国医师协会骨科医师分会脊柱创伤学组、中国医师协会骨科医师分会智能骨科学组与陕西省医师协会骨科微创专业委员会共同发起,联合多学科专家,基于循证证据和多中心德尔非法专家共识,制订了本指南。本指南系统总结了智能化技术在脊柱外科的应用范围,围绕三维可视化、3D 打印、导航与机器人、人工智能、远程诊疗及智能化技术应用落地 6 个部分,最终形成 15 条推荐意见,并明确了各项技术的适用场景、证据等级与推荐强度,旨在促进其科学、规范、高效应用,并为不同层级医疗机构提供实践建议,最终提升脊柱外科整体诊疗水平与临床决策支持能力。

**【关键词】** 脊柱; 智能化; 脊柱外科; 数字骨科; 指南

**基金项目:** 国家重点研发计划(2024YFC3607000、2022YFC2407503); 陕西省科学技术厅重点产业创新链(群)-社会发展领域项目(2023-ZDLSF-03); 陕西省卫生健康委科研创新能力提升计划(2025PT-01)

**实践指南注册:** 国际实践指南注册与透明化平台(PREPARE-2025CN1310)

**Clinical practice guidelines for the application of intelligent technology in spinal surgery (2026 edition)**

Spinal Trauma Group, Chinese Association of Orthopaedic Surgeons; Intelligent Orthopaedics Group, Chinese Association of Orthopaedic Surgeons; Shaanxi Medical Doctor Association Professional Committee on Orthopaedic Minimally Invasive Surgery

Corresponding authors: He Baorong, Department of Spinal Surgery, Honghui Hospital, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China, Email: hebr888@163.com; Feng Shiqing, Department of Orthopedics, Qilu Second Hospital of Shandong University, Jinan 250033, China, Email: shiqingfeng@sdu.edu.cn; Xu Zhengwei, Department of Spinal Surgery, Xi'an Orthopedic Research Institute, Xi'an 710054, China, Email: irenewayne@126.com; Yan Liang, Department of Spinal Surgery, Honghui Hospital, Xi'an

DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20260207-00414

收稿日期 2026-02-07 本文编辑 梁明修

引用本文: 中国医师协会骨科医师分会脊柱创伤学组, 中国医师协会骨科医师分会智能骨科学组, 陕西省医师协会骨科微创专业委员会. 智能化技术在脊柱外科中的应用临床实践指南(2026 版)[J]. 中华医学杂志, 2026, 106(20): 1977-1997. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20260207-00414.



中华医学杂志社  
Chinese Medical Association Publishing House

版权所有 违者必究



Jiaotong University, Xi'an 710054, China, Email: henry\_yanliang@163.com

**【Abstract】** In response to the challenges of insufficient precision and limited safety associated with traditional techniques in the diagnosis and treatment of complex spinal diseases, intelligent technologies—represented by 3D visualization, additive manufacturing (3D printing), surgical navigation and robotics, artificial intelligence, and telemedicine—are driving spine surgery into a new era of precision and personalized treatment. However, there is currently a lack of standardized protocols or guidelines for the clinical application of these intelligent technologies in spine surgery. To standardize and promote their clinical use, this guideline was developed through an initiative led by the Spinal Trauma Group of the Chinese Association of Orthopaedic Surgeons (CAOS) and the Intelligent Orthopaedics Group of CAOS, in collaboration with Shaanxi Medical Doctor Association Professional Committee on Orthopaedic Minimally Invasive Surgery. Multidisciplinary experts participated, formulating recommendations based on evidence-based medicine and multi-center Delphi expert consensus. This guideline systematically summarizes the application scope of intelligent technologies in spine surgery, covering six aspects: 3D visualization, 3D printing, surgical navigation and robotics, artificial intelligence, telemedicine, and the implementation of intelligent technologies. It finally forms 15 recommendations, clarifies the applicable scenarios, evidence levels, and recommendation strength for each technology, and aims to promote their scientific, standardized, and efficient application, provide practical suggestions for medical institutions at different levels, and ultimately enhance the overall clinical diagnosis and treatment level and clinical decision-making support capacity in spine surgery.

**【Key words】** Spine; Intelligent; Spine Surgery; Digital Orthopaedics; Guideline

**Fund program:** Key Project of National Key Research and Development Plan(2024YFC3607000, 2022YFC2407503); Science and Technology Department of Shaanxi Province Key Industrial Innovation Chain (Group)-Social Development Project (2023-ZDLSF-03); Research and Innovation Capability Enhancement Program of Shaanxi Provincial Health Commission (2025PT-01)

**Practice guideline registration:** Practice Guideline Registration for Transparency (PREPARE-2025CN1310)

复杂脊柱疾病在诊断、手术规划与执行方面存在诸多挑战,传统技术手段在精度、安全性和个性化方面存在局限。近年来,以三维可视化、3D打印、手术导航与机器人、AI及远程诊疗为代表的智能化技术迅速发展,为脊柱外科带来了革命性突破<sup>[1-3]</sup>。它们通过提升解剖显示的精确性、手术操作的稳定性、术后康复的针对性以及医疗资源的可及性,尤其在合并骨质疏松、畸形矫正、翻修手术等复杂场景中展现出显著优势<sup>[4-5]</sup>。

为系统总结智能化技术在脊柱外科的应用现状、规范其临床使用流程,并为各级医疗机构提供实践指导,中国医师协会骨科医师分会脊柱创伤学组、中国医师协会骨科医师分会智能骨科学组与陕西省医师协会骨科微创专业委员会共同发起,并联合脊柱外科、影像学、护理与康复医学等多学科专家,共同制订了本版《智能化技术在脊柱外科中的应用临床实践指南(2026版)》(简称本指南)。本指南制订基于最新循证医学证据,并融合了多中心德尔菲法问卷调查及面对面专家讨论,旨在推动智能化技术在脊柱外科的科学、规范与高效应用,以期全面提升临床诊疗水平,辅助临床决策

支持。

## 一、指南形成过程

### (一)指南注册

本指南在国际实践指南注册平台完成注册(PREPARE-2025CN1310)。

### (二)指南制订方法

本指南的制订过程符合美国医学研究所(Institution of Medicine, IOM)、指南研究与评价工具 II (Appraisal of Guidelines Research and Evaluation II, AGREE II) 及 WHO 指南制订手册关于临床实践指南构建的概念与过程框架,严格按照预先的计划书进行。指南的报告过程参考中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022版)<sup>[6]</sup>。

### (三)指南工作组

本指南由中国医师协会骨科医师分会脊柱创伤学组、中国医师协会骨科医师分会智能骨科学组与陕西省医师协会骨科微创专业委员会共同发起,由西安交通大学附属红会医院牵头于 2025 年 1 月 1 日正式启动。指南制订工作由 3 个核心团队协作完成,包括指南编制专家组、指南秘书组和外部评审组。各组构成与职能如下:



指南编制专家组为跨学科团队,成员涵盖脊柱外科、护理学、医院管理、指南方法学、公共卫生管理、智能化技术及软件网络等领域的权威专家。其主要职责包括:(1)确定智能化技术应用的核心议题与研究范围;(2)完成证据整合与质量评价;(3)负责所分配章节的循证医学评估;(4)起草推荐意见框架及核心内容;(5)组织共识会议形成初步推荐方案;(6)撰写指南全文;(7)综合各方意见修订指南草案,并完成最终审定。

指南秘书组由具备脊柱外科临床与循证医学研究背景的专业人员组成,主要职责包括:(1)调研智能化技术的临床应用现状;(2)起草指南计划书;(3)系统检索、筛选及整理相关文献;(4)全程记录指南制订流程;(5)协调各项工作进程。

外部评审组作为独立评估机构,由多学科权威专家及一线临床医师组成,不参与指南制订的具体过程,以确保评审独立性与客观性。其核心职能包括:(1)对指南草案进行专业性评审;(2)提出重要修改建议以完善最终版本;(3)从临床适用性、科学性 & 可操作性等多个维度对指南进行全面评估。

通过以上 3 个团队的明确分工与紧密协作,本指南历经议题确立、证据整合、共识形成、全文撰写、多轮评审与修改完善等关键阶段,最终形成这份兼具科学性、实用性与前沿性的指导文件。

#### (四)指南的使用者和目标应用人群

本指南旨在为参与脊柱外科智能化技术开发、应用与管理的相关方提供指导,其使用者主要包括医疗机构管理人员、临床医师、护士、政策制定者、卫生部门管理者、技术公司及第三方机构人员等。本指南的目标应用人群为罹患复杂脊柱疾患、需借助智能化技术进行辅助诊疗的患者。

#### (五)利益冲突声明

所有参与指南制订的成员均对本指南有关的任何利益关系进行了声明,并填写了利益声明表。

#### (六)智能化技术应用范围的确定

本指南的核心作用在于规范智能化技术的临床应用流程。为此,工作组通过第一轮开放性问卷

调查,共回收 27 份有效问卷,重点调研了当前智能化技术在脊柱外科的实际应用情况。通过对问卷结果进行汇总与去重分析,最终归纳出 5 类应用方向。在此基础上,工作组组织了第二轮专家函询,针对这 5 类应用方向提出潜在的推荐意见,最终确定三维可视化、3D 打印、导航与机器人、人工智能、远程诊疗、智能化技术应用落地六部分内容共 15 条推荐意见。

#### (七)证据检索

针对智能化技术在脊柱外科临床应用的相关证据进行系统检索:(1)检索数据库包括 PubMed、Web of Science、Embase、Cochrane Library、中国知网及万方数据库;检索词为“3D”“Navigation”“Robot”“Artificial Intelligence”“Telemedicine”“Spine”“三维”“导航”“机器人”“人工智能”“远程诊疗”“脊柱外科”;(2)检索研究类型涵盖系统综述、荟萃分析、随机对照试验、队列研究、病例对照研究、病例系列研究、个案报道和专家述评等;(3)检索时间为建库至 2025 年 9 月 1 日。通过系统检索共获得相关文献 2 286 篇(中文 873 篇、英文 1 413 篇)。将所有文献导入 EndNote X9 文献管理软件,通过阅读题目与摘要,去除重复文献及不符合纳入标准的文献(包括动物实验、基础研究、非中英文文献、会议摘要/论文及非骨科临床应用研究),最终纳入 159 篇文献进行分析,其中中文 25 篇、英文 134 篇。

#### (八)文献证据等级评价与推荐强度

本指南采用推荐意见分级的评估、制订及评价(grading of recommendations assessment, development and evaluation, GRADE)分级体系对证据的质量和推荐意见的推荐强度进行分级。GRADE 证据质量和推荐强度分级的含义分别见表 1 和 2。

#### (九)证据质量评价

证据评价与分级小组采用系统评价的方法学质量评价工具(Assessment of Multiple Systematic Reviews, AMSTAR)<sup>[7]</sup>对指南中纳入的系统评价与荟萃分析进行方法学质量评价,采用 Cochrane 风险

表 1 GRADE 证据质量分级

| 证据等级  | 定义                              |
|-------|---------------------------------|
| 高等(A) | 非常有把握观察值接近真实值                   |
| 中等(B) | 对观察值有中等把握:观察值有可能接近真实值,但也有可能差别很大 |
| 低等(C) | 对观察值的把握有限:观察值可能与真实值有很大差别        |
| 极低(D) | 对观察值几乎没有把握:观察值与真实值可能有极大差别       |

注:GRADE 为推荐意见分级的评估、制订与评价



表2 本指南涉及的推荐强度分级

| 推荐强度分级                         | 定义                     |
|--------------------------------|------------------------|
| 强推荐                            | 明确显示干预措施利大于弊或弊大于利      |
| 弱推荐                            | 利弊不确定或无论质量高低的证据均显示利弊相当 |
| 专家建议(GPS) 基于非直接证据或专家意见、经验形成的推荐 |                        |

偏倚评价工具<sup>[8]</sup>、诊断准确性研究的质量评价工具(Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies-2, QUADAS-2)<sup>[9]</sup>及纽卡斯尔-渥太华量表(Newcastle-Ottawa Scale, NOS)<sup>[10]</sup>分别对随机对照试验、诊断性研究和观察性研究进行方法学质量评价。使用GRADE方法<sup>[11]</sup>对证据体和推荐意见进行分级(表1、2)。评价过程由2位专业人士独立完成,若存在不一致,则通过共同讨论或咨询第三方协商解决。

#### (十)推荐意见形成

初步拟定24条推荐意见。随后经过两轮函询收集意见及一轮面对面指南论证会,最终形成15条推荐意见,并明确了每条意见的推荐强度和证据等级。所有推荐意见均经无记名投票方式投票,达成超过2/3专家共识后确定。

#### (十一)指南外审

本指南在发布前进行了同行评议,并对评审意见进行回复和修改。

#### (十二)指南发布与传播

本指南发布后,工作组将通过专业期刊、网站及学术会议等多种渠道,在国内组织开展推广和传播工作,以确保临床医师及相关利益方充分了解并正确应用本指南。未来工作组将依据最新循证医学证据进展,每3~5年对指南进行一次系统性更新。

### 二、三维可视化

1. 诊断规划—基于三维影像的精准诊断与规划:共纳入文献证据10项,其中B级证据6项<sup>[12-17]</sup>,C级证据4项<sup>[18-21]</sup>。

在椎管狭窄及复杂脊柱畸形的术前评估中,3D影像技术的应用可显著提升诊断精度与手术规划的可靠性。在中央椎管、侧隐窝及椎间孔狭窄的鉴别诊断中,3D-MRI序列通过多平面与曲面重建技术,能够清晰显示硬膜囊受压程度及神经根走行路径。一项纳入17项研究的系统评价表明,3D-MRI诊断腰椎侧隐窝狭窄的灵敏度达94%,特异性为89%<sup>[22]</sup>;其曲面重建技术可清晰显示神经根腹侧背侧受压比例,较传统2D-MRI误诊率降低

37%<sup>[12]</sup>,并在保持诊断准确性的同时,平均缩短MRI扫描时间15 min,降低医疗成本。

EOS全身骨骼三维建模成像系统(EOS Imaging)作为当前成熟应用的三维可视化工具,在脊柱侧凸诊疗中展现出独特优势。其双平面X射线成像技术结合三维建模算法,可在站立位获取脊柱-骨盆整体影像,辐射剂量较传统X线降低50%~85%<sup>[18]</sup>,特别适用于需要长期随访的青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)患者<sup>[19]</sup>。多项研究证实,EOS系统在Cobb角测量方面显著优于常规X线测量<sup>[13]</sup>,且这种差异在重度侧弯患者中更为显著<sup>[23]</sup>。该系统可同步获取Cobb角、椎体旋转度(apical vertebral rotation, AVR)、骨盆参数等20余项定量指标<sup>[24-25]</sup>。有研究证实其三维重建精度与CT高度一致<sup>[14]</sup>。Cobb角测量即便是在>50°侧弯中仍保持高精度<sup>[15-16]</sup>。这种三维重建能力革新了手术规划,例如Sangole等<sup>[20]</sup>提出的“达芬奇分型”通过EOS三维参数将Lenke 1型胸弯细分为矢状面正常后凸型、低后凸型等亚组,以指导个性化矫形策略。EOS三维参数也为支具疗效评估提供了新指标。Kwan等<sup>[17]</sup>的前瞻性研究显示,支具治疗1年时的椎体轴向旋转矫正速度是预测侧弯进展的独立因素,凸显了三维参数对个体化治疗的指导价值。有学者对AIS患者行后路矫形术后EOS评估,发现同样具有3D定量分析及评估治疗策略的价值<sup>[21]</sup>。尽管EOS显示出明确优势,但系统对患者配合度要求高,在严重旋转畸形中精度可能下降。

**推荐意见1:**3D影像技术可提供更精确、全面且低辐射的三维可视化信息,推荐用于复杂脊柱疾病的术前诊断、评估和手术规划,以提供个性化、精准化诊疗依据。(强推荐,证据等级B)

2. 术中引导—空间三维可视技术辅助复杂手术:共纳入文献证据8项,其中A级证据2项<sup>[26-27]</sup>,B级证据2项<sup>[28-29]</sup>,C级证据4项<sup>[30-33]</sup>。

扩展现实(extended reality, XR)技术,包括虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)和混合现实(mixed reality, MR),通过计算机算法将虚拟信息与真实场景融合,实现术中三维引导。VR构建完全虚拟的手术环境,用于术前规划和培训;AR将虚拟影像(如肿瘤边界、螺钉轨迹)叠加于真实术野;MR则允许虚拟与真实物体实时交互,如手势操控全息影像<sup>[34]</sup>,XR技术能够显著提升复杂手术的精准性和安全性<sup>[35]</sup>。AR技术已实



现椎弓根螺钉置入的实时导航,辅助置入的临床准确率达 94.1%~99.5%<sup>[36]</sup>,显著高于传统徒手置钉<sup>[28]</sup>,并在减少辐射暴露、缩短手术时间和降低术中失血量方面具有明显优势<sup>[37]</sup>。即便在脊柱侧凸患者中,AR 导航仍保持 94.1% 螺钉准确率<sup>[30]</sup>,同时实现更高的螺钉植入密度,有助于降低翻修手术几率<sup>[29]</sup>。MR 系统通过三维重建技术进一步整合虚拟规划与真实视野,使复杂解剖结构的可视化精度达到亚毫米级,有研究前瞻性地将 MR 技术辅助螺钉置入与徒手技术对比,结果发现 MR 技术可显著提高脊柱手术的安全性和螺钉置入的精度<sup>[26]</sup>。另有研究报道,MR 辅助经皮椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP)技术也可准确定位椎体内真空裂隙的位置,并通过球囊支撑更有效地改善椎体高度、优化骨水泥弥散和加强疼痛缓解<sup>[27]</sup>。Carl 等<sup>[31-32]</sup>将 XR 可视技术应用于椎管内肿瘤切除术,结果显示其具有较高的精度,平均注册误差仅为 1 mm,辐射剂量降低 70%,并能在术野中清晰可视化肿瘤轮廓,精准识别肿瘤范围。Molina 等<sup>[33]</sup>报道的 AR 介导的肿瘤手术中,AR-HMD(增强现实头戴显示器)辅助全脊柱切除术能够实现肿瘤边界毫米级可视化,避免肿瘤包膜破裂,同时通过三维全息模型规划截骨平面,减少关键结构损伤风险。尽管有若干高级证据支持 XR 技术的应用效果,但该技术存在学习曲线,术中设备注册环节如出现误差会影响全局精度,而且由于技术新颖,实际使用成本极高导致普及度较低,限制了临床推广。

**推荐意见 2:**在复杂脊柱手术中,推荐应用空间三维可视技术将虚拟信息与真实手术场景高精度融合进行术前模拟、术中多模态影像融合引导,可显著提升复杂脊柱手术的精准性、安全性和效率。(弱推荐,证据等级 C)

3. 教学培训与术后康复—VR 技术在教学与康复中的应用:共纳入文献证据 14 项,其中 A 级证据 9 项<sup>[38-46]</sup>,B 级证据 4 项<sup>[47-50]</sup>,C 级证据 1 项<sup>[51]</sup>。

目前使用 VR 进行脊柱外科手术培训仍主要集中在练习椎弓根螺钉置入,有荟萃分析显示,与传统口头教学相比,接受过 AR/VR 培训的住院医师螺钉置入精确度显著增加( $OR=5.05$ )<sup>[38]</sup>。近期研究进一步证实,基于 Sim-Ortho 平台的 VR 脊柱模拟器可用于颈椎前路椎间盘切除植骨融合内固定术的模拟培训,能够帮助初级、中级和高级医师提高对虚拟解剖结构的感知准确性<sup>[47]</sup>,且不受年龄影响,

各年龄段医师的操作表现评分均有所提升<sup>[48]</sup>。也有学者转向利用 VR 来教学和练习微创脊柱内镜手术,以改善其陡峭的学习曲线<sup>[39, 49]</sup>。更有研究报道,AI、VR、3D 打印结合病例教学法的四位一体混合式教学模式在脊柱肿瘤临床教学中具有良好应用效果,能够提高本科医学生对脊柱肿瘤的识别和诊断能力,建立正确的临床思维路径<sup>[50]</sup>。然而, Lohre 等<sup>[52]</sup>纳入了 38 项评估 VR 手术模拟器的研究,系统性评估了 VR 模拟器在教学培训、术前规划和术中应用方面的效果,结果发现众多模拟器虽然能提供多样化的手术操作,在短期随访中,医师的操作技能和患者预后都有所改善,但总体研究质量和证据水平仍然很低。未来的研究也更需要进行进一步探索 VR 在辅助复杂脊柱外科手术训练方面的应用,如脊柱减压融合等。同时,在我国住院医师规范化培训体系中,VR 培训平台的标准化评估体系尚待建立。

空间三维可视技术在脊柱康复领域展现出多维度的应用优势。(1)疼痛控制:VR 技术通过沉浸式环境干扰疼痛信号传递,在慢性腰痛管理中表现出显著效果。荟萃分析显示,VR 干预组的疼痛强度降低达 1.99 分,显著低于传统物理治疗<sup>[40]</sup>。此外,VR 技术还被证实能有效缓解脊髓损伤后的神经病理性疼痛,通过沉浸式环境激活大脑的多感官通路,干扰疼痛信号的传递,同时通过游戏化设计(如平衡训练、虚拟导航)转移患者对疼痛的注意力,形成“注意力分散效应”。Putrino 等<sup>[41]</sup>研究显示,单次 10 min VR 沉浸体验后,患者疼痛评分即可显著下降。更有研究将 VR 与脊髓电刺激结合,通过个性化沉浸式虚拟现实增强疼痛调控效果,可将慢性腿痛患者的疼痛等级降低 44%,即便干预停止后镇痛作用仍然存在,具有明显的残留效应和治疗潜力<sup>[42]</sup>。(2)功能康复:VR 训练在改善上下肢活动能力方面表现出色。利用 VR 环境的交互特性,通过创建逼真的场景如生活场景烹饪、购物等并提供即时反馈,使患者参与专门针对运动技能、感觉能力和认知功能的个性化练习、活动和模拟,有助于提升步态稳定性、改善动静态平衡<sup>[51]</sup>。常见应用形式包括通过精密控制器、HMD(头戴式显示器)耳机与虚拟世界进行交互完成游戏动作、任务、指令等从而增强肌肉力量、协调性以及整体感觉运动整合能力<sup>[43-45]</sup>。(3)心理干预:VR 的沉浸式体验使患者参与度显著提高。Austin 等<sup>[46]</sup>的随机对照试验显示,VR 对脊髓损伤患者神经性疼痛造成的焦虑



障碍有较好的治疗效果,表明 VR 在心理干预方面具有积极作用。此外,游戏化设计通过设定目标与进度条、积分与成就系统等机制,使得原本枯燥的康复过程变得有趣,从而显著提升患者的依从性。

**推荐意见 3:** 推荐将 VR 技术作为脊柱外科手术培训的标准化工具及康复治疗的辅助手段。(强推荐,证据等级 A)

### 三、3D 打印

1. 解剖模型—复杂病例的应用:共纳入文献证据 7 项,其中 A 级证据 4 项<sup>[53-56]</sup>,B 级证据 2 项<sup>[57-58]</sup>,C 级证据 1 项<sup>[59]</sup>。

3D 打印解剖模型通过将患者 CT/MRI 数据转化为实体模型,显著提升复杂脊柱病变的术前规划精度。研究表明,此类模型可帮助术者直观理解脊柱三维解剖结构(如畸形、肿瘤位置),减少术中操作时间及出血量,同时降低术中透视次数<sup>[53]</sup>。例如,在脊柱肿瘤切除术前,3D 模型帮助外科医师在术前观察肿瘤的形态、侵袭范围和解剖关系,并在术中辅助定位肿瘤边界,从而更完整地切除肿瘤组织,同时保持切缘阴性<sup>[59]</sup>,该技术对于脊柱恶性肿瘤的诊疗尤其具有推广意义。Wang 等<sup>[57]</sup>探讨 3D 打印模型辅助脊柱恶性肿瘤的整块切除手术治疗效果时发现,采用 3D 打印模型辅助组(3D 组)的 R0 切除率和肿瘤包膜保留率均高于非 3D 组,术后疼痛缓解显著优于非 3D 组。

而脊柱侧凸手术中,模型辅助规划使螺钉置入准确率达 72.5%,可增强外科医生挑战更高级别截骨术的信心,并提高严重脊柱畸形矫形手术的安全性和效率<sup>[58]</sup>。此外,模型还可用于医患沟通和教学。不仅能提升患者对脊柱疾病的理解和治疗依从性,增加患者满意度<sup>[54-55]</sup>,还可增强骨科住院医师对 AIS 的理解<sup>[56]</sup>。

**推荐意见 4:** 推荐在复杂脊柱病变的术前规划、术中引导及医患沟通中应用 3D 打印解剖模型,以提高手术精度与安全性,并改善患者预后与医学教育效果。(强推荐,证据等级 A)

2. 手术导板—精准化手术导板应用:共纳入文献证据 7 项,其中 A 级证据 4 项<sup>[1, 60-62]</sup>,C 级证据 1 项<sup>[63]</sup>,D 级证据 2 项<sup>[64-65]</sup>。

3D 打印手术导板(如钻头导板、椎弓根螺钉导板)通过个性化匹配患者骨性标志,实现术中精准定位。荟萃分析显示,导板辅助胸腰椎椎弓根螺钉置入准确率显著优于徒手操作<sup>[1]</sup>。Hess 等<sup>[60]</sup>的研究进一步量化了这种精确性,显示导板辅助置钉在

矢状位的角度偏差为 2.56°,在轴位的角度偏差为 2.31°,符合 Gertzbein 安全标准。尤其在颈椎融合手术中,导板辅助螺钉置入准确率达 97.3%,除此之外在手术时间( $Z=2.41$ )、术中失血量( $Z=2.64$ )、透视次数( $Z=3.64$ )等方面均优于传统手术<sup>[61]</sup>。对于脊柱侧凸手术,3D 打印导板同样展现出显著优势,其置钉优良率( $OR=2.22$ )和置钉合格率( $OR=3.66$ )均高于徒手技术;总置钉时间、术中出血量也显著减少;然而,在主弯矫正率和手术时间方面,两组差异无统计学意义<sup>[62]</sup>。3D 打印导板在其他复杂解剖结构的脊柱手术中也显示出良好应用价值。Kaneyama 等<sup>[63]</sup>报道使用 3D 打印导板辅助置入了 48 枚 C<sub>2</sub> 螺钉,其中 47 枚成功置入。Tu 等<sup>[64]</sup>将 3D 钛打印截骨导向器应用于强直性脊柱炎伴重度脊柱后凸患者,实现了 94% 的螺钉准确性和平均 65.9° 的矫正度,且无严重神经血管并发症。甚至 Zhang 等<sup>[65]</sup>使用 3D 打印病变截骨导板对颈椎结核人工椎体进行准确螺钉固定,降低了瘫痪风险。

尽管上述高等级证据居多,证实其可提高精度,但考虑到其增加了术前准备时间与成本,且在某些常规、解剖标志清晰的病例中,其优势相对于经验丰富的术者并不显著,因此作弱推荐。本技术尤其适用于解剖结构复杂或变异的病例。而且在推广过程中仍需解决导板设计周期较长及一次性使用成本较高等实际问题。

**推荐意见 5:** 在解剖结构复杂或变异的脊柱手术中,可使用 3D 打印手术导板引导手术操作,提高手术的精准性。(弱推荐,证据等级 A)

3. 植入物—个体化植入物应用:共纳入文献证据 12 项,其中 A 级证据 6 项<sup>[66-71]</sup>,B 级证据 3 项<sup>[72-74]</sup>,C 级证据 3 项<sup>[75-77]</sup>。

患者特异性植入物通过 3D 打印多孔结构(如钛合金材料)实现解剖适配与骨整合。其中应用最广泛的是椎间融合器。有研究发现,钛制融合器植入对于腰椎融合是有效、快速和安全的<sup>[78]</sup>,但使用 3D 打印这无疑会增加患者额外的治疗成本。因此,有学者荟萃分析 3D 打印融合器与 PEEK 椎间融合器在后路腰椎椎间融合术时的应用效果对比,尽管 3D 打印融合器组的术后早期椎间融合较好,但两组在最终随访时的脊柱融合率差异无统计学意义( $P=0.41$ )<sup>[66]</sup>,即便是最新的荟萃分析也仅确认了 3D 打印钛融合器在远期沉降率方面的优势,而在远期融合率、并发症发生率和再手术率方面,两



组差异仍无统计学意义<sup>[67]</sup>。事实上,常规 PEEK 融合器存在的下沉、弹性模量不匹配及应力屏蔽等缺陷,在前路颈椎融合术时表现得更为明显。相比之下,3D 打印多孔钛椎间融合器能够更好地维持颈椎曲度和椎间高度,缓解疼痛,加速术后功能恢复<sup>[68]</sup>,其临床应用价值在颈椎领域相较于腰椎更为显著。

然而,有学者认为 3D 打印个体化植入物的使用应限于解剖结构复杂的病例,如肿瘤、感染、创伤或先天性异常导致的显著结构畸形,此时需要打印解剖特异性假体以改善预后<sup>[75]</sup>。3D 打印定制椎体能够更精确地重建骨缺损,其内部多孔结构可有效诱导骨长入。有研究将其用于胸腰椎肿瘤整块切除后的前路重建,回顾性分析显示总体融合率为 87.0%。最终随访时的平均假体下沉度为 $(1.60 \pm 1.79) \text{ mm}$ <sup>[76]</sup>。与传统钛网联合同种异体骨植骨融合相比,3D 打印人工椎体的沉降程度更低,表明其在胸腰椎肿瘤整块切除后可为前柱重建提供即时稳定性,是一种可靠的选择<sup>[69, 72]</sup>。即使是多节段或交界处节段的脊柱肿瘤,3D 打印人工椎体也能提供良好的脊柱稳定性重建,再联合辅助治疗,术后预后良好,局部复发率较低<sup>[77]</sup>。但需注意的是,该研究中 8 例患者仅 6 例成功植入 3D 打印人工椎体,另 2 例因植入物不匹配而改为传统重建。上颈椎椎体肿瘤切除因解剖结构复杂而极具挑战性。有研究回顾性比较了接受常规钛网重建与 C<sub>2</sub> 3D 打印人工椎体的应用效果。结果显示围手术期并发症发生率和死亡率分别为 45.2% 和 6.5%,研究认为,尽管 C<sub>2</sub> 椎体肿瘤全切除伴随较高的围手术期风险,但 3D 打印 C<sub>2</sub> 人工椎体仍能提供可靠的重建结果<sup>[73]</sup>。此外,3D 打印人工椎体在颈椎前路椎体次全切除术方面的应用也较为广泛,多项研究证实其有利于维持椎间隙高度和颈椎生理曲度,降低假体沉降率<sup>[70-71, 74]</sup>,但远期效果仍需进一步观察。

**推荐意见 6:** 对于因肿瘤、感染、创伤或先天性异常导致的显著脊柱结构性缺损,建议使用 3D 打印个体化多孔钛合金植入物,以实现更精确的解剖重建、获得更好的早期稳定性、降低植入物沉降风险,并促进骨融合。(强推荐,证据等级 B)

#### 四、导航与机器人技术

1. 导航与机器人技术的临床应用指征:共纳入文献证据 11 项,其中 A 级证据 8 项<sup>[79-86]</sup>,B 级证据 3 项<sup>[87-89]</sup>。

研究显示,机器人辅助在胸腰椎常规手术中的

精确度可达 94.2%~98.2%,术中翻修率为 0.55%~1.08%,再手术率为 0.28%~0.76%,其准确性优于徒手、透视乃至 CT 导航技术<sup>[79-80]</sup>。在颈椎上应用时,机器人辅助颈椎螺钉置入的临床可接受率为 98%,高于常规徒手置钉,围手术期并发症发生率更低,术中出血量更少<sup>[81]</sup>。随着机器人及导航技术的广泛应用,文献报道的置钉精度呈逐年上升趋势<sup>[82]</sup>。然而,常规应用这些技术可能增加患者的经济负担,因此,将其优先用于解剖结构复杂的病例更具临床价值。例如,在强直性脊柱炎合并脊柱骨折脱位的患者中,由于术区解剖标志不清,且常合并骨质疏松,需进行全节段椎弓根螺钉固定以实现牢固重建,多项研究证实导航或机器人在该类患者中具有重要应用价值<sup>[87-89]</sup>。有学者通过荟萃分析比较导航和机器人在辅助脊柱侧凸矫形手术的安全性和有效性,发现机器人依然表现出最高的精确性( $OR=3.06, P<0.001$ ),但其手术时间显著长于导航及徒手技术<sup>[83]</sup>。相比之下,导航可通过提供良好的精确性和相对较短的手术时间来平衡,也就意味着机器人辅助技术虽然是实现高精度的首选,但在复杂病例中,导航系统可作为实现快速且精准操作的可行替代方案<sup>[84]</sup>。Baldwin 等<sup>[85]</sup>的荟萃分析指出,术中导航辅助小儿脊柱侧凸的螺钉置入精确度是非导航技术的 2~3 倍,潜在风险仅为 1/3,但手术时间平均延长约 30 min。对于精度要求不高的标准手术,C 臂透视因其辐射暴露较低仍具适用性;而 CT 导航虽辐射剂量较高,但其较高的精确性对于复杂手术不可或缺<sup>[86]</sup>。

尽管导航与机器人技术展现出高准确性,但均存在陡峭的学习曲线。这直接影响其初期应用的成功率和并发症发生率。因此更要重视术者培训与学习曲线。建议开展该技术的单位应建立规范的培训体系,术者应在模拟器或实验室掌握基本操作后再逐步应用于临床。

**推荐意见 7:** 在解剖结构复杂、高风险或需多节段重复操作的脊柱手术中,推荐应用机器人辅助或术中导航技术,以提升手术精准度、降低翻修率与再手术率并减少围手术期并发症;对于常规或标准手术,若对精度要求相对不高,可权衡手术时间与辐射暴露,选择透视或导航技术。(强推荐,证据等级 A)

2. 导航与机器人技术的拓展应用:共纳入文献证据 5 项,其中 B 级证据 3 项<sup>[90-92]</sup>,C 级证据 1 项<sup>[93]</sup>,D 级证据 1 项<sup>[2]</sup>。



椎板切除减压术可能会导致神经功能缺损、感染、脑脊液漏等并发症。目前辅助脊柱减压的机器人系统尚未完全成熟,现有体外研究主要采用超声骨刀进行精确切割,并集成力反馈机制以控制切割深度。虽然与传统手术相比,机器人辅助下椎板完全穿透的发生率显著降低(6.7%比30%),但切割速度相对较慢,效率有待提升<sup>[94]</sup>。相比之下,导航系统在减压手术中的拓展应用更为成熟。有研究尝试利用导航系统在二维图像上精确定位并标记胸椎黄韧带骨化物,然后使用超声骨刀或磨钻进行常规减压,取得了一定效果<sup>[90-91]</sup>。Li等<sup>[92]</sup>通过使用S8导航系统结合超声骨刀进行三维实时动态可视化减压,以降低胸椎黄韧带骨化症的术中医源性神经功能恶化的风险。共纳入91例患者,分为可视化组(S8导航+超声骨刀)和对照组(超声骨刀)。可视化组的神经功能恶化发生率(9.8%)显著低于对照组(30.0%),可视化组术后随访的m-JOA评分更高且每节段椎板减压时间也更短,术中失血量更少,非硬膜骨化脑脊液漏发生率及神经根损伤率更低,总体更加安全可靠。

此外,导航与机器人技术在脊柱翻修手术、脊柱肿瘤切除中也展现出良好应用前景。Wu等<sup>[93]</sup>提出了一种机器人结合超声截骨手术系统辅助良性骶神经源性肿瘤切除术的新手术策略,所有患者均实现肿瘤的全部切除,且无局部复发或死亡病例。Satin等<sup>[2]</sup>指出,脊柱翻修手术技术要求高于初次手术,并发症发生率更高,且临床疗效存在差异。由于解剖标志改变或骨质缺损,在既往手术和(或)融合节段徒手置入椎弓根螺钉更为困难,而机器人辅助在此类具有异常解剖因素的翻修脊柱手术中展现出独特优势。研究最终强调了机器人辅助翻修手术的3项重要作用:规划截骨方案、重新建立螺钉通道以及置入翻修螺钉。

**推荐意见 8:** 可将导航系统与超声骨刀等工具结合,或利用机器人高精度机械臂,完成复杂手术中的精准截骨、减压及肿瘤切除等操作。(弱推荐,证据等级B)

## 五、AI技术

1. AI赋能的影像智能诊断与筛查: 共纳入文献证据17项,其中B级证据6项<sup>[95-100]</sup>,C级证据11项<sup>[101-111]</sup>。

AI,特别是机器学习(machine learning, ML)和深度学习(deep learning, DL),正被积极探索用于解决脊柱外科领域的挑战。其核心价值在于快速

捕捉影像的生理及病理特征,自动进行器官组织定位、分割和可疑部位标注,辅助医师高效、准确地锁定病灶<sup>[112]</sup>,但是AI影像算法的泛化能力与算法可解释性仍是未来推广应用的关键挑战。

脊柱手术依赖患者特异性定量指标(如Cobb角、矢状面平衡、骨密度),传统手动测量耗时且存在主观性。AI/ML技术正被用于自动化测量并预测手术适应证。在脊柱侧凸诊断中,AI显著提高了Cobb角测量的速度和精度:有研究在X线片上自动拟合曲线计算Cobb角,误差低于人工标准上限(11.8°)<sup>[101]</sup>;Jamaludin等<sup>[104]</sup>结合DL与双能X线技术开发的模型,灵敏度86.5%、特异度96.9%、AUC为0.80、Kappa一致性0.90;基于3D超声和卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的方法计算Cobb角平均误差已缩小至2.0°(标准差3.7°)<sup>[113]</sup>。基于CT、MRI的自动识别、定位和测量研究也在不断拓展<sup>[102-103]</sup>。AI可显著加速影像获取流程。基于CNN的DL协议用于MRI重建,使颈椎扫描时间缩短9 min 57 s(提速77%),并保持高诊断一致性( $\kappa=0.60\sim0.98$ )<sup>[95]</sup>。甚至有研究利用DL模型从腰椎CT生成具有诊断价值的T<sub>2</sub> MRI图像,评估椎体与椎间盘,图像质量与常规MRI差异无统计学意义<sup>[96]</sup>,这对MRI禁忌证患者尤为重要。

AI在识别脊柱退行性疾病方面成果显著。Hallinan等<sup>[97]</sup>开发的基于CNN模型能自动分级腰椎管狭窄,与高年资影像医师诊断高度一致。Lim等<sup>[98]</sup>研究表明AI辅助可减少评估变异性,提高报告效率和一致性。针对椎间盘退变,利用多尺度特征提取实现基于Pfirrmann分级的自动评估模型,准确率超过95%<sup>[105-106]</sup>,能快速识别严重脊柱退变病例。AI模型还成功应用于脊柱肿瘤、感染和创伤的诊断领域。Zhuo等<sup>[99]</sup>设计的模型用以区分脱髓鞘病与脊髓肿瘤,精确度79%~96%(AUC:0.85~0.99)。Liu等<sup>[107]</sup>开发的新型模型无需手动分割,即可在矢状位T<sub>1</sub>加权像(T<sub>1</sub>-weighted imaging, T<sub>1</sub>WI)、T<sub>2</sub>加权像(T<sub>2</sub>-weighted imaging, T<sub>2</sub>WI)及抑脂像(fat saturation, FS)上快速鉴别病理性椎体压缩骨折,准确率(90%~96%)高于影像科医师(81%~90%)。AI还可区分化脓性脊柱炎与Modic终板变化<sup>[108]</sup>,提示可能的致病微生物从而指导治疗<sup>[100]</sup>。甚至是辅助评估创伤性损伤如细微损伤、骨折、后方韧带复合体损伤<sup>[109]</sup>,有模型对急性椎体骨折评估准确率高达96.7%~98.0%<sup>[110-111]</sup>。尽管面临数据异质性、算法可解释性等挑战,相关研究已构建起涵盖影像增



强、自动分型、风险预测的完整技术体系,为脊柱疾病诊疗提供强有力的智能支持。

AI在脊柱外科中的应用虽展现出高精度与高效率,但其仍处于辅助阶段,存在算法黑箱、数据依赖性强、泛化能力不足等问题<sup>[114]</sup>。因此,AI输出结果不可作为最终诊断依据,必须由医师结合临床经验、多模态信息及患者具体情况进行复核与确认<sup>[115]</sup>。这一“医师复核原则”不仅是技术上的必要,也是医疗伦理与法律责任的明确要求。

**推荐意见 9:** AI可作为脊柱外科诊疗的辅助手段,用于影像数据的自动化测量、关键病灶的识别标注以及常见脊柱疾病的初步筛查与分级评估,但最终诊断依据必须经由医师确认。(强推荐,证据等级 C)

**2. AI驱动的手术规划与执行:** 共纳入文献证据 5 项,其中 A 级证据 1 项<sup>[116]</sup>, C 级证据 4 项<sup>[117-120]</sup>。

目前 AI 技术在脊柱外科手术中操作的主要价值体现在优化手术规划、增强术中导航精度,以及与机器人系统协同实现精准操作<sup>[121]</sup>。对于需要截骨矫形的侧凸患者,确定截骨范围和程度是手术关键难点。Hetherington 等<sup>[117]</sup>开发的脊柱水平识别系统能够有效完成脊柱扫描与三维重建,为手术方案的选择及截骨的范围等提供了可循证据。配备 AI 技术的新一代机器人不仅能够自动识别螺钉置入的最佳轨迹,还可自动规划脊柱侧凸患者截骨矫形的范围和连接棒的曲度形态<sup>[118]</sup>。在强化术中导航方面, AI 可以基于透视图像和 MRI 图像三维重建术区图像,其重建精度与常规 CT 相当,同时显著降低辐射暴露,并能提供更多的解剖细节<sup>[119]</sup>,这些重建数据可与机器人或导航系统自动配准,进一步缩短手术时间。结合 AI 与 AR 技术的新型导航工具已应用于椎体压缩性骨折手术,能自动规划穿刺路径,提高穿刺准确性<sup>[116]</sup>。另有研究团队开发出新型手术规划系统,利用 AI 模型优化弓根螺钉轨迹规划,使螺钉路径通过高骨密度区域,从而获得最佳抗拔出力<sup>[120]</sup>。

**推荐意见 10:** 在复杂脊柱手术中,应用 AI 技术优化手术规划、强化术中导航,并与机器人及 AR 系统结合提升手术精准性与安全性,减少术中辐射暴露,优化内植物的生物力学性能。(弱推荐,证据等级 C)

**3. AI 构建的风险预测与预警模型:** 共纳入文献证据 14 项,其中 A 级证据 3 项<sup>[3, 122-123]</sup>, B 级证据 3 项<sup>[124-126]</sup>, C 级证据 8 项<sup>[127-134]</sup>。

近年来, AI 与 ML 技术在脊柱外科预后预测领域的应用展现出巨大的潜力,为制定个体化治疗策略和优化临床决策提供强有力的数据驱动工具<sup>[135]</sup>,但由于训练数据多源于欧美人群,其在亚洲人群中的适用性仍需验证。

(1) 手术疗效与功能预后预测: 针对腰椎间盘突出症,已有学者开发出基于深度学习的模型,能够预测手术干预的时机<sup>[127]</sup>。该模型以 Oswestry 功能障碍指数 (oswestry disability index, ODI) 的最小临床意义变化值 (minimal clinically important difference, MCID) 为临界值,预测误差控制在 12%。其核心临床价值在于辅助决策: 当模型预测值超过 MCID 时,提示保守治疗可能获得更佳疗效;反之,预测值较差则强烈提示早期手术干预可能使患者获益更优。在脊髓型颈椎病术后功能状态预测方面, Khan 等<sup>[128]</sup>开发的 ML 模型能够预测术后功能恶化风险,并识别出关键的影像学预后预测因子,为术前风险分层和手术决策提供重要参考。对于成人脊柱畸形患者,研究焦点已扩展至术后功能结局和生活质量改善的预测。基于脊柱侧凸研究协会-22 (Scoliosis Research Society-22, SRS-22) 问卷构建的模型,能够有效预测矫形术后患者的主观疗效评价<sup>[122]</sup>。更进一步地研究整合关键参数,开发了新的分类系统,不仅能预测主观疗效,更能对各种手术技术组合进行精准的风险-效益分析,显著提升了治疗规划的精细化水平<sup>[3]</sup>。

(2) 并发症风险预警: 术后感染是脊柱手术的严重并发症。Hopkins 等<sup>[129]</sup>利用深度神经网络开发的模型,在预测后路脊柱融合术后感染方面表现出色,其阳性预测值 (positive predictive value, PPV) 为 92.56%, 阴性预测值 (negative predictive value, NPV) 达 98.5%, 显示出良好的模型区分度 (AUC: 0.775~0.787)。针对脊柱融合术的总体并发症预测,结合人工神经网络和逻辑回归的模型目前已实现 87.6% 的准确率<sup>[130]</sup>。成人脊柱畸形术后并发症预测是研究热点。Pellisé 等<sup>[131]</sup>的模型专门用于量化评估术后并发症 (如假关节形成伴植入物失效、交界性后凸、螺钉松动) 及非计划再入院的风险。其他研究应用包括人工神经网络、支持向量机、逻辑回归和随机森林在内的多种算法在早期及远期并发症预测中整体性能优异 (准确率 87.6%~92.5%), 显著优于传统预测方法<sup>[124-125]</sup>。在骨质疏松性椎体骨折不愈合预测中,基于 MRI 表现、后凸角和体质指数 (body mass index, BMI) 等关键特征



的 ML 模型展现出比传统方法更高的预测效能<sup>[123]</sup>。

(3) 关键临床事件预测: 术后死亡率预测, 尤其在肿瘤和复杂手术领域, 具有极高临床价值。Karhade 等<sup>[132]</sup>评估了多种 ML 模型预测脊柱转移瘤术后 30 d 死亡率的效能, 筛选出在识别能力、校准度和整体性能最优的算法, 并集成到开放访问的网络应用中, 便于临床使用。DiSilvestro 等<sup>[133]</sup>基于国家手术质量改进计划 (National Surgical Quality Improvement Program, NSQIP) 数据库数据, 利用贝叶斯分类算法预测脊柱肿瘤切除术后 30 d 死亡率, 该模型具备学习能力, 能随数据积累不断持续提升预测精度, 有助于优化术前决策及患者管理。术后 30 d 再入院是重要的医疗质量指标和经济负担来源。Kuris 等<sup>[134]</sup>利用大规模 NSQIP 数据, 开发了神经网络模型预测腰椎融合术后 30 d 再入院率, 并确认年龄 > 65 岁和 ASA 分级 > II 是普遍的风险因素。

(4) 患者筛选与风险分层: 随着颈椎前路间盘切除融合术门诊化趋势, Wang 等<sup>[126]</sup>基于 NSQIP 数据开发的人工神经网络模型为患者筛选提供了重要工具, 可有效识别不适合门诊手术的高风险患者。

**推荐意见 11:** 建立基于 AI 的多模态风险预测模型, 可用于预测治疗效果、智能预警术后并发症及患者筛选, 从而制定个体化诊疗策略、进行风险分层和优化临床决策。(弱推荐, 证据等级 C)

## 六、远程诊疗

(一) 适用场景—远程诊疗的适用范围与患者选择

共纳入文献证据 17 项, 其中 A 级证据 9 项<sup>[136-144]</sup>, C 级证据 8 项<sup>[145-152]</sup>。

数字技术的迅猛发展, 特别是移动通信和智能终端的普及, 深刻变革了医疗服务模式, 催生了以可穿戴设备和移动健康 (mobile health, mHealth) 为代表的远程诊疗技术被广泛应用<sup>[153]</sup>。

1. 移动健康在肌肉骨骼疾病管理中的效能与价值: (1) 脊柱关节炎管理: 基于智能手机的交互式 mHealth 工具整合了患者自我评估与医师临床记录, 显著优化了强直性脊柱炎患者的疾病管理流程<sup>[136]</sup>。其核心价值体现在: ① 大幅减少非必要医疗接触 (节省 29.1% 的三级医院门诊); ② 显著节约成本与时间; ③ 促进患者自我管理并提供临床决策支持数据。(2) 非特异性腰痛 (nonspecific low back pain, NSLBP) 与慢性腰痛 (chronic low back pain, CLBP): 证据显示, 远程干预作为辅助手段

(如结合健康教育、运动指导) 可有效改善 NSLBP 患者的功能障碍<sup>[137]</sup>。然而, 单纯远程干预如网站、APP 等在减轻 CLBP 疼痛和残疾方面的效果相对有限, 但能有效提升患者生活质量<sup>[138]</sup>。特定形式的干预, 如基于计步器和互联网介导的方案, 则被证明可减少慢性背痛相关的残疾<sup>[139]</sup>。

## 2. 围手术期管理的优化—依从性与早期预警

(1) 术后康复依从性: 移动应用在腰椎术后康复中展现出明确优势。定制化康复方案通过手机远程系统实施, 2 年后在改善 ODI 和疼痛视觉模拟评分 (visual analogue scale, VAS) 方面显著优于常规指导, 且效果在依从性高的患者中更为显著<sup>[140]</sup>。这突显了 mHealth 在监督术后康复训练、监测活动量趋势和提升患者依从性方面的适用性。

(2) 早期并发症预警: 术后监测应用程序可有效识别疼痛加剧、发热等可量化症状, 并触发预警机制, 从而减少不必要的急诊就诊<sup>[145]</sup>。此外, 移动 APP 还能通过提升患者对治疗方案的理解和依从性, 进一步降低手术取消率、术后并发症及再入院风险<sup>[146]</sup>。以上发现提示, 移动技术在术后主动监测和风险防范中具有潜在应用价值, 但目前相关证据等级相对较低, 且应用场景主要局限于症状明确且可量化的领域。

3. 远程诊疗在脊髓损伤 (spinal cord injury, SCI) 综合管理中的核心价值: SCI 患者面临复杂的健康挑战, 远程诊疗作为传统医疗的补充, 展现出多方面的价值: (1) 提升可及性与连续性: 远程诊疗有效克服地理障碍, 使农村或行动不便患者能获得压疮、神经源性膀胱/肠道管理等专科医疗服务<sup>[147, 154]</sup>, 同时可通过电话、视频随访监测并发症, 为高风险患者提供从住院到家庭的过渡期管理支持<sup>[141]</sup>。(2) 自我管理支持: 针对性移动应用通过提醒和教育, 能有效降低 SCI 后的尿路感染发生率<sup>[155]</sup>, 电话辅导则可显著提升患者对治疗与康复的参与度<sup>[142]</sup>。(3) 机体活动锻炼: 视频指导结合网络课程的混合远程模式, 虽在提升运动耐量方面效果存在差异, 但能显著改善生活质量、减轻抑郁焦虑、提升生活满意度, 并增强“有意义的生活体验”<sup>[143, 148]</sup>。(4) 营养管理: 远程营养咨询可有效改善 SCI 患者的饮食质量<sup>[149]</sup>。(5) 慢性疼痛与情绪管理: ① 心理干预: 基于网络的自助心理干预措施可改善 SCI 相关的慢性疼痛及抑郁焦虑症状<sup>[144-150]</sup>; ② 神经反馈技术: 家庭便携式脑电图结合神经反馈训练是新兴且有前景的中枢神经病理性疼痛管理方



法,初步研究显示可显著改善疼痛<sup>[151]</sup>。(6)功能康复:视频远程康复模式,特别是结合VR和家庭传感器技术的方案,能有效指导家庭训练,进而改善不完全性SCI患者的下肢肌力、平衡和移动能力<sup>[152]</sup>。

**推荐意见 12:**以可穿戴技术及移动健康技术为代表的远程诊疗可作为慢性脊柱疾病管理、术后常规随访及SCI患者管理的有效补充手段,以改善健康结局、提升治疗依从性。(强推荐,证据等级A)

## (二)可穿戴技术

智能可穿戴技术通过可穿戴/植入式传感器实现脊柱功能的客观量化,弥补患者自主报告结局的主观偏差;实时反馈与个体化干预显著提升康复依从性与疗效,推动脊柱护理向精准化、智能化转型<sup>[156]</sup>。

1. 智能监测—基于可穿戴设备的监测与评估:共纳入文献证据6项,其中A级证据1项<sup>[157]</sup>,B级证据1项<sup>[158]</sup>,C级证据2项<sup>[159-160]</sup>,D级证据2项<sup>[161-162]</sup>。

(1)运动功能动态评估:①步态分析:惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)与智能鞋垫持续监测步态参数。研究表明,腰椎管狭窄症(lumbar spinal stenosis, LSS)患者术前步速显著低于健康人群,经可穿戴传感器行步态分析可获取步态质量的关键信息,如步态不对称持续异常提示术后恢复不佳,有助于评估LSS患者的功能限制、减压手术的结果以及制定个体化康复方案<sup>[157]</sup>;另有研究利用智能鞋捕捉的步态参数来预测LSS术后的ODI和VAS评分改善情况<sup>[159]</sup>;②姿势监测:基于多传感器融合技术(加速度计+陀螺仪+磁力计)可实现三维姿态解析。Bazzarelli等<sup>[160]</sup>研发的姿势可穿戴设备通过姿势监测结合振动触觉反馈,诱导AIS患者背部肌肉主动收缩,有助于姿势矫正,旨在加强背部肌肉和增加脊柱的灵活性。

(2)生理与并发症预警:①心血管与神经功能: $T_6$ 及以上水平SCI患者易发自主神经反射异常和体位性低血压。现有可穿戴设备可实时监测血压波动与心律失常<sup>[163]</sup>,具有改善运动功能、睡眠质量和心血管健康的潜力;②睡眠呼吸障碍:有研究开发了一项简单、性价比高的睡眠监测工具,通过新型智能手机系统记录脉搏、血氧饱和度、声学 and 加速度计数据,利用自动算法分析呼吸暂停和低通气事件,并监测睡眠姿势,以促进SCI患者睡眠呼吸障碍的监测<sup>[158]</sup>;③病情恶化:腰椎显微椎间盘切除术后使用可穿戴加速度计客观监测活动和步态速度,有助于早期发现腰椎间盘突出症的复发<sup>[161]</sup>。可穿

戴设备支持脊柱患者的长期远程连续监测,有助于外科医师和康复治疗师早期识别恶化症状并监测干预后的恢复过程<sup>[162]</sup>。

**推荐意见 13:**建议在脊柱疾病患者的围手术期及康复管理中,应用可穿戴设备进行连续的运动功能动态评估和生理监测,以辅助制定个体化康复方案、早期识别并发症及评估手术疗效。(弱推荐,证据等级C)

2. 智能干预—基于可穿戴设备的居家康复与慢病管理:共纳入文献证据12项,其中A级证据3项<sup>[164-166]</sup>,B级证据2项<sup>[167-168]</sup>,C级证据4项<sup>[169-172]</sup>,D级证据3项<sup>[173-175]</sup>。

(1)实时反馈与运动训练:Matheve等<sup>[164]</sup>的研究采用基于运动传感器的姿势反馈系统这一新型康复技术,发现其在改善慢性腰痛患者腰椎-骨盆运动控制方面较传统反馈方法更有效。另有研究使用腰骨盆监测器作为反馈装置,通过振动提示减少腰椎屈曲,从而降低椎间盘负荷,帮助患有NSLBP或有NSLBP风险的个体提高姿势注意意识,避免引起疼痛的姿势<sup>[165]</sup>。还有研究开发了一种用于颈椎监测的可穿戴智能系统,其核心为单个三轴加速度计,便于长期佩戴。该系统能够基于身体矢状面的俯仰角区分四种颈部曲度水平,并记录每种姿势的维持时长。为提升临床实用性,研究人员还开发了配套的移动应用程序并部署于智能手机平台,使医师能够便捷地进行在线远程监测,实时掌握患者颈部状态,从而有效支持远程诊断<sup>[169]</sup>。

(2)个性化康复管理:①活动处方:基于可穿戴传感器数据,可为能够行走的不完全性SCI患者开发能量消耗估计模型,并依据加速度计数据定制易于理解的活动目标。研究表明,建议此类不完全性SCI患者每日行走2 000~3 000步可显著改善健康结局<sup>[170]</sup>;②依从性提升:温度/压力传感器监测脊柱侧凸支具佩戴情况,可显著提升患者佩戴依从性(85.7%比56.5%),相较于未使用传感器组,日均佩戴时间增加5.24 h<sup>[167]</sup>;③远程康复:腰椎手术后早期采用可穿戴设备结合远程医疗咨询进行身体活动干预,相较于常规术后护理,患者更易达到预期活动量,且接受度更高<sup>[166]</sup>。值得关注的是,已有研究开发出一种面向卒中和SCI患者的可穿戴外骨骼,旨在通过辅助步态训练,帮助存在步态障碍的患者站立和行走。研究发现,外骨骼辅助康复对所有参与者都具有可行性。尽管在神经功能缺损方面未观察到显著改善,但所有参与者在步态表现、



平衡能力、近端肌肉力量、心理状态以及康复满意度等多个维度均取得积极进步<sup>[171-172]</sup>。还有研究发现,该技术对急慢性 SCI 患者膀胱和肠道功能也有积极影响<sup>[168]</sup>。在术后并发症康复领域,可穿戴机器人也取得了显著进展。有研究针对 1 例颈椎术后出现 C<sub>5</sub> 麻痹且恢复延迟的患者,应用可穿戴机器人套装混合辅助肢体进行肩部外展训练。结果显示,该患者的肩部外展角度和力量在每次训练中均得到改善,并最终实现了肩部功能的完全恢复。研究者认为,机器人辅助训练纠正了其瘫痪肩部的错误运动模式,并通过促进正确的运动学习加速了康复进程,这项技术有望成为术后 C<sub>5</sub> 麻痹患者的有效治疗工具<sup>[173]</sup>。此外,研究报道可穿戴外骨骼机器人混合辅助肢体训练在脊柱肿瘤术后、胸椎管狭窄术后的肢体功能康复方面取得了显著效果<sup>[174-175]</sup>。

### (三)移动健康技术

共纳入文献证据 9 项,其中 A 级证据 4 项<sup>[140, 176-178]</sup>,C 级证据 5 项<sup>[145, 179-182]</sup>。

移动健康技术作为远程诊疗的重要技术手段,其在脊柱外科的整合应用正深刻改变着传统诊疗模式。基于智能手机的传感器技术、远程医疗平台及定制化应用程序,为脊柱疾病患者的围手术期管理提供了创新解决方案<sup>[183]</sup>。

1. 术前应用:(1)术前准备优化:通过智能手机应用程序向患者发送需确认遵守的术前指导,可提高术前说明的依从性(100%),并减少最后一刻取消手术的情况<sup>[176]</sup>;此类应用还能简化患者与其护理团队的沟通流程,通过将住院流程分解为多个阶段,为患者提供个性化的护理路径。研究显示,81% 的患者完成了基线术前结果量表,88% 患者认为其可显著优化术前准备<sup>[179]</sup>;(2)行为干预与风险控制:应用程序可针对禁烟医嘱、阿片类药物使用等推送个性化干预内容,结合疼痛日记跟踪,降低脊柱术后并发症风险<sup>[184]</sup>;(3)患者教育与沟通:应用程序提供按需访问的手术信息、药物指南及影像报告解读,患者信息保留率较纸质手册提升<sup>[180]</sup>。开发的智能手机应用其嵌入式消息系统支持术前实时咨询,减少患者焦虑<sup>[179]</sup>。

2. 术后应用:(1)客观功能监测与远程随访:智能手机传感器(加速度计、陀螺仪等)通过 ML 算法,动态监测患者功能状态,减少传统结果量表报告的主观偏倚<sup>[185]</sup>。远程随访尤其适用交通不便地区:脊柱术后视频随访总成功率达 82.87%,但其效果受手术部位和社会经济因素影响<sup>[181]</sup>;(2)伤口与并

发症管理:某些应用程序可通过患者上报的疼痛、体温、伤口渗血等信息触发分级警报,远程解决 94% 的术后问题<sup>[145]</sup>。伤口照片传输功能助力早期识别手术部位感染,约 55% 患者避免因担忧而返院复查<sup>[186]</sup>;(3)康复指导与依从性提升:新型移动健康应用程序基于 ERAS 原则生成每日任务清单,提供具体的锻炼任务、切口清洁包扎说明、护理团队宣教内容以及其他个性化建议<sup>[177]</sup>。坚持完成清单任务并定期上传的患者伤口愈合更好、疼痛程度降低更明显、步数恢复更快<sup>[182]</sup>。有大型随机对照试验研究证实,mHealth 指导的腰椎术后康复的患者,2 年后 ODI 和 VAS 评分改善显著优于传统组( $P < 0.05$ )<sup>[140]</sup>,且视频引导锻炼减少往返复诊的交通负担,提升康复便利性;(4)长期自我行为管理:SelfBACK 应用程序通过 AI 为腰痛患者提供常规护理辅助下的定制化自我管理方案,研究显示干预 3 个月后疼痛相关残疾评分显著降低( $P < 0.01$ )<sup>[178]</sup>。

上述部分案例基于国外应用场景,未来可结合我国分级诊疗体系与 5G 环境,探索适应本土临床场景的移动康复平台。

**推荐意见 14:**移动健康技术在脊柱外科围手术期管理中具有重要价值,建议将其整合应用于临床实践以优化患者诊疗流程、改善功能结局并提升长期自我管理能力。(弱推荐,证据等级 C)

### 七、智能化技术应用落地

共纳入文献证据 5 项,其中 A 级证据 3 项<sup>[138, 187-188]</sup>,B 级证据 2 项<sup>[189-190]</sup>。

1. 伦理规范:尽管智能化技术的深度融合正以前所未有的方式重塑脊柱外科诊疗范式、手术实践与医学教育,但这一变革进程必须被置于严格的伦理规范框架之下审慎推进,以确保技术创新真正服务于患者的根本利益,避免因技术滥用、数据泄露或算法偏见对患者造成伤害<sup>[191]</sup>。具体而言,在利用 AI 进行影像学诊断或手术决策支持时,必须对其算法的透明度、可解释性及可靠性进行严格验证,防止“黑箱”决策损害医患信任<sup>[192]</sup>;对于患者隐私数据的采集、存储与使用,需建立超越常规标准的防护机制,确保敏感健康信息在数字化流程中的绝对安全,避免因数据商业化滥用而违背医学伦理中的保密原则<sup>[193]</sup>。再者,越是使用先进技术,就越要重视患者知情同意,应告知患者其原理、局限性和数据使用方式,这是临床伦理实践的重要一环。此外,在智能化技术的前沿探索中,还需前瞻性地界定其应用边界,防止技术对脊柱脊髓神经功能的



过度干预引发深层的伦理问题<sup>[194]</sup>。伦理是智能化技术发展的先导和底线,完善的监管体系则是保证智能化应用的齿轮,建立覆盖 AI 算法开发、数据安全与临床应用全过程的伦理审查与监管机制,智能化技术发展才能行稳致远。

2. 资源配置:鉴于我国医疗资源分布不均衡的现状,智能化设备的配置需遵循务实且具有前瞻性的梯度策略,以实现资源的最优化利用。对于基层医院,应优先推广性价比高且操作相对简便的智能化技术,如 3D 打印手术导板与基础光学导航系统,这些技术能有效辅助术者在缺乏高年资专家的情况下仍能实现椎弓根螺钉的精准置入,显著降低手术失误风险,缩短学习曲线,使基层医院的患者能就近获得高质量、同质化的手术治疗<sup>[189-190]</sup>。对于承担疑难重症诊疗与技术辐射任务的区域医疗中心,建议配备高精度手术机器人并整合 AR 导航系统,通过机械臂的亚毫米级精准操作与 AR 技术将虚拟解剖结构、病灶范围及植入物轨迹实时叠加于真实术野,极大提升对于复杂脊柱畸形、翻修手术或肿瘤切除等高风险操作的安全性与成功率,实现从“精准”到“智能精准”的跨越<sup>[187]</sup>。在顶尖的教学医院,除临床应用外,还应增设 VR 模拟培训平台,VR 技术能为住院医师提供可重复、无风险的真实手术模拟环境,加速其显微外科技术与空间判断能力的养成<sup>[188]</sup>。

3. 卫生经济学:智能化技术的跃进始终伴随着高昂的成本,因此需坚持卫生经济学的成本效益原则,实施精细化的成本控制策略,避免盲目追求技术领先而导致的资源浪费与可及性下降。在材料选择上,应将定制化 3D 打印椎间融合器或人工椎体优先应用于先天性脊柱畸形、重度创伤或翻修手术等极端复杂病例,充分发挥其解剖匹配优势,实现最佳的生物力学稳定性和骨融合效果<sup>[195]</sup>;而对于绝大多数常规退行性病变如腰椎间盘突出症或腰椎管狭窄症,则采用标准化、批量生产的植入物,从而有效控制材料成本,使更多患者能受益于基础智能化技术。在服务模式上,应积极发展远程诊疗,尤其是借助 5G 技术实现跨区域的实时术中会诊与高质量的术后随访<sup>[138]</sup>,并通过医保支付方式改革予以支持,使有限的卫生资源能最大程度地惠及更广泛人群,最终推动脊柱外科向着更加精准、安全、普惠和人性化的方向可持续发展。

**推荐意见 15:**需在符合伦理的情况下规范地使用智能化技术,智能设备的引进可按医院的平台

高低进行梯度配置,智能化技术的选择还需从经济学角度出发考虑。(强推荐,证据等级 A)

## 八、总结与说明

本指南系统梳理了智能化技术在脊柱外科的应用现状,涵盖三维可视化、3D 打印、导航与机器人、人工智能及远程诊疗五大方向,共提出 15 条推荐意见,并明确了各项技术的适用范围、证据等级与推荐强度。指南的制订严格遵循循证医学原则,结合多学科专家共识,旨在推动智能化技术在脊柱外科的科学、规范与高效应用。随着技术的快速发展,智能化已成为脊柱外科精准化、个性化、微创化发展的重要推动力。本指南不仅为临床医师提供了可操作的技术路径,也为医疗机构在技术引进、资源配置与伦理合规方面提供了参考依据。同时,指南强调在技术应用中应始终以患者安全与治疗效果为核心,兼顾卫生经济学原则,促进医疗资源的合理分配与高效利用。未来,随着更多高质量临床证据的积累和技术的进一步成熟,本指南将持续更新,以反映智能化技术在脊柱外科的最新进展,助力我国脊柱外科诊疗水平的整体提升。本指南中涉及的干预措施的安全性基础需以当前法规为前提,包括但不限于生产、转运、应用等环节。本指南仅作为学术指导建议,不作为法律依据。临床医务人员在使用本指南的同时,还要综合考虑现实的具体情况来进行决策。

### 本指南制订工作委员会名单

**指南指导专家:**贺宝荣(西安交通大学附属红会医院脊柱外科);冯世庆(山东大学第二医院骨科);高延征(河南省人民医院脊柱脊髓外科);梅伟(郑州市骨科医院骨科);闫亮(西安市红会医院脊柱外科);许正伟(西安市骨科研究所脊柱外科)

**执笔专家:**都金鹏(西安交通大学附属红会医院脊柱外科);贺园(西安市第五医院骨科)

**指南方法学专家:**张荣强(陕西中医药大学公共卫生学院流行病学与卫生统计学教研室)

**指南参与讨论专家(按姓氏汉语拼音排序):**陈亮(苏州大学附属第一医院骨科);董博(西安交通大学附属红会医院康复医院疼痛病区);段永超(西安交通大学附属红会医院术中影像科);樊珊(西安交通大学附属红会医院北院区手术麻醉部);冯皓宇(山西省白求恩医院骨科);黄霖(中山大学孙逸仙纪念医院脊柱外科);康学文(兰州大学第二医院骨科);李利(中国人民解放军总医院第四医学中心骨科医学部脊柱外科);李水霞(西安交通大学附属红会医院南区手术麻醉部);柳达(中国医科大学附属盛京医院脊柱微创外科);鲁世保(首都医科大学宣武医院骨科);宁广智(天津医科大学总医院骨科);乔欢欢(空军军医大学第二附属医院



脊柱外科);宋纯理(北京大学第三医院骨质疏松科);王凯丰(北京大学人民医院脊柱外科);相宏飞(青岛大学附属医院脊柱外科);颜峰(浙江台州市中医院骨伤科);杨磊(哈尔滨医科大学第一附属医院骨科);张志才(华中科技大学同济医学院附属协和医院骨科);仇建国(北京协和医院骨科)

**指南秘书组:**冯铭哲(西安交通大学附属红会医院脊柱外科);刘元(西安交通大学附属红会医院脊柱外科);屈泽超(西安交通大学附属红会医院脊柱外科);李大同(西安交通大学附属红会医院脊柱外科)

**指南外部评审组(按姓氏汉语拼音排序):**陈伟(河北医科大学第三医院骨科);凡进(江苏省人民医院骨科);郭华(西安市第五医院骨科);贺利军(西安市第五医院骨科);姜宇(北京大学第三医院骨科);刘新宇(山东大学齐鲁医院骨科);陆声(云南省第一人民医院骨科);林斌(联勤保障部队第九〇九医院骨科);申才良(安徽医科大学第一附属医院脊柱外科);桑宏勋(南方医科大学深圳医院骨科);魏志坚(天津医科大学总医院骨科);吴天定(中南大学湘雅医院脊柱外科);肖建如(海军军医大学第二附属长征医院骨科);张涛(山东大学第二医院脊柱外科);赵斌(山西医科大学第二医院骨科)

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

## 参 考 文 献

- Wallace N, Butt BB, Aleem I, et al. Three-dimensional printed drill guides versus fluoroscopic-guided freehand technique for pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of radiographic, operative, and clinical outcomes[J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(8): 314-322. DOI: 10.1097/BSD.0000000000001023.
- Satin AM, Kisinde S, Lieberman IH. Robotic-assisted revision spine surgery[J]. *Int J Spine Surg*, 2022, 16(S2): S14-S21. DOI: 10.14444/8272.
- Ames CP, Smith JS, Pellisé F, et al. 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(13): 915-926. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002974.
- 邢帅, 高延征, 王红强, 等. “O”型臂导航系统辅助半椎体切除植骨融合内固定治疗颈胸段先天性半椎体畸形[J]. *中华骨科杂志*, 2023, 43(6): 351-358. DOI: 10.3760/cma.j.cn121113-20221213-00716.
- Wallace N, Schaffer NE, Aleem IS, et al. 3D-printed patient-specific spine implants: a systematic review[J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(10): 400-407. DOI: 10.1097/BSD.0000000000001026.
- 陈耀龙, 杨克虎, 王小钦, 等. 中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022版)[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(10): 697-703. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20211228-02911.
- Shea BJ, Grimshaw JM, Wells GA, et al. Development of AMSTAR: a measurement tool to assess the methodological quality of systematic reviews[J]. *BMC Med Res Methodol*, 2007, 7:10. DOI: 10.1186/1471-2288-7-10.
- Higgins JP, Altman DG, Gøtzsche PC, et al. The Cochrane Collaboration's tool for assessing risk of bias in randomised trials[J]. *BMJ*, 2011, 343: d5928. DOI: 10.1136/bmj.d5928.
- Whiting PF, Rutjes AW, Westwood ME, et al. QUADAS-2: a revised tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies[J]. *Ann Intern Med*, 2011, 155(8): 529-536. DOI: 10.7326/0003-4819-155-8-201110180-00009.
- Stang A. Critical evaluation of the Newcastle-Ottawa scale for the assessment of the quality of nonrandomized studies in meta-analyses[J]. *Eur J Epidemiol*, 2010, 25(9): 603-605. DOI: 10.1007/s10654-010-9491-z.
- Guyatt G, Oxman AD, Akl EA, et al. GRADE guidelines: 1. Introduction-GRADE evidence profiles and summary of findings tables[J]. *J Clin Epidemiol*, 2011, 64(4): 383-394. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2010.04.026.
- Sayah A, Jay AK, Toaff JS, et al. Effectiveness of a rapid lumbar spine MRI protocol using 3D T2-weighted SPACE imaging versus a standard protocol for evaluation of degenerative changes of the lumbar spine[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2016, 207(3): 614-620. DOI: 10.2214/AJR.15.15764.
- Bagheri A, Liu XC, Tassone C, et al. Reliability of three-dimensional spinal modeling of patients with idiopathic scoliosis using EOS system[J]. *Spine Deform*, 2018, 6(3): 207-212. DOI: 10.1016/j.jspd.2017.09.055.
- Al-Aubaidi Z, Lebel D, Oudjhane K, et al. Three-dimensional imaging of the spine using the EOS system: is it reliable? A comparative study using computed tomography imaging[J]. *J Pediatr Orthop B*, 2013, 22(5): 409-412. DOI: 10.1097/BPB.0b013e328361ae5b.
- Glaser DA, Doan J, Newton PO. Comparison of 3-dimensional spinal reconstruction accuracy: biplanar radiographs with EOS versus computed tomography[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(16): 1391-1397. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3283182518a15.
- 夏庆福, 张延斌, 夏纪元, 等. 基于EOS系统和CT系统测量青少年特发性脊柱侧凸顶椎旋转角度的对比观察[J]. *骨科临床与研究杂志*, 2023, 8(3): 156-159. DOI: 10.19548/j.2096-269x.2023.03.005.
- Kwan K, Cheung A, Koh HY, et al. Brace effectiveness is related to 3-Dimensional plane parameters in patients with adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2021, 103(1): 37-43. DOI: 10.2106/JBJS.20.00267.
- Kim SB, Heo YM, Hwang CM, et al. Reliability of the EOS imaging system for assessment of the spinal and pelvic alignment in the sagittal plane[J]. *Clin Orthop Surg*, 2018, 10(4): 500-507. DOI: 10.4055/cios.2018.10.4.500.
- Rehm J, Germann T, Akbar M, et al. 3D-modeling of the spine using EOS imaging system: inter-reader reproducibility and reliability[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171258. DOI: 10.1371/journal.pone.0171258.
- Sangole AP, Aubin CE, Labelle H, et al. Three-dimensional classification of thoracic scoliotic curves[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2009, 34(1): 91-99. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3283181877bbb.
- Ilharreborde B, Dubousset J, Le Huec JC. Use of EOS imaging for the assessment of scoliosis deformities: application to postoperative 3D quantitative analysis of the trunk[J]. *Eur Spine J*, 2014, 23 Suppl 4: S397-S405.



- DOI: 10.1007/s00586-014-3334-7.
- [22] Nevalainen MT, Vähä J, Räsänen L, et al. Diagnostic utility of 3D MRI sequences in the assessment of central, recess and foraminal stenoses of the spine: a systematic review [J]. *Skeletal Radiol*, 2024, 53(12): 2575-2584. DOI: 10.1007/s00256-024-04689-1.
  - [23] Illés T, Somoskeőy S. The EOS™ imaging system and its uses in daily orthopaedic practice[J]. *Int Orthop*, 2012, 36(7):1325-1331. DOI: 10.1007/s00264-012-1512-y.
  - [24] 何建容, 梁泽军, 唐静, 等. EOS 成像系统在脊柱侧凸中的应用进展 [J]. *中华放射学杂志*, 2025, 59(7): 822-826. DOI: 10.3760/cma.j.cn112149-20240911-00555.
  - [25] 胡宗杉, 马鸿儒, 钱至恺, 等. 基于年龄和性别的中国正常成年人脊柱-骨盆矢状位形态的多中心研究 [J]. *中华骨科杂志*, 2021, 41(13): 844-855. DOI: 10.3760/cma.j.cn121113-20210204-00127.
  - [26] Gu Y, Yao Q, Xu Y, et al. A Clinical application study of mixed reality technology assisted lumbar pedicle screws implantation[J]. *Med Sci Monit*, 2020, 26: e924982. DOI: 10.12659/MSM.924982.
  - [27] Wei P, Yao Q, Xu Y, et al. Percutaneous kyphoplasty assisted with/without mixed reality technology in treatment of OVCF with IVC: a prospective study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 255. DOI: 10.1186/s13018-019-1303-x.
  - [28] Elmi-Terander A, Burström G, Nachabé R, et al. Augmented reality navigation with intraoperative 3D imaging vs fluoroscopy-assisted free-hand surgery for spine fixation surgery: a matched-control study comparing accuracy[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 707. DOI: 10.1038/s41598-020-57693-5.
  - [29] Edström E, Burström G, Persson O, et al. Does augmented reality navigation increase pedicle screw density compared to free-hand technique in deformity surgery? Single surgeon case series of 44 patients[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2020, 45(17): E1085-E1090. DOI: 10.1097/BRS.0000000000003518.
  - [30] Elmi-Terander A, Burström G, Nachabe R, et al. Pedicle screw placement using augmented reality surgical navigation with intraoperative 3D imaging: a first in-human prospective cohort study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44(7): 517-525. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002876.
  - [31] Carl B, Bopp M, Saß B, et al. Implementation of augmented reality support in spine surgery[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(7): 1697-1711. DOI: 10.1007/s00586-019-05969-4.
  - [32] Carl B, Bopp M, Saß B, et al. Reliable navigation registration in cranial and spine surgery based on intraoperative computed tomography[J]. *Neurosurg Focus*, 2019, 47(6):E11. DOI: 10.3171/2019.8.FOCUS19621.
  - [33] Molina CA, Dibble CF, Lo SL, et al. Augmented reality-mediated stereotactic navigation for execution of en bloc lumbar spondylectomy osteotomies[J]. *J Neurosurg Spine*, 2021, 34(5): 700-705. DOI: 10.3171/2020.9.SPINE201219.
  - [34] 李思敬, 王林. 扩展现实技术在骨科临床中的应用 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2024, 26(1): 50-56. DOI: 10.3760/cma.j.cn421213-20210105-00013.
  - [35] 王其飞, 田大胜. 增强现实与混合现实技术在脊柱微创手术中的创新与发展 [J]. *中华外科杂志*, 2025, 63(9): 787-791. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20250109-00014.
  - [36] Ahern DP, Gibbons D, Schroeder GD, et al. Image-guidance, robotics, and the future of spine surgery [J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(5): 179-184. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000809.
  - [37] McCloskey K, Turlip R, Ahmad HS, et al. Virtual and augmented reality in spine surgery: a systematic review [J]. *World Neurosurg*, 2023, 173: 96-107. DOI: 10.1016/j.wneu.2023.02.068.
  - [38] Jung Y, Muddaluru V, Gandhi P, et al. The development and applications of augmented and virtual reality technology in spine surgery training: a systematic review[J]. *Can J Neurol Sci*, 2024, 51(2): 255-264. DOI: 10.1017/cjn.2023.46.
  - [39] Yu H, Zhou Z, Lei X, et al. Mixed reality-based preoperative planning for training of percutaneous transforaminal endoscopic discectomy: a feasibility study[J]. *World Neurosurg*, 2019, 129: e767-e775. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.06.020.
  - [40] Kumar V, Vatkar AJ, Kataria M, et al. Virtual reality is effective in the management of chronic low back ache in adults: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Eur Spine J*, 2024, 33(2): 474-480. DOI: 10.1007/s00586-023-08040-5.
  - [41] Putrino D, Tabacof L, Breyman E, et al. Pain reduction after short exposure to virtual reality environments in people with spinal cord injury[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(17): 8923. DOI: 10.3390/ijerph18178923.
  - [42] Solcà M, Krishna V, Young N, et al. Enhancing analgesic spinal cord stimulation for chronic pain with personalized immersive virtual reality[J]. *Pain*, 2021, 162(6): 1641-1649. DOI: 10.1097/j.pain.0000000000002160.
  - [43] An Y, Park C. The effects of virtual soccer game on balance, gait function, and kick speed in chronic incomplete spinal cord injury: a randomized controlled trial[J]. *Spinal Cord*, 2022, 60(6): 504-509. DOI: 10.1038/s41393-021-00745-y.
  - [44] Lee MJ, Lee SM. The effect of virtual reality exercise program on sitting balance ability of spinal cord injury patients[J]. *Healthcare (Basel)*, 2021, 9(2): 183. DOI: 10.3390/healthcare9020183.
  - [45] Lim DY, Hwang DM, Cho KH, et al. A fully immersive virtual reality method for upper limb rehabilitation in spinal cord injury[J]. *Ann Rehabil Med*, 2020, 44(4): 311-319. DOI: 10.5535/arm.19181.
  - [46] Austin PD, Craig A, Middleton JW, et al. The short-term effects of head-mounted virtual-reality on neuropathic pain intensity in people with spinal cord injury pain: a randomised cross-over pilot study[J]. *Spinal Cord*, 2021, 59(7): 738-746. DOI: 10.1038/s41393-020-00569-2.
  - [47] Ledwos N, Mirchi N, Bissonnette V, et al. Virtual reality anterior cervical discectomy and fusion simulation on the novel sim-ortho platform: validation studies[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2020, 20(1): 74-82. DOI: 10.1093/ons/opaa269.
  - [48] Luca A, Giorgino R, Gesualdo L, et al. Innovative educational pathways in spine surgery: advanced virtual reality-based training[J]. *World Neurosurg*, 2020, 140: 674-680. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.04.102.
  - [49] Hu Z, Li X, Cui J, et al. Significance of preoperative planning software for puncture and channel establishment in percutaneous endoscopic lumbar



- DISCECTOMY: a study of 40 cases[J]. *Int J Surg*, 2017, 41: 97-103. DOI: 10.1016/j.ijisu.2017.03.059.
- [50] 欧阳汉强, 吴红斌, 周非非, 等. 四位一体混合式创新教学模式在脊柱肿瘤临床教学中的应用[J]. *中华医学教育探索杂志*, 2025, 24(9): 1236-1241. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20240923-02027.
- [51] 王楚, 孙雪琳, 贾彦梅, 等. 居家脊髓损伤患者虚拟现实运动康复系统的开发与接受度评价[J]. *中华现代护理杂志*, 2024, 30(31): 4275-4280. DOI: 10.3760/cma.j.cn115682-20240710-03839.
- [52] Lohre R, Wang JC, Lewandrowski KU, et al. Virtual reality in spinal endoscopy: a paradigm shift in education to support spine surgeons[J]. *J Spine Surg*, 2020, 6(Suppl 1): S208-S223. DOI: 10.21037/jss.2019.11.16.
- [53] Öztürk AM, Süer O, Govsa F, et al. Patient-specific three-dimensional printing spine model for surgical planning in AO spine type-C fracture posterior long-segment fixation[J]. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 2022, 56(2): 138-146. DOI: 10.5152/j.aott.2021.21332.
- [54] Zhuang YD, Zhou MC, Liu SC, et al. Effectiveness of personalized 3D printed models for patient education in degenerative lumbar disease[J]. *Patient Educ Couns*, 2019, 102(10): 1875-1881. DOI: 10.1016/j.pec.2019.05.006.
- [55] 刘啸. 3D 打印教学模型在脊柱外科教学中的应用[J]. *中华医学教育探索杂志*, 2021, 20(2): 189-192. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20200130-00400.
- [56] Liu R, Ma H. Three-dimensional printed models improve orthopedic residents' understanding of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *BMC Med Educ*, 2025, 25(1): 37. DOI: 10.1186/s12909-024-06617-2.
- [57] Wang Y, Xiang Y, Tian Q, et al. Application of image-fusion 3D printing model in total en bloc spondylectomy for spinal malignant tumors[J]. *J Healthc Eng*, 2022, 2022: 7907191. DOI: 10.1155/2022/7907191.
- [58] Pan A, Ding H, Hai Y, et al. The value of three-dimensional printing spine model in severe spine deformity correction surgery[J]. *Global Spine J*, 2023, 13(3): 787-795. DOI: 10.1177/21925682211008830.
- [59] Xiao JR, Huang WD, Yang XH, et al. En bloc resection of primary malignant bone tumor in the cervical spine based on 3-Dimensional printing technology[J]. *Orthop Surg*, 2016, 8(2): 171-178. DOI: 10.1111/os.12234.
- [60] Hess S, Husarek J, Müller M, et al. Applications and accuracy of 3D-printed surgical guides in traumatology and orthopaedic surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Exp Orthop*, 2024, 11(3): e12096. DOI: 10.1002/jeo2.12096.
- [61] Azimi P, Yazdani T, Benzel EC, et al. 3D-printed navigation template in cervical spine fusion: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(2): 389-401. DOI: 10.1007/s00586-020-06601-6.
- [62] Liang W, Han B, Hai JJ, et al. 3D-printed drill guide template, a promising tool to improve pedicle screw placement accuracy in spinal deformity surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(5): 1173-1183. DOI: 10.1007/s00586-021-06739-x.
- [63] Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M, et al. A novel screw guiding method with a screw guide template system for posterior C-2 fixation: clinical article[J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 21(2): 231-238. DOI: 10.3171/2014.3.SPINE13730.
- [64] Tu Q, Ding HW, Chen H, et al. Three-Dimensional-printed individualized guiding templates for surgical correction of severe kyphoscoliosis secondary to ankylosing spondylitis: outcomes of 9 cases[J]. *World Neurosurg*, 2019, 130: e961-e970. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.07.047.
- [65] Zhang YW, Deng L, Zhang XX, et al. Three-Dimensional printing-assisted cervical anterior bilateral pedicle screw fixation of artificial vertebral body for cervical tuberculosis[J]. *World Neurosurg*, 2019, 127: 25-30. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.03.238.
- [66] Tan JH, Cheong CK, Hey H. Titanium (Ti) cages may be superior to polyetheretherketone (PEEK) cages in lumbar interbody fusion: a systematic review and meta-analysis of clinical and radiological outcomes of spinal interbody fusions using Ti versus PEEK cages[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(5): 1285-1295. DOI: 10.1007/s00586-021-06748-w.
- [67] Duan Y, Feng D, Li T, et al. Comparison of lumbar interbody fusion with 3D-printed porous titanium cage versus polyetheretherketone cage in treating lumbar degenerative disease: a systematic review and meta-analysis[J]. *World Neurosurg*, 2024, 183: 144-156. DOI: 10.1016/j.wneu.2023.12.111.
- [68] Zhai WJ, Liu L, Gao YH, et al. Application of 3D-printed porous titanium interbody fusion cage vs. polyether ether ketone interbody fusion cage in anterior cervical discectomy and fusion: a systematic review and meta-analysis update[J]. *Exp Ther Med*, 2024, 28(1): 290. DOI: 10.3892/etm.2024.12579.
- [69] 宋瑞鹏, 蔡一鸣, 赵耀, 等. 3D 打印人工椎体用于脊柱肿瘤切除重建的临床效果[J]. *中华实验外科杂志*, 2023, 40(9): 1863-1865. DOI: 10.3760/cma.j.cn421213-20230301-01058.
- [70] Wei F, Xu N, Li Z, et al. A prospective randomized cohort study on 3D-printed artificial vertebral body in single-level anterior cervical corpectomy for cervical spondylotic myelopathy[J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(17): 1070. DOI: 10.21037/atm-19-4719.
- [71] 李玉伟, 李修智, 谷世锋, 等. 自稳定零切迹 3D 打印人工椎体在颈椎后纵韧带骨化症治疗中的应用观察[J]. *中华医学杂志*, 2024, 104(7): 526-532. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20230801-00128.
- [72] Cao Y, Yang N, Wang S, et al. The application of 3D-printed auto-stable artificial vertebral body in en bloc resection and reconstruction of thoracolumbar metastases[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 638. DOI: 10.1186/s13018-023-04135-3.
- [73] Hu P, Du S, Wei F, et al. Reconstruction after resection of C2 vertebral tumors: a comparative study of 3D-printed vertebral body versus titanium mesh[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 1065303. DOI: 10.3389/fonc.2022.1065303.
- [74] Fang T, Zhang M, Yan J, et al. Comparative analysis of 3D-printed artificial vertebral body versus titanium mesh cage in repairing bone defects following single-level anterior cervical corpectomy and fusion[J]. *Med Sci Monit*, 2021, 27: e928022. DOI: 10.12659/MSM.928022.
- [75] 李小康, 石磊, 栗向东, 等. 3D 打印匹配式人工椎体的设计及临床应用短期疗效[J]. *中华骨科杂志*, 2024, 44(6): 354-361. DOI: 10.3760/cma.j.cn121113-20240204-00084.
- [76] Zhou H, Liu S, Li Z, et al. 3D-printed vertebral body for anterior spinal reconstruction in patients with thoracolumbar spinal tumors[J]. *J Neurosurg Spine*, 2022, 37(2): 274-282. DOI: 10.3171/2022.1.SPINE21900.



- [77] Hu X, Kenan S, Cheng M, et al. 3D-printed patient-customized artificial vertebral body for spinal reconstruction after total en bloc spondylectomy of complex multi-level spinal tumors[J]. *Int J Bioprint*, 2022, 8(3):576. DOI: 10.18063/ijb.v8i3.576.
- [78] 戎宏涛, 张雪琴, 朱涛. 3D 打印技术在脊柱外科中的应用进展[J]. *中华神经外科杂志*, 2020, 36(1): 88-90. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-2346.2020.01.022.
- [79] MacLean L, Hersh AM, Bhimreddy M, et al. Comparison of accuracy, revision, and perioperative outcomes in robot-assisted spine surgeries: systematic review and meta-analysis[J]. *J Neurosurg Spine*, 2024, 41(4):519-531. DOI: 10.3171/2024.4.SPINE23917.
- [80] Naik A, Smith AD, Shaffer A, et al. Evaluating robotic pedicle screw placement against conventional modalities: a systematic review and network meta-analysis[J]. *Neurosurg Focus*, 2022, 52(1): E10. DOI: 10.3171/2021.10.FOCUS21509.
- [81] Wu J, Fan M, He D, et al. Accuracy and clinical characteristics of robot-assisted cervical spine surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int Orthop*, 2024, 48(7):1903-1914. DOI: 10.1007/s00264-024-06179-4.
- [82] Naik A, MacInnis BR, Shaffer A, et al. Trends in technology for pedicle screw placement: a temporal meta-analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2023, 48(11): 791-799. DOI: 10.1097/BRS.0000000000004604.
- [83] Al-Naseem AO, Al-Muhannadi A, Ramadhan M, et al. Robot-assisted pedicle screw insertion versus navigation-based and freehand techniques for posterior spinal fusion in scoliosis: a systematic review and meta-analysis[J]. *Spine Deform*, 2024, 12(5): 1203-1215. DOI: 10.1007/s43390-024-00879-y.
- [84] Łajczak P, Ayesha A, Jabbar R, et al. Comparison of accuracy of pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis using freehand fluoroscopic, navigation, and robotic-assisted techniques-a systematic review and bayesian network meta-analysis[J]. *Neurosurg Rev*, 2025, 48(1):257. DOI: 10.1007/s10143-025-03333-3.
- [85] Baldwin KD, Kadiyala M, Talwar D, et al. Does intraoperative CT navigation increase the accuracy of pedicle screw placement in pediatric spinal deformity surgery? A systematic review and meta-analysis[J]. *Spine Deform*, 2022, 10(1): 19-29. DOI: 10.1007/s43390-021-00385-5.
- [86] Shirbache K, Heidarzadeh M, Qahremani R, et al. A systematic review and meta-analysis of radiation exposure in spinal surgeries: comparing C-arm, CT navigation, and O-arm techniques[J]. *J Med Imaging Radiat Sci*, 2025, 56(2): 101831. DOI: 10.1016/j.jmir.2024.101831.
- [87] 李帅, 白胶胶, 贺宝荣, 等. 机器人系统辅助置钉与徒手置钉翻修治疗强直性脊柱炎合并下颈椎骨折的疗效比较: 一项多中心回顾性研究[J]. *中华创伤杂志*, 2025, 41(5): 440-448. DOI: 10.3760/cma.j.cn501098-20250107-00014.
- [88] 苏锴, 姜文涛, 邵哲, 等. O 形臂导航系统辅助与徒手置钉后路椎弓根螺钉内固定治疗成人强直性脊柱炎合并下颈椎骨折的疗效比较[J]. *中华创伤杂志*, 2025, 41(7):645-652. DOI: 10.3760/cma.j.cn501098-20250330-00175.
- [89] Li Y, Liu H, Xue A, et al. Clinical outcome analysis of robot-assisted pedicle screw insertion in the treatment of ankylosing spondylitis complicated with spinal fractures[J]. *World Neurosurg*, 2024, 184: e331-e339. DOI: 10.1016/j.wneu.2024.01.126.
- [90] Wen BT, Chen ZQ, Sun CG, et al. Three-dimensional navigation (O-arm) versus fluoroscopy in the treatment of thoracic spinal stenosis with ultrasonic bone curette: a retrospective comparative study[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(20):e15647. DOI: 10.1097/MD.00000000000015647.
- [91] Wang ZW, Wang Z, Fan XW, et al. Precise surgical treatment of thoracic ossification of ligamentum flavum assisted by O-arm computer navigation: a retrospective study[J]. *World Neurosurg*, 2020, 143: e409-e418. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.07.196.
- [92] Li S, Du J, Wang X, et al. S8 navigation system combined with an ultrasonic osteotome for three-dimensional real-time dynamic visualization decompression to reduce postoperative neurological deterioration in thoracic ossification of the ligamentum flavum[J]. *Eur Spine J*, 2025, 34(3):1004-1017. DOI: 10.1007/s00586-024-08603-0.
- [93] Wu H, Fu YW, Gao ZH, et al. Surgical strategy and application of robotic-assisted benign sacral neurogenic tumor resection[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2023, 24(3):232-241. DOI: 10.1227/ons.0000000000000493.
- [94] Li Z, Jiang S, Song X, et al. Collaborative spinal robot system for laminectomy: a preliminary study[J]. *Neurosurg Focus*, 2022, 52(1): E11. DOI: 10.3171/2021.10.FOCUS21499.
- [95] Kashiwagi N, Sakai M, Tsukabe A, et al. Ultrafast cervical spine MRI protocol using deep learning-based reconstruction: diagnostic equivalence to a conventional protocol[J]. *Eur J Radiol*, 2022, 156: 110531. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110531.
- [96] Gotoh M, Nakaura T, Funama Y, et al. Virtual magnetic resonance lumbar spine images generated from computed tomography images using conditional generative adversarial networks[J]. *Radiography (Lond)*, 2022, 28(2):447-453. DOI: 10.1016/j.radi.2021.10.006.
- [97] Hallinan J, Zhu L, Yang K, et al. Deep learning model for automated detection and classification of central canal, lateral recess, and neural foraminal stenosis at lumbar spine MRI[J]. *Radiology*, 2021, 300(1): 130-138. DOI: 10.1148/radiol.2021204289.
- [98] Lim D, Makmur A, Zhu L, et al. Improved productivity using deep learning-assisted reporting for lumbar spine MRI[J]. *Radiology*, 2022, 305(1): 160-166. DOI: 10.1148/radiol.220076.
- [99] Zhuo Z, Zhang J, Duan Y, et al. Automated classification of intramedullary spinal cord tumors and inflammatory demyelinating lesions using deep learning[J]. *Radiol Artif Intell*, 2022, 4(6):e210292. DOI: 10.1148/ryai.210292.
- [100] Wang W, Fan Z, Zhen J. MRI radiomics-based evaluation of tuberculous and brucella spondylitis[J]. *J Int Med Res*, 2023, 51(8): 3000605231195156. DOI: 10.1177/03000605231195156.
- [101] Sardjono TA, Wilkinson MH, Veldhuizen AG, et al. Automatic Cobb angle determination from radiographic images[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38(20): E1256-E1262. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182a0c7c3.
- [102] Chen Y, Gao Y, Li K, et al. Vertebrae identification and localization utilizing fully convolutional networks and a hidden markov model[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2020, 39(2):387-399. DOI: 10.1109/TMI.2019.2927289.



- [103] Zhu X, He X, Wang P, et al. A method of localization and segmentation of intervertebral discs in spine MRI based on Gabor filter bank[J]. Biomed Eng Online, 2016, 15:32. DOI: 10.1186/s12938-016-0146-5.
- [104] Jamaludin A, Fairbank J, Harding I, et al. Identifying scoliosis in population-based cohorts: automation of a validated method based on total body dual energy x-ray absorptiometry scans[J]. Calcif Tissue Int, 2020, 106(4): 378-385. DOI: 10.1007/s00223-019-00651-9.
- [105] Liawrungrueang W, Kim P, Kotheeranurak V, et al. Automatic detection, classification, and grading of lumbar intervertebral disc degeneration using an artificial neural network model[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(4): 663. DOI: 10.3390/diagnostics13040663.
- [106] Xie J, Yang Y, Jiang Z, et al. MRI radiomics-based decision support tool for a personalized classification of cervical disc degeneration: a two-center study[J]. Front Physiol, 2023, 14:1281506. DOI: 10.3389/fphys.2023.1281506.
- [107] Liu B, Jin Y, Feng S, et al. Benign vs malignant vertebral compression fractures with MRI: a comparison between automatic deep learning network and radiologist's assessment[J]. Eur Radiol, 2023, 33(7): 5060-5068. DOI: 10.1007/s00330-023-09713-x.
- [108] Mukaihata T, Maki S, Eguchi Y, et al. Differentiating magnetic resonance images of pyogenic spondylitis and spinal modic change using a convolutional neural network [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2023, 48(4): 288-294. DOI: 10.1097/BRS.0000000000004532.
- [109] Jo SW, Khil EK, Lee KY, et al. Deep learning system for automated detection of posterior ligamentous complex injury in patients with thoracolumbar fracture on MRI[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 19017. DOI: 10.1038/s41598-023-46208-7.
- [110] Wang YN, Liu G, Wang L, et al. A deep-learning model for diagnosing fresh vertebral fractures on magnetic resonance images[J]. World Neurosurg, 2024, 183: e818-e824. DOI: 10.1016/j.wneu.2024.01.035.
- [111] 严瀚, 刘文锋, 吴梦林, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折 MRI 精准辅助诊断模型的研究[J]. 中华创伤骨科杂志, 2023, 25(1): 64-69. DOI: 10.3760/cma.j.cn115530-20221111-00560.
- [112] 伊力扎提·伊力哈木, 赵坤, 仲海, 等. 脊柱影像学辅助测量系统在腰椎动力位 X 线片分析中的应用效果[J]. 中华外科杂志, 2025, 63(10): 936-941. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20250212-00068.
- [113] Greer H, Gerber S, Niethammer M, et al. Scoliosis screening and monitoring using self contained ultrasound and neural networks[J]. Proc IEEE Int Symp Biomed Imaging, 2018, 2018: 1500-1503. DOI: 10.1109/ISBI.2018.8363857.
- [114] Lee A, Ong W, Makmur A, et al. Applications of artificial intelligence and machine learning in spine MRI[J]. Bioengineering (Basel), 2024, 11(9): 894. DOI: 10.3390/bioengineering11090894.
- [115] Bhavani Sowndharya B, Mathan Muthu CM, Vickram AS, et al. Bio-ethical considerations in the application of artificial intelligence in spinal surgery[J]. Brain Spine, 2025, 5:104161. DOI: 10.1016/j.bas.2024.104161.
- [116] Auloge P, Cazzato RL, Ramamurthy N, et al. Augmented reality and artificial intelligence-based navigation during percutaneous vertebroplasty: a pilot randomised clinical trial[J]. Eur Spine J, 2020, 29(7): 1580-1589. DOI: 10.1007/s00586-019-06054-6.
- [117] Hetherington J, Lessoway V, Gunka V, et al. SLIDE: automatic spine level identification system using a deep convolutional neural network[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2017, 12(7): 1189-1198. DOI: 10.1007/s11548-017-1575-8.
- [118] Pham MH, Hernandez NS, Stone LE. Preoperative robotics planning facilitates complex construct design in robot-assisted minimally invasive adult spinal deformity surgery-A preliminary experience[J]. J Clin Med, 2024, 13(7):1829. DOI: 10.3390/jcm13071829.
- [119] Morbée L, Chen M, Herregods N, et al. MRI-based synthetic CT of the lumbar spine: Geometric measurements for surgery planning in comparison with CT[J]. Eur J Radiol, 2021, 144: 109999. DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.109999.
- [120] Ma C, Zou D, Qi H, et al. A novel surgical planning system using an AI model to optimize planning of pedicle screw trajectories with highest bone mineral density and strongest pull-out force[J]. Neurosurg Focus, 2022, 52(4): E10. DOI: 10.3171/2022.1.FOCUS21721.
- [121] 刘载阳, 冯陈诚, 黄博, 等. 人工智能规划联合计算机导航手术治疗强直性脊柱炎重度复合畸形 1 例[J]. 中华外科杂志, 2023, 61(8): 718-721. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20221125-00496.
- [122] Ames CP, Smith JS, Pellisé F, et al. Development of predictive models for all individual questions of SRS-22R after adult spinal deformity surgery: a step toward individualized medicine[J]. Eur Spine J, 2019, 28(9): 1998-2011. DOI: 10.1007/s00586-019-06079-x.
- [123] Takahashi S, Terai H, Hoshino M, et al. Machine-learning-based approach for nonunion prediction following osteoporotic vertebral fractures[J]. Eur Spine J, 2023, 32(11): 3788-3796. DOI: 10.1007/s00586-022-07431-4.
- [124] Scheer JK, Smith JS, Schwab F, et al. Development of a preoperative predictive model for major complications following adult spinal deformity surgery[J]. J Neurosurg Spine, 2017, 26(6): 736-743. DOI: 10.3171/2016.10.SPINE16197.
- [125] Yagi M, Hosogane N, Fujita N, et al. Predictive model for major complications 2 years after corrective spine surgery for adult spinal deformity[J]. Eur Spine J, 2019, 28(1):180-187. DOI: 10.1007/s00586-018-5816-5.
- [126] Wang KY, Suresh KV, Puvanesarajah V, et al. Using predictive modeling and machine learning to identify patients appropriate for outpatient anterior cervical fusion and discectomy[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2021, 46(10):665-670. DOI: 10.1097/BRS.0000000000003865.
- [127] McGirt MJ, Sivaganesan A, Asher AL, et al. Prediction model for outcome after low-back surgery: individualized likelihood of complication, hospital readmission, return to work, and 12-month improvement in functional disability[J]. Neurosurg Focus, 2015, 39(6): E13. DOI: 10.3171/2015.8.FOCUS15338.
- [128] Khan O, Badhiwala JH, Akbar MA, et al. Prediction of worse functional status after surgery for degenerative cervical myelopathy: a machine learning approach[J]. Neurosurgery, 2021, 88(3): 584-591. DOI: 10.1093/neuros/nyaa477.



- [129] Hopkins BS, Mazmudar A, Driscoll C, et al. Using artificial intelligence (AI) to predict postoperative surgical site infection: a retrospective cohort of 4 046 posterior spinal fusions[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2020, 192: 105718. DOI: 10.1016/j.clineuro.2020.105718.
- [130] Kim JS, Merrill RK, Arvind V, et al. Examining the ability of artificial neural networks machine learning models to accurately predict complications following posterior lumbar spine fusion[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43(12):853-860. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002442.
- [131] Pellisé F, Serra-Burriel M, Smith JS, et al. Development and validation of risk stratification models for adult spinal deformity surgery[J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 31(4):587-599. DOI: 10.3171/2019.3.SPINE181452.
- [132] Karhade AV, Thio Q, Ogink PT, et al. Development of machine learning algorithms for prediction of 30-day mortality after surgery for spinal metastasis[J]. *Neurosurgery*, 2019, 85(1): E83-E91. DOI: 10.1093/neuros/nyy469.
- [133] DiSilvestro KJ, Veeramani A, McDonald CL, et al. Predicting postoperative mortality after metastatic intraspinal neoplasm excision: development of a machine-learning approach[J]. *World Neurosurg*, 2021, 146:e917-e924. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.11.037.
- [134] Kuris EO, Veeramani A, McDonald CL, et al. Predicting readmission after anterior, posterior, and posterior interbody lumbar spinal fusion: a neural network machine learning approach[J]. *World Neurosurg*, 2021, 151:e19-e27. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.02.114.
- [135] 于研, 向卿志, 王聪, 等. SPINEX——脊柱全息智能诊疗平台[J]. *中国临床案例成果数据库*, 2023, 05(1): E00823. DOI: 10.3760/cma.j.cmc.2023.e00823.
- [136] Ji X, Wang Y, Ma Y, et al. Improvement of disease management and cost effectiveness in chinese patients with ankylosing spondylitis using a smart-phone management system: a prospective cohort study[J]. *Biomed Res Int*, 2019, 2019: 2171475. DOI: 10.1155/2019/2171475.
- [137] Dario AB, Moreti Cabral A, Almeida L, et al. Effectiveness of telehealth-based interventions in the management of non-specific low back pain: a systematic review with meta-analysis[J]. *Spine J*, 2017, 17(9): 1342-1351. DOI: 10.1016/j.spinee.2017.04.008.
- [138] Molina-Garcia P, Mora-Traverso M, Prieto-Moreno R, et al. Effectiveness and cost-effectiveness of telerehabilitation for musculoskeletal disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2024, 67(1): 101791. DOI: 10.1016/j.rehab.2023.101791.
- [139] Krein SL, Kadri R, Hughes M, et al. Pedometer-based internet-mediated intervention for adults with chronic low back pain: randomized controlled trial[J]. *J Med Internet Res*, 2013, 15(8):e181. DOI: 10.2196/jmir.2605.
- [140] Hou J, Yang R, Yang Y, et al. The effectiveness and safety of utilizing mobile phone-based programs for rehabilitation after lumbar spinal surgery: multicenter, prospective randomized controlled trial[J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2019, 7(2):e10201. DOI: 10.2196/10201.
- [141] Hossain MS, Harvey LA, Rahman MA, et al. A pilot randomised trial of community-based care following discharge from hospital with a recent spinal cord injury in Bangladesh[J]. *Clin Rehabil*, 2017, 31(6):781-789. DOI: 10.1177/0269215516654207.
- [142] Houlihan BV, Brody M, Everhart-Skeels S, et al. Randomized trial of a peer-led, telephone-based empowerment intervention for persons with chronic spinal cord injury improves health self-management[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2017, 98(6):1067-1076.e1. DOI: 10.1016/j.apmr.2017.02.005.
- [143] Coulter EH, McLean AN, Hasler JP, et al. The effectiveness and satisfaction of web-based physiotherapy in people with spinal cord injury: a pilot randomised controlled trial[J]. *Spinal Cord*, 2017, 55(4): 383-389. DOI: 10.1038/sc.2016.125.
- [144] Hearn JH, Finlay KA. Internet-delivered mindfulness for people with depression and chronic pain following spinal cord injury: a randomized, controlled feasibility trial[J]. *Spinal Cord*, 2018, 56(8): 750-761. DOI: 10.1038/s41393-018-0090-2.
- [145] Debono B, Bousquet P, Sabatier P, et al. Postoperative monitoring with a mobile application after ambulatory lumbar discectomy: an effective tool for spine surgeons[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(11):3536-3542. DOI: 10.1007/s00586-016-4680-4.
- [146] Felbaum DR, Stewart JJ, Anaizi AN, et al. Implementation and evaluation of a smartphone application for the perioperative care of neurosurgery patients at an academic medical center: implications for patient satisfaction, surgery cancelations, and readmissions[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2018, 14(3): 303-311. DOI: 10.1093/ons/oxp112.
- [147] Hatch MN, Martinez RN, Etingen B, et al. Characterization of telehealth use in veterans with spinal cord injuries and Disorders[J]. *PM R*, 2021, 13(10): 1094-1103. DOI: 10.1002/pmrj.12515.
- [148] Lai B, Rimmer J, Barstow B, et al. Teleexercise for persons with spinal cord injury: a mixed-methods feasibility case series[J]. *JMIR Rehabil Assist Technol*, 2016, 3(2):e8. DOI: 10.2196/rehab.5524.
- [149] Wood S, Khong CM, Dirlikov B, et al. Nutrition counseling and monitoring via tele-nutrition for healthy diet for people with spinal cord injury: a case series analyses[J]. *J Spinal Cord Med*, 2022, 45(4): 547-555. DOI: 10.1080/10790268.2021.1871824.
- [150] Dear BF, Nicholson Perry K, Siddall P, et al. The pain course: exploring the feasibility of an internet-delivered pain management programme for adults with spinal cord injury[J]. *Spinal Cord*, 2018, 56(10): 931-939. DOI: 10.1038/s41393-018-0146-3.
- [151] Al-Taleb M, Purcell M, Fraser M, et al. Home used, patient self-managed, brain-computer interface for the management of central neuropathic pain post spinal cord injury: usability study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 128. DOI: 10.1186/s12984-019-0588-7.
- [152] Villiger M, Liviero J, Awai L, et al. Home-based virtual reality-augmented training improves lower limb muscle strength, balance, and functional mobility following chronic incomplete spinal cord injury[J]. *Front Neurol*, 2017, 8:635. DOI: 10.3389/fneur.2017.00635.
- [153] 董佳兴, 王连成, 张金钊, 等. 远程康复联合门诊治疗在轻度青少年特发性脊柱侧凸中的效果研究[J]. *中国全科医学*, 2022, 25(32): 4065-4071. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2022.0418.



- [154] Ho C, Atchison K, Noonan VK, et al. Models of care delivery from rehabilitation to community for spinal cord injury: a scoping review[J]. *J Neurotrauma*, 2021, 38(6): 677-697. DOI: 10.1089/neu.2020.7396.
- [155] Kryger MA, Crytzer TM, Fairman A, et al. The effect of the interactive mobile health and rehabilitation system on health and psychosocial outcomes in spinal cord injury: randomized controlled trial[J]. *J Med Internet Res*, 2019, 21(8):e14305. DOI: 10.2196/14305.
- [156] 杨鑫鑫, 郭清, 王晓迪, 等. 近十年我国可穿戴设备在健康管理领域的研究现状及发展趋势[J]. *中国全科医学*, 2023, 26(12):1513-1519. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2022.0814.
- [157] Loske S, Nüesch C, Byrnes KS, et al. Decompression surgery improves gait quality in patients with symptomatic lumbar spinal stenosis[J]. *Spine J*, 2018, 18(12):2195-2204. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.04.016.
- [158] Castillo-Escario Y, Kumru H, Ferrer-Lluis I, et al. Detection of sleep-disordered breathing in patients with spinal cord injury using a smartphone[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(21):7182. DOI: 10.3390/s21217182.
- [159] Lee SI, Champion A, Huang A, et al. Identifying predictors for postoperative clinical outcome in lumbar spinal stenosis patients using smart-shoe technology[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 77. DOI: 10.1186/s12984-017-0288-0.
- [160] Bazzarelli M, Durdle N, Lou E, et al. A wearable networked embedded system for the treatment of scoliosis[J]. *Stud Health Technol Inform*, 2002, 91:383-386.
- [161] Mobbs RJ, Katsinas CJ, Choy WJ, et al. Objective monitoring of activity and Gait Velocity using wearable accelerometer following lumbar microdiscectomy to detect recurrent disc herniation[J]. *J Spine Surg*, 2018, 4(4):792-797. DOI: 10.21037/jss.2018.12.02.
- [162] Fonseka RD, Natarajan P, Maharaj MM, et al. Two-year continuous data capture using a wearable sensor to remotely monitor the surgical spine patient: a case report [J]. *J Spine Surg*, 2022, 8(1): 170-179. DOI: 10.21037/jss-21-89.
- [163] Zhao F, Balthazaar S, Hiremath SV, et al. Enhancing spinal cord injury care: using wearable technologies for physical activity, sleep, and cardiovascular health[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2024, 105(10):1997-2007. DOI: 10.1016/j.apmr.2024.06.014.
- [164] Matheve T, Brumagne S, Demoulin C, et al. Sensor-based postural feedback is more effective than conventional feedback to improve lumbopelvic movement control in patients with chronic low back pain: a randomised controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 85. DOI: 10.1186/s12984-018-0423-6.
- [165] Ribeiro DC, Sole G, Abbott JH, et al. The effectiveness of a lumbopelvic monitor and feedback device to change postural behavior: a feasibility randomized controlled trial[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2014, 44(9):702-711. DOI: 10.2519/jospt.2014.5009.
- [166] Master H, Coronado RA, Whitaker S, et al. Combining wearable technology and telehealth counseling for rehabilitation after lumbar spine surgery: feasibility and acceptability of a physical activity intervention[J]. *Phys Ther*, 2024, 104(2)DOI: 10.1093/ptj/pzad096.
- [167] Miller DJ, Franzone JM, Matsumoto H, et al. Electronic monitoring improves brace-wearing compliance in patients with adolescent idiopathic scoliosis: a randomized clinical trial[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(9):717-721. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31822f4306.
- [168] Brinkemper A, Grasmücke D, Yilmaz E, et al. Influence of locomotion therapy with the wearable cyborg hal on bladder and bowel function in acute and chronic SCI patients[J]. *Global Spine J*, 2023, 13(3): 668-676. DOI: 10.1177/21925682211003851.
- [169] Wang Y, Zhou H, Yang Z, et al. An intelligent wearable device for human's cervical vertebra posture monitoring [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2018, 2018: 3280-3283. DOI: 10.1109/EMBC.2018.8512896.
- [170] Popp WL, Schneider S, Bär J, et al. Wearable sensors in ambulatory individuals with a spinal cord injury: from energy expenditure estimation to activity recommendations[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 1092. DOI: 10.3389/fneur.2019.01092.
- [171] 施杰洪, 王荣丽, 王宁华. 动态脊柱支撑机器人在脊髓损伤后躯干控制评定中的初步应用研究[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2024, 46(1): 38-43. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.01.008.
- [172] Jang TG, Choi SH, Yu SH, et al. Exoskeleton-assisted gait training in spinal disease with gait disturbance[J]. *Korean J Neurotrauma*, 2022, 18(2): 316-323. DOI: 10.13004/kjnt.2022.18.e25.
- [173] Kubota S, Kadone H, Shimizu Y, et al. Robotic shoulder rehabilitation with the hybrid assistive limb in a patient with delayed recovery after postoperative c5 palsy: a case report[J]. *Front Neurol*, 2021, 12:676352. DOI: 10.3389/fneur.2021.676352.
- [174] Soma Y, Kubota S, Kadone H, et al. Postoperative acute-phase gait training using hybrid assistive limb improves gait ataxia in a patient with intradural spinal cord compression due to spinal tumors[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58(12): 1825. DOI: 10.3390/medicina58121825.
- [175] Fujii K, Abe T, Kubota S, et al. The voluntary driven exoskeleton hybrid assistive limb (HAL) for postoperative training of thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament: a case report[J]. *J Spinal Cord Med*, 2017, 40(3): 361-367. DOI: 10.1080/10790268.2016.1142056.
- [176] Stewart JJ, Fayed I, Henault S, et al. Use of a smartphone application for spine surgery improves patient adherence with preoperative instructions and decreases last-minute surgery cancellations[J]. *Cureus*, 2019, 11(3):e4192. DOI: 10.7759/cureus.4192.
- [177] 陈敏, 周冰华, 吴正艳. 互联网+延伸性护理对腰椎间盘突出症患者康复锻炼依从性及功能改善的影响[J]. *国际护理学杂志*, 2024, 43(16): 3056-3060. DOI: 10.3760/cma.j.cn221370-20230427-00713.
- [178] Sandal LF, Bach K, Øverås CK, et al. Effectiveness of App-delivered, tailored self-management support for adults with lower back pain-related disability: a selfback randomized clinical trial[J]. *JAMA Intern Med*, 2021, 181(10): 1288-1296. DOI: 10.1001/jamainternmed.2021.4097.
- [179] Ponder M, Ansah-Yeboah AA, Charalambous LT, et al. A smartphone App with a digital care pathway for patients undergoing spine surgery: development and feasibility study[J]. *JMIR Perioper Med*, 2020, 3(2): e21138. DOI:



- 10.2196/21138.
- [180] 李文敏, 吴杨宇娟, 胡紫木, 等. 我国互联网医院的可及性与诊疗服务质量评价[J]. 中华医院管理杂志, 2024, 40(4): 286-291. DOI: 10.3760/cmaj.cn111325-20231008-00203.
- [181] Totala P, Janu V, Sharma RK, et al. Telemedicine in follow-up after spine surgery: need of the hour[J]. Asian J Neurosurg, 2024, 19(2): 263-269. DOI: 10.1055/s-0044-1787082.
- [182] Glauser G, Ali ZS, Gardiner D, et al. Assessing the utility of an IoS application in the perioperative care of spine surgery patients: the NeuroPath Pilot study[J]. Mhealth, 2019, 5:40. DOI: 10.21037/mhealth.2019.09.01.
- [183] Nadal C, Sas C, Doherty G. Technology acceptance in mobile health: scoping review of definitions, models, and measurement[J]. J Med Internet Res, 2020, 22(7): e17256. DOI: 10.2196/17256.
- [184] Bai MY, Mobbs RJ, Walsh WR, et al. mHealth Apps for enhanced management of spinal surgery patients: a review[J]. Front Surg, 2020, 7: 573398. DOI: 10.3389/fsurg.2020.573398.
- [185] 吴孝琦, 罗飞, 史凡凡, 等. 移动健康在慢性肌肉骨骼疼痛患者自我管理中的应用进展[J]. 中华老年骨科与康复电子杂志, 2024, 10(4): 251-256. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2024.04.009.
- [186] De La Cruz Monroy M, Mosahebi A. The use of smartphone Applications (Apps) for enhancing communication with surgical patients: a systematic review of the literature[J]. Surg Innov, 2019, 26(2): 244-259. DOI: 10.1177/1553350618819517.
- [187] Riewruja K, Tanasansomboon T, Yingsakmongkol W, et al. A network meta-analysis comparing the efficacy and safety of pedicle screw placement techniques using intraoperative conventional, navigation, robot-assisted, and augmented reality guiding systems[J]. Int J Spine Surg, 2024, 18(5): 551-570. DOI: 10.14444/8618.
- [188] Reinhold M, Asal C, Driesen T, et al. Learning effectiveness of clinical anatomy and practical spine surgery skills using a new VR-based training platform[J]. Brain Spine, 2024, 4: 102826. DOI: 10.1016/j.bas.2024.102826.
- [189] Ermawan R, Corrigan H, Wiyono N. Current update and trend of 3D printing in spinal surgery: a bibliometric analysis and review of literature[J]. J Orthop, 2024, 50: 22-28. DOI: 10.1016/j.jor.2023.11.054.
- [190] 黄秋, 闫冰, 王永才, 等. 3D 打印骨骼模型在基层医院骨科实习教学中的应用初探[J]. 中华医学教育探索杂志, 2017, 16(11): 1159-1163. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-1485.2017.11.018.
- [191] 冯世庆. 脊柱外科人工智能研究发展的机遇与挑战[J]. 中华医学杂志, 2024, 104(37): 3459-3464. DOI: 10.3760/cmaj.cn112137-20240410-00840.
- [192] Padela AI, Hayek R, Tabassum A, et al. Assisting, replicating, or autonomously acting? An ethical framework for integrating ai tools and technologies in healthcare[J]. Bioethics, 2026, 40(1): 52-60. DOI: 10.1111/bioe.70019.
- [193] Deivayanai VC, Swaminaathanan P, Vickram AS, et al. Transforming healthcare: the impact of artificial intelligence on diagnostics, pharmaceuticals, and ethical considerations-a comprehensive review[J]. Int J Surg, 2025, 111(7): 4666-4693. DOI: 10.1097/JIS.0000000000002481.
- [194] Tian H, Zhao J, Sun Y, et al. Dynamic bone recognition for robotic vertebral plate cutting via unit energy consumption and SVM optimized by PSO[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 16378. DOI: 10.1038/s41598-025-01576-0.
- [195] Sharma S, Pahuja S, Gupta V, et al. 3D printing for spine pathologies: a state-of-the-art review[J]. Biomed Eng Lett, 2023, 13(4): 579-589. DOI: 10.1007/s13534-023-00302-x.

·读者·作者·编者·

## 关于参考文献著录格式要求

参考文献著录格式基本参照此行 GB/T7714-2015《信息与文献参考文献著录规则》, 采用顺序编码制著录, 依照文献在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字加方括号标出。将参考文献按引用先后顺序(用阿拉伯数字标出)全部排列于文末。参考文献中的作者, 1~3 名全部列出, 3 名以上只列前 3 名, 后加“等”或其他与之相应的文字, 如“et al.”。著录作者姓名时将姓放在前, 名缩写放在姓后面。外文期刊名称用缩写, 以《Index Medicus》中的格式为准; 中文期刊用全名。每条参考文献均需著录起止页码。文献题名项后需标注文献类型标志项目。作者必须将参考文献与其原文核对无误。举例如下。

- [1] 孙宏斌, 夏术阶, 唐孝达. 前列腺移行带和外周带差异基因表达研究[J]. 中华医学杂志, 2005, 85(9): 610-613. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2005.09.012.(期刊格式)
- [2] Collins FS, Varmus H. A new initiative on precision medicine[J]. N Engl J Med, 2015, 372(9): 793-795. DOI: 10.1056/NEJMp1500523.(期刊格式)
- [3] 汪敏刚. 支气管哮喘[M]/戴自英. 实用内科学. 8 版. 北京: 人民卫生出版社, 1991: 833-840.(专著中析出文献格式)
- [4] Sodeman WA Jr, Sodeman WA. Pathologic physiology: mechanisms of disease[M]. 8th ed. Philadelphia: Saunders, 1974: 457-472.(书籍格式)

(本刊编辑部)

