

# 冠心病患者平板运动试验中心率收缩压乘积变化与冠状动脉病变程度、病变支数的关系

刘昱, 蒋鹏, 高文华, 牧仁娜  
(内蒙古自治区人民医院急诊科, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**【摘要】目的：**探讨冠心病患者平板运动试验中心率收缩压乘积(RPP)变化与冠状动脉病变程度、病变支数的关系。**方法：**选取 83 例冠心病患者为冠心病组, 根据病变程度分为轻度组( $n = 48$ )和重度组( $n = 35$ ); 根据病变支数分为单支病变组( $n = 43$ )和多支病变组( $n = 40$ )。另选取 50 名同期健康体检志愿者为对照组。比较冠心病组和对照组 HR、SBP 及 RPP; 比较不同冠状动脉病变程度、不同冠状动脉病变支数患者静态 RPP 及动态峰值 RPP。采用受试者工作特征(ROC)曲线分析 RPP 对冠心病患者不同病变程度及病变支数的预测效能。**结果：**冠心病组患者静止期 RPP 及动态峰值 RPP 均高于对照组( $P < 0.05$ ); 轻度组患者静态 RPP、动态峰值 RPP 均低于重度组( $P < 0.05$ )。ROC 曲线分析显示, 静态 RPP 和动态峰值 RPP 对不同冠状动脉病变程度患者的敏感度、特异度、曲线下面积(AUC)分别为 77.14%、66.67%、0.768 和 74.29%、93.75%、0.869; 静态 RPP 和动态 RPP 对不同冠状动脉病变支数患者的敏感度、特异度、AUC 分别为 71.59%、97.50%、0.673 和 100.00%、23.26%、0.726。**结论：**冠心病患者平板运动试验中 RPP 升高显著, 且与冠状动脉病变程度及病变支数关系密切。

**【关键词】** 冠心病; 平板运动试验; 心肌耗氧量; 冠状动脉病变程度; 病变支数

**【中图分类号】** R541.7      **【文献标志码】** A

## Relationship between rate pressure product change in treadmill exercise test and coronary artery lesion degree and lesion count in patients with coronary heart disease

LIU Yu, JIANG Peng, GAO Wen-hua, MU Ren-na  
(Department of Emergency, the People's Hospital of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

**【Abstract】 Objective:** To explore the relationship of rate pressure product (RPP) changes with coronary artery lesion degree and lesion count in patients with coronary heart disease. **Methods:** 83 patients with coronary heart disease were selected as the coronary heart disease group, and they were divided into mild group ( $n = 48$ ) and severe group ( $n = 35$ ) according to the degree of lesions. According to the number of lesions, they were divided into single vessel lesion group ( $n = 43$ ) and multi vessel lesion group ( $n = 40$ ). Another 50 volunteers who underwent health check ups during the same period were selected as the control group. The differences in heart rate (HR), systolic blood pressure (SBP), and RPP were compared between coronary heart disease group and control group. The static RPP and dynamic peak RPP of patients with different degrees and numbers of coronary artery lesions were compared. Receiver operating characteristic (ROC) analysis was used to assess the predictive efficacy of RPP for different degrees and numbers of lesions. **Results:** The static RPP and dynamic peak RPP in the coronary heart disease group were higher than those in the control group ( $P < 0.05$ ). The static RPP and dynamic peak RPP of the mild group were lower than those of the severe group ( $P < 0.05$ ). ROC curve analysis showed that the sensitivity, specificity, and AUC of static RPP and dynamic peak RPP for patients with different degrees of coronary artery disease were 77.14%, 66.67%, 0.768, and 74.29%, 93.75%, and 0.869, respectively. The sensitivity, specificity, and AUC of static RPP and dynamic RPP for patients with different numbers of coronary artery lesions were 71.59%, 97.50%, 0.673 and 100.00%, 23.26%, 0.726, respectively. **Conclusion:** The RPP in patients with coronary heart disease is increased during the exercise test, and it is closely related to coronary artery lesion degree and lesion count.

**【Key words】** Coronary heart disease; Treadmill exercise test; Myocardial oxygen consumption; Coronary artery lesion degree; Lesion count

损伤。冠心病的主要症状包括动脉壁增厚、硬化和管腔狭窄,冠心病的发病率、死亡率和致残率逐年上升<sup>[1]</sup>,好发于>40岁人群。平板运动试验(treadmill exercise test,TET)是基层医院检查冠状动脉病变的常用方法,能反映冠心病引起的心肌缺血的变化<sup>[2]</sup>,优点是无创、价格低廉,可以提供应激状态下的心肌信息<sup>[3]</sup>,但TET过程中的运动量可能会增加患者心脏负荷,使心肌的需氧量增加。心率收缩压乘积(rate pressure product,RPP)是较为可靠的心肌耗氧量指标,在临床上,特别是在麻醉和康复方面应用广泛,能确定冠状动脉循环对心肌代谢的需求<sup>[4]</sup>。当高RPP被定义为心肌氧供需失衡时,研究其与冠状动脉病变程度、病变支数的关系可指导冠心病患者的管理。本研究旨在探讨RPP与冠心病患者冠状动脉病变程度及病变支数的关系。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2019年6月至2024年6月内蒙古自治区人民医院收治的83例冠心病患者为冠心病组,其中男性51例,女性32例;年龄(68.72±12.95)岁;病程(4.63±1.21)年;合并症:糖尿病24例,高血压32例,高脂血症9例。根据病变程度分为轻度组( $n=48$ )和重度组( $n=35$ );根据病变支数分为单支病变组( $n=43$ )和多支病变组( $n=40$ )。另选取50名同期健康体检志愿者为对照组。本研究经医院医学伦理委员审核批准。纳入标准:(1)在冠状动脉造影下,任何冠状动脉狭窄或完全闭塞 $\geq 50\%$ 可诊断为冠心病<sup>[5]</sup>;(2)年龄 $\geq 18$ 岁;(3)临床资料完整。排除标准:(1)有TET禁忌症的患者;(2)急性冠脉综合征患者;(3)严重肝肾功能不全;(4)有严重的电解质紊乱;(5)暂时性脑缺血发作;(6)心血管内科开放性手术或介入性手术史,如射频消融、瓣膜修复或置换手术。

1.2 方法

1.2.1 TET 使用CASE V6.61运动跑步机(ge healthcare,USA)进行TET。 $\beta$ 受体阻滞剂、钙通道阻滞剂、硝酸盐和洋地黄药物在TET前3d停用。所有试验均在餐前或餐后2h进行。在TET期间全

程记录导联心电图和心率。在TET前记录血压,TET期间每2min监测1次血压,TET后立即监测1次血压,TET后每2min监测1次血压。同时,记录患者症状。符合以下任一条件即终止运动:典型心绞痛发作;心率(HR)达到预期标准[目标HR=(220-年龄) $\times 85\%$ ];血压下降 $>10$ mmHg;并发心律失常;晕厥、步态障碍、不能继续运动的。

1.2.2 冠状动脉病变程度判定 根据Gensini评分<sup>[6]</sup>确定病变程度,轻度患者评分 $<20$ 分,重度患者评分 $\geq 20$ 分。

1.3 观察指标

(1)RPP变化:记录基线HR、收缩压和心电图结果,并用无创血压计测量受试者左臂的血压。心电图和HR持续显示在监视器上,并以1min为间隔记录在纸上。在每种压力类型下,每隔1min记录1次患者的血压。 $RPP = \text{心率(HR)} \times \text{收缩压(SBP)} \times 10 - 3$ 。基础RPP=静息HR $\times$ 静息SBP。峰值RPP为最大心率乘以每种应激类型所达到的最大SBP。(2)冠心病组和对照组组心率、收缩压及RPP。(3)不同冠状动脉病变程度患者静态RPP及动态峰值RPP。(4)冠心病患者RPP对冠状动脉病变程度的诊断效能。(5)不同病变支数患者静态RPP及动态峰值RPP。(6)冠心病患者RPP对冠状动脉病变支数的诊断效能。

1.4 统计学分析

采用SPSS 26.0软件对数据进行处理与分析。计量资料符合正态分布且方差齐性,以( $\bar{x} \pm s$ )表示,组间两两比较行独立样本 $t$ 检验,多时间点比较采用重复测量资料的方差分析,进一步两两比较采用Dunnett- $t$ 检验;计数资料以 $[n(\%)]$ 表示,组间比较行独立样本 $\chi^2$ 检验;诊断效能以受试者工作特征(ROC)曲线分析。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 冠心病患者TET试验中的RPP变化

83例冠心病患者各运动期HR、SBP、RPP水平均明显高于静止期,且呈现逐渐上升趋势( $P<0.05$ ),恢复期虽高于静止期,但相较各运动期则呈下降趋势( $P<0.05$ )。见表1。

表 1 冠心病患者 TET 试验中的 RPP 变化 ( $\bar{x} \pm s$ )

| 参数        | 静止期         | 运动期 1                     | 运动期 2                     | 运动期 3                     | 运动期 4                     | 运动期 5                     | 恢复期                       | F 值     | P 值    |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|--------|
| 心率(次/min) | 77.62±10.24 | 98.62±12.43 <sup>①</sup>  | 105.73±13.72 <sup>①</sup> | 127.40±14.75 <sup>①</sup> | 135.77±15.99 <sup>①</sup> | 141.75±16.30 <sup>①</sup> | 128.20±13.69 <sup>①</sup> | 226.369 | <0.001 |
| 收缩压(mmHg) | 118.60±9.55 | 126.75±10.31 <sup>①</sup> | 134.75±11.20 <sup>①</sup> | 139.76±11.85 <sup>①</sup> | 143.75±12.20 <sup>①</sup> | 152.48±12.61 <sup>①</sup> | 145.23±11.91 <sup>①</sup> | 85.740  | <0.001 |
| RPP       | 92.06±15.82 | 125.00±16.72 <sup>①</sup> | 142.47±18.22 <sup>①</sup> | 178.05±20.43 <sup>①</sup> | 195.17±22.40 <sup>①</sup> | 216.14±25.76 <sup>①</sup> | 186.18±22.76 <sup>①</sup> | 23.124  | <0.001 |

① $P<0.05$ ,与同组静止期比较。

## 2.2  冠心病组和对照组 HR、SBP 及 RPP 比较

冠心病组患者静止期 HR、静止期 SBP、静止期

RPP、动态峰值 HR、动态峰值 SBP、动态峰值 RPP 高于对照组,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 2。

表 2  冠心病组与对照组 HR、SBP 及 RPP 比较( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别               | 静止期 HR(次/min) | 静止期 SBP(mmHg) | 静止期 RPP       | 动态峰值 HR(次/min) | 动态峰值 SBP(mmHg) | 动态峰值 RPP       |
|------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 冠心病组( $n = 83$ ) | 77.62 ± 10.24 | 118.60 ± 9.55 | 92.06 ± 15.82 | 141.75 ± 16.30 | 152.48 ± 12.61 | 216.14 ± 25.76 |
| 对照组( $n = 50$ )  | 65.61 ± 9.40  | 109.42 ± 9.20 | 71.79 ± 12.43 | 128.23 ± 14.85 | 143.20 ± 11.45 | 183.63 ± 22.79 |
| $t$ 值            | 6.753         | 5.443         | 7.732         | 4.788          | 4.253          | 7.355          |
| $P$ 值            | <0.001        | <0.001        | <0.001        | <0.001         | <0.001         | <0.001         |

## 2.3  不同冠状动脉病变程度患者静态 RPP 及动态峰值 RPP 比较

轻度组冠心病患者静态 RPP、动态峰值 RPP 低于重度组患者,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 3。

表 3  不同冠状动脉病变程度患者静态 RPP 及动态峰值 RPP 比较( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别              | 静态 RPP        | 动态峰值 RPP       |
|-----------------|---------------|----------------|
| 轻度组( $n = 48$ ) | 89.52 ± 9.85  | 208.42 ± 22.13 |
| 重度组( $n = 35$ ) | 95.54 ± 11.20 | 226.73 ± 25.42 |
| $t$ 值           | 2.595         | 3.495          |
| $P$ 值           | 0.011         | 0.001          |

## 2.4  RPP 对冠状动脉病变程度的诊断效能

ROC 曲线分析显示,静态 RPP 和动态峰值 RPP 对不同冠状动脉病变程度患者的敏感度、特异度、曲线下面积( $AUC$ )分别为 77.14%、66.67%、0.768 和 74.29%、93.75%、0.869。见表 4。

表 4  冠心病患者 RPP 对冠状动脉病变程度的诊断效能

| 指标       | 截断值    | 敏感度(%) | 特异度(%) | $AUC$ 值 | 95% $CI$      |
|----------|--------|--------|--------|---------|---------------|
| 静态 RPP   | 90.72  | 77.14  | 66.67  | 0.768   | 0.665 ~ 0.870 |
| 动态峰值 RPP | 223.95 | 74.29  | 93.75  | 0.869   | 0.785 ~ 0.953 |

## 2.5  不同冠状动脉病变支数患者静态 RPP 及动态峰值 RPP 比较

单支病变组冠心病患者静态 RPP、动态峰值 RPP 低于多支病变组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 5。

表 5  不同病变支数患者静态 RPP 及动态峰值 RPP 比较( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别                | 静态 RPP       | 动态峰值 RPP       |
|-------------------|--------------|----------------|
| 单支病变组( $n = 43$ ) | 88.25 ± 8.55 | 210.43 ± 24.13 |
| 多支病变组( $n = 40$ ) | 96.08 ± 9.43 | 222.28 ± 20.49 |
| $t$ 值             | 3.967        | 2.403          |
| $P$ 值             | <0.001       | 0.019          |

## 2.6  RPP 对冠状动脉病变支数的诊断效能

ROC 曲线分析显示,静态 RPP 和动态峰值 RPP

对不同冠状动脉病变支数患者的敏感度、特异度、 $AUC$  分别为 71.59%、97.50%、0.673 和 100.00%、23.26%、0.726。见表 6。

表 6  冠心病患者 RPP 对冠状动脉病变支数的诊断效能

| 指标       | 截断值    | 敏感度(%) | 特异度(%) | $AUC$ 值 | 95% $CI$      |
|----------|--------|--------|--------|---------|---------------|
| 静态 RPP   | 71.59  | 97.50  | 23.26  | 0.673   | 0.555 ~ 0.790 |
| 动态峰值 RPP | 191.75 | 100.00 | 23.26  | 0.726   | 0.613 ~ 0.839 |

## 3  讨论

冠心病在老年人群中发病率较高,主要表现为脂质代谢异常,血脂水平升高,导致冠状动脉粥样硬化,血管变窄或闭塞,阻断血流,引起心肌缺血缺氧<sup>[7]</sup>。TET 是临床上常用的一种无创诊断冠心病的方法,通过采集运动时心电信号的变化来评估冠心病患者的心肌缺血程度。

HR 和 SBP 是决定休息和运动期间心肌耗氧量变化的最重要变量。由于交感神经放电增加,运动使 SBP、HR 和 RPP 明显增加<sup>[8]</sup>。在本研究 TET 试验期间,冠心病患者 HR、SBP 和 RPP 随着时间异常升高,说明随着运动期间心脏负荷的增加而增加,需要提供足够的血液供应给活跃的心肌。考虑到血压和心率的昼夜节律性质,静息 RPP 表现出强烈的昼夜节律模式,在醒来后不久达到最大值,并在醒着的时间内保持相当稳定。在 TET 试验中,由于中枢指令和自主神经系统受到刺激,副交感神经活动减少,交感神经活动增加,导致 HR 和周围血管阻力的整体增加,从而增加收缩压和心率,在运动后的恢复期间,RPP 下降是由于机械和代谢反射的减少<sup>[9]</sup>。因此在冠心病患者中的 TET 期间,急性血流动力学反应增加,表现为 HR、SBP 和 RPP 引起的心血管过载。既往研究<sup>[10]</sup>发现,与健康男性相比,家族性高胆固醇血症男性患者在平板运动时的收缩压和舒张压峰值更高。

血流动力学特性受损是心血管疾病发生和发展的重要变量<sup>[11]</sup>。本研究采用 Gensini 评分系统对冠心病患者病变严重程度进行评估<sup>[12]</sup>。经过分析发现,RPP 与病变程度正相关,分析原因可能为 RPP 是

间接衡量心肌耗氧量的指标,而耗氧量是心脏负荷最重要的指标<sup>[13]</sup>。运动和静息的主要血流动力学反应受自主神经系统调节,TET 期间运动引起的交感神经刺激增加引起冠状动脉进一步收缩,从而导致心肌缺血,而 RPP 与心肌缺氧缺血改变有线性关系<sup>[14]</sup>。RPP 的升高表明心肌需氧量增加,表现为心肌缺血,心肌缺血可加重结构损伤,引起细胞死亡,这可能进一步损害心功能,影响患者预后<sup>[15]</sup>。冠心病病变严重患者血管内皮功能损伤严重,氧化应激、血管炎症增加,血管黏附单核/巨噬细胞、促血栓形成因子分泌增多,可能导致更高的心脏负荷,并影响到交感神经、迷走神经活性<sup>[16-17]</sup>,使患者的 RPP 数值异常升高。有研究<sup>[18]</sup>发现,高强度运动后机体交感神经兴奋性增强,迷走神经兴奋性降低,会增大心律失常风险。此外,持续的缺氧可导致病理性代偿过程,如动脉重塑(导致心肌增厚)和心肌细胞死亡<sup>[19]</sup>,也是 RPP 与冠心病患者病变严重程度密切相关的原因之一。

病变支数不仅能反映心肌缺血面积,还能反映冠状动脉粥样硬化的严重程度。本研究发现,冠状动脉病变支数与 RPP 正相关,分析原因可能是随着病程的延长,心肌细胞损伤加剧,病变血管支数增多,此时患者存在严重的内皮功能障碍,动脉硬化增加和导管血管弹性降低,引起血管壁缺血、缺氧,导致内皮衍生的一氧化氮生成、释放减少、活性下降,造成内皮依赖性血管舒张反应减弱,表现为运动时收缩压和心率的升高。此外,多支病变患者心脏自主神经末梢纤维受到严重损伤,通常会出现迷走神经功能下降、交感神经活性增强,因此 RPP 参数会异常升高。

综上,冠心病患者平板运动试验中 RPP 数值呈现异常升高态势,且与冠状动脉病变程度及病变支数关系密切。

参考文献

[1] Wang L, Mei F, Min M, *et al.* Adoption of the cardiopulmonary exercise test in the exercise ability and cardiopulmonary function rehabilitation of coronary artery disease (CAD) patients[J]. BMC Cardiovascular Disorders, 2024, 24(1): 313.

[2] Yilmaz A, Hayiroğlu M, Salturk S, *et al.* Machine learning approach on high risk treadmill exercise test to predict obstructive coronary artery disease by using P, QRS, and T waves' features [J]. Current Problems in Cardiology, 2023, 48(2): 101482.

[3] 凌静, 吴瑶, 田国平. 冠心病患者运动平板试验中碎裂 QRS 波特点及其与室性心律失常的相关性[J]. 华中科技大学学报(医学版), 2024, 53(5): 659 - 669.

[4] Jiang ZH, Aierken A, Wu TT, *et al.* Rate pressure product as a novel predictor of long-term adverse outcomes in patients after percutaneous coronary intervention: a retrospective cohort study[J]. BMJ

Open, 2023, 13(4): e067951.

[5] 中国中医药研究促进会中西医结合心血管病预防与康复专业委员会. 稳定性冠心病中西医结合康复治疗专家共识[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2019, 17(3): 321 - 329.

[6] Gensini GG. A more meaningful scoring system for determining the severity of coronary heart disease [J]. The American Journal of Cardiology, 1983, 51(3): 606.

[7] 薛宁宁, 杜岳, 李楠. 心脏康复训练在改善老年慢性冠心病患者日常生活能力及心脏功能中的价值[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2024, 23(11): 825 - 829.

[8] Zhou J, Li YJ, Zhou XD, *et al.* Rate-pressure product is a novel predictor for short- and long-term mortality in patients with acute coronary syndrome undergoing primary PCI/immediate invasive strategy [J]. Clinical Interventions in Aging, 2024, 19: 571 - 579.

[9] Soltani M, Sarvestan A, Hoseinzadeh F, *et al.* The effects of type of recovery in resistance exercise on responses of platelet indices and hemodynamic variables [J]. PLoS One, 2023, 18(8): e0290076.

[10] Vartela V, Armenis I, Leivadarou D, *et al.* Reduced global longitudinal strain at rest and inadequate blood pressure response during exercise treadmill testing in male heterozygous familial hypercholesterolemia patients [J]. International Journal of Cardiology Hypertension, 2021, 9: 100083.

[11] Lyu S, Chen Z, Cui M, *et al.* Effectiveness of an online/offline mixed-mode Tai Chi cardiac rehabilitation program on microcirculation in patients with coronary artery disease: a randomized controlled study [J]. Clinical Hemorheology and Microcirculation, 2023, 85(4): 385 - 393.

[12] Cheng X, Han W, Liang Y, *et al.* Risk prediction of coronary artery stenosis in patients with coronary heart disease based on logistic regression and artificial neural network [J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2022, 2022: 3684700.

[13] Weyers JJ, Ramanan V, Javed A, *et al.* Myocardial blood flow is the dominant factor influencing cardiac magnetic resonance adenosine stress T2 [J]. NMR in Biomedicine, 2022, 35(3): e4643.

[14] 刘银花, 段向青, 丁芳, 等. 冠心病患者拔牙中心率收缩压累积指标变化规律及临床意义[J]. 中华老年口腔医学杂志, 2022, 20(5): 274 - 277, 287.

[15] 盛玉杰, 王询, 王泽静. CT 冠状动脉定量在评估冠心病患者心肌缺血诊断中的应用价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(5): 103 - 105.

[16] 黄瑛, 余朝萍, 刘天虎. 血清 ESM-1、sICAM-1 与不稳定型心绞痛患者冠心病严重程度的关系及对急性心肌梗死发病的预测价值[J]. 中国现代医学杂志, 2024, 34(18): 71 - 76.

[17] 杜鹏辉, 周琦, 张贻凤. 腺苷 A2a 受体/Krüppel 样因子 5 对缺血再灌注损伤大鼠心肌的影响[J]. 国际心血管病杂志, 2023, 50(3): 155 - 160, 189.

[18] 赵鸣卓, 李显, 牛慧茹, 等. 运动平板对于早复极新入伍战士风险评估意义[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2024, 16(8): 942 - 945.

[19] 李红英, 张会军, 王军, 等. lncRNA SNHG1 靶向 miR-145-5p/PDCD4 轴对缺氧/复氧诱导的心肌细胞凋亡的影响[J]. 中国医科大学学报, 2023, 52(10): 904 - 909, 916.

(收稿日期: 2025 - 01 - 16 修回日期: 2025 - 04 - 10)