

人工智能辅助参与牙体牙髓基础与临床研究

王祝愉 权晶晶

中山大学附属口腔医院, 光华口腔医学院, 广东省口腔医学重点实验室, 广东省口腔疾病临床医学研究中心, 广州 510055

通信作者: 权晶晶, Email: quanjj3@mail.sysu.edu.cn

【摘要】 人工智能(AI)技术正在深刻改变牙体牙髓病学的基础与临床研究范式。在基础研究中, AI通过高精度影像分割、多模态数据整合与生物信息学分析, 助力科研人员深入探索牙髓牙本质复合体的结构特征、生物学机制及疾病发生、发展规律。在临床研究中, AI优化了研究设计、疾病诊断与治疗结局预测全过程, 提升了研究的科学性、效率与可重复性。尽管AI在数据质量、算法可解释性和跨学科融合等方面仍面临挑战, 但其作为“科研协作者”的潜力日益凸显, 有望推动牙体牙髓病学迈向更精准、高效与创新的研究新阶段。

【关键词】 人工智能; 牙体牙髓病学; 科研模式变革; 基础研究; 临床研究

引用著录格式: 王祝愉, 权晶晶. 人工智能辅助参与牙体牙髓基础与临床研究[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2026, 20(1):25-33.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.01.004

Artificial intelligence-assisted basic and clinical research in endodontics

Wang Zhuyu, Quan Jingjing

Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangdong Provincial Clinical Research Center of Oral Diseases, Guangzhou 510055, China

Corresponding author: Quan Jingjing, Email: quanjj3@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Artificial intelligence (AI) is profoundly transforming the paradigms of basic and clinical research in endodontics. In basic research, AI facilitates the in-depth exploration of the structural characteristics, biological mechanisms, and disease pathogenesis of the pulp-dentin complex through high-precision image segmentation, multimodal data integration, and bioinformatics analysis. In clinical research, AI optimizes the entire process of study design, disease diagnosis, and treatment outcome prediction, enhancing the scientific rigor, efficiency, and reproducibility of research. Despite challenges related to data quality, algorithm interpretability, and interdisciplinary integration, AI's potential

as a "research collaborator" is increasingly evident, promising to advance endodontics into a new era of more precise, efficient, and innovative research.

【Key words】 Artificial intelligence; Endodontics; Research paradigm shift; Basic research; Clinical research

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.01.004

人工智能(artificial intelligence, AI)正在从根本上改变牙体牙髓病学的研究范式。传统研究方法受限于样本量不足、主观偏差和分析效率低下等问题。AI技术通过强大的数据处理能力、模式识别能力和预测建模能力, 正成为科研人员探索牙体牙髓复杂生物学机制和优化临床研究设计的强大工具^[1]。

当前AI应用模型主要涵盖三大方向:(1)机器学习与深度学习模型。包括传统机器学习模型(如逻辑回归、随机森林、梯度提升决策树和无监督聚类等), 以及深度学习架构[如卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、稠密连接网络、径向基函数神经网络、生成对抗网络、Transformer和自编码器等], 用于影像分割、疾病分类和预后预测等感知与决策任务。(2)大语言模型(large language model, LLM)。基于Transformer的大规模预训练语言模型, 具备文本理解、生成与推理能力, 可用于文献分析、知识抽取与文本辅助生成, 常与检索增强生成技术结合以提升准确性。(3)智能体系统。在LLM或规划算法基础上集成任务编排、工具调用能力的自动化系统, 可用于数字化设计-制造等复杂研究流程的辅助执行。此外, AI常与定量构效关系、网络药理学、分子对接和有限元分析等计算方法结合, 形成多模态分析范式, 进一步拓展其在机制探索与临床优化中的应用边界。

AI驱动的科研范式通过数据、算力和算法的深度耦合, 深度嵌入科学研究的全过程, 引发科研流程、思考逻辑和组织模式的深刻变革^[2]。这种变革使研究人员能够更高效地处理以往复杂的科学问题, 如牙髓炎的分子网络调控机制、根管形态多样性及各类疑难临床研究等^[3]。基础研究方面, AI赋能科研人员从海量影像数据、分子生物学数据和临床数据中提取前所未有的洞察, 加速对牙髓牙本质复合体生物学特性、再生潜力、牙体牙髓疾病发生与修复机制的研究^[4]。在临床研究领域, AI技术不仅优化了研究设计与实施流程, 还通过智能数据分析客观了诊疗标准, 提升了治疗结局的预

测精度,为循证牙体牙髓病学提供新的方法论支撑^[5]。

同时,本综述也将系统阐述AI技术具体如何助力牙体牙髓领域科研,涵盖从微观机制探索到宏观研究实施的各个环节,并展望AI驱动下的牙体牙髓研究未来发展方向。

一、人工智能驱动牙体牙髓科研模式变革

1. 自动化文献分析:牙体牙髓病学研究高度依赖对现有证据的系统梳理,涉及证据链构建、研究空白识别、机制假设提炼及研究设计要素提取与追踪。传统文献检索面临检索体量大、筛选耗时和跨学科知识整合困难等痛点。AI作为辅助工具,可大幅提升信息获取与结构化整理的效率,但其在证据质量评估及结论边界界定方面仍需研究者主导。

自动化文献分析的输入数据通常来源于学术数据库(如PubMed、Web of Science等)的检索结果,包括文献元数据、摘要、全文文本、引文网络、MeSH主题词及作者与机构信息。这些数据经预处理后,用于提取特定基因/蛋白质、病因/治疗方法等研究主体及其关联关系(如调控、抑制和促进等)。

LLM在文献分析中承担的主要任务包括:(1)检索与初筛辅助。基于语义相似度快速定位相关文献。(2)信息抽取与结构化汇总。从全文提取研究目的、方法、结果和结论等要素。(3)关系抽取与知识组织。识别实体间的相互作用,构建领域知识图谱。(4)综述草稿生成。基于结构化信息自动生成文献综述初稿。

已有平台集成了上述 workflow。“无相智研”科研大模型平台专为高效文献检索与跨学科整合设计,具有较高的文献关键信息抽取精确率,覆盖医疗、生物医药、先进材料、能源和高端制造等多个领域,可提供垂直类模型与定制化解决方案。智能知识图谱构建技术能够自动从科学文献中提取主体及其关联,形成结构化的知识网络,这种能力使研究人员能够快速筛选前人已有研究内容,识别现阶段知识空白,发现新研究方向,预估潜在的作用机制,加速科学发现进程^[6]。万方数据推出的“数源AI学术研究平台”(https://airead.wanfangdata.com.cn/homepage),能基于所选主题或文献集合,自动撰写结构清晰的文献综述,大幅减少了文献梳理阶段的耗时,有效辅助了课题立项与论文写作。但平台生成内容因LLM存在一定的幻觉率,故其原创性与创新性仍需专家把关。

2. 智能实验设计:AI正推动牙体牙髓研究的实验设计

从试错模式向预测性设计转变。在水凝胶、复合树脂等材料研发,生物活性因子等分子筛选及治疗方案优化等场景中,AI能基于已有知识预测最优实验路径,从而减少盲目实验,提升资源利用效率。

实验设计依赖高质量的先验数据,AI可高效检索-集成-分析此类数据,包括材料物化性质数据、化合物分子描述符、基因组学数据,以及如参数、方法、结果等历史实验记录 and 临床前研究数据等。

基于以上数据,AI可通过多种模型辅助实验设计:(1)逻辑回归。通过对特征进行线性组合,分析分子描述符与指纹。(2)随机森林。用于分析复杂材料成分数据,预测材料性能。(3)梯度提升(XGBoost)决策树。用于预测材料在环境下的性能变化或分析降解产物。(4)定量构效关系(QSAR)模型。通过建立单靶点及多靶点QSAR模型,预测并分析材料的生物活性关键因素。

已有研究展示了AI在实验智能设计与材料性能预测方面的效能。在水凝胶类新材料的研发中,AI系统可通过分析已知分子的描述符与指纹,预测其凝胶形成能力或自组装行为,从而指导研究人员聚焦最有潜力的候选分子。Li等^[7]构建机器学习模型预测核苷衍生物的水凝胶形成能力,测试准确率达71%,从PubChem筛选的12种分子中有10种成功形成水凝胶,这种计算优先的筛选模式显著降低了实验成本与时间。在复合树脂材料的成分优化方面,AI模型可分析材料成分与性能之间的复杂关系,快速识别关键影响因素。Li等^[8]利用随机森林等算法建立的模型,成功预测了树脂复合材料块的抗弯强度,并确定填料含量和三乙二醇二甲基丙烯酸酯(TEGDMA)是影响强度的最关键特征。同样,Wang等^[9]应用机器学习算法有效预测了粘接剂的微拉伸粘接强度,并识别出10-甲基丙烯酰基癸基磷酸酯(MDP)、pH值等主要影响因素。这种数据驱动的成分解析为材料配方优化提供了新思路。此外,在材料性能预测领域,AI技术展现出广泛潜力。Suryawanshi等^[10]利用XGBoost等机器学习模型,成功预测了树脂复合材料在特定环境下的磨损特性。Halder等^[11]建立了包含138种化合物的多靶点QSAR模型,较好地揭示了导致丙烯酸单体较高细胞毒性的潜在关键结构和物理化学因素,也有助于新单体的实验设计与筛选(表1)。

表1 人工智能(AI)在实验智能设计与材料性能预测中的应用

应用领域	AI技术	实施方式	效能体现	研究价值
水凝胶分子筛选	逻辑回归、随机森林等	基于分子描述符与指纹构建QSAR预测模型	核苷衍生物成胶能力的模型准确率71% ^[7]	加速功能性水凝胶材料的发现
复合树脂成分优化	随机森林、梯度提升等	分析材料成分数据,预测力学性能并识别关键特征	识别影响粘接剂 μ TBS的4种关键成分 ^[9]	明确材料成分-性能关系,指导针对性配方改进
材料老化与性能预测	XGBoost、多层感知机等	基于实验数据训练模型,预测材料在特定环境下的性能变化	成功预测复合材料磨损特性 ^[10]	预测材料长期性能,评估安全风险
单体毒性预测	QSAR等	建立单靶点及多靶点QSAR模型,分析结构与毒性关系	揭示了细胞毒性的关键结构物化因素 ^[11]	辅助生物相容性设计与筛选

注: XGBoost为梯度提升; QSAR为定量构效关系; μ TBS为微拉伸粘接强度。

3. 精确数据挖掘:精确数据融合分析是AI赋能科研的重要方向。面对牙体牙髓研究产生的多模态、高通量数据, AI能够挖掘其中隐藏的复杂模式与非预期关联,推动知识发现。这有助于识别新的生物标志物、治疗靶点,或揭示疾病发生与治疗反应的未知机制。然而,数据来源异质性强与标注标准不统一是一项重要挑战。

AI精确挖掘的对象包括影像数据[锥形束CT(cone-beam computed tomography, CBCT)、显微CT等]、组学数据(基因组、转录组和蛋白组等)、临床数据(电子病历、随访记录等)及实验测量数据等。其中,多模态数据的对齐与融合是挖掘深度关联的关键。

在精确数据挖掘中,核心AI任务包括:(1)多模态数据融合分析。利用深度学习模型整合异源数据,发现跨尺度关联。(2)无监督学习与异常检测。在无预先假设下发现数据中的新亚型或异常模式。(3)自动化假设生成:基于数据与知识图谱,推理出可检验的科学假设。(4)科研趋势预测。分析文献动态,预测领域未来热点。

研究表明, AI在根管预备中可综合分析镍钛器械机械性能与根管解剖形态,挖掘出对应的临床操作最佳参数。Guo等^[12]在器械直径、根管宽度和进给速度这些显著因素基础上扩大数据范围,并建立起径向基函数神经网络,用以预测根管预备过程中的需设置的推力和扭矩,结果显示误差小于14%。这种跨尺度数据分析能力极大拓展了科研人员的认知边界。在根管治疗大数据分析中, AI可挖掘关键信息进行分析与预测。Herbst等^[13]使用机器学习发现,牙槽骨丧失与根管治疗失败率升高显著关联,其风险比高达6.48,提示牙周组织的状态对根管治疗预后具有重要影响,这一在传统假设(根管形态、充填质量、根尖病变大小等)驱动研究中易被忽略的发现,为临床难度评估提供了新视角。Campo等^[14]构建了以贝叶斯网络为主体,基于案例推理的CBR系统,该系统可在病例库中挖掘与新病例最匹配的记录,并在此基础上结合新病例的特征进行分析,从而预测其根管再治疗的结果与风险。此外有研究表明,基于大规模文献分析和实验数据挖掘, AI可生成可检验的科学预测与假设^[15]。Yadalam等^[16]利用生成式AI挖掘预测了影响牙髓干细胞存活的核心基因集,主要包括调控核转录因子 κ B(nuclear transcription factor-kappa B, NF- κ B)和肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)信号通路的RPS29、RPS16、RPL18等。AI自编码器实现了76.92%的准确率,精确率-召回率曲线下面积(area under curve, AUC)为0.92,展示了自编码器在预测牙髓炎症和再生中相关枢纽基因的潜在应用价值,为靶向性再生策略提供了分子靶点。

二、人工智能在牙体牙髓基础研究中的应用

1. 解剖结构研究的智能突破:精准量化牙齿及其周围结构的解剖特征是理解牙髓牙本质复合体生物学特性、评估治疗风险的基础。传统人工标注方法效率低、一致性差。AI实现了对CBCT、显微CT等影像中复杂解剖结构的高通量、高精度分割与三维重建。

此类研究的数据主要为CBCT等三维医学影像,但需由专家对牙齿、根管、上颌窦和下颌神经管等目标结构进行像素级标注,形成训练集。然而,数据质量与标注一致性直接影响模型性能。

在此影像数据基础上, AI主要采用基于CNN的语义分割模型(如U-Net及其变体)。这些模型能自动识别并勾画影像中的目标解剖结构。引入注意力模块可提升对细微结构的分割精度。

李成业等^[17]的研究构建了融合卷积注意力模块的U-Net深度学习模型,用于分割CBCT影像中的上颌窦与上颌后牙结构。该模型通过关注特征图中的重要通道和空间位置,提升了解剖结构分割的精确度,上颌窦与上颌后牙的Dice系数分别达0.90与0.83。这种高精度分割能力使研究人员能够高效构建大规模牙齿与周围解剖结构的三维模型,为研究上颌后牙根尖与上颌窦的复杂解剖关系提供了可靠的技术基础。在根管解剖研究中, Karobari等^[18]综述指出,深度学习算法能自动识别并分类CBCT影像中的复杂根管形态,如C形根管、额外根管等变异,不同系统的敏感性为67.3%~97.1%, AUC最高达0.98。这种能力使研究人员能够在大量人群中系统研究根管形态的种族差异、性别差异及其与治疗难度的关联,并为其牙髓牙本质复合体生物学特性的个性化研究提供解剖学依据^[19-20]。

2. 疾病机制研究的新型方法: AI通过整合宏观影像与微观分子数据,为揭示龋病、牙髓炎等疾病的发病与进展机制提供了新视角。它能够连接临床表型与分子表型,发现关键通路与生物标志物。

此类研究数据来源多样,主要包括牙齿表面高光谱影像、组织病理切片、分子检测数据(如RNA-seq、蛋白质芯片等)及临床指标等。同样,多模态数据的对齐与融合仍是关键挑战。

在此类数据基础上, AI主要应用包括:(1)高光谱图像分析。利用轻量级CNN对牙齿表面逐像素分类,识别对应区域。(2)病理图像定量分析。自动量化炎症细胞浸润、胶原排列等。(3)多组学数据整合。使用深度学习挖掘基因表达与临床结局的关联网。

同济大学研究团队开发的新型快速诊断方法,通过采集牙齿表面的高光谱数据立方体,利用逐像素识别网络实现了对牙釉质、牙结石和龋齿病变的高效光谱分类^[21]。该方法准确率达到了(99.77 \pm 0.15)%,并能检测出人工标注难以界定的牙结石-龋损共生界面。这种技术使研究人员能够从光谱特征角度研究龋病进展的微观变化,为探索早期龋的矿化动力学提供了新工具。牙髓炎症研究中, AI通过分析临床表现与影像特征,能够自动分类牙髓炎严重程度,为研究不同炎症阶段的牙髓生物学反应提供了标准化工具。Sherif等^[22]开展的随机对照试验利用基于CNN的深度学习模型,评估牙髓炎患牙进行活髓切断术的成功率,并探索伴有根尖周炎的重度牙髓炎患牙保存活髓治疗的可能性,这为更客观高效研究牙髓在炎症状态下的修复机制提供了临床证据。AI驱

动的分子机制研究进一步拓展了疾病机制的探索深度。通过深度学习模型分析基因表达数据,研究人员能够识别干细胞分化、牙本质形成、牙髓炎症过程中的关键基因和信号通路,如通过深度学习分析牙髓炎单细胞 RNA-seq 数据,可识别介导炎症向修复转换的关键细胞亚群,并发现关键基因 *PRKCB*、*GSDMD*、*ARMCX3* 和 *CASP3* 参与中性粒细胞胞外陷阱形成和 MAPK 信号通路^[23]。

3. 生物材料与组织工程的创新研究: AI 加速了牙体牙髓修复与再生材料的研发流程,涵盖从分子筛选、材料设计、性能预测到组织工程优化的全过程。但其在上下游通路及因果逻辑等方面,仍需研究者研判。

此类研究依赖于材料科学(如化学成分、力学性能等)数据库、化合物库、生物活性(如细胞毒性、促成骨/牙本质分化能力等)数据集及组织工程构建体的显微影像与功能检测数据。

在此类数据基础上, AI 的关键技术包括: (1) 机器学习。预测材料性能, 建立材料成分-结构-性能关系模型。 (2) 网络药理学与分子对接。筛选具有特定生物活性的分子。 (3) 生成对抗网络。设计新型高分子或支架结构。 (4) 深度学习。优化支架孔隙结构, 提升牙髓再生构建体的成功率与功能性。

在生物材料开发上, AI 机器学习算法可通过分析材料化学成分与物理性能之间的关系, 预测新型生物材料的性能, 加速材料研发过程。Li 等^[24]成功开发了一种超分子 Ag-isoG 水凝胶, 其不仅可快速成胶以填补根管中器械无法到达的位置, 还具有热稳定性、显著的抗菌活性和较低的细胞毒性, 且易于去除。此外, Li 等^[25]利用 AI 模型, 建立了一种从化学结构预测水凝胶形成能力的方法, 并验证了其在实际生物培养中的有效性, 为后续智能开发功能性水凝胶提供了新范式。基于支架的预血管化技术是牙髓再生的研究热点, AI 技术可通过分析血管生成与干细胞活性的复杂关系, 优化预血管化支架的设计参数。Bukač 等^[26]利用 AI 算法优化支架

的拓扑结构, 提升了支架内部营养物质传输效率, 为预血管化牙髓再生提供了理论设计工具。在牙髓组织工程领域, 基于生成式设计与机器学习, AI 可生成具有目标孔隙率、机械强度和生物相容性的支架结构, 优化细胞附着与组织再生微环境^[27]。研究证实, AI 可自动识别干细胞分化状态、 β -半乳糖苷酶等衰老标志, 预测细胞与材料相互作用效果, 实现支架-细胞相互作用的高通量、智能化评估^[28-29]。Bermejillo Barrera 等^[30]发现, AI 还可借助虚拟断层扫描与三维 CNN 等技术, 辅助设计与优化组织工程支架的结构与功能, 为牙髓再生提供新型诱导分子或组合疗法(表 2)。

三、人工智能在牙体牙髓临床研究中的应用

1. 疾病诊疗的客观标准: 诊断标准的客观化与可量化是提升临床研究科学性的核心。AI 通过提供一致、可重复的评估工具, 助力研究人员对比和优化现有诊断标准, 并探索新的分类体系。

此类研究需要大规模、标准标注的诊断数据集, 如按 ICCMS[®]标准标注的龋齿口内扫描数据、按牙髓炎分类标准标注的根尖片或 CBCT 数据及对应的金标准——临床确诊结果。

在此类数据基础上, AI 主要应用包括: (1) 基于 CNN 的病变检测与分割。自动定位并量化龋损、根尖周病变范围。 (2) 分类模型。根据影像特征自动对疾病严重程度进行分类(如牙髓炎可逆/不可逆等)。 (3) 风险预测模型。综合多模态信息预测疾病进展或并发症风险。

AI 对龋病诊断的准确率研究已广泛开展^[31-32]。一项实验将融合注意力模块的 U-Net 深度学习模型应用于口内扫描三维数据的龋齿自动检测, 通过 9 014 张各类图像数据, 检测得, 对成洞龋识别灵敏度和特异度分别为 96.0% 和 97.0%; 对未成洞窝沟龋灵敏度为 95.8%、特异度为 99.0%; 对未成洞邻面龋灵敏度为 88.1%、特异度为 97.1%^[33]。该研究构建的儿童龋人工智能识别系统雏形, 能够在大规模儿童研究中客观评估不同龋病诊断标准的敏感性与特异性, 为龋病诊断学

表 2 人工智能(AI)在生物材料/组织工程研究中的应用

研究方向	AI 技术	数据来源	研究成果	科研意义
抗菌性根管充填材料开发	机器学习	实验合成与表征等	开发出 Ag-isoG 超分子水凝胶, 具有显著抗菌活性, 细胞毒性低 ^[24]	提供一种快速、稳定、抗菌性强且生物相容性好的根管消毒与充填新材料
水凝胶生物材料性能预测	梯度提升、随机森林等	组合化学库、凝胶实验数据等	预测水凝胶形成准确率达 62%; 识别出 Fmoc-氨基酸等关键结构特征与凝胶能力相关 ^[25]	建立“化学结构-凝胶性能”预测模型, 加速新型生物材料智能筛选与设计
生物活性分子虚拟筛选	网络药理学、分子对接等	化合物数据库、蛋白质结构数据库、生物活性数据集等	预测分子与靶点相互作用, 筛选具有牙髓保护或再生诱导潜力的生物活性分子 ^[27]	提高药物发现效率, 为牙髓再生提供新型诱导分子或组合疗法
干细胞与材料相互作用分析	卷积神经网络等	干细胞图像数据、基因表达谱、细胞形态与分化标志物等	自动识别干细胞分化状态、衰老标志, 预测细胞与材料相互作用效果 ^[28-29]	实现细胞-材料界面的智能化、高通量分析, 指导材料表面改性与生物功能调控
组织工程支架设计与优化	机器学习、生成对抗网络等	显微 CT、机械性能数据、生物相容性数据库等	生成具有理想机械强度与生物相容性的支架结构, 优化细胞附着于组织再生微环境 ^[30]	实现个性化、功能化支架的智能设计, 促进牙髓再生治疗

的研究提供证据支持。进一步地,郭静等^[34]通过“益生牙kid”AI云平台比较不同设备采集照片的筛查效能,结果显示单反相机与智能手机的AUC分别为0.859和0.849,且AI诊断结果与3名高年资医师诊断共识的Kappa一致性为0.613、0.560,证明了AI辅助诊断工具在标准化临床研究数据采集与评估中的潜力。在牙髓炎诊断中,王丽等^[35]开发了基于DenseNet(稠密连接网络)的模型,通过分析根尖片预测影像学近髓的患牙,实际因已露髓感染而已形成牙髓炎的概率,AUC达0.97,而高年资医师AUC为0.87,Kappa一致性为0.6。该模型不仅辅助治疗决策,更成为研究“影像表现-临床病理状态”关联、从而精炼牙髓炎诊断标准的重要实验工具。在根尖周病变方面,Allihaibi等^[36]的回顾性研究发现,Diagnocat在确定病变状态方面与临床医师表现出高度一致性,总体一致率为89%。

2. 治疗结局预测的模型构建:精准预测如活髓治疗成功率、显微根管手术预后等治疗结局,是实现个性化治疗的基础,也是临床研究的重要终点。AI通过整合多维数据构建预测模型,超越传统单一因素的判断。然而,AI预测依赖数据纳入与精度,且数据注释稍有差异,则精度波动较大。

此类研究数据整合自电子健康记录(患者全身状况、既往史、家族史等)、影像数据(根管形态、病变大小等)、治疗记录(器械、技术和医师经验等)及长期随访结果。

在此类数据基础上,AI广泛应用梯度提升、随机森林和深度学习等模型。这些模型能够处理非线性关系与高阶交互作用,提供个体化不同治疗预后的概率。

在结局预测及辅助决策方面,叶莉等^[37]的综述指出,AI深度学习在牙髓根尖周病的临床诊疗中已经展现出良好应用前景,尤其在利用影像资料进行结构或病变的检测、诊断、分类和分割等方面独具优势。AI能够从大量的口腔影像数据中提取精细的特征,辅助医师作出更精确的诊断和治疗决策。Lu等^[38]的研究发现,AI利用随机森林与梯度提升模型,具有预测牙髓再生治疗预后的潜在能力,2年预后AUC分别为0.86、0.85。一项进行中的研究使用AI检测患有不可逆性牙髓炎并伴有根尖周炎的成熟恒磨牙,并评估对其进行完全活髓切断术的成功率^[22]。这类研究旨在建立基于AI的预后预测模型,明确保髓治疗的适应证,推动治疗理念的革新。AI还用于疗效动态监测,例如通过系列口内扫描图像自动化龋损尺寸变化,或分析CBCT图像评估根尖周骨愈合^[39-40]。

在根管治疗领域,Herbst等^[41]对591例病例进行了长达6个月以上的随访,结果发现,随机森林模型的预测准确率高达95.5%。Qu等^[42]建立并验证了用于显微根管手术预后预测的AI深度学习模型,结果表明,梯度提升模型的预测能力(AUC=0.88),为临床医师帮助患者权衡显微根管手术与其他治疗方案提供了可靠的临床决策支持工具(表3)。

3. 根管预备器械及根管充填材料精进的推手:AI正辅助优化根管治疗核心器械与材料的研发,通过分析临床反馈大数据与模拟计算,改进产品设计以更好地匹配临床需求与解剖现实。然而,临床转化始终是一项巨大挑战,AI研发的产品不仅需和传统工艺相对比,更是需要时间的考验。

此类研究数据主要来源于器械的力学性能测试、疲劳实验、临床器械分离率、口内根管成形效果及大量根管预备后的三维形态扫描数据。

在此类数据基础上,AI应用包括:(1)有限元分析结合AI优化。用于器械截面设计与热处理工艺优化。(2)聚类分析与回归模型。从海量临床数据中归纳医师的操作习惯与偏好。(3)生成式设计。根据理想的根管预备形态反向设计匹配的牙胶尖三维模型。

尽管根管治疗机器人无法像种植手术机器人一样以较为成熟的形式向市场化及临床应用转化,但AI辅助已应用到根管治疗序列步骤如根管预备及根管充填中^[43]。崔晨等^[44]的综述指出,针对根管预备环节,AI不仅在手动及机用预备器械的截面设计、锥度改进和热处理工艺等方面得到广泛应用,通过临床病例反馈的大数据结合AI算法演绎出的最适合中国口腔医师操作习惯的根管预备器械,也在陆续问世之中,但其验证仍需要落实到临床操作中,与现有器械进行切削效率、根管成形和抗疲劳能力等各类性能对比。针对根管充填环节,根管充填目前主要以牙胶及糊剂充填为主,Keith等^[45]的研究揭示了不同厂家镍钛器械与对应牙胶尖之间存在尺寸不匹配问题,这主要源于传统生产工艺的误差。因此,基于AI智能体的牙胶尖数字化设计-制造一体化流程,也在逐步展开,其验证需通过体外实验评估如锥度、直径误差等的匹配精度,并通过如染料渗透法等临床试验比较其根管封闭性能与长期临床成功率。

四、挑战与未来发展方向

1. 数据质量与标准化:AI在牙体牙髓研究中面临的首要挑战是数据质量问题。口腔影像数据来源于不同的设备

表3 人工智能(AI)在临床结局预测中的典型应用

预测类型	AI模型	数据来源	预测精度	临床意义
牙髓再生效果	随机森林等	根管数量、肿胀或窦道和根尖周病变大小等	2年预后准确率0.84,AUC为0.86 ^[38]	再生治疗策略优化
活髓治疗成功率	深度学习	炎症程度、牙髓电测值等	研究进行中 ^[22]	明确活髓治疗新适应证
根管治疗预后	随机森林等	根管形态、病变大小、充填质量和牙周情况等	半年预后准确率95.5% ^[41]	个性化治疗计划制定
根尖手术预后	梯度提升等	牙齿类型、病变大小、骨缺损类型和根管充填密度等	AUC为0.88 ^[42]	优化手术方案与预后咨询

注:AUC为曲线下面积。

制造商、采集参数和分辨率,导致数据异质性强。儿童口内扫描数据质量波动、早期龋损样本不足等问题影响模型泛化能力。解决方案包括开发跨设备兼容算法,并通过迁移学习增强小样本场景下的敏感性^[33]。

数据标注标准不统一是另一重要挑战。不同专家对牙髓炎程度、根管形态分类等可能存在标注差异。建立专家共识标注指南和开发半自动化标注工具是可能的解决路径。此外,牙体牙髓病学专用数据集的缺乏限制了AI模型的训练与验证。构建大规模、高质量、多中心的牙体牙髓病学专用数据集是未来重要发展方向^[46]。

隐私保护与数据共享的平衡是实际应用中的难题。患者医疗数据涉及隐私问题,限制了数据的广泛共享和使用。联邦学习等隐私计算技术可在不集中数据的情况下训练模型,为多中心研究提供可能^[47-48]。例如,中国台北医学大学开发的基于联邦学习的智慧医疗系统,能在保护患者隐私的前提下实现多中心协作^[49]。

2. 算法透明度与可解释性:AI在牙体牙髓研究中的应用还面临算法可解释性挑战。复杂的深度学习模型常被视为“黑箱”,其决策过程难以理解,影响研究结论的可接受性。开发可解释人工智能(explainable AI, XAI)技术,如特征重要性分析、注意力模块可视化等,有助于增强AI决策过程的透明度,使研究人员能够理解、信任和有效利用AI生成的洞察^[50]。

因果推断能力不足是当前AI模型的另一局限。大多数AI模型擅长发现相关性而非因果关系,而医学研究往往需要明确的因果结论。整合因果推断框架与深度学习模型,是提升AI在牙体牙髓病学研究中科学价值的重要方向^[37,51]。

模型泛化能力的限制也需要关注。在特定数据集上训练的AI模型,在不同人群、不同设备采集的数据上性能可能下降。开发更具鲁棒性和泛化能力的算法,是确保AI研究成果能够广泛应用的关键^[52]。

3. 技术整合与人才培养:AI技术与传统研究方法的整合需要进一步探索。如何将AI工具无缝嵌入现有研究流程,实现人机协同的研究模式,是发挥AI最大效用的关键。开发用户友好的AI研究平台,降低技术使用门槛,将促进AI在牙体牙髓病学界被广泛接纳^[53]。

跨学科人才培养是推动AI牙体牙髓病学研究发展的基础。当前同时精通牙体牙髓病学和人工智能的复合型人才严重短缺。设立跨学科培训项目,促进知识交流与技能融合,是培养下一代牙体牙髓病学研究者的必要途径^[54]。

学术评价体系调整也是促进AI在牙体牙髓病学研究中的应用的重要因素。当前学术评价体系可能未能充分认可数据贡献、算法开发等非传统研究成果。建立更加多元化的评价机制,将有助于推动学科交叉融合^[55]。

4. 跨学科可迁移AI方向:当前许多其他医学领域已取得成效的AI应用实例,其具有向牙体牙髓病学研究迁移的潜力。

(1) 临床研究智能体:在中医药领域,已有基于LLM微

调构建的临床研究智能体,能够覆盖证据生产全流程^[56]。可迁移理由在于,牙体牙髓临床研究同样涉及复杂的证据链管理与个性化分析需求。然而,当前缺乏针对牙体牙髓病学知识图谱与专业工作流定制的智能体。因此需先构建领域知识图谱,随后在回顾性研究数据上测试智能体在辅助方案设计、数据提取等方面的准确性与效率,并与传统方法对照。

(2) 临床研究质量控制AI系统:在肿瘤学等领域,AI已用于自动化数据监测、入选标准筛选与多中心一致性评估^[57]。可迁移理由在于,牙体牙髓根管治疗、根尖手术对数据质量与一致性的要求同样严格。然而,当前缺少适配牙体牙髓数据结构的质量控制算法。因此,应在模拟或历史牙体牙髓试验数据上,测试AI系统在识别数据异常、加速受试者筛选等方面的如敏感性、特异性、时间节省等效能指标,并开展前瞻性试点研究。

(3) 多模态临床试验预测平台:如TrialBench平台,能整合多种数据预测试验结局^[58]。可迁移理由在于,牙体牙髓临床试验同样面临患者招募、脱落预测和结局评估等通用挑战。然而,当前缺乏纳入牙体牙髓口内扫描、CBCT等特异性数据模态的标准平台。因此,可尝试将牙体牙髓试验数据映射至现有平台框架,评估其预测任务,如受试者保留率等的性能,并逐步开发牙体牙髓病科扩展模块。

随着此平台功能将来的完善,上述类似技术可能迁移至牙体牙髓病学研究,实现从临床研究设计、病例报告表生成、数据管理到数据统计分析的全链条智能化服务,进一步助力牙体牙髓病学临床研究的开展。

5. 临床转化与落地挑战:从实验室研究到真正融入牙体牙髓病学的临床工作流程,AI仍面临着一系列关键挑战,需要系统性地应对与突破。这些挑战主要包括以下几个方面,它们也常是学界、临床工作者及患者共同关注的焦点。

(1) 临床验证标准尚未统一:目前,AI工具的有效性与其安全性缺乏公认的评估体系,亟需开展前瞻性、多中心和大样本的临床研究,以科学证据明确其在疾病检测、诊断建议和预后预测等方面的非劣效性或优越性。这既是技术落地的科学基础,也是医疗监管和审批的重要依据^[59-60]。

(2) 与传统诊断方法的对比研究尚不充分:必须通过严谨的对照实验,厘清AI相较于现有标准方法的附加价值,明确其最适合的应用场景——是作为辅助筛查工具、诊断决策支持,还是用于治疗规划与效果评估。只有在明确临床效用后,AI才能真正提升诊疗效率与质量^[61]。

(3) 医师与患者的接受度是推广关键:AI并非完全取代医师,而是作为一种辅助工具。医师需理解AI的决策逻辑,建立合理信任,克服使用习惯上的阻力;患者则需对AI参与诊疗过程有知情与认可。这涉及医学教育、人机交互设计以及公众科普等多方面工作^[39]。

(4) 责任界定与伦理框架尚不清晰:当AI辅助决策出现错误或意外后果时,如何界定医师、开发机构和医疗机构之间的责任,目前仍缺乏明确的法律与伦理指引。必须加快建立相应的问责机制与伦理准则,以保障医疗安全与各方

权益^[62]。

(5)患者数据隐私与安全贯穿始终:医疗数据具有高度敏感性,除了上述提到的数据质量与标准化外,AI系统的训练、部署与应用必须符合数据保护法规。技术上可采用联邦学习、加密计算等手段实现数据“可用不可见”;管理上需完善权限控制、审计追踪等制度,在推动技术发展的同时严守患者隐私底线^[47-48]。

因此,AI在牙体牙髓病学乃至整个医疗领域的融合,不仅是一个技术问题,更是涉及临床验证、医患认知、法律伦理及数据治理的系统工程。只有多维度协同推进,才能推动AI从实验走向临床,真正赋能现代医疗。

五、小结

AI技术正深刻变革牙体牙髓病学基础与临床研究的范式。在基础研究中,AI通过高精度影像分割、多模态数据整合和生物信息学分析,赋能科研人员更深入探索牙髓牙本质复合体的结构、生物学机制及疾病规律;在临床研究中,AI优化了研究设计、诊疗评估和结局预测全过程,提升了研究的效率与科学性。

未来,随着高质量数据集构建、可解释AI及隐私计算技术的发展,AI与牙体牙髓研究的融合将更为深入。跨学科平台与人才队伍建设至关重要。面对数据质量、算法透明度及临床转化等多重挑战,需要领域内外的协同努力。

AI并非取代研究者,而是作为强大的“科研协作者”,拓展人类智慧的边界。其人机协同的新模式,有望引领牙体牙髓病学步入一个更加精准、高效与创新的时代。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Lee SJ, Poon J, Jindarojanakul A, et al. Artificial intelligence in dentistry: Exploring emerging applications and future prospects [J]. *J Dent*, 2025, 155: 105648. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.105648.
- [2] 余江,张越,周易. 人工智能驱动的科研新范式及学科应用研究[J]. *中国科学院院刊*, 2025, 40(2):362-370. DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.20230411001.
- [3] Agrawal P, Nikhade P. Artificial intelligence in dentistry: Past, present, and future [J]. *Cureus*, 2022, 14(7): e27405. DOI: 10.7759/cureus.27405.
- [4] Najeeb M, Islam S. Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: Current trends and future prospects [J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25(1):592. DOI:10.1186/s12903-025-05989-1.
- [5] 邓旭亮,徐明明,杜宸临. 人工智能驱动口腔医学:临床、科研、教学与管理的创新探索[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2025, 57(5):821-826. DOI:10.19723/j.issn.1671-167X.2025.05.002.
- [6] Roy A, Grisan E, Buckeridge J, et al. ComProScanner: A multi-agent based framework for composition-property structured data extraction from scientific literature [J/OL]. *arXiv*, 2025. [2025-12-08]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.20362>.
- [7] Li W, Wen Y, Wang K, et al. Developing a machine learning model for accurate nucleoside hydrogels prediction based on descriptors [J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1):2603. DOI:10.1038/s41467-024-46866-9.
- [8] Li H, Sakai T, Tanaka A, et al. Interpretable AI explores effective components of CAD/CAM resin composites [J]. *J Dent Res*, 2022, 101(11):1363-1371. DOI:10.1177/00220345221089251.
- [9] Wang R, Hass V, Wang Y. Machine learning analysis of microtensile bond strength of dental adhesives [J]. *J Dent Res*, 2023, 102(9):1022-1030. DOI:10.1177/00220345231175868.
- [10] Suryawanshi A, Behera N. Prediction of wear of dental composite materials using machine learning algorithms [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2024, 27(3):400-410. DOI:10.1080/10255842.2023.2187671.
- [11] Halder AK, Delgado AHS, Cordeiro MNDS. First multitarget QSAR model for predicting the cytotoxicity of acrylic acidbased dental monomers [J]. *Dent Mater*, 2022, 38(2):333-346. DOI:10.1016/j.dental.2021.12.014.
- [12] Guo W, Wang L, Li J, et al. Prediction of thrust force and torque in canal preparation process using Taguchi method and artificial neural network [J]. *Adv Mech Engin*, 2021, 13(10):1-15. DOI:10.1177/16878140211052459.
- [13] Herbst CS, Schwendicke F, Krois J, et al. Association between patient-, tooth- and treatment-level factors and root canal treatment failure: A retrospective longitudinal and machine learning study [J]. *J Dent*, 2022, 117: 103937. DOI:10.1016/j.jdent.2021.103937.
- [14] Campo L, Aliaga IJ, de Paz JF, et al. Retreatment predictions in odontology by means of CBR Systems [J]. *Comput Intell Neurosci*, 2016:7485250. DOI:10.1155/2016/7485250.
- [15] Tyagin I, Safro I. Dyport: Dynamic importance-based biomedical hypothesis generation benchmarking technique [J]. *BMC Bioinformatics*, 2024, 25(1):213. DOI:10.1186/s12859-024-05812-8.
- [16] Yadalam PK, Krithikadatta J, Natarajan PM, et al. Prediction of hub genes in pulpal inflammation and regeneration using autoencoders and a generative AI approach [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1):26225. DOI:10.1038/s41598-025-12074-8.
- [17] 李成业,易可欣,张茗茗,等. 基于深度学习的上颌窦与上颌后牙CBCT影像的自动分割[J]. *牙体牙髓牙周病学杂志*, 2025, 30(8):443-449. DOI:10.15956/j.cnki.chin.j.conserv.dent.2025.08.002.
- [18] Karobari MI, Adil AH, Mathur A, et al. Applications and clinical translation of artificial intelligence in CBCT-based detection of endodontic lesions: A scoping review [J]. *Oral Radiol*, 2025. DOI:10.1007/s11282-025-00876-5.
- [19] 林超英,张岚,黄定明. 人工智能在根管治疗中的研究进展 [J]. *国际口腔医学杂志*, 2025, 52(5):572-578. DOI:10.7518/gjkq.2025087.
- [20] Santos AO, Fontenele RC, Neves FS, et al. A unique AI-based tool for automated segmentation of pulp cavity structures in

- maxillary premolars on CBCT[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1):5509. DOI:10.1038/s41598-025-86203-8.
- [21] Wang X, Ma Z, Xing Y, et al. Rapid species discrimination of similar insects using hyperspectral imaging and lightweight edge artificial intelligence[J]. *R Soc Open Sci*, 2024, 11(7):240485. DOI:10.1098/rsos.240485.
- [22] Sherif M, Ibrahim E. Success of pulpotomy in molars with pulpitis with periodontitis detected using AI and those without periodontitis [J/OL]. *Clinical Trials*, 2025. <https://ichgcp.net/clinical-trials-registry/NCT06767371>.
- [23] Liu J, Zhang D, Cao Y, et al. Screening of crosstalk and pyroptosis-related genes linking periodontitis and osteoporosis based on bioinformatics and machine learning[J]. *Front Immunol*, 2022, 13:955441. DOI:10.3389/fimmu.2022.955441.
- [24] Li T, Luo Y, Wu S, et al. Super-rapid In Situ formation of a silver ion-induced supramolecular hydrogel with efficient antibacterial activity for root canal disinfection [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(25):29854-29865. DOI:10.1021/acsami.3c03335.
- [25] Li F, Han J, Cao T, et al. Design of self-assembly dipeptide hydrogels and machine learning via their chemical features [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2019, 116(23):11259-11264. DOI:10.1073/pnas.1903376116.
- [26] Bukač M, Čanić S, Muha B, et al. A computational algorithm for optimal design of a bioartificial organ scaffold architectures [J]. *PLoS Comput Biol*, 2024, 20(11):e1012079. DOI:10.1371/journal.pcbi.1012079.
- [27] Saberian E, Jenča A, Jenča A, et al. Applications of artificial intelligence in regenerative dentistry: Promoting stem cell therapy and the scaffold development [J]. *Front Cell Dev Biol*, 2024, 12:1497457. DOI:10.3389/fcell.2024.1497457.
- [28] Leya W, Lee BS, Imboden S, et al. Phenotyping senescent mesenchymal stromal cells using AI image translation [J]. *Curr Res Biotechnol*, 2023, 5:100120. DOI:10.1016/j.crbiot.2023.100120.
- [29] Waisman A, La Greca A, Möbbs AM, et al. Deep learning neural networks highly predict very early onset of pluripotent stem cell differentiation [J]. *Stem Cell Rep*, 2019, 12(4):845-859. DOI:10.1016/j.stemcr.2019.02.004.
- [30] Bermejillo Barrera MD, Franco-Martínez F, Díaz Lantada A. Artificial intelligence aided design of tissue engineering scaffolds employing virtual tomography and 3D convolutional neural networks [J]. *Mater (Basel)*, 2021, 14(18):5278. DOI:10.3390/ma14185278.
- [31] Arzani S, Karimi A, Iranmanesh P, et al. Examining the diagnostic accuracy of artificial intelligence for detecting dental caries across a range of imaging modalities: An umbrella review with meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2025, 20(8):e0329986. DOI:10.1371/journal.pone.0329986.
- [32] Wang C, Zhang R, Wei X, et al. Machine learning-based automatic identification and diagnosis of dental caries and calculus using hyperspectral fluorescence imaging [J]. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2023, 41:103217. DOI:10.1016/j.pdpdt.2022.103217.
- [33] 李若竹, 朱俊霞, 王媛媛, 等. 基于深度学习的儿童龋齿人工智能识别系统雏形的开发 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2021, 56(12):1253-1260. DOI:10.3760/ema.j.cn112144-20210712-00323.
- [34] 郭静, 张瑞文, 张东杰, 等. 人工智能口腔实景图像识别技术用于龋齿筛查的效能研究 [J]. *空军军医大学学报*, 2024, 45(10):1140-1146. DOI:10.13276/j.issn.2097-1656.2024.10.011.
- [35] 王丽, 吴菲, 肖墨, 等. 基于深度学习的龋源性牙髓炎露髓风险预测 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2023, 41(2):218-224. DOI:10.7518/gjkq.2023.2022418.
- [36] Allilhaibi M, Koller G, Mannocci F. The detection of apical radiolucencies in periapical radiographs: A comparison between an artificial intelligence platform and expert endodontists with CBCT serving as the diagnostic benchmark [J]. *Int Endod J*, 2025, 58(8):1146-1157. DOI:10.1111/iej.14250.
- [37] 叶莉, 杜宇. 深度学习在牙髓根尖周病临床诊疗中的应用 [J/OL]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2024, 18(6):351-356. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.06.001.
- [38] Lu J, Cai Q, Chen K, et al. Machine learning models for prognosis prediction in regenerative endodontic procedures [J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25(1):234. DOI:10.1186/s12903-025-05531-3.
- [39] Li YH, Li YL, Wei MY, et al. Innovation and challenges of artificial intelligence technology in personalized healthcare [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):18994. DOI:10.1038/s41598-024-70073-7.
- [40] 钱军, 马芮, 曲妍, 等. 人工智能在锥形束计算机断层扫描影像中识别慢性根尖周炎根尖区病变的应用 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2022, 40(5):576-581. DOI:10.7518/hxkq.2022.05.011.
- [41] Herbst SR, Herbst CS, Schwendicke F. Preoperative risk assessment does not allow to predict root filling length using machine learning: A longitudinal study [J]. *J Dent*, 2023, 128:104378. DOI:10.1016/j.jdent.2022.104378.
- [42] Qu Y, Lin Z, Yang Z, et al. Machine learning models for prognosis prediction in endodontic microsurgery [J]. *J Dent*, 2022, 118:103947. DOI:10.1016/j.jdent.2022.103947.
- [43] 刘倩如, 胡景昱, 吴昊, 等. 机器人在牙体牙髓病学领域的研究进展 [J/OL]. *国际口腔医学杂志*, [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1698.R.20251217.1548.002>.
- [44] 崔晨, 权晶晶, 韦曦. 临床导向的机用镍钛预备器械研究新进展 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2024, 42(6):699-705. DOI:10.7518/hxkq.2024.2024225.
- [45] Keith AM, Hinman SE, Dickens NE, et al. Standardization of variable taper files and corresponding gutta-percha cones amongst manufacturers [J]. *J Endod*, 2024, 50(12):1766-1771. DOI:10.1016/j.joen.2024.10.002.
- [46] Fontenele RC, Jacobs R. Unveiling the power of artificial intelligence for image-based diagnosis and treatment in endodontics: An ally or adversary? [J]. *Int Endod J*, 2025, 58

- (2):155-170. DOI:10.1111/iej.14163.
- [47] Patel M, Dayan I, Fishman EK, et al. Accelerating artificial intelligence: How federated learning can protect privacy, facilitate collaboration, and improve outcomes [J]. *Health Informatics J*, 2023, 29(4): 14604582231207744. DOI: 10.1177/14604582231207744.
- [48] Ali M, Naeem F, Tariq M, et al. Federated learning for privacy preservation in smart healthcare systems: A comprehensive survey [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2023, 27(2): 778-789. DOI: 10.1109/JBHI.2022.3181823.
- [49] Lin WC. Development and application of an innovative smart medical system for dental image-assisted diagnosis [J]. *National Science and Technology Council Project*, 2025.
- [50] Cao Z, Zhang H, Zou Z. Language models reveal a complex sequence basis for adaptive convergent evolution of protein functions [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2025, 122(39): e2418254122. DOI: 10.1073/pnas.2418254122.
- [51] 任佳宁, 格根塔娜. 深度学习在牙体牙髓病中的研究进展[J/OL]. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2025, 17(8): 76-81. DOI: 10.12037/YXQY.2025.08-12.
- [52] Cruz-Gonzalez P, He AW, Lam EP, et al. Artificial intelligence in mental health care: A systematic review of diagnosis, monitoring, and intervention applications [J]. *Psychol Med*, 2025, 55:e18. DOI: 10.1017/S0033291724003295.
- [53] Schwendicke F, Samek W, Krois J. Artificial intelligence in dentistry: Chances and challenges [J]. *J Dent Res*, 2020, 99(7): 769-774. DOI: 10.1177/0022034520915714.
- [54] Aminoshariae A, Nosrat A, Nagendrababu V, et al. Artificial intelligence in endodontic education [J]. *J Endod*, 2024, 50(5): 562-578. DOI: 10.1016/j.joen.2024.02.011.
- [55] Pretolesi D, Stanzani I, Ravera S, et al. Artificial intelligence and network science as tools to illustrate academic research evolution in interdisciplinary fields: The case of Italian design [J]. *PLoS One*, 2025, 20(1): e0315216. DOI: 10.1371/journal.pone.0315216.
- [56] 天津中医药大学. 全球首个中医药循证评价智能体(Aireview Agent)发布[J]. *天津中医药*, 2025, 42(7): 822.
- [57] Wang X, Chou K, Zhang G, et al. Breast cancer pre-clinical screening using infrared thermography and artificial intelligence: A prospective, multicentre, diagnostic accuracy cohort study [J]. *Int J Surg*, 2023, 109(10): 3021-3031. DOI: 10.1097/JS9.000000000000594.
- [58] Chen J, Hu Y, Cai M, et al. TrialBench: Multi-Modal AI-ready datasets for clinical trial prediction [J]. *Sci Data*, 2025, 12(1): 1564. DOI: 10.1038/s41597-025-05680-8.
- [59] Marwaha J. Artificial intelligence in conservative dentistry and endodontics: A game-changer [J]. *J Conserv Dent Endod*, 2023, 26(5): 514-518. DOI: 10.4103/JCDE.JCDE_7_23.
- [60] 刘舒钰, 何静晨, 唐璐书, 等. 人工智能在牙体牙髓病学中的应用研究进展 [J]. *中国实用口腔科杂志*, 2025, 18(3): 343-350. DOI: 10.19538/j.kq.2025.03.014.
- [61] Felek T, Tercanlı H, Gök RS. Evaluating vision transformers and convolutional neural networks in the context of dental image processing: A systematic review [J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25(1): 1626. DOI: 10.1186/s12903-025-07036-5.
- [62] Hurd TC, Payton FC, Hood DB. Targeting machine learning and artificial intelligence algorithms in health care to reduce bias and improve population health [J]. *Milbank Q*, 2024, 102(3): 577-604. DOI: 10.1111/1468-0009.12712.

(收稿日期:2025-12-27)

(本文编辑:王嫚)