

## RSNA2025 胸部影像学

魏冰宇, 陈冲, 赵廷洁, 祝婷婷, 王玉锦, 周舒畅

**【摘要】** 2025 年 RSNA 年会的主题是“放射学: 个性化医疗由此开始”, 强调生成式人工智能 (Generative AI)、光子计数 CT 及多模态大模型等前沿技术在医学影像中的深度应用, 旨在通过放射医学的精准化转型与个体化评估推动个性化医疗的发展。肺结节、肺癌、慢性阻塞性肺疾病 (COPD) 和间质性肺疾病 (ILD) 等常见病的精准化管理仍是研究核心, 其中生成式 AI 辅助报告生成、光子计数 CT 定量评估以及多模态预后预测方案成为推动个性化医疗的关键突破点。

**【关键词】** 人工智能; 单光子发射计算机体层摄影术; 肺疾病, 慢性阻塞性; 肺疾病, 间质性; 癌症早期检测; 多模态成像

**【中图分类号】** R-05; R814.42; R563.9; R563.13; R730.4; R445 **【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1000-0313(2026)02-0119-08

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.001

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



2025 年第 111 届北美放射学会 (Radiological Society of North America, RSNA) 年会于 2025 年 11 月 30 日—12 月 4 日在美国芝加哥举行。本届年会的主题为“放射学: 个性化医疗由此开始” (Radiology: Personalized Medicine Starts Here), 旨在探讨放射医学如何通过技术革新, 在诊疗全流程中为患者提供定制化的医疗方案。在胸部影像学方面, 2025 年 RSNA 聚焦于: 生成式人工智能 (generative artificial intelligence, GenAI) 在影像判读与自动化报告中的突破; 光子计数计算机断层扫描 (photon-counting computed tomography, PCCT) 在肺实质微小病变和肺血管定量中的深度应用; 以及结合生物标志物与影像组学的多模态精准预后模型。

## 人工智能/深度学习

生成式人工智能 (GenAI) 与大语言模型 (large language model, LLM) 在放射学报告自动化领域的临床效能评估是本届年会最受瞩目的焦点。Sharma 等评估了包括 GPT-4o、Claude 3.7 Sonnet 在内的 10 种 LLM 在生成胸部 X 线片结构化报告中的表现。研究利用 1,000 例放射科病例进行测试, 发现 GPT-4o 在诊断准确率 (93%) 和定位精度 (98%) 上表现最佳, 但同时指出其 25% 的致幻率仍是限制其独立临床应用的主要瓶颈。与之呼应, Harris 等则在大型放射科实践中部署了基于 160 万份影像训练的生成式模型, 在

处理 34,680 份病例的回顾性研究中, 发现 22% 的模型生成报告在质量上被认为优于或等同于高年资医师。上述研究表明, 生成式 AI 能较为明显优化 workflow, 但在当前技术条件下仍需放射科医生的严密监管。

针对生成式人工智能在临床落地的规范化路径, 本届年会达成了首个专家共识。Jeong 等通过德尔菲法制定了关于 GenAI 在胸部 X 线片解读中应用的韩国胸科放射学会专家共识。研究邀请 20 名专家对 6 个临床场景下的 60 个病例进行评估, 结果显示 GenAI 在健康筛查场景中的准确性最高且幻觉率最低, 但在急诊与重症监护场景中表现欠佳。共识明确反对在缺乏医师监督的情况下独立使用 AI 生成报告, 并强调在临床实施前需建立严格的教育与评估指南。Zheng 等的研究也进一步印证, 在所有临床场景中人类阅片者的诊断准确率 (90.3%) 始终显著高于现有的 LLM 模型 (62.1%), 再次确证了人类专业知识在复杂决策中的核心地位。

在功能量化与预防医学领域, AI 展现出通过常规影像提取个体化生理指标的卓越能力。Pu 等开发了一种多任务深度学习 (multi-task learning, MTL) 模型, 旨在通过辅助注入身高、性别等信息, 实现基于普通胸片对肺功能参数 (pulmonary function test, PFT) 的精准预测。在 3 万余例病例的独立测试中, 模型预测用力肺活量 (forced vital capacity, FVC) 的皮尔逊相关系数达 0.876, 且预测第 1 秒用力呼气容积 (forced expiratory volume in 1 second, FEV1) 的误差显著低于单任务模型。该研究为医疗资源匮乏地区提供了一种精准、无创且低成本的肺功能监测新手段。

多容积 CT 成像结合 AI 算法为理解气道疾病的

作者单位: 430030 武汉, 华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科

作者简介: 魏冰宇 (2001—), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事胸部心血管影像工作。

通讯作者: 周舒畅, E-mail: 20254859@qq.com

个体化力学差异提供了新手段。Syed Ahmed Nadeem 等探讨了保留比率性肺功能障碍(preserved ratio impaired spirometry, PRISm)及不同严重程度慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)患者的气道形态学受损情况。研究通过自动化算法量化吸气相与呼气相 CT 图像中的气道径向扩张度(radial expansion,  $\Delta_{air-R}$ )和纵向拉伸度(along-the-length stretching,  $\Delta_{air-S}$ )。结果显示,气道力学受损程度随 COPD 分级的增加而显著加重,且 PRISm 患者的受损程度与轻度 COPD 相当。这表明多容积 CT 衍生的力学指标比传统形态学指标更能揭示气流受限的动态本质,有助于制定精准的呼吸治疗方案。

在肺癌风险长期预测与筛查频率制定方面, AI 模型展现出较为明显的决策支持价值。Lin 等开发了 ScreenLungNet 模型,旨在通过低剂量计算机断层扫描(low-dose computed tomography, LDCT)筛查预测未来 3 年的肺癌发生风险。研究利用 Vision Transformer 架构整合全肺特征与局部结节恶性度评分,在近 2 万名参与者的独立验证中,预测受试者工作特征曲线下面积(area under the receiver operating characteristic curve, AUC)达到 0.93 ~ 0.94, 准确率达 94.8%。该项研究的临床意义在于通过 AI 提供的长期风险分层,可为低风险人群安全延长筛查间隔,同时为高风险个体实施加密监测,从而极大优化了肺癌筛查的资源分配。

肺结节的精准恶性评价正向着可解释性与置信度量化的方向迈进。Alksas 等提出了一种基于可解释 Transformer 架构的 AI 框架,通过融合球形修正局部三值模式(spherical modified local triple pattern, SMLTP)纹理特征与球谐函数描述符进行结节分类。该模型在外部验证中取得了 99.3% 的准确率和 0.9993 的 AUC,且嵌入的特征图能直观可视化结节内部的恶性特征,为临床审阅提供了可追踪的逻辑基础。Mortani Barbosa 等则引入了置信度评估策略,通过对高危活检队列进行再训练,使 DeepPNP 模型在识别高置信度恶性结节时的 AUC 从 0.580 提升至 0.828。这种基于置信度的 AI 分类,有望在临床实践中大幅减少不必要的有创活检。

AI 在急症分诊与特定解剖结构识别中展现出极高的工作流优化效率。Lanza 等比较了不同 nnU-Net 模型配置在急性肺栓塞自动检测及体积量化中的表现,证实结合区域生长的 3D 模型(AUC=0.909)在内部及外部验证中均优于 2D 模型。Ouyang 等则针对急诊易误漏诊的食管异物开发了专用的 3D U-Net 自动检测系统,对尖锐异物的检出敏感度达 94.2%,且对

穿孔并发症的预测(AUC=0.891)优于单纯影像学经验评估。此外, Myeongjun Kim 等研究利用 nnU-Net V2 模型实现了 18 个肺段支气管的自动标记(命中率 94.3%),为临床支气管镜手术规划提供了精准的自动化辅助方案。

最后, AI 模型在特殊人群评估与公平性伦理方面的研究得到了深化。Shen 等旨在确定影响 AI 对肺癌胸片异常评分的关键因素,发现实性病变大小、肿瘤分期及边缘清晰度是影响评分的较为突出因素,提醒临床在解读 AI 生成的异常分值时必须结合影像学特征。针对 AI 算法的偏差, Shu 等开展了关于种族分类对 AI 模型表征影响的研究,揭示了模型在不同种族亚组间存在内部特征表征差异。这一发现挑战了“通用偏倚校正方法”的有效性,强调了在实现个体化精准医疗的过程中,必须针对不同患者群体开发更具公平性、健壮性的人工智能系统。

## 光子计数 CT

光子计数探测器计算机断层扫描(photon-counting detector computed tomography, PCD-CT)凭借其多能量探测与超高空间分辨率的优势,正在推动胸部影像学从形态学诊断向功能定量评估跨越。Tomoaki Sasaki 等旨在评估基于碲锌镉(cadmium zinc telluride, CZT)探测器的 PCD-CT 生成的电子密度(electron density, ED)和有效原子序数(effective atomic number, EZ)图像在肺气肿定量评估中的应用价值。研究前瞻性纳入 72 名患者,并与 70keV 虚拟单色图像(70keV virtual monoenergetic image, VMI70)进行对比。结果显示 ED 图像衍生的肺气肿比率与用力呼气容积(forced expiratory volume, FEV)1.0% 的相关性最强( $r = -0.652, P < 0.001$ ),且在肺气肿程度较轻的患者中分化能力更优。这表明 PCD-CT 的物质分解能力有望比传统基于 CT 值的评估更准确地监测 COPD 的早期进展。

在肺循环功能成像领域, PCD-CT 为无创评估肺血流动力学提供了新路径。Bjarne Kerber 等利用 PCD-CT 评估肺灌注的年龄相关性变化,旨在探索肺动脉高压的潜在影像学生物标志物。通过对 50 名健康受试者和 28 名肺动脉高压患者的光谱数据分析发现,健康个体的所有肺叶平均强化值随年龄增长较为明显下降(左下叶:  $r = -0.51$ );而与对照组相比,慢性血栓栓塞性肺动脉高压(chronic thrombo embolic pulmonary hypertension, CTEPH)患者呈现出较为明显的局灶性灌注减低。该研究证实 PCD-CT 灌注参数能够揭示疾病特异性的灌注模式,可能实现对肺动脉高压的早期识别与严重程度评估。

PCD-CT 在大幅降低辐射剂量的同时,依然维持了极高的诊断分诊效能。Javier Yametti 等在光子计数探测器计算机断层扫描肺动脉造影(photon-counting detector computed tomography pulmonary angiography, PCD-CTPA)与标准能量集成探测器(energy-integrating detector, EID)CTPA 的对比研究中发现,尽管 PCD-CT 的中位辐射剂量较 EID 组降低了 51%(6 mGy vs. 11 mGy),但在检测肺栓塞的特异性上反而更高。此外,Philipp Gruschwitz 等探讨了采用优化混合团注方案的 PCD-CTPA 效能,结果显示在仅使用 43%对比剂用量和 58%辐射剂量的条件下,其管腔强化值(377.5 HU)与对比噪声比与标准 EID 方案相当。这些发现证明,PCD-CT 在保障诊断质量的前提下,显著提升了检查的安全性,契合了个体化精准医疗的需求。

针对极细微解剖结构与复杂间质性肺疾病(interstitial lung disease, ILD)的评估,PCD-CT 展现出较为明显的附加价值。Francois Pontana 等研究旨在比较超高分辨率(ultra-high resolution, UHR)PCD-CT 与第三代双源高分辨率计算机断层扫描(high-resolution computed tomography, HRCT)在系统性硬化症合并ILD患者中的价值。研究发现 PCD-CT 改善了磨玻璃影( $P=0.0003$ )、小叶内网状影及牵拉性支气管扩张的显示效果,且辐射剂量较为明显降低[容积 CT 剂量指数(volume CT dose index, CTDIvol): 2.35 mGy vs. 3.35 mGy]。微血管成像方面 Fuminari Tatsugami 等首次证实 UHR 模式结合深度学习重建(deep learning reconstruction, DLR)技术可显著提升 Adamkiewicz 动脉(artery of Adamkiewicz, AKA)的清晰度,超高分辨率深度学习重建(super-high-resolution deep learning reconstruction, SHR-DLR)图像的信噪比(5.7)高于常规方案(3.9),有助于降低主动脉手术中脊髓损伤的风险。

重建算法与核函数的优化是发挥 PCD-CT 性能的关键环节。Pauline Pannenbecker 等在两种剂量水平下探讨了能为超高分辨率计算机断层扫描肺动脉造影(ultra-high-resolution computed tomography pulmon aryangiography, UHR-CTPA)提供图像噪声与血管锐度最佳平衡的卷积核。通过对 8 名放射科医师完成的 18,240 次主观比较分析发现,中等锐度核(Bv56)在客观指标与读者偏好中均获得最高评价,且该优势与辐射剂量水平无关。这一结论为 PCD 技术下的超高分辨率成像选择合适的重建核提供了标准,确保了在较低辐射剂量下实现卓越的血管显影效果,尤其适用于临床对细微肺栓塞的精准诊断。

## 慢性阻塞性肺疾病

针对 COPD 患者的全身合并症评估,放射医学已从肺部单一评价延伸至多器官风险预测。Elena Ghotbi 等旨在基于多民族动脉粥样硬化研究(Multi-Ethnic study of atherosclerosis, MESA)研究数据,利用多水平纵向分析评估非 COPD 受试者中 CT 衍生的定量肺气肿改变与椎体体积性骨丢失之间的关联。研究利用 TotalSegmentator v2 对 2312 名受试者的 T1-T10 椎体进行 3D 深度学习分割。结果显示横断面分析中肺气肿百分比与较低的骨矿物质密度(bone mineral density, BMD)显著相关( $\beta=-0.94$ );纵向分析进一步支持在男性群体中亚临床肺气肿(阈值 2.7%)与椎体体积性 BMD 丢失增加独立相关( $\beta=-0.35, P<0.001$ )。该研究强调对于因各种心肺指征接受 CT 检查的患者,肺气肿量化可为其骨骼健康评估提供重要早期参考。

多容积 CT 成像技术为量化气道呼吸力学特征提供了新视角。Alejandro Comellas 等探讨了保留比率性肺功能障碍(PRISm)及不同严重程度 COPD 患者的气道形态学受损情况。研究通过吸气相与呼气相 CT 图像,利用自动化算法计算了气道径向扩张( $\Delta$ air-R)和纵向拉伸( $\Delta$ air-S)。研究发现经年龄、性别和体重指数(body mass index, BMI)校正后,气道呼吸力学受损程度随 COPD 严重程度增加,其中 PRISm 患者的受损程度与轻度 COPD 相当。这表明多容积 CT 衍生的力学指标有助于深入理解 COPD 不同阶段气流受限的病理机制。

关于 COPD 表型分析的深度研究,本届年会提出了气道与血管不匹配的新型模型。Stephanie Marie Aguilera 等旨在基于 CT 衍生的血管-肺容积比(vascular-to-lungvolume ratio, VLR)与气道-肺容积比(airway-to-lungvolume ratio, ALR)对 COPD 进行亚型分析。研究纳入了 COPD Gene 研究中的 8102 名受试者,根据 ALR 和 VLR 将患者分为参考组、血管亚型、气道亚型及混合亚型。结果显示同时具备低 ALR 和低 VLR 的“混合亚型”总体结局最差,其 FEV<sub>1</sub> 年下降率达-9.4 mL/年,死亡风险比高达 1.5。该研究证实,血管重构的额外相互作用对 COPD 患者的功能能力和预后有较大影响,血管不匹配是一种区别于传统气道评估的新型表型。

在特殊人群的肺部特征研究方面,Yanisa Jarusy-ingdumrong 等调查了联合抗逆转录病毒治疗(combined antiretroviral therapy, cART)时代人类免疫缺陷病毒(human immunodeficiency virus, HIV)感染老年人与 HIV 阴性人群的肺气肿患病率差异。通过对

479 名受试者进行胸部 CT 视觉评估与低衰减区域 (lowattenuation area, LAA)-950 定量评估,结果显示校正后的肺气肿患病率在 HIV 阳性组 (12.1%) 与阴性组 (10.1%) 之间并无明显差异 ( $P=0.535$ )。研究进一步确定当前吸烟、肺结核病史、低 BMI 和高龄是主要的危险因素,而较长的 cART 治疗时间与风险降低相关。这一结论挑战了以往关于 HIV 感染者肺气肿发生率显著增加的报告,强调了持续有效治疗在维持肺部健康中的价值。

图像重建技术对肺功能定量参数的准确性具有重要影响。Wang 等评估了不同重建矩阵在胸部 CT 肺功能定量参数准确性评估中的应用。研究收集了 54 名同时接受 CT 与肺功能检查 (PFT) 的患者,分别采用  $512 \times 512$ 、 $768 \times 768$  及  $1024 \times 1024$  矩阵进行重建。结果显示随着矩阵增大,肺低密度假阳性率 (LAA%-950) 的相关性随之增强,其中  $1024 \times 1024$  大矩阵与 PFT 指标的相关性最佳。该研究提示在进行临床慢阻肺筛查和定量分析时,采用更大维度的重建矩阵有助于提高肺功能评估的准确性与稳定性。

环境污染对呼吸系统影响的量化评估也是本届会议的关注点。Nitin P. Ghonge 等验证了长期暴露于不良空气质量会导致无症状人群出现结构性肺部改变的假设。研究对比了德里-国家首都区 (污染严重) 与其他地区的 120 名患者。结果显示高污染地区组有 63.3% 的受试者存在低衰减区域 (LAA), 高于其他地区组的 38.3% ( $P=0.006$ )。该研究通过 CT 肺密度测定证实了污染暴露引起的早期“隐匿性”结构性损伤,为环境健康风险评估提供了客观的影像学证据。

肌肉减少症作为 COPD 常见的肺外合并症,其对危重患者预后的预测价值得到了进一步确证。Dai 等探讨了基于胸部 CT 诊断的肌肉减少症对 COPD 慢性阻塞性肺疾病急性加重 (exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease, ECOPD) 危重患者长期死亡率的影响。研究通过测量 T12 椎体水平的骨骼肌指数 (skeletal muscle index, SMI) 对 148 名 ICU 患者进行评估。结果显示肌肉减少症组的 1 年全因死亡率 (28.57%) 高于非肌少症组 (6.25%,  $P=0.001$ ), 多变量 Cox 回归证实肌少症是 1 年死亡率的独立风险因素 ( $HR=3.981$ )。该研究拓展了胸部 CT 的临床应用价值,揭示了其在 ECOPD 患者综合管理与生存预测中的重要作用。

## 肺结节与肺癌筛查

针对肺癌筛查标准的适用性及其在真实世界中的执行情况, Maedeh Sharifian 等开展了一项基于电子病历 (electronic medical record, EMR) 记录与美国预

防服务工作组 (U.S. Preventive Services Task Force, USPSTF) 标准的回顾性分析。研究回顾了 2,554 名肺癌患者的诊疗轨迹,发现仅 23% 的患者在 EMR 中有结构化的吸烟史记录。在符合 2021 年 USPSTF 筛查标准的个体中,仅有 5% 在确诊前两年内实际接受了 LDCT 检查。该研究指出由于电子病历中吸烟史记录的不完整以及现行筛查标准的局限性,导致大量肺癌病例未被早期发现,突显了改进数据采集并采用更具包容性的筛查策略的必要性。

对于性质不确定的肺结节,如何平衡诊断准确性与放射科医生的工作负荷成为一大挑战。Noa Antonissen 等介绍了 LUNA25 挑战赛的基准测试研究,旨在比较放射科医师与人工智能在低剂量 CT 上对 5~15 mm 性质不确定结节的恶性风险评估表现。该竞赛利用国家肺部筛查试验 (National Lung Screening Trial, NLST) 公开数据集训练模型,并使用隐藏的外部测试集 [如荷兰-比利时肺癌筛查试验 (Netherlands-Leuven Longkanker Screenings Onderzoek, NELSON)、意大利多中心肺癌检测试验 (Multicentric Italian Lung Detection, MILD) 试验数据] 进行评估。研究预计将于 2025 年底公布全球 80 余名资深放射科医师与最佳 AI 算法的对比结果。这一研究将为 AI 技术在提升早期肺癌检出率及减少不必要随访方面的潜力提供国际性的基准证据。

通过风险评分优化筛查间隔是实现个体化医疗的重要途径。Joshua Rattee 等旨在评估利用风险评估 (risk assessment, RA) 分数确定两年一次 (Biannual) 肺癌筛查资格的临床影响。研究分析了 4,825 名参加筛查计划的患者,并根据 RA 分数进行分层。结果显示对于 RA 分数低于 3% 的患者,若采用两年一次的筛查频率,仅会漏诊 0.4% 的恶性肿瘤,同时可避免 28/1029 (2.7%) 的假阳性结果。结论认为 RA 分数低于 3% 的患者恶性肿瘤检出率较低,可以安全地指导延长筛查间隔,从而减少频繁年度筛查带来的相关风险。

在真实世界肺癌筛查项目的临床转归评估方面, Aparna Singh 等比较了某大型医疗系统筛查项目与 NLST 队列的手术结果及癌症复发情况。研究分析了 387 名通过筛查接受手术切除的患者,结果显示与 NLST 组相比,真实世界筛查组因良性病变接受手术的比例更低 (12% vs. 18%,  $P=0.016$ ), 且患者表现出更优的无复发生存率 ( $HR=0.60$ )。该研究强调在当代临床环境中,肺癌筛查的实施不仅具有高度的安全性,且通过更佳的手术患者选择,改善了患者的肿瘤学结局。

纵向 AI 诊断技术有望挑战传统以结节生长率为

核心的评价范式。Sylvain Bodard 等探讨了超越结节大小生长的纵向 AI 诊断在肺癌早期发现中的性能。研究利用 NLST 测试队列中诊断前 12~24 个月(T-2)和 0~12 个月(T-1)的两轮扫描数据进行评估。结果显示在生长缓慢且性质不确定的结节中, AI 模型在 T-2 时期的诊断效能(AUC=0.908)甚至超过了放射科医师在 T-1 时期的诊断(AUC=0.861)。这意味着 AI 模型能够挑战“体积倍增时间(volume doubling time, VDT)”作为主要指标的现状, 为肺癌治疗提供潜在的 1 年提前期。

针对纯磨玻璃结节(pureground-glass nodule, pGGN)的病理预测, Wang 等开展了 Lung-PNet 模型的多中心外部验证研究, 旨在区分浸润性腺癌(invasive adenocarcinoma, IAC)与非浸润性亚型。研究收集了 7 家医院共 720 例 pGGN 图像, 验证结果显示模型的总体受试者工作特征曲线下面积(area under the receiver operating characteristic curve, AUC-ROC)为 0.800, 阴性预测值(negative predictive value, NPV)高达 0.930。结论认为 Lung-PNet 作为一种可靠的“排除性”工具, 能够协助多学科团队避免对非浸润性病变的过度治疗, 通过将低风险结节分层为监测或有限切除, 可能减少 30%~40%的不必要手术。

值得警惕的是既往癌症病史可能会削弱现有风险预测模型的效能。Allen Luna 等旨在评估肺癌风险预测模型在有既往恶性肿瘤史或辅助治疗暴露患者中的表现。研究对比了梅奥模型与 DeepLung 偶然发现的肺结节(incidental pulmonary nodule, IPN)深度学习模型。结果显示与无癌症病史者相比, 两种模型在有恶性肿瘤史患者中的性能均受损(梅奥模型 AUC 仅 0.410)。该研究强调在对特定人群进行 IPN 风险分层时, 现行模型未能充分捕捉个体风险特征, 亟需引入生物标志物等额外输入以提供更个性化的监测方案。

在非实性结节(non-solid nodules, NSNs)的侵袭性术前评估中, Ye 等开发了一种基于影像学特征的三元分类模型。研究纳入 1,683 名肺腺癌患者共 2,125 个 NSNs, 评估了包括大小、CT 衰减值、血管数量及支气管充气征在内的多项特征。结果显示, 该三元分类模型在区分癌前病变、微浸润性腺癌(minimally invasive adenocarcinoma, MIA)和浸润性腺癌(IAC)方面表现优异, 总体 AUC 达 0.90。该研究显示结节密度均匀性、空泡征及胸膜牵拉征等特征对预测病理亚型具有重要意义, 可有效辅助临床决策。

最后, 针对非吸烟肺癌这一特定人群, Wang 等探讨了 CT 衍生影像生物标志物对术后生存期的预测价值。研究量化了 112 名受试者的肺、气道及身体成分

特征。多变量 Cox 分析显示, 较低的骨密度(HR=0.64)和较高的气道比率(HR=1.62)是术后生存期较差的独立预测因素。该研究表明治疗前 CT 扫描显示的非肺部表现(如骨骼与气道特征)亦能提供关键的个体化预后信息, 应将其纳入术前风险分层评估。

## 间质性肺疾病

间质性肺异常(interstitial lung abnormalities, ILA)向临床纤维化进展的早期预警是实现个体化干预的关键。Tician Schnitzler 开展了一项跨大洲的多中心研究, 旨在识别可预测 ILA 进展为临床特发性肺纤维化(idiopathic pulmonary fibrosis, IPF)的影像学生物标志物。研究利用 743 例病例构建并验证了风险分层模型, 评估了包括胸膜下纤维化、前肺野受累及中重度肺气肿在内的关键特征。结果显示胸膜下纤维化(OR 7.55)和中央区纤维化(OR 10.78)是强有力的预测指标; 外部验证中模型在识别高风险进展组方面的 AUC 达到 0.922~0.935。该研究证实通过对 CT 影像特征的直观评估, 可识别出 ILA 偶然发现者中的高风险亚群, 从而实现更早的转诊与监测。

功能性核磁共振技术在评估纤维化肺部病理生理改变中展现出独特价值。Ni 等旨在应用相位分辨功能肺磁共振成像(phase-resolved functional lung magnetic resonance imaging, PREFUL MRI)分析纤维化 ILD 患者的肺灌注与通气特征。研究前瞻性纳入 30 例纤维化 ILD 患者及 30 例正常对照, 并将 MRI 参数与高分辨率 CT(HRCT)及肺功能指标(PFT)进行相关性研究。结果发现患者组的平均灌注量显著降低, 且灌注缺损百分比与一氧化碳弥散量(diffusing capacity of the lung for carbon monoxide, DLCO)占预计值百分比呈正相关( $r=0.682, P<0.0001$ )。该研究结论指出, 相位分辨功能 MRI 能无创且客观地评估纤维化 ILD 患者的通气与灌注受损程度, 为评估疾病严重程度提供了新型影像学手段。

肺血管重塑在 IPF 疾病进展中的作用得到了量化研究的进一步支持。Yang 等评估了 CT 衍生的血管指标与轻度 IPF 患者急性加重风险之间的直接关联。研究采用深度学习方法对 253 名患者的血管指标进行量化, 包括平均肺动脉/静脉直径及小血管血容量分数。结果显示平均肺静脉直径(HR 15.12)与平均肺动脉直径(HR 4.57)是急性加重最强的预测指标。结论认为 IPF 中的血管改变对预后的影响超出了单纯的纤维化负荷, CT 可见的肺血管重塑信息为急性加重风险评估提供了重要的临床补充。

特殊全身性疾病累及肺部的自然病程研究为临床分诊提供了数据支持。Victoria Shi 等旨在探讨镰状

细胞病患者中纤维化 ILD 的发生率及进展预测因素。研究回顾性分析了 133 例患者长达 9.7 年的随访数据,发现 CT 所示纤维化 ILD 进展的发生率为 12.0%。多变量逻辑回归分析确定,基线 CT 显示的纤维化改变是未来疾病进展的独立危险因素(HR 6.9,  $P = 0.03$ ),且进展者伴有明显的肺功能恶化。该研究强调早期影像学评估有助于识别哪些镰状细胞病患者将从针对性的间质性肺病管理策略中获益。

影像组学与力学分析技术的结合为理解肺实质的功能异常提供了新维度。Jooae Choe 等利用 CT 弹性配准技术评估 IPF 患者不同病变区域的力学形变特征。研究通过吸/呼气相 HRCT 生成形变图,并在全肺水平计算雅可比行列式(Jacobian determinant)。结果显示 IPF 患者的外观正常肺区域表现出最大的中位容积形变值(0.64),高于健康对照组( $P < 0.001$ );而双下叶外观正常区域的形变减少与 1 年内 FVC 下降显著相关。该研究提示 CT 弹性配准能够捕捉外观正常肺组织的功能异常,对传统的视觉模式分类形成了重要补充。

针对非特异性间质性肺炎(nonspecific interstitial pneumonia, NSIP)的影像学特征鉴别,Raquel Dias 等探讨了空气潴留(Air Trapping)在 NSIP 模式中的普遍性及其预后意义。研究评估了 414 例 HRCT 扫描,比较了结缔组织病相关间质性肺疾病(connective tissue disease-associated interstitial lung disease, CTD-ILD)、过敏性肺炎(hypersensitivity pneumonitis, HP)及特发性间质性肺炎等 6 组患者。结果显示虽然空气潴留常见于 HP(84.8%),但在 NSIP 模式的其他亚型中亦有发生(如药物性 ILD 达 100%),且空气潴留的存在与死亡率增加无明显关联。该研究指出空气潴留并非 HP 独有,其在 NSIP 诊断中的特异性需结合临床背景审慎解读。

微观病理特征与宏观影像表现的关联研究深化了对 ILD 进展的理解。Akira Haga 等旨在测试较大的成纤维细胞灶(Fibroblast Foci)是否与间质性肺病定量区域分析(quantitative zones in interstitial lung disease, QZIP-ILD)量化的影像学进展相关。通过对 100 名接受外科肺活检的患者进行数字化组织学分析,结果发现较高的成纤维细胞灶百分比与上叶蜂窝样变及牵拉性支气管扩张的年度增加相关。该研究结论认为自动化的 CT 进展指标与数字化定量组织学具有高度相关性,可作为评估 ILD 纤维化快速进展的定量标志物。

分子成像技术为评估 ILD 的活动度提供了新线索。Kim 等开展了一项前瞻性探索性研究,旨在测试高分辨率 CT 与成纤维细胞活化蛋白抑制剂(fibro-

blast activation protein inhibitor, FAPI)正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)在预测进展性纤维化 ILD 中的价值。初步结果显示 HRCT 上的预测进展区域与肺移植病理标本中的纤维化范围呈正相关。该发现支持进一步开发预测性 CT 及成纤维细胞活化蛋白抑制剂正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(FAPI-PET/CT)生物标志物,用于进展性纤维化 ILD 的精准分层与病情监测。

在系统性硬化症(systemic sclerosis, SSc)累及肺部的功能评估中,Silke Westphale 等探讨了 3D 超短回波时间(ultrashort echo time, UTE)功能性肺部 MRI 与肺功能检测的相关性。研究对 14 名 SSc 患者在屏气状态下行螺旋采集 3D UTE 序列,并计算信号基分数通气量。结果显示 MRI 检测的通气不均匀性与 DLCO%呈负相关( $r = -0.73, P = 0.007$ )。该研究证实功能性肺部 MRI 能够弥合结构性影像与肺功能检测之间的诊断缺口,助力系统性硬化症肺部病变的早期发现与精准监测。

吸烟相关 ILD 的鉴别诊断是临床的一大难点。Lee 等旨在利用 CT 特征区分吸烟相关间质性纤维化(smoking-related interstitial fibrosis, SRIF)与肺纤维化合并肺气肿(combined pulmonary fibrosis and emphysema, CPFE)。研究回顾性分析了 72 例经病理确诊的患者,发现中枢性肺泡间质性肺气肿(multiple thin-walled cysts, MTWC)在 SRIF 组的发生率(72.4%)显著高于 CPFE 组(25.6%)。基于此特征构建的逻辑回归模型在鉴别诊断中取得了 0.958 的 AUC。该研究结论强调精准区分 SRIF 与 CPFE 具有重要的临床意义,因为前者病程相对良性,而后者伴随更重的发病率与死亡负担。

## 血管性疾病

深度学习技术提升了肺血管造影的图像质量并降低了对比剂负担。Shen 等旨在探讨深度学习重建(DLR)联合对比增强优化技术在双低剂量计算机断层扫描肺动脉造影(computed tomography pulmonary angiography, CTPA)中的应用效果。研究对 130 名疑似肺栓塞患者进行双中心前瞻性对比,结果显示在降低辐射剂量和对比剂用量的条件下,DLR 重建图像的信噪比和对比噪声比在所有数据集中均为最高,其诊断效能( $AUC = 0.986$ )优于常规混合迭代重建方案。这一发现为临床提升肺栓塞诊断准确性及患者检查安全性提供了一种优化的低辐射、低对比剂成像策略。

针对肺栓塞(pulmonary embolism, PE)引发的右心功能受损,简化评估指标在临床实践中更具实用价

值。Neel Vora 等旨在通过常规非心电门控胸部 CT 评估急性与慢性肺栓塞患者右心室(right ventricle, RV)重构的差异。研究对比了 216 名受试者的右心室基底直径/心尖直径比值,发现急性肺栓塞患者的该比值升高( $P < 0.001$ ),且在区分急性 PE 与无 PE 患者时具有较高的准确性( $AUC = 0.80$ )。该研究表明利用非门控 CT 的简单几何测量指标即可辅助鉴别急性与慢性肺栓塞重构,为急诊放射学快速风险分层提供了便捷工具。

特定人群与系统性血管病变的精准评估也是本届年会的关注点。Gilad Borisovsky 等比较了妊娠期女性各阶段 CTPA 的图像质量,发现随孕期增加,由于呼吸伪影的影响,诊断质量显著下降,第三孕周的非诊断性扫描率升至 13.5%,提示晚期妊娠时需考虑替代成像方案。针对系统性病变,Xiao 等通过 CTPA 对高安大动脉炎(Takayasu arteritis, TA)患者的肺动脉受累进行特征分析,发现 TA 累及肺动脉会导致中型血管(1.6~3.2 mm)出现的容积减少。这些研究强调了结合患者生理状态进行个体化血管影像评估的重要性。

自动化血管分割与重塑特征分析深化了对慢性血栓性肺动脉高压的理解。Lin 等开发并验证了一种基于深度学习的肺血管分割模型,旨在通过多中心数据检测慢性血栓性肺动脉高压(chronic thrombo embolic pulmonary hypertension, CTEPH)。模型在识别 CTEPH 方面表现出极佳性能, $AUC$  达到 0.95~0.97。同时,Morteza Saneitaheri 等探讨了肺动脉梗阻指数(pulmonary artery obstruction index, PAOI)与肺静脉(pulmonary vein, PV)指标的关系,发现 PE 患者同侧肺静脉显著变窄且与 PAOI 高度相关,反映了血栓负荷引发的静脉重塑过程。该系列研究证明,利用自动量化工具评估动静脉结构的精细变化,可为栓塞性疾病的严重程度预测及个体化管理提供精准依据。

## 胸部 MRI

低中场强磁共振成像在肺实质病变诊断中的临床价值得到了进一步评估。Felicia Tang 等旨在比较 0.55T 肺部 MRI 与胸部 CT 在检测常见肺部病变中的图像质量及诊断效能。研究前瞻性纳入 28 名受试者,对比了 0.55T MRI[含  $T_2W$  定期旋转增强重建并行采集技术(periodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstruction, BLADE)及  $T_1W$  UTE 序列]与 CT 的表现。结果显示 79.8% 的 MRI 图像质量被评为“良好”及以上;MRI 对实变影、大结节( $>7$  mm)及肺动脉扩张的显示效果极佳,但对小结

节( $\leq 7$  mm)及肺气肿的检测能力仍受限于空间分辨率。该研究证实 0.55T MRI 可作为 CT 的无辐射替代方案,尤其适用于需要频繁随访监测的放射敏感患者。

相位分辨功能肺磁共振成像(PREFUL-MRI)在无创评估肺功能及血管病变中展现出高度的一致性与临床潜力。Meng Qin 旨在探讨 PREFUL-MRI 在不同呼吸模式下评估健康志愿者肺通气参数的可行性。研究纳入 30 名受试者,发现 PREFUL-MRI 通气参数与传统肺功能检查指标( $FEV_1\%$ )具有强相关性( $r = 0.699$ ),且在无需复杂呼吸动作的情况下即可提供可靠的通气分布图。在此基础上,Liu 等利用 PREFUL-MRI 定量评估肺动脉高压患者的灌注与通气,发现肺动脉高压患者的总灌注缺损百分比(total perfusion defect percentage, QDPtotal)高于正常对照组(42.90% vs. 10.20%,  $P < 0.001$ ),且在鉴别肺动脉高压(pulmonary arterial hypertension, PAH)与 CTEPH 方面具有中等诊断价值( $AUC = 0.709$ )。

超短回波时间(UTE)序列通过捕捉极短的信号反馈,为阻塞性肺疾病的精准分型提供了重要依据。Seokwon Lee 等旨在通过非增强超短回波时间磁共振成像(ultra short echo time magnetic resonance imaging, UTE MRI)获得的三维通气相关图谱,精准评估阻塞性肺疾病的表型。研究纳入 29 名患者,通过吸气末与呼气末图像差异计算通气加权图。结果显示利用 UTE MRI 参数构建的线性决策函数能有效区分肺气肿主导型(emphysema-predominant, EP)和气道主导型(airway-predominant, AP)表型,准确率达 83.3%。这一成果证明,UTE MRI 能够提供无辐射的功能生物标志物,助力临床制定个体化的慢阻肺治疗策略。

针对气体成像技术的仿真模拟研究为理解不同示踪气体的成像差异提供了理论支撑。Jeffrey Ord 等旨在模拟动态氟-19( $F_{19}$ )和单次呼吸超极化氙-129( $Xe_{129}$ )在虚拟肺环境中的成像过程。模拟结果显示  $F_{19}$  和  $Xe_{129}$  对远端气道的高度狭窄( $>80\%$ )均具有较好的敏感性,但  $Xe_{129}$  的敏感性在添加随机衰减值后显著下降。该研究通过体外模拟阐明了气道阻力与成像信号丢失之间的依赖关系,有助于进一步优化功能性肺部 MRI 技术在区域肺功能研究中的应用。

## 多模态影像组学

在个性化医疗背景下,多模态数据融合与影像组学成为预测肿瘤微环境与组织学特征的关键技术。You 等旨在建立一个非侵入性模型,通过结合定量 CT 形态学、正电子发射断层扫描(positron emission tomography, PET)代谢参数(肿瘤与肺  $SUV_{max}$  比

值)及临床特征,预测肺腺癌(lung adenocarcinoma, LUAD)的程序性死亡配体 1(programmed cell death ligand 1, PD-L1)表达状态。研究回顾性分析了 431 例患者的 18F-氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography,<sup>18</sup>F-FDG PET/CT)影像,利用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)回归筛选预测因子。结果显示该多元逻辑回归模型在验证队列中的 AUC 达 0.758,且具有 97.7%的高阴性预测值。该模型无需复杂的影像组学特征提取,利用常规临床数据即可有效识别不太可能从免疫治疗中获益的患者,支持了个体化治疗决策。此外,在针对肺腺癌高级别组织学模式的术前预测中,多模态堆叠集成模型展现出卓越效能。You 等进一步开发了一种融合 PET/CT 定量参数、CT 影像组学(3380 个特征)与临床变量的无创堆叠集成模型,用于预测 LUAD 中实体型或微乳头型成分 $\geq 20\%$ 的高级别模式。研究构建了基于极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)和 LASSO-逻辑回归的双层架构,在独立验证队列中实现了 0.950 的高 AUC。这表明多模态堆叠模型能提供关键的肿瘤生物学行为信息,有助于临床医生在肺叶切除与亚肺叶切除之间制定精准的手术策略。

在急危重症感染的管理中,分子诊断与影像组学

的结合开辟了早期风险分层的新范式。Catharina Gerhards 等探讨了循环游离 DNA (cell-free DNA, cfDNA)完整性特征与 CT 影像组学在急性呼吸系统疾病患者预后预测中的价值。研究发现急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)患者的 cfDNA 浓度显著升高,且影像组学特征“original\_glm\_ClusterShade”与体外膜肺氧合(extra corporeal membrane oxygenation, ECMO)需求呈强负相关( $r = -0.84$ )。结论指出整合 cfDNA 分子标志物与 CT 影像组学,能够有效实现对危重患者的非侵入性病情监测,为精准分诊和器官支持治疗提供了有力的依据。

对于特定肺部感染性病变,3D 深度学习与时间序列模型提高了诊断的特异性。Liu 等开发了基于 3D EfficientNetB0 的深度学习模型,用于非结核分枝杆菌肺病(non-tuberculous mycobacterial lung disease, NTM-LD)胸部 CT 模式的标准化分类,模型对纤维空洞型、支气管扩张型亚型的分类准确率达 75.68%,有助于根据影像亚型定制抗感染策略。此外,Zhang 等构建了整合多时间点胸片肺炎量化评分与实验室指标的 XGBoost 时间序列模型,能以 0.936 的高 AUC 准确区分铜绿假单胞菌的肺部感染与定植,进一步推动了抗生素的精准使用。

(收稿日期:2026-01-30 修回日期:2026-02-04)