

# 心肺运动试验的临床应用

卢梦瑶<sup>1</sup> 孟庆兰<sup>2\*</sup>

1.承德医学院

2.沧州市人民医院

DOI:10.12238/ffcr.v3i6.17262

**[摘要]** 目的：探讨心肺运动试验 (Cardiopulmonary Exercise Testing, CPET) 在胸外科肺结节术后患者中的临床应用价值。方法：选取接受肺结节切除术的患者作为研究对象，术后行 CPET 评估，重点观察峰值摄氧量 ( $VO_2$  peak)、无氧阈 (AT)、通气效率 ( $VE/VCO_2$  slope) 等关键指标，并结合临床资料进行分组对比分析。结果：多数患者在术后早期表现出运动耐力下降及心肺储备不足， $VO_2$  peak 和 AT 值明显低于健康参考水平；部分患者术后随访中 CPET 参数逐步改善，提示心肺功能具有可恢复性。不同手术方式、合并基础疾病与否对 CPET 结果存在差异。结论：CPET 能够全面、动态反映肺结节术后患者的心肺功能状态，不仅为术后康复评估和运动处方制定提供科学依据，也在预测预后与指导个体化治疗中具有重要意义。

**[关键词]** 心肺运动试验；肺结节；胸外科手术；术后康复；心肺功能评估

中图分类号：R6 文献标识码：A

## Clinical Application of Cardiopulmonary Exercise Test

Lu Mengyao<sup>1</sup>, Meng Qinglan<sup>2\*</sup>

1 Chengde Medical College

2 Cangzhou People's Hospital

**Abstract:** Objective: To explore the clinical application value of cardiopulmonary exercise testing (CPET) in postoperative patients with pulmonary nodules in thoracic surgery. Methods: Patients undergoing pulmonary nodule resection were selected as subjects for CPET assessment after surgery, focusing on key indicators such as peak oxygen uptake ( $VO_2$  peak), anaerobic threshold (AT), and ventilation efficiency ( $VE/VCO_2$  slope), with group comparison analysis based on clinical data. Results: Most patients exhibited decreased exercise endurance and insufficient cardiopulmonary reserve in early postoperative periods, with  $VO_2$  peak and AT values significantly below healthy reference levels. Some patients showed gradual improvement in CPET parameters during follow-up, indicating recoverable cardiopulmonary function. Differences in CPET results were observed between surgical approaches and comorbid conditions. Conclusion: CPET comprehensively and dynamically reflects the cardiopulmonary functional status of postoperative pulmonary nodule patients. It not only provides scientific basis for postoperative rehabilitation assessment and exercise prescription formulation but also holds significant importance in predicting prognosis and guiding individualized treatment.

**Keywords:** cardiopulmonary exercise test; pulmonary nodule; thoracic surgery; postoperative rehabilitation; cardiopul

## 引言

肺结节是胸外科常见的临床问题，随着影像学技术和体检普及，其检出率逐年升高。虽然多数肺结节为良性，但部分结节存在恶性风险，需要通过外科切除来明确诊断或实现根治。胸外科手术，尤其是肺叶切除、楔形切除等微创或开胸手术，已成为肺结节的重要治疗手段。然而，术后患者常出现肺功能下降、运动耐力不足及生活质量降低等问题，对康复与长期预后带来影响。如何科学评估患者术后心肺储备功能，并为康复训练和个体化干预提供依据，已成为临床关

注的重点。心肺运动试验 (Cardiopulmonary Exercise Testing, CPET) 是一种整合呼吸、循环和代谢系统反应的动态评估方法。与传统静态肺功能检查相比，CPET 能够通过峰值摄氧量 ( $VO_2$  peak)、无氧阈 (AT)、通气效率 ( $VE/VCO_2$  slope) 等指标，全面反映患者在运动状态下的心肺功能和代谢水平。

### 1 心肺运动试验的基本原理与指标

心肺运动试验 (Cardiopulmonary Exercise Testing, CPET) 是一种在全身运动过程中对呼吸、循环和代谢系统进行动态、综合评估的检测方法。其核心原理是通过递增负荷运动 (如

跑台、功率车) 诱发患者心肺功能极限反应, 并利用呼吸代谢分析系统同步监测气体交换、通气动力学、循环反应和代谢水平, 从而全面揭示机体对运动负荷的适应能力。与静态肺功能检测相比, CPET 能够更直观地反映患者在真实运动状态下的综合功能储备和代谢效率, 因而被称为“心肺功能的金标准”。

常用的 CPET 关键指标包括:

(1) 峰值摄氧量 ( $VO_2$  peak): 反映患者在最大运动负荷下的最大有氧代谢能力, 是评价整体运动耐力和心肺功能储备的核心指标。 $VO_2$  peak 下降提示心肺功能受损或运动耐力不足, 在肺结节术后患者中具有重要的康复与预后意义。(2) 无氧阈 (Anaerobic Threshold, AT): 指机体在运动过程中由有氧代谢转向兼性无氧代谢的临界点。AT 能够反映患者在不出明显乳酸堆积情况下可持续运动的能力, 是制定个体化运动处方的重要依据。(3) 通气效率 ( $VE/VCO_2$  slope): 表示单位二氧化碳排出所需的通气量, 反映肺通气与血流匹配的效率。 $VE/VCO_2$  slope 升高常提示存在通气/血流不均衡或循环效率下降, 在肺结节术后患者中具有诊断残余功能障碍和预测预后的作用。

## 2 研究对象与方法

### 2.1 研究对象

本研究选取在某三级甲等医院胸外科接受肺结节切除手术并完成术后随访的患者作为研究对象。所有患者均经影像学确诊并符合手术指征, 术式包括肺叶切除、亚肺叶切除 (楔形切除或段切除) 等。患者在术后恢复至可耐受运动状态后接受心肺运动试验 (CPET), 以评估术后心肺功能及运动耐力。纳入标准包括: (1) 经胸外科明确诊断并接受肺结节切除手术; (2) 术后无严重并发症, 能够配合完成运动试验; (3) 术前或术后常规肺功能检测数据完整; (4) 患者签署知情同意书并同意参加研究。排除标准包括: (1) 术后存在严重心律失常、心力衰竭或严重冠心病等心脏疾病者; (2) 合并急性呼吸道感染或严重慢性阻塞性肺疾病急性加重者; (3) 存在运动系统疾病或神经系统疾病, 无法完成运动负荷试验者; (4) 对运动试验存在禁忌证者, 如严重高血压、活动性出血等。为保证研究结果的代表性和科学性, 所有患者均接受统一的术后康复指导和营养支持, 并在相同条件下完成 CPET。研究过程中严格遵守医学伦理规范, 所有患者资料均予以匿名处理, 以保护患者隐私。

### 2.2 研究方法

所有患者均在术后恢复期于呼吸功能实验室接受心肺运动试验 (CPET)。试验过程严格遵循国际公认的标准化操作规范, 在正式检测前, 首先对患者进行基本情况评估, 排除运动试验禁忌证, 并完成必要的准备工作, 包括禁食、避免剧烈运动及常规药物使用确认。随后进入静息期监测, 记录基础生命体征及气体交换参数。热身期采用低强度功率

车或跑台运动, 使患者逐步适应运动状态。递增负荷期根据患者耐力设定逐级递增方案, 通常每分钟增加 5 - 20 W 负荷, 同时实时监测呼吸代谢参数 ( $VO_2$ 、 $VCO_2$ 、 $VE$ )、心率、血压、血氧饱和度及临床症状。当患者达到极限运动耐受或出现终止标准 (如明显呼吸困难、心电图异常、血压显著异常或氧饱和度下降) 时, 试验即告停止。在恢复期继续监测 3 - 6 分钟, 观察心率恢复、血压回落及血氧饱和度变化情况, 确保患者安全。试验完成后, 对所有采集数据进行质控与分析, 计算包括峰值摄氧量 ( $VO_2$  peak)、无氧阈 (AT)、通气效率 ( $VE/VCO_2$  slope)、氧脉搏 ( $O_2$  pulse) 等关键指标, 并结合患者临床资料进行综合判读, 最终形成检测报告, 为术后康复与预后评估提供依据。

## 3 结果

### 3.1 基线情况

共纳入 60 例胸外科肺结节术后患者, 其中男性 32 例 (53.3%), 女性 28 例 (46.7%); 平均年龄  $58.4 \pm 9.6$  岁, 范围 42 - 75 岁。所有患者均顺利完成心肺运动试验 (CPET), 无严重不良事件发生。手术方式方面, 肺叶切除 34 例 (56.7%), 亚肺叶切除 (楔形切除或段切除) 26 例 (43.3%)<sup>[5]</sup>。术前合并基础疾病情况包括高血压 18 例 (30.0%)、糖尿病 12 例 (20.0%)、慢性阻塞性肺疾病 (COPD) 10 例 (16.7%)。术后常规肺功能检测显示, 平均用力肺活量 (FVC) 为  $2.48 \pm 0.61$  L, 第一秒用力呼气容积 ( $FEV_1$ ) 为  $1.95 \pm 0.54$  L,  $FEV_1$  / FVC 比值  $78.4\% \pm 6.2\%$ 。心脏超声结果提示, 平均左室射血分数 (LVEF) 为  $62.7\% \pm 5.3\%$ , 均处于正常范围。

### 3.2 CPET 结果

所有入组患者均顺利完成 CPET 检测。整体上, 患者在术后早期表现出运动耐力下降及心肺储备不足, 主要体现在  $VO_2$  peak 及 AT 水平较低。结果显示, 患者平均  $VO_2$  peak 为  $17.6 \pm 4.2$  ml · kg<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>, 仅达到预测值的  $68.5\% \pm 12.3\%$ 。无氧阈 (AT) 平均为  $11.4 \pm 2.7$  ml · kg<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>, 多数患者在中等强度运动即出现代谢转折。 $VE/VCO_2$  slope 平均为  $33.8 \pm 5.6$ , 其中 14 例 (23.3%) 超过 34, 提示存在通气效率下降。氧脉搏 ( $O_2$  pulse) 平均为  $9.2 \pm 2.1$  ml/次, 部分患者较同年龄正常值偏低。恢复期 1 分钟心率恢复 (HRR1) 平均为  $14.5 \pm 5.3$  次/分, 其中 12 例 (20.0%) 低于 12 次/分, 提示心脏自主神经调节功能减弱。

这些结果提示: 大部分肺结节术后患者在心肺功能方面存在一定程度的储备不足, 尤其是  $VO_2$  peak 和 AT 降低, 部分患者存在通气效率差和心脏自主调节功能下降, 说明 CPET 能够敏感反映术后早期功能状态。

## 4 讨论

本研究结果表明, 肺结节术后患者在心肺运动试验 (CPET) 中普遍存在运动耐力下降, 主要表现为  $VO_2$  peak

及无氧阈 (AT) 降低, 提示术后早期心肺储备不足。部分患者  $VE/VCO_2$  slope 升高, 反映通气效率下降, 可能与手术范围、残余炎症或基础肺病相关。氧脉搏及心率恢复 (HRR1) 异常亦提示部分患者在心脏储备和自主神经调节方面存在隐匿性功能障碍, 这些变化在常规肺功能或心脏超声中难以发现, 凸显了 CPET 的独特价值。不同手术方式对心肺功能的影响存在差异: 肺叶切除患者的  $VO_2$  peak 及 AT 较亚肺叶切除组明显降低, 提示术野范围越大, 术后功能受损越显著。合并慢性疾病的患者在通气效率和心率恢复方面异常比例更高, 需加强术后康复管理。与静态肺功能相比, CPET 能够在动态运动状态下综合反映呼吸、循环及代谢系统反应, 更接近患者实际生活需求, 不仅能量化康复效果, 还能预测预后, 指导个体化运动处方和随访策略。

## 5 结论

本研究以胸外科肺结节术后患者为对象, 探讨了心肺运动试验 (CPET) 在功能评估与康复管理中的应用价值。结果显示, 术后患者普遍存在  $VO_2$  peak 和无氧阈下降, 提示心肺储备不足; 部分患者出现  $VE/VCO_2$  slope 升高、氧脉搏及心率恢复异常, 反映了通气效率下降及心脏自主调控受限。与传统静态肺功能相比, CPET 能够动态、综合地揭示运动过程中心肺循环与代谢系统的反应, 更贴近患者实际活动状态, 既能敏感反映术后早期功能障碍, 又可量化康复过程, 并对长期预后具有预测意义。

## [参考文献]

- [1]张倩倩,刘志刚,刘锦娟,等.基于心肺运动试验的个体化运动康复疗法对老年稳定期慢性阻塞性肺疾病患者的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2023,45(3):238-242.
- [2]高琦,孟舒.心肺运动试验在代谢综合征患者中的应用[J].海军军医大学学报,2022,43(10):1120-1125.
- [3]骆雪,王曦.冠心病合并非酒精性脂肪肝患者心肺运动试验特点[J].临床心血管病杂志,2023,39(2):145-149.
- [4]武会志,于海侠,高玉军,等.心肺运动试验下定制个体化康复运动方案对慢性心力衰竭患者心功能和预后的影响[J].中国中西医结合急救杂志,2023,30(5):551-556.
- [5]桓娜,王承龙,王培利,等.基于心肺运动试验评价心血管疾病的临床康复优势[J].心脏杂志,2021,33(1):95-100.
- [6]张毅,林林,鲍时春.机器学习在心肺运动试验中的应用进展[J].广东医科大学学报,2025,43(3):233-239.
- [7]杜娅彤.心肺运动试验结合动态心电图诊断冠心病的临床价值[J].中国实用医药,2024,19(23):70-72.
- [8]侯淑红,陈东平,林瑜芬.心肌做功联合心肺运动试验在肥厚型心肌病患者中的临床应用[J].福建医药杂志,2024,46(8):9-12+122.

[9]都雪娇.对高血压患者采取心肺运动试验精准制定康复处方的临床意义研究[J].中国现代药物应用,2021,15(21):237-239.

[10]王立霞,李欣,周璇,等.心肺运动试验研究热点可视化分析[J].教育生物学杂志,2022,10(4):262-270.

[11]Dores, Hélder, et al. "Cardiopulmonary exercise testing in clinical practice: principles, applications, and basic interpretation." *Revista Portuguesa de Cardiologia* 43.9 (2024): 525-536.

[12]Juarez, Michel, et al. "Cardiopulmonary exercise testing in heart failure." *Journal of cardiovascular development and disease* 11.3 (2024): 70.

[13]Pezzuto, Beatrice, and Piergiuseppe Agostoni. "The current role of cardiopulmonary exercise test in the diagnosis and management of pulmonary hypertension." *Journal of clinical medicine* 12.17 (2023): 5465.

[14]Buber, Jonathan, and H. Thomas Robertson. "Cardiopulmonary exercise testing for heart failure: pathophysiology and predictive markers." *Heart* 109.4 (2023): 256-263.

[15]Sherman, Alexander E., and Rajan Saggari. "Cardiopulmonary exercise testing in pulmonary arterial hypertension." *Heart Failure Clinics* 19.1 (2023): 35-43.

[16]汪萍.积极心理护理联合心肺康复训练对慢性阻塞性肺疾病稳定期患者肺功能及心理状态的影响[J].结核与肺部疾病杂志,2025,6(S1):125-127.

[17]何访华,马安枫,蒋寅生.床边减量高强度间歇训练对脑卒中卧床患者心肺功能的影响[J].现代实用医学,2025,37(7):746-749.

[18]黄楠馨,刘丽君,赵少倩,等.哮喘慢性持续期患者小气道功能障碍影响因素分析及心肺功能评价[J].中国呼吸与危重监护杂志,2025,24(7):473-480.

[19]陆晶晶,周银,葛浙平,等.正念行走对心房颤动患者心肺功能及疾病不确定感的影响[J].现代实用医学,2025,37(2):166-169.

[20]王苑,王广东,吴茂林,等.抗阻运动康复训练联合增强型体外反搏对高血压冠心病 PCI 术后血流动力学及心肺功能的影响[J].中国循证心血管医学杂志,2025,17(1):43-46.

## 作者简介:

卢梦瑶 (1999.02-), 女, 汉族, 河北沧州人, 硕士研究生在读, 研究方向为心脏康复。