

## 美国心脏协会指南解读系列

## ——《人工智能在心血管疾病中的应用科学声明》解读

周伊恒, 杨梓钰, 吕垚, 刘力滴, 沈灿, 廖晓阳, 贾禹\*

扫描二维码  
查看原文

610041 四川省成都市, 四川大学华西医院全科医学中心 全科医学教研室 全科医学研究室

\*通信作者: 贾禹, 助理研究员; E-mail: jiayu\_huaxi@qq.com

周伊恒与杨梓钰为共同第一作者

**【摘要】** 人工智能(AI)是改善卫生保健服务的新兴技术。在全球政府机构和学术部门的共同推进下,大量研究论证AI可以改进心血管疾病的诊断、治疗和预防,但其发展和应用仍存在一些限制,尚未在广泛范围内服务临床。基于此,美国心脏协会(AHA)于2024-04-02在*Circulation*发表了《人工智能在心血管疾病中的应用科学声明》(以下简称声明)。该声明综述了AI在心血管疾病诊断、分类和治疗中的研究进展,提出了AI应用中存在的问题以及在解决方案,并且构建了未来AI在心血管领域应用的框架。本文旨在对该声明进行解读,为我国AI在心血管疾病的应用和研究提供建议和方向。

**【关键词】** 人工智能; 心血管疾病; 科学声明; 解读; 美国心脏协会

**【中图分类号】** R 54 **【文献标识码】** A DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0192

## Interpretation of the Use of Artificial Intelligence in Improving Outcomes in Heart Disease: a Scientific Statement from the American Heart Association

ZHOU Yiheng, YANG Ziyu, LYU Yao, LIU Lidi, SHEN Can, LIAO Xiaoyang, JIA Yu\*

Teaching &amp; Research Section/General Practice Research Institute, General Practice Medical Center, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

\*Corresponding author: JIA Yu, Research associate; E-mail: jiayu\_huaxi@qq.com

ZHOU Yiheng and YANG Ziyu are co-first authors

**【Abstract】** Artificial Intelligence (AI) is an emerging technology to improve healthcare services. With the joint promotion of government agencies and academic departments around the world, a large number of studies have demonstrated that AI can improve the diagnosis, treatment and prevention of cardiovascular disease. However, there are still some limitations in its development and application, and it has not yet been widely used in clinical practice. Based on this, the American Heart Association (AHA) published the Use of Artificial Intelligence in Improving Outcomes in Heart Disease: a Scientific Statement from the American Heart Association in *Circulation* on April 2, 2024. This statement reviews the research progress of AI in the diagnosis, classification and treatment of cardiovascular disease, puts forward the existing problems and potential solutions, and builds a framework for the future application of AI in the cardiovascular disease. This article aims to interpret the statement for providing advice and direction for the application and research of AI in cardiovascular disease in China.

**【Key words】** Artificial intelligence; Cardiovascular diseases; Scientific statement; Interpretation; American Heart Association

心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)是全球最主要的死亡原因,发病率呈持续上升趋势<sup>[1]</sup>。CVD在不同病情阶段异质性明显,精准防治CVD仍然

是当前的巨大挑战<sup>[2-3]</sup>,亟须探索解决路径。人工智能(artificial intelligence, AI)可解析复杂数据、挖掘隐藏关联、构建数学模型,是改进临床实践的新兴技术,有

基金项目:四川省科技厅软科学项目(2022JDR0325)

引用本文:周伊恒,杨梓钰,吕垚,等.美国心脏协会指南解读系列——《人工智能在心血管疾病中的应用科学声明》解读[J].中国全科医学,2024,27(35):4353-4357. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0192. [www.chinagp.net]

ZHOU Y H, YANG Z Y, LYU Y, et al. Interpretation of the Use of Artificial Intelligence in Improving Outcomes in Heart Disease: a Scientific Statement from the American Heart Association [J]. Chinese General Practice, 2024, 27 (35): 4353-4357.

© Editorial Office of Chinese General Practice. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

望提高心血管领域的各项诊治技术的准确性和效率<sup>[4]</sup>。美国心脏协会（American Heart Association, AHA）于2024-04-02在 *Circulation* 发表的《人工智能在心血管疾病中的应用科学声明》（以下简称声明）中提出，AI在医学的应用得到学术界和全球政府机构的推动，各级部门正在投入大量资源利用AI改变医疗保健服务，这促使过去十年与医疗保健相关的AI研究快速增长<sup>[5]</sup>。该声明综述了AI在心血管领域研究和临床实践中实现精准医疗和实施科学的最新技术，展示了AI在心血管领域的推广应用现状，并分析了相关局限性以及解决手段。考虑到该声明对于推动AI在心血管疾病研究、应用和发展的重要作用，团队对此声明进行解读，供同行学者参考。解读团队由心血管病专家、全科医学临床医生以及从事AI相关研究的临床医生组成。

## 1 声明制订背景与方法

该声明是由SALAH S. Al-Zaiti博士代表AHA精准心血管医学研究所及其他多个委员会撰写的科学声明，旨在展现AI在心血管研究和临床护理中实现精准医疗和实施科学的当前状况以及说明AI的实践情况和挑战。该声明适用于所有已应用或者可能应用AI的医疗卫生机构，包括初级医疗卫生机构、特殊医疗卫生机构、长期医疗卫生机构和社区，目标人群为从事与心血管疾病有关的临床医生以及研究AI的科研人员。声明主要是通过总结现有AI在心血管疾病诊断、分类和治疗中的研究，提出了AI在心血管疾病各个领域的应用和面临的挑战。

## 2 声明的主要内容

### 2.1 AI在影像学中的应用

心脏影像学在临床中存在一些问题，例如人才培养周期长、医疗资源不平等及图像处理、分割、定量工作量<sup>[6]</sup>。AI的成像工具可能是这些问题的有效解决方案。

AI算法在心脏疾病诊断和预后方面得到广泛运用，不仅涵盖了安排和调度图像获取的过程，还能减少图像获取和处理时间，减少辐射暴露和对比剂使用量。另外，AI算法还能辅助于诊断和报告，为临床决策提供支持，并预估患者的预后。AI在多种心脏成像方式（超声心动图、心脏CT、心脏核磁共振成像和核医学成像）均有应用价值。在超声心动图中，AI可以自动分割心室容积进行分析，计算射血分数，评估瓣膜结构以及纵向应变和心室壁运动异常<sup>[7]</sup>。在心脏CT中，AI可以自动量化冠状动脉斑块和血流，对冠状动脉评分从而评估心血管风险，以及计算血流储备分数和心肌灌注<sup>[8]</sup>。例如，我国学者CHEN等<sup>[9]</sup>以299例冠心病患者的血管内超声为参考标准，构建了基于冠脉CT的斑块影像模型，发现建立的影像模型比传统根据斑块解剖学特征

判断易损斑块的准确度更高，并且与不良心血管事件相关。AI在心脏核磁中能够自动分析心室结构和体积以及心肌血流和灌注储备<sup>[10]</sup>。在核医学成像方面，AI可以用于心肌血流和流动储备的量化以及其心血管死亡率的预测。另外，AI在心脏疾病的治疗以及卒中的早期诊断和预后预测等方面有一定的应用价值。

AI在影像学中的应用面临一些挑战，如数据样本量偏小、数据整理复杂等。声明指出，通过采用适当的学习技术（例如监督学习或者非监督学习）、开发深度学习、建立数据共享机制，可能是有效的解决途径。

### 2.2 AI在电生理方面的应用

在电生理领域，AI通过自动化解码可以识别心电图信号。多项研究表明AI可以扩展现有专家的能力，实现心电图报告的自动化和精确解读<sup>[11-13]</sup>，然而，由于目前临床数据的应用相对不足，这可能对医疗决策产生不利影响<sup>[14]</sup>。其次，可以识别人工难以识别的心电图的微妙变化，增强对疾病表型的鉴别。此外，在疾病发生过程中，心脏电活动的改变较影像学改变和结构改变出现得更早，因此AI的应用可能有助于发现隐匿性疾病和预测相关疾病。

回顾性研究中显示AI可以通过心电图在不同人群（不同性别、种族、妊娠状态）中识别出左心室功能不全<sup>[15]</sup>。另外，在超过20 000例非心力衰竭患者中，AI通过心电图对心室功能不全的检测率相比常规方法提高了32%<sup>[16]</sup>。AI还可以识别其他结构性心脏病，包括肥厚型心肌病、淀粉样变性、主动脉狭窄和肺动脉高压。在36 280例患者中（已知8.4%具有阵发性心房颤动），AI通过单导联心电图识别无症状心房颤动的受试者工作特征曲线下面积（AUC）为0.87<sup>[12]</sup>。我国有研究通过整合心电图和影像学等资料开发出的AI模型成功用于主动脉夹层的诊断<sup>[17]</sup>，这一成果拓展了AI在心电图领域的应用，表明可以利用AI对心电图以及其他资料进行整合开发，从而增强对心血管疾病的识别能力。此外，还有研究显示AI可以分别通过心内的心脏电信号、心电图或者患者临床特征来预测消融后心房颤动的再发生率，均比现有的临床评分具有更高的准确度，而且多模态融合心脏电信号、心电图和患者临床特征可以进一步提高预测准确度<sup>[18]</sup>。

AI在电生理领域应用的局限性包括在大型人群中应用的稳健性不足，缺乏前瞻性的临床研究。通过结合心血管电生理专业知识、加强医疗和AI的交叉融合、增加结果可解释性，有助于提高AI在人群应用的稳健性。

### 2.3 AI在院内监测的应用

传统的院内监测系统在生命指标超出给定阈值时即会发出警报，这种警报方法忽略了个体生理信号之间的潜在变化，有研究显示5%~13%的监测警报是有价值的<sup>[19]</sup>，无效警报在重症监护室较常见，大部分无效警

报可能会分散医生的注意力从而危害患者健康。

AI 可以优化患者的监护,提高监测准确性。在重症监护室应用卷积神经网络可以区分真假监护报警,从而减少警报疲劳<sup>[20]</sup>。在预测病情恶化方面,床旁监测 AI 可以识别出重症监护室监测心力衰竭的恶化和失代偿前的细微生理特征变化,从而进行早期干预。另外, AI 可以对败血症和低血压提前预测,较传统方法提前 3~40 h 并且有很高的准确性。一项纳入 36 项研究(包含 6 项随机对照试验)的 Meta 分析显示,基于 AI 算法预测败血症并早期干预相比其他预测败血症的策略死亡率更低(相对风险度为 0.56)<sup>[21]</sup>。AI 可以利用心电图、血压和经皮血氧饱和度预测心室纤颤的发生,对心室纤颤发作 5 min~6 h 的准确性为 0.83~0.94<sup>[22]</sup>。在心房颤动的预测方面,一项纳入 6 040 例心脏手术后患者的研究显示, AI 预测术后心房颤动的发生率优于标准化临床评分。AI 还可以预测既往心房颤动病史的住院患者发生卒中、短暂性缺血发作和出血的风险<sup>[23]</sup>。AI 也可以有效预测各种手术围术期并发症和死亡率,可以改善患者选择、手术设计和知情同意。

AI 在院内监测的应用面临一些挑战,包括缺乏严格的前瞻性评估、对临床终点的影响有限、难以做出影响临床决策的预测,以及缺乏标准化平台向临床医生报告预测等问题。此外,声明还指出噪声干扰和监测数据的有效性等问题。对此,通过设计前瞻性试验可以验证 AI 评估的准确性,延长数据采集时间、增强监测数据的有效性。

## 2.4 AI 在可穿戴/可植入设备的应用

植入式和可穿戴技术可以为临床医生提供连续性的生理数据,合理解读这些数据可以更全面地了解疾病进展、找到新的干预时间点、重新定义住院和门诊的界限,改善医疗不平衡。

声明指出可穿戴设备可以记录使用者的运动、心率、心律和血压情况,可以用于日常健康管理甚至疾病诊断。大量研究表明基于 AI 的可穿戴设备可以监测近期心房颤动的发生,还可以利用脉冲信号测量血压。我国一项纳入近 25 万人的心房颤动筛查研究显示 0.23% 的参与者收到心房颤动预警且阳性值高达 91.6%<sup>[24]</sup>。可穿戴设备还可以指导心力衰竭患者的管理,一项多中心的研究显示将 AI 应用于智能手机的可穿戴的多传感器胸贴,可以对心力衰竭加重有很高的预测价值(灵敏度为 88%,特异度为 85%)<sup>[25]</sup>。植入式设备也可以提供数据监测以改善心血管护理,包括植入式心律失常监测器、起搏器或除颤器。

可穿戴设备应用的局限性包括信号质量和患者舒适度。可穿戴设备的数据隐私问题需要得到进一步的解决,数据的隐私和完整性需要得到保护,比如可以建立基于 AI 技术的可穿戴设备的监管途径。另外,许多已公开

发表的 AI 算法缺乏透明度和可复现性<sup>[26]</sup>,需要进一步的前瞻性研究或临床试验来验证 AI 算法的可信度。例如,有研究表明通过可穿戴设备诊断的心房颤动仅有 34%~65% 的准确性,大部分心房颤动记录无法得到证实<sup>[27]</sup>。在接受度方面,有调查显示 35% 的临床工作者拒绝将基于 AI 技术的可穿戴设备应用于患者管理<sup>[28]</sup>。

## 2.5 AI 在遗传变异的应用

DNA 测序项目提供了大量的人类基因组数据,结合表型信息和生活方式,为 AI 提供了所需的训练数据。AI 对心血管疾病风险变异的识别,可以预测个体未来的疾病风险,开启疾病进行监测的新阶段,有助于开发靶向药物和预测疾病的严重程度。利用 AI 将多基因风险评分和临床信息结合,可能会推进精准医疗在心血管疾病中的应用和实施。然而,识别心血管疾病风险变异的 AI 尚处于开发阶段,需要不断地发展完善才可能成熟应用。

## 2.6 AI 在电子病历的应用

利用 AI 对电子病历进行分析可以改善疾病监测,将患者分层为“可治疗类型”和“不可治疗类型”,并基于此确定临床工作流程。另一方面,电子病历中记录了大量的数据,包括患者病史、实验室检查、影像学检查、临床结局等, AI 可以整合这些信息,从中提取出有用的模式和关联,从而对疾病结果进行预测。声明描述了几个基于电子病历的成功应用案例。

在预测死亡率方面,一项总结了 21 项基于 AI 使用电子病历预测院内死亡率的综述显示, AI 预测重症监护室死亡率正确性约为 86%<sup>[29]</sup>。另一项纳入超 20 万名重症监护室患者的研究显示<sup>[30]</sup>, AI 基于电子病历预测患者 30 d 死亡率的准确性高于简化急性生理学评分(SAPS)。AI 使用电子病历预测不良心血管事件也具有很高的准确性,一项纳入 7 686 例患者电子病历的研究显示<sup>[31]</sup>,在对 1 000 个变量进行分析后,预测研究的 AUC 为 0.81。在疾病分类方面, AI 可以整合多个复杂数据来更好地对疾病进行分类。比如,对于心力衰竭的分类, AI 不局限于传统的射血分数保留和射血分数下降的分类,还整合了多种模式的数据,以识别心力衰竭不良预后风险增高的患者。

基于 AI 分析电子病历在临床中的应用也存在一些限制,比如电子病历的质量和准确性。在分析电子病历时也会产生潜在偏差,比如临床医生会对病情严重或者不稳定的患者进行更多的检查以及重复检查,因此收集的病历其实有临床医生的潜在判断,而且这种偏差在不同的临床医生中具有高度变异性。而且,不同实验室的测量结果并非完全相同,这可能造成研究结果缺乏普遍性。另外,目前仍然缺乏足够的证据表明基于电子病历的 AI 预测可以对患者预后产生积极影响。

### 3 AI在心血管领域实施的框架

声明针对未来如何在心血管领域应用AI提出了一系列综合性策略,确保AI在心血管疾病和管理中的有效应用和整合。这一框架不仅着眼于技术和科学层面的考量,同时强调了伦理、法规、教育和患者参与的重要性,旨在指导从AI技术开发到临床实践的整个过程,构建一个全面、可持续发展的系统,以促进AI技术在心血管医学领域的成功实施和应用。结合声明全文内容,团队总结框架内容如下:

(1) 数据质量与标准化: 强调数据的质量和标准化是成功实施AI的关键。这需要确保所收集数据的准确性、全面性和代表性,并遵循统一的数据格式和标准,以便于数据的共享、分析和跨平台兼容。

(2) 多学科协作: 提倡建立一个跨学科的协作环境,让医生、数据科学家、AI技术专家、患者以及政策制定者等多方参与到AI解决方案的开发和实施过程中。这有助于从不同的角度理解心血管医学的需求和挑战,并共同开发出更加有效、可靠的AI算法。

(3) 透明性与可解释性: 对于心血管医学中使用的AI模型,要求其不仅需要高精度,同时也要具备透明性和可解释性,即模型的决策过程可以被医生和患者理解,确保医疗决策的信任度和接受度。

(4) 法规遵从与伦理考量: 强调在AI技术的开发和应用过程中,必须遵循相关法规政策,并严格考虑伦理问题,包括但不限于患者隐私保护、数据安全以及公平性等问题。

(5) 验证与临床试验: 在AI技术正式应用于临床之前,必须通过严格的验证和临床试验,以评估其安全性、有效性和可靠性。这包括在多样化的患者群体中进行大规模的验证,确保技术的普适性和广泛应用价值。

(6) 持续监测与改进: 强调持续监测对AI系统的重要性,并根据临床反馈和技术进步不断优化和调整模型。这有助于实时发现并解决可能出现的问题,保障患者的健康和安全。

(7) 教育与培训: 为了确保医疗人员能够有效使用AI技术,提倡对医生、护士等临床人员进行必要的AI教育和技能培训,提高他们对新技术的认识和应用能力。

(8) 患者参与: 鼓励将患者纳入AI技术的开发和评估过程中,确保技术设计和实施能够满足患者的实际需求,以及提高患者对于使用AI技术的接受度和满意度。

### 4 声明对我国临床实践和指南制订的意义

#### 4.1 对我国临床实践的意义

声明强调了利用AI技术实现精准医学和实施科学在心血管疾病研究和临床中的应用,这为我国在心血管

医学领域推行精准医学提供了重要的参考和借鉴,有助于提升治疗效率和个性化治疗水平。另外,AI技术可以在一定程度上解决我国医疗资源不平衡的现状,对于改善偏远和欠发达地区的医疗服务有重要意义。但是,考虑到前文所述应用AI的限制,临床工作中应当把AI处理的结果当作决策的参考意见而非决定因素。

#### 4.2 对我国指南制订的意义

声明指出AI应用的研究现状以及存在的挑战,为我国心血管疾病治疗指南的制订和更新提供了多维度参考。应用AI有助于改善对心血管疾病的筛查、预测、诊断和治疗,但是需要更多的前瞻性、多中心和随机对照研究来提高AI应用的证据等级。

### 5 小结

该声明为心血管医学领域的科研和临床实践提供了前沿技术的应用展望,还提出了实施中需关注的多个关键问题,对于推动我国AI的发展和應用有显著的参考价值。同时,声明为我国制订和完善心血管疾病治疗指南提供了重要参考,特别是在充分利用AI技术、提升治疗效果、保证患者安全等方面。声明鼓励跨学科合作,促进技术的平等化应用,并指出了当前实践中需要注意的问题和挑战。但是AI的应用也有一定局限性,比如AI可靠性尚未得到大规模验证,缺乏前瞻性研究,存在数据安全性和相关法律制定问题,缺乏证据支持应用AI可以改善患者预后等。因此,相关问题是未来的研究重心,以促进AI服务临床实践。

作者贡献: 周伊恒、杨梓钰负责文章的构思与设计、论文撰写; 吕焜、刘力滴、沈灿、廖晓阳负责对文章的修订; 贾禹负责文章的质量控制及审校,对文章整体负责。

本文无利益冲突。

### 参考文献

- [1] CREA F. Challenges in the prevention of cardiovascular diseases: traditional and non-traditional risk factors [J]. *Eur Heart J*, 2021, 42 (21): 2025-2029. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab296.
- [2] VALENZUELA P L, RUILOPE L M, SANTOS-LOZANO A, et al. Exercise benefits in cardiovascular diseases: from mechanisms to clinical implementation [J]. *Eur Heart J*, 2023, 44 (21): 1874-1889. DOI: 10.1093/eurheartj/ehad170.
- [3] LAVIE C J. Progress in cardiovascular diseases statistics 2022 [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2022, 73: 94-95. DOI: 10.1016/j.pcad.2022.08.005.
- [4] 王义为, 杨婷婷, 朱光宇, 等. 心血管数字医学的临床应用进展及展望 [J]. *中国心血管病研究*, 2023, 21 (8): 740-745. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5301.2023.08.012.
- [5] ARMOUNDAS A A, NARAYAN S M, ARNETT D K, et al. Use of artificial intelligence in improving outcomes in heart disease: a scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2024, 149 (14): e1028-1050. DOI: 10.1161/

- CIR.000000000001201.
- [6] WEIKERT T, FRANCONI M, ABBARA S, et al. Machine learning in cardiovascular radiology: ESCR position statement on design requirements, quality assessment, current applications, opportunities, and challenges [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31 (6): 3909–3922. DOI: 10.1007/s00330-020-07417-0.
- [7] VAN DEN OEVER L B, VONDER M, VAN ASSEN M, et al. Application of artificial intelligence in cardiac CT: from basics to clinical practice [J]. *Eur J Radiol*, 2020, 128: 108969. DOI: 10.1016/j.ejrad.2020.108969.
- [8] RAU A, SOSCHYNSKI M, TARON J, et al. Artificial intelligence and radiomics: value in cardiac MRI [J]. *Radiologie*, 2022, 62 (11): 947–953. DOI: 10.1007/s00117-022-01060-0.
- [9] CHEN Q, PAN T, WANG Y N, et al. A coronary CT angiography radiomics model to identify vulnerable plaque and predict cardiovascular events [J]. *Radiology*, 2023, 307 (2): e221693. DOI: 10.1148/radiol.221693.
- [10] NARAYAN S M, WANG P J, DAUBERT J P. New concepts in sudden cardiac arrest to address an intractable epidemic: JACC state-of-the-art review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73 (1): 70–88. DOI: 10.1016/j.jacc.2018.09.083.
- [11] BOLLEPALLI S C, SEVAKULA R K, AU-YEUNG W M, et al. Real-time arrhythmia detection using hybrid convolutional neural networks [J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10 (23): e023222. DOI: 10.1161/JAHA.121.023222.
- [12] ATTIA Z I, NOSEWORTHY P A, LOPEZ-JIMENEZ F, et al. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm: a retrospective analysis of outcome prediction [J]. *Lancet*, 2019, 394 (10201): 861–867. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)31721-0.
- [13] AL-ZAITI S, BESOMI L, BOUZID Z, et al. Machine learning-based prediction of acute coronary syndrome using only the pre-hospital 12-lead electrocardiogram [J]. *Nat Commun*, 2020, 11 (1): 3966. DOI: 10.1038/s41467-020-17804-2.
- [14] SMITH S W, WALSH B, GRAUER K, et al. A deep neural network learning algorithm outperforms a conventional algorithm for emergency department electrocardiogram interpretation [J]. *J Electrocardiol*, 2019, 52: 88–95. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2018.11.013.
- [15] YAO X X, RUSHLOW D R, INSELMAN J W, et al. Artificial intelligence-enabled electrocardiograms for identification of patients with low ejection fraction: a pragmatic, randomized clinical trial [J]. *Nat Med*, 2021, 27 (5): 815–819. DOI: 10.1038/s41591-021-01335-4.
- [16] SIONTIS K C, LIU K, BOS J M, et al. Detection of hypertrophic cardiomyopathy by an artificial intelligence electrocardiogram in children and adolescents [J]. *Int J Cardiol*, 2021, 340: 42–47. DOI: 10.1016/j.ijcard.2021.08.026.
- [17] LIU W T, LIN C S, TSAO T P, et al. A deep-learning algorithm-enhanced system integrating electrocardiograms and chest X-rays for diagnosing aortic dissection [J]. *Can J Cardiol*, 2022, 38 (2): 160–168. DOI: 10.1016/j.cjca.2021.09.028.
- [18] TANG S Y, RAZEGHI O, KAPOOR R, et al. Machine learning-enabled multimodal fusion of intra-atrial and body surface signals in prediction of atrial fibrillation ablation outcomes [J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2022, 15 (8): e010850. DOI: 10.1161/CIRCEP.122.010850.
- [19] RUSH B, CELI L A, STONE D J. Applying machine learning to continuously monitored physiological data [J]. *J Clin Monit Comput*, 2019, 33 (5): 887–893. DOI: 10.1007/s10877-018-0219-z.
- [20] GUGLIN M E, THATAI D. Common errors in computer electrocardiogram interpretation [J]. *Int J Cardiol*, 2006, 106 (2): 232–237. DOI: 10.1016/j.ijcard.2005.02.007.
- [21] SYED M, SYED S, SEXTON K, et al. Application of machine learning in intensive care unit (ICU) settings using MIMIC dataset: systematic review [J]. *Informatics*, 2021, 8 (1): 16. DOI: 10.3390/informatics8010016.
- [22] MATAM B R, DUNCAN H, LOWE D. Machine learning based framework to predict cardiac arrests in a paediatric intensive care unit: prediction of cardiac arrests [J]. *J Clin Monit Comput*, 2019, 33 (4): 713–724. DOI: 10.1007/s10877-018-0198-0.
- [23] FALSETTI L, RUCCO M, PROIETTI M, et al. Risk prediction of clinical adverse outcomes with machine learning in a cohort of critically ill patients with atrial fibrillation [J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1): 18925. DOI: 10.1038/s41598-021-97218-2.
- [24] GUO Y T, WANG H, ZHANG H, et al. Mobile photoplethysmographic technology to detect atrial fibrillation [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 74 (19): 2365–2375. DOI: 10.1016/j.jacc.2019.08.019.
- [25] SHAH A J, ISAKADZE N, LEVANTSEVYCH O, et al. Detecting heart failure using wearables: a pilot study [J]. *Physiol Meas*, 2020, 41 (4): 44001. DOI: 10.1088/1361-6579/ab7f93.
- [26] HAIBE-KAINS B, ADAM G A, HOSNY A, et al. Transparency and reproducibility in artificial intelligence [J]. *Nature*, 2020, 586 (7829): E14–16. DOI: 10.1038/s41586-020-2766-y.
- [27] WYATT K D, POOLE L R, MULLAN A F, et al. Clinical evaluation and diagnostic yield following evaluation of abnormal pulse detected using Apple Watch [J]. *J Am Med Inform Assoc*, 2020, 27 (9): 1359–1363. DOI: 10.1093/jamia/ocaa137.
- [28] TRAN V T, RIVEROS C, RAVAUD P. Patients' views of wearable devices and AI in healthcare: findings from the ComPaRe e-cohort [J]. *NPJ Digit Med*, 2019, 2: 53. DOI: 10.1038/s41746-019-0132-y.
- [29] PIRRACCHIO R, PETERSEN M L, CARONE M, et al. Mortality prediction in intensive care units with the Super ICU Learner Algorithm (SICULA): a population-based study [J]. *Lancet Respir Med*, 2015, 3 (1): 42–52. DOI: 10.1016/S2213-2600(14)70239-5.
- [30] WU T T, ZHENG R F, LIN Z Z, et al. A machine learning model to predict critical care outcomes in patient with chest pain visiting the emergency department [J]. *BMC Emerg Med*, 2021, 21 (1): 112. DOI: 10.1186/s12873-021-00501-8.
- [31] ZHAO J, FENG Q P, WU P, et al. Learning from longitudinal data in electronic health record and genetic data to improve cardiovascular event prediction [J]. *Sci Rep*, 2019, 9 (1): 717. DOI: 10.1038/s41598-018-36745-x.

(收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-07-25)

(本文编辑: 赵跃翠)