

冷冻球囊导管消融治疗心房颤动的研究进展

王宇, 吴翔, 徐伟

南京大学医学院附属鼓楼医院心血管内科, 江苏 南京, 210008

通信作者: 徐伟, E-mail: 13390900868@163.com



徐伟, 南京大学医学院附属鼓楼医院心血管内科主任医师、教授、医学博士, 第二届国家名医。现任南京大学医学院附属鼓楼医院心血管内科行政副主任兼房颤中心主任; 中国医师协会心律学专业委员会副主任委员、国家卫生计生委脑卒中防治专家委员会房颤卒中防治专业委员会副主任委员、中华医学会心电生理和起搏分会心力衰竭器械治疗工作委员会副主任委员、中华医学会心电生理和起搏分会心脏远程医疗专业委员会副主任委员、江苏省医学会心电生理与起搏分会候任主任委员、江苏省医学会心血管病分会心律失常学组组长、南京医学会临床电生理分会主任委员、中国县域心脏心律医师联盟理事长兼江苏省县域心脏心律医师联盟主席、中国房颤中心联盟副主席、江苏省间隔部起搏俱乐部主席、江苏省房颤冷冻消融俱乐部主席、中华医学会心电生理和起搏分会起搏学组委员, 中华医学会心电生理和起搏分会房颤工作组成员、中华医学会心电生理和起搏分会左心耳封堵工作委员会委员、国家医学考试中心心血管专科医师考试专家委员会委员, 美国心律学会 Fellow、欧洲心脏病学会 Fellow、亚太心律学会 Fellow、国家卫生和计划生育委员会医学参考报心律学频道副主编及中华心律失常学杂志等多家专业学术期刊编委, 目前是冷冻消融、左心耳封堵、无导线起搏全球带教者。

【摘要】 心房颤动 (AF) 是临床上最常见的心律失常之一, 其发病率随人口老龄化逐年上升。冷冻球囊导管消融术是其手术治疗方法之一, 因其独特的设计优势、学习曲线段、安全性高等特点, 在房颤治疗中有着重要的地位。本文旨在对冷冻球囊导管消融治疗房颤的最新研究进展做一综述。

【关键词】 心房颤动, 冷冻球囊消融, 研究进展

【文章编号】 2095-834X (2024) 11-01-06

DOI: 10.26939/j.cnki.CN11-9353/R.2024.11.001

本文著录格式: 王宇, 吴翔, 徐伟. 冷冻球囊导管消融治疗心房颤动的研究进展[J]. 当代介入医学电子杂志, 2024, 1(11): 01-06.

Research progress of cryoballoon ablation in the treatment of atrial fibrillation

Wang Yu, Wu Xiang, Xu Wei

Department of Cardiology, Nanjing Drum Tower Hospital, the Affiliated Hospital of Nanjing University Medical School, Nanjing 210008, Jiangsu, China

Corresponding author: Xu Wei, E-mail: 13390900868@163.com

【Abstract】 Atrial fibrillation (AF) is one of the most common arrhythmias in clinical practice, and its incidence increases year by year with the aging of the population. Cryoballoon catheter ablation is one of the surgical treatment methods for AF. Because of its unique design advantages, learning curve segment and high safety characteristics, it has an important position in the treatment of atrial fibrillation. The purpose of this article is to review the recent research progress of cryoballoon catheter ablation in the treatment of atrial fibrillation.

收稿日期: 2024-09-10

【Keywords】 Atrial fibrillation; Cryoballoon ablation; Research progress

心房颤动是最常见的心律失常,其伴随着心衰、脑卒中等心脑血管并发症的增加,随着全球糖尿病、肥胖人群的增多,房颤患病率、医疗负担逐年增加^[1]。以往指南推荐的房颤治疗方法主要为抗心律失常药物,但越来越多的研究证明,早期通过导管消融治疗房颤患者具有房颤复发率降低、患者生活质量改善、再入院率降低^[2]等优势,近年来房颤导管消融在房颤管理指南中的地位不断提高。冷冻消融疗法最开始应用于皮肤病变和肿瘤,随着导管技术的发展,20 世纪 90 年代冷冻消融被引入心脏电生理领域,冷冻球囊导管消融因其为肺静脉隔离所设计的独特优势,以及学习曲线短、安全性高等特点,在房颤导管消融治疗中起着重要作用^[3]。本综述纳入了关于房颤球囊冷冻消融的最新研究,以期探讨今后的治疗方向。

1 基本原理

1.1 生物学机制 冷冻球囊导管消融是通过 Joule-Thomson 效应,利用 N₂O 等冷冻能源由液相转变为气相的过程中大量带走周围组织中的热量,造成低温引起靶点心肌细胞坏死^[4]。其生物学机制如下:(1)靶点细胞损伤与死亡:低温可以引起细胞代谢减缓,细胞电活动消失,进而处于电静止状态;低温会使细胞内外的水分结冰,形成冰晶,破坏细胞膜和细胞器,并使细胞内水分外渗,造成细胞脱水,导致细胞结构损伤;低温还会导致蛋白质结构改变,如使细胞膜表面的钠钾、钠钙离子泵失去功能,影响细胞代谢和信号传导;当逐步开始复温时,通过细胞内外膜渗透压差、血流复流带来的再灌注损伤等病理生理过程,最终导致细胞死亡。(2)微循环障碍:冷冻可以直接损伤血管内皮细胞,导致血管通透性增加和血栓形成;冷冻区域的血流减少,进一步导致组织缺血和坏死;冷冻区域复温过程中,微血管内皮水肿、微血管破裂与微血栓形成等可进一步加重缺血损伤。(3)炎症反应:冷冻后,坏死组织引发急性炎症反应,吸引免疫细胞清除坏死组织,甚至诱导损伤细胞凋亡;炎症反应后期,成纤维细胞增殖,胶原沉积,形成纤维化瘢痕,阻断异常电信号传导。

1.2 手术原理 Haïssaguerre 等^[5]首先发现肺静脉(pulmonary vein, PV)是心房颤动的主要触发点。通过消融肺静脉与左心房的电信号连接,从而阻止异常电信号引发的心房颤动,奠定了肺静脉隔离(pulmonary vein isolation, PVI)治疗心房颤动的理论基础^[6]。冷冻球囊导管消融因其球囊设计与肺静脉前庭解剖结构高度契合,能够实现单次消融形成连续的

环形损伤,减少动脉栓塞、肺静脉狭窄及心房食管瘘等严重并发症的发生风险^[7]。其手术特点可以归纳为:(1)电生理效应:冷冻球囊导管消融通过低温破坏心肌细胞,形成非导电的纤维化瘢痕,阻断异常电信号,恢复正常心律。(2)影响因素:在术中冷冻治疗效果受多种因素影响,由术中最低温度、降温速度、复温速度、冷冻时间、冷冻次数、接触程度及局部血流等因素共同决定冷冻治疗效果。(3)选择性消融:不同组织对冷冻消融的敏感性不同,心肌细胞比周围组织(如神经、血管)更敏感,使得冷冻消融更具选择性。(4)安全性:冷冻消融允许进行可逆性测试,通过暂时冷冻评估消融效果,减少永久性损伤及并发症的风险^[8]。

1.3 设备结构和工作原理 冷冻球囊导管消融系统其设备结构包括冷冻球囊导管、冷冻控制台、充气系统和导航系统。术中首先通过股静脉或颈静脉将冷冻球囊导管插入,并在 X 射线或超声引导下将导管前端的球囊送至心脏目标区域(如肺静脉口),由集成在球囊表面或导管上的电极监测心电信号,利用 CARTO™ 三维电解剖标测系统(CARTO™ 3D electroanatomical mapping system)协助构建心脏电活动图并精准定位异常电信号来源。通过充气系统向球囊内注入气体,使其膨胀并与心肌组织紧密接触,术中需确保球囊完全封堵目标区域,以防止冷冻剂泄露并提高消融效果。于冷冻控制台将冷冻剂(如 N₂O、H₂、He 等)输送至球囊内部,冷冻剂在球囊内蒸发吸收热量,使球囊表面温度迅速降至 -50℃ 至 -60℃ 甚至更低,低温透过球囊传导至心肌组织,导致冷冻区域的目标细胞损伤和坏死,最终形成纤维化瘢痕,阻断异常电信号的传导。冷冻过程中在冷冻控制台设置冷冻参数(如温度、时间、次数等),并实时监测球囊表面和组织的温度、球囊内的压力。冷冻结束后,冷冻剂停止循环,球囊逐渐复温,通过 CARTO™ 三维电解剖标测系统评估消融效果,确认异常电信号是否被阻断,如有必要,可重复冷冻过程以增强消融效果。确认消融成功后,将球囊排气并撤出导管,手术结束。

2 冷冻球囊导管消融的临床研究进展

2.1 主要随机对照试验总结 FIRE AND ICE 试验是首个直接比较冷冻球囊消融与射频消融治疗阵发性房颤的大规模随机对照试验(randomized controlled trial, RCTs)。该研究纳入 762 例阵发性房颤患者,随机分为冷冻消融组和射频消融组,研究结果表明冷冻消融组在主要终点(房颤复发、抗心律失常药物使用或再次消融)上不劣于射频消融组,且两组在安全性

(如并发症发生率)上无显著差异。该试验证实了冷冻消融在治疗阵发性房颤患者的有效性和安全性^[7]。STOP AF 试验是早期评估冷冻球囊消融治疗阵发性房颤患者的关键研究,该研究纳入 245 例阵发性房颤患者,研究结果表明单次消融后,69.9% 的患者在 12 个月内无房颤复发;二次消融后,成功率提高至 74.1%;主要并发症(如膈神经麻痹)发生率为 3.07%^[9]。CRYO-FIRST 试验比较了冷冻消融与抗心律失常药物作为阵发性房颤患者一线治疗的效果,纳入 218 例阵发性房颤患者,研究结果表明冷冻消融组在 12 个月内的无房颤复发率显著高于抗心律失常药物组(82.2% 和 67.6%),冷冻消融组的生活质量评分显著改善,两组的安全性无显著差异^[10]。该试验支持将冷冻消融作为阵发性房颤的一线治疗选择,尤其是对药物治疗效果不佳的患者。

2.2 最新的 Meta 分析与临床证据 与抗心律失常药物相比,冷冻球囊导管消融作为一线治疗显著降低了房颤复发率和住院率,并改善了患者生活质量^[11]。与射频导管消融相比,多项 Meta 分析表明冷冻球囊导管消融有相似的疗效和总体安全性^[12-14]。此外,冷冻球囊导管消融的手术时间显著短于射频消融,且导管稳定性高,降低重复消融和心包填塞的风险,但会增加格式麻痹的风险^[14]。在特殊人群中,对于伴有射血分数降低的心力衰竭患者,冷冻球囊导管消融显著改善了临床结局,1 年无房颤复发率达 65%^[15]。在性别差异性研究中,冷冻球囊导管消融在女性患者中的安全性与射频导管消融相当,且在男性患者中表现出更低的长期失败率^[16]。同时,尽管目前新型消融技术(如脉冲场消融、激光球囊等)在急性手术成功率和安全性方面表现优异,但冷冻球囊导管消融在长期疗效和手术效率方面仍具有竞争力^[17-18]。总体而言,冷冻球囊导管消融在房颤治疗中展现出高效、安全的特点,为其临床应用提供了坚实的证据支持。

3 冷冻球囊导管消融技术的改进与创新

近年来,冷冻球囊导管消融技术在设备设计、能量传递机制及与其他技术的结合方面取得了显著进展,进一步提升了其在房颤治疗中的疗效和安全性。二十一世纪初,CryoCath Technologies 研发出第一代冷冻球囊导管(Arctic Front),通过球囊内液态制冷剂的蒸发实现冷冻消融^[19]。第二代冷冻球囊(Arctic Front Advance)通过优化喷射孔设计和缩短球囊前端,使冷冻剂分布更均匀并增强了与肺静脉的贴合度,显著提高了消融效率并降低了手术时间^[20]。第三代冷冻球囊(Arctic Front Advance Pro)进一步改进了冷冻剂输送系统,缩短了降温时间,在治疗复杂病例(如

持续性房颤)中表现出更高的成功率^[21]。第四代冷冻球囊(POLARx)则通过可调节直径和实时温度监测系统,实现了更高的消融精准度和安全性^[22]。

此外,冷冻球囊导管消融与 CARTO™ 三维电解剖标测系统的结合,显著提高了手术的精准性,拓展了手术适应症^[23]。在房性心动过速(atrial tachycardia, AT)治疗中,冷冻球囊导管消融因其组织损伤均匀、边界清晰的特点,可能成为局灶性房速的理想选择,特别是在肺静脉口或心房敏感区域的病灶中已显示出较高的成功率和较低的并发症风险^[24]。对于典型心房扑动(atrial flutter, AFL),冷冻球囊导管消融在三尖瓣峡部线性消融中表现出与射频导管消融相当的疗效,且手术时间更短,可能成为其治疗的新选择^[25]。此外,冷冻球囊导管消融在特定室性心律失常(如右室流出道室性早搏)中也展现出潜力,尤其是在靠近冠状动脉或膈神经的解剖区域^[26]。

4 人工智能与机器学习在冷冻球囊导管消融领域中的应用

随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的快速发展,其在房颤诊疗中的应用正逐步改变传统医疗模式,为提升诊断效率、优化治疗方案以及推动科研进展提供了新的方向^[27-28]。在房颤的早期筛查与诊断中,人工智能通过整合多源数据,显著提升了诊断的效率和准确性^[29-30]。作为人工智能的核心技术之一,机器学习(machine learning, ML)通过分析心电图(electrocardiogram, ECG)数据,能够高效识别房颤,尤其适用于无症状或阵发性房颤的筛查。例如,基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)的算法能够从单导联或多导联 ECG 中自动提取特征,实现房颤的精准分类^[31]。此外,机器学习还可整合电子健康记录(electronic health records, EHR)、影像数据和生物标志物等多源数据,构建房颤风险预测模型,辅助早期干预^[29,32]。人工智能的广泛应用使得房颤的诊断从传统的依赖医生经验逐步转向数据驱动的智能模式。

在冷冻球囊导管消融治疗领域,人工智能通过综合分析患者的临床特征、基因信息及治疗反应数据,为个性化治疗策略的制定提供了重要支持。因机器学习其独特的处理数据集的优势,在模型建立过程中较之传统预测模型,可以纳入包括心脏形态结构影像^[33]、电生理信号、临床等多样化的特征数据,使之在术前不仅能预测不同治疗方案的疗效和风险,还能提供更贴合的预测效果^[34]。例如,Arie Lorin Schwartz 等^[23]为 CARTO™ 三维电解剖标测系统研发机器学习新型模板,使用左心房的计算机断层扫

描血管造影,成功地重建左心房解剖结构,可安全地用于指导房颤消融。Chih-Min Liu等^[35]将神经网络的深度学习结合消融前肺静脉计算机断层扫描几何切片,从而建立非肺静脉触发因素的预测模型,识别消融前肺静脉触发的高危患者。在手术过程中,针对环形标测导管的电描记图标测,Jan De Pooter等^[36]使用机器学习的自动算法减少远场电描记图的影响,最终输出模型对肺静脉隔离状态评估的灵敏度和特异性>80%。在使用3D标测的临床研究中,Wataru Sasaki等^[37]通过使用机器学习模型自动分类肺静脉的解剖位置,实时分析消融部位的电活动,优化消融策略,预测潜在的再连接部位,有助于改善手术结果。Elaheh Arefinia等^[38]研究了一种基于卷积神经网络和递归神经网络的多模态接触力估计方法,探究心脏组织和导管之间的接触力,提升消融质量。Yaacoub Chahine等^[39]采用机器学习分析术中温度数据,预测内镜下食管病变的发生率,提高手术安全性。在术后管理中,机器学习结合可穿戴设备,能够实时监测患者的心律变化,及时预警房颤复发或其他心律失常事件,为患者提供动态健康管理^[40]。

5 总结与展望

冷冻球囊导管消融技术作为房颤治疗领域的一项重要微创手段,近年来取得了显著进展,其通过冷冻球囊导管实现肺静脉隔离,已在阵发性房颤治疗中展现出良好的有效性和安全性。相较于射频导管消融,冷冻球囊导管消融具有操作简便、学习曲线短、手术时间相对较短等优势,同时其均匀的能量分布特性也降低了组织损伤和并发症的风险。然而,尽管冷冻球囊导管消融在阵发性房颤中表现优异,其在持续性房颤和长程持续性房颤中的应用仍需更多高质量临床研究的支持。此外,冷冻消融技术仍面临一些挑战,如术中温度控制的精准性、球囊与组织接触的稳定性以及术后房颤复发率的进一步降低等问题,这些都需要通过技术创新和临床实践不断优化。

未来研究的重点方向应聚焦于以下几个方面:首先,需进一步优化技术,包括改进球囊设计、提升能量传递效率以及开发更智能的冷冻球囊导管消融设备,以实现更精准的治疗效果。其次,继续扩大适应症范围,通过更多临床研究探索冷冻消融在复杂房颤类型、特殊解剖位置及其他心律失常中的应用价值。此外,尽管人工智能与机器学习在房颤诊疗中展现出显著潜力,但仍面临数据质量、算法可解释性、模型泛化能力及伦理隐私等挑战。最后,多学科协作,如电生理学、影像学、材料科学和人工智能等领域的深度融合,将为技术创新和临床转化提供强有力的支持。

总之,冷冻球囊导管消融技术在房颤治疗中具有广阔的应用前景,但其进一步发展仍需克服当前的技术瓶颈和临床挑战。通过持续的技术创新、多学科协作以及人工智能的赋能,冷冻球囊导管消融有望在未来为更多患者提供更安全、更高效的治疗选择,推动房颤诊疗迈向更高水平。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Ko D, Chung MK, Evans PT, et al. Atrial fibrillation: a review[J]. JAMA, 2025, 333(4): 329–342.
- [2] Kirchhof P, Benussi S, Kotecha D, et al. 2016 ESC guidelines for the management of atrial fibrillation developed in collaboration with EACTS[J]. Eur Heart J, 2016, 37(38): 2893–2962.
- [3] 吴立群, 黄从新, 黄德嘉, 等. 经冷冻球囊导管消融心房颤动中国专家共识[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2020, 34(2): 95–108.
- [4] 尤华彦, 王如兴. 心房颤动冷冻球囊消融的临床应用进展[J]. 实用心电学杂志, 2019, 28(4): 266–272.
- [5] Haïssaguerre M, Jaïs P, Shah DC, et al. Spontaneous initiation of atrial fibrillation by ectopic beats originating in the pulmonary veins[J]. N Engl J Med, 1998, 339(10): 659–666.
- [6] Calkins H, Kuck KH, Cappato R, et al. 2012 HRS/EHRA/ECAS expert consensus statement on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation: recommendations for patient selection, procedural techniques, patient management and follow-up, definitions, endpoints, and research trial design: a report of the Heart Rhythm Society (HRS) task force on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation. Developed in partnership with the European Heart Rhythm Association (EHRA), a registered branch of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Cardiac Arrhythmia Society (ECAS); and in collaboration with the American College of Cardiology (ACC), American Heart Association (AHA), the Asia Pacific Heart Rhythm Society (APHRS), and the Society of Thoracic Surgeons (STS). Endorsed by the governing bodies of the American College of Cardiology Foundation, the American Heart Association, the European Cardiac Arrhythmia Society, the European Heart Rhythm Association, the Society of Thoracic Surgeons, the Asia Pacific Heart Rhythm Society, and the Heart Rhythm Society[J]. Heart Rhythm, 2012, 9(4): 632–696. e21.

- [7] Kuck KH, Brugada J, F rnkranz A, et al. Cryoballoon or radiofrequency ablation for paroxysmal atrial fibrillation [J]. *N Engl J Med*, 2016, 374(23): 2235–2245.
- [8] 束宇婷, 谭家宏, 叶萍, 等. 冷冻球囊导管消融治疗心房颤动的进展[J]. *生物医学工程与临床*, 2018, 22(1): 110–115.
- [9] Packer DL, Kowal RC, Wheelan KR, et al. Cryoballoon ablation of pulmonary veins for paroxysmal atrial fibrillation: first results of the North American Arctic Front (STOP AF) pivotal trial[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 61(16): 1713–1723.
- [10] Wazni OM, Dandamudi G, Sood N, et al. Cryoballoon ablation as initial therapy for atrial fibrillation[J]. *N Engl J Med*, 2021, 384(4): 316–324.
- [11] Liu Z, Yang Z, Lu Y, et al. Short - term and long - term effects of cryoballoon ablation versus antiarrhythmic drug therapy as first - line treatment for paroxysmal atrial fibrillation: a systematic review and meta - analysis[J]. *Clin Cardiol*, 2023, 46(10): 1146–1153.
- [12] Kim JA, Chelu MG. Comparison of cryoballoon and radiofrequency ablation for persistent atrial fibrillation: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2023, 66(3): 585–595.
- [13] Patel N, Patel K, Shenoy A, et al. Cryoballoon ablation for the treatment of atrial fibrillation: a meta-analysis[J]. *Curr Cardiol Rev*, 2019, 15(3): 230–238.
- [14] Fortuni F, Casula M, Sanzo A, et al. Meta-analysis comparing cryoballoon versus radiofrequency as first ablation procedure for atrial fibrillation[J]. *Am J Cardiol*, 2020, 125(8): 1170–1179.
- [15] Taha AM, Hendi NI, Elwekel AB, et al. Cryoballoon ablation for atrial fibrillation in patients with heart failure and reduced left ventricular ejection fraction: a systematic review and meta - analysis[J]. *Clin Cardiol*, 2024, 47(1): e24177.
- [16] du Fay de Lavallaz J, Badertscher P, Kobori A, et al. Sex-specific efficacy and safety of cryoballoon versus radiofrequency ablation for atrial fibrillation: an individual patient data meta-analysis[J]. *Heart Rhythm*, 2020, 17(8): 1232–1240.
- [17] Vetta G, Della Rocca DG, Parlavecchio A, et al. Multielectrode catheter-based pulsed electric field vs. cryoballoon for atrial fibrillation ablation: a systematic review and meta-analysis[J]. *Europace*, 2024, 26(12): euae293.
- [18] Serban T, Mannhart D, Abid QU, et al. Durability of pulmonary vein isolation for atrial fibrillation: a meta-analysis and systematic review[J]. *Europace*, 2023, 25(11): euad335.
- [19] Van Belle Y, Janse P, Rivero-Ayerza MJ, et al. Pulmonary vein isolation using an occluding cryoballoon for circumferential ablation: feasibility, complications, and short-term outcome[J]. *Eur Heart J*, 2007, 28(18): 2231–2237.
- [20] Akkaya E, Berkowitsch A, Zaltsberg S, et al. Second - generation cryoballoon ablation for treatment of persistent atrial fibrillation: three - year outcome and predictors of recurrence after a single procedure[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2017, 29(1): 38–45.
- [21] Knappe V, Lahrmann C, Funken M, et al. Comparison of Arctic Front Advance Pro and POLARx cryoballoons for ablation therapy of atrial fibrillation: an intraprocedural analysis[J]. *Clin Res Cardiol*, 2025, 114(1): 83–92.
- [22] Tanese N, Almorad A, Pannone L, et al. Outcomes after cryoballoon ablation of paroxysmal atrial fibrillation with the PolarX or the Arctic Front Advance Pro: a prospective multicentre experience[J]. *Europace*, 2023, 25(3): 873–879.
- [23] Schwartz AL, Chorin E, Mann T, et al. Reconstruction of the left atrium for atrial fibrillation ablation using the machine learning CARTO 3 m-FAM software[J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2022, 64(1): 39–47.
- [24] Akkaya E, Berkowitsch A, Rieth A, et al. Clinical outcome and left atrial function after left atrial roof ablation using the cryoballoon technique in patients with symptomatic persistent atrial fibrillation[J]. *Int J Cardiol*, 2019, 292: 112–118.
- [25] Gupta D, Ding WY, Calvert P, et al. Cryoballoon pulmonary vein isolation as first-line treatment for typical atrial flutter[J]. *Heart*, 2023, 109(5): 364–371.
- [26] Nagashima K, Choi EK, Lin KY, et al. Ventricular arrhythmias near the distal great cardiac vein: challenging arrhythmia for ablation[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2014, 7(5): 906–912.
- [27] Schnabel RB, Marinelli EA, Arbelo E, et al. Early diagnosis and better rhythm management to improve outcomes in patients with atrial fibrillation: the 8th AFNET/EHRA consensus conference[J]. *EP Europace*, 2023, 25(1): 6–27.
- [28] Ding EY, Marcus GM, McManus DD. Emerging technologies for identifying atrial fibrillation[J]. *Circ Res*, 2020, 127(1): 128–142.
- [29] Christopoulos G, Graff-Radford J, Lopez CL, et

- al. Artificial intelligence–electrocardiography to predict incident atrial fibrillation[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2020, 13(12): e009355.
- [30] Hannun AY, Rajpurkar P, Haghpanahi M, et al. Cardiologist–level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network[J]. *Nat Med*, 2019, 25(1): 65–69.
- [31] Boveda S, Metzner A, Nguyen DQ, et al. Single–procedure outcomes and quality–of–life improvement 12 months post–cryoballoon ablation in persistent atrial fibrillation: results from the multicenter CRYO4PERSISTENT AF trial[J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2018, 4(11): 1440–1447.
- [32] Olier I, Ortega–Martorell S, Pieroni M, et al. How machine learning is impacting research in atrial fibrillation: implications for risk prediction and future management[J]. *Cardiovasc Res*, 2021, 117(7): 1700–1717.
- [33] Firouznia M, Feeny AK, LaBarbera MA, et al. Machine learning–derived fractal features of shape and texture of the left atrium and pulmonary veins from cardiac computed tomography scans are associated with risk of recurrence of atrial fibrillation postablation[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2021, 14(3): e009265.
- [34] Luo A, Chen W, Zhu H, et al. Machine learning in the management of patients undergoing catheter ablation for atrial fibrillation: scoping review[J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e60888.
- [35] Liu CM, Chang SL, Chen HH, et al. The clinical application of the deep learning technique for predicting trigger origins in patients with paroxysmal atrial fibrillation with catheter ablation[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2020, 13(11): e008518.
- [36] De Pooter J, Timmers L, Boveda S, et al. Validation of a machine learning algorithm to identify pulmonary vein isolation during ablation procedures for the treatment of atrial fibrillation: results of the PVISION study[J]. *Europace*, 2024, 26(5): euae116.
- [37] Sasaki W, Tanaka N, Matsumoto K, et al. Validation of ablation site classification accuracy and trends in the prediction of potential reconnection sites for atrial fibrillation using the CARTONET® R12. 1 model[J]. *J Arrhythm*, 2024, 40(5): 1085–1092.
- [38] Arefinia E, Jagadeesan J, Patel RV. Machine–learning–based multi–modal force estimation for steerable ablation catheters[J]. *IEEE Trans Med Robot Bionics*, 2024, 6(3): 1004–1016.
- [39] Chahine Y, Afroze T, Bifulco SF, et al. Machine learning identifies esophageal luminal temperature patterns associated with thermal injury in catheter ablation for atrial fibrillation[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2024, 35(4): 737–746.
- [40] Tison GH, Sanchez JM, Ballinger B, et al. Passive detection of atrial fibrillation using a commercially available smartwatch[J]. *JAMA Cardiol*, 2018, 3(5): 409–416.

(本文编辑: 马萌萌, 许守超)