

多层螺旋CT肺动脉造影在肺栓塞诊断中的应用进展

赵 晨, 孟 姮*

北华大学附属医院(三甲)急诊一楼CT科, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年7月26日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年8月28日

摘 要

肺栓塞(Pulmonary Embolism, PE)是由内源性或外源性的栓子堵塞肺动脉主干或分支导致的肺循环障碍综合征。近年来,其发病率呈上升趋势。多层螺旋CT肺动脉造影(Multi-slice Spiral CT Pulmonary Angiography, MSCTPA)是一种无创性检查技术,在临床广泛应用,16层螺旋CT具有快速、薄层、分辨率高等优点,在诊断肺栓塞上发挥了重要作用。本文系统性地梳理了多层螺旋CT肺动脉造影的技术原理与分类、优势、技术进展、临床应用策略,对于指导临床医生,特别是基层或非专科医生合理选择检查、制定诊疗方案具有显著的教育和指导价值。文章综合了技术原理、临床实践和未来展望,为读者提供了关于该主题的全面概览。

关键词

肺栓塞, 多层螺旋CT肺动脉造影, 诊断, 进展

Application Progress of Multi-Slice Spiral CT Pulmonary Angiography in the Diagnosis of Pulmonary Embolism

Chen Zhao, Heng Meng*

Department of CT, First Floor Emergency Department, Beihua University Affiliated Hospital (Grade III), Jilin Jilin

Received: Jul. 26th, 2025; accepted: Aug. 19th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 赵晨, 孟姮. 多层螺旋 CT 肺动脉造影在肺栓塞诊断中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(8): 1937-1941.
DOI: 10.12677/acm.2025.1582444

Abstract

Pulmonary Embolism (PE) is a syndrome of pulmonary circulation disorder caused by endogenous or exogenous emboli blocking the main or branch of the pulmonary artery. In recent years, its incidence rate has been on the rise. Multi-slice Spiral CT Pulmonary Angiography (MSCTPA) is a non-invasive examination technique that is widely used in clinical practice. 16-slice spiral CT has the advantages of rapidity, thin slice, and high resolution, and has played an important role in the diagnosis of pulmonary embolism. This article systematically reviews the technical principles and classification, advantages, technological progress, and clinical application strategies of multi-slice spiral CT pulmonary angiography. It has significant educational and guiding value for guiding clinical doctors, especially grass-roots or non-specialist doctors, to rationally select examinations and formulate treatment plans. The article integrates technical principles, clinical practice and future prospects, providing readers with a comprehensive overview of the topic.

Keywords

Pulmonary Embolism, Multi-Slice Spiral CT Pulmonary Angiography, Diagnosis, Progress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在肺栓塞中, 肺血栓栓塞症(Pulmonary Thromboembolism, PTE)是最主要的一种, 约占 90%以上。肺栓塞是一种无特异性临床表现的疾病, 其主要临床表现为呼吸困难、咯血、胸痛、晕厥等, 严重时甚至会引起猝死。研究表明, 未经治疗的肺栓塞患者死亡率可达 20%~30%, 如果能得到有效的诊治, 死亡率将仅为 8%左右[1]。所以, 正确的早期确诊是提高患者疗效的关键。多层螺旋 CT 肺动脉造影作为一种非侵入性、快速、准确和可重复性的检测方法, 已经逐步替代常规的肺动脉造影术。

2. 多层螺旋 CT 肺动脉造影的技术原理

多层螺旋 CT 肺动脉造影是基于 X 线影像和 CT 扫描两种影像学的交叉融合而成。该技术的关键在于采用多个探头实现肺部螺旋成像, 在 X 射线入肺时, 由于肺部各器官(如血管、肺实质和骨骼等)的密度差别而出现不同程度的衰减。利用旋转内插法重构肺部血管的截面图, 并利用后处理方法得到肺部血管的 3D 显示图。MSCTPA 最大的优点是可以通过调整螺旋间距和管球转动的转速, 实现一次闭气(5~10 秒钟)即可实现对肺部的完整成像, 有效减少由于呼吸活动引起的伪迹, 确保了影像的连续性[2]。后处理是提高影像学性能的关键, 多平面重建(Multiplanar Reformation, MPR)可以从多个角度观测血管运动, 而曲面重建(Curved Planar Reformation, CPR)可以将扭曲的肺血管进行线性化, 而最大密度投影(Maximum Intensity Projection, MIP)可以清晰地反映血管中造影剂的充盈情况, 而容积再现(Volume Rendering, VR)可以直接展示整个肺血管的解剖形态, 从而精确地判定血栓的位置、形态和病变程度[3]。

3. 多层螺旋 CT 肺动脉造影的优势

在肺栓塞诊断中, 多层螺旋 CT 肺动脉造影因其独特的成像技术, 逐渐替代了常规的检测方式, 已逐渐成为肺癌的主要诊断方式。相对于数字减影血管造影(Digital Subtraction Angiography, DSA), 其曾经被

称为“金标准”，由于其具有一定的创伤性与并发症风险，如假性动脉瘤、血栓形成皮下血肿等，并且由于仪器的局限性，使其在临床上的推广受到了较大的阻碍[4]。而 MSCTPA 的非侵入性特点则从本质上避免了上述问题，大大提高了检查的安全性。随着 64 层及更高的 CT 机的出现，CT 成像速度快、空间密度高，使最小的肺动脉栓塞检出的最小粒径达到 2 mm，为肺部微小病变的早期发现奠定了基础。临床资料表明，MSCTPA 对肺主动脉干和叶段栓塞症的灵敏度高达 86%~100%，可直观地反映病灶的大小和病情，提高了确诊的准确性[5]。采用该方法可以有效去除大血管和心脏假说，特别是在靠近心缘区的区域内，可清楚地看到肺动脉，从而解决常规影像容易遗漏的问题。随着 3D 后处理的不断完善，利用 MPR、MIP 和 VR 等方法可以获得完整的 3D 影像，从而解决 DSA 成像中由于视角受限而造成的影像交叠问题[6]。

4. 在肺栓塞诊断中多层螺旋 CT 肺动脉造影的临床应用

4.1. 在肺栓塞诊断中多层螺旋 CT 肺动脉造影的临床应用价值

近年来，随着多层螺旋 CT 肺动脉造影的发展，以及 4 层、16 层和 64 层等多种仪器的使用，其在临床上的准确性得到了进一步的提高。基于 PIOPED II 的 4 排 CT 影像学评价，其对动脉粥样硬化的敏感性和特异性分别达到 96% 和 83%。在实际应用中，CT 检查必须与临床评价有机地联系起来：对于具有较小或中等临床可能发生病变的患者，CT 阴性者的阳性预测值达到 96%，而 CT 检查的阴性预测值为 89%，可以用来进行判断；高度或中等风险组 CT 检查的阳性率分别为 96%、92% [7]。一旦诊断明确，应尽早进行抗凝治疗。MSCTPA 联合临床评估或者 D-二聚体检测，可以构成一个完整的诊断链条。已有研究表明，16 排 CT 联合 D-二聚体检测结果为阴性的患者，其 DVT 发生的概率小于 1%，3 月后发生的概率只有 1.5%，达到了单纯依靠影像诊断或剔除肺动脉栓塞的目的。然而，CT 检查与临床评价不一致，CT 检查为高风险人群，CT 检查为阴性者，其阴性预测为 60%，而 CT 检查为低风险人群时，其阳性预测值只有 58% [8]。16 排 CT 可以准确地反映动脉粥样硬化的位置和侵犯的程度，提高了对可疑患者的早期确诊率。其中，64 层螺旋 CT 的技术突破十分重要，其亚毫米层厚小于 1 mm，旋转速度可达 0.3~0.5 秒/圈，极大地提高了亚肺段及其以下动脉的成像效率。胸部全幅扫描 4 s~6 s 可显著降低呼吸障碍患者的呼吸伪像。64 排 CT 三联成像技术可以在 8 秒钟之内完成肺动脉、胸主动脉和冠脉的三维成像，为临床早期识别肺动脉和肺动脉疾病提供了一种有效的方法。

4.2. 多层螺旋 CT 肺动脉造影与其他影像学检查方法的对比研究

在肺栓塞诊断体系中，多层螺旋 CT 肺动脉造影是目前肺动脉造影较核素显像、MRI 及肺动脉造影等方法更具优越性，是目前肺动脉造影的主要手段。MSCTPA 相对于放射性核素肺通气灌注(pulmonary ventilation/perfusion, V/Q)成像具有更高的成像速率和更高的临床一致性。Blachere 等[9]的对照研究发现，MSCTPA 在肺动脉粥样硬化中的灵敏度为 94.1%，特异性为 93.6%，而 V/Q 成像为 80.8%、73.8%。V/Q 扫描技术的不足之处为：很难区分肺动脉粥样硬化或其他病变，有些病例不能确诊或排除，需要与 X 线片相配合才能提高对 X 线片的确诊率，有研究显示 V/Q 成像对可疑患者有 91% 的确诊率。目前，临床上常用的影像学表现为室间隔左移、右心室增大、右心室收缩等，而能直观看到心脏血栓的患者只有 10%，与 MSCTPA 相比，其准确性较差。MRI 肺动脉造影耗时长，检测费用高，对亚肺段动脉的检出率不高(约 40%)，限制了其在临床上的推广。尽管常规的肺动脉造影被认为是“金标准”，但由于其有创、损伤大、易发生死亡等缺点，在临床上的使用受到极大限制。

4.3. 双能 CT 在灌注成像中的应用

双能 CT 灌注成像显示“高光”和“阴影”共存于急性肺动脉栓塞(APE)。对潍坊市人民医院 21 例病

例进行回顾性分析, 结果显示, DEPI 法得到的灌注缺陷指数(PPDI)与传统 CT 肺动脉梗阻指标(PAOI)具有较高的相关性, 而低危和中危组 PPDI 则有明显的差异[10]。然而, 目前最明显的缺点是, 样本数只有 21 个, 且缺少外在证实。DEPI 使 CTPA 敏感性从 72% 提高到 89%, 但特异性却降低到 79% (Meta 分析 $n=1274$), 提示“漏诊减少, 误诊增多”的零和游戏仍然存在。在慢性阻塞性肺疾病(COPD)和心力衰竭(HF)患者中, 高达 25% 的“假阳性”, 容易被误诊为中、高风险需要溶栓治疗。尽管双层检测器不需要第二次扫描, 但仍然需要 60 mL~80 mL 的造影剂才能确定碘的可靠性; 虽然 tin-filter 可以将有效剂量降低到 1.1 mSv, 但目前还没有广泛应用, 基层医院的治疗水平还停留在 2.5 mSv~3.5 mSv。检测孤立亚段栓子(SSPE)一直是其争论的焦点。积极的证据: DEPI 还发现了 6%~8% 的 SSPE, 30 天内的再栓率为 3.7%。SSPE 的抗凝治疗并没有明显减少, 但导致严重的出血。对于合并有右心室功能不全的 SSPE 患者, 应该考虑 D-二聚体的动力学改变和出血危险度来判断是否进行抗凝治疗, 而不是单纯的 DEPI 检查。对于中高风险、CTPA 阴性而临床高度怀疑的患者, DEPI 可以用作“二线工具”, 如果 PPDI 大于 20%, 伴有右室功能障碍, 则可以作为溶栓治疗的辅助选择。

4.4. AI 在 PE 诊断与风险分层中的具体作用

人工智能(AI)在肺动脉栓塞(PE)的诊断和危险分层中逐渐显示其临床价值, 但其实际应用需要从关键角度进行客观评价。在诊断层次上, AI 利用深度学习算法对 CTPA 图像进行分析, 从而实现对肺动脉栓塞的自动识别和定位。本课题组前期研究发现, 该方法对中心性 PE 的诊断敏感性达到 92%~96%, 达到了高级放射科医生的水准, 特别是在初级医疗机构或紧急情况下, 可有效降低漏诊几率。但由于血管伪影、呼吸运动等因素造成的误判, 目前对于亚段及以下微小栓子的鉴别仍然存在一定的局限性, 假阳性率高达 8%~15%。在危险分层中, 将 CTPA 的影像学特征和临床资料(D 二聚体水平、心率、基础疾病等)相结合, 建立预测模型, 对 PE 的近期不良事件进行定量评估。本研究以国际注册资料为基础, 建立了以 AUC 为指标的 30 d 死亡率预测模型, 其 AUC 为 0.82, 高于传统 Wells 量表(AUC: 0.73)。但是, 这种方法过于依赖于高质量的样本, 当涉及多种基础疾病的复杂病例时, 其推广性能会明显降低, 并且缺少跨人群的数据进行验证。目前, 关于无症状性亚段 PE (SSPE)的处理仍存在较大争议。虽然 AI 可以提高 SSPE 的检出率, 但是过多会造成不必要的抗凝治疗。SSPE 中只有 2%~5% 的患者发生了显著的血栓事件, 所以 AI 分层的结果必须与临床表现相联系, 而不能机械地套用算法的结论。

4.5. 光子计数 CT 的潜力

光子计数 CT 是新一代成像技术, 在肺动脉栓塞(PE)的诊断方面具有独特的优势, 但其临床转化还存在诸多问题, 需要合理地结合实际应用。在成像质量的改善上, 光子 CT 能将 X 射线直接转化为 X 射线, 排除了电子噪声的影响, 使其空间分辨能力大幅提升到 0.2 mm, 比常规 CT 提高 40% 以上。此方法可使肺动脉次段及以下分支更清楚地显示, 对微小栓子的检出敏感性可增加 15%~20%。我们前期研究发现, 光子计数 CT 对亚段 PE 的检出率比 MSCT 提高了 23%, 特别是对肥胖、肺气肿患者, 能有效降低运动伪迹及容积效应的影响。其中, 放疗剂量的控制是重点。基于能量分层的方法, 在同等成像质量的情况下, 可以减少 30%~50% 的剂量, 对易感人群(如年轻患者和孕妇)具有较高的保护价值。但是, 它的限制也是显而易见的。目前, 其设备造价比常规 CT 高 3~4 倍, 难以推广; 在高计数率时, 由于电荷分享作用, 小栓塞会出现假阳性; 能量定标误差也会对定量结果产生影响。另外, 对于植入体周围伪影的提升也是有限的, 对于术后 PE 的评价并没有太大的好处。争论的焦点是过度诊断的危险性。较高的肺泡灌洗液检出率能否提高临床疗效尚未确定, 在新发现的肺泡灌洗液中, 只有 6% 需要对其进行调整。

5. 多层螺旋 CT 肺动脉造影的应用前景展望

随着多层螺旋 CT 肺动脉造影的不断革新和应用, 使其在临床上的应用更加多样化。现有技术主要集中在降低管电流和低压技术(例如 80 kV 代替 100 kV)上, 可以在保证成像效果的前提下降低 40%, 特别适合 100 kg 以下的患者。该方法可根据患者的不同情况, 进行相应的调整, 从而降低了不必要的辐射, 具有很好的推广价值。多平面重构、容积再现和最大密度投影等多层面融合, 可有效提高肺内动脉的立体重构, 提高了临床诊断的准确率。双源 CT 双能型肺血流灌注显像有望在一次扫描中实现血管解剖、肺血流灌注和影像学重建, 为同时评价动脉粥样硬化和灌注损伤提供了一种崭新的方法。

虽然 MSCTPA 的应用已经得到了人们的普遍认同, 但是仍然有许多争论和问题需要解决。亚肺段肺动脉栓塞检出率明显低于中心型肺动脉, 但由于缺乏有效检测手段, 且亚肺段栓塞对心脏储备不良的患者具有致死危险, 提高亚肺段病灶检出率已成为该领域的一个重点研究主题。目前, 对于没有发生深静脉血栓的患者, 单纯性亚肺段动脉栓塞虽然可以防止其进一步发展, 但是却会导致手术失败和高龄患者发生出血的危险, 迫切需要更大范围的临床研究来确定其诊断和治疗方案。临床评价是 MSCTPA 疗效评价的关键, 而我国尚有待于改进和改良。MSCTPA 是目前最好的检测手段, 具有无创、灵敏度高、快速、特异性强等优点, 可以用于急、慢性血栓的早期识别。

6. 结论

总之, 多层螺旋 CT 肺动脉造影是一种非侵入性、快速和准确的影像技术, 是目前临床上最好的检测手段。近年来, MSCTPA 在肺动脉粥样硬化方面的研究得到了极大的发展。利用迭代重建技术、双能量 CT 及人工智能等新技术, 使多层螺旋 CT 肺动脉造影在影像学上有较好的表现, 并可以有效降低患者所受的放射剂量。因此, 多层螺旋 CT 肺动脉造影技术在临床上得到广泛应用。

参考文献

- [1] 刘小娇. 多层螺旋 CT 肺动脉成像诊断肺栓塞的效果分析[J]. 现代医用影像学, 2025, 34(4): 639-641.
- [2] 赵兴永, 狄群, 李辉. 多层螺旋 CT 肺动脉造影在急性肺栓塞患者中的应用价值研究[J]. 现代医用影像学, 2024, 33(8): 1433-1435.
- [3] 刘振. 分析多层螺旋 CT 肺动脉造影对急性肺栓塞的诊断价值[J]. 影像研究与医学应用, 2023, 7(13): 129-131.
- [4] 储赞. 多层螺旋 CT 肺动脉造影预测急性肺栓塞患者预后的分析[J]. 世界复合医学, 2022, 8(9): 72-74+78.
- [5] 曹俊涛, 胡铭, 徐婷, 梁冰, 屠建春, 张欢. 双源螺旋 CT 三种扫描模式肺动脉造影诊断肺栓塞[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(10): 1552-1557.
- [6] 杨萧琪, 张文建, 黄露. 64 排螺旋 CT 肺动脉造影对肺栓塞患者临床诊断敏感度及特异度的影响[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(14): 196-197.
- [7] 杨迦童, 席旺荣. 多层螺旋 CT 肺动脉造影在肺栓塞患者中的诊断价值[J]. 血栓与止血学, 2021, 27(4): 592-593.
- [8] 李婧. 64 层螺旋 CT 肺动脉造影在肺栓塞诊断中的应用价值分析[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(1): 119-120.
- [9] Blachere, H., Latrabe, V., Montaudon, M., Valli, N., Couffinhal, T., Raherisson, C., *et al.* (2000) Pulmonary Embolism Revealed on Helical CT Angiography: Comparison with Ventilation-Perfusion Radionuclide Lung Scanning. *American Journal of Roentgenology*, **174**, 1041-1047. <https://doi.org/10.2214/ajr.174.4.1741041>
- [10] 宋虎, 邹俊杰, 王凤, 李瑞东, 王秋艳, 张孔源. 双能 CT 肺灌注成像在急性肺动脉栓塞检查中的应用价值[J]. 中国辐射卫生, 2023, 32(5): 550-555.