·临床研究·

便携式掌式12导联心电信号采集装置在老年心血管疾病中的诊断效能

芦婷婷[1,2]，曹瑞华[1]，王雨嘉[1]，申玉玉[3]，李颖苇[3]，高姗[1]，孙广华[1]，王慧泉[3]，范利[1]，曹丰[1*]

([1]中国人民解放军总医院第二医学中心心血管内科，国家老年疾病临床医学研究中心，北京 100853；[2]南开大学医学院临床医学系，天津 300071；[3]天津工业大学生命科学学院，天津 300387)

【摘　要】 **目的**　探讨便携式掌式12导联心电信号采集装置(PH-ECG)在老年心血管病患者中的诊断效能。**方法**　选择2020年2月至2022年12月就诊于中国人民解放军总医院第二医学中心心血管内科，明确诊断心肌梗死、房颤(AF)等不同心血管疾病的315例门诊和住院老年患者为研究对象，对患者分别进行标准12导联心电图(CL-ECG)及PH-ECG检查，统计PH-ECG在不同心血管疾病诊断中的灵敏度、特异度、阳性预测值(PPV)及阴性预测值(NPV)。采用SPSS 26.0统计软件进行数据分析。计数资料组间比较采用χ^2检验。检查结果一致性使用Kappa和配对χ^2检验进行评估。**结果**　PH-ECG检测ST段改变的灵敏度、特异度及准确度分别为75.0%、98.6%及97.1%，与CL-ECG结果进行一致性检验，Kappa值为0.754，$P=0.000$；PH-ECG检测T波异常的灵敏度、特异度及准确度分别为75.0%、97.9%及95.6%，与CL-ECG结果进行一致性检验，Kappa值为0.750，$P=0.000$；PH-ECG检测房颤的灵敏度、特异度及准确度分别为95.5%、99.1%及98.1%，与CL-ECG结果进行一致性检验，Kappa值为0.949，$P=0.000$；PH-ECG对心肌梗死、室性早搏等其他心血管疾病诊断的灵敏度及特异度均在90%以上，与CL-ECG结果进行一致性检验，具有较好的一致性(Kappa值>0.800)。**结论**　PH-ECG具有便携性、实时性、操作简便等优点，在院外心电图检查中具有重要前景。

【关键词】 老年人；12导联心电图；可穿戴设备；便携式

【中图分类号】 R445.9　　**【文献标志码】** A　　**【DOI】** 10.11915/j.issn.1671-5403.2023.11.177

Diagnostic efficiency of portable handheld 12-lead ECG signal acquisition device in elderly patients with cardiovascular diseases

Lu Tingting[1,2], Cao Ruihua[1], Wang Yujia[1], Shen Yuyu[3], Li Yingwei[3], Gao Shan[1], Sun Guanghua[1], Wang Huiquan[3], Fan Li[1], Cao Feng[1*]

([1]Department of Cardiology, Second Medical Centre of Chinese PLA General Hospital, National Clinical Research Centre for Geriatric Diseases, Beijing 100853, China; [2]Department of Clinical Medicine, School of Medicine, Nankai University, Tianjin 300071, China; [3]School of Life Sciences, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

【Abstract】 **Objective**　To investigate the diagnostic efficiency of portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device (PH-ECG) in elderly patients with cardiovascular diseases. **Methods**　A total of 315 elderly outpatients and inpatients diagnosed with cardiovascular diseases such as myocardial infarction and atrial fibrillation (AF) in the Department of Cardiology, Second Medical Center of Chinese PLA General Hospital from February 2020 to December 2022 were recruited in this study. All of them received conventional 12-lead electrocardiography (CL-ECG) and PH-ECG respectively. The sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV), and negative predictive value (NPV) of PH-ECG with different cardiovascular diseases were calculated. SPSS statistics 26.0 was used to perform the statistical analysis. *Chi*-square test was employed for intergroup comparison on enumerate data. The consistency of obtained results was tested by Kappa and paired *Chi*-square test. **Results**　The sensitivity, specificity and accuracy of PH-ECG in detecting ST segment changes were 75.0%, 98.6% and 97.1%, respectively, and the Kappa value was 0.754, $P=0.000$ for consistency when compared with CL-ECG. In detecting abnormal T wave, the sensitivity, specificity and accuracy were 75.0%, 97.9% and 95.6% respectively in PH-ECG, and the Kappa value was 0.750 when compared with CL-ECG. For detecting atrial fibrillation, the sensitivity, specificity and accuracy were 95.5%, 99.1% and 98.1% respectively, and the Kappa value was 0.949, $P=0.000$. The sensitivity and specificity for the detection of myocardial infarction, premature ventricular contraction and other cardiovascular diseases were all above 90%, and there was good consistency (Kappa values >0.800) between PH-ECG and CL-ECG. **Conclusion**　PH-ECG has the advantages of portability, real-time performance and easy operation, and has an important prospect in out-of-hospital electrocardiogram examination.

【Key words】 aged; 12-lead electrocardiogram; wearable devices; portable

收稿日期：2023-02-28；**接受日期**：2023-03-06

基金项目：国家自然科学基金(92249301)；卫健委重点课题(2020ZD05)；科技部重点研发计划(2022YFC3602400)

通信作者：曹丰，E-mail：fengcao8828@163.com

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China (92249301), *the Key Project of National Health Commission* (2020ZD05) *and the Key Research and Development Program of Ministry of Science and Technology* (2022YFC3602400).
Corresponding author: *Cao Feng*, *E-mail*: *fengcao8828@163.com*

冠心病、心律失常等心血管疾病已成为全球发病率和死亡率的主要原因[1]。老年人群因多种疾病共存,急性心肌缺血、心律失常等不良心血管事件更易发生[2],且该类心血管事件常发生于医院外,院外早期及时的心电图检查,对其预防和早期诊治至关重要[3,4]。目前标准12导联心电图(conventional 12-lead electrocardiogram,CL-ECG)是诊断心律失常、心肌缺血必需的检查之一,但CL-ECG存在专业性强、便携性差、院外检查困难等限制难以满足院外检查需求[5]。本研究旨在评价本课题组自主研发的便携式掌式12导联心电信号采集装置(portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device,PH-ECG)在不同老年心血管疾病诊断中的诊断效能。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选择2020年2月至2022年12月就诊于中国人民解放军总医院心血管内科门诊和住院的315例老年患者(年龄≥65岁)为研究对象,详细记录其临床资料和主要检查检验指标。本研究已通过本院伦理委员会审批通过(伦理号:S2021-220-01),所有参与者均签署知情同意书。

纳入标准:(1)年龄≥65岁;(2)明确诊断有急性ST段抬高型心肌梗死(acute ST-segment elevation myocardial infarction,STEMI)、急性非ST段抬高型心肌梗死(Non ST-segment elevation myocardial infarction,NSTEMI)、不稳定性心绞痛(unstable angina,UA)、陈旧性心肌梗死等心肌缺血,房颤(atrial fibrillation,AF)、窦性心动过速、窦性心动过缓、窦性心律不齐、房性早搏(atrial premature complex,APC)、室性早搏(ventricular premature complex,VPC)及一度房室传导阻滞等心律失常疾病患者。

排除标准:(1)不稳定精神疾病;(2)皮肤病变严重,不适合与本研究心电图设备电极材料接触;(3)严重器质性病变可影响心电图检查结果者。

1.2 方法

由一位经过充分受训的心血管内科医师对315例受试者分别进行PH-ECG和CL-ECG检查,两种检查基本同步进行,检查时间间隔不超过10 min。CL-ECG检查使用标准12导联心电图机(Mlnx X2000,宁波市美灵思医疗器械有限公司,图1),PH-ECG检查使用本课题组自主研发的可穿戴便携式掌式12导联心电信号采集装置(发明专利ZL 202110586314.4),该设备对照临床测量标准,在手套掌心一侧上定位了全导联心电所需的10个电极位置,且基于4G和蓝牙无线,心电波形可实时显示在所连接的APP界面上,同时心电信号可实时传输至医生端进行后续分析,实现心电图远程监测(图2)。



图1 PH-ECG设备图

Figure 1 Picture of PH-ECG device

PH-ECG: portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device.



图2 PH-ECG设备心电波形图

Figure 2 Picture of measured ECG waveform by PH-ECG device

PH-ECG: portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device.

行心电图检查时,患者均平卧,平静呼吸,心电图走纸速度均为25 mm/s,定标电压为10 mm/mV。PH-ECG设备测量电极位置放置如图3所示,电极具体放置位置如下。V1:大拇指指根处的电极,放置于位于胸骨右缘,第4肋与第5肋骨之间,并进行定位;V2:V1与V3导联中间处电极,放置于V1导联胸骨中线对称位置;V3:食指指根和无名指指根交叉处的电极;V4:无名指第一指节处的电极;V5:无名指第二指节处的电极,放置于左侧第5肋间水平,用于定位;V6:无名指第三指节处的电极,放置于左侧第5肋间水平;RA:大拇指指尖处的电极,放置于右侧胸壁,约第二肋骨下缘;

LA:食指指尖处的电极,放置于左侧胸壁,约第二肋骨下缘;LL:小拇指指尖处的电极,放置于左侧胸壁下缘;RL:手掌右下方靠近手腕处的电极。

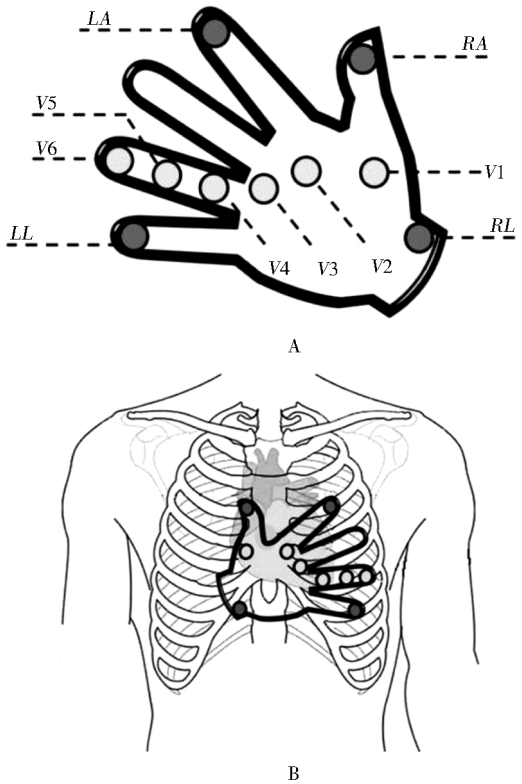


图 3 PH-ECG 设备测量电极位置示意图

Figure 3 Position of PH-ECG device measurement electrode

PH-ECG: portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device.

检查结束后将检查顺序随机打乱,另外一位对受检者病情不知情的心血管内科副主任医师对两种检查结果进行判定,按照心电图诊断术语标准[6],判定结果包括:正常心电图、心肌梗死、异常 Q 波、ST 段改变、T 波异常等心肌缺血表现及 AF、窦性心动过速、窦性心动过缓、窦性心律不齐、APC、VPC 及一度房室传导阻滞等心律失常表现。

1.3 统计学处理

采用 SPSS 26.0 统计软件进行数据分析。计数资料以例数(百分率)表示,组间比较采用 χ^2 检验。检查结果一致性使用 Kappa 和配对 χ^2 检验进行评估。$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 患者临床资料情况

315 例患者中,男性 192 例(61.0%),女性 123 例(39.0%);年龄 65~98(78.1±11.3)岁;体质量指数(22.0±3.04)kg/m^2。部分患者心电图同时可有多种表现,经统计,CL-ECG 表现为 AF 等心律失常的患者共 260 例,表现为 T 波异常等心肌缺血的患者共 87 例。

2.2 PH-ECG 与 CL-ECG 检查结果比较

所有受试者均行 PH-ECG 及 CL-ECG 检查,二者对不同心律失常及心肌缺血的检查结果比较,差异无统计学意义($P>0.05$;表 1)。

2.2.1 PH-ECG 对心律失常检查的诊断效能 PH-ECG 对心律失常检查的诊断效能指标详见表 2。其中,AF 检查的灵敏度、特异度及准确度分别为 95.0%、99.1%和 98.1%。阳性预告值(positive predictive value,PPV)与阴性预告值(negative predictive value,NPV)分别为 97.4%和 98.3%。与 CL-ECG 结果进行一致性检验,Kappa 值为 0.949,$P=0.000$,其结果具有高度一致性。

PH-ECG 对窦性心动过缓、窦性心动过速、窦性心律不齐、APC、VPC 及一度房室传导阻滞等其他心律失常的检查灵敏度、特异度、PPV 及 NPV 均在 90%以上,与 CL-ECG 结果进行一致性检验,Kappa 值>0.80,$P=0.000$,结果具有高度一致性。

2.2.2 PH-ECG 对心肌缺血检查的诊断效能 PH-ECG 对心肌缺血检查的诊断效能指标详见表 3。PH-ECG 对心肌梗死检查的灵敏度、特异度、PPV 及 NPV 均在 90%以上,与 CL-ECG 结果进行一致性检验,Kappa 值均>0.80,$P=0.000$,两种检查方式在诊断结果上具有高度一致性。PH-ECG 对 ST 改变检查的灵敏度、特异度、准确度、PPV 及 NPV 分别为 75.0%、98.6%、97.1%、78.9%和 98.3%,与 CL-ECG 结果进行一致性检验,Kappa 值为 0.754,$P=0.000$,结果具有较强的一致性。PH-ECG 对 T 波异常检查的灵敏度、特异度、准确度、PPV 及 NPV 分别为 75.0%、97.9%、95.6%、80.0%和 97.2%,与 CL-ECG 结果进行一致性检验,Kappa 值为 0.750,检查结果具有较强一致性。

3 讨 论

本研究是一项非随机的前瞻性观察性研究,通过在老年心血管疾病人群中应用 PH-ECG 探索其诊断价值,以 CL-ECG 为标准对照,PH-ECG 对 AF、窦性心动过缓、窦性心动过速、窦性心律不齐、APC、VPC、一度房室传导阻滞等心律失常及 ST 改变、陈旧性心肌梗死等心肌缺血中均具有较高的灵敏度和特异度。本研究在便携式远程心电监测方面做了初步探索及验证,为院外急救提供了重要的检查手段,以期优化院外心血管疾病患者的诊断模式。

表1 PH-ECG与CL-ECG检查结果比较

Table 1 Comparison of PH-ECG and CL-ECG results

(n=315)

CL-ECG	PH-ECG			χ^2	P value
	Yes	No	Total		
AF				0.167	0.668
Yes	76	4	80		
No	2	233	235		
Total	78	237	315		
APC				0.000	1.000
Yes	36	4	40		
No	3	273	275		
Total	39	277	315		
VPC				0.200	0.063
Yes	55	0	55		
No	5	255	260		
Total	60	255	315		
First degree atrioventricular block				0.000	1.000
Yes	14	1	15		
No	0	300	300		
Total	14	301	315		
Sinus bradycardia				0.000	1.000
Yes	20	0	20		
No	0	295	295		
Total	20	295	315		
Sinus tachycardia				0.500	0.600
Yes	28	2	30		
No	0	285	285		
Total	28	287	315		
Sinus arrhythmia				0.000	1.000
Yes	18	2	20		
No	1	294	295		
Total	19	296	315		
AMI				0.000	1.000
Yes	14	1	15		
No	0	300	300		
Total	14	301	315		
ST changes				0.000	1.000
Yes	15	5	20		
No	4	291	295		
Total	19	296	315		
Prior myocardial Infarction				0.600	0.500
Yes	18	2	20		
No	0	295	295		
Total	18	297	315		
T wave inversion				0.071	0.791
Yes	24	8	32		
No	6	277	283		
Total	30	285	315		

PH-ECG: portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device; CL-ECG: conventional 12-lead electrocardiogram; AF: atrial fibrillation; APC: atrial premature complex; VPC: ventricular premature complex; AMI: acute myocardial infarction.

表2 PH-ECG对心律失常的诊断效能

Table 2 Diagnostic efficacy of PH-ECG for arrhythmia

Item	Sensitivity (%)	Specificity (%)	PPV (%)	NPV (%)	Accuracy (%)	Kappa value
AF	95.0	99.1	97.4	98.3	98.1	0.949
APC	90.0	99.3	92.3	98.6	98.1	0.899
VPC	100.0	98.1	91.7	100.0	98.4	0.947
First degree atrioventricular block	93.3	100.0	100.0	99.7	99.7	0.964
Sinus bradycardia	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	1.000
Sinus tachycardia	93.3	100.0	100.0	99.3	99.4	0.962
Sinus arrhythmia	90.0	99.7	94.7	99.3	99.0	0.918

PH-ECG: portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device; AF: atrial fibrillation; APC: atrial premature complex; VPC: ventricular premature complex; PPV: positive predictive value; NPV: negative predictive value.

表3 PH-ECG对心肌缺血的诊断效能

Table 3 Diagnostic efficacy of PH-ECG for myocardial ischemia

Item	Sensitivity (%)	Specificity (%)	PPV (%)	NPV (%)	Accuracy (%)	Kappa value
AMI	93.3	100.0	100.0	99.7	99.7	0.964
ST changes	75.0	98.6	78.9	98.3	97.1	0.754
Prior myocardial infarction	90.0	100.0	100.0	99.3	99.4	0.944
T wave inversion	75.0	97.9	80.0	97.2	95.6	0.750

PH-ECG: portable handheld 12-lead electrocardiogram signal acquisition device; AMI: acute myocardial infarction; PPV: positive predictive value; NPV: negative predictive value.

近年来,随着互联网技术的飞速发展及全球新型冠状病毒疫情的影响,基于智能可穿戴设备的远程医疗逐渐走向普遍化[7],移动心电设备也在不断改良及推广应用,从单导联至12导联不等[8],经验证具有较好的临床应用价值,在心血管疾病的管理中具有较好的前景[9,10]。在多种智能心电图设备中,手持式单导联心电图检测房颤的灵敏度及特异度分别为89%~99%和95%~99%[5,11],本研究中PH-ECG检测房颤的灵敏度及特异度分别为95.0%和99.1%,其结果与手持式单导联心电设备检查结果相符。本研究中受试者分别进行PH-ECG与CL-ECG检查的时间间隔为10 min以内,与CL-ECG检查结果相比,PH-ECG对检查急性心肌梗死患者的灵敏度为93.3%。在一项关于多导联(22导联)移动心电图设备检查急性心肌梗死患者的灵敏度研究中[12],受试者分别进行CL-ECG与多导联移动心电图设备行心电图检查的时间间隔为20 min(4~45 min),与CL-ECG检查结果相比,多导联移动心电图设备对急性心肌梗死患者检查的灵敏度为91.2%。由于心肌梗死患者的心电图ST段表现可在短时间内发生变化,同一患者不同时间点的心电图检查可能有不同结果[13]。故在多导联移动心电图设备对急性心肌梗死患者的灵敏度研究中,受试

者进行两种心电图检查的时间差较大可能导致了其灵敏度稍低于 PH-ECG 设备。

PH-ECG 对 ST 段改变、T 波异常的检查灵敏度分别为 75.0%和 75.0%，PPV 分别为 78.9%和 80.0%，灵敏度及阳性预告值较低，分析原因是 PH-ECG 的心电图信号质量受基线漂移、电力线干扰、肌电噪声及工频噪声等的影响，部分噪声水平无法完全消除，影响心电图的结果分析。这些干扰正如现有心电图检查设备的噪声来源[14]，这些噪声同时也导致在 PH-ECG 检查时，等待基线稳定需要花费比 CL-ECG 检查更多的时间。具体解决方案为在设备正式使用前，协调专业医护人员对受试者、受试者家属或陪护进行面对面详细培训，包括设备的使用、注意事项、皮肤清洁等，确保设备使用的正确性和高效性。检查时嘱受检者平静呼吸，尽量减小呼吸幅度；检查前进行相应皮肤清洁，并用酒精擦拭受接触皮肤以降低肌电噪声及工频噪声干扰。由于电极放置位置的不完全吻合，PH-ECG 中的 T 波幅度与 CL-ECG 的 T 波幅度不完全一致，这也是影响 T 波异常检查灵敏度的原因。

现有的可穿戴心电图设备大多为单导联式设备，应用验证的疾病大多集中于单病种[15]，对于移动心脏遥测设备等多导联设备，由于佩戴时间长，专业性强，患者的依从性及体验感不佳[16,17]。本研究中的 PH-ECG 是 12 导联心电图设备，设备穿戴过程简洁，前期将采集到的掌式心电与标准心电处理后创建了心电数据库，提出了基于栈式自编码算法的掌式心电映射模型，对波形的映射效果进行了交叉验证，其结果证明映射算法可以将掌式心电转换为标准心电并保留波形特征，PH-ECG 所测心电波形可信度高，能够对房颤、心肌梗死等多种疾病进行较准确的心电图验证。

本研究仍存在一定的局限性。(1)人群样本量相对较小，心血管疾病种类不够单一，阳性与阴性样本不均衡，心电监测的结果分析混杂因素较多；(2)研究对象为 65 岁及以上的老年心血管疾病患者，受试者皮肤多干燥，电生理信号传导不良，导致所测的心电图信号噪声干扰大，本设备电极材料的柔性传感方面需要进一步改进；(3)该设备电极放置位置与标准 12 导联位置不完全吻合，故心电信号在波形振幅方面存在一定误差，影响心肌梗死、ST 改变等检查的灵敏度及准确度。在本研究的基础上，我们将对自主研发的便携式掌式 12 导联心电信号采集装置进行不断改良及优化，以提高检测的灵敏度及特异度，以期未来在院内外急救方面可以更好的应用。

综上所述，本研究针对老年患者心肌梗死、心律失常等多种心血管疾病，将 PH-ECG 与标准心电图对比，进行灵敏度、特异度等诊断效能验证及一致性检验，结果显示二者具有较好的一致性。该设备作为一种院外心电图检查设备，具有便携性、可操作性强、实时性、适老性等优点，在心电监测技术逐步发展并完善的背景下，有着较大的临床价值及应用前景。

【参考文献】

[1] Soppert J, Lehrke M, Marx N, *et al*. Lipoproteins and lipids in cardiovascular disease: from mechanistic insights to therapeutic targeting[J]. Adv Drug Deliv Rev, 2020, 159: 4-33. DOI: 10.1016/j.addr.2020.07.019.

[2] Liu Z, Li G, Ma Y, Lin L. The effects of aspirin with combined compound Danshen Dropping pills on hemorheology and blood lipids in middle-aged and elderly patients with CHD: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Public Health, 2021, 9: 664841. DOI: 10.3389/fpubh.2021.664841.

[3] Chew KT, Raman V, Then PHH. Remote arrhythmia detection for elder care in Malaysia[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(24): 8197. DOI: 10.3390/s21248197.

[4] Schreinlechner M, Rizas KD, Bauer A. Digital screening for atrial fibrillation ready for prime time? Lessons learned from eBRAVE-AF[J]. Clin Transl Med, 2023, 13(1): e1151. DOI: 10.1002/ctm2.1151.

[5] Bouzid Z, Al-Zaiti SS, Bond R, *et al*. Remote and wearable ECG devices with diagnostic abilities in adults: a state-of-the-science scoping review[J]. Heart Rhythm, 2022, 19(7): 1192-1201. DOI: 10.1016/j.hrthm.2022.02.030.

[6] 全军心血管专业委员会心脏无创检测学组,《心电图诊断术语规范化中国专家共识(2019)》编写专家组. 心电图诊断术语规范化中国专家共识(2019)[J]. 实用心电学杂志, 2019, 28(3): 161-165. DOI: 10.13308/j.issn.2095-9354.2019.03.002.

[7] Ohannessian R, Duong TA, Odone A. Global telemedicine implementation and integration within health systems to fight the COVID-19 pandemic: a call to action[J]. JMIR Public Health Surveill, 2020, 6(2): e18810. DOI: 10.2196/18810.

[8] Veltmann C, Ehrlich JR, Gassner UM, *et al*. Wearable-basierte detektion von arrhythmien[J]. Der Kardiologe, 2021, 15(4): 341-353. DOI: 10.1007/s12181-021-00488-3.

[9] Zinzuwadia A, Singh JP. Wearable devices-addressing bias and inequity[J]. Lancet Digit Health, 2022, 4(12): e856-e857. DOI: 10.1016/s2589-7500(22)00194-7.

[10] Bayoumy K, Gaber M, Elshafeey A, *et al*. Smart wearable devices in cardiovascular care: where we are and how to move forward[J]. Nat Rev Cardiol, 2021, 18(8): 581-599. DOI: 10.1038/s41569-021-00522-7.

[11] Bansal A, Joshi R. Portable out-of-hospital electrocardiography: a review of current technologies[J]. J Arrhythm, 2018, 34(2): 129-138. DOI: 10.1002/joa3.12035.

[12] Spaich S, Kern H, Zelniker TA, *et al*. Feasibility of CardioSecur®, a mobile 4-electrode/22-lead ECG device, in the prehospital emergency setting[J]. Front Cardiovasc Med, 2020, 7: 551796. DOI: 10.3389/fcvm.2020.551796.

[13] Tanguay A, Lebon J, Lau L, *et al*. Detection of STEMI using prehospital serial 12-lead electrocardiograms[J]. Prehosp Emerg Care, 2018, 22(4): 419-426. DOI: 10.1080/10903127.2017.1399185.

[14] Satija U, Ramkumar B, Manikandan MS. A review of signal processing techniques for electrocardiogram signal quality assessment[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2018, 11: 36-52. DOI: 10.1109/rbme.2018.2810957.

[15] Escobar-Linero E, Muñoz-Saavedra L, Luna-Perejón F, *et al*. Wearable health devices for diagnosis support: evolution and future tendencies[J]. Sensors (Basel), 2023, 23(3): 1678. DOI: 10.3390/s23031678.

[16] Varma N, Cygankiewicz I, Turakhia MP, *et al*. 2021 ISHNE/HRS/EHRA/APHRS collaborative statement on mHealth in arrhythmia management: sigital medical tools for heart rhythm professionals: from the International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology/Heart Rhythm Society/European Heart Rhythm Association/Asia Pacific Heart Rhythm Society[J]. Ann Noninvasive Electrocardiol, 2021, 26(2): e12795. DOI: 10.1111/anec.12795.

[17] Duncker D, Ding WY, Etheridge S, *et al*. Smart wearables for cardiac monitoring-real-world use beyond atrial fibrillation[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(7): 2539. DOI: 10.3390/s21072539.

(编辑：郑真真)