

doi: 10.3969/j.issn.1006-7795.2025.06.003

· 专家述评 ·

人工智能在口腔医学中的应用

谢理哲^{1,2,3} 严斌^{1,2,3,4*△} 王林^{2,3,4*△}

(1. 南京医科大学口腔数字化医疗技术工程中心, 南京 210029; 2. 南京医科大学口腔疾病研究与防治国家级重点实验室培育建设点, 南京 210029; 3. 江苏省口腔转化医学工程研究中心, 南京 210029; 4. 南京医科大学附属口腔医院正畸科, 南京 210029)

【摘要】 随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的飞速发展, 其已深度渗透至口腔医学诊疗的全流程, 广泛应用于预防、诊断、治疗、风险评估及预后判断等关键环节。本文系统梳理 AI 技术在口腔医学诊疗中的研究进展与应用现状, 聚焦于核心技术在口腔临床典型场景中的落地成效, 深入剖析当前技术实践过程中面临的诸多瓶颈和挑战, 并对未来发展提出前瞻性展望, 旨在为口腔医学智能化诊疗体系的构建与完善提供理论依据和实践参考。

【关键词】 人工智能; 口腔医学; 智能诊疗; 临床应用; 瓶颈; 挑战; 研究进展

【中图分类号】 R78; TP18 **【文献标识码】** A

The application of artificial intelligence in stomatology

Xie Lizhe^{1,2,3}, Yan Bin^{1,2,3,4*△}, Wang Lin^{2,3,4*△}

(1. Oral Digital Medical Technology Engineering Center, Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base of Research, Prevention and Treatment for Oral Diseases, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Province Engineering Research Center of Stomatological Translational Medicine, Nanjing 210029, China; 4. Department of Orthodontics, The Affiliated Stomatological Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China)

【Abstract】 With the rapid development of artificial intelligence (AI) technology, it has been deeply integrated into the entire workflow of stomatological diagnosis and treatment, and it is widely applied in key aspects such as prevention, diagnosis, treatment, risk assessment, and prognosis evaluation. Herein we systematically reviews the research progress and application status of AI technology in stomatological diagnosis and treatment, focuses on the implementation effects of core technologies in typical clinical scenarios of stomatology, conducts an in-depth analysis of the major bottlenecks and challenges encountered in current practice, and puts forward a forward-looking prospect for its future development. It aims to provide a theoretical basis and practical reference for the construction and optimization of the intelligent diagnosis and treatment system in stomatology.

【Key words】 artificial intelligence; stomatology; intelligent diagnosis and treatment; clinical application; bottlenecks; challenges; research progress

口腔医学作为一门聚焦口腔及颌面部疾病预防、诊断与治疗的学科, 其研究涉及的学科领域范围广, 从常见的龋病、牙周炎到疑难的颌面肿瘤及畸形, 造成了棘手的全球性公共卫生挑战, 这些疾病不仅影响患者咀嚼、发音等核心生理能力, 还与心血管疾病、糖尿病等多种全身性疾病密切关联, 展现了早期筛查和精准诊疗在提升公众健康水平方面的关键意义。

人工智能(artificial intelligence, AI)技术快速发展为口腔医学研究带来新突破。AI 可以模拟人类思

考以处理较为复杂的综合信息, 在影像识别、诊疗计划制定以及健康管理等方面都表现出巨大潜力。本文旨在介绍 AI 技术发展情况, 梳理其在口腔医学诊疗中的实际应用案例, 并分析当前面临的主要挑战, 研讨未来发展趋势。

1 AI 概述

1.1 AI 技术演进

AI 技术雏形最早可以追溯到西周《列子·汤问》

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2402103, SQ2023YFC2400025)。This study was supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFC2402103, SQ2023YFC2400025).

* Corresponding author, E-mail: byan@njmu.edu.cn; lw603@njmu.edu.cn

△严斌和王林对本文有同等贡献。

网络出版时间: 2025-11-27 15:19 网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3662.R.20251127.0936.006>

中偃师为周穆王制作能歌善舞机关人偶的记载,体现了古时候人们对于智能技术的向往。1956年,约翰·麦卡锡首次提出“AI”这一概念,使AI成为计算机科学中一门独立的经验科学^[1]。

口腔医学领域的AI经历了3个主要阶段的变化(图1)。第一阶段主要是基于规则的专家系统,在20世纪80年代,该类系统应用于龋病风险评估,但鉴于其僵化的固有规则难以适应复杂的临床实际,应用效果受到限制^[2-3]。第二阶段是传统机器学习时期,自20世纪90年代末期起,支持向量机等人工设计的特征工程实现了对医学影像的初步识别,例如对于根尖周病的判别就在这个时期得到了发展,然而该技术的性能瓶颈仍很明显^[4]。第三阶段是深度学习和大模型时代。自2012年深度学习技术在图像识别上取得重大突破以来,以卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)为代表的模型可以实现“端到端”的特征自动学习,在龋病检测等任务上准确率、灵敏度和特异度显著超过传统方法^[5-6]。随

后,Transformer架构以及大模型的引入,更是增加了AI处理复杂逻辑并进行综合诊断的能力,标志着AI与口腔医学的深度融合进入了全新的发展阶段^[7-8]。

1.2 AI分类及应用

自2012年以来,关于AI领域的分类方法有诸多报道,不同研究视角下的分类标准常因技术维度与载体形态的交叉而存在差异。本文从技术功能角度将智能技术分为智能决策、智能生成、智能推荐、智能感知和智能控制五大类(图2)。智能决策融合知识逻辑与深度学习技术,用于辅助临床诊断决策和医疗资源调配;智能生成突破传统“识别与分析”的局限,以内容生成作为核心功能;智能推荐基于用户画像和算法模型,实现个性化健康管理和临床知识推送;智能感知通过融合传感器技术与信号处理算法,实现对环境信息的精准获取与解读,是连接物理世界与数字世界的桥梁;智能控制则能够在无人干预的情况下,驱动智能机器或系统自主实现控制目标,在智能手术和智能康复等设备中发挥关键作用。

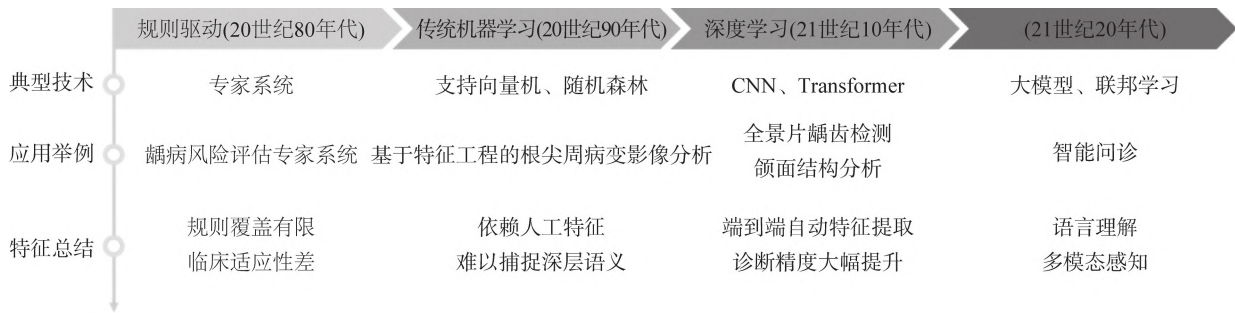


图1 口腔医学 AI 技术演进
Fig. 1 Evolution of AI technology in stomatology
AI: artificial intelligence; CNN: convolutional neural network.



图2 AI 技术功能分类
Fig. 2 Classification of AI technology functions
AI: artificial intelligence.

目前, AI 技术已全面应用于口腔医学的疾病预防、诊断、治疗和健康管理等各个环节, 在不同应用场景下呈现出多元化发展态势, 并衍生出多种适配场景的 AI 载体^[9-10](图 3)。AI 技术的不断迭代与融合, 正推动口腔医疗服务向智能化、精准化和高效化方向发展。我国在口腔医学领域的 AI 技术发展尤为迅速。至今, 国内 AI 项目增长速度显著超

越国际水平(图 4), 特别是在基于计算机视觉的智能决策领域, 逐步实现从“跟跑”到“并跑”乃至“领跑”的跨越。在智能感知与智能控制领域, 国内成功研发出多项具自主知识产权的口腔专科机器人系统和术中导航设备, 相关技术应用转化的成功, 标志着该领域巨大的潜力和前景。

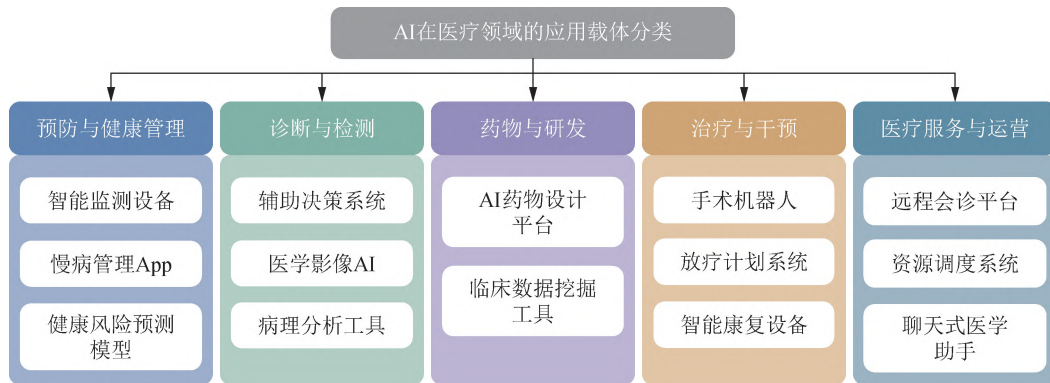


图 3 AI 应用载体分类
Fig. 3 Classification of application carriers in AI
AI; artificial intelligence.

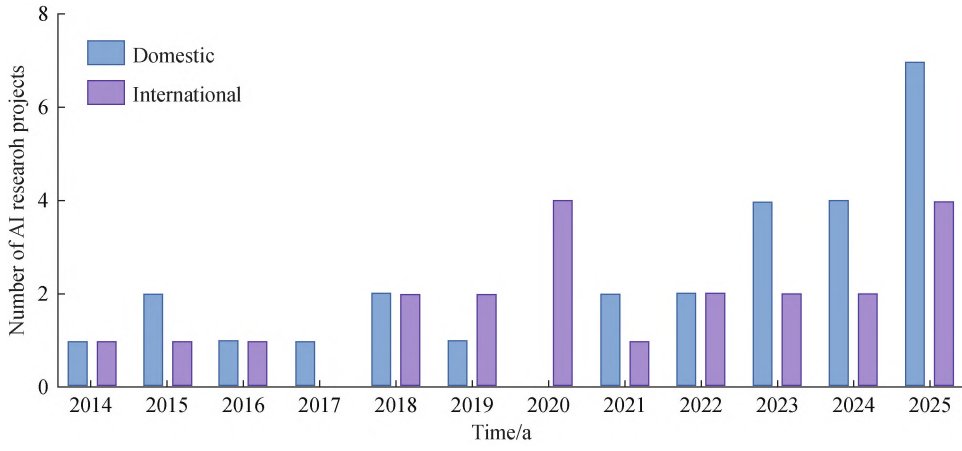


图 4 新闻媒体报道的独立 AI 项目数量 (国内 vs. 国际)
Fig. 4 Distribution of AI standalone projects reported by news media (Domestic vs. International)
AI; artificial intelligence.

2 AI 在口腔医学各亚专科的临床应用

2.1 AI 在牙体牙髓病科的应用

牙体牙髓疾病(如龋齿、牙髓炎、根尖周炎等)是口腔常见疾病,具有早期症状隐匿、病情进展迅速的特点,精准诊断和高效治疗对于保留患牙功能至关重要。近年来, AI 在牙体牙髓病变影像智能检测方面表现突出,已成为辅助早期诊断的重要手段。

智能决策在牙体牙髓疾病分类分级诊断中展现出卓越成效。Zheng 等^[11]首次利用多模态 CNN 融合临床参数与根尖 X 线影像数据,用于深龋及牙髓炎识别,准确率达 82%。Moidu 等^[12]利用 YOLO v3 架构的 CNN 网络对 1 950 张口内根尖片进行根尖指数评分,灵敏度为 92.1%,阳性预测值为 86.4%。术前规划与术后管理也是智能决策的重要应用方向。Qu 等^[13]应用梯度提升机与随机森林模型,对 178 例

患者共 234 颗牙齿进行牙髓显微外科手术预后评估,结果表明 AI 技术可辅助临床医生进行术前风险评估和医患沟通。同济大学林翔团队整合口腔颌面锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)与 micro-CT 数据,利用 U-Net 神经网络实现了牙髓腔与牙体结构的自动精确分割,基于分割结果辅助医生确定根管预备路径、入路深度和器械选择,在处理复杂、变异或钙化根管时优势明显,显著提升了影像引导下临床治疗的智能化水平^[14]。Gao 等^[15]建立基于 13 个术前变量的误差反向传播(back propagation, BP)神经网络,用于预测根管治疗术后的短期疼痛,预测准确率达 95.60%,为术后管理提供了重要的量化参考。

智能感知与智能控制在牙体牙髓病治疗中已有初步应用,我国研发的“AI 根管预备机器人”,配备力传感器与视觉导航系统,可自动调整锉针深度和角度,实现部分根管预备过程的自动化操作^[16-17]。未来有望进一步深化多模态技术融合与智能控制应用,推动牙体牙髓疾病诊疗迈向更精准、高效、普惠的智能化新阶段。

2.2 AI 在牙周病科的应用

牙周组织健康是维持口腔整体功能和全身健康的重要基石,牙周病变若未能及时治疗,可能导致牙齿松动、脱落,甚至引发全身性炎症反应。牙周病是成人牙齿缺失的主要原因之一,其早期诊断和个体化治疗一直是临床关注的重点。AI 技术的应用为牙周病的精准诊断、病程监测、治疗决策和个体化管理提供了全新的工具。

基于医学影像的辅助诊断是智能决策和智能推荐在牙周病诊疗中应用最广泛的领域。Lee 等^[18]利用 CNN 网络自动提取影像特征,开发的牙周病牙齿检测系统在前磨牙和磨牙区域的检测准确率分别达到 81.0% 和 76.7%,具有良好的灵敏度和特异度。Balaei 等^[19]开发的双功能 AI 系统在牙周炎初筛和疗效评估中的准确率分别达 66.7% 和 91.6%。Yang 与 Tonetti 两个团队的研究方向均集中于多模态影像融合,前者通过融合 CBCT 影像与口内扫描数据(intra-oral scan, IOS),实现对牙周软组织厚度的虚拟测量,后者通过融合 IOS 图像与 CBCT 影像,实现龈骨距(gingiva-bone distance, GBD)的自动测量和骨丧失程度量化,并据此生成牙位化的治疗方案,是智能决策技术在牙周诊疗中的典型应用^[20-21]。Liu

等^[22]提出了一种联合传感器、深度学习和移动终端的智慧齿科健康物联网系统,基于收集的 12 600 张临床图像数据集,开发了一种由 MASK R-CNN 网络训练的自动诊断模型,探索了其在家庭牙科保健中的应用可行性。智能控制虽然在牙周领域的应用尚处于起步阶段,但其在图像导航、动态建模和手术引导等方面已展现出巨大潜力。AI 技术的发展与运用有望助力牙周疾病从诊断到治疗的闭环式智能化管理,并为牙周健康维护提供新的精准、高效的解决思路。

2.3 AI 在口腔修复科的应用

口腔修复科医师主要工作内容是恢复缺失、缺损的牙齿形态、功能和美观,常用治疗手段包括义齿、种植体和贴面等技术。上述技术不仅追求恢复患者咀嚼功能,更是追求对患者颜面美观进行改善。随着 AI 技术的引进,口腔修复科正在从传统经验依赖型诊疗模式转变为智能感知和精确控制新模式。

在修复体设计方面, Lerner 等^[23]结合牙列三维扫描数据实现 AI 辅助全数字化氧化锆修复体个性化设计,有效减小修复误差并提高治疗成功率。Zhang 等^[24]开发的智能决策系统可以识别修复体边缘,预测脱落风险,预测准确率达 97.43%;并利用特征参数为医生提供修复方案建议。另外,有研究者利用 GoogLeNet Inception-v3 和 CNN 技术对不同类型种植体进行识别,准确率可达 85.29% ~ 99.78%^[25-27]。对于美学修复,基于 CNN 的牙色匹配模型在色差评估中表现稳定,牙色匹配准确率超过 90%^[28-30],为个性化美学修复提供了有力支持。

在修复体制作环节,辅助技术可自动生成修复体仿真模型,据此优化工艺参数,显著提高金属烤瓷修复体的铸造精度^[28]。在种植修复领域,智能控制技术也推动其从传统人工操作逐步迈向自动化时代。我国第四军医大学赵铱民院士团队^[31]便在该领域取得突破性进展,成功完成国际首例种植机器人相邻双种植体的自主植入及即刻修复手术。此外,针对全口修复及牙列缺损患者的临床观察^[32-33]显示,其预后效果良好,进一步证明了自主式口腔种植机器人系统的临床可行性。

2.4 AI 在口腔颌面外科的应用

口腔颌面外科诊疗内容包含颌骨发育异常、颌面部外伤及肿瘤等多种疾病类型,其实施高度依赖精准的术前评估和稳定的术中操作。近年来, AI 辅助技

术已逐步覆盖术前规划到术中导航及术后护理全阶段,并在病灶定位、风险预测与手术引导等关键环节中发挥重要作用。

多项研究^[34-41]均表明, AI 技术可以辅助识别不同类型颌骨囊性病变。例如, Poedjiastoeti 等^[34]和 Chai 等^[35]学者分别运用 VGG-16 和 Inception-v3 网络, 实现全景 X 线片和 CBCT 影像中成釉细胞瘤与牙源性角化囊肿的有效分类。Tong 等^[36]和 Wang 等^[37]学者利用 U-Net 实现 CBCT 骨折自动检测, 经评测与人工诊断结果一致性高达 90%。AI 技术也可以帮助进行术中风险评估以及临床决策, Achararit 等^[38]和 Chindanuruks 等^[39]比较 CNN 算法与专家对下颌第三磨牙阻生情况及其拔除难度的评估差异, 发现算法结果与人工诊断具有较好一致性。香港大学牙医学院开发的多模态医疗大模型, 可实现术中三维图像与视频配准、透视投影及动态视觉追踪, 为医生提供实时导航辅助, 操作效率与精准度有显著提升^[40]。Choi 团队^[41]基于双层神经网络计算是否手术、手术类型和是否拔牙决策的成功率, 其诊断准确率分别为 96% 和 91%, 有效减少了人为误差, 为复杂的正颌手术提供了可靠的量化决策支持。

2.5 AI 在口腔正畸科的应用

正畸治疗是干预错颌畸形、颌骨发育不协调等颌颌面发育异常问题的主要方法, 其治疗周期通常普遍较长, 患者存在显著的个体差异, 整个治疗过程高度依赖医生的临床经验——这些因素共同对临床制定精准且个性化的正畸治疗方案提出了较高要求。当前, AI 技术的持续发展正不断为正畸诊疗工作注入新的数字化与智能化支持。

具体来看, 计算机辅助图像处理与检测技术在正畸诊疗中具有实际应用价值, 有助于提升工作效率与诊断精确性。龚蓓文等^[42]实现了头颅侧位片标志点的自动识别, 即便部分标记缺失仍能完成 61 个标志点的高精度定位。对三维数字牙模进行自动牙体分割是后续测量与分析的关键前提, 其精度直接影响诊断与治疗方案质量。Xu 团队^[43]采用一种两级分层 CNN 模型, 该模型会按照先后顺序划分牙齿-牙龈边界以及齿间区域, 最终使分割准确率达到 99.06%, 这一技术成果可较好地集成至正畸计算机辅助设计系统中。

进一步地, 智能算法逐步具备生成能力, 在骨龄预测方面, 目前全球已开发出多套骨龄评价相关 AI

系统, 包括 BoneXpert、GoogLeNet 和 OxfordNet 等, 这些系统可获得与传统人工骨龄评估相当的结果, 具有客观性强、效率高和节省时间等优势, 并自动生成结构化图文报告, 为医生提供详细的诊断依据^[44-46]。在正畸治疗临床决策方面, Huang 等^[47]提出并实现了一套融合多模态数据的智能辅助决策系统, 通过决策树、随机森林等四种机器学习方法对 192 例患者的临床信息及治疗方案进行正畸拔牙决策预测, 决策树综合性能最优。具体到拔牙决策, 拥挤度、侧貌面型与下切牙倾斜度是贡献度最大的三项特征。此外, 牙齿移动监测一直是正畸诊疗中的难点, 张华等^[48]通过采集患者的初始口腔三维数据、牙齿特征点和治疗方案参数, 建立牙齿移动轨迹的预测模型, 生成动态牙齿移动模拟。该技术体系将成为优化正畸诊疗路径的关键突破口, 推动正畸诊疗模式向数字化转型。

3 AI 在口腔医学中应用的挑战与前瞻性思考

早期 AI 发展受限于 CPU 架构的算力瓶颈与并行计算工具缺失, 复杂模型训练难以落地^[49]。2012 年以来, GPU 专用 AI 芯片的突破与分布式计算框架的成熟, 推动算力呈指数级增长, 促使 AI 算法向纵深演进: 从万级参数的基础模型, 发展至亿级参数的深度学习网络, 再到具备万亿级参数的大模型。大模型凭借海量参数, 能够更好地适配现实世界的复杂场景, 重构 AI 底层逻辑, 持续推动通用 AI 的发展。

大模型在口腔医学领域有着巨大的潜力和广阔的前景, 国内相关的研究和应用不断涌现。四川大学华西口腔医学院韩向龙团队^[50]发布了“华西口腔智联大模型”, 覆盖智能分诊、辅助诊断、口腔影像报告生成、教学与考试模拟等多个场景。首都医科大学附属北京口腔医院白玉兴教授^[51]构建了 B-AI 全国首款正畸智能体, 贯穿正畸诊疗全流程, 实现多模态影像数据自动分析, 电子病历自动生成, 正畸方案隔空预览等多项功能。与此同时, 青岛市口腔医院构建了基于大模型算法框架的口腔智慧诊断系统, 居民可通过手机自拍初筛, 推动了口腔医疗向“健康管理导向”的转变^[52]。南京医科大学谢理哲教授联合华西口腔医院刘洋教授融合自研关节运动采集系统, 完成国内首款颞下颌关节诊断大模型“颌颜悦色”的构建与上线^[53-54]。这些技术创新不仅拓展了智慧医疗的应用边界, 更为口腔医学个性化、普惠化发展注入了

动力,为进一步重塑口腔医疗生态提供了实践参考。

AI在口腔医学领域有着巨大的潜力,但“黑箱”问题依然是临床广泛应用的主要阻力。医师在使用智能诊疗时,不仅会关注其结论,更需要了解结论的生成逻辑和依据^[55]。以往发表的研究中大多数模型都在可解释性、特征重要性分析等方面缺乏足够的分析和说明,降低了口腔医生的信任度,影响了人机的密切协作^[56]。近两年,提升算法可解释性、系统解析AI决策逻辑已受到越来越多的关注,推动着AI在口腔专科的落地。

模型的泛化表现欠缺同样也会限制AI的广泛应用。已有研究^[57]表明,使用单一人种数据训练龋病检测模型,在应用到其他人种时会出现性能严重降低的情况。检测设备和采集参数及操作的不一致,也会显著提升AI模型的临床应用风险。通过多中心合作,纳入多种族、多地区、多设备的大数据集可以降低一定风险,但算法的研究也应受到同样的重视,自适应算法和元学习等也可引入到临床AI研究中,以增强AI模型在新场景下的适应能力和稳定性。

智能手机与AI整合也为传统口腔医疗服务带来新变革。Ding等^[58]开发出便携龋损检测器,可以供用户实现龋洞自我检测。此外,牙龈炎症监测、正畸治疗模拟、口腔癌风险评估等应用出现,可以为用户随时提供远程问诊和个性化医疗指导,提升大众口腔健康管理质量^[10-11,59]。

AI应用场景的不断拓展,给伦理和监管带来了更大的挑战。当使用AI技术时如何进行责任判定;当AI建议与医生经验存在分歧时如何取舍,这些都极易引发医疗与法律风险^[60-61]。目前,数据伦理问题、患者知情权和隐私权保护方面的规定还在完善中。各国针对口腔领域的AI产品应用缺乏成熟的规范管理^[62-63]。大部分国家在强化患者知情权,确立数据分级、数据溯源等管理方案方面还在探索中,以实现伦理规范与人文关怀的融合。

综上,AI在口腔医学领域的应用已完成从概念萌芽到初步实践的跨越。目前仍面临着诸多挑战,未来研究将以临床实际需求为导向,注重提升模型可解释性和真实世界的泛化性。此外,伦理审查与监管体系也亟待建立。只有寻找到技术创新与规范约束之间的平衡点,才能让AI真正实现从“辅助工具”到“决策伙伴”的转变,促进口腔医学迈向更加精确、普惠、智能的方向。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突。

Declaration of conflicting interests All authors declare no competing interests.

作者贡献声明 谢理哲:查阅、整理文献,撰写文章;严斌、王林:提出思路,总体把关,审定论文。

Author contributions Xie L Z: Reviewed and organized literature, and wrote the article; Yan B and Wang L: Proposed ideas, overall supervision, and reviewed the paper.

参考文献

- [1] McCarthy J, Minsky M, Rochester N, et al. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence[C]. 1955-08-31.
- [2] 周学东, 郭静, 陈谦明, 等. 人工智能在口腔医学中的应用与发展[J]. 中华口腔医学杂志, 2020, 55(6): 361-365.
- [3] 周学东, 凌均荣, 梁景平, 等. 龋病临床治疗难度因素及处理[J]. 华西口腔医学杂志, 2017, 35(1): 1-7.
- [4] Rigatti S J. Random forest[J]. J Insur Med, 2017, 47(1): 31-39.
- [5] Dos Santos D F D, Tosta T A A, Silva A B, et al. Automated nuclei segmentation on dysplastic oral tissues using CNN[C]//2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), Niteroi: IEEE, 2020: 45-50.
- [6] Liang Y T, Li D L, Deng D M, et al. AI-driven dental caries management strategies: from clinical practice to professional education and public self care[J]. Int Dent J, 2025, 75(4): 100827.
- [7] Schneider L, Krasowski A, Pitchika V, et al. Assessment of CNNs, transformers, and hybrid architectures in dental image segmentation[J]. J Dent, 2025, 156: 105668.
- [8] Li Y J, Huang Q, Jiang J, et al. Large language model-based biological age prediction in large-scale populations[J]. Nat Med, 2025, 31(9): 2977-2990.
- [9] Chau R C W, Thu K M, Hsung R T C, et al. Self-monitoring of oral health using smartphone selfie powered by artificial intelligence: implications for preventive dentistry[J]. Oral Health Prev Dent, 2024, 22: 327-340.
- [10] Birur P N, Sunny S P, Jena S, et al. Mobile health application for remote oral cancer surveillance[J]. J Am Dent Assoc, 2015, 146(12): 886-894.
- [11] Zheng L W, Wang H L, Mei L, et al. Artificial intelligence in digital cariology: a new tool for the diagnosis of

- deep caries and pulpitis using convolutional neural networks[J]. *Ann Transl Med*, 2021, 9(9): 763.
- [12] Moidu N P, Sharma S, Chawla A, et al. Deep learning for categorization of endodontic lesion based on radiographic periapical index scoring system[J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26(1): 651–658.
- [13] Qu Y, Lin Z Z, Yang Z J, et al. Machine learning models for prognosis prediction in endodontic microsurgery[J]. *J Dent*, 2022, 118: 103947.
- [14] 林翔, 傅裕杰, 任根强, 等. U-Net 神经网络分割锥形束 CT 影像中下颌磨牙牙体与牙髓腔及其准确性验证[J]. *上海口腔医学*, 2022, 31(5): 454–459.
- [15] Gao X, Xin X, Li Z, et al. Predicting postoperative pain following root canal treatment by using artificial neural network evaluation[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 17243.
- [16] 黄丽珊, 劳思颖, 李思雨, 等. 自主式机器人辅助显微根尖手术治疗 1 例[J]. *牙体牙髓牙周病学杂志*, 2024, 29(8): 480–482.
- [17] 孙柯, 尚振华, 佟洪波. 一种自动化牙髓治疗机器人: CN202411566002.7[P]. 2025-02-11.
- [18] Lee J H, Kim D H, Jeong S N, et al. Diagnosis and prediction of periodontally compromised teeth using a deep learning-based convolutional neural network algorithm[J]. *J Periodontal Implant Sci*, 2018, 48(2): 114–123.
- [19] Balaei A T, De Chazal P, Eberhard J, et al. Automatic detection of periodontitis using intra-oral images[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2017, 2017: 3906–3909.
- [20] Yang M, Li C S, Yang W, et al. Accurate gingival segmentation from 3D images with artificial intelligence: an animal pilot study[J]. *Prog Orthod*, 2023, 24(1): 14.
- [21] Tan M H, Cui Z M, Li Y, et al. PerioAI: a digital system for periodontal disease diagnosis from an intra-oral scan and cone-beam CT image[J]. *Cell Rep Med*, 2025, 6(6): 102186.
- [22] Liu L Z, Xu J W, Huan Y X, et al. A smart dental health-IoT platform based on intelligent hardware, deep learning, and mobile terminal[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2020, 24(3): 898–906.
- [23] Lerner H, Mouhyi J, Admakin O, et al. Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior Jaws of 90 patients[J]. *BMC Oral Health*, 2020, 20(1): 80.
- [24] Zhang B, Dai N, Tian S K, et al. The extraction method of tooth preparation margin line based on S-octree CNN [J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2019, 35(10): e3241.
- [25] Lee J H, Jeong S N. Efficacy of deep convolutional neural network algorithm for the identification and classification of dental implant systems, using panoramic and periapical radiographs: a pilot study [J]. *Medicine*, 2020, 99(26): e20787.
- [26] Da Mata Santos R P, Vieira Oliveira Prado H E, Soares Aranha Neto I, et al. Automated identification of dental implants using artificial intelligence[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2021, 36(5): 918–923.
- [27] Benakatti V B, Nayakar R P, Anandhalli M. Machine learning for identification of dental implant systems based on shape-a descriptive study [J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2021, 21(4): 405–411.
- [28] Matin I, Hadzistevic M, Vukelic D, et al. Development of an expert system for the simulation model for casting metal substructure of a metal-ceramic crown design [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2017, 146: 27–35.
- [29] Wei J Q, Peng M D, Li Q, et al. Evaluation of a novel computer color matching system based on the improved back-propagation neural network model [J]. *J Prosthodont*, 2018, 27(8): 775–783.
- [30] Carrillo-Perez F, Pecho O E, Morales J C, et al. Applications of artificial intelligence in dentistry: a comprehensive review[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2022, 34(1): 259–280.
- [31] Li Z W, Xie R, Bai S Z, et al. Implant placement with an autonomous dental implant robot: a clinical report[J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 133(2): 340–345.
- [32] Xie R, Liu Y C, Wei H B, et al. Clinical evaluation of autonomous robotic-assisted full-arch implant surgery: a 1-year prospective clinical study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2024, 35(4): 443–453.
- [33] Wang M Z, Liu F, Zhao X, et al. Robot-assisted surgery for dental implant placement: a narrative review [J]. *J Dent*, 2024, 146: 105034.
- [34] Poedjastoeti W, Suebnukarn S. Application of convolutional neural network in the diagnosis of jaw tumors [J]. *Healthc Inform Res*, 2018, 24(3): 236–241.
- [35] Chai Z K, Mao L, Chen H, et al. Improved diagnostic accuracy of ameloblastoma and odontogenic keratocyst on cone-beam CT by artificial intelligence [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 793417.
- [36] Tong Y H, Jie B M, Wang X B, et al. Is convolutional neural network accurate for automatic detection of zygomatic fractures on computed tomography? [J]. *J Oral Maxillo-*

- fac Surg, 2023, 81(8): 1011-1020.
- [37] Wang X B, Xu Z N, Tong Y H, et al. Detection and classification of mandibular fracture on CT scan using deep convolutional neural network [J]. Clin Oral Investig, 2022, 26(6): 4593-4601.
- [38] Achararit P, Manaspon C, Jongwannasiri C, et al. Impacted lower third molar classification and difficulty index assessment: comparisons among dental students, general practitioners and deep learning model assistance[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 152.
- [39] Chindanuruks T, Jindanil T, Cumpim C, et al. Development and validation of a deep learning algorithm for the classification of the level of surgical difficulty in impacted mandibular third molar surgery[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2025, 54(5): 452-460.
- [40] 香港大学牙医学院. 香港大学牙医学院开设全球首创人工智能诊所 AI 工具精准预测口腔癌风险[EB/OL]. (2025-05-11) [2025-10-20]. https://www.hku.hk/press/c_news_detail_28304.html.
- [41] Choi H I, Jung S K, Baek S H, et al. Artificial intelligent model with neural network machine learning for the diagnosis of orthognathic surgery[J]. J Craniofac Surg, 2019, 30(7): 1986-1989.
- [42] 龚蓓文, 常收, 左飞飞, 等. 基于卷积神经网络的头影测量自动定点研究[J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(12): 1249-1256.
- [43] Xu X J, Liu C, Zheng Y Y. 3D tooth segmentation and labeling using deep convolutional neural networks [J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2019, 25(7): 2336-2348.
- [44] Tong C, Liang B Y, Li J, et al. A deep automated skeletal bone age assessment model with heterogeneous features learning[J]. J Med Syst, 2018, 42(12): 249.
- [45] Liu J L, Li S H, Cai Y M, et al. Automated radiographic evaluation of adenoid hypertrophy based on VGG-Lite[J]. J Dent Res, 2021, 100(12): 1337-1343.
- [46] Xie L Z, Tang W, Izadikhah I, et al. Development of a multi-stage model for intelligent and quantitative appraising of skeletal maturity using cervical vertebrae cone-beam CT images of Chinese girls[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2022, 17(4): 761-773.
- [47] Huang J L, Chan I T, Wang Z X, et al. Evaluation of four machine learning methods in predicting orthodontic extraction decision from clinical examination data and analysis of feature contribution[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2024, 12: 1483230.
- [48] 张华, 李哲, 王锐. 口腔正畸治疗过程中的牙齿移动轨迹预测方法与流程: CN113876419A[P]. 2022-01-04.
- [49] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [50] 四川大学华西口腔医院. 我院华西口腔智联大模型入选医学人工智能创新与实践典型案例[EB/OL]. (2025-09-29) [2025-11-08]. <https://www.hxkq.org/Html/News/Articles/16797.html>
- [51] 北京口腔医院. 震撼首发 | 我院发布全国首款实用级正畸智能体 B-AI[EB/OL]. (2025-11-07) [2025-11-04]. https://mp.weixin.qq.com/s/5Txce_5elcs6XVDkYNKyKg.
- [52] 青岛市口腔医院. 青岛市口腔智慧诊断系统正式发布[EB/OL]. (2025-09-18) [2025-11-04]. <https://mp.weixin.qq.com/s/WF1h65erpzz1zn4a11LpDw>.
- [53] 朱思颖, 朱锦怡, 唐雯, 等. 基于大模型与双路径检索的颞下颌关节疾病临床辅助诊断系统研发[C]. 中华口腔医学会口腔医学计算机专业委员会第23次口腔医学数字化应用学术会议, 西安, 2025.
- [54] 朱思颖, 朱锦怡, 周山, 等. 面向数字口腔医学的复杂临床推理知识增强框架研究[C]. 中华医学会第十四次数字医学学术年会会议, 上海, 2025.
- [55] Holzinger A, Langs G, Denk H, et al. Causability and explainability of artificial intelligence in medicine[J]. Wiley Interdiscip Rev Data Min Knowl Discov, 2019, 9(4): e1312.
- [56] Tjoa E, Guan C T. A survey on explainable artificial intelligence (XAI): toward medical XAI [J]. IEEE Trans Neural Netw Learn Syst, 2021, 32(11): 4793-4813.
- [57] Finlayson S G, Subbaswamy A, Singh K, et al. The clinician and dataset shift in artificial intelligence[J]. N Engl J Med, 2021, 385(3): 283-286.
- [58] Ding B C, Zhang Z, Liang Y R, et al. Detection of dental caries in oral photographs taken by mobile phones based on the YOLOv3 algorithm[J]. Ann Transl Med, 2021, 9(21): 1622.
- [59] Akwaid Z J, Almousa E. Shaping the future of orthodontics with artificial intelligence: an overview of innovations today, insights for tomorrow[J]. Australasian Orthodontic Journal, 2025, 41(1): 88-99.
- [60] Gerke S, Minssen T, Cohen G. Chapter 12-ethical and legal challenges of artificial intelligence-driven healthcare [M]//Bohr A, Memarzadeh K. Artificial Intelligence in Healthcare. New York: Academic Press, 2020: 295-336
- [61] Price W N 2nd, Gerke S, Cohen I G. Potential liability

- for physicians using artificial intelligence [J]. JAMA, 2019, 322(18): 1765-1766.
- [62] Topol E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence[J]. Nat Med, 2019, 25(1): 44-56.
- [63] Morley J, Machado C C V, Burr C, et al. The ethics of AI in health care: a mapping review[J]. Soc Sci Med, 2020, 260: 113172.

(收稿日期:2025-09-22 修回日期:2025-10-10)

编辑 陈瑞芳



开放获取 本文使用遵循知识共享署名——非商业性使用4.0国际许可协议(CC BY-NC4.0),详细信息请访问 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>。

OPEN ACCESS This article is licensed for use under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (CC BY-NC 4.0). For more information, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.