

心肺运动试验(CPET)在急性冠脉综合征(ACS)中的应用进展研究

刘秋艳¹, 赵秋燕², 董 榆^{2*}

¹大理大学临床医学院, 云南 大理

²大理大学第一附属医院心血管内科, 云南 大理

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月1日

摘 要

心肺运动试验(Cardiopulmonary Exercise Testing, CPET)作为一项动态、综合性的心肺评估工具, 在急性冠脉综合征(Acute Coronary Syndrome, ACS)的综合管理中扮演着重要作用。本文通过综述近年来CPET在ACS领域的最新应用进展, 重点分析其在诊断评估、风险分层及康复管理方面的独特价值。CPET通过对静息及运动状态下的气体代谢、呼吸、血压、心率、心电及症状的连续性监测, 核心指标如峰值摄氧量(VO_2 -peak)、氧脉搏(O_2 pulse)、无氧阈(AT)及二氧化碳通气当量斜率(VE/VCO_2 slope)等可敏感反映心肌缺血导致的心肺功能损害, 且对疾病预后具有独立预测价值, 是预测主要不良心血管事件(Major adverse cardiovascular events, MACE)和全因死亡的独立危险因素。目前CPET在ACS患者综合管理中展现出不可替代的作用, 但未来仍需进一步开展相关研究, 以推动CPET在ACS综合管理中的规范化与精准化应用。

关键词

心肺运动试验, 急性冠脉综合征, 心脏康复

Progress in the Application of Cardiopulmonary Exercise Testing (CPET) in Acute Coronary Syndrome (ACS)

Qiuyan Liu¹, Qiuyan Zhao², Yu Dong^{2*}

¹School of Clinical Medicine, Dali University, Dali Yunnan

²Department of Cardiology, The First Affiliated Hospital of Dali University, Dali Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 刘秋艳, 赵秋燕, 董榆. 心肺运动试验(CPET)在急性冠脉综合征(ACS)中的应用进展研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(7): 132-140. DOI: 10.12677/acm.2026.1672506

Received: May 29, 2026; accepted: June 23, 2026; published: July 1, 2026

Abstract

Cardiopulmonary exercise testing (CPET), as a dynamic and comprehensive assessment tool for the heart and lungs, plays a significant role in the integrated management of acute coronary syndrome (ACS). This article reviews the latest application progress of CPET in the field of ACS, with a focus on analyzing its unique value in diagnosis and assessment, risk stratification, and rehabilitation management. CPET continuously monitors gas metabolism, respiration, blood pressure, heart rate, electrocardiogram, and symptoms during both rest and exercise. Core indicators such as peak oxygen uptake ($\text{VO}_2\text{-peak}$), oxygen pulse (O_2 pulse), anaerobic threshold (AT), and carbon dioxide ventilation equivalent slope (VE/VCO_2 slope) can sensitively reflect the damage to cardiopulmonary function caused by myocardial ischemia and have independent predictive value for disease prognosis. They are independent risk factors for major adverse cardiovascular events (MACE) and all-cause mortality. Currently, CPET has shown an irreplaceable role in the comprehensive management of ACS patients, but further research is still needed in the future to promote the standardized and precise application of CPET in the integrated management of ACS.

Keywords

Cardiopulmonary Exercise Testing, Acute Coronary Syndrome, Cardiac Rehabilitation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球化的加速, 心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)已成为全球公共卫生领域的重大挑战, 其高死亡率在发展中国家尤为显著[1]。急性冠脉综合征(acute coronary syndrome, ACS)是心血管疾病中的急危重症, 涵盖一系列临床综合征, 包括不稳定型心绞痛(Unstable Angina, UA)、非 ST 段抬高型心肌梗死(Non-ST-segment Elevation Myocardial Infarction, NSTEMI)和 ST 段抬高型心肌梗死(ST-segment Elevation Myocardial Infarction, STEMI), 其共同病理基础为冠状动脉粥样硬化斑块破裂或侵蚀后继发血栓形成[2]。尽管经过成功的血运重建(如经皮冠状动脉支架植入术, PCI), 能够及时挽救濒死的心肌细胞, 改善缺血症状, 保护心功能, 但患者仍然存在一定的心肺功能的损害及运动耐量的下降, 面临较高的远期不良心血管事件(如心力衰竭、再梗死等) [1] [3]。如何对稳定期的 ACS 患者进行整体功能评估、强化冠心病二级预防以及改善远期预后, 以心肺运动试验(Cardiopulmonary exercise test, CPET)为基础的心脏康复(Cardiac rehabilitation, CR)显得尤为重要。心肺运动试验(CPET)被认为是评估心肺功能和运动耐力的金标准[4]。其通过在递增负荷运动状态下对气体代谢、呼吸、血压、心率、心电及症状的连续性动态监测, 并对指标监测结果(如 $\text{VO}_2\text{-peak}$ 、AT、 O_2 pulse、 VE/VCO_2 slope 等)进行综合分析, 从而实现对患者的循环、呼吸、代谢等功能的综合评估。近年来, 心肺运动试验(CPET)在 ACS 患者中的诊疗评估、风险分层、预后预测及康复指导等方面的作用尤为突出[5] [6]。本文旨在综述 CPET 在 ACS 患者中的应用进展, 着重分析 CPET 在 ACS 患者诊疗评估与预后管理中的应用价值与局限性, 以进一步评估心血管风险, 指导临床治疗, 从而制定个体化的康复方案。

2. 心肺运动试验(CPET)

2.1. 心肺运动试验(CPET)概述

心肺运动试验(CPET)被认为是心脏康复(CR)中评估有氧运动的最佳方法,其作为一种无创非侵入性检测技术,能定量综合心肺功能储备和运动耐量[7]。CPET 采用渐进式症状限制方案,动态监测患者在递增负荷状态下的生理反应,系统评估从大气吸入到骨骼肌线粒体代谢的氧运输效能,并量化心血管系统的氧输送与线粒体呼吸链的氧利用之间的协同上限阈值,揭示 ATP (Adenosine Triphosphate, 腺苷三磷酸)再生过程中氧依赖性的调控极限[4] [5]。与传统的静态检查方法(如常规影像学、肺功能测试和静息超声心动图等)相比,心肺运动试验(CPET)可更精准地量化患者日常活动相关症状的病理生理基础,动态评估心、肺、血管、骨骼肌的协同工作能力,从而鉴别运动不耐受的原因(如心脏泵血功能不足、心肌缺血、肺换气功能障碍、外周肌肉代谢异常等)。CPET 在心肺疾病,尤其是 ACS 稳定期患者的精准诊疗评估、风险分层、预后预测、康复指导等全链条中具有核心临床价值,是连接临床诊疗与预后、康复管理的关键桥梁,能够帮助临床医生制定个性化的治疗方案提供重要依据[5]。

2.2. 心肺运动试验(CPET)的核心指标的临床意义

心肺运动试验通过多项核心指标,为 ACS 患者的心肺功能储备和运动耐量进行综合评估。

2.2.1. 峰值摄氧量($\text{VO}_2\text{-Peak}$)

指患者在递增负荷运动过程中,尽管负荷继续增加,但摄氧量不再增加或增加幅度极小(通常定义为 $<150\text{ mL/min}$)时达到的最高摄氧量水平。它直接反映“氧运输链”整体功能储备,是评估整体心肺功能储备的“金标准”和核心指标,其降低直接反映了心输出量储备不足(如心肌梗死后心功能不全、残余心肌缺血或心室重构等)和/或外周氧利用的障碍(如肺气体交换障碍、贫血或肌肉代谢异常);同时,它也是预测 ACS 患者远期全因死亡率和心血管事件的独立强预测因子,通常数值越低(如 $<14\text{ mL/kg/min}$ 或 $<65\%$ 预测值),预后越差[8] [9]。

2.2.2. 无氧阈(AT)

无氧阈标志着机体在递增负荷运动中由有氧供能向无氧供能转换的临界点;其代表亚极量运动耐量,其不受患者主观努力程度及测试终止意愿的影响,用于评估患者的日常活动能力,具有更强的稳定性和更高的可重复性,尤其适用于无法完成极量运动的 ACS 患者;此外,无氧阈水平与冠状动脉额血流储备能力和心肌灌注效率密切相关,其数值降低通常提示冠脉微循环功能障碍,能够早期发现功能减退[10]。

2.2.3. 氧脉搏($\text{O}_2\text{ Pulse}$, VO_2/HR)

氧脉搏可以作为心搏出量的间接指标,氧脉搏的变化可能早于患者明显的心绞痛症状或心电图 ST 段出现显著压低,因此对于心肌缺血的早期识别具有独特价值。当运动中出现心肌缺血时,可能导致心室收缩功能降低,每搏量不能正常增加或受限,表现为氧脉搏曲线平台提前出现或下降[11][12]。Peak $\text{O}_2\text{ pulse}$ 对心肌缺血的评估价值显著,其下降幅度与缺血严重程度正相关[12]。

2.2.4. 二氧化碳通气当量斜率($\text{VE}/\text{VCO}_2\text{ Slope}$)

是评估肺循环淤血与通气-血流匹配的重要指标,其升高($\text{VE}/\text{VCO}_2\text{ slope} < 30$ 为正常)提示通气效率降低或肺灌注不足,是心脏泵血功能减退的结果;该值异常升高($\text{VE}/\text{VCO}_2\text{ slope} > 34$)提示 ACS 患者心肌缺血程度加重与微循环功能障碍;若其显著升高($\text{VE}/\text{VCO}_2\text{ slope} \geq 45$)则提示心血管事件及肺血管疾病(Pulmonary Vascular Disease, PVD)风险显著增加[6];同时,它也被视为心力衰竭及不良预后的强预测因子,在射血分数降低的心衰患者中, $\text{VE}/\text{VCO}_2\text{ slope}$ 是比 $\text{VO}_2\text{ peak}$ 更敏感的预后指标[6]。

综上, 这些指标在 ACS 患者的心肺功能状态评估和预后判断中具有独特的核心价值。

3. 心肺运动试验(CPET)在 ACS 患者诊断与功能评估中的应用进展

3.1. 应用时机与安全性

心肺运动试验(CPET)在 ACS 患者中的应用时机尤为重要。根据心肺运动相关指南[5] [7], 2 天内的急性心肌梗死或持续性不稳定型心绞痛是心肺运动试验(CPET)的绝对禁忌症, 确诊的阻塞型冠状动脉左主干狭窄为相对禁忌症。研究表明[13] [14], 对于病情相对已稳定的患者, 早期进行症状限制性 CPET (如在 PCI 术后 2~4 周)已被证明是安全的, 且能为早期心脏康复提供关键基线数据。同时可提升患者远期体力活动水平和生活质量, 且不增加不良事件风险[13]。

3.2. CPET 在心肌缺血与功能评估中的价值

CPET 核心指标在心肌缺血与功能评估具有独特价值。Popovic 等[15]研究证实, CPET 诊断心肌缺血的敏感度(88%)与特异度(98%)显著优于平板运动试验(Treadmill Exercise Test, TET)。有研究表明[8] [10]: $\text{VO}_2\text{ peak}$ 、 $\text{VO}_2\text{ peak/Kg}$ 、 $\text{Peak O}_2\text{ pulse}$ 、AT 代谢当量及 $\text{VO}_2/\text{kg-AT}$ 越低, 冠脉病变累及血管数越多、狭窄程度越高, 左室功能越差; 其中, $\text{VO}_2\text{ peak}$ 与冠状动脉病变的严重程度(如 Gensini 评分)显著负相关[9]。另有研究表明, $\text{Peak O}_2\text{ pulse}$ 对心肌缺血的评估价值显著, 其下降幅度与缺血严重程度正相关[12]。此外, VE/VCO_2 斜率是成熟的心肌缺血预测参数, 该值异常升高($\text{VE/VCO}_2\text{ slope} > 34$)提示 ACS 患者心肌缺血程度加重与微循环功能障碍, 不良预后风险上升[6]。

3.3. CPET 在制定个体化运动处方中的核心作用

心脏康复(CR)作为急性冠脉综合征(ACS)二级预防的核心组成部分, 而心肺运动试验(CPET)是制定精准、安全、有效运动处方的重要依据。通过 CPET 测定的无氧阈(AT)、峰值摄氧量($\text{Peak O}_2\text{ pulse}$)和峰值摄氧量($\text{VO}_2\text{ peak}$)等客观指标, 可以科学地制定个体化的运动处方及运动强度区间。研究表明[16] [17], ACS 经皮冠状动脉介入治疗(PCI)术后患者应接受以运动训练为基础的心脏康复(I 级推荐), 其中以 CPET 为主, 运动训练可使 $\text{VO}_2\text{ peak}$ 提升 11%~36%, 且在功能储备最低者中改善尤为显著。另有研究表明[18], 基于 CPET 的有氧运动可显著提升通气阈值摄氧量($\text{VO}_2\text{ at VT}$), 有效改善左心室(Left Ventricle, LV)重塑、增强心肌收缩力及内皮功能。以上结果证实, 与经验性运动处方相比, 以 CPET 客观数据为基础的康复策略能够客观评估 ACS 患者的心肺适能(Cardiorespiratory Fitness, CRF), 为制定个体化运动处方提供依据。Chen 等[19]的研究进一步揭示, CPET 可改善完全血运重建后 ACS 患者的通气效率、运动耐力及心肺储备功能, 并通过增强心肌收缩力提升泵血功能与收缩/舒张功能。

4. CPET 在 ACS 患者预后预测中的作用

目前心肺运动试验(CPET)在 ACS 患者预后预测中的应用已取得显著进展, 其核心指标已被证实作为 ACS 患者远期预后的独立预测因子, 基于 CPET 指导下的心脏康复可有效优化 ACS 患者的风险 - 获益比。

4.1. 峰值摄氧量($\text{VO}_2\text{ Peak}$)的预后价值

$\text{VO}_2\text{ peak}$ 的预后意义最为明确。大量研究表明, $\text{VO}_2\text{ peak}$ 是预测全因死亡及心血管死亡的可靠指标。Keteyian SJ 等人[20]的研究指出, $\text{VO}_2\text{ peak}$ 每减少 1 MET (约为 3.5 ml/kg/min), 死亡风险显著增加。对于接受经皮冠状动脉介入治疗(PCI)后的患者, 出院早期若 $\text{VO}_2\text{ peak/kg}$ 低于 16 ml/min/kg, 则提示未来 2 年内发生心血管事件的风险显著升高[21]。

4.2. 亚极量运动指标的增量预测价值

随访研究[6] [22]显示, Peak Mets 每增加 1 单位, 全因死亡率和心血管事件发生率分别降低 15%和 19%。无氧阈(AT)对应的摄氧量(VO_2 at AT)与冠状动脉狭窄程度呈负相关, 且其降低与不良预后具有独立关联性[18]。 $\text{VO}_2/\text{kg-AT}$ 随冠脉狭窄加重而降低, 与 ACS 患者全因死亡率及致命性心血管事件风险呈显著负相关[23]。这一发现表明, 即使患者未能完成高强度的运动(例如老年人或体弱患者), 亚极量运动指标仍能为预后评估提供重要的信息。史笑笑[24]等人的研究表明, ACS 患者心肺储备功能显著受损, 主要是运动持续时间及代谢当量(METs)、无氧阈摄氧量占预计值百分比($\%\text{VO}_2$ peak)明显降低, 而呼吸储备功能轻度下降。另有研究发现[25], 运动耐量是后续结局(包括全因死亡及死亡/复发性 AMI 复合终点)的有力预测因子; 每增加 1 个 MET, 死亡/再梗死风险降低 20%, 全因死亡风险降低 27%。

4.3. 通气效率指标(VE/VCO_2 Slope)的预测意义

VE/VCO_2 slope 表示运动时的通气反应, 反映了机体清除二氧化碳所需的通气量。 VE/VCO_2 slope 异常升高可能与通气/灌注比例失调、心排量下降、肺毛细血管楔压升高等相关, 其数值越高, 提示病情越严重, 预后相对越差。在 ACS 患者中, 尤其是合并左心室功能不全的患者, VE/VCO_2 slope 已被证明是预测心力衰竭再住院及死亡的优异指标, 与心血管事件的预后密切相关, 在预测意义上甚至优于 VO_2 peak [26] [27]。

5. 当前研究局限性及未来展望

尽管心肺运动试验(CPET)在急性冠脉综合征(ACS)患者中的应用已取得较为充分的循证医学支持, 但在临床实践中的应用仍面临诸多困难及挑战, 仍然需要我们不断深入研究。

5.1. 结果普适性不足

目前我国 ACS 患者群体中普遍存在对心脏康复的认知度及参与度较低的情况, 同时由于 CPET 设备昂贵, 操作的专业化, 以及基层医院通常无法开展, 从而限制了 ACS 患者的功能及预后评估, 进而导致了对于心脏康复, 尤其是心肺运动试验(CPET)的普适性不足。基于目前心脏康复现状, 我们需要加强社会宣教, 加强专业医护人员的培训, 积极构建医院 - 社区 - 家庭共同努力的康复系统等, 进一步推动心脏康复的发展。

5.2. 急性期及高危患者应用的风险

在 ACS 急性期(<72 小时)或不稳定型心绞痛是心肺运动试验(CPET)的绝对禁忌症。早期进行 CPET 可能导致患者出现再梗死或血流动力学不稳定, 显著增加了恶性心律失常、急性心衰、再梗死、心脏破裂甚至猝死的风险, 从而导致现在大多数研究多聚焦病情稳定的 ACS 患者中[14]。即使进入了稳定期, 对于高危患者, 例如存在心梗后炎症的并发症(如较大的室壁瘤、未处理的主干病变、存在恶性心律失常等)的患者, CPET 操作也需要极为谨慎[28]。如何在保证患者安全的情况下, 尽可能早期进行运动评估(例如采用低强度、分阶段等)在临床上亟待解决; 同时我们应考虑对于 ACS 患者将“急性事件的预测”转向“稳定期或恢复期的预后评估及康复指标”, 未来仍需进一步大量研究。

5.3. 预测模型的普适性

目前的 CPET 预后预测模型(如 VO_2 peak 和/或 VE/VCO_2 斜率)主要源于心衰研究, 对于 ACS 人群的研究相对较少, 主要是因为二者的核心病理不同, ACS 患者由于突发的急性心肌缺血或坏死, 导致 CPET

指标(如 VO_2 peak 和/或 VE/VCO_2 斜率)表现更为复杂,可能是心功能(如心输出量)、心源性(如心肌顿抑)、缺血性(再梗死)或心理因素(焦虑、恐惧等)等多种因素导致;同时,预后预测模型可能受年龄(老年)、性别(男性)、伴随疾病(肺疾病 COPD、糖尿病、贫血等)、心肌损伤范围与部位(如大面积前壁心肌梗死)、冠脉狭窄程度(如多支血管病变等)、缺血时间与再灌注损伤、PCI 血运重建效果(不完全血运重建、支架内血栓或再狭窄)等因素的影响[6][29][30]。因此,未来需要对 ACS 人群进行大规模前瞻性队列研究,进一步验证预测模型的普适性与临床可行性。

5.4. 多模态评估的整合

CPET 给临床医生提供了强大的功能学信息,但未来的研究不应只关注 VO_2 peak 等孤立指标,应该注重核心 CPET 整合指标(VO_2 peak、 VE/VCO_2 斜率、Peak O_2 pulse、无氧阈等)、其他影像学检查(如心脏磁共振、心脏彩超)、生物标志物(如高敏肌钙蛋白、NT-pro BNP)、临床(肌酐、贫血)及遗传信息相结合,从而构建一个更加全面的多维度风险评估体系[31][32]。例如,可以深入探讨 CPET 指标与冠状动脉斑块特征(通过冠脉 CTA、OCT、IUVS 评估)之间的关联,真正实现功能评估与结构评估相结合,进一步提高对 ACS 患者的预后的预测价值,从而给临床医生的治疗策略提供参考。

5.4.1. CPET + 负荷超声心动图[33]-[35]

CPET 与负荷超声心动图的结合在临床实践中具有诊断效能互补的优势,二者协同可同时评估运动诱发的心肌缺血(心电图 + 症状)与区域性室壁运动异常。负荷超声心动图可直观显示缺血导致的收缩功能下降,而 CPET 提供整体心肺功能储备信息;二者联合可更精准地鉴别缺血性与非缺血性运动不耐受,并评估缺血阈值与心功能储备的匹配关系;心梗后两者联合可为心梗后风险分层和康复提供全面信息。

5.4.2. CPET + 心脏磁共振(CMR) [36]

CMR 可提供心肌组织学特征(如瘢痕负荷、微循环阻塞、心肌水肿、左室质量等),将 CPET 测得的功能损伤指标(如 VO_2 peak 降低、 VE/VCO_2 斜率升高)与 CMR 的组织学特征相关联,可深入揭示功能损伤的病理基础。例如,可以探讨瘢痕负荷与 VO_2 peak 的定量关系,或心肌水肿与异常通气反应之间的关联,从而实现功能评估与组织学特征的结构化整合。

5.4.3. CPET + 生物标志物与遗传信息

结合高敏肌钙蛋白、NT-proBNP、炎症因子及冠心病相关遗传风险评分,可能进一步提高对 ACS 患者预后的预测价值。

5.5. 人工智能与机器学习的应用

CPET 产生的多维动态时序数据(如每秒的气体交换、心率、血压、血氧饱和度变化曲线)为人工智能(AI)和机器学习(ML)的应用提供了理想的数据基础。传统分析主要依赖少数手工提取的静态指标(如 VO_2 peak、 VE/VCO_2 slope),忽略了运动全程及恢复期的丰富动态信息,未来研究应致力于人工智能和机器学习等方面。

5.5.1. 构建基于深度学习的预后预测模型[37][38]

Ross HJ 等人采用 DeepSurv 算法,结合深度学习和生存算法,将 CPET 逐次呼吸(breath-by-breath)的多维时序数据(13 个测量指标的时序特征)与临床数据整合,预测心力衰竭患者的死亡、心脏移植或机械循环支持复合终点[37]。此外,Huang Y 等人[38]的研究利用长短期记忆网络(LSTM)、Transformer 等模型,直接处理 CPET 原始时序数据,自动提取与 ACS 预后相关的动态特征(如摄氧动力学、恢复期半衰

期、振荡呼吸模式、运动功率的细微变化等),以预测心力衰竭患者的预后,这可能比传统静态指标具有更高的预测准确性;该研究团队所提出的“LSTM + Transformer”架构可以直接迁移到 CPET 时序数据的预后建模中,为“利用 Transformer 和 LSTM 处理 CPET 时序数据”提供方法学支撑。

5.5.2. 亚临床表型识别[37]

应用无监督聚类算法,基于 CPET 全程数据对 ACS 患者进行精细化的功能表型分型,识别出传统指标无法区分的亚组(如“摄氧动力学异常为主型”vs“通气效率异常为主型”),从而实现更精准的风险分层和个体化康复策略制定。

5.5.3. 可解释性 AI

目前在 CPET 预后预测研究中,专门应用 SHAP 或 LIME 进行可解释性分析的报道较少。未来研究可结合 SHAP、LIME 等可解释性技术,揭示 AI 模型决策的关键特征,帮助临床医生理解模型输出的依据,增强 AI 模型在临床实践中的可信度和可接受性。

5.6. 个体化康复处方的深度优化

目前以 CPET 为基础的心脏康复方案主要关注运动强度。未来的研究有必要进一步探索 CPET 中的其他关键信息(如震荡呼吸模式、运动通气功率、心率反应、血压反应、心律失常发生情况、恢复期动力学等),从而制定个体化的运动处方。这可能包括如何运动模式的选择(如间歇性运动与持续性运动)、运动方式(有氧运动、抗阻训练、柔韧性和平衡性训练、呼吸训练等)、运动类型(如增强型体外反搏、功能性运动、水平律动疗法、反应性扩充疗法)以及康复疗程的设计等,以最大化保证运动处方的疗效和安全性,从而提高 ACS 患者的康复效果及生活质量。

6. 总结与展望

近年来,心肺运动试验(CPET)在急性冠脉综合征(ACS)患者综合管理中的应用已取得实质性进展,在临床实践中发挥了越来越重要的作用,主要表现在 CPET 在 ACS 患者的诊疗评估、风险分层、预后预测和指导个体化心脏康复等方面。然而,CPET 并非适用于所有的 ACS 患者,要结合临床和患者的实际情况,同时临床上目前仍需要克服许多困难,包括临床及患者认知不足、急性期应用受限、预测模型缺乏普适性等。未来的研究应致力于开展设计严谨的多中心前瞻性队列研究,并结合其他影像学或生物标志物等,深入探讨 CPET 在 ACS 患者管理与康复中的潜能,并建立多模态的预后预测模型并验证及普适性,从而制定个体化的运动康复方案,更好地优化临床决策,改善患者长期预后。

参考文献

- [1] Jian, R., Zhang, J., Zeng, Y., Zhou, T., Wu, Y., Wu, L., *et al.* (2025) In-Hospital Mortality Risk Prediction Models for Patients with Acute Coronary Syndrome: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **12**, Article 1659184. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1659184>
- [2] 中华医学会心血管病学分会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 经皮冠状动脉介入治疗指南(2025) [J]. 中华心血管病杂志, 2025, 53(7): 717-745.
- [3] Rao, S.V., O'Donoghue, M.L., Ruel, M., Rab, T., Tamis-Holland, J.E., Alexander, J.H., *et al.* (2025) 2025 ACC/AHA/ACEP/NAEMSP/SCAI Guideline for the Management of Patients with Acute Coronary Syndromes: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation*, **151**, e771-e862. <https://doi.org/10.1161/cir.0000000000001309>
- [4] Tran, D. (2018) Cardiopulmonary Exercise Testing. In: Guest, P., Ed., *Investigations of Early Nutrition Effects on Long-Term Health*, Springer, 285-295. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7614-0_18
- [5] Brazile, T.L., Levine, B.D. and Shafer, K.M. (2025) Cardiopulmonary Exercise Testing. *NEJM Evidence*, **4**.

- <https://doi.org/10.1056/evidra2400390>
- [6] 雷翔梨. 急性冠脉综合征患者心肺运动试验特点及其与预后的相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 晋中: 山西医科大学, 2023.
 - [7] Herdy, A.H., Ritt, L.E.F., Stein, R., Araújo, C.G.S.D., Milani, M., Meneghelo, R.S., *et al.* (2016) Cardiopulmonary Exercise Test: Fundamentals, Applicability and Interpretation. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, **107**, 467-481. <https://doi.org/10.5935/abc.20160171>
 - [8] Winter, U.J., Gitt, A.K., Blaum, M., Fritsch, J., Berge, P.G., Pothoff, G. and Hilger, H.H. (1994) Kardiopulmonale Leistungsfähigkeit bei Patienten mit koronarer Herzkrankheit [Cardiopulmonary Capacity in Patients with Coronary Heart Disease]. *Zeitschrift für Kardiologie*, **83**, 73-82.
 - [9] Beltrame, J.F. (2018) The Emergence of the Coronary Vasomotor Dysfunction Era. *International Journal of Cardiology*, **254**, 43-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.11.102>
 - [10] Belardinelli, R., Lacalaprice, F., Carle, F., Minnucci, A., Cianci, G., Perna, G. and D'Eusano, G. (2003) Exercise-induced Myocardial Ischaemia Detected by Cardiopulmonary Exercise Testing. *European Heart Journal*, **24**, 1304-1313. [https://doi.org/10.1016/s0195-668x\(03\)00210-0](https://doi.org/10.1016/s0195-668x(03)00210-0)
 - [11] Laukkanen, J.A., Araújo, C.G.S., Kurl, S., Khan, H., Jae, S.Y., Guazzi, M., *et al.* (2018) Relative Peak Exercise Oxygen Pulse Is Related to Sudden Cardiac Death, Cardiovascular and All-Cause Mortality in Middle-Aged Men. *European Journal of Preventive Cardiology*, **25**, 772-782. <https://doi.org/10.1177/2047487318761679>
 - [12] 朱珊雨, 王曦, 孙兴国. 心肺运动试验用于冠心病诊断价值的临床研究[J]. 中国应用生理学杂志, 2021, 37(1): 72-78.
 - [13] 张红岩, 于蕾, 李春峰, 等. 基于 CPET 制定的运动康复对 ACS 患者冠脉介入术后的影响[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2024, 45(23): 2251-2254.
 - [14] Zhang, Q., Hu, Q., Li, Y., Sun, Y., He, J., Qiu, M., *et al.* (2021) Efficacy of CPET Combined with Systematic Education of Cardiac Rehabilitation after PCI: A Real-World Evaluation in ACS Patients. *Advances in Therapy*, **38**, 4836-4846. <https://doi.org/10.1007/s12325-021-01871-y>
 - [15] Popovic, D., Martic, D., Djordjevic, T., Pesic, V., Guazzi, M., Myers, J., *et al.* (2017) Oxygen Consumption and Carbon-Dioxide Recovery Kinetics in the Prediction of Coronary Artery Disease Severity and Outcome. *International Journal of Cardiology*, **248**, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.06.107>
 - [16] Aguiar Rosa, S., Abreu, A., Marques Soares, R., Rio, P., Filipe, C., Rodrigues, I., *et al.* (2017) Cardiac Rehabilitation after Acute Coronary Syndrome: Do All Patients Derive the Same Benefit? *Revista Portuguesa de Cardiologia*, **36**, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.repc.2016.09.011>
 - [17] Zhao, Y., Wang, Z. and Gao, Y. (2026) Exercise-Based Cardiac Rehabilitation for Patients Undergoing Coronary Artery Operation: A Systematic Review and Meta-Analysis Based on Current Randomized Controlled Trials. *International Journal of Surgery*, **112**, 12443-12444. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000004831>
 - [18] D'Andrea, A., Carbone, A., Ilardi, F., Pacileo, M., Savarese, C., Sperlongano, S., *et al.* (2022) Effects of High Intensity Interval Training Rehabilitation Protocol after an Acute Coronary Syndrome on Myocardial Work and Atrial Strain. *Medicina*, **58**, Article 453. <https://doi.org/10.3390/medicina58030453>
 - [19] Chen, W., Feng, Y., Yu, M., Zhang, Z., Wu, J., Liu, W., *et al.* (2024) Effects of Different Rehabilitation Modality on Cardiopulmonary Function in Patients with Acute Coronary Syndrome after Revascularization. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **10**, Article 1120665. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1120665>
 - [20] Keteyian, S.J., Leifer, E.S., Houston-Miller, N., Kraus, W.E., Brawner, C.A., O'Connor, C.M., *et al.* (2012) Relation between Volume of Exercise and Clinical Outcomes in Patients with Heart Failure. *Journal of the American College of Cardiology*, **60**, 1899-1905. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.08.958>
 - [21] Fujimoto, W., Oishi, S. and Kawai, H. (2016) The Prognostic Significance of Cardiopulmonary Exercise Testing at Discharge for the Patients with Acute Myocardial Infarction. *Journal of Cardiac Failure*, **22**, S174. <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2016.07.118>
 - [22] Lee, D., Sui, X., Artero, E.G., Lee, I., Church, T.S., McAuley, P.A., *et al.* (2011) Long-Term Effects of Changes in Cardiorespiratory Fitness and Body Mass Index on All-Cause and Cardiovascular Disease Mortality in Men. *Circulation*, **124**, 2483-2490. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.111.038422>
 - [23] Li, S., Yuan, Y., Zhao, L., Lv, T., She, F., Liu, F., *et al.* (2022) Coronary Stenosis Is a Risk Marker for Impaired Cardiac Function on Cardiopulmonary Exercise Test. *BMC Cardiovascular Disorders*, **22**, Article No. 486. <https://doi.org/10.1186/s12872-022-02935-9>
 - [24] 史笑笑. 急性冠脉综合征患者 PCI 术后康复早期心肺功能改变的特点[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2009.
 - [25] Mewton, N., Thibault, H., Roubille, F., Lairez, O., Rioufol, G., Sportouch, C., *et al.* (2013) Postconditioning Attenuates

- No-Reflow in STEMI Patients. *Basic Research in Cardiology*, **108**, Article No. 383. <https://doi.org/10.1007/s00395-013-0383-8>
- [26] Guazzi, M., Raimondo, R., Vicenzi, M., Arena, R., Proserpio, C., Sarzi Braga, S., *et al.* (2007) Exercise Oscillatory Ventilation May Predict Sudden Cardiac Death in Heart Failure Patients. *Journal of the American College of Cardiology*, **50**, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2007.03.042>
- [27] Bianchi, S., Maloberti, A., Peretti, A., Garatti, L., Palazzini, M., Occhi, L., *et al.* (2021) Determinants of Functional Improvement after Cardiac Rehabilitation in Acute Coronary Syndrome. *High Blood Pressure & Cardiovascular Prevention*, **28**, 579-587. <https://doi.org/10.1007/s40292-021-00473-7>
- [28] Miller, A. and Vanderpool, R.R. (2025) Cardiopulmonary Exercise Testing in Research. *Heart Failure Clinics*, **21**, 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.hfc.2024.09.002>
- [29] Marzolini, S., Oh, P., Peterman, J.E., Wallace, P., Yadollahi, A., Rivera-Theurel, F., *et al.* (2025) Sex Differences and Correlates of the Utility of the Cardiopulmonary Exercise Test for Prescribing Exercise at Entry to Cardiac Rehabilitation. *Canadian Journal of Cardiology*, **41**, 481-490. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2024.11.022>
- [30] Luo, J., Zeng, C., Zhao, Y. and Zeng, Z. (2023) The Relationship between Homocysteine and Cardiopulmonary Exercise Testing in Patients with Acute Coronary Syndrome after Percutaneous Coronary Intervention. *BMC Cardiovascular Disorders*, **23**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s12872-022-02976-0>
- [31] Wu, S., Liu, B., Fan, H., Zhong, Y., Yang, Y. and Yao, A. (2024) Using Ultrasound Radiomics to Forecast Adverse Cardiovascular Events in Patients with Acute Coronary Syndrome after Percutaneous Coronary Intervention. *Echocardiography*, **41**, e15907. <https://doi.org/10.1111/echo.15907>
- [32] Salvioni, E., Bonomi, A., Re, F., Mapelli, M., Mattavelli, I., Vitale, G., *et al.* (2020) The MECKI Score Initiative: Development and State of the Art. *European Journal of Preventive Cardiology*, **27**, 5-11. <https://doi.org/10.1177/2047487320959010>
- [33] Santoro, C., Sorrentino, R., Esposito, R., Lembo, M., Capone, V., Rozza, F., *et al.* (2019) Cardiopulmonary Exercise Testing and Echocardiographic Exam: An Useful Interaction. *Cardiovascular Ultrasound*, **17**, Article No. 29. <https://doi.org/10.1186/s12947-019-0180-0>
- [34] Chaudhry, S., Kumar, N., Arena, R. and Verma, S. (2023) The Evolving Role of Cardiopulmonary Exercise Testing in Ischemic Heart Disease—State of the Art Review. *Current Opinion in Cardiology*, **38**, 552-572. <https://doi.org/10.1097/hco.0000000000001086>
- [35] Afthonidis, N.L., Michou, V., Anyfanti, M., Dalkiranis, A., Panayiotou, G., Koutlianos, N., *et al.* (2025) Advanced Stress Echocardiography with Cardiopulmonary Exercise Testing after Myocardial Infarction. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, **10**, Article 393. <https://doi.org/10.3390/jfkm10040393>
- [36] Sidhu, B.S., Gould, J., Elliott, M.K., Mehta, V.S., Niederer, S.A., Carr-White, G., *et al.* (2021) Clinical Effectiveness of a Dedicated Cardiac Resynchronization Therapy Pre-Assessment Clinic Incorporating Cardiac Magnetic Resonance Imaging and Cardiopulmonary Exercise Testing on Patient Selection and Outcomes. *IJC Heart & Vasculture*, **34**, Article ID: 100800. <https://doi.org/10.1016/j.ijcha.2021.100800>
- [37] Ross, H.J., Peikari, M., Vishram-Nielsen, J.K.K., Fan, C.S., Hearn, J., Walker, M., *et al.* (2024) Predicting Heart Failure Outcomes by Integrating Breath-By-Breath Measurements from Cardiopulmonary Exercise Testing and Clinical Data through a Deep Learning Survival Neural Network. *European Heart Journal—Digital Health*, **5**, 324-334. <https://doi.org/10.1093/ehjdh/ztae005>
- [38] Huang, Y., Wang, M., Zheng, Z., Ma, M., Fei, X., Wei, L., *et al.* (2023) Representation of Time-Varying and Time-Invariant EMR Data and Its Application in Modeling Outcome Prediction for Heart Failure Patients. *Journal of Biomedical Informatics*, **143**, Article ID: 104427. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104427>