

# 心脏磁共振在轻链型淀粉样变预后评估及风险分层中的研究进展

王银秋 彭礼清

(四川大学华西医院放射科, 四川 成都 610041)

**【摘要】** 轻链型淀粉样变是一种由免疫球蛋白轻链聚集形成的淀粉样原纤维在组织及器官中沉积并引起组织器官损伤的系统性疾病, 心脏受累是患者预后的决定性因素。因此, 心脏受累程度的准确评估对于轻链型淀粉样变患者的预后评估及风险分层至关重要。电影成像、灌注成像、延迟强化、T1 mapping 等不同心脏磁共振成像技术可以从多个方面评估轻链型淀粉样变患者的心脏受累程度, 为患者预后评估及风险分层提供重要价值。现就心脏磁共振在轻链型淀粉样变患者的预后评估及风险分层中的研究进展予以综述。

**【关键词】** 轻链型淀粉样变; 心脏磁共振; 磁共振成像; 预后; 风险分层

**【DOI】** 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.08.007

## Application of Cardiac Magnetic Resonance in Prognosis and Risk Stratification in Light-Chain Amyloidosis

WANG Yinqiu, PENG Liqing

(Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**【Abstract】** Light-chain amyloidosis is a systemic disease, caused by tissue deposition of insoluble amyloid fibrils made up of immunoglobulin light chain that leads to organ dysfunction. Cardiac involvement is a key determinant of patient survival. Therefore, accurate assessment of the degree of cardiac involvement is essential for the prognosis and risk stratification of patients with light-chain amyloidosis. Different cardiac magnetic resonance imaging techniques such as cine imaging, perfusion imaging, late gadolinium enhancement and T1 mapping can assess the degree of cardiac involvement from in various aspects, which can provide important value for prognosis and risk stratification in patients with light-chain amyloidosis. In this article, we review the application of cardiac magnetic resonance in the prognosis and risk stratification of patients with light-chain amyloidosis.

**【Keywords】** Light-chain amyloidosis; Cardiac magnetic resonance; Magnetic resonance imaging; Prognosis; Risk stratification

轻链型淀粉样变是由免疫球蛋白轻链聚集形成的淀粉样原纤维在组织及器官中沉积并引起组织器官损伤所致的系统性疾病<sup>[1]</sup>。心脏是最常受累的器官之一, 心脏受累是所有受累器官中预后最差的<sup>[2]</sup>。目前由梅奥诊所建立的 Mayo 分期系统在临床患者管理中的应用较为广泛<sup>[3]</sup>。但 Mayo 分期中所使用的 N 末端脑钠肽前体 (N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP) 和心肌肌钙蛋白 T 不具有特异性, 且易受肝肾功能、化学治疗药等多种因素的干扰<sup>[4]</sup>, 因此, 仅依赖血清生物标志物的预后分期系统对临床医生做出准确的治疗决策仍然具有挑战性。

心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 作为一种多参数、多序列的成像方式, 目前已经被广泛应用于心脏疾病的评估<sup>[5]</sup>。CMR 在轻链型淀粉样变

患者预后评估中的重要性日渐受到人们的重视, 研究人员在该方面做了许多探索。现就 CMR 的各项临床技术在轻链型淀粉样变患者预后评估的研究进展综述如下。

### 1 CMR 电影成像在轻链型淀粉样变预后评估中的价值

#### 1.1 心脏功能与预后

在轻链型淀粉样变中, 当心脏受累时, 淀粉样蛋白在心肌组织中聚集可导致室壁增厚、僵硬, 从而导致心室舒张功能障碍, 并进一步导致心房功能障碍, 对患者预后产生不良影响, 因此对心室及心房功能评估可以为患者提供预后评估及风险分层价值<sup>[6]</sup>。CMR 电影成像可用于评估心脏解剖结构、室壁运动、心房和心室功能, 它被认为是无创性评估心脏形态和

功能的金标准。

### 1.1.1 左心室功能与预后

心肌收缩分数 (myocardial contraction fraction, MCF) 和左心室整体功能指数 (left ventricular global function index, LVGFI) 是反映左心室功能的定量指标, 它们是左心室功能改变与结构改变信息的结合, 可以更全面地反映左心室功能障碍的病理生理学机制。

Arenja 等<sup>[7]</sup> 纳入了 74 个轻链型淀粉样变患者研究发现, MCF 是全因死亡及全因死亡和心脏移植的复合终点事件的独立预测因子 ( $HR = 0.97, P = 0.002$ ;  $HR = 0.96, P < 0.001$ ), MCF  $\leq 56.6\%$  的患者死亡和心脏移植的风险显著增高。在另一项研究中, Miao 等<sup>[8]</sup> 发现 MCF  $< 39\%$  ( $HR = 10.266, P < 0.001$ ) 和 LVGFI  $< 26\%$  ( $HR = 9.267, P < 0.001$ ) 是轻链型淀粉样变患者死亡的独立危险因素。

### 1.1.2 左心房功能与预后

Mohty 等<sup>[9]</sup> 发现较低的左心房排空分数 (left atrial emptying fraction, LAEF) 患者与较高的 2 年死亡风险独立相关 ( $HR = 1.08, P = 0.003$ ), LAEF  $\leq 16\%$  是患者死亡的独立预测指标 ( $HR = 7.63, P = 0.0006$ )。

### 1.1.3 心脏瓣膜平面位移水平

心脏瓣膜平面位移水平是指各个瓣环区舒张末期到收缩末期位移的距离, 是评估心脏功能的指标。Ochs 等<sup>[10]</sup> 在一项回顾性研究中发现, 与其他心脏瓣膜平面位移水平相比, 主动脉瓣前瓣收缩位移为全因死亡率和心脏移植提供了最佳的预测价值 ( $HR = 0.10, \chi^2 = 15.6, P = 0.0002$ ), 并且它能够显著提高临床预测模型和影像预测模型的预测能力。

## 1.2 心肌应变与预后

特征追踪是一项基于 CMR 电影序列衍生的组织追踪新技术, 它可以通过应变、应变率等参数定量评估心肌的运动和变形, 客观地量化和表征心肌功能, 与传统的心脏功能指标相比, 它对于早期心功能障碍的检测更为敏感<sup>[11]</sup>。

### 1.2.1 左心室应变与预后

Illman 等<sup>[12]</sup> 回顾性分析了 76 例轻链型淀粉样变患者左心室整体纵向、周向和径向应变, 发现在调整了 Mayo III 期后, 左心室整体纵向应变 ( $HR = 1.07, P = 0.04$ )、周向应变 ( $HR = 1.09, P = 0.03$ ) 和径向应变 ( $HR = 0.96, P = 0.02$ ) 仍然是轻链型淀粉样变患者死亡的预测因子。Wan 等<sup>[13]</sup> 研究发现轻链型淀粉样变患者的左心室整体纵向、周向和径向应变均低于正常对照组, 在多因素 Cox 回归分析中显示周向应变是患者全因死亡的独立预测因子, 周向应变每降低 1%, 患者的死亡风险增加 1.16 倍。Arenja 等<sup>[7]</sup> 单独分析了

左心室长轴应变在轻链型淀粉样变患者中的风险分层的价值, 发现左心室长轴应变与全因死亡和心脏移植的复合终点事件独立相关 ( $HR = 1.05, P < 0.001$ )。

### 1.2.2 左心房应变与预后

Lu 等<sup>[14]</sup> 发现左心房功能受损程度与轻链型淀粉样变患者的淀粉样蛋白负荷相关。Tan 等<sup>[15]</sup> 发现, 在轻链型淀粉样变中, 心脏受累患者的左心房整体应变、被动应变和主动应变均较心脏未受累的患者降低, 在调整混杂变量后, 左心房整体应变降低仍是患者死亡的独立危险因素 ( $HR = 0.866, P = 0.027$ ), 并且左心房整体应变可以为淀粉样蛋白中度负荷的患者提供附加的预后价值。

### 1.2.3 右心室应变与预后

Wan 等<sup>[16]</sup> 在研究中使用了右室射血分数、分数面积变化、长轴应变、游离壁纵向应变、整体纵向应变、三尖瓣环收缩期位移这 6 个参数来量化轻链型淀粉样变患者的右心室功能并且比较了它们的预后价值, 发现右心室游离壁纵向应变在区分死亡患者和生存患者方面效果最好, 其曲线下面积 (area under the curve, AUC) 为 0.792, 在调整了纽约心功能分级 (New York Heart function association, NYHA)、Mayo 分期等参数后, 右心室游离壁纵向应变仍与患者死亡独立相关。Li 等<sup>[17]</sup> 分析了轻链型淀粉样变患者右心室整体纵向、周向和径向应变, 发现右心室整体纵向应变降低与患者全因死亡独立相关 ( $HR = 1.10, P = 0.047$ )。

## 2 CMR 首过灌注成像在轻链型淀粉样变预后评估中的价值

除了心功能受损外, 轻链型淀粉样变患者还可能出现肺血流动力学异常, 且与预后不良有关<sup>[18]</sup>。CMR 首过灌注成像可以用于反映心脏和肺血流动力学, 最近一个基于首过灌注序列的新指标——肺通过时间 (pulmonary transit time, PTT) 被引入研究用来评价心肺功能<sup>[19-21]</sup>。Bi 等<sup>[22]</sup> 对 226 例轻链型淀粉样变患者进行了中位随访时间为 35 个月的前瞻性队列研究, 发现在分别调整了临床变量 ( $HR = 1.061, P = 0.003$ )、生物标志物 ( $HR = 1.055, P = 0.008$ )、CMR 相关变量 ( $HR = 1.077, P < 0.001$ ) 及治疗方式 ( $HR = 1.063, P = 0.001$ ) 后, PTT 仍是患者全因死亡的独立预测因子, 此外, 研究还发现 PTT 可以为 Mayo III 期及 NYHA III 级的患者的风险分层提供附加价值。

## 3 CMR 延迟强化成像在轻链型淀粉样变预后评估中的价值

CMR 延迟强化 (late gadolinium enhancement, LGE) 成像的本质是不能进入心肌细胞的钆对比剂在心肌细胞间质积聚, 正常心肌细胞间质容积较小, 钆

对比剂分布容积很小,当心肌细胞间质扩大,钆对比剂分布容积增加,因此异常心肌组织在 LGE 成像上表现为高信号,与肥厚型心肌病、扩张型心肌病等非缺血性心肌病不同的是,心肌淀粉样变患者的细胞外间质扩大是由于淀粉样原纤维的浸润所致,而非心肌纤维化<sup>[23]</sup>。广泛透壁 LGE 和心内膜下 LGE 是心肌淀粉样变最常见的类型,LGE 在淀粉样变患者诊断及预后评估中具有重要价值<sup>[24]</sup>。

### 3.1 LGE 阳性与预后

Wan 等<sup>[25]</sup>纳入了 61 例轻链型淀粉样变患者,发现右心室收缩末期容积指数及右心室 LGE ( $HR = 2.814, P = 0.037$ ) 是心脏受累的轻链型淀粉样变患者全因死亡的独立预测因子,在轻链型淀粉样变患者中,右心室 LGE 仍然是全因死亡的独立预测因子。Li 等<sup>[17]</sup>也发现左心室及右心室 LGE 阳性都是轻链型淀粉样变患者发生全因死亡的独立预测因子。

### 3.2 LGE 类型与预后

Boynton 等<sup>[26]</sup>将轻链型淀粉样变患者的 LGE 类型分为了广泛性 LGE、局灶斑片状 LGE 及无 LGE 三种,发现广泛性 LGE 患者的死亡率最高,在调整了 Mayo 分期后,广泛性 LGE 仍然与全因死亡独立相关 ( $HR = 2.03, P = 0.05$ )。Lin 等<sup>[27]</sup>也发现广泛性 LGE 是轻链型淀粉样变患者全因死亡的独立预测因子 ( $HR = 4.804, P = 0.001$ )。

### 3.3 QALE 评分与预后

QALE (query amyloid late enhancement) 评分是一个由 Dungu 等<sup>[28]</sup>设计的评估心肌淀粉样变患者 LGE 程度的半定量评分系统。Wan 等<sup>[29]</sup>研究了该评分在轻链型淀粉样变患者中的预后价值,发现 QALE 评分  $\geq 9$  分的患者死亡率高于 QALE 评分  $< 9$  分的患者,在多因素 Cox 回归分析中,QALE 评分  $\geq 9$  分是全因死亡的独立预测因子 ( $HR = 5.997, P < 0.001$ )。

## 4 T1 mapping 在轻链型淀粉样变预后评估中的价值

LGE 可以对心肌细胞间质中淀粉样蛋白沉积进行定性及半定量评估,但是部分存在心肌细胞间质淀粉样蛋白沉积的患者 LGE 表现为阴性,LGE 无法准确评估心脏受累的程度。T1 mapping 可以测量图像中每个体素的 T1 信号(T1 弛豫时间,单位为 ms),通过初始 T1 值和增强后 T1 值可以计算细胞外容积 (extracellular volume, ECV),并且定量评估心肌淀粉样蛋白负荷<sup>[30]</sup>。ECV 反映心肌细胞间质的信息,T1 值反映心肌细胞间质和心肌细胞二者的信息,而淀粉样蛋白主要沉积在细胞间质,因此,ECV 在定量评估淀粉样蛋白负荷方面更加准确<sup>[31]</sup>。

### 4.1 左心室初始 T1 值和 ECV 与预后

Banypersad 等<sup>[32]</sup>对 100 例轻链型淀粉样变患者的研究中发现,ECV  $> 45\%$  是患者死亡的独立预测因子 ( $HR = 4.41, P < 0.01$ )。Lin 等<sup>[27]</sup>也发现 ECV  $\geq 44\%$  是全因死亡的独立预测因子,并且 ECV  $\geq 44\%$  能对相同 LGE 类型亚组的患者进一步风险分层。Miao 等<sup>[33]</sup>发现 ECV (每增加 10%,死亡风险增加 2.087 倍)和初始 T1 值(每增加 100 ms,死亡风险增加 2.443 倍)都是轻链型淀粉样变患者死亡的独立预测因子,该研究还发现了在 ECV  $> 40\%$  的患者中,与常规化疗的患者相比,接受自体干细胞移植的患者有更高的心脏和肾脏应答率。

Wan 等<sup>[34]</sup>分别研究了左心室基底部、中部及心尖部 ECV 对轻链型淀粉样变患者全因死亡的影响,发现基底部 ECV 在预测患者死亡率方面效果最好 ( $AUC = 0.845$ ),并且基底部 ECV 与全因死亡独立相关,基底部 ECV 每增加 1%,患者的死亡风险增加 1.038 倍。

### 4.2 左心室初始 T1 值和 ECV 变化与预后

近来,关于 T1 mapping 最新的应用研究主要聚焦于其对轻链型淀粉样变化疗后的心脏淀粉样蛋白负荷改变的评估。Martinez-Naharro 等<sup>[35]</sup>前瞻性地纳入了 176 例心脏受累的轻链型淀粉样变患者,所有患者在确诊之后均接受了硼替佐米一线化疗,患者在确诊、化疗后 6、12 及 24 个月进行 CMR 检查,并根据 ECV 的变化将患者分为进展 (ECV 增加  $\geq 0.05$ )、稳定 (ECV 变化  $< 0.05$ ) 及消退 (ECV 下降  $\geq 0.05$ ),研究发现在调整了血液学反应、NT-proBNP 改变和整体纵向应变改变后,化疗后 6 个月的 ECV 的进展仍然可以预测患者的死亡 ( $HR = 3.82, P < 0.001$ )。随后,同一中心的 Ioannou 等<sup>[36]</sup>根据初始 T1 值的变化将患者分为初始 T1 值降低 (初始 T1 值降低  $\geq 50$  ms)、初始 T1 值稳定 (初始 T1 值变化  $< 50$  ms) 及初始 T1 值增加 (初始 T1 值增加  $\geq 50$  ms),发现在调整了血液学反应和 NT-proBNP 改变后,化疗后 6 个月的初始 T1 值增加仍然是患者死亡的独立预测因子 ( $HR = 2.41, P = 0.003$ )。因此,左心室初始 T1 值和 ECV 变化可以作为化疗的轻链型淀粉样变患者死亡的重要预测因子。

### 5 T2 mapping 在轻链型淀粉样变预后评估中的价值

最近的一项研究<sup>[37]</sup>表明,淀粉样变患者心脏受累是淀粉样蛋白浸润和心肌水肿叠加的结果。因此,除了使用 T1 mapping 评估淀粉样蛋白浸润还可以使用 T2 mapping 评估心肌的水肿,能更全面评估心肌组织特征。Kotecha 等<sup>[38]</sup>发现 T2 值  $> 55$  ms 的患者生存率低于 T2 值  $< 55$  ms 的患者,在调整 ECV 和 NT-proBNP 后 T2 值仍然能独立预测患者的死亡 ( $HR = 1.32, P =$

0.02)。另一项研究<sup>[39]</sup>表明,与健康对照组相比,轻链型淀粉样变患者的 T2 值显著增加,但 T2 值对心肌淀粉样变患者的预后没有影响。T2 值在对轻链型淀粉样变患者的预后评估方面仍然存在争议,未来需要更多的研究来证明 T2 值在预后评估中的价值。

## 6 影像组学在轻链型淀粉样变预后评估中的价值

影像组学是一种新兴的影像分析技术,它可以通过高通量计算将医学图像转换为可挖掘的数据,通过对这些数据进行分析能够为疾病的诊断、鉴别诊断及预后提供重要的价值<sup>[40]</sup>。Zhou 等<sup>[41]</sup>在最近一项多中

心队列研究中,分别从 LGE 图像中左心室基底部、中部、心尖部及整体提取、筛选组学特征,并根据所选组学特征计算每个患者的放射组学评分(Rad-score),发现在验证集中,不同部位的 Rad-score 模型预测全因死亡的效果没有显著差异,Rad-score 模型的预后价值优于半定量的 QALE 模型及定量 LGE 模型,联合 Rad-score 模型和 Mayo 分期能够获得比单独 Mayo 分期更好的预测性能(AUC 0.86 vs 0.81,  $P=0.03$ )。基于 CMR 的影像组学能够为心脏受累的轻链型淀粉样变患者的风险分层提供额外的价值。

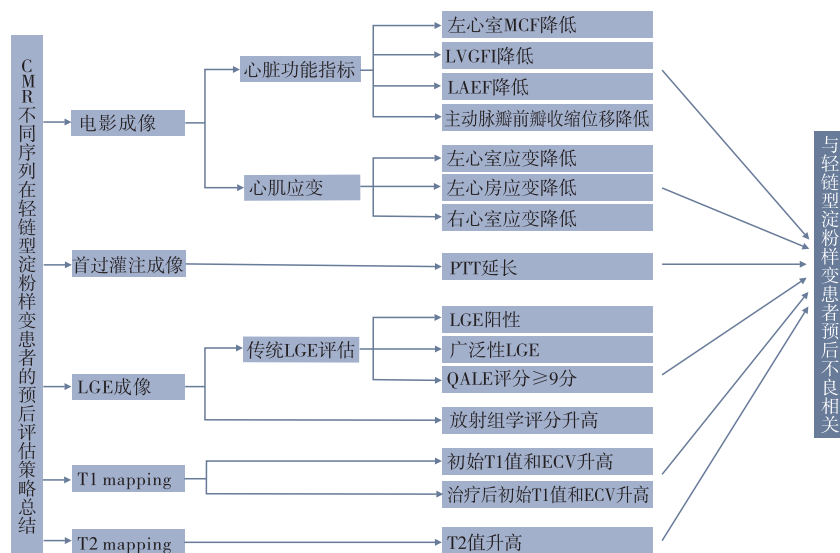


图1 CMR 不同序列在轻链型淀粉样变患者的预后评估策略总结

## 7 总结与展望

上述基于 CMR 不同序列的参数均能够为轻链型淀粉样变患者的预后评估及风险分层提供重要价值,图1中总结了 CMR 不同序列在轻链型淀粉样变患者中的预后评估策略,其中尤其以 ECV 最为重要,它不仅可以作为 LGE 的替代方法预测患者死亡,还能定量评估心肌淀粉样蛋白的沉积,从而可以用于在治疗过程中反映淀粉样蛋白负荷及评估疗效,但 ECV 需要注射对比剂后才能获取,对于肾脏功能受损的患者,可能成为对比剂注射的禁忌证,特别是在淀粉样变患者中,肾脏功能受损更为常见。此时,基于电影序列的应变参数更加能够发挥作用,它可以不用注射对比剂获取,而且还能够敏感识别心脏早期功能障碍,因此可以作为对比剂禁忌患者预后评估的重要参数。但是由于 T1 mapping 序列及特征追踪技术需要手动勾画图像,不仅耗时长,而且易受勾画者的主观影响,因此它们还未常规应用于临床工作。要将研究结果转化为临床应用还需要更多的研究支持。

除了上述 CMR 序列之外,还有一些新兴的 CMR 序列已经被用于心肌淀粉样变患者的评估中,包括弥

散张量成像、心脏代谢成像及弹性成像等,可以帮助更深入了解心肌微观结构及心肌淀粉样变患者病理生理过程<sup>[31]</sup>。此外,目前基于人工智能的心血管成像分析技术与临床相关数据结合,可实现心血管疾病精准的早期诊断和预后评估,优化风险分层,指导临床决策。未来,随着 CMR 新序列的研究及人工智能的发展与成熟,可以将 CMR 应用于临床实践中,基于 CMR 不同序列的参数有望能够与 Mayo 分期联合,为轻链型淀粉样变患者提供更加精确的预后评估及风险分层,有助于临床医生定制针对性治疗方案,及时实施干预措施,优化远期预后。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Wechalekar AD, Gillmore JD, Hawkins PN. Systemic amyloidosis [J]. Lancet, 2016, 387(10038): 2641-2654.
- [2] Bloom MW, Gorevic PD. Cardiac amyloidosis [J]. Ann Intern Med, 2023, 176(3): ITC33-ITC48.
- [3] Merlini G, Dispenzieri A, Sanchirawala V, et al. Systemic immunoglobulin light chain amyloidosis [J]. Nat Rev Dis Primers, 2018, 4(1): 38.
- [4] Baker KR. Light chain amyloidosis: epidemiology, staging, and prognostication [J]. Methodist DeBakey Cardiovasc J, 2022, 18(2): 27-35.

- [5] Arnold JR, McCann GP. Cardiovascular magnetic resonance: applications and practical considerations for the general cardiologist [J]. *Heart*, 2020, 106(3): 174-181.
- [6] Aimo A, Merlo M, Porcari A, et al. Redefining the epidemiology of cardiac amyloidosis. A systematic review and meta-analysis of screening studies [J]. *Eur J Heart Fail*, 2022, 24(12): 2342-2351.
- [7] Arenja N, Andre F, Riffel JH, et al. Prognostic value of novel imaging parameters derived from standard cardiovascular magnetic resonance in high risk patients with systemic light chain amyloidosis [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2019, 21(1): 53.
- [8] Miao FJ, Tang CX, Chen WC, et al. [The prognostic value of morphological and functional parameters of cardiac magnetic resonance in patients with systemic light chain amyloidosis] [J]. *Zhonghua yi xue za zhi*, 2023, 103(7): 506-512.
- [9] Mohty D, Boulogne C, Magne J, et al. Prognostic value of left atrial function in systemic light-chain amyloidosis: a cardiac magnetic resonance study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016, 17(9): 961-969.
- [10] Ochs MM, Fritz T, Arenja N, et al. Regional differences in prognostic value of cardiac valve plane displacement in systemic light-chain amyloidosis [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19(1): 87.
- [11] Xu J, Yang W, Zhao S, et al. State-of-the-art myocardial strain by CMR feature tracking: clinical applications and future perspectives [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(8): 5424-5435.
- [12] Illman JE, Arunachalam SP, Arani A, et al. MRI feature tracking strain is prognostic for all-cause mortality in AL amyloidosis [J]. *Amyloid*, 2018, 25(2): 101-108.
- [13] Wan K, Sun J, Yang D, et al. Left ventricular myocardial deformation on cine MR images: relationship to severity of disease and prognosis in light-chain amyloidosis [J]. *Radiology*, 2018, 288(1): 73-80.
- [14] Lu J, Yang Z, Tang D, et al. The correlation of left atrial dysfunction and amyloid load in patients with immunoglobulin light-chain cardiac amyloidosis: a 3T cardiac magnetic resonance study [J]. *Br J Radiol*, 2023, 96(1148): 20220985.
- [15] Tan Z, Yang Y, Wu X, et al. Left atrial remodeling and the prognostic value of feature tracking derived left atrial strain in patients with light-chain amyloidosis: a cardiovascular magnetic resonance study [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2022, 38(7): 1519-1532.
- [16] Wan K, Lin J, Guo X, et al. Prognostic value of right ventricular dysfunction in patients with al amyloidosis: comparison of different techniques by cardiac magnetic resonance [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 52(5): 1441-1448.
- [17] Li X, Li J, Lin L, et al. Left and right ventricular myocardial deformation and late gadolinium enhancement: incremental prognostic value in amyloid light-chain amyloidosis [J]. *Cardiovasc Diagn The*, 2020, 10(3): 470-480.
- [18] Duca F, Snidat A, Binder C, et al. Hemodynamic profiles and their prognostic relevance in cardiac amyloidosis [J]. *J Clin Med*, 2020, 9(4): 1093.
- [19] Ricci F, Barison A, Todiere G, et al. Prognostic value of pulmonary blood volume by first-pass contrast-enhanced CMR in heart failure outpatients: the PROVE-HF study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(8): 896-904.
- [20] Houard L, Amzulescu MS, Colin G, et al. Prognostic value of pulmonary transit time by cardiac magnetic resonance on mortality and heart failure hospitalization in patients with advanced heart failure and reduced ejection fraction [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(1): e011680.
- [21] Seraphim A, Knott KD, Menacho K, et al. Prognostic value of pulmonary transit time and pulmonary blood volume estimation using myocardial perfusion CMR [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(11): 2107-2119.
- [22] Bi K, Wan K, Xu Y, et al. Pulmonary transit time derived from first-pass perfusion cardiac MR imaging: a potential new marker for cardiac involvement and prognosis in light-chain amyloidosis [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 60(3): 999-1010.
- [23] Markousis-Mavrogenis G, Giannakopoulou A, Belegirinos A, et al. Cardiovascular magnetic resonance imaging patterns in rare cardiovascular diseases [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(21): 6403.
- [24] Dohy Z, Szabo L, Pozsonyi Z, et al. Potential clinical relevance of cardiac magnetic resonance to diagnose cardiac light chain amyloidosis [J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0269807.
- [25] Wan K, Sun J, Han Y, et al. Right ventricular involvement evaluated by cardiac magnetic resonance imaging predicts mortality in patients with light chain amyloidosis [J]. *Heart Vessels*, 2018, 33(2): 170-179.
- [26] Boynton SJ, Geske JB, Dispenzieri A, et al. LGE provides incremental prognostic information over serum biomarkers in AL cardiac amyloidosis [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(6): 680-686.
- [27] Lin L, Li X, Feng J, et al. The prognostic value of T1 mapping and late gadolinium enhancement cardiovascular magnetic resonance imaging in patients with light chain amyloidosis [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1): 2.
- [28] Dzung JN, Valencia O, Pinney JH, et al. CMR-based differentiation of AL and ATTR cardiac amyloidosis [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(2): 133-142.
- [29] Wan K, Sun J, Han Y, et al. Increased prognostic value of query amyloid late enhancement score in light-chain cardiac amyloidosis [J]. *Circ J*, 2018, 82(3): 739-746.
- [30] Liu Y, Zhu J, Chen M, et al. 3.0T cardiac magnetic resonance quantification of native T1 and myocardial extracellular volume for the diagnosis of late gadolinium enhancement-negative cardiac amyloidosis [J]. *Ann Transl Med*, 2022, 10(14): 794.
- [31] Maggialelli N, Torrente A, Lorusso G, et al. Role of cardiovascular magnetic resonance in cardiac amyloidosis: a narrative review [J]. *J Pers Med*, 2024, 14(4): 407.
- [32] Banyersad SM, Fontana M, Maestrini V, et al. T1 mapping and survival in systemic light-chain amyloidosis [J]. *Eur Heart J*, 2015, 36(4): 244-251.
- [33] Miao F, Tang C, Ren G, et al. The prognostic value of multiparametric cardiac magnetic resonance in patients with systemic light chain amyloidosis [J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1069788.
- [34] Wan K, Li W, Sun J, et al. Regional amyloid distribution and impact on mortality in light-chain amyloidosis: a T1 mapping cardiac magnetic resonance study [J]. *Amyloid*, 2019, 26(1): 45-51.
- [35] Martinez-Naharro A, Patel R, Kotecha T, et al. Cardiovascular magnetic resonance in light-chain amyloidosis to guide treatment [J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(45): 4722-4735.
- [36] Ioannou A, Patel RK, Martinez-Naharro A, et al. Tracking treatment response in cardiac light-chain amyloidosis with native T1 mapping [J]. *JAMA Cardiol*, 2023, 8(9): 848-852.
- [37] Grazzini G, Pradella S, Bani R, et al. The role of T2 mapping in cardiac amyloidosis [J]. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 2024, 14(10): 1048.
- [38] Kotecha T, Martinez-Naharro A, Treibel TA, et al. Myocardial edema and prognosis in amyloidosis [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(25): 2919-2931.
- [39] Ridouani F, Damy T, Tacher V, et al. Myocardial native T2 measurement to differentiate light-chain and transthyretin cardiac amyloidosis and assess prognosis [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1): 58.
- [40] 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.
- [41] 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*, 2024, 34(1): 402-410.

收稿日期: 2024-05-07