

P 波参数与形态对心房颤动及其他心血管疾病的预测作用

郭叶丹 刘璐 张树龙

(大连大学附属中山医院心脏中心, 辽宁 大连 116001)

【摘要】 心房颤动是最常见的心律失常,其特点是快速和异常的心房激活导致心房功能受损。因 P 波特征的任何偏转都意味着心房激活时间和传导途径的变化,因此,了解 P 波典型形态学改变以及异常 P 波参数与心房颤动间的联系可做到早期心房颤动的精准预测。现重点介绍 P 波形态、P 波参数与心房颤动的联系,探索基于人工智能技术下 P 波对心房颤动的预测价值,以及 P 波参数对其他心血管疾病的预测作用,为将来 P 波对心房颤动和其他心血管疾病发生的早期识别提供一种新的手段。

【关键词】 P 波参数;P 波形态;心房颤动;心血管疾病

【DOI】10. 16806/j. cnki. issn. 1004-3934. 2023. 10. 013

Predictive Role of P-Wave Parameters and Morphology for Atrial Fibrillation and Other Cardiovascular Diseases

GUO Yedan, LIU Lu, ZHANG Shulong

(Heart Center, Zhongshan Hospital Affiliated to Dalian University, Dalian 116001, Liaoning, China)

【Abstract】 Atrial fibrillation is the most common arrhythmia, characterized by rapid and abnormal atrial activation leading to impaired atrial function. Any deflection of P-wave characteristics implies changes in atrial activation time and conduction pathway, so understanding the typical morphological changes of P-wave and the relationship between abnormal P-wave parameters and atrial fibrillation can lead to accurate prediction of early atrial fibrillation. This review described the P-wave morphology, the mechanism of association between P-wave parameters and atrial fibrillation, and explore the predictive value of P-wave for atrial fibrillation based on artificial intelligence technology, as well as the predictive effects of P-wave parameters on other cardiovascular disease. It provides a new method for early recognition of P-wave as atrial fibrillation and other cardiovascular diseases in the future.

【Key words】 P-wave parameters; P-wave morphology; Atrial fibrillation; Cardiovascular disease

心房颤动 (atrial fibrillation, AF) 是最常见的心律失常之一,与显著的发病率和死亡率相关,是栓塞性卒中和心力衰竭 (heart failure, HF) 恶化的危险因素^[1]。AF 由炎症、心房传导阻滞、纤维化和左心房增大等多因素参与,其进展与心房重构有关,心房间传导异常和传导异质性受损,被认为是 AF 发展的潜在机制^[2]。P 波代表心房活动,其特征性的改变揭示了心房激动时间和传导路径的局部变化^[3]。因此,利用 P 波参数及形态学改变,可做到 AF 的早期预测。现对正常生理条件下可能影响 P 波的因素进行简要探讨,针对 P 波与 AF 预测间的联系机制,人工智能技术下 P 波的预测价值,以及 P 波参数对于其他心血管疾病的预测作用做一综述。

1 影响 P 波参数和形态的因素

2022 年发表的 P 波参数国际指南^[4]表示, P 波参数包括 P 波离散度 (P-wave dispersion, Pd)、V₁ 导联 P

波终末电势 (P-wave terminal force in lead V₁, PTFV₁)、房间传导阻滞 (interatrial block, IAB)、P 波时限、P 波电轴 (P-wave axis, PWA)、P 波面积等, P 波参数反映了潜在的心房结构、大小和电激活; 这些因素的改变表现为 P 波参数的异常, 且不同情况下 P 波形态也各异。笔者认为正常生理条件下, P 波参数不是维持不变的, 心房优势传导径路的改变、激动位置、消融术后肺静脉再连接均可能导致 P 波形态和参数异常。

心房间传导路径有 4 条, 即 Bachmann 束、冠状静脉窦附近心房下部肌束、卵圆窝处的穿间隔纤维、毗邻右侧肺静脉的后侧纤维。不同心房间传导路径占主导时, 相应地会造成 P 波时限与形态的改变^[5] (表 1)。其次, 脉冲起点变化也可能导致 P 波改变。如 Loewe 等^[6]证实了 P 波形态受右心房最早激活部位 (the earliest activated site, EAS) 的移动及其靠近心房间连接 (inter-atrial connection, IAC) 的影响, 同时还发

现 PTFV₁ 与二者也存在显著相关性,PTFV₁ 显示出 EAS 从前/上位置移动到后/下位置的 U 形过程,附近的 EAS 导致 PTFV₁ 差异为 2 倍。因此在临床实践中评估 PTFV₁ 时应考虑到这一点。而 Pezzuto 等^[7]表示阵发性房颤(paroxysmal atrial fibrillation, PAF)患者 P 波形态变异性可通过窦房结出口位置的变异性及其周围存在的慢传导区来解释,慢传导区面积越大,P 波形态变异性越大。此外,因肺静脉电隔离的异位活动在引发持续性 AF 中起重要作用,而 AF 患者消融后复发被认为是其肺静脉和左心房之间电传导的重新连接。Martinez-Mateu 等^[8]表示消融前后 P 波的特征变化(包括持续时间、振幅或面积)可用作肺静脉隔离成功的指标,并可用于检测接受 AF 消融术的患者随访后期肺静脉是否重新连接。Yanagisawa 等^[9]通过调查 PAF 初次消融术后有/无肺静脉重新连接患者的 P 波参数及形态,发现肺静脉再连接组 P 波最大时限再次显著增加,且会出现新的或延迟的 P 波切迹。笔者猜测部分 P 波切迹的形成可能是由于肺静脉和肺静脉结(包括左心房)的心肌套管的激活。因此,消融后 P 波最大时限无明显变化和 P 波有助于诊断成功的肺静脉隔离,二者组合形成的参数可能进一步增强预测效果。

表 1 不同传导路径阻滞组合的 P 波时限及形态变化

心房传导通路	P 波时限/ms	P 波形态
正常	103	正向
Bachmann 束阻滞	113	正向
右肺静脉阻滞	104	正向
卵圆窝阻滞	105	正向
冠状窦阻滞	103	正向
Bachmann 束 + 右肺静脉阻滞	124	正负双向
Bachmann 束 + 卵圆窝阻滞	114	正向
Bachmann 束 + 冠状窦阻滞	113	正向
Bachmann 束 + 右肺静脉 + 卵圆窝阻滞	160	正负双向
Bachmann 束 + 右肺静脉 + 冠状窦阻滞	124	正负双向

2 P 波形态和 P 波参数与 AF

2.1 P 波形态与 AF

2.1.1 P 波低平

Filos 等^[3]探讨了 PAF 患者与健康受试者 P 波形态差异,发现 PAF 患者心房基质的电不稳定性更高,心房传导模式会改变;并且可仅通过异常的 P 波形态来预测 AF。Rasmussen 等^[10]提出了一个 P 波面积/P 波时限指数用于反映 P 波形态,其中小 P 波面积/P 波时限指数表示平坦 P 波,而大 P 波面积/P 波时限指数表示尖峰短 P 波;研究发现 II 导联中的小 P 波面积/P 波时限指数可能是心房肌受损和传导时间延长

的标志,与 AF 发生率增加有关。由于低平 P 波的形成可能源于心房肌纤维化,且与纤维化的严重程度成正相关,因此,笔者认为低平 P 波可能是心房扩张和纤维化的标志物,能预测 AF 的发生。

2.1.2 下壁导联双向 P 波

Skov 等^[11]表示 II 导联正负双向 P 波与 AF、缺血性卒中和传导障碍的关联性特别强,同时该研究还提出下壁导联双向 P 波的数量与 AF 发生风险成正相关。Eranti 等^[12]基于 X、Y 和 Z 导联 P 波极性,提出一种可评估 AF 不同风险的正交 P 波形态。其分 3 型:1 型,P 波时限 < 110 ms;2 型,显著 V₁ 导联 P 波末端力相对普遍;3 型,最常见的是三度 IAB 患者(其特征是 II、III 和 aVF 导联 P 波时限 ≥ 120 ms 且表现为双向 P 波形态)。研究发现 3 型 P 波与 AF 住院风险增加高度相关,而 1 型 P 波受试者 AF 住院风险非常低;其中基于不同性别,异常 P 波形态的患病率不同。

2.1.3 P 波宽大及 V₁ 导联双向 P 波

Andlauer 等^[13]发现左心房扩张导致受试者依赖性 P 波持续时间(P-wave duration, PWd)延长,二者存在中度相关性;同时发现 V₁ 导联的绝对负振幅与左心房向心性肥厚高度相关。但 PWd 变化在 0 ~ 2 ms 几乎不受左心房壁厚度变化的影响。笔者猜测左心房扩张导致的 P 波增宽以及由左心房向心性肥厚形成的 V₁ 导联双向 P 波形态,可能成为预测 AF 的指标。

2.2 P 波参数与 AF

2.2.1 Pd

Pd 通过 P 波最大持续时间和 P 波最小持续时间的差值进行量化,研究发现术前高 Pd 是行冠状动脉旁路移植术患者术后 AF 的预测因子^[14]。在一项接受植入式循环记录仪治疗的隐源性卒中患者的研究中,Marks 等^[15]表示年龄、舒张功能障碍、房性早搏和 Pd 升高有助于检测 AF 风险较高的人群,其中 Pd > 40 ms 是 AF 唯一独立预测因子。

2.2.2 PTFV₁

PTFV₁(图 1)被评估为 V₁ 导联中负向 P 波振幅和持续时间的乘积,≥ 4 000 ms × μV 则为异常;Lebek 等^[16]发现异常 PTFV₁ 可作为 AF 一项预测因子,同时使用特定的 Ca²⁺-钙调蛋白依赖性蛋白激酶 II(Ca²⁺/calmodulin-dependent protein kinase II, CaMK II)抑制剂可显著降低 AF 和 PTFV₁ 异常的发生率。其机制考虑为 CaMK II 是心脏离子维持稳态的关键调节剂和心房电重塑的基础。Wolder 等^[17]探究了 PTFV₁ 组成成分,即 V₁ 导联 P 波终末持续时间(P-wave terminal duration in lead V₁, PTDV₁)和 V₁ 导联 P 波末端振幅

(P-wave terminal amplitude in lead V_1 , PTAV₁) 与 AF 和卒中/短暂性脑缺血发作 (transient ischemic attack, TIA) 之间的联系,发现 PTFV₁ 异常与 AF 和卒中/TIA 的风险增加有关,其中 PTDV₁ 的增加与 AF 和卒中/TIA 的发生呈剂量效应关系,而 PTAV₁ 与 AF 之间的关系不太明显。主要原因考虑 PTAV₁ 反映了矢量投影,而该矢量投影可因不同的因素发生改变,包括心脏和心电图电极放置的位置等。

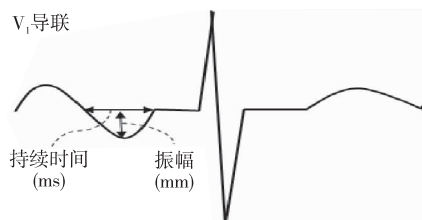


图1 PTFV₁ 示意图

2.2.3 IAB

IAB 是描述左右心房间传导延迟的心电图模式, Bachmann 束是心房传导最重要的通路,一般认为, IAB 的发病机制是 Bachmann 束部分或完全阻滞。根据阻滞程度不同,可分为一度、二度、三度 IAB (表 2 和图 2),其中三度 IAB 是快速房性心律失常的独立预测因子,与 AF、缺血性卒中、认知障碍、痴呆有关。当 IAB 患者伴有室上性心律失常 (如 AF) 时,称为贝叶综合征,其发生机制考虑高度 IAB 不仅为折返提供了条件,还与房性早搏发生率增加有关^[18]。关于 AF 与 IAB 间相互作用,研究^[19]表明心房不同步、纤维化和扩张型心肌病均可能导致 IAB,最终导致 AF,且 IAB 和 AF 可能形成一个恶性循环。已证明 IAB 具有临床预后意义,应进行深入的研究以探讨相关危险因素,更好地定义其与 AF 的关系。

表 2 IAB 定义及分型

分类	阻滞程度	定义	相关发现
部分 IAB	一度	P 波时限 ≥ 120 ms	I、II、III、aVF 导联常见正向双峰 P 波, V_1 导联可见正常双向 P 波
中间型 IAB	二度	同一份心电图上显示出不同程度的阻滞 (一度 ~ 三度)	P 波改变可能在早搏引发的间歇后出现
高度 IAB	三度	P 波时限 ≥ 120 ms 伴下壁导联 (II、III、aVF 导联) 正负双向 P 波	存在不典型表现: P 波时限 < 120 ms 并非全下壁导联都有双向 P 波

2.2.4 P 波时限

目前众多研究认为 PWd 延长与 AF 发生有关,那么 PWd 缩短与 AF 间是否存在类似效应? Auricchio 等^[20]评估短 P 波患者肺静脉隔离后 AF 的复发率,发

现 PWd 与 AF 复发显著相关, PWd < 110 ms 和 PWd ≥ 140 ms 的患者 AF 复发风险相对于 110 ~ 139 ms 组增加了近 2 倍。该研究还提出钠通道电导的增加可能导致 PWd 明显缩短,这与心房传导速度增加有关,这一新发现背后的机制需进一步探索。

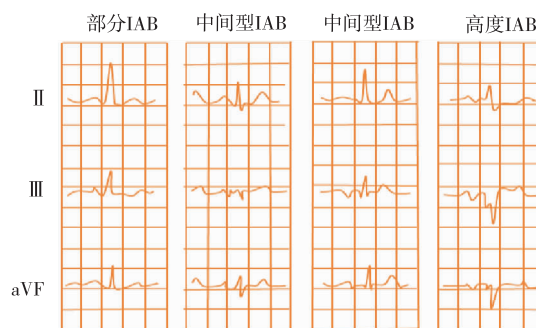


图2 IAB 示意图

2.2.5 PWA

正常的 PWA 为 $0^\circ \sim +75^\circ$, Dhaliwal 等^[21]发现 PWA 异常者的 AF 累积发生率几乎是正常者 2 倍,且 P 波左右电轴偏差发生 AF 的风险相当。一组社区动脉粥样硬化风险的研究^[22]表明, 19% PWA 异常患者会发展为 AF, PWA 异常者发生 AF 的可能性是其它因素的 2.34 倍,随着 PWA 降低到 14° 以下或超过 55° , AF 发生率会明显增加。但存在高度 IAB 时,由于 II、III 和 aVF 导联中 P 波呈现正负双向形态,笔者无法计算 PWA。关于 PWA 异常的 AF 患者并发卒中风险, Maheshwari 等^[23]对 2 229 例和 700 例由不同中心诊断为 AF 且未行抗凝治疗的患者进行研究,结果提示 PWA 异常与缺血性卒中风险增加相关 ($HR = 1.84$, 95% CI 1.33 ~ 2.55),并显著改善了 CHA₂DS₂-VASc 评分的风险预测。由于该研究只涉及美国人群,可能存在种族差异,因而在进入临床实践前,需在不同人群中测试该评分。

3 P 波参数结合人工智能

机器学习 (machine learning, ML) 是人工智能的一个分支, Trayanova 等^[24]通过归纳 ML 在电生理和心律失常方面的主要成就,提出应用 ML 技术有助于心律失常的诊治。以上均是通过传统方法利用 P 波来预测 AF。随着医工结合快速发展,通过 ML 方法是否可进一步挖掘 P 波参数对于 AF 的预测价值呢? 此外,卒中作为心血管疾病常见并发症, P 波参数结合 ML 应用于临床是否能有效降低卒中发生率呢?

3.1 AF

由于识别 AF 的主要挑战是心电图上不突出的 P 波, Yang 等^[25]开发了一种信号处理技术——最小弧长均匀相位经验模式分解用于隔离并提取 P 波,使用了支持向量机、感知器、随机森林和 XGBoost4 种 ML

分类器对 AF 进行分类,结果提示预测 AF 的 ML 模型(感知器),其 ROC 曲线下面积(area under the curve, AUC)最高为 0.64;在这些模型中,Ⅱ和 V₄ 导联以及 V₃ 和 V₅ 导联之间 P 波夹角是最重要的两个特征(夹角越大,AF 风险较高),与仅使用 P 波时限和振幅的模型相比,增加了分类性能(AUC = 0.56)。一项单中心回顾性研究^[26]采用决策树 ML 方法,发现二尖瓣狭窄的心房电生理变化可在心电图上检出,年龄、收缩压和 V₃ 导联 P 波面积可预测二尖瓣狭窄患者新发 AF 事件,V₃ 导联 P 波面积的最佳截止值为 1.45 Ashman 单位;使用 ML 模型改善了预测性能(AUC = 0.65)。Ouyang 等^[27]利用 physionet.org 数据库,对心电图数据进行滤波处理,提取了 P 波形态参数(PWd、PWA、Pd 等)和心率变异性参数共 31 个,采用 ML 进行数据挖掘,结果证实,P 波参数对 AF 患者的心电图有显著影响。因此,未来可通过该研究中确定的 P 波形态参数再结合 ML 模型,建立一个可解释的人工智能 AF 预测模型。

3.2 卒中

目前越来越多的证据支持 ML 可预测卒中发生。在一项预测二尖瓣反流死亡率和脑血管事件研究^[28]中,PWd 被证明是卒中最重要预测因素之一,将其加入到 ML 模型中有助于预测 TIA/卒中和全因死亡率。为了降低 AF 患者卒中发生率,Wu 等^[29]利用 50 例正常人和 50 例 PAF 患者的心电图,建立了一个高精度的人工智能模型。特征提取方面,类似于学者 Ouyang 将 P 波形态学参数和心率变异性参数结合起来;建模方面,将决策树、k 最近邻、人工神经网络和支持向量机 4 个 ML 模型一起训练,结果显示 P 波参数组合改善了模型对 AF 的早期诊断,可为医生早期介入治疗提供诊断参考,避免卒中发生。

4 P 波参数与其他心血管疾病

4.1 致心律失常性右室心肌病

致心律失常性右室心肌病(arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy, ARVC)是一种遗传性心肌病。Baturova 等^[30]评估了 P 波参数是否能作为 ARVC 进展过程中的一项心电图标志物,发现 ARVC 确诊前,P 波参数无异常,而确诊后 V₁ 和 V₂ 导联 P 波面积显著减少,异常 PTFV₁ 的患病率从开始诊断到随访第 15 年增加了 13%,演变过程中 PWd 和 PWA 无变化。前者可通过右心房心肌在疾病进展中的参与来解释,笔者推测,右心房传导异常在影响 P 波形态的同时,可能会增加 P 波的初始右心房向量与受影响较小的左心房向量之间的重叠,从而对整个 PWd 影响最小。

4.2 高血压

高血压能诱发心房重塑并导致传导异常,Aizawa

等^[31]回顾了高血压与 P 波参数之间的相关性研究,提出与非高血压组相比,高血压患者 P 波参数异常更常见。校正年龄,PWd 和 Pd 仍是高血压患者 AF 复发或新发 AF 的预测指标;但有效的高血压治疗后异常 P 波参数可得到纠正。笔者猜测通过治疗高血压来逆转 P 波参数可能确实与新发 AF 的发生率降低有关,其中准确测量 PWd 和 Pd 至关重要。

4.3 HF

Ostrowska 等^[32]在探讨 P 波参数能否预测 HF 事件的研究中发现,V₁ 导联中的 PWd 与突发 HF 之间存在很强的 U 型相关性,PWd < 60 ms 时 HF 风险显著增加,原因可能是心房传导速度增加,与跨膜离子通道或间隙连接的变化有关;但 HF 与 P 波振幅和 PR 间期之间无显著关系。总之,该研究提出短 PWd 与偶发 HF 之间的关联是一种新的发现,未来可能有助于 HF 的早期诊断和预防。对于其他 P 波参数,Abdellah 等^[33]提出 Pd > 40 ms 和 IAB 在 HF 患者中普遍存在,同时它们与左室射血分数下降、心功能差、住院和死亡率增加相关。笔者认为,将这些心电图参数添加到临床评估中可显著提高对 HF 发病率和死亡率的预测。

4.4 心肌梗死

一项前瞻性观察性研究^[34]提出 IAB 在 ST 段抬高型心肌梗死(ST segment elevation myocardial infarction, STEMI)患者中普遍存在,且 STEMI 患者的 IAB 可靠地预测了 1 年后的新发 AF;其中弥漫性心肌缺血是导致 IAB 的主要因素。Demirci 等^[35]在急性冠脉综合征患者中发现,依据 PTFV₁ 的方向可检测左右心房的改变,其对心肌梗死、心房肥大、三支血管病变有一定的预测价值。

通过以上探讨,笔者发现利用 P 波参数和形态学改变可一定程度地预测 AF 和其他心血管疾病。此外,临床中还可能不存在 P 波消失的情况,可能是 P 波真正消失,也可能是 P 波被藏匿。笔者认为前者考虑窦性停搏、窦房传导阻滞、心房肌异常;后者与异位节律的起源部位及其激动心房、心室的先后顺序有关。总之,P 波消失代表激动异常,可能反映了不同的心血管病变。

5 展望

P 波与 AF 密切相关,异常的 P 波形态和参数可作为早期预测 AF 发生的指标。相对于传统方法,通过人工智能技术,针对 P 波参数/指数以及图片的处理,建立诊断模型,可能成为未来预测 AF 的新模式。对于 AF 以外的其他心血管疾病,P 波参数也可能成为一项独立预测指标。

参 考 文 献

- [1] Gajendragadkar PR, von Ende A, Ibrahim M, et al. Assessment of the causal relevance of ECG parameters for risk of atrial fibrillation: a mendelian randomisation study[J]. *PLoS Med*, 2021, 18(5): e1003572.
- [2] Reese-Petersen AL, Olesen MS, Karsdal MA, et al. Atrial fibrillation and cardiac fibrosis: a review on the potential of extracellular matrix proteins as biomarkers [J]. *Matrix Biol*, 2020, 91-92: 188-203.
- [3] Filos D, Chouvarda I, Tachmatzidis D, et al. Beat-to-beat P-wave morphology as a predictor of paroxysmal atrial fibrillation [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2017, 151: 111-121.
- [4] Chen LY, Ribeiro ALP, Platonov PG, et al. P wave parameters and indices: a critical appraisal of clinical utility, challenges, and future research—A consensus document endorsed by the International Society of Electrocardiology and the International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology [J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2022, 15(4): e010435.
- [5] Gao Y, Gong YL, Xia L, et al. Simulation of inter atrial block based on a human atrial model[J]. *J Zhejiang Univ Sci B*, 2019, 20(4): 300-309.
- [6] Loewe A, Krueger MW, Holmqvist F, et al. Influence of the earliest right atrial activation site and its proximity to interatrial connections on P-wave morphology [J]. *Europace*, 2016, 18(suppl 4): iv35-iv43.
- [7] Pezzuto S, Gharaviri A, Schotten U, et al. Beat-to-beat P-wave morphological variability in patients with paroxysmal atrial fibrillation: an in silico study [J]. *Europace*, 2018, 20(suppl 3): iii26-iii35.
- [8] Martinez-Mateu L, Melgarejo-Meseguer FM, Muñoz-Romero S, et al. Manifold analysis of the P-wave changes induced by pulmonary vein isolation during cryoballoon procedure[J]. *Comput Biol Med*, 2023, 155: 106655.
- [9] Yanagisawa S, Inden Y, Okamoto H, et al. Electrocardiogram characteristics of P wave associated with successful pulmonary vein isolation in patients with paroxysmal atrial fibrillation: significance of changes in P-wave duration and notched P wave[J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2020, 25(2): e12712.
- [10] Rasmussen MU, Kumarathurai P, Fabricius-Bjerre A, et al. P-wave indices as predictors of atrial fibrillation [J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2020, 25(5): e12751.
- [11] Skov MW, Ghouse J, Kühl JT, et al. Risk prediction of atrial fibrillation based on electrocardiographic interatrial block [J]. *J Am Heart Assoc*, 2018, 7(11): e008247.
- [12] Eranti A, Carlson J, Kenttä T, et al. Orthogonal P-wave morphology, conventional P-wave indices, and the risk of atrial fibrillation in the general population using data from the Finnish Hospital Discharge Register[J]. *Europace*, 2020, 22(8): 1173-1181.
- [13] Andlauer R, Seemann G, Baron L, et al. Influence of left atrial size on P-wave morphology: differential effects of dilation and hypertrophy[J]. *Europace*, 2018, 20(suppl 3): iii36-iii44.
- [14] Achmad C, Tiksnadi BB, Akbar MR, et al. Left volume atrial index and P-wave dispersion as predictors of postoperative atrial fibrillation after coronary artery bypass graft: a retrospective cohort study [J]. *Curr Probl Cardiol*, 2023, 48(3): 101031.
- [15] Marks D, Ho R, Then R, et al. Real-world experience with implantable loop recorder monitoring to detect subclinical atrial fibrillation in patients with cryptogenic stroke: the value of p wave dispersion in predicting arrhythmia occurrence[J]. *Int J Cardiol*, 2021, 327: 86-92.
- [16] Lebek S, Wester M, Pec J, et al. Abnormal P-wave terminal force in lead V₁ is a marker for atrial electrical dysfunction but not structural remodelling [J]. *ESC Heart Fail*, 2021, 8(5): 4055-4066.
- [17] Wolder LD, Graff C, Baadsgaard KH, et al. The electrocardiographic P terminal force in lead V₁, its components and the association with stroke and atrial fibrillation or flutter[J]. *Heart Rhythm*, 2023, 20(3): 354-362.
- [18] Power DA, Lampert J, Camaj A, et al. Cardiovascular complications of interatrial conduction block: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 79(12): 1199-1211.
- [19] Bisbal F, Baranchuk A, Braunwald E, et al. Atrial failure as a clinical entity: JACC review topic of the week [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 75(2): 222-232.
- [20] Auricchio A, Özkartal T, Salghetti F, et al. Short P-wave duration is a marker of higher rate of atrial fibrillation recurrences after pulmonary vein isolation: new insights into the pathophysiological mechanisms through computer simulations [J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(2): e018572.
- [21] Dhaliwal KK, Upadhyay B, Soliman EZ, et al. Association of P-wave axis with incident atrial fibrillation in diabetes mellitus (from the ACCORD trial) [J]. *Am J Cardiol*, 2020, 128: 191-195.
- [22] Maheshwari A, Norby FL, Soliman EZ, et al. Abnormal P-wave axis and ischemic stroke: the ARIC study (atherosclerosis risk in communities) [J]. *Stroke*, 2017, 48(8): 2060-2065.
- [23] Maheshwari A, Norby FL, Roetker NS, et al. Refining prediction of atrial fibrillation-related stroke using the P₂-CHA₂DS₂-VAsc Score [J]. *Circulation*, 2019, 139(2): 180-191.
- [24] Trayanova NA, Popescu DM, Shade JK. Machine learning in arrhythmia and electrophysiology [J]. *Circ Res*, 2021, 128(4): 544-566.
- [25] Yang HW, Hsiao CY, Peng YQ, et al. Identification of patients with potential atrial fibrillation during sinus rhythm using isolated P wave characteristics from 12-lead ECGs [J]. *J Pers Med*, 2022, 12(10): 1608.
- [26] Tse G, Lakhani I, Zhou J, et al. P-wave area predicts new onset atrial fibrillation in mitral stenosis: a machine learning approach [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2020, 8: 479.
- [27] Ouyang CS, Chen YJ, Tsai JT, et al. Data mining analysis of the influences of electrocardiogram P-wave morphology parameters on atrial fibrillation [J]. *J Intel Fuzzy Syst*, 2021, 40(4): 7901-7908.
- [28] Zhou J, Lee S, Liu Y, et al. Predicting stroke and mortality in mitral regurgitation: a machine learning approach [J]. *Curr Probl Cardiol*, 2023, 48(2): 101464.
- [29] Wu C, Hwang M, Huang TH, et al. Application of artificial intelligence ensemble learning model in early prediction of atrial fibrillation [J]. *BMC Bioinformatics*, 2021, 22(suppl 5): 93.
- [30] Baturova MA, Svensson A, Aneq MÅ, et al. Evolution of P-wave indices during long-term follow-up as markers of atrial substrate progression in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy [J]. *Europace*, 2021, 23(suppl 1): i29-i37.
- [31] Aizawa Y, Sato T, Akazawa K. Prevalence, significance and reversal of abnormal P-wave indices in hypertension: a review and meta-analysis [J]. *J Electrocardiol*, 2019, 53: 13-17.
- [32] Ostrowska B, Lind L, Sciaraffia E, et al. A short P-wave duration is associated with incident heart failure in the elderly: a 15 years follow-up cohort study [J]. *J Geriatr Cardiol*, 2022, 19(9): 643-650.
- [33] Abdellah AT, El-Nagary M. Prevalence of P wave dispersion and interatrial block in patients with systolic heart failure and their relationship with functional status, hospitalization and one year mortality [J]. *Egypt Heart J*, 2018, 70(3): 181-187.
- [34] Çinier G, Tekkeşin Aİ, Genç D, et al. Interatrial block as a predictor of atrial fibrillation in patients with ST-segment elevation myocardial infarction [J]. *Clin Cardiol*, 2018, 41(9): 1232-1237.
- [35] Demirci B, Coskun A, Bakar C, et al. Relationship of V₁ derivation biphasic P waves with morbidity and mortality in myocardial infarction cases [J]. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2022, 32(8): 963-968.

收稿日期: 2023-03-07