

放疗相关心血管损伤的影像学表现与研究进展*

杨梦犀¹ 徐文婷¹ 戴全² 刁伟³ 周鹏¹

[摘要] 放疗作为肿瘤的重要治疗手段,在控制肿瘤进展的同时,也可造成心血管损伤,增加患者远期预后不良的风险。放疗相关心血管损伤表现多样,包括冠心病、心包炎、心瓣膜疾病、心肌病、胸颈部大血管粥样硬化等。影像学检查在放疗相关心血管损伤的诊疗中占有重要地位,可为疾病诊断、病情随访、预后判断提供关键信息。本文针对放疗相关不同类型心血管损伤的影像特征及研究进展进行综述。

[关键词] 放射治疗;心脏血管损伤;磁共振;CT断层成像;超声;核医学成像

DOI:10.13201/j.issn.1001-1439.2024.08.015

[中图分类号] R541 **[文献标志码]** A

Imaging manifestations and research progress of radiotherapy-related cardiovascular injury

YANG Mengxi¹ XU Wenting¹ DAI Quan² DIAO Wei³ ZHOU Peng¹

(¹Department of Imaging; ²Department of Ultrasound; ³Department of Nuclear Medicine, Sichuan Cancer Clinical Medical Research Center, Sichuan Cancer Hospital and Research Institute, Sichuan Cancer Prevention Center Affiliated Cancer Hospital of University of Electronic Science and Technology, Chengdu, 610041, China)

Corresponding author: ZHOU Peng, E-mail: penghyzhou@126.com

Abstract As a vital therapy for tumors, radiotherapy effectively controls the progression of cancer; however, radiotherapy also leads cardiovascular injury and increases the risk of poor long-term prognosis. There are various manifestations of radiotherapy-related cardiovascular injury, including coronary heart disease, pericarditis, valvular heart disease, cardiomyopathy, chest and neck vascular atherosclerosis. Imaging examination plays an important role in the diagnosis and treatment of radiotherapy-related cardiovascular diseases, which provides key information for clinical diagnosis, routine follow-up and prognosis prediction. Therefore, this article reviews the imaging characteristics and research progress according to the types of radiotherapy-related cardiovascular diseases.

Key words radiotherapy; cardiovascular injury; magnetic resonance imaging; X-ray computed tomography; ultrasonography; radionuclide imaging

放疗是淋巴瘤、乳腺癌等恶性肿瘤的重要治疗手段之一,可有效控制肿瘤进展,提高患者远期生存率。然而,伴随患者生存期逐渐延长,放疗相关心血管损伤的发生率逐渐增高,是患者远期预后不良的危险因素^[1-2]。研究显示,肿瘤患者心血管不良事件的发生与胸部放疗独立相关,且发生率随着放疗剂量的增加而增加^[3-5]。在放疗相关心血管损伤的临床诊疗中,影像学检查能够无创监测心血管

损伤、指导临床干预、评价治疗效果,对改善患者心血管预后具有重要意义^[2]。鉴于胸部放疗相关心血管损伤诊断的临床价值日益重要,本文将对放疗相关心血管损伤的影像学特征与相关研究进展进行综述。

1 放疗相关心血管损伤的发病机制与危险因素

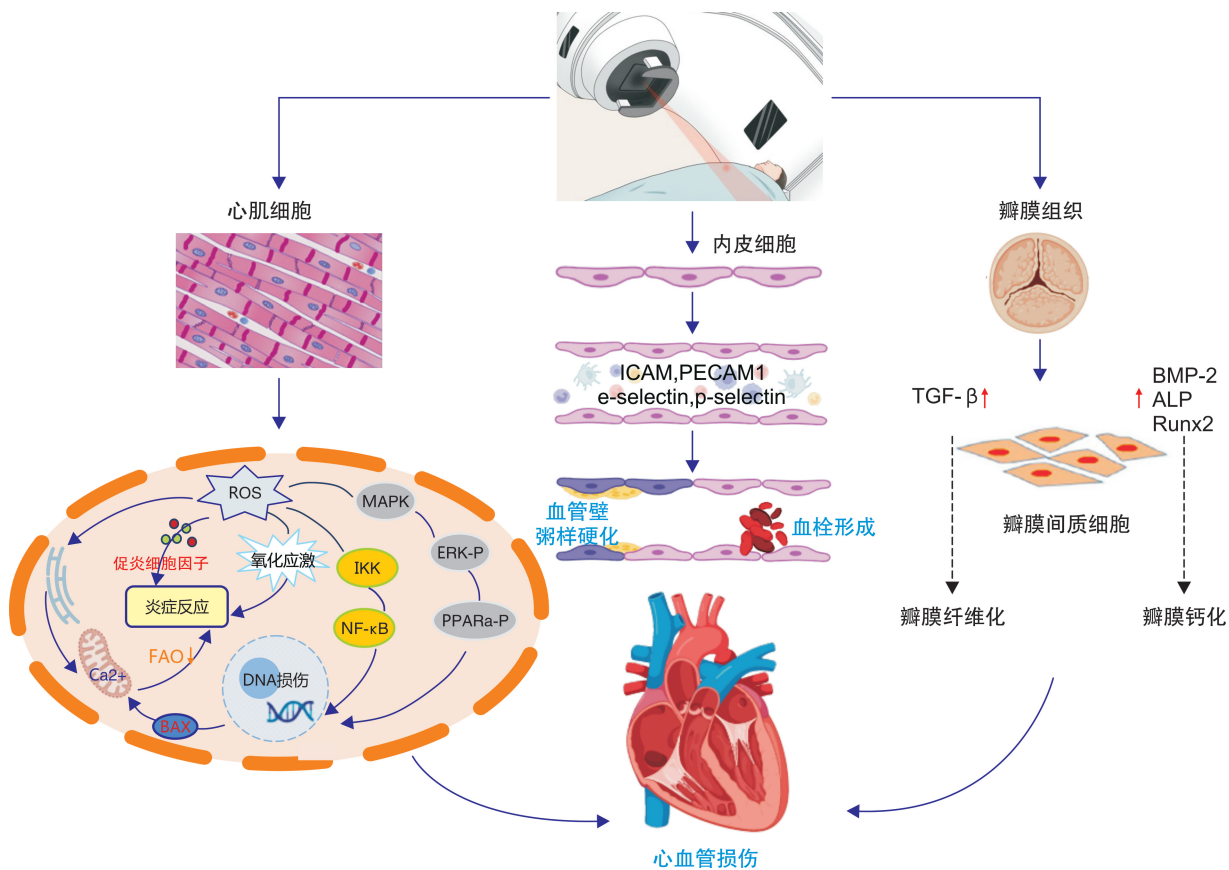
放疗可导致血管内皮细胞功能紊乱、破坏内皮屏障完整性,使血管扩张、血管壁通透性增加,引发急性炎症反应。炎症通路信号上调进一步促进血管壁粥样硬化、血管腔内血栓形成。心肌细胞受到电离辐射后发生炎症与氧化应激反应,严重者细胞死亡、随后由纤维组织替代^[6]。电离辐射还会促进瓣膜组织内成纤维细胞的增殖、胶原合成的增加,从而引起组织纤维化;成骨因子受到刺激会诱导成骨,从而导致瓣膜钙化^[7]。尽管放疗相关心血管损伤的发病机制尚未完全阐明,但一些信号通路已被明确参与并促进了疾病的进展(图1)^[6-7]。

*基金项目:国家自然科学基金(No:82202094);四川省自然科学基金(No:2022NSFSC1600、2023NSFSC1719);四川省肿瘤医院优秀青年基金(No:YB2023014)

¹四川省肿瘤临床医学研究中心影像科 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(成都,610041)

²四川省肿瘤临床医学研究中心超声科 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

³四川省肿瘤临床医学研究中心核医学科 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
通信作者:周鹏, E-mail: penghyzhou@126.com



ROS:活性氧;BAX:BCL2 相关蛋白;IKK:核因子 κ B 激酶抑制剂;NF- κ B:核转录因子- κ B;MAPK:丝裂原活化蛋白激酶;ERK-P:细胞外调节蛋白激酶;PPAR α -P:过氧化物酶体增殖物激活受体 α ;ICAM:细胞间黏附分子;PECAM1:血小板内皮细胞黏附分子;e-selectin:e 选择蛋白;p-selectin:p 选择蛋白;TGF- β :组织生长因子- β ;BMP-2:骨形态发生蛋白-2;ALP:碱性磷酸酶;Runx2:转录因子 RUNX2。

图 1 放疗相关心血管损伤的分子机制示意图

Figure 1 Molecular mechanism of radiation-related cardiovascular injury

胸部肿瘤放疗时,射线照射的范围可覆盖心包、冠状动脉(冠脉)、心脏瓣膜、心肌组织以及胸部与邻近颈部的大血管,从而引发多种心血管疾病:①心包放射性损伤可发展为心包炎。②冠脉内皮细胞受损,可导致冠心病或进一步加重原有冠心病的严重程度。③心脏瓣膜受损,可导致瓣膜狭窄或关闭不全。④心肌放射性损伤可引起炎症反应;心肌微血管受损可导致心肌缺血性损伤。严重的心肌损伤最终发展为心肌纤维化。⑤颈胸部大血管内皮细胞受到辐射,同样会促进大血管粥样硬化进展。根据发病与放疗的时间间隔,放疗相关心血管损伤可分为急性与慢性反应(表 1)^[2,8]。急性反应发生率较低,且多数发病隐匿;放疗结束后不久,患者出现心血管相关症状可提示急性反应的发生。慢性反应往往在放疗后几年发生,相关症状与心血管原发疾病较难鉴别。

随着对放疗相关心血管损伤的逐渐了解,以下因素也被认为与放疗相关血管损伤的发生存在密切联系,包括放疗部位为前胸部或左胸部、单次放射剂量高(>2 Gy/d)、累计放射剂量高(>30 Gy)、接受放疗年龄 <50 岁、同时接受化疗(蒽环类药物

作用明显)、合并心血管危险因素(高血压、高血脂、糖尿病等)以及既往心血管病史等^[2]。

2 放疗相关心血管损伤的影像学评价及其临床价值

2.1 冠心病

放疗可引起冠脉损伤并加速动脉粥样硬化进展。乳腺癌左胸放疗时左冠脉前降支易受到照射,而淋巴瘤放疗则更多累及左冠脉主干、回旋支与右冠脉^[2]。放疗引发的冠脉开口处粥样硬化并不少见且危险性较高^[2]。

冠脉造影是诊断冠心病的金标准,可同时对冠心病进行介入性治疗。然而,该检查具有侵入性且辐射剂量高,通常并不用作放疗后患者的常规检查手段^[9]。

目前,心脏 CT 已经成为放疗患者冠脉随访最常用的检查手段,其中 CT 冠脉血管成像是诊断冠心病最佳的非侵入性检查手段,可清晰地显示冠脉粥样硬化斑块的形态与性质、受累血管的狭窄程度^[10-11];基于心脏 CT 平扫分析的冠脉钙化分数可反映粥样斑块的危险程度,进一步预测患者的心血管预后^[12-13]。多项研究通过对放疗患者心脏 CT 数据的分析证实,放疗可显著增加患者罹患冠心病

的风险,且放射剂量与冠心病发病率、冠脉钙化积分呈明显正相关^[14-17]。随着CT新技术的发展,心脏CT功能与组织学成像有潜力为冠心病的诊疗提供更多有价值的信息;心脏CT心动周期全期像扫描可测量左右心室运动功能^[18],评估冠心病患者心脏运动功能受损。CT心肌灌注与CT冠脉血管成像相结合能够完成冠脉形态与心肌供血的一

站式评价,进一步提高冠心病的诊断准确率^[8,19-20]。基于CT心肌增强延迟扫描的细胞外间隙(extra-cellular volume,ECV),可实现冠心病心肌纤维化定性诊断与定量评价^[21-22]。目前,这些新技术在放疗相关冠脉损伤的应用报道较少,相关领域值得进一步探索。

表1 放疗相关心血管损伤急慢性反应
Table 1 Acute and chronic reactions of radiation-related cardiovascular injuries

疾病类型	急性反应	慢性反应
冠心病	作用不明显(放疗6个月后才可能出现心肌灌注缺损或心肌运动障碍)	- 促进冠心病更早发病 - 加重冠心病的严重程度 - 放疗后10年以上才出现临床症状(年龄小于50岁的患者多于10年后发病,年龄更大的患者潜伏期更长) - 好发部位为冠脉开口和近段
心包炎	- 急性渗出性心包炎相对罕见(多由于接受放疗的肿瘤靠近心脏) - 迟发性急性心包炎发生于放疗后数周内,可表现为有症状的心包炎或无症状的心包积液,心脏填塞较为罕见	- 慢性心包炎多发生于放疗后数周或者数年后,表现为心包泛增厚、粘连,以及心包积液 - 缩窄性心包炎发生率4%~20%,与放疗剂量相关
心脏瓣膜疾病	作用不明显	- 表现为瓣膜的增厚、纤维化、缩短和钙化 - 瓣膜反流比瓣膜狭窄更为常见,好发于二尖瓣与主动脉瓣 - 瓣膜狭窄好发于主动脉瓣 - 发病率与辐射剂量呈正相关
心肌病	急性心肌炎可导致心脏运动功能轻度减低或心电图异常	- 心肌纤维化可导致心脏舒张与收缩功能障碍、心律失常 - 严重者可发展为限制心肌病甚至心力衰竭
颈动脉、主动脉粥样硬化	作用不明显	- 血管壁粥样硬化斑块形成,多位于照射范围内 - 相比原发性血管粥样硬化,放疗导致的粥样硬化病变长度更长、累及范围更广

负荷超声心动图与SPECT心肌灌注成像可诊断放疗相关冠脉损伤导致的心肌缺血。放疗后冠脉损伤致使血流储备能力下降,负荷超声心动图可显示受累冠脉供血区域心肌异常运动。研究数据显示,无症状放疗患者中14%~17%存在心脏运动功能障碍^[2,23]。SPECT能够诊断放疗患者冠脉损伤引起的心肌灌注异常。文献证实在接受放疗后,患者SPECT静息态与负荷态成像心肌灌注异常的发生率增加,且灌注异常与患者的胸痛发作密切相关^[2,23-24]。

心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)多序列成像可对心脏功能、心肌组织特征及血流灌注等进行一站式评价,可为放疗相关冠心病的诊断与危险分层提供关键信息。CMR心肌首过灌注成像可诊断冠心病导致的心肌缺血,表现为受累冠脉对应供血区域的心肌灌注减低或灌注缺损^[25-26]。研究显示,在53例接受过胸部放疗的淋巴瘤患者中,CMR心肌灌注缺损的发生率明显高于同龄健康志愿者(约68%),这可能与放疗导致

的冠心病相关^[27]。近年来,新兴CMR全定量灌注技术能够自动生成心肌血流量的伪彩图,实现了冠心病的心肌缺血的客观量化^[28-29]。CMR延迟强化可显示冠心病导致的局灶性心肌纤维化,表现为心内膜下或透壁性异常强化影。肿瘤患者合并心血管疾病时,症状通常并不典型,有时需与心肌炎、心肌病等进行鉴别,心内膜下延迟强化是冠心病的典型表现,可为临床诊断提供参考^[25]。CMR心脏电影成像还可评价冠心病是否引起心脏运动功能障碍。研究数据证实,基于CMR的心肌灌注缺损、左心室射血分数下降(心脏运动功能障碍)是冠心病远期心血管不良预后的独立预测因子^[30]。得益于运动校正、成像加速、冠脉重建等技术的发展,MR冠脉成像的图像质量显著提高、采集速度明显加快,在冠脉管腔狭窄、斑块的危险性的诊断中显示出较好的应用前景,有望为放疗相关冠心病的诊断提供更多有价值的信息^[31]。研究表明CMR可良好地显示放疗导致的心肌缺血(包括心肌灌注缺损、心内膜下延迟强化等)^[27,32-34];2022年欧洲心脏

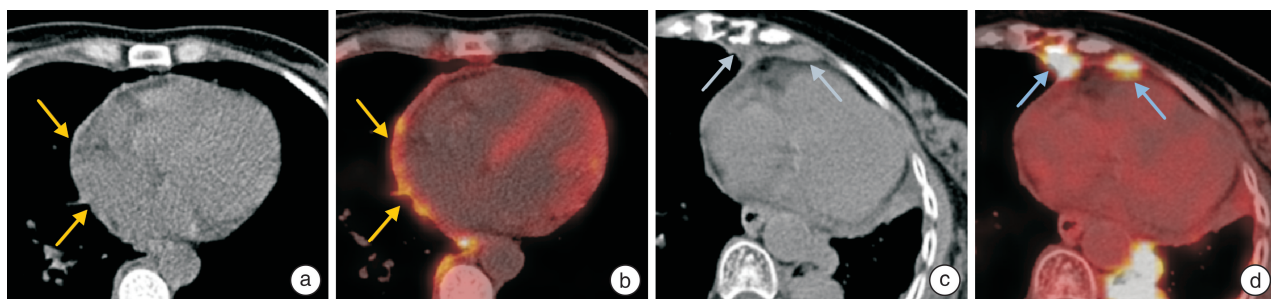
病学会肿瘤心脏病指南亦肯定了 CMR 对于肿瘤患者非阻塞性冠心病的诊断价值^[35]。然而,目前针对放疗相关冠心病的 CMR 前瞻性研究相对较少,尤其 CMR 新技术在本病诊疗中的应用价值尚需后续探究。

2.2 心包炎

放射导致的心包炎,急性期表现为心包增厚与心包积液;慢性期,心包炎可吸收痊愈,也可发展为心包钙化或缩窄性心包炎。急性期,心包增厚二维超声表现为心包回声增强,心包积液表现为心脏外围的无回声区^[2,36]。缩窄性心包炎超声可表现为以下征象:心包增厚、左心室舒张受限、呼气相室间隔明显的舒张性反跳、吸气相二尖瓣 E 波速率变异 $>25\%$ 等^[2]。心脏 CT 与 CMR 对放疗相关心包炎同样具有良好的诊断价值。与超声心动图比较,心

脏 CT 与 CMR 能够更加灵敏地检测心包增厚与心包积液;增强扫描心包明显强化可进一步明确心包炎诊断^[37]。针对心包钙化,心脏 CT 是最灵敏的影像检查手段。心脏 CT 和 CMR 还可清晰显示缩窄性心包炎引起的一系列形态学改变,包括心房扩大、腔静脉扩张、胸腔积液等^[2]。

^{18}F -FDG PET 功能成像可以反映细胞代谢的活性,其结合 CT 或 MR 等结构成像能够更加准确地诊断放疗引发的急性心包炎^[37]。由于炎性细胞浸润,PET 成像上心包炎表现为 FDG 摄取轻-中度升高。更为重要的是,PET 成像可为肿瘤患者心包转移与心包炎的鉴别诊断提供关键信息,心包转移在 PET-CT 成像上通常表现为心包不均匀增厚、心包 FDG 摄取量显著增高(图 2)^[38]。



心包炎在 PET-CT 上表现为心包均匀增厚(A 黄色箭头),FDG 摄取量呈中度升高(B 黄色箭头);心包转移在 PET-CT 上表现为心包不均匀、结节样增厚(C 蓝色箭头),FDG 摄取量明显增高(D 蓝色箭头)。

图 2 PET-CT 示心包炎

Figure 2 Pericarditis in PET-CT

2.3 心脏瓣膜疾病

放疗引起的心脏瓣膜病可表现为:主动脉根部、主动脉瓣环、主动脉瓣小叶、主动脉瓣间、二尖瓣环、二尖瓣叶基部和中部的纤维化与钙化;其中二尖瓣尖与二尖瓣连接处较少受到累及,这可与风湿性心瓣膜病相鉴别^[2]。放疗相关瓣膜病以二尖瓣与主动脉瓣反流最为常见^[39-40]。

超声心动图是心脏瓣膜疾病的首选检查手段,可清晰地显示瓣膜增厚、粘连、钙化以及运动异常。与此同时,超声心动图还可评价心脏瓣膜病变引起的血流动力学改变与心脏运动功能障碍(图 3)。心脏 CT 对于瓣膜病变的形态学评价同样具有价值,可清晰地显示病变瓣膜的形态、反流口大小以及主动脉根部扩张情况。目前,心脏 CT 已经成为心脏瓣膜病介入治疗术前评估的重要检查项目^[2,41]。CMR 平面成像与相位成像,可测量瓣膜开口面积与跨瓣血流速度;基于 CMR 电影序列对心房与心室舒张末期、收缩末期容积的测量可进一步计算瓣膜的反流量。CMR 4D-flow 新技术能够更加系统地评价血流动力学改变,目前是心脏瓣膜疾病的研究热点^[41-42]。但由于操作难度较大、检查

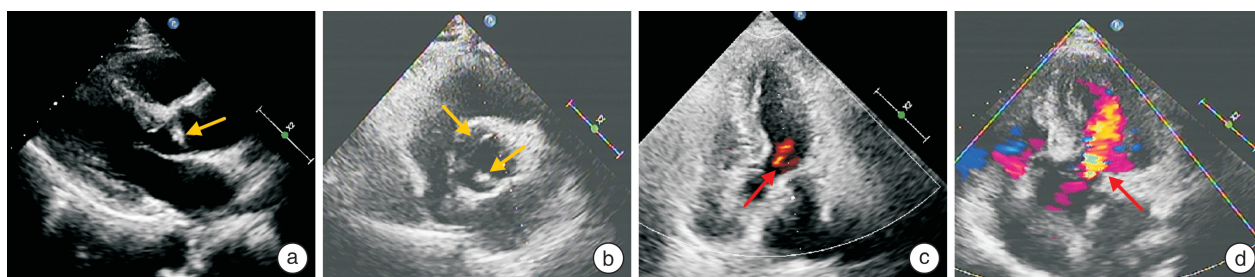
时间较长,CMR 在心脏瓣膜疾病中普及程度尚不及心脏超声与心脏 CT^[43]。

2.4 心肌病

电离辐射引起心肌损伤,急性期表现为心肌炎症反应;严重的损伤可导致心肌细胞死亡,最终由纤维组织替代;心肌组织纤维化范围广泛时,甚至可进展为限制性心肌病^[2]。相比其他影像学检查手段,CMR 对心肌组织的病理学评价具有明显的优势;CMR T1 加权早期强化扫描与 T2 加权成像,可定性诊断心肌水肿与炎症。CMR T1 mapping 及 T2 mapping 组织定量技术,可量化心肌水肿程度,对心肌炎症的诊断更加客观、准确(图 4)。针对心肌纤维化,CMR 增强延迟扫描是评价心肌局灶性纤维化的金标准;基于 CMR T1 mapping 计算的 ECV 可量化评价纤维化,对检测心肌弥漫性纤维化更具优势^[44]。多项研究显示 CMR 增强延迟扫描可良好地显示放疗患者的心肌局灶性纤维化^[45-48]。Takagi 等^[47]发现 T1 mapping 可早于传统延迟增强扫描,发现放疗患者室间隔心肌的异常改变。然而,Ricco 等^[45]与 Tahir 等^[48]采用 T1 mapping 与 T2 mapping 对放疗患者心肌组织进行

评价,却发现放疗前、后相关参数并无明显统计学差异。以上矛盾结果可能是由于不同研究间放疗剂量、随访时间的差异造成的。T1 mapping 与 T2

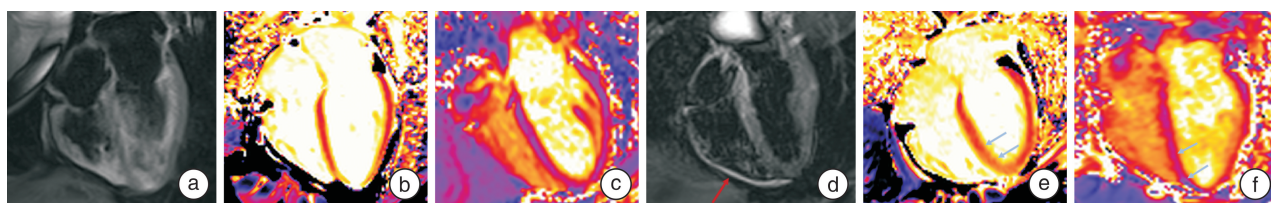
mapping 对放疗后患者心肌组织学改变的诊断价值尚需更多研究进一步明确。



超声心动图(a,b)清晰显示了主动脉瓣的增厚与钙化(黄色箭头);彩色多普勒成像(c,d)可敏感检测到瓣膜病变导致的血流动力学改变(红色箭头)(c为主动脉瓣轻度反流,d为主动脉瓣重度反流)。

图3 超声心动图

Figure 3 Echocardiography



a~c为放疗前CMR心肌成像;d~f为放疗后CMR心肌成像;T2WI显示患者放疗后心包出现少量积液(红色箭头)、心肌信号无明显改变(a,d),而T1 map(b,e)及T2 map(c,f)显示室间隔中部及左心室心尖部心肌信号出现增高(蓝色箭头),以T1 map增高更为明显,这提示放疗引起了心肌水肿。

图4 47岁左侧乳腺癌女性患者接受50 Gy胸部放疗

Figure 4 A 47-year-old woman with left side breast cancer received 50 Gy chest radiotherapy

2.5 心功能不全

放疗相关心脏损伤的类型多种多样,最终都可导致心脏运动功能障碍。虽然心脏运动功能障碍并非为放疗相关心脏损伤的特异性表现,但其能反映心脏损伤的严重程度,有利于患者的危险分层与预后评估。超声心动图和CMR是评价心脏运动功能最常用的检查方法(图5)^[49]。放疗常引起节段性心肌运动障碍,好发于左心室下壁^[2],病变严重时可能导致左心室射血分数下降。针对左心室射血分数保留的患者,心肌应力分析技术可更加灵敏地识别亚临床心脏运动功能障碍^[50-51]。Lo等^[52]的研究对接受放疗的乳腺癌患者进行了跟踪随访,结果显示尽管患者左心室射血分数无明显改变,但左心室纵向与径向应力均于放疗后明显降低,且应力降低与心脏辐射剂量存在相关性。

心脏舒张功能障碍发生多早于收缩功能障碍,对舒张功能障碍的评价有利于更早地识别放疗相关心脏损伤。既往研究显示,在无症状的放疗患者中,部分患者可出现心脏舒张功能障碍,其发生率甚至高于收缩功能障碍^[2]。放疗相关心脏损伤可导致缩窄性心包炎与限制性心肌病,并对心脏舒张功能造成进一步损害。超声心动图对心脏舒张功

能的评价具有优势,临床常用的技术主要包括常规多普勒与组织多普勒^[53]。

2.6 颈动脉、主动脉粥样硬化

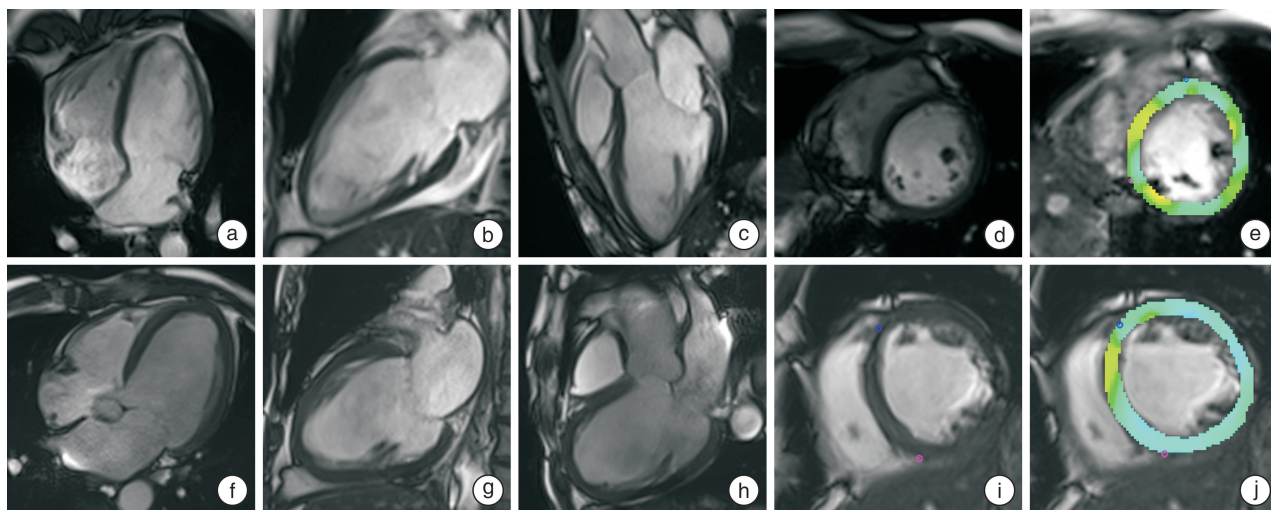
放疗在引发心脏损伤的同时,还会对照射野中的大血管造成伤害。研究证明,放疗会加剧主动脉与颈动脉粥样硬化的进展,进一步增加心脑血管不良事件发生的风险^[2]。与原发性和动脉粥样硬化相比,放疗导致的粥样硬化病变长度更长、累及范围更广,有时还可出现在原发性动脉粥样硬化较少累及的部位。针对放疗导致的颈动脉粥样硬化,颈动脉超声具有良好的诊断价值,该检查可清晰地显示颈动脉内膜中层的增厚以及动脉管腔的狭窄。相关超声研究显示,与未接受放疗的对照组相比,放疗患者颈动脉中层内膜明显增厚、管壁钙化及管腔狭窄更为严重^[54-56]。CT与磁共振血管成像对动脉斑块的诊断同样具有价值,它们不仅可以清晰地显示动脉粥样斑块的形态,还可判断斑块的组成成分。除此之外,磁共振相位对比成像还有潜力评估受累血管狭窄处的血流动力学改变^[2]。

2.7 鉴别诊断

放疗相关心血管疾病与对应的原发性心血管疾病往往具有较为相似的影像学表现,临床病史和

疾病好发部位可为两者的鉴别诊断提供参考。若患者近期接受放疗且排除原发性心血管疾病危险因素,依据临床症状与影像学征象可准确诊断放疗相关急性心血管损伤。接受放疗后数年甚至数十年发生心血管疾病的患者,根据病史需考虑到放疗相关慢性心血管损伤的可能性^[2,6]。依据发病机制及解剖学特点,原发性心血管疾病往往具有其好发部位;而放疗相关心血管损伤的发病位置通常与放

疗照射野吻合^[2,47],根据影像学上发病位置的不同有助于进一步明确诊断。例如,接受左乳腺癌放疗患者左心室前壁可出现局限性运动功能障碍,与放疗照射区域相似^[57];且左乳放疗患者的左冠脉前降支更易发生冠脉粥样硬化^[58]。需要注意的是,临床诊疗中相较于放疗相关心血管疾病与原发性心血管疾病两者的鉴别诊断,放疗后的定期影像学随访以及时发现心血管并发症更为重要。



健康志愿者(a~e)以及乳腺癌放疗患者(f~j)心脏电影图像及后处理应力图像。61岁女性健康志愿者(左心室射血分数:65%;GLS:-17.7%;GRS:40.6%;GCS:-21.2%);63岁男性乳腺癌患者,化疗后12年、肺转移放化疗后4年,左心室呈球形增大,左心室射血分数以及应力明显减低(左心室射血分数:38%;GLS:-8.55%;GRS:20.09%;GCS:-12.12%)。GLS:左心室整体纵向应力;GRS:左心室整体径向应力;GCS:左心室整体周向应力。

图5 健康志愿者以及乳腺癌放疗患者心脏影像

Figure 5 Heart imaging of healthy volunteers and patients with breast cancer radiation therapy

3 小结

放疗相关心血管损伤表现多样,而针对不同心血管损伤适宜的影像检查手段也不尽相同。放疗相关心血管损伤的临床表现多缺乏特异性,且以慢性反应多见。因此,正确认识不同心血管损伤的影像学表现,在放疗后定期地进行影像学随访,有助于放疗相关心血管并发症的早期诊断与干预治疗。随着影像技术的进步与发展,新兴的成像技术与图像分析手段有望更早地识别放疗相关心血管损伤,从而为临床诊疗及预后评估提供更多有价值的信息。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Zamorano JL, Lancellotti P, Rodriguez Muñoz D, et al. 2016 ESC Position Paper on cancer treatments and cardiovascular toxicity developed under the auspices of the ESC Committee for Practice Guidelines; The Task Force for cancer treatments and cardiovascular toxicity of the European Society of Cardiology(ESC)[J]. Eur Heart J, 2016, 37(36):2768-2801.
- [2] Lancellotti P, Nkomo VT, Badano LP, et al. Expert consensus for multi-modality imaging evaluation of cardiovascular complications of radiotherapy in a-

- dults; a report from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2013, 26(9):1013-1032.
- [3] Atkins KM, Chaunzwa TL, Lamba N, et al. Association of left anterior descending coronary artery radiation dose with major adverse cardiac events and mortality in patients with non-small cell lung cancer[J]. JAMA Oncol, 2021, 7(2):206-219.
- [4] Henson KE, McGale P, Darby SC, et al. Cardiac mortality after radiotherapy, chemotherapy and endocrine therapy for breast cancer: Cohort study of 2 million women from 57 cancer registries in 22 countries[J]. Int J Cancer, 2020, 147(5):1437-1449.
- [5] Atkins KM, Rawal B, Chaunzwa TL, et al. Cardiac radiation dose, cardiac disease, and mortality in patients with lung cancer[J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73(23):2976-2987.
- [6] Meattini I, Poortmans PM, Aznar MC, et al. Association of breast cancer irradiation with cardiac toxic effects: a narrative review[J]. JAMA Oncol, 2021, 7(6):924-932.
- [7] Monte IP, Cameli M, Losi V, et al. Valvular damage[J].

- J Cardiovasc Echogr, 2020, 30(Suppl 1): S26-S32.
- [8] Wang H, Wei J, Zheng Q, et al. Radiation-induced heart disease: a review of classification, mechanism and prevention[J]. Int J Biol Sci, 2019, 15(10): 2128-2138.
- [9] Levine GN, Bates ER, Blankenship JC, et al. 2011 ACCF/AHA/SCAI Guideline for Percutaneous Coronary Intervention: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions[J]. Circulation, 2011, 124(23): e574-e651.
- [10] Narula J, Chandrashekar Y, Ahmadi A, et al. SCCT 2021 Expert Consensus Document on Coronary Computed Tomographic Angiography: A Report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2021, 15(3): 192-217.
- [11] Rosmini S, Aggarwal A, Chen DH, et al. Cardiac computed tomography in cardio-oncology: an update on recent clinical applications[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2021, 22(4): 397-405.
- [12] ÓHartaigh B, Gransar H, Callister T, et al. Development and validation of a simple-to-use nomogram for predicting 5-, 10-, and 15-year survival in asymptomatic adults undergoing coronary artery calcium scoring[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11(3): 450-458.
- [13] 曹丰, 孙婷. 无创影像及智能分析技术在老年冠心病诊疗中的应用[J]. 临床心血管病杂志, 2023, 39(10): 741-744.
- [14] Tagami T, Almahariq MF, Balanescu DV, et al. Usefulness of coronary computed tomographic angiography to evaluate coronary artery disease in radiotherapy-treated breast cancer survivors[J]. Am J Cardiol, 2021, 143: 14-20.
- [15] Gal R, van Velzen SGM, Hooning MJ, et al. Identification of risk of cardiovascular disease by automatic quantification of coronary artery calcifications on radiotherapy planning CT scans in patients with breast cancer[J]. JAMA Oncol, 2021, 7(7): 1024-1032.
- [16] Milgrom SA, Varghese B, Gladish GW, et al. Coronary artery dose-volume parameters predict risk of calcification after radiation therapy[J]. J Cardiovasc Imaging, 2019, 27(4): 268-279.
- [17] Yakupovich A, Davison MA, Kharouta MZ, et al. Heart dose and coronary artery calcification in patients receiving thoracic irradiation for lung cancer[J]. J Thorac Dis, 2020, 12(3): 223-231.
- [18] Fu H, Wang X, Diao K, et al. CT compared to MRI for functional evaluation of the right ventricle: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2019, 29(12): 6816-6828.
- [19] Takx R, Celeng C, Schoepf UJ. CT myocardial perfusion imaging: ready for prime time? [J]. Eur Radiol, 2018, 28(3): 1253-1256.
- [20] Lopez-Mattei JC, Yang EH, Ferencik M, et al. Cardiac computed tomography in cardio-oncology: JACC CardioOncology Primer[J]. JACC Cardio Oncol, 2021, 3(5): 635-649.
- [21] Tanabe Y, Kido T, Kurata A, et al. Late iodine enhancement computed tomography with image subtraction for assessment of myocardial infarction[J]. Eur Radiol, 2018, 28(3): 1285-1292.
- [22] Wang R, Liu X, Schoepf UJ, et al. Extracellular volume quantitation using dual-energy CT in patients with heart failure: Comparison with 3T cardiac MR [J]. Int J Cardiol, 2018, 268: 236-240.
- [23] Cuomo JR, Javaheri SP, Sharma GK, et al. How to prevent and manage radiation-induced coronary artery disease[J]. Heart, 2018, 104(20): 1647-1653.
- [24] Pak S, Hawash AA, Linares J, et al. Myocardial damage on SPECT imaging among patients treated with radiotherapy for left-sided breast cancer: Systematic review with meta-analysis and narrative synthesis[J]. J BUON, 2018, 23(4): 910-918.
- [25] Edvardsen T, Asch FM, Davidson B, et al. Non-Invasive Imaging in Coronary Syndromes: Recommendations of The European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography, in Collaboration with The American Society of Nuclear Cardiology, Society of Cardiovascular Computed Tomography, and Society for Cardiovascular Magnetic Resonance [J]. J Am Soc Echocardiogr, 2022, 35(4): 329-354.
- [26] Hendel RC, Friedrich MG, Schulz-Menger J, et al. CMR first-pass perfusion for suspected inducible myocardial ischemia [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2016, 9: 1338-1348.
- [27] Machann W, Beer M, Breunig M, et al. Cardiac magnetic resonance imaging findings in 20-year survivors of mediastinal radiotherapy for Hodgkin's disease[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 79(4): 1117-1123.
- [28] Hsu LY, Jacobs M, Benovoy M, et al. Diagnostic performance of fully automated pixel-wise quantitative myocardial perfusion imaging by cardiovascular magnetic resonance[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11(5): 697-707.
- [29] Mygind ND, Michelsen MM, Pena A, et al. Coronary microvascular function and myocardial fibrosis in women with angina pectoris and no obstructive coronary artery disease: the iPOWER study[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2016, 18(1): 76.
- [30] El Aidi H, Adams A, Moons KG, et al. Cardiac magnetic resonance imaging findings and the risk of cardiovascular events in patients with recent myocardial infarction or suspected or known coronary artery disease: a systematic review of prognostic studies[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(11): 1031-1045.
- [31] Hajhosseiny R, Bustin A, Munoz C, et al. Coronary magnetic resonance angiography: technical innovations leading us to the promised land? [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(12): 2653-2672.
- [32] van der Velde N, Janus CPM, Bowen DJ, et al. Detection of subclinical cardiovascular disease by cardiovas-

- cular magnetic resonance in lymphoma survivors[J]. JACC Cardio Oncol, 2021, 3(5):695-706.
- [33] Umezawa R, Ota H, Takanami K, et al. MRI findings of radiation-induced myocardial damage in patients with oesophageal cancer [J]. Clin Radiol, 2014, 69(12):1273-1279.
- [34] Burke AM, Yeh C, Kim S, et al. A prospective study of early radiation associated cardiac toxicity following neoadjuvant chemoradiation for distal esophageal cancer[J]. Front Oncol, 2020, 10:1169.
- [35] Lyon AR, López-Fernández T, Couch LS, et al. 2022 ESC Guidelines on cardio-oncology developed in collaboration with the European Hematology Association (EHA), the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology (ESTRO) and the International Cardio-Oncology Society (IC-OS)[J]. Eur Heart J, 2022, 43(41):4229-4361.
- [36] 黄勇. 放射性心血管疾病的研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(4):349-353.
- [37] Alter P, Figiel JH, Rupp TP, et al. MR, CT, and PET imaging in pericardial disease[J]. Heart Fail Rev, 2013, 18(3):289-306.
- [38] Shim HK, Kim MR, Lee H. Fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography identifying pericardial metastasis from early-stage p16-positive oropharyngeal cancer [J]. Clin Case Rep, 2020, 8(7):1261-1264.
- [39] Wang H, Wei J, Zheng Q, et al. Radiation-induced heart disease: a review of classification, mechanism and prevention[J]. Int J Biol Sci, 2019, 15(10):2128-2138.
- [40] Poltavskaya MG, Emelina EI, Avdeev YV, et al. Heart valve injury due to radiation therapy[J]. Kardiologiia, 2019, 59(2S):56-68.
- [41] Shah DJ. 4D Flow CMR: The final frontier in valvular heart disease? [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2021, 14(7):1367-1368.
- [42] Corrias G, Cocco D, Suri JS, et al. Heart applications of 4D flow[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2020, 10(4):1140-1149.
- [43] Francone M, Budde RPJ, Bremerich J, et al. CT and MR imaging prior to transcatheter aortic valve implantation: standardisation of scanning protocols, measurements and reporting-a consensus document by the European Society of Cardiovascular Radiology (ESCR)[J]. Eur Radiol, 2020, 30(5):2627-2650.
- [44] Plana JC, Thavendiranathan P, Bucciarelli-Ducci C, et al. Multi-Modality Imaging in the Assessment of Cardiovascular Toxicity in the Cancer Patient[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11(8):1173-1186.
- [45] Ricco A, Slade A, Canada JM, et al. Cardiac MRI utilizing late gadolinium enhancement (LGE) and T1 mapping in the detection of radiation induced heart disease [J]. Cardiooncology, 2020, 6:6.
- [46] Umezawa R, Ota H, Takanami K, et al. MRI findings of radiation-induced myocardial damage in patients with oesophageal cancer [J]. Clin Radiol, 2014, 69(12):1273-1279.
- [47] Takagi H, Ota H, Umezawa R, et al. Left Ventricular T1 mapping during chemotherapy-radiation therapy: serial assessment of participants with esophageal cancer[J]. Radiology, 2018, 289(2):347-354.
- [48] Tahir E, Azar M, Shihada S, et al. Myocardial injury detected by T1 and T2 mapping on CMR predicts subsequent cancer therapy-related cardiac dysfunction in patients with breast cancer treated by epirubicin-based chemotherapy or left-sided RT[J]. Eur Radiol, 2022, 32(3):1853-1865.
- [49] 李新立, 郑旭辉, 唐愿. 心脏磁共振成像在心力衰竭中的应用[J]. 临床心血管病杂志, 2023, 39(4):251-254.
- [50] Gavara J, Rodriguez-Palomares JF, Valente F, et al. Prognostic value of strain by tissue tracking cardiac magnetic resonance after ST-segment elevation myocardial infarction [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11(10):1448-1457.
- [51] Merckx R, Leerink JM, Feijen E, et al. Echocardiography protocol for early detection of cardiac dysfunction in childhood cancer survivors in the multicenter DCCSS LATER 2 CARD study: Design, feasibility, and reproducibility [J]. Echocardiography, 2021, 38(6):951-963.
- [52] Lo Q, Hee L, Batumalai V, et al. Subclinical cardiac dysfunction detected by strain imaging during breast irradiation with persistent changes 6 weeks after treatment[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 92(2):268-276.
- [53] Nagueh SF. left ventricular diastolic function: understanding pathophysiology, diagnosis, and prognosis with echocardiography[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(1 Pt 2):228-244.
- [54] Strüder D, Hellwig S, Rennau H, et al. Screening for irradiation vasculopathy by intima-media thickness sonography in head and neck cancer patients[J]. Eur Arch Otorhinolaryngol, 2021, 278(6):2017-2026.
- [55] Fernández-Alvarez V, López F, Suárez C, et al. Radiation-induced carotid artery lesions[J]. Strahlenther Onkol, 2018, 194(8):699-710.
- [56] Li Y, Kwong DL, Wu VW, et al. Computer-assisted ultrasound assessment of plaque characteristics in radiation-induced and non-radiation-induced carotid atherosclerosis[J]. Quant Imaging Med Surg, 2021, 11(6):2292-2306.
- [57] Jurcut R, Ector J, Erven K, et al. Radiotherapy effects on systolic myocardial function detected by strain rate imaging in a left-breast cancer patient[J]. Eur Heart J, 2007, 28(24):2966.
- [58] Cheng YJ, Nie XY, Ji CC, et al. Long-term cardiovascular risk after radiotherapy in women with breast cancer[J]. J Am Heart Assoc, 2017, 6(5):e005633.

(收稿日期:2023-07-14)