

· 临床医学 ·

微伏级T波电交替在低中危冠心病患者的应用

卞燕飞¹, 颜紫宁^{2*}, 葛少洁¹¹南京医科大学附属常州第二人民医院心功能科, ²心内科, 江苏 常州 213003

[摘要] 目的:分析低危、中危冠心病患者的微伏级T波电交替(microvolt T-wave alternans, MTWA)值与最大微伏级T波电交替(max-MTWA)值并评估低、中危冠心病患者猝死风险的差异。方法:选取确诊的冠心病患者112例作为冠心病组,非冠心病患者66例作为对照组,冠心病组再根据运动平板试验Duke评分(Duke treadmill score, DTS)分为两个亚组,即低危组(5分≤DTS≤15分)和中危组(-10分≤DTS<5分)。所有研究对象进行运动平板试验的同时用移动平均修正法测得max-MTWA值及其对应的心率(heart rate, HR)和MTWA值,计算max-MTWA值及其对应HR的比值(max-MTWA/HR),并比较各组患者max-MTWA值、max-MTWA/HR比值和MTWA值的差异。结果:冠心病组的max-MTWA值、max-MTWA/HR比值和MTWA值较对照组高,差异有统计学意义($P < 0.05$),且max-MTWA值及max-MTWA/HR比值中危组>低危组>对照组,差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。对照组与低危组MTWA值的差异无统计学意义($P > 0.05$)。中危组的MTWA值明显高于对照组和低危组($P < 0.05$)。结论:冠心病严重者max-MTWA值及max-MTWA/HR比值升高。低危冠心病患者猝死风险较低,与对照人群无差异,而中危冠心病患者猝死风险较低危冠心病患者高。

[关键词] 运动平板试验;冠心病;微伏级TWA值;最大微伏级TWA值;心脏性猝死

[中图分类号] R541.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2021)10-1468-06

doi: 10.7655/NYDXBNS20211008

The application of microvolt T-wave alternans in patients with low and moderate risk coronary artery disease

BIAN Yanfei¹, YAN Zining^{2*}, GE Shaojie¹¹Department of Cardiac Function, ²Department of Cardiology, the Affiliated Changzhou No.2 People's Hospital of Nanjing Medical University, Changzhou 213003, China

[Abstract] **Objective:** To analysis the values of microvolt T-wave alternans (MTWA) and maximum T-wave alternans (max-MTWA) in patients with low or moderate risk coronary artery disease (CAD), and assess the risk of sudden cardiac death (SCD). **Methods:** One hundred and twelve CAD patients were enrolled for this study, and sixty-six non-CAD patients as the control group. Based on the Duke treadmill test scores (DTS), CAD patients were divided into 2 groups: the low-risk CAD group (with scores ranging from 5 to 15) and the moderate-risk CAD group (with scores ranging from -10 to 5). All participants performed treadmill exercise stress tests and MTWA, max-MTWA and the heart rates (HR) at max-MTWA were recorded by the time-domain modified moving average beat analysis (MMA) method, then the ratio of max-MTWA/HR was calculated. **Results:** There were significant differences in max-MTWA, max-MTWA/HR ratio and MTWA values between the control group and the CAD group (all $P < 0.05$). Furthermore, subgroup analysis showed that the max-MTWA and max-MTWA/HR ratio in the moderate-risk CAD group were higher than those in the low-risk CAD group, and the parameters in the low-risk CAD group were higher than those in the control group (all $P < 0.05$). There was no significant difference in MTWA between the low-risk CAD group and the control group ($P > 0.05$). However, MTWA in the moderate-risk CAD group were significantly higher than those in the low-risk CAD group and the control group (all $P < 0.05$). **Conclusion:** max-MTWA and max-MTWA/HR ratio were significantly increased in patients with severe CAD. The risk of SCD in low-risk CAD patients was the low as the control group, while moderate-risk CAD patients have a higher risk of SCD.

[基金项目] 常州市卫生计生委重大科技项目(ZD201605)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: nz_y@sina.com

[Key words] treadmill EST; coronary artery disease; microvolt T-wave alternans; maximum amplitude of MTWA; sudden cardiac death

[J Nanjing Med Univ, 2021, 41(10): 1468-1473]

冠状动脉粥样硬化性心脏病(冠心病)威胁全球人类的健康。据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)2015年报道,冠心病成为全球死亡的首要病因。随着生活水平的提高和社会老龄化日益严重,中国的冠心病患病率逐年增加^[1]。更重要的是,冠心病也是心源性猝死最主要的病因^[2]。因此对冠心病患者进行风险分层、预测猝死风险显得尤为重要。通过对冠心病患者的病情监测可以指导治疗、评估恶性心律失常和猝死的风险,有利于提高冠心病患者的生存率。

评价猝死风险的指标主要有T波电交替、左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、电生理检查、心室晚电位、心率震荡、心率变异性、QRS波时限、QT间期离散度、T波峰末间期离散度等。以往研究证明,T波电交替是预测恶性心律失常和猝死的独立危险因素^[3-4]。尤其是严重的冠心病和/或左室功能严重受损的患者微伏级T波电交替(microvolt T-wave alternans, MTWA)值会明显增高^[5-6]。本研究创新性地分析心功能和心脏结构正常、无明显症状的低、中危冠心病患者的最大MTWA(max-MTWA)值、max-MTWA/心率(heart rate, HR)比值及MTWA值与对照组的差异,探讨MTWA值在低、中危冠心病患者中的应用价值,并比较其心脏性猝死风险的大小。

1 对象和方法

1.1 对象

连续选取2016年3月—2020年10月在常州市第二人民医院行运动平板试验检查和冠脉CT(CTA)或冠状动脉造影检查的患者178例,其中临床确诊且运动平板试验阳性的冠心病患者112例作为冠心病组,男65例,女47例,年龄(55.4±9.7)岁。国内外大量研究显示运动平板试验 Duke 评分(Duke treadmill score, DTS)与冠心病患者冠脉病变的严重程度呈显著负相关^[7-8]。因此冠心病组根据DTS进行再分组,其中5分≤DTS≤15分的冠心病患者50例作为低危组,男29例,女21例,平均年龄(53.4±10.2)岁,-10分≤DTS<5分的冠心病患者62例作为

中危组,男36例,女26例,平均年龄(56.9±9.0)岁。非冠心病者(包括无任何疾病的健康人和排除冠心病的患者)66例作为对照组,男37例,女29例,年龄(51.2±8.4)岁。所有研究对象均详细询问病史、服药史及家族史,接受常规十二导联心电图、彩色多普勒超声心动图、肝肾功能检查等,排除先天性心脏病、心脏瓣膜病、心肌病、心功能不全、心肌梗死、高血压左室肥厚、肝肾功能异常、心室内阻滞、早期复极综合征、L-QT间期综合征、Brugada综合征、心律失常、精神心理因素、电解质异常、人工起搏心律等疾病的患者,排除有晕厥、猝死等家族史患者,除有心绞痛但无冠脉病变证据的患者和服用抗心律失常药物的患者,确保研究对象无引起MTWA值增高的其他因素。本研究经常州市第二人民医院伦理委员会审查通过,所有研究对象均签署知情同意书。

1.2 方法

本研究采用美国GE公司的CASE800运动平板心电监测系统合并Marquette T波电交替分析程序,选择BRUCE运动方案(次极量运动标准:心率达90%的最大心率)进行运动平板试验。运动前每位研究对象都被告知运动平板试验检查的注意事项及可能出现的风险,排除禁忌证,告知家属陪同,并签署知情同意书。如有服用硝酸酯类药物或β-受体阻滞剂^[9]者需停药2周后进行检查,运动前测量基础心率、血压,了解一般情况及稳定受试者情绪。运动过程中监测心电、血压的变化,观察受试者面色、步态等,询问其运动过程中的症状。运动平板试验可以让受试者心率逐渐增快,通过增加运动负荷诱发低、中危冠心病患者潜在的心肌缺血。在运动试验过程中通过Marquette T波电交替分析程序测得MTWA值、最大MTWA值及其对应的心率。为了减少肌电干扰,粘贴电极片的位置尽量避开肌肉丰厚处,电极片粘贴前用沙皮纸轻轻打磨皮肤,去除角质层,采用3M抗干扰电极片。模拟十二导联心电图,计算机程序对每次心跳的信息进行分析。为了避免影响MTWA值的检测,要求运动过程中踏板频率不应是心率的一半,呼吸频率不应是心率的四分之一^[10]。根据传统终止标准终止运动,运动结

束后继续监测心电、血压等变化,观察患者面色,询问患者一般情况,给予擦汗、喝水等护理,直到患者恢复,如有血压增高者延长恢复期的监测。

DTS的计算方法:DTS=运动时间(min)-5×ST段偏移最大毫米数-4×心绞痛指数(无胸痛发生为0,有胸痛发生为1,因胸痛终止试验为2)。DTS的计算由两位有多年检查运动平板试验经验的医师完成,对有疑问的患者请第3位医师进行讨论后共同完成。

获取MTWA值的方法,本研究采用基于时域法的modified moving average beat analysis(MMA)计算MTWA值。基于时域法的MMA方法是利用T波电交替的检测模块流程,跟踪心电图T波的振幅和形态的逐搏变化,计算出奇数心搏和偶数心搏的中位波形的最大差值,作为MTWA值^[5]。在运动平板试验过程中测得MTWA值和max-MTWA值,由于max-MTWA出现时常伴随较快的心率,所以对max-MTWA值用其对应的心率进行矫正,即max-MTWA/HR比值。仔细检查噪音水平,去除噪音超过20 μV的MTWA值及max-MTWA值。采用HR≤110次/min时检测到的最大MTWA值作为MTWA值。同时分析整个运动期及恢复期的max-MTWA值及其对应的

HR,计算max-MTWA/HR比值。

1.3 统计学方法

所有数据均采用SPSS26.0统计学软件分析。计量资料如果服从正态分布,采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)进行统计描述,两组之间的比较采用独立样本t检验,3组之间的比较采用单因素方差分析,如果组间差异有统计学意义,进一步采用Bonferroni法进行两两比较;如果不服从正态分布,采用中位数(四分位数)[$M(P_{25}, P_{75})$]进行统计描述,组间比较采用非参数检验(Kruskal-Wallis秩和检验),当组间有统计学差异,进一步采用Bonferroni法进行多重比较。计数资料采用频数和率表示,组间比较采用卡方检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 各组基本资料的比较

由表1中对照组和冠心病组基本资料的比较发现,两组性别构成比、左室射血分数、体重指数(body mass index, BMI)、基础心率、基础血压、最大血压、心律失常的发生率、高血脂、高尿酸、糖尿病、家族史、吸烟史等资料无统计学差异,而冠心病组的平均年龄、高血压患者的百分比、运动时

表1 各组基本资料的比较

Table 1 Comparison of main clinical characteristics in different groups

| 变量 | 对照组(n=66) | 冠心病组 | | | P值 |
|-------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| | | 合计(n=112) | 低危组(n=50) | 中危组(n=62) | |
| 男性[n(%)] | 37(56.06) | 65(58.04) | 29(58.00) | 36(58.06) | 0.967 |
| 年龄(岁, $\bar{x} \pm s$) | 51.18 ± 8.36 | 55.41 ± 9.67 | 53.36 ± 10.23 | 56.90 ± 9.00 | 0.004 |
| BMI(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$) | 24.47 ± 2.74 | 24.19 ± 2.78 | 23.90 ± 2.79 | 24.42 ± 2.77 | 0.497 |
| LVEF[% , $M(P_{25}, P_{75})$] | 60(57, 63) | 60(56, 62) | 59(56, 61) | 60(57, 64) | 0.485 |
| 运动时间(min, $\bar{x} \pm s$) | 9.45 ± 2.43 | 8.23 ± 2.23 | 9.42 ± 1.79 | 7.27 ± 2.08 | <0.001 |
| 最大运动负荷[MET, $M(P_{25}, P_{75})$] | 10.6(10.0, 12.9) | 10.0(8.7, 11.3) | 10.7(10.0, 12.7) | 9.9(7.0, 10.2) | <0.001 |
| 基础心率(次/min, $\bar{x} \pm s$) | 83.61 ± 12.36 | 79.68 ± 12.97 | 79.54 ± 13.94 | 79.79 ± 12.25 | 0.143 |
| 最大心率[次/min, $M(P_{25}, P_{75})$] | 171(155, 179) | 160(146, 171) | 164(151, 173) | 151(144, 171) | <0.001 |
| 基础SBP(mmHg, $\bar{x} \pm s$) | 125.06 ± 19.25 | 127.79 ± 18.81 | 125.52 ± 14.75 | 130.02 ± 17.30 | 0.133 |
| 基础DBP[mmHg, $M(P_{25}, P_{75})$] | 81(72, 87) | 80(72, 86) | 80(70, 85) | 80(73, 86) | 0.844 |
| 最大SBP[mmHg, $M(P_{25}, P_{75})$] | 176(157, 192) | 173(160, 198) | 172(157, 191) | 176(161, 208) | 0.305 |
| 最大DBP[mmHg, $M(P_{25}, P_{75})$] | 76(65, 87) | 78(69, 88) | 78(72, 88) | 76(66, 88) | 0.676 |
| ST/HR指数[$M(P_{25}, P_{75})$] | 1.12(0.52, 1.51) | 1.85(1.20, 2.65) | 1.62(0.80, 2.18) | 2.04(1.37, 3.02) | <0.001 |
| 心律失常[n(%)] | 34(51.52) | 58(51.79) | 26(52.00) | 32(51.61) | 0.999 |
| 高血压[n(%)] | 12(18.18) | 44(39.29) | 15(30.00) | 29(46.77) | 0.002 |
| 高血脂[n(%)] | 12(18.18) | 26(23.21) | 12(24.00) | 14(22.58) | 0.719 |
| 高尿酸[n(%)] | 11(16.67) | 19(16.96) | 9(18.00) | 10(16.13) | 0.965 |
| 糖尿病[n(%)] | 8(12.12) | 17(15.17) | 9(18.00) | 8(12.90) | 0.632 |
| 家族史[n(%)] | 7(10.61) | 14(12.5) | 6(12.00) | 8(12.90) | 0.921 |
| 吸烟史[n(%)] | 9(13.64) | 17(15.18) | 6(12.00) | 11(17.74) | 0.667 |

间、最大运动负荷、最大心率和ST/HR指数与对照组比较差异均有统计学意义。对照组和两个亚组之间的比较发现,平均年龄、高血压患者的百分比、运动时间、最大运动负荷、最大心率和ST/HR指数等差异均有统计学意义。

2.2 各组 max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值、MTWA 值的比较

表2中结果显示,对照组和冠心病组 max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值、MTWA 值的差异均有统计学意义($P < 0.05$),冠心病组的 max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值、MTWA 值均高于对照组。

对照组与低危组、中危组3组的 max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值及 MTWA 值差异有统计学意义($P < 0.001$)。3组间的两两比较显示, max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值差异均有统计学意义($P < 0.05$),中危组高于低危组,低危组高于对照组。低危组和对照组的 MTWA 值差异无统计学意义($P > 0.05$),而中危组 MTWA 值高于对照组和低危组,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。

3 讨论

运动平板试验作为一项简便易行、非侵入性、

表2 各组 max-MTWA 值、max-MTWA/HR、MTWA 值的比较

Table 2 Comparison of max-MTWA, max-MTWA/HR ratio and MTWA in different groups [$M(P_{25}, P_{75})$]

| 变量 | 对照组($n=66$) | 冠心病组 | | | P 值 |
|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|---------|
| | | 合计($n=112$) | 低危组($n=50$) | 中危组($n=62$) | |
| max-MTWA 值(μV) | 16.0(11.0, 22.0) | 28.5(19.0, 47.0) | 25.0(18.0, 34.0)* | 38.0(21.0, 60.0)** | < 0.001 |
| 心率(次/min) | 114(105, 120) | 115(109, 120) | 115(109, 120) | 115(109, 120) | 0.939 |
| max-MTWA/HR 比值 | 0.15(0.10, 0.20) | 0.26(0.17, 0.43) | 0.22(0.15, 0.30)* | 0.35(0.21, 0.57)** | < 0.001 |
| MTWA 值(μV) | 6.0(3.0, 12.0) | 10.0(4.0, 24.5) | 8.5(3.0, 15.0) | 12.5(6.0, 28.0)** | < 0.001 |

与对照组比较,* $P < 0.01$;与低危组比较,** $P < 0.05$ 。

利于普遍开展筛选冠心病的检查,已在临床得到广泛应用,该检查不仅可以辅助诊断冠心病而且能判断冠心病的严重程度。研究表明 DTS 与冠脉病变程度呈显著负相关,DTS 越低,冠状动脉狭窄越严重^[11-12],或冠脉存在多支病变,病变越复杂^[8,12],5 年生存率越低^[11]。

T 波电交替现象与心率有关,本研究也发现健康人随心率增快 MTWA 值增加,但非简单的线性关系。Smith 等^[13]用起搏方式增快心率导致 T 波电交替的现象在动物实验中也有报道。部分研究以心率(110±10)次/min 作为检测 MTWA 值的心率范围^[14],也有文献提到心率 105~110 次/min 作为检测 T 波电交替值的目标心率^[15]。而本研究发现,部分冠心病患者的 MTWA 值在心率未达到 110 次/min 时已出现最大 MTWA 值,而在对照组中未出现这种现象,说明此类患者存在非生理性的心电不稳定现象,在较低的心率时就出现 T 波电交替现象。有研究发现当心率大于 110 次/min 时部分正常人也会出现 T 波电交替^[10,16],而高频率心搏时出现的 T 波电交替对恶性心律失常的预测意义不大或无意义^[10]。国内外也有较多文献提到阈值心率≤110 次/min 作为观察 T 波电交替的界限^[10,17]。因此,本研究采用心率≤110 次/min 时检测到的最大 MTWA 值作为

MTWA 的观察值(即 MTWA 值),用其预测低、中危冠心病患者猝死风险的高低。

用 MMA 法测得 MTWA 值的特点是在运动伪差等原因造成的伪影心电图、噪音、运动过程中的非平稳心电图、早搏等情况下精确测量出 MTWA 值。与受稳定心率限制的频域谱分析法(即频域法)不同,在动态心电图和运动试验中能更好地测得 MTWA 值,对心室纤颤的风险作出准确评估^[5,18]。既往有研究在运动平板试验中用时域法测得 MTWA/HR 的比值来筛选冠心病,并确认其筛选冠心病的价值^[19]。本研究着重于非冠心病者与不同严重程度的冠心病患者比较,重点研究低危、中危冠心病患者的 max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值的大小与冠心病严重程度的关系。T 波电交替是一项兼具阳性预测价值和阴性预测价值的评估猝死风险的指标^[20-21],是恶性心律失常和猝死的独立预测因子^[4]。因此在进行运动平板试验的同时还能用 MTWA 预测冠心病患者的猝死风险,对他们进行猝死风险分层,筛选出高风险猝死的冠心病患者,指导治疗以避免恶性事件的发生。

本研究主要得出以下结论:①冠心病患者的 max-MTWA 值、max-MTWA/HR 比值、MTWA 值高于非冠心病者;②冠心病严重程度增加,在整个运动

平板试验过程中测得的 max-MTWA 值及 max-MTWA/HR 比值增大;③低危冠心病患者和对照人群的猝死风险没有差异,因此,低危冠心病猝死风险较低;④中危冠心病患者 MTWA 值较对照人群和低危冠心病患者增大,预测其猝死风险增大。

MTWA 值作为单一指标预测猝死风险时,达 60 μV 为较高猝死风险的切点^[22]。本研究在对照组和低危组未发现 MTWA 值 $\geq 60 \mu\text{V}$ 的患者,而中危组有 3 例 MTWA 值 $\geq 60 \mu\text{V}$ (分别为 78、61、69 μV)。此 3 例患者积极进行冠心病规范化治疗、改善生活方式后复查 MTWA 值,发现 MTWA 值均有不同程度的下降(治疗后 MTWA 值分别下降为 62、42、41 μV) ,但例数太少,我们将继续积累病例数做进一步研究。

T 波在心室肌细胞的动作电位时程(action potential duration, APD)上代表心室肌细胞的复极,T 波电交替是由心室肌细胞复极不协调所致。在冠状动脉闭塞的动物^[5,13]和人类血管成形术的过程中^[23]均证实心肌缺血会导致 T 波电交替。T 波电交替发生机制有多种学说,目前认为主要与心肌细胞 APD 和细胞内钙循环失衡有关^[24-25]。不同严重程度的冠心病患者存在不同严重程度的冠脉病变及心肌缺血、局部心肌灌注不足,心肌缺血导致的 T 波电交替现象也具有区域性^[5]。心肌缺血时该区域心肌细胞三磷酸腺苷代谢障碍和钙瞬变^[25]。内质网(sarcoplasmic reticulum, SR)上的 Ryanodine 受体(RyR)释放 Ca^{2+} 增多与 SR- Ca^{2+} -ATPase(SERCA)从细胞液中再摄取 Ca^{2+} 失去平衡,细胞内 Ca^{2+} 离子浓度增高, Na^{+} - Ca^{2+} 交换(NCX)增多,减弱净复极电流而影响心肌细胞膜电流,使中层心肌细胞 APD 延长,随后一次心搏 Na^{+} - Ca^{2+} 交换减少,导致 APD 缩短,心肌细胞 APD 长短交替。中层心肌细胞复极与心内膜、心外膜心肌细胞复极不一致导致心室壁复极离散,而产生 T 波电交替现象^[24-27]。因此,心肌缺血时钙循环失衡、APD 交替导致心肌细胞复极电交替,T 波机械交替总是伴随着电交替而发生^[26]。

国内外应用 MTWA 检测技术于临床研究的时间虽然不长,但大家已认识到它在预测高危患者猝死风险和恶性心律失常方面的价值。美国 GE 公司 2007 年推出的 T 波电交替内科医生指南中提出量级的 TWA 值越大,猝死或恶性心律失常的风险越高。随着 TWA 研究的不断深入和计算机技术的发展,我们已能测得 MTWA 值。用 MMA 法测得的微伏级 TWA 值有利于在冠心病患者中筛选出高猝死风险

的患者。

综上,监测 MTWA 值不仅有利于冠心病患者病情评估,筛选出高猝死风险的患者,指导治疗,预防恶性事件的发生,还能在患者 PCI 术后复查 MTWA 值观察手术疗效^[14]。因此,对冠心病患者监测 MTWA 值一方面可以在筛选冠心病的同时提示其严重程度,另一方面还可以对冠心病患者进行猝死风险分层,对高猝死风险患者积极治疗,预防恶性事件的发生。

[参考文献]

- [1] 刘小清. 冠心病流行病学研究进展及疾病负担[J]. 中华心血管病杂志, 2008, 36(6): 573-576
- [2] MORIN D P, HOMOUD M K, ESTES N A M. Prediction and prevention of sudden cardiac death[J]. Card Electrophysiol Clin, 2017, 9(4): 631-638
- [3] DAS M. Indications for ICD and cardiac resynchronization therapy for prevention of sudden cardiac death[J]. Expert Rev Cardiovasc Ther, 2009, 7(2): 181-195
- [4] NIEMINEN T, LEHTIMÄKI T, VIIK J, et al. T-wave alternans predicts mortality in a population undergoing a clinically indicated exercise test[J]. Eur Heart J, 2007, 28(19): 2332-2337
- [5] NEARING B D, VERRIER R I. Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy[J]. J Appl Physiol, 2002, 92(2): 541-549
- [6] GOLD M R, IP J H, COSTANTINI O, et al. Role of microvolt T-wave alternans in assessment of arrhythmia vulnerability among patients with heart failure and systolic dysfunction: primary results from the T-wave alternans sudden cardiac death in heart failure trial substudy[J]. Circulation, 2008, 118(20): 2022-2028
- [7] 潘明, 白明, 汪涛, 等. 平板运动试验评分与冠状动脉病变的关系[J]. 临床心电学杂志, 2006, 15(2): 103-105
- [8] ACAR Z, KORKMAZ L, AGAC M T, et al. Relationship between Duke treadmill score and coronary artery lesion complexity[J]. Clin Invest Med, 2012, 35(6): E365-369
- [9] KLINGENHEBEN T, GRÖNEFELD G, LI Y G, et al. Effect of metoprolol and d, l-sotalol on microvolt-level T-wave alternans. Results of a prospective, double-blind, randomized study[J]. J Am Coll Cardiol, 2001, 38(7): 2013-2019
- [10] 黄织春, 许原, 郭继鸿, 等. 健康人微伏级 T 波电交替试验检测分析[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2003, 17(6): 447-450
- [11] MARK D B, HLATKY M A, HARRELL J R, et al. Exercise treadmill score for predicting prognosis in coronary

- artery disease[J]. *Ann Intern Med*, 1987, 106(6): 793-800
- [12] SHAW L J, PETERSON E D, SHAW L K, et al. Use of a prognostic treadmill score in identifying diagnostic coronary disease subgroups [J]. *Circulation*, 1998, 98(16): 1622-1630
- [13] SMITH J M, CLANCY E A, VALERI C R, et al. Electrical alternans and cardiac electrical instability [J]. *Circulation*, 1988, 77(1): 110-121
- [14] 李婷婷, 燕军, 胡晓芹, 等. 冠心病患者运动平板试验中微伏级T波电交替分布特征及其在血运重建后的变化[J]. *中国循环杂志*, 2018, 33(1): 41-45
- [15] VERRIER R L, KLINGENHEBEN T, MALIK M, et al. Microvolt T-wave alternans physiological basis, methods of measurement, and clinical utility--consensus guideline by International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology [J]. *Am Coll Cardiol*, 2011, 58(13): 1309-1324
- [16] PASTORE J M, GIROUARD S D, LAURITA K R, et al. Mechanism linking T-wave alternans to the genesis of cardiac fibrillation [J]. *Circulation*, 1999, 99(10): 1385-1394
- [17] MOLON G, COSTA A, BERTOLINI L, et al. Relationship between abnormal microvolt T-wave alternans and poor glycemic control in type 2 diabetic patients [J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2007, 30(10): 1267-1272
- [18] 魏珑, 魏海峰, 魏佑震, 等. 非稳态心电图T波交替时域移动平均方法的研究[J]. *生物医学工程研究*, 2014, 33(2): 86-88
- [19] 蒲里津, 罗海芸, 汤亚明, 等. 在常规运动试验中以时域法微伏级T波电交替筛查冠心病的价值[J]. *中国循环杂志*, 2011, 26(3): 190-193
- [20] IKEDA T, SAITO H, TANNO K, et al. T-wave alternans as a predictor for sudden cardiac death after myocardial infarction [J]. *Am J Cardiol*, 2002, 89(1): 79-82
- [21] FURLANELLO F, GALANTI G, MANETTI P, et al. Microvolt T-wave alternans as predictor of electrophysiological testing results in professional competitive athletes [J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2004, 9(3): 201-206
- [22] SLAWNYCH M P, NIEMINEN T, KÄHÖNEN M, et al. Post-exercise assessment of cardiac repolarization alternans in patients with coronary artery disease using the modified moving average method [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 53(13): 1130-1137
- [23] MARTÍNEZ J P, OLMOS S, WAGNER G, et al. Characterization of repolarization alternans during ischemia: time-course and spatial analysis [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2006, 53(4): 701-711
- [24] PRUVOT E J, KATRA R P, ROSENBAUM D S, et al. Role of calcium cycling versus restitution in the mechanism of repolarization alternans [J]. *Circ Res*, 2004, 94(8): 1083-1090
- [25] QIAN Y W, CLUSIN W T, LIN S F, et al. Spatial heterogeneity of calcium transient alternans during the early phase of myocardial ischemia in the blood-perfused rabbit heart [J]. *Circulation*, 2001, 104(17): 2082-2087
- [26] SHIMIZU W, ANTZELEVITCH C. Cellular and ionic basis for T-wave alternans under long-QT conditions [J]. *Circulation*, 1999, 99(11): 1499-1507
- [27] WALKER M L, WAN X, KIRSCH G E, et al. Hysteresis effect implicates calcium cycling as a mechanism of repolarization alternans [J]. *Circulation*, 2003, 108(21): 2704-2709

[收稿日期] 2021-02-23



欢迎关注本刊微博、微信公众号!