

影像学新技术在间质性肺疾病评价中的应用进展

江叶海, 蒲豆豆, 任占丽, 于楠

【摘要】 影像学在间质性肺疾病(ILD)的诊断、评估中至关重要。近年来随着影像学新技术的不断发展,如 CT、MRI、正电子发射型断层扫描(PET)为 ILD 诊断与评估提供了客观工具。本文将基于多模态定量影像技术在 ILD 的应用与探索进行综述。

【关键词】 间质性肺疾病;体层摄影术,X 线计算机;磁共振成像;正电子发射断层扫描

【中图分类号】 R563.9;R445.2;R814.42 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2024)01-0127-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.01.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



间质性肺疾病(interstitial lung diseases,ILD)是一组具有高度异质性的疾病,无论是发病原因、病理特点,还是影像学表现都相当复杂,这使得疾病诊断和评估变得困难^[1-3]。影像学是诊断及评估 ILDs 的常用方法,然而大多为定性诊断,存在相当的主观性^[4,5]。近年来计算机辅助诊断、纹理分析和影像组学的兴起,为进一步提取和分析 CT 图像特征提供了新的技术手段,有利于区分不同病变、肺实质、支气管和血管的改变特点。除此之外,新的影像学技术提供了更多的形态学和功能学信息,如超极化气体 MRI 以及正电子发射断层扫描(positron emission tomography,PET),而基于多模态的 ILD 评价方法和技术探索是近年来影像学对 ILD 诊疗的最大贡献。

CT 定量分析

1.CT 半定量分析

CT 半定量分析是影像医生根据 ILD 的影像学特点,计算病变在各肺叶中累及百分比的一种半定量方法。既往研究表明 ILD 患者的肺纤维化范围和程度与疾病预后存在相关性^[5,6]。Nurmi 等^[7]采用 CT 半定量分析证实网格影、牵拉支气管扩张及肺结构变形的范围与类风湿性关节炎患者预后不良有关。Sambataro 等^[8]对系统性硬化症患者的磨玻璃影和纤维化程度进行评价,发现磨玻璃影与疾病活动度相关,而纤维化可能是疾病损害的标志。半定量评估在一定程度上引入了定量的概念,通过量化病变范围来评价随访

者病情的进展情况,并对患者疗效进行预后评估。然而半定量手段需要依赖医生的主观判断,观察者的内部与外部一致性较差。

2.基于肺密度与体积的 CT 定量分析

基于肺密度与体积的 CT 定量分析是通过肺密度和肺体积来定量评估 ILD。正常肺密度 CT 值的峰值为-800 HU,并且左偏。当发生纤维化时,平均肺密度(mean lung density,MLD)增加,密度直方图显示肺密度分布的峰度减低和偏度减小。有研究证实 MLD 的增加与干燥综合征和系统性硬化症 ILD 疾病严重程度有关^[9,10]。虽然定量分析方法可以消除半定量分析中观察者内和观察者间的异质性,提高准确性和可重复性。然而基于全肺测量的 MLD 会受肺内局部的空气滞留、肺气肿的影响,造成全肺的 MLD 值减低,从而影响对整体肺实质病变的判断。除此之外,依靠肺密度区分 ILD 的亚型仍有争议。有学者认为依靠 MLD 和肺密度峰度、偏度能区分非特异性间质性肺炎与寻常型间质性肺炎^[11],但也有研究发现不能区分两者差异^[12]。因此有学者提出了基于体积的定量分析方法^[13],研究发现体积的减小与 ILD 患者的疾病程度有关^[14]。然而肺外围病变可能会影响整体肺的分割,且患者扫描时的呼吸配合也会影响到肺体积的测量。

3.CT 肺纹理分析与机器学习

CT 纹理分析通过提取肺组织每个像素密度和形态的特点获得肺实质局部或整体的纹理特征。基于这些纹理学信息可以用来鉴别 ILD 的不同影像学特征,如区分肺气肿、蜂窝征、纤维化组织中的磨玻璃影等^[15]。自适应多特征方法(adaptive multiple feature method,AMFM)肺纹理分析软件能够区分肺气肿、肺纤维化、磨玻璃影、肺实变和蜂窝征,敏感度和特异度均在 95%以上^[16]。在一项关于特发性肺纤维化(idio-

作者单位: 712046 陕西,陕西中医药大学医学技术学院(江叶海、蒲豆豆、任占丽、于楠);712000 陕西,陕西中医药大学附属医院医学影像科(任占丽、于楠)

作者简介: 江叶海(1999-),女,湖南岳阳人,硕士研究生,技师,主要从事胸部影像新技术工作。

通讯作者: 于楠, E-mail: yunan0512@sina.com

基金项目: 陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(23JJP036);陕西省自然科学基金研究计划项目(2022JM-453);国家级大学生创新创业训练计划项目

pathic pulmonary fibrosis, IPF) 的大型临床研究中,使用 AMFM 软件进行定量分析,发现磨玻璃影的范围与 IPF 进展密切相关^[16]。

关于肺实质纹理分析的机器学习有两种类型:监督型和无监督型。无监督的数据驱动的组织纹理分析(data-driven textural analysis, DTA)软件机器被赋予没有任何预标记的数据,并且必须独立地对数据进行分组。DTA 能够从 CT 原始数据中获得组织纹理信息,通过相同像素纹理的聚类从正常组织中分离出纤维组织,并且对其定量分析,获得纤维化程度值。有研究对 280 例 IPF 患者的肺纤维化定量值与肺功能进行了相关性研究,结果发现两者相关性好,且在随访过程中随着肺纤维化值的增加,肺功能也逐渐下降^[15]。Pan 等^[17]研究发现无监督机器学习还可以识别和评估 IPF 进展,并可作为预测性标志物。

监督型的机器学习模型是用于病理分型和评估的计算机辅助肺信息学模型(computer aided lung informatics for pathology evaluation, CALIPER),这种分析方法利用肺组织研究联盟(lung tissue research consortium)数据库中 ILD 患者的薄层 CT 图像,将肺实质分为体积感兴趣区(volumes of interest, VOIs)。再由四位胸部放射专家对随机选择的 VOIs 进行以下归类:正常、磨玻璃影、不规则网格影、蜂窝影、低密度衰减区和/或肺气肿(图 1)^[18]。有研究对 55 例 IPF 患者进行 CALIPER 分析,发现 ILD 的总体积、不规则网格影的总体积都与患者的生存率有关^[19]。

4. CT 肺血管定量分析

肺间质疾病常常累及肺血管,因此对肺血管病变的分割和定量评价也非常重要^[20,21]。通过对全肺血管体积(pulmonary vessel volume, PVV)的提取和定

量,发现 PVV 不仅与 ILD 病变范围相关,且 PVV 结合 CALIPER 指标能更好地评估 ILD 患者的预后。目前使用的 PVV 分割方法有基于 CT 的血管横截面积定量法。有研究对结缔组织病相关间质性肺病患者进行血管分析,发现 PVV 可预测系统性硬化相关性间质性肺疾病的严重程度^[21]。然而关于肺血管的分割、定量以及对血管分支的形态测量仍然是分割的难点,需要进一步的人工智能模型进行分析。

虽然 CT 定量分析是 ILD 定量分析的主要手段,但目前仍然存在以下问题:①CT 扫描数据的同质化问题,多中心研究所面临的扫描设备、扫描参数、重建参数的方式不同可能会影响定量分析结果,因此需要对不同来源数据进行标准化;②患者的呼吸配合度问题,患者深吸气幅度、患者配合度都可能影响肺密度,因此需要对数据进行校正;③定量分析反映的主要是肺结构的改变,但不能完全反映肺功能改变。因此,在有解剖成像的同时,需要进一步采用影像学多模态的技术方法,从功能方面对肺间质纤维化进行评估。

磁共振功能评价

胸部是磁共振的一个巨大挑战,由于肺内缺乏氢质子、空气与组织界面磁敏感伪影以及呼吸和心脏运动等原因使得肺部 MRI 成为难点。近年来 MRI 新序列如超短回波时间序列(ultrashort echo time, UTE)的研发为 ILD 结构评价提供了可能性^[22]。最近,UTE 的价值已在肺部和肺部疾病的成像中得到证实^[23,24]。自由呼吸的 UTE 序列虽然采集时间较长,但能够获得和 CT 类似的图像效果^[25]。有研究显示 UTE 序列检测肺纤维化征象的敏感度为 97.2%,在识别 IPF 的影像特征和评估肺纤维化程度方面具有较高的可重复性,且 UTE 在检测 IPF 的影像特征(网状

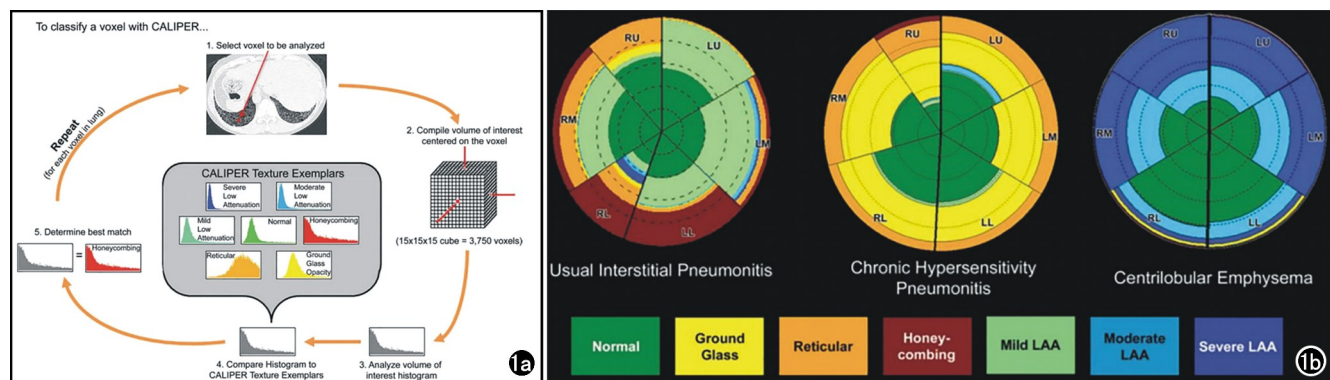


图 1 基于 CALIPER 纹理分析的流程。a) 流程图显示了 CALIPER 测量肺实质的过程。对于每个 $15 \times 15 \times 15$ 大小的体素,计算基于直方图的特征,然后与已经标记并训练获得的组学特征比对,再进行分类;b) 纹理特征输出过程。整个圆形代表整个肺容积,并按肺解剖结构划分,同心圆中扇形虚线内代表该肺叶的 20%。肺实质异常的分布和模式表明疾病过程。如 UIP 的双基底层蜂窝状改变(左)、慢性过敏性肺炎(CHP)的磨玻璃改变(中)或小叶中心性肺气肿(右)以上肺为主的低密度区(LAA)^[18]。

结构、牵引性支气管扩张症和蜂窝状等)方面与 HRCT 高度一致^[26]。Ohno 等^[27]对 19 例 ILD 患者的 UTE 与 CT 进行比较,发现 UTE 序列诊断 ILD 的敏感度、特异度和准确率分别为 100.0%、97.0% 和 97.6%。然而,关于 UTE 在评估 ILD 肺部异常的研究有限^[28,29],还需进一步研究。

1.磁共振弹性成像

磁共振弹性成像(MR elastography, MRE)是测量组织硬度的一种方法,通过机械波在组织中的传播得到关于组织弹性的信息。MRE 目前较多用于评价慢性肝病患者的情况^[30,31],是一种安全、可靠、无创且可用来对肝脏纤维化进行分期的新技术。有研究证实了 MRE 在肺部的可行性,且发现具有良好的重复性和再现性^[32-34]。Marinelli 等^[35]使用 MRE 技术对 ILD 患者与正常对照组进行比较,发现 ILD 患者肺实质剪切硬度更高,且与疾病程度相关。但 MRE 能否用于 ILD 进展评价仍需要进一步研究的验证。

2.超极化气体 MRI

超极化气体 MRI 是指患者吸入氦(³He)或氙气(¹²⁹Xe)提高肺部磁性的 MR 成像方法。吸入 ¹²⁹Xe 不局限在气道内,而是穿过肺泡间质进入毛细血管血液,利用氙气¹²⁹Xe 在气相和水相[组织和血浆(tissue and plasma, TP)和红细胞(red blood cell, RBC)]中的化学位移,使用光谱技术能够发现肺泡到毛细血管之间的扩散受限。在 IPF 患者中,RBC 信号峰值较 TP 信号峰值相对减低^[36]。且有研究证实信号峰度的改变与 IPF 和 CTD-ILD 患者的一氧化碳弥散值相关^[36-38]。

3.动态增强 MRI

MRI 肺功能成像除上述技术以外,还有动态增强成像。动态增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI)为肺血流动力学评估提供了

一种新的手段。Mirsadraee 等^[39]评价注射对比剂前后 10 min 和 20 min 纤维化肺实质的 T₁ 信号特征,发现钆对比剂可用于识别形态正常肺实质的早期纤维化改变。Montesi 等^[40]使用 DCE-MRI 对 IPF 中肺微血管系统的整体和局部变化进行体内量化,发现 DCE-MRI 能够检测 IPF 微血管和血管外细胞外间隙的变化,且洗脱率在疾病进展迅速的 IPF 受试者与缓慢进展的受试者之间有所差别。Frenk 等^[41]研究发现在 IPF 中使用 DCE-MRI 的全局分析会掩盖 IPF 中肺血流动力学的区域性变化,第一运输时间值可能是预测 IPF 进展的一个标志物。除此之外,也有研究发现对比剂通过肺部时间的半高宽平均值有可能成为 IPF 中肺血管疾病进展的定量生物标志物^[42]。

通过对系统性硬化症患者的 MRI 和 CT 视觉评估发现,MRI 评价结果和 CT 具有较好一致性,但作为一种新的检查序列还需要进一步研究^[43]。综上所述,MRI 作为一种新的无辐射肺功能评价方法,对于 ILD 评估仍需要不断探索和验证。

正电子发射断层扫描

正电子发射计算机断层扫描(positron emission tomography-computed tomography, PET-CT)是 PET 与 CT 的结合,其图像既融合了 CT 的解剖信息又包含了 PET 的功能信息。既往研究报道 18 氟脱氧葡萄糖(18F-fluorodeoxyglucose, ¹⁸F-FDG) PET-CT 在 ILD 中的应用^[44-46]。在这些研究中,系统性硬化 ILD 患者的肺摄取¹⁸F-FDG 高于对照组,且与肺功能试验呈负相关。此外,PET-CT 还可以在 CT 上未确定纤维化的区域检测到¹⁸F-FDG。同时研究也发现¹⁸F-FDG 摄取值与疾病的活动度有关,与那些不需要治疗的患者相比,需要治疗患者的¹⁸F-FDG 摄取值更高^[44,46]。研究也发现 PET-CT 在改善 ILD 患者治疗

表 1 不同影像检查方法或图像分析方法对 ILD 评估的价值比较

方法	优点	不足	展望
CT 半定量分析	不需要特殊软件辅助,简单易行,能够初步提供病变范围指标	主观性强,可重复性弱	临床应用价值推广
CT 定量分析	基于图像分割的肺体积、肺密度、肺血管、支气管定量技术,能够多角度观察 ILD 带来的肺结构变化	需要良好的图像质量,保证图像质量同质性。	指标参数较多,但筛选高预测性指标及指标直接的协同预测作用需要探索。
CT 肺纹理分析与机器学习	人工智能方法将图像分为正常、磨玻璃影、不规则网格影、蜂窝影、低密度衰减区和/或肺气肿几种关键征象,有利于评估以上几类关键指标在 ILD 的分布特点,协助区分 ILD 亚型	需要特殊软件,使用广泛性有限,尚不能用于区分 ILD 亚型	临床实用性的探索,对 ILD 亚型区分、预后评估的价值。
MRI	UTE 可用于形态评估;动态增强 MRI 可评估血流动力学变化;超极化气体 MRI 可评估气血交换能力。侧重于功能成像	价格高,检查时间长,接受度相对较弱。	功能成像和结构之间的关系探索
PET-CT	ILD 的代谢现象	价格高,检查时间长,接受度相对更弱。	临床价值的挖掘及与其他影像方式的协同价值

反应的风险评估和预测方面的潜在价值^[47]。此外,新的 PET 示踪剂的研发也是 PET 在 ILD 评估方面的另一个趋势,如 ¹¹C-[R]-PK11195、⁶⁸Ga-FAPI-04/46 等。

影像学新技术提供的定量分析在 ILD 评估中发挥着越来越大的作用,虽然这些方法还需要进一步的外部验证,尚未在临床实践中广泛应用,但它们有望成为 ILD 评估的辅助工具,并在诊断和评估治疗疗效中发挥重要作用。量化肺血管变化被证明是 ILD 评估中一个全新的指标。纹理分析、聚类技术和机器学习可以自动分层疾病的图像,并提供决策支持。MRI 和 PET 仍然是 ILD 中的探索性技术,但能够帮助探究疾病的形态学改变与功能学改变之间的联系(表 1)。

参考文献:

- [1] Shih AR, Nitiwarangkul C, Little BP, et al. Practical application and validation of the 2018 ATS/ERS/JRS/ALAT and Fleischner Society guidelines for the diagnosis of idiopathic pulmonary fibrosis[J]. *Respir Res*, 2021, 22(1):124.
- [2] Raghu G, Remy-Jardin M, Richeldi L, et al. Idiopathic Pulmonary Fibrosis (an Update) and Progressive Pulmonary Fibrosis in Adults: An Official ATS/ERS/JRS/ALAT Clinical Practice Guideline[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2022, 205(9):e18-e47.
- [3] 王超,雷洁,邱晓晖,等.类风湿关节炎相关间质性肺疾病的危险因素分析[J]. *放射学实践*, 2021, 36(7):868-872.
- [4] Chawla A, Lim TC, Krishnan V, et al. Imaging of interstitial lung diseases[J]. *Thoracic Imaging*, 2019, 13(1):361-423.
- [5] Chen X, Guo J, Yu D, et al. Predictors of mortality in progressive fibrosing interstitial lung diseases[J]. *Front Pharmacol*, 2021, 12(10):754851.
- [6] Hino T, Hida T, Nishino M, et al. Progression of traction bronchiectasis/bronchiolectasis in interstitial lung abnormalities is associated with increased all-cause mortality: age Gene/Environment Susceptibility-Reykjavik Study[J]. *Eur J Radiol Open*, 2021, 8(3):100334.
- [7] Nurmi HM, Kettunen HP, Suoranta SK, et al. Several high-resolution computed tomography findings associate with survival and clinical features in rheumatoid arthritis-associated interstitial lung disease[J]. *Respir Med*, 2018, 134(1):24-30.
- [8] Sambataro D, Sambataro G, Pignataro F, et al. Quantification of ground glass opacities can be useful to describe disease activity in systemic sclerosis[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2020, 10(4):225.
- [9] Ufuk F, Demirci M, Altinisik G, et al. Quantitative analysis of Sjogren's syndrome related interstitial lung disease with different methods[J]. *Eur J Radiol*, 2020, 128(7):109030.
- [10] Ufuk F, Demirci M, Altinisik G. Quantitative computed tomography assessment for systemic sclerosis-related interstitial lung disease: comparison of different methods[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(8):4369-4380.
- [11] Do KH, Lee JS, Colby TV, et al. Nonspecific interstitial pneumonia versus usual interstitial pneumonia: differences in the density histogram of high-resolution CT[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2005, 29(4):544-548.
- [12] Sverzellati N, Calabrà E, Chetta A, et al. Visual score and quantitative CT indices in pulmonary fibrosis: relationship with physiologic impairment[J]. *Radiol Med*, 2007, 112(8):1160-1172.
- [13] Yin N, Shen C, Dong F, et al. Computer-aided identification of interstitial lung disease based on computed tomography[J]. *J Xray Sci Technol*, 2019, 27(4):591-603.
- [14] Robbie H, Wells AU, Fang C, et al. Serial decline in lung volume parameters on computed tomography (CT) predicts outcome in idiopathic pulmonary fibrosis (IPF) [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(4):2650-2660.
- [15] Humphries SM, Yagihashi K, Huckleberry J, et al. Idiopathic pulmonary fibrosis: data-driven textural analysis of extent of fibrosis at baseline and 15-month follow-up[J]. *Radiology*, 2017, 285(1):270-278.
- [16] Salisbury ML, Lynch DA, Van Beek EJ, et al. Idiopathic pulmonary fibrosis: the association between the adaptive multiple features method and fibrosis outcomes[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 195(7):921-929.
- [17] Pan J, Hofmanninger J, Nenning KH, et al. Unsupervised machine learning identifies predictive progression markers of IPF [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(2):925-935.
- [18] Chen A, Karwoski RA, Gierada DS, et al. Quantitative CT analysis of diffuse lung disease[J]. *Radiographics*, 2020, 40(1):28-43.
- [19] Erickson BJ, Korfiatis P, Akkus Z, et al. Machine learning for medical imaging[J]. *Radiographics*, 2017, 37(2):505-515.
- [20] Jacob J, Bartholmai BJ, Rajagopalan S, et al. Predicting outcomes in idiopathic pulmonary fibrosis using automated computed tomographic analysis[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 198(6):767-776.
- [21] Cosimo B, Mariaelena O, Michael P, et al. Lung vascular changes as biomarkers of severity in systemic sclerosis-associated interstitial lung disease[J]. *Rheumatology*, 2023, 62(2):696-706.
- [22] Tiddens HA, Stick SM, Wild JM, et al. Respiratory tract exacerbations revisited: ventilation, inflammation, perfusion, and structure (VIPS) monitoring to redefine treatment[J]. *Pediatr Pulmonol*, 2015, 50(Suppl 40):S57-65.
- [23] Geiger J, Zeimpekis KG, Jung A, et al. Clinical application of ultrashort echo-time MRI for lung pathologies in children[J]. *Clin Radiol*, 2021, 76(9):708.e9-708.e17.
- [24] Higano NS, Hahn AD, Tkach JA, et al. Retrospective respiratory self-gating and removal of bulk motion in pulmonary UTE MRI of neonates and adults[J]. *Magn Reson Med*, 2017, 77(3):1284-1295.
- [25] Hatabu H, Ohno Y, Gefter WB, et al. Expanding applications of pulmonary MRI in the clinical evaluation of lung disorders: fleischner society position paper[J]. *Radiology*, 2020, 297(2):286-301.
- [26] Yang X, Liu M, Duan J, et al. Three-dimensional ultrashort echo time magnetic resonance imaging in assessment of idiopathic pulmonary fibrosis, in comparison with high-resolution computed tomography [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(8):4176-4189.
- [27] Ohno Y, Koyama H, Yoshikawa T, et al. Pulmonary high-resolution ultrashort TE MR imaging: comparison with thin-section standard- and low-dose computed tomography for the assess-

- ment of pulmonary parenchyma diseases[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 43(2):512-532.
- [28] Dournes G, Yazbek J, Benhassen W, et al. 3D ultrashort echo time MRI of the lung using stack-of-spirals and spherical k-Space coverages: evaluation in healthy volunteers and parenchymal diseases[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(6):1489-1497.
- [29] Romei C, Turturici L, Tavanti L, et al. The use of chest magnetic resonance imaging in interstitial lung disease: a systematic review[J]. *Eur Respir Rev*, 2018, 27(150):180062.
- [30] Wang H, Tkach JA, Trout AT, et al. Respiratory-triggered spin-echo echo-planar imaging-based mr elastography for evaluating liver stiffness[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 50(2):391-396.
- [31] Li J, Venkatesh SK, Yin M. Advances in magnetic resonance elastography of liver[J]. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 2020, 28(3):331-340.
- [32] Fakhouri F, Kannengiesser S, Pfeuffer J, et al. Free-breathing MR elastography of the lungs: an in vivo study[J]. *Magn Reson Med*, 2022, 87(1):236-248.
- [33] Fakhouri F, Dong H, Kolipaka A. Magnetic resonance elastography of the lungs: a repeatability and reproducibility study[J]. *NMR Biomed*, 2019, 32(7):e4102.
- [34] Chassagnon G, Martin C, Marini R, et al. Use of elastic registration in pulmonary MRI for the assessment of pulmonary fibrosis in patients with systemic sclerosis[J]. *Radiology*, 2019, 291(2):487-492.
- [35] Marinelli JP, Levin DL, Vassallo R, et al. Quantitative assessment of lung stiffness in patients with interstitial lung disease using MR elastography[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46(2):365-374.
- [36] Weatherley ND, Stewart NJ, Chan HF, et al. Hyperpolarised xenon magnetic resonance spectroscopy for the longitudinal assessment of changes in gas diffusion in IPF[J]. *Thorax*, 2019, 74(5):500-502.
- [37] Mummy DG, Bier EA, Wang Z, et al. Hyperpolarized ^{129}Xe MRI and spectroscopy of gas-exchange abnormalities in nonspecific interstitial pneumonia[J]. *Radiology*, 2021, 301(1):211-220.
- [38] Wang JM, Robertson SH, Wang Z, et al. Using hyperpolarized ^{129}Xe MRI to quantify regional gas transfer in idiopathic pulmonary fibrosis[J]. *Thorax*, 2018, 73(1):21-28.
- [39] Mirsadraee S, Tse M, Kershaw L, et al. T_1 characteristics of interstitial pulmonary fibrosis on 3T MRI—a predictor of early interstitial change? [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2016, 6(1):42-49.
- [40] Montesi SB, Zhou IY, Liang LL, et al. Dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging of the lung reveals important pathology in idiopathic pulmonary fibrosis[J]. *ERJ Open Res*, 2021, 7(4):00907-2020.
- [41] Frenk NE, Montesi SB, Chen TQ, et al. Free-breathing dynamic contrast-enhanced magnetic resonance of interstitial lung fibrosis[J]. *Magn Reson Imaging*, 2020, 69(6):16-21.
- [42] Weatherley ND, Eaden JA, Hughes PJC, et al. Quantification of pulmonary perfusion in idiopathic pulmonary fibrosis with first pass dynamic contrast-enhanced perfusion MRI [J]. *Thorax*, 2021, 76(2):144-151.
- [43] Bruno H, Lilian L, Adalberto R, et al. Chest MRI with CT in the assessment of interstitial lung disease progression in patients with systemic sclerosis[J]. *Rheumatology*, 2022, 61(11):4420-4426.
- [44] Bellando-Randone S, Tartarelli L, Cavigli E, et al. ^{18}F -fluorodeoxyglucose positron-emission tomography/CT and lung involvement in systemic sclerosis[J]. *Ann Rheum Dis*, 2019, 78(4):577-578.
- [45] Peelen DM, Zwezerijnen B, Nossent EJ, et al. The quantitative assessment of interstitial lung disease with positron emission tomography scanning in systemic sclerosis patients[J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2020, 59(6):1407-1415.
- [46] Ledoult E, Morelle M, Soussan M, et al. ^{18}F -FDG positron emission tomography scanning in systemic sclerosis-associated interstitial lung disease: a pilot study[J]. *Arthritis Res Ther*, 2021, 23(1):76.
- [47] Win T, Screatton NJ, Porter JC, et al. Pulmonary ^{18}F -FDG uptake helps refine current risk stratification in idiopathic pulmonary fibrosis (IPF)[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(5):806-815.

(收稿日期:2022-09-23 修回日期:2023-02-10)