

DOI:10.61189/502219wgjrhc

· 综述 ·

## AI+赋能胸片和CT诊治肺部疾病研究进展及展望

叶晓丹<sup>1</sup>,白春学<sup>2\*</sup>

1. 复旦大学附属中山医院放射科,上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院呼吸危重医学科,上海市呼吸病研究所,上海呼吸物联网医学工程技术研究中心,上海 200032

**[摘要]** 肺部疾病长期居全球死亡与致残前列,胸片与CT虽是筛查、诊断与随访的基础入口,但在高负荷与复杂病谱下暴露出漏诊、误诊及定量不足等局限。深度学习、影像组学与多模态大模型的兴起,使人工智能(*artificial intelligence, AI*)成为胸部影像从“读片工具”迈向“系统工程”的关键驱动力。AI已在肺结节/肺癌、结核、肺炎、间质性肺疾病(*interstitial lung disease, ILD*)、慢性阻塞性肺疾病(*chronic obstructive pulmonary disease, COPD*)、小气道及肺血管疾病等多谱系任务中显著提升检测、分割、表型量化与风险预测能力,并稳定量化倍增时间、纤维化负荷和气道重塑等关键指标,成为落实Fleischner、亚洲及中国指南的重要技术基础。在预防与筛查中,AI支持高危人群识别、胸片大规模筛查、低剂量CT(*low-dose computed tomography, LDCT*)风险分层及间质性肺异常(*interstitial lung abnormality, ILA*)、小气道病等亚临床异常的早期发现,可与健康管理、数字孪生和元宇宙平台结合,构建防线前移式干预模式。在诊断中,影像大模型与医学GPT可生成结构化报告,提供“指南在线”的决策支持,并面向医生与患者输出差异化解释;在治疗与随访中,AI赋能放疗计划、术前导航、治疗反应预测及肺功能估测,推进影像一功能一体化和个体化长期管理。未来将聚焦通用胸部影像大模型构建、5P医学深度融合、联邦学习与全球协同数据网络建设,并从“影像环节智能化”走向“医院—社区—家庭—云端—元宇宙”贯通的全病程系统工程,使胸片与CT成为数字呼吸健康生态的关键基础设施。

**[关键词]** 人工智能;肺癌筛查;影像组学与多模态大模型;肺间质病与慢阻肺定量表型;数字孪生与元宇宙医学;医学GPT与智能决策支持

[中图分类号] R 814.42 [文献标志码] A

### Research progress and prospects of AI+ empowering chest X-ray and CT in the diagnosis and treatment of lung diseases

YE Xiaodan<sup>1</sup>, BAI Chunxue<sup>2,3,4\*</sup>

1. Department of Radiology, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai Respiratory Research Institution, Shanghai Engineer &amp; Technology Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai 200032, China

**[Abstract]** Lung diseases have long been at the forefront of global mortality and disability, although chest X-ray and CT are the basic entrances for screening, diagnosis and follow-up, they are exposed to limitations such as miss diagnosis, misdiagnosis and insufficient quantification under high load and complex disease spectrum. The rise of deep learning, radiomics, and multimodal large models has made Artificial Intelligence (AI) a key driving force for chest images to move from "reading tools" to "system engineering". AI has significantly improved detection, segmentation, phenotypic quantification, and risk prediction capabilities in multi-spectrum tasks such as lung nodules/lung cancer, tuberculosis, pneumonia, interstitial lung disease (ILD), chronic obstructive pulmonary disease (COPD), small airways, and pulmonary vascular diseases, and has stabilized key indicators such as doubling time, fibrosis burden, and airway remodeling, becoming an important technical basis for the implementation of Fleischner, American College of Chest Physicians (ACCP), and China guidelines. In prevention and screening, AI supports the identification of high-risk groups, large-scale chest X-ray screening, LDCT risk stratification, and early detection of subclinical abnormalities such as ILA and small airway disease, which can be combined with health management, digital twins, and metaverse platforms to build a forward-moving defense line intervention model. Physicians and patients generate structured reports, provide "guide online" decision support, and output differentiated explanations by using imaging diagnostic models and medical GPTs. AI also empowers radiotherapy planning, preoperative navigation, treatment response prediction, and lung function estimation, promoting image-function integration and individualized long-term management for treatment and follow-up. In the future, it will focus on the construction of general chest imaging large models, the deep

[收稿日期] 2025-12-10

[接受日期] 2025-12-23

[作者简介] 叶晓丹,博士,主任医师. E-mail: yuanyxd@163.com

\*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

integration of 5P medicine, the construction of federated learning and global collaborative data networks, and move from "intelligent imaging links" to the whole course of the disease system project that connects "hospital–community–family–cloud–metaverse", so that chest X-ray and CT will become the key infrastructure of the digital respiratory health ecosystem.

**[Key Words]** AI; Lung cancer screening; radiomics and multimodal foundation models; quantitative phenotyping of ILD and COPD; digital twin and metaverse medicine; medical GPT and intelligent decision support

在全球呼吸健康中,肺部疾病长期位居死亡和致残负担前列,严重威胁人群寿命与生活质量,是核心公共卫生问题<sup>[1-3]</sup>。胸片和CT作为最基础、最容易获得且覆盖人群最广的“入口影像”,几乎贯穿肺部疾病从筛查、初诊到随访的全流程,是呼吸专科、急诊、全科与公共卫生项目依赖的关键工具<sup>[1-3]</sup>。

随着低剂量CT肺癌筛查项目的推广,以及结核病和慢性阻塞性肺病(简称慢阻肺)等慢性呼吸疾病负担不断上升,各类胸部影像检查需求呈指数级增长,影像科和临床科室面临前所未有的读片压力。在高工作量和复杂病谱交织的多模态影像环境中,漏诊、误诊及关键征象识别延迟风险显著增加,既影响个体预后,也削弱筛查与慢病管理项目的整体效益。因此,在保证甚至提升诊断质量的前提下支撑如此庞大的影像服务需求,已成为现代呼吸影像亟待解决的关键命题。

尽管胸片和CT技术本身已相对成熟,传统“人工读片+经验决策”模式在现代精准医学语境下暴露出明显局限<sup>[2,4]</sup>。影像解读高度依赖个人经验与训练背景,不同医师和中心在病灶识别、严重程度评估与随访建议上差异显著,“漏小灶、漏早期结节、漏轻微间质异常”在基层与高负荷场景中尤为常见。对于肺气肿负荷、纤维化体积、小气道病变或肺血管重构等复杂表型,临床多仍停留在“定性描述”层面,缺乏稳定可重复的定量指标,难以支撑精准分层、疗效评价与长期病程对比。大量影像报告也仍以非结构化文本存在,难以与电子病历、基因组学、肺功能及可穿戴/远程监测数据直接对接,“数据资产”价值未能充分释放<sup>[3]</sup>。仅依靠传统模式已难以满足未来呼吸疾病综合防治的精细化需求。

在此背景下, AI深度学习、影像组学和多模态大模型快速发展,为胸片和CT“智能升级”提供了关键的技术基础<sup>[1-2,4-5]</sup>。大量研究表明, AI系统在结节检测、肺炎识别、纤维化定量等任务中已从“简单检测+二分类”迈向“风险预测+多任务联合学习+多模态决策支持”,部分任务表现已达到或接近资深专家水平。技术焦点也随之从追求单一算法性能转向“如何嵌入真实临床工作流”,使AI从实验室成果转变为可持续运行的数字基础设施。

最新肺结节AI研究与多地区指南共同指出,AI不应仅被视为孤立的“第二读片者”,而应作为贯穿筛查、诊断、随访、治疗决策及患者教育的“系统性支撑层”,帮助规范落实复杂指南并缓解人力压力<sup>[4-6]</sup>。同时,以“元宇宙医学+医学GPT+数字孪生”为代表的新模式提出,将AI影像分析与云端平台、虚拟仿真训练及数字人专家(如BAIMGPT)深度耦合,可在虚实融合环境中实现影像知识的可视化传播、技能训练与患者赋能<sup>[7-9]</sup>。新时代影像工作的核心在于高效的人机协同。在这一整体愿景下,胸片和CT不再只是静态图像,而是构成“影像智能系统工程”的数据纽带与算法载体,为未来呼吸医学的结构性重塑奠定基础。

## 1 AI+赋能预防和筛查

**1.1 人群风险预测与筛查路径智能优化** 肺部疾病防控的首要问题,是在有限资源下精准识别高危人群并合理安排筛查频次。依托电子病历(electronic health record, EHR)、长期随访队列和健康管理平台,构建了整合吸烟史、职业暴露、环境污染、家族史、既往病史及社会决定因素的多维风险预测模型,用以估算肺癌和慢性呼吸病发生风险。将上述模型与LDCT及胸片资源配置结合,AI系统可自动给出筛查起始年龄、间隔与终止时点的“个体化方案”,在避免“一刀切”过度筛查的同时降低高危人群漏筛风险,从而在群体层面实现更优资源配置。

在策略设计层面,将肺结节亚洲共识、Fleischner指南和中国2024版肺结节专家共识中的风险分层规则与随访算法编码为AI决策树或大模型提示系统,可形成“指南级”的智能筛查与随访路径。系统在识别结节类型和危险因素后,可自动匹配推荐随访间隔及补充检查,并提示是否需要多学科会诊,从而将复杂文本指南转化为临床一线可直接调用的“结构化逻辑”。

**1.2 AI赋能胸片大规模人群筛查** 在资源受限地区,胸片依然是最具可及性的成像工具,也是结核、肺炎及部分慢性病早期识别的主力手段<sup>[8-10]</sup>。基于大规模胸片数据库训练的深度学习模型,可在短时间内完成批量筛查,对可疑异常按风险排序并优先

呈交放射科或呼吸科医师审阅。

在结核防控方面,CAD4TB类系统及多家厂商AI胸片软件已在多国完成前瞻性评估。相较人工阅读,AI在结核征象检出方面可显著提高敏感度,并在维持合理特异性的前提下降低人力成本与报告时间,尤其适合移动筛查车与社区项目。在肺部感染领域,多数深度学习模型在胸片肺炎检测中的AUC>0.9,但同时提示现有研究仍存在数据集偏倚、标签质量不均以及缺乏多中心外部验证等问题<sup>[10]</sup>。未来需在多地区、多设备和多种病原体谱系中开展前瞻性研究,以验证其真实世界效能。

针对慢性气道病人群,AI可由常规胸片估算肺容量、部分肺功能参数及胸廓形态异常,在体检或基层就诊人群中识别隐匿肺功能下降与高危表型,为早期干预、戒烟管理和长期健康管理提供低成本影像入口<sup>[11-12]</sup>。这对尚不具备广泛肺功能检测能力的地区具有重要补位意义。

**1.3 AI赋能LDCT肺癌与肺结节筛查** 低剂量CT是肺癌早筛基石,其大规模应用却带来结节数量庞大、读片负担沉重及随访路径复杂等问题<sup>[3-4]</sup>。深度学习LDCT筛查模型(如Google提出的端到端三维网络)在大样本验证中显示,在结节恶性风险预测方面优于传统体积或规则评分,并可在不依赖既往影像的情况下对多时相变化进行隐式建模<sup>[4]</sup>。这种模型可作为“前置筛查器”,从大量LDCT检查中快速筛选出最值得关注的高危结节和人群。

最新肺结节AI文献综述<sup>[5]</sup>表明,AI已贯穿“结节检测与分割—良恶性预测—生长模型—治疗效应评估”的全生命周期管理链条,从单点辅助工具逐步演变为支撑动态管理的关键技术模块。在指南层面,共识将结节体积测量、倍增时间、病灶类型和患者危险因素整合为更精准但复杂的管理策略。AI量化工具能提供高精度、可重复的体积与密度测量并自动计算倍增时间,因此被视为落地指南推荐的重要技术支撑。

**1.4 隐匿性病变与亚临床异常的早期发现** 在强调“防线前移”的呼吸医学中,隐匿性病变与亚临床异常的早期识别具有重要价值<sup>[13-15]</sup>。肺间质异常(interstitial lung abnormalities, ILA)常在体检或非肺部指征CT中偶然发现,Fleischner ILA官方文件指出,部分ILA可进展为特发性肺纤维化等显性间质性肺病,因而需要精准识别与动态随访。AI通过纹理分析和体素级分割,可在大规模CT数据中自动筛查疑似ILA人群,并定量其程度和分布,为早期干预与临床研究提供基础队列。

借助深度学习、肺纹理及小血管/小气道特征定量,AI还能在肺功能尚正常或仅轻度异常阶段识别小气道疾病、微小肺气肿及肺血管异常,将“检测窗口”前移至真正的预防阶段<sup>[11,16]</sup>。这一“影像先于症状与功能变化”的策略,有望推动临床模式从“症状驱动就诊”向“影像—功能一体化早筛”转变<sup>[17-19]</sup>。

**1.5 与健康管理元宇宙预防生态的融合** AI影像技术正逐步融入全生命周期健康管理和元宇宙医学生态<sup>[20-21]</sup>。依托元宇宙医学和数字孪生理念,可构建可交互虚拟肺模型,使吸烟、职业暴露及长期空气污染对肺结构和功能的累积损伤能以可视化形式呈现,帮助公众直观理解“看不见的伤害”,强化戒烟与防护动机。对高危人群,平台可生成个体化风险仪表盘,使预防策略从抽象宣教转向具象化、情境化干预。

在服务交付层面,基于BAIMGPT等数字人医学GPT,可将AI筛查结果、指南推荐与个体风险信息以通俗语言推送给患者与基层医生,实现“云端—社区—家庭”一体化的预防与筛查协同<sup>[22]</sup>。数字人专家既可在院内门诊提供实时解释和决策支持,也可在院外通过移动终端和元宇宙门诊持续陪伴,形成覆盖人群和个体层面的预防闭环。

## 2 AI+赋能诊断

**2.1 数据与模型基础** AI赋能诊断依赖充足多样的数据。长期积累形成的大规模胸片与CT数据库,包含结构化报告、关键征象标注及基于结局的弱监督标签,为多任务、多病种联合模型与自监督预训练提供了良好基础<sup>[1-2]</sup>。在此之上,结节检测网络、肺炎分类网络、肺气肿定量网络等任务特异模型相继建立,为后续大模型发展积累了方法学经验。

近年兴起的影像大模型在训练策略上更为多样,广泛采用掩码重建、对比学习及“影像—报告”跨模态训练,能够在粗标甚至无标数据上学习通用潜在表征。这些表征可经轻量化微调服务于结节识别、肺炎检测及间质性肺疾病分型等多种任务,显著减少对高质量标注的依赖,提升在不同机构与场景中的可推广性。

**2.2 肺结节与肺癌的AI诊断体系** 在肺结节管理中,AI已从单一“检出工具”发展为涵盖检测、分割、良恶性预测和随访管理的综合诊断体系<sup>[4-6]</sup>。多维卷积网络与转换器结构可在三维CT数据中识别可疑结节并完成精细分割,通过候选筛选控制假阳性率,使AI在LDCT筛查中充当“第一读片者”,大幅度减轻初筛负担<sup>[4-6]</sup>。

在良恶性预测与风险分层方面, AI通过整合结节大小、形态、边缘特征、实性比例、纹理及时间序列变化等多维信息,以非侵袭方式提高恶性风险评估精度<sup>[4-5, 17-19]</sup>。模型输出的概率值或风险等级可直接对接“继续观察”“缩短随访间隔”或“建议进一步侵袭性检查/干预”等决策,为“可观察对标:需活检/切除”提供量化依据。

在更高层面,以影像组学为基础整合临床信息、实验室指标、血液生物标志物和分子分型,构建“影像—临床—分子”端到端模型,全面评估肺癌生物学行为、分期及预后风险<sup>[18-19]</sup>。这类多模态模型承接Fleischner及亚洲/中国共识倡导的个体化管理理念,使影像解读从形态描述走向生物学推断。

### 2.3 感染性与炎症性肺病的AI诊断

感染性与炎症性肺病是胸片和CT最常见的适应证之一。对社区获得性肺炎及病毒性肺炎(包括COVID-19),多项研究表明,深度学习模型可显著提高胸片识别敏感度,尤其提升非放射科医师和基层机构对多样影像表现的识别能力。但病原体特异性诊断仍需依赖临床与实验室检查,仅凭影像AI难以完全替代综合判断,这也强调了AI“辅助而非替代”的定位<sup>[7, 10]</sup>。

在结核领域,多款AI胸片软件已在多国应用,其在结核征象检出方面表现接近甚至优于普通读片者,且可显著缩短报告时间<sup>[8-9]</sup>。在高负荷地区,AI适合作为前置筛查与分级诊疗工具:对高度可疑影像给予优先提示,对低风险个案进行快速“排除”,从而优化人力资源配置。

对于支气管扩张、非结核分枝杆菌病等复杂感染性/炎症性疾病,AI可自动量化支扩程度、黏液栓负荷与病灶体积,为严重程度分级、治疗策略选择及疗效监测提供客观指标<sup>[2, 23]</sup>。

### 2.4 慢性气道和肺血管疾病

已经逐步从影像描述到量化表型拓展。COPD及相关气道疾病具有高度异质性,不同患者在肺气肿分布、小气道病变及气道重塑方面差异显著<sup>[11, 15-16]</sup>。AI算法可自动量化肺气肿负荷、气道壁厚度、PRISM表型与小气道病特征,构建与肺功能、急性加重频率和长期预后密切相关的CT表型谱。这为精准药物治疗、肺减容策略和个体化康复方案提供了数据基础。

在肺血管疾病方面,机器学习可基于CT肺动脉造影及常规胸片推断肺动脉压力、血流动力学参数与小血管稀疏程度,辅助早期筛查肺动脉高压和慢性血栓栓塞性肺高压。虽然相关研究仍在探索,但已显示出在非侵袭风险分层和监测中的潜在价值。

### 2.5 ILD与弥漫性肺病的智能分型与定量

ILD及

弥漫性肺病的影像解读高度依赖经验,传统目测分级的一致性有限<sup>[13-15, 23]</sup>。基于Fleischner ILA立场文件和IPF相关白皮书,AI通过定量纤维化体积、蜂窝肺比例、磨玻璃密度和网格影分布,可在客观、可重复基础上优化亚型区分和进展预测,为临床试验设定影像终点、筛选高危人群和评估治疗反应提供了可靠工具。

在基层和资源有限地区,CT检查机会有限,胸片仍为主要成像手段。利用深度学习从胸片估算肺总量、纤维化占比和预后风险,可为ILD患者提供初步分层与随访建议,使高级定量理念下沉至低成本应用场景<sup>[12, 16]</sup>。

### 2.6 多模态、结构化报告和决策支持

临床落地层面,AI既要“看得准”,也要“说得清、用得上”。报告结构化是关键环节:AI可自动将胸片/CT所见映射至标准化模板,生成包含病灶位置、大小、数量、类型及相关征象的要素化报告,降低漏报风险,同时为后续研究提供统一数据源。

将Fleischner和区域共识的管理算法嵌入AI报告系统,可在读片时实时给出随访间隔、补充检查和MDT讨论建议,实现“指南同步”的决策支持模式。医师在阅读AI生成报告的同时即可获得对应指南条款与推荐等级提示,在不显著增加负担的前提下提升决策规范度。

通过BAIMGPT等医学GPT调用影像AI结果,可面向医生输出要点式决策支持与风险摘要,面向患者则提供通俗问答、图形化解释和个体化随访建议<sup>[22]</sup>。“同一事实+差异化叙事”的双面板输出,有助于在专业决策与患者理解之间取得平衡。

## 3 AI+赋能治疗与精准治疗

### 3.1 肺癌治疗中治疗决策与疗效预测

在肺癌管理中,影像已从单纯诊断工具转变为贯穿治疗全程的评估平台,AI的重要性日益凸显,可用于放疗计划优化,以支持个体化放疗方案设计。

在系统治疗中,AI模型通过分析肿瘤负荷、形态、血供及微环境相关征象,可预测免疫和靶向治疗的疗效与毒性风险,将LDCT及治疗中CT转化为个体化反应预测模型<sup>[3-4, 24-25]</sup>。结合Fleischner、亚洲及中国肺结节共识关于亚实性/多发结节长期随访与干预指征的推荐,AI还可持续量化病灶体积、密度和新发病灶,帮助判断“继续观察对标:干预升级”,在保障疗效的同时减少过度治疗。

### 3.2 介入、手术与放疗中的导航与虚拟仿真

介入与外科治疗高度依赖精确影像导航。基于CT三维

重建与实时导航, AI可优化经皮消融路径、支气管镜路径及胸腔镜切除范围, 在保证病灶完整切除的前提下最大限度保留正常肺组织, 缩短手术时间并降低并发症风险。

在“元宇宙医学”框架下, 可将AI重建生成的三维虚拟肺模型呈现于沉浸式环境, 用于术前演练、MDT讨论及患者沟通<sup>[20-21]</sup>。团队成员可在虚拟手术室反复推演不同策略、模拟突发情况处理, 而患者也能通过可视化方式理解病变位置及拟行操作, 从而提升团队协作效率与患者依从性。

**3.3 药物治疗与疾病进程的影像量化随访** 在慢性肺病药物治疗与自然史研究中, 需要敏感且客观的指标以评估病程与治疗反应。针对ILD及抗纤维化治疗, AI量化纤维化负荷及形态变化, 较传统目测更易捕捉细微改变, 为以影像为终点的试验和真实世界研究提供可靠工具。

在COPD与支气管扩张等疾病中, AI可定量气道直径、壁厚、肺实质密度与支扩程度, 用于评估长效支气管扩张剂、肺减容手术和支气管热成形等干预效果, 并在长期随访中绘制“影像指纹”演变轨迹, 为预后评估提供新视角。

**3.4 AI估测肺功能与“影像—功能”一体化管理** AI正推动肺功能与影像从“平行评估”走向一体化。CT和胸片深度学习模型可从影像估测FVC、FEV<sub>1</sub>等关键肺功能参数, 多项研究提示二者具有良好一致性和泛化能力, 为无法完成肺功检测的老年、重症和远程人群提供重要替代。

在数字孪生肺框架下, 将多时点CT/胸片与AI估测肺功能整合为个体化“功能轨迹”, 并以可视化曲线呈现疾病进展、治疗响应及短期风险, 可直观支撑治疗调整和康复计划制定, 同时提升患者对自身病程的理解与参与度。

**3.5 BAIMGPT与影像驱动的个体化管理路径** 数字人医学GPT在整合复杂影像与指南逻辑方面具有独特优势。“肺结节专家——BAIMGPT白皮书”提出, 通过将肺结节AI分析结果、Fleischner及区域指南规则和个体风险信息整合进数字人专家, 可为不同层级医院及公众提供分层化、循证的随访与转诊建议<sup>[22]</sup>。BAIMGPT是医生端的“智能助手”, 也是患者端的“全时空解释者”, 有助于减少信息不对称。

在ILD、COPD和肺高血压等慢病场景中, BAIMGPT可拓展为调用影像AI与云端PACS自动生成“病程时间线+关键影像节点+风险预测”, 用于治疗优化与患者赋能<sup>[22]</sup>。结合随访系统、远程监测与康复平台, BAIMGPT可将单次影像检查转化为全

程管理入口, 推动真正意义上的动态个体化管理。

#### 4 AI+赋能胸片和CT诊治肺部疾病的挑战与解决方案

**4.1 数据质量、偏倚与外部可推广性** 胸部影像的AI性能高度依赖训练数据质量与代表性。现有模型多基于单一国家、高收入地区或单一厂商数据训练, 若直接用于不同种族、疾病谱或设备条件的人群, 可能出现性能下降甚至系统性偏倚<sup>[1-2,6,8]</sup>。标签质量参差、病程阶段分布不均和随访不足亦影响模型稳健性与泛化能力。

为此需推动多中心、跨设备、跨疾病谱联合数据库建设, 通过统一标准与质量控制提升样本多样性。联邦学习与隐私增强技术为跨机构、跨区域协同训练提供途径, 在不共享原始数据前提下实现模型共建。同时, 在模型说明书中披露训练数据结构、适用人群与潜在局限, 有助于临床正确理解AI工具“适用边界”。

**4.2 可解释性与临床信任** 深度神经网络常被视为“黑箱”, 缺乏透明的决策路径, 限制了医生对AI结论的采纳<sup>[3,14]</sup>。在肺结节生物学行为判断、复杂ILD分型及多病灶鉴别诊断等高风险场景中, 医生往往更看重“能否解释”, 而非单一性能指标。当AI输出与临床直觉不符且不能给出合理解释时, 使用者可能选择忽略甚至对系统失去信任。

提升可解释性可通过注意力可视化、原型学习与因果推断等方法, 在病灶层面展示AI关注区域和关键特征。在报告界面同步呈现AI推荐及其依据(如倍增时间、密度变化、纤维化体积分数等), 有助于医生将AI输出与自身判断交叉验证。通过RCT评估AI对诊断一致性、决策质量与患者结局的真实影响, 亦是建立循证信任的重要路径。

**4.3 监管、伦理与责任划分** 目前监管多将AI定位为“辅助诊断软件”, 主要围绕特定任务审批。然而, 随着大模型和多任务系统的出现, AI在诊疗路径中的参与深度不断增加, 部分场景已具备半自主决策能力, 对现有监管模式和责任划分提出挑战。

未来需建立以AI介入程度为核心的分级监管体系, 对不同风险等级应用设定差异化的质量、可解释性与审计要求, 同时明确数据安全与隐私保护标准, 规范模型更新与再训练流程。对于责任划分, 应界定医生在采纳或忽略AI建议时的责任边界, 以及医疗机构在选型、部署与持续监控中的职责, 以在创新与安全之间取得平衡。

**4.4 工作流整合与经济学评价** 从“技术先进”到

“临床可用”，关键在于与工作流的深度整合。研究显示，合理部署的AI系统可减少漏诊误诊、缩短报告时间；但若触发规则或界面设计不合理，则可能增加额外点击和“警报疲劳”，抵消其收益。

实践中，应针对急诊、门诊、体检与结核筛查中心等场景制定差异化触发与优先级策略，将AI结果融入现有报告工作站，而非额外增加独立界面，从而减少流程割裂。同时开展成本效果和成本效益分析，量化AI对再入院率、住院时长、床位周转和长期预后的影响，为管理者与支付方提供决策依据，支撑AI的可持续应用。

**4.5 与指南、共识和MDT模式的深度耦合** 肺结节相关Fleischner、亚洲及中国共识在风险分层、随访间隔和干预指征上愈加精细，虽提升科学性，却增加一线医生完整遵循的难度。在高负荷环境中，医生难以在每次读片时逐条核对最新指南，这为AI提供了重要切入点。

通过将指南与共识路径编码为机器可读规则，并与影像AI输出对接，系统可在MDT讨论前自动生成“初步建议”，包括风险等级、推荐方案及争议焦点。专家在此基础上进行修订，可形成“AI+MDT”的混合决策模式，兼顾规范化与个体化，也为质量控制和学习型系统建设沉淀数据。

**4.6 元宇宙医学、数字人专家与教育监管** 元宇宙医学共识指出，沉浸式仿真环境可用于放射与呼吸专科培训、质量控制和公众科普，但亦伴随过度娱乐化、信息过载及内容真实性监管等问题。AI可自动生成典型病例库和个性化训练路径，元宇宙则将其转换为交互场景，显著提升学习效率<sup>[20-21]</sup>。

对于BAIMGPT等数字人医学GPT，在影像解释和健康咨询中必须坚持“赋能+分流”定位，而非取代医生。面向公众时，系统不得提供具体剂量调整或侵袭操作指导，遇潜在危险信号应明确建议及时就医或急诊。同时，需建立数字人内容的审核与更新机制，确保其基于最新指南与证据，避免知识陈旧或误导。

## 5 展望

**5.1 从任务特异模型到“通用胸部影像大模型”** 期待从“AI工具”到“影像智能生态系统”的迅速发展。未来胸部影像AI将从“任务特异模型”走向“通用胸部影像大模型”。这类模型在预训练阶段即覆盖多病种、多任务和多模态数据，可通过少样本甚至零样本学习快速适应新任务、新疾病与新设备，显著

降低开发与部署成本。同时，它们将与融合影像、文本、基因组及时序生理数据的多模态医学大模型深度耦合，成为数字人专家中的核心视觉模块，为多系统综合管理提供“平台级能力”。

**5.2 5P医学与AI赋能胸片/CT的深度融合** 5P医学为AI赋能胸片和CT提供了系统框架。在预测层面，AI整合影像与多模态数据预测疾病发生、进展与不良结局；在预防层面，通过识别ILA、小气道病和早期结节等亚临床异常，实现前移预警和干预；在个体化层面，基于影像表型与分子分型制定个体化治疗方案。在参与层面，元宇宙与数字人专家帮助患者以更直观方式理解影像与疾病状态，提升参与度；在精准医学层面，稳定可重复的影像定量指标是精准医学和药物研发的重要终点。

**5.3 开放数据、联邦学习与全球协同** 要实现上述愿景，开放协作与全球协同不可或缺。构建跨国家、跨厂商、跨疾病的大规模开放影像库与联邦学习网络，有助于降低偏倚、提高泛化能力，并使低中收入国家同享AI红利。在这一过程中，需要在隐私保护、数据主权与科研开放间取得平衡，通过标准化数据格式和互操作协议推动多方共建共享。

**5.4 从“影像环节智能化”到“全病程系统工程”** 未来的AI胸片/CT系统应从“单次检查工具”演进为“全病程系统工程”的关键模块<sup>[22,24-25]</sup>。以肺结节、ILD、COPD、肺高血压与结核为例，可将AI影像分析与门诊决策支持、数字随访、远程康复和患者自我管理平台贯通，构建“医院—社区—家庭—云端—元宇宙”的闭环管理体系。在这一体系中，一次影像检查成为触发后续风险评估、随访计划、数字人解释与远程监测的起点，推动形成持续迭代的学习型健康系统。

**5.5 元宇宙医学与医学GPT引领的新模式** 结合元宇宙医学共识与BAIMGPT实践，可预见一种新的影像诊疗模式逐步成形。在这一模式下，胸片和CT由云端多模态大模型自动分析与结构化，生成适用于医生与患者的多层次报告；医生在实体或虚拟MDT环境中与AI共同审阅影像、讨论决策；患者通过元宇宙门诊与数字人专家获得个性化解释与随访支持，实现真正的参与式医疗。

在这样的演进路径中，胸片与CT不再只是静态二维或三维图像，而是支撑医学新质生产力、连接现实与数字空间的关键数据枢纽。AI、元宇宙与医学GPT的协同，将传统“读片艺术”升级为“影像智能系统工程”，为全球肺部疾病防控和呼吸医学发

展开启新篇章。最终实现“名医治未病，元医惠众生”愿景。

**伦理声明** 无。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突。

**作者贡献** 叶晓丹:撰写、修改论文,核对参考文献;白春学:选题、撰写、修改、定稿,使用AI技术生成图片。

## 参考文献

- [1] HWANG E J, GOO J M, PARK C M. AI applications for thoracic imaging: considerations for best practice [J]. Radiology, 2025, 314(2): e240650.
- [2] LIM W H, KIM H. Application of artificial intelligence in thoracic radiology: a narrative review[J]. Tuberc Respir Dis, 2025, 88(2): 278–291.
- [3] NISHINO M, SCHIEBLER M L. Advances in thoracic imaging: key developments in the past decade and future directions[J]. Radiology, 2023, 306(2): e222536.
- [4] ARDILA D, KIRALY A P, BHARADWAJ S, et al. End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography[J]. Nat Med, 2019, 25(6): 954–961.
- [5] LI X, ZHANG W Z, FANG J L, et al. Advance in the use of artificial intelligence of pulmonary nodule: evolution, trends, and future directions[J]. Int J Surg, 2025, 111(10): 7135–7154.
- [6] WIDMANN G, LUGER A K, SONNWEBER T, et al. Machine learning based multi-parameter modeling for prediction of post-inflammatory lung changes [J]. Diagnostics, 2025, 15(6): 783.
- [7] LEE H W, JIN K N, OH S, et al. Artificial intelligence solution for chest radiographs in respiratory outpatient clinics: multicenter prospective randomized clinical trial [J]. Ann Am Thorac Soc, 2023, 20(5): 660–667.
- [8] HAN Z L, ZHANG Y Y, LI J, et al. Performance of artificial intelligence-powered chest X-ray for detection of pulmonary tuberculosis: a systematic review and meta-analysis. J Thorac Dis. 2025;17(3):3223–3237.
- [9] KHAN F A. Chest x-ray analysis with deep learning-based software as a triage test for pulmonary tuberculosis. EClinical Medicine. 2020, 28:100472.
- [10] SIDDIQI R, JAVAID S. Deep learning for pneumonia detection in chest X-ray images: a comprehensive survey[J]. J Imaging, 2024, 10(8): 176.
- [11] PARK H, YUN J, LEE S M, et al. Deep learning – based approach to predict pulmonary function at chest CT [J]. Radiology, 2023, 307(2): e221488.
- [12] UEDA D, MATSUMOTO T, YAMAMOTO A, et al. A deep learning-based model to estimate pulmonary function from chest x-rays: multi-institutional model development and validation study in Japan[J]. Lancet Digit Health, 2024, 6(8): e580–e588.
- [13] HATABU H. Interstitial lung abnormalities detected incidentally on CT: a position paper from the fleischner society [J]. Lancet Respir Med. 2020, 8(7):726–737.
- [14] HATA A, SCHIEBLER M L, LYNCH D A, et al. Interstitial lung abnormalities: state of the art[J]. Radiology, 2021, 301(1): 19–34.
- [15] ALMEIDA S D, NORAJITRA T, LÜTH C T, et al. Prediction of disease severity in COPD: a deep learning approach for anomaly-based quantitative assessment of chest CT [J]. Eur Radiol, 2024, 34(7): 4379–4392.
- [16] CHEN B, LIU Z Y, LU J J, et al. Deep learning parametric response mapping from inspiratory chest CT scans: a new approach for small airway disease screening [J]. Respir Res, 2023, 24: 299.
- [17] MACMAHON H, NAIDICH D P, GOO J M, et al. Guidelines for management of incidental pulmonary nodules detected on CT images: from the fleischner society 2017[J]. Radiology, 2017, 284(1): 228–243.
- [18] BAI C X, CHOI C M, CHU C M, et al. Evaluation of pulmonary nodules clinical practice consensus guidelines for Asia[J]. Chest, 2016, 150(4): 877–893.
- [19] 中华医学会呼吸病学分会肺癌学组,中国肺癌防治联盟专家组.肺部结节诊治中国专家共识(2024年版)[J].中华结核和呼吸杂志.2024, 47(8):716–729.
- [20] Bai C, Yang D, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clin eHealth. 2022(5):1–9.
- [21] 白春学.元宇宙医学之我见[J].中国医药导刊, 2023, 25(1): 1–6.
- [22] 白春学.肺结节专家——BAIMGPT白皮书[J].2025(2): 55–64.
- [23] NAKAMURA H. Current advances in pulmonary functional imaging[J]. J Thorac Imaging. 2024;39(3):e45–e60.
- [24] NATHANI A, DINCER H E. Advancements in imaging technologies for the diagnosis of lung cancer and other pulmonary diseases[J]. Diagnostics, 2025, 15(7): 826.
- [25] RAHOUMA M, MOHSEN H, MAHMOUD A, et al. Artificial intelligence (AI) applications and their impact on thoracic surgery: a narrative review[J]. Curr Chall Thorac Surg, 2025, 7: 27.

## 引用本文

叶晓丹,白春学. AI+赋能胸片和CT诊治肺部疾病研究进展及展望[J].元宇宙医学,2025,2(4):10–16.

YE X D, BAI C X. Research progress and prospects of AI+ empowering chest X-ray and CT in the diagnosis and treatment of lung diseases[J]. Metaverse Med, 2025, 2(4):10–16.