

心搏骤停早期预警评分系统的研究现状和展望

吕智康 程兆云 孙俊杰 轩继中 胡俊龙 刘前进

郑州大学人民医院(河南省人民医院)心血管外科, 郑州 450003

通信作者:程兆云, Email: 13903712068@163.com

【摘要】 心搏骤停是心脏性猝死的第4个时期,特征是心电活动停止,循环呼吸迅速衰竭,往往预后不佳。如何有效预测心搏骤停是诊疗环节中的重点和难点。近些年早期预警评分系统在心搏骤停中应用的研究不断突破,从最初根据一定数量的样本制定出仅包含基本生命体征指标的传统评分系统,发展到不断增减变换参考指标、增加样本量制定出敏感度和特异度更高的改良评分系统。如今,电子信息技术不断发展,评分系统的制定过程中引入了机器学习技术,突破了既往评分系统的局限性,在临床上取得了不错的效果。本文分析并比较了国内外不同早期预警评分系统的相关研究和前沿进展,总结了研究成果、空白点及存在的不足;同时结合我国分级诊疗政策,论述了心搏骤停早期预警评分系统未来在我国的发展应用方向。

【关键词】 心搏骤停; 早期预警评分系统; 研究现状; 展望

基金项目: 河南省医学科技攻关计划项目(2018020456, 2018020438)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20201231-00791

Research status and prospect of cardiac arrest early warning scoring system

Lyu Zhikang, Cheng Zhaoyun, Sun Junjie, Xuan Jizhong, Hu Junlong, Liu Qianjin

Department of Cardiovascular Surgery, Zhengzhou University People's Hospital (Henan Provincial People's Hospital), Zhengzhou 450003, Henan, China

Corresponding author: Cheng Zhaoyun, Email: 13903712068@163.com

【Abstract】 Cardiac arrest is the fourth stage of sudden cardiac death, which is characterized by the cessation of electrical activity in the heart, rapid circulatory and respiratory failure, and the prognosis is often poor. How to effectively predict cardiac arrest is the key and difficult point in the diagnosis and treatment process. In recent years, the research on the application of early warning scoring system in cardiac arrest has made continuous breakthroughs, from initially formulating a traditional scoring system containing only basic vital signs indicators according to a certain number of samples to continuously increasing and changing indicators, increasing the sample size, and formulating an improved scoring system with better sensitivity and specificity. Nowadays, with the continuous development of electronic information technology, machine learning technology is introduced into the formulation of scoring system, which breaks through the limitations of previous scoring system and has achieved good results in clinic. This article analyzes and compares the relevant research and cutting-edge progress of different early warning scoring systems at home and abroad, and summarizes the research results, gaps and shortcomings. Finally, combined with the relevant policies of graded diagnosis and treatment in China, this paper discusses the development and application direction of cardiac arrest early warning scoring system in the future.

【Key words】 Cardiac arrest; Early warning scoring system; Research status; Prospect

Fund program: Medical Science and Technology Project of Henan Province (2018020456, 2018020438)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20201231-00791

心搏骤停是心脏丧失有效泵血功能,血流突然中止,临床表现有胸痛、气促、呼吸异常或消失、意识丧失。美国每年约35万人发生院外心搏骤停^[1],约30万人发生院内心搏骤停^[2],全因死亡约1.8万人,相关死亡约38万人^[1]。我国的情况更是不容乐观,每年大约有54万人发生心搏骤停,全因病死率为7.4%^[3]。最新指南显示,早期预警评分系统可以预测心搏骤停的发生,降低病死率^[4-5],但是早期预警评分系统种类繁多,不同的早期预警系统相比较而言能给患者带来多少益处难以定论。现针对这一问题搜集不同心搏骤停早期预警评分系统相关文献,并比较优劣,论述心搏骤停早期预警评分系统在我国的发展可能。

1 常用心搏骤停早期预警评分系统

目前常用的心搏骤停早期预警评分系统包括心脏风险

指数修订版(the revised cardiac risk index, RCRI)、早期预警评分(early warning score, EWS)、改良早期预警评分(modified early warning score, MEWS)、国家早期预警评分(national early warning score, NEWS)、心搏骤停危险分级(the cardiac arrest risk triage, CART)、电子心搏骤停危险分级(electronic cardiac arrest risk triage, eCART)和机器学习技术。

1.1 基本特征和临床效果(表1~2):自1997年Morgan制定出第一个早期预警评分系统用于心搏骤停以来,心搏骤停早期预警评分系统发展演变出诸多分支,但大体上趋于三大类。第一类,如EWS、MEWS、NEWS和CART。此类评分简洁、操作性强,主要包括基本生命体征等指标。第二类,如RCRI和eCART。此类评分在第一类的基础上进一步发展,评分较为复杂,增加了生化指标。第三类,如机器学习。机器学习

表1 心搏骤停早期预警评分系统的基本特征

早期预警评分系统	制定年份(年)	评分指标	适用场景
RCRI ^[6]	1999	冠状动脉疾病、心力衰竭、脑血管疾病、胰岛素依赖型糖尿病、肾功能不全、高危的非心脏外科手术	非心脏外科手术患者术前评估术后并发心血管事件
EWS ^[7]	1997	生命体征和意识状态等	急诊或入院前患者病情评估和危险分层
MEWS ^[8]	2001	收缩压、心率、呼吸频率、体温和意识	急诊或入院前患者病情评估和危险分层
NEWS ^[9]	2012	脉搏、体温、呼吸频率、血氧饱和度、收缩压及意识水平	急诊或入院前患者病情评估和危险分层
CART ^[10]	2012	呼吸频率、心率、舒张压和年龄	住院患者
eCART ^[11]	2014	呼吸频率、心率、舒张压、年龄和化验指标	住院患者
机器学习技术 ^[12]	2015	腺苷心肌灌注显像 ^[13] 、生命体征、生化指标、心电图等临床数据 ^[14-15]	住院患者,救护车 ^[16]

注:RCRI为心脏风险指数修订版,EWS为早期预警评分,MEWS为改良早期预警评分,NEWS为国家早期预警评分,CART为心搏骤停危险分级,eCART为电子心搏骤停危险分级

技术是传统评分与新时代电子信息算法的结合,与前两类差异巨大。它的评分过程复杂,指标繁多、不统一,无法人为评分,只能通过电子机器自动评估。在临床应用效果方面,机器学习技术最出色,受试者工作特征曲线下面积(area under the receiver operator characteristic curve, AUC)达0.85,其他评分的AUC从高到低依次为第二类的eCART和RCRI、第一类的NEWS和MEWS。可以看出,随着时间推移,心搏骤停早期预警评分系统正在朝着操作过程更复杂、临床应用效果更优秀的方向不断发展。由于改良版心搏骤停早期预警评分系统的临床应用效果优于最初版,近期有关最初版早期预警评分系统的研究较少,本文只讨论改良版心搏骤停早期预警评分系统的临床应用效果。

表2 心搏骤停早期预警评分系统的临床应用效果

早期预警评分系统	AUC	早期预警评分系统	AUC
RCRI	0.750 ^[17]	eCART	0.801 ^[18]
MEWS	0.698 ^[18]	机器学习算法	0.850 ^[15]
NEWS	0.718 ^[18]		

注:RCRI为心脏风险指数修订版,EWS为早期预警评分,MEWS为改良早期预警评分,NEWS为国家早期预警评分,CART为心搏骤停危险分级,eCART为电子心搏骤停危险分级,AUC为受试者工作特征曲线下面积

1.2 优点、不足和前沿进展:RCRI的优点是评分指标较简洁,仅包括患者的术前病史和手术种类,评分过程易于操作。RCRI的缺点:一是RCRI的某些评分指标定义较为模糊,使用的是狭义上的定义,在一定程度上降低了RCRI的准确性;二是RCRI的适用人群范围较窄,只能用于非心脏外科手术患者术前评估术后住院期间或术后30d内出现死亡或心血管事件(包括心源性死亡、心肌梗死和心搏骤停)的风险,极大地限制了RCRI的应用空间,并且RCRI的临床应用效果一般。国外已开展了诸多有关RCRI的研究,结果较为全面和成熟。RCRI能在中等程度上区分非心脏术后患者发生心搏骤停高风险与低风险的可能,但对大血管手术(如腹主动脉人工血管置换术)患者的预测能力较差。目前,有关RCRI的研究仍保持较高热度,研究热点主要是通过加入新的评分指标、探索特殊适用人群或更改部分评分指标的定义标准

来提高RCRI的临床应用效果。国外学者对RCRI的适用人群进行研究,制定出不同适用人群的改良版RCRI^[19-20],但改良版RCRI未被广泛接受和使用。近5年国内对RCRI的关注度不高,尚未在中文数据库中检索到国内有关RCRI临床应用效果的报道。

EWS在英国不同医院有不同的版本,评分指标和过程存在差异。大多数版本的评分指标包括生命体征等,只有少数版本的评分指标包含血生化参数^[7]。总体而言,EWS的评分指标和过程简洁可行,操作性强,这是它的优点之一;EWS的另一个优点是适用范围较广。EWS在设计之初没有对适用人群进行严格的限制,它的预测结局包括死亡、脑梗死、心搏骤停、转入重症监护病房(intensive care unit, ICU)等不良事件。EWS的缺点是临床应用效果一般,敏感度和特异度不高;不能持续监测,只能由有经验的临床医生根据患者情况计算分析得出预测结果;某些评分指标较为模糊,没有严格的参照标准,导致评估结果容易受操作人员的主观影响^[21]。目前,EWS的研究热度一般,发表的文献大多为对既往文献进行总结的综述、系统回顾和Meta分析。国外学者研发了不少EWS改良版本,其中最为出名的是MEWS和NEWS。MEWS和NEWS在EWS的基础上增加了评分指标,提升了临床应用效果,在欧洲诸多医院被广泛使用。国内部分医院逐渐开展MEWS和NEWS的临床应用工作,某些医院也将EWS的其他改良版本应用于临床,如儿童早期预警评分(pediatric early warning score, PEWS)。目前,探索不同适用人群和预测结局的临床效果是研究的热点。国外文献大多为针对特定疾病患者的报道,如肝病和新型冠状病毒肺炎^[22-23];近几年发表的文献大多将心搏骤停、心源性死亡和死亡等不良事件合并为1个预测结局,很少有研究者将心搏骤停作为预测结局进行单独分析^[18, 24]。另外,由于MEWS和NEWS的应用广泛,不少文献都将二者作为对照组来比较,从而探讨改良或新制定的预警评分系统的临床疗效。目前国内针对EWS、MEWS和NEWS的文献大多为单中心小样本报道,且大多应用于护理、急救领域,以结局为心搏骤停的研究较少。

CART的优点是评分指标少,操作简单易行;缺点是敏感度和特异度一般。eCART是CART的改良版本,评分指

标中加入了血生化指标,在适用人群方面没有调整,仍然适用于住院患者。eCART的优点是临床应用效果尚优,缺点是操作比较复杂。近年来,国外的文献报道大多为回顾性分析,也没有将心搏骤停作为预测结局单独分析^[18]。

目前,心搏骤停早期预警评分系统中常用的机器学习技术包括人工神经网络(artificial neural network, ANN)、深度学习(deep learning, DL)和随机森林算法(random forest, RF)。机器学习技术的优点是敏感度和特异度较其他评分系统有了很大提升;应用范围广泛,适用于不同类型的患者;具有自我学习和完善的能力,随着数据输入次数的增多能够不断自我进步,校正预测结局与临床最终结局的误差^[15]。机器学习技术的缺点是评分指标繁多,评分计算过程复杂,临床医生无法通过计算与经验分析得出预测结局,只能通过机器计算才能预测结局;目前训练样本不足,需要大量的训练样本才能逐渐成熟并在临床使用,临床使用时还要根据临床病例不断校对误差,需要一定的成长时间^[25];评估患者的类型会影响预测结果,如年龄、地域、合并症等,在患者类型发生改变时,预测结果的误差就会增加,机器又要重新开始校对、学习。近期发表的国外文献大多为大样本多中心回顾性分析或系统回顾等,研究种类覆盖全面,而国内目前尚缺乏这方面的研究报道。

2 近些年诞生的心搏骤停早期预警评分系统

近年来诞生了不少心搏骤停早期预警评分系统,发表在权威期刊上的包括病房风险分级工具^[26]、5个常见指标的评分^[27]、心电图风险评分^[28]和使用临床指标的预测模型^[29]等。病房风险分级工具来自美国芝加哥大学医学中心联合5家医院开展的多中心回顾性研究,从约27万例住院患者中筛选出预后不良(心搏骤停、转入ICU和死亡)的患者,采用离散时间生存分析建立预测模型,最后将预测结局与MEWS的预测结果进行比较^[26]。5个常见指标的评分是法国巴黎猝死专家中心从巴黎地区4年内接受急救医疗服务(emergency medical service, EMS)的8112例ST段抬高心肌梗死患者中筛选出452例院外心搏骤停患者,采用多变量回归模型确定与心搏骤停相关的因素,再基于这个多变量回归模型制定出的评分系统^[27]。这项研究最大的特色为最终结局是预测院外心搏骤停这一不良事件。在此类研究中,预测结局设计为院外心搏骤停是很困难的。心电图风险评分是美国芝加哥医学中心基于心电图异常信号制定的评分标准^[28]。该中心通过分析心电图异常信号出现次数 ≥ 4 次与心搏骤停不良结局之间的关系制定出评分系统,并计算AUC,证实评分系统可靠。使用临床指标的预测模型是从北美和欧洲5个注册试验中筛选出室性心律失常和心搏骤停的528例右室发育不良/心脏病患者,采用比例风险回归模型从8个潜在的影响因素中选择7个制定评分系统,最后将预测效果与植入型心律转复除颤器(implantable cardioverter defibrillator, ICD)放置算法进行比较^[29]。上述文献存在一些局限,例如:论证了临床指标与结果的关联强度,但没有与其他早期预警评分系统的临床应用效果进行横向比较^[28-29];

研究对象限于合并特殊疾病的患者^[27, 29];没有将心搏骤停作为预测结局单独分析^[26, 29];病例样本年份较久^[26]。突破这些局限尚需要进一步研究,目前这些早期预警评分系统尚未被广泛认可和使用。没有检索到国内学者制定的早期预警评分系统的文献。

3 讨论

历经20余年的发展,心搏骤停早期预警评分系统最初以基本生命体征为评分指标,后续不断改良、完善,加入生化等新的指标,临床应用效果不断进步。近5年心搏骤停早期预警评分系统向信息化方向发展,引入机器学习技术,取得了突破性的进展。目前,心搏骤停早期预警评分系统呈现出3个主要热点和发展方向。

一是信息化,向机器学习技术发展。机器学习算法具有自我学习、完善的能力,能在不断评估样本预测结局的过程中自动校正预测结局与实际临床结果之间的误差,这种过程与临床医生积累临床经验类似。理论上,机器学习算法评估样本越多,自我完善的程度就越高,临床预测结局的准确度也越高,突破了以往心搏骤停早期预警评分系统的局限性,具有相当的发展潜力。但是,目前只有少数中心有小样本的报道,尚处于临床试验阶段,随之暴露出来的难点和问题还需进一步完善,距离全面进入临床还有很长的路要走。

二是继续完善、增减评分指标。目前,有一些中心或医院牵头,采用临床医师手工填报或信息化技术建立了多中心大型数据库,经过10余年的积累使得这些数据库拥有超过10余万例庞大的病历资料,并借助不断建立、更新的大型数据库,在心搏骤停早期预警评分系统的制定过程中扩充样本量。在巨大的样本量基础上,完善、增减评分指标,制定出新的心搏骤停早期预警评分系统。巨大的样本量在一定程度上缩减了预测结局与临床最终结果之间的误差,保证了较为可靠的临床应用效果。但是,这种方式只能通过人为改变或增加评分指标来提高敏感度和特异度,在一次次改动中不断接近真实的临床结局,对数据库的样本量有较高的要求,耗费的人力物力也较大,难以突破自身的局限,发展潜力有限。

三是基于现有的早期预警评分系统,探索新的适用人群和新的预测结局。早期预警评分系统在设计之初,就是为了预测死亡、心搏骤停、进入ICU等不良结局,可以预测的临床结局是比较广泛的。早期预警评分系统应用于特殊人群(老年、术后、合并特殊疾病等),预测结局设计成脑梗死、心肌梗死等新的临床结果,测试敏感度和特异度,从而论证早期预警评分系统用于新的人群和预测结局的可行性。目前,国内此类文献报道多集中在护理^[30]、急救^[31]等方面的单中心小样本研究,还有很大的上升发展空间。

在临床实际应用方面,心搏骤停早期预警评分系统在我国也有很大的发展空间。目前我国执行的是分级诊疗政策,包含3个级别,即基础保健/首诊、二级医疗和三级医疗,分别对应的是:为社区提供预防、医疗、保健、康复服务的基层医院和卫生院;向多个社区提供综合医疗卫生服务和承担

一定教学、科研任务的地区性医院；向几个地区提供高水平专科性医疗卫生服务和执行高等教育、科研任务的区域性医院。三类心搏骤停早期预警评分系统则可以分别应用于三级诊疗。第一类心搏骤停早期预警评分系统简单实用，仅需简单的生命体征就可以实现预警，没有场地和设备的限制；大多数医务工作者经过培训和学习后，就能熟练使用预警评分系统，且临床效果和准确性尚可。第一类心搏骤停早期预警评分系统适合基层全科医生开展（基础保健/首诊），如 MEWS 和 NEWS。第二类心搏骤停早期预警评分系统评分指标包括血常规、生化、心电图等，其准确性较第一类有所提高，要求具有一定的设备和场地，比较适合县市级医院开展（二级医疗），如 RCRI 和 eCART。第三类心搏骤停早期预警评分系统对场地和设备要求最高，具备学习和进化能力^[15]，比较适合省级医院及医学中心开展（三级医疗），如机器学习技术。心搏骤停早期预警评分系统可以与分级诊疗政策契合，更好地分配医疗资源，避免医疗资源浪费，将危重患者及时分级分类，更快转诊，使优良的医疗资源向危重患者倾斜，从而降低病死率。这也是适合我国国情的发展方向，但尚需文献支持。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Virani SS, Alonso A, Benjamin EJ, et al. Heart disease and stroke statistics—2020 update: a report from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2020, 141 (9): e139–e596. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000757.
- [2] Holmberg MJ, Ross CE, Fitzmaurice GM, et al. Annual incidence of adult and pediatric in-hospital cardiac arrest in the United States [J]. *Circ Cardiovasc Qual Outcomes*, 2019, 12 (7): e005580. DOI: 10.1161/CIRCOUTCOMES.119.005580.
- [3] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2019 概要 [J]. *中国循环杂志*, 2020, 35 (9): 833–854. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2020.09.001.
- [4] Berg KM, Cheng A, Panchal AR, et al. Part 7: systems of care: 2020 American Heart Association guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care [J]. *Circulation*, 2020, 142 (16_suppl_2): S580–S604. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000899.
- [5] 吴佳天, 陆宗庆, 朱星星, 等. 《美国心脏协会关于心搏骤停存活的科学声明》摘译与解读 [J]. *中华危重病急救医学*, 2020, 32 (8): 915–921. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200605-00440.
- [6] Lee TH, Marcantonio ER, Mangione CM, et al. Derivation and prospective validation of a simple index for prediction of cardiac risk of major noncardiac surgery [J]. *Circulation*, 1999, 100 (10): 1043–1049. DOI: 10.1161/01.cir.100.10.1043.
- [7] Fu LH, Schwartz J, Moy A, et al. Development and validation of early warning score system: a systematic literature review [J]. *J Biomed Inform*, 2020, 105: 103410. DOI: 10.1016/j.jbi.2020.103410.
- [8] Subbe CP, Kruger M, Rutherford P, et al. Validation of a modified early warning score in medical admissions [J]. *QJM*, 2001, 94 (10): 521–526. DOI: 10.1093/qjmed/94.10.521.
- [9] Jones M. NEWSDIG: the National Early Warning Score Development and Implementation Group [J]. *Clin Med (Lond)*, 2012, 12 (6): 501–503. DOI: 10.7861/clinmedicine.12-6-501.
- [10] Churpek MM, Yuen TC, Park SY, et al. Derivation of a cardiac arrest prediction model using ward vital signs [J]. *Crit Care Med*, 2012, 40 (7): 2102–2108. DOI: 10.1097/CCM.0b013e318250aa5a.
- [11] Churpek MM, Yuen TC, Park SY, et al. Using electronic health record data to develop and validate a prediction model for adverse outcomes in the wards [J]. *Crit Care Med*, 2014, 42 (4): 841–848. DOI: 10.1097/CCM.0000000000000038.
- [12] Deo RC. Machine learning in medicine [J]. *Circulation*, 2015, 132 (20): 1920–1930. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.115.001593.
- [13] Haro Alonso D, Wernick MN, Yang YY, et al. Prediction of cardiac death after adenosine myocardial perfusion SPECT based on machine learning [J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26 (5): 1746–1754. DOI: 10.1007/s12350-018-1250-7.
- [14] Layeghian Javan S, Sepehri MM, Layeghian Javan M, et al. An intelligent warning model for early prediction of cardiac arrest in sepsis patients [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2019, 178: 47–58. DOI: 10.1016/j.cmpb.2019.06.010.
- [15] Kwon JM, Lee Y, Lee Y, et al. An algorithm based on deep learning for predicting in-hospital cardiac arrest [J]. *J Am Heart Assoc*, 2018, 7 (13): e008678. DOI: 10.1161/JAHA.118.008678.
- [16] Lee H, Shin SY, Seo M, et al. Prediction of ventricular tachycardia one hour before occurrence using artificial neural networks [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 32390. DOI: 10.1038/srep32390.
- [17] Ford MK, Beattie WS, Wijeyesundera DN. Systematic review: prediction of perioperative cardiac complications and mortality by the revised cardiac risk index [J]. *Ann Intern Med*, 2010, 152 (1): 26–35. DOI: 10.7326/0003-4819-152-1-201001050-00007.
- [18] Green M, Lander H, Snyder A, et al. Comparison of the between the flags calling criteria to the MEWS, NEWS and the electronic cardiac arrest risk triage (eCART) score for the identification of deteriorating ward patients [J]. *Resuscitation*, 2018, 123: 86–91. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2017.10.028.
- [19] Alrezk R, Jackson N, Al Rezk M, et al. Derivation and validation of a geriatric-sensitive perioperative cardiac risk index [J]. *J Am Heart Assoc*, 2017, 6 (11): e006648. DOI: 10.1161/JAHA.117.006648.
- [20] Bronheim RS, Oermann EK, Bronheim DS, et al. Revised cardiac risk index as a predictor for myocardial infarction and cardiac arrest following posterior lumbar decompression [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44 (3): E187–E193. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002783.
- [21] Downey CL, Tahir W, Randell R, et al. Strengths and limitations of early warning scores: a systematic review and narrative synthesis [J]. *Int J Nurs Stud*, 2017, 76: 106–119. DOI: 10.1016/j.ijnurstu.2017.09.003.
- [22] Hydes TJ, Meredith P, Schmidt PE, et al. National early warning score accurately discriminates the risk of serious adverse events in patients with liver disease [J]. *Clin Gastroenterol Hepatol*, 2018, 16 (10): 1657–1666. e10. DOI: 10.1016/j.cgh.2017.12.035.
- [23] Kostakis I, Smith GB, Prytherch D, et al. The performance of the national early warning score and national early warning score 2 in hospitalised patients infected by the severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) [J]. *Resuscitation*, 2021, 159: 150–157. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2020.10.039.
- [24] Kramer AA, Sebati F, Lissauer M. A review of early warning systems for prompt detection of patients at risk for clinical decline [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2019, 87 (1S Suppl 1): S67–S73. DOI: 10.1097/TA.0000000000002197.
- [25] Krittanawong C, Rogers AJ, Johnson KW, et al. Integration of novel monitoring devices with machine learning technology for scalable cardiovascular management [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2021, 18 (2): 75–91. DOI: 10.1038/s41569-020-00445-9.
- [26] Churpek MM, Yuen TC, Winslow C, et al. Multicenter development and validation of a risk stratification tool for ward patients [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2014, 190 (6): 649–655. DOI: 10.1164/rccm.201406-10220C.
- [27] Karam N, Bataille S, Marjion E, et al. Identifying patients at risk for prehospital sudden cardiac arrest at the early phase of myocardial infarction: the e-MUST study (Evaluation en Médecine d'Urgence des Stratégies Thérapeutiques des infarctus du myocarde) [J]. *Circulation*, 2016, 134 (25): 2074–2083. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.116.022954.
- [28] Aro AL, Reinier K, Rusinaru C, et al. Electrical risk score beyond the left ventricular ejection fraction: prediction of sudden cardiac death in the Oregon sudden unexpected death study and the atherosclerosis risk in communities study [J]. *Eur Heart J*, 2017, 38 (40): 3017–3025. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz331.
- [29] Cadrin-Tourigny J, Bosman LP, Nozza A, et al. A new prediction model for ventricular arrhythmias in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy [J]. *Eur Heart J*, 2019, 40 (23): 1850–1858. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz103.
- [30] 李晓燕, 都玉娜, 陈民, 等. 改良早期预警评分临床应用的 SWOT 分析 [J]. *中华危重病急救医学*, 2019, 31 (4): 509–512. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2019.04.029.
- [31] 顾明, 付阳阳, 李晨, 等. 改良早期预警评分在急诊重症患者早期死亡中的预测价值 [J]. *中华危重病急救医学*, 2015, 27 (8): 687–690. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2015.08.014.

(收稿日期: 2020-12-31)