

低剂量 CT 扫描技术在肺癌筛查中的诊断价值与风险评估

黄晓倩

联勤保障部队第 980 医院 河北 石家庄 050000

摘要: 肺癌是全球范围内发病率和死亡率最高的恶性肿瘤之一, 早期发现、早期诊断、早期治疗是改善患者预后的关键。近年来, 低剂量计算机断层扫描 (LDCT) 作为肺癌筛查的重要手段, 在多项大型随机对照试验中被证实可显著降低高危人群的肺癌相关死亡率。本文系统综述了 LDCT 在肺癌筛查中的诊断效能、临床应用现状、假阳性结果管理策略、辐射暴露风险、过度诊断问题以及成本效益分析, 并结合国内外指南对 LDCT 筛查的适用人群、筛查频率及后续管理路径进行深入探讨。研究表明, 尽管 LDCT 筛查存在一定的假阳性率、辐射暴露及潜在的过度诊断风险, 但在高危人群中带来的生存获益远大于潜在危害。未来应进一步优化筛查标准、人工智能辅助判读及多模态生物标志物联合策略, 以提升 LDCT 筛查的精准性与安全性。

关键词: 低剂量 CT; 肺癌筛查; 诊断价值; 假阳性; 辐射风险; 过度诊断; 成本效益

引言

肺癌是全球癌症致死首因, 2022 年 IARC 数据显示, 全球每年新发肺癌约 220 万例, 死亡 180 万例。我国肺癌的发病率和死亡率也居高不下, 是重大公共卫生问题。因早期肺癌症状不明显, 多数患者确诊时已至中晚期, 5 年生存率不足 20%, 建立有效的早期筛查体系意义重大。传统胸部 X 线检查敏感性低, 难发现直径小于 1 cm 的肺结节, 无法有效降低肺癌死亡率。低剂量 CT (LDCT) 分辨率高、成像快、辐射剂量低, 逐渐成为肺癌筛查首选。2011 年, 美国 NLST 证实, 与常规胸部 X 线相比, 年度 LDCT 筛查可使高危人群肺癌死亡率降低 20%, 此后 NELSON 试验等进一步验证了其价值。不过, LDCT 筛查并非毫无缺陷。它假阳性率高, 可能带来不必要的侵入性检查、心理负担及医疗资源浪费; 长期重复筛查有潜在致癌风险; 过度诊断也引发伦理与临床决策争议。因此, 全面评估 LDCT 在肺癌筛查中的诊断价值与潜在风险, 对科学制定筛查策略、优化临床路径意义重大。

1 低剂量 CT 的技术原理与参数设置

低剂量 CT 是在保证图像质量满足肺部结节检出需求的前提下, 通过降低管电流 (mA)、管电压 (kV) 及优化重建算法等手段, 显著减少辐射剂量的一种 CT 扫描技术^[1]。常规胸部 CT 的辐射剂量约为 7–8 mSv, 而 LDCT 通常控制在 1–2 mSv 之间, 相当于自然本底辐射 6–12 个月的累积量。典型的 LDCT 扫描参数包括: 管电压 100–120 kV, 管电流 20–60 mA, 螺距 1.0–1.5, 层厚 1–2.5 mm, 采用高空间分辨率重建算法 (如骨算法或肺算法)。现代多排螺旋 CT (如 64 排及以上) 配合迭代重建 (IR) 或深度

学习重建 (DLR) 技术, 可在进一步降低剂量的同时维持图像信噪比, 提升微小结节 (< 5 mm) 的检出能力。值得注意的是, LDCT 虽降低了辐射, 但其图像噪声相对较高, 可能影响对磨玻璃结节 (GGNs) 或部分实性结节的细节分辨。因此, 设备性能、操作规范及放射科医师经验对筛查质量至关重要。

2 LDCT 在肺癌筛查中的诊断价值

2.1 高敏感性与早期检出能力

LDCT 对肺结节的检出敏感性显著高于胸部 X 线。NLST 研究显示, LDCT 可检出 96% 的肺癌病例, 其中 85% 为 I 期或 II 期早期肺癌; 而 X 线仅能检出 75%, 且多为晚期。NELSON 试验中, LDCT 筛查组的 I 期肺癌比例高达 69%, 显著高于对照组 (23%)。尤其对于非小细胞肺癌 (NSCLC) 中的腺癌亚型——常表现为磨玻璃或部分实性结节——LDCT 具有独特优势。这类病变在 X 线上几乎不可见, 但在 LDCT 上清晰可辨, 为早期干预提供了窗口期。

2.2 降低肺癌死亡率的循证证据

NLST 是首个大规模 RCT, 纳入 53,454 名 55–74 岁、吸烟史 ≥ 30 包年且当前吸烟或戒烟 < 15 年的高危人群。结果显示, LDCT 组肺癌死亡率较 X 线组降低 20% (RR = 0.80, 95% CI: 0.73–0.93), 全因死亡率亦降低 6.7%。NELSON 试验 (欧洲最大规模) 纳入 15,789 名高危男性, 随访 10 年后 LDCT 组肺癌死亡率降低 24% (HR = 0.76, 95% CI: 0.61–0.95), 女性亚组分析亦显示类似获益。基于上述证据, 美国预防服务工作组 (USPSTF) 于 2013 年首次推荐 LDCT 用于高危人群肺癌筛查, 并于 2021 年将筛查年龄下限由 55 岁降至 50 岁, 吸烟包年标准由 30 降至 20, 显著扩

大了受益人群范围。

2.3 对特定人群的筛查价值

尽管吸烟是肺癌最主要的危险因素，但LDCT的筛查价值并不仅限于重度吸烟者。大量流行病学证据表明，其他多种因素同样显著增加肺癌风险，包括一级亲属中有肺癌病史、长期职业性暴露于石棉或氡气、居住在高空气污染地区、患有慢性阻塞性肺疾病（COPD）或特发性肺纤维化，以及曾因其他恶性肿瘤接受过胸部放疗等^[2]。这些人群即使不吸烟或吸烟量较少，其肺癌发生风险仍显著高于普通人群。基于此，中国《肺癌筛查与早诊早治指南（2023年版）》明确提出，除满足年龄 ≥ 50 岁、吸烟 ≥ 20 包年等基本条件外，凡具备上述任一额外高危因素的个体，均应考虑纳入LDCT筛查范畴。这种更为包容的风险评估模型，有助于在更广泛的潜在高危人群中实现早期肺癌的识别与干预，从而最大化公共健康效益。

3 LDCT筛查的主要风险与挑战

3.1 假阳性结果及其管理

LDCT筛查面临的最突出挑战在于其较高的假阳性率。在NLST研究中，高达96.4%的初始阳性结果（定义为发现 ≥ 4 mm的非钙化结节）最终被证实为良性病变，如肉芽肿、瘢痕或炎性假瘤。这种高比例的假阳性不仅给受检者带来显著的心理焦虑，还可能触发一系列不必要的后续检查，包括重复CT、PET-CT显像，甚至侵入性的经皮肺穿刺活检或胸腔镜手术，进而导致并发症风险增加和医疗资源的浪费。为应对这一难题，国际放射学界开发并推广了Lung-RADS分类系统。该系统根据结节的大小、密度（如实性、部分实性或纯磨玻璃）以及随访期间的变化趋势，将其分为1至4类，并为每一类别提供明确的随访或干预建议。例如，Lung-RADS 3类结节（如6–8 mm的实性结节）建议6个月后复查以观察稳定性，而4B或4X类则提示高度恶性可能，需在3个月内进行进一步评估。通过这种结构化的报告与管理路径，NELSON试验成功将假阳性率控制在2%以下，显著提升了筛查的临床实用性与患者体验。

3.2 辐射暴露风险

尽管单次LDCT的辐射剂量（1–2 mSv）远低于常规诊断性CT，但考虑到筛查通常需要年度重复进行，累积辐射暴露仍是一个不容忽视的问题。以连续10年筛查计算，累积剂量可达10–20 mSv。根据广泛采用的线性无阈（LNT）辐射致癌模型，每接受10 mSv的辐射，个体终生患癌风险约增加1/2000。对于年轻女性而言，由于乳腺组织对电离辐射更为敏感，这一风险可能进一步放大^[3]。

然而，多项风险-收益模型分析一致指出，在明确界定的高危人群中，LDCT筛查所避免的肺癌死亡人数远远超过其可能诱发的继发性癌症死亡人数。例如，有研究估算，在NLST入组人群中，每避免1例肺癌死亡，仅对应0.1–0.12例由辐射诱发的癌症死亡，净获益极为显著。因此，只要严格限定筛查对象为真正高危人群，并避免在低风险个体中滥用，辐射风险即可被有效控制在可接受范围内。

3.3 过度诊断问题

过度诊断是指通过筛查发现的某些惰性肺癌（如原位腺癌AIS或微浸润腺癌MIA），若未经筛查，可能终身不会进展为有症状或致命的疾病。对这类病变进行手术切除，虽可“治愈”癌症，却可能给患者带来不必要的生理创伤、肺功能损失及心理负担。NLST研究估计其过度诊断率约为18%，而设计更优的NELSON试验则将这一比例降至2%–5%，显示出随访策略优化的重要性。目前，临床上尚缺乏在筛查初期可靠区分惰性侵袭性病变的生物标志物或影像特征。因此，主流指南普遍建议对小、稳定的纯磨玻璃结节采取保守随访策略，而非立即干预。这一理念也得到了病理学分类更新的支持——2021年世界卫生组织（WHO）正式将“原位腺癌”从浸润性肺癌的范畴中移除，重新定义为前驱病变，反映了医学界对过度诊断问题的深刻反思与积极应对。

3.4 成本效益与可及性

LDCT筛查的成本效益受地区医疗资源、支付体系及筛查依从性影响。在美国，LDCT被Medicare覆盖，成本效益比约为50,000–100,000/QALY（质量调整生命年），符合卫生经济学标准。在中国，尽管设备普及率逐年提高，但基层医院缺乏标准化操作流程与专业判读能力，限制了筛查推广。此外，筛查依从性亦是关键。NLST中仅62%参与者完成全部3次年度筛查，脱落率高削弱了整体效益。因此，建立区域筛查中心、远程影像会诊平台及患者教育体系，对提升筛查覆盖率至关重要。

4 优化LDCT筛查策略的前沿方向

4.1 人工智能辅助诊断

近年来，人工智能特别是深度学习技术在医学影像领域的迅猛发展，为解决LDCT筛查中的效率与准确性瓶颈提供了全新思路。基于卷积神经网络的AI算法已能在肺结节的自动检测、三维分割、密度分类及恶性概率预测等方面达到甚至超越人类专家的水平。AI辅助阅片可将放射科医师的工作负荷降低，同时显著提升对 < 6 mm微小结节的检出一致性^[4]。未来，AI有望进一步整合患者的临床信息、遗传背景及环境暴露数据，构建动态、个

性化的肺癌风险预测模型，从而实现筛查间隔与干预强度的精准定制。

4.2 多模态生物标志物联合筛查

单一依赖影像学的筛查模式存在固有局限，尤其是在特异性方面。为此，研究者正积极探索将LDCT与液体活检、呼出气分析或血清蛋白标志物等生物检测手段相结合的多模态策略。例如，DART研究发现，在LDCT基础上联合检测一组血浆蛋白标志物（如Pro-SFTPB、CEA等），可将假阳性率降低近50%，大幅减少不必要的后续检查。类似地，基于循环肿瘤DNA（ctDNA）或微小RNA（miRNA）的分子筛查技术也在早期临床试验中展现出良好前景。这种“影像+分子”的融合范式，有望在未来成为肺癌早筛的主流模式。

4.3 动态风险评估与个体化筛查

当前的筛查标准多基于静态人口学与行为学变量（如年龄、吸烟史），未能充分反映个体风险的动态演变。理想的筛查策略应根据肺功能变化、新发合并症、戒烟状态更新、家族史补充等信息，实时调整筛查起止时间与频率。例如，一位成功戒烟15年以上的 former smoker，其风险可能已显著下降，继续年度筛查的边际效益有限；而一位新诊断COPD的55岁轻度吸烟者，其风险可能已跃升至需启动筛查的阈值。发展此类动态、连续的风险评估工具，是实现真正个体化肺癌预防的关键一步。

5 结语

低剂量CT扫描技术作为肺癌早期筛查的核心工具，已被高质量循证医学证据证实可显著降低高危人群的肺癌死亡率。其高敏感性使得早期、可治愈性肺癌得以及时发现，从而改善患者预后。然而，假阳性结果、辐射暴露、过度诊断及成本效益等问题亦构成现实挑战。未来，通过人工智能赋能、多模态生物标志物整合、动态风险评估及标准化管理体系的建立，有望在最大化LDCT筛查获益的同时，最小化其潜在风险。在国家层面推动规范化、个体化、智能化的肺癌筛查策略，是实现“健康中国2030”癌症防治目标的关键路径。

参考文献

- [1] 杏子,彭源.低剂量CT在肺癌筛查中的价值[J].中国防痨杂志,2024,46(S2):234-236.
- [2] 窦科妮.低剂量CT:肺癌早期筛查的黄金标准[J].药物与人,2025,(08):54-56.
- [3] 卢建朋.低剂量CT扫描在早期肺癌筛查中的诊断效能与安全性评估[C]//重庆市健康促进与健康教育学会.临床医学创新与实践学术研讨会论文集(一).邢台市第九医院/巨鹿县医院,;2025:546-549.
- [4] 陈琳琳.低剂量CT扫描在肺癌筛查中的应用价值[C]//四川省国际医学交流促进会.2025年基层感染质量管理提升学术研讨会论文集.北京按摩医院,;2025:19-23.