

量化肺水肿的影像学研究进展

王亚男, 张景峰, 戴琦

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.04.030

【中图分类号】 R541.6⁺3; 445 【文献标志码】 C 【文章编号】 1671-0800(2025)04-0437-04

肺水肿(pulmonary edema, PE)是指肺组织液形成和回流平衡失调,肺淋巴和肺静脉系统无法在短时间内吸收大量组织液,致使液体从肺毛细血管渗出并积聚在肺间质和肺泡内,导致严重的肺通气和换气障碍^[1]。PE 是引起急诊院前呼吸困难的第二位病因,住院死亡率高达 4%~10%^[2]。根据发病机制分为静水压性水肿、伴有或不伴有弥漫性肺泡损伤(diffuse alveolar damage, DAD)的通透性水肿以及混合性水肿 4 类^[3]。PE 临床表现多样,发生率、死亡率均较高,因此早期准确诊断至关重要。影像学是目前最方便且有效的诊断方法,包括胸部 X 线检查(chest X-ray, CXR)、胸部 CT 检查、磁共振成像(MRI)等。近年来深度学习(deep learning, DL)在弥漫性肺部疾病中应用日益增多,为量化 PE 指明新方向。本文就量化 PE 的影像学技术及研究进展进行简要综述,为临床治疗方案的选择及评估提供依据。

1 CXR 量化 PE 的应用价值

放射影像学成像是一种无创检查,用于定性评估肺水肿的存在和严重程度。CXR 以无创、低成本、易获取的特点,成为诊断 PE 的最常用的技术之一,目前 CXR 量化 PE 依赖于主观评分。PE 放射学评估(RALE)是最常用的评分系统之一^[4],将肺划分为 4 个区域,每个区域实变程度和密度相乘后依次相加得到总分(0~48),分数越高肺水含量越大。当肺水含量>35%时 CXR 检测结果为阳性^[5]。RALE 评分是客观量化 CXR 图像的工具,易于计算、可行且可靠^[6]。一项二尖瓣术后发生单侧 PE 的研究应

用 RALE 评分,显示其敏感性和特异性高达 94%^[7]。Vaik 等^[8]发现,新型冠状病毒肺炎(COVID-19)感染后出现急性呼吸窘迫综合征(ARDS)时,基线 CXR 的 RALE 评分较高,而后期的 RALE 评分增加与较高的死亡率相关。Shaver 等^[9]在肺移植患者术后第 3 天的 RALE 评分获得类似上述的结论。因 RALE 评分的高度可重复性,监测 RALE 评分可预测治疗效果^[10]。有研究证明,RALE 评分与 ARDS 患者早期脱机和拔管相关,并能预测机械通气的持续时间^[11]。RALE 评分不仅用于 PE,还可作为极低出生体重儿氧合指数的预测及紧急情况下作为肺炎严重程度的量化^[12-13]。尽管因其 CXR 简便、高效的优点广泛应用于临床,但仍存在局限性,如充盈压升高与影像学检查结果之间存在延时、多器官投射叠加而成的二维图像^[14]及 RALE 评分需依靠放射科医生手动总结得分等^[15]。随着数字图像采集技术不断进步提高了图像质量,人工智能(AI)引入医学影像领域,提高了疾病诊断的准确性及工作效率。

2 胸部 CT 检查量化 PE 的应用价值

胸部 CT 扫描是定性评估 PE 的金标准^[16]。通过使用定量计算机断层扫描(QCT)来测量肺含水量,为临床医生提供病灶分布、密度变化等信息,可视化地了解肺部病理生理学改变。然而,由于其复杂性和耗时性,胸部 CT 检查量化 PE 尚未成为常规诊断的一部分。Barile 等^[17]发现以-825 Hu 作为临界值,用于识别 PE 的准确性最高,与定性(视觉)CT 分析相比,定量分析具有更高的敏感性和特异性(84% vs 100%和 78% vs 95%)。这表明了胸部 CT 视觉评估 PE 存在误差,即使接受过亚专科培训的胸部放射科医生,早期 PE 的微小密度差异仍低于其视觉阈值。

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LTGY23H180003)

作者单位: 315211 宁波,宁波大学医学部(王亚男);宁波市第二人民医院(张景峰、戴琦)

通信作者: 张景峰, Email: jingfengzhang73@163.com

现常用量化肺密度的方法包括扇区法(测量肺实质外围区域的密度)和全肺法(测量包括肺实质和中央血管结构的平均密度)^[18]。有研究比较了心源性肺水肿(CPE)和ARDS肺内含水量及分布,发现重度ARDS肺内的含水量高于CPE,二者的分布均与重力作用相关,但无差异^[19]。Fermoyle等^[20]研究发现,射血分数保留的心力衰竭(HFpEF)患者和健康受试者运动后,HFpEF组肺水含量高于对照组,且运动后二者差异进一步增加。有学者提出无创生物电阻抗分析(BIA)是胸部CT扫描评估肺水含量时的可行性工具^[21]。

目前脉搏指示连续心排量(pulse indicator continuous cardiac output, PICCO)监测肺血管外肺水指数(extra vascular lung water index, EVLWI)是诊断PE的金标准,但其费用高、且有创伤性^[22]。尽管CT定量测量尚不能完全精准预测EVLWI^[23],但与传统有创检查方法的相比,消除了手术风险和潜在的并发症,更容易被患者接受并实施。有研究发现,EVLWI可通过在肺感兴趣区域(ROI)内排除可识别的血管后,利用 $[\text{平均肺密度(Hu)}+1\ 000]/10$ 计算得出^[20]。有学者发现PE中的CT肺密度测量值与平均肺毛细血管楔压(PCWP)呈线性相关,与纽约心脏学会(NYHA)心功能分级相关联^[17]。一项基于EVLWI和肺血管通透性指数(PVPI)的研究发现,EVLWI与CT上观察到的总混浊体积强相关($r=0.72$),而PVPI与临床和放射学参数的相关性较弱,这说明胸部CT不仅实现了PE准确量化,同时还能显示临床结局^[24]。电离辐射是CT检查最显著的局限性,随着技术不断发展,辐射剂量已在不断降低。此外,肺密度测量与肺含气量相关,若存在肺气肿、最大吸气量时测量,炎症细胞聚集结果可能不同^[25]。

3 MRI 成像量化 PE 的应用价值

MRI因其信号强度与肺含水量成正比,可实现对PE的精准量化,被提议为最有前途的无创量化PE的方法。与其临床技术(X射线、CT、超声和心导管插入术)相比,MRI具有无创、定量且不受电离辐射的优势。随着梯度回波序列技术(GRE)的应用,单次屏气采集用以估计质子密度为主,图像成像时间得以缩短。但MRI广泛用于临床量化PE仍面临

挑战,包括肺部较低的质子密度导致低信噪比、 T_2 信号快速衰减、呼吸运动伪影以及磁场不均匀等,但这些不足在Thompson等^[25-26]的研究中得到解决。Seemann等^[27]采用连续3D MRI质子密度加权序列及滑动窗口和呼吸运动校正图像重建,实现对休息、运动及休息-运动过渡期三种状态的肺水动态测量。Goodhart等^[28]通过动态测量仰卧位的肺水含量,发现仰卧位后数十分钟内潮汐呼吸期间,肺水总量略有减少($3.3\pm 4.0\%$),建议仰卧一段时间再行MRI检查以提高测量精度。

MRI不仅能准确且重复地量化PE,同时还可获得心脏功能数据和组织特征。Rocha等^[29]证实了量化静息状态下PE的预后价值,但目前对量化负荷状态下PE的预后价值尚存异议。对舒张功能障碍的患者,在最大负荷运动时测定肺水含量,发现HFpEF或心脏淀粉样变性患者的肺水含量短暂增加,而未患心力衰竭的糖尿病患者则不会出现上述情况^[30]。在心力衰竭患者中,肺水含量增加与左室充盈压升高相关,肺水含量 $> 28\%$ 是1年内死亡或就诊的独立危险因素^[25]。与CXR、CT等检查相比,MRI检查的费用昂贵,但随着医保制度的不断完善,一定程度上减轻患者的经济负担。另外,强磁场和射频场的作用,导致心脏起搏器失灵、金属植入物发生移位,故心脏起搏器术后及金属植入术后患者是MRI检查的禁忌人群,需寻找其他合适且高效的影像技术替代^[31]。

4 DL 量化 PE 的应用价值

当前AI在医学影像中的应用进入高速发展阶段,尤其是DL,有效地从大数据中提取特征,并分析肉眼难以观察到的图像信息,成为处理高维医学影像数据的关键工具^[32-33]。多项研究表明,DL模型在许多生存预测和医学成像分析任务中达到甚至超过人类专家的表现^[34]。特别是在COVID-19流行期间,DL模型在识别病毒性肺炎类型上获得瞩目成绩^[35]。

Akbar等^[36]使用Siamese卷积网络在CXR上成功实现了PE严重程度的预测,最优模型的AUC高达0.91。Schulz团队^[37]将经肺热稀释法(TPTD)提取的EVLWI作为定量指标,采用EfficientNet B5为主的迁移学习方法分析数据得出,DL在量化PE严

重程度具有更客观的优势。Liang 等^[38]利用自我监督的机器学习方法,将孪生神经网络(Sim Siam)架构优化,用于预测 RALE 评分。新模型的所有性能指标均优于未经预训练的 Sim Siam 编码器和从头开始训练的 ResNet-50 模型($P < 0.01$)。Meng 等^[39]通过双机械自我学习及双向多模态交叉注意力算法,在 CXR 上实现 PE 严重程度分级,最佳 F1 评分为 0.667、 $AUC=0.904$,优于其他先进的多模态算法,并最大限度地减少人为因素干扰。

DL 因自动分割图像的优势,在疾病诊断的精度和速度方面发挥出色。Conrad 等^[16]将肺部 CT 分割器工具与胸部成像平台的 R-231 模型结合使用,对 145 例 PE 图像进行自动分割,结果与 TPTD 相比,总体偏倚较低、一致性水平较高。目前,DL 尚未大规模应用于临床实践工作,其原因包括模型可解释性较弱、对大规模标注数据的依赖性较强及对硬件资源要求较高等。有研究者提出,利用注意力机制、热力图等可视化工具进行解释,或使用 LIME 模型或 SHAP 等算法模型以解决解释性较弱的难题。随着未来不同算法问世,DL 学习性能得到逐步提升,有望提高模型的准确性^[40-42]。

5 总结与展望

影像学检查可为 PE 的早期诊断、评估病情及预后等提供可靠依据。目前 CXR 是最容易获得且最经济的方法,CT 因其高分辨力有助于早期诊断是当前应用最广泛的检查手段,MRI 提供功能学信息在应用中具有较大优势,DL 作为高效的辅助诊断方法,为临床工作提供强有力的技术支撑。在临床实践中,选择何种方法取决于患者自身情况、当时临床环境以及对同时获得其他信息的需求。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] CUI X Y, CHEN W Y, ZHOU H Y, et al. Pulmonary edema in COVID-19 patients: Mechanisms and treatment potential[J]. Front Pharmacol, 2021, 12: 664349.
- [2] AISSAOUI N, HAMZAOU O, PRICE S. Ten questions ICU specialists should address when managing cardiogenic acute pulmonary oedema[J]. Intensive Care Med, 2022, 48(4): 482-485.
- [3] CHAUHAN G, LIAO R Z, WELLS W, et al. Joint modeling of chest radiographs and radiology reports for pulmonary edema

- assessment[J]. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2020, 12262: 529-539.
- [4] 张倩, 李小民, 谢永鹏, 等. RALE 评分与 LUS 评分的相关性及其对 ARDS 患者预后的价值研究[J]. 临床急诊杂志, 2023, 24(07): 340-346.
- [5] BARILE M. Pulmonary edema: A pictorial review of imaging manifestations and current understanding of mechanisms of disease[J]. Eur J Radiol Open, 2020, 7: 100274.
- [6] 任英杰, 刘蓉安, 黎嘉嘉, 等. 肺水肿影像评分评估静脉-动脉体外膜肺氧合患者预后的价值[J]. 实用医院临床杂志, 2023, 20(6): 165-170.
- [7] MOSTAFA K, WOLF C, SEEHAFFER S, et al. Redefining unilateral pulmonary edema after mitral valve surgery on chest X-ray imaging using the RALE scoring system[J]. J Clin Med, 2023, 12(18): 6043.
- [8] VALK C M A, ZIMATORE C, MAZZINARI G, et al. The prognostic capacity of the radiographic assessment for lung edema score in patients with COVID-19 acute respiratory distress syndrome-an international multicenter observational study[J]. Front Med (Lausanne), 2022, 8: 772056.
- [9] SHAVER C M, KOYAMA T, OYSTER M, et al. Radiographic assessment of lung edema (RALE) score on day 3 after lung transplantation is associated with poor clinical outcomes[J]. J Heart Lung Transplant, 2024, 43(4): S142.
- [10] VOIGT I, MIGHALI M, MANDA D, et al. Radiographic assessment of lung edema (RALE) score is associated with clinical outcomes in patients with refractory cardiogenic shock and refractory cardiac arrest after percutaneous implantation of extracorporeal life support[J]. Intern Emerg Med, 2022, 17(5): 1463-1470.
- [11] LIN X F, WANG F N, WANG Y T. Study on the predictive value of a pulmonary edema imaging score for delayed extubation in patients after heart valve surgery on cardiopulmonary bypass[J]. Rev Cardiovasc Med, 2024, 25(10): 387.
- [12] ZUIKI M, ASUKA K, HASEGAWA T, et al. Radiographic scores as a predictor of oxygenation index in very low-birthweight infants[J]. Pediatr Int, 2024, 66(1): e15811.
- [13] COZZI D, ALBANESI M, CAVIGLI E, et al. Chest X-ray in new coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection: Findings and correlation with clinical outcome[J]. Radiol Med, 2020, 125(8): 730-737.
- [14] AHMAD H K, MILNE M R, BUCHLAK Q D, et al. Machine learning augmented interpretation of chest X-rays: A systematic review[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(4): 743.
- [15] TENDA E D, YUNUS R E, ZULKARNAEN B, et al. Comparison of the discrimination performance of AI scoring and the Brixia score in predicting COVID-19 severity on chest X-ray imaging: Diagnostic accuracy study[J]. JMIR Form Res, 2024, 8: e46817.
- [16] CONRAD A M, ZIMMERMANN J, MOHR D, et al. Quantification of pulmonary edema using automated lung segmentation on computed tomography in mechanically ventilated patients with acute respiratory distress syndrome[J]. Intensive Care Med Exp, 2024, 12(1): 95.
- [17] BARILE M, HIDA T, HAMMER M, et al. Simple quantitative chest CT for pulmonary edema[J]. Eur J Radiol Open, 2020, 7: 100273.

- [18] CHARLES JAIN C, TSCHIRREN J, REDDY Y N V, et al. Subclinical pulmonary congestion and abnormal hemodynamics in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(4): 629-637.
- [19] VERGANI G, CRESSONI M, CRIMELLA F, et al. A morphological and quantitative analysis of lung CT scan in patients with acute respiratory distress syndrome and in cardiogenic pulmonary edema[J]. *J Intensive Care Med*, 2020, 35(3): 284-292.
- [20] FERMOYLE C C, STEWART G M, BORLAUG B A, et al. Effects of exercise on thoracic blood volumes, lung fluid accumulation, and pulmonary diffusing capacity in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2020, 319(5): R602-R609.
- [21] BATTUMUR B, LEE J E, CHOI Y J, et al. Feasibility of non-invasive bioelectrical impedance analysis to estimate lung fluid status in patients with and without acute heart failure[J]. *J Card Fail*, 2023, 29(4): 599-600.
- [22] GOMES F K A, FAGUNDES A A P, AMORIM F F. Cardiac output and stroke volume assessments by transthoracic echocardiography and pulse index continuous cardiac output monitor in critically ill adult patients: A comparative study[J]. *J Intensive Care Med*, 2024, 39(4): 341-348.
- [23] LINDOW T, QUADRELLI S, UGANDER M. Noninvasive imaging methods for quantification of pulmonary edema and congestion: A systematic review[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2023, 16(11): 1469-1484.
- [24] SCHIPPERS J R, ATMOWIHARDJOL N, DUIJVELAAR E, et al. Deep phenotyping of pulmonary edema and pulmonary vascular permeability in COVID-19 ARDS[J]. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2025, 328(1): L30-L40.
- [25] THOMPSON R B, CHOW K, PAGANO J J, et al. Quantification of lung water in heart failure using cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2019, 21(1): 58.
- [26] MEADUS W Q, STOBBER R W, GRENIER J G, et al. Quantification of lung water density with UTE yamball MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2021, 86(3): 1330-1344.
- [27] SEEMANN F, JAVED A, KHAN J M, et al. Dynamic lung water MRI during exercise stress[J]. *Magn Reson Med*, 2023, 90(4): 1396-1413.
- [28] GOODHART T, SERES P, GRENIER J, et al. Dynamic changes in lung water density and volume following supine body positioning[J]. *Magn Reson Med*, 2024, 91(6): 2612-2620.
- [29] ROCHA B M L, CUNHA G J L, FREITAS P, et al. Measuring lung water adds prognostic value in heart failure patients undergoing cardiac magnetic resonance[J]. *Sci Rep*, 2021, 11: 20162.
- [30] BURRAGE M K, HUNDERTMARK M, VALKOVIC L, et al. Energetic basis for exercise-induced pulmonary congestion in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Circulation*, 2021, 144(21): 1664-1678.
- [31] TARNOKI D L, KARLINGER K, RIDGE C A, et al. Lung imaging methods: Indications, strengths and limitations[J]. *Breathe (Sheff)*, 2024, 20(3): 230127.
- [32] DUONG K S, RUBNER R, SIEGEL A, et al. Machine learning assessment of background parenchymal enhancement in breast cancer and clinical applications: A literature review[J]. *Cancers (Basel)*, 2024, 16(21): 3681.
- [33] 秦李祎, 吕平欣, 郭琳, 等. 基于CT图像的肺结核病灶治愈状态判定深度学习模型的建立[J]. *中国防痨杂志*, 2024, 46(03): 272-278.
- [34] LIU X Y, ZHANG D F, LIU Z Y, et al. Deep learning radiomics-based prediction of distant metastasis in patients with locally advanced rectal cancer after neoadjuvant chemoradiotherapy: A multicentre study[J]. *E Bio Medicine*, 2021, 69: 103442.
- [35] 王颖, 彭文献. 深度学习在新型冠状病毒肺炎的智能诊断应用的研究进展[J]. *北京生物医学工程*, 2024, 43(04): 420-425+432.
- [36] AKBAR M N, WANG X, ERDOGMUSD, et al. PENet: Continuous-valued pulmonary edema severity prediction on chest X-ray using Siamese convolutional networks[C]. *Glasgow: IEEE*, 2022.
- [37] SCHULZ D, RASCH S, HEILMAIER M, et al. A deep learning model enables accurate prediction and quantification of pulmonary edema from chest X-rays[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 201.
- [38] LIANG Z H, XUE Z Y, RAJARAMAN S, et al. Automatic quantification of COVID-19 pulmonary edema by self-supervised contrastive learning[C]. *Cham: Springer*, 2023.
- [39] MENG Z Y, ZHAO H J, TAN W X, et al. A novel approach for stratifying pulmonary edema severity on chest X-ray via dual-mechanic self-learning and bidirectional multi-modal cross-attention algorithms[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2024, 2829(1): 012019.
- [40] HATABU H, BARILE M. Detection of pulmonary congestion in heart failure with preserved ejection fraction using quantitative chest CT[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(4): 638-640.
- [41] 谢浩杰, 鲁明丽, 张陈, 等. 基于深度学习的肺结核检测综述[J]. *中国医学物理学杂志*, 2024, 41(07): 918-924.
- [42] UKWUOMA C C, CAI D S, EZIEFUNA E O, et al. Enhancing histopathological medical image classification for Early cancer diagnosis using deep learning and explainable AI-LIME & SHAP[J]. *Biomed Signal Process Contr*, 2025, 100: 107014.

收稿日期: 2024-11-03

(本文编辑: 方能)