

综 述

基于超声心动图及CMR
评价运动员心肌应变的
研究进展*张恒锐¹ 田 鑫² 兰红琳^{2,*}

1.长治医学院研究生学院 (山西 长治 046000)

2.晋城市人民医院影像科 (山西 晋城 048000)

【摘要】长期的高强度运动训练可能改变心脏的形态和功能,这种现象被称为运动员心(athlete's heart, AH)。这反映了心脏的适应性,有助于运动员提高成绩。常见表现包括心室扩大、心房增大和心室肥厚,这些特征可能与扩张型心肌病或右心室发育不良的早期阶段相似。心脏的整体或局部应变可能在形态、功能和射血分数变化之前已有所体现,因此客观评估心肌应变极为重要。心肌应变(myocardial strain, MS)检测是少数能够客观量化区域性心室功能障碍的技术之一,在区分心脏病理理性改变与长期高强度训练引起的生理性适应中扮演重要角色。利用超声心动图和心血管磁共振(cardiovascular magnetic resonance, CMR)的衍生技术,如speckle tracking echocardiography(STE)和CMR-feature tracking(CMR-FT),可以测量心肌变形,更准确地识别和描述亚临床心脏收缩功能障碍。本文综述了基于超声心动图和CMR的心肌应变技术在评估运动员心脏功能中的应用。

【关键词】运动员心脏; 心肌应变;
磁共振成像; 超声心动图

【中图分类号】R445.1; R445.2

【文献标识码】A

【基金项目】山西省基础研究计划项目基金
(20210302123015)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.08.056

Advancements in Assessing Myocardial Strain in Athletes through Echocardiography and Cardiovascular Magnetic Resonance Imaging*

ZHANG Heng-rui¹, TIAN Xin², LAN Hong-lin^{2,*}

1. Graduate School of Changzhi Medical College, Changzhi 046000, Shanxi Province, China

2. Department of Imaging, Jincheng People's Hospital, Jincheng 048000, Shanxi Province, China

ABSTRACT

Prolonged high-intensity athletic training may alter the morphology and function of the heart, a phenomenon known as Athlete's Heart (AH). This reflects the heart's adaptability, which aids athletes in enhancing their performance. Common manifestations include ventricular enlargement, atrial enlargement, and ventricular hypertrophy, which may resemble the early stages of dilated cardiomyopathy or right ventricular dysplasia. Global or regional myocardial strain may be evident before changes in morphology, function, and ejection fraction, making objective assessment of myocardial strain critically important. Myocardial Strain Imaging (MS) is one of the few techniques capable of objectively quantifying regional ventricular dysfunction and plays a pivotal role in differentiating pathological cardiac changes from physiological adaptations induced by long-term high-intensity training. Derived techniques from echocardiography and cardiovascular magnetic resonance (CMR), such as Speckle Tracking Echocardiography (STE) and CMR Feature Tracking (CMR-FT), allow for the measurement of myocardial deformation, providing a more accurate identification and description of subclinical cardiac contractile dysfunction. This article reviews the application of myocardial strain techniques based on echocardiography and CMR in assessing cardiac function in athletes.

Keywords: Athlete's Heart; Myocardial Strain; Cardiovascular Magnetic Resonance; Echocardiography

运动员的心血管系统面临着持续的重复性负荷,这增加了他们患心血管疾病的风险^[1]。此外,频繁的体育锻炼使得他们的心脏在形态、功能和调节方面发生了显著适应性变化^[1],表现为心脏质量增加、心室腔扩张、心房增大和心室肥厚,同时收缩和舒张功能得到保留^[2]。尽管保留了心脏功能,但这些生理性适应可能与某些病理性改变重叠,例如扩张型心肌病或右心室发育不良的早期阶段。因此,鉴别诊断变得极具挑战性^[3]。这种现象常被称作“灰色地带”,需要使用更严谨精确的新型诊断方法。心脏尺寸评估和心肌变形评估相结合,可以全面评估心脏功能,这种方法已证实能有效区分心脏病变与长期高强度训练引起的生理适应。常用诊断方法包括STE和CMR-FT,这些技术能测量心肌变形,更准确地识别和描述亚临床双心室收缩功能障碍^[4]。

1 概 述

心肌应变(MS)是衡量心肌变形的敏感指标,通常用百分比(%)来表示。它的定义为心肌长度从舒张末期的松弛状态到收缩末期的收缩状态的变化。心室主要参数包括纵向应变(longitudinal strain, LS)、径向应变(radial strain, RS)及周向应变(circumferential strain, CS)。心内膜下层肌纤维从心底到心尖纵向排列,心肌中间层肌纤维环形分布,心外膜下层肌纤维从心尖到心底斜形排列,这些排列分别决定纵向、径向和周向应变^[5]。心房的主要参数包括储蓄应变、导管应变和收缩应变。应变率(strain rate, SR)反映心肌形变的速度,不受周围组织的牵拉和整体位移影响,能准确描绘心肌运动的微小变化。应变率(SR)的类型包括纵向收缩期应变率(LSR-S)、周向收缩期应变率(CSR-S)、径向收缩期应变率(RSR-S)、纵向舒张期应变率(LSR-D)、周向舒张期应变率(CSR-D)、径向舒张期应变率(RSR-D),以及收缩期应变率峰值(SRs)、舒张早期应变率峰值(SRe)和舒张晚期应变率峰值(SRa)^[6]。

2 STE及CMR评估心肌应变技术原理

2.1 STE原理 STE与传统超声心动图均采用图像处理算法,通过识别超声波与心肌感兴趣区之间产生的散斑图案(超声波束的反向散射)来跟踪心动周期中点之间的距离或时空位移(局部应变速度向量),从而提供关于局部和整体心肌应变的有价值信息。传统的组织多普勒技术因其角度依赖性和对噪声的敏感性,精度和实用性受到限制。STE有效地解决了这些局限性,并且能够准确区分正常心肌节段性位移和由于心肌肥大或邻近心肌

【第一作者】张恒锐,男,医师,主要研究方向:心血管磁共振。E-mail: jczhanghr@163.com

【通讯作者】兰红琳,男,主任医师,主要研究方向:心血管磁共振。E-mail: jcmrllhl@163.com

组织受限而被动发生的心肌节段性位移。二维 STE(2D-STE)通过三个短轴视图和三个心尖视图的组合来评估GCS、GRS及GLS。与此相比,三维STE(3D-STE)通过单次心尖图像采集,可以自动测量GCS、GRS 和 GLS。虽然2D-STE需要在多个心动周期内采集多个二维图像,耗时较长,但其时间和空间分辨率高于3D-STE的单次全体积采集^[7]。

2.2 CMR-FT原理 随着CMR技术的进一步发展,多种先进的心肌应变评估技术得到开发。这包括受激回波位移编码(displacement encoding with stimulated echoes, DENSE)、应变编码成像(strain encoded, SENC)和被视为磁共振心肌应变金标准的标记技术(myocardial tagging, MT)等。这些技术需要特定的磁共振序列和专用的后处理软件,且处理时间较长,因此它们的适用性有限^[8]。应用于标准b-SSFP-CMR的CMR-FT技术,可能是评估左心室应变最便捷的方法。CMR-FT是一种基于光流技术的磁共振方法,该技术最初用于评估流体运动。CMR-FT适用于标准的cine-CMR序列,无需额外扫描。其后处理软件操作简便,可在二腔、三腔、四腔及短轴电影序列中勾画心内外膜轮廓。该软件的半自动算法利用光流技术测量预定点的运动矢量,跟踪整个心动周期的心肌边界位移。此外,沿时间轴生成的心肌界面空间运动轮廓经过复杂的数据处理后,可以全面分析应变,其中纵向应变通过长轴视图,周向和径向应变通过短轴视图获得^[9]。

3 基于STE评估运动引起的心功能变化

3.1 运动引起的左心房功能变化 左心房心肌应变(LAS)根据三个左心房(LA)周期进行定义:储蓄期LAS(LASr)与LA舒张及左心室收缩功能相关,导管期LAS(LAScd)与左心室早期舒张功能相关,收缩期LAS(LASct)与左心室晚期舒张功能相关。因此,评估左心房功能的变化至关重要^[6]。

Cousergue等^[10]通过2D-STE评估了年龄对运动员左心房功能重塑的影响。结果显示,与年轻运动员相比,大师级运动员(年龄>35岁)的平均LA容积更大,而LAEF减低;同时发现大师级运动员LASr和LAScd减少,LASct显著增加。Cheema等^[11]的研究结论与此相似。Ghekiere等^[12]的研究发现,与运动前相比,剧烈骑行后左心房应变略有下降。Yaman等^[13]使用2D-STE评估低强度运动对心肌的影响时发现,运动人群在左心房导管期的应变率显著高于久坐人群。此外,与久坐人群相比,运动人群的导管期应变率与收缩期应变率之比(LAScd/LASct和pLASrct/pLASrct)也显著更高。研究还指出,低强度运动是这些较高比率的唯一预测因子,表明引起左心房应变差异的原因可能是运动强度的不同。通过评估LAS等指标,可以了解左心房功能的变化情况。年龄和运动强度的差异可能导致左心房容积、舒张功能及收缩功能发生变化。

3.2 运动引起的左心室功能变化 Dawkins等^[14-15]的研究显示,在静息状态下,运动员的左心室纵向应变低于同年龄的健康对照组。此外,室间隔的厚度差异也影响左心室GLS的表现,室间隔舒张末厚度小于10mm的运动员显示出更高的GLS值。Tony G. Dawkins等^[14]进一步发现,与阻力运动员相比,耐力运动员的LVGLS达峰时间更长。阻力训练者在压力负荷下能更好地维持心搏出量,而耐力训练者在容量负荷下则显示出更大的舒张末期容积。这些结果为左心室对血流动力学压力或容量负荷的训练特异性适应性提供了新的证据。Izem等^[16-17]研究了从静息到运动过程中左心室力学的变化,发现非运动员的收缩期LS和CS在运动开始后的60秒和45秒内迅速增加,并在此后保持稳定。纵向舒张应

变率在第一分钟内增加,随后也保持稳定。与久坐对照组相比,耐力自行车运动员的LS、CS、纵向收缩应变率和心尖部周向收缩应变率没有明显差异。然而,这些运动员的基底部周向收缩应变率在运动过程中增加的速度和程度更为显著。Pieles等^[18]通过2D-STE研究发现,在青少年中,运动初期左心室的收缩期纵向应变显著增高后保持稳定,而周向应变在整个运动过程中显著增强,这可能是左心室收缩力增加的主要机制。Yeo等^[19-21]的研究表明,与赛前相比,运动员的LVGLS在赛后(至少1小时后)普遍降低,这一结果与其他研究一致。Christou等^[21]的研究发现,赛后运动员的左心室壁厚度增加,这种增加减少了左心室纵向位移,进而降低了左心室GLS。因此,运动后左心室GLS的轻度下降可能部分由壁厚的几何学变化引起,但也不排除心肌功能轻度受损的可能。Klaeboe等^[22]的研究证明,尽管GLS在应变参数中无法区分轻度肥厚性心脏病(Hypertrophic Cardiomyopathy, HCM)和AH,机械弥散却表现出良好的鉴别能力,为区分运动员心脏重塑和轻度HCM提供了新见解。未来研究应进一步评估超声心动图斑点追踪技术在疑似HCM的运动员中的适应性。这种技术不仅有助于识别HCM患者,也可用于其他心肌疾病的诊断。Żebrowska等^[23]的研究表明,相较于未伴有左心室肥厚者(非运动员、非LVH运动员),伴有左心室肥厚的运动员(LVH组)在静息状态下基底部旋转角度显著降低。与对照组相比,LVH组运动后的基底部周向应变(BCS)和整体纵向应变(GLS)显著提高。这些发现说明,在心肌明显肥厚的运动员中,心脏的应变和旋转适应能力降低。利用STE技术评估左心室旋转,对预测因体力劳动引起的生理性和病理性心肌肥厚患者的心脏功能紊乱至关重要。STE技术的应用在评估运动员左心室功能的变化中显示出其重要性,为我们提供了对心脏适应性和潜在病理变化的深入理解。这些研究成果不仅对运动医学领域具有重要意义,也为心脏疾病的诊断和治疗提供了新的视角。

3.3 运动引起的右心功能变化 一项荟萃分析^[24]显示,运动员右心室自由壁的纵向应变相似,心尖的纵向应变较大,而基底的应变较低。这种从基底部到心尖部递增的应变梯度是运动员心脏的典型特征。Forsythe等^[25]的研究指出,相比非运动员,运动员的右心室和右心房体积增大,但右心室区域的纵向应变无显著差异,显示出从基底部到心尖部的递增应变梯度。此外,除心尖部舒张早期应变率外,运动员右心室心肌的几乎所有区域均显示出较低的应变率。Unnithan等^[26]的研究发现,运动员右心室纵向应变的达峰时间延长,收缩期和舒张晚期的应变率显著降低,而心尖部的舒张早期应变率则有所增加。这种特别是在心尖部表现出的较高舒张早期应变率可能导致运动员在舒张晚期功能表现更强。Yeo等^[19]的研究表明,半程马拉松结束后,运动员右心室游离壁的纵向应变降低,且比赛完成时间越短,变化越显著。Wolff等^[20]的研究显示,赛后右心室游离壁的应变未显著下降,但表现出较大的个体差异。此外,应变下降幅度与年龄增长相关,其具体机制仍需进一步研究。Ghekiere等^[12]的研究结果表明,赛后右心室的应变减少幅度超过左心室,且在高强度运动后,右心房在储蓄期和导管期的应变显著降低,而收缩期应变未见明显变化。LaGerche等^[27]的研究显示,比赛后,除了收缩期应变率峰值维持较低水平外,运动员的右心室收缩期应变及应变率均有所下降,但这些应变参数在赛后6-11天内大多恢复至赛前水平。在训练有素的运动员中,我们可以观察到仅限于右心室的功能障碍,这种障碍在一周后可恢复。然而,长期耐力训练的运动员中出现了心肌纤维化,这表明心室重塑程度更高。这为未来研究大量剧

烈运动是否会导致心律失常提供了理论基础。此外,接受大量训练的运动员的右心房(RA)体积增大。虽然心房扩大看似是对高强度训练的正常生理适应,但越来越多的证据^[28]显示心房扩大与房性心律失常之间存在关联,这一内在机制仍需深入研究。STE技术在评估运动员右心室功能方面的应用,揭示了运动对心脏结构和功能的复杂影响。这些研究结果强调了对运动员心脏进行细致监测的重要性,尤其是在高强度训练和比赛后。未来的研究将有助于更好地理解运动引起的心脏适应性变化,以及这些变化对长期心脏健康的潜在影响。

4 基于CMR评估运动引起的心功能变化

4.1 运动引起的左心功能变化 Chen等^[29-30]的研究表明,运动员的左心室整体应变普遍较低,赛后左心室GLS下降,而GCS和GRS则升高,左心房GLS也有所降低。伴有局灶性心肌纤维化(LGE+)的男性铁人三项运动员赛后左心室和左心房的GLS均保持不变,这表明上述变化可能是急性耐力运动后的一种内在代偿机制。Tahir等^[31]的研究涉及78名铁人三项运动员和28名年龄相匹配的久坐对照者,通过使用FT技术,发现伴有局灶性心肌纤维化(LGE+)的运动员相比无此病变(LGE-)的运动员,其左心室整体径向应变显著降低。LGE+及其直接相邻节段的径向应变均有所降低。这些径向应变的降低表明,即使在射血分数正常的情况下,心肌纤维化也对LGE+铁人三项运动员的左心室功能产生了负面影响。此外,应变分析显示,对照组中心肌的第4和第5节段的径向和纵向应变最高,这可能解释了铁人三项运动员心肌纤维化倾向于发生在这些区域的原因。Gastl等^[32]的研究发现,与对照组(AH组)相比,无论是否伴有流出道梗阻的肥厚性心脏病患者(HOCM/HNCM),其GLS绝对值均有显著增加,但各组之间在舒张早期周向应变率峰值(SRcc)上无明显差异。此外,在鉴别AH与HOCM/HNCM时,当GLS的临界值小于21.8%时,对AH的鉴别灵敏度为92%,特异度为68%;而当临界值大于24.3%时,用于鉴别HNCM与AH的GLS灵敏度和特异度分别为89%和100%。

磁共振心肌标记技术(myocardial tagging)作为磁共振心肌应变成像的“金标准”^[33],能够定量评估心肌形变和室壁运动。然而,由于该技术需要特定的扫描序列和后处理软件,其在临床上的应用受到了限制。Ricci等^[33]的研究发现,比赛后3至6小时内,与赛后一个月的随访相比,心尖的旋转和扭转明显增加,而左心室收缩期的径向应变峰值显著减少。这些变化与急性可逆性心肌水肿相似均表现为心尖区域的分布较为疏松,这可能与铁人三项运动员的高强度运动有关。尽管存在局限性,但CMR-FT技术为我们提供了一种有力的工具,以更细致地理解运动对心脏功能的影响,以及心肌纤维化如何影响心脏的应变能力。未来的研究将进一步探索这些变化对运动员心脏健康的远期意义,以及如何利用这些知识来优化运动训练。

4.2 运动引起的右心功能变化 Starekova等^[34]的研究包括23名职业足球运动员、19名铁人三项运动员和16名健康对照者。通过使用CMR-FT技术分析,发现两组运动员的右心室纵向应变及舒张期纵向应变率均低于健康对照者,其中足球运动员的右心室纵向应变低于铁人三项运动员。研究^[29]表明,铁人三项运动员的右心室游离壁GLS和右心房GLS低于健康对照者。赛后这些运动员的右心室与右心房纵向应变保持不变,而右心室整体应变(RVGCS)较赛前有所增加。对于LGE+的男性铁人三项运动员,赛后右心室及右心房的应变同样保持稳定。Wang等^[30]的研究发现,相比于久坐不动的对照组,马拉松运动员的右心室应变和整体圆周应变率均显

著降低。CMR-FT技术在评估运动员右心功能方面提供了宝贵的见解,揭示了运动对心脏结构和功能的影响。未来的研究可以着重于心肌纤维化与心脏应变能力之间的关系,以及不同类型和强度的运动如何影响心脏的适应性和潜在的病理变化。

5 总结与展望

适当的长期运动训练可能会导致心血管重塑,这种生理性适应有助于提高心肺功能的健康水平,并可降低心血管不良事件的发生率。然而,关于长期高强度运动训练是否会导致精英运动员慢性心肌损伤的累积效应,目前仍存在争议^[35]。STE和CMR-FT技术能够量化运动员的心脏及其外围表现,提供关于心血管疾病风险的重要信息。这些技术不仅能全面评估心脏结构的变化,还能敏感地检测到心脏结构及收缩功能的早期变化,为临床提供一种全面且有效的新方法。这些技术安全性高,并且支持重复检测^[36-37]。运动训练显著影响心血管疾病患者的风险状况和临床疗效,是治疗心血管疾病的基础。确凿证据^[38]显示,持续六个月以上的运动训练对患有冠状动脉疾病或心力衰竭的患者的心脏功能和重塑有积极影响。然而,心肌应变技术存在局限性,如技术原理和分析算法的差异^[39],以及后处理软件之间的不一致性^[40]。这些因素导致了缺乏统一的评判标准,从而限制了其在临床上的应用。期望未来心肌应变技术得到广泛应用,为诊断由大量运动引起的亚临床心功能改变提供更精确的数据支持,以更好地指导临床决策。此外,结合心肌应变技术与其他心脏功能参数(如T1 mapping、T2 mapping及LGE)可以全面评估心脏结构和功能的变化,但目前这类综合研究还不多。

参考文献

- [1] PALERMI S, SERIO A, VECCHIATO M, et al. Potential role of an athlete-focused echocardiogram in sports eligibility[J]. WJC, 2021, 13(8): 271-297.
- [2] PALERMI S, CAVARRETTA E, D' ASCENZI F, et al. Athlete's heart: a cardiovascular step-by-step multimodality approach[J]. Rev. Cardiovasc. Med., 2023, 24(5): 151.
- [3] D' ANDREA A, SPERLONGANO S, RUSSO V, et al. The role of multimodality imaging in athlete's heart diagnosis: current status and future directions[J]. JCM, 2021, 10(21): 5126.
- [4] DOMENECH-XIMENOS B, SANZ-DE LA GARZA M, SEPULVEDA-MARTINEZ Á, et al. Assessment of myocardial deformation with CMR: a comparison with ultrasound speckle tracking[J]. Eur Radiol, 2021, 31(10): 7242-7250.
- [5] MORARIU V I, ARNAUTU D A, MORARIU S I, et al. 2D speckle tracking: a diagnostic and prognostic tool of paramount importance[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2022, 26(11): 3903-3910.
- [6] 马运婷, 郑月, 王璐静, 等. 心肌应变检测技术在非酒精性脂肪性肝病心肌损伤中的研究进展[J]. 天津医药, 2023, 51(8): 888-892.
- [7] HUANG R, JIN J, ZHANG P, et al. Use of speckle tracking echocardiography in evaluating cardiac dysfunction in patients with acromegaly: an update[J]. Front. Endocrinol., 2023, 14: 1260842.
- [8] 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.
- [9] LANGE T, SCHUSTER A. Quantification of myocardial deformation applying CMR-feature-tracking—all about the left ventricle?[J]. Curr Heart Fail Rep, 2021, 18(4): 225-239.
- [10] COUSERGUE C, SALOUX E, REBOURSIÈRE E, et al. Age impacts left atrial functional remodeling in athletes[J]. PLoS ONE, 2022, 17(7): e0271628.
- [11] CHEEMA B, KINNO M, GU D, et al. Left atrial size and strain in elite athletes: a cross-sectional study at the NBA Draft Combine[J]. Echocardiography, 2020, 37(7): 1030-1036.
- [12] GHEKIERE O, HERBOTS L, PETERS B, et al. Exercise-induced myocardial T1

- increase and right ventricular dysfunction in recreational cyclists: a CMR study[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2023, 123(10): 2107–2117.
- [13] YAMAN B, AKPINAR O, KEMAL H S, et al. The beneficial effect of low-intensity exercise on cardiac performance assessed by two-dimensional speckle tracking echocardiography[J]. *Echocardiography*, 2020, 37(12): 1989–1999.
- [14] DAWKINS T G, CURRY B A, DRANE A L, et al. Stimulus-specific functional remodeling of the left ventricle in endurance and resistance-trained men[J]. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2020, 319(3): H632–H641.
- [15] REFOYO E, TROYA J, DE LA FUENTE A, et al. Myocardial work index in professional football players: a novel method for assessment of cardiac adaptation[J]. *JCM*, 2023, 12(9): 3059.
- [16] IZEM O, MAUFRAIS C, OBERT P, et al. Kinetics of left ventricular mechanics during transition from rest to exercise[J]. *MED SCI SPORT EXER*, 2019, 51(9): 1838–1844.
- [17] IZEM O, MAUROT L, TORDI N, et al. Key role of left ventricular untwisting in endurance cyclists at onset of exercise[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2021, 131(5): 1565–1574.
- [18] PIELES G E, GOWING L, RYDING D, et al. Characterisation of LV myocardial exercise function by 2-D strain deformation imaging in elite adolescent footballers[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121(1): 239–250.
- [19] YEO T J, LING L H, LAM C S P, et al. Cardiac and renal biomarkers in recreational runners following a 21 km treadmill run[J]. *Clinical Cardiology*, 2020, 43(12): 1443–1449.
- [20] WOLFF S, PICCO J M, DÍAZ-GONZÁLEZ L, et al. Exercise-induced cardiac fatigue in recreational ultramarathon runners at moderate altitude: insights from myocardial deformation analysis[J]. *Front. Cardiovasc. Med.*, 2022, 8: 744393.
- [21] CHRISTOU G A, PAGOURELIAS E D, ANIFANTI M A, et al. Exploring the determinants of the cardiac changes after ultra-long duration exercise: the echocardiographic Spartathlon study[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2020, 27(14): 1467–1477.
- [22] KLAEBOE L G, LIE Ø H, BREKKE P H, et al. Differentiation of myocardial properties in physiological athletic cardiac remodeling and mild hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Biomedicines*, 2024, 12(2): 420.
- [23] ŻEBROWSKA A, MIKOŁAJCZYK R, WAŚKIEWICZ Z, et al. Left ventricular systolic function assessed by speckle tracking echocardiography in athletes with and without left ventricle hypertrophy[J]. *JCM*, 2019, 8(5): 687.
- [24] DAWKINS T G, CURRY B A, WRIGHT S P, et al. Right ventricular function and region-specific adaptation in athletes engaged in high-dynamic sports: a meta-analysis[J]. *Circ Cardiovascular Imaging*, 2021, 14(5): e012315.
- [25] FORSYTHE L, SOMAUROO J, GEORGE K, et al. The right heart of the elite senior rugby football league athlete[J]. *Echocardiography*, 2019, 36(5): 888–896.
- [26] UNNITHAN V B, BEAUMONT A, ROWLAND T W, et al. The influence of training status on right ventricular morphology and segmental strain in elite pre-adolescent soccer players[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121(5): 1419–1429.
- [27] LA GERCHE A, BURNS A T, MOONEY D J, et al. Exercise-induced right ventricular dysfunction and structural remodelling in endurance athletes[J]. *Eur. Heart J*, 2012, 33(8): 998–1006.
- [28] CALVO N, BRUGADA J, SITGES M, et al. Atrial fibrillation and atrial flutter in athletes[J]. *Br J Sports Med*, 2012, 46(Suppl 1): i37–i43.
- [29] CHEN H, WARNCKE M L, MUELLERLEILE K, et al. Acute impact of an endurance race on biventricular and biatrial myocardial strain in competitive male and female triathletes evaluated by feature-tracking CMR[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(5): 3423–3435.
- [30] WANG Z, SONG T, YU D, et al. Correlation analysis of epicardial adipose tissue and ventricular myocardial strain in Chinese amateur marathoners using cardiac magnetic resonance[J]. *PLoS ONE*, 2022, 17(9): e0274533.
- [31] TAHIR E, STAREKOVA J, MUELLERLEILE K, et al. Impact of myocardial fibrosis on left ventricular function evaluated by feature-tracking myocardial strain cardiac magnetic resonance in competitive male triathletes with normal ejection fraction[J]. *Circ J*, 2019, 83(7): 1553–1562.
- [32] GASTL M, LACHMANN V, CHRISTIDI A, et al. Cardiac magnetic resonance T2 mapping and feature tracking in athlete's heart and HCM[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5): 2768–2777.
- [33] RICCI F, AQUARO G D, DE INNOCENTIIS C, et al. Exercise-induced myocardial edema in master triathletes: insights from cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. *Front. Cardiovasc. Med.*, 2022, 9: 908619.
- [34] STAREKOVA J, THOTTAKARA T, LUND G K, et al. Increased myocardial mass and attenuation of myocardial strain in professional male soccer players and competitive male triathletes[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(11): 2187–2197.
- [35] MISSENERD O, GABAUDAN C, ASTIER H, et al. Absence of cardiac damage induced by long-term intensive endurance exercise training: a cardiac magnetic resonance and exercise echocardiography analysis in masters athletes[J]. *American Journal of Preventive Cardiology*, 2021, 7: 100196.
- [36] 凌小莉, 刘承宏, 赵凯跃, 等. 心脏MR特征追踪技术对业余马拉松运动员双心室心肌应变的研究[J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(12): 1278–1283.
- [37] 张贺彬, 高枫, 杨寸芯, 等. 三维斑点追踪技术评价业余马拉松运动员左心室结构与收缩功能的早期改变[J]. *中华超声影像学杂志*, 2022, 31(8): 705–711.
- [38] ALHUMAID W, SMALL S D, KIRKHAM A A, et al. A contemporary review of the effects of exercise training on cardiac structure and function and cardiovascular risk profile: insights from imaging[J]. *Front. Cardiovasc. Med.*, 2022, 9: 753652.
- [39] BUCIUS P, ERLEY J, TANACLI R, et al. Comparison of feature tracking, fast-SENSE, and myocardial tagging for global and segmental left ventricular strain[J]. *ESC Heart Failure*, 2020, 7(2): 523–532.
- [40] GRÖSCHEL J, KUHN T J, VIEZZER D, et al. Comparison of manual and artificial intelligence based quantification of myocardial strain by feature tracking—a cardiovascular MR study in health and disease[J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(2): 1003–1015.

(收稿日期: 2024-05-21)
(校对编辑: 赵望淇、江丽华)