

重点选题“AI影像学”·专题专栏

心脏磁共振影像组学在非缺血性心肌病中的应用研究进展[▲]

王哲涛¹ 任静² 周鹏² 王春华^{2*}

(1 华西医院放射科, 四川省成都市 610041; 2 四川省肿瘤临床医学研究中心, 四川省肿瘤医院·研究所, 四川省癌症防治中心, 电子科技大学附属肿瘤医院影像科, 四川省成都市 610041)



王春华, 博士, 主治医师。主持四川省干部保健科研课题1项。在 *Circulation Journal*, *Journal of Cardiology*, *European Radiology Experimental*, *Frontiers in Oncology*, *OncoTargets and Therapy*, 《磁共振成像》《国际医学放射学》等国内外期刊发表论文7篇。多次参加国际医学磁共振学会(ISMRM)、北美放射学会(RSNA)、欧洲放射学会议(ECR)等高水平国际学术会议, 曾获 ISMRM、RSNA 学术奖励。目前主要研究方向为影像组学在乳腺、心脏磁共振中的应用, 以及肿瘤心脏病学。

【摘要】 非缺血性心肌病的病因复杂, 主要由遗传、心肌代谢、心肌结构改变等所致, 而非冠状动脉病变引起。心脏磁共振(CMR)能够高分辨显示心肌组织特征, 并能够提供客观的心功能参数。传统CMR图像观察及分析手段对图像的利用十分有限, 而CMR影像组学技术的出现为非缺血性心肌病的研究提供了新的方法。本文将综述CMR影像组学在非缺血性心肌病中的应用研究进展, 主要包括其在肥厚型心肌病、扩张型心肌病、心肌淀粉样变性诊断及预后预测中的应用价值。

【关键词】 非缺血性心肌病; 心脏磁共振; 影像组学; 诊断; 预测; 综述

【中图分类号】 R 445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 0253-4304(2024)02-0204-06

DOI: 10.11675/j.issn.0253-4304.2024.02.05

Application of radiomics based on cardiac magnetic resonance to non-ischemic cardiomyopathy: a research progress

WANG Zhetao¹, REN Jing², ZHOU Peng², WANG Chunhua²

(1 Department of Radiology, West China Hospital, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2 Department of Radiology, Sichuan Clinical Medical Research Center for Cancer, Sichuan Cancer Hospital & Institute, Sichuan Center for Cancer Prevention and Control, Affiliate Cancer Hospital of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, Sichuan, China)

【Abstract】 The etiology of non-ischemic cardiomyopathy is complex, mainly resulting from heredity, myocardial metabolism, and myocardial structural change, rather than from coronary artery disease. Cardiac magnetic resonance (CMR) can display the characteristics of myocardial tissues at high resolution, and provide objective parameters of cardiac function. Traditional CMR image observation and analytic methods on the utilization of image are very limited, whereas radiomics technique based on CMR supplies a new approach for the research of non-ischemic cardiomyopathy. In this paper, research progress on application of radiomics based on CMR to non-ischemic cardiomyopathy is reviewed, mainly containing its application value in the diagnosis and prognostic prediction of hypertrophic cardiomyopathy, dilated cardiomyopathy, and cardiac amyloidosis.

【Key words】 Non-ischemic cardiomyopathy, Cardiac magnetic resonance, Radiomics, Diagnosis, Prediction, Review

▲基金项目: 国家自然科学基金(U21A20521); 四川省干部保健科研项目(川干研2024-804, 川干研2024-115)

第一作者简介: 王哲涛, 在读硕士研究生, 主管技师, 研究方向为心脏磁共振及肌骨影像定量分析。

*王春华为本文通信作者。

非缺血性心肌病定义为除冠状动脉疾病外的原发性心肌病变,表现为心脏形态结构异常、心功能障碍的异质性心肌疾病,主要由遗传因素、代谢因素及心肌结构改变等导致,包括肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)、扩张型心肌病(dilated cardiomyopathy, DCM)、心肌淀粉样变性(cardiac amyloidosis, CA)等。MRI可以实现多方位、多参数扫描,具有优良的组织分辨率,能够对心脏客观成像,各指标具有可重复性,在心脏成像方面具有明显优势。心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)可以检测心功能及心肌组织特征,评估非缺血性心肌病患者的心功能障碍、心肌水肿及心肌纤维化的情况^[1-2]。尽管如此,当前常规MRI在非缺血性心肌病的应用仍然存在图像利用有限、肉眼观察不够敏感等局限性。影像组学是一种量化图像数据的新兴技术,近来在心脏疾病诊断及预测方面显示出巨大潜力^[3]。CMR影像组学分析可以定量分析肉眼无法辨别的微小变化,从而提高影像学在疾病诊断、鉴别诊断及预后预测方面的应用价值^[4-6]。目前,已有不少增强及非增强CMR序列的影像组学分析在非缺血性心肌病中的应用研究报告,本文将对CMR影像组学在非缺血性心肌病诊断及预后预测中应用价值的相关研究进行综述。

1 影像组学概述

影像组学是一门具有广阔应用前景的新技术,其通过对医学图像的深度挖掘来提取高通量的定量特征,从而用于疾病诊断和预后评估。影像组学的理论基础是医学图像中包含了大量客观和定量信息,而在常规临床实践中无法通过视觉完整获得这些信息,其目的是寻找肉眼无法发现的非侵入性影像学标志物,并将其应用于疾病诊断、亚型分类、预后评估及治疗管理^[7]。影像组学分析的主要步骤包括图像采集、图像重建、图像预处理、图像分割、特征提取、特征筛选、模型建立及统计分析,目前在心脏疾病领域受到越来越多的关注。

影像组学的每个步骤都十分重要,其中以图像采集尤为重要,实施标准化图像数据采集有利于研究可重复性的提高及研究结论的推广。获取原始图像后,可通过部分序列进行后处理,例如 T_1 mapping、 T_2 mapping序列。在图像分割之前或之后进行预处理,处理方式包括归一化、重采样、离散化、空间滤

波、信号强度矫正等^[8]。图像分割方式包含手动、半自动、全自动,提高图像分割效率和准确度也是CMR影像组学研究的热点之一^[9-10]。图像分割好后可以得到大量影像组学特征,分为一阶统计特征、形状特征、纹理特征和高阶统计特征。一阶统计特征描述图像感兴趣区的强度特点,如峰度、偏度、标准差、均值、方差。形状特征描述感兴趣区的大小,如体积、表面积、二维直径和三维直径。纹理特征考虑了像素的特点及相互关系,如直方图、灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)、灰度游程长度矩阵(gray level run-length matrix, GLRLM)、灰度非均匀度(gray level non-uniformity, GLNU)、小波等^[4,11]。高阶统计特征是在对图像进行滤波或数学变换后,分析多个像素之间的关系和差异^[7]。特征提取后筛选出最优的影像组学特征,然后构建模型计算分类效能。

2 CMR影像组学在HCM中的应用研究

HCM是一种常见的常染色体显性遗传性心肌疾病,先进的干预措施和药物治疗能够有效管理HCM患者的临床症状,但是患者仍然可发生严重并发症,例如室性心律失常、心源性猝死等^[12]。CMR有助于诊断HCM及预测患者的预后,影像组学分析手段增加了心脏定量特征,有利于提高诊断及预测效能。

2.1 在HCM诊断中的应用 有学者基于 T_1 WI-CMR图像提取纹理特征,发现HCM患者的部分纹理特征与健康志愿者不同,包括特征GLNU、低频子带小波能量系数(WavEnLL)、分数(Fraction)、和平均(SumAver),其中 $GLNU \geq 46$ 诊断HCM的敏感度和特异度分别为94%和90%,诊断钆对比剂延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)阴性HCM的敏感度和特异度分别为100%、90%^[13]。Amano等^[12]通过 T_2 WI-CMR纹理分析发现,HCM患者和健康对照人群的 T_2 值无明显差异,而GLNU却能够很好地区别HCM患者和健康对照人群,其截断值取64.7时曲线下面积(area under the curve, AUC)为0.93。Thornhill等^[14]分析了HCM患者的LGE-CMR影像组学特征,发现患者肥厚节段的游程非均匀度(run-length non-uniformity, RLNU)和GLNU高于非肥厚节段,且HCM患者的非肥厚非纤维化节段RLNU和GLNU均高于正常人群。

2.2 在HCM鉴别诊断中的应用 CMR影像组学在HCM的鉴别诊断方面也具有重要意义,包括鉴别不

同特征的HCM及鉴别HCM与其他疾病。LGE技术可作为检测纤维化组织的有力工具,LGE-CMR在区别HCM病因方面具有重要作用^[15]。HCM患者需要反复接受CMR检查,而多次使用钆对比剂可导致钆累积而对机体产生不良影响。Neisius等^[5]利用T₁ mapping-CMR影像组学特征区分LGE阳性和阴性HCM患者,发现基于1个GLRLM、1个GLCM和3个局部二值模式(local binary pattern, LBP)特征构建的决策树分类器可以识别出100%的LGE阳性患者和37%的LGE阴性患者。Mancio等^[16]则利用cine-CMR影像组学特征、心功能结合机器学习模型来区分LGE阳性和阴性HCM患者,最终筛选出7个最佳影像组学特征来建立XGBoost模型,发现该模型的AUC为0.83,敏感度和特异度分别为91%、62%。由此可见,基于CMR影像组学特征的模型在识别心肌纤维化HCM患者方面具有较好的效能,有利于减少不必要的钆对比剂使用。Wang等^[17]发现基于初始T₁ mapping图像的影像组学分析能够很好地鉴别不同基因突变相关性HCM,即β-肌球蛋白重链7基因突变相关性HCM和β-肌球蛋白结合蛋白C3基因突变相关性HCM,其鉴别效能优于传统的初始T₁值。Neisius等^[18]利用初始T₁ mapping影像组学特征鉴别HCM和高血压心脏病,筛选出的6个重要特征的最大鉴别准确度为86.2%,鉴别能力优于初始T₁值。Shi等^[19]也发现基于CMR T₁ mapping和细胞外容积(extracellular volume, ECV)图像的纹理分析不仅可以有效鉴别HCM患者与正常人群,还可鉴别HCM与高血压心脏病。

2.3 在HCM预后预测中的应用 除了诊断和鉴别诊断,影像组学在HCM患者的预后预测中也具有一定的应用价值。Cheng等^[4]通过LGE-CMR影像组学特征预测收缩功能不全HCM患者的预后,发现筛选出的3个特征(X0_H_skewness、X0_GLCM_cluster_tendency、X0_GLRLM_energy)可以预测患者的无事件生存情况。Amano等^[20]发现LGE-CMR的纹理特征LGE_entropy LL可预测HCM患者是否发生室性心动过速。Alis等^[21]则通过机器学习预测HCM患者是否发生室性心动过速,发现K最近邻分类器预测室性心动过速的效能最高,敏感度、特异度、准确度分别为95.2%、93.0%、94.1%,该机器学习共包含8个特征(6个GLCM、1个GLRLM、1个Gabor变换特征)。Amano等^[12]也发现,T₂短反转时间反转恢复序列图像的纹理分析是定量分析HCM患者心肌组织改变的有效手段,其中

GLNU不仅可反映心肌组织的不均匀性,还可区别异常高信号(abnormal hyperintensity, AHI)肥厚区域与非AHI肥厚区域,而AHI是预测LGE阳性HCM患者发生非持续性室性心动过速的独立因子。此外,Wang等^[22]发现,从LGE-CMR图像中提取出可反映瘢痕异质性的特征LBP(19)、Moment(1),是预测HCM患者心源性猝死的独立因子,其中LBP(19)≥4.27、Moment(1)≥4.26的患者更容易发生心源性猝死。Fahmy等^[23]基于LGE-CMR影像组学特征构建了心肌LGE影像组学模型,发现该模型对HCM患者的心源性猝死发生风险具有较好的预测效能,且优于欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology, ESC)或美国心脏病学会(American College of Cardiology, ACC)/美国心脏病学会(American Heart Association, AHA)风险模型,将影像组学特征与ESC或ACC/AHA模型整合后,预测效能又进一步得到提高。

2.4 HCM相关CMR影像组学方法的优化 近年来,学者们除了关注影像组学在HCM诊断和预后预测效能方面的应用价值,还针对影像组学方法的优化开展研究。Marfisi等^[8]分析了7个重采样体素、9个箱宽、7个空间滤波器对HCM患者影像组学特征的影响,发现T₁ mapping和T₂ mapping心肌影像组学特征对图像滤波器有显著的依赖性,对重采样体素/面箱宽敏感度有限,同时T₂ mapping的影像组学特征对图像预处理的敏感度低于T₁ mapping。Campello等^[3]对来自5个不同中心的HCM患者和健康志愿者的CMR图像进行归一化处理及研究,结果表明特征协调技术ComBat能够去除由多中心导致的影像组学特征变异,但是会略微降低分类效能,而分段线性直方图匹配归一化可使影像组学特征在分类时具有更强的泛化能力。Pu等^[24]利用HCM患者的CMR图像建立了5个预测模型:使用逻辑回归和共线性分析在训练集中选择具有显著差异的CMR成像参数构建CMR模型;利用XGBoost筛选的影像组学特征分别构建基于最大室壁厚度层面和整个左心室心肌的R1模型和R2模型;通过逻辑回归将CMR模型与R1模型或R2模型整合,建立I_{CMR+R1}模型和I_{CMR+R2}模型。结果表明I_{CMR+R2}模型识别LGE阳性HCM患者的效能优于其他模型,AUC、准确度、敏感度分别为0.90、89.0%、92.5%^[24]。

总之,CMR影像组学在HCM中的应用十分广泛,包括诊断、鉴别诊断、预后预测等,而对影像组学方法的不断优化,有利于提高对HCM的早期检测、风险分层和个性化管理。

3 CMR 影像组学在 DCM 中的应用研究

DCM 是一种以左心室或双心室扩张和收缩功能障碍为特征的严重疾病,临床表现具有高度异质性,利用 CMR 诊断 DCM、预测 DCM 相关不良事件的发生具有重要意义。Zhang 等^[25]基于 10 种特征筛选方法和 9 种分类器的不同组合构建了 90 个分类模型来区分 DCM、HCM 和健康志愿者,最终利用随机森林最小冗余最大相关模型筛选出 9 个最优特征,包括 LeastAxisLength、Maximum2DDiameterSlice、Median、MinorAxisLength、Sphericity、VoxelVolume、Kurtosis、Flatness 和 Skewness,分类准确度达到 91.2%。Muthalaly 等^[26]发现,左心室平均熵可以改善临床指标及 LGE 质量对 DCM 患者发生心力衰竭的预测能力,可以作为一个预测 DCM 患者不良心血管事件的新型标志物。Shu 等^[27]纳入 114 例左心室射血分数严重降低(<35%)的 DCM 患者进行回顾性分析,发现 3 个与 LGE 异质性和变化相关的纹理特征(GLCM_contrast、GLCM_difference average、GLCM_difference entropy)可以作为预测 DCM 患者临床不良结局(全因死亡或心脏移植)的新型标志物。Zhang 等^[28]发现 T₁ mapping 影像组学特征也能够很好地预测 DCM 患者全因死亡和心脏移植的发生风险,基于影像组学特征、临床指标、常规 MRI 参数所建立的随机森林模型可获得更佳的预测效能,AUC 和 F1 评分分别为 0.95 和 0.89。Chang 等^[29]还发现非增强 T₁ mapping-CMR 影像组学特征可提高临床指标对 DCM 患者左心室重构的预测能力。Suyama 等^[30]采用 ECV 图像进行纹理分析,发现平均 ECV 是评估 DCM 患者是否存在左心室重构的重要纹理特征,使用支持向量机模型有助于发现指南导向药物治疗耐药的高危 DCM 患者。总之,CMR 影像组学有助于提高诊断 DCM 及预测不良心血管事件的临床效能,为提高 DCM 患者生存质量提供重要的影像学依据。

4 CMR 影像组学在 CA 中的应用研究

CA 是一种常见的限制型心肌病,表现为非扩张的左心室舒张功能障碍,并伴有心房扩张,可并发心力衰竭。CA 患者的预后通常较差,因此不同 CMR 指标对 CA 的诊断和预后预测极为重要。Zhou 等^[31]采用 Boruta 算法筛选 CA 患者的不同区域 LGE-CMR 影像组学特征并构建 XGBoost 模型,结果显示基于基底段 LGE-CMR 影像组学特征构建的模型诊断 CA 的 AUC 最高,在训练集、内部验证集和外部验证集中 AUC 分别为 0.92、0.89 和 0.92,优于肉眼评估和 LGE 定量参数。除了诊断 CA,CMR 影像组学在 CA 与其

他疾病的鉴别诊断中也具有较好的应用价值。既往有学者对 CA 和 HCM 患者的 cine-CMR 图像进行纹理分析,发现两者的偏度、峰度、熵值差异具有统计学意义,在中等纹理过滤的条件下室间隔熵值是鉴别效能最好的参数,AUC、敏感度、特异度、符合率分别为 0.87、87.2%、90.9%、88.0%^[32]。Jiang 等^[33]也利用 cine-CMR 影像组学特征鉴别 CA 和 HCM,发现 GLNU 是最优特征,CA 患者的 GLNU 低于 HCM 患者,当 GLNU \geq 25 时准确度为 85%、AUC 为 0.86,与常规 MRI 参数联合鉴别时 AUC 能达到 0.89。此外,LGE 阳性 CA 患者的 GLNU 也显著高于 LGE 阴性 CA 患者^[32]。Huang 等^[34]的研究表明,T₂WI-CMR 纹理分析可以有效鉴别 CA 和 HCM,最终筛选出的 7 个纹理特征可以获得与 LGE 分析相当的鉴别能力。Schofield 等^[35]采用舒张末中间段的增强 cine-CMR 图像进行纹理分析,结果显示 CA 与 HCM、高血压性左心室肥厚、动脉硬化纹理特征存有差异。Antonopoulos 等^[36]发现,在内部验证集和外部验证集中,T₁ mapping 影像组学特征在鉴别 CA 患者、HCM 患者、左心室肥厚患者、健康志愿者中均显示出良好的效能(AUC 为 0.75)。Zhou 等^[37]发现,与定量 LGE 参数相比,LGE-CMR 影像组学能更好地预测 CA 患者的全因死亡发生风险,而影像组学特征联合 Mayo 分期预测时可获得更高的准确度。总之,CMR 影像组学特征可为诊断 CA、预测 CA 相关不良临床事件提供更多有意义的参考。

5 CMR 影像组学在其他非缺血性心肌病中的应用研究

Mannil 等^[38]纳入 58 例 Takotsubo 综合征(Takotsubo syndrome, TTS)患者,通过 LGE-CMR 和 T₂WI-CMR 图像纹理分析来预测主要不良心脑血管事件,共降维筛选出 10 个最优 T₂WI-CMR 纹理特征,基于这 10 个纹理特征构建的朴素贝叶斯分类器获得最好的预测效能,敏感度为 82.9%,特异度为 83.7%,AUC 为 0.88。这是首个关于 T₂WI-CMR 影像组学预测 TTS 临床不良结局的研究,提示影像组学特征可以作为预测 TTS 患者不良临床事件的标志物。Wu 等^[39]对系统性红斑狼疮患者的初始 T₁ mapping 图像进行影像组学分析,发现影像组学特征 S_{33_sum average}越高的患者越容易发生射血分数保留的心力衰竭(heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF),S_{33_sum average} 预测 HFpEF 的效能优于平均 ECV 值。今后,CMR 影像组学将应用于更多非缺血性心肌病的研究,提高疾病诊断效能及相关事件的预测效能。

6 小结与展望

影像组学是十分有潜力的图像定量分析新技术,可以提高CMR检查诊断非缺血性心肌病和预测不良临床结局的能力,相比于肉眼观察,可提供更多的客观影像学信息。然而,CMR影像组学目前尚处于概念验证性研究阶段,主要存在以下局限性:(1)图像难以实现标准化采集,医疗机构图像采集使用的设备生产商、场强、扫描参数各不相同。(2)影像组学特征筛选、模型构建的方法多种多样,难以统一,使得各个研究的可重复性及推广性降低。(3)影像组学的各个特征存在可解释性问题,难以用病理学、生理学进行精确诠释,需要进一步深入研究,阐述各个特征在生物学上的意义。(4)目前的研究存在样本量较小、样本来源单一、仅进行回顾性分析等问题,论证力度有待提高,今后需要更多大样本、前瞻性、多中心、多学科交叉的研究进一步全面论证。

虽然CMR影像组学目前还存在诸多限制,尚不能广泛应用于非缺血性心肌病的诊疗,但是CMR影像组学在非缺血性心肌病中的应用潜力是无限的,其可以增加大量传统CMR参数以外的客观信息,尤其增加了非对比剂CMR的定量特征,为临床提供更多影像学标志物,为不能使用钆对比剂的患者提供了更多选择。随着人工智能技术的进步,影像组学与病理组学、蛋白组学、代谢组学、基因组学的融合越来越深入,有助于研究者们识别不同非缺血性心肌病的新型生物标志物、治疗靶点和预测指标,促进对非缺血性心肌病发病及进展过程的理解、患者个体化治疗的实现。总之,CMR影像组学在非缺血性心肌病中具有良好的临床应用前景,有助于开发更有针对性和更有效的治疗策略,最终改善非缺血性心肌病患者的临床结局。

参 考 文 献

- [1] O'Brien AT, Gil KE, Varghese J, et al. T2 mapping in myocardial disease: a comprehensive review[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2022, 24(1):33.
- [2] Wang CH, Zheng J, Sun JY, et al. Endogenous contrast T1rho cardiac magnetic resonance for myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy patients[J]. J Cardiol, 2015, 66(6):520-526.
- [3] Campello VM, Martín-Isla C, Izquierdo C, et al. Minimising multi-centre radiomics variability through image normalisation: a pilot study[J]. Sci Rep, 2022, 12(1):12532.
- [4] Cheng SN, Fang MJ, Cui C, et al. LGE-CMR-derived texture features reflect poor prognosis in hypertrophic cardiomyopathy patients with systolic dysfunction: preliminary results[J]. Eur Radiol, 2018, 28(11):4615-4624.
- [5] Neisius U, El-Rewaidy H, Kucukseymen S, et al. Texture signatures of native myocardial T1 as novel imaging markers for identification of hypertrophic cardiomyopathy patients without scar[J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 52(3):906-919.
- [6] Raisi-Estabragh Z, Izquierdo C, Campello VM, et al. Cardiac magnetic resonance radiomics: basic principles and clinical perspectives[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21(4):349-356.
- [7] Polidori T, De Santis D, Rucci C, et al. Radiomics applications in cardiac imaging: a comprehensive review[J]. Radiol Med, 2023, 128(8):922-933.
- [8] Marfisi D, Tessa C, Marzi C, et al. Image resampling and discretization effect on the estimate of myocardial radiomic features from T1 and T2 mapping in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Sci Rep, 2022, 12(1):10186.
- [9] Wang XC, Wang FS, Niu YM. Two-stage CNN whole heart segmentation combining image enhanced attention mechanism and metric classification[J]. J Digit Imaging, 2023, 36(1):124-142.
- [10] Martín-Isla C, Campello VM, Izquierdo C, et al. Deep learning segmentation of the right ventricle in cardiac MRI: the M&Ms challenge[J]. IEEE J Biomed Health Inform, 2023, 27(7):3302-3313.
- [11] Larroza A, Materka A, López-Lereu MP, et al. Differentiation between acute and chronic myocardial infarction by means of texture analysis of late gadolinium enhancement and cine cardiac magnetic resonance imaging[J]. Eur J Radiol, 2017, 92:78-83.
- [12] Amano YS, Yanagisawa F, Omori Y, et al. Detection of myocardial tissue alterations in hypertrophic cardiomyopathy using texture analysis of T₂-weighted short inversion time inversion recovery magnetic resonance imaging[J]. J Comput Assist Tomogr, 2020, 44(3):341-345.
- [13] Baessler B, Mannil M, Maintz D, et al. Texture analysis and machine learning of non-contrast T1-weighted MR images in patients with hypertrophic cardiomyopathy - preliminary results[J]. Eur J Radiol, 2018, 102:61-67.
- [14] Thornhill RE, Cocker M, Dwivedi G, et al. Quantitative texture features as objective metrics of enhancement heterogeneity in hypertrophic cardiomyopathy[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2014, 16(Suppl 1):P351.
- [15] 胡瑞,李瑞,杨鹏程,等.心脏磁共振在诊断左室肥厚疾病中的临床应用进展[J].磁共振成像, 2022, 13(5):151-153, 170.
- [16] Mancio J, Pashakhanloo F, El-Rewaidy H, et al. Machine learning phenotyping of scarred myocardium from cine in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2022, 23(4):532-542.

- [17] Wang J, Yang FY, Liu WT, et al. Radiomic analysis of native T1 mapping images discriminates between MYH7 and MYBPC3-related hypertrophic cardiomyopathy [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 52(6):1714-1721.
- [18] Neisius U, El-Rewaidy H, Nakamori S, et al. Radiomic analysis of myocardial native T1 imaging discriminates between hypertensive heart disease and hypertrophic cardiomyopathy [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(10):1946-1954.
- [19] Shi RY, Wu R, An DAL, et al. Texture analysis applied in T1 maps and extracellular volume obtained using cardiac MRI in the diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy and hypertensive heart disease compared with normal controls [J]. *Clin Radiol*, 2021, 76(3):236.e9-236.e19.
- [20] Amano YS, Suzuki Y, Yanagisawa F, et al. Relationship between extension or texture features of late gadolinium enhancement and ventricular tachyarrhythmias in hypertrophic cardiomyopathy [J]. *Biomed Res Int*, 2018, 2018:4092469.
- [21] Alis D, Guler A, Yergin M, et al. Assessment of ventricular tachyarrhythmia in patients with hypertrophic cardiomyopathy with machine learning-based texture analysis of late gadolinium enhancement cardiac MRI [J]. *Diagn Interv Imaging*, 2020, 101(3):137-146.
- [22] Wang J, Bravo L, Zhang JQ, et al. Radiomics analysis derived from LGE-MRI predict sudden cardiac death in participants with hypertrophic cardiomyopathy [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8:766287.
- [23] Fahmy AS, Rowin EJ, Jaafar N, et al. Radiomics of late gadolinium enhancement reveals prognostic value of myocardial scar heterogeneity in hypertrophic cardiomyopathy [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2024, 17(1):16-27.
- [24] Pu C, Hu X, Lv S, et al. Identification of fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy: a radiomic study on cardiac magnetic resonance cine imaging [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(4):2301-2311.
- [25] Zhang XX, Cui CX, Zhao SF, et al. Cardiac magnetic resonance radiomics for disease classification [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(4):2312-2323.
- [26] Muthalaly RG, Kwong RY, John RM, et al. Left ventricular entropy is a novel predictor of arrhythmic events in patients with dilated cardiomyopathy receiving defibrillators for primary prevention [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(7 Pt 1):1177-1184.
- [27] Shu SL, Wang C, Hong ZM, et al. Prognostic value of late enhanced cardiac magnetic resonance imaging derived texture features in dilated cardiomyopathy patients with severely reduced ejection fractions [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8:766423.
- [28] Zhang J, Xu YW, Li WH, et al. The predictive value of myocardial native T1 mapping radiomics in dilated cardiomyopathy: a study in a Chinese population [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 58(3):772-779.
- [29] Chang S, Han K, Kwon Y, et al. T1 Map-based radiomics for prediction of left ventricular reverse remodeling in patients with nonischemic dilated cardiomyopathy [J]. *Korean J Radiol*, 2023, 24(5):395-405.
- [30] Suyama S, Kato S, Nakaura T, et al. Machine learning to predict left ventricular reverse remodeling by guideline-directed medical therapy by utilizing texture feature of extracellular volume fraction in patients with non-ischemic dilated cardiomyopathy [J]. *Heart Vessels*, 2023, 38(3):361-370.
- [31] Zhou XY, Tang CX, Guo YK, et al. Diagnosis of cardiac amyloidosis using a radiomics approach applied to late gadolinium-enhanced cardiac magnetic resonance images: a retrospective, multicohort, diagnostic study [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9:818957.
- [32] 江舒, 张吉沐阳, 王怡宁, 等. 纹理分析用于心肌淀粉样变性和肥厚型心肌病鉴别诊断的可行性研究 [J]. *放射学实践*, 2017, 32(12):1225-1228.
- [33] Jiang S, Zhang LL, Wang J, et al. Differentiating between cardiac amyloidosis and hypertrophic cardiomyopathy on non-contrast cine-magnetic resonance images using machine learning-based radiomics [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9:1001269.
- [34] Huang S, Shi K, Zhang Y, et al. Texture analysis of T2-weighted cardiovascular magnetic resonance imaging to discriminate between cardiac amyloidosis and hypertrophic cardiomyopathy [J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2022, 22(1):235.
- [35] Schofield R, Ganeshan B, Fontana M, et al. Texture analysis of cardiovascular magnetic resonance cine images differentiates aetiologies of left ventricular hypertrophy [J]. *Clin Radiol*, 2019, 74(2):140-149.
- [36] Antonopoulos AS, Boutsikou M, Simantiris S, et al. Machine learning of native T1 mapping radiomics for classification of hypertrophic cardiomyopathy phenotypes [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):23596.
- [37] Zhou XY, Tang CX, Guo YK, et al. Late gadolinium enhanced cardiac MR derived radiomics approach for predicting all-cause mortality in cardiac amyloidosis: a multicenter study [J]. *Eur Radiol*, 2023, 34(1):402-410.
- [38] Mannil M, Kato K, Manka R, et al. Prognostic value of texture analysis from cardiac magnetic resonance imaging in patients with Takotsubo syndrome: a machine learning based proof-of-principle approach [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):20537.
- [39] Wu LM, Shi RY, Wu CW, et al. A radiomic MRI based nomogram for prediction of heart failure with preserved ejection fraction in systemic lupus erythematosus patients: insights from a three-center prospective study [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 56(3):779-789.

(收稿日期:2023-11-18 修回日期:2024-01-27)