

影像学检查在心房颤动射频导管消融术的应用进展

廖佳 熊青松 凌智瑜 殷跃辉

(重庆医科大学附属第二医院心内科, 重庆 400010)

【摘要】 射频导管消融术已成为临床心房颤动的一线治疗方案,充分的术前和术后评估对提高手术的成功率及减少并发症有重要价值。近年来,随着各类新的影像学方法的出现及原有影像学技术的不断发展,心房颤动消融的围手术期评估体系呈现多元化态势。熟悉及准确地运用影像学检查,在指导患者选择、术前准备及预后判断中起着不可替代的作用。

【关键词】 心房颤动;射频导管消融术;多层螺旋 CT;心脏磁共振成像;心腔内超声

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2022.01.009

Imaging Examination in Radiofrequency Catheter Ablation of Atrial Fibrillation

LIAO Jia, XIONG Qingsong, LING Zhiyu, YING Yuehui

(Department of Cardiology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

【Abstract】 Radiofrequency catheter ablation has become the first-line treatment for atrial fibrillation in clinic, and adequate preoperative and postoperative evaluation is of great value in improving the success of surgery and reducing the complications. In recent years, with the emergence of various new imaging methods and the continuous development of existing imaging techniques, the perioperative evaluation system of atrial fibrillation ablation has been diversified. Familiar and accurate use of imaging examination plays an irreplaceable role in guiding patient selection, preoperative preparation and prognosis judgment.

【Key words】 Atrial fibrillation; Radiofrequency catheter ablation; Multislice spiral computed tomography; Cardiac magnetic resonance imaging; Intracardiac echocardiography

心房颤动(房颤)是最常见的心律失常,中国现存大约 1 000 万患者,且发病人数仍在逐年增长。最新指南提出:目前除了药物治疗外,对于有临床症状的房颤,射频导管消融术可作为房颤治疗的一线方案^[1]。但由于导管消融的侵袭性,标准化的导管消融程序需要在患者的选择、导管消融策略的制定和治疗监测方面做出全面的综合考虑^[2]。新的影像学设备的出现及原有常规影像学技术的不断发展,使得房颤导管消融围手术期的管理日趋成熟。现运用于临床的影像学检查包括多层螺旋 CT (multislice spiral computed tomography, MSCT)、心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance imaging, CMR)、经食管超声心动图检查(trans-esophageal echocardiography, TEE)以及心腔内超声(intracardiac echocardiography, ICE),合理地选用不同检查方式对导管消融术前、术中和术后均具有重要意义。现就近年来各类临床影像学检查在房颤射频消融术不同阶段的作用做一综述。

1 术前阶段:患者选择及术前准备

1.1 检测左心房和左心耳血栓

左心房或左心耳内血栓形成是房颤患者射频消融术的绝对禁忌证,目前 TEE 是检查左心房或左心耳血栓的金标准。2019 年美国心脏协会房颤指南^[2]及 2020 年欧洲心脏病协会房颤指南^[3]均推荐在导管消融术前必需进行 TEE 评估是否有左心房或左心耳血栓,但 TEE 是一种相对有创的检查技术,检查结果的准确性依赖于操作者的经验,且部分患者难以耐受^[4]。近年来国内外开展了大量临床试验以探索一种更加无创且可靠的检测方法。

MSCT 具有超高的扫描速度、空间分辨率和完善的后处理功能,可为分析左心耳及左心房功能提供技术支持。目前指南推荐 CT 检查可作为房颤患者射频消融术前不能耐受 TEE 的替代检查。Spagnolo 等^[5]对 260 例房颤患者在术前 2 h 内同时行 TEE 和 MSCT 检查,对比结果显示 TEE 诊断的全部血栓患者均可经

基金项目:重庆市科卫联合医学科研项目(2018ZDXM015);重庆市卫健委第五批高端人才项目(2019-181);重庆医科大学附属第二医院宽仁英才项目([2020]7)

通信作者:凌智瑜, E-mail: lingzy1977@163.com

延迟 MSCT 正确识别,无假阳性,且各时相的特异性及阳性预测值均为 100%。左心耳形态及功能是左心耳血栓形成的独立危险因素,MSCT 还可通过后处理技术重构出左心耳形态,采用心功能分析软件获得左心耳三维图像,并测量左心耳及左心房体积,从而计算左心耳射血分数并反映左心耳功能。

CMR 检测血栓的研究中,早期研究就发现,相比于 TEE,CMR 对血栓的诊断可能具有更高的敏感性。Kitkungvan 等^[6]的一项 meta 研究表明,延迟钆增强磁共振显像 (late gadolinium enhancement MRI, LGE-MRI) 检测左心房或左心耳血栓的总敏感性为 80%,特异性为 99.2%,更重要的是,LGE-MRI 可很好地鉴别肿瘤和血栓。

相较于 MSCT 和 CMR,超声检查一直有方便快捷和经济实惠等优点,近期有研究认为二维斑点追踪超声心动图可计算左心房应变及应变率以预测左心耳的排空速度与血栓风险,当左心耳排空速度 < 20 cm/s 时更易形成血栓。Zhu 等^[7]的研究提示当心房存储期纵向应变值 < 13% 时预测左心耳血流淤滞敏感性为 90%,特异性为 74%,可作为估计未来血栓栓塞风险的补充指标。

至此,通过 MSCT 和 CMR 以完全非侵入性的方式评估房颤患者术前左心房或左心耳的血栓情况,有望在一次检查中同时明确详细解剖结构和血栓。但目前 TEE 仍是术前筛查左心房或左心耳血栓的首选检查方式,对于无法耐受 TEE 的患者,MSCT 和 CMR 等可作为补充。

1.2 明确心房和肺静脉的解剖及解剖变异

房颤发病机制的研究表明,有 90% 房颤患者的肺静脉为其主要触发灶,实现肺静脉与心房的电隔离是目前房颤消融手术的基石。所以术前需运用 MSCT 或 MRI 全面了解患者的心腔内部结构、肺静脉回流、肺静脉口部径线以及入左心房方式,有助于制订肺静脉隔离消融策略,以保证手术安全和高效地进行。

肺静脉变异在房颤患者中较为常见,Skowerski 等^[8]通过分析 224 例房颤患者的 CT 详细解剖结果,发现肺静脉解剖异常易表现为右肺静脉直径增粗,并提出这种特异性可定义为房颤的图像生物标志物,且是预测房颤复发的独立因素^[9]。此外,据报道左上及左下肺静脉靠近腹尾侧的解剖类型在房颤复发患者中更为常见^[10],且左肺静脉共干与术后心律失常复发率增高的趋势相关^[11]。由于这一特性,相关肺静脉解剖变异处可能为潜在触发灶,术中可能倾向于消融该平面及定位为靶肺静脉。所以术前对肺静脉的全面解剖定位及评估可改变操作者对房颤治疗策略的制

定,从而更好地指导手术,减少房颤术后复发率。

同时值得一提的是另一类解剖变异——左心房憩室(left atrial diverticula, LAD),在房颤患者中检出率为 10%~46%^[12]。薄壁 LAD 多位于左心房前上壁,靠近常规的消融部位^[12],消融时的能量传递易导致心脏穿孔或心脏压塞等严重并发症,所以术中应尽量避免在此处消融。既往研究中较细小的 LAD 的检出均通过心脏 MSCT 和 CMR,而近期有病例报告也可通过 TEE 检出^[13]。所以术前通过各类影像学检查检出 LAD 的存在,可最大限度地减少消融穿孔的机会,提高手术的安全性。

2 术中阶段:精确指导手术实施

在房颤射频消融术中,准确地构建左心房及肺静脉模型,是肺静脉隔离及线性消融成功的基础。运用影像学图像指导三维建模,可提高建模的准确性,修正呼吸和位移引起的模型误差,提高手术成功率,减少术中并发症。目前多使用 CARTO-MERGE 和 CARTO-SOUND 用于指导建模。其基本原理均是将 CARTO 心脏三维电解剖标测系统与心脏影像数据集整合,以重建三维心脏模型,不同之处在于 CARTO-MERGE 主要利用的是术前进行的 CT 或 MRI 扫描图像,而 CARTO-SOUND 则直接基于术中 ICE 的三维超声图像。基于成像容积数据集的三维电解剖标测可跟踪导管的移动,实时获得心脏解剖结构,精确地指导消融导管到达靶点部位,判断导管与组织的贴靠,减少房间隔穿刺并发症,实时监测术中腔内变化,第一时间发现心房内微血栓、心包积液和心脏压塞等并发症,精确地指导手术的实施。

CARTO-MERGE 利用的是术前进行的 CT 或 MRI 扫描图像,存在一定的局限性,患者的心律状态、呼吸、心脏收缩和血流情况等都可影响图像整合的准确性,所以需尽量缩短 CT 三维重建距离手术电解剖构建的时间,且患者 CT 三维重建与电解剖构建时的心律要保持一致,这样才能减少图像整合的偏差^[14]。

最新的 CARTO-SOUND 利用超声导管获得三维图像进行导管消融手术,则可真正做到介入手术的零射线,真正意义上实现绿色电生理,并为特殊人群如孕妇、小孩、体质过敏、严重肝和肾功能不全以及低免疫等患者提供了更好的选择^[15]。同时针对于早期并发症的发现,CARTO-SOUND 也更具优势。超声导管可清楚和完全地描记食管左心房段,并将描记到的食管图像经 CARTO-SOUND 系统重建为食管的三维图像,在进行消融时可准确地避开,防止严重并发症如心房食管瘘的发生^[16]。以往三维标测技术并不能发现并监测术中左心房血栓情况,而 CARTO-SOUND 可

实时地监测术中血栓形成,减少栓塞事件的发生,且对于不能耐受 TEE 的患者,ICE 血栓检出敏感性远高于 TEE,避免术前 TEE 导管对食管造成的机械性损伤。Nakamura 等^[17]研究发现,在 ICE 指导下对 85 例房颤患者进行射频消融术时,使用 CARTO-SOUND 将超声导管在左心房、肺静脉顶部和后壁的实时成像相结合,有助于在射频消融径线的三维重建,进而实现更准确和可靠的导管消融点定位。

目前有学者认为 CARTO-SOUND 也具有一定的局限性。Rordorf 等^[18]以 MSCT 建立的三维图像作为金标准,研究了心腔内三维超声图像重建的精确度。结果提示 ICE 引导的解剖重建图像,在一定程度上低估了左心房和肺静脉的尺寸,可能的原因是仅从右心房的角观测左心房,则超声波束直接平行于左心房前壁,会造成一定的盲区。但若将导管进一步推进至冠状静脉窦口或左心房内,可能导致并发症的发生以及增加手术时间。并且目前 CARTO-SOUND 费用仍较高,从而限制了该项技术的广泛推广。

3 术后阶段:早期发现并发症和预测术后房颤复发

3.1 早期发现并发症

房颤的导管消融是最复杂的介入电生理过程之一。房颤消融的本质包括导管操作和在纤细的薄壁心房消融,相关解剖结构非常靠近其他重要的器官和结构,这些器官和结构可能会受到附带损伤的影响,一些并发症的发生可能会导致终生残疾甚至是死亡,所以需早期识别并处理术后并发症。

3.1.1 消融性左心房瘢痕

由于射频消融的组织损伤效应,术后及时行 LGE-MRI 可直观地显示术后瘢痕组织的位置和分布,判断消融损伤的连续性,预测术后复发风险。Linhardt 等^[19]对房颤患者术后 3 个月的 LGE-MRI 图像进行分析,以评估消融线间隙情况,结果提示消融线间隙长度与肺静脉隔离术后 1 年内房颤复发相关,消融间隙长度增加 10%,房颤复发可能增加 16%。Fochler 等^[20]通过对 102 例术后复发患者进行 LGE-MRI 引导的再次消融治疗,提出通过 LGE-MRI 检测的肺静脉隔离消融线间隙和浅层心房瘢痕进行靶向消融可实现瘢痕均质化,是治疗房颤消融后心律失常复发的可行和有效的方法,指导消融操作并缩短手术时间。但这种手术方案是否可用于房颤的初次射频消融中呢?现一项大型前瞻性随机对照试验 DECAAF II^[21]正在进行中,此试验将招募 900 例持续性房颤患者按 1:1 的方式被随机分配至传统肺静脉隔离组(对照组)及传统肺静脉隔离组 + LGE-MRI 引导靶向心房纤维消融组(试验组),随访两组患者术后心律失常的复发率,期待该研

究能带来更好的房颤消融结果。

3.1.2 心房食管瘘

心房食管瘘虽然发生率较低,但一旦发生,其死亡率为 80%,通过影像学检查可早期识别射频消融术后有食管瘘或穿孔风险的患者,尽早采取措施预防进一步恶化,降低死亡率。食管内镜检查仍是目前检测消融诱导的相应食管病变的金标准^[22]。近期 Halbfass 等^[23]通过对术后即行 LGE-MRI 和食管内镜检查结果对比,以评估食管热损伤,结果提示 LGE-MRI 检测的 T2 脂肪饱和序列、短时反转恢复序列和钆对比剂的延迟强化序列可及早识别食管穿孔和心房食管瘘的先兆表现,与食管内镜结果相比,所有三个序列联合诊断心房食管瘘的阳性预测值为 75%,阴性预测值为 97%,敏感性为 86%,特异性为 95%。另一项研究则认为 LGE-MRI 对中至重度食管热损伤的敏感性及阴性预测值均为 100%,认为 LGE-MRI 对房颤消融后食管热损伤的筛查具有极高的敏感性和阴性预测值^[24]。

3.1.3 肺静脉狭窄

肺静脉狭窄定义为肺静脉或肺静脉分支的直径减少,可分为轻度狭窄(直径减少 < 50%)、中度狭窄(直径减少 50% ~ 70%)以及重度狭窄(直径减少 > 70%),据报道发生率为 1% ~ 3%。对于重度肺静脉狭窄患者,应早期行介入治疗,避免不可逆性肺动脉高压形成,促进缺血肺灌注的恢复。肺静脉狭窄患者最常见的临床症状包括呼吸困难、咳嗽、胸痛和咯血等,但在一些重度肺静脉狭窄或闭塞患者中,因侧支循环较丰富而临床症状并不典型,所以仍需早期的影像学检查以协助诊疗^[25]。目前诊断肺静脉狭窄的“金标准”仍是肺静脉造影,CT 在评价肺静脉狭窄上有很高的敏感性、特异性,可同时明确肺静脉病变的位置及严重程度^[26]。而 MRI 可显示肺静脉周围组织,肺磁共振血管成像可协助区别狭窄 < 25% 和 > 50% 的病变,肺通气灌注成像可记录肺静脉狭窄的血流分布特点^[27]。

3.2 预测术后房颤复发

射频消融术治疗房颤的目的是阻断房颤的触发及维持病灶,研究表明,房颤的发生和发展倾向于由阵发性向持续性转变。房颤的持续可能引起心房电重构及解剖重构,对于心房重构严重的患者,导管消融往往存在较高复发风险,术后可早期通过各类检查评估心房结构,判断重构情况。

3.2.1 左心房纤维化

心房纤维化是心房损伤及炎症的结果之一,被认为是房颤患者射频消融术后房颤复发的独立预测因素。LGE-MRI 不仅可准确地评估心房纤维化程度,还可对心肌纤维化进行量化处理。DECAAF 研究中根据

LGE-MRI 量化心肌纤维化程度分为:1 期($<10\%$)、2 期($10\% \sim <20\%$)、3 期($20\% \sim <30\%$)和 4 期($\geq 30\%$),射频消融术后随访房颤复发率,认为随着纤维化程度分期的增加,术后房颤复发率进一步增加^[28]。Kheirhahan 等^[29]定义新的纤维化为消融手术后至少 15 个月在 LGE-MRI 上检测到新的心房强化信号,结果表明新的纤维化每增加 1%,消融后房颤复发的概率增加 3%。Khurram 等^[30]研究 LGE-MRI 范围与房颤复发的相关性,提出无论房颤患者基线及持续性如何,LGE $\leq 35\%$ 都有良好的预后,而 LGE $> 35\%$ 在术后的第 1 年有更高的复发率。

虽然 LGE-MRI 目前被认为是检测心房纤维化的无创性可视化工具,已有研究将心房低电压区域或传导速度减慢与 LGE-MRI 识别纤维化及心律失常基质数据相关联,但目前其准确性仍存在争议。Caixal 等^[31]通过对房颤患者的 LGE-MRI 图像逐点分析,认为高信号区域易表现为电压降低和传导减慢,且降低强度与双极电压和传导速度明显相关。但在心房扩张(左心房 > 45 mm)者,LGE-MRI 评价局部血流速度的能力可能降低,这也是 LGE-MRI 对左心房纤维化评价难以在各个中心重复的原因,其结果与检测仪器、检测条件及患者配合均有关。具体而言,LGE-MRI 预测传导速度的准确性随着心房扩张而降低,在较小和重构较少的心房中表现更好,这需在随后更大规模的研究中得到证实,但不可否认 LGE-MRI 仍是目前无创性评价心肌纤维化最重要的指标。

3.2.2 心外膜脂肪组织

心外膜脂肪组织分泌的脂肪因子和炎性介质等会促进心房结构和功能的重构,促进房颤的发生和发展。近期研究发现心外膜脂肪组织体积(epicardial adipose tissue volume, EATV)增大、心外膜脂肪组织厚度增加以及左心房 EATV/总 EATV 的比值越高,均是术后房颤复发的预测指标,且与房颤术后栓塞性卒中有关系^[32]。心外膜脂肪组织一般采用 CT 进行测量, Maeda 等^[33]通过对 217 例房颤患者术后随访,发现心外膜脂肪组织体积指数(EATVI)($EATVI = EATV/\text{体表面积}$)可预测导管消融术后房颤的复发。Sepehri Shamloo 等^[34]纳入 10 个临床试验共 1 208 例房颤消融患者进行荟萃分析,结果提示房颤复发患者中的左心房周围 EATV [标准化平均差(SMD) = 0.862 mL, 95% CI 0.567 ~ 1.156]和总 EATV(SMD = 1.017 mL, 95% CI 0.748 ~ 1.286)均高于未复发房颤患者,左心房周围 EATV 和总 EATV 的增加与消融后房颤复发相关。近期另一项研究发现房颤复发患者的 EATV 更高(144.5 mm^3 vs 128.5 mm^3 , $P < 0.01$),且 2 年后在房

颤复发患者中进一步显著进展($+ 11.8 \text{ mm}$ vs -3.5 mm , $P < 0.01$)^[35]。

3.2.3 左心房大小、容积和顺应性

左心房的大小和容积被公认是房颤射频消融术后房颤复发的独立预测因素^[35]。左心房容积相似的患者,反映左心房应变的参数也可能不同,提示左心房应变参数是反映左心房功能更加敏感的指标^[36-37]。Soga 等^[38]通过房颤复发患者行常规超声心动图,计算最大左心房容积指数和最小左心房容积指数及其差值($\Delta LAVI$),分析显示 $\Delta LAVI$ 是房颤复发的独立预测因子($OR = 1.131$, 95% CI 1.057 ~ 1.221, $P < 0.001$),且上述指标每位患者需(1.02 ± 0.10) min 即可获得,认为可能是预测房颤患者复发的一个更有价值且便捷的附加因子,可同时反映左心房舒张功能。在一项纳入 12 项研究^[39]共 1 025 例患者的 meta 分析中提示:二维斑点追踪超声心动图测量的心房纵向应变峰值的较低值与术后复发风险的增加独立相关,复发患者的心房纵向应变峰值显著低于维持窦性心律的患者($15.7\% \pm 5.7\%$ vs $23.0\% \pm 7.0\%$, $P = 0.016$)^[40]。

4 小结

房颤患者的导管消融治疗要求个体化病例管理方法。各类影像学检查是房颤导管消融的必要工具,术前合理使用各种影像学检查纳入合适的患者,制定最佳导管消融方案,同时根据纤维化的部位及程度,结合术中高密度电压标测的结果,有助于调整术中干预策略,提高消融效率,缩减手术时间,术后早期识别术后并发症,评估手术效果,甚至指导二次手术消融^[41]。同时,随着影像检查技术的进步,未来期待将多种影像检查技术与生化指标联合应用,制定相关标准联合评估房颤患者心房内血栓和心肌纤维化等综合预测因素,选择最优治疗方案,提高手术成功率,减少术后复发。

参考文献

- [1] Beaser AD, Cifu AS. Management of patients with atrial fibrillation[J]. JAMA, 2019, 321(11):1100-1101.
- [2] January CT, Wann LS, Calkins H, et al. 2019 AHA/ACC/HRS focused update of the 2014 AHA/ACC/HRS guideline for the management of patients with atrial fibrillation: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines and the Heart Rhythm Society in Collaboration With the Society of Thoracic Surgeons[J]. Circulation, 2019, 140(2):e125-e151.
- [3] Hindricks G, Potpara T, Dagres N, et al. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): The Task Force for the diagnosis and management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC[J]. Eur Heart J, 2021, 42(5):373-498.

- [4] 何钊, 杨英. 心脏磁共振在房颤患者左心房左心耳血栓检测中的应用进展[J]. 分子影像学杂志, 2019, 42(1): 27-30.
- [5] Spagnolo P, Giglio M, di Marco D, et al. Diagnosis of left atrial appendage thrombus in patients with atrial fibrillation; delayed contrast-enhanced cardiac CT[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(3): 1236-1244.
- [6] Kitkungvan D, Nabi F, Ghosn MG, et al. Detection of LA and LAA thrombus by CMR in patients referred for pulmonary vein isolation[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(7): 809-818.
- [7] Zhu MR, Wang M, Ma XX, et al. The value of left atrial strain and strain rate in predicting left atrial appendage stasis in patients with nonvalvular atrial fibrillation[J]. *Cardiol J*, 2018, 25(1): 87-96.
- [8] Skowerski M, Wozniak-Skowska I, Hoffmann A, et al. Pulmonary vein anatomy variants as a biomarker of atrial fibrillation-CT angiography evaluation[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2018, 18(1): 146.
- [9] Istratoie S, Roşu R, Cismaru G, et al. The impact of pulmonary vein anatomy on the outcomes of catheter ablation for atrial fibrillation[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2019, 55(11): 727.
- [10] Kocyigit D, Yalcin MU, Gurses KM, et al. Pulmonary vein orientation is independently associated with outcomes following cryoballoon-based atrial fibrillation ablation[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2018, 12(4): 281-285.
- [11] Larsen JM, Deyell MW, Macle L, et al. Impact of left common pulmonary veins in the contact-force vs. Cryoballoon Atrial Fibrillation Ablation (CIRCA-DOSE) study[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2020 Jul 6. DOI: 10.1111/jce.14652. Online ahead of print.
- [12] Peng LQ, Yu JQ, Yang ZG, et al. Left atrial diverticula in patients referred for radiofrequency ablation of atrial fibrillation; assessment of prevalence and morphologic characteristics by dual-source computed tomography[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2012, 5(2): 345-350.
- [13] Schneider M, Morris DA, Pieske-Kraigher E, et al. Left atrial diverticulum—An unexpected finding in routine transesophageal echocardiography[J]. *Echocardiography*, 2021, 38(1): 147-148.
- [14] Dong J, Dickfeld T, Dalal D, et al. Initial experience in the use of integrated electroanatomic mapping with three-dimensional MR/CT images to guide catheter ablation of atrial fibrillation[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2006, 17(5): 459-466.
- [15] 梁梅, 郝应禄, 杨明, 等. 采用 Cartosound 零射线射频消融治疗心房颤动五例[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2018, 32(4): 411-412.
- [16] Biermann J, Bode C, Asbach S. Intracardiac echocardiography during catheter-based ablation of atrial fibrillation[J]. *Cardiol Res Pract*, 2012, 2012: 921746.
- [17] Nakamura K, Naito S, Kaseno K, et al. Integration of intracardiac echocardiography and computed tomography during atrial fibrillation ablation; combining ultrasound contours obtained from the right atrium and ventricular outflow tract[J]. *Int J Cardiol*, 2017, 228: 677-686.
- [18] Rordorf R, Chieffo E, Savastano S, et al. Anatomical mapping for atrial fibrillation ablation: a head-to-head comparison of ultrasound-assisted reconstruction versus fast anatomical mapping[J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2015, 38(2): 187-195.
- [19] Linhart M, Alarcon F, Borràs R, et al. Delayed gadolinium enhancement magnetic resonance imaging detected anatomic gap length in wide circumferential pulmonary vein ablation lesions is associated with recurrence of atrial fibrillation[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2018, 11(12): e006659.
- [20] Fochler F, Yamaguchi T, Kheirkahan M, et al. Late gadolinium enhancement magnetic resonance imaging guided treatment of post-atrial fibrillation ablation recurrent arrhythmia[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2019, 12(8): e007174.
- [21] Marrouche NF, Greene T, Dean JM, et al. Efficacy of LGE-MRI-guided fibrosis ablation versus conventional catheter ablation of atrial fibrillation; the DECAAF II trial; study design[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2021, 32(4): 916-924.
- [22] Yarlagadda B, Deneke T, Turagam M, et al. Temporal relationships between esophageal injury type and progression in patients undergoing atrial fibrillation catheter ablation[J]. *Heart Rhythm*, 2019, 16(2): 204-212.
- [23] Halbfass P, Lehmkuhl L, Foldyna B, et al. Correlation of magnetic resonance imaging and post-ablation endoscopy to detect oesophageal thermal injury in patients after atrial fibrillation ablation; MRI-EDEL-study[J]. *Europace*, 2020, 22(7): 1009-1016.
- [24] Marashly Q, Gopinath C, Baher A, et al. Late gadolinium enhancement magnetic resonance imaging evaluation of post-atrial fibrillation ablation esophageal thermal injury across the spectrum of severity[J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(7): e018924.
- [25] Doppalapudi H, Yamada T, Kay GN. Complications during catheter ablation of atrial fibrillation; identification and prevention[J]. *Heart Rhythm*, 2009, 6(12 suppl): S18-S25.
- [26] Ghaye B, Szapiro D, Dacher JN, et al. Percutaneous ablation for atrial fibrillation; the role of cross-sectional imaging[J]. *Radiographics*, 2003, 23(suppl 1): S19-S33.
- [27] Ohana M, Bakouboula B, Labani A, et al. Imaging before and after catheter ablation of atrial fibrillation[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2015, 96(11): 1113-1123.
- [28] Marrouche NF, Wilber D, Hindricks G, et al. Association of atrial tissue fibrosis identified by delayed enhancement MRI and atrial fibrillation catheter ablation; the DECAAF study[J]. *JAMA*, 2014, 311(5): 498-506.
- [29] Kheirkahan M, Baher A, Goldooz M, et al. Left atrial fibrosis progression detected by LGE-MRI after ablation of atrial fibrillation[J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2020, 43(4): 402-411.
- [30] Khurram IM, Habibi M, Gucuk Ipek E, et al. Left atrial LGE and arrhythmia recurrence following pulmonary vein isolation for paroxysmal and persistent AF[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(2): 142-148.
- [31] Caixal G, Alarcón F, Althoff TF, et al. Accuracy of left atrial fibrosis detection with cardiac magnetic resonance; correlation of late gadolinium enhancement with endocardial voltage and conduction velocity[J]. *Europace*, 2021, 23(3): 380-388.
- [32] Cho KI, Kim BJ, Cho SH, et al. Epicardial fat thickness and free fatty acid level are predictors of acute ischemic stroke with atrial fibrillation[J]. *J Cardiovasc Imaging*, 2018, 26(2): 65-74.
- [33] Maeda M, Oba K, Yamaguchi S, et al. Usefulness of epicardial adipose tissue volume to predict recurrent atrial fibrillation after radiofrequency catheter ablation[J]. *Am J Cardiol*, 2018, 122(10): 1694-1700.
- [34] Sepehri Shamloo A, Dagres N, Dinov B, et al. Is epicardial fat tissue associated with atrial fibrillation recurrence after ablation? A systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Cardiol Heart Vasc*, 2019, 22: 132-138.
- [35] Beyer C, Tokarska L, Stühlinger M, et al. Structural cardiac remodeling in atrial fibrillation[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(11): 2199-2208.
- [36] 牛海燕, 田国祥, 张敏郁, 等. 三维超声心动图及斑点追踪成像评价左心房不同构型阵发性房颤患者左心房功能的临床研究[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2020, 12(1): 39-42.
- [37] 贺鹏康, 杨颖, 范芳芳, 等. 左心房顺应性参数与阵发性心房颤动射频消融术后复发率相关性分析[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2020, 28(2): 94-101.
- [38] Soga F, Tanaka H, Mochizuki Y, et al. Combined assessment of left atrial volume parameters for predicting recurrence of atrial fibrillation following pulmonary vein isolation in patients with paroxysmal atrial fibrillation[J]. *Echocardiography*, 2019, 36(5): 862-869.
- [39] Nielsen AB, Skaarup KG, Lassen MCH, et al. Usefulness of left atrial speckle tracking echocardiography in predicting recurrence of atrial fibrillation after radiofrequency ablation; a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(7): 1293-1309.
- [40] Wen S, Indrabhinduwat M, Brady PA, et al. Post procedural peak left atrial contraction strain predicts recurrence of arrhythmia after catheter ablation of atrial fibrillation[J]. *Cardiovasc Ultrasound*, 2021, 19(1): 22.
- [41] Romanov A, Pokushalov E, Ponomarev D, et al. Pulmonary vein isolation with concomitant renal artery denervation is associated with reduction in both arterial blood pressure and atrial fibrillation burden; data from implantable cardiac monitor[J]. *Cardiovasc Ther*, 2017, 35(4): e12264.