

低,未来可能扩展到更大的患者群体。Schoennagel 等探讨应用心脏多普勒超声门控技术的特征追踪 MRI (feature tracking MRI, FT-MRI) 评价胎儿左、右心室 GLS 的可行性,结果显示,与健康胎儿相比,先天性心脏病胎儿的左室和右室 GLS 值显著降低。使用多普

勒超声门控的 FT-MRI 评价胎儿心功能提供了一种新的定量方法,可能成为提高对胎儿心功能认识的新工具。

(收稿日期:2024-01-21)

## • RSNA2023 聚焦 •

# RSNA2023 胸部影像学

谢开,孙希子,唐媛媛,陈冲,赵延洁,周舒畅,夏黎明

**【摘要】** 2023 年 RSNA 年会的主题是“引领变革”,强调了放射学领域的不断发展,旨在让放射学专业人士在变革中起到引领作用。今年关于胸部影像学方面的研究热点和重点包括以下几个方面:人工智能、深度学习、影像组学、气道病变与慢性阻塞性肺疾病、肺弥漫性疾病、肺结节与肺癌筛查、胸部恶性肿瘤、血管疾病、肺部感染性疾病、胸部 MRI 和能量 CT。本文针对上述内容进行较全面的综述。

**【关键词】** 人工智能;深度学习;影像组学;慢性阻塞性肺疾病;间质性肺病;肺癌筛查;磁共振成像;能量 CT

**【中图分类号】** R814.42;R816.4;R-05 **【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1000-0313(2024)02-0152-12

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 人工智能/深度学习

胸部 X 线片(CXR)是放射科最常见的检查。Pant 等使用人工智能(AI)模型 DeepTek AI 回顾性地将四家医院(A、B、C 和 D)17500 例正位 CXR 分为“可能正常”或“疑似异常”,在不同的阈值下,DeepTek AI 从 A、B、C 和 D 区分出“可能正常”的比例分别为 21%、28%、31%、20%和 45%、55%、63%、37%,错误率(实际异常但评估为可能正常的比例)分别为 4%、3%、1%、3%和 11%、6%、8%、8%,医生从 A、C 和 D 区分出“可能正常”的比例为 41%、65%和 76%,错误率为 11%、3%和 11%,AI 评估的结果与医生的一致性高达 95%。DeepTek AI 可以有效地区分正常和异常 CXR,从而优化放射科工作流程。Lee 等评估了正常过滤(NF)AI 模型检测异常 CXR 的敏感度及报告的正常 CXR 的比例,发现当 NF 模型阈值特异度设定为 50%时,可以减少 22.0%的正常 CXR 的报告工作量,总体敏感度为 97.8%。研究还联合了可检测 CXR 异常的商用(CA)AI 模型,CA 模型检测出了 16.7%的

漏诊异常病例。NF 模型具有减少放射科医生工作量的潜在价值,而与 CA 模型的联合使用有助于防止漏诊。

CXR 的诊断错误率一直保持不变,AI 的应用有助于提高诊断正确率。Talwar 等基于一种商用 AI 系统(Annalise Enterprise CXR)回顾性分析了一家教学医院的 1559 例 CXR,并与原始影像报告进行了对比。AI 共发现 169 例 CXR 存在重要病变,而其中 97 例原始报告经医生确认为漏诊,常见的漏诊病变有肺结节(16%)、胸腔积液(16%)、椎体压缩性骨折(12%)等。Frias 等通过基于自然语言处理(NLP)的影像报告搜索引擎(Microsoft Nuance)查询了 3760 例 CXR 是否存在孤立性肺结节(SPN)、肺炎和气胸等,每份影像报告(Rad1)由医生进行人工审核,并用多发现 AI 算法(Annalise.AI)确认诊断是否一致,结果发现 NLP/Rad1 和 AI 具有较高的真阳性和真阴性一致性,NLP/AI 模式可以识别 CXR 的误诊和漏诊。Luchs 等应用 AI 模型回顾性地分析了 519 例 65 岁以上患者的 CXR,用于评估是否存在骨质疏松和椎体楔形骨折。AI 模型检测出的骨质疏松和椎体楔形骨折分别为 76 例(14.6%)和 58 例(11.2%),而放射报告中分别为 8 例(1.5%)和 0 例(0.0%),模型与报告不一致的原因主要是放射科医生的未报告。他们还利用 AI 模型回顾性分析了 1261 例门诊老年( $\geq 65$  岁)患者的 CXR

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:谢开(1999-),女,湖北汉川人,硕士研究生,主要从事胸部影像诊断工作。

通讯作者:夏黎明, E-mail:lmxia@tjh.tjmu.edu.cn

图像,发现 AI 模型对于部分慢性疾病检测的敏感度和特异度优于放射科医生的报告。

尽管 AI 应用于临床可以提高诊断效能和工作效率,但仍需要评估实际使用情况,以确保 AI 更好地辅助临床实践。Tang 等比较了使用三种 AI 用户界面(仅文本;联合 AI 置信度评分和文本;AI 置信度评分、文本和图像)和不使用 AI 下放射科医生对胸片上肺结节和肿块的诊断情况,发现医生使用仅文本 AI 用户界面时的受试者操作特征(ROC)曲线下面积(AUC)高于未使用时的 AUC(0.87 vs.0.82),而另外两种界面与未使用时无明显差异。Dasegowda 等对应用于临床的 CXR 诊断 AI 算法进行了多中心上市后监测(PMS),发现 AI 算法的独立诊断性能优于放射学报告,AI 辅助显著提高了放射科医生诊断的 AUC(增加 6%~19%)。Scrivner 等使用扩展技术接受模型(ETAM)评估了放射科医生对计算机辅助诊断(CAD)技术的接受和使用情况,参与评估的医生表示信任 AI,但 AI 仍存在阅片时间等方面的问题,主要问题在于 AI 用户测试中缺乏放射科医生参与导致整合性和可用性低。AI 开发应将用户训练和 workflows 整合等纳入考虑,有助于 AI 更好应用于临床。目前通过图像预处理技术[如直方图均衡化(HE)、对比限制适应性直方图均衡化(CLAHE)以及非锐利掩膜(UM)],许多检测 CXR 异常的 AI 方法已经有了具有前景的进展,但应用于来自不同机器的不同图像特征时这些方法受到了一定限制。Shin 等提出了一种基于 X 射线物理的数据增强(XPA)技术,发现应用 XPA 的 AI 模型诊断性能在不同的扫描机器上都优于未应用的模型。

要在临床中发挥 AI 的价值,还应该关注其应用在不同类型患者上的差异。Sourlos 等比较了商用 AI 软件和放射科医生检测肺气肿患者和非肺气肿患者胸部 CT 上肺结节的能力,发现在非肺气肿患者中,AI 检测肺结节的能力优于放射科医生,但在肺气肿患者中,尽管 AI 敏感度较高,但假阳性率也较高,因此诊断能力不如医生。不同软件之间诊断也有所差异。Hsiao 等比较了三种 AI 软件 ClearRead CT v5.6.3(Riverain Technologies, Miamisburg, OH)、InferRead Lung CT AI vR12(InferVision Technology, Philadelphia, PA)和 Lung AI(MICA v29.8, Research Model: AMM7; Arterys, Redwood city, CA)在胸部 CT 上检测肺转移癌患者肺结节的能力,发现三种软件检测的结节与放射科医生报告的结节有很大差异,尽管 InferVision 检测到的结节数量最多,但 Arterys 检测到的结节在最终报告中的占比最大。

Chalil 等利用 2000 例 CXR(训练集:验证集=80;

20)对预先训练的卷积神经网络(CNN)进行迁移学习,用于检测胸片上的医疗设备或其他异物并进行分类,发现训练过的模型可以较准确地进行分类,未来需要进一步更大量的数据集对其进行训练以提高模型性能。在 CXR 上检测和测量气管导管(ETT)的 AI 工具主要应用于放射科。Bera 等比较了 ICU 医生在有和没有 AI 辅助的情况下检测和测量 ETT 的差别,发现使用 AI 后医生诊断的敏感度和特异度都有所提高,平均诊断时间缩短了约 52%,75%的受试者表示希望在临床实践中使用 AI。

高分辨率(HR)数据可以提高深度学习(DL)模型的诊断性能。Yanagawa 等分别基于正常分辨率(NR,矩阵  $512 \times 512$ ,层厚 0.5 mm)和 HR(矩阵  $2048 \times 2048$ ,层厚 0.25 mm)CT 图像数据开发了两个预测浸润性肺腺癌(IVA)的 DL 模型,发现在训练集和测试集中,HR 模型的 AUC 均明显高于 NR 模型( $P < 0.05$ ),放射科医生在使用 HR 模型的情况下,诊断的准确率和敏感度相比于未使用时明显提高。

DL 重建(DLR)方法可以提高图像质量。Ota 等回顾性收集了 20 例急诊胸部 CT 图像,并用运动伪影矫正 DL 重建(MC-DLR)方法进行重建,并由几位放射科医生和技师独立随机地对运动伪影进行评分,结果发现使用 MC-DLR 重建的图像评分相比于未使用的显著降低。急诊患者通常难以采集到高质量的 CT 图像,而 MC-DLR 能有效减少后处理图像中的运动伪影,提高图像质量。Takenaka 等分别用混合迭代重建(Hybrid-IR)和 DLR 方法对 40 例患有肺部疾病患者的标准[CT 剂量指数体积(CTDIvol):  $(9.0 \pm 1.8)$  mGy]、减量[CTDIvol:  $(1.7 \pm 0.2)$  mGy]和超低剂量[CTDIvol:  $(0.8 \pm 0.1)$  mGy]CT(SDCT、RDCT 和 ULDC)的高清 CT(HDCT)进行了重建并分析比较,发现 DLR 获得的 CT 图像信噪比(SNR)明显高于 Hybrid-IR( $P < 0.0001$ ),且在 ULDC 中 DLR 对病灶的检出能力优于 Hybrid-IR。Lv 等发现相比于自适应统计迭代重建(ASiR-V)算法,DLR 算法结合低管电压(100 kVp)可以显著降低胸部 CT 扫描的辐射剂量,联合图像增强滤波器(LU)可以明显降低图像噪声,提高图像质量。Wang 等对 60 位患者的常规剂量 CT(RDCT)和低剂量 CT(LDCT)图像进行了分析,RDCT 使用 Hybrid-IR 算法重建,LDCT 分别使用 Hybrid-IR 和 DLR 算法重建,发现 DLR 重建的 LDCT 的整体图像质量明显优于 Hybrid-IR( $P < 0.001$ ),与 RDCT 相当。

Cho 等开发了一个基于 DL 的自动预测算法(DLLV),可以根据 CXR 预测左心室射血分数(LVEF)。在测试集中,DLLV 预测患者  $LVEF \leq$

35%和 $\leq 50\%$ 的 AUC 分别为 0.79 和 0.80, 根据 DLLV 结果有选择性地建议超声心动图检查可减少 70%的检查, 而 DLLV 不建议超声心动图检查的患者中, 仅有 0.1%的患者 LVEF 异常。DLLV 可对需要超声心动图检查的患者进行预筛, 减少不必要的检查。

最近大型语言模型 (LLMs), 如 ChatGPT 和 Google Bard 已被广泛应用, 带来许多益处, 但也存在一些问题。Rahsepar 等分别在 ChatGPT 和 Google Bard 提出了关于肺癌预防、筛查以及影像报告中常用术语(基于美国放射学学会和 Fleischner 学会的 Lung Imaging Reporting and Data System (Lung-RADS) v2022 建议)的问题, 发现 ChatGPT 回答时的准确率和一致性均优于 Google Bard。尽管 LLMs 为医学等领域提供了新的可能性, 但医疗决策的实施仍需要严格审查。Haver 等评估了由 ChatGPT 生成的肺癌预防和筛查常见问题回答的可读性, 得到的答案总体平均语言复杂度为 49.7, 总体平均可读性为 12.6 级, 对于大众难以理解。在经过 ChatGPT、GPT-4 和 Bard 对这些答案进行简化后, 语言复杂度和可读性得到优化。LLM 的文本简化能够提高信息的临床适用性, 有助于大众更好地获取健康信息。

## 影像学

PD-L1 表达决定了非小细胞肺癌 (NSCLC) 患者治疗方案的选择, 其表达水平可用于评估患者免疫治疗后反应。Gong 等从 259 例病理确诊的 NSCLC 患者术前平扫 CT 图像中提取了影像组学特征和 DL 特征, 用于预测 PD-L1 表达, 计算得到了每位患者的影像组学得分 (Rad-score) 和 DL 影像组学得分 (DLR-score)。在训练队列和验证队列中, PD-L1 表达的 Rad-score AUC 分别为 0.786 和 0.702, DLR-score AUC 分别为 0.983 和 0.942, 可非侵入性地预测 PD-L1 表达。Chen 等收集了 117 例接受度伐单抗治疗的晚期 NSCLC 患者的治疗前 ( $n=117$ ) 和治疗后 ( $n=79$ ) CT 图像, 并提取了影像组学特征, 发现治疗后影像组学特征与临床特征结合的模型预测患者总生存期 (OS) 的能力最佳, 治疗前影像组学特征模型的预测能力也优于单独的临床特征模型。

模型设计是成功构建模型的关键。Gordon 等分别使用两种特征提取技术(从分割病灶中手工提取特征和预训练 ResNet 从最大肿瘤周围边界提取深度特征)构建了基于胸部 CT 预测 NSCLC 患者表皮生长因子受体突变状态 (EGFRm+/-) 影像基因组学的模型, 发现使用手工提取特征通过主成分分析 (PCA) 过滤影像基因组学模型相比于深度特征表现出更好的预测能力和前瞻普适性。

肺泡间转移 (STAS) 会影响 NSCLC 患者手术方法的选择和患者的预后。Lou 等回顾性收集了 373 例 NSCLC 患者的术前胸部 CT 和临床资料, 构建了五个预测 NSCLC STAS 的模型: 一个临床模型、两个影像组学模型(经典肿瘤影像组学模型和扩大肿瘤影像组学模型)和两个组合模型(经典肿瘤组合模型和扩大肿瘤组合模型), 研究发现经典肿瘤影像组学和组合模型对 STAS 的预测能力相对较好, 但扩大肿瘤兴趣区 (ROI) 并不能提高模型预测能力。

Huang 等基于 DL 和影像组学提取了胸部 CT 上磨玻璃密度结节 (GGN) 的临床和形态特征及全肺影像特征, 并利用反向传播神经网络构建 5 种预测良性和恶性 GGN 的模型, 研究发现综合临床形态学特征、全肺影像组学特征和全肺图像特征 (CMRI) 的模型在内部验证集、外部测试集 1 和 2 中的 AUC 最高, 分别为 0.886、0.830 和 0.879。

酪氨酸激酶抑制剂 (TKIs) 是复发或晚期不可切除骨肉瘤 (OS) 患者的主要治疗手段。Zhou 等回顾性纳入了 90 例 OS 肺转移患者的胸部 CT 图像, 提取并生成了影像组学特征, 利用影像组学特征和临床特征分别建立了两个多变量 COX 比例风险回归模型 (R 模型和 C 模型), 并基于所有特征建立了多维诺莫图 (RC 模型), 用于预测 OS 患者的无进展生存期 (PFS)。研究发现 R 模型和 RC 模型预测 PFS 的能力均优于 C 模型, 影像组学可用于预测接受 TKIs 治疗的 OS 患者的预后。

Zhang 等开发和验证了一个基于增强 CT 评估胸腺上皮肿瘤 (TET) 侵袭性和组织学风险的影像组学和语义学诺莫图, 对于 Masaoka-Koga 分期和 WHO 分类, 联合模型分别整合了 5 个瘤周影像组学特征、4 个语义学特征和 5 个瘤周影像组学特征、2 个语义学特征, 测试集上区分早期 (I/II 期)、进展期 (III/IV 期) 和低风险 (A/AB/B1 型)、高风险 (B2/B3/C 型) TETs 的 AUC 分别为 0.958 和 0.857。结合了瘤周影像组学特征和语义学特征的诺莫图有助于确定晚期和高风险 TET 以及术前决策。

## 气道病变与慢性阻塞性肺疾病

Lee 等基于胸部 CT 对重症哮喘患者治疗前后支气管扩张 (BE) 评分和黏液嵌塞 (MI) 程度进行可视化定量分析, 发现治疗后 MI 范围变化的临床意义高于 BE 评分, 其变化与管径 10 mm 的气道壁面积的平方根 (Pi10)、肺功能检查 (PFT) 和嗜酸性粒细胞的变化相关, 可通过对气道的定量分析和对 MI 程度的视觉分析评估患者治疗后的反应。

肺叶切除术后右肺中叶 (RML) 扭转可能危及患

者的生命。Tamizuddin 等分析了 52 例影像学疑似但并未扭转及 6 例确诊 RML 扭转的患者的 CXR 及 CT 的影像学特征,发现确诊患者影像更易出现反晕征、受累肺叶磨玻璃密度影(GGO)范围更广、冠状面上 RML 支气管和中间支气管之间的夹角更大,这些特征有助于放射科医生更早、更准确地诊断 RML 扭转,从而改善患者预后。

肺淋巴管畸形(PLM)在伴有淋巴-气道或肺泡漏时,乳糜漏会导致乳糜性肺炎和塑性性支气管炎,由于压力变化等原因气道中的气体会进入淋巴管,形成淋巴泡沫征(LBS),是高分辨率 CT(HRCT)上诊断淋巴-气道或肺泡漏的特殊征象。Liu 等回顾性收集了 810 例诊断为原发性肺淋巴瘤(PPL)的患者,其中 62 例伴有乳糜性痰和塑性性支气管炎的患者都有肺和(或)纵隔 LBS,这些患者在之后 1~6 个月的随访中 LBS 呈动态变化。

Jorshery 等对之前开发的基于 CXR 预测肺相关死亡率的 CNN(CXR-Lung-Risk)进行了外部验证,用于评估其预测 6 年内慢性阻塞性肺疾病(COPD)高风险人群的能力。研究发现 CXR-Lung-Risk 与 COPD 的发生显著独立相关,且 CXR-Lung-Risk 与临床风险评分(TargetCOPD)联合预测的 AUC(0.72)高于仅 TargetCOPD 预测的 AUC(0.66)。CXR-Lung-Risk 有助于识别 COPD 高风险的人群,有助于患者的早期干预。Park 等使用 AI 分析了 COPD 患者胸部 CT 的支气管扩张评分,该评分反映了内气道相对于近端气道的异常变细程度(评分 $\geq 1.1$  可认为有气道扩张),研究发现支气管扩张评分、CT 壁面积百分比和第一秒用力呼气容积(FEV1)在多变量分析中是 COPD 急性加重的重要预测因素(OR: 1.12, 95% CI: 1.03 ~ 1.22,  $P=0.007$ )。使用 AI 自动量化支气管扩张程度可以预测 COPD 急性加重。

骨质疏松是 COPD 的主要合并症,也是椎体压缩性骨折(VCF)易发生的原因之一,而 VCF 导致的脊柱形态改变会影响肺的扩张从而影响肺功能。Nadeem 等开发了一种基于 DL 自动评估 VCF 的方法,发现 GOLD 2~4 级的 COPD 患者 VCF 计数显著高于 GOLD 0 级的患者,女性患者的 VCF 计数较低,年龄与 VCF 计数呈正相关。

Lee 等开发并验证了一种基于 CXR 检测肺气肿的深度神经网络,深度神经网络在内部测试集( $n=184$ )、外部测试集 1( $n=491$ )和外部测试集 2( $n=559$ )中的 AUC 分别为 0.90、0.90 和 0.87,可较准确地诊断肺气肿。

## 肺弥漫性疾病

Lee 等应用基于 DL 的人体成分分析软件对特发

性肺纤维化(IPF)患者基线和 1 年后胸部 CT 所示的 T<sub>12</sub>~L<sub>1</sub> 层面的平均脂肪面积和肌肉面积进行了计算,通过 COX 回归分析、Kaplan-Meier 曲线及 Log-rank 检验评估了成分变化与预后之间的关系。研究发现,第一年病程中脂肪面积显著减少与患者的不良预后相关。Rothenberg 等比较了全自动和半自动定量 CT(QCT)生物标记物预测 IPF 患者无移植生存期(TFS)的准确性,研究使用全自动 AI 算法基于 HRCT 量化肺间质异常(ILA),包括全肺百分比(ILA-WL)和边缘百分比(ILA-R),并应用半自动测量得到肺表面不规则(PSI)评分,同时计算了由性别、年龄、肺功能测试结果组成的性别-年龄-生理学(GAP)评分。结果发现全自动 AI 算法的生物标志物在预测 TFS 方面的准确性高于 PSI 和 GAP 评分,可能可以作为 IPF 患者更准确的预后评估方法。Knopf 等分析比较了端粒长度正常和缩短的间质性肺病(ILD)患者胸部 HRCT 影像进展的情况,发现端粒缩短患者的进展率更高,端粒长度与影像学进展显著相关。端粒长度可用于评估 ILD 患者的影像进展风险,从而对高风险人群进行密切随访或早期干预。

进行性肺纤维化(PPF)是指表现出进行性特征,除 IPF 外的其他 ILD,可通过抗纤维化药物治疗。Cho 等回顾性收集了 75 位确诊为 ILD(除 IPF 外)并进行肺活检的患者,将患者分为 PPF 和非 PPF,发现普通型间质性肺炎(UIP)病理类型与影像学上蜂窝样改变、牵拉性支气管扩张和网格样改变表现相关( $P<0.001$ ),牵拉性支气管扩张为 PPF 的唯一预测因素( $HR=6.54, P=0.003$ ),PPF( $HR=3.96, P=0.013$ )和高龄( $HR=1.13, P<0.001$ )与非 IPF ILD 患者死亡风险增加相关,提示及时开始抗纤维化治疗对改善患者预后的重要性。目前除了 IPF,尚没有针对 UIP 病理类型的 HRCT 诊断标准,而 UIP 是预测 PPF 的关键。Egashira 等基于机器学习训练了一种基于 HRCT 预测 UIP 病理类型的 AI,发现该模型在预测不同 ILD UIP 病理类型方面的能力优于经验丰富的放射科医生。

DL 模型在不同 CT 成像参数中稳定性的不确定性是其尚未广泛应用于临床的原因之一。Yu 等比较了三个基于胸部 CT 将 ILD 患者分为 IPF 和非 IPF 的 DL 模型的能力,发现模型在应用于不同的 CT 成像参数时其预测性能有区别,预测性能的相关因素包括平均有效 mAs、患者体位和扫描层厚。在开发 AI 模型并将其应用于临床时,应增强其泛化能力。Choi 等基于自动化定量软件根据肺癌术前胸部 CT 图像将 1199 名患者分为正常组和 ILA 组,并评估了 ILA 范围,发现基于增强扫描评估的 ILA 范围要大于平扫,

因此使用增强 CT 进行自动定量评估时,需要谨慎对待,以免对 ILA 过度诊断。

一氧化碳弥散量(DLCO)是 IPF 患者的重要功能指标,但有的患者难以配合这项检查。Chung 等利用 XGBoost 机器学习算法,基于 QCT 的肺部结构和功能特征预测 IPF 患者 1 年后的 DLCO,发现左肺区域通气指数(RRAVC)、高衰减面积百分比(HAA%)和气管壁增厚与较低的 DLCO 相关。

Marrocchio 等利用量化软件(Aview, Coreline Soft, Seoul, Republic of Korea)对系统性硬化症(SSc)患者胸部 CT 显示的肺血管进行了定量分析,分析发现 SSc 患者的平均血管数、小于  $5\text{ mm}^2$  的血管数和小于  $5\text{ mm}^2$  的血管总体积与总血量(BV5/TBV)的比值均小于正常对照组,在 SSc 患者中,合并肺动脉高压(PH)患者的肺血管总表面积低于未合并 PH 的患者。定量 CT 可以检测 SSc 患者肺血管的变化,有助于对 SSc 病理生理机制的理解,并对其严重程度和预后进行评估。

特发性炎症性肌病相关性 ILD(IIM-ILD)的急性加重(AE)会危及患者的生命,根据诊断标准,AE 可分为特发性(I-AE)和感染性(iT-AE)。Zhang 等回顾性分析了 69 例 AE-IIM-ILD(I-AE34 例, iT-AE35 例)患者,发现特发性 AE-IIM-ILD 的预后优于感染性,而中性粒细胞百分比(NEU)与 HRCT 显示的 GGO 范围结合有助于区分两种患者(AUC 为 0.812),让临床医生为患者提供更合适的治疗方案。

HRCT 不仅可以对 ILD 进行初步筛查,还可以用于评估疾病进展。Lee 等回顾性收集了 120 例 2013 年 3 月—2021 年 2 月至少进行了两次 HRCT 的原发性干燥综合征(pSS)患者的临床和影像学数据,研究发现基线 HRCT 无 ILD 的 pSS 患者( $n=81$ )在随访期间(中位数 2.8 年)无 ILD 发生, pSS-ILD 患者( $n=39$ )中,约半数(19/39, 48.7%)患者出现进展,呈缓慢逐渐恶化,CT 表现为 UIP(OR=15.237)和随访间隔时间(OR=1.403)是 pSS-ILD 进展的独立危险因素。

普通变异型免疫缺陷病(CVID)可能会并发肉芽肿性和淋巴细胞性 ILD(GL-ILD), GL-ILD 包括多种 ILD 异常,会导致 CVID 加重。Landini 等回顾性收集了 38 位 GL-ILD 和 38 位非 GL-ILD 的 CVID 患者的胸部 CT 和 PFT 数据,发现 GL-ILD 最常见的影像学表现为支气管扩张、支气管壁增厚、黏液栓、树芽征、马赛克灌注等,CT 网格样改变与 PFT 恶化相关,这些特征有助于诊断 GL-ILD。

Grafham 等利用自动化 CT 分析工具对肺移植患者基线和 6 个月时肺纹理和肺血管容积(PVV)的变化进行了分析计算,并研究了这些变化与慢性肺移植

功能障碍(CLAD)发病的关系。非闭塞性细支气管炎综合征(BOS)型 CLAD 的 PVV 从基线到发病时有所增加, GGO 及网格样改变也增加,而 BOS 型 CLAD 的 PVV 和肺纹理从基线到发病时无显著差异。PVV 的增加与非 BOS 型 CLAD 的发病相关。

Kim 等对肺纤维化合并肺气肿(CPFE)的影像学类型及其与预后的关联进行了研究,发现 10% 的吸烟相关性间质纤维化(SRIF)/脱屑性间质性肺炎(DIP)患者在一年后表现为进行性纤维化(PF),明显低于 UIP 患者(56%),进展速度最慢的类型是 SRIF,其次是非特异性间质性肺炎(NSIP)和寻常性间质性肺炎(UIP)。尽管影像学类型与无肺移植存活率无关,但与纤维化进展相关,而纤维化进展是预测无肺移植存活率的重要因素。

肺淋巴回流病(PLRD)是一种罕见疾病,其特征是支气管-纵隔淋巴干发育畸形和/或胸导管出口异常。Hao 等分析了 580 例 PLRD 确诊患者的 HRCT 和 MSCT 淋巴造影图像,发现 86 例表现为蛙卵征,其特征为弥漫性不均匀分布的 GGO 和多个不连续的小结节叠加。蛙卵征有助于放射科医生对 PLRD 引起的肺淋巴水肿和淋巴管扩张进行诊断,同时也有助于水肿程度的判断及临床分期。

弥漫性囊性肺疾病(DCLD)是以肺实质内弥漫分布含气囊腔为特征的一组肺部疾病,由于 DCLD 相对罕见,且与肺气肿等疾病表现相似,因此常被误诊。Noonan 等提出了一种能识别和量化 DCLD CT 图像中囊性区域的模板匹配方法,并与放射科医生的手动标注结果进行比较,结果显示 Dice 相似系数、精确度、特异度和 F1 评分分别为 86%、79%、99% 和 88%,模板匹配方法为 DCLD 提供了一种可靠、高效的评估手段。

## 肺结节与肺癌筛查

Tsepang 等回顾性收集了 71 位经病理证实的 SPN 患者的双层光谱探测器 CT 静脉期图像,发现恶性组 SPN 的碘浓度(IC)值、肺动脉标准化 IC(NIC<sub>pa</sub>)、40 keV 单色图 CT 值以及光谱 HU 曲线斜率明显高于良性组( $P<0.05$ ),双层光谱探测器 CT 有助于区分良性和恶性 SPN。Pu 等收集了 109 位接受过多次 LDCT 肺癌筛查且基线 CT 扫描时发现肺结节的患者,发现基于基线 LDCT 得到的皮下脂肪(SAT)和内脏脂肪(VAT)体积与结节倍增时间(DT)显著相关。身体成分特征可作为预测肺结节生长的生物标志物,有助于不确定结节的评估。Ma 等将 453 例病理确诊的肺实性结节患者按结节相邻情况分为肺胸膜实性结节(PPSN)组和孤立性实性结节(ISN)组,使用 DL 模

型 Swin Transformer 来预测结节良恶性,发现分组后 ISN 组预测的 AUC 高于分类前预测的 AUC,而 PPSN 组 AUC 减低。使用 DL 模型时进行更详细的分类可能有助于提高预测能力。Staudte 等对组织胞浆菌病流行地区的 235 例检查报告中包含“卫星结节”字样的胸部 CT/CTA 患者进行了分析,发现约 86% 伴有卫星结节的肺结节为良性病变,其他因素中,边缘毛刺征( $OR=0.06, P<0.01$ )、转移性疾病或新诊断癌症史( $OR=0.15, P<0.01$ )与恶性相关性最强,而支气管血管束结节、边缘光滑与年轻三种变量联合预测良性的性能最强(AUC 0.84,  $P<0.01$ )。因此在组织胞浆菌病流行地区,根据卫星结节和支气管血管束结节等预测肺结节的良恶性有助于指导随访计划。

Alam 等分析了一家医院参加肺癌筛查(LCS)、Lung-RADS 分级为 4B/4X 并因肺恶性结节手术治疗的患者的手术延迟(LCS 与手术间隔时间超过 60 天)的相关因素,发现手术延迟与就诊地点和区域中位收入相关。肺癌手术延迟可能恶化诊疗差距,尤其是对于来自低收入地区的患者。他们还收集了 260 例参加 LCS 并因肺结节进行手术治疗的患者的结节病理结果,发现 15% 为良性病变,病理主要为感染/炎症、瘢痕/纤维化和良性肿瘤等,尽管 Lung-RADS 指南应用于 LCS 中,但良性结节的手术治疗无法避免。

进展型部分实性结节(PSN)可能会发展为肺癌。Bondarenko 等利用商业算法识别 PSN,并通过放射学报告 NLP 来确认 PSN 进展与否,发现在多变量分析中,位于右肺中叶( $OR=0.27, 0.12\sim0.99, P=0.02$ )、年龄( $OR=1.10, 0.98\sim1.02, P<0.001$ )和分叶征( $OR=1.53, 2.77\sim6.50, P<0.001$ )是预测 PSN 进展的重要因素。商业算法与放射学报告 NLP 的结合有助于对 PSN 的识别和生长监测。Weng 等利用 PSN 的影像组学特征和患者临床特征开发了一种用于预测 PSN 进展的 ML 模型,该模型在验证集上的 AUC 为 0.78,可以识别进展性结节。

肺癌是癌症死亡的首要原因,尽管有明确证据表明 LCS 有益,但肺癌筛查率仍较低。Zhao 等利用 CT 和基于广角碳纳米管 X 射线的固定式数字胸部断层合成系统对带有肺结节的“LUNGMAN”模型进行了扫描,每个模型不同肺叶中随机放置 3 个不同密度的结节( $-800$  HU、 $-600$  HU、 $+130$  HU),CT 和断层合成系统在检测可活检的结节方面特异度均为 1,敏感度分别为 0.958 和 0.850,断层合成系统的敏感度随肺结节密度的增加而增加,检测 130 HU 可活检结节的敏感度为 1。该断层合成系统可能可以提高肺癌筛查率,其诊断能力及临床应用还需要更进一步的研究。Sandler 等回顾性收集了两家医院 32165 位进行

过乳腺 X 射线检查的患者,根据电子健康记录确定了符合 LCS 条件的 1569 位患者并通知其参加 LCS,研究发现通过这样针对性地通知提高了 LCS 的参与率。

Trujillo 等基于一个大型学术多中心机构的影像数据库评估了 2021 年美国预防服务工作组(USPSTF)LCS 指南标准扩大对目标人群社会人口学特征和临床特征的影响,发现新的指南下,目标人群平均年龄和每年吸烟数量降低,LungRads Score(LRS)1 和 2 占比增高,而 3 和 4 减低,2021-USPSTF 指南可能有助于更早发现与吸烟相关的肺癌。

Kiraly 等开发了一个辅助肺癌筛查的 AI 助手,并用 627 例(141 例癌症阳性)病例对其进行了回顾性测试,研究发现在 AI 的帮助下,放射科医生诊断的准确性和特异性均有所提高。Fabritius 等利用 AI 系统对 100 位肺结节患者随访前后胸部 CT 图像上的结节进行了匹配分析,发现 AI 的正确匹配率为 97.8%,但在结节数量大于 50 个的图像中正确匹配率明显降低,肺实质、外周及血管旁结节的正确匹配率优于膈旁结节。AI 有助于对肺结节患者随访的标准化评估,但也需要考虑结节数量和位置。

Yip 等利用国家肺筛查试验(NLST)和国际肺癌研究协会(IASLC)两个数据库对其之前发表的随访时间延迟对早期肺癌预后影响的量化结果进行了验证,估算了不同体积倍增时间(VDT)的肺癌直径随随访时间延迟的变化,并评估了肺癌治愈率的下降情况,研究发现 CT 随访时间的间隔对患者的预后具有显著影响,尤其是生长较快及体积较大的肺癌,因此应量化延迟随访对肺癌患者的影响,从而制定更好的管理方案。目前,LDCT Lung-RADS 评分 $\leq 2$ 分(良性)的患者的随访时间间隔为 1 年。Chaudhari 等利用 NLST 数据集开发了一个基于胸部 CT 和临床特征预测患者 2 年内 Lung-RADS 评分进展情况的 DL 模型,与 Lung-RADS 进展至 4 分的显著相关特征包括平均结节大小、最大结节大小、结节数量和肺气肿,该模型有助于优化低风险患者的随访时间间隔。

Rau 使用 DL 模型自动分割了 NLS 参与者基线和一年随访时胸部 CT 上的主动脉,并对大血管病变(最大直径、体积和钙化)进行量化,通过多变量 COX 比例风险回归分析评估了病变与心血管疾病死亡率之间的关系。结果发现,主动脉体积和钙化的预测价值显著高于最大直径,一年随访时钙化增加与心血管疾病死亡相关性最高。基于 AI 的大血管病变量化技术可以识别出心血管死亡高危人群,从而提早预防和治疗。Karout 等比较了放射科医生和 AI 算法在 LCS-LDCT 上诊断及测量胸主动脉扩张和动脉瘤的性能,研究发现放射科医生诊断的 AUC、敏感度和特异度分

别为:升主动脉瘤 0.86、72%和 100%;主动脉扩张 0.66、35%和 97%;降主动脉瘤 0.50、0%和 99%,AI 算法为:升主动脉瘤 0.99、100%和 99%;主动脉扩张 0.86、82%和 90%;降主动脉瘤 0.93、94%和 91%。AI 算法可以优化在 LCS-LDCT 上对胸主动脉扩张和动脉瘤的诊断。

Pallasch 等使用三维 DL 模型基于平扫胸部 CT 测量了参加肺癌筛查的 26144 位患者基线及一年后 ( $n=52228$ ) 的 SAT 体积 (SATvol) 和密度 (SATHU),发现 SATHU 与全因死亡率独立相关,且一年内 SATvol 和 SATHU 下降 ( $\geq 10\%$ ) 的患者相比于稳定的患者预后明显较差。自动化 DL 模型有助于肺癌筛查中高危人群的识别,可以优化患者管理。CXR-Lung-Risk 是一种可以基于 CXR 预测肺相关死亡风险的 DL 模型。Walia 等收集了 24333 名从不吸烟患者的常规门诊 CXR 对该模型进行了外部验证,将患者分为低、中、高风险组,主要结果为 6 年内肺癌发病率。研究发现,CXR-Lung-Risk 分类为高风险组的患者肺癌患病率明显增加。目前,美国医疗保险和医疗补助服务中心 (CMS) 的肺癌筛查标准并不建议对从不吸烟者进行筛查,而 CXR-Lung-Risk 对不吸烟者中高患肺癌风险人群的识别具有一定的临床意义。

Su 等使用相同管电压和管电流 (120 kV, 45 mA) 和不同螺距和旋转时间 (组 0: 0.984, 0.28 s; 组 1: 0.992, 0.35 s; 组 2: 0.992, 0.28 s; 组 3: 1.375, 0.5 s; 组 4: 1.531, 0.5 s; 组 5: 0.984, 0.35 s) 分别对包含 9 个模拟结节的 Lungman 模型进行了 CT 扫描,并用 AI 软件 (智能 4D 胸部成像系统 5.5, YITU 医疗) 对图像进行分析,发现不同螺距和旋转时间对图像质量、结节大小和 CT 值测量无影响,而对辐射剂量有影响,组 0 的剂量长度乘积 (DLP) 最低。在进行胸部 LDCT 筛查时,螺距和旋转时间采用 0.984 和 0.28 s 可以减低辐射剂量。Hata 等使用传统 CT (C-CT) 和超高分辨率 CT (UHRCT) 收集了 20 例死亡人体的肺部图像数据,C-CT 采用 512 矩阵、0.5 mm 层厚和 Hybrid-IR 进行重建,UHR-CT 采用了三种重建方法:UHR-512 (与 C-CT 相同)、UHR-DLR (1024 矩阵、0.25 mm 层厚和 DLR) 和 UHR-2048 (2048 矩阵、0.25 mm 层厚和 Hybrid-IR),并将 CT 图像评估的结节和气道与 HE 染色获得的组织学结果进行比较评分。研究发现,UHR-CT 的评分均优于 C-CT,错误率低于 C-CT,在结节评估方面,UHR-2048 重建方法优于 UHR-DLR。UHR-CT 相比于 C-CT 在评估结节和气道方面的能力更优。

## 胸部恶性肿瘤

肺癌患者治疗前评估和病理分级预测有助于患者

治疗方案的选择。Deng 等收集了 107 例 N0 期 NSCLC 患者的术前光谱 CT 参数用于构建一个评估患者有无淋巴管侵犯的诊断模型,并将其可视化为诺莫图。研究发现基于临床特征 (性别、TIF-1、淋巴细胞计数) 和光谱 CT 参数 (双相中的 70 keV、90 keV 和 Eff-Z) 的预测模型的 AUC、敏感度和特异度分别为 0.93、0.89 和 0.88。Lee 等开发了一个用于评估患者预后的基于 CT 并可以学习肺腺癌形态学和组织病理学特征的 DL 模型,并对其进行了验证。在时间测试集 ( $n=640$ ) 验证中,5 年复发率 (FFR) 和总生存率 (OS) 的 TD-AUC 分别为 0.79 和 0.73,在外部测试集 ( $n=846$ ) 验证中,5 年 OS 的 TD-AUC 为 0.71,该模型可以准确评估患者的预后。Nagano 等对 110 例肺癌患者的术前双能 CT (DECT) 测量参数进行了分析,这些患者根据组织病理学分化被分为低级别组 (G1 和 G2) 和高级别组 (G3 和 G4),研究发现低级别组的平衡期 IC、有效原子序数 (Zeff) 和细胞外体积 (ECV) 分数显著高于高级别组,平衡期 IC、Zeff 和 ECV 分数区分两种分组的 AUC 分别为 0.688、0.672 和 0.750。DECT 测量的平衡期 IC、Zeff 和 ECV 分数有助于预测肺癌的病理分级,其中 ECV 分数预测能力最佳。Chen 等对 342 例接受帕博利珠单抗 (PEMBRO) 免疫治疗的 4 期 NSCLC 患者的治疗前 CT 图像进行分析,并基于放射学特征对患者进行分型,研究发现基于放射学特征对 NSCLC 组织学亚型 (腺癌、鳞癌、其他) 和肿瘤分化亚型 (良好、中等、较差) 分型的准确率分别为 81.5% 和 82.3%,并且放射学特征与 NSCLC 相关基因 (如 EGFR、ALK、ROS 等) 的基因突变表达有显著相关性。

PD-L1 表达状态是肺癌免疫治疗最重要的生物标志物,目前 PD-L1 评估的金标准是病理科医生的人工评估,而人工评估会受到专业知识和经验的影响。Huang 等开发了一种基于 CT 图像和 HE 染色切片预测肺癌的 PD-L1 表达状态的多模态 AI 模型,研究发现该模型在训练组、验证组和测试组的预测能力均高于单模态模型,且该模型预测的 PD-L1 阳性患者的 PFS 明显长于阴性患者。这种多模态 AI 模型可有效预测肺癌的 PD-L1 表达状态,避免了人工评估的主观偏差。

在接受免疫治疗的癌症患者中,身体质量指数 (BMI) 较高的超重/肥胖患者生存期更长。Decazes 等利用 DL 软件 (Anthropometer3DNet) 根据晚期 NSCLC 患者的治疗前胸腹盆三维 CT 图像测量了人体测量参数 (瘦体重 LBM、脂肪体重 FBM、肌肉体重 MBM、内脏脂肪体重 VFM 和皮下脂肪体重 SFM),低 SFM 和 MBM 与接受免疫治疗的 NSCLC 患者的不良

预后相关。肺癌患者人体测量参数的测量对于患者免疫治疗的预后评估有重要意义。

Ahn 等回顾性纳入了 684 名因影像学表现为亚实性结节(SSNs)且临床分期为 Ia 期而接受肺叶/肺段切除术的肺腺癌患者,并评估了这些患者术前 CT 上切除 SSN(主要结节)和同期存在的 SSN 的放射学特征,发现患者复发时间和总生存率与同期存在的 SSN 无关,主要取决于主要结节的特征(实性部分大小和组织学亚型),但同期存在的 $\geq 6$  mm SSN 的数量增加与无二次干预患者的生存率降低相关,说明目前对多发亚实性结节的患者采取的以主要结节为重点的管理策略是合理的。

Kim 等发现在因疑似肺癌或肺转移癌而接受 CT 引导下肺活检,最终由病理科医生确诊为组织性肺炎的患者中,有高达 10% 的人可能会漏诊肺恶性肿瘤,因此对于临床高度怀疑恶性肿瘤的组织性肺炎患者应考虑再次进行活检。

AI 可作为肺转移筛查的临床辅助工具。Cho 等利用检测肺结节的 AI 系统对 878 例腹部 CT 诊断为无肺基底段转移的恶性肿瘤患者的 CT 图像进行了回顾性分析,这些患者均在腹部 CT 检查 3 年后确诊肺转移,AI 识别了 25 例最初被忽略的结节,对漏诊结节有较高的敏感度,有助于减少放射科医生的漏诊。Park 等评估了放射科医生在有或无基于 AI 的 CAD(DL-CAD)系统下对直肠癌患者胸部 CT 肺转移情况诊断能力和时间的差异,发现使用 DL-CAD 系统后医生诊断肺结节的敏感度显著提高,诊断时间显著缩短,而假阳性率无明显变化。

Penalva 等分析比较了可切除和不可切除性胸膜间皮瘤(MPM)的临床和影像学特征,发现两组患者在石棉接触、新辅助治疗、临床 T 分期、所有胸膜厚度(PT)测量、PT 类型及程度等方面差异具有统计学意义,多因素分析中,新辅助化疗、胸膜增厚程度、上 PT 最大值、胸膜外脂肪消失及纵隔浸润的组合预测模型诊断性能最佳(AUC=0.876)。对 MPM 不可切除性进行预测可避免不必要的手术。

## 血管疾病

患者由于怀疑肺栓塞(PE)以外的原因而行常规增强 CT 检查时,医生可能会漏诊偶发 PE(iPE),AI 可以辅助检测 iPE,并具有良好的敏感度和特异度。Graeve 等利用经 FDA 批准的 AI 算法(Aidoc Medical)对 1965 例因怀疑 PE 以外原因而进行的增强胸部 CT 进行了 iPE 诊断分析。研究发现近 50% 的 iPE 被放射科医生漏诊,而 AI 算法的敏感度和特异度分别为 95% 和 99%,近 76% 的漏诊 iPE 位于右肺下叶,

57% 的漏诊 iPE 的诊断时间为下午 1 点至 5 点。Fahimi 等对一种基于增强 CT 检测 iPE 的 AI 算法进行了多中心外部验证,该算法诊断 iPE 的 AUC 为 0.86(95%CI:0.94~0.78),准确率为 0.88,且对于不同医院、性别、年龄和不同公司的 CT 扫描机器均适用。Nawras 等进行了一项 Meta 分析,用于评估 AI 算法在检测 iPE 中的应用。共有四项研究(19,440 次 CT)纳入分析,合并敏感度和特异度分别为 0.839 和 0.999。Nabipoorashrafi 等评估了计算机辅助的 AI 分诊和优先处理系统对进行胸部和/或腹部 CT 检查的 iPE 患者等待时间的影响,等待时间定义为患者完成检查到放射科医生打开图像开始诊断的时间。AI 通知优先处理的疑似阳性病例的中位等待时间为 86 分钟,而未通知的阴性病例等待时间为 242 分钟,中位等待时间缩短了 64.4%。使用 AI 分诊和优先处理系统可以节省 iPE 患者的诊断延误时间,有助于对患者的尽早诊断及治疗。

将 AI 应用于临床实践中有助于为临床提供更快且更准确的诊断,但需要不断评估。Quenet 等对一个基于 AI 的急性 PE 检测软件 CINA-PE v1.0.3(Avicenna.AI,La Ciotat,France)远程用于不同医院急诊科的检测性能进行了评估,发现该软件的敏感度和特异度分别为 85.3% 和 95.8%,阳性预测值(PPV)和阴性预测值(NPV)分别为 72.5% 和 98.1%,显示出较高的检测性能。Langius 等利用两家医院疑似 PE 患者的 CT 肺动脉造影(CTPA)扫描数据对 RSNA 2020 PE 诊断挑战赛中获胜的 DL 模型进行了外部验证,A 医院(n=238)外部验证 AUC 为 0.96(95%CI:0.93~0.99),B 医院(n=114)利用光谱探测器 CT(SDCT)扫描获得的常规数据和虚拟单色图像(VMI)数据的 AUC 分别为 0.89(95%CI:0.82~0.96)和 0.86(95%CI:0.78~0.95)。研究说明该 DL 模型在常规 CTPA 中具有较高的诊断价值,同时在新技术方面对模型进行额外训练可提高其通用性。

Altmayer 等进行了一项 Meta 分析,用于比较磁共振血管造影(MRA)和通气/灌注(V/Q)显像诊断急性 PE 方面的能力。结果显示 MRA 诊断急性 PE 的敏感度和特异度分别为 0.87 和 0.91,V/Q 显像分别为 0.81 和 0.84,MRA 与 V/Q 显像的诊断能力相当甚至更优,且 MRA 不需要使用对比剂也没有辐射。Munz 等利用 ASL-MRI 对 15 例 PE 患者治疗前后的肺灌注缺损比例进行了分类并分析了肺灌注变化,研究发现治疗后所有患者的肺灌注均有改善,其中 7 名患者的灌注缺损完全恢复。动脉自旋标记 MRI(ASL-MRI)有助于无创性监测 PE 患者的治疗效果,不过还需要进一步的研究来评估其临床价值。

Ye 等对 100 名疑似 PE 的患者进行了 CTPA 检查,肥胖患者( $\text{BMI} \geq 25$ , 组 1)的重建技术采用传统 Hybrid-IR 算法(AIDR 3D)、基于模型的迭代重建算法(FIRST)和对比增强技术(CE-Boost),非肥胖患者( $\text{BMI} < 25$ , 第 2 组)采用 AIDR 3D。研究发现, FIRST 可以降低图像噪声, FIRST 和 CE-Boost 可以提高图像的 SNR 和对比噪声比(CNR),提高了放射科医生对图像质量和诊断可信度的评分。FIRST 和 CE-Boost 能提供更高质量的 CTPA 图像,有助于肥胖患者的 PE 诊断和辐射剂量减少。

PE 患者的预后评估及治疗后评价也十分重要。Lee 等利用 CT 纹理分析(CTTA)评估了 88 名肺动脉内膜切除术(PTE)的患者治疗前后的变化,其中 51 名患者在治疗后完全恢复。完全恢复组和病灶残留组空间缩放因子(SSF)3-6 的熵、SSF 0 的平均值和正像素平均值(MPP)及 SSF 4-6 的标准差(SD)具有显著差异, SSF 0 图像的灰度共生矩阵(GLCM)纹理特征参数也有显著差异。Meyer 等基于 CTPA 计算了 981 名患者急性 PE 患者胸大肌的骨骼肌面积(SMA)、骨骼肌指数(SMI)、肌肉密度和厚度,分析发现与 30 天内死亡的患者相比,存活患者的各项测量值都较高,血流动力学稳定的患者相较于不稳定的患者各项测量值也更高。SMA、SMI、肌肉密度和厚度与急性 PE 患者 30 天死亡率的 OR 值分别为 0.94、0.78、0.96 和 0.96 ( $P < 0.001$ )。

Ebrahimian 等回顾性分析了 440 位妊娠女性和 474 位非妊娠女性的 CTPA 图像,发现妊娠患者 CTPA 的 PE 阳性率(3.4%)显著低于非妊娠患者(9.7%) ( $P = 0.004$ ),而 CTPA 未能明确诊断的患者还需要进行额外检查,说明妊娠人群中可能存在 CTPA 过度使用的情况,这会导致母亲和胎儿受到不必要的辐射。Wismueller 利用 AI 图像分析软件(Aidoc Medical, Tel Aviv, Israel)评估了全球碘对比剂短缺对 CTPA 检查中 PE 阳性率的影响。研究发现,在对比剂短缺期间,CTPA 检查数量下降,而检查中的 PE 阳性率显著增加,而作为对照的平扫头部 CT 检查数量和颅内出血(ICH)阳性率无显著差异。可解释为在对比剂严重短缺期间,临床医生对于 CTPA 检查的适应症要求更加严格,因此只有更可能患 PE 的患者才能接受检查。

在 PTE 术前对慢性血栓栓塞性肺动脉高压(CTEPH)患者进行评估和分级有助于患者治疗方案的制定。Hahn 等让 6 名放射科医生根据一种 CTEPH 最近端病变定位外科分类(1 级=肺动脉干病变;2 级=1 级远端至肺段病变;3 级=肺段病变;4 级=亚段病变;0 级=无病变)对 163 例 CTEPH 患者

PTE 前的 CTPA 进行了分类,并与外科医生手术时的分类进行比较。研究发现,放射科医生与外科医生分类的一致性为中到高度,术前 CTPA 和 PTE 之间的间隔时间越短,一致性越高,在评估 3~4 级的病变时,层厚  $\geq 1 \text{ mm}$  的 CTPA 得到的一致性小于层厚  $< 1 \text{ mm}$  的 CTPA。Higuchi 等分析比较了接受球囊肺血管成形术(BPA)治疗的 CTEPH 患者术前的 UHRCT( $n=12$ )和传统 CT(cCT)( $n=12$ )的血管造影图像,发现 UHRCT 对病变的检出率明显高于 cCT(肺段动脉:98% vs. 80%,  $P = 0.011$ ;亚段动脉:93% vs. 48%,  $P < 0.001$ ),在环状狭窄、网状、次完全和完全闭塞 4 种类型的病变中,CTPA 最难检测到网状病变。相较于 cCT, UHRCT 有助于更准确地检测作为 BPA 靶点的外周肺动脉病变。Bambrick 等对 144 名(女性 78 名)经手术确诊的 CTEPH 患者的术前 CTPA 图像在性别差异方面进行了回顾性分析,发现与男性相比,女性的平均受累血管数量更少,无病变的肺段数量更多。两者病变在肺段和亚段水平的分布也有显著差异,女性亚段水平病变分布更多,因此慢性肺栓塞造成的负担也更低,这有助于解释为何女性 CTEPH 患者的手术率低于男性。

高空间分辨率光子计数探测器 CT(PCD-CT)有助于解释 CTEPH 小血管病变的病理生理学。Jardin 等对 29 例 PCD-CT 血管造影检查表现为马赛克灌注的 CTEPH 患者的肺循环远端(肺实质外三分之一)分支形态进行了评估,发现马赛克灌注的高衰减区和低衰减区在远端肺动脉扩张、不确定微小结节、小叶 GGO 和肺静脉直径方面存在显著差异。

DECT 有助于评估 CTEPH 和 PE 患者肺灌注的差异。Gertz 等评估了急性 PE 和 CTEPH 患者进行双层 DECT(dIDECT)检查得到的肺灌注图的差异,发现 PE 患者肺灌注正常区域的平均和峰值碘摄取量均高于 CTEPH 患者,而肺灌注缺损区的平均灌注量减低。Hansen 等对 162 名确诊为急性 PE( $n=81$ )或 CTEPH( $n=81$ )的成年患者进行了双源双能 CTPA(DE-CTPA),并使用基于机器学习的 Examine DE Lung Isolation 软件获得了肺灌注数据,发现 PE 患者的全肺、单侧肺、肺叶血容量均低于 CTEPH 患者,这可能是急性失代偿和慢性代偿导致的差异。

肺部疾病 CT 量化的金标准是放射科医生的目测评估,但由于特征相似,区分特发性肺动脉高压(IPAH)和与肺部疾病相关的 PH(PH-LD)较困难,区分两者及亚型判断对治疗方案的制定至关重要。Dwivedi 等研究了将 AI 模型与放射科医生的影像报告相结合量化 PH 患者肺部病变对患者预后的价值,发现 AI 模型量化的纤维化程度是预测患者预后的独

立因素,而且模型可以检测到放射科医生忽略的轻微(1%)纤维化。将 AI 模型与基于影像学评分的疾病和人口统计学预测模型结合,可显著提高其预测强度( $c\text{-index}$  0.763 vs. 0.742,  $P=0.038$ ),这种方法将有助于确定 PH 表型。

Yokota 等开发了可评估肺血流量的肺动态灌注 CT 成像(LCTP)技术,并让 23 名怀疑肺动脉高压的患者接受了 LCTP 和灌注成像检查,根据 LCTP 重建 CTPA 并定量计算每个肺叶的灌注比。与常规 CTPA 相比,CTPA 与 LCTP 结合诊断的敏感度、准确度和 AUC 均增加,其平均辐射剂量和对比剂用量分别为( $5.1\pm 1.3$ ) mSv 和( $78\pm 15$ ) mL。LCTP 可提供更准确的诊断,且辐射剂量和对比剂用量也在可接受范围内。

Nagatani 等对 30 位志愿者(11 位 PH 患者、9 位无 PH 的结缔组织病相关性间质性肺炎(CTD-IP)患者和 10 位对照组志愿者)进行了胸部超高分辨率(SHR)平扫 CT 检查,使用 SHR 模式的基于 DL 的重建算法获得图像数据。结果显示,在 SHR 模式下,PH 患者小于  $0.5\text{ mm}^2$  的平均血管直径(AVD)相比于 CTD-IP 患者和对照组较小( $P<0.01$ ), $1\sim 2\text{ mm}^2$  的 AVD 与 PH 患者的平均肺动脉压(PAP)呈负相关( $r=-0.67$ ,  $P=0.048$ )。SHR 平扫胸部 CT 有助于评估 PH 患者外周动脉的重塑情况。

撕裂内膜沿降主动脉(DTA)的螺旋轨迹(ST)是主动脉夹层(AD)CTA 图像上的特征,但目前并没有对 ST 的深入研究。Schell 等根据冠状面 CTA 图像上撕裂内膜沿主动脉峡部到腹部远端段的位置变化进行了半定量评分:ST0(旋转 $<45^\circ$ ),ST1( $45^\circ\sim 90^\circ$ ),ST2( $90^\circ\sim 180^\circ$ ),ST3( $180^\circ\sim 270^\circ$ ),ST4( $270^\circ\sim 360^\circ$ )和 ST5( $>360^\circ$ ),研究发现 ST $>1$  与长期主动脉不良事件(AAE)(定义为 DTA 动脉瘤、择期或急诊主动脉手术、AD 相关临床并发症或死亡)风险增加相关联,可作为 AD 的早期风险评估标志。假腔动脉瘤变性(FL)是 B 型 AD(TBAD)的常见并发症,亚急性 FL 生长可预测 TBAD 患者晚期不良事件(LAE),预防性血管内修复术(TEVAR)可预防假腔动脉瘤,但临床很难早期识别 FL 高危患者。血管变形匹配(VDM)是一种可以基于常规 CT 图像计算主动脉三维变化的新技术,Marway 等利用 VDM 技术对 33 位 TBAD 患者术前和出院后 1~3 个月的 CTA 图像进行了分析研究,发现 VDM 可以识别亚急性 FL 增长,而这种变化常被临床忽略。TBAD 术后 1~3 个月主动脉的微小增长( $>2\text{ mm}$ )可识别出 LAE 高风险患者,利用 VDM 技术有助于提高高风险患者的预后。

肺灌注评估是患者肺移植或肺切除术前评估中重

要的一项。动态 DR 摄影技术(DDR)是一种可以通过检测整个心动周期的像素信号变化评估区域肺灌注情况的新技术。Mareddy 等回顾性收集了 53 例患者 DDR 和放射性核素肺显像的肺灌注情况并进行对比分析,发现两种检查得到的灌注情况有很强的相关性( $r=0.923$ ,  $P<0.001$ ),而 DDR 的检查速度和费用均优于放射性核素肺显像,可以减少患者的等待时间和医疗费用。

Mohsen 等回顾性检索了增强胸部/腹部 CT 报告中包含“对比剂分层”、“对比剂聚集”或“依赖性对比剂分层”的病例,分析对比剂分层征象与心脏骤停及死亡之间的相关性,发现静脉系统中的对比剂分层现象与较高的心脏骤停发生率和死亡率相关,识别这一征象有助于及时发现心脏骤停高风险患者。

Heimer 等在兔子模型上分别使用新型静脉注射用氧化钽(TaCZ)纳米颗粒与常规碘化(碘普罗胺)CT 对比剂进行检查,发现 TaCZ 在各扫描时间的血管增强效果均显著优于碘普罗胺,可以优化胸部动静脉造影的成像质量。

## 肺部感染性疾病

Wen 等训练了一种对革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌性肺炎进行分类的融合模型,该模型结合了患者的影像特征及临床特征,经验证发现该融合模型在细菌性肺炎分类中表现良好,可以帮助临床医生准确识别患者的肺炎类型,避免不必要的抗生素使用,提供及时的临床决策支持,改善患者预后。

Ibad 等开发并验证了一种基于胸部 CT 测量胸大肌成分的全自动 DL 算法,并利用 COX 回归模型评估了肺炎住院风险与胸大肌成分测量之间的关系。DL 算法可以有效地测量胸大肌成分,但胸大肌成分测量只能预测 COPD 患者的肺炎住院风险,无法预测总体人群的风险情况。

6 个月时的痰培养情况(阳性或转阴)对于评估耐药药结核病(MDR-TB)长程治疗方案的治疗反应非常重要。Li 等基于空洞的影像组学特征构建了影像组学模型,基于独立分析且有显著差异的基本临床特征和主要 CT 征象构建了临床模型,并基于这两种模型生成了综合模型。影像组学模型在训练队列和测试队列中的 AUC 分别为 0.892 和 0.839,与综合模型相当(0.913 和 0.815),优于临床模型(0.688 和 0.525)。影像组学和组合模型可以预测 MDR-TB 长程治疗方案 6 个月时的痰培养情况,从而对后续治疗提供指导。

Sanjase 等评估了 CXR AI 系统(包括肺结核 AI 和 CXR 异常 AI)在艾滋病高发人群中检测活动性肺结核(TB)和肺部异常的能力。研究发现,肺结核 AI

的 AUC 为 88%,应用高敏感度和平衡操作点(OP)进行评分,敏感度和特异度分别为 87%和 70%、78%和 82%。CXR 异常的 AUC 为 97%,在高敏感度 OP 中的敏感度和特异度分别为 97%和 79%。CXR AI 系统可作为有效的 TB 和肺部异常的筛查工具。

## 胸部 MRI

Altmayer 等分别使用 CXR、HRCT、MRI 和肺功能检查对 77 位确诊为肺结节病的患者进行了检查,CXR 采用 Siltzbach 分级系统、HRCT 和 MRI 采用硬皮病肺研究 I 系统进行评分,并以 1 年后 FVC 下降 $\geq 5\%$ 为疾病进展的标准。研究发现 MRI 评分与 CT 和 CXR 相关,CT 和 MRI 评分与 FVC 和 DLCO 相关,CT(OR=1.236, $P=0.044$ )和 MRI(OR=1.594, $P=0.021$ )可预测疾病进展。MRI 可以作为评估肺结节病进展的检查方法,但仍需要进一步的研究。

Zhu 等纳入了 16 个中心参加了两轮同天内 MRI 和 LDCT 检查或首次检查后有组织病理学检查结果的重度吸烟者,用于评估形态功能 MRI 对重度吸烟者偶发肺结节的诊断和长期预后预测能力。研究发现,MRI 对恶性结节诊断的准确率与 LDCT 相似,两者对偶发结节的远期预后预测一致性也很高,MRI 结合社会人口学和临床特征生成的偶发肺结节进展预测模型准确性更高,与 LDCT 模型无差异。基于 MRI 的偶发结节风险预测模型可减少患者辐射,有助于对肺结节的诊断和预后预测。

超短回波时间(UTE)MRI 具有作为薄层 CT 检测和识别肺结节替代方法的临床潜能,但由于大量的 3D 径向采样和网格重建导致扫描时间较长。Ohno 等分别使用共轭梯度(CG)重建和网格重建对 UTE MRI 数据进行重建,发现 CG 重建有助于缩短扫描时间,且不会影响图像质量和结节检测。

MRI 有望成为 ILD 患者 CT 随访的无辐射替代方案。Bayerl 等对 25 名患有风湿性疾病或 IPF 的患者进行了 HRCT 和 0.55T MRI 检查,发现肺部低场磁共振成像在评估肺纤维化的总体程度方面与 HRCT 无显著差异,肺部低场磁共振成像能可靠地显示 ILD 的总体范围。Vyas 等对 31 名结缔组织病相关 ILD(CTD-ILD)患者的胸部 HRCT 和 MRI 图像进行评分和比较,发现两种检查方法在形态学和整体评估方面显示出中等一致性。MRI 在评估胸膜下线、蜂窝样改变、胸膜下囊肿和 GGO 范围时与 HRCT 一致,显示病灶的最佳 MRI 序列是短时间反转恢复序列(STIR)、4 分钟后对比增强序列和双激发式稳态自由进动(BTfE)序列。

Alatoum 等收集了 15 位新型冠状病毒肺炎(CO-

VID-19)患者,所有患者进行了 HP-Xe 的区域通气和气体交换(RBC:膜)及灌注 MR 成像,还接受了作为定量验证的 DECT V/Q 成像。HP-Xe MRI 获得的 RBC:膜与 DLCO 相关,且与 DECT 得到的气体交换参数显著相关。HP-Xe MRI 可作为 DECT 的无辐射替代方案,对症状持续存在的 COVID-19 患者进行定期随访。

MRI 可在无对比剂无辐射且自由呼吸情况下对肺部疾病进行功能性评估。Zhu 等基于相位分辨功能性肺 MRI(PREFUL)对健康志愿者和不同 GOLD 分级的 COPD 患者的肺通气和灌注情况进行了评估,发现 COPD 患者的平均通气和灌注百分比明显低于健康志愿者,患者的 GOLD 分级与通气缺陷百分比(VDP)相关( $P<0.05$ ),重度患者(GOLD 3~4 级)的灌注和通气缺陷匹配百分比(VQM)高于轻度(GOLD 1~2)患者。Capaldi 等利用低场强(0.55T)傅立叶分解磁共振成像(FDMRI)对 17 位不同肺部疾病患者和 4 位健康志愿者肺通气和灌注情况进行了评估,发现与健康志愿者相比,肺部疾病患者存在明显的通气灌注异常(即 V/Q 不匹配),VDP 和灌注缺损百分比(QDP)明显升高。

Chen 等利用 UTE MRI 对 101 例 0~2 岁婴儿进行了肺部 MRI 检查,婴儿根据胎龄(GA)分为极早产儿组( $GA<28$  周, $n=33$ ),中晚期早产儿组( $GA>28$  周并 $<37$  周, $n=34$ )以及足月儿组( $GA\geq 37$  周, $n=34$ ),用标准化肺信号强度肺-肌比值(LMR)量化肺组织密度,结果显示极早产儿组、中晚期早产儿组及足月儿组全肺 LMR 平均值分别为 45.1、48.7 和 50.8,极早产儿组与足月儿组差异具有统计学意义。极早产儿肺部可能存在持续的结构异常,患早发性 COPD 的风险更高。

Enoki 等利用 4D-Flow、3D-cine 技术和毯状线圈对 10 名健康志愿者进行了 CMR 检查,旨在研究应用无创性检查方法评估体位改变对心功能和肺血流影响的可行性。研究发现,心功能随体位改变无明显变化,而志愿者在左侧卧位或右侧卧位时,同侧的肺动脉血流量有所增加。应用无创性检查方法测量体位改变引起的血流动力学变化,有助于评估心衰等其他疾病患者的病情。

Wing 等利用 UTE MRI 和 $^{19}\text{F}$  MRI 评估了 5 位健康志愿者的仰卧位肺叶通气动力学,应用 $^{19}\text{F}$  气体吸入和呼出速率 $[\tau_1(\text{s}),\tau_2(\text{s})]$ 衡量气体交换效率,发现平均而言双肺下叶气体吸入和呼出速率最快,这与人体站立的生理原则相符合。对于缺乏超极化气体( $^3\text{He}$ 、 $^{129}\text{Xe}$ )的机构, $^{19}\text{F}$  可以作为替代。

## 能量 CT

肺栓塞的常见症状是呼吸困难,因此患者在进行 CTPA 检查时难以配合屏气,超高螺距 PCD-CT 可以避免屏气。Pannenbecker 等评估了诊断急性 PE 时,使用 PCD-CT 和传统能量积分探测器(EID)CT 在自由呼吸技术下进行超高螺距 CTPA 的图像质量(IQ)和辐射剂量。研究发现,PCD-CT 相比于 EID-CT 能在辐射剂量更低的情况下获得更好的图像质量,还能通过重建彩色编码碘分布图提供更多的功能信息。他们还分别让两组疑似 PE 患者在 PCD-CT 扫描仪(Siemens Naeotom Alpha)和 EID-CT 扫描仪(Siemens Somatom Force)上接受了 CTPA 检查,发现 PCD 组肺动脉的 CNR 和 SNR 更高,放射科医生主观评分更高,且辐射剂量更低。PCD-CT 可以在更低辐射剂量的情况下获得高质量的影像,有助于对急性肺栓塞的诊断。Jardin 等分别对两组怀疑急性肺栓塞的患者进行了 PCD-CT(组 1,  $n=158$ )和 EID-CT(组 2,  $n=172$ )血管造影检查,组 1 患者中,可屏气 6 s 的采用双能量扫描方案(组 1a,  $n=105$ ),气促的采用高螺距单能量方案(组 1b,  $n=53$ ),组 2 患者均使用多能量方案。研究发现,与组 1a 相比,组 2 的平均扫描时间更短,平均 CTDIvol 和中位 DLP 更低,且灌注图像的定性评分更高。

Cao 等前瞻性纳入了 102 例疑似 PE 患者并对其进行了双层光谱 CT(DLCT)CTPA 检查,光谱数据重建为常规图像(CI)、碘密度图(ID)、Zeff 图和 ID-Zeff 融合图(ID-Zeff)。102 例患者中共 63 例确诊为 PE, CI、ID、Zeff 和 ID-Zeff 分别检出 53、55、60 和 60 例, ID-Zeff 相比于 CI 检出率显著提高,且 ID-Zeff 能更准确地评估血栓负荷。

PCD-CT 可在减少辐射剂量的同时提高成像质量。Yalon 等回顾性收集了 150 例 CTPA 检查,其中使用高螺距多能扫描模式(ME FLASH)的 PCD-CT、单能高螺距(SE FLASH)和常规螺距双能(DE)的双源 EID-CT 各 50 例,发现相比于 EID-DE 和 EID SE FLASH,PCD-CT ME FLASH 在较低辐射剂量和对比剂剂量的情况下,显示出了更高的肺动脉增强对比度、更少的运动伪影和更高的图像质量。Khalighinejad 等比较了 PCD-CT 和 EID-CT 进行胸部 CT 成像的表现,发现与 EID-CT 相比,PCD-CT 的 CTDIvol 和

DLP 平均值明显减低,主动脉、肺动脉和甲状腺的 CNR 明显升高。Jardin 等比较了年龄和体重匹配的两组患者分别在 PCD-CT(组 1)和 EID-CT(组 2)上进行胸部 CTA 检查的图像质量,发现与 EID-CT 相比,PCD-CT 辐射剂量和扫描时间显著降低,且两者的图像质量无显著差异。他们还比较了肿瘤患者通过 PCD-CT(组 1)和双源 DECT(DS-DECT)(组 2)获得的静脉期胸部 CT 图像,两组图像在上腔静脉和上胸部静脉的显影质量、肺动脉的可分析水平方面无差异,与组 2 相比,组 1 的线束硬化伪影和心脏运动伪影更少、CNR 平均值更高、DLP 中位数更低,且组 1 图像能更好地诊断血管内或血管周围异常(如急性 PE 和静脉血栓)。

Nomura 等首次对基于 CZT 的 PCD-CT(CZT-PCD-CT)进行了临床研究,正常分辨率(NR)图像使用 512 矩阵大小和 Hybrid-IR 进行重建,超高分辨率(SHR)图像使用 1024 矩阵大小、Hybrid-IR 和 DLR 两种方法重建。结果发现使用 DLR 的 SHR 图像在三种图像中噪声水平最低,SHR 图像中的 GGO 和支气管更清晰,胸壁下冲伪影明显减少。CZT-PCD-CT SHR 图像显著提高图像质量,有助于医生更好地诊断。Huflage 等比较了超低剂量 PCD-CT 分别应用 UHR 模式( $120 \times 0.2$  mm)与标准宏模式( $144 \times 0.4$  mm)获所得的图像质量,发现 UHR 在 CTDIvol 匹配情况下比标准宏模式的图像噪声更低,且医生一致倾向于 UHR。UHR 的小像素效应可以降低辐射剂量同时获得更高质量的图像。Pourmorteza 等利用不同直径和壁厚的 3D 打印气道模型评估了新技术深硅 PCD-CT 在肺部小气道成像方面的优势,研究发现 UHR PCD-CT 可在 70 keV VMI 重建下实现对气道管径和壁厚的亚像素( $<150 \mu\text{m}$ )精确测量,有助于优化气道变化的特征描述,对于监测囊性纤维化等疾病的治疗情况具有临床应用前景。

Yel 等纳入了 30 位术前进行了 DECT 检查的乳腺癌患者,以淋巴结(LN)切除术后的病理学报告作为参考标准,区分转移性和非转移性 LN 的 DECT 测量参数,发现两者的脂肪比例存在显著差异,诊断转移性 LN 的最佳脂肪比例阈值为 17.8%,其敏感度为 89%,特异度为 93%。

(收稿日期:2023-01-22)