·临床研究·

低剂量CT扫描联合AI分析在肺结节筛查与追踪中的应用价值

黄茂华* 黄晓 杜茂云

（广西百色市人民医院放射科，百色 533000）

【摘要】 目的 探讨低剂量螺旋CT（low-dose computed tomography, LDCT）扫描联合人工智能（artificial intelligence, AI）分析在肺结节首次筛查及随访复查中的应用价值。**方法** 选取2023年1月至2025年6月期间在我院接受LDCT筛查并至少完成1次随访复查的160例肺结节患者作为研究对象，均接受LDCT检查，并采用肺结节人工智能影像辅助诊断系统，将病理结果作为金标准，比较AI阅片与人工阅片对不同直径结节的检出率、同一结节追踪成功率和阅片耗时。**结果** AI阅片对直径<3 mm和3 mm≤直径<5 mm的微小结节的检出率高于人工阅片（$P<0.05$）；在随访复查阶段，AI阅片对同一结节的追踪成功率高于人工阅片（$P<0.05$）；AI阅片平均耗时显著短于人工阅片（$P<0.001$）。**结论** LDCT扫描技术联合AI智能诊断分析在肺结节诊断中具有明显的应用价值，尤其在微小结节复查前后变化识别方面展现出高灵敏度和高效率，在节省时间、标准化诊断流程上具有独特优势，值得临床推广。

【关键词】 低剂量CT；人工智能；肺结节

【中图分类号】 R814.42; R734.2 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202601015

Application value of low-dose CT scan combined with AI analysis in screening and tracking of pulmonary nodules

*Huang Maohua**, *Huang Xiao*, *Du Maoyun*

(*Radiology Department*, *Baise People's Hospital*, *Baise 533000*, *China*)

【Abstract】 Objective To evaluate the value of low-dose CT (LDCT) scan combined with artificial intelligence (AI) analysis in the screening and follow-up of pulmonary nodules. **Methods** A total of 160 patients with pulmonary nodules who underwent LDCT screening and completed at least one follow-up between January 2023 and June 2025 were selected. All of them underwent LDCT examination and the lung nodule artificial intelligence imaging-assisted diagnosis system was used. The pathological results were used as the gold standard to compare the detection rates of different diameter nodules, the tracking success rates of the same nodules, and the time spent on reading films between AI reading and manual reading. **Results** AI reading showed higher detection rates for nodule diameter <3 mm and [3, 5) mm than manual reading($P<0.05$). During follow-up, AI achieved higher tracking success rates of the same nodule($P<0.05$). AI also required markedly less reading time ($P<0.001$). **Conclusion** The LDCT scan combined with AI analysis has significant application value in the diagnosis of pulmonary nodules, especially in the identification of changes in small nodules before and after re-examination, it demonstrates high sensitivity and efficiency. It has unique advantages in saving time and standardizing the diagnostic process, and is worthy of clinical promotion.

【Key words】 Low-dose CT; artificial intelligence; Pulmonary nodules

肺结节是胸部CT检查中最常见的影像学异常表现，通常直径≤30 mm。随着健康体检的普及以及公众对肺部健康关注度的上升，低剂量螺旋CT（low-dose computed tomography, LDCT）已成为肺结

第一作者：黄茂华，男，本科，副主任技师，研究方向：医学影像技术应用及质量控制

节筛查与随访复查的主要手段[1]。大量研究证实，LDCT在显著降低辐射剂量的同时仍能保持较高的空间分辨率，使得其适用于需要长期、重复检查的结节人群管理。然而，随之而来的海量影像数据显著增加了放射科医师的阅片负担，同时也暴露出人工阅片在微小结节（直径 <5 mm）检出、前后影像对比及毫米级测量一致性方面的局限[2]。肺结节临床管理以随访监测变化为核心，而非一次性明确诊断，根据相关指南[3]，对于大多数结节，尤其是以磨玻璃成分为主的小结节，需通过连续、多次复查观察其直径、体积及密度变化，才能判断其生物学行为及潜在的恶性风险。对于肺结节患者来说，需要在两次或多次的CT图像中，找到同一个结节，并计算其变化，然而人工阅片在随访中普遍存在一定的不足之处，例如，因不同医师之间的主观差异导致测量的最大径线偏差可达1 ~ 2 mm，且多发结节前后追踪不稳定，易出现漏追踪现象，因此传统人工随访模式难以满足精细化管理需求[4]。基于深度学习的人工智能（artificial intelligence, AI）影像识别技术，为肺结节整个随访周期的管理提供了新的解决方案。AI不仅能够在筛查阶段提高对微小结节的检出率，更重要的是在随访中通过三维空间自动配准精确对齐前后影像，自动追踪同一结节，并输出最大径线、三维体积以及平均CT衰减值的标准化定量测量结果。相较于人工阅片，AI依托算法模型实现毫米级测量的高度一致性，有效降低不同阅片者间的差异，且AI阅片速度快、稳定性高，不受疲劳及主观因素影响，有助于构建高效的肺结节随访体系[5]。基于以上背景，本研究重点评估LDCT联合AI分析在肺结节首次筛查及随访复查中的应用价值，系统比较AI与人工阅片在微小结节检出、前后随访影像自动配准、结节体积与密度变化定量测量等方面的差异，以期为肺结节人群的长期随访管理提供更高效、标准化、可重复的技术路径。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2023年1月至2025年6月期间在我院接受LDCT筛查并至少完成1次随访复查的受检者作为研究对象，在初筛阶段，共检索到病例178例，依据纳入与排除标准逐一进行审核，最终剔除18例，其中，既往接受过肺部肿瘤治疗患者5例、低剂量CT图像质量不佳者4例、合并严重心肺功能不全无法完成标准LDCT扫描者3例、复查资料缺失或随访中断者4例、病理证实结果不明确或记录缺失者2例，最终纳入160例符合要求的患者进行统计分析。所有患者知情同意。纳入患者中，男性87例，女性73例；年龄32 ~ 76岁，平均年龄（56.34 ± 9.21）岁；共检出肺结节348枚，其中，单发结节56枚，多发结节292枚。

1.2 纳入和排除标准

纳入标准：①年龄 ≥18岁，性别不限；②接受LDCT检查后发现单发或多发肺结节，且影像资料完整。

排除标准：①既往接受过肺部肿瘤放疗、化疗或手术者；②合并严重心肺功能不全、呼吸衰竭或活动性肺部感染者；③CT图像存在明显运动伪影、金属伪影，无法进行有效阅片分析。

1.3 检查与阅片方法

1.3.1 低剂量CT扫描

采用东芝320排640层 Aquilion ONE TSX 301 CT扫描仪，患者取仰卧位，双臂上举，深吸气末屏气扫描。扫描范围自肺尖至两侧肋膈角，覆盖整个肺部，并做好其他辐射敏感组织防护。扫描参数：管电压100 ~ 120 kV，管电流自动调节（30 ~ 80 mAs），扫描层厚5 mm，层间距5 mm，重建层厚1 mm，矩阵512 × 512，螺距1.0。图像重建采用FIRST算法，该算法集合正投影算法和全模型数据重建两项技术以减少噪声并保证低剂量扫描影像的高质量。平均容积CT剂量指数（volume CT dose index, $CTDI_{vol}$）为（1.3 ± 0.4）mGy，总剂量长度乘积（dose length product, DLP）为（48.7 ± 13.2）mGy·cm，整体辐射剂量控制在常规胸部CT的20% ~ 25%。

1.3.2 AI智能阅片

采用经国家药品监督管理局认证的数坤科技肺结节人工智能影像辅助诊断系统（以下简称AI系统），该系统基于卷积神经网络（convolutional neural network, CNN）深度学习框架，模型训练样本量超过50 000例胸部CT影像。AI系统在导入医学数字成像和通信（digital imaging and communications in

medicine, DICOM）格式原始数据后自动执行结节识别、分割与特征提取，输出结节位置坐标、最大径线、平均CT值、密度分类及良恶性概率评分。在复查时AI系统通过三维空间配准将基线与随访LDCT影像自动对齐，自动识别匹配前后两次检查中同一结节，并输出每个结节的前后变化量，包括最大径线变化、体积变化、体积增长率以及平均CT值变化，随后自动生成随访比对报告。

1.3.3 专业医师阅片

由2名副主任医师以上职称的放射科医师采用同一显示终端进行独立阅片，均对病例信息及AI结果双盲。记录自打开图像至最终报告生成所需的时间为阅片耗时。医师对肺结节形态进行评估，包括：结节大小、边界、密度、钙化、毛刺征及胸膜牵拉征等。若2名医师意见不一致，由第3名具有主任医师职称的放射科医师裁定。

1.4 观察指标

（1）不同直径结节的检出率：以病理结果为金标准，统计AI阅片与人工阅片对不同直径（直径<3 mm、3 mm≤直径<5 mm、5 mm≤直径<10 mm、直径≥10 mm）结节的检出率。

（2）同一结节追踪成功率：同一结节追踪成功率指在复查LDCT影像中，通过AI自动配准或人工阅片，在与基线影像一致的三维空间位置成功定位到同一结节，并完成轮廓识别及最大径线、体积或CT值测量的比率。追踪成功率=成功追踪的结节数量/结节总数×100.00%。

（3）阅片耗时：记录AI阅片与人工阅片所需时间并进行对比。

1.5 统计学方法

所有数据使用SPSS 26.0统计软件进行分析。符合正态分布的计量资料以均值±标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，组间比较采用独立样本t检验。计数资料以例数（n）和百分比（%）表示，组间比较采用χ^2检验。AI阅片与人工阅片的一致性采用Kappa检验评估。以P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 不同直径结节的检出率比较

首次筛查中，对于直径<3 mm和3 mm≤直径<5 mm的结节，AI阅片检出率高于人工阅片，差异具有统计学意义（P<0.05）；对于5 mm≤直径<10 mm和直径≥10 mm的结节，两种阅片方式的检出率差异无统计学意义（P>0.05）。见表1。

表1 两种阅片方式对不同直径结节的检出率比较［n（%）］

组别	检出率			
	直径<3 mm（n=66）	3 mm≤直径<5 mm（n=95）	5 mm≤直径<10 mm（n=113）	直径≥10 mm（n=74）
AI阅片	62（93.94）	91（95.79）	113（100.0）	74（100.0）
人工阅片	54（81.82）	82（86.32）	113（100.0）	74（100.0）
χ^2值	4.552	3.896	0.000	0.000
P值	0.033	0.048	1.000	1.000

2.2 同一结节追踪成功率比较

160例受检者全部至少完成1次复查，共涉及348枚结节，AI阅片对同一结节的追踪成功率高于人工阅片，差异具有统计学意义（P<0.05）。见表2。

表2 两种阅片方式在随访复查中对同一结节的追踪成功率比较［n（%）］

组别	例数	结节数	追踪成功率
AI阅片	160	348	342（98.28）
人工阅片	160	348	330（94.83）
χ^2值			6.214
P值			0.013

2.3 阅片耗时比较

AI阅片平均耗时显著短于人工阅片，差异具有统计学意义（P<0.001）。见表3。

表3 两种阅片方式阅片耗时比较（min，$\bar{x} \pm s$）

组别	例数	耗时
AI阅片	160	1.16±0.92
人工阅片	160	13.74±3.28
t值		46.711
P值		<0.001

3 讨论

近年来，我国肺结节检出率不断提升，同时有大量流行病学资料显示，肺癌的5年生存率与肺结节发现阶段密切相关[6]，当病灶直径小于10 mm时，手术切除后的5年生存率可超过90%，而一旦直径超过30 mm或出现胸外转移，生存率骤降至20%以下[7]。因此，肺结节的早期发现、准确诊断与动态监测是降低肺癌死亡率的关键环节。传统X线胸片由于分辨率有限，对直径<10 mm的微小结节检出率不足30%；而常规剂量CT虽能显著提高检出率，但辐射剂量相对较高，难以长期重复随访[8-9]。LDCT的出现，使得在可接受辐射范围内实现高灵敏度肺结节筛查成为可能，且该技术已成为全球公认的早期肺癌筛查标准方法之一。然而，随着LDCT在临床的普及，大量影像数据的积累在增加放射科医师阅片负荷的同时对其判断一致性也提出了更高的要求。放射科医师的阅片判断是肺部影像诊断的“金标准”[10]，其优势在于经验丰富的医师能够综合解剖结构、临床症状、既往影像学变化与病史信息，作出多维度诊断，识别复杂病理背景，例如肺不张、炎性渗出或纤维化区域的结节样密度改变。然而，人工阅片也面临明显局限，主要是医师阅片负荷过重。LDCT每例图像切片数量超过300张，大样本筛查容易造成视觉疲劳，增加漏检率[11]。AI系统基于深度学习算法，通过CNN对海量CT影像数据进行特征提取，可对DICOM格式原始影像执行三维肺组织分割，自动排除血管、支气管等非目标结构，并通过多层神经网络提取密度、形态、纹理特征，并与训练样本库中的典型病灶特征相匹配，实现定量评估[12]。

本研究结果显示，人工阅片在5 mm≤直径<10 mm及直径≥10 mm结节的检出率上与AI阅片差异无统计学意义（$P>0.05$），说明在中大体积结节判断方面，医师的影像识别与空间定位能力仍具有高度可靠性。而AI阅片在直径<3 mm与3 mm≤直径<5 mm微小结节的检出率上显著优于人工阅片（$P<0.05$），这是因为微小结节直径小、体积有限，边缘信号易被噪声淹没[13]，AI模型通过多尺度特征融合与迭代学习，能识别灰度梯度变化与空间纹理不连续性，从而捕捉人眼难以分辨的细微密度差异，且人工阅片易将血管交叉影或支气管截面误判为结节，AI通过三维卷积建模检测血管方向连续性特征，能在形态维度上自动排除伪影，提升准确率[14]。同时AI系统内置的噪声建模机制可提高信噪比，使低剂量图像仍具备足够特征强度；而人工阅片在高噪声条件下视觉识别率下降明显。由此可见，人工阅片在结构复杂或边界清晰病灶的诊断上依旧具有不可替代性，AI在这一领域更多起到辅助作用。此外，AI系统可同时处理多层影像数据并综合判断体积、密度、形态参数；而人工阅片需逐层扫描，易受主观判断与疲劳影响[15]。

本研究结果还提示，AI阅片在160例患者中的同一结节追踪成功率为98.28%，显著高于人工阅片的94.83%（$P<0.05$）。由于肺结节随访管理依赖前后影像的精确比对，人工阅片需要逐层查看并比对前后扫描影像，但受限于两次扫描间受检者体位、呼吸状态及肺充气程度的轻微差异，易造成解剖位置不完全一致，从而增加医师识别难度，此外，人工逐层比对不仅耗时长，而且在多发小结节或密度变化细微的结节中容易遗漏基线影像中已存在的结节，或误将新增结节识别为基线结节；而AI采用三维空间自动配准，将基线与随访复查影像放在同一解剖坐标体系内进行比对，具有高度稳定性，且AI对每个体素进行空间对齐，使两个时间点的影像达到精确重叠，减少因体位差异导致的匹配偏差，并利用结节位置、密度、形态等多参数进行综合判断，可在大多数病例中准确定位同一结节。

进一步研究发现，AI阅片平均耗时显著短于人工阅片（$P<0.05$），主要是因为AI系统在影像导入后可自动识别并完成检测，无需逐层人工扫描，且深度学习模型支持图形处理器（graphics processing unit, GPU）并行处理，大幅减少分析时间，特别是AI系统不受疲劳、注意力分散或视觉适应等影响，能够保证持续稳定的运算速度，可直接生成结构化报告与三维重建图像，省略人工描述环节[16]。

本研究中AI系统在随访复查时对同一结节的追踪存在前后对比不能自动定位的问题，分析其原因主要有以下几点。①呼吸相和肺容积的显著差异。CT扫描时，要求患者屏住呼吸。如果一次扫描是深吸气末，另一次是平静呼吸中期，整个肺的容积、

形态、膈肌位置、叶间裂位置都会发生巨大变化，结节在肺内的相对位置就会发生移动。②结节自身形态的显著变化。炎性结节在经过抗感染治疗后明显缩小或消失，AI可能认为“目标已不存在”。当结节在短期内特征变化过大如迅速增大、密度发生明显改变（如纯磨玻璃结节出现实性成分）等，就会超出AI的匹配容差范围[17]。③算法本身的容错能力和泛化能力。AI模型是在大量标注数据基础上训练的。如果训练数据未能充分覆盖上述各种复杂情况如大幅度的呼吸相差异、不同型号设备的图像差异等，那么在遇到这些“陌生”场景时，AI表现就会不佳。算法的鲁棒性不足是当前许多AI医疗产品面临的共同挑战。

本研究仍存在一定局限性，需要在未来研究中进一步完善。①本研究仅纳入单一医疗机构的160例患者，样本量相对有限，可能影响AI系统在不同设备、不同人群的泛化能力，未来需开展多中心、大样本的验证性研究。②纳入的患者仅完成至少1次复查，随访时间跨度不足以反映磨玻璃结节或惰性结节的长期演变，对体积增长率、密度进展趋势的长期稳定性评估仍需延长观察周期。③AI在体积评估方面表现优异，但未对同一结节在不同三维软件中的体积测量进行一致性对照，需增加跨平台比对以确保可重复性，未来可将AI检测结果与随访管理平台链接，实现自动生成随访提醒、自动标记新增病灶、自动比对前后图像差异等功能，推动肺结节随访管理流程标准化和智能化。

综上所述，LDCT扫描技术联合AI智能诊断分析在肺结节诊断中具有明显的应用价值，尤其在微小结节复查前后变化识别方面展现出高灵敏度和高效率，在节省时间、标准化诊断流程上具有独特优势，值得临床推广。

[参 考 文 献]

[1] 梁付奎, 傅晓琴, 李彩琴, 等. 人工智能AI联合低剂量肺部CT扫描在肺结节诊断中的应用价值分析[J]. 影像研究与医学应用, 2023, 7(15): 28–30.

[2] 邓海波. 人工智能联合低剂量肺部CT扫描在肺结节诊断中的应用价值分析[J]. 临床医药文献电子杂志, 2024, 11(21): 76–79.

[3] 毛卫霞, 任聪云, 李少臻, 等. 人工智能联合低剂量肺部CT扫描在肺原位癌筛查中的诊断价值[J]. 中国医学装备, 2021, 18(12): 45–48.

[4] 林泽, 李晶, 彭志伟, 等. AI辅助系统评估双层探测器光谱CT虚拟平扫肺结节检出的价值探究[J]. 临床放射学杂志, 2024, 43(8): 1404–1409.

[5] 王文通, 王铎尧, 王昭波. AI肺结节诊断软件联合靶扫描技术在肺结节患者早期肺癌诊断中的应用效果[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(17): 98–100.

[6] 于程程, 王晨, 李翔, 等. AI与不同年资医师对肺结节检出效能的比较研究[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(4): 22–25.

[7] 田景东, 王晶, 易晋声, 等. 基于两种AI软件对≤5 mm肺结节的诊断价值研究[J]. 中国医学工程, 2025, 33(6): 15–20.

[8] 吴玉萍, 杜静芳, 李娅. AI辅助标注肺结节的CT影像学诊断肺结节准确度与一致性分析[J]. 黑龙江医学, 2025, 49(17): 2119–2121.

[9] 李艳,李运健.高分辨率CT在表现为纯磨玻璃结节肺腺癌中的诊断价值[J].现代仪器与医疗,2025,31(6):48–52.

[10] 史明艳, 刘改乐, 郭彦杰. 基于人工智能（AI）的低剂量CT检查对良恶性肺结节的鉴别诊断研究[J]. 临床医学工程, 2025, 32(1): 49–52.

[11] 蔡少辉, 林巧娟, 杨树木, 等. CT与AI肺结节诊断系统对诊断肺结节及鉴别分型的临床价值[J]. 医疗装备, 2024, 37(5): 30–33.

[12] 张蜜, 谈炎欢, 鱼汀, 等. AI肺结节诊断系统对孤立性肺结节良恶性诊断效能评估[J]. 交通医学, 2024, 38(2): 165–167.

[13] 杨洁, 赵森, 李秋实, 等. 功能磁共振成像联合CT配合AI诊断系统鉴别诊断肺结节良恶性的价值观察[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31(8): 52–53.

[14] 姜繁. AI辅助诊断系统精确定位对肺结节的类型和分级的判断价值[J]. 现代医用影像学, 2024, 33(5): 965–967, 969.

[15] 段秀秀, 王梦坤, 王丽君, 等. 肺结节影像学特征与人工智能对肺结节良恶性的诊断价值[J]. 临床肺科杂志, 2025, 30(7): 1050–1054, 1063.

[16] 刘鲜艳, 单法成, 李珊, 等. AI对肺结节良恶性鉴别及浸润程度的诊断价值分析[J]. 实用癌症杂志, 2022, 37(12): 1994–1996, 2000.

[17] Yang X, Dorrius M D, Jiang W, et al. Association between visual emphysema and lung nodules on low–dose CT scan in a Chinese Lung Cancer Screening Program (Nelcin–B3)[J]. Eur Radiol, 2022, 32(12): 8162–8170.