

本文引用: 崔浩宁, 吴孝军, 王时宇, 等. 心率-血压乘积在急性心肌梗死后心力衰竭发生风险中的预测价值[J]. 中国动脉硬化杂志, 2026, 34(6): 498-505. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.06.002.

· 心脏康复专栏 ·

[文章编号] 1007-3949(2026)34-06-0498-08

心率-血压乘积在急性心肌梗死后心力衰竭发生风险中的预测价值

崔浩宁^{1,2}, 吴孝军^{1,2}, 王时宇^{1,2}, 郑祥慧^{1,2}, 侯欣宇^{1,2}, 曹天辉^{1,2},
李奇峰^{1,2}, 马欢⁵, 姚晶⁶, 郑阳^{1,2,3,4}, 吴健^{1,2,3,4}

哈尔滨医科大学附属第二医院 1. 心血管内科, 2. 心脏康复中心, 黑龙江省哈尔滨市 150086; 3. 心肌缺血教育部重点实验室, 黑龙江省哈尔滨市 150001; 4. 哈尔滨医科大学寒地心血管病全国重点实验室, 黑龙江省哈尔滨市 150081;
5. 南方医科大学附属广东省人民医院心脏康复中心, 广东省广州市 519041; 6. 鹤岗市人民医院, 黑龙江省鹤岗市 154100

[摘要] **[目的]** 探讨基于心肺运动试验(CPET)获取的峰值心率-血压乘积(RPP peak)在急性心肌梗死(AMI)患者的心力衰竭发生风险中的预测价值及其在风险分层中的作用。**[方法]** 本研究为一项回顾性队列研究, 纳入2018年1月—2023年12月期间在哈尔滨医科大学附属第二医院、广东省人民医院及鹤岗市人民医院早期接受标准化踏车式症状限制型CPET的3 172例AMI患者。根据是否发生急性心肌梗死后心力衰竭(Post-MI HF)分为Post-MI HF组和非Post-MI HF组。采用Cox回归分析评估RPP peak与Post-MI HF风险的关联性, 使用限制性立方样条(RCS)分析其与Post-MI HF风险的线性关系, 通过ROC曲线评估RPP peak的预测性能。为探索其在风险分层中的作用, 根据RPP peak三分位数将研究对象分为T1、T2、T3三组, 通过Kaplan-Meier生存曲线比较不同RPP peak水平下Post-MI HF的无事件累计生存率, 并进一步行Cox回归分析三组间的风险差异。**[结果]** 经纳排标准筛选后, 共纳入2 221例AMI患者, 其中有237例发生Post-MI HF。Cox回归分析显示, RPP peak升高是Post-MI HF发生的独立保护因素, 每升高1个单位Post-MI HF风险降低9% ($HR=0.914$, 95% $CI: 0.883 \sim 0.944$, $P<0.001$)。RCS曲线分析提示RPP peak与Post-MI HF风险呈线性关系 ($P_{\text{nonlinear}}=0.978$)。ROC曲线分析显示, RPP peak在预测1年、3年和5年Post-MI HF风险时, 其曲线下面积(AUC)均优于单一指标峰值心率(HR peak)与峰值收缩压(SBP peak)。Kaplan-Meier生存曲线显示, 不同RPP peak水平组间Post-MI HF发生呈显著的风险梯度关系 (Log-rank $P<0.001$), 且随着RPP peak水平升高, 无事件生存率逐步提高。进一步的Cox回归分析显示, 与T1组相比, T2组 ($HR=0.488$, 95% $CI: 0.363 \sim 0.657$, $P<0.001$) 和T3组 ($HR=0.308$, 95% $CI: 0.219 \sim 0.434$, $P<0.001$) 的Post-MI HF风险显著降低。**[结论]** RPP peak是Post-MI HF发生的独立预测指标, 并与其发生风险呈线性负相关, 对AMI患者Post-MI HF的早期预防和风险分层具有重要的临床意义。

[关键词] 心率-血压乘积; 急性心肌梗死; 心力衰竭; 心肺运动试验; 心脏康复

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

Prognostic value of the rate-pressure product in predicting heart failure after acute myocardial infarction

CUI Haoning^{1,2}, WU Xiaojun^{1,2}, WANG Shiyu^{1,2}, ZHENG Xianghui^{1,2}, HOU Xinyu^{1,2}, CAO Tianhui^{1,2}, LI Qifeng^{1,2},
MA Huan⁵, YAO Jing⁶, ZHENG Yang^{1,2,3,4}, WU Jian^{1,2,3,4}

1. Department of Cardiology, 2. Department of Cardiac Rehabilitation Center, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 3. The Key Laboratory of Myocardial Ischemia, Chinese Ministry of

[收稿日期] 2026-01-22

[修回日期] 2026-04-10

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(82372565); 黑龙江省自然科学基金优青项目(ZL2024H007); 黑龙江省卫生健康委科研课题(20240303010021)

[作者简介] 崔浩宁, 硕士研究生, 主要研究方向为心血管疾病预防与康复, E-mail: chn2374120915@163.com。通信作者吴健, 博士, 主任医师, 博士研究生导师, 主要研究方向为心脏康复及心脏疾病的免疫学机制, E-mail: wujian780805@163.com。通信作者郑阳, 博士, 副主任医师, 博士研究生导师, 主要研究方向为心血管炎症和免疫的基础及转化医学, E-mail: zhengyanghmu@163.com。

Education, Harbin, Heilongjiang 150001, China; 4. State Key Laboratory of Frigid Zone Cardiovascular Diseases, Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150081, China; 5. Department of Cardiac Rehabilitation, Guangdong Provincial People's Hospital (Guangdong Academy of Medical Sciences), Southern Medical University, Guangzhou, Guangdong 519041, China; 6. Hegang People's Hospital, Hegang, Heilongjiang 154100, China

[ABSTRACT] **Aim** To investigate the predictive value of peak rate-pressure product (RPP peak) derived from cardiopulmonary exercise testing (CPET) for the risk of heart failure after acute myocardial infarction (AMI), and to evaluate its role in risk stratification. **Methods** This retrospective cohort study included AMI patients who underwent early standardized symptom-limited cycle ergometer-based CPET between January 2018 and December 2023 at the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Guangdong Provincial People's Hospital, and Hegang People's Hospital. Patients were classified into heart failure after acute myocardial infarction (Post-MI HF) and non-Post-MI HF groups based on the occurrence of Post-MI HF. Cox proportional hazards regression was used to assess the association between RPP peak and the risk of Post-MI HF. Restricted cubic spline (RCS) analysis was applied to examine the dose-response relationship between RPP peak and post-MI HF risk. Time-dependent receiver operating characteristic (ROC) curves were used to evaluate the predictive performance of RPP peak. For risk stratification, patients were categorized into tertiles (T1, T2 and T3) according to RPP peak levels. Kaplan-Meier survival curves were constructed to compare cumulative event-free survival across tertiles, and Cox regression analysis was further performed to quantify risk differences among groups.

Results After applying inclusion and exclusion criteria, 2 221 AMI patients were included, among whom 237 developed post-MI HF. Cox regression analysis demonstrated that elevated RPP peak was an independent protective factor for Post-MI HF, with each one-unit increase in RPP peak associated with a 9% reduction in Post-MI HF risk ($HR=0.914$, 95% CI : $0.883 \sim 0.944$, $P<0.001$). RCS analysis indicated a linear association between RPP peak and Post-MI HF risk ($P_{\text{nonlinear}}=0.978$). ROC curves analysis showed that RPP peak achieved higher area under the curve (AUC) values for predicting 1-, 3-, and 5-year Post-MI HF compared with peak heart rate (HR peak) and peak systolic blood pressure (SBP peak) alone. Kaplan-Meier analysis revealed a significant graded relationship between RPP peak tertiles and Post-MI HF risk (Log-rank $P<0.001$), with higher RPP peak levels associated with improved survival. Further Cox regression analysis showed that, compared with the lowest tertile (T1), the risk of post-MI HF was significantly lower in T2 ($HR=0.488$, 95% CI : $0.363 \sim 0.657$, $P<0.001$) and T3 ($HR=0.308$, 95% CI : $0.219 \sim 0.434$, $P<0.001$). **Conclusions** RPP peak is an independent predictor of Post-MI HF and is linearly and inversely associated with Post-MI HF risk. These findings highlight the clinical value of RPP peak for early risk assessment, prevention, and risk stratification in AMI patients.

[KEY WORDS] rate-pressure product; acute myocardial infarction; heart failure; cardiopulmonary exercise testing; cardiac rehabilitation

急性心肌梗死后心力衰竭 (heart failure after acute myocardial infarction, Post-MI HF) 是急性心肌梗死 (acute myocardial infarction, AMI) 患者的常见不良并发症, 目前已成为一项重大疾病负担^[1]。尽管急性再灌注和药物治疗水平的进步提高了 AMI 患者的生存率^[1-2], 但也使更多患者处于心功能受损的高风险状态^[3]。近年来约 1/4 的 AMI 患者进展为 Post-MI HF 并面临着更高的死亡率和再住院风险^[4-6]。因此, 早期识别 Post-MI HF 高风险人群对于及时实施预防策略和改善预后至关重要。

心率-血压乘积 (rate-pressure product, RPP) 是由心率与收缩压相乘计算得出的指标^[7], 可简便反映心肌耗氧水平^[8]。近年来, RPP 在心血管疾病患者群体中的预后预测价值逐渐受到关注。既往研究表明, 基于心肺运动试验 (cardiopulmonary exercise testing, CPET) 获取的峰值心率-血压乘积 (rate-

pressure product peak, RPP peak), 作为反映运动应激下血流动力学反应能力的指标, 在心力衰竭 (heart failure, HF) 患者中具有重要的预后意义, RPP peak 水平降低与不良临床结局风险增加密切相关^[9-10]。尽管 RPP peak 在 HF 患者中的预后价值已初步得到验证, 但目前尚未有研究系统评估其在 AMI 患者 Post-MI HF 发生风险中的预测能力及临床意义。因此, 本研究旨在探讨 RPP peak 在 Post-MI HF 风险预测中的作用并评估其作为风险分层工具的应用价值, 为 AMI 患者的精准预后管理和二级预防提供新的依据。

1 资料和方法

1.1 研究对象

本研究为一项回顾性队列研究, 纳入了 2018 年

1月—2023年12月期间在哈尔滨医科大学附属第二医院、广东省人民医院及鹤岗市人民医院接受标准化踏板式症状限制型 CPET 的 3 172 例 AMI 患者。纳入标准:①首次诊断为 AMI;②年龄 18~80 岁;③在住院期或出院后 1 个月内接受过踏板式症状限制型 CPET。排除标准:①在住院期或接受 CPET 前发生 HF;② CPET 期间峰值呼吸交换率 (peak respiratory exchange ratio, RER peak) < 1.0;③缺失数据。根据纳排标准,最终共 2 221 例 AMI 患者纳入本研究,中位随访时间为 36 个月 (12~48 个月)。本研究经哈尔滨医科大学附属第二医院伦理委员会批准 (KY2025-028)。

1.2 临床资料收集

收集研究对象入院时的临床基线资料,包括年龄、性别、体重指数 (body mass index, BMI)、用药情况、AMI 类型、高血压史、高脂血症史、糖尿病史、脑卒中史、吸烟史、氨基末端脑钠肽前体 (N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)、心肌肌钙蛋白 I (cardiac troponin I, cTnI)、白细胞计数 (white blood cell count, WBC)、红细胞计数 (red blood cell count, RBC)、血红蛋白 (hemoglobin, Hb)、血小板计数 (platelet count, PLT)、肌酸激酶 (creatinine kinase, CK)、血清肌酐 (serum creatinine, SCr)、乳酸脱氢酶 (lactate dehydrogenase, LDH)、空腹血糖 (fasting blood glucose, FBG)、血尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN)、总胆固醇 (total cholesterol, TC)、甘油三酯 (triglyceride, TG)、高密度脂蛋白胆固醇 x (high density lipoprotein cholesterol, HDLC)、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDLC)、丙氨酸氨基转移酶 (alanine aminotransferase, ALT)、左室舒张期末内径 (left ventricular end-diastolic diameter, LVEDD)、射血分数 (ejection fraction, EF) 等数据。BMI 的计算公式为体重 (kg)/身高 (m)², AMI 类型依据第 4 版心肌梗死通用定义^[11]分为 ST 段抬高型心肌梗死 (ST-elevation myocardial infarction, STEMI) 和非 ST 段抬高型心肌梗死 (non-ST-elevation myocardial infarction, NSTEMI), 高血压史、高脂血症史、糖尿病史及脑卒中史根据既往明确诊断和病历记录确定。吸烟史定义为既往有吸烟行为。

1.3 心肺运动试验资料收集

本研究纳入了三家医院收治的 AMI 患者 CPET 数据,所有患者均在住院期或出院后 1 个月内接受踏板式症状限制型 CPET。所有 CPET 评估均由经

验丰富的工作人员按照已发表的声明执行^[12]。所有 CPET 检查均采用 RAMP 方案,每分钟递增负荷量按预期最大功率除以 8~12 计算,并在受试者达到自觉极量或出现声明规定的终止指征时终止,包括无法继续运动、明显胸痛、严重呼吸困难、明显心电图异常等。运动试验结束后采用标准化处理原则提取各项指标如峰值摄氧量 (peak oxygen uptake, VO_2 peak)、通气量/二氧化碳生成量斜率 (ventilatory equivalent for carbon dioxide, VE/VCO_2 slope)、峰值收缩压 (peak systolic blood pressure, SBP peak)、峰值舒张压 (peak diastolic blood pressure, DBP peak)、峰值心率 (peak heart rate, HR peak)、RER peak 和峰值功率等。 VO_2 peak 定义为运动最后 1 min 至恢复期最初 15 s 内获得的 30 s 摄氧量平均值, VE/VCO_2 slope 由运动开始至峰值期间的通气量与二氧化碳排出量的线性回归斜率计算得出^[13], RPP peak 定义为 (SBP peak × HR peak)/100。

1.4 随访及分组

本研究的研究终点 Post-MI HF 定义为在既往无 HF 病史、住院期及进行 CPET 前均未进展为 HF 的 AMI 患者中的新发 HF。AMI 的诊断依据第 4 版心肌梗死通用定义进行^[11], HF 的诊断依据《中国心力衰竭诊断和治疗指南 2018》进行^[14]。随访在出院后 1、3、6 和 12 个月通过电话访谈或门诊就诊进行。对于随访超过 1 年的患者,每 6 个月进行一次随访。为进一步探索 RPP peak 在 Post-MI HF 风险分层中的潜在价值,依据研究人群中 RPP peak 的三分位数分布对患者进行分层, RPP peak ≤ 18.39 定义为 T1 组, 18.39 < RPP peak ≤ 22.33 定义为 T2 组, RPP peak > 22.33 定义为 T3 组。

1.5 统计学分析

所有统计分析均通过 R4.3.2 完成。正态分布的连续变量均以 $\bar{x} \pm s$ 描述,采用 *t* 检验进行组间比较。非正态分布的连续变量以中位数和四分位数描述,采用 Mann-Whitney *U* 检验进行比较。分类变量以例数和百分比描述,采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验进行比较。采用 Cox 回归模型进行单因素分析和混杂因素调整,通过受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线评估 RPP peak 在 AMI 患者 Post-MI HF 风险中的预测价值。使用 Kaplan-Meier 方法构建累积生存曲线,并采用 Log-rank 对数秩检验进行比较。采用限制性立方样条 (restricted cubic spline, RCS) 进一步探索 RPP peak 与 Post-MI HF 发生的关联。所有分析均采用双侧检验, *P* < 0.05 被认为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 基线资料比较

本研究共纳入 2 221 例 AMI 患者,有 237 例 (10.7%) 患者发生 Post-MI HF, 年龄 57.00 (50.00, 63.00) 岁, 其中男性 1 611 例 (72.5%), 女性 610 例 (27.5%), STEMI 患者 1 507 例 (67.9%)。与非 Post-MI HF 组相比, Post-MI HF 组患者年龄更大 (60.00 岁比 56.00 岁, $P<0.001$), STEMI 占比更高 (80.6% 比 66.3%, $P<0.001$), BMI 更低 ($P=$

0.035), 高脂血症比例较低而高血压及脑卒中比例较高 (均 $P<0.05$)。Post-MI HF 组患者 LVEDD 显著增大, 而 EF 显著降低 (均 $P<0.001$), CK、CK-MB、cTnI、NT-proBNP、FBG、SCr、BUN、ALT、LDH、WBC 及中性粒细胞计数水平均显著升高 (均 $P<0.001$)。在 CPET 指标方面, Post-MI HF 组患者的 VO_2 peak、SBP peak、DBP peak、HR peak、RPP peak 和峰值功率显著低于非 Post-MI HF 组, 而 VE/VCO_2 slope 显著较高 ($P<0.001$; 表 1)。

表 1. Post-MI HF 组与非 Post-MI HF 组的基线资料比较
Table 1. Baseline characteristics of Post-MI HF and non-Post-MI HF patients

项目	非 Post-MI HF 组 ($n=1\ 984$)	Post-MI HF 组 ($n=237$)	P
年龄/岁	56.00 (49.00, 62.00)	60.00 (53.00, 68.00)	<0.001
女性/男性/[例(%)]	535/1 449 (27.0/73.0)	75/162 (32.0/68.0)	0.147
BMI/(kg/m^2)	25.60 (23.50, 27.76)	25.00 (23.40, 27.30)	0.035
心肌梗死类型/[例(%)]			<0.001
NSTEMI	668 (33.7)	46 (19.4)	
STEMI	1 316 (66.3)	191 (80.6)	
高血压史/[例(%)]	918 (46.3)	128 (54.0)	0.029
高脂血症史/[例(%)]	851 (42.9)	81 (34.2)	0.012
糖尿病史/[例(%)]	456 (23.0)	60 (25.3)	0.470
脑卒中史/[例(%)]	141 (7.1)	28 (11.8)	0.014
吸烟史/[例(%)]	1 465 (73.8)	168 (70.9)	0.370
用药情况/[例(%)]			
阿司匹林	1 955 (98.5)	231 (97.5)	0.330
氯吡格雷	969 (48.8)	135 (57.0)	0.022
替格瑞洛	999 (50.4)	103 (43.5)	0.053
β 受体阻滞剂	1 224 (61.7)	158 (65.7)	0.155
ACEI/ARB 药物	573 (28.9)	83 (35.0)	0.060
LVEDD/mm	47.10 (44.25, 50.00)	49.70 (46.60, 54.00)	<0.001
EF/%	61.00 (58.00, 63.00)	55.30 (53.00, 59.70)	<0.001
LDH/(U/L)	292.50 (190.00, 500.00)	773.00 (385.00, 1 354.00)	<0.001
PLT/($\times 10^9 L^{-1}$)	218.50 (176.00, 270.00)	229.00 (180.00, 279.00)	0.075
RBC/($\times 10^{12} L^{-1}$)	4.77 (4.30, 5.15)	4.76 (4.30, 5.15)	0.942
WBC/($\times 10^9 L^{-1}$)	10.60 (7.80, 14.00)	12.30 (9.00, 15.80)	<0.001
Hb/(g/L)	152.00 (142.00, 161.00)	151.00 (138.00, 160.00)	0.178
中性粒细胞计数/($\times 10^9 L^{-1}$)	8.54 (4.92, 11.68)	10.10 (6.58, 13.29)	<0.001
淋巴细胞计数/($\times 10^9 L^{-1}$)	2.12 (1.34, 2.90)	2.15 (1.40, 2.86)	0.336
SCr/($\mu mol/L$)	85.00 (75.00, 93.00)	86.00 (77.00, 99.00)	0.005
BUN/(mmol/L)	5.30 (3.40, 6.81)	6.19 (4.29, 7.89)	<0.001
FBG/(mmol/L)	6.63 (5.25, 8.87)	7.37 (5.70, 9.67)	<0.001
TC/(mmol/L)	4.80 (4.10, 5.30)	4.66 (4.10, 5.30)	0.227
TG/(mmol/L)	1.22 (0.93, 1.76)	1.24 (0.96, 1.75)	0.604
LDLC/(mmol/L)	3.01 (2.47, 3.54)	2.88 (2.44, 3.56)	0.581
HDLc/(mmol/L)	1.12 (0.95, 1.28)	1.12 (0.96, 1.30)	0.788

续表

项目	非 Post-MI HF 组 (n=1 984)	Post-MI HF 组 (n=237)	P
ALT/(U/L)	23.00(18.00,36.00)	31.00(20.00,57.00)	<0.001
白蛋白/(g/L)	42.10(39.35,44.70)	41.40(39.20,44.30)	0.202
CK/(U/L)	261.00(96.00,1 017.00)	1 230.00(123.00,2 984.00)	<0.001
CK-MB/(μg/L)	13.70(9.00,81.30)	134.50(17.50,292.20)	<0.001
cTnI/(μg/L)	10.96(5.38,31.00)	56.54(14.00,123.58)	<0.001
NT-proBNP/(ng/L)	433.00(157.00,873.00)	1 977.00(667.00,4 347.00)	<0.001
VO ₂ peak/[mL/(kg·min)]	16.50(14.30,19.00)	13.60(11.60,15.90)	<0.001
VE/VCO ₂ slope	27.06(24.44,30.16)	30.27(27.53,34.70)	<0.001
SBP peak/mmHg	168.00(151.50,185.00)	155.00(140.00,171.00)	<0.001
HR peak/(次/min)	123.00(113.00,133.00)	115.00(107.00,130.00)	<0.001
RPP peak	20.61(17.56,23.87)	17.97(17.64,21.45)	<0.001
DBP peak/mmHg	89.00(79.00,98.00)	85.00(75.00,94.00)	<0.001
峰值功率/W	102.00(84.00,121.00)	83.00(65.00,104.00)	<0.001
RER peak	1.11(1.05,1.17)	1.06(1.02,1.14)	<0.001

注:ACEI:血管紧张素转换酶抑制剂(angiotensin converting enzyme inhibitor);ARB:血管紧张素受体拮抗剂(angiotensin receptor blocker)。

2.2 RPP peak 与 Post-MI HF 的 Cox 回归分析

Cox 回归分析结果显示,RPP peak 与 AMI 患者的 Post-MI HF 发生风险在单因素和多因素模型中均呈显著负相关(均 $P<0.001$;表 2)。在未调整任何混杂因素的单因素分析中,RPP peak 每升高一个单位,Post-MI HF 的发生风险降低 11% ($HR=0.888,95\%CI:0.860\sim0.916,P<0.001$)。在逐步调整混杂因素后,RPP peak 的保护效应仍然显著:模型 1(调整年龄、性别、BMI 和心肌梗死类型)中 HR 为 0.894($95\%CI:0.866\sim0.923,P<0.001$);考虑到 RPP peak 由 HR peak 和 SBP peak 计算而来,在多变量模型中进一步纳入 β 受体阻滞剂使用情况及高血压史进行调整,以控制可能影响心率和血压反应的混杂因素,在上述调整后,RPP peak 与 Post-MI HF 风险的负相关关系仍保持稳定,模型 2(进一步调整高血压、高脂血症、糖尿病史及 β 受体阻滞剂使用)中 HR 为 0.895($95\%CI:0.867\sim0.924,P<0.001$);在最终模型 3(进一步调整 EF、LVEDD、NT-proBNP 及 cTnI)中,RPP peak 升高仍为 Post-MI HF 的独立保护因素($HR=0.914,95\%CI:0.883\sim0.944,P<0.001$)。

2.3 RPP peak 与 Post-MI HF 发生风险的 RCS 分析

在 Cox 回归分析提示 RPP peak 与 Post-MI HF 发生风险呈显著负相关的基础上,进一步采用 RCS 分析对二者间的剂量-反应关系进行评估。如图 1 所示,RPP peak 与 Post-MI HF 风险之间呈显著总体相关性($P_{overall}<0.001$),但未观察到明显的非线性关联($P_{non-linear}=0.978$),提示该关联在整体范围内

近似呈线性关系。即随着 RPP peak 水平升高,Post-MI HF 的发生风险持续下降。

表 2. RPP peak 与 Post-MI HF 风险的 Cox 回归分析
Table 2. Cox proportional hazards analysis of the association between RPP peak and incident Post-MI HF

模型	β	Z	HR(95% CI)	P
单因素分析	-0.119	-7.420	0.888(0.860~0.916)	<0.001
模型 1	-0.112	-6.887	0.894(0.866~0.923)	<0.001
模型 2	-0.111	-6.803	0.895(0.867~0.924)	<0.001
模型 3	-0.091	-5.390	0.914(0.883~0.944)	<0.001

注:模型 1:调整年龄、性别、BMI 和心肌梗死类型;模型 2:在模型 1 基础上调整高血压、高脂血症、糖尿病史和 β 受体阻滞剂使用;模型 3:在模型 2 基础上调整 EF、LVEDD、NT-proBNP 和 cTnI。

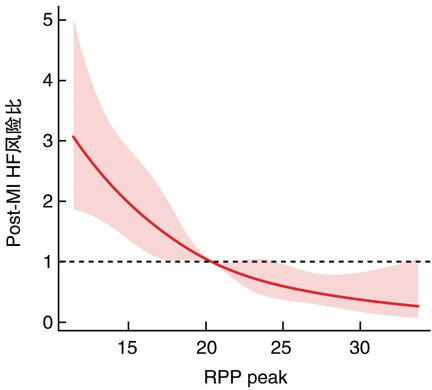


图 1. RPP peak 与 Post-MI HF 风险的 RCS 分析
Figure 1. RCS analysis of the relationship between RPP peak and Post-MI HF occurrence risk

2.4 RPP peak 在 Post-MI HF 风险预测中的价值

采用时间依赖性 ROC 曲线分析,评估 RPP peak 在不同随访时间点对 Post-MI HF 发生风险的预测能力,并与 HR peak 和 SBP peak 进行比较。如图 2 所示,在随访 12、36 和 60 个月时,RPP peak 在各时间点均表现出稳定的区分能力,其 AUC 分别为 0.672 (95% CI: 0.633 ~ 0.712)、0.679 (95% CI:

0.641 ~ 0.718) 和 0.674 (95% CI: 0.631 ~ 0.717)。在所有评估时间点,RPP peak 的 AUC 均高于 HR peak 和 SBP peak,提示 RPP peak 在中长期随访中具有相对更优且稳定的风险区分能力。上述结果表明,RPP peak 相较于单一 HR 或 SBP 指标,在 Post-MI 风险预测中具有更好的预测价值。

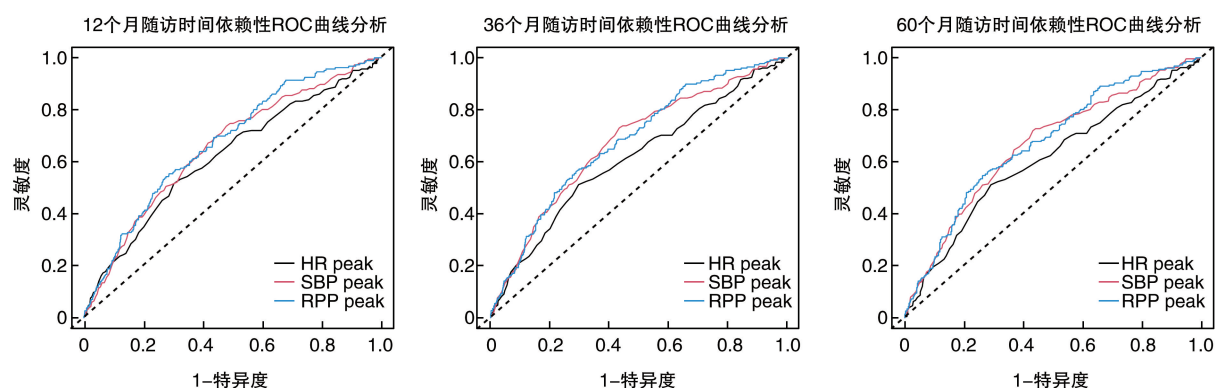


图 2. HR、SBP 与 RPP 在预测 Post-MI HF 风险中的时间依赖性 ROC 曲线

Figure 2. Time-dependent ROC curves for predicting Post-MI HF occurrence risk using HR, SBP, and RPP

2.5 不同 RPP peak 水平的 Kaplan-Meier 生存曲线分析

Kaplan-Meier 生存曲线(图 3)显示,根据 RPP peak 水平将患者分为三组(T1、T2 和 T3)后,各组间的无事件累计生存率存在显著差异(Log-rank $P < 0.001$);三组曲线在随访早期即已明显分离,并在整个随访期间保持稳定的梯度分布,T1 组无事件生存率最低,T2 组次之,T3 组最高。随着随访时间延长,组间差异逐渐扩大,提示较低的 RPP peak 水平对应更高的 Post-MI HF 发生风险。

2.6 不同 RPP peak 水平与 Post-MI HF 的 Cox 回归分析

为进一步定量评估不同 RPP peak 水平与 Post-MI HF 发生风险间的关联,并验证 Kaplan-Meier 生存曲线分析所观察到的风险梯度差异,本研究基于 RPP peak 的三分位数分组构建 Cox 比例风险回归模型(表 3)。结果显示,与 T1 组相比,T2 组和 T3 组患者的 Post-MI HF 风险显著降低,且呈现明确的剂量-反应关系。

具体而言,T2 组 Post-MI HF 发生率为 9.0%,显著低于 T1 组的 17.3%,其发生风险降低约 51% ($HR = 0.488$, 95% CI: 0.363 ~ 0.657, $P < 0.001$);T3 组 Post-MI HF 发生率进一步降低至 5.8%,其发生

风险较 T1 组降低约 69% ($HR = 0.308$, 95% CI: 0.219 ~ 0.434, $P < 0.001$)。上述结果表明,较高的 RPP peak 水平与 Post-MI HF 发生风险显著降低独立相关。综合 Kaplan-Meier 生存曲线分析与 Cox 回归结果,基于 RPP peak 水平的风险分层能够稳定且有效地区分 AMI 患者的 Post-MI HF 风险。

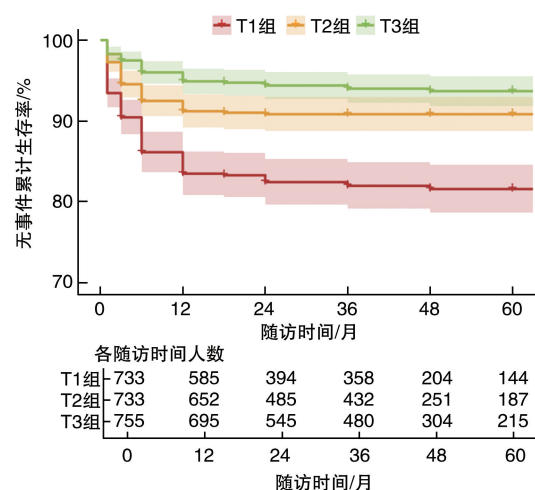


图 3. RPP peak 三分位分组与 Post-MI HF 风险的 Kaplan-Meier 生存曲线分析

Figure 3. Kaplan-Meier survival curve analysis of Post-MI HF occurrence risk stratified by tertiles of peak RPP

表 3. 基于 RPP peak 三分位分组的 Post-MI HF 发生风险 Cox 回归分析

Table 3. Cox regression analysis of Post-MI HF occurrence risk across tertiles of RPP peak

分组	发生事件数/总数[例(%)]	β	Z	HR(95% CI)	P
T1 组	127/733(17.3)	Reference		Reference	
T2 组	66/733(9.0)	-0.717	-4.724	0.488(0.363~0.657)	<0.001
T3 组	44/755(5.8)	-1.177	-6.728	0.308(0.219~0.434)	<0.001

3 讨论

Post-MI HF 是 AMI 患者常见的不良并发症之一,其发生会显著增加患者的死亡率和再住院风险^[4]。因此,对 Post-MI HF 风险进行早期、准确的预测,有助于临床医护人员识别高风险患者,在优化二级预防措施和改善预后中具有重要的临床意义^[15-16]。本研究发现,基于 CPET 获得的 RPP peak 在 Post-MI HF 发生风险预测中具有良好的预测价值。RPP peak 与 Post-MI HF 风险呈显著线性负相关关系,在多变量 Cox 回归中进一步调整 β 受体阻滞剂使用、高血压史等可能直接影响心率和血压反应的混杂因素后,该关联仍然保持稳定且显著。进一步的分层分析显示,随着 RPP peak 水平的升高,AMI 患者的 Post-MI HF 发生风险呈现出明显的梯度下降趋势。上述发现表明,RPP peak 可以作为 AMI 患者 Post-MI HF 发生风险评估与分层的实用功能学指标。

RPP 作为反映心脏做功及心肌耗氧水平的综合血流动力学指标,其运动峰值水平在不同心血管疾病人群中的预后意义近年来逐渐受到关注。既往研究显示,在慢性 HF 及射血分数降低型 HF 患者中,RPP peak 水平越高,其全因死亡、左心室辅助装置植入及心脏移植等不良结局发生风险越低^[9-10],提示 RPP peak 能够反映心脏在运动应激状态下的功能储备水平,是预测 HF 患者不良预后风险的关键因素之一。在 AMI 人群中,相关证据相对有限,但已有研究发现完成充分血运重建的患者 RPP peak 水平更高,而血运重建不完全者 RPP peak 明显受限^[17],提示该指标可能与心肌灌注改善程度及心脏代偿能力相关。本研究在上述证据基础上进一步拓展了 RPP peak 的预测价值,在 AMI 患者中证实了其 与 Post-MI HF 发生风险呈线性负相关关系。综合既往研究与本研究结果可见,运动应激状态下的血流动力学反应能力在不同心血管疾病谱系中可能具有共通的预后价值。

值得注意的是,静息状态下的 RPP(resting rate-

pressure product, RPP rest) 与运动负荷状态下的 RPP peak 在心血管疾病患者中的预后意义并不一致,提示二者可能反映了不同的生理状态和功能内涵。既往研究表明,较高的 RPP rest 往往与不良预后风险增加相关。例如,在经皮冠状动脉介入治疗术后的冠心病患者及急性冠脉综合征患者中,基线时 RPP rest 升高与全因死亡、心源性死亡及主要不良心血管事件风险增加独立相关^[8,18]。此外,RPP rest 还与 AMI 患者住院期间心肺功能呈显著负相关^[19],提示其可能反映基础血流动力学负荷增加或交感神经持续激活状态,而非心脏功能储备充足。相比之下,基于 CPET 获取的运动负荷状态下 RPP peak 更能体现心血管系统心率和血压反应的综合能力,反映了心脏功能储备、血管反应性及整体代偿能力^[10]。鉴于 HF 的核心病理生理特征是运动不耐受,即机体在运动或应激状态下无法充分增加心输出量以满足代谢需求,运动负荷状态下的功能学指标较静息状态指标更能反映心血管系统真实的代偿能力和功能储备^[20-21]。这进一步凸显了 RPP peak 在 Post-MI HF 风险评估中的独特价值,为 AMI 患者的早期风险识别提供了功能学依据。

在临床实践层面,本研究表明基于 CPET 获得的 RPP peak 不仅具有稳定的独立预测价值,还可通过分位数分层的方式实现直观、便捷的风险评估。基于 RPP peak 构建的三分位风险分层能够有效区分不同风险水平的 AMI 患者,Post-MI HF 发生风险随 RPP peak 水平升高呈现明显的梯度下降趋势,对于 RPP peak 处于 T1 水平的 AMI 患者,建议在出院后早期启动心脏康复治疗,并在随访过程中加强心功能监测。与主要依赖静息状态检验检查的传统风险评估模式相比,RPP peak 能够识别患者潜在的功能储备受限状态,有望作为一种补充性的功能学指标用于 Post-MI HF 的早期风险识别与精准分层,从而为随访管理和二级预防策略的个体化制定提供依据。

本研究存在一定的局限性。首先,本研究为回顾性队列研究,尽管在分析中已调整多种混杂因

素,但仍不可避免存在选择偏倚和残余混杂的影响。其次,研究对象限于能够完成 CPET 的 AMI 患者,部分病情较重或存在运动禁忌的患者未能纳入,可能在一定程度上限制了研究结果的外推性。最后,RPP peak 的获取依赖于 CPET 或运动负荷试验等实施条件,对于部分基层医疗机构或无法完成相关检查的患者,其临床应用仍存在一定限制。

综上所述,基于 CPET 获得的 RPP peak 与 AMI 患者 Post-MI HF 发生风险呈显著负相关,且可有效区分不同风险水平人群,为 Post-MI HF 的风险分层和早期预防提供了有价值的功能学临床依据。

[参考文献]

- [1] UDELL J A, BAHIT M C, CAMPBELL P, et al. Prevention of heart failure after acute myocardial infarction [J]. *Lancet*, 2025, 406(10508): 1154-1170.
- [2] VENTURA M, BELLEUDI V, SCIATTELLA P, et al. High quality process of care increases one-year survival after acute myocardial infarction (AMI): a cohort study in Italy [J]. *PLoS One*, 2019, 14(2): e0212398.
- [3] RASHID M, ABRAMOV D, NASEER M U, et al. 15-Year trends, predictors, and outcomes of heart failure hospitalization complicating first acute myocardial infarction in the modern percutaneous coronary intervention era [J]. *Eur Heart J Open*, 2025, 5(2): oea013.
- [4] BUTLER J, HAMMONDS K, TALHA K M, et al. Incident heart failure and recurrent coronary events following acute myocardial infarction [J]. *Eur Heart J*, 2025, 46(16): 1540-1550.
- [5] GERBER Y, WESTON S A, ENRIQUEZ-SARANO M, et al. Mortality associated with heart failure after myocardial infarction: a contemporary community perspective [J]. *Circ Heart Fail*, 2016, 9(1): e002460.
- [6] HERNANDEZ A F, UDELL J A, JONES W S, et al. Effect of empagliflozin on heart failure outcomes after acute myocardial infarction: insights from the EMPACT-MI trial [J]. *Circulation*, 2024, 149(21): 1627-1638.
- [7] GOBEL F L, NORSTROM L A, NELSON R R, et al. The rate-pressure product as an index of myocardial oxygen consumption during exercise in patients with angina pectoris [J]. *Circulation*, 1978, 57(3): 549-556.
- [8] ZHOU J, LI Y J, ZHOU X D, 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]. *Clin Interv Aging*, 2024, 19: 571-579.
- [9] CHAIKIJURAJAI T, FINET J E, ENGELMAN T, et al. Prognostic value of hemodynamic gain index in patients with heart failure with reduced ejection fraction [J]. *JACC Heart Fail*, 2024, 12(2): 261-271.
- [10] CHAIKIJURAJAI T, FINET J E, WU Y, et al. Risk stratification with the haemodynamic gain index and peak rate-pressure product in patients with chronic heart failure undergoing treadmill exercise testing [J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2025, 32(11): 939-946.
- [11] THYGESEN K, ALPERT J S, JAFFE A S, et al. Fourth universal definition of myocardial infarction (2018) [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(18): 2231-2264.
- [12] FLETCHER G F, ADES P A, KLIGFIELD P, et al. Exercise standards for testing and training: a scientific statement from the American heart association [J]. *Circulation*, 2013, 128(8): 873-934.
- [13] GANESANANTHAN S, RAJKUMAR C A, FOLEY M, et al. Cardiopulmonary exercise testing and efficacy of percutaneous coronary intervention: a substudy of the ORBITA trial [J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(33): 3132-3145.
- [14] 中华医学会心血管病学分会心力衰竭学组, 中国医师协会心力衰竭专业委员会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 中国心力衰竭诊断和治疗指南 2018 [J]. *中华心血管病杂志*, 2018, 46(10): 760-789.
- Heart Failure Working Group, Chinese Society of Cardiology, Chinese Medical Association, Chinese Heart Failure Committee, Chinese Medical Doctor Association, Editorial Board, Chinese Journal of Cardiovascular Diseases. Chinese guidelines for the diagnosis and treatment of heart failure 2018 [J]. *Chin J Cardiol*, 2018, 46(10): 760-789.
- [15] SEFEROVIC P M, PONIKOWSKI P, ANKER S D, et al. Clinical practice update on heart failure 2019: pharmacotherapy, procedures, devices and patient management. An expert consensus meeting report of the heart failure association of the European society of cardiology [J]. *Eur J Heart Fail*, 2019, 21(10): 1169-1186.
- [16] 赵媛媛, 赵延龙, 王 帅, 等. 应激性高血糖比值对急性心肌梗死患者 PCI 术后左心室重塑的预测价值 [J]. *中国动脉硬化杂志*, 2026, 34(2): 129-136.
- ZHAO Y Y, ZHAO Y L, WANG S, et al. The predictive value of stress hyperglycemia ratio for left ventricular remodeling after PCI in patients with acute myocardial infarction [J]. *Chin J Arterioscler*, 2026, 34(2): 129-136.
- [17] ZHAO L T, LIU Y W, LI S Y, et al. Time of the low-level cardiopulmonary exercise test does not affect the evaluation of acute myocardial infarction in stable status [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 1092787.
- [18] JIANG Z H, AIERKEN A, WU T T, 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.
- [19] ZENG C M, ZHAO Y M, LI Y Y, et al. The effects of rate pressure product at admission on cardiopulmonary function during hospitalization in patients with acute myocardial infarction [J]. *Postgrad Med*, 2023, 135(8): 803-808.
- [20] MOUNSEY L A, GUO M, LAU E S, et al. Exercise training in heart failure: clinical benefits and mechanisms [J]. *Circ Res*, 2025, 137(2): 273-289.
- [21] DEL BUONO M G, ARENA R, BORLAUG B A, et al. Exercise intolerance in patients with heart failure: JACC state-of-the-art review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73(17): 2209-2225.

(此文编辑 许雪梅)