

· 专家论坛 ·

DOI: 10.12449/JCH251102

## 肝病数字活检的关键技术与应用前景

周阳<sup>1a</sup>, 陈振伟<sup>1b</sup>, 施翰英<sup>1c</sup>, 林孔英<sup>1d</sup>, 王英超<sup>1a,2</sup>, 曾永毅<sup>1d</sup>

1 福建医科大学孟超肝胆医院 a. 生物信息样本库, b. 信息科, c. 教学办, d. 肝胆胰外科, 福州 350025

2 福建省肝病科学研究中心, 福州 350025

通信作者: 曾永毅, lamp197311@126.com (ORCID: 0000-0001-8823-698X)

**摘要:** 肝病数字活检是人工智能技术与肝病大数据的深度融合,通过智能分析辅助临床决策与全流程管理。本文综述了以标准化数据治理为基础、多模态医学大模型为核心的人工智能技术体系,涵盖自然语言处理、知识图谱、生成式人工智能与大语言模型在专病数据库建设、诊断、预测、治疗及医疗文书生成等方面的应用,并探讨其在医学教育、科研与管理中的前景。尽管该技术展现出广阔的应用潜力,但在多中心数据整合、算法可解释性、伦理与数据安全等方面仍面临挑战。未来应构建闭环优化、人机协同的智能生态,促进其在“医-教-研-管”全链条的深度应用,助力肝病精准防控与全程健康管理。

**关键词:** 肝病数字活检平台; 人工智能; 数据库

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(62275050); 国家重点研发计划(2022YFC2407304); 福建省自然科学基金计划项目(2025J011318); 福州市科技计划项目(2024-G-015)

### Digital biopsy for liver diseases: A review of technological advances and application prospects

ZHOU Yang<sup>1a</sup>, CHEN Zhenwei<sup>1b</sup>, SHI Hanying<sup>1c</sup>, LIN Kongying<sup>1d</sup>, WANG Yingchao<sup>1a,2</sup>, ZENG Yongyi<sup>1d</sup>

1. a. Biological Information Biobank, b. Department of Information Technology, c. Office of Teaching Affairs, d. Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Mengchao Hepatobiliary Hospital of Fujian Medical University, Fuzhou 350025, China; 2. Liver Disease Research Center of Fujian Province, Fuzhou 350025, China

Corresponding author: ZENG Yongyi, lamp197311@126.com (ORCID: 0000-0001-8823-698X)

**Abstract:** Digital biopsy for liver diseases is characterized by the deep integration of artificial intelligence (AI) technologies and large-scale liver disease data, through which intelligent analytics are applied to support clinical decision-making and full-cycle management. This article reviews the AI technical framework based on standardized data governance and centered on multimodal large medical models, covering the application of natural language processing, knowledge map, generative AI, and large language models in the establishment of databases for specialty diseases, diagnosis, prognosis prediction, treatment, and automated medical documentation. This article also discusses the application prospects of this framework in medical education, scientific research, and healthcare management. Although this technique shows broad application potential, it still faces challenges in areas such as multi-center data integration, model interpretability, ethics, and data security. In the future, a smart ecosystem with closed-loop optimization and human-AI collaboration should be established to promote the comprehensive implementation of digital biopsy in the whole process of medicine, education, research, and management, thereby providing help for the precise prevention and control and holistic health management of liver diseases.

**Key words:** Liver Disease Digital Biopsy Platform; Artificial Intelligence; Databases

**Research funding:** National Natural Science Foundation of China (62275050); National Key Research and Development Program of China (2022YFC2407304); Natural Science Foundation of Fujian Province (2025J011318); Fuzhou Science and Technology Program (2024-G-015)

肝病已成为全球主要的公共卫生负担之一。在临床管理中面临着诊疗信息碎片化与动态评估手段匮乏的双重挑战。传统依赖肝穿刺的“金标准”和液体活检技术,不仅具有侵入性、成本高昂等局限,还难以实现持续的病情监测,影响疾病的早期干预。近年来,人工智能(artificial intelligence, AI)技术驱动医学大模型的快速发展,成为了挖掘海量临床数据的强大工具,为辅助诊断、预后分析和治疗决策提供有力支撑<sup>[1]</sup>。在肝病领域内,医学大模型、影像组学和数字病理等新兴技术正在推动肝病诊疗迈入以数据驱动与智能计算为核心的新阶段<sup>[2-3]</sup>。尽管如此,医院异构系统导致的数据壁垒与信息孤岛<sup>[4]</sup>,限制了医学大模型在真实临床环境中的适用性。

为解决上述挑战,“肝病数字活检”区别于传统活检技术,是通过整合多源临床数据,构建全周期标准化的专病数据库,并利用医学大模型作为核心推理引擎,建立面向真实世界持续优化的智能平台。不仅在疾病无创精准诊断与动态预测方面实现从“微观分子”到“临床表型”的多尺度解构,而且在优化医疗资源、促进肝病研

究和医学教育方面实现协同发展,最终赋能肝病临床新生态。本文以临床应用场景为牵引,系统综述数据治理、跨模态与时序建模、知识增强与可解释AI等关键进展,探讨其在临床诊疗、医学教育、科研转化与医疗管理中的应用路径,旨在为“数据-知识-临床”闭环实践提供可复用的技术与工程参考(图1)。

## 1 数据治理:技术体系与核心支撑

数据治理是肝病数字活检技术体系中最重要的一部分,旨在将多源临床数据转化为可计算分析的专病数据库资源。该体系以标准化治理为基础(表1),以多模态融合为桥梁,以医学大模型与知识推理为核心,并以可信治理为保障,共同构成“数据-算法-知识-安全”的支撑体系。

1.1 数据清洗与医学术语标准化 数据治理是肝病数字活检的基础环节,需要将多源异构临床数据转化为高质量、可计算分析单元的任务。该环节不仅要求在合规前提下完成去标识化与访问控制,还需通过AI技术实现高效清洗、标准化与质量监控<sup>[16-18]</sup>。在数据清洗的过程



图1 肝病数字活检技术体系

Figure 1 Technical framework of liver disease digital biopsy

表1 数据治理环节的关键技术与应用

Table 1 Key technologies and applications in data governance

治理环节	关键技术与应用场景	参考文献
数据清洗与标准化	NLP负责从原始文本中提取实体和关系; 知识图谱依托标准词汇体系实现语义整合与知识推理	[5-7]
质量控制与溯源	区块链与分布式账本技术用于数据溯源与审计; 知识图谱编码医学规则,自动发现逻辑冲突(如用药与诊断不符); NLP负责利用数据自身结构学习高质量表示,提升异常检测精度	[8-10]
模型迭代	基础模型通过对海量数据预训练,可持续监控数据质量与算法偏差; 数字孪生构建虚拟数据环境,用于安全、低成本地仿真和验证治理策略迭代	[11-12]
隐私与安全	联邦学习实现“数据不动模型动”的多中心协同治理; GAN生成高质量合成数据,替代敏感原始数据用于开发和测试; 二者结合能杜绝隐私泄露	[13-15]

注: NLP, 自然语言处理; GAN, 生成对抗网络。

中,NLP技术被广泛应用于电子健康记录等非结构化文本的自动结构化处理,能有效识别并标记缺失值、噪声及隐私信息<sup>[5,19]</sup>;可以通过无监督机器学习算法进行主题建模和去标识化,既提升了数据质量,也增强了合规性与安全性<sup>[20]</sup>。此外,知识图谱通过构建基于本体的结构化知识网络,并整合标准术语与自由文本,能有效解决词汇多样性与不一致性问题<sup>[6,21-22]</sup>,进一步结合基于Transformer的上下文嵌入与字符串相似度计算方法,对候选术语进行语义和字形层面的联合排序与消除歧义,实现医学术语向标准知识库的精准映射<sup>[7]</sup>。NLP与知识图谱常协同应用,形成自动化处理流程:由NLP负责从原始文本中提取实体和关系,知识图谱则依托标准词汇体系实现语义整合与知识推理,二者共同支持高质量、标准化医学数据集的构建,为下游AI模型训练与真实世界应用奠定可靠基础,推动精准医学的发展。

**1.2 数据的质量控制与溯源** 医疗数据治理中的质量控制与溯源追踪是保障肝病数字活检技术可信性与可用性的关键支柱。质量控制需要系统应对医疗数据在完整性、准确性、一致性与及时性等多维度的缺陷,尤其在多源异构数据集成环境中,缺失与逻辑错误频发,必须依靠自动化评估与跨系统验证(如临床文档与检验检查结果匹配)以及区块存储来维持质控数据与临床实际的一致性<sup>[8-10,23]</sup>。而溯源追踪则依赖于规范的“元数据管理机制”与“唯一标识体系”,明确记录数据起源、变换历史与访问路径,确保全流程可回溯与可复现<sup>[24]</sup>。并且,该机制需要建立标准化数据作业流程(如完整的肝病病程转换过程及质量控制脚本)和清晰的数据责任主体,以弥补碎片化信息在治理过程中的权属模糊。为实现系统化治理,需构建跨层级的协调架构与互操作性标准,例如通过国家级数据管治委员会推动数据规范统一与质量评估工具的标准化,将质量维度嵌入数据生命周期的各个阶段<sup>[25-26]</sup>。AI可以提升异构数据整合与异常检测的效率,同时区块链与分布式账本技术可以增强审计透明度与不可篡改性。通过“标准-工具-流程”的协同,使得质量控制与溯源追踪共同构成了医学数据应用的前提。

**1.3 数据治理模型迭代** 数据治理成果反馈与治理模型迭代是肝病数字活检技术中保障治理体系持续优化与适应性的核心机制,其有效实现高度依赖AI技术的支持。机器学习与深度学习技术通过对多源异构医疗数据的深入分析,为治理措施的有效性提供客观评估与反馈。

治理模型的动态优化可以借鉴医疗健康领域的基础模型(healthcare foundation model, HFM)等大型基础模

型,该模型利用多样化的医疗大数据进行训练,能够持续监控治理模型的运行性能、识别潜在偏见及安全风险,为训练策略调整提供依据<sup>[11,27]</sup>。数字孪生可以通过构建高保真的虚拟数据环境,为治理策略迭代提供安全、高效的仿真验证平台。整个反馈-迭代流程倚重于AI驱动的持续监控机制,可实时追踪数据流、模型行为及治理成效,及时识别模型质量退化、算法偏差与合规风险,并触发预警与自适应调整<sup>[12]</sup>。通过AI与治理流程的深度融合,最终构建“感知、评估与优化”为一体的智能闭环,在保障数据安全与伦理合规的基础上,持续提升数据质量、增强信任机制,并推动肝病数字活检技术对健康数据的价值深度挖掘。

**1.4 数据安全与伦理** 在肝病数字活检体系中,数据安全的实现是数据共享与应用的核心保障,依赖多种AI技术的协同赋能。区块链与AI技术的结合构成了去中心化、防篡改的数据管理基础,通过智能合约自动执行访问策略,并借助AI模型实时检测异常操作,显著增强医疗数据的完整性与可控性<sup>[13-14]</sup>。在隐私保护方面,联邦学习通过在本地进行分布式模型训练,仅聚合加密的参数更新,有效避免原始敏感数据泄露<sup>[14]</sup>;同时,GAN能够合成符合真实分布但无隐私风险的合成数据,为模型开发提供安全原料<sup>[15]</sup>。可解释AI通过揭示算法决策的内在逻辑,有效辅助监管人员审核数据使用行为,确保其符合伦理标准<sup>[28]</sup>。此外,AI驱动的实时异常检测系统可主动识别潜在恶意行为(如非法访问或网络攻击),并联动响应机制以降低风险。面向生物特征等敏感信息,专用AI脱敏工具可在辅助诊断的同时有效保护患者身份安全。医疗数据安全仍面临数据碎片化、算法鲁棒性不足以及生成式AI伪造数据等新威胁,需结合对抗训练、水印技术等持续加强技术治理与制度规范。

## 2 AI辅助的临床任务体系

肝病数字活检技术不仅是一套多模态数据治理的AI算法体系,更是一种面向临床的智能化诊疗的新范式。其核心目标是融合可信数据与医学大模型,实现辅助肝病的全周期诊疗,涵盖诊断、分期、风险预测、个体化治疗与健康管理等关键环节。在应用层面,肝病数字活检技术依托标准化数据治理和多模态建模体系,构建了覆盖“诊断-预测-管理-文书”的智能任务体系(表2),实现了从数据分析到临床决策的闭环应用。

**2.1 临床辅助决策** 临床辅助决策是肝病数字活检技术最常见的应用场景,其发展建立在高质量数据治理与

表2 AI辅助的临床任务体系中的关键技术与应用

Table 2 Key technologies and applications in the AI-assisted clinical task system

AI辅助的医学任务	关键技术与应用场景	参考文献
临床辅助决策	计算机视觉聚焦于肝脏影像(CT/MRI)中病灶的自动检测、定位与分类; 知识图谱提供鉴别诊断支持; 生成式AI生成初步诊断意见与治疗建议	[29-31]
风险预测与患者管理	卷积神经网络预测肝纤维化进展、肝硬化失代偿、肝细胞癌发生风险,对患者进行动态 风险分层; 基于时序建模进行健康风险自动化预警,并利用NLP技术生成个性化的健康管理方案	[32-34]
医疗文书自动化生成	大语言模型、生成式AI与多模态技术可自动整合患者病史与检查结果,并生成包括影 像诊断报告、门诊病历、病程记录及出院小结在内的医学文书	[35-37]

多模态医学大模型融合的基础之上。通过对检验、检查、随访与电子病历文本等源数据的标准化和整合,在真实世界中能够为辅助诊断与个体化临床决策提供支持。在这一架构中需要生成式AI、知识图谱与强化学习等关键技术协同作用,提升辅助诊断、病灶检测与个体化治疗方案生成等方面的效能。生成式AI不仅能够基于大语言模型生成初步诊断意见和患者特异性治疗建议,还可借助医学影像数据,增强小样本疾病(如罕见肝病)的检测能力。知识图谱通过整合疾病、基因、药物与临床表现之间的复杂关系,为诊断推理提供可解释的逻辑支持,如在鉴别诊断中识别易混淆疾病或预测药物-疾病相互作用等<sup>[29-30]</sup>。在病灶检测过程中,基于深度学习的视觉模型与知识图谱中的解剖学、病理学知识相结合,可实现对异常影像的精准定位与分类,同时通过强化学习动态调优检测阈值和序列决策,有效减少漏诊与误诊。在个体化治疗推荐中,生成式AI与知识图谱的深度融合,能够协同构建数字肝病孪生体,可以根据个体患者的真实状况,进而生成与临床表型高度吻合的个体化治疗方案<sup>[31]</sup>。强化学习通过模拟治疗路径与反馈机制,探索剂量调整、联合用药等实际场景,从而实现治疗策略的持续优化<sup>[32-34]</sup>。但是,该技术体系仍面临模型可解释性、多源异构数据对齐融合及伦理等关键挑战。

**2.2 风险预测模型与患者管理** 肝病数字活检在风险预测与患者管理方面的核心目标是建立“预测-干预-反馈”的闭环式智能管理体系,实现从单一风险评估到动态疾病演进监测的转变。通过融合多模态数据,包括肝脏影像、检验指标、基因组学与电子病历文本,AI模型可显著提升肝纤维化、肝硬化失代偿及肝细胞癌、肝衰竭等关键临床结局的预测精度<sup>[38-42]</sup>。例如,通过卷积神经网络的模型可自动化分析CT影像,提取肝实质变化的定量特征,实现对肝硬化患者再入院和死亡风险的动态分层,其效能优于传统预后评分<sup>[40]</sup>;同时,深度学习能够从乙型肝炎患者的影像中识别早期肝癌的潜在特征,助

力高危人群的精准筛查与早期干预。

在患者全周期管理方面,AI可以系统性地赋能个体化诊疗与长期随访。例如,基于联邦学习架构的多中心风险预测模型,能够在保护隐私的前提下,动态整合患者跨机构的实时影像、生化检测及用药记录,为代偿期肝硬化患者生成个体化的肝癌筛查间隔建议与抗肝纤维化治疗调整方案。同时,NLP技术自动化解析随访病历中的文本描述,提取如乏力程度、腹体征变化及治疗依从性等社会心理与临床症状特征,进而预警失代偿风险并自动生成个性化健康教育内容与复诊提醒<sup>[43]</sup>。

**2.3 医疗文书自动化生成** 生成式AI与大语言模型已成为医疗文书自动生成的核心技术支撑,其在肝病临床实践中的应用尤为显著。以GPT系列为代表的生成式模型能够基于医患对话内容自动生成符合医学规范的门诊病历、病程记录及出院小结等文书,减轻医生负担<sup>[35-36]</sup>。在肝病领域,这类技术可结合肝脏专科术语与诊疗逻辑,自动归纳患者病史、体征及辅助检查结果,生成结构化电子病历。与此同时,NLP技术通过分析非结构化文本(如既往病程描述或影像报告),提取关键临床概念并将其转化为标准化数据,为后续文书生成提供高质量输入。多模态技术进一步拓展了生成能力,例如,通过整合肝脏CT、MRI影像与临床数据,AI系统可自动生成影像诊断描述与初步印象报告,辅助医生快速完成肝癌、肝硬化等疾病的影像学评估与文档记录<sup>[37,44-45]</sup>。但是生成文本仍可能存在事实性疏漏或语义偏差,尤其在描述复杂肝病分期、合并症及治疗建议时,需引入医学知识图谱进行校准与增强。因此,尽管生成式AI极大提升了文书撰写的效率与一致性,其临床应用仍依赖真实场景下的有效性验证与人工审核机制的建立,以兼顾效率与医疗安全。

### 3 AI辅助体系在医学多场景中的应用

肝病数字活检不仅是一套以AI为核心的技术体系,

更是一种贯穿临床、教学、科研与管理全周期的智能医学生态模式。在真实世界应用中,可优化医疗资源的智能化配置,重塑个体化的医学教育路径以缩短学习曲线,并打通科研转化的关键环节以加速研发进程。

**3.1 医疗管理** 在医疗行政领域,AI技术通过优化工作流程与资源管理显著提升运行效率。例如,在肝移植中心的手术室调度中,AI系统可基于历史数据与实时需求预测手术时长与资源消耗,自动生成排班方案,减少医患的等待时间,提高资源利用率<sup>[46-47]</sup>。同时,NLP技术能够自动化处理肝病患者的电子健康记录,完成结构化录入、诊断编码及保险申报,减轻行政负担并降低人为错误<sup>[48]</sup>。

**3.2 医学教育** 在医学教育中,生成式AI正逐步改变传统教学模式。以肝病专科培训为例,基于大语言模型的对话系统能够生成高度仿真的临床案例,例如模拟肝硬化患者突发上消化道出血的诊疗决策过程,为医学生提供交互式、个性化的学习体验。此外,AI还可将复杂的肝脏影像学资料转化为可解释的教学内容,辅助低年资医生理解影像特征与疾病的关联,提升教学的动态性与交互性<sup>[49]</sup>。

**3.3 科研转化** 在科研转化方面,AI加速了从基础研究向临床应用的关键跨越。在多中心肝病研究中,联邦学习技术支持在保护原始数据隐私的前提下联合训练预测模型,如基于异质人群的肝细胞癌复发风险模型,既保护数据隐私又提升模型的泛化能力<sup>[50]</sup>。然而,这些技术的临床应用仍面临挑战,包括算法透明度不足、多中心数据标准化缺失以及转化流程中的伦理审查需求,需通过可解释AI及标准化验证框架逐步解决。

## 4 结论

肝病数字活检作为AI与肝病诊疗深度融合的前沿方向,以数据智能驱动临床智慧化为核心,构建了覆盖“医-教-研-管”全流程的一体化智能平台。本文系统阐述了NLP、知识图谱、大语言模型等AI技术在数据治理和各类临床实践场景中的技术策略和应用前景。然而,实现AI在辅助临床决策、患者管理、医学教育与科研转化的全方位应用,需要系统性整合与治理数据资源,推动算法可解释性与标准化验证体系建设,并深化伦理框架设计,最终实现从技术验证到规模化临床落地。

未来,肝病数字活检应持续推进技术融合与场景适配,构建闭环优化、人机协同的智能生态,推动肝病数字孪生体的构建,最终为实现肝病精准防控和全程健康管理提供可靠支撑。

**利益冲突声明:** 本文不存在任何利益冲突。

**作者贡献声明:** 曾永毅负责论文的总体规划与统筹;周阳主导研究设计与初稿撰写;陈振伟负责数据整理与图表制作;施翰英、林孔英参与资料收集与文献综述;王英超负责论文修改与语言润色。

## 参考文献:

- [1] SCHATTENBERG JM, CHALASANI N, ALKHOURI N. Artificial intelligence applications in hepatology[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2023, 21(8): 2015-2025. DOI: 10.1016/j.cgh.2023.04.007.
- [2] CAZZANIGA G, L'IMPERIO V, BONOLDI E, et al. Automating liver biopsy segmentation with a robust, open-source tool for pathology research: The HOTSPoT model[J]. NPJ Digit Med, 2025, 8(1): 455. DOI: 10.1038/s41746-025-01870-1.
- [3] WAQAS A, BUI MM, GLASSY EF, et al. Revolutionizing digital pathology with the power of generative artificial intelligence and foundation models[J]. Lab Invest, 2023, 103(11): 100255. DOI: 10.1016/j.labinv.2023.100255.
- [4] HE R, SARWAL V, QIU XR, et al. Generative AI models in time-varying biomedical data: Scoping review[J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e59792. DOI: 10.2196/59792.
- [5] BOSMA JS, DERCKSEN K, BUILTJES L, et al. The DRAGON benchmark for clinical NLP[J]. NPJ Digit Med, 2025, 8: 289. DOI: 10.1038/s41746-025-01626-x.
- [6] FEI H, REN YF, ZHANG Y, et al. Enriching contextualized language model from knowledge graph for biomedical information extraction[J]. Brief Bioinform, 2021, 22(3): bbaa110. DOI: 10.1093/bib/bbaa110.
- [7] KALYAN KS, SANGEETHA S. BertMCN: Mapping colloquial phrases to standard medical concepts using BERT and highway network[J]. Artif Intell Med, 2021, 112: 102008. DOI: 10.1016/j.artmed.2021.102008.
- [8] OZONZE O, SCOTT PJ, HOPGOOD AA. Automating electronic health record data quality assessment[J]. J Med Syst, 2023, 47(1): 23. DOI: 10.1007/s10916-022-01892-2.
- [9] SCOTT HF, BRILLI RJ, PAUL R, et al. Evaluating pediatric sepsis definitions designed for electronic health record extraction and multicenter quality improvement[J]. Crit Care Med, 2020, 48(10): e916-e926. DOI: 10.1097/CCM.0000000000004505.
- [10] RISKIN DJ, MONDA KL, GAGNE JJ, et al. Implementing accuracy, completeness, and traceability for data reliability[J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(3): e250128. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2025.0128.
- [11] RIZZO M. AI in neurology: Everything, everywhere, all at once part 3: Surveillance, synthesis, simulation, and systems[J]. Ann Neurol, 2025, 98(4): 651-667. DOI: 10.1002/ana.27230.
- [12] STETSON PD, CHOY J, SUMMERVILLE N, et al. Responsible artificial intelligence governance in oncology[J]. NPJ Digit Med, 2025, 8(1): 407. DOI: 10.1038/s41746-025-01794-w.
- [13] KOUTSOUBIS N, WAQAS A, YILMAZ Y, et al. Privacy-preserving federated learning and uncertainty quantification in medical imaging[J]. Radiol Artif Intell, 2025, 7(4): e240637. DOI: 10.1148/ryai.240637.
- [14] LIU JH, CHEN C, QU YY, et al. RASS: Enabling privacy-preserving and authentication in online AI-driven healthcare applications[J]. ISA Trans, 2023, 141: 20-29. DOI: 10.1016/j.isatra.2023.03.049.
- [15] LI J, CAIRNS BJ, LI JS, et al. Generating synthetic mixed-type longitudinal electronic health records for artificial intelligent applications[J]. NPJ Digit Med, 2023, 6(1): 98. DOI: 10.1038/s41746-023-00834-7.
- [16] ISGUT M, GLOSTER L, CHOI K, et al. Systematic review of advanced AI methods for improving healthcare data quality in post COVID-19 era[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2023, 16: 53-69. DOI: 10.1109/RBME.2022.3216531.
- [17] ANAYA G, PETTEE GABRIEL K, ST-ONGE MP, et al. Optimal instruments for measurement of dietary intake, physical activity, and sleep among adults in population-based studies: Report of a na-

- tional heart, lung, and blood institute workshop[J]. J Am Heart Assoc, 2024, 13(21): e035818. DOI: 10.1161/JAHA.124.035818.
- [18] BRADSHAW TJ, BROSCHE-LENZ J, URIBE C, et al. Recommendations for standardizing nuclear medicine terminology and data in the era of theranostics and artificial intelligence[J]. J Nucl Med, 2025, 66(9): 1471-1479. DOI: 10.2967/jnumed.124.269424.
- [19] COSTELLO J, KAUR M, REFORMAT MZ, et al. Leveraging knowledge graphs and natural language processing for automated web resource labeling and knowledge mobilization in neurodevelopmental disorders: Development and usability study[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e45268. DOI: 10.2196/45268.
- [20] SHI J, BENDIG D, VOLLMAR HC, et al. Mapping the bibliometrics landscape of AI in medicine: Methodological study[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e45815. DOI: 10.2196/45815.
- [21] EDFELDT K, EDWARDS AM, ENKVIST O, et al. A data science roadmap for open science organizations engaged in early-stage drug discovery[J]. Nat Commun, 2024, 15(1): 5640. DOI: 10.1038/s41467-024-49777-x.
- [22] XI JN, SUN DH, CHANG C, et al. An omics-to-omics joint knowledge association subtensor model for radiogenomics cross-modal modules from genomics and ultrasonic images of breast cancers[J]. Comput Biol Med, 2023, 155: 106672. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2023.106672.
- [23] AN D, LIM M, LEE S. Challenges for data quality in the clinical data life cycle: Systematic review[J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e60709. DOI: 10.2196/60709.
- [24] GIEREND K, FREIESLEBEN S, KADIOGLU D, et al. The status of data management practices across German medical data integration centers: Mixed methods study[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e48809. DOI: 10.2196/48809.
- [25] LIGHTERNESS A, ADCOCK M, SCANLON LA, et al. Data quality-driven improvement in health care: Systematic literature review[J]. J Med Internet Res, 2024, 26: e57615. DOI: 10.2196/57615.
- [26] SYED R, EDEN R, MAKASI T, et al. Digital health data quality issues: Systematic review[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e42615. DOI: 10.2196/42615.
- [27] HE YT, HUANG FX, JIANG XR, et al. Foundation model for advancing healthcare: Challenges, opportunities and future directions[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2025, 18: 172-191. DOI: 10.1109/RBME.2024.3496744.
- [28] SCHWABE D, BECKER K, SEYFERTH M, et al. The METRIC-framework for assessing data quality for trustworthy AI in medicine: A systematic review[J]. NPJ Digit Med, 2024, 7(1): 203. DOI: 10.1038/s41746-024-01196-4.
- [29] TIWARI P, ZHU HY, PANDEY HM. DAPath: Distance-aware knowledge graph reasoning based on deep reinforcement learning[J]. Neural Netw, 2021, 135: 1-12. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.11.012.
- [30] PENG CY, XIA F, NASERIPARSA M, et al. Knowledge graphs: Opportunities and challenges[J]. Artif Intell Rev, 2023, 56(11): 13071-13102. DOI: 10.1007/s10462-023-10465-9.
- [31] BHUYAN SS, SATEESH V, MUKUL N, et al. Generative artificial intelligence use in healthcare: Opportunities for clinical excellence and administrative efficiency[J]. J Med Syst, 2025, 49(1): 10. DOI: 10.1007/s10916-024-02136-1.
- [32] HE JZ, TIBO A, JANET JP, et al. Evaluation of reinforcement learning in transformer-based molecular design[J]. J Cheminform, 2024, 16(1): 95. DOI: 10.1186/s13321-024-00887-0.
- [33] ATANCE SR, DIEZ JV, ENKVIST O, et al. De novo drug design using reinforcement learning with graph-based deep generative models[J]. J Chem Inf Model, 2022, 62(20): 4863-4872. DOI: 10.1021/acs.jcim.2c00838.
- [34] PARK J, AHN J, CHOI J, et al. Mol-AIR: Molecular reinforcement learning with adaptive intrinsic rewards for goal-directed molecular generation[J]. J Chem Inf Model, 2025, 65(5): 2283-2296. DOI: 10.1021/acs.jcim.4c01669.
- [35] YIM WW, FU YJ, BEN ABACHA A, et al. Aci-bench: A novel ambient clinical intelligence dataset for benchmarking automatic visit note generation[J]. Sci Data, 2023, 10: 586. DOI: 10.1038/s41597-023-02487-3.
- [36] KERNBERG A, GOLD JA, MOHAN V. Using ChatGPT-4 to create structured medical notes from audio recordings of physician-patient encounters: Comparative study[J]. J Med Internet Res, 2024, 26: e54419. DOI: 10.2196/54419.
- [37] RAO VM, HLA M, MOOR M, et al. Multimodal generative AI for medical image interpretation[J]. Nature, 2025, 639(8056): 888-896. DOI: 10.1038/s41586-025-08675-y.
- [38] DINANI AM, KOWDLEY KV, NOUREDDIN M. Application of artificial intelligence for diagnosis and risk stratification in NAFLD and NASH: The state of the art[J]. Hepatology, 2021, 74(4): 2233-2240. DOI: 10.1002/hep.31869.
- [39] AHN JC, RATTAN P, STARLINGER P, et al. AI-Cirrhosis-ECG (ACE) score for predicting decompensation and liver outcomes[J]. JHEP Rep, 2025, 7(5): 101356. DOI: 10.1016/j.jhepr.2025.101356.
- [40] SU GL, ZHANG P, BELANCOURT PX, et al. Incorporation of quantitative imaging data using artificial intelligence improves risk prediction in veterans with liver disease[J]. Hepatology, 2024, 80(4): 928-936. DOI: 10.1097/HEP.0000000000000750.
- [41] ZHAI YP, HAI DR, ZENG L, et al. Artificial intelligence-based evaluation of prognosis in cirrhosis[J]. J Transl Med, 2024, 22(1): 933. DOI: 10.1186/s12967-024-05726-2.
- [42] SPANN A, STRAUSS AT, DAVIS SE, et al. The role of artificial intelligence in chronic liver diseases and liver transplantation[J]. Gastroenterology, 2025, 169(3): 456-470. DOI: 10.1053/j.gastro.2025.05.012.
- [43] FUJIWARA N, FOBAR AJ, RAMAN I, et al. A blood-based prognostic liver secretome signature predicts long-term risk of hepatic decompensation in cirrhosis[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2022, 20(5): e1188-e1191. DOI: 10.1016/j.cgh.2021.03.019.
- [44] BEDDIAR DR, OUSSALAH M, SEPPÄNEN T. Automatic captioning for medical imaging (MIC): A rapid review of literature[J]. Artif Intell Rev, 2023, 56(5): 4019-4076. DOI: 10.1007/s10462-022-10270-w.
- [45] FINK A, RAU A, REISERT M, et al. Retrieval-augmented generation with large language models in radiology: From theory to practice[J]. Radiol Artif Intell, 2025, 7(4): e240790. DOI: 10.1148/ryai.240790.
- [46] BELLINI V, RUSSO M, DOMENICHETTI T, et al. Artificial intelligence in operating room management[J]. J Med Syst, 2024, 48(1): 19. DOI: 10.1007/s10916-024-02038-2.
- [47] XU ZJ, WANG X, ZENG SS, et al. Applying artificial intelligence for cancer immunotherapy[J]. Acta Pharm Sin B, 2021, 11(11): 3393-3405. DOI: 10.1016/j.apsb.2021.02.007.
- [48] MUKHERJEE J, SHARMA R, DUTTA P, et al. Artificial intelligence in healthcare: A mastery[J]. Biotechnol Genet Eng Rev, 2024, 40(3): 1659-1708. DOI: 10.1080/02648725.2023.2196476.
- [49] MOROSKY CM, BAECHE-LIND L, CHEN KT, et al. Practical applications of artificial intelligence chatbots in obstetrics and gynecology medical education[J]. Am J Obstet Gynecol, 2025, 233(1): 4-11. DOI: 10.1016/j.ajog.2025.04.021.
- [50] KARARGYRIS A, UMETON R, SHELLER MJ, et al. Federated benchmarking of medical artificial intelligence with MedPerf[J]. Nat Mach Intell, 2023, 5(7): 799-810. DOI: 10.1038/s42256-023-00652-2.

收稿日期: 2025-09-01; 录用日期: 2025-10-18

本文编辑: 刘晓虹

引证本文: ZHOU Y, CHEN ZW, SHI HY, et al. Digital biopsy for liver diseases: A review of technological advances and application prospects[J]. J Clin Hepatol, 2025, 41(11): 2207-2212.

周阳, 陈振伟, 施翰英, 等. 肝病数字活检的关键技术与应用前景[J]. 临床肝胆病杂志, 2025, 41(11): 2207-2212.